

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คู่มือและซอฟต์แวร์ออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน TUNNEL LINING DESIGN HANDBOOK AND SOFTWARE



โดย

นายดำรงศักดิ์ โมรันเจียร

นายเนติรัช มายขุนทด

นายกฤษฎเมธ พุมมะริน

MR.

3/1/44/1

2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....62527
วัน,เดือน,ปี. 19 ส.ค. 2549

b. 11625482
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TUNNEL LINING DESIGN HANDBOOK AND SOFTWARE



MR. DUMRONGSAK MORATSATHIAN
MR. NETIRUT MAIKHUNTHOD
MR. KITSUMATE PUMMARIN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ คู่มือและซอฟต์แวร์ออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

นักศึกษา นายดำรงศักดิ์ โมรัชเรฐียร รหัสประจำตัว 45010268

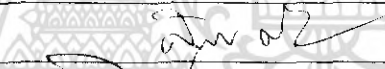
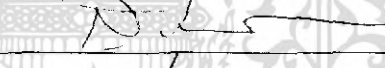
 นายเนติรัช มายขุนทด รหัสประจำตัว 45010412

 นายกิจสุเมธ พุ่มมะริน รหัสประจำตัว 45010903

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.สุพจน์	ศรีนิล	
ผศ.ดร.สุชัยวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	
อ.สมเกียรติ	ขวัญฤกษ์	
อ.ณอม	ศรีวรษา	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ. สุพจน์ ศรีนิล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 30 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	คู่มือและซอฟต์แวร์ออกแบบผนังอุโมงค์
นักศึกษา	นายคำรงค์ศักดิ์ โมรัมย์จิ๋ว นายเนติรัช มายขุนทด นายกฤษเมธ พุ่มมะริน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุวัชรวิทย์ สุวรรณสวัสดิ์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการจัดทำคู่มือรายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินและการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินที่มีรายละเอียดการคำนวณที่ชัดเจน โดยศึกษาจากอุโมงค์ระบายน้ำของพื้นที่เขตพระโขนง ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการพิจารณาออกแบบมี 4 วิธี ได้แก่ ทฤษฎี Terzaghi, Einstien, Muir Wood และทฤษฎี Beam-spring model รวมไปถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการเสริมเหล็กชั้นส่วนผนังอุโมงค์ โดยใช้ทฤษฎีกำลังของวิธีการออกแบบเสาต้นและวิธีการออกแบบคาน

จากการศึกษาพบว่า ทฤษฎี Terzaghi และ Beam-spring model จะมีค่าแรงกระทำภายในขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินที่จะทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งแรงกระทำภายในที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนทฤษฎี Einstien ค่าแรงกระทำภายในจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของดินและค่าที่ได้จะน้อยกว่าค่าของทฤษฎี Terzaghi และ Beam-spring model ในส่วนของทฤษฎีของ Muir Wood ค่าแรงก็ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน แต่ค่าแรงกระทำภายในที่ได้มีค่าน้อยกว่าทฤษฎีอื่นๆ มาก ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกทฤษฎี Terzaghi เพราะเหมาะสมในด้านการปลอดภัย ส่วนทฤษฎี Beam-spring model จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

ในการเสริมเหล็กตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบพบว่า การออกแบบตามทฤษฎีกำลังของวิธีการออกแบบเสาต้น จะออกแบบโดยใช้ค่า โมเมนต์ดัด แรงตามแนวแกนและแรงเฉือน ส่วนการออกแบบตามวิธีการออกแบบคาน จะใช้เพียงค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน เท่านั้น จากผลที่ได้ ค่าปริมาณเหล็กเสริมในการออกแบบตามวิธีเสาต้นจะได้ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า

โครงการพิเศษนี้ยังได้มีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณจากตัวโปรแกรมเดิมให้สามารถใช้งานได้ง่ายและแสดงผลการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ทฤษฎีของ Terzaghi วิศวกรและนักวิจัยจึงสามารถใช้โปรแกรมนี้ในการคำนวณ อีกทั้งยังสามารถหาปริมาณเหล็กเสริมและขนาดของ bolt ที่เหมาะสม

Title : TUNNEL LINING DESIGN HANDBOOK AND SOFTWARE
Name : MR. DAMRONGSAK MORUSSATHIAN
MR. NETIRUT MAIKHUNTHOD
MR. KITSUMATE PUMMARIN
Field : CIVIL ENGINEERING
Department : CIVIL ENGINEERING
Faculty : ENGINEERING
Adviser : ASST.PROF.SUCHATVEE SUWANSAWAT

ABSTRACT

This special project focuses on the study of construction details and tunnel lining design. The constructions of flood prevention tunnel in PRAKANONG area was used as a case study. Internal force on tunnel lining is studied using Terzaghi, Einstein, Muir Wood and Beam-spring model theorems. Additionally reinforcement using column design method and beam design method of Ultimate Strength Design(USD) theorem were performed.

For the internal force, Terzaghi and Beam-spring model theorems vary on soil conditions. Their results were similar. Einstein theorem depends on the modulus of soil. The results give values that are smaller than those calculated using Terzaghi and Beam-spring model theorem. In Muir Wood theorem depends on soil conditions but the results give values that are smaller than other theorems. Therefore, the tunnel design calculation recommended by Terzaghi would be suggested in this special project.

For the reinforcement, column design method using bending moment, axial force and shear force in design but beam design method using bending moment and shear force. In design by column design method, the reinforcement are smaller than calculated using beam design method.

Additionally, a calculation program was developed. The program is easy to use and give efficiency results calculated from Terzaghi theorem. Engineers and researchers can practically use the program in lining design, which provides reinforcement and bolt specification.

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ อีกทั้งท่านยังได้สละเวลาอันมีค่าที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้ได้รับบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.สุพจน์ ศรีนิล , อ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์ และ อ.ณอม ศรีวรษา ซึ่งเป็นกรรมการคุมสอบ โครงการพิเศษนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่างๆต่อการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิศวกรรม ทำให้สามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การเลี้ยงดู ดูแลเอาใจใส่ และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลาเสมอมา ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการออกแบบและก่อสร้างสำหรับงานเลขของสัได้เป็นอย่างดี

นายดำรงศักดิ์ โมรันเชียร

นายเนติรัช มายขุนทด

นายกฤษฎเมธ พุมมะริน

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ณ
	สารบัญรูป	ท
1	บทนำ	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
	1.4. ขอบเขตของโครงการ	2
	1.5. วิธีการดำเนินโครงการ	2
	1.6. ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
2	ประวัติความเป็นมาของอุโมงค์ใต้ดิน	
	2.1. บทนำ	4
	2.2. ขอบเขตและการใช้งาน	4
	2.3. ประวัติความเป็นมาของอุโมงค์	5
	2.4. เทคนิคการเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีระเบิด	5
	2.5. วิธีการเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องเจาะ	6
	2.6. บทบาทความรู้ทางธรณีวิทยา	6
	2.7. การใช้อุโมงค์เพื่อประโยชน์อื่นๆ	6
	2.7.1. อุโมงค์สำหรับส่งน้ำและกักเก็บไฟฟ้า	7

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	2.7.2. อุโมงค์สำหรับเก็บเอกสารและอาหาร	7
	2.7.3. อุโมงค์สำหรับเก็บน้ำมัน	7
	2.7.4. อุโมงค์สำหรับเก็บกากนิวเคลียร์	7
3	วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	
	3.1. การขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	13
	3.1.1. วิธีการขุดอุโมงค์ในดินอ่อน	13
	3.1.1.1. วิธีขุดแบบ Heading and Bench Excavation	14
	3.1.1.2. การใช้ Shield ช่วยในการขุดเจาะ	15
	3.1.1.3. Pipe Jacking	25
	3.2. การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธีใช้หัวขุดเจาะ	29
	3.2.1. การเลือกวิธีการของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield	29
	3.2.1.1. ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของหัวขุดเจาะ	30
	3.2.1.2. การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะ	31
4	การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีใช้หัวขุดเจาะ	
	4.1. หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	39
	4.1.1. ข้อกำหนดทั่วไป	39
	4.1.2. หลักการพื้นฐานในการออกแบบ	40
	4.1.3. โครงสร้างของหัวขุดเจาะ	46
	4.1.4. หน่วยขุดตัด	54
	4.1.5. หน่วยขับเคลื่อน	64
	4.1.6. ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์	69
	4.1.7. ระบบไฮดรอลิก ระบบไฟฟ้าและระบบควบคุม	72
	4.1.8. หน่วยเสริม	74
	4.1.9. วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (EPB)	80
	4.1.10. การบำรุงรักษาหัวขุดเจาะ	115

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
4.2.	ขั้นตอนการก่อสร้าง	117
4.2.1.	การสำรวจสำหรับงานอุโมงค์	117
4.2.1.1.	วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	117
4.2.1.2.	การสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง	117
4.2.1.3.	การสำรวจภายใต้เงื่อนไขซึ่งเป็นอุปสรรค	119
4.2.1.4.	การสำรวจเพื่อจัดทำแผนที่ภูมิประเทศและสำรวจสภาพดิน	121
4.2.1.5.	การสำรวจเพื่อหามาตรการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อม	129
4.2.1.6.	การควบคุมงานสำรวจและการวางแผนงานอุโมงค์ใต้ดิน	132
4.2.1.7.	การสำรวจทางธรณีวิทยา	137
4.2.1.8.	การสำรวจขณะทำการก่อสร้าง	146
4.2.2.	การขุดเจาะและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	172
4.2.2.1.	ข้อกำหนดทั่วไป	172
4.2.2.2.	การสำรวจ	172
4.2.2.3.	การดำเนินการก่อสร้าง	175
4.2.2.4.	มาตรการเสริม	205
4.2.2.5.	การเคลื่อนตัวของดินและการป้องกันสิ่งปลูกสร้างเดิม	211
4.2.2.6.	เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้	215
4.2.2.7.	การควบคุมการทำงานในภาคสนาม	227
4.2.2.8.	การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ	231
4.2.2.9.	มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม	237
4.3.	กรณีอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน	245
4.4.	การตรวจสอบและบำรุงรักษาสภาพอุโมงค์ใต้ดิน	281
4.4.1.	วิธีการตรวจสอบอุโมงค์เพื่อการฟื้นฟูสภาพ	281
4.4.2.	การซ่อมแซมอุโมงค์	292
4.4.2.1.	การซ่อมแซมคอนกรีต	292
4.4.2.2.	การซ่อมแซมรอยแตก	299

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	4.4.2.3. การซ่อมแซมโลหะ	301
	4.4.2.4. การซ่อมแซมอิฐก่อสร้าง	301
	4.4.2.5. การซ่อมแซม Segmental tunnel liner	303
	4.4.2.6. ต้นทุนการซ่อมแซม	305
	4.5. การเกิดไฟไหม้และผนังอุโมงค์ป้องกันไฟ	307
	4.5.1. ไฟไหม้ในอุโมงค์	307
	4.5.2. ความเสียหายจากผนังอุโมงค์ที่เกิดไฟไหม้	309
	4.5.3. การป้องกันไฟสำหรับผนังอุโมงค์ใต้ดิน	313
	4.5.3.1. การทดสอบไฟไหม้กับผนังอุโมงค์ใต้ดิน	313
	4.5.3.2. ผลการทดสอบไฟไหม้ผนังอุโมงค์	314
	4.5.3.3. การใช้งานวิธีการป้องกันไฟไหม้	318
	4.6. ราคาการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	320
	4.6.1. การประมาณราคาการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	320
	4.6.2. ข้อมูลราคา	322
	4.6.3. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อราคาก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	331
5	กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง	
	5.1. กฎหมายและข้อระเบียบข้อบังคับเบื้องต้นที่สามารถประยุกต์ใช้ได้	340
6	ข้อมูลทางปฐพีกลศาสตร์และพฤติกรรมดิน	
	6.1. ข้อมูลทางปฐพีกลศาสตร์	345
	6.1.1 การสำรวจพื้นที่ตั้งโครงการก่อสร้าง	345
	6.1.2 การเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่าง	347
	6.1.2.1 วัตถุประสงค์ในการสำรวจ	347
	6.1.2.2 ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการสำรวจชั้นดิน	347
	6.1.3 การทดสอบดอกลดลองแบบมาตรฐาน	351
	6.1.4 ปริมาณความชื้นในดิน	355

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
6.1.5	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	356
6.1.6	การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์	357
6.1.7	ขนาดและความกระจายของขนาดเม็ดดิน	358
6.1.7.1	การจำแนกประเภทของดิน	358
6.1.7.2	การจำแนกประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน	358
6.1.7.3	การหาขนาดของเม็ดดิน	359
6.1.7.4	การปรับแก้	360
6.1.7.5	การหาการกระจายตัวของเม็ดดิน	360
6.1.8	การวัดระดับน้ำใต้ดินหรือการวัดความดันน้ำ	362
6.1.8.1	ความไวในการวัดน้ำ	362
6.1.8.2	พิชโซมิเตอร์	363
6.1.9	คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินทางด้านงานอุโมงค์	365
6.2	การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์	368
6.2.1	ปัญหาการสูญเสียมวลดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	368
6.2.2	การตอบสนองของดินที่ถูกก่อกำเนิดขึ้นโดยหัวขุดเจาะอุโมงค์และวิธีการทำนาย	368
6.2.3	วิธีการทำนายการเสียรูปของดิน	374
6.2.3.1	Stochastic and Empirical Methods	375
6.2.3.2	วิธีวิเคราะห์ (Analytical Solution)	381
6.2.3.3	Finite element and Numerical Methods	389
6.3	เครื่องมือและวิธีวัดการเคลื่อนตัวของดิน	405
6.3.1	Inclinometer	405
6.3.1.1	ชนิดของ Inclinometer	407
6.3.1.2	ปัจจัยที่มีผลทำให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องของ Inclinometer	413
6.3.1.3	ชนิดของ Inclinometer casing	416
6.3.1.4	การเลือกประเภทของ casing	417

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
6.3.1.5	การติดตั้ง Inclinator casing	418
6.3.1.6	ข้อกำหนดของ Couple	419
6.3.1.7	การติดตั้งในสนาม	419
6.3.1.8	การติดตั้งในหลุมเจาะ	419
6.3.1.9	การติดตั้งในพื้นที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนตัวมาก	420
	ใน Thin Shear Zone	
6.3.1.10	การติดตั้งบนเสาเข็ม	421
6.3.1.11	Calibration	421
6.3.1.12	Near-Vertical Test Casing	421
6.3.1.13	Test in Bottom of Near-Vertical Field Casing	422
6.3.1.14	Test Stand	422
6.3.1.15	Checks on Inclinator for use in Near-Vertical Casing	422
6.3.1.16	Checks on Inclinator for Inclinator casing	422
6.3.1.17	Maintenance	423
6.3.1.18	Data Collection	423
6.3.1.19	Field Checks on Inclinator	423
6.3.1.20	Measurement Method	423
6.3.1.21	Initial Reading	424
6.3.1.22	Reading within Telescoping Casing	424
6.3.2	Extensometers	427
6.3.2.1	Probe Extensometers	427
6.3.2.2	Rod Extensometers	432
6.3.2.3	Rod Material	435
6.3.2.4	Anchors	436
6.3.2.5	กระบวนการติดตั้ง Probe Extensometers	437
6.3.2.6	การติดตั้ง Rod Extensometers	440

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	6.3.2.7 ข้อควรพิจารณาอื่น ๆ	442
7	การออกแบบผนังอุโมงค์	
7.1.	ผนังอุโมงค์	443
7.1.1	หน้าที่ของผนังอุโมงค์	443
7.1.2	ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์	445
7.1.2.1	รูปร่างและขนาด	445
7.1.2.2	รูปร่างของหน้าตัด	451
7.1.3	รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	452
7.1.3.1	มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ	457
7.1.3.2	วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียบ	458
7.1.4	การคำนวณ โครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	460
7.1.4.1	พื้นฐานของการคำนวณโครงสร้าง	460
7.1.4.2	การคำนวณองค์ประกอบของแรง	461
7.2	ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน	468
7.2.1	ขอบเขตของการประยุกต์ใช้	468
7.2.2	คำจำกัดความ	469
7.2.3	การเลือกโครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์	471
7.2.4	พื้นฐานการออกแบบ	472
7.2.5	ขั้นตอนการออกแบบ	473
7.2.6	แบบก่อสร้าง	473
7.3	การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ	474
7.3.1	น้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ออกแบบ	474
7.3.2	แรงดันในแนวตั้งและแนวราบ	475
7.3.2.1	แรงดันดินในแนวตั้ง	476
7.3.2.2	แรงดันดินในแนวราบ	476
7.3.3	แรงดันน้ำ	477

สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
7.3.4 น้ำหนักบรรทุกคงที่	478
7.3.5 ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกกบนผิวดิน	479
7.3.6 แรงต้านทานของดิน	479
7.3.7 น้ำหนักจากการก่อสร้าง	480
7.3.8 น้ำหนักภายใน	481
7.3.9 ผลกระทบจากแผ่นดินไหว	482
7.3.10 ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง	484
7.3.11 ผลกระทบจากการทำงานบริเวณข้างเคียง	484
7.3.12 ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน	484
7.3.13 น้ำหนักอื่น ๆ	485
7.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์	485
7.4.1 กล่าวนำ	485
7.4.2 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi	485
7.4.3 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein	488
7.4.4 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood	489
7.4.5 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของโดยวิธี Beam-spring Model	491
7.4.5.1 แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง	491
7.4.5.2 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ	491
7.4.5.3 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวตั้งและแรงดันดินด้านข้าง	492
7.4.5.4 แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้รูปแบบโดยวิธี Beam-spring Model	494
7.5 ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม	452
7.5.1 กล่าวนำ	452
7.5.2 พื้นฐานออกแบบ	452
7.5.2.1 วิธีออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง	495

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	7.5.2.2 วิธีออกแบบคานโดยวิธีกำลัง	502
7.6	ตัวอย่างการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน	504
	7.6.1 กล่าวนำ	504
	7.6.2 การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	504
	7.6.2.1 ชิ้นส่วนคอนกรีต	504
	7.6.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ	505
	7.6.2.3 สภาพชั้นดิน	505
	7.6.2.4 หาแรงกระทำภายนอก	507
	7.6.2.5 หาแรงกระทำภายใน	513
	7.6.3 การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน	533
	7.6.3.1 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีการออกแบบเสาสั้น	533
	7.6.3.2 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีการออกแบบคาน	536
8	ปัญหาในการก่อสร้าง	
	8.1 กล่าวนำ	539
	8.2 ปัญหาในการก่อสร้าง	539
9	การใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณ	
	9.1 กล่าวนำ	544
	9.2 วัตถุประสงค์	544
	9.3 หลักการ	544
	9.4 วิธีการใช้โปรแกรม	545
	9.5 ข้อจำกัดของโปรแกรม	551
	9.6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในที่ได้จากโปรแกรมกับ ทฤษฎี Empirical ต่าง ๆ	522
	บรรณานุกรม	561
	ภาคผนวก	ผ1

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์	9
2.2.	แสดงประวัติของการเจาะอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา	10
3.1.	หลักเกณฑ์การเลือก shield	27
3.2.	แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เหมาะสม	33
4.1.	ความเค้นที่ยอมให้ของเหล็ก	44
4.2.	การแบ่งประเภทของหัวขุดเจาะแบบ Shield	86
4.3.	ข้อดีของการใช้ EPB shield เปรียบเทียบกับหัวขุดเจาะชนิดอื่น	93
4.4.	รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ	122
4.5.	ข้อมูลลักษณะ Taper ring	135
4.6.	ข้อกำหนดของวงผนังอุโมงค์แนวตรงและ Taper ring ตามรัศมีแนวโค้งที่ต่างกัน	136
4.7.	การจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification System	141
4.8.	Terminology Used to Describe Soils Relative Density for Granular Soils	142
4.9.	Special Data Requirements for TBM Project	145
4.10.	รายการคำนวณค่าพิกัดและระดับ	169
4.11.	ประเภทของการป้องกันโครงสร้างจากการระเบิดของก๊าซ	221
4.12.	รายชื่อของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟ	232
4.13.	ค่า Stability ของอุโมงค์: Cohesive Soil	246
4.14.	ค่า Stability ของอุโมงค์ : Silty sand เหนือระดับ Water table	247
4.15.	พฤติกรรมของอุโมงค์ : Sand และ Gravel	248
4.16.	Decompression Table	253
4.17.	ความสามารถของการ grout ที่เกี่ยวกับ ค่าความซึมได้ และเปอร์เซ็นต์ความละเอียดของทราย	256
4.18.	การใช้เครื่องจักร	267
4.19.	การใช้เครื่องจักรพิเศษ	268

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
4.20.	ปริมาณของ Ground loss และคุณภาพของอุโมงค์	272
4.21.	ข้อจำกัดของ Angular Distortion	275
4.22.	สัญลักษณ์ตัวแปรมาตรฐาน	284
4.23.	การทดสอบพิเศษ	289
4.24.	การเปรียบเทียบ Shotcrete	298
4.25.	การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ซ่อมแซมคอนกรีต	305
4.26.	การเปรียบเทียบการประมาณราคาการฟื้นฟูสภาพอุโมงค์	306
4.27.	แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ในประเทศญี่ปุ่น	307
4.28.	แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดินทั่วโลก	308
4.29.	รายละเอียดงานก่อสร้างอุโมงค์ประปา	322
4.30.	รายละเอียดงานก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	323
4.31.	ดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง	324
4.32.	ดัชนีค่าจ้างแรงงาน	325
4.33.	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวบรวมได้จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	326
4.34.	แสดงข้อมูลที่ปรับสภาพแล้วของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	327
4.35.	แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	328
4.36.	แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	329
6.1.	ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐาน ฟินิเตอร์ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และกำลังของดิน	351
6.2.	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของมวลดินจำพวกไม่มีแรงเหนียว กับค่าของมุมเสียดทานภายใน	352
6.3.	การจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification System	357
6.4.	ชนิดของพิซโซมิเตอร์ (Piezometer)	364
6.5.	Terminology Used to Describe Soils Relative Density for Granular Soils	366
6.6.	ค่าการทรุดตัวของดินช่วงต่างๆ	379
6.7.	Inclinometer	411

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
7.1.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต	455
7.2.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก	456
7.3.	แสดงขนาดเรียบและองศาของความเรียบ	460
7.4.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง	477
7.5.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-spring model	492
7.6.	แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 1	505
7.7.	แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 2	506
7.8.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน	509
7.9.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้งในกรณีที่ 1	513
7.10.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 1	513
7.11.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 1	513
7.12.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 1	514
7.13.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 1	514
7.14.	แสดงแรงกระทำรวมที่ได้ในกรณีที่ 1	514
7.15.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้งในกรณีที่ 2	516
7.16.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 2	516
7.17.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 2	516
7.18.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 2	516
7.19.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 2	517
7.20.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดในกรณีที่ 2	517
7.21.	แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1	519
7.22.	แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2	522
7.23.	แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	524
7.24.	แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	524

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
7.25.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	524
7.26.	แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	526
7.27.	แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	526
7.28.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	527
7.29.	แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน (k, δ) โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	529
7.30.	แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	529
7.31.	แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน (k, δ) โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	531
7.32.	แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	531
9.1.	แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายใน ของ Terzaghi	554
9.2.	แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม	555
9.3.	แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายใน ของ Einstein	556
9.4.	แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม	556
9.5.	แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายใน ของ Muir Wood	559
9.6.	แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม	559
9.7.	แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายใน	560
9.8.	แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม	560

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.1.	หลักการของ shield tunneling	17
3.2.	แสดง Ripper-Bucket Excavator	19
3.3.	แสดง cutting face stability หลักการและช่วงใช้งาน	21
3.4.	แสดงแผนภาพการทำงานของระบบการทำงานของ hydroshield	22
3.5.	แสดงลักษณะส่วนหัวเจาะ hydroshield	22
3.6.	แสดงส่วน Head และ Nozzle hydroshield	23
3.7.	แสดง Mixshield – Basic Machine	24
3.8.	ผังแสดง shield ชนิดต่างๆ	25
3.9.	แสดงวิธี jacking method	26
3.10.	แสดงวิธี jacking method ในสถานที่ก่อสร้าง	26
3.11.	ประเภทของหัวเจาะ Shield	29
3.12.	แสดงแผนภาพของการเลือกวิธีใช้หัวเจาะอุโมงค์	32
4.1.	ตัวอย่างการหาน้ำหนักวิธีที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง	42
4.2.	น้ำหนักแผ่กระจายที่ใช้ใน Uniform ring	42
4.3.	น้ำหนักโดยรวมของดินแบบหัวเจาะในปัจจุบัน	45
4.4.	รูปร่างและลักษณะหัวเจาะ	46
4.5.	รายละเอียดของส่วนหาง	48
4.6.	ระยะที่ยอมให้สำหรับการเจาะตามแนวโค้งและการปรับเบี่ยงเบนทิศทาง	48
4.7.	ความยาวของหัวเจาะ	49
4.8.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกกับความยาวหัวเจาะ	50
4.9.	ความยาวของส่วนหาง	52
4.10.	ประเภทของหัวตัด	55
4.11.	ประเภทของตัวถ้ายันหัวตัด	56
4.12.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวเจาะกับ ตัวคูณประกอบแรงบิด	59
4.13.	รูปร่างของหัวส่วน	61
4.14.	ประเภทของการบิดคดหัวส่วน	62

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.15.	ตำแหน่งของ Cutter bearing seal	63
4.16.	รูปร่างของ Cutter bearing seal	63
4.17.	ระยะของการขุดเจาะเสริม	64
4.18.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกหัวขุดเจาะกับกำลังผลักดัน	66
4.19.	ตัวอย่างการติดตั้งหัวคดที่เชื่อมศูนย์กับผนังอุโมงค์	68
4.20.	ประเภทของชุดติดตั้ง	69
4.21.	ตัวจับผนังอุโมงค์	70
4.22.	ชุดรักษารูปทรงของผนังอุโมงค์	72
4.23.	ประเภทของส่วนข้อต่อ	76
4.24.	กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ	77
4.25.	Marc Brunel's screw	81
4.26.	Marc Brunel's compartment shield	82
4.27.	Marc Brunel's shield สำหรับอุโมงค์ใต้แม่น้ำเทมส์	83
4.28.	การกำบังผิวหน้าด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	87
4.29.	Partial face shield	88
4.30.	หัวขุดเจาะแบบเปิดหน้าที่ใช้ในโครงการ Trans Bay Tube	89
4.31.	หัวขุดเจาะแบบอัดแรงดันอากาศใช้ในโครงการอุโมงค์ทางด่วนปารีส	89
4.32.	หัวขุดเจาะแบบ Slurry ที่ใช้กับการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำใน Mexico	90
4.33.	EPB Shield ใช้กับโครงการ Singapore MRT	90
4.34.	Mix shield ใช้ในโครงการ Fourth Elb Tunnel	91
4.35.	Blind shield ผลิตโดย Mitsubishi	91
4.36.	อธิบายส่วนประกอบ EPB shield	93
4.37.	สายพานลำเลียงดินขุดออกจาก Screw conveyor	95
4.38.	ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อโดยตรงกับ Screw conveyor	95
4.39.	รถจักรลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์	96
4.40.	ผังลำดับการควบคุมการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	97

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.41.	จอควบคุมการทำงานของหัวขุดเจาะแสดงค่าทุกตัวแปรระหว่างการขุดเจาะ	98
4.42.	แม่แรงไฮดรอลิก อยู่ต่อท้าย EPB shield	100
4.43.	การผลึกของแม่แรงด้านผนังอุโมงค์ เมื่อหัวขุดเจาะเดินหน้าการขุดเจาะ	101
4.44.	ผนังอุโมงค์เสริมเหล็กในโครงการ MRTA	101
4.45.	การจัดเก็บผนังอุโมงค์ (MRTA)	102
4.46.	แผนผังแสดงช่องว่างที่ส่วนหางระหว่างผนังอุโมงค์กับหัวขุดเจาะ	103
4.47.	แสดงรายละเอียดของผนังอุโมงค์	104
4.48.	แขนเครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์ ตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้	105
4.49.	การเชื่อมต่อนขึ้นส่วนวงผนังอุโมงค์ด้วย Curve bolt	105
4.50.	Curve bolt	106
4.51.	การขันยึด Curve bolt ให้แน่น	106
4.52.	การตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งวงผนังอุโมงค์	107
4.53.	การขนย้ายขึ้นส่วนวงผนังอุโมงค์เข้าสู่เครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์	107
4.54.	Tail skin seal	109
4.55.	การอัดฉีดปูนเหลวผ่านรูในผนังอุโมงค์	110
4.56.	การอัดฉีดปูนเหลวโดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน	110
4.57.	ส่วนประกอบของระบบนำทาง	112
4.58.	Laser theodolite ติดตั้งอยู่หลัง EPB shield	113
4.59.	Laser target ติดตั้งที่ไว้หลัง EPB shield	113
4.60.	ระบบแสดงผลควบคุมการขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ	114
4.61.	ระบบข้อมูลนำทางภายในห้องควบคุม	114
4.62.	แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะ ขนาดใหญ่ขณะเจาะอุโมงค์	125
4.63.	แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะซึ่งทำให้เกิด Sink hole	127
4.64.	ระดับความดันน้ำในดินที่ตรวจวัดในโครงการ MRTA	128
4.65.	ความสัมพันธ์ระหว่างแนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางอุโมงค์	133

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.66.	ลักษณะทางเรขาคณิตของ Taper ring	134
4.67.	Taper clock	137
4.68.	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าความชื้นน้ำ	143
4.69.	ความสัมพันธ์ทางธรณีวิทยากับองค์ประกอบของโครงการ	144
4.70.	เครื่องมือทำมูนฉาก	147
4.71.	การถ่ายพิกัดทางราบ	148
4.72.	การถ่ายค่าพิกัดทางตั้ง	149
4.73.	วงรอบและระดับในอุโมงค์	150
4.74.	หมุดวงรอบ	151
4.75.	กล้องตั้งแนวด้วยแสงเลเซอร์	152
4.76.	หน่วยรับแสงเลเซอร์	153
4.77.	หน่วยวัดการะของหัวชุดเจาะ	153
4.78.	หน่วยรวบรวมข้อมูลและควบคุมการทำงาน	154
4.79.	มิติและตำแหน่งของเครื่องชุดเจาะ	155
4.80.	จุดสำรวจในเครื่องเจาะ	156
4.81.	ตำแหน่งจุดเลเซอร์	157
4.82.	เครื่องเจาะกัมและเงย	158
4.83.	เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง	159
4.84.	โค้งวงกลม	160
4.85.	โค้งสไปรล	161
4.86.	ระยะ Off set หัวเจาะ	162
4.87.	แบบแปลนทางราบ	163
4.88.	ตำแหน่งของเครื่องชุดเจาะ	167
4.89.	ตำแหน่งของเครื่องชุดเจาะ	167
4.90.	แสดงผลการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ	168
4.91.	ตำแหน่งจุดสำรวจ	170

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.92.	ระยะผลึกของแม่แรงหัวขุดเจาะ	171
4.93.	ตัวอย่างวิธีการนำหัวขุดเจาะออกจากกำแพงอาคารระบวยอากาศ	178
4.94.	ตัวอย่างวิธีการเข้าของหัวขุดเจาะ	179
4.95.	ระบบของหัวขุดเจาะแบบ Slurry shield	185
4.96.	วัสดุทั่วไปที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน	189
4.97.	อุปกรณ์การขนส่งในอุโมงค์ที่มีความลาดชัน	200
4.98.	วิธีการคำนวณหาแรงดันอากาศ	210
4.99.	การแยกประเภทการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะ	212
4.100.	แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ EPB	215
4.101.	แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ EPB	216
4.102.	รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ EPB	216
4.103.	รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry	217
4.104.	ขั้นตอนการดูแลรักษา Slurry โดยใช้สารเร่งการตกตะกอน	226
4.105.	ขั้นตอนการแยกและคัดกรวดออก	227
4.106.	ตัวอย่างรายละเอียดของวงจรการทำงาน	228
4.107.	การทำนายพฤติกรรมของเมื่อดินขนาด D10	247
4.108.	วิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน	249
4.109.	แผนผังการออกแบบ Well point และ Deep point	250
4.110.	งาน Grouting ในงานอุโมงค์	254
4.111.	วิธี Grouting และประเภทของดิน	255
4.112.	ขนาดของเมื่อดินที่เหมาะสมกับการ Grout แต่ละประเภท	255
4.113.	ความสามารถของการ Grout ได้ของดิน	256
4.114.	แบบแปลนของ Grout pipe	257
4.115.	การ Grout บริเวณ crown	258
4.116.	การ Grout ในแนวราบและรูปพัดในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินในลอสแอนเจลิส	259
4.117.	การออกแบบและตำแหน่งของรูที่จะ Grout จริง	260

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.118.	Multiple injections for crown grouting	261
4.119.	ส่วนประกอบภายในรู Grout	262
4.120.	ตัวอย่างผลจากความร้อนบนพื้นดินที่เป็นน้ำแข็ง	264
4.121.	การคำนวณหาระยะเวลาที่แข็งตัว	265
4.122.	การประยุกต์ใช้เครื่องจักรในดินอ่อนกับขนาดเม็ดดิน	266
4.123.	ของอุโมงค์นิยามที่เกี่ยวกับการทรุดตัวและ Ground Loss ของอุโมงค์	270
4.124.	คุณสมบัติความเป็นไปได้ของส่วนโค้งที่ใช้แทนรูปตัดการทรุดตัวเหนืออุโมงค์	273
4.125.	สมบัติฐานของความกว้างของการทรุดตัว	274
4.126.	กล่องของอุโมงค์ทั่วไปแบบอุโมงค์คู่	282
4.127.	กล่องอุโมงค์ทั่วไปแบบอุโมงค์เดี่ยว	283
4.128.	อุโมงค์แบบส่วนโค้งหลังคาแบบอุโมงค์เดี่ยว	283
4.129.	รูปแบบอุโมงค์แบบวงกลม	283
4.130.	วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับคอนกรีต	290
4.131.	การทดสอบ Sonic ultrasonic และแนวท่อของอุโมงค์	290
4.132.	ความแข็งแรงของคอนกรีตกับความเร็ว	291
4.133.	ตัวอย่างข้อมูลการตรวจสอบที่สมบูรณ์แบบ	293
4.134.	ตัวอย่างผลการสรุปข้อมูล	294
4.135.	แสดงข้อมูลของหนังสือสัญญา	295
4.136.	แสดงหน้าตัดของการซ่อมแซมคอนกรีต	296
4.137.	รายละเอียดของรอยต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	297
4.138.	รายละเอียดการซ่อมแซม Shotcrete	299
4.139.	การติดตั้ง Ports ของการ Grout โดยใช้สารเคมี	301
4.140.	การซ่อมแซมแบบโครงเหล็ก	302
4.141.	การเปลี่ยนชิ้นส่วนของเหล็ก	302
4.142.	การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง	303
4.143.	การซ่อมแซมเหล็กแผ่นแนวทาง	304

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.144.	รูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดิน	308
4.145.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Moorflekt	310
4.146.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Summit	310
4.147.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Mont Blance	311
4.148.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard	311
4.149.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Euro	312
4.150.	ตัวอย่างทดสอบ	313
4.151.	การติดตั้งการป้องกันไฟ	313
4.152.	โค้งของความร้อนสำหรับการทดสอบ (RABT)	314
4.153.	ชุดตัวอย่างทดสอบ	314
4.154.	แสดงการพังทลายของผิวคอนกรีต	315
4.155.	อุณหภูมิที่ผิวชั้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันไฟ	315
4.156.	อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันไฟ	316
4.157.	Carbonation by the heating	317
4.158.	การติดตั้ง Board type ในอุโมงค์ Elbe	318
4.159.	การป้องกันไฟไหม้แบบ Spray mortar type ในอุโมงค์ Westerschelde	319
4.160.	แสดงอุโมงค์ที่มีระบบป้องกันไฟแบบต่างๆ	331
4.161.	รูปแสดงหัวเจาะชนิดต่างๆ	332
4.162.	แสดงวิธีการขุดเจาะแบบ Pipe Jacking	333
4.163.	แสดงการขุดเจาะแบบ EPB	333
4.164.	แสดงทัศนียภาพด้านบนของอุโมงค์	335
4.165.	แสดงทัศนียภาพภายในอุโมงค์	336
4.166.	แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีความแออัด	337
4.167.	แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีพื้นที่ก่อสร้างมาก	337
4.168.	แสดงสถานที่เก็บชิ้นส่วนอุโมงค์	338

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าการซึมผ่าน	367
6.2	การกล่มของอุโมงค์ที่ขุดผ่านแม่น้ำ	369
6.3	มวลดินสูญเสียที่ต้องป้องกันหน้าดิน	370
6.4	มวลดินสูญเสียของส่วนบนหัวเจาะ	370
6.5	มวลดินสูญเสียจากการเอียงของหัวเจาะขณะขุดอุโมงค์	371
6.6	การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการรบกวนมวลดินขณะเลื่อนหัวเจาะ	371
6.7	การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากช่องว่างหลังขุดเจาะ	371
6.8	ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างของมวลดินเมื่อมีตัวป้องกันดิน	373
6.9	ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างของมวลดินเมื่อมีตัวป้องกันดิน	373
6.10	ความน่าจะเป็นของเส้นโค้งที่ใช้อธิบายการทรุดตัว	376
6.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว พารามิเตอร์ และความลึกของอุโมงค์	377
6.12	การเปลี่ยนรูปร่างของดินรอบ ๆ แบบจำลองอุโมงค์ในดินเหนียว	380
6.13	การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของพารามิเตอร์ของอุโมงค์ในดินเหนียว	381
6.14	การเปลี่ยนรูปร่างของดินรอบ ๆ ของอุโมงค์ในดินเหนียว	382
6.15	การเปลี่ยนรูปร่างของดินรอบ ๆ ของอุโมงค์ในดินเหนียว	383
6.16	รูปตัดแสดงการทรุดตัวของทราย	383
6.17	การทรุดตัวตามแนวยาวเนื่องจากต้องป้องกันดินของอุโมงค์	384
6.18	ระบบการเคลื่อนตัวกับการทรุดตัวของผิวดิน	385
6.19	รูปร่างการทรุดตัวตามแนวยาวที่เสนอโดย Attewell and Woodman	385
6.20	รูปภาพจริงตามหลักวิชาการ	387
6.21	การสูญเสียมวลดินรูปวงรี	389
6.22	การเขียนแบบการสูญเสียมวลดิน	391
6.23	คำนิยามของ GAP	392
6.24	การเขียนแบบการป้องกันขั้นสูงโดย “Excavation Elements”	393

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.25	รูปหัวเจาะในดินอ่อน	395
6.26	แบบจำลองอุโมงค์	396
6.27	การทดลองอนุกรม 3 มิติ	396
6.28	ตัวอย่างแบบจำลองอุโมงค์ 2 มิติ หลังการพังทลาย	397
6.29	แผนผังของการถล่มบนแบบจำลองอุโมงค์	397
6.30	แบบจำลอง 3 มิติของหัวเจาะหลังการพังทลาย	397
6.31	การพังทลายของแบบจำลองอุโมงค์	398
6.32	แบบจำลอง 3 มิติ ของหัวเจาะหลังการพังทลาย	399
6.33	แผนผังการพังทลายที่เครื่องจักร	399
6.34	แบบจำลองอุโมงค์ขนาดเล็กเพื่อ Centifuge Test	401
6.35	รูปการป้องกันดินและช่องว่างด้านหลังหัวเจาะ	401
6.36	รูปตัดตามยาวจาก Shield Test และความหนาของช่องว่าง	403
6.37	ผลการวัดแรงดันดิน	403
6.38	Inclinometer system: Slope Indicator Company Digitilt® system	406
6.39	Principle of Inclinometer operation	407
6.40	Solip-state data logger for inclinometer	408
6.41	Recorder-Processor-Printer (RPP) for Digitilt® inclinometer	409
6.42	Slope Indicator Series 200B inclinometer	409
6.43	แสดง Spiral checking sensor	416
6.44	Arrangement for grouting through a pipe within inclinometer casing	420
6.45	Magnetic Extensometers	429
6.46	Sondex	430
6.47	แสดง Settlement probe ชนิด Hook type และ USBR type	431
6.48	Borehole Extensometer	433
6.49	Tensioned and Untensioned Rod Extensometer	434
6.50	แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Magnetic Extensometer	437
6.51	แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Sondex	438

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.52	แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Heave-Settlement Points	439
7.1	แสดงองค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ	446
7.2	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน	447
7.3	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย	448
7.4	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ	449
7.5	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิลพลังงาน	449
7.6	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิลสื่อสาร	450
7.7	แสดงรูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ	450
7.8	แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์	451
7.9	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี	457
7.10	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์	457
7.11	แสดงแบบแผนของแบบจำลองในการออกแบบ	463
7.12	แสดงการกระจายของน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบตามจุดประสงค์ต่างๆ	464
7.13	แสดงการถ่ายโมเมนต์คัตตัวงแหวนที่อยู่ติดกัน	466
7.14	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อ่ง	469
7.15	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคานคอนกรีต	469
7.16	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ	470
7.17	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค	470
7.18	แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์	471
7.19	แสดงแบบจำลองสปริง	480
7.20	แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ	483
7.21	แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทัชชี Terzaghi	486
7.22	แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein, 1979)	488
7.23	แสดงลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนประกอบของวิธี Beam-spring model	491
7.24	แสดงแรงดันดินแนวตั้งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-Spring Model	493
7.25	แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนวยาว	494
7.26	แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-Spring Model	495

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
7.27	แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์	496
7.28	การกระจายความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัด	499
7.29	สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด	499
7.30	แสดงขนาดของอุโมงค์	504
7.31	แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 1	506
7.32	แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 2	507
7.33	แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวนอนที่จุดต่างๆ	507
7.34	เงื่อนไขของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก	508
7.35	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1	515
7.36	กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1	515
7.37	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2	517
7.38	กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2	518
7.39	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1	520
7.40	กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1	520
7.41	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2	522
7.42	กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2	523
7.43	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	525
7.44	กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	525
7.45	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	527
7.46	กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	528

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
7.47	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	529
7.48	กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	530
7.49	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	531
7.50	กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	532
7.51	แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสั้น	535
7.52	แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์วิธีออกแบบคาน	538
9.1	แสดงหน้าจอต้อนรับสู่โปรแกรม Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0	545
9.2	แสดงหน้าจอรับค่า Input	546
9.3	แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion	546
9.4	แสดงหน้าจอค่าแนะนำของค่า (k_v) และค่า Subgrade Reaction Factor	547
9.5	แสดงหน้าจอแสดงค่าแรงกระทำภายใน	548
9.6	แสดงหน้าจอเมื่อคลิก Details	548
9.7	แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก	549
9.8	แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ	550
9.9	แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ	550
9.10	แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	551

บทที่ 1

บทนำ

1.1. กล่าวนำ

วิศวกรรมโยธา มีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ รวมถึงการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในสังคม กล่าวได้ว่าเป็นพื้นฐานสำคัญในการดำรงอยู่ของมนุษย์ อันสอดคล้องตามสภาพเศรษฐกิจและสังคม ดังนั้นเมื่อประเทศมีความเติบโตในเชิงประชากรมากขึ้น จึงเกิดปัญหาหลายประการตามมา โดยเฉพาะด้านการคมนาคม การแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ ก็จำเป็นต้องอาศัยความรู้ด้านวิศวกรรมโยธาเป็นหลัก ทั้งนี้งานก่อสร้างใต้ดินนับเป็นส่วนสำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว รวมทั้งการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติ ให้เจริญก้าวหน้าต่อไป

1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยในสภาวะการณ์ปัจจุบันสืบเนื่องถึงอนาคคนั้น เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายว่า งานก่อสร้างใต้ดิน มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ต่อการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคของประเทศไทย อาทิเช่น ระบบลำเลียงน้ำประปา ระบบระบายน้ำ และระบบคมนาคมขนส่ง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากความจำเป็นและสภาวะบีบบังคับของการใช้พื้นที่อันเป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้างบนพื้นดิน ดังที่ได้กล่าวมานั้น จึงแสดงให้เห็นถึงบทบาทและความสำคัญของอุโมงค์ใต้ดิน ที่มีต่อการพัฒนาประเทศ

“Metropolitan District Railway” กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ค.ศ.1863 เป็นอุโมงค์รถไฟใต้ดินแห่งแรกของโลก นับแต่นั้นเป็นต้นมา จึงได้เกิดโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินเพื่อประโยชน์ในการคมนาคมขนส่งอย่างแพร่หลาย ทั้งในทวีปยุโรป และบางประเทศในทวีปเอเชีย “โครงการรถไฟฟ้ามหานคร” พ.ศ.2547 เป็นอุโมงค์รถไฟใต้ดินแห่งแรกของประเทศไทย ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีด้านอุโมงค์ใต้ดินและเคของส้นนั้น จะมีความก้าวหน้ามาแล้วกว่า 140 ปี แต่สำหรับประเทศไทยแล้วไม่อาจปฏิเสธได้เลยว่าเป็นเทคโนโลยีและองค์ความรู้ใหม่ สำหรับวิศวกรและนักออกแบบชาวไทย อีกทั้งในปัจจุบัน ยังมีงานศึกษาด้านการออกแบบ และก่อสร้างอุโมงค์และเคของส้น ไม่มากเท่าที่ควรเป็นเหตุให้การก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินยังคงอาศัยเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากต่างประเทศซึ่งจะเป็นปัญหาสำคัญต่อการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคระยะยาวของประเทศไทยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นนั้นจึงเป็นการใช้อย่างยิ่ง ในการที่ได้จัดทำคู่มือการออกแบบเพื่อประโยชน์ในงานออกแบบก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน และเป็นการพัฒนาองค์ความรู้แก่วิศวกรชาวไทย อันจะส่งผลดีต่อการพัฒนาประเทศในอนาคต

1.3. วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

เพื่อศึกษาทฤษฎีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบรวมทั้งปัจจัยที่ควรพิจารณาในการก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดินและเคหของส์แล้วเสนอผลสรุปหลักการสำคัญในการออกแบบและก่อสร้างเป็นคู่มือที่มีประโยชน์ต่องานอุโมงค์และเคหของส์ในประเทศไทยได้ อีกทั้งพัฒนาซอฟต์แวร์ให้สามารถแสดงผลการออกแบบ เพื่อใช้ในงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4. ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาและวิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินและเคหของส์
2. ศึกษาขั้นตอนและปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการก่อสร้าง
3. ศึกษาฐานงานจริง เฉพาะโครงการก่อสร้างอุโมงค์และเคหของส์ในกรุงเทพมหานคร
4. พิจารณาศึกษาเฉพาะอุโมงค์ใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยวิธีการใช้หัวขุดเจาะ
5. พิจารณาศึกษาเฉพาะเคหของส์แบบวงกลม
6. พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์และเคหของส์

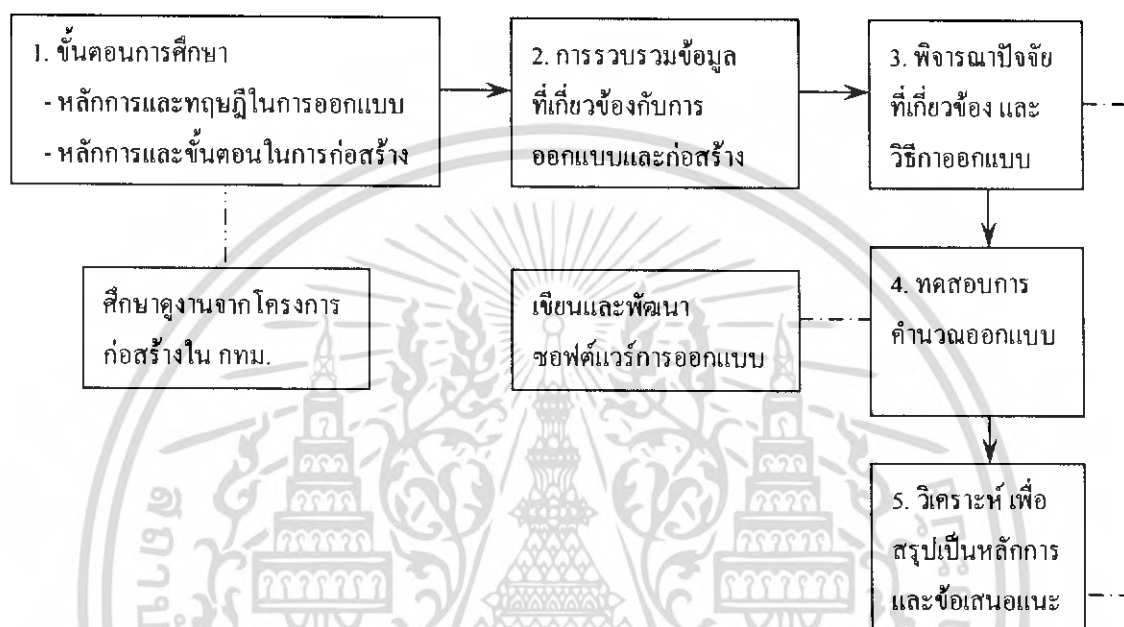
1.5. วิธีการดำเนินโครงการพิเศษ

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผนังอุโมงค์และเคหของส์
2. ศึกษาขั้นตอนและหลักการที่สำคัญต่อการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินและเคหของส์
3. ศึกษาฐานงานจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์และเคหของส์ในกรุงเทพมหานคร
4. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและก่อสร้าง
5. พิจารณาปัจจัยสำคัญทั้งหมด ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและก่อสร้าง
6. พิจารณาวิธีการออกแบบต่างๆ ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ
7. ทดสอบวิธีการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินและเคหของส์
8. สรุปหลักการและข้อเสนอแนะจากการวิเคราะห์ผลการคำนวณและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เขียนและพัฒนาซอฟต์แวร์ออกแบบผนังอุโมงค์และเคชองส์ให้สามารถใช้งานจริงได้

แผนผังการดำเนินงาน



1.6. ประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการพิเศษ

เมื่อทำการศึกษาและพิจารณาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบรวมทั้งขั้นตอนและปัจจัยที่สำคัญในการก่อสร้าง แล้วทำการทดลองออกแบบตามทฤษฎีต่าง ๆ นั้น จะสามารถสร้างความเข้าใจและวิเคราะห์สรุปหลักการที่สำคัญ เป็นคู่มือสำหรับการออกแบบผนังอุโมงค์ได้ดินและเคชองส์ อันจะเกิดประโยชน์ต่องานออกแบบและก่อสร้าง อุโมงค์ใต้ดินและเคชองส์ของประเทศไทย

นอกจากนี้ การพัฒนาซอฟต์แวร์การออกแบบ จะส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้โปรแกรมออกแบบ เพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ประวัติความเป็นมาของอุโมงค์ใต้ดิน

2.1 บทนำ

ปัจจุบันอุโมงค์ได้เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันเรามากขึ้น การเจริญเติบโตของเมืองใหญ่บางครั้ง ทำให้การก่อสร้างบนดินไม่สามารถทำได้สะดวก หรือไม่เหมาะสม การก่อสร้างใต้ดินจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานคร การก่อสร้างใต้ดินเป็นงานที่ได้รับการกล่าวถึงมากกว่ามีความเหมาะสม ดังจะเห็นว่ามีโครงการก่อสร้างใต้ดินมากมาย เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์ท่อน้ำเสียใต้ดิน ของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร รวมถึง 6 โครงการ โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำประปาของ กปน. โครงการอุโมงค์สำหรับวางสายไฟฟ้า สายโทรเลข และสายโทรศัพท์อุโมงค์ ทางรอดตามสี่แยกที่มีการจราจรแออัด เช่น สี่แยกบางพลัด สามแยกดินแดง วงเวียนอนุสาวรีย์ หลักสี่ อุโมงค์กัลปพฤกษ์แยกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สี่แยกมไหสวรรค์ สี่แยกท่าพระและโครงการเจาะอุโมงค์รถค่าไฟฟ้าใต้ดินของ รฟม. ซึ่งได้เริ่มดำเนินการตั้งแต่เดือนสิงหาคม ปีที่แล้ว โครงการก่อสร้างอุโมงค์ตามต่างจังหวัด เช่นอุโมงค์ที่ทำเป็นสถานีกำเนิดไฟฟ้าระบบสูบกลับของ กฟผ. ที่ลำตะคอง จ. นครราชสีมาและอุโมงค์เพื่อการทำเหมืองแร่ไปแตชของบริษัท ไปแตชแห่งอาเซียน ที่ อ.บำเน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุโมงค์ใต้ดินขอบเขตและการใช้งานของอุโมงค์ประวัติความเป็นมา การพัฒนาการเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีการเปิดและด้วยเครื่องจักรกล ความรู้ทางธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องและการใช้อุโมงค์เพื่อประโยชน์อื่นๆ

2.2 ขอบเขตและการใช้งาน

อุโมงค์เป็น โครงสร้างที่อยู่ใต้ดินมนุษย์ได้สร้างขึ้นมาเพื่อให้การคมนาคมและการขนส่งสะดวก รวดเร็ว ปลอดภัยขึ้น ไม่ว่าสภาพภูมิอากาศจะเป็นอย่างไร เช่น การสร้างอุโมงค์ลอดภูเขา แม่น้ำ ทำเลท่าเลสาบ และเมืองใหญ่ที่มีปัญหาการ จราจรผิวดินมนุษย์รู้จักนำทรัพยากรธรณี เช่น แร่เหล็ก ทอง ทองแดง เงิน และแร่อื่น ขึ้นมาใช้ประโยชน์โดยการเจาะอุโมงค์ เป็นเส้นทางนำแร่ออกมาจากแหล่งแร่ต่างๆ ตารางที่ 1 ชี้ให้เห็นถึงชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์

2.3 ประวัติความเป็นมาของอุโมงค์

การพัฒนาอารยธรรมของอารยชนต่างๆ ซึ่งในสมัยก่อนมนุษย์เราได้อาศัยถ้ำเป็นที่อยู่อาศัยจากหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่ประเทศออสเตรเลีย มีอายุ 40,000 ปี ก่อนคริสต์ศักราชภายในอุโมงค์เก่าแก่ บางแห่งใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางประวัติศาสตร์ได้ดี เพราะมาภาพเขียน และลายลักษณ์อักษรโบราณ ต่อมามนุษย์มีความต้องการวัตถุดิบ เช่น เหล็ก ทองแดง เพื่อพัฒนาประเทศ ได้มีการขุดอุโมงค์เพื่อการทำเหมืองแร่ขึ้นเมื่อ 3,000 ปี ก่อนคริสตกาลการพัฒนาเทคนิคความรู้ในการก่อสร้างอุโมงค์ส่วนหนึ่งได้รับแรงผลักดันมาจากความต้องการในงานด้านอุตสาหกรรมที่พัฒนาขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการขนส่งเพื่อใช้ในการงานอุตสาหกรรมมีการพัฒนาการขุดเจาะอุโมงค์อย่างต่อเนื่อง ในช่วงการปฏิวัติอุตสาหกรรมในประเทศอังกฤษ (คริสต์ศตวรรษที่ 18-19) อุโมงค์ได้ถูกสร้างขึ้นมามาก สำหรับการคมนาคม ในรูปของอุโมงค์รถไฟเพื่อแก้ปัญหาด้าน วิศวกรรมเมื่อทางรถไฟต้องวิ่งผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขาสูง การก่อสร้างอุโมงค์ลอดได้ภูเขา จึงเกิดขึ้นเพื่อลดทั้งอันตรายและเวลาเดินทาง

อุโมงค์ระบายน้ำขนาดใหญ่ ชื่อ The Soughs ที่ Hill Carn, Derbyshire ประเทศอังกฤษ สร้างขึ้นระหว่างปี ค.ศ. 1766-1787 มีความยาวถึง 7 กิโลเมตรความรู้ความเข้าใจจากประสบการณ์ครั้งนั้นได้นำไปใช้ในการพัฒนาอุโมงค์ส่งน้ำยาวถึง 70 กิโลเมตร ที่เมือง Worsley. ในยุคนั้นการทำเหมืองแร่ที่มีแหล่งแร่ลึกมากๆ ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ คือ การเจาะอุโมงค์หรือระบบของอุโมงค์เข้ามาใช้ในการผลิตแร่ และ ระบบค้ำยันที่นำมาใช้ให้สอดคล้องกับ สภาพทางโดยสร้างธรณีวิทยาของหินนั้นในอเมริกาได้มีการทำเหมืองแร่โดยการเจาะอุโมงค์ได้ลึกถึง 4 กิโลเมตร นับเป็นอุโมงค์ที่ลึกที่สุดในโลก ในขณะนี้ สำหรับอุโมงค์สำหรับการคมนาคมได้มีการก่อสร้างลอดแม่น้ำทะเลสาบ และทะเลในการก่อสร้างอุโมงค์ เหล่านี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความสำคัญและได้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ในการก่อสร้างอุโมงค์หลากหลายตามประเทศ

2.4 เทคนิคการเจาะอุโมงค์ด้วยวัตุระเบิด

เทคนิคการเจาะและใช้วัตุระเบิดนี้ได้นำมาใช้เมื่อประมาณ 200 ปีที่ผ่านมา นับว่าเป็นเทคนิคที่ทำให้ การเจาะ อุโมงค์ ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว สามารถเจาะในภูเขาหินที่แข็งมาก และด้วยความยาวอุโมงค์ที่เจาะได้ต่อวันเพิ่มขึ้นรูเจาะระเบิดแต่ละรูจะบรรจุวัตุระเบิดซึ่งอาจจะใช้เป็นแท่งไดนาไมต์หรือ ทุยแอมโมเนียผสมน้ำมันดีเซลหมายเลขที่กำกับรูเจาะระเบิดคือ เบอร์ของแท่งทุยระเบิดซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปะทุระเบิด จะใช้เวลาต่างต้นตามเบอร์ส่วนกำกับ เช่น เบอร์ 1 จะทำการปะทุระเบิดก่อนเบอร์ 2 และเบอร์ 2 จะทำการปะทุระเบิดก่อนเบอร์ 3 ที่ดังนี้ โดยอาศัยหลักการเพิ่มพื้นที่อิสระให้มากขึ้นของการระเบิด ของวัตุระเบิดจะทำให้ประสิทธิภาพในการระเบิด สูงขึ้นส่วนขั้นตอนการระเบิดอธิบาย ดังนี้ เมื่อวัตุระเบิดปะทุระเบิดอธิบายได้ ดังนี้ เมื่อวัตุระเบิดปะทุระเบิดขึ้นจะทำให้เกิดพลังงานจำนวนมหาศาลในรูเจาะระเบิด พลังงานส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปรอบๆ รูเจาะในเนื้อหินในรูปของคลื่นเมื่อคลื่นจำนวนนี้เคลื่อนที่มาถึงหน้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิสระหรือ บริเวณสัมผัสระหว่างเนื้อหิน กับอากาศก็จะกลายเป็นแรงดึง ด้วยแรงดึงเพียง 1-10 เท่าของแรงดึง
ที่มนุษย์สามารถเจาะอุโมงค์ในหินที่แข็งมากๆ ได้

2.5 วิธีการเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์

จากนี้ที่มนุษย์สามารถเจาะอุโมงค์ในหินที่แข็งมากๆ ได้ไม่ได้หมายความว่าในชั้นดินอ่อนนั้น
มนุษย์ไม่มีการพัฒนาเต็มรูปแบบ สำหรับชั้นดินที่อ่อนและมีน้ำใต้ดิน มนุษย์ได้เริ่มมีการพัฒนาเต็มรูปแบบ
สำหรับชั้นดินที่อ่อนและมีน้ำใต้ดิน มนุษย์ได้เริ่มพัฒนาเครื่องเจาะอุโมงค์ในช่วง 50 ปี ที่ผ่านมามีเครื่องเจาะ
อุโมงค์ในดินอ่อน หลายชนิดพร้อมเทคนิคต่าง ๆ ของเครื่องเจาะอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน รวมทั้งวิธีการควบคุม
ความปลอดภัย ของอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน รวมทั้งวิธีการควบคุมความปลอดภัยของอุโมงค์ เทคนิควิธีการ
เหล่านี้ได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 สำหรับการเจาะอุโมงค์บริเวณ กรุงเทพมหานคร ยกตัวอย่างโครงการ
รถไฟฟ้าใต้ดินของ รฟม. อุโมงค์ที่มีความลึก 23 เมตร เพื่อพิจารณาระดับน้ำใต้ดิน 0.1-2 เมตรจากผิวดินและ
คุณสมบัติของดินเหนียวที่ระดับอุโมงค์มีค่าเฉลี่ยของ Natural Water Content 25% , Liquid Limit 50%
, Plastic Limit 20% มีการเลือกใช้ Earth Pressure Balance - Machine เพื่อเหมาะสมสำหรับการเจาะ
อุโมงค์บริเวณกรุงเทพมหานคร

2.6 บทบาทความรู้ทางธรณีวิทยา

ความรู้ทางธรณีวิทยาเป็นพื้นฐานความเข้าใจพฤติกรรมของ ดิน หิน และน้ำใต้ดินที่มี
อิทธิพลต่อการเจาะอุโมงค์ การเลือกใช้เครื่องจักร การเลือกใช้ระบบกำบังการรักษาความปลอดภัยภายใน
อุโมงค์ได้ใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณที่ เจาะอุโมงค์เป็นตัวกำหนด ดังนั้นการสำรวจทางธรณีวิทยา
ที่ถูกต้อง จึงเป็นสิ่งแรกที่เรจะต้องกระทำและ ข้อมูลที่ได้ต้องถูกต้องกระทำและ ข้อมูลที่ได้จะต้องถูกต้อง
หากได้ข้อมูลที่คาดเคลื่อน ผลการออกแบบคำนวณจะผิดพลาดก่อให้เกิดความเสียหายได้ การเปลี่ยนแปลง
ทางธรณีวิทยาบางช่วงของอุโมงค์ และวางแผนแก้ไขล่วงหน้า

2.7 การใช้อุโมงค์เพื่อประโยชน์อื่น

จากสภาพของโครงสร้างทางธรณีวิทยาและรูปร่างของอุโมงค์ที่สามารถก่อสร้างให้เป็น
รูปร่างที่ต่างไปจากรูปร่างอุโมงค์ทั่วไปอุโมงค์ที่ก่อสร้างเป็นรูปร่างต่างๆสามารถใช้เพื่อประโยชน์อื่น
ยกตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 อุโมงค์สำหรับส่งน้ำและกำเนิดไฟฟ้า

เป็นหลักการใช้ประโยชน์ของโครงสร้างหินที่แข็งแรงโดยการเจาะอุโมงค์ทำเป็นท่อส่งน้ำ แทนการส่งน้ำด้วยท่อโลหะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ตลอดปีทั้งที่ในฤดูหนาว ผิวน้ำในทะเลสาบกลายเป็น น้ำแข็ง

2.7.2 อุโมงค์สำหรับเก็บเอกสาร อาหาร

โดยอาศัยหลักการที่ว่า ภายใต้อุณหภูมิลดลงเล็กน้อย และค่าความชื้นคงที่ตลอดทั้งปี จึงเหมาะที่จะขุดอุโมงค์เป็นโพรงสำหรับเก็บเอกสาร อาหาร และ เป็นการประหยัดไฟฟ้าสำหรับ เครื่องทำความเย็นในการลดอุณหภูมิหรือควบคุมอุณหภูมิภายในอุโมงค์และสามารถที่จะสร้างเป็น โกดังขนาดใหญ่ เท่ากับโครงสร้างของหินนั้น

2.7.3 อุโมงค์สำหรับเก็บน้ำมัน

จากสถานภาพโครงสร้างธรณีวิทยา ของหินบางชนิดที่มีลักษณะ ป้องกันการไหลซึมของ น้ำมันได้ และหินนั้นไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี กับน้ำมันเราสามารถที่จะสร้างคลังน้ำมันขนาดใหญ่ เก็บไว้ใต้ดิน และปลอดภัยกว่าการสร้างถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่เก็บไว้ใต้ดินและปลอดภัยกว่าการสร้างถังเก็บน้ำมันในปัจจุบัน

2.7.4 อุโมงค์สำหรับเก็บกากนิวเคลียร์

เป็นผลจากการวิจัยของหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศแคนาดาได้สรุปว่า การเจาะอุโมงค์ ลงไปเพื่อสร้างเป็นสถานที่เก็บกากนิวเคลียร์ใต้ดินเป็นวิธีการที่เหมาะสมทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยโดยอาศัยหลักการที่ว่าแร่กัมมันตภาพรังสีเกิดขึ้น ตามธรรมชาติ และอยู่ในโครงสร้าง ธรณีวิทยา ดังนั้นการนำกากนิวเคลียร์กลับไปเก็บไว้คล้ายสภาพของการเกิดตามธรรมชาติ และควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิดย่อมได้รับการยอมรับจากสังคมมากกว่าวิธีอื่น

การใช้ประโยชน์ของอุโมงค์มีประวัติความเป็นมายาวนานกว่า 60,000 ปีแล้ว ตั้งแต่การใช้ เพื่อเป็น ที่อยู่อาศัยของมนุษย์ เป็นที่หลบภัยเพื่อการคมนาคม เพื่อการขนส่ง เพื่อการทำเหมืองแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาการใช้อุโมงค์ในโครงสร้างธรณีวิทยาที่เหมาะสมได้ขยายขอบเขตออกไปเช่นเพื่อส่งน้ำและทำเป็นสถานที่กำเนิดไฟฟ้าเก็บอาหารเอกสารสำหรับเก็บน้ำมันสถานที่วิจัยทาง วิทยาศาสตร์ และสำหรับเก็บกากนิวเคลียร์ ในอนาคตมนุษย์สร้างอุโมงค์เพื่อประโยชน์เฉพาะด้านอีกมากมาย สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการก่อสร้างอุโมงค์คือ ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณนั้นความรู้ทางธรณีวิทยา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกรณีเทคนิคสำหรับประเทศไทยมีโครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินเพิ่มขึ้น ปัญหาจากการก่อสร้างอุโมงค์การใช้พื้นที่ใต้ดินย่อมตามมาในอนาคตซึ่งจำเป็นต้องหาทางแก้ไขปัญหาได้แต่ทางด้านกฎหมายนั้น หากหน่วยราชการหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้พื้นที่ใต้ดินยังไม่มีกฎหมายรองรับที่ชัดเจนก็ควรที่จะมีการจัดตั้งหน่วยงานกลางอิสระ เพื่อรับผิดชอบการใช้พื้นที่ใต้ดินที่ชัดเจนมีกฎระเบียบและบทกำหนดโทษ ซึ่งผู้เขียนคาดว่าจะคงมีปัญหาเกี่ยวกับเรื่องนี้แน่นอนในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์

ชนิดของอุโมงค์	การใช้ประโยชน์
1. อุโมงค์เพื่อการคมนาคม	1. อุโมงค์ทางรถไฟ 2. อุโมงค์ทางหลวงหรือทางเชื่อมระหว่างถนน 3. อุโมงค์ทางเดินเท้า 4. อุโมงค์เดินเรือใต้น้ำ 5. อุโมงค์ขนส่งรถไฟใต้ดิน 6. อุโมงค์ลอยใต้น้ำ 7. อุโมงค์วางพื้นทะเลสาบ
2. อุโมงค์เพื่อการขนส่ง	1. อุโมงค์ส่งน้ำ 2. อุโมงค์รับน้ำเสีย 3. อุโมงค์ที่ใช้ขนส่งลำเลียงในโรงงานอุตสาหกรรม
3. อุโมงค์เพื่อการทำเหมืองแร่	1. อุโมงค์ทางเข้า 2. อุโมงค์ระบายอากาศ 3. อุโมงค์สำหรับสำรวจแร่และหิน 4. อุโมงค์ระบายน้ำออกจากบ่อเหมือง 5. อุโมงค์งานบริการทั่วไป
4. อุโมงค์เพื่อประโยชน์อื่นๆ	1. อุโมงค์ส่งน้ำและทำเป็นสถานีกำเนิดไฟฟ้า 2. อุโมงค์สำหรับวางสายไฟฟ้า สายโทรเลข และสายโทรศัพท์ 3. อุโมงค์หนีภัย 4. อุโมงค์สำหรับเก็บอาหาร เอกสาร น้ำมัน 5. อุโมงค์เก็บกากนิวเคลียร์ 6. อุโมงค์เพื่อการทดลอง วิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงประวัติของการเจาะอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา

ระยะเวลา	การพัฒนาอุโมงค์	ความยาว ของอุโมงค์	ขนาดของอุโมงค์
3C (ก่อน คริสตกาล)			
4000	การทำเหมืองแร่เฮมาไทด์ในสมัยดึกดำบรรพ์ เพื่อ ใช้เป็นเครื่องประดับที่เมือง BOMVU RIDGE ประเทศสวิตเซอร์แลนด์	หลายขนาด	
15000-10000	การพัฒนาการทำเหมืองแร่ได้ดินที่ Grimes Graves, East Anglina เป็นแร่	มากกว่า 10 เมตร	
3000-1000	Flint อุโมงค์หินที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองแร่, หลุมศพ และวัดที่ประเทศอียิปต์ และมอลต้า อุโมงค์ขนาดใหญ่เกี่ยวกับการทำเหมือง แร่โลหะต่างๆ ที่ประเทศกรีซ	หลายขนาด	
2500-20 th C	การทำเหมืองแร่เกลือ ที่ Hallstatt Salzkammergut ประเทศออสเตรีย		
2000-20 th C	เป็นยุคของการทำเหมืองแร่เหล็กที่ Mt.Laurion, Attic Peninsula, ประเทศกรีซ	หลายขนาด	
2000	อุโมงค์ลอดแม่น้ำยูเกติสและอุโมงค์ลอดแม่น้ำบาบิโลน	1 กิโลเมตร	3.6 x 4.5 เมตร
700	อุโมงค์ shilloah	540 เมตร	
700	อุโมงค์ส่งน้ำในเยรูซาเลม	200 เมตร	7 x 7 เมตร
600	อุโมงค์ส่งน้ำที่เกาะ Samos, ประเทศกรีซ	1.5 กิโลเมตร	1.8 x 1.8 เมตร
500BC- 500AD	การทำเหมืองแร่ของโรมัน, อุโมงค์และเครื่องจักร ช่วยปรับปรุงให้ระบายน้ำได้ดินได้ดี	หลายขนาด	
AD(คริสตกาล)			
50	อุโมงค์ถนนลอด Posilopo ที่กรุงโรม	900 เมตร	กว้าง 7.5 เมตร
300-400	อุโมงค์เครือข่ายของที่ฝังศพที่ Catacombs	หลายขนาด	
500-1500	อุโมงค์เพื่อการทหาร สนใจที่จะเพิ่มกิจกรรมการทำ	หลายขนาด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	เหมืองแร่ และโครงของอุโมงค์ ถนนลอด		
700-20th C	เหมืองแร่โลหะได้ดินขนาดใหญ่ในยุโรป	5.6 กิโลเมตร	
1400	อุโมงค์เหมืองแร่ที่ Biber ประเทศฮังการี		
1500-1800	การเพิ่มของการใช้อุโมงค์เดินเรือ		
1627	การขุดเจาะอุโมงค์เหมืองแร่โดยใช้ดินปืนที่ Selmechbanya ประเทศฮังการี	หลายขนาด	
1627	อุโมงค์เดินเรือโดยใช้การระเบิดหินด้วยดินปืนที่ Languedoc ประเทศฝรั่งเศส	หลายขนาด	
1862	อุโมงค์รถไฟแห่งแรก (ใช้ม้า) ที่ Roanne-Andressieux		
1826-1829	อุโมงค์รถไฟขับเคลื่อนโดยไอน้ำสาย LIVERPOOL-MANCHESTER ประเทศอังกฤษ	หลายขนาด	
1842	อุโมงค์ลอดแม่น้ำเทมส์เป็นอุโมงค์ลอดได้น้ำแห่งแรกที่ไม่มีการสร้างทางเบี่ยงของแม่น้ำ	150 เมตร	6.7 x 11.3 เมตร
1857-1871	อุโมงค์รถไฟเชื่อมฝรั่งเศสถึงอิตาลี มีการใช้เครื่องเจาะระบบไฮดรอลิกเจาะหินเป็นครั้งแรก	12.7 กิโลเมตร	8 x 7.5 เมตร
1864	Nobel ได้ประดิษฐ์ระเบิดไดนาไมต์และใช้ในอุโมงค์ที่ MONT CENIS		
1872-1881	อุโมงค์ St.Gotthard	15 กิโลเมตร	8 x 7.4 เมตร
1895-1921	อุโมงค์ Simplon	19.7 กิโลเมตร	5 x 5.4 เมตร
1906-1912	อุโมงค์ Loetschberg การทำอุโมงค์รถไฟตัดภูเขาประสบปัญหาการไหลของน้ำอย่างแรง ทราบและถูกรังซึ่งอยู่ลึกจากพื้นแม่น้ำ 180-200 m. อุโมงค์ได้ป้องกันโดยใช้กำแพงและวิธีเบี่ยงเบนรอบพื้นที่	16 กิโลเมตร	8 x 6.1 เมตร
1918-1934	อุโมงค์ Tanna ที่ญี่ปุ่นมีปัญหาใหญ่ของทรุดของเพดานอุโมงค์สูงถึง 60 เมตร	7.8 กิโลเมตร	8.4 x 5.8 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสำนักพิมพ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	และการทะลักไหลของน้ำเข้าอุโมงค์ มีความดันน้ำถึง 200 เมตร และอุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 30 องศา ใช้คอนกรีตหนาถึง 2 เมตร สำหรับ lining เพดาน		
1920-1931	อุโมงค์ Great Apennine	18.5 กิโลเมตร	9.4 x 8.3 เมตร
1924-1927	อุโมงค์ New Cascade สหรัฐอเมริกา อัตราการเจาะอุโมงค์ 4.3 กิโลเมตร/ปี	12.4 กิโลเมตร	4.9 x 7.3 เมตร
1925-1934	อุโมงค์ Mersey Liverpool เป็นอุโมงค์ถนนลอดใต้ น้ำ 4 ช่องทางจราจร ความลึกเฉลี่ยจากท้องแม่น้ำถึงหลังคาอุโมงค์ 10 เมตร ในช่วง 10 เมตร เป็นหิน 6 เมตร	3.4 กิโลเมตร	14 เมตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง)
1959-1965	อุโมงค์ Mont Blanc เป็นอุโมงค์ทางหลวงที่ยาวที่สุด	12.7 กิโลเมตร	9 x 12.5 เมตร 9 x 9.7 เมตร
1964-1988	อุโมงค์ SeiKan ที่ญี่ปุ่นทำอุโมงค์โดยใช้การเจาะและวัดระยะเบ็ด และการทะลักไหลของน้ำเข้าอุโมงค์ 11 ลิตร/นาที่	53.8 กิโลเมตร (23.3 กิโลเมตร ได้น้ำ)	5 x 4.2 เมตร
1968-1974	อุโมงค์ Orange Fish ที่แอฟริกาใต้ มีปัญหาน้ำท่วมและเกิดติดไฟของแก๊สมีเทนในอุโมงค์	82.5 กิโลเมตร	5.4 เมตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง)
1986-1992	อุโมงค์รถไฟเชื่อมฝรั่งเศสถึงอังกฤษมีการใช้เครื่องเจาะระบบ TBM	50.5 กิโลเมตร	7.6 เมตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

3.1 การขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม

3.1.1 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน

อุโมงค์ในดินอ่อนสามารถขุดได้โดย hand mine หรือ โดย tunneling machine โดยใช้ shield หรือปราศจากการใช้ shield ก็ได้ เกณฑ์การเลือกวิธีการขุดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและพฤติกรรมที่คาดการณ์ไว้ของดิน ซึ่งบรรยายไว้ในรูปของ Terzaghi's behavioristic classification

การขุดเจาะอุโมงค์สำเร็จได้โดยการเลือกวิธีการขุดเจาะที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับพฤติกรรมของดิน และโดยการประเมินลักษณะของดินได้อย่างถูกต้อง การประเมินถือเป็นส่วนสำคัญของการทำ geotechnical investigation ซึ่งขึ้นอยู่กับการจำแนกประเภทโดยลักษณะเฉพาะและลักษณะทั่วไปที่ได้กล่าวไว้แล้ว และประเมินค่าพารามิเตอร์บางตัวเช่น grain size distribution (การกระจายขนาดของเม็ดดิน) , กำลังรับแรงของดิน (strength of soil) และค่าความซึมได้ของดิน (permeability of soil) สถานะน้ำใต้ดิน ในทางปฏิบัติแล้วการแสดงผลการเกี่ยวพันระหว่าง คุณสมบัติของดินและพฤติกรรมของดิน เป็นไปได้ยากและถูกมีอิทธิพลโดยแฟกเตอร์ทางธรณีวิทยา (non-geotechnical factors) เช่น ขนาดของอุโมงค์ ค่อไปนี้คือความสัมพันธ์ของวิธีขุดเจาะอุโมงค์กับ Terzaghi classification สำหรับดิน

Firm ground

soil included : firm to stiff clay ประกอบด้วย clay till , cemented sand and gravels.

method : สามารถใช้ได้ทั้ง hand method หรือ machine tunneling method เพราะมี stand uptime เพียงพอ

Revealing ground

soil included : sand และ silts ที่มีแรงยึดเหนี่ยว เนื่องจากแรงดึงใน pore-water

method : การขุดแบบ hand mining ต้องทำด้วยความระมัดระวัง ให้ติดตั้ง support ที่ face และ roof ทันที หรืออาจขุดด้วย machine tunneling ซึ่งต้องทำการติดตั้ง support ทันทีเหมือนกัน

Running ground

soil included : dry sand และ loose gravel

method : การขุดแบบ hand tunneling ให้ติดตั้ง fore-poling ค้ำยันที่ roof หรือขุด โดยใช้ shield สำหรับอุโมงค์ขนาดใหญ่

Flowing ground

method : uncemented sands และ silt ใต้น้ำ

soil included : ใช้ shield tunneling ร่วมกับการใช้ compressed air หรือ groundwater lowering

Squeezing ground

soil included : ดินเหนียวอ่อนมากหรือดินเหนียวแข็ง

method : การขุดแบบ hand tunneling โดยใช้ shield ในดินเหนียวอ่อน และใช้ compressed air

3.1.1.1 วิธีขุดแบบ Heading and Bench Excavation

Heading and Bench method เป็นการขุดเจาะอุโมงค์แบบ hand mining (ขุดโดยใช้คน หรือ เครื่องจักรในการขุดเช่น back hoe) ซึ่งสามารถใช้กับอุโมงค์ขนาดใหญ่ได้ มันเป็นวิธีการดั้งเดิมสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนและใช้กันทั่วไปก่อนที่จะมีการนำเอาเครื่องขุดเจาะเข้ามาใช้ และถือว่าวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ประหยัดที่สุดสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ที่ไม่ยาวมาก เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 15 ฟุต และสภาพดินเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว (GOLDER ASSOCIATES, 1976)

การปฏิบัติการ : ส่วน heading หรือ ส่วนครึ่งบนของ tunnel face จะถูกขุดหลังจากทำการขุดส่วนครึ่งล่างแล้ว (ซึ่งเรียกว่า bench) ซึ่งเราจะต้องรีบทำโครงสร้างค้ำยัน ส่วน heading ไว้ โดยโครงสร้างค้ำยันประกอบด้วย breastboards ซึ่งจะติดตั้งในแนวระดับค้ำ ไว้กับเสาไม้ในแนวตั้ง (soldiers) ซึ่งจะค้ำอยู่กับ upright posts และ lining ส่วนที่เราติดตั้งเสร็จแล้ว ต่อมาเราจะเริ่มเอา breastboards ออกทีละตัวโดยเริ่มจาก breastboards ตัวบนก่อน แล้วเราทำการขุดดิน heading ส่วนนั้นจนได้ระยะพอสมควรก็จะทำการติดตั้ง breastboards ค้ำดินที่เพิ่งขุดใหม่ แล้วทำการรื้อ breastboards ตัวล่างถัดมาเพื่อขุดดิน heading ส่วนนั้น จนกระทั่งเต็ม tunnel face เราก็จะทำการติดตั้ง primary lining เพื่อเป็นค้ำยันชั่วคราว และทำการขุด bench

ส่วนต่อไปจนเสร็จจึงทำการติดตั้ง lining ส่วนที่เหลือ เราจะใช้ท่อซึ่งมีสกรูไขปรับขนาดได้ ค้ำยัน lining ส่วนบนไว้

Mayo (1969) แนะนำว่า สำหรับอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ฟุต ต้องการคนงาน 24 คนสำหรับขุดโดยวิธี Heading and Bench ในดิน silt clay โดยใช้คน 10 คน ทำงานเกี่ยวกับการขนส่งลำเลียง และติดตั้ง support และอีก 14 คน ทำหน้าที่เกี่ยวกับงานขุดและติดตั้ง lining อัตราก้าวหน้าโดยเฉลี่ยประมาณ 20 ฟุตต่อ 24 ชั่วโมงการทำงานในการเลื่อนตัว 3 ครั้ง ไม่รวมการติดตั้ง final lining

ความเหมาะสม : เหมาะกับดินที่สามารถรูปได้เอง, ดินเหนียวแข็ง, ทราย และกรวดที่อยู่ในสภาพแน่นแล้วถ้าเป็นดินสภาพไม่ดีจะต้องใช้วิธีการอัดอากาศหรือใช้สารละลายที่มีความหนาแน่นสูงช่วย

ข้อดีของวิธี Heading and Bench สามารถปรับให้ใช้ได้กับดินชนิดต่างๆ มันสามารถใช้ขุดอุโมงค์ในดินที่เกิดจากการทับถม , ดินเหนียวอ่อน , silts และ sand หรือในดินที่มีก้อนหินขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำให้การขุดเจาะโดยใช้หัวขุดเจาะชะงักได้ และยังสามารถใช้กับการขุด mixed face (มีดินชนิดต่างๆ ปนกัน ในตำแหน่งที่กำลังขุด tunnel face) ซึ่งอาจเป็นดินอ่อนปนกับหินก็ได้ หรือสามารถใช้ร่วมกับการใช้ shield แบบ compressed air ในการขุดดินที่มีเสถียรภาพของดินน้อย ค่าใช้จ่าย initial capital cost ต่ำ และไม่ต้องการคนงานที่มีความชำนาญด้านเครื่องจักรกลที่ซับซ้อนแบบหัวเจาะ

ข้อเสียของ Heading and Bench คืออัตราการขุดต่ำและต้องใช้แรงงานคนมาก ซึ่งในจำนวนคนงานที่เท่ากัน และใช้หัวเจาะที่มีความเหมาะสม อัตราการขุดเจาะต่อวัน สองสาม เท่าของการขุดแบบ Heading and Bench ในอุโมงค์ขนาดเดียวกัน

3.1.1.2 การใช้ shield ช่วยในกาขุดเจาะ

(1.) ประวัติความเป็นมา

ในปี 1825 การใช้ shield ครั้งแรกได้ถูกคิดค้นขึ้นในกรุงลอนดอนโดย Marc Brunel ซึ่งนำมาใช้กับอุโมงค์ กว้าง 38 ฟุต สูง 22 ฟุต โดย East London Subway ต่อมาการใช้วิธี compressed air ใน shield ก็ถูกเสนอขึ้นมาเป็นครั้งแรกโดย Loed Cochran ในปี 1869 shield แบบคอนกรีตได้ถูกจดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก โดย Peter W. Barlow ในประเทศอังกฤษ และ shield แบบวงกลม ตัวแรกแบบเดียวกับที่ใช้ในปัจจุบันนี้ โดยถูกออกแบบในปี 1896 โดย J.J. Greathead (MICHAEL , 1987)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ shield แบบผสม เป็นสิ่งจำเป็นในการเจาะอุโมงค์โดยใช้อัดอากาศ ร่วมกับการ grouting ด้วยสารเคมี เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของ face ซึ่งไม่เหมาะสมในเรื่องความปลอดภัยและราคาจากจุดนี้จึงนำไปสู่การประดิษฐ์ mechanical shield ที่เป็นแบบปิดกั้น (Close-face) เรียกว่า slurry shield และ earth pressure balance (EPBS) slurry shield ถูกพัฒนาขึ้นในยุโรป และ EPBS ถูกพัฒนาขึ้นในญี่ปุ่นในปี 1974 (NAITOH , 1985)

(2.) ลักษณะการทำงานของ shield แบบผสม (Conventional shield)

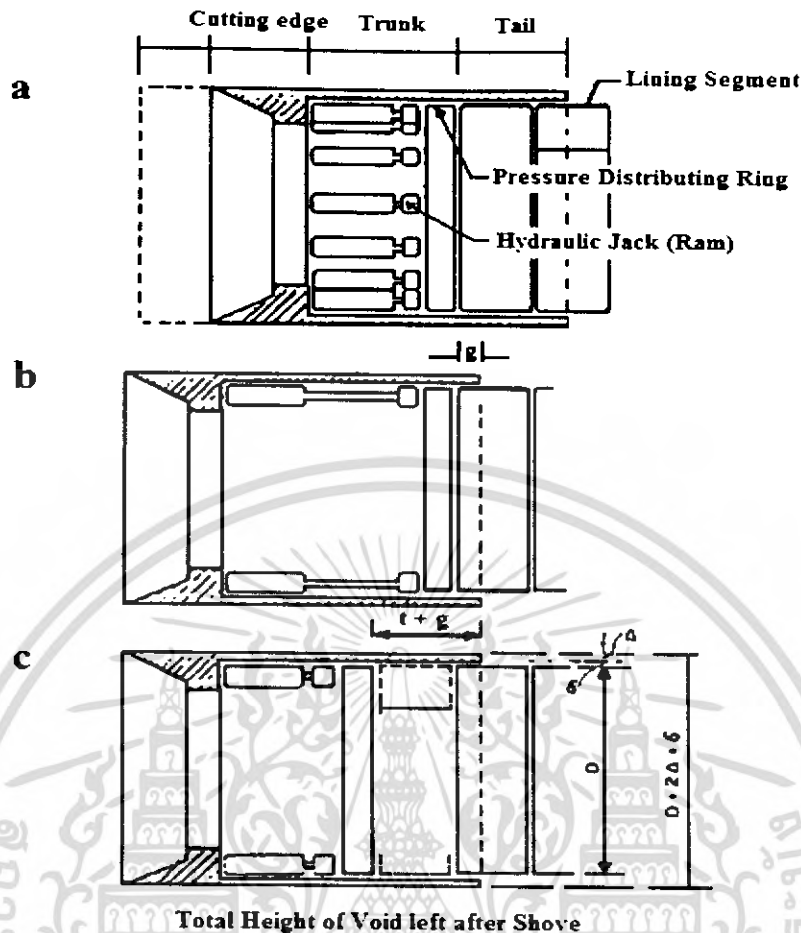
Tunneling shield ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- (1) cutting shield อยู่ส่วนหน้าสุดของ shield สร้างด้วยเหล็กกล้ามีความแข็งแรง
- (2) body ของ shield ซึ่งช่วยรับดินโดยรอบไม่ให้ทรุดตัวลงมา และเป็นที่ติดตั้ง ชุดอุปกรณ์ jacking (ใช้ในการเลื่อนตัวของ shield เป็นอุปกรณ์ hydraulic) และให้คนเข้าไปทำงานควบคุม shield
- (3) tail piece (ส่วนหาง) ของ shield เป็นส่วนที่มีอุปกรณ์และที่ว่างสำหรับการติดตั้ง lining

วงจรการทำงานของ shield ประกอบด้วย

- (1) การขุดบริเวณ face (หน้าอุโมงค์) และการจัดหาสิ่งที่จะช่วยดันดินที่ face เท่าที่จำเป็น
- (2) การเลื่อนตัวของ Shield ในทิศทางที่ทำการขุดเจาะ โดยอาศัยการผลักดันตัวกับ lining ที่ได้ทำการติดตั้งไว้แล้ว
- (3) เมื่อการขุดเจาะได้ระยะพอที่จะทำการติดตั้ง Lining ในส่วนหางของ shield แบบแผนการทำงานของ shield tunneling เป็นดังรูป 3.1

สำนักหอสมุดกลางฯ พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 หลักการของ shield tunnelling

(3.) ประเภทของ shield

Shield machines สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ conventional (แบบผสม) กับ special แต่เดิมเราใช้วิธี compressed air เพื่อป้องกันน้ำและดินที่ไหลเข้ามาที่บริเวณ face ต่อมาการใช้ compressed air ไม่มีความสำคัญมาก หลังจากมีการพัฒนา slurry shield และ EPMS ซึ่งเป็น special shield (YOSHIKAWA, 1985)

เครื่องจักรสามารถแบ่งตามลักษณะการขุด ออกเป็น 2 ประเภท คือ full-face machines ใช้หัวเจาะแบบหมุนหรือเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ซึ่งจะขุดได้เต็มหน้าอุโมงค์ (face) ในเวลาเดียวกัน และอีกประเภท คือ part-face machine ซึ่งใช้การหมุนหรือแกว่งของแขนที่ติดใบเลื่อยหรือใบมีดอยู่ เพื่อตัดขุดดินในส่วนต่าง ๆ ของ face ออก ลักษณะการทำงานของเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ (TBM) แบบต่าง ๆ ดังนี้

1. แบบ full face excavation

1.1 Wheel Type

ลักษณะ : หัวเจาะชนิดนี้จะใช้การเคลื่อนตัวกระแทกกับ face แล้วทำการขุด ดัด หรือ ขุด ดินบริเวณ face ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดินที่ขุดขึ้นมาจะหล่นลงไปด้านล่างของ shield แล้วถูกลำเลียงออกไปด้านหลัง TBM (หัวเจาะ) โดยสายพานลำเลียง , buckets, mucking arms หรืออุปกรณ์ทำนองเดียวกันนี้

ความเหมาะสม : เหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อน , firm to stiff clay , cemented sand และ gravels , sand และ silt

1.2 Drum Type

ลักษณะ : หัวเจาะชนิดนี้ดัดแปลงมาจากหัวเจาะแบบ radial- wheel type (แบบ 1) ซึ่งหัว ดัดจะติดกับ drum ซึ่งจะหมุนอยู่ข้างนอก shield ซึ่ง drum จะหมุนด้วย อัตราเร็ว 4 ถึง 6 รอบ/นาที ในทั้งสองทิศทางเพื่อให้เหมาะกับสภาพดิน ใบมีดสามารถที่จะต่อกับ cutting arm ได้

ความเหมาะสม : เหมาะกับดินเหนียวอ่อน ถึงดินเหนียวแข็ง, sand และ silt, gravel

1.3 Oscillating Type (แบบแกว่ง)

ลักษณะ : เครื่องเจาะแบบ Oscillating arm excavator นี้จะเหมือนกับ wheel excavator แต่ต่างกันโดยที่การเจาะจะทำโดยชุดของ arm ที่สามารถแกว่งไปมา ได้ ซึ่งสามารถปรับความยาวของ arm ได้ ทำให้หัวเจาะชนิดนี้สามารถใช้เจาะ อุโมงค์เป็นรูปร่างแบบอื่น ๆ ได้จะติดชุดใบมีดไว้ที่ด้านหน้าและสามารถเคลื่อนที่ กลับไปกลับมาได้ในทิศทางแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของ shield การเคลื่อนที่ แบบกลับไปกลับมาของ arms สามารถควบคุมได้และสามารถปรับความยาว arms ได้ ทำให้หัวเจาะชนิดนี้สามารถใช้เจาะอุโมงค์เป็นรูปร่างอื่น ๆ ได้

ความเหมาะสม : เหมาะกับดินเหนียวอ่อนถึงแข็ง sand และ silt, gravel หัวเจาะชนิดนี้ยังเหมาะ กับดินที่มีพฤติกรรมแบบ flowing หรือ running ได้ โดยส่วน hood (หรือbody) ของ shield สามารถที่จะยึดได้เพื่อกดส่วนหัวเจาะลง เพื่อช่วยลดแรงดันดิน บริเวณ cutting (ใบมีด) และช่วยให้ระบบการนำดินออกมีประสิทธิภาพดีขึ้น

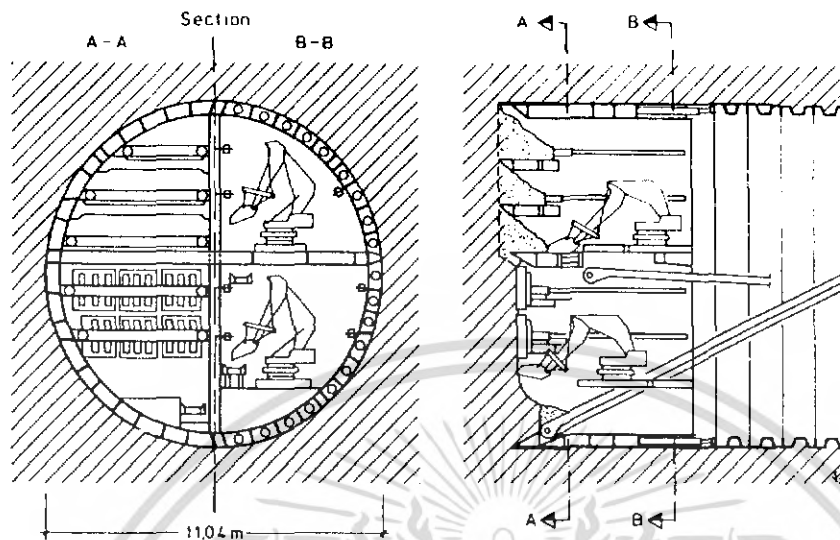
2.Part- Face Excavator

2.1 Ripper-Bucket Excavator

ลักษณะ : หัวเจาะชนิดนี้จะต้องตัดฉีกดินออกโดยใช้ฟันเลื่อย พร้อมกับกวาดดินลง สายพานที่ด้านล่างของหัวเจาะ เพื่อนำดินออกไปด้านหลัง (รูป 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหมาะสม : เหมาะกับสภาพดินที่ต้องใช้แบบ shield แบบ “open face” และเหมาะกับหินที่
มีการแตกละเอียดง่าย



รูปที่ 3.2 แสดง Ripper-Bucket Excavator (จาก Mechanised Shield Tunnelling)

(4.) Slurry Shield Method

ในวิธี Slurry Shield Method เราใช้ mineral, bentonite, clayey soil หรือ cme เป็นสารช่วยยับยั้งการพังทลายของหน้าดินบริเวณ face shield แบบนี้จะใช้กับดินชนิดต่างๆ ตั้งแต่ดินเหนียวอ่อนจนถึง gravels ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามใน gravels การใช้ shield แบบนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของ face ไม่สู้จะดีนัก เพราะ mud cake (การที่ slurry เป็นตัวประสานช่วยยึดจับเม็ดดินให้เป็นก้อน เรียกว่า mud cake) จะไม่เกิดขึ้นเนื่องจาก slurry สามารถไหลซึมออกไปได้ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินของ gravels การวิเคราะห์เชิงสถิติของข้อมูลการก่อสร้างที่ได้บันทึกไว้ บ่งบอกว่า slurry จะเหมาะสมกับสภาพดินเดิมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปกราฟรูป 3.3 (YOSHIDAWA, 1985) ข้อดีของ slurry shield คือ ความต้องการกำลังบิดน้อยกว่า EPBS ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง shield จะถูกจำกัดโดยความสามารถในการรับแรงบิดของมัน

(5.) Earth Pressure Balance Shield (EPBS)

Earth Pressure Balance Shield ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในญี่ปุ่นโดยบริษัท Sato Kogyo company ซึ่งกำลังคิดค้นหาวิธีที่ปลอดภัย สำหรับเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน และดินที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรม แบบ running อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยปราศจากการใช้ slurry (BARBARA STACK, 1985) แนวความคิดพื้นฐานของ EPBS คือว่าดินที่ face สามารถที่จะควบคุมให้พ้นจากการเกิดการทรุดตัวได้ โดยการใช้อัดความดันในช่อง soil chamber เพื่อกันไม่ให้ดินไหลเข้าไปในหัวเจาะ (NAITOH, 1985) สภาพดินที่เหมาะสมกับการใช้ EPBS แสดงดังรูป 3.3 (YOSHIKAWA, 1985)

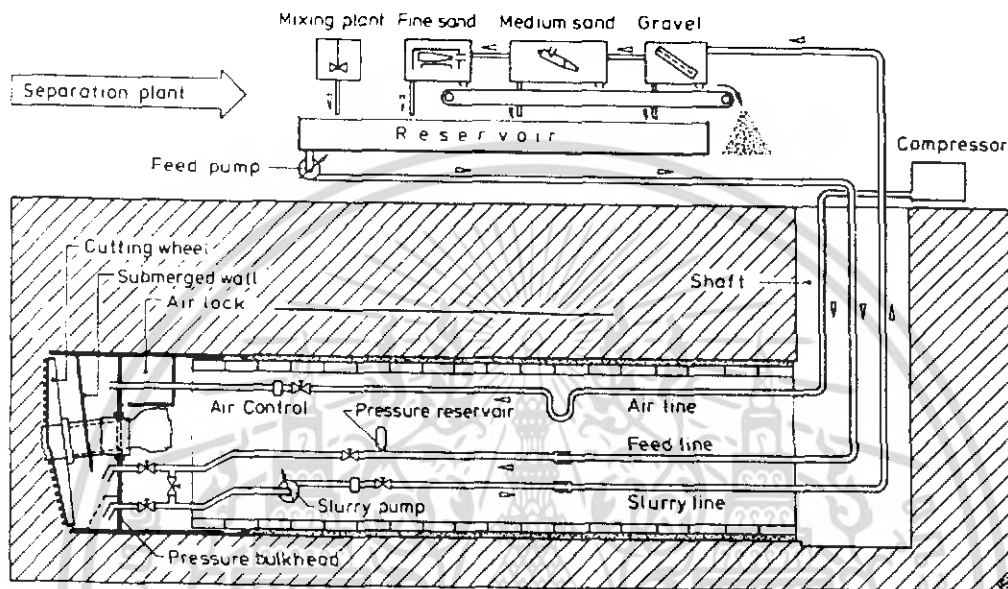
ลักษณะที่สำคัญของระบบ EPBS

1. ดินที่ถูกขุดโดย rotating cutter frame (1) ตอนแรกจะถูกสะสมอยู่ในห้อง pressure soil chamber (2) ข้างหลังหัวเจาะ (cutter)
2. อัดความดันให้กับดินที่ขุดแล้วที่อยู่ในห้อง soil chamber (3) และบีบตัว jack (4) ดันหัวเจาะ เพื่อเกิดแรงดันดินและน้ำที่บริเวณด้านหน้าหัวเจาะ
3. ส่วน (6) ที่ติดเข้าไปใน Soil chamber จะทำการลำเลียงดินออกเพื่อควบคุมความดัน
4. Tail gate (7) ที่ปลายส่วนจะใช้ปิดกรณีฉุกเฉิน เพื่อกรองดินเม็ดละเอียดและน้ำให้ไหลไปได้
5. สำหรับ Cohesive soil ดินที่ได้จากการขุดจะถูกลำเลียงโดยชุดสายพานหลังจากที่ดินหล่นมาจาก tail gate จะทำหน้าที่เหมือน soil-water separation plant ระบบนี้เรียกว่า Earth Pressure Type ของ EPBS method
6. อุปกรณ์ที่นำมาติดกับ mucking adjuster (7) เช่น water pressure chamber (8) ที่ปลายส่วนทำให้หัวเจาะสามารถขุดเจาะดินที่มีความชื้นและความไม่เสถียรสูงได้ระดับน้ำใต้ดินที่มีแรงดันมาจาก mucking adjuster ก็จะมีเครื่องแยกหินกรวดออกจากดินละเอียด
7. แรงดันน้ำส่วนเกิน (excess water pressure) ที่ mucking adjuster สามารถทำให้สมดุลได้โดยการนำเอาน้ำธรรมดาเข้ามาใหม่ (9) น้ำเสียจะถูกลำเลียงออกโดยท่อหมายเลข (10) ในรูปของ Slurry
8. เครื่องแยกดินและน้ำ (11) จะต้องบำบัดให้น้ำเสียจากท่อหมายเลข (10) เป็นน้ำดี พร้อมทั้งจะนำไปใช้ได้ ใหม่ ระบบทั้งหมดนี้ถูกเรียกว่า water pressure type ของ EPBS (ABE et. al. 1978)

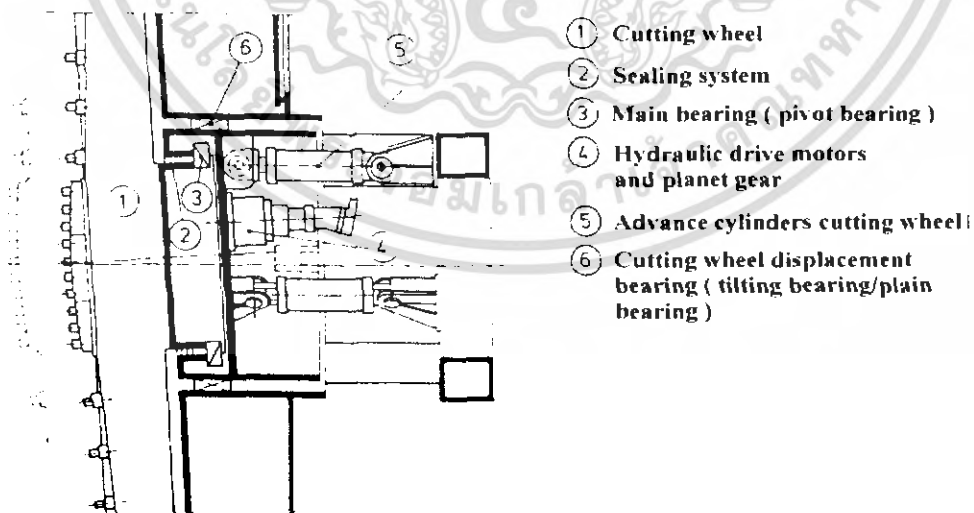
Shield machine	Slurry shield	Pressure Balancing Shield	Slime shield
Item			
Illustration of Cutting facing stability			
Principle of cutting face Stability	Cohesive soil: $\phi = 0$ $\gamma_s (h+h_1) - 2C_s = \gamma_s h + \Delta P$ Sandy soil: $C_s = 0$ $K_a \gamma_s (h+h_1) = \gamma_s h + \Delta P$ where: K_a : Coefficient of active earth pressure γ_s : Submerged soil density γ_s : Submerged soil density in pressure chamber γ_s : Submerged slurry density ΔP : Slurry pressurization (excess groundwater pressure)	Cohesive soil: $\phi = 0$ $\gamma_s (h+h_1) - 2C_s = \gamma_s h + 2C_s + R$ Sandy soil: $C_s = C_c = 0$ $K_a \gamma_s (h+h_1) = \gamma_s h + R$ h_1 : Height of loose soil h : Height in pressure chamber h_s : Height of groundwater C_s : Cohesion of ground soil C_c : Cohesion of soil in chamber R : Plastic mass pressure	Cohesive soil: $\phi = 0$ $\gamma_s (h+h_1) - 2C_s = \gamma_s h + 2C_s + \Delta P + R$ Sandy soil: $C_s = C_c = 0$ $K_a \gamma_s (h+h_1) = \gamma_s h + \Delta P + R$
Adaptable soil range			

รูปที่ 3.3 แสดง cutting face stability หลักการและช่วงใช้งาน

face support โดยการใช้ slurry ซึ่งจะอยู่ในช่องระหว่างฝาตัน (bulkhead) และ face ความสมดุลและการป้อนและดูดกลับของ slurry ถูกควบคุมโดย feed pump ขณะที่ air accumulator จะถูกใช้ในการรักษาความดันของ ๆ slurry ให้คงที่ แม้ว่าอาจจะมีการแปรเปลี่ยนในอัตราก้าวหน้า (advanced rate) อย่างทันที หรือ ความสมดุลกันในสภาวะชั่วคราวของการป้อนและดูดกลับของ slurry ตามที่กำหนดไว้



รูป 3.4 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบการทำงานของ hydroshield
(จาก Mechanised Shield Tunnelling)



รูป 3.5 แสดงลักษณะส่วนหัวเจาะ hydroshield
(จาก Mechanised Shield Tunnelling)

(6.) Hydrojet Shield

ลักษณะที่สำคัญของ Hydrojet Shield คือ อุปกรณ์ที่ใช้เจาะดินหัวเจาะของ hydroshield จะติดตั้งเป็นชุดใบมีดอยู่บน cutting wheel ขณะที่การเจาะของ hydrojet shield จะใช้การฉีดพ่นของไหลในระนาบตั้งฉากกับแกนของ shield (BECKER & SAWINSKI, 1983) ขณะที่ทำการฉีดก็จะใช้ slurry เพื่อ support หน้าอุโมงค์ไว้ ทิศทางการไหลของ slurry จะผ่าน oscillating nozzles ที่ติดอยู่ใกล้ ๆ กับผิวของ shield (รูป 3.6)

(7.) Mixshield

Mixshield คือเครื่องเจาะอุโมงค์สำหรับดินอ่อนได้ดินน้ำ พัฒนามาจาก hydrojet shield และได้พัฒนาให้ใช้ได้กับ cohesive soil

Mixshield ถูกออกแบบเพื่อสนองความต้องการต่อไปนี้

(1). มันต้องสามารถทำงานในฐานะ shield machine ที่ใช้

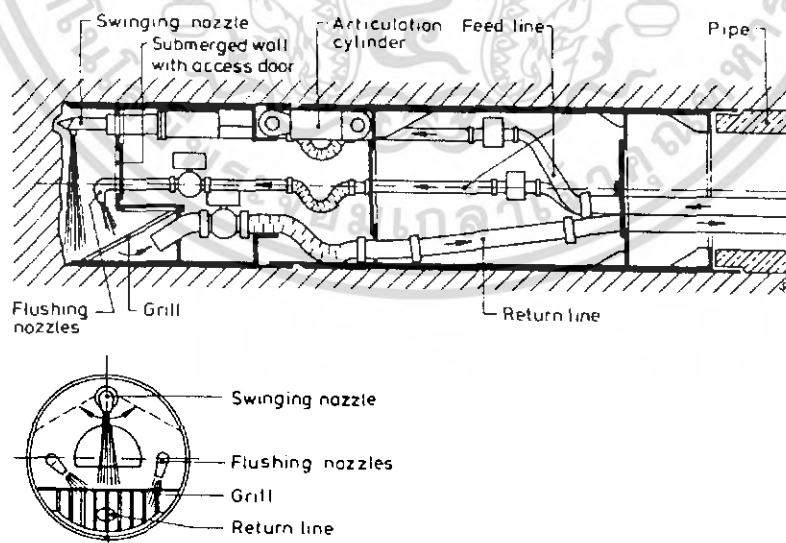
- liquid support face
- face support โดย compressed air
- face support โดย ดินที่ได้จากการขุด

พื้นฐานตัวเครื่องจะต้องเหมือนกันทุกรุ่น

(2). การเปลี่ยน shield จะต้องสามารถใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

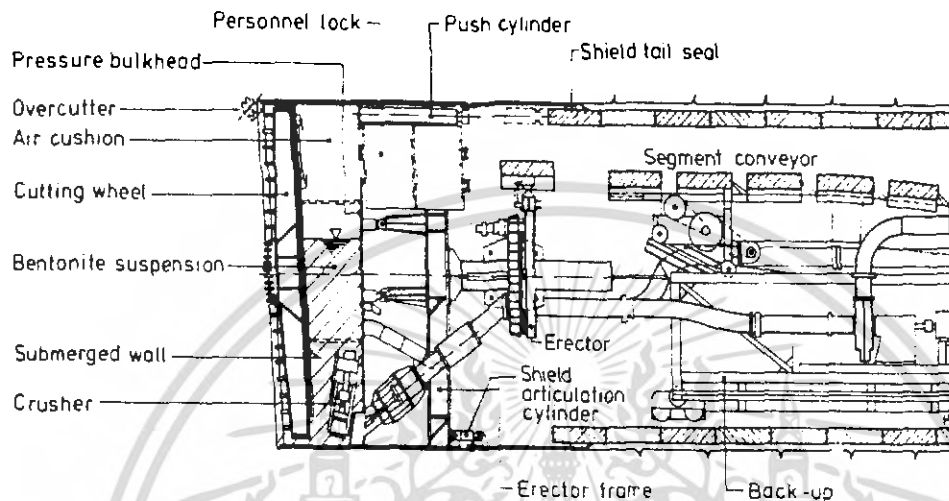
(3). การเปลี่ยน shield ได้ดินจะต้องทำได้

รูปแบบของตัวเครื่องเจาะแสดงในรูป 3.7



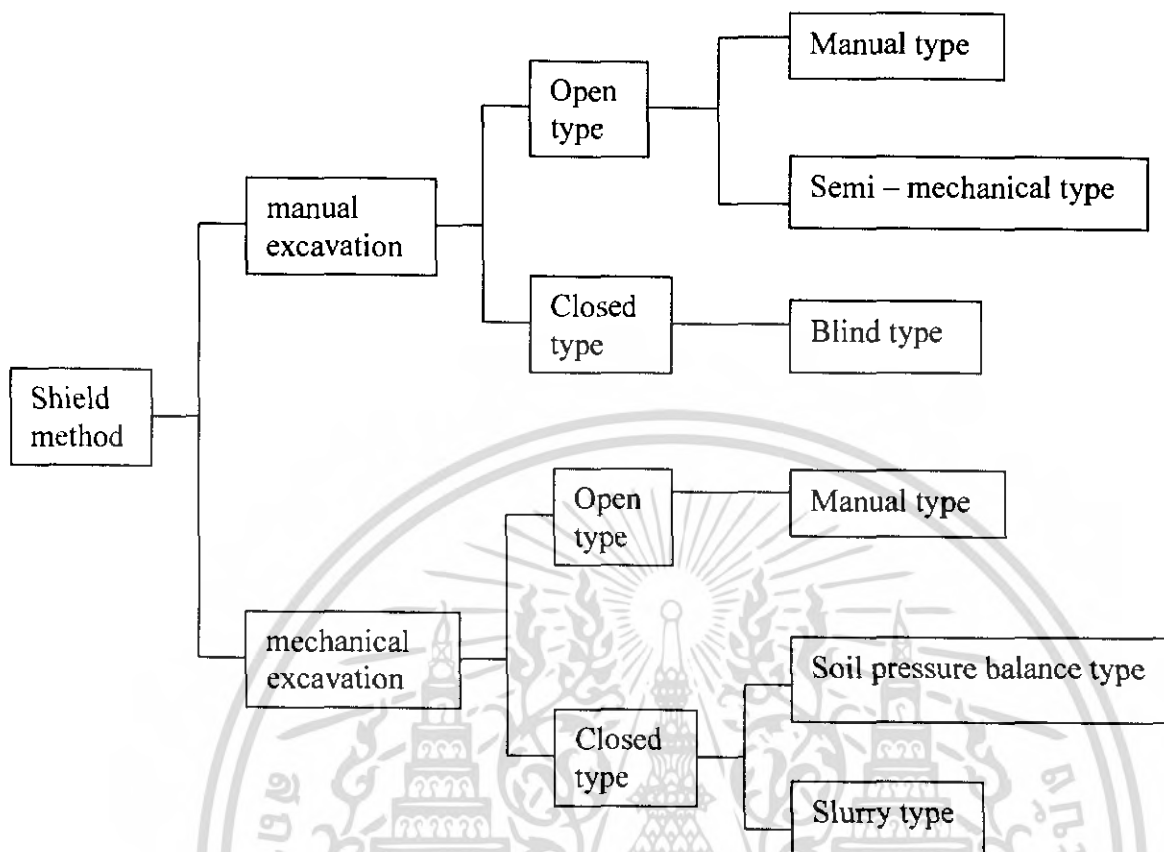
รูป 3.6 แสดงส่วน Head และ Nozzle hydroshield

รุ่นที่ใช้ “liquid support face” ได้พิสูจน์ประสิทธิภาพของมันแล้วใน HERA circuit และโครงการอุโมงค์น้ำเสีย Burring ในประเทศเยอรมนี การทดสอบจากการใช้งานจริงของรุ่น “Earth Pressure” และ “Compressed Air” ยังไม่มีการทดสอบ ถ้าทั้ง 2 รุ่นนี้ใช้งานได้ดี เราก็จะสามารถประดิษฐ์เป็น “universal shield machine” ได้ตามที่คาดไว้ (BECKER, 1987)



รูป 3.7 แสดง Mixshield – Basic Machine
(จาก Mechanized Shield Tunneling)

(8.) ข้อพิจารณาการเลือก shield



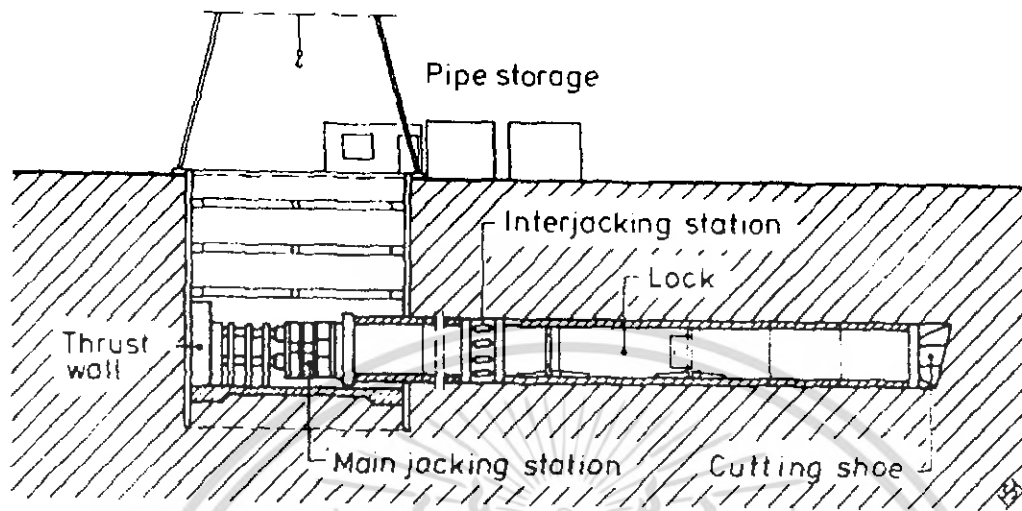
รูปที่ 3.8 แสดง shield ชนิดต่างๆ

รูปที่ 3.8 แสดง shield method ชนิดต่างที่ได้กล่าวไว้แล้ว การเลือก shield จะขึ้นอยู่กับ สภาพ บริเวณข้างเคียงของเส้นทางที่จะทำการเจาะอุโมงค์ สภาพดิน ประวัติการทำงานที่เคยมีมาในอดีต ซึ่งทั้ง 4 วิธีที่ได้ทำเครื่องหมาย * เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายทั่วไป และมีหลักเกณฑ์การพิจารณาดัง ในตารางที่ 3.1 ดังนั้นการเลือก shield ก็จะทำโดยการนำเอาข้อมูลเฉพาะของอุโมงค์ที่จะทำการ ก่อสร้างมาเทียบกับตารางที่ 3.1 เพื่อหา shield ที่เหมาะสมที่สุด

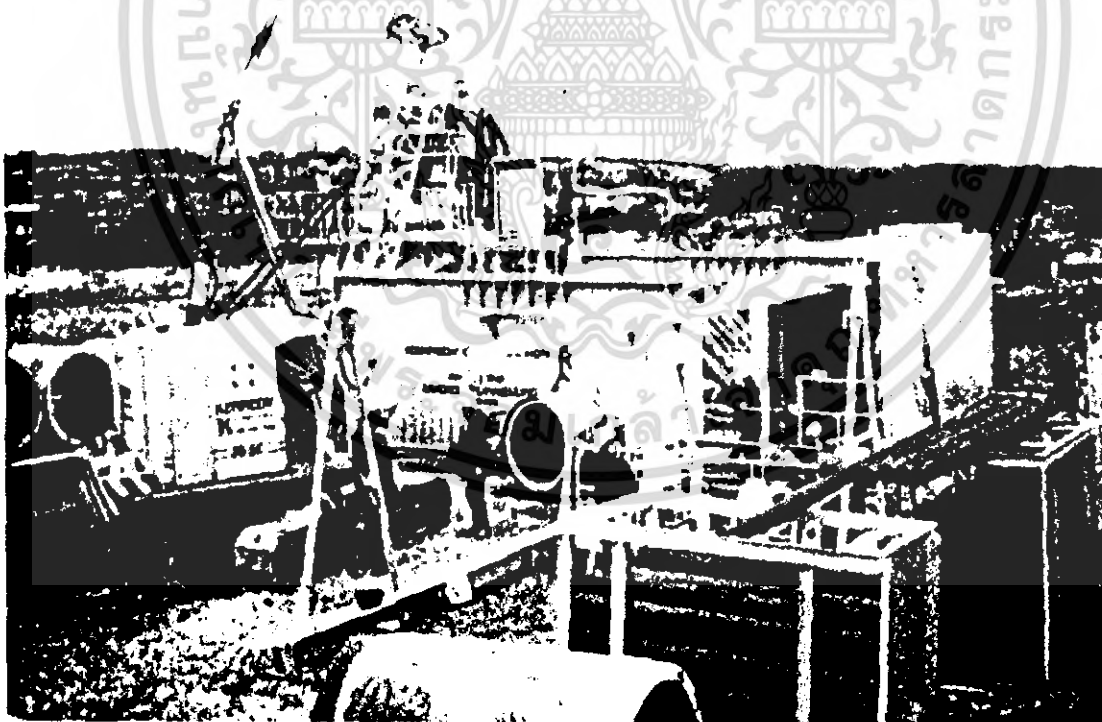
3.1.1.3 Pipe Jacking

อีกทางเลือกหนึ่งของการใช้เครื่องขุดเจาะ (mole) กับ lining รูปแบบต่าง ๆ เมื่อ เร็ว ๆ นี้ โครงการก่อสร้าง อุโมงค์ลำเลียงสิ่งปฏิกูล (sewer tunnel) ขนาดเล็กได้ใช้ระบบเครื่อง เจาะแบบ full-face mining machine กับระบบการดัน (jacking) lining เข้าไปด้วย ขณะที่ทำ การเจาะไปข้างหน้า ดังนั้นจึงไม่มีการทิ้งช่วงให้ดินที่ถูกเจาะเกิดการยุบตัว เพราะการขุดเจาะไป ข้างหน้าเกิดขึ้นพร้อมกับการดัน leading pipe เข้าไปด้วย SULINSKI (1972) ได้ให้รายละเอียด

ของการก่อสร้าง sewer tunnel ใน Chicago ซึ่งเราเลือกวิธีใช้วิธีนี้ทำให้ประสบความสำเร็จในการประมูล ขณะที่บริษัทอื่นใช้วิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม รูป 3.9 แสดงวิธี jacking method



รูป 3.9 แสดงวิธี jacking method (จาก Mechanised Shield Tunnelling)



รูป 3.10 แสดงวิธี jacking method ในสถานที่ก่อสร้าง (จาก Mechanised Shield Tunnelling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 หลักเกณฑ์การเลือก shield

Shield method				Manual Shield			Semi-mechanical Shield			mechanical Shield			Blind Shield			Pressure Balanced Shield			Slurry Shield		
Soil Classification	soil	N Value	Water content ratio (%)	Auxiliary method			Auxiliary method			Auxiliary method			Auxiliary method			Auxiliary method			Auxiliary method		
				N	Y	K	N	Y	K	N	Y	K	N	Y	K	N	Y	K	N	Y	K
Alluvial Cohesive soil	Humus Silt, Clay Sandy silt, clay Sandy silt, clay	0 0-2 0-5 5-10	300- 100-300 80- 50-	X X X Δ	X X X O	A A	X X X Δ	X X X O	X X X A	X X X Δ	X X X O	X X X A	X X X O	Δ Δ Δ .	A A A A	X X X O	Δ O O O	Δ O O A	X Δ Δ Δ	Δ O O .	A A A A
Deluvial Cohesive Soil	Loam, Clay Sandy loam, Clay Sandy loam, Clay	10-20 15-25 20-	50- 50- 20-	O O Δ	.	.	O O O	.	.	Δ O O	.	.	X X X	X X X	.	O O O	.	.	O O O	.	.
Soft rock	Mud stone	50-	-20	X	.	.	O	.	.	O	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.	.
Sandy soil	Sand mixed with silt clay Loose sand Compacted sand	10-15 10-30 30-	-20 -20 -20	Δ X Δ	O Δ O	A AB AB	Δ X Δ	O X O	A AB AB	Δ X Δ	O Δ O	A AB AB	X X X	X X X	.	O Δ Δ	.	.	O Δ O	.	A A A
Sand, Cobble stone	Loose sand Solidified sand Sand mixed with cobble stone Cobble stone clay	10-40 40-		X Δ X X	Δ O Δ Δ	AB AB AB AB	X Δ X X	Δ O O Δ	AB AB AB AB	X Δ X X	Δ O X X	AB AB AB AB	X X X X	X X X X	.	O O O O	.	.	Δ O Δ Δ	O .	A A A A

Note 1) Manual shield, semi-mechanical shield and blind shield shall be, in principle carried out in combination with compressed air method

N (no) : in case that an auxiliary method is not used.
Y (yes) : in case that an auxiliary method has been used.
O : conform to the requirements.
Δ : study is required in the application.
X : not conform to the requirements.
- : not necessary to use in particular
K (kind).....A : grouting method
B : grout-water level lowering method

Note 2) O is desirable in the selection of a principal method to be used, but the above table takes into consideration that the case other than O must be applied, depending on the partially different soil.

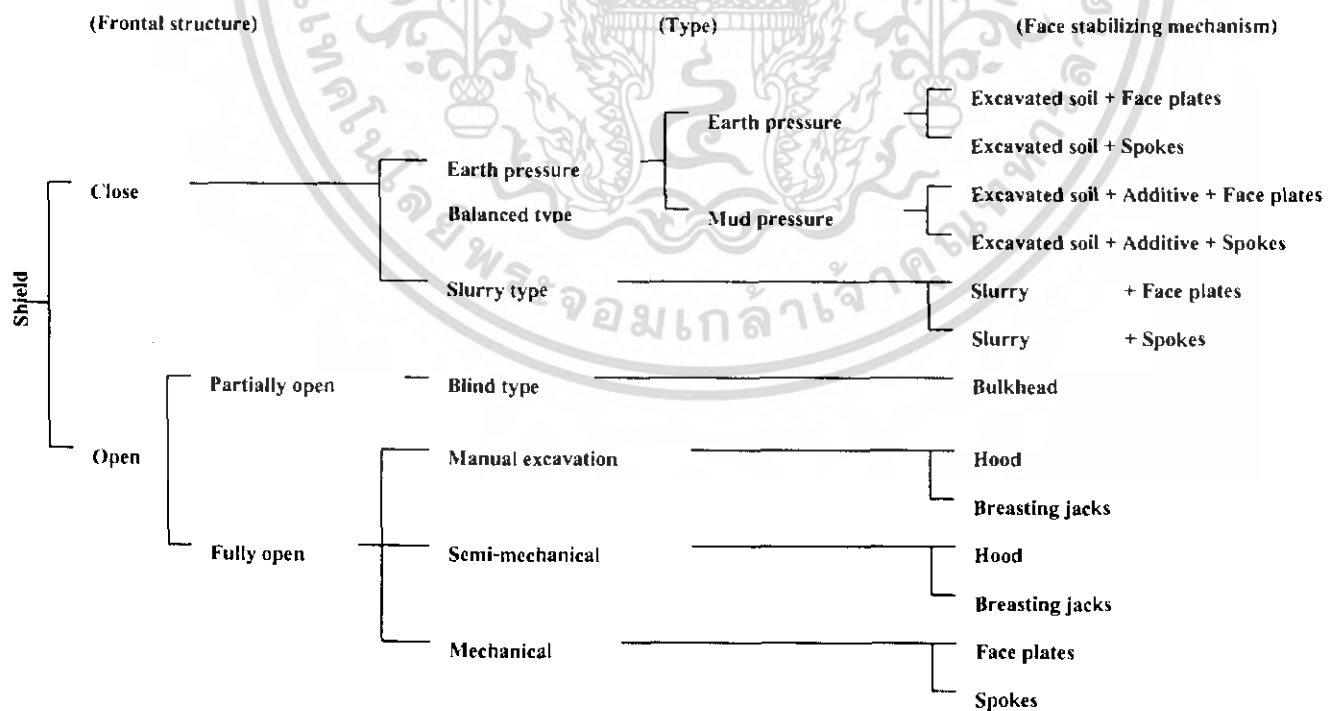


3.2 การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธีใช้หัวขุดเจาะ

3.2.1 การเลือกวิธีการของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ในการที่จะทำให้มีความสามารถในการก่อสร้างที่ปลอดภัยและประหยัดของอุโมงค์ได้ดินเงื่อนไขพื้นฐานสำหรับการเลือกวิธีการทำหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ควรจะจัดให้อยู่ในลำดับในการพิจารณาในเรื่องการขุด ผันงอุโมงค์ (Lining) ฯลฯ นอกจากสภาพของพื้นดิน สภาพของพื้นผิว มิติของส่วนตัด ความยาวของการก่อสร้าง การวางแผนเส้นทางของอุโมงค์ได้ดิน และระยะเวลาการก่อสร้าง

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Machines) มีทั้งแบบปิดและแบบเปิดต่อโครงสร้างของส่วนที่อยู่ด้านหน้า เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) มีประเภทความดันดินสมดุล(Earth Pressure Balance)และสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry) และเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) มีประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) และเปิดเพียงบางส่วน (Partially Open) ประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) แบ่งย่อยออกเป็นการขุด การขุดด้วยมือ ประเภทเกทกึ่งกลไกและกลไกต่อวิธีการขุด ประเภทส่วนหน้าเปิดบางส่วนจะรวมถึงหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield แบบ Blind Shield ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 ประเภทของหัวเจาะ Shield (จาก Japanese Standard For Shield Tunneling)

3.2.1.1 ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิดมีส่วนกันเพื่อจะทำให้มีความมั่นคงแก่ส่วนหน้าที่ดินภายใต้ความกดดัน

ก. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล(Earth Pressure Balance (EPB) Type Shield Machines) EPB จะเปลี่ยนดินที่ขุดให้เข้ากับความดันโคลน และปรับอัดความดันให้คงที่ตลอดบริเวณผิวหน้า เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล(EPB) จะประกอบด้วยกลไกของการขุดเพื่อที่จะตัดเฉือนดิน กลไกการผสมผสานเพื่อจะผสมดินที่ขุดออกมาให้เข้ากับความดันน้ำโคลน กลไกการปล่อยดินเพื่อจะปล่อยดินและกลไกการควบคุมที่จะรักษาการกระจายตัวของแรงดันดิน เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (EPB) แยกออกเป็นเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth Pressure Type Shield Machines) และเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud Pressure Type Shield Machines) ต่อความสามารถของเครื่องคิดเกี่ยวกับสิ่งที่เพิ่มเข้าไปสำหรับการเปลี่ยนดินที่ขุดออกไปสู่ความดันโคลน

1. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน(Earth Pressure Type Shield Machines) จะตัดเฉือนดินด้วยหัวเครื่องแบบหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบ เติมเนื้อที่ว่างระหว่างส่วนหน้าและส่วนกันตรงหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ที่มีดินผสมและทำให้มีความดันแก่ดินด้วยแรงฟุ้งของหัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield) ความดันของการกระทำของดินบนส่วนหน้าจะถูกทำให้มีความสม่ำเสมอแก่ดิน ดินก็จะถูกปล่อยออกในที่สุดโดยวิธีการของการลำเลียงด้วยสายพานลำเลียง ฯลฯ
2. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud Pressure Type Shield Machines) จะฉีดสิ่งที่เพิ่มเข้าไปและผสมกับดินที่ขุดโดยหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบตัว ความดันของโคลนที่มาจากกรหลอมเหลวจะทำให้เกิดความสม่ำเสมอแก่ส่วนหน้าในวิธีการเดียวกันเช่นเดียวกันกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud pressure type shield machines) ดินจะถูกปล่อยออกมาในที่สุดโดยวิธีการของสายพานลำเลียง ฯลฯ

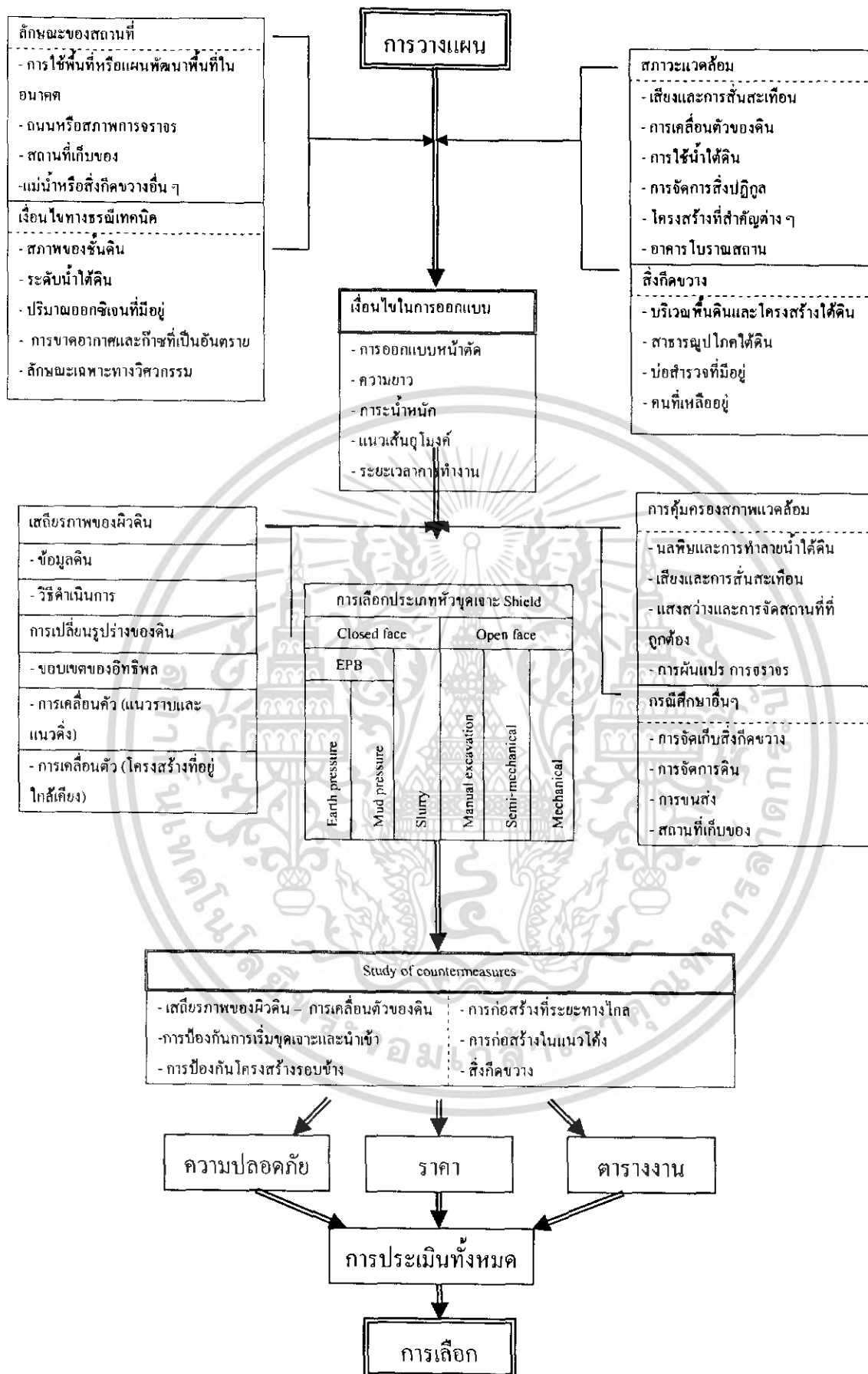
ข. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry Type Shield Machines) น้ำเลนปรับสมดุลดินที่ได้ทำให้มีความดันจะประยุกต์เพื่อจะทำให้เกิดความมั่นคงแก่ส่วนหน้าที่ดินที่ตัดเฉือนดิน สารละลายปรับสมดุลดินจะถูกทำให้หมุนเวียนในการที่จะนำส่งดินที่ขุดโดยการลำเลียงของเหลว อุปกรณ์การป้อน หรือ การปล่อยสารละลายปรับสมดุลดินให้หมุนเวียนและทำให้เกิดความกดดันแก่ น้ำเลน และอุปกรณ์การดำเนินเป็นกระบวนการของสารละลายเพื่อจะปรับคุณสมบัติสารละลายไปสู่ระดับที่ได้ระบุไว้

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) จะใช้กับส่วนหน้าที่เปิดเต็มที่หรือเปิดเกือบทั้งหมด เครื่องประเภทนี้สามารถประยุกต์ได้กับดินที่มีการคงอยู่ของตนเองที่ส่วนหน้า ดินประเภทอื่นสามารถจะได้รับการปรับปรุงโดยมากจากการช่วยเพื่อจะทำให้บรรลุผลการคงอยู่ของตนเองที่ส่วนหน้า ส่วนหน้าที่เป็นหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield เกือบจะปิดในกรณีของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เปิดบางส่วนยกเว้นทางออกของดินที่จัดให้มีที่ส่วนหน้าที่จะควบคุมการไหลเข้าของดินที่ขุดและที่จะทำให้มันคงแก่ส่วนหน้าที่ตัด

1. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Machines) ใช้เพื่อตัดพื้นดินด้วยเครื่องสำหรับแซะหรือดัก ของที่ใช้ในการขุดแร่ สิ่งที่ใช้ขุด ฯลฯ ดินที่ขุดออกมาจะถูกปล่อยโดยเครื่องลำเลียงสายพาน รถเข็น และอื่นๆ หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือโดยปกติจะจัดให้มีกลไกการทำให้มีเสถียรภาพของส่วนหน้า เช่น ฝาครอบ แม่แรงที่ใช้สำหรับทำให้แตกที่ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน
2. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกึ่งกลไก(Semi-Mechanical Type Shield Machines) โดยพื้นฐานจะมาจากเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Machines) ซึ่งจะตัดถืออุปกรณ์ด้วยตัวขุด ตัวโหลด และผลรวมทั้ง 2 อย่าง ส่วนหน้าของเครื่องใช้ระหว่างการขุดจะเปิดกว้างมากและมันจะยากที่จะปกป้องส่วนหน้าที่ตัดเฉือนในระหว่างขุด
3. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก (Mechanical Type Shield Machines) มีลักษณะเฉพาะคือมีหัวเครื่องตัดอยู่บนด้านหน้าของส่วนหน้าที่จะตัดดินอย่างอัตโนมัติโดยต่อเนื่อง หัวเครื่องตัดอาจจะมีการป้องกันส่วนหน้าที่ตัดบางอย่าง
4. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield (Blind Type Shield Machines) จะคลุมปิดส่วนหน้าของเครื่องตัดยกเว้นทางออกดินที่สามารถปรับได้ที่จัดให้มีที่ด้านหน้าของส่วนหน้า ด้านหน้าของส่วนหน้าของเครื่องจะถูกอัดเข้าไปยังพื้นดินเพื่อจะทำให้พื้นดินหลวม อ่อนตัวและเคลื่อนย้ายไปยังจุดปล่อยดิน ที่ความมั่นคงแก่ส่วนหน้าคั่นนั้น ขึ้นกับความต้านทานของการปล่อยของดินที่ถูกทำให้เป็นของเหลวถูกปรับและถูกใช้

3.2.1.2 การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดอย่างเดียวในการเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ก็คือการทำให้มีเสถียรภาพของส่วนหน้าในการตัดเฉือน การศึกษาที่สมบูรณ์จะต้องกำหนดในเรื่องสิ่งแวดล้อมรอบๆ ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสถานที่ในการสร้าง ความปลอดภัย ทางเศรษฐกิจ ฯลฯ นอกจากสภาพดินและน้ำใต้ดิน รูปที่ 3.12 แสดงถึงแผนภาพของการเลือกของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพของการเลือกวิธีใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 32 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เหมาะสม

Shield type		Closed type										Open type			
		Earth pressure balanced type					Slurry type					Manual excavation type		Semi-mechanical type	
		Earth pressure		Mud pressure			Slurry type		Manual excavation type			Semi-mechanical type		Mechanical type	
		Soil type	N-value	Applica bility	Precautions	Applica bility	Precautions	Applica bility	Precautions	Applica bility	Precautions	Applica bility	Precautions	Applica bility	Precautions
Alluvial clayey soil	Humus		0	Δ	-			Δ							
	Silt and clay		0 - 7	Δ	-					Δ	Ground movement			Δ	-
	Sandy silt and sandy clay		0 - 5	Δ	-					Δ	Ground movement			Δ	-
			5 - 10	Δ	-					Δ	Ground movement	Δ	Ground movement	Δ	Ground movement
Clayey soil	Loam and clay		10 - 20	Δ	Plugging due to excavated										Plugging due to excavated soil
	Sandy loam and sandy clay		15 - 25	Δ	Plugging due to excavated soil									Δ	-
			25 or over	Δ	Plugging due to excavated soil									Δ	-
	Hard pan (Mudstone)		30 or over	Δ	Plugging due to excavated soil	Δ	Bit wear			Δ	Excavator Loader			Δ	-
Sandy soil	Sand mixed with silty clay		10 - 15	Δ	-										Groundwater pressure
	Loose sand		10 - 30	Δ	Fine fraction content					Δ	Groundwater pressure			Δ	Groundwater pressure
	Dense sand		30 or over	Δ	Fine fraction content					Δ	Groundwater pressure	Δ	Groundwater pressure	Δ	Groundwater pressure
	Loose sand and gravel		10 - 40	Δ	Fine fraction content					Δ	Groundwater pressure	Δ	Groundwater pressure	Δ	Groundwater pressure
Sand, gravel and boulders	Cemented sand and gravel		40 or over	Δ	Groundwater pressure					Δ	Safe excavation*4	Δ	Groundwater pressure	Δ	Wear of bits and face plate*4
	Sand and gravel mixed with cobbles		-	Δ	Screw conveyor specifications*1			Δ	Bit specification*3	Δ	Bit specification*4	Δ	Groundwater pressure	Δ	Wear of bits and face plate*4
	Boulder and cobbles		-	Δ	Bit specification*2			Δ	Gravel crushing*3	Δ	Bit specification*4	Δ	Groundwater pressure*5	Δ	-
			-	Δ	Bit specification*2			Δ	Gravel crushing*3	Δ	Bit specification*4	Δ	Groundwater pressure*5	Δ	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เหมาะสม ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note: 1) Applicability symbols:

○: Suitable for the soil condition in principle. Δ: Auxiliary measures and/or mechanisms must be studied in advance. ×: Not suitable for the soil conditions in principle.

2) Open shields frequently used with the pneumatic method but the applicability must be checked.

3) Blind shield is not included in the list because this type is seldom used. This type is only applicable to certain alluvial clayey soil and entailground movement.

4) N-values are shown as a guide of soil quality.

5) Precautions given represent only the most important factors for the Δmarked grounds and type.

The asterisks (*) indicate presence of other similarly important precautions.

For example, *1: Wear of bit and face plate, bit specifications, *2: Serew conveyor specifications, *3: Countermeasures against slurry leakage, *4: Groundwater pressure, and

*5: Over-excavation

6) Mudstone with low strength is considered



การเลือกสถานที่สำหรับปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และการถ่ายเทสิ่งสกปรกที่ได้จากการขุดกำลังจะกลายเป็นสิ่งที่สำคัญมากขึ้นในการเลือกวิธีการก่อสร้างในปีที่ผ่านมา บันทึกการปฏิบัติงานในอดีตได้เป็นปัจจัยในการกำหนดในบางกรณี ตารางที่ 3.4. แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เหมาะสม ประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่ดีที่สุดที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละอย่างได้อธิบายไว้ข้างล่าง

ก. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล(Earth Pressure Balance Type Shield Method) EPB มีประเภทความดันของดินและประเภทความดันของโคลน ลำดับแรกเหมาะสำหรับประเภทที่แน่นแข็งของดินที่อาจจะทำให้เป็นของเหลวได้และทำให้เต็มในช่องเครื่องตัดและเครื่องสายพานลำเลียง สำหรับการปล่อย การรักษาส่วนหน้าตัดที่มีเสถียรภาพ ลำดับต่อมาจะเพิ่มน้ำ น้ำเลน หรือสิ่งที่เพิ่มเข้าไปยังดินทรายในช่องเครื่องตัดที่ขาดการเป็นของเหลวเพื่อจะปรับปรุงการเคลื่อนย้ายของความดันที่ส่วนหน้า

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน(Earth Pressure Type Shield Machines) มีลักษณะเฉพาะเป็นระบบสำหรับการนำเข้ดินในเวลาเดียวกัน และความสามารถขุดเจาะของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ดังนั้นมันจึงเป็นไปได้ที่จะไม่ทำแค่เพียงทำให้มีเสถียรภาพแก่ส่วนหน้าแต่จะทำให้ลดเหลือต่ำสุดเกี่ยวกับผลกระทบต่อนดินที่อยู่โดยรอบด้วยเช่นกัน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือการทำงานในส่วนพื้นผิวจะไม่จำเป็นเพราะว่ามาตรการสนับสนุนจะไม่จำเป็นโดยพื้นฐาน

วิธีเกี่ยวกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud Pressure Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับชนิดของดินที่ใหญ่ที่สุดรวมถึงพื้นดินอ่อนที่มีระดับความแข็งแรงน้อย เช่น ทรายผสมกรวดที่พัฒมาทับถมกับน้ำ ทราย โคลนเลนและดินเหนียว สิ่งสะสมเดียวกับซากที่เหลือจากน้ำท่วมและดินที่อ่อนแ่เบะแข็งสลับกัน เครื่องสายพานลำเลียงที่ปล่อยดินเท่านั้นจะไม่พอเพียง อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะตัดเฉือนผ่านพื้นดินด้วยความดันที่มาจากความกดดันของน้ำที่สูงการเพิ่มเครื่องป้อนที่เก็บกักความดันต่างๆ การรวมเอาเครื่องสูบเพื่อขจัดสิ่งสกปรกและการปรับปรุงในคุณสมบัติของดินที่ขุดจะได้ทำการศึกษา

ข. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry Type Shield Method) จะประยุกต์ความดันน้ำเลนที่สูงกว่าความดันน้ำใต้ดินที่ส่วนหน้าเพื่อจะทำให้มีเสถียรภาพ สำหรับความมีเสถียรภาพที่ส่วนหน้าจะได้รับการยกระดับให้สูงขึ้นโดยคุณสมบัติสารละลายปรับสมดุลดิน ดังนั้นหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดินจึงมีประสิทธิภาพคล้ายกันสำหรับสถานที่ที่มีความดันน้ำใต้ดินสูง พื้นที่ดังกล่าวจะเป็นได้แม่น้ำและได้ท้องทะเล

สารละลายปรับสมดุลดินจะถูกสูบจากพื้นดินไปยังส่วนหน้าโดยผ่านท่อป้อนและท่อปล่อยส่วนหน้าจะถูกปิดอย่างสิ้นเชิงด้วยความปลอดภัยในระดับสูง และด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมการทำงานที่ดี ไม่มีความดันที่ล้นเกินได้รับการประยุกต์สำหรับดิน หรือไม่มีการผลักดันกลับของพื้นดินเกิดขึ้นด้วยผลกระทบเล็กน้อยต่อพื้นดินที่อยู่รอบด้าน นอกจากนี้การทำงานจากพื้นดินก็ไม่ได้จำเป็นเพราะว่าโดยหลักการไม่มีมาตรการสนับสนุนที่จำเป็น ข้อดีนี้เหมือนกับที่เป็นของแต่ละวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน(Earth Pressure Type Shield Method)

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับชนิดของดินหลายชนิดรวมถึงทรายผสมกรวดและโคลนที่น้ำพัดพามา ทรายและโคลนเลน ดินเหนียวหรือชั้นที่สลับกันกับพื้นดินที่มีซีเมนต์ที่ไม่แน่น และพื้นดินที่อ่อนหรือกับปริมาณบรรจุน้ำที่สูงกับความยากที่เป็นผลตามมาในการก่อรูปส่วนหน้าที่ค้ำที่คงอยู่ด้วยตนเอง ทรายผสมกรวดที่เป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย และโคลนเลน ดินเหนียว หรือชั้นที่สลับกันที่มีน้ำมากที่ส่งผลต่างเป็นไปได้ในการทรุดลงของพื้นดินที่มีการไหลเข้าของน้ำ วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Method) อาจจะพบว่าเป็นการยากในการที่จะรักษาสภาพหน้าตัดให้มีความมั่นคงในพื้นที่ที่มีการแทรกซึมของน้ำสูง หรือในพื้นที่ที่มีก้อนหินใหญ่ในกรณีนี้การใส่มาตรการช่วยจะได้รับการพิจารณา

ค. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method) ส่วนหน้าที่อยู่ด้านหน้าของเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Machines) จะเปิดจนทำให้ส่วนหน้าที่อ่อนและแข็ง กรวด ก้อนหินใหญ่ ฯลฯ สามารถได้รับการจัดการอย่างง่ายดายที่สุด วิธีเกี่ยวกับการใช้แรงดันลมจะใช้บ่อยในเวลาเดียวกันเพื่อจะทำให้เกิดความมั่นคงแก่ส่วนหน้า การใช้ หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือสันนิษฐานว่าส่วนหน้าทนทานเป็นเวลาหลายชั่วโมง พร้อมกระบวนการทางเคมีจะใช้สำหรับดินที่ไม่ก่อรูปเป็นส่วนหน้าที่มั่นคง การทำให้น้ำลดลงจะทำให้ใช้ได้ในเวลาเดียวกันเมื่อส่วนหน้าไม่มั่นคงเนื่องจากระดับน้ำใต้ดินที่สูงและการไหลเข้ามาของน้ำที่เป็นผลตามมา

วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method) จะเหมาะสมที่สุดสำหรับทรายที่ผสมกับกรวด ซึ่งเป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วมที่หนาแน่น ทรายและโคลนเลนซีเมนต์ และชั้นดินเหนียวเพราะว่าโดยปกติส่วนหน้าจะทนทานในดินประเภทเหล่านี้ ส่วนหน้าจะไม่ทนทานในทรายซึ่งเป็นดินทรายโคลนที่น้ำพัดพามาซึ่งมีความอ่อนมาก โคลนเลนและชั้นดินเหนียวดังนั้นมาตรการสนับสนุนหนึ่งหรือมากกว่ามาตรการจะถูกใช้อย่างพร้อมเพรียงกัน วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual excavation type shield

method) เป็นรูปแบบแรกของวิธีการด้านหัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield) ทั้งหมด และเป็นที่ยอมรับกันจนกระทั่งถึงครึ่งหลังของทศวรรษ 1970 ในญี่ปุ่น ในปัจจุบันนี้ไม่ค่อยได้ใช้ สิ่งที่ทำแทนก็คือเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด(Close-face type shield machines)ใช้เพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าความไม่ไว้วางใจอย่างมากเกี่ยวกับมาตรการสนับสนุน

ง. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกึ่งกลไก(Semi-Mechanical Type Shield Method) จะใช้ในพื้นที่ดินที่ทนทานอยู่ด้วยตนเองได้ในหลักการ ดินที่สามารถประยุกต์ได้ โดยลักษณะเป็นตัวอย่างจะรวมถึงทรายผสมกรวดซึ่งเป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย โคลนเลนที่เป็นซีเมนต์และดินเหนียวมันจะไม่เหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมของดินทรายโคลนซึ่งนำพามาที่อ่อนวิธีการการใช้แรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำ การเป็นตะกอนของสารเคมี และมาตรการการสนับสนุนอื่นๆ อาจจะใช้ในการรวมกันเข้าในลักษณะเดียวกัน ดังเช่น ที่ใช้กับวิธีเดียวกับวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method)

จ. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก(Mechanical Type Shield Method) จะติดตั้งอุปกรณ์ด้วยหัวตัดเฉือนแบบหมุนรอบสำหรับการขุดที่ต่อเนื่อง ส่วนหน้าหัวเครื่องตัดมี 2 ประเภท ประเภทแรกคือประเภทแผ่นหน้าและประเภทที่สองคือชนิดที่คล้ายซี่ล้อรถ ประเภทแผ่นหน้าเหมาะสำหรับส่วนตัดขนาดใหญ่ ส่วนหน้าที่มันคงและการปรับที่ปรับได้จะช่วยให้เกิดความสามารถแก่เครื่องที่จะดำเนินผ่านชั้นที่มีกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมาก ประเภทซี่ล้อรถจะใช้บ่อยเพื่อจะขจัดกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมากออกจากส่วนตัดเล็กๆที่มีส่วนหน้าค่อนข้างจะมันคง เช่นเดียวกันกับประเภทการขุดด้วยมือและแบบกึ่งกลไก เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก (Mechanical Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมเกี่ยวกับซากเหลือน้ำท่วมที่มีส่วนหน้าทนทานอยู่ด้วยตนเอง การใช้ที่ผสมผสานกันของมาตรการช่วยหนึ่งอย่างหรือมากกว่า เช่นวิธีเกี่ยวกับแรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำการเป็นตะกอนทางเคมี จะเป็นเชิงบังคับสำหรับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก(Mechanical Type Shield Machines) ในสิ่งสะสมดิน โคลนทรายที่นำพามาที่โดยปกติจะไม่ก่อรูปส่วนหน้าที่ทนทานอยู่ได้ด้วยตนเอง

ฉ. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield (Blind Type Shield Method) ส่วนกันจะถูกจัดให้อย่างเบาบางอยู่หลังส่วนหน้าเพื่อจะทำให้เครื่องเหมาะสำหรับการทำแนบไปข้างหน้าผ่านพื้นที่อ่อนมาก ส่วนกันจะถูกเปิดบางส่วนเพื่อจะขจัดดิน หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบหัวบอดจะเหมาะที่สุดสำหรับชั้นโคลนเลนที่เป็นดินทรายโคลนซึ่งนำพามาผสมกับทราย มันจะไม่เหมาะสมสำหรับดินแข็งเพราะว่ามันได้รับการออกแบบเพื่อจะบีบรัดดินโดยผ่านทางเปิด ดินที่มีปริมาณบรรจุน้ำสูงมักจะอุดเครื่องที่จะทำให้มันไม่สามารถคืบหน้าต่อไป ถ้าหากดัชนีความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลองตัวมีสูงเกินไป ในทางตรงข้ามการไหลเข้าของดินอาจจะกลายเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้
ที่ส่งผลในการขจัดดินมากเกินไป แรงพุ่งสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบหัวบอดควรจะทำให้การ
คำนวณในขณะที่พิจารณาสภาพดิน อัตราการเปิดส่วนหน้า ฯลฯ สภาพดินที่สามารถประยุกต์ได้จะ
ถูกจำกัดมากและการทำให้เสียรูปเกี่ยวกับพื้นดินค่อนข้างจะมีมาก สำหรับเหตุผลเหล่านี้ หัวขุด
เจาะอุโมงค์แบบหัวบอดไม่ได้ถูกนำมาใช้นานแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 38 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีใช้หัวขุดเจาะ

4.1 หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

4.1.1 ข้อกำหนดทั่วไป

ขอบเขตของเนื้อหา

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ข้อกำหนดพื้นฐานสำหรับการออกแบบและสร้างหัวขุดเจาะ เพื่อใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์รูปหน้าตัดวงกลม และอาจรวมถึงหัวขุดเจาะที่ไม่เป็นวงกลม อันขึ้นอยู่กับความเห็นของวิศวกรผู้รับผิดชอบ

เนื่องจากอุโมงค์ส่วนใหญ่มีรูปหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้น คู่มือเล่มนี้ จึงได้ให้ข้อกำหนดสำหรับหัวขุดเจาะแบบวงกลม ที่ถูกใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน ข้อกำหนดที่ให้ไว้ในมาตรฐานของคู่มือเล่มนี้ วิศวกรผู้รับผิดชอบสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบหัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินที่เป็นรูปหน้าตัดอื่นๆ เช่น รูปตัดวงรี, รูปตัดวงกลมหลายรูป และรูปตัดสี่เหลี่ยม

การออกแบบหัวขุดเจาะ

หัวขุดเจาะนั้นควรได้รับการออกแบบ ให้สามารถขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินได้อย่างปลอดภัยและคุ้มค่าในขณะที่ต้องรองรับน้ำหนักที่กระทำจากพื้นดินโดยรอบ การออกแบบหัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินควรพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

(1) คุณสมบัติของดิน

รายการด้านล่างนี้ แสดงถึงรายการประเภทของดินและชั้นดินที่ต้องพิจารณาเป็นกรณีพิเศษ ในการออกแบบหัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

- ดินเหนียวอ่อน มีความอ่อนไหวสูง
- ดินทรายหลวม มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้สูง
- ดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง
- ชั้นดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นดินที่มีก้อนหินขนาดใหญ่ หรือท่อนไม้ หรือวัสดุอื่นๆปะปนอยู่
- ชั้นดินผสมระหว่างดินอ่อนและดินแข็ง

(2) ความยาวของอุโมงค์

เมื่อหัวขุดเจาะต้องการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีความยาวมากๆ ควรศึกษาอย่างละเอียดถึง การสึกกร่อนและความทนทานของส่วนประกอบต่างๆของหัวขุดเจาะ นอกจากนี้การบำรุงรักษา การหยอดน้ำมันหล่อลื่น และการเปลี่ยนอะไหล่ชิ้นส่วนต่างๆก็ควรได้รับการพิจารณาด้วยเช่นกัน

(3) แนวเส้นทางของอุโมงค์

ในกรณีของอุโมงค์ตามแนวทางโค้งนั้น ควรพิจารณาวางแผนแนวเส้นทางของอุโมงค์ โดยรอบคอบ ให้มีการขุดเจาะพิเศษ น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

(4) ความลึกของอุโมงค์จากผิวดิน

ในกรณีของอุโมงค์ลึก ควรศึกษาอย่างละเอียดถึงกำลังรับแรงของส่วนประกอบหัวขุด เจาะ และการต้านทานต่อแรงดันน้ำที่มีค่าสูง ของส่วนที่ทำหน้าที่อุดกั้นการรั่วซึม

4.1.2 หลักการพื้นฐานในการออกแบบ

น้ำหนักบรรทุกกระทำ

น้ำหนักบรรทุกเหล่านี้ควรได้พิจารณาไว้ในรายการการออกแบบหัวขุดเจาะ

- 1) แรงดันในแนวราบและแนวดิ่ง (Vertical and horizontal earth pressure)
- 2) แรงดันน้ำ (Water pressure)
- 3) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead weight)
- 4) น้ำหนักกระทำเหนืออุโมงค์ (Overburden load)
- 5) น้ำหนักกระทำที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง (Load imposed by direction change)
- 6) แรงดันจากการตัดผิวหน้า (Cutting face pressure)
- 7) น้ำหนักจากกรณีอื่นๆ

การพิจารณากรณีต่างๆอย่างละเอียดรอบคอบ เป็นสิ่งจำเป็นในการหาน้ำหนักกระทำ เพื่อการออกแบบหัวขุดเจาะ

(1) แรงดันดินในแนวราบและแนวดิ่ง (Vertical and horizontal earth pressure)

ถือได้ว่าเป็นการง่ายนัก ในการจัดการรับแรงดันดิน ซึ่งน้ำหนักสูงสุดจะกระทำต่อหัวขุดเจาะในสถานะคงที่ (Static) เท่านั้น หัวขุดเจาะอุโมงค์ได้ดินควรมีความสามารถในการถ่าน้ำหนักแบกทาน ไม่ใช่เพียงแต่น้ำหนักคงที่ (Static loads) ได้เท่านั้น แต่ควรมีความสามารถ ในการถ่าน้ำหนักที่มีการเคลื่อนที่ (Dynamic loads) ที่กระทำระหว่างกันอย่างซับซ้อนได้ ปัญหาภัยแรงต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการขุดเจาะ ก็สามารถป้องกันได้ โดยการพิจารณาถึง น้ำหนักที่มีการเคลื่อนที่ (Dynamic loads) นี้ ด้วยความละเอียดรอบคอบ และระมัดระวังเป็นพิเศษ

สำหรับแรงปฏิกิริยาของพื้นดิน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของหัวขุดเจาะ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรง (Deformation) ได้ นั่น ส่วนใหญ่แล้ว มักเป็นกรณีที่ไม่ได้รับการพิจารณา รวมไว้ในรายการการออกแบบ

(2) แรงดันน้ำ (Water pressure)

สำหรับหัวขุดเจาะแบบปิดด้านหน้า (Closed-face) นั้น ควรได้พิจารณาถึงแรงดันน้ำ รวมไว้ในรายการการออกแบบด้วย แต่สำหรับหัวขุดเจาะแบบเปิดหน้า (Open-face) จำเป็น อย่างยิ่งในทุกๆกรณี ที่จะต้องพิจารณาถึงแรงดันน้ำไว้ในรายการการออกแบบเสมอ

(3) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead weight)

สมการหาค่าแรงปฏิกิริยา ได้จากการพิจารณาถึงน้ำหนักของหัวขุดเจาะ ดังนี้

$$P_s = \frac{W}{D \times l}$$

P_s = แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากน้ำหนักของหัวขุดเจาะ

W = น้ำหนักของหัวขุดเจาะ

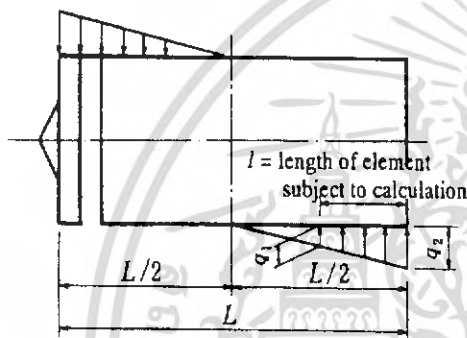
D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางรอบนอกของหัวขุดเจาะ

l = ความยาวของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

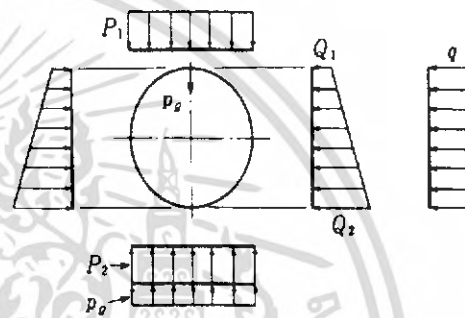
(4) น้ำหนักกระทำเหนืออุโมงค์ (Overburden load)

(5) น้ำหนักกระทำที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง (Load imposed by direction changes)

การทำงานของหัวขุดเจาะ จะขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาจากดินโดยรอบ เมื่อเป็นการขุดเจาะในส่วนที่เป็นทางโค้ง รวมทั้งเมื่อหัวขุดเจาะมีการเปลี่ยนทิศทางเกิดขึ้น ซึ่งแรงปฏิกิริยานี้ ก็คือน้ำหนักที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง (Direction changing load) การหาค่าน้ำหนักสูงสุด โดยมากมักหาค่าโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ด้านหนึ่งของหัวขุดเจาะนั้น อยู่ภายใต้แรงปฏิกิริยากระทำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ แรงดันดินเมื่ออยู่หนึ่ง (Passive earth pressure) หรือ หัวขุดเจาะอยู่ภายใต้แรงปฏิกิริยา เมื่อแม่แรงเครื่องหนึ่ง ทำการดันหัวขุดเจาะเพียงด้านเดียว น้ำหนักแผ่กระจายที่ใช้ในการหาค่าโดยทั่วไปนั้น แสดงได้ดัง รูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการหาน้ำหนัก
วิธีที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง



รูปที่ 4.2 น้ำหนักแผ่กระจายที่ใช้ใน
Uniform ring

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(6) แรงดันจากการตัดผิวหน้า (Cutting face pressure)

การหาแรงดันจากการตัดหน้านั้น ขึ้นอยู่กับประเภทของหัวขุดเจาะ ในกรณีของหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield machine) นั้นก็ขึ้นอยู่กับแรงดันดิน

สำหรับหัวขุดเจาะแบบ Slurry shield ขึ้นอยู่กับแรงดันดินเหลว (Slurry pressure) ในกรณีของการขุดเจาะที่ใช้แรงจากเครื่องจักร จะขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาที่คงเหลือ จากแม่แรงดันดินแรงกระทำนี้ กระทำต่อชิ้นส่วนเสริมการรับแรงของหัวขุดเจาะ ที่ฝักันและที่ผิวแผ่นเรียบ เช่น ที่คานเสา และ คาดเพดาน

(7) น้ำหนักจากกรณีอื่นๆ

น้ำหนักจากกรณีพิเศษอื่นๆ ที่กระทำกับหัวขุดเจาะในระหว่างการขุดเจาะนั้น ควรได้รับการพิจารณา แยกเป็นกรณีๆ ไป

การออกแบบโครงสร้างหัวขุดเจาะ

โครงสร้างของหัวขุดเจาะ ควรได้รับการออกแบบ รวมถึงในแต่ละองค์ประกอบของหัวขุดเจาะซึ่งทำหน้าที่ต่างๆ ให้มีความปลอดภัย และสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขของน้ำหนักกระทำต่างๆ ในทุกกรณี

ในการออกแบบหัวขุดเจาะนั้น โดยทั่วไปแล้วจะสมมติให้แรงในชั้นส่วนที่สูงสุด เป็นแรงกระทำรอบๆหัวขุดเจาะ ส่วนของคาน (Girder) เป็นตัวทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ ส่วนของฝาครอบเครื่องขุด (Hood) นั้น ออกแบบเป็นลักษณะเหมือนคานยื่นซึ่งด้านที่ยึดแน่น จะยึดติดอยู่กับส่วนของคาน สำหรับหัวขุดเจาะประเภทปิดด้านหน้า (Closed-face) หากฝักันและส่วนประกอบอื่นๆ สามารถพิจารณาเป็นได้ดังเช่นชั้นส่วนฝาครอบซึ่งช่วยรับแรง ส่วนประกอบเหล่านั้นก็สามารถรวมเข้าไว้ในรายการการออกแบบได้ด้วยเช่นกัน

ในการออกแบบ ส่วนของหางหัวขุดเจาะ (Tail) สามารถพิจารณาให้เป็นได้ ดังนี้

- โครงสร้างวงแหวน หรือ
- โครงเปลือกนอกทรงกระบอก ปลายยึดแน่นหนึ่งข้าง

ในกรณีของ การเปลี่ยนรูปทรงแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ของหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล, หัวขุดเจาะแบบ Slurry, และหัวขุดเจาะแบบใช้แรงจากเครื่องจักร ควรได้รับการตรวจสอบให้มีช่องว่างที่เหมาะสมสำหรับรับแรงเบกทานที่จะเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายได้

ความเค้นที่ยอมให้ สำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างหัวขุดเจาะ พิจารณาได้ดังนี้

- ความเค้นที่ยอมให้ ภายใต้ น้ำหนักที่กระทำในระยะยาว (Long-term loading ได้แก่ แรงดันดินแนวราบและดิ่ง, แรงดันน้ำ, น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักกระทำโดยรอบ) พิจารณาได้ตามตารางที่ 4.1
- ความเค้นที่ยอมให้ ภายใต้ น้ำหนักที่กระทำในระยะสั้น (Short-term loading ได้แก่ น้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงทิศทาง) พิจารณาได้โดยใช้ ตัวประกอบเพิ่มค่าขึ้นจาก ตารางที่ 4.1

ความเค้นสูงสุดที่ยอมให้ หาได้โดยคูณตัวประกอบ ซึ่งควรเท่ากับ 150% คูณกับ ความเค้นใน ตารางที่ 4.1 หรือคูณกับ กำลังรับแรงสูงสุดในพิสัยยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ โดยจะเลือกใช้ค่าที่น้อยกว่า

ตารางที่ 4.1 ความเค้นที่ยอมให้ของเหล็ก

Steel type	SS400, SM400A	SM490
Allowable stress		
Tensile	160	215
Compressive	160	215
Bending	160	215
Shear	90	125

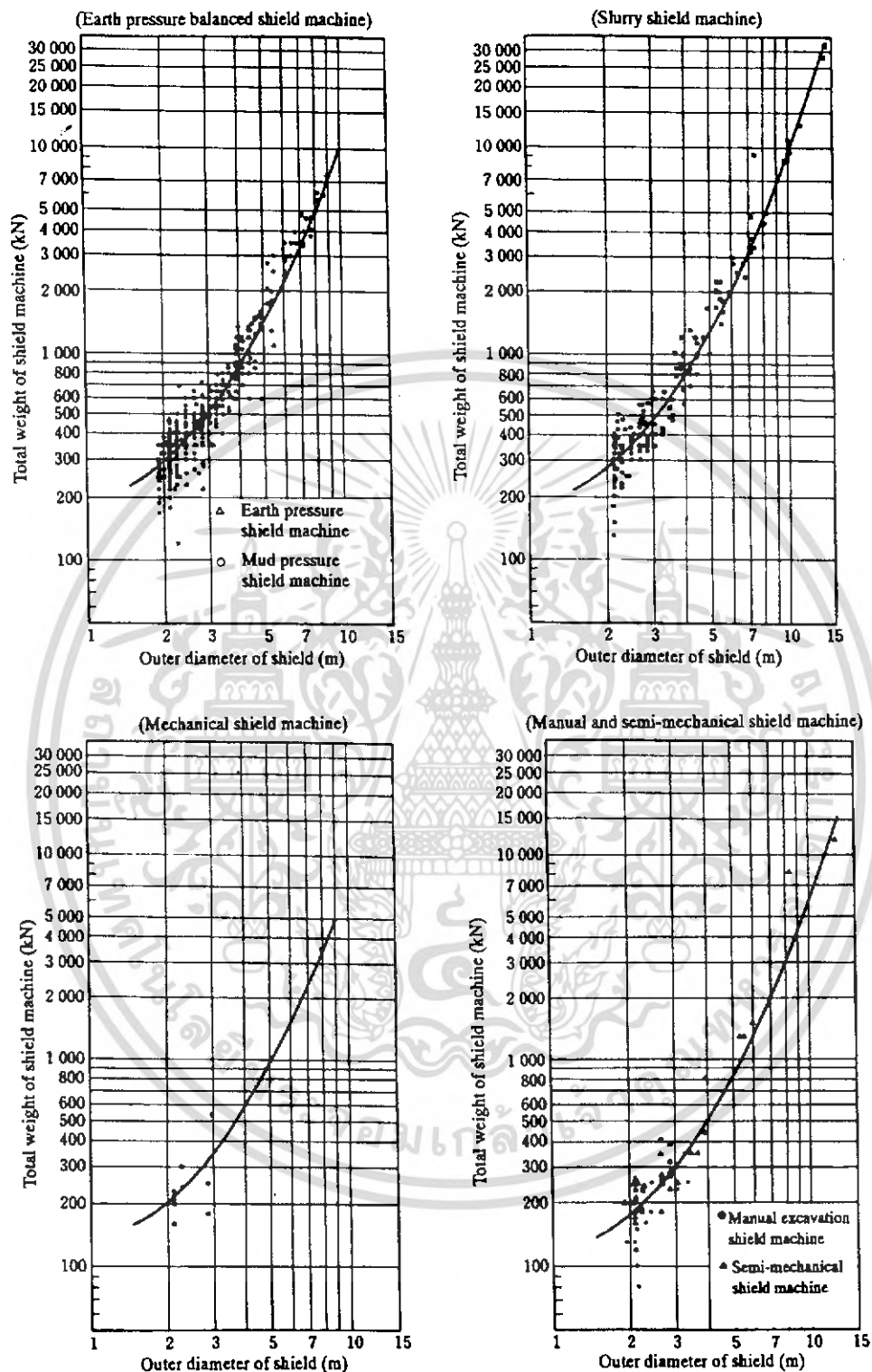
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่ต้องรับแรงกระแทกหรือแรงที่กระทำเข้าไปซ้ำๆ นั้น ควรได้ทำการศึกษาอย่างละเอียด เป็นกรณีพิเศษ

สำหรับหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล, หัวขุดเจาะแบบ Slurry, และหัวขุดเจาะแบบใช้แรงจากเครื่องจักรนั้น ที่ผิวแผ่นเรียบมักจะเสียหายบ่อยครั้ง เนื่องจากแรงเสียดทานของดิน ดังนั้น เพื่อเป็นการทดแทนในส่วนนี้ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่อยู่ใกล้กับหัวตัด (Cutter head) จึงควรมีจำนวนเผื่อไว้ที่แน่นอนอย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับ ชนิดของดินและความยาวของอุโมงค์

น้ำหนักของหัวขุดเจาะ

น้ำหนักเฉพาะแต่ละชิ้นส่วนของหัวขุดเจาะนั้น ควรได้พิจารณาไว้อย่างครบถ้วน น้ำหนักชิ้นส่วนของหัวขุดเจาะ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากว่า หัวขุดเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่า ก็จะมีปัจจัยด้านน้ำหนักที่กระทบต่อ การแยกชิ้นส่วน การเคลื่อนย้าย และการจัดวางตำแหน่งหัวขุดเจาะในปล่องปลายเปิด (Shaft) ยิ่งไปกว่านั้น น้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงของหัวขุดเจาะ ก็ยังมีผลกระทบต่อการพิจารณาการทำงานในสภาพที่เป็นดินอ่อน รวมทั้งผู้ออกแบบหัวขุดเจาะ ก็ควรได้พิจารณาถึงเรื่องนี้ไว้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.3 น้ำหนักโดยรวมของ ดันแบบหัวขุดเจาะในปัจจุบัน
 (จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 45 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 โครงสร้างของหัวขุดเจาะ

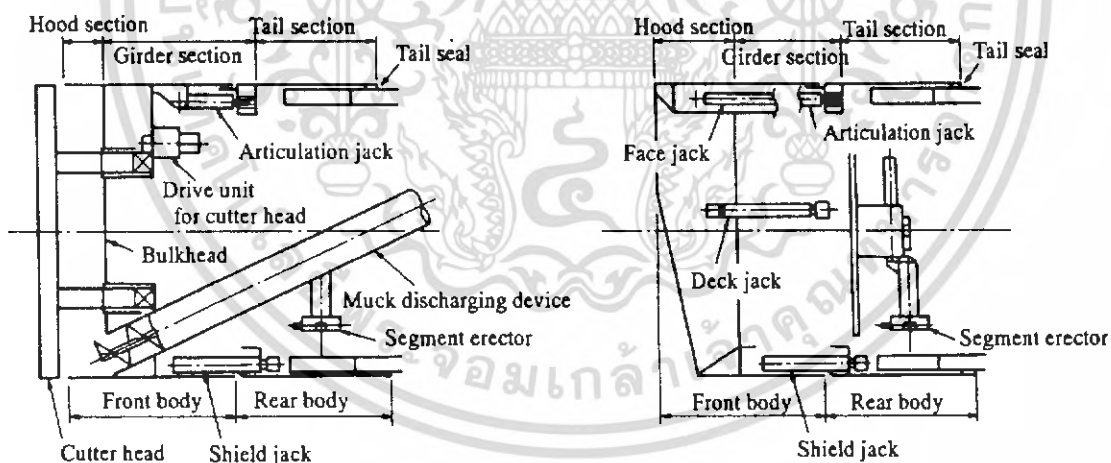
รูปร่างลักษณะของหัวขุดเจาะ

หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินนั้นควรมีลักษณะที่ถูกต้องเหมาะสม ตามหน้าที่ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวขุดเจาะ หัวขุดเจาะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้

- 1) โครงเหล็กกรอบนอก ทำหน้าที่ป้องกันส่วนประกอบภายใน จากแรงกระทำรอบนอก
- 2) หัวตัด (Cutter head) ทำหน้าที่ขุดตัดหน้าดินภายใต้การป้องกันโดยโครงเหล็กนอก
- 3) ชุดอุปกรณ์ในส่วนหาง ทำหน้าที่ในการจัดวางแนวอุโมงค์และขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ

แหล่งพลังงานและหน่วยควบคุมที่จำเป็นต่อการทำงานของหัวขุดเจาะ จะติดไว้กับหางท้ายของพื้นเพื่อง ซึ่งดำเนินงานของหัวขุดเจาะ

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ออกแบบควรตัดสินใจ ในการใช้หน่วยข้อต่อ (Articulation Unit) โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวทางอุโมงค์ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ สภาพดิน และลักษณะเงื่อนไขต่างๆตลอดแนวเส้นทาง



รูป 4.4 รูปร่างและลักษณะของหัวขุดเจาะ

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

หัวขุดเจาะส่วนที่อยู่ติดกับหน้าดิน มักจะเป็นอุปกรณ์ซึ่งเป็นกลไกที่เลื่อนปรับได้ ที่ส่วน Head section และ Hood section เพื่อเป็นการลดเครื่องมือที่ไว้วัดค่า

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ

- (1) การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ ควรพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงผนังอุโมงค์ ช่องว่างที่ส่วนหางหัวขุดเจาะ(Tail) และความหนาของ Tail skin plate
- (2) การหาระยะช่องว่างที่ส่วนหาง ต้องพิจารณาถึง รูปร่างและขนาดของวงผนังอุโมงค์ แนวอุโมงค์ การปรับแนวอุโมงค์และการติดส่วนกันการรั่วซึมที่ส่วนหาง

รายละเอียดต่าง ๆ มีดังนี้

- (1) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ สามารถหาได้จากสมการข้างล่าง (ดังรูปที่ 4.5)

$$D = D_o + 2(x + l)$$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงผนังอุโมงค์

x = ช่องระยะห่างที่ส่วนหาง

l = ความหนาของ Tail skin plate

- (2) ระยะช่องว่างของส่วนหาง (Tail clearance)

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาถึง ในการหาระยะช่องว่างที่ส่วนหาง มีดังนี้

- ระยะ x_1 ต่ำสุดที่ยอมให้ จำเป็นสำหรับการขุดเจาะในแนวโค้ง และการปรับเบี่ยงเบนทิศทาง (ดังรูปที่ 4.6)

$$x_1 = \delta / 2$$

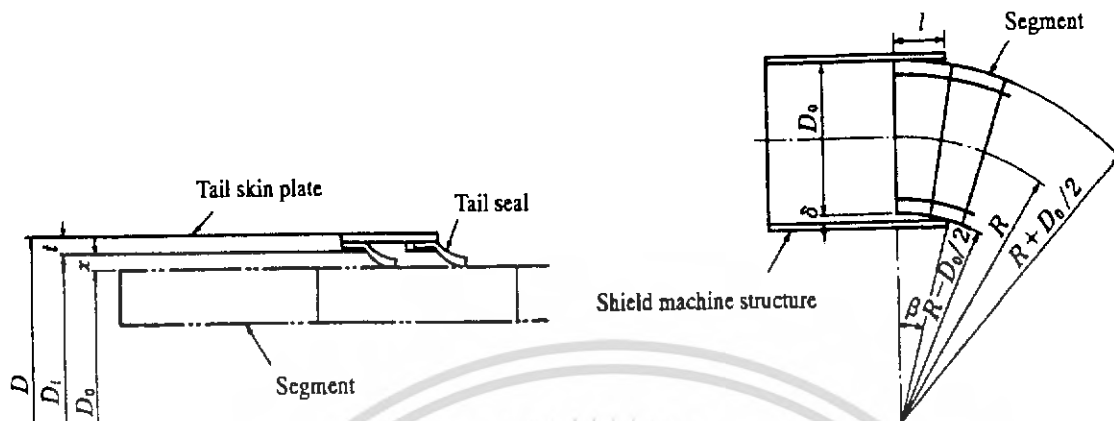
$$\delta = \left(R - \frac{D_o}{2}\right)(1 - \cos \beta) \approx \frac{l^2}{2\left(R - \frac{D_o}{2}\right)}$$

R = รัศมีความโค้ง ของแนวศูนย์กลางอุโมงค์

l = ความยาวของส่วนหาง

$R + D_o/2$ = รัศมีความโค้งภายนอก ของวงผนังอุโมงค์

$R - D_o/2$ = รัศมีความโค้งภายใน ของวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.5 รายละเอียดของส่วนหาง

รูปที่ 4.6 ระยะที่ยอมให้ สำหรับการขุดเจาะตาม
แนวโค้ง และการปรับเบี่ยงเบนทิศทาง

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

- ระยะที่ยอมให้ สำหรับการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์
บ่อยครั้งที่มีการใช้ระยะช่องว่างที่ส่วนหาง เท่ากับ 20 – 40 มิลลิเมตร และเนื่องจาก
ช่องว่างที่ส่วนหาง (Tail void) เป็นผลรวมของ ระยะช่องว่าง (Tail clearance) กับความหนาของ
Tail skin plate ดังนั้น จึงควรทำการศึกษายละเอียดรอบคอบ เกี่ยวกับระยะช่องว่างที่ส่วนหาง
(Tail clearance)

ถ้าหากชิ้นผนังอุโมงค์ส่วนหน้าสุด หรือชิ้นส่วนโครงสร้างหัวขุดเจาะ ที่ป้องกันการ
อุดช่องว่างที่ส่วนหาง ถูกเก็บอยู่ภายในส่วนหางของหัวขุดเจาะแล้ว ควรทำการสำรวจให้มั่นใจได้ว่า
มีระยะช่องว่างที่ส่วนหาง มากเพียงพอ (ดังรูปที่ 4.6)

ความยาวของหัวขุดเจาะ

การออกแบบความยาวของหัวขุดเจาะนั้น ต้องระบุถึง ลักษณะของดิน แนวอุโมงค์
ประเภทของหัวขุดเจาะ การใช้หน่วยซื้อต่อ ความกว้างของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ และระบบการใส่
K segment

สมการสำหรับการออกแบบกำหนดความยาวของหัวขุดเจาะ และส่วนต่างๆ มีดังนี้

$$L_I = l_C + l_M$$

$$l_M = l_H + l_G + l_T$$

L_I = ความยาวรวมของหัวขุดเจาะ

l_M = ความยาวของหัวขุดเจาะ

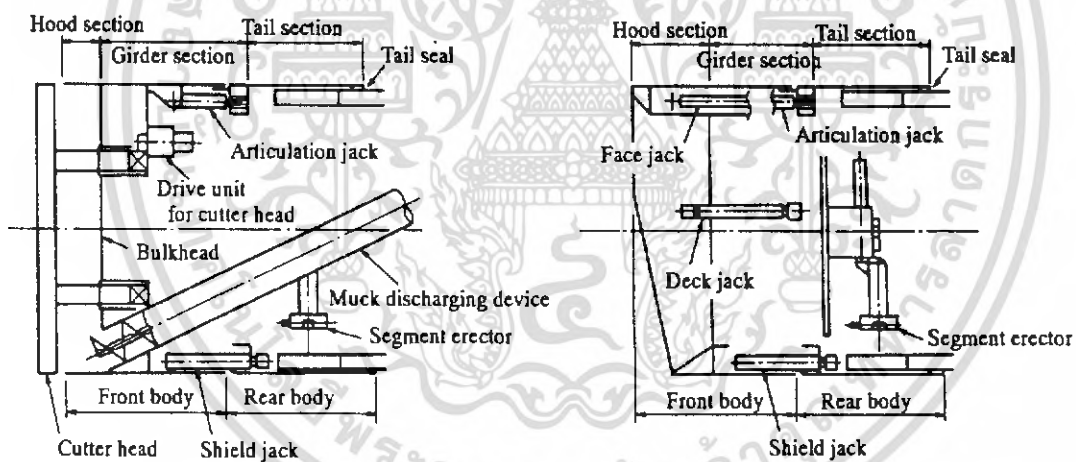
l_C = ความยาวของส่วนขุดตัด

l_H = ความยาวของส่วนหัวครอบ

l_G = ความยาวของส่วนแกนใหญ่

l_T = ความยาวของส่วนหาง

ความยาวรวมของหัวขุดเจาะ (L) เป็นความยาวที่มากที่สุด จากปลายสุดส่วนหน้า ถึง ปลายสุดของส่วนหางของหัวขุดเจาะ (ดังรูปที่ 4.7 ก. และรูปที่ 4.7 ข.)

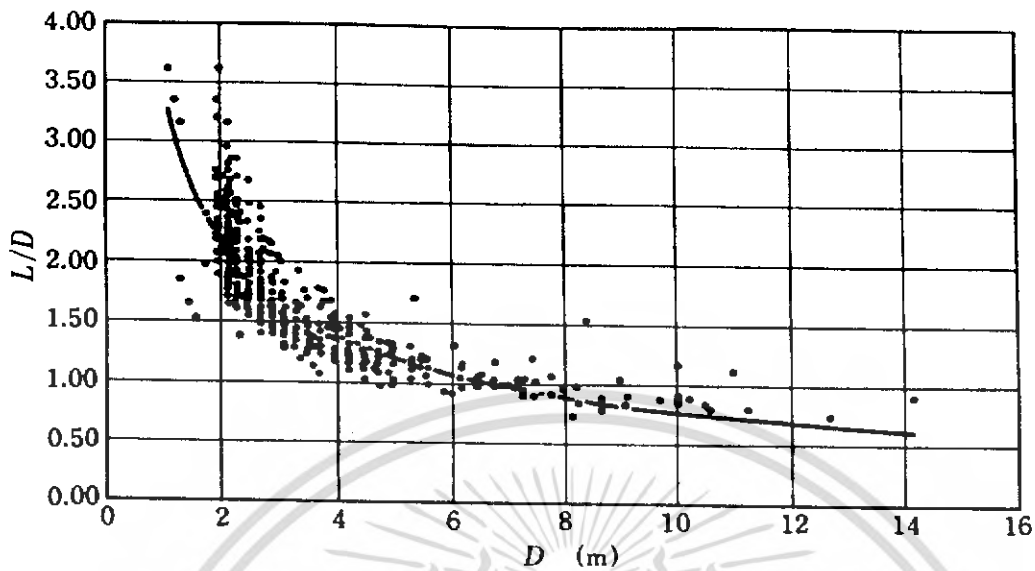


ก. หัวขุดเจาะแบบปิดด้านหน้า (แบบแรงดันดินสมดุล)

ข. หัวขุดเจาะแบบเปิดด้านหน้า

รูปที่ 4.7 ความยาวของหัวขุดเจาะ

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก(D) กับความยาว (L) ของหัวขุดเจาะ
(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

หัวขุดเจาะควรออกแบบ ให้มีความยาวสั้นที่สุด เท่าที่จะเป็นไปได้ตามความเหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก กับความยาวของหัวขุดเจาะแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.8

ส่วนหมวกครอบ (Hood section)

รูปร่างและลักษณะของส่วนหมวกครอบควรออกแบบตามลักษณะของดินและประเภทของหัวขุดเจาะ โครงสร้างต่างๆก็ควรมีกำลังรับน้ำหนักที่มากเพียงพอ

ส่วนหมวกครอบช่วยรักษาเสถียรภาพของผิวน้ำดินไว้ อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นเส้นทางสำหรับขนถ่ายดินจากการขุดเจาะไปยังส่วนหางของหัวขุดเจาะอีกด้วยในกรณีของการขุดด้วยหัวตัดนั้น ระบบการลำเลียงส่งถ่ายดินจากการขุดเจาะนั้นควรพิจารณาตัดสินใจจากรูปร่างและลักษณะของส่วนหมวกครอบ โดยเฉพาะหัวขุดเจาะแบบเปิดด้านหน้า (Closed-Face) นั้น ส่วนของหมวกครอบควรออกแบบให้แน่ใจว่า ดินที่ขุดออกมานั้นรวมกันได้อย่างสมบูรณ์

ส่วนคานหลัก (Girder Section)

ช่องว่างที่ต้องการสำหรับจัดวางแม่แรงหัวขุดเจาะ ที่รองหัวตัด หน่วยขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ หน่วยข้อต่อ และอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายดิน ควรรวมเข้าไว้ในรายการสำหรับการหาความยาวของคานหลัก คานหลักขนาดใหญ่นี้ควรออกแบบให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอ

คานหลักเป็นโครงเฟรมหลักของหัวขุดเจาะ และรองรับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ ส่วนหมวกครอบและส่วนหางของหัวขุดเจาะนั้น ได้รับการออกแบบโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ส่วนของคานหลักจะต้องมีความแข็ง (Rigidity) และควรคำนึงถึงเสมอเมื่อทำการออกแบบคานหลัก

ส่วนของคานหลักถูกจัดวางให้พอดีได้ โดยใช้โครงสร้างรูปวงแหวนทั้งที่ด้านหน้าและที่ปลายของส่วนท้าย ในกรณีของหัวขุดเจาะเส้นผ่านศูนย์กลางขาคกลางและขนาดใหญ่ ส่วนประกอบต่าง ๆ มักจะได้รับการเสริมกำลังโดยใช้เสาและคาน

เสาและคานควรทำการออกแบบดังนี้

- สามารถรองรับน้ำหนักที่ส่งถ่ายมาจากส่วนคานหลัก และน้ำหนักที่เกิดตัวประกอบขึ้นส่วนผนังอุโมงค์ อุปกรณ์ขนถ่ายดินโคลน และน้ำหนักจากส่วนท้าย (Rear deck)
- มีช่องว่างที่มาก เพื่อให้สามารถทำการบำรุงรักษาเครื่องมือต่างๆ ได้ เช่น เครื่องมือไฮดรอลิก เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งท่อและเคเบิลต่างๆ

ส่วนหาง (Tail section)

- (1) การหาความยาวของส่วนหาง ควรคำนึงถึงความกว้างและรูปร่างของชั้นส่วนผนังอุโมงค์
- (2) การหาความหนาของ Tail skin plate ควรศึกษาอย่างละเอียดถึงการเสียรูป (Deformation) ที่จะเกิดขึ้นกับ Tail skin plate
- (3) ต้องจัดให้มีช่องว่างที่ส่วนหางให้มากพอ เพื่อให้มั่นใจได้ถึงความปลอดภัยและเพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

(1) ความยาวของส่วนหาง

ความยาวของส่วนหาง ควรทำการพิจารณาดังนี้

- ต้องมีช่องว่าง เพื่อการประกอบชั้นส่วนผนังอุโมงค์
- คำนึงถึงรูปร่างและจำนวนที่ปิดช่องว่างที่ส่วนหาง (Tail seal)

นอกจากนี้ เมื่อทำการขุดเจาะในส่วนโค้ง ก็ควรทำการปรับความยาวของส่วนหาง ได้ดังสมการนี้

$$l_r = l_j + C + l_s + C' + l_p$$

l_r = ความยาวของส่วนหาง

l_j = ความยาวของแม่แรงหัวขุดเจาะ

l_s = ความกว้างของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

l_p = ความยาวของส่วนปิดช่องว่างที่ส่วนหาง

C = ระยะที่ยอมให้สำหรับประกอบผนังอุโมงค์

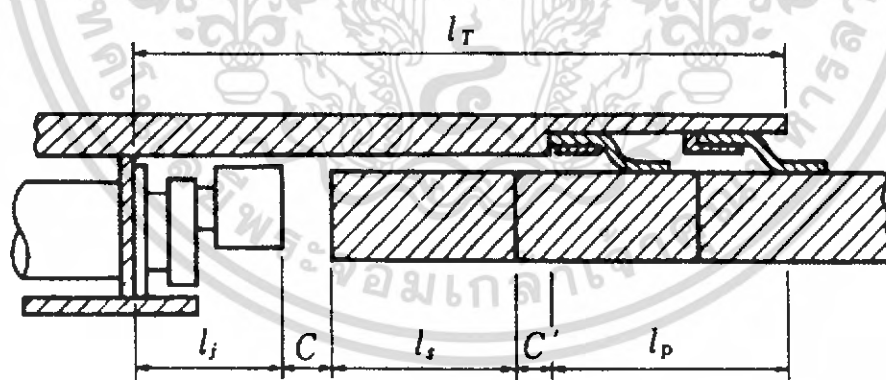
= 100 – 150 มิลลิเมตร (ควรทำการเพิ่มระยะสำหรับการติดตั้ง

K segment ในทิศทางแนวยาว ซึ่งขึ้นกับมุมที่ทำการติดตั้ง

C' = ระยะที่ยอมให้ ภายในส่วนหาง เพื่อใส่ชิ้นส่วน

(2) ความหนาของ Tail skin plate

เป็นการดีกว่า หากออกแบบให้ Tail skin plate มีความหนาน้อยที่สุด ภายใต้ขอบเขต คือไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทรง (Deformation) มากเกินไป ความหนาของที่ปิดช่องว่างของส่วนหาง (Tail seal) ซึ่งต้องสัมผัสกับผนังอุโมงค์ ก็ต้องแน่ใจว่ามีความหนาพอ



รูปที่ 4.9 ความยาวของส่วนหาง

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

3) ส่วนหาง (Tail section)

ส่วนหางของหัวขุดเจาะ ควรจัดให้มีช่องว่างที่มากพอ เพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ การGrout อุดเต็มช่องว่าง และการสำรวจ นอกจากนี้ควรจัดให้มีแท่นทำงานและราวจับยึด ซึ่งมีความจำเป็นเช่นกัน

การอุดช่องว่างของส่วนหาง (Tail Seals)

การเลือกที่อุดช่องว่างของส่วนหางให้เหมาะสมนั้น ควรพิจารณาถึงความสามารถในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำปูนที่Grout การต้านทานต่อแรงดัน และความทนทาน

ส่วนปิดช่องว่างที่ส่วนหาง ปิดอยู่ระหว่าง Tail skin plates กับ ผิวนอกของผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งแล้ว เพื่อป้องกันการรั่วซึมของ น้ำใต้ดิน และน้ำปูนGrouting ไหลเข้าสู่อุโมงค์ใต้ดิน ในกรณีของหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล และ หัวขุดเจาะแบบ Slurry shield machines นั้น ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail seal) นี้ จะมีหน้าที่ในการรักษาแรงดัน

ในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์นั้น มักจะไม่ตรงกับศูนย์กลางของวงผนังอุโมงค์ที่ได้ออกแบบไว้ และวงผนังอุโมงค์ที่แท้จริง ก็มักจะมีการเอียงศูนย์ หรือเป็นรูปวงรีเสมอ โดยเฉพาะเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินตามแนวทางโค้ง ช่องว่างที่ส่วนหางจะไม่สม่ำเสมอ ไม่เท่ากันโดยตลอดด้วยเหตุนี้ ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail seal) จึงจำเป็นเพื่อการต้านทานแรงดันจากการGrout แรงดันจากSlurry และแรงดันจากน้ำใต้ดินที่อยู่ข้างใน เมื่อช่องว่างที่ส่วนหาง (Tail clearance) ใกล้เคียงกับค่าจากการออกแบบ อย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวงผนังอุโมงค์

โดยทั่วไป Tail seal บางชุด ต้องเคยเพิ่มความอัดแน่นของน้ำ ในการหาจำนวนชุดของ Tail seal ที่ต้องใช้ จึงควรพิจารณาถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ ลักษณะของดิน แรงดันน้ำใต้ดิน และผลจากการเปลี่ยนที่ปิดช่องว่าง ระหว่างทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วย

ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail seal) อาจทำจากยาง พลาสติก เหล็ก Stainless steel หรือประกอบขึ้นจากวัสดุต่างๆเหล่านี้ สำหรับการออกแบบนั้น แบ่งที่ปิดช่องว่างส่วนท้ายเป็น 2 ประเภท คือ แบบแปรงปิดช่องว่าง (Brush seal) และ แบบแผ่นปิดช่องว่าง (Plate seal)

ความอัดแน่นของน้ำ และความทนทานของ ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง สามารถเพิ่มได้ โดยการอุดช่องว่างระหว่างที่ปิด ด้วยน้ำมันจารบี เนื่องจาก น้ำมันจารบี หรือน้ำมันหล่อลื่น ต้องถูกใช้เพื่อให้หัวขุดเจาะขับเคลื่อนไปได้ จึงจำเป็นต้องจัดให้มีการเติมให้เต็มอยู่เสมอ

ในบางครั้ง อาจเกิดแรงกระทำจากชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ไปยัง Tail seal ซึ่งอยู่ห่างกัน โดยเฉพาะเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีระยะทางยาวๆ หรืออุโมงค์ตามแนวโค้งด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวัสดุของ Tail seal จำนวนของTail seal ที่ใช้ และวิธีการในการเติมสารหล่อลื่น

4.1.4 หน่วยขุดตัด

การเลือกหน่วยขุดตัด

การเลือกหน่วยขุดตัดควรพิจารณาจาก การเพิ่มความเร็วในการขุด การประหยัดแรงงาน และความปลอดภัยในการทำงานซึ่งเหมาะสมกับสภาพของหน้าดิน

การเลือกหน่วยขุดตัดควรพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้

- ประเภทของหัวขุดเจาะ
- ประเภทตัวช่วยค้ำยันของหัวขุดตัด
- หัวสว่านของหัวขุดตัด
- ประเภทงานหัวขุดตัด
- แรงบิดของหัวขุดตัด
- แรงผลักดัน

ประเภทของหัวขุดตัด

การเลือกของหัวขุดตัด สำหรับหัวขุดเจาะแต่ละประเภท (EPB, Slurry, Mechanical) ควรเลือกโดยให้มีความเหมาะสมกับสภาพของดินโดยรอบ และต้องสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาพดินส่วนใหญ่ได้

วัตถุประสงค์ในการใช้หัวขุดตัด คือ เพื่อช่วยความเร็วในการขุดเจาะ ประหยัดกำลังแรงงานและเพิ่มความปลอดภัยในการขุดเจาะเมื่อทำให้หน้าดินมีความมั่นคง ดังนั้นการเลือกประเภทหน้าขุดตัดจึงควรพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้

- ประเภทของหัวขุดตัด
- แรงบิดของหัวขุดตัด
- หัวสว่านของหัวขุดตัด
- ประเภทตัวช่วยค้ำยันของหัวขุดตัด
- รอยแยกของหัวขุดตัด
- แรงผลักดัน

(1) ประเภทของหัวขุดตัด

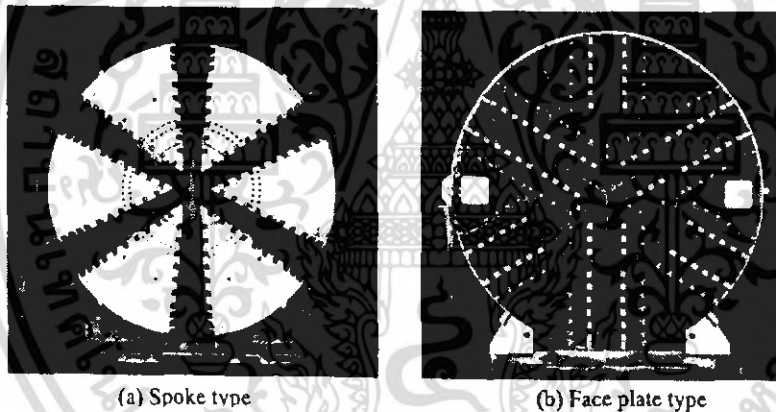
หัวขุดตัดแบบหมุนเป็นชนิดหนึ่งที่กะทัดรัดและใช้งานได้หลากหลาย หัวขุดตัดพิเศษชนิดอื่นๆที่ใช้กัน ได้แก่ หัวตัดแพแกว้าง

(2) โครงสร้าง

ในทางโครงสร้างมีประเภทของหัวขุดตัดอยู่ 2 แบบ พื้นฐานคือเพชีลล์ (Spoke) และแพหน้าราบ (face plate) การเลือกประเภทนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งก่อสร้างในนั้นและสภาพของดิน ดังรูป 4.10)

(3) รูปร่าง

หัวตัดมีรูปร่างหน้าตัดพื้นฐานอยู่ 3 แบบ คือ แบบแบนราบ แบบโค้งเว้า แบบโค้งนูน นอกจากนี้ยังมีหน้าตัดแบบพิเศษซึ่งจัดเรียงหัวขุดเจาะแบบ Multiple และหัวตัดแบบไม่เป็นวงกลม ควรให้ความสำคัญถึงการสึกกร่อนของหัวตัดซึ่งแตกต่างกันตามรูปร่างของหัวตัด โดยเฉพาะเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ในเนื้อดินที่มีกรวดปนอยู่



รูปที่ 4.10 ประเภทของหัวตัด

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ประเภทของตัวถ้ำยันหัวตัด

ประเภทของตัวถ้ำยันหัวตัดควรเลือกให้เหมาะสมกับขนาดและเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวตัดและชนิดของดินนอกจากนี้ควรเลือกให้เข้ากับเครื่องถ้ำเลี้ยงดินเหลวออก

(1) ประเภทของตัวถ้ำยันหัวตัด

ประเภทของตัวถ้ำยันหัวตัดแสดงดังรูป 4.11

(2) รูปร่างลักษณะ

ลักษณะต่างๆของตัวค้ำยันหัวตัดแตกต่างกันดังนี้

ก) ตัวค้ำยันที่ศูนย์กลาง

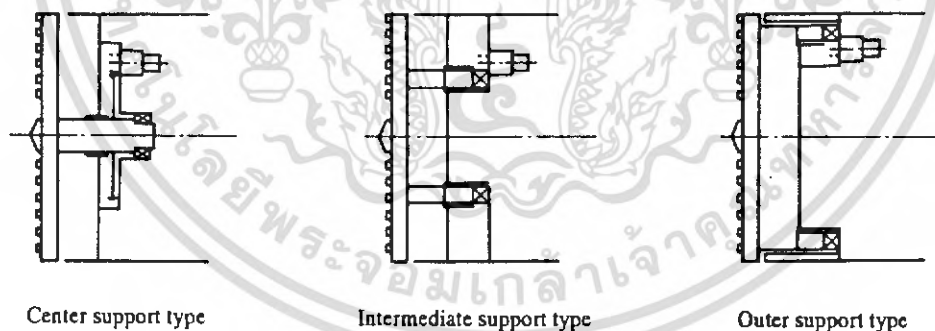
ประเภทนี้มีโครงสร้างที่ธรรมดาใช้งานได้ทั่วไปสำหรับหัวขุดเจาะขนาดเล็กและขนาดกลางตัวค้ำยันประเภทนี้สามารถป้องกันการยุบตัวของดินเหนียวกับตัวเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเลื่อนหัวตัดได้ง่ายแต่การนำก้อนหินขนาดใหญ่ออกนั้นทำได้ยากเพราะช่วงห่างระหว่างตัวเครื่องมีจำกัด

ข) ตัวค้ำยันที่ช่วงกลาง

ตัวค้ำยันประเภทนี้มีโครงสร้างที่มีความสมดุลดี ใช้งานได้สำหรับหัวขุดเจาะขนาดกลางและขนาดใหญ่หากนำตัวค้ำยันประเภทนี้มาใส่กับหัวขุดเจาะขนาดเล็กก็ควรพิจารณาถึงการลำเลียงก้อนหินขนาดใหญ่ออกและการป้องกันดินเหนียวยึดติดกับช่วงกลางของหน้าตัดหัวเจาะ

ค) ตัวค้ำยันที่รอบนอก

ตัวค้ำยันประเภทนี้ทำให้เกิดช่องกลางหัวขุดเจาะอย่างมากดังนั้นจึงเป็นการง่ายสำหรับหัวขุดเจาะขนาดเล็กในการลำเลียงเอาก้อนหินขนาดใหญ่ออก มีตัวค้ำยันอยู่ 2 แบบพื้นฐานคือ รูปร่างเป็นวง(กลอง) และรูปร่างแท่งสี่เหลี่ยม(คาน) หากจะใช้ตัวค้ำยันประเภทนี้ก็จำเป็นจะต้องศึกษาถึงการป้องกันดินเหนียวยึดติดตามวงรอบของหัวเจาะ



รูปที่ 4.11 ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัด

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

แรงบิดของหัวตัด

แรงบิดของหัวตัดควรหาได้จากชนิดของดินและประเภทโครงสร้างของหัวขุดเจาะ

(1) การหาค่าแรงบิดของหัวตัด

การหาค่าแรงบิดของหัวตัดควรพิจารณาถึงชนิดของดินรวมทั้งประเภทโครงสร้างและขนาดของหัวขุดเจาะแรงบิดที่ต้องการ (T_N) ประกอบด้วยแรงบิดส่วนต่างๆดังนี้

$$T_N = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6$$

T_N = แรงบิดที่ต้องการ

T_1 = แรงบิดที่จำเป็นเพื่อเอาชนะตัวแรงต้านทานการขุดเจาะของดิน

T_2 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านการเสียดทานของดิน

T_3 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านทานจากการกวาดผสมของดิน

T_4 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงแบกทาน

T_5 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านเสียดทานของ bearing seal

T_6 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อการสูญเสียทางกลจากการกักเก็บ

(2) สมการแรงบิดของหัวตัด

แรงบิดของหัวตัดสามารถหาได้โดยใช้สมการ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการหาค่า

$$T = \alpha \cdot D^3$$

T = แรงบิดของหัวตัด

D = เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกของหัวขุดเจาะ

α = ตัวคูณประกอบสำหรับแรงบิด

ตัวคูณประกอบสำหรับแรงบิด (α) โดยมากแล้วจะใช้ค่าตามช่วงต่างๆ แม้ว่าตามจริงจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขุดเจาะและชนิดของดิน

$\alpha = 8-23$ สำหรับหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (EPB)

$\alpha = 9-15$ สำหรับหัวขุดเจาะแบบ Slurry

โดยที่ T มีหน่วยเป็น KNm และ D มีหน่วยเป็น m

(3) ประเภทของตัวหัวตัด

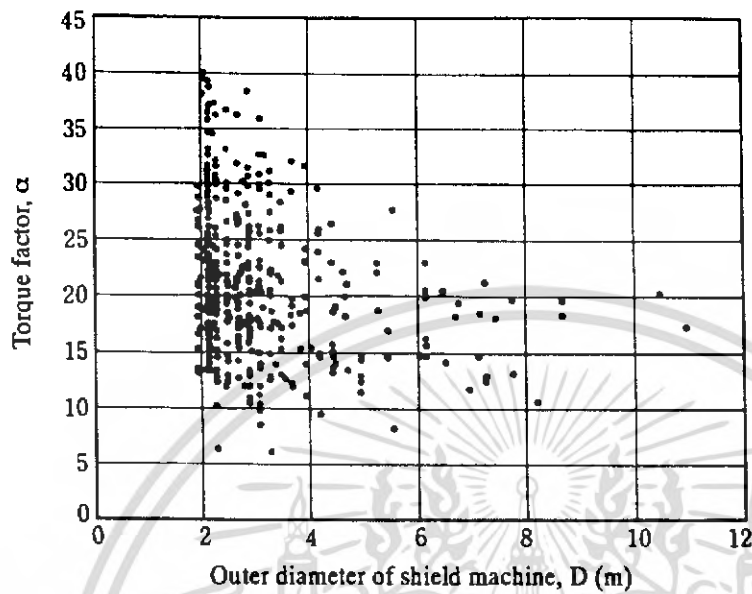
ประเภทต่างๆของตัวจับหัวตัดมีลักษณะดังต่อไปนี้

Hydraulic motor: ง่ายต่อการควบคุมแรงบิดและความเร็วในการหมุนและนอกจากนี้ยังสามารถปรับทิศทางการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย

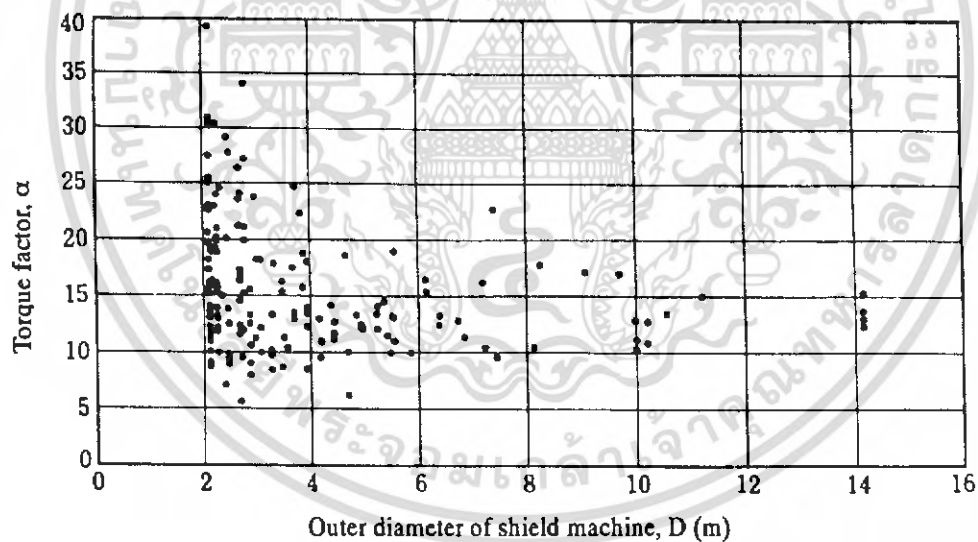
Electric motor: มีประสิทธิภาพสูงและช่วยรักษาสภาวะแวดล้อมภายในอุโมงค์ในขณะที่ทำงานสามารถควบคุมความเร็วการหมุนได้หากใช้แบบมีตัวปรับค่าและง่ายต่อการใช้ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาวิธีการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อยได้ในทุกกรณี

Hydraulic jack: ส่วนใหญ่แล้วใช้สำหรับการขุดเจาะที่ไม่ต่อเนื่องเช่นใช้กับหัวตัดแบบแกว่งไปมา (Oscillating cutters)





(a) Earth pressure balanced shield machine



(b) Slurry shield machine

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะกับตัวคูณประกอบแรงบิด
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

รอบแยกของหัวตัด

รูปร่างขนาดและรูปแบบของรอบแยกหัวตัดขึ้นอยู่กับชนิดของดิน เสถียรภาพหน้าดิน และประสิทธิภาพของหัวตัด

(1) รูปร่างและขนาด

รูปร่างและขนาดของรอบแยกถูกกำหนดโดยจำนวนซี่และขนาดของเม็ดกรวดที่เจาะผ่านด้วยหัวขุดเจาะ มีหลายกรณีที่รูปร่างของรอบแยกเป็นเส้นตามแนวซี่และในรูปร่างแบบอื่นๆตามแต่ขนาดของเม็ดกรวด โดยทั่วไปแล้วขนาดของรอบแยกหาได้จากขนาดใหญ่ที่สุดของเม็ดกรวดที่พบ มีความเป็นไปได้ในการกำหนดขนาดของรอบแยกเพื่อที่จะบดก้อนหินขนาดใหญ่โดยใช้ Roller cutter ที่ติดไว้กับหน้าตัด

(2) อัตราส่วนของการเปิด(Opening ratio)

อัตราส่วนของการเปิดจำเป็นสำหรับรอบแยกของหัวตัดซึ่งมีสภาพดังนี้

$$W_0 = \frac{A_s}{A_r}$$

W_0 = อัตราส่วนของการเปิด

A_s = พื้นที่ทั้งหมดที่เปิดออกในหัวขุดตัด (ไม่รวมพื้นที่หัวส่วนของหัวตัดที่ยื่นออกมา)

A_r = พื้นที่ของหัวตัด

อัตราส่วนการเปิดนั้นโดยมากแล้วอยู่ในช่วง 10-30% สำหรับหัวเจาะแบบ Slurry ช่วงของอัตราส่วนการเปิดสำหรับหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (EPB) นั้นจะมากกว่าของหัวเจาะแบบ Slurry

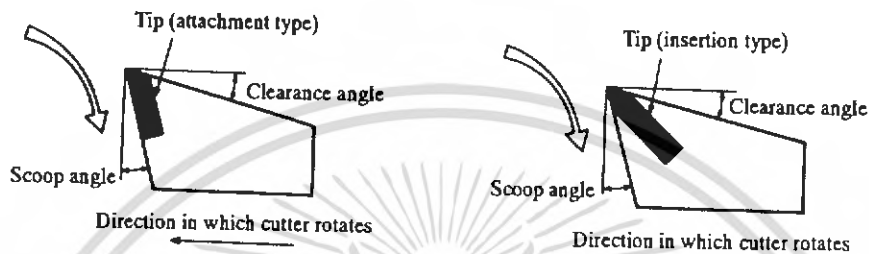
การเพิ่มอัตราส่วนการเปิดนั้นจะเป็นประโยชน์สำหรับหารขุดเจาะในดินเหนียวมากๆ เช่น Consolidated Clayey Soil หากเป็นดินที่มีความเสี่ยงต่อการถล่มลงมา จำเป็นจะต้องทำงานศึกษาอย่างระมัดระวังเพราะจะมีความเสี่ยงในการขุดเจาะอย่างมากหากจำเป็นต้องมีหน่วยเปิด ปิด รอบแยกก็ควรคำนึงถึงการป้องกันดินถล่มภายในเครื่องผ่านทางรอบแยกเมื่อเครื่องขุดหยุดการทำงาน

หัวสว่านของหัวตัด

รูปร่าง วัสดุ และรูปภาพ ของหัวสว่านขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

(1) รูปร่าง

Scoop angle ของหัวสว่านควรเลือกให้เหมาะสมตามชนิดของดิน (ดังรูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.13 รูปร่างของหัวสว่าน (พื้น)

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

- Consolidated clay

โดยทั่วไปแล้วจะใช้หัวสว่านที่มี Scoop Angle มากๆ

- Gravel layers

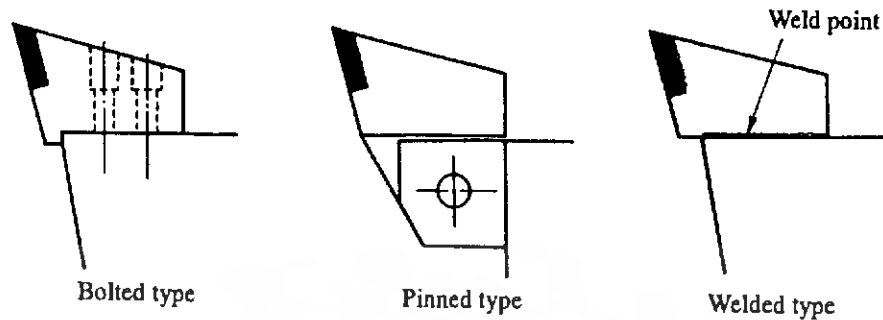
โดยทั่วไปแล้วจะใช้หัวสว่านที่มี Scoop Angle น้อย และจำเป็นจะต้องวัดระยะเพื่อป้องกันปลายหัวตัดหักหรือหลุดออกมา

การยื่นออกมาของหัวสว่านจำเป็นต้องหาด้วยการศึกษาถึงปริมาณของปัจจัยต่างๆ ดังนี้: การคาดการณ์การสึกกร่อนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระยะทางการขุดเจาะ อัตราความก้าวหน้าของงาน ความเร็วในการหมุนของหัวตัด และความถี่ของการตัดหากทำการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีความยาวมากๆ ควรศึกษาถึงความทนทานของหัวสว่านและวิธีการเปลี่ยนหัวสว่านตามชนิดของดินและระยะทางในการขุดเจาะ

(2) วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ Cemented carbide ในส่วนของปลายหัวสว่าน

(3) รูปแบบ

รูปแบบของหัวสว่านควรพิจารณาถึงชนิดของดิน เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขุดเจาะ ความเร็วในการหมุน และความยาวของอุโมงค์ วิธีการติดหัวสว่านแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ประเภทของการปิดติดหัวส่วน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

Cutter Bearing Seals

Cutter bearing seals ควรจะสามารถป้องกัน cutter bearing จากการไหลเข้าของดิน น้ำใต้ดิน และสารผสมเพิ่มอื่นๆ อีกทั้งต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการต้านแรงดันดินใน cutter chamber แรงดันน้ำใต้ดิน แรงดันน้ำโคลน แรงดันการฉีกส่วนเสริม และแรงดันอากาศได้

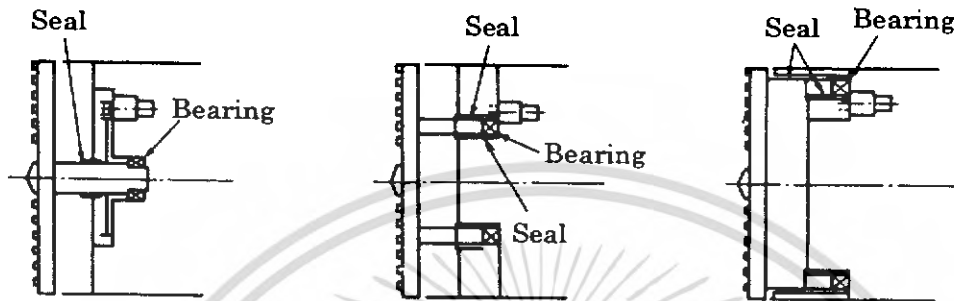
(1) การกำหนดตำแหน่ง ตำแหน่งของ Cutter bearing seals ขึ้นอยู่กับประเภทของตัวก้ำยันหัวชุดตัด (Cutter support) ที่ปิด (seal) ต้องใส่ให้พอดีกับ Cutter bearing ในตัวก้ำยันหัวชุดตัด ดังอธิบายไว้ในเบื้องต้น

(2) วัสดุที่ใช้ ควรจะต้องทนทานต่อแรงดันสึกกร่อน น้ำมัน และความร้อน ดังนั้นเพื่อให้สามารถทำหน้าที่ดังกล่าวได้ภายใต้สภาวะที่วิกฤตของสภาพดินและแรงดันของน้ำ ส่วนใหญ่แล้วจึงใช้ Nitride rubber และ Polyurethane rubber เป็นวัสดุของ seal

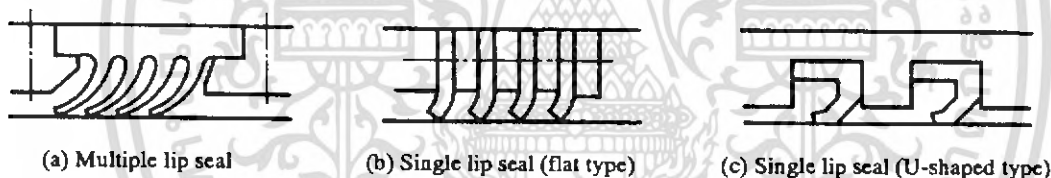
(3) รูปร่าง Cutter bearing seals สามารถใช้ได้ทั้งแบบเดี่ยวๆหรือแบบหลายๆชั้นวางเรียงเป็นชุด (ดังรูปที่ 4.16) มีการเติมจารบีหรือน้ำมันเพื่อป้องกันการเลื่อนผิวหน้าของ seal ไม่ให้เกิดการเสียหายจนทำให้ดินผ่านเข้ามาได้

หากแรงดันน้ำสูง ก็จำเป็นต้องศึกษาถึงการลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงดันที่สูงมากระทำต่อ Seal และการลดน้ำหนักที่กระทำบน seal ทั้งนี้อาจรวมถึงแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการเจาะอุโมงค์ที่มีระยะขาวนั้นต้องศึกษาถึงความทนทานในการเลื่อนไถลของ seal ภายใต้

สถานะที่ทารุณเพื่อความทนทานของ seal ก็จำเป็นต้องเตรียมการควบคุมตัวอย่างเช่น การควบคุมแรงดันและปริมาณจารบีที่จะอัดเข้าไปหรือเมื่อจะทำการสุมตัวอย่างของเหลวและควบคุมอุณหภูมิของ bearing seals ก็ต้องใช้ Temperature Sensor



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของ Cutter bearing seals
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 4.16 รูปร่างของ Cutter bearing seals
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

หน่วยชุดเจาะเสริม

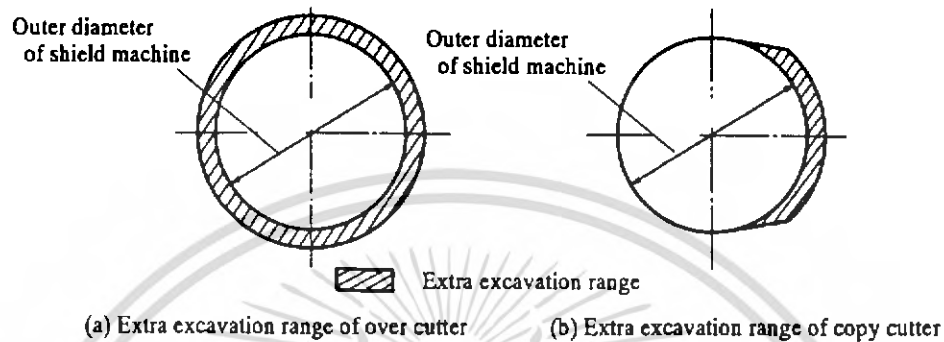
หน่วยชุดเจาะเสริมนี้จะเพิ่มในขั้นตอนการทำงานของหัวชุดเจาะเมื่อต้องการใช้เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของดินและสภาพของการก่อสร้าง

ประเภทของหน่วยชุดเจาะเสริม ได้แก่ แบบ Over cutters และแบบ Copy cutters

(1) Over cutters

การชุดเจาะเพิ่มจะทำรอบๆ ตลอดทั้งอุโมงค์ โดยใช้ over cutters ซึ่งยื่นออกมาจากหัวชุดตัด (ดังรูปที่ 4.17a)

การควบคุมการขุดเจาะเสริมเกินออกมานั้นอาจปรับเปลี่ยนได้และกำหนดคงที่
เริ่มแรกนั้นส่วนที่ขึ้นออกมาของการขุดเจาะตัดเสริมสามารถปรับได้ด้วยไฮดรอลิก ขณะที่หัวสว่านวง
นอกจะถูกจัดให้อยูริมขอบของหัวตัด



รูปที่ 4.17 ระยะของการขุดเจาะเสริม
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(2) Copy cutters

แบบ Copy cutters จะสามารถขุดเจาะเสริมเป็นรูปส่วนของวงกลมได้ตามระยะต่างๆ
ที่ต้องการแม้ว่าส่วนที่ตัดจะขึ้นออกจากหัวขุดตัดเหมือนกับ over cutters (ดังรูปที่ 3.17 b)

หลายกรณี Copy cutters ขุดขึ้นออกมาโดยใช้กำลังของไฮดรอลิก ทั้งนี้ปริมาณของ
การขุดเจาะเสริมและระยะของมันควรจะอ่านค่าและปรับค่าได้ง่ายๆด้วย นอกจากนี้กำลังของ
หัวตัดเสริมก็จำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ

4.1.5 หน่วยขับเคลื่อน

กำลังผลักรวม

กำลังผลักรวมของหัวขุดเจาะหาได้จากการรวมแรงต้านทานต่างๆที่ต้านทานต่อการ
ขับเคลื่อนของเคลื่อนขนั้รวมทั้งส่วนเพื่อเพิ่มในขณะเดินเครื่องจะเกิดแรงต้านทานต่อหัวขุดเจาะดังนี้

- 1) การต้านทานจากการเสียดทานหรือการยึดเหนี่ยวกันระหว่างผิวนอกของหัวขุดเจาะกับดิน
โดยรอบ (F_1)
- 2) การต้านทานการเจาะของหัวสว่านในส่วน hood เมื่อเดินเครื่อง (F_2)
- 3) การต้านทานที่ผิวหน้าขุดเจาะ (F_3)

- a. แรงดันภายในช่องสำหรับในหัวชุดเจาะแบบปิดด้านหน้า
- b. การต้านทานการเคลื่อนที่ของหัวชุดตัดสำหรับหัวชุดเจาะแบบใช้เครื่องยนต์
- c. แรงปฏิกิริยาจากแม่แรงในกรณีของหัวชุดเจาะแบบใช้มือและแบบกึ่งเครื่องยนต์
- 4) การต้านทานเมื่อเปลี่ยนทิศทาง(แรงต้านทานนี้เกิดตามแนวอูโมงค์และเกิดจากการปรับแก้ทิศทางที่เบี่ยงเบนรวมทั้งการต้านทานจากการปรับเสถียรภาพและการสับัดเพื่อเปลี่ยนทิศทาง)(F_4)
- 5) การต้านทานอันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนกับskin plate ที่ส่วนหาง(F_5)
- 6) การต้านทานการรูดลากของรอราง(F_6)

ผลรวมของแรงต้านทาน ($\sum F$) สามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้ แรงต้านทานเฉพาะตามประเภทของเครื่องยนต์นั้นจะต้องศึกษาอย่างละเอียดในการพิจารณาถึงกำลังผลักรวมและส่วนเพื่อเพิ่มที่เหมาะสม

$$\sum F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$$

$$F_1 = \left\{ \mu_1 \cdot (\pi D_0 \cdot L \cdot P_m + W) \right\}$$

$$F_2 = l \cdot t \cdot K_r \cdot P_m$$

$$F_3 = P_r \frac{\pi}{4} D_0^2$$

$$F_4 = R \cdot S$$

$$F_5 = \mu_2 \cdot G_1$$

$$F_6 = \mu_3 \cdot G_2$$

μ_1 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับดิน

μ_2 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับเหล็ก/คอนกรีต

μ_3 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อรถกับราง

D_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกของหัวชุดเจาะ

L = ความยาวของหัวชุดเจาะ

W = น้ำหนักของหัวชุดเจาะ

G_1 = น้ำหนักของชิ้นส่วนผนังอูโมงค์

G_2 = น้ำหนักของเกียร์รถราง

P_m = แรงดันดินเฉลี่ยที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ

P_1 = แรงดันที่กระทำต่อหัวตัดขุดเจาะ (เช่น แรงปฏิกิริยาต่อแม่แรง, แรงดันดินบนฝากัน, แรงดันดินเหลว เป็นต้น)

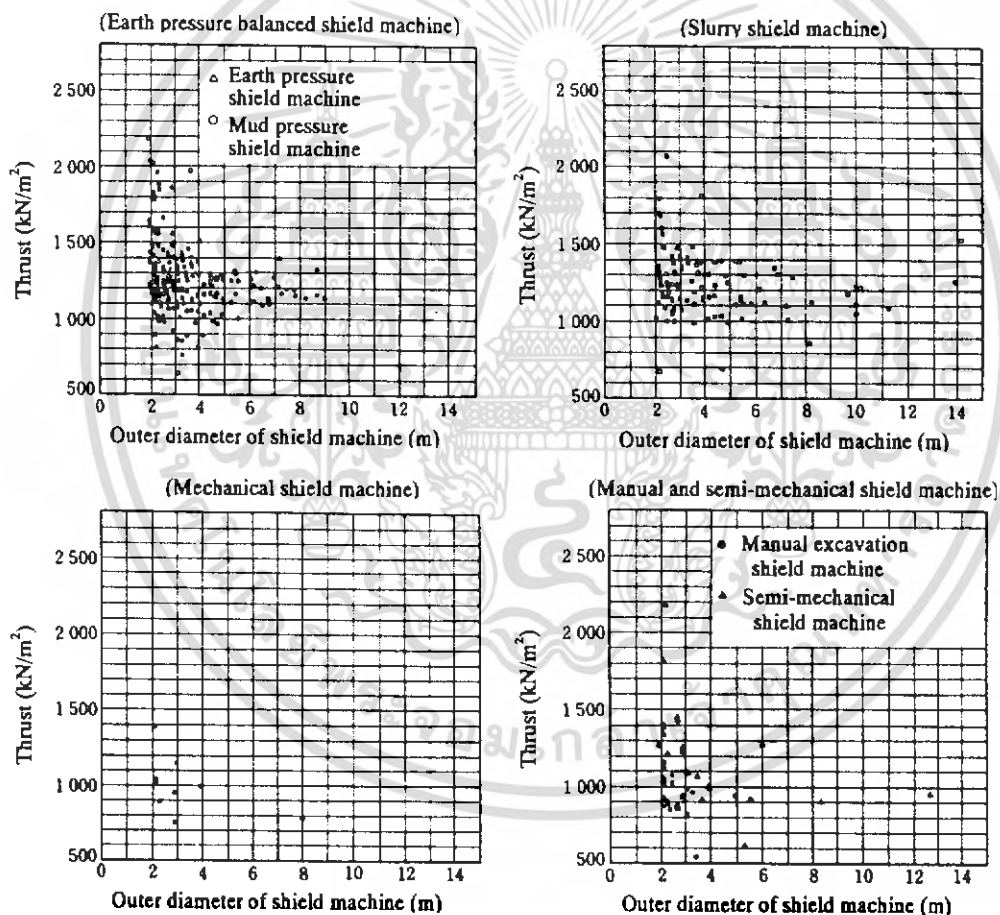
c = cohesion สัมประสิทธิ์ของ passive earth pressure

R = แรงต้านทานต่อแรงดันดิน (แรงหนูน, passive earth pressure, etc.)

l = ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัดขุดเจาะ

r = ความหนาของหัวสว่านที่เจาะเข้าไป

S = พื้นที่ของการต้านทานในทิศทางที่ทำการขุดเจาะ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะกับกำลังผลักดัน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

การเลือกและวางตำแหน่งแม่แรง

การเลือกและวางตำแหน่งของแม่แรงจะต้องช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของหัวขุดเจาะและประสิทธิภาพในการติดตั้งชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ประเด็นต่อไปนี้จะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังในการเลือกและวางตำแหน่งแม่แรงหัวขุดเจาะ

(1) การเลือกแม่แรงหัวขุดเจาะ

แม่แรงหัวขุดเจาะจะต้องมีโครงสร้างที่แน่นหนาและทำงานโดยใช้ไฮดรอลิก ส่วนใหญ่แล้ว แม่แรงมักถูกออกแบบให้ทำงานได้ที่ความดัน hydraulic สูงถึง 30,300 – 40,000 kN/m²

(2) การวางตำแหน่งของแม่แรงหัวขุดเจาะ

1) จัดวางแม่แรงไว้ที่ช่องว่างรอบๆขอบในของ Skin plate อย่างเท่าๆกัน เพื่อให้แรงกระทำรอบวงผนังอุโมงค์อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามระยะห่างของช่องว่างนี้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับดินและเงื่อนไขอื่นๆ

2) โดยทั่วไปการวางตำแหน่งแม่แรงนั้นจะต้องให้แกนขนานตามแนวยาวกับแกนหัวขุดเจาะ บางกรณีอาจจัดวางให้เกิดการเอียงศูนย์เพื่อป้องกันกระบอกแม่แรง ในกรณีนี้จะต้องพิจารณาถึงแรงดัดที่กระทำต่อกระบอกแม่แรงด้วย

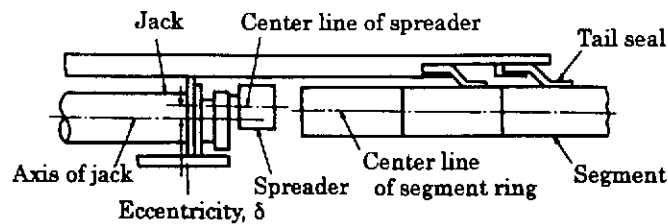
(3) จำนวนแม่แรงหัวขุดเจาะ

กำลังแรงผลักและจำนวนของแม่แรงที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขุดเจาะ กำลังแรงผลักรวม โดยโครงสร้างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์และแนวเส้นของอุโมงค์ส่วนมากแล้ว สำหรับหัวขุดเจาะขนาดกลางและขนาดเล็กจะใช้กำลังพลังของแม่เหล็ก 600-1500 kN แต่สำหรับหัวขุดเจาะขนาดใหญ่ใช้กำลังแรงผลักแม่เหล็กแม่แรง 2,000-4,000 kN

(4) หัวกด (Spreaders)

1) หัวกดต้องชนกับหัวของก้านลูกสูบแต่ละตัวและเชื่อมต่อกับแม่แรงด้วยหมุดยึดหรือรอบต่อรอบวงเพื่อให้กำลังแรงผลักกระทำต่อขอบผนังอุโมงค์กระจายอย่างสม่ำเสมอ

2) บางกรณี แกนกลางของหัวกดไม่ตรงกับแกนของแม่แรงเช่นนี้แล้ว แรงเอียงศูนย์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้นให้ถือว่ามีน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีกรณีของการเปลี่ยนหัวกดเพื่อให้เหมาะสมกับความหนาของผนังอุโมงค์ซึ่งแตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการติดตั้งหัวกดที่เชื่อมศูนย์กับผนังอุโมงค์
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

3) ต้องหาขนาดของหัวกดซึ่งไม่ทำให้เกิดแรงส่วนเกินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเหล็กและผนังอุโมงค์ RC แบบมีโครงสร้างจะต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโครงในแนวตั้งด้วย

4) วัสดุที่ใช้เป็นหัวกดขึ้นอยู่กับชนิดของผนังอุโมงค์ ซึ่งอาจจำเป็นต้องบุด้านในหัวกดด้วยยางเพื่อป้องกันขอบของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ผนังอุโมงค์

ระยะการผลัดของแม่แรง

ระยะดันของแม่แรงหัวกด จะต้องพอดีกับความกว้างของผนัง รวมทั้งระยะขอบผนัง

โดยทั่วไประยะดันของแม่แรงเท่ากับความกว้างของผนังบวกด้วย 100-150 มิลลิเมตร ในกรณีของใส่ K segment ในทิศตามแนวยาวนั้นจะเป็นต้องมีระยะยาวกว่าและขึ้นอยู่กับวงรอบของ K segment และมุมในการใส่

อัตราการผลัดของลูกสูบแม่แรง

การหาความเร็วในการทำงานของแม่แรงจะต้องพิจารณาโดยคำนึงถึงความเร็วในการเดินหน้าชุดเจาะของหัวกดและประสิทธิภาพในการก่อสร้างที่ได้ ส่วนใหญ่แล้วแม่แรงจะทำงานในอัตรา 50-100 มิลลิเมตร/นาที เมื่อจะเพิ่มประสิทธิภาพในการก่อสร้างก็ต้องเพิ่มอัตราการดันของแม่แรงด้วยเช่นกัน

4.1.6 ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

การเลือกชุดติดตั้งผนังอุโมงค์

การเลือกชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ที่เหมาะสมในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ให้มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพต้องพิจารณาจากชนิดและขนาดของหัวชุดเจาะ ขนาดของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ระบบลำเลียงดินและวงจรในการทำงาน

ชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ใช้ในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เข้าไปในส่วนหางของหัวชุดเจาะชุดติดตั้งจึงจำเป็นต้องมีหน้าที่ในการหมุน เลื่อน เดินหน้า ถอยหลัง และการยื่นตัวจับผนังอุโมงค์เข้าและออกซึ่งใช้ระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น

ชุดติดตั้งผนังอุโมงค์นี้จะติดอยู่บนบานวงแหวนของหัวชุดเจาะนั่นเองหรือไม่เช่นนั้นก็จะติดอยู่บนชุดเกียร์พ่วงซึ่งลากตามท้าย

(1)ประเภทของชุดติดตั้ง: ชุดติดตั้ง 2 ประเภทซึ่งเหมาะสมสำหรับติดอยู่บนตัวของหัวชุดเจาะมันเอง คือแบบวงแหวนและแบบท่อกกลางซึ่งเคยใช้กันมากในประเทศญี่ปุ่น (ดังรูปที่ 4.20)



(a) แบบวงแหวน(Ring type)



(b) แบบท่อกกลาง (Hollow shaft type)

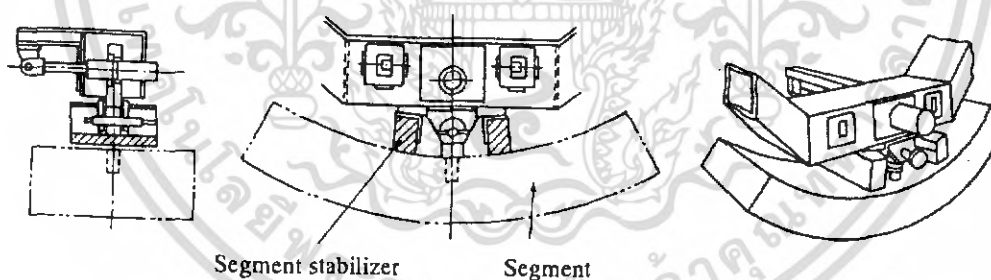
รูปที่ 4.20 ประเภทของชุดติดตั้ง

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

- a) แบบวงแหวน: ชุดติดตั้งแบบวงแหวนมีแกนซึ่งสามารถยื่นออกได้ติดอยู่บนวงแหวนกลางซึ่งรองรับอยู่บนล้อเลื่อนที่ส่วนท้ายของคานวงแหวนหรือในส่วนหางของหัวขุดเจาะติดกับหัวคดผนังอุโมงค์
- b) แบบท่อกลวง: ชุดติดตั้งแบบท่อกลวงนี้มีแกนการหมุนแนวเดียวกับแนวศูนย์กลางหัวขุดเจาะสามารถติดตั้งอุปกรณ์ขนส่งลำเลียงดินไว้ในท่อกลวงนี้ได้

(2) ตัวจับผนังอุโมงค์: กลไกการทำงานของตัวจับผนังอุโมงค์ขึ้นอยู่กับรูปร่างผนังอุโมงค์เนื่องจากกลไกการทำงานมีผลต่อประสิทธิภาพในการติดตั้งผนังอุโมงค์ ดังนั้นการเลือกตัวจับที่มีความเร็วสูงและสามารถจับยึดชิ้นส่วนได้อย่างมั่นคงปลอดภัยจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ โดยทั่วไปตัวจับที่ใช้กันเป็นแบบ Manual screws และแบบ Hydraulic jack (ดังรูปที่ 4.21)

- (3) ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์อัตโนมัติ
- ชุดประกอบแบบอัตโนมัติสามารถนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้
- a) เพิ่มความปลอดภัยในการประกอบผนังอุโมงค์
 - b) เพิ่มความเร็วในการติดตั้ง
 - c) ลดกำลังแรงงานที่ใช้
 - d) เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน



รูปที่ 4.21 ตัวจับผนังอุโมงค์

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ชุดประกอบผนังอุโมงค์อัตโนมัติประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนผนังจับยึด ชิ้นส่วนวางตำแหน่ง และชิ้นเชื่อมต่อชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ การเลือกชุดประกอบผนังอุโมงค์ให้เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างชิ้นส่วนผนัง สภาพแวดล้อมภายในอุโมงค์ ความทนทานของส่วนประกอบอุปกรณ์ต่างๆ และพื้นที่ว่างที่จำเป็นสำหรับจัดวางอุปกรณ์

กำลังความสามารถของชุดติดตั้งผนังอุโมงค์

กำลังความสามารถของชุดติดตั้งหาได้โดยพิจารณาถึงประเภทรูปร่างน้ำหนักและการควบคุมการติดตั้งผนังอุโมงค์

กำลังความสามารถของชุดติดตั้งผนังอุโมงค์มีรายละเอียดดังนี้

- 1) แรงแนวรัศมี: แรงนี้ใช้ในการจับยึดชิ้นส่วนตามแนวรัศมีติดกับผิวอุโมงค์หรือในการใส่ K-segment ในระหว่างการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์หรือการเรียงแนวชิ้นส่วนผนังที่ติดตั้งแรงนี้ต้องมีค่ามากกว่า 5 เท่าของน้ำหนักชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ใหญ่ที่สุด
- 2) แรงยก: แรงยกโดยทั่วไปคือ 1.5-2 เท่าของน้ำหนักชิ้นส่วนผนังที่ให้ที่สุด
- 3) แรงหมุน: ชุดติดตั้งต้องสามารถหมุนและหยุดอยู่กับที่ในขณะที่ทำการยึดจับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ซึ่งหนักที่สุดที่จังหวะสูงสุดได้
- 4) ความเร็วการหมุน: ความเร็วการหมุนมีแบบความเร็วสูงและต่ำ โดยทั่วไปความเร็วสูงคือ 250-400 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วต่ำคือ 10-50 มิลลิเมตร/วินาที ที่ขอบนอก
- 5) ความเร็วการยืดเข้า-ออก: ความเร็วในการยืดเข้าและออกของกระบอกไฮดรอลิกในทิศทางตามแนวรัศมี มีอัตราคือ 50-200 มิลลิเมตร/วินาที
- 6) การเคลื่อนตามแนวยาว: คือระยะทางที่ชิ้นส่วนผนังเคลื่อนที่โดยชุดติดตั้งไปตามแนวทิศทางของอุโมงค์ ส่วนใหญ่แล้ว 150-300 มิลลิเมตร
- 7) ความสามารถเพิ่มพิเศษสำหรับชุดติดตั้งผนังอุโมงค์อัตโนมัติ: ชุดติดตั้งอัตโนมัติจำเป็นต้องมีการควบคุมแรงและความเร็วข้างต้นในข้อ 1) ถึงข้อ 5)
- 8) แรงดันไฮดรอลิก: แรงดันไฮดรอลิกที่ใช้ในระบบคือ 10,000-20,000 kN/m²

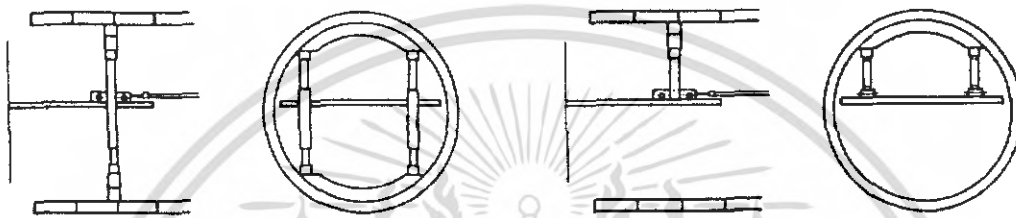
ส่วนเสริมของชุดประกอบผนังอุโมงค์

เพื่อให้การประกอบติดตั้งผนังอุโมงค์มีความถูกต้อง การใช้ส่วนเสริมของชุดประกอบผนังอุโมงค์จะมีประโยชน์อย่างยิ่งเช่น ชุดรักษารูปทรงของวงผนังอุโมงค์

นอกจากการประกอบติดตั้งผนังอุโมงค์ให้ใกล้เคียงกับรูปวงกลมแล้ว การประกอบผนังอุโมงค์ถัดมาก็อาจเกิดความยุ่งยากได้ วิธีในการทำให้การติดตั้งมีความถูกต้องมีดังนี้

- 1) วิธีการปรับให้ผนังอุโมงค์เป็นวงกลม โดยการใช้แม่แรงไฮดรอลิกยึดติดกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์(ดังรูปที่ 4.22)

- 2) วิธีการปรับให้ผนังอุโมงค์เป็นรูปร่างกลมโดยการให้มีการสัมผัสติดกับผิวด้านในของส่วนหางหัวขุดเจาะ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการตกลงของชั้นส่วนผนังได้โดยการให้ชั้นส่วนผนังส่วนนำ ติดกับผิวในของส่วนหางหัวขุดเจาะ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของส่วนหางก็จะมีผลต่อการควบคุมทิศทางของหัวขุดเจาะ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาค้นคว้าอย่างละเอียดก่อน



a) ระบบขุดออกทางแนวดิ่ง

b) ระบบขุดออกเฉพาะซีกบน

รูปที่ 4.22 ชุดรักษารูทรงของผนังอุโมงค์
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

4.1.7 ระบบไฮดรอลิก ระบบไฟฟ้า และระบบควบคุม

ระบบไฮดรอลิก

วงจรลำเลียงไฮดรอลิกจัดไว้เพื่อใช้เพิ่มเติมกับอุปกรณ์ไฮดรอลิกต่างๆ และต้องสามารถหยุดได้อย่างสมบูรณ์ปลอดภัย เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉินขึ้น อุปกรณ์ไฮดรอลิกต่างๆ ต้องพิจารณาเลือกให้เหมาะสมกับเงื่อนไขพิเศษต่างๆ ด้วย

วงจรลำเลียงไฮดรอลิกต้องจัดให้ผ่านระบบแม่แรงหัวขุดเจาะ ระบบหัวตัด และระบบชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ โดยที่กำลังของแต่ละวงจรจะจัดแยกเฉพาะหรืออาจจัดแบ่งร่วมกันระหว่างระบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ก่อสร้างทั่วไปแล้ว วงจรลำเลียงไฮดรอลิกของหัวขุดเจาะเป็นระบบที่ความจุและแรงดันสูงกว่าและจะต้องทำงานภายใต้สภาพการณ์ที่เลวร้าย ดังนั้นในการเลือกและการออกแบบอุปกรณ์จะต้องระมัดระวังและมีข้อพิจารณาดังนี้

- a) แต่ละส่วนประกอบจะต้องทำงานตามการควบคุมสั่งการและส่วนประกอบซึ่งใช้ในการบรรจุจะต้องยึดอย่างมั่นคงอยู่กับที่เมื่อเกิดการกระเทือนสั้นไหว นอกจากอุปกรณ์ต่างๆ ต้องยึดแน่นอยู่ที่ตำแหน่งหยุดนิ่งที่ถูกต้องหากำลังงานดับลงหรือเมื่อเกิดการหยุดในกรณีฉุกเฉิน
- b) การเลือกอุปกรณ์ไฮดรอลิกต้องมีความทนทานและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดเสียงดังภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความชื้นสูง เศษดิน และฝุ่นละออง
- c) น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกซึ่งกลั่นจากปิโตรเลียม เช่น JIS K 2213 turbine oil ส่วนใหญ่แล้วใช้กับอุปกรณ์ไฮดรอลิก เนื่องจากความสะอาดของน้ำมันไฮดรอลิกมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ดังนั้นจึงต้องกำจัดฝุ่นออกจากระบบท่อไฮดรอลิก
- d) ในที่ซึ่งมีการเกิดประกายไฟเกิดขึ้น ต้องทดสอบรอยรั่วของถังน้ำมันโดยการเติมน้ำลงในถังเพื่อทดสอบ

ระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าต่างๆต้องป้องกันให้อยู่ห่างจากน้ำ ความชื้น และป้องกันการสั้นสะเทือน ควรจัดวางไว้ในที่ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน ตรวจสอบ และบำรุงรักษา

เมื่อจะทำการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในอุโมงค์ซึ่งต้องมีความชื้นและการรั่วซึมของน้ำจึงต้องพิจารณาเป็นพิเศษในกรณีดังนี้

- a) มอเตอร์: สิ่งจำเป็นพื้นฐานสำหรับมอเตอร์ก็จะต้องคิดพัฒนาระบายความร้อน ซึ่งออกแบบมาสำหรับใช้งานในภาคสนามได้
- b) แผงควบคุม: แผงควบคุมมอเตอร์ บอร์ดจ่ายไฟ และแผงควบคุมไฟฟ้า ต้องสามารถทนทานต่อสภาพที่มีหยดน้ำในอุโมงค์และออกแบบมาเพื่อใช้งานในภาคสนาม ควรตั้งอยู่ในตำแหน่งซึ่งมีหยดน้ำซึมน้อยที่สุด
- c) อุปกรณ์ตรวจจับข้อผิดพลาด: อุปกรณ์ตรวจจับข้อผิดพลาดต้องหลักปฏิบัติตามมาตรฐานโครงสร้างและระเบียบความปลอดภัยของ JIS C 8371 เช่นเดียวกับข้อบังคับสุขลักษณะและความปลอดภัยในอุตสาหกรรม
- d) หากภายในอุโมงค์มีแก๊สติดไฟ เช่นมีเทน ก็จำเป็นต้องมีการวัดค่าระดับเพื่อป้องกันการปะทุระเบิดอันเกิดสภาวะความเสี่ยงจากการทำงานภายในอุโมงค์

ระบบควบคุม

ระบบควบคุมจะต้องออกแบบให้สามารถควบคุมได้ทุกส่วนของหัวขุดเจาะ ทั้งส่วนการขุดเจาะ การเดินหน้าหัวขุด การลำเรียงดิน การติดตั้งผนังอุโมงค์ และส่วนอื่นๆให้ทำงานกันอย่างสมดุล อีกทั้งต้องสามารถจัดการกับการดำเนินงานที่ผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

ในการออกแบบระบบการทำงานของส่วนการขุดเจาะ การเดินหน้าขุด การลำเรียงดิน การติดตั้งผนังอุโมงค์ และส่วนอื่นๆนั้น ต้องพิจารณาถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยและการใช้งานดังนี้

- a) ต้องสามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพการดำเนินงานในแต่ละส่วนได้อยู่เสมอและข้อมูลการปฏิบัติงานที่บ่งชี้พร้อมต้องง่ายต่อการอ่านผล
- b) ต้องจัดให้มีการเชื่อมต่อและสัญญาณเตือนเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับส่วนต่างๆในกรณีที่เกิดการดำเนินงานผิดพลาด
- c) ในสถานการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับหรือในกรณีฉุกเฉินนั้น แต่ละส่วนต้องพร้อมต่อการหยุดการทำงานและอยู่ในสถานะที่มีความปลอดภัยได้

4.1.8 หน่วยเสริม

หน่วยควบคุมทิศทาง

ต้องสามารถควบคุมทิศทางการทำงานของหัวขุดเจาะได้ ตามสภาพดิน แนวอุโมงค์ และประเภทของหัวขุดเจาะได้อย่างเหมาะสม

หน่วยควบคุมทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาทิศทางการทำงานของหัวขุดเจาะ เช่นการเดินหน้าหัวขุดเจาะตามแนวอุโมงค์ที่ได้วางไว้อย่างถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อทำการขุดเจาะตามแนวโค้งและเนินลาด หน่วยควบคุมทิศทางนี้จะนำมาใช้งานก็ต่อเมื่อไม่สามารถควบคุมทิศทางได้โดยการใช้แม่แรงหัวขุดเจาะเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ในการออกแบบหน่วยควบคุมทิศทาง ต้องพิจารณาเพิ่มเติมถึงจุดศูนย์ถ่วงและแรงแรงลอยตัวด้วย ดังนี้

(1) หน่วยควบคุมทิศทาง ต้องมีรูปร่างและความแข็งแรงเหมาะสม ทนทานต่อแรงจุดของดินเมื่อเดินหน้าการขุดเจาะ ความแข็งแรงของส่วนประกอบต่างๆของหัวขุดเจาะ ซึ่งอยู่ติดกับหน่วยควบคุมทิศทาง เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

(2) ประเภท รูปร่าง จำนวน และตำแหน่งของหน่วยควบคุมนี้ ต้องทำการพิจารณา โดยขึ้นอยู่กับแนวของอุโมงค์ ความแข็งแรงของชั้นดิน และประเภทของหัวขุดเจาะ ให้มีความเหมาะสม

ระบบควบคุมทิศทางประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1) หน่วยขุดเจาะเสริม : หน่วยขุดเจาะเสริมจะทำหน้าที่ ขุดอุโมงค์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดหัวขุดเจาะ โดยที่ Over cutter และ Copy cutter จะสัมผัสติดกับหัวตัดของหัวขุดเจาะทั้งแบบแรงดันดินสมดุล แบบSlurry และหัวเจาะแบบ Mechanical excavation การขุดเจาะเสริมจะช่วยให้การลดแรงฉุดลากของดินและเพิ่มความง่ายในการควบคุมทิศทาง

2) ตัวปรับเสถียรภาพ : ปีกที่ยื่นออกจากหัวขุดเจาะในทิศทางการเดินหน้าขุดเจาะนั้น จะช่วยเพิ่มแรงกดและป้องกันการเลี้ยวหมุนของหัวขุดเจาะ ซึ่งหากปีกเหล่านี้เอียงจะทำให้เกิดแรงหมุนขึ้นได้

3) แผ่นการต้านทาน : แผ่นการต้านทานจะยื่นออกจากหัวขุดเจาะด้วยมุมที่ถูกต้องตามทิศทางการเดินขุดเจาะ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มแรงกดของดินและช่วยควบคุมทิศทางการขุดเจาะ

4) หางเสือ : ปีกหางเสือจะยึดอยู่คงที่ ที่ท้ายของหัวขุดเจาะ เพื่อป้องกันการทรุดตัว และช่วยให้ทิศทางการขุดเจาะมีความถูกต้อง

5) ที่จับยึด : ที่จับยึดจะเกิดแรงต้านทานผนังอุโมงค์ เป็นแรงปฏิกิริยาที่ใช้ควบคุมทิศทางการขุดเจาะอุโมงค์

ส่วนข้อต่อ

ส่วนข้อต่อต้องอยู่ในสภาพที่ดีและเหมาะสมกับแนวอุโมงค์ สภาพดิน และประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์

เมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ตามแนวโค้ง จำเป็นต้องเตรียมส่วนข้อต่อของหัวขุดเจาะให้พร้อม ส่วนข้อต่อนี้ทำหน้าที่เชื่อมสองส่วน คือส่วนหน้าและส่วนท้ายของหัวขุดเจาะเข้าไว้ด้วยกัน และยอมให้สามารถปรับมุมมองได้ ทั้งนี้วัตถุประสงค์ก็เพื่อลดปริมาณการขุดเจาะเสริมที่จำเป็นในการขุดเจาะตามแนวโค้ง และปรับส่วนประกอบที่ใช้ในการผลักดันหัวขุดเจาะให้เหมาะสมต่อการเลี้ยว

การเลือกส่วนข้อต่อต้องพิจารณาเป็นพิเศษในประเด็นต่อไปนี้

- (1) ความแน่นของการอุดกันการรั่วซึมของน้ำทั้งสองฝั่ง
- (2) การเอียงศูนย์ระหว่างแม่แรงหัวขุดเจาะ กับแนวศูนย์กลางของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์
เมื่อมีการเบี่ยงเบนหัวขุดเจาะที่จุดข้อต่อ
- (3) สิ่งกีดขวางที่ Screw conveyor หรือท่อขนถ่ายลำเลียงดินภายในหัวขุดเจาะ

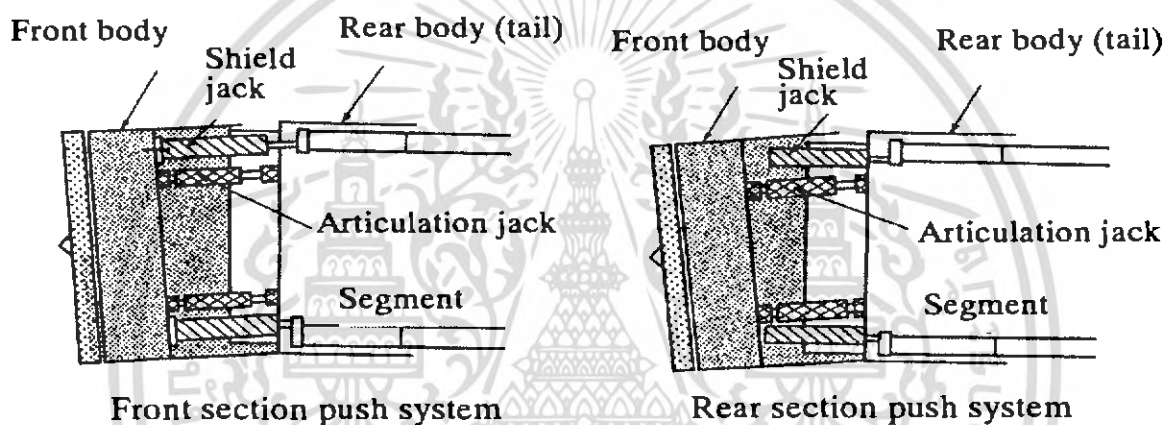
1) ประเภทของส่วนข้อต่อ : ส่วนข้อต่อมีสองประเภท คือ แบบติดกับแม่แรงหัวชุดเจาะซึ่งผลึกจากส่วนหน้า และแบบติดกับแม่แรงซึ่งผลึกออกจากส่วนท้าย

2) กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ : กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อมีสองรูปแบบ คือ

X-Articulation mechanism มีข้อหมุนที่จุดตัด

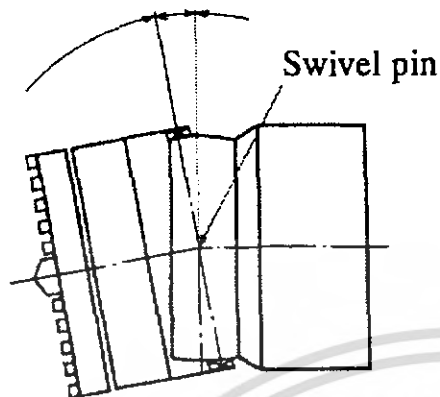
V-Articulation mechanism ไม่มีข้อหมุนที่จุดตัด

3) กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อเสริม : เพื่อช่วยลดการต้านทานของดินและลดความจำเป็นในการชุดเจาะเสริม อาจจะต้องมีกลไกการทำงานของหัวตัดให้สามารถถอดเปลี่ยนได้ หรือกลไกที่ยอมให้มีการเลื่อนหรือการเอียงของหัวตัดซึ่งเอียงไปทางรัศมีวงในของอุโมงค์ตามแนวโค้ง



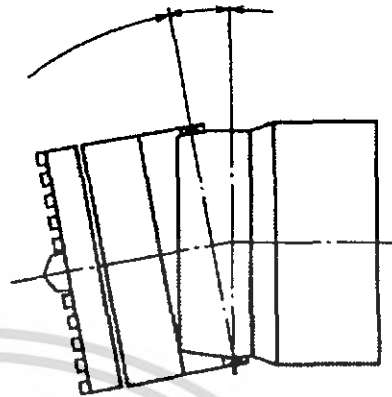
รูปที่ 4.23 ประเภทของส่วนข้อต่อ
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

Articulation angle θ



X-articulation mechanism
(with swivel pin)

Articulation angle θ



V-articulation mechanism
(with no swivel pin)

รูปที่ 4.24 กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

อุปกรณ์งานสำรวจ

อุปกรณ์การสำรวจต้องสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมและมีความถูกต้องแม่นยำภายใต้สภาพแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันสูงในอุโมงค์ใต้ดิน

อุปกรณ์การสำรวจต้องเลือกให้มีความเหมาะสมกับหัวขุดเจาะ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมแนวทางของอุโมงค์ อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้มีดังนี้

- 1) อุปกรณ์ควบคุมการกำหนดระดับ : Shield jack stroke meter, U-tube, Plum bob และ Inclinator
- 2) อุปกรณ์ควบคุมการเอียงและการหันเห : Shield jack stroke meter, Gyro compass
- 3) อุปกรณ์ควบคุมการหมุน : U-tube, Plumb bob และ Inclinator

สำหรับการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของหัวขุดเจาะอัตโนมัติ ใช้เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์และ Gyro compass

หน่วยฉีดอัดปูนเหลว

หน่วยฉีดอัดปูนเหลวต้องสามารถอัดฉีดปูนให้อุดเต็มช่องว่างในส่วนหางของหัวชุดเจาะ อีกทั้งต้องมีความสะดวกในการดูแลรักษา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเลือกวัสดุ วิธีการอัดฉีด และปริมาณการอัดฉีดที่เหมาะสม

การอัดฉีดปูนเหลวจำเป็นต้องทำการติดตั้งท่อลำเลียงที่ส่วนหางหัวชุดเจาะ หน่วยอัดฉีดต้องสามารถอัดฉีดปูนเหลวได้อย่างต่อเนื่อง ท่ออัดฉีดต้องมีขนาดที่เหมาะสมและอยู่ในตำแหน่งที่ไม่กระทบต่อดินรอบอุโมงค์ และทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ

ควรพิจารณาถึงการป้องกันน้ำและดินไหลย้อนกลับเข้าสู่ท่ออัดฉีดเมื่อทำการฉีดอัดปูนเหลว ยิ่งไปกว่านั้นควรเตรียมการต่างๆ ให้พร้อมสำหรับการเคลื่อนที่ของปูนเหลว ซึ่งอาจเกิดการแข็งตัวในท่อ

เกียร์พวง

เกียร์พวงซึ่งลากตามท้ายหัวชุดเจาะ ใช้สำหรับเคลื่อนอุปกรณ์ในการขับหัวชุดเจาะ และเพื่อการบรรจุจัดเก็บวัสดุเพิ่มไว้ในนั่งร้าน

เกียร์พวงทำหน้าที่ในการลากห้องพักพนักงาน หน่วยไฮดรอลิกและหน่วยไฟฟ้า ซึ่งไม่สามารถตั้งอยู่ในหัวชุดเจาะได้ด้วยตัวของมันเอง เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวชุดเจาะเช่นเดียวกับอุปกรณ์การลำเลียงดิน อุปกรณ์อัดฉีดปูนเหลว และเครื่องจับยึดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

ต้องทำการจัดพื้นที่ว่างในการทำงานให้เหมาะสมไว้ในอุโมงค์ และรูปแบบของเกียร์พวงต้องพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้

- 1) การบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆบนเกียร์พวง
- 2) การลำเลียงดินที่ขุดและเคลื่อนย้ายผนังอุโมงค์
- 3) ความจำเป็นสำหรับนั่งร้าน

มาตรการในการจัดการความปลอดภัยเป็นสิ่งจำเป็นอีกประการเพราะเป็นการยากที่จะมีเส้นทางฉุกเฉินในอุโมงค์ใต้ดิน มาตรการเหล่านี้ เช่น การติดตั้งรถเลื่อนใช้มือโยก เพื่อเป็นการป้องกันในกรณีที่มีการบาดเจ็บ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุโมงค์ขนาดใหญ่

เกียร์พวงที่ใช้กันมีสองประเภท แบ่งตามรูปแบบของหน้าตัด คือ แบบโครง และแบบด้านเดียว การเลือกประเภทให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดอุโมงค์และเงื่อนไขในการก่อสร้าง

โดยทั่วไปจะคิดรางไว้สำหรับเกียร์พ่วง หรืออาจจะวางรางอยู่บนฐานรองรับให้พอดีกับชิ้นส่วนหนึ่งอุโมงค์ รถลากจะเคลื่อนโดยการลากจูงหรือเคลื่อนได้ด้วยตัวของมันเอง ก่อนหน้านี้จะเป็นการเชื่อมติดไว้กับหัวขุดเจาะโดยใช้ท่อนเหล็กและเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวขุดเจาะ แต่ต่อมาเป็นการเคลื่อนที่ด้วยตัวของมันเอง เดินตามหัวขุดเจาะในการออกแบบลักษณะรูปร่างของเกียร์พ่วงนั้นต้องพิจารณาในประเด็นด้านความปลอดภัย ตามสภาพในการก่อสร้างด้วย ได้แก่ การจัดช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์กับเกียร์พ่วงให้เหมาะสม เมื่อทำการขุดเจาะในช่วงที่โค้งมากๆ การป้องกันเกียร์พ่วงจากการล้มคว่ำหรือการตกรางและการป้องกันจากการที่ไม่สามารถควบคุมได้ เมื่ออยู่บนเนินที่ลาดเอียงมากเกินไป

ระบบน้ำมันหล่อลื่น

ระบบน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมต้องแน่ใจได้ว่าจะช่วยให้ Cutter bearing , Cutter bearing seal , Reduction gears, Agitator, Screw conveyor และหน่วยเชื่อมต่อต่างๆ สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์

ต้องมีการจัดเตรียมระบบน้ำมันหล่อลื่นไว้อย่างเพียงพอ สำหรับการทำงานของ Cutter bearing, Cutter bearing seal, Reduction gears, Agitator, Screw conveyor และหน่วยเชื่อมต่อต่างๆ การที่หน่วยต่างๆ เหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับการเติมน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณตามข้อกำหนดของวิธีการเติม ตามหลักการแล้วระบบน้ำมันหล่อลื่นต้องควบคุมเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของวงจรการทำงานของหัวขุดเจาะ

4.1.9 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ Earth Pressure Balance (EPB)

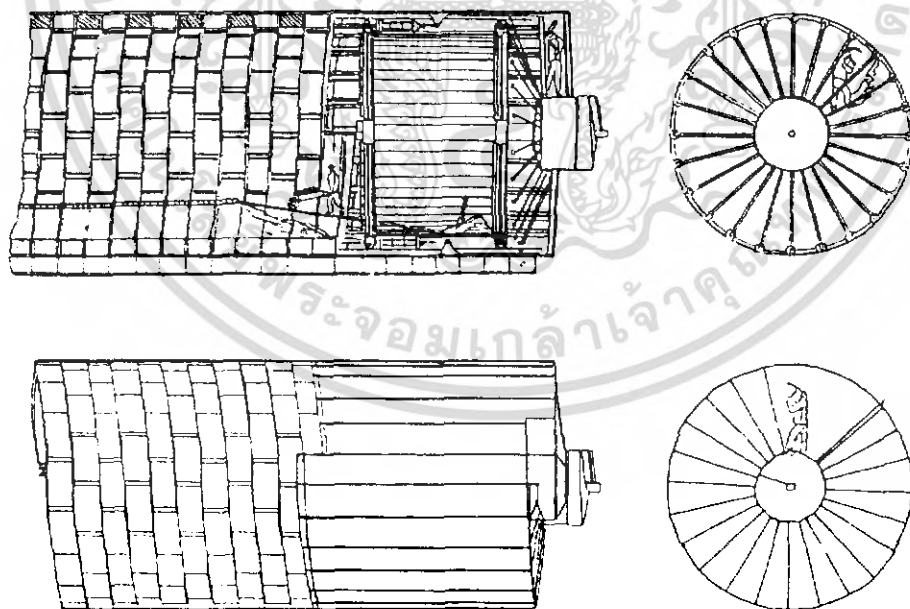
1. พัฒนาการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ

จากความหมายของ Shield ที่แปลว่าเกราะป้องกัน ในที่นี้ หัวเจาะ หรือ Shield ซึ่งได้ถูกติดตั้งไว้ภายในบริเวณที่มีการขุดเจาะอุโมงค์ ได้ทำหน้าที่ในการป้องกันการยุบตัวของผนังหรือด้านบนของส่วนที่หัวเจาะได้ติดตั้งอยู่นั้นของอุโมงค์ซึ่งเพิ่งได้ถูกขุดเจาะขึ้น และไม่ได้มีเครื่องมืออื่นใดที่ช่วยในการค้ำยันได้ถูกติดตั้งภายในอุโมงค์ เมื่ออุโมงค์ถูกขุดเจาะในดินที่มีเสถียรภาพ จะเห็นได้ชัดว่า ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้หัวเจาะอุโมงค์ อย่างไรก็ตาม ความสำคัญของหัวเจาะไม่ได้มีอยู่เพียงแต่การช่วยในการค้ำยันตัวอุโมงค์เพียงเท่านั้นแต่มันยังเป็นเครื่องมือในการขุดเจาะอุโมงค์ให้ยาวออกไปอีกด้วย ดังนั้น เมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่มีสภาพดี จึงเป็นธรรมดาที่จะมีการใช้หัวเจาะแบบง่ายๆ ด้วย ยกตัวอย่างเช่น หัวเจาะช่วยทำให้มีที่ปักสำหรับ สิ่งก่อสร้างส่วนต่างๆ หน่วยที่ทำการทั้งดิน อุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการฉาบ เป็นต้น หัวเจาะยังทำให้มีสะพานระหว่างแนวอุโมงค์ที่สร้างขึ้นมาและด้านหน้าของอุโมงค์จึงส่งผลให้การขุดเจาะตัวอุโมงค์ให้ยาวออกไปและการขุดดินที่ส่วนหน้านั้นอาจจะถูกทำขึ้นได้อย่างต่อเนื่องไปพร้อมๆ กัน

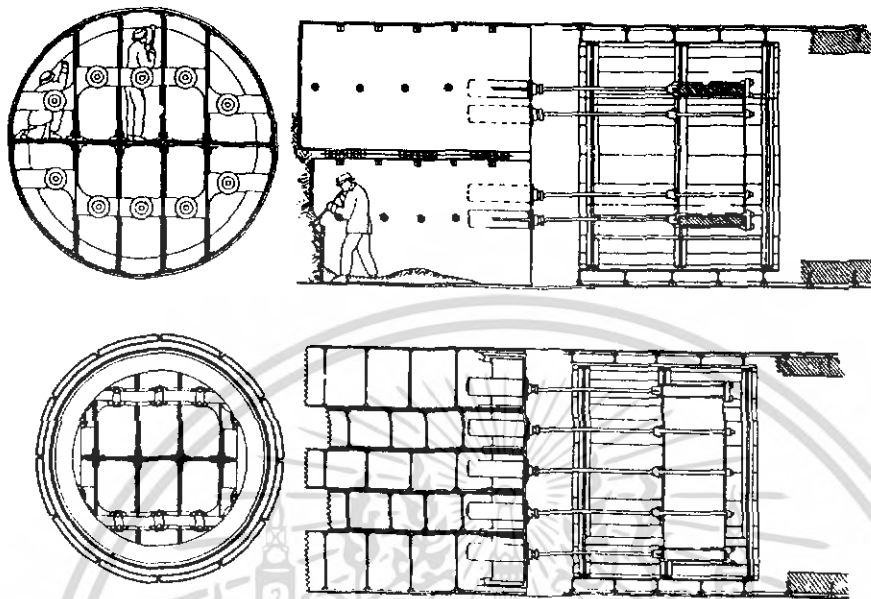
การใช้หัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์เริ่มจากหัวเจาะสำหรับดินอ่อนที่พัฒนาขึ้นโดย Marc Isambard Brunel ในประเทศอังกฤษ โดย Brunel ได้คิดค้นหัวเจาะวงกลม 2 ชนิดสำหรับมาเอามาใช้งาน ซึ่งได้จดลิขสิทธิ์ไว้ในปี 1818 หัวเจาะประกอบด้วย หลายส่วนที่แตกต่างกัน ในแต่ละส่วนนี้ คนงานหนึ่งคนสามารถทำงานได้อย่างอิสระและปลอดภัย หัวเจาะประเภทแรก คือ 'screw shield' ซึ่งผิวของหัวเจาะทั้งหมดถูกดันไปข้างหน้าโดยอาศัย แม่แรงไฮดรอลิก (ดังรูปที่ 4.25) หัวเจาะชนิดนี้เรียกได้ว่าเป็นต้นแบบ ของ หัวเจาะ Earth Pressure Balance ในปัจจุบัน หัวเจาะประเภทที่สอง Brunel แบ่งหัวเจาะเป็นส่วนเล็กๆ ซึ่งสามารถถูกทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยแม่แรง ในขณะที่คนงานในแต่ละส่วนย่อยๆ (cell) ภายในหัวเจาะเอาดินออกด้านเหนือหัวเจาะ แต่ละส่วนย่อยๆ สามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน (ดังรูปที่ 4.26) หลังจากที่มีการขุดเจาะในแต่ละรอบได้เสร็จสิ้นลง thrust jack ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่ด้านหลังของหัวเจาะก็จะปฏิบัติหน้าที่ต่อแนวอุโมงค์ที่สร้างขึ้นใหม่หรือ ต่อกับวงแหวนของแม่แรงผลัก และทำให้หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า ด้วยกันกับด้านหน้าของหัวเจาะทั้งหมดและอุปกรณ์ที่ช่วยในการวางแผนการขุดเจาะ

โครงการการขุดเจาะอุโมงค์ใต้แม่น้ำเทมส์ในลอนดอนช่วยให้ Brunel ได้เข้าใจหลักการดังกล่าว หัวเจาะแบบ Brunel ทำขึ้นมาจาก เหล็กดังรูปที่ 4.27 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและประกอบไปด้วย ช่องที่ติดกันจำนวน 12 ช่อง แต่ละช่องมีความกว้างประมาณ 1 เมตรซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ ได้แก่ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง แต่ละช่องจะอยู่บนขาที่หมุน

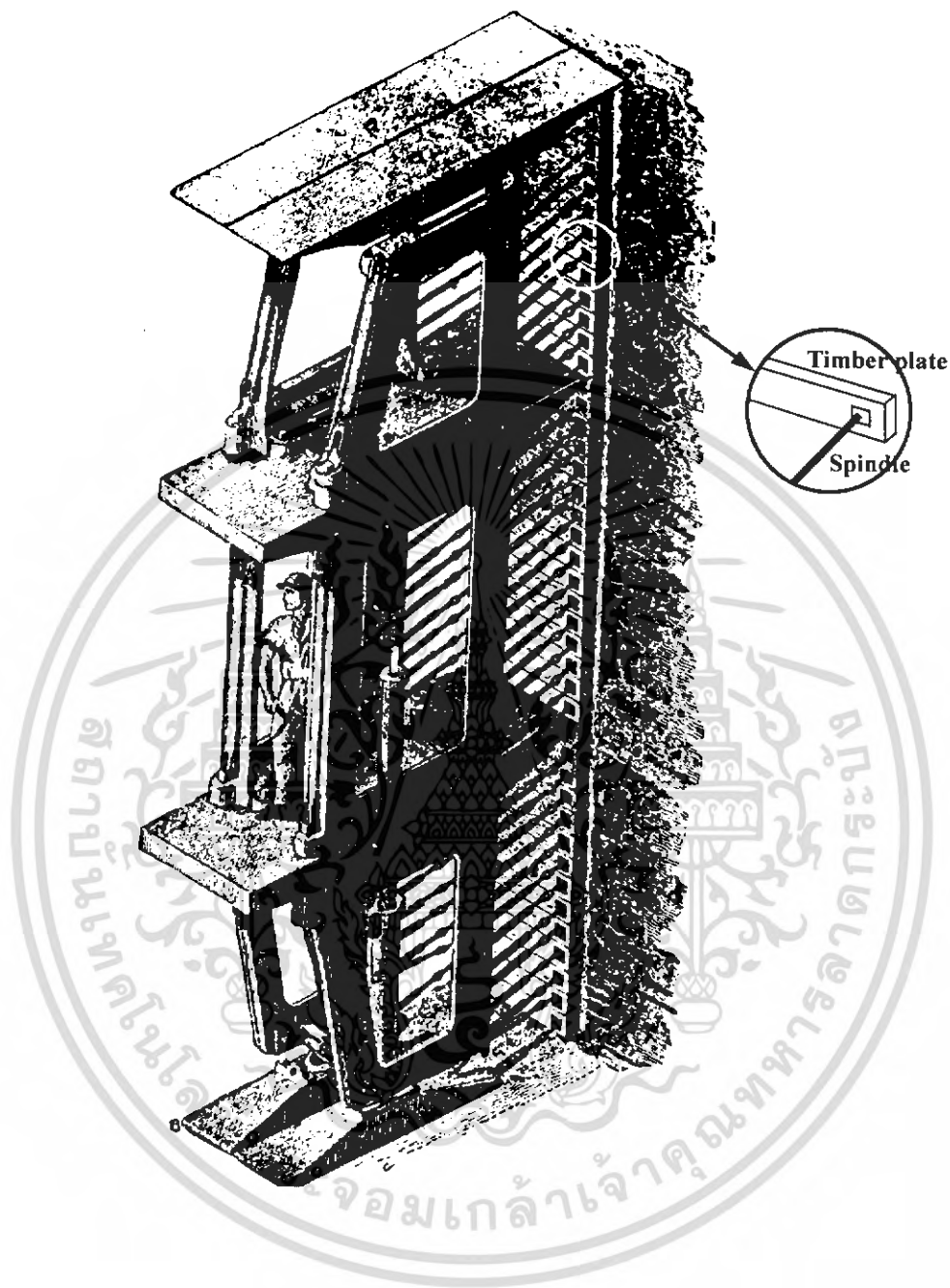
ได้ 2 อันที่ติดอยู่ด้วยลูกบอลที่ยึดอยู่กับพื้นแบนๆ 2 อัน แต่ละส่วนจะมีคนงานหนึ่งคน ดังนั้น คนงานทั้งหมดจึงเป็น 36 คน หัวเจาะจะทำงานไปตามแบบดังกล่าว คือ เริ่มจาก แผ่นไม้จะถูกดันเข้าไปในดิน โดยอาศัยเพลาหมุน (ดังรูปที่ 4.27) ในแต่ละครั้งเมื่อแผ่นไม้ถอนตัวจากดิน ดินจะถูกขุดออกประมาณ 6 นิ้ว จากนั้นแผ่นไม้ก็จะถูกติดตั้งกลับเข้าที่เดิมและยึดอยู่ด้วยเพลาหมุน อิฐจะถูกก่อไว้ด้านหลังของหัวเจาะและทำหน้าที่เป็นที่ค้ำสำหรับช่องทั้งหมด กระบวนการทั้งหมดนี้ก็คือหนึ่งรอบของการขุดเจาะ อุโมงค์นี้เริ่มค้นขุดเจาะในปี 1825 และสำเร็จลงอย่างยากเย็นในปี 1843 ภายหลังจากที่ผ่านน้ำท่วมรุนแรงไปถึง 5 ครั้ง ในปี 1869 James Henry Greathead ขุดอุโมงค์ได้แม่น้ำเทมส์โดยใช้หัวเจาะแบบ circular สำหรับในตอนแรก แนวอุโมงค์หลักส่วนต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ หัวเจาะ Greathead 's circular ได้เป็นต้นแบบของหัวเจาะแบบเปิดซึ่งพัฒนาขึ้นมาในภายหลัง หัวเจาะมีลักษณะเป็นเครื่องทรงกลมที่หมุนหัวใบพัดที่ประกอบไปด้วยหลายใบพัดประกบกัน ในปี 1959 ได้นำเอาน้ำเป็นตัวค้ำด้านหน้าอุโมงค์สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ที่ระบายน้ำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.35 เมตรในประเทศเยอรมนี ในปี 1967 หัวเจาะแบบ slurry ที่ประกอบด้วยวงล้อสำหรับตัดและระบบกำจัดดินแบบไฮดรอลิก ได้ถูกใช้ในประเทศญี่ปุ่น สำหรับหัวเจาะ แบบ Earth Pressure Balance (EPB) ได้ถูกเริ่มใช้ในปี 1966 ในประเทศญี่ปุ่นเช่นเดียวกัน รายละเอียดของพัฒนาการต่างๆ ของหัวเจาะเหล่านี้สามารถพบได้ในการศึกษาของ Stack (1982) และ Maidel et al.(1996)



รูปที่ 4.25 Marc Brunel's "screw" shield (1818)



รูปที่ 4.26 Marc Brunel's "compartiment" shield (1818)



รูปที่ 4.27 Marc Brunel's shield สำหรับอุโมงค์ใต้แม่น้ำเทมส์ ตอนใต้ของอังกฤษ (1825-1843)

2. หัวเจาะชนิดต่างๆ

หลักการทั่วๆ ไปของหัวเจาะมีพื้นฐานมาจาก เหล็กทรงกระบอกที่ประกอบขึ้นมา และดันไปข้างหน้าตามแนวแกนอุโมงค์ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่ขุดดินออกไปด้วย หัวเจาะป้องกัน ช่องว่างที่ถูกขุดออกจนกระทั่งแนวอุโมงค์ขุดขึ้นต้นหรือปลายของแนวอุโมงค์ได้ถูกติดตั้งขึ้น หัวเจาะ จะต้องทนทานต่อความดันของดินรอบๆ และป้องกันการไหลของน้ำใต้ดิน ในขณะที่ช่องว่างเหนือหัว เจาะจะถูกยึดอยู่ด้วยตัวหัวเจาะ การวัดค่าเพื่อป้องกันปากอุโมงค์ จะต้องถูกทำขึ้นขึ้นอยู่กับสภาพดิน และน้ำ ในรูปที่ 4.28 การวัดค่า 5 ชนิดที่แตกต่างกันสำหรับรักษาสถียรภาพของปากอุโมงค์ได้ถูกทำ อธิบายไว้ วิธีการนี้เป็นประโยชน์ข้อใหญ่สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ ที่ช่วยให้ดินสามารถ ถูกรักษาสภาพไว้ตลอดการขุดเจาะ

นอกจากวิธีการที่เฉพาะในการถ้ำจนตัวอุโมงค์แล้ว วิธีการการขุดเอาดินออกยังเป็น ปัจจัยสำคัญของหัวเจาะ การขุดเจาะแบบใช้มือ เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดและใช้ในกรณีที่พิเศษ เช่น การขุด เจาะในระยะสั้นๆ ภายใต้สภาพทางธรณีวิทยาที่เฉพาะเท่านั้น อย่างไรก็ตาม วิธีปกติก็คือการใช้เครื่องมือ ในการขุดเจาะซึ่งแบ่งออกเป็น การขุดเจาะแบบ Partial-face และ full-face หัวเจาะแบบ Partial-face ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 (เช่น ที่แบ่งเป็น หัวเจาะแบบ partially open ในตารางที่ 4.2) อุปกรณ์ เช่น เครื่องมือขุดเจาะและใบพัดแบบพิเศษ ได้ถูกนำมาใช้ มันถูกนำและควบคุมโดยการควบคุมด้วยคน หรือแบบอัตโนมัติ การขุดเจาะแบบ full-face (เช่น หัวเจาะแบบ close-face ในตารางที่ 4.2) ซึ่ง ขึ้นกับสภาพของดินที่ทำการขุดเจาะ จะดำเนินการเกิดขึ้นโดย spoke wheel, rim wheel หรือหัว ใบพัดแบบปิดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.31 ถึง รูปที่ 4.34

หัวเจาะแบบ Open-face เป็นหัวเจาะที่ปราศจากระบบที่มีการให้ความดันที่ปาก อุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 4.30 โดยปกติแล้ว หัวเจาะแบบ open-face จะถูกใช้ในดินที่ไม่มีน้ำใต้ดินหรือ ในดินน้ำในดินมีระดับต่ำไว้ก่อน ในกรณีที่การสนับสนุนที่ปากอุโมงค์เพื่อต้านกับแรงดันจากพื้นดิน เป็นที่ต้องการ ก็จะทำให้ได้โดยอาศัยวิธีทางกล (ดังรูปที่ 4.28b) ถ้าหากหัวเจาะทำงานอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า ระดับน้ำ เพื่อเป็นการป้องกันการไหลเข้าของดิน แรงอัดอากาศจะถูกนำมาใช้ หัวเจาะแบบใช้แรงอัด อากาศ (Compressed air shield, ดังรูปที่ 4.28c ถึง 4.31) สามารถนำมาใช้ได้เช่นเดียวกับ หัวเจาะ แบบ partial-face และ full-face อากาศที่ถูกให้สำหรับป้องกันเป็นที่ต้องการเนื่องมาจากการหยุด กะทันหันอาจจะนำไปสู่การไหลของน้ำเข้าสู่หัวเจาะและตัวอุโมงค์รวมไปถึงช่องใต้อากาศที่ถูกอัดเป็น ที่ต้องการที่จะให้อากาศไม่สามารถผ่านได้

ปากอุโมงค์สามารถค้ำยันโดยแรงดันจากโคลนในหัวเจาะแบบ Slurry (ดังรูปที่ 4.28d และ 4.32) สิ่งที่ใช้ในค้ำยันของปากอุโมงค์ในหัวเจาะแบบ Slurry จะเป็นของเหลวที่มีแรงเสียด

ทานน้อย ประกอบไปด้วยน้ำและองค์ประกอบเสริมซึ่งสามารถก่อตัวเป็นชั้นที่ไม่สามารถผ่านเข้าได้ที่บริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและดิน ชั้นนี้จะส่งผ่านแรงดันของของเหลวที่ใช้ลำเลียงไปยังปากอุโมงค์ Bentonite เป็นสารที่ใช้ทั่วไปที่เพิ่มเข้าไปในโคลน ในหัวเจาะแบบ EPB (รูปที่ 4.33) องค์ประกอบของดินเองจะช่วยก้ำกั้นปากอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 4.28e แรงดันภายในช่องดินจำเป็นที่จะต้องถูกรักษาให้เท่ากับแรงดันดินที่กระทำต่อด้านหน้าของหัวเจาะ

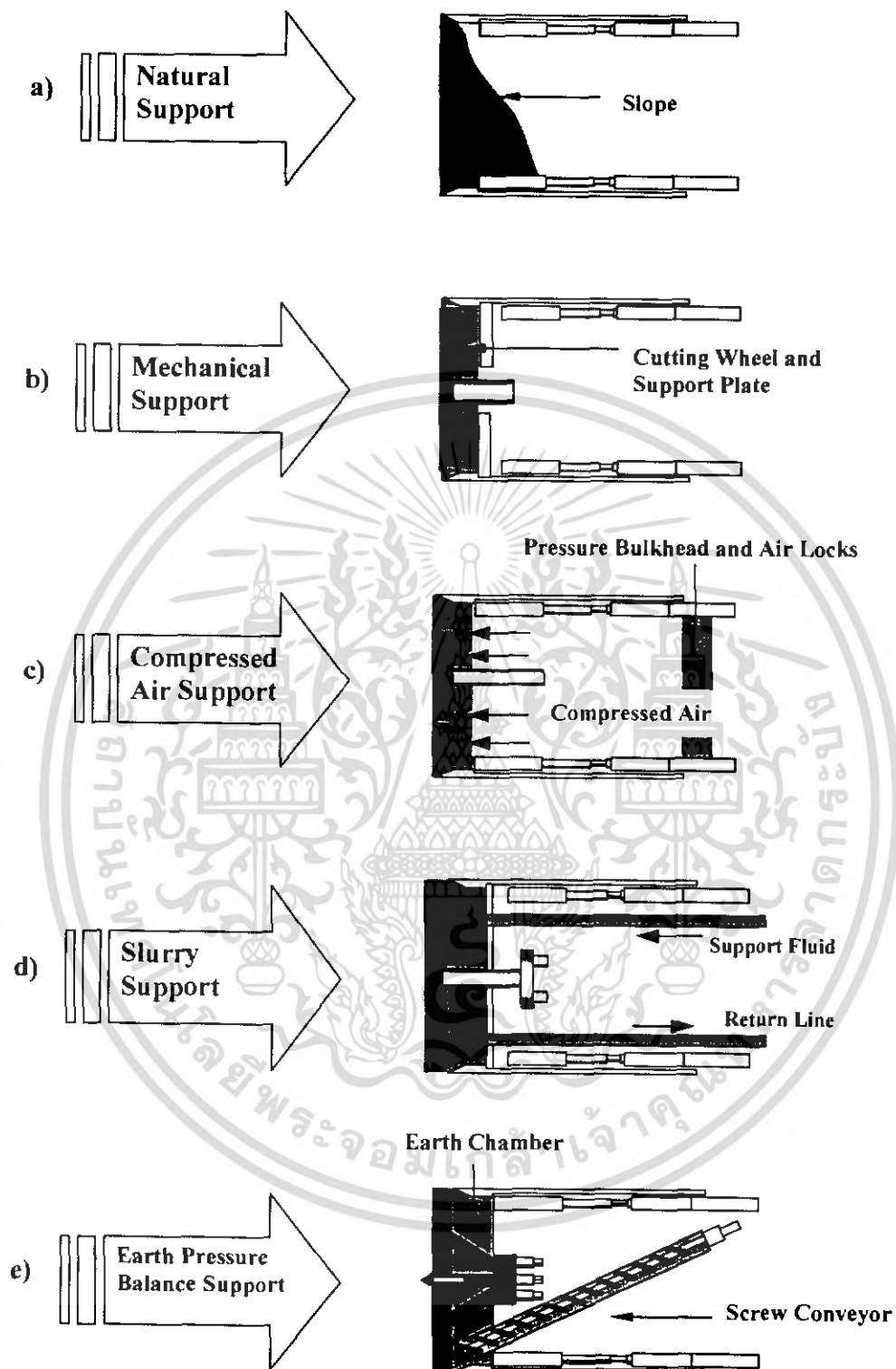
เนื่องจากลักษณะทางธรณีที่พิเศษและสภาพที่เป็น Hydro-geological บางครั้งจึงไม่สามารถที่จะขุดเจาะเส้นทางอุโมงค์ทั้งหมดได้ด้วยเครื่องมือในการขุดเจาะเพียงอันเดียว สำหรับเหตุผลนี้ หัวเจาะแบบผสม (ดังรูปที่ 4.34) ได้ถูกพัฒนาขึ้นซึ่งสามารถทำงานได้กับรูปแบบทางธรณีที่เปลี่ยนแปลงไป หัวเจาะแบบ Slurry, EPB และแบบผสมถูกจัดออกเป็นหัวเจาะแบบ close-face (ดังตารางที่ 4.2) หัวเจาะแบบผสมจะเป็นแบบผลัดกันแสดงไว้ในรูปที่ 4.35 หัวเจาะมักจะถูกใช้ในกรณีที่ตั้งสภาพดินมีลักษณะผสมและมีความเหนียวต่ำและมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างเป็นพลาสติกมากเนื่องจากดินสามารถถูกบีบอัดไปสู่ด้านในอุโมงค์ทางช่องเปิดต่างๆ ด้านหน้า

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โครงการการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนจำนวนมากได้พัฒนาเทคนิคของหัวเจาะแบบ EPB และ Slurry หัวเจาะแบบ EPB มักจะถูกพิจารณาว่าเหมาะสมต่อดินเหนียวหรือดินแข็งซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางที่เป็นก้อนหินใหญ่หรือก้อนกรวด และในที่ซึ่งน้ำเหนือปากอุโมงค์ไม่สูงมากนัก ในอีกทางหนึ่ง ดินยังมีลักษณะผสมผสานและค่อนข้างมากเท่าใด ความสำเร็จของเทคนิคก็มีมากขึ้นเท่านั้น ถึงแม้ว่าหัวเจาะแบบ EPB จะสามารถที่จะทำงานได้ในดินที่มีสภาพเป็นดินทราย นี่อาจจะเป็นปัญหา ในทางตรงกันข้าม วิธีการของหัวเจาะแบบ Slurry จะเหมาะสมสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่ไม่มีสภาพเหนียว

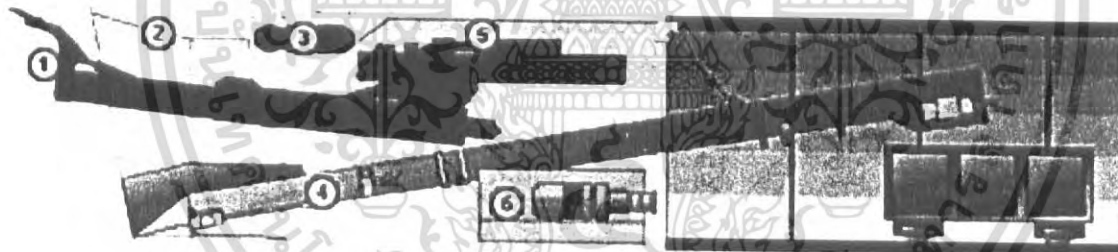
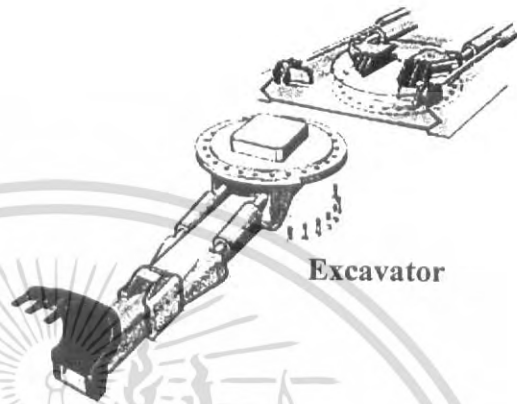
ตารางที่ 4.2 การแบ่งประเภทของหัวขุดเจาะแบบ Shield

Shield	Face	Machine Type	Stabilization of Cutting Face	Excavating Method
	Fully Open	Manual	Hood + Earth Retaining Jack	Hand
		Semi-Mechanical	Hood + Earth Retaining Jack	Back Hoe, etc.
		Mechanical	Cutter Disk or Spoke	Revolving Cutter
	Partially Open	Partial Face Extraction	Hood	Excavation shovel, bucket tooth
		Blind	Steel Bulkhead with slit	Extrusion
	Closed	Earth Pressure Balance (EPB)	Dug Soil + Cutter Disk or Spoke + (additive)	Revolving Cutter
		Slurry	Slurry + Cutter Disk or Spoke	Revolving Cutter
		Mixed	Slurry + EPB	Revolving Cutter

สำหรับการเอาดินที่ขุดเจาะออกนั้น ระบบการขนส่งที่พิเศษจะจำเป็นต่อการขนย้ายดินผ่านหัวเจาะไปสู่ผิวหน้า ระบบที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องถูกเลือกจากชนิดของดินที่คาดเอาไว้ วิธีการขุดเจาะที่จะเกิดขึ้น วิธีการลำเลียงอุโมงค์ การตัดสินใจนี้จะผลโดยตรงต่อระบบการขนย้ายดินที่ถูกขุดซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

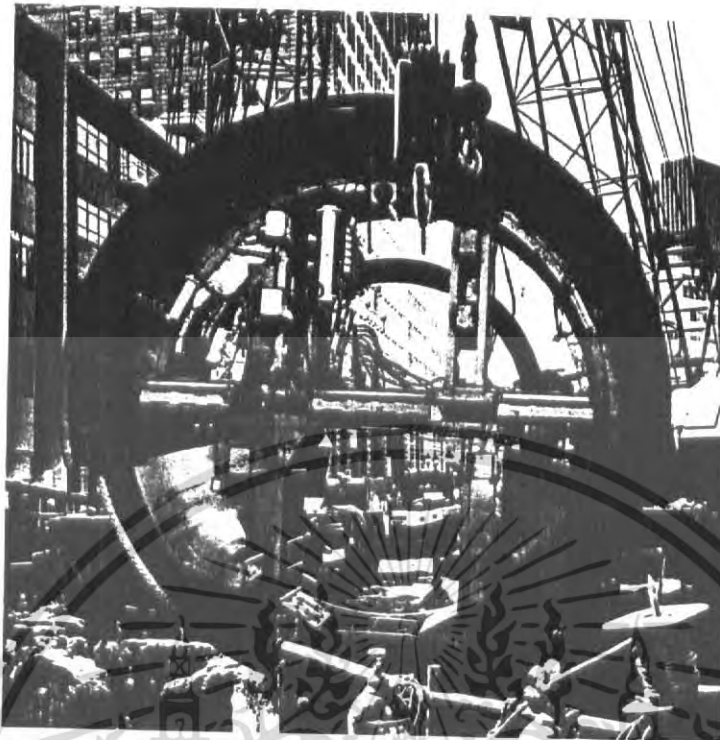


รูปที่ 4.28 การค้ำยันผิวหน้าด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (after Maidl et al., 1996)

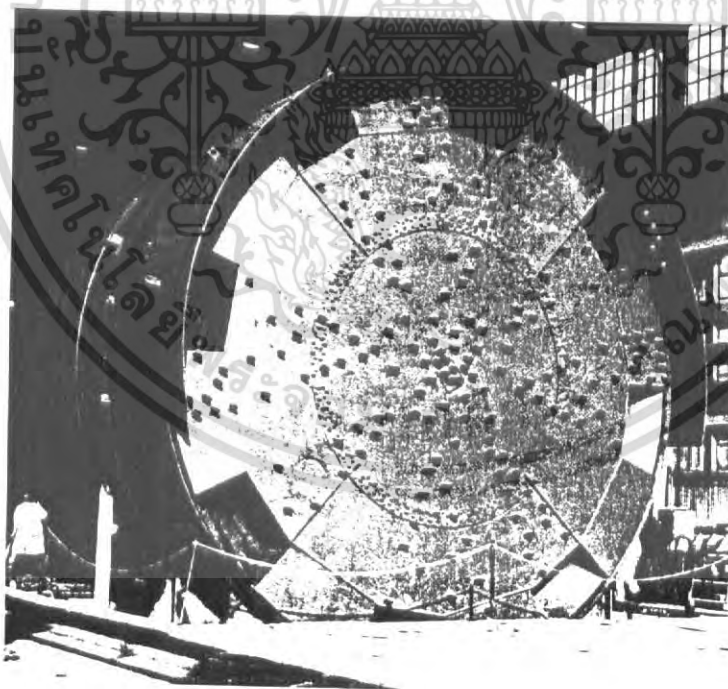


1. Excavator
2. Shield
3. Steering cylinder
4. Conveyor belt
5. Machine pipe
6. Hydraulic power pack

รูปที่ 4.29 Partial face shield (Herrenknecht)

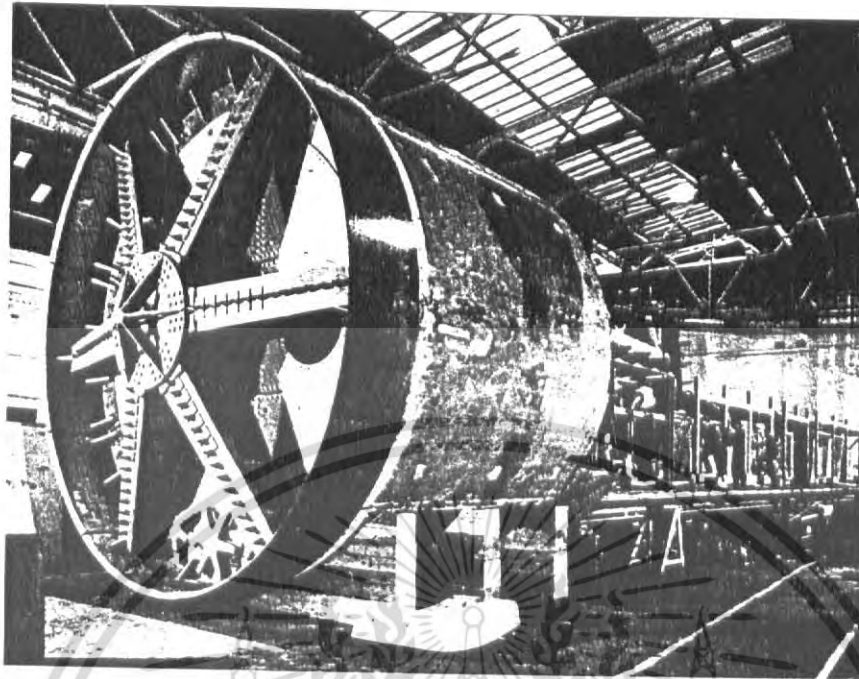


รูปที่ 4.30 หัวขุดเจาะแบบเปิดหน้าที่ใช้ในโครงการ Trans-Bay tube (1969)

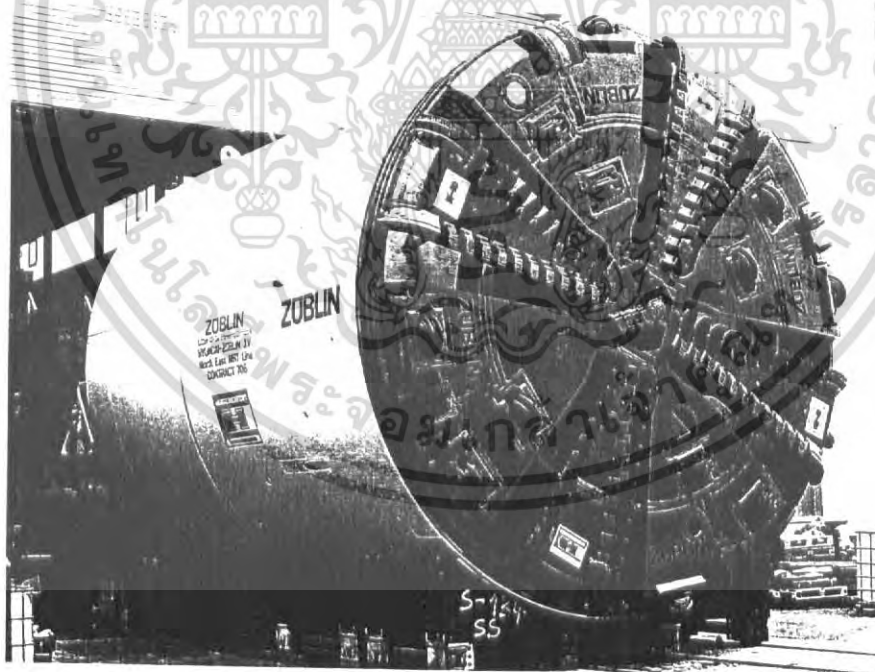


รูปที่ 4.31 หัวขุดเจาะแบบอัดแรงดันอากาศใช้ในโครงการ อุโมงค์ทางด่วนใน Paris (1964)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

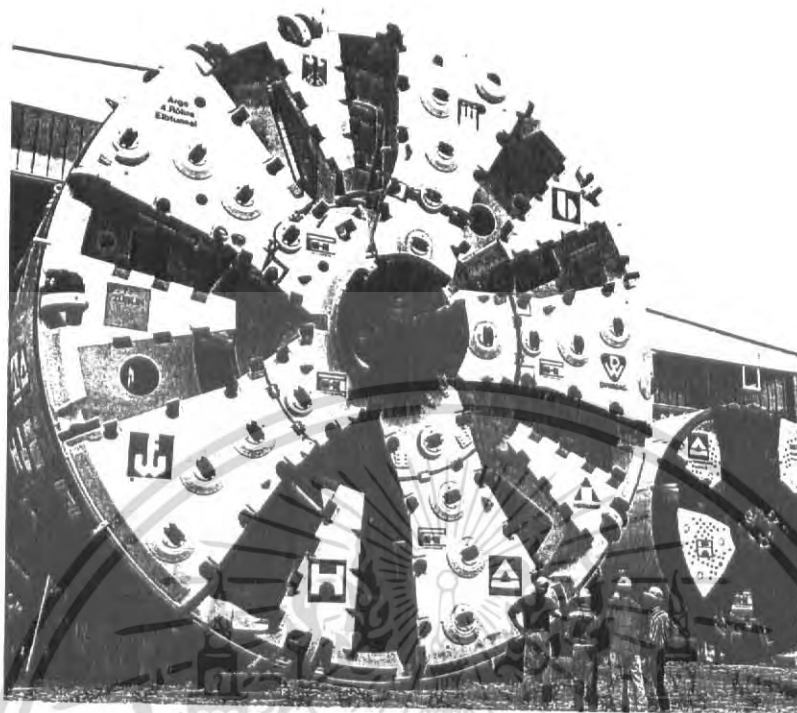


รูปที่ 4.32 หัวชุดเจาะแบบ Slurry ที่ใช้กับการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำใน Mexico City (1969)



รูปที่ 4.33 EPB shield ใช้กับโครงการ Singapore MRT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 Mix shield ใช้ในโครงการ Fourth Elb Tunnel, Germany



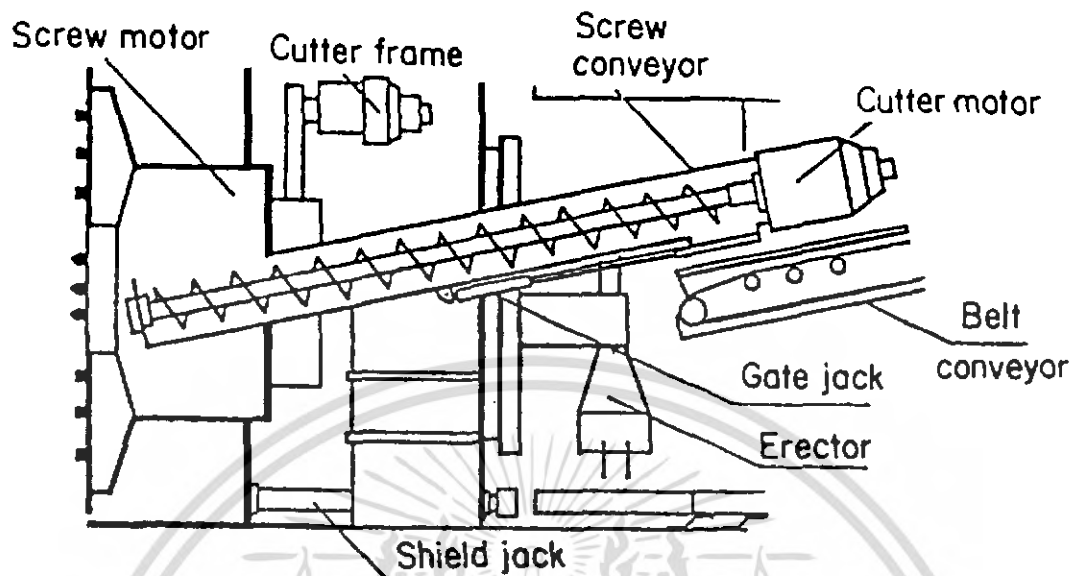
รูปที่ 4.35 Blind shield ผลิตโดย Mitsubishi

3. หัวเจาะแบบ Earth Pressure Balance (EPB)

3.1 บทนำ

หลักการพื้นฐานของหัวเจาะแบบ EPB ได้เริ่มต้นขึ้นโดย บริษัท Sato Kogyo จำกัด ซึ่งได้พยายามที่จะหาวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน แม้ว่า โครงการจำนวนมากโดยการใช้หัวเจาะแบบ Compressed air และ Slurry ถูกทำสำเร็จขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีข้อเสียและข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกันวิธีการนี้ ซึ่งทางบริษัทได้พยายามที่จะตัดออกไป ในขณะที่เดียวกันนี้ หัวเจาะแบบ Slurry ถูกใช้ทั่วไปในการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตาม มันถูกพบว่ามันมีต้นทุนสูงและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่แพง เนื่องจากหัวเจาะแบบ slurry ต้องการโรงงานที่แยกกันบนผิวดิน โดยเฉพาะ ทางบริษัทต้องการหาเครื่องมือ ซึ่งขุดเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ทางธรรมชาติและกฎหมายที่ระบุไว้ในหลายๆเมืองในประเทศญี่ปุ่นเอง (Stack 1982) นี่รวมไปถึงกฎหมายเกี่ยวกับการควบคุมมลภาวะทางน้ำและอากาศ ระบบน้ำในอุตสาหกรรม การบำบัดของเสียและการรักษาความสะอาด และการป้องกันการขาดออกซิเจน และการป้องกันสารพิษในอากาศที่ถูกอัด เป็นต้น พัฒนาการของหัวเจาะแบบ EPB จึงได้เริ่มขึ้นโดยบริษัท Sato Kogyo ในปี 1983 และจากผลงานวิจัยจำนวนมากทั้งจากในห้องทดลองและในภาคสนาม ในปี 1966 หน่วยงานจึงได้ถูกสร้างขึ้นโดยบริษัท Ishikawajima Harima Heavy Industries จำกัด ในปี 1974 หัวเจาะ EPB อันแรกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 3.72 เมตร ได้ถูกใช้สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ที่มี 1900 เมตร ในเมืองโตเกียว รูปที่ 4.36 แสดงแผนภาพของหัวเจาะ EPB อันแรก

ในปีต่อมา หัวเจาะแบบ EPB ได้ถูกผลิตโดยผู้ผลิตจำนวนมากขึ้นภายใต้ชื่อที่แตกต่างกันออกไปเช่น หัวเจาะ earth pressure balance, earth pressure holding, slime shield, confined soil shield, mud pressurized shield หรือ muddy soil shield ซึ่งทั้งหมดนี้ใช้วิธีการเดียวกัน คือระบบ earth pressure balance หัวเจาะแบบ EPB มีข้อดีที่เหนือกว่าหัวเจาะแบบอื่นด้วยที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3



Shield Machine (Earth Pressure Type)

รูปที่ 4.36 อธิบายส่วนประกอบ Earth Pressure Balance shield โดย Sato Kogyo (1963)

ตารางที่ 4.3 ข้อดีของการใช้ EPB shield เปรียบเทียบกับหัวขุดเจาะชนิดอื่น

Advantages over Slurry Shield	Advantages over Partial-face Shield	Advantages over Open-faced Shield
No separation plant, Economical application in ground with a high percentage of silt and clay	Can excavate a variety of soil conditions below the ground water	Can excavate a variety of soil conditions below the ground water
Can operate in both open mode and earth pressure balance mode	Full face cutter provides a better performance with lower ground loss	No compressed air-lock chamber needed

3.2 การขุดเจาะ

ในเทคนิคการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแบบ EPB อุโมงค์จะถูกขุดเจาะได้โดยหัว
ไบพัต ดินที่ถูกขุดออกจะถูกเอาออกโดยตัวขนส่งแบบ screw conveyor และ belt conveyor ดังที่ได้
แสดงไว้ในรูปที่ 4.36 และ 4.37ตามลำดับ จากช่องเก็บดินขนย้ายโดยการป้อนดังรูปที่ 4.28 หรือการใช้

การดึงออกโดยหัวรถจักร (รูปที่ 4.29) ในทางปฏิบัติ เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดิน แรงดันของดินที่หัวไบบัคจะถูกเฝ้าติดตามและควบคุมดังนี้

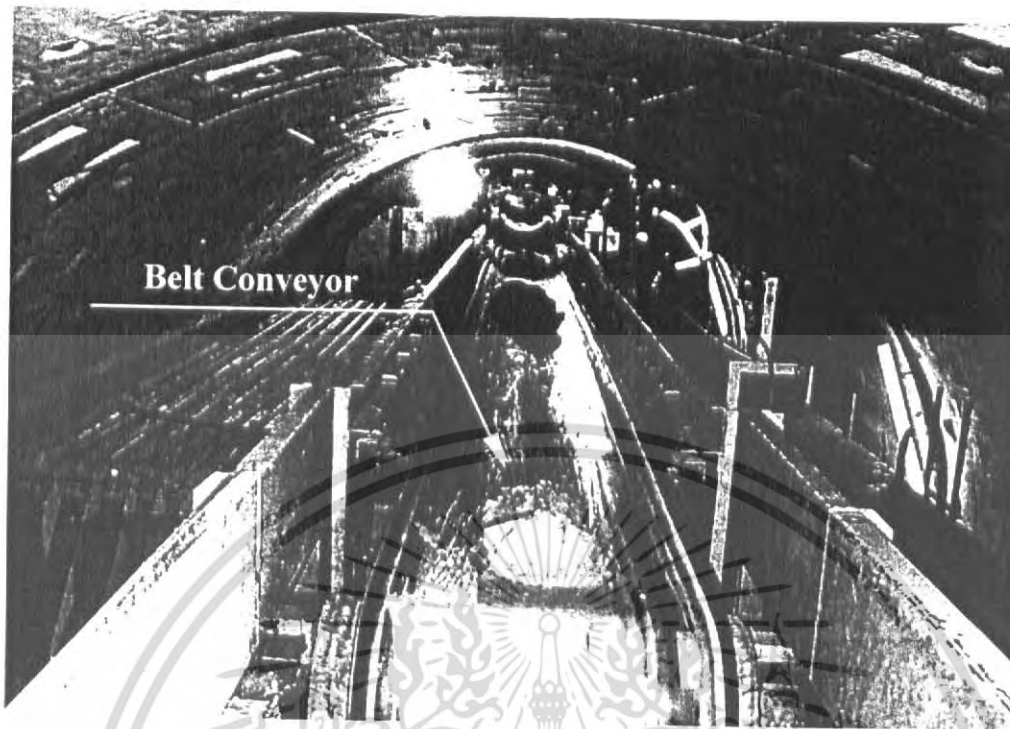
1) แรงดันด้านหน้าที่ตั้งไว้ในรอบการขุดเจาะแต่ละครั้งจำเป็นต้องถูกกำหนดก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น ขึ้นกับการออกแบบแนวอุโมงค์และสภาพดินใต้พื้นผิว แรงดันที่ตั้งไว้นี้จะถูกใช้เป็นปัจจัยที่ควบคุมการขุดเจาะทั้งหมด

2) ในระหว่างการขุดเจาะ แรงดันจริงๆจำเป็นต้องถูกบันทึกไว้และควบคุมและรักษาไว้ที่ระดับแรงดันที่ตั้งไว้

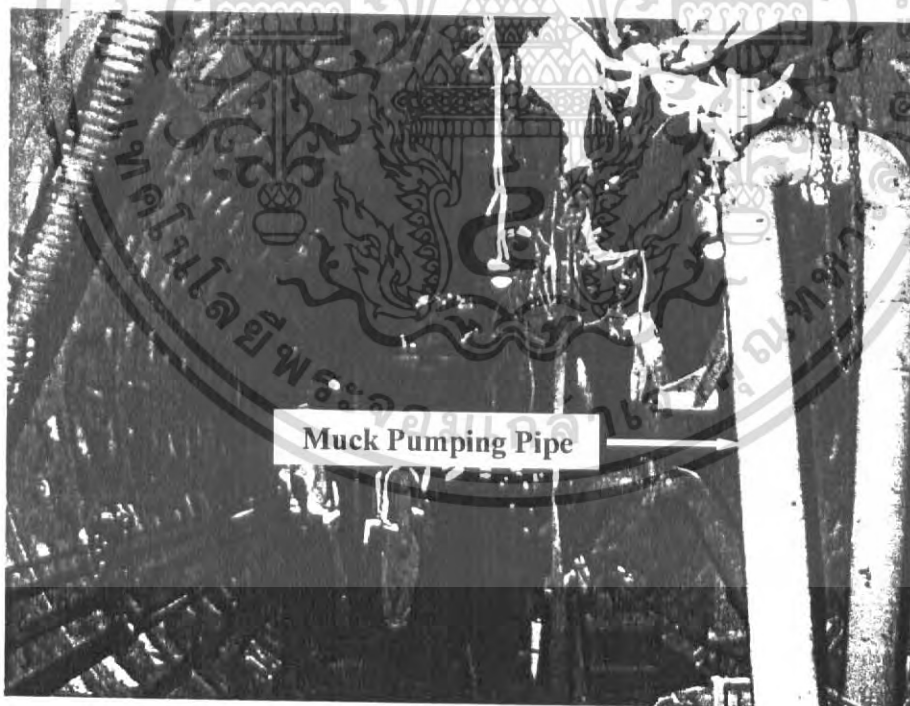
3) ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ แรงดันที่ตั้งไว้และแรงดันจริงๆ จำเป็นต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะซึ่งจะถูกใช้ในการอ้างอิง

แรงดันที่ตั้งไว้ถูกใช้เป็นปัจจัยควบคุมการขุดเจาะโดยตลอด ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.30 การควบคุมการทำงานของหัวเจาะจำเป็นต้องติดตามอย่างใกล้ชิดในการขุดเจาะเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าหัวเจาะทำงานภายใต้แรงดันที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ การทำงานของหัวเจาะในห้องควบคุมจำเป็นต้องวัดค่าปัจจัยการทำงานอื่นๆ ทั้งหมดตลอดเวลาที่การขุดเจาะได้เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.31

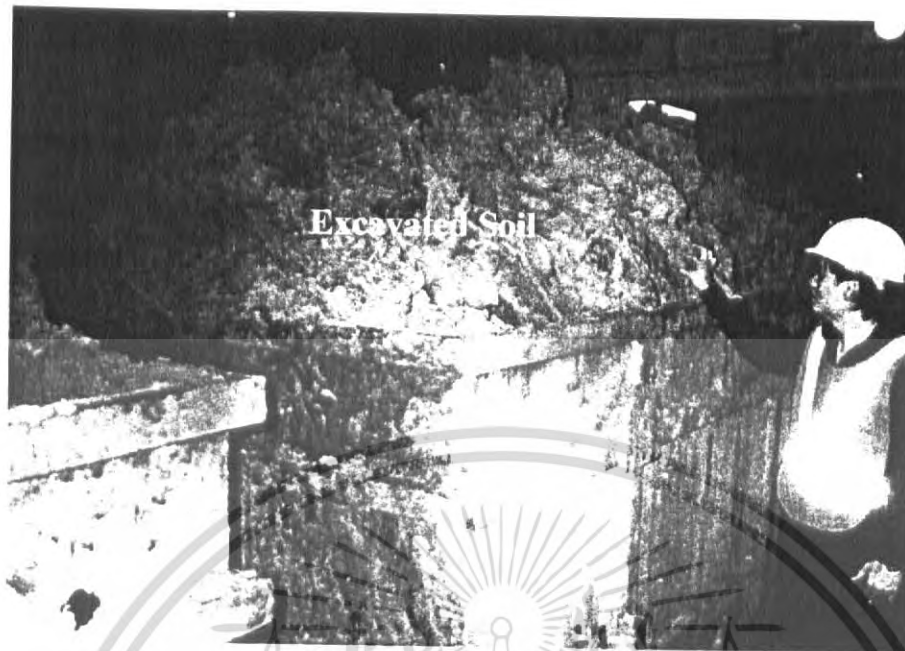
สิ่งหนึ่งที่พึงระลึกไว้ก็คือ ถ้าวิธีการบีบได้ถูกใช้สำหรับการขนถ่ายดินที่ถูกขุดออก (รูปที่ 4.28) มีข้อสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา ในวิธีการนี้ ท่อขนส่งถูกติดโดยตรงกับ screw conveyor ความเร็วในท่อขนส่งจะต้องสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตันเนื่องจากตะกอนดินในท่อ แต่จะต้องไม่สูงไปที่จะทำให้ท่อสีก นอกจากนี้ เนื่องจากวิธีการขุดเจาะด้วยหัวเจาะ EPB อัตราของการขนส่งดินจำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับแรงดันที่ถูกควบคุมเอาไว้ด้านหน้าของช่องเก็บดิน ตัวควบคุมหัวเจาะจำเป็นต้องทำการรักษาสมดุลของอัตราการบีบเอาดินออกและการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะเพื่อที่จะควบคุมแรงดันด้านหน้า โดยปกติ การขุดเจาะและการเคลื่อนไปด้านหน้าของหัวเจาะจะถูกทำให้เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เนื่องจากไบบัคขุดดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ แม่แรงไฮดรอลิกด้านหลังหัวเจาะยึคออกและดันด้านกับแนวอุโมงค์เพื่อผลักดันให้หัวเจาะเคลื่อนต่อไปข้างหน้า (รูปที่ 4.42 และ 4.43) ยกตัวอย่างเช่น ในโครงการฟม. (MRTA) แรงของแม่แรงหัวเจาะหรือแรง thrust อยู่ที่ระหว่าง 600 และ 1000 ตัน และ Stroke ของแม่แรงอยู่ที่ 1.60 เมตรการควบคุมของตำแหน่งการตี การเบี่ยงเบนจากแนวราบและแนวโค้ง และการวางแผนยังจำเป็นต้องลดการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะ โดยทั่วไป ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะถูกบันทึกไว้ตลอดการขุดเจาะในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.37 สายพานลำเลียงดินที่ขุดออกจาก Screw conveyor (Bangkok-MRTA)

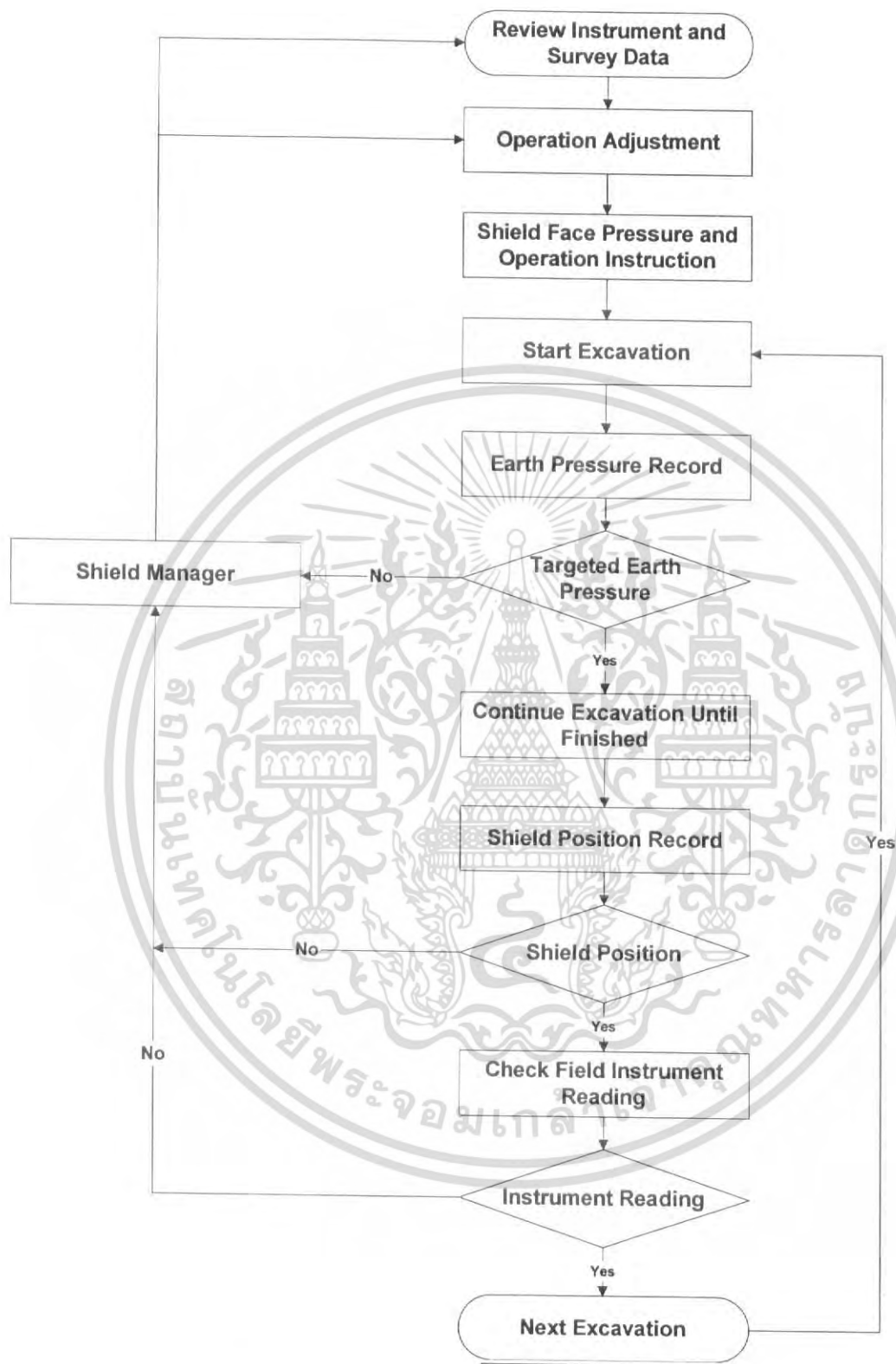


รูปที่ 4.38 ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อโดยตรงกับ Screw conveyor (Bangkok-MRTA)



รูปที่ 4.39 รถจักรลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์ (Bangkok-MRTA)





รูปที่ 4.40 ผังลำดับการควบคุมการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน



รูปที่ 4.41 จอควบคุมการทำงานของหัวขุดเจาะ แสดงค่าทุกตัวแปรระหว่างการขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน⁹⁸เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวางแผนอุโมงค์

การวางแผนอุโมงค์เป็นส่วนๆมักจะเกี่ยวข้องกับการใช้หัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์ และจะถูกสร้างขึ้นภายใต้การป้องกันของช่องว่างทรงกระบอกท้ายหัวเจาะ เป็นระบบแบบ One-pass และให้ทั้งการรักษาสภาพของปากอุโมงค์ตลอดการก่อสร้างและการวางแผนอุโมงค์ถาวร รูปที่ 4.44 และ 4.45 แสดงส่วนของแนวบังคับอุโมงค์ที่เป็นคอนกรีตที่ใช้ในโครงการ MRTA ส่วนนี้สร้างขึ้นและติดตั้งเพื่อปิดความทนทาน การวางแผนเป็นส่วนๆ อาจจะใช้ระบบ แบบ two-pass โดยใช้ส่วนที่สร้างขึ้นชั่วคราวที่ให้เฉพาะการรักษาสภาพการก่อสร้าง และในครั้งที่สองเป็นการก่อแนวคอนกรีตเพิ่มขึ้นสำหรับใช้ถาวร โดยทั่วไป การวางแผนส่วนของอุโมงค์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าอุโมงค์ที่ขุดเจาะขึ้น เนื่องจากมันมักจะสร้างขึ้นภายในหัวเจาะทรงกระบอกซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือขุดเจาะ ช่องว่างวงแหวนที่เกิดโดยรอบ (รูปที่ 4.46) มักจะถูกเติมเต็มโดยการฉาบปูนปิด ในดินเปือก การวางแผนของส่วนอุโมงค์มักจะถูก bolted (ม้วน พัน) เพื่อบีบอัดลูกสูบเพื่ออุดการรั่วของน้ำ ในดินแข็ง การวางแผนอุโมงค์ที่ไม่ถูก bolted (ม้วน พัน) อาจจะถูกนำมาใช้ นอกจากนี้ ในดินที่มีระยะเวลาคืนตัวที่เหมาะสม การวางแผนอุโมงค์ส่วนต่างๆอาจจะถูกขยายโดยการเอาออกหลังจากที่ได้ถูกเคลียร์โดยการเคลื่อนไปข้างหน้าของหัวเจาะดังรูปที่ 4.47

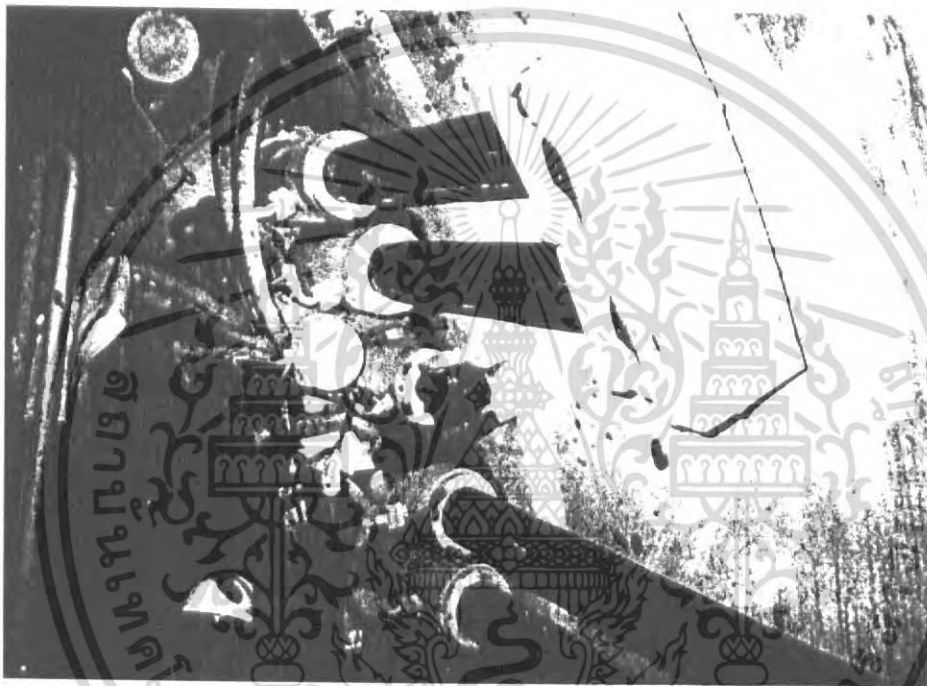
3.4 Segment erection

แนวอุโมงค์จะถูกติดตั้งเป็นส่วนๆ โดยใช้ตัวก่อสร้างที่ตั้งอยู่ภายในหัวเจาะดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.48 ในโครงการ MRTA วงแหวนส่วนต่างๆ ที่มีความยาว 1.2 ตลอดแนวแกนอุโมงค์และประกอบไปด้วย ส่วนคอนกรีต 6 ส่วนสำหรับอุโมงค์ทางทิศใต้ และส่วนคอนกรีต 7 ส่วนสำหรับส่วนอุโมงค์ทิศเหนือทั้งสองส่วนรวมไปถึง หนึ่งส่วนของส่วนที่เรียวลง ความแตกต่างของส่วนเนื่องมาจากอุปสรรคในการจัดการส่วนของอุโมงค์ที่แตกต่างกันในทิศเหนือและทิศใต้ แต่ละส่วนถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ส่วนโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.49 ถึง 4.51

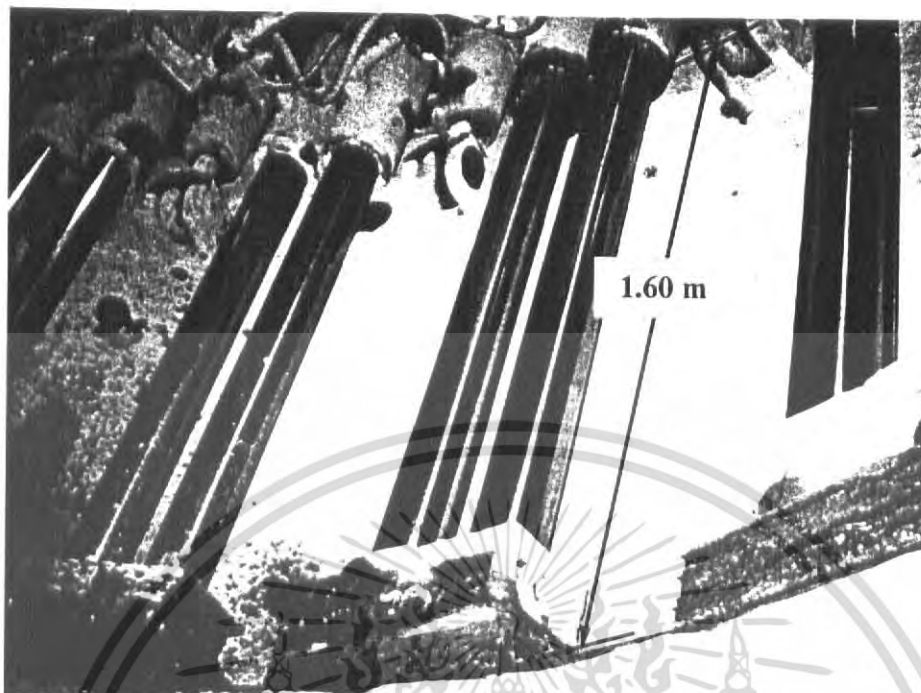
ในระหว่างการขุดเจาะ คนงานภายในอุโมงค์จะสั่งเอาส่วนของอุโมงค์จากที่เก็บของที่ตั้งอยู่บนพื้นดินที่อยู่ระหว่างทาง (รูปที่ 4.45) ส่วนที่กลับกันจะเป็นส่วนแรกที่ถูกติดตั้ง ลำดับการติดตั้งที่ถูกต้องจะถูกกำหนดอย่างแน่นอน และการเปลี่ยนแปลงใดๆของลำดับจะหมายถึงการสูญเสียเวลาไป ในอุโมงค์ รายการการติดตั้งซึ่งขึ้นกับชนิดของวงแหวนและตำแหน่งของการติดตั้งถูกสร้างขึ้นและจัดส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการก่อสร้าง เครื่องคอมพิวเตอร์นี้จะให้ข้อมูลบนค่ากลางที่เหมาะสมของวงแหวนท้ายอุโมงค์เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเจาะ โดยมีการอ้างอิงมาจากตำแหน่งของวงแหวนสุดท้ายที่ถูกวัดหลังจากการขุดเจาะในแต่ละรอบและตำแหน่งที่คาดไว้ในระหว่างรอบการขุดเจาะต่อไป ความถูกต้องของการติดตั้งแนวอุโมงค์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเส้นทางของตัวก่อสร้าง ตัวก่อสร้าง

จำเป็นที่จะตั้งตำแหน่งส่วนของแนวลูโมงค์ในวงแหวนด้วยความถูกต้องในระดับไมกซ์มิลลิเมตรซึ่งวงแหวนของแนวลูโมงค์พัฒนาแรงดันที่สัมผัสที่มากพอที่จะอัดถูกสับระหว่างส่วนต่างๆ หลังจากการติดตั้งได้เสร็จสิ้นลง ตำแหน่งของแนวลูโมงค์จำเป็นที่จะต้องถูกติดตามดังรูปที่ 4.52

ส่วนของแนวลูโมงค์สามารถถูกขนย้ายไปที่ตัวก่อสร้างได้สองวิธี คือ 1) โดยการสวนกัน 2) โดยทางด้านเหนือ ในโครงการ MRTA ส่วนของแนวลูโมงค์ได้ถูกขนย้ายไปที่ตัวก่อสร้างโดยลูโมงค์ที่สวนกันซึ่งใช้อุปกรณ์น้อยกว่าการใช้ทางด้านเหนือลูโมงค์ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.42 แม่แรงไฮดรอลิกอยู่ต่อท้าย EPB shield



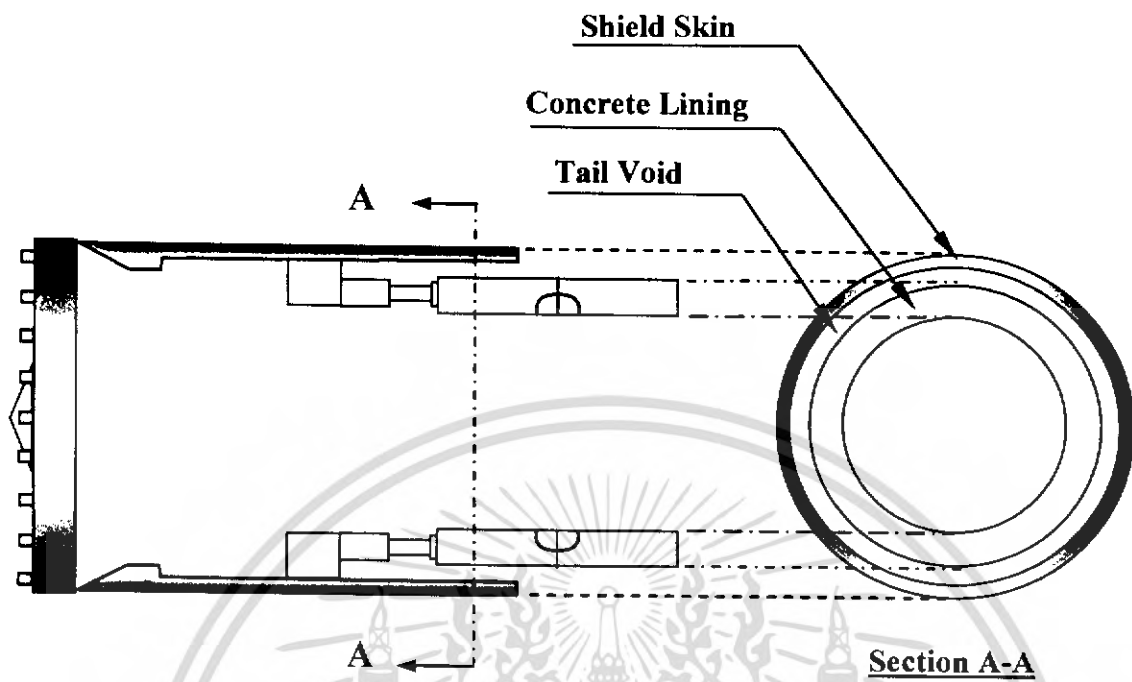
รูปที่ 4.43 การปลักของแม่แรงด้านผนังอุโมงค์ เมื่อหัวขุดเจาะเดินทางสู่จุด



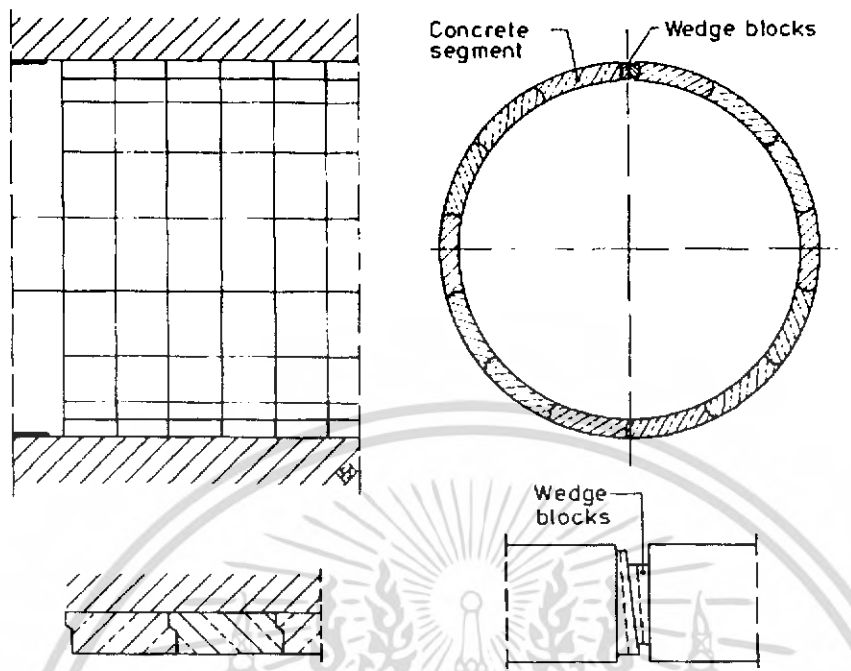
รูปที่ 4.44 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ในโครงการ MRTA กรุงเทพมหานคร



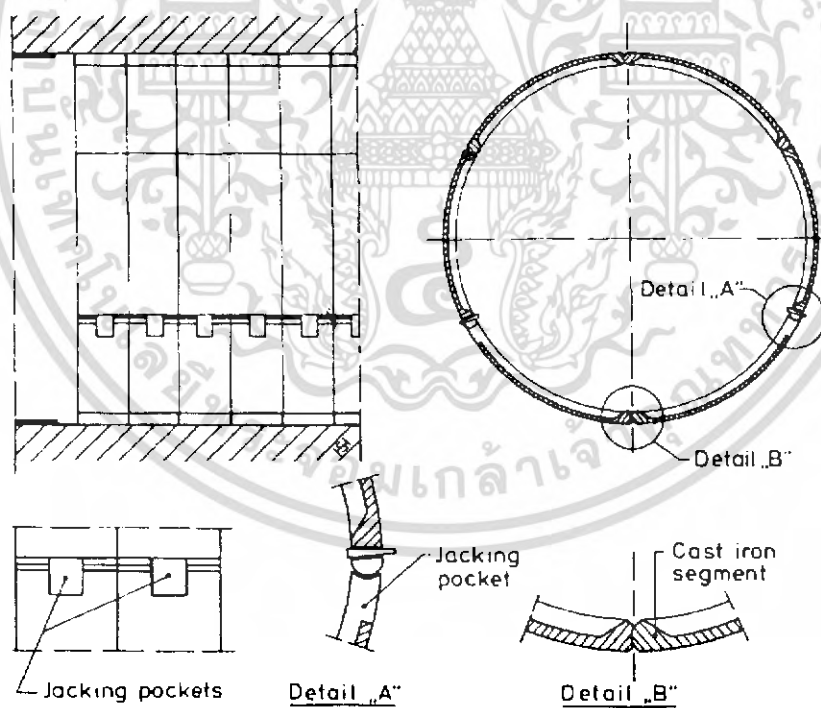
รูปที่ 4.45 การจัดเก็บผนังอุโมงค์ (Bangkok-MRTA, Thiam Ruam Mit Station)



รูปที่ 4.46 แผนผังแสดงช่องว่างที่ส่วนหาง ระหว่างผนังอุโมงค์กับหัวขุดเจาะ



(a) Concrete segment with wedge blocks

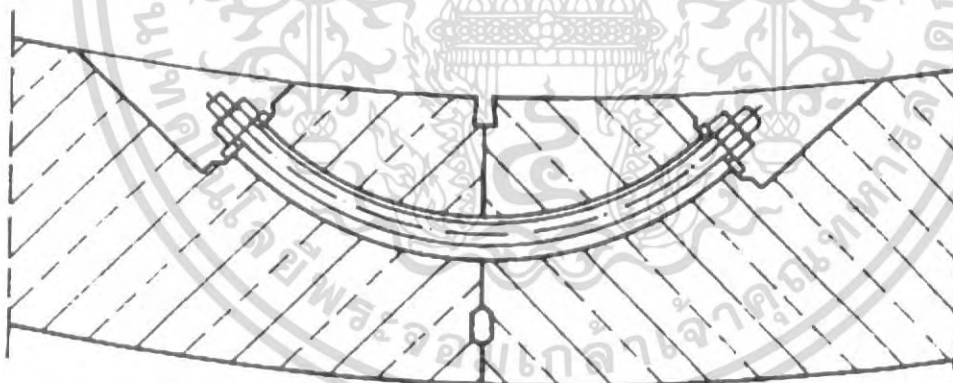


(b) Cast iron segment with jacking pockets

รูปที่ 4.47 แสดงรายละเอียดวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.48 แขนเครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์ ติดตั้งผนังอุโมงค์ตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.49 การเชื่อมต่อชิ้นส่วนวงผนังอุโมงค์ด้วย Curve bolt



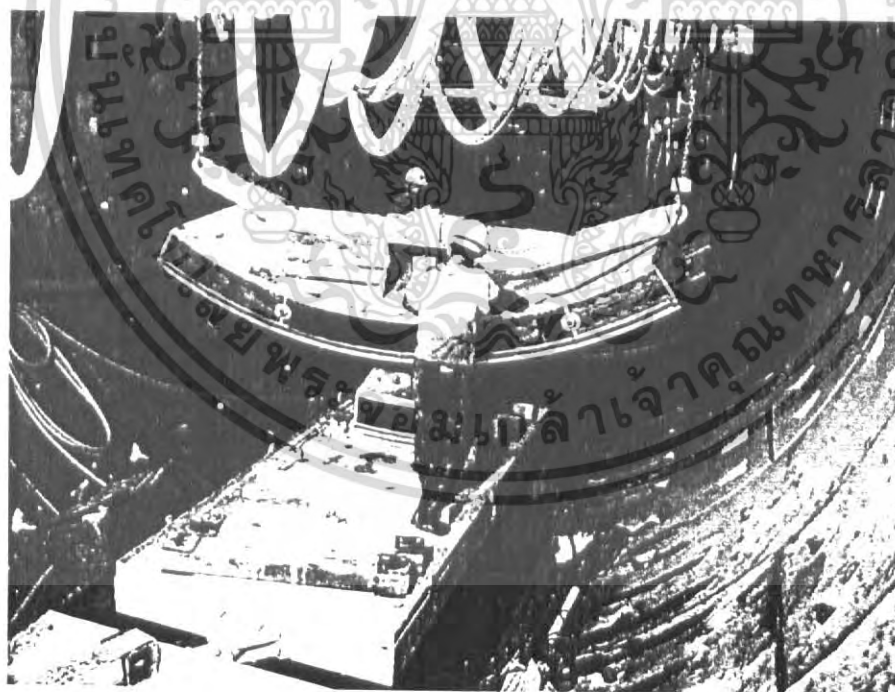
รูปที่ 4.50 Curve bolt



รูปที่ 4.51 คนงานกำลังทำการขัน Curve bolt ให้ยึดแน่น



รูปที่ 4.52 การตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.53 การขนย้ายชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เข้าสู่เครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์

3.5 Tail Void Grouting

ในการใช้หัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะจะใหญ่กว่าแนวอุโมงค์ที่ได้สร้างไว้ เนื่องจาก ข้อแรกก็คือ ผิวของหัวเจาะจะต้องซ้อนทับกับแนวอุโมงค์เพื่อให้การประกอบของวงแหวนอุโมงค์เกิดขึ้นได้ และข้อที่สองก็คือ เนื่องจากการเคลียร์จะต้องเกิดขึ้นระหว่างด้านนอกของแนวอุโมงค์และด้านในของส่วนท้ายเพื่อให้การควบคุมหัวเจาะรอบๆ ส่วนโค้งและแก้ไขการวางแผนที่ผิดไปให้ทำขึ้นได้ ดังนั้น จึงทำให้เกิดวงแหวนของช่องว่างรอบๆ ด้านนอกของอุโมงค์เนื่องจากหัวเจาะถูกผลักเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (รูปที่ 4.46) ดังนั้น การฉาบปิดช่องว่างวงแหวนด้านท้ายจึงถูกทำขึ้นเพื่อลดการเสียรูปของดินด้านนอกอุโมงค์

ที่ด้านท้ายของหัวเจาะ จะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายใช้สำหรับป้องกันด้านหลังของหัวเจาะจากน้ำในดิน ดินรอบๆ และของเหลวที่ใช้ค้ำยันหรือปูนสำหรับฉาบปิด ส่วนปิดผิวด้านท้ายแยกหัวเจาะจากวงแหวนรอบๆ และถูกออกแบบขึ้นเพื่อปิดช่องว่างระหว่างส่วนท้ายและส่วนของแนวอุโมงค์ (รูปที่ 4.54) มันจะต้องทนต่อแรงดันดิน แรงดันน้ำ แรงดันของปูนที่ฉาบปิดซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงมาก โดยปกติวัสดุที่มีความยืดหยุ่นทั้งหมด เช่น ผ้า ลวดไหม และเชือกจะถูกใช้ยึดใส่ข้อต่อและอุดการสูญเสียอากาศที่ถูกอัด (ในกรณีของหัวเจาะ แบบ compressed air) หรือป้องกันการรั่วของปูนที่ฉาบปิดไหลสู่หัวเจาะ ในปัจจุบันนี้ วิธีการนี้ได้ถูกแทนที่โดยการใช้อากาศด้วยสายไฟ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์รถไฟใต้ดินในกรุงเทพฯ การใช้สายไฟอัดซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นได้ถูกยกขึ้นบนส่วนท้ายดังรูปที่ 4.54 สำหรับหัวเจาะ Kawasaki และ Herrenknecht ซึ่งใช้ในโครงการ MRTA มีการอัดด้วยสายไฟสามแถว น้ำมันหล่อลื่นได้ถูกฉีดอัดลงไปในช่วงระหว่างแต่ละแถวและเก็บไว้ที่ความดันสูงเพื่อป้องกันน้ำ ดินหรือปูนจากการไหลเข้าไปบริเวณที่ทำการปิดการรั่ว

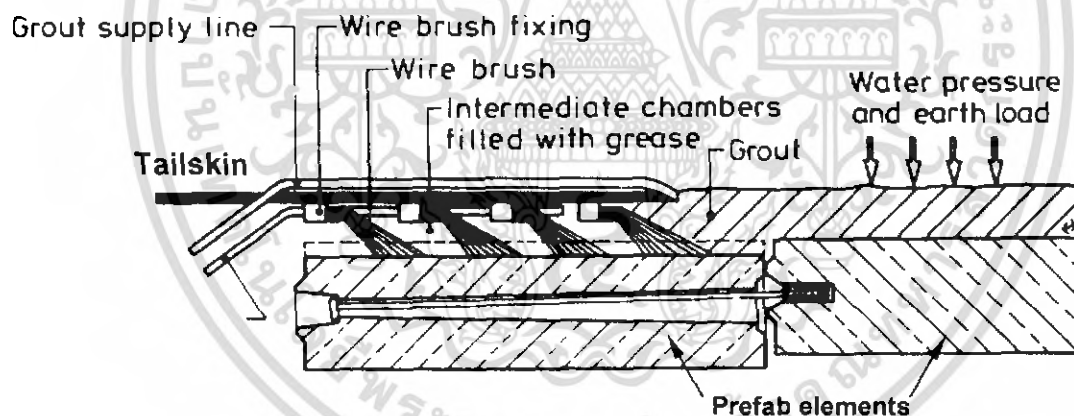
ปูนได้ถูกฉีดเข้าไปในรูในแต่ละส่วน รูจะพอดีกับตะปูที่เชื่อมส่วนที่ต่อกันและปิดโดยเครื่องอุดตลอดการติดตั้งวงแหวน ในโครงการ MRTA วาล์วพลาสติกที่ไม่หมุนคืนได้ถูกสร้างขึ้นในส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.55 ตลอดการฉาบปูน ปูนจะถูกฉีดและไหลลงจากรูที่ด้านเหนืออุโมงค์ดังนั้นปูนจึงสามารถแทรกไปสู่ช่องว่างโดยการฉีดความดันและแรงโน้มถ่วง การฉีดจะถูกทำอย่างต่อเนื่องภายใต้ความดันสูงในช่องว่างที่พัฒนาด้านหลังของท้ายหัวเจาะ ฟังก์ชันไว้ว่า การฉีดปูนเข้าไป ไม่เพียงควบคุมปริมาตร (เช่น โดยการควบคุมเปอร์เซ็นต์ปูนที่ฉีด) แต่ยังควบคุมความดันด้วย ซึ่งถูกวัดภายในท่อปูนหรือที่ส่วนที่เป็นคอนกรีต ในโครงการ MRTA ความดันถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติให้มีความอยู่ที่ประมาณ 3 bar (300 kPa) ซึ่งเป็นสภาพที่ออกแบบของส่วนของแนวอุโมงค์ ด้วยความดันที่สูงที่ฉีดเข้าไปช่องว่างสามารถถูกเติมได้ในเวลาอันสั้นและวัสดุที่ฉาบปิดนี้สามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งปริมาตรและความดันของปูนถูกวัดค่าและบันทึกโดยระบบการติดตามวัดค่าในอุโมงค์ที่แต่ละรอบการขุดเจาะ

ปริมาตรของปูนที่ฉาบปิดจะถูกควบคุมเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ปูนได้ปิดช่องว่างทั้งหมดได้เต็ม เปอร์เซ็นต์ของปูนที่เติมเข้าไปสามารถคำนวณได้จาก

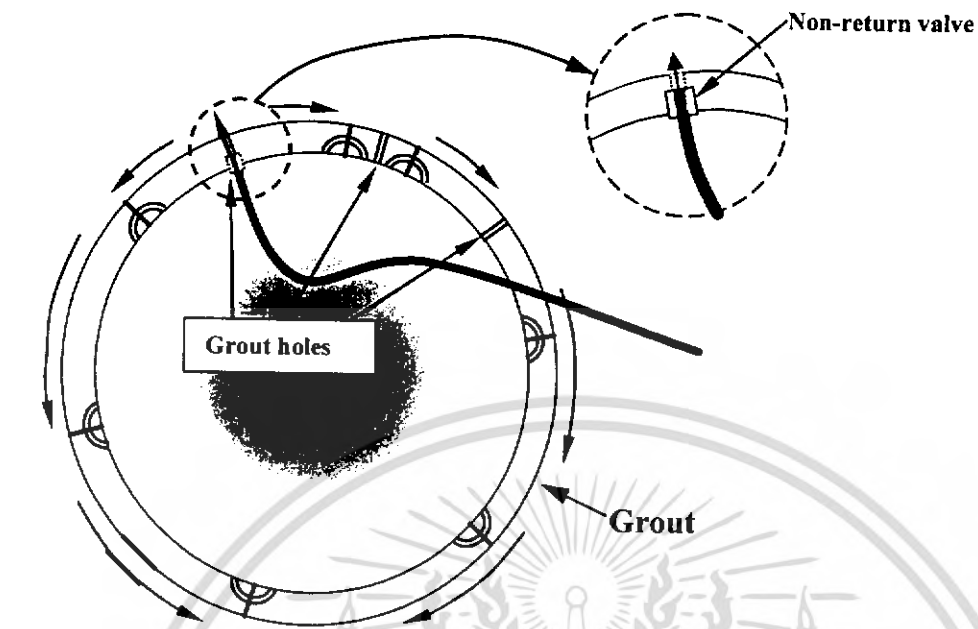
ปริมาตรปูนที่เติม (เปอร์เซ็นต์) = ปริมาตรปูน X 100 / ปริมาตรช่องว่างที่ประมาณได้

ในโครงการ MRTA วัสดุที่ใช้ฉาบปิดประกอบด้วยองค์ประกอบสองตัวเรียกว่า วัสดุ A และ วัสดุ B วัสดุ A ประกอบด้วย ซีเมนต์ bentonite และน้ำ วัสดุ B เป็นของเหลวที่ใช้เร่งความเร็ว (โซเดียมซิลิเกต) ณ ท้ายของหัวเจาะ วัสดุ A และ B จะถูกผสมดังรูปที่ 4.56 ก่อนที่จะถูกปั๊มเข้าสู่รูที่จะทำการฉาบปิดของแต่ละส่วน (พอดีกับวาล์วพลาสติกที่ไม่หมุนคืน) เพื่อปิดช่องว่างวงแหวนด้านท้ายให้เต็ม

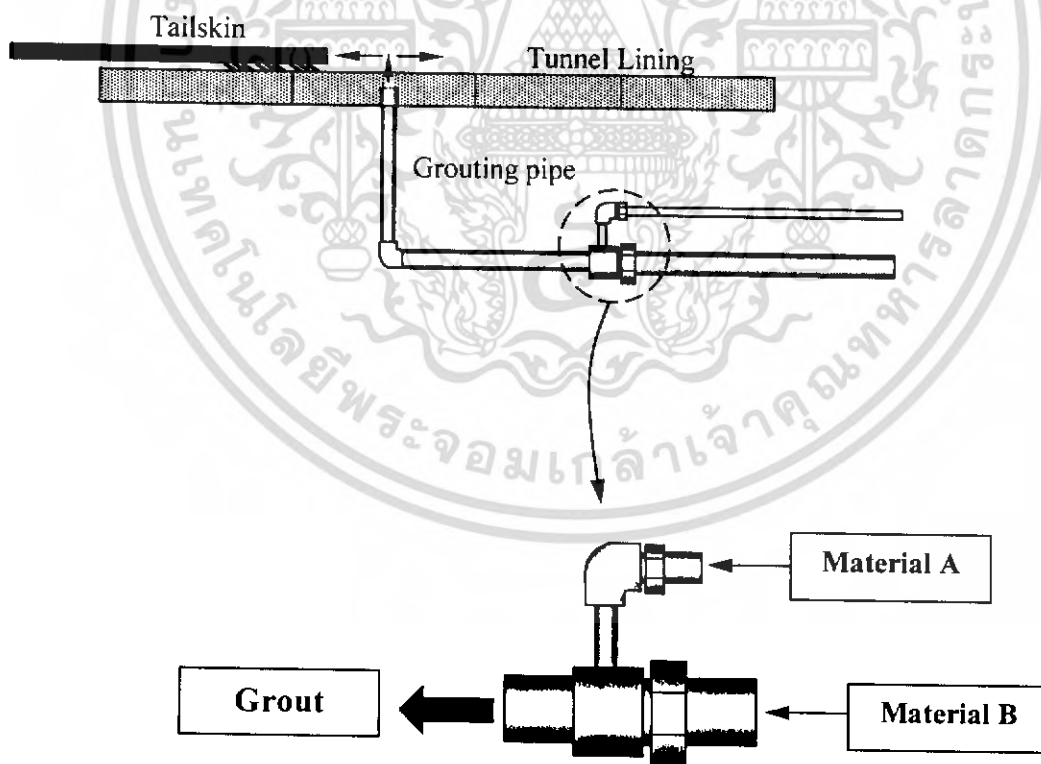
การฉาบปิดครั้งที่สองจะถูกใช้สำหรับปิดช่องว่างที่ยังเหลืออยู่รอบๆ โมงค์และเพื่อความแน่นอนว่าการฉาบปิดครั้งแรกนั้นมีความเพียงพอ จากช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ การฉาบปิดครั้งที่สองจะถูกทำขึ้นเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไป 40-120 เมตร ดังนั้น ในโครงการนี้ การฉาบปิดเสร็จสิ้นลงในเวลา 14 วันหลังจากการสร้างวงแหวน โดยทั่วไป ความดันที่ใช้ในการฉาบปิดในครั้งที่สองจะไม่มากกว่า 3 bar



รูปที่ 4.54 Tail skin seal (wire brush seal)



รูปที่ 4.55 การอัดฉีดปูนเหลวผ่านรูในผนังอุโมงค์



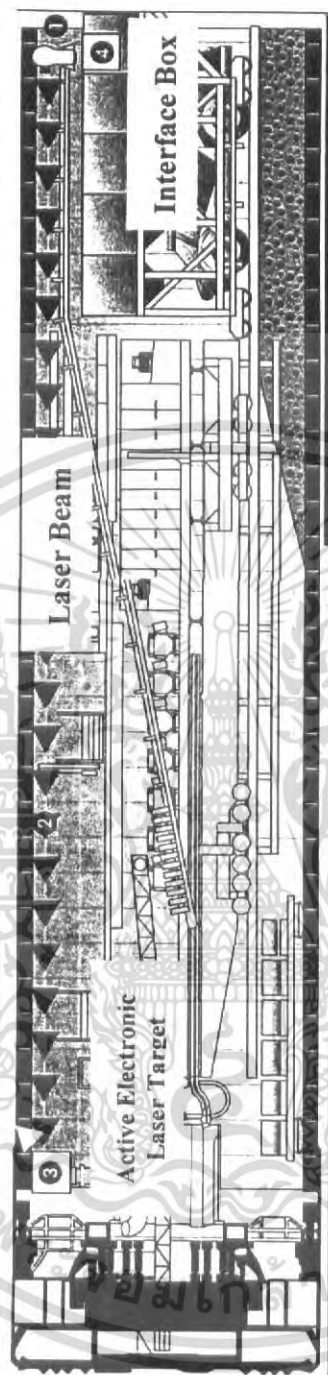
รูปที่ 4.56 การอัดฉีดปูนเหลวโดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน

3.6 Guidance system

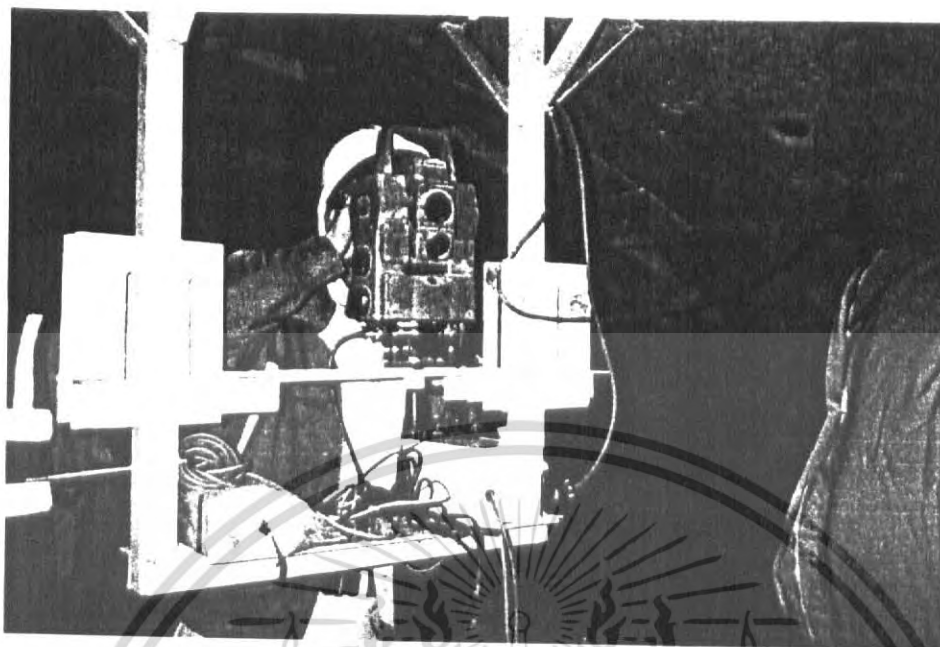
การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะไม่เคยสำเร็จขึ้นได้โดยไม่มีการเบี่ยงเบนของอุโมงค์ไปจากแกนอุโมงค์ที่ตั้งขึ้นมา มันมีความสำคัญที่จะให้คนงานที่ขับเคลื่อนหัวเจาะทราบข้อมูลของตำแหน่งของหัวเจาะที่เทียบกับระนาบของแกนอุโมงค์ที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่องเพื่อจะได้มีการแก้ไขให้ถูกต้อง ดังนั้น เนื่องจากลักษณะที่ต้องการจริง ๆ นั้น คำนึงถึงความถูกต้องของการขับเคลื่อนอุโมงค์และการควบคุมหัวเจาะระหว่างการขุดเจาะ ระบบการสำรวจและนำทางจึงมีความสำคัญมาก

ระบบการสำรวจและนำทางในปัจจุบันนี้ทำให้สามารถติดตามตำแหน่งของหัวเจาะได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 4.57) แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของระบบนำทางหัวเจาะ ในปัจจุบันนี้ ระบบการควบคุมทิศทางที่อาศัยเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอุโมงค์ ไม่ว่าจะเป็นเลเซอร์แบบลำแสงเดี่ยวหรือเครื่องมือเลเซอร์ที่ติดตั้งเลเซอร์ (รูปที่ 4.58) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อส่งผ่านแสงเลเซอร์ เครื่องมือที่ติดตั้งเลเซอร์นี้จำเป็นต้องถูกติดตั้งขนานไปกับแกนหัวเจาะในช่องสำหรับการสำรวจเพื่อที่จะรักษาความเป็นอิสระเหนือความยาวทั้งหมดของหัวเจาะรวมไปถึงระบบสำรอง และเพื่อที่จะกำหนดตำแหน่งของหัวเจาะด้วยลำแสงเลเซอร์ ระบบการกำหนดเป้าหมายจะถูกติดไว้กับหัวเจาะ (รูปที่ 4.59) และถูกหาตำแหน่งซึ่งเป็นตรงกลางที่แสงเลเซอร์กระทบ ข้อมูลที่ถูกป้อนกลับไปจะอยู่ในรูปของพิกัดแนวนอนและแนวตั้งที่ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งตั้งอยู่ที่ผู้ทำการควบคุมเครื่อง (ดังรูปที่ 4.60 และ 4.61) ระบบนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงต้องการความรู้อีกมากมายที่ให้โดยผู้ทำการควบคุมเครื่องมือ

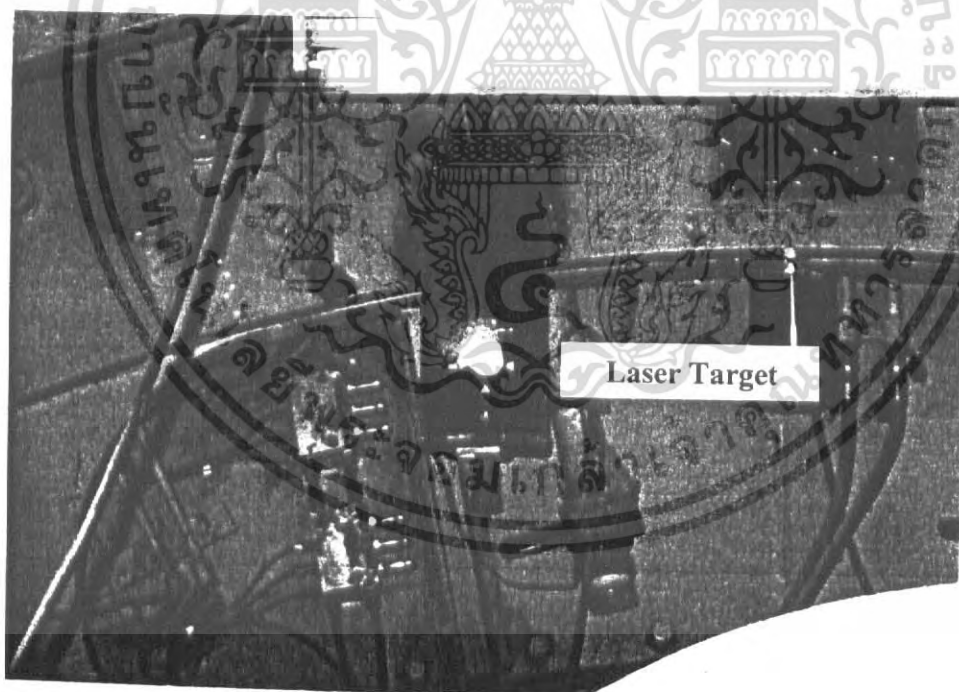
Laser
Theodolite



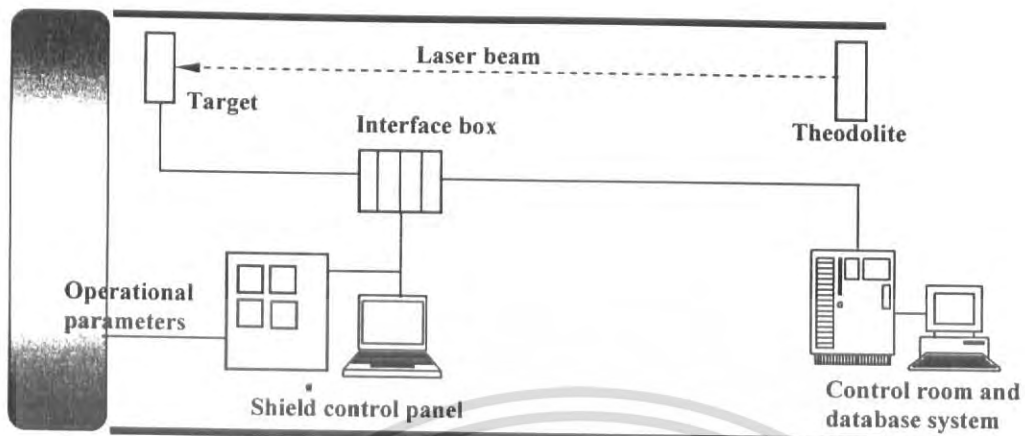
รูปที่ 4.57 ส่วนประกอบของระบบนำทาง



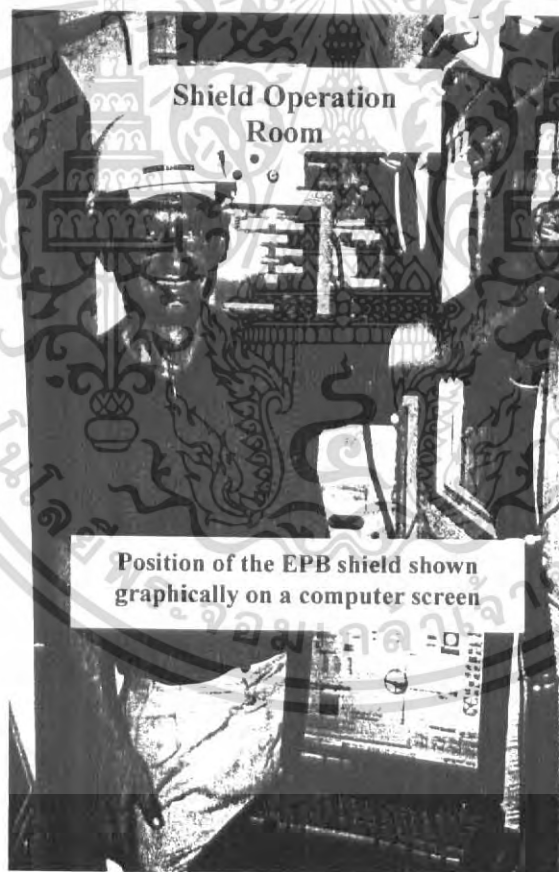
รูปที่ 4.58 Laser theodolite ติดตั้งอยู่หลัง EPB shield



รูปที่ 4.59 Laser target ติดตั้งไว้หลัง EPB shield



รูปที่ 4.60 ระบบแสดงผลควบคุมการขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ



รูปที่ 4.61 ระบบข้อมูลการนำทาง ภายในห้องควบคุม

4.1.10 การบำรุงรักษาหัวชุดเจาะ

การตรวจสอบและบำรุงรักษา

หัวชุดเจาะต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษา ตามช่วงเวลาที่กำหนด และทุกๆ ที่มีความจำเป็นได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อการรักษาระดับความพึงพอใจในการปฏิบัติงาน และป้องกันการพังเสียหายและอุบัติเหตุ

รายการการตรวจสอบและบำรุงรักษามีดังนี้

(1) การตรวจสอบประจำวัน

- 1) ตรวจสอบนอตและสลักเกลียวว่าหลวมหรือไม่ และขันให้แน่น
- 2) ตรวจสอบเสียง และความร้อนที่เพิ่มมากเกินไปผิดปกติ
- 3) ตรวจสอบการรั่วของน้ำมันไฮดรอลิก น้ำมันหล่อลื่น น้ำและอากาศ
- 4) ตรวจสอบความเหมาะสมส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่น และเติมให้เต็ม
- 5) ตรวจสอบระดับน้ำมันไฮดรอลิกในแท็งก์ว่าอยู่ในระดับปกติหรือไม่
- 6) ตรวจสอบกำลังไฟฟ้า
- 7) ตรวจสอบสวิทช์ ไฟนำทาง อุปกรณ์ต่างๆ และแสงควบคุมว่าทำงานได้ปกติหรือไม่
- 8) ตรวจสอบสภาพสายยางและเคเบิลที่เชื่อมต่อหัวชุดเจาะกับเกียร์ฟวง
- 9) ตรวจสอบ Relief valve สำหรับแรงดันปกติ
- 10) ตรวจสอบความสะอาดของวงจรไฮดรอลิก ภายหลังจากการตรวจสอบทำความสะอาด อุปกรณ์ไฮดรอลิกและเครื่องกรอง

(2) การตรวจสอบตามช่วงเวลาต่างๆ

1) การตรวจสอบรายเดือน

- ถังระบายน้ำมัน
- ตรวจสอบรายละเอียดต่างๆของมอเตอร์ ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่น การวัดการต้านทานของฉนวน และการป้องกันน้ำ
- ตรวจสอบแสงควบคุม เคเบิล และอุปกรณ์ต่างๆ ตรวจสอบ Relay สำหรับการสืบทอดการวัดการต้านทานของฉนวนและตรวจสอบท่อต่างๆว่าเสียหายหรือไม่

2) การตรวจสอบทุกๆครั้งปี

- ตรวจสอบน้ำมันไฮดรอลิกและน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งต้องทำโดยผู้ผลิตน้ำมันไฮดรอลิกนั้น

(3) การบำรุงรักษาระหว่างช่วงที่มีการหยุดการขุดเจาะ

หากจำเป็นต้องขยายเวลาในการหยุดการขุดเจาะ ต้องทำการบำรุงรักษาดังนี้

- 1) ให้แต่ละส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ทำงานโดยไม่ต้องเดินหน้าขุดเจาะ ทุกๆ 10-15 วัน
- 2) เติมน้ำมันหล่อลื่นให้กับส่วนต่างๆ ที่มีการเลื่อนไถลเช่น Cylinder rod และ Valve spool
- 3) ใช้เครื่องทำความร้อนเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันการควบแน่นในศูนย์ควบคุมมอเตอร์



4.2 ขั้นตอนการสำรวจ

4.2.1 การสำรวจสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน

4.2.1.1 วัตถุประสงค์ของการสำรวจ

การสำรวจจะต้องดำเนินการในการปฏิบัติการโดยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling) ในสถานะที่ปลอดภัย รวดเร็ว และประหยัด

การสำรวจประกอบด้วย

1. การสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง
2. การสำรวจภายใต้เงื่อนไขซึ่งเป็นอุปสรรค
3. การสำรวจเพื่อการจัดทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจสภาพดิน
4. การสำรวจเพื่อหามาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
5. การควบคุมงานสำรวจและการวางแผนสำหรับอุโมงค์ใต้ดิน
6. การสำรวจทางธรณีวิทยา
7. การสำรวจขณะทำการก่อสร้าง

การสำรวจจะถูกดำเนินการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐาน อันได้แก่ การวางแผนการออกแบบ การก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ผลของการสำรวจจะใช้สำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์ ให้อยู่ในแนวทางที่เหมาะสมและการเลือกที่จะประยุกต์วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ให้เหมาะสมกับเส้นทางของงานเหล่านั้น มาตรการการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ขนาดของโครงการและรายละเอียดของโครงการ และข้อมูลสำหรับการบำรุงรักษาเกี่ยวกับอุโมงค์ หลังจากการเสร็จสิ้นของโครงการ

4.2.1.2 การสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง

การสำรวจสภาพสถานที่ตั้งถูกกำหนดตามสิ่งต่างๆดังนี้

1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง
2. แผนการในอนาคต
3. การจัดจำแนกประเภทถนนและสภาพการจราจร
4. ความยุ่งยากในเรื่องการใช้ที่ดินสำหรับการก่อสร้าง
5. สถานะแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล
6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และระบบการเชื่อมต่อของน้ำเสียสำหรับการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสำรวจสถานะสถานที่ตั้ง จะต้องครอบคลุมสถานะท้องถิ่นตามการปรับตรงที่ เกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ได้ทำการไว้ข้างต้น การสำรวจสถานะสถานที่ตั้งโดยหลักๆจะถูกดำเนินการ สำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์และการวินิจฉัยถึงความเหมาะสมของวิธีขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัว ขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ขนาดของอุโมงค์และรายละเอียดต่างๆ ข้อมูลที่ได้ รับมาจะใช้ ณ เวลาของการก่อสร้างของโครงการด้วยเช่นกัน

1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง

วิธีนี้เป็นการสำรวจสถานะการใช้ที่ดินในพื้นที่เมืองใหญ่ พื้นที่เกษตร พื้นที่ป่าไม้ แม่น้ำและทะเลตามเส้นทางอุโมงค์ที่ได้เสนอ ในพื้นที่เมืองจะต้องการสำรวจเพื่อจะระบุถึงการใช้ ที่ดินที่ได้กำหนดให้ (ที่อยู่อาศัย ทางการค้า การใช้ทางอุตสาหกรรม ฯลฯ)และระดับของการจัดให้ เป็นเมืองใหญ่ การสำรวจสิทธิในด้านทรัพย์สินก็เพื่อจะวินิจฉัยว่าทรัพย์สินที่มีอยู่นั้นมีความ เกี่ยวข้องเป็นเจ้าของในทางสาธารณะ หรือในทางส่วนตัวหรือไม่ เพื่อจะตรวจสอบการเรียกร้อง สิทธิในทรัพย์สิน และข้อจำกัดเหนือและใต้ดินตามเส้นทางอุโมงค์

2. แผนการในอนาคต

ลักษณะนี้เป็นการที่จะตรวจสอบแผนการพัฒนาในอนาคตตามเส้นทางและขนาด ของ แผนรายการกำหนดและข้อจำกัดที่เกี่ยวกับแผนการพัฒนาแผนงานในอนาคต

3. การจัดจำแนกประเภทถนนและสถานะการจราจร

ลักษณะนี้เป็นการที่จะระบุเฉพาะสำหรับการจัดจำแนกประเภทถนนและ ความสำคัญของพื้นถนน เพื่อศึกษาเกี่ยวกับงานขุดในถนน ปริมาณการจราจรของถนนและอื่นๆ ลักษณะที่ตั้งของปล่องแนวดิ่ง (Shaft) จะสามารถกำหนดด้วยการเคลื่อนย้ายดินที่ขุดและการ ระดม/การปล่อยจากการระดมของอุปกรณ์และวัสดุในระหว่างการก่อสร้างนอกจากการใช้ที่ได้ วางแผนไว้ใดๆ หลังจากการก่อสร้าง จึงแนะนำให้พิจารณาล่วงหน้าเกี่ยวกับผลกระทบที่มีศักยภาพ ของการทำให้มันคงเกี่ยวกับพื้นดินที่จะเป็นสาเหตุจากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

4. ความยุ่งยากในเรื่องการใช้ที่ดินสำหรับการก่อสร้าง

สถานของการก่อสร้างรอบๆที่ตั้งปล่องแนวดิ่ง (Shaft) เป็นแผนงานเฉพาะที่ สำคัญที่สุดอันหนึ่งสำหรับโครงการจากขั้นตอนการเลือกเส้นทางไปจนถึงการเสร็จสิ้นโครงการ ดังนั้นมาตรการที่จำเป็นทั้งหมดจะต้องดำเนินการในการที่จะทำให้ที่ดินสำหรับใช้ในการสร้าง นอกจากนี้จะมีความจำเป็นด้วยเช่นกันที่จะทำให้เกิดความมั่นคงแก่สถานที่จำกัดและเส้นทาง การลำเลียงสำหรับดินที่ขุดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สภาพแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล

นับว่าเป็นเรื่องสำคัญที่จะสำรวจภาคตัดขวางของแม่น้ำ โครงสร้างของริมฝั่งของ มันคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่อยู่กับฝั่ง และแผนในอนาคตสำหรับแม่น้ำ และการปรับปรุง สะพานในกรณีอุโมงค์ที่เสนอข้ามหรือไปใกล้แม่น้ำ มันมีความจำเป็นที่จะรักษาความลึกที่เพียงพอ และระยะทางจากทางที่แม่น้ำไหลผ่านและสะพาน กระบวนวิธีแบบเดียวกัน จะประยุกต์ใช้กับ อุโมงค์ที่ดำเนินไปใกล้หรือภายใต้ทะเลสาบ และทะเล

6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และน้ำเสียสำหรับการสร้าง

จำเป็นจะต้องตรวจสอบระบบความจุ แรงดัน และความสามารถด้านการจ่ายไฟฟ้า ใกล้สถานที่ที่ได้ทำการทำการก่อสร้าง ถ้าหากจำเป็นจะกำหนดให้มีการเตรียมระบบการจ่าย กระแสไฟฟ้าที่เป็นกำลังสำรอง ส่วนในด้านน้ำประปาจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่ามีน้ำให้กับเมือง ที่สามารถจะหามาได้หรือไม่ และจุดของการค่อของมัน ขนาดของท่อ และจำนวนที่มีอยู่ของน้ำ ส่วนทางด้านเกี่ยวกับระบบน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องยืนยัน ตำแหน่งที่ตั้งการปล่อยออกของมันจำนวน น้ำเสียที่สามารถปล่อยออกได้ และเกณฑ์คุณภาพน้ำ สำหรับการปล่อยออก

4.2.1.3 การสำรวจภายใต้เงื่อนไขซึ่งเป็นอุปสรรค

การสำรวจที่มีอุปสรรคจะต้องดำเนินการเพื่อระบุชุดเกี่ยวกับรายการดังต่อไปนี้

1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่เหนือและใต้ดิน
2. ปังจัยที่เป็นสาธารณูปการที่อยู่ใต้ดิน
3. บ่อที่ยังใช้ได้ และบ่อที่ถูกทิ้งร้าง
4. สถานที่ตั้งของสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้ และงานชั่วคราว
5. อื่นๆ

ก่อนการเริ่มต้นการเลือกเส้นทาง จะต้องทำการสำรวจอย่างระมัดระวัง เพื่อจะ กำหนดอย่างชัดเจนเกี่ยวกับรายการที่อาจจะส่งผลต่อการสร้างอุโมงค์ภายในขอบเขตของอิทธิพล ตามเส้นทางของอุโมงค์

การสำรวจต้องคำนึงถึงความปลอดภัย 2 อย่าง คือ การทำให้มั่นคงปลอดภัยด้าน สิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้อุโมงค์ และสำหรับการความปลอดภัยของการสร้างอุโมงค์ประเภทหั่วชุด เเจาะ Shield ผลการสำรวจจะทำหน้าที่เป็นหลักฐานสำหรับกาประเมินค่าเกี่ยวกับการทำให้เสีย รูปของสิ่งปลูกสร้าง การทำให้แห้งและการทำให้เกิดมลภาวะของบ่อ การทะลักออกของอากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัดและน้ำเลน อากาศที่รั่วไหลออกมาและน้ำเลน ความดันของดินที่มีต่ออุโมงค์ การรับภาระ น้ำหนักเหนืออุโมงค์ และสภาวะการรับภาระแรงอื่นๆ

1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนและอยู่ใต้ดิน

เกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน ประเภทสิ่งปลูกสร้างและรูปแบบของฐานราก การมีอยู่ของห้องใต้ดินและความลึกของฐานรากแบบปกติ และแบบฝังครึ่งจะถูกทำการสำรวจ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญด้วยเช่นกันที่จะสำรวจว่ามีการใช้สิ่งปลูกสร้างเหล่านี้ได้ผลอย่างไร และในการที่จะทำการสำรวจต้องติดตั้งด้วยเครื่องมือที่มีความไว

2. สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดิน

สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดินที่จะได้รับการสำรวจตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ สถานที่สำหรับปล่องแนวตั้ง (Shaft) จะต้องมีการสำรวจที่ถี่ขึ้น ในจุดแรกเริ่มของการสำรวจเป็นการขุดสำหรับการสำรวจ และการมุ่งหวังเกี่ยวกับแผ่นดินไหวจะจำเป็นในบางกรณีที่จะยืนยันถึงตำแหน่งที่ตั้ง ขนาด ความลึกและสภาวะ

3. บ่อที่ยังใช้และบ่อที่ทิ้งร้าง

มีความจำเป็นที่จะหาตำแหน่งที่ตั้งของบ่อที่ยังใช้และบ่อที่ทิ้งร้างด้วยเช่นกันในการที่จะประเมินความเสี่ยงของการทะลักออกและการรวมของน้ำเลนและอากาศที่ขาดออกซิเจนในระหว่างปฏิบัติการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield การขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ในแบบเกี่ยวกับการใช้อากาศต้องการให้มีการสำรวจที่กว้างขวางมากกว่าวิธีการอื่นๆ บ่อถูกทิ้งร้างจะต้องได้รับการจำแนกออกมาเกี่ยวกับสถานที่ตั้งที่วางอยู่บนพื้นฐานของคำกล่าวของเจ้าของบ่อ

4. สถานที่ตั้งสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้และงานแบบชั่วคราว

มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ให้รวบรวมข้อมูลข่าวสารโดยตรงจากเจ้าของที่ดินเกี่ยวกับเงื่อนไขของสถานที่ตั้งเหล่านี้เนื่องจากมีความเป็นไปได้ของการขุดโดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เผชิญกับอุปสรรคจะต้องถูกเคลื่อนย้ายไปหรือนำขึ้นมาจากพื้นดิน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสำรวจสิ่งที่เคลื่อนย้ายออกมาจากสถานที่ที่ทำการขุดเจาะ โดยมีเงื่อนไขและสภาวะของการถมดินกลับและความปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดิน

5. อื่นๆ

ถ้าหากสิ่งที่เป็นสาธารณูปโภค หรือสิ่งปลูกสร้างใต้ดินได้รับการวางแผนที่จะสร้างในอนาคตที่สถานที่ตั้ง ตำแหน่งที่ตั้งของสิ่งทั้งหลายนี้ ขนาดและความลึก จำเป็นจะต้องได้รับการตรวจสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความขัดแย้งต่อกัน ในพื้นที่ที่มีระเบิดที่ไม่ระเบิดซึ่งยังคงสามารถพบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงเป็นคำสั่งที่จะทำให้ได้ผลด้านความปลอดภัยของโครงการได้โดยการเก็บข้อมูลข้อมูลสารเกี่ยวกับตำแหน่งที่อยู่ที่เป็นไปได้ของพวกระเบิดจากผู้อยู่อาศัยในท้องถิ่นและการสำรวจทางธรณีวิทยาในตำแหน่งแรกเริ่ม

4.2.1.4 การสำรวจเพื่อการจัดทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจสภาพดิน

การสำรวจเพื่อการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินมีการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การทำแผนที่ภูมิประเทศ
2. การสร้างเป็นรูปธรรมทางธรณีวิทยา
3. สภาพของดิน
4. น้ำใต้ดิน
5. การมีอยู่ของอากาศที่ขาดออกซิเจน ก๊าซอันตราย ฯลฯ

การสำรวจทางธรณีวิทยา การเจาะและวิธีการอื่นๆ ของการสำรวจจะต้องดำเนินการอย่างเหมาะสม วิศวกรที่รับผิดชอบที่ควบคุมจะต้องกำหนดจุดที่เหมาะสมและรายการสำรวจต่างๆ

สภาพทางภูมิประเทศและธรณีวิทยามีผลต่อการออกแบบและการก่อสร้างในโครงการสร้างอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการสำรวจจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง

รายการและลำดับของการสำรวจภูมิประเทศและชั้นดินได้สรุปในตารางที่ 4.4 แล้วสิ่งที่เพิ่มหรือลดลงของการสำรวจเป็นผลร่วมกันของโครงการที่มีลักษณะเฉพาะ

การสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ และการสำรวจทางธรณีวิทยา เพื่อที่จะเข้าใจสภาพทั่วไปของชั้นหินตามเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์

การมีข้อมูลทั้งหมดของการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นระดับชั้นดินที่สามารถจำแนกโดยง่ายหรือชั้นดินซึ่งยากที่จะจำแนกได้ หรือจะเป็นสภาวะปัญหาของดินที่คงอยู่หรือไม่คงอยู่และอื่นๆอีก เป็นความรับผิดชอบของวิศวกรผู้ควบคุมจะตัดสินใจในการสำรวจขั้นพื้นฐานของการกำหนดขอบเขต และเรื่องอื่นๆซึ่งเป็นผลมาจากการสำรวจเบื้องต้น

ตารางที่ 4.4 รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการ
ขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	- ความเข้าใจสภาพทั่วไปของการทำแผนที่และการบอกลักษณะภูมิประเทศดินและโครงสร้างชั้นดิน - การทำนายเกี่ยวกับดินที่เป็นปัญหาและพื้นฐานสำหรับการสำรวจสิ่งที่ตามมา	- ความเข้าใจชั้นดินและสภาพดินตามเส้นทางทั้งหมด - ความเข้าใจคุณสมบัติเทคนิคทางธรณีวิทยา - การเตรียมในเรื่องโครงสร้างทางธรณีวิทยา	- การสำรวจดินเพื่อเป็นส่วนเสริม - การสำรวจดินในรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งสำหรับการออกแบบและการสร้าง - ข้อมูลข่าวสารการออกแบบสำหรับสภาพพิเศษ เช่น แผ่นดินไหว
วิธีการของการสำรวจ	- การเก็บและการรวบรวมข้อมูลข่าวสารที่มีอยู่ - เก็บการรวบรวมและประมวลผลเกี่ยวกับโครงการอื่นมีลักษณะใกล้เคียงกันในอดีต	- การเจาะ(borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test) - เก็บตัวอย่างดิน	- การเจาะ(borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test)

ตารางที่ 4.4(ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับ
โครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- การสำรวจเอกสาร - สังเกตสภาพทั่วไปในสถานที่ก่อสร้าง	- การสำรวจระดับน้ำใต้ดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure) - การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการทดสอบ (การทดสอบทางกายภาพและทางกลศาสตร์)	- เก็บตัวอย่างดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure) - การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) - การทดสอบดินในห้องทดลอง - การทดสอบแรงดันด้วย Pressuremeter - สำรวจปัญหาการขาดออกซิเจนและก๊าซที่เป็นอันตรายและก๊าซไวไฟ - Deep Foundation Excavation - PS Logging
เนื้อหาของการสำรวจ	- การตรวจสอบเอกสาร เช่น แผนที่ต่าง ๆ (แผนที่ทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการทำแผนที่และบอกลักษณะภูมิประเทศ ธรณีวิทยา และเทคนิคทางธรณี)	- ส่วนประกอบชั้นดิน - ค่า N (Standard Penetration Test) - ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ - ระดับน้ำใต้ดิน และความดันน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - การกระจายตัวของเม็ด	- ค่า N (Standard Penetration Test) - ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ - ระดับน้ำใต้ดินและความดันของน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4(ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับ
โครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

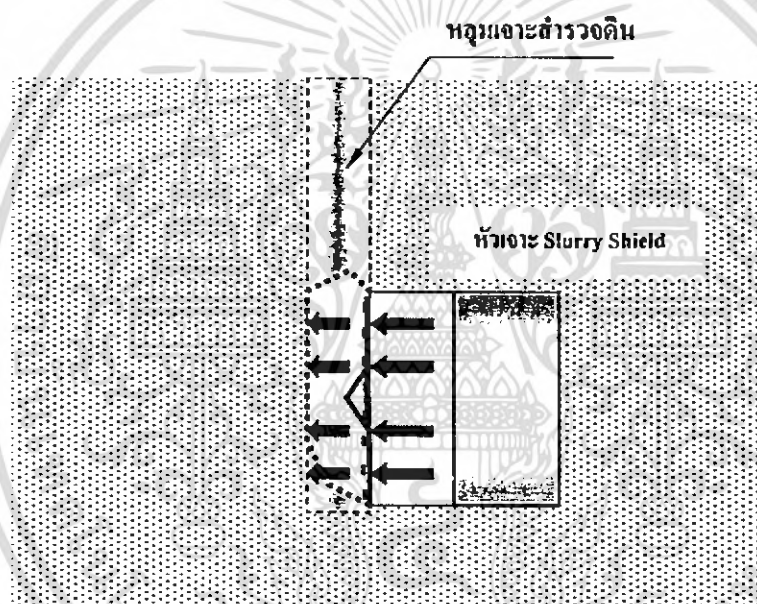
รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- รายงานการสำรวจดินที่มีอยู่ - รายงานการก่อสร้างเกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่ได้สร้างก่อน ๆ ในบริเวณใกล้เคียง - บ่อและน้ำใต้ดิน - การสังเกตในเรื่องการทำแผนที่ภูมิประเทศสภาพดิน และพื้นที่โดยรอบ - การทรุดตัวของดิน	- ดิน - ปริมาณความชื้นในดิน - ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน - หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการยุบตัว - คุณสมบัติของการยุบตัวคายน้ำของดิน	- ปริมาณความชื้นในดิน - ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน - หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการยุบตัว - คุณสมบัติของการยุบตัวคายน้ำของดิน - ความเร็วและทิศทางของน้ำใต้ดิน - ขนาดและรัศมีของหินกรวด และก้อนหินใหญ่ - โมดูลัส Subgrade Reaction - ความเร็วของคลื่นต้นสะเทือน - แนวทางการออกแบบเพื่อต้านแผ่นดินไหว

การสำรวจชั้นพื้นฐาน ควรเริ่มด้วยการเจาะสำรวจดิน พร้อมการทดสอบ Standard Penetration Test โดยที่จำนวน ระยะห่าง และความลึกของหลุมเจาะจะถูกกำหนดโดยสภาพภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยา ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจชั้นดินในบริเวณพื้นที่โดยรอบ โดยทั่วไประยะห่างของหลุมเจาะจะประมาณ 200 ถึง 500 เมตร (JSCE-Japanese Standard) อัตราส่วนที่ใช้รูปตัดตามยาวของชั้นดินธรรมดา คือ 1 : 1,000 ถึง 1 :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5,000 ตามแนวราบและ 1 : 200 ถึง 1 : 500 ตามแนวดิ่ง หรือตามความสะดวกของการใช้งาน โครงร่างทางธรณีวิทยาจะมีลักษณะของชั้นดิน และค่า N ของชั้นดินแต่ละชั้น ซึ่งแสดงถึงปัญหาทางธรณีวิทยาที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield

การสำรวจชั้นรายละเอียดจะดำเนินการในตำแหน่งที่ตั้งที่มีปัญหา ซึ่งวางอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สำรวจมา หลุมที่เจาะสำหรับการสำรวจอาจจะเป็นสาเหตุของการไหลเข้ามาของน้ำและอาจก่อปัญหาขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ Shield ประเภทที่ใช้ Slurry Shield และ Compressed Air Shield เนื่องจากแรงดันและ Slurry อาจรั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.62 จึงจำเป็นต้องเอาใจใส่เป็นพิเศษกับตำแหน่งที่อยู่ของหลุมและการถมดินกลับ



รูปที่ 4.62 แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ขณะเจาะอุโมงค์

การสำรวจชั้นรายละเอียดจะดำเนินการเพื่อเสริมการสำรวจเบื้องต้นและพื้นฐาน โดยจะทำการเพิ่มจุดสำรวจในตำแหน่งที่อาจเป็นปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบและก่อสร้าง และเพื่อให้ได้ข้อมูลการออกแบบในกรณีเฉพาะ เช่น แผ่นดินไหว การสำรวจประเภทนี้อาจจะประกอบด้วย การวัดขนาดก้อนกรวดสูงสุด การทดสอบแรงดันดินด้วย Pressuremeter การทำ PS-logging และอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 4.4 โดยการใช้หลุมเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น

1. ลักษณะภูมิประเทศ

การสำรวจควรเริ่มต้นด้วยการสังเกตและเข้าใจลักษณะภูมิประเทศตามเส้นแนวอุโมงค์เนื่องจากว่า มันจะสะท้อนถึงสภาพดินใต้พื้นดิน เช่น ถ้าหากสถานที่ที่จะทำการสำรวจอยู่บนภูเขาหรือที่ราบสูงก็มักจะคาดการณ์ได้ว่าไม่มีชั้นที่ดินอ่อนอยู่ข้างใต้ และควรจะสังเกตว่าอุโมงค์อาจจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของความดันของดินที่ไม่สมมาตร ถ้าหากเส้นทางไปตามแนวหรือข้ามขอบแนวของที่ต่ำหรือที่ราบสูง

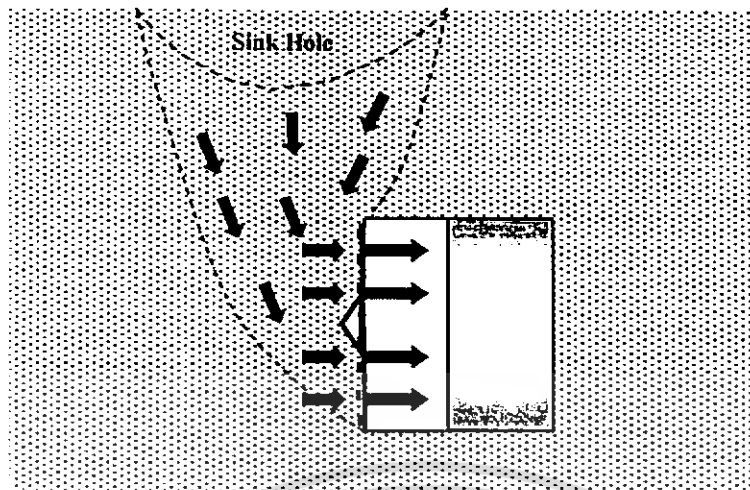
2. ลักษณะทางธรณีวิทยา

เป็นความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงลักษณะทางธรณีวิทยาใต้พื้นดิน ในพื้นที่ที่ครอบคลุมแนวอุโมงค์ที่กำลังพิจารณาทุกเส้นทาง โดยการเก็บข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับสภาพของดิน โดยการทำการตรวจสอบสถานที่ร่วมไปกับการสำรวจเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลข่าวสารที่เป็นประโยชน์ยังสามารถหาได้จาก วารสารทางวิชาการและหน่วยงานราชการ เช่น กรมทรัพยากรธรณีและกรมชลประทาน เป็นต้น

3. สภาพดิน

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ Slurry Shield ที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะ จะต้องทำการสำรวจขนาด รูปร่าง ความแข็ง และเปอร์เซ็นต์ของกรวด ขนาดละเอียดหรือค่าสัมประสิทธิ์ Coefficient of Uniformity (C_u) ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังต่อไปนี้

- ดินเหนียวเกาะติด Cutter และที่อุดตัน Cutter Chambers ทำให้หัวเจาะไม่สามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้
- การพังทลายของหน้าดิน โดยเฉพาะที่เป็นทรายหลวมที่ส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการทรุดตัวบนผิวดินเป็นหลุมขนาดใหญ่ (Sink Hole) ดังแสดงในรูปที่ 4.63 เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถก่อดัวได้
- ดินที่มีลักษณะเป็นกรวดอาจก่อให้เกิดการสึกกร่อนและทำความเสียหายแก่ Cutter และที่อุดตันท่อลำเลียงดินออก



รูปที่ 4.63 แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิด Sink Hole

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield, EPB) จำเป็นที่จะต้องตรวจสอบขนาดใหญ่ที่สุดและรูปร่างของกรวด ความแข็ง ขนาดคละของดิน และค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ เพื่อจะออกวัสดุและรูปร่างของใบตัดและขนาดของช่องเปิดส่วนหน้าของหัวเจาะ สายพานลำเลียงและส่วนประกอบอื่นๆ ให้มีความเหมาะสม

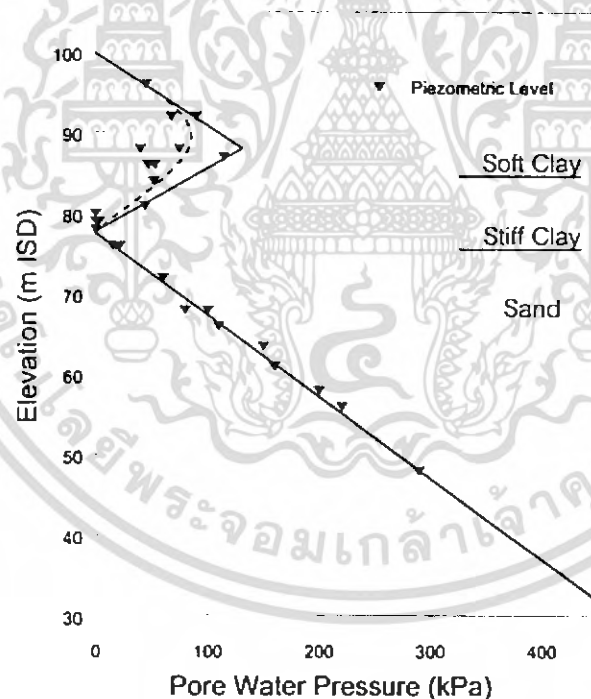
ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดย Pneumatic หรือ Compressed Air ในชั้นทรายหลวมได้ระดับน้ำใต้ดิน ทรายอาจจะพังทลายและน้ำจะทะลักเข้ามาในส่วนหน้าของหัว ถ้าหากความดันต่ำเกินไป ถ้าหากความดันสูงเกินไปอาจส่งผลให้ทรายเกิดการสั่นและนำไปสู่ปรากฏการณ์ทรายดูด (Quick Sand) ดังนั้นจึงยากที่จะรักษาสสมดุลระหว่างความดันภายในและภายนอกซึ่งเป็นผลมาจากความดันดิน และความดันน้ำที่ผสมผสานในดินประเภทนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระยะจากผิวดินถึงอุโมงค์มีค่าน้อยยิ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายบนผิวดิน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบขนาดคละ อัตราส่วนช่องว่าง ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำและค่า Stability Number (N) ของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ

หากต้องการขุดเจาะอุโมงค์ในดินฝุ่น (Silt) หรือดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) มีค่า N ประมาณ 2 น้อยกว่า จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน หน่วยแรงอัดของดิน (Unconfined Compression Strength) ค่าการเสีรูปและค่าการยุบตัวคายน้ำของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะและ การทรุดตัวของดินอย่างมีประสิทธิภาพ

4. น้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินมักจะทำการวัดในระหว่างการทำการเจาะสำรวจดิน อย่างไรก็ตามควรจะสังเกตว่า ความดันของน้ำในชั้นซึม เช่น ชั้นทรายและชั้นกรวด ที่อยู่ใต้ชั้นที่บีบน้ำ เช่น ชั้นดินเหนียว ดังกรณีฐานดินกรุงเทพ ไม่ได้มีแรงดันน้ำสถิตยระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 4.64 จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดความดันน้ำ ในแต่ละชั้นดินโดยละเอียด

ระดับน้ำใต้ดินและระดับความดันน้ำในดินอาจจะผันผวน เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยเฉพาะในฤดูฝน จึงมีความสำคัญที่จะบันทึกสภาวะขณะทำการวัดทุกครั้ง ถ้าหากพบความดันน้ำสูงในชั้นซึม น้ำจะต้องวัดค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ ทิศทางและความเร็วของน้ำใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ สามารถคาดคะเนได้จากการขนาดละเอียดของดิน แต่การทดสอบในที่(In-Situ Test) เช่น Well Piezometer Test ยังคงมีความสำคัญเช่นเดียวกันที่จะวัดสสารในน้ำใต้ดิน เช่น ปริมาณเกลือ



รูปที่ 4.64 ระดับความดันน้ำในดินที่ตรวจวัดในโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

5. สภาพอากาศไร้ออกซิเจน ก๊าซอันตรายและก๊าซไวไฟ

ถ้าหากชั้นที่เป็นทราย หรือที่เป็นกรวดอยู่ด้วยระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำเนื่องมาจากการสูบน้ำจากบ่อมากเกินไป การใช้บ่อลึกและอื่นๆ ภายใต้อันที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ ช่องว่างในชั้นที่สามารถแทรกซึมได้อาจจะบรรจุไปด้วยอากาศที่ขาดออกซิเจนหรือก๊าซที่เป็นอันตราย ก๊าซมีเทนที่รั่วสามารถก่อให้เกิดการระเบิด การมีอยู่ของก๊าซจะตรวจไม่ใช่เฉพาะสำหรับการวางแผนงานเท่านั้น แต่ก็จะต้องทำเพื่อความปลอดภัยด้วยเช่นกัน ก๊าซที่เป็นอันตรายอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ มาตรการเพื่อป้องกันการผุกร่อนของอุโมงค์ และส่วนประกอบที่เป็นเหล็กจะมีความจำเป็นถ้าหากตรวจพบต้องพิจารณาถ้าหากตรวจพบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้าหากตรวจพบก๊าซอันตรายเหล่านี้ จะต้องคำนึงถึงมาตรการการระบายอากาศที่พอเพียง และจำเป็นต้องมีมาตรการป้องกันการระเบิดหรือติดไฟ

4.2.1.5 การสำรวจเพื่อหามาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หัวข้อดังต่อไปนี้จะได้รับการสำรวจเมื่อมีความจำเป็นที่จะป้องกันสิ่งแวดล้อมระหว่างทำการก่อสร้างและหลังจากการสร้างอุโมงค์

1. เสียงและการสั่นสะเทือน
2. การเคลื่อนตัวของพื้นดิน
3. ระดับน้ำใต้ดิน
4. อากาศที่ขาดออกซิเจน และก๊าซที่เป็นอันตราย เช่นก๊าซมีเทน
5. กากหรือตะกอนเคมี
6. ผลพลอยได้จากการก่อสร้าง
7. อื่นๆ

ตามวิธีการของการป้องกันสิ่งแวดล้อม หัวข้อที่ได้ทำเป็นระบบการป้องกันจะต้องได้รับการสำรวจก่อนและระหว่างการสร้าง และผลควรจะนำมาใช้สำหรับการออกแบบและการจัดการการก่อสร้างบางหัวข้อของหัวข้อเหล่านี้ควรจะต้องได้รับการสำรวจหลังจากการสร้างตามที่จำเป็นด้วยเช่นกันในการตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม

1. เสี่ยงและการสั่นสะเทือน

ควรทำการประเมินผลกระทบของเสี่ยงและการสั่นสะเทือน จากการก่อสร้างทั้งหมดก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อหาวิธีป้องกัน โดยเฉพาะพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบมากเป็นพิเศษ เช่น โรงพยาบาล และโรงเรียน

2. การเคลื่อนตัวของพื้นดิน

อาคาร และสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์จะต้องได้รับการสำรวจ ก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อตรวจสอบสภาพอาคารทั่วไป และจัดประเภทของอาคารตามลำดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น อาคารคึกแถวเก่า 3 ชั้น ซึ่งมีเสาเข็มสั้น อาจจะถูกจัดอยู่ในประเภทที่ต้องระมัดระวัง และต้องติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวทั้งก่อนการก่อสร้าง ระหว่างการก่อสร้างและหลังจากการก่อสร้างเพื่อจะหาจำนวนระดับของการยกระดับขึ้นของพื้นดิน หรือ การจมลงของพื้นดิน

ด้านการทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์เป็นปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างได้ดินและบนดินให้น้อยที่สุด ดังนั้นการประเมินค่าการทรุดตัวของดินก่อนการก่อสร้างจึงมีความจำเป็นเพื่อหาแนวอิทธิพล (Influenced Zone) และระบุตำแหน่งที่อาจเป็นอันตรายจากการก่อสร้าง อีกทั้งยังใช้เป็นบรรทัดฐานในการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อการรักษาระดับการทรุดตัวให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหรือค่าที่ประมาณไว้ ทั้งนี้เพื่อควบคุมผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์

3. ระดับน้ำใต้ดิน

ควรทำการสำรวจระดับน้ำใต้ดินและคุณภาพของบ่อน้ำในแนวอิทธิพล เนื่องจากว่า การเปลี่ยนแปลงในระดับน้ำใต้ดิน ที่เกิดจากการก่อสร้างอาจจะกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความธรรมชาติ และชีวิตของผู้อาศัยหรืออุตสาหกรรมในพื้นที่การก่อสร้าง ควรบันทึกเวลาของการสำรวจระดับน้ำใต้ดิน เพราะวาระดับน้ำใต้ดินผันผวน ตามฤดูกาล

4. อากาศที่ขาดออกซิเจน และก๊าซอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน

ออกซิเจนในที่ว่างจะถูกทำให้หมดสิ้นไป โดยการออกซิเดชันของ ปริมาณแร่ เหล็ก และอินทรีย์วัตถุในดิน และอากาศที่ขาดออกซิเจนซึ่งเป็นผลตามมา อาจจะถูกผลักดันเข้าไปสู่บ่อใกล้เคียง และชั้นใต้ดินโดยการประยุกต์ของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบอัดอากาศ (Pneumatic Shield) ในชั้นทราย หรือกรวดที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าได้ชั้นดินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้

ดังนั้น ตำแหน่งที่ตั้งของบ่อ ระดับน้ำของบ่อและรากฐานของโครงสร้างที่จะได้รับผลกระทบ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้าง และการรั่วของอากาศที่ขาดออกซิเจนจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับการตรวจสอบระหว่างการก่อสร้าง การมีอยู่ของก๊าซที่เป็นอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน และอื่นๆ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้างโดยการเจาะ ถ้าหากตรวจพบก็จะวัดและตรวจสอบความเข้มข้นของมันก่อนและระหว่างการก่อสร้าง

5. กากหรือตะกอนสารเคมี

คุณภาพของน้ำในบ่อและแหล่งน้ำอื่น เช่น คลองหรือแม่น้ำ อาจได้รับผลกระทบจากการรั่วซึมของน้ำปูน (Grout Material) หรือสารละลายเบนโทไนท์ จากการทำงานของหัวเจาะ Shield ดังนั้นจะต้องสำรวจและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระหว่างการก่อสร้างเป็นระยะ

6. สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง

การลดในสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างและการรีไซเคิลของเสียจากการก่อสร้างจะได้รับการส่งเสริมสำหรับการดำเนินงานแบบราบเรียบ และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเมื่อโครงการขุดอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield อยู่ภายใต้การวางแผนและการออกแบบ และอยู่ระหว่างการก่อสร้าง จะต้องจัดให้มีตำแหน่งที่ตั้งเส้นทางของการลำเลียงของเสีย และสถานที่การกำจัดขั้นสุดท้าย

สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างที่ได้จากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield (ดินที่เกิดจากการก่อสร้างและของเสียจากการก่อสร้าง) จะถูกกำจัดอย่างเหมาะสมโดยอาศัย “แนวทางปฏิบัติสำหรับการจัดการที่เหมาะสมของสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง”

“สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง” หมายถึง วัสดุที่เกิดขึ้นมาจากการก่อสร้าง

“ดินที่เกิดจากการก่อสร้าง” หมายถึง วัสดุที่เป็นดินที่เกิดขึ้นมาจากการก่อสร้าง

“ของเสียจากการก่อสร้าง” หมายถึง ผลพลอยได้จากการก่อสร้างตามที่ได้ให้คำนิยาม ใน พ.ร.บ. สำหรับการกำจัดของเสีย และสุขอนามัย (กฎหมาย 1970 เลขที่ 137)

7. อื่นๆ

การสำรวจปริมาณการจราจรจะดำเนินการเพื่อจะประเมินผลกระทบของยานพาหนะสำหรับการก่อสร้างที่มีต่อการจราจรทั่วไปรอบๆ ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และจะกำหนดเส้นทางยานพาหนะสำหรับการก่อสร้างด้วยเช่นกัน กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้องจะต้องศึกษาโดยต่อเนื่อง เนื่องจากว่าการประเมินสิ่งแวดล้อมอาจจะกำหนดสำหรับวัตถุประสงค์ทางการรักษาสีสิ่งแวดล้อม

4.2.1.6 การควบคุมงานสำรวจและการวางแผนสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน

ลักษณะทางเรขาคณิตของอุโมงค์ใต้ดิน (Tunnel Geometry)

ก) ความสัมพันธ์ของแนวศูนย์กลางเส้นทางกับแนวศูนย์กลางอุโมงค์

สำหรับระบบขนส่งสาธารณะนั้น โดยทั่วไปแล้ว แนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ จะไม่เป็นแนวเดียวกัน เนื่องจากเงื่อนไขบังคับในการขุดเจาะ แนวศูนย์กลางของเส้นทาง เป็นตัวควบคุมพื้นฐานในระหว่างการวางแผนของระบบ อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินนั้น ต้องมีหลักที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน ซึ่งบุคลากรภาคสนามของผู้รับเหมาและวิศวกรมักจะใช้ แนวศูนย์กลางของอุโมงค์ เพื่อเป็นหลักในการควบคุมอุโมงค์มากกว่าเลือกใช้แนวศูนย์กลางของเส้นทาง

ระยะตั้งฉากตามแนวราบและแนวตั้ง จากแนวศูนย์กลางของเส้นทาง ถึงแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ แปรผันกับการยกระดับขึ้นของเส้นทาง แนวศูนย์กลางอุโมงค์ตามแนวโค้งได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน(ดังรูป 4.65) ดังนั้นแนวศูนย์กลางอุโมงค์จึงควรพัฒนา ให้ประกอบด้วย เส้นสัมผัสรอบวง, เส้นรอบวง และรูปตัด และการประมาณแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ตามทฤษฎีต้องอยู่ภายใต้เกณฑ์ความคลื่อนที่กำหนดให้ (0.25 นิ้ว) แนวศูนย์กลางนี้ควรรวมเข้าไว้ในแบบก่อสร้างของหนังสือสัญญาก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินและการควบคุมอุโมงค์ทั้งหมดก็ควรตั้งอยู่บนพื้นฐานเช่นกันนี้

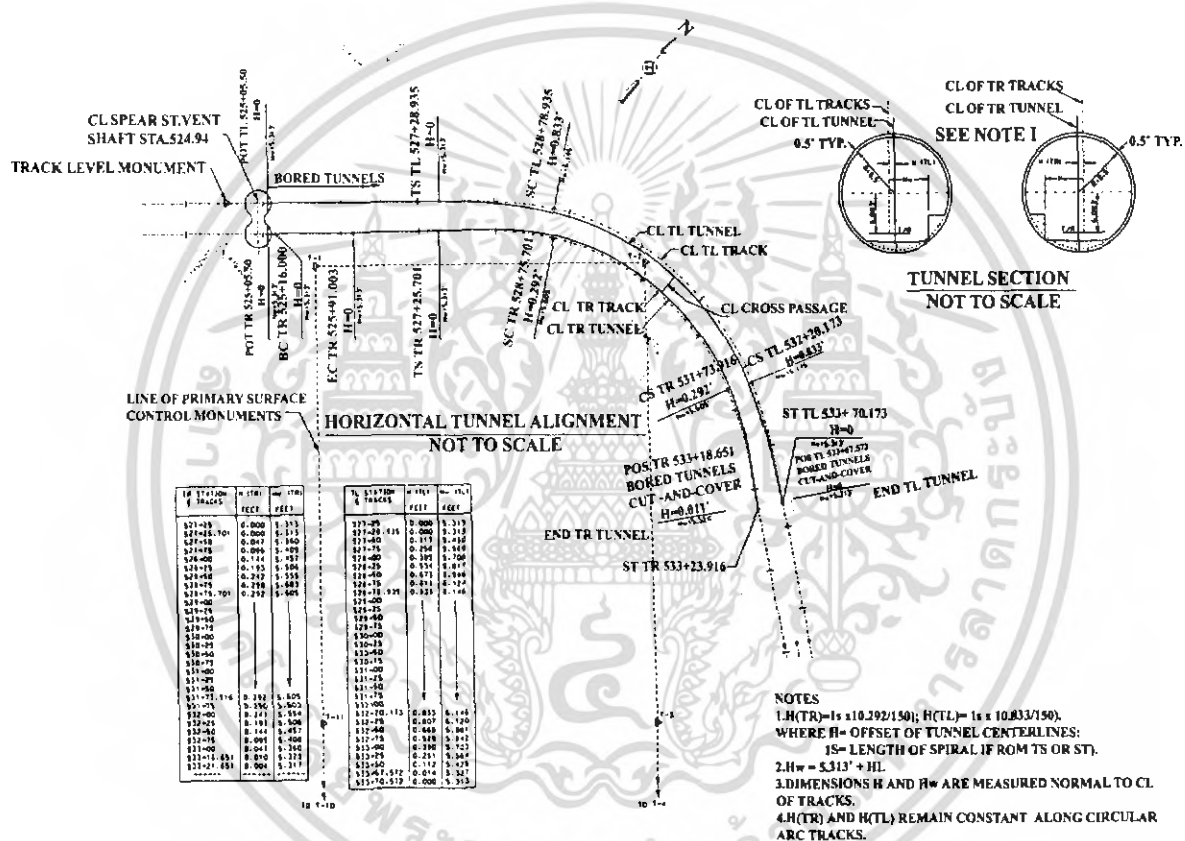
รายการระบุตำแหน่งโคออดิเนตของจุด, แรงเบกทานรอบวงของอุโมงค์, ค่าระดับของจุด และความลาดชันที่ระยะห่างกัน 5 ฟุต ตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์ ก็ควรได้ระบุไว้ในเอกสารสัญญาการก่อสร้าง โดยเหตุที่ การตั้งสถานีตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์และแนวศูนย์กลางของเส้นทางนั้นแตกต่างกัน เนื่องจาก ความแตกต่างของรัศมีของแนวโค้ง หมายเลขระบุสถานีตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์และ แนวศูนย์กลางเส้นทาง จึงควรระบุไว้ ที่ส่วนเริ่มต้นและส่วนท้ายของโครงการก่อสร้างรวมทั้ง ที่จุด TS (tangent spiral), จุด SC (spiral curve) และที่จุดต่างๆ ซึ่งมีความสำคัญ เช่น ที่ Vent shaft หรือ ทางผ่านเข้าสู่อุโมงค์ สถานีเริ่มต้นสำหรับแนวศูนย์กลางอุโมงค์ ควรเริ่มต้นที่ 0+00 สำหรับในแต่ละโครงการก่อสร้าง ส่วนหมายเลขสถานีตามเส้นทางนั้น ดำเนินไปตามระยะทางทั้งหมด ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ก็รวมหลายๆโครงการก่อสร้างเข้าไว้ด้วยกัน

ถ้าระบบขนส่งสาธารณะมีจุดศูนย์กลางของระบบ ประกอบด้วยเส้นทางหลายสาขา ในทิศทางที่ต่างกัันนั้น ที่จุดศูนย์กลางนี้ก็ควรถูกกำหนดให้เป็นสถานี 0+00 การขยายสถานี

ออกไป ตามเขตพื้นที่รอบๆเมือง รวมทั้งการขยายเส้นทางในอนาคตนั้น ก็จะสามารถทำได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาของการลำดับการตั้งสถานี

ข) เส้นทางงานสำรวจ

เส้นทางของการก่อสร้างนั้น ดำเนินตามเส้นทางจากการสำรวจ เพื่อให้พนักงานก่อสร้างได้ทำการติดตั้งหัวขุดเจาะหรือเครื่องมือและอุปกรณ์ เส้นทางการทำงานอาจจะดำเนินไปตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์หรือตามจุดตำแหน่งของเลเซอร์ ส่วนใหญ่แล้วเส้นทางในการทำงานนั้น มีความถูกต้องได้ โดยการทำการรอบ (Traverse survey)



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างแนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางอุโมงค์

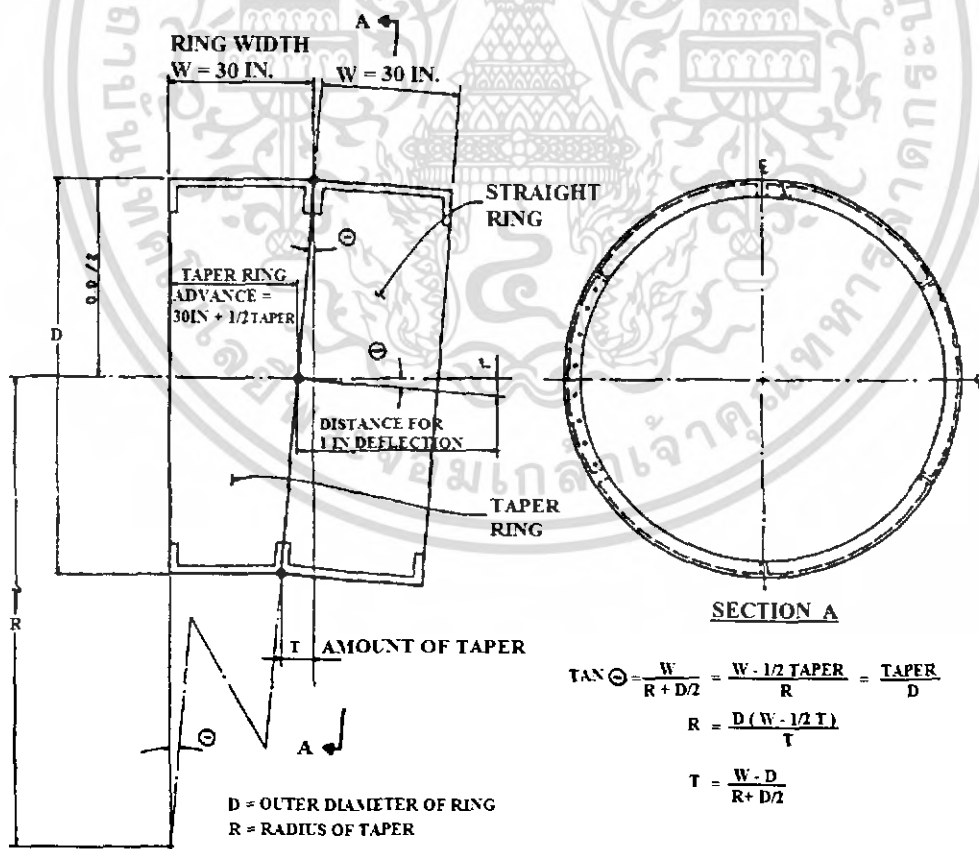
ก) ผนังอุโมงค์และวงผนังอุโมงค์แบบลดขนาด (Taper ring)

ผนังอุโมงค์นั้นมีหลายชนิด ได้แก่ เหล็กกล้า, เหล็กหล่อ และ คอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งถูกติดตั้งในอุโมงค์เพื่อใช้กันดินไว้ ผนังอุโมงค์ที่ใช้ก่อสร้างในดินอ่อนสำหรับโครงการ San Francisco BART system เป็นวงผนังอุโมงค์ที่ประกอบด้วย ชิ้นส่วนเหล็ก 6 ชิ้น และมีชิ้นส่วนขนาดเล็กชิ้นสุดท้าย (small key segment) เชื่อมต่อกันเป็นวง โดยที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้นเข้าสลักต่อกัน รวมทั้งปีกยื่นของผนังอุโมงค์วงสุดท้ายที่ส่วนหางของเครื่องขุดเจาะด้วย เพื่อประกอบกันเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงผนังอุโมงค์ขนาดมาตรฐาน กว้าง 2.5 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 17.5 ฟุต ผนังอุโมงค์ขนาดมาตรฐานนั้นออกแบบมาเพื่อต่อกันเป็นแนวโค้ง ให้ได้รัศมีมากกว่า 1,500 ฟุต ส่วนผนังอุโมงค์แบบพิเศษซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18.0 ฟุต ได้รัศมีของแนวโค้งอุโมงค์น้อยกว่า 1,500 ฟุต ซึ่งตามแนวโค้งเหล่านี้ จะต้องมีย่อว่างมากพอสำหรับส่วนที่ยื่นออกจากตัวรถไฟใต้ดิน

หากมีการก่อสร้างอุโมงค์ตามแนวตรงเป็นส่วนมาก ก็จะทำให้การประกอบผนังอุโมงค์สำหรับแนวตรงนั้นตามปกติ ยกเว้นสำหรับวงอุโมงค์ที่มีการเบี่ยงเบนไปด้านใดด้านหนึ่ง อันเนื่องมาจากวงอุโมงค์ที่ผิดรูปทรงไป ดังนั้นสำหรับแนวอุโมงค์โค้ง ทั้งแนวโค้งและแนวราบ จึงต้องใช้วงผนังอุโมงค์แบบลดขนาด (Taper rings) ในการเปลี่ยนทิศทางของอุโมงค์ตามแนวโค้งและแนวราบ ความกว้างของวงผนังอุโมงค์นี้ได้แก่ 30, 29.25, 28.75 และ 28 นิ้ว (ดังรูป 4.66 และตาราง 4.5) รัศมีแนวโค้งของอุโมงค์เป็นตัวกำหนดประเภทและจำนวนของ Taper ring ที่ต้องการ ตาราง 4.5 แสดงให้เห็นถึง taper ring ของอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 17.5 ฟุต ซึ่งลดขนาดลง 0.75 นิ้ว ประกอบกันเป็นอุโมงค์ที่มีรัศมีแนวโค้ง 621.25 ฟุต แต่สำหรับแนวโค้งที่มีรัศมีมากกว่านี้ จะต้องใช้ Taper ring สลับกันกับวงอุโมงค์ของแนวตรง จึงจะได้รัศมีแนวโค้งที่ขาวขึ้น



รูปที่ 4.66 ลักษณะทางเรขาคณิตของ Taper ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลลักษณะของ Taper ring

Item	Ring O.D.		
	17 ft., 6 in	18 ft., 0 in	18 ft., 0 in
Ring O.D. (inches)	210.0	216.0	216.0
Amount of Taper (inches)	0.75	1.25	2.00
Angle θ (degrees)	0° 12' 16.65"	0° 19' 53.65"	0° 31' 49.81"
Deflection in 30 inches (inches)	0.107	0.174	0.278
Distance to Deflect 1 inch (feet)	23.33	14.44	9.10
Radius of Continuous taper rings (feet)	691.25	423.0	261.0

บ่อยครั้งที่ผู้รับเหมาก่อสร้างต้องทำการประมาณจำนวนของ วงผนังอุโมงค์ตาม แนวตรงและ taper ring ที่ต้องการ ก่อนเริ่มการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งการประมาณจำนวนผนังอุโมงค์ ทั้ง 2 ชนิดตามหลักทางทฤษฎีนั้น ตั้งอยู่บนพื้นฐานของค่ารัศมีและความยาวของแนวโค้ง ซึ่ง สัมพันธ์ต่อกัน รวมทั้งลักษณะทางเรขาคณิตของ taper ring อีกด้วย จำนวนของ taper ring ที่ ต้องการจริง ๆ นั้น จะมากกว่าจำนวนที่ได้จากทางทฤษฎีเสมอ ทั้งนี้เนื่องจาก taper ring จำนวน หนึ่งจะถูกใช้ไปกับการแก้ไข ในกรณีที่มีการขุดเจาะอุโมงค์เผลอออกจากแนว เพื่อเพิ่มความใกล้เคียงใน การหาจำนวนวงผนังอุโมงค์ที่ต้องการจริงๆ จึงได้ทำการเปรียบเทียบจำนวนผนังอุโมงค์ที่ได้ติดตั้ง จริง กับจำนวน taper ring ที่ได้จากทฤษฎี ที่ใช้สำหรับอุโมงค์ตามแนวโค้ง ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อกำหนดของวงผนังอุโมงค์แนวตรงและ Taper ring ตามรัศมีแนวโค้งที่ต่างกัน

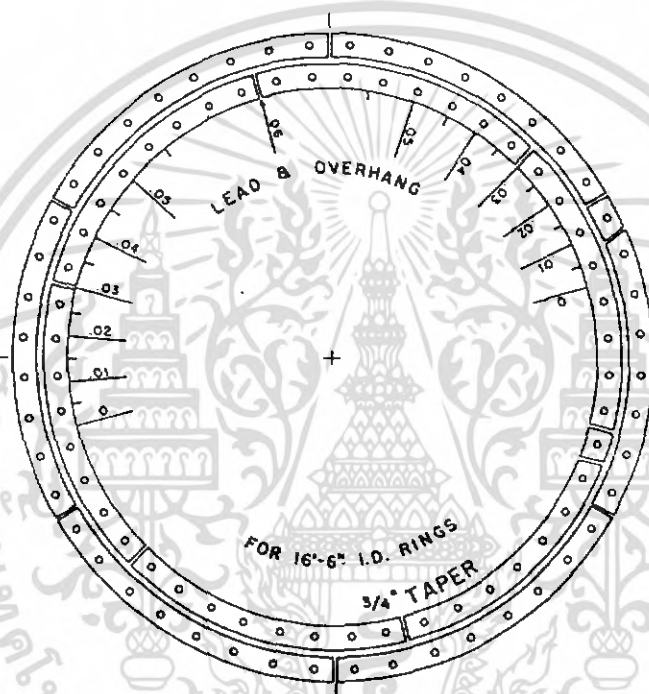
				Tunnel Lined with 2.5-ft Wide Steel Lining Rings.		
				17.5-ft Diameter		18.0-ft Diameter
				Line	Straight Tunnel	1.785-ft Radius Tunnel
Theoretical number Of rings required	Straight Rings		1	660	234	111
	Taper Rings	0.75-inch taper	2	-	148	-
		1.25-inch taper	3	-	-	119
		2.0-inch taper	4	-	-	37
Theoretical footage			5	1650.00	995.00	667.50
Actual Footage *			6	1649.10	995.00	656.85
Actual number of Rings Installed	Straight Rings		7	621	204	85
	Taper Rings	0.75-inch taper	8	39	178	-
		1.25-inch taper	9	-	-	138
		2.0-inch taper	10	-	-	44
		0.75-inch taper	11	6%	8%	-
		1.25-inch taper	12	-	-	7%
		2.0-inch taper	13	-	-	3%
* The difference between theoretical and actual footage is caused by the fact that each taper ring is about one-half a taper shorter at the centerline tunnel than the straight ring.						

Extra taper ring สามารถติดตั้งแบบกลับหัวต่อกัน เป็นคู่ของวงอุโมงค์แนวตรงได้เสมอ การเปรียบเทียบระหว่างบรรทัดที่ 3 และ 4 ในตาราง 4.6 นั้นแสดงถึง ความยาวของอุโมงค์เป็นฟุตตามทฤษฎี ซึ่งคำนวณได้โดยการคูณจำนวนวงผนังอุโมงค์ด้วยความกว้างของผนัง ซึ่งความยาวนี้ต้องลดลงอีกเนื่องจากเศษที่ลดลงของ taper ring ที่ได้ติดตั้ง

การติดตั้ง Taper ring นั้น โดยทั่วไปแล้วส่วนกว้างที่สุดของชิ้นส่วน จะวางลงตามแนวแกนราบ และคัง ดังนั้นการเปลี่ยนทิศทางจึงเกิดขึ้นตามแนวราบหรือแนวคังเท่านั้น อย่างไรก็ตาม มีบ่อยครั้งที่ส่วนกว้างสุดของ taper ring ต้องวางอยู่ที่ตำแหน่งอื่น เนื่องจากความจำเป็นของการต่อเชื่อมของวงอุโมงค์ เมื่อเป็นเช่นนั้น การเปลี่ยนทิศทางจึงเกิดขึ้นได้ทั้งระนาบแนวราบและแนวคังควบคู่กัน taper clock ที่แสดงดังรูป 4.66 ช่วยให้สะดวกต่อการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนทิศทางตามแนวราบและแนวคัง ตามตำแหน่งของ taper ring ที่แตกต่างกันไปในการใช้ taper clock นั้น จะใช้แบบจำลองที่ติดไว้บนกระดาษแข็ง และวงผนังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในจะถูกแยกออกจากวงผนังภายนอก วงผนังภายนอกจะถูกหมุนให้ได้ตำแหน่งตามที่วงผนัง
อุโมงค์ได้ถูกติดตั้งไว้ ก่อนที่จะทำการพิจารณาถึง taper ring

สำหรับ taper ring ตามตำแหน่งที่แสดงดังรูป 4.66 นั้น จะได้ส่วนที่ยื่นออก 0.15 ฟุต และ
เอียงออกทางซ้าย 0.057 ฟุต ซึ่งจะต้องดึงอุโมงค์กลับไปทางขวาให้ได้ตามแนว หากไม่ต้องการให้
อุโมงค์เกิดการขยับระดับนั้น จะต้องทำการเวียนสลักยึด 2 รู ของ taper ring ไปตามเข็มนาฬิกา จึง
จะทำให้ส่วนที่ยื่นออกหายไป และเอียงออกทางซ้าย 0.06 ฟุต อย่างไรก็ตาม ดังที่กล่าวมานั้น เนื่อง
ด้วยจุดเชื่อมต่อของวงผนังอุโมงค์ที่ใช้จัดเรียงแนวกับวงผนังอุโมงค์ที่ติดกันนั้น จะมีผลกระทบต่อ
ผนังอุโมงค์ โดยทำให้กำลังการรับแรงลดน้อยลงได้



รูปที่ 4.67 Taper clock.

4.2.1.7 การสำรวจทางธรณีวิทยา

การสำรวจทางธรณีวิทยามีเนื้อหา ดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการสำรวจ
2. ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการเจาะสำรวจชั้นดิน
3. ความร่วมมือและการฝึกอบรม
4. การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์
5. คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินสำหรับงานอุโมงค์
6. ขอบเขตของธรณีเทคนิคสำหรับโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเจาะ

8. การใช้เครื่องมือในการติดตาม

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการสำรวจ

มีความมุ่งหมายเพื่อที่จะหาขอบเขตและความหนาแน่นดินที่แน่นอน ในบริเวณหนึ่งๆพร้อมวิเคราะห์หาคุณสมบัติของชั้นดินเหล่านั้นทั้งด้านกายภาพ และทางด้านวิศวกรรม โดยทั่วไปจะเจาะสำรวจทดสอบภาคสนามและเก็บตัวอย่างชั้นจากแต่ละความลึกเพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบต่อในห้องปฏิบัติการ วิศวกรผู้ออกแบบจะไม่สามารถออกแบบได้หากปราศจากการสำรวจพื้นที่และหาข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินที่ถูกต้องและเพียงพอ

2. ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการเจาะสำรวจชั้นดิน

ก.) ผลกระทบจากสภาพชั้นดินที่แปรปรวน

- เมื่อมีการสำรวจชั้นดิน อาจพบว่าสภาพชั้นดินแปรปรวน หรือไม่ตรงกับที่ได้คาดไว้จากข้อมูลเดิมในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวางแผน กำหนดตำแหน่งและจำนวนหลุมเจาะสำหรับการออกแบบแต่ละโครงการ ควรสังเกตว่าการเจาะสำรวจนี้จะได้เพียงข้อมูลทางความลึก ณ ตำแหน่งหลุมเจาะเท่านั้น โดยจะไม่ทราบข้อมูลชั้นดินในบริเวณอื่นหรือชั้นดินระหว่างหลุมเจาะ นอกจากจะใช้หลักการประมาณการ หรือคาดคะเนโดยวิธีการลากเส้นเชื่อมโยงลักษณะเฉลี่ยของชั้นดินแต่ละชั้นจากข้อมูลชั้นดินที่ทราบคุณสมบัติแล้วจากหลุมเจาะสำรวจจริงเท่านั้น กรณีที่พบว่าชั้นดินในพื้นที่โครงการมีความแปรปรวนมาก อาจจัดแยกขอบเขตพื้นที่ตามลักษณะหรือชนิดของชั้นดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงคล้ายคลึงกัน การแบ่งแยกขอบเขตพื้นที่นี้อาจจัดตามลักษณะทางกายภาพ หรือลักษณะคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมหรือตามตัวแปรค่าเฉพาะของดิน (Soil Parameter) หรือตามความอ่อน-แข็ง หรือตามความหลวม-แน่น ของแต่ละชั้นดินเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจำแนกประเภทดินให้ออกแบบได้อย่างเหมาะสมตามกลุ่มชั้นดินที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีผลกระทบจากปัจจัยสภาพชั้นดินเช่นนี้ จึงควรมีการตรวจสอบปรับแก้ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่ได้พบจากสถานที่จริงอย่างใกล้ชิดโดยวิศวกรผู้ชำนาญการอีกครั้ง

ข.) ผลกระทบจากคุณภาพการเก็บตัวอย่างชั้นดินและคุณภาพการวิเคราะห์ทดสอบ

- ผู้ออกแบบไม่ได้ปรับแก้ค่าทดสอบที่ได้โดยตรงจากสนาม หรือไม่เข้าใจถึงสภาพชั้นดินที่มีปัญหา เมื่อนำผลการแปลค่าการสำรวจหรือการทดสอบที่คลาดเคลื่อนมาใช้ โดยเฉพาะเมื่อมีผลกระทบของคุณภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง

ระหว่างการก่อสร้างพบว่า ข้อมูลหรือสภาพชั้นดินที่คลาดเคลื่อนหรือผิดเพี้ยนไปจากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจก่อนอย่างมีนัยสำคัญหากไม่ได้มีการประสานงาน หรือรายงานให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรผู้ออกแบบได้แก้ไขแบบหรือแก้ไขรายการคำนวณ หรือแก้ไขการเจาะสำรวจตรวจสอบใหม่ ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพชั้นดินที่ค้นพบว่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลใหม่ที่เป็นจริงตรงกับแนวคิดในการออกแบบ ตลอดจนการกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างตามลำดับของงานแต่ละชนิด ซึ่งผู้ออกแบบได้เคยวางแผน ระบุ และรับรู้เข้าใจในหลักการไว้ก่อนแล้ว

ก.) ผลกระทบจากข้อมูลที่ได้จากการเฝ้าตรวจวัดระหว่างการก่อสร้าง

- เพื่อให้โครงสร้างมั่นคงไม่เกิดการเสียหายในภายหลัง วิศวกรผู้ออกแบบมักจะตั้งสมมุติฐานหรือกำหนดแบบจำลองโครงการให้อยู่ในกรณีวิกฤต หรือสมมุติให้มีปัจจัยเสี่ยงสูงซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ถ้าข้อมูลที่ได้รับระหว่างการออกแบบไม่ชัดเจนหรือไม่น่าเชื่อถือ สมมุติฐานที่เกินจริงย่อมทำให้ได้โครงสร้างขนาดใหญ่และไม่ประหยัด แต่ถ้าเจ้าของโครงการนั้นยอมให้มีการปรับปรุงหรือแก้ไขแบบได้บางส่วนเมื่อได้รับข้อมูลเพิ่มเติมจากการคอยเฝ้าติดตามสังเกตในระหว่างการก่อสร้าง ก็จะทำให้วิศวกรผู้ออกแบบเชื่อมั่นและสามารถคำนวณโครงสร้างบนพื้นฐานของความเป็นจริง ทำให้สามารถประหยัดค่าก่อสร้างของโครงการลงได้อีกมาก

การออกแบบโดยวิธีดังกล่าวข้างต้น เรียกว่า วิธีเฝ้าติดตามระหว่างการก่อสร้าง (Observation Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานใต้ดินที่มีตัวแปรมากหรือมีความเสี่ยงสูง จำเป็นต้องมีการวัดค่าและเฝ้าติดตามพฤติกรรมของชั้นดินอย่างใกล้ชิด ด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลที่รวดเร็วและสะดวกในทางปฏิบัติ เช่น การวัดแรงดันน้ำใต้ดิน การบันทึกระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลง การวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อนำมาปรับแก้แบบ เช่น งานอุโมงค์ รถไฟฟ้าใต้ดิน หรืองานขุดเปิดดินในระดับลึก

ในการออกแบบวิศวกรรมปฐพีด้วยวิธีการเฝ้าติดตามระหว่างการก่อสร้าง เริ่มต้นด้วยการเจาะสำรวจดินเพื่อตรวจสอบชั้นดินอ่อน หรือชั้นดินที่มีการทรุดตัวสูง ซึ่งคาดว่าจะเกิดปัญหาในการก่อสร้าง จากนั้นจึงจัดให้มีมาตรการตรวจวัด เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลและนำข้อมูลจากบริเวณที่คาดว่าจะทำให้เกิดปัญหานั้น หรือข้อมูลจากบริเวณข้างเคียง มาคำนวณปรับแก้ระหว่างการก่อสร้างได้ทันที

3. ความร่วมมือและการฝึกอบรม

โครงการใต้ดินต่างๆ มีแนวความคิดพื้นฐานสำหรับงานทางด้านธรณีวิทยาหรือธรณีเทคนิคจะต้องมีทิศทาง กฎระเบียบต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถทำได้โดยต้องมีการสำรวจทางธรณีเทคนิค (Geotechnical investigation)

ธรณีเทคนิคจะมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องเข้าใจและต้องนำไปใช้ได้ถูกต้อง สำหรับพนักงานทุกคน ไม่ใช่เฉพาะวิศวกรธรณีเทคนิค

วิศวกรธรณีเทคนิคหรือผู้ที่ชำนาญแต่ละคนจะต้องเข้าใจและต้องมีความเอาใจใส่แก่ลูกทีมทุกคนเนื่องจากงานอุโมงค์ต้องการความเข้มงวดทางด้านธรณีเทคนิคอย่างมากจึงต้องมีการอบรม การฝึกหัดต่างๆที่ดี โดยวิศวกรธรณีเทคนิคและวิศวกรปฐพี และต้องมีการควบคุมการปฏิบัติและมีการประเมินผลด้วย

4. การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์

การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์จะใช้ระบบ Unified Soil Classification (UC) การจำแนกชนิดของดินโดยระบบ UC นี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเนื้อดิน (Textural Characteristics) สำหรับเม็ดดินหยาบที่มีฝุ่น(ดินเม็ดละเอียด) ปนอยู่น้อย และไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ แต่สำหรับดินเม็ดละเอียดที่ขนาดเม็ดดินมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินจะประเมินคุณสมบัติด้วยการเขียนจุด (Plot) ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index , PI) ในแผนภูมิพลาสติกซิตี ในการจำแนกชนิดของดินแบบ UC คุณสมบัติของดินต่อไปนี้จะใช้เป็นพื้นฐานในการจำแนกชนิดของดิน

- 1) เปอร์เซ็นต์ของเม็ดกรวด หยาบ และดินเม็ดละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200)
- 2) ลักษณะของกราฟผลการทดสอบตะแกรงร่อน (การกระจายและความละเอียดของเม็ดดิน)
- 3) คุณสมบัติพลาสติกซิตี (Plasticity)

การจำแนกชนิดของดินแบบ UC เป็นวิธีการจำแนกชนิดของดินที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดสำหรับงานทั่วไป

ตารางที่ 4.7 การจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification System

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests			Soil Classification	
			Group Symbol	Group Name
Coarse-Grained Soils (More than 50% retained on No.200 sieve)	Gravels (More than 50% of coarse fraction retained on No.4 sieve)	Clean gravels (Less than 5% fines)	GW	Well-Graded Gravel
			GP	Poorly-Graded Gravel
		Gravels with fines (More than 12% fines)	GM	Silty Gravel
			GC	Clayey Gravel
	Sands (50% or more of coarse fraction passes No.4 sieve)	Clean sands (Less than 5% fines)	SW	Well-Graded Sand
			SP	Poorly-Graded Sand
		Sands with fines (More than 12% fines)	SM	Silty Sand
			SC	Clayey Sand
Fine-Grained Soils (50% or more passes the No.200 sieve)	Silts and Clays (Liquid limit less than 50)	Inorganic	CL	Lean Clay
			ML	Silt
	Silts and Clays (Liquid limit 50 or more)	Organic	OL	Organic Clay Organic Silt
		Inorganic	CH	Fat Clay
			MH	Elastic Silt
			Organic	OH
Highly Organic Soils	Primarily Organic Matter: dark in color;organic odor		PI	Peat

Note: Cobbles are defined as 3 to 12 inches. Boulder are defined as greater than 12 inches.

5. คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินทางด้านงานอุโมงค์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินแบ่งได้เป็น

- 1) Soil mass strength
- 2) Soil mass modulus
- 3) Soil mass permeability

ในเม็ดดินหยาบ เช่น ทราย ความแข็งแรง (Strength) ของมันมักจะถูกประมาณ โดยการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test , SPT) ซึ่งจะถูกทำให้เป็นมาตรฐานโดยประมาณเป็น Relative density โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 140 ปอนด์เป็นน้ำหนักทดสอบ และค่า Relative density จะถูกประเมินอย่างหยาบๆได้จากค่า “N” หรือ blows/ft ดังตารางที่ 4.8

สำหรับดินเม็ดละเอียดความแข็งแรง (Strength) ของดินจะอธิบายได้ในเทอมของ Consistency หรือ Undrained shear strength ดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 Terminology Used to Describe Soils Relative Density for Granular Soils

Relative Density	Standard Penetration Resistance (N-value) blows/ft	
very loose	0 to 4	Easily penetrated with ½-in. rebar pushed by hand
loose	4 to 10	Easily penetrated several inches with ½-in. rebar pushed by hand
medium dense	10 to 30	Easily to moderately penetrated with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer
dense	30 to 50	Penetrated 1 ft with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer
very dense	over 50	Penetrated only a few inches with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer

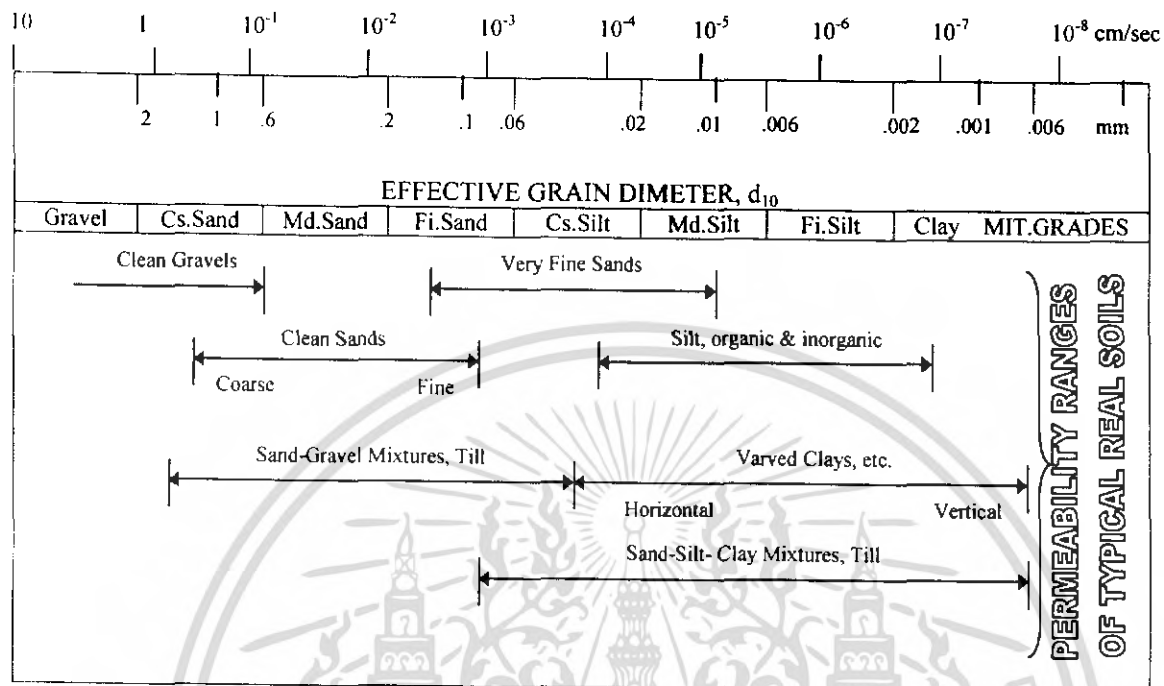
Consistency For Fine-Gravel (Cohesive) Soils

Consistency	Standard Penetration Resistance (N-values) blows/ft	Approximate Range of Unconfined Compressive Strength, tons/sq.ft.	Field Identification
very soft	less than 2	less than 0.25	Squeezes between finger when fist is closed; easily penetrated several inches by fist
soft	2 to 4	0.25 to 0.5	Easily molded by fingers; easily penetrated several inches by thumb
medium stiff	4 to 8	0.5 to 1.0	Molded by strong pressure of fingers; can be penetrated several inches by thumb with moderate effort
stiff	8 to 15	1.0 to 2.0	Dented by strong pressure of fingers; readily indented by thumb, can be penetrated only with great effort
very stiff	15 to 30	2.0 to 4.0	Readily indented by thumb nail
hard	over 30	over 4.0	Indented with difficulty by thumb nail

สำหรับค่าโมดูลัส (Soil Modulus) ได้ถูกวัดเป็นค่าความแข็งของดิน หรือการต้านทานต่อการเสียรูปจากแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

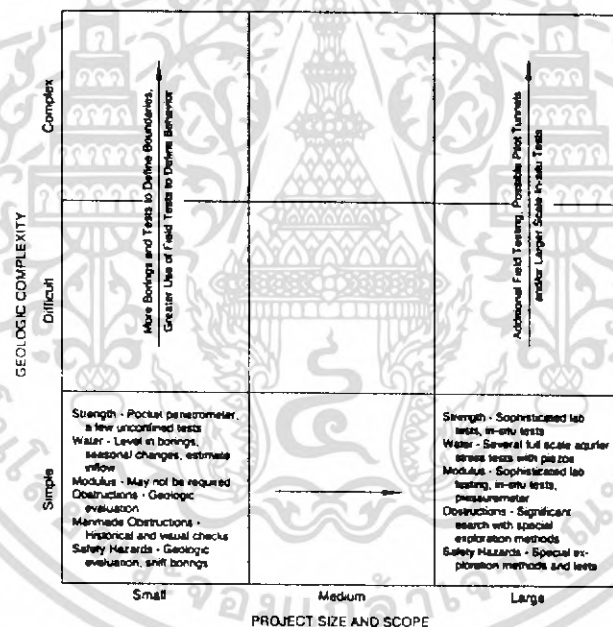
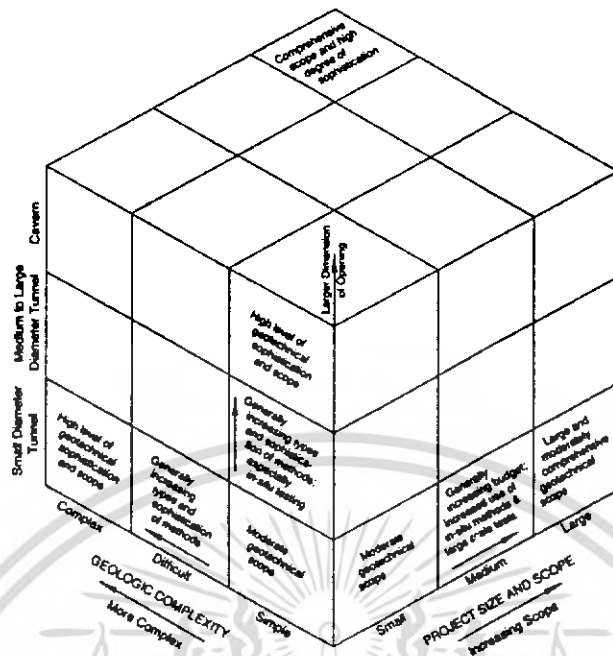
สำหรับค่าความซึมน้ำ (Permeability) บางทีอาจจะประมาณจากขนาดของเม็ดดิน หรือวัด
 ในสนาม ดังรูป 4.68



รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าความซึมน้ำ

6. ขอบเขตของธรณีเทคนิคสำหรับโครงการ

การสำรวจทางธรณีเทคนิคต้องมีการทำกิจกรรมต่างๆ ให้เหมาะสมกับโครงการ กล่าวคือถ้าโครงการมีขนาดเล็กและงานธรณีวิทยาไม่ซับซ้อนการสำรวจทางธรณีเทคนิคก็ไม่ต้องมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งความสัมพันธ์ของธรณีวิทยาและองค์ประกอบของโครงการแสดงดังรูปที่ 4.69 ซึ่งมันช่วยให้เห็นภาพได้ว่าจะต้องมีการสำรวจทางธรณีเทคนิคมากน้อยแค่ไหนจึงจะเหมาะสมกับโครงการ และจากรูปจะเห็นได้ว่าถ้างานธรณีเทคนิคมากขึ้นก็จะทำให้งานทางด้านธรณีวิทยาซับซ้อนมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ของธรณีวิทยาและองค์ประกอบของโครงการ

7. เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเจาะ

โครงการที่ใช้เครื่องจักรในการขุดเจาะจำเป็นต้องมีการสำรวจทางธรณีเทคนิคเป็นพิเศษ ส่วนรายละเอียดปลีกย่อยนั้นจะต้องมีการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการใช้เครื่องจักรและการเลือกใช้ชนิดของเครื่องจักร และนอกจากนั้นจะต้องมีข้อมูลสำหรับเครื่องจักรเหล่านั้น เช่น ต้องรู้กำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับเครื่องจักรตั้งแต่ข้อมูลทางด้านการสึกกร่อนและปัจจัยต่างๆเพื่อที่จะทำนายอัตราการทะลุวง เป็นต้น เครื่องจักรต่างๆจึงต้องมีการพัฒนาและมีการทดสอบเป็นพิเศษ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะทำนายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆซึ่งมีผลกระทบต่อเครื่องจักรเหล่านั้น สำหรับเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์จะต้องมีลักษณะพิเศษดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 Special Data Requirements for TBM Project

BOTH ROCK AND SOIL TUNNELS	
Detail of All Significant Mixed-Face Condition	Special need for rock or soil mass strength data and groundwater conditions in each strata to predict ground/TBM interaction in mixed-face condition. Soil/rock mixed-face needs special characterization.
In Situ Stress	Special characterization required if particularly high or low.
Overload Ratio of Stress to Strength	Prediction of control of shield or locking of machine.
Groundwater Inflow	Prediction of inflow more important on TBM products.
Anisotropy	Texture and fabric of rock or soil more important to TBM products.
Hazardous Gas (Methana)	For design of automatic shutdown system.
ROCK TUNNELS	
Unconfined Strength	Use in combination with abrasion data
Abrasivity of Rock	Cutter cost predictions
Mineralogy, Petrology, and Crystal Size	Supplemental data to support engineering data
Rock Hardness	Universities and TBM manufacturers use their special test method with correlations to penetration rate and cutter costs.
Details of Jointing	Details of joint spacing and orientation determine cutter/rock interaction. Intense jointing effects. Defines nature of muck. Look for rock wedges that might jam TBM.
Fault and Shear Zones	Strength and deformability of fault on shear zone affect gripper behavior.
SOIL TUNNELS	
Cobbles and Boulders	Important to predict size, distribution, and abundance of boulders and cobbles. Maximum size important for specifying type of machine.
Overload Ratio of Stress to Strength	Generally more important in soil than rock. Factor in determining if pressurized-face TBM needed. Also factor in steering control of shield.
Stickness of Soil	Potential problem in EPB mode.
Groundwater Conditions and Likely Inflow to the Face	May determine need for pressurized-face TBM.
Sensitive Structures within Zone of Influence	May determine need for pressurized-face TBM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การใช้เครื่องมือในการติดตาม

การใช้เครื่องมือในการทำงานเพื่อที่จะติดตามและควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์ จะทำให้ได้ผลประโยชน์จากการใช้เครื่องมือคือ

1. เพื่อเฝ้าสังเกตถึงพฤติกรรมของดินและระดับน้ำใต้ดิน
2. เพื่อจัดทำเอกสารเกี่ยวกับความปลอดภัยจากการก่อสร้างและมีการเตือนล่วงหน้าถึงผลร้ายจากพฤติกรรมของดิน
3. เพื่อหาเหตุผลต่างๆที่เป็นสาเหตุให้เกิดพฤติกรรมที่เลวของดิน
4. เพื่อได้ข้อมูลสำหรับการก่อสร้างที่รองรับแล้วว่าปลอดภัย
5. เพื่อรับรองถึงความปลอดภัยจากวิธีการก่อสร้างที่ปรับปรุงใหม่
6. เพื่อที่จะทราบถึงข้อเท็จจริงที่ใช้ออกแบบแล้วทำให้มีความปลอดภัยสูงและประหยัดต้นทุน
7. เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับการเรียกร้องทางกฎหมาย

4.2.1.8 การสำรวจขณะทำการก่อสร้าง

การสำรวจขณะทำการก่อสร้างประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

1. การถ่ายค่าพิกคลงสู่ใต้ดิน
2. ระบบนำทางของแนวอุโมงค์
3. มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ
4. การบังคับหัวเจาะในโค้ง
5. แบบของแนวอุโมงค์
6. รายงานประจำวัน

โดยมีรายละเอียดดังนี้

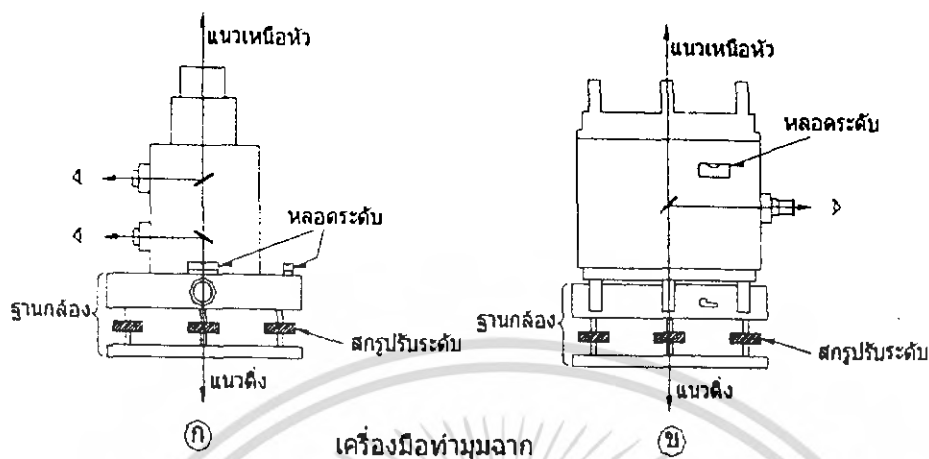
1. การถ่ายค่าพิกคลงสู่ใต้ดิน

การถ่ายค่าพิกคลงสู่ใต้ดิน วัดอุปสรรคการถ่ายพิกคจากและระดับลงสู่ใต้ดิน คือ เพื่อนำค่าเหล่านี้ไปบังคับหัวเจาะให้เดินตามแนวที่ออกแบบ โดยเริ่มสำรวจออกจากหมุดบังคับทางราบและทางตั้งบนพื้นดิน เครื่องมือสำรวจและการดำเนินงานมีดังนี้

ก.) เครื่องมือทำฉาก (รูปที่ 4.70) เป็นเครื่องมือสำรวจใช้สำหรับถ่ายจุดข้างบนลงสู่ข้างล่าง(หรือสลับกัน) เครื่องมือชนิดนี้ที่เหมาะสมกับงานอุโมงค์ที่มีความลึกมาก เป็นเครื่องมือทำฉากใช้แสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์เป็นแสงสีแดง (แสงกล้ำ) ทำขึ้นโดยใช้แสงส่องลงบนปรมาณูธาตุบางธาตุ ทำให้แสงเดินทางไปเป็นคลื่นในทิศทางเดียวในระยะไกลๆ โดยทั่วไปใช้แก๊สฮีเลียมกับนีออน เป็นกำเนิดแสงเลเซอร์ จุดเลเซอร์จะมีขนาดขึ้นอยู่กับระยะทางเช่นระยะทาง 100 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. เป็นต้น ความถูกต้องของแนวตั้ง 1/30,000 หรือระยะตั้ง 30 ม.
ความคลาดเคลื่อน 1 มม.



รูปที่ 4.70 เครื่องมือทำมุมฉาก

การดำเนินงานในสนาม เมื่อปล่องตั้งจุดถึงระดับที่กำหนดให้(หรือสถานีเสร็จแล้ว) จำเป็นต้องถ่ายพิกัดบนดินลงสู่ได้ดิน ใ่วธีหนึ่งปล่องต่อสองจุด

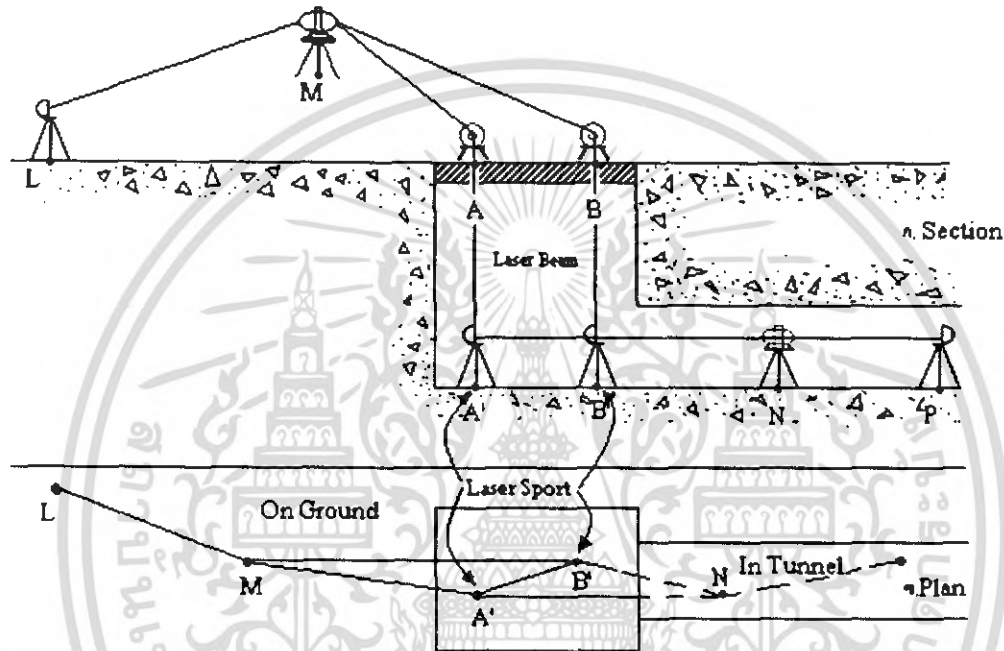
- เจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. ให้ทะลุฝาปิดปล่อง รูทั้งสองห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ตั้งเครื่องมือทำมุมฉากกับรูทั้งสองแล้วประกอบชุดเลเซอร์
- หมายจุดเลเซอร์ข้างล่างแล้ววัดระยะราบระหว่างจุดเลเซอร์ทั้งสองซึ่งจะให้ป็นเส้นฐานต่อไป
- จุดข้างล่างจะมีพิกัดฉากเท่ากับจุดข้างบน

ข้อแนะนำ : ที่ตั้งเครื่องต้องแข็งแรงและไม่กระเทือน จุดข้างล่างควรตั้งบนพื้นคอนกรีตที่แข็งแรงเช่นฝังแผ่นโลหะลงในคอนกรีต การหาจุดข้างบนโดยใช้ฉากรองรับ เช่น หมายจุดบนกระบอก เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนทางมุมเป็นส่วนกลับกับระยะห่างระหว่างสองจุด ถ้าเป็นไปได้จุดทั้งสองอยู่ในแนวเส้นทางออกแบบ ถ้าหากมีความจำเป็น ควรขยายเส้นฐานและทำสารบัญหมุดเพื่อสะดวกในการค้นหา กรณีเป็นอุโมงค์คู่ควรทำแยกกันแล้วตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายหลัง

ข.) การถ่ายค่าพิกัดทางราบ(ดูรูปที่ 4.71) มีวัตถุประสงค์ต้องการค่าพิกัดฉากไปยังจุดเลเซอร์ทั้งสอง ทั้งบนดินและใต้ดิน สมมุติ A , B และ A' , B' เป็นจุดเลเซอร์, LMเป็นหมุดวงรอบบนดิน ที่ทราบค่าพิกัดฉาก, N และP เป็นจุดวงรอบใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตั้งกล้องแนวจุด M ทำการวัดมุมราบ LMB และ BMA แล้ววัดระยะราบ MA และ MB
 - ตั้งกล้องจุด N ทำการวัดมุมราบ A'NB' และ B'NP แล้ววัดระยะราบ NA', NB' และ NP
- ข้อแนะนำ วัดมุมราบและระยะราบหลาย ๆ ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย เลือกเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง, ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเครื่องมือก่อนหรือหลังทำการวัด, จุด A, B และ A', B' เป็นจุดตั้งเป้า ไม่จำเป็นต้องวัดมุมราบ อาจจะสร้างโครงข่ายบนบนดินเพิ่มอีก 1 จุด ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จุด A' และ B'



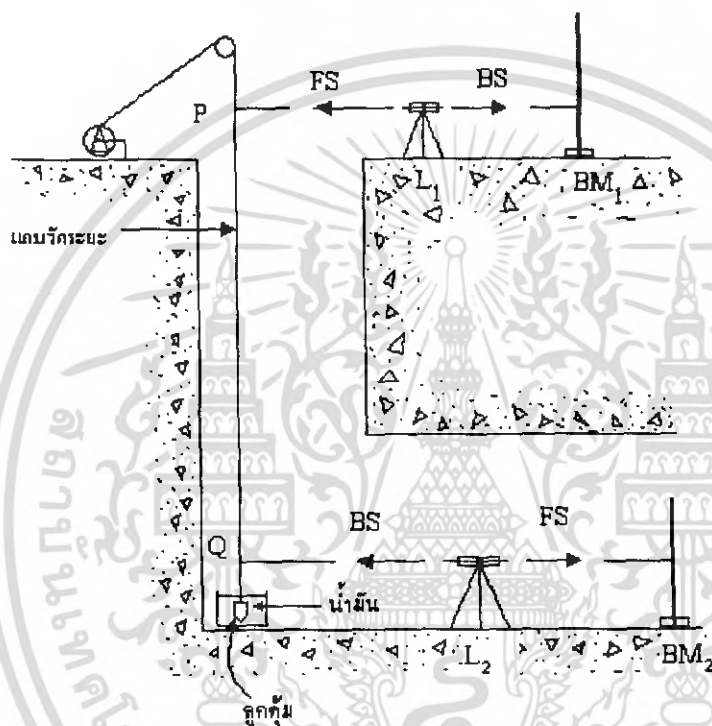
รูปที่ 4.71 การถ่ายพิกัดทางราบ

การคำนวณ ขั้นตอนการคำนวณหาพิกัดจาก จุด N และ P

- ในสามเหลี่ยมบนดิน AMB ทราบด้านสามด้าน และมุม AMB คำนวณส่วนที่เหลือ
- ในสามเหลี่ยมใต้ดิน A'NB' ทราบด้านสามด้านและมุม A'NB' คำนวณส่วนที่เหลือ
- ทำการตรวจสอบผลการคำนวณโดยใช้สภาวะทางเรขาคณิต
- วงรอบเปิด LMA(A')B(B')NP คำนวณแอดมิชชันได้
- คำนวณพิกัดจาก N และ P ได้ กระจายหมุดวงรอบเพิ่มเติมเช่นฝังในกำแพง หรือบนหิ้ง ทั้งนี้เพื่อป้องกันหมุดสูญหาย และมีสิ่งกีดขวางในภายหลัง
- ถ้าหากจุด A' และ B' มีความคลาดเคลื่อน 2 มม. และระยะ AB เท่ากับ 4 ม. จะทำให้ทิศทาง A'B' หรือ B'A' มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 95"

ค.) การถ่ายค่าพิกัดทางตั้ง (รูปที่ 4.72) การถ่ายค่าระดับบนดินลงสู่ใต้ดินมีหลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือสำรวจ และการดำเนินงาน ขั้นตอนการถ่ายระดับโดยตรงมี ดังนี้

- หย่อนแถบวัดระยะลงในแนวตั้งโดยผูกน้ำหนักที่ปลายข้างหนึ่ง
- ตั้งกล้องระดับ L_1 ทำการอ่านไม้ระดับบน BM_1 และแถบวัดระยะ
- ตั้งกล้องระดับ L_2 ทำการอ่านแถบวัดระยะ และไม้ระดับบน BM_2
- คำนวณระยะตั้ง PQ คือผลต่างค่าที่อ่านได้
- คำนวณระดับ BM_2 = ระดับ BM_1 + BS (บน BM_1) - PQ - FS (บน BM_2)



รูปที่ 4.72 การถ่ายค่าพิกัดทางตั้ง

ข้อแนะนำ

- ปรับแก้แถบวัดระยะเช่น แรงดึง อุณหภูมิ ความยาวไม่มาตรฐาน เป็นต้น
- เช้ตุ๊กตุ้มลงในน้ำมันเครื่องเพื่อชะลอความกว้าง
- ขณะปฏิบัติงาน หยุดการเป่าลมชั่วคราว หรือเลือกเวลาปฏิบัติ
- ทำการอ่านหลายๆ ครั้ง และหลายตำแหน่ง ของแถบวัดระยะ

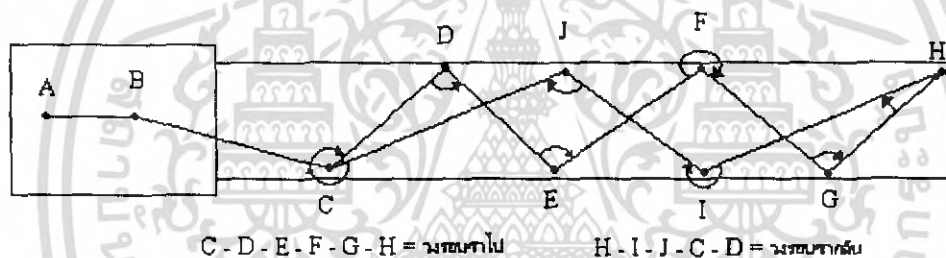
ง.) วรอบและระดับในอุโมงค์ (รูปที่ 4.73) การวางโครงข่ายหมุดบังคับทางราบ

ในอุโมงค์ โดยจะสร้างวงรอบเป็นรูปพินปลาทั้งขาไปและขากลับ ทั้งนี้เพื่อจัดการหักเหของแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

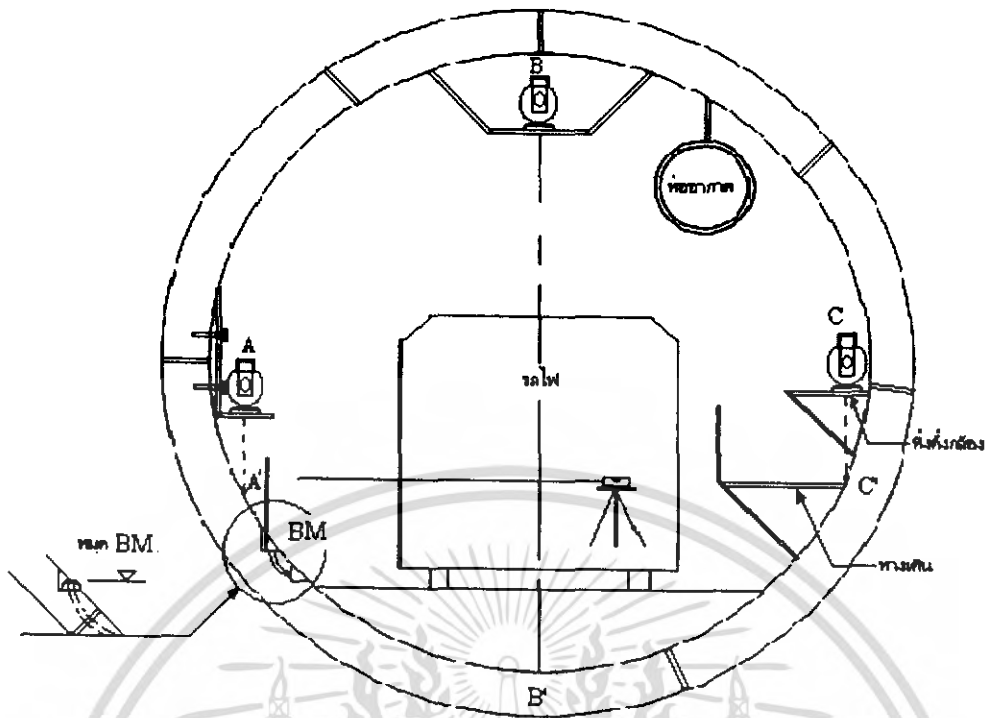
ทำการวัดมุมและระยะทางทั้งขาไปและขากลับ แล้วคำนวณความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบ และคาดหวังความถูกต้องของผลงาน ควรสอดคล้องเงื่อนไขที่กำหนดให้

หมุดวงรอบควรตั้งอยู่บนหิ้ง (รูปที่ 4.74) ประกอบด้วยแผ่นเหล็กติดกับขาเหล็ก ยึดเข้ากับแหวน ตำแหน่งสูงประมาณ 1.50 ม. จะระบุตรงแผ่นเหล็กเพื่อสอดคล้องกับค้ำถั่ง แล้วหมาย จุดตั้งกล้องบนวงแหวน จุดวงรอบห่างกันประมาณ 50 – 60 ม.

การสร้างหมุด BM ในอุโมงค์อาจจะใช้หมุดวงรอบก็ได้ หรือหาที่เหมาะสมกว่า และออกงานสะดวก เช่น อาจจะเลือก BM ไว้ตามจุดถาวรของวงแหวน เป็นต้น ทำระดับไปและกลับโดยวิธีอ่านสามสายไข ตรวจสอบความถูกต้องของผลงาน และคาดหวังอยู่ในเกณฑ์กำหนด 12 มม. $\sqrt{k}$, (k ระยะวงรอบระดับ ขาไปหรือขากลับ คิดเป็นกม.) ทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของสายไขก่อนหรือหลังปฏิบัติงาน ทำสารบัญหมุดทั้งหมุดวงรอบ และหมุด BM, ทำการตรวจสอบพิสัยฉากและระดับหมุด BM เป็นช่วง ๆ ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลง หรือการขยับของวงแหวน ใช้ค่าใหม่เสมอเพื่อนำทางให้หัวเจาะเดินไปยังจุดมุ่งหมาย



รูปที่ 4.73 วงรอบและระดับในอุโมงค์



รูปที่ 4.74 หมุดวงรอบ

2. ระบบนำทางของอุโมงค์

ระบบนำทางของอุโมงค์ ในปัจจุบันเครื่องมือสำรวจได้พัฒนาขึ้นมากกว่าเดิม โดยมุ่งหวังทำงานด้วยความรวดเร็ว มีความละเอียดสูง ประหยัดกำลังคน และย่นระยะเวลาทำงาน

ระบบนำทางการขุดเจาะอุโมงค์ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือ และอุปกรณ์หลาย ๆ ส่วน แต่ละส่วนทำงานคนละหน้าที่แล้วนำไปประมวลผล โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ และโปรแกรม เพื่อให้การขุดเจาะเป็นไปตามความต้องการ การประมวลผลที่ออกมาทำการตรวจสอบโดยการเก็บข้อมูลทางสนามระบบนำทางในปัจจุบันมีหลายวิธี ดังนี้

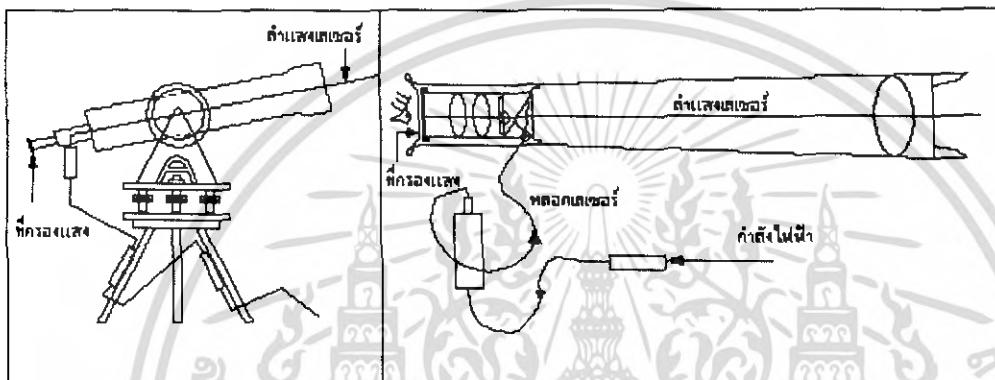
- ไจโร และ ระดับน้ำ ทิศทางใช้ไจโร และระดับใช้หลอดระดับน้ำ ทั้งสองส่วนจะมีเซ็นเซอร์รองรับแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งไปที่หน่วยประมวลผล
- กล้องแนวแบบอัตโนมัติ กล้องสำรวจหาทิศทางและระดับจะทำการค้นหาหมุดโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะวัดมุมและระยะทางไปยังเป้าที่อยู่ท้ายเครื่องเจาะ ค่าที่ได้ส่งต่อเข้าคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมทำการคำนวณ แล้วเปรียบเทียบกับตำแหน่งหัวเจาะ
- แสงเลเซอร์ ใช้กล้องแนวติดแสงเลเซอร์ไปกระทบเป้า จะได้พิกัดและมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ แล้วส่งข้อไปคำนวณหาตำแหน่งหัวเจาะซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.) กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์ (รูปที่ 4.75) กล้องที่ใช้เป็นกล้องแนวธรรมดาแต่ใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นแนวเล็งไปกระทบเป้ารับแสงจะได้ระยะทางทิศทาง จุดตั้งกล้องต้องทราบพิกัดจากและระดับ

หน้าที่ของกล้องแนวใช้แสงเลเซอร์

- ตั้งค่าเอซิมูทจากจุดตั้งกล้องกล้องไปยังเป้าหลัง
- หมุนกล้องให้ค่าเอซิมูทของแนวออกแบบ เป็นกำลังจะเจาะ
- วัดมุมตั้งไปยังจุดเลเซอร์ และวัดระยะทาง



รูปที่ 4.75 กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์

ข.) หน่วยรับแสงเลเซอร์ (รูปที่ 76) หน่วยรับแสงเลเซอร์ทำด้วยโลหะรูปทรงกระบอกขนาดหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 0.15 ม. ยาวประมาณ 0.50 ม. และน้ำหนัก 30 กก. ด้านหน้าเป็นเป้าหรือจอรับแสงเลเซอร์ คือเป้าที่หนึ่ง และภายในกระบอกมีจอรับแสงเลเซอร์ คือเป้าที่สอง หน่วยนี้จะติดตั้งด้านท้ายของเครื่องเจาะในตำแหน่งกล้องมองเห็น ทรงกระบอกสามารถหมุนในระนาบตั้งและขยับไปทางซ้ายหรือขวาได้ ทั้งนี้เพื่อให้รับแสงเลเซอร์ตลอดเวลาการเจาะอุโมงค์

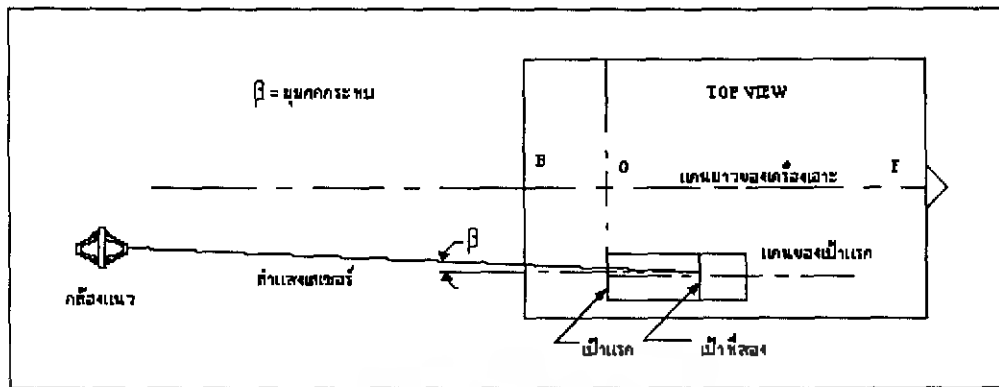
หน้าที่หน่วยรับแสงเลเซอร์

- เป้าที่หนึ่งจะให้ตำแหน่งจุดเลเซอร์เทียบกับแกนของมันเอง
- เป้าที่สองจะให้มุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ คือมุมระหว่างแนวแสงกระทำกับแกนยาวของทรงกระบอก

ปัญหาอาจจะเกิดขึ้นมีดังนี้

- มีบางสิ่งบางอย่างบังแสงเลเซอร์หรือกำลังของแสงเลเซอร์อยู่นอกเกณฑ์
- มีแสงรบกวนภายนอกหรือหากจุดเลเซอร์ตกขอบเป้า มุมตกกระทบจะวัดไม่ได้
- ในกรณีเป้าขยับออกจากลำแสง ให้ขยับเป้าเข้า แล้วป้อนค่าใหม่เข้าหน่วยควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

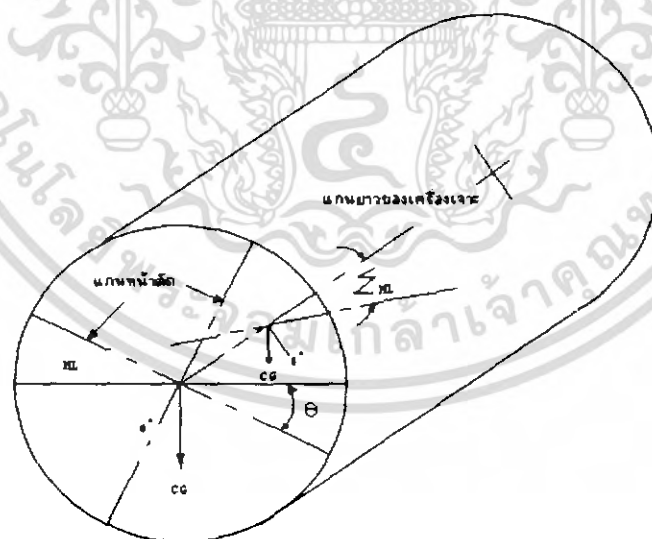


รูปที่ 4.76 หน่วยรับแสงเลเซอร์

ค.) หน่วยวัดการะของหัวเจาะ (รูปที่ 4.77) หน่วยวัดการะอาการของเครื่องเจาะ เป็นกล่องโลหะ สี่เหลี่ยมผืนผ้าวางในแนวตั้ง จะติดตั้งภายในเครื่องเจาะ และตั้งในตำแหน่งที่หมายไว้ข้างกล่อง ภายในกล่องมีเซนเซอร์หรือหลอดไฟรับอาการของเครื่องเจาะ แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งต่อไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง หน้าที่หน่วยวัดสภาวะของเครื่องเจาะ

- วัดการหมุนตัวของเครื่องเจาะ บอกเป็นมุมขององศา หรือระยะที่ออกเป็น มม. ต่อระยะตั้ง 1 ม.
- วัดการก้มหรือเอียงของเครื่องเจาะ บอกเป็นมุมองศา หรือระยะที่ออกเป็น มม. ต่อระยะตั้ง 1 ม.

ค่ามุมที่ได้ใช้หลักการแทนของเครื่องเจาะกระทำกับแนวตั้งคู่คของโลก



รูปที่ 4.77 หน่วยวัดการะของหัวเจาะ

ง.) หน่วยรวบรวมข้อมูล (รูปที่ 4.78) หน่วยรวบรวมข้อมูลเป็นกล่องโลหะที่เหลี่ยมผืนผ้า หาดำตั้งด้านท้าย หรือในห้องบังคับเครื่องเจาะ หน้าที่ของหน่วยรวบรวมข้อมูล

- กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยรับแสงเลเซอร์
- กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยวัดสถานะของเครื่องเจาะ
- จัดหากำลังไฟฟ้าให้กับหน่วยรับแสงเลเซอร์
- เตรียมส่งข้อมูลไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง

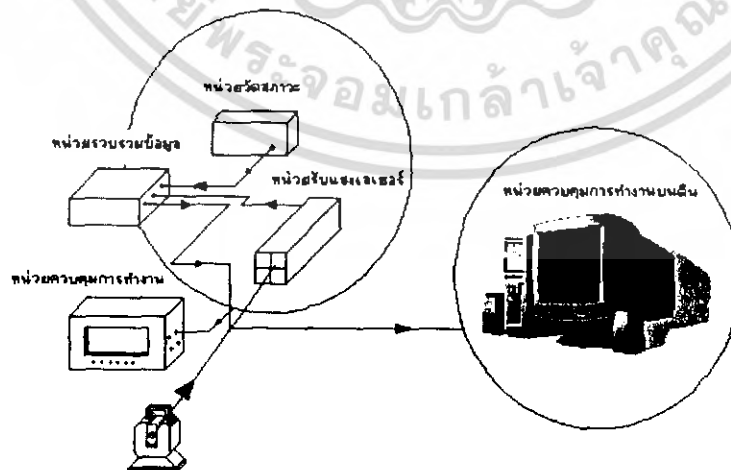
จ.) หน่วยควบคุมการทำงาน (รูปที่ 4.78) เป็นหน่วยสุดท้ายของระบบการทำงาน คือมีจอแสดงผล มีหน่วยประเมินผล และโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อคำนวณค่าที่จำเป็น เช่น ตำแหน่งหัวเจาะขณะนั้นและจุดเลเซอร์ ขนาดและทิศทางการหมุนตัว ขนาดและทิศทางการเอียงของเครื่องเจาะ และสามารถป้อนข้อมูลต่าง ๆ เช่น ค่าออฟเซตทางราบและทางดิ่ง ทิศทางราบและทิศทางการเอียง และค่าคงที่หรือมิติของเครื่องเจาะ มีหลายแบบ เช่น วางกับพื้นและจะติดตั้งไว้ในห้องที่อยู่ท้ายเครื่องเจาะ มองเห็นอย่างถนัด ป้องกันสิ่งรบกวนภายนอก มีสายไฟรับข้อมูลจากหน่วยที่กล่าวไว้แล้ว

หน้าที่ของหน่วยควบคุมการทำงาน

- เป็นศูนย์กลางของการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่ต้น
- รับข้อมูลจากหน่วยรวบรวมข้อมูลและป้อนข้อมูลจากผู้ควบคุม
- หาความเบี่ยงเบนแนวเจาะกับแนวออกแบบเป็นกราฟิก และตัวเลข
- ควบคุมโปรแกรมการคำนวณและจัดพิมพ์เอกสารรายงานประจำวัน

ปัญหาอาจจะเกิดขึ้นกับหน่วยนี้

- เมื่อโปรแกรมมีปัญหาจะมีผลต่อเนื่องทั้งระบบ
- ไม่ได้รับข้อมูลจากหน่วยที่เกี่ยวข้อง หรือข้อมูลมีปัญหา



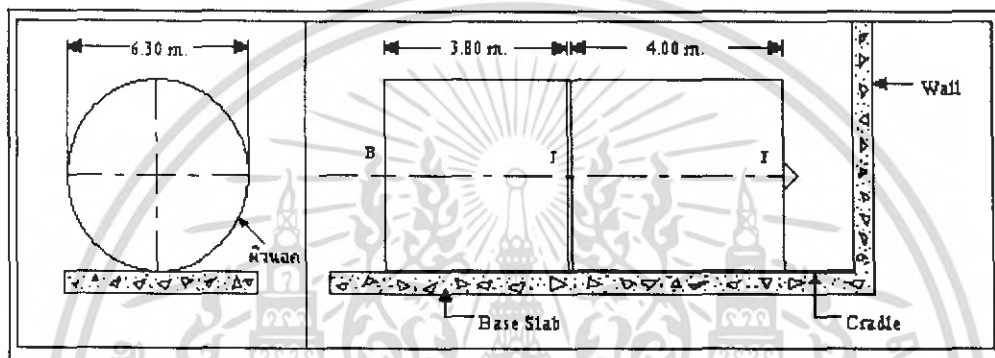
รูปที่ 4.78 หน่วยรวบรวมข้อมูลและหน่วยควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ

มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ (รูปที่ 4.79) เครื่องเจาะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหัวยาวประมาณ 4 ม. และส่วนท้ายยาวประมาณ 3.8 ม. ตรงรอยต่อเป็นกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก ทั้งนี้เพื่อช่วยให้เครื่องเจาะขยับตัวในการเคลื่อนที่ และแรงกดตัวที่หัวเจาะ รัศมีภายนอก 6.30 ม.

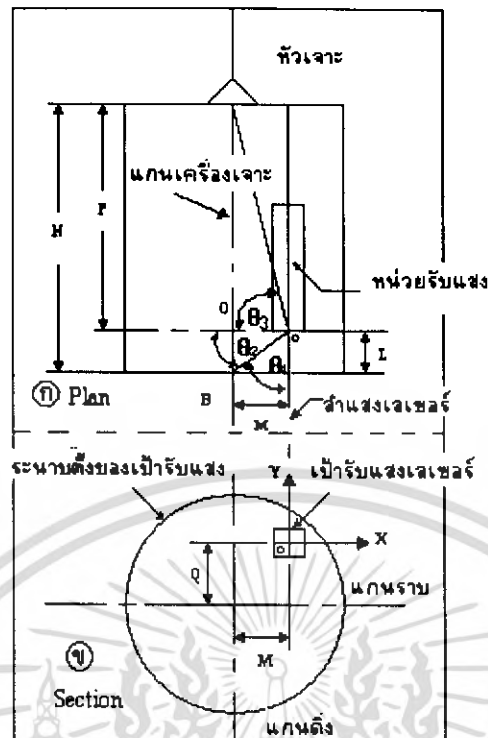
ก.) การตรวจสอบตำแหน่งก่อนเจาะ เครื่องเจาะตั้งอยู่บนคานเหล็กและรองรับด้วยพื้นคอนกรีตหนาและแข็งแรง คานเหล็กจะเคลื่อนขึ้นลง และไปซ้ายขวาได้เล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อให้แกนของหัวเจาะอยู่ในตำแหน่งที่ออกแบบ



รูปที่ 4.79 มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ

ทำการติดตั้งหน่วยต่าง ๆ ที่จะใช้นำทางดังนั้นได้กล่าวไว้แล้ว ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการติดตั้ง เช่นการหมุนตัว และการก้มหรือเงยของแกนหัวเจาะ หมายตำแหน่งจุดเริ่มเจาะบนกำแพง โดยใช้กล้องแนว และเครื่องวัดระยะ อีดีเอ็ม

ข.) จุดสำรวจในเครื่องเจาะ (รูปที่ 4.80) จุดสำรวจในเครื่องเจาะเป็นจุดสำคัญที่จะบอกตำแหน่งของหัวเจาะคือจุด B และจุด F จุดทั้งสองอยู่ในแกนกลางของเครื่องเจาะ จุด B และจุด F อยู่ที่ท้ายและหัวของเครื่องเจาะตามลำดับ ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ที่มีดังนี้



รูปที่ 4.80 จุดสำรวจในเครื่องเจาะ

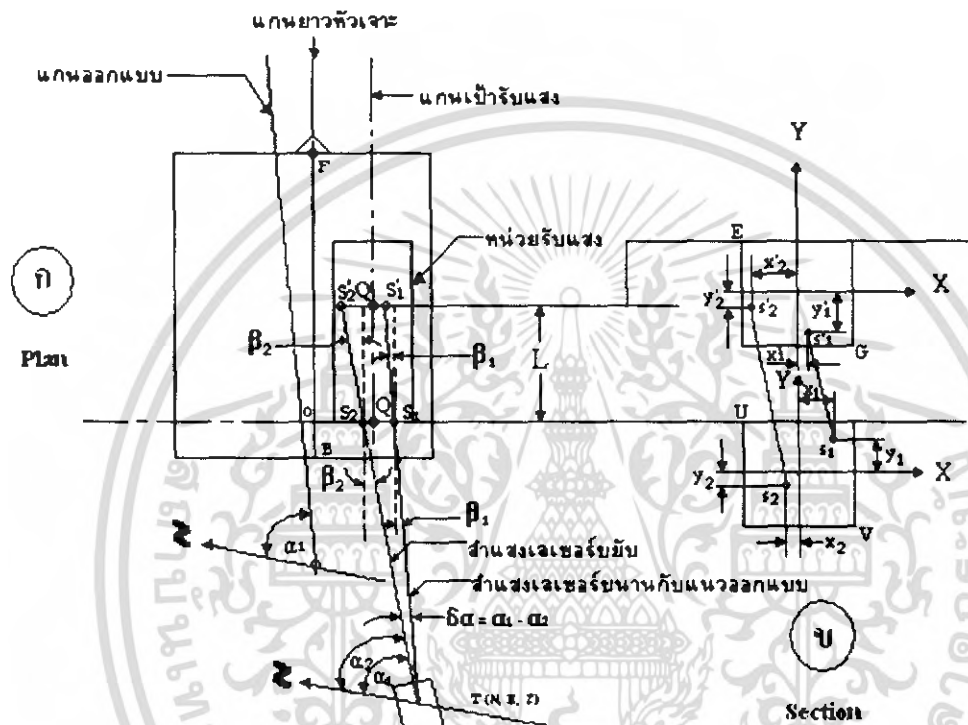
- L = ระยะราบเป็นระยะระหว่างระนาบตั้งที่ผ่านจุดสำรวจ B และจุดตัดกลางเป้ารับแสง
M = ระยะราบเป็นระยะระหว่างแกนยาวเครื่องเจาะ และแกนยาวเป้ารับแสง
N = ระยะราบเป็นระยะระหว่าง จุดสำรวจ B , F
P = ระยะราบเป็นระยะระหว่าง จุดสำรวจ F และ O
Q = ระยะตั้งเป็นระยะกลางเป้ารับแสง และแกนราบ (หน้าตัดเครื่องเจาะ)
 θ = ระหว่างด้านที่กำหนดให้

ค.) ตำแหน่งจุดเลเซอร์ (รูปที่ 4.81) แนวลำแสงเลเซอร์จะเป็นแนวเล็งของกล้อง และจะขนานกับแนวออกแบบ ดังนั้น จุดเลเซอร์จะตกลงบนเป้าแรก ณ ที่ใดที่หนึ่ง ขึ้นอยู่กับการ ขยับแกนเครื่องเจาะ ถ้าหากตกบริเวณตรงกลางจะได้ค่าถูกต้องกว่าที่อื่น กำหนด UV เป็นระนาบตั้ง ที่ผ่านเป้าหมายเป้าแรก x_1, y_1 เป็นพิกัดฉากของจุดเลเซอร์ S1 แสงเลเซอร์ที่เลี้ยวจะผ่านเป้าแรก ไปกระทบเป้าที่สองที่อยู่ในหน่วยเป้ารับแสง คือ EG จะได้ค่าพิกัดทางราบ x'_1, y'_1, β_1 เป็น มุมตกกระทบ จากค่าคงที่ของหน่วยเป้ารับแสง สามารถคำนวณ β_1 ได้ ในระบบนี้ จะใช้เซนเซอร์ รองรับแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ออกเป็นตัวเลขดูที่หน่วยควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสังเกตมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์

- ถ้าหากจุด S1 ตกกลางเป้าแรกและกลางเป้าที่สองแกนหัวเจาะจะขนานกับแนวออกแบบ ได้ $\beta = 0$
- ถ้าหากจุด S1 ตกกลางเป้าแรกและ $x'1 \neq 0$ แกนหัวเจาะเอียงไปข้างใดข้างหนึ่งของแนวออกแบบ ขึ้นอยู่กับเครื่องหมาย $x'1$ ได้ β
- ถ้าหาก $x1 = x'1$ ลำแสงเลเซอร์จะขนานกับแกนเป้ารับแสง ได้ $\beta = 0$



รูปที่ 4.81 ตำแหน่งจุดเลเซอร์

- เครื่องเจาะกัมหรือเกย (รูปที่ 4.82) ขนาดและทิศทางหัวเจาะจะกัมหรือเกยได้จากหน่วยวัดสภาวะของเครื่องเจาะ ภายในมีเซนเซอร์รับขนาดและทิศทางแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าลงป็นหน่วยรวบรวมข้อมูล และหน่วยควบคุมการทำงาน ซึ่งจะเปิดคูได้ทีหน้าจอแสดงผล

จากรูปข้างล่าง BOF เป็นแกนยาวของเครื่องเจาะเมื่ออยู่ในแนวราบ B'O'F' เป็นแกนยาวของเครื่องเจาะเมื่อเอียงขึ้นเป็นมุม α และ D1,D2,D3 เป็นแนวออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเบี่ยงเบนเมื่อเทียบกับแนวราบดังนี้

$O'O_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่ระนาบตั้งผ่านเป้าแรก

$F'F_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่หัวเจาะ

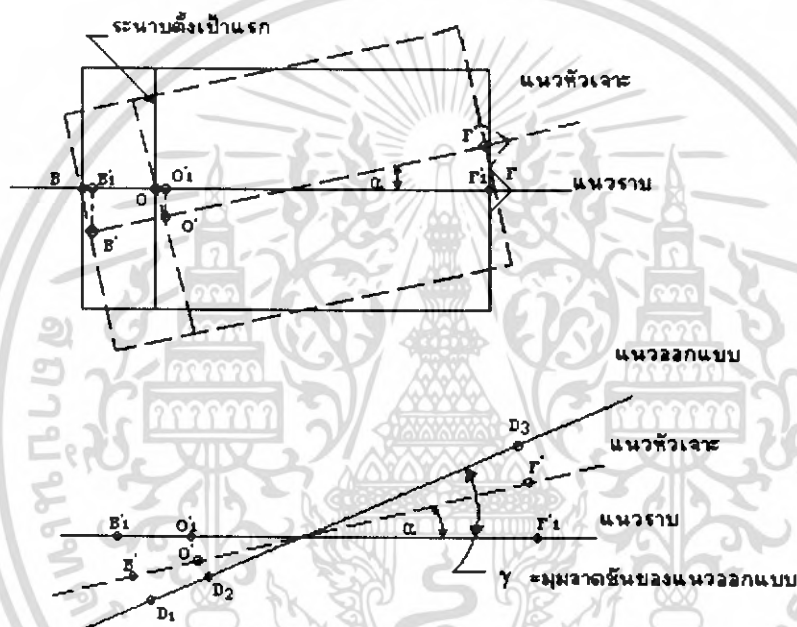
$B'B_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่ท้ายหัวเจาะ

ค่าเบี่ยงเบนเมื่อเทียบกับแนวออกแบบดังนี้

D_2O' เกิดที่ระนาบตั้งผ่านเป้าแรก

D_3F' เกิดที่หัวเจาะ

D_1B' เกิดที่ท้ายหัวเจาะ

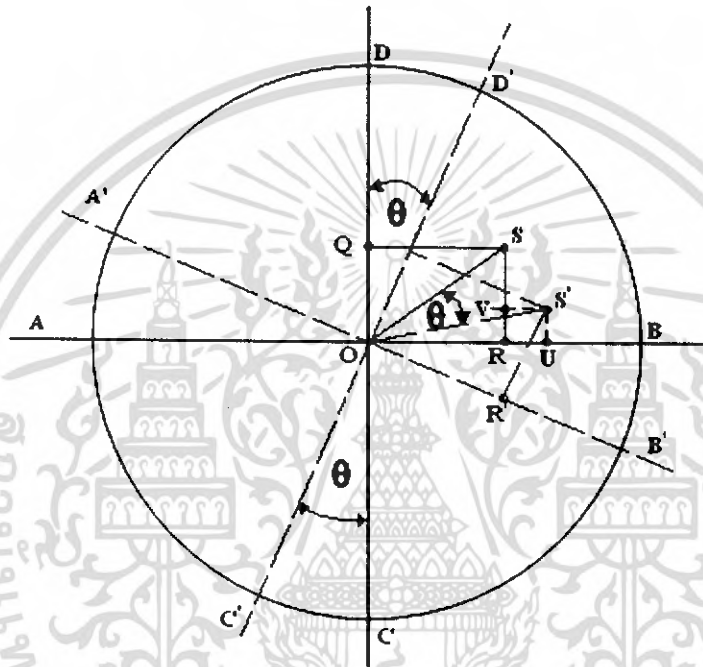


รูปที่ 4.82 เครื่องเจาะกัมหรือเงย

- เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง (รูปที่ 4.83) ทำให้หน้าตัดของเครื่องเจาะหมุนรอบแกนยาว ดังนั้นค่าพิกัดของจุดเลเซอร์เปลี่ยนตำแหน่งออกจากแนวปกติ จะมีผลต่อค่าคงที่ของเครื่องเจาะดังนี้

AB และ CD เป็นแกนของหัวเจาะในสถานะปกติ $A'B'$ และ $C'D'$ เป็นแกนหัวเจาะเมื่อหมุน (ตามเข็มนาฬิกา) ไปเป็นมุม θ , S' เป็นตำแหน่งจุดเลเซอร์, SQ และ SR เป็นค่าคงที่ตั้งแต่ต้น ขั้นตอนการคำนวณ

- สามเหลี่ยมหน้าจั่ว OSS' คำนวณมุม OSS'
- สามเหลี่ยมมุมฉาก OSR คำนวณมุม OSR
- สามเหลี่ยมมุมฉาก SVS' คำนวณมุม VSS' ความยาว VS' หรือ RU
- คำนวณหาพิภคฉาก และระดับจุด U
- ถ่ายค่าไปยังจุด O และไปที่จุดสำรวจ B และ F
- แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าออกแบบ เพื่อหาค่าเบี่ยงเบน



รูปที่ 4.83 เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง

4. การบังคับหัวเจาะในทางโค้ง

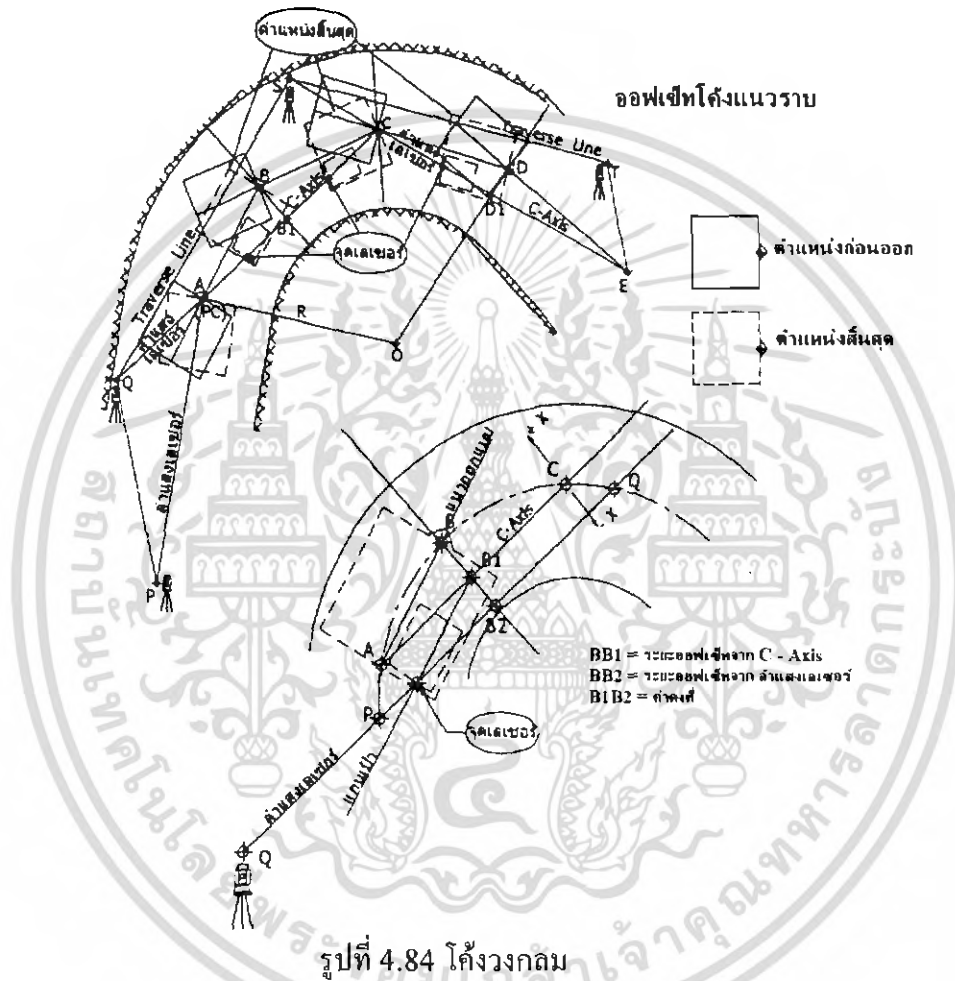
การบังคับหัวเจาะในทางโค้ง คือการบังคับหัวเจาะเดิมตามการออกแบบที่เป็น โค้งทางราบและโค้งทางตั้ง ซึ่งเป็นการยากที่จะบังคับหัวเจาะให้เดินตามเส้นทางที่กำหนดให้ คือหัวเจาะจะขยับไปมาประมาณ 5 ซม. ทำการแบ่งโค้งออกเป็นคอร์ดสั้นๆ เช่นกำหนดขอบนอกของเครื่องเจาะห่างจากโค้งมากที่สุด 5 ซม. รัศมีโค้งเท่ากับ 200 ม. จะได้ความยาวคอร์ดมากที่สุด 9 ม. ความยาวขนาดนี้อาจจะพอเหมาะที่จะทำให้เครื่องเจาะขนาดนี้ผ่านไปได้

ในปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องเจาะให้ทำการขุดเจาะไปตามโค้งได้สะดวกมากขึ้น โดยป้อนข้อมูลล่วงหน้าของโค้งเข้ากับหน่วยควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.) โค้งวงกลม ตามรูปที่ 4.84 กำหนดคอร์ด AC เป็น C-axis, BB1 เป็นระยะออฟเซต, AB เป็นแนวหัวเจาะที่ใกล้กับอาร์คมากที่สุด, เมื่อหัวเจาะอยู่ A ให้คำนวณค่าออฟเซตล่วงหน้า BB1 และ AB จะเป็นระยะล่วงหน้า ป้อนระยะทั้งสองลงในหน่วยควบคุมงาน ผู้ควบคุมจะใช้ค่าทั้งสองบังคับเส้นทางจนกระทั่งได้ระยะทาง AB

ในทำนองเดียวกันให้เครื่องเจาะอยู่ที่ B ให้คำนวณค่าล่วงหน้าดังได้กล่าวไว้แล้ว แต่ค่าออฟเซตที่จุด C เท่ากับศูนย์



ข.) โค้งสไปรัล (รูปที่ 4.85) การบังคับหัวเจาะในโค้งสไปรัลจะสะดวกกว่าในโค้งวงกลมเพราะว่าค่าออฟเซตน้อยกว่า แต่มีการคำนวณยุ่งยากที่จะให้เป็นไปตามสภาวะทางเรขาคณิต

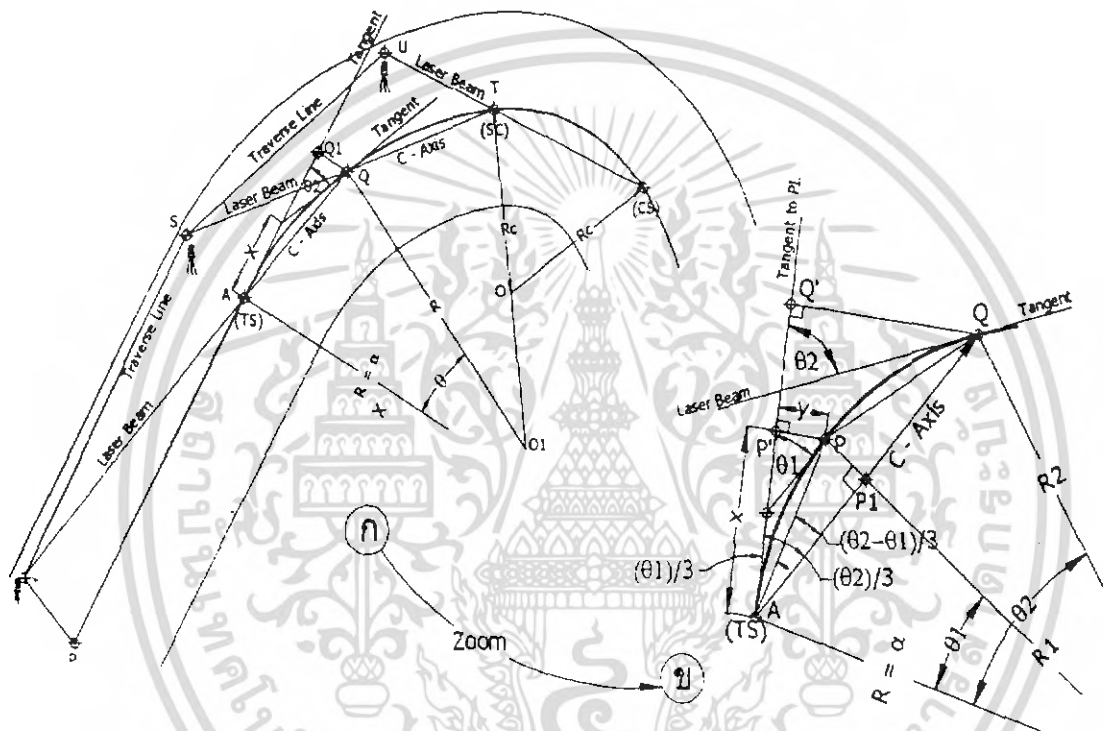
- อาร์ค AQT เป็นโค้งสไปรัล, P และ Q เป็นจุดใด ๆ ในโค้ง
- P และ Q เป็นจุดใด ๆ ในโค้ง, ทราบระยะ AP และ AQ คำนวณมุมที่เส้นสัมผัสทั้งสอง θ_1 และ θ_2
- กำหนด คอร์ด AQ เป็น C-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนด APP_1 ทราบมุม PAP_1 และคอร์ด AP กำหนดระยะออฟเซต PP_1 ได้
ขั้นตอนให้หัวเจาะไปถึงจุด P

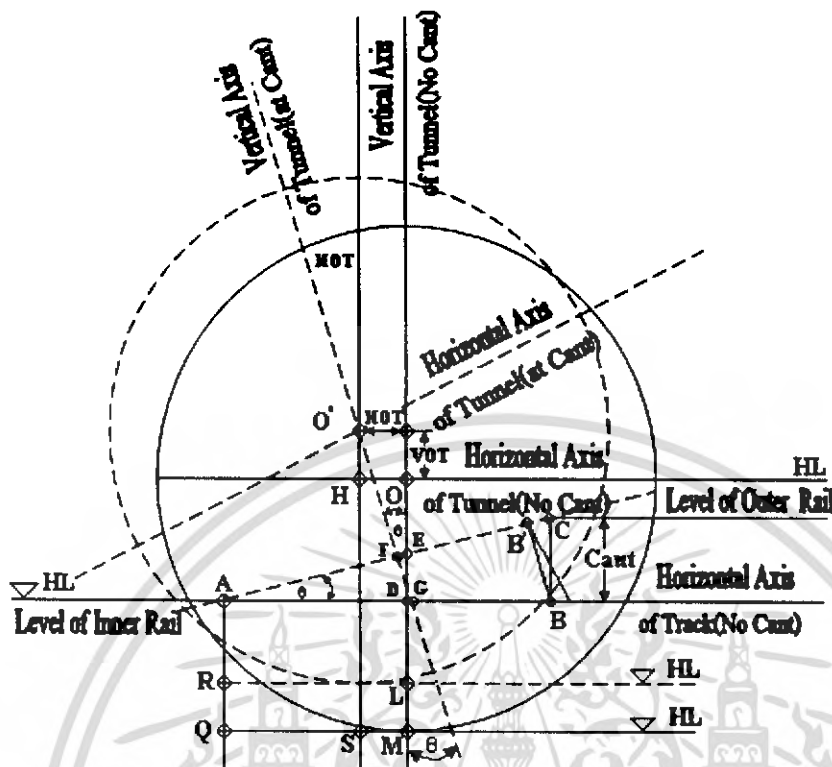
- ป้อนระยะออฟเซตล่วงหน้า PP_1 เข้ากับหน่วยควบคุมการทำงาน
- ป้อนระยะคาดการณ์ล่วงหน้าเข้ากับหน่วยควบคุมการทำงาน คือ ระยะ AP
- บังคับเครื่องเจาะเดินไปข้างหน้าจนกระทั่งได้ค่าตามข้อที่ 1 และ 2

ในทำนองเดียวกันให้เครื่องเจาะเดินทางจาก P ไป Q ต้องคำนวณล่วงหน้า ดังได้กล่าวไว้
แล้ว



รูปที่ 4.85 ไค้งสไปรด์

ค.) ระยะออฟเซตหัวเจาะ คือการหาระยะออฟเซตของหัวเจาะที่ออกจากแนว
ปกติ ระยะนี้จะคำนวณที่หัวเจาะอยู่ในโค้งที่ระดับแบบหมุนรอบขอบในของราง ดูรูปที่ 4.86
เป็นไค้งเถี่ยวซ้าย



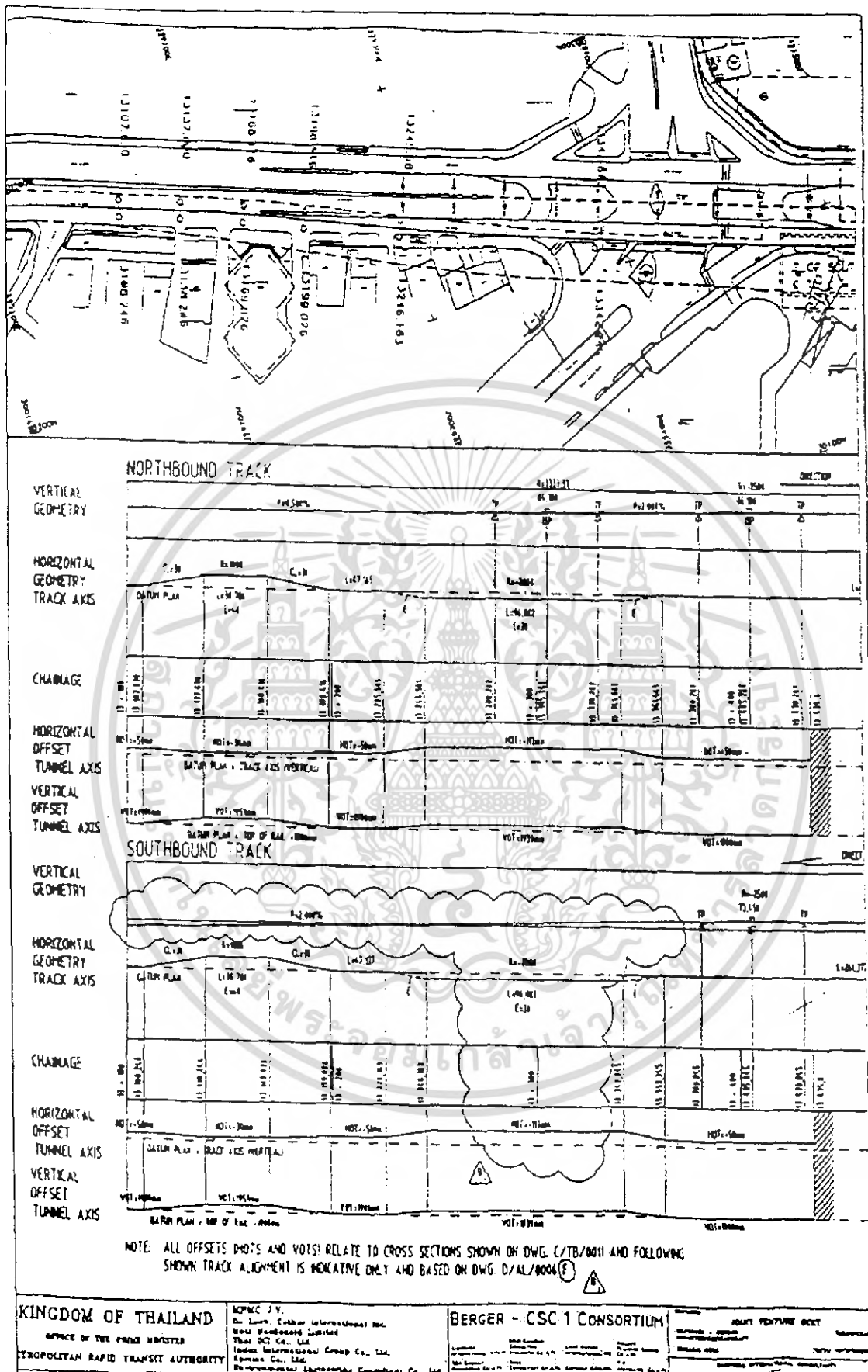
รูปที่ 4.86 ระยะออฟเซตหัวเจาะ

O เป็นจุดศูนย์กลางของหัวเจาะในโค้งปกติ, AB เป็นความกว้างของราง, D เป็นจุดกลางช่วงราง, O' เป็นจุดศูนย์กลางของหัวเจาะในโค้งที่ยกกระดืบ, A เป็นจุดหมุน ทำการยกกระดืบ CB หรือมุม θ , AB' เป็นความกว้างราง และ F เป็นจุดกึ่งกลาง AB', ลากเส้นตั้งผ่านจุด O' และตัดเส้นราบผ่านจุด O ที่จุด H จะได้ OH เป็นระยะออฟเซตทางราบ และ O'H เป็นระยะออฟเซตทางตั้ง

5. แบบของแนวอุโมงค์

แบบของแนวอุโมงค์ แบบของแนวอุโมงค์จะแสดงรายละเอียดต่าง ๆ บนพื้นดิน และแนวเส้นทางของอุโมงค์ มี 2 ชุด คือ ชุดแรกเป็นแบบสำรวจเพื่อนอกแบบ ใช้พิกัดเป็น ยูทีเอ็มกริดและระดับน้ำทะเลปานกลาง ชุดที่สองเป็นการสำรวจเพื่อการก่อสร้าง ใช้พิกัดฉาก และระดับสมมุติ ทั้งนี้เพื่อการสะดวกในการให้ตำแหน่งสิ่งปลูกสร้าง แบบทั้งสองชุดจะเริ่มต้นที่จุดเดียวกันแต่คนละพิกัด ระยะระหว่างสถานีอาจจะไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบใหม่ให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.87 แบบแปลนทางราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.) แบบแปลน (รูปที่ 4.87) แบบแปลนทางราบของเส้นทางรถไฟ มีมาตราส่วน 1 : 1,000 ดิช่องแนวกวรีทุก ๆ 100 ม. เป็นกระดาษเขียนแบบขนาด A3 สิ่งที่น่าสังเกตดังนี้

- สัญลักษณ์และอักษรย่อของแผนที่เส้นทาง
- แสดงรายละเอียดบนดินตลอดเส้นทาง เช่น สิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ หมดเขตทางและหมดเวนคืนที่ดินใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างสถานี
- โค้งแนวราบ จะเป็นสไปรัลและวงกลม จะบอกระยะทาง และพิกัด สมมุติที่จุดสัมผัส
- แสดงหมุดอาณาเขตของสถานี และค่าพิกัดฉาก และระยะทาง กึ่งกลางสถานี

ข.) แบบโปรไฟล์ (รูปที่ 4.87) แบบโปรไฟล์ของ เส้นทางรถไฟ ใช้มาตราส่วนทางราบ 1 : 1,000 ใช้โค้งวงกลมแทนโค้งแนวตั้ง กำกับความยาวรัศมี และความยาวโค้ง ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

- แนวความลาดชันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ บอก ระยะทาง ที่จุดสัมผัส
- จุดตัดของความลาด จะบอกค่า ระยะทาง และค่าระดับ
- จุดต่ำสุดจะบอก ระยะทาง และค่าระดับ

ค.) แบบจุดเจาะอุโมงค์ (รูปที่ 4.87) แบบจุดเจาะอุโมงค์เป็นการขยายให้เห็นตำแหน่งหัวเจาะที่อยู่ในแนวตรง และแนวโค้ง

- แบบเส้นทาง เป็นแบบแสดงทิศทางของโค้งเลี้ยวซ้าย หรือ เลี้ยวขวา ของเส้นทางที่กำหนดให้ บอกความยาวโค้ง, รัศมีโค้งวงกลม, ระยะยกโค้ง และระยะทาง ของจุดสัมผัส

- แบบระยะออฟเซต (รูปที่ 4.86) ระยะออฟเซตมีได้สองทาง คือ ออฟเซตทางราบ และออฟเซตทางตั้ง หมายถึงหัวเจาะจะต้องขยับออกจากปกติเล็กน้อยเมื่อเข้าโค้ง ค่าออฟเซตได้จากการคำนวณและออกแบบให้พื้นสิ่งปลูกสร้าง

- แบบออฟเซตทางราบ คือระยะทางราบ วัดจากหน้าตัดที่ผ่านหัวเจาะปกติกับหัวเจาะ ที่ขยับเนื่องจากการยกโค้ง คือ OH
- แบบออฟเซตแนวตั้ง คือระยะตั้งวัดจากหน้าตัดที่ผ่านหัวเจาะปกติกับหัวเจาะที่ขยับเนื่องจากการยกโค้ง คือ O'H

6. รายงานประจำวัน

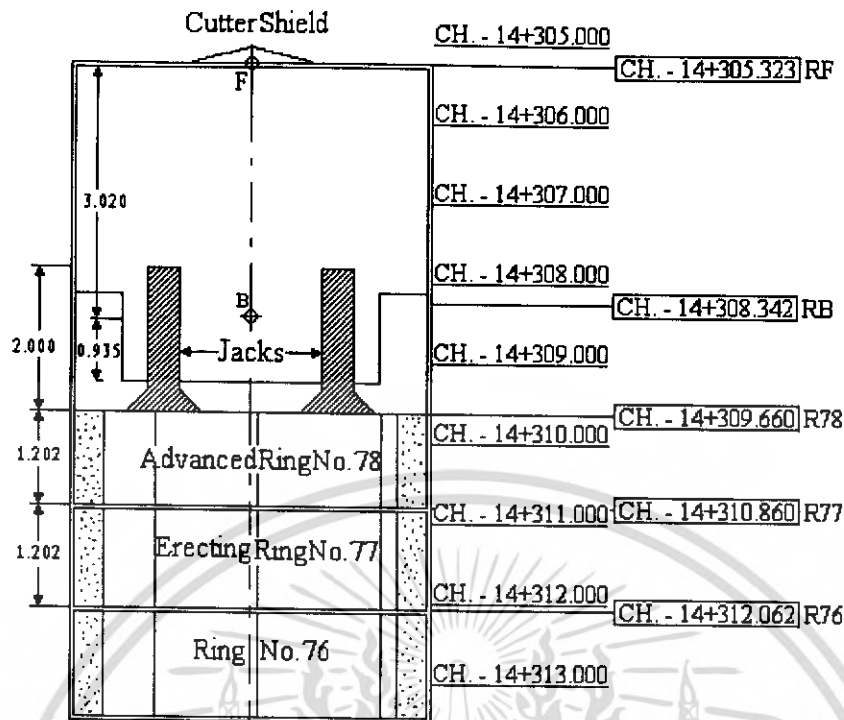
รายงานประจำวัน รายงานประจำวันแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ รายงานตำแหน่งเครื่องเจาะและรายงานตำแหน่งของวงแหวน

ก.) ตำแหน่งของเครื่องเจาะ (รูปที่ 4.88 และ 4.89) เป็น ตำแหน่งสุดท้ายของแกนเครื่องเจาะหยุดเพื่อจะประกอบวงแหวน เป็นข้อมูลของหัวเจาะที่หยุดอยู่กับที่มีดังนี้

- กราฟฟิคแสดงแกนของหัวเจาะหรือ B ไป F สามารถวัดได้จากกราฟฟิคนั้น
- ตัวเลขได้จากการวัดความยาวของแจ็คและค่าออกแบบ ค่าต่างความยาวของแจ็ค (รูปที่ 4.92)
- แถบแผนภูมิ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แสดงถึงการเจาะเสร็จไปแล้ว
- แถบแผนภูมิ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเจาะตั้งแต่ต้น
- กราฟฟิคแสดงตำแหน่งจุดเจาะเมื่อหัวเจาะที่หยุด ซึ่งสามารถวัดพิกัด x และ y ได้
- ช่วงระยะเวลาการเจาะที่แล้วเสร็จต่อ 1 วงแหวน

รายงานที่สองแสดงผลของการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ B และ F (รูปที่ 4.90)

- ระยะทาง ของจุดสำรวจ B และ F
- พิกัดฉากและระดับของจุดสำรวจ
- การหมุนตัวของเครื่องเจาะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
- การก้มหรือเงยของเครื่องเจาะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
- แอซิมุทและระดับ จุดสำรวจ
- ค่าต่างระหว่างตำแหน่งเครื่องเจาะกับตำแหน่งออกแบบ



รูปที่ 4.88 ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ

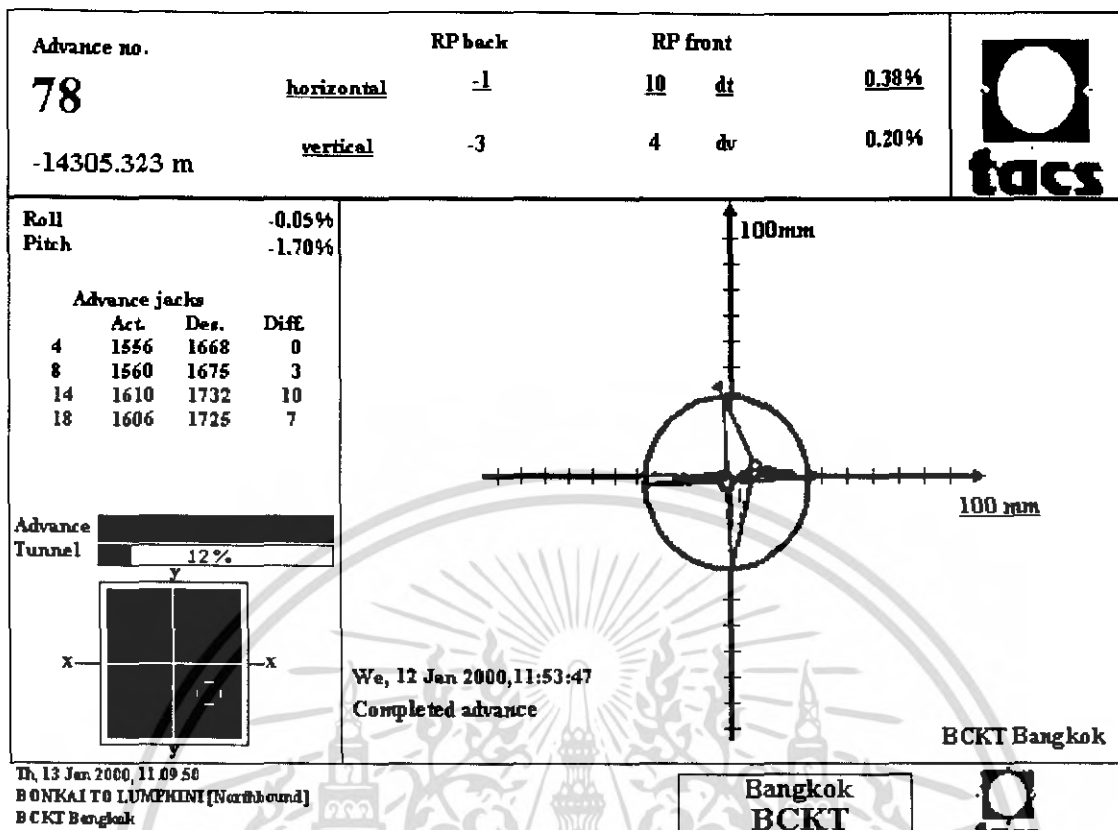
ข้อมูลจุดตั้งกล้องมีดังนี้

- ระยะทาง และตำแหน่งจุดตั้งกล้อง
- แอซิมุทและมุมโค้งจากจุดตั้งกล้องไปยังเป้าเลเซอร์
- ระยะทาง และระยะจากจุดตั้งกล้องไปยังเป้าเลเซอร์
- ระยะทาง ของวงแหวนเริ่มต้นในสายนั้น ๆ

ข้อมูลเพิ่มเติม มีดังนี้

- ระยะทางท่อนหัวและท่อนท้ายของเครื่องเจาะ
- ระยะระหว่างวงแหวน (ผิวด้านนอก) และผนังหัวเจาะ
- พิกัดฉากและกำลังของจุดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.89 ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tacs - acs-II
 Project: BCKT Bangkok
 Tunnel: BOKAI TO LUMPHINI (Northbound)

Ring nr 77
 Advance no. 78

Advance record



Date of ring erection: We, 12 Jan 2000, 10:59:37

TBM data, Chainage RP back: -14308.342m

Roll: 0.88%

	Act.	Des.	Dif.
hor angle	318.52872	318.20862	0.31881
Pitch	-1.70	-1.80	0.10
Easting	400320.882	400320.882	
Northing	28872.746	28872.746	
Level	82.416	82.416	

TBM data, Chainage RP front: -14306.323m

	Act.	Des.	Dif.
hor angle	318.52872	318.36763	0.16109
Pitch	-1.70	-2.00	0.30
Easting	400317.880	400317.880	
Northing	28873.613	28873.613	
Level	82.884	82.884	

Ring data, Chainage: -14310.860m

	Act.	Des.	Dif.
hor angle	317.87088	318.08200	-0.18100
Pitch	-1.81	-1.63	-0.01
Easting	400322.988	400322.988	
Northing	28873.631	28873.631	
Level	82.881	82.881	

Laser station: 64055

	Chainage	hor. angle	Zenith angle
Before	-14328.805m	318.85400gon	10: 71800gon
Easting	400337.827m	Northing	Level
Distance	17.883m	Reference ring:	Chainage ref. ring: -14418.860m

Jack extension before ring erection	Adjustment extension back	Clearance	ZEO
10 1000 4 1000	10 110 0 00	7 300	X8 21 L0L 31
10 1000 0 1000	10 100 0 00	7 300	Y8 -17 LKV 17

Th, 13 Jan 2000, 11:26:32
 BOKAI TO LUMPHINI (Northbound)
 BCKT Bangkok



รูปที่ 4.90 แสดงผลของการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.) ตำแหน่งของวงแหวน (ดูรูปที่ 4.90 ซีกด้านบนขวา)

- ระยะทาง ของแหวนอยู่ที่ขอบหน้า
- ผลต่างแอมพิทูดระหว่างแกนกลางของวงแหวนที่วางกับออกแบบ
- ผลต่างระหว่างการก้มหรือเงยของแกนกลางของวงแหวนที่วางกับออกแบบ
- ช่องว่างระหว่างผิวนอกวงแหวนไปผิวด้านในของเครื่องเจาะ
- กราฟฟีกกลม ๆ แสดงตำแหน่งการวางวงแหวนแกนของวงแหวนที่ออกแบบและแสดงทิศทางแกนของวงแหวนที่วาง (วัสดุออกจากกราฟฟีกได้)
- ตัวเลขแสดงค่าเบี่ยงเบนทางราบและทางดิ่ง ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

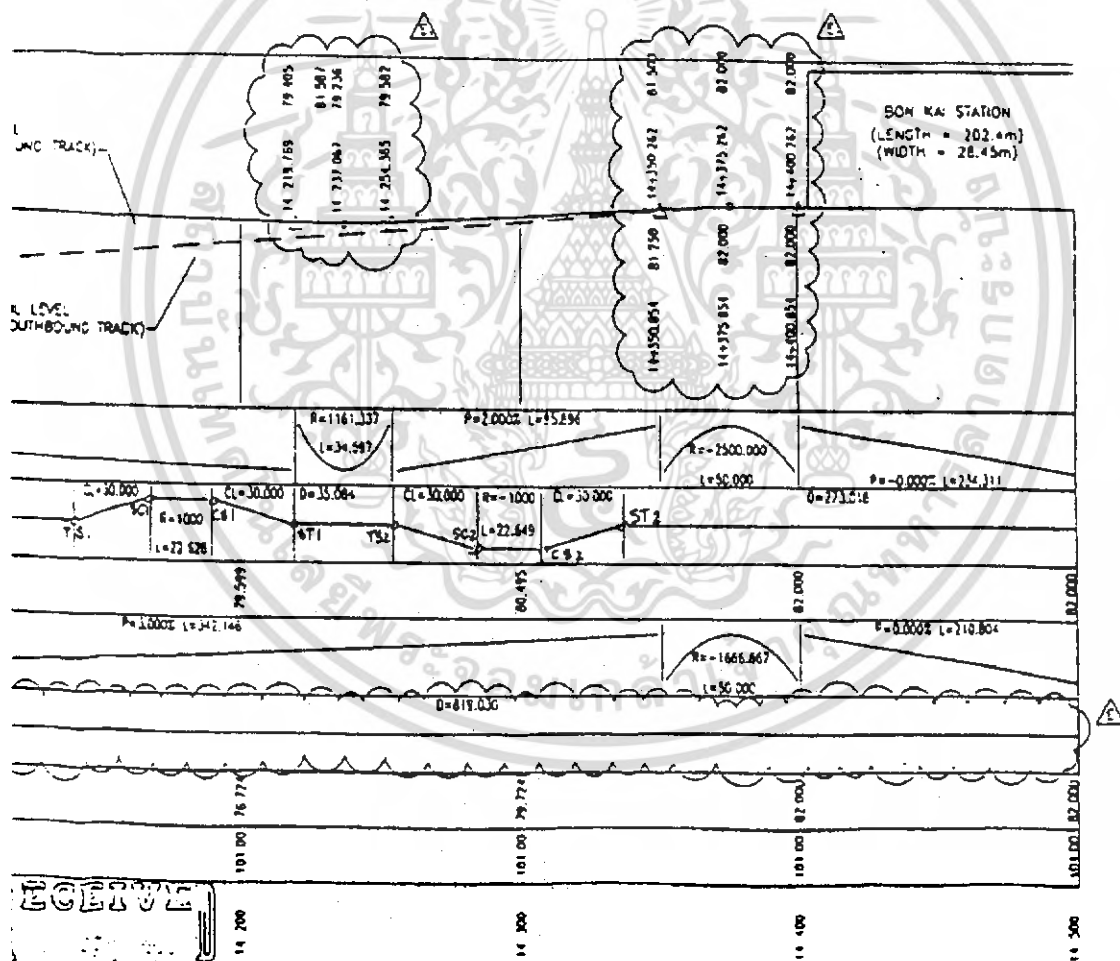
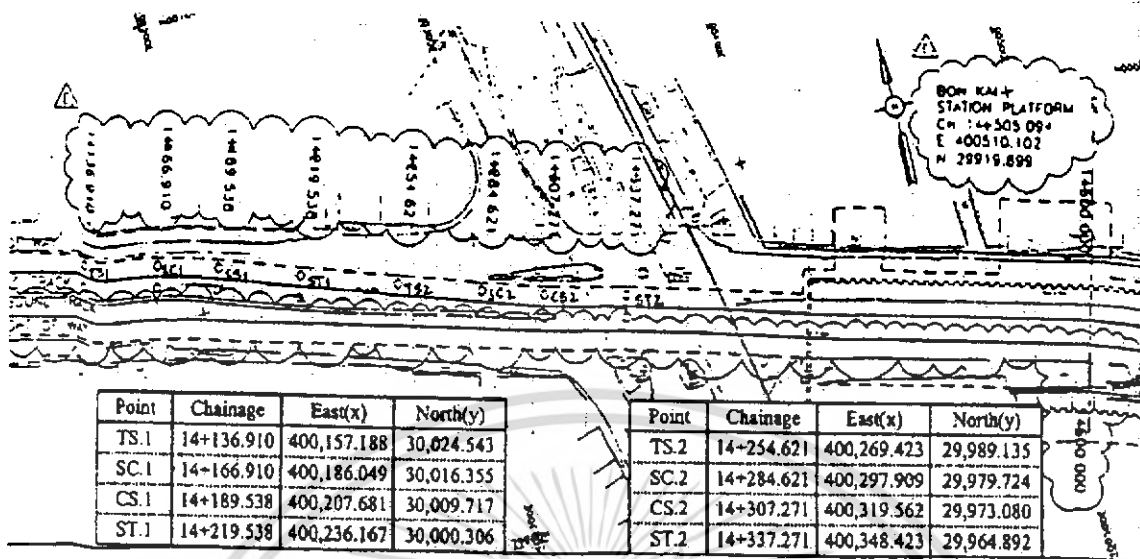
ข้อสังเกต ตามรูปวงแหวนประกอบเซกเมนต์ อยู่ 6 ชิ้น มีความหนา 30 ซม. แต่ละชิ้นความยาวคอร์ดต่างกัน ยกเว้น A1, A2 , และ A3 ตำแหน่งการประกอบขึ้นอยู่กับแนวออกแบบเช่นโค้งทางราบและ โค้งทางดิ่งจะใช้เซกเมนต์ K วางในตำแหน่งต่างกัน , ความสัมพันธ์ระหว่างหัวเจาะกับวงแหวน ดูรูปที่ 4.88

ตารางด้านล่างนี้ แสดงรายการ การคำนวณค่าพิกัดและระดับที่ออกแบบวงแหวนที่ 77 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงแหวนที่ติดตั้งไปแล้ว

ตารางที่ 4.10 รายการคำนวณค่าพิกัดและระดับ

CSC1 : SURVEY SECTION												
PROJECT:		METROLITAN RAPID TRANSIT RATCHAMONGHON										
LOCALTION:		North Bound Segment Survey From Lumpini Station To Bonkai Station										
COMPUTED:		MR.PHUTTHA THONGTON										
CHECKED BY:		MR.THAWORN KAEWYANA										
Ring No	Chainage (m)	Track Axis Coordinates			Azimuth			X-offt. (m)	Y-offt. (m)	Tunnel Center Coordinates		
		East(x)	North(y)	Elev. (m)	°	'	"			East(x)	North(y)	Elev. (m)
3	14+399.734	400,408.599	29,948.146	82.000	105	33	4.8	0.050	-0.065	400,408.586	29,948.098	83.900
8	14+393.729	400,402.814	29,949.756	81.991	105	33	4.8	0.050	-0.065	400,402.800	29,949.708	83.891
20	14+379.317	400,388.929	29,953.620	81.912	105	33	4.8	0.050	-0.065	400,388.916	29,953.571	83.812
41	14+354.096	400,364.632	29,960.381	81.574	105	33	4.8	0.050	-0.065	400,364.618	29,960.333	83.474
58	14+333.679	400,344.962	29,965.855	81.168	105	33	49.2	0.048	-0.058	400,344.949	29,965.810	83.075
77	14+310.860	400,323.006	29,972.072	80.712	106	13	2.8	0.032	-0.013	400,322.997	29,972.040	82.664
87	14+298.850	400,311.494	29,975.493	80.472	106	53	35.7	0.030	-0.006	400,311.485	29,975.464	82.431
109	14+272.428	400,286.313	29,983.494	79.943	108	15	54.5	0.038	-0.030	400,286.301	29,983.458	81.878
116	14+264.020	400,278.335	29,986.146	79.775	108	29	0.9	0.044	-0.047	400,278.321	29,986.105	81.694
129	14+248.409	400,263.535	29,991.113	79.478	108	34	4.5	0.050	-0.065	400,263.519	29,991.065	81.378
RP front	14+305.323	400,317.694	29,973.632	80.601	106	31	20.6	0.030	-0.006	400,317.685	29,973.603	82.560
RP front	14+308.342	400,320.589	29,972.778	80.662	106	21	1.8	0.031	-0.008	400,320.748	29,972.748	82.618

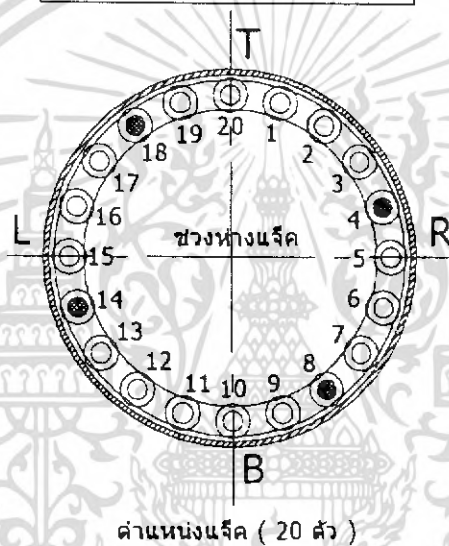
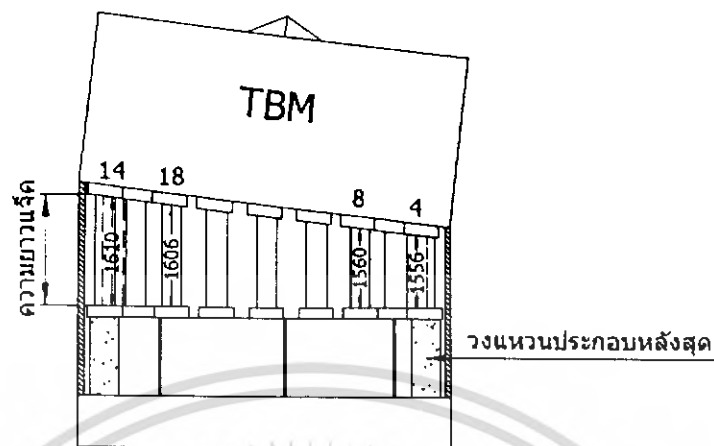
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BY:.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.91 ตำแหน่งจุดสำรวจ



รูปที่ 4.92 ระยะผลักรของแม่แรงหัวชุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การก่อสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในงานก่อสร้าง

4.2.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป (General Requirement)

การวางแผนงานก่อสร้าง (Construction Planning)

ก่อนที่งานก่อสร้างจะเริ่มขึ้น ควรทำความเข้าใจกับวัตถุประสงค์ ขอบเขต และตารางเวลาทำงานให้ละเอียดถี่ถ้วนเสียก่อน และควรจะมีเอกสารประกอบในงานออกแบบ รายละเอียดพิเศษที่สอดคล้องกับสภาพทางธรณีวิทยาที่ได้ทำการสำรวจมา รวมถึงปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น ความปลอดภัย และวิธีการก่อสร้าง

4.2.2.2 การสำรวจ (Survey)

การสำรวจระดับผิวดิน (Surface Survey)

(1) ก่อนที่จะเริ่มงานก่อสร้าง จะต้องมีการสำรวจขั้นพื้นฐาน โดยจะทำการสำรวจแนวเส้นศูนย์กลางของอุโมงค์ (Center Line) การทำระดับตามระยะทางของแนวความยาวของอุโมงค์บนพื้นดิน (Longitudinal Leveling) รวมทั้งการติดตั้งหมุดควบคุม (Control Point) ให้เสร็จเรียบร้อย

(2) หมุดควบคุมจะต้องทำขึ้นให้เหมาะสมกับลักษณะของเส้นทางการสำรวจ เช่น จัดวางตำแหน่งของหมุดพยานและหมุดหลักฐานเป็นรูปสามเหลี่ยมตามความเหมาะสมกับความยาวของอุโมงค์ และลักษณะทางธรณีวิทยา เป็นต้น หมุดควบคุมจะต้องตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงและมีการป้องกันไว้อย่างดี เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของหมุด หมุดอ้างอิงของหมุดควบคุมก็จะต้องทำขึ้นเพื่อป้องกันเหตุการณ์ในกรณีที่หมุดควบคุมถูกทำลายเสียหาย ซึ่งจะสามารถวางหมุดควบคุมขึ้นมาใหม่ได้จากหมุดอ้างอิงที่มีอยู่ได้ง่ายขึ้น

(3) จุด BM (Bench Mark) มาตรฐานจะต้องทำขึ้นเป็นตัวแรกหรือพร้อมๆ กับ BM ตัวอื่นๆ โดย BM มาตรฐานควรจะต้องจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงและควรมีการตรวจสอบตามกำหนดเวลาอยู่เสมอ

แม้ว่าโดยทั่วไปการสำรวจในระดับพื้นดินเพื่อใช้ในการวางแผนในงานก่อสร้างจะต้องเสร็จสิ้นก่อนการก่อสร้างจะเริ่มขึ้นก็ตาม แต่การสำรวจก็ยังต้องมีขึ้นอีกครั้งเพื่อตรวจสอบผลการสำรวจก่อนหน้านี้ที่ใช้ในการออกแบบและเพื่อติดตั้งหมุดควบคุมเพิ่มเติม

ในการขุดเจาะอุโมงค์นอกจากจะทำการขุดเจาะตามสัญญาที่ระบุไว้แล้วเกี่ยวข้องกับสิทธิประโยชน์ของเขตที่ดินข้างเคียงด้วย ดังนั้นการสำรวจจึงต้องทำการสำรวจในขอบเขตที่ดินข้างเคียงด้วย

การสำรวจบนพื้นดินจะเป็นพื้นฐานในการสำรวจแนวอุโมงค์ และการสำรวจเผ่าตั้งเกตุการณ์เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของพื้นดินและโครงสร้างที่มีอยู่

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การสำรวจบนพื้นดินจะต้องทำการสำรวจไปในทิศทางของแนวอุโมงค์ที่จะทำการก่อสร้าง และการสำรวจโดยหลักๆแล้วจะเป็นการสำรวจงานทาง (Route Survey) เพื่อวาดแนวเส้นทางของอุโมงค์บนพื้นดิน การทำระดับจะทำตลอดแนวเส้นทางของ Centerline ของอุโมงค์เพื่อวัดค่าระดับของแต่ละสถานีตามแนวเส้นทาง

(2) โดยปกติแล้วเส้นทางในการสำรวจจะถูกเลือกให้อยู่ในดัวเมืองภายใต้ข้อกำหนดทางด้านธรณีวิทยา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการสร้าง และวัดหมุดอ้างอิงเพื่อให้มีความปลอดภัยและความถูกต้องแม่นยำ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำเครื่องมือที่เรียกว่า Electro-Optical distance meter เข้ามาช่วยในการเพิ่มระยะทางในการสำรวจได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะมีแนวเส้นทางในการสำรวจมากขึ้นเป็นหลายๆกิโลเมตร ซึ่งจะทำให้การสำรวจมีความถูกต้องมากขึ้น

(3) BM มาตรฐานจะใช้คล้ายกับหมุดควบคุมพื้นฐาน ไม่เพียงแต่ใช้เพื่อประโยชน์ในการสำรวจอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้ประโยชน์ในการสำรวจการเคลื่อนตัวของดินและ โครงสร้างที่มีอยู่ หลังจากการก่อสร้างสิ้นสุดลงด้วย

ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ BM จะมีระยะเวลานาน ตำแหน่งที่ติดตั้ง BM และตัว BM เองก็จะต้องใช้วัสดุที่ได้คัดเลือกมาอย่างดี และระดับของ BM มาตรฐานจะต้องมีการตรวจสอบและปรับแก้อยู่เสมอ

การสำรวจอุโมงค์ (Tunnel Survey)

(1) การสำรวจอุโมงค์จะต้องกระทำด้วยความระมัดระวังและบ่อยครั้ง เนื่องจากการสำรวจมีลักษณะเฉพาะของตัวเอง

(2) การเชื่อมเส้นศูนย์กลาง (Center Line) และ BM เข้ากับอาคารระบายอากาศควรกระทำด้วยความแม่นยำเป็นพิเศษ

(3) หมุดควบคุมจะต้องถูกติดตั้งอย่างมั่นคงเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ หรือสูญหายในระหว่างการขุดอุโมงค์ในตำแหน่งที่มีหมุดควบคุมอยู่ จึงควรติดตั้งในที่ที่ปลอดภัยจากแรงที่กระทำต่อหมุด

(4) ระยะของช่วงห่างในการสำรวจนั้นจะต้องมีการคำนวณที่พิจารณาถึงขนาดของอุโมงค์ หรือการจัดวางตำแหน่งของอุโมงค์ไว้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานสำรวจอุโมงค์จะทำการควบคุมการต่อขยายของตัวอุโมงค์ และกำกับการดำเนินการจากจุดควบคุมที่อยู่บนระดับผิวดิน

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) เนื่องจากการแก้ไขแนวเส้นทางของอุโมงค์ไม่สามารถทำได้หลังจากได้ดำเนินการก่อสร้างไปแล้ว ดังนั้นจึงต้องคอยตรวจสอบการเบี่ยงเบนจากแนวศูนย์กลางที่ได้ออกแบบไว้อยู่เสมอ และเครื่องจักรที่ใช้จะต้องมีการแก้ไขอย่างเร่งด่วนโดยไม่ให้เกิดความล่าช้า

(2) การเชื่อมโยงแนวเส้นทางเข้ากับอาคารระบายอากาศ สามารถทำได้โดยใช้ลูกตั้งกล้องธีโอดอลไลท์ (Theodolites) เป็นต้น ถ้าอาคารระบายอากาศมีทางออกสู่พื้นดินเพียงทางเดียวแล้ว ระยะเส้นทางในอุโมงค์จนถึงอาคารระบายอากาศจะต้องมีระยะทางที่สั้นที่สุด และจะเป็นการยากยิ่งกว่าถ้าใช้กล้องธีโอดอลไลท์เพียงอย่างเดียวในอาคารระบายอากาศที่มีความลึกมาก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิธีการปฏิบัติให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ก่อนที่จะปฏิบัติงานจริง และการเชื่อมโยงแนวศูนย์กลางอุโมงค์กับแนวอาคารระบายอากาศจากบนพื้นดินลงมาสู่ระดับอุโมงค์จะต้องมีความแม่นยำมาก

(3) ควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งหมุดควบคุมไว้ใกล้บริเวณก่อสร้างมากจนเกินไป เพราะอาจได้รับความเสียหายจากแรงกระแทกจากการก่อสร้างได้ เช่น แรงสั่นสะเทือน และอาจจะทำให้หมุดเกิดการชำรุดเสียหายได้ ในกรณีที่มีการก่อสร้างอุโมงค์คู่ จะต้องมีการตรวจสอบหมุดควบคุมของอุโมงค์เดิมเสมอ เพราะอาจมีการเคลื่อนที่ได้หลังจากการก่อสร้างเสร็จ

(4) ระยะห่างระหว่างจุดสำรวจในแนวโค้งเท่ากับ 10-20 เมตร และ 50 เมตรในแนวทางตรง เมื่อมีการสำรวจเสร็จในแต่ละจุดจะต้องทำหมุดไว้ข้างหลังเสมอ และหมุดควบคุมควรมีการตรวจสอบเทียบกับหมุดสำรวจที่อยู่บนพื้นดินเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้

การสำรวจพิภพห้วมอุโมงค์ (Shield Machine Attitude Survey)

(1) ห้วมจะทำการขุดเจาะไปตามเส้นทางที่ได้มาจากการสำรวจตำแหน่งของห้วม

(2) การสำรวจห้วมจะต้องเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสม ให้สอดคล้องกับวิธีการทำงาน

การสำรวจห้วมจะกระทำในระหว่างการทำงานขุดเจาะ โดยใช้ประโยชน์จากหมุดสำรวจที่ได้ทำไว้ในงานสำรวจอุโมงค์เพื่อที่จะรักษาแนวเส้นทางของอุโมงค์ภายใต้ข้อบังคับที่ได้กำหนดไว้

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การสำรวจพิกัดของหัวเจาะจะต้องทำ 2 ครั้งใน 1 วัน จะต้องทำการสำรวจตำแหน่งที่ยกขึ้น ลาดเอียง เลี้ยวโค้ง และการกลิ้งของหัวเจาะอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อที่จะได้ทำการยึดจับตำแหน่งไว้

(2) ส่วนประกอบและรายละเอียดของหัวเจาะจะทำการตรวจวัดอย่างคร่าวๆ เช่น ระยะห่างระหว่างด้านซ้าย ขวา บน และล่าง ช่วงระยะการตัดหน้าดิน และความยาวของหัวเจาะ

ความลาดเอียง การเลี้ยวโค้ง และการหมุนหัวเจาะสามารถวัดได้โดยการใช้ลูกตั้ง Inclinometer หรือ gyrocompass มาติดตั้งที่หัวเจาะ หรือไม้ก็ใช้กล้องธีโอโดไลต์

ในการสำรวจจะใช้ระบบอัตโนมัติ ซึ่งจะบันทึกผลการสำรวจที่ได้ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการขุดเจาะ ระบบสำรวจอัตโนมัติด้วยแสงเลเซอร์ หรือการจับภาพถ่ายไปที่หัวเจาะ จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะประมวลผล และทำการตรวจวัด ได้เป็นผลลัพธ์ออกมา

4.2.2.3 การดำเนินการก่อสร้าง (Execution)

อาคารระบายอากาศ (Shaft)

(1) อาคารระบายอากาศจัดว่าเป็นโครงสร้างถาวรชนิดหนึ่งที่ต้องทำการก่อสร้าง ซึ่งจะต้องนำเสาคอนกรีตที่ทำหน้าที่ค้ำยันและทำการผูกในอาคาร ไปพร้อมๆ กับการขุดเจาะเพื่อให้เป็นไปตามตารางเวลาที่ได้ระบุไว้

(2) การออกแบบโครงสร้างอาคารระบายอากาศจะต้องคำนึงถึงขนาดของหัวเจาะ การนำหัวเจาะลงไป และชิ้นส่วนของหัวเจาะ วิธีการเริ่มการก่อสร้าง ความปลอดภัยจากแรงปฏิกิริยาในการก่อสร้าง และสภาพแวดล้อม

(3) ในการก่อสร้างอาคารระบายอากาศ จะต้องใช้วิธีที่ระมัดระวังและปลอดภัย และยังคงคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยา สภาพของท้องถนน การจราจร และผลกระทบที่เกิดจากสภาพที่แวดล้อม ตลอดจนเสียง และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) อาคารระบายอากาศสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ได้ 4 ประเภท คือ อาคารระบายอากาศที่ทางออก อาคารระบายอากาศระหว่างช่วงกลางอุโมงค์ อาคารระบายอากาศในช่วงโค้ง

(1.1) อาคารระบายอากาศบริเวณทางออก จะก่อสร้างบริเวณปากทางออกโดยเป็นตำแหน่งที่จะนำหัวเจาะ อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆลงไป ซึ่งจะต้องขนย้ายดินที่ขุดออกเพื่อเตรียมพื้นที่การทำงาน การบำรุงรักษาสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้นก็ถือว่าเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องจัดการให้อยู่ในสภาพที่ดี จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆสิ่งที่จะต้องระมัดระวัง เช่น เรื่องเสียง การสั่นสะเทือน การเคลื่อนตัวของดิน การจราจรมลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ และชั่วโมงการทำงาน ถ้ามีปัญหาใดปัญหาหนึ่งเกิดขึ้นในการทำงานแล้ว ก็ส่งผลกระทบต่อ จนทำให้งานมีความล่าช้ากว่าที่กำหนดไว้ในตารางเวลาอย่างไม่สามารถทำนายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดสิ่งเหล่านี้ก่อนเริ่มการก่อสร้าง

(1.2) จากวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ดังที่กล่าวมา อาคารระบายอากาศระหว่างกลางนั้น จะถูกก่อสร้างเป็นโครงสร้างถาวรที่กึ่งกลางอุโมงค์ หรือเพื่อเป็นการตรวจสอบหัวเจาะ

(1.3) อาคารระบายอากาศบริเวณทางเข้า จะถูกสร้างในบริเวณปลายของอุโมงค์ และจะเป็นตำแหน่งที่รถถอนและนำหัวเจาะออกไป

(1.4) อาคารระบายอากาศบริเวณทางโค้ง จะถูกสร้างขึ้นในกรณีที่หัวเจาะไม่สามารถเลี้ยวได้ในรัศมีความโค้งที่น้อยๆ หรือเพื่อจะเปลี่ยนทิศทางในการขุดเจาะภายในอาคารระบายอากาศในกรณีของการก่อสร้างอุโมงค์คู่ที่ใช้หัวเจาะตัวเดียวกัน

(2) มีรายละเอียดดังนี้

(1.1) โดยทั่วไปขนาดช่องว่างในอาคารระบายอากาศบริเวณทางออกจะมีขนาด 0.75-1.0 เมตร จากด้านข้างทั้งสองของหัวเจาะ และจะต้องจัดเตรียมพื้นที่ให้พอดีกับด้านหน้าและหลังของหัวเจาะ ในการดำเนินการจะเป็นการขนย้ายดินออกในระหว่างที่หัวเจาะทำการเจาะ หรือเป็นการนำชิ้นส่วนของหัวเจาะลงไปอาคารระบายอากาศ ระยะห่างด้านล่างจะต้องคำนวณไว้ก่อนล่วงหน้าโดยพิจารณาถึง ส่วนประกอบของหัวเจาะและการระบายน้ำออกจากอุโมงค์

(1.2) ตำแหน่งที่วางหัวเจาะ จะต้องออกแบบให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำหนัก และการเคลื่อนตัวของหัวเจาะในระหว่างการขุดเจาะได้ ในเวลาชั่วคราว

(1.3) แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทำงาน จะกระทำต่อผนังของอาคารระบายอากาศหรือดินที่อยู่ด้านท้ายของหัวเจาะ หรือเป็นแรงปฏิกิริยาที่มาจากเหล็กสร้าง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงที่จะเกิดขึ้นเหล่านี้ไว้ล่วงหน้าด้วย

(1.4) ในการเปิดกำแพงเพื่อนำหัวเจาะเข้าสู่อาคารระบายอากาศนั้น จะต้องออกแบบให้กำแพงสามารถต้านทานแรงดันดินที่มีอยู่ภายนอก และต้องออกแบบให้สามารถพังกำแพงได้ง่าย ขนาดของช่องเปิดจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางนอกสุดของหัวเจาะประมาณ 10-20 เซนติเมตร ต้องมีความทนทานและมีพื้นที่ทางเข้าในการติดตั้งเครื่องจักรด้วย ในช่องเปิดของอาคารระบายอากาศตรงทางเข้าจะมีขนาดใหญ่กว่านี้เล็กน้อย

(3) อาคารระบายอากาศจะทำการก่อสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์โดยจะทำการก่อสร้างโดยใช้การเจาะเปิดหน้าดิน (Open-Cut) หรือใช้เคซอน (Caisson) หัวเจาะก็สามารถใช้งานในอาคารระบายอากาศได้ ในการก่อสร้างจะต้องเลือกวิธีที่ปลอดภัยที่สุดและประหยัดที่สุด โดยจะพิจารณาถึงขนาดอาคารระบายอากาศ สภาพทางธรณีวิทยา สภาพของถนน ปริมาณการจราจร สภาพสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ในกรณีที่อาคารระบายอากาศไม่สามารถก่อสร้างในแนวเส้นทางอุโมงค์ได้ จำต้องเลือกตำแหน่งที่อยู่ห่างออกไป จะต้องมีการก่อสร้างทางเชื่อมต่อระหว่างอาคารระบายอากาศกับแนวอุโมงค์โดยให้มีระยะทางสั้นที่สุด

ทางออกและทางเข้าของหัวเจาะ (Departing and Arrival of Shield Machine)

(1) ในกรณีของการเริ่มต้นทำการขุดเจาะนั้น จำต้องวางหัวเจาะไว้ในตำแหน่งที่ถูกต้องตามที่ไว้วางแผนไว้ จากนั้นจึงนำหัวเจาะลงสู่ดิน ในการทำการขุดเจาะด้วยหัวเจาะนั้นจะต้องทำด้วยความระมัดระวังให้เป็นไปตามแนวเส้นทางที่ได้วางไว้ โดยไม่ให้มีสาเหตุที่ก่อให้เกิดอันตราย ไม่ว่าจะเป็นอันตรายจากส่วนของกำแพงอาคารระบายอากาศที่หลงเหลืออยู่ สภาพแวดล้อมของถนน สาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน เป็นต้น

(2) ในกรณีของทางเข้า ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องมีการวัดขนาดให้ถูกต้อง และเครื่องจักรจะต้องขับเคลื่อนไปด้านหน้าตามแนวทางที่ได้วางไว้ จนถึงตำแหน่งที่ระบุไว้ด้วยความระมัดระวัง โดยไม่ให้มีอันตรายที่ส่งผลต่อสภาพของถนน สาธารณูปโภคใต้ดิน เป็นต้น

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) หัวเจาะจะเริ่มทำการขุดเจาะตามขั้นตอน ประกอบด้วยการผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนที่ไปยังหน้าด้วยแม่แรงจากจุดเริ่มต้น โดยใช้แรงปฏิกิริยาจากโครงสร้าง เช่น ชั้นส่วนชั่วคราวในอาคารระบายอากาศ ให้เคลื่อนตัว แล้วจึงทำการขุดเจาะดินไปตามเส้นทางอุโมงค์

(1.1) การวางตำแหน่งของหัวเจาะ หมายถึง การประกอบชิ้นส่วนและชุดของหัวเจาะในตำแหน่งที่เหมาะสม ในอาคารระบายอากาศ ถ้าในกรณีที่ได้คำนวณไว้ว่าจะมีการทรุดตัวของดินอ่อนหลังจากที่ได้นำหัวเจาะลงสู่ชั้นดินนั้น จะต้องจัดตำแหน่งให้อยู่ในระดับที่สูงกว่าที่ได้ออกแบบไว้หลายเซ็นติเมตร

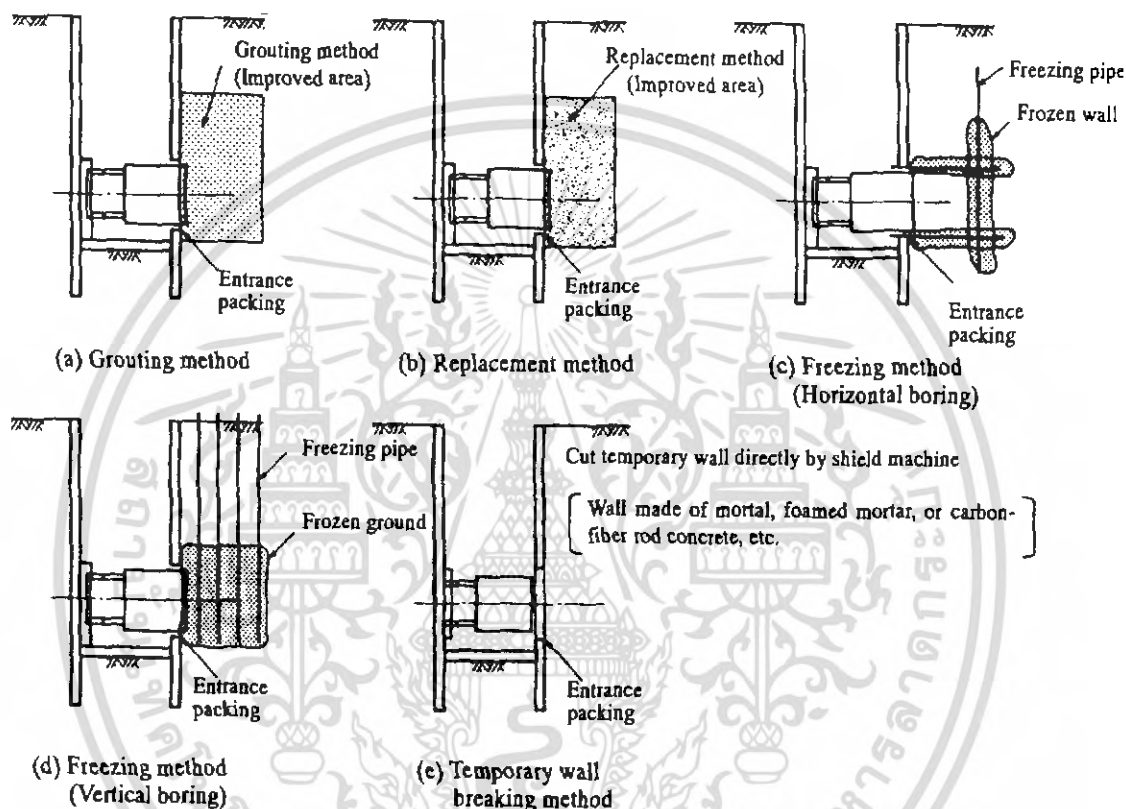
(1.2) อุปกรณ์ยึดรั้ง (Back Anchor Facility) จะประกอบด้วยชิ้นส่วนชั่วคราวและคานรูปตัว H เป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงผลักดันจากแม่แรงที่ทำให้หัวเจาะเคลื่อนตัวได้

(1.3) การเปิดหน้าทางเข้า (Entrance Opening) ในการพังกำแพงเพื่อเปิดเป็นทางเข้าของหัวเจาะ และการเสี่ยงต่อการพังทลายของดิน ดังนั้นการทำลายกำแพงชั่วคราวจะต้องทำด้วยความรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระมัดระวัง โดยใช้ชิ้นส่วนขนาดเล็กกับการค้ำยันจากทางด้านหน้าของหัวเจาะ โดยปิดติแล้วทางเข้าจะ
 ทำเป็นคอนกรีตปิดผนึก หรือเป็นทางเข้าคอนกรีตธรรมดา จะต้องติดตั้งไปตลอดความยาวของทางเข้าของ
 หัวเจาะเพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้าง

(1.4) วิธีเริ่มการดำเนินการ (Method of Starting) จะต้องคำนึงถึงสถานะของเงื่อนไข
 ต่างๆ เช่น ดิน น้ำใต้ดิน ชนิดของหัวเจาะ ระดับความลึกที่มากเกินไป และสภาพการทำงาน วิธีเริ่มการทำงาน
 สามารถแยกออกได้ดังที่แสดงในรูปที่ 4.93



รูปที่ 4.93 ตัวอย่างวิธีการนำหัวเจาะออกจากกำแพงอาคารระบายอากาศ
 (จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

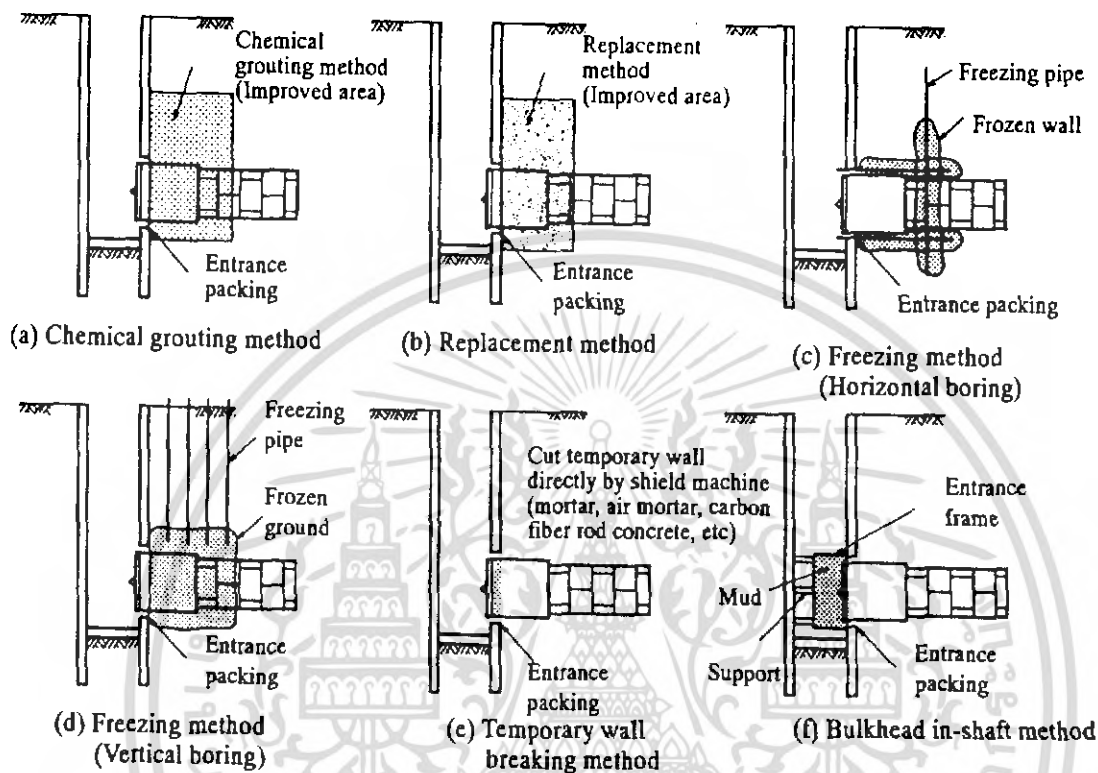
ข้อควรระวังเมื่อนำหัวเจาะลงสู่ดิน จะมีวิธีเริ่มต้นที่ต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของหัวเจาะที่
 ใช้และวิธีการ โดยทั่วไปจะต้องให้ความสำคัญกับสิ่งกีดขวางที่ยังคงเหลืออยู่ในขณะทำลายกำแพง เช่น ดินที่
 อุดตันอยู่ ความล่าช้าของ Countermeasures เนื่องจากการไหลของดินและน้ำเข้ามาในช่องว่างระหว่างอาคาร
 ระบายอากาศกับหัวเจาะอย่างไม่ได้คาดหมาย

(2) การศึกษาหัวข้อในต่อไปนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วนแล้วก่อนที่จะดำเนินการ รูปที่ 4.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 178 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.1) วิธีการสร้างเสถียรภาพของให้แกดินที่อยู่รอบๆ ต้องใช้ทางเข้าที่เป็นแบบ Entrance Packing

(1.2) วิธีการสำรวจตำแหน่งของหัวเจาะเพื่อที่จะให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ให้ถึงกำแพง และการสื่อสารระหว่างในและนอกอุโมงค์



รูปที่ 4.94 ตัวอย่างแสดงวิธีการเข้าของหัวเจาะ
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(1.3) ตำแหน่งใดที่ต้องใช้ความเร็วในการขับเคลื่อนที่ต่ำ และต้องใช้ความเร็วต่ำเพียงใด

(1.4) สิ่งที่แปลกปลอมที่เข้ามาในหัวเจาะทำให้หัวเจาะมีแรงดันลดลง

(1.5) จำเป็นต้องมีก้ำยันด้านทางแรงของดินที่อยู่บริเวณทางเข้าอาคารระบายอากาศ เพื่อการขับเคลื่อนหัวเจาะและตัว Countermeasure ของหัวเจาะ

- (1.6) จังหวะและวิธีการทำลายกำแพง
- (1.7) Countermeasure ที่ด้านทานดินและน้ำที่ไหลเข้าพื้นที่ว่างระหว่างทางเข้ากำแพง
- (1.8) ตำแหน่งที่หัวเจาะจะหยุดในกรณีที่หัวเจาะถูกทิ้งไว้ใต้ดิน
- (1.9) วิธีการถนอมกลับในพื้นที่ทางเข้าบริเวณใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.10) เครื่องมือชั่วคราว เช่น ตัวอุ้มหัวเจาะในทางเข้าอาคารระบายอากาศ ในกรณีที่หัวเจาะถูกนำลงมาทางอาคารระบายอากาศ

การขับเคลื่อนหัวเจาะไปข้างหน้า (Advancement)

หัวเจาะจะต้องขับเคลื่อนไปตามศูนย์กลางของอุโมงค์ตามที่ได้ออกแบบไว้อย่างเที่ยงตรง ในขณะที่แม่แรงจะทำการผลักดันหัวเจาะไปด้านหน้า โดยจะต้องรักษาเสถียรภาพของดินไว้พร้อมๆกันด้วย

(1) จำนวนของแม่แรงและตำแหน่งจะต้องเลือกให้เพียงพอที่จะดันให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ แม่แรงจะพิจารณาเลือกโดยคำนึงถึงความโค้ง และระดับลาดเอียงของแนวเส้นทาง อาจจะใช้แม่แรงเพียงผลักดันหัวเจาะด้านเดียวเพื่อให้การขับเคลื่อนในแนวโค้ง ลาดเอียง และเพื่อปรับแก้แนวเส้นทาง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณออกแบบสมรรถนะของแม่แรง จำนวนที่ต้องใช้ และตำแหน่งติดตั้งไว้ก่อนแล้ว แรงผลักดันจากแม่แรงจะต้องมีมากพอ ในเส้นทางโค้งจะมีอุปกรณ์ติดตั้งที่ใช้ในการเชื่อมต่อแรงดันที่ต้องการก็ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน ชนิดของหัวเจาะ ปริมาณดินที่ขุดเจาะ และรัศมีความโค้ง ซึ่งจะต้องมีการควบคุมดูแลอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้น

(2) การบำรุงรักษาเสถียรภาพของการขุดเจาะ ตามที่ได้การขับเคลื่อนหัวเจาะและการขุดเจาะต้องดำเนินการไปพร้อมๆกัน ปริมาณการขุดเจาะและอัตราการเคลื่อนที่จะต้องมีการปรับแก้ไปในแต่ละสภาพการ ดังนั้นจะต้องมีมาตรการป้องกันการขุดเจาะในปริมาณที่มากเกินไป สิ่งกีดขวางที่อยู่ในห้องเครื่อง และจะต้องมีการรักษาเสถียรภาพของการทำงานเอาไว้ อีกนัยหนึ่งเครื่องขุดเจาะประเภท Open-Face จะขับเคลื่อนไปพร้อมกับการขุดเจาะหรือทันทีที่ขุดเจาะเสร็จแล้ว ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน

(3) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหัวเจาะ เช่น ชิ้นส่วนต่างๆ จะต้องมีการป้องกัน จะต้องพิจารณาค่าของความแข็งแรงในการรับแรงกดอัดจากแรงผลักดันหัวเจาะที่มาจากแม่แรง ซึ่งจะต้องให้มีแรงที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด จะเป็นการดีกว่าถ้าเลือกใช้แม่แรงหลายตัวเพื่อที่จะช่วยเฉลี่ยแรงที่จะเกิดขึ้นให้น้อยลง นอกจากนี้แล้วในเส้นทางโค้ง และทางลาดเอียงจะต้องเลือกใช้แม่แรงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

(4) หัวเจาะต้องขุดเจาะไปตามแนวเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้อย่างแม่นยำ โดยพยายามให้หัวเจาะมีการเอียง ลาด หรือโค้งตัวให้น้อยที่สุด ขณะที่ทำการขุดเจาะแม่แรงจะออกแรงผลักดันให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ที่วางไว้เพื่อขุดเจาะดิน เมื่อถึงทางโค้ง หรือทางลาดเอียงจะต้องขับเคลื่อนโดยใช้แม่แรงแบบแยกส่วนและอาจจะต้องใช้ขนาดที่เล็กลง ชิ้นส่วนที่ใช้ในการตัดหน้าดินจะต้องจัดให้มีทิศทางตั้งฉากกับศูนย์กลางของอุโมงค์มากที่สุด การเอียงตัว การสั่นตัวไปมาของหัวเจาะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุหลายประการ เช่น มาจากแรงปฏิกิริยาที่มาจากดิน แรงผลักดันจากแม่แรง คุณลักษณะเฉพาะของหัวเจาะ และสภาพของดิน ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องแก้ไขให้อยู่ในแนวที่ได้ออกแบบไว้ก่อนที่จะมีการเคลื่อนนอกเส้นทางมากกว่านี้ เป็นเรื่องธรรมดาที่หัวเจาะจะอยู่ในลักษณะหน้าคว่ำ (Nose-Down) เพราะว่าดินที่มีความอ่อนมากและ/หรือ โครงสร้างของหัวเจาะ มีการใช้แม่แรงในส่วนล่างมากกว่าส่วนบน ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์หมุนขึ้น จะต้องยึดถือแนวเส้นทางที่ได้มาจากผลสำรวจให้ถูกแนวก่อนที่หัวเจาะจะเบี่ยงออกไปจากแนวเส้นทาง ถ้าสภาพของดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันแล้ว หัวเจาะอาจจะเบี่ยงเบนออกไปจากแนวเส้นทางได้ ดังนั้นจึงต้องมีการระบุถึงตำแหน่งที่สภาพของดินมีการเปลี่ยนแปลงไว้ด้วย

การขุดเจาะ เสถียรภาพของดิน และการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะประเภท EPB

จะต้องรักษาเสถียรภาพของหน้าดินเอาไว้ในขณะที่ทำการขุดเจาะ โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาของดินและเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์

- (1) จะต้องมีการควบคุมแรงดันในห้องขุดเจาะดิน และปริมาณดินที่ได้ขุดเจาะไปแล้ว เพื่อรักษาเสถียรภาพของดินเอาไว้ ต้องมีการใส่สารปรุงแต่งตามสภาพของดิน เพื่อปรับแต่งสภาพการไหลและความฝืดตัวให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม
- (2) ในการเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจะต้องพิจารณาถึงวิธีการที่ใช้ในการขุดเจาะ วิธีการขนย้ายดินออก และคุณสมบัติของดิน สมรรถนะของเครื่องที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมกับกำหนดการขุดเจาะ จะต้องมีการจัดการกับสิ่งปนเปื้อนที่มากับดิน

โดยมีรายละเอียดดังนี้

- (1) ในขณะที่หัวเจาะ EPB ทำการขุดเจาะดิน ดินที่ถูกขุดเจาะออกมานั้นจะไหลเข้าสู่ในส่วนของหัวเจาะที่เรียกว่าห้องขุดเจาะดิน (Cutter Chamber) และดินเหล่านี้จะถูกลำเลียงออกมาด้วยสกรูลำเลียง (Screw Conveyor) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งอยู่ที่หัวเจาะ การนำดินที่ขุดเจาะแล้วออกมานั้นเป็นการตอบสนองต่ออัตราการขุดเจาะดินของหัวเจาะ การรักษาเสถียรภาพของดินจะทำได้โดยใช้แรงดันในห้องขุดเจาะ ซึ่งจะต้องรักษาแรงดันไว้ให้มีปริมาณที่เพียงพอในการรักษาเสถียรภาพของดิน

ต้องมีการตรวจวัดแรงดันดิน และปริมาณการขุดเพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียง และอัตราการขุดเจาะของหัวเจาะ ต้องควบคุมอัตราการหมุนของใบมีดขุดเจาะดินและแรงผลักดันของแม่แรงเพื่อรักษาเสถียรภาพของหน้าดินเอาไว้ด้วยเช่นกัน

- (2) มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.1) สภาพของดิน : ดินที่ถูกขุดเจาะออกมาจะเข้าไปอยู่ในห้องด้านในหัวหัวเจาะ ซึ่งดินเหล่านี้จะต้องมีปรับปรุงคุณสมบัติทั้งการไหลและปริมาณน้ำที่มีให้เพียงพอที่จะลำเลียงออกไปด้วยสกรูลำเลียงได้ เพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันให้เพียงพอกับการรักษาเสถียรภาพของดินได้อย่างปลอดภัย และมีการขนย้ายดินที่ถูกขุดเจาะออกมาในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้หัวเจาะสามารถทำการขุดเจาะต่อไปได้ ถ้าดินที่ถูกขุดเจาะเป็นดินเหนียวที่มีมุมเสียดทานระหว่างเม็ดดินน้อยหรือเป็นโคลนตม จะทำการปั่นด้วยหัวไบมีด (Cutter head) เพื่อให้สามารถไหลได้ เช่นเดียวกันกับค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) เพื่อให้มีค่าน้อย จึงต้องมีการปั่นกวนในห้องขุดเจาะและในสกรูลำเลียง แล้วจึงปล่อยออกจากสกรูลำเลียงต่อไป

อีกกรณีหนึ่ง คือดินมีลักษณะเป็นทรายที่มีมุมเสียดทานภายในมากหรือเป็นกรวด ซึ่งทำการปรับปรุงคุณสมบัติการไหลตัวและการป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดินเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการอัดฉีดสารปรุงแต่งดินเข้าไปผสมกันเพื่อให้มีการไหลได้มากขึ้นและลดค่าการซึมผ่านได้ที่มีอยู่น้อยลงด้วย

(1.2) สารปรุงแต่ง : ในหัวเจาะชนิด EPB จะทำการฉีดสารปรุงแต่งที่หน้าดิน หรือในห้องขุดเจาะดินนั้นก็ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ต่อไปนี้

- เพื่อเพิ่มค่าการไหลตัวได้ของดินที่ถูกขุดเจาะออกมาแล้วอยู่ใน ห้องขุดเจาะดิน
- เพื่อปั่นกวนดินที่ถูกขุดเจาะออกมาให้มีค่า Permeability ต่ำลง
- เพื่อป้องกันไม่ให้ดินที่ถูกขุดเจาะออกมานั้นติดกับไบมีดที่ตัดดิน และจะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อไปนี้
- การลดการเสียดสีกับไบมีดขุดเจาะดิน
- การลดลงของแรงหมุนของหัวขุดเจาะและของสกรูลำเลียง

ในการเลือกสารปรุงแต่งจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของดินและวิธีที่ใช้ในการขนย้ายดินออก คุณสมบัติของสารปรุงแต่งที่ต้องการมีดังต่อไปนี้

- ทำให้ดินไหลตัวได้มากขึ้น
- สามารถผสมกับดินได้ง่าย
- ไม่แยกตัว
- ไม่เป็นอันตราย

สารปรุงแต่งที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 4 ประเภทดังนี้

1. ประเภทแร่ธาตุ (Mineral Type): มีอนุภาคที่ละเอียด เช่น ดินเหนียวและเบนโทไนท์ (Bentonite) เติมนลงในดินเพื่อปรับปรุงการไหลตัวและ ค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดิน สารประเภทนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่าสามารถนำไปใช้กับดินได้หลายประเภท แต่ก็ต้องมีเครื่องจักรสำหรับผสมสารนี้ที่มีขนาดใหญ่กว่าประเภทอื่นๆ และยังต้องมีแท็งก์บรรจุด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประเภทสารกระตุ้นบริเวณพื้นผิวด้านนอก (Surface active agent type) : ได้แก่สารประเภทโฟม (Foam) ซึ่งทำมาจากสารอ็อกซิเจนเข้าไป จะทำการอ็อกซิเจนเข้าไปในดิน สารประเภทนี้จะไปป้องกันไม่ให้ดินเกาะกับใบมีดตัดดิน และยังช่วยเพิ่มการไหลตัวและค่าการซึมผ่านได้ให้กับดินอีกด้วย โฟมจะสลายไปเองได้ ดังนั้นจึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด

3. ประเภทโพลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำได้สูง : สารประเภทนี้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้หลายร้อยเท่าของตัวมันเอง และจะมีสภาพคล้ายกับเจลลี่ ไม่แข็งจนในน้ำได้ดิน และมีประสิทธิภาพในการป้องกันการไหลพุ่งของน้ำภายใต้แรงดันสูง อีกนัยหนึ่งสารประเภทนี้จะถูกทำลายความสามารถในการดูดซับน้ำได้ง่ายถ้ามีคลอไรด์หรือไอออนของโลหะหนัก เช่น เหล็ก (Iron) หรือทองแดง (Copper) ที่มีอยู่ในดินอย่างหนาแน่น หรือในดินที่มีสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่าง

4. ประเภทโพลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ (Water soluble polymer type) : โพลิเมอร์ประเภทนี้จะช่วยเพิ่มความหนืดและความสามารถในการสูบ (Pump) ซึ่งจะคล้ายกับโพลิเมอร์ประเภทดูดซับน้ำได้สูง สาร CMC (Carboxy methyl Cellulose) จะถูกใช้มาก แต่ก็มีผลิตภัณฑ์ที่ปรับปรุงตัวใหม่ๆ ออกมามากมายในปัจจุบัน

สารปรุงแต่งที่ต้องผสมที่ภายนอกแล้วจึงสูบเข้าไปในหัวเจาะ หรือในห้องชุดเจาะดิน วิธีการควบคุมปริมาณสารเพิ่มที่ฉีดอัดเข้าไป ส่วนมากจะใช้อัตราการชุดเจาะดินของหัวเจาะเป็นตัวควบคุม ซึ่งปริมาณที่จะฉีดอัดจะมีปริมาณคงที่อยู่ในระดับหนึ่ง โดยจะใช้อัตราการชุดเจาะเป็นตัวปรับแก้ให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

(1.3) การควบคุมแรงดันภายในห้องชุดเจาะดิน : ในหัวเจาะ EPB จะต้องมีการปรับแก้แรงดันในห้องชุดเจาะอย่างเหมาะสมเพื่อให้หน้าดินยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยปกติแล้วถ้าแรงดันมีมากเกินไปก็จะทำให้มีการทะลักของดินที่อยู่ในห้องชุดเจาะดินมีน้อยก็จะทำให้เสี่ยงต่อการทะลักของน้ำเข้ามาและทำลายหน้าดินให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ถ้าหากแรงดันมีมากเกินไปก็จะทำให้แรงหมุนที่อยู่ในห้องชุดเจาะแรงแรงผลึกที่จะต้องใช้น้ำมันมากขึ้น ทำให้อัตราการชุดเจาะลดลง นอกจากนี้ยังอาจทำให้มีการทะลักของดินที่อยู่ในห้องชุดเจาะพุ่งออกมาด้านนอกได้

ในการควบคุมแรงดันในห้องชุดเจาะ จะใช้แรงดันดินในสถานะปกติเป็นขอบเขตบนของแรงดันในห้องชุดเจาะ เพื่อลดการทรุดตัวของพื้นดิน ใช้แรงดันดินในสถานะที่ถูกกระตุ้นเป็นขอบเขตล่างเพื่อรักษาเสถียรภาพของดินไว้ แม้ว่าจะมีการทรุดตัวอยู่บ้างก็ตาม

วิธีการควบคุมแรงดันในห้องชุดเจาะและการชุดเจาะของเครื่องจักรมีดังนี้

- ควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียง
- ควบคุมความเร็วของแรงผลักดันที่ส่งมาจากแม่แรง
- ควบคุมทั้งอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงและความเร็วของแรงผลักดันจากแม่แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.4) การตรวจสอบเสถียรภาพของหน้าดิน : แม้ว่าจะเป็นวิธีที่ไม่สามารถกระทำได้โดยตรง แต่ก็ใช้กันทั่วไป โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันดินไว้ที่ Bulkhead ของหัวเจาะ ส่วนวิธีที่สามารถทำได้โดยตรงคือ การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีทั้งแบบหน้าสัมผัส (Contact Type) และแบบไร้สัมผัส (Non-contact type) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดมีดินที่หลวมและมีรูโพรงอยู่ได้

(1.5) การควบคุมปริมาณขุดเจาะ : การนำดินออกจากห้องขุดเจาะจำเป็นต้องทำให้สัมพันธ์กับปริมาณการขุดเจาะ เพื่อให้การขุดเจาะดินดำเนินไปได้อย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพของดินไปในตัว

อย่างไรก็ตามปริมาตรและน้ำหนักของดินจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากการพองตัว การแปรผันของหน่วยน้ำหนักในดิน ชนิดและปริมาณของสารปรุงแต่งที่อัดฉีดเข้าไป และวิธีการขนย้ายดินออก จึงเป็นการยากในการวัดปริมาณของการขุดเจาะที่ได้แน่นอน ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของดินที่ขุดได้นั้นสามารถเปลี่ยนสถานะได้ ตั้งแต่แข็งของแข็ง (Semi-solid) ไปถึงของไหล (Liquid) ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะป้องกันการพังทลายของหน้าดิน และการหลุดตัวของดิน เพียงแค่ควบคุมปริมาตรของดินอย่างเดียว ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมแรงดันในห้องขุดเจาะและปริมาตรของดินที่ขุดเจาะออกมาด้วย

(3) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1.1) วิธีการขนถ่ายดินออก (Discharging Method) : มีหลายวิธีที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจากเครื่องขุดเจาะ EPB เช่น ใช้รถขน ใช้การสูบลูก และใช้การสูบโดย Slurry เป็นต้น

(1.2) การกำจัดดินที่ขุดเจาะออกมา : ถ้าดินมีลักษณะที่เป็นโคลน คล้ายของไหล จะจัดให้อยู่ในกลุ่มของของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะต้องมีการปรับสภาพระดับปานกลางก่อนที่จะมีการขนย้ายออกไป

การขุดเจาะ เสถียรภาพของหน้าดินและการกำจัดดินที่ขุดเจาะออกมาของหัวเจาะประเภท Slurry (Slurry Shield)

(1) จะต้องมีการรักษาเสถียรภาพของหน้าดินอย่างปลอดภัย โดยคำนึงถึงสภาพของดินและหน้าตัดขวางของอุโมงค์

(2) คุณภาพของ Slurry จะต้องควบคุมตามสภาพของดิน เพื่อให้มีเยื่อหุ้มดิน โคลน (Mud Film) บนหน้าดินอย่างเพียงพอ และต้องมีการควบคุมแรงดันที่หน้าดินพร้อมกับปริมาณที่ขุดเจาะเช่นเดียวกัน

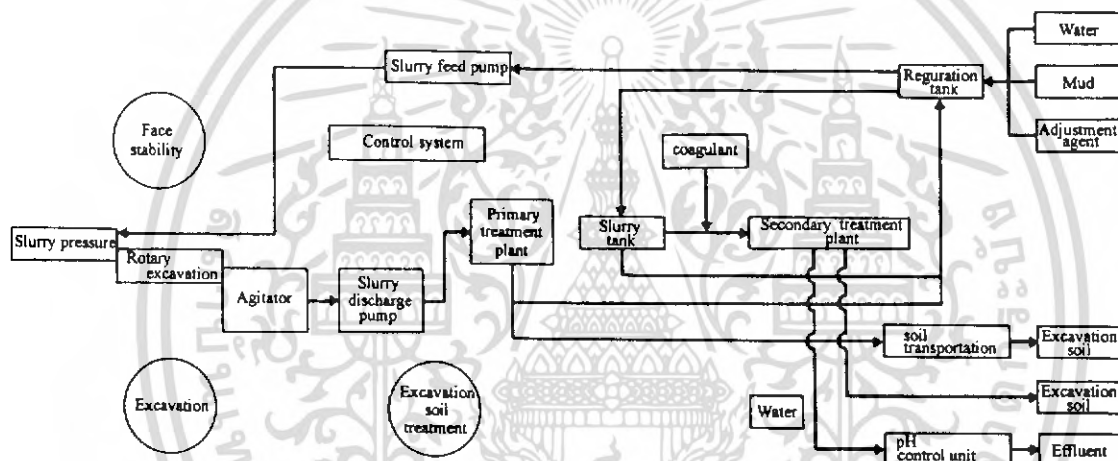
(3) การเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการรักษาสภาพ Slurry นั้นจะต้องเหมาะสมกับการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน และให้สัมพันธ์กับกำหนดการทำงานที่ได้วางแผนไว้

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) มีรายละเอียดดังนี้

ในวิธีการใช้หัวเจาะประเภท Slurry นั้น ตัว Slurry จะเป็นตัวที่คอยรักษาสถียรภาพของหน้าดินและเป็นตัวที่ทำหน้าที่ขนย้ายดินออกไป โดยใช้หัวใบมีดในการขุดเจาะดินแบบอัตโนมัติ เพื่อรักษาระบบสาธารณูปโภคที่อยู่บนผิวดิน

การขุดเจาะอุโมงค์ การรักษาสถียรภาพของหน้าดินและการนำดินที่ขุดเจาะได้ออกมาจากหัวเจาะ จะต้องพิจารณาให้เป็นหนึ่งระบบ โดยระบบนี้ถูกออกแบบมาให้ประสานกับคุณสมบัติและสมรรถนะของเครื่องมือแต่ละชนิด ระบบของหัวเจาะแสดงเป็นโครงร่างในรูปที่ 4.95



รูปที่ 4.95 ระบบของหัวขุดเจาะแบบ Slurry Shield

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ต้องมีการคำนวณระบุเกณฑ์กำหนดที่ต้องควบคุมปริมาณดินที่ต้องทำการขุดเจาะ คุณภาพของตัว Slurry เอง สภาพของหน้าดิน การอัดฉีดน้ำปูน ปริมาตรการไหลของ Slurry และความเร็วในการขนถ่ายดินของ Slurry ซึ่งจะต้องมีการติดตามดูแลและควบคุมอย่างระมัดระวัง

(2) มีรายละเอียดดังนี้

(1.1) การควบคุมแรงดันของตัว Slurry : แรงดันของ Slurry จะต้องถูกควบคุมภายใต้ขอบเขตของความปลอดภัยของเสถียรภาพของหน้าดิน ขอบเขตของการควบคุมนั้นจะต้องออกแบบไว้ล่วงหน้า โดยใช้เงื่อนไขทางธรณีวิทยาและแรงดันของดิน/น้ำ โดยปกติแล้วถ้าแรงดันใน Slurry มีค่าต่ำจนเกินไปอาจทำให้ดินพังทลายลงมาได้ ถ้าแรงดันมีค่ามากเกินไปอาจทำให้เกิดการปะทุของ Slurry ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ขอบเขตของแรงดันของ Slurry จะใช้ค่าของแรงดันดินในสภาวะปกติเพื่อให้มีการทรุดตัวน้อย กำหนดให้แรงดันดินในสภาวะที่ถูกกระตุ้นเป็นขอบเขตล่าง เพื่อให้อย่างน้อยที่สุดก็ยังจะสามารถรักษา เสถียรภาพของดินไว้ได้ แม้ว่าหน้าดินจะมีบางส่วนที่ทรุดตัวลงมาบ้างก็ตาม

(1.2) การตรวจสอบเสถียรภาพของหน้าดิน : วิธีที่ใช้โดยทั่วไปในการตรวจสอบและ ควบคุมแรงดันในห้องชุดเจาะนั้น จะใช้การติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำ (Water Pressure Gauge) ไว้ที่ตัว Bulkhead ส่วนวิธีที่สามารถกระทำได้โดยตรงคือ การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีทั้ง แบบหน้าสัมผัส (Contact Type) และแบบไร้สัมผัส (Non-contact type) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดมี ดินที่หลวมและมีรูโพรงอยู่ได้

(1.3) การควบคุมปริมาณการชุดเจาะดิน : การชุดเจาะดินจำเป็นต้องมีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ปริมาณดินที่ชุดมานั้นเท่ากับปริมาณดินที่ถูกขนย้ายออกไปจากหัวเจาะ จะสามารถพิจารณาภาพ ของหน้าดินและปริมาณการชุดเจาะได้จากค่าความต่างระหว่างปริมาตรของดินที่ชุดได้และน้ำหนักแห้ง (Dry weight) ของดินที่ชุด ซึ่งจะทำการคำนวณข้อมูลที่ได้มาจากมาตรวัดการไหล (Flow meter) และ มาตรวัดความหนาแน่น (Density meter) ที่ติดตั้งไว้ที่ทางเข้าและทางออกของดินใน Slurry

(3) มีรายละเอียดดังนี้

(1.1) วิธีการขนย้าย : ดินที่ชุดเจาะออกมาจะถูกกววและผสมกันในห้องชุดเจาะ ด้วยเครื่อง กววและจะถูกสูบออกมาไว้ที่ผิวดิน บนผิวดิน กรวดและทรายจะถูกแยกออกจากกันโดยอัตโนมัติด้วย เครื่องมือในขั้นต้น จากนั้นจะผสมสารก่อให้เกิดการควบแน่นลงไปใน Slurry เพื่อทำให้ดินเหนียวและ โคลนมีความแข็งแรงจนสามารถขนออกไปได้ หลังจากที่ได้ขนย้ายทรายและดินเหนียวออกไปแล้ว จะต้องมีการปรับความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และค่าความหนืด โดยการเติมน้ำ ดินเหนียว เบนโทไนท์ และ สารเพิ่มความหนืดลงไปใน จากนั้นก็จะเริ่มกระบวนการใหม่เช่นนี้อีกครั้งต่อไปเรื่อย

(1.2) การขนย้ายดินออก : ปริมาณน้ำในดินและสารเร่งให้จับตัวเป็นก้อนที่ผสมลงในดิน จะต้องเหมาะสมกับมาตรฐานของสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ขนย้ายออกไปได้อย่างไม่มีปัญหา

โดยทั่วไปแล้วดินที่ถูกคัดแยกด้วยเครื่องจักรในขั้นต้นนั้นจะแยกว่าดินนั้นใช้ประโยชน์ ไม่ได้ แต่ในขั้นที่สอง ก้อนดินจะถูกเอาน้ำออกจนแข็งเป็นก้อน ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามหน้างานต่างๆ และ ก้อนดินเหล่านั้น สำหรับประเทศญี่ปุ่นจัดว่าเป็นของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม

การชุดเจาะดิน การรักษาเสถียรภาพของหน้าดิน และการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะ ประเภท Open -Face

(1) การชุดเจาะดินด้วยเครื่องชุดเจาะที่ใช้มือ แบบกึ่งเครื่องจักรกล และหัวเจาะแบบ เครื่องจักรกล จะต้องทำการชุดเจาะไปในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพของหน้าดิน พร้อมกับระบบที่ค้ำยัน

หน้าดินที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาเลือกจากสภาพของดินทางธรณีวิทยา และขนาดของหน้าดินที่จะต้องทำให้หลวมตัวน้อยลง

(2) ระบบการขนย้ายดินจะต้องเลือกให้สอดคล้องกับวิธีการที่ขุดเจาะ คุณสมบัติของดิน และกำหนดการขุดเจาะ

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) มีรายละเอียดดังนี้

(1.1) วิธีการใช้เครื่องมือขุดเจาะที่ใช้มือ : จะใช้วิธีนี้ในการขุดเจาะดินเมื่อทำการขุดเจาะด้วยเครื่องจักรไปแล้ว และหน้าดินสามารถตั้งตัวอยู่ได้โดยไม่ทรุดตัวลงมา โดยจะทำการเจาะดินภายในฝาคอรอบ ซึ่งเป็นการเปิดหน้าดินแบบเฉพาะที่ จากนั้นต้องหาแม่แรงมาค้ำยันไว้ทันทีที่ขุดเจาะเสร็จสมบูรณ์

(1.2) วิธีการใช้เครื่องขุดเจาะแบบกึ่งเครื่องจักรกล : จะใช้วิธีนี้ในกรณีที่หน้าดินสามารถทรงตัวอยู่ได้ด้วยตัวของมันเอง และขนาดของหน้าดินค่อนข้างใหญ่ ควรจะเลือกใช้เครื่องมือประเภทนี้ให้สอดคล้องกับความยาวตลอดทั้งอุโมงค์ ขนาดของหน้าดิน และกำลังรับแรงอัดของดิน เนื่องจากว่า จะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการขุดเจาะเอาไว้ด้วย จึงเป็นการยากที่จะจัดตั้งแม่แรง ยิ่งไปกว่านั้น หน้าดินที่ไม่ได้ค้ำยันขนาดใหญ่จะต้องมีการป้องกันการพังทลายอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ

(1.3) วิธีการใช้หัวเจาะแบบเครื่องจักรกล : กระบวนการตั้งแต่การขุดเจาะจนถึงการขนย้ายดินออก จะกระทำโดยเครื่องจักรโดยทั้งสิ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบกึ่งเครื่องจักรกล การทรุดตัวของผิวดินและการเกิดช่องว่างในดินมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ เพราะจะมีการขุดเจาะที่มากจนเกินไป และมีการพังทลายของหน้าดินในบางส่วน ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลปริมาตรการขุดเจาะและสภาพของหน้าดินอย่างระมัดระวัง ในชั้นของหินโคลน (Mudstone) และชั้นของกรวดที่อัดตัวกันเป็นก้อน จะมีการเสียดสีขัดข่วนกับใบมีดขุดเจาะดิน ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลอัตราการขุดเจาะให้เหมาะสม

(2) ดินที่ขุดเจาะออกมาจะถูกขนย้ายด้วยสายพานลำเลียง หรือโดยสกรูลำเลียง และขนย้ายออกจากอุโมงค์ด้วยรถขนดิน หรือใช้การสูบลอยไป

การบุผนังภายในอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง (Primary Lining)

โดยทั่วไปหลังจากที่ทำการขุดเจาะเสร็จแล้ว จะต้องติดตั้งผนังด้านในอุโมงค์ในชั้นที่หนึ่งทันที โดยจะต้องกระทำอย่างถูกต้องและปลอดภัยในทางที่ขุดเจาะเสร็จ

(1) การติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง : เมื่อหัวเจาะทำการขุดเจาะดินอยู่ก็สามารถถูกผลักให้ถอยกลับมามีได้ด้วยแรงดันดินที่อยู่ด้านหน้า หรือด้วยแรงดันในห้องขุดเจาะดิน ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นส่วนของผนังด้วยแม่แรงตามแนวทางอุโมงค์ที่ได้ขุดเจาะไว้แล้ว ชั้นส่วนของผนังโดยปกติแล้วจะสร้างให้มีส่วนที่ยื่นออกมาเพื่อยึดเกี่ยวกับชั้นส่วนข้างเคียง ต้องทำการติดตั้งอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อที่ถูกต้อง ส่วนของสลักของชั้นส่วนผนัง (Segment) จะต้องเชื่อมกับอีกชั้นส่วนหนึ่งได้พอดีและปลอดภัย โดยจะใช้เครื่องจักรในการติดตั้ง (Erector) ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้จะต้องมีความแม่นยำเพื่อให้สลักของแต่ละชั้นแนบสนิทกันพอดี และเพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชั้นส่วนอื่นๆด้วย

(2) การรักษารูปทรงของชั้นส่วนผนัง : การติดตั้งชั้นส่วนผนังรูปวงแหวนอย่างถูกรูปทรงและปลอดภัย การรักษาสภาพหน้าตัดดินในอุโมงค์และความรวดเร็วในการก่อสร้าง การป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับชั้นส่วนของผนัง การปรับปรุงคุณสมบัติความฝืดของน้ำ และการลดการทรุดตัวของดิน ทั้งหมดเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง ในขณะที่ทำการติดตั้งจะต้องให้ความสนใจกับรูปทรงวงแหวนของชั้นส่วนผนัง จะต้องขันสลักเกลียวให้แน่นเพื่อป้องกันการหลวม หลังจากชั้นส่วนผนังถูกผลักออกมาจากทางท้ายของหัวเจาะ จะเสี่ยงต่อการเกิดการเสียรูปที่มาจากแรงดันดินหรือมาจากแรงดันของการอัดฉีดน้ำปูนได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลรักษาความโค้งของชั้นส่วนให้ดี

(3) การขันสลักเกลียวของชั้นส่วนและการขันให้แน่นอีกครั้ง : จะต้องขันสลักเกลียวด้วยแม่แรงให้แน่น ปลอดภัย และไม่ให้เกิดชั้นส่วนผนังเสียรูป เนื่องจากแรงผลักดันจะถูกถ่ายจากส่วนหัวเจาะมายังชั้นส่วนของผนัง จึงต้องมีการขันซ้ำให้แน่นอีกครั้งในบริเวณที่พื้นอิทธิพลของแรงผลักดันไปแล้ว

(4) การประกอบชั้นส่วนอัตโนมัติ : ชั้นส่วนผนังจะถูกขนย้ายมายังตำแหน่งที่ติดตั้งด้วยรถขนาดเล็ก หัวเจาะจะทำการป้อนชั้นส่วนเข้าเครื่องติดตั้งผนังที่อยู่ภายในหัวเจาะ แล้วทำการติดตั้งโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวทั้งอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติได้มีการปรับพัฒนาแล้วในปัจจุบัน

การอัดฉีดน้ำปูนกลับ (Backfill Grouting)

การทำการอัดฉีดน้ำปูนจะทำโดยใช้วัสดุและวิธีการอัดฉีดที่เหมาะสมที่สุด โดยจะต้องทำการอัดฉีดน้ำปูนในขณะที่หัวเจาะทำการขุดเจาะไปด้วย หรือในทันทีที่หัวเจาะได้เคลื่อนตัวออกไปแล้ว ดังนั้นช่องว่างที่จะเกิดขึ้นจะถูกอุดสนิทอย่างสมบูรณ์ และยังช่วยป้องกันการหลวมตัวของดินหรือการทรุดตัวของดินได้

จะต้องทำการอัดฉีดน้ำปูนในทันที เพื่อป้องกันการหลวมตัวและการทรุดตัวของดิน นอกจากนี้แล้วยังเป็นการป้องกันการไหลของน้ำเข้ามาจากทางรอยต่อของชั้นส่วนของผนัง ช่วยรักษา

เสถียรภาพชั้นส่วนวงแหวนให้แน่นหนาขึ้น และช่วยป้องกันสั้วเสียดคลานจำพวกงูเลื้อยเข้ามาในอุโมงค์อีกด้วย

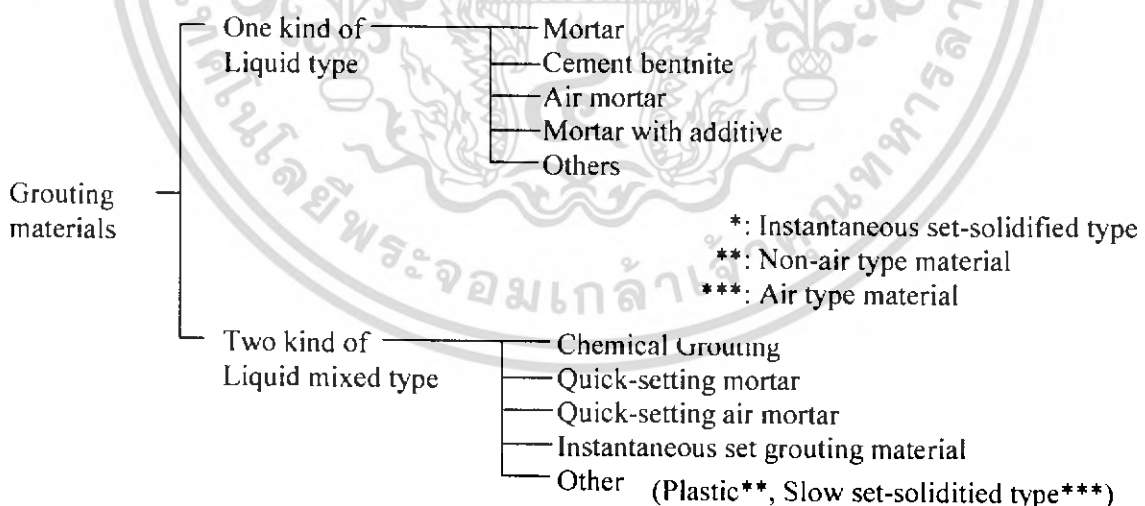
(1) วัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน : วัสดุที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ไม่มีการแยกตัว
- ไม่สูญเสียคุณสมบัติการไหลตัว
- มีปริมาตรลดลงเล็กน้อยหลังการอัดฉีด
- มีกำลังขึ้นสูงกว่าหรือเทียบเท่ากำลังของดินในเวลาอันสั้น
- มีความฝืดตัวในปริมาณพอดี

โดยทั่วไปแล้วในกรณีดินที่มีความแข็งแรงอยู่แล้วจะ ไม่มีความจำเป็นในการอัดฉีดน้ำปูนเข้าไป แต่จะใช้สารประเภท One-Liquid เพียงตัวเดียวในการอัดฉีดซึ่งถือว่าเพียงพอแล้ว อย่างไรก็ตามในกรณีของดินเหนียวที่ไม่แข็งแรงหรือดินทรายที่สามารถพังทลายได้จึงต้องมีการอัดฉีดสารเข้าไปพร้อมๆกับการขุดเจาะ ดังนั้นจึงต้องใช้สารประเภท Two-Liquid ฉีดเข้าไป

คุณสมบัติสารประเภท one-liquid มีดังต่อไปนี้

- จะต้องมีความไหลตัวเพียงพอ
- สามารถอุดรอยรั่วได้
- ไม่มีแยกตัวหรือแข็งจนกว่าจะแข็งตัว



รูปที่ 4.96 วัสดุทั่วไปในการอัดฉีดน้ำปูน

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสารประเภท Two-liquid จะมีลักษณะไหลตัวได้ก่อนการอัดฉีดและจะกลายมาเป็น Thixotropic ในระหว่างหรือหลังการอัดฉีด

- สามารถอัดฉีดเข้าไปในพื้นที่ที่จำกัดได้
- สามารถกำหนดระยะเวลาแข็งตัวได้
- ถ้าจำเป็นควรมีกำลังขึ้นเร็ว

(2) จังหวะเวลาในการอัดฉีดน้ำปูน : โดยทั่วไปแล้วจะทำการอัดฉีดไปพร้อมกันหรือในทันทีที่ปูผนังอุโมงค์เสร็จ ในกรณีที่ทำไปพร้อมๆกันนั้น จะต้องอัดฉีดน้ำปูนผ่านท่อไปที่แผ่นงานที่อยู่ด้านท้ายของหัวเจาะหรืออัดฉีดเข้าไปตามรูในชั้นส่วนของผนังพร้อมกับการขุดเจาะอุโมงค์ ส่วนการทำแบบทันทีทันใดหลังจากขุดเจาะดินนั้นจะทำการอัดฉีดสารเข้าไปหลังจากที่ทำการขุดเจาะไปแล้ว

(3) วิธีการอัดฉีดน้ำปูน : จะทำการอัดฉีดไปตามรู ช่องว่างของชั้นส่วนผนังหรือ อัดฉีดผ่านทางท่อไปยังแผ่นงานที่อยู่ท้ายหัวเจาะ วัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดจะลำเลียงไปโดยรถพ่วงขนาดเล็ก แต่ก็สามารถทำการสูบออกมาโดยตรงจากเครื่องจักรที่อยู่บนผิวดินได้ เพื่อที่จะป้องกันวัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดหรือน้ำได้ดินที่เป็นส่วนเกินจะเข้ามา ต้องอัดฉีดจนกระทั่งท้ายหัวเจาะให้ทำหน้าที่เป็นตัวหุ้ม ป้องกันสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าไปในหัวเจาะ

(4) แรงดันที่ใช้ในการอัดฉีด : โดยทั่วไปจะใช้แรงดันอยู่ที่ $100 - 300 \text{ kN/m}^2$ อย่างไรก็ตามก็ตามกำลังความแข็งแรงของชั้นส่วนผนัง แรงดันดิน แรงดันน้ำใต้ดิน และแรงดันใน Slurry ควรจะพิจารณาให้สอดคล้องกัน เพื่อตั้งค่าแรงดันของการอัดฉีดได้ถูกต้อง การอัดฉีดน้ำปูนควรจะอัดฉีดเพื่อให้แรงดันกระทำทั่วพื้นผิวของชั้นส่วนวงแหวน เนื่องจากสาเหตุของรั่วซึมเข้าสู่ดิน การเจาะทะลุเข้าไปในดินด้วยของอัดฉีด การสูญเสียน้ำ และการตัดหน้าดินที่มากเกินไป ทำให้ปริมาณของสารที่ใช้ในการอัดฉีดต้องเพิ่มขึ้นถึง 150-200% ของปริมาณช่องว่างตามทฤษฎี (พื้นที่หน้าตัดของหัวเจาะลบด้วยพื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วนวงแหวน) โดยปกติการอัดฉีดน้ำปูนจะถูกควบคุมแรงดันหรือไม่กี่ปริมาตร ถ้าเป็นไปได้ควรจะควบคุมทั้งสองอย่างทั้งแรงและปริมาตร

(5) การควบคุมคุณภาพ : เนื่องจากการอัดฉีดน้ำปูนในการขุดเจาะอุโมงค์เป็นสิ่งสำคัญจึงต้องมีการดูแลและควบคุมคุณภาพของวัสดุที่ใช้ด้วย และยังจำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพตามระยะเวลาที่กำหนด โดยจะต้องทำการตรวจวัดค่าของอัตราการไหล ความหนืด อัตราการแข็ง ระยะเวลาแข็งตัว และกำลังรับแรงกดอัดตามกำหนดด้วย

(6) ผลกระทบจากการอัดฉีดน้ำปูนและแรงผลักดันที่ถูกผลักส่งมา : จุดประสงค์ของการอัดฉีดน้ำปูน เพื่อป้องกันดินเกิดการหลวมตัวและเพื่อถ่ายแรงผลักดันจากแม่แรงไปยังดิน เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์นี้ จะต้องทำการอุดรูรั่ว และช่องว่างที่มีให้หมดทุกจุด

การกันน้ำ (Water Proofing)

การกันน้ำจะต้องกระทำด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับสภาพการทำงานเพื่อที่จะบรรลุจุดประสงค์ของการขุดเจาะอุโมงค์ได้

เนื่องจากส่วนมากการก่อสร้างอุโมงค์จะทำการก่อสร้างในระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน จึงต้องมีการป้องกันแรงดันที่มาจากน้ำใต้ดินซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรั่วซึม และจะทำให้เกิดผลกระทบมากมายซึ่งจะก่อให้เกิดความยากลำบากในภายหลัง

การกันน้ำในการบุผนังอุโมงค์จะทำโดยการอุดรอยรั่ว การคล้อยกึ่ง (caulking) และการอุดช่องว่างระหว่างสลักเกลียว และรูสำหรับการอัดฉีดน้ำปูน

(1) การอุดช่องว่าง : การอุดช่องว่างเป็นการใช้วัสดุเข้าไปอุดในช่องว่างที่รอยต่อหลังขึ้นส่วนผนังอุโมงค์ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้มีดังต่อไปนี้

- ต้องมีความยืดหยุ่นและไม่สูญเสียความฝืดน้ำ ภายใต้แรงผลักดันที่กระทำซ้ำๆ ที่กระทำต่อชั้นส่วนของผนังหรือการเสีรูปของชั้นส่วนของผนัง
- สามารถทนต่อแรงผลักดันของแม่แรงและความฝืดของสลักเกลียวได้
- จะต้องไม่มีผลกระทบต่อรูปทรงของชั้นส่วนของผนัง
- ต้องมีการยึดติดระหว่างวัสดุอื่นและตัวมันเองได้ดี
- ต้องทนต่อสภาพสึกกร่อน ด้านทานสารเคมีได้ และมีความทนทาน
- ใช้งานได้ดี และคงรูปเสมือนเป็นเนื้อเดียวกับสลักเกลียวและชั้นส่วนของผนัง

วัสดุที่ใช้รวมทั้งยางอันวัลคาไนซ์บิวทิล (Unvulcazied Butyl Rubber) ยางบิวทิลขึ้นรูป (Butyl Rubber) ยางสังเคราะห์พิเศษ และหัวสารไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) โดยสารไฮโดรฟิลิก หรือโพลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำได้มาผสมกับยางธรรมชาติหรือยูรีเทน (Urethane) ซึ่งนิยมใช้กันในปัจจุบัน

ในบริเวณที่ตัวกันน้ำจะสึกหรอได้ง่าย เช่น วงแหวนกันน้ำในชั้นทราย ตัวกันน้ำที่อุดอยู่ในบริเวณข้อต่อ จะต้องมีการซ่อมแซมอยู่เป็นประจำ

(2) การคล้อยกึ่ง (Caulking) : เป็นวิธีการใช้วัสดุคล้อยกึ่งในบริเวณด้านในของร่องของข้อต่อในชั้นส่วนของผนังอุโมงค์ ซึ่งจะถูกยึดติดไว้อย่างแน่นหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) วัสดุหลักๆของการล่อกกิ้งที่นิยมใช้ คือ น้ำยางอีพ็อกซี่ (Epoxy) ไธโอคอล (Thiokal) และน้ำยางยูเรีย (Urea Resin) จะทำการล่อกกิ้งที่ขึ้นส่วนผนังที่สลักข้อต่อที่ทำการขันให้แน่นอีกครั้ง

(4) การป้องกันน้ำบริเวณสลักของขึ้นส่วนผนังและรูอัดฉีดน้ำปูน : จะใช้ตัวกรอมเมท (Grommet) สอดแทรกเข้าไประหว่างเกลียวของสลักเกลียวกับรูที่ใส่สลักเกลียว เพื่อให้สลักเกลียวในขึ้นส่วนผนังนั้นแน่นยิ่งขึ้น และเป็นตัวที่อุดช่องว่างที่อยู่รอบ ๆ สลักเกลียวเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำเข้ามารูสลักเกลียวได้

การบุผนังอุโมงค์ชั้นที่สอง (Secondary Lining)

การบุผนังในชั้นนี้จะทำหลังจากที่ได้ทำการดูแลรักษาสภาพผนังในชั้นแรกอย่างดีแล้ว เช่น การทำการกันน้ำ และการทำความสะอาด

(1) การทำการก่อสร้างการบุผนังชั้นที่สองนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบอุโมงค์ คอนกรีตที่นำมาติดตั้งจะมีการเสริมเหล็กหรือไม่เพื่อจุดประสงค์ในการเสริมแรงในการบุขึ้นส่วนผนัง การป้องกันการกัดกร่อน การกันน้ำ การปรับแก้แนวเส้นทางอุโมงค์ การป้องกันการสั่นสะเทือน การปรับผิวหน้าอุโมงค์ให้เรียบ อุโมงค์ในบางกรณีจะมีการฝังท่อสำเร็จรูปตามแนวอุโมงค์ไว้ด้วย เพื่อประโยชน์ในการเป็นทางเดินน้ำ จากนั้นจะทำการอุดช่องว่างในท่อด้วยคอนกรีต หรือมอร์ตาร์เพื่อป้องกันการเข้ามาของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ การบุผนังครั้งที่สองนี้จะต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการยากที่เดิมเนื้อคอนกรีตเข้าไปในช่องว่างที่ยังเหลืออยู่ จะต้องทำการอุดด้วยน้ำปูนหรือมอร์ตาร์ หรือจะเป็นวัสดุอื่นที่ผ่านทางท่ออัดฉีดน้ำปูน และต้องติดตั้งท่อไล่อากาศไว้ด้วย จะต้องอ้างอิงจาก “มาตรฐานรายละเอียดสำหรับการออกแบบและการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีต”

(2) การเตรียมพื้นที่ : ก่อนที่จะทำการบุผนังนั้น จะต้องขันตัวสลักเกลียวที่อยู่ในชั้นส่วนผนังให้แน่นขึ้นอีกครั้ง ต้องทำความสะอาดทุกชั้นส่วนของผนังและต้องอุดรอยรั่วของผนังทุกจุดที่มีอยู่ให้เรียบร้อย

(3) การรักษาระดับความหนาของการบุผนังและหน้าตัดด้านในอุโมงค์ : ความหนาของการบุผนังนั้นจะต้องคำนึงถึงสถานะของการออกแบบ การดำเนินการติดตั้งตัวคอนกรีต และปริมาณการปรับแก้สำหรับแนวเส้นทางอุโมงค์ หรือการดำเนินการติดตั้งท่อสำเร็จรูป การดูแลรักษาสภาพของโครงสร้างภายในอุโมงค์เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) การถอดแบบหล่อคอนกรีตออก : ช่วงจังหวะที่ถอดแบบออกนั้นจะต้องครบกำหนดเวลาที่คอนกรีตขึ้นรูปได้ที่แล้ว ถ้าวถอดเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการถอดแบบจะต้องเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยอาศัยประสบการณ์จากการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีขนาดคล้ายกันก่อนหน้านี้ หรือใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแทน การถอดแบบคอนกรีตจะต้องกระทำหลังจากที่คอนกรีตมีกำลังถึงที่ได้ระบุไว้

(5) การป้องกันการแตกร้าวและการกันน้ำ : มีอยู่สองขั้นตอนในการจัดการกับรอยร้าวในคอนกรีต หนึ่งคือขั้นตอนการผสมคอนกรีต และสองคือวิธีการก่อสร้าง

ข้อกำหนดในการผสมคอนกรีตมีดังนี้

- ลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ต่อหน่วยลงเพื่อที่จะลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) หรือใช้สารผสมเพิ่มจำพวกฟลายแอส (Flyash) หรือใช้ซีเมนต์ประเภทเฟอ์แรนซ์ (Furnance)
- ลดปริมาณน้ำที่ใช้ต่อหน่วยเพื่อป้องกันการแตกร้าวจากการหดตัวแล้วคายน้ำ
- ศึกษาการใช้เออี (AE) ในการลดปริมาณสารปนเปื้อน

ข้อกำหนดสำหรับการดำเนินการติดตั้งคอนกรีตมีดังนี้

- ต้องให้เวลาคอนกรีตขึ้นรูปอย่างเพียงพอก่อนการถอดแบบ
- หลีกเลี่ยงการเทคอนกรีตในบริเวณกว้างในครั้งเดียว
- ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อคอนกรีต และต้องระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอ
- ติดตั้งฉนวนในบริเวณรอยต่อ ข้อต่อ

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะตั้งแต่สองตัวขึ้นไป

ในกรณีของการก่อสร้างที่ใช้หัวเจาะตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะต้องใส่ใจกับความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์ทั้งสองตัวเป็นพิเศษ ต้องมีการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินและอุโมงค์อย่างระมัดระวัง ถ้าจำเป็นก็ควรนำวิธีอื่นมาช่วย

ในกรณีของการใช้หัวเจาะตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ไม่ว่าจะขุดเจาะดินในแนวราบหรือแนวตั้งก็ตาม จะต้องมีการติดตามดูแลผลกระทบระหว่างอุโมงค์ทั้งสองเป็นพิเศษ และจะต้องใช้วิธีการก่อสร้างที่ปลอดภัยโดยคำนึงถึงสภาพของดิน วิธีการขุดเจาะ เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดอุโมงค์และระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง ผลที่ได้นั้นก็จะเป็นการดำเนินการต่อไป ถ้าจำเป็นก็ต้องมีการตรวจวัดค่าอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการป้องกันการคลายตัวของดิน และการเสีรูปของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ผลกระทบระหว่างอุโมงค์ : ผลกระทบจะขึ้นอยู่กับสภาพของการก่อสร้าง อย่างไรก็ดี ตามผลกระทบที่มีต่ออุโมงค์จะมีดังนี้

- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ใช้แรงผลักดันหรือลากเข้า ในการขุดเจาะอุโมงค์
- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ หัวเจาะถูกลากเข้าโดยมีเส้นทางตัดผ่านกับเส้นทางขุดเจาะอีกเส้นทางหนึ่งหรือไม่
- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ หัวเจาะถูกผลักดันเข้าไปในเส้นทางที่ทำการอัดฉีดน้ำปูนของอีกหัวเจาะหนึ่งหรือไม่
- อุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะในปัจจุบันนั้นเคลื่อนตัวเข้าไปในดินที่มีการหลวมตัวเนื่องมาจากการขุดเจาะจากหัวเจาะก่อนหน้านี้หรือไม่

ในเส้นทางที่ตัดผ่านกันดังกล่าวข้างต้นนี้จะส่งผลกระทบให้เกิดการบิดเบี้ยวของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ การเสียรูป และการวิบัติของสลักเกลียว การรั่วไหลของน้ำเข้ามาในอุโมงค์ และเกิดการทรุดตัวของอุโมงค์มากขึ้นได้ จึงต้องมีการคำนึงถึงความจำเป็นในการดำเนินการขุดเจาะให้เหมาะสม

(2) การติดตามผลของสภาพดินลึ่อุโมงค์ : การติดตามพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของหน้าดิน การเสียรูปของอุโมงค์ การทรุดตัว และการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ตลอดเวลา เนื่องจากว่าสภาพของดินและวิธีการก่อสร้างนั้นไม่เหมือนกับที่ได้คำนวณไว้เสมอไป จำเป็นต้องใช้การดำเนินการติดตามอย่างแม่นยำโดยใช้เครื่องวัดการทรุดตัวของดิน (Ground settlement gauge) อินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer) เครื่องวัดแรงดันดิน (Earth Pressure gauge) ไพโซมิเตอร์ (Piezometer) และคอนเวอร์เจนซ์มิเตอร์ (Convergence Meter) ถ้าตรวจผลสิ่งผิดปกติใดๆจะต้องรีบดำเนินการจัดการทันที และต้องหาสาเหตุให้พบภายใต้สภาวะการที่ผิดปกติ อาจจะต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้าง หรือใช้วิธีการตรวจวัดอื่นๆเพิ่มเติม

การตัดผ่านแม่น้ำ (River Crossing)

ในกรณีที่อุโมงค์ตัดผ่านใต้แม่น้ำ จะต้องมีการควบคุมการก่อสร้างให้ปลอดภัยมากขึ้น โดยคำนึงถึงสภาพของดินและน้ำที่ได้ทำการศึกษามาแล้ว

สิ่งที่ควรคำนึงถึงเมื่อมีการก่อสร้างภายใต้แม่น้ำมีดังนี้

(1) การสำรวจสภาพดินและน้ำใต้ดิน : โดยทั่วไปสภาพของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และน้ำใต้ดินจะไหลอย่างรวดเร็วภายใต้หน้าของแม่น้ำ เนื่องจากสภาพของดินและน้ำใต้ดินเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้วิธีการขุดเจาะ และรายละเอียดอื่นๆ

(2) เสถียรภาพของหน้าดิน : ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดินและน้ำใต้ดินนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน แรงดันของน้ำอาจจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับแรงดันส่วนเกิน (Overburden) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันของแม่น้ำ แรงดันในห้องขุดเจาะก็ต้องควบคุมให้เข้ากับแรงดันดินและน้ำใต้ดิน ถ้าแรงดันน้ำมีค่ามากกว่าแรงดันในห้องหัวเจาะแล้ว จำเป็นต้องมีการเตรียมการป้องกันการลอบตัวของอุโมงค์ และการเสีรูปของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ต้องดูแลเสถียรภาพของหน้าดินและการรั่วซึม หรือใช้การเป่าลมไล่สิ่งแปลกปลอมต่างที่จะเข้ามา

(3) การป้องกันอิทธิพลของเขื่อนกั้นน้ำและโครงสร้างของแม่น้ำ : อิทธิพลของเขื่อนและโครงสร้างของแม่น้ำนั้นจะส่งผลต่อการทำการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งจะต้องมีการประมาณการและมีการตรวจวัดเพิ่มเติมเพื่อใช้ข้อมูลในเวลาที่เป็น

(4) อื่นๆ : จำเป็นต้องติดต่อกับสำนักงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับแม่น้ำนั้น เนื่องจากอาจมีข้อห้ามต่างๆในการก่อสร้างและต้องทำการเตรียมการไว้ล่วงหน้า เช่น การกั้นน้ำ ซึ่งจะต้องมีการเตรียมการไว้ด้วย

การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้น (Tunnel Construction with Shallow Cover)

โดยปกติแล้วการขุดเจาะใต้พื้นดินที่ปกคลุมจะต้องมีความหนาจากจุดที่ทำการขุดเจาะอย่างน้อย $1.0 - 1.5D$ (โดยที่ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ที่ขุดเจาะ) ในปัจจุบันมีตัวอย่างของการขุดเจาะอุโมงค์ในระดับตื้นมากมาย การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้นจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

(1) การควบคุมแรงดันดิน : การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้นจะมีแรงดันส่วนเกินน้อย ดังนั้นช่วงของแรงดันดินที่ยอมให้มีได้จึงมีค่าน้อยตาม แรงดันตัวอื่นอาจกลายเป็นตัวที่ส่งผลกระทบอย่างร้ายแรงก่อนหน้าดินที่ทำการขุดเจาะก็เป็นได้

(2) การอัดดินน้ำปูน : ในพื้นที่ที่ตื้นนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อผิวดินและสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดินในบริเวณนั้นได้ โดยจะทำให้เกิดช่องว่างในดินขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการอัดดินน้ำปูนเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน วัสดุที่ใช้ในการอัดดินจะต้องมีกำลังที่ขึ้นเร็ว จะต้องทำการอัดดินน้ำปูนไปพร้อมๆกับการขุดเจาะอุโมงค์

(3) การทำงานภายใต้สภาวะพิเศษ : ในบริเวณที่ตัดผ่านแม่น้ำจำเป็นต้องศึกษาถึงการลอบตัวของอุโมงค์ และการบิดเบี้ยวของชั้นส่วนของผนังในอุโมงค์ เพื่อให้หน้าดินมีเสถียรภาพ และป้องกันการรั่วซึมของสิ่งแปลกปลอมอื่นๆได้ ในที่ที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้นนี้จะมีบ้านพักอาศัยที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงสาเหตุจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนได้ ควรหลีกเลี่ยงการทำงานก่อสร้างในตอนกลางคืนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับลึก

การก่อสร้างในระดับลึกนั้นจะต้องทำการศึกษาวิธีการก่อสร้าง เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ โดยพิจารณาถึงสภาพใต้ดิน และต้องมีการตรวจวัดเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการก่อสร้างนั้นปลอดภัย

เมื่ออุโมงค์อยู่ลึกมากขึ้นก็หมายความว่า การก่อสร้างต้องอยู่ภายใต้แรงดันน้ำใต้ดินที่มากขึ้นด้วย ในโครงการหนึ่งมีแรงดันน้ำสูงถึง 600 kN/m^2 เมื่อการก่อสร้างทำในระดับความลึกมากจะต้องทำการศึกษาสภาพใต้ดิน (ดินและน้ำใต้ดิน) ชนิดของเครื่องจักรกล และสภาพการก่อสร้าง

(1) หัวเจาะ : สำหรับหัวเจาะในอุโมงค์ลึก การตรวจสอบทุกชั้นไม่ว่าจะเป็นใบมีดตัดดิน ดินที่ขุดเจาะออกมา อีกทั้งระบบการขุดเจาะจะต้องนำมาพิจารณาทำการป้องกัน

- การเคลือบใบมีดขุดเจาะดิน (Cutter Seal) : จะมีลักษณะคล้ายกับตัวกันน้ำ (Water Stop) แต่เป็นตัวที่ใช้กับใบมีดขุดเจาะดิน วัสดุที่ใช้ในการปกคลุมจะต้องทนต่อแรงดันน้ำสูงๆ และต้องศึกษาว่าต้องใช้ปริมาณเท่าใด

- การเคลือบท้ายหัวเจาะ (Tail Seal) : จะเป็นตัวกันน้ำที่ติดตั้งที่ท้ายหัวเจาะ วัสดุที่ใช้ในการปกคลุมจะต้องทนต่อแรงดันน้ำสูงๆ และต้องศึกษาว่าต้องใช้ปริมาณเท่าใด จะต้องพิจารณาระบบป้องกัน และต้องมีการติดตั้งตัวกันน้ำสำหรับในกรณีฉุกเฉินเอาไว้ด้วย

- อุปกรณ์ขนย้ายดินออกจากหัวเจาะ : จะต้องมีการทำงานอย่างคงที่อย่างต่อเนื่องภายใต้แรงดันน้ำสูงๆ ได้ นอกจากนี้ยังต้องเตรียมตัวเคลือบสำหรับเพลาหมุนในหัวเจาะประเภท Slurry เพื่อให้ทำงานในแรงดันน้ำสูงๆ ได้เช่นกัน ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กันน้ำในกรณีฉุกเฉินไว้ด้วย

- อุปกรณ์ในการขับเคลื่อน : ต้องใช้แม่แรงและระบบไฮดรอลิกที่มีสมรรถนะสูงเพื่อเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นด้วย

(2) ชิ้นส่วนผนังของอุโมงค์ : จะต้องมีการเตรียมสิ่งเหล่านี้สำหรับผนังอุโมงค์ที่อยู่ลึกมากๆ วัสดุกันน้ำ ตัวกันน้ำบริเวณ ช่องว่างของสลักเกลียวและรูสำหรับอัดฉินน้ำปูน และแรงที่มาจากการทำการขุดเจาะ เช่น แรงผลักดันของแม่แรงที่ใช้ในการอัดฉินน้ำปูน ตัวสลักที่อยู่ในแนวราบจะเสี่ยงต่อแรงดันด้านนอกมากเป็นพิเศษ

การก่อสร้างอุโมงค์ในบริเวณโค้งหักศอก (Tunnel Construction with Sharp Curve)

เมื่อต้องการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก จะต้องมีการวัดค่าเพื่อให้แน่ใจว่าปลอดภัย และต้องการก่อสร้างอย่างถูกต้องตามสภาพของใต้ดิน และต้องมีการป้องกันการเสียรูป การเคลื่อนตัวของอุโมงค์จากแรงปฏิกิริยาจากแม่แรงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก ค่าต่อไปนี้จะต้องทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดและต้องมีการตรวจวัดอย่างถูกต้อง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการดำเนินการก่อสร้างเป็นไปอย่างปลอดภัยและถูกต้อง ได้แก่ สภาพของดิน แนวเส้นทางอุโมงค์ หัวเจาะ ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ การเปิดหน้าดิน การตรวจวัดค่าต่างๆ การอัดฉีดน้ำปูน

โดยปกติแล้วรัศมีโค้งในทางปฏิบัติมีแนวโน้มว่าจะมีค่ามากกว่าค่ารัศมีทางทฤษฎี ดังนั้นจึงต้องทำการวัดค่าถึงขอบเขตที่จำเป็น

ค่าดังต่อไปนี้มีผลต่อการก่อสร้างในโค้งหักศอก

(1) หัวเจาะ

- ความยาวของหัวเจาะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เป็นข้อต่อเชื่อมระหว่างหัวเจาะ
- ต้องมีการติดตั้งใบมีดชุดเจาะสำรอง
- ค่าของแรงดันและแรงหมุนเหวี่ยงใบมีดชุดเจาะดินจะต้องมีมากพอ และทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปข้างหน้าได้ด้วยแม่แรงแยกส่วนเท่าที่จะเป็นไปได้

(2) ชั้นส่วนผนังอุโมงค์

- ชั้นส่วนที่จะใช้ต้องมีความเรียบมาก
- ต้องมีความกว้างน้อย
- พื้นผิวด้านนอกและช่องข้อต่อของสลักเกลียวจะต้องมีการเสริมแรงเพื่อป้องกันแรงกระทำที่เอียงศูนย์

นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือการเพิ่มพื้นที่ว่างที่ท้ายหัวเจาะ โดยลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นส่วนของวงแหวนลงสำหรับโค้งหักศอกโดยเฉพาะ

(3) การเปิดหน้าดิน : ยิ่งเปิดหน้าดินกว้างก็ยิ่งทำการก่อสร้างได้ง่ายขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดปัญหาดินหลวมตามมา การอัดฉีดน้ำปูนจะทำได้ และจะเกิดการเสียวรูปของอุโมงค์ เนื่องจากมีแรงต้านทานแรงผลักดันจากแม่แรงที่น้อยลงนั่นเอง การเปิดหน้าดินจึงต้องทำให้น้อยที่สุดและต้องรักษาสเตียรภาพของดินไปในตัวด้วย อย่างไรก็ตามขอบเขตของการเปิดหน้าดินจะต้องใหญ่พอสำหรับเหตุการณ์สุดวิสัยด้วย

(4) มาตรการเสริม : ถ้าลักษณะใต้ดินมีลักษณะร่วนมากจะต้องมีการอัดฉีดน้ำปูน โดยใช้สารเคมีหรือใช้การอัดฉีดแรงดันสูง และใช้วิธีการผสมกันเพื่อป้องกันการเกิดการหลวมตัวของดินที่เป็นผลมาจากการขุดเปิดหน้าดิน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าดินมีแรงปฏิกิริยาอย่างพอเพียง

(5) การอัดฉีดน้ำปูน : เมื่อทำการก่อสร้างในโค้งหักศอกจะต้องทำการติดตั้งชิ้นส่วนของผนังโดยทันทีเพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้แรงปฏิกิริยาที่มีต่อแรงขับเคลื่อนของหัวเจาะจะต้องไม่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียรูป การเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ และเบี่ยงเบนออกนอกแนวเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ในการอัดฉีดน้ำปูนจะต้องใช้วัสดุที่ไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรหลังจากทำการอัดฉีดไปแล้ว จะต้องมีการอัดฉีดน้ำปูนในช่วงเริ่มต้นและมีค่ากำลังที่ใกล้เคียงกับของดิน จึงจำเป็นต้องทำการอัดฉีดน้ำปูนทันทีในกรณีที่มีการขุดเปิดหน้าดินมากขึ้น

(6) การสำรวจแนวเส้นทาง : ทำการสำรวจแนวเส้นทางเพื่อที่จะรักษาแนวเส้นทางเดิมไว้ยังมีความจำเป็นต้องควบคุมเส้นทางมากเท่าใดก็ต้องทำการสำรวจมากครั้งขึ้นเท่านั้น

การก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน (Steep Gradient Tunnel Construction)

การทำการก่อสร้างในทางลาดชัน ระบบการขนส่งและดินที่ขุดเจาะได้ และอุปกรณ์ที่ปลอดภัยจะต้องพิจารณานำมาใช้งานเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพดินและมาตรการดูแลรักษา เพื่อให้มั่นใจได้ว่ามีความปลอดภัยในการก่อสร้าง

การก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชันจำเป็นต้องมีมาตรการพิเศษสำหรับการขนส่งอุปกรณ์ อุปกรณ์ด้านความปลอดภัย การเพิ่มสมรรถนะของหัวเจาะ การเปลี่ยนแปลงและการเสริมแรงในผนังคอนกรีต

การพิจารณาก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชันนั้นมีข้อกำหนดทางกฎหมายสำหรับการขนส่งวัสดุ ตามกฎด้านความปลอดภัยและสุขภาพในโรงงานอุตสาหกรรม บทที่ 202 ได้กำหนดว่าเส้นทางลาดในการก่อสร้างอุโมงค์จะต้องต่ำกว่า 50/1000 (5%) สำหรับการเคลื่อนตัวของรถไฟ เช่น รถไฟที่ใช้การเคลื่อนตัวด้วยแบตเตอรี่ เป็นต้น

หัวข้อต่อไปนี้จะต้องให้ความสนใจและมีมาตรการที่มีประสิทธิภาพให้เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน

(1) เสถียรภาพของหน้าดิน : เนื่องจากแรงดันดิน/น้ำ มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเส้นทางลาดของอุโมงค์ จึงจำเป็นที่จะต้องปรับค่าแรงดันในห้องขุดเจาะให้เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับทางลาดจะเป็นการขกในการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะ และการขุดเจาะก็จะดำเนินไปได้อย่างช้าๆ

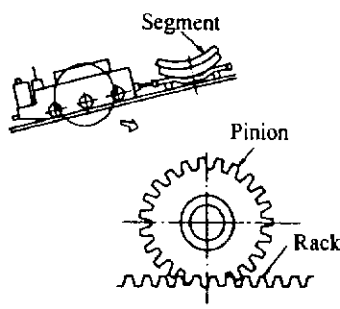
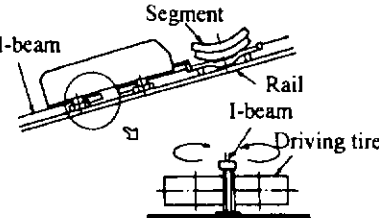
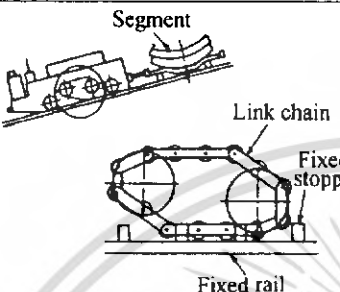
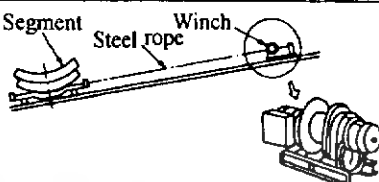
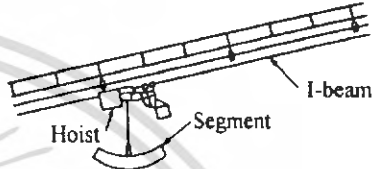
(2) หัวเจาะ : เนื่องจากหัวขุดเจาะคือส่วนที่อยู่หน้าสุดของหัวเจาะ ถ้ามีน้ำหนักที่ถ่วงมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการคว่ำหน้าลงของหัวเจาะได้ ฉะนั้นขนาดแม่แรงที่ใช้ในส่วนล่างต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะรักษาระดับเอาไว้ได้

(3) ชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ : เมื่อติดตั้งชิ้นส่วนผนังรูปวงแหวนนั้น ตัวติดตั้งจะทำงานได้ยากเนื่องจากมีพื้นที่ที่จำกัดในทางลาดชัน

(4) การอัดคาน้ำปูน : ในการก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยหลังจากทำการอัดฉีดไปแล้ว และจะต้องมีกำลังที่ขึ้นเร็วจนเท่ากับกำลังของดิน

(5) การขนส่งอุปกรณ์ในอุโมงค์ : ถ้านำระบบรางปกติมาใช้ในทางลาดชันแล้วก็จะทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงจากการไถลของรถรางขนส่งอุปกรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้การขนส่งระบบหนึ่งในที่แสดงต่อไปนี้ (อ้างอิงรูปที่ 4.97 นี้)

- ระบบรอกและเฟืองขับ (Rack and pinion system)
- ระบบโซ่คล้อง (Link chain system)
- ระบบขับเคลื่อนด้วยล้อยาง (Rubber tire System)
- ระบบรอกว้าง (Winch System)
- ระบบชักรอก (Hoist System)

Transportation	Concept drawing	Transportation	Concept drawing
① Rack and pinion system Battery locomotive type Electric train type		③ Rubber tire system Electric train type	
② Link chain system Battery locomotive type		④ Winch system	
		⑤ Hoist system	

รูปที่ 4.97 อุปกรณ์การขนส่งในอุโมงค์ที่มีความลาดชัน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(6) การนำหัวเจาะเข้าและออก : เมื่อหัวเจาะเริ่มขุดเจาะที่ทางลาดชันจะยิ่งเสี่ยงต่อการไถลออกนอกเส้นทางจึงควรมีการป้องกันไว้ด้วย เมื่อหัวเจาะมาถึงบริเวณทางลาดชันที่เป็นทางขึ้น จะต้องให้ส่วนท้ายของหัวลงมาก่อน แล้วส่วนบนค่อยตามลงมา จะต้องมีการป้องกันการดินหลวมหรือการไหลเข้าของน้ำเหนือบริเวณหัวเจาะของอาคารระบายอากาศ

(7) การดำเนินการในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชัน : ถ้าระยะรัศมีความโค้งมีค่าน้อยมากในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชันแล้ว หัวเจาะจำเป็นต้องใช้ข้อต่อพ่วงกับแม่แรงในแนวโค้งด้วย เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนผนังหรือการเคลื่อนตัว ต้องมีการอัดดินน้ำปูนอย่างถูกต้อง

(8) การไหลเข้าของน้ำ : ในทางลาดลงจะยิ่งทำให้น้ำไหลเข้าได้มากขึ้นและง่ายขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมการป้องกันการไหลเข้าของน้ำไว้อย่างดี

การก่อสร้างอุโมงค์ในระยะทางยาว (Long-distance Tunnel construction)

ถ้าต้องการก่อสร้างอุโมงค์ในบริเวณทางที่มีความยาวมาก ๆ ควรจะใช้หัวเจาะประเภท Close-Face เพื่อความทนทานและประสิทธิภาพของหัวเจาะ อุปกรณ์ก่อสร้างจะต้องใช้ให้เหมาะสมกับสภาพของใต้ดินและจะต้องมีมาตรการดูแลด้านการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดเสียงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วตัวอุโมงค์ที่มีความยาวที่มากกว่า 1.5 กิโลเมตรจัดว่าเป็นการก่อสร้างอุโมงค์ในระยะยาวได้ หัวข้อต่อไปนี้จะต้องคำนึงถึงเมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์เป็นทางยาว โดยใช้หัวเจาะชนิด Closed-Type

(1) ความทนทาน : หัวข้อดังต่อไปนี้จะต้องนำมาพิจารณาสำหรับความทนทานในแต่ละสภาพของใต้ดิน ประเภทของหัวเจาะและสภาพการก่อสร้าง นอกจากนี้ ความทนทานของหัวขุดเจาะ หัวขุดเจาะดิน ไบมีดขุดเจาะดิน ค้อนเลื่อนไบมีดและท้ายหัวเจาะ ก็ต้องนำมาพิจารณาด้วย

- หัวขุดเจาะดิน : การเสียดสีที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ความเร็วที่ใช้ในการขับเคลื่อน ความเร็วของการขุดเจาะดิน และความสามารถในการไหลตัวของวัสดุที่ถูกขุดเจาะออกมา ในอดีตการเสียดสีอย่างรุนแรงจะเห็นได้จากขอบนอกของวงแหวนและเส้นรอบวงของหัวขุดเจาะ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันการเสียดสีที่ดี มีการเชื่อมเหล็กที่ทนต่อการเสียดสีและแทรกส่วนประกอบที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษด้วย

- ไบมีดขุดเจาะดิน : การเสียดสีและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับไบมีดจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ทำการก่อสร้าง สภาพของดิน รูปร่างของไบมีด ชนิดของวัสดุที่เป็นไบมีดและจำนวนไบมีดต่อการหมุนตัดหน้าดิน อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักของการเสียดสีก็คือ สภาพของดินและระยะห่างของไบมีด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่ทนต่อการเสียดสี เช่น ไบมีดแบบพรีคัตติง (Precutting) ไบมีดแบบงาน และไบมีดแบบขั้วบันไดเป็นต้น

- การเคลื่อนเพื่อเพิ่มความทนทาน : ต้องมีการเคลื่อนไบมีด และขึ้นส่วนที่ต้องเผชิญกับการเสียดสี ต้องเลือกใช้วัสดุเคลื่อนที่ทนต่อการเสียดสีได้ดี และ/หรือทำการหล่อหุ้มแบบหลายชั้น แล้วทำการอัดจาระบีเข้าไปเพื่อประปรังความฝืดน้ำและลดการเสียดสีลง

- ท่อ Slurry และท่อปล่อยน้ำออก : ในชั้นดินที่เป็นทรายและกรวดจะทำให้ท่อ Slurry สึกหรอได้ง่าย จึงต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาเพื่อให้มีการสึกหรอช้าลง

(2) การบำรุงรักษา : การบำรุงรักษาที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการยืดอายุความทนทานให้แก่หัวเจาะ และป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจนไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับไบมีดขุดเจาะ โดยปกติแล้วการเสียดสีจะเกิดขึ้นที่ชั้นนอกสุดของไบมีดที่ระยะห่างของไบมีดที่มากที่สุด จึงต้องมีการดูแลรักษาอย่างดี

(3) การเปลี่ยนไบมีดตัดดิน : การเปลี่ยนไบมีดและการเคลื่อนท้ายหัวเจาะจะต้องกระทำบ่อยครั้งในการขุดเจาะอุโมงค์ในระยะทางที่ยาว สำหรับรายละเอียดในการเปลี่ยนไบมีด การเคลื่อนท้ายหัวเจาะ จะต้องคำนึงถึงวิธีการเปลี่ยนที่สะดวกในระหว่างการก่อสร้างด้วย (ยกเว้นตัวหุ่นนอกสุด)

(4) เครื่องจักรและอุปกรณ์ : ในการก่อสร้างอุโมงค์ในระยะทางยาว ระบบการขนย้ายดิน ออกอาจจะถูกจำกัด ดังนั้นเพื่อที่จะทำงานได้มากขึ้น ลดความเสี่ยงต่อความไม่ปลอดภัยและงานที่ยุงยาก และเพื่อปรับปรุงคุณภาพของอุโมงค์และสภาพการทำงาน การขนส่งวัสดุอัดโนมิติ การติดตั้งชิ้นส่วนผนังอัดโนมิติ และการอัดฉีดน้ำปูนแบบอัดโนมิติจะต้องนำมาใช้

(5) ความปลอดภัยและสุขภาพ : ในการก่อสร้างอุโมงค์ระยะทางยาว สภาพการทำงาน จำเป็นต้องมีการปรับปรุง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับความปลอดภัยและสุขภาพติดตั้งอยู่เช่น ห้อยน้ำ ห้อยอาบน้ำและห้องพักผ่อนสำหรับคนงานเป็นต้น

การเปลี่ยนใบมีดขุดเจาะดิน (Cutter Bits Change)

การเสียดสี ความทนทานและวิธีการเปลี่ยนใบมีดจะต้องนำมาพิจารณาในระยะทางการทำงานที่ยาวนานและสภาพของใต้ดินนั้นๆ

ใบมีดจำเป็นต้องเปลี่ยนเมื่อเกิดการสึกหรอและ/หรือปลายใบมีดเกิดความเสียหาย การเสียดสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของหัวเจาะ ลักษณะของดิน ระยะห่างของใบมีด รูปทรงและวัสดุที่นำมาทำเป็นใบมีด จะต้องคำนึงถึงความทนทาน การเสียดสีที่เกิดกับใบมีด และการคำนวณไว้ด้วยว่าควรเปลี่ยนใบมีดที่ตำแหน่งใด เมื่อใด

มาตรการสำหรับความปลอดภัยในการก่อสร้างที่พึงกระทำมีดังนี้

(1) ประมาณค่าการเสียดสี : โดยทั่วไปแล้ว จะประมาณค่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$\delta = K \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot L / V$$

โดยที่

δ = ปริมาณการเสียดสี (มม.) (ที่ผิวที่อยู่ชั้นนอกสุด)

π = ค่าคงที่สำหรับการเสียดสีที่เกิดขึ้น (mm/Km)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ

N = จำนวนรอบในการหมุนต่อนาทีของใบมีด (RPM)

L = ความยาวที่ทำการขุดเจาะ (Km)

V = ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนตัวไปข้างหน้า (m/min)

*K เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน ชนิดของหัวเจาะ วัสดุและตำแหน่งของใบมีด โดยจะเลือกจากพื้นฐานข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ที่คล้ายๆกันมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การตรวจสอบการเสียดสี : เพื่อที่จะคำนวณคิกรของการเสียดสีที่ไบริด ต้องมีการบันทึกข้อมูลของการขุดเจาะ และต้องมีการวิเคราะห์หัวเจาะและลักษณะของดิน ในการตรวจหาการเสียดสีที่เกิดขึ้นจะใช้อุปกรณ์ เช่น ไฮดรอลิก ไฟฟ้าหรือคลื่นอัลตราโซนิก

(3) การเปลี่ยนไบริด : ในการเปลี่ยนไบริดในระหว่างทำการก่อสร้างจะต้องพิจารณาถึงความง่ายในการเปลี่ยนด้วยโดยจะการใช้การติดตั้งด้วยหมุด (Pin) หรือสลักเกลียว ในกรณีที่ไบริดต้องทำการเปลี่ยนในอุโมงค์ หน้าตัดของดินจะต้องมีเสถียรภาพมากพอโดยมีวิธีเสริม เช่น การอัดฉีดน้ำปูน การกดอัดอากาศ หรือการแช่แข็งดิน เพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้าง

การต่อเชื่อมอุโมงค์ใต้ดิน (Underground Tunnel Construction)

หลังจากที่ได้ปรับแก้ตำแหน่งของหัวเจาะที่ใช้ทั้งสองตัวแล้ว ก็มาถึงการเชื่อมต่อเส้นทางโดยที่ชั้นใต้ดินก็ยังจะมีเสถียรภาพอยู่

มีการเชื่อมต่ออุโมงค์ใต้ดินอยู่สองวิธี : วิธีแรกคือการเชื่อมต่อโดยมุ่งหน้าเข้าหากันเพื่อเชื่อมเส้นทาง (head-on) (Head-on) อีกทางหนึ่งคือ การเชื่อมต่อทางด้านข้าง ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องมีการศึกษาว่าควรอยู่ตำแหน่งใด การทำให้ดินมีเสถียรภาพจากการเชื่อมต่ออุโมงค์ก็นับว่าเป็นสิ่งจำเป็น

เมื่อหัวเจาะเชื่อมต่ออุโมงค์ด้วยวิธี Head-on จะต้องมีการอัดฉีดดินด้วยสารเคมี การอัดฉีดแรงดันสูง การใช้แบบผสมผสานกัน หรือใช้วิธีการแช่แข็งเหมือนที่ใช้กันทั่วไป เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุโมงค์ก็มีที่พัฒนาขึ้นมาบ้างแล้วในปัจจุบัน

เมื่ออุโมงค์ถูกเชื่อมต่อแล้ว ต้องมีการปรับปรุงพื้นที่ระหว่างกันให้เหมาะสม ในเวลาเดียวกันต้องมีการเสริมแรงในอุโมงค์เพื่อป้องกันความเสียหายใดๆที่จะเกิดขึ้นในอุโมงค์หลังจากที่เชื่อมต่อแล้ว

การขยายพื้นที่ใต้ดิน (Underground Space Enlargement)

การขยายพื้นที่ใต้ดินจะต้องใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมกับสภาพของดินนั้นๆ การป้องกันเส้นทางอุโมงค์เกิดการเสียรูปเนื่องมาจากแรงดันดินที่ไม่สมมาตรกัน

สิ่งจำเป็นสำหรับการขยายพื้นที่ในชั้นใต้ดินมีดังนี้

- การก่อสร้างโครงสร้างสถานีเช่น สถานีรถไฟใต้ดินระหว่าง 2 อุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การก่อสร้างพื้นที่สำหรับเครื่องจักรกลในการทำงานหรือก่อสร้างพื้นที่สำหรับทำงานในชั้นใต้ดิน
- การก่อสร้างสาขาย่อยของอุโมงค์หรือการเชื่อมต่อด้วยอุโมงค์ด้วยมุมค่าหนึ่ง

โดยทั่วไปการขุดเจาะหน้าดินจะเปิดกว้างขึ้นอีกเมื่อมีการก่อสร้างขยายพื้นที่ว่างในใต้ดินขึ้น ในกรณีนี้ เนื่องจากดินใต้เกิดการหลวมขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์และว จึงจำเป็นต้องรักษาเสถียรภาพของดินเอาไว้โดยใช้วิธีการสำรอง การขยายพื้นที่ใต้ดินต้องกระทำอย่างระมัดระวัง โดยทำการขุดเจาะเปิดหน้าดินเป็นส่วนๆ และค้ำยันดินไว้ด้วยค้ำยันเหล็กหรือชิ้นส่วนผนังพิเศษ

วิธีการก่อสร้างแบบพิเศษในการขยายพื้นที่ของอุโมงค์ที่มีอยู่โดยการใช้ชิ้นส่วนของผนังและเครื่องมือในการขุดเจาะ และการขยายพื้นที่ทางด้านข้างของอุโมงค์

การรื้อถอนสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดิน (Removal of Underground Obstruction)

เมื่อมีการรื้อถอนสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดิน จะต้องมีการดูแลความเรียบร้อยเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการก่อสร้างนั้นปลอดภัย โดยใช้ข้อมูลของการสำรวจหาสิ่งกีดขวาง

โดยทั่วไปสิ่งกีดขวางที่อยู่ชั้นใต้ดิน จะถูกรื้อถอนออกไปก่อนที่การขุดเจาะอุโมงค์จะเริ่มขึ้น ในบางกรณีสิ่งกีดขวางต้องทำการรื้อถอนภายในตัวอุโมงค์ สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงในการรื้อถอนมีดังนี้

(1) การรื้อถอนจากผิวดิน : หลังจากการรื้อถอนสิ่งกีดขวางบนผิวดินแล้วจะต้องทำการถมกลับคืนด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้หัวเจาะสามารถเคลื่อนผ่านไปได้อย่างปลอดภัยปราศจากสิ่งกีดขวางจากส่วนที่เหลือค้างอยู่ หรือจากการถมกลับที่ไม่ดีพอ

(2) การรื้อถอนจากภายในตัวอุโมงค์ : จะต้องทำการอัดฉีดดินด้วยสารเคมีหรืออัดฉีดด้วยสารเคมีพร้อมกับการอัดอากาศจะต้องทำ เมื่อทำการอัดฉีดด้วยสารเคมีโดยการฉีดเข้าไปรอบๆหัวเจาะ ต้องไม่ให้สารเคมีที่ใช้หลุดเข้าไปในตัวเคลือบใบมีดได้ เมื่อคนงานมีความจำเป็นต้องออกไปข้างนอกกำแพงกันดินเพื่อไปรื้อถอนสิ่งกีดขวางในหัวเจาะประเภท Closed-face ต้องมีการติดตั้งท่ออัดฉีดน้ำปูนไปที่หน้าดินและท่อระบายน้ำในบริเวณหัวขุดเจาะดินด้วย

4.2.2.4 มาตรการเสริม (Auxiliary Measures)

ทั่วไป

เมื่อชั้นดินเกิดความไม่เสถียรและพังทลายจากการขุดเจาะหน้าดิน หรือเกิดการทรุดตัว และ/หรือการขุดอุโมงค์ในบริเวณผิวดินที่ได้วางแผนไว้ ควรมีมาตรการให้ดินมีเสถียรภาพ เช่น วิธีการอัดฉีดหน้าดินด้วยสารเคมี วิธีการอัดฉีดแรงดันสูง และการผสมดิน วิธีการแช่แข็งดิน วิธีการลดน้ำ วิธีการใช้แรงดันลม และ/หรือการรวมวิธีการทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยคำนึงถึงสภาพของดิน ประเภทของหัวเจาะ และสภาพสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากดินจะไร้เสถียรภาพจากตำแหน่งทางเข้าหรือบริเวณอาคารระบายอากาศ ที่หน้าตัดโค้งหักศอก ที่ตำแหน่งการขุดเจาะในระดับตื้น และที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับโครงสร้างที่มีอยู่ จึงต้องมีการใช้มาตรการเสริมเหล่านี้ในกรณีที่เป็น

วิธีการอัดฉีดดินด้วยสารเคมี (Chemical Grouting Method)

ในวิธีการอัดฉีดจะต้องมีการคำนวณวัสดุที่จะต้องใช้ พื้นที่ที่ต้องอัดฉีด ลักษณะของดินตามสภาพทางธรณีวิทยาและสิ่งแวดล้อม

วิธีการใช้สารเคมีในการอัดฉีดดินจะช่วยเพิ่มกำลังและลดค่าซึมผ่านได้ของดินให้มากขึ้น โดยการอัดฉีดสารเคมีเข้าไปตามช่องว่างและรอยแยกของดิน

เมื่อมีการรื้อถอนกำแพงส่วนที่ตกค้างอยู่ที่ทางเข้าของหัวเจาะในอาคารระบายอากาศ ดินในตำแหน่งนั้นจะถูกเปิดไว้เป็นเวลานาน ดังนั้นการอัดฉีดสารเคมีจะไปช่วยหยุดการซึมของน้ำใต้ดินและช่วยเพิ่มกำลังของดินด้วย

การอัดฉีดด้วยสารเคมีจะใช้ในกรณีต่อไปนี้

- บริเวณที่หัวเจาะอีกตัวผ่านเข้ามาใกล้หรืออยู่ใต้โครงสร้างที่สำคัญ หรือระบบสาธารณูปโภคที่สำคัญที่อยู่ใต้ดิน
- บริเวณที่หัวเจาะผ่านหรือตัดผ่านบริเวณแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล
- บริเวณที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์อยู่ใกล้กับสถานที่ก่อสร้างได้ดินอื่นๆ
- บริเวณที่แรงดันส่วนเกินมีค่าน้อย
- บริเวณที่ต้องทำการเปลี่ยนใบมีดของหัวเจาะ
- บริเวณที่ทำการขยายพื้นที่ของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อการสร้างกำแพงด้านทานแรง และกำแพง Cut-off สำหรับการควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก
- เพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศในการใช้แรงดันลม
- เพื่อหลีกเลี่ยงการหลวมตัวของดินที่มาจากการขุดเจาะดิน

วิธีการอัดฉีดและวัสดุที่ใช้จะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสม และให้เข้ากับวัตถุประสงค์ของการอัดฉีด ซึ่งจะต้องเป็นไปตามสภาพทางธรณีวิทยา และชนิดของหัวเจาะที่ใช้ การอัดฉีดจะกระทำตาม “มาตรการการปฏิบัติการอัดฉีดสารเคมี 1974” (Provision Guideline Concerning Chemical Grouting 1974) และ “วิธีการควบคุมคุณภาพของการอัดฉีดสารเคมี” ทั้งสองหลักปฏิบัติถูกพิมพ์เผยแพร่โดยกระทรวงการก่อสร้าง (Ministry of Construction)

วิธีการใช้การอัดฉีดแรงดันสูงและการผสมดิน

เมื่อเลือกที่จะใช้วิธีอัดฉีดแรงดันสูงและผสมดินแล้วจะต้องทำการตรวจสอบสภาพของสถานที่ก่อสร้าง สภาพทางธรณีวิทยา และคุณสมบัติของวิธีที่ใช้รอบรอบ

การอัดฉีดด้วยแรงดันสูงและการผสมสารเข้าไปในดินเป็นวิธีที่ใช้เพื่อสร้างเป็นเสาดิน (Soil Column) ในดิน โดยการแทนที่ดินหรือผสมสารเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเข้าไปในดินโดยใช้การอัดฉีดแรงดันสูง โดยปกติแล้วการอัดฉีดใช้แรงดันสูงนี้จะนำมาใช้คล้ายกับวัตถุประสงค์การอัดฉีดด้วยสารเคมี

อย่างไรก็ตามกำลังของดินที่สูงขึ้นและการกั้นน้ำจะได้ผลดีกว่าการอัดฉีดด้วยสารเคมี วิธีการอัดฉีดแรงดันสูงและการผสมสารเข้าไปในดินจะต้องกระทำภายใต้การดูแลอย่างเหมาะสม หัวข้อต่อไปนี้จะได้นำมาใช้ในการพิจารณาด้วย

- การออกแบบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาจะต้องเป็นไปตามสภาพของดินและความเร็วในการขุดตัวของเสา และจะต้องคำนึงถึงการแยกชั้นของเสาดินด้วย
- ในชั้นกรวดหรือชั้นดินแข็ง จะต้องกระทำอย่างรอบคอบ เนื่องจากชั้นรูปและออกแบบขนาดเสาได้ยาก
- เนื่องจากชั้นดินไม่ได้สม่ำเสมอและมีการรั่วซึมของโคลนเลนอยู่ จึงต้องใส่ใจให้มาก เมื่อมีการขุดย้ายโคลนเลนออก ก็ต้องมีการควบคุมอัตราการอัดฉีดให้เท่ากับอัตราที่ขุดย้ายออก
- เมื่อมีการอัดฉีดแรงดันสูงเพื่อทำอันเดอร์พิน (Underpin) ค่ากำลังของดินที่เพิ่มขึ้นจะมาจากอัดฉีดที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ดังนั้นจะต้องทำการก่อสร้างอย่างระมัดระวัง
- ผลกระทบต่อโครงสร้างของอันเดอร์พินเหล่านั้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมคุณภาพในการปรับระดับห้วยเสาเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อไม่ให้มีการเอื่อมของเสาที่ยังไม่ได้ทำการกดอัดบนห้วยเสาได้

วิธีการแช่แข็งดิน (Ground Freezing Method)

เมื่อเลือกใช้วิธีแช่แข็งดิน จะต้องมีการตรวจสอบสภาพทางธรณีวิทยาและสภาพพื้นที่ของโครงการ รวมทั้งคุณลักษณะของวิธีที่ใช้อย่างเคร่งครัด

เมื่อวิธีการแช่แข็งถูกเลือกใช้ จะต้องคำนึงถึงหัวข้อต่อไปนี้

(1) การแช่แข็งดินนั้นจะต้องมีการติดตามควบคุมอุณหภูมิของดิน ถ้าอุณหภูมิในอุโมงค์สูงมาก จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่เป็นฉนวนความร้อนแบบวงจรความเย็นเข้ามาช่วย เนื่องจากความเย็นจะช่วยดูดซับอุณหภูมิที่สูงและความชื้นให้น้อยลง และจึงทำการเปิดหน้าดินเพื่อแช่แข็งต่อไป

(2) จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรอยแตกในท่อวงจรความเย็น ซึ่งจะทำให้เกิดการรั่วซึมของความเย็นเข้าสู่ดินได้ โดยปกติแล้วจะมีการทดสอบท่อวงจรความเย็นด้วยแรงดันหลังจากการติดตั้ง และการขุดเจาะใกล้กับบริเวณท่อจะต้องกระทำหลังจากที่ติดตั้งท่อเข้าสู่ตำแหน่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(3) เมื่อมีการไหลของน้ำใต้ดิน (ความเร็วจะอยู่ที่ประมาณ 1 เมตรถึง 5 เมตรต่อวัน) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแช่แข็งดินได้ จำเป็นต้องพิจารณาการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นทรายและกรวดที่คาดว่าจะมีน้ำใต้ดินอยู่มาก และมีการซึมผ่านสูง ถ้าเป็นไปได้จำเป็นต้องลดความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดินด้วยการอัดฉีดด้วยสารเคมี

(4) เมื่อตำแหน่งที่แช่แข็งมีส่วนสัมผัสกับโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน จำเป็นต้องทำการแช่แข็งโครงสร้างนั้นด้วยเนื่องจากอาจจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในภายหลัง ซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการแช่แข็งดินได้ ในกรณีที่ใช้การแช่แข็งดินในส่วนที่ตัดผ่านกับแม่น้ำไปแล้ว บริเวณระหว่างกันแม่น้ำหรือทะเลสาบกับส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไปก็ต้องมีการตรวจสอบด้วย

(5) แม้ว่ากำลังของดินจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงแล้วก็ตาม ก็ไม่ได้หมายถึงดินที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบที่มีค่าน้อยกว่า 10% จะมีกำลังสูงขึ้นตามที่ได้อธิบายเอาไว้ ยิ่งไปกว่านั้นการแช่แข็งดินในบริเวณชายฝั่งจำเป็นต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำเค็มอาจจะเข้ามาทำลายโครงสร้างกำลังของดินที่ถูกแช่แข็งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) จะเกิดการยกตัวของดินขึ้นเมื่อทำการแช่แข็งและเกิดการทรุดตัวลงมาเมื่อมีการละลาย ขนาดของการยกตัวและทรุดตัวของดินนั้นจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะของดิน ระยะเวลาแช่แข็ง ขนาดบริเวณที่ทำการแช่แข็ง ความเร็วในการละลาย และสภาพของน้ำหั่นกบรทุก โดยทั่วไปขนาดของการยกตัวและทรุดตัวจะมีค่าน้อยในชั้นทรายและกรวด มีค่าสูงในชั้นดินเหนียว ดินโคลนหรือในดินที่มีสารอินทรีย์มาก มีวิธีที่จะช่วยลดการทรุดตัวของดินได้โดยการเร่งการละลายของน้ำแข็งโดยใช้น้ำร้อนช่วยในการละลาย แล้วใช้การอัดฉีดสารเคมีเข้าไปในช่องว่างของดิน

เมื่อเลือกที่จะใช้วิธีการแช่แข็งดินก็จำเป็นต้องหมั่นตรวจสอบโครงสร้างที่อยู่ด้านข้างหรือบริเวณใกล้เคียง และโครงสร้างที่อยู่ใต้ดินอย่างดี ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับอุโมงค์ว่าจะได้รับผลกระทบจากการแช่แข็งอย่างไรบ้างโดยละเอียดถี่ถ้วน

วิธีลดน้ำ (Dewatering Method)

เมื่อเลือกใช้วิธีลดน้ำจะต้องพิจารณาตรวจสอบสภาพทางธรณีวิทยา และสภาพของพื้นที่โครงการ รวมทั้งคุณลักษณะของวิธีที่ใช้ด้วย

เมื่อค่าการซึมผ่านได้ของดินมีค่าสูง และยังมีการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามา ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายในการเปิดหน้าดินได้ จึงต้องใช้วิธีการลดน้ำเพียงอย่างเดียวหรือใช้พร้อมกับวิธีอื่นๆ

วิธีนี้จะใช้กับชั้นของทรายละเอียดและกรวดปนทรายที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านประมาณ 10^{-1} - 10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที วิธีการลดน้ำจะก่อให้เกิดการทรุดตัวของดินและการลดระดับน้ำในบ่อสูบให้ต่ำลงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบบริเวณโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงที่อาจจะได้รับอิทธิพลจากการลดน้ำไว้ล่วงหน้า

วิธีการใช้แรงดันลม (Pneumatic Method)

เมื่อจะใช้แรงดันลมจะต้องคำนวณผลกระทบที่จะเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้าอย่างละเอียด จากแรงดันอากาศและการลดแรงดันอากาศ และการสิ้นสุดกระบวนการอัดอากาศ

(1) การใช้งาน : จะต้องคำนึงถึงวิธีการขับเคลื่อนแรงลมอย่างรอบคอบ เนื่องจากอาจจะไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ภายใต้สภาวะการใช้งานต่างๆ เช่น ในความลึกที่มีมากเกินไป ลักษณะของดินและน้ำใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ผลกระทบของแรงดันอากาศที่มีต่อเสถียรภาพในการเปิดหน้าดิน : ผลกระทบของแรงดันอากาศที่มีต่อการรักษาเสถียรภาพในการเปิดหน้าดินสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทดังนี้

- ป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดินและป้องกันการพังทลายที่มาจากการเปิดหน้าดิน
- เป็นค้ำยันในการเปิดหน้าดินโดยใช้แรงดันอากาศ
- เป็นการปรับปรุงกำลังของดินตะกอนหรือตะกอนทรายจากการลดน้ำโดยอัดอากาศเข้าไป

ไป

(3) ผลกระทบของการกดอัดอากาศตามสภาพทางธรณีวิทยา : โดยทั่วไปผลกระทบของการกดอัดอากาศที่มีต่อสภาพทางธรณีวิทยามีดังนี้

- หินกรวด

เนื่องจากมีช่องว่างที่อากาศสามารถผ่านได้มากและคาดว่าจะมีการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาได้ในปริมาณมาก ทำให้มีการรั่วซึมของอากาศออกไปจากการใช้แรงดันอากาศได้ ดังนั้นผลกระทบที่มาจากการกดอัดอากาศจึงยังไม่เห็นชัดเจนนัก และผลกระทบที่มาจากการค้ำยันการเปิดหน้าดินก็ไม่สามารถคาดการณ์ได้เช่นกัน

- ชั้นดินปนทราย

เนื่องจากค่าของอากาศที่ผ่านได้มีค่าสูง การใช้อากาศในการอัดแรงดันจึงต้องใช้ในปริมาณมาก เมื่อมีการใช้แรงดันสูงจะทำให้เกินแรงดันมากที่สุดที่จำกัดไว้ในที่ดิน จะทำให้เกิดการระเบิดได้ แม้ว่า การไหลเข้าของน้ำใต้ดินจะมีค่าน้อยกว่าในชั้นดินกรวดก็ตามแต่เป็นการยากที่จะป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดินได้ ดังนั้นการพังทลายของการเปิดหน้าดินจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำไหลเข้ามา

- ชั้นดินโคลน

เนื่องจากค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดินชนิดนี้มีค่าน้อย และการกดอัดอากาศในดินประเภทนี้ค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพ เมื่อมีการดำเนินการอัดอากาศอย่างเหมาะสม การป้องกันการไหลเข้าของน้ำก็สามารถทำได้โดยไม่มีการระเบิดออก ถ้ามีการควบคุมแรงดันอากาศได้อย่างเหมาะสมกับแรงดันดินส่วนเกินในที่ที่ลึกต่างๆ หน้าดินจะถูกค้ำยันด้วยแรงดันอากาศและการปรับปรุงกำลังของดินโดยผลที่ได้จากการลดน้ำ

- ชั้นดินเหนียว

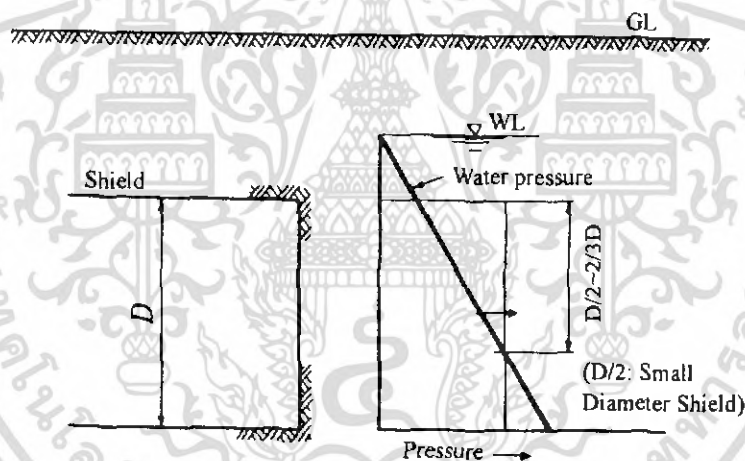
ถ้าดินมีความอ่อนมากและการเปิดหน้าดินไม่มีเสถียรภาพก็สามารถใช้วิธีการอัดอากาศเพื่อใช้เป็นค้ำยันของหน้าดินและเป็นการเพิ่มกำลังของดินจากการลดน้ำได้

- ชั้นดินที่มีความหลากหลายของดินหลายประเภท

ตามปกติแล้วดินส่วนมากจะประกอบไปด้วยชั้นดินหลายประเภท และมีความซับซ้อนแรงดันของน้ำใต้ดินที่มีอยู่จะมีความไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีชั้นที่บ้น้ำอยู่ด้วย เช่น ลักษณะของดินที่แม้ว่าจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชั้นดินทรายหรือกรวดก็ตาม ถ้ามีค่าที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ในปริมาณที่ต่ำเนื่องจากมีชั้นของดินเหนียวหรือดินตะกอนปะปนอยู่ ในกรณีที่มีชั้นที่หนา 2 ชั้นที่มีค่าแรงดันน้ำต่างกันอยู่ จะต้องใช้แรงดันอากาศที่มีค่าต่ำกว่า ถ้าแรงดันของน้ำใต้ดินมีค่าน้อยจะเกิดการรั่วไหลของอากาศในปริมาณมาก ถ้าแรงดันน้ำใต้ดินมีค่ามากน้ำก็จะไหลเข้ามาในอุโมงค์ ปกติแล้วการใช้แรงดันลมจะกระทำได้ดีลำบาก ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่ามากกว่า 1×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที

(4) การคำนวณค่าความดันอากาศ : โดยทั่วไปแล้วการคำนวณค่าความดันอากาศจะอยู่บนพื้นฐานของแรงดันของน้ำใต้ดินที่ตำแหน่งที่จะทำการขุดเจาะเป็นหลัก โดยคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เป็นการยากที่จะให้แรงดันอากาศมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดดิน เนื่องจากยากที่จะหาแรงดันที่เหมาะสมเพื่อให้เท่ากันตลอดหน้าตัดดินเพื่อทดแทนค่าความต่างของแรงดันน้ำและดินที่ด้านบนและด้านล่างของหน้าดิน โดยปกติแล้วจะตั้งให้แรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันของน้ำใต้ดินอยู่ที่ระหว่าง $D/2$ และ $D/3$ จากด้านบนของการเปิดหน้าดิน ใช้ $D/2$ ในอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสำหรับดินเหนียวที่มีค่ายอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อย ต้องใช้แรงดันอากาศค่าน้อยๆ (อ้างอิงรูปที่ 4.98)



รูปที่ 4.98 วิธีการคำนวณหาแรงดันอากาศ

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(5) การสำรวจการก่อสร้างล่วงหน้า เครื่องมือวัดการรั่วไหลของอากาศ และช่วงเวลาในการดำเนินการกดอัดอากาศ : หัวข้อต่อไปนี้จะต้องนำมาพิจารณาในการป้องกันการรั่วไหลของอากาศและการระเบิดออกมาของอากาศ

- การสำรวจการก่อสร้างล่วงหน้าและเครื่องมือวัดค่า

เนื่องจากการรั่วไหลของอากาศที่ไม่มีออกซิเจนและการปนเปื้อนของบ่อสูบน้ำ อาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ จึงจำเป็นต้องมีการสำรวจบ่อสูบน้ำและชั้นใต้ดินภายในรัศมี 1 กิโลเมตรรอบๆ แนวเส้นทางอุโมงค์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีโครงการไถ่ดินอื่นๆที่กำลังดำเนินการก่อสร้างหรือตึก อาคารต่างๆ คอมม่อนสะพาน ระบบสาธารณูปโภคต่างๆที่อยู่ใต้ดิน และทางเดินใต้ดินที่อยู่ใกล้กับแนวเส้นทางอุโมงค์แล้วจะต้องทำการวิเคราะห์อย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีการหลวมตัวมาก่อนแล้วจากโครงการก่อนหน้านี้ หรือในชั้นดินที่สามารถให้อากาศซึมผ่านได้ที่มีอยู่ จำเป็นต้องใช้การอัดฉีดด้วยสารเคมีเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศและการระเบิด

- ช่วงเวลาที่สิ้นสุดการดำเนินการอัดอากาศ

ควรหลีกเลี่ยงการหยุดอัดอากาศแบบทันทีทันใด การสิ้นสุดการอัดอากาศควรจะทำด้วยความระมัดระวังในขณะที่มีการเฝ้าสังเกตการณ์พฤติกรรมของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรุดตัวของดิน และการไหลบ่าเข้าของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

4.2.2.5 การเคลื่อนตัวของดินและการป้องกันโครงสร้างที่มีอยู่

การเคลื่อนตัวของดินและมาตรการการป้องกัน

การเคลื่อนตัวของดินเป็นผลสืบเนื่องมาจากการวางแผนและการออกแบบอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และสภาพการก่อสร้างซึ่งสามารถทำให้ดินเคลื่อนตัวน้อยลงได้โดยใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม และมีการควบคุมการก่อสร้างอย่างรอบคอบ

(1) สาเหตุการเกิดและกลไกของการเคลื่อนตัวของดิน : สาเหตุการเกิดการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมีดังนี้

- ความไม่สมดุลของแรงดันน้ำใต้ดินและดินที่หน้าดิน : ถ้าอัตราการขุดเจาะ และอัตราการขนย้ายดินออกนั้นเกิดขึ้นไม่พร้อมกันในหัวเจาะแบบ EPB หรือ Slurry ก็ตาม จะทำให้มีความแตกต่างของแรงดันขึ้นระหว่างแรงดันภายในห้องของตัวหัวเจาะเอง กับแรงดันดินและน้ำใต้ดินที่อยู่ภายนอก ทำให้หน้าดินเกิดความไม่สมดุล ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินได้ ถ้าแรงดันภายในตัวห้องหัวเจาะมีค่าน้อยกว่าแรงดันดินที่อยู่ภายนอกจะเกิดการทรุดตัวของดินขึ้น ในทางกลับกันถ้าแรงดันในห้องหัวเจาะมีมากเกินไปก็จะทำให้ดินถูกยกตัวขึ้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดมาจากแรงดันที่หน้าตัดดินลดลง และเกิดการเสียรูปแบบอีลาสโต-พลาสติก (Elasto-Plastic) จากการเพิ่มแรงดัน

- การรบกวนดินในระหว่างการขุดเจาะ : การรบกวนดินเป็นสาเหตุมาจากการขุดเจาะดิน และแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของหัวเจาะ และดินซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวหรือยกตัวของดินได้ โดยเฉพาะในการควบคุมแนวเส้นทางของการขุดเจาะในบริเวณส่วนโค้งต้องทำให้ดีเนื่องจากจะทำให้เกิดการหลวมตัวของดินได้

- ช่องว่างด้านท้ายที่เกิดขึ้นและการอัดฉีดน้ำปูนกลับเข้าไปไม่เพียงพอ : เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นด้านท้ายซึ่งดินจะถูกค้ำยันไว้ด้วยแผ่นเหล็กนั้น เป็นสาเหตุในการเกิดการเสียรูปและการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

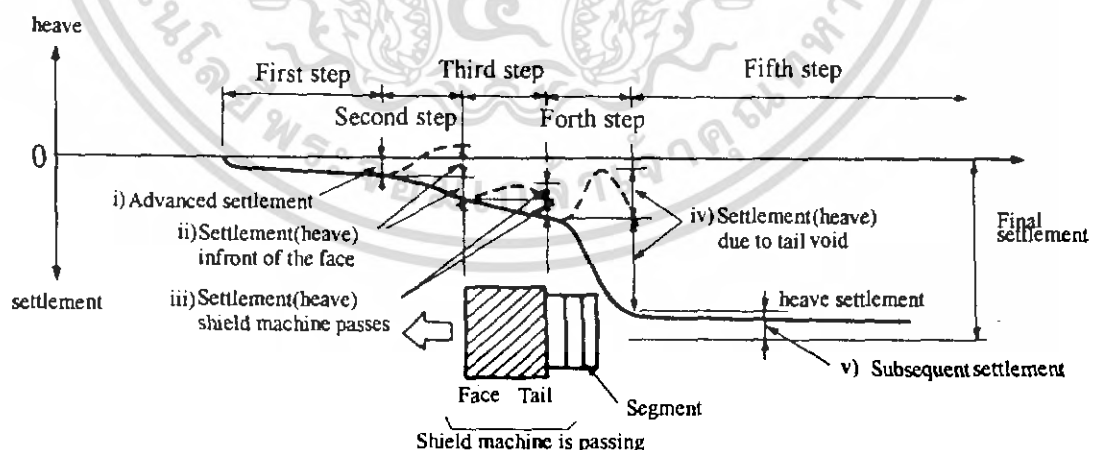
ทรุดตัวของดินได้ นี่คือการเสียรูปทางอีลาสโต-พลาสติก โดยมีสาเหตุมาจากค่าความเค้นที่ลดลง ขนาดของการทรุดตัวของดินจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน ระยะเวลา ตำแหน่งที่ทำการอัดฉีด แรงดัน และปริมาณที่ใช้ในการอัดฉีด ถ้าแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดในชั้นดินเหนียวมีมากจนเกินไปจะทำให้เกิดการยกตัวของดินขึ้น

- การเสียรูปและการเปลี่ยนตำแหน่งของการบุผนังชั้นแรก : ถ้าสลักเกลียวไม่ได้ทำการขันให้แน่นพอจะทำให้ชิ้นส่วนของผนังวงแหวนเกิดการเสียรูปได้ การทรุดตัวที่มากขึ้นของดินตามพื้นที่ว่างด้านท้ายที่มากขึ้น หรือการเสียรูปของการบุผนังอุโมงค์ที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกที่ไม่สมดุลหลังจากถูกผลักออกจากทางด้านท้ายหัวเจาะ

- การลดระดับของน้ำใต้ดิน : ถ้ามีการรั่วซึมหรือการไหลเข้าของน้ำมาในผนังชั้นที่หนึ่ง จะเกิดการลดระดับของน้ำใต้ดินให้ต่ำลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวของดินได้ เป็นการทรุดตัวที่มีสาเหตุจากการรวมตัวกันของดิน เพราะว่าค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มมากขึ้น

(2) ลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน : การเคลื่อนตัวของดินเนื่องมาจากการขุดเจาะดินนั้นมีลักษณะการรวมกันอย่างซับซ้อนทั้งการยกตัวและการทรุดตัวของดินที่มีสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นห้าขั้นตอนตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 4.99 ขั้นตอนที่ (a) และ (b) จะเกิดขึ้นก่อนที่บริเวณเส้นทางที่หัวเจาะผ่าน และขั้น (c) เกิดบริเวณที่ทางผ่านของหัวเจาะ ขั้น (d) และ (e) จะเกิดหลังจากที่หัวเจาะได้ผ่านไปแล้ว

วิธีการก่อสร้างอาจจะต้องมีการปรับปรุงให้เป็นไปตามพื้นฐานของการสักรูปของดินที่ได้ทำการวิเคราะห์มา



รูปที่ 4.99 การแยกประเภทของการเคลื่อนตัวของดินเนื่องมาจากการขุดเจาะของหัวเจาะดิน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

- การทรุดตัวล่วงหน้า : จะเกิดในบริเวณส่วนหน้าของเส้นทางที่หัวขุดเจาะผ่าน มีสาเหตุเนื่องมาจากการลดระดับลงของระดับน้ำใต้ดินในชั้นดินทราย และในชั้นดินที่มีความอ่อนมากๆ อาจจะเกิดการไหลของดินที่หน้าตัดดินได้

- การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณด้านหน้าของหน้าตัดดิน : การทรุดตัวหรือยกตัวประเภทนี้จะเกิดในบริเวณส่วนหน้าตัวหัวเจาะ ซึ่งจะมีสาเหตุมาจากแรงดันดินหรือแรงดันน้ำใต้ดินเกิดความไม่สมดุล

- การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณหัวเจาะ : การทรุดตัวหรือยกตัวประเภทนี้มีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานระหว่างตัวหัวเจาะกับดิน หรือการรบกวนดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะดินในปริมาณที่มากเกินไป

- การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณท้ายหัวเจาะ : การทรุดตัวหรือยกตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างกะทันหันหลังจากที่หัวเจาะทำการขุดเจาะผ่านไป แล้ว มีสาเหตุมาจากช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะที่มีหรือแรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูนที่มีมากเกินไป การทรุดตัวในการขุดเจาะอุโมงค์ ส่วนมากจะเป็นการทรุดตัวในประเภทนี้

- การทรุดตัวสืบเนื่อง : การทรุดตัวประเภทนี้จะเกิดในชั้นดินเหนียวที่มีความอ่อน ที่ถูกทำให้เกิดการหลวมตัวหรือถูกรบกวนสมดุลย์ของดิน

(3) ขนาดและการกระจายการเคลื่อนตัวของดิน : รูปร่างหน้าตัดของการทรุดตัวในช่วงสุดท้าย โดยทั่วไปจะมีลักษณะสมมาตรกับศูนย์กลางของอุโมงค์ และคล้ายกับโค้งกลับหัว ขนาดและขอบเขตของการทรุดตัวจะแปรผันตามสภาพของดินและสัดส่วนของความลึกต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ ในดินโคลนเหนียว (Diluvial Gourd) หรือในดินตะกอนน้ำพา การสัณรูปของดินจะมีค่าน้อยลงเมื่อขึ้นไปถึงผิวดินด้านบน อีกทางหนึ่ง การทรุดตัวในบริเวณผิวดินจะมีลักษณะคล้ายกับการทรุดตัวของดินในบริเวณที่อยู่ใกล้อุโมงค์แม้ว่าอัตราส่วนความลึกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะจะมีค่ามากก็ตาม

(4) มาตรการการป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน : ทุกสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของดินจะต้องกำจัดให้หมดสิ้นไป เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัว มาตรการการป้องกันมีดังต่อไปนี้

- การป้องกันการไม่สมดุลย์ของแรงดันที่หน้าตัดดิน : ในหัวเจาะแบบ EPB แรงดันในห้องขุดเจาะจะถูกควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ และอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงให้เหมาะสมกับแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดิน ต้องมีการอัดฉีดสารเติมแต่งเข้าไปในห้องขุดเจาะเพื่อเพิ่มการเคลื่อนตัวของดินที่ถูกเจาะออกมาให้เป็นไปตามทฤษฎีมากขึ้น และเพื่อหลีกเลี่ยงการเพิ่มช่องว่างในห้องหัวเจาะ

ในหัวเจาะแบบ Slurry คุณภาพของ Slurry จะต้องควบคุมให้เหมาะสมกับค่าการซึมผ่านได้ของดิน เพื่อให้แรงดันใน Slurry มีความสมดุลย์กับแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดินที่หน้าตัดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มาตรการการป้องกันการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ : จะต้องมีการควบคุมทิศทางในการขุดเจาะเพื่อป้องกันการออกนอกเส้นทาง เพื่อให้แรงเสียดทานระหว่างหัวเจาะและดินมีค่าน้อยลงและการรบกวนสภาพดินก็จะน้อยลงเช่นกัน

- มาตรการการป้องกันการทรุดตัวที่มาจากช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะ และป้องกันการการยกตัวของดินที่เป็นผลมาจากกการอัดฉีดน้ำปูนกลับเข้าไปในดิน : การอัดฉีดน้ำปูนจะต้องกระทำไปพร้อมๆ กับการขุดเจาะดิน วัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดจะต้องมีคุณสมบัติที่ซึมผ่านได้ดี และมีกำลังที่เหมาะสมในทางธรณีวิทยา การอัดฉีดครั้งที่สองจะทำการอุดเข้าไปในช่องว่างเพื่อลดการทรุดตัวของดิน ในชั้นดินเหนียวตะกอนน้ำพาจะต้องควบคุมการอัดฉีดไม่ให้เป็นสาเหตุของการยกตัวของดินและการรบกวนสมดุลของดินจากแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดได้

- มาตรการการป้องกันการเสียรูปของผนังชั้นแรก : ชั้นส่วนผนังรูปวงแหวนจะต้องรักษาสภาพรูปทรงของชั้นส่วนไว้ และจะต้องขันสลักเกลียวให้แน่นเพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวเสียรูปของรูปทรงวงแหวนได้

- มาตรการการป้องกันการลดระดับของน้ำใต้ดิน : การติดตั้งชั้นส่วนผนังต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเพื่อลดการเบี่ยงตำแหน่ง และการเกิดช่องว่าง มาตรการการป้องกันน้ำจะต้องนำมาใช้กับส่วนรอยต่อและรูสำหรับอัดฉีดน้ำปูนอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

(5) การคาดการณ์และติดตามการเคลื่อนตัวของดิน : การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยให้มูลค่าการเคลื่อนตัวของดินที่ยอมรับได้โดยใช้พื้นฐานข้อมูลย้อนหลังในอดีต หรือใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนท์-อีลิเมนต์ (Finite-Element Method) ของการขุดเจาะอุโมงค์ไว้ล่วงหน้า หลังจากเริ่มทำการขุดเจาะอุโมงค์จะต้องมีการติดตามระดับของผิวดินไปตลอดแนวเส้นศูนย์กลางและตามแนวเส้นทางสองข้างอุโมงค์ ผลการตรวจสอบจะนำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมการขุดเจาะในส่วนต่างๆต่อไป

การก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียงและการป้องกันสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิม

ถ้าในเส้นทางขุดเจาะที่ได้วางไว้นั้นอยู่ใกล้กับโครงสร้างที่มีอยู่เดิม จำเป็นต้องใช้มาตรการป้องกัน จะต้องมีการติดตามตรวจสอบสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิมในระหว่างการก่อสร้าง และจะต้องสำรวจหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งก่อสร้างเหล่านั้นอย่างรอบคอบด้วย

ถ้ามีสิ่งก่อสร้างเดิมอยู่ใกล้กับพื้นที่ที่จะทำการขุดเจาะ จะต้องมีการสำรวจก่อนการก่อสร้าง และประเมินพฤติกรรมและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่ในบริเวณใกล้เคียงด้วย การขุดเจาะอุโมงค์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกร้าวในสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการป้องกันอย่างเหมาะสม ในระหว่างทำการก่อสร้าง จีการควบคุมที่ใช้จะต้องคูณค่าด้านความปลอดภัย (Safety Factor) เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

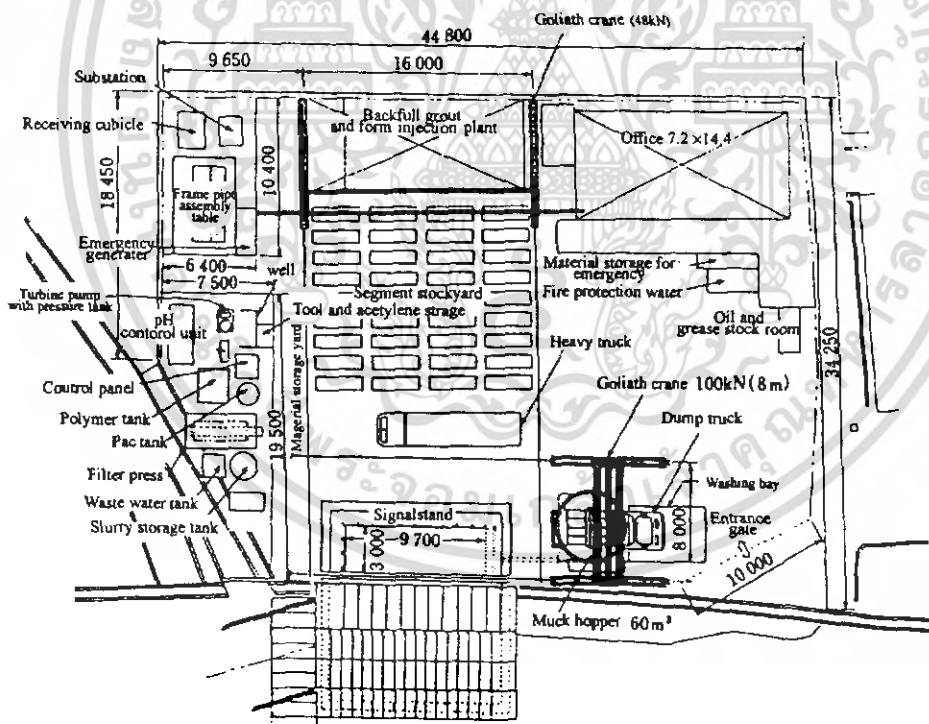
ไปเพิ่มให้เป็นที่ยอมรับ การขุดเจาะอุโมงค์จะต้องดำเนินการไปตามนั้น ถ้าจำเป็นก็ทำการจัดตั้งระบบการควบคุมขึ้นมาเพื่อติดตามตรวจสอบผล เพื่อไว้ใช้ในอนาคตได้

4.2.2.6 เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)

เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)

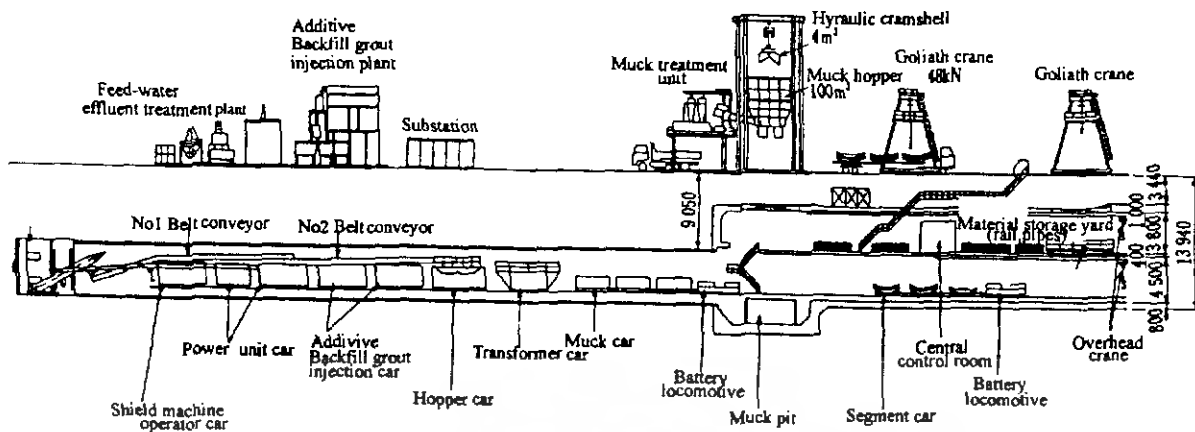
เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานก่อสร้างนั้น จะต้องมีความเหมาะสมและสมรรถนะที่เพียงพอเหมาะสมกับแผนกำหนดการและวิธีการก่อสร้าง

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานรวมถึงสถานที่เก็บวัสดุ เครื่องมือขนย้ายดิน วัสดุที่รับเข้ามา เครื่องมืออำนวยความสะดวกในการขนส่ง เครื่องมือเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือสื่อสาร อุปกรณ์ระบายอากาศ อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัยและความปลอดภัย และเครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นที่สอง ในวิธีการก่อสร้างบางวิธีจะมีเครื่องจักรในการผสมสารปรุงแต่ง (Slurry Plant) เครื่องจักรสำหรับคัดแยกหินออกและจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการควบคุมการก่อสร้างด้วย

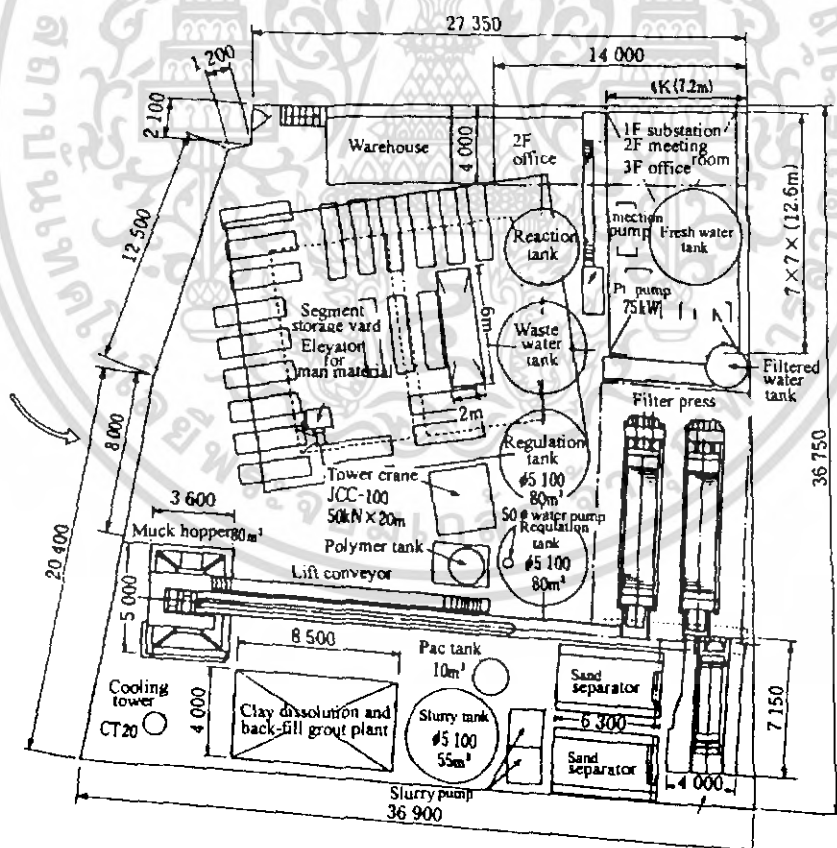


รูปที่ 4.100 แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ EPB
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

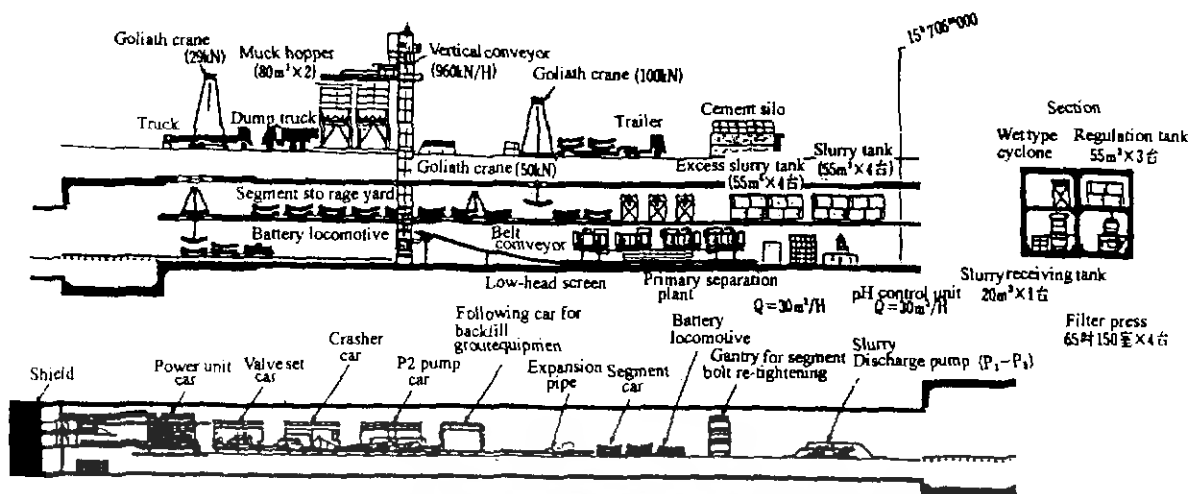
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.101 แผนผังค้ำยันสำหรับหัวเจาะแบบ EPB
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 4.102 รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ EPB
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 4.103. รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

สถานที่เก็บวัสดุและโรงเก็บอุปกรณ์ (Material Storage Yard and Warehouse)

สถานที่เก็บวัสดุและโรงเก็บอุปกรณ์จะต้องมีพื้นที่อย่างเพียงพอสำหรับการเก็บรักษาวัสดุทั้งแบบชั่วคราวและถาวร (เช่น ชิ้นส่วนผนัง ค้ำยัน นั่งร้าน และอุปกรณ์ก่อสร้าง)

เครื่องมือสำหรับการขนย้ายดินออก (Muck Removal Facilities)

เครื่องที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจะต้องสอดคล้องกับแผนการทำงานโดยคำนึงถึงวัฏจักรในการขุดดินและสภาพของหน้างาน

เครื่องมือที่ใช้ในการขนย้ายจะต้องมีการพิจารณาสมรรถนะในหลายๆด้านอย่างเพียงพอ เช่น ระบบการขนย้ายดินในและนอกอุโมงค์ เพื่อรื้อถอนดินที่ตำแหน่งขุดเจาะ เพื่อให้สอดคล้องกับการขุดเจาะดิน และวิธีการที่ใช้

ระบบขนย้ายดินที่ขุดเจาะโดยใช้ตัวฮอปเปอร์ (Hopper) ในการขนย้ายจากกันของอาคารระบบอากาศมีดังต่อไปนี้

(1) ระบบการขนย้ายดินในอุโมงค์

- ระบบราง
- ระบบสายพานลำเลียง
- ระบบรถยกเท
- ระบบสเลอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ระบบการขนย้ายดินที่อาคารระบายอากาศ : ระบบการขนย้ายจะทำการขนย้ายดินด้วยรถขนดินหรือโดยวิธีอื่น แล้วนำขึ้นทางอาคารระบายอากาศด้วยฮอปเปอร์ (Hopper) หรือสต็อกไฟล์ (Stockpile) ประเภทของเครื่องมือมีดังต่อไปนี้

- ระบบเครนแบบขาห้อย (Gantry Crane System)
- ระบบแกรบฮอปเปอร์ (Grab Hopper System)
- ระบบสกีพาวเวอร์ (Skip Tower System)
- ระบบลำเลียงในแนวตั้ง (Vertical Conveyor System)

ระบบการขนย้ายดินที่อาคารระบายอากาศนับเป็นระบบสำคัญที่ทำการรวมดินที่ขนย้ายออกมาที่บริเวณนี้ จึงต้องมีการพิจารณาเลือกใช้ระบบอย่างรอบคอบที่สุด

(3) ระบบการขนย้ายดินแบบต่อเนื่อง : จะใช้ระบบท่อลำเลียงเพื่อการขนย้ายดินออกอย่างต่อเนื่องจากตัวอุโมงค์ขึ้นไปจนถึงผิวดิน ระบบการลำเลียงโดยใช้ท่อเป็นระบบที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากได้รวมระบบการลำเลียงทั้งแนวราบและแนวตั้งไว้ด้วยกัน ระบบนี้จะช่วยลดการจราจรในตัวอุโมงค์ลงทำให้มีความปลอดภัยขึ้น และยังช่วยลดแรงงานโดยอัตโนมัติ

(4) เครื่องลำเลียงแบบฮอปเปอร์ : ปริมาณความจุของฮอปเปอร์จะต้องเพียงพอกับการกักเก็บดินที่ถูกขุดเจาะออกมา เพื่อให้เป็นไปตามกระบวนการขุดเจาะที่ได้วางแผนไว้

เครื่องมือขนส่งวัสดุ (Material Handling Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการขนส่งวัสดุนั้นจะต้องพิจารณาให้เป็นไปตามกำหนดการส่ง รอบเวลา และการจัดสรรตามแต่ละส่วนของงาน

ระบบการขนส่งวัสดุจำเป็นต้องออกแบบให้เคลื่อนที่ได้ทั้งในและนอกบริเวณหน้างาน โดยไม่รบกวนระบบที่ทำการขนย้ายดินออกมา

ระบบขนส่งวัสดุในอุโมงค์ : ระบบรางจะนิยมใช้ในการขนส่งวัสดุในอุโมงค์มากที่สุด

ระบบการขนส่งวัสดุในอาคารระบายอากาศ : ระบบที่ใช้จะเป็นเครนแบบขาห้อย (Gantry) หรือแบบเป็นแขนของปั้นจั่น (Jib) ซึ่งจะเน้นการเคลื่อนของระบบการขนส่งวัสดุที่เข้าและออกอาคารระบายอากาศเป็นหลัก

ระบบการขนส่งวัสดุอย่างต่อเนื่อง : ระบบการขนส่งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์โดยอัตโนมัติ เพื่อขนส่งชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์อย่างต่อเนื่องจากผิวดินจนถึงหน้างานที่อยู่ใต้ดิน เมื่อใช้ระบบดังกล่าวจะต้องมีการรักษาความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ โดยใช้ระบบเซ็นเซอร์ตรวจสอบตลอดทั้งระบบ มีปุ่มหยุดฉุกเฉิน และศูนย์กลางควบคุมระบบ

เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้า (Electric Power Supply Facilities)

เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องติดตั้งและดูแลรักษาให้เป็นไปตามมาตรฐานด้านเทคนิคไฟฟ้า (Electric Technical Standard) และกฎหมายความปลอดภัยและสุขภาพในงานอุตสาหกรรม

ต้องมีการห่อหุ้มฉนวนประเภทกันน้ำกับตัวเครื่อง ในกรณีที่เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความต่างศักย์ที่สูงมาก หรือสูงเป็นพิเศษ จะใช้ฉนวนและสายเคเบิลสำหรับสายไฟฟ้าเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการช็อตของไฟฟ้า (Electric Shock)

เครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ใต้ดิน : การเลือกเครื่องมือด้านไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการใช้ และระยะทางยาวรวมของอุโมงค์

จะต้องมีจุดจ่ายไฟอิสระตั้งอยู่ในหน้างานเพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉินที่เกิดไฟดับหรือมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น

อุปกรณ์ส่องสว่าง (Lighting Facilities)

อุปกรณ์ส่องสว่างจะต้องทำการติดตั้งตามบริเวณที่ทำงานและทางเดิน แสงสว่างที่อยู่ในอุโมงค์จะต้องมีความสว่างมากเพียงพอสำหรับความปลอดภัย และต้องมีอุปกรณ์ป้องกันสภาพสิ่งแวดล้อมสภาพอากาศติดตั้งไว้ด้วย

จำเป็นต้องมีแสงสว่างอย่างน้อย 70 ลักซ์ในพื้นที่ที่ทำงานในอุโมงค์ และ 20 ลักซ์ในที่อื่นๆ ไฟฉุกเฉินจะมีการติดตั้งไว้ตลอดทางเดิน ทางเข้า ทางออก และบันได เพื่อช่วยให้คนงานสามารถหาทางออกจากอุโมงค์ได้ในกรณีที่เกิดไฟดับ

ระบบติดต่อสื่อสาร (Communication System)

ระบบติดต่อสื่อสารระหว่างพื้นที่ที่ทำงานแต่ละส่วนจะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือ และระบบสัญญาณเตือนในกรณีฉุกเฉิน เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานในอุโมงค์ และเพื่อรักษาความปลอดภัยในการทำงานในชั้นใต้ดินด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในการระบายอากาศ (Ventilation Facilities)

จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ระบายอากาศให้มีอากาศบริสุทธิ์ในอุโมงค์ เพื่อรักษา สภาพแวดล้อมในการทำงานให้ปลอดภัยและสะอาด

ทางเดินและบันไดที่ปลอดภัย (Safety Walkway and Stair)

จะต้องมีทางเดินและบันไดที่ถูกติดตั้งอย่างปลอดภัยและทอดยาวไปถึงบริเวณหน้างาน

เครื่องมือสูบน้ำและจ่ายน้ำ (Water Supply and Discharge Facilities)

เครื่องมือสูบน้ำและจ่ายน้ำที่ติดตั้งจะต้องมีปริมาณความสามารถในการสูบน้ำมากพอตามที่ได้ คำนวณการอัตราการใช้น้ำไว้ จะต้องมีการดูแลรักษาเครื่องมืออย่างเหมาะสมในระหว่างที่ทำการก่อสร้าง

อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัยและดับเพลิง (Fire Fighting and Fire Prevention Facilities)

จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับดับเพลิงและป้องกันอัคคีภัยติดตั้งไว้ในบริเวณหน้างานเพื่อป้อง การอัคคีภัย

อุปกรณ์เตือนภัย/ตรวจสอบก๊าซไวไฟ และก๊าซอันตราย (Combustible Gas and Harmful Gas Monitoring/Warning Facilities)

ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบและเตือนภัยเกี่ยวกับก๊าซ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุการระเบิด หรืออันตรายของก๊าซในบริเวณที่ทำงาน

เมื่อได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าในบริเวณที่จะทำการก่อสร้างนั้นอาจมีสภาพทางธรณีที่มีการ เจือปนของก๊าซที่ไวไฟ ก๊าซไว้ออกซิเจน หรือก๊าซที่เป็นอันตราย ที่คาดว่าจะเกิดการระเบิดขึ้นได้ จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบและเตือนภัยเกี่ยวกับก๊าซไว้ในบริเวณที่ทำการก่อสร้าง และเพื่อที่จะให้ อุปกรณ์ระบายอากาศช่วยในการเจือจางก๊าซพิษในระหว่างขุดเจาะอุโมงค์ได้

เครื่องมือตรวจจับก๊าซไวไฟ : เมื่อคาดการณ์ไว้ว่าอาจจะมีก๊าซไวไฟอยู่ จำเป็นต้องทำการ ติดตั้งเครื่องมือตรวจจับก๊าซ และบันทึกผลรวมทั้งอุปกรณ์ในการเตือนภัยก็ต้องมีการติดตั้ง ข้อควรระวังใน การระเบิดหรือติดไฟของก๊าซจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการระเบิดเช่นกัน การติดตั้งเครื่องมือจะต้องทำตาม มาตรฐานสำหรับการป้องกันโครงสร้างจากการระเบิดตามประเภทของก๊าซ ตารางที่ 4.11 แสดงวิธีการ ป้องกันโครงสร้างประเภทต่างๆ

ตารางที่ 4.11 ประเภทของการป้องกันโครงสร้างจากการระเบิดของก๊าซ
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

a. Increased-safety explosion-protected structure	Structure having increased safety, with apparatus that cannot causing ignition or release thermal energy under normal operation
b. Flame-proof explosion protected structure	Enclosed structure designed to withstand the pressure generated by an internal explosion and to cool the hot gas through the clearance in order to prevent ignition of explosive gas.
c. Intrinsic safe structure	Structure with intrinsically safe equipment approved by a public testing organization, generating insufficient energy to ignite the gas by an arc or high temperature under normal or abnormal conditions
d. Oil-filled structure	Structure with apparatus generating sparks or arc immersed in oil to prevent the ignition of explosive gas.
e. Purged and pressurized structure	Structure with purge and pressurized enclosure to reduce flammable gas concentration to an acceptable safe level

เครื่องมือตรวจสอบก๊าซอันตราย : ถ้าคาดว่ามีการรั่วออกซิเจนหรือก๊าซอันตรายจะต้องมีการติดตามตรวจสอบ จดบันทึก และติดตั้งอุปกรณ์เตือนภัยเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ

อุปกรณ์ช่วยในการเลี้ยวโค้ง การเข้าและออกของหัวเจาะ (Shield Machine Departing, Arriving and Turning Facilities)

ในการเริ่มการทำงานของหัวเจาะจะต้องออกแบบอุปกรณ์ที่ช่วยในการเลี้ยว เข้า และออก เพื่อให้เป็นไปตามกำหนดการก่อสร้าง และต้องทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีที่ปลอดภัยที่สุดด้วยเช่นกัน

เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง (Primary Lining Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งผนังอุโมงค์ในชั้นแรกจะต้องสามารถใช้งานได้ดี ทำการติดตั้งได้อย่างแม่นยำ และง่าย โดยคำนึงถึงวัสดุ ขนาดรูปร่าง และมิติของชิ้นส่วนผนังเป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการอัดฉีดน้ำปูน (Backfill Grouted Facilities)

เครื่องมือดังกล่าวจะใช้ในขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูน ซึ่งจะต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถอุดช่องว่างด้านท้ายของการขุดเจาะได้โดยสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่ได้วางแผนไว้

รถที่ใช้ในการทำขนขลา (Working Platform Car)

รถที่จะใช้จะต้องมีพื้นที่ว่างมากเพียงพอเพื่อขนส่งวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการอัดฉีดน้ำปูน ครั้งที่สอง การคล้อยก การขันสลักเกลียวให้แน่นขึ้นอีก และงานอื่นๆที่เกี่ยวข้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังครั้งที่สอง (Secondary Lining Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังชั้นที่สองจะต้องมีสมรรถนะมากพอที่จะทำงานให้เป็นไปตามแผนการที่ได้วางไว้ และต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ลักษณะในการบุผนังมือที่สองประเภทคือ การขึ้นรูปด้วยตัวแทรกเวลเลอร์ (Traveler) และการนำมาประกอบเอง โดยปกติแล้วแบบแทรกเวลเลอร์จะเป็นที่นิยมมากกว่า ส่วนแบบประกอบชิ้นส่วนจะใช้เฉพาะหน้าตัดแบบพิเศษหรืออุโมงค์ที่มีความยาวน้อยเท่านั้น

ตัวแทรกเวลเลอร์มีอยู่สามประเภทคือ ประเภทพับเก็บไม่ได้ ประเภททานเข็ม และประเภทพับเก็บได้ ประเภทที่พับเก็บไม่ได้นั้นจะใช้เมื่อมีการบุผนังทีละส่วน ประเภททานเข็มใช้เมื่อบุผนังชั้นส่วนแบบทรงกลมในคราวเดียวกัน ประเภทพับเก็บได้ใช้กับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีเหล็กอยู่ ซึ่งจะง่ายต่อการเคลื่อนที่ในผิวโค้ง

เครื่องมือที่ใช้ในการอัดอากาศและเครื่องมือที่ใช้ในอัดแรงดันลม

เครื่องมือที่ใช้ในการอัดแรงดันลม ตัวเป่าลมและตัวเครื่องตำรองจะต้องดำเนินการอัดแรงดันลมตาม ปริมาตรอากาศที่ได้กำหนดไว้ โดยอุปกรณ์จะมีตัวล็อก อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ทำความเย็น แท็งค์รองรับและท่อจ่ายอากาศ ต้องทำการอัดอากาศที่มีความสะอาด ในอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม

เครื่องมือที่ใช้ในการอัดอากาศ เมื่อทำการอัดอากาศในบริเวณหน้าดินหรือบริเวณอื่น ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดไว้ให้พร้อม

สมรรถนะของเครื่องจักร : โดยปกติแล้วอัตราการใช้อากาศสำหรับวิธีการขับเคลื่อนด้วยแรงลม จะถูกประมาณค่าจากปริมาตรรวมจากหัวข้อต่อไปนี้

การรั่วซึมออกจากหน้าดิน

การรั่วซึมเข้ามาที่ด้านท้ายของหัวเจาะในการบุผนังชั้นที่หนึ่ง

การรั่วซึมที่ตัวล็อก

ปริมาตรหลักๆของการรั่วซึมมาจากหัวข้อต่อไปนี้ ก) อัตราการรั่วซึมขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่านได้ของดินและอากาศ หน้าตัดขวางของหัวเจาะ แรงอากาศที่ถูกกดอัด และการปกคลุมดินที่อยู่เหนืออุโมงค์ขึ้นไป ปริมาตรการรั่วซึมจะมีสาเหตุมาจาก ข) สภาพของผนังที่บุไว้ในชั้นแรก การเคลื่อนวัสดุ และการอัดฉีดน้ำปูนหลังจากที่ทำการบุผนังแล้ว

สูตรสำหรับการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้โดย Johnanssen Hewett มีดังนี้

$$Q = \alpha D^2$$

เมื่อ Q = ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ (ด้านทางเข้า ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ (เมตร)
 α = ค่าสัมประสิทธิ์ของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์ของดิน จำนวนโดยใช้หัวข้อทั้ง 3 ในตอนต้น และพิจารณาข้อมูลในกรณีที่คล้ายกันในอดีตประกอบ

โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของดินจะมีค่าอยู่ที่ 3.65 สำหรับดินปกติ และ 7.3 สำหรับดินทรายและกรวด ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะใช้ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องมือที่ใช้ในการสูบน้ำอัดอากาศได้ในความเป็นจริงแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการนี้

ระบบที่ใช้ในการควบคุมวิธีการขุดเจาะโดยใช้หัวเจาะประเภท EPB

ระบบที่ใช้ในการควบคุมหัวเจาะ EPB นั้นจะต้องมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในขณะที่ทำการรักษาเสถียรภาพของหารเปิดหน้าดินไปในตัวด้วย

ในหัวเจาะประเภท EPB นั้น แรงดันดินและแรงดันจากน้ำใต้ดินจะถูกก้ำยันโดยดินที่ถูกขุดออกมาที่อยู่ในห้องขุดเจาะของหัวเจาะ แรงดันในห้องขุดเจาะจะถูกควบคุมด้วยสกรูลำเลียง และถูกลำเลียงออกมาที่ทางออก การลำเลียงดินที่ออกมาจะมีสัดส่วนเป็นไปตามการขุดเจาะของหัวเจาะ ดังนั้นการรวมระบบการทำงานย่อยๆเหล่านี้ไว้ในระบบควบคุมเพียงหนึ่งเดียวนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ ตามปกติแล้วในระบบการควบคุมนั้นจะทำการตรวจวัดและติดตามข้อมูลที่ทำการขุดเจาะ เช่น สภาพของหน้าตัดใบมีด แรงดันในห้องตัดดิน อัตราการขุดเจาะ และปริมาณของดินที่ขุดเจาะออกมาได้ และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขุดเจาะ การสูบลินออก เป็นต้น

ฟังก์ชันหลักที่จำเป็นต่อระบบควบคุมมีดังนี้

ก. การควบคุมแรงดันดินที่หน้าตัดดิน : ควบคุมความเร็วในการขุดเจาะเพื่อให้สมดุลกับแรงดันดิน/น้ำที่หน้าตัดดิน และแรงดันดินในห้องขุดเจาะ

ข. การควบคุมปริมาตรการขนย้ายดิน : ควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงเพื่อให้สมดุลกับปริมาณของดินที่เข้าและออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. การควบคุมอัดฉีดสารปรุงแต่ง : จัดเตรียมปริมาณสารเติมแต่งให้เหมาะสมกับดินแต่ละชนิดเพื่อรักษาสภาพการไหลตัวได้ภายใต้ปริมาณดินที่มีอยู่ในห้องตัดดิน

ง. การควบคุมการบั่นที่กผลการทำงานของหัวเจาะจะทำที่ห้องดำเนินการหรือศูนย์กลางควบคุม และเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงาน แสดงข้อมูลที่ได้และวิเคราะห์ และทำการบั่นที่กผลข้อมูล

เครื่องมือสำหรับแปรโคลนใน Slurry เป็นก้อนดินแข็ง

เครื่องมือแปรรูปให้อยู่ในสถานะของแข็งนี้จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปของโคลนที่ถูกขุดเจาะออกมาเป็น สถานะที่สะดวกต่อการขนย้ายดินออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการแปรสถานะของโคลนมีดังนี้

ตากให้แห้งด้วยแสงแดด

ใช้ผงซีเมนต์และปูนขาว

ใช้สารเติมแต่งประเภทโพลีเมอร์

การควบคุมการทำงานสำหรับหัวเจาะประเภท Slurry

การควบคุมจะควบคุมวงจรการทำงานของหัวเจาะแบบ Slurry และควบคุมเสถียรภาพของแรงดันน้ำในบริเวณหน้าตัดดิน เพื่อให้การขุดเจาะดู โม่งค์เป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

การทำงานของหัวเจาะแบบ Slurry จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบลูกเพื่อทำแรงดันที่บริเวณหน้าตัดดินและเครื่องสูบลูกสำหรับการสูบลูกดินเข้าและออกเครื่องสูบลูกทุกตัวจะต้องทำงานพร้อมกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์สำหรับการควบคุมรวม โดยปกติแล้วระบบจะทำการตรวจวัดแรงดันที่หน้าตัดดิน พิกัดของหัวเจาะ สถานะของเครื่องจักรใน Slurry และโอนถ่ายข้อมูลเหล่านี้ไปยังศูนย์การควบคุมกลางเพื่อควบคุมการทำงานต่อไป

ฟังก์ชันการทำงานหลักที่จำเป็นสำหรับเครื่องมือการควบคุมการทำงานมีดังนี้

การควบคุมแรงดันดิน/น้ำ ที่หน้าตัดดิน : ควบคุมอัตราการไหลเข้าและออกเพื่อให้มีความสมดุลระหว่าง แรงดันดิน/น้ำที่หน้าตัดดินและแรงดันใน Slurry ในห้องขุดดิน

การควบคุมคุณภาพของ Slurry : ปรับแก้และรักษาคุณภาพของ Slurry หลังจากทำการแยกทรายและอนุภาคดินออกจากกันเพื่อกลับมาทำงานเป็นวัฏจักรอีกครั้ง

การควบคุมวงจรการทำงานของ Slurry : ทำการติดตาม ตรวจวัด ควบคุมแรงดันน้ำในหัวขุดเจาะและปริมาณการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการบันทึกผลการขุดเจาะดิน : ติดตามการทำงานของหัวขุดเจาะที่ห้อง
ดำเนินการหรือห้องศูนย์กลางควบคุม และเก็บรวบรวมข้อมูล แสดงข้อมูล วิเคราะห์และบันทึกผลที่ได้

เครื่องมือดูแลรักษาตัว Slurry (Slurry Treatment Facilities)

เครื่องมือนี้จะสามารถแยกน้ำและดินจากการขนย้ายออกจาก Slurry และจะต้องมีความจุ
มากพอเพื่อที่จะรักษาอัตราการเร็วกับอัตราการขุดเจาะอุโมงค์

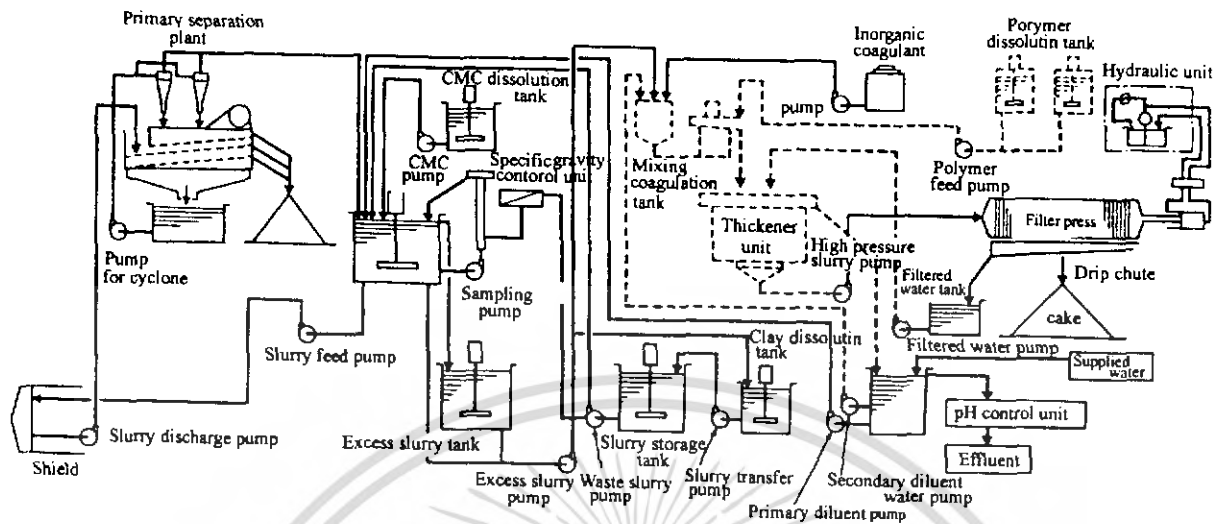
การขนย้ายดินโคลนใน Slurry ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายของไหลจะถูกแยกของแข็งกับน้ำออก
จากกัน เครื่องมือนี้จะทำการปรับแก้สภาพตัว Slurry เพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้งานได้อีกครั้ง

เครื่องมือดูแลรักษา Slurry นั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ เครื่องมือดูแลรักษาชั้นดิน ชั้นที่
สอง และชั้นที่สาม โดยทั่วไปการทำงานในชั้นดินจะให้ความสำคัญกับการแยกทรายในดินปนทราย และชั้น
ที่สองจะให้ความสำคัญกับการแยกดินเหนียวในชั้นดินปนดินเหนียว

(3) ชั้นดิน : เครื่องมือนี้จะทำการแยกทราย กรวด ดินเหนียว และดินตะกอนที่มีอนุภาค
ที่ใหญ่กว่า 75 ไมโครเมตร จาก Slurry ที่นำออกมาโดยใช้วิธีทางกายภาพในการแยก โดยทั่วไปแล้วจะใช้ทั้ง
วิธีการร่อนด้วยตะแกรงและการหมุนแบบเปียก (Wet-type cyclone)

(4) ชั้นที่สอง : สารปนเปื้อนส่วนเกินได้แก่ ตะกอนละเอียดที่มีอนุภาคเล็กกว่า 75
ไมโครเมตร ดินเหนียว และอนุภาคคอลลอยด์จะแยกได้ยาก ดังนั้นจะต้องเติมสารเร่งตกตะกอนลงใน Slurry
เพื่อให้จับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นจึงทำการลดน้ำโดยใช้บ่อตก และทำการกดอัดด้วยเครื่องทอ โดยทั่วไปจะ
ใช้ตัวกดอัดแบบกรอง

(5) ชั้นที่สาม : น้ำที่ได้จากชั้นตอนที่สองนั้นโดยปกติจะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูง
จะต้องใช้เครื่องมือปรับสภาพให้เป็นกลางและไถ่น้ำออกจากชั้นตอนที่สองและควบคุมความชื้น

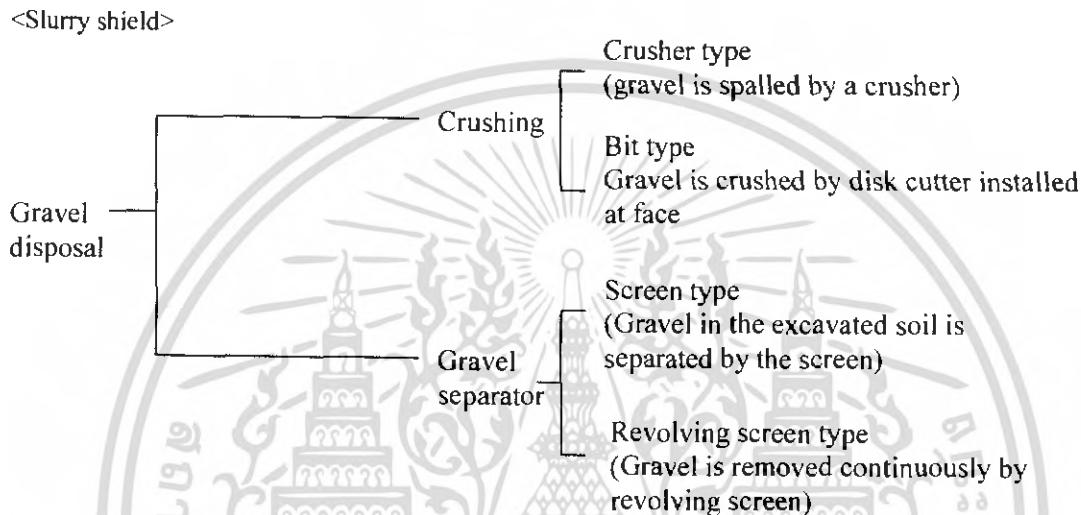
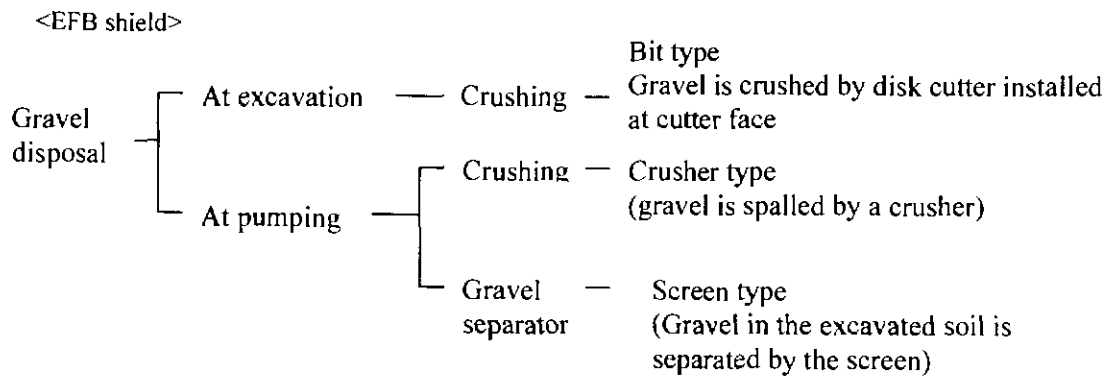


รูปที่ 4.104 ขั้นตอนการดูแลรักษา Slurry โดยใช้สารเร่งการตกตะกอนแบบโพลิเมอร์
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ขั้นตอนการแยกกรวดออก (Gravel Removal Facilities)

ขั้นตอนการแยกกรวดจะต้องสามารถแยกและทำการบดละเอียดได้อย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการแยกกรวดออกแสดงในรูปที่ 4.105 การเลือกวิธีที่ใช้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของกรวดหรือสถานที่ซึ่งสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้



รูปที่ 4.105 ขั้นตอนการแยกและคัดกรวดออก
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

4.2.2.7 การควบคุมการทำงานในภาคสนาม

การควบคุมตารางการทำงาน (Schedule Control)

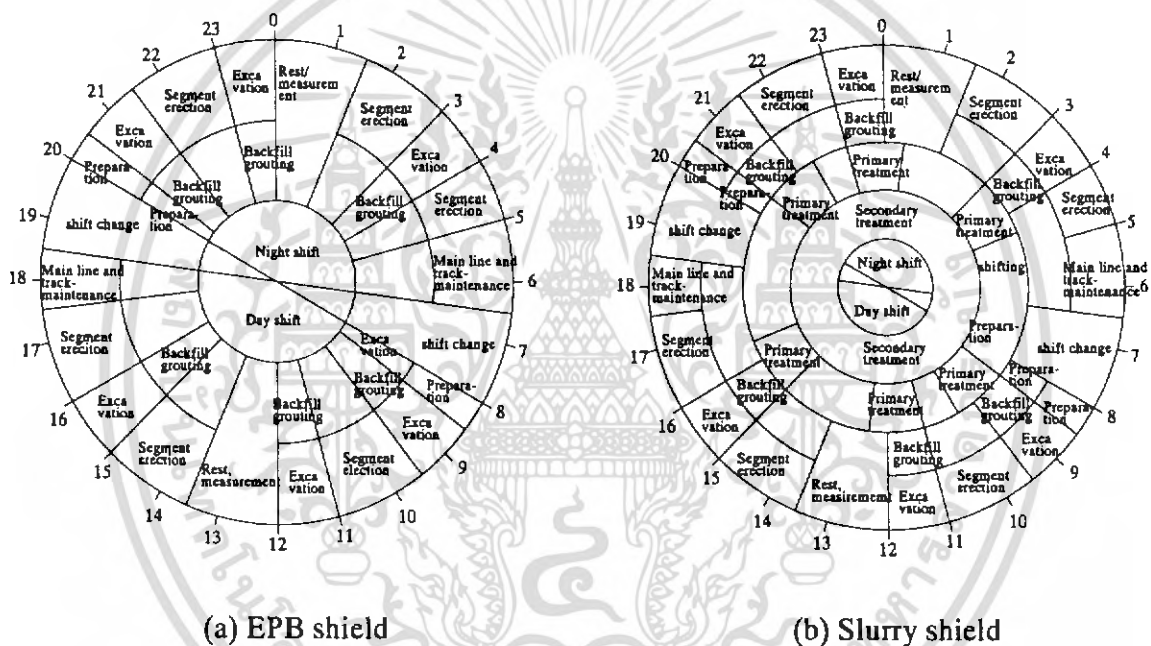
ขั้นตอนการทำงานจะต้องมีการติดตามผลอยู่เสมอ และต้องจัดการระบบการทำงานไม่ให้เบี่ยงเบนออกจากที่ได้วางแผนไว้ กำหนดการของการทำงานทั้งหมดจะต้องถูกควบคุมเพื่อให้โครงการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยปราศจากอุปสรรคใดๆ

(1) ทบทวนวงจรเวลา : การจัดทำวงจรเวลาของการทำงานใน 1 รอบจะต้องจัดทำขึ้นมาเนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญเพื่อใช้ในการทบทวนการทำงานตามตารางงาน เพราะสามารถเป็นตัวแทนในกำหนดการทำงานทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบวงจรเวลาซึ่งเป็นตัวที่จะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนให้เห็นถึงสภาพการทำงานที่แท้จริงได้ จะต้องนำขั้นตอนการทำงานจริงมาเปรียบเทียบกับตารางการทำงาน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าขั้นตอนนั้นเป็นไปตามกำหนดการเดิม นอกจากนี้ยังต้องตระหนักถึงการขนส่งวัสดุและดิน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาพการจราจรในเมือง สถานที่สำหรับการขนย้ายวัสดุและดิน) ความปลอดภัยในการทำงาน ชั่วโมงต้องห้ามในการทำงานเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆอาคารระบายอากาศ และสภาพทางเศรษฐกิจอื่นๆ ถ้าแผนการทำงานล่าช้ากว่ากำหนดเดิมหนึ่งช่วง จำเป็นต้องทำการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานใหม่ วงรอบเวลาตัวอย่างที่สร้างขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.106

(2) การเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้าง : เมื่อขั้นตอนการทำงานล่าช้ากว่ากำหนดการเดิม จะต้องมีการวิเคราะห์ถึงการทำงานเป็นพิเศษซึ่งจะส่งผลต่อกำหนดการทั้งหมดของโครงการ จากนั้นจึงพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4.106 ตัวอย่างรายละเอียดของวงรอบการทำงาน
(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)

ก่อนใช้วัสดุชิ้นหลักๆและผลิตภัณฑ์ต่างๆในอุโมงค์ จะต้องมีการทดสอบและ/หรือตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่าเป็นไปตามข้อกำหนดในส่วนของคุณภาพ รูปทรง มิติ กำลัง และอื่นๆ

วัสดุบางตัวที่เกิดการแตกหักเสียหายได้ง่าย จำเป็นต้องมีการดูแลการขนย้ายและการเก็บรักษาให้ดีเป็นพิเศษ

การทดสอบและการตรวจสอบ : หัวข้อต่อไปนี้คือวัสดุและผลิตภัณฑ์หลักๆที่จะต้องถูกทดสอบและตรวจสอบ

(1) ชั้นส่วนของผนัง

(2) หัวขุดเจาะ

(3) วัสดุที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน

- วัสดุ : เช่นซีเมนต์ มวลรวมละเอียด สารเคมีผสมเพิ่ม จะต้องถูกควบคุมให้เป็นไปตาม “มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีต (1996)” (Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures (1996))

- หัวข้อสำหรับการทดสอบและตรวจสอบ : กำลังรับแรงกดอัดของมอร์ตาร์จะต้องทดสอบโดย “Guideline for concrete compressive strength test) ของสมาพันธ์วิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย ญี่ปุ่น (Japan Society of Civil Engineering) ส่วนประกอบของมอร์ตาร์จะทำการทดสอบโดย “Guideline for consistency test of mortar injection for prepacked concrete) ของสมาพันธ์วิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย ญี่ปุ่น

(4) สารกักน้ำสำหรับการบ่มผนังชั้นแรก : การคัดเลือกสารกักน้ำที่ใช้ในการบ่มผนังชั้นแรกต้องเป็นไปตามข้อกำหนดและสภาพการทำงานที่มีคุณภาพ สารกักน้ำต้องผ่านการทดสอบความเหนียว ความยืดตัว กำลัง ความต้านทาน ความทนทานต่อสารเคมี และระยะเวลาการแข็งตัว

(5) คอนกรีตที่บ่มผนังชั้นที่สอง : จะต้องมีการควบคุมคุณภาพให้เป็นไปตาม “Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structure (1996)”

การจัดการการทำงาน (Management of work)

เมื่ออยู่ในขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ สภาพของหน้าดิน การเบี่ยงเบนจากแนวเส้นศูนย์กลาง การเสีรูปร่างและการแตกหักของชั้นส่วนของผนัง การรั่วซึมของน้ำ และการทรุดตัวของพื้นดินจะต้องมีการติดตามตรวจสอบตลอดเวลา และจะต้องควบคุมการทำงานให้เป็นไปตามขั้นตอน มีการสำรวจและตรวจวัดเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนด

ต้องมีการควบคุมการทำงานโดยใช้การสำรวจและการวัดซึ่งบ่งบอกถึงสภาพการทำงานที่เป็นจริง ผลการสำรวจ และการตรวจวัดจะต้องจดบันทึกเป็นบันทึกประจำวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) การควบคุมหน้าตัดดิน : การเปรียบเทียบสภาพหน้าตัดดินจริงกับการบันทึกการสำรวจก่อนการก่อสร้างเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำ ต้องลงรายละเอียดไว้ในการสำรวจด้วย จำเป็นมากโดยเฉพาะดินเหล่านี้

ก. ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพอย่างกะทันหัน มีจุดอ่อนตัวที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้และไม่เคยพบในโครงการก่อนหน้านี้เลย

ข. บริเวณที่มีแหล่งน้ำอยู่ข้างเคียงหรือตัดผ่าน

ค. ดินที่มีการหลวมตัวหรือมีระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงขึ้นขึ้นจากการรั่วซึมของน้ำในท่อ ท่อระบายน้ำหรือแอ่งน้ำ

ง. ดินที่มีชั้นหินที่บางมากจนไม่สามารถทำการสำรวจพบในทางธรณีวิทยาได้

ในกรณีของหัวเจาะชนิด Closed-face จะต้องมีการวัดค่าตามหัวข้อต่อไปนี้ด้วย

ก. แรงผลักดัน แรงหมุนบิดมีดตัดหน้าดิน แรงหมุนของสกรูลำเลียง และความเร็วของการขับเคลื่อน

ข. แรงดันในห้องขุดเจาะดิน แรงดันใน Slurry เป็นต้น

ค. ปริมาณดินที่ถูกขุดเจาะออกมา

(2) การควบคุมแรงผลักดัน การขุดเจาะ การก้ำขึ้น และดินที่ถูกขุดเจาะออกมา : การควบคุมแรงดัน และการควบคุมการขุดเจาะดิน การทำเสถียรภาพหน้าดิน และการขนย้ายดินออก

(3) การควบคุมการบุผนังชั้นแรก : คุณภาพของการบุผนังชั้นแรกจะส่งผลต่อการเสียรูป/การเปลี่ยนแปลงชั้นส่วนของผนัง น้ำหนักบรรทุกของดินที่ไม่สมมาตรที่กระทำต่อตัวอุโมงค์ การทรุดตัวของผิวดิน การรั่วซึมของน้ำ และการขับเคลื่อนอย่างถูกต้องได้ การคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการทำให้อย่างมั่นใจได้ว่าการติดตั้งผนังอุโมงค์นั้นได้รูปทรงกลมจริงๆ และขณะเดียวกันก็หลีกเลี่ยงความเสียหายและการหลุดร่วงของชั้นส่วนของผนังอุโมงค์ได้

(4) การควบคุมการอัดฉีดน้ำปูน : การอัดฉีดที่ไม่ดีสามารถส่งผลต่อตัวอุโมงค์ เช่น ทำให้น้ำหนักบรรทุกของดินที่กระทำแบบอสมมาตร มีการทรุดตัวของผิวดิน การรั่วซึมของน้ำตลอดการบุผนังอุโมงค์ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการเลือกวัสดุที่ใช้ในการอัดฉีด การออกแบบการผสมคอนกรีต (Mixing Design) แรงดันที่ใช้ในการอัดฉีด ปริมาณการอัดฉีดและวิธีการอัดฉีดอย่างรอบคอบ

(5) การควบคุมการบุผนังชั้นที่สอง : การบุผนังชั้นที่สองนั้นจะส่งผลกระทบต่อความทนทาน ความผิวน้ำและการดูแลรักษาอุโมงค์ในอนาคต ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาการออกแบบการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้ง วิธีการป้อนและระยะเวลาการออกแบบอย่างละเอียดถี่ถ้วน ความหนาที่ใช้ในการบุผนังและมิดีด้าน ในอุโมงค์จะต้องทำอย่างปลอดภัยตามแผนการก่อสร้างที่ได้วางไว้

4.2.2.8 การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ (Safety and Health Administration)

ในการก่อสร้างจะต้องมีการป้องกันอุบัติเหตุ มีการปฏิบัติงานด้วยความปลอดภัยและข้อห้ามต่างๆ ด้วยการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ

1) รหัสและข้อความที่เกี่ยวข้อง : จาก The Industrial Safety and Health Law และองค์กรที่เกี่ยวข้องกับด้านกฎหมายความปลอดภัยและสุขภาพของแรงงาน และจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่ดี นอกจากนี้ยังมีแนวทางด้านความปลอดภัยมากมายที่ถูกจัดตั้งขึ้นมา ซึ่งจะต้องทาการจดบันทึกสิ่งเหล่านี้ ทั้งข้อกำหนด และแนวทางสำหรับความปลอดภัยในโครงการก่อสร้าง

2) แผนการรายงานการก่อสร้าง : แผนการก่อสร้างบางแผน การติดตั้ง และกำหนดการ ขั้นตอนการทำงานจะต้องทำการรายงานต่อสำนักงานการตรวจสอบมาตรฐานแรงงาน (Labor Standard Inspection Office) ภายใต้การดูแลของกฎหมายความปลอดภัยและสุขภาพด้านอุตสาหกรรม (Industrial Safety and Health Law)

3) การบริหารจัดการความปลอดภัย : การจัดการที่ดีไม่เพียงแต่ออกกฎข้อห้ามเพื่อความปลอดภัยเท่านั้น แต่ยังควรส่งเสริมการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุให้มากขึ้น โดยจัดให้มีสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ดีและสร้างความปลอดภัยในการทำงานและสุขภาพให้กับคนงานด้วย

4) การอบรมด้านความปลอดภัยและข้อห้ามในการทำงาน : เนื่องจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น มีสาเหตุมาจากการบริหารจัดการด้านการก่อสร้างที่ไม่ดี ทำให้คนงานขาดความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ และการดูแลรักษาที่ไม่ดีพอ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการอบรมด้านความปลอดภัยขึ้นในกรณีที่มีการจ้างงานเข้ามาใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งงาน และเมื่อคนงานจะต้องทำงานในพื้นที่ที่อันตราย

5) การตรวจสอบด้านความปลอดภัย : เนื่องจากการตรวจสอบความปลอดภัยในแต่ละหัวข้อนั้นจะแตกต่างกันไปตามสภาพของงาน วิธีการทำงาน เครื่องมือที่ใช้ และขั้นตอนการทำงาน จึงต้องจัดตั้งกฎข้อบังคับให้เหมาะสมกับแต่ละสภาพของงาน จัดตั้งการตรวจสอบสำหรับงานแต่ละประเภท บัญชีที่ตรวจสอบ (Inspection List) จะต้องถูกจัดทำขึ้นและบันทึกผลการตรวจสอบลงไป ต้องจัดทำกฎระเบียบในการตรวจวัดและบันทึกผลของปริมาณออกซิเจนที่มีในอากาศและปริมาณก๊าซไวไฟด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงาน (Providing Good Working Environment)

ต้องปฏิบัติตามขั้นตอนที่กฎระเบียบต่างๆเพื่อรักษาความปลอดภัยและสุขอนามัยที่ดีในสภาพแวดล้อมในการก่อสร้าง

สภาพแวดล้อมในการทำงานที่ดีจะต้องดำเนินการให้มีทั้งในการขุดเจาะอุโมงค์ที่อยู่ใต้ดินและบนพื้นดิน เพื่อให้มีความปลอดภัยและถูกสุขอนามัย ต้องมีระบบระบายอากาศ แสงสว่าง ทางเดิน ที่เพียงพอ และกำจัดสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายในอุโมงค์ให้หมดไป ข้อกำหนดเหล่านี้ต้องมีอย่างนี้เพื่อให้เป็นไปตามแผนการที่วางไว้

การระบายอากาศ : การระบายอากาศเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงไม่ได้ในการรักษาความปลอดภัยและสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงานในอุโมงค์ ดังนั้นในการวางแผนวิธีการระบายอากาศ และเครื่องมือที่ใช้ นั้นจะต้องพิจารณาถึงสภาพทางธรณีวิทยา ขนาดของหัวเจาะ วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ และกำหนดการก่อสร้าง ถ้าเป็นไปได้ที่จะมีก๊าซไว้ออกซิเจนหรือก๊าซที่เป็นอันตรายอยู่ยังต้องมีระบบอากาศที่ดีพอ จะต้องจัดให้ระบบระบายอากาศมีสมรรถนะที่เพียงพอสำหรับกรณีที่เกิดเหตุที่ไม่คาดคิดด้วย (โดยปกติแล้วคนงานจะใช้อากาศบริสุทธิ์ในการหายใจ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที) เมื่อมีก๊าซไว้ออกซิเจนหรือก๊าซอันตรายอยู่ จะต้องจัดให้มีก๊าซออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่มากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีก๊าซไวไฟและก๊าซพิษอยู่ ค่าออกซิเจนจะต้องน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ ชีตเริ่มต้นของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟตามข้อบังคับของรัฐบาล แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งคำนวณไว้แล้วไม่ว่าจะอยู่ในอันตรายหรือไม่ก็ตาม ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายใต้การทำงาน จำเป็นต้องทำการตรวจวัดและรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 37 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 รายชื่อของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟ

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

King of gas	Characteristics of gases ¹⁾			Forecasted trouble and dangers	Legal limit ³⁾	Threshold value ACGIH ⁴⁾
	Specific gravity ²⁾	Color,smell, Etc.	Explosion limit (%in volume)			
Carbon monoxide (CO)	1.0	Colorless, no smell	12.5/74	Toxication, Explosion	100 ppm	25 ppm
Carbon dioxide (NO ₂)	1.5		-	Toxication	-	3 ppm
Carbonic acid gas (H ₂ S)	1.5	Colorless, no smell	-	Hyoixia and anoxia	1.5 %	5000 ppm
Hydrogen sulfide (CO ₂)	1.2	Colorless, Rotten egg smell	4.3/45	Toxication, Explosion	10 ppm	10 ppm
Sulfurous acid gas (SO ₂)	2.3	Colorless, Sulfur smell	-	Toxication	-	2 ppm
Oxygen (O ₂)	1.1	Colorless, no smell	-	Hyoixia and anoxia	18 %	-
Methane (CH ₄)	0.6	Colorless, no smell	5.3/14	Explosion	1.5 % ⁵⁾	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note:

- 1) The symptoms in the human body vary with the concentration, elapsed exposed time. Please refer to the related literatures, including the Modern Labor Hygiene Handbook 1988, Institute of Labor Science
- 2) Specific gravity: the specific gravity of gas shown is compared with same condition under the normal condition (0 deg.C, 1 atmosphere)
- 3) The limit values given here are those provided in Ordinance on Industrial Safety and health, Ordinance on Prevention of Anoxia, etc., and Notification of the Ministry of Labor. If the air in the tunnel is below these limits, working should be prohibited.
- 4) AGGIH; these values are provided according to American Conference of Governmental Industrial Hygienists for use in health management a), but can be used only as a reference, not as a criterion for toxicity, and b), It is recognized that most of the workers would not be affected when the concentration is under these values even if they work in several consecutive days in the tunnel.
- 5) Methane gas does not explode if its concentration is within 5.3 to 14.0 % or less, according to the Ordinance on Industrial Safety and Health, the concentration of combustible gas is specified to be "less than 30 % of their explosion lower limit", their concentration to be respected is determined to be 1.5 % as a provisional level for the moment.

แสงสว่าง : จะต้องจัดให้มีแสงสว่างในที่ทำงานและทางเดินเพื่อป้องกันอุบัติเหตุและเพื่อรักษาสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงาน จะต้องจัดแสงสว่างที่เพียงพอที่หน้างาน ตัวติดตั้งผนังอุโมงค์ ส่วนที่ทำงานกับเครื่องจักรต่างๆ บริเวณที่ทำการถนบกกลับและบริเวณสายพานลำเลียง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้มีแสงสว่างอย่างน้อยที่สุด 70 ลักซ์

บางครั้งเป็นการยากที่จะติดตั้งไฟส่องสว่างให้ต่อเนื่องตลอดทั้งทางเดิน แต่ในส่วนที่มีมืดที่สุดก็ต้องมีแสงสว่างไม่น้อยกว่า 20 ลักซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่แต่ละส่วนของอุโมงค์ แต่โดยทั่วไปจะใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 วัตต์ ทุกๆ 5-8 เมตรภายในอุโมงค์

การระบายน้ำ : จะต้องเตรียมการให้มีการระบายน้ำอย่างเพียงพอ เพื่อไม่ให้เป็นสาเหตุในการรบกวนการขุดเจาะอุโมงค์ จะต้องมีการจัดเตรียมระบบระบายน้ำฉุกเฉินและมาตรการสำรองในกรณีที่มีการไหลบ่าของน้ำเข้ามาโดยไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า ทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ

ทางเดิน : จะต้องมีการจัดระเบียบความปลอดภัยสำหรับทางเดินเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากการจราจร ทางเดินจะต้องมีความกว้างที่มากพอ เพื่อที่ไม่ให้คนงานต้องสัมผัสโดนกับพาหนะที่เคลื่อนที่เข้า-ออก ต้องมีพื้นผิวที่เรียบและมีแสงสว่างเพียงพอ

อุปกรณ์ป้องกันอันตราย : จะต้องให้หมวกนิรภัย อุปกรณ์ช่วยหายใจ หน้ากาก ที่อุดหูเพื่อลดเสียง แว่นตานิรภัย ถุงมือป้องกันการสัมผัสความร้อน ชุดเปือก และอุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น จะต้องบังคับให้คนงานใส่อุปกรณ์เหล่านี้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแรงดันที่ใช้แรงดันลม (Pneumatic Pressure Control)

เมื่อเลือกใช้วิธีอัดอากาศ สภาพการทำงานจะเสี่ยงอันตรายและมีหลายสิ่งที่ต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยและสุขภาพที่ดีด้วย เช่น การใช้อุปกรณ์ในการอัดอากาศ สุขภาพของพนักงานในสภาวะมีแรงดันและสภาวะปกติ การป้องกันอัคคีภัย จะต้องนำความปลอดภัยและสุขภาพที่ดีในการทำงานภายใต้แรงดันสูงมาใช้ นอกจากนี้แล้วยังมีกฎข้ออื่นๆอีก

(1) ในปกติทั่วไป : จะต้องมีการควบคุมดูแลจำนวนคนที่อยู่ในอุโมงค์โดยจัดทำป้ายชื่อหรือใช้การตรวจโดยการขานชื่อ และห้ามนำวัตถุไวไฟทุกชนิดเข้าไปในอุโมงค์ ยิ่งไปกว่านั้นยังห้ามถือวัสดุใดๆที่เป็นเชื้อเพลิงเข้าไปในอุโมงค์

(2) อุปกรณ์อัดอากาศ : ต้องใช้อุปกรณ์ที่เชื่อถือได้ในการอัดอากาศ จะต้องมีการล้างสารกรองไว้ในกรณีที่อุปกรณ์ใช้มีกำลังตกลง

(3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการและการดูแลรักษาการกดอัดอากาศ : จะต้องมีการแจ้งให้คนงานทราบถึงการสื่อสารและสัญญาณที่ใช้สำหรับเครื่องมือในการอัดอากาศ การดำเนินการกดอัดอากาศต้องเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ และการอัดอากาศจะต้องดำเนินการด้วยกลุ่มคนเพียงกลุ่มเดียวเท่านั้น

อุบัติเหตุและอุบัติภัย (Accident and Disasters)

จะต้องมีการป้องกันอุบัติภัยที่จะเกิดขึ้นในอุโมงค์ จะต้องมีการป้องกันอุบัติเหตุและอุบัติภัยที่มีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ไม่เหมาะสม สภาพการทำงานและวิธีการทำงานที่แปลกประหลาดในอุโมงค์

(1) การป้องกันอัคคีภัย : การพิจารณาถึงอัคคีภัยในอุโมงค์ในบางกรณีก็ยากที่จะแยกแยะสาเหตุการเกิดได้อย่างแน่ชัด จึงจำเป็นที่จะต้องจัดให้มีมาตรการสำหรับการป้องกันอัคคีภัยขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวิธีการอัดอากาศ ซึ่งจะต้องให้ความใส่ใจกับคนงานที่ทำงานในที่ที่อากาศไม่มีการถ่ายเท ต้องจัดให้มีอุณหภูมิที่ติดไฟได้อยู่ในระดับต่ำ ต้องใส่ใจกับความเร็วในการลุกลามของเพลิงไหม้และการดับเพลิงภายใต้สภาวะมีแรงดัน

ตามกฎหมายด้านอัคคีภัยได้ระบุอย่างชัดเจนว่าน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงชั้นดี ถ้ามีน้ำมันดิบจำนวนหนึ่งอยู่ในอุโมงค์น้อยกว่าที่กฎหมายกำหนดก็จะใช้กฎหมายเทศบาลในการควบคุมปริมาณการมีวัตถุไวไฟที่น้อยที่สุด สำหรับกรณีที่มีจำนวนที่มากกว่านั้นก็จะใช้กฎหมายอัคคีภัยในการควบคุมปริมาณการมีวัตถุไวไฟ วิธีที่ดีที่สุดในการป้องกันอัคคีภัยคือ การลดปริมาณวัตถุไวไฟที่มีในอุโมงค์ที่จะเป็นไปได้ ลดการใช้ไฟในอุโมงค์ให้น้อยลง และจัดตั้งหน่วยงานด้านป้องกันอัคคีภัยขึ้นมาเพื่อรับผิดชอบด้านนี้โดยเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องจัดการแหล่งกำเนิดอัคคีภัยและวัตถุไวไฟ ต้องมีเครื่องมือสำหรับดับเพลิงติดตั้งไว้ และต้องมีมาตรการในการดับเพลิงด้วย

(2) การป้องกันอุบัติเหตุจากการระเบิดของก๊าซ : การทำการขุดเจาะดินในบริเวณที่ได้ระบุด้านล่างนี้ ซึ่งเสี่ยงต่อการระเบิดของก๊าซและการเผาไหม้ในอุโมงค์ได้ เนื่องจากก๊าซที่ติดไฟได้ เช่น ก๊าซมีเทน จะพุ่งตัวออกมาจากดินและแยกตัวออกมาจากน้ำในอุโมงค์

ก. หนองน้ำและแอ่งน้ำหรืออ่าวที่มีมลพิษสูงแล้วถูกถมด้วยสลัดจ์ (Sludge) ขึ้นมาจนใช้ได้ใหม่

ข. พื้นที่ที่มีผลผลิตของก๊าซมีเทนอยู่

ค. ชั้นดินที่มีอิฐมวลอยู่มาก

จากการพิจารณาชั้นดินในหัวข้อข้างบนแล้วจะเห็นว่ามีความจำเป็นในการสำรวจพื้นที่ที่ต้องการขุดเจาะ และยังต้องทำการสำรวจสภาพแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียง การสำรวจทางธรณีวิทยาและทางศาสตร์จะต้องมีการสำรวจก่อนอย่างเพียงพอก่อนที่จะมีการขุดเจาะ ในพื้นที่ที่น่าจะมีก๊าซไวไฟอยู่ ควรจะกระทำการตรวจสอบด้วยการเจาะหลุมสำรวจ ควรจะมีการปรับปรุงดิน พิจารณานิคมของหัวเจาะที่ใช้เลือกใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการระเบิดจากก๊าซได้

ในกรณีที่มีก๊าซไวไฟอยู่ก็ควรจะมีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ โดยจะต้องทำการศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในการระบายอากาศ วิธีการระบายอากาศ ประสิทธิภาพของการระบายอากาศอย่างรอบคอบ

(3) การป้องกันก๊าซไร้ออกซิเจน และก๊าซพิษ : ในพื้นที่ที่ถูกปิดกั้นจากสภาวะภายนอกหรือในที่ที่มีการระบายอากาศที่ไม่ดีจะทำให้เกิดปัญหากับก๊าซไร้ออกซิเจนและก๊าซพิษได้ เนื่องจากมีการใช้ออกซิเจนในอากาศไปจนหมดมีการรั่วของก๊าซ (มีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น) ไหลไปตามอากาศที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ ดังนั้นในกรณีทำงานโดยใช้หัวเจาะจำเป็นต้องมีการเจาะหลุมสำรวจก่อนในบริเวณที่จะทำการขุดเจาะและในพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อให้ทราบข้อมูลของก๊าซพิษและก๊าซไร้ออกซิเจนไว้ล่วงหน้า

ก๊าซไร้ออกซิเจนที่อาจเกิดในอุโมงค์ในกรณีทำการขุดเจาะในชั้นดินต่อไปนี้

ชั้นทรายหรือกรวดที่ไม่มีหรือมีน้ำใต้ดินเพียงเล็กน้อยในชั้นดินที่ถูกชั้นที่น้ำประกอบอยู่

ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของสารที่สามารถถูกกริดิวได้ เช่นเกลือของเหล็กและเกลือของ

แมงกานีส

ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน อีเทน เป็นต้น

ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของอิฐมวล และสารประกอบอินทรีย์อยู่

ชั้นดินที่มี หรือนำจะมีน้ำพุที่มีกรดคาร์บอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นดินที่มีจุดสแตกเนชัน (Stagnation) ที่มีองค์ประกอบของก๊าซไร้ออกซิเจนอยู่อย่างหนาแน่น

พื้นที่ที่มีการใช้การอัดอากาศอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียง

จะต้องมีการสำรวจทางธรณีวิทยาอย่างเพียงพอหรือให้พนักงานก่อสร้างอื่นที่ทำการเสร็จเรียบร้อยแล้วหรืออยู่ในระหว่างการก่อสร้างจะต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีพอเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่มาจากก๊าซไร้ออกซิเจนได้ และเพื่อให้ภายในอุโมงค์ที่มีก๊าซออกซิเจนอย่างเพียงพอ และจะทำให้ปริมาณก๊าซพิษเจือจางลงได้

จะต้องมีการจัดบันทึกการตรวจวัดก๊าซออกซิเจน และก๊าซพิษในอากาศตามสภาพที่สัมพันธ์กันตามข้อกำหนดของ Prevention of Anoxia เป็นต้น

(4) การป้องกันปัญหาที่เกิดจากแรงดันสูง : เมื่อทำงานภายใต้สภาวะมีแรงดันอยู่ คนงานจะเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยที่เกี่ยวกับ Dysbarism ได้ อาจจะเป็นไซนัส และป่วยจากก๊าซไนโตรเจนเป็นต้น จึงต้องป้องกันปัญหาสุขภาพจากการทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดัน โดยจัดการเชิงบังคับเวลาการทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดัน มีการปรับสภาพในห้องความดันก่อน มีการลดปริมาณก๊าซทุกครั้งที่ทำงานเสร็จ ใช้วิธีการทางการแพทย์ที่เหมาะสม คนงานที่จะต้องทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดันจะต้องมีการตรวจสุขภาพ และต้องผ่านการทดสอบซึ่งจะทำทุกๆหกเดือน

(5) การป้องกันอันตรายจากการยก การขนย้าย และบนราง : เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องป้องกันคนงานจากอุบัติเหตุในการขนย้ายวัสดุหรือดินในอาคารระบายอากาศ และในพนักงานก่อสร้าง เพื่อให้บรรลุเป้าหมายนี้ จะต้องมีการป้องกันเป็นขั้นตอน รวมทั้งการป้องกันการสัมผัสและการใช้อุปกรณ์ป้องกันการตก ราง โดยพิจารณาถึงความปลอดภัยในขั้นตอนการติดตั้ง และการจัดลำดับของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องด้วย

การช่วยชีวิตและเหตุฉุกเฉิน (Emergency and Rescuing Action)

จำเป็นต้องมีมาตรการเหล่านี้โดยการจัดตั้งหน่วยงานสำหรับกรณีฉุกเฉินหรืออุบัติเหตุที่เกิดขึ้น

จะต้องจัดให้มีอุปกรณ์ที่จำเป็นในกรณีที่มีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้น เช่น เครื่องมือสื่อสาร และจะต้องมีตำรวจและเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งานตลอดเวลา ต้องมีระบบสื่อสารระหว่างภายในและภายนอกอุโมงค์ และต้องจัดตั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องขึ้นมาด้วย

(1) เครื่องมือสื่อสาร : ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับสัญญาณเตือนภัย อุปกรณ์สำหรับการประกาศทั้งในและนอกสถานที่ก่อสร้าง โดยต้องจัดลำดับการเตรียมพร้อมเอาไว้ และต้องมีการดูแลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รักษาอยู่ตลอด ควรจะจัดให้มีเครื่องมือสื่อสารแบบไร้สายไว้นอกเหนือจากเครื่องมือสื่อสารระบบธรรมดา
ทั่วไปแล้ว

(2) อุปกรณ์ในการอพยพคนและเครื่องป้องกัน : เครื่องช่วยหายใจ เช่น เครื่องช่วยหายใจ
แบบอากาศและออกซิเจน อุปกรณ์ช่วยอพยพคน เช่น ไฟนำทางแบบพับเก็บได้ จะต้องจัดให้มีไว้ในพื้นที่ที่
สำคัญๆ เส้นทางอพยพจะต้องมั่นใจได้ว่าคนงานทุกคนได้รับแจ้ง และทราบว่ายู่ตรงจุดไหน

(3) การปฐมพยาบาลเบื้องต้น : ในกรณีที่คนงานได้รับบาดเจ็บและป่วยในระหว่างการ
ทำงานจะต้องได้รับการปฐมพยาบาลขั้นต้น และจัดให้อยู่ในพื้นที่ที่โล่งมีอากาศถ่ายเทได้สะดวก

(4) วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในกรณีฉุกเฉิน : เมื่อการขุดเจาะอุโมงค์ถูกพักเป็นเวลานาน
ในกรณีของเครื่องขุดเจาะแบบ Open-faced type จะต้องจัดให้มีมาตรการเตรียมการไว้ให้มีวัสดุเพียงพอใน
การอุดช่องว่างในดินสำหรับหน้าดินที่ทำการขุดเปิดทั้งหมด

(5) เครื่องมือทางการแพทย์ในกรณีฉุกเฉิน : ตามที่พระราชบัญญัติความปลอดภัยและ
สุขภาพในการทำงานภายในแรงดันสูง จะต้องมีการทางการแพทย์ไว้รองรับเมื่อคนงานทำงานในที่ที่มี
แรงดัน 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หรือมากกว่านี้ และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ใช้ในกรณีฉุกเฉินด้วย

4.2.2.9 มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม

มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อมทั่วไป

จะต้องดำเนินการจัดทำมาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อมในที่ทำการขุดเจาะ
อุโมงค์ จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาลักษณะที่จำเป็นและปฏิบัติเพื่อลดปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อ
สิ่งแวดล้อม

(1) สืบหาสาเหตุที่สำคัญก่อนการทำงาน : หัวข้อดังต่อไปนี้ถ้าจำเป็นก็ควรทำการสืบหา
ตรวจสอบ เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบๆ

สำรวจระบบสาธารณูปโภคและอาคารที่จะต้องใส่ใจเป็นพิเศษที่อาจได้รับผลกระทบจาก
การสั่นสะเทือน และเสียงรบกวน เช่น โรงเรียน ศูนย์เลี้ยงเด็ก โรงพยาบาล/คลินิก ห้องสมุด บ้านพักคนชรา
อาคารที่พักอาศัยของทางราชการ และการเสีรูป การทรุดตัวของโครงสร้างถนน สะพานและตอม่อ เป็นต้น

สำรวจสภาพแวดล้อมการใช้ชีวิตของประชาชนในเขตที่อยู่อาศัย

สำรวจความสั่นสะเทือนและเสียงที่มีอยู่เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำรวจการใช้ประโยชน์จากน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียง

(2) กฎหมายและข้อห้ามที่เกี่ยวข้อง : กฎหมายและข้อห้ามที่เกี่ยวกับมลพิษตาม “Basic Law for Environmental Pollution Control” ซึ่งจะควบคุมคุณภาพของน้ำ มลพิษทางอากาศ มลพิษทางดิน การสิ้นสละเทือน การทรุดตัวของดิน เป็นต้น และตามเทศบาลต่างๆก็มีกฎระเบียบของแต่ละท้องถิ่นที่สอดคล้องกับพระราชบัญญัติในข้างต้น นอกจากนี้ยังมีกฎข้อห้ามอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการรักษาสิ่งแวดล้อม มาตรการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการจราจรคือ “Outline of Measure for Prevention of Public Disaster due to Construction(1993)” ที่อ้างอิงถึง

(3) มาตรการหลักสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม

ก. ในการวางแผนด้านเทคนิคนั้น ผู้วางแผนจะต้องเลือกใช้วิธีการทำงานที่เหมาะสมที่สุด โดยเครื่องมือการก่อสร้างและวิธีการที่ใช้จะต้องคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมไว้ล่วงหน้า และยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น คุณภาพในการทำงาน ต้นทุนในการทำงาน ระยะเวลาในการทำงานและความปลอดภัย

ข. เมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์จะต้องดำเนินไปตามเส้นทางของถนนและสิ่งสำคัญก็คือต้องใส่ใจกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อที่อยู่อาศัย ในกรณีนี้ควรจะมีการประชุมก่อนการทำการก่อสร้าง เป็นต้น เพื่อให้การทำงานสามารถดำเนินไปได้ด้วยความเข้าใจและช่วยเหลือซึ่งกันและกันของผู้อยู่อาศัย

การควบคุมด้านเสียง (Noise Control)

สำหรับการป้องกันมลภาวะทางเสียง จำเป็นที่จะต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามข้อห้ามและกฎหมาย และปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลของการสำรวจที่ได้มา

เนื่องจากแหล่งกำเนิดเสียงจากการก่อสร้างอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของผู้คนได้ จึงจะเป็นที่จำเป็นที่จะสืบหาพื้นฐานของเสียงเดิม และสภาพสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบๆ ในขั้นตอนการวางแผน จากข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการทำงาน อุปกรณ์การก่อสร้างที่ก่อให้เกิดเสียงน้อยและมีมาตรการ การป้องกันเพื่อความเข้าใจของผู้ที่อยู่อาศัย จึงจำเป็นต้องให้ความสนใจกับระบบการจัดการหน้างานก่อสร้าง

(1) ข้อห้ามและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ก. กฎหมายข้อห้ามทางด้านเสียง ควบคุมเสียงตามประเภทของงานอย่างเด่นชัด เช่นการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. กฎข้อบังคับ มีแหล่งกำเนิดเสียงบางที่ ที่ต้องปฏิบัติตามข้อบังคับของเขตเทศบาล การก่อสร้างแบบพิเศษจะยึดปฏิบัติตามกฎหมายข้อกำหนดด้านเสียง

(2) การสำรวจและสืบสวนขั้นต้น

ก. ทำการสำรวจหัวข้อเหล่านี้

- ศูนย์รวมของบ้านพักอาศัยและระบบสาธารณูปโภค ซึ่งอยู่รอบบริเวณอาคารระบายอากาศและตลอดแนวเส้นทางอุโมงค์
- ระยะทางระหว่างบ้านพักอาศัยกับแหล่งกำเนิดเสียง และอาณาเขตของที่อยู่อาศัย
- เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ที่ก่อให้เกิดเสียงจะต้องมีการตรวจวัดระดับของเสียงที่มีอยู่ และตัวอย่างการป้องกันเสียง

ข. การสำรวจผลกระทบ จากผลการสำรวจที่ได้ จะต้องคาดการณ์ไว้ล่วงหน้าอย่างเหมาะสมว่าแหล่งกำเนิดเสียงจะส่งผลกระทบที่เป็นไปได้อย่างไรบ้าง ในการคำนวณเพื่อคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะต้องคำนวณความเข้มของเสียง โดยคำนึงถึงการอ่อนกำลังลงของเสียงตามระยะทาง แหล่งกำเนิดเสียง ความเข้มของเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน การสะท้อนของเสียง เป็นต้น

(3) มาตรการป้องกัน

ก. เลือกใช้วิธีการทำงานและเครื่องมือในการก่อสร้างที่ลดเสียง ใช้ตัวป้องกันเสียงและตัวครอบป้องกันเสียงกับเครื่องจักร การติดตั้งตัวหุ้มกันเสียง

ข. ใช้อุปกรณ์ และเครื่องจักรอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เสียงดังจนเกินไป

ค. ทบทวนการกระจายตัวของเสียง

ง. ติดตั้งอุปกรณ์กำจัดเสียง

ในที่ที่มีความถี่ของเสียงต่ำจากการสั่นสะเทือน แนะนำให้ทำการป้องกัน เช่น ใช้การสั่นสะเทือนเข้าหักล้าง หรือ เปลี่ยนความถี่ของการสั่นสะเทือน

การควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration Control)

เพื่อป้องกันการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากสถานที่ก่อสร้างจำเป็นต้องกระทำอย่างเหมาะสมให้สอดคล้องกับการสำรวจในขั้นต้น และให้อยู่ภายใต้กฎข้อบังคับทางด้านกฎหมายสำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือน

เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่มาจากการทำงานนั้นไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์เท่านั้นแต่ยังส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของบ้านที่อยู่อาศัยและสาธารณูปโภค (ความเสียหาย) ซึ่งสิ่งนี้สามารถควบคุมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) แหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนหลัก แหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในกรณีของการขุดเจาะอุโมงค์ก็เกือบจะเหมือนกับในกรณีของเสียงแล้ว จะทำการพิจารณาถึงการสั่นสะเทือนของหัวขุดเจาะอุโมงค์ชนิด Slurry โดยเฉพาะการขุดเจาะในที่ตื้นจะต้องให้ความใส่ใจมากเนื่องจากจะเป็นตัวกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจากการขุดเจาะดินได้

(2) ข้อกำหนดและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ก. กฎหมายข้อห้ามสำหรับการสั่นสะเทือน ซึ่งจะควบคุมการสั่นสะเทือนจากประเภทของงานเช่นการก่อสร้างแบบพิเศษ

ข. กฎข้อบังคับของเทศบาล ในบางแห่ง แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนจะถูกควบคุมโดยกฎหมายของเทศบาลนอกเหนือจากการทำการก่อสร้างแบบพิเศษ

(3) การสำรวจในขั้นต้น จะต้องทำการสำรวจในเบื้องต้นในเรื่องของการสั่นสะเทือน คล้ายกับวิธีของเสียง แต่ความเข้มของการสั่นสะเทือนจะแตกต่างกันตามระยะทางและสภาพทางธรณีวิทยา

(4) การป้องกัน สำหรับแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนมีวิธีการป้องกันตามหัวข้อต่อไปนี้ ซึ่งจะรวมถึงการเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานเพื่อให้สอดคล้องกับวิถีชีวิตประจำวันของมนุษย์ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

ก. เลือกใช้วิธีการทำงานหรือเครื่องจักรที่ลดการสั่นสะเทือน หรือเลือกใช้ทั้งสองอย่างในเวลาเดียวกัน

ข. คิดตั้งลูกยาง สปริงแรงดันลม เป็นต้น เพื่อเป็นฉนวนลดแรงสั่นสะเทือน

ค. เลือกสถานที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องจักร

สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมอ้างอิงที่ “Technical Guideline Concerning Noise and vibration Prevention due to Construction (1987)”, โดยการก่อสร้าง

การป้องกันมลพิษทางน้ำ (Prevention of water Pollution)

เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำที่มาจากการทำงานก่อสร้าง จะต้องมีการการดูแลควบคุมให้เป็นไปตามกฎหมายและข้อบังคับเพื่อที่จะป้องกันมลพิษที่จะเกิดกับน้ำในสาธารณะ

(1) กฎข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง กฎข้อบังคับที่เกี่ยวกับมลพิษทางน้ำมีดังนี้

ก. กฎหมายเกี่ยวกับมลพิษทางน้ำ ซึ่งจะกำหนดมาตรฐานของน้ำที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำสาธารณะ จากโรงงานหรือการดำเนินการใดๆที่มีรายชื่อกำหนดอยู่ในข้อกฎหมาย

ข. กฎหมายเกี่ยวกับท่อระบายน้ำทิ้ง ซึ่งจะควบคุมมลพิษในน้ำทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. กฎหมายน้ำในแม่น้ำ ซึ่งจะกำหนดมลพิษของน้ำที่จะปล่อยลงสู่แม่น้ำ (50 m³/วัน หรือมากกว่านั้น)

ง. กฎหมายปกป้องแหล่งประมง ซึ่งจะควบคุมงานก่อสร้างเป็นต้นในเขตที่อยู่ภายใต้กฎหมายการปกป้องแหล่งประมง

จ. กฎหมายอุทยานแห่งชาติ จะควบคุมด้านมลพิษมีทั้ง พระราชบัญญัติควบคุมน้ำทิ้ง พระราชบัญญัติควบคุมน้ำทิ้ง พระราชบัญญัติการจัดการขยะมูลฝอย และพระราชบัญญัติดูแลแหล่งประมงในปัจจุบัน ดังนั้นการระบายน้ำทิ้งจึงถูกควบคุมโดยพระราชบัญญัติ

ฉ. แนวทางสำหรับการก่อสร้างโดยใช้สารเคมีในการเกร้าท์ขึ้นดิน ซึ่งจะกำหนดถึงการเลือกใช้ การออกแบบ และวิธีการดำเนินการเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดกับสุขภาพของมนุษย์ และมลพิษในน้ำใต้ดิน เนื่องจากการใช้สารเคมีในการเกร้าท์

(2) มาตรการการป้องกัน ก่อนที่จะเริ่มทำการก่อสร้างจะต้องมีการตรวจสอบกฎข้อห้ามและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบที่จะได้รับจากมลพิษทางน้ำ เพื่อที่จะทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่ลำน้ำสาธารณะ ปริมาณและคุณภาพของน้ำทิ้ง จะถูกตรวจวัดและทำเป็นรายงานเพื่อรายงานต่อองค์กรที่ดูแลด้านนี้

ก. หัวข้อในการสำรวจ

- ระบบ, ปริมาณน้ำ ปริมาณและคุณภาพและสถานภาพการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำที่จะทำการปล่อยน้ำทิ้งลงไป

- ข้อห้ามและกฎหมาย เช่นมาตรฐานน้ำทิ้ง กระบวนการและขั้นตอนการรายงานเป็นต้น

- คุณภาพ, ปริมาณเป็นต้น ของมลพิษทางน้ำ หรือน้ำทิ้งที่ใช้ในกระบวนการรายงานเป็นต้น

- วิธีการบำบัด สลัดจ์

- ตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัด

ข. วิธีการบำบัด

- การทำให้สารแขวนลอย : ติดตั้งห้องกรวด, แท้งค์สำหรับตกตะกอน หรือ แท้งค์สำหรับการตกตะกอนทางเคมี โดยอาศัยการจับตัวเป็นก้อน

- สลัดจ์ : ทำให้เป็นของแข็งด้วยการรีดน้ำออกหรือใช้วิธีการลดความชื้น

- น้ำทิ้งในขั้นตอนสุดท้าย : ปล่อยให้ไหลผ่าน แท้งค์ตกตะกอน หรือรินตกตะกอน

- ค่า pH : ต้องปรับค่า pH ในน้ำที่เป็นกรด – ด่าง ให้เป็นกลางก่อนปล่อยออกไป

- น้ำมัน : น้ำมันที่ปะปนอยู่ในน้ำทิ้งจะต้องถูกนำออกด้วยวิธีพัดพาออกไปหรือใช้การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรการสำหรับน้ำใต้ดิน (Measures for Groundwater)

ถ้าการขุดคูมอังก์ส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดินจะต้องมีมาตรการที่ดีพอในการสำรวจเพื่อให้สอดคล้องกับความจำเป็น

จะต้องคอยดูแลควบคุมเสถียรภาพของหน้างาน จากวิธีการที่ใช้เช่น วิธีการลดน้ำ วิธีการใช้แรงดันลม วิธีการเกร้าท์ด้วยสารเคมีเป็นต้น ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดินได้ ก่อนเริ่มงานก่อสร้างจะต้องทำการสำรวจสถานะการใช้ประโยชน์ จากน้ำใต้ดินรอบๆ สถานที่ก่อสร้างเพื่อใช้มาตรการที่เหมาะสมได้

(1) การสำรวจ

ก. การสำรวจระดับดินและระดับน้ำ คุณภาพ และทิศทางทางไหลรอบๆ สถานที่ก่อสร้าง เพื่อความเข้าใจถึงแนวโน้มที่มี

ข. สำรวจสถานะของบ่อ สระ อ่างเก็บน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บ่อสำหรับจ่ายน้ำไว้ใช้ภายใน และหรือเพื่อการพาณิชย์

ค. ถ้าวางแผนไว้ว่าจะใช้สารเคมีในการเกร้าท์ จะต้องทำการสำรวจหัวข้อที่ได้ให้ไว้ใน “Provisional Guideline Concerning Chemical Grouting (1974)”

(2) มาตรการ

ก. วิธีช่วย : ป้องกันการลดระดับของน้ำใต้ดินได้โดยการใช้วิธีช่วยอย่างเหมาะสม เช่น วิธีใช้แรงดันลม การเกร้าท์ด้วยสารเคมี การแช่แข็ง การตัดขาดกำแพง เป็นต้น เพื่อรักษาระดับน้ำเอาไว้ในกรณีนั้นนอกจาก สภาพทางธรณีวิทยาแล้ว แรงดันส่วนเกิน ส่วนประกอบของดิน สภาพแวดล้อมรอบๆ สถานที่ก่อสร้าง เช่น บ่อน้ำ ซึ่งจะต้องให้ความสำคัญในการพิจารณาถึงด้วย

ข. การป้องกันมลพิษทางน้ำ เนื่องมาจากการเกร้าท์ด้วยสารเคมี : เมื่อมีการใช้สารเคมีในการเกร้าท์ จะต้องคอยติดตามดูแลโดยจัดให้มีการตรวจวัดรอบๆ สถานที่ก่อสร้าง อ้างอิงรายละเอียดจาก “Provisional Guideline Concerning Chemical Grouting (1974)”

การป้องกันปัญหาสำหรับร่างกายมนุษย์จากก๊าซไร้ออกซิเจน (ไฮโปเซีย/แอนโนเซีย)

ก่อนที่จะใช้วิธีแรงดันลมจะต้องมีการป้องกัน ผลกระทบที่จะส่งผลกระทบต่อบริเวณรอบๆ จากการรั่วซึมของก๊าซไร้ออกซิเจนได้

ก่อนทำการใช้วิธีแรงดันลมจะต้องมีการสำรวจสภาพทางธรณีวิทยาและน้ำใต้ดินบริเวณรอบๆ สถานที่ก่อสร้างอย่างเพียงพอเนื่องจากการใช้วิธีนี้จะทำให้เกิดการรั่วซึมก็ควรมีการจัดการกับการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันลมอย่างเหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับแรงดันและต้องมีการเฝ้าติดตามการรั่วใดๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกัน ไฮโปเซียและแอนโนเซีย

(1) ข้อกำหนดและกำหนดที่เกี่ยวข้อง

ก. พระราชบัญญัติป้องกัน Anoxia : จะต้องทำการสำรวจ และตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซไว้ oxygen และก๊าซพิษ

ข. กฎข้อบังคับสำหรับความปลอดภัยและสุขภาพในโรงงาน : จะต้องเลือกใช้วิธีการทำงานและมาตรการสำหรับการทำงานกับสิ่งแวดล้อมในกรณีที่มีก๊าซรั่วออกซิเจน ตามตารางที่ 6 ที่แนบมาว่าสถานที่ก่อสร้างใดบ้างที่มีแนวโน้มที่จะขาดแคลนก๊าซออกซิเจน

(2) มาตรการ

ก. ทำการสำรวจและทบทวนก่อนที่งานจะเริ่มขึ้น : ถ้ามีความเป็นไปได้ว่าจะมีการรั่วของออกซิเจนในอากาศออกมาก็ควรทำการสำรวจในหัวข้อต่อไปนี้ ก่อนที่จะเริ่มงาน

- แรงดันอากาศที่เหมาะสมสำหรับสภาพทางธรณีวิทยาและน้ำใต้ดิน
- ความสัมพันธ์กับโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการ และโครงการในอดีตที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง
- ความสัมพันธ์ระหว่างบ่อน้ำ โครงสร้าง และวัตถุที่ฝังไว้รอบๆ สถานที่ก่อสร้าง

ข. มาตรการป้องกัน

- การตรวจวัดและเฝ้าสังเกตการณ์รั่วซึม : ทำการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนโดยมีศูนย์กลางที่บ่อน้ำ หรือห้องตัดดินที่อยู่ใต้ดินและ จะต้องทำการตรวจวัดภายในรัศมี 1 กิโลเมตรรอบๆ สถานที่ก่อสร้างด้วย

- มาตรการการป้องกัน

- วิธีการเสริมจะใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของอากาศรั่วออกซิเจน
- จะต้องถมกลบบ่อน้ำเก่า ที่อยู่ใกล้บริเวณที่ก่อสร้าง ถ้าเป็นไปได้ควรทำการศึกษาบ่อน้ำที่อยู่ใกล้ตลอดระยะเวลาโครงการ

- เมื่อมีการรั่วของก๊าซขึ้น ควรมีมาตรการที่เหมาะสมเช่น การห้ามเข้าเด็ดขาด

การดูแลรักษา และการขนย้ายออกอย่างเหมาะสม

ดินที่ถูกขุดเจาะออกมาจะต้องมีการรักษาสภาพและทำการขนย้ายออกไปอย่างเหมาะสม

ดิน(muck) คือผลผลิตที่ได้มาจากการก่อสร้างซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ให้ได้มากที่สุดตามที่ “Law for Promotion Utilization of Recycled Resource (1991)” กล่าวไว้ สถิติที่ได้มาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงาน ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของ “ของทิ้ง” จะต้องการบำบัดและขนย้ายออกไปอย่างถูกวิธี ตามที่ได้บอกไว้ใน “Waste Disposal and Public Cleaning Law (1992)” สลัดจ์เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการก่อสร้างซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำอยู่สูงและมีดินที่มีอนุภาคที่ละเอียด สามารถนำสลัดจ์มาใช้ใหม่ได้โดยผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพเพิ่มลดของทิ้งลงและรักษาสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้นด้วย วิธีการบำบัดระดับกลางที่เหมาะสมจะต้องเลือกเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านคุณภาพและคุณลักษณะของผลผลิตที่ได้ออกมา



4.3 กรณีอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน

จำนวนประชากรในเมืองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแออัดมากขึ้น การให้บริการด้านต่างๆ เช่น การขนส่ง การประปา การระบายน้ำเสีย สาธารณูปโภคต่าง ๆ นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกระทำใต้ดิน เพราะการสร้างใต้ดินทำให้เกิดการประหยัดพื้นที่ซึ่งไม่สามารถทำได้บนบก การสร้างอุโมงค์ใน soft ground มีแนวโน้มที่จะเสียหายต่ำกว่าการใช้วิธีการ cut and cover ดังเช่นในเมืองใหญ่นั้นพื้นที่ส่วนใหญ่ นั้นเป็น soft ground การสร้างอุโมงค์ใน soft ground จึงเป็นสิ่งที่เราต้องรู้ บทเรียนนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขของการออกแบบและการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณ soft ground ซึ่งถือว่าอุโมงค์นี้สามารถขุดโดยใช้คนและเครื่องมือ โดยวิธีการต่างๆ ได้ ถึงแม้ว่าเราจะมีเครื่องจักรมากมายก็ตาม

จุดประสงค์ของบทเรียนนี้คือการสร้างความตระหนักว่า อุโมงค์มีความซับซ้อน แต่ก็ยังสามารถใช้หลักทางวิศวกรรมและข้อกำหนดต่างๆ สร้างขึ้นมาได้โดยใช้หลักการประหยัดวัสดุและมีความแข็งแรงที่เพียงพอ ในความซับซ้อนนี้เอง บทเรียนนี้จึงไม่สามารถอธิบายตามอย่างหนังสือทำอาหารบางเล่ม เพราะจะเป็นต้องใช้ข้อกำหนดต่างๆ และหลักการทางวิศวกรรมเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและลงรายละเอียดที่ชัดเจนสอดคล้องกัน

การวิจัยในทางธรณีวิทยา

การวิจัยในทางธรณีวิทยาซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ แสดงไว้ รวมถึงการลงรายละเอียดที่เจาะจง การออกแบบเพื่อใช้ในการประมูล และการเก็บข้อมูลที่ครบถ้วน

การสร้างอุโมงค์ใน soft ground นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นพิเศษคือ สภาพของน้ำใต้ดิน และ stability หรือลักษณะของค่า strength ของดิน ในดินที่ละเอียด 2 สิ่งนี้ก็จะยังมีความเกี่ยวข้องกันมากขึ้น

การทำนายพฤติกรรมของดิน

การทำนายพฤติกรรมของดินในการสร้างอุโมงค์บริเวณ soft ground นั้นค้นพบโดย Terzaghi ใน “Tunnelman’s Ground classification” ซึ่งสามารถขยายความได้ในเรื่องของน้ำใต้ดินและพฤติกรรมต่างๆ

- **Clays และ Silty sands**

ตามข้อกำหนดของ Peck ที่กล่าวถึง cohesive หรือการยึดเกาะของวัสดุนั้นต้องมีเพียงพอ และมีค่า compressive strength ที่เหมาะสม ซึ่งทราบได้จากการทดสอบ unconfined compressive strength ซึ่งการคำนวณค่าต่างของดินนั้นหาได้จากสมการ

$$N_1 = \frac{P_z - P_a}{S_u}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า N_1 คือ stability factor , P_z คือค่า overburden pressure ตรงเส้นผ่านศูนย์กลาง P_a คือค่าของ equivalent uniform interior pressure และ S_u คือค่าของ Undrained shear strength ซึ่งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่า Unconfined compressive strength

- **Cohesive soils**

Cohesive soils หรือดินเหนียวมีความคล้ายคลึงกับวัสดุที่เป็นพลาสติกซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสม่ำเสมอในทางทฤษฎี ซึ่งได้รับการพัฒนาได้เป็นสมการดังแสดง ค่า stability ของอุโมงค์สามารถหาได้ตามตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่า Stability ของอุโมงค์: Cohesive Soil (After Peck, 1969 and Phienwaja, 1987)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Stability Factor, N_t	Tunnel Behavior
1	Stable
2-3	Small creep
4-5	Creeping, usually slow enough to permit tunneling
6	May produce general shear failure. Clay likely to invade tail space too quickly to handle

- **Silty sand เหนือระดับ Water table**

วัสดุจำพวกนี้จะมีค่าการบีบเค้นอยู่แล้ว แต่จะเปราะในบริเวณที่มีการเปิดปิดอุโมงค์ การทำนายพฤติกรรมตามสมการด้านบนนั้นต้องใช้ตาราง 4.14 ประกอบการคำนวณ

- **Silty sand ไปจนถึง Gravels**

เมื่อวัสดุมีค่าการบีบเค้นที่ไม่เพียงพอ ก็จะมีปัญหามากขึ้น Heuer ได้อธิบายไว้ในเรื่อง “Undefined compressive strength” ที่พูดถึง “ การตัดสินใจและความถูกต้องเหมาะสม ” ว่าในรูป 6-1 นั้น การคำนวณค่าต่างๆของดินจะใช้ดินขนาด D_{10} ซึ่งเหมาะสมสำหรับดินที่แน่นเท่านั้น ($N > 30$) เหนือ water table โดยมีการบดอัดที่สม่ำเสมอ ($C_u < 6$) รวมถึงรูปทรงอนุภาคและการเคลื่อนที่ของระบบน้ำภายในนั้นตามลักษณะเฉพาะ ดินที่หยาบและมีรูปร่างกลมจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า ซึ่งดินที่มีการบีบเค้นและมีเหลี่ยมมุมก็จะมีคุณสมบัติดีกว่า รูป 4.107 ได้นำไปใช้กับ Los Angeles Metro พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

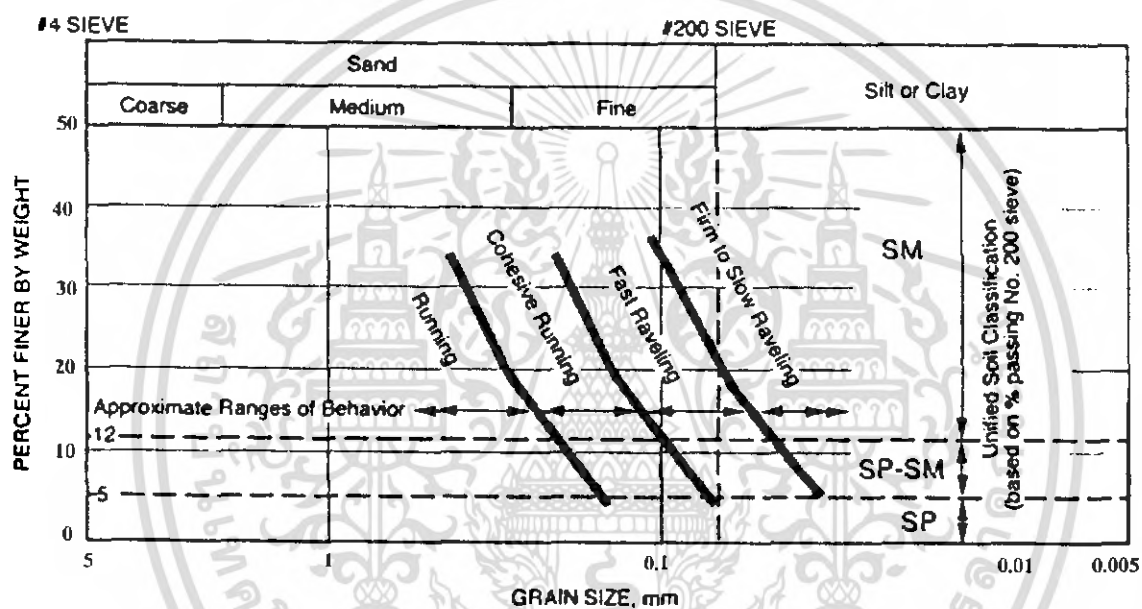
- **Silty sand** ข้างใต้ **water table**

ดินประเภทนี้จะเกิดการไหล ถ้าค่า $C_u < 3$ และจะไหลเหมือนกับ Cohesive หากว่ามีค่า $C_u < 6$

ตารางที่ 4.14 ค่า Stability ของอุโมงค์ : Silty sand เหนือระดับ Water table (Heuer,1994)

(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Stability Factor, N_t	Tunnel Behavior
1/4-1/3	Firm
1/3-1/2	Slow Raveling
1/2-1	Raveling



NOTES

1. Based on D_{10} size shown for dense soil, $N > 30$, above water table developed from Terzaghi (Proctor and White, 1977).
2. Very loose soils ($N < 10$) or rounded particles may behave 1 or 2 classes poorer.
3. Very angular sands, bonds, or cementation may behave 1 or 2 classes better.
4. Behavior below water table may be flowing and is a function of water head and permeability and other factors.

รูปที่ 4.107 การทำนายพฤติกรรมของดินขนาด D_{10} (จาก Tunnel Engineering Handbook)

- **Sand และ Gravel**

พฤติกรรมของ Sand และ Gravel นั้นเป็นไปตามตารางที่ 4.15

Soil Stabilization และ Ground water control

เป็นเวลา 40 ปีที่ Dr. Karl Terzaghi ได้เขียนหนังสือที่กล่าวถึงสภาพของดินในการสร้างอุโมงค์ใน soft ground

ปัญหาต่างๆสามารถเกิดขึ้นได้ในการก่อสร้างทั้งทางตรงและทางอ้อมเนื่องมาจากพฤติกรรมของน้ำที่มีต่ออุโมงค์ ซึ่งทำให้เกิดเทคนิคต่างๆที่ช่วยในการป้องกันปัญหาน้ำรั่วซึม

ตารางที่ 4.15 พฤติกรรมของอุโมงค์ : Sand และ Gravel (Terzaghi, 1977)

(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Designation	Degree of compactness	Tunnel Behavior	
		Above Water Table	Below Water Table
Very Fine Clean Sand	Loose, $N \leq 10$	Cohesive Running	Flowing
	Dense, $N > 30$	Fast Raveling	Flowing
Fine Sand with Clay Binder	Loose, $N \leq 10$	Rapid Raveling	Flowing
	Dense, $N > 30$	Firm or Slowly Raveling	Slowly Raveling
Sand or Sandy Gravel with Clay Binder	Loose, $N < 10$	Rapid Raveling	Rapidly Raveling or Flowing
	Dense, $N > 30$	Firm	Firm or Slow Raveling
Sandy Gravel and Medium to Coarse Sand		Running ground. Uniform ($C_u < 3$) and loose ($N < 10$) materials with round grains run much more ($C_u > 6$) and dense ($N > 30$) ones with Angular grains.	Flowing conditions Combined with extremely heavy discharge of water.

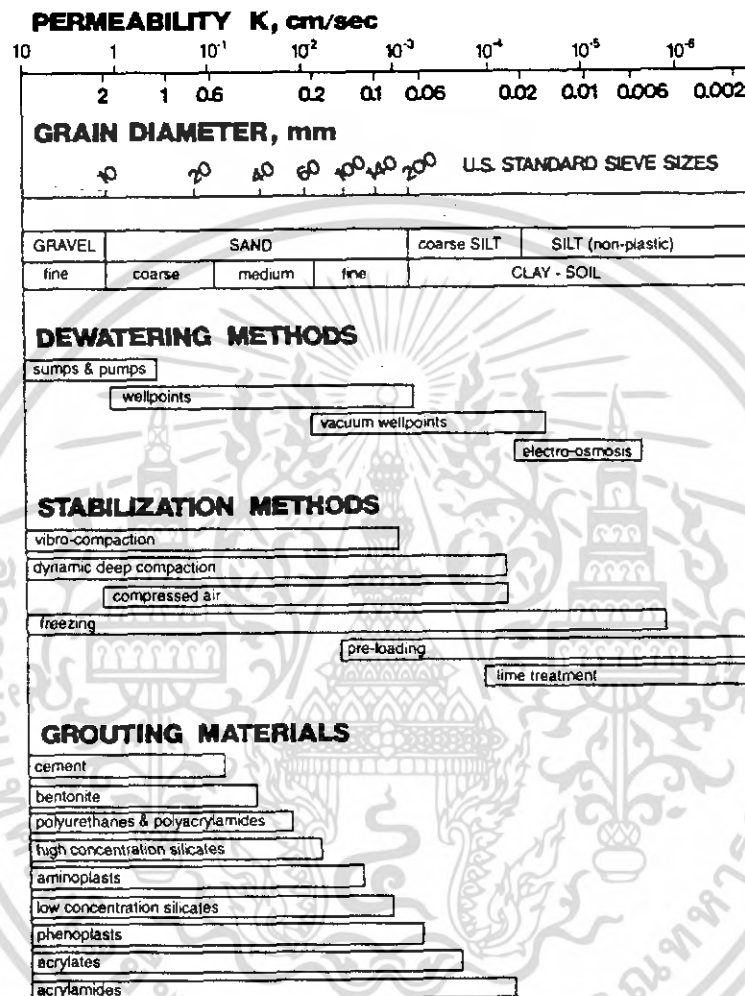
การควบคุมระบบน้ำใต้ดินเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการก่อสร้างอุโมงค์ใน soft ground ปริมาณน้ำน้อยๆในอนุภาคของดินเหนือ water table นั้นมีประโยชน์คือช่วยเพิ่มความคงทนเพราะมีการยึดเกาะมากขึ้นทำให้เกิดแรงผ่านรูเล็กๆกระจายออกไป แต่ข้างใต้ของ water table นั้นน้ำจะทำให้เกิด strength ที่ต่ำลง และทำให้เกิดการ failure จากแรงดันของน้ำที่รั่วซึมออกมา ปริมาณน้ำใน clay สามารถบอกค่า strength, sensitivity และ swelling ของวัสดุได้ การควบคุมสิ่งต่างๆเหล่านี้จึงมีความจำเป็น เราจึงต้องเลือกใช้ค่าต่างๆตามคุณสมบัติของวัสดุเพื่อการออกแบบและก่อสร้างที่เหมาะสม

การลดปริมาณน้ำ (Dewatering)

ข้อของเสียและ pumps เป็นสิ่งที่จำเป็นของการลดปริมาณน้ำ แต่โดยทั่วไปมักใช้วิธีการขุดโพรงขนาดใหญ่ ในการสร้างอุโมงค์นั้นจะมีการขุดโพรงในการระบายน้ำ หรือในการสร้างอุโมงค์บริเวณทรายก็เหมือนกันเพราะมีความดันต่ำและระบายออกได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Wellpoint ถูกนำมาใช้ดังแสดงในรูป 4.108 เพื่อลดปริมาณน้ำของ sandy silt ไปจนถึง coarse sand และ Gravel โดยการใช้ wellpoint 2 เส้น วางลงด้านหนึ่งของอุโมงค์ และมีระยะห่างประมาณ 3-6 ฟุตใน fined grain soil และอาจได้มากถึง 15 ฟุต อัตราการไหลของน้ำในแต่ละ wellpoint นั้นประมาณ 5-60 gpm

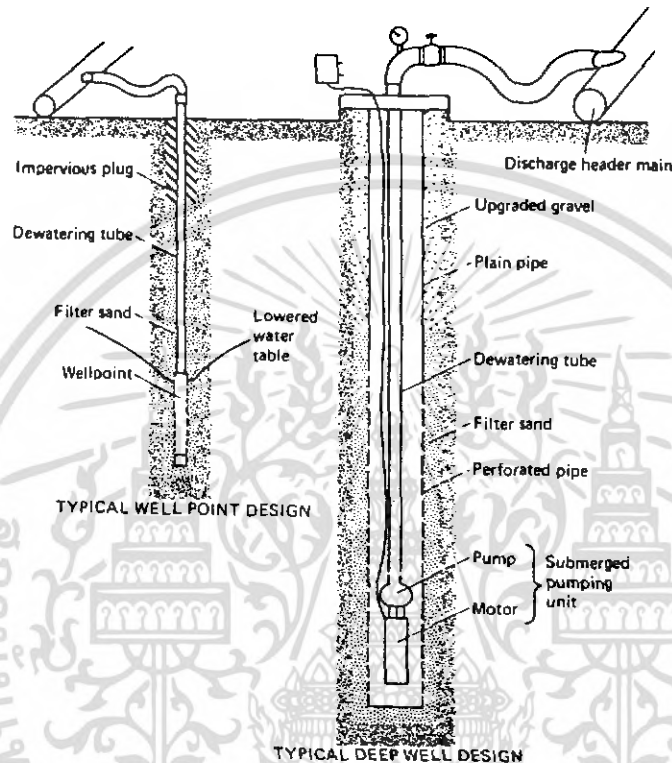


รูปที่ 4.108 วิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน (Karlo, 1990) (จาก Tunnel Engineering Handbook)

ระบบ wellpoint จะใช้ได้ดีในอุโมงค์สั้นๆ 5-22 ฟุต ถ้าต้องการลึกมากกว่านี้จำเป็นต้องมีเทคนิคที่มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การต่อความยาวของ wellpoint ไม่สามารถกระทำได้ใน fined grain soil บางครั้งก็สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคพิเศษเช่น การใช้ระบบสูญญากาศ หรือ electro-osmosis หรืออาจใช้ Eductor หรือ Ejector ในระดับที่ต่ำกว่า water table ประมาณ 15 ฟุต ซึ่งจะได้ผลที่ดีกว่า และต้องออกแบบยุ่งยากกว่าระบบ well point ซึ่งจะดีที่สุดถ้าสามารถต่อเติมระบบ well point ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Deep well จะมีขนาดใหญ่กว่า wellpoint ดังนั้นตามสภาวะทางธรณี ใน deep well แต่ละอันก็จะทำให้เกิดการไหลที่มีปริมาณมากกว่า wellpoint มากไปกว่านั้น pump สามารถอยู่ในน้ำได้ ในแต่ละ deep well จึงมีการไหลที่มากขึ้น โดย deep well สามารถขุดลึกได้ถึง 100 ฟุต ด้วย drawdown ที่มากถึง $\frac{3}{4}$ ส่วน รายละเอียดต่างๆของการติดตั้งขึ้นอยู่กับความชำนาญและประสบการณ์



รูปที่ 4.109 แผนผังการออกแบบ wellpoint และ deep well (จาก Tunnel Engineering Handbook)

การติดตั้ง deep well มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-12 นิ้ว ด้วยขนาดความจุ 70-100 gpm เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ wellpoint แล้ว มีราคาแพงกว่ามากทั้งการติดตั้งและการดำเนินการ ดังนั้นผู้ออกแบบและผู้รับเหมาต้องมีการติดตามอย่างต่อเนื่องในเรื่องของการก่อสร้างและการดัดน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดค่า effective stress ที่เพิ่มขึ้นในดิน ซึ่งสามารถหาค่าได้จากทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ

ในการดำเนินการลดปริมาณน้ำ Drawdown ของระรุดตัวใน cohesive soil และ elastic compression ใน granular soil โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน soft cohesive soil ซึ่งมีการทรุดตัวที่มากจนอาจก่อให้เกิดความเสียหาย ข้อกำหนดต่างๆสามารถสรุปได้ดังนี้

- การทรุดตัวเล็กน้อยที่เกิดขึ้นสามารถซ่อมแซมได้ เช่น การทรุดตัวบางจุด หรือ อาคารที่ไม่สูงมาก
- ติดตั้งผนัง cut-off ทั้ง 2 ข้างของแนว จำกัดค่า drawdown รวมถึงการทรุดตัวในพื้นที่นั้นๆ
- ระบายน้ำออกสู่ภายนอก เพราะอาจมีผลต่อ drawdown และค่าการทรุดตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายปีที่ผ่านมา กระบวนการ dewatering เป็นสิ่งที่ท้าทายขึ้นในน้ำใต้ดินที่มีสารปนเปื้อนต่างๆ รวมถึงความต้องการก่อสร้างบริเวณใต้ดินมีมากขึ้น แต่จะมีปัญหาเกี่ยวกับการก่อสร้างได้สถานที่ที่มีการแปรรูป การเก็บ สารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะในเมือง บริเวณที่เป็นปัญหามากที่สุดก็คือบริเวณที่เป็นบิมน้ำมันเก่าๆ

สิ่งก่อสร้างเหล่านี้ไม่ได้อยู่ในแผนที่ ถึงแม้ว่าจะมีอยู่ แต่ก็ไม่ได้มีการหาปริมาณสารที่รั่วออกมา รวมถึง ทิศทาง ขนาด หรือปริมาณสารที่ปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาดังนี้

- บรรยากาศที่อันตรายต่อการทำงาน
- การถ่ายเทสารปนเปื้อนไปในอากาศ
- การรั่วซึมของสารต่างๆเข้ามาในอุโมงค์

ตัวอย่างของที่เกิดขึ้นได้แก่ รถไฟใต้ดินที่ Baltimore ซึ่งต้องทำการซ่อมแซมใน 1 ปีต่อมา

ถึงจะเป็นสารปนเปื้อนที่มาจากธรรมชาติก็ตาม เช่น การแพร่กระจายของไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น อาจก่อให้เกิดการแปรสภาพของน้ำภายในอุโมงค์ได้ จึงต้องมีการก่อสร้างโรงงานที่กำจัดสารปนเปื้อนก่อนจะทำการระบายน้ำออก

Compressed Air

ด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยของการสร้างอุโมงค์ใน soft ground วิธีการโดยใช้ compressed air นั้นจึงแพร่หลายน้อยลง แต่ compressed air นั้นก็ยังเป็นวิธีที่ดีต่อ stability ของดิน และน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะใน granular soil หรือ squeezing soft cohesive soil

ใน granular soil นั้น compressed air ใช้เพื่อลดความดันของน้ำเพื่อป้องกันการไหลกลับเข้าอุโมงค์ แต่ก็เกิดปัญหาอีกเพราะความดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.43 psi ต่อความลึก 1 ฟุต จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลดังต่อไปนี้

- ถ้าความดันอากาศมีค่าเท่ากับที่ด้านในจะทำให้ น้ำไหลออก ทำให้ทรายแห้ง
- ถ้าความดันอากาศมีค่าเท่ากับที่ภายนอกจะทำให้ความดันน้ำที่ด้านในมีค่าที่ต่ำลงเป็น 0.43D ซึ่งทำให้น้ำไหลเข้าอุโมงค์มากเกินไป

วิธีการแก้ปัญหาคือต้องทำให้เกิดความดันอากาศที่สมดุล ความดันน้ำก็จะสมดุลตามมา ซึ่งวิศวกรและผู้รับเหมาต้องคำนึงถึงเรื่องนี้มากเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น

- ใน cohesive ground นั้นเราต้องทำให้เกิดความดันอากาศที่เพียงพอ ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพของอุโมงค์ในการขุดเจาะและการก่อสร้าง Peck ได้เสนอสมการของ Clays และ Silty sands ที่ใช้ในการคำนวณค่า stability ของอุโมงค์ โดยค่า Pa เป็นค่าความดันอากาศ ตาราง 4.13 และ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของค่า stability factor และพฤติกรรมของอุโมงค์

การใช้ compressed air นั้นการออกแบบและก่อสร้างต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งที่รายละเอียดดังต่อไปนี้

- Compressors
- วัสดุและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ
- เวชภัณฑ์
- สาธารณูปโภคและคนงาน
- ทีมแพทย์พยาบาล

ปริมาณของอากาศที่ใช้ขึ้นอยู่กับแต่ละที่ แต่สมการทั่วไปคือสมการดังนี้

$$Q = KD^2$$

โดยค่า Q คือปริมาณของ compressed air ที่ใช้, K คือค่าคงที่ จะใช้ 12 ใน fine sand และ 24 ใน gravel และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ การดูแลเรื่องการปรับความดันในที่แจ้งนั้น ต้องระมัดระวังมาก เพราะอาจทำให้อุโมงค์เกิดการโก่งได้ จึงต้องมีการควบคุมดูแลในโครงสร้างกายภาพ ตาราง 4.16 แสดงถึงเวลาที่ใช้ในกระบวนการ decompress หลังจากการให้ความดันเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะเป็นไปตามขั้นตอนตามเวลาที่ใช้

เนื่องจากในปัจจุบันการใช้ compressed air มีน้อยลงทำให้หัวข้อนี้ไม่ได้ถูกอ้างถึงมากในหนังสือต่างๆ ซึ่งหากต้องการศึกษาสามารถหาได้จากหนังสือของ Richardson และ Mayo, Deix และ Farjeat

ตารางที่ 4.16 Decompression Table (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Work Pressure psig	Hours Under Pressure										
	1/2	1	1-1/2	2	3	4	5	6	7	8	Over 8
0-12	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	6	5	6	6	5	6	6	6	16	16	32
16	7	7	7	7	11	17	48	63	63	73	87
18	7	7	7	8	11	17	48	63	63	73	87
20	7	7	8	15	15	43	63	73	83	103	113
22	9	9	15	24	38	58	98	108	118	128	133
24	11	12	23	27	52	92	117	122	127	137	151
26	13	14	29	34	69	104	126	141	142	142	163
28	15	23	31	41	98	127	143	153	153	155	183
30	17	28	38	62	105	143	165	168	178	188	204
32	19	35	43	85	126	163	178	193	203	213	226
34	21	39	58	98	151	178	195	218	223	233	248
36	24	44	63	113	170	198	223	233	243	253	273
38	28	49	73	128	178	203	223	238	253	263	278
40	31	49	84	143	183	213	233	248	258	278	288
42	37	56	102	114	189	215	245	260	263	268	293
44	43	64	118	154	199	234	254	264	269	269	293
46	44	74	139	171	214	244	269	274	289	299	318
48	51	89	144	189	229	269	299	309	319	319	-
50	58	94	164	209	249	279	309	329	-	-	-

Note: Working chamber pressure. Total decompression time, minutes; California Code of Regulations August 1985.

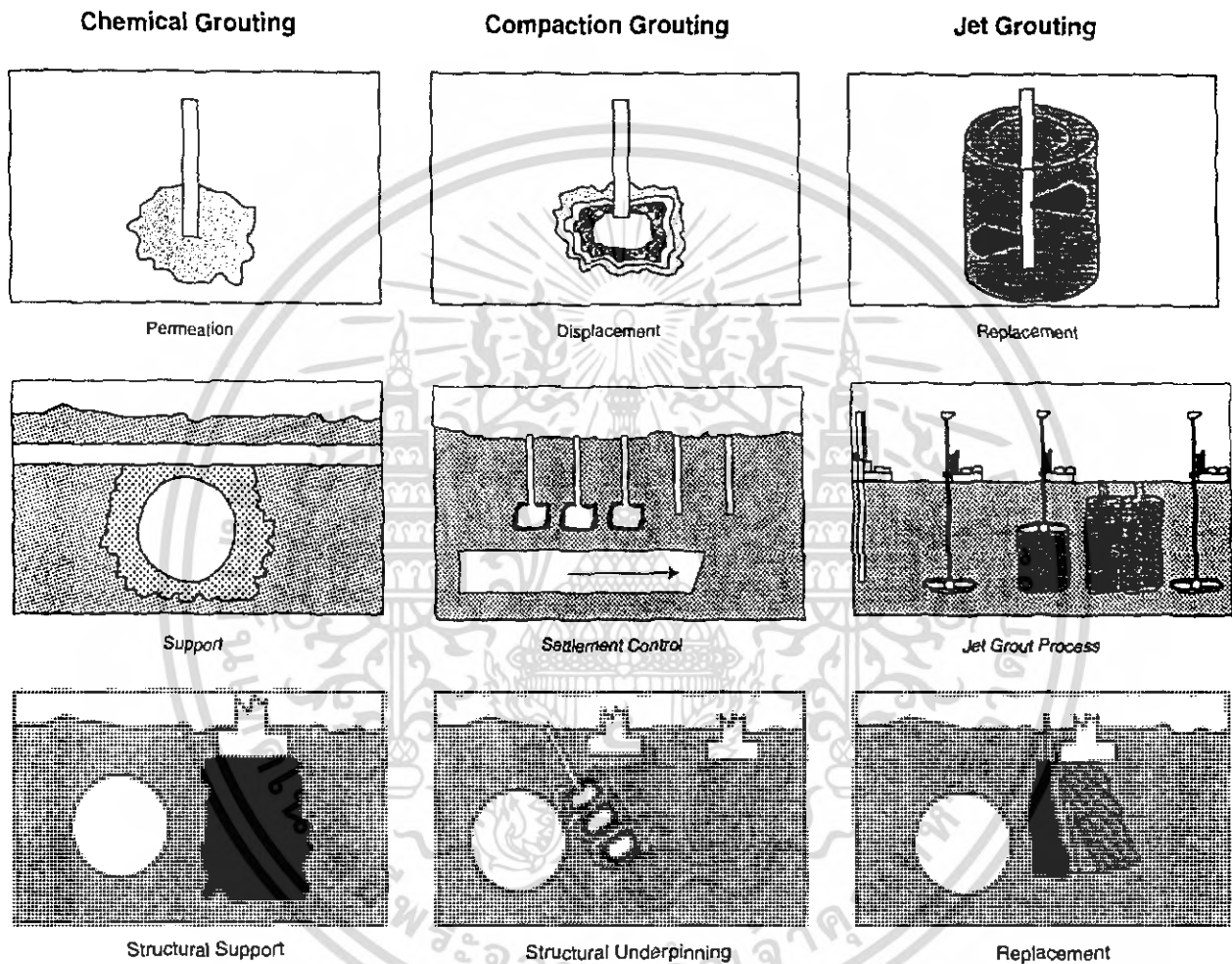
1. 14-22 psi require a two-step decompression; 24-38 require a three-step decompression; and 40-50 require a four-step decompression.
2. When decompression exceeds 75 minutes, a special decompression chamber must be provided
3. At least one physician, licensed in the state, must be available at all time to provide medical supervision. The physician must meet all requirements of the compressed air workers and be willing to enter the pressurized environment as needed.
4. See applicable regulations for additional details.

Grouting

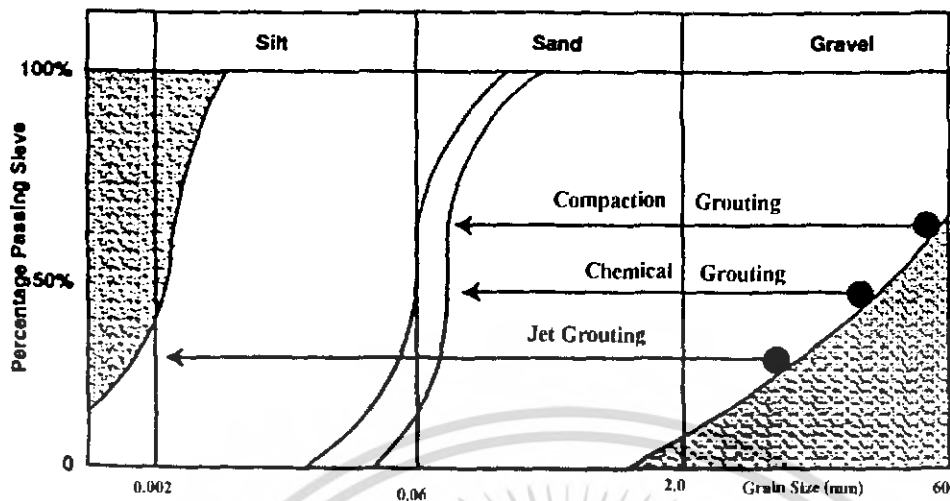
มีวิธีการทาง grouting มากมายที่นำมาใช้เพิ่ม stability ของ soft ground ที่จะทำอุโมงค์ มีการพัฒนาในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ ทั้งในเรื่องของ groundwater และ ค่า stability ของดิน ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพมากเมื่อเจอปัญหาต่างๆ อาทิเช่น 1) ดินที่ไม่แข็งแรงซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการก่อสร้างได้ 2) การลด permeability และการไหลของ groundwater 3) การลดผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการ dewatering และความละเอียดของดิน 4) การ stabilize sandy soil เพราะอาจมีแนวโน้มไหลไปได้ในภาวะที่แห้งในระดับที่ต่ำกว่า water table Gularte ได้แบ่ง grouting ออกเป็น 3 ประเภทคือ - Permeation Grouting คือการเติมสารเคมี หรือ cement binder ลงไปในรูเล็กๆของดิน - Jet grouting คือ ใช้ความดันสูง

เพื่อให้ดินแตกและแทนที่ด้วยส่วนผสมของดินและ cement - Compaction grouting คือการทำให้ดินแน่น โดยใช้ grouting ที่เหนียวถึกลงไป ดังรายละเอียดในรูป 4.110 และ 4.111

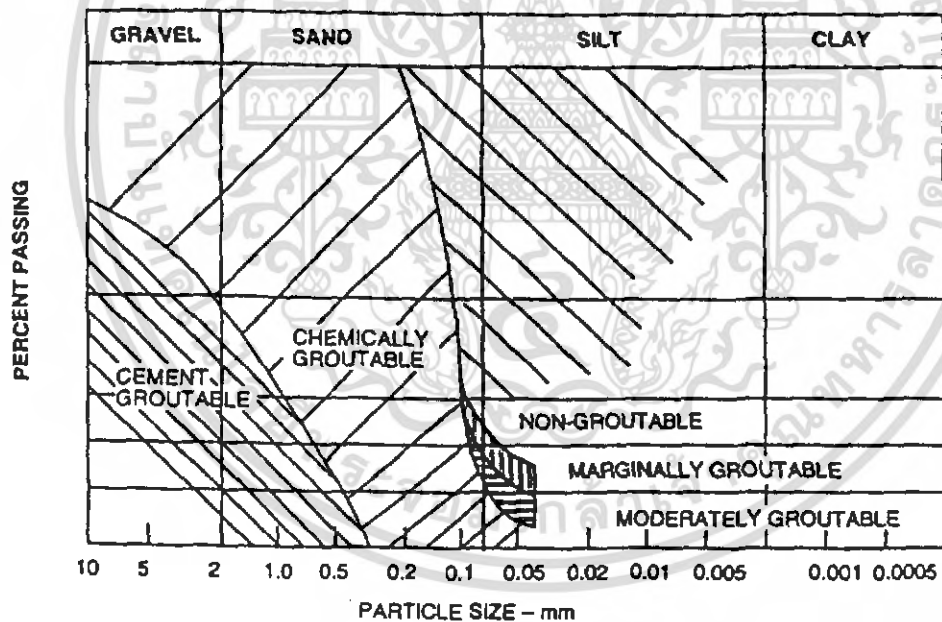
กระบวนการทาง Grouting นั้นต้องคำนึงค่า permeability ของดิน ดังรูป 4.112 แสดงวัสดุต่างๆที่ใช้ grouting แสดงความเหมาะสมระหว่างดินกับวัสดุที่ใช้ grouting นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของดินด้วย คือ เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ดังตาราง 4.17 และรูป 4.113



รูปที่ 4.110 งาน grouting ในงานอุโมงค์ (after Gularte ,1989) (จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.111 วิธี Grouting และประเภทของดิน (after Gularte, 1989)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

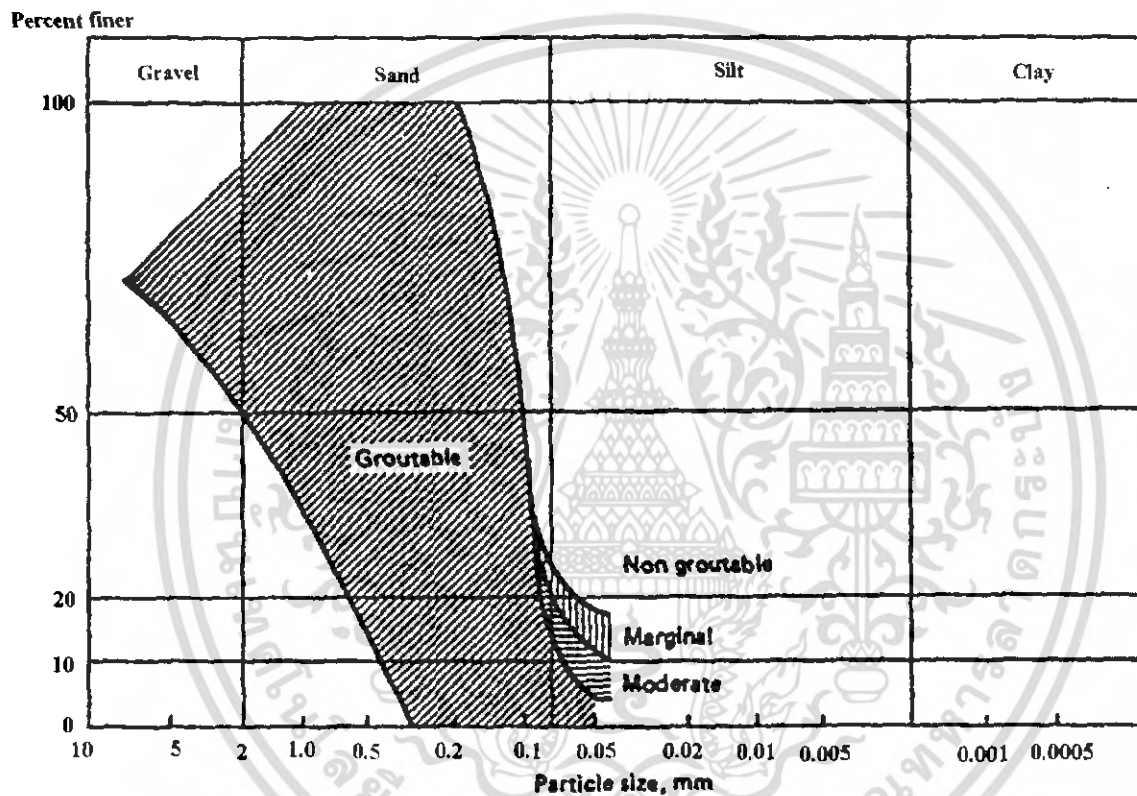


รูปที่ 4.112 ขนาดของเม็ดดินที่เหมาะสมกับการ grout แต่ละประเภท (after Baker, 1982)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

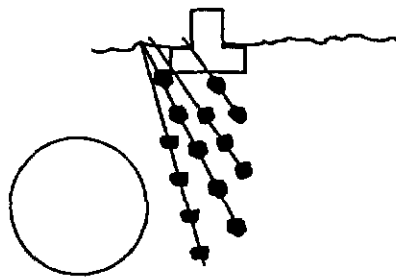
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการ grout ที่เกี่ยวกับ ค่าความซึมได้และเปอร์เซ็นต์ความละเอียดของทราย
(from Baker, 1982) (จาก Tunnel Engineering Handbook)

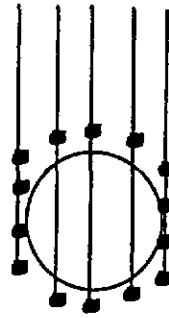
Groutability	General Soil Permeability, cm/sec	Percentage of Fines in Sandy Soil
Easy	10^{-1} to 10^{-3}	<12
Moderate	10^{-3} to 10^{-4}	12 to 20
Marginal	10^{-4} to 10^{-5}	20 to 25
UngROUTable	$<10^{-5}$	>25



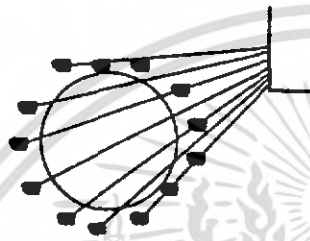
รูปที่ 4.113 ความสามารถในการ grout ได้ของดิน (Karol, 1990)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



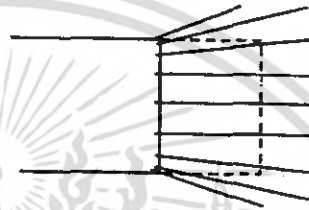
(A) FAN ARRAY BELOW FOOTING



(B) PARALLEL ARRAY FROM SURFACE



(C) FAN ARRAY FROM PIT

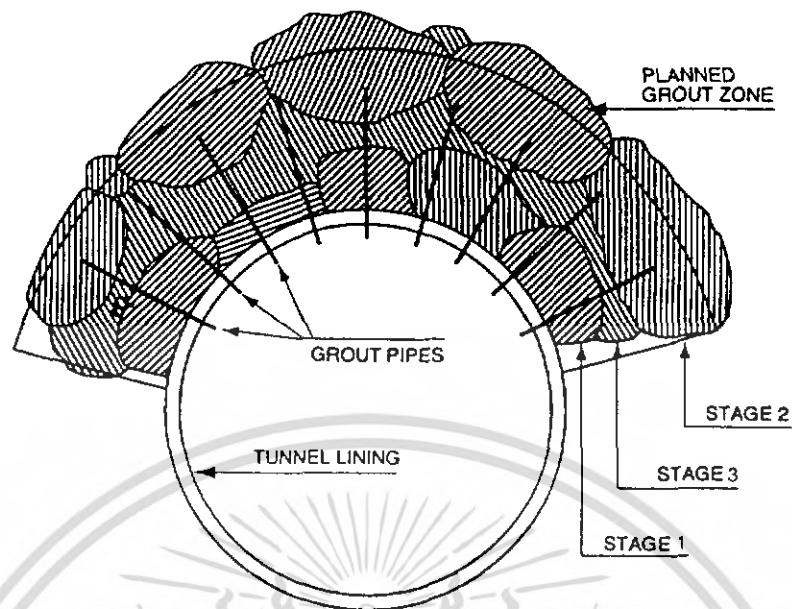


(D) CROWN OR FAN ARRAY FROM SUCCESSIVE HEADINGS

รูปที่ 4.114 แบบแปลนของ Grout pipe (after Baker, 1982)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Permeation grouting นั้นอาจใช้ cement หรือ สารเคมี ตามความเหมาะสมของการขุดเจาะ และความละเอียดของดิน ดังรูป 4.112 cement grout นั้นเหมาะกับ gravel และทรายบางชนิด ซึ่งสารเคมีนั้นเหมาะกับดินที่มีความละเอียดมากกว่า ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณดินน้อยกว่า 10% ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้นมีแนวโน้มที่สามารถ grout ได้ และมากกว่า 20% นั้นไม่สามารถทำได้ จากผลการทดลองใน Los Angeles สรุปว่า การ grouting ในปัจจุบันนั้นมีความสำเร็จมากกว่าเดิม 5% อย่างไรก็ตาม ก็ยังต้องใช้หลักทฤษฎีมาช่วย รวมถึงอาจต้องใช้ grouting แบบดั้งเดิม เช่น pipe spacing จาก 18 นิ้วถึง 5 ฟุต

โดย pipe ที่ใช้ต้องวางขนานกัน ซึ่งอาจต้องใช้การคำนวณมือโดยวิศวกร การคำนวณอื่นๆเช่น soil permeability , grout ชนิดต่างๆ ดังรูป 4.115



รูปที่ 4.115 การgrout บริเวณ crown (after Baker, 1982)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

ในอดีต มีการใช้ grouting 4 วิธี คือ stage, series, circuit และ packer ในทางปฏิบัติปัจจุบัน ใช้เพียง packer grouting ที่ยังใช้อยู่ เพราะมีต้นทุนที่ต่ำ และควบคุมง่ายในปัจจัยต่างๆ เช่น

- การควบคุมพื้นที่การเดินท่อและการทำการฉีดยาเคมีลงไป
- การควบคุมช่องทางการไหลภายในท่อ
- เป็นทางเลือกที่ 2 หรือ 3 ในการ grouting

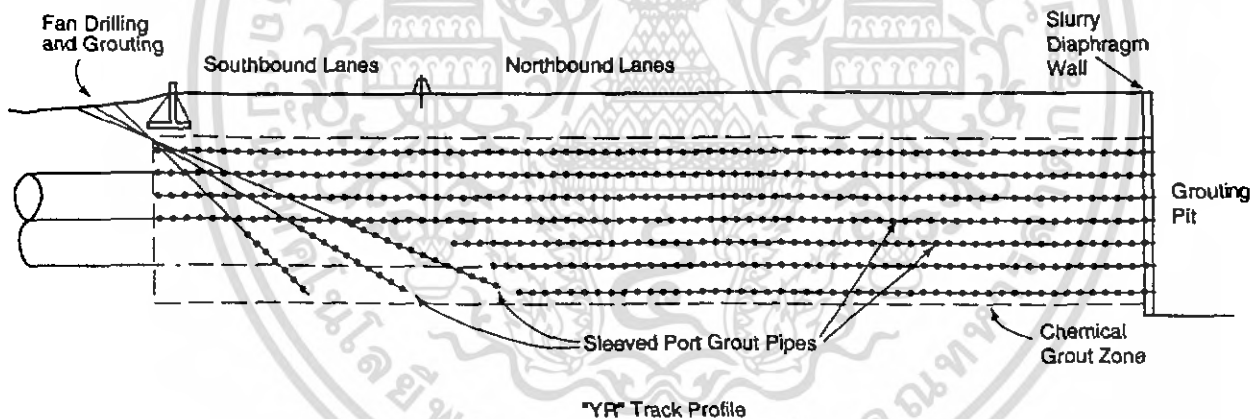
เป้าหมายของ grouting คือการทำให้ดินมีความแน่นมากขึ้นโดยการฉีดยาเคมีลงไป ซึ่งในความเป็นจริงมักจะมีปริมาณน้อยกว่า และรูปร่างแตกต่างจากในทางทฤษฎี ซึ่งโดยปกติการ grouting ครั้งแรก หรือครั้งต่อๆ มานั้นจะสามารถครอบคลุม 90% ของปริมาณที่ต้องการ ซึ่งเพียงพอที่ทำให้ดินเกิด stability ซึ่งการดำเนินการก่อสร้างก็เป็นไปตาม Baker

Tertiary Grouting นั้นก็จำเป็นในบางกรณีที่ต้องการครอบคลุมมากกว่าที่ทำ grouting ในครั้งแรกและครั้งที่สอง ซึ่งเป้าหมายคือการป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะพออนุภาคต่างๆ เข้ามา การ grouting แบบนี้ยังดูแลถึงการไหลและปัญหาในเรื่องการขนส่งต่างๆ ซึ่ง grouting ปกติไม่สามารถทำได้ ซึ่งสามารถศึกษาได้เพิ่มเติมถึงเปอร์เซ็นต์ในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติได้

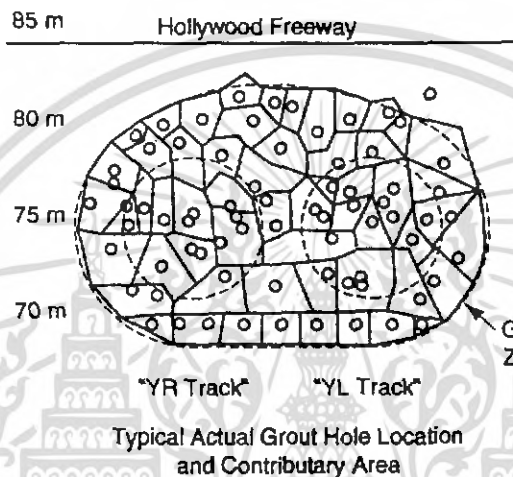
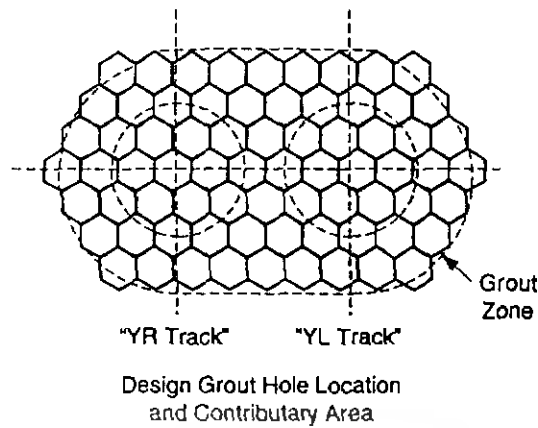
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ grouting ได้แก่ storage tank , mixing tank, pump, meters, gauges, packer, hoses โดยเฉพาะ pumping plant นั้นสำคัญมากในการผสมและการส่งกำลัง pump ซึ่งต้องมีกำลังมากขึ้นหากอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อเหมาะสมกับความดันที่ใช้รูปแบบ หากส่วนผสมของ grout มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายก็จำเป็นต้องมีความจุมากขึ้น รวมถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปหรือเวลาที่ต้องการเพิ่มความดันทานในการไหล การดูแลในเรื่องอัตราการไหลและความดันเป็นเรื่องสำคัญ ควรติดตั้ง displacement meter ไว้ที่ทางเข้าและออกของ pump รวมถึง gauge pressure ที่ควรติดตั้งไว้ที่ pump และบน grout pipe

ในอุโมงค์รถไฟใต้ดินที่ Los Angeles จำเป็นต้องมีเลนย่อยๆ (8 เลน) ตามทางหลัก (รูป 4.116 และ 4.117) ซึ่งจะสามารถเจาะรู grout ในแนวราบได้โดยที่ไม่เป็นอันตรายจากการเจาะแนวตั้ง ส่วนใหญ่จะเป็นการเจาะจากด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น มีความยาวประมาณ 275 ฟุต ซึ่งต้องใช้การควบคุมให้เป็นไปตามแนวระดับที่กำหนดในแบบ แม้มีการเปลี่ยนแปลงแนวระดับบ้างก็ตาม พื้นที่ที่ทำการเจาะรู และ grout ที่ใช้นั้นเป็นตัวบอกความสำเร็จ ซึ่งถึงแม้ว่าเกิดไฟไหม้ รูที่เจาะและ grouting ก็ยัง stable ได้แม้จะมีการเคลื่อนไหวอยู่ด้านบนระยะ 6-12 ฟุตก็ตาม



รูปที่ 4.116 การ grout ในแนวราบและรูปตัดในโครงการรถไฟใต้ดินในลอสแอนเจลิสใต้ Hollywood Freeway (Gularte et al., 1991) (จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.117 การออกแบบและตำแหน่งของรูที่ grout จริง(Monsees, 1993)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การติดตั้งท่อ grout

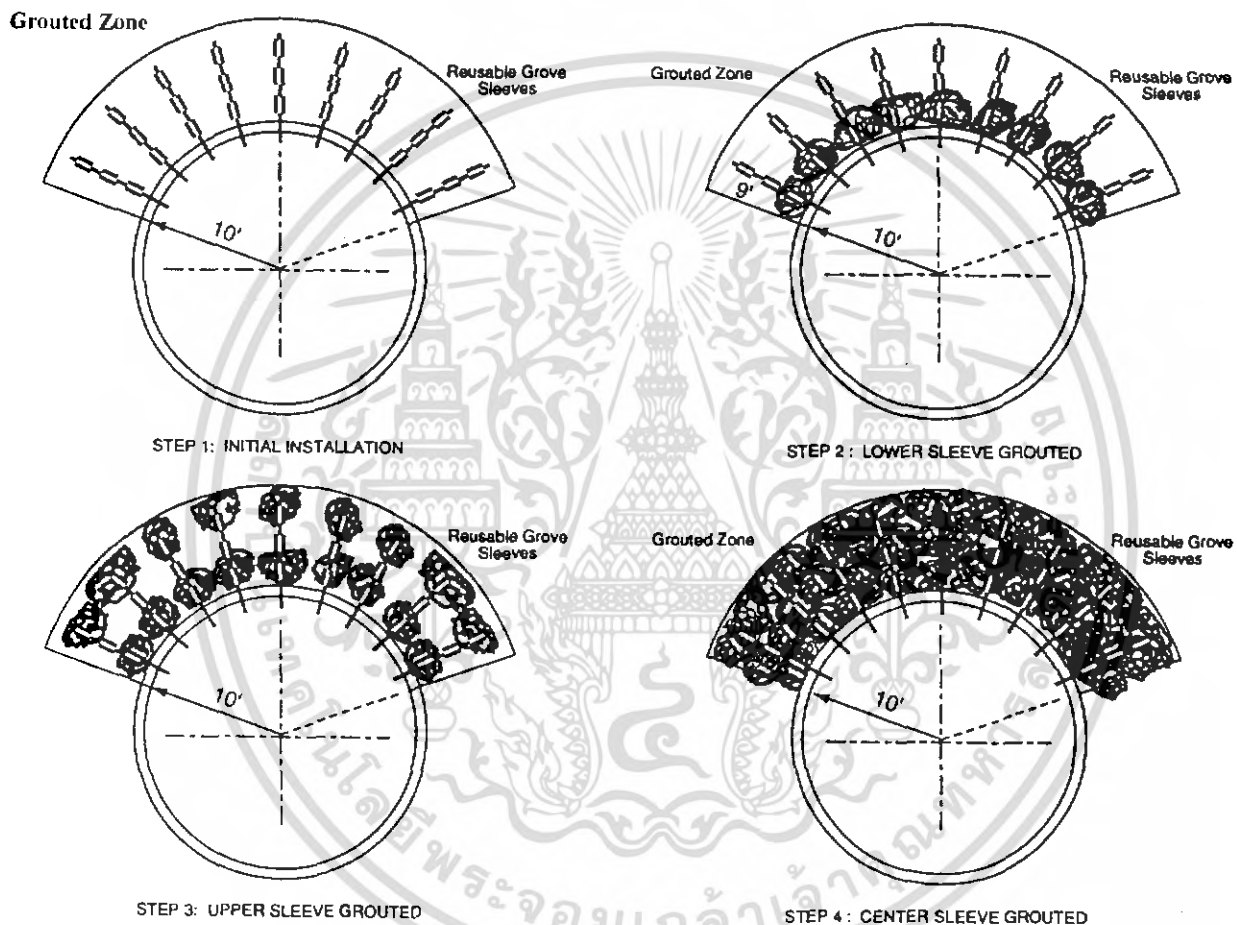
จุดประสงค์ก็คือสามารถกระจาย grout ได้อย่างทั่วถึงในพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งอาจมีการเจาะและฉีดสารลงไปได้หลายครั้ง (รูป 4.118) จำนวนชนิดท่อ grout ที่ใช้ขึ้นอยู่กับว่าต้องการครอบคลุมเนื้อที่เท่าใด driven pipe หรือ jetted pipe นั้นใช้ได้ดีสุดในการฉีด grout ลงไปในรูลึก และ slotted pipe นั้นเหมาะกับการ grouting ชั้นดินที่ลึกมากๆ

จากการทดลองพบว่า sleeve port pipe (รูป4.119) นั้นดีที่สุด โดยการวาง sleeve port ในพื้นที่ที่กำหนด ก็จะสามารถ grout ที่บริเวณใดก็ได้ ก็รั้งก็ได้ ซึ่งประโยชน์ยังมีอีกดังต่อไปนี้ 1) Grout สามารถไปที่ระดับความลึกใดก็ได้ 2)ป้องกันการไหลกลับและการกลายเป็นวุ้นหลังจาก grouting 3) มี

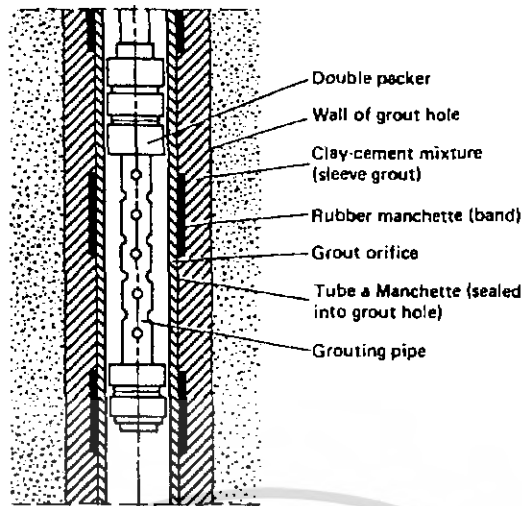
ความมิดชิดไม่รั่วซึมออกไปจากพื้นที่ที่ต้องการ
เดียวกันได้

4) Grout ที่เป็นสารเคมีหรือ cement สามารถที่จะใช้ต่อ

การติดตั้ง pipe เพื่อ grouting ต้องมีการดูแลและควบคุมอย่างดี โดยต้องมีความมิดชิดไม่รั่วซึม ต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ไม่เกิดการเสียหายหากด้านบนเป็นทางสัญจร ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น cement , bentonite และ fly ash โดย grout ต้องมีความหนาพอที่จะป้องกันการไหลซึมของดิน ในทางทฤษฎีนั้นต้องมีค่า strength ค่ำ และเปราะ



รูปที่ 4.118 Multiple injection for crown grouting (after Gularte, 1989)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.119 ส่วนประกอบภายในรู grout (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Freezing

สภาพทั่วไป : Freezing หรือ การให้ความเย็นจนแข็งตัวมีการใช้บ่อยในพวงงานเสาในน้ำมากกว่างานอุโมงค์ วิธีนี้สามารถรักษาระดับแนวต่างๆ ได้ดี เราต้องมั่นใจว่ามีน้ำเพียงพอ และการ freezing ต้องไม่ทำให้ stability ของ dry soil เปลี่ยนแปลง โดยกำจัดความร้อนจำเพาะ เพื่อให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ซึ่งจะมีพฤติกรรมเหมือนซีเมนต์ที่เชื่อมดินทั้งหมดไว้ด้วยกัน ช่วยให้เกิด strength ที่มากขึ้น ลด permeability ของ soil ลง จากการศึกษาพบว่าน้ำที่มีความเค็มมากกว่า จะทำการ freezing ได้ยากกว่า น้ำใต้ดินจึงมีค่า freezing point ต่ำกว่า น้ำโดยทั่วไป

อีกวิธีการหนึ่งคือการขนส่งน้ำใต้ดินออก โดยทำการระบายความร้อนออกจนทำให้อุณหภูมิ ลดลงจนต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง การขนส่งน้ำใต้ดินออกมานั้นเป็นวิธีการที่ระบายความร้อนได้เร็วกว่ากระบวนการ freezing ถึงแม้ว่าจะมีเทคโนโลยีที่สูงกว่าก็ตาม ซึ่งเป็นไปได้มากที่จะ freeze เร็วขึ้นถ้า น้ำลดลงประมาณ 3 นิ้ว ต่อชม. ที่ความเร็วต่ำกว่านี้ การไหลของน้ำจะทำให้ใช้เวลานาน รูปร่างที่กำหนดไม่ได้หลังจากแข็งตัวอาจทำให้เกิดความยากในการทำ freezing wall ในดินหลายชนิดนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการ freeze นั้นทำให้เกิดการกระพือของพื้นดิน หลังจากน้ำแข็งละลายจะทำให้เกิดการโก่งตัวในระยะยาวได้

Refrigerated Brine (การให้ความเย็นโดยใช้น้ำเกลือ)

โดยการติดตั้งเครื่องทำความเย็นให้กับน้ำเกลือที่สามารถ pump ลงไปได้ถึงด้านล่างจนถึงดิน น้ำเกลือที่อุ่นจะขึ้นไปที่เครื่อง และไหลลงไปเป็นวัฏจักร ทำให้ถึงจุดที่ freeze ได้

ในการสร้างอุโมงค์ เราต้องดูเรื่อง stability ของดิน strength เป็นเรื่องรอง กล่าวคือ ไม่จำเป็นต้องดูระดับความชื้นเพื่อทำให้น้ำแข็งมีค่า strength ที่มากขึ้น ในการสร้างอุโมงค์บางครั้งไม่จำเป็นต้องมีค่า strength ที่มากเกินไป

แทนที่จะเป็นแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำเกลือ ก็สามารถเป็นสารอื่นที่มี freezing point ต่ำกว่า ซึ่งอาจแพงกว่า และก็ยังมีไนโตรเจนเหลวหรือ คาร์บอนไดออกไซด์เหลว แต่พวกนี้จะมีราคาแพงและข้อควรระวังในการใช้มาก

ไนโตรเจนเหลว สำหรับการก่อสร้างที่มีเวลาจำกัด คือการผ่านไนโตรเจนเหลวในเครื่องให้ความชื้น ต้องมีการควบคุมอย่างดี เพราะอาจเกิดการรั่วออกมาได้ในกระบวนการทำไนโตรเจนเหลว และผ่านการให้ความความชื้นกลับไปกลับมาเป็นวัฏจักรเช่นเดียวกับน้ำเกลือ

การระบายไอของไนโตรเจนต้องมีการดูแลอย่างดี ไม่ควรใช้ท่อเหล็กเพราะจะเปราะที่อุณหภูมิต่ำๆ ควรใช้พวก stainless จะดีกว่า

การออกแบบ เราต้องทราบในส่วนของคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อดินเมื่อให้ความชื้นจนถึง freezing point ของน้ำ ผลกระทบต่างๆแสดงในรูป 4.120

การคำนวณพลังงานความร้อนและเวลาที่ใช้ในการ freezing นั้นใช้สมมติฐานอย่างง่ายและมีการถ่ายโอนความร้อนอย่างสม่ำเสมอในดิน รูป 4.121 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง freezing time และ spacing of freezing element สำหรับน้ำเกลือที่ใช้หรือไนโตรเจนเหลว

การดำเนินการ ทำการติดตั้งเครื่องมือต่างๆ และมีการตรวจตราโดย Thermocouple strings ซึ่งจะทราบอุณหภูมิของน้ำใต้ดิน และเครื่องทำความเย็น นอกจากนั้นก็มีเครื่อง Piezometer เพื่อดูแลในส่วนของ frozen ring และ free-draining soil

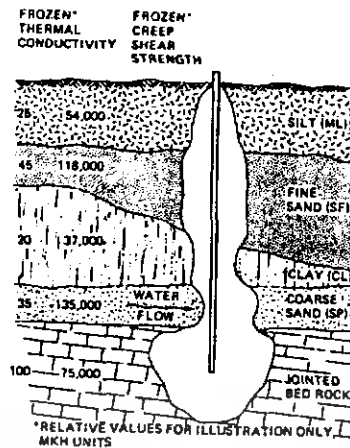
เราต้องดูแลองค์ประกอบต่างๆเช่น น้ำ ท่อน้ำทิ้ง หรือ การระบายไอ ซึ่งต้องไม่ทำให้เกิดผลกระทบจากความชื้น

การ freezing ต้องมีความเหมาะสมไม่เพียงแต่ stabilization แต่รวมถึงกระบวนการ dewatering และ grouting ความชื้นหรือน้ำแข็งที่เกิดขึ้นต้องไม่ทำให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป

การขุดเจาะอุโมงค์นั้นต้องทำอย่างระมัดระวัง โดยใช้อุปกรณ์ในการขุดเหมืองที่ใช้ในที่เย็นหรือเป็นน้ำแข็งได้

อุโมงค์อาจเป็นน้ำแข็งได้บริเวณรอบๆ จากการเจาะในแนวราบ หากไม่สามารถเจาะต่อไปได้ อาจต้องเจาะสูงขึ้น ซึ่งต้องการ Stabilization ที่สูงขึ้น และสามารถติดตั้งระบบทำความเย็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.120 ตัวอย่างผลจากความร้อนบนพื้นดินที่เป็นน้ำแข็ง
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

เครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างอุโมงค์

เครื่องจักรมีอยู่มากมาย แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง 2-3 จุด เพราะอุโมงค์บริเวณ soft ground นั้นเป็นวงกลม จึงต้องมีการค้ำยันถึงพื้นที่หน้าตัดมาก

Marc Brunel เป็นผู้บุกเบิกเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างอุโมงค์ จากความเป็นไปได้ 2 สิ่งคือ 1) การสังเกตหินที่สามารถเจาะได้โดยการเจาะแบบเกลียว 2) การเจาะรูเล็กๆใน soft ground มีความ stable กว่า การเจาะรูใหญ่ ซึ่ง 2 สิ่งนี้ได้นำมาใช้ในการสร้างเครื่องมือที่ใช้สร้างอุโมงค์ มีการป้องกันที่มากขึ้น แบ่งเป็น 5 องค์ประกอบดังนี้

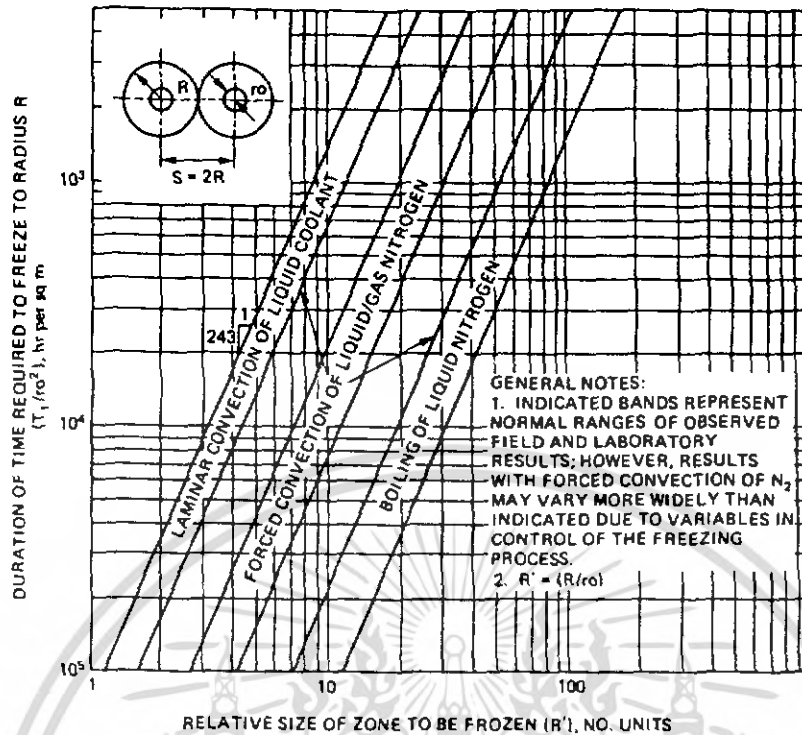
The cutting edge ทำการตัดบริเวณรอบๆ โดยตัดส่วนเกินที่ไม่ได้ถูกตัดโดยหัวขุดเจาะ ซึ่งบางส่วนอาจไม่ถูกตัดเนื่องมาจากการเรียงตัวของหัวตัด เป็นต้น

The body คือส่วนของเครื่องจักรโดยทั่วไปเป็นเหล็กทรงกระบอก ทั้งแนวตั้งและแนวนอน โดยจะทำหน้าที่แบ่ง zone ต่างๆออกตามขนาดที่ต้องเจาะซึ่งต้องมีความปลอดภัยและมีความ stable สูง

ตรงส่วนปลายของเครื่องจักรจะใช้เพื่อความปลอดภัยของคนงาน เพื่อมั่นใจว่าระบบการควบคุมจะไม่มีปัญหา

ระบบ Shove jack นั้นเพื่อการควบคุมระบบใบพัด ซึ่งอยู่รอบๆเครื่องจักร การทำงานจะมีการควบคุมทุกขั้นตอนให้เป็นไปตามขั้นตอนการขุดเจาะ

ในส่วนหน้าของ shield นั้นจะมี hood เพื่อป้องกันคนงานบริเวณใบหน้า โดยลำตัวและใบหน้าของคนงานจะได้รับการป้องกันในขณะที่ขุดเจาะ



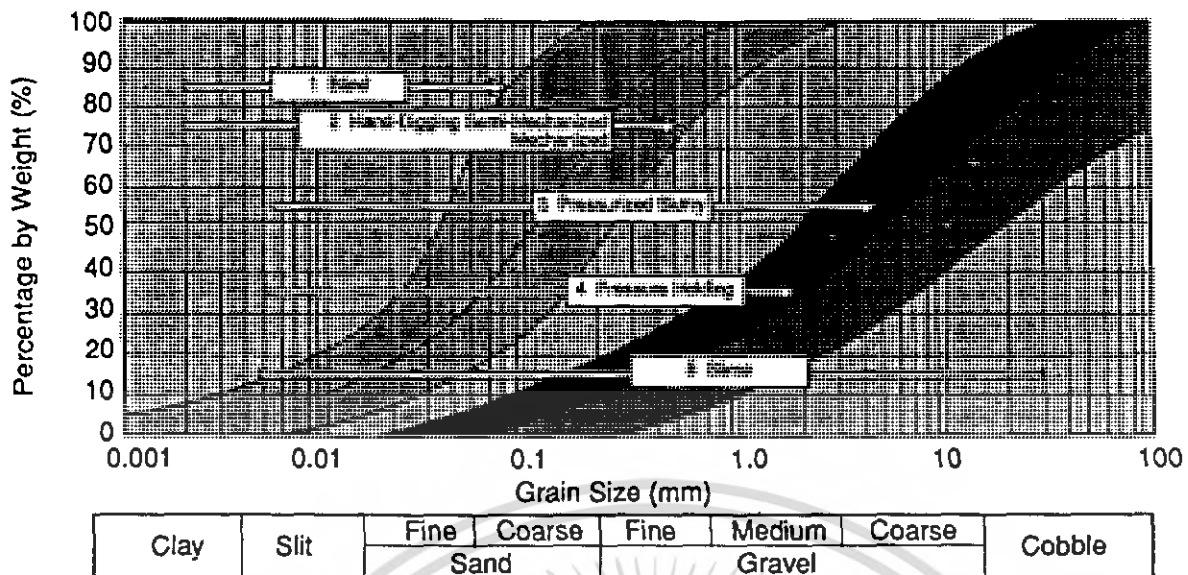
รูปที่ 4.121 การคำนวณหาระยะเวลาที่แข็งตัว(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การเลือกใช้เครื่องจักรในการขุดอุโมงค์บริเวณ soft ground

โดยการพิจารณาจากสภาพดิน น้ำ ขนาดอุโมงค์ ระบบการรองรับ สภาพการขุดเจาะ และสภาพแวดล้อมในการขุดเจาะ มีตัวแปรมากมายที่เกี่ยวข้อง ประเทศญี่ปุ่นนั้นต้องคำนึงเรื่องนี้มาก เพราะมีการขุดอุโมงค์บริเวณ soft ground มากมาย ซึ่งมีความยากแตกต่างกัน ต้องมีการเก็บข้อมูลมากมาย ซึ่งข้อมูลต่างๆ สามารถสรุปได้ใน Hitachi Zosen

รูป 4.122 แสดงการนำเครื่องจักรหลายชนิดไปใช้ในการขุดอุโมงค์เปรียบเทียบกับขนาด grain ตารางที่ 4.18 และ 4.19 นั้นแสดงข้อสรุปต่างๆ

โลกทุกวันนี้มีการสร้างอุโมงค์มากมาย โดยทั่วไปใช้เครื่องจักรที่ขุดเป็นวงกลม บางครั้งอาจมีรูปร่างที่แตกต่างไปจากนี้ได้ ขึ้นอยู่กับสถานที่ และสถานะที่เราไปขุดเจาะนั้นๆ



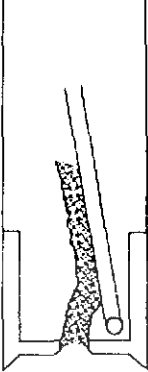
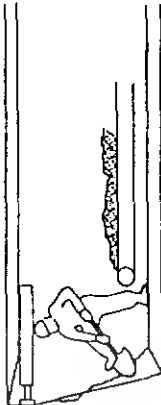
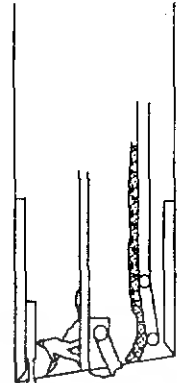
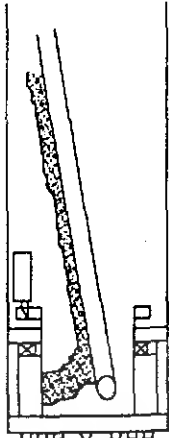
รูปที่ 4.122 การประยุกต์ใช้เครื่องจักรในดินอ่อนกับขนาดของเม็ดดิน
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การใช้ shield (หน้าかく) แบบง่าย

เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อความปลอดภัยของคนงานในการขุดเจาะ shield ที่เรานิยมใช้คือ Brunel shield การขุดเจาะด้วยมือนั้นต้องมีเครื่องป้องกันที่หน้าและหน้าอก การขุดเจาะนั้นต้องมีการดูแลเครื่องป้องกันอย่างเหมาะสมเมื่อมีการขุดเจาะที่ลึกมากขึ้นเรื่อยๆ

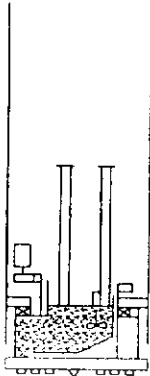
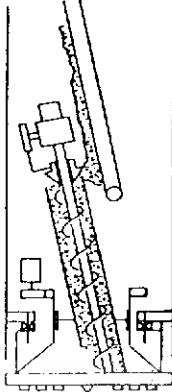
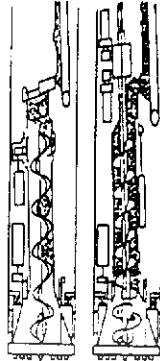
ขั้นตอนต่อไปคือการใช้ที่ขุดพิเศษ โดยยังคงมีเครื่องป้องกันที่หน้าและลำตัวเช่นเดิม แต่มีเพิ่มเติมในส่วนการป้องกันบริเวณใบหน้า

ตารางที่ 4.18 การใช้เครื่องจักร (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Type	Description	Note	Sketch
Blind shield	A closed face (or blind) simple shield used in very soft clays and silts. Muck discharge is controlled by adjusting the aperture opening and the advance rate.	Use in harbor and river crossing in very soft soils. Often results in a wave for mound of soil over the machine.	
Open face, hand-dug shield	Good for short, small tunnels in hard, non-collapsing soils. Usually equipped with face jack to hold breasting at the face. If soil conditions require it, this machine may have movable hood and/or deck.	A direct descendent of the Brunel shield. Now largely replaced by more mechanized equipment. Sometimes used at the head of large cross section, jacked tunnels.	
Semi-mechanized	Similar to the open face, but with a back hoe, boom cutter (roadheader) or the like.	Until very recently, the most common shield. Often equipped with "pie plate" breasting and one or more tables. Can have trouble in soft, loose, or running ground. Compressed air may be used for face stability in poor ground.	
Mechanized	A fully mechanized machine. Excavates with a full face cutter wheel and pick or disc cutters.	Manufactured with a wide variety of cutting tools for various soils. Face openings (doors, guillotine, and the like) can be adjusted to control the muck taken in versus the advance of the machine. May also be used with compressed air for face stability in poor ground.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 การใช้เครื่องจักร (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Type	Description	Note	Sketch
Slurry face machine	This machine uses pressurized slurry to balance the groundwater and soil pressure at the face. It has a bulkhead (closed face) to maintain the slurry must be piped down and recycled from the surface. It may also be equipped with a stone crusher for occasional cobbles. This machine is good for water bearing silts and sands with fine gravels.	Best for sandy soils: tends to gum up in clay soils; with coarse soils, face may collapse into the slurry. Coarse soils are defined as • Gravel content > 60% • Clay and silt content < 10% • Water content < 18% • Coefficient of permeability $\geq 10^{-2}$ cm/s • Cobbles greater than 8 in.	
Earth pressure balance (EPB) machine	This machine has a closed chamber (bulkhead) face that uses trapped water and soil material to balance the groundwater and/or collapsing soil pressure at the face. It uses a screw discharger with a cone valve or other means to form a sand plug to control muck removal from the face and thereby maintain face pressure to "balance" the earth pressure. It is good for clay and clayey and silty sand soils, generally below the water table.	Also best for sandy soils, with acceptable conditions defined as • Clay and silty content > 7% • Gravel content < 70% • Cohesive soils (not less than 40% clay and silt) have N-value < 15 • Water content > 18% in sandy soils and > 25% in cohesive soils	
EPB high-density slurry machine	A hybrid machine that injects a denser slurry (sometimes called slime) into the cutting chamber. Developed for use where soil is complex, lacks fines or water for an EPB machine, or too coarse for a slurry machine.	Has worked in soil with 85% gravel content and cobbles and boulders up to 20 in. x 10 in. x 7 in. Has worked in sandy gravel soil with N=30 to 50 and sandy or silty soil with N=5 to 35	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การเจาะแบบหลายหัว (multiple heading)

อุโมงค์บางอุโมงค์นั้นอาจมีหัวเจาะหลายหัว โดยแบบการเจาะนี้จะใช้ได้เฉพาะการเจาะช่วงสั้นๆเท่านั้น เมื่อมีการเจาะที่ยากขึ้นเช่นการเจาะอุโมงค์ในรฟไต้ดินแบบ 2 ช่องทางซึ่งมีแค่ช่องห่างไม่มากระหว่างรฟไต้กับ freeway ที่อยู่ด้านบน ในกรณีนี้อาจต้องใช้ multiple heading มาช่วย

อุโมงค์แบบ multiple heading อาจรองรับด้วยกระดุกและไม้กระดานโดยใช้ liner plate ช่วยในการบอกระดับ การดำเนินการนี้ต้องมีเวลาที่ยาวนานพอสมควร ต้องมีเครื่องมือที่สามารถเตรียมที่ก่อนการขุดเจาะด้วย

Soft ground tunnel support and lining

อุโมงค์ส่วนใหญ่ขุดเจาะแบบใดแบบหนึ่งใน TBM ที่กล่าวในบทที่ 11 ระบบ support ต่างๆนั้นมีลักษณะแบบใดแบบหนึ่งต่อไปนี้

1. ประกอบไปด้วยกระดุก (ribs) แบบ steel wide flange และ lagging โดยมี span ที่ทอดยาวรอบวงของอุโมงค์
2. ประกอบไปด้วย unbolted precast concrete ที่มีวงแหวนอยู่ในส่วนท้ายของเครื่องจักร
3. ประกอบไปด้วย bolted precast concrete ซึ่งมีวงแหวนอยู่เช่นเดียวกัน

การสร้างอุโมงค์บนความสัมพันธ์ของ support และ พื้นดิน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ถ้าหากมีการสร้างที่เชื่อมต่อดีและสม่ำเสมอ การเชื่อมต่อกันดีต้องมาจาก การขยายตัวของระบบ support , ระบบ grouting ซึ่งสิ่งเหล่านี้ต้องไม่ทำให้พื้นดินมีการเคลื่อนที่

เราต้องมีการดูแลอย่างเหมาะสม รวดเร็วในการปฏิบัติงานในระบบก่อสร้าง การออกแบบต่างๆต้องมีรายละเอียดที่มากพอ และจำเป็นต่อการก่อสร้าง

ในส่วนประกอบแบบที่ 1 และ 2 นั้น จะใช้คอนกรีตที่หล่อในที่ เราจะมีการติดตั้งท่อระบายน้ำและเชื่อมกันน้ำซึมทั้งในแบบที่ 1 และ 2 ทั้ง 2 แบบจะเป็น two-pass lining แต่ในแบบที่ 3 นั้นจะเป็น one – pass lining

ผลกระทบต่อพื้นผิวของการก่อสร้างอุโมงค์

เมื่อมีการก่อสร้างอุโมงค์นั้น จะมีผลกระทบต่อดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งอาจทำให้ดินทรุดตัว หรือโครงสร้างต่างๆเปลี่ยนไป ซึ่งวิศวกรต้องทำให้เกิดการทรุดตัวน้อยที่สุด ผู้รับเหมาก็ต้องควบคุมอุปกรณ์ต่างๆเช่นเดียวกัน

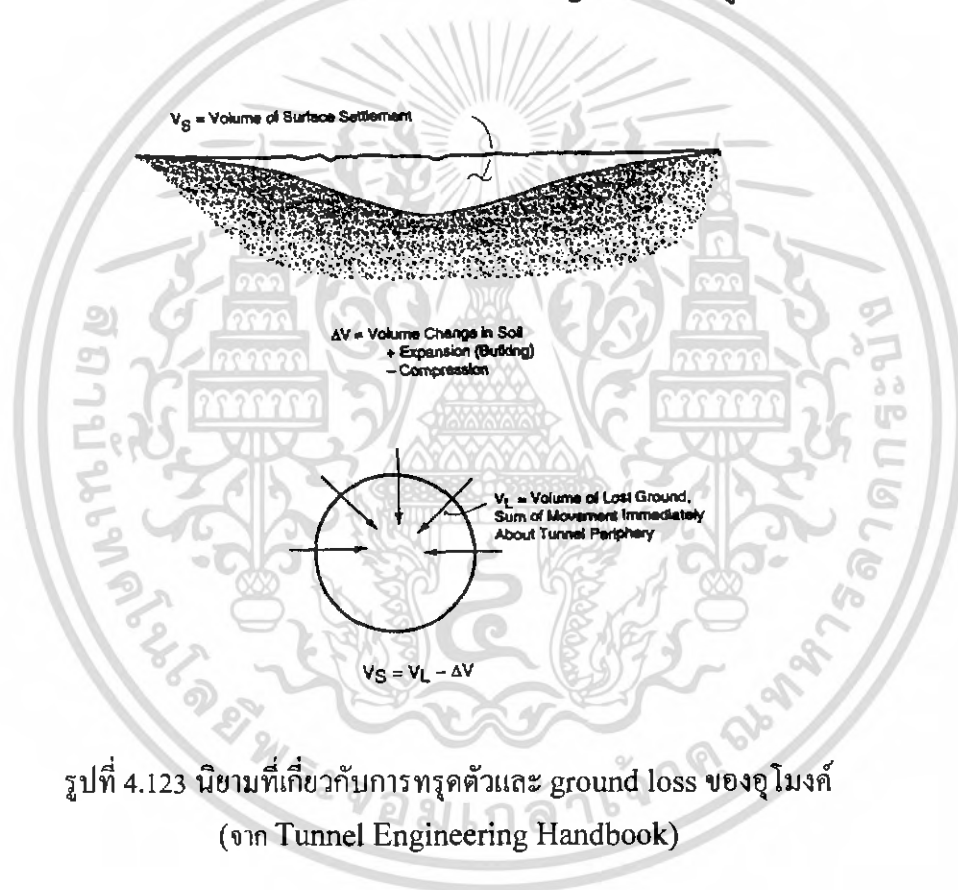
การทรุดตัวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง water table

เกิดจากกระบวนการลดปริมาณน้ำ หรือมีการระบายน้ำออก ซึ่งจะทำให้เกิดค่า effective stress เพิ่มขึ้น

อุโมงค์ที่สร้างในทรายหรือ gravel การทรุดตัวมีเล็กน้อยถ้าทรายไม่เคลื่อนที่ง่ายเกินไป สำหรับดินเหนียว silt , peats การทรุดตัวสามารถหาค่าได้ ซึ่งมักมีค่ามากกว่า ขึ้นอยู่กับความหนาและคุณสมบัติ

การทรุดตัวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นดิน

ในอดีตยังไม่มีข้อมูลในเรื่องการเคลื่อนตัวของพื้นดินมากนัก หลังจากปี 1970 นั้นก็มีการวิจัยและพัฒนามากขึ้นเช่น การสร้างรถไฟใต้ดินที่ Baltimore Washington D.C. ดังรูป 4.123



รูปที่ 4.123 นิยามที่เกี่ยวกับการทรุดตัวและ ground loss ของอุโมงค์
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

ΔV (Volume Change) = การเพิ่ม หรือลดลงของปริมาณของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์

V_s (Volume of Surface Settlement) = ปริมาณการทรุดตัวจากระดับพื้นดิน

V_L (Volume of Lost Ground) = ปริมาณการเคลื่อนตัวของดินทั้งหมดที่ออกจากบริเวณอุโมงค์นั้น

ความสัมพันธ์ของปริมาณ 3 สิ่งนี้ ซึ่งโดยทั่วไปเราประมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้จากปริมาณพื้นดินที่เคลื่อนตัวหายไป ซึ่งได้ทั้งการหาปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

การประมาณค่าพื้นดินที่เคลื่อนหายไป

พื้นดินที่หายไปใน soft ground นั้นจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุอย่างน้อย 9 อย่าง สามารถสรุปได้เป็น 3 อย่างดังนี้

- Face Losses การเคลื่อนที่ของดินส่วนก่อนที่จะถึง shield เกิดจาก raveling , caving, flowing, ruining, squeezing
- Shield Losses การเคลื่อนที่ของดินตรงบริเวณ shield เกิดจาก plowing, pitching , yawing เป็นต้น
- Tail Losses การเคลื่อนที่ของดินบริเวณ support system เกิดจากการขยายตัวของ support system , grouting

เราใช้ 2 วิธีการที่ใช้เพื่อการประมาณค่าดินที่หายไป ได้แก่ 1) การเก็บข้อมูลพื้นที่นั้นๆ เพื่อการประมาณค่าเป็น % ได้ เช่นที่ Washington D.C. จะมีค่าดินที่หายไปประมาณ 1% ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นประมาณ 1-1.5% ถึง 3% 2) การคำนวณโดยวิศวกรโดยใช้ค่าทางกลศาสตร์ของดิน การสร้างอุโมงค์ วิธีต่างๆ ซึ่งแสดงในตาราง 6-8

ทั้ง 2 วิธีนั้นจะถือว่าเครื่องจักรต่างๆ ไม่มี error ซึ่งในความเป็นจริงเป็นไปได้ การคำนวณก็จะปรับแก้เพื่อความถูกต้องมากขึ้นซึ่งอาจจะบวกเพิ่มประมาณ 1% ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นถ้าเกิดจาก yawing หรือ transversing ก็อาจเพิ่ม 1-2% เป็นต้น

ปัจจัยอื่นๆก็มีผลต่อการทรุดตัวเช่นกัน แต่ก็ยากที่จะหาค่าออกมา เช่น

- การเริ่มต้นการขุดเจาะ เช่น การสำรวจดิน คนงาน เทคนิค บางทีโครงการแต่ละโครงการมีความแตกต่างกันในรายละเอียด จำเป็นต้องมีการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อการควบคุมที่สร้างสรรค์ขึ้น มีคุณภาพมากขึ้น
- การพักงานก่อสร้าง และการเริ่มต้นการก่อสร้างใหม่ อาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น คนงานประท้วง หยุดงาน เครื่องมือเสีย อุบัติเหตุ ดินทรุด เป็นต้น ซึ่งอุโมงค์ต้องมี stabilization เพียงพอ ซึ่งบางครั้งอาจมีสภาพบางอย่างที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีการเริ่มงานใหม่ก็ต้องสามารถติดตามต่อได้ทันที ไม่เหมือนกับการเริ่มต้นจากศูนย์
- สิ่งกีดขวาง เช่น สิ่งกีดขวาง เช่น บ่อน้ำร้าง ธรรมชาติต่างๆ เนินดิน สิ่งปนเปื้อนต่างๆ แก๊สต่างๆ สิ่งเหล่านี้อาจต้องทำให้เกิดการพักงานก่อสร้างชั่วคราวได้
- พื้นที่ที่มีการสัณฐานมาก เช่น ในเมืองใหญ่ๆ ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการก่อสร้าง เช่นตามสี่แยกหรือตรงจุดที่อุโมงค์ 2 อุโมงค์มาตัดผ่านกัน ซึ่งจะยังทำให้เกิดค่าการทรุดตัวของดินมากขึ้นอีก และอาจทำให้น้ำสามารถไหลเข้ามาได้มากขึ้น การขุดเจาะต่างๆน้อยลง

เห็นได้ชัดว่ามีปัจจัยมากมายที่ทำให้เกิดการทรุดตัว ซึ่งวิศวกรและผู้รับเหมาต้องรับมือ และหาทางป้องกัน ซึ่งจำเป็นต้องใช้การตัดสินใจที่แม่นยำในการแก้ปัญหาเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีความเสียหายมากก็นั้นแสดงว่าอาจมีปัจจัยที่มากกว่านี้ได้แก่

- หินก้อนใหญ่ทำให้หัวตัดเปลี่ยนทิศทาง
- การเคลื่อนตัวของทรายและ silt
- การบีบอัดตัวของ clay และ silt
- การขุดเจาะที่ไม่สมดุล

ดังนั้น การคำนวณปริมาณดินที่สูญหายไปจึงเป็นศิลปะที่ซับซ้อนสำหรับวิศวกรและผู้รับเหมา ที่ต้องมีความรู้ที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.20 ปริมาณของ Ground loss และคุณภาพของอุโมงค์
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Case	V_L %
Good practice in firm ground • Applies to better soils and excellent ground control	0.5
Good practice in slowly raveling ground • Considered good ground	1.5
Fair practice in fast raveling ground • More shield and tail loss	2.5
Poor practice in cohesive running ground • Yet more shield loss • Tail void mostly unfilled by grouting and/or support expansion of the initial support	4.0 or more

การกระจายตัวของการทรุดตัว

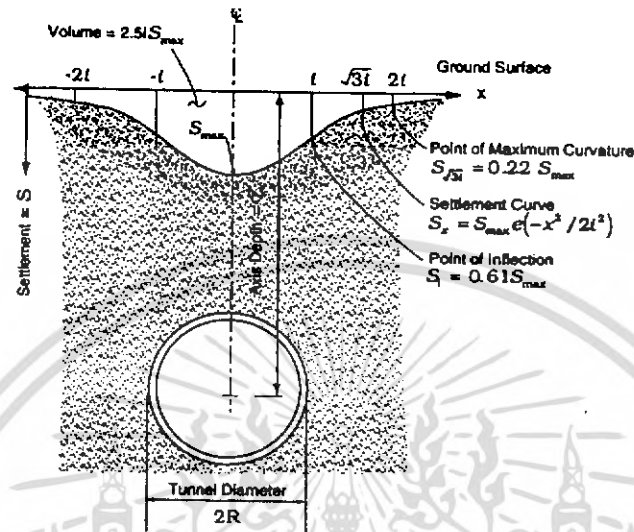
ในอุโมงค์เดี่ยว การทรุดตัวนั้นสามารถหาได้จากค่าดินที่สูญหายไป โดยทั่วไป การกระจายจะเป็นแบบรูปประจักษ์หรือการกระจายปกติ สามารถแสดงได้ในรูป 6-18 ในทุกกรณีที่เกิดการทรุดตัว โดยถือว่าไม่มีค่า stiffness

ในทางเรขาคณิตของอุโมงค์ที่ซับซ้อนขึ้น การทรุดตัวจะขึ้นกับวิธีการก่อสร้าง และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยวิศวกรสามารถที่จะสร้างสมมุติฐานได้ดังต่อไปนี้

- อุโมงค์ที่ขนานกัน 3-4 ช่องทาง การทรุดตัวจะทราบโดยการสร้างการกระจายออกมาในแต่ละอุโมงค์ ซึ่งต้องมีความละเอียดมากขึ้นดังตาราง 4.20 การคำนวณต่างๆที่ไม่มีในตารางสามารถเทียบบัญญัติได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขุดเจาะนั้นจะเริ่มที่ได้คู่มือก่อนเพราะการเจาะด้านล่างจะรบกวนดินที่ด้านบน ดังตาราง 4.20 การกระจายตัวของทรุดตัวนั้นหาได้จากค่า i ดังรูป 4.124 ค่าสูงสุดของการทรุดตัวนั้นคือปริมาตรหารด้วย $2.5i$



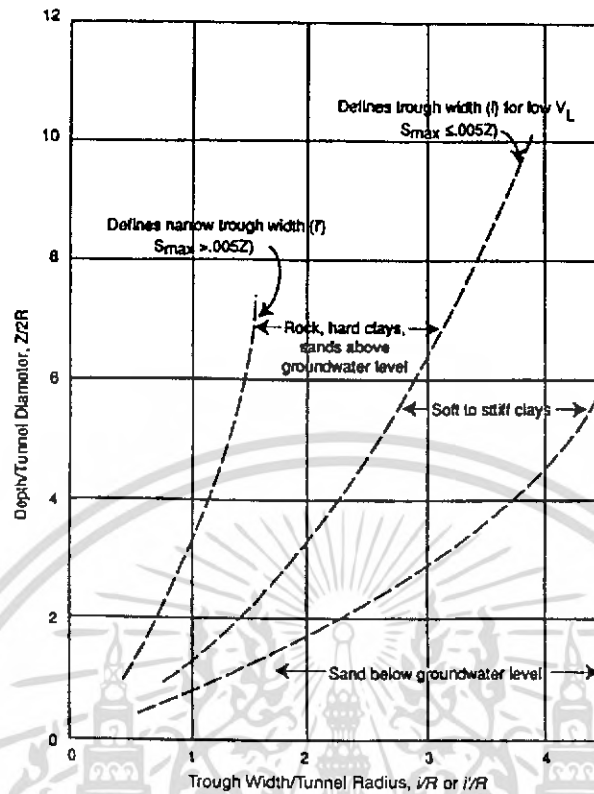
รูปที่ 4.124 คุณสมบัติความเป็นไปได้ของส่วนโค้งที่ใช้แทนรูปตัดการทรุดตัวเหนือคู่มือ
(Adapted from Peck, 1969) (จาก Tunnel Engineering Handbook)

รายละเอียดต่าง ๆ นั้นมีความซับซ้อนมากในการคำนวณ ในคู่มือที่ขึ้น ค่าการทรุดตัวจะเป็น non-linear เพราะดินที่มีการเคลื่อนตัวได้ง่ายก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้มาก เช่นเดียวกับการสร้างคู่มือในทราย อย่างไรก็ตามสามารถทำให้สะดวกขึ้นตามรูปที่ 4.125 ได้

ผลกระทบของการทรุดตัว - ความเสียหายในโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้น

วิศวกรควรประมาณความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง โดยทั่วไปมีความเสียหายที่อาจเกิดได้ดังต่อไปนี้

- ความเสียหายทางสถาปัตยกรรม เช่น เกิดรูปร่างที่เปลี่ยนไป เช่น การ crack ในส่วนของผนัง พื้น
- ความเสียหายในการนำไปใช้ คือ มีการทำงานที่เปลี่ยนไปต่อการนำไปใช้ เช่น ประตู หน้าต่างที่มีปัญหาผนังที่ลาดเอียง ซึ่งอาจมีผลกระทบต่างๆได้



รูปที่ 4.125 สมมติฐานของความกว้างของการทรุดตัว (Adapted from Peck, 1969)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

- ความเสียหายในโครงสร้าง คือ มีผลต่อ stability ของโครงสร้าง ซึ่งอาจทำให้เกิด การแตกร้าว ในส่วนของ คาน เสา และ ผนังที่รับแรงกระทำ

ทางเลือกต่างๆ ได้เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบที่มีต่อการทรุดตัวของการก่อสร้าง ดัง การก่อสร้างใน Skempton และ Macdonald ที่พบว่ามี ความเสียหายมากมายเกิดขึ้นต่อ โครงสร้าง ผนังรับแรง ต่างๆ ดังตารางที่ 4.21

โดยปกติแล้ว โครงสร้างผนังที่รับ load จะมีโอกาสเกิด crack นั้นคิดเป็นสัดส่วน 1/300 ซึ่ง ในทางปฏิบัติอาจประมาณ 1/600 ซึ่ง ในเสา หรือ ฐานรากนั้นอาจมีค่าได้ถึงประมาณ 1 นิ้ว

เราต้องป้องกันการทรุดตัวที่เกิดจากอุโมงค์เอง โดยต้องตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ดังต่อไปนี้

- การควบคุมที่เหมาะสมทุกชั้นตอน
- การจำกัดขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง ลดผลกระทบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อน
- ติดตั้ง ground support อย่างรวดเร็ว
- มีความรวดเร็วในการทำ pea-graveling, grouting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ข้อจำกัดของ Angular Distortion (Wahls, 1981)
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Category of Potential Damage	Angular Distortion
Danger to machinery sensitive to settlement	1/750
Danger to frames with diagonals	1/600
Safe limit for no cracking of building ^a	1/500
First cracking of panel wall	1/300
Difficulties with overhead cranes	1/300
Tilting of high rigid building becomes visible	1/250
Considerable cracking of panel and brick walls	1/150
Danger of structural damage to general building	1/150
Safe limit for flexible brick walls ^a	1/150
^a Safe limit includes a factor of safety	

ในกรณีพิเศษ อาจต้องมีข้อควรระวังเพิ่มเติมดังนี้

- การใช้ compressed air
- การทำ grouting เพื่อลดการทรุดตัวก่อนการสร้างอุโมงค์
- การทำ grouting เพื่อลดการทรุดตัวในขณะที่สร้างอุโมงค์
- การทำ Freezing ก่อนการสร้างอุโมงค์
- การใช้ Compaction grouting ระหว่างอุโมงค์และฐานราก
- โครงสร้างที่หนูนอุโมงค์ในวิธีการต่างๆ

วิธีการป้องกันในการก่อสร้าง

ในอดีต ถ้าเราทราบว่าจะเกิดการทรุดตัว เราจะป้องกันโดยใช้วิธี 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1) การสร้างโครงสร้างที่หนูนด้านล่าง รวมถึงการใช้ฐานรากที่ลึกขึ้นแต่ไม่มีผลต่ออุโมงค์ แต่มีข้อเสียตรงที่มีราคาแพง ทางที่ดูน่าจะเป็นการใช้เทคโนโลยีที่สูงขึ้น การควบคุมที่เข้มงวด ซ่อมแซมให้ตรงจุด ซึ่งวิธีนี้มีการดำเนินการที่ราคาถูกลง

ใน coarse grain นั้นจะใช้ Permeation grouting เพื่อปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีการใช้ construction pit เป็นวิธีการที่สามารถลดการทรุดตัวได้อย่างดี แต่มีราคาสูงมากเช่นกัน

เทคนิคใหม่อีกวิธี คือ การใช้ compaction grouting ซึ่งใช้เป็นครั้งแรกใน Baltimore ซึ่งลดการทรุดตัวได้ถึง $\frac{3}{4}$ นิ้ว ในตัวอย่างที่ยังไม่ grout นั้นลดการทรุดตัวได้ $\frac{1}{4}$ นิ้ว ซึ่งได้นำไปใช้ใน Los Angeles ในการสร้างรถไฟใต้ดินในอุโมงค์คู่ใน sandy soil ได้อาคาร 16 อาคาร

Compaction grouting นั้นใช้ grout ที่มีความเหนียวแล้วฉีดลงไป ผ่านท่อไปสู่อุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจุดหลักคือกาฉีด grout ไปสู่บริเวณดินที่อ่อนและเคลื่อนตัวง่าย เพื่อประโยชน์คือ โครงสร้าง โดยมีการควบคุมเวลา ความดัน เพื่อป้องกันการเกิดการทรุดตัว โดยเน้นบริเวณที่อาจเกิดการทรุดตัว ก่อน เพื่อจะทราบว่าการ grouting เมื่อใดนั้น วิศวกรต้องศึกษาเรื่องการทรุดตัวในระดับความลึกต่างๆของดิน เป็นอย่างดี

ในการป้องกันการทรุดตัวอีกทางหนึ่งคือการใช้ผนังป้องกัน อาจเป็นแบบที่ผสม ดินกับซีเมนต์ ที่พบในอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่นตามลำดับ และอาจใช้วิธีแบบ cut and cover ได้ เนื่องจากค่า stiffness ของ กำแพงนี้ทำหน้าที่เหมือนโครงสร้าง cut-off เพื่อช่วยในเรื่องการโก่งด้นข้าง

การดำเนินการภาคปฏิบัติของวิศวกรรมอุโมงค์

การดำเนินการภาคปฏิบัติขึ้นกับประสบการณ์ จากรายงานของ Kuesel ใน rapid transit rail ซึ่งบรรยายในการก่อสร้างภาคปฏิบัติอย่างละเอียด โดยกล่าวถึงเนื้อหาในบทที่ 5 และ 7 ด้วย

การก่อสร้างอุโมงค์

การก่อสร้างอุโมงค์นั้นคล้ายคลึงกับการทำนาฬิกาข้อมือของสวิส หมายถึงต้องมีความรวดเร็ว ซึ่งต้องมีความแม่นยำในเรื่องระดับ และตำแหน่งต่างๆ

การออกแบบไม่มีความสมบูรณ์แบบ 100% โดยเฉพาะโค้งต่างๆ ต้องดูแลเครื่องจักรมากเป็นพิเศษ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมหน้างาน ซึ่งต้องคำนึงถึงระยะเวลา และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ด้วย

ในการก่อสร้างนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง วิศวกรต้องเป็นผู้กำหนด center line และ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังและประสบการณ์สูง เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน และต้องมีความรวดเร็วทันเวลาด้วย ผู้รับเหมาก็ต้องมีความแม่นยำด้วยเช่นกัน

การออกแบบที่ดีนั้นก็เพื่อจะทำให้เกิด error ที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นการยากหากเจอสภาพดินที่ไม่ คาดหมาย หรือคลาดเคลื่อนจากคน จากเครื่องจักร ถ้ามีความคลาดเคลื่อนมากไป ต้องมีการหยุดพักการขุดเจาะ ซึ่งต้องมีการตรวจสอบค่าต่างๆใหม่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความล่าช้า และค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น การดำเนินการสร้าง ต่อไปอาจเกิดอันตรายได้

การออกแบบที่ดีต้องมีการปรับแก้หน้างานเพียงเล็กน้อย เช่น การปรับระดับในการขุดเจาะ ต้องไม่มากเกินไป เป็นต้น ถ้าการดูแลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยลง ตัวอย่างเช่น รถไฟใต้ดิน Trans – Bay ใน San Francisco มีการคลาดเคลื่อนมากกว่า 2 ฟุต จากแบบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายมากมายจากการตรวจสอบ alignment ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งไม่มีใครรู้นอกจากวิศวกร และ ผู้รับเหมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้น ก็ต้องมีการแก้ไขเป็นระยะๆ เพื่อดูแลค่าต่างๆ ให้เหมาะสม ซึ่งมีการดำเนินการต่างๆ ดังนี้

1. สำรวจเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบ lining รวมถึงความหนาที่ใช้
2. มีการใช้ lining มากขึ้น และใช้เหล็กเสริมแบบเส้นและแบบ plate เพื่อเสริมกำลังวัสดุ
3. ลดขนาดความหนาโดยใช้ lining ด้วยเหตุผลทางสภาพพื้นที่

การวิเคราะห์ lining และการออกแบบ

ความหนาของ lining ที่ใช้ขึ้นกับ load และ stress ต้องมากกว่า design load และถ้าเป็น precast concrete นั้นจะขึ้นกับระยะระหว่าง bolt โดยทั่วไป precast segment จะมีความหนา 8 นิ้ว ซึ่งถ้าคำนึงถึงค่า load อย่างเดียว 6 นิ้วก็น่าจะพอ

Liners ที่ใช้กับคอนกรีตที่หล่อในที่ ใช้ความหนา 12 นิ้ว จากประสบการณ์นั้น nominal design จะมีค่าน้อยกว่า 12 นิ้ว ซึ่งยากที่จะให้คอนกรีตไหลผ่านไปที่ที่ต้องการ ในที่นี้ต้องมีการเสริมเหล็กด้วย ซึ่งพบว่าขนาดใช้ความหนา 12 นิ้วนั้น บางทีร่องฝังคอนกรีตก็ปรากฏออกมาให้เห็น ซึ่งก็ต้องมีการซ่อมแซมกันต่อไป

ในบางที่นั้น อาจใช้ความหนาน้อยกว่านี้ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่า strength แล้วความหนาไม่ควรเกิน 8 นิ้ว ซึ่งอาจทำไม่ได้จริงในคอนกรีตที่หล่อในที่แบบบางๆ ซึ่งหากทำได้ก็จะมีความแข็งแรง

การวิเคราะห์เรื่อง lining นั้นเป็นศิลปะที่ไม่คงที่ตายตัว เช่น การหาค่าของ stress ในสะพานเหล็ก แรงกระทำที่มาจากน้ำหรือน้ำใต้ดินนั้นยากที่จะประมาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยน TBM และ support อุโมงค์ตอนเริ่มต้น ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณอย่างมากมาย

โดยทั่วไปนั้น การวิเคราะห์ส่วน lining ก็จะมีการหาคำนวณ ค่า stress ตามแนวแกน และค่า bending stress ซึ่งสามารถหาค่าออกมาได้ตามสมการ

ถ้าเป็น two - state lining การคิด bending stress จะต้องคิดรวมกับ initial support ของอุโมงค์ด้วย ซึ่งจะมีในส่วนของ shearing stress ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติในอุโมงค์ทั่วไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนพื้นดินสิ้นสุดลง อุโมงค์ที่เปิดออกแล้วก็จะ stable และรับ load ของตัวเอง stress บางส่วนก็จะถ่ายเทไปสู่ lining เมื่อเวลาผ่านไป

ข้อควรทราบอีกอย่างหนึ่งคือต้องรองรับได้เวลาเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งอาจทำให้พื้นดินมีการเปลี่ยนรูปร่าง เช่นการเปลี่ยนจากสี่เหลี่ยมเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม เปลี่ยนวงกลมเป็นวงรี การกำหนดความหนาของ lining ไม่ได้ช่วยในการลดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ แต่ lining ที่บางจะช่วยในการยืดหยุ่นมากกว่าที่ความหนามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมทางวิศวกรรมที่ Los Angeles สามารถทำนายความรุนแรงในการเปลี่ยนรูปร่างได้ และประเมินความเสียหายที่เกิดกับ lining ได้ ซึ่งใน L.A. นั้นมี lining ที่ไม่เกิน 12 นิ้ว

การออกแบบเพื่อรองรับแผ่นดินไหวของอุโมงค์ใน soft ground

ถึงแม้ว่าอุโมงค์นั้นมีความเสียหายน้อยกว่าสิ่งก่อสร้างด้านบนเมื่อเกิดแผ่นดินไหว แต่ก็ก่อเกิดความเสียหายเช่นกัน ซึ่งต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ เกี่ยวกับแผ่นดินไหวต่อไปนี้

- ข้อมูลในอดีตเกี่ยวกับแผ่นดินไหว ความรุนแรง
- สาเหตุที่เกิดขึ้น
- หลักฐานที่เกี่ยวข้องในการเกิดแผ่นดินไหว
ซึ่งในทางปฐพีศาสตร์นั้นก็ต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆดังนี้
- ความลึกของชั้นหินด้านล่าง
- โครงสร้างและคุณสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ
- สถานที่ของ water table , เสถียรภาพของดิน
- ข้อมูลทางดิน ความเร็วของ shear จากแผ่นดินไหว

ข้อมูลเหล่านี้ต้องเก็บอย่างระมัดระวัง มีการก่อสร้างหลายครั้งที่ไม่สามารถทำได้จากผลกระทบของแผ่นดินไหว ซึ่งความแน่นอนก็คือความไม่แน่นอน เมื่อเกิดแผ่นดินไหวแล้วต้องไม่ให้เกิดการถล่มลงมา แต่หลังจากนั้นต้องมีการสร้างต่อหรือซ่อมแซมอย่างรวดเร็วและปลอดภัย

ผู้เชี่ยวชาญในเรื่องแผ่นดินไหวนั้นจะเป็นผู้หาค่าของแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่อาจเกิดขึ้น วิศวกรก็จํานําค่านี้ออกแบบค่า maximum design earthquake (MDE) และค่า operating design earthquake (ODE)

- MDE จะเกิดในรอบ 1000 ปี ซึ่งมีความเป็นไปได้น้อยมากประมาณ 5% หรือน้อยกว่านั้น เพื่อใช้ออกแบบให้เกิดความปลอดภัย
- ODE จะเกิดในรอบหลายร้อยปี ซึ่งเป็นไปได้มากกว่า 40%

ผลกระทบหลักของแผ่นดินไหว

ผลกระทบหลักที่มีผลต่อแผ่นดินไหวแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

Faulting เช่นการเกิดการโก่งตัวของชั้นหิน ซึ่งเป็นการขยักที่เราจะ design ออกมาเพื่อรองรับ แต่เราสามารถจำกัดมีความเสียหายที่น้อยที่สุดได้

การหาทิศทางและตำแหน่งที่เกิดขึ้นของ faulting นั้นเป็นเรื่องท้าทาย การวิเคราะห์ทางแผ่นดินไหวนั้นไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนในเรื่องดังกล่าว ซึ่งเราอาจต้องวิเคราะห์ทั้งใน tension และ compression

ในท่อระบายน้ำนั้น การออกแบบนั้นค่อนข้างมีข้อจำกัดมาก โดยต้องคำนึงถึงค่าการโก่งทาง ด้านข้างด้วย รวมถึง compressive load เป็นต้น

ใน L.A. นั้นเราใช้ ductile steel lining และไม่ใช่ segmented concrete เพราะอาจทำให้เกิดการโก่ง ความเปราะ และต้องมีการระวังการรั่วของมีเทน ไม่มี fault crossing

เมื่อใดที่เกิด faulting การเคลื่อนตัวก็อาจเกิดขึ้นได้ ในซานเมืองก่อให้เกิดความเสียหายมาก การหาต้นเหตุและรีบแก้ไขในจุดนั้นจะช่วยได้มาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง มีขั้นตอนการสำรวจที่ค่อนข้างซับซ้อน ต้นทุนที่ใช้ก็มีค่าสูงไปด้วย

การทำนายการโก่งตัวจาก faulting นั้นกล่าวถึงใน Bonilla ซึ่งมีค่าต่างๆตั้งแต่ ไม่กี่ เซนติเมตร ถึงเป็นเมตร

Shaking หรือการสั่นสะเทือน ทำให้ wave เคลื่อนแผ่นดินไหวไปตามดิน วิศวกรจะต้อง คำนึงถึง shear wave ที่ทำให้เกิดการโก่งตัว ซึ่งไม่ทราบว่าเป็นจุดใด wave จะขนานไปกับแนวแกน ซึ่งทำให้เกิด การเปลี่ยนรูปร่างอุโมงค์ โดยจะเคลื่อนไปมา ซึ่งทำให้คุณสมบัติดินเปลี่ยนไป

การเสียรูปต่างๆ นั้นเป็นผลกระทบที่เกิดจาก wave แผ่นดินไหว เสมือนว่าอุโมงค์และดิน เคลื่อนที่ไปพร้อมกันคล้ายกัน

ถึงแม้ว่าการโก่งตัวจะมามาก แต่จะกระจายออกไปเป็นทางยาว จึงทำให้เกิดการเสียรูปเล็กน้อย อาจเกิด strain หรือ ไม่เกิดขึ้นอยู่กับวัสดุ ซึ่งจะมีผลต่อ ductility ต่อไป

Strain ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวแบบ

ค่า strain ที่มากที่สุดสามารถหาได้จากสมการ

$$\epsilon_L = \frac{V_{\max}}{2C_{se}} \pm 0.7R \frac{A_{\max}g}{C_{se}^2}$$

ϵ_L = longitudinal strain in lining

$V_{\max}$ = maximum particle velocity

$A_{\max}$ = maximum acceleration in gravity units

g = acceleration gravity

C_{se} = effective shear wave velocity

R = centerline radius of tunnel lining

ตัวแปรแรกคือ free-field compressive / tensile strain ที่ขนานกับอุโมงค์ ตัวที่สองคือค่า bending ในแนวขวางจากการเคลื่อนที่แบบงอของอุโมงค์ ค่า strain จะต้องมีค่าที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strain ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวในแนวรอบ

Strain ที่เกิดตามแนวรอบนั้นจะทำให้เกิด shear wave ดังจากกับแกนอุโมงค์ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งบางครั้งก็มีค่ามากและมีผลต่อโครงสร้างโดยตรง ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์โดยใช้ finite element ในโปรแกรมต่างๆ เช่น ABACUS หรืออาจหาได้จากสมการต่อไปนี้สำหรับอุโมงค์วงกลม

$$\varepsilon_{rack} = \frac{V_{\max}}{C_{se}} \left[2 \frac{t}{R} + \frac{3E_m R}{16E_L t} \right]$$

$$\varepsilon_{rack} = 2 \frac{V_{\max} t}{C_{se} R}$$

ε_{rack} = strain induced by racking

t = lining thickness

E_m = modulus of elasticity of soil

E_L = modulus of elasticity of lining

$V_{\max}$ = maximum particle velocity

C_{se} = effective shear wave velocity

R = centerline radius of tunnel lining

ค่า strain ต่างๆนี้เป็นการคำนวณการออกแบบพื้นฐาน ซึ่งทนต่อการเสีรูปจากแผ่นดินไหว โดยการใช้สัดส่วนของค่า strain จากแผ่นดินไหว กับค่า strain ที่ทำให้เกิดการ failure ณ จุดนั้นๆ

ในการใช้สมการ 6-4 และ 6-5 ต้องเป็นไปตามสมมุติฐานดังนี้

- ค่า flexibility ratio มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 20
- ค่า wave length ในความเร็วสูงสุดต้องมีค่าน้อย 8 เท่าของความกว้างอุโมงค์
- ค่า tensile cracking จากแผ่นดินไหวต้องยอมรับได้ มีค่ามากกว่า normal strain ที่น้อยกว่า 0.003 นิ้ว/นิ้ว

เราต้องทราบว่า การเสีรูปที่มีมากมีความสัมพันธ์กับการออกแบบโครงสร้างเพื่อแผ่นดินไหว , shear wave , modulus of elasticity ของดิน ซึ่งจะมีค่าน้อยลงเมื่อมีการสั่นสะเทือนน้อยลง สำหรับดินแบบ soft นั้นค่า velocity ratio จะมีค่าประมาณ 2-3 และ E แปรผกผันตรงกับ C_2 และค่า modulus ratio มีค่า 4 ถึง 9

4.4 การตรวจสอบและบำรุงรักษาสภาพอุโมงค์ใต้ดิน

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาได้มีการคำนึงถึงโครงสร้างพื้นฐานของอุโมงค์ที่ใช้งาน โดยเฉพาะในอเมริกาที่มีการก่อสร้างก่อนสงครามโลกครั้งที่2 เนื่องจากมีอายุการใช้งานมาก การสร้างใหม่นั้นมีต้นทุนสูงมาก การฟื้นฟูให้คงสภาพเดิมจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

การฟื้นฟูสภาพอุโมงค์จึงเกิดความนิยมอย่างรวดเร็ว เพื่อขนส่งน้ำ ขนพาหนะต่างๆ ที่จำเป็นต่อความเจริญในเมือง การฟื้นฟูให้คืนสู่สภาพเดิมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อความเจริญในเมือง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดูแลระดับ การซ่อมแซมโดยการดูแลการก่อสร้างอย่างเหมาะสม เพื่อการทำงานอย่างดีของอุโมงค์

4.4.1 วิธีการตรวจสอบอุโมงค์เพื่อการฟื้นฟูสภาพ

ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลออกแบบ

สิ่งที่สำคัญในการฟื้นฟูสภาพอุโมงค์คือ ความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างเดิมและกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป รวมถึงแผนต่างๆตลอดจนข้อจำกัดเงื่อนไขต่างๆของอุโมงค์นั้นๆ

แผนและข้อจำกัดต่างๆนั้นได้มาจากข้อมูลทางวิศวกรรม เช่น รูปถ่าย บันทึกการก่อสร้าง ข้อมูลทางสังคม ประวัติศาสตร์

ข้อมูลทางประวัติศาสตร์จะบอกเราถึงระบบการทำงานของอุโมงค์ รายการคำนวณที่จำเป็น แผนการก่อสร้าง รวมถึงเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้าง

จุดประสงค์การตรวจสอบสภาพอุโมงค์

จุดประสงค์ของการสำรวจนั้นเพื่อการตรวจเอกสาร สภาพทางกายภาพ ข้อจำกัดพื้นฐานเพื่อการหาคุณสมบัติต่างๆของระบบอุโมงค์ สภาพหรือเงื่อนไขต่างๆจะทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานของอุโมงค์เพื่อการป้องกันความเสียหายทางโครงสร้าง รวมถึงสภาพการลงทุนที่เกิดขึ้น

สภาพต่างๆของอุโมงค์ทำให้เราทราบถึงการนำไปใช้ เช่น ระบบขนส่งต่างๆ ระยะเวลาที่ทำการปิดปรับปรุง รวมถึงอุโมงค์ที่ใช้ในการถ่ายเทของเหลว เช่น น้ำ ทั้งทางกายภาพ และการขนส่งขนพาหนะในระยะทางที่ห่างไกล (ROVs) ซึ่งมักจะได้อาจจากอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก คือ

เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 60 นิ้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่ต่ำลงไปจากพื้นดิน อาจมีการบันทึกภาพจากวิดีโอ เพื่อบันทึกประโยชน์ใช้สอยและสภาพทางกายภาพต่างๆ

ในอุโมงค์ที่ขุดถ่ายของเหลว การตรวจสอบอาจยากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีความคล้ายคลึงกับอุโมงค์ที่ขุดถ่ายขนพาหนะต่างๆเช่นกัน

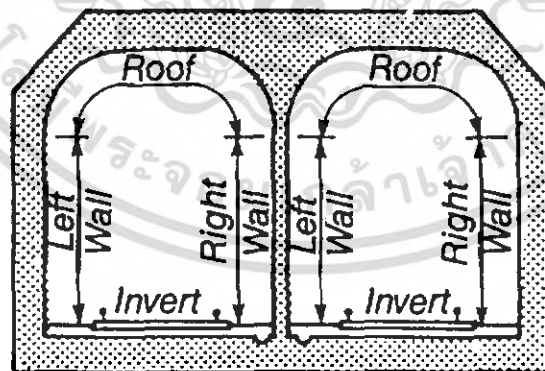
การตรวจสอบการทำงานของคนงานและเครื่องมือที่ใช้

อุโมงค์ที่ขุดถ่ายขนพาหนะควรมีคนงานทีมละ 3 คน เพื่อดูแลพื้นที่หน้าตัดต่างๆ ของอุโมงค์ ดังรูปที่ 4.126 ถึง 4.129 เมื่อการก่อสร้างดำเนินไป จำเป็นต้องมีการตรวจสอบการทำงานของ คนงานเหล่านี้ โดยมีการจดบันทึก เอาไว้ อุโมงค์ต่างๆควรมีการสำรวจในเวลาใกล้เคียงกันเพื่อ การเปรียบเทียบตามตาราง 4.22

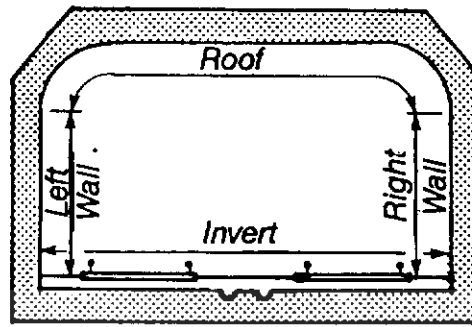
เงื่อนไขของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในระบบอุโมงค์นั้นแบ่ง ได้ดังนี้

- เครื่องมือเคียว
- เครื่องมือที่เป็นชุด
- เครื่องมือเพื่อความปลอดภัย

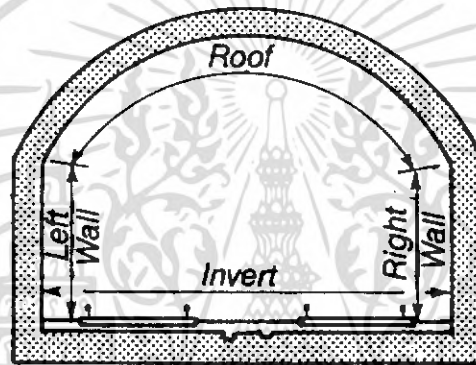
เครื่องมือต่างๆนั้นแยกตามประเภทการนำไปใช้ เช่นเป็นแบบอันเดียวๆ หรือแบบเป็น ชุด โดยเครื่องมือเพื่อความปลอดภัย นั้นก็ใช้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมืออื่นๆ



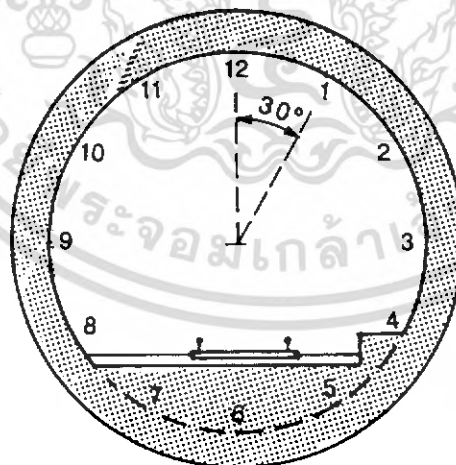
รูปที่ 4.126 กล้องของอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์คู่
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.127 กล้องอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์เดี่ยว
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.128 อุโมงค์แบบส่วนโค้งหลังคา แบบอุโมงค์เดี่ยว
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.129 รูปแบบอุโมงค์แบบวงกลม
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

ตารางที่ 4.22 สัญลักษณ์ตัวแปรมาตรฐาน (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Symbol	Identification	Symbol	Identification
Concrete Spalls		Framing Steel	
S-1	Concrete spalls less than 2"	F-1	Surface rust
S-2	Concrete spall to re-rod	F-2	Loss of section -%
S-3	Concrete spall behind re-rod	F-3	Out of plane -H=Horz. , V=Vert.
S-4	Special concrete spall	F-4	Broken
Concrete Delaminations		F-5	Buckled
D	Delamination	F-6	Other -requires extensive notes
Tunnel Cracks		Steel Liner Plate Segments	
C-1	Less than 1/8 inch (3 mm)	P-1	Surface rust
C-2	1/8 inch to 1/4 inch (3-6 mm)	P-2	Loss of section -%
C-3	1/4 inch to 1/2 inch (6-12 mm)	P-3	Out of plane -H=Horz. , V=Vert.
C-4	Grater than 1/2 inch (12 mm)	P-4	Broken
Tunnel Joints		P-5	Buckled
J-1	Joint less than 1/8 inch (3 mm)	P-6	Other -requires extensive notes; sketches
J-2	Joint 1/8 inch to 1/4 inch (3-6 mm)	Steel Liner Plate Flanges	
J-3	Joint greater than 1/2 inch (12 mm)	FL-1	Surface rust
J-4	Special joint -requires extensive notes	FL-2	Loss of section -%
Reinforcing Steel		FL-3	Out of plane -H=Horz. , V=Vert.
R-1	Surface rust	FL-4	Broken
R-2	Loss of section -%	FL-5	Buckled
R-3	Out of plane -H=Horz. , V=Vert.	FL-6	Other -requires extensive notes
R-4	Broken	Precast Concrete Liner Segment	
R-5	Buckled	SC-1	Concrete spalls less than 2" (5.0 CM)
R-6	Other -requires extensive notes	SC-2	Concrete spall to re-rod
Bolt Connections		SC-3	Concrete spall behind re-rod
B-1	Surface rust	SC-4	Special concrete spall
B-2	Loss of section -%	SC-5	Other -requires extensive notes
B-3	Out of plane -H=Horz. , V=Vert.	SCD	Delamination
B-4	Broken	Tunnel Moisture	
B-5	Buckled	M	Moist
B-6	Other -requires extensive notes	PM	Past Moisture
B-7	Bolt missing	GS	Glistening Surface
Tunnel Brick		F	Flowing
BR-1	Loss of section, depth=in.,(cm)(M ²) Area=S.F.	D	Dry
BR-2	Loss of mortar -F T ² . (M ²)	Notes: 1. For steel sets in rock tunnels, use same terminology as for framing steel. 2. Use terminology from concrete section	
BR-3	Other -requires extensive notes		
Rock Bolts			
RB-1	Surface rust		
RB-2	Loss of section -%.		
RB-3	Broken		
RB-4	Buckled		
RB-5	Loss of tension		
RB-6	Other -requires extensive notes		

เครื่องมือแบบชุด

- Fiberglass tape
- 6V hand lantern พร้อมแบตเตอรี่
- ค้อน Schmidt
- Calipers
- Lumber crayons
- Felt-tip markers
- Marking paint
- ถุงเครื่องมือ
- ถุงมือ, dielectric (ถ้ามี)
- กส้อง 38 มม.
- ฟิล์ม 35 มม.
- ชุดปฐมพยาบาล
- เครื่องควบคุมระบบไฟฟ้า

- เครื่องสังเกตการณ์ air quality

เครื่องมือเดี่ยว

- Flashlight พร้อมแบตเตอรี่
- ไม้บรรทัดขนาดยาว, ไม้วัด
- Safety vest
- แว่นตานิรภัย
- ค้อน 0.56 kg.
- หมวกนิรภัย
- วิทยู VHF
- ที่ชาร์จแบตเตอรี่วิทยู
- เครื่องช่วยหายใจ (ถ้ามี)
- เครื่องสังเกตการณ์ air quality

นอกจากนี้ยังอาจต้องใช้เครื่องมือต่างๆเพื่อการตรวจสอบรวมถึง เครื่องมือเพื่อการสำรวจ และทดสอบ แตกต่างตามสิ่งที่ต้องการตรวจสอบ

เครื่องมือที่ใช้เพื่อความปลอดภัย

ส่วนที่สำคัญมากสุดในการตรวจสอบ คือความปลอดภัย และการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยทุกขั้นตอน ต่อทั้งผู้ที่เป็นเจ้าของและผู้ใช้บริการ ความปลอดภัยต่าง ๆ นั้นต้องมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- พื้นที่ที่รับผิดชอบที่ชัดเจน
- ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้เพื่อความปลอดภัย
- แผนงานเพื่อความปลอดภัย
- เครื่องมือมาตรฐาน เครื่องหมายต่างๆ
- เครื่องมือเพื่อความปลอดภัยพิเศษ
- ขั้นตอนการขุดเจาะ
- ขั้นตอนเวลาฉุกเฉิน

ความรับผิดชอบเพื่อความปลอดภัย

ความปลอดภัยเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อทุกคน และเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นหน้าที่ของบุคคลต่อไปนี้

- ผู้จัดการโครงการ
- รองผู้จัดการโครงการ
- ผู้ตรวจสอบอาวุโส
- ผู้ตรวจสอบ
- คนงานทุกคน

เครื่องมือเพื่อความปลอดภัย จำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- มีการป้องกันต่อทุกคน
- เห็นชัดและทันทั่วทั้งที่

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบนั้นอาจสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

- หมวกนิรภัย
- เครื่องส่งสัญญาณ
- Flashlight
- วิทยุ UHF
- เครื่องมือพิเศษ
- Safety vest
- เครื่องช่วยหายใจ (ถ้ามี)
- เครื่องตรวจจับแก๊สรั่ว
- เครื่องมือปลอดภัยอื่นๆ

ขั้นตอนการตรวจสอบและเอกสารสำคัญต่างๆ

ตัวแปรเพื่อการตรวจสอบก็เป็นสิ่งสำคัญในการประเมินคุณภาพ และการรายงานผลการทำงาน เพื่อการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมให้เป็นไปตามมาตรฐานตามตารางที่ 4.22

การตรวจสอบอุโมงค์เบื้องต้น

กระทำโดยผู้ตรวจสอบอาวุโสซึ่งรวมถึง วิศวกรโครงสร้าง วิศวกรธรณี นักวิชาการ ซึ่งต้องมีการตรวจสอบร่วมกันอย่างถูกต้องเหมาะสมตาม guideline ที่ทำการตกลงร่วมกันตาม มาตรฐาน เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามตารางการทำงานที่กำหนด

การควบคุมการสำรวจ

การตรวจสอบอุโมงค์นั้นจำเป็นต้องมีระบบที่เข้าใจตรงกัน มีพื้นฐานดังต่อไปนี้

- ต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะเวลายาวนานระยะหนึ่ง
- ต้องมีทีมตรวจสอบที่ดำเนินการรวดเร็ว
- ลดต้นทุนโครงการและไม่เกิดความสับสน

นอกจากนี้ต้องมีความถูกต้องแม่นยำในตำแหน่งและโครงสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 4.126 ถึง 4.128 โดยอุโมงค์วงกลมนั้น เป็นไปตามรูป 4.129

การ calibrate ของทีมตรวจสอบ

Calibration เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนแปลง ก็ต้องมีความเป็นมืออาชีพและมี มาตรฐาน ให้สามารถตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การประกันคุณภาพโครงการ

เพื่อความมั่นใจในความสำเร็จ โคนต้องมีมาตรฐานของการเก็บข้อมูล ซึ่ง ประสิทธิภาพต่างๆ นั้นสามารถได้มาจากสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้

- การตรวจสอบจุดที่มี defect ของอุโมงค์
- การบริหารจัดการกับข้อมูลต่างๆ
- การรายงานผลที่ถูกต้อง
- การพัฒนาในเรื่องของสัญญาก่อสร้าง

การตรวจสอบประจำ

อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ต้องมีการดูแลอย่างสม่ำเสมอ ตามตารางที่ 4.22 การตรวจสอบ ในเรื่องเอกสารนั้นแบ่งตามประเภทต่างๆ ของอุโมงค์

ส่วนประกอบโครงสร้างพิเศษ

อุโมงค์บางชนิดมีการก่อสร้างที่พิเศษ เช่น อุโมงค์รถไฟ ซึ่งต้องมีการตรวจตราอย่างสม่ำเสมอตามประเภท

โครงสร้างพิเศษ

โครงสร้างของอุโมงค์บางอย่างมีความพิเศษขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งการก่อสร้างก็มีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจมีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ในลักษณะตัวแปรที่ใช้ต่าง ๆ กัน

ส่วนประกอบหลักของกระบวนการตรวจสอบมีความแตกต่าง จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพต่างๆตามแต่ละชนิดของอุโมงค์

เงื่อนไขของการสำรวจนั้นต้องมีรายละเอียดเพียงพอในเรื่องของ ผนัง เพดาน เป็นต้น ขั้นตอนการจัดการข้อมูล

กระบวนการบริหารจัดการกับข้อมูลนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก โดยเฉพาะเอกสารต่างๆ เพื่อประกันคุณภาพของการตรวจสอบนี้

เอกสารบันทึก แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- เอกสารทั่วไป
- เอกสารรายงาน defects ของอุโมงค์
- เอกสารรายงาน defect

เอกสารทั่วไป

บันทึกเหตุการณ์ต่างๆ ไป ความปลอดภัย

แบบฟอร์มข้อมูล

เป็นโดยต้องเป็นไปตามมาตรฐาน

เอกสารที่แสดงรูปถ่าย

โดยใช้กล้อง 35 มม. แสดงข้อมูลเพื่อความชัดเจนมากขึ้น

การทดสอบพิเศษ

แสดงได้ดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 การทดสอบพิเศษ (จาก Tunnel Engineering Handbook)

In Situ Concrete Strength			
Type	Test Method	Property Measured	Region Tested
Semi-Destructive	Pull Out Test	Indirect Shear/ Tensile Strength	Surface Zone
	Break-Off Test	Flexural Strength	Surface Zone
	Windsor Probe	Penetration Resistance	Surface Zone
	Tescon Probe	Stress-Strain Relationship	Internal Zone
	Cores	Strength	Internal Zone
	Carbonization	Depth CO ₂	Surface Zone
	Petrographic Analysis	Composition	Internal Zone
Nondestructive	Rebound Hammer	Resilience	Internal Zone
	Ground Penetrating Radar	General Condition	Internal Zone
	Refraction Survey	Micro Cracking	Internal Zone
	Resistivity	Steel Corrosion	Internal Zone
	Ultrasonic	Elastic Modulus	Surface and Internal Zone
	Pulse Velocity	(If the density and Poisson's Ratio are known)	Internal Zone
Steel Tunnel Elements			
Type	Test Method	Property Measured	
Destructive	ASTM E8	Strength	
Destructive	ASTM E10	Hardness	
Destructive	ASTM E18	Hardness	
Destructive	ASTM E370	Strength of Steel Element	
Destructive	ASTM E390	Quality of Welds	
Nondestructive	ASTM A325	Torque for Bolt Connections	
Nondestructive	ASTM 490	Bolt Connections	

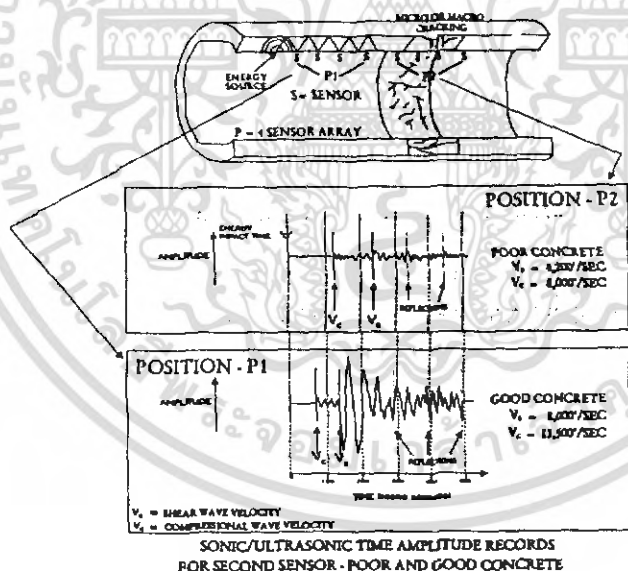
Test Method	Cracks		Chemical Alteration	Delamination	Rebar	Moduli Values	Strength
	Macro	Micro					
Sonic/ultrasonic compressional, shear velocity & attenuation	☐	☐	☐	☐		☐	☐
Sonic/Ultrasonic Reflection/Resonances				☐		☐	☐
Radar		☐	☐	☐	☐		
Thermography		☐	☐	☐			

☐ Best use of method

☐ Dependent on favorable conditions

รูปที่ 4.130 วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับคอนกรีต
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

รูปที่ 4.130 นั้น เทคนิคต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะที่แตกต่างกันของแต่ละวัสดุ เช่น อลูมิเนียม การนำไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติต่างๆ เป็นต้น การแตกหัก ความชื้น เป็นต้น



รูปที่ 4.131 การทดสอบ Sonic/ultrasonic และแนวท่อ ของอุโมงค์
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

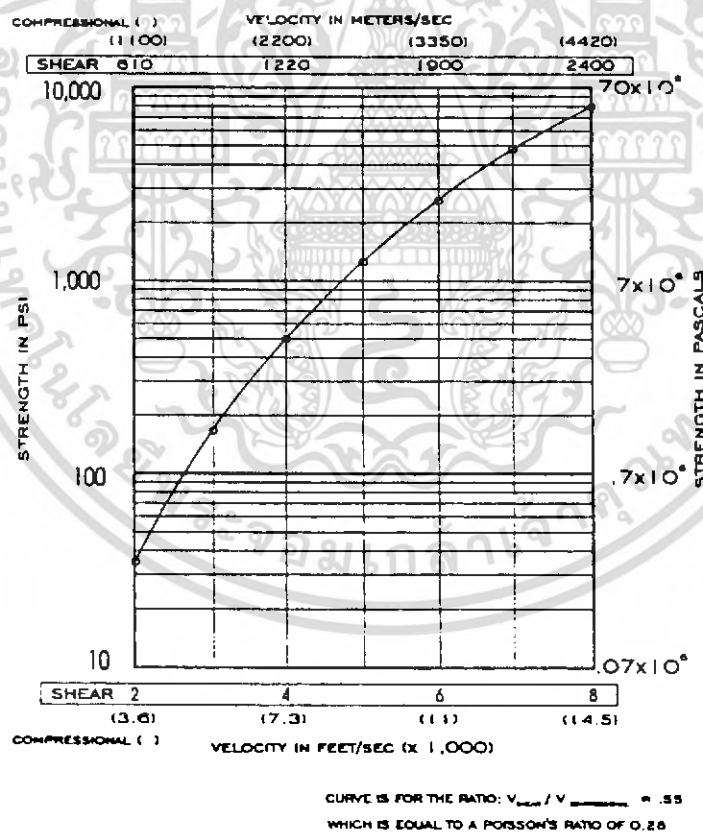
ในอุโมงค์นั้นมีหลายตัวแปรที่ต้องมีการวิเคราะห์ออกมา ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงของอุโมงค์
- รายละเอียดจุดที่เกิดความเสียหาย หรือรอยแตก
- จุดที่เป็นโครงสร้างโลหะ
- จุดที่เป็นส่วนบางและส่วนหนา
- จุดที่เป็นส่วนที่เป็นรูปทูน

ดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัดโดยใช้ Ultrasonic ใช้เพื่อวัดค่า transit time ซึ่งมีคุณสมบัติ

- วัดความเร็ว และค่า stasticity
- วัดหาจุดที่มีรูปทูน รอยค่อ รอยแตก ต่างๆ ดังรูปที่ 4.131 และ 4.132



รูปที่ 4.132 ความแข็งแรงของคอนกรีตกับความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน²⁹¹การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การนำเสนอข้อมูล

ใช้โปรแกรม spreadsheet ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อแยกประเภทข้อมูลต่างๆ รวมถึงโปรแกรม computer aid drafting (CAD)

โปรแกรมที่ใช้ต้องสามารถแยกประเภท มีมาตรฐาน รวมถึงมีระบบในการเปรียบเทียบข้อมูลในแต่ละชุด อย่างรวดเร็ว

ในระหว่างการสำรวจนั้น เราใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการสำรวจที่รวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.133 และ 4.134 และแสดงข้อมูล CAD ในรูปที่ 4.135 ในส่วนของ defect , พื้นที่หน้าตัด และ ข้อมูลเบื้องต้น

การประเมินผลข้อมูล

ได้มาจากข้อมูลเบื้องต้นของการออกแบบ การตรวจสอบนั้นจะทำการเปรียบเทียบอย่างเหมาะสม เกี่ยวกับสภาพทางกายภาพ และสภาวะแวดล้อม รวมถึงตัวอย่างทดสอบพิเศษ รายงานที่สรุปออกมานั้นต้องสามารถอธิบายสาเหตุและสิ่งที่เกิดขึ้นได้ ในส่วนของ defect ต่างๆ

4.4.2 การซ่อมแซมอุโมงค์

การซ่อมแซมต้องมีความทนทาน นำไปใช้ได้เร็ว รวมถึงมีความปลอดภัย ซึ่งมีการซ่อมแซมแบ่งเป็นประเภทต่างๆดังนี้

4.4.2.1 การซ่อมแซมคอนกรีต

การซ่อมแซมอุโมงค์คอนกรีตต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรง
- ความทนทาน
- สภาพแวดล้อม
- เวลาที่สามารถใช้ได้ตามปกติ

GREEN LINE TUNNEL INSPECTION
HIGHLAND BRANCH
INBOUND TRACK

STATION	LOCA	TYP	AREA SF	LENGTH LF	DPH IN	M	RE BAR	PCT	PHOTO	REMARKS
07+17	L	C1	0.0	6.0	0.0	D				PAST MOISTURE
07+19	L	D	4.0	0.0	0.0	D				
07+19	L	C2	0.0	17.0	0.0	D				SHOWS SIGNS OF PAST MOISTURE
07+80	L	C1	0.0	14.0	0.0	F			BB,9,10	GROUTED JOINT /FAILED /RUSTY
08+53	L-C	C1	0.0	30.0	0.0	W				WET CRACK, HEAVY RUST, FAILED PATCH
08+58	R	C1	0.0	3.0	0.0	D				
08+82	L	C1	0.0	6.0	0.0	D				PAST MOISTURE
08+95	R	C1	0.0	3.0	0.0	D				
09+01	L-C	C1	0.0	30.0	0.0	W				PAST MOISTURE
09+41	L-C	C1	0.0	30.0	0.0	D			B11-B12	FLOWING 10 FEET UO ON LEFT WALL
09+80	L-C	C1	0.0	30.0	0.0	W				WET 10 FEET UP FROM BASE
10+18	L-C	C2	0.0	30.0	0.0	F			B13-B14	FLOW LEFT WALL
10+58	L-C	C2	0.0	30.0	0.0	F			B15	FLOW FROM CROWN/RUST STAIN CROWN
10+84	L-C	C1	0.0	25.0	0.0	D				PAST MOISTURE
11+00	L	C1	0.0	14.0	0.0	D				PAST MOISTURE
11+00	L	S2	2.0	0.0	1.0	D	R-2	10		AT BASE
11+14	L-C-R	C2	0.0	44.0	0.0	W				
11+40	L-C	C1	0.0	30.0	0.0	W				WET 10 FEET UP LEFT WALL
11+57	L-C-R	C2	0.0	44.0	0.0	M				MOIST LEFT WALL
12+00	L-C-R	C1	0.0	44.0	0.0	M				MOIST AT BASE OF LEFT WALL
12+49	L-C-R	C2	0.0	44.0	0.0	M				MOIST LEFT WALL AT NICHE
12+82	C	D	15.0	0.0	0.0	D			B16	AT CATENARY SUOORT
13+50	L	C2	0.0	13.0	0.0	M				OLD PORTAL, END CENTER WALL

รูปที่ 4.133 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจสอบที่สมบูรณ์แบบ
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

วิธีการฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีต

คือการทดแทนโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุใหม่ที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน มี 3 วิธีการคือ

- Replacing
- Shotcreting
- Grouting

ซึ่งวัสดุที่ใช้ในวิธีต่างๆมีดังต่อไปนี้

- คอนกรีตซีเมนต์พอร์ตแลนด์
- Polymer- PCC
- Epoxy – PCC
- Polymer mortar

- Epoxy mortar
- Special cement

การเลือกวิธีการและวัสดุที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาไปใช้ การติดตั้ง
ตลอดจนการซ่อมแซม

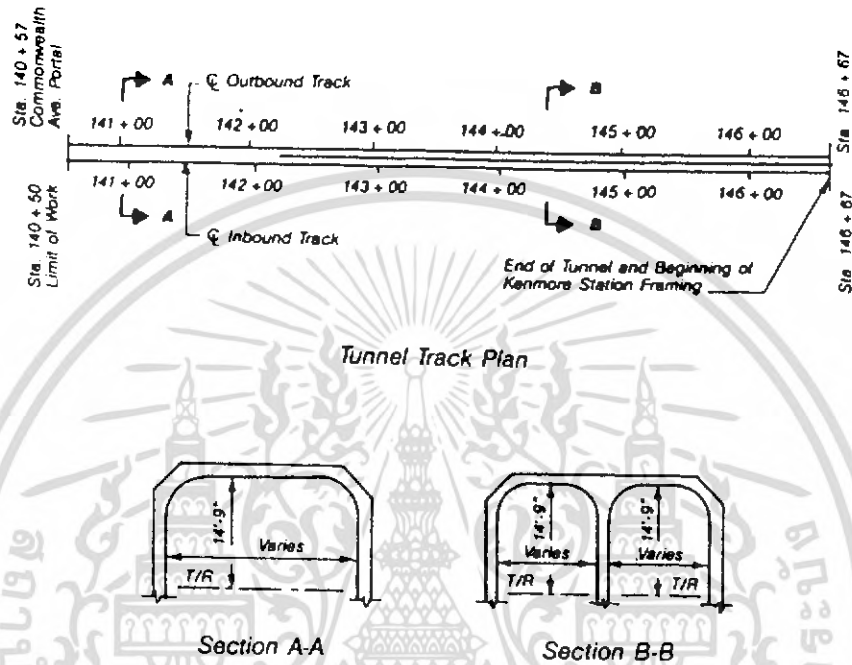
การเตรียมพื้นผิว

การเตรียมพื้นผิวนั้นประกอบไปด้วย

- การขจัดสิ่งสกปรก
- การขำระล้างสนิม และการกัดเซาะจาก R.C.
- การซ่อมแซมหรือการแทนที่ตามต้องการ

GREEN LINE INSPECTION COPLEY STATION TO ARLINGTON STATION INBOUND REHAB SUMMARY						
STATION	LOC	TYPE	AREA IN SF	LENGTH IN LF	DEPTH IN IN	M
*****BEGINNING @ STATION 199						
199+32	R	S2	20.0	0.0	1.5	D
199+57	R	S2	8.0	0.0	2.0	D
199+62	R	S2	8.0	0.0	2.0	D
199+68	R	S2	6.0	0.0	1.5	D
199+81	R	S2	3.0	0.0	2.0	D
** Subtotal **			45.0	0.0		
*****BEGINNING @ STATION 200						
200+15	C	S2	12.0	0.0	2.0	D
200+15	R	S2	60.0	0.0	3.0	D
200+30	R	S2	10.0	0.0	3.0	D
200+40	R	S2	20.0	0.0	2.0	D
200+57	R	S2	2.0	0.0	1.0	D
200+62	R	S2	30.0	0.0	3.0	D
200+85	R	S2	4.0	0.0	2.0	D
200+93	R	S2	20.0	0.0	2.0	D
** Subtotal **			158.0	0.0		
*****BEGINNING @ STATION 201						
201+67	R	S2	45.0	0.0	3.0	D
201+90	C	S2	3.0	0.0	1.5	D
** Subtotal **			48.0	0.0		
*****BEGINNING @ STATION 202						
202+45	R	S2	40.0	0.0	2.0	D
202+61	R	S2	12.0	0.0	1.5	D
202+78	C	S2	8.0	0.0	1.5	D
202+89	R	S2	45.0	0.0	1.5	D
202+98	R	S2	20.0	0.0	3.0	D
** Subtotal **			125.0	0.0		
*****BEGINNING @ STATION 203						
203+16	R	S2	20.0	0.0	2.0	D
203+99		S2	3.0	0.0	3.0	D
** Subtotal **			23.0	0.0		
*****BEGINNING @ STATION 204						
204+12	R	S2	40.0	0.0	1.5	D
204+57	R	S2	10.0	0.0	1.5	D
204+90	C	S2	15.0	0.0	2.0	D

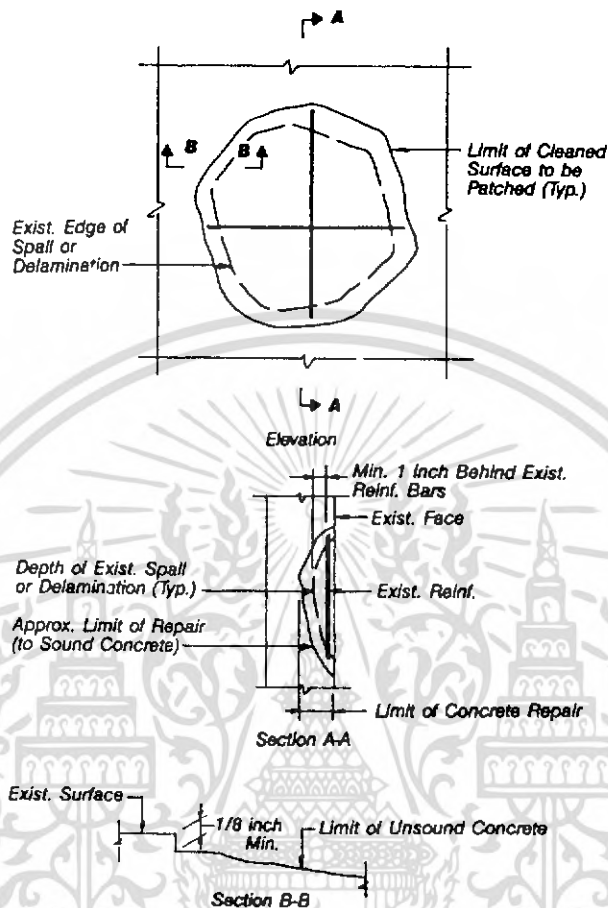
รูปที่ 4.134 ตัวอย่างผลการสรุปข้อมูล
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



STATION		SPALLS				DELAN	CRACKS				KXP JOINTS		
FROM	TO	S-1 SF(D)	S-2 SF(D)	S-3 SF(D)	S-4 SF	0 LF	C-1 LF	C-2 LF	C-3 LF	C-4 LF	S-1 LF	S-2 LF	S-3 LF
Portal	14+00	6(2)	25(2)	44(3)		16	44						
41+01	42+00	50(2)	78(2)	36(9)		83	20	70	27				
42+01	43+00	74(9)	24(2)	8(1)		221	75	53	60	6			
43+01	44+00	51(2)	207(2)	40(3)		193	42	42					
44+01	45+00	33(2)	31(2)		135(8)	104	66	40	30	5			
45+01	46+00	52(2)	45(2)	34(2)		190	65	40		50			
46+01	46+67		47(2)			77	43	41	39				

Note:(D) ความลึกเฉลี่ยในหน่วยนิ้ว

รูปที่ 4.135 แสดงข้อมูลของหนังสือสัญญา
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

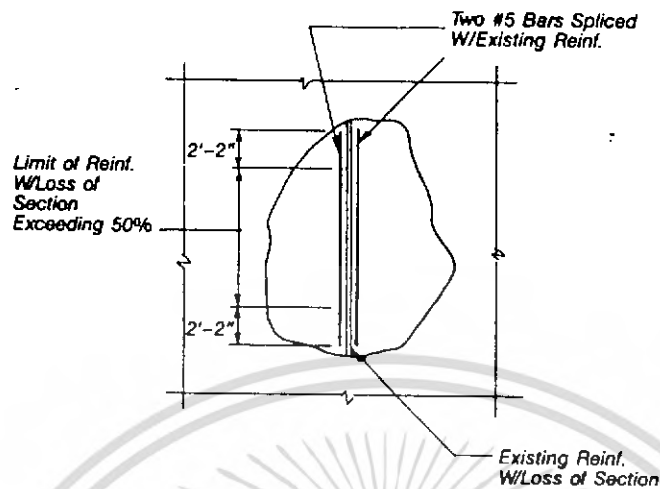


รูปที่ 4.136 แสดงหน้าตัดของการซ่อมแซมคอนกรีต
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

3 ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ดังแสดงในรูป 4.136
การใช้การชำระล้างด้วยความดันน้ำที่มากนั้นเป็นสิ่งไม่ควร เพราะอาจทำให้เกิดความ
เสียหายต่อสายส่งสัญญาณต่างๆ

การซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก

การซ่อมแซมเป็นไปตามมาตรฐาน ACI ดังรูป 4.137 ซึ่งเป็นไปตามการออกแบบ
โครงสร้าง



รูปที่ 4.137 รายละเอียดของรอยต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

คอนกรีตที่หล่อในที่

มีวิธีการ 2 วิธี คือ

- การขนถ่ายวัสดุโดยใช้ราง
- การขนถ่ายโดยใช้ slick line

การขนถ่ายด้วยวิธีการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพดี แต่ก็สามารถเกิดปัญหาได้หลายอย่างอาทิเช่น บริเวณผนัง ซึ่งคอนกรีตนี้จำเป็นต้องมีการบดเคาะกันมากเป็นพิเศษ

ในความเป็นจริงนั้น การเพิ่มการบดเคาะเป็นเรื่องยาก เพราะต้องมีการเลือกใช้ซีเมนต์ที่มีคุณภาพสูง ประกอบการใช้สัดส่วนที่เหมาะสมก็เป็นเรื่องที่มีความละเอียดสูง ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ต้องการอย่างเจาะจง

Polymer Cementitious Mortars

Polymer ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- กันน้ำ
- กันความเย็นได้
- เพิ่มการบดเคาะ
- ลด shrinkage
- เพิ่ม set time

Acrylic copolymers (Acs) เป็นโพลิเมอร์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเหล่านี้มากที่สุด ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้ใช้นั้นมีปริมาณน้อยและหลงไปในความหนาประมาณ 1-2 นิ้ว จากปริมาณที่ต้องซ่อมแซม 4-6 นิ้ว

Shotcrete

ผลิตโดยอากาศที่อัดแน่นและทรายผสมซีเมนต์ โดยที่ shotcrete นั้นแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- Cementitious shotcrete
- Latex/acrylic-modified shotcrete
- Two-component epoxy shotcrete

ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 การเปรียบเทียบ Shotcrete (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Shotcrete Type	Compressive Strength (28 Day) (psi)	Ultimate Bond Stress (psi)	Particle Rebound (%)	Set Time (min)
Cementitious	4,500	90	20-50	10-30
Latex-Modified	7,000	155	5-10	15-20
Epoxy-Two Component	6,500	129	10-25	2-5

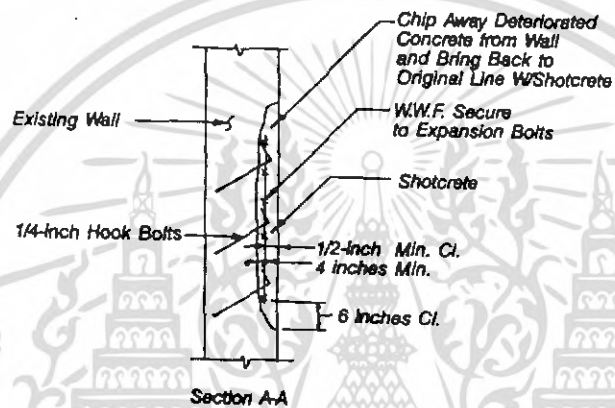
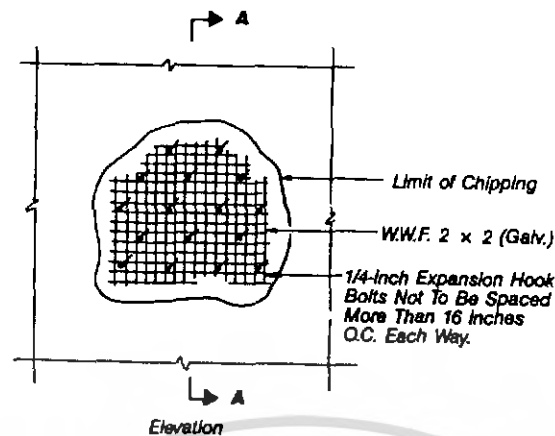
Grouting

Grouting เป็นวิธีการที่จะเติมช่องว่างต่างๆให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ป้องกันการซึมของน้ำ ดังแสดงในรูป 4.138

Grout นั้นเป็นของเหลวที่ pump โดยใช้ความดัน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

- **Particle grout** คือ มีส่วนประกอบเป็น cement เป็นหลัก
- **Single / multiple-component chemical grouts**

การใช้ grout ที่มีความดันมากเป็นการไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงไม่ควรเกิน 40 psi



รูปที่ 4.138 รายละเอียดการซ่อมแซม Shotcrete
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

4.4.2.2 การซ่อมแซมรอยแตก

การซ่อมแซมโครงสร้างรอยแตก

รอยแตกมักจะมาจากการเกิด shrinkage หรือแรงจากภายนอก ทำให้เกิดการซึมของน้ำและการกัดเซาะ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องซ่อมแซมเป็นไปจามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- อุดรอยร้าวพื้นผิวด้วยเจล
- ติดตั้ง injection port
- ฉีด epoxy resin ไปตามรอยแตก

การฉีด epoxy resin ไปตามรอยแตกนั้นโดยการใช้ความดันสูง ซึ่งไม่เกิน 100 psi แต่ที่ใช้ในการทำงานนั้นคือ 40 psi

การควบคุมการรั่วซึมของอุโมงค์โดยการฉีดสารไปตามรอยแตก

การอุดรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกที่เกิดจากโครงสร้างนั้นมีต้นทุนมาก เช่นจากการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ เพราะ resin สามารถควบคุมได้แค่โครงสร้างแต่ไม่สามารถควบคุมการไหลของน้ำใต้ดินได้ ซึ่งสามารถจะควบคุมได้ด้วย grouting ซึ่งมี 2 ประเภทได้แก่

Particle Grouts โดยใช้เป็นประเภทที่ 1 และ 2 ของซีเมนต์portland ซึ่งมีสารพิษน้อยกว่า แต่มีอายุที่ไม่นาน

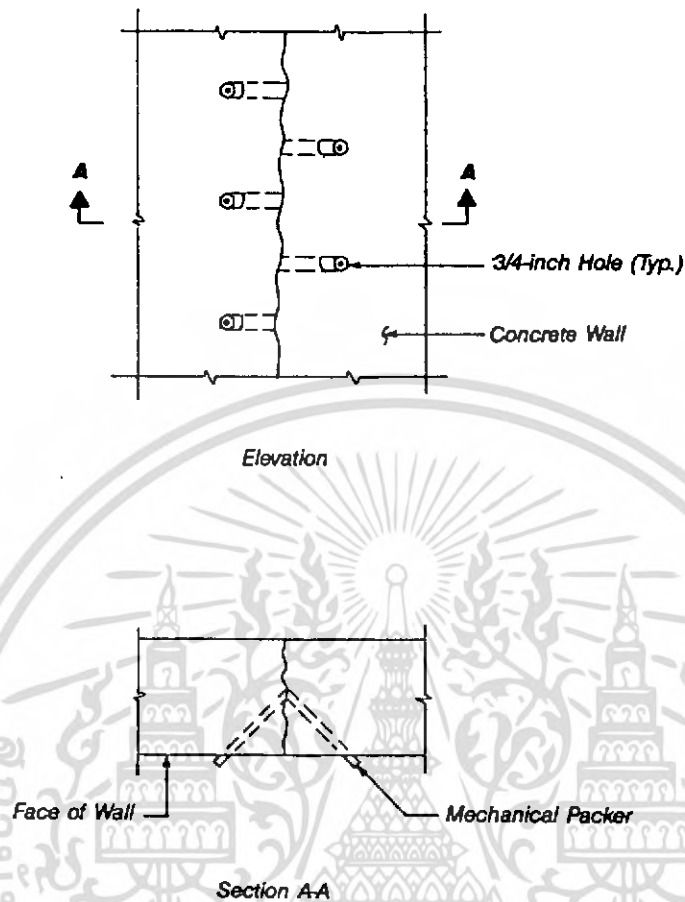
Chemical Grouts มีความหลากหลายโดยมีตัวอย่างดังนี้

- Acrylamides มีพิษมาก ความหนืดต่ำ
- Acrylates ความหนืดต่ำ มีพิษน้อย
- Sodium silicate ความหนืดปานกลาง
- Lignosulfonate and aminoplasts
- Polyurethane ความหนืดสูง มีปฏิกิริยากับน้ำ มีการใช้ที่แพร่หลายที่สุด

ประสิทธิภาพโดยรวมดีสุด

การ grouting นั้นมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- Injection port ต้องติดตั้งถูกต้องที่ รูป 4.139
- Mechanical packer ต้องติดตั้งอย่างแน่นหนา
- พื้นผิวของรอยแตกนั้นต้องสะอาด ใช้ระบบ hydraulic pump



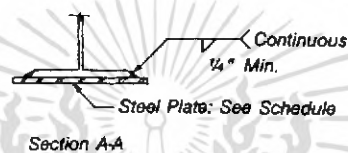
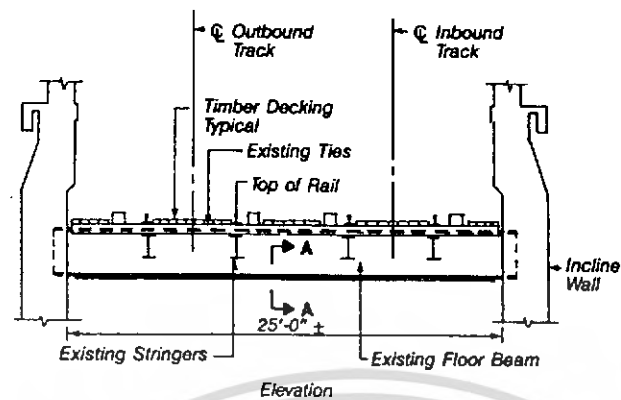
รูปที่ 4.139 การติดตั้ง ports ของการ grout โดยใช้สารเคมี
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

4.4.2.3 การซ่อมแซมโลหะ

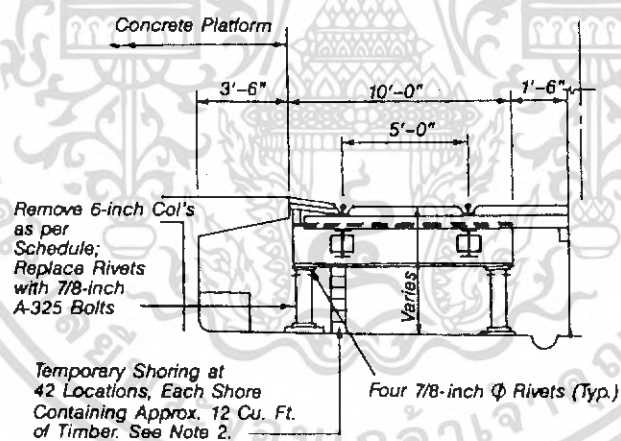
นิยมใช้ cast iron ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ ASIC ซึ่งใช้การซ่อมแซมโดย steel plate หรือการใช้โครงสร้างใหม่ต่อเติมเข้าไป ดังรูปที่ 4.140 และ 4.141 ซึ่งมีการใช้ bolt ตามมาตรฐาน ASTM A325 หรือ A490 การทาสีเหล็กเป็นวิธีที่ช่วยป้องกันกาเกิดสนิมและการกัดเซาะได้อย่างดี

4.4.2.4 การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง

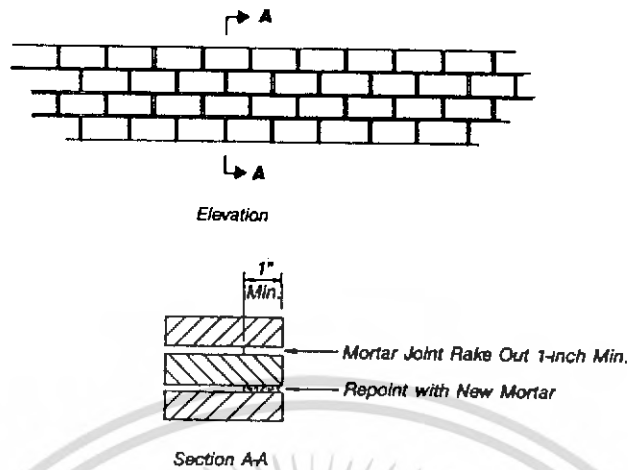
เราจะใช้ cementitious mortar ดังรูปที่ 4.142



รูปที่ 4.140 การซ่อมแซมแบบโครงเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.141 การเปลี่ยนชิ้นส่วนของเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 4.142 การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

4.4.2.5 Segmental tunnel liners

Segmental tunnel liners ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ

- Precast concrete
- Steel
- Cast iron

Defect ที่มักเกิดขึ้นใน Segmental tunnel liners คือ

- รอยแตก
- รอยร้าวของข้อต่อต่างๆ
- การกัดเซาะจากรอยร้าวหรือกระแสไฟฟ้า
- การผิดรูปเนื่องจากการกระแทก หรือ stress

Precast concrete segmental liners

สามารถควบคุมโดยใช้ epoxy resin ซึ่งสามารถควบคุมได้โดย

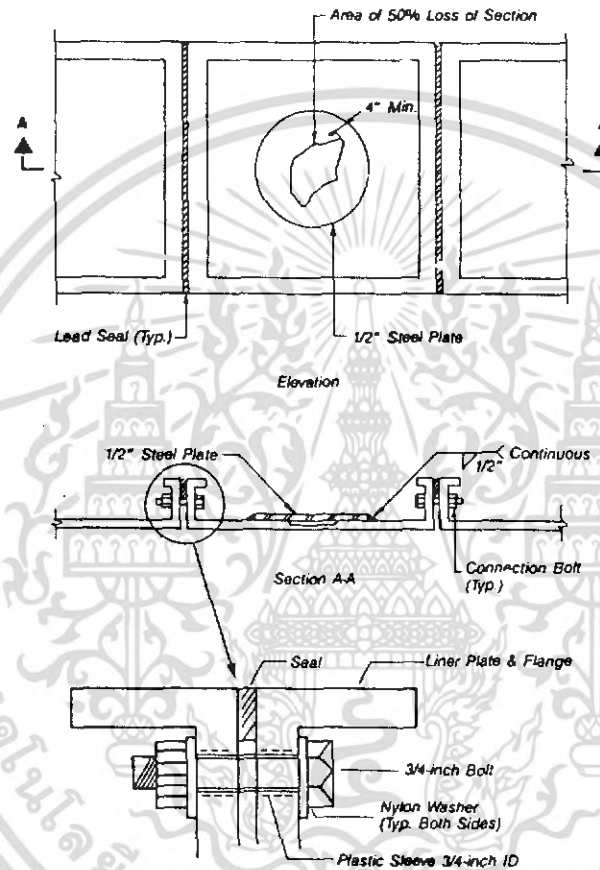
- การใช้ chemical grout
- การอุดรอยร้าวที่รอยต่อ
- การติดตั้ง gasket

Steel segmental liners

รอยร้าวที่เกิดกับ Steel segmental liners นั้นเราจะใช้ cementitious grout หรือ chemical grout

การกัดเซาะที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เราจะใช้ insulating sleeves หรือ jacket ในรูป

4.143



รูปที่ 4.143 การซ่อมแซมเหล็กแผ่นแนวทาง
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Cast iron segmental liners

เราจะใช้ cementitious หรือ chemical grout เพื่ออุดรอยร้าวบริเวณรอยต่อ และ การกัดเซาะที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เราจะใช้ insulating sleeves หรือ jacket ได้เช่นกันดังรูป 4.143

4.4.2.6 ต้นทุนการซ่อมแซม

ตารางที่ 4.25 แสดงถึงชนิดและความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ในการซ่อมแซม และพื้นฟูโมเมนต์ให้กลับสภาพเดิม ต้นทุนการก่อสร้างแสดงในตารางที่ 4.26 ในส่วนของต้นทุนวัสดุที่ใช้ ราคาประมูลใน Boston

ตารางที่ 4.25 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ซ่อมแซมคอนกรีต (จาก Tunnel Engineering Handbook)

Application	Two-Component Self-Leveling Mortar	Latex-improved Shotcrete	Two-Component Mortar	Epoxy Shotcrete	Polymer Masonry Mortar
On grade, above, below	X	X	X	X	X
On horizontal	X	X	X	X	X
On vertical			X	X	X
Overlay system	X	X			X
Structural material	X	X	X	X	X
Leveling product	X	X			X
Bolt holes filler - voids and cavities			X		X
Minimum depth	1/2 inch	1/8 inch	1/8 inch	1/8 inch	
Maximum depth					1/4 inch
Extend with aggregate	X	X		X	
High abrasion	X	X	X	X	X
Good bond strength	X	X	X	X	X
Compatible coefficient of expansion -- Concrete	X	X	X	X	X
Resistant to salts	X	X	X	X	X
High early strength	X	X	X	X	X
High compressive	X	X	X	X	X
High flexural	X	X	X	X	X
Good freeze thaw	X	X	X	X	X
Not a vapor barrier	X	X	X	X	X
Not flammable	X	X	X	X	X
OK potable water	X	X	X		X
Traffic 1-2 hours	X				X
Low rebound and dust		X		X	

ตารางที่ 4.26 การเปรียบเทียบการประมาณราคาการฟื้นฟูสภาพอุโมงค์
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Repair	Material	Bid price
Portland Cement Concrete (4,000 psi)	\$ 60.00 cu yd	\$ 800.00 cu yd
Polymer-Modified Portland Cement (4,000 psi)	\$ 72.00 cu yd	\$ 800.00 cu yd
Cementitious Shotcrete	\$ 60.00 cu yd	\$ 2,100.00 cu yd
Latex-Modified Shotcrete	\$ 32.00 cu ft	\$ 150.00 cu ft
Epoxy Shotcrete	\$ 300.00 cu yd	\$ 4,000.00 cu yd
Two-Component Mortar (Vertical)	\$ 50.00 cu ft	\$ 150.00 cu ft
Two-Component Mortar (Horizontal)	\$ 55.00 cu ft	\$ 150.00 cu ft
Polymer Mortar	\$ 55.00 cu ft	\$ 150.00 cu ft
Crack injection (Epoxy Resin)	\$ 1.20 linear ft	\$ 24.00 linear ft
Crack injection (Polyurethane Foam)	\$ 85.00 gal	\$ 70.00 linear ft
Painting of Framing Steel	\$ 1.00 sq ft	\$ 3.00 sq ft
NOTES:		
1. All bid prices include demolition and preparation		
2. All work based on 8-hour working day (starting at 10 PM)		
3. All prices in 1994 dollars for work performed in Boston		
4. All work performed during operations shutdown		

4.5 การเกิดไฟไหม้และผนังป้องกันไฟ

4.5.1 ไฟไหม้ในอุโมงค์

ปี 1995 ประชากรในโลกอาศัยอยู่ในเมืองประมาณ 45 % และคาดว่าจะเพิ่มมากขึ้นเป็น 55% ในปี 2015 จำนวนนี้จะเพิ่มจาก 39% เป็น 50% ในประเทศ กำลังพัฒนาและจาก 75% เป็น 80% ในประเทศอุตสาหกรรมประชากรในเมืองเพิ่มมากขึ้นประมาณ 60 ล้านคนทุกปี ในปี 2015 ประชากรในเมืองประมาณ 10 % จะกระจุกตัวอยู่ในเมืองใหญ่ ๆ ด้วยจำนวนมากกว่า 15 ล้านคน ประมาณ 18 ใน 26 เมืองใหญ่เหล่านี้อยู่ในทวีปเอเชีย เนื่องจากการเพิ่มประชากรโลกและการกระจุกตัวอยู่ในเมือง ก็สามารถคาดการณ์ได้ว่าปริมาณการจราจรของโลกจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่าของปัจจุบัน จึงเกิดการเพิ่มโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะในเขตเมือง การก่อสร้างได้ดินนั้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ใช้สอย ช่วยป้องกันสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ ด้านถนนแผ่นดินไหวได้ดีกว่า ถนนมากกว่า และทำหน้าที่พิเศษต่าง ๆ ได้ดี การใช้งานอุโมงค์และโครงสร้างได้ดินที่มากขึ้นจะช่วยแก้ปัญหาให้กับเมืองใหญ่และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับชุมชนเมือง ซึ่งช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิต ด้วยความต้องการนี้แผนการสร้างอุโมงค์ใน 15 -20 ปีหน้าในยุโรปมีมากถึง 2100 กิโลเมตร ในเอเชีย 2350 กิโลเมตร อเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ 650 กิโลเมตร

ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่การเกิดไฟไหม้ในอุโมงค์ได้ดินจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มจำนวนอุโมงค์และปริมาณการจราจรซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณประชากรและกระจุกตัวในเมือง ตารางที่ 4.27 แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ และรูปที่ 4.144 แสดงถึงรูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ได้ดิน ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มว่าต้องเกิดไฟไหม้ในอุโมงค์เพิ่มมากขึ้นในอนาคต โดยเฉพาะอุโมงค์รถยนต์ อย่างไรก็ตามต้องมีมาตรการป้องกันไฟไหม้กับผู้ใช้และโครงสร้างอุโมงค์ได้ดิน

ตารางที่ 4.27 แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ในประเทศญี่ปุ่น

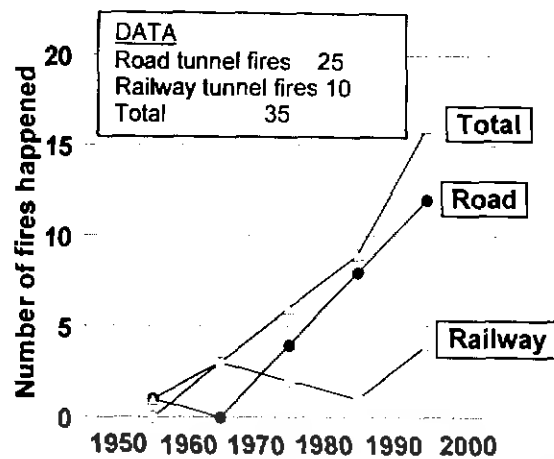
Year	Railway	Road	Total
1991	3	12	15
1992	2	6	8
1993	0	14	14
1994	2	12	14
1995	0	30	30
1996	1	12	13
1997	3	14	16
1998	4	21	25
1999	3	20	23
2000	1	30	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดินทั่วโลก

Tunnel	Country	Year	Time required to extinguish	Number of death and wounded	Damage to the structures
Holland	USA	1949	4 hrs	W66	L=200m
Grand Central Station	USA	1964		W11	the station
Pencentral Railway (under sea tunnel)	USA	1969		D1 W8	
Railway	France	1971	24 hrs	D2	
Mont-Blanc	France-Italy	1974	15 min	W1	
Guadarrama	Spain	1975			
BP-A6 intersection	France	1976	1 hrs	W12	L=150m
Velsen	The Netherlands	1978	1 hrs 20	D5 W5	L=30m
Gongochinas	Spain	1978	60 hrs	D7	
San Francisco (BART)	USA	1979	7 hrs 30	D1 W about 50	To the cable
Cladecott	USA	1982	2 hrs 40	D7 W2	580m
Pecorila Galleria	Italy	1983		D9 W22	Very light
Gottard	Swiss	1984			
Felbertauern	Austria	1984			
L'Arne	France	1986		D3 W5	Several facilities
Gumefens	Swiss	1987	2 hrs	D2	light
Roldal	Norway	1990	50 min	W1	light
Mont-Blanc	France-Italy	1990		W2	Several facilities
Subway	USA	1991		D5 W113	
Serra Ripoli	Italy	1993	2 hrs 30	D4 W4	light
Hovden	Norway	1993	1 hrs	W5	The heat insulation
Huguenot	S. Africa	1994	1 hrs	D1 W28	
Grandbert Straight railway	Denmark	1994	10 hrs	None	The shield segment up to 10cm deep
Pfander	Austria	1995	1hrs	D3 W4	
Subway	Azerbaijan	1995	unknown	D239 W265	
Isola delle Femmine	Italy	1996		D5 W20	
Ekeberg	Norway	1996	34min		
Euro tunnel	England France	1996	9hrs	W6	Lining and facilities
Gothard	Swiss	1997	30min		Linings spalled
Mont-Blanc	France	1999	53hrs	D41	Linings spalled
Railway	Italy	1999		D4 W10	
Tauern	Austria	1999	16hrs	D12 W59	L=1.5lm 30cm of spalling of lining
Seljestad	Norway	2000	45min	W6	
Kitzsteinhorn mountain railway	Austria	2000	2hrs30	D155	
Gothard	Swiss	2001	37hrs	D11 W4	Fall off the ceiling
Daegu subway	Korea	2003		D192 W145	Lining spalled

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.144 รูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดิน

4.5.2 ความเสียหายจากผนังอุโมงค์ที่เกิดไฟไหม้

ตัวอย่างความเสียหายของผนังอุโมงค์เนื่องจากไฟไหม้ดังนี้

1) Hokuriku Tunnel

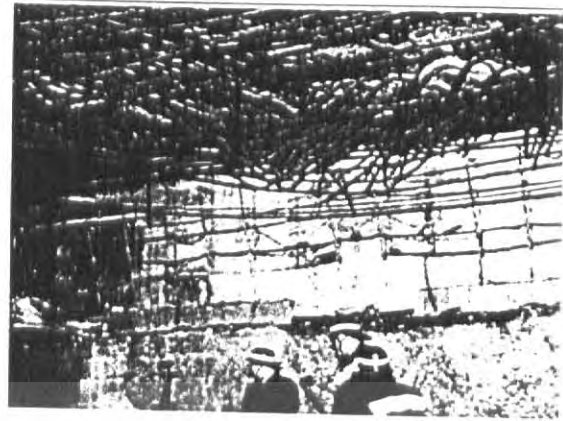
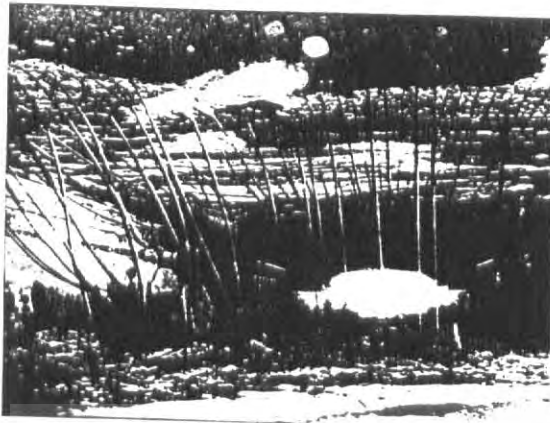
เป็นอุโมงค์รถไฟยาว 13.8 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่ Fukai ประเทศญี่ปุ่น เกิดไฟไหม้ ปี 1972 สาเหตุจากรถตู้เสบียงอาหารอาหารบนขบวนรถไฟ มีผู้เสียชีวิต 30 คน บาดเจ็บ 714 คน

2) Nipponzaka Tunnel

เป็นอุโมงค์ทางด่วน เจาะผ่านภูเขาเป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่ shizuka เกิดไฟไหม้ในปี 1979 สาเหตุเกิดจากรถบรรทุกน้ำมันชนกัน ใช้เวลา 7 วันในการดับเกิดการพังทลายของพื้น เพดานและผนังอุโมงค์คอนกรีตเป็นระยะทาง 1,122 เมตร มีผู้เสียชีวิต 7 คน บาดเจ็บ 189 คน ใช้เวลาซ่อมแซม 2 เดือนในงบประมาณ 33 ล้านเหรียญสหรัฐ

3) Moorfleet Tunnel (รูปที่ 4.145)

อุโมงค์นี้เป็นอุโมงค์เปิดแบบ RC box กว้าง 13.5 เมตร สูง 3.5 เมตร เพดานเป็น prestress concrete slab หนา 1 เมตร ความยาวรวม 243 เมตร ตั้งอยู่ใกล้กับเมือง Hamburg เกิดไฟไหม้ในปี 1968 สาเหตุจากรถบรรทุก Polyethyleneหนัก 4 ตัน เกิดการกระแทกหลุดอย่างมากที่เพดานและผนังอุโมงค์ ทำให้สามารถมองเห็นหลอดอัดแรงที่ยื่นออกมา



รูปที่ 4.145 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Moorfleet

4) Summit Tunnel (รูปที่ 4.146)

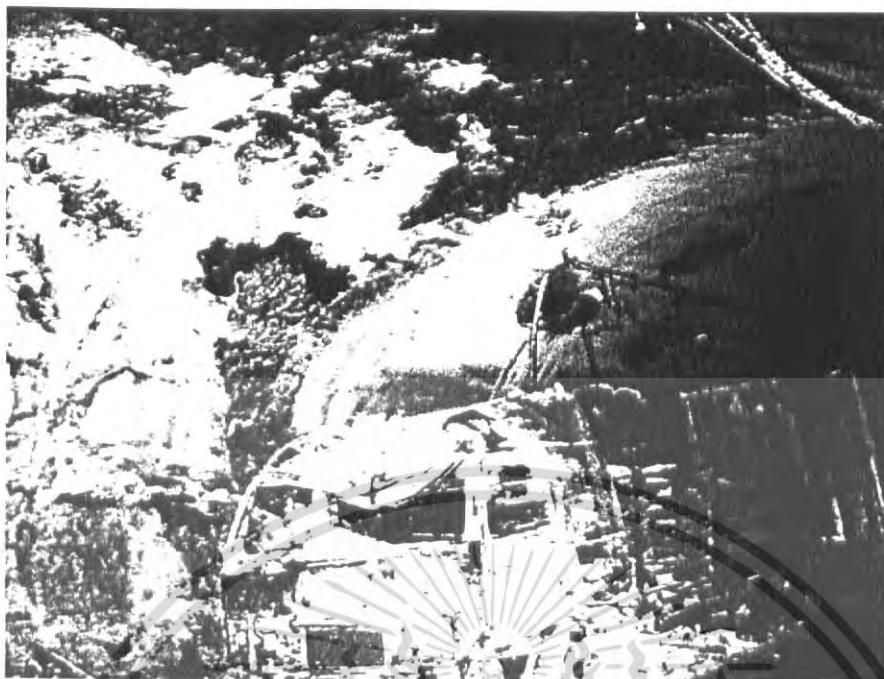
อุโมงค์สูง 7 เมตร ยาว 2.7 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่สหราชอาณาจักร เกิดเหตุไฟไหม้ในปี 1984 ต้นเหตุเกิดจากรถบรรทุก gasoline หนัก 600 ตัน วัดอุณหภูมิในคอนกรีต ได้สูงถึง 1200°C ทำให้คอนกรีตเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.146 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Summit

5) Mont Blanc Tunnel (รูปที่ 4.147)

เกิดเหตุเพลิงไหม้ในเดือนมีนาคม ปี 1999 ใช้เวลาในการซ่อมแซมนานถึง 3 ปี จากรายงานใช้งบประมาณซ่อมแซม 27 ล้านเหรียญสหรัฐ



รูปที่ 4.147 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Mont Blanc

6) Gotthard Tunnel (รูปที่ 4.148)

อุโมงค์ตั้งอยู่ใน Switzerland มีความยาว 16.9 กิโลเมตร เกิดเพลิงไหม้ในเดือนตุลาคมปี 2001 จากการชนกันของ รถ บรรทุก ทำให้พื้นคอนกรีตเพดานร่วงพังลงมาและวัตถุหินในคอนกรีตได้สูงถึง 1200°C มีผู้เสียชีวิต 11 คน ใช้เวลาในการซ่อมแซม 2 เดือน หลังจากเหตุไฟไหม้ในอุโมงค์ ทำให้ปริมาณผู้ใช้รถยนต์เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นเป็น 18000 คัน/วัน



(a)



(b)

รูปที่ 4.148 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

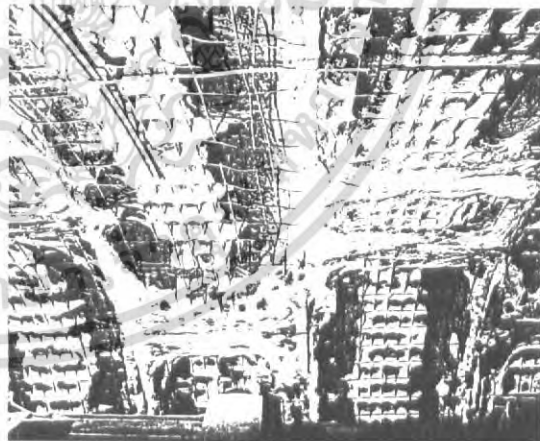


(d)

รูปที่ 4.148 (ต่อ) ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard

7) Euro Tunnel (รูปที่ 4.149)

เกิดเหตุเพลิงไหม้ในเดือนพฤศจิกายนปี 1996 เป็นอุโมงค์ TBM shield หลังจากเกิดเหตุหนึ่งอุโมงค์ได้รับความเสียหายอย่างหนักและดูเหมือนว่าจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ คืบรอบๆๆ อุโมงค์ประกอบด้วยชั้นหินที่มีเสถียรภาพ นี่จึงนำไปเป็นเหตุผลหนึ่งที่เป็นการป้องกันการพังทลายของทั้งหมด แม้ว่าหนึ่งอุโมงค์จะได้รับความเสียหายอย่างหนัก การซ่อมแซมใช้เวลานานถึง 6 เดือน ความสูญเสียคิดเป็นมูลค่าถึง 350 ล้านดอลลาร์



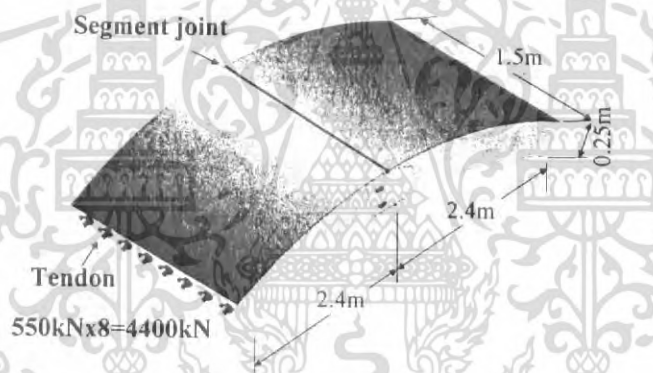
รูปที่ 4.149 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Euro Tunnel

4.5.3 การป้องกันไฟสำหรับผนังอุโมงค์ใต้ดิน

4.5.3.1 การทดสอบไฟไหม้กับผนังอุโมงค์

รูปที่ 4.150 แสดงถึง แสดงถึงการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ใช้ในอุโมงค์ TBM shield แต่ละตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย จุดเชื่อมต่อชิ้นส่วน 2 จุด เชื่อมต่อกันในทิศทางเส้นรอบวง และทำการอัดแรงตามแรงอัดที่ออกแบบ แต่ละชิ้นส่วนมีความยาว 2.5 เมตร กว้าง 1.5 เมตร และหนา 0.25 เมตร

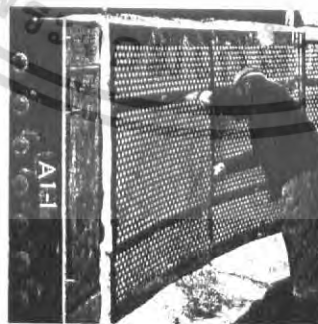
มาตรการป้องกันไฟไหม้ทำได้ 3 ประเภท คือ Board Type ,Silica fiber blanket type และ spay mortar type ดังแสดงในรูปที่ 4.151 ตัวอย่างเหล่านี้จะถูกทดสอบภายใต้ RABT 60 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.152 ซึ่งให้ความร้อนสูงสุด 1200 °C นาน 1 ชั่วโมง ทำให้ได้พลังงาน 100 MW อีกทั้งยังทดสอบตัวอย่างที่ไม่มีการป้องกันไฟ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ รูปที่ 15 แสดงชุดตัวอย่างทดสอบในเตาหลอม



รูปที่ 4.150 ตัวอย่างทดสอบ



(a) Board type

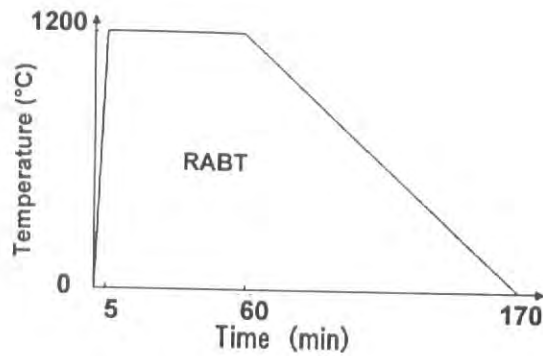


(b) Silica fiber type

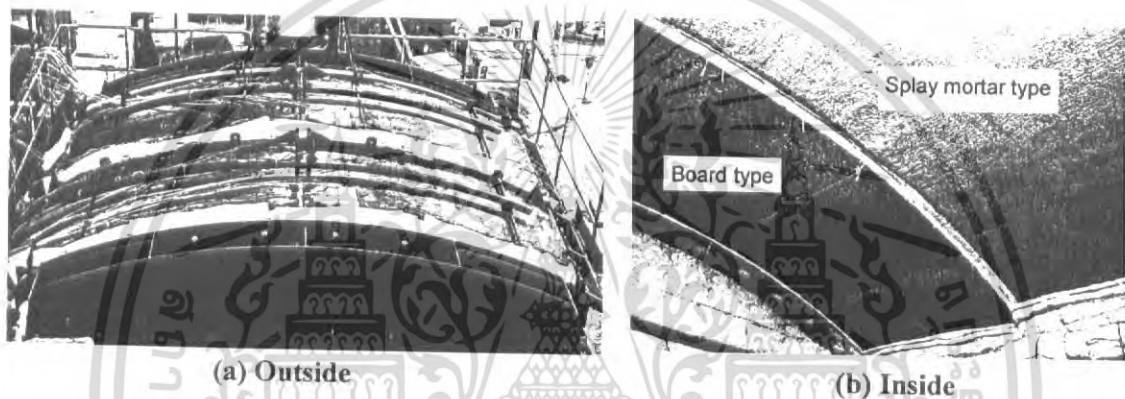


(c) Spray mortar type

รูปที่ 4.151 การติดตั้งการป้องกันไฟ



รูปที่ 4.152 โค้งของความร้อนสำหรับการทดสอบ (RABT)



รูปที่ 4.153 ชุดตัวอย่างทดสอบ

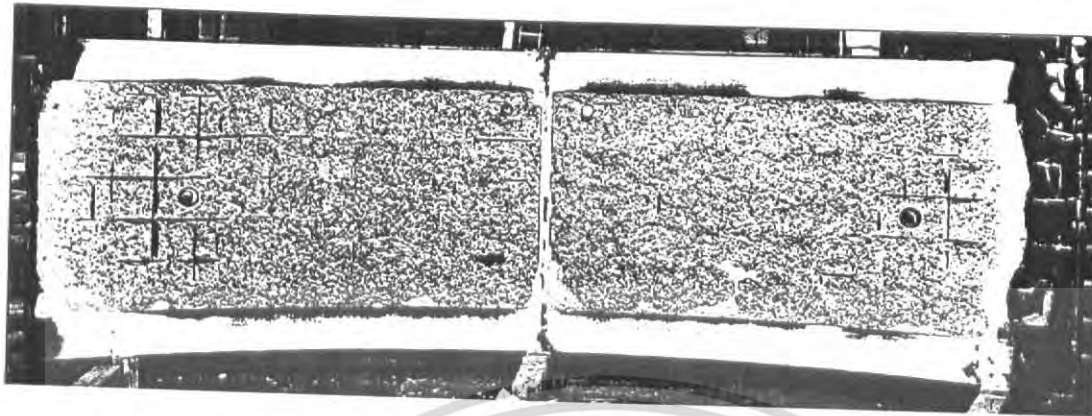
4.5.3.2 ผลการทดสอบไฟไหม้ผนังอุโมงค์

รูปที่ 4.154 แสดงถึงการพังทลายของผิวคอนกรีต

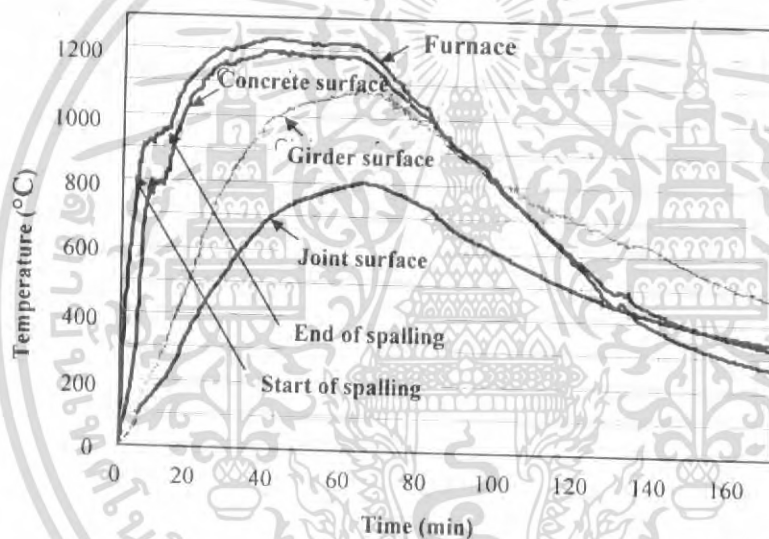
รูปที่ 4.155 แสดงถึงอุณหภูมิที่วัดได้ในชั้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ไม่มีการป้องกันไฟระหว่างที่ได้รับความร้อน การสังเกตผลการทดสอบทำอย่างต่อเนื่องโดยใช้กล้องวิดีโอบันทึกในระหว่างการทดสอบ การกะเทาะของคอนกรีตสำหรับชั้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเตาหลอมสูงถึง 800°C หลังจากนั้นจะเกิดการกะเทาะหลุดออกอย่างต่อเนื่องนานประมาณ 10 นาที ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิเตาหลอมอยู่ต่ำกว่าโค้งความร้อนที่ได้วางแผนไว้ หลังจากการกะเทาะออกของคอนกรีตเสร็จสิ้นแล้วอุณหภูมิในเตาหลอมจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งดังแสดงในรูป ซึ่งดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความชื้นที่ยังคงอยู่ในเนื้อคอนกรีต อุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของเตาหลอมแต่อุณหภูมิของผิวเหล็กต่ำกว่าที่ผิวคอนกรีตซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากคุณสมบัติในการนำความร้อนที่สูงกว่า การกะเทาะหลุดออกนี้เกิดตลอดทั่วทั้งผิวหน้าคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึกมากที่สุด คือ 60.2 มม. ซึ่งมากกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ทำให้สามารถมองเหล็กเสริมได้ วัสดุอุดป้องกันน้ำที่ทำจากยางที่ขยายตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำนั้นถูกเผาไหม้จนหมด



รูปที่ 4.154 แสดงถึงการพังทลายของผิวคอนกรีต



รูปที่ 4.155 อุณหภูมิที่ยังขึ้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันไฟ

รูปที่ 4.156 แสดงถึงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างที่มีการป้องกันไฟแต่ละวิธีในระหว่างที่รับความร้อน อุณหภูมิในเตาหลอมใกล้เคียงกับต้นแบบของ RABT อุณหภูมิผิวหน้าของคอนกรีตถูกรักษาไว้ให้ต่ำกว่า 260°C สำหรับตัวอย่างที่ป้องกันโดย Board type และ Blanket type ต่ำกว่า 200°C สำหรับตัวอย่างที่ป้องกันโดย Spray mortar type ไม่เกิดการกระเทาะให้สังเกตเห็นได้ทั้ง 3 รูปแบบ มาตรการป้องกันทุกวิธีนั้นเพียงพอต่อความต้องการในการป้องกันไฟไหม้

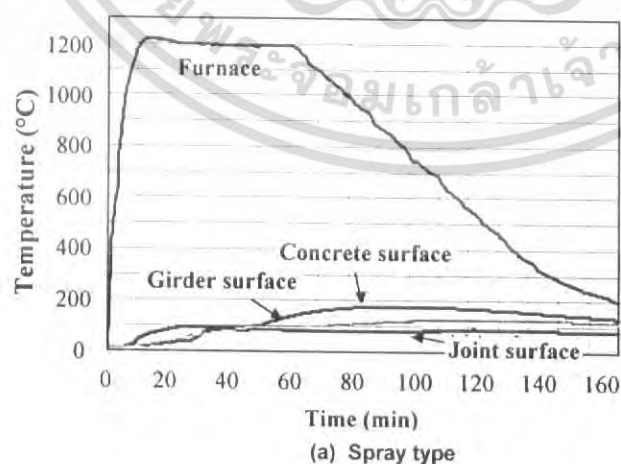
การทดสอบแรงอัดและการวัดคาร์บอนจะกระทำแกนของชิ้นส่วนที่ได้รับความร้อนแล้วกำลังแรงอัดคอนกรีตที่ทดสอบด้วยตัวอย่างทรงกระบอก ก่อนการทดสอบไฟไหม้คือ 60-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง 315 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

63 N/mm² หลังจากได้รับความร้อนแล้วกำลังลดลงถึงครึ่งหนึ่งของกำลังก่อนการรับความร้อน แต่สำหรับกำลังแรงอัดคอนกรีตของชิ้นส่วนที่ป้องกันไฟไหม้นั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เมื่อได้รับความร้อน ค่า Young's Modulus ของชิ้นส่วนที่ไม่ป้องกันลดลงหนึ่งในสี่ส่วน และมีคาร์บอนเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนด้วยหากไม่มีการป้องกันผิวหน้า ซึ่งการป้องกันทั้ง 3 วิธีจะช่วยป้องกันการเกิดคาร์บอนในชิ้นส่วนคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.157 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดที่กระจายในคอนกรีตกับคาร์บอนที่เกิดขึ้น คอนกรีตในส่วนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 500°C หรือมากกว่านี้จะปรากฏให้เห็นถึงคาร์บอน

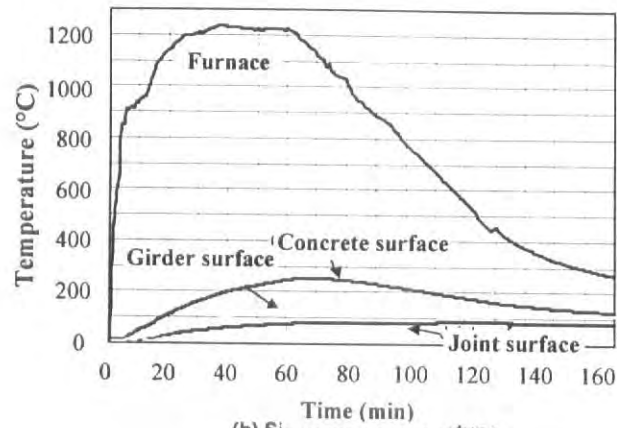
จากการทดสอบนี้ทำให้ได้ข้อมูลดังนี้

1. เกิดการกะเทาะของคอนกรีต และมีความลึกถึง 60 มม. เมื่อไม่มีการป้องกันไฟที่ผิวหน้า
2. กำลังแรงอัดของคอนกรีตลดลงครึ่งหนึ่งของค่ากำลังในภาวะปกติและ Young's Modulus ลดลงหนึ่งในสี่ส่วนเมื่อได้รับความร้อน
3. เกิดคาร์บอนในคอนกรีตเนื่องจาก Portlandite resolution ที่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 500°C
4. อุณหภูมิของคานเหล็กและจุดเชื่อมต่อที่เป็นเหล็กสูงเกินกว่าขีดจำกัดเมื่อไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันไฟ
5. วัสดุอุดกันน้ำเสียหายทั้งหมดจากไฟไหม้เมื่อไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันไฟ
6. การป้องกันไฟทั้งประเภท Board type , silica fiber blanket type และ spray mortar type ช่วยรักษาอุณหภูมิของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ให้ต่ำกว่า 260°C และรักษาอุณหภูมิของจุดเชื่อมต่อที่เป็นเหล็กให้ต่ำกว่า 100°C รวมทั้งช่วยป้องกันวัสดุอุดกันน้ำไม่ให้ได้รับความร้อนเสียหายได้

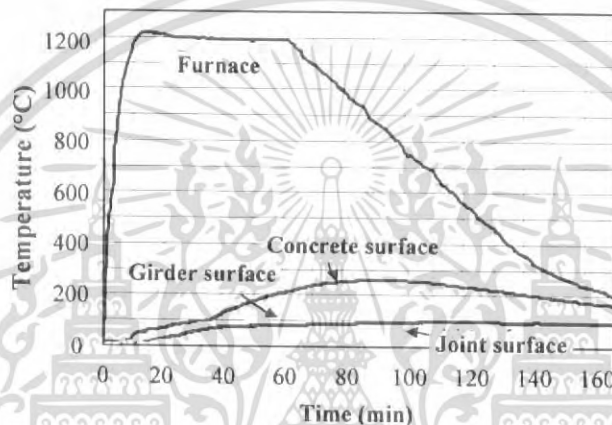


รูปที่ 4.156 อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

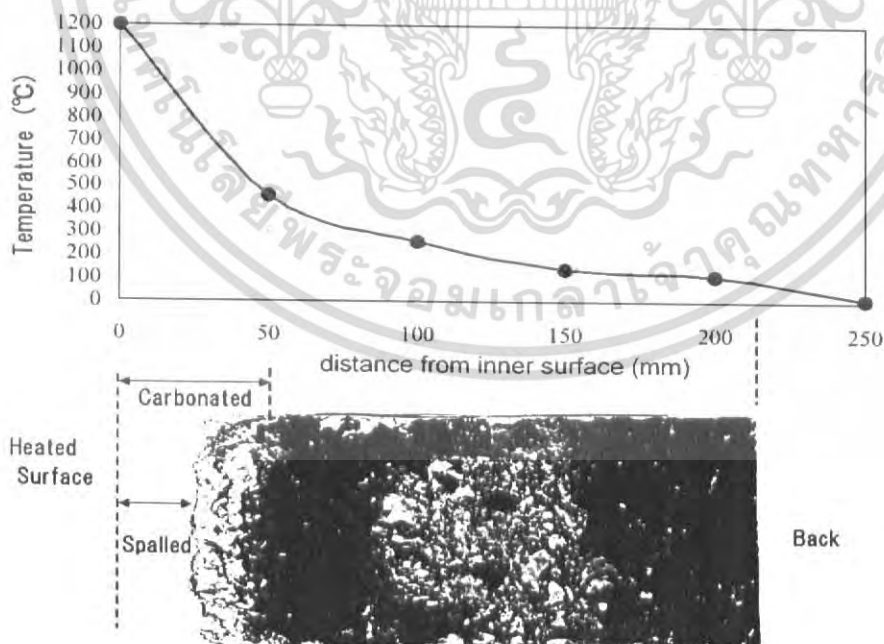


(b) Simulated beam, girder type



(c) Board type

รูปที่ 4.156 (ต่อ) อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันไฟ



รูปที่ 4.157 Carbonation by the heating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.3 การใช้งานวิธีป้องกันไฟไหม้

ตัวอย่างการใช้มาตรการป้องกันไฟไหม้สำหรับผนังอุโมงค์มีดังนี้

1. Elbe Tunnel

อุโมงค์ Elbe ตั้งอยู่ใน Hamburg ประเทศเยอรมนี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.2 ม. ยาว 4403 ม. ใช้การป้องกันไฟไหม้แบบ Board type โดยมีการพิจารณาออกแบบการป้องกันไฟดังนี้

- สมมติฐานของอุณหภูมิตาม RABT (อุณหภูมิสูงสุด 1200°C 90 นาที)
- รูปแบบการป้องกันใช้ Silicate calcium board
- ความหนา Board 25 มม.

ดังแสดงในรูปที่ 4.158 เป็นการติดตั้งการป้องกันไฟแบบ Board type ในอุโมงค์ Elbe



รูปที่ 4.158 การติดตั้ง Board type ในอุโมงค์ Elbe

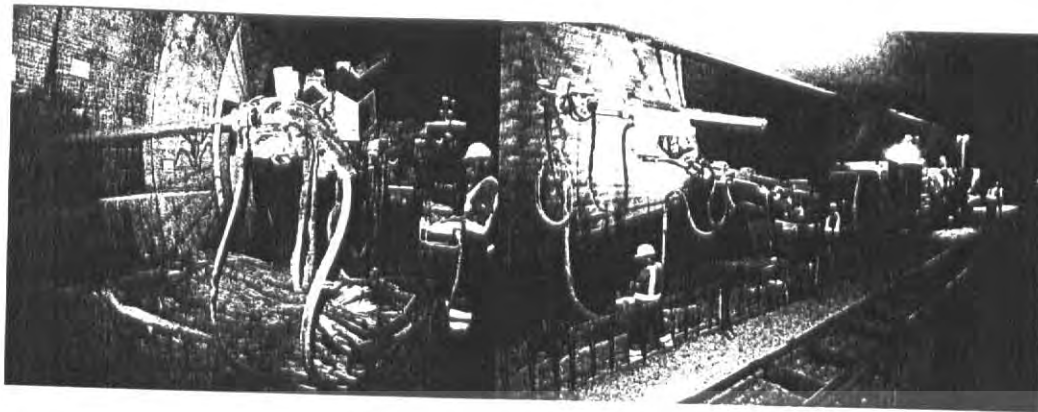
2. Westerschelde Tunnel

Westerschelde Tunnel ตั้งอยู่ทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ของ Netherlands ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.3 ม. ยาว 17.2 กม. ใช้การป้องกันไฟไหม้แบบ Spray mortor type มีการพิจารณาออกแบบการป้องกันไฟดังนี้

- ตั้งสมมติฐานของอุณหภูมิตาม RWS (อุณหภูมิสูงสุด 1350°C)
- ใช้การฉีดยึดพื้น mortor ที่ผสมจนทนความร้อน (Vermiculite spray mortor) ในการ ป้องกันไฟไหม้
- ความหนาการฉีดยึด 45 มม.

รูปที่ 4.159 อธิบายถึงการติดตั้งการป้องกันไฟไหม้แบบ spray mortor type ในอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.159 การป้องกันไฟไหม้แบบ spray mortar type ในอุโมงค์ Westerschelde

4.6 ราคาการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ก่อนที่ผู้ลงทุนจะตัดสินใจดำเนินโครงการใดขึ้นมาหนึ่ง จะต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้น (Pre-Feasibility Study) ก่อน เพื่อจะพิจารณาว่ามีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดในการดำเนินโครงการ ราคาการก่อสร้างถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิจารณาความเป็นไปได้ดังกล่าว โดยราคาการก่อสร้างซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเงินลงทุนในการดำเนินโครงการจะต้องนำไปรวมกับค่าใช้จ่ายอื่นๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับรายได้ของโครงการ เพื่อหาผลประโยชน์ตอบแทนของโครงการ ผลประโยชน์ตอบแทนของโครงการนี้จะใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาว่าโครงการมีความเหมาะสมสำหรับการลงทุนมากน้อยเพียงใด ดังนั้น การประมาณราคาการก่อสร้างจึงมีความสำคัญและมีประโยชน์ในการนำไปใช้สำหรับการพิจารณากำหนดเป็นโครงการขึ้น

4.6.1 การประมาณราคาการก่อสร้าง

ปัจจุบันอุโมงค์ขนส่งมวลชล อุโมงค์ส่งน้ำ และอุโมงค์อื่นๆ ได้เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันเรามากขึ้น การเจริญเติบโตของเมืองใหญ่ บางครั้งทำให้การก่อสร้างวัตถุดิบดินไม่สามารถทำได้สะดวกหรือไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีการจราจรคับคั่งและมีอาคารตั้งอยู่หนาแน่น การก่อสร้างใต้ดินจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการก่อสร้าง และเป็นงานที่ได้รับการกล่าวถึงมากกว่ามีความเหมาะสม ดังจะเห็นได้ว่ามีโครงการก่อสร้างใต้ดินมากมาย เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่รับน้ำเสียใต้ดินของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำประปาของการประปานครหลวง โครงการอุโมงค์สำหรับวางสายไฟฟ้าและโครงการท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง เป็นต้น

การประมาณราคาการก่อสร้างเป็นวิธีการที่ใช้คำนวณหาค่าใช้จ่ายของโครงการก่อสร้าง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีแล้วแต่วัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ ได้จัดแบ่งรูปแบบของการประมาณราคาออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การประมาณราคาอย่างหยาบ เป็นการประมาณราคาในขณะที่แบบรูปและรายการยังไม่สมบูรณ์เรียบร้อย หรืออยู่ในช่วงที่กำลังวางแผนคิดของโครงการเบื้องต้น ซึ่งในการวางแผนโครงการขั้นต้น เจ้าของโครงการจะต้องทราบถึงต้นทุนของโครงการอย่างคร่าวๆ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการลงทุน และวางแผนจัดการด้านงบประมาณเบื้องต้นก่อนที่จะมีการประมาณราคาอย่างละเอียดตามอีกครั้งหนึ่ง ในส่วนของผู้รับเหมาการประมาณราคาอย่างหยาบนี้ก็จะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายของโครงการ ก่อนที่จะตัดสินใจเข้าร่วมประกวดราคา ทั้งยังสามารถนำการประมาณราคาอย่างหยาบมา

เปรียบเทียบกับ การประมาณราคาอย่างละเอียดได้อีกด้วย การประมาณราคาอย่างหยาบจะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายของโครงการได้อย่างรวดเร็ว โดยการนำข้อมูลจากประสบการณ์ของผู้ที่เคยทำงานนี้มาแล้วในอดีตมาทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายของโครงการ ซึ่งความถูกต้องของการประมาณราคาจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลและประสบการณ์ของผู้ประมาณราคา โดยทั่วไปจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5-40% จากค่าใช้จ่ายจริง

2. การประมาณราคาอย่างละเอียด เป็นการประมาณราคาจากแบบรูปและรายการที่สมบูรณ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เจ้าของโครงการและผู้รับเหมาทราบถึงราคาค่าก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เพื่อใช้ในการตั้งราคากลางของเจ้าของโครงการ และใช้ในการประมาณราคาเพื่อเข้าร่วมประกวดราคาของผู้รับเหมา รวมถึงการนำไปใช้สำหรับควบคุมต้นทุนค่าใช้จ่ายและวางแผนการจัดซื้อวัสดุก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพ โดยการประมาณราคาจะต้องทำการศึกษาแบบรูปและรายการอย่างละเอียด สำนักรวปริมาณงานและวัสดุที่จะต้องใช้ รวมถึงแรงงาน เครื่องมือเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น การจัดเตรียมสถานที่ก่อสร้าง บริเวณกองเก็บวัสดุ เป็นต้น

การประมาณราคาค่าก่อสร้างมีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องนับตั้งแต่เจ้าของงาน วิศวกร ผู้ออกแบบ ตลอดจนผู้รับเหมาก่อสร้าง โดยเจ้าของงานซึ่งอาจจะเป็นหน่วยงานราชการหรือเอกชน หากทราบราคาค่าก่อสร้างโดยประมาณก่อนการออกแบบ ก็จะได้ใช้พิจารณากำหนดวงเงินหรืองบประมาณเพื่อการก่อสร้างนั้น หรือในทางกลับกัน จะได้ใช้กำหนดขอบเขตของงานที่จะทำการก่อสร้างให้เหมาะสมกับวงเงินหรืองบประมาณที่เจ้าของงานมีอยู่ สำหรับวิศวกร หรือผู้ออกแบบก็จะได้ใช้ในการศึกษาหาความเหมาะสมของโครงการกับงบประมาณที่มี และภายหลังจากการออกแบบก็จะต้องประมาณราคาอย่างละเอียดเพื่อใช้กำหนดเป็นราคากลางเสนอแก่เจ้าของงานเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกผู้รับเหมา รวมถึงการต่อรองราคาต่อไป และในส่วนของผู้รับเหมาที่จะต้องประมาณราคาเพื่อใช้ในการเสนอราคาแก่เจ้าของงาน ซึ่งหากการประมาณราคาผิดพลาดก็อาจจะทำให้ผู้รับเหมาเสนอราคาสูงเกินไป ก็จะได้งานนั้น หรือถ้าเสนอราคาต่ำไป ก็จะได้งานนั้นไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายหรือขาดทุนได้

การประมาณราคาอย่างหยาบหรือการประมาณราคาเบื้องต้นจะใช้เมื่อต้องการทราบราคาของสิ่งก่อสร้างอย่างคร่าวๆ ในขั้นแรกของการวางแผนการก่อสร้าง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของโครงการ สำหรับกำหนดวงเงินหรืองบประมาณในการก่อสร้าง หรือเพื่อใช้ในการกำหนดรูปแบบและขนาดของโครงการให้เพียงพอกับงบประมาณที่มี การประมาณแบบนี้เป็นวิธีการที่ทำได้รวดเร็ว แต่มีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้วิธีการประมาณที่เหมาะสม ความพร้อมของสถิติและข้อมูลในอดีต เนื่องจากความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ดังกล่าว ทำให้

ให้การประมาณราคาควรต้องมีการคิดเปอร์เซ็นต์เผื่อไว้ 20-30% โดยขึ้นอยู่กับสถิติและข้อมูลในอดีต ถ้ามีสถิติและข้อมูลในอดีตพร้อม การเผื่อก็จะน้อยกว่ากรณีที่มีสถิติและข้อมูลในอดีตไม่พร้อม

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การเลือกใช้การประมาณราคาด้วยวิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำราคาที่ได้ไปใช้ โดยถึงแม้ว่าการประมาณราคาอย่างละเอียดจะให้ราคาที่ใกล้เคียงความจริงมากกว่าการประมาณราคาอย่างหยาบ แต่ก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าเช่นกัน ดังนั้นถ้าหากเจ้าของโครงการหรือผู้รับเหมาต้องการที่จะทราบราคาก่อสร้างของโครงการภายในระยะเวลาจำกัด การใช้การประมาณราคาอย่างหยาบก็จะทำให้ทราบราคาได้ก่อนการประมาณราคาอย่างละเอียด สำหรับการประมาณราคาอย่างหยาบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับหลักการทางสถิติและการเก็บข้อมูลค่าก่อสร้างของโครงการในอดีต ซึ่งนำไปสู่วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสิ่งที่จะก่อสร้างกับราคาก่อสร้าง

4.6.2 ข้อมูลราคา

ตารางที่ 4.29 รายละเอียดงานก่อสร้างอุโมงค์ประปา

ปี	ชื่อโครงการ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	ราคารวม (บาท)
2544	G-TN-7	2.5	2,376	338,535,605
2543	G-MC-7A	3.4	7,000	1,109,636,425
2543	G-MC-7B	2.3	14,800	1,623,289,050
2538	G-BC-5C	2	10,752	721,546,152
2535	G-TN-R1	3.4	10,300	607,743,000
2532	G-TN-6	2	2,190	181,126,100
2524	G-TN-5C	2.5	2,670	305,170,709
2524	G-TN-5B	2.5	4,840	276,000,000
2519	G-TN-4B-R	2	3,673	179,384,000
2519	G-TN-3-R	2.5	7,500	416,790,000
2519	G-TN-2	3.4	8,450	505,519,851
2519	G-TN-1A	2	1,770	101,746,800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 322 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 รายละเอียดงานก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

ปี	ชื่อโครงการ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	ราคารวม (บาท)
2544	สถานีย่อยมหาเมฆ	1	515	23,028,027
2544	สถานีย่อยคลองใหม่	1.5	374	25,538,480
2544	สถานีย่อยครุใน	1	32	6,658,578
2544	โครงการวัดนครอินทร์	1.2	515	25,311,125
2543	สถานีย่อยสามย่าน	1.5	62	8,296,815
2543	สถานีย่อยสะพานดำ	0.8	982	68,399,700
2543	สถานีย่อยพระโขนง	1.5	95	8,923,076
2543	สถานีย่อยนางเลิ้ง	1.2	877	78,552,350
2543	สถานีย่อยธนบุรี	1.2	448	50,129,329
2543	สถานีต้นทางบางกะปิ	1.2	41	6,819,500
2542	สถานีย่อยพระนครใต้	1.5	297	14,594,000
2540	สถานีย่อยบางชัน	1.5	1,617	131,895,843
2539	สถานีย่อยกิ่งเพชร	1.5	1,866	143,422,313
2539	โครงการจิตรสดา	1.5	8,612	607,645,412
2538	โครงการถนนศรีนครินทร์	1.5	4,322	214,777,628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 323 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.31 คำนีราควัสดุก่อสร้าง

ปี	ดัชนี	หมายเหตุ
2519	34.7	
2520	37.2	
2521	40.2	
2522	49.3	
2523	55.6	
2524	59.7	
2525	61.9	
2526	62.3	
2527	62.6	
2528	63.9	
2529	63.3	
2530	66	
2531	73.7	
2532	82.5	
2533	89.1	
2534	93.7	
2535	93.3	
2536	94.3	
2537	96.3	
2538	100	ปีฐาน
2539	101.2	
2540	106.5	
2541	125.6	
2542	119.8	
2543	120.7	
2544	125.9	
2545	126.5	

ที่มา : สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา³²⁴ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.32 ดัชนีค่าจ้างแรงงาน

ปี	อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ(บาท/วัน)	ดัชนี	หมายเหตุ
2519	25	19	
2520	25	19	
2521	28	21	
2522	35	26	
2523	45	33	
2524	54	40	
2525	61	45	
2526	64	47	
2527	66	49	
2528	70	52	
2529	70	52	
2530	73	54	
2531	73	54	
2532	78	58	
2533	90	67	
2534	100	74	
2535	115	85	
2536	125	93	
2537	132	98	
2538	135	100	ปีฐาน
2539	145	107	
2540	157	116	
2541	162	120	
2542	162	120	
2543	162	120	
2544	165	122	
2545	165	122	

ที่มา : กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา325จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.33 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับรวมมาได้จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ปิระปา

	งานทั่วไป		งานอุปสรค		งานบ่อ			งานอุโมงค์			งานอุปกรณ์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)
1	6980113	2991477	250389	584241	7740922	11611383	95373191	177121640	28705800	7176450	139050415	199485191		
2	38699640	16585560	13356600	31165400	22690830	34036245	348062138	646401113	31711120	7927780	454520328	736116098		
3	54916050	23535450	10215900	23837100	50030980	75046470	468271125	869646375	38231680	9557920	621665735	1001623315		
4	15043980	6447420	0	0	13780260	20670390	220874318	410195163	27627697	6906924	277326255	444219897		
5	61719700	26451300	0	0	35135400	52703100	145047175	269373325	13850400	3462600	255752675	351990325		
6	12697510	5441790	60930	142170	5052760	7579140	50241870	93306330	5282880	1320720	73335950	107790150		
7	6160	2406240	143700	335300	4506336	6759505	95779192	177875641	9400188	2350047	115443976	189726733		
8	35316400	15135600	259200	604800	3646400	5469600	74382000	138138000	2438400	609600	116042400	159957600		
9	15460837	6626073	16254781	3792789	6171452	9257178	128686758	238989693	4943792	1235948	156888320	259901681		
10	12511800	5362200	6000	14000	1542880	2314320	53878580	100060200	2955200	738800	70894460	108489540		
11	28505400	12216600	712698	1662963	5461212	8191818	147096558	273179332	22794624	5698656	204570492	300949359		
12	7559132	3239628	0	0	1369704	2054556	28746298	53385982	4313200	1078300	41988334	59758466		

ตารางที่ 4.34 แสดงข้อมูลที่ปรับสภาพแล้วของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

	งานทั่วไป		งานอุปสรค		งานป่อ		งานอุโมงค์		งานอุปกรณ์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)
1	5544172	2452030	198879	478886	6148469	9517527	75753130	145181672	22800477	5882336	110445127	163512451
2	32062668	13821300	11065949	25971167	18799362	28363538	288369625	538667594	26272676	6606483	376570280	613430081
3	45497970	19312875	8463877	19864230	41450688	62538725	387962821	724705313	31674963	7964933	515050319	834686096
4	15043980	6447420	0	0	13780260	20670390	228074318	410195163	27627697	6906924	277326255	444219897
5	66151876	31119176	0	0	37658521	62003647	155463210	316909794	14845016	4073647	274118623	414106265
6	15390921	9382397	73855	245121	6124558	13067483	60899236	160872983	6403491	2277103	88892061	185845086
7	9404623	6015600	240704	838250	7548302	16898762	160434157	444689104	15745709	5875118	193373494	474316833
8	59156449	37839000	434171	1512000	6107873	13674000	124592965	345345000	4084422	1524000	194375879	399894000
9	44555726	34874068	4684383	19962047	17785164	48751989	370855209	1257840487	14247239	6504989	452127722	1.368E+09
10	36057061	28222105	17291	73684	4446340	12180632	155269683	526632737	8516427	3888421	204306801	570997579
11	82148127	64297895	2053886	8752435	15738363	43114832	423909389	1437785905	65690559	29992926	589540324	1.584E+09
12	21784242	17050674	0	0	3947274	10813453	82842357	280978853	12429971	5675263	121003844	314518242

ตารางที่ 4.35 แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างคูโม่งค้ำประปา

เลขที่	งานทั่วไป		งานอุปสรค		งานบ่อ		งานคูโม่งค้ำ		งานอุโมงค์		งานอุโมงค์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)
1	2333	1032	84	202	2588	4006	31883	61103	9596	2476	46484	68818		
2	4580	1974	1581	3710	2686	4052	41196	76983	3753	944	53796	87633		
3	3074	1325	572	1342	2801	4226	26214	48967	2140	538	34801	56398		
4	1399	600	0	0	1282	1922	20543	38151	2570	642	25793	41315		
5	6423	3021	0	0	3656	6020	15094	30768	1441	385	26613	40204		
6	7028	4284	34	112	2797	5967	27808	73458	2924	1040	40590	84861		
7	3522	2253	90	314	2827	6329	60088	166550	5897	220	72425	177647		
8	12222	7818	90	312	1262	2825	25742	71352	844	315	40160	82623		
9	5941	4650	625	2662	2371	6496	49447	167712	1900	867	60284	182387		
10	9817	7684	5	20	1211	3316	42273	143379	2319	1059	55624	155458		
11	9722	7609	243	1036	1863	5102	50167	170152	7774	3549	69768	187449		
12	12307	9633	0	0	2230	6109	46804	158745	7023	3206	68364	177694		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สำนักงานวิศวกรรมโยธาจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.36 แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

โครงการ	งานทั่วไป		งานอุปสรรค		งานขุด		งานอุโมงค์		งานอุปกรณ์	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
ค่าเฉลี่ย	5072.63	2788.38	306.38	749.00	2487.38	4418.38	31071.00	70912.75	3645.63	1068.75
มาตรฐาน	4051.00	2113.50	87.00	257.00	2741.50	4139.00	27011.00	66227.50	2747.00	793.00
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3472.41	2346.83	547.75	1272.03	817.60	1591.31	14009.69	42177.21	2857.10	824.83
ความเบ้	1.33	1.63	2.30	2.29	-0.66	-0.23	1.38	1.94	1.51	1.11
ความเอน	1.92	2.81	5.29	5.31	-0.09	-1.10	2.21	4.60	2.16	-0.31
ค่าต่ำสุด	1399.00	600.00	0.00	0.00	1262.00	1922.00	15094.00	30768.00	844.00	315.00
ค่าสูงสุด	12222.00	7818.00	1581.00	3710.00	3656.00	6329.00	60088.00	166550.00	9596.00	2476.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การถือกใช้การประมาณราคาด้วยวิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำราคาที่ได้ไปใช้ โดยถึงแม้ว่าการประมาณราคาอย่างละเอียดจะให้ราคาที่ใกล้เคียงความจริงมากกว่าการประมาณราคาอย่างหยาบแต่ก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าเช่นกัน ดังนั้นถ้าหากเจ้าของโครงการหรือผู้รับเหมามีต้องการที่จะทราบราคาค่าก่อสร้างของโครงการภายในระยะเวลาจำกัด การใช้การประมาณราคาอย่างหยาบก็จะทำให้ทราบราคาได้ก่อนการประมาณราคาอย่างละเอียด สำหรับการประมาณราคาอย่างหยาบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือลักษณะการเก็บข้อมูลค่าก่อสร้างของโครงการในอดีต ซึ่งนำไปสู่วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสิ่งที่จะก่อสร้างกับราคาค่าก่อสร้าง ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี หนึ่งในหลายวิธีนั้นก็คือ การประมาณการจากแบบจำลอง ซึ่งทำโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าใช้จ่ายของโครงการต่างๆ ในอดีตเพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายราคาค่าก่อสร้างของโครงการในอนาคต วิธีการประมาณจากแบบจำลอง เช่น การวิเคราะห์ การถดถอย เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายกับปริมาณงานในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และนำสมการที่ได้ไปใช้หาค่าใช้จ่ายที่โครงการตามปริมาณงานของโครงการ มอนติคาร์โล เป็นการนำข้อมูลค่าใช้จ่ายมาวิเคราะห์หาค่าทางสถิติและรูปแบบการแจกแจงของข้อมูลค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เหมาะสม จากนั้นก็สร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ

4.6.3 ปัจจัยที่มีผลกับราคาก่อสร้างอุโมงค์

1) FIRE PROTECTION

จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของอุโมงค์

1. อุโมงค์ขนส่งมวลชน จำเป็นจะต้องมีการติดตั้งเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้อุโมงค์เมื่อเกิดอุบัติเหตุ หรือ เหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด หรือขึ้นอยู่กับกรออกแบบ และจุดคุ้มทุนในการติดตั้งระบบว่ามีความสมควรที่จะติดตั้งหรือไม่
2. อุโมงค์ส่งน้ำไม่มีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบบ FIRE PROTECTION เพราะความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุเกี่ยวกับไฟมีน้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย

เมื่อเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยของอุโมงค์ทั้งสองลักษณะ จะเห็นว่าอุโมงค์ที่มีระบบ FIRE PROTECTION จะมีราคาต่อหน่วยที่สูงกว่าจากการเพิ่มขึ้นของระบบ ซึ่งบางโครงการราคาของ FIRE PROTECTION อาจจะมีราคาที่สูงกว่าราคาก่อสร้างอุโมงค์เสียอีก



BOARD TYPE



SILICAFIBER TYPE



SPAY MOTAR TYPE

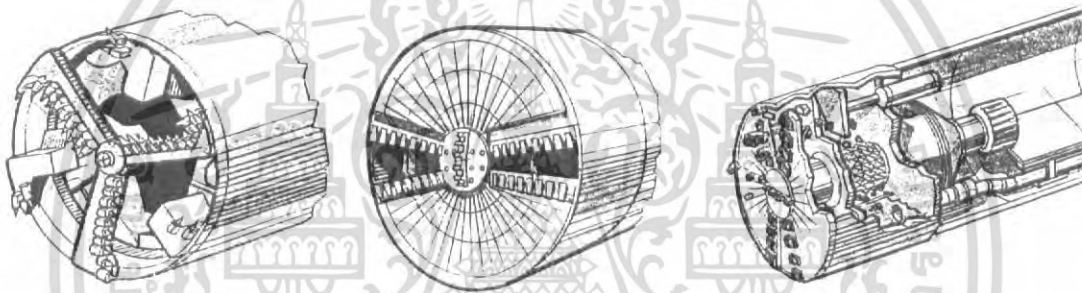
รูปที่ 4.160 แสดงอุโมงค์ที่มีระบบป้องกันไฟต่างๆ

2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์

1. เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับราคาก่อสร้างอุโมงค์ จะเกี่ยวข้องกับ การหาวิธีการที่เหมาะสมในการขุดเจาะอุโมงค์ ในเรื่องของราคา ผลกระทบในการดำเนินงานก่อสร้างจะเกี่ยวข้องกับการลำเลียง วัสดุ อุปกรณ์ เข้าออกภายในอุโมงค์ ซึ่งมีจำนวนมาก ทำให้การดำเนินงานก่อสร้างมีความล่าช้า

2. ขนาดของอุโมงค์ที่มีความแตกต่างกัน จะทำให้

- มีรายจ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของการปฏิบัติงาน
- ราคาของหัวเจาะ มีราคาเพิ่มขึ้นตามขนาดของอุโมงค์
- ราคาของเครื่องจักรในการลำเลียงที่เพิ่มขึ้น
- SEGMENT มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น การประกอบ การขนส่ง วัสดุที่ใช้หล่อมีปริมาณที่มาก

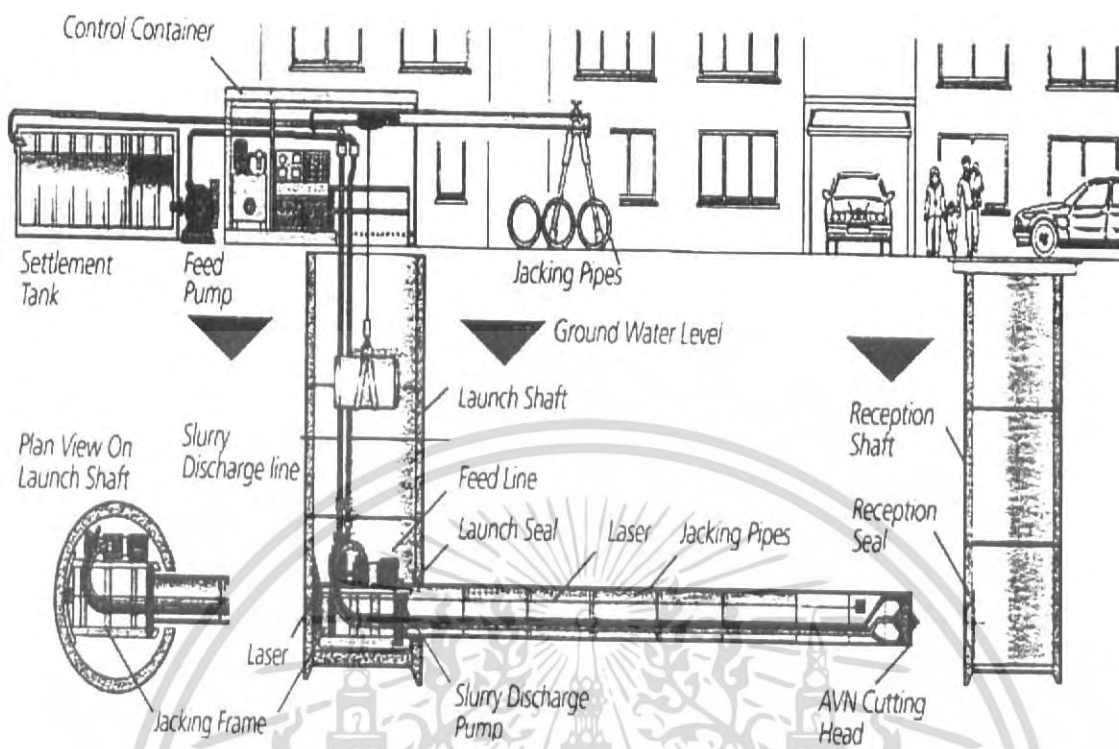


TUNNEL BORING MACHINE

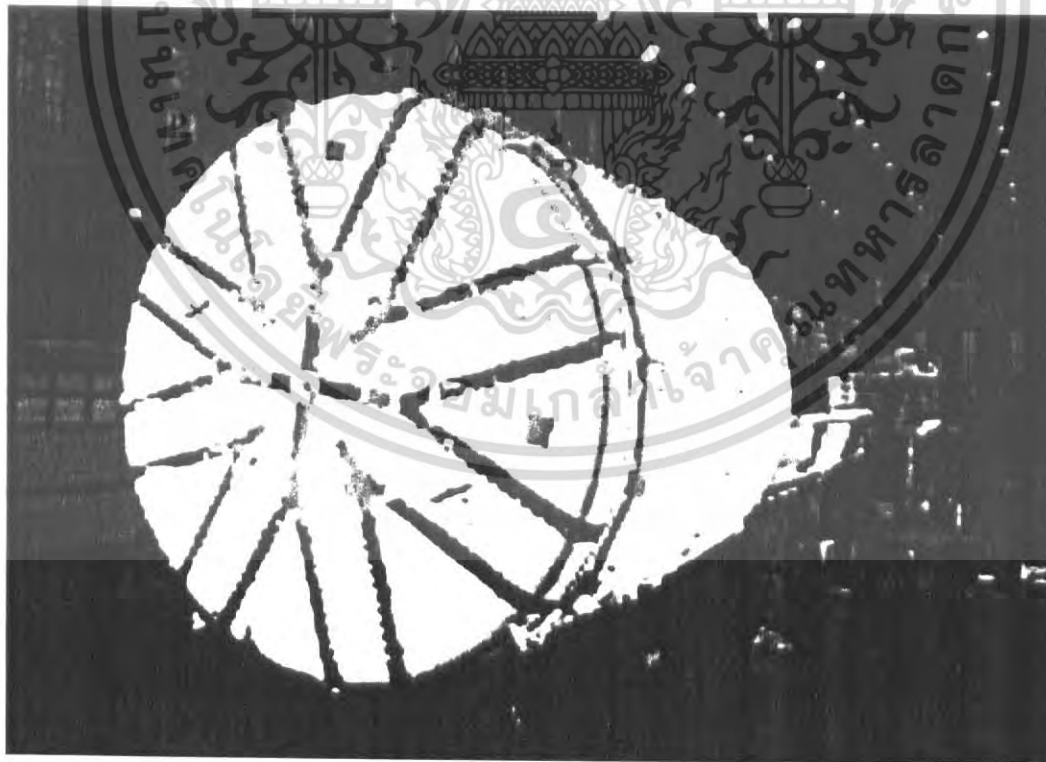
EART PRESSURE BALANCE

SLURRY

รูปที่ 4.161 รูปแสดงหัวเจาะชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.162 แสดงวิธีการขุดเจาะแบบ PIPE JACKING



รูปที่ 4.163 แสดงการขุดเจาะแบบ EPB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 333 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) GROUND IMPROVEMENT

1. ลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ของอุโมงค์ การออกแบบจะมีผลทำให้มีการทำ GROUND IMPROVEMENT ที่แตกต่างกัน ทั้งปริมาณงาน และราคาที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณงานปัญหาทางหน้างาน ระดับน้ำใต้ดิน การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารที่มีการเจาะผ่าน ซึ่งราคาที่เพิ่มขึ้น จะมีความไม่แน่นอน จะต้องมีการคิดราคาในส่วนนี้ละเอียดมาก
- 2 ความแตกต่างของราคา ของอุโมงค์ขนส่งมวลชน และ อุโมงค์ส่งน้ำ ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในส่วนของ GROUND IMPROVEMENT

- อุโมงค์ขนส่งมวลชน จะมีจำนวนของสถานี อาคารผู้โดยสาร และอื่นๆ เกี่ยวกับโครงสร้างอาคารมาก และในการขุดเจาะ จะต้องมีการเสริมความแข็งแรงของดินบริเวณดังกล่าว เพื่อการขุดเจาะที่สะดวก ทำให้ขั้นตอนการก่อสร้างในการทำ GROUND IMPROVEMENT มีมาก
- อุโมงค์ส่งน้ำ จะมีการทำ GROUND IMPROVEMENT เฉพาะในการขุดเจาะ และผ่าน โครงสร้างอาคาร หรือผ่าน SHATF เท่านั้น

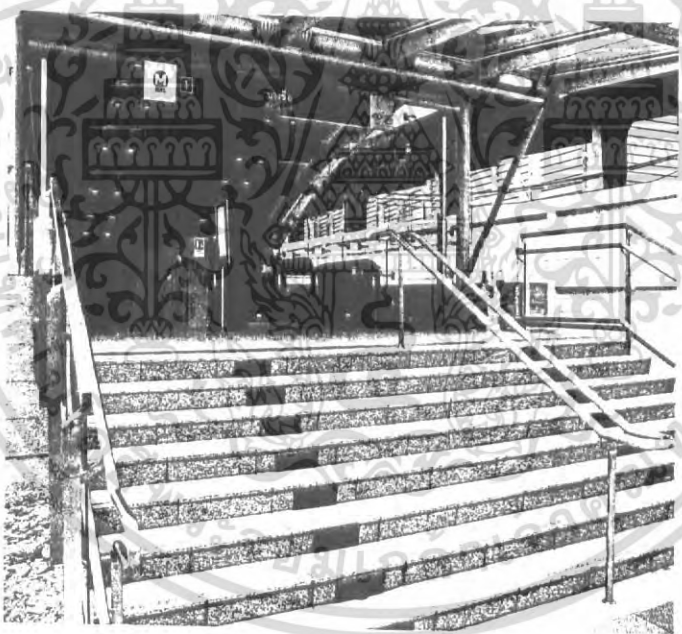
เพราะฉะนั้นไม่ว่าจะทำอุโมงค์ ที่มีการใช้งานในลักษณะใด ราคาที่เพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปัญหาหน้างาน และลักษณะของการใช้งาน

4) ระยะทางและความยาวของอุโมงค์

จะมีผลในเรื่องการขนส่ง และการลำเลียง ยังมีการขุดเจาะไปไกลมาก จากจุดเริ่มต้น ระยะเวลา ระยะทางในการขนถ่าย และลำเลียง การประกอบชิ้นส่วนอุโมงค์จะมีระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีการจัดการที่ดี จะมีการลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้มาก หรือ อาจจะหาจากจุดคุ้มทุน ว่าถ้ามีการ เพิ่ม SHAFT เข้าไปอีก จะมีความคุ้มค่ากว่า การลำเลียง ขนถ่ายในระยะทางไกลๆหรือไม่

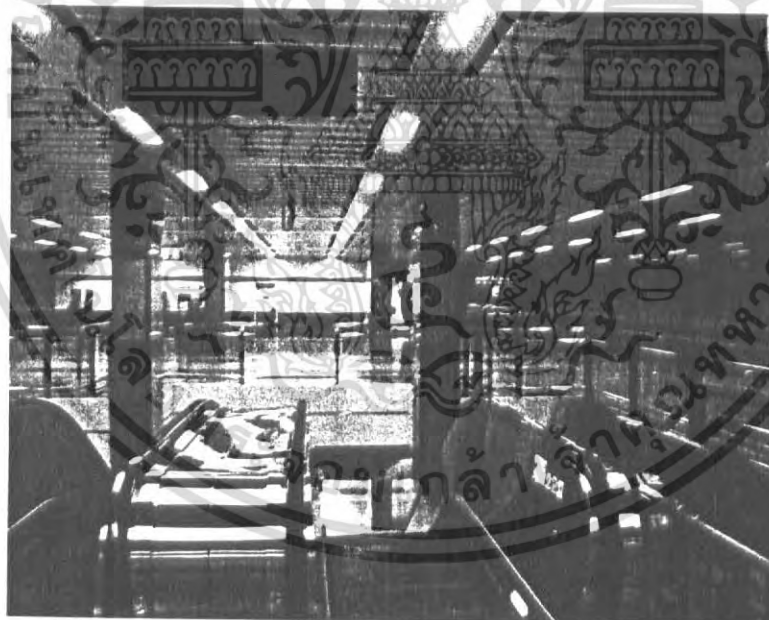
5) ทัศนียภาพของ โครงการ

ขึ้นอยู่กับรูปแบบ และ ที่ตั้งของโครงการ ว่าเส้นทางของแนวอุโมงค์ ผ่านสถานที่สำคัญหรือไม่ จะต้องมีการหลบหลีก หรือเปลี่ยนแปลงอย่างไร การปรับปรุงทัศนียภาพ ด้านบน และภายในอุโมงค์ทั้งหลาย จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของราคาก่อสร้างทั้งสิ้น



รูปที่ 4.164 แสดงทัศนียภาพด้านบนของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ³³⁵ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

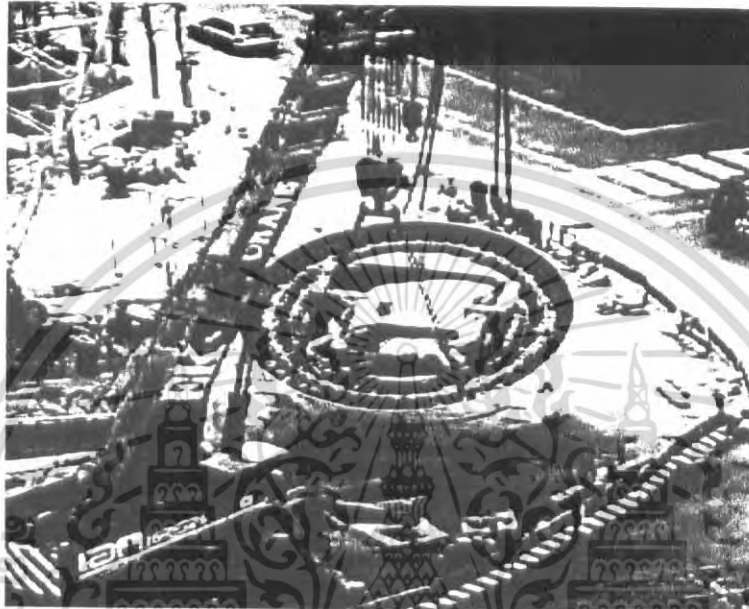


รูปที่ 4.165 แสดงทัศนียภาพภายในของอุโมงค์

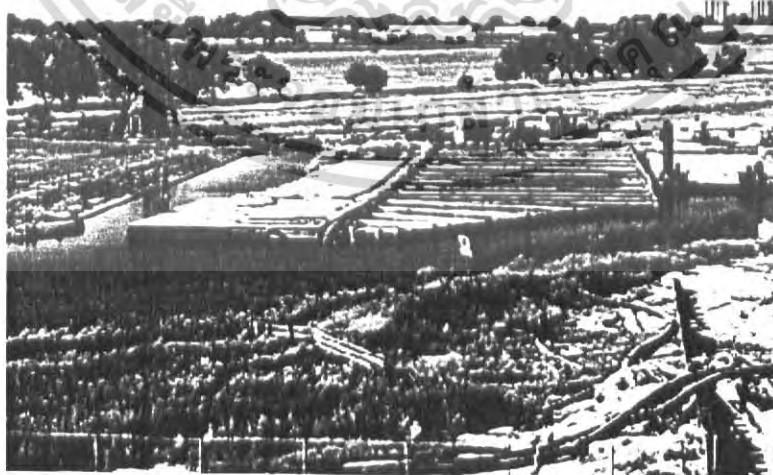
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 336 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) สถานที่ตั้งของโครงการ

มีผลต่อการดำเนินงานก่อสร้าง และ การขนส่ง สถานที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรมาก การจราจรที่แออัด จะมีการดำเนินการก่อสร้าง และ การขนส่งที่ยากลำบาก มากขึ้น การลำเลียงชิ้นส่วนอุปกรณ์ หรือการขนถ่ายวัสดุหน้างาน จะมีความยากลำบาก และล่าช้ามาก จะทำงานได้สะดวกในเวลากลางคืน



รูปที่ 4.166 แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีความแออัด



รูปที่ 4.167 แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีพื้นที่ในการก่อสร้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ระดับความลึกของอุโมงค์

ความลึกจะมีผลกับราคา ในเรื่องของการขุดเจาะ การลำเลียงดิน ระบบอัดอากาศ ความปลอดภัยในการทำงาน

8) ระยะเวลาในการก่อสร้าง

ขี้งานก่อสร้างมีความล่าช้ามากเท่าไร ก็จะทำให้เกิดราคาที่เพิ่มขึ้นจาก อัตราดอกเบี้ย ค่าดำเนินงานในการก่อสร้างในส่วนของค่าแรง ค่าปรับตามสัญญาการก่อสร้าง และอื่นๆ ซึ่งมีผลเสียต่อโครงการทั้งสิ้น จะต้องมีการจัดการที่ดี ทำงานให้เป็นไปตามแผนงานที่วางไว้เสมอ จึงจะไม่มีผลกระทบต่อราคาค่าก่อสร้าง

9) สถานที่เก็บวัสดุอุปกรณ์

จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการขนส่ง ความสะดวกในการขนส่ง ราคาในการเข้าพื้นที่ ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ถ้ามีการกำหนดสถานที่ผลิตผล จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่เพิ่มขึ้น แต่ในบางโครงการ ขอมที่จะเข้าที่ดินในราคาที่สูง เพื่อการขนส่งที่มีระยะทางที่สั้นลง ค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่น้อยลง มากกว่าราคาเช่าที่ดินที่ถูก แต่มีราคาในการขนส่งที่สูง



รูปที่ 4.168 แสดงสถานที่เก็บชิ้นส่วนอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 338 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการรวบรวมปัจจัยต่างๆ สามารถสรุปผลที่ได้ว่า ราคาค่าก่อสร้างอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง วิธีการก่อสร้าง รูปแบบการใช้งาน การตกแต่ง ความยาวของอุโมงค์ ระบบป้องกันภัย ระบบรักษาความปลอดภัย และอื่นๆ เพราะฉะนั้นในการประมาณราคาค่าก่อสร้าง จะต้องต้องมีข้อมูลต่างๆที่แม่นยำ ถึงจะทำให้การประมาณราคาอุโมงค์ มีความเที่ยงตรง และ ใกล้เคียง กับค่าก่อสร้างจริงมากที่สุด

ผลจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับราคาค่าก่อสร้างอุโมงค์

เนื่องจากจำนวนในการก่อสร้างอุโมงค์ประปา และ อุโมงค์ขนส่งมวลชน ในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก ทำให้รูปแบบของราคาค่าก่อสร้างยังคงมีไม่มากนัก แต่อาจจะแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานของอุโมงค์ คือ อุโมงค์ส่งน้ำ และอุโมงค์ขนส่งมวลชน

โดยเมื่อดูจากลักษณะการใช้งานแล้ว อุโมงค์ขนส่งมวลชน จะมีปัจจัยที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างมีราคาที่สูงกว่า ถึงแม้ว่า ขนาดของอุโมงค์จะมีขนาดที่เท่ากันก็ตาม เนื่องจากอุโมงค์ขนส่งมวลชน จำเป็นจะต้องมี ระบบรักษาความปลอดภัย เพื่อรักษาชีวิตของประชาชน รูปแบบการตกแต่ง ความสวยงาม สถานีโดยสารและจุดเชื่อมต่อต่างๆทั้งหลายเหล่านี้จะต้องมีการก่อสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น

ในขณะที่อุโมงค์ส่งน้ำ ไม่จำเป็นจะต้องมีปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมา เพราะฉะนั้น พอจะสรุปได้ว่า ราคาค่าก่อสร้างอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของอุโมงค์ ขนาดอุโมงค์ ความยาวของอุโมงค์ พื้นที่ในการก่อสร้างอุโมงค์ และสถานที่เตรียมวัสดุ ความหนาแน่นของประชากรในการใช้พื้นที่ดังกล่าว ซึ่งทำให้การก่อสร้าง มีความยากลำบากมากขึ้นทำให้ราคาค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 5

กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

5.1 กฎหมายและข้อระเบียบข้อบังคับเบื้องต้นที่สามารถประยุกต์ใช้ได้

ก่อนการจดทะเบียนอุโมงค์ จำเป็นจะต้องพิจารณาในเรื่องกฎหมายและระเบียบข้อบังคับขอบเขตของกฎหมาย กระบวนการที่จำเป็นและมาตรการในการทำให้สอดคล้องกับกฎหมายและระเบียบข้อบังคับต่างๆ

การปฏิบัติงานจะได้รับการควบคุมโดยกฎหมายและระเบียบข้อบังคับ งานจะต้องได้รับอนุญาตและอนุมัติโดยเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องฉะนั้นจึงแนะนำให้ทำการตรวจสอบอย่างละเอียดเกี่ยวกับขอบเขตของข้อจำกัด กระบวนการที่จะเป็น และมาตรการที่จะดำเนินการ จะต้องทำการสังเกตว่ามันอาจจะกินเวลานานในการรับการอนุมัติและสังเกตถึงการแปรผันบางอย่างระหว่างคำสั่งของรัฐบาลท้องถิ่น

กฎหมายและข้อระเบียบข้อบังคับเบื้องต้นที่สามารถประยุกต์ได้ดังในตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารถประยุกต์ใช้ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
(การวางแผนเมือง) กฎหมายการวางแผนเมืองและอื่นๆ	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในพื้นที่การวางแผนเกี่ยวกับเมือง เขตชนบทและพื้นที่การปรับใหม่เกี่ยวกับที่ดิน การควบคุมในเรื่องการใช้เนื้อที่ว่างได้ดิน
(การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม) กฎหมายอุทยานตามธรรมชาติ กฎหมายอุทยานเมืองใหญ่ พระราชบัญญัติการคุ้มครองทรัพยากรทางวัฒนธรรม	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในอุทยานแห่งชาติ วนอุทยานกึ่งแห่งชาติ อุทยานจัดการโดยรัฐบาลท้องถิ่นและอุทยานเมืองใหญ่ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในสถานที่ทางประวัติศาสตร์ สถานที่อันสวยงาม พื้นที่อนุสาวรีย์ตามธรรมชาติและพื้นที่สินทรัพย์ทางวัฒนธรรม
(ทะเลและแม่น้ำ) กฎหมายฝั่งทะเล กฎหมายแม่น้ำ กฎหมายช่องขนถ่ายสินค้าและท่าเรือ กฎหมายการบุกเบิกท่อน้ำสาธารณะ	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในพื้นที่อนุรักษ์ชายฝั่งทะเลพื้นที่แม่น้ำพื้นที่ท่าเรือและอื่นๆ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนา และการครอบครองผิวน้ำหรือตัวน่าน้ำสาธารณะเช่นแม่น้ำ ทะเลสาบ ทะเลและอื่นๆ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องธุรการบำบัดของเสียมลภาวะทางทะเลและภัยพิบัติทางทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารถประยุกต์ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
(ถนนและการจราจร) กฎหมายถนน กฎหมายการจราจรบนท้องถนน	การใช้ถนน การครอบครองถนน
(การบิน) กฎหมายเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และศิลปะการบินพลเรือน	ขีดจำกัดความสูงของอาคารเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากเครื่องบิน
(การป้องกันมลภาวะ) กฎหมายทฤษฎีการควบคุมมลภาวะเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม กฎหมายระเบียบข้อบังคับด้านเสียง กฎหมายเกี่ยวกับระเบียบข้อบังคับในเรื่องการการสันตะเทือน	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการก่อสร้างสำหรับการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการเสียงและการสันตะเทือนเนื่องจากการก่อสร้าง
กฎหมายการกักน้ำเสียและการทำความสะอาดสาธารณะ แนวทางปฏิบัติที่เป็นข้อบังคับเกี่ยวกับตะกอนทางเคมี	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการการปล่อยลงลำน้ำสาธารณะ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการกักน้ำเสีย
เทคนิคแนวทางปฏิบัติเกี่ยวกับการป้องกันทางเสียงและการสันตะเทือนอันเนื่องมาจากการก่อสร้าง	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการหรือตะกอนทางเคมี

ตารางที่ 5.1. (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารถประยุกต์ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
(ทรัพยากร) กฎหมายสำหรับการส่งเสริมในเรื่องการใช้ทรัพยากรที่สามารถรีไซเคิลได้ คำสั่งรัฐมนตรีเกี่ยวกับการวินิจฉัยของผู้ก่อสร้างในเรื่องทรัพยากรที่สามารถรีไซเคิลได้	มาตรฐานการวินิจฉัยสำหรับการส่งเสริมและรีไซเคิลดินที่ขุดขึ้นมา
(การป้องกันภัยพิบัติ) กฎหมายสำหรับระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนา ฯลฯ ที่ดินเกี่ยวกับอาคาร กฎหมายป้องกันการเลื่อนไหลของดิน กฎหมายเกี่ยวกับการป้องกันด้านความบกพร่องของพื้นที่เสี่ยงที่สูงชัน กฎหมายการดับเพลิง กฎหมายปฏิบัติเกี่ยวกับดินปืน กฎหมายด้านความปลอดภัยแรงงานและสุขภาพ	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในเขตพิเศษ ระเบียบข้อบังคับสำหรับการก่อสร้างของที่ดินอาคาร การป้องกันการเลื่อนไหล การป้องกันในเรื่องความบกพร่องเกี่ยวกับความลาดเอียงที่สูงชัน ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการดับเพลิง
กฎด้านความปลอดภัยแรงงานและสุขภาพ กฎด้านความปลอดภัยและสุขภาพสำหรับงานที่มีความดันสูง กฎด้านความปลอดภัยสำหรับภาชนะเครื่องต้มและถังความดัน กฎโครงสร้างถังความดัน กฎป้องกันการขาดออกซิเจน	ความปลอดภัยและสุขภาพด้านแรงงาน, การป้องกันการขาดออกซิเจน ระเบียบข้อบังคับในเรื่องดินปืน ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการทำงานที่มีความดันสูง, ภาชนะเครื่องต้มและถังความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 343 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารถประยุกต์ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
เค้าโครงในเรื่องมาตรการสำหรับการป้องกันภัยพิบัติสาธารณะเนื่องจากการก่อสร้างมาตรฐานด้านโครงสร้างสำหรับการป้องกันในเรื่องเครื่องใช้ไฟฟ้าและการระเบิดด้านเครื่องจักรกล กฎสำหรับการมอบหมายอำนาจหน้าที่ด้านเครื่องจักรกล	การป้องกันภัยพิบัติสาธารณะ การป้องกันในเรื่องเครื่องใช้ไฟฟ้าและการระเบิดของเครื่องจักรกล
(มาตรฐานอาคาร) กฎหมายควบคุมอาคาร	มาตรฐานสำหรับสถานที่ตั้ง โครงสร้าง อุปกรณ์และการใช้อาคาร
(ไฟฟ้า) กฎหมายอุตสาหกรรมอรรถประโยชน์ด้านไฟฟ้าประมวลกฎหมายเทคนิคเกี่ยวกับฉนวนไฟฟ้า	กฎเกี่ยวกับงานฉนวนไฟฟ้า การบำรุงรักษา และการปฏิบัติงาน

ตัวอย่างกฎหมายที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร(MRTA) กรุงเทพมหานครซึ่งอยู่ในภาคผนวกได้แก่

1. พระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540
2. กฎกระทรวง พ.ศ. 2542 ออกตามความในพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
3. กฎกระทรวง ฉบับที่ 2 พ.ศ.2542 ออกตามความในพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
4. ประกาศองค์การรถไฟฟ้ามหานคร เรื่อง ข้อกำหนดทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการใช้ที่ดินของเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายในอสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ตามโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สายเฉลิมรัชมงคล

บทที่ 6

ข้อมูลทางปฐพีกลศาสตร์และพฤติกรรมดิน

6.1 ข้อมูลทางปฐพีกลศาสตร์

6.1.1 การสำรวจพื้นที่ตั้งของโครงการก่อสร้าง

ในการสำรวจพื้นที่ของโครงการก่อสร้างนั้น ก่อนอื่นจะต้องทราบประเภทหรือชนิดของงานโครงการเสียก่อน เพื่อเป็นพื้นฐานของการกำหนดข้อมูลและขอบเขตของรายละเอียดที่ต้องการ ซึ่งข้อมูลและรายละเอียดดังกล่าวจะเป็นตัวดัชนีของการวางแผนงานของการสำรวจได้อย่างมีประสิทธิภาพ การสำรวจพื้นที่ที่สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ งานสำรวจสภาพพื้นผิวดิน ซึ่งเป็นการสำรวจภูมิประเทศทางด้านธรณีวิทยา อาทิเช่น สภาพพื้นผิวดินและปรากฏการณ์ของความเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ พืชที่ปกคลุม ภูมิอากาศ และสภาพของสิ่งแวดล้อม ในการสำรวจสภาพพื้นผิวดินเพื่อการรวบรวมข้อมูลควรจะปฏิบัติตามการควบคุมไปกับการศึกษาแผนที่ทางธรณีวิทยา ส่วนงานสำรวจสภาพใต้พื้นผิวดิน จะเป็นการเจาะสำรวจชั้นดินเพื่อทราบถึงพฤติกรรมอย่างถ่องแท้ของดินแต่ละชั้น ตลอดจนระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจและขั้นตอนของการวิเคราะห์หวัจย ที่มีความมั่นใจสูง จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อเสถียรภาพของการออกแบบและจะไม่มีปัญหาในภายหลัง ตามปกติจะกำหนดงบประมาณการเจาะสำรวจประมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ของงบประมาณทั้งหมดของโครงการแต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับขนาดของโครงการและลักษณะความซ้ำซ้อนของชั้นดิน

อนึ่งดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดัชนีของการวางแผนงานการสำรวจขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทของโครงการนั้นต้องมีเป้าหมายที่เด่นชัด อาทิเช่น โครงการประเภทงานอาคาร เป้าหมายของการเจาะสำรวจเพื่อการคัดเลือกชนิดของฐานราก คำนวณน้ำหนักบรรทุกของฐานราก ประมาณค่าการทรุดตัวของโครงสร้าง หน่วยแรงดันของดินที่กระทำด้านข้าง ฯลฯ นอกจากนั้นข้อมูลการเจาะสำรวจจะขาดเสียมิได้ คือ การสำรวจหาระดับน้ำใต้ดิน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการออกแบบและก่อสร้าง

การวางแผนงานสำรวจพื้นที่

แผนงานการดำเนินการสำรวจพื้นที่จะต้องประกอบด้วย ขั้นตอนการเจาะสำรวจ แผนดำเนินงานเจาะสำรวจ การทดสอบชนิดของดิน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ขั้นตอนของการเจาะสำรวจ แบ่งออกเป็น การเจาะสำรวจเบื้องต้น และการเจาะสำรวจแบบรายละเอียด ซึ่งการเจาะสำรวจเบื้องต้นเป็นการสำรวจลักษณะของสภาพพื้นที่ทั่วไป กอปรกับเจาะสำรวจหรือชุดหลุมสำรวจ (Test Pits) ประมาณ 2-3 หลุม เพื่อบำบัดน้ำใต้ดิน และดัชนีคุณสมบัติเบื้องต้นของดินในแต่ละชั้น เช่น การทดสอบขนาดของเม็ดดิน ดัชนีความเหลวตัวของดิน ปริมาณความชื้นของมวลดินธรรมชาติ เป็นต้น การเจาะสำรวจเบื้องต้นเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ เมื่อเห็นว่าโครงการสามารถเป็นไปได้อีกก็เริ่มเข้าสู่การเจาะสำรวจแบบละเอียดด้วยการเพิ่มจำนวนหลุมเจาะ และทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินต่อไป

ข. แผนดำเนินงานเจาะสำรวจ จะต้องประกอบด้วย เทคนิค กรรมวิธี การทดสอบ และจำนวนตัวอย่างที่ต้องการใช้ในการทดสอบ การหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เช่น ปริมาณความชื้นของมวลดินจะต้องหาจากตัวอย่างดินที่ได้คงสภาพความชื้นตามธรรมชาติ ปริมาณไม่น้อยกว่า 100 กรัมโดยน้ำหนัก ขนาดผลของเม็ดดินจะต้องหาจากตัวอย่างดินที่มีปริมาณไม่น้อยกว่า 200 กรัมโดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะจะต้องหาจากตัวอย่างดินที่มีขนาดตั้งแต่ 6.5 มม. ลงมาด้วยปริมาณไม่น้อยกว่า 100 กรัมโดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าปริมาณตัวอย่างดินที่ใช้การทดลองเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเพื่อป้องกันปัญหาปริมาณตัวอย่างดินมีไม่พอที่จะทดลอง

ค. การทดสอบชนิดของดิน สำหรับดินมวลละเอียดที่จะนำมาทดสอบจะต้องเป็นตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Soil) การทดสอบคุณสมบัติจะเกี่ยวกับความสามารถของการรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว การทดลองประกอบด้วย ชีดจำกัดแอดเดอร์เบอร์ก (Atterberg Limits) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) ขนาดเม็ดดินและความต้านทานแรงเฉือนของมวลดิน ส่วนดินมวลหยาบที่นำมาทดสอบมักจะเป็นดินที่เปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil) การทดสอบจะประกอบด้วย การหาขนาดของเม็ดดิน การหาชีดแอดเดอร์เบอร์ก ความถ่วงจำเพาะ การบดอัด ความชื้นได้ของมวลดิน

6.1.2 การเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่าง

6.1.2.1 วัตถุประสงค์ในการสำรวจ

มีความมุ่งหมายเพื่อที่จะหาขอบเขตและความหนาแน่นดินที่แน่นอน ในบริเวณหนึ่งๆพร้อมวิเคราะห์หาคุณสมบัติของชั้นดินเหล่านั้นทั้งด้านกายภาพ และทางด้านวิศวกรรม โดยทั่วไปจะเจาะสำรวจทดสอบภาคสนามและเก็บตัวอย่างชั้นจากแต่ละความลึกเพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบต่อในห้องปฏิบัติการ วิศวกรผู้ออกแบบจะไม่สามารถออกแบบได้หากปราศจากการสำรวจพื้นที่และหาข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินที่ถูกต้องและเพียงพอ

6.1.2.2 ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการเจาะสำรวจชั้นดิน

ก.) ผลกระทบจากสภาพชั้นดินที่แปรปรวน

- เมื่อมีการสำรวจชั้นดิน อาจพบว่าสภาพชั้นดินแปรปรวน หรือไม่ตรงกับที่ได้คาดไว้จากข้อมูลเดิมในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวางแผน กำหนดตำแหน่ง และจำนวนหลุมเจาะสำหรับการออกแบบแต่ละโครงการ ควรสังเกตว่าการเจาะสำรวจนี้จะได้เพียงข้อมูลทางความลึก ณ ตำแหน่งหลุมเจาะเท่านั้น โดยจะไม่ทราบข้อมูลชั้นดินในบริเวณอื่นหรือชั้นดินระหว่างหลุมเจาะ นอกจากจะใช้หลักการประมาณการ หรือคาดคะเนโดยวิธีการลากเส้นเชื่อมโยงลักษณะเฉลี่ยของชั้นดินแต่ละชั้นจากข้อมูลชั้นดินที่ทราบคุณสมบัติแล้วจากหลุมเจาะสำรวจจริงเท่านั้น กรณีที่พบว่าชั้นดินในพื้นที่โครงการมีความแปรปรวนมาก อาจจัดแยกขอบเขตพื้นที่ตามลักษณะหรือชนิดของชั้นดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงคล้ายคลึงกัน การแบ่งแยกขอบเขตพื้นที่นี้อาจจัดตามลักษณะทางกายภาพ หรือลักษณะคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมหรือตามตัวแปรค่าเฉพาะของดิน (Soil Parameter) หรือตามความอ่อน-แข็ง หรือตามความเหลว-แน่น ของแต่ละชั้นดินเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจำแนกประเภทดินให้ออกแบบได้อย่างเหมาะสมตามกลุ่มชั้นดินที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีผลกระทบจากปัจจัยสภาพชั้นดินเช่นนี้ จึงควรมีการตรวจสอบปรับแก้ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่ได้พบจากสถานที่จริงอย่างใกล้ชิดโดยวิศวกรผู้ชำนาญการอีกครั้ง

ข.) ผลกระทบจากคุณภาพการเก็บตัวอย่างชั้นดินและคุณภาพการวิเคราะห์ทดสอบ

- ผู้ออกแบบไม่ได้ปรับแก้ค่าทดสอบที่ได้โดยตรงจากสนาม หรือไม่เข้าใจถึงสภาพชั้นดินที่มีปัญหา เมื่อนำผลการแปลค่าการสำรวจหรือการทดสอบที่ตลาดเคลื่อนมาใช้ โดยเฉพาะเมื่อมีผลกระทบของคุณภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการก่อสร้างพบว่า ข้อมูลหรือสภาพชั้นดินที่คลาดเคลื่อนหรือผิดแผกไปจากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจก่อนอย่างมีนัยสำคัญหากไม่ได้มีการประสานงาน หรือรายงานให้วิศวกรผู้ออกแบบได้แก้ไขแบบหรือแก้ไขรายการคำนวณ หรือแก้ไขการเจาะสำรวจตรวจสอบใหม่ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพชั้นดินที่ค้นพบว่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลใหม่ที่เป็นจริงตรงกับแนวคิดในการออกแบบ ตลอดจนการกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างตามลำดับของงานแต่ละชนิด ซึ่งผู้ออกแบบได้เคยวางแผน ระบุ และรับรู้เข้าใจในหลักการไว้ก่อนแล้ว

ค.) ผลกระทบจากข้อมูลที่ได้จากการเฝ้าตรวจวัดระหว่างการก่อสร้าง

- เพื่อให้โครงสร้างมั่นคงไม่เกิดการเสียหายในภายหลัง วิศวกรผู้ออกแบบมักจะตั้งสมมุติฐานหรือกำหนดแบบจำลองโครงการให้อยู่ในกรณีวิกฤต หรือสมมุติให้มีปัจจัยเสี่ยงสูงซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ถ้าข้อมูลที่ได้รับระหว่างการออกแบบไม่ชัดเจนหรือไม่น่าเชื่อถือ สมมุติฐานที่เกินจริงย่อมทำให้ได้โครงสร้างขนาดใหญ่และไม่ประหยัด แต่ถ้าเจ้าของโครงการนั้นยอมให้มีการปรับปรุงหรือแก้ไขแบบได้บางส่วนเมื่อได้รับข้อมูลเพิ่มเติมจากการคอยเฝ้าติดตามสังเกตในระหว่างการก่อสร้าง ก็จะทำให้วิศวกรผู้ออกแบบเชื่อมั่นและสามารถคำนวณ โครงสร้างบนพื้นฐานของความเป็นจริง ทำให้สามารถประหยัดค่าก่อสร้างของโครงการลงได้อีกมาก

การออกแบบโดยวิธีดังกล่าวข้างต้น เรียกว่า วิธีเฝ้าติดตามระหว่างการก่อสร้าง (Observation Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานใต้ดินที่มีตัวแปรมากหรือมีความเสี่ยงสูง จำเป็นต้องมีการวัดค่าและเฝ้าติดตามพฤติกรรมของชั้นดินอย่างใกล้ชิด ด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลที่รวดเร็วและสะดวกในทางปฏิบัติ เช่น การวัดแรงดันน้ำใต้ดิน การบันทึกระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลง การวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อนำมาปรับแก้แบบ เช่น งานอุโมงค์ รถไฟฟ้าใต้ดิน หรืองานขุดเปิดดินในระดับลึก

ในการออกแบบวิศวกรรมปฐพีด้วยวิธีการเฝ้าติดตามระหว่างการก่อสร้าง เริ่มต้นด้วยการเจาะสำรวจดินเพื่อตรวจสอบชั้นดินอ่อน หรือชั้นดินที่มีการทรุดตัวสูง ซึ่งคาดว่าจะเกิดปัญหาในการก่อสร้าง จากนั้นจึงจัดให้มีมาตรการตรวจวัด เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลและนำข้อมูลจากบริเวณที่คาดว่าจะทำให้เกิดปัญหานั้น หรือข้อมูลจากบริเวณข้างเคียง มาคำนวณปรับแก้ระหว่างการก่อสร้างได้ทันที

การเจาะสำรวจดินโดยทั่วไปมักจะทำวิธีดังต่อไปนี้ หลุมเจาะ (Test Pit) ส่วนเจาะ (Auger) เจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) การทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนของดินในสนาม การเก็บตัวอย่างดิน การเจาะสำรวจและการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนของดินอาจดำเนินการร่วมกันหรือแยกจากกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับความมั่นใจของขบวนการสำรวจและทดสอบ ถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากรู้จักเลือกใช้วิธีการที่ถูกต้อง จะทำให้ประหยัดงบประมาณของการลงทุนและไม่สิ้นเปลืองเวลาโดยใช้เหตุ

ก. การทำหลุมขุด (Test Pit) มักจะใช้สำหรับหาแหล่งวัสดุโดยเฉพาะสำรวจดินระดับดิน การขุดอาจใช้แรงคนหรือเครื่องจักรขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโครงการแต่ละประเภทและไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากนัก สามารถเก็บข้อมูลของชั้นดินได้ง่าย ความลึกของหลุมขุดขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินและระดับน้ำใต้ดินเป็นเกณฑ์ กล่าวคือสามารถขุดลึกลงไปต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่มากนัก หลุมขุดมักจะถล่มถ้าปราศจากการค้ำยัน การเก็บตัวอย่างจากหลุมสามารถปฏิบัติการได้ด้วยการบรรจุลงภาชนะที่ได้การคงสภาพปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติ ตัวอย่างดินที่เก็บตัวอย่างดินที่เก็บบรรจุลงถือว่าเป็นดินเปลี่ยนสภาพ นำไปทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีคุณสมบัติทางด้านกายภาพต่างๆ เท่านั้น นอกจากนี้วิธีการเก็บตัวอย่างดังกล่าวอาจปฏิบัติการเก็บตัวอย่างดินด้วยกล้องเก็บตัวอย่างภายใต้การอนุรักษ์ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของตัวอย่างดินด้วยการคลุมด้วยผ้าสาหร่าย และฉาบปิดทับด้วยซีเมนต์ นอกจากนั้นจะต้องป้องกันการกระเทือนตัวอย่างดินในกล้องด้วยการนำซีเมนต์ใส่ในช่องว่างด้านข้างให้เต็มพร้อมกับปิดฝาให้เรียบร้อยเพื่อนำส่งห้องทดลองต่อไป

ข. ส่วนเจาะ (Auger) เป็นเครื่องมือเจาะหลุมเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกตามที่ต้องการ โดยเฉพาะการเก็บตัวอย่างดินเหนือระดับน้ำใต้ดินที่ต้องการคงสภาพปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของมวลดินเอาไว้ ส่วนเจาะมีทั้งแบบเป็นหัว (Post Hole หรือ Bucket) และแบบเป็นเกลียว (Continuous Flight Auger) สามารถปฏิบัติการโดยใช้มือหมุน และเครื่องมือหนึ่งส่วนเจาะแบบเกลียวตลอดความยาว การเจาะดินต้องใช้เครื่องมือใช้สำหรับเจาะดินที่มีสภาพแข็งจนถึงสภาพชั้น สำหรับดินสภาพอ่อนหรือดินทรายได้ระดับน้ำ การใช้ส่วนเจาะแบบเกลียวตลอดความยาวจะไม่สัมฤทธิ์ผลต่อการนำพาตัวอย่างดินขึ้นมาปากหลุม ตัวอย่างดินที่ได้จากการใช้ส่วนเจาะสำรวจนั้นเป็นตัวอย่างชนิดเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Soil) ใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพของมวลดิน การเจาะสำรวจด้วยการใช้ส่วนสามารถปฏิบัติการต่อชั้นดินระดับดินที่มีระยะความลึกไม่เกิน 6.00 ม. เพราะการเจาะลึกมากกว่านี้จะเป็นการเสี่ยงต่อปัญหาหลุมเจาะถล่มเว้นเสียแต่ได้ใส่ท่อเหล็กกันดิน (Casing) การเก็บตัวอย่างด้วยการใช้ส่วนเจาะในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการเจาะด้วยส่วนมือ ซึ่งหมุนส่วนลงในดินตามทิศทางตามเข็มนาฬิกา จนกระทั่งดินเต็มส่วนจากนั้นก็จัดการดึงส่วนขึ้น ทำการแคะดินเพื่อตรวจสอบ จัดการหมุนส่วนให้ลึกลงไปอีก ตัวอย่างดินที่ได้แคะออกควรจัดเรียงเป็นแถวตามลำดับของระดับความลึกเพื่อสะดวกต่อการพิจารณาลักษณะดินแต่ละชั้นด้วยตาเปล่าในเบื้องต้น ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกตามต้องการ ก็จัดการนำตัวอย่างดินในแต่ละระดับความลึกบรรจุใส่ถุงพลาสติกพร้อมที่จะนำส่งเข้าห้องทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. การเจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) เป็นวิธีการที่เพิ่มประสิทธิภาพการเจาะหลุมให้ลึกมากขึ้นและสามารถปฏิบัติการกับชั้นดินทุกชนิดด้วยหลักการที่สำคัญ กล่าวคือ การเจาะแบบฉีดล้างต้องมีหัวกระทุ้งหรือหัวหมุนที่มีขนาดพอเหมาะ และภายในมีรูฉีดน้ำที่ได้ส่งน้ำมาตามก้านเจาะการกระทุ้ง (Chopping) หรือหมุนหัวหมุน (Rotary) ในชั้นดินจะกระทำไปพร้อมกับการฉีดน้ำตลอดเวลา ทำให้เศษดินที่อยู่ก้นหลุมจะถูกน้ำดันขึ้นมาเบื้องบน การเก็บตัวอย่างดินด้วยการเจาะฉีดล้างแบบหัวหมุนนั้น จะเป็นตัวอย่างดินที่คงสภาพมากกว่าตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะฉีดล้างแบบกระทุ้ง อย่างไรก็ตามการเก็บตัวอย่างดินด้วยการเจาะฉีดล้างแบบหัวหมุนนั้น มักจะใช้กับงานวิจัยเป็นส่วนใหญ่ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง การปฏิบัติงานเจาะแบบฉีดล้างจะต้องป้องกันการถล่มของหลุมเจาะซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ท่อเหล็กกันดิน (Casing) ดอกให้ปลายท่อเหล็กกันดินอยู่เหนือระดับที่จะเก็บตัวอย่างดินอย่างน้อย 50 ซม. หรืออาจใช้น้ำโคลน (Mud Slurry) ที่มีความข้นพอเหมาะไปช่วยลดความซึมผ่านของผนังดินในหลุม และดันผนังหลุมไม่ให้เกิดการถล่ม น้ำโคลนสามารถเตรียมจากการผสมดิน โคลนตามธรรมชาติหรือกึ่งใช้ผงดินเบนโทไนท์เป็นผงดินเมื่อผสมกับน้ำจะบวมตัว

ง. การเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling) การเก็บตัวอย่างดินเป็นสิ่งสำคัญของงานเจาะสำรวจโดยเฉพาะตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะแบบฉีดล้าง การเจาะจะต้องไม่กระทบกระเทือนชั้นดินที่จะเก็บตัวอย่าง อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพสามารถแบ่งออกได้เป็นกระบอกเก็บตัวอย่างแบบบาง (Thin Wall Tube) ทำจากโลหะ อลูมิเนียม ทองเหลือง เหล็กที่มีผิวเรียบทั้งภายในและภายนอกมีขนาดตาม ASTM D-1587 และหัวเก็บตัวอย่าง (Sampler Head) เป็นส่วนที่ต่อยึดเข้ากับกระบอกบาง และก้านเจาะเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเก็บตัวอย่างให้ติด และไม่ถูกรบกวน อนึ่งหัวเก็บตัวอย่างแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ แบบเปิด (Open Drive Sampler) และแบบลูกสูบ (Piston Sampler) ใช้เก็บตัวอย่างดินจำพวกดินอ่อน ดินตะกอน และดินเหนียวปนดินตะกอนปนทรายในสภาพที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินและอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.1.3 การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

มาตรฐานพินิเตอร์ชั้น เป็นวิธีการหาค่ากำลังของดินจำพวกดินทราย หรือดินแข็งในสนาม โดยอาศัยหลักการที่ว่าระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในมวลดิน เนื่องจากการกระทำของแรงจะแปรผกผันกับความแข็งหรือแน่นของมวลดิน กล่าวคือ ดินแข็งจะมีความต้านทานสูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในมวลดินต่ำ ส่วนดินอ่อนจะมีความต้านทานต่ำ ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในมวลดินสูง ซึ่ง ASTM D 1586-67 ได้กำหนดเครื่องมือที่ใช้ตอกลงไปในพื้นที่ดิน เรียกว่า สปลิท สปูน (Split-Spoon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 2 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $1\frac{3}{8}$ นิ้ว ตอกด้วยลูกตุ้มหนัก 140 ปอนด์ ระยะยก 30 นิ้ว แรงต้านทานของดินคิดจากจำนวนครั้งที่ตอกที่ทำให้ สปลิท สปูน จมลงไปในพื้นที่ดินลึก 1 ฟุต เราเรียกจำนวนครั้งที่ตอกว่า โบลว์ เคาน์ท์ (Blow Count)

ความต้านทานของมวลดินจากการทดสอบมาตรฐานพินิเตอร์ชั้น จะมีความสัมพันธ์ต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินจำพวกทราย กำลังของดินเหนียว ดังตารางที่ 6.1 และสัมพันธ์ต่อมุมเสียดทานภายในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐาน พินิเตอร์ชั้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์และกำลังของดิน

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย		
ความต้านทานพินิเตอร์ชั้น, N (ครั้ง/ฟุต)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์	สภาพของดิน
0 - 4	0 - 0.2	หลวมมาก
4 - 10	0.2 - 0.4	หลวม
10 - 30	0.4 - 0.6	ปานกลาง
30 - 50	0.6 - 0.8	แน่น
มากกว่า 50	0.8 - 1.0	แน่นมาก

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

กำลังของดินเหนียว		
ความต้านทานพี้นิเตรชั้น, N (กรัม/ฟุต)	หน่วยแรงวัดแกนเดียว (ตัน/ฟุต ²)	ความชื้นเหลว
น้อยกว่า 2	น้อยกว่า 0.25	อ่อนมาก
2 - 4	0.25 - 0.50	อ่อน
4 - 8	0.50 - 1.00	ปานกลาง
8 - 15	1.00 - 2.00	เหนียว
15 - 30	2.00 - 4.00	เหนียวมาก
มากกว่า 30	มากกว่า 4.00	แข็ง

ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของมวลดินจำพวกไม่มีแรงเหนียวนำกับค่าของ
มุมเสียดทานภายใน

ความต้านทานพี้นิเตรชั้น มาตรฐาน, N (กรัม/ฟุต)	มุมเสียดทานภายใน (ϕ), องศา	
	เพค (Peck, 1974)	เมเยอร์ฮอฟ (Meyerhof, 1956)
0 - 4	น้อยกว่า 29	น้อยกว่า 30
4 - 10	29 - 30	30 - 35
10 - 30	30 - 36	35 - 40
30 - 50	36 - 41	40 - 45
มากกว่า 50	มากกว่า 41	มากกว่า 45

วัตถุประสงค์ (ASTM D-1586, ASTM D-3350)

- การทดสอบจะได้ค่า SPT-N (ครั้ง/30 ซม.) และตัวอย่างแปลงสภาพอยู่ภายในกระบอกผ่า
- นำค่าไปใช้จำแนกความแน่น-แข็งของดิน
- นำค่า N ไปออกแบบฐานราก
- ทำการทดสอบในชั้นดินแข็ง-ดินเหนียวที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพได้

มาตรฐาน

ลูกตุ้ม -หนัก 140 ปอนด์ (63.5 กก.)

- ยกตอกสูง 30 นิ้ว (76 ซม.)

กระบอกผ่า (Split Barrel – Spoon) - Ø ID $1\frac{3}{8}$ " ($1\frac{1}{2}$ ")
- Ø OD 2"
- ยาวไม่ต่ำกว่า 20 นิ้ว

ค่าที่ทดสอบได้

- คำนับครั้งตอก (Blow Count), N มีหน่วยเป็น Blow/ft (ครั้ง/30 ซม.) ซึ่งเป็นค่าจำนวนนับครั้งลูกตุ้มตอกกระบอกผ่ามาตรฐานจมลงในชั้นดิน 3 ช่วง 0-15 ซม. , 15-30 ซม. และ 30-45 ซม. โดยจะตัดทั้งค่าแรกและรวมค่า 2 ช่วงสุดท้าย (30 ซม.) เป็นค่า N (ครั้ง/30 ซม.) ระยะความห่างในการทดสอบโดยปกติทุกระยะความลึก 1.5 ม. (หรือ 1.0 ม. ที่ผิวดิน)

การนำค่าไปใช้

- จำแนกความแน่น-แข็งของดิน
- แปลงค่าเป็นค่าคงตัวอื่นๆสำหรับการออกแบบฐานราก
- ค่ามุม ϕ
- ค่าแรงเฉือน S_u – ดินเหนียว (Clay), $S_u = \frac{N}{15}$ ตัน/ม²

ข้อจำกัดในการทดสอบ

- ไม่สามารถทำการทดสอบในชั้นดินเหนียวอ่อน ค่า $N < 1$ ครั้ง/30 ซม.
- ไม่สามารถทดสอบในชั้นกรวดที่มีขนาดเม็ดใหญ่ได้ เม็ดกรวดอาจจะขวางปากกระบอก
ควรจะตรวจสอบด้วยการย้ายหลุม

ข้อระมัดระวังในการทดสอบ

- ระดับน้ำในหลุมเจาะ ต้องมีระดับใกล้เคียงกับระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติเพื่อให้น้ำหนักกดทับที่ก้นหลุมใกล้เคียงในสภาพเดิม
- ขนาดก้านเจาะที่ใช้ต้องมีขนาดไม่เล็กเกินไป (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1.625" มิฉะนั้น อาจจะโค้งงอในหลุมเจาะระหว่างดรอ)
- การปล่อยลูกตุ้มด้วยกว้างเชือกต้องปล่อยตกโดยอิสระ เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียจึงจะได้ค่า N ที่ถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.4 ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content)

ความชื้น (Water Content) , w คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของเม็ดดิน $\times 100 \%$ การหาค่าความชื้น, w ทำได้โดยนำตัวอย่างดินปริมาณพอเหมาะตามขนาดเม็ดดินที่ทดสอบใส่ภาชนะเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105° เซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชม. ซึ่งดินจะแห้งผลต่างของน้ำหนักดินก่อนและหลังอบคือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไป (W_w) น้ำหนักดินแห้งที่ชั่งได้เท่ากับ W_s ,

$$\text{ความชื้น, } w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \%$$

เมื่อ :- W_w = น้ำหนักของน้ำ

W_s = น้ำหนักของเม็ดดิน

หน่วยความชื้น , w - ทำรายงานแสดงค่าเป็น %

- ในสูตรการคำนวณใช้ทศนิยม

การทดสอบค่าความชื้นโดยปกติจะทดสอบ 2 สถานะ คือ ค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) ทดสอบจากตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ที่เก็บมาจากสนามจากหลุมเจาะ (Borehole) เคลือบขี้ผึ้ง (Wax) หรือบรรจุใส่ถุงพลาสติกไว้กันความชื้นระเหย และการทดสอบค่าความชื้นในระหว่างการทดสอบต่างๆ เช่นการทดสอบการบดอัด (Compaction) ทดสอบซีบีอาร์ (CBR) เป็นต้น การทดสอบความชื้นตามธรรมชาติเป็นการทดสอบชั้นพื้นฐานที่กระทำได้ง่าย แต่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติของชั้นดินได้ดี จึงนิยมทำการทดสอบเป็นมาตรฐานในงานเจาะสำรวจดิน ในการทดสอบต่างๆ เนื่องจากค่าความชื้นของดินจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อคุณสมบัติและค่าคงตัวของดิน

6.1.5 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid)

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Soil Solid) ซึ่งมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า ตะแกรงเบอร์ 4 ลงมา (ถ้ามีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 4 จะทำการทดสอบอีกวิธีหนึ่ง เช่น ตามวิธี ASTM C – 127) ค่าความถ่วงจำเพาะของดินมีความสำคัญในการคำนวณ ค่าคงตัว (Parameter) ต่างๆ จากความสัมพันธ์องค์ประกอบของดิน ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าเฉพาะของเม็ดดินเท่านั้น ไม่รวมส่วนของน้ำ อากาศ

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w(4^\circ C)}$$

ส่วนความหนาแน่นรวม (ρ_t) และค่าน้ำหนักรวมต่อปริมาตร (γ_t) นั้นเป็นค่าที่รวมทั้งองค์ประกอบ น้ำ และอากาศอยู่ด้วย ซึ่งจะมีหน่วยเป็น มวล หรือน้ำหนักต่อปริมาตร ถ้าดินมีขนาดเม็ดใหญ่กว่า (ทราย) จะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า (เช่น ทราย มีค่า G_s ประมาณ 2.65) ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ดินเหนียว) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 2.71 หรือถ้าดินนั้นมีโลหะผสมอยู่เช่น มีเหล็กผสม ดินก็จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า ค่าเฉลี่ยตามปกติ เช่น $G_s = 2.90-3.00$ เป็นต้น ในการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

$$G_s = \frac{\text{น้ำหนักเม็ดดิน}}{\text{น้ำหนักของน้ำ}} \quad \text{ที่มีปริมาตรเท่ากันที่ } 4^\circ C$$

การหาค่าน้ำหนักของเม็ดดิน ใช้การอบแห้งตัวอย่างดินหลังการทดลอง ส่วนน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับเม็ดดิน ใช้วิธีการแทนที่น้ำตามกฎของอิมมิดิส

ภาษาที่ใช้ในการทดลองหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน มี 2 วิธี คือ

1.) ปิกโนมิเตอร์ (Pycnometer) เป็นภาชนะแก้ว มีฝาปิดเฉพาะซึ่งจะทำให้มีปริมาตรคงที่

ข้อดี ทดลองง่าย

ข้อเสีย เป็นภาชนะพิเศษ และมีขนาดเล็กสามารถบรรจุตัวอย่างดินได้น้อยทำให้ผลการทดสอบไม่ละเอียด

2.) ขวดแก้วฟลากลันเบน (Volumetric Flask) ขนาด 500 ซม³

ข้อดี เป็นภาษาที่ใช้ทั่วไป หาทดแทนได้ง่าย

ข้อเสีย การทดลองยุ่งยากกว่าสามารถควบคุมปริมาตรไม่ได้คงที่

ในการทดลอง ต้องวัดปริมาตรของน้ำที่ถูกต้องซึ่งจะต้องปราศจากฟองอากาศจึงต้องทำการไล่อากาศ (De-Aired) และควบคุมอุณหภูมิของน้ำ (น้ำ ขวดแก้ว จะขยายตัวเมื่อร้อนขึ้น) จึงต้องสอบเทียบ (Calibrate) ขวดแก้วที่อุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.6 การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์

การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์จะใช้ระบบ Unified Soil Classification (UC) การจำแนกชนิดของดินโดยระบบ UC นี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเนื้อดิน (Textural Characteristics) สำหรับเม็ดดินหยาบที่มีฝุ่น (ดินเม็ดละเอียด) ปนอยู่น้อย และไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ แต่สำหรับดินเม็ดละเอียดที่ขนาดเม็ดดินมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินจะประเมินคุณสมบัติด้วยการเขียนจุด (Plot) ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) ในแผนภูมิพลาสติกซิตี ในการจำแนกชนิดของดินแบบ UC คุณสมบัติของดินต่อไปนี้จะเป็นพื้นฐานในการจำแนกชนิดของดิน

- 1) เปอร์เซ็นต์ของเม็ดกรวด ทราย และดินเม็ดละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200)
- 2) ลักษณะของกราฟผลการทดสอบตะแกรงร่อน (การกระจายและความละเอียดของเม็ดดิน)
- 3) คุณสมบัติพลาสติกซิตี (Plasticity)

การจำแนกชนิดของดินแบบ UC เป็นวิธีการจำแนกชนิดของดินที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดสำหรับงานทั่วไป

ตารางที่ 6.3 การจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification System

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests			Soil Classification	
			Group Symbol	Group Name
Coarse-Grained Soils (More than 50% retained on No.200 sieve)	Gravels (More than 50% of coarse fraction retained on No.4 sieve)	Clean gravels (Less than 5% fines)	GW	Well-Graded Gravel
		Gravels with fines (More than 12% fines)	GP	Poorly-Graded Gravel
			GM	Silty Gravel
			GC	Clayey Gravel
	Sands (50% or more of coarse fraction passes No.4 sieve)	Clean sands (Less than 5% fines)	SW	Well-Graded Sand
		Sands with fines (More than 12% fines)	SP	Poorly-Graded Sand
			SM	Silty Sand
			SC	Clayey Sand
Fine-Grained Soils (50% or more passes the No.200 sieve)	Silts and Clays (Liquid limit less than 50)	Inorganic	CL	Lean Clay
		Organic	ML	Silt
			OL	Organic Clay
	Silts and Clays (Liquid limit 50 or more)	Inorganic	CH	Fat Clay
			MH	Elastic Silt
		Organic	OH	Organic Clay
Highly Organic Soils	Primarily Organic Matter: dark in color;organic odor		PI	Peat

Note: Cobbles are defined as 3 to 12 inches. Boulder are defined as greater than 12 inches.

6.1.7.ขนาดและความกระจายของขนาดเม็ดดิน

6.1.7.1 การจำแนกประเภทของดิน

ดินเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยสิ่งต่างๆหลายอย่าง เช่น กรวด ทราย ตะกอนทราย ดินเหนียว สารอินทรีย์ เป็นต้น และคุณสมบัติของดินจะขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ดังกล่าวเหล่านี้ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจำแนกประเภทของดิน เพื่อบ่งถึงคุณสมบัติที่แตกต่างกันของดินแต่ละประเภท โดยจัดให้ดินที่มีลักษณะคล้ายกัน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน อยู่ในพวกเดียวกัน

ดินสามารถถูกจำแนกประเภทออกได้หลายลักษณะ เช่น จำแนกประเภทตามลักษณะสภาพทางธรณีวิทยา ตามปริมาณแร่ธาตุที่ประกอบอยู่ ตามขนาดของเม็ดดิน ตามคุณสมบัติความเหนียว (Plasticity) ของดิน ซึ่งการจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดินและคุณสมบัติความเหนียวของดินนี้ จะถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุดในทางวิศวกรรม

6.1.7.2 การจำแนกประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน

ดินจะถูกแบ่งออกเป็นดินพวกเม็ดหยาบ เช่น หิน กรวด ทราย และพวกดินเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทราย ดินเหนียว วัสดุแขวนลอย เป็นต้น สำหรับดินพวกเม็ดหยาบ จะหาขนาดได้ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดต่างๆกัน ส่วนดินพวกเม็ดละเอียด หาขนาดด้วยวิธีวัดอัตราการตกตะกอนในน้ำ

กล่าวคือประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน สามารถแยกได้เป็น

- 1) ดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soil) – มีขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอน (ตะแกรง #200) ขึ้นไปมากกว่า 50 % ซึ่งมีทราย (Sand) และกรวด (Gravel)
- 2) ดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) – มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ลงมาต่ำกว่า 50 % ซึ่งมีดินตะกอน (Silt) และดินเหนียว (Clay)

การจำแนกประเภทของดิน โดยอาศัยขนาดของเม็ดดินอย่างเดียวนี้ มีประโยชน์ต่องานทางด้านวิศวกรรมน้อยมาก เพราะคุณสมบัติของดินนั้น นอกจากจะขึ้นกับปริมาณและขนาดของเม็ดดินแล้ว ยังขึ้นกับคุณสมบัติความเหนียวของดินอีกด้วย

คุณสมบัติของดินทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกัน โดยสรุป ดินเม็ดหยาบ - มีผลกระทบจากความกระจายของขนาดเม็ดดินอย่างมาก ในการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นต่างกัน ความกระจายตัวของขนาดเม็ดดินเม็ดหยาบใช้การควบคุมด้วยการทดสอบตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ส่วนดินเม็ดละเอียดนั้นจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้า และคุณสมบัติความเหนียว (Plasticity) ใช้การควบคุมด้วยการทดสอบพิกัดอัตราแอดตะเบิร์ก (Atterberg Limits) เป็นหลัก

6.1.7.3 การหาขนาดของเม็ดดิน

การหาขนาดของเม็ดดิน ทำได้ 2 วิธี คือ

1. โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis หรือ Mechanical analysis)

ดินเม็ดหยาบจะการใช้การทดสอบตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) โดยสรุปใช้ตะแกรงทดสอบ (Test Sieve) ที่มีขนาดรูลอด (Opening) ถูกต้องได้มาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตะแกรง 200 มม. (มีขนาด 100 มม. และขนาด 300 มม. ด้วย แต่สำหรับใช้เฉพาะงานพิเศษ) ตะแกรงจะมีขนาดรูลอดต่าง ๆ กัน ลักษณะของรูลอดตามมาตรฐานจะเป็น รูกกลม (Round) รูสี่เหลี่ยม (Square) และแบบตะแกรงเส้นลวดสานกัน (Woven Wire) ซึ่งจะเป็นแบบที่นิยมใช้ที่สุด ตะแกรงจะกำหนดช่องรูลอด (ช่องว่างภายใน) จากขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว (6.35 มม.) ขึ้นไปจนถึงขนาดขนาดใหญ่สุด 4 นิ้ว (100 มม.) ส่วนขนาดเล็กจาก 6.35 มม. ลงไปจะเรียกเป็นเบอร์ ซึ่งเบอร์ที่ใช้มีอยู่หลายมาตรฐาน (ASTM, BS, Tyler) โดยประมาณจำนวนเบอร์ตะแกรงจะเท่ากับจำนวนช่องรูลอดต่อระยะตะแกรง 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงเบอร์ 100 หมายถึงใน 1 นิ้ว จะมีช่องตะแกรง 100 ช่อง หรือ 10000 รูลอดในตารางนิ้วของตะแกรง

การทดสอบจะนำตัวอย่างดินที่เป็นตัวแทน (Representative) ของตัวอย่างในกองวัสดุ ด้วยการแยกด้วยเครื่องแยกตัวอย่าง (Sample Splitter) หรือการแบ่ง 4 (Quartering) ขนาดน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดินใหญ่สุดของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง ตัวอย่างดินต้องแห้งพอสมควรที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักดินในขณะทดสอบ (ไม่จำเป็นต้องอบแห้ง) นำตะแกรงมาซ้อนกันตามลำดับ ขนาดเล็กกว่าอยู่ข้างล่าง จำนวนและขนาดของตะแกรงที่จะใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เช่น ถ้าต้องการทดสอบเพื่อจำแนกชนิดของดินก็ควรมีตะแกรงขนาดที่แยกขนาด ดิน ทราย กรวด เช่น เบอร์ 200 , เบอร์ 40 , เบอร์ 4 , เบอร์ 10 , ขนาด 19.1 มม. เป็นต้น และแทรกเบอร์ที่อยู่ระหว่างตะแกรงเหล่านั้นตามความเหมาะสม และถ้าจะทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อกำหนดรายละเอียด (Specification) ของวัสดุที่ใช้ตะแกรงตามขนาดที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดรายละเอียด จะได้เปรียบเทียบผลได้โดยตรง ชั้นล่างสุดเป็นถาดรับ (Pan) ข้างบนสุดเป็นฝาปิด (Cover) วางชั้นตะแกรงทั้งหมดบนเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) เทวัสดุทดสอบใส่ด้านบน ปิดฝาและเดินเครื่องเขย่าตะแกรงจนกระทั่งวัสดุได้ลอดผ่านตะแกรงแต่ละชั้นโดยอิสระจนหมด ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที นำตะแกรงที่มีวัสดุค้างอยู่แต่ละอันมาชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักตะแกรงแต่ละอัน จะได้น้ำหนักวัสดุที่ค้างตะแกรงแต่ละขนาด ก็จะสามารถคำนวณหาส่วนที่ค้างหรือผ่านตะแกรงขนาดต่างๆเป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำหนักทั้งหมดได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักของดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100$$

เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม = ผลบวกของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่ใหญ่กว่า
 เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (% Passing หรือ % Finer หรือ % Smaller)
 = 100 - เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม

2. โดยวิธีตกตะกอน (Hydrometer analysis)

วิธีนี้เหมาะสำหรับดินพวกเม็ดละเอียด ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. ลงไป เช่น ตะกอนทราย ดินเหนียว เป็นต้น ทำได้โดยนำดินที่ต้องการหาขนาดมาละลายน้ำแล้วใส่ลงในหลอดแก้ว ให้เม็ดดิน (ตะกอน) กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในน้ำ แล้วใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดอัตราการตกตะกอน หรือ คือวัดความถ่วงจำเพาะของดินที่ละลายแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ความลึก h ในช่วงเวลาต่างๆ โดยอาศัยกฎของสโตก (Stoke's Law) ที่ว่า ความเร็วของการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเม็ดดิน ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืดของของเหลวและขนาดของเม็ดดิน กล่าวคือ ดินเม็ดใหญ่จะตกตะกอนก่อน (จม) เร็วกว่าดินเม็ดเล็ก ดังนั้นเมื่อทราบความเร็วของการตกตะกอน ก็สามารถคำนวณหาขนาดของตะกอน (เม็ดดิน) ได้

6.1.7.4 การปรับแก้

เนื่องจากในการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีตกตะกอนนี้มีตัวแปรอยู่หลายตัว เช่น อุณหภูมิของน้ำ สารเคมีที่ใช้ผสมเพื่อให้เม็ดดินกระจายตัว การอ่านค่าจากไฮโดรมิเตอร์ซึ่งจะต้องอ่านที่ระดับท้องน้ำ แต่เนื่องจากส่วนผสมมีลักษณะขุ่นไม่สามารถอ่านได้ จึงต้องอ่านที่ส่วนบนของฟิวน้ำแทน และเมื่อจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงไป ระดับน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เหล่านี้เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้สิ่งต่างๆดังกล่าวนี้และต้องทำการปรับค่าการวัด (Calibration) ของไฮโดรมิเตอร์แต่ละอันก่อนใช้ด้วย

6.1.7.5 การหาการกระจายตัวของเม็ดดิน

เมื่อนำผลการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดิน ทั้งดินพวกเม็ดหยาบที่ได้จากวิธีร่อนด้วยตะแกรง และดินพวกเม็ดละเอียดที่ได้จากวิธีตกตะกอน มาเขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดินกับจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเล็กกว่าโดยน้ำหนัก ในกระดาษ Semi-log ก็จะได้กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ดินที่มีขนาดคละกันดี (Well graded soil)

คือดินที่มีขนาดต่างๆคละกันอย่างเหมาะสม ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก เส้นกราฟจะแผ่กว้างอย่างราบเรียบสม่ำเสมอ จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

2. ดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

ก. ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform graded) คือเม็ดดินจะมีขนาดเดียวกัน เป็นส่วนใหญ่ เส้นกราฟจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตั้ง

ข. ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap graded) คือดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ขาดขนาดปานกลางไป เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นราบในช่วงที่ขนาดเม็ดดินขาดหายไป



6.1.8 การวัดระดับน้ำใต้ดินหรือการวัดความดันน้ำ (Hanna , 1985)

ระดับน้ำใต้ดินมีความสำคัญในงานวิเคราะห์ปัญหาด้านธรณีเทคนิค และในงานก่อสร้างต่างๆ ในการที่จะได้ข้อมูลระดับน้ำ (ความดัน) ที่ถูกต้องเพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาด้านธรณีเทคนิค จะต้องทำการศึกษาและวัดระดับน้ำใต้ดิน ด้วยเครื่องมือและวิธีการที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยช่างเทคนิค วิศวกรที่มีประสบการณ์ ซึ่งในวิชาด้านธรณีเทคนิคจะแยกสาขาออกไปต่างหากเรียก ‘ Field Instrumentation ’

6.1.8.1 ความไวในการวัดน้ำ

ในการวัดระดับน้ำใต้ดิน หรือวัดความดันน้ำในสนาม และการวัดความดันน้ำในห้องทดลอง (ในตัวอย่าง เช่น การทดสอบแรงอัด 3 แกน หรือ การทดสอบการอัดตัวบางชนิด) มีหลักการวัดที่คล้ายคลึงกันคือ

- ความถูกต้องของการวัด
- ความไวของการวัด

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ

- ค่าองค์ประกอบปริมาตร (Volume Factor) ของเครื่องวัด และโดยเฉพาะการวัดในสนาม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ชนิดของเครื่องวัด สภาพการวัด เช่น มีฟองอากาศในระบบการวัดที่เปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อถูกความดันฟองอากาศจะยุบตัวทำให้มีค่าองค์ประกอบปริมาตร (Volume Factor) ของระบบการวัดเพิ่มขึ้น
- ค่าซึมผ่านของดิน (Soil Permeability)
- พื้นที่รับน้ำของเครื่องวัด (Shape Factor หรือ Intake Factor)

ในการวัดความดันน้ำด้วยวิธีใดๆ จะต้องใช้เวลาวัดระยะหนึ่งก่อนที่จะเครื่องวัดนั้นจะอ่านค่าความดันจริง (หรือใกล้เคียงจริง) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอ่านนี้เรียก เวลาอ่านที่ล่าช้า (Time Lag)

ค่าองค์ประกอบปริมาตร (Volume Factor) , V_f คือ ค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องวัดที่จะชี้ค่าอ่านความดัน ต่อค่าเปลี่ยนแปลงความดัน 1 หน่วย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากลักษณะของเครื่องวัดชนิดต่างๆ ที่สามารถคำนวณได้โดยตรง หรือทำการทดลองสอบเทียบ (Calibration)

ค่าองค์ประกอบรูปร่าง (Shape Factor) , F พื้นที่รับน้ำของเครื่องวัดใดๆ ในสภาพขอบเขตการไหลเข้าของน้ำ (Boundary Conditions) สามารถหาได้โดยวิธีแก้สมการลาปลาซ (Laplace Equation) ของการไหล หรือด้วยวิธีการเขียนตาข่ายการไหล (Flow Net) ซึ่งมีผู้ได้ทำสูตรสำเร็จสำหรับสภาพลักษณะการไหลต่างๆ ไว้แล้ว เช่น Hvorslev (1951) ได้ให้อัตราการไหลแบบต่างๆ ดังสมการ

$$q = F \cdot k \cdot H$$

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน, ซม./วินาที

H คือค่าความดันน้ำในรูปของหัวน้ำ (Head Water), ม.(น้ำ)

F คือองค์ประกอบรูปร่าง (Shape Factor)

ค่าระยะเวลาที่ล้าหลัง (Time Lag), T จะเป็นปฏิภาคโดยตรงต่อค่า V_f และเป็นปฏิภาคส่วนกลับต่อค่า F : สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านค่าหนึ่ง

$$T = f\left(\frac{V_f}{F}\right)$$

หรือ

$$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{V_f}{F} = \frac{V_f}{k \cdot F}$$

เมื่อ

$$V_f = \frac{V}{H} : T = \frac{V}{F \cdot k \cdot H}$$

และ

$$q = F \cdot k \cdot H : T = \frac{V}{q}$$

ค่าองค์ประกอบปริมาตร, V_f จะขึ้นอยู่กับค่าเปลี่ยนแปลงของเครื่องวัดความดัน (ระดับ) น้ำ ไม่ขึ้นกับลักษณะของหัววัดน้ำ ส่วนเวลาวัดที่ล้าหลังจะขึ้นกับลักษณะของหัววัดน้ำด้วย

6.1.8.2 พิกโซมิเตอร์ (Piezometer)

จากการใช้บ่อวัดน้ำมีข้อเสียคือ

- ขนาดบ่อใหญ่ วัดน้ำได้ช้า (Slow Response)
- ค่าระดับน้ำที่วัดเฉลี่ยทั้งความลึกของบ่อ (ไม่เฉพาะจุด)

ในการประยุกต์ใช้งานวัดความดันน้ำที่มีความสำคัญ มักจะทำการวัดน้ำเฉพาะความลึกและต้องเป็นแบบตอบสนองได้เร็ว (Quick Response) เพื่อให้ได้ผลวัดที่ถูกต้อง จึงนิยมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้พิซโซมิเตอร์ (Piezometer) ซึ่งเป็นวัสดุพรุน (Porous) ฝังที่ความลึกที่จะวัดความดันน้ำเป็นจุดรับน้ำ (Intake) และต่อท่อตั้งขึ้นไปข้างบนที่ผิวดินเข้ากับเครื่องวัดน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นท่อตั้งวัดระดับน้ำ (Standpipe) ในตัวท่อเอง หรือต่อท่อเข้ามาวัดความดัน (Pressure Gauge) , หลอดปรอท (Mercury Manometer) หรือ เครื่องแปลงสัญญาณวัดความดันไฟฟ้า (Pressure Transducer) หรือวิธีการวัดแบบอื่นๆ ที่ติดตั้งกลไกการวัดที่จุดรับน้ำ (Piezometer Tip) เช่น เครื่องวัดแบบใช้ลม (Pneumatic) เป็นต้น

จากวิธีการติดตั้ง และวิธีการวัดต่างๆ สามารถแบ่งกลุ่มของพิซโซมิเตอร์ (Piezometer) ได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ชนิดของพิซโซมิเตอร์ (Piezometer)

หัว (Tip)	การวัดความดันน้ำ (Pressure Measurement)	ชนิดเรียก
หัวหินพรุน (Porous Tip)แบบ Casagrande	ในท่อตั้ง (Standpipe) แบบปิด (Closed Hydraulic) มาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) แบบหลอดปรอท (Mercury Manometer)	แบบท่อตั้ง (Standpipe) แบบปิด (Closed Hydraulic)
หัวหินพรุน (Porous Tip)แบบเฉพาะมีลิ้น	แบบอัดลม (Pneumatic)	แบบลม (Pneumatic)
หัวหินพรุน (Porous Tip)มีจุดรับสัญญาณ (Sensor), ไฟฟ้าอยู่ในตัว	ไฟฟ้า (Electrical) - Vibrating Wire - Strain Gauge	แบบไฟฟ้า (Electrical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.9 คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินทางด้านงานอุโมงค์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินแบ่งได้เป็น

- 1) Soil mass strength
- 2) Soil mass modulus
- 3) Soil mass permeability

ในเมื่อดินหยาบ เช่น ทราย ความแข็งแรง (Strength) ของมันมักจะถูกประมาณ โดยการทดสอบดักทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ซึ่งจะถูกทำให้เป็นมาตรฐานโดยประมาณเป็น Relative density โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 140 ปอนด์เป็นน้ำหนักทดสอบ และค่า Relative density จะถูกประเมินอย่างหยาบๆได้จากค่า “N” หรือ blows/ft ดังตารางที่ 6.5

สำหรับดินเหนียวละเอียดความแข็งแรง (Strength) ของดินจะอธิบายได้ในเทอมของ Consistency หรือ Undrained shear strength ดังตาราง 6.5

ตารางที่ 6.5 Terminology Used to Describe Soils Relative Density for Granular Soils

Relative Density	Standard Penetration Resistance (N-value) blows/ft	
very loose	0 to 4	Easily penetrated with ½-in. rebar pushed by hand
loose	4 to 10	Easily penetrated several inches with ½-in. rebar pushed by hand
medium dense	10 to 30	Easily to moderately penetrated with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer
dense	30 to 50	Penetrated 1 ft with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer
very dense	over 50	Penetrated only a few inches with ½-in. rebar driven by 5-lb hammer

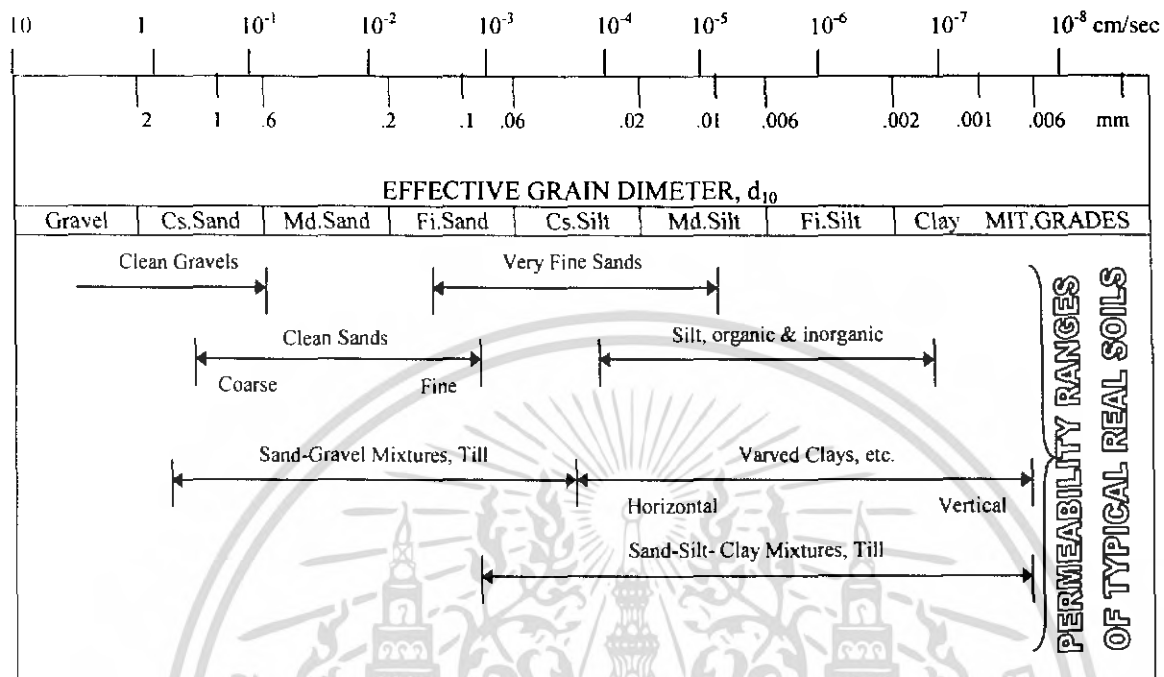
Consistency for Fine-Gravel (Cohesive) Soils

Consistency	Standard Penetration Resistance (N-values) blows/ft	Approximate Range of Unconfined Compressive Strength, tons/sq.ft.	Field Identification
very soft	less than 2	less than 0.25	Squeezes between finger when fist is closed; easily penetrated several inches by fist
soft	2 to 4	0.25 to 0.5	Easily molded by fingers; easily penetrated several inches by thumb
medium stiff	4 to 8	0.5 to 1.0	Molded by strong pressure of fingers; can be penetrated several inches by thumb with moderate effort
stiff	8 to 15	1.0 to 2.0	Dented by strong pressure of fingers; readily indented by thumb, can be penetrated only with great effort
very stiff	15 to 30	2.0 to 4.0	Readily indented by thumb nail
hard	over 30	over 4.0	Indented with difficulty by thumb nail

สำหรับค่าโมดูลัส (Soil Modulus) ได้ถูกวัดเป็นค่าความแข็งของดิน หรือการต้านทานต่อการเสียรูปจากแรงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความซึมน้ำ (Permeability) บางทีอาจจะประมาณจากขนาดของเม็ดดิน หรือวัดในสนาม ดังรูป



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าความซึมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การเคลื่อนตัวของดิน จากการขุดเจาะอุโมงค์

6.2.1 ปัญหาการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) จากการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินไม่ว่าจะใช้วิธีการก่อสร้างแบบใดก็ตาม ล้วนแล้วแต่ต้องพยายามควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งบนผิวดินและต่อโครงสร้างใกล้เคียงให้น้อยที่สุดซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ จะต้องควบคุมปริมาณการสูญเสียมวลดินหรือ Ground Loss ให้ต่ำที่สุด

$$\text{Ground Loss (\%)} = \frac{(\text{ปริมาณมวลดินที่ไหลเข้าอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร})}{\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร}} \times 100$$

$$\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อเมตร (ในกรณีอุโมงค์กลม)} = \frac{\pi D_o^2}{4} \times 1 \text{ เมตร}$$

โดย D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์

หากปริมาณการสูญเสียมวลดินมากขึ้นจะส่งผลให้การทรุดตัวของมวลดินมากขึ้น และย่อมทำให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินมากขึ้นด้วย ก่อให้เกิดผลกระทบต่อผิวดินและโครงสร้างในแนวข้างเคียง

โดยปริมาณการสูญเสียมวลดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังนี้

1. ขนาดของอุโมงค์
2. วิธีการขุดเจาะ
3. ชนิดและสภาพของดิน

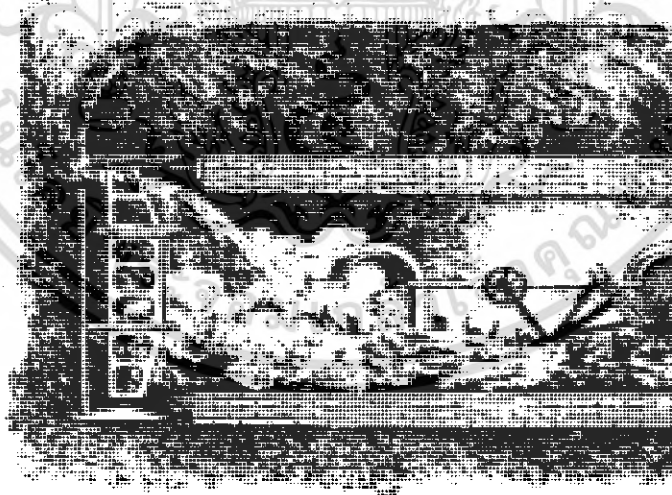
6.2.2 การตอบสนองของดินซึ่งถูกก่อให้เกิดขึ้นโดยหัวเจาะอุโมงค์ และ วิธีการทำนาย

การตอบสนองโดยพื้นฐานส่วนใหญ่ต่อการเจาะอุโมงค์หลายๆ ชนิดใน ดินอ่อน ซึ่งก็คือ ดินเคลื่อนตัวไปทางช่องเปิด เนื่องมาจากนี้เป็นจุดที่ความเครียดจะลดน้อยลง นอกจากนี้ ถ้าดินอยู่ใต้ระดับน้ำระดับน้ำจะมีการเคลื่อนตัวไปทางช่องเปิด ภายใตักฎง่ายๆ นี้ รายละเอียดของการตอบสนองของพื้นดินจะ

แปรไปตามเทคนิคที่ใช้ในการเจาะดิน วัตถุประสงค์ของบทนี้ ก็คือเพื่อแนะนำหลักการของการตอบสนองของดินที่เกิดขึ้นจากหัวเจาะซึ่งพัฒนาขึ้นมาเพื่อทำนายและอธิบายการเสียรูปของดิน

โดยทั่วไป การขุดเจาะดินอ่อนส่งผลต่อการเสียรูปของดินในสองทาง ก็คือ การเสียรูปที่มีสาเหตุโดยตรงมาจากการเจาะอุโมงค์ นี่นับได้ว่าเป็นการเสียรูปที่มีสำคัญและมักจะอธิบายได้โดย การสูญเสียดิน (ground loss) อีกข้อหนึ่งก็คือ การทรุดตัว ซึ่งจัดเป็นการทรุดตัวในระยะยาว ที่มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดรอบๆ อุโมงค์ การทรุดตัวมักจะเกิดในระยะยาวหลังจากที่มีการขุดเจาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขของดิน การศึกษาี้ เราจะพูดถึงแค่เพียงการสูญเสียดินซึ่งเกิดจากการขุดเจาะและเกิดขึ้นระหว่างการขุดเจาะ

การสูญเสียดินมีสองประเภท ประเภทแรกเกิดขึ้นในปีแรกของพัฒนาหัวเจาะ การสูญเสียดินอาจเกิดขึ้นโดยทันทีที่ไม่สามารถควบคุมได้และมีลักษณะรุนแรง นี่เนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ การไหลของดินลงสู่ผิวหน้าของอุโมงค์ เหมือนกับในกรณีของ Marc Brunel ที่ขุดเจาะอุโมงค์ใต้แม่น้ำไทม์ในปี 1828

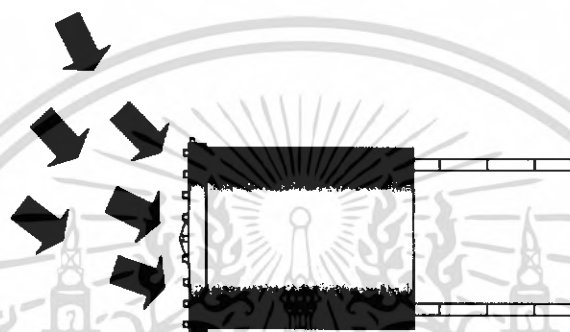


รูปที่ 6.2 การถล่มของอุโมงค์ที่ขุดผ่านแม่น้ำเทมส์ ในปี 1828

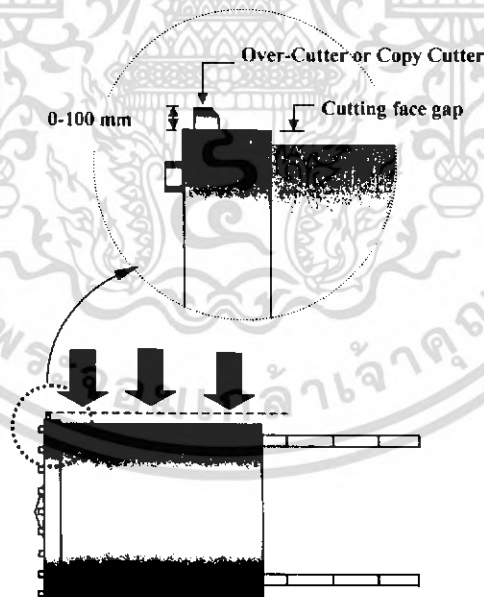
แต่มันสามารถเกิดเนื่องจากการไหลของดินลงสู่เส้นทางขุดเจาะหรือการชนของเส้นทางที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ เทคนิค close face shield tunneling ได้ถูกแนะนำ ซึ่งผิวหน้าของอุโมงค์ภายใต้การ

ควบคุม โดยแรงดันอากาศ แรงดันของโคลน หรือแรงดันของดินที่ถูกให้ที่ด้านหน้าของหัวเจาะ การเคลื่อนตัวของดินอย่างรุนแรงจะสามารถป้องกันได้ ดังนั้น เราจะ ไม่กล่าวถึงอีก

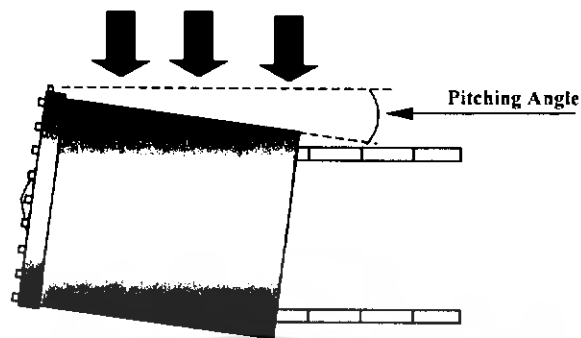
การสูญเสียดินในประเภทที่สองเกิดขึ้นมาจากกระบวนการการขุดเจาะดินดังรูป 6.3 – 6.7 (ความเป็นไปได้รูปแบบหลักๆสำหรับการสูญเสียดิน) การสูญเสียดินเหนือหัวเจาะเกิดขึ้นได้ในห้วงระยะที่แตกต่างกัน



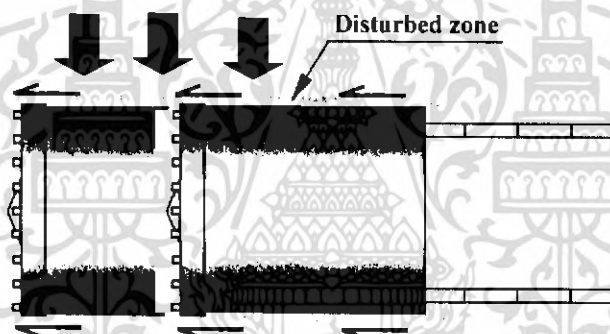
รูปที่ 6.3 มวลดินสูญเสียที่ตัวป้องกันหน้าดิน



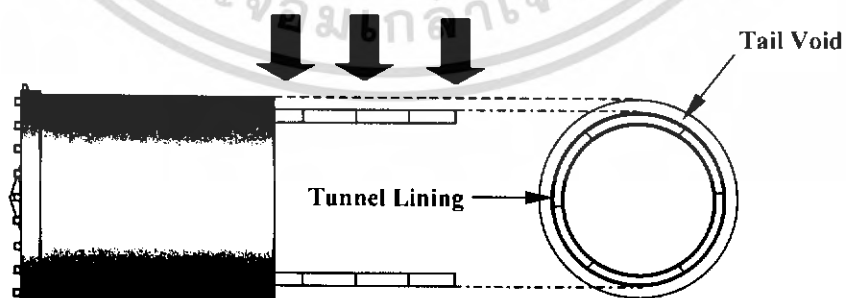
รูปที่ 6.4 มวลดินที่สูญเสียของ ส่วนบนหัวเจาะ



รูปที่ 6.5 มวลดินที่สูญเสียจากการเอียงของหัวเจาะขณะขุดอุโมงค์



รูปที่ 6.6 การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการรบกวนมวลดินขณะเลี้ยวหัวเจาะ



รูปที่ 6.7 การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากช่องว่างหลังหัวเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.การสูญเสียที่ผิวหน้าอุโมงค์เกิดขึ้นเมื่อใช้หัวเจาะแบบเปิด หรือเมื่อหัวเจาะมีความดันที่ต่ำ ทำให้ดินสามารถเคลื่อนตัวไปที่ผิวหน้าได้ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ในกรณีนี้ ปริมาตรเป็นลบ หรือปริมาตรส่วนมาก จะถูกเอาออก

2.การขุดเจาะที่มากเกินไปด้านนอกอุโมงค์โดยรอบบริเวณผิวหน้าของเครื่องจักรซึ่งถูกทำให้เกิด โดยการมีใบพัดที่ใหญ่เกินไป (ขนาดใหญ่จนถึง 100 มิลลิเมตรด้านนอกของของพื้นผิว) และพื้นที่อยู่ ด้านหน้าของเครื่องจักร

3.การไถหรือการออกนอกเส้นทางของเครื่องจักรซึ่งเกิดขึ้นจากการเหวี่ยงสามารถตัดให้เกิดวงรีขนาดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าหัวเจาะ ดังรูปที่ 6.5 ณ ที่มุมที่เกิดจากการเหวี่ยง ในทางทฤษฎี หัวเจาะที่มีขนาดยาวจะทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ได้มากกว่าหัวเจาะที่มีขนาดสั้น

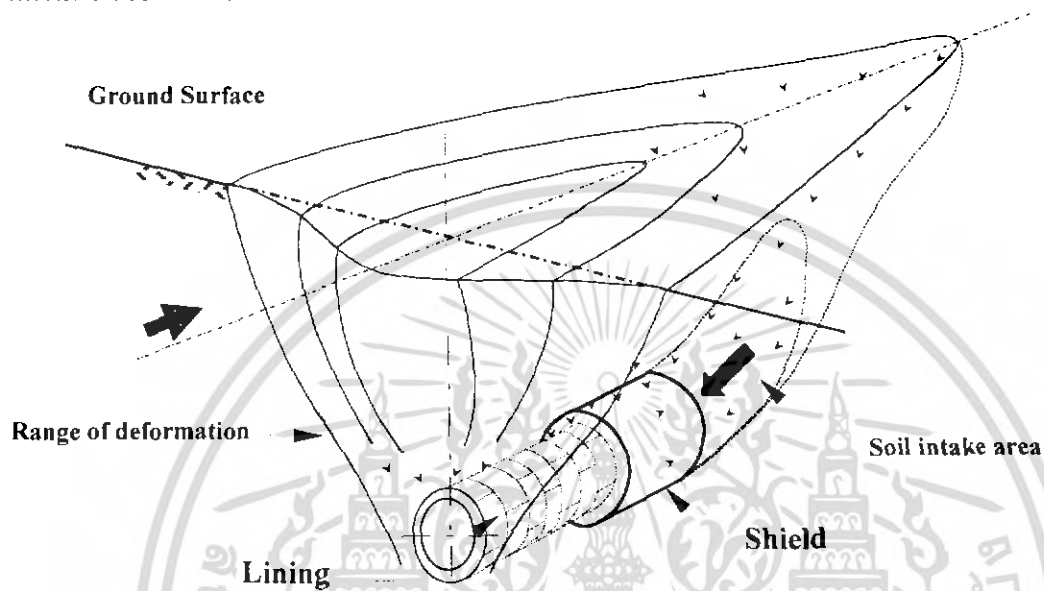
4.บริเวณที่ถูกรบกวนหรือเกิดการแข็งตัวใหม่รอบๆ ผิวหน้าของหัวเจาะ เนื่องมาจาก การเคลื่อนอย่างแรงของหัวเจาะที่มีเส้นศูนย์กลางขนาดใหญ่ สามารถเกิดการเคลื่อนตัวของดินเหนือหัวเจาะ (รูปที่ 6.6)

5.ช่องว่างที่ส่วนท้ายของหัวเจาะหลังจากที่หัวเจาะผ่านเข้าไป ทำให้เกิดการเสียรูปของดินที่มีองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากดินที่อยู่ด้านนอกเคลื่อนเข้ามาในช่องว่าง ช่องว่างที่เกิดขึ้นการความแตกต่างของดินที่อยู่รอบๆ การขุดเจาะกับ outer liner surface (รูปที่ 6.7) หนึ่งในวิธี การที่มักจะใช้คือพยายามที่จะกำจัดช่องว่างโดยการขยายตัวอุโมงค์หรือการก่อซีเมนต์รอบๆ อุโมงค์เหมือนกับที่เกิดจากด้านท้ายของหัวเจาะก่อนที่ดินเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ในช่องว่าง

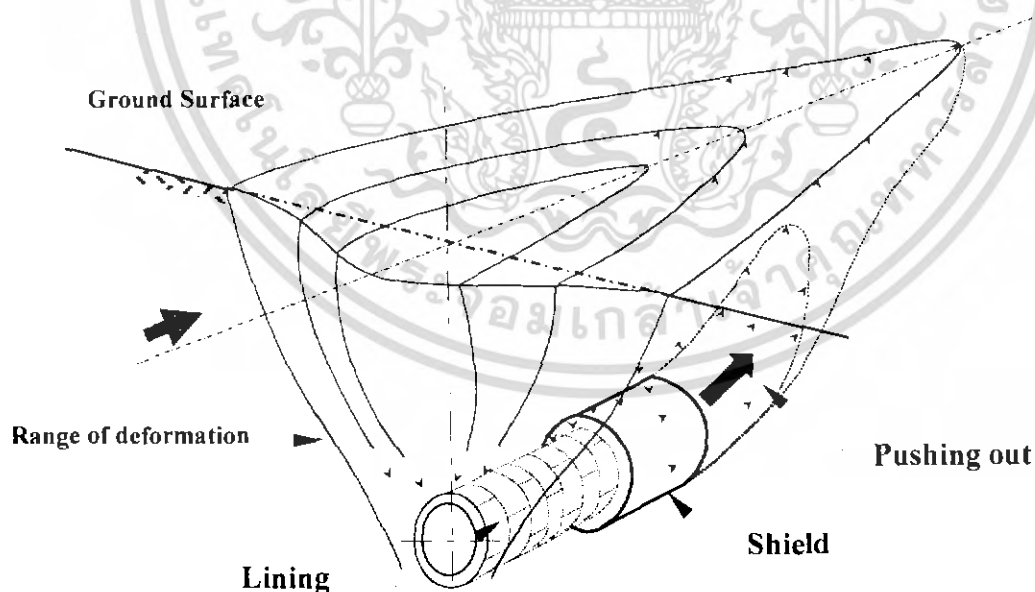
การเคลื่อนตัวของดินที่มีปริมาณมากซึ่งการจากระยะต่างๆ เหล่านี้ มีอิทธิพลมาจากสภาพของดิน วิธีการก่อสร้าง การควบคุมหัวเจาะ การควบคุมนี้รวมไปถึงการควบคุมที่ความดันที่ส่วนหัว การควบคุมที่หัวเจาะ อัตราการผ่านเข้าไปของหัวเจาะ และคุณภาพของกนงาน ดังนั้น ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวเข้าสู่ด้านหน้าของอุโมงค์ ส่งผลให้เกิดช่องว่างด้านท้ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การรบกวนดินอย่างรุนแรงโดยการควบคุมที่แย่ และการติดตั้งของ liner ที่ช้าเนื่องจากระบบการทำงานที่ไม่ดี ทั้งหมดนี้ล้วนแต่ส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวของดินเพิ่มมากขึ้น

การเคลื่อนตัวของดินอันเนื่องมาจากการสูญเสียดินโดยตัวมันเองที่ผิวหน้าในช่องที่ขยายไปทางด้านข้างและด้านเหนือของผิวที่เกิดขึ้นมาก่อน รูปที่ 6.8 แสดงให้เห็น รูปสามมิติของ surface settlement ของตัวอุโมงค์ซึ่งถูกทำให้เกิดโดยการสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ ปริมาตร

ของดินที่ขุดออกไปน้อยกว่าปริมาณของหัวเจาะที่เข้าไปอยู่ในดิน (อย่างเช่น หัวเจาะถูกกำหนดให้มี ปริมาตรสมมูลเป็นบวก) ดินจะถูกดึงออก (รูปที่ 6.9) ในกรณีนี้สามารถเป็นผลของการให้แรงดันมากเกินไป ที่ด้านหน้าของหัวเจาะ



รูปที่ 6.8 ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างของมวลดินเมื่อมีตัวป้องกันดิน



รูปที่ 6.9 ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างของมวลดินเมื่อมีตัวป้องกันดิน

6.2.3 วิธีการทำนายการเสียรูปของดิน

ระหว่างไม่กี่ปีที่ผ่านมา การศึกษาวิจัยส่วนมากเกี่ยวกับการเสียรูปของดินซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการขุดเจาะนี้ส่งผลให้เกิด ความเข้าใจที่ดีขึ้นในปัญหาที่เกิดขึ้น การประมาณการเสียรูปของดินโดยหลักๆ แล้วสามารถทำได้ด้วย 4 วิธีนี้

- 1) การคำนวณในทางสถิติและการใช้สูตร รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทำนายการแทนที่ของ stochastic medium ได้ถูกศึกษาเป็นครั้งแรกโดย Litwinisyn ในปี 1956 ต่อมา ปี 1969 Peck เสนอว่าการกระจายของการทรุดตัวของผิวดินควรที่จะอธิบายได้โดยสูตรที่ใช้ เส้นกราฟปกติของความน่าจะเป็น หรือ Gaussian curve ตัวแปรที่นำมาออกแบบถูกใช้ในรูปของ error function รวบรวมมาจากการวัดปริมาณในสนามในอุโมงค์ที่มีสภาพดินที่แตกต่างกัน วิธีการนี้ถูกสนับสนุน โดยการศึกษาของ O'Reilly and New ในปี 1982 นอกจากนี้ Attawell and Woodman ได้พัฒนาทฤษฎีทางสถิติสำหรับการทำนายการทรุดตัวของผิวน้ำในแนวตั้ง
- 2) วิธีการวิเคราะห์ ความเครียดของดินและการเคลื่อนตัวถูกคำนวณโดยวิธีการวิเคราะห์ ผู้ศึกษาหลายคนได้อธิบายวิธีการซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมการรูปแบบปิด ในปี 1987 Sagaseta ได้แสดงการวิเคราะห์สองมิติของการเสียรูปของดินสำหรับการได้รับความเค้นของดินได้มาจากดินที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันและมีส่วนผสมไม่แน่นอน (อย่างเช่นวิธีการขยายหน้าตัดของความเค้นของ Baligh (1985) โดยการนำดินที่ไม่เคยถูกรบกวน) ในปี (1996) Verruijt And Booker ได้ปรับปรุงวิธีการประมาณที่ถูกคิดโดย Sagaseta เพื่อที่จะให้วิธีการแก้ปัญหาสำหรับกรณีการสูญเสียดินไม่เฉพาะเพียงแต่สำหรับกรณีที่ไม่มีน้ำออกที่มี Poisson's ratio เท่ากับ 0.5 แต่ยังใช้สำหรับค่าประมาณของ Poisson's ratio เหมือนเดิม ในปี 1998 Loganathan And Poulos ได้ปรับปรุงวิธีการแก้ปัญหาของ Verruijt And Booker และละทิ้งองค์ประกอบที่เบี่ยงเบนซึ่งส่งผลในแนวอุโมงค์ที่มีการทรุดตัวของผิวน้ำที่แคบลง ต่อจากนั้น ในปี 1997 Pinto ขยายวิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์ เพื่ออธิบายการเสียรูปทั้งในผิวและด้านข้างของอุโมงค์
- 3) Finite Element And Numerical Method เนื่องจากความยากที่เกี่ยวข้องในการสร้างสมการที่เหมาะสมเชิงวิเคราะห์ Finite Element And Numerical Method ได้ถูกนำมาใช้สำหรับปัญหาทางกลศาสตร์ของดินและหิน อย่างไรก็ตามยังคงมีความยากที่เกี่ยวกับความถูกต้องขอตัวแปรเชิงวัสดุและข้อเท็จจริงที่ว่า การจำลองความเค้นในระนาบสองมิติในอุโมงค์

ในดินไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของดินด้านหน้าผิวอุโมงค์(Mair And Taylor 1997) นอกจากนี้ การบังคับที่พิจารณาจากการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element ก็คือมันมักจะค่อนข้างยากที่จะได้คุณสมบัติในตัวของวัสดุซึ่งต้องการสำหรับการให้ค่าจริงๆใน Finite Element Program อย่างไรก็ตามการทำนายการเคลื่อนตัวของดินที่มีพื้นฐานอยู่บน Finite Element หรือ Numerical Method มีประโยชน์สำหรับการชี้รูปแบบทั่วไปของการเสียรูปในภาคสนาม

- 4) การทดลองในห้องทดลองอุโมงค์จำลอง Cohesive And Cohesionless ได้ถูกทำขึ้นเพื่อศึกษากระบวนการเคลื่อนตัวของดินและการชนที่เกิดจากหัวเครื่องจักร (Atkinsor et al.,1975 Atkinsor And Potts 1977 Kimura And Mair 1981 Nomoto et al., 1999) จากผลการศึกษามันถูกแนะนำว่าตัวแปรในการเสียรูปของดินที่ถูกอธิบายในแบบจำลอง สามารถนำมาใช้สำหรับการประมาณรูปร่างของการทรุดตัวของอุโมงค์และการทรุดตัวอย่างมากของผิว มากไปกว่านั้นผลของการทดลองยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทางคณิตศาสตร์

6.2.3.1 Stochastic and Empirical Methods

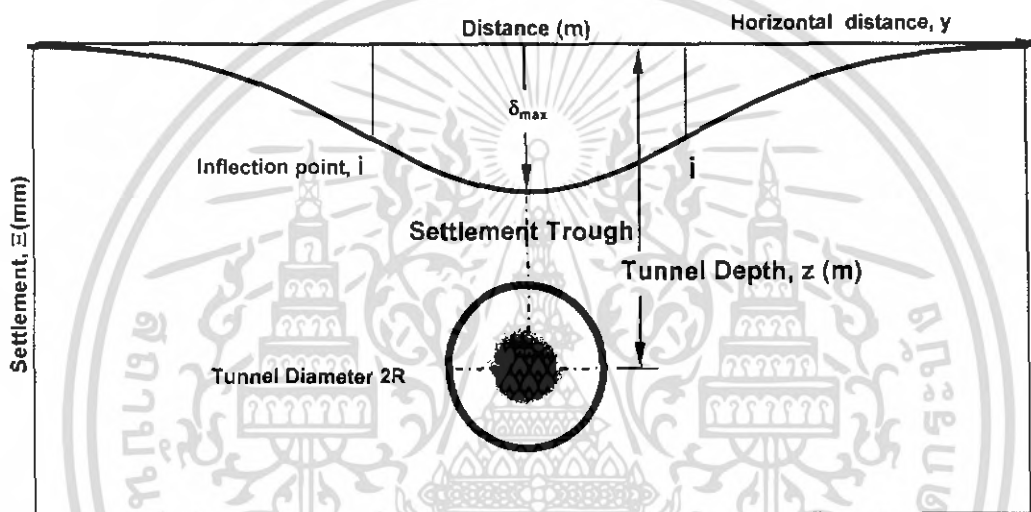
Peck (1969)

จากการศึกษาข้อมูลที่มีอยู่ที่ได้จากการขุดเจาะอุโมงค์ ในปี 1969 Peck ได้สังเกตการทรุดตัวของดินเหนืออุโมงค์เดี่ยวๆมักจะถูกแสดงภายในข้อจำกัดที่มีเหตุผลโดย error function หรือ กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Gaussian curve) โดยพื้นฐานแล้ว Peck ทำให้สมการ stochastic ของ Litwinniszyn (1956) สมการของ Peck ช่วยให้การประมาณการทรุดตัวสามารถทำได้ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะด้านข้างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ข้อมูลเหล่านี้ถูกต้องการสำหรับตัดสินใจการ underpinning ถัดไปใกล้ๆ กับการก่อสร้าง หรือการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ

คุณสมบัติ ที่ค่าประเ็นของ สมการความน่าจะเป็นปกติ และ ความสัมพันธ์ของสมการความน่าจะเป็นต่อมิติของอุโมงค์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 6.10 รัศมีของอุโมงค์ถูกแสดงด้วยR และความลึกตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับของอุโมงค์ถูกแสดงด้วยค่า z จุดสูงสุดของกราฟความน่าจะเป็น คือ ค่าสูงสุดของการทรุดตัว (maximum settlement) ดังนั้น ค่าการทรุดตัว ณ จุดต่างๆคือ

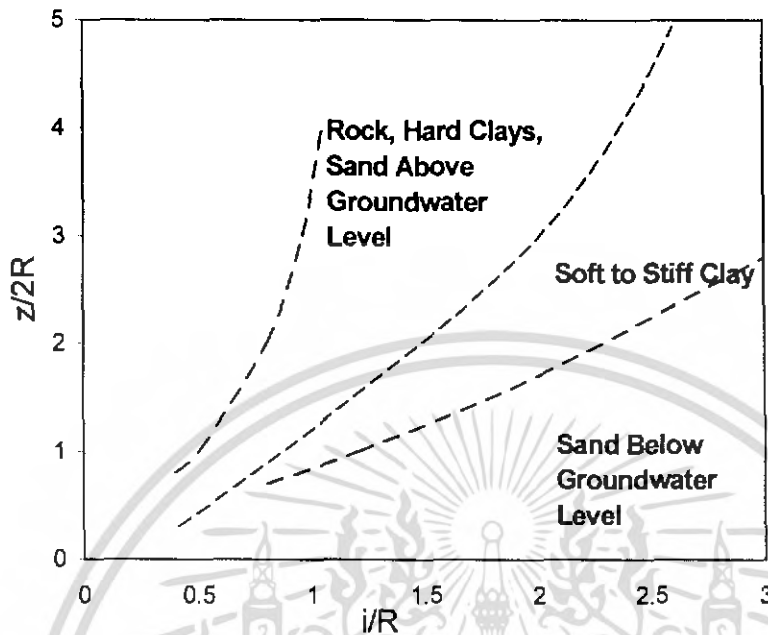
$$\delta = \delta_{\max} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right]$$

ค่า $\delta_{\max}$ ได้ถูกนำมาให้คำอธิบายด้านล่างนี้ ตำแหน่ง inflection ของเส้นกราฟถูกกำหนดที่ค่าระยะทาง i ในอีกด้านหนึ่งของแนวตรงกลางของอุโมงค์ ค่า i ก็คือคุณสมบัติของกราฟความน่าจะเป็นปกติหรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.61\delta_{\max}$



รูปที่ 6.10 ความน่าจะเป็นของเส้นโค้งที่ใช้อธิบายการทรุดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว พารามิเตอร์ และความลึกของอุโมงค์

ค่า i ได้ถูกคำนวณสำหรับอุโมงค์ ซึ่งมีข้อมูลการทรุดตัวที่น่าเชื่อถือ ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ซึ่ง plot ระหว่าง i/R กับ $z/2R$ กราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและผลที่เกี่ยวข้องกับชนิดของดิน ดังเช่นที่คาดไว้ ยิ่งมีค่าความลึกมากเท่าไร ค่าความกว้างของการทรุดตัวของอุโมงค์จะยิ่งมากขึ้น

ค่าปริมาตรของการทรุดตัวของอุโมงค์ (ยกตัวอย่างเช่น ปริมาตรต่อหน่วยความยาว) มีลักษณะเป็นกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังสมการ

$$V_s = 2.5i\delta_{\max}$$

จากการศึกษาในภาคสนามที่รายงานโดย Cording and Hansmire (1975) ปริมาตรของการทรุดตัวของอุโมงค์สามารถถูกนำมาเกี่ยวข้องเนื่องกับการสูญเสียดินในตัวอุโมงค์ เขาทั้งสองคนได้สังเกตพบว่าอุโมงค์ในดินส่วนมากพัฒนาปริมาตรการทรุดตัวโดยประมาณได้เท่ากับปริมาตรของดินที่เสียไปจากการสูญเสียดินในตัวอุโมงค์ โดยทั่วไป การสูญเสียดิน (G.L%) ถูกแสดงด้วยค่า ส่วนเปอร์เซ็นต์ของบริเวณที่มีการขุดอุโมงค์ (ยกตัวอย่างเช่น ในอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D)

$$V_s = \frac{G.L\%}{100} \left(\pi \frac{D^2}{4} \right)$$

ดังนั้น C_{max} สามารถหาได้ถ้ารู้ค่าการสูญเสียดิน

O'Relly and New (1982)

O'Relly and New เสนอว่าการเคลื่อนตัวของดินเหนืออุโมงค์ สามารถประมาณ จากการ ใช้ empirical methods เหมือนกับ Peck ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลที่มีมาก่อน รายงานโดย O'Relly and New (1982) มีรากฐานอยู่บนค่าการประเมินทางสถิติจากการสังเกตการณ์ในภาคสนามของการทรุดตัวของ ดินเหนือ tabular mine opening (Litwinniszyn, 1956) อย่างไรก็ตาม Peck ได้สนับสนุนมาก่อนแล้ว ว่า วิธีการนี้ยังพอเพียงในการจำลองรูปร่างของการทรุดตัวที่ถูกต้องทำให้เกิดโดยการขุดอุโมงค์ในดินอ่อน

O'Relly and New (1982) สมมติว่า การเคลื่อนตัวทั้งหมดในดิน เกิดขึ้นจากดินที่เกิด ขนานไปกับ Radial path ที่นำไปสู่แกนของอุโมงค์และการเคลื่อนตัวเกิดในสภาพที่ได้ให้ค่าความเค้นคง ตัวของปริมาตรของการเสียรูปของดิน

สมมติฐานนี้ได้รับการสนับสนุนโดยข้อมูลการวัดในภาคสนามและผลของการทำ centrifuge tests อุโมงค์จำลองที่สร้างจากดินอ่อน ดังรูปที่ 6.12 ข้อมูลที่มีอยู่พยายามที่จะให้คำแนะนำว่า การไหลถูกกำหนดทิศทางให้ตรงกับ 'sink' ซึ่งถูกกำหนดให้มีตำแหน่งที่จุดซึ่งจะอยู่ได้ ระดับแกนของ อุโมงค์ บางที่อาจอยู่ใกล้กับระดับในด้านกลับกันของอุโมงค์

พัฒนาการของ Radial flow assumption หมายความว่า ความกว้างของบริเวณที่มีการเสีย รูปของดินลดลงโดยเป็นเส้นตรงกับความลึกใต้ระดับของผิวดิน ผลของการเคลื่อนตัวของดินอย่างมาก เพิ่มขึ้นโดยเป็นเส้นตรงกับความลึกใต้ผิว เป็นไปตาม สมการปริมาตรความเค้นคงตัวในแนวระนาบ (the plane strain constant volume assumption)

$$i = Kz$$

i = inflection point (เช่น ค่าความกว้างของอุโมงค์) ที่ความสูง (z) เหนือแกนอุโมงค์

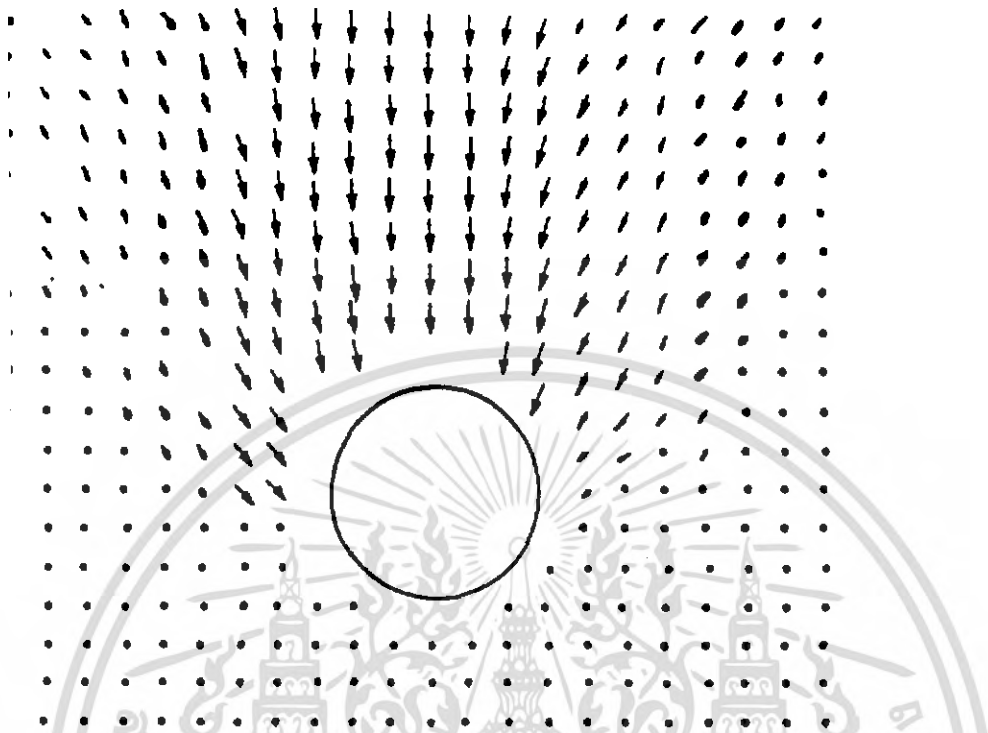
K = ค่าคงตัว ซึ่งจะเท่ากับ 0.5 สำหรับ cohesive soil

0.25 สำหรับ granular soil

การศึกษาต่อมาในภาคสนามชี้ให้เห็นว่า สำหรับ ดินเหนียว(clay) K จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 (stiff clay) ถึง 0.7 (ดินอ่อน,silty clay) สำหรับดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดเหนือน้ำ K จะประมาณ 0.2-0.3 ดังแสดงในตารางที่ 6.6

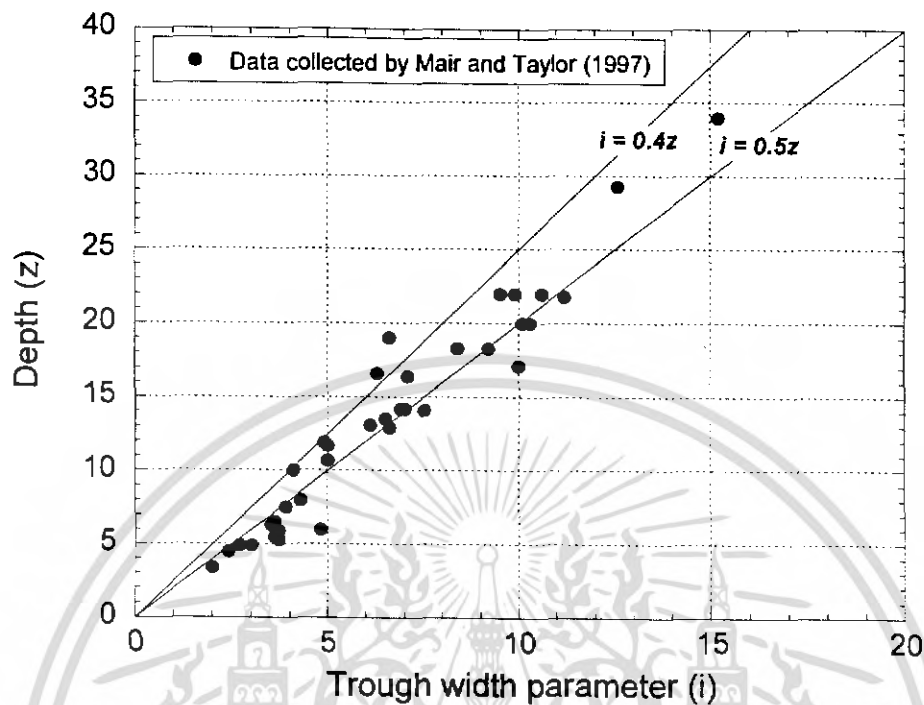
ตาราง 6.6 ค่าการทรุดตัวของดินช่วงต่างๆ

Ground Conditions	Tunneling Methods	Trough width parameter constant, K	Remarks
Stiff fissured clay	Shield or hand	0.4-0.5	Considerable data available; losses normally 1-2 %
Glacial deposits	Shield in free air Shield with compressed air	0.5-0.6	Compressed air to assist control of ground movements
Recent silty clay deposit ($C_u = 10-40$ kPa)	Shield with compressed air	0.6-0.7	
Granular material above the water table		0.2-0.3	



รูปที่ 6.12 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆแบบจำลองอุโมงค์ในดินเหนียว

การแสดงค่าของ $i = 0.4z$ และ $0.5z$ สอดคล้องกับฐานข้อมูลของอุโมงค์ที่รายงานโดย Mair and Taylor ในปี 1997 ค่า inflection point มีพื้นฐานอยู่บนรายงานและกราฟที่ plot ระหว่าง ความลึกของอุโมงค์ดังแสดงในรูป 6.13

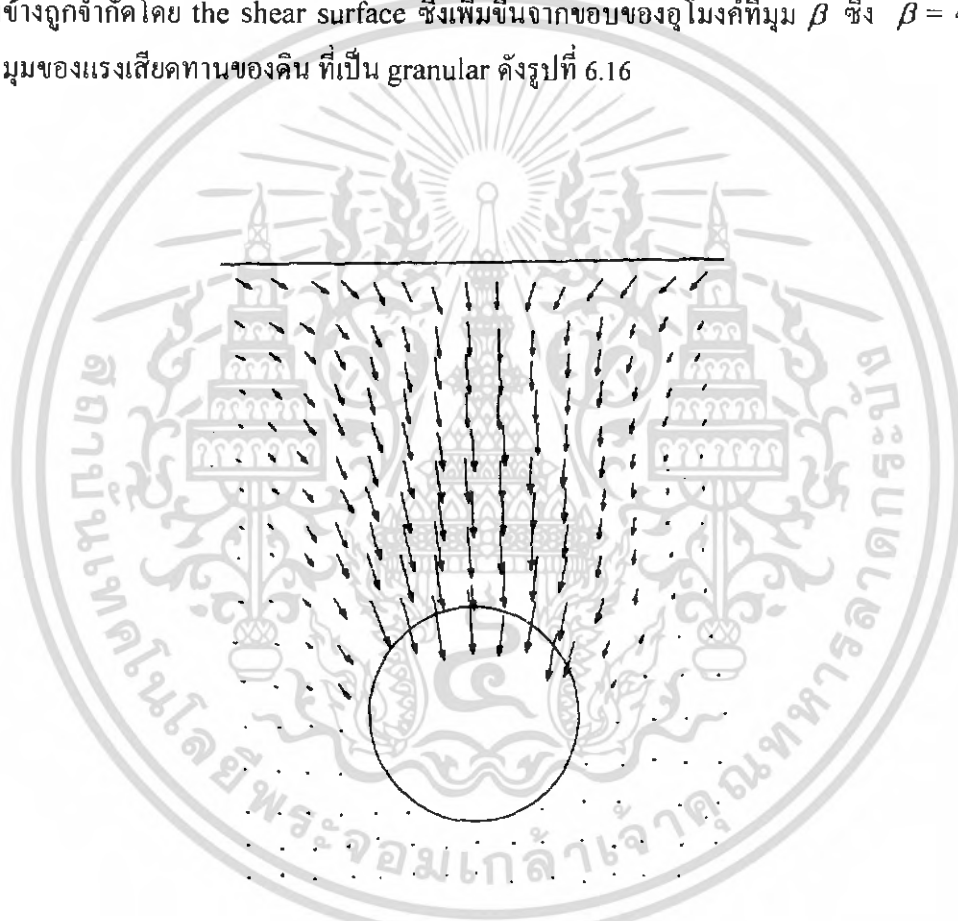


รูปที่ 6.13 การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของพารามิเตอร์ของอุโมงค์ในดินเหนียว

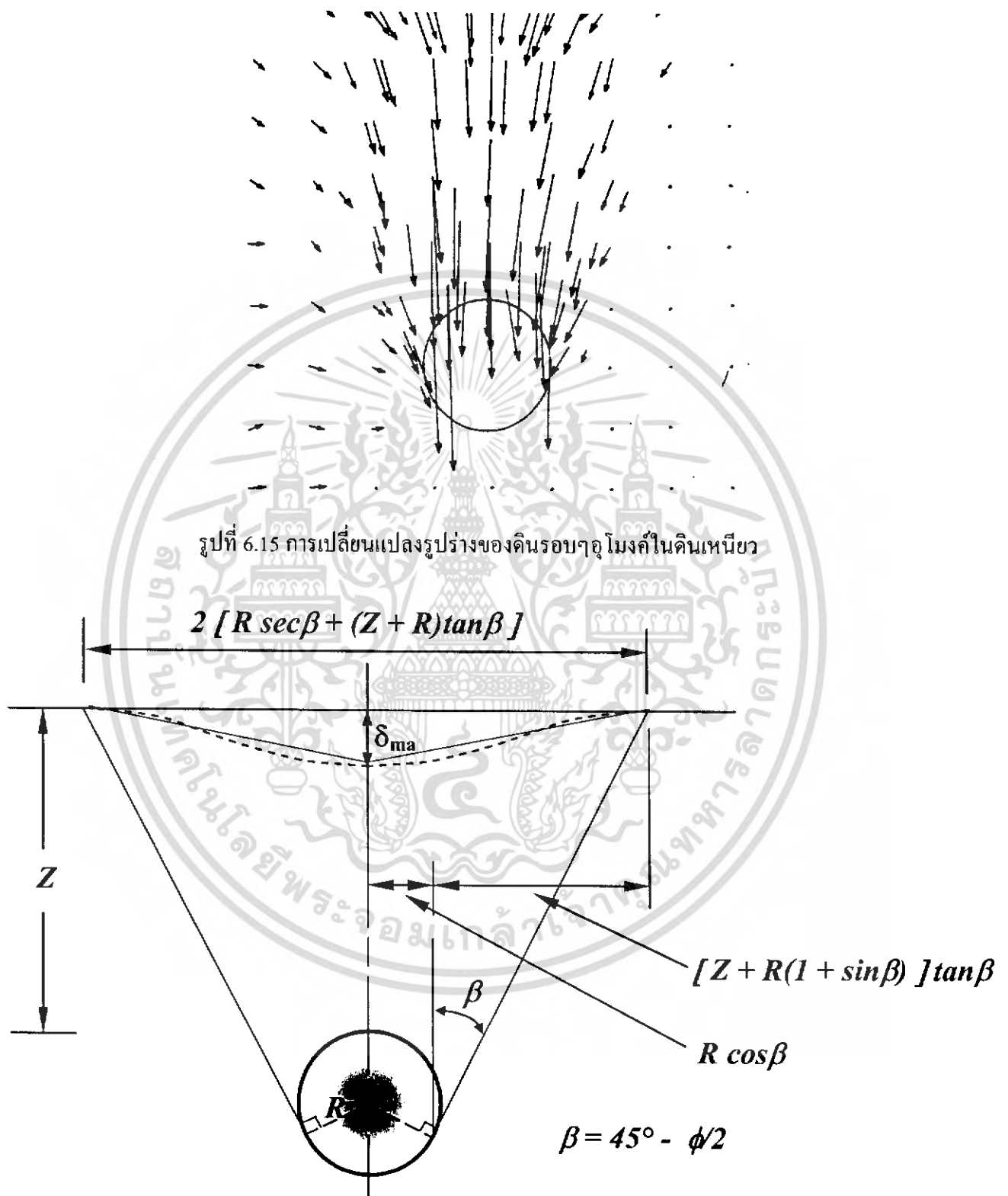
นอกจากนี้ ผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Fujita (1981) ผู้ซึ่งได้ศึกษาข้อมูลจากหลายๆ กรณีในญี่ปุ่น สำหรับอุโมงค์ที่ขุดโดยหลายๆ เทคนิค เช่น hand mined shield, blind shield, slurry shield และ EPB shield Fujita สนับสนุนข้อสรุปของ O'Reilly and New ที่ว่า ความกว้างรูปแบบของการทรุดตัวของอุโมงค์ในดินเหนียวไม่เกี่ยวข้องกับวิธีการก่อสร้าง

อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวสำหรับ cohesive soil ก่อนข้างที่จะใช้ไม่ได้กับ granular soil เนื่องจาก สมมติฐานที่ว่า particle displacement จากอุโมงค์ถูกกำหนดให้มีทิศทางไปตามแกนอุโมงค์ ที่ไม่ได้มีการศึกษาในห้องทดลองสนับสนุน ต่อมา สมมติฐานของการเสถียรภาพของดินที่ปริมาตรคงตัวไม่สามารถรักษาไว้ได้ดังเช่นการขยายตัวหรือหดตัวของ granular soil อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ระหว่างการเสถียรภาพของดิน Potts and Cording, 1976 ยังรายงานว่าการหดตัวของดินอย่างรวดเร็วที่มี inward displacement ขนาดใหญ่ของการทรุดตัวของอุโมงค์ ใกล้กับผิวหน้าของดินที่มี การไหลของทรายลงสู่ในช่องซึ่งเกิดจากการขุดดิน (รูปที่ 6.14 and 6.15) ในปี 1975 Atkinson et al อธิบายการทรุดตัวประเภทนี้ในลักษณะของการขยายของลิ่มเหนียวอุโมงค์ด้านบน ซึ่งพัฒนาจนเกิดการยุบลงของผิวหน้าที่ขยายในแนวตั้งไปสู่ด้านบนจากส่วนโค้งของอุโมงค์

O'Relly and New บอกว่า การเคลื่อนตัวของดินในดินที่ cohesionless นำไปสู่การทรุดตัวที่ลึกและแคบด้วยความเกินในแนวนอนที่ผิวเมื่อรวมกันกับความเกินในแนวดิ่งที่มากกว่า 0.5% ดังนั้น Gaussian curve ไม่สามารถใช้ประมาณค่าการทรุดตัวได้อย่างถูกต้องเสมอไปในดินชนิดนี้ สมมติฐานนี้ยังสอดคล้องกับการรายงานของ Cording and Hansmire and Attewell ที่ว่า ในหลายๆ กรณีโดยเฉพาะในดินที่เป็น granular การทรุดตัวของอุโมงค์ การทรุดตัวทางด้านข้างไม่สามารถอธิบายโดยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังนั้น พวกเขาจึงเสนอว่า การทรุดตัวในรูปแบบที่ต่างออกไปในลักษณะเป็นรูปปลี การทรุดตัวทางด้านข้างถูกจำกัดโดย the shear surface ซึ่งเพิ่มขึ้นจากขอบของอุโมงค์ที่มุม β ซึ่ง $\beta = 45 - \phi / 2$ และ ϕ เป็นมุมของแรงเสียดทานของดิน ที่เป็น granular ดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.14 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆอุโมงค์ในดินเหนียว



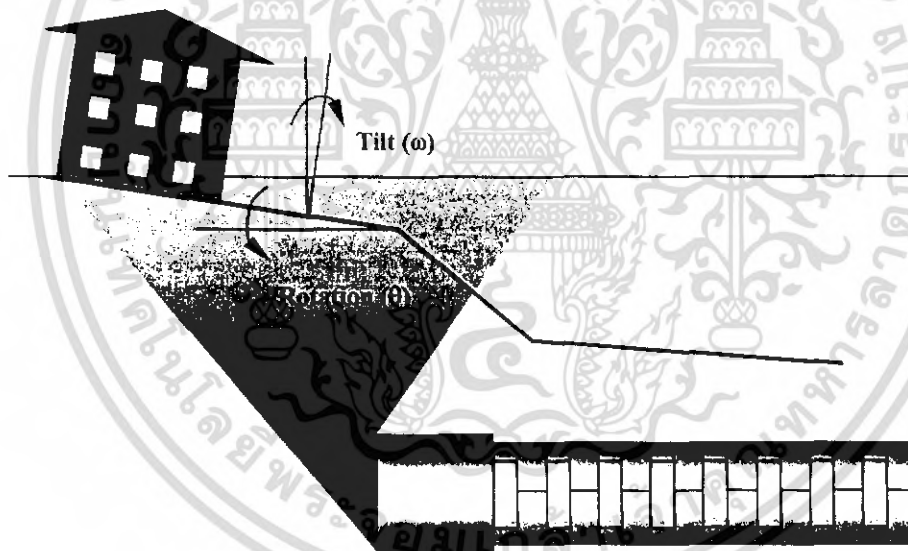
รูปที่ 6.16 รูปตัดแสดงการทรุดตัวของทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

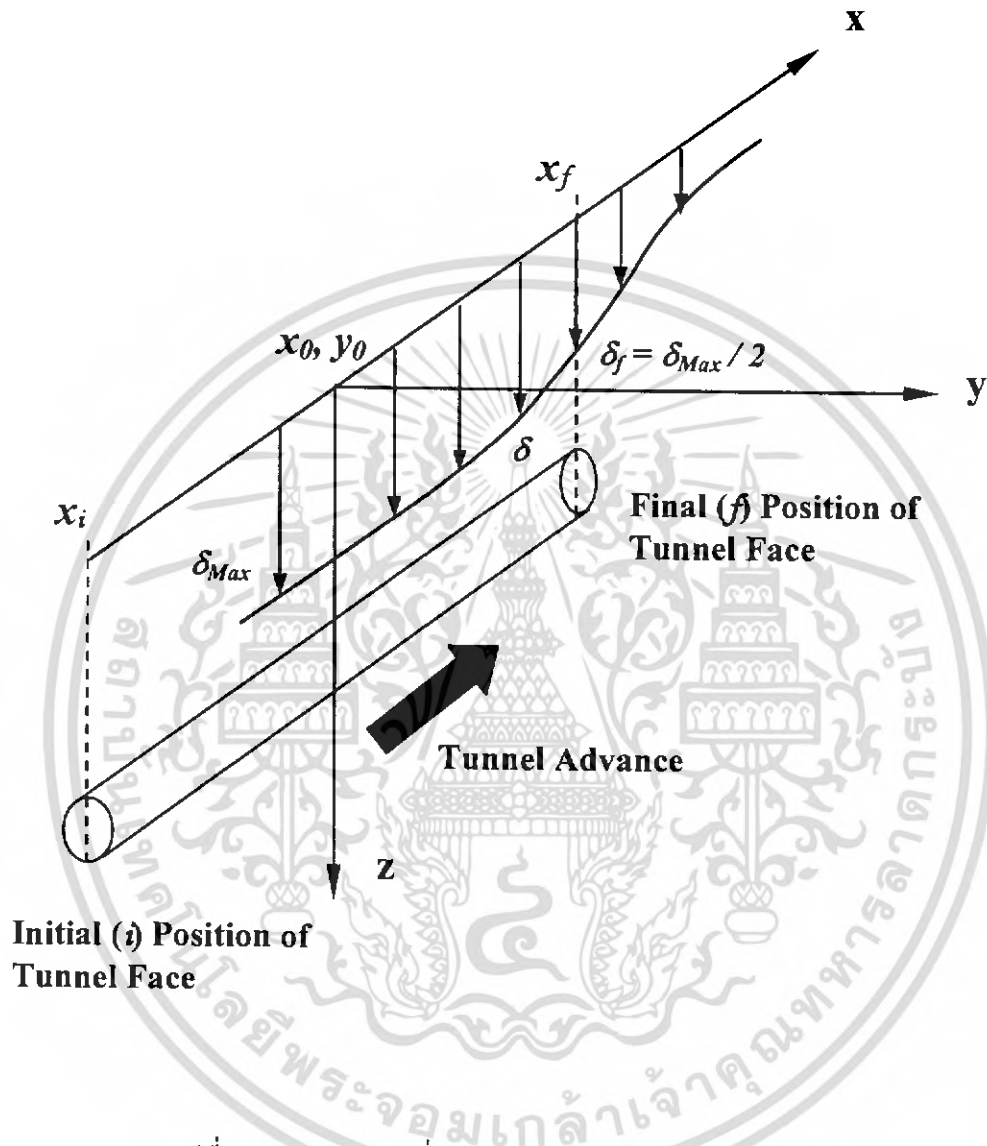
Attewell and Woodman (1982)

หั่วเจาะอุโมงค์ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดการเสียรูปของดินในทิศทางตรงกันข้ามส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของดินแต่ยังทำให้เกิดการเสียรูปของดินในแนวยาว สามารถเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างที่มีอยู่ ดังรูป 6.17 เป็นที่น่าเสียดายว่าการศึกษาวិชาลัยส่วนน้อยที่ทำเพื่อศึกษากระบวนการทรุดตัวของดินในแนวยาว

Attewell and Woodman เสนอว่า empirical solution สำหรับการทรุดตัวในแนวยาวของผิวน้ำดินที่ได้จากการปรับปรุง สมการความน่าจะเป็นปกติ เขาได้พัฒนาทฤษฎีของ Litwinniszyn อย่างไรก็ดีตาม เขาบอกว่า สมการจำกัดเพียงแต่อุโมงค์ฝึกหัด โดยเฉพาะ ในแนวยาว จำเป็นจะต้องพิจารณาตำแหน่งการสูญเสียที่ความลึก z_0 ในแนวที่ $y = 0$ จาก x_i ไปจนถึง x_f ซึ่ง i คือจุดเริ่มต้นของอุโมงค์ และ f เป็นจุดสิ้นสุดดังรูป 6.18



รูปที่ 6.17 การทรุดตัวตามแนวยาวเนื่องจากตัวป้องกันดินของอุโมงค์

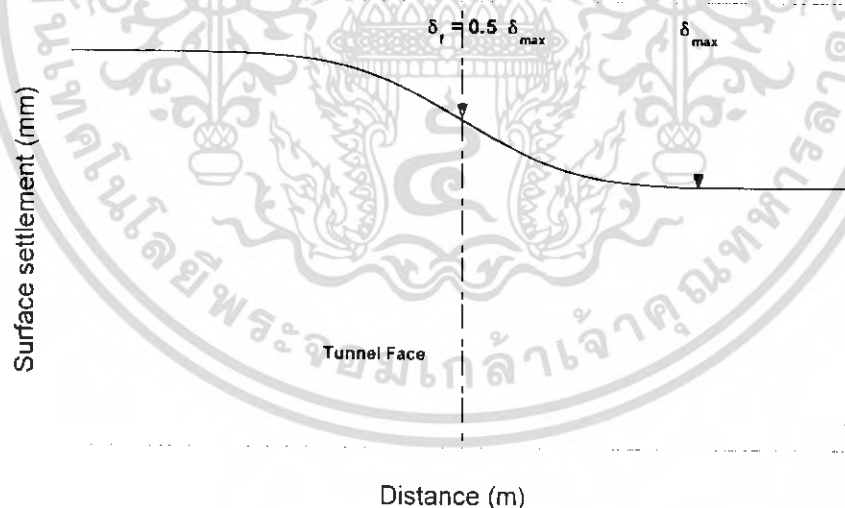


รูปที่ 6.18 ระบบการเคลื่อนตัวกับการทรุดตัวของผิวดิน

คั่งเงื่อนไขในรูปที่ 6.18 สามารถประมาณค่าการทรุดตัวของดินในแนวยาวได้จากการ
 สูญเสียดิน ดังสมการ

$$\delta = \frac{V}{\sqrt{2\pi \cdot i^2}} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right\}$$

Attewell and Woodman สมมติว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของการเสียรูปที่ผิวหน้าอย่างมาก เกิด
 ที่ระยะที่ผิวของหัวเจาะดังรูป 6.19 อย่างไรก็ตามเขาชี้ให้เห็นว่าสมการนี้ใช้ได้สำหรับการทรุดตัวที่
 ก่อให้เกิดโดยการขุดเจาะในดินเหนียวเหมือนเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้ในการทรุดตัวที่เกิดจากThe
 Jubilee Line Project ที่ลอนดอน นอกจากนี้ เขาเห็นพ้องกันว่า ยังมีความต้องการข้อมูลการเสียรูปของดิน
 ที่มากกว่าสามมิติ (เช่น ทั้งในแนวขวางและแนวยาว) จากการวัดในภาคสนามเพื่อที่จะให้ข้อมูลพื้นฐานใน
 การปรับปรุงและขยายผลของเทคนิคนี้



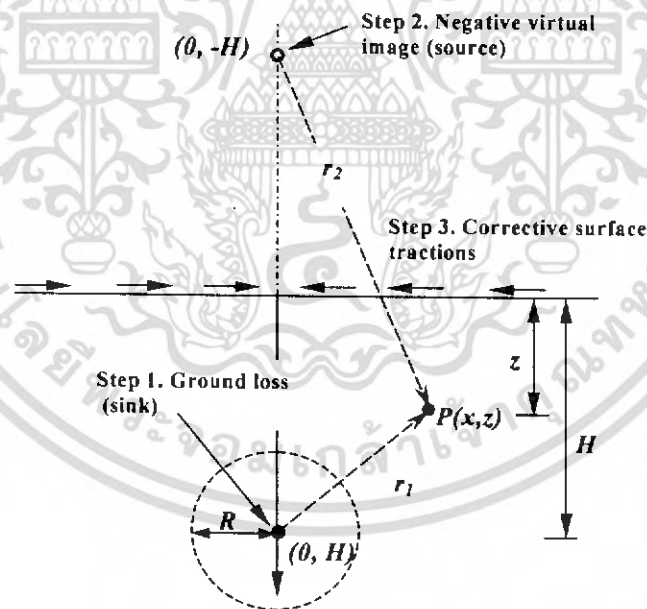
รูปที่ 6.19 รูปร่างการทรุดตัวตามแนวยาวที่เสนอโดย Attewell and Woodman (1982)

6.2.3.2 วิธีการวิเคราะห์ (Analytical solutions)

Verruijt and Booker (1996)

Verruijt and Booker (1996) ได้เสนอว่า การแก้ปัญหาโดยวิธีการวิเคราะห์สำหรับ อุโมงค์ใน homogenous elastic half-space สมการของเขาเป็นการทำให้วิธีการของ Sagaseta ง่ายขึ้น โดยสมการนี้ให้การแก้ปัญหาคาการสูญเสียดินไม่เพียงแต่สำหรับกรณีที่ไม่มีแรงอัด (incompressible case) (เช่น กรณีที่ poisson 's ratio เท่ากับ 0.5) แต่ยังใช้ได้กับค่า Poisson's ratio อื่น รวมไปถึงผลกระทบจาก ovalization

สมการเบื้องต้นโดย sagaseta มีพื้นฐานมาจากการบังคับโดยพฤติกรรมของดินที่ไม่มีแรงอัด ดังรูปที่ 6.20 ข้อแรก การสูญเสียดินในการขุดเจาะที่ไม่เอาน้ำออกใน infinite space ได้ถูกนำมาพิจารณา ละครดับของอุโมงค์ไปที่ point sink (ขั้นตอนที่ 1) ในสภาพที่ไม่มีแรงอัดและเป็นทรงกลม สมมาตรที่อธิบายรัศมีในสนามของการแทนที่ สบด้วยระยะถึง sink ผิวหน้าของดินถูกพิจารณาโดยใช้ virtual image technique (ขั้นตอนที่2) ประกอบกับ Corrective surface tractions (ขั้นตอนที่ 3) สำหรับ วิธีการแก้ปัญหายืดหยุ่นสำหรับ half space ซึ่งถูกนำมาใช้



รูปที่ 6.20 รูปภาพจริงตามหลักวิชาการ

จากรูปที่ 6.20 การแก้ปัญหาในรูปแบบปิด ถูกเสนอโดย Veruijt and Booker สำหรับการประมาณของการเสีรูปของดินที่ผิวหน้าดินและชั้นใต้ผิวน้ำดินสามารถแสดงได้โดย สมการ

$$U_z = -\varepsilon R^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left(\frac{z_1 (kx^2 - z_2^2)}{r_1^4} + \frac{z_2 (kx^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right) + \frac{2\varepsilon R^2}{m} \left(\frac{(m+1)z_2}{r_2^2} - \frac{mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right) - 2\delta R^2 h \left(\frac{x^2 - z_2^2}{r_2^4} + \frac{m}{m+1} \frac{2zz_2(3x^2 - z_2^2)}{r_2^6} \right)$$

เมื่อ

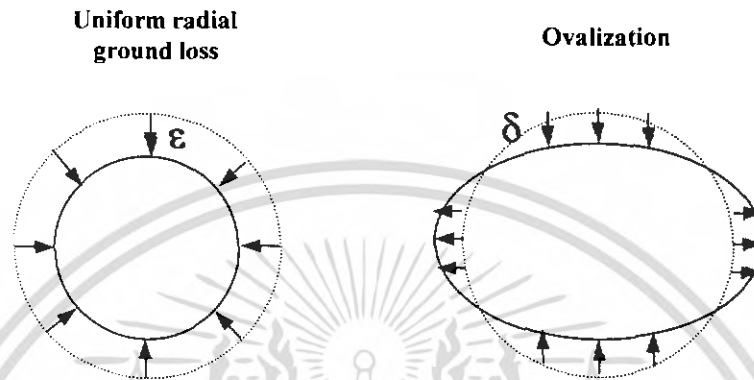
- ε = uniform radial ground loss (รูปที่ 6.21)
- δ = long-term ground deformation due to the ovalization of the tunnel Lining (รูปที่ 2.20)
- z_1 = $z - H$
- z_2 = $z + H$
- r_1^2 = $x^2 + z_1^2$
- r_2^2 = $x^2 + z_2^2$
- R = tunnel radius
- H = depth to the source
- m = $1/(1-2\nu)$
- k = $\nu/(1-2\nu)$
- ν = Soil Poisson's ratio

ในสมการนี้ รูปที่ 6.21 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการเสีรูปของดินโดยพื้นฐาน 2 กระบวนการของอุโมงค์ ได้แก่

Uniform radial displacement (แสดงให้เห็นในการประมาณข้อแรกว่า การสูญเสียดินที่อาจจะเกิดในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์)

Ovalization ของอุโมงค์ซึ่งเกิดจาก การแทนที่ของแนวอุโมงค์

วิธีการ Analytical solution นี้ ได้ถูกปรับปรุงโดย González and Sagaseta ในปี 2001 ทั้งสอง ได้ fit ข้อมูลที่ได้จากการวัดกับสมการของ Veruijt and Booker ได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 6.21 การสูญเสียมวลดินรูปวงรี

6.2.3.3 Finite element and Numerical Methods

ในปัจจุบันนี้ การวิเคราะห์ในเชิงสองมิติเป็นเรื่องทั่วไป การวิเคราะห์ Finite element ให้ผลอย่างมากของโอกาสของการจำลองการขุดอุโมงค์ในหลายๆ รูปแบบ อย่างไรก็ตามมีหลักฐานว่าการพัฒนาการของการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ หัวเจาะ เป็นสามมิติแต่การใช้การวิเคราะห์สามมิติในการขุดเจาะยังมีปัญหาได้แก่

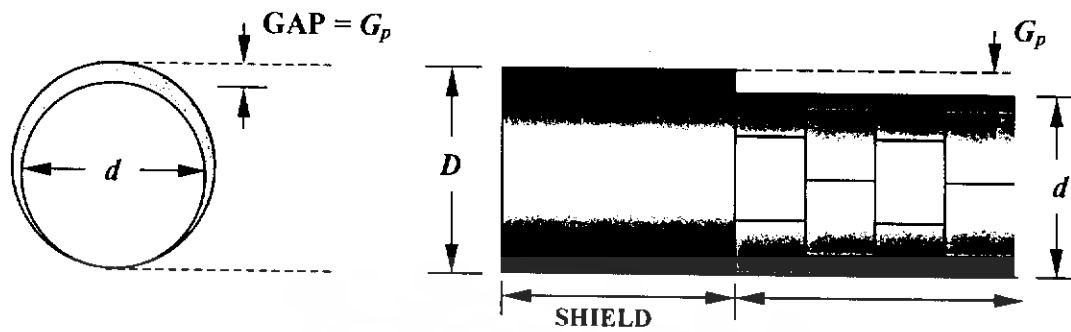
- 1) ราคาและเวลาสำหรับการวิเคราะห์ในสามมิติ ซึ่งจำลองแนวทางการขุดเจาะและรูปทรง 3 มิติ และแบบจำลองดินที่ไม่เป็นเส้นตรงต่อเนื่องมีมาก
- 2) ในการขุดเจาะ ตัวแปรจำนวนมากส่งผลให้ผลที่ได้ยากที่จะอธิบาย เช่น ปัญหาเรื่องคุณสมบัติของแนวอุโมงค์ ระดับการรบกวนดิน การเอาหัวเจาะเข้าไป ช่องว่างด้านท้ายและตัวแปรของรูปแบบดิน
- 3) การวิเคราะห์จำนวนมากเป็นที่ต้องการในหนึ่งโครงการเนื่องจาก สภาพทางธรณีวิทยา สภาพของอุโมงค์ รูปทรงการวางอุโมงค์และอื่นๆ ตลอดแนวอุโมงค์

- 4) ในแบบจำลองดินที่ต่อเนื่องได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าสำเร็จที่การจำลองในทุกๆ มุมมองของดินและอุโมงค์

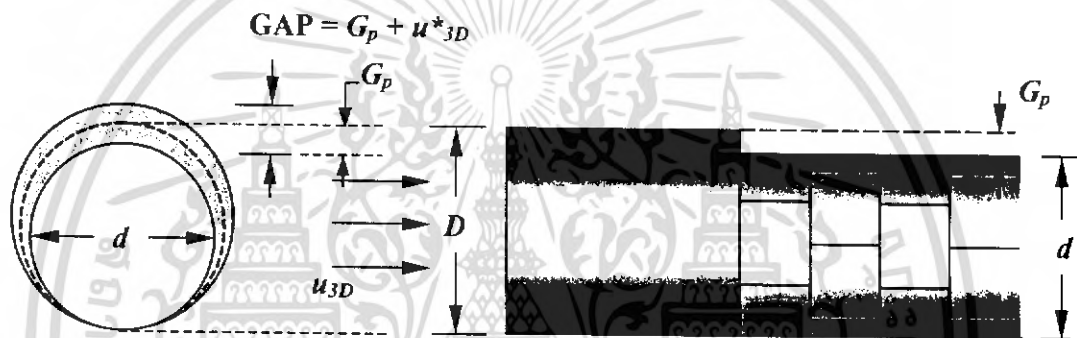
เหตุผลทั้งหมดนี้ ยังคงเป็นที่ยอมรับ แต่ได้มีพัฒนาการที่ยิ่งใหญ่ของ FE ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา

การวิเคราะห์ FE ในสามมิติที่ทำโดย Lee and Rowe สามารถใช้ทำนายการเคลื่อนที่เข้าแทนที่ของดินในสามมิติภายในมวลดิน อย่างไรก็ตาม เนื่องมาจากราคาที่ค่อนข้างสูงและเวลาในการทำนายมีความเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์นี้ วิธีการในทางสองมิติอย่างง่ายจึงมักจะถูกพัฒนาขึ้น สำหรับวัตถุประสงค์ของการทำการวิเคราะห์แรงดันในระนาบสองมิติ องค์ประกอบของการสูญเสียซึ่งอธิบายไว้โดย Lee and Rowe ดังแสดงในรูปที่ 6.22 ถูกแทนด้วย ตัวแปร g ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้น concept ของวิธีนี้ก็คือการทำให้การอธิบายการเคลื่อนตัวของดินในสามมิติง่ายขึ้นเนื่องจากการใช้ระนาบสองมิติ เพื่อที่จะเปลี่ยนปัญหาให้เป็นสองมิติ ตัวแปร g จะถูกนำมาใช้เพื่อรับเอาปริมาตรการเคลื่อนตัวของดินที่เท่ากันในแนวภาคตัดขวาง โดยเฉพาะ ผลจากการใช้ตัวแปร g สามารถรวมในแบบจำลองแรงดันในระนาบสองมิติโดยการประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางการขุดเจาะอุโมงค์ให้ใหญ่ขึ้น ด้วยการเพิ่มปริมาตรที่สอดคล้องกับปริมาตรของดินที่สูญเสียเหนือหัวเจาะ (เช่น ปริมาตรต่อหน่วยความยาวของอุโมงค์) ดังรูป 6.23

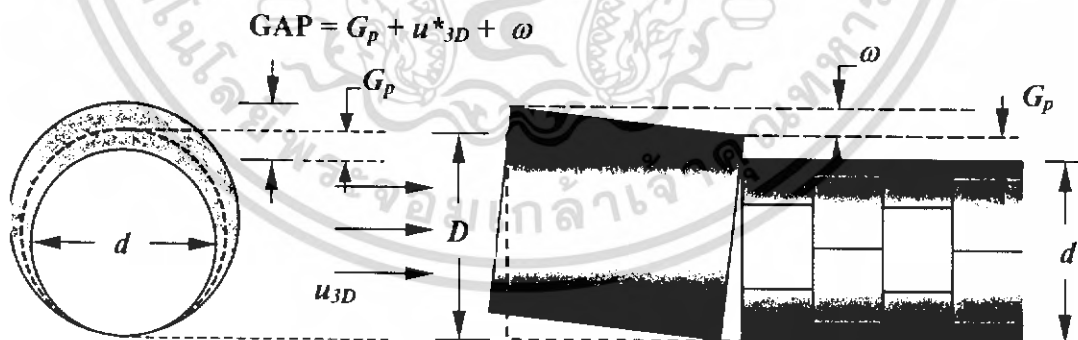
อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ในสองมิติ การทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์ มีแนวโน้มที่จะกว้างขึ้นกว่าที่วัดได้จากการทรุดตัวที่ผิว โดยเฉพาะในอุโมงค์ที่มีการแข็งตัวของดินอย่างมาก Clough and Leca (1989) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้การวิเคราะห์ในสองมิติเพื่อแทนสามมิติส่งผลให้การทำนายการทรุดตัวเป็นไปได้ไม่ดี การวิเคราะห์ FE แบบไม่เป็นเส้นตรง ได้ถูกทำสำหรับการสร้าง NARM อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ในสามมิติใน NARM มีความซับซ้อนอยู่บ้าง แต่ไม่จำเป็นต้องจำลองความซับซ้อนในการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ



(a) Tunnel advances in perfect alignment and fully supported at the face



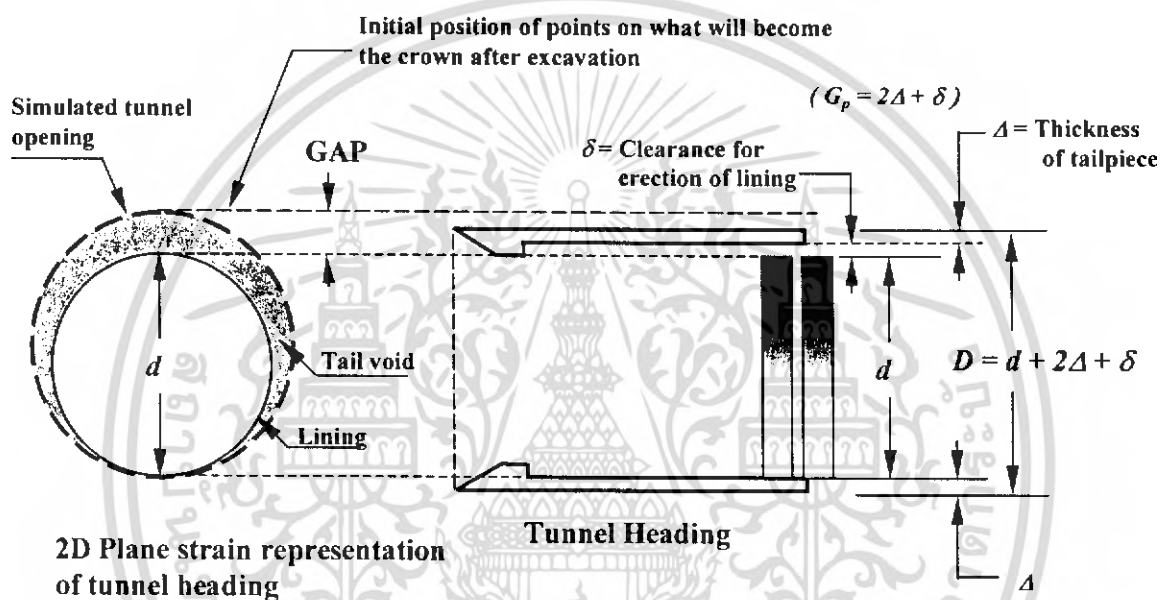
(b) Tunnel advances in perfect alignment but allowing soil movement at the face due to relief of stresses



(c) Tunnel advancement is subjected to all possible sources of “ground loss” Including over-excavation due to alignment and workmanship problems

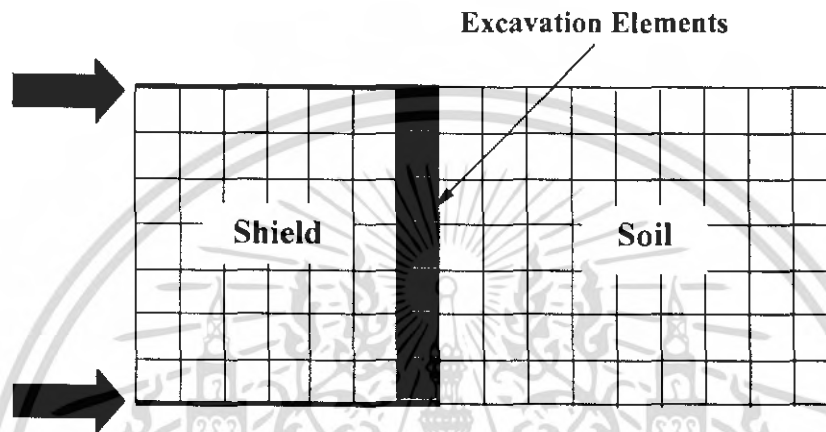
รูปที่ 6.22 การเขียนแบบการสูญเสียมวลดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 คำนิยามของ GAP

Akagi and Komiya (1996) อธิบาย การวิเคราะห์ FE ในสามมิติ ของ หัวเจาะ EPB ใน อุโมงค์ที่ขุดในดินอ่อน โดยใช้ critical state soil model ในการที่จะจำลองการเคลื่อนเข้าไปของหัวเจาะ พวกเขาได้แนะนำให้ใช้ Excavated element ซึ่งอยู่ที่ส่วนหน้าของหัวตัด เพื่อแสดงให้เห็นบริเวณของการรบกวนดินที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว โดยการใช้หัวเจาะอุโมงค์ ดังรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 การเลียนแบบการป้องกันชั้นสูงโดย “Excavation elements”

ผลการทำนายโดยใช้ แบบจำลองสามมิติ นั้นสอดคล้องดีกับการวัดในภาคสนามดังรูปที่ 6.24 อย่างไรก็ตาม หัวเจาะและการเข้าไปของหัวเจาะได้ถูกจำลองในการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน นอกจากนี้ ผู้เขียนเห็นว่าในการที่จะได้การทำนายได้เพียงพอแบบจำลองนี้ยังต้องการการสนับสนุนจากข้อมูลในภาคสนาม

มากไปกว่านั้น ปัญหาหลักของการวิเคราะห์ในสองมิติ (เช่น แรงเค้นในแนวระนาบ) ก็คือว่า การวิเคราะห์ในสองมิติประมาณว่า จุดสิ้นสุดของการขุดเจาะอยู่ไกลจากจุดที่ทำการศึกษา ดังนั้น การวิเคราะห์ในสองมิติจึงไม่เพียงพอถ้าคำนึงถึงผลกระทบในสามมิติ เช่น แบบจำลองสองมิติ ยกเว้นความเป็นไปได้ของเกิดความเครียดเนื่องมาจากการขุดเจาะที่ผิวอุโมงค์ ซึ่งเป็นปัญหาคำคัญในเชิงปฏิบัติ ในอีกทางหนึ่งการวิเคราะห์ในสามมิติส่งผลให้มีรายละเอียดให้การทดสอบในความเข้มข้นของแรงเครียดใกล้ภาคสนามซึ่งพัฒนาโดยรอบจุดสิ้นสุดและขอบของการขุดเจาะ Eberhardt (2001) ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ FE ในสามมิติที่มีพื้นฐานบนตัวอย่างที่ได้จาก Gotthard base tunnel และ Fenster Bedretto ใน Central Swiss Alps. ถึงแม้ว่า แบบจำลองพยายามที่จะจำลองการสร้างอุโมงค์ในหิน วิธีก็ยังเหมือนกับการทำในดิน แบบจำลองสำรวจแรงเครียดใกล้กับสนามระหว่างการดำเนินการขุดอุโมงค์ที่ลึกเข้าไปข้างหน้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเนื่องจากการมาถึงของด้านหน้าของอุโมงค์และการผ่านเข้าสู่ปริมาตร

ของหิน การวิวัฒนาการในทาง spatial และชั่วคราว ของแรงเครียดในสนามในสามมิติรวมไปถึงแรงเครียดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงและยังรวมไปถึงการหมุนของแกนของแรงเครียดหลักๆ การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ต่อสภาพของมวลหินมีผลอย่างที่สุดต่อกระบวนการเสียรูปและความล้มเหลวที่ใกล้กับอุโมงค์จริงๆ

kimura and Mair (1981)

ในขณะที่ Atkinson and Potts สนใจการเคลื่อนตัวของดินในสองมิติในแบบจำลอง Kimura and mair ได้พัฒนาวิธีการเดียวกันแต่รวมเอาปัญหาในสามมิติของในด้านหัวอุโมงค์ ใกล้กับผิวดิน centrifuge tests ได้ถูกจัดขึ้นในดินอ่อนเพื่อสำรวจความสัมพันธ์ในแบบจำลองสองและสามมิติ

ในการที่จะ ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อเสถียรภาพของอุโมงค์และการเคลื่อนตัวของดิน มีความจำเป็นที่จะต้องทำสมการการประมาณค่าที่แน่นอน และสร้าง แบบจำลองง่ายของอุโมงค์ที่อยู่ระหว่างการก่อสร้าง ในหลายๆกรณีของการสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน การนำโดยไม่มีแนวสามารถแสดงโดยรูปที่ 6.25 ซึ่ง Si เป็นค่าแรงดันที่สนับสนุนอุโมงค์ H เป็นส่วนทางด้านบน D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ L เป็นระยะด้านหน้าถึงส่วนของโครงสร้าง ในดินอ่อน Si มักจะถูกกำหนดโดย การใช้แรงอัดอากาศหรือแรงอัดโคลน (เช่น concept ของ Atkinson and Potts, 1977)

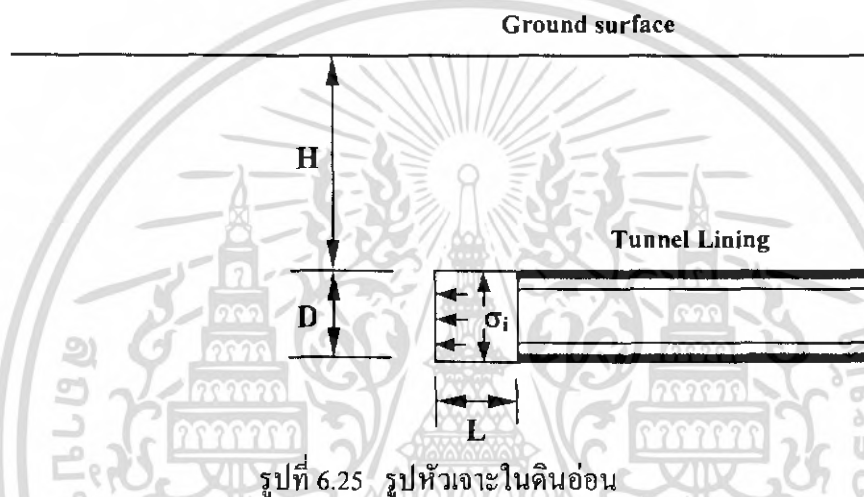
ระยะ L ขึ้นอยู่กับชนิดการขุดอุโมงค์ เช่นถ้ามีการใช้หัวเจาะ $L = 0$ 1 ดังที่ได้อธิบายไปแล้วว่าการวิเคราะห์มักจะเป็นสองมิติ นี่ถูกเชื่อว่าเป็นจริงเฉพาะระยะ L มีค่ามากที่เห็นผลได้ต่อไป สำหรับการทดลองในสองมิติโดย atkinson and Pott แบบแผนของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 6.26 สำหรับสามมิติ อย่างไรก็ตาม kimura and Mair พัฒนาอุโมงค์ครึ่งวงกลมด้วยระนาบของสามมาตรที่หล่อลิ้นและไม่มีแรงเสียดทานที่ผิวระหว่าง Perspex window และดิน ดังรูป 6.27 ความยาวส่วนมากของครึ่งวงกลมได้ถูกวางแนวขึ้น ดังนั้น เฉพาะส่วนหัวที่ไม่มีการวางแนวไว้ อัตราส่วน L/D จะถูกแปรไปจาก 0 ถึง 3 kaolin ที่ไม่ได้ได้อาน้ำออกที่มีแรงเฉือน 26 kPa ถูกนำมาใช้ตลอดการทดลอง

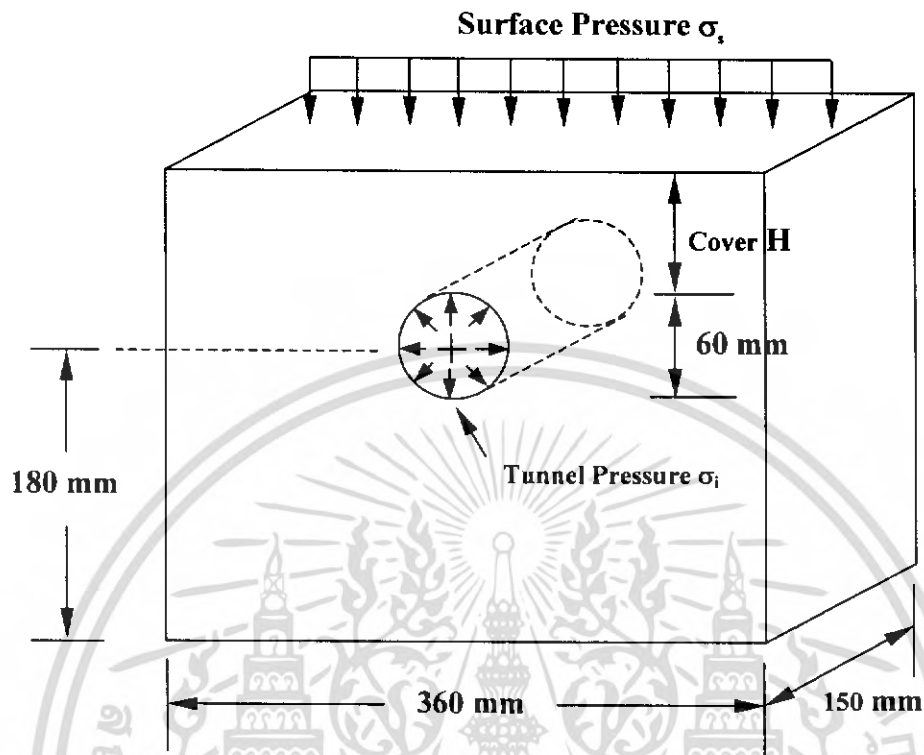
ผลการทดลองจากสองมิติถูกแสดงใน รูปที่ 6.28 การยุบลงของอุโมงค์ ได้เกิดขึ้นส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวของดินไปตามแนวอุโมงค์ กระบวนการยุบตัวนี้ไปสู่การทรุดตัวของดินที่ผิวดังรูปที่ 6.29 kimura and mair สังเกตว่าความกว้างของการยุบตัวสอดคล้องอย่างดีกับข้อมูลภาคสนามของ Peck ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับแบบจำลองอุโมงค์ที่ทำโดย Atkinson and Potts

ผลการทดลองในสามมิติหลังจากที่ล้มเหลวดังรูป 6.30 และ 6.31 ใน $H/D = 0.5$ และ $L = 0$ (เช่น ส่วนหัวได้รับการสนับสนุนไปที่ด้านหน้า) ดังรูปการเคลื่อนตัวไปตามด้านหน้าของอุโมงค์และ

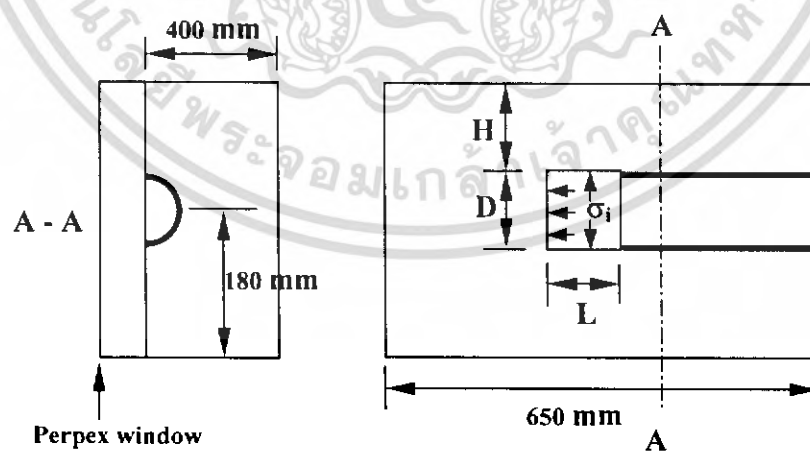
ส่งผลให้เกิด depression (a sink hole) ที่ผิวหน้า ลักษณะนี้แสดงการเคลื่อนตัวในสามมิติข้างหน้า
ด้านหน้าของอุโมงค์

ในทางตรงข้ามแบบจำลองในรูป 6.32 มีส่วนสำคัญของการที่หัวไม่มีแนว ($L/D = 2$) และ
มันแสดงให้เห็นถึงกระบวนการมาถึงอย่างสมบูรณ์ในสองมิติที่การเคลื่อนตัวของดินไปในทิศทางของแกน
อุโมงค์ (ส่วนหน้าของด้านหน้าของอุโมงค์) ที่มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ดังรูป
6.33 เขายังได้ชี้ให้เห็นว่าถ้าความยาวของ





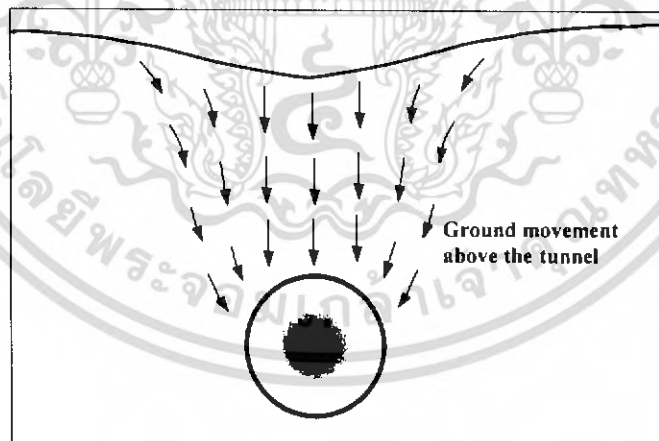
รูปที่ 6.26 แบบจำลองอุโมงค์



รูปที่ 6.27 การทดลองอนุกรม 3 มิติ

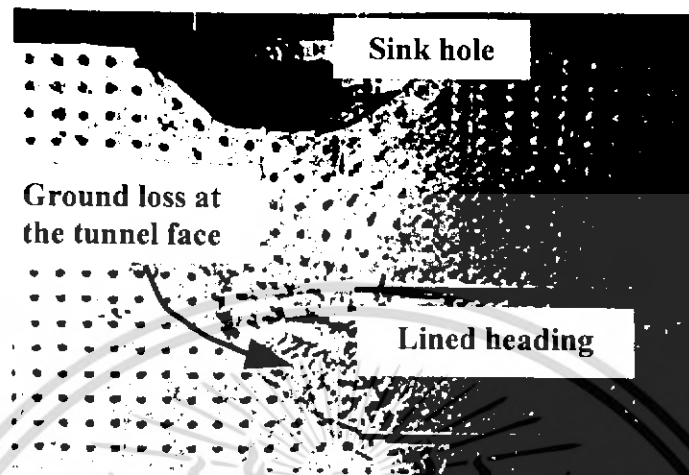


รูปที่ 6.28 ตัวอย่างแบบจำลองอุโมงค์ 2 มิติ หลังการพังทลาย

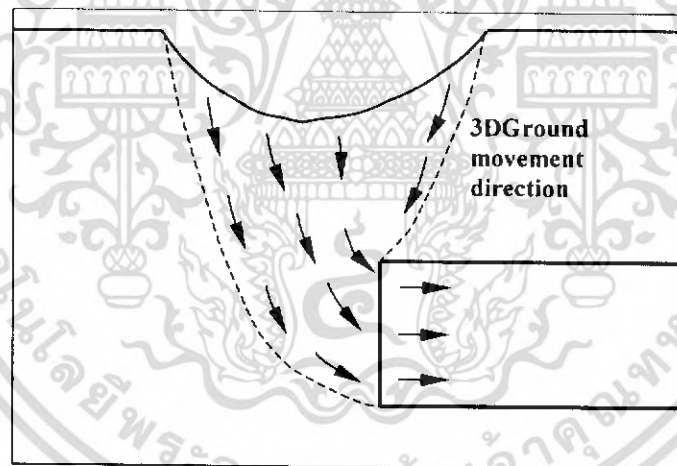


รูปที่ 6.29 แผนผังของการถล่มบนแบบจำลองอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

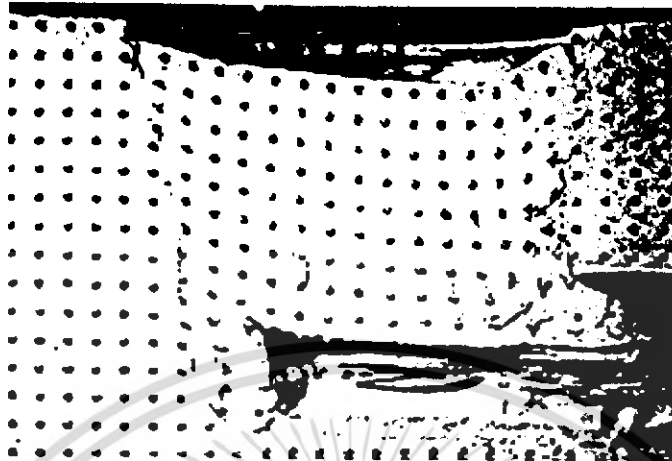


รูปที่ 6.30 แบบจำลอง 3 มิติ ของหัวเจาะหลังการพังทลาย

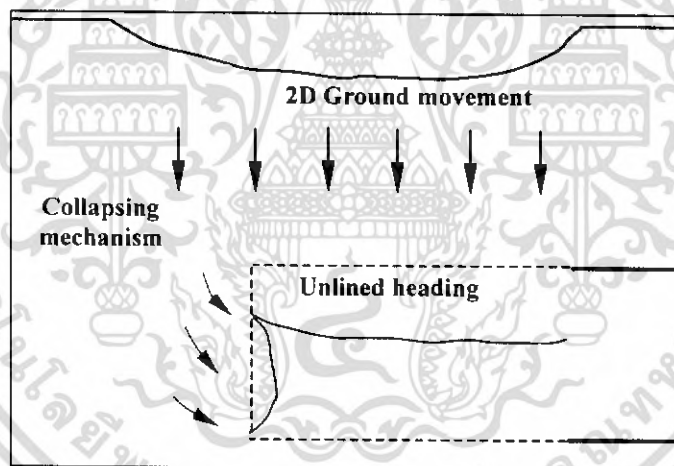


รูปที่ 6.31 การพังทลายของแบบจำลองอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 398 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 แบบจำลอง 3 มิติ ของหัวเจาะหลังการพังทลาย



รูปที่ 6.33 แผนผังการพังทลายที่เครื่องจักร

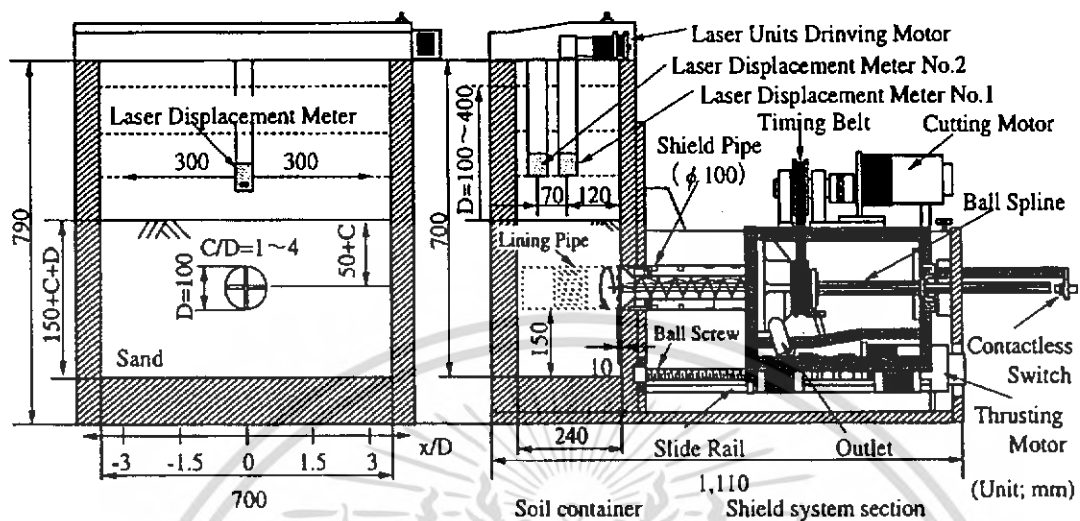
ส่วนที่ไม่มีแนวมาก แรงดันในอุโมงค์ต่ำ การเคลื่อนตัวของดินและการสูญเสียดินในอุโมงค์ จะแสดงลักษณะเป็นสองมิติ (เช่น ดินเคลื่อนตัวในแนวตั้งไปตามอุโมงค์) มากกว่าสามมิติ (เช่น ดินเข้าทางด้านหน้าอุโมงค์)

โดยสรุป centrifuge tests บนแบบจำลองแสดงให้เห็นลักษณะการเคลื่อนตัวของดินที่มีผลมาจากเสถียรภาพของอุโมงค์ นอกจากนี้ ผลนี้ยังช่วยในการออกแบบอุโมงค์และประเมินบนพื้นฐานจากการสังเกตการเคลื่อนตัวของดิน

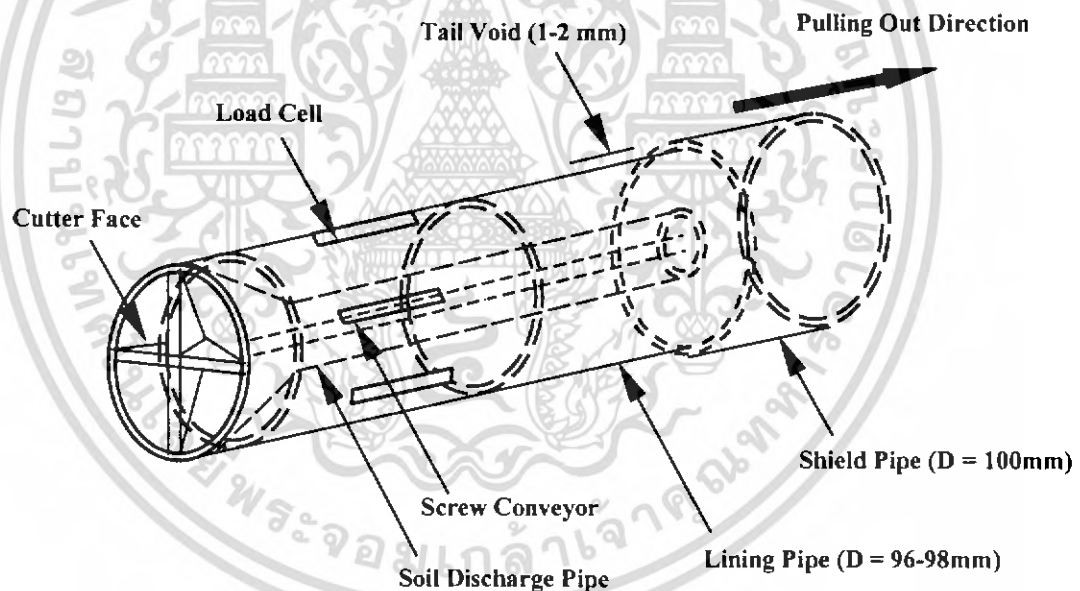
Nomoto (1999)

Nomoto พัฒนาหัวเจาะจำลองที่สามารถทำงานได้ในความเร่งของ centrifuge และสามารถจำลองรายละเอียดการก่อสร้างในกระบวนการแบบปิด ผิวหน้าของหัวเจาะที่เข้าไปและการเกิดช่องว่างที่ส่วนท้าย ในการทดลองนี้เขาได้ใช้ทราย Toyoura ซึ่งมีค่าความหนาแน่นประมาณ 70% และ $F_{max} = 42 \text{ degree}$ ตัวประกอบที่กำหนดในการทดลองนี้ได้แก่ C/D (เช่น C คือส่วนปกปิดที่เป็นภาระ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ) ดังรูป 6.34 ความหนาของช่องว่างด้านท้าย (v) และ ลำดับการก่อสร้าง ค่าความเร่งของ centrifuge ที่เท่ากับ $25g$ (245 m/s^2) ได้ถูกใช้กับการเปลี่ยนค่า C จาก 1D ไปจนถึง 4D การทดลองจำลองความเร็วของการแทรกผ่านที่ 15 mm/min และการหมุนของใบพัดที่ 11 rpm หัวเจาะขนาด 2.5 m ที่สร้างเป็นต้นแบบ

การทดลองหัวเจาะได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อจำลองกระบวนการของการใช้หัวเจาะอุโมงค์จากใบพัดไปสู่การเกิดช่องว่างที่ท้ายหัวเจาะ ณ ตอนเริ่มต้นแบบจำลองหัวเจาะดังรูป 6.34 ได้ถูก thrust ไปสู่ทางเข้าของ container ประมาณ 230 mm ก่อนที่มันจะถูกดึงออกเพื่อที่จะสร้างช่องว่างประมาณ 2 mm ทางด้านท้าย ในการเจาะจริงๆ ช่องว่างส่วนท้ายเกิดจากการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะทิ้งช่องว่างระหว่างรอบๆหัวเจาะกับ ส่วนผิวอุโมงค์ด้านนอก (outer lining surface) ในแบบจำลองเป็นการยากที่จะจำลองกระบวนการอย่างถูกต้อง ดังนั้น ช่องว่างจึงเกิดจากการดึงท่ออันนอกสุดออกมาดังรูปที่ 6.35 ในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนตัวของหัวเจาะหลังจากที่การปั่นของใบพัดได้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว การทำงานในสองรูปแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อดูการเกิดช่องว่างในสองรูปแบบ (เช่น 1 mm และ 2 mm) รูปที่ 6.35 อย่างไรก็ตาม กระบวนการ backfill grouting ไม่ได้ถูกนำมาคิดในการทดลองนี้เนื่องจากกระบวนการนี้ซับซ้อนเกินกว่าที่จะจำลองขึ้นมาได้



รูปที่ 6.34 แบบจำลองอุโมงค์ขนาดเล็ก เพื่อทดลอง centrifuge test



รูปที่ 6.35 รูปการป้องกันดินและช่องว่างด้านหลังหัวเจาะ

Nomoto พบว่ารูปแบบการทรุดตัวเหนียวมาโดยการทดลองหัวเจาะ (รวมไปถึงการเกิดช่องว่าง) เหมือนกับที่อธิบายโดย Peck ว่าเป็นไปตาม กราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังนั้น เขาจึงเสนอว่า สมการจะเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \delta_{\max} \exp(-\alpha \cdot x^2)$$

เมื่อ α คือ ค่าคงที่จากการทดลอง

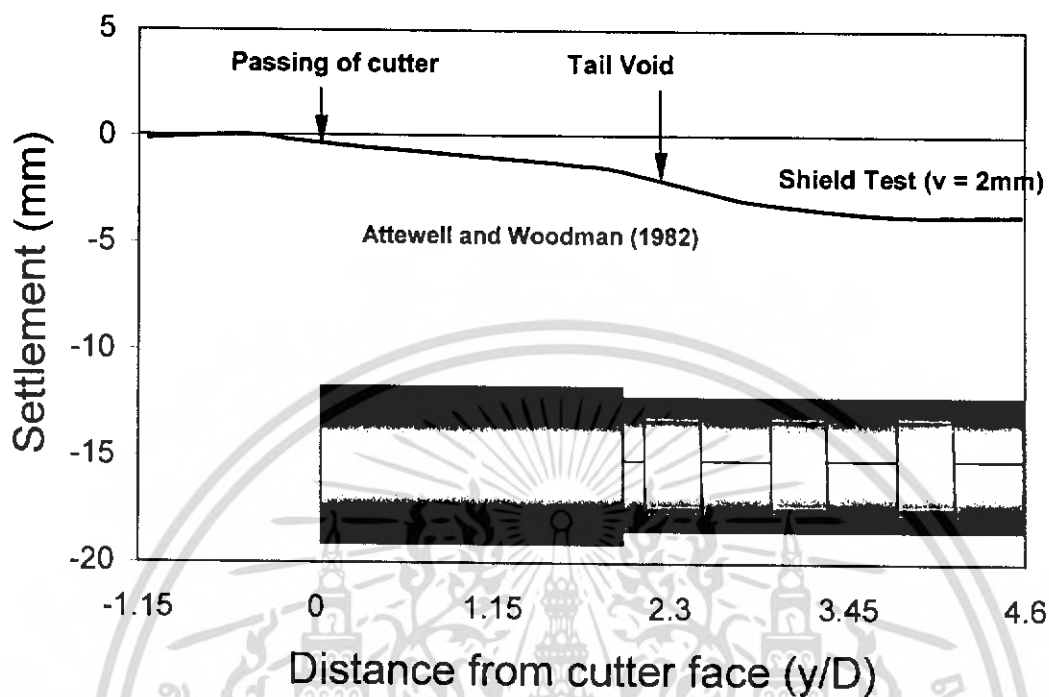
(C/D) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของ α กับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\alpha = \beta \cdot \left(\frac{C}{D} \right)^{-\gamma}$$

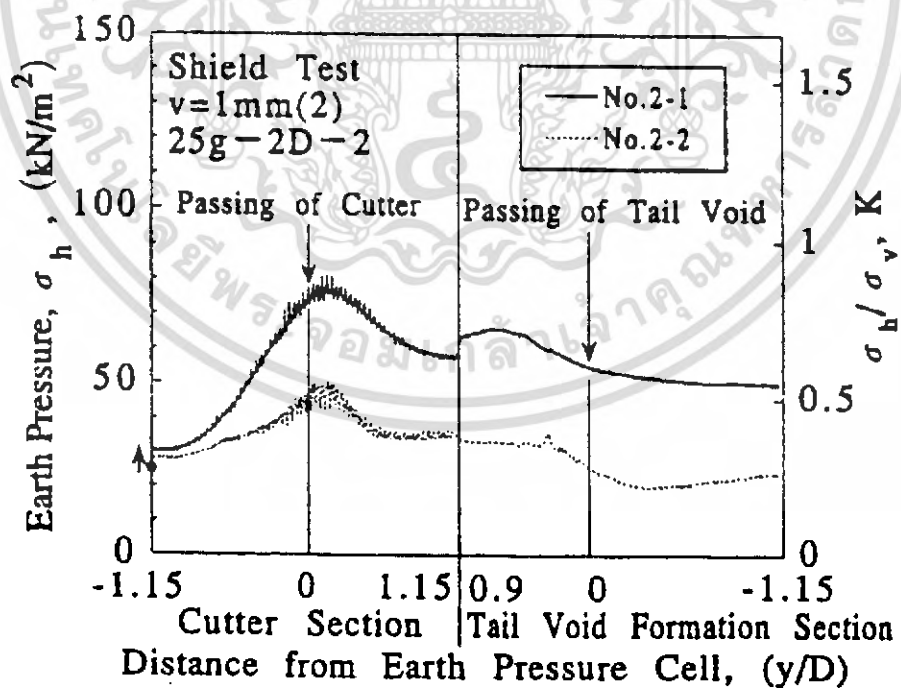
เมื่อ β และ γ เป็นค่าคงที่จาก series of tests

การทดสอบในแนวยาวสามารถวัดได้โดย laser displacement meter รูปที่ 6.36 ซึ่งให้เห็นถึงการทดสอบแบบหลักๆ ที่ เกิดเหนือหัวเจาะและหลังจากที่หัวเจาะผ่านเข้าไป ที่ผิวของหัวเจาะ สามารถวัดการทดสอบได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ attewell and Woodman ที่แสดงในรูปที่ 6.36 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสมการของ attewell และ Woodman ไม่ถูกต้องสำหรับการใช้หัวเจาะที่มีตัวสนับสนุนผิวหน้า (เช่น slurry shield and EPB shield) สมการของ attewell and woodman ประมาณว่า การทดสอบของผิวหน้าด้านบนของอุโมงค์สอดคล้องกับ 0.5Dmax หรือ 50% ของการทดสอบที่มากที่สุดหลังจากที่หัวเจาะผ่านเข้าไปดังรูปที่ 6.21 อย่างไรก็ตามสมมติฐานนี้ใช้ได้กับหัวเจาะแบบเปิดเท่านั้น

Nomoto ยังศึกษาลักษณะแรงดันของดินโดยรอบๆหัวเจาะ แรงดันของดินวัดโดยการติดตั้ง Pressure gauge สองตัวในแบบจำลอง (เช่น gauge no.2-1 and 2-2) ดังรูปที่ 6.37 เขาพบว่าแรงดันของดินเริ่มจะเพิ่มขึ้นทันทีที่ใบพัดเริ่มทำงานและไปถึงค่ามากที่สุดเมื่อใบพัดผ่านจุดที่ทำการวัดดังรูปที่ 6.37 ซึ่ง $v = 1 \text{ mm}$ และ ส่วนที่ปิดดิน = 2D (เช่น D= เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ) ในการทดลองนี้ ค่าความเร่งของ centrifuge เท่ากับ 25g ได้ถูกนำมาใช้ ระหว่างกระบวนการเกิดช่องว่างส่วนท้ายหัวเจาะแรงดันของดินที่ได้ถูกวัดโดย gauge no.2-1 และ 2-2 จะลดลงและลงที่ที่ระดับที่ต่ำกว่าระดับเริ่มต้นดังรูป 6.37 Nomoto เสนอว่า การเพิ่มขึ้นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากดินที่ไถ่ที่ด้านหน้าการขุดเจาะและการลดลงทันทีเกิดจากผลที่ได้จากคามยืดหยุ่นในบริเวณนั้นรอบๆหัวเจาะ



รูปที่ 6.36 รูปตัดตามยาวจาก shield test และความหนาของช่องว่าง



รูปที่ 6.37 ผลการวัดแรงดันดิน

การวัดการเคลื่อนตัวของดินจำเป็นต้องวัดค่าก่อนที่หัวเจาะของอุโมงค์ได้ดินจะมาถึงตำแหน่งของเครื่องมือที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้าง (Inclinometer) เป็นระยะทางเท่ากับ สองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ และจำเป็นต้องทำการวัดค่าต่อไปจากระยะตำแหน่งที่ติดตั้ง Inclinometer เป็นระยะทางเท่ากับสี่เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งระยะที่มากนี้เองจึงเป็นอุปสรรคในเรื่องของเวลาที่ใช้ทำการทดลองซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาที่มาก ซึ่งถ้าไม่มีการผลัดเปลี่ยนผู้ทำการทดลองแล้ว อาจจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากความอ่อนล้าของผู้ทำการทดสอบ

ปัญหาที่พบบ่อยมากในบริเวณที่มีการก่อสร้างอุโมงค์ได้ดินคือ ปัญหาการการเคลื่อนตัวของดิน ถึงแม้ว่าทางผู้ทดสอบของโครงการก่อสร้างที่รับผิดชอบจะมีเครื่องมือวัดผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างแล้วแต่ทว่า จะไม่สามารถบอกถึงผลกระทบที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างบริเวณที่มีการตัดผ่านอุโมงค์ได้ดิน หรือมีการประเมินผลกระทบที่ล้ำซ้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างไปแล้ว

6.3 เครื่องมือและวิธีการเคลื่อนตัวของดิน

6.3.1 Inclinerometers

Inclinerometer เป็นอุปกรณ์อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของท่อที่ฝังไปจากเดิมโดยจะมีการส่งผ่านข้อมูลเฉลี่ยผ่านท่อในการทดลองจะมีตัวส่งสัญญาณที่เรียกว่า Gravity-sensing transducer เป็นตัวส่งข้อมูล โดยออกแบบให้มีการวัดค่าเบี่ยงเบนให้มีความสัมพันธ์ในแกนตั้ง การติดตั้งท่อแต่ละชั้นควรติดตั้งให้อยู่ในแนวตั้งให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ให้ Inclinerometer แสดงค่าผลการเคลื่อนตัวในแนวราบ เครื่องมือ Inclinerometer จะเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้เป็นตัวอ้างอิงข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ Slope และ ดัชนีชี้วัดความชัน (Slope indicators)

ตัวอย่างส่วนประกอบที่เป็นตัวที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

1. กำหนดขอบเขตการเคลื่อนตัวของพื้นที่
2. เครื่องมือวัดอัตราการเคลื่อนตัวของทางค้ำข้างโดยสาเหตุหลาย ตัวอย่างเช่น การก่อสร้างเขื่อนกั้นน้ำ การสร้างเขื่อนที่สร้างอยู่ในชั้นดินที่อ่อน (Soft Ground) การก่อสร้างอุโมงค์ที่มีการเปิดหน้าดิน
3. เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความเบี่ยงเบนจากการทำกำแพงกันดิน เสาเข็ม กำแพงยึดดิน (Retaining Wall)

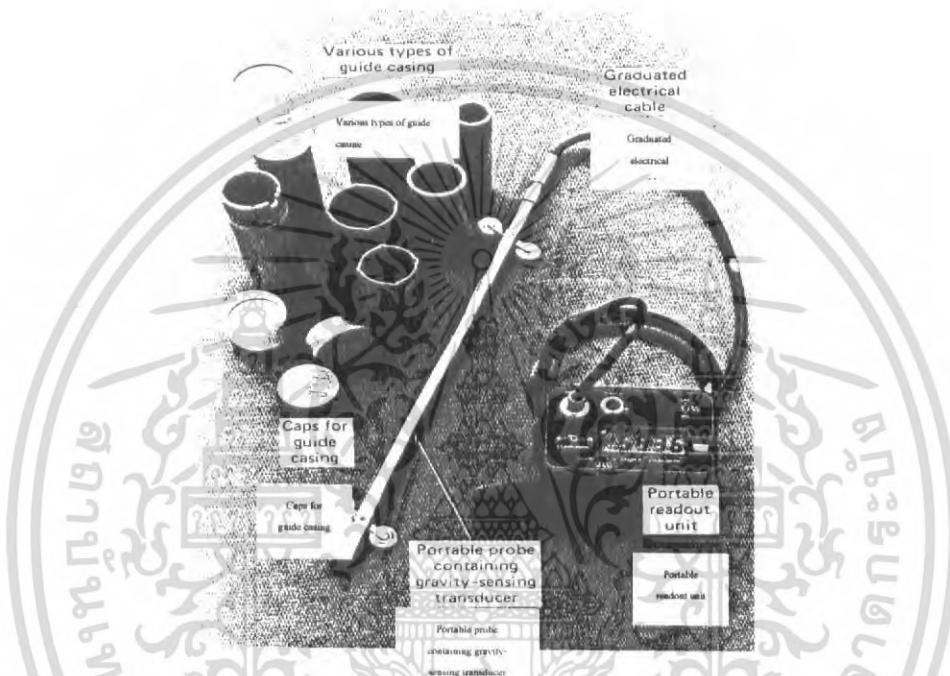
ในบางการทดลองสามารถปฏิบัติการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบได้ โดยให้มีการติดตั้งท่อบริเวณที่ต้องการจะทำการทดสอบ ยกตัวอย่างเช่น การทรุดตัวของเขื่อน ถังน้ำมัน และการก่อสร้างโครงสร้างอื่น ๆ ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน และสามารถประยุกต์หรือดัดแปลงหาแนว (Profile) ของการไหลของของเหลวได้ การวัดความเบี่ยงเบนภายในท่อที่จะมีการส่งผลให้เกิดปัญหา ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเครื่องมือสัญญาณเตือนว่ามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดของคอนกรีตหรือหน้าตัดของหินที่เขื่อนโดยจะมีการแจ้งว่ามีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมเท่าไร โดยการใช้ความสามารถของเครื่องมือ Inclinerometer ยกตัวอย่างในหลุมสำรวจจะมีการบอกทิศทางการเคลื่อนตัวโดยกำหนดให้ในขั้นตอนแรกทำการเจาะหลุมใหม่ ๆ จะถือว่าหลุมบริเวณนั้นยังไม่มีมีการเคลื่อนตัวของดิน เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มมีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นซึ่ง เครื่องมือ Inclinerometer สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวนั้นได้และสามารถนำข้อมูลนั้นเพื่อไปทำการวิเคราะห์ Bending Moment ได้

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของเครื่องมือ Inclinerometer มีด้วยกัน 4 ข้อ คือ

1. casingที่ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของInclinerometer โดยจะทำมาจาก พลาสติก อลูมิเนียม ไฟเบอร์กลาสหรือเหล็ก เมื่อต้องการทดลองการเปลี่ยนแปลงของดินในแนวราบ ควรที่จะทำการติดตั้ง

ท่อ casing ให้ใกล้เคียงแนวของเส้นตรงให้มากที่สุด โดยปกติแล้วท่อ casing จะต้องเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของ Inclinator

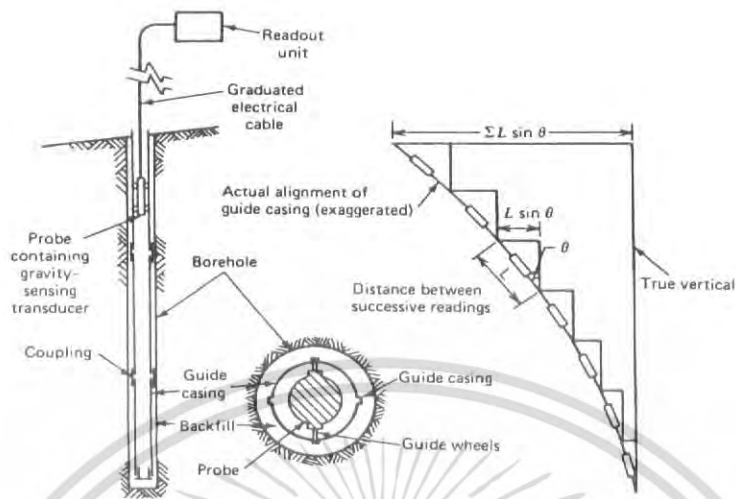
2. A portable probe containing a gravity – sensing transducer
3. A portable readout ใช้สำหรับเป็นเครื่องจ่ายไฟและตัวเก็บข้อมูลที่ี้จากการทดลอง
4. A graduated electrical cable เป็นสายที่เชื่อมข้อมูลที่ี้จากการทดลองส่งไปยังเก็บไว้ใน the Readout unit



รูปที่ 6.38 Inclinator system: Slope Indicator Company Digitilt® system (courtesy of Slope Indicator Company, Seattle, WA)

จากรูปที่ 6.38 เป็นแสดงหลักการทำงานของเครื่องมือ Inclinator สำหรับการเคลื่อนที่ในท่อ casing จากที่มีการติดตั้ง casing เสร็จเรียบร้อยแล้วแนวของท่อจะต้องใกล้เคียงกับแกนตั้ง จากการทดลองจะได้ค่าเบี่ยงเบนค้อยๆ ลดลงในช่วงที่อยู่บริเวณด้านล่างของท่อ และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการทดลองในระดับที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยจะมีการกำหนดแนวแรกเป็นแนวหลักเพื่อเป็นข้อมูลที่ี้ยังไม่มีการเคลื่อนตัวของดิน ผลต่างระหว่างการอ่านค่าในครั้งแรกและการอ่านค่าในครั้งที่สองเมื่อเวลาผ่านไป จะเห็นได้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงแนวของเส้นตรง ในการการติดตั้งท่อ casing จะต้องทำการติดตั้งให้บริเวณด้านปลายสุดของท่อ casing ต้องไม่มีการเคลื่อนตัวของท่อ และจากข้อมูลสามารถแปลงผลข้อมูลทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของการวัดค่าในครั้งแรกและการวัดค่าในครั้งที่ถัดไปและนำผลต่างของค่าทั้งสองมา Plot กราฟก็จะทำให้ได้การเคลื่อนตัวของท่อ Casing ในแนวราบตลอดความยาวของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.39. Principle of Inclinometer operation

6.3.1.1 ชนิดของ Inclinometer (types of Inclinometer)

ชนิดต่าง ๆ ของ Inclinometer ในแบบต่าง ๆ ได้ระบุและได้มีการเปรียบเทียบในตาราง 3.1 ส่วนมากแล้วท่อ casing ที่ใช้สำหรับทดลอง Inclinometer จะจัดทำมา 2 ระบาย เพื่อที่จะทำมาวัดค่าได้ 2 ระบายเพื่อที่จะได้ค่าที่มีความถูกต้องที่สุด โดยในแนวราบจะประกอบได้ด้วยการเคลื่อนตัวของดินทางแนวนอนและในแนวที่ตรงกันข้าม โดยผลการทดลองที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าการเคลื่อนตัวของดินได้

Inclinometer with Force Balance Accelerometer Transducer

แรงที่ทำให้สมดุลเมื่อมีการเคลื่อนขึ้นของ Inclinometer และแรงจะมีการส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมีการที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ในการส่งสัญญาณของข้อมูลจะประกอบไปด้วย 2 แกน แกนที่ 1 จะเป็นการส่งสัญญาณขึ้นมาจากด้านล่าง และแกนที่ 2 จะเป็นการส่งแบบหน้าตัดที่ 90 องศา แรงจะส่งผลทำให้เครื่องมือสมดุล ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าที่เหมาะสมเพื่อจะได้ในไปคำนวณต่อไป โดยผลที่ออกมาจากอยู่ในรูปของ $\sin \theta$ โดยส่วนมากจะเป็นทางด้านเดียวกับแกนของล้อ Inclinometer การเลือกใช้เครื่องมือการวัดที่เหมาะสมมีด้วยกัน 2 แบบ แบบแรกเป็นธรรมดา(Manual) และแบบที่สองเป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งในแบบที่หนึ่งที่เป็นแบบธรรมดาคือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่สุดใช้ง่ายและราคาไม่สูงมากนัก จะประกอบไปด้วย Power Supply , ตัวควบคุม และตัวแสดงผล ดังตัวอย่างรูปที่ 6.38 การบันทึกค่าจะบันทึกลงใน สมุดจดบันทึกข้อมูลในสนาม โดยสามารถนำมาคำนวณได้ในภายหลังโดยการใช้มือหรือการใช้คอมพิวเตอร์คำนวณ แบบที่สอง จะเป็นแบบอัตโนมัติจะประกอบได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

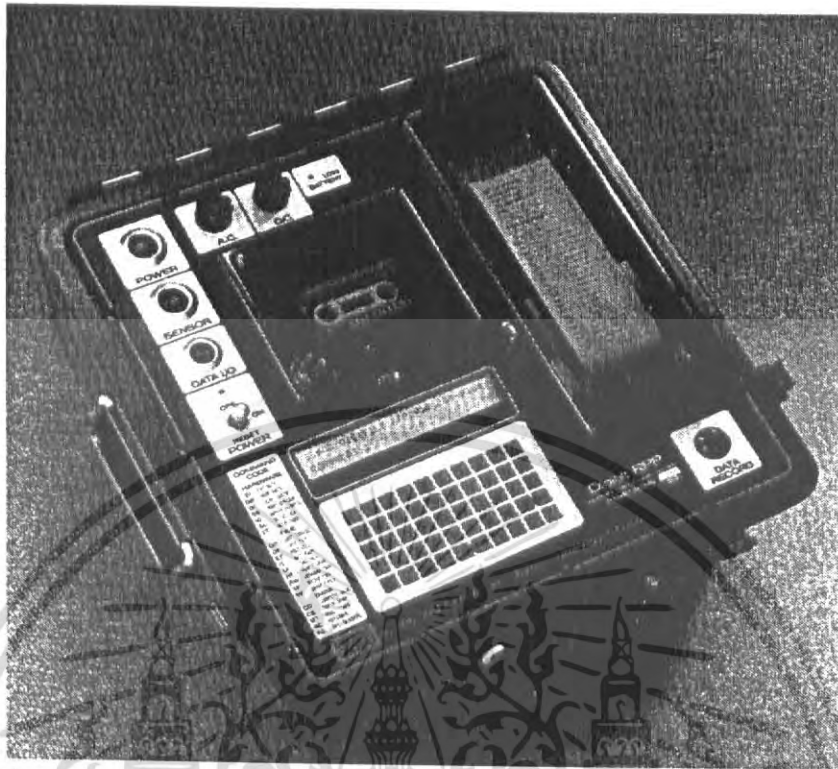
ด้วย Power Supply ตัวควบคุมและตัวแสดงผลและอุปกรณ์อื่นๆ เช่น Magnetic cassette tape หรือ Solid-State เพื่อประสิทธิภาพของดิน Weeks และ Starzewski (1986) ได้มีการกล่าวถึงเครื่องมืออัตโนมัติ และได้พัฒนาในประเทศอังกฤษ โดย Geotechnical Instruments (U.K.) Ltd. ดังแสดงในรูปที่ 6.40 Mikkelsen และ Wilson (1983) พัฒนาในบริษัท Slope Indicator ในประเทศอังกฤษ ดังแสดงในรูป 6.41 และมีการพัฒนาให้มีการตรวจสอบแก้ไขข้อมูลในสนาม โดยจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น Thomas (1985) ได้มีการเปรียบเทียบราคาสำหรับระบบทั้งสองระบบคือแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ และบริษัท Slope Indicator ได้มีการผลิต Inclinator ที่ทำทดลองความลึกที่มากกว่า 180 ม.



รูปที่ 6.40. Solip-state data logger for inclinometer (courtesy of Geotechnical Instrument (U.K.) Ltd., Leamington Spa, England).

Slope Inclinator Series 200B

เป็นเครื่องมือ Inclinator ที่มีแกนเดี่ยวถูกประดิษฐ์ขึ้นมาไม่นาน โดยบริษัท Slope Indicator โดยเครื่องมือนี้จะมีคุณสมบัติในการส่งถ่ายข้อมูลของการวัดความเบี่ยงเบนได้ ส่วนประกอบหลักของการส่งข้อมูลก็จะมีลูกตุ้มที่เหวี่ยงอย่างอิสระและจะมีท่อตรงโค้งๆ ที่คอยรักษาสมดุลของลูกตุ้มไว้ ในการวัดข้อมูลจะใช้ล้อที่อยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องมือเป็นตัววัดการเคลื่อนตัวของดิน ส่วนประกอบของอุปกรณ์ คือ สวิตช์ แบตเตอรี่ และ Potentiometers Indicator



รูปที่ 6.41. Recorder-Processor-Printer (RPP) for Digitilt[®] inclinometer (courtesy of Slope Indicator Company, Seattle, WA)



รูปที่ 6.42. Slope Indicator Series 200B inclinometer (courtesy of Slope Indicator Company, Seattle, WA).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 409 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inclinometer with Bonded Resistance Strain Gage Transducer

เครื่องมือ Bonded Resistance Strain Gage เป็นเครื่องมือที่มีการเคลื่อนตัวของลูกตุ้มอย่างอิสระเมื่อมีการเกิดการบิดงอตัวเกิดขึ้น Bending Strain ที่อยู่ในลูกตุ้มจะส่งผลไปยัง Strain Gage และเครื่องมือ Wheatstone bridge เป็นเครื่องมือที่แจ้งข้อมูลที่วัดได้ Green ได้ทำการเปรียบเทียบการปฏิบัติงานของเครื่อง Bonded resistance strain gage Inclinometer กับ Slope Inclinometer Series 200B Kallstenius and Bergau (1961) ได้กล่าวถึงเรื่องเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Bonded resistance strain gage Inclinometer) และได้มีการพัฒนาโดยสถาบัน Swedish Geotechnical โดยมีค่ามาตรฐานในการปฏิบัติอยู่ที่ 1.5 นิ้ว หรือ 38 มม. ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี Inclinometer เป็นตัวที่จะบอกค่าทิศทางการเคลื่อนตัวของดินโดยค่าของความแน่นอนที่ถูกต้องจะอยู่ที่ ± 0.40 นิ้ว หรือ ± 10 มม. ในความลึก 100 ฟุต

Inclinometer with Vibrating Wire Transducer

Vibrating Wire เป็นเครื่องมือที่ใช้ลูกตุ้มขึ้นลงทางด้านตรง ซึ่งจะมีลักษณะที่เหมือนกับเครื่องมือ Inclinometer with Bonded Resistance Strain Gage Transducer สำหรับเครื่องส่งสัญญาณ 2 ตัวจะใช้สำหรับการเคลื่อนตัวแกนเดียว และในการเคลื่อนตัว 2 แกนจะใช้เครื่องมือส่งสัญญาณ 4 ตัว เมื่อมีการต้องการให้ประมวลผลออกมาจะต้องใช้อุปกรณ์เครื่องจ่ายไฟ ตัวควบคุม เครื่องที่รับความถี่ของข้อมูล

Inclinometer with Electrolytic Level Transducer

เครื่องมือ Electrolytic Level Transducer กล่าวโดย Granvina และ Carison โดยในการปฏิบัติงานจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 นิ้ว (36 มม.) เครื่องมือได้มีการออกแบบสำหรับหลุมเจาะที่มีทิศทางที่ได้สำรวจไว้ โดยการเจาะหลุมเจาะจะใช้ระบบการระบายน้ำโดยการใช้ก๊าซ การใช้ระบบเครื่องขุดกลไกในการเจาะหลุมให้ได้ทิศทางที่ได้มีการกำหนดไว้ จะประกอบไปด้วย มอเตอร์ กระแสตรง Slip Rings และ Mercury Switch ได้มีการจัดเตรียมไว้ในเครื่องมือ Electrolytic Level Transducer โดยการอ่านค่าต่าง ๆ จะอ่านในแนวดิ่ง อุปกรณ์ทดลองที่คล้ายลูกสูบจะสามารถหย่อนลงไปได้เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวของดินได้ในบริเวณที่มีน้ำใต้ดินอยู่ในหลุม โดยจะมีการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลมายังตัวบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 6.7 Inclinometer

Type of Inclinometer	Advantages	Limitations	Typical Range	Approximate Precision ^a
Force balance accelerometer transducer (e.g., Figure 12.66)	Long successful experience record Most widely used type Version available with automatic readout, recording, data reduction, and plotting provisions Version available for use in 1.5 in. (38 mm) inside diameter grooved casing Version available for use in horizontal casing for monitoring settlement		$\pm 30^\circ$, optional to $\pm 90^\circ$	± 0.05-0.5 in. in 100 ft (± 1-13 mm in 30 m)
Slope Indicator Series 200B	Long successful experience record	Standard version is Uniaxial No provision for automatic readout No longer manufactured	$\pm 12^\circ$, optional to $\pm 25^\circ$	± 0.3 -1.0 in. in 100 ft (± 8-25 mm in 30 m)
Bonded resistance strain gage transducer	Version available for use in smooth 1.5 in. (38 mm) inside diameter pipe	Errors owing to moisture, temperature and electrical connections are possible Abandoned by most manufacturers	$\pm 20^\circ$	± 0.02 -1.0 in. in 100 ft (± 0.5-25 mm in 30 m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 Inclinator (ต่อ)

Vibrating wire trasducer	Long successful experience recordd	Special manufacturing techniques required to minimize zero drift Bulky transducer results in large probe Abandoned by most manufacturers	$\pm 20^\circ$	$\pm 0.1 - 0.5$ in. in 100 ft ($\pm 3-13$ mm in 30 m)
Electrolytic level transducer		Size of transducer limits use to near-horizontal holes Short experience record	$\pm 40^\circ$	± 2 in.in 100 ft (± 50 mm in 30 m)
Shear probe (poor man's inclinometer)	Simple Inexpensive	Poor precision Does not measure inclination Cannot determine curvature below point of smallest curvature	$\pm 30^\circ$	Very crude

^aDefined as repeatability with which the instrument can determine the horizontal position of one end of a near-vertical casing with respect to the other (± 1 in. in 100 ft corresponds to about ± 25 mm in 30 m, $\pm 8 \times 10^{-4}$ radian, or ± 170 arc-seconds). Repeatability in near-horizontal casing is similar. Repeatability is decreased in inclined casing

Cooke และ Price (1974) ได้กล่าวถึงรายงานเกี่ยวกับการวัดความลาดเอียงโดยใช้เครื่องมือ Electrolytic Level Transducer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถบันทึกผลของข้อมูลในที่ที่ต้องการวัดค่าหลายๆ ครั้ง โดยจะไม่มีปัญหาเรื่องข้อมูลจะซ้อนทับกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจมาก

6.3.1.2 ปัจจัยที่มีผลทำให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องของ Inclinometer

สิ่งสำคัญที่มีผลทำให้ปัจจัยที่มีความถูกต้องในการวัดของข้อมูล Inclinometer คือ ความสามารถ และความเชี่ยวชาญของบุคลากรในการใช้เครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ

ความถูกต้องของการใช้เครื่องมือ Gravity – Sensing Transducer

โดยทั่วไปการผลิตอุปกรณ์จะมีการกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือไว้อย่างละเอียด ซึ่งเครื่องมือที่มีการส่งสัญญาณ แบบ Gravity – Sensing ถูกสร้างขึ้นภายใต้พื้นฐานความถูกต้องซึ่งสามารถรับประกันความถูกต้องได้ในขณะทำการปฏิบัติงานได้

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะมีสาเหตุหลัก ๆ อยู่ด้วยกันอยู่ทั้งหมด 3 ข้อ คือ อันดับแรก ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด อันดับที่สองความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการกำหนดจุดให้เป็นจุดตั้งต้น อันดับสามการหมุนของมุมอะซิมัท (azimuth rotation) การส่งสัญญาณของการวัดมีความสัมพันธ์กันระหว่างการส่งข้อมูลกับการรับข้อมูล โดยกำหนดมาตรฐานของการ Plot กราฟความชันการออฟเซตศูนย์ (bias) ของการอ่านค่า Inclinometer เมื่อทำการทดลองในแนวตั้ง (True – Vertical Alignment) การหมุนของมุมอะซิมัทความคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์ที่ได้จากความแตกต่างของการกำหนดแกนที่จะใช้ในการส่งสัญญาณกับตัวของล้อย Inclinometer ไปทิศทางที่แตกต่างกันและค่าที่ได้จากการทดลองจะใช้ไม่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันเกิน ± 0.50 degree ความผิดพลาดทั้ง 3 ข้อนี้สามารถควบคุมให้น้อยลงได้โดย ควรมีการควบคุมที่ดี ดัดรอกเพิ่มในขณะที่ทำการหย่อน Inclinometer เพื่อให้เครื่องมือมีความนิ่ง ทำการทดลองหลาย ๆ ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย การปรับแก้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ออกแบบและกำหนดสภาพของล้อย

Wilson และ Mikkelen (1997) ได้มีการคิดค้นวิธีการทดลองที่ดีขึ้นโดยการออกแบบล้อยของ Inclinometer ให้ดีขึ้นโดยทำการเพิ่มแกนของล้อย เพื่อลดการเลื่อนไถลของล้อย และเป็นการลดการแกว่งตัวของ Inclinometer การออกแบบนี้จะทำให้ต้องมีการเพิ่มขึ้นของล้อย 2 ล้อย โดยการวัดการเคลื่อนตัวจะให้ล้อยเคลื่อนตัวตามร่องที่มีอยู่ในท่อ Casing

แนวท่อ Casing

จากตารางที่ 2 ประกอบด้วย ความสามารถในการวัดของเครื่องมือและประเภทของการใช้งาน Inclinometer การทดลองการวัดเคลื่อนตัวของ Inclinometer ในแนวตั้งโดยจะสามารถวัดในท่อ Casing ที่มีการติดตั้งในแนวราบ ในการส่งสัญญาณแบบ Gravity-Sensing จะถูกส่งขึ้นมาใน

ทิศทางตั้งตรง ความถูกต้องในการวัดการเคลื่อนตัวของดินในท่อ Casing ในแนวราบจะคล้ายกับการติดตั้งท่อในแนวตั้ง และในบางกรณีการวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งอาจมีความถูกต้องมากกว่าการวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบเนื่องจากการวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบจะมีการเลื่อนไถลของ Inclinometer ที่มากกว่าการวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

ในการทดลองการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้ Inclinometer ในท่อ Casing มีด้วยกัน 2 วิธีที่สามารถทำได้ วิธีที่ 1 เป็นแบบธรรมดา การทดลองการเคลื่อนตัวของท่อในแนวตั้งที่มีความโน้มเอียงอยู่ระหว่าง 45 degree ของแนวตั้ง และการวัดการเคลื่อนตัวของท่อในแนวราบที่มีความโน้มเอียงอยู่ระหว่าง 45 degree เครื่องมือจะไม่สามารถส่งถ่ายสัญญาณได้เมื่อมีการรบกวนบริเวณข้าง ๆ เนื่องจากเครื่องมือมีความไวต่อปฏิกิริยารอบข้าง แต่ว่าถ้ามีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยจะสามารถปรับแก้ได้โดยใช้ผลรวม (Check Sum) วิธีที่ 2 การใช้การทดลองในท่อ Casing โดยมีความโน้มเอียงประมาณ 25 degree ในแนวตั้งและแนวราบ ในการทดลองจะให้ Inclinometer ค้างอยู่ในท่อ Casing โดยจะมีการส่งสัญญาณขึ้นมาเพื่อทำการเก็บบันทึก ซึ่งในการส่งสัญญาณนี้ถ้ามีการรบกวนจะส่งผลทำให้ค่าผลรวมที่ได้จะไม่สามารถนำมาใช้ได้

เมื่อทำการวัดการเคลื่อนตัวในท่อ Casing การเปลี่ยนด้านของมุมอะซิมัทเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน จากตัวอย่างเมื่อท่อ Casing ห่างออกจากแนวตั้ง 5 degree ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ 2 นิ้วจากความสูง 100 ฟุต หรือ 50 มม. ที่ความสูง 30 ม. (Wilson and Mikkelsen) การแสดงรายละเอียดของสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนตัวของท่อ Casing โดย Mikkelsen and Wilson (1983)

Penman and Hussain (1984) ได้มีการศึกษาค้นคว้าสำหรับการวัดการเปลี่ยนแปลงของเขื่อนกันน้ำที่มีน้ำอยู่ทางด้านหน้ากับเขื่อนที่มีขางมะตอยที่อยู่ด้านหน้า Inclinometer จะเคลื่อนที่ในระหว่างท่อ Casing ที่มีการโน้มเอียง และ Inclinometer จะค้างอยู่บนแนวตั้งโดยจะเคลื่อนที่ในรางที่มีการติดอยู่กับรรางข้างหน้า ดังนั้นจะเป็นการยากที่จะให้การเคลื่อนตัวไปด้วยกันระหว่างรรางและ Inclinometer ในการวัดการเคลื่อนตัวของดิน

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ Casing

ท่อCasingที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดและล้อยของ Inclinometer จะต้องมีความกว้างมากขึ้น และจะทำให้ความคลาดเคลื่อนจากมุมอะซิมัทจะลดลง

กระบวนการถมดินที่บริเวณหลุมเจาะ (Borehole Backfilling Procedure)

การถมดินที่ไม่ได้คุณภาพเพื่อทำการติดตั้งท่อ Casing อาจจะทำให้ข้อมูลที่อ่านได้นั้นมีค่าเฉลี่ยที่ได้จะมีความกระจัดกระจายมากก่อนที่จะบันทึกผล ปกติแล้วการถมดินจะมีการถมด้วยเวลาที่มีความสม่ำเสมอ ถ้าต้องการข้อมูลที่มีความแม่นยำมาก ๆ อาจจะต้องใช้วิธีการลดผลกระทบจากบริเวณหลุมสำรวจให้มากที่สุด และจะต้องมีการถมดินทุก ๆ ปีบริเวณของหลุมเพื่อทำการลดช่องว่างในการgrout ของกระบวนการถมนี้จะมีผลกระทบมากกว่าการบดอัดของดินที่มีขนาดเล็ก ๆ

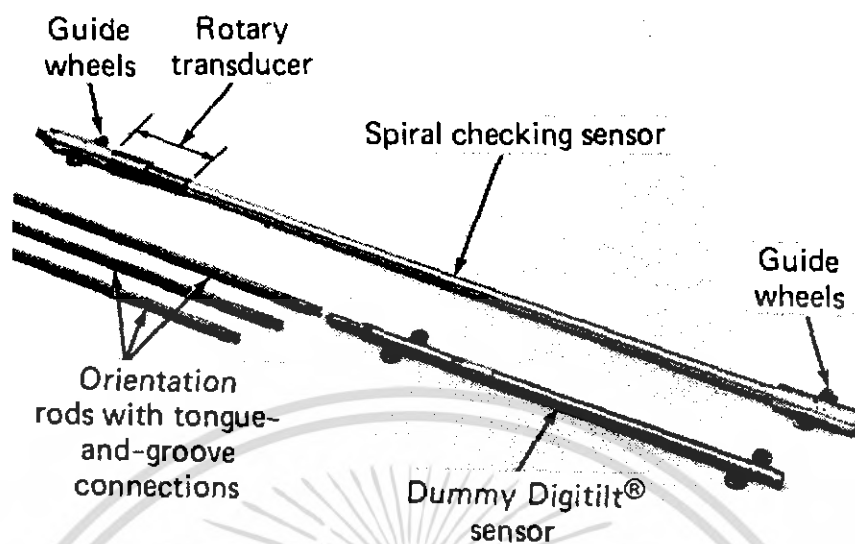
สลักเกลียวของท่อ Casing (Spiraling of Casing)

เมื่อทำการติดตั้งท่อ Casing ให้อยู่ในหลุมแล้ว จะมีการปรับร่องอยู่ในร่องที่ไว้สำหรับเป็นแนวการเคลื่อนที่ของ Inclinometer ในความลึกที่ต่าง ๆ การติดตั้งของขอท่อจะติดตั้งทุก ๆ 3 เมตร โดยการเคลื่อนตัวของท่อจะต้องเคลื่อนที่ต่อเนื่องกันไม่มีการให้ท่อหลุดออกจากกัน Green(1974) ได้มีการทดลองวัดโดยมีข้อต่อจำนวน 10 ท่อน ในความลึก 24 เมตร โดยใช้ข้อต่อเป็นพลาสติกโดยจะมีการวัดที่เหมือนเดิม การติดตั้งในสถานที่ที่มีแสงแดดที่จัดจะเป็นสาเหตุให้เกลียวของท่อพลาสติกแน่นและความยาวควรจะมี ความยาวที่มีความยาวที่เท่ากันตลอด โดยจะต้องเก็บไว้ในที่ร่มและจุดที่ใช้ขีดย่อจะต้องมีความเหมาะสมที่ไม่สามารถรับ โมเมนต์ได้

ก่อนที่จะมีการติดตั้งสลักเกลียวจะต้องทำการวัดขอท่อ ยกตัวอย่าง ความยาวของท่อ Casing สามารถกำหนดใน V-block บน Bench หรือ ปุ่ม ในแนวของเส้นใยในลอนที่อยู่ด้านล่างสุด ข้อต่อสามารถทำการตรวจสอบแนวได้โดยการตรวจสอบตามแนวของท่อปุ่ม โดยจะดูความถูกต้องของการบิดของข้อต่อหรือไม่ และจะมีการสังเกตด้วยตาเปล่าด้วย วิธีการวัดขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต เช่น บริษัท Slope Indicator จะใช้วัดมาตรฐานการวัดแบบสองทิศทาง ควรใช้ความยาวของท่อให้สัมพันธ์กับความลึกของหลุมเจาะ สลักเกลียวสามารถติดตั้งโดยการใช้เทคนิคการติดตั้ง เมื่อท่อถูกประกอบจนได้ความยาวแล้วจะทำการขันท่อให้แน่นไม่ให้ตัวท่อขยับซ้ายขวาก่อนจะทำการขันแน่นตัวท่อ เนื่องจากอาจทำให้ท่อเกิดความเสียหายได้โดยท่อจะมีค่าความทนทานค่าหนึ่งจากโรงงานผู้ผลิต สังเกตร่องที่จะทำการทดสอบ ถ้าไม่ตรงกันจะต้องทำการปรับแก้ก่อนออกมาจากวางแผนการปรับตัวระหว่างการติดตั้งปลายท่อของ casing ต้องหมุนได้อิสระ ปลาย casing ควรจะทำให้สูงขึ้นจากดิน การเจาะและถอน casing ต้องทำโดยไม่มี การหมุนการวัดโดย spiral หลังจากติดตั้ง casing จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลงเมื่อมีการติดตั้งในระดับลึกกว่า 200 ฟุต (60 ม.) จึงจำเป็นต้องทราบการเคลื่อนตัวของที่แท้จริง โดยการวัดสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. Spiral checking sensor รูปที่ 3.6 ซึ่งมีระยะระหว่างล้อ 1.5 ม. สามารถอ่านข้อมูลได้ทิศทางเดียว
2. Inclinometer probe ใช้หย่อนลงใน casing ให้ความละเอียดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.43. แสดง Spiral checking sensor

Spiral จะอ่านข้อมูลเพียง 1 ชุดแต่สามารถอ่านในแบบ biaxial เพื่อคำนวณทิศทางของการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น หรือการเคลื่อนตัวในทิศทางอื่นที่อาจเกิดขึ้นได้ ทำการปรับข้อมูลหรือสร้างกราฟจากคอมพิวเตอร์ได้

การอ่านค่าในแต่ละตำแหน่ง

การอ่านค่าไม่ได้กำหนดค่าตำแหน่งการวัดที่แน่นอน โดยแต่ละตำแหน่งจะต้องมีการกำหนดไว้แน่นอน เคเบิลที่ใช้ต่อกับ Inclinator จะต้องไม่มีการบิด ตำแหน่งที่ทำการวัดจะต้องเป็นจุดถาวรและแน่นอน อีกสาเหตุหนึ่งที่จะเป็นการเพิ่มความผิดพลาดได้คือการเพิ่มความยาวของ casing ถ้าวางของ casing ไม่ตรงกันหรือท่อติดท่อไม่ตรงแนวจะยิ่งทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ วิธีการอ่านค่าใน casing จะอ่านค่าเมื่อระยะช่องว่างระหว่างล๊อคของ Inclinator มีค่าเท่ากัน ถ้าวางไม่เท่ากันการเคลื่อนตัวของ casing จะทำให้กราฟที่ได้ไม่สม่ำเสมอในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้

6.3.1.3 ชนิดของ Inclinator casing

สามารถใช้ได้ทั้งท่อพลาสติก อะลูมิเนียมอัลลอยด์ และไฟเบอร์กลาส ส่วนท่อเหล็กจะมีใช้งานบ้าง แต่ไม่เป็นที่นิยมมากนัก

Plastic casing

ท่อทำจากวัสดุ ABS (acrylonitrile butadiene styrene) เนื่องจากใช้งานง่ายแต่จะมีการเปราะแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

Aluminum casing

Aluminum casing จะมีร่องของท่อโผล่ออกมาข้างนอก วัดขนาดจากร่องที่อยู่ตรงข้าม กันได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.4-3.4 นิ้ว ขนาดใหญ่สุดของ couple มีความยาว 6 นิ้ว (150 มม.) Aluminum casing จะมีปัญหาเรื่องสนิม เนื่องจากน้ำใต้ดินหรือน้ำปูนที่เกิดจากการ Grouting ในระหว่างการติดตั้ง จากการรายงานพบว่า ในหลายกรณีจะเกิดสนิมที่ท่อในเวลาไม่นาน ซึ่งถ้าเลือกใช้ท่อประเภทนี้จะต้องทำการป้องกันการเกิดสนิมด้วย

Steel Casing

ร่องของท่อจะเชื่อมติดกับท่อเหล็ก สามารถใช้เป็น Inclinator casing ใช้ในการวัดกับเสาเข็มเหล็ก มีราคาถูกที่สุดแต่จะให้ความแม่นยำต่ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.75 นิ้ว เป็นขนาดทั่วไป การเชื่อมต่อจะต้องไม่ให้ร่องเกิดการบิด โดยขนาดของ couple จะต้องมีความพอดีกับขนาดของท่อ

6.3.1.4 การเลือกประเภทของ Casing

ประเภทของ Casing และ couple ขึ้นอยู่กับกระบวนการติดตั้ง จะต้องรู้ลักษณะการเคลื่อนตัวของดินหรือหินที่แน่นอน ควรเลือกชนิดของ Inclinator casing และ couple ให้มีความเหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการหา

1. การเลือก Casing ขึ้นกับ แรง axial compression และ axial extension โดยถ้า แรง axial Compression และ axial extension มีค่าไม่เกิน 1% จากการคาดเดาพฤติกรรม ต้องเลือก couple ให้เหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหาย
2. ดินรอบ Casing จะมีการเคลื่อนตัว การเคลื่อนตัวของ casing จะเหมือนกับการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ อย่างไรก็ตาม Inclinator casing เมื่อติดตั้งลงในดิน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Shear Zone ในลักษณะเดียวกัน ค่า Shear จะเกิดขึ้นต่ำกว่าค่าจากการเคลื่อนตัวจริง เป็นสาเหตุให้เกิด Bending ใน inclinometer casing เพื่อไม่ให้ bending มีผลเสียหายกับ inclinometer ถ้าการเคลื่อนตัวใน Shear zone เกิดขึ้นตามที่ทำนายไว้ จะสามารถเลือกใช้ casing ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ และ Prove ขนาดเล็กได้ บางครั้งผู้ใช้งานจะมีความกังวลว่า Inclinator casing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะด้านการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้าง ในกรณีที่ใช้ในดินอ่อน ความกังวลนี้แสดงให้เห็นว่าดินมีการเคลื่อนตัวรอบๆ Inclinator casing แต่จากหลักฐานที่มีอยู่แสดงให้เห็นว่า casing เคลื่อนตัวไปพร้อมกับดิน อย่างไรก็ตามเมื่อติดตั้ง Casing ลงในดินอ่อน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างใน Shear zone ที่แตกต่างกันมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ดินในแต่ละท้องถิ่นแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่า Shear ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นช้ากว่าในความเป็นจริง

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ casing สามารถยอมรับได้หรือไม่ การเลือกใช้ casing ขนาดใหญ่ทำให้ต้องมีการขุดหลุมขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย กรณีที่มีการติดตั้ง casing ในคอนกรีต เพื่อพิจารณาโครงสร้างแล้ว อาจจะต้องจำกัดขนาดของ Casing ซึ่งถูกติดตั้ง ในเสาเข็มแบบ H-Pile การเลือกใช้ขนาดของ casing ความที่ออกแบบจะสามารถควบคุม Factor ด้านความปลอดภัยได้ couple ที่ใช้ต้องไม่ยื่นออกเกินเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในของ casing
4. ทำการติดตั้งโดยผู้ชำนาญการและมีความระมัดระวัง ต้องมีการต่อเชื่อมโดย Couple ให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
5. อายุการใช้งาน ปัจจัยสำคัญมาจากน้ำใต้ดินที่มีสภาพเป็นด่าง และน้ำปูนที่เกิดจากการ Grouting ขณะทำการติดตั้งและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบันที่เป็นข้อมูลในแต่ละพื้นที่ ถ้าค่า pH มากกว่า 10 หรือเกิดการเคลื่อนไหวที่ต้องสังเกตการณ์ 8 ควรเลือกใช้ Plastic casing และเลือกใช้ Aluminum casing ในดินที่มีสภาพเป็นด่าง โดยจะต้องทำการป้องกันการเกิดสนิม
6. ความลึกของการติดตั้งในระดับลึกมาก จะนิยมใช้ aluminum casing ซึ่งถ้าเป็น plastic casing จะต้องระวังความเสียหายที่เกิดจากความดันที่เกิดจากการ grout ด้านนอกและแรง axial stress ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ในขั้นตอนการติดตั้ง
7. Plastic couple จะทำการปิดสนิทได้ง่ายกว่า ท่อชนิดอื่นโดย ถ้าเลือกใช้การ grout จะทำให้ท่อปิดสนิทได้ดี
8. ค่าใช้จ่ายที่จะใช้ในการเลือกชนิดของ casing

6.3.1.5 การติดตั้ง Inclinator casing

กระบวนการติดตั้ง ของ Inclinator casing การติดตั้งจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกโดยต้องมีการเลือกใช้ชนิดของ casing couple และข้อกำหนดของแต่ละ site กระบวนการอธิบายโดย AASHTO (1978), ISRM (1981a), Wilson and Mikkelsen (1977, 1978) และคู่มือการใช้งานจากบริษัทผู้ผลิตเมื่อทำการติดตั้ง Inclinator casing ร่วมกับ extensometer

6.3.1.6 ข้อกำหนดของ Couple

จะต้องมีความระมัดระวังทุกครั้ง ปิดรอยต่อของ couple และ bottom cap เพื่อป้องกันการรบกวนดินเนื่องจากการถมดิน couple แบบ O-rings ไม่จำเป็นต้องทำการ seal แต่ถ้าเป็น couple ชนิดอื่นจะต้องทำการ seal ด้วยยางหรือเทป และการยึดด้วย rivet เพื่อควบคุมแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัว การปิดด้วยยางหรือเทปจะทำการปิดที่หัวของ rivet โดยหัวของ rivet ต้องเรียบ rivet ที่ติดตั้งแต่ละตัว ส่วนใหญ่จะใช้ซีเมนต์ทำการปิด couple ที่เป็นพลาสติก และหาค่ากำลังรับแรงดึงเพื่อคำนวณหาความแข็งแรงของซีเมนต์ได้ เมื่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดต้องการในซีเมนต์ couple ที่ใช้ใน PVC หรือ ABS casing ควรผสม primer เพื่อให้มีการยึดเกาะที่ผิว การยึดด้วย rivet จะต้องทำการยึดโดยไม่ให้โดนกับร่องของ casing ต้องติดตั้งโดยเลี่ยงแนวทางเคลื่อนตัวของ inclinometer probe

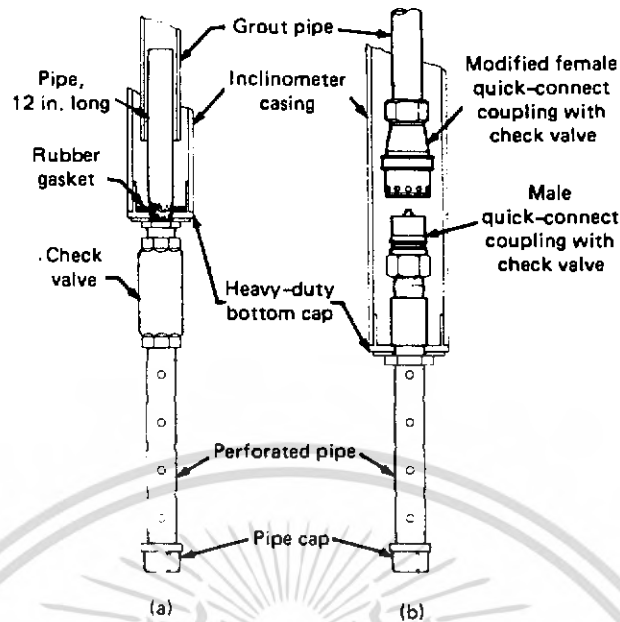
6.3.1.7 การติดตั้งในสนาม

Inclinometer casing ที่ติดตั้งในสนาม แล้วใช้ Inclinometer probe หย่อนลงใน Inclinometer casing จะสามารถตรวจสอบแรงอัด การทรุดตัวที่เกิดกับ casing ได้

6.3.1.8 การติดตั้งในหลุมเจาะ

ระยะระหว่างผนังของหลุมเจาะกับ Inclinometer casing จะต้องทำการ grout ด้วยทรายหรือกรวดขนาดเล็กเพื่อป้องกันการสูญเสียมวลดินรอบๆ

เมื่อถึงขั้นตอนที่จะต้องทำการ Grout จะทำการ grout ผ่านทางท่อที่แรกเข้าไปอยู่ข้างนอกของ Inclinometer casing ลักษณะการติดตั้งรูปที่ 3.7 สำหรับการติดตั้งในหลุมเจาะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก



รูปที่ 6.44. Arrangement for grouting through a pipe within inclinometer casing

- a) Single shutoff arrangement with gasket seal and
 - b) Double shutoff arrangement with quick-connect
- (Courtesy of slope indicator Company, Seattle, WA).

การติดตั้งในรูปที่ 6.44 จะใช้ท่อเหล็กหรือท่อหัวเจาะไม่เกิน 12 นิ้ว (300 มม.) ท่อยาว จะทำการปิดด้วยสลักยางแล้วจึงทำการ grout หลังจากทำการ grout ระหว่างหลุมเจาะกับ inclinometer casing แล้ว จะทำการวัดปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่จากการ grout หลังจากนั้นควรเลี้ยงที่จะ เปิด check valve อีก จะมี 2 วิธีที่ใช้หาแรงลอยตัวในขณะที่ทำการ grout และ ตรวจสอบให้แน่ใจว่า แนวของ casing ยังอยู่ในแนวตรง วิธีแรกสามารถรับรู้แรงที่กระทำที่ bottom cap วิธีที่สองคือน้ำหนัก ของท่อ grout ที่ใช้และหนักด้านบนของ inclinometer casing โดยวิธีที่สองจะนำมาใช้กับหลุมที่ลึก เพราะ bottom cap จะรับแรงมากกว่า ส่วนวิธีแรกจะใช้กับ inclinometer casing ที่ต่อกันด้วย couple

6.3.1.9 การติดตั้งในพื้นที่ที่มีค่าหมายว่าจะมีการเคลื่อนตัวมากใน Thin Shear Zone

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างใน Shear Zone ที่มีสาเหตุมาจากการเกิดโมเมนต์คดใน casing และมีค่ามากกว่าค่าที่จะรับได้ในพื้นที่นั้นๆ ถ้าการเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปตามที่ทำนายไว้ ควร เลือกใช้ casing ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่และ prove ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ จะช่วย ในงานหลุมเจาะขนาดใหญ่และมีดินถมอ่อน ในกรณีที่เกิดแรงเฉือนมาก แรงจะไม่กระจายตัวให้เห็นใน casing ที่มีขนาดใหญ่

เราสามารถบอกแนวโน้มการเคลื่อนตัวได้จากการแปลงค่าจาก slope extensometer การติดตั้งแบบยึดทางเดียวจะติดตั้งต่ำกว่าบริเวณที่เกิดแรงเฉือนส่วนใหญ่ จะทำการยึดที่ส่วนปลายด้านล่างของ casing และมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จะมีการหย่อน slope extensometer ร่วมกับการหย่อน inclinometer probe ทำให้ได้ค่าที่ต้องการได้

6.3.1.10 การติดตั้งบนเสาเข็ม

เมื่อมีการติดตั้งบนเสาเข็มที่เป็นทองเหลืองหรือเหล็ก จะสามารถที่จะติดตั้งได้ 2 กรณี คือ

1. ใช้ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม เชื่อมติดกับเสาเข็มโดยตรงตามแนวของเสาเข็ม และใช้เป็น Inclinometer Casing
2. ใช้ท่อเหล็กเชื่อมติดกับเสาเข็ม และบรรจุ Inclinometer casing ไว้ภายใน โดยทั้งสองวิธีนี้สามารถทำได้โดยการเจาะลงไปดินหลังจากทำการตอกเสาเข็มแล้ว

6.3.1.11 Calibration

Inclinometer สามารถนำกลับมายังโรงงานที่ผลิตเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ แต่การตรวจสอบตามตารางทำได้ไม่ค่อยสะดวกจึงใช้วิธีตรวจสอบในสนามแทน ซึ่งค่านี้สามารถใช้ในการอ้างอิงในสนามเท่านั้น แต่ไม่สามารถนำไปอ้างอิงกับการตรวจสอบของโรงงานผู้ผลิตได้ Probe จำเป็นต้องนำกลับไปยังโรงงานเพื่อตรวจสอบ และ Inclinometer ต้องทำการตรวจสอบในสนามเมื่อถึงเวลาที่กำหนด ถ้าปฏิบัติตามดังนี้ ก็ไม่จำเป็นต้องส่งไปตรวจสอบตามตารางที่โรงงานกำหนด

6.3.1.12 Near – Vertical Test Casing

ติดตั้งท่อทดสอบในสถานที่ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ หรือที่ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับสถานที่ในอุดมคติ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง) ถ้าการติดตั้งทำได้ไม่สะดวกสามารถฝังในบล็อกคอนกรีตขนาด 55 แกลลอน (208 ลิตร) ในชั้นหิน ท่อมาตรฐานจะมีขนาดความยาวเท่ากับ 4 ฟุต (12 เมตร) เริ่มติดตั้งท่อโดยท่อแรกติดตั้งในแนวตั้ง ส่วนท่ออื่นๆติดตั้งให้เอียงจากแนวตั้ง 10 และ 15 องศาตามลำดับ จากนั้นเริ่มอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิคงที่ โดยจะได้ค่าต่างๆ เช่น ตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของแต่ละล้อของทิศทาง A และทิศทาง B มุมที่เปลี่ยนไป และค่าเบี่ยงเบนจาก แนวโน้มเอียง เพื่อจัดเตรียมข้อมูลสำหรับระบบปรับค่าความถูกต้อง ส่วนรายละเอียดอื่นๆ อยู่ในคู่มือของบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.13 Test in Bottom of Near – Vertical Field Casing

ท่อที่ติดตั้งในสนามสามารถติดตั้งได้ที่มีความลึกระดับต่างๆ ตามข้อมูลที่ต้องการและต้องวางอยู่บนที่ที่มั่นคง เช่นที่ความลึกประมาณ 20 ถึง 30 เมตร จะวางอยู่บนชั้นดินแน่น จะไม่ย้ายเครื่องมือในช่วงที่ทำการสำรวจ โดยในการอ่านค่าจะอ่านในช่วงเวลาเดียวกันและในบริเวณเดียวกัน ส่วนขั้นตอนการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องของวิธีนี้จะน้อยกว่าวิธีก่อนหน้านี้

6.3.1.14 Test Stand

Test Stand จะทำการทดสอบโดยบริษัทผู้ผลิตเพื่อตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือ ลักษณะการทดสอบจะคล้ายกับการทดสอบก่อนหน้านี้ โดยหากต้องการความแม่นยำสูงต้องทดสอบในห้องทดลอง อย่างไรก็ตามยังมีทางเลือกให้สามารถทดสอบในสนามได้แต่ค่าความถูกต้องจะน้อยกว่าเมื่อเลือกใช้วิธีนี้สิ่งสำคัญก็คือ Test Stand จะต้องมีความเสถียรภาพทั้งขณะเตรียมการและขณะอ่านค่า

6.3.1.15 Checks on Inclinator for Use in Near – Horizontal Casing

เมื่อใช้ Probe ในการวัดความผิดปกติในแนวดิ่งโดยใช้การวางท่อในแนวราบสามารถทำการตรวจสอบได้เช่นเดียวกัน โดยในการทดสอบต้องการท่อทดสอบสองท่อ ท่อแรกให้ร่องเอียงไปในทิศตะวันออก 10 องศาในแนวดิ่ง ส่วนท่อที่สองให้เอียงไป 10 องศาในแนวราบ และในทิศตะวันออกของแนวดิ่ง

6.3.1.16 Check on Inclinator for in Inclined Casing

เมื่อ Probe ถูกใช้ในการวัดในท่อเอียงวิธีการตรวจสอบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่ง เมื่อใช้ Probe พิเศษร่วมกับการติดตั้ง Transducer ดังนั้นค่าของแกนจะเป็นค่าประมาณของแนวดิ่งเมื่อ Probe อยู่ในท่อเอียง เครื่องมือสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อติดตั้งท่อในแนวเอียง อย่างไรก็ตาม Probe ไม่สามารถหมุนได้ 180 องศา หรือ หมุนได้ครบรอบ ดังนั้นการตรวจสอบอาจมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าการตรวจสอบทั่วไป

6.3.1.17 Maintenance

Inclinometer Probe ควรได้รับการตรวจเช็คบ่อยๆ และหลังจากการใช้งานควรทำความสะอาดและเช็ดด้วยน้ำมัน สำหรับการติดตั้งเป็นระยะเวลานานอาจเกิดการสึกหรอของร่องท่อ ในเบื้องต้นควรทำความสะอาดท่อและท่อถ้ามีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปข้างใน ถ้าเป็นไปได้ควรทำความสะอาดโดยใช้น้ำล้างและใช้แปรงขัดทำความสะอาด

6.3.1.18 Data Collection

แม้จะมีการกำหนดขนาดท่อที่แน่นอนแต่ท่อที่ผลิตในแต่ละโรงงานไม่สามารถใช้แทนกันได้ ในด้านของความถูกต้องควรจะมีหลักการใช้ Probe แทนกัน แต่ในโครงการพิเศษการใช้ช่างคนเดียวและอุปกรณ์ชุดเดียว ได้รับผลที่ดีกว่า

6.3.1.19 Field Check on Inclinometer

การเก็บข้อมูลจะเก็บเป็นบางวัน การตรวจสอบในสนามควรทำให้แน่ใจว่าระบบการปฏิบัติงานถูกปรับปรุงโดยใช้หนึ่งในวิธีที่ได้อธิบายไปข้างต้น

1. หย่อน Probe ลงในท่อที่ความลึก 20 ฟุต (6 เมตร) จากระดับน้ำใต้ดิน
2. รอให้อุณหภูมิคงที่
3. อ่านค่า
4. ดึง Probe ขึ้นแล้วหมุน 180 องศา แล้วหย่อนลงในระดับเดิม
5. รอให้อุณหภูมิคงที่
6. อ่านค่าแล้วจดบันทึก

6.3.1.20 Measurement Method

Probe จะขีดแนวปลายท่อแนวตั้ง ปลายท่อเอียง หรือระยะหยุคของท่อแนวราบการวัดทำได้โดยการถือ Probe ในแต่ละความลึกภายในท่อ แล้วบันทึกค่าความลึกและค่าความโน้มเอียง ซึ่งค่าความแม่นยำสูงสุดสามารถอ่านได้ในช่วงที่เท่ากับระยะห่างระหว่างล้อ การอ่านค่าในท่อแนวตั้งโดยทั่วไปจะอ่านหน้าศูนย์ก่อนแล้วค่อยกลับด้านไปอ่านค่าหน้า 180 องศา และจะต้องทำการวัดค่า ณ สถานที่เดิม ถ้าใช้ Probe ที่อ่านค่าได้หน้าเดียวจะต้องหมุน Probe ไป 90 องศาเพื่ออ่านค่าอีกหน้าหนึ่ง โดยต้องทำทั้งหน้า 0 องศาและหน้า 180 องศาด้วย ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสามารถคำนวณได้เมื่อทำการอ่านค่าหน้า 180 องศาและได้ยืนยันข้อมูลในสนามไปแล้ว เมื่ออ่านค่าในท่อในแนวราบ check-sum

สามารถทำได้หลังจากอ่านค่าจบจากปลายถึงปลาย ส่วนการอ่านค่าในท่อเอียงเป็นไปได้ว่าแกนของ transducer อาจขกตัวขนานหรือตั้งฉากกับแกนของ Probe ได้แต่เป็นไปได้ที่จะขกตัวในแนวเอียง

6.3.1.21 Initial Reading

การวัดข้อมูลเบื้องต้นกับข้อมูลทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กัน เมื่ออ่านค่าเริ่มต้นจะถูกกำหนดและบันทึกเพื่อใช้กับข้อมูลที่ตามมาสำหรับ Inclinometer แบบสองหน้าจะใช้ทางด้านทิศตะวันออกของหน้า A

6.3.1.22 Reading within Telescoping Casing

Automatic Recording

แม้จะเพิ่มความเร็วในการเก็บข้อมูลแต่ค่าที่อ่านได้ จะขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของเครื่อง เมื่อใช้คนในการบันทึกข้อมูล เจ้าหน้าที่สามารถหาค่าความเปลี่ยนแปลงของ check-sum และทำการปรับแก้ได้ในทันที อย่างไรก็ตามการเก็บข้อมูลอัตโนมัติไม่อนุญาตให้ check-sum ในสนามและข้อมูลจะถูกตรวจสอบความผิดพลาด หลังจากเริ่มพิมพ์ข้อมูลในสำนักงานและเมื่อพบข้อผิดพลาดก็จะเกิดการสับสน

Data Processing

ขั้นตอนแรกของกระบวนการจะเริ่มจากการพิจารณา check-sum โดยขั้นตอนนี้จะทำขณะเดียวกันกับการแก้ไขข้อมูล check-sum จะถูกใช้ในการทดสอบหาความผิดพลาดของข้อมูล ในทางทฤษฎี check-sum จะคงที่ตลอดความลึกของชุดข้อมูล แต่ในความจริง check-sum จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ ลักษณะของท่อ เครื่องมือ และผู้ทำการเก็บข้อมูล คู่มือของบางบริษัทอาจแสดงขนาดของการเปลี่ยนแปลงของ check-sum เช่น สถานภาพของ check-sum จะอยู่ภายในช่วง ± 10 หรือ 20 หน่วยจากค่ากลางของ check-sum ของข้อมูล หลังจากการพิจารณา check-sum แล้วจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. ตรวจสอบค่าความแตกต่างของหน้า 180 องศา
2. หักลบค่าต่างของหน้า 180 องศากับข้อมูลเบื้องต้น
3. รวมค่าความแตกต่างของข้อมูลจากปลายด้านล่างถึงปลายด้านบน
4. รวมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกับค่าปรับแก้คงที่

Data Interpretation

วัตถุประสงค์ของการวัดโดยใช้ Inclinator คือ เพื่อระบุสถานที่ของการเปลี่ยนรูปและระยะ เวลาของการเปลี่ยนรูปร่างของโซนที่ได้กำหนดไว้ บ่อยครั้งที่โซนที่มีการทรุดตัวมีความหนาไม่มากและการทรุดตัวแทบจะเท่ากับระดับความลึกที่สำรวจ

Use of Inclinator Data to Estimate Bending Moment

โมเมนต์และความเค้นสามารถที่จะคำนวณย้อนกลับได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัดโดย Inclinator ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$M_x = \frac{d\theta_x}{dx} \cdot EI_x$$

เมื่อ θ_x = มุมที่วัดโดย Inclinator ที่หน้าตัด X

M_x = โมเมนต์ที่ หน้าตัด X

E = โมดูลัสยืดหยุ่น

I_x = โมเมนต์หน้าตัดที่หน้าตัด X

ข้อมูลที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อใช้กับท่อที่มีโครงสร้างยืดหยุ่นเช่น Steel Pile เพราะจะเกิดการเปลี่ยนที่เห็นได้ชัดและรู้ค่าของโมเมนต์หน้าตัด อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับโครงสร้างประกอบ เช่น reinforced concrete retaining wall , reinforced slurry wall , drilled shafts เพราะว่าค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมากและเนื่องจากเราไม่รู้ค่าโมเมนต์หน้าตัดที่แน่นอน นอกจากนี้พฤติกรรมของคอนกรีตนั้นไม่ยืดหยุ่นและดินในพื้นที่ทดสอบยังเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามระยะเวลา สำหรับโครงสร้างส่วนมากสามารถนำข้อมูลจากค่าที่อ่านได้จาก Inclinator นำมาประมาณค่าโมเมนต์ ซึ่งเราสามารถตรวจสอบได้โดยวัดค่าความเค้นภายในและวัดแรงภายนอก ตัวอย่างเช่นการวัดของ Sheet Pile Wall , Slurry Wall และ Cylinder Pile Wall ซึ่งอธิบายไว้โดย Gould และ Dunnicliff ในปี 1971 , Saxena 1974 และ Soaers 1983 เกี่ยวกับการวัด Slurry Wall

Transverse Deformation Gage

เกจวัดการเปลี่ยนรูปได้อธิบายไว้ดังในหนังสือคือ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในหลุมหรือท่อ เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงจากแกนของท่อหรือหลุม Inclinator ถูกจัดอยู่ในอุปกรณ์ประเภทนี้ เช่นกัน แต่จะมีการจำแนก ตัวอย่างการใช้งาน เช่นการประมาณความลึกและของเขตของโซนที่มีการเคลื่อนตัวในธรรมชาติ การกำหนด slope เมื่อทำการขุด slope หรือใช้วัดรูปแบบการเคลื่อนตัวแนวราบในเขื่อนและรอบๆอุโมงค์ เกจวัดการเปลี่ยนรูปแสดงถึง ระบายเนิน เส้นแนวตั้ง ตำแหน่งของ Inclometers และ Deflect meters

Shear Plane Indicators

การระบุระบายแรงเฉือนมีตั้งแต่วิธีที่มีราคาถูกคือ Rupture Stakes จนถึงวิธีที่มีราคาแพงคือ Slope Indicator

Rupture Stakes

ในดินอ่อนเสาไม้สามารถกดหรือดกให้ลึกได้ตามความต้องการในการทำนายระบายแรงเฉือน แรงเฉือนจะทำลายเสาไม้และความลึกของระบายแรงเฉือนสามารถทำนายได้โดยการดึงส่วนบนของแต่ละเสาขึ้นซึ่งเสาไม้ที่ใช้จะเป็นไม้เนื้ออ่อนหรือไม้เนื้อแข็งก็ได้แต่ต้องปราศจาก นอตหรือตะปู Eide และ Holmberg ทำการทดลองโดยใช้เสาไม้ที่มีขนาด 2 นิ้ว (50 มม.) เพราะเป็นช่วงที่เสาจะถูกทำลายอย่างแน่นอนใต้เสาไม้หลังจากติดตั้งท่อเหล็กโดยดันเสาไม้ลงตามท่อเหล็กจากนั้นดึงท่อเหล็กขึ้น โดยวิธีนี้จะค่อนข้างประหยัดถ้าทำการติดตั้งด้วยมือ แต่ถ้ามีการใช้เครื่องมือขุดเจาะตามที่กล่าวมาจะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงมากกว่า เพราะการทำด้วยมือมีความเสี่ยงที่เสาจะแตกเมื่อดึงขึ้นจากดิน ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จะถูกนำไปใช้ส่วนข้อมูลที่เกิดผลลาคส่วนน้อยสามารถละทิ้งไปได้

Shear Probe

ประกอบด้วยท่อพลาสติกหรือท่อ PVC หนึ่งข้างติดตั้งในหลุมสำรวจในแนวตั้ง ความลึกของ shear zone สามารถหาได้โดยหย่อนท่อนไม้ลงไปในหลุมแล้ววัดระยะจากปลายด้านบนจนถึงระยะที่ท่อนไม้หยุด ณ จุดที่ท่อนมีความโค้งที่สุด ส่วนระยะจากปลายด้านล่างของ Shear Zone สามารถวัดได้โดยใช้เชือกมัดท่อนไม้แล้วหย่อนลงไป วัดระยะที่ท่อนไม้หยุด รัศมีความโค้งสามารถหาได้จากการหย่อนชุดของท่อนไม้ที่มีความยาวต่างกันลงในท่อ รัศมีความโค้งหาได้โดย

$$R = \frac{L^2}{8(D_1 - D_2)}$$

โดย

R	=	รัศมีความโค้งของท่อ
D1	=	รัศมีภายในของท่อ
D2	=	รัศมีภายนอกของท่อนไม้
L	=	ความยาวของท่อนไม้

6.3.2 Extensometers

6.3.2.1 Probe Extensometers

เป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในงานดิน สามารถใช้ในงานทั่วไป ที่มีการทรุดตัวมาก การอ่านค่าได้จากสเก็ชภาพท่อที่บรรจุ Probe Extensometers ให้ค่าความละเอียด 1 มิลลิเมตร สามารถแบ่งได้เป็น

- Magnetic Extensometers
- Sondex
- USBR Settlement Probe & Telescoping Casing

Magnetic Extensometers สำหรับหา Profile การทรุดตัวในแนวดิ่ง

ข้อมูลจาก Magnetic Extensometers สามารถแสดงค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งพร้อมกันกับค่าการทรุดตัวรวมที่เกิดขึ้นทั้งหมด

Magnetic Extensometers ประกอบด้วย

1. จำนวน Magnet ที่อยู่ตลอดความยาวท่อ Magnet จะยึดติดกับกับดินรอบ ๆ และสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกับค่าการทรุดตัว
2. การอ่านค่าโดย จะอ่านค่าสุดเมื่อ probe อยู่ที่ก้นของท่อ ทำการสเก็ชภาพที่ความลึกแต่ละจุด Magnet เมื่อ Probe เข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กแล้ว ขอสวิตช์เพื่อให้แสงสว่างและสัญญาณไฟฟ้า แบ่งชนิดของการปล่อยสัญญาณ เป็น 2 ชนิด คือ

1. ปล่อยสัญญาณเป็นระยะใกล้ๆ ในกรณีทั่วไป
2. ปล่อยสัญญาณในจุดที่จะพิจารณาเป็นกรณีพิเศษ

การแปลงค่าโดยอ้างอิง จากเทปวัดของ Survey เทียบกับ ระยะความลึกที่บันทึกไว้จาก Magnet หลังจากทำการยึดท่อในดินที่มั่นคงแล้ว ความลึกของแต่ละ Magnet ทำการติดตั้งจุดอ้างอิงไว้ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 427 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

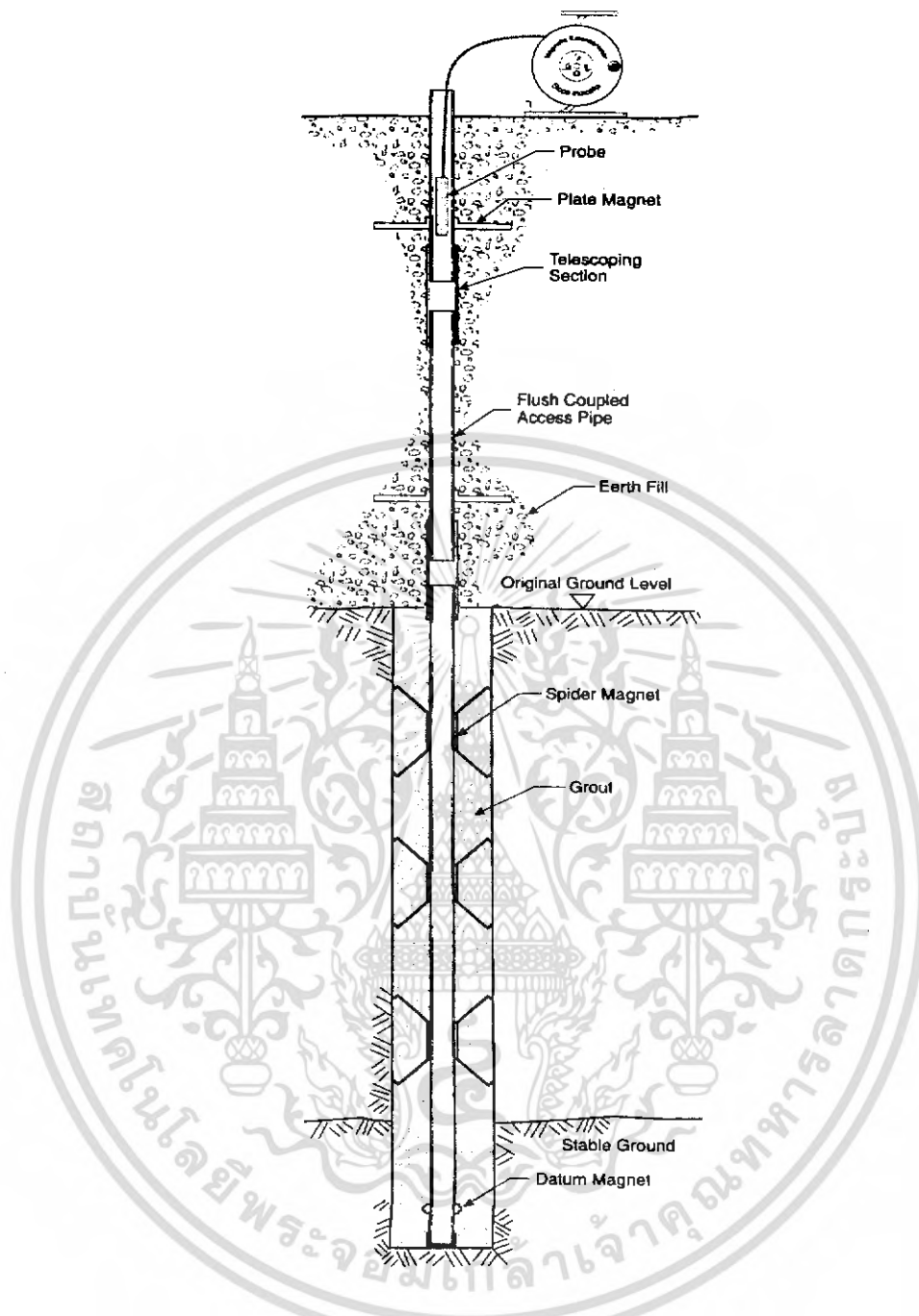
ด้านล่างของท่อเรียกว่า “datum magnet” การทวัดตัวหรือขกตัวสามารถคำนวณได้โดยการเปรียบเทียบกับ Magnet อ้างอิง เป็น Initial depth

ประโยชน์

1. การวัดหลายจุดค่าที่หาได้จะยังไม่ใช้การทวัดตัวรวมแต่จะเป็น Inclinator ในแต่ละจุด magnet
2. การวัดทาง survey ไม่จำเป็นต้องใช้ ถ้ากันทวัดติดแน่นในดินที่มั่นคง
3. ราคาไม่แพง
4. การอ่านค่าง่าย
5. สามารถใช้งานร่วมกัน Inclinator

ข้อจำกัดการใช้งาน

1. ต้องใช้คนใน Site งานเป็นอยู่ควบคุม

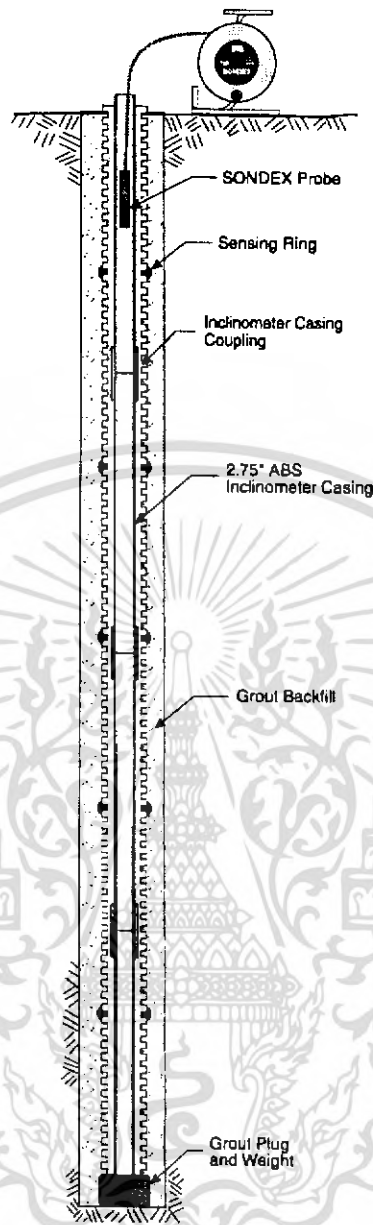


รูปที่ 6.45. Magnetic Extensometers

Sondex ใช้สำหรับการหา Profile การทรุดตัวในแนวดิ่ง

ข้อมูลจาก Sondex สามารถแสดงระดับการทรุดตัว พร้อมกับค่าการทรุดตัวรวม
ทั้งหมดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.46. Sondex

Sondex ประกอบด้วย probe ที่ติดกับเคเบิลหรือเทปเหล็ก ม้วนสายเคเบิลที่ต่อกับ
โวลต์มิเตอร์ และแหวนสแตนเลสสตีล ที่เป็นตัวเซ็นเซอร์ติดตั้งอยู่เป็นระยะภายในท่อ ในกรณีดินอ่อน
แหวนจะถูกยึดติดกับท่อพลาสติกที่มีลักษณะขุ่น “Corrugate pipe” และติดตั้งท่อที่บรรจุ probe
“access pipe” ไว้ใน corrugate pipe โดยจะติดตั้ง “access pipe” ไว้ตลอดความยาวท่อ โดยที่
sensor ที่ติดตั้งจะสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ในดินที่มีลักษณะแข็งขึ้น sensor จะสามารถติดกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 430 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อพลาสติกได้โดยตรง จะทำการ Operate ค่าโดยการสแกนภาพของ Probe ที่เคลื่อนที่ผ่านท่อ เครื่องมือวัดจะทำการประมวลผลแบบอัตโนมัติ เมื่อ coil ของ probe อยู่ในระดับเดียวกับ sensor ของ ring จะอ้างอิงจากจุดที่ทำไว้บนเคเบิล จากเทปวัดระยะหรือบันทึกจากระดับความลึกของแต่ละ ring ข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการวัดได้

ประโยชน์

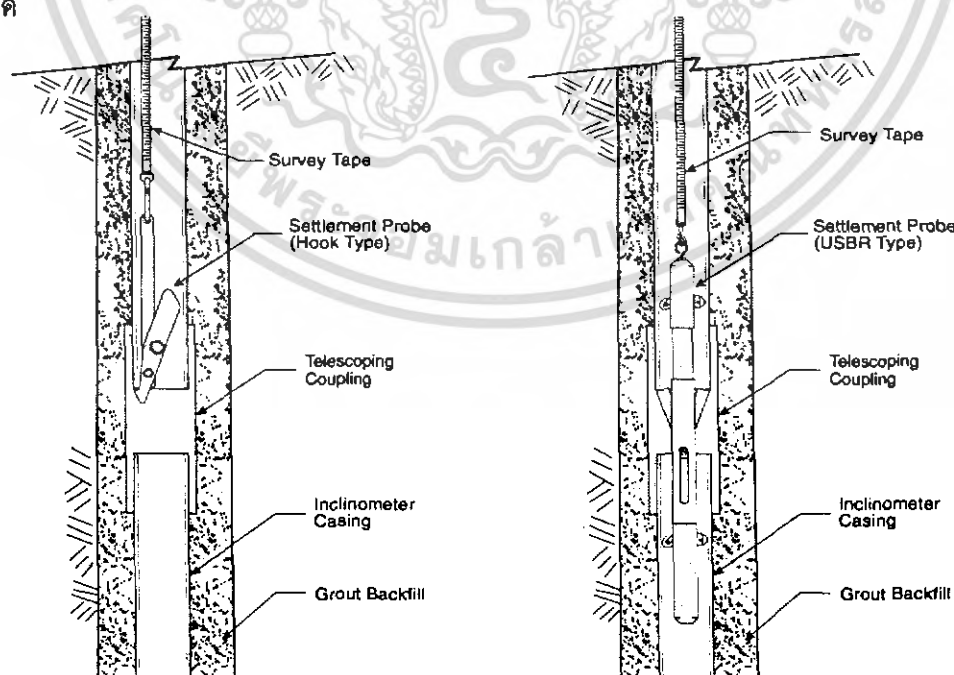
1. ในการวัดหลายจุดค่าที่หาได้จะยังไม่ใช้การหาค่ารวมแต่จะเป็น Inclinator ในแต่ละจุด magnet
2. การวัดทาง Survey ไม่จำเป็นต้องใช้ ถ้ากันท่อยึดติดแน่นในดินที่มั่นคง
3. สามารถใช้งานร่วมกับ Inclinator

ข้อจำกัดการใช้งาน

1. ต้องใช้คนใน Site งานเป็นอยู่ควบคุม
2. ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการอ่านค่า
3. การติดตั้งทำได้ยาก

Settlement probe สำหรับการหา profile ในแนวดิ่ง

ข้อมูลจาก Sondex สามารถแสดงระดับการทรุดตัว พร้อมกับค่าการทรุดตัวรวมทั้งหมดได้



รูปที่ 6.47. แสดง Settlement probe ชนิด Hook type และ USBR type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Settlement probe สามารถนำไปใช้งานร่วมกับ Inclinator casing โดย Probe จะถูกติดตั้งกับแท่งเหล็กวัดระยะ ที่มีขนาดยาวเท่ากับขนาดยาวท่อ ข้อต่อของท่อต้องให้ แขนของ probe สามารถเคลื่อนผ่านไปได้ โดย แขนของ probe จะมีขนาดความกว้างเท่ากับหน้าตัดของ casing

การอ่านค่าสามารถอ่านได้จากแท่งวัดระยะ การปล่อยแขนของ probe จนถึงปลายล่างสุด เมื่อ Probe เคลื่อนที่ถึงปลายท่อแล้ว จะสามารถล็อกแขนของ Probe กับท่อได้

ถ้าปลายล่างสุดของ Casing มีความมั่นคงจะสามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงได้ หรืออ่านค่าจากการใช้ปลายด้านบนเป็นจุดอ้างอิง การหาค่าสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้นั้นกับเอาไว้ กับข้อมูลที่ทำการวัดได้

ประโยชน์

1. Settlement probe แบบ Hook type มีราคาไม่แพง
2. สามารถแสดง profile ได้ หลายจุด

ข้อจำกัดการใช้งาน

1. ต้องทำการติดตั้ง Inclinator casing
2. ต้องใช้คนใน Site งานเป็นอยู่ควบคุม
3. Settlement probe แบบ USBR type มีราคาแพง
4. การอ่านค่ายาก

6.3.2.2 Rod Extensometers

สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- Borros Point
- Tensioned-Rod Extensometers
- Untensioned-Rod Extensometers

Borros point Extensometers สามารถเคลื่อนที่ไปได้ในดินอ่อน และผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าได้จากการใช้เครื่องมือทางด้าน surveying ที่มีคุณภาพ

Tensioned-rod และ Untensioned-rod สามารถใช้ได้ทั้งในงานดินและงานหิน เนื่องจากเครื่องมือมีขนาดเล็กกว่า โดยทั่วไปมีขนาด 100-150 มิลลิเมตร และสามารถหาค่าได้ถึงหน่วยไมโคร-มิลลิเมตร

Borros Point

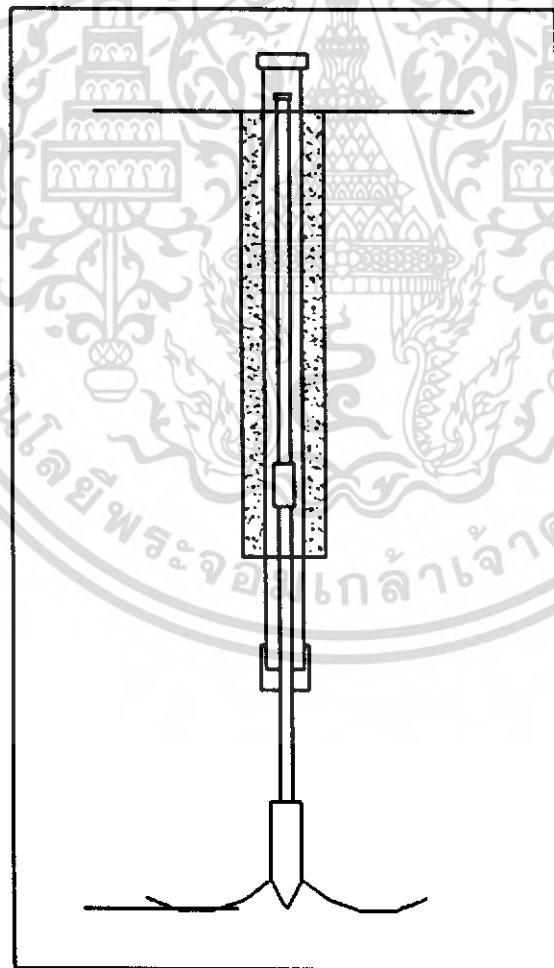
Borros Point ประกอบด้วย สมอสามขา ท่อภายในขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว ท่อภายนอกขนาด 1 นิ้ว ซึ่งทำจากเหล็ก ตัวสมอจะแนบกับท่อภายใน และจะเคลื่อนที่ได้โดยอิสระภายในที่ภายนอกขนาด 1 นิ้ว

ประโยชน์

1. การติดตั้งที่ง่าย และราคาถูก
2. มีความน่าเชื่อถือ

ข้อจำกัดการใช้งาน

1. ใช้ในดินอ่อนเท่านั้น
2. ถูกรบกวนจากสถานที่ปฏิบัติงาน

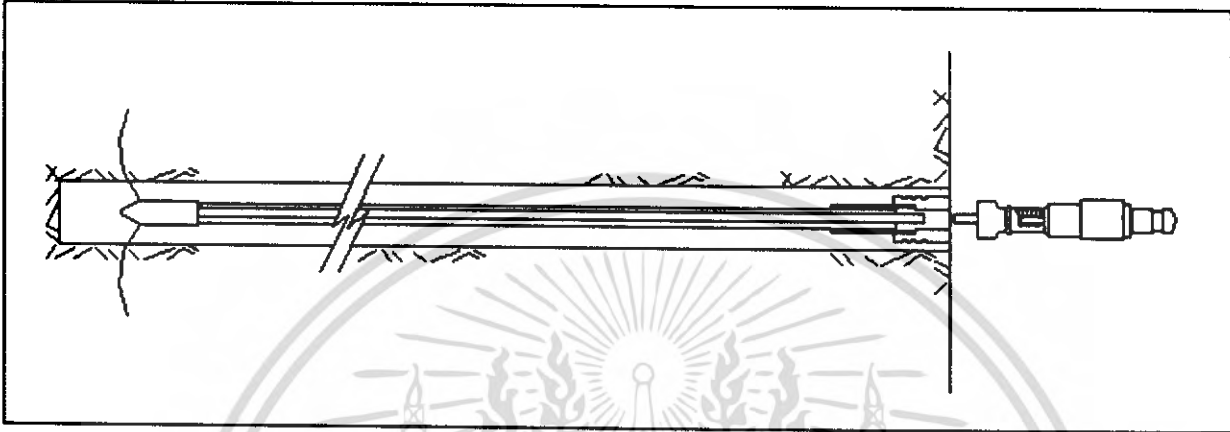


รูปที่ 6.48. Borehole Extensometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tensioned and Untensioned Rod Extensometer

Rod Extensometer ใช้สำหรับติดตามการเคลื่อนตัวของดินหรือหิน ตามแนวแกนของหลุม



รูปที่ 6.49. Tensioned and Untensioned Rod Extensometer

A Single - Point Rod Extensometer

ประกอบด้วย สมอสามขา, หัวอ้างอิง, Rod สมอจะแนบกับ Rod และติดตั้งไว้กับหลุม หัวอ้างอิง จะติดตั้งที่ปลอกของหลุม ความยาวของ Rod จะวัดตั้งแต่สมอถึงหัวอ้างอิง ระยะที่เปลี่ยนไปบ่งบอกถึงการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้น การวัดจะสังเกตที่หัวอ้างอิงอาจวัดโดย Micrometer หรือ Electronic Sensor และใช้สำหรับคำนวณหาขนาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะการเคลื่อนตัวเมื่อหัวอ้างอิงหรือสมอตั้งอยู่ในที่อ้างอิงที่ชัดเจนแล้ว ระยะการเคลื่อนตัวสามารถทำนายได้

A Multi - Point Rod Extensometer

ประกอบด้วย สมอสามขา 6 ตัว, Rod หลายตัว และ 1 หัวอ้างอิง สมอจะติดตั้งในระยะใกล้กันในขอบเขตที่ต่างกัน การวัดจะสังเกตที่หัวอ้างอิง อาจวัดโดย Micrometer หรือ Electronic Sensor ข้อมูลของ Multi - Point Rod Extensometer สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวระหว่างสมอแต่ละตัว และการกระจายตัว นอกจาก ขนาด อัตราของระยะการเคลื่อนตัว

Tension Rod - Extensometer

Tension Rod - Extensometer ใช้ในหลุมที่มีความลึกมาก ในการติดตั้งแรงเสียดทานระหว่าง Rod กับท่อป้องกันจะกลายเป็นแฟกเตอร์ซึ่งสามารถเกิดโมเมนต์ที่เกิดขึ้น อุปกรณ์ในหัวอ้างอิงจะช่วยรักษาให้ Rod อยู่ภายใต้แรงดึง ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากแรงเสียดทานได้

ประโยชน์

1. ใช้งานได้ในทุกทิศทางจากแนวตั้งสู่แนวราบ
2. ทำงานได้ดีทั้งการรับแรงดึงและแรงอัด

ข้อจำกัดการใช้

1. ราคาสูง
2. ติดตั้งยาก
3. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวราบมีผลกระทบกับค่าที่อ่านได้

UnTension Rod - Extensometer

จะไม่มีแรงดึงในอุปกรณ์

ประโยชน์

1. ราคาถูก
2. ติดตั้งง่าย

ข้อจำกัดการใช้

1. ใช้กับ Rod ที่มีความยาว 30 เมตร (Fiberglass) หรือ 50 เมตร (Steel) ชกเว้นเมื่อ Rod เคลื่อนออกจากสมอ (เมื่อทำมุมกับปากหลุมเกิน 45 องศา)

6.3.2.3 Rod Material

Tension Rod

เป็น Fiberglass หรือ Aluminum ซึ่งการติดตั้งจะคล้ายกันแต่ Fiberglass จะไม่มีปัญหาการกัดกร่อน

UnTension Rod

เป็น Stainless steel หรือ Fiberglass Stainless steel Rod จะติดตั้งยาว 10 ฟุต และจะต้องใช้ความระมัดระวังมากในการติดตั้ง Steel Rod จะถูกใช้มากกว่าในงานที่ต้องรับแรงอัด แต่จะมี

ความยากลำบากในการติดตั้งในพื้นที่ควบคุม เช่น อุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก Fiberglass Rod จะติดตั้งตลอดความยาวและต้องการช่องว่างเล็กน้อยในการติดตั้ง

6.3.2.4 Anchors

Groutable Anchor

การติดตั้งทำได้ง่าย ป้องกันการซึมน้ำผ่านหลุมเหมาะสำหรับการติดตามผลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานต้องการเครื่องมือในการ Grouting ความแข็งแรงของการ Grouting จะเท่ากับกำลังของดินรอบๆ ถ้าการ Grout สมบูรณ์อาจเกิดการพังที่ผิวหน้าระหว่างสองส่วน การ Grout จะต้องสามารถให้ สมอเคลื่อนที่ไปรอบอุโมงค์ได้ บางครั้งจะใช้ Styrofoam ใส่ลงในหลุมเพื่อให้แน่ใจว่าสมอสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่จะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ถ้าดินมีรอยแยกหรือมีโพรง

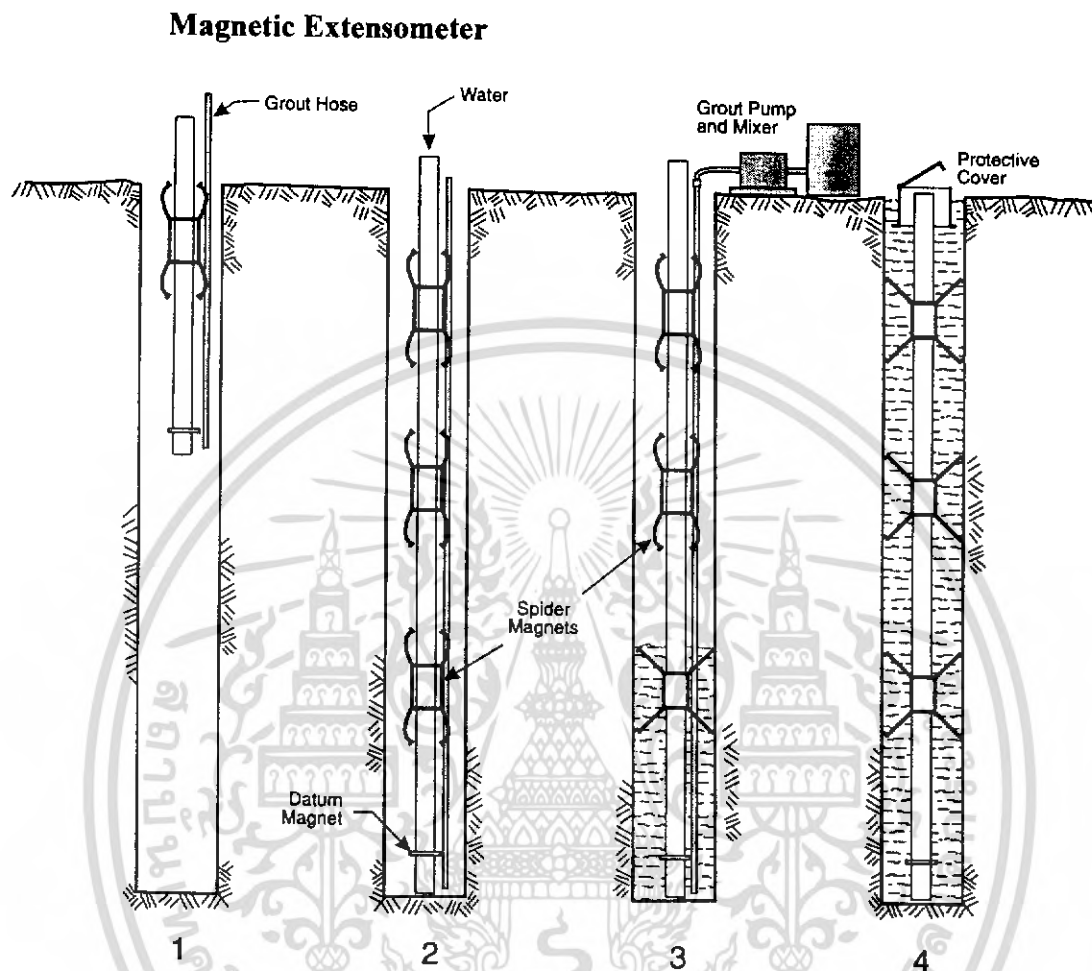
Hydraulic Anchor

bladder type ถูกใช้สำหรับหินหลายชนิดและยังสามารถใช้กับคอนกรีตได้อีกด้วย เมื่อ bladder ซึ่งเป็นแม่แรงขดลวดทองแดงถูกกระตุ้นขดลวดจะคลายตัวแล้วเกิดแรงกดกระทำต่อผนังของหลุม ส่วน prong type ใช้ในงานดินเป็นส่วนมาก เมื่อมันถูกกระตุ้นขาของสมอจะกางขยายออกสู่ดินภายนอก สมอแบบ single – acting จะมีขา 3 ขา และสมอแบบ double – acting จะมีขา 6 ขา ซึ่งจะใช้ได้ดีกว่าในหลุมที่มีความลึกมากหรือประยุกต์ใช้งานในภาวะวิกฤต ทั้ง bladder และ prong สามารถ grout เพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าหลุมได้ สมอ Hydraulic มีราคาแพงกว่า สมอแบบ grout จะใช้สำหรับงานที่ไม่มีเวลาพอที่จะใช้สมอแบบ grout ดังนั้น Extensometer จะพร้อมใช้งานทันทีที่สมอถูกกระตุ้น สมอแบบ Hydraulic จะใช้เมื่อสภาพงานไม่เหมาะที่จะสมที่จะใช้การ grout หรือหินที่มีรอยร้าวมาก

Mechanical Anchor

จะใช้กับ Rod ที่มีขนาดสั้น ใช้กับหินที่คุณภาพดี โดยปลอกจะขยายตัวออกเมื่อถูกกระตุ้นโดย อัตราโมเมนต์จาก bolt ของอุโมงค์ Rod สามารถถอดออกเพื่อนำมาติดตั้งและใช้งานใหม่ได้ ระบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับการ grout เนื่องจาก Rod ไม่ได้ถูกหุ้มห่อไว้ในกระบอกป้องกัน

6.3.2.5 กระบวนการติดตั้ง Probe Extensometer

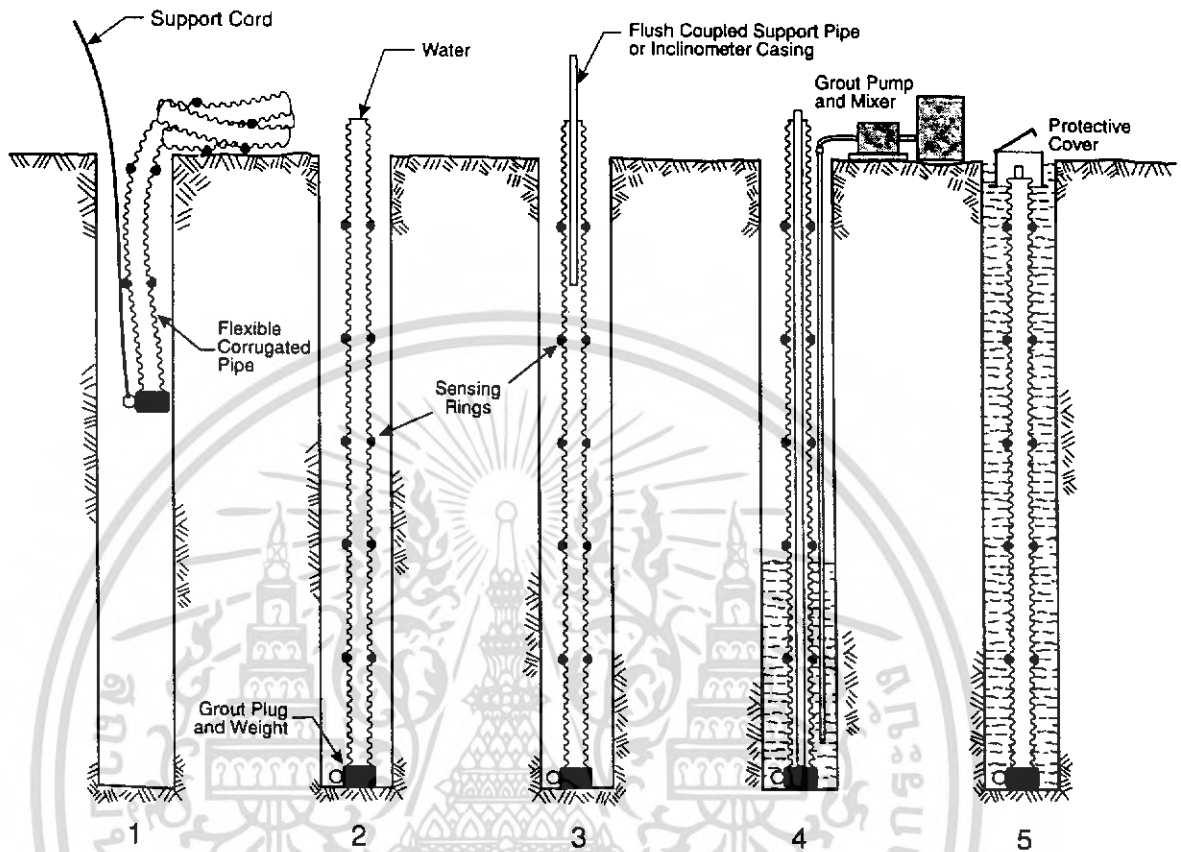


รูปที่ 6.50. แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Magnetic Extensometer

1. ทำความสะอาดหลุมเจาะความสะอาด ทำการติดตั้ง Datum Magnet โดยให้ติดตั้งอยู่กับข้างใต้ของท่อ จากนั้นทำการติดตั้งท่อตัวอื่นพร้อมกับติดตั้ง Spider Magnets เข้ากับแต่ละท่อน ทำสัญลักษณ์กับเชือก ขดลวดและสายเทปกับท่อ เพื่อง่ายต่อการตรวจสอบระยะ
2. ประกอบ Grout Hose เข้ากับข้างใต้ของท่อทางด้านล่างสุดของหลุมเจาะบอกกับการติดตั้งท่อ ต่อๆ ไปทำการเชื่อมรอยต่อของท่อ ระมัดระวังข้อต่อที่จะหลุดออกจากขาของ Magnet ดังนั้นจึงต้องดันท่อข้างในหลุมเจาะไว้ ประกอบท่อให้ได้ตำแหน่งการพร้อมกับการตรวจสอบความลึก
3. เริ่มขั้นตอนการกราน การติดตั้งวิธีนี้จะทำให้สารกรานมีระดับที่สูงเนื่องจากมีขาที่สามารถขยายได้ การติดตั้งท่อ Casing แบบการเจาะด้วยสว่าน ในขั้นตอนการติดตั้งท่อภายในหลุมจะยังไม่มีกรขยายขาที่ติดกับ Casing จนกระทั่งสารกรานเต็มส่วนที่เป็นขาที่ใช้ยึดท่อ Casing
4. เมื่อติดตั้งเสร็จแล้วควรจะให้ท่อควรอยู่สูงกว่าระดับผิวดินเพื่อที่จะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

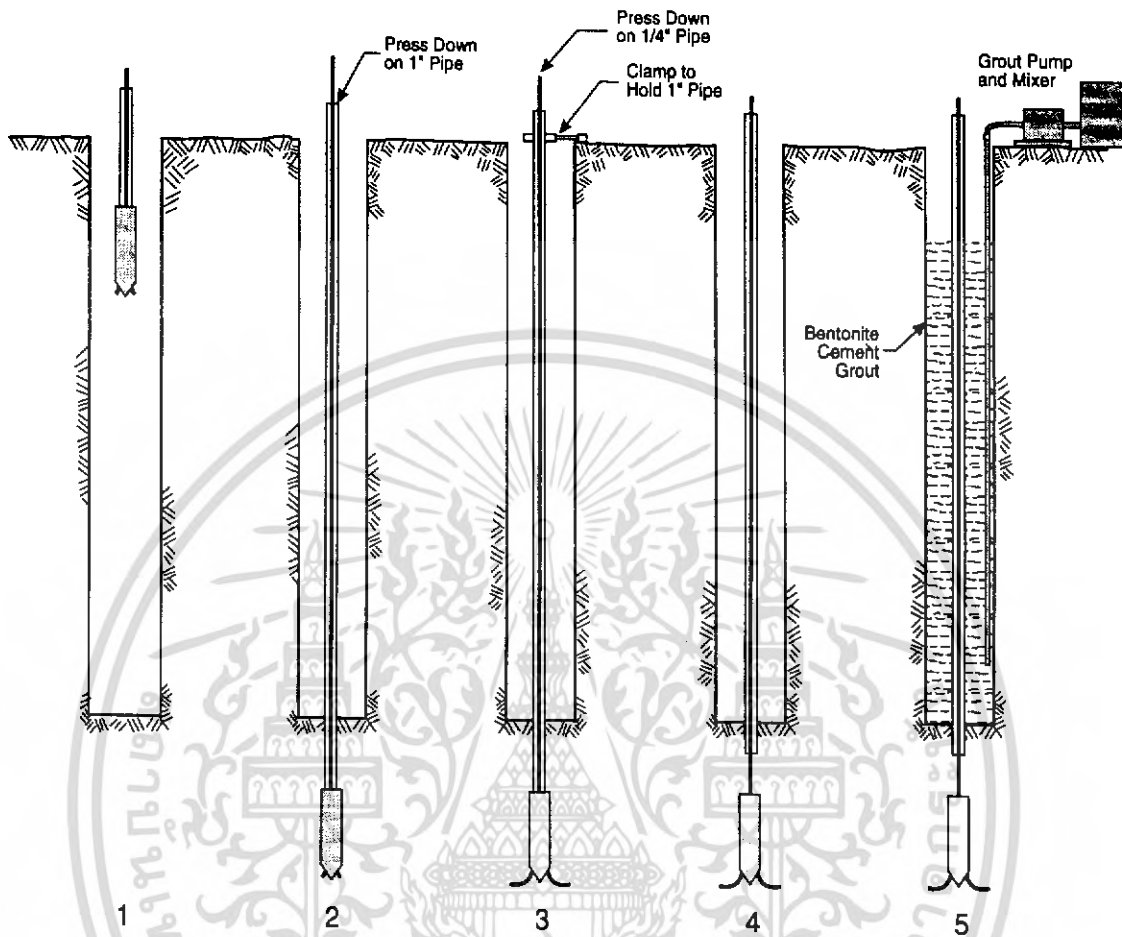
Sondex



รูปที่ 6.51. แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Sondex

1. การติดตั้งตัวเสียบและน้ำหนักที่ใช้ในการกดทับเพื่อป้องกันท่อ Corrugated ลอยตัวและเพื่อให้ถูกต้องตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ ทำความสะอาดหลุม ติดตั้งสายลวดเข้ากับห่วงเพื่อที่ใช้เป็นตัวที่ส่งต่อไปยังทางด้านล่างของหลุม และในหลุมเจาะอาจมีน้ำอยู่หลุมเจาะ จึงอาจเกิดแรงดันของน้ำเข้าไปในท่อเพื่อที่จะให้ท่อเข้าสู่สภาพที่ปกติ โดยต้องมั่นใจว่าน้ำเต็มท่อแล้ว จากนั้นปลดลวดออกจากห่วง
2. สามารถติดตั้งท่อ Access หรือท่อ Inclinometer เข้าด้วยกันในท่อ Corrugate ได้ ในการติดตั้งท่อนี้ภายในหลุมเจาะจะต้องไม่มีเศษวัสดุใดตกลงไปอยู่ภายในท่อได้
3. ตรวจสอบความถูกต้องของการติดตั้งจากข้างบนของหลุมเจาะ จากนั้นทำการปิดปากหลุมและในขั้นตอนการเกรานี้ห้ามให้น้ำปนเข้าไปภายในท่อ Corrugate โดยอย่างเด็ดขาด
4. เมื่อติดตั้งเสร็จแล้วควรจะให้ท่อควมอยู่สูงกว่าระดับผิวดินเพื่อที่จะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

Heave-Settlement Points



รูปที่ 6.52. แสดงการติดตั้ง Extensometer โดยวิธี Heave-Settlement Points

1. ในการขุดเจาะหลุมที่ใช้ทำการทดลองนี้จะขุดหลุมที่มีความลึกที่ต่ำกว่าความลึกของสมอ ทำความสะอาดหลุมเจาะให้สะอาด ใส่ลวดโดยการทาน้ำมันบริเวณรอบนอกของท่อ จากนั้นจึงสวมเส้นลวดเข้าไปในท่อแล้ว ทำการต่อเข้ากับสมอยึดการที่ลวดมีความลื่น จึงสามารถเลื่อนได้ลวดออกจากสมอได้ง่าย จากบริเวณด้านล่างของท่อจะมีลวดทางด้านซ้ายโดยจะไม่ไ้ดึงออกจากท่อ จนกว่าจะให้ลวดโผล่พ้นออกจากสมอ
2. สลักที่ติดตั้งทางด้านล่างของหลุมเจาะและการต่อของท่อทั้งสองเข้าด้วยกัน จะมีความสำคัญ เมื่อสลักติดตั้งได้ถึงบริเวณที่ได้ออกแบบไว้จะดันสมอที่เป็นลวดออกมาเพื่อยึดเป็นสมอ
3. ยึดตัวของท่อทางข้างบนหลุมเจาะ จากนั้นให้ดันลวดโดยให้มีความยาวประมาณ 180 ซม. จากสมอ โดยจะเปรียบเสมือนสมอที่เป็นง่ามออกมาโดยอาจจะมีหินหรือเศษต่างๆ ที่อยู่บริเวณรอบของหลุมเจาะจะทำให้การทำงานจะยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการถอดท่อออกจากสมอ โดยหมุนออกประมาณ 15 รอบ แล้วดึงท่อขึ้นจากสมอ โดยให้ระยะทางให้มากที่สุดเพื่อที่จะเป็นการลดผลการทับที่อาจเกิดจากการทรุดตัวและการบวมตัว
5. ทำการปิดปากหลุมโดยกำหนดให้มีให้มีหินหรือเศษวัสดุต่าง ๆ เข้าไปในท่อหรือข้างนอกของท่อ

6.3.2.6 การติดตั้ง Rod Extensometer

Rod Extensometer

การควบคุมกระบวนการติดตั้งจะประกอบไปด้วย

Boreholes

ในกระบวนการติดตั้ง เต้นผ่านศูนย์กลางที่ได้ออกแบบไว้ของ Rod Extensometer จะมีค่ามากที่สุดในการเจาะหลุมอยู่ที่ 75 – 83 mm (3.0 – 3.25 นิ้ว) โดยจะมีการใช้แหวนยึดที่มีขนาดที่ใหญ่กว่ายึดบริเวณด้านบนที่ปากหลุม โดยหลุมอาจจะเป็นหลุมที่เป็นการระบายน้ำอย่างอิสระโดยหลุมเจาะจะต้องมีความสะอาดและจะต้องกำจัดเศษขยะออกก่อนทำการติดตั้ง โดยอาจจะมีการเจาะแบบอื่นอีกเช่น Diamond และ Percussive

การวัดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้เครื่องมือ Extensometer โดยการสำรวจจะต้องกำหนดทิศทางของการเคลื่อนตัวของดินให้ถูกต้อง เนื่องจากเครื่องมือจะมีความสามารถในการวัดได้เพียงแกนเดียว ยกตัวอย่าง การวัดการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยการติดตั้ง Extensometer ในทิศทางตั้งฉากกับผนังของอุโมงค์ การวัดบริเวณมีความผิดปกติโดยสามารถแบ่งแยกออกเป็นบริเวณที่มีผลกระทบหรือไม่มีผลกระทบ และในบริเวณที่มีแรงเสียดทานของดินจะทำให้การวัดการเคลื่อนตัวของดินมีมุมที่วัดได้จะแคบลง

ระยะห่างของสลักจะมีข้อกำหนดโดยแฟกเตอร์ของดินและขนาดเรขาคณิตของเครื่องมือ พื้นที่ที่มีดินที่มีลักษณะดินที่มีความอ่อน การขุดเจาะจะใช้หัวเจาะแบบ Diamond และควรจัดสลักมีช่องว่างให้เหมาะสมกับสภาพของพื้นที่ของดินนั้น ๆ

ตำแหน่งของการติดตั้งสลักควรเลือกดินที่มีความเสถียรภาพ จากการเคลื่อนตัวของดิน โดยจะต้องมีความสัมพันธ์กันระหว่างการเคลื่อนตัวของดินและสลัก ยกตัวอย่าง การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์โดยจะมีการฝังสลักในความลึกที่มาก โดยการสูญเสียมวลดินจะเกิดที่บริเวณทางด้านหน้าของหัวเจาะ

สลักเกลียวของ Rod (Twisting of Rods)

จะไม่ทำเกลียวในระหว่างการติดตั้งเนื่องจากสลักของ Rod จะช่วยในการบอกถึงความสัมพันธ์ต่างๆ โดยจะระบุเป็นสปีริวเวอร์รอบ ๆ ของหลุมเจาะ

สารเกรน (Grouting)

ความถ่วงจำเพาะของสารเกรนจะใช้การผสมซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ไม่เกิด 1:1 โดยอาจจะมีการใช้ปัมเพื่อให้สะดวกในการเท โดยที่ท่อที่ใช้ลำเลียงสารเกรนจะมีท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก โดยปกติแล้วจะไม่ต้องการอุปกรณ์อื่น ๆ อีก ในการเกรนจำเป็นต้องมีการควบคุมความดันของสารเกรนเพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดตัว โดยการใส่ปลอกหุ้มเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะส่ง ผลต่อ Extensometer เมื่อความยาวของท่อโพสิเออร์ที่ลื่นมีความยาวที่มากขึ้น จะทำให้การลำเลียงสารเกรนได้ยากลำบากมากขึ้น จึงจำเป็นต้องลดขนาดของท่อลำเลียงให้มีขนาดเล็กลง และจะส่งผลทำให้แรงเสียดทานมีค่าที่น้อยลงตามไปด้วย

Grouting Down-Holes

ท่อของสารเกรนที่เป็นลักษณะเส้นเคียว จะสามารถใช้งานกับหลุมที่มีลักษณะแนวตั้งและแนวเอียง เทปที่ติดที่บริเวณส่วนล่างของท่อจะเป็นตัวที่จะช่วยป้องกันแรงดันของสารเกรนจะไปทำลายดินที่อยู่ทางด้านล่างของสลัก ดังนั้นการติดตั้งท่อจะติดอยู่ข้างใน ส่วนท่ออีกชั้นหนึ่งติดตั้งเพื่อป้องกันผลกระทบต่างๆ ที่จะเกิดกับท่อในบางครั้งในการป้องกันอาจจะติดตั้งท่อป้องกันเพียงท่อเดียวตลอดของ ความยาวของท่อ Extensometer ก็ได้ อุปสรรคในการที่หลุมเจาะมีความยาวที่มากคือการที่ต้องดึงสายของสารเกรนที่มีความยาวมากขึ้น เนื่องจากจะต้องดึงสายขึ้นมาตามระดับที่เพิ่มขึ้นของระดับสารเกรนในหลุมเจาะ

Grouting Up-Holes

1. เทปพันท่อนส่วนแรกจะเป็นการป้องกันดินในส่วนที่ความลึกที่มากกว่าความลึกสลัก ซึ่งจะมีผลกระทบบริเวณทางก้นของท่อ เทปพันท่อในส่วนที่สองจะป้องกันในส่วนที่อยู่บริเวณของสลัก และเทปที่พันในส่วนที่ 3 จะเป็นการป้องกันจากระยะจากปลอกของท่อประมาณ 2 – 3 เมตร
2. ในการติดตั้ง Extensometer และท่อภายในหลุมเจาะ จะมีการใช้ซีเมนต์ที่มีความเร็วในการแข็งตัว โดยที่หลุมเจาะนั้นจะต้องทำให้หลุมเจาะนั้นชุ่มน้ำ และจะมีการใช้ปัมฉีดสารเกรนลงในหลุมโดยสายของท่อนั้นจะมีความยาวที่ยาวกว่าหลุมเจาะ และในการติดตั้งจะต้องอยู่ในระยะเวลาที่ยอมให้สารเกรนแข็งตัว

3. สารเกสรที่ใช้ป้อนเข้าไปในหลุมเจาะจะใช้ประโยชน์เมื่อทอมีความยาวมาก ๆ การทำงานของสารเกสรจะสมบูรณ์ได้จะต้องให้สารเกสรออกจากท่อบริเวณท้ายของทอ และมีการพันทอเพื่อไม่ให้ไปสัมผัสกับลวดที่อยู่ข้าง ๆ

6.3.2.7 ข้อควรพิจารณาอื่น ๆ (Other Consideration)

ปัญหาปกติของ Extensometer ที่ทำให้ระบบทางกลศาสตร์ของเครื่องมือมีความเสียหาย ยกตัวอย่างเช่น หน้าปัดแสดงผล สายเคเบิลส่งสัญญาณ สายเชื่อมต่อสัญญาณ ความชื้นและเศษที่ติดอยู่กับสายเคเบิลส่งสัญญาณหรือหน้าปัดแสดงผล ซึ่งปัญหาเรื่องความชื้นที่จะส่งผลทำให้เกิดเป็นน้ำแข็งเข้าไปมีผลกระทบต่อการปฏิบัติงาน วิธีการป้องกันโดยการใช้ฝาปิดบริเวณที่อยู่ด้านบนของทอที่ใช้หย่อน



บทที่ 7

การออกแบบผนังอุโมงค์

7.1 ผนังอุโมงค์

7.1.1 หน้าที่ของผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ (Lining) จะถูกพิจารณาให้ปลอดภัย และโครงสร้างต้องต้านทานแรงจากพื้นดิน และแรงดันที่กระทำโดยน้ำ และน้ำหนักต่างๆจากดินโดยรอบ เพื่อที่จะพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนภายในอุโมงค์ และพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานของอุโมงค์ และเงื่อนไขในการก่อสร้าง

หลักสำคัญของผนังอุโมงค์ (Lining) มี 3 ข้อ

1. เพื่อจะทนทานต่อภาระการ โหลด บนอุโมงค์ต่างเพียงพอและต่างปลอดภัย
2. เพื่อจะสงวนหน้าที่สำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์
3. เพื่อจะมีโครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขการสร้างอุโมงค์

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของแรงขับอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield-Driver Tunnel) จะมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับข้อ 3 ที่ได้กล่าวข้างต้น ผนังอุโมงค์ (Lining) จะได้รับการจัดประเภทเป็นผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จากประเด็นความคิดเห็นของการก่อสร้าง ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) โดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่จัดอย่างเหมาะสม ขณะที่ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จะเป็นชนิดคอนกรีตที่หล่อในที่ข้างในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining)

สถานการณ์ที่แสดงถึงคุณลักษณะของผนังอุโมงค์ (Lining) มีดังนี้

1. ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ทำหน้าที่สำหรับคำนวณภาระบรรทุก ที่มีต่ออุโมงค์โดยจะแบ่งน้ำหนักบรรทุกระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining)
 2. ผนังอุโมงค์ (Lining) เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของอุโมงค์ต้องสามารถซ่อมบำรุงและสามารถที่จะจัดการได้เมื่อใดที่เปิดให้บริการ ในด้านเกี่ยวกับสภาพที่น้ำไม่เข้า การกั้นน้ำ และความทนทานของผนังอุโมงค์ (Lining)
 3. หน้าที่ของผนังอุโมงค์ (Lining) ในระหว่างการสร้างอุโมงค์หรือทางใต้ดินก็คือเพื่อจะรับภาระแรงผลักดันเกี่ยวกับการทำให้คืบหน้าสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และเพื่อจะทนต่อความ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คันเกี่ยวกับการแทงบีดที่เดิมด้านส่วนหลัง ผนังอุโมงค์ (Lining) มีหน้าที่เป็นโครงสร้างผนังอุโมงค์(Lining)ของอุโมงค์อย่างทันทีทันใด แล้วหลังจากที่หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shieldสามารถขุดเจาะได้เพิ่มขึ้น

วิธีการของผนังอุโมงค์ (Lining) ที่ใช้คอนกรีตที่ถูกดันออก ได้นำมาใช้ในการใช้แทนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ คอนกรีตสดหรือสิ่งที่เติมได้เหมือนกันภายใต้ความดันในส่วนปลายของหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ที่สวมกับอุปกรณ์ด้วยรูปแบบภายในและกลไกของการทำให้เกิดความดันของคอนกรีต โครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่ก่อเป็นรูปแบบถูกทำให้เหมาะที่ให้กับพื้นผิวของพื้นดินที่ถูกขุดเมื่อหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shieldสามารถขุดเจาะได้เพิ่มขึ้น

ช่วงเวลาระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) สามารถจะยาวหรือการเปลี่ยนแปลงการรับภาระโหลด ระหว่างระยะเวลานี้จะยากที่จะทำให้แน่ใจ และนั่นเป็นการยากด้วยเช่นกันที่จะประเมินการรับภาระโหลดระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ด้วยเหตุผลเหล่านี้ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะได้รับการออกแบบตามปกติที่จะยึดถือการรับภาระโหลดทั้งหมดบนอุโมงค์ หรือในฐานะเป็นโครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่สำคัญ

หน้าที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จึงเป็นการคุ้มครองผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) โดยการป้องกันการสึกกร่อนและการเสริมกำลังของผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) เป็นงานท้ายสุดสำหรับหน้าที่ของการปรับ การวางแผนเส้นทาง การเบี่ยงเบน เส้นทางกั้นน้ำและหน้าที่อื่นๆ ที่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์

ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) อาจได้รับการละเว้น โดยมีข้อแม้ว่าการกั้นน้ำของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และการป้องกันการสึกกร่อนจะได้รับการพิจารณาโดยสมบูรณ์ เมื่อผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ได้รับการออกแบบโดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างหลัก ความแข็งแรงของอุโมงค์จะเพิ่มขึ้นแต่พฤติกรรมของการประกอบโครงสร้างจะไม่สมบูรณ์ การศึกษาในรายละเอียดและในแบบเฉพาะจะเป็นที่ต้องการเมื่อโครงสร้างลักษณะเฉพาะนี้จะใช้ในโครงการการสร้างอุโมงค์ มาตรการต่อต้านที่ต่อต้านการทรุดตัวไม่เท่ากันและแผ่นดินไหวก็ควรจะต้องจัดให้มีสำหรับพื้นดินที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และการเชื่อมต่อกับปล่องแนวตั้ง(Shaft)เมื่อทำการออกแบบผนังอุโมงค์ (Lining) สำหรับอุโมงค์ที่มีหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่จะสร้างขึ้นในพื้นที่อ่อน

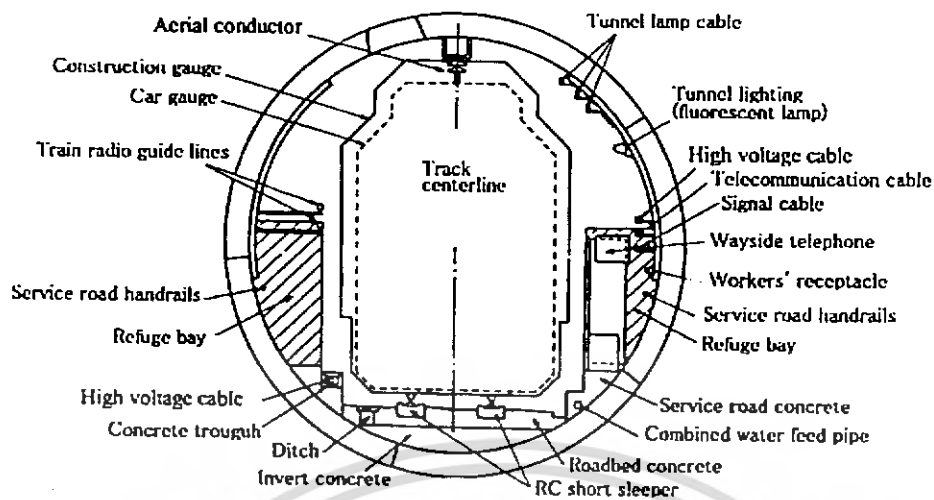
7.1.2 ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์

1. รูปร่างและขนาดของส่วนตัดภายในอุโมงค์จะต้องเพียงพอสำหรับการใช้งานของอุโมงค์และจะกำหนดโดยการพิจารณาข้อกำหนดการสร้าง
2. หน้าตัดของหัวเจาะอุโมงค์ Shield โดยทั่วไปเป็นรูปวงกลม

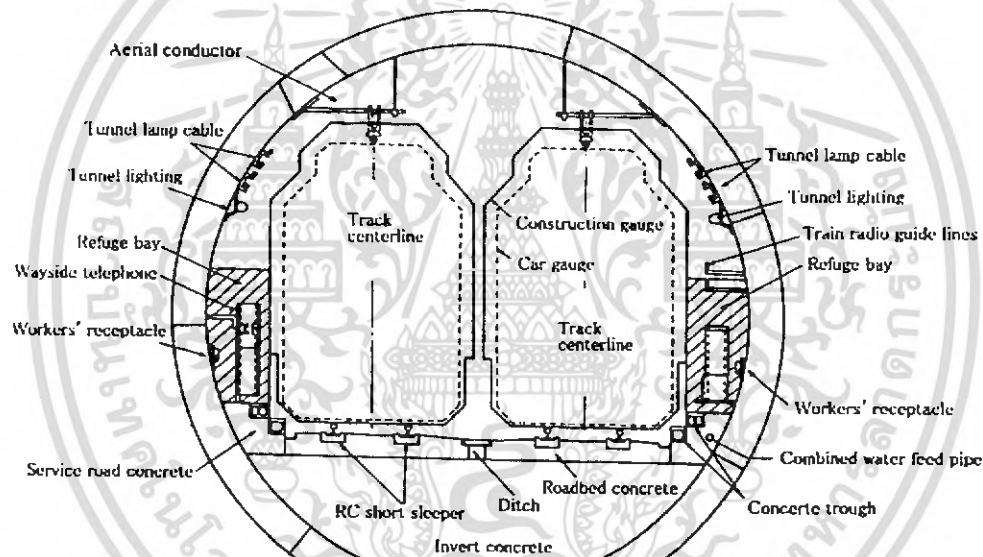
7.1.2.1 รูปร่างและขนาด

ขนาดของหน้าตัดภายในของอุโมงค์จะกำหนดโดยการพิจารณาหน้าตัดภายในที่กำหนดสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์และหน้าตัดกำหนดสำหรับการก่อสร้าง “มาตรฐานขั้นต่ำประกอบผนังอุโมงค์สำหรับการใช้งานอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield ” จะเป็นการอ้างอิงที่ดีเมื่อการออกแบบอุโมงค์ด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.8 ถึง 8.3 เมตร

1. ทางรถไฟ อุโมงค์รางเดี่ยว หรืออุโมงค์รางคู่จะถูกเลือกใช้เป็นปกติ หน้าตัดภายในจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาถึงขนาดในการก่อสร้าง ขนาดความกว้างของทางรถไฟในการสร้างและเนื้อที่ว่างที่กำหนดสำหรับการรองรับโครงสร้างราง การซ่อมบำรุงและที่พักและเส้นทางรถไฟ สัญญาณและโทรคมนาคม อุปกรณ์ที่ให้แสงสว่าง แผนกงานเกี่ยวกับการระบายอากาศและการระบายน้ำ หน้าตัดภายในจะต้องกำหนดโดยการพิจารณาถึงค่าความเผื่อของการก่อสร้าง ค่าความเผื่อการสร้างโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 มม. ในแนวตั้งและในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังรูปที่ 7.1(a). และ 7.1(b).



(a).



(b).

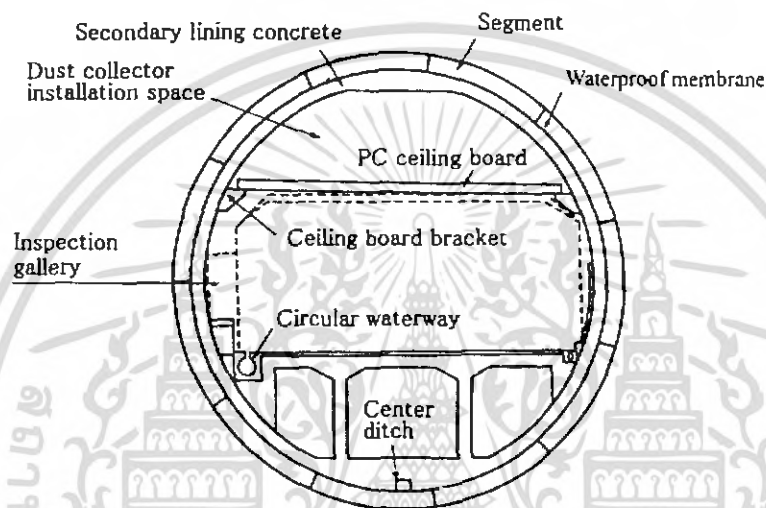
รูปที่ 7.1 แสดงองค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ

(a). อุโมงค์รางเดี่ยว

(b). อุโมงค์รางคู่

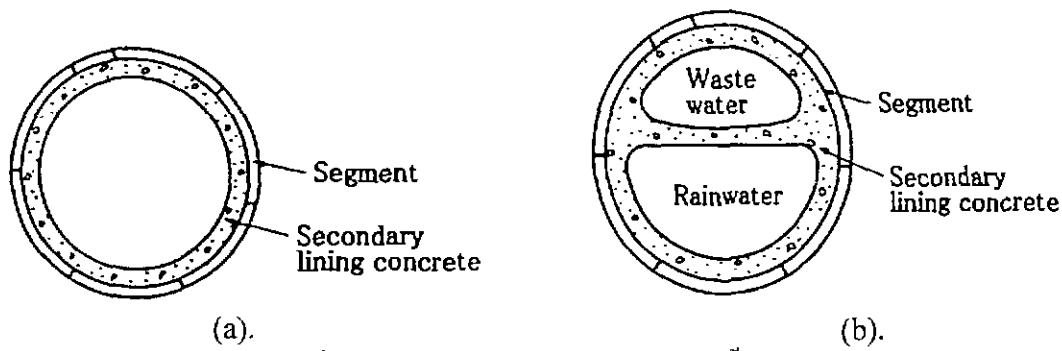
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถนน หน้าตัดภายในจะกำหนดโดยการพิจารณาถึงขนาดสำหรับการก่อสร้าง ต่อการจัดจำแนกประเภทของถนนที่สามารถประยุกต์ได้ในระเบียบข้อบังคับ โครงสร้างถนนและเนื้อที่ว่างที่กำหนดสำหรับการบำรุงรักษาและพื้นที่สำหรับท่าระบายอากาศหรือพัดลมและแผนงานสำหรับอุปกรณ์ติดตั้งส่องสว่าง การป้องกันอุบัติเหตุ การตรวจสอบ การจัดการ การตกแต่งภายใน และป้ายการจราจร ความปกติกจะกำหนดหน้าตัดโดยการเพิ่มค่าความเผื่อของการวางแนวของหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) โดยทั่วไปค่าความเผื่อในการสร้างจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 มม. ในแนวตั้ง และในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังแสดงในรูป 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน

3. ระบบท่อน้ำเสีย หน้าตัดภายในจะกำหนดโดยการสันนิษฐานถึงการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) หน้าตัดภายในจะต้องเพียงพอสำหรับความเร็วการไหลที่สามารถยอมรับได้ และอัตราการไหลที่ได้ออกแบบ ดังรูป 7.3(a). จะต้องใช้ผนังกันเพื่อแบ่งหน้าตัดภายใน ยกตัวอย่างเช่น หน้าตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสียและระบายน้ำฝน ดังรูป 7.3(b).



รูปที่ 7.3. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย

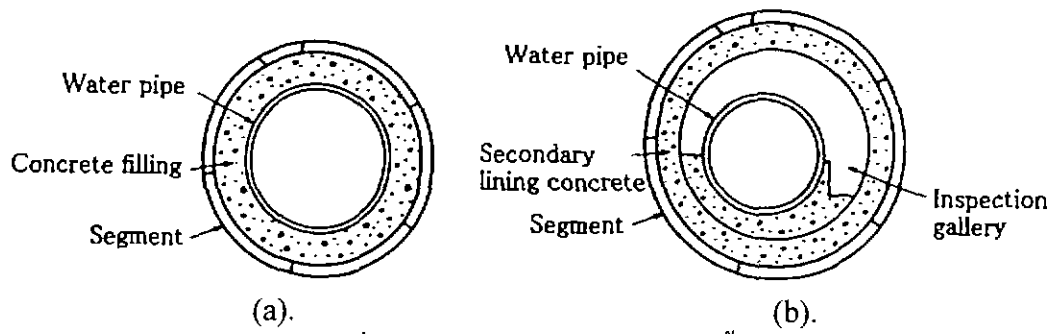
(a). รูปตัดทั่วไป (b). รูปตัดแบบ 2 ชั้น

4. ระบบประปา งานระบบน้ำส่วนใหญ่ประกอบด้วยท่อความดัน อุโมงค์นั้นเป็นคอนกรีตกำลังต่ำที่กำหนดสำหรับท่อความดัน ดังนั้น ท่อต่อต้านความดันไฮดรอลิกที่ทำด้วยเหล็ก หรือเหล็กหล่อที่หลอมเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ซึ่งโดยทั่วไปจะจัดวางไว้ในอุโมงค์ วิธีการที่เป็นตัวอย่างประกอบด้วย

ประเภทเคมิกอนกรีต ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 330 ถึง 600 มม. ที่ใหญ่กว่าท่อที่โดยรัศมีถูกสร้างขึ้นตามโดยท่อเหล็กที่เชื่อมต่อหรือท่อเหล็กหล่อที่หลอมเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ในอุโมงค์ ที่ว่างระหว่าง ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเต็มไปด้วยคอนกรีต นี่คือการที่เป็นที่นิยมมากที่สุด

ที่ว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาความเค้นการวางแนวของหัวเจาะอุโมงค์ Shield และความหนาต่ำสุดของผนังอุโมงค์ (Lining) ดังรูป 7.4(a).

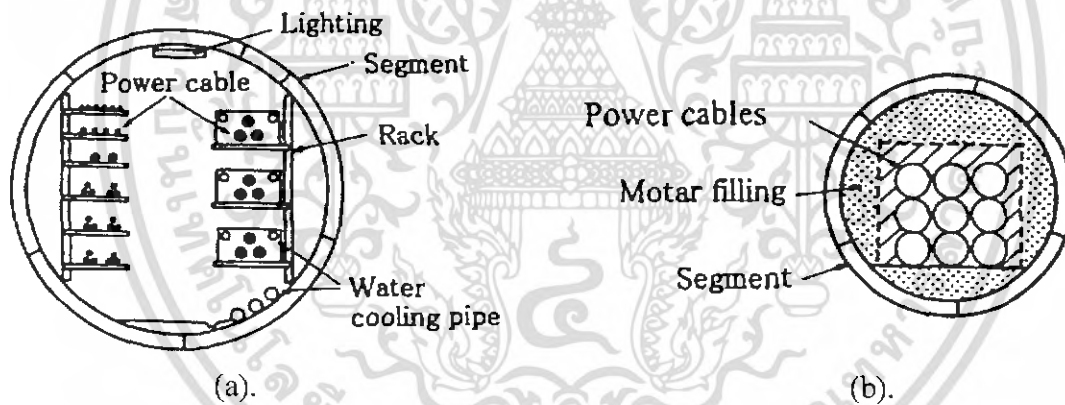
ประเภทอุโมงค์เพื่อการตรวจสอบ หน้าตัดภายในของผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีขนาด 950 ถึง 1100 มม. ที่ใหญ่กว่าท่อที่โดยรัศมี หน้าตัดของอุโมงค์จะถูกปรับท่อน้ำและส่วนตรวจตรา โดยทั่วไปจะใช้ท่อเหล็กหรือท่อเหล็กหล่อ ที่ว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเป็นส่วนตรวจตรา ดังรูป 7.4(b).



รูปที่ 7.4. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ

(a).ประเภทเติมคอนกรีต (b).ประเภทอุโมงค์เพื่อการตรวจสอบ

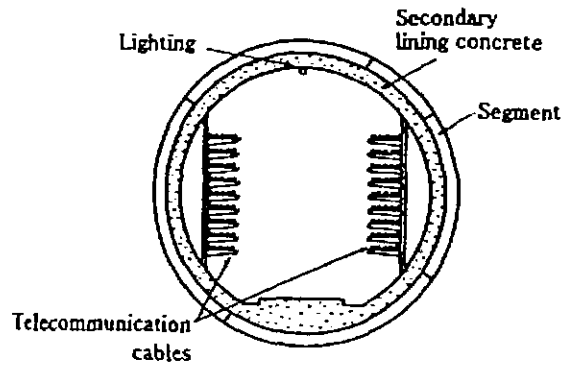
5. กำลังไฟฟ้า การใช้อุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะอุโมงค์ Shield สำหรับสายการต่อผ่านกำลังไฟฟ้าจะถูกจัดแบ่งประเภทเป็นประเภทตะแกรงและประเภทท่อดิน หน้าตัดภายในของอุโมงค์ประเภทตะแกรงจะตัดสินโดยการพิจารณาส่วนการตรวจตราและที่ว่างสำหรับงานวางสายไฟ ดังรูป 7.5(a). และ 7.5(b). ประเภทแนวท่อดินจะถูกใช้บ่อยๆสำหรับจำนวนเล็กน้อยของสายไฟที่เกี่ยวข้องหน้าตัดจะถูกกำหนดโดยจำนวนของสายไฟที่จะติดตั้ง



รูปที่ 7.5. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิลพลังงาน

(a). แบบตะแกรง (b). แบบท่อ

6. โตรคมนาคม หน้าตัดภายในควรตัดสินจากส่วนการตรวจตราและพื้นที่สำหรับสายเคเบิล ดังรูป 7.6



รูปที่ 7.6. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิลสื่อสาร

7. ท่อก๊าซ ท่อเหล็กหรือท่อด้านความดันอื่นๆ จะถูกจัดวางในอุโมงค์ 2 ประเภท ตัวอย่าง คือ

ประเภทเดิมมอร์ต้า ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซประมาณ 650 ถึง 750 มม. หลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ท่อนำก๊าซจะถูกจัดวางและเข้าร่วมในอุโมงค์ ช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเติมด้วยมอร์ต้า

ระยะห่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อก๊าซควรที่จะสามารถวางท่อนั้นได้ เพื่อเป็นระยะเผื่อของอุโมงค์ ดังรูป 7.7(a).

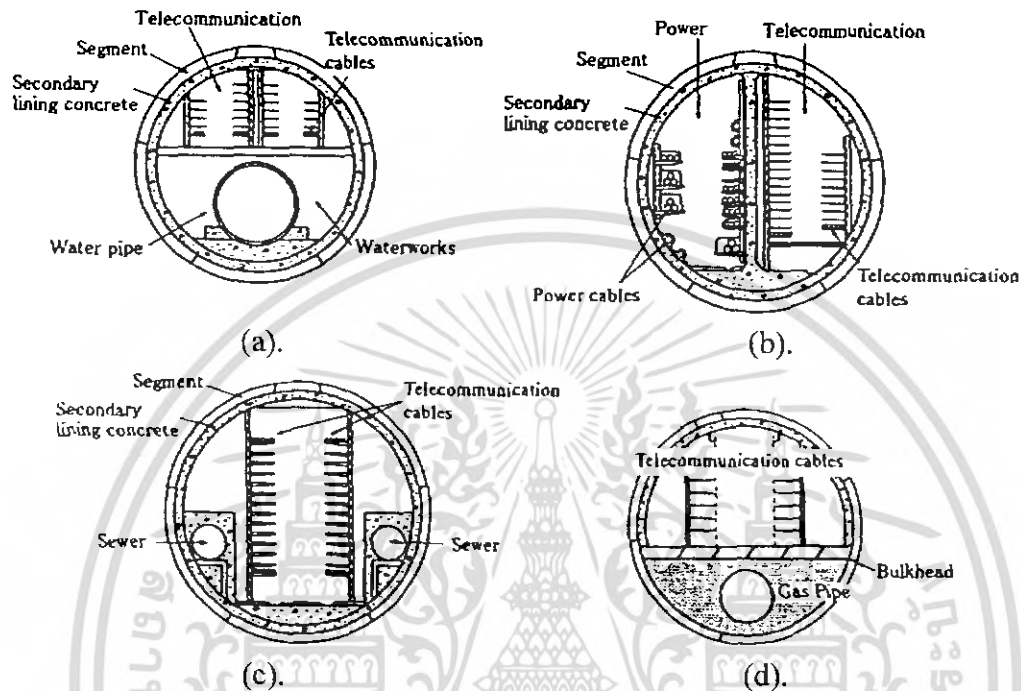
ประเภทอุโมงค์การตรวจสอบผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซโดยรัศมีประมาณ 950 ถึง 1050 มม. หลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ก็จะจัดวางท่อก๊าซ ดังรูป 7.7(b).



รูปที่ 7.7. แสดงรูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ

(a).ประเภทเดิมมอร์ต้า (b).ประเภทอุโมงค์การตรวจสอบ

8. อุโมงค์แบบอนเนกประสงค์ เมื่อระบบน้ำ การกำจัดน้ำเสีย สายไฟฟ้า สายโทรคมนาคม หรือท่อก๊าซอาจจะถูกจัดวางเข้าในอุโมงค์เดี่ยว หน้าตัดภายในที่ถูกเลือกจะให้เนื้อที่ว่างพอสำหรับการผสมผสานเข้าด้วยกันของการประยุกต์สองอย่างหรือมากกว่านี้ ดังรูป 7.8(a). 7.8(b). 7.8(c). และ 7.8(d).



รูปที่ 7.8. แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์

- (a). ระบบน้ำและระบบการสื่อสาร (b). ระบบพลังงานและระบบการสื่อสาร
(c). ระบบระบายน้ำเสียและระบบสื่อสาร (d). ท่อก๊าซและระบบสื่อสาร

ในการที่จะทำให้ผลกระทบของอุบัติเหตุติดตั้งฝักันโดยทั่วไปน้อยที่สุด เมื่อรวมถึงท่อก๊าซ จะต้องศึกษาการแรงกระทำและความเค้นในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) เมื่อใช้กำแพงกันเป็นส่วนประกอบโครงสร้างในอุโมงค์

7.1.2.2 รูปร่างของหน้าตัด

รูปร่างของหน้าตัดของอุโมงค์ส่วนมากเป็นรูปร่างกลมอันเนื่องมาจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. หน้าตัดวงกลม โดยทั่วไปจะเป็นสิ่งที่ต้านทานต่อแรงดันภายนอกได้มากที่สุด
2. หน้าตัดวงกลม จะมีความสะดวกสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และผนังที่เป็นรูปร่างวงกลมถูกผลิตและติดตั้งได้ง่าย
3. หน้าตัดวงกลมจะไม่แสดงปัญหาใดๆ ในกรณีของการหมุนหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ใ้ว่าหน้าตัดวงกลมจะใช้ได้ในทุกกรณีเสมอไปเนื่องจากความจำเป็นบางโอกาสสำหรับการใช้ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นของเนื้อที่ว่างของอุโมงค์ ข้อจำกัดเกี่ยวกับหน้าที่ของหน้าตัดวงกลม ความยากในการใช้ที่ดิน โครงสร้างของบริเวณใกล้ชิด และพื้นดินปกคลุมที่บาง ในปีที่ผ่านมาเร็วๆนี้ วงกลมคู่และส่วนตัดที่เป็นรูปไข่ และส่วนตัดที่ไม่เป็นวงกลมอื่นๆ จะใช้เพิ่มขึ้นนอกจากส่วนตัดครึ่งวงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและส่วนตัดรูปเกือกม้าของอุโมงค์ตามแบบนิยม

7.1.3 รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกกำหนดการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยจะทำให้ง่ายในการก่อสร้าง และให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ปัจจัยหลักและการพิจารณาทั่วไป กำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ถูกกำหนดซึ่งได้บรรยายไว้ในหัวข้อรูปร่าง และขนาดของหน้าตัดภายในอุโมงค์ โดยความต้องการช่องว่างภายในของอุโมงค์และความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining)

2. ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) (ความหนา)

ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าตัด ซึ่งการพิจารณาหลักๆมาจากเงื่อนไขของน้ำหนัก (Load) เช่น สภาพของดิน หรือภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์ (Overburden) แต่บางกรณีกำหนดโดยวัตถุประสงค์ของการใช้งาน และความสามารถในการใช้งานของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะมีค่าประมาณ 4% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ จะต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งได้แก่ ชิ้นส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต (Ribbed Type Concrete Segment) ซึ่งมีอัตราส่วนความสูงประมาณ 5%ของเส้นผ่านศูนย์กลาง

2. ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

มีความต้องการให้ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment) มีขนาดจำกัด เพื่อความสะดวกในการขนย้าย และการประกอบวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) และโครงสร้างของหน้าตัดโค้งเหมือนกับในรูปของความยาวส่วนท้ายของหัวชุดเจาะอุโมงค์ Shield ในขณะที่เพื่อเป็นการปรับลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment) ปรับลดจำนวนของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และจำนวนของร่องสลักเกลียว(bolt) ที่จะต้องดูแลการรั่วไหลของน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ถ้าพิจารณาถึงระยะเวลาความรวดเร็วในการก่อสร้างจะต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีขนาดที่กว้างมาก จึงต้องมีการกำหนดพิจารณาให้เหมาะสมจากงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต รวมทั้งดูถึงราคาค่าต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งานของอุโมงค์อีกด้วย

ตามที่ได้มีการบันทึกข้อมูลงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300 - 1500 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับหน้าตัดของอุโมงค์

สำหรับ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทเหล็ก (Iron Segment) ความกว้างอยู่ระหว่าง 750-1200 มม.

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete Segment) ความกว้างอยู่ระหว่าง 900-1200 มม.

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ใช้กันอยู่ที่ 1000 มม. ถูกนำมาใช้กันทั่วไป

3. การแบ่งจำนวนชิ้นส่วนในวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment Ring)

วงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment Ring) จะประกอบไปด้วย

- ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เอ (A Segment) จำนวน 2 ชิ้นส่วนขึ้นไป
- ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์บี (B Segment) จำนวน 2 ชิ้นส่วน
- ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) จำนวน 1 ชิ้นส่วน

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแรกชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางรัศมีของอุโมงค์ รูปแบบที่สองชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามยาวของอุโมงค์ ส่วนรูปแบบที่สามชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) เป็นแบบผสมผสานระหว่างรูปแบบ 1 และ 2 ซึ่งความยาวของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางรัศมีของอุโมงค์จะสั้นกว่าของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เอ (A Segment) และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์บี (B Segment)

การก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต สำหรับอุโมงค์รถไฟวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะถูกแบ่งออกประมาณ 6 – 11 ชิ้นส่วน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 6 - 8 ชิ้นส่วน สำหรับอุโมงค์ที่ใช้สำหรับระบายน้ำ น้ำเสีย สายโทรเลขใต้ดิน โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5 - 7 ชิ้นส่วน

ในมาตรฐานการออกแบบอุโมงค์ประเภทห้วยขุดเจาะ Shield ได้ทำการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทเหล็ก (Iron Segment) และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete Segment) ดังตารางที่ 7.1. และ 7.2.

ตารางที่ 7.1. แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต

เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของวงแหวน อุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของ ชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวง แหวน
1800 - 2000	750	100 125	5
2150 - 3350	900 1000	100(200) 125	5
3350 - 4800	900 1000	125(225) 150 175(250) 200(275)	6
5100 - 6000	900 1000	175 200 225 250 275 300	6
(6300 - 6900)	900 1000	250 275 300	7
(7250 - 8300)	900 1000	275 300 320 350	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2. แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์หลัก

เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของวงแหวน อุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของ ชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวง แหวน
1800 - 2000	750	75 100	6
2150 - 2550	900 1000	100 125	6
2750 - 3350	900 1000	100 125 150	6
3350 - 4050	900 1000	125 150 175	7
4300 - 4800	900 1000	150 175	7
5100 - 5700	900 1000	175 200 225	7
6000	900 1000	200 225	7
(6300 - 6900)	900 1000	250 275	7
(7250 - 8300)	900 1000	300 320 350	8

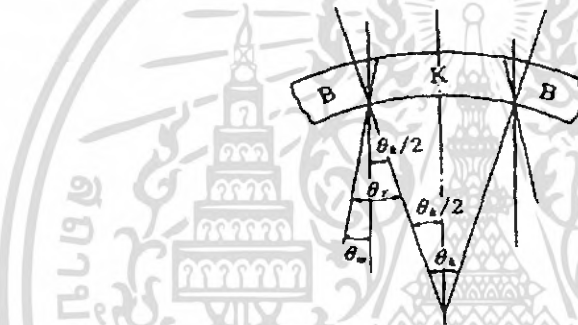
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.3.1 มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ

มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบจะถูกกำหนดการพิจารณาถึงการส่งผ่านขององค์ประกอบแรงความง่ายของการประกอบ สภาพของโครงสร้าง และความง่ายในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

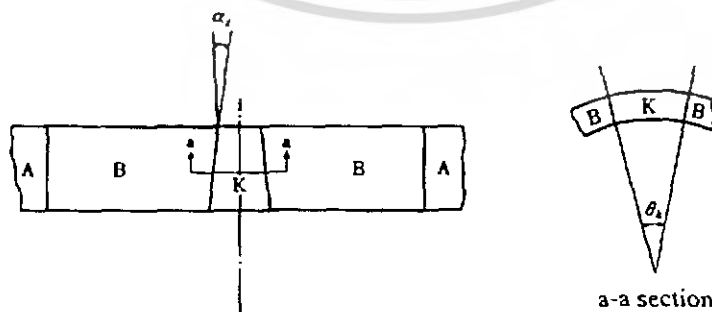
สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางของรัศมีอุโมงค์ มุมของรอยต่อ (α_r) จะได้มาดังสมการ

$$\alpha_r = \frac{\theta_k}{2} + \omega \quad (3.1.)$$



รูปที่ 7.9. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี

โดย ω เป็นมุมอยู่ในขอบเขตการประกอบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) และโดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 2-5 องศา อย่างไรก็ตามมุมที่เล็กกว่านี้อาจจะให้ผลที่ดีกว่าภายใต้สภาพที่ความสามารถในการใช้งานจะไม่สูญเสียไป ในการกำหนดเจาะจงจะเสนอประมาณ 3 องศา



รูปที่ 7.10 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมุมของรอยต่อมีขนาดใหญ่ รอยต่อของผิวหน้าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะสามารถหลุดออกได้โดยง่าย ทำให้การส่งผ่านแรงตามแนวแกนและแรงเฉือน เป็นไปอย่างยากลำบาก เพราะฉะนั้นมุมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (θ_k) ต้องทำให้มีขนาด ที่เล็กลง มุมของรอยต่อจะมีขนาดใหญ่เฉพาะสำหรับอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กซึ่งควร จะต้องพิจารณาในกรณีนี้เป็นพิเศษ

สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามแนวยาวของ อุโมงค์แสดงดังรูป โดยปกติจะไม่มีมุมของรอยต่อ (α_r) แต่มุมของการประกอบชิ้นส่วนประกอบ ผนังอุโมงค์ (α_k) ต้องถูกนำมาพิจารณาในสภาพของการก่อสร้าง รวมถึงความยาวของเครื่องจักร หัวชุดเจาะอุโมงค์ (Shield Machine) และการสอดแทรกกระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (Segment) และรอยต่อของวงรอบ มุมของการประกอบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 17 – 24 องศา ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของโครงสร้าง เมื่อมุมของชิ้น ส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (θ_k) มีค่ามุมกว้างมากและชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีความหนา มาก จะมีการกำหนดมุมที่แน่นอนสำหรับระบบรอยต่อและการประกอบ

7.1.3.2 วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring)

จำนวนของความกว้าง และความเรียวของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) จะถูกกำหนดโดยการวางแผนของอุโมงค์ สภาพของดิน โดยรอบอุโมงค์ การอัด ฉีดน้ำปูน ความแข็งแรงของระบบรอยต่อกับการประกอบ ผลที่ได้ของชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (Segment) และขอบเขตของการก่อสร้าง

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) มีอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกใช้ สำหรับการวางแผนโค้งของอุโมงค์ และอีกรูปแบบหนึ่งใช้สำหรับการปรับแก้แนว วงแหวนผนัง อุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) สำหรับการวางแผนโค้งของอุโมงค์ที่ลดลงทีละน้อยโดยปกติจะ ออกแบบดังเช่นการทำให้มีความเรียวลงเท่ากับวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ใช้สำหรับการปรับแก้การวางแผน ดังนั้นจำนวนวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ต้องการใช้จะไม่จำเป็นที่จะต้องการเพิ่มขึ้น

จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ต้องการสำหรับการ ปรับแนวจะแตกต่างกันตามอัตราส่วนของหน้าตัดการวางแผนโค้งที่ลดลงและหน้าตัดการวางแผน โค้ง เฉียบขาดภายในหน้าตัดของการก่อสร้าง หรือไม่ก็เป็นการปรับแนวของอุโมงค์ เช่น โค้งตัวเอส (S-sharpes) หรือสภาพของดินโดยรอบ จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring)

โดยปกติที่โครงการจะใช้สำหรับการปรับแนวอยู่ที่ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงแหวนที่โครงการสำหรับหน้าตัดที่ติดต่อกัน

อย่างไรก็ตามหน้าตัดการวางโค้งที่ลดลงที่น้อย ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper Ring) สำหรับการปรับแนวทางยาว จะใช้ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงรอบที่โครงการจะถูกเตรียมสำหรับหน้าตัดที่ติดต่อกัน

ความกว้างสูงสุดของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่เป็นหลักที่ใช้สำหรับโค้งอื่นๆนอกเหนือจากโค้งที่ลดน้อยมีค่ามากกว่า 250 มม. ส่วนความกว้างของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว(Tapered Ring) ที่เป็นคอนกรีตมีค่ามากกว่า 750 มม.

ความเร็วถูกกำหนดโดยรูปแบบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ความกว้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) รัศมีความโค้ง การประเมินอัตราการใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ในหน้าตัดโค้ง ผลที่ได้จากวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) และช่องว่างช่วงท้าย เป็นต้น การก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีตได้กำหนดความเร็วและมุมของความเรียวดังตารางที่ 7.3.

ความเร็วและมุมของความเรียวสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 10 เมตร หรือมีรูปร่างไม่ปกติจะต้องปรึกษาวินิจฉัยเพื่อขอคำแนะนำ

อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ต่อวงแหวนมาตรฐานในการก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต ถูกใช้ด้วยอัตราส่วน 2 : 1 และที่พบเห็นกันบ่อยๆได้แก่ 3 : 1, 1 : 1, 4 : 1 และ 3 : 2 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ 2 : 1 หรือใหญ่กว่าถูกนำมาใช้ การพิจารณาจะถูกทดแทนด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ไม่ถูกเชื่อมกันตรงรอยต่อที่ติดต่อกัน ในอุโมงค์ที่มีรัศมีขนาดใหญ่ เช่น อุโมงค์รถไฟ อุโมงค์ถนน อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ต่อวงแหวนมาตรฐานจะอยู่ที่ 1 : 1 หรือน้อยกว่า

ตารางที่ 7.3. แสดงขนาดริ้วและองศาของความริ้ว

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ วงแหวนอุโมงค์ใต้ดิน(D_o) เมตร	$D_o < 4$	$4 \leq D_o < 6$	$6 \leq D_o < 8$	$8 \leq D_o < 10$	$10 \leq D_o$
Terper (มิลลิเมตร)	15-75	30-80	30-90	40-90	40-70
Terper Angle.	20'-115'	20'-70'	15'-50'	15'-35'	10'-25'

7.1.4 การคำนวณโครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

7.1.4.1 พื้นฐานของการคำนวณโครงสร้าง

หลักเกณฑ์การคำนวณโครงสร้าง

1. การคำนวณโครงสร้างสำหรับอุโมงค์ จะถูกกำหนดภายใต้น้ำหนัก (Loads) ในแต่ละระยะในระหว่างการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้าง
2. ออกแบบน้ำหนักสำหรับหน้าตัดของอุโมงค์จะถูกกำหนดโดยสมมติขึ้นมาในเงื่อนไขที่เป็นไปได้ในหน้าตัดอุโมงค์ ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมในการออกแบบ
3. การคำนวณที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนของแรงหรือการเสียดสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่เป็นคอนกรีต การคำนวณจะถูกทำโดยละเอียดการเสริมเหล็กและสมมติว่าหน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตใช้เป็นตัวที่มีผลบังคับ

การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกทำด้วยการพิจารณาถึงน้ำหนักที่กระทำต่ออุโมงค์ต่อการก่อสร้างสำหรับอายุการใช้งานหลายๆปี หลังจากราก่อสร้างแล้วเสร็จดังนี้

1. การพิจารณาถึงความมั่นคง องค์ประกอบของแรง และการเสียดในระหว่างระยะเวลาทันทีทันใดหลังจากราก่อสร้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ประกอบกับการแข็งตัวของวัสดุอัดฉีดน้ำปูนเพื่ออุดรู
2. การพิจารณาองค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และการเสียดเนื่องจากผลกดันของแม่แรงกดหัวชุดเจาะอุโมงค์ (Shield Jacks)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การพิจารณาองค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และการเสียรูปเนื่องจากแรงดันของการอัดฉีดน้ำปูน
4. พิจารณาโครงสร้างของโค้งเฉียบขาด (Sharp Curve)
5. พิจารณาในกรณีการเปลี่ยนอย่างฉับพลันของดิน
6. พิจารณารอยต่อของอุโมงค์และปล้องแนวตั้ง (Shaft)
7. พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โครงการก่อสร้างบริเวณใกล้เคียง และอื่นๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมารบกวนอุโมงค์ในอนาคต

7.1.4.2 การคำนวณองค์ประกอบของแรง

องค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกคำนวณในการพิจารณาคุณสมบัติของโครงสร้าง รัศมีของวงรอบ Segment ที่ใช้สำหรับการคำนวณโครงสร้างจะถูกกำหนดเป็นรัศมีของจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของอุโมงค์

องค์ประกอบของแรงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ ของน้ำหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงปฏิกิริยาของดินซึ่งรูปร่างของโครงสร้างวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) สภาพต่างๆ เหล่านี้จะถูกทำให้แน่ชัดดังนี้

วงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะประกอบด้วยหลายๆ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ซึ่งจะประกอบกันด้วยสลักเกลียว (Bolts) การเสียรูปในวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะใหญ่กว่าวงแหวนด้วยความแข็งแรงของการตัดที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความแข็งแรงเท่ากับหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) สิ่งนี้เพราะว่าความแข็งแรงของรอยต่อมีความแข็งแรงน้อยกว่าหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ด้วยเหตุนี้ มันจึงมีความสำคัญที่จะกำหนดเกี่ยวกับการหาค่าการลดลงของความแข็งแรงที่รอยต่อสำหรับการคำนวณองค์ประกอบแรง นอกจากนี้สลักเกลียว (Bolts) ที่ใช้เชื่อมรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และรอยต่อวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ถูกทำให้เชื่อมกัน โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นมันมีความสำคัญในการหาค่าผลของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ที่ติดต่อกันสำหรับการคำนวณออกแบบ

รูปร่างสำหรับการคำนวณออกแบบถูกแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ โดยการหาค่ารอยต่อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) เป็นวงแหวนด้วยความแข็งแรงเกร็งของการตัดที่สม่ำเสมอ

1. การละเว้นการลดลงของความแข็งแรงเกร็งที่รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) วงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ถูกกระทำด้วยความแข็งแรงเกร็งของการตัดที่สม่ำเสมอ (EI) ซึ่งเท่ากับหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)
2. สัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งแรงเกร็งของการตัด (น้อยกว่าเท่ากับ 1) แนะนำให้หาค่าความแข็งแรงเกร็งของรอยต่อ วงแหวนถูกกระทำกันอย่างสม่ำเสมอแต่ความแข็งแรงเกร็งน้อยกว่า (วงแหวนแข็งที่มีความแข็งแรงเกร็งของการตัดเท่ากัน) ความแข็งแรงเกร็งของการตัดแทนด้วย ηEI ส่วนการแบ่งโมเมนต์ตัดแสดงเป็นเครื่องหมายโดยเสนอเป็นอัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์ตัด (ξ) โดย

โมเมนต์ของหน้าตัดหลักมีค่าเท่ากับ $(1 + \xi)M$

โมเมนต์ของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีค่าเท่ากับ $(1 - \xi)M$

การบรรยายรูปร่างในหัวข้อ 1 เป็นลักษณะที่ไม่ซับซ้อนและรูปแบบของการกระจายน้ำหนักถูกนำเสนอ การใช้วิธีคำนวณสำหรับวงแหวนด้วยความแข็งแรงเกร็งของการตัดที่สม่ำเสมอและการกระจายน้ำหนักร่วมกัน ซึ่งเรียกว่า วิธีการคำนวณปกติ

การบรรยายรูปร่างในหัวข้อ 2 เป็นรูปร่างที่ศึกษาด้วยเหตุผลซึ่งใช้ความเกี่ยวข้องของวิธีการคำนวณปกติถ้าการกระจายน้ำหนักร่วมกันถูกใช้แล้วค่า $\eta = 1$, $\xi = 0$ ถูกแทนที่ วิธีนี้กลายเป็นเหมือนว่าวงแหวนแข็งด้วยความแข็งแรงเกร็งของการตัดเต็มที่ซึ่งเรียกว่า วิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

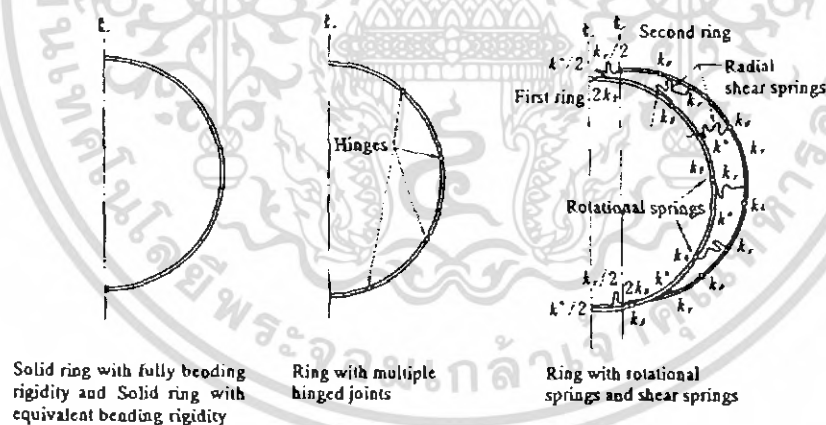
ข. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) เป็นวงแหวนที่มีหลายจุดหมุน

รูปร่างแบบนี้ใช้ในสหราชอาณาจักร และรัสเซีย ที่ซึ่งสภาพต่างๆของดินมีคุณลักษณะที่ต่างกัน ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ถูกติดตั้งตามรอยต่อที่ต่อเนื่องกันเพื่อเตรียมรับแรงปฏิกิริยาของดินที่คาดว่าจะมีต่อวงแหวนการเสียบ

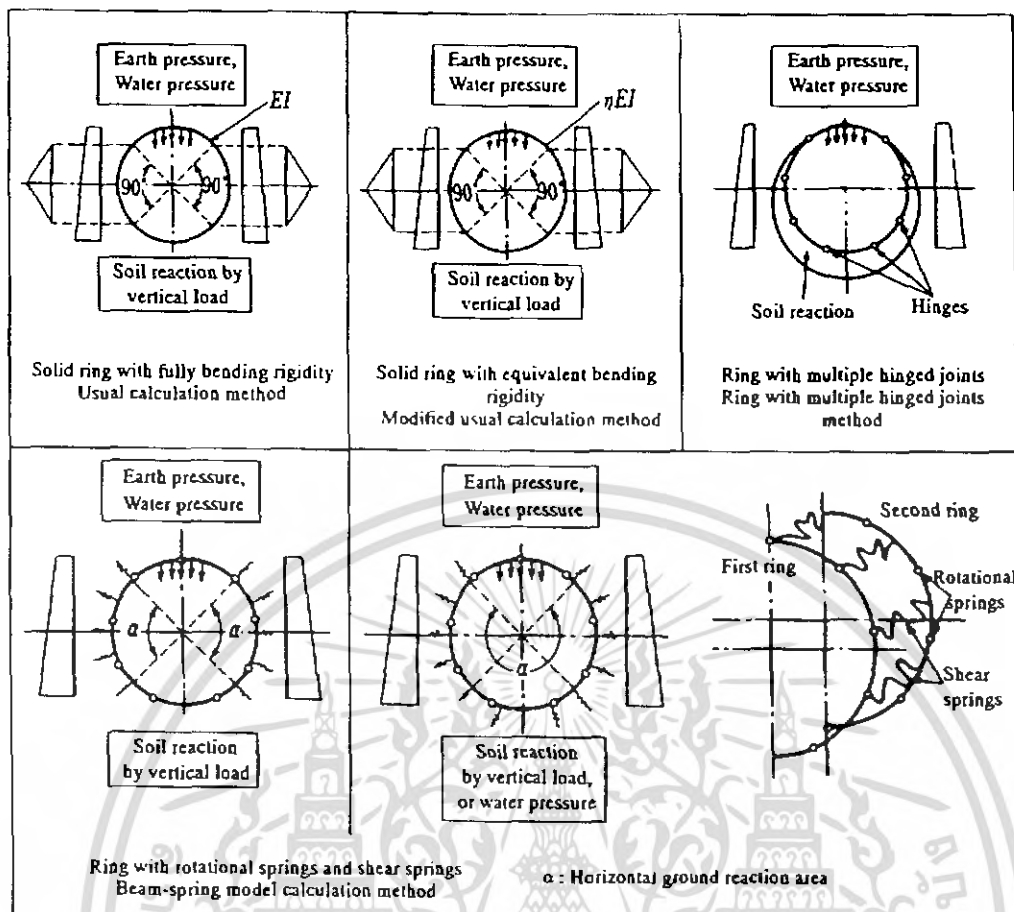
ค. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) เป็นวงแหวนที่ประกอบด้วย สปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring)

วงแหวนประกอบด้วยสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) ที่ทำหน้าที่เชื่อมรอยต่อวงแหวน และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) ที่เชื่อมวงแหวนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ซึ่งถูกหาค่าตามผลของรอยต่อระหว่างวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ในการเตรียมรับความเค้นของวงแหวน รูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมรับความเค้นของวงแหวน ซึ่งสามารถหาค่าผลของวงแหวนที่ติดต่อกัน

การหารูปร่างที่เหมาะสมเพื่อคำนวณองค์ประกอบแรงขึ้นอยู่กัสภาพต่างๆที่ให้มี เช่น การใช้งานอุโมงค์ สภาพต่างๆของดิน การออกแบบน้ำหนัก โครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ความต้องการความแม่นยำในการวิเคราะห์ การพิจารณาอย่างรอบคอบจะเป็นตัวเลือกรูปร่างในการออกแบบ แผนผังรูปร่างต่างๆของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) แสดงในรูป 7.11. และการกระจายวัตถุประสงค์ของรูปร่างแสดงในรูป 7.12. นอกจากนี้ยังมีการบรรยายถึง Beam-Spring Model ซึ่งใช้ความยืดหยุ่นของดินแทนแรงปฏิกิริยาของดินในแนวดิ่ง และใช้ความยืดหยุ่นดิน (Spring) แทนแรงปฏิกิริยาของน้ำหนักบรรทุกคงที่ การคำนวณสมมติว่าความยืดหยุ่นของดินใช้ตามสมมติฐานของWinkler



รูปที่ 7.11. แสดงแบบแผนของแบบจำลองในการออกแบบ



รูปที่ 7.12. แสดงการกระจายของน้ำหนักบรรทุกออกแบบตามจุดประสงค์ต่างๆ
วิธีการคำนวณรูปร่างในการออกแบบมีดังนี้

1. วิธีการคำนวณปกติ

วิธีนี้ถูกเสนอในปี 1960 และใช้อย่างกว้างขวางในประเทศญี่ปุ่น รูปร่างการกระจายน้ำหนักร่วมกัน แรงปฏิกิริยาของดินในแนวดิ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอ และแรงปฏิกิริยาแนวราบของดินเป็นสามเหลี่ยมกระจายระหว่าง 45° ถึง 135° จากยอดของทั้งสองข้าง การเลือกรูปทางแนวราบของวงแหวนที่เส้น Spring line ซึ่งจะกำหนดขนาดของแรงปฏิกิริยาแนวราบของดินเป็นความแตกต่างซึ่งขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาของดินที่ได้มาจากน้ำหนักคงที่ของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะถูกนำมาพิจารณา สมก แต่สมการ จะเป็นลักษณะพิเศษเฉพาะของวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง แต่ถ้า $\eta = 1$ สมการจะได้มาซึ่งวิธีการคำนวณปกติ

2. วิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

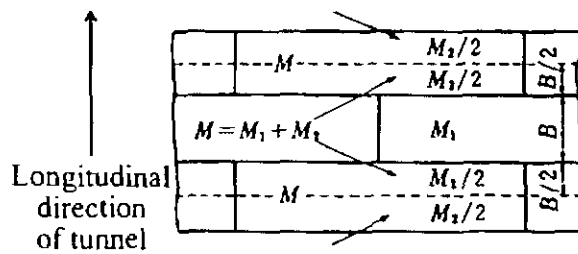
อย่างรู้กันว่าการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนควรเสริมกำลังความอ่อนแอของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ในความแข็งแรง ซึ่งจะไม่ถูกกำหนดถึงผลการหาค่าของวงแหวนที่ติดต่อกันในปี 1960 นำหนักต่างๆมากมายที่นำมาทดสอบถูกนำไปได้มาซึ่งข้อมูลการเสีรูปของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งยึดติดรอยต่อด้วยสลักเกลียว (Bolt) แนวคิดของสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งแรงในการค้ำ (η) ถูกเสนอแนะโดยผลลัพธ์ของการทดสอบอย่างละเอียดและการวิเคราะห์ถึงสมมติฐาน

ยิ่งกว่านั้นในเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน การเสีรูปของวงแหวนจะกว้างกว่าวงแหวนแข็งด้วยความแข็งแรงของการค้ำเต็มที่ ในสภาพต่างๆที่ไม่ดีของดินค่า η ไม่ส่งผลต่อขนาดขององค์ประกอบแรง แต่ในคุณลักษณะที่ดีกว่าของสภาพต่างๆของดินตรงที่แรงปฏิกิริยาของดินได้มาจากวงแหวนของการเสีรูปซึ่งสามารถถูกคาดว่ามี η ที่ส่งผลต่อขนาดขององค์ประกอบแรงอย่างมาก ค่า η ขึ้นอยู่กับสภาพดินซึ่งเหมือนกับรูปแบบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) คุณสมบัติโครงสร้างของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) วิธีการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน และคุณสมบัติโครงสร้างของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งค่าถูกกำหนดโดยประสบการณ์ในการพิจารณาของผลลัพธ์การทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อ และการบันทึกข้อมูลโครงการที่ผ่านมาในอดีต การพิจารณาอย่างรอบคอบจะให้กำหนดค่าของ η เพราะถ้า η ถูกประมาณค่าของมันต่ำเกินไปจะส่งผลต่อปฏิกิริยาของดินที่มีค่ามากเกินไป และผลที่สุดขององค์ประกอบแรงก็จะมีค่าที่ต่ำไปด้วย

อีกกรณีหนึ่ง รอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะเป็นจุดหมุน (Hinge) ส่วนของโมเมนต์ค้ำจะไม่ถูกโยกย้ายไปที่รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) แต่ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ติดต่อกันจะต้องมีการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนโดยการต้านทานแรงเฉือนที่รอยต่อของวงแหวนอุโมงค์

อัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์ค้ำ (ξ) เป็นอัตราส่วนของ $\frac{M_2}{M}$ ในรูป 3.26.

โดย M_2 เป็นโมเมนต์ค้ำซึ่งถูกโยกย้ายจากวงรอบที่อยู่ติดกัน และ M เป็นโมเมนต์ค้ำถูกคำนวณจากวงแหวนสม่ำเสมอของ ηEI ในความแข็งแรง ξ ถูกกำหนดโดยประสบการณ์และผลลัพธ์ของการทดสอบพฤติกรรมเช่นเดียวกับ η



รูปที่ 7.13. แสดงการถ่ายโมเมนต์คัตสู่วงแหวนที่อยู่ติดกัน

ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งแรงการคัต (η) และอัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์คัต (ξ) ถูกทำให้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน มันถูกคาดการณ์ว่าถ้า η ได้ใกล้เคียง 1 ค่า ξ ได้ใกล้เคียง 0 และถ้า η ได้น้อยกว่า 1 ค่า ξ ได้ใกล้เคียง 1 อีกนัยหนึ่งก็คือว่าความแข็งแรงของรอยต่อขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เหมือนราวกับของหน้าตัดหลัก ($\eta=1$) ไม่มีโมเมนต์คัตถูกโยกย้ายไปยังวงแหวนที่ติดกัน และถ้ารอยต่อขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เป็นจุดหมุน โมเมนต์คัตทั้งหมดถูกโยกย้ายไปยังวงแหวนที่อยู่ติดกัน แต่มันจะถูกทำให้รู้ว่าถ้ารอยต่อของขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เป็นจุดหมุน (Hinge) เมื่อวงแหวนขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ถูกล้อมรอบด้วยดินค่า ξ จะไม่เป็น 0 ผลของการบวกค่า η และ ξ ดูเหมือนว่าจะมีค่าเป็น 1 เสมอ

แรงอัดตามแนวแกนที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดในดิน เหล่านี้ได้มาจากการทดสอบพฤติกรรมของดิน มันถูกพิสูจน์ว่า η ของอุโมงค์มีขนาดใหญ่กว่าวงแหวนของการทดสอบ และค่า ξ ของอุโมงค์มีขนาดเล็กกว่าวงแหวนของการทดสอบ การออกแบบน้ำหนักมีความไม่แน่นอนในการผสมผสานของ $\eta = 1$ และ $\xi = 0$ ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบ ในรายละเอียดอื่นๆที่ค่า $\eta = 1$ และ $\xi = 0$ ถูกนำมาใช้กับขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat Type Segment) ค่า $\eta = 0.8$ และ $\xi = 0.3$ ถูกแสดงสำหรับอ้างอิงในรายละเอียดของค่าที่นำมาใช้จากการทดสอบพฤติกรรมสำหรับวงแหวนขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment ring) ด้วยการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนว่าค่า $\eta = 0.8-0.6$ และ $\xi = 0.3-0.5$ สมการของหน้าตัดแรงสำหรับวิธีการคำนวณปกติ และวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุงถูกแสดงในบทที่ 4 ที่ผ่านมา เร็วนี้ค่าของ η และ ξ ที่ใช้ในวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุงถูกตรวจสอบด้วยการคำนวณตัวเลขโดย Beam-Spring Model ซึ่งจะอธิบายในวิธีที่ 4

3. วิธีการคำนวณวงรอบด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุน

วิธีนี้ให้ประโยชน์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆของดินที่ดีในต่างประเทศ รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะเป็นจุดหมุน

วงแหวนด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุนเป็นโครงสร้างที่ไม่มั่นคงโดยตัวของมันเอง แต่มันจะมั่นคงก็ต่อเมื่อถูกรองรับด้วยดิน เพราะฉะนั้นมันสำคัญที่จะหาค่าการกระจายน้ำหนักกระทำบนวงแหวนและแรงปฏิกิริยาของดิน มันจะถูกพิจารณาอย่างดีในการกำหนดหรือไม้มันก็เหมาะสมสำหรับสภาพของดินซึ่งเท่ากับแรงปฏิกิริยาของดินในพื้นที่กว้างที่คาดว่าจะมี การกระจายน้ำหนักร่วมกันถูกใช้สำหรับน้ำหนักกระทำภายนอกและสมมติฐานของ Winkler ถูกประยุกต์สำหรับปฏิกิริยาของดินต่อการเสีรูปของวงแหวนอุโมงค์

วิธีการคำนวณอื่นๆสำหรับวงแหวนรอยต่อที่เป็นจุดหมุนถูกทำการหาวิธีแก้ปัญหาสำหรับรูปร่างนี้ ซึ่งใน 1 รอยต่อถูกสมมติให้ปลดจุดหมุน การเสีรูปถูกคำนวณและตรวจสอบสำหรับความปลอดภัย ไม่นานมานี้มันสามารถถูกคำนวณเกี่ยวกับตัวเลขโดยการใช้สปริงเชื่อมวงแหวน(Rotation Spring) สำหรับแต่ละจุดหมุน และการแทนที่ค่า 0 สำหรับค่าของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring)

โมเมนต์ดัดที่ถูกคำนวณด้วยวิธีนี้พิจารณาน้อยและมากโดยออกแบบให้เกิดประโยชน์สูงสุดแล้วดำเนินการได้ อีกกรณีหนึ่งเงื่อนไขของดินโดยรอบมีอิทธิพลในการตัดสินใจสำหรับความปลอดภัยของอุโมงค์ มีการศึกษาที่พอเพียงจะนำไปดำเนินการสำหรับสิ่งรบกวนของดินโดยรอบ ต่อเนื่องด้วยโครงสร้างบริเวณใกล้เคียงหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จหรือการกันซึม น้ำของอุโมงค์

ในต่างประเทศ สภาพของดินที่มีคุณลักษณะที่ดี การเชื่อมรอยต่อด้วยสลักเกลียว (Bolt) ถูกใช้ติดตั้งวงแหวน และการเคลื่อนย้ายวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ที่เป็นโครงสร้างหลายจุดหมุน หลังจากน้ำหนักกระทำก็จะมีคามมั่นคง

4. วิธีการคำนวณBeam-spring model

วิธีนี้หาค่าการลดลงของความแข็งแกร่งการดัดและผลของรอยต่อต่อการเตรียมความเลื่อมของวงแหวน โดยใช้รูปร่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) พิจารณาเป็นคานโค้ง หรือคานค่อเนื่องและรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เชื่อมด้วยสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และรอยต่อวงแหวนเชื่อมด้วย สปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring)

ถ้าค่าของสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) ถูกแทนที่เท่ากับ 0 และค่าของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) เท่ากับ 0 ในรูปร่างนี้ ซึ่งมันจะกลายเป็นโครงสร้างที่มีหลายจุดหมุน ดังนั้นถ้ามีการแทนแบบไม่สิ้นสุดมันจะเป็นเหมือนวงแหวนแข็งด้วยความแข็งแรงของการคัดเต็มที ฉะนั้นวิธีนี้เป็นหนึ่งของผลกระทบของวิธีทั้งหลายในการแสดงวิธีการคำนวณวงแหวนชิ้นส่วนประกอบหนึ่งอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งมันจะประกอบด้วยวิธีการคำนวณปกติและวิธีการคำนวณวงรอบด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุน นอกจากการหาค่าผลกระทบของวงแหวนที่ต่อกันในการตระเตรียมรับความเลื้อนของวงแหวน

การกระจายน้ำหนักร่วมกันใช้มากสำหรับวิธีนี้ ในบางกรณีแรงปฏิกิริยาของดินกระทำเหมือนกับความยืดหยุ่น (Spring) ของดินซึ่งมันถูกประยุกต์สำหรับน้ำหนักที่ไม่สมมาตร

ผลของตำแหน่งรอยต่อและการผสมผสาน และหน่วยแรงเฉือนบนวงแหวนของรอยต่อถูกหาค่าในวิธีนี้ ค่าคงที่ของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) เป็นปกติที่จะถูกกำหนดจากการทดสอบพฤติกรรม สำหรับสมมติฐานของวิธีการคำนวณของค่าคงที่เหล่านี้ถูกนำมาเสนอด้วย

โมเมนต์คดบนหน้าตัดหลักจะมีค่าต่ำ ถ้าค่าคงที่ของสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) น้อย มันเป็นการสมมติที่ไม่สิ้นสุดสำหรับความปลอดภัย

วิธีนี้ใช้สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ของอุโมงค์ถาวร และอุโมงค์รถไฟ นอกจากนี้มันใช้สำหรับอุโมงค์เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกับเงื่อนไขการออกแบบที่ยุงยากหรือสำหรับการหาค่าผลลัพธ์การคำนวณของวิธีการคำนวณปกติและวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

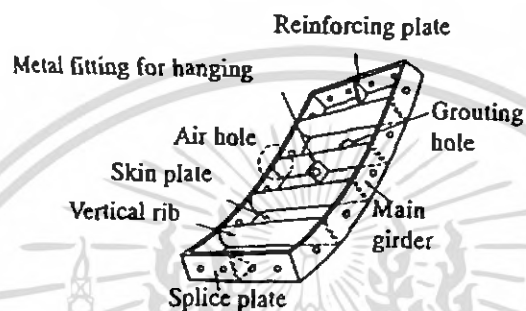
7.2 ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

7.2.1 ขอบเขตของการประยุกต์ใช้

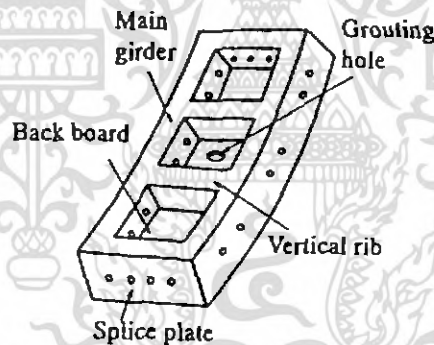
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการออกแบบและผลิตผนังอุโมงค์ (Lining) โดยที่อุโมงค์มีลักษณะเป็นวงกลมและมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้กับอุโมงค์รูปร่างอื่นโดยได้รับความเห็นจากวิศวกรผู้ควบคุม

7.2.2 คำจำกัดความ

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box Type Segment) คือ ชื่อโดยทั่วไปของชิ้นส่วนที่ประกอบด้วย Main Girders และ Splice Plates หรือ Vertical Ribs คำว่าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box Type Segment) ใช้เรียกชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็ก ส่วนชิ้นส่วนที่ทำด้วยคอนกรีต เรียกว่า ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต (Ribbed Type Concrete Segment)

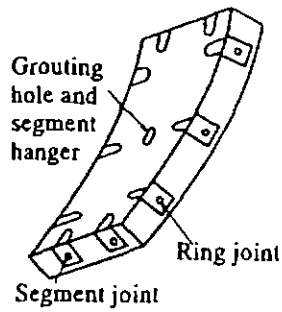


รูปที่ 7.14. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง



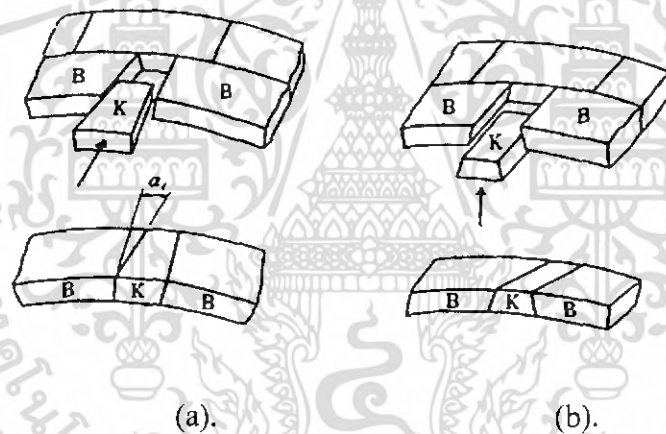
รูปที่ 7.15. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat Type Segment) คือ ชิ้นส่วนที่อยู่ในรูปแผ่นราบ (Flat Plate) จะเป็นชิ้นส่วนที่เป็นของแข็ง โดยปกติจะทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในส่วนที่จะใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบที่คอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้าที่เป็นชิ้นแทนเหล็กเสริมที่เป็นเส้น



รูปที่ 7.16 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) คือ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) จะมี 2 รูปแบบแยกตามการประกอบเข้า รูปแบบแรกจะใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี ส่วนอีกรูปแบบจะใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์



รูปที่ 7.17. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค

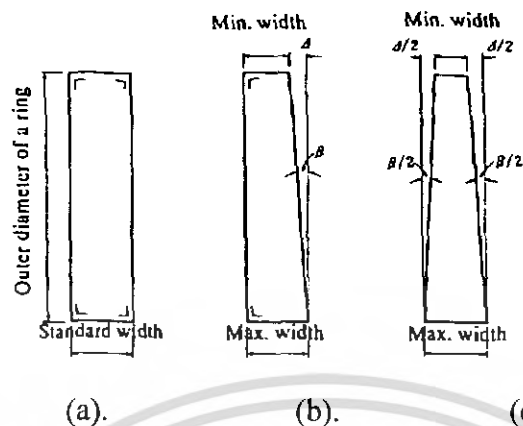
(a).แบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี (b).แบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

จำนวนชิ้นส่วนประกอบวงแหวน (Number of Division) คือ จำนวนของ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ประกอบเป็นวงแหวนอุโมงค์ 1 วงแหวน

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper Ring) คือ วงแหวนที่มีส่วนเรียวให้เล็กลง เพื่อใช้ในการวางโค้งของอุโมงค์หรือเพื่อปรับการเรียงตัวของอุโมงค์

รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่าง ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในวงแหวนอุโมงค์

รอยต่อวงแหวน (Ring Joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างวงแหวนของอุโมงค์แต่ละวงแหวนเข้าด้วยกัน



รูปที่ 7.18. แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์

- (a). วงแหวนผนังอุโมงค์ทางตรง (b). วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียวทางซ้ายหรือทางขวา
(c). วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเอียงประสม

7.2.3 การเลือกโครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์

การเลือกความแข็งแรง โครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์ควรเลือกให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้อุโมงค์ สภาพชั้นดินและวิธีการก่อสร้าง

ในหลายกรณี ผนังอุโมงค์ประกอบด้วยผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) และต้องการการบำรุงรักษาภายใน โดยการค้ำยันดินโดยตรง ต้องการความเหมาะสมต่อจุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และมีการปฏิบัติงานที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์

ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) รูปแบบโดยทั่วไปจะใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box Type Segment) หรือชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat Type Segment) Flat Type ขัดติดด้วย สลักเกลียว (bolt) ชิ้นส่วนสามารถแยกประเภทโดยวัสดุที่ใช้ผลิต

การเลือกประเภทของชิ้นส่วนควรใช้ความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์ สภาพชั้นดิน และวิธีการก่อสร้าง ปัจจุบันชิ้นส่วนคอนกรีตหรือเหล็ก มีมาตรฐานมิติ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และความกว้างที่ใช้สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง เช่น งานส่งน้ำ ระบายน้ำ ส่วนขนาดใหญ่ เช่น รถไฟใต้ดิน โดยใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตเป็นหลัก อื่นๆ ชิ้นส่วนเหล็กหล่อ ใช้ในงานอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงสภาพชั้นดิน ชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตของ Box Type หรือ Flat Type จะถูกนำมาเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ ขณะที่ ชิ้นส่วนเหล็กหล่อ หรือ เหล็กกล้า จะใช้ในที่ที่พิจารณาแรงกระทำเป็นพิเศษ หรือ ชิ้นส่วนที่ต้องการทำช่องเปิด

เมื่อคำนวณแรงกระทำต่อผนังชั้นอุโมงค์ การหาค่าที่แน่นอนของคุณสมบัติของ โครงสร้างอุโมงค์ เป็นสิ่งสำคัญเพราะฉะนั้นการเลือกโครงการสร้างผนังอุโมงค์ ก่อนข้างที่จะ สำคัญที่จะตัดสินใจ ถึงความสำคัญที่จะออกแบบ ของผนังที่ต้องการ

ผนังอุโมงค์ชั้นใน(Secondary Lining)เป็นโครงสร้างภายในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) เมื่อเร็ว ๆ นี้มีการแทนที่ด้วยการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) โดยการใช้การใส่ท่อ (ท่อเหล็ก, ท่อเหล็กหล่อ ฯลฯ) บริเวณช่องว่างระหว่างท่อกับผนังอุโมงค์ หลัก (Primary Lining) คือการถมกลับคืน

เมื่อผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ถือว่าเป็นโครงสร้างถาวรผนังอุโมงค์ ชั้นใน (Secondary Lining) จะใช้เพื่อ

1. ป้องกันการกัดกร่อน
2. เพิ่มความแข็งแรง
3. ปรับการเรียงตัวของอุโมงค์
4. กันน้ำซึม
5. ตกแต่งภายใน

7.2.4 พื้นฐานของการออกแบบ

การออกแบบผนังอุโมงค์ควรอยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยที่ยอมรับให้กับ จุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และควรขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบจากความเสี่ยงที่ยอมรับให้บนเงื่อนไขที่ เพียงพอและเหมาะสมกับการก่อสร้าง งานจะต้องทำโดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพดี

พื้นฐานและหลักการในการออกแบบผนังอุโมงค์ แรงที่ใช้ออกแบบและทางเลือก โครงสร้างควรอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และทฤษฎี และการดำเนินงานว่าสามารถบอกล ผลสะท้อนกลับได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมแรงของอุโมงค์นั้นซับซ้อน อย่างน้อยที่สุด ความปลอดภัยของโครงสร้างเป็นพื้นฐานของการออกแบบ เมื่อเกิดปัญหาของความไม่แน่นอน เพียงเล็กน้อย

การออกแบบผนังอุโมงค์นั้น ความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญไม่เฉพาะหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้วเท่านั้นแต่ขณะก่อสร้างก็ต้องปลอดภัยด้วย

7.2.5 ขั้นตอนการออกแบบ

มีความจำเป็นที่จะต้องอธิบายให้ชัดเจนถึงสภาพ ความคิด ข้อสันนิษฐาน และ ขั้นตอนการคำนวณ

เนื้อหาของการคำนวณออกแบบควรจะชัดเจนทุกขั้นตอนตามข้างล่าง

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. เงื่อนไขการก่อสร้าง
6. วิศวกรผู้ออกแบบ
7. วันที่ประกาศใช้

7.2.6 แบบก่อสร้าง

แบบก่อสร้างควรจะบอกตำแหน่งติดตั้งของโครงสร้าง รูปร่าง ขนาดของ โครงสร้าง ที่สัมพันธ์กับหน้าตัดอย่างชัดเจน

แบบก่อสร้างต้องมีข้อมูลตามที่กำหนด

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. สภาพการก่อสร้าง
6. ชื่อและตำแหน่งของวิศวกรผู้ออกแบบ
7. มาตรฐาน
8. หน่วยที่ใช้

7.3 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกกระทำ

7.3.1 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ

น้ำหนักบรรทุกที่ควรพิจารณาในการแบบผนังอุโมงค์

1. แรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบ
2. แรงดันน้ำ
3. น้ำหนักบรรทุกคงที่
4. น้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน
5. แรงต้านทานของดิน
6. น้ำหนักภายใน
7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง
8. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว
9. ผลกระทบจากอุโมงค์ใกล้เคียง
10. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง
11. ผลกระทบจากการทรุดตัวของชั้นดิน
12. อื่นๆ

ผนังอุโมงค์ (Lining) ต้องได้รับการออกแบบและการรับรองในเรื่องความปลอดภัยของอุโมงค์และการปฏิบัติงานไม่เฉพาะหลังที่ดำเนินการเปิดใช้แล้วแต่ต้องมีความปลอดภัยในระหว่างทำการก่อสร้างด้วย แรงที่จะนำมาประกอบการพิจารณาการออกแบบอาจพิจารณาจากจุดประสงค์การใช้อุโมงค์แรงที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแบ่งแยกได้ 3 ประเภทดังนี้

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary Loads)

- แรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบ
- แรงดันน้ำ
- น้ำหนักบรรทุกคงที่
- น้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน
- แรงต้านทานของดิน

น้ำหนักกระทำรอง (Secondary Loads)

- น้ำหนักภายใน
- น้ำหนักจากการก่อสร้าง
- ผลกระทบจากแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special Loads)

- ผลกระทบจากอุโมงค์ใกล้เคียง
- ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง
- ผลกระทบจากการทรุดตัวของชั้นดิน
- อื่นๆ

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary Loads) เป็นแรงพื้นฐานที่จะต้องนำมาพิจารณาเสมอในการออกแบบ น้ำหนักกระทำรอง (Secondary Loads) จะเกิดขึ้นระหว่างทำการก่อสร้างหรือหลังจาก ก่อสร้างอุโมงค์เสร็จแล้ว ซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ สภาพการก่อสร้างและตำแหน่งของอุโมงค์ ในขณะที่น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special Loads) จะถูกนำมาพิจารณาโดยเฉพาะตามสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

น้ำหนักบรรทุกเหล่านี้ที่นำมาพิจารณาเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ แต่การวิเคราะห์ผลจากน้ำหนักบรรทุกไม่คงที่จะถูกนำมาใช้เมื่อแผ่นดินไหวมีผลกระทบต่ออุโมงค์ การออกแบบผนังอุโมงค์โดยการวิเคราะห์แรงเช่นนี้เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

7.3.2 แรงดันในแนวตั้งและแนวราบ

ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน แรงดันน้ำใต้ดิน สามารถแบ่งได้ 2 แบบในการหาค่าแรงดันดิน

1. แรงดันน้ำใต้ดินกระทำแยกจากแรงดันดิน (แรงดันประสิทธิผล)
2. แรงดันน้ำใต้ดินกระทำรวมกับแรงดันดิน (แรงดันรวม)

แรงดันในแนวตั้งจะเป็นน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniform Load) กระทำต่ออุโมงค์ที่ส่วนบน (Crown) ของอุโมงค์ ขนาดของแรงจะพิจารณาจากความหนาของดินเหนืออุโมงค์ รูปร่างหน้าตัดและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังอุโมงค์และสภาพชั้นดิน

แรงดันดินในแนวราบควรจะเป็นแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ และจะแปรผันตามหน่วยน้ำหนักของดินและความลึก โดยจะกระทำที่จุดศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ที่ส่วนบน (Crown) และส่วนล่าง (Bottom) ของอุโมงค์ ขนาดของแรงคำนวณจากการคูณแรงดันดินในแนวตั้งกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

แรงที่กระทำบนผนังอุโมงค์เป็นแรงที่ซับซ้อนพอสมควรและยากต่อการหาค่าที่แน่นอน ตามที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีที่ใช้หาค่าแรงดันดินโดยทั่วไป แรงดันดินที่กระทำต่อผนัง

อุโมงค์ตามที่กล่าวข้างต้นอธิบายถึงการหาค่าแรงดันดินโดยไม่คำนึงถึงการผิดรูปของอุโมงค์แรงดันดินที่กระทำต่ออุโมงค์ที่ ส่วนล่าง (Bottom) ที่พิจารณาคือแรงต้านทานของดิน

การคำนวณหาค่าแรงดันดินมี 2 วิธี หนึ่งคือแยกแรงดันน้ำออกจากแรงดันดิน (แรงดันประสิทธิภาพ) และอีกวิธีคือรวมแรงดันดินและแรงดันน้ำเข้าด้วยกัน (แรงดันรวม) โดยวิธีแรกจะนำมาประยุกต์ใช้กับดินทรายและวิธีหลังใช้กับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว อาจยกเว้นดินพวกดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)

7.3.2.1 แรงดันดินในแนวตั้ง

แรงดันดินในแนวตั้งจะกระทำต่อผนังอุโมงค์ในระยะยาวมันเป็นสิ่งที่ดีกว่าที่ไม่ถือว่าผลกระทบของดินต่อผนังอุโมงค์จากการที่ดินเหนียวอุโมงค์นั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการใช้ Loosening Pressure ในการออกแบบ โดยอาจจะเกิดปัญหาในดินทรายแต่ไม่มีผลต่อดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว มากไปกว่านั้นสภาพของชั้นดินต้องสนใจเพราะแรงดันดินในบางครั้งมีแนวโน้มจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะแรงดันที่กระทำบนท่อที่ฝังดินอยู่ซึ่งดินเหนียวอุโมงค์มีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ อาจเป็นไปได้ที่จะใช้สูตร Loosening Pressure ในการหาค่าแรงดันดินในแนวตั้งโดย ในดินทรายถ้าดินเหนียวอุโมงค์มีความหนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่าจะใช้สูตรคำนวณ Loosening Pressure ในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวถ้าความหนาของดินเหนียวอุโมงค์หนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่า ในดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay $N \geq 8$) จะใช้สูตรคำนวณ Loosening Pressure ในขณะที่ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay $4 \leq N < 8$) หรือ ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay $2 \leq N < 4$) จะใช้การหาค่าตามปกติ

7.3.2.2 แรงดันดินในแนวราบ

คล้ายกับแรงดันดินในแนวตั้ง เป็นเรื่องยากที่จะประมาณแรงดันดินในแนวราบให้ถูกต้อง โดยหาได้จากการคูณกันระหว่างแรงดันดินในแนวตั้งกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง หรืออาจจะสมมติให้แรงดันดินในแนวตั้งที่หาได้นั้นเป็นน้ำหนักที่กระทำอยู่ที่ส่วนบน (Crown) ซึ่งน้ำหนักบรรทุกนี้จะเพิ่มอัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อความลึกของชั้นดินวัดจากส่วนบน (Crown) สามารถนำมาใช้หาค่าแรงดันดินในแนวราบได้

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างควรหาจากความเกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณออกแบบและวิธีการก่อสร้างไม่ใช่ธรรมชาติของดิน อย่างไรก็ตามเป็นสิ่งที่ยากที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ได้อย่างถูกต้องแต่สามารถหาได้จากค่าที่แสดงในตารางที่ 7.4. การเปลี่ยนแปลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันดินในแนวดิ่งและแนวราบค่อนข้างมาก ดังนั้นควรจะมีมาตรการในการหาค่าหลังจากพิจารณาถึงสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

ตารางที่ 7.4. แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

วิธีออกแบบ	ชนิดของดิน	λ
แรงดันประสิทธิผล	ดินทรายแน่นมาก	0.30 - 0.45
	ดินทรายแน่น	0.45 - 0.55
	ดินทรายหลวม	0.50 - 0.60
	ดินเหนียวแข็งมาก	0.35 - 0.45
	ดินเหนียวแข็ง	0.45 - 0.55
	ดินเหนียวปานกลาง	0.45 - 0.55
แรงดันรวม	ดินเหนียวปานกลาง	0.55 - 0.65
	ดินเหนียวอ่อน	0.65 - 0.75
	ดินเหนียวอ่อนมาก	0.75 - 0.85

7.3.3 แรงดันน้ำ

1. ระดับน้ำใต้ดินควรจะถูกกำหนดโดยการออกแบบในด้านความปลอดภัย ความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในขณะก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง
2. แรงดันในแนวดิ่งควรจะถูกกระจายเท่าๆ กันและขนาดของแรงดันควรจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic Pressure) กระทำบนจุดสูงสุดของอุโมงค์และจุดต่ำสุดของอุโมงค์
3. แรงดันน้ำในแนวราบควรกระจายอย่างสม่ำเสมอและขนาดของแรงจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic Pressure)

แรงดันน้ำกระทำบนผนังอุโมงค์ขณะที่การทำงานของอุโมงค์แสดงความแตกต่างของลักษณะจากสภาพดินเดิมต่อสภาพการก่อสร้าง มันค่อนข้างยากที่คาดเดาแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจริง ระดับน้ำใต้ดินในระยะยาวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติหรืออิทธิพลที่ไม่แน่นอน สำหรับอุโมงค์ที่ตั้งอยู่ในที่ระดับน้ำใต้ดินสูงไม่ต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย ถ้าอยู่ในระดับน้ำใต้ดินต่ำจะต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย มีความสำคัญมากที่จะต้องหาค่าระดับน้ำใต้ดินให้ถี่ถ้วนเพื่อจะคำนวณแรงดันน้ำ

ถ้าหน่วยน้ำหนักจมน้ำ คือ หน่วยน้ำหนักที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน แรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic Pressure) เป็นการเหมาะสมที่จะเป็นแรงดันน้ำที่ใช้ออกแบบ อย่างไรก็ตามการกระจายและขนาดของแรงดันน้ำสามารถหาได้อย่างง่ายโดยทำตามข้อกำหนดของแรงดันดิน

ผลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ เป็นแรงลอยตัวถ้าผลของแรงดันดินในแนวดิ่งมากกว่าแรงลอยตัวจะทำให้เกิดแรงต้านทานของดินในแนวดิ่งได้อุโมงค์ (Subgrade Reaction) ถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าแรงดันดินในแนวดิ่งจะทำให้อุโมงค์ลอย อาจทำให้เกิดความเสียหาย จึงต้องมีการเพิ่มน้ำหนักให้ตัวอุโมงค์โดยการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) หรือเพิ่มน้ำหนักบนผิวดินด้วยค้อนน้ำหนัก

7.3.4 น้ำหนักบรรทุกคงที่

น้ำหนักบรรทุกคงที่ คือ แรงในแนวดิ่งที่กระจายตามความยาวบริเวณจุดศูนย์กลางของผนังอุโมงค์

ถ้าการกระจายของน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของจุดศูนย์กลาง ต้องเฉลี่ยค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่

ในระหว่างการก่อสร้างผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ซึ่งจะต้องทำหลังจากผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) มันคงแล้วน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ไม่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบผนังอุโมงค์เพราะน้ำหนักของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จะถูกรับด้วยตัวของมันเอง อย่างไรก็ตามถ้าสมมติให้ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) รับน้ำหนักรวมกับ ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) น้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ควรจะใช้คำนวณด้วยในระหว่างการก่อสร้าง

สำหรับหน่วยน้ำหนักที่ใช้คำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ ถ้ารู้ค่าน้ำหนักน้ำหนักที่แท้จริงก็ควรนำมาใช้ แต่ถ้ารู้ก็สามารถใช้หน่วยน้ำหนักโดยประมาณ $24 - 26 \text{ kN/m}^3$ (สำหรับชั้นส่วนคอนกรีต)

7.3.5 ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน

ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน ควรจะกำหนดแรงที่ส่งผ่านที่ใช้พิจารณาความเค้นในพื้นที่ดิน

ผลกระทบของความเค้นในพื้นที่ดินเพราะน้ำหนักที่กระทำบนผิวดินหรือปฏิกิริยาของโครงสร้างฐานรากที่ลดลงตามความลึก เพราะฉะนั้น สามารถพิจารณาระยะไกลๆ จากจุดที่น้ำหนักกระทำ ผลกระทบจากน้ำหนักกองที่บนผิวดินส่วนมากในแรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์จะลดลง อย่างไรก็ตามไม่ยากที่จะเจาะจงระดับของผลกระทบ ผลกระทบเหล่านี้ในแรงดันดินจะแปรผันขึ้นอยู่กับ ขนาดของน้ำหนัก ประเภทของฐานราก ความลึกระหว่างดินที่อยู่เหนืออุโมงค์กับส่วนล่าง(Bottom) ของฐานรากและสภาพชั้นดิน

สำหรับการคำนวณหาค่าการส่งผ่านของความเค้นในดิน มีวิธีที่ใช้เช่น สูตรของ Boussinesq และ สูตรของ Westergaard

โดยปกติอุโมงค์จะไม่ตั้งอยู่ใต้โครงสร้างโดยตรงแต่จะอยู่ใต้ถนน ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างเหนืออุโมงค์จะต้องตรวจสอบถ้าอุโมงค์อยู่ใกล้เขตถนน

7.3.6 แรงต้านทานของดิน

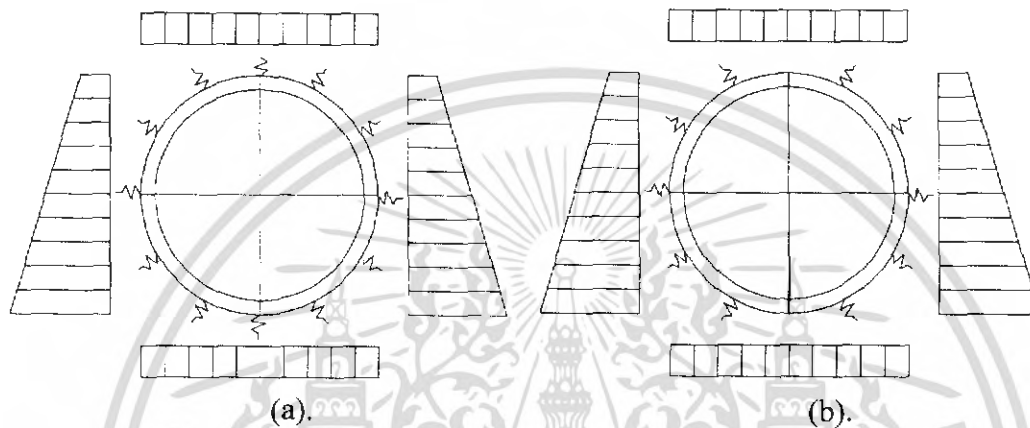
ขอบเขตของการเกิดแรง รูปร่างของการกระจายและความหนาแน่นของแรงต้านทานควรพิจารณาที่รอยต่อโดยวิธีการคำนวณที่ใช้

ท่ามกลางน้ำหนักที่กระทำบนผนังอุโมงค์ แรงต้านทานของดินแตกต่างจากน้ำหนักอื่นที่สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ โดยปกติแรงต้านทานของดินสามารถแยกได้เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนรูปของดินและแรงต้านทานที่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดินสมัยก่อน การปฏิบัติโดยปกติที่จะระบุรูปร่างการกระจายของแรงต้านทานให้สมดุลกับแรงที่กำหนดได้ขณะที่ต่อมาการสันนิษฐานของ Winkler เป็นพื้นฐานที่ว่าแรงต้านทานเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน

วิธีที่ใช้ในการคำนวณ แรงต้านทานในแนวดิ่งซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำหนักที่กำหนดได้ เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของดินและเป็นแรงต้านทานที่สม่ำเสมอเหมือนกับน้ำหนักที่กำหนดได้ ในอีกด้านหนึ่งแรงต้านทานในแนวราบเป็นแรงต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน และมีรูปร่างการกระจายของแรงเป็นสามเหลี่ยม ค่าความ

หนาแน่นสูงสุดที่ตำแหน่ง Spring Line ผ่อกว้างในช่อง $\pm 45^\circ$ จาก Spring Line สำหรับการออกแบบสามารถใช้ค่าคงที่ของแรงต้านทานในแนวราบได้จากตาราง

อีกวิธีหนึ่งในการอธิบายถึงแรงกระทำชั้นดินกับผนังอุโมงค์ โดยสมมติให้ชั้นดินเปรียบเสมือนสปริง วิธีนี้แรงต้านทานของดินจะสมมติว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์โดยเป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดิน โดยในยุโรป แบบจำลองจะให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ ส่วนในญี่ปุ่นจะใช้แบบจำลองของ Winkler



รูปที่ 7.19. แสดงแบบจำลองสปริง

(a). แบบจำลองที่ให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ

(b). แบบจำลองของ Winkler

7.3.7 น้ำหนักจากการก่อสร้าง

น้ำหนักจากการก่อสร้างที่ควรพิจารณา มีดังนี้

1. แรงผลักดันของแม่แรงกดหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Jacks)
2. แรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting)
3. น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง
4. อื่นๆ

น้ำหนักชั่วคราวที่กระทำบนชั้นส่วนขณะขั้นตอนการก่อสร้าง จากขั้นตอนการติดตั้งชั้นส่วนจนถึงขั้นตอนหลังจากการทำให้แข็งของการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) เพื่อเติมเต็มช่องว่างในส่วนท้าย ที่สะสมกัน เรียกว่า น้ำหนักจากการก่อสร้าง น้ำหนักนี้จะใช้พิจารณาในการออกแบบชั้นส่วนจากความสัมพันธ์ของวิธีการก่อสร้าง

เป็นการยากที่จะกำหนดน้ำหนักจากการก่อสร้างได้แม่นยำ เพราะมันจะแปรผันขึ้นกับสภาพชั้นดินและสภาพการทำงาน ๆ อย่างไรก็ตาม สำคัญมากที่จะต้องทำความเข้าใจในน้ำหนักจากการก่อสร้าง เพราะการหาค่าที่เหมาะสมและผลสะท้อนของมันในการออกแบบจะนำไปสู่การใช้งานที่เข้าใจได้ง่ายของชิ้นส่วนและความมั่นคงและการปฏิบัติที่มีประสิทธิภาพ

1. แรงผลักดันของแม่แรงกดหัวชุดเจาะอุโมงค์ (Shield Jacks) เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของอุโมงค์ในขณะที่หัวชุดเจาะอุโมงค์(shield) เคลื่อนที่ไปข้างหน้า
2. แรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) เมื่อทำการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) โดยการฉีดวัสดุเข้าไปที่ช่องว่างในส่วนท้ายแรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) จะกระทำเป็นน้ำหนักเพียงชั่วคราวบริเวณรอบๆ รูที่อัดฉีดน้ำปูน (Grouting)
3. น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง ใช้ออกแบบค้ำยันที่ยกชิ้นส่วน ต้องศึกษาอิทธิพลของค้ำยันแต่ละชิ้นส่วนขณะประกอบเป็นวง
4. อื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา น้ำหนักจากการก่อสร้างอื่นๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ของ Backup Carriage น้ำหนักที่กำหนดโดยประเภทของหัวชุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ฯลฯ

7.3.8 น้ำหนักภายใน

น้ำหนักภายในคือน้ำหนักที่กระทำด้านในผนังอุโมงค์หลังจากอุโมงค์เสร็จแล้ว และกำหนดตามสภาพความเป็นจริง

น้ำหนักภายในจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ ความปลอดภัยของโครงสร้างของผนังอุโมงค์จะต้องรองรับน้ำหนักประเภทนี้ด้วย

การศึกษาถึงน้ำหนักนี้โดยปกติจะละเว้น นอกจากอุโมงค์จะอยู่ในชั้นดินที่อ่อนมาก อย่างไรก็ตามน้ำหนักภายในจะถูกพิจารณาถึงอิทธิพลต่อกำลังและการเปลี่ยนรูปของอุโมงค์

สำหรับอุโมงค์ที่ภายในจะมีแรงดันน้ำ ต้องการการเลือกแบบ โครงสร้างที่เหมาะสมรวมถึง ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) และนำสิ่งที่จำเป็นมาศึกษาแล้วนำไปรวมกับน้ำหนักอื่นที่ใช้ออกแบบ ในการศึกษาี้ แรงดันดินและแรงดันน้ำที่กระทำต่ออุโมงค์ควรจะมีระดับในการกำหนดและการรับรองความปลอดภัยของอุโมงค์

7.3.9 ผลกระทบจากแผ่นดินไหว

เมื่อคาดว่าจะเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหวควรศึกษาตามความสำคัญของอุโมงค์ และพิจารณาถึงสภาพที่ตั้งของอุโมงค์ สภาพโดยรอบของชั้นดิน การเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น รายละเอียดโครงสร้างของอุโมงค์และสภาพอื่นๆ ที่จำเป็น

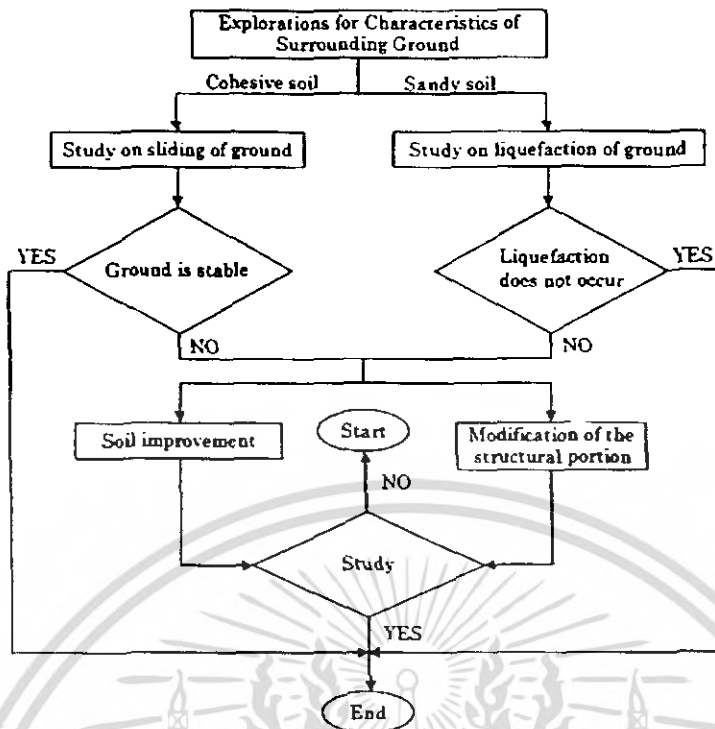
ผลกระทบจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างใต้ดินโดยปกติพิจารณาจาก

เมื่อนำหน้าของอุโมงค์เปรียบเทียบกับดินที่อุโมงค์อยู่นั้นอุโมงค์จะเบากว่า เพราะฉะนั้นแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออุโมงค์ แรงเฉื่อยของอุโมงค์มีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินโดยรอบ ผลที่ตามมาคือ อุโมงค์จะสั่นเกือบจะเหมือนกับชั้นดิน ถ้าดินเหนืออุโมงค์มากกว่า ความลึกที่แน่นอน เพราะฉะนั้นผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะน้อยเมื่อเทียบกับอุโมงค์และความหนาของดินเหนืออุโมงค์ และในดินที่มีความสม่ำเสมอ เปรียบเทียบกับอุโมงค์ที่สร้างโดยวิธีอื่น เช่น วิธีขุดและปิดหน้าดิน(Cut & Cover) อุโมงค์ที่ใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะเคลื่อนไหวไปกับชั้นดินได้มากกว่า เพราะความแข็งแรงของอุโมงค์มีน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่ออุโมงค์ที่อยู่ในสภาพดังต่อไปนี้ ควรจะทำการศึกษาเพราะผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะมีมาก

1. บริเวณที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงทันที เช่น จุดเชื่อมต่อระหว่างอุโมงค์ใต้ดินกับปล่องแนวตั้ง (Shaft)
2. เมื่ออุโมงค์อยู่ในชั้นดินอ่อน
3. เมื่อสภาพชั้นดินทางธรณีวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงความลึกของหินดินดานอย่างทันทีทันใด
4. เมื่อการวางตัวของอุโมงค์เป็นโค้งที่ค่อนข้างแหลม

โดยปกติการศึกษาเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่มีผลต่ออุโมงค์จะทำ 3 สิ่งคือ

1. ความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ
2. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางขวาง
3. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางยาว



รูปที่ 7.20 แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ

7.3.10 ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง

เมื่อสร้างอุโมงค์ขนานกับอุโมงค์ที่มีอยู่ สภาพชั้นดินโดยรอบ ตำแหน่งของอุโมงค์ที่สัมพันธ์กับอุโมงค์อื่น เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและวิธีการก่อสร้าง ควรจะนำมาพิจารณา ถ้าจำเป็นต้องพิจารณาว่า อุโมงค์มีปฏิกิริยาอย่างไรต่ออุโมงค์อื่นและผลกระทบซึ่งกันและกันขณะที่ทำการก่อสร้าง

การสร้างอุโมงค์ 2 อุโมงค์หรือมากกว่า อุโมงค์ควรจะตั้งขนานกันและใกล้ๆกันในแนวราบหรือตามแนวยาวสำหรับความยาวที่แน่นอน ความหลวมของดินมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาของอุโมงค์และผลกระทบจากการก่อสร้างควรจะนำมาพิจารณา และถ้าจำเป็นต้องมีมาตรการที่เหมาะสม เช่น การเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ หรือเพิ่มมาตรการ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินและป้องกันการเปลี่ยนรูปของดิน

หัวข้อที่ต้องพิจารณาก่อนก่อสร้างอุโมงค์ขนานมีดังนี้

1. ตำแหน่งของอุโมงค์ที่สัมพันธ์กับอุโมงค์อื่น
2. สภาพของดินรอบอุโมงค์
3. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์
4. เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างของอุโมงค์ที่กำลังจะสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประเภทของหั่วจุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่ใช้ในการก่อสร้าง
6. น้ำหนักที่เกิดในช่วงเวลาการก่อสร้าง

7.3.11 ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง

เมื่อคาดว่าโครงสร้างอื่นจะถูกสร้างบริเวณใกล้เคียงขณะที่ก่อสร้างหรือหลังจากจุดเจาะอุโมงค์ การประเมินควรจะทำถ้าอาจเกิดผลกระทบที่เลวร้าย

มีหลายกรณีที่อยู่ใกล้เคียงหรือโครงสร้างอื่น สร้างพร้อมกันหรือหลังจากการก่อสร้าง อุโมงค์จะมีผลกระทบจากการที่ดินโดยรอบถูกรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขณะทำงาน การเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ การป้องกันที่เหมาะสมหรือการปรับปรุงดินอาจจะจำเป็น

ควรทำการเปลี่ยนเงื่อนไขในการคำนวณเมื่อ

1. เมื่อโครงสร้างใหม่จะสร้างเหนืออุโมงค์โดยตรง หรือ ใกล้เคียง สิ่งที่เปลี่ยนคือ น้ำหนักบรรทุกเหนือผิวดิน
2. เมื่อดินเหนือหรือใต้อุโมงค์โดยตรงถูกขุด สิ่งที่เปลี่ยนคือ เงื่อนไขของแรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบและคุณสมบัติของดิน เช่น ค่าคงที่ของแรงต้านทานของดิน
3. เมื่อดินด้านข้างของอุโมงค์ถูกรบกวน สิ่งที่เปลี่ยนคือ แรงดันดินหรือแรงต้านทานด้านข้าง
4. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของแรงดันน้ำ

7.3.12 ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน

ผลกระทบจากการทรุดตัวควรทดสอบเมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน

เมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน ต้องสนใจว่าดินมีคุณสมบัติอย่างไร หลังจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน มีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์และจุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวดิ่ง (Shaft)

ก. อุโมงค์

ผลกระทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์สามารถศึกษาได้ 2 ทางคือ

1. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวของอุโมงค์ในทางขวาง
2. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวไม่เท่ากันของอุโมงค์ในทางยาว

ข. จุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวตั้ง (Shaft)

แนวโน้มความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปรากฏที่จุดต่อของอุโมงค์กับปล่องแนวตั้ง (Shaft) เพราะความแตกต่างของโครงสร้างจะเชื่อมต่อที่ตำแหน่งนี้เพราะฉะนั้นจะป้องกันการเกิดความเค้นโดยการใช้อยู่ที่ขั้วค้ำยัน

7.3.13 น้ำหนักอื่นๆ

ก่อนการทดสอบควรพิจารณาถึงผลกระทบของน้ำหนักอื่นที่อาจเป็นไปได้ในการออกแบบผนังอุโมงค์

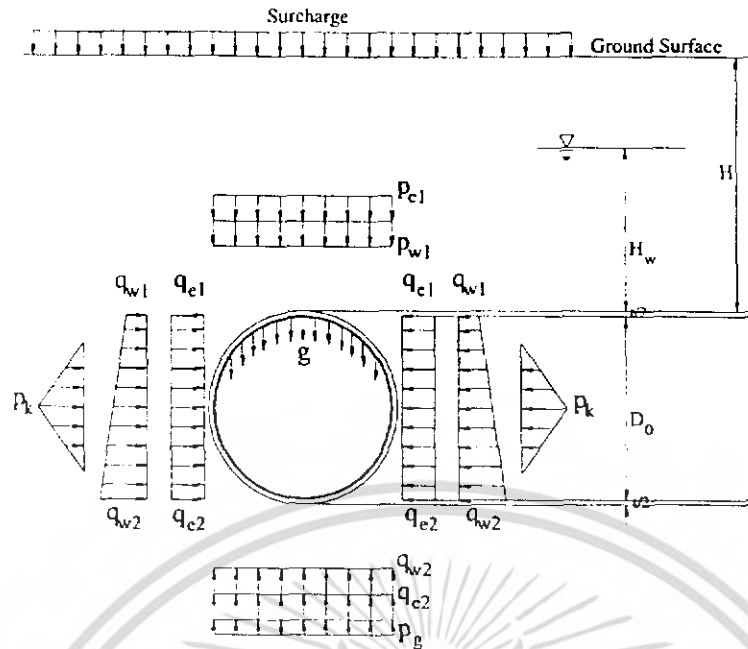
7.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์

7.4.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์ที่ได้จากแต่ละทฤษฎีแล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ต่อไป โดยมีทฤษฎีที่จะนำมาเรียบเรียงได้แก่ ทฤษฎีของ Terzaghi Einstein Muir Wood และทฤษฎี Beam-Spring Model

7.4.2 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi

จากรูปที่ 4.1. แสดงหน่วยแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ซึ่งจะทำการคำนวณแยกเป็นส่วนๆ แล้วรวมผลการคำนวณแรงกระทำภายนอกทั้งหมดแบ่งได้ ดังนี้



รูปที่ 7.21. แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี Terzaghi

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง ($P = P_{c1} + P_{w1}$)

$$M_1 = \frac{1}{4}(1 - 2\sin^2 \theta)P \cdot R_c^2 \quad (4.1.)$$

$$N_1 = \sin^2 \theta \cdot P \cdot R_c \quad (4.2.)$$

$$Q_1 = -P \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (4.3.)$$

เมื่อ

M_1 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

Q_1 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน ($Q = q_{c1} + q_{w1}$)

$$M_2 = \frac{1}{4}(1 - 2\cos^2 \theta)Q \cdot R_c^2 \quad (4.4.)$$

$$N_2 = \cos^2 \theta \cdot Q \cdot R_c \quad (4.5.)$$

$$Q_2 = Q \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (4.6.)$$

เมื่อ

M_2 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_2 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_2 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยม ($Q' = q_{c2} + q_{w2}$)

$$M_3 = \frac{1}{48}(6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c^2 \quad (4.7.)$$

$$N_3 = \frac{1}{16}(\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c \quad (4.8.)$$

$$Q_3 = \frac{1}{16}(\sin\theta + 8\sin\theta\cos\theta - 4\sin\theta\cos^2\theta)(Q' - Q) \cdot R_c \quad (4.9.)$$

เมื่อ M_3 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_3 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_3 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน ($k\delta$)

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{4} \quad M_4 = (0.2346 - 0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c^2 \quad (4.10.)$$

$$N_4 = (0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c \quad (4.11.)$$

$$Q_4 = 0.3536\sin\theta \cdot (k\delta)R_c \quad (4.12.)$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad M_4 = (-0.3487 + 0.5\sin^2\theta + 0.2357\cos^3\theta)(k\delta)R_c^2 \quad (4.13.)$$

$$N_4 = (-0.7071\cos\theta + \cos^2\theta + 0.7071\sin^2\theta\cos\theta)(k\delta)R_c \quad (4.14.)$$

$$Q_4 = (\sin\theta\cos\theta - 0.7071\cos^2\theta\sin\theta)(k\delta)R_c \quad (4.15.)$$

เมื่อ M_4 = โมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

N_4 = แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

Q_4 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ ($g = \gamma_c \cdot t$)

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad M_5 = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta \right) g \cdot R_c^2 \quad (4.16.)$$

$$N_5 = \left(\theta\sin\theta - \frac{1}{6}\cos\theta \right) g \cdot R_c \quad (4.17.)$$

$$Q_5 = - \left(\theta\cos\theta + \frac{1}{6}\sin\theta \right) g \cdot R_c \quad (4.18.)$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$M_5 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta) \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta - \frac{1}{2} \pi \sin^2 \theta \right) g \cdot R_c^2 \quad (4.19.)$$

$$N_5 = \left(-\pi \sin \theta + \theta \sin \theta + \pi \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c \quad (4.20.)$$

$$Q_5 = \left\{ (\pi - \theta) \cos \theta - \pi \sin \theta \cos \theta - \frac{1}{6} \sin \theta \right\} g \cdot R_c \quad (4.21.)$$

เมื่อ M_5 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์
 N_5 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์
 Q_5 = แรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

ดังนั้นแรงกระทำทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดังนี้

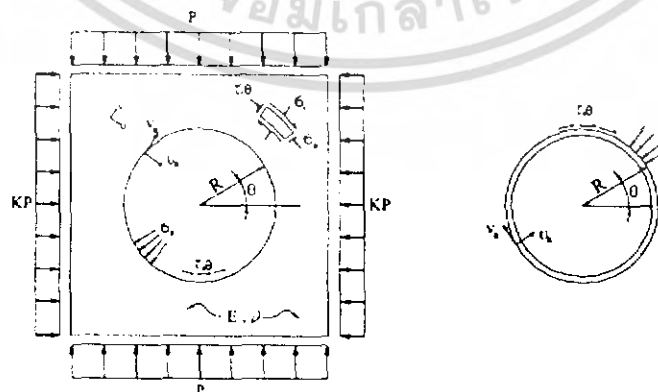
$$\text{แรงในแนวแกนทั้งหมด (Total Axial Forces)} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 \quad (4.22.)$$

$$\text{แรงโมเมนต์ดัดทั้งหมด (Total Moment)} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 \quad (4.23.)$$

$$\text{แรงเฉือนทั้งหมด (Total Shear Forces)} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (4.24.)$$

7.4.3 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

วิธีนี้จะใช้หลักการของทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์ จะสามารถหาค่า การเสียรูปและแรงที่เกิดขึ้นภายในผนังอุโมงค์โดยมีสมมติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัด เป็นอีลาสติก เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังรูปที่ 4.2. ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ จะได้สูตรนำมาใช้เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและ โมเมนต์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์



รูปที่ 7.22. แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein, 1979)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาแรงภายใน

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2}(1+K)(1-a_0^*) + \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_1^*)\cos 2\theta \quad (4.25.)$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_1^*)\cos 2\theta \quad (4.26.)$$

7.4.4 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

วิธีนี้มีพื้นฐานอยู่บนข้อสมมติว่า Circular Lining เกิด Deformation เป็นรูปวงรี ใน Elastic Ground และไม่เกิด Shear Stress ระหว่าง Lining กับดิน และสมมติให้อุโมงค์ถูก ล้อมรอบด้วย Elastic Ground แบบสมบูรณ์ ในวิธีนี้ Bending Moment ใน Lining จะเป็นดัง สมการข้างล่างนี้

$$P_o = P - Q' \quad (4.27.)$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (P + Q') \quad (4.28.)$$

$$Q_2 = \frac{E \times R_o^3}{E_c(1+\nu) \cdot 12 \cdot I} \quad (4.29.)$$

$$S_r = \frac{P_o \times (1+2Q_2)}{2 \times \left(1 + \frac{Q_2 \cdot (3-2\nu)}{3-4\nu}\right)} \quad (4.30.)$$

$$S_{N1} = 3 \times (3-4\nu) \times \frac{P_o}{2} - (2 \cdot Q_2 + (4-6\nu)) \times S_r \quad (4.31.)$$

$$S_{N2} = 4 \cdot Q_2 + 5 - 6\nu \quad (4.32.)$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} \quad (4.33.)$$

$$Q = \frac{E_c \times R_o}{E(1+\nu) \cdot (R_o - R_i)} \quad (4.34.)$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1+Q} \quad (4.35.)$$

$$N_B = \Delta P \times R_o \quad (4.36.)$$

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง ($P = P_{el} + P_{wl}$)

$$M_1 = \frac{R_o^2}{6} (2S_N + S_T) \cos 2\theta \quad (4.37.)$$

$$N_1 = -\frac{R_o}{3} (S_N + 2S_T) \cos 2\theta + N_h \quad (4.38.)$$

เมื่อ M_1 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอก
 N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอก

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ ($g = \gamma_c \cdot l$)

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_2 = \left(\frac{3}{8} \pi - \theta \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c^2 \quad (4.39.)$$

$$N_2 = \left(\theta \sin \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c \quad (4.40.)$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$M_2 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta) \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta - \frac{1}{2} \pi \sin^2 \theta \right) g \cdot R_c^2 \quad (4.41.)$$

$$N_2 = \left(-\pi \sin \theta + \theta \sin \theta + \pi \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c \quad (4.42.)$$

เมื่อ M_2 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์
 N_2 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

$$\text{แรงโมเมนต์คัตทั้งหมด (Total Moment)} = M_1 + M_2 \quad (4.43.)$$

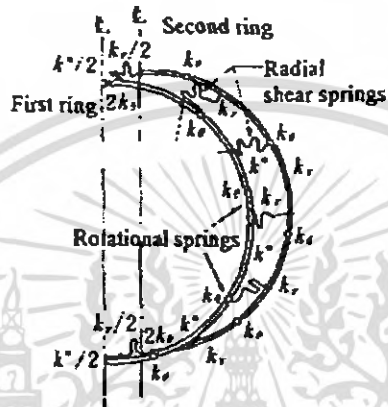
$$\text{แรงในแนวแกนทั้งหมด (Total Axial Forces)} = N_1 + N_2 \quad (4.44.)$$

ซึ่ง K_O = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง
 R_O = รัศมีถึงผิวด้านนอกของ Lining
 R_C = รัศมีถึงแนวแกนกลางของ Lining
 E_C = Young's Modulus of Lining
 E = Young's Modulus ของดินหรือหิน
 I = Moment of Inertia ของ Lining ต่อหน่วยความยาวของอุโมงค์
 ν = Poisson's ratio สำหรับดิน

7.4.5 ทฤษฎีหาแรงกระทำภายในโดยวิธี Beam-Spring Model

7.4.5.1 แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง

รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบจะถูกยึดด้วย Bolt เหตุก็เพื่อลดความตายตัวของ รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบ ปรับลดในรอยต่อที่ตายตัวเนื่องจากรูปร่างโดยใช้ Rotation Spring สำหรับยึดคิวงแหวนข้างเคียงในแนวรอยต่อตามเส้นรอบวง และใช้ Shear Spring ตาม รอยต่อแนวยาวของอุโมงค์



รูปที่ 7.23. แสดงลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนประกอบของวิธี Beam-spring model

วิธี Beam-spring model ซึ่งถูกใช้งานในลักษณะรูปร่างซึ่งประกอบด้วย ชิ้นส่วนประกอบโดยเฉพาะที่เหมือนกัน รอยต่อโดยรอบใช้ Rotation spring และรอยต่อตาม แนวความยาว (ring joint) ใช้ Shear spring สำหรับความมั่นคงของ Rotation spring และ Shear spring จะถูกกำหนดโดยการคำนวณมาจากการทดลอง

7.4.5.2 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ

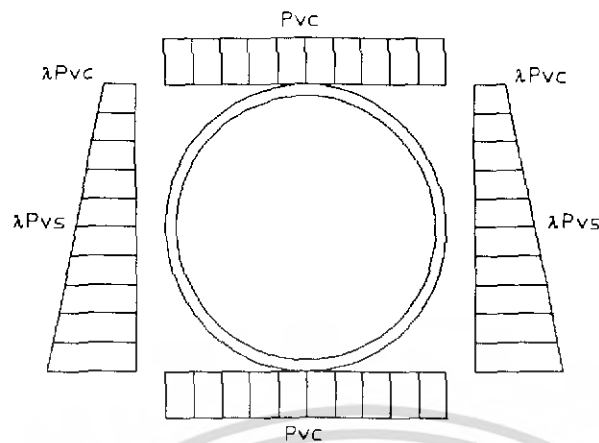
ดินทราย

ดินและน้ำ พิจารณาแยกกัน

ดินเหนียว

ดินและน้ำ พิจารณารวมกัน

7.4.5.3 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวตั้งและแรงดันดินทางข้าง



รูปที่ 7.24 แสดงแรงดันดินแนวตั้งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-Spring Model

แรงดันดินแนวตั้งถูกสมมติให้เป็นน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอกระทำที่ตำแหน่ง Crown และ Invert วงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ โดยที่ Total Overburden Pressure หรือ Loosening Earth Pressure ทั้งคู่จะใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันดินแนวตั้ง ตามกฎค่าตัวแปรกำลังใช้สำหรับคำนวณ Loosening Earth Pressure ถูกกำหนดจากการทดสอบดิน ดังตาราง 4.1.

สำหรับแรงดันดินทางข้าง แรงกระทำแผ่ที่ไม่สม่ำเสมอถูกนำไปประยุกต์ ในการกระจายนี้กำหนดค่าโดยการเพิ่มจำนวนของแรงดันแนวตั้งสำหรับการคำนวณออกแบบที่กระทำที่ Top ของอุโมงค์โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง (λP_{vc}) และกำหนดอีกค่าโดยการเพิ่มจำนวนของแรงดันแนวตั้งสำหรับการคำนวณออกแบบที่กระทำที่ Spring Line ของอุโมงค์โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง (λP_{vs}) ถูกกระจายขยายพื้นที่ไปยังตำแหน่งต่ำสุดของอุโมงค์

ฉะนั้นวิธีการคำนวณนี้ ค่าแรงดันดินทางข้างจะน้อยกว่าที่ตำแหน่งต่ำสุดของการคิดตามวิธีที่ถือตามตำราต่างๆไป ซึ่งก็สรุปได้ว่าแรงดันดินทางข้างจะมีการกระจายค่าน้อยตามความลึก

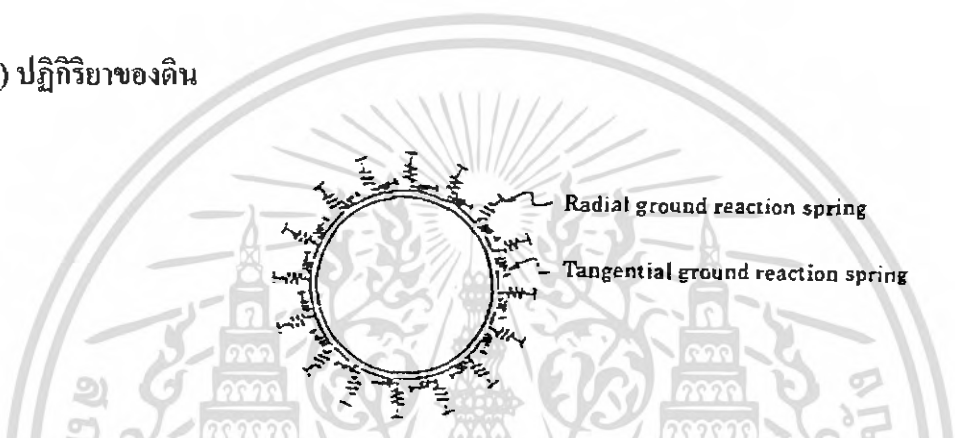
ตารางที่ 7.5. แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-spring model

ชนิดของดิน	k_o
ดินทรายแน่นมาก	0.45
ดินทรายแน่น	0.45 - 0.50
ดินทรายหลวม	0.50 - 0.60

ตารางที่ 7.5.(ต่อ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-spring model

ชนิดของดิน	k_o
ดินเหนียวแข็งมาก	-
ดินเหนียวแข็ง	0.50 – 0.60
ดินเหนียวปานกลาง	0.50 – 0.60
ดินเหนียวอ่อน	0.60 – 0.70
ดินเหนียวอ่อนมาก	0.70 – 0.80

(1.) ปฏิกริยาของดิน



รูปที่ 7.25. แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนวยาว

แรงปฏิกริยาของดินจะถูกสมมติให้รองรับโดยระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของอุโมงค์ และพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในสัดส่วนของการแทนที่ในชั้นส่วนประกอบ หลักเกณฑ์การสมมตินี้ แรงปฏิกริยาของดินถูกกำหนดโดยการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงปฏิกริยาของดิน โดยการแทนที่ ระบบ Spring เฉพาะทิศทางตามแนวรัศมีเท่านั้นจะถูกพิจารณาสำหรับการออกแบบใช้งาน

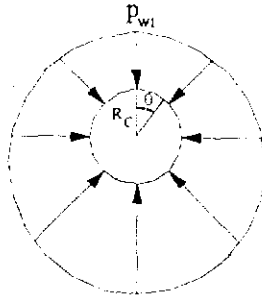
ค่าสัมประสิทธิ์ (k_r) ของแรงปฏิกริยาของดินตามแนวรัศมีในวิธี Beam-Spring Model จะถูกกำหนดโดยใช้สมการ

$$k_r = \frac{3E_o}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c} \quad (4.45.)$$

(2.) แรงดันน้ำ

พิจารณาเปลี่ยนตามความลึก แรงดันน้ำใต้ดินมีค่าที่กระทำต่อศูนย์กลางของอุโมงค์จากตำแหน่งใดๆที่ถูกสมมติ จากรูป 4.5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.26. แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-Spring Model

(3.) น้ำหนักของตัวอุโมงค์

น้ำหนักของตัวอุโมงค์จะถูกสมมติให้เป็นแรงที่มากระทำที่กระจายสม่ำเสมอ ในทิศทางตามแนวตั้ง ตามแกนสะเทินของอุโมงค์

7.4.5.4 แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้ออกแบบในวิธี Beam-Spring Model

ก่อนจะมีการนำเสนอวิธี Beam-Spring Model ได้มีการตรวจวัดในสนาม การทดลอง การวิเคราะห์ เหล่านี้ได้ถูกนำมาปฏิบัติกับวิธีการทดสอบแบบลองผิดลองถูก ทำให้ได้แนวคิดที่เกี่ยวกับแรงดันดินแนวตั้ง แรงดันน้ำ และการควบคุมแรงดันดินและแรงดันน้ำ ซึ่งมันถูกค้นพบว่า สัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ)เป็นรายละเอียดที่เป็นผลกระทบสำคัญต่อความไหวของจำนวนค่าของแรงภายในหน้าตัด

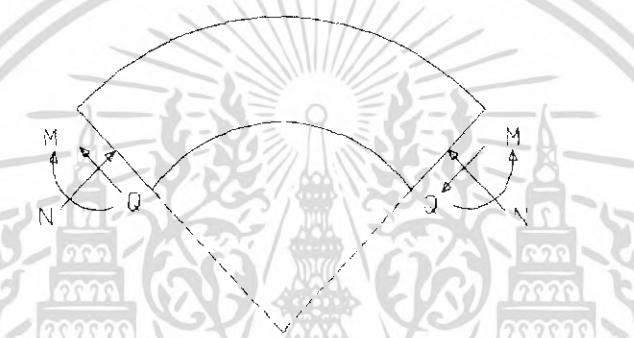
สัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ) เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในความไหวของค่า $+M_{max}$ หลังจากที่มีการคำนวณซ้ำๆหลายรอบ

ในชั้นของดินเหนียวอ่อน การคำนวณ $+M_{max}$ เป็นค่าต่ำสุดสำหรับแรงดันดินแนวตั้ง(Total Overburden Earth Pressure) ที่ความลึกที่แนชัดเมื่อสัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ)เป็นค่าคงที่ การตรวจวัดในสนามแสดงผลลัพธ์ให้เห็นว่าแรงดันดินแนวตั้งที่กระทำมีค่า 70-80 % ของ Total Overburden Pressure ซึ่งสิ่งนี้แสดงว่าต้องมีการศึกษากรณีนี้สู่การลดแรงดันดินแนวตั้งเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นการออกแบบที่กระเบียบแบบแผนเดิม

7.5 ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม

7.5.1 กล่าวนำ

เนื่องด้วยผนังอุโมงค์ใต้ดินจะต้องรับแรงที่มากระทำภายในผนังอุโมงค์ใต้ดิน แรงต่างๆที่มากระทำอันได้แก่ โมเมนต์ดัด (Bending Moment) แรงตามแนวแกน (Axial Force) และแรงเฉือน (Shear Force) ดังรูป 5.1. ซึ่งแรงทั้งสามเหล่านี้ที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้ต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมในผนังอุโมงค์ใต้ดิน เพื่อที่จะทำให้ผนังอุโมงค์ใต้ดินสามารถรับภาระต่างๆได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยในบทนี้จะกล่าวทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตามวิธีกำลัง



รูปที่ 7.27 แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

7.5.2 พื้นฐานการออกแบบ

วิธีการออกแบบเหล็กเสริมที่ผู้เขียนได้นำเสนอนี้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการออกแบบเสาสั้น และวิธีการออกแบบคาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.5.2.1 วิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง

กำลังขององค์ภายใต้แรงดัด M_n และแรงตามแนวแกน P_n จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสองข้อคือความสมดุลของแรงภายในและการสอดคล้องของความเครียด รูปที่ 5.2. แสดงภาวะทั่วไปของหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม ภายใต้ผลรวมของแรงดัดและแรงตามแนวแกน จะหาแรงดึงหรือแรงอัดในเหล็กเสริมได้จากความสัมพันธ์กับความเครียด ณ ตำแหน่งของเหล็กเสริมนั้น

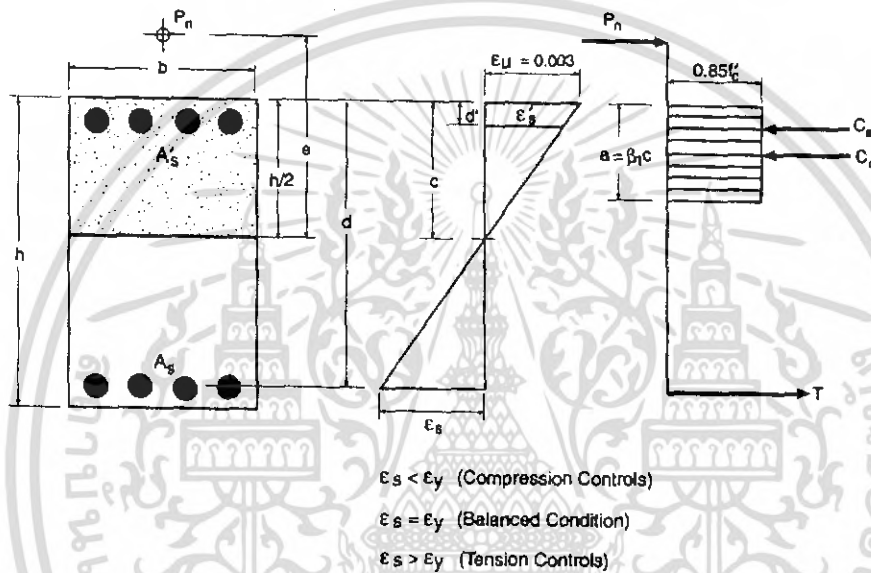
$$T = A_s f_s = A_s (E_s \epsilon_s) \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s < \epsilon_y \quad (5.1a.)$$

$$\text{หรือ } T = A_s f_y \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s \geq \epsilon_y \quad (5.1b.)$$

$$C_s = A_s' f_s' = A_s' (E_s \epsilon_s') \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s' < \epsilon_y \quad (5.2a.)$$

$$\text{หรือ } C_s = A_s' f_y \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s' \geq \epsilon_y \quad (5.2b.)$$

$$C_c = 0.85 f_c' b a \quad (5.3.)$$



รูปที่ 7.28 การกระจายความเค้นและหน่วยแรงในหน้าตัด

ภายใต้ผลรวมของแรงคัตและแรงตามแกน

$$\text{โดยที่ } f_s' = \frac{6120(c-d')}{c} \leq f_y \quad (5.4.)$$

$$f_s = \frac{6120(c-d)}{c} \leq f_y \quad (5.5.)$$

และจะหาค่าลึงระบุในการรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ (P_n และ M_n) ได้จากสภาวะสมดุลของหน้าตัด

จากความสัมพันธ์ของแรงจะได้

$$P_n = C_c + C_s + T \quad (5.6.)$$

จากความสัมพันธ์ของโมเมนต์รอบศูนย์ถ่วงของหน้าตัด

$$M_n = P_n e = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (5.7.)$$

ถ้ารู้สถานะของความเครียดก็จะหา P_n และ M_n ได้ทันที ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของสถานะความเครียดสมดุล เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก ($\epsilon_s = \epsilon_y$) พร้อมกับความเครียดในผิวคอนกรีตภายใต้แรงอัดถึงจุดอัดแตก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{6120}} = \frac{6120}{6120 + f_y} \quad (5.8.)$$

$$\text{ดังนั้น } a_b = \frac{6120}{6120 + f_y} \beta_1 d \quad (5.9.)$$

$$\text{และ } \frac{\epsilon_s'}{\epsilon_u} = \frac{c_b - d'}{c_b} \quad (5.10.)$$

$$\text{ดังนั้น } \epsilon_s' = 0.003 \left(1 - \frac{d'}{c_b} \right) = 0.003 \left(1 - \frac{d'}{d} \frac{6120 + f_y}{6120} \right) \quad (5.11.)$$

$$\text{และ } f_s' = E \epsilon_s' \quad \text{แต่ต้องไม่เกิน } f_y \quad (5.12.)$$

จากความสัมพันธ์ของแรง

$$P_{nb} = 0.85 f_c' a_b b + A_s' f_s' + A_s f_y \quad (5.13a.)$$

ถ้า $f_s' = f_y$ และ $A_s' = A_s$ จะได้

$$P_{nb} = 0.85 \beta_1 f_c' b d \frac{6120}{6120 + f_y} \quad (5.13b.)$$

จากความสมดุลของโมเมนต์

$$M_n = P_{nb} e_b = 0.85 f_c' b a_b \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (5.14.)$$

กำลังรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและแรงดัด ที่สภาวะความเครียดสมดุล เป็นเพียงแค่กรณีหนึ่งในหลายกรณีที่จะเกิดขึ้นในหน้าตัดซึ่งสามารถแบ่งแยกออกไปได้อีก 2 กรณี คือ กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด และกรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง ดังจะนำเสนอต่อไปนี้

(1.) กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_n) มากกว่าแรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุล (P_{nb}) หรือมีระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) น้อยกว่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่สภาวะสมดุล (e_b) องค์อาคารจะวิบัติโดยการอัดแตกของคอนกรีตในระหว่างที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงจะน้อยกว่าจุดคราก หรืออาจอยู่ภายใต้แรงอัดด้วย การออกแบบและวิเคราะห์ในกรณีนี้ จะใช้การลองผิดลองถูกโดยการสมมติค่าของความลึกของแกนสะเทิน (c) ร่วมกับความสอดคล้องของความเครียดและสมการสมดุล หรืออาจจะใช้การประมาณโดยวิธีของ Whitney

วิธีของ Whitney จะให้ค่าในการออกแบบที่ต่ำกว่าค่าจริงที่ได้จากการลองผิดลองถูก ยกเว้นแต่เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำมีค่าเข้าใกล้แรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุลวิธีของ Whitney จะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีของ Whitney ถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัยสมมติฐานตามที่แสดงในรูปที่ 5.3. ดังต่อไปนี้

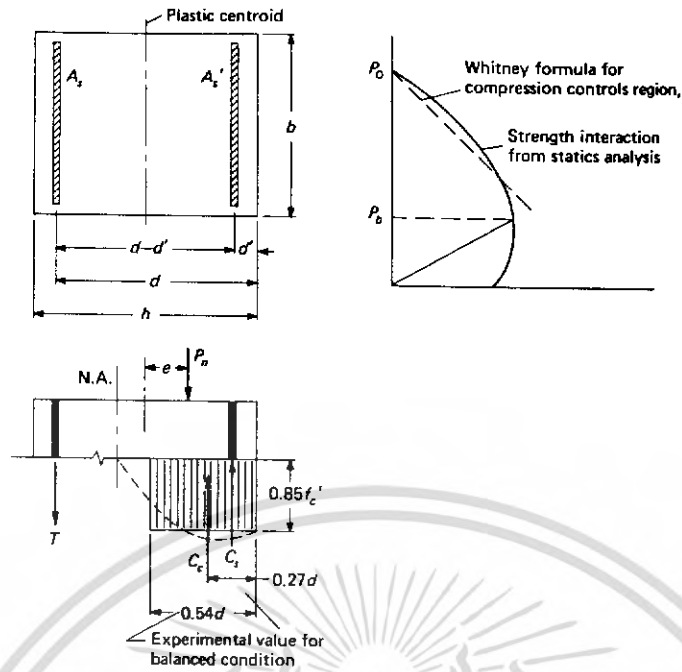
- มีการวางเหล็กเสริมแถวเดียวแบบสมมาตรรอบแกนรับแรงดัด
- เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก
- ไม่คิดพื้นที่ของคอนกรีตซึ่งถูกแทนที่โดยพื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- ความลึกของรูปกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้าเทียบเท่าของหน่วยแรงในคอนกรีต $a = 0.54d$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่สภาวะสมดุลขององค์อาคารรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
- ความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและแรงดัดภายใต้อิทธิพลของแรงอัดถือว่าเป็นเชิงเส้นตรง

จากรูปที่ 5.3 ถ้ารวมโมเมนต์รอบแนวเหล็กเสริมรับแรงดึงจะได้

$$P_n \left(e + \frac{d - d'}{2} \right) = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (5.15.)$$

$$\text{โดยที่ } C_c = 0.85 f_c' b a = 0.85 f_c' b (0.54d) = 0.459 b d f_c' \quad (5.16a.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.29. สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

$$C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.459 f_c' b d \left(d - \frac{0.54d}{2} \right) = \frac{1}{3} f_c' b d^2 \quad (5.16b.)$$

$$C_s = A_s' f_y \quad (5.16c.)$$

แทนค่า สมการ (5.16b.) และ (5.16c.) ลงใน (5.15.) จะได้

$$P_n = \frac{\frac{1}{3} f_c' b d^2}{e + \frac{1}{2} (d - d')} + \frac{A_s' f_y (d - d')}{e + \frac{1}{2} (d - d')} = \frac{\frac{f_c' b h}{3} e}{\frac{d^2}{2} + \frac{3(d - d')h}{2d^2}} + \frac{A_s' f_y}{\frac{e}{d - d'} + \frac{1}{2}} \quad (5.16d.)$$

$$\text{เมื่อ } e = 0 : P_n = P_o = 0.85 f_c' b h + f_y (A_s + A_s') = 0.85 f_c' b h + 2 f_y A_s'$$

แทนค่าข้างบนลงในสมการ (5.16d.) จะได้

$$0.85 f_c' b h + 2 f_y A_s' = \frac{\frac{f_c' b h}{3}}{0 + \frac{3(d - d')h}{2d^2}} + \frac{A_s' f_y}{0 + \frac{1}{2}} \quad (5.16e.)$$

$$\frac{3(d - d')h}{2d^2} = \frac{1}{0.85} = 1.18 \quad (5.16f.)$$

แทนค่าสมการ (1.16c.) ลงใน (1.16d.) จะได้

$$P_n = \frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2} + 1.18} + \frac{A_s'f_y}{\frac{e}{d-d'} + 0.5} \quad (5.17.)$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความชะลูด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s' = \left(P_n - \frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{e}{d-d'} + 0.5}{f_y} \right) \quad (5.18.)$$

จะต้องเสริมเหล็ก A_s' นี้ทั้งสองด้านของแกนสมมาตร ทำให้ได้ปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมด $A_{st} = 2A_s'$

(2.) กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดิ่ง

เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_n) น้อยกว่าแรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุล (P_{nb}) หรือเมื่อระยะเยื้องศูนย์ (e) มากกว่าระยะเยื้องศูนย์ที่สภาวะสมดุล (e_b) องค์อาคารจะวิบัติโดยเริ่มต้นจากที่เหล็กเสริมรับแรงดิ่งถึงจุดคราก ในระหว่างที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัดจะถึงจุดครากหรือน้อยกว่าก็ได้

การวางเหล็กเสริมให้สมมาตรรอบแกนรับแรงดัด ($A_s' = A_s$) เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป เพื่อรับการกลับทิศทางของแรงในองค์อาคารรับแรงตามแนวแกนและแรงดัด เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวางเหล็กกลับทางในการก่อสร้าง

ถ้าสมมติให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดครากด้วย และใช้ $A_s' = A_s$ จะได้

$$P_n = 0.85f_c'ba, \quad a = \frac{P_n}{0.85f_c'} \quad (5.19.)$$

$$\begin{aligned}
 M_n = P_n e &= 0.85 f_c' b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 0.85 f_c' b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d')
 \end{aligned} \quad (5.20.)$$

แทนค่า P_n และ a จากสมการ (5.19.) ลงใน (5.20.)

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{P_n}{1.7 f_c' b} \right) + A_s f_y (d - d') \quad (5.21.)$$

$$\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right) - A_s f_y (d - d') = 0 \quad (5.22.)$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความชะลุด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s = \frac{\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right)}{f_y (d - d')} \quad (5.23.)$$

จะต้องเสริมเหล็ก A_s นี้ทั้งสองด้านของแกนสมมาตร ทำให้ได้ปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมด $A_{s1} = 2A_s$

(3.) เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง

แสดงค่า N_u , P_u และ V_u

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \left(1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g} \right) \quad (5.24.)$$

แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริม

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (5.25.)$$

เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม

ระยะเรียงของเหล็กปลอกคือค่าน้อยที่สุดจาก

$$s = \frac{A_s f_s d}{V_s} \quad (5.26a.)$$

$$s = \frac{A_s f_y}{3.5 b_w} \quad (5.26b.)$$

$$s = \frac{d}{2} \quad (5.26c.)$$

7.5.2.2 วิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

ในการออกแบบของคานรับแรงคัต เช่น กานและแผ่นพื้น จะต้องลดค่ากำลังระบุของหน้าคัต (Nominal Strength, M_n) ลงด้วยตัวคูณลดกำลัง ϕ เพื่อที่จะได้มาซึ่งกำลังที่ใช้ในการออกแบบ (Design Strength, ϕM_n) ขององค์คานนั้น และกำลังที่ใช้ในการออกแบบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (Required Strength, M_u)

ทุกองค์คานภายใต้แรงคัตจะต้องถูกปฏิบัติให้เป็นไปตามข้อกำหนดในด้านกำลังและนอกเหนือจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อกำหนดในด้านการใช้งาน ซึ่งควบคุมการแตกร้าวขององค์คานโดยจะอยู่ในรูปแบบของการจัดวางเหล็กเสริม และที่สำคัญที่สุดก็คือการแอ่นตัวขององค์คาน

(1.) การออกแบบหน้าคัตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว

การออกแบบหน้าคัตสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวเป็นมีตอนได้ดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าโดยประมาณของอัตราส่วนการเสริมเหล็กรับแรงดึง ρ ซึ่งต้องไม่เกิน $0.75\rho_b$ และไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ ซึ่งอัตราส่วนเหล็กเสริมที่สถานะสมดุล ρ_b หาได้จากสมการ

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{6120 f_y}{6120 + f_y} \right) \quad (5.27.)$$

โดยที่ $\beta_1 = 0.85 ; f_c' \leq 280 \text{ kg/cm}^2$ (5.28a.)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} ; 280 < f_c' \leq 560 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.28b.)$$

$$\beta_1 = 0.65 ; f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.28c.)$$

2. เมื่อหาค่า ρ ได้แล้ว โดยที่ $\rho_{\min} \leq \rho \leq 0.75\rho_b$

โดยที่ $R_n = \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_c'} \right)$ (5.29.)

3. จากขั้นตอนที่ 3 หาค่าใหม่ของ ρ จากสมการที่(5.30.)

โดยที่ $\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0.85 f_c'}} \right)$ (5.30.)

4. หาปริมาณเหล็กเสริม A_s ที่ต้องการ

$$A_s = \rho b d \quad (5.31.)$$

โดยที่ ρ เป็นค่าแก้ไขที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

(2.) เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

- แสดงค่า แรงเฉือนที่กระทำบนหน้าตัดและจุดตัวคูณเพิ่มแล้ว (V_u)
- กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53 f_c' b d \quad (5.32.)$$

- แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริมใช้สมการ 5.25.
- เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม
- ระยะเรียงของเหล็กปลอกใช้เงื่อนไขตามสมการ 5.26a. 5.26b. และ 5.26c.

7.6 ตัวอย่างการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

7.6.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะแสดงรายการคำนวณจากทฤษฎีต่างๆ โดยใช้โครงการอุโมงค์ระบายน้ำของพื้นที่เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร เป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบนอก 5.40 เมตร ความหนาของอุโมงค์ 0.25 เมตร โดยศูนย์กลางของอุโมงค์อยู่ที่ความลึก 23.525 เมตรจากผิวดิน

7.6.2 การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

กรณีที่ 1 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นทรายแน่น (Dense Sand)

กรณีที่ 2 อุโมงค์วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)

7.6.2.1 ชิ้นส่วนคอนกรีต



รูปที่ 7.30. แสดงขนาดของอุโมงค์

กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบนอกของอุโมงค์, $D_o = 5.40$ เมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบในของอุโมงค์, $D_i = 4.90$ เมตร

ความหนาของผนัง, $t = 0.25$ เมตร

ความกว้างของชั้นส่วน, $b = 1.20$ เมตร

จำนวนชั้นส่วนใน 1 วง $= 6$ ชั้น

7.6.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2

คอนกรีต ; $f'_c = 400 \text{ kg/cm}^2$

$E_c = 30 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

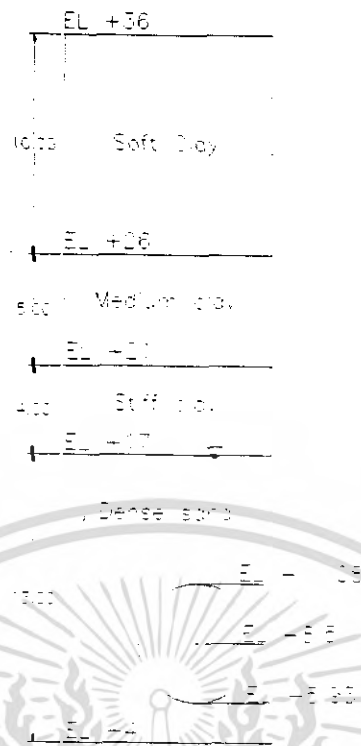
เหล็กเสริม ; SD 40 ; $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$

SR 24 ; $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$

7.6.2.3 สภาพชั้นดิน

ตารางที่ 6.1. แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 1

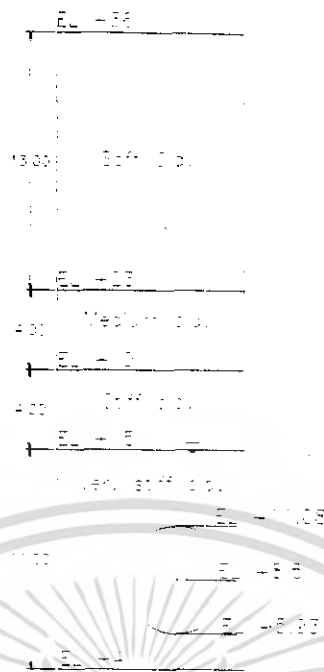
Layer	Level	γ kN/m ³	ϕ' (°)	S_u kN/m ²	E kN/m ²	ν	k_o
Soft clay	0-10	16	15	20	4000	0.3	0.65
Medium clay	10-15	17	20	50	10000	0.3	0.65
Stiff clay	15-19	18	20	100	25000	0.3	0.65
Dense sand	19-28	20	30	-	45000	0.25	0.5



รูปที่ 7.31. แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 1

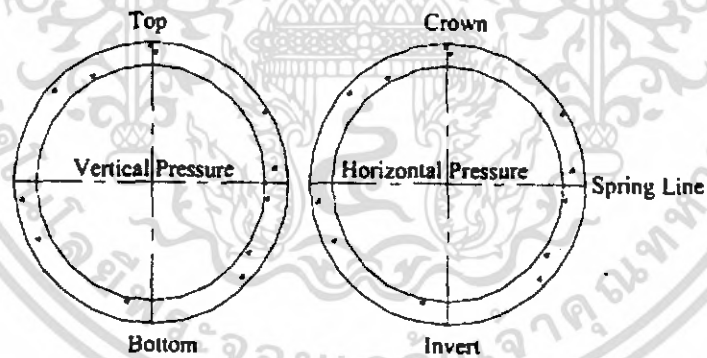
ตารางที่ 7.7. แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 2

Layer	Level	γ kN/m ³	ϕ' (°)	S_u kN/m ²	E kN/m ²	ν	k_o
Soft clay	0-13	16	15	20	4000	0.3	0.65
Medium clay	13-17	17	20	50	10000	0.3	0.65
Stiff clay	17-21	18	20	100	25000	0.3	0.65
Very stiff clay	21-33	18	25	100	35000	0.3	0.65

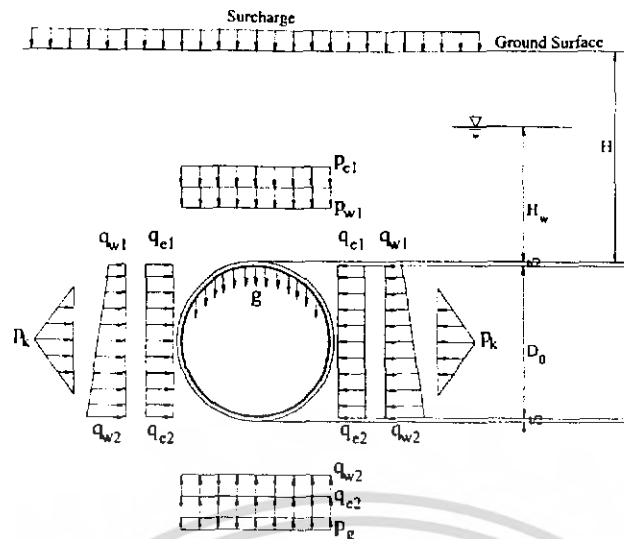


รูปที่ 7.32. แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 2

7.6.2.4 หาแรงกระทำภายนอก



รูปที่ 7.33. แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวตั้งและแนวนอนที่จุดต่างๆ



รูปที่ 7.34. เปรียบเทียบของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก

กรณีที่ 1

แรงดันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง Top

-แรงดันดิน

$$p_{e1} = (16 \times 10) + (17 \times 5) + (18 \times 4) + [(20 - 10) \times 5.92] = 376.2 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w1} = 10 \times 5.92 = 59.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง Bottom

-แรงดันดิน

$$p_{e2} = 376.2 + [(20 - 10) \times 5.4] = 430.2 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w2} = 59.2 + (10 \times 5.4) = 113.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Crown

-แรงดันดิน

$$q_{e1} = (0.5 \times 376.2) = 188.10 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w1} = 59.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Invert

-แรงดันดิน

$$q_{e2} = (0.5 \times 430.2) = 215.10 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w2} = 113.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงต้านทานในแนวนอน ($k \cdot \delta$)

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454 k R_c^4)}$$

โดยที่ ; $P = p_{e1} + p_{w1} = 435.40 \text{ kN/m}^2$

$$Q = q_{e1} + q_{w1} = 247.30 \text{ kN/m}^2$$

$$Q' = q_{e2} + q_{w2} = 328.30 \text{ kN/m}^2$$

δ = การเสยรูปทางด้านข้างจากแรงดันดินและน้ำ

η = สัมประสิทธิ์การเสยรูปของอุโมงค์ $\eta = 1$

E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (kN/m^2)

I = โมเมนต์เฉื่อยของคอนกรีต (m^4)

k = Subgrade Reaction Factor (ดังตาราง 7.8)

ตารางที่ 7.8. แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	$k \text{ (kg/cm}^3\text{)}$
ดินทรายแน่นมาก, ดินเหนียวแข็งมาก	3.0-5.0
ดินทรายแน่น, ดินเหนียวแข็ง	1.0-3.0
ดินเหนียวปานกลาง	0.5-1.0
ดินทรายหลวม	0.0-1.0
ดินเหนียวอ่อน	0.0-0.5
ดินเหนียวอ่อนมาก	0

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1.2 \times 0.25^3}{12} = 0.00156 \text{ m}^4/\text{ring}$$

$$I = \frac{0.00156}{1.2} = 0.00130 \text{ m}^4/\text{m}$$

$$E_c = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

จากตาราง $k = 20000 \text{ kN/m}^3$

$$R_c = \text{รัศมีของอุโมงค์ถึงจุด Centroid} = 2.575 \text{ m}$$

แทนค่าแล้วได้
$$\delta = \frac{[(2 \times 435.40) - 247.30 - 328.30]2.575^4}{24(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 20000 \times 2.575^4)}$$

$$\delta = 0.00685$$

ดังนั้น $k \cdot \delta = 20000 \times 0.00685 = 137 \text{ kN/m}^2$

แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์ (p_g)

$$p_g = \pi \cdot g$$

$$g = \frac{W}{2\pi \cdot R_c}$$

$$W = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)\gamma_c}{4}$$

โดยที่ ; W = น้ำหนักของอุโมงค์

$$\gamma_c = \text{หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต} (26 \text{ kN/m}^3)$$

$$W = \frac{\pi(5.4^2 - 4.9^2) \times 26}{4} = 105.16 \text{ kN/m}$$

$$g = \frac{105.16}{2\pi \cdot 2.575} = 6.50 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น $p_g = \pi \cdot 6.5 = 20.42 \text{ kN/m}^2$

กรณีที่ 2

แรงดันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง Top

-แรงดันดิน

$$p_{e1} = (16 \times 13) + (17 \times 4) + (18 \times 4) + [(18 - 10) \times 3.92] = 379.36 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w1} = 10 \times 3.92 = 39.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง Bottom

-แรงดันดิน

$$p_{e2} = 379.36 + [(18 - 10) \times 5.4] = 422.56 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w2} = 39.2 + (10 \times 5.4) = 93.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Crown

-แรงดันดิน

$$q_{e1} = (0.65 \times 379.36) = 246.58 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w1} = 39.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Invert

-แรงดันดิน

$$q_{e2} = (0.65 \times 422.56) = 274.66 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w2} = 93.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงต้านทานในแนวนอน ($k \cdot \delta$)

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454kR_c^4)}$$

$$\text{โดยที่ ; } P = p_{e1} + p_{w1} = 418.56 \text{ kN/m}^2$$

$$Q = q_{e1} + q_{w1} = 285.78 \text{ kN/m}^2$$

$$Q' = q_{e2} + q_{w2} = 367.86 \text{ kN/m}^2$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1.2 \times 0.25^3}{12} = 0.00156 \text{ m}^4/\text{ring}$$

$$I = \frac{0.00156}{1.2} = 0.00130 \text{ m}^4/\text{m}$$

$$E_c = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

จากตาราง $k = 40000 \text{ kN/m}^3$

$$R_c = \text{รัศมีของอุโมงค์ถึงจุด Centroid} = 2.575 \text{ m}$$

แทนค่าแล้วได้
$$\delta = \frac{[(2 \times 418.56) - 285.78 - 367.86]2.575^4}{24(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 40000 \times 2.575^4)}$$

$$\delta = 0.00283$$

ดังนั้น $k \cdot \delta = 40000 \times 0.00280 = 113.13 \text{ kN/m}^2$

แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์ (p_g)

$$p_g = \pi \cdot g$$

$$g = \frac{W}{2\pi \cdot R_c}$$

$$W = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)\gamma_c}{4}$$

โดยที่ ; W = น้ำหนักของอุโมงค์

$$\gamma_c = \text{หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต} (26 \text{ kN/m}^3)$$

$$W = \frac{\pi(5.4^2 - 4.9^2) \times 26}{4} = 105.16 \text{ kN/m}$$

$$g = \frac{105.16}{2\pi \cdot 2.575} = 6.50 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น $p_g = \pi \cdot 6.5 = 20.42 \text{ kN/m}^2$

7.6.2.5 หาแรงกระทำภายใน

(1.) โดยทฤษฎีของ Terzaghi

กรณีที่ 1

ตารางที่ 7.9. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	721.74	0.00	-721.74	0.00	721.74
N_1 (kN/m)	0.00	560.58	1121.16	560.58	0.00
Q_1 (kN/m)	0.00	-560.58	0.00	560.58	0.00

ตารางที่ 7.10. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	-409.94	0.00	409.94	0.00	-409.94
N_2 (kN/m)	636.80	318.40	0.00	318.40	636.80
Q_2 (kN/m)	0.00	318.40	0.00	-318.40	0.00

ตารางที่ 7.11. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_3 (kN-m/m)	-55.95	-7.91	67.14	7.91	-78.32
N_3 (kN/m)	65.18	42.93	0.00	61.36	143.40
Q_3 (kN/m)	0.00	42.93	13.04	-61.36	0.00

ตารางที่ 7.12. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงด้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 1

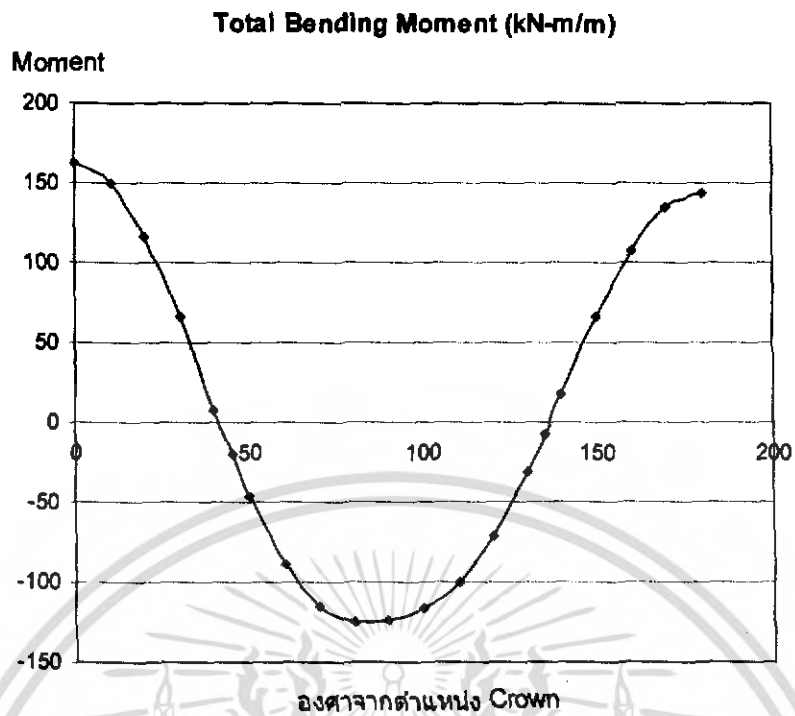
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-108.13	-14.02	137.48	-14.02	-108.13
N_4 (kN/m)	124.78	88.22	0.00	88.22	124.78
Q_4 (kN/m)	0.00	88.22	0.00	-88.22	0.00

ตารางที่ 7.13. แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 1

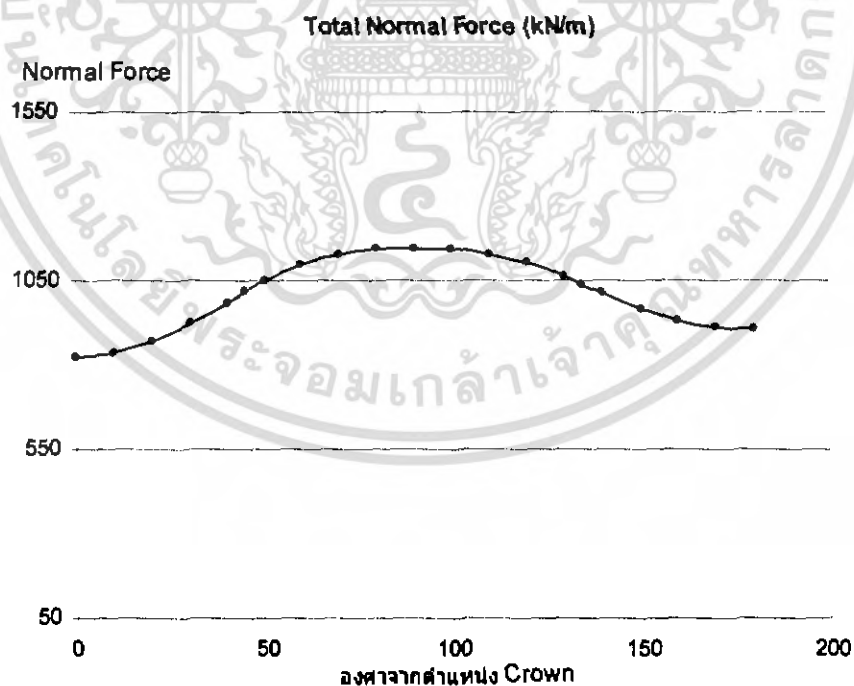
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_5 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_5 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79
Q_5 (kN/m)	0.00	-11.27	-2.79	15.02	0.00

ตารางที่ 7.14. แสดงแรงกระทำรวมที่ได้ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	162.59	-20.49	-124.11	-7.55	144.34
N_T (kN/m)	823.97	1017.45	1147.45	1038.23	907.76
Q_T (kN/m)	0.00	-122.30	10.25	107.62	0.00



รูปที่ 7.35. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.36. กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2

ตารางที่ 7.15. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	693.83	0.00	-693.83	0.00	693.83
N_1 (kN/m)	0.00	538.90	1077.97	538.90	0.00
Q_1 (kN/m)	0.00	-538.90	0.00	538.90	0.00

ตารางที่ 7.16. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	-473.73	0.00	473.73	0.00	-473.73
N_2 (kN/m)	735.88	367.94	0.00	367.94	735.88
Q_2 (kN/m)	0.00	367.94	0.00	-367.94	0.00

ตารางที่ 7.17. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_3 (kN-m/m)	-56.69	-8.02	68.03	8.02	-79.37
N_3 (kN/m)	66.05	43.50	0.00	62.18	145.31
Q_3 (kN/m)	0.00	43.50	13.21	-62.18	0.00

ตารางที่ 7.18. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงด้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 2

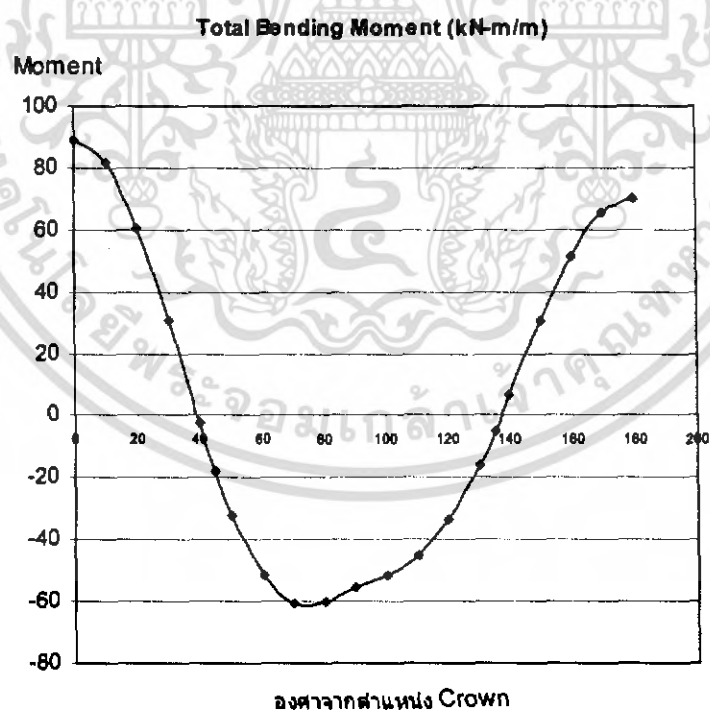
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-89.27	-11.58	113.49	-11.58	-89.27
N_4 (kN/m)	103.01	72.83	0.00	72.83	103.01
Q_4 (kN/m)	0.00	72.83	0.00	-72.83	0.00

ตารางที่ 7.19. แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 2

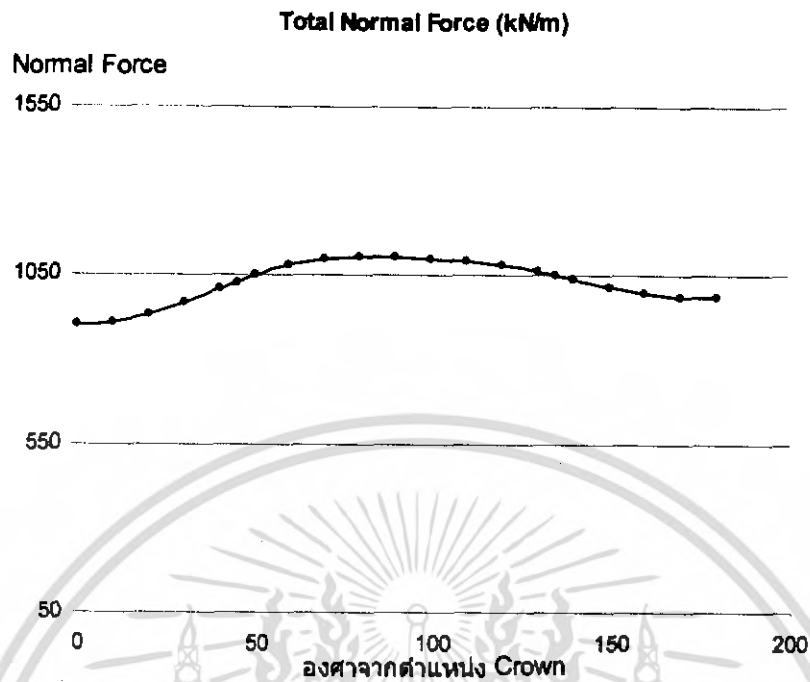
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_s (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_s (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79
Q_s (kN/m)	0.00	-11.27	-2.79	15.02	0.00

ตารางที่ 7.20. แสดงแรงกระทำทั้งหมดในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	89.01	-18.15	-55.50	-1.44	70.46
N_T (kN/m)	902.15	1030.49	1104.08	1051.52	986.99
Q_T (kN/m)	0.00	-65.90	10.42	50.97	0.00



รูปที่ 7.37. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2



รูปที่ 7.38. กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆ จากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2

(2.) โดยทฤษฎีของ Einstein

กรณีที่ 1

Compressibility Ratio (C^*) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำแบบสมมาตรและสม่ำเสมอ หาค่าได้ดังนี้

$$C^* = \frac{45000 \times 2.7(1 - 0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.25(1 - 0.29^2)} = 0.017$$

Flexibility Ratio (F^*) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำแบบไม่สมมาตร หาค่าได้ดังนี้

$$F^* = \frac{45000 \times 2.7^3(1 - 0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.0013(1 - 0.29^2)} = 23.25$$

$$a_0^* = \frac{0.017 \times 23.25(1 - 0.29)}{0.017 + 23.25 + 0.017 \times 23.25(1 - 0.29)} = 0.012$$

$$a_2^* = \frac{(23.25 + 6)(1 - 0.29)}{2 \times 22.56(1 - 0.29) + 6(5 - 6 \times 0.29)} 0.395$$

เมื่อ a_0^* และ a_2^* เท่ากับค่าคงที่ได้จากความสัมพันธ์ Stress-displacement

เมื่อ E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอุโมงค์ (30×10^6 kN/m²)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (45000 kN/m²)

ν_s = Poisson's ของผนังอุโมงค์ (0.25)

ν = Poisson's ของดิน (0.29)

M = โมเมนต์คดภายในผนังอุโมงค์ (kN-m/m)

T = แรงในแนวแกนของผนังอุโมงค์ (kN/m)

R = รัศมีของผนังอุโมงค์ (2.7 m)

K = สัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้างเฉลี่ย (0.62)

P = แรงกระทำในแนวตั้ง (Overburden Pressure) (t/m²)

$$\gamma_{ave} = \frac{(16 \times 10) + (17 \times 5) + (18 \times 4) + (20 \times 13)}{32} = 18.03 \text{ kN/m}^3$$

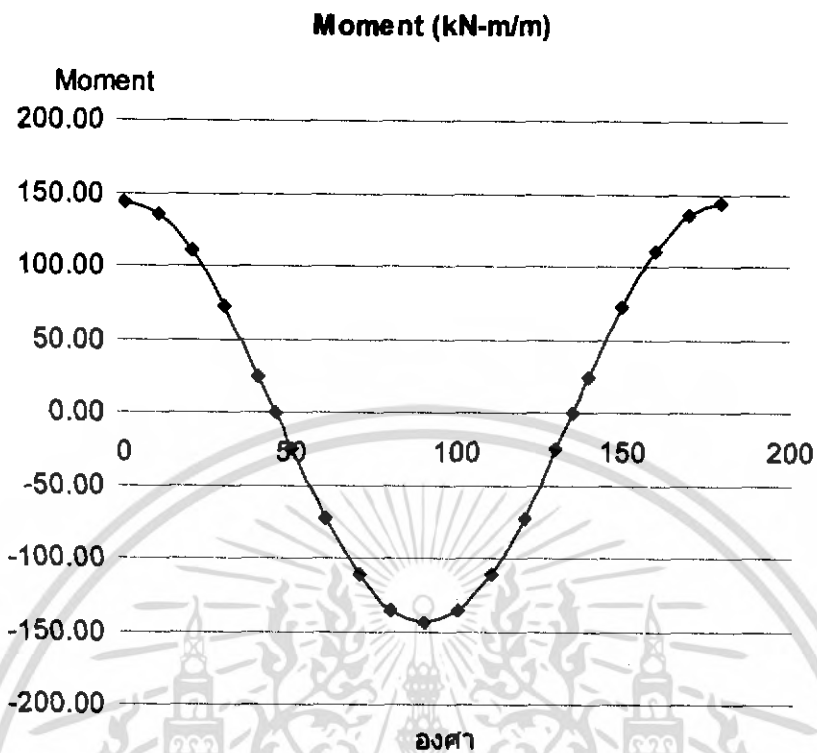
$$P = (18.03 \times 19) + [(18.03 - 10) \times 8.5] + (10 \times 8.5) = 495.83 \text{ kN/m}^2$$

θ = มุมรอบผนังอุโมงค์ทวนเข็มนาฬิกา

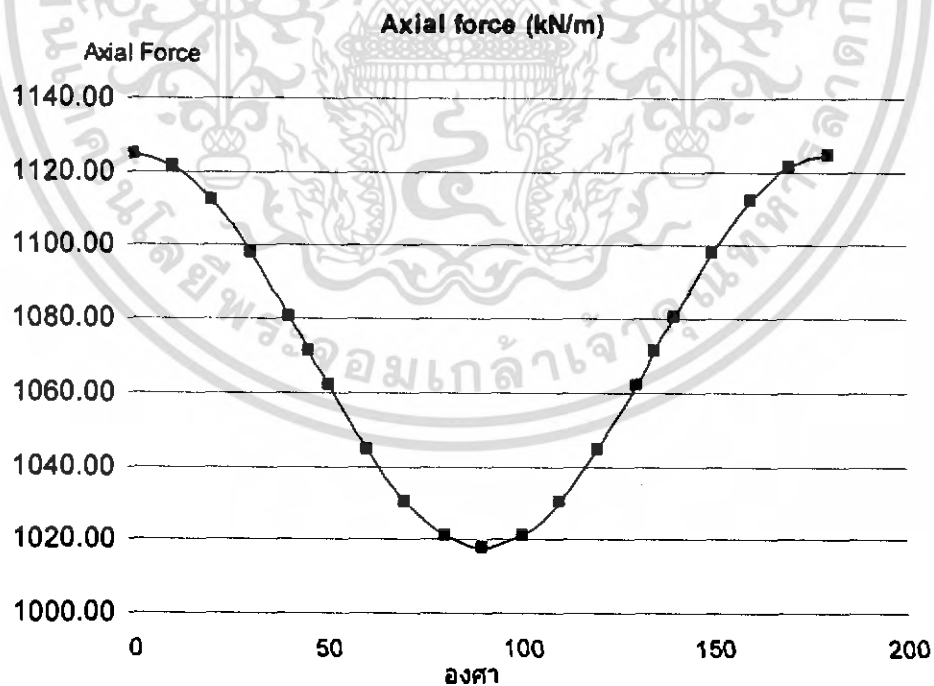
A_s = พื้นที่หน้าตัดของผนัง (0.25 m²/m)

ตารางที่ 7.21. แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	144.22	0.00	-144.22	0.00	144.22
T (kN/m)	1125.87	1072.45	1019.04	1072.45	1125.87



รูปที่ 7.39. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.40. กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2

$$C^* = \frac{35000 \times 2.7(1 - 0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.25(1 - 0.30^2)} = 0.013$$

$$F^* = \frac{35000 \times 2.7^3(1 - 0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.0013(1 - 0.30^2)} = 18.20$$

$$a_0^* = \frac{0.013 \times 18.20(1 - 0.30)}{0.013 + 18.20 + 0.013 \times 18.20(1 - 0.30)} = 0.009$$

$$a_2^* = \frac{(18.20 + 6)(1 - 0.30)}{2 \times 18.20(1 - 0.30) + 6(5 - 6 \times 0.30)} = 0.379$$

เมื่อ E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอุโมงค์ (30×10^6 kN/m²)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (35000 kN/m²)

ν_s = Poisson's ของผนังอุโมงค์ (0.25)

ν = Poisson's ของดิน (0.30)

M = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ (kN-m)

T = แรงในแนวแกนของผนังอุโมงค์ (kN/m)

R = รัศมีของผนังอุโมงค์ (2.7 m)

K = สัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้างเฉลี่ย (0.65)

P = แรงกระทำในแนวตั้ง (Overburden Pressure) (t/m²)

$$\gamma_{ave} = \frac{(16 \times 13) + (17 \times 4) + (18 \times 4) + (18 \times 11)}{32} = 17.06 \text{ kN/m}^3$$

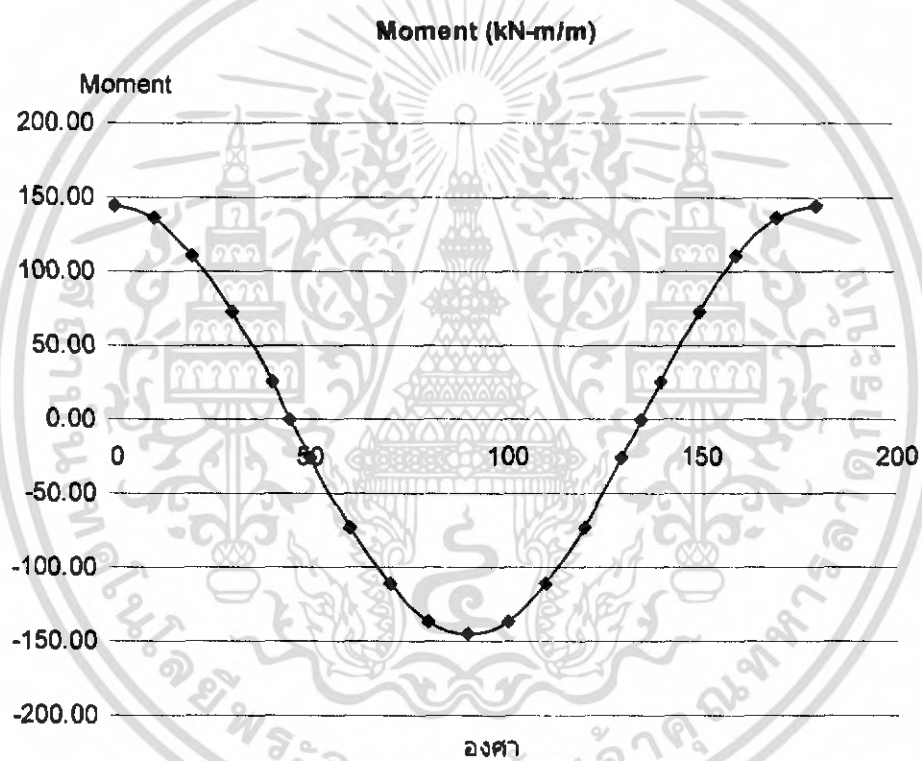
$$P = (17.06 \times 21) + [(17.06 - 10) \times 6.5] + (10 \times 6.5) = 469.15 \text{ kN/m}^2$$

θ = มุมรอบผนังอุโมงค์ที่วนเข็มนาฬิกา

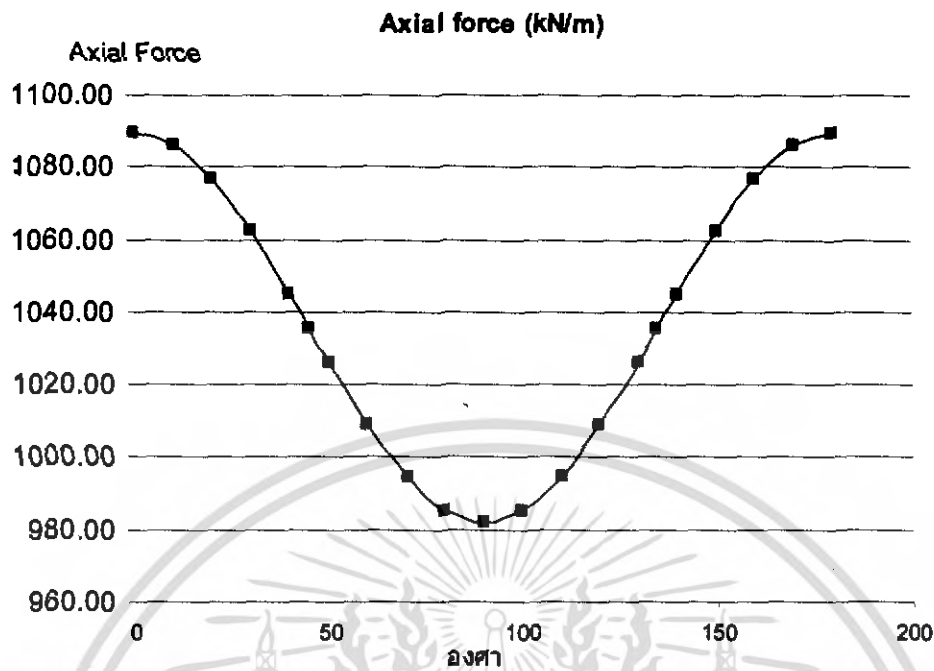
A_s = พื้นที่หน้าตัดของผนัง (0.25 m²/m)

ตารางที่ 7.22. แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	144.84	0.00	-144.84	0.00	144.84
T (kN/m)	1089.27	1035.63	981.98	1035.63	1089.27



รูปที่ 7.41. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2



รูปที่ 7.42. กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einstein ในกรณี 2

(3.) ทฤษฎีของ Muir Wood

กรณีที่ 1

$$P_o = 435.4 - 328.3 = 107.1 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (435.4 - 328.3) = 381.25 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_2 = \frac{45000 \times 2.7^3}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot 12 \cdot 0.0013} = 1.45$$

$$S_T = \frac{107.1 \times (1 + (2 \times 1.45))}{2 \times \left(1 + \frac{1.45 \cdot (3 - (2 \cdot 0.3))}{3 - (4 \cdot 0.3)} \right)} = 71.21$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4 \cdot 0.3) \times \frac{107.1}{2} - (2 \cdot 1.45 + (4 - 6 \cdot 0.3)) \times 71.21$$

$$S_{N1} = -74.51$$

$$S_{N2} = (4 \cdot 1.45) + 5 - (6 \cdot 0.3) = 9.01$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} = \frac{-74.51}{9.01} = -8.27$$

$$Q = \frac{45000 \times 2.7}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot (2.7 - 2.45)} = 0.0125$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1+Q} = \frac{381.25}{1+0.0125} = 377.15 \text{ kN/m}^2$$

$$N_B = \Delta P \times R_O = 377.15 \times 2.7 = 1018.3 \text{ kN/m}$$

ตารางที่ 7.23. แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

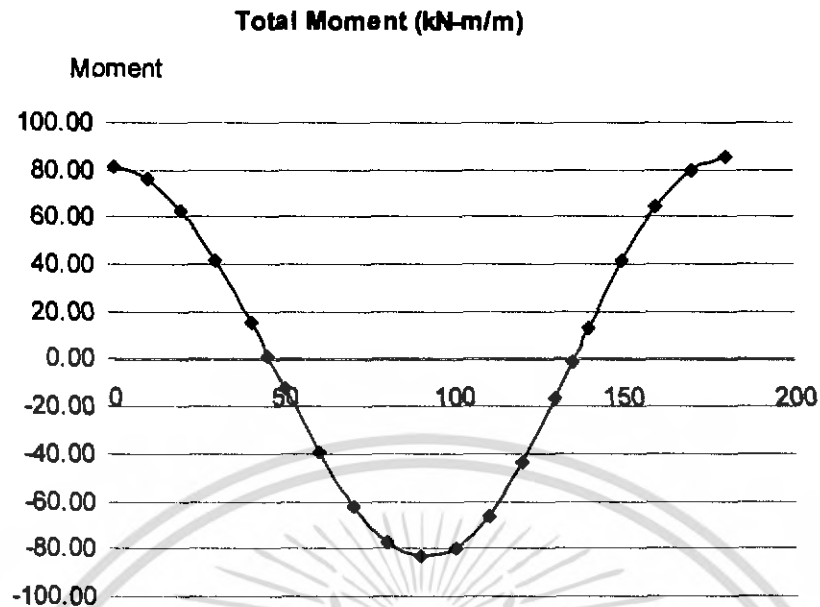
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	66.42	0.00	-66.42	0.00	66.42
N_1 (kN/m)	897.57	1018.30	1139.34	1018.30	897.57

ตารางที่ 7.24. แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_2 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79

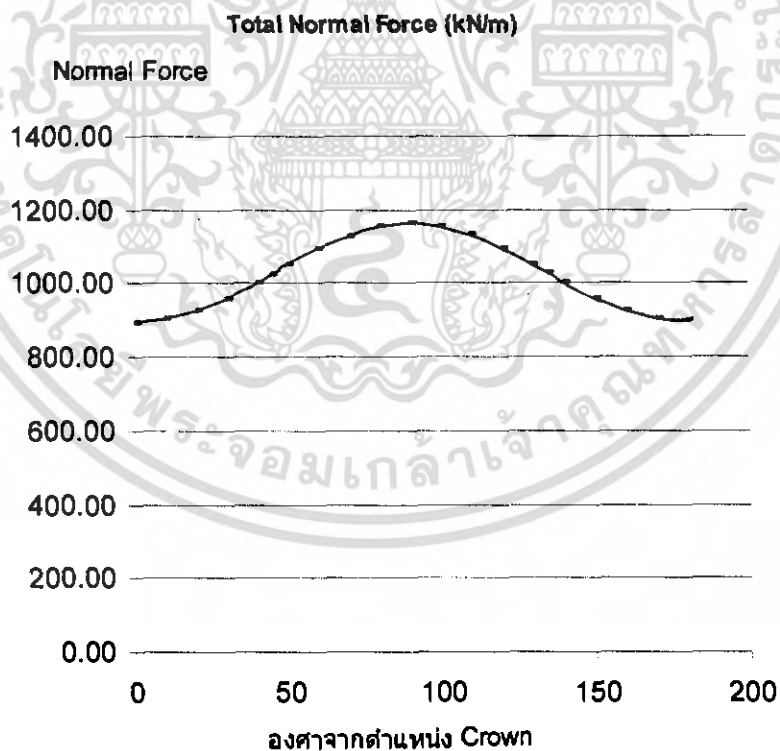
ตารางที่ 7.25. แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	81.28	1.44	-83.35	-1.44	-85.41
N_T (kN/m)	894.78	1025.62	1165.33	1027.97	900.35



องศาจากตำแหน่ง Crown

รูปที่ 7.43 กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.44. กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2

$$P_o = 418.56 - 367.86 = 50.7 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (418.56 + 367.86) = 393.21 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_2 = \frac{35000 \times 2.7^3}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot 12 \cdot 0.0013} = 1.13$$

$$S_7 = \frac{50.7 \times (1 + (2 \times 1.13))}{2 \times \left(1 + \frac{1.13 \cdot (3 - (2 \cdot 0.3))}{3 - (4 \cdot 0.3)} \right)} = 32.97$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4 \cdot 0.3) \times \frac{50.7}{2} - (2 \cdot 1.13 + (4 - 6 \cdot 0.3)) \times 32.97$$

$$S_{N1} = -10.16$$

$$S_{N2} = (4 \cdot 1.13) + 5 - (6 \cdot 0.3) = 7.72$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} = \frac{-10.16}{7.72} = -1.32$$

$$Q = \frac{35000 \times 2.7}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot (2.7 - 2.45)} = 0.0097$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1 + Q} = \frac{393.21}{1 + 0.0097} = 389.43 \text{ kN/m}^2$$

$$N_B = \Delta P \times R_O = 389.43 \times 2.7 = 1051.46 \text{ kN/m}$$

ตารางที่ 7.26. แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

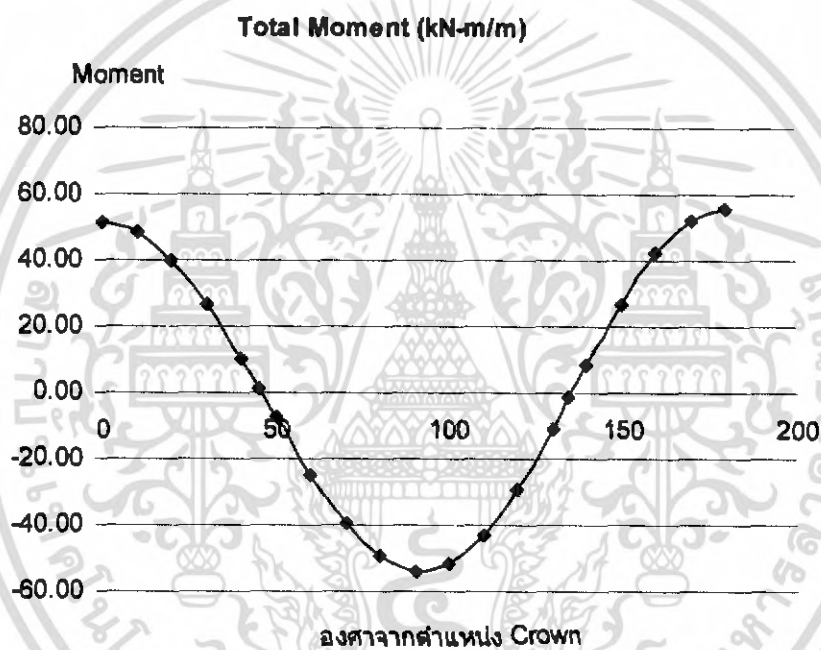
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	36.85	0.00	-36.85	0.00	36.85
N_1 (kN/m)	993.30	1051.46	1109.62	1051.46	993.30

ตารางที่ 7.27. แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

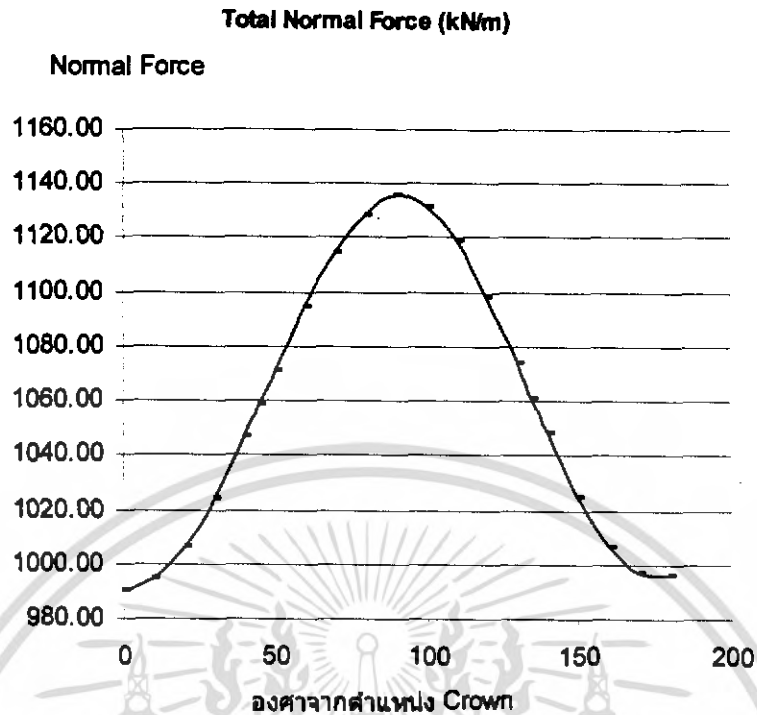
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_2 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79

ตารางที่ 7.28. แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	51.71	1.44	-53.78	-1.44	55.84
N_T (kN/m)	990.51	1058.78	1135.91	1061.13	996.09



รูปที่ 7.45. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2



รูปที่ 7.46. กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

(4.) ทฤษฎี Beam-Spring Model

ใช้สมการของ Terzaghi ในการหาค่าของแรงกระทำภายในแต่จะเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำเนื่องจากแรงต้านทานในแนวนอน

โดยเปลี่ยนค่า Subgrade Reaction Factor

กรณีที่ 1

$$k_r = \frac{3E_o}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c}$$

$$k_r = \frac{3(45000)}{(1+0.25)(5-6 \cdot 0.25) \cdot 2.575} = 11983 \text{ kN/m}^3$$

$$\delta = \frac{[(2 \times 435.40) - 247.30 - 328.30]2.575^4}{24(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 11983 \times 2.575^4)}$$

$$\delta = 0.00859$$

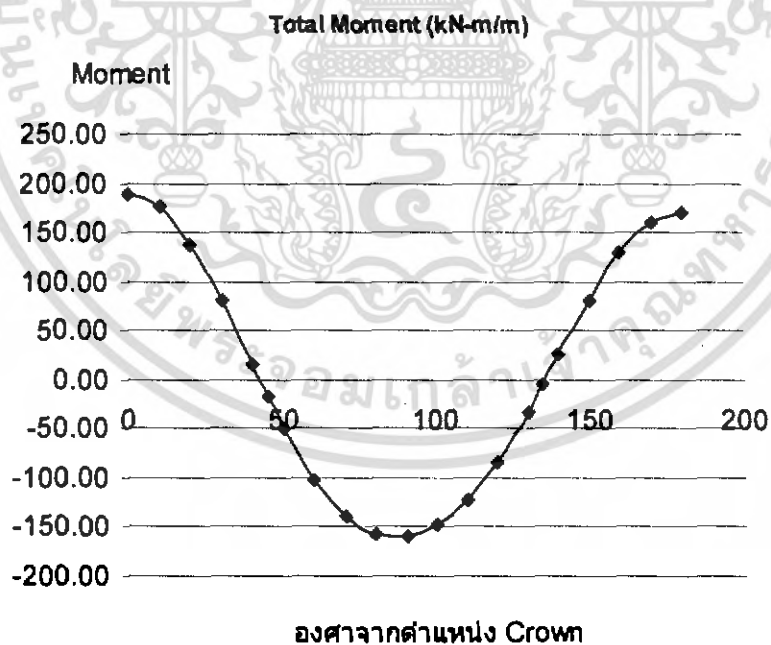
ดังนั้น $k \cdot \delta = 11983 \times 0.00859 = 102.99 \text{ kN/m}^2$

ตารางที่ 7.29. แรงภายในที่เกิดจากแรงด้านทานในแนวนอน (k, δ)
โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

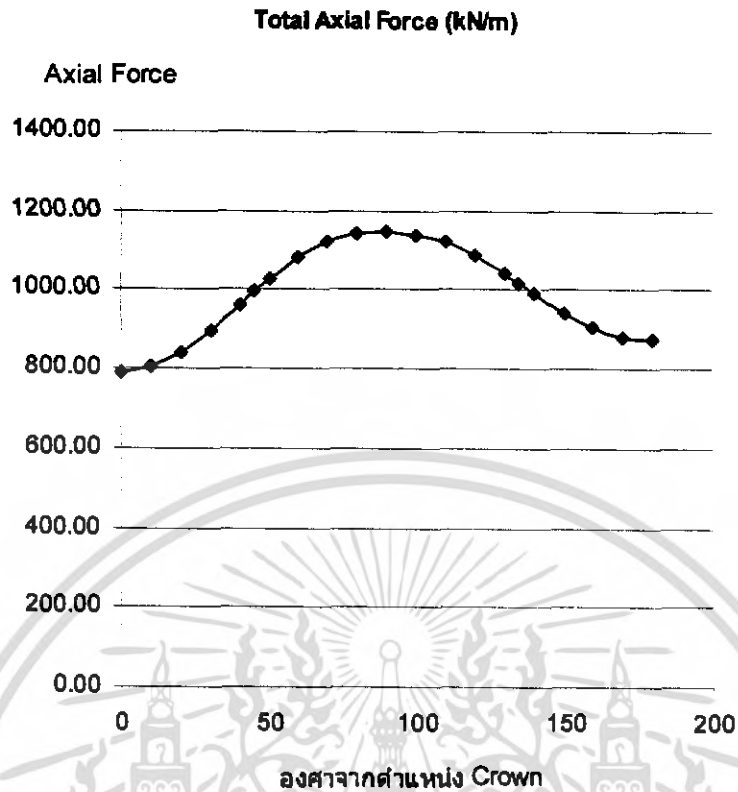
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_d (kN-m/m)	-81.27	-10.54	103.32	-10.54	-81.27
N_d (kN/m)	93.78	66.30	0.00	66.30	93.78
Q_d (kN/m)	0.00	66.30	0.00	66.30	0.00

ตารางที่ 7.30. แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	189.45	-17.01	-158.27	-4.07	171.21
N_T (kN/m)	792.96	995.53	1147.45	1016.31	876.76
Q_T (kN/m)	0.00	-144.22	10.25	129.54	0.00



รูปที่ 7.47. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.48 กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model
ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2

$$k_r = \frac{3E_o}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c}$$

$$k_r = \frac{3(35000)}{(1+0.3)(5-6 \cdot 0.3) \cdot 2.575} = 9802 \text{ kN/m}^3$$

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454 k R_c^4)}$$

$$\delta = \frac{[(2 \times 418.56) - 285.78 - 367.86] 2.575^4}{24(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 9802 \times 2.575^4)}$$

$$\delta = 0.00574$$

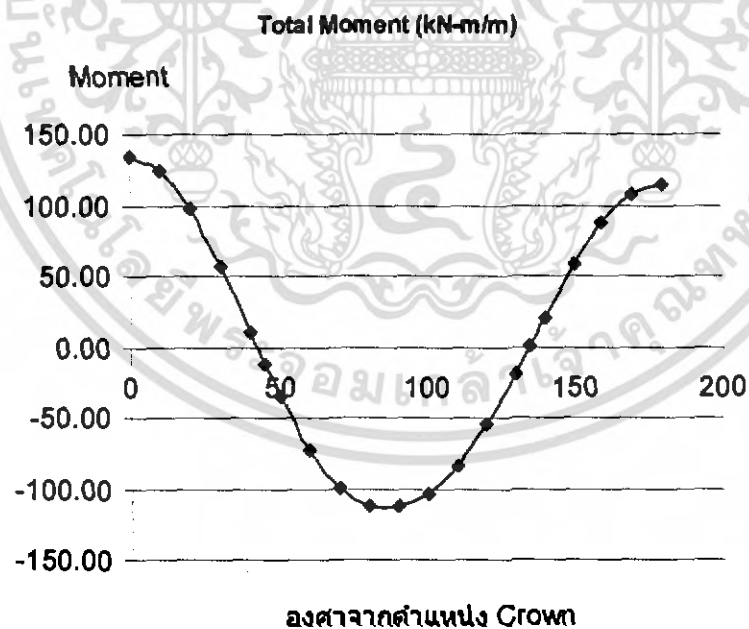
ดังนั้น $k \cdot \delta = 9802 \times 0.00574 = 56.26 \text{ kN/m}^2$

ตารางที่ 7.31. แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน (k, δ)
โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

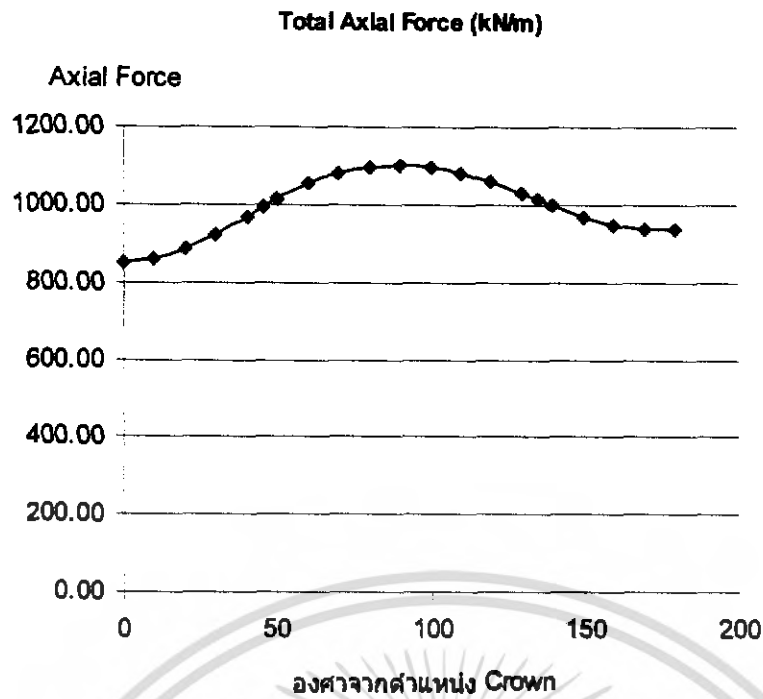
θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-44.39	-5.76	59.44	-5.76	-44.39
N_4 (kN/m)	51.22	36.21	0.00	36.21	51.22
Q_4 (kN/m)	0.00	36.21	0.00	-36.21	0.00

ตารางที่ 7.32. แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	133.88	-12.33	-112.56	0.82	115.34
N_T (kN/m)	850.36	993.87	1104.08	1014.91	935.20
Q_T (kN/m)	0.00	-102.51	10.42	87.58	0.00



รูปที่ 7.49. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2



รูปที่ 7.50. กราฟแสดง Total Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆ จากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

7.6.3 การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน

ตัวอย่างการคำนวณการเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน ใช้วิธีออกแบบเสาต้น และวิธีออกแบบคาน โดยอ้างอิงตัวอย่างมาจากบทที่ 4 ในการคำนวณออกแบบอุโมงค์ โดยใช้ค่าแรงกระทำภายในจากทฤษฎี Terzaghi ชั้น Dense Sand ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}M_{\max} &= 162.59 \quad \text{kN-m/m} \\N_{\max} &= 1147.45 \quad \text{kN/m} \\V_{\max} &= 122.3 \quad \text{kN/m}\end{aligned}$$

แปลงเป็นกิโลกรัม(kg) $1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$

$$\begin{aligned}M_{\max} &= 16259 \quad \text{kg-m/m} \\N_{\max} &= 114745 \quad \text{kg/m} \\V_{\max} &= 12230 \quad \text{kg/m}\end{aligned}$$

7.6.3.1 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบเสาต้น

$$\beta_1 = 0.85 ; f_c' \leq 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} ; 280 < f_c' \leq 560 \text{ kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.65 ; f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_c' = 400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{ดังนั้น } \beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(400 - 280)}{70} = 0.76$$

ระยะหุ้มคอนกรีต สัมผัสดิน 4 cm. ไม่สัมผัสดิน 3 cm. (สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 6 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 25 - 3 - 0.6 - \frac{1.6}{2} = 20.60 \text{ cm.}$$

กำลังที่ต้องการ

$$M_u = 1.2 \times 1.4 \times 16259 = 27315 \text{ kg-m}$$

$$P_u = 1.2 \times 1.4 \times 114745 = 192772 \text{ kg}$$

$$V_u = 1.2 \times 1.4 \times 12230 = 20546 \text{ kg}$$

โดยที่ 1.2 คือ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1.4 คือ ตัวปรับค่าของวิธีกำลัง

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{27315}{192772} = 14.20 \text{ cm.}$$

กำลังระบุ : $0.1f'_c A_g = 0.1 \times 400 \times 120 \times 25 = 120000 \text{ kg.}$

เมื่อเทียบกับ P_u แล้วใช้ $\phi = 0.7$ จะได้

$$P_n = \frac{192772}{0.7} = 275389 \text{ kg.}$$

$$M_n = \frac{27315}{0.7} = 39021 \text{ kg} \cdot \text{m.}$$

$$V_n = \frac{20546}{0.7} = 29351 \text{ kg.}$$

ที่สภาวะความเครียดสมดุล :

$$c_b = \frac{6120d}{6120 + f_y} = \frac{6120 \times 20.6}{6120 + 4000} = 12.50 \text{ cm.}$$

$$a_b = \beta_1 c_b = 0.76 \times 12.50 = 9.5 \text{ cm.}$$

ถ้าสมมติให้ $A_s = A'_s$ และ $f_s = f'_s = f_y$

จะได้ $P_{nb} = 0.85f'_c a_b b = 0.85 \times 400 \times 9.5 \times 120 = 387600 \text{ kg.}$

จะเห็นว่า P_n น้อยกว่า P_{nb} แสดงว่าหน้าตัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดึง

$$A_s = \frac{\frac{P_n^2}{1.7f'_c b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right)}{f_y (d - d')} = \frac{\frac{275389^2}{1.7 \times 400 \times 120} - 275389 \left(\frac{25}{2} - 14.2 \right)}{4000(20 - 4.4)} = 21.57 \text{ cm}^2$$

เลือกใช้ DB 16 จำนวน 11 เส้น ได้ $A_s = A'_s = 22.11 \text{ cm}^2$. จะได้

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{2 \times 22.11}{120 \times 25} = 0.014 \text{ ซึ่งต้องอยู่ระหว่าง 0.01 และ 0.08}$$

$0.01 < \rho < 0.08$ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ดังนั้นใช้เหล็กเสริม DB 16 จำนวน 11 เส้น ทั้งบนและล่าง

เหล็กรับแรงเฉือน

$$N_u = P_u = 192772 \text{ kg}$$

$$V_u = 20546 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.53(1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g}) f_c' b d = 0.53(1 + 0.0071 \times \frac{192772}{25 \times 120}) \sqrt{400} \times 120 \times 20.6$$

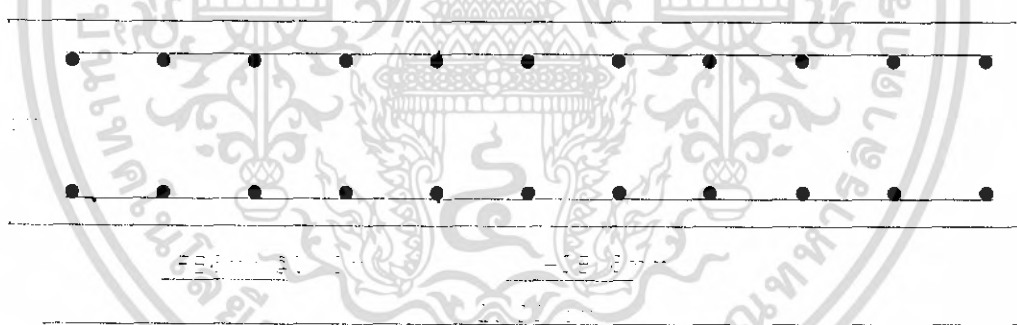
$$V_c = 38157.81 \text{ kg} > V_u.$$

ดังนั้น ใช้ RB 8 จำนวน 10 ขา ($A_v = 8 \times 0.283 = 2.83 \text{ cm.}$)

ระยะเรียงมากที่สุด $s_{\max} = \frac{A_v \cdot f_s}{3.5b} = \frac{2.26 \times 2400}{3.5 \times 120} = 12.89 \text{ cm.}$

หรือ $s_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{20.6}{2} = 10.30 \text{ cm.}$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 6 mm. @ 0.10 m.



รูปที่ 7.51. แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาต้น

7.6.3.2 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบคาน

$$M_T = 162.59 \text{ kN-m/m}$$

$$M_{\max} = M_T \cdot b = 162.59 \times 1.2 = 195.11 \text{ kN-m/ring}$$

โมเมนต์ที่ต้องการ $M_u = M_{\max} \cdot \text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง}$; (ตัวคูณเพิ่มกำลัง=1.4)

$$M_u = 195.11 \times 1.4 = 273.15 \text{ kN-m/ring} = 27315 \text{ kg-m/ring}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} ; (\phi = 0.9 \text{ สำหรับแรงดัด})$$

$$\text{โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบ } M_n = \frac{27315}{0.9} = 30350 \text{ kg-m/ring}$$

ระยะหุ้มคอนกรีต สัมผัสดิน 4 cm. ไม่สัมผัสดิน 3 cm. (สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 6 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 25 - 3 - 0.6 - \frac{1.6}{2} = 20.60 \text{ cm.}$$

$$\beta_1 = 0.85 ; f_c' \leq 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} ; 280 < f_c' \leq 560 \text{ kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.65 ; f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_c' = 400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{ดังนั้น } \beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(400 - 280)}{70} = 0.76$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right)$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \times 0.76 \times 400}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0391$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.75 \times 0.0391 = 0.0293$$

$$R_{n,\max} = \rho_{\max} f_y \left(1 - \frac{\rho_{\max} f_y}{1.7 f_c'} \right)$$

$$R_{n,\max} = 0.0293 \times 4000 \left(1 - \frac{0.0293 \times 4000}{1.7 \times 400} \right) = 97.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{n,\max} = R_{n,\max} b d^2$$

$$M_{n,\max} = 97.000 \times 1.2 \times 20.6^2 = 49395.50 \text{ kg-m}$$

โมเมนต์สูงสุดที่ได้รับได้

$$M_{u,\max} = \phi \cdot M_{n,\max} = 0.9 \times 49395.50 = 44455.95 \text{ kg-m} > M_u \text{ O.K.}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b d^2} = \frac{30350}{1.2 \times 20.6^2} = 59.600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0.85 f_c'}} \right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \times 400}{4000} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 59.600}{0.85 \times 400}} \right) = 0.0165$$

ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_s = \rho b d = 0.0165 \times 120 \times 20.6 = 40.79 \text{ cm}^2/\text{ring}$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm ($A_s = 2.01 \text{ cm}^2$) ใช้เหล็ก = $\frac{40.79}{2.01} = 20.29$ เส้น

ดังนั้นใช้ 21 เส้น ($A_s = 2.01 \times 21 = 42.21 \text{ cm}^2$) O.K.

$$\text{ระยะเรียง} = \text{ช่องว่าง/จำนวนเส้น} = \frac{120 - (2 \times 3) - (2 \times 0.6)}{21} = 5.37 \text{ cm. ใช้ } 5.00 \text{ cm.}$$

$$\text{ระยะคอนกรีตหุ้มถึงผิวเหล็กเสริม, } C_c = 3 + 0.6 = 3.6 \text{ cm.}$$

$$\text{หน่วยแรงในเหล็กเสริม, } f_s = 0.6 f_y = 0.6 \times 4000 = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้, } s = \frac{90000}{f_s} - 2.5 C_c = \frac{90000}{2400} - (2.5 \times 3.6) = 28.50 \text{ cm.}$$

ระยะเรียงที่ใช้ 5.00 cm. < ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้ O.K.

$$\text{ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม} = 5.0 - (2 \times 0.8) = 3.4 \text{ cm.} > 2.5 \text{ cm. O.K.}$$

เนื่องจากรับโมเมนต์ลบด้วยจึงใส่เหล็กทั้งบนและล่าง

เหล็กรับแรงเฉือน

$$Q_T = 122.30 \text{ kN/m}$$

$$V_{\max} = Q_T \cdot b = 122.30 \times 1.2 = 146.76 \text{ kN/ring}$$

แรงเฉือนที่ต้องการ

$$V_u = V_{\max} \cdot \text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง} \quad ; (\text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง}=1.4)$$

$$V_u = 146.76 \times 1.4 = 205.46 \text{ kN/ring} = 20546 \text{ kg/ring}$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} \quad ; (\phi = 0.85 \text{ สำหรับแรงเฉือน})$$

แรงเฉือนที่ใช้ออกแบบ

$$V_n = \frac{20546}{0.85} = 24171.76 \text{ kg/ring}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

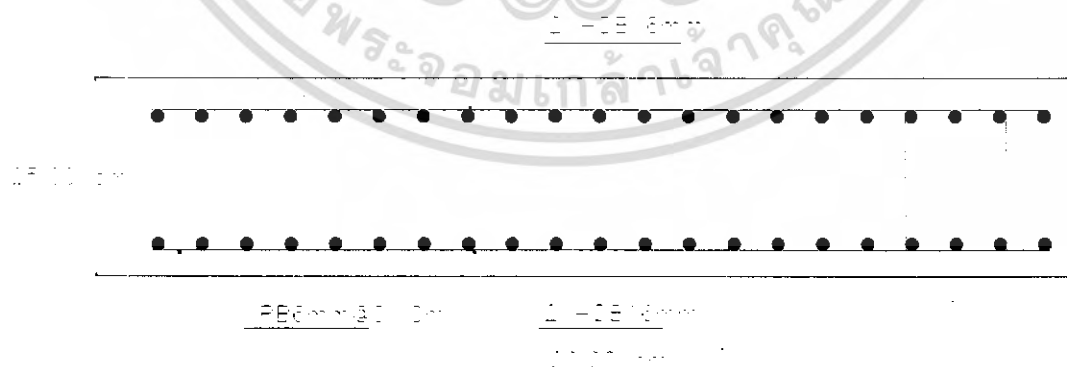
$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \times \sqrt{400} \times 120 \times 20.6 = 26203.2 \text{ kg} > V_n$$

ดังนั้น ใช้ RB 6 จำนวน 10 ขา ($A_v = 10 \times 0.283 = 2.83 \text{ cm.}$)

$$\text{ระยะเรียงมากที่สุด} \quad s_{\max} = \frac{A_v \cdot f_s}{3.5b} = \frac{2.83 \times 2400}{3.5 \times 120} = 16.17 \text{ cm.}$$

$$\text{หรือ} \quad s_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{20.6}{2} = 10.30 \text{ cm.}$$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 6 mm. @ 0.10 m.



รูปที่ 7.52. แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์วิธีออกแบบคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์

8.1 กล่าวนำ

ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ที่จะกล่าวถึงในโครงการพิเศษนี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะปัญหาหลักๆที่มักจะเกิดขึ้นจริงขณะกำลังก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้มาจากการที่กลุ่มโครงการพิเศษของข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาจากการก่อสร้างจริง และจากผู้เชี่ยวชาญในด้านการก่อสร้างอุโมงค์ จึงสามารถที่จะระบุได้ว่าปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอุโมงค์จริง พร้อมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์เป็นแนวทางที่ผู้เชี่ยวชาญได้ชี้แนะถึงแนวทางการแก้ไข ซึ่งทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้รวบรวมปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์และแนวทางการแก้ไขปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์แสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

8.2 ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์

ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ที่ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้กล่าวถึงนี้ล้วนแต่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงขณะก่อสร้างอุโมงค์ในปัจจุบัน

8.2.1 ปัญหาการทรุดตัวของหัวเจาะที่วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน

ปัญหา - เนื่องจากบางช่วงของอุโมงค์จะวางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน ดังนั้นเมื่อหัวเจาะหยุดการเคลื่อนที่ขณะประกอบผนังอุโมงค์ หรือหยุดเนื่องจากตรงกับวันหยุดอาจทำให้หัวเจาะมีการทรุดตัวลงจากระดับเดิม เนื่องจากตัวหัวเจาะมีน้ำหนักมาก และชั้นดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับน้ำหนักของหัวเจาะไม่ไหว จึงทำให้หัวเจาะเกิดการทรุดตัว

การแก้ไข - แต่เนื่องจากการทรุดตัวมีไม่มาก สามารถแก้ไขได้โดยเมื่อเริ่มทำการเจาะอีกครั้งก็ใช้ขาถีบไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ด้านล่างถีบดันหัวเจาะเพื่อให้หัวเจาะกลับเข้าสู่ระดับเดิมที่ได้ออกแบบไว้อีกครั้งหนึ่ง

8.2.2 ปัญหาการแตกร้าวของผนังอุโมงค์เมื่อส่วนหางของหัวเจาะมากระแทกขณะเลี้ยวโค้ง

ปัญหา – ในส่วนของหัวเจาะนั้นจะมีผนังของหัวเจาะคลุมผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้ว ดังนั้นเวลาเข้าโค้งที่มีความโค้งมากๆ ส่วนท้ายของหัวเจาะอาจไปเบียดกับผนังอุโมงค์ได้ และทำให้ตัวอุโมงค์เกิดการแตกร้าวได้

การแก้ไข – ปัญหานี้จะเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากโค้งไม่มีความโค้งมากเกินไป และจะมีการใช้ชั้นผนังอุโมงค์พิเศษ หรือที่เรียกว่า เทเปอร์ (Taper) ซึ่งสามารถปรับผนังอุโมงค์ให้มีความโค้งได้ตามความโค้งของอุโมงค์ที่ต้องการ จึงทำให้ปัญหาการเบียดกระแทกระหว่างส่วนหางของหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ลดลงไป

8.2.3 ปัญหาการแตกของชั้นผนังอุโมงค์เนื่องจากผิวหน้าไม่ได้ระนาบดังเดียวกัน

ปัญหา – การออกแบบให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้านั้นต้องใช้ขาไฮดรอลิกเป็นตัวขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยจะติดกับผิวหน้าของผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จล่าสุด ดังนั้นถ้าผิวหน้าของชั้นผนังอุโมงค์ไม่ได้อยู่ในระนาบดังเดียวกันกับขาไฮดรอลิกแล้วเวลาถีบจะทำให้เกิดเป็น Point Load กระทำที่ผิวหน้าของชั้นผนังอุโมงค์ จึงอาจทำให้ชั้นผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าวได้

การแก้ไข – การแก้ไขคือขณะที่ทำการประกอบชั้นผนังอุโมงค์นั้น ผู้ประกอบต้องประกอบด้วยความระมัดระวัง ให้ชั้นผนังอุโมงค์อยู่ในระนาบดังเดียวกันทุกชั้นและถ้าหากชั้นผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าวก็ทำให้ทำการสกัดชั้นส่วนบริเวณที่แตกออก แล้วทำความสะอาดให้ดี จากนั้นจึงทาสีด้วยน้ำยาประสาน Bonding Agent จากนั้นจึงฉาบปิดด้วย Polymer Modified Leveling Mortar ซึ่งวัสดุฉาบนี้จะมีแข็งแรงเท่ากับชั้นผนังอุโมงค์จึงสามารถรับแรงได้

8.2.4 ปัญหาข้อเก็บดินเต็ม

ปัญหา – เนื่องจากการก่อสร้างนั้นระยะเวลาในการก่อสร้างเป็นตัวแปรที่สำคัญเป็นอย่างมาก เพราะถ้าใช้เวลามากจะทำให้ส่งผลถึงค่าก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งในโครงการก่อสร้างนี้เวลาก็คือเป็นตัวแปรที่สำคัญด้วย ดังนั้นทางบริษัทผู้รับเหมาจึงมีการให้เงินรางวัล (Bonus) แก่ผู้ที่ทำงานในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์ โดยจะมีอัตราแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับจำนวนวงที่ทำการก่อสร้างได้ในแต่ละกะงาน เพราะฉะนั้นคนงานทุกคนจึงทำงานกันอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้งานมากที่สุด และเมื่อทำงานมากดินที่ขุดขึ้นมาจะมีจำนวนมากด้วย แต่เนื่องจากพื้นที่ในการก่อสร้าง

บ่อเก็บดินมีจำกัด ความสามารถในการเก็บดินก็เลยมีจำกัดด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการขนดินออกจากบ่อเก็บดินไปทิ้งข้างนอกซึ่งทางบริษัทผู้รับเหมาได้ให้บริษัทอื่นมาขนดินนี้ออกไปอีกที่ แต่เนื่องจากการที่รถบรรทุกต้องใช้เวลาในการวิ่งในตอนกลางวัน จึงวิ่งได้ในเวลากลางคืนเท่านั้น จึงทำให้การขนดินออกทำได้ช้า เลยทำให้ดินเต็มบ่อเร็ว และบางทีบริษัทขนดินก็ไม่มาขนดิน จึงทำให้ดินเต็มบ่อ และการเจาะอุโมงค์ก็ไม่สามารถทำได้จึงต้องหยุดงานไป

การแก้ไข – การแก้ไขปัญหานี้ในเรื่องนี้นั้นสามารถทำได้ทางเดียวก็คือต้องเพิ่มเที่ยวรถขนดินให้มากขึ้นเพียงพอต่อการต้องการในการขนดิน และต้องมีการปรับเงินบริษัทขนดินหากไม่มาขนดินออกไป

8.2.5 ปัญหาขบวนการไฟตกราง

ปัญหา – เนื่องจากการต่อรางรถไฟเป็นการต่อแบบชั่วคราว ซึ่งบางทีก็จะไม่ได้ระดับเดียวกันตรงรอยต่อจึงทำให้ล้อรถไฟสะดุดและตกรางได้ และสาเหตุของการตกรางอีกข้อหนึ่งก็คือคนขับรถไฟด้วยความเร็วสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้

การแก้ไข – ต้องให้คนขับรถไฟขับภายใต้ความเร็วที่กำหนดไว้ และเวลาประกอบรางรถไฟต้องพยายามประกอบให้ได้ระดับเดียวกันมากที่สุด

8.2.6 ปัญหาเสาเข็มสะพานกีดขวางแนวการก่อสร้างอุโมงค์

ปัญหา - ในเส้นทางก่อสร้างอุโมงค์บางแห่งที่จะต้องลอดผ่านใต้สะพานอาจจะเจอปัญหาคือ จะพบเสาเข็มของสะพานขวางเส้นทางของอุโมงค์อยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเจาะผ่านเสาเข็มของสะพานไปแล้วจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มคั่นที่ถูกคั่นนั้นเสียไป

การแก้ไข – จะทำได้โดยการอัดน้ำปูน (Jet Grout) ลงไปบริเวณเสาเข็มคั่นที่ถูกคั่นเพื่อให้ดินรอบๆเสาเข็มสามารถรับกำลังได้มากขึ้น และเพิ่มเสาเข็มให้มี End Bearing มากขึ้น โดยที่กำลังรับเสาเข็มจะต้องเท่ากับคอนกรีตที่ยังไม่ได้คั่นเสาเข็ม

8.2.7 ปัญหาหัวเจาะไม่เหมาะกับสภาพดินที่เป็นจริงในหน้างาน

ปัญหา – ความเป็นจริงทางบริษัทผู้ผลิต ได้ทำการเจาะสำรวจดินเป็นจุดๆเท่านั้น โดยลึมหามันถึงว่าสภาพชั้นดินในกรุงเทพมหานคร นั้นเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก ดังนั้นถ้าชุดเจาะสภาพดินที่เป็นดินเหนียวอ่อนก็จะใช้ข้อมูลตรงนี้ไปทำการออกแบบหัวเจาะ แต่ในความเป็นจริงจะมีสภาพดินที่แตกต่างกันไป ซึ่งส่วนมากจะมีสภาพที่แข็งกว่าที่นำตัวอย่างไปใช้ในการออกแบบ จึง

ทำให้เกิดปัญหาในเวลาเจาะดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเข้าโค้ง สามารถเข้าโค้งได้ช้ามากหรือ บางครั้งเข้าโค้งแทบไม่ได้เลย

การแก้ไข – ตัดให้ความยาวของหัวเจาะสั้นลงไปโดยการตัดส่วนที่เรียกว่า Tail Seal ออกไป ทำให้ลดปัญหาลงไปได้มาก

8.2.8 ปัญหาน้ำท่วมขังในบริเวณการเจาะอุโมงค์

ปัญหา – ในการก่อสร้างอุโมงค์จะมีน้ำเป็นตัวช่วยให้เกิดการเจาะที่ง่ายและ สะดวกรวดเร็วขึ้น โดยการนำน้ำใส่เข้าไปในหัวเจาะ เพื่อให้ดินเกิดความอ่อนตัวและเกิดความเหนียวต่อการลำเลียงออกไปทิ้งข้างนอก แต่ก็มีบางครั้งที่ถนนควบคู่น้ำใส่น้ำมากเกินไป จนเกิดการ ไหลล้นมาทาง Screw Conveyor เกิดความสกปรกและเกิดน้ำท่วมขังในบริเวณหน้านางานนั้น และ ก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่ายและยากต่อการทำงาน เช่น การเดินไหล การทำงาน Survey ที่ลำบากมาก ยิ่งขึ้น

การแก้ไข – ต้องระมัดระวังในการควบคู่น้ำ และคู่น้ำออกจากบริเวณการ ก่อสร้างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

8.2.9 ปัญหาเรื่องอากาศและฝุ่นละอองภายในสถานที่ก่อสร้าง

ปัญหา – เนื่องจากเป็นการทำงานในชั้นใต้ดิน แน่นอนว่าอากาศจะต้องมีน้อยหรือ แทบจะไม่มีเลยถ้าทำการก่อสร้างไปในระยะทางที่ไกลไปเรื่อยๆ และยังมีฝุ่นละอองจากการ ก่อสร้างด้วย

การแก้ไข - จัดให้มีพัดลมดูดอากาศจากด้านบนบริเวณปากบ่อลงไปภายในอุโมงค์ นอกจากนั้นแล้วต้องมีการป้องกันตัวเองด้วย โดยการสวมหน้ากากป้องกันฝุ่นละอองให้รัดกุม

8.2.10 ปัญหาแนวอุโมงค์จริงอยู่นอกแนวที่ออกแบบไว้

ปัญหา – การควบคุมให้หัวเจาะเคลื่อนที่ นอกจากจะต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความ ชำนาญเป็นพิเศษแล้วลักษณะและคุณสมบัติของดินที่จะทำการขุดเจาะก็มีความสำคัญมาก เพราะจะ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สำคัญในการทำให้หัวเจาะเคลื่อนที่ออกนอกแนวที่ได้ออกแบบไว้

การแก้ไข – การแก้ไขสามารถแก้ไขได้โดยใช้ฮาโดลิคติดในด้านที่เลี้ยวออก เพื่อให้กลับสู่แนวเดิม ถ้าหากไม่เข้าแนวอุโมงค์ก็จะใช้ขาเบรคซึ่งเป็นท่อนเหล็กเสียบออกไป

ด้านข้างของอุโมงค์ ด้านที่ต้องการให้เลี้ยวเข้าเพื่อเป็นจุดหมุนให้หัวเจาะเคลื่อนเข้าสู่แนเดิมที่
ออกแบบไว้

8.2.11 ปัญหาอุปกรณ์ในส่วนของหัวเจาะเกิดการชำรุดเสียหาย

ปัญหา – เนื่องจากช่วงระยะเวลาในการทำการก่อสร้างนั้นจะทำงานตลอด 24
ชั่วโมง ดังนั้นหัวเจาะก็จะทำงานตลอดเกือบ 24 ชั่วโมงด้วย จึงส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆ เสียหายได้
เพราะต้องทำงานตลอด 24 ชั่วโมงทุกวัน

การแก้ไข – การแก้ไขนั้นทำได้ยาก เพราะไม่สามารถหยุดพักเครื่องได้เพราะจะทำ
ให้การทำงานหยุดชะงัก ดังนั้นควรเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นไว้สำหรับซ่อมแซม
ให้พร้อม เพราะเมื่อเกิดความเสียหายแล้วจะสามารถซ่อมแซมได้ทันที

8.2.12 ปัญหาน้ำใต้ดินซึมเข้ามาภายในอุโมงค์

ปัญหา – เนื่องจากอุโมงค์บางตำแหน่งวางผ่านบริเวณที่มีน้ำใต้ดินอยู่ และถ้าหาก
บริเวณนั้นการประกอบอุโมงค์ไม่ดีพอ เกิดช่องว่างระหว่างชั้นผนังอุโมงค์ก็อาจทำให้น้ำใต้ดิน
ภายนอกรั่วซึมเข้ามาภายในอุโมงค์ได้

การแก้ไข – ถ้าเราแน่ใจว่าปริมาณน้ำมีเพียงเล็กน้อยก็อาจปล่อยให้ซึมเข้ามา
จนกว่าจะแห้ง แต่ถ้ามีปริมาณมากก็ควรจะมีการอุดรูรั่วนั้นซะ ที่สำคัญต้องสังเกตดูด้วยว่าน้ำที่รั่ว
เข้านั้นมีเศษดินตะกอนปะปนมาด้วยหรือเปล่า เพราะถ้ามีอาจทำให้ดินด้านบนเกิดการทรุดตัวได้
และส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียงได้

บทที่ 9

โปรแกรมช่วยในการคำนวณ

Ladkrabang Tunnel Lining Design Version 3.0

9.1 กล่าวนำ

โปรแกรม Visual Basic 6 สามารถออกแบบโปรแกรมให้ใช้งานง่ายเหมือน Windows ซึ่งช่วยให้เข้าใจการทำงานได้ไม่ยาก และคำนวณผลการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้มีชื่อว่า Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0 โดยใช้ทฤษฎีของ Terzaghi คำนวณหาค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาสนของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบเหล็กเสริม ผลที่ได้คือค่าโมเมนต์ค้ดสูงสุด แรงในแนวแกนสูงสุด แรงเฉือนสูงสุดและค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ ซึ่งนำค่าที่ได้ไปออกแบบต่อไป

9.2 วัตถุประสงค์

1. โปรแกรมนี้เขียนขึ้นเพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ได้สะดวกและรวดเร็ว
2. เพื่อให้บุคคลผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้ได้
3. เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างอุโมงค์ต่อไป

9.3 หลักการ

1. โปรแกรมนี้ได้ใช้สูตรการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินคือ Terzaghi เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาสนของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบเหล็กเสริม แล้วเขียนออกมาเป็นโปรแกรมโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0
2. ตัวโปรแกรมจะเข้าสู่การรับค่าและคำนวณต่อไป โดยสูตรของ Terzaghi ซึ่งสามารถบอกค่าโมเมนต์ค้ด แรงในแนวแกนและค่าแรงเฉือนที่ 0 – 180 องศาและแสดงค่าโมเมนต์ค้ดสูงสุด แรงในแนวแกนสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดออกมา
3. โปรแกรมจะแสดงค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ พร้อมแบบก่อสร้างของหน้าตัดผนังอุโมงค์ใต้ดิน

9.4 วิธีการใช้โปรแกรม

1. เข้าสู่โปรแกรมโดยเรียกไฟล์ Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0.exe



รูปที่ 9.1 แสดงหน้าจอต้อนรับสู่โปรแกรม Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0

เมื่อเข้าสู่โปรแกรม หน้าแรกจะเป็นหน้าต่าง Input ซึ่งเป็นหน้าต่างที่จะต้องใส่ค่าตามที่ต้องการโดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- Concrete Segment เป็นส่วนที่จะ Input ค่าที่เกี่ยวกับส่วนประกอบของวงแหวนผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ได้แก่ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (Outer Diameter) ความหนาของผนังอุโมงค์ (Thickness) ความกว้างของวงแหวนประกอบผนังอุโมงค์ (Width) ค่า f_c' และค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ($24-26 \text{ kN/m}^3$)
- Soil Properties เป็นส่วนที่จะ Input ค่าของสภาพชั้นดินในบริเวณที่ต้องออกแบบ โดยเริ่มจากการใส่จำนวนชั้นดิน (Number of Layer) จากนั้นใส่ค่าหน่วยน้ำหนักของดินและความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการใส่ค่า ระดับน้ำใต้ดิน Surcharge Load สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_h) ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ ค่า Subgrade Reaction Factor ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ และค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่

Earthquake Tunnel Design (v2.2) [Input]

File Help

Concrete Segment

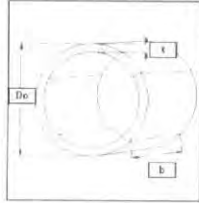
Outer Diameter (Do) m ☐ Suggestion

Thickness (t) m

Width (b) m

Compressive Strength (fc) ksc

Unit Weight kN/m³



Soil Properties

Number of Layers

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Height (m)
1	16	10
2	17	5
3	18	4
4	20	5.52
5	0	0

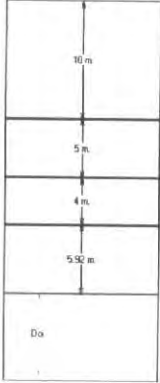
Water Level at Top of Layer No.

Surcharge Loads (q) kN/m²

ks (Tunnel Layer) ☐ Suggestion

Subgrade Reaction (k) kN/m³ ☐ Suggestion

Unit Weight at Tunnel Layer kN/m³



Calculation

รูปที่ 9.2 แสดงหน้าจอรับค่า Input

ถ้าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (Outer Diameter) อยู่ในช่วงที่มีการก่อสร้างเป็นมาตรฐาน จะสามารถเลือกที่ Suggestion ได้ เมื่อเลือกที่ Suggestion ปრაกฏตัวเลือกของความหนาของผนังอุโมงค์ (Thickness) และ ความกว้างของวงแหวนประกอบผนังอุโมงค์ (Width) ที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งจะใช้หรือไม่ก็ได้

Earthquake Tunnel Design (v2.2) [Input]

File Help

Concrete Segment

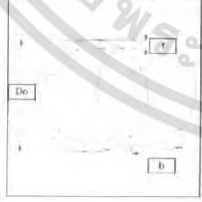
Outer Diameter (Do) m ☒ Suggestion

Thickness (t) m m

Width (b) m m

Compressive Strength (fc) ksc ksc

Unit Weight kN/m³ kN/m³



Soil Properties

Number of Layers

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Height (m)
1	16	10
2	17	5
3	18	4
4	20	5.52
5	0	0

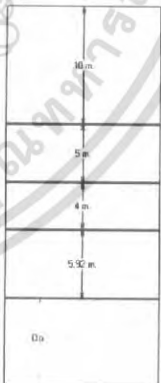
Water Level at Top of Layer No.

Surcharge Loads (q) kN/m²

ks (Tunnel Layer) ☐ Suggestion

Subgrade Reaction (k) kN/m³ ☐ Suggestion

Unit Weight at Tunnel Layer kN/m³



Calculation

รูปที่ 9.3 แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion

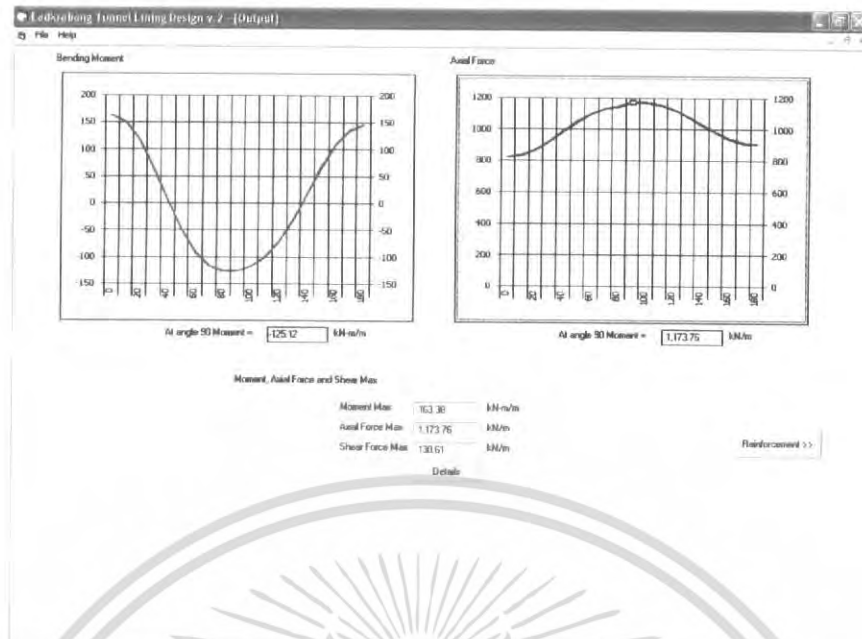
ถ้าต้องการคำแนะนำของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_o) หรือค่า Subgrade Reaction Factor ให้คลิกที่เลือก Suggestion

Design Method	Soil	k_o
Effective Stress Method	Very Dense Sand	0.30 - 0.45
	Dense Sand	0.45 - 0.55
	Loose Sand	0.50 - 0.60
	Very Soft Clay	0.35 - 0.45
	Stiff Clay	0.45 - 0.55
Total Stress Method	Medium Stiff Clay	0.45 - 0.55
	Medium Stiff Clay	0.55 - 0.65
	Soft Clay	0.65 - 0.75
	Very Soft Clay	0.75 - 0.85

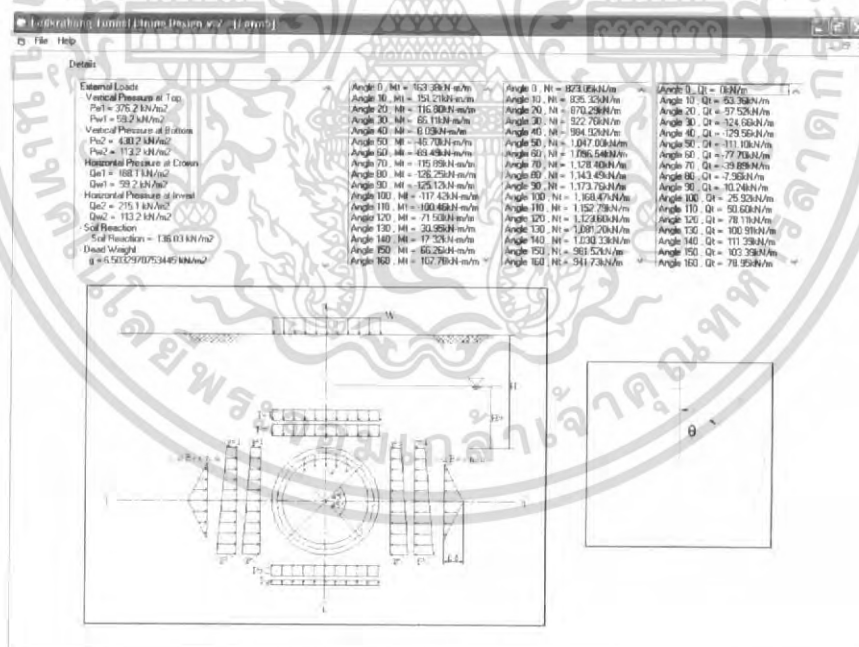
รูปที่ 9.4 แสดงหน้าจอคำแนะนำของค่า (k_o) และค่า Subgrade Reaction Factor

- เมื่อคลิกปุ่ม Calculation ในหน้าต่างแรก หน้าต่างผลการคำนวณก็แสดงขึ้น โดยจะประกอบด้วยกราฟแสดงค่า Bending Moment และ Axial Force ซึ่งแกนตั้งแสดงค่าแรง แกนนอนแสดงค่าองศาจาก Crown รวมถึงค่า Moment Max, Axial Force Max และ Shear Force Max

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



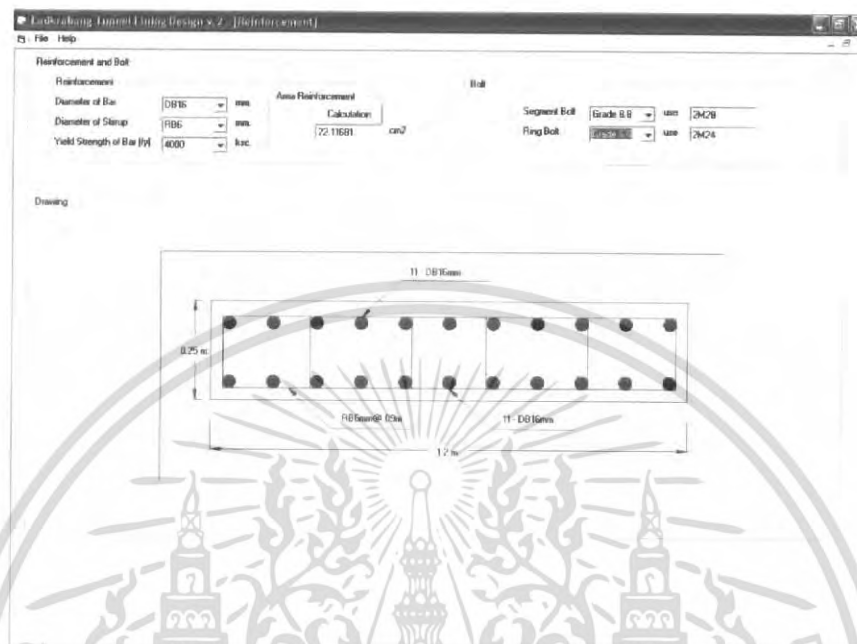
รูปที่ 9.5 แสดงหน้าจอแสดงค่าแรงกระทำภายใน
ถ้าต้องการดูรายละเอียดค่าที่ได้จากการคำนวณ ให้คลิกที่ปุ่ม Details หน้าต่างแสดง
รายละเอียดจะแสดงขึ้น



รูปที่ 9.6 แสดงหน้าจอเมื่อคลิก Details

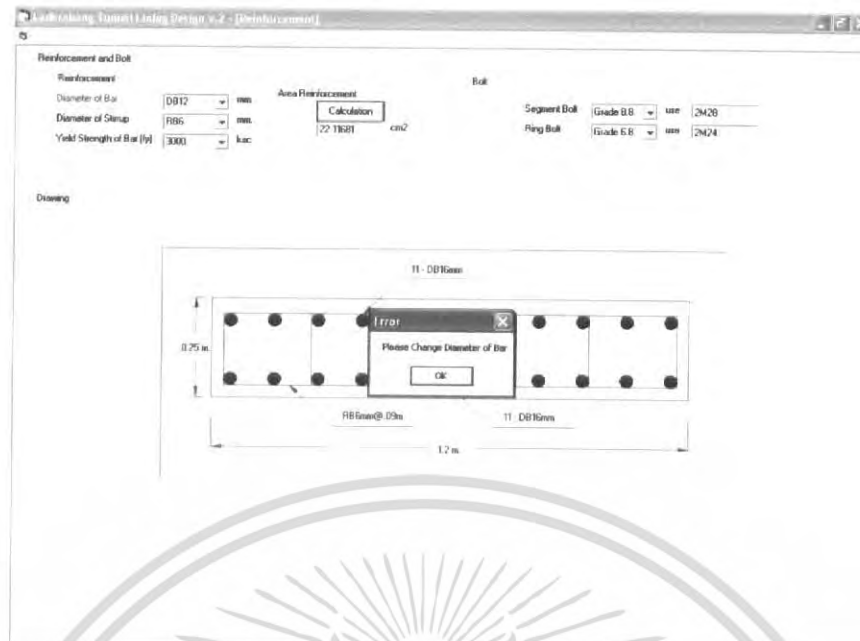
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน้าต่างการเสริมเหล็ก โดยเลือกขนาดของเหล็กเสริม (Diameter of Bar) ขนาดเหล็กปลอก (Diameter of Stirrup) และค่า f_y ของเหล็กเสริม แล้วคลิกที่ปุ่ม Calculation จะได้ค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ หลังจากนั้นก็เลือก Grade ของ Segment Bolt และ Ring Bolt

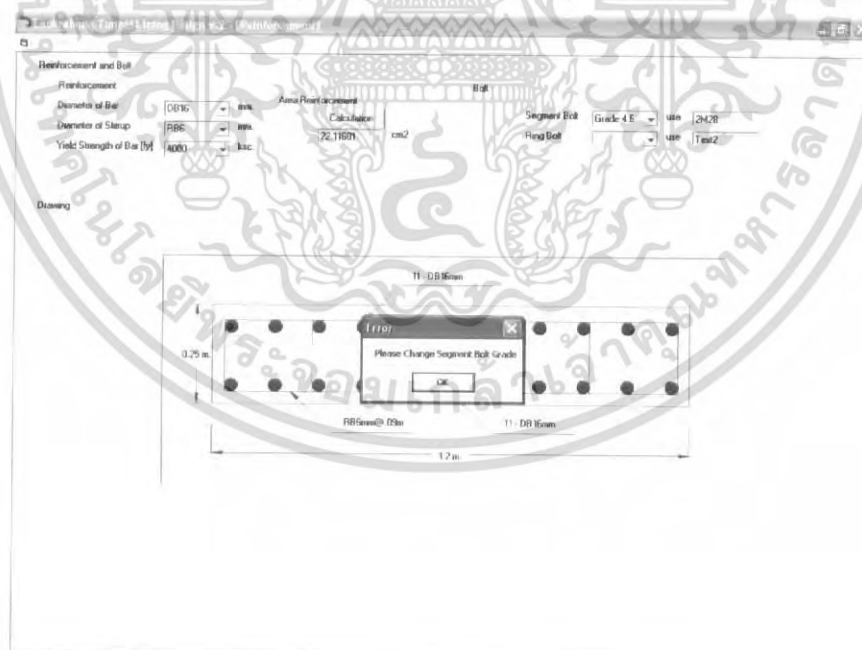


รูปที่ 9.7 แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก

ถ้าขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Diameter of Bar”

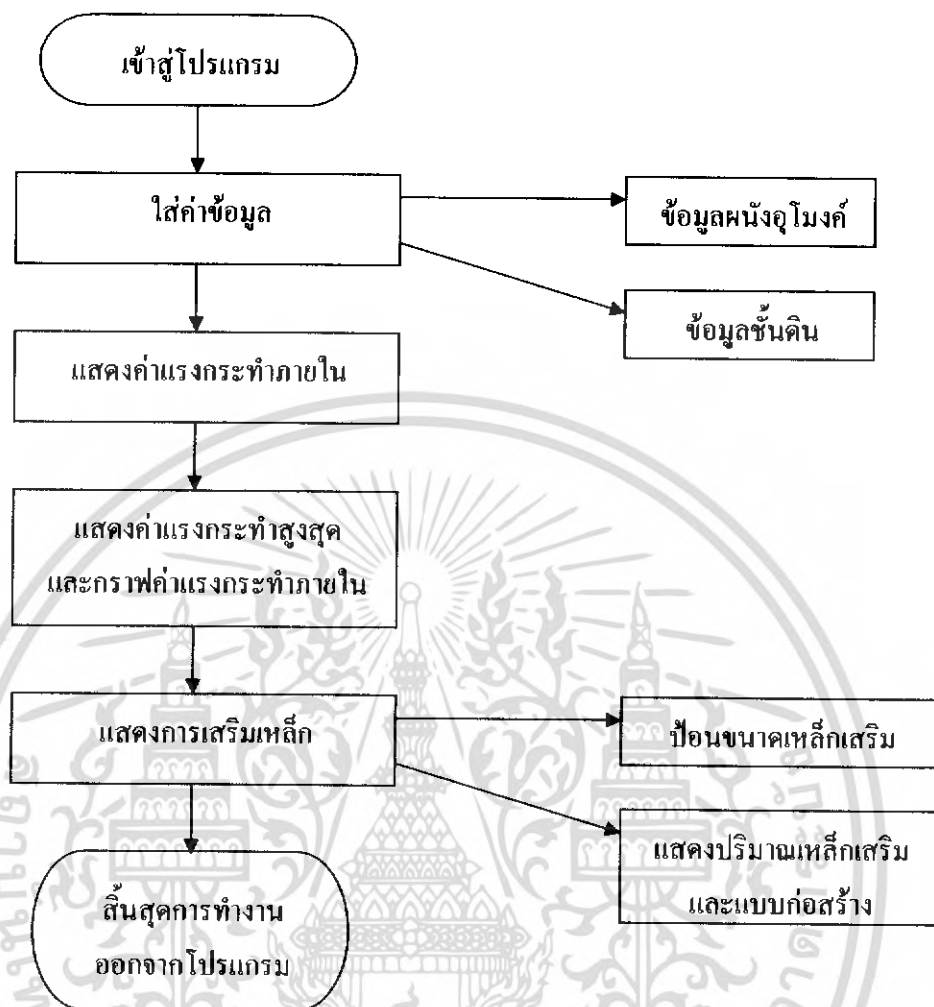


รูปที่ 9.8 แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ
ถ้า Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Segment Bolt” หรือ “Please Change Ring Bolt”



รูปที่ 9.9 แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.10 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

9.5 ข้อกำหนดของโปรแกรม

1. การวิเคราะห์แรงดันดินจะยอมให้วิเคราะห์เพียง 5 ชั้น แต่สามารถแก้ไขตัวโปรแกรมให้รับมากขึ้นได้
2. เป็นโปรแกรมที่ใช้ทฤษฎี Terzaghi เพียงทฤษฎีเดียวแต่ก็เป็นทฤษฎีที่ในปัจจุบันนิยมใช้
3. การเสริมเหล็กกำหนดค่าที่น้อยที่สุดคือ 1% ซึ่งในการใช้งานจริงอาจใช้ค่าน้อยสุดต่ำกว่า 1% ก็ได้

9.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎี Empirical ต่างๆ

ในหัวข้อนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นมาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร Empirical ต่างๆ ได้แก่ ทฤษฎีของ Terzaghi , ทฤษฎีของ Einstein , ทฤษฎีของ Muir Wood และทฤษฎี Beam-Spring Model โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎี Empirical ต่างๆในกรณีที่ 1 คืออุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นทรายแน่น (Dense Sand) เท่านั้น ซึ่งได้ผลดังนี้

9.6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi

- ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง ($P = P_{e1} + P_{w1}$)

$$M_1 = \frac{1}{4}(1 - 2\sin^2 \theta)P \cdot R_c^2$$

$$N_1 = \sin^2 \theta \cdot P \cdot R_c$$

$$Q_1 = -P \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta$$

เมื่อ M_1 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

Q_1 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน ($Q = q_{e1} + q_{w1}$)

$$M_2 = \frac{1}{4}(1 - 2\cos^2 \theta)Q \cdot R_c^2$$

$$N_2 = \cos^2 \theta \cdot Q \cdot R_c$$

$$Q_2 = Q \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta$$

เมื่อ M_2 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_2 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_2 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยม ($Q' = q_{c2} + q_{w2}$)

$$M_3 = \frac{1}{48}(6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c^2$$

$$N_3 = \frac{1}{16}(\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c$$

$$Q_3 = \frac{1}{16}(\sin\theta + 8\sin\theta\cos\theta - 4\sin\theta\cos^2\theta)(Q' - Q) \cdot R_c$$

เมื่อ M_3 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_3 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_3 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน ($k\delta$)

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}$$

$$M_4 = (0.2346 - 0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c^2$$

$$N_4 = (0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c$$

$$Q_4 = 0.3536\sin\theta \cdot (k\delta)R_c$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_4 = (-0.3487 + 0.5\sin^2\theta + 0.2357\cos^3\theta)(k\delta)R_c^2$$

$$N_4 = (-0.7071\cos\theta + \cos^2\theta + 0.7071\sin^2\theta\cos\theta)(k\delta)R_c$$

$$Q_4 = (\sin\theta\cos\theta - 0.7071\cos^2\theta\sin\theta)(k\delta)R_c$$

เมื่อ M_4 = โมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

N_4 = แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

Q_4 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ ($g = \gamma_c \cdot 1$)

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_5 = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta \sin \theta - \frac{5}{6}\cos \theta \right) g \cdot R_c^2$$

$$N_5 = \left(\theta \sin \theta - \frac{1}{6}\cos \theta \right) g \cdot R_c$$

$$Q_5 = - \left(\theta \cos \theta + \frac{1}{6}\sin \theta \right) g \cdot R_c$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$M_5 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta) \sin \theta - \frac{5}{6}\cos \theta - \frac{1}{2}\pi \sin^2 \theta \right) g \cdot R_c^2$$

$$N_5 = \left(-\pi \sin \theta + \theta \sin \theta + \pi \sin^2 \theta - \frac{1}{6}\cos \theta \right) g \cdot R_c$$

$$Q_5 = \left\{ (\pi - \theta) \cos \theta - \pi \sin \theta \cos \theta - \frac{1}{6}\sin \theta \right\} g \cdot R_c$$

เมื่อ M_5 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์
 N_5 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์
 Q_5 = แรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

ดังนั้นแรงกระทำทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดังนี้

แรงในแนวแกนทั้งหมด (Total Axial Forces) = $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$

แรงโมเมนต์ดัดทั้งหมด (Total Moment) = $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5$

แรงเฉือนทั้งหมด (Total Shear Forces) = $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$

ตารางที่ 9.1 แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	162.59	-20.49	-124.11	-7.55	144.34
N_T (kN/m)	823.97	1017.45	1147.45	1038.23	907.76
Q_T (kN/m)	0.00	-122.30	10.25	107.62	0.00

- แรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 9.2 แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	163.38	-19.31	-125.12	-6.82	145.14
N_T (kN/m)	823.05	1015.96	1173.76	1055.77	906.84
Q_T (kN/m)	0.00	-120.33	10.24	106.15	-3.41

ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณแรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

9.6.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

- ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

การหาแรงภายในกระทำใน

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2}(1+K)(1-a_0^*) + \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta$$

โดยที่ $C^* = \frac{ER(1-\nu_s^2)}{E_s A_s (1-\nu^2)}$

$$F^* = \frac{ER^3(1-\nu_s^2)}{E_s I_s (1-\nu^2)}$$

$$a_0^* = \frac{C^* F^* (1-\nu)}{C^* + F^* + C^* F^* (1-\nu)}$$

$$a_2^* = \frac{(F^* + 6)(1-\nu)}{2F^* (1-\nu) + 6(5-6\nu)}$$

ตารางที่ 9.3 แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	155.99	0	-155.99	0	155.99
T (kN/m)	1133.77	1076.00	1018.21	1075.99	1133.76

- แรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 9.4 แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	161.26	0.00	-161.26	0.00	161.26
T (kN/m)	1125.87	1072.45	1019.04	1072.45	1125.87

ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณแรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

9.6.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

- ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

การหาแรงภายในกระทำใน

$$P_o = P - Q$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (P + Q')$$

$$Q_2 = \frac{E \times R_o^3}{E_c \cdot (1 + \nu) \cdot 12 \cdot I}$$

$$S_T = \frac{P_o \times (1 + 2Q_2)}{2 \times \left(1 + \frac{Q_2 \cdot (3 - 2\nu)}{3 - 4\nu} \right)}$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4\nu) \times \frac{P_o}{2} - (2 \cdot Q_2 + (4 - 6\nu)) \times S_T$$

$$S_{N2} = 4 \cdot Q_2 + 5 - 6\nu$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}}$$

$$Q = \frac{E_i \times R_o}{E(1 + \nu) \cdot (R_o - R_i)}$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1 + Q}$$

$$N_R = \Delta P \times R_o$$

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง ($P = P_{el} + P_{w1}$)

$$M_1 = \frac{R_o^2}{6} (2S_N + S_T) \cos 2\theta$$

$$N_1 = -\frac{R_o}{3} (S_N + 2S_T) \cos 2\theta + N_B$$

เมื่อ M_1 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอก
 N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอก

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ ($g = \gamma_c l$)

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_2 = \left(\frac{3}{8} \pi - \theta \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c^2$$

$$N_2 = \left(\theta \sin \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$M_2 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta) \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta - \frac{1}{2} \pi \sin^2 \theta \right) g \cdot R_c^2$$

$$N_2 = \left(-\pi \sin \theta + \theta \sin \theta + \pi \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c$$

เมื่อ M_2 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

M_2 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

แรงโมเมนต์คัตทั้งหมด (Total Moment) = $M_1 + M_2$

แรงในแนวแกนทั้งหมด (Total Axial Forces) = $N_1 + N_2$

ซึ่ง K_O = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

R_O = รัศมีถึงผิวด้านนอกของ Lining

R_C = รัศมีถึงแนวแกนกลางของ Lining

E_C = Young's Modulus of Lining

E = Young's Modulus ของดินหรือหิน

I = Moment of Inertia ของ Lining ต่อหน่วยความยาวของอุโมงค์

ν = Poisson's ratio สำหรับดิน

ตารางที่ 9.5 แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	81.28	1.44	-83.35	-1.44	-85.41
N_T (kN/m)	894.78	1025.62	1165.33	1027.97	900.35

- แรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 9.6 แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	81.28	1.44	-83.35	-1.44	-85.41
N_T (kN/m)	894.78	1025.62	1165.33	1027.97	900.35

ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณแรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

9.6.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Beam-Spring Model

- ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Beam-Spring Model

ใช้สมการของ Terzaghi ในการหาค่าของแรงกระทำภายในแต่จะเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำเนื่องจากแรงต้านทานในแนวนอน

โดยเปลี่ยนค่า Subgrade Reaction Factor เป็น

$$k_r = \frac{3E_o}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c}$$

ตารางที่ 9.7 แสดงแรงกระทำภายในรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Beam-Spring Model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	189.45	-17.01	-158.27	-4.07	171.21
N_T (kN/m)	792.96	995.53	1147.45	1016.31	876.76
Q_T (kN/m)	0.00	-144.22	10.25	129.54	0.00

- แรงกระทำภายในรวมที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 9.8 แสดงแรงกระทำรวมในกรณีที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	218.24	-12.63	-194.87	66.66	200.00
N_T (kN/m)	759.74	971.54	1173.76	954.265	843.54
Q_T (kN/m)	0.00	-164.725	10.24	143.565	-3.41

ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณแรงกระทำภายในรวมที่ได้จาก โปรแกรมกับทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Beam-Spring Model นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

บรรณานุกรม

- สุัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์, แหลมทอง เหล่าคงถาวร และ วสันต์ชัย ชวศิริกุลพล, 2536. การออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินสำหรับดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ชัชว ไซยวงศ์เหล็ก, วิรัช ประนัดเด และ ศิริพงษ์ นาคทอง, 2546. การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ปิยะฉัฐ แสงจันทร์, 2546. การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่ออุโมงค์ใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Japan Society of Civil Engineers, 1996. Japanese Standard For Shield Tunneling. Third Edition. Japan : Toshindo Co.,Ltd.
- John O. Bickel, Thomas R. Kuesel, Elwyn H. King, 1996. Tunnel engineering handbook. Second Edition. New York: Chapman & Hall.
- Suchatvee Suwansawat, 2002. Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok. Doctor of Science in Civil and Environmental Engineering Thesis Massachusetts Institute of Technology.
- Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht, Lothar Anheuser, 1996. Mechanised Shield Tunneling. First Edition. Berlin: Ernst & Sohn.
- Koichi Ono, 2004. Tunnel Fire and the Lining Protection. The seventeenth KKCNN Symposium on Civil Engineering, Thailand.
- John Dunnicliff, 1993. Geotechnical Instrumentation for Monitoring field Performance. Second Edition. USA :

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พระราชบัญญัติ

ว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน

พ.ศ. ๒๕๔๐

ภูมิพลอดุลยเดช ป.ร.

ให้ไว้ ณ วันที่ ๑๔ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๔๐

เป็นปีที่ ๕๒ ในรัชกาลปัจจุบัน

พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช มีพระบรมราชโองการโปรดเกล้าฯ ให้
ประกาศว่า

โดยที่เป็นการสมควรให้มีกฎหมายว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน
จึงทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ตราพระราชบัญญัติขึ้นไว้โดยคำแนะนำและยินยอมของรัฐสภา
ดังต่อไปนี้

มาตรา ๑ พระราชบัญญัตินี้เรียกว่า “พระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๔๐”

มาตรา ๒ พระราชบัญญัตินี้ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษา
เป็นต้นไป

มาตรา ๓ ในพระราชบัญญัตินี้

“กิจการขนส่งมวลชน” หมายความว่า การจัดสร้าง ขยาย บูรณะ ปรับปรุง ซ่อมแซม และ
บำรุงรักษาระบบขนส่งมวลชน การให้บริการหรือการอำนวยความสะดวกแก่สาธารณะชนผู้โดยสารหรือจะใช้
ระบบขนส่งมวลชน และการดำเนินกิจการอื่นที่เกี่ยวข้องเนื่องกับกิจการดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“ระบบขนส่งมวลชน” หมายความว่า รถขนส่งมวลชน ทางรถขนส่งมวลชน สถานีรถขนส่งมวลชน ที่จอดรถขนส่งมวลชน ศูนย์ซ่อมบำรุง โรงเก็บของการเดินรถขนส่งมวลชน การจัดให้มีสถานที่จอดยานพาหนะของผู้โดยสาร ระบบพลังงาน ระบบควบคุม ระบบสัญญาณ ระบบจัดจำหน่าย และเก็บค่าโดยสาร ระบบความปลอดภัย ระบบระบายอากาศ ระบบระบายน้ำ และระบบสื่อสารที่ใช้ในกิจการขนส่งมวลชน และให้หมายความรวมถึงอาคารและอุปกรณ์ของระบบดังกล่าวด้วย

“รถขนส่งมวลชน” หมายความว่า รถขนส่งผู้โดยสารได้จำนวนมากที่พ่วงกันเป็นขบวนและขับเคลื่อนไปตามทางรถขนส่งมวลชน แต่ไม่รวมถึงรถขนส่งมวลชนบางเส้นทาง หรือบางประเภทที่รัฐมนตรีประกาศกำหนด

“ทางรถขนส่งมวลชน” หมายความว่า รังหรือทางที่จัดสร้างขึ้นโดยเฉพาะ สำหรับรถขนส่งมวลชน ไม่ว่าจะจัดสร้างอยู่บน เหนือ หรือใต้พื้นดินหรือพื้นน้ำ หรือผ่านไปในอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างใดๆ ก็ตาม

“การในอสังหาริมทรัพย์” หมายความว่า การที่ก่อขึ้นในอสังหาริมทรัพย์อันเป็นเหตุให้รัฐได้ใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์นั้นเพื่อกิจการขนส่งมวลชน

“เงินค่าทดแทน” หมายความว่า เงินค่าทดแทนการในอสังหาริมทรัพย์และให้หมายความรวมถึงเงินค่าทดแทนอื่นด้วย

“หน่วยงาน” หมายความว่า ส่วนราชการและรัฐวิสาหกิจตามกฎหมายว่าด้วยวิธีการงบประมาณ ราชการส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานอื่นของรัฐ บรรดาที่มีอำนาจหน้าที่ดำเนินการเกี่ยวกับกิจการขนส่งมวลชน

“พนักงานเจ้าหน้าที่” หมายความว่า หัวหน้าหน่วยงาน และผู้ซึ่งหัวหน้าหน่วยงานที่ดำเนินการแต่งตั้งให้ปฏิบัติการตามพระราชบัญญัตินี้

“รัฐมนตรี” หมายความว่า รัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัตินี้

มาตรา ๔ ให้นายกรัฐมนตรีรักษาการตามพระราชบัญญัตินี้ และให้มีอำนาจออกกฎกระทรวง และประกาศเพื่อปฏิบัติการตามพระราชบัญญัตินี้

กฎกระทรวงและประกาศนั้น เมื่อได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษาแล้วให้ใช้บังคับได้

มาตรา ๕ ในการปฏิบัติหน้าที่ตามพระราชบัญญัตินี้ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่เป็นเจ้าพนักงาน ตามประมวลกฎหมายอาญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด ๑

การจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน

มาตรา ๖ ในกรณีที่หน่วยงานใดมีความจำเป็นต้องใช้อสังหาริมทรัพย์เพื่อประโยชน์ในการดำเนินกิจการขนส่งมวลชนโดยไม่จำเป็นต้องได้มาซึ่งอสังหาริมทรัพย์ ถ้ามิได้ตกลงกันไว้เป็นอย่างอื่น ให้ดำเนินการตามบทแห่งพระราชบัญญัตินี้ แต่ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องได้มาซึ่งอสังหาริมทรัพย์ ให้ดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์

มาตรา ๗ ในการดำเนินกิจการขนส่งมวลชนโดยการก่อสร้าง ขยาย บูรณะ หรือปรับปรุงอย่างใหญ่ ซึ่งระบบขนส่งมวลชน ให้หน่วยงานดำเนินการ ดังต่อไปนี้

- (๑) จัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมเพื่อปฏิบัติตามกฎหมายว่าด้วยการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ
- (๒) จัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการจราจรและผลที่จะได้รับการดำเนินการ สำหรับหลักเกณฑ์ วิธีการ ระเบียบปฏิบัติ และการจัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าว ตลอดจนเอกสารที่เกี่ยวข้องซึ่งต้องเสนอพร้อมกับรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบนั้น ให้เป็นไปตามที่รัฐมนตรีประกาศกำหนดในราชกิจจานุเบกษา
- (๓) จัดทำแผนดำเนินการ พร้อมทั้งแผนที่โดยสังเขปกำหนดเขตที่จะก่อสร้าง ขยาย บูรณะ หรือปรับปรุงอย่างใหญ่

ให้หน่วยงานเสนอรายงานและแผนดำเนินการตามวรรคหนึ่งให้คณะกรรมการจัดระบบการจราจรทางบกตามกฎหมายว่าด้วยคณะกรรมการจัดระบบการจราจรทางบกพิจารณาเพื่อเสนอความเห็นประกอบการพิจารณาของคณะรัฐมนตรี

มาตรา ๘ เพื่อประโยชน์ในการดำเนินกิจการขนส่งมวลชนจะตราพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่จะดำเนินการก็ได้

ในพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่จะดำเนินการต้องระบุ

- (๑) ความประสงค์ของการตราพระราชกฤษฎีกา
- (๒) หน่วยงานที่จะดำเนินการ
- (๓) กำหนดเขตที่ดินเท่าที่จำเป็นในบริเวณที่จะดำเนินการ

ให้มีแผนที่หรือแผนผังแสดงแนวเขตที่ดินในบริเวณที่จะดำเนินการแนบท้ายพระราชกฤษฎีกา และให้ถือเป็นส่วนหนึ่งแห่งพระราชกฤษฎีกานั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พระราชกฤษฎีกาเช่นนี้ให้ใช้บังคับได้มีกำหนดสองปี หรือตามกำหนดเวลาที่ระบุไว้ในพระราชกฤษฎีกานั้น แต่ต้องไม่เกินสี่ปี แล้วแต่จะเห็นว่าจำเป็นเพื่อทำการสำรวจที่ดินที่จะดำเนินการนั้น

มาตรา ๕ เมื่อพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ มีผลใช้บังคับแล้ว ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ปิดประกาศสำเนาแห่งพระราชกฤษฎีกาดังกล่าวพร้อมทั้งแผนที่ หรือแผนผังท้ายพระราชกฤษฎีกาไว้โดยเปิดเผย ณ สถานที่ ดังต่อไปนี้

(๑) ที่ทำการของหน่วยงานที่ดำเนินการ

(๒) ศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร สำนักงานเขต และที่ทำการแขวง หรือศาลากลางจังหวัด ที่ว่าการอำเภอหรือกิ่งอำเภอ ที่ทำการกำนัน และที่ทำการผู้ใหญ่บ้าน แห่งท้องที่ที่อสังหาริมทรัพย์นั้นตั้งอยู่ แล้วแต่กรณี

(๓) สำนักงานที่ดินกรุงเทพมหานคร และสำนักงานที่ดินกรุงเทพมหานครสาขา หรือสำนักงานที่ดินจังหวัด สำนักงานที่ดินจังหวัดสาขา และสำนักงานที่ดินอำเภอ แห่งท้องที่ที่อสังหาริมทรัพย์นั้นตั้งอยู่ แล้วแต่กรณี

มาตรา ๑๐ ภายในกำหนดอายุแห่งพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจดำเนินการสำรวจเพื่อทราบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับสภาพ ลักษณะและการเข้าใช้ประโยชน์บน เหนือ หรือใต้พื้นดินหรือพื้นน้ำ ที่จะก่อการะในอสังหาริมทรัพย์โดยไม่มีการเวนคืน และข้อเท็จจริงเกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ที่จะต้องเวนคืน เพื่อการวางแผนหรือออกแบบกิจการขนส่งมวลชน

เพื่อประโยชน์ในการสำรวจตามวรรคหนึ่ง ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจดำเนินการภายในแนวเขตที่ดินตามแผนที่หรือแผนผังท้ายพระราชกฤษฎีกา ดังต่อไปนี้

(๑) เข้าไปตรวจตรา เข้าไปใช้สอย หรือเข้าครอบครองอสังหาริมทรัพย์เป็นการชั่วคราวได้ตามความจำเป็น

(๒) ขุด เจาะ คัดค้นต้นไม้ หรือรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างที่มีใช้โรงเรียน หรือที่อยู่อาศัยของบุคคลใดๆ หรือดำเนินการอื่นใดเท่าที่จำเป็นในอสังหาริมทรัพย์ ในการนี้ให้มีอำนาจทำลายสิ่งกีดขวางหรือเคลื่อนย้ายสิ่งของได้ตามความจำเป็น และเก็บหิน ดิน น้ำ หรือสิ่งต่างๆ อันจำเป็นแก่การสำรวจเพื่อนำไปใช้เป็นตัวอย่างในปริมาณพอสมควร

(๓) มีหนังสือเรียกให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองอสังหาริมทรัพย์นำหนังสือแสดงสิทธิในที่ดินหรือสำเนาหนังสือดังกล่าวมาแสดง หรือให้ข้อเท็จจริงใดๆ เกี่ยวกับสภาพของอสังหาริมทรัพย์ ทรัพย์สินสิทธิเหนืออสังหาริมทรัพย์ หรือสิทธิอื่นอันเกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ของผู้นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดำเนินการตาม (๑) หรือ (๒) ให้ผู้ซึ่งปฏิบัติงานร่วมกับพนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจดำเนินการตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่มอบหมาย และถ้าการดำเนินการใดต้องกระทำในโรงเรียนหรือที่อยู่อาศัยของบุคคล หากเจ้าของหรือผู้ครอบครองไม่ยินยอมจะต้องมีเจ้าพนักงานตำรวจแห่งท้องที่เข้าไปด้วยเพื่อเป็นพยาน และจะต้องกระทำในระหว่างเวลาพระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตก

ก่อนการดำเนินการตาม (๑) หรือ (๒) พนักงานเจ้าหน้าที่ต้องแจ้งเป็นหนังสือให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ทราบถึงกิจกรรมที่จะต้องกระทำและความจำเป็นที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้นั้นล่วงหน้าไม่น้อยกว่าสิบห้าวัน เว้นแต่ในกรณีที่ไม่อาจติดต่อกับเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ได้ ให้ประกาศให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์นั้นทราบ โดยทำเป็นหนังสือปิดไว้ ณ ที่ที่อสังหาริมทรัพย์นั้นตั้งอยู่ และ ณ สำนักงานเขต หรือที่ว่าการอำเภอหรือกิ่งอำเภอ ที่ทำการกำนัน และที่ทำการผู้ใหญ่บ้าน แห่งท้องที่ที่อสังหาริมทรัพย์นั้นตั้งอยู่ ทั้งนี้ ให้แจ้งกำหนดวัน เวลา และการที่จะกระทำนั้นไว้ด้วย และให้ถือว่าเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์นั้นได้รับแจ้งเมื่อล่วงพ้นระยะเวลาสิบห้าวันนับแต่วันประกาศ

ในการปฏิบัติหน้าที่ตามมาตรา ๑๑ พนักงานเจ้าหน้าที่หรือผู้ซึ่งปฏิบัติงานร่วมกับพนักงานเจ้าหน้าที่ต้องแสดงบัตรประจำตัวซึ่งออกโดยหน่วยงานที่ดำเนินการต่อบุคคลซึ่งเกี่ยวข้อง

ถ้าการปฏิบัติของพนักงานเจ้าหน้าที่หรือผู้ซึ่งปฏิบัติงานร่วมกับพนักงานเจ้าหน้าที่ตามมาตรา ๑๑ ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์หรือผู้ทรงสิทธิอื่นมีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทน สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นจากหน่วยงานที่ดำเนินการนั้น

มาตรา ๑๑ เมื่อพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๘ มีผลใช้บังคับแล้ว ให้หน่วยงานที่ดำเนินการมีอำนาจใช้ที่ดินดังต่อไปนี้ในการดำเนินกิจการขนส่งมวลชนของหน่วยงานที่ดำเนินการได้

(๑) ที่ดินอันเป็นสาธารณสมบัติของแผ่นดินสำหรับพลเมืองใช้ร่วมกัน แต่พลเมืองเล็กใช้ประโยชน์ในที่ดินนั้น หรือได้เปลี่ยนแปลงสภาพจากการเป็นที่ดินสำหรับพลเมืองใช้ร่วมกัน และมีได้ตกเป็นกรรมสิทธิ์ของผู้ใด

(๒) ที่ดินอันเป็นสาธารณสมบัติของแผ่นดินสำหรับพลเมืองใช้ร่วมกัน และพลเมืองยังใช้ประโยชน์ในที่ดินนั้นอยู่ แต่ได้มีการจัดที่ดินแปลงอื่นให้พลเมืองใช้ร่วมกันแทน โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษาแล้ว

(๓) ที่ดินอันเป็นสาธารณสมบัติของแผ่นดินที่สงวนหรือหวงห้ามไว้เพื่อสาธารณประโยชน์ หรือเพื่อให้ประชาชนใช้ประโยชน์ร่วมกัน ซึ่งทางราชการไม่ประสงค์จะสงวน หรือหวงห้ามไว้อีกต่อไป

(๔) ที่ดินอันเป็นสาธารณสมบัติของแผ่นดินสำหรับใช้เพื่อประโยชน์ของแผ่นดินโดยเฉพาะ หรือที่ดินที่ได้สงวนหรือหวงห้ามไว้ตามความต้องการของทางราชการ และคณะรัฐมนตรีได้ให้ความเห็นชอบแล้ว

(๕) ที่ดินอันเป็นสาธารณสมบัติของแผ่นดินซึ่งเป็นที่ดินรกร้างว่างเปล่า หรือที่ดินซึ่งมีผู้เวนคืน หรือทอดทิ้งหรือกลับมาเป็นของแผ่นดินโดยประการอื่นตามประมวลกฎหมายที่ดิน

(๖) ที่ดินขององค์การของรัฐบาลตามกฎหมายว่าด้วยการจัดตั้งองค์การของรัฐบาลหรือตามกฎหมายเฉพาะ และคณะรัฐมนตรีได้ให้ความเห็นชอบแล้ว

(๗) ที่วัด ที่ธรณีสงฆ์ หรือที่ศาสนสมบัติกลาง เมื่อมหาเถรสมาคมไม่จัดซื้อ และได้มีการจ่ายค่าผาติกรรมแล้ว

มาตรา ๑๒ ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ ให้ถือว่าพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่จะดำเนินการตามมาตรา ๘ เป็นพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่จะเวนคืนตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์

มาตรา ๑๓ ในกรณีที่ไม่มีความจำเป็นต้องเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจทำความตกลงกับเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์เพื่อกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ตามความจำเป็นของการดำเนินการและกำหนดเงินค่าทดแทนภาระในอสังหาริมทรัพย์ดังกล่าว แต่จะตกลงกำหนดเงินค่าทดแทนเกินกว่าเงินค่าทดแทนที่คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ กำหนดไม่ได้

ในกรณีที่มีการตกลงกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์และเงินค่าทดแทนกันได้ตามวรรคหนึ่ง ให้พนักงานเจ้าหน้าที่จ่ายเงินค่าทดแทนทั้งหมดให้แก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ภายในเก้าสิบวันนับแต่วันที่ทำสัญญากำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์

มาตรา ๑๔ ในกรณีที่สามารรถตกลงกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ได้ แต่ไม่อาจตกลงกันได้ในเรื่องเงินค่าทดแทน หากเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์จะขอรับเงินค่าทดแทนที่พนักงานเจ้าหน้าที่กำหนดไว้ตามมาตรา ๑๓ ไปก่อนโดยสงวนสิทธิอุทธรณ์ต่อรัฐมนตรีตามมาตรา ๓๖ ก็ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ดำเนินการทำสัญญากำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์โดยมีเงื่อนไขดังกล่าว แล้วจ่ายเงินค่าทดแทนไปก่อนได้

มาตรา ๑๕ ในกรณีที่ดินที่จะกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ตามมาตรา ๑๓ มีหนังสือแสดงสิทธิในที่ดิน ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งพนักงานเจ้าหน้าที่ตามประมวลกฎหมายที่ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบการทำสัญญากำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์และให้ดำเนินการจดทะเบียนเพื่อกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ในหนังสือแสดงสิทธิในที่ดิน ในการนี้ให้ยกเว้นค่าธรรมเนียมตามประมวลกฎหมายที่ดิน

เพื่อประโยชน์ในการจดทะเบียน ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ตามประมวลกฎหมายที่ดินมีอำนาจเรียกหนังสือแสดงสิทธิในที่ดินฉบับเจ้าของที่ดินจากผู้ถือไว้ได้

มาตรา ๑๖ ในกรณีที่ดินที่จะกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ตามมาตรา ๑๓ ไม่มีหนังสือแสดงสิทธิในที่ดิน ให้หน่วยงานที่ดำเนินการแต่งตั้งคณะกรรมการชั้นคณะหนึ่งประกอบด้วย ผู้อำนวยการเขต หรือนายอำเภอหรือปลัดอำเภอผู้เป็นหัวหน้าประจำกิ่งอำเภอ แล้วแต่กรณี แห่งท้องที่ซึ่งที่ดินดังกล่าวตั้งอยู่ พนักงานที่ดินอำเภอหรือพนักงานที่ดินกิ่งอำเภอ ผู้ใหญ่บ้านในท้องที่ซึ่งที่ดินดังกล่าวตั้งอยู่ และผู้แทนของหน่วยงานที่ดำเนินการเพื่อดำเนินการสอบสวนให้ทราบถึงผู้มีสิทธิในที่ดินดังกล่าว เมื่อทราบถึงผู้มีสิทธิในที่ดินแล้วจึงให้ดำเนินการจ่ายเงินค่าทดแทนต่อไป

ในการสอบสวนเพื่อทราบถึงผู้มีสิทธิในที่ดินตามวรรคหนึ่งให้นำบทบัญญัติแห่งประมวลกฎหมายที่ดินเกี่ยวกับการรังวัดที่ดินและการออกหนังสือแสดงสิทธิในที่ดินมาใช้บังคับโดยอนุโลม

มาตรา ๑๗ เมื่อได้จดทะเบียนกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์แล้วให้อสังหาริมทรัพย์นั้นตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์โดยไม่มีกำหนดเวลานับแต่วันที่จดทะเบียนเป็นต้นไป เว้นแต่จะได้จดทะเบียนกำหนดเวลาเป็นอย่างอื่น

เจ้าของอสังหาริมทรัพย์จะทำการใดๆ อันจะเป็นเหตุให้การใช้ประโยชน์ของรัฐตามภาระในอสังหาริมทรัพย์ลดลงหรือเสื่อมความสะดวกไม่ได้ เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นหนังสือจากพนักงานเจ้าหน้าที่ และในการอนุญาตนั้นพนักงานเจ้าหน้าที่จะกำหนดเงื่อนไขอย่างใดด้วยหรือไม่ก็ได้

การจำหน่ายหรือแบ่งแยกอสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ไม่เป็นเหตุให้ภาระในอสังหาริมทรัพย์นั้นสิ้นสุดลง

มาตรา ๑๘ ภาระในอสังหาริมทรัพย์ซึ่งได้จดทะเบียนไว้แล้ว หากมิได้ใช้ตามวัตถุประสงค์ภายในสิบปี เจ้าของอสังหาริมทรัพย์มีสิทธิขอให้จดทะเบียนเลิกภาระในอสังหาริมทรัพย์นั้นได้

หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการขอให้จดทะเบียนเลิกภาระในอสังหาริมทรัพย์ และการเรียกคืนค่าทดแทนจากเจ้าของอสังหาริมทรัพย์ให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง

ให้นำบทบัญญัติมาตรา ๑๕ มาใช้บังคับกับการจดทะเบียนเลิกภาระในอสังหาริมทรัพย์โดยอนุโลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด ๒

การเข้าใช้สังหาริมทรัพย์ในกรณีมีความจำเป็นและเร่งด่วน

มาตรา ๑๕ ในกรณีที่หน่วยงานที่ดำเนินการเห็นว่าในการดำเนินการขนส่งมวลชนที่ได้มีการตราพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๘ แล้ว หากเน้นเข้าไปจะเป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการดำเนินการดังกล่าว ให้อธิบดีรัฐมนตรีมีอำนาจประกาศในราชกิจจานุเบกษากำหนดให้การเข้าใช้สังหาริมทรัพย์นั้นเป็นกรณีที่มีความจำเป็นและเร่งด่วนได้

เมื่อได้มีประกาศตามวรรคหนึ่งแล้ว ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจเข้าใช้สังหาริมทรัพย์ได้ แต่ต้องมีหนังสือแจ้งให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์นั้นทราบล่วงหน้าไม่น้อยกว่าหกสิบวัน และพนักงานเจ้าหน้าที่ต้องจัดให้มีการจ่ายหรือวางเงินค่าทดแทนที่กำหนดก่อน และให้นำบทบัญญัติมาตรา ๒๒ มาใช้บังคับโดยอนุโลม

ให้นำบทบัญญัติมาตรา ๑๐ วรรคสี่ วรรคห้า และวรรคหก มาใช้บังคับกับการดำเนินการของพนักงานเจ้าหน้าที่ตามมาตรา ๑๕ โดยอนุโลม

หมวด ๓

การกำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์

มาตรา ๒๐ ในกรณีที่ทราบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ที่จำเป็นสำหรับกิจการขนส่งมวลชนแล้ว แต่พนักงานเจ้าหน้าที่และเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ไม่อาจตกลงกันได้ในเรื่องการกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์หรือในเรื่องเงินค่าทดแทน ซึ่งมีใช้กรณีตามมาตรา ๑๕ ให้ตราพระราชบัญญัติกำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน โดยให้ระบุที่ดินหรืออสังหาริมทรัพย์อื่นที่ต้องคกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ และลักษณะของภาระในอสังหาริมทรัพย์ พร้อมทั้งรายชื่อเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์

ให้มีแผนที่หรือแผนผังแสดงเขตที่ดินหรืออสังหาริมทรัพย์อื่นที่ต้องคกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ ตำแหน่ง ระดับ เนื้อที่ และบริเวณที่ต้องใช้เพื่อกิจการขนส่งมวลชนอย่างชัดเจนไว้ท้ายพระราชบัญญัติตามวรรคหนึ่ง และให้ถือว่าแผนที่หรือแผนผังเป็นส่วนหนึ่งแห่งพระราชบัญญัตินั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขตที่ดินนั้นต้องปักหลักหมายเขตไว้โดยชัดเจนก่อนที่จะออกพระราชบัญญัติ

มาตรา ๒๑ ให้ที่ดินหรืออสังหาริมทรัพย์อื่นในเขตตามแผนที่หรือแผนผังท้ายพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์นับแต่วันที่พระราชบัญญัตินี้มีผลใช้บังคับ แต่หน่วยงานที่ดำเนินการจะมีสิทธิเข้าใช้ที่ดินหรืออสังหาริมทรัพย์อื่นนั้นได้ ก็ต่อเมื่อได้จ่ายหรือวางเงินค่าทดแทนตามที่บัญญัติไว้ในพระราชบัญญัตินี้แล้ว

เพื่อเป็นหลักฐานทางทะเบียน ให้จดทะเบียนกำหนดลักษณะการในอสังหาริมทรัพย์ตามพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ และให้นำบทบัญญัติมาตรา ๑๕ และมาตรา ๑๖ มาใช้บังคับกับการจดทะเบียนกำหนดลักษณะการในอสังหาริมทรัพย์ตามมาตรา ๑๕ ด้วยโดยอนุโลม

ให้นำมาตรา ๑๗ มาใช้บังคับกับการกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์ตามมาตรา ๑๕

มาตรา ๒๒ เมื่อพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ มีผลใช้บังคับแล้ว ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนตามมาตรา ๒๑ มารับเงินค่าทดแทนตามที่คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ กำหนด ทั้งนี้ ภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งต้องไม่เกินเก้าสิบวันนับแต่วันที่พระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนฉบับนั้นใช้บังคับ

ในกรณีที่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนผู้ใดไม่มารับเงินค่าทดแทนภายในระยะเวลาที่กำหนดหรือในกรณีที่ไม่มีเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนรายใดได้เพราะมีปัญหาเกี่ยวกับกรรมสิทธิ์หรือสิทธิอื่นในอสังหาริมทรัพย์ที่ต้องกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่วางเงินค่าทดแทนไว้ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรา ๒๔ โดยพลัน

มาตรา ๒๓ ในกรณีที่มีการจำนอง นุริมสิทธิ หรือทรัพย์สินอย่างอื่นเหนืออสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งให้ผู้รับจำนอง ผู้ทรงนุริมสิทธิ หรือผู้รับประโยชน์จากทรัพย์สินดังกล่าวมาขอรับชำระหนี้ หรือรับชดเชยจากเงินค่าทดแทนสำหรับอสังหาริมทรัพย์นั้นภายในหกสิบวันนับแต่วันที่ได้รับแจ้ง และในระหว่างนั้นยังมีให้พนักงานเจ้าหน้าที่จ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ แต่พนักงานเจ้าหน้าที่จะจ่ายเงินให้แก่ผู้รับจำนอง ผู้ทรงนุริมสิทธิ หรือผู้รับประโยชน์จากทรัพย์สินดังกล่าวได้ก็ต่อเมื่อกรณีตกลงกันได้แล้ว ถ้ายังมีปัญหาโต้แย้งกันอยู่ ให้พนักงานเจ้าหน้าที่วางเงินค่าทดแทนไว้ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรา ๒๔ โดยพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้นำบทบัญญัติมาตรา ๑๐ บรรคสี่ มาใช้บังคับกับการแจ้งของพนักงานเจ้าหน้าที่ตามวรรคหนึ่ง ด้วยโดยอนุโลม

มาตรา ๒๔ ในกรณีที่จะต้องมีการวางเงินค่าทดแทน ให้กระทำโดยการนำเงินไปวางค้ำศาล หรือสำนักงานสรรพากร หรือฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจในชื่อของผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทน โดยแยกฝากเป็นบัญชีเฉพาะราย และถ้ามีดอกเบี้ยหรือดอกเบี้ยใดเกิดขึ้นเนื่องจากเงินนั้น ให้ตกเป็นสิทธิแก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนนั้นด้วย

เมื่อพนักงานเจ้าหน้าที่นำเงินค่าทดแทนไปวางตามวรรคหนึ่งแล้ว ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนนั้นทราบโดยพลัน โดยส่งทางไปรษณีย์ตอบรับ

หลักเกณฑ์และวิธีการนำเงินค่าทดแทนไปวางค้ำศาลหรือสำนักงานสรรพากร หรือฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจ และวิธีการร้องขอรับเงินค่าทดแทนดังกล่าวให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง

หมวด ๕ เงินค่าทดแทน

มาตรา ๒๕ ภายในสามสิบวันนับแต่วันที่พระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ ใช้บังคับ หรือ ภายในสามสิบวันนับแต่วันที่พระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน ใช้บังคับในกรณีที่มีการใช้บังคับพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน ตามมาตรา ๒๐ โดยไม่มีการตราพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ ให้รัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชกฤษฎีกา หรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติ แล้วแต่กรณี แต่งตั้งคณะกรรมการขึ้นคณะหนึ่งประกอบด้วย ผู้แทนของหน่วยงานที่ดำเนินการหนึ่งคน ผู้แทนกระทรวงการคลังหนึ่งคน ผู้แทนกรมที่ดินหนึ่งคน ผู้แทนสภาท้องถิ่นที่เกี่ยวข้องแห่งละหนึ่งคน และผู้ทรงคุณวุฒิซึ่งรัฐมนตรีแต่งตั้งอีกไม่เกินสามคน ซึ่งต้องเป็นผู้มีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับวิศวกรรมศาสตร์ ธรณีวิทยา หรือมีความรู้ความชำนาญ ในการประเมินราคาอสังหาริมทรัพย์ เพื่อทำหน้าที่กำหนดจำนวนเงินค่าทดแทน

มาตรา ๒๖ เงินค่าทดแทนนั้น ให้กำหนดให้แก่

(๑) เจ้าของกรรมสิทธิ์ที่ดินหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งที่ดินที่ยังไม่มีเอกสารแสดงกรรมสิทธิ์อันต้องตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์

(๒) เจ้าของโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นที่มีอยู่ในที่ดินในวันที่พระราชกฤษฎีกาตาม มาตรา ๔ มีผลใช้บังคับ หรือได้ปลูกสร้างขึ้นภายหลังโดยได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่ดำเนินการ หากโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างนั้นต้องถูกรื้อถอนไป เนื่องจากตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๓) บุคคลผู้เสียสิทธิในการใช้อสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ ในกรณี queบุคคลเช่นนั้นได้จ่ายค่าใช้สิทธิดังกล่าวให้แก่เจ้าของอสังหาริมทรัพย์ที่ค้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์นั้นแล้ว

(๔) ผู้เช่าที่ดิน โรงเรือน หรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นในที่ดินที่ต้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ ทั้งนี้ การเช่านั้นต้องมีหลักฐานเป็นหนังสือ ซึ่งได้ทำไว้ก่อนวันที่พระราชกฤษฎีกาความมาตรา ๘ มีผลใช้บังคับ หรือได้ทำขึ้นภายหลังโดยได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่ดำเนินการ และการเช่านั้นยังมิได้ระงับไปในวันที่หน่วยงานที่ดำเนินการ หรือพนักงานเจ้าหน้าที่ได้เข้าใช้ที่ดิน โรงเรือน หรือสิ่งปลูกสร้างดังกล่าว แลเงินค่าทดแทนในการเช่านี้พึงกำหนดให้เฉพาะที่ผู้เช่าได้เสียหายจริง โดยเหตุที่เสียสิทธิการใช้ประโยชน์ในที่ดิน โรงเรือน สิ่งปลูกสร้างอย่างอื่น หรือต้องออกจากที่ดิน โรงเรือน สิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นก่อนสัญญาเช่าระงับ

(๕) เจ้าของดินไม่ยินยอมที่ขึ้นอยู่ในที่ดินในวันที่พระราชกฤษฎีกาความมาตรา ๘ มีผลใช้บังคับ หากดินไม่ยินยอมนั้นต้องถูกคัดค้านออกไปเนื่องจากที่ดินต้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์

(๖) องค์การของรัฐบาลกฎหมายว่าด้วยการจัดตั้งองค์การของรัฐบาล หรือตามกฎหมายเฉพาะในกรณีที่มีการดำเนินกิจการขององค์การของรัฐบาลนั้นได้รับการกระทบกระเทือน

มาตรา ๒๗ ในกรณีที่มีการเข้าใช้สังหาริมทรัพย์ก่อให้เกิดภาระแก่เจ้าของหรือผู้ครอบครอง โดยชอบด้วยกฎหมายน้อยจนถือได้ว่าไม่ทำให้การใช้สอยอสังหาริมทรัพย์นั้นของเจ้าของหรือผู้ครอบครอง โดยชอบด้วยกฎหมายต้องลดน้อยลง ไม่ต้องจ่ายเงินค่าทดแทนให้

หลักเกณฑ์การวินิจฉัยว่าภาระที่เกิดขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์นั้นถือได้ว่าไม่ทำให้การใช้สอยอสังหาริมทรัพย์นั้นต้องลดน้อยลง ให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง

มาตรา ๒๘ ในกรณีที่มีการเข้าใช้อสังหาริมทรัพย์จะมีผลทำให้เจ้าของกรรมสิทธิ์ที่ดินหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งที่ดินที่ยังไม่มีเอกสารแสดงกรรมสิทธิ์ หรือเจ้าของอสังหาริมทรัพย์อื่นที่จะต้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ไม่อาจใช้สอยอสังหาริมทรัพย์นั้นได้ตามปกติ เจ้าของหรือผู้ครอบครองอาจร้องขอต่อหน่วยงานที่ดำเนินการให้จัดซื้อหรือเวนคืนอสังหาริมทรัพย์นั้นตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์

เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยเบื้องต้นของหน่วยงานที่ดำเนินการ หลักเกณฑ์การวินิจฉัยว่าภาระที่เกิดขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์ลักษณะใดที่อาจถือได้ว่าทำให้ไม่อาจใช้สอยอสังหาริมทรัพย์ได้ตามปกติให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่หน่วยงานที่ดำเนินการไม่ยอมจัดซื้อหรือเวนคืนตามคำร้องขอของบุคคลตามวรรคหนึ่ง บุคคลดังกล่าวมีสิทธิอุทธรณ์ต่อรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ หรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ ภายในหกสิบวันนับแต่วันที่ได้รับแจ้งเป็นหนังสือจากหน่วยงานที่ดำเนินการ ทั้งนี้ ให้รัฐมนตรีวินิจฉัยอุทธรณ์ให้เสร็จสิ้นภายในหนึ่งร้อยยี่สิบวันนับแต่วันที่ได้รับคำอุทธรณ์ มิฉะนั้นให้ถือว่ารัฐมนตรีวินิจฉัยให้จัดซื้อหรือเวนคืนตามคำร้องขอในวรรคหนึ่ง

คำวินิจฉัยของรัฐมนตรีให้เป็นที่สุด

มาตรา ๒๕ หลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดจำนวนเงินค่าทดแทนให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง ทั้งนี้ ให้คำนึงถึงลักษณะ และความมากหรือน้อยของข้อจำกัดสิทธิอันเป็นภาระในอสังหาริมทรัพย์อันพึงมีขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์นั้นด้วย

มาตรา ๓๐ ภายใต้บังคับมาตรา ๒๕ เพื่อให้เกิดความเป็นธรรมแก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทน และประโยชน์สาธารณะ ให้คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ กำหนดจำนวนเงินค่าทดแทนโดยคำนึงถึง

- (๑) ราคาของอสังหาริมทรัพย์ ณ วันที่คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ กำหนดเงินค่าทดแทน
- (๒) ขนาด ที่ตั้ง สภาพและลักษณะการใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์ที่เจ้าของ หรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายอาจมีได้
- (๓) สภาพการใช้ที่ดินในบริเวณใกล้เคียงกับที่ดินนั้น
- (๔) สภาพและลักษณะของภาระอันพึงมีขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์นั้นเนื่องจากการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของการเข้าใช้อสังหาริมทรัพย์

(๕) ผลประโยชน์หรือความเสียหายที่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์ได้รับจากการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของการเข้าใช้อสังหาริมทรัพย์ในขณะนั้น

ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ตาม (๒) หรือ (๓) ให้ถือข้อเท็จจริงตามที่ปรากฏในวันที่พระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ ใช้อ้างอิง หรือในวันที่พระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนใช้อ้างอิงในกรณีที่มีการใช้อ้างอิงพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ โดยไม่มีการตราพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ แล้วแต่กรณี

ถ้าการงานหรือกิจการอย่างใดที่ทำไปในการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของการเข้าใช้อสังหาริมทรัพย์ใดทำให้อสังหาริมทรัพย์นั้นมีราคาสูงขึ้น คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ จะลดหย่อนหรือยกเว้นไม่กำหนดเงินค่าทดแทนแก่อสังหาริมทรัพย์นั้นก็ได้ แต่ไม่ให้ถือว่าราคาอสังหาริมทรัพย์

ที่ทวีขึ้นนั้นสูงไปกว่าจำนวนเงินค่าทดแทนเพื่อจะให้เจ้าของ หรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมาย กลับต้องจ่ายเงินให้อีก แต่ถ้การดังกล่าวทำให้อสังหาริมทรัพย์นั้นราคาลดลง ให้กำหนดเงินค่าทดแทนโดยคำนึงถึงราคาที่ลดลง ทั้งนี้ คณะกรรมการดังกล่าวต้องให้เหตุผลแห่งการนั้นด้วย

มาตรา ๓๑ การกำหนดเงินค่าทดแทนสำหรับโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นที่มีอยู่ในที่ดินนั้น ในวันที่พระราชกฤษฎีกาใช้บังคับที่ค้องถูกรื้อถอนไปเนื่องจากที่ดินอันเป็นที่ตั้งของโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างนั้นตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ ให้นำหลักเกณฑ์ตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์มาใช้บังคับโดยอนุโลม

มาตรา ๓๒ ในกรณีที่รัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๔ หรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ แล้วแต่กรณี เห็นว่าเงินค่าทดแทนที่ได้กำหนด หรือได้จ่ายไปแล้วทั้งหมด หรือบางส่วนไม่เป็นธรรม แก่บุคคลตามมาตรา ๒๖ เนื่องจากปรากฏภายหลังว่า ข้อเท็จจริงที่ใช้ในการกำหนดเงินค่าทดแทนนั้นคลาดเคลื่อน รัฐมนตรีโดยอนุมัติของคณะรัฐมนตรีมีอำนาจสั่งให้คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ หรือคณะกรรมการที่แต่งตั้งขึ้นใหม่ตามหลักเกณฑ์ในมาตรา ๒๕ แกะไขจำนวนเงินค่าทดแทนการใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์เสียใหม่ตามหลักเกณฑ์และเงื่อนไขที่คณะรัฐมนตรีอนุมัติได้ และให้ถือว่าจำนวนเงินค่าทดแทนที่แก้ไขแล้วเป็นจำนวนเงินค่าทดแทนที่กำหนดใหม่แทนจำนวนค่าทดแทนเดิม

ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือภายในหนึ่งร้อยยี่สิบวันนับแต่วันที่กำหนดจำนวนเงินค่าทดแทนใหม่แจ้งให้ผู้มีสิทธิมารับค่าทดแทนส่วนที่เพิ่มขึ้น และให้ตามมาตรา ๒๒ วรรคสอง และมาตรา ๓๔ มาใช้บังคับโดยอนุโลม

ถ้การสั่งให้แก้ไขตามวรรคหนึ่ง มีผลเป็นคุณแก่บุคคลตามมาตรา ๒๖ บุคคลใดมาครั้งหนึ่งแล้วจะสั่งให้แก้ไขเพื่อบุคคลนั้นอีกไม่ได้

มาตรา ๓๓ ในกรณีที่รัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชกฤษฎีกาที่ออกตามมาตรา ๔ หรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ เห็นว่า จำนวนเงินค่าทดแทนที่จะให้แก่บุคคลตามมาตรา ๒๖ ซึ่งคณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ ได้กำหนดไว้ นั้นสูงเกินไป โดยมีได้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ตามมาตรา ๒๕ หรือมาตรา ๓๐ ให้รัฐมนตรีดังกล่าวมีอำนาจดังต่อไปนี้

(๑) สั่งให้คณะกรรมการดังกล่าวพิจารณาทบทวนการกำหนดจำนวนเงินค่าทดแทนเช่นนั้นใหม่ หรือ

(๒) แต่งตั้งคณะกรรมการชุดใหม่ตามหลักเกณฑ์ในมาตรา ๒๕ ให้ปฏิบัติหน้าที่แทนคณะกรรมการชุดเดิม

มาตรา ๓๔ ในกรณีที่พนักงานเจ้าหน้าที่จ่ายเงินค่าทดแทนล่าช้ากว่ากำหนดเวลาตามมาตรา ๑๓ หรือวางเงินค่าทดแทนล่าช้ากว่ากำหนดเวลาตามมาตรา ๒๒ ให้ผู้มีสิทธิได้รับค่าทดแทนได้รับดอกเบี้ยในอัตราสูงสุดของดอกเบี้ยเงินฝากประเภทฝากประจำของธนาคารออมสินในจำนวนเงินดังกล่าว นับแต่วันที่พ้นกำหนดเวลาการจ่ายเงินค่าทดแทน หรือวางเงินค่าทดแทน

มาตรา ๓๕ การร้องขอรับเงินค่าทดแทนที่วางไว้ตามพระราชบัญญัตินี้ ให้ร้องขอภายในสิบปี นับแต่วันที่มีการวางเงิน ถ้าไม่ร้องขอภายในกำหนดเวลาเช่นนั้นให้เงินนั้นตกเป็นของแผ่นดิน

หมวด ๕

การอุทธรณ์และการฟ้องคดีต่อศาล

มาตรา ๓๖ ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนตามมาตรา ๒๖ ผู้ใดไม่พอใจเงินค่าทดแทนที่ได้รับ หรือจะได้รับ มีสิทธิอุทธรณ์ต่อรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชกฤษฎีกาตามมาตรา ๘ หรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนตามมาตรา ๒๐ ภายในหกสิบวันนับแต่วันที่ได้รับหนังสือจากพนักงานเจ้าหน้าที่ให้ไปรับเงินค่าทดแทนดังกล่าว

ในการพิจารณาอุทธรณ์ตามวรรคหนึ่ง ให้รัฐมนตรีแต่งตั้งคณะกรรมการขึ้นคณะหนึ่ง ประกอบด้วย ประธานกรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิทางกฎหมายหนึ่งคน ผู้ทรงคุณวุฒิทางวิศวกรรมศาสตร์หนึ่งคน และ ผู้มีความรู้ความชำนาญในการประเมินราคาอสังหาริมทรัพย์สามคน ซึ่งในสามคนนี้ต้องแต่งตั้งจาก ภาคเอกชนหนึ่งคน เป็นผู้พิจารณาเสนอความเห็นต่อรัฐมนตรี ทั้งนี้ ให้รัฐมนตรีวินิจฉัยอุทธรณ์ ให้เสร็จสิ้นภายในหกสิบวันนับแต่วันที่ได้รับคำอุทธรณ์

มาตรา ๓๗ ในกรณีที่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนไม่พอใจคำวินิจฉัยของรัฐมนตรีผู้รักษาการ ตามพระราชกฤษฎีกาหรือรัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัติตามมาตรา ๓๖ หรือในกรณีที่ รัฐมนตรีมิได้วินิจฉัยอุทธรณ์ให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดเวลาตามมาตรา ๓๖ วรรคสอง ให้มีสิทธิ ฟ้องคดีต่อศาลได้ภายในสองปีนับแต่วันที่ได้รับแจ้งคำวินิจฉัยของรัฐมนตรี หรือนับแต่วันที่พ้นกำหนดเวลา ตามมาตรา ๓๖ วรรคสอง แล้วแต่กรณี

การอุทธรณ์ต่อรัฐมนตรีตามมาตรา ๓๖ วรรคหนึ่ง หรือฟ้องคดีต่อศาลตามวรรคหนึ่ง ไม่กระทบกระเทือนการครอบครองหรือใช้อสังหาริมทรัพย์ หรือการดำเนินการใดๆ ของหน่วยงาน ที่ดำเนินการ หรือพนักงานเจ้าหน้าที่

ในกรณีที่รัฐมนตรีหรือศาลวินิจฉัยให้ชำระเงินค่าทดแทนเพิ่มขึ้น ให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนได้รับดอกเบี้ยในอัตราสูงสุดของดอกเบี้ยเงินฝากประเภทฝากประจำของธนาคารออมสิน ในจำนวนเงินที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ นับแต่วันที่ต้องมีการจ่ายเงินค่าทดแทน หรือวางเงินค่าทดแทนนั้น

หมวด ๖

การดูแลรักษาระบบขนส่งมวลชน

มาตรา ๓๔ ในเขตดำเนินการระบบขนส่งมวลชนไม่ว่าบน เหนือ หรือใต้พื้นดินหรือพื้นน้ำ ห้ามมิให้ผู้ใดปลูกสร้างอาคาร โรงเรือน ต้นไม้ หรือสิ่งอื่นใด สกัดตั้งสิ่งใด ขุดหรือเจาะพื้นดิน ถมดิน ทั้งสิ่งขอร หรือกระทำด้วยประการใดๆ ที่อาจทำให้เกิดอันตรายหรือเป็นอุปสรรคแก่ระบบขนส่งมวลชน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นหนังสือจากพนักงานเจ้าหน้าที่ และในการอนุญาตนั้นพนักงานเจ้าหน้าที่ จะกำหนดเงื่อนไขอย่างใดด้วยหรือไม่ก็ได้ ถ้ามีการฝ่าฝืน ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจสั่งให้ผู้ฝ่าฝืน รื้อถอน ขนย้าย คัดฟัน ทำลาย หรือกระทำการใดๆ ได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ถ้าผู้นั้นไม่ปฏิบัติตาม หรือในกรณีที่หาตัวผู้ฝ่าฝืนไม่ได้ เมื่อได้ประกาศคำสั่งไว้ ณ บริเวณนั้น และ ณ สำนักงานเขต หรือ ที่ว่าการอำเภอหรือกิ่งอำเภอ ที่ทำการกำนันและที่ทำการผู้ใหญ่บ้านแห่งท้องที่นั้นเป็นเวลาอันสมควรแล้ว และไม่มีการปฏิบัติตามคำสั่งนั้น ให้พนักงานเจ้าหน้าที่มีอำนาจรื้อถอน ขนย้าย คัดฟัน ทำลาย หรือ กระทำการใดๆ ได้ตามการแก่กรณี โดยผู้ใดจะเรียกร้องค่าเสียหายมิได้ และผู้ฝ่าฝืนต้องเป็นผู้เสีย ค่าใช้จ่ายในการนั้นด้วย

ในกรณีที่มีการฝ่าฝืนตามวรรคหนึ่งและเป็นกรณีจำเป็นต้องป้องกันอันตรายเป็นการด่วน ซึ่งการสั่ง หรือประกาศให้ผู้ฝ่าฝืนปฏิบัติก่อนอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบขนส่งมวลชน พนักงานเจ้าหน้าที่ มีอำนาจรื้อถอน ขนย้าย คัดฟัน ทำลาย หรือกระทำการใดๆ ได้ตามการแก่กรณีโดยไม่ต้องสั่งหรือ ประกาศก่อน ทั้งนี้ หากพนักงานเจ้าหน้าที่ได้ดำเนินการตามสมควรแก่เหตุ ผู้ใดจะเรียกร้องค่าเสียหาย มิได้ และผู้ฝ่าฝืนต้องเป็นผู้เสียค่าใช้จ่ายที่จำเป็นในการนั้นด้วย

มาตรา ๓๕ ในกรณีที่จำเป็นและเร่งด่วน พนักงานเจ้าหน้าที่หรือผู้ซึ่งปฏิบัติงานร่วมกับ พนักงานเจ้าหน้าที่ มีอำนาจเข้าไปในที่ดินหรือสถานที่ของบุคคลใดในเวลาใด เพื่อตรวจ ซ่อมแซม หรือแก้ไขระบบขนส่งมวลชนได้ ถ้าเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายซึ่งอสังหาริมทรัพย์อยู่ ณ ที่นั้นด้วย ก็ให้พนักงานเจ้าหน้าที่แจ้งให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองนั้นทราบก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกระทำการตามวรรคหนึ่ง พนักงานเจ้าหน้าที่หรือผู้ซึ่งปฏิบัติงานร่วมกับพนักงานเจ้าหน้าที่ต้องพยายามมิให้เกิดความเสียหายแก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมาย ซึ่งอสังหาริมทรัพย์หรือผู้ทรงสิทธิอื่น แต่ถ้าเกิดความเสียหายขึ้น หน่วยงานที่ดำเนินการต้องรับผิดชอบเพื่อความเสียหายนั้น

หมวด ๗

บทกำหนดโทษ

มาตรา ๔๐ ผู้ใดขัดขวางการปฏิบัติงานของพนักงานเจ้าหน้าที่ตามมาตรา ๑๐ (๑) หรือ (๒) หรือมาตรา ๑๕ ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหนึ่งปี หรือปรับไม่เกินสองหมื่นบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

ผู้ใดไม่ปฏิบัติตามหนังสือเรียกของพนักงานเจ้าหน้าที่ตามมาตรา ๑๐ (๓) ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหนึ่งเดือน หรือปรับไม่เกินสองพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

มาตรา ๔๑ ผู้ใดฝ่าฝืนหรือไม่ปฏิบัติตามเงื่อนไขที่ได้รับอนุญาตตามมาตรา ๓๘ ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหนึ่งปี หรือปรับไม่เกินสองหมื่นบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

ผู้รับสนองพระบรมราชโองการ

พลเอก ชวลิต ยงใจยุทธ

นายกรัฐมนตรี

หมายเหตุ :- เหตุผลในการประกาศใช้พระราชบัญญัติฉบับนี้ คือ โดยที่การดำเนินการตามโครงการระบบขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ตลอดจนเมืองอื่นๆ อาจมีทั้งส่วนที่ต้องสร้างไปบน เหมือ หรือได้พื้นดินหรือพื้นน้ำ ซึ่งในส่วนของ การก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนนั้น รัฐอาจมีความจำเป็นต้องเข้าไปใช้ประโยชน์ในที่ดินของเอกชน เฉพาะส่วนที่เป็นแดนกรรมสิทธิ์บน เหมือ หรือได้พื้นดินหรือพื้นน้ำซึ่งมิใช่กรรมสิทธิ์ของสังหาริมทรัพย์ และโดยที่ในปัจจุบัน ยังไม่มีกฎหมายกำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการในเรื่องนี้ไว้ จึงจำเป็นต้องตราพระราชบัญญัตินี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กฎกระทรวง

(พ.ศ. ๒๕๕๒)

ออกตามความในพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๕๐

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕ และมาตรา ๒๔ แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๕๐ นายกรัฐมนตรีออกกฎกระทรวงไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ในกฎกระทรวงนี้

“การวางเงินค่าทดแทน” หมายความว่า การนำเงินไปวางต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์หรือฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจ เพื่อทดแทนการถืออสังหาริมทรัพย์ต้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์ตามกฎหมายว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน

“รัฐวิสาหกิจ” หมายความว่า รัฐวิสาหกิจตามกฎหมายว่าด้วยวิธีการงบประมาณ

“พนักงานเจ้าหน้าที่” หมายความว่า หัวหน้าหน่วยงานที่ดำเนินการตามพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่ที่จะดำเนินการขนส่งมวลชน หรือพระราชบัญญัติกำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน แล้วแต่กรณี และให้หมายความรวมถึงผู้ซึ่งได้รับมอบหมายจากหัวหน้าหน่วยงานดังกล่าวด้วย

หมวด ๑

การวางเงินค่าทดแทน

ข้อ ๒ การวางเงินค่าทดแทนตามมาตรา ๑๕ วรรคสอง มาตรา ๒๒ วรรคสอง หรือมาตรา ๒๓ วรรคหนึ่ง ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ปฏิบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๑) ในกรณีที่มีประกาศกำหนดให้การเข้าซื้อสังหาริมทรัพย์เป็นกรณีที่มีความจำเป็นและเร่งด่วน ให้นักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งโดยวิธีส่งทางไปรษณีย์ตอบรับให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินทดแทนมารับเงินค่าทดแทนภายในระยะเวลาที่กำหนด แต่ต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้าไม่น้อยกว่าหกสิบวัน และให้แจ้งด้วยว่า หากไม่คิดขอรับเงินค่าทดแทนภายในกำหนดระยะเวลาดังกล่าวพนักงานเจ้าหน้าที่จะดำเนินการวางเงินค่าทดแทน

(๒) ในกรณีที่มีการตราพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน และในพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนฉบับนั้นมิได้กำหนดเรื่องค่าทดแทนไว้เป็นอย่างอื่น ให้นักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งโดยวิธีส่งทางไปรษณีย์ตอบรับให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนมารับเงินค่าทดแทนภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งต้องไม่เกินเก้าสิบวันนับแต่วันที่พระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนใช้บังคับ และให้แจ้งด้วยว่าหากไม่คิดขอรับเงินค่าทดแทนภายในกำหนดระยะเวลาดังกล่าวพนักงานเจ้าหน้าที่จะดำเนินการวางเงินค่าทดแทน

(๓) ในกรณีที่มีการตราพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน โดยไม่มีการตราพระราชกฤษฎีกากำหนดเขตที่ดินในบริเวณที่จะดำเนินการ และในพระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนฉบับนั้นมิได้กำหนดเรื่องค่าทดแทนไว้เป็นอย่างอื่น ให้นักงานเจ้าหน้าที่มีหนังสือแจ้งโดยวิธีส่งทางไปรษณีย์ตอบรับให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนมารับเงินค่าทดแทนภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งต้องไม่เกินเก้าสิบวันนับแต่วันที่พระราชบัญญัติกำหนดการในอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนใช้บังคับ และให้แจ้งด้วยว่าหากไม่คิดขอรับเงินค่าทดแทนภายในกำหนดระยะเวลาดังกล่าวพนักงานเจ้าหน้าที่จะดำเนินการวางเงินค่าทดแทน

(๔) ในกรณีที่พนักงานเจ้าหน้าที่ได้มีหนังสือแจ้งให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนมารับเงินค่าทดแทนตาม (๑) (๒) หรือ (๓) แล้วปรากฏว่าไม่มีผู้รับ ให้นักงานเจ้าหน้าที่แจ้งโดยวิธีปิดประกาศแจ้งความไว้ ณ ที่ซึ่งอสังหาริมทรัพย์นั้นตั้งอยู่และสถานที่ตามมาตรา ๕ โดยระบุกำหนดเวลาที่พนักงานเจ้าหน้าที่จะดำเนินการวางเงินค่าทดแทนซึ่งต้องไม่น้อยกว่าเจ็ดสิบห้าวันนับแต่วันปิดประกาศแจ้งความ

ข้อ ๓ เมื่อได้ดำเนินการตามข้อ ๒ แล้วปรากฏว่าผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนไม่มารับเงินค่าทดแทน หรือในกรณีที่ไม้อาจจ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนรายได้ตาม มาตรา ๒๒ วรรคสอง หรือมาตรา ๒๓ วรรคหนึ่ง ให้นักงานเจ้าหน้าที่วางเงินค่าทดแทนโดยฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจแห่งใดแห่งหนึ่งซึ่งเห็นว่าเป็นการสะดวกและเป็นประโยชน์ทั้งแก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนและหน่วยงานที่ดำเนินการ เว้นแต่ในกรณีที่พนักงานเจ้าหน้าที่เห็นว่าการวางเงินค่าทดแทนต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์ที่มีเขตอำนาจตามกฎหมายจะเป็นประโยชน์แก่การดำเนินการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์นั้นมากกว่า หรือผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนได้แจ้งเป็นหนังสือภายในกำหนดเวลาตามข้อ ๒ ว่าประสงค์จะให้นำเงินค่าทดแทนไปวางต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์

ข้อ ๔ ในการวางเงินค่าทดแทน ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ปฏิบัติดังนี้

(๑) ในกรณีฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจ ให้ฝากไว้ในบัญชีเงินฝากประเภทเพื่อเรียกหรือประเภทออมทรัพย์ หรือบัญชีเงินฝากประเภทประจำในกรณีที่เห็นว่าจะจะเป็นประโยชน์แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนมากกว่า ในการฝากให้แยกฝากเป็นบัญชีเฉพาะรายและระบุชื่อผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนและจำนวนเงินค่าทดแทนที่แน่นอน สำหรับกรณีการวางเงินค่าทดแทนเนื่องจากพนักงานเจ้าหน้าที่ไม่อาจจ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนรายได้ได้ตามมาตรา ๒๒ วรรคสอง หรือมาตรา ๒๓ วรรคหนึ่ง ให้ระบุจำนวนเงินค่าทดแทนที่แน่นอนและชื่อผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทน ตลอดจนสิทธิของผู้นั้นทุกคนให้ชัดเจน เว้นแต่ในกรณีที่ไมอาจทราบชื่อหรือสิทธิของผู้นั้นได้

(๒) ในกรณีวางเงินค่าทดแทนต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์ ให้ระบุชื่อผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนและจำนวนเงินค่าทดแทนที่แน่นอน สำหรับกรณีการวางเงินค่าทดแทนเนื่องจากพนักงานเจ้าหน้าที่ไม่อาจจ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนรายได้ได้ตามมาตรา ๒๒ วรรคสอง หรือมาตรา ๒๓ วรรคหนึ่ง นอกจากให้ระบุจำนวนเงินค่าทดแทนที่แน่นอนและชื่อผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนแล้วให้ระบุสิทธิของผู้นั้นทุกคนให้ชัดเจน เว้นแต่ในกรณีที่ไมอาจทราบชื่อหรือสิทธิของผู้นั้นได้ พร้อมทั้งให้ระบุรายละเอียดเกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ที่ต้องตกอยู่ภายใต้ภาระในอสังหาริมทรัพย์และสิทธิอื่นๆ ที่ได้รับเงินค่าทดแทนเนื่องจากการกำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์ด้วย

ข้อ ๕ เมื่อพนักงานเจ้าหน้าที่ได้นำเงินค่าทดแทนไปวางแล้วให้มีหนังสือแจ้งให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนทราบโดยพลัน โดยวิธีส่งทางไปรษณีย์ตอบรับ และให้แจ้งวิธีปฏิบัติในการขอรับเงินค่าทดแทนดังกล่าวด้วย

หมวด ๒

การร้องขอรับเงินค่าทดแทน

ข้อ ๖ ในกรณีวางเงินค่าทดแทนโดยฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจ ให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนซึ่งประสงค์จะขอรับเงินค่าทดแทนแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบล่วงหน้าไม่น้อยกว่าสิบห้าวัน และเมื่อผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนได้แสดงหลักฐานว่าตนเป็นผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนในกรณีนั้นอย่างชัดเจนแล้ว ให้พนักงานเจ้าหน้าที่ดำเนินการเบิกจ่ายเงินค่าทดแทนดังกล่าวให้โดยไม่ชักช้า เว้นแต่ในกรณีที่เป็นการวางเงินค่าทดแทนเนื่องจากพนักงานเจ้าหน้าที่ไม่อาจจ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับเงินค่าทดแทนรายได้ได้ตามมาตรา ๒๒ วรรคสอง หรือมาตรา ๒๓ วรรคหนึ่ง พนักงานเจ้าหน้าที่จะดำเนินการเบิกจ่ายเงินค่าทดแทนให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนได้ต่อเมื่อ

(๑) มีสัญญาประนีประนอมยอมความโดยมีหลักฐานเป็นหนังสือมาแสดงในกรณีผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนทุกคนตกลงกันได้

(๒) มีคำพิพากษาดังที่สุดแสดงว่าเป็นผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทน

ข้อ ๗ ในกรณีวางเงินค่าทดแทนต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์ให้ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนซึ่งประสงค์จะขอรับเงินค่าทดแทนยื่นคำร้องขอต่อศาล หรือสำนักงานวางทรัพย์

การรับและจ่ายเงินค่าทดแทนที่วางไว้ให้แก่ผู้มีสิทธิได้รับเงินค่าทดแทนให้เป็นไปตามระเบียบกระทรวงยุติธรรมว่าด้วยการวางทรัพย์

ให้ไว้ ณ วันที่ ๒๐ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๔๒

ชาน หลีกภัย
นายกรัฐมนตรี

หมายเหตุ :- เหตุผลในการประกาศใช้กฎกระทรวงฉบับนี้ คือ โดยที่มาตรา ๒๔ วรรคสาม แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๔๐ บัญญัติว่า หลักเกณฑ์และวิธีการนำเงินค่าทดแทนไปวางต่อศาลหรือสำนักงานวางทรัพย์หรือฝากไว้กับธนาคารซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจและวิธีการร้องขอรับเงินค่าทดแทนดังกล่าวให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง จึงจำเป็นต้องออกกฎกระทรวงนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กฎกระทรวง

ฉบับที่ ๒ (พ.ศ. ๒๕๕๒)

ออกตามความในพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๕๐

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๔ มาตรา ๒๗ มาตรา ๒๘ และมาตรา ๒๙ แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๕๐ นายกรัฐมนตรีออกกฎกระทรวงไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ให้ใช้บังคับกฎกระทรวงนี้ในท้องที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ข้อ ๒ ในกฎกระทรวงนี้

“สิ่งก่อสร้าง” หมายความว่า อุโมงค์ สถานีรถขนส่งมวลชน ปล่องระบายอากาศ อาคารและอุปกรณ์ของระบบขนส่งมวลชน

“ความลึก” หมายความว่า ระยะจากผิวดินจนถึงส่วนบนสุดของสิ่งก่อสร้างใต้พื้นดิน

“คณะกรรมการ” หมายความว่า คณะกรรมการตามมาตรา ๒๕ แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. ๒๕๕๐

ข้อ ๓ เมื่อหน่วยงานมีความจำเป็นต้องสร้างสิ่งก่อสร้างใต้ที่ดินของเอกชนโดยไม่จำเป็นต้องได้มาซึ่งกรรมสิทธิ์ในที่ดินและได้กำหนดลักษณะการในอสังหาริมทรัพย์นั้นแล้ว การกำหนดเงินค่าทดแทนการในอสังหาริมทรัพย์เบื้องต้นให้แก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายให้คำนวณ ดังนี้

เงินค่าทดแทนการในอสังหาริมทรัพย์ = ราคาที่ดิน × ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ × ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึก

ราคาที่ดิน ได้แก่ ราคาค่าทดแทนที่ดินบริเวณที่มีการกำหนดลักษณะการในอสังหาริมทรัพย์นั้น ถ้าหากมีการเวนคืนตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ ได้แก่ ค่าตามที่กำหนดในข้อ ๔

ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึก ได้แก่ ค่าตามที่กำหนดในข้อ ๕

ข้อ ๔ ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ให้เป็นดังนี้

อัตราส่วนของที่ดิน	ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่
น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ ๓๐	๑.๐
มากกว่า ร้อยละ ๓๐ แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ ๔๐	๑.๑
มากกว่า ร้อยละ ๔๐ แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ ๕๐	๑.๑๕
มากกว่า ร้อยละ ๕๐ แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ ๖๐	๑.๒
มากกว่า ร้อยละ ๖๐	๑.๒๕

อัตราส่วนของที่ดิน ได้แก่ อัตราร้อยละของพื้นที่ที่ถูกกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ โดยคำนวณจากพื้นที่ของที่ดินแปลงนั้น

ในกรณีที่ที่ดินนั้นคิดออกเป็นผืนเดียวกันกับที่ดินแปลงอื่นของเจ้าของเดียวกัน อัตราส่วนของที่ดิน ให้คำนวณจากพื้นที่ของที่ดินแปลงที่ถูกกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์และที่ดินที่ติดต่อกันเป็นผืนเดียวกันกับที่ดินแปลงนั้นของเจ้าของเดียวกันด้วย

ข้อ ๕ ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึกให้เป็นดังนี้

ความลึก	ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึก
น้อยกว่าหรือเท่ากับ ๑๒ เมตร	๐.๔
มากกว่า ๑๒ เมตร แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ ๔๐ เมตร	๐.๓
มากกว่า ๔๐ เมตร แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ ๖๐ เมตร	๐.๒
มากกว่า ๖๐ เมตร แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ ๑๐๐ เมตร	๐.๑
มากกว่า ๑๐๐ เมตร	๐

ข้อ ๖ ในกรณีที่การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ทำให้การใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์ ที่ตกอยู่ภายใต้การดังกล่าวลดลง ให้คณะกรรมการกำหนดเงินค่าทดแทนให้สำหรับประโยชน์ที่ลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ในกรณีดังต่อไปนี้ ให้สันนิษฐานว่ามีผลให้การใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์ลดลง

(๑) การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ทำให้ที่ดินส่วนที่ปลอดจากภาระในอสังหาริมทรัพย์ของเจ้าของเดียวกันแยกเป็นหลายส่วน แต่ละส่วนมีเนื้อที่น้อยหรือมีรูปร่างไม่เหมาะสมแก่การก่อสร้าง เช่น เป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู หรือรูปทรงอื่น

(๒) การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ทำให้ที่ดินซึ่งใช้เป็นที่อยู่อาศัยหรือประกอบกิจการโดยชอบด้วยกฎหมายถูกแยกจากกันเป็นหลายส่วนและทำให้ไม่ได้รับประโยชน์สูงสุดจากการใช้ตามสภาพเดิม

ข้อ ๗ การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ที่มีความลึกเกินกว่าหนึ่งร้อยเมตร ให้ถือว่าก่อให้เกิดภาระแก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายน้อยจนถือได้ว่าไม่ทำให้การใช้ประโยชน์ในอสังหาริมทรัพย์นั้นต้องลดน้อยลง หน่วยงานไม่ต้องจ่ายเงินค่าทดแทนให้

ข้อ ๘ การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ที่ครอบคลุมที่ดินทั้งแปลง และมีความลึกน้อยกว่าสิบสองเมตร เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายอาจร้องขอให้หน่วยงานดำเนินการจัดซื้อหรือเวนคืนที่ดินนั้นตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ได้

ในกรณีที่การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ทำให้ที่ดินส่วนที่ปลอดจากภาระแยกเป็นหลายส่วน และภาระในอสังหาริมทรัพย์มีความลึกน้อยกว่าสิบสองเมตร เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายอาจร้องขอให้หน่วยงานดำเนินการจัดซื้อหรือเวนคืนที่ดินส่วนที่ถูกกำหนดภาระในอสังหาริมทรัพย์ตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ได้

ในกรณีตามวรรคสอง หากที่ดินส่วนที่ปลอดจากภาระในอสังหาริมทรัพย์ส่วนใดมีเนื้อที่เหลือน้อยกว่าสี่สิบห้าตารางวา และมีความยาวด้านใดด้านหนึ่งน้อยกว่าสิบเมตร เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายอาจร้องขอให้หน่วยงานดำเนินการจัดซื้อหรือเวนคืนที่ดินส่วนที่ปลอดจากภาระนั้นตามกฎหมายว่าด้วยการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ด้วยก็ได้

ข้อ ๙ ในกรณีที่การกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ทำให้ต้องแก้ไขปรับปรุงอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างใดๆ ในที่ดินที่ถูกกำหนดภาระหรือทำให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายต้องหยุดกิจกรรมใดๆ เป็นการชั่วคราว เนื่องจากการแก้ไขปรับปรุงดังกล่าว หรือต้องย้ายออกจากอสังหาริมทรัพย์ในระหว่างการแก้ไขปรับปรุง ให้คณะกรรมการกำหนดเงินค่าทดแทนให้แก่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายเฉพาะที่ได้เสียหายนิจจริง โดยเหตุที่ต้องมีการแก้ไขปรับปรุงอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างหรือสูญเสียรายได้ระหว่างหยุดกิจกรรมชั่วคราว หรือต้องขนย้ายทรัพย์สินออกจากอสังหาริมทรัพย์ระหว่างการแก้ไขปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขอรับเงินค่าทดแทนการสูญเสียรายได้ตามวรรคหนึ่ง ให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายแสดงหลักฐานการสูญเสียรายได้ต่อคณะกรรมการตามระเบียบที่หน่วยงานกำหนด

ข้อ ๑๐ ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ชั่วคราว เพื่อเตรียมการก่อสร้าง หรือดำเนินการสร้าง ขยาย ปรับปรุง หรือบำรุงรักษากิจการขนส่งมวลชน ให้คณะกรรมการกำหนดเงินค่าทดแทนโดยคำนึงถึงอัตราค่าเช่าที่ดินนั้นหรืออัตราค่าเช่าที่ดินในบริเวณใกล้เคียงและในการจดทะเบียนกำหนดลักษณะภาระในอสังหาริมทรัพย์ในหนังสือแสดงสิทธิในที่ดิน ให้กำหนดระยะเวลาของภาระในอสังหาริมทรัพย์นั้นไว้ตามมาตรา ๑๙ ด้วย

ข้อ ๑๑ ให้นำความในข้อ ๒ ข้อ ๓ ข้อ ๔ ข้อ ๕ ข้อ ๖ ข้อ ๗ ข้อ ๘ ข้อ ๙ และข้อ ๑๐ มาใช้บังคับกับการกำหนดเงินค่าทดแทนให้แก่องค์การของรัฐตามมาตรา ๒๖ (๖) ด้วยโดยอนุโลม

ให้ไว้ ณ วันที่ ๒๐ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

ชวน หลีกภัย
นายกรัฐมนตรี

หมายเหตุ :- เหตุผลในการประกาศใช้กฎกระทรวงฉบับนี้ คือ โดยที่ในปัจจุบันรัฐมีความจำเป็นต้องจัดให้มีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขึ้นในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลโดยเร็วเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลและยังเป็นการช่วยลดมลพิษและการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงจากรถยนต์อื่นจะเป็นผลดีแก่สิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจของประเทศด้วย และเนื่องจากการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในบางส่วนจำเป็นต้องดำเนินการได้พื้นดินโดยไม่จำเป็นต้องได้มาซึ่งกรรมสิทธิ์ในที่ดิน ภาครัฐจึงกำหนดลักษณะการระนองสิทธิในทรัพย์สินตามกฎหมายว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชนแทน และโดยที่กฎหมายดังกล่าวได้กำหนดให้หลักเกณฑ์และวิธีการในการกำหนดจำนวนเงินค่าทดแทน การวินิจฉัยว่าภาระที่เกิดขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์ไม่ทำให้การใช้สอยอสังหาริมทรัพย์ต้องลดน้อยลง และการวินิจฉัยว่าภาระที่เกิดขึ้นแก่อสังหาริมทรัพย์ลักษณะใดที่อาจถือได้ว่าทำให้ไม่อาจใช้สอยอสังหาริมทรัพย์ได้ตามปกติ ให้เป็นไปตามที่กำหนดในกฎกระทรวง จึงจำเป็นต้องออกกฎกระทรวงนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



องค์การรถไฟฟ้ามหานคร
METROPOLITAN RAPID TRANSIT AUTHORITY

ประกาศองค์การรถไฟฟ้ามหานคร

เรื่อง ข้อกำหนดทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการใช้ที่ดินของเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบ
ด้วยกฎหมายในอสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ตามโครงการ
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สายเฉลิมรัชมงคล (ช่วงบางซื่อ-หัวลำโพง) ในกรณีที่มีการ
ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน

โดยที่ดินที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ตามพระราชบัญญัติว่าด้วยการ
จัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540 เป็นที่ดินที่อยู่ในเขตดำเนินการระบบ
ขนส่งมวลชน ซึ่งมาตรา 38 แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่ง
มวลชน พ.ศ. 2540 บัญญัติห้ามมิให้ผู้ใดปลูกสร้างอาคาร โรงเรือน ต้นไม้หรือสิ่งอื่นใด ติดตั้งสิ่งใด
ชุดหรือเจาะพื้นดิน ถมดิน ทิ้งสิ่งของ หรือกระทำด้วยประการใด ๆ ที่อาจทำให้เกิดอันตรายหรือ
เป็นอุปสรรคแก่ระบบขนส่งมวลชน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากพนักงานเจ้าหน้าที่ และในการ
อนุญาตนั้น พนักงานเจ้าหน้าที่จะกำหนดเงื่อนไขอย่างใดด้วยหรือไม่ก็ได้ ดังนั้น เพื่อความสะดวก
แก่การใช้ที่ดินของเจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายในที่ดินดังกล่าว เพื่อประโยชน์
ในการพิจารณาและอนุญาตตามมาตรา 38 แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์
เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540 ผู้อำนวยการองค์การรถไฟฟ้ามหานคร ในฐานะพนักงาน
เจ้าหน้าที่ตามพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540
สำหรับโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สายเฉลิมรัชมงคล (ช่วงบางซื่อ-หัวลำโพง) จึงออกข้อ
กำหนดทางวิศวกรรมเพื่อเป็นหลักเกณฑ์การใช้ที่ดินของเจ้าของหรือผู้ครอบครอง โดยชอบด้วย
กฎหมายในอสังหาริมทรัพย์ที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ ตามโครงการรถไฟฟ้าขนส่ง
มวลชน สายเฉลิมรัชมงคล (ช่วงบางซื่อ-หัวลำโพง) ในกรณีที่มีการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน
(Underground Structure) ไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ในประกาศนี้

“ที่ดิน” หมายความว่า ที่ดินที่ตกอยู่ภายใต้การในอสังหาริมทรัพย์ตามพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540

“โครงสร้างใต้ดิน” หมายความว่า สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินและอุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดิน

“สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน” หมายความว่า โครงสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน และให้หมายความรวมถึงโครงสร้างของสถานีสลับแรงรถไฟฟ้า อุโมงค์ทางเดินของผู้โดยสารและอุโมงค์ระบายอากาศ

“อุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดิน” หมายความว่า โครงสร้างอุโมงค์ที่อยู่ระหว่างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน

“รฟม.” หมายความว่า องค์การรถไฟฟ้ามหานคร

“พนักงานเจ้าหน้าที่” หมายความว่า ผู้อำนวยการองค์การรถไฟฟ้ามหานคร หรือผู้ซึ่งผู้อำนวยการองค์การรถไฟฟ้ามหานครแต่งตั้งให้เป็นผู้มีอำนาจพิจารณาอนุญาตตามมาตรา 38 แห่งพระราชบัญญัติว่าด้วยการจัดหาอสังหาริมทรัพย์เพื่อกิจการขนส่งมวลชน พ.ศ. 2540

ข้อ 2 ประกาศนี้ให้ใช้บังคับเฉพาะกรณีที่มีการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน (Underground Structures) หรือโครงสร้างเชิงลาด (Transition Structures) ใต้ดินนั้น ไม่รวมถึงกรณีที่มีการก่อสร้างปากทางเข้าออกอุโมงค์ (Portal Structures) และ โครงสร้างระดับดิน (At-Grade Structures)

ข้อ 3 นอกจากที่ได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่นในประกาศนี้ การปลูกสร้างอาคาร โรงเรือน ต้นไม้หรือสิ่งอื่นใด ติดตั้งสิ่งใด ขุดหรือเจาะพื้นดิน ถมดิน ทั้งสิ่งของ หรือกระทำด้วยประการใด ๆ ที่อาจทำให้เกิดอันตรายหรือเป็นอุปสรรคแก่ระบบขนส่งมวลชน จะต้องได้รับอนุญาตจากพนักงานเจ้าหน้าที่

ข้อ 4 การกระทำได้ต่อไปนี้ในที่ดินจะกระทำมิได้

- (1) การปลูกสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นบนสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน
- (2) การก่อสร้างที่ต้องใช้เสาเข็มซึ่งทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือน ไม่ว่าด้วยวิธีการตอกหรือเจาะ หรือเสาเข็มพืด (Sheet pile) ที่ใช้วิธีการตอก
- (3) การขุดเจาะหลุมสำรวจชั้นดิน (bored holes) การขุดเจาะบ่อน้ำบาดาล
- (4) การฉีดน้ำปูนด้วยแรงอัดสูงจนอาจทำให้ดินเคลื่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ ๕ การกระทำได้ดังต่อไปนี้ในที่ดิน อนุญาตให้ดำเนินการได้

- (1) การขุดดินที่มีความลึกไม่เกิน 0.5 เมตร เหนือโครงสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน
- (2) การขุดดินที่มีความลึกไม่เกิน 1.5 เมตร เหนืออุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดิน
- (3) การใช้ที่ดินเป็นสถานที่จอดรถยนต์
- (4) การปลูกพืชล้มลุก ไม้ดอก ไม้ประดับ และพืชสวนครัว
- (5) การปลูกไม้ยืนต้นเหนืออุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดิน

ข้อ 6 ในกรณีที่เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายประสงค์จะปลูกสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นในที่ดิน จะต้องได้รับอนุญาตจากพนักงานเจ้าหน้าที่ก่อน เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเพื่อปลูกสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นตามวรรคหนึ่ง เจ้าของหรือผู้ครอบครองโดยชอบด้วยกฎหมายต้องขอตรวจดูแบบแปลนแผนผังและข้อมูลของโครงสร้างใต้ดินในส่วนที่เกี่ยวข้องและจำเป็น ตลอดจนปรึกษากับพนักงานเจ้าหน้าที่ได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย เว้นแต่ค่าถ่ายสำเนาเอกสาร ทั้งนี้ ภายใต้งบบังคับของกฎหมายว่าด้วยข้อมูลข่าวสารของทางราชการ

ถ้าขออนุญาตปลูกสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอย่างอื่นตามวรรคหนึ่ง จะต้องมีการที่วิศวกรที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมตามกฎหมายตรวจสอบและลงนามรับรองในแบบ รายการคำนวณและเอกสารที่เกี่ยวข้องว่าเป็นไปโดยถูกต้องตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- (1) น้ำหนักบรรทุกสมทบ (surcharges)

ก. การถมดินเพิ่มเติม การปลูกสร้างใด ๆ หรือการวางกองวัสดุหรือสิ่งอื่นใดบนดิน จะต้องไม่ทำให้น้ำหนักบรรทุกสมทบบนดินเดิมเกิน 50 กิโลปาสกาล (5 ตัน ต่อตารางเมตร) หรือจะต้องไม่ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดินโดยรวมเกิน 25 กิโลปาสกาล (2.5 ตัน ต่อตารางเมตร)

ข. สำหรับสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน การถมดินเพิ่มเติม การปลูกสร้างใด ๆ หรือการวางกองวัสดุหรือสิ่งอื่นใด จะต้องไม่ก่อให้เกิดหน่วยแรงกระทำเพิ่มเติมในแนวตั้งบนหลังคาสถานีเกิน 20 กิโลปาสกาล (2 ตัน ต่อตารางเมตร) หรือ 25 กิโลปาสกาล (2.5 ตัน ต่อตารางเมตร) สำหรับหน่วยแรงกระทำเพิ่มเติมในแนวราบที่กระทำต่อผนังโครงสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน

ทั้งนี้ การคำนวณน้ำหนักบรรทุกสมทบเพิ่มเติมที่กระทำเพื่อบนโครงสร้างสถานี และ หรืออุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดิน ให้คำนวณจากค่าความลาดของการกระจายแรง 2:1 (อัตราส่วนความลึกต่อระยะในแนวนอน) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การเคลื่อนตัวที่ไม่เท่ากันที่เป็นผลจากการปลูกสร้างใด ๆ จะต้องไม่ทำให้เกิดการผิดรูปของรางรถไฟฟ้าหรือแท่นรองรางเกินกว่า 3 มิลลิเมตรในระยะ 6 เมตร (1:2,000) หรือไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวรวมของโครงสร้างสถานี และ/หรือ อุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดินหรือรางรถไฟฟ้าในระนาบใด ๆ เกิน 6 มิลลิเมตร

(3) การใช้เสาเข็มสั้น เสาเข็มสมอ และเสาเข็มเจาะ จะต้องใช้วิธีการที่ไม่ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนจนอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างใต้ดิน และปลายของเสาเข็มจะต้องมีระยะห่างจากขอบบนสุดของอุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าใต้ดินไม่น้อยกว่า 6 เมตร

(4) การฉีบน้ำปูนหรือสิ่งอื่นใด (grouting) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน จะต้องไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย และไม่มีผลกระทบต่อความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างใต้ดิน

ข้อ 7 ในกรณีจำเป็น พนักงานเจ้าหน้าที่อาจอนุญาตให้ปลูกสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอื่นใด โดยมีเงื่อนไขให้ต้องมีการจัดหาและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดผลกระทบของงานที่ปลูกสร้าง เพื่อตรวจวัดค่าทางด้านเทคนิควิศวกรรมที่จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดิน หรือสถานะของดินในบริเวณใกล้เคียง โดยอาจกำหนดให้การจัดตั้งอุปกรณ์และ/หรือการตรวจวัดต้องกระทำโดยผู้ขออนุญาต รฟม. หรือผู้ชำนาญการในด้านนั้น ๆ ที่ รฟม. เชื่อถือก็ได้ ทั้งนี้ ผู้ได้รับอนุญาตจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบบรรดาค่าใช้จ่ายเพื่อการนั้น

การจัดให้มีอุปกรณ์ตรวจวัดผลกระทบของงานก่อสร้างตามวรรคหนึ่ง ให้มีระยะเวลาตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่กำหนดเท่าที่เห็นว่าจำเป็น

ข้อ 8 ผู้อำนวยการองค์การรถไฟฟ้ามหานครมีอำนาจตีความและวินิจฉัยปัญหาเกี่ยวกับการปฏิบัติตามประกาศนี้

ประกาศ ณ วันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2543

(นายประภัตร จงสวน)

ผู้อำนวยการองค์การรถไฟฟ้ามหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้