

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ในดินอ่อนและเปรียบเทียบการออกแบบ

**STUDY OF TUNNEL LINING BEHAVIOR
IN SOFT GROUND AND DESIGN COMPARISON**

โดย
นายกิตติ บุญนิรโรค
นายชัยวัฒน์ นาคประดิษฐ์
นายธเรศ พรหมเด่น

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 71953
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ย. 2550

b.....
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF TUNNEL LINING BEHAVIOR
IN SOFT GROUND AND DESIGN COMPARISON**

MR. KITTI

BOONNITROD

MR. CHAIWAT

NAKPRADIT

MR. THARATE

PROMDEN

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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ในดินอ่อนและเปรียบเทียบการออกแบบ

STUDY OF TUNNEL LINING BEHAVIOR IN SOFT
GROUND AND DESIGN COMPARISON

นักศึกษา นายคิตติ บุญจิรอด รหัสประจำตัว 46010038

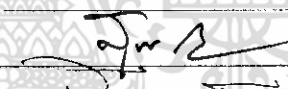
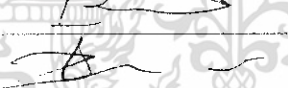
นายชัยวัฒน์ นาคประดิษฐ์ รหัสประจำตัว 46010163

นายธเรศ พรหมเด่น รหัสประจำตัว 46010299

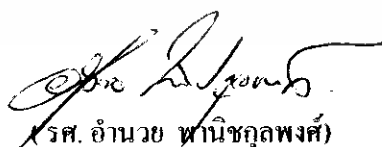
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุวัชรวิ์ สุวรรณสวัสดิ์

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.สุพจน์ ศรีนิล	
ผศ.ดร.สุวัชรวิ์ สุวรรณสวัสดิ์	
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว


(รศ. อำนวณ พานิชกุลพงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 7 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ในดินอ่อน และเปรียบเทียบการออกแบบ STUDY OF TUNNEL LINING BEHAVIOR IN SOFT GROUND AND DESIGN COMPARISON		
นักศึกษา	นายกิตติ	บุญนิจรอด	
	นายชัยวัฒน์	นาคประคิษฐ์	
	นายธเรศ	พรหมเด่น	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์		
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์		
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาถึง รายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินและการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินที่มีรายละเอียดการคำนวณที่ชัดเจน โดยมีทฤษฎีที่นำมาใช้ในการพิจารณาออกแบบทั้งสิ้น 5 วิธี ได้แก่ ทฤษฎี JSCE, Einstein, Erdmann, Muir Wood และทฤษฎี Beam-spring model รวมไปถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการเสริมเหล็กขึ้นส่วนผนังอุโมงค์ โดยใช้ทฤษฎีกำลังของวิธีการออกแบบเสาสั้นและวิธีการออกแบบคาน นอกจากนี้ยังได้นำค่าแรงกระทำภายในต่างๆ ที่ได้จากทั้ง 5 ทฤษฎีมาเปรียบเทียบในกรณีชั้นดินต่างๆ อีกด้วย

จากการศึกษาพบว่า ทฤษฎี JSCE และ Beam-spring model จะมีค่าแรงกระทำภายในขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินที่จะทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งแรงกระทำภายในที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนทฤษฎี Einstein และ Erdmann ค่าแรงกระทำภายในจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของดินและค่าที่ได้จะน้อยกว่าค่าของทฤษฎี JSCE และ Beam-spring model ในส่วนของทฤษฎีของ Muir Wood ค่าแรงก็ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน แต่ค่าแรงกระทำภายในที่ได้มีค่าน้อยกว่าทฤษฎีอื่นๆ มาก

สำหรับการเปรียบเทียบในกรณีต่างๆ นั้นทฤษฎีที่ให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดคือทฤษฎี JSCE แต่ทฤษฎี Beam-spring model จะให้ค่าแรงแนวแกนและแรงเฉือนสูงสุด ดังนั้นถ้าพิจารณาในด้านการปลอดภัยแล้วนั้น ทฤษฎี JSCE และ Beam-spring model จะมีความเหมาะสมมากที่สุด

Title : STUDY OF TUNNEL LINING BEHAVIOR IN SOFT
GROUND AND DESIGN COMPARISON
Name : MR. KITTI BOONNITROD
MR. CHAIWAT NAKPRADIT
MR. THARATE PROMDEN
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. Internal force on tunnel lining is studied using JSCE, Einstein, Erdmann, 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. Furthermore comparison of internal force of all theorems was performed.

For the internal force, JSCE and Beam-spring model theorems vary on soil conditions. Their results were similar. Einstein and Erdmann theorem depends on the modulus of soil. The results give values that are smaller than those calculated using JSCE and Beam-spring model theorem. In Muir Wood theorem depends on soil conditions but the results give values that are smaller than other theorems.

For theorem comparison in every case, bending moment maximum theorem is JSCE, axial force and shear force maximum is Beam-spring model theorem. Therefore, the tunnel design calculation recommended by JSCE and Beam-spring model would be suggested in the case of safety and appropriate.

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ อีกทั้งท่านยังได้สละเวลาอันมีค่าที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.สุพจน์ ศรีนิล และ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกภัย ซึ่งเป็นกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่างๆ ต่อการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิศวกรรม ทำให้สามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การเลี้ยงดู ดูแลเอาใจใส่ และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลาเสมอมา ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการออกแบบและก่อสร้างสำหรับงานอุโมงค์ได้ดินได้เป็นอย่างดี

นายกิตติ บุญนิจรอด
นายชัยวัฒน์ นาคประดิษฐ์
นายธเรศ พรหมเด่น
ผู้ประพันธ์

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอวนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ท
	สารบัญรูป	ถ
1	บทนำ	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและที่มาของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์	1
	1.4. ขอบเขตของการศึกษา	2
	1.5. ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
	1.6. ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
2	ประวัติความเป็นมาการก่อสร้างอุโมงค์	
	2.1. บทนำ	4
	2.2. เทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ในอดีต	4
	2.3. เทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ในยุคปัจจุบัน	7
	2.4. ตัวอย่างของอุโมงค์	13
	2.4.1. อุโมงค์ในประวัติศาสตร์	13
	2.4.2. อุโมงค์ที่ยาวที่สุด	15
	2.4.3. อุโมงค์ที่น่าสนใจ	16

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	วิธีก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	
	3.1. วิธีขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน	19
	3.2. วิธีขุดเจาะแบบ Heading and bench excavation	20
	3.3. Pipe Jacking	21
	3.4. การขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะ	22
	3.4.1. ประวัติความเป็นมา	22
	3.4.2. หลักการทำงานของหัวเจาะ	26
	3.4.3. การเลือกวิธีการของหัวเจาะอุโมงค์	34
	3.4.3.1. ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของหัวเจาะอุโมงค์	38
	3.4.3.2. การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะอุโมงค์ Shield	42
4	หัวเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	
	4.1. หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	48
	4.1.1. ข้อกำหนดทั่วไป	48
	4.1.2. หลักการพื้นฐานในการออกแบบ	49
	4.1.3. โครงสร้างของหัวขุดเจาะ	54
	4.1.4. หน่วยขุดตัด	63
	4.1.5. หน่วยขับเคลื่อน	74
	4.1.6. ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์	78
	4.1.7. ระบบไฮดรอลิก ระบบไฟฟ้า และระบบควบคุม	82
	4.1.8. หน่วยเสริม	83
	4.2. วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ Earth pressure balance	89
	4.3. หัวเจาะแบบ Slurry shield	111
	4.4. หัวเจาะแบบ Manual excavation, Semi-mechanical excavation และ Mechanical shield	117
	4.5. หัวเจาะแบบผสม Combined shield	122
	4.5.1. แผนการพัฒนา	124

๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	4.5.2. หลักการของเครื่องจักร	126
	4.6. การบำรุงรักษาหัวขุดเจาะ	129
5.	ผนังอุโมงค์	
5.1.	ผนังอุโมงค์	132
5.1.1.	หน้าที่ของผนังอุโมงค์	132
5.1.2.	ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์	135
5.1.2.1.	รูปร่างและขนาด	135
5.1.2.2.	รูปร่างของหน้าตัด (Shape of tunnel section)	141
5.1.3.	การวางแผนเส้นทางอุโมงค์ (Tunnel alignment)	142
5.1.4.	น้ำหนักบรรทุกทุกด้านบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel overburden)	144
5.1.5.	ระดับของอุโมงค์ (Grade of tunnel)	145
5.1.6.	แผนงานเฉพาะสำหรับการอำนวยความสะดวกในอุโมงค์	146
5.1.7.	มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน	147
5.1.8.	ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้าง	149
5.1.9.	มาตรการรักษาสีงแวดล้อม	150
5.1.10.	มาตรการกำหนดตารางของงาน	151
5.1.11.	การตรวจสอบ การวัด และบันทึก	152
5.2.	ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ได้ดิน	154
5.2.1.	ขอบเขตของการประยุกต์ใช้	154
5.2.2.	คำจำกัดความ	154
5.2.3.	การเลือกโครงสร้างและประเภทของอุโมงค์	159
5.2.4.	พื้นฐานของการออกแบบ	160
5.2.5.	ขั้นตอนการออกแบบ	160
5.2.6.	แบบก่อสร้าง	161
5.3.	รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)	162

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	5.3.1. รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment)	162
	5.3.2. มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ	168
	5.3.3. วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว(Tapered ring)	169
	5.3.4. ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate และ Blackboard	171
	5.3.5. ค่าความเค้นของหน้าตัดหลัก (Stress of main)	173
	5.3.6. การคำนวณจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	175
	5.3.7. การคำนวณ Skin plate และ Blackboard	177
	5.3.8. การคำนวณ Vertical rib	178
	5.4. รายละเอียดการออกแบบสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	179
	5.4.1. โครงสร้างจุดต่อ	179
	5.4.2. การจัดวางสลักเกลียว	180
	5.4.3. Vertical rib	181
	5.4.4. การป้องกันการรั่วซึมของน้ำ(Waterproofing)	182
	5.4.5. รูสำหรับอัดฉีดน้ำปูน (Grouting hole)	182
	5.4.6. ความสามารถในการทำงานการจัดเรียงและการยึดเหล็กเสริมแรง	182
	5.4.7. การป้องกันการสั่นไหวและการเกิดสนิม	183
	5.4.8. รายละเอียดการออกแบบอื่นๆ	184
	5.5. การผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	185
	5.5.1. พื้นฐานทั่วไป	185
	5.5.2. ค่าเผื่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	188
	5.5.3. การตรวจสอบ	189
6	การขุดเจาะและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	
	6.1. ข้อกำหนดทั่วไป(General requirement)	190
	6.1.1. การวางแผนงานก่อสร้าง (Construction planning)	190
	6.2. การสำรวจสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน	190

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
6.2.1.	วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	190
6.2.2.	กสรสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง	191
6.2.3.	การสำรวจสิ่งที่เป็นอุปสรรค	193
6.2.4.	การสำรวจเพื่อการจัดทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจสภาพดิน	194
6.2.5.	การสำรวจเพื่อหามาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	203
6.2.6.	การควบคุมงานสำรวจและการวางแผนสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน	205
6.2.7.	การสำรวจทางธรณีวิทยา	212
6.2.8.	การสำรวจขณะทำการก่อสร้าง	221
6.3.	การดำเนินการก่อสร้าง (Execution)	248
6.3.1.	ปล่องแนวตั้ง (Shaft)	248
6.3.2.	ทางออกและทางเข้าของหัวเจาะ (Departing and Arrival of shield machine)	251
6.3.3.	การขับเคลื่อนหัวเจาะไปข้างหน้า (Advancement)	255
6.3.4.	การขุดเจาะเสถียรภาพของดินและการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะประเภท EPB	256
6.3.5.	การขุดเจาะเสถียรภาพของหน้าดินและการกำจัดดินที่ขุดเจาะออกมาของหัวเจาะประเภท Slurry (Slurry shield)	261
6.3.6.	การขุดเจาะดิน การรักษาเสถียรภาพของหน้าดินและการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะประเภท Open -Face	264
6.3.7.	การระบุผนังภายในอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง (Primary lining)	265
6.3.8.	การฉีดอัดน้ำปูนกลับ (Backfill grouting)	267
6.3.9.	การกันน้ำ (Waterproofing)	270
6.3.10.	การบุผนังชั้นใน (Secondary lining)	271
6.3.11.	การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะตั้งแต่สองตัวขึ้นไป	273
6.3.12.	การตัดผ่านแม่น้ำ (River crossing)	274

ฎ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	6.3.13. การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้น (Tunnel construction with shallow cover)	275
	6.3.14. การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับลึก	275
	6.3.15. การก่อสร้างอุโมงค์ในบริเวณโค้งหักศอก	276
	6.3.16. การก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน (Steep gradient tunnel construction)	278
	6.3.17. การก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระยะทางยาว (Long-distance tunnel construction)	280
	6.3.18. การเปลี่ยนใบมีดขุดเจาะดิน (Cutter bits change)	281
	6.3.19. การต่อเชื่อมอุโมงค์ใต้ดิน (Underground tunnel construction)	282
	6.3.20. การขยายพื้นที่ใต้ดิน (Underground space enlargement)	283
	6.3.21. การรื้อถอนสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดิน (Removal of underground obstruction)	284
	6.4. มาตรการเสริม (Auxiliary measures)	285
	6.4.1. ทั่วไป	285
	6.4.2. วิธีการอัดฉีดด้วยสารเคมี (Chemical grouting method)	285
	6.4.3. วิธีการใช้การฉีดอัดแรงดันสูงและการผสมดิน	286
	6.4.4. วิธีการแช่แข็งดิน (Ground freezing method)	287
	6.4.5. วิธีการดewater (Dewatering method)	288
	6.4.6. วิธีการใช้แรงดันลม (Pneumatic method)	289
	6.5. การเคลื่อนตัวของดินและการป้องกันโครงสร้างที่มีอยู่	292
	6.5.1. การเคลื่อนตัวของดินและมาตรการป้องกัน	292
	6.5.2. การก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียงและการป้องกันสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิม	295
	6.6. เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)	296

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
6.6.1. เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)	296
6.6.2. สถานที่เก็บวัสดุและโรงเก็บอุปกรณ์ (Material storage yard and Warehouse)	298
6.6.3. เครื่องมือสำหรับขนย้ายดินออก (Muck removal facilities)	298
6.6.4. เครื่องมือขนส่งวัสดุ (Material handing facilities)	299
6.6.5. เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้า (Electric power supply facilities)	301
6.6.6. อุปกรณ์ส่องสว่าง (Lighting facilities)	301
6.6.7. ระบบติดต่อสื่อสาร (Communication system)	302
6.6.8. อุปกรณ์ในการระบายอากาศ (Ventilation facilities)	302
6.6.9. ทางเดินและบันไดที่ปลอดภัย (Safety walkway and Stair)	302
6.6.10. เครื่องมือสูบน้ำและจ่ายน้ำ (Water supply and Discharge facilities)	302
6.6.11. อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัยและดับเพลิง (Fire fighting and Fire prevention facilities)	302
6.6.12. อุปกรณ์เตือนภัย/ตรวจสอบก๊าซไวไฟและก๊าซอันตราย (Combustible gas and Harmful gas monitoring/Warning facilities)	303
6.6.13. อุปกรณ์ในการเลี้ยวโค้งการเข้าและออกของหัวเจาะ (Shield machine departing, Arriving and Turning facilities)	304
6.6.14. เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining facilities)	304
6.6.15. เครื่องมือที่ใช้สำหรับการฉีดน้ำปูน (Backfill grouted facilities)	304
6.6.16. เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังครั้งที่สอง (Secondary lining facilities)	304

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
6.6.17.	เครื่องมือที่ใช้ในการอัดอากาศและเครื่องมือที่ใช้ในการอัดแรงดันลม	305
6.6.18.	ระบบที่ใช้ในการควบคุมวิธีการขุดเจาะประเภท EPB	306
6.6.19.	เครื่องมือสำหรับแปรโคลนใน Slurry เป็นก้อนดินแข็ง	306
6.6.20.	การควบคุมการทำงานสำหรับหัวเจาะประเภท Slurry	307
6.6.21.	เครื่องมือดูแลรักษาตัว Slurry (Slurry treatment facilities)	307
6.6.22.	ขั้นตอนการแยกกรวดออก (Gravel removal facilities)	309
6.7.	การควบคุมการทำงานในภาคสนาม	310
6.7.1.	การควบคุมตารางการทำงาน (Schedule control)	310
6.7.2.	การควบคุมคุณภาพ (Quality control)	311
6.7.3.	การจัดการทำงาน (Management of work)	312
6.8.	การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ (Safety and Health administration)	314
6.8.1.	การจัดการให้มีสภาพแวดล้อมที่ดีในที่ทำงาน (Providing Good working environment)	315
6.8.2.	การควบคุมแรงดันที่ใช้แรงดันลม (Pneumatic pressure control)	317
6.8.3.	อุบัติเหตุและอุบัติภัย (Accident and Disasters)	318
6.8.4.	การช่วยชีวิตและเหตุฉุกเฉิน (Emergency and Rescuing action)	320
6.9.	การเกิดไฟไหม้และผนังป้องกันไฟ	322
6.9.1.	ไฟไหม้ในอุโมงค์	322
6.9.2.	ความเสียหายจากผนังอุโมงค์ที่เกิดไฟไหม้	324
6.9.3.	การป้องกันไฟสำหรับผนังอุโมงค์ใต้ดิน	328
6.9.3.1.	การทดสอบไฟไหม้กับผนังอุโมงค์	328
6.9.3.2.	ผลการทดสอบไฟไหม้ผนังอุโมงค์	330

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
6.9.3.3.	การใช้งานวิธีป้องกันไฟไหม้	334
6.10.	มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม	337
6.10.1.	มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อมทั่วไป	337
6.10.2.	การควบคุมด้านเสียง (Noise control)	338
6.10.3.	การควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration control)	339
6.10.4.	การป้องกันมลพิษทางน้ำ (Prevention of water pollution)	340
6.10.5.	มาตรการสำหรับน้ำใต้ดิน (Measures for groundwater)	341
6.10.6.	การป้องกันปัญหาสำหรับร่างกายมนุษย์จากการขาดออกซิเจน (Hypoxia anoxia)	342
6.10.7.	การดูแลรักษา และขนย้ายออกอย่างเหมาะสม	343
6.11.	การตรวจสอบและบำรุงรักษาสภาพอุโมงค์ใต้ดิน	344
6.11.1.	วิธีการตรวจสอบอุโมงค์เพื่อการฟื้นฟูสภาพ	344
6.11.2.	การซ่อมแซมอุโมงค์	358
6.11.2.1.	การซ่อมแซมคอนกรีต	358
6.11.2.2.	การซ่อมแซมรอยแตก	362
6.11.2.3.	การซ่อมแซมโลหะ	364
6.11.2.4.	การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง	366
6.11.2.5.	Segmental tunnel liners	366
6.11.2.6.	ต้นทุนการซ่อมแซม	368
6.12.	ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์	370
6.12.1.	กล่าวนำ	370
6.12.2.	ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์	370
6.12.2.1.	ปัญหาการทรุดตัวของหัวเจาะที่วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน	370
6.12.2.2.	ปัญหาการแตกร้าวของผนังอุโมงค์เมื่อส่วนหางของหัวเจาะมากระแทกขณะเลี้ยวโค้ง	371

๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	6.12.2.3. ปัญหาการแตกของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เนื่องจาก ผิวหน้าไม่ได้ระนาบดังเดียวกัน	371
	6.12.2.4. ปัญหาบ่อเก็บดินเต็ม	371
	6.12.2.5. ปัญหาขบวนรถไฟตกราง	372
	6.12.2.6. ปัญหาเสาเข็มสะพานกึ่งขวงแนวการก่อสร้างอุโมงค์	372
	6.12.2.7. ปัญหาหัวเจาะไม่เหมาะสมกับสภาพดินที่เป็นจริงในหน้างาน	373
	6.12.2.8. ปัญหา น้ำท่วมขังในบริเวณการเจาะอุโมงค์	373
	6.12.2.9. ปัญหาเรื่องอากาศและฝุ่นละอองในสถานที่ก่อสร้าง	373
	6.12.2.10. ปัญหาแนวอุโมงค์จริงอยู่นอกแนวที่ออกแบบไว้	374
	6.12.2.11. ปัญหาชุดอุปกรณ์ในส่วนของหัวเจาะเกิดชำรุดเสียหาย	374
	6.12.2.12. ปัญหา น้ำใต้ดินซึมเข้ามาภายในอุโมงค์	374
	6.13. ราคาการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	375
	6.13.1. การประมาณราคาก่อสร้าง	375
	6.13.2. ข้อมูลราคา	377
	6.13.3. ปัจจัยที่มีผลกับราคาก่อสร้างอุโมงค์	385
	6.13.4. ผลจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆกับราคาก่อสร้างอุโมงค์	392
7.	การออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน	
	7.1. กล่าวนำ	393
	7.2. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ JSCE	393
	7.2.1. น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ	393
	7.2.2. แรงดันในแนวตั้งและแนวราบ	394
	7.2.2.1. แรงดันในแนวตั้ง	395
	7.2.2.2. แรงดันในแนวราบ	395
	7.2.3. แรงดันน้ำ	396
	7.2.4. น้ำหนักบรรทุกคงที่	397
	7.2.5. ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน	398

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	7.2.6. แรงต้านทานของดิน	398
	7.2.7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง	399
	7.2.8. น้ำหนักจากภายใน	400
	7.2.9. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว	401
	7.2.10. ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง	402
	7.2.11. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณข้างเคียง	403
	7.2.12. ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน	403
	7.2.13. น้ำหนักอื่นๆ	404
	7.2.14. การคำนวณองค์ประกอบแรงของ JSCE	404
7.3.	ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein	407
7.4.	ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Erdmann	409
7.5.	ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood	410
7.6.	ทฤษฎีหาแรงกระทำภายในโดยวิธี Beam-spring model	411
	7.6.1. แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง	412
	7.6.2. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ	412
	7.6.3. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้าง	413
	7.6.4. แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้ออกแบบในวิธี Beam-spring model	417
7.7.	ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม	418
	7.7.1. กล่าวนำ	418
	7.7.2. พื้นฐานการออกแบบ	418
	7.7.2.1. วิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง	418
	7.7.2.2. วิธีการออกแบบคาน โดยวิธีกำลัง	425
7.8.	ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงภายในที่กระทำต่ออุโมงค์	427
	7.8.1. กรณีที่ 1 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	428

ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
7.8.2.	กรณีที่ 2 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน	430
7.8.3.	กรณีที่ 3 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	432
7.8.4.	กรณีที่ 4 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน	434
7.8.5.	กรณีที่ 5 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	436
7.8.6.	กรณีที่ 6 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน	438
7.8.7.	กรณีที่ 7 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	440
7.8.8.	กรณีที่ 8 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน	442
7.8.9.	กรณีที่ 9 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินทราย และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	444
7.8.10.	กรณีที่ 10 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินทราย และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน	446
7.9.	การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ	448
7.10.	การเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าแรงกระทำภายในสูงสุดในแต่ละกรณี	463
7.11.	การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน	464
7.11.1.	วิธีออกแบบเสาสั้น	464
7.11.1.1.	ตัวอย่างการคำนวณเสริมเหล็กเสริมจากกรณีที่ 1 ดินเหนียว อ่อนอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	464

ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	7.11.1.2. ตัวอย่างการคำนวณเหล็กเสริมจากกรณีที่ 5 ดินเหนียว แข็งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	467
	7.11.1.3. ตัวอย่างการคำนวณเหล็กเสริมจากกรณีที่ 9 ดินทราย ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	470
8.	โปรแกรมช่วยในการคำนวณ Ladkrabang Tunnel Lining Design Version 3.0	
	8.1. กล่าวนำ	469
	8.2. วัตถุประสงค์	469
	8.3. หลักการ	469
	8.4. วิธีการใช้โปรแกรม	470
	8.5. ข้อจำกัดของโปรแกรม	476
9.	ข้อสรุปและเสนอแนะ	
	9.1. กล่าวนำ	483
	9.2. ข้อสรุป	483
	9.3. ข้อเสนอแนะ	484
	บรรณานุกรม	486

ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์	12
3.1.	หลักเกณฑ์การเลือกหัวเจาะ	36
3.2.	แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม	41
3.3.	การแบ่งประเภทของหัวเจาะแบบ Shield	42
3.4.	แสดง Cutting face stability หลักการและช่วงใช้งาน	47
4.1.	ความถี่ที่ยอมให้ของเหล็ก	53
4.2.	ข้อดีของการใช้ EPB shield เปรียบเทียบกับหัวเจาะชนิดอื่น	90
4.3.	สิ่งที่ต้องศึกษาและสำรวจของแต่ละองค์ประกอบ	102
5.1.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต	164
5.2.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก	165
5.3.	แสดงขนาดเรียวยและองศาของความเรียวย	171
5.4.	ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กและแบบแผ่นเรียบ	180
5.5.	Box segment of concrete (without sheaths)	180
5.6.	เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมและคอนกรีตหุ้ม	183
5.7.	แสดงระยะที่ยอมให้ (หน่วย:mm)	188
6.1.	รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดิน สำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ (Shield tunnel)	196
6.2.	ข้อมูลลักษณะของ Taper ring	209
6.3.	ข้อกำหนดของวงผนังอุโมงค์แนวตรงและ Taper ring ตามรัศมีแนวโค้งที่ต่างกัน	210
6.4.	การจำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification System	215
6.9.	รายชื่อของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟ	311
6.10.	แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ในประเทศญี่ปุ่น	322
6.11.	แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดินทั่วโลก	323

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
6.12.	สัญลักษณ์ตัวแปรมาตรฐาน (จาก Tunnel Engineering Handbook)	347
6.13.	การทดสอบพิเศษ (จาก Tunnel Engineering Handbook)	352
6.14.	การเปรียบเทียบ Shotcrete (จาก Tunnel Engineering Handbook)	361
6.15.	การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ซ่อมแซมคอนกรีต (จาก Tunnel Engineering Handbook)	368
6.16.	การเปรียบเทียบการประมาณราคาการฟื้นฟูสภาพอุโมงค์	369
6.17.	รายละเอียดงานก่อสร้างอุโมงค์ประปา	377
6.18.	รายละเอียดงานก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	378
6.19.	ดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง	379
6.20.	ดัชนีค่าจ้างแรงงาน	380
6.21.	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวบรวมได้จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	381
6.22.	แสดงข้อมูลที่ปรับสภาพแล้วของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	382
6.23.	แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	383
6.24.	แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา	384
7.1.	แสดงประเภทของน้ำหนักที่กระทำ	393
7.2.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างและสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยาดิน	396
7.3.	แสดงหน่วยน้ำหนักของวัสดุ (kN/m^3)	398
7.4.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน	406
7.5.	แสดงค่าตัวแปรความแข็งแรงที่ใช้สำหรับคำนวณค่า Loosening earth pressure โดยวิธี Beam-spring model	414
7.6.	แสดงค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างระหว่างวิธีทั่วไปกับ วิธี Beam-spring model	415
7.7.	แสดงสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ฐานกับรัศมีของอุโมงค์ใน แบบจำลอง Beam-spring model (N/mm^2)	416
7.8.	แสดงการคำนวณแรงโมเมนต์บวกสูงสุด $+M_{\max}$ ในหน้าตัดอุโมงค์ โดยเปรียบเทียบวิธีการออกแบบทั่วไปกับวิธี Beam-spring model	417

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
7.9.	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ	427
7.10.	แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในแต่ละกรณี	463
7.11.	แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดในแต่ละกรณี	463
7.12.	แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าเฉือนสูงสุดในแต่ละกรณี	463



น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1.	เทคโนโลยีการก่อสร้างอุโมงค์ในยุคโรมัน	6
2.2.	การขุดเจาะอุโมงค์แบบไม่เต็มหน้า (Head and bench)	6
2.3.	เครื่องขุดเจาะอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์	8
2.4.	หัวขุดเจาะอุโมงค์ของเจมส์ เกทเฮด	9
2.5.	หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Slurry/Hydro shield	10
2.6.	อุโมงค์ Eupalinos tunnel	14
2.7.	แผนภาพการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้ก่อสร้างอุโมงค์ The Thames tunnel ในกรุงลอนดอน	14
2.8.	การตกแต่งภายในของอุโมงค์แม่น้ำเทมส์ ยุคกลางศตวรรษที่ 19	15
2.9.	อุโมงค์ Laerdalstunnel ในประเทศนอร์เวย์ – อุโมงค์ถนนที่ยาวที่สุดในโลก	17
2.10.	อุโมงค์ Houyet ในประเทศเบลเยียม	17
2.11.	อุโมงค์ Gotthard Base tunnel	18
2.12.	อุโมงค์ The Thames tunnel ในปี 2005 ของทางรถไฟใต้ดินลอนดอน	18
3.1.	แสดงวิธี Jacking method (จาก Mechanised shield tunneling)	22
3.2.	แสดงวิธี Jacking method ภายในอุโมงค์	22
3.3.	Marc Brunel's "screw" shield (1818)	25
3.4.	Marc Brunel's "compartment" shield (1818)	25
3.5.	หลักการของการขุดเจาะอุโมงค์โดยหัวเจาะอุโมงค์	26
3.6.	การค้ำยันผิวหน้าด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (After Maidl et al., 1996)	26
3.7.	Partial face shield (Herrenknecht)	30
3.8.	หัวขุดเจาะแบบเปิดหน้าที่ใช้ในโครงการ Trans-Bay tube (1969)	31
3.9.	หัวขุดเจาะแบบอัดแรงดันอากาศใช้ในโครงการ อุโมงค์ทางด่วนใน Paris (1964)	31
3.10.	หัวขุดเจาะแบบ Slurry ที่ใช้กับการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำใน Mexico City (1969)	32
3.11.	EPB shield ใช้กับโครงการ Singapore MRT	32

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.12.	Blind shield ผลิตโดย Mitsubishi	33
3.13.	Shield with excavator	33
3.14.	Articulated Shield	34
3.15.	ประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์	35
3.16.	แสดงแผนภาพของการเลือกวิธีใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์	40
4.1.	ตัวอย่างการหาน้ำหนักวิธีที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง	51
4.2.	น้ำหนักแผ่กระจายที่ใช้ใน Uniform ring	51
4.3.	น้ำหนักโดยรวมของ คันแบบหัวขุดเจาะ ในปัจจุบัน	54
4.4.	รูปร่างและลักษณะของหัวขุดเจาะ	55
4.5.	รายละเอียดของส่วนหาง	57
4.6.	ระยะที่ยอมให้ สำหรับการขุดเจาะตามแนว โค้ง และการปรับเบี่ยงเบนทิศทาง	57
4.7.	ความยาวของหัวขุดเจาะ	58
4.8.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก(D) กับความยาว (L) ของหัวขุดเจาะ	59
4.9.	ความยาวของส่วนหาง	61
4.10.	ประเภทของหัวตัด	64
4.11.	ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัด	66
4.12.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะ กับตัวคูณประกอบแรงบิด	68
4.13.	รูปร่างของหัวส่วน (ฟัน)	70
4.14.	ประเภทของการยึดติดหัวส่วน	71
4.15.	ตำแหน่งของ Cutter bearing seals	72
4.16.	รูปร่างของ Cutter bearing seals	73
4.17.	ระยะของการขุดเจาะเสริม	73
4.18.	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะกับกำลังผลักดัน	76
4.19.	ตัวอย่างการติดตั้งหัวกดที่เชื่อมศูนย์กับผนังอุโมงค์	77

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.20.	ประเภทของชุดติดตั้ง	79
4.21.	ตัวจับผนังอุโมงค์	80
4.22.	ชุดรักษารูปทรงของผนังอุโมงค์	82
4.23.	ประเภทของส่วนข้อต่อ	86
4.24.	กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ	86
4.25.	อธิบายส่วนประกอบ Earth Pressure Balance shield โดย Sato Kogyo (1963)	90
4.26.	สายพานลำเลียงดินที่ขุดออกจาก Screw conveyor (Bangkok-MRTA)	92
4.27.	ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อโดยตรงกับ Screw conveyor (Bangkok-MRTA)	92
4.28.	รถจักรลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์ (Bangkok-MRTA)	93
4.29.	ผังลำดับการควบคุมการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน	94
4.30.	จอควบคุมการทำงานของหัวขุดเจาะ แสดงค่าทุกตัวแปรระหว่างการขุดเจาะ	95
4.31.	แม่แรงไฮดรอลิกอยู่ต่อท้าย EPB shield	97
4.32.	การผลัดของแม่แรงด้านผนังอุโมงค์ เมื่อหัวขุดเจาะเดินหน้าการขุด	98
4.33.	ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ในโครงการ MRTA กรุงเทพมหานคร	98
4.34.	การจัดเก็บผนังอุโมงค์ (Bangkok-MRTA, Thiam Ruam Mit Station)	99
4.35.	แผนผังแสดงช่องว่างที่ส่วนทาง ระหว่างผนังอุโมงค์กับหัวขุดเจาะ	99
4.36.	แสดงรายละเอียดวงผนังอุโมงค์	100
4.37.	แขนเครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์ ติดตั้งผนังอุโมงค์ตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้	101
4.38.	การเชื่อมต่อชิ้นส่วนวงผนังอุโมงค์ด้วย Curve bolt	101
4.39.	Curve bolt	102
4.40.	คนงานกำลังทำการขัน Curve bolt ให้ยึดแน่น	102
4.41.	การตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งวงผนังอุโมงค์	103
4.42.	การขนย้ายชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เข้าสู่เครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์	103
4.43.	Tail skin seal (wire brush seal)	105
4.44.	การอัดฉนวนเคลือบผ่านรูในผนังอุโมงค์	106

ผ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.45.	การอัดฉีดปูนเหลวโดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน	106
4.46.	ส่วนประกอบของระบบนำทาง	108
4.47.	Laser theodolite ติดตั้งอยู่หลัง EPB shield	109
4.48.	Laser target ติดตั้งที่ไว้หลัง EPB shield	109
4.49.	ระบบแสดงผลควบคุมการขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ	110
4.50.	ระบบข้อมูลการนำทาง ภายในห้องควบคุม	110
4.51.	ระบบการเจาะอุโมงค์โดยหัวเจาะ Slurry shield	111
4.52.	แสดงกลไกภายในหัวเจาะแบบ Slurry shield	117
4.53.	หัวเจาะแบบ Slurry Shield	117
4.54.	แสดงกลไกการทำงานภายใน Manual shield	118
4.55.	หัวเจาะแบบ Manual shield	119
4.56.	Face jack devices ที่ส่วนบนของหน้าตัด	120
4.57.	แสดงกลไกการทำงานภายใน Mechanical shield	122
4.58.	หัวเจาะแบบ Mechanical shield	122
4.59.	การผสมระหว่างหัวเจาะ	123
4.60.	Mixshield (Wayss & Freytag)	127
4.61.	Mix shield ใช้ในโครงการ Fourth Elb Tunnel, Germany	128
4.62.	Polyshield (Voest Alpine)	129
5.1.	ผนังอุโมงค์	134
5.2.	องค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ	136
5.3.	รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน	137
5.4.	รูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย	138
5.5.	รูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ	139
5.6.	รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้ในการวางสายส่งกระแสไฟฟ้า	139
5.7.	รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางระบบโทรคมนาคม	140
5.8.	รูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ	140

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
5.9.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์	141
5.10.	ความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะกับรัศมีความโค้ง	143
5.11.	แสดงภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์น้อยที่สุดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ Shield	145
5.12.	ปล่องแนวตั้ง (Shaft)	150
5.13.	การก่อสร้างปล่องแนวตั้ง (Shaft)	150
5.14.	หัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภท Earth pressure balance shield	154
5.15.	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์	155
5.16.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกลิ้ง	156
5.17.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคั่นกริด	156
5.18.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ	157
5.19.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค	157
5.20.	แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์	158
5.21.	หน้าตัดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	158
5.22.	แบบจำลองผนังอุโมงค์ชนิด Typical	166
5.23.	ผนังอุโมงค์ ชนิด Typical	166
5.24.	แบบจำลองผนังอุโมงค์ชนิด Trapezoidal segment	167
5.25.	ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ชนิด Trapezoidal segment	167
5.26.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี	168
5.27.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์	168
5.28.	ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate	172
5.29.	หน้าตัดประสิทธิภาพของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	172
5.30.	การกระจายค่าความเค้นคั่นบนจุดต่อของหน้าตัด	176
5.31.	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหลักของแม่แรงและ Vertical rib	178
5.32.	รูอากาศของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก	184
5.33.	การเตรียมแบบหล่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	185

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
5.34.	การตรวจสอบเหล็กเสริมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	186
5.35.	การทดสอบกริดลงแบบหล่อ	186
5.36.	การตกแต่งผิวหน้าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	187
5.37.	การบ่มชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	187
5.38.	การวัดขนาด	189
6.1.	แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่าง ในหลุมเจาะขนาดใหญ่เจาะอุโมงค์	189
6.2.	แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิด Sink Hole	191
6.3.	ระดับความคืบหน้าในดินที่ตรวจวัดในโครงการอุโมงค์รถไฟ สายเฉลิมรัชมงคล	202
6.4.	ความสัมพันธ์ระหว่างแนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางอุโมงค์	207
6.5.	ลักษณะทางเรขาคณิตของ Taper ring	208
6.6.	Taper clock.	210
6.7.	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าความชื้นน้ำ	218
6.8.	ความสัมพันธ์ของธรณีวิทยาและองค์ประกอบของโครงการ	219
6.9.	เครื่องมือทำมุมจาก	222
6.10.	การถ่ายภาพทิศทางราบ	223
6.11.	การถ่ายภาพทิศทางตั้ง	224
6.12.	วงรอบและระดับในอุโมงค์	225
6.13.	หมุดวงรอบ	226
6.14.	กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์	227
6.15.	การใช้กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์	227
6.16.	หน่วยรับแสงเลเซอร์	228
6.17.	หน่วยรับแสงเลเซอร์	229
6.18.	หน่วยวัดการกระของหัวเจาะ	230
6.19.	หน่วยรวบรวมข้อมูลและหน่วยควบคุมการทำงาน	231

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.20.	มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ	231
6.21.	จุดสำรวจในเครื่องเจาะ	232
6.22.	ตำแหน่งจุดเลเซอร์	233
6.23.	เครื่องเจาะกัมหรือเอย	234
6.24.	เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง	235
6.25.	โค้งวงกลม	236
6.26.	โค้งสไปรล	237
6.27.	ระยะออฟเซตหัวเจาะ	238
6.28.	แบบแปลนทางราบ	239
6.29.	ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ	242
6.30.	ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ	243
6.31.	ระยะของแม่แรงหัวขุดเจาะ	243
6.32.	ระยะผลักของแม่แรงหัวขุดเจาะ	244
6.33.	แสดงผลของการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ	245
6.34.	ตำแหน่งจุดสำรวจบทที่ 6	247
6.35.	ปล่องแนวตั้ง Shaft	250
6.36.	การขุดปล่องแนวตั้ง (Shaft)	250
6.37.	การขนย้ายหัวเจาะลงทางปล่องแนวตั้ง (Shaft)	250
6.38.	การติดตั้งหัวเจาะ	251
6.39.	ตัวอย่างวิธีการนำหัวเจาะออกจากกำแพงปล่องแนวตั้ง	253
6.40.	ตัวอย่างแสดงวิธีการเข้าของหัวเจาะ	254
6.41.	หัวเจาะกำลังเข้าสู่ปล่องแนวตั้ง	255
6.42.	หัวเจาะแบบ EPB	257
6.43.	การลำเลียงดินออกจากหัวเจาะ โดยสายพานลำเลียง	261
6.44.	ระบบของหัวขุดเจาะแบบ Slurry Shield	262
6.45.	หัวเจาะแบบ Slurry	264

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.46.	การขนย้ายชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	266
6.47.	การลำเลียงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ภายในอุโมงค์	267
6.48.	วัสดุทั่วไปในการฉีดอัดน้ำปูน	248
6.49.	การ Grouting	249
6.50.	อุปกรณ์การขนส่งในอุโมงค์ที่มีความลาดชัน	279
6.51.	ระยะของแม่แรงหัวขุดเจาะวิธีการคำนวณหาแรงดันอากาศ	291
6.52.	การแยกประเภทการเคลื่อนตัวของดินเนื่องมาจากการขุดเจาะของหัวเจาะดิน	293
6.53.	แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ EPB	296
6.54.	รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ EPB	297
6.55.	แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry	297
6.56.	รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry	298
6.57.	ระบบขนส่งวัสดุในอุโมงค์	300
6.58.	ระบบการขนส่งวัสดุในปล่องแนวตั้ง	300
6.59.	ขั้นตอนการดูแลรักษา Slurry โดยใช้สารเร่งการตกตะกอนแบบโพลีเมอร์	308
6.60.	ขั้นตอนการแยกและคัดกรวดออก	309
6.61.	ตัวอย่างรายละเอียดของวงรอบการทำงาน	311
6.62.	รูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดิน	324
6.63.	รูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดิน	325
6.64.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Summit	325
6.65.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Mont Blanc	326
6.66.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard	327
6.67.	ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Euro Tunnel	328
6.68.	ตัวอย่างทดสอบ	329
6.69.	การติดตั้งการป้องกันไฟ	329
6.70.	โค้งของความร้อนสำหรับการทดสอบ (RABT)	329
6.71.	ชุดตัวอย่างทดสอบ	330

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.72.	แสดงถึงการพังทลายของผิวคอนกรีต	331
6.73.	อุณหภูมิที่ยังขึ้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันไฟ	331
6.74.	อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันไฟ	333
6.75.	Carbonation by the heating	334
6.76.	การติดตั้ง Board type ในอุโมงค์ Elbe	335
6.77.	การป้องกันไฟใหม่แบบ Spray mortar type ในอุโมงค์ Westerschelde	336
6.78.	กล่องของอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์คู่	345
6.79.	กล่องอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์เดี่ยว	346
6.80.	อุโมงค์แบบส่วนโค้งหลังคา แบบอุโมงค์เดี่ยว	346
6.81.	2 รูปแบบอุโมงค์แบบวงกลม	346
6.82.	วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับคอนกรีต	353
6.83.	การทดสอบ Sonic/ultrasonic และแนวท่อ ของอุโมงค์	353
6.84.	ความแข็งแรงของคอนกรีตกับความเร็ว	354
6.85.	ตัวอย่างข้อมูลการตรวจสอบที่สมบูรณ์แบบ	355
6.86.	ตัวอย่างผลการสรุปข้อมูล	356
6.87.	ตัวอย่างผลการสรุปข้อมูล	357
6.88.	แสดงหน้าตัดของการซ่อมแซมคอนกรีต	359
6.89.	รายละเอียดของรอยต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	360
6.90.	รายละเอียดการซ่อมแซม Shotcrete	362
6.91.	การติดตั้ง Ports ของการ Grout โดยใช้สารเคมี	364
6.92.	การซ่อมแซมแบบโครงเหล็ก	365
6.93.	การเปลี่ยนชิ้นส่วนของเหล็ก	365
6.94.	การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง	366
6.95.	การซ่อมแซมเหล็กแผ่นแนวทาง	367
6.96.	รูปแสดงหัวเจาะชนิดต่างๆ	386
6.97.	แสดงวิธีการขุดเจาะแบบ Pipe jacking	386

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.98.	แสดงทัศนียภาพด้านบนของอุโมงค์	388
6.99.	แสดงทัศนียภาพภายในของอุโมงค์	389
6.100.	แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีความแออัด	390
6.101.	3แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีพื้นที่ในการก่อสร้างมาก	390
6.102.	แสดงสถานที่เก็บชิ้นส่วนอุโมงค์	391
7.1.	แสดงแบบจำลองสปริง	399
7.2.	แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดิน โดยรอบ	402
7.3.	แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี JSCE	404
7.4.	แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)	408
7.5.	แสดงการกระจายแรงภายในแนวแกนและ โมเมนต์คดมากที่สุด	409
7.6.	แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ โดยวิธีทั่วไปและวิธี Beam-spring model	412
7.7.	แสดงแรงดันดินแนวตั้งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-spring model	413
7.8.	แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนวยาว	415
7.9.	แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-spring model	416
7.10.	แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์	418
7.11.	การกระจายความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัด ภายใต้ผลรวมของแรงคดและแรงตามแกน	419
7.12.	สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด	422
7.13.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 1	428
7.14.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 2	430
7.15.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 3	432
7.16.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 4	434
7.17.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 5	436
7.18.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 6	438
7.19.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 7	440

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
7.20.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 8	442
7.21.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 9	444
7.22.	แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 10	446
7.23.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 1	448
7.24.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 1	449
7.25.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 1	449
7.26.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 2	449
7.27.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 2	450
7.28.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 2	450
7.29.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 3	451
7.30.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 3	452
7.31.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 3	452
7.32.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 4	452
7.33.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 4	453
7.34.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 4	453
7.35.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 5	454
7.36.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 5	455
7.37.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 5	455
7.38.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 6	455
7.39.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 6	456
7.40.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 6	456
7.41.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 7	457
7.42.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 7	458
7.43.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 7	458
7.44.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 8	458
7.45.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 8	459

ล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
7.46.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 8	459
7.47.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 9	460
7.48.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 9	461
7.49.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 9	461
7.50.	แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 10	461
7.51.	แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 10	462
7.52.	แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 10	462
7.53.	แสดงหน้าตัดเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสนในกรณีที่ 1	468
7.54.	แสดงหน้าตัดเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสนในกรณีที่ 5	469
7.55.	แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบคาน	474
8.1	แสดงหน้าจอรับค่า Input	477
8.2	แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion	477
8.3.	แสดงหน้าจอค่าแนะนำของค่า (k_v) และค่า Subgrade reaction factor	478
8.4.	แสดงหน้าจอแสดงค่าแรงกระทำภายใน	479
8.5.	แสดงหน้าจอเมื่อคลิก Details	479
8.6.	แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก	480
8.7.	แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ	481
8.8.	แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ	481
8.9.	แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	482

บทที่ 1

บทนำ

1.1. คำนำ

การก่อสร้างในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะด้านการคมนาคม ที่มักก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องความต้องการในการใช้พื้นที่ก่อสร้างมากขึ้นซึ่งไม่สอดคล้องกับพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบันซึ่งลดน้อยลงไปอย่างมาก เช่น การสร้างรถไฟฟ้า การสร้างอุโมงค์ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้ด้านวิศวกรรมโยธาเป็นส่วนใหญ่ งานก่อสร้างอุโมงค์ได้คืบหน้าเป็นวิธีการในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศให้เจริญก้าวหน้าต่อไป

1.2. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากความจำเป็นและสภาวะบีบบังคับในการใช้พื้นที่อันเป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้างบนพื้นดินนั้น เทคโนโลยีทางด้านงานอุโมงค์ได้คืบหน้า จึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหานี้

เทคโนโลยีทางด้านงานอุโมงค์ได้คืบหน้า สำหรับประเทศไทยนั้น นับว่าเป็นเทคโนโลยีและความรู้ใหม่ ซึ่งวิศวกร และนักออกแบบชาวไทยควรจะให้ความสนใจ และศึกษาถึงการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อการใช้งานให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ได้คืบหน้านั้น มีบทบาทในเรื่องการคมนาคมขนส่ง การส่งน้ำ การระบายน้ำ ซึ่งมีผลในการช่วยเหลือการพัฒนาประเทศ ทางด้านสาธารณูปโภค เป็นอย่างมาก

1.3. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาวิธีการก่อสร้างและการออกแบบก่อสร้างผนังอุโมงค์ได้คืบหน้า รวมทั้งศึกษาทฤษฎีแรงกระทำภายในของแต่ละวิธี พร้อมทั้งปัจจัยต่างๆในการก่อสร้างผนังอุโมงค์ได้คืบหน้า ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบหลักการของทฤษฎีต่างๆ เพื่อออกแบบก่อสร้างผนังอุโมงค์ได้คืบหน้า

1.4. ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในการก่อสร้างอุโมงค์ และการออกแบบโดยทฤษฎี JSCE, Einstein, Erdmann, Muir Wood, Beam-spring model โดยคิดแรงที่มากกระทำต่อตัวอุโมงค์คิดเป็นชิ้นเดียวกันทั้งหมด และไม่คิดแรงที่มากกระทำต่อจุดต่อของแนวผนังอุโมงค์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าแรงภายในที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ โดยแบ่งกรณีเป็นตำแหน่งที่อุโมงค์วางในดินแต่ละประเภทอันได้แก่ ดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวปานกลาง ดินเหนียวแข็ง และดินทราย รวมทั้งวิเคราะห์ผลการออกแบบที่ได้จากการคำนวณ

1.5. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการ ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ และทฤษฎี JSCE, Einstein, Erdmann, Muir Wood, Beam-spring model พร้อมกับศึกษาฐานจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในสถานที่จริง
2. รวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผนังอุโมงค์ และขั้นตอนการก่อสร้างผนังอุโมงค์
3. พิจารณาปัจจัย ตัวแปรที่เกี่ยวข้องของทฤษฎีต่างๆ ที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบ รวมทั้งวิธีการออกแบบผนังอุโมงค์
4. ทดลองออกแบบผนังอุโมงค์โดยใช้ทฤษฎี JSCE, Einstein, Erdmann, Muir Wood, Beam-spring model
5. เปรียบเทียบการออกแบบโดยแบ่งการพิจารณาเป็นอุโมงค์ที่วางตัวอยู่บนดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวปานกลาง ดินเหนียวแข็ง ดินทราย อีกทั้งยังแบ่งเพิ่มเป็นอุโมงค์ที่วางตัวอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน และอุโมงค์ที่วางตัวอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน
6. สรุปผลการเปรียบเทียบในดินแต่ละชนิดและวิเคราะห์ผลการออกแบบ

1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาและพิจารณาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน พร้อมทั้งปัจจัยต่างๆ ในการก่อสร้างอุโมงค์ได้ดิน แล้วทำการทดลองออกแบบตามทฤษฎีต่างๆ นั้น ทำให้มีความเข้าใจในการออกแบบผนังอุโมงค์ ทำให้ทราบค่าแรงภายในที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ ว่ามีความเหมาะสมอย่างไร หรือค่าที่ได้นั้นจะส่งผลกระทบต่ออย่างไร รวมทั้งในดินแต่ละประเภทที่อุโมงค์วางตัวใช้ทฤษฎีใดจะเหมาะสมที่สุด พร้อมกับวิเคราะห์สรุปหลักการที่สำคัญ รวมทั้งทราบ

ถึงผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อผนังอุโมงค์ ทำให้สามารถนำขั้นตอนต่างๆ ที่ศึกษามาใช้ในการ
ออกแบบเพื่อใช้งานจริงในการก่อสร้างอุโมงค์ได้คืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ประวัติความเป็นมาของอุโมงค์ใต้ดิน

2.1 บทนำ

เนื่องด้วยการพัฒนาาระบบสาธารณูปโภคได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกประเทศทั่วโลก อีกทั้งปัจจัยด้านพื้นที่บนดินมีจำกัด จึงทำให้เกิดโครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินขึ้นมากมาย เพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านการขนส่งมวลชน จนถึงระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ ในประเทศไทยเองก็เช่นกัน ได้มีโครงการอุโมงค์ใต้ดินเกิดขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน ตั้งแต่อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายแรก คือ สายเฉลิมรัชมงคล อุโมงค์ประปาขนาดใหญ่ อุโมงค์สำหรับสายส่งกระแสไฟฟ้า และอุโมงค์ระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วม การขุดเจาะอุโมงค์ดังกล่าวใช้วิธีการขุดเจาะด้วยหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล หรือ Earth pressure balance (EPB) Shield ซึ่งเป็นวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในการขุดผ่านชั้นดินเหนียว และยังสามารถใช้ในกรณีดินทรายเป็นได้ หากใช้โฟมช่วยขณะทำการขุดเจาะ อย่างไรก็ตามกว่าที่เราจะสามารถขุดเจาะอุโมงค์ได้อย่างปลอดภัยในปัจจุบัน ในอดีตวิศวกรอุโมงค์ได้ผ่านความยากลำบากในการก่อสร้างอุโมงค์อย่างมาก ซึ่งในการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละโครงการนั้น ต้องใช้ทั้งงบประมาณและแรงงานมหาศาล อีกทั้งยังมักเกิดการพังทลายอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งคร่าชีวิตคนและส่งผลเสียหายอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม จนทำให้ต้องมีการพัฒนาเครื่องมือและวิธีการขุดเจาะให้ทันสมัยมากขึ้น เพื่อป้องกันการสูญเสียดังกล่าว บทความนี้จะนำเสนอการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างอุโมงค์ตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบัน โดยจะเน้นการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่เกิดขึ้นมากและมีความสำคัญที่สุดในปัจจุบัน โดยเฉพาะโครงการอุโมงค์ที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว และที่กำลังก่อสร้างอยู่ในประเทศไทย

2.2 เทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ในอดีต

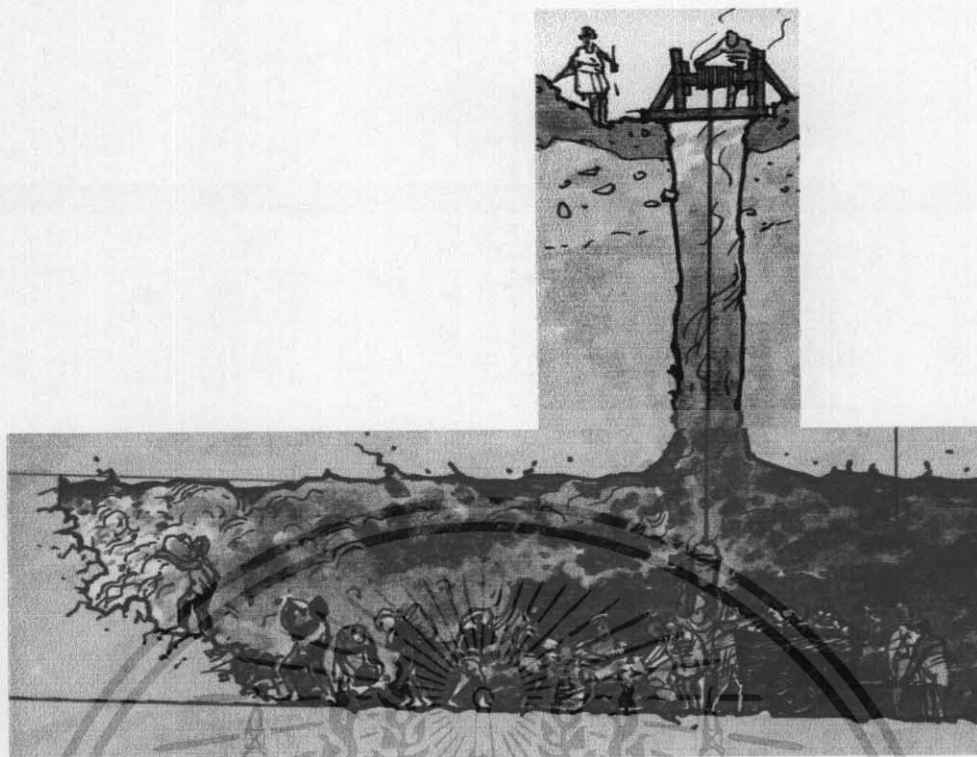
มนุษย์ได้ริเริ่มการขุดเจาะอุโมงค์มาตั้งแต่ยุคดึกดำบรรพ์ ในสมัยก่อนมนุษย์เราได้อาศัยถ้ำเป็นที่อยู่อาศัยจากหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่ประเทศออสเตรีย มีอายุ 40,000 ปี ก่อนคริสต์ศักราชภายในอุโมงค์เก่าแก่ บางแห่งใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางประวัติศาสตร์ได้ดี เพราะมีภาพเขียน และลายลักษณ์อักษรโบราณ แต่ได้เริ่มบันทึกเป็นหลักฐานอย่างชัดเจนในสมัยกรีกและโรมัน หรือเมื่อ 2-3 พันปีก่อน ในสมัยนั้นชาวกรีกและโรมันรู้จักการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อส่งน้ำหรือที่

รู้จักกันว่า Aquaduct โดยสามารถสร้างได้ยาวเป็นกิโลเมตร อุโมงค์ส่วนใหญ่ในยุคก่อนมักจะเจาะผ่านชั้นหิน โดยอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก วิธีการก่อสร้างในยุคแรกนั้นคนงานก็จะใช้สิ่วค่อยๆ สกัดไปที่ละน้อย ต่อมาเริ่มรู้จักใช้ไฟเผาหน้าหินให้ร้อนจัดก่อนจากนั้นจึงใช้น้ำราด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทำให้หินเกิดการแตกร้าว และง่ายต่อการสกัดออกดังแสดงในรูปที่ 2.1 การก่อสร้างอุโมงค์ในอดีตนี้จะใช้คนงานจำนวนมาก และใช้เวลานานนับสิบปี ดังตัวอย่างเช่น อุโมงค์ส่งน้ำในยุคของซีซาร์คลอเดียส แห่งอาณาจักรโรมันซึ่ง ต้องใช้แรงงานถึง 30,000 คน ใช้เวลานานถึง 10 ปี

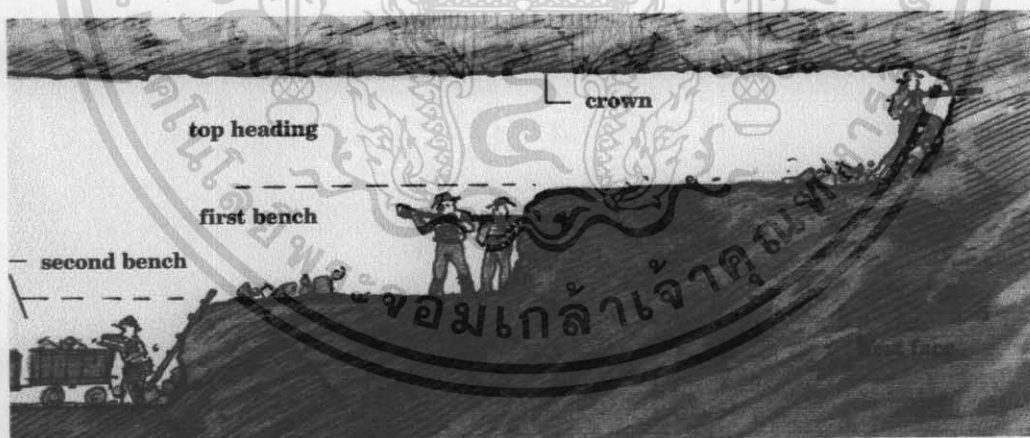
ประมาณ 2160 ถึง 2180 ปีก่อนคริสต์ศักราช มีการก่อสร้างอุโมงค์คนเดินเท้ายาวกว่า 900 เมตร ลอดใต้แม่น้ำยูเฟรติส (แถบดินแดนเมโสโปเตเมีย) เพื่อเชื่อมต่อระหว่างพระราชวังและโบสถ์ โดยทำการเบี่ยงแนวทางการไหลของแม่น้ำในช่วงน้ำแล้ง

ต่อมามนุษย์เริ่มทำทฤษฎีธรณีวิทยาขึ้น โดยเริ่มมีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน (Soft ground) และหินที่มีความแข็งแรงน้อยมากขึ้น ซึ่งความยากและอันตรายของการขุดเจาะอุโมงค์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการคงตัวของดินหรือ Stand-up time ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระดับของน้ำใต้ดิน จึงเริ่มมีการพัฒนาการขุดแบบ Head and bench โดยจะขุดเจาะอุโมงค์แบบไม่เต็มหน้า โดยจะขุดจากด้านบนของอุโมงค์ (Head) ออกไปก่อนจากนั้นจึงเริ่มขุดด้านล่าง (Bench) ตามออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ก่อนติดตั้งค้ำยัน ซึ่งในอดีตจะเป็นไม้หรือก่ออิฐเพื่อสร้างเป็นผนังอุโมงค์ ในยุคนี้เครื่องมือที่ใช้ในการขุดเจาะมีการพัฒนามากขึ้นและเริ่มใช้วัตถุระเบิดช่วยในการก่อสร้าง แต่การขุดเจาะดินแบบนี้ยังมีความเสี่ยงสูง เนื่องจากดินด้านบนและด้านบนของอุโมงค์จะพังทลายเข้ามา หากติดตั้งค้ำยันไม้ทันทหรือค้ำยันไม่แข็งแรงพอ หรือหากขุดเจาะอุโมงค์ได้ระดับน้ำใต้ดินก็มักเกิดปัญหาการไหลของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ จนถึงขนาดเกิดน้ำท่วมภายในอุโมงค์ และดินโดยรอบถล่มลงมาสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงได้

ในช่วงปี ค.ศ. 1759 ถึง 1761 มีการขุดอุโมงค์เพื่อใช้เป็นคลองใต้ดินสำหรับขนส่งถ่านหินเป็นระยะทางประมาณ 16 กิโลเมตร (10 ไมล์) ในประเทศอังกฤษ จากเมือง Worsley ถึงเมือง Manchester การขุดใช้ค้อน พั่ว เสียม และสว่าน และใช้ระเบิดหากพบหินแข็ง การใช้คลองในการขนส่งช่วยลดต้นทุนของถ่านหินในเมือง Manchester ได้กว่าครึ่งหนึ่ง



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการก่อสร้างอุโมงค์ในยุคโรมัน ที่มนุษย์สามารถสร้างอุโมงค์เพื่อใช้ในการส่งน้ำ โดยอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก และรู้หลักการทางวิทยาศาสตร์ว่าวัตถุที่อุณหภูมิลดลงจะเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จะก่อให้เกิดการแตกร้าว ซึ่งง่ายต่อการทำลาย

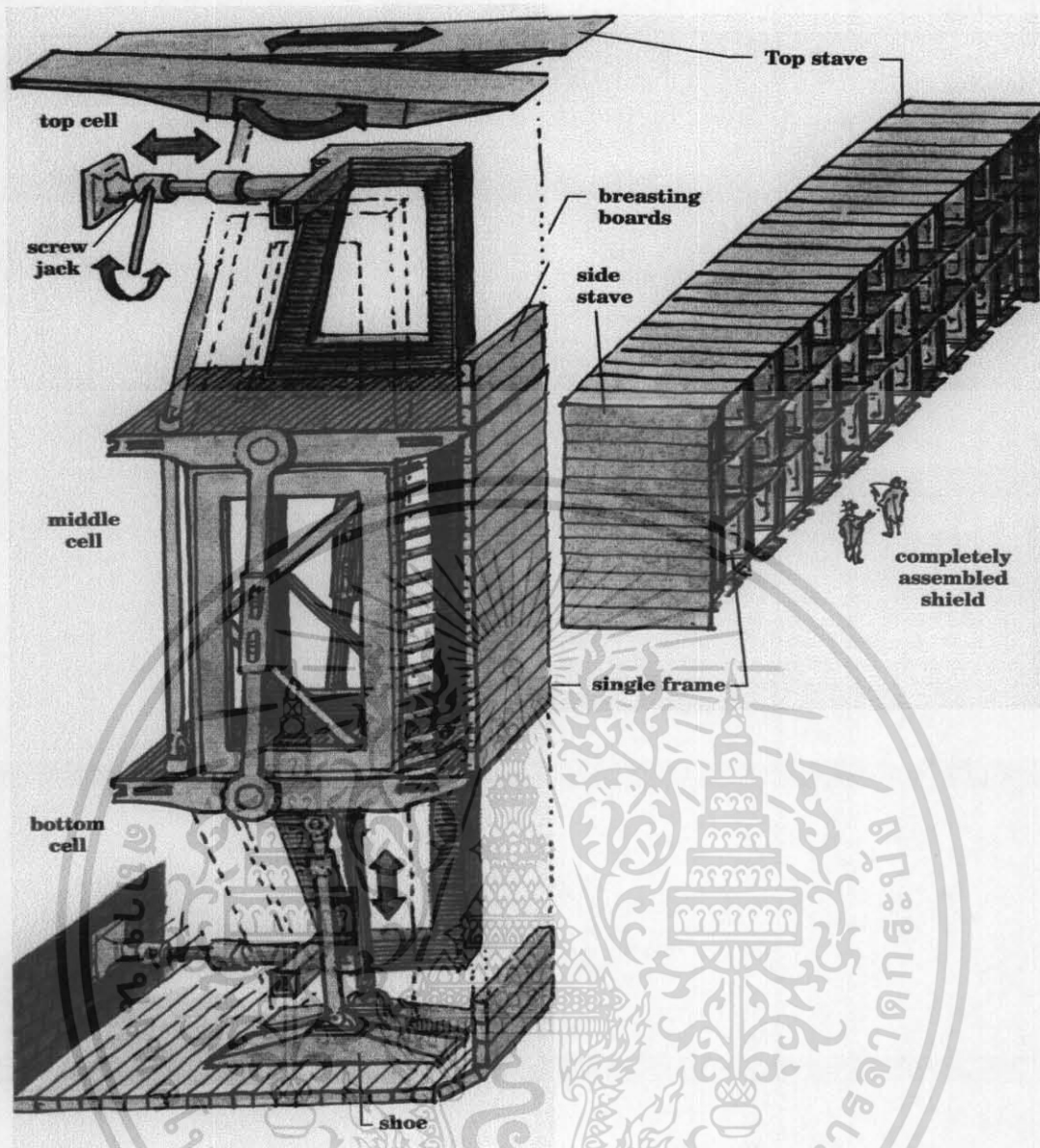


รูปที่ 2.2 การขุดเจาะอุโมงค์แบบไม่เต็มหน้า (Head and bench) ได้ถูกพัฒนาขึ้นควบคู่กับเครื่องมือขุดเจาะที่ทันสมัยมากขึ้น และวัฏระเหิดได้ถูกนำมาใช้เพื่อทำลายหน้าหิน อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างอุโมงค์ยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก และไม่มีอุปกรณ์ป้องกันการพังทลายของอุโมงค์ทั้งทางด้านหน้าและด้านบน

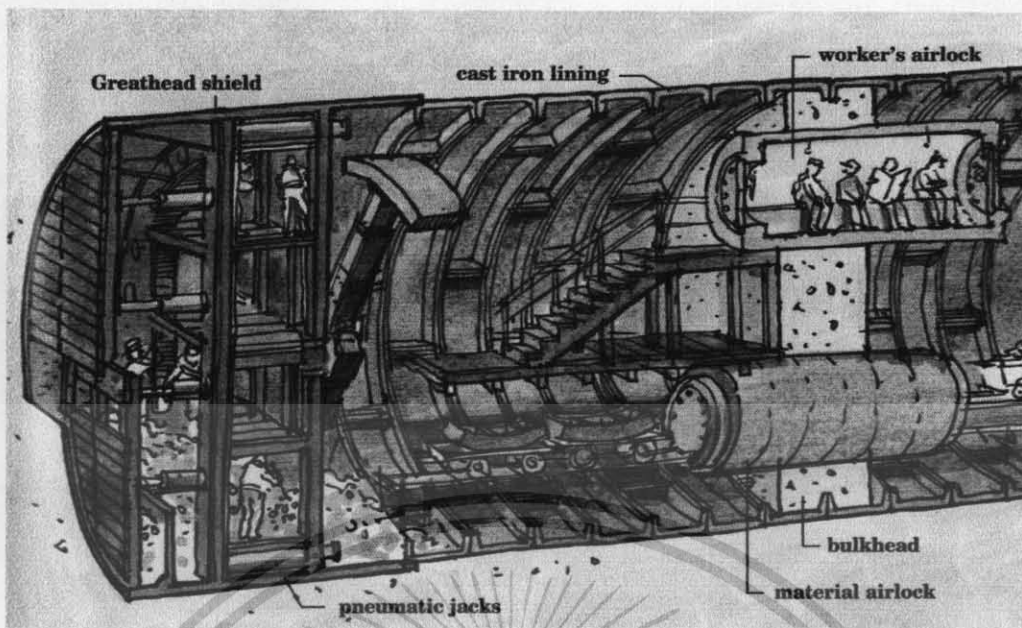
2.3 เทคโนโลยีการก่อสร้างอุโมงค์ในยุคปัจจุบัน

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น การขุดเจาะอุโมงค์ในอดีตมักประสบปัญหาการพังทลายของดินทั้งจากคาตาอุโมงค์ หรือด้านหน้าอุโมงค์ โดยเฉพาะในการขุดเจาะอุโมงค์ในดินทรายหรือได้ระดับน้ำใต้ดิน ทำให้การขุดเจาะอุโมงค์ต้องใช้เวลานานและมักจะสร้างความสูญเสียทั้งชีวิตและสภาพแวดล้อม จนในที่สุดการปฏิบัติการขุดเจาะอุโมงค์จึงได้เริ่มขึ้นในประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1825 โดยวิศวกรเลื่องชื่อ มาร์ค บรูเนล (Marc Brunel) ซึ่งพยายามจะขุดเจาะอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์ ณ กรุงลอนดอน ซึ่งนายบรูเนล ได้ใช้ความพยายามในการขุดอุโมงค์นี้อยู่นานกว่า 14 ปี จนได้สามารถขุดอุโมงค์ที่มีความยาวกว่า 150 เมตรได้สำเร็จ และจากความอุตสาหะพยายามของเขานี้เอง ทำให้เขาได้รับพระราชทานบรรดาศักดิ์เป็น “เซอร์” (Sir) จากพระนางเจ้าวิกตอเรีย พระบรมราชินีนาถแห่งประเทศอังกฤษ

ในระหว่างดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์นี้หลายครั้งที่อุโมงค์เกิดถล่มทลายลงมา เนื่องจากไม่สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำและดินบริเวณด้านหน้าของอุโมงค์ได้ จากความล้มเหลวครั้งแล้วครั้งเล่า เซอร์มาร์ค บรูเนล ได้เรียนรู้และพัฒนาวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยการทำแผ่นเหล็กหล่อมาประกอบเป็นเฟรมถึง 12 เฟรม โดยแต่ละเฟรมจะมีแผ่นหลังคา เมื่อต่อกันแล้วจะมีลักษณะคล้ายกล่องสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ในแต่ละเฟรมจะแบ่งเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยด้านหน้าของเฟรมประกอบด้วยแผ่นไม้วางตามยาวเรียงกันเป็นกำแพง เพื่อป้องกันการพังทลายของดินด้านหน้าของอุโมงค์ โดยแผ่นไม้ดังกล่าวจะถูกค้ำไว้กับเฟรมเหล็ก วิธีการขุดเจาะก็จะค่อยๆ ขุดแผ่นไม้ออกมาครั้งละชั้น แล้วขุดดินด้านหน้าเข้าไปทีละ 6 นิ้ว จากนั้นจึงประกอบแผ่นไม้กลับไปดังเดิม แล้วติดตั้งค้ำยันไว้ เมื่อขุดเจาะดินหน้าแผ่นไม้ทุกแผ่นแล้ว เฟรมจะถูกดันไปข้างหน้า เพื่อพร้อมสำหรับขุดดินในกระบวนการเดิมอีกครั้ง โดยจะทำกระบวนการนี้ซ้ำแล้วซ้ำอีกเพื่อขุดเจาะอุโมงค์ทีละ 6 นิ้ว ไปสู่อีกฝั่งหนึ่งของแม่น้ำเทมส์ และผนังอุโมงค์ที่ใช้ก็เป็นแผ่นอิฐก่อ จึงไม่เป็นที่สงสัยเลยว่าใช้เวลานาน กว่าอุโมงค์จะก่อสร้างสำเร็จ วิธีที่เซอร์มาร์ค บรูเนล ใช้นี้ได้กลายมาเป็นวิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบ Shield ที่ใช้กันสืบต่อมาจนกระทั่งปัจจุบัน จากนั้นในปี ค.ศ. 1869 นายเจมส์ เทพเฮด ก็สามารถขุดเจาะอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์ ด้วยเครื่องมือขุดเจาะคล้ายของบรูเนล แต่เป็นรูปทรงกระบอกแทนที่สี่เหลี่ยมแบบเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.4 และยังเป็นครั้งแรกที่ใช้ผนังอุโมงค์แบบเหล็กหล่อ เครื่องขุดเจาะของเจมส์ เทพเฮด นำไปสู่การพัฒนาสู่การสร้างเครื่องเจาะอุโมงค์แบบหน้าเปิด (Open-faced shield) ในช่วงต่อมา



รูปที่ 2.3 เครื่องขุดเจาะอุโมงค์ลัดได้แม่น้ำเทมส์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยเซอร์มาร์ค บรูเนล โดยสามารถป้องกันการพังทลายของดิน ทั้งจากด้านบนซึ่งมีแผ่นเหล็กค้ำยันอยู่ และจากด้านหน้า อุโมงค์ซึ่งมีแผ่นไม้ถูกค้ำไว้ด้วยเฟรมเหล็ก เครื่องขุดเจาะนี้จะค่อยๆเคลื่อนไปข้างหน้าอย่างช้าๆด้วยแม่แรง



รูปที่ 2.4 หัวเจาะอุโมงค์ของเจมส์ เกทเฮดซึ่งเป็นต้นแบบของหัวเจาะอุโมงค์ รุ่นที่สองต่อจากที่พัฒนาขึ้นโดยเซอร์มาร์ค บรูเนล เริ่มมีการใช้เทคโนโลยีอัดอากาศในห้อง airlock และใช้ผนังอุโมงค์แบบเหล็กหล่อขึ้นเป็นครั้งแรก

ในช่วงปี ค.ศ. 1868 ถึง 1869 มีการคิดค้นการเจาะอุโมงค์ภายใต้แรงอัดอากาศ (Compressed air) สูงเพื่อช่วยด้านการไหลของน้ำเข้ามาในหัวเจาะ โดยมีการใช้งานจริงเป็นครั้งแรกกับการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินในกรุงลอนดอนในปีค.ศ. 1886

ในปี ค.ศ. 1876 ได้มีการพัฒนาเครื่องเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องมือกล (Mechanized shield) เป็นครั้งแรกโดยชาวอังกฤษชื่อ จอห์น ดิกกินสัน บรันตันและ จอร์จ บรันตัน จากนั้นในปี ค.ศ. 1896 หัวเจาะอุโมงค์ Price shield ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยหัวเจาะอุโมงค์นี้ประสบความสำเร็จในการเจาะอุโมงค์ดินเหนียวใต้กรุงลอนดอน หัวเจาะอุโมงค์ชนิดนี้เป็นการผสมหัวเจาะอุโมงค์ของนายเกตเฮดกับใบพัดตัดเฉือนดินแบบหมุน

ในปี ค.ศ. 1927 อุโมงค์ฮอลแลนด์ (Holland tunnel) ได้ถูกสร้างขึ้นลอดใต้แม่น้ำฮัดสัน (Hudson river) ในมหานครนิวยอร์ก ด้วยหัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 9.1 เมตร ซึ่งยังคงใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

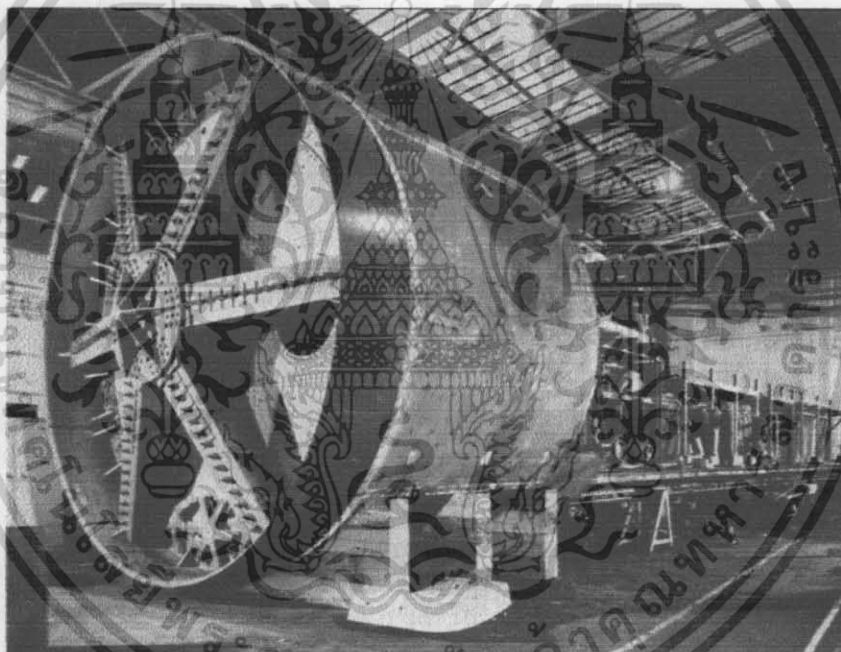
ในช่วงปีค.ศ. 1939 ถึง 1941 มีการเจาะอุโมงค์รถไฟใต้ดินในเมืองชิคาโก (Chicago subway) ผ่านดินเหนียวอ่อน โดยใช้หัวเจาะอุโมงค์แบบปิด (Blind shield) ซึ่งเป็น

การดันหัวเจาะให้ดินเคลื่อนผ่านหน้าต่างด้านหน้าหัวเจาะเข้ามา
ความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบขนส่งมวลชนในชิคาโกในปัจจุบัน

อุโมงค์รถไฟใต้ดินนี้มี

ต่อมาในปี ค.ศ. 1959 ระบบป้องกันดินด้านหน้าด้วยของเหลวได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศเยอรมนี ซึ่งนำไปสู่การผลิตเครื่องขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้น้ำโคลนหรือ Slurry/Hydro shield เพื่อป้องกันการพังทลายของดินขณะขุดเจาะอุโมงค์เป็นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นเมื่อปีค.ศ. 1967 โดยหัวเจาะนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในประเทศเยอรมนี หัวเจาะชนิดแรกที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เพื่อช่วยป้องกันการพังทลายของดินถูกพัฒนาขึ้นโดย Wayss & Freytag

จากนั้นในปี ค.ศ. 1966 ได้เริ่มมีการพัฒนาเครื่องขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) ซึ่งกลายเป็นเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ยอดนิยมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.5 หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Slurry/Hydro shield ซึ่งทำงานโดยการใช้แรงดันน้ำโคลนหรือ Slurry ป้องกันดินพังด้านหน้าของอุโมงค์

ในประเทศไทยก็มีการก่อสร้างอุโมงค์เกิดขึ้นมากมายนับตั้งแต่ในสมัย
พระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 ได้ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ก่อสร้าง
อุโมงค์รถไฟที่เขาขุนตาล จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นอุโมงค์ที่เจาะผ่านชั้นหิน หลังจากนั้นก็มีงาน
ก่อสร้างอุโมงค์เกิดขึ้นมากมาย ซึ่งที่จริงแล้วการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์แบบหัวเจาะ

อุโมงค์ ได้เกิดขึ้นในประเทศไทยนับสิบปีแล้ว นับตั้งแต่โครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง จนกระทั่งในปีพ.ศ. 2539 โครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล ก็ได้เกิดขึ้น ซึ่งโครงการดังกล่าวถือเป็นอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของกรุงเทพฯ อุโมงค์รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลนี้เป็นอุโมงค์คู่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.30 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 30 เซนติเมตร มีระยะทางของอุโมงค์ยาวประมาณ 20 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีโดยสาร 18 สถานี โดยจะสามารถให้บริการผู้โดยสารได้ไม่น้อยกว่า 40,000 คน ต่อชั่วโมงต่อทิศทาง อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินแห่งนี้ใช้หvacระบบแรงดันดินสมดุลถึง 8 ตัวด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยหvacลงที่ระดับลึกเฉลี่ย 21 เมตร จากผิวดิน ซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งเป็นชั้นดินที่เหมาะสมในการก่อสร้างอุโมงค์ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง และระยะเวลาการคงตัวของดินหรือ Stand-up time นานพอสมควร ดังนั้นโอกาสการพังทลายขณะการก่อสร้างน้อยกว่าดินชนิดอื่น โดยปกติแล้วดินในกรุงเทพฯ จะมีลักษณะเป็นชั้นๆ เรียงลงมาตั้งแต่ชั้นดินที่เหนียวอ่อน ซึ่งลึกจากผิวดินจนถึงความลึกที่ 15 เมตร จากนั้นก็จะเป็นดินเหนียวแข็งจาก 15 เมตร จนถึงประมาณ 25 เมตร และตามด้วยชั้นทราย ชั้นแรก ซึ่งมีความลึกตั้งแต่ 25 เมตรลงไป แต่การหvacอุโมงค์นี้ยังคงเป็นงานที่มีความท้าทายมาก เพราะต้องหvacอุโมงค์ใต้ย่านการจราจรที่แออัดของกรุงเทพฯ คือ ใต้ถนนพระราม 4 ถนนอโศกดินแดง ถนนรัชดาภิเษก ถนนลาดพร้าว และถนนพหลโยธิน ซึ่งในบางกรณีต้องหvacผ่านฐานรากของสะพานข้ามแยก เช่น สะพานไทย-ญี่ปุ่น และสะพานข้ามแยกลาดพร้าว จึงต้องมีการย้ายฐานรากของสะพานด้วยวิธี Underpinning นอกจากนี้แล้วการหvacอุโมงค์ยังอาจส่งผลกระทบต่อผิวดินและอาคารข้างเคียงตามแนวอุโมงค์ได้ จึงต้องทำการหvacด้วยความระมัดระวังอย่างสูงและจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิค เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวของดินและอาคารขณะทำการหvacอุโมงค์ การติดตั้งเครื่องมือวัดในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกนี้ ถือว่ามีความครบถ้วนสมบูรณ์ที่สุดแห่งหนึ่งของโลกก็ว่าได้

ตารางที่ 2.1 ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์

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

2.4 ตัวอย่างของอุโมงค์

2.4.1 อุโมงค์ในประวัติศาสตร์

- Qanat หรือ Kareez ของเปอร์เซียเป็นอุโมงค์ส่งน้ำสำหรับประชาชน โดยอุโมงค์ Qanat ที่เก่าและใหญ่ที่สุดอยู่ในเมือง Iranian แห่ง Gonabad ซึ่งสร้างขึ้นเมื่อ 2700 ปีก่อน โดยเป็นอุโมงค์ที่ใช้สำหรับส่งน้ำและทำเกษตรกรรมสำหรับประชาชน 40,000 คน โดยมีความลึก 360 เมตร มีความยาวทั้งสิ้น 45 กิโลเมตร

- อุโมงค์ Eupalinian aqueduct บนเกาะ Samos (Ionian) สร้างขึ้นเมื่อ 520 ปีก่อนคริสตกาล โดยวิศวกรซึ่งมีชื่อว่า Eupalinos ซึ่งสร้างอุโมงค์โดยการเจาะภูเขา ด้วยทีมงาน 2 ทีมเจาะจาก 2 ฝั่งภูเขาเข้าบรรจบกันตรงกลาง ซึ่งใช้เวลาการก่อสร้างเป็นระยะเวลา 5-15 ปี โดยภูเขาแห่งนี้เป็นหินปูน เล่ากันว่าทาสที่มาขุดเจาะอุโมงค์แห่งนี้ต้องเสียชีวิตกันเป็นจำนวนมาก อุโมงค์แห่งนี้ถูกสร้างและซ่อมแซมขึ้นใหม่อีกครั้งโดยสถาปนิกชาวเยอรมัน ในศตวรรษที่ 19 อุโมงค์มีความยาว 1030 เมตร ปัจจุบันนี้นักท่องเที่ยวสามารถไปเยี่ยมชมอุโมงค์แห่งนี้ได้

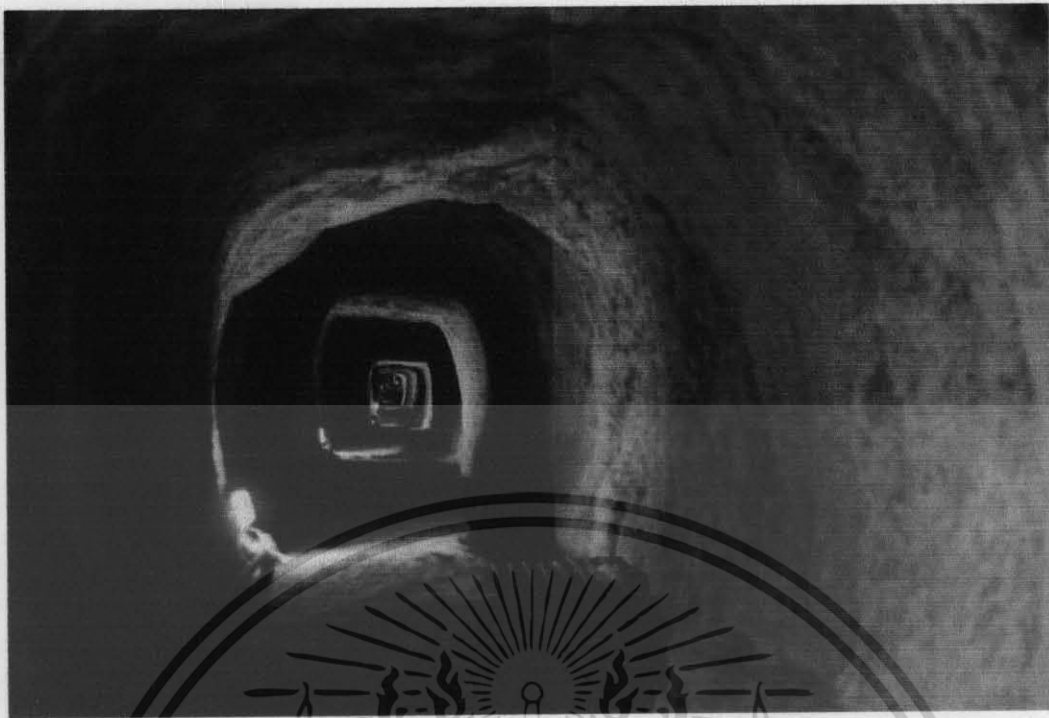
- อุโมงค์ Sapperton บนคลอง Thames & Severn ในประเทศอังกฤษ ขุดผ่านภูเขาเปิดใช้ในปี ค.ศ. 1789 ซึ่งมีความยาว 3.5 กิโลเมตร และให้เรือขนถ่านหินแล่นผ่านได้

- อุโมงค์ Box tunnel ซึ่งเปิดใช้ในปี ค.ศ. 1841 ซึ่งเป็นอุโมงค์ทางรถไฟที่ยาวที่สุดในโลกในขณะนั้น โดยมีระยะความยาวทั้งสิ้น 2.9 กิโลเมตร

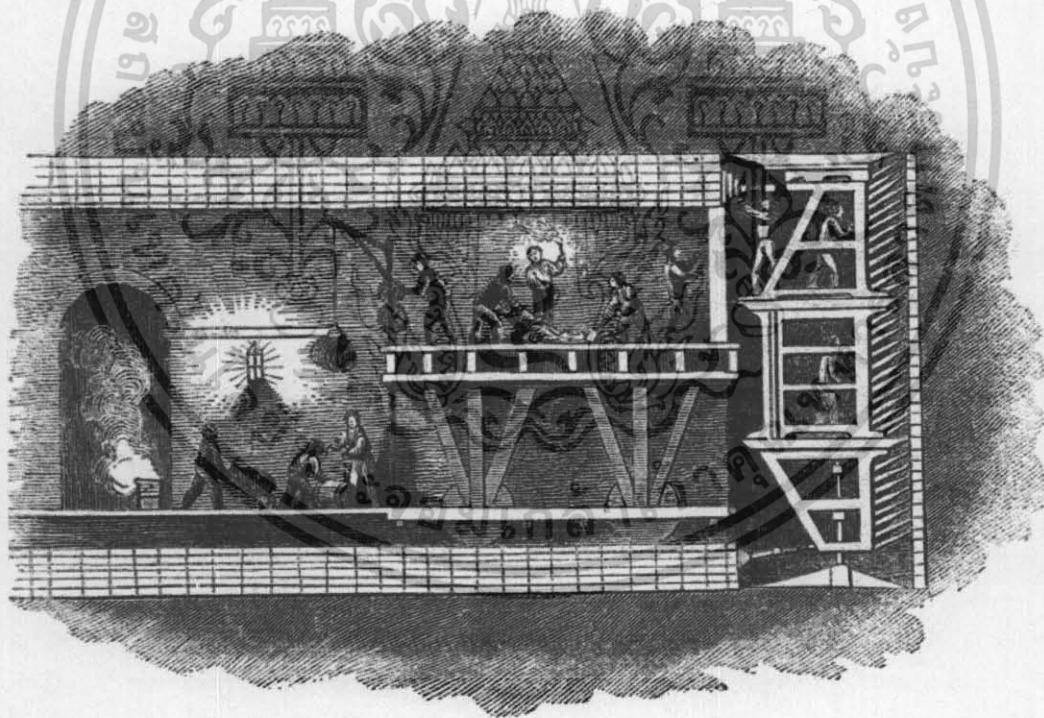
- อุโมงค์ Thames tunnel ซึ่งสร้างขึ้นโดย Marc Isambard Brunel และบุตรชายของเขา Isambard Kingdom Brunel เปิดใช้ในปี ค.ศ. 1843 เป็นอุโมงค์แห่งแรกที่ขุดเจาะอุโมงค์ได้น้ำ และเป็นอุโมงค์แห่งแรกที่ใช้หัวเจาะอุโมงค์ ปัจจุบันอุโมงค์แห่งนี้เป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางรถไฟลอนดอนตะวันออก (East London line) ของรถไฟใต้ดินลอนดอน (London underground)

- อุโมงค์ Cobble hill และ อุโมงค์ Murray hill ในเมืองนิวยอร์ก เป็นอุโมงค์รถไฟที่เก่าแก่ที่สุดที่ขุดเจาะได้แนวนอน โดยเปิดใช้ในปี ค.ศ. 1850

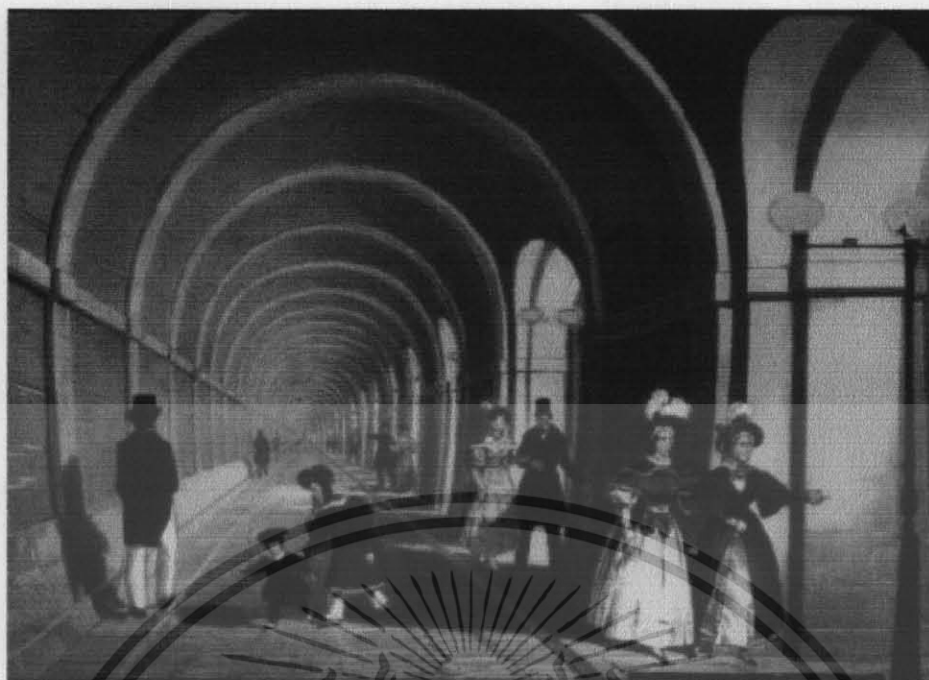
- อุโมงค์ส่วนที่เก่าที่สุดของรถไฟใต้ดินลอนดอน ก่อสร้างขึ้นโดยใช้วิธีขุดเจาะอุโมงค์แบบ Cut and cover ในทศวรรษที่ 1860



รูปที่ 2.6 อุโมงค์ Eupalinos tunnel



รูปที่ 2.7 แผนภาพการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้ก่อสร้างอุโมงค์ The Thames tunnel
ในกรุงลอนดอน



รูปที่ 2.8 การตกแต่งภายในของอุโมงค์แม่น้ำเทมส์ ยุคกลางศตวรรษที่ 19

2.4.2 อุโมงค์ที่ยาวที่สุด

- อุโมงค์ Seikan tunnel ในประเทศญี่ปุ่นอุโมงค์รถไฟที่ยาวที่สุดในโลกโดยมีความยาวทั้งสิ้น 53.9 กิโลเมตร (33.4 ไมล์) โดยมีอุโมงค์ส่วนที่อยู่ใต้ทะเลยาวถึง 23.3 กิโลเมตร (14.5 ไมล์)
- อุโมงค์ Channel tunnel ที่ลอดผ่านช่องแคบอังกฤษเชื่อมระหว่างประเทศฝรั่งเศสและอังกฤษเป็นอุโมงค์ที่ยาวที่สุดอันดับสองของโลก โดยมีความยาวทั้งสิ้น 50 กิโลเมตร (31 ไมล์) โดยมีอุโมงค์ส่วนที่อยู่ใต้ทะเลยาว 39 กิโลเมตร (24 ไมล์)
- อุโมงค์ Laerdal tunnel ในประเทศนอร์เวย์ที่เชื่อมเมือง Laerdal และเมือง Aurland เป็นอุโมงค์ถนนที่ยาวที่สุดในโลก โดยมีความยาวทั้งสิ้น 24.5 กิโลเมตร (15.2 ไมล์)
- อุโมงค์ St. Gotthard tunnel จาก Göschenen ไปยัง Airolo ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ซึ่งเปิดใช้งานเมื่อวันที่ 5 กันยายน ค.ศ. 1980 เป็นอุโมงค์ทางหลวงที่ยาวเป็นอันดับสองของโลกโดยมีความยาวทั้งสิ้น 16.32 กิโลเมตร (10.14 ไมล์)
- อุโมงค์ Solbakk tunnel ในเมือง Stavanger ประเทศนอร์เวย์ซึ่งมีกำหนดเปิดใช้ในปี ค.ศ. 2015 มีความยาวทั้งสิ้น 14 กิโลเมตร ซึ่งทำให้อุโมงค์แห่งนี้เป็นอุโมงค์ถนนใต้น้ำที่ยาวที่สุดในโลก อุโมงค์แห่งนี้มี 4 ช่องจราจร มีขีดจำกัดความเร็ว 90 กิโลเมตร/ชั่วโมง

- อุโมงค์ Hsuehshan tunnel ในภาคเหนือของประเทศไต้หวันซึ่งเปิดใช้เมื่อวันที่ 16 มิถุนายน ค.ศ. 2006 มีความยาวทั้งสิ้น 12.955 กิโลเมตร (8.05 ไมล์) อุโมงค์แห่งนี้เป็นอุโมงค์ถนนที่ยาวที่สุดในทวีปเอเชีย โดยมีความยาวเป็นอันดับ 3 ของโลก

- อุโมงค์ Rennsteig tunnel ในภาคกลางของประเทศเยอรมนีที่วิ่งลอดป่า Thuringian มีความยาวทั้งสิ้น 8.5 กิโลเมตร เป็นอุโมงค์ที่ยาวที่สุดของประเทศเยอรมนีในขณะนี้

- อุโมงค์ North Cape tunnel ในภาคเหนือของประเทศนอร์เวย์ เชื่อมต่อเกาะ Magerya กับแผ่นดินใหญ่ เป็นอุโมงค์ถนนที่ลอดผ่านใต้ทะเลที่ยาวที่สุดในโลก โดยเปิดใช้ในปี ค.ศ. 1999 มีความยาวทั้งสิ้น 7 กิโลเมตร มีความลึก 212 เมตรจากระดับน้ำทะเล

- อุโมงค์ Päijänne tunneli เป็นอุโมงค์ที่ยาวที่สุดในโลกที่เจาะอุโมงค์เข้าไปในหุบเขา ตั้งอยู่ที่ทางใต้ของประเทศฟินแลนด์ โดยมีความยาวทั้งสิ้น 120 กิโลเมตร โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ส่งน้ำไปยังเมืองหลวงเฮลซิงกิ

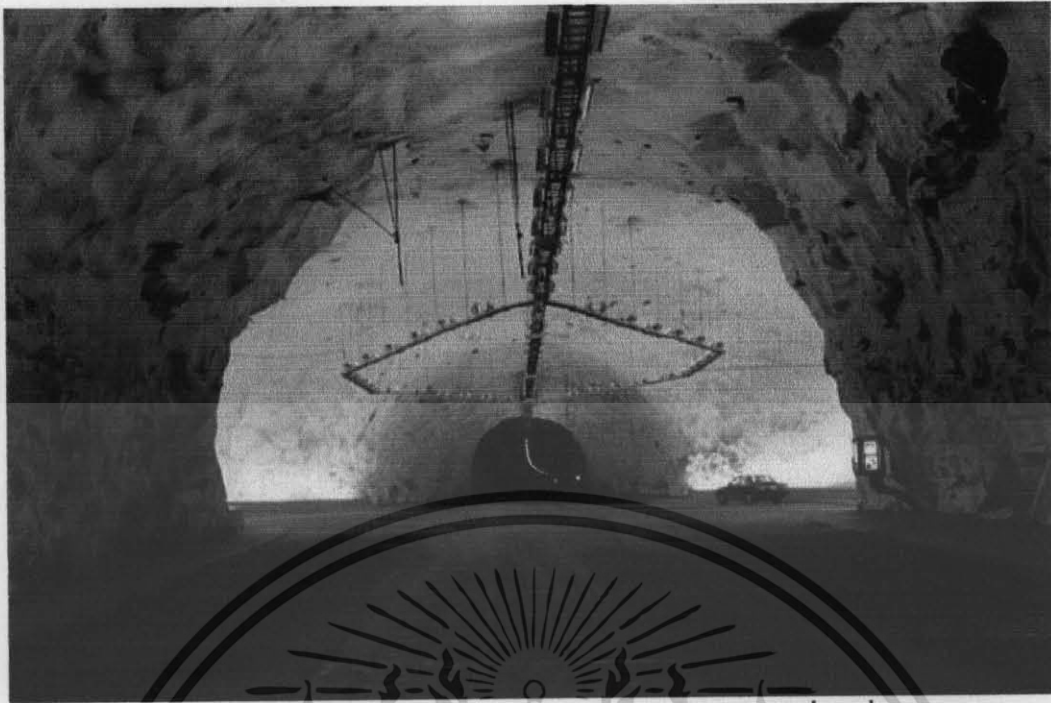
2.4.3 อุโมงค์ที่น่าสนใจ

- อุโมงค์ Lincoln tunnel ที่เชื่อมระหว่างนิวยอร์กซิตีและนิวยอร์กเป็นอุโมงค์ที่คับคั่งไปด้วยยานพาหนะที่สุดในโลก โดยมียานพาหนะใช้บริการถึง 120,000 คัน/วัน

- อุโมงค์ Williamson's tunnels ในเมืองลิเวอร์พูลถูกสร้างด้วยงบประมาณที่สิ้นเปลืองมาก โดยเป็นอุโมงค์ที่สิ้นเปลืองที่สุดในโลก

- โครงการอุโมงค์ Chicago Deep มีเครือข่ายอุโมงค์ที่ยาวถึง 109 ไมล์ (197 กิโลเมตร) ถูกออกแบบเพื่อลดปัญหาน้ำท่วมในเขตชิคาโก เริ่มสร้างในปี ค.ศ. 1970 โดยคาดว่าจะแล้วเสร็จในปี ค.ศ. 2019

- อุโมงค์ Fenghuoshan บนสายทางรถไฟชิงไห่-ทิเบต เป็นอุโมงค์สำหรับทางรถไฟที่ยาวที่สุดในโลก



รูปที่ 2.9 อุโมงค์ Laerdalstunnel ในประเทศนอร์เวย์ – อุโมงค์ถนนที่ยาวที่สุดในโลก



รูปที่ 2.10 อุโมงค์ Houyet ในประเทศเบลเยียม

71953



รูปที่ 2.11 อุโมงค์ Gotthard Base tunnel



รูปที่ 2.12 อุโมงค์ The Thames tunnel ในปี 2005 ของทางรถไฟใต้ดินลอนดอน

บทที่ 3

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

3.1 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน

อุโมงค์ในดินอ่อนสามารถขุดได้โดย Hand mine หรือ Tunneling machine โดยใช้หัวเจาะหรือปราศจากการใช้หัวเจาะก็ได้ เหนือการเลือกวิธีการขุดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและพฤติกรรมที่คาดการณ์ไว้ของดิน ซึ่งบรรยายไว้ในรูปของ Terzaghi's behavioristic classification

การขุดเจาะอุโมงค์ทำสำเร็จได้โดยการเลือกวิธีการขุดเจาะที่เหมาะสม กับ พฤติกรรมของดิน และประเมินลักษณะของดินได้อย่างถูกต้อง การประเมินถือเป็นส่วนสำคัญของการทำ Geotechnical investigation ซึ่งขึ้นอยู่กับ การจำแนกประเภทโดยลักษณะเฉพาะและ ลักษณะทั่วไปที่ได้กล่าวไว้แล้ว และประเมินค่าพารามิเตอร์บางตัวเช่น Grain size distribution (การกระจายขนาดของเม็ดดิน) , กำลังรับแรงของดิน (Strength of soil) และค่าความซึมได้ของดิน (Permeability of soil) สถานะน้ำใต้ดิน ในทางปฏิบัติแล้วการแสดงความเกี่ยวพันระหว่าง คุณสมบัติของดินและพฤติกรรมของดิน เป็นไปได้ยากและถูกมีอิทธิพลโดยแฟกเตอร์ทางธรณีวิทยา (Non-geotechnical factors) เช่น ขนาดของอุโมงค์ ต่อไปนี้คือ ความสัมพันธ์ของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์กับ 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

Reveling ground

Soil included : Sand and 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 and loose gravel

Method : การขุดแบบ Hand tunneling ให้ติดตั้ง Fore-poling ค้ำยันที่ Roof หรือขุดโดยใช้หัวเจาะสำหรับอุโมงค์ขนาดใหญ่

Flowing ground

Soil included : Uncemented sands and silt ใต้น้ำ

Method : ใช้ Shield tunneling ร่วมกับการใช้ Compressed air หรือ Groundwater lowering

Squeezing ground

Soil included : ดินเหนียวอ่อนมากหรือดินเหนียวแข็ง

Method : การขุดแบบ Hand tunneling โดยใช้หัวเจาะในดินเหนียวอ่อน และใช้ Compressed air

3.2 วิธีขุดแบบ Heading and bench excavation

Heading and bench method เป็นการขุดเจาะอุโมงค์แบบ Hand mining (ขุดโดยใช้คน หรือ เครื่องจักรในการขุดเช่น Back hoe) ซึ่งสามารถใช้กับอุโมงค์ขนาดใหญ่ได้ วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนและใช้กันทั่วไปก่อนที่จะมีการนำเอาเครื่องขุดเจาะเข้ามาใช้ และยังถือว่าเป็นวิธีการที่ประหยัดที่สุดสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ที่ไม่ยาวมาก เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 15 ฟุต และสภาพดินเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว (Golder Associates, 1976)

การปฏิบัติการ : ส่วน Heading หรือ ส่วนครึ่งบนของ Tunnel face จะถูกขุดหลังจากทำการขุดส่วนครึ่งล่างแล้ว (ซึ่งเรียกว่า Bench) ซึ่งเราจะต้องรีบทำโครงสร้างค้ำยัน ส่วน Heading ไว้ โดยโครงสร้างค้ำยันประกอบด้วย Breastboards ซึ่งจะติดตั้งในแนวระดับค้ำไว้กับเสาไม้ในแนวดิ่ง (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 ทำงาน

เกี่ยวกับการขนส่งลำเลียง และติดตั้ง Support และอีก 14 คน ทำหน้าที่เกี่ยวกับงานขุดและติดตั้ง Lining อัตราค่าหัวหน้าโดยเฉลี่ยประมาณ 20 ฟุตต่อ 24 ชั่วโมงการทำงานในการเลื่อนตัว 3 ครั้ง ไม่รวมการติดตั้ง Final lining

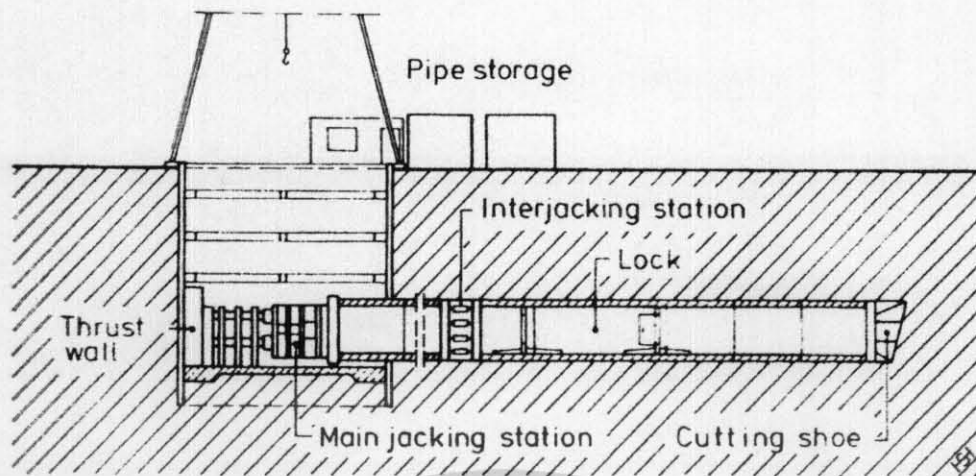
ความเหมาะสม : เหมาะกับดินที่สามารถคงรูปได้เอง, ดินเหนียวแข็ง, หิน และ กรวดที่อยู่ในสภาพแน่นแล้วถ้าเป็นดินสภาพไม่ดีจะต้องใช้วิธีการอัดอากาศหรือใช้สารละลายที่มีความหนาแน่นสูงช่วย

ข้อดีของวิธี Heading and bench สามารถปรับให้ใช้ได้กับดินชนิดต่างๆ เช่น ดินที่เกิดจากการทับถม , ดินเหนียวอ่อน , Silts และ Sand หรือในดินที่มีก้อนหินขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำให้การขุดเจาะโดยใช้หัวขุดเจาะจะงัดได้ และยังสามารถใช้กับการขุด Mixed face (มีดินชนิดต่างๆ ปนกัน ในตำแหน่งที่กำลังขุด Tunnel face) ซึ่งอาจเป็นดินอ่อนปนกับหินก็ได้ หรือสามารถใช้ร่วมกับการใช้ หัวเจาะแบบ Compressed air ในการขุดดินที่มีความเสถียรภาพของดินน้อย ค่าใช้จ่าย Initial capital cost ต่ำ และ ไม่ต้องการคนงานที่มีความชำนาญด้านเครื่องจักรกลที่ซับซ้อนแบบหัวเจาะ

ข้อเสียของ Heading and bench คืออัตราการขุดต่ำและต้องใช้แรงงานคนมาก หากเทียบกับการใช้หัวเจาะแล้ว การใช้หัวเจาะ ในดินที่มีความเหมาะสม จะมีอัตราการขุดเจาะต่อวันเป็น 2-3 เท่าของการขุดแบบ Heading and bench ในอุโมงค์ขนาดเดียวกัน

3.3 Pipe Jacking

อีกทางเลือกหนึ่งของการใช้เครื่องขุดเจาะ (Mole) กับ Lining รูปแบบต่าง ๆ เมื่อเร็วๆ นี้ โครงการก่อสร้าง อุโมงค์ลำเลียงสิ่งปฏิกูล (Sewer tunnel) ขนาดเล็กได้ใช้ระบบเครื่องเจาะแบบ Full-face mining machine กับระบบการดัน (Jacking) Lining เข้าไปด้วย ขณะที่ทำการเจาะไปข้างหน้า ดังนั้นจึงไม่มีการทิ้งช่วงให้ดินที่ถูกเจาะเกิดการยุบตัว เพราะการขุดเจาะไปข้างหน้าเกิดขึ้นพร้อมกับการดัน Leading pipe เข้าไปด้วย Sulinski (1972) ได้ให้รายละเอียดของการก่อสร้าง Sewer tunnel ใน Chicago ซึ่งเรานำวิธีใช้วิธีนี้ทำให้ประสบความสำเร็จในการประมูล ขณะที่บริษัทอื่นใช้วิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม รูปที่ 3.1 แสดงวิธี Jacking method



รูปที่ 3.1 แสดงวิธี Jacking method (จาก Mechanised shield tunneling)



รูปที่ 3.2 แสดงวิธี Jacking method ภายในอุโมงค์

3.4 การขุดเจาะอุโมงค์โดยวิธีใช้หัวขุดเจาะ

3.4.1 ประวัติความเป็นมา

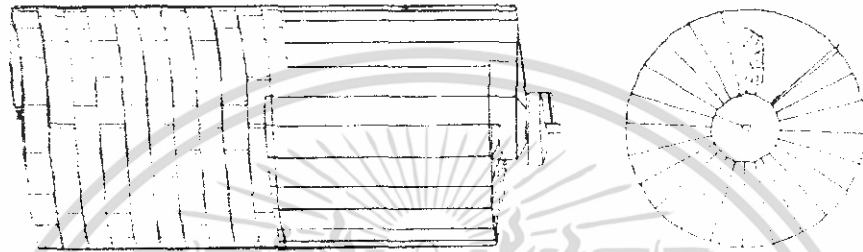
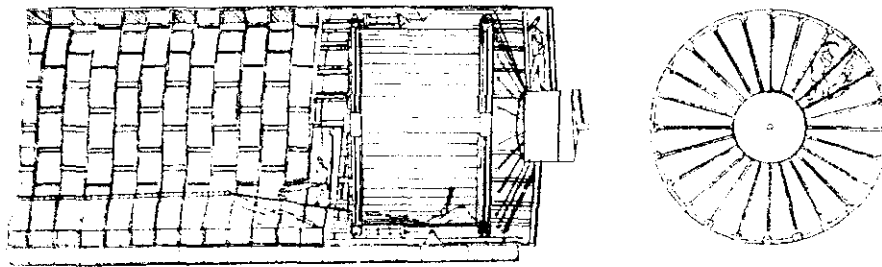
คำว่า Shield นั้นแปลว่า เกราะป้องกัน แต่ในที่นี้ Shield หรือก็คือหัวเจาะจะถูกติดตั้งไว้ภายในบริเวณที่มีการขุดเจาะอุโมงค์ โดยทำหน้าที่ในการป้องกันการยุบตัวของผนังหรือพื้นที่ด้านบนของส่วนที่หัวเจาะอุโมงค์เพิ่งได้ถูกขุดเจาะขึ้น และไม่ได้มีเครื่องมืออื่นใดที่ช่วยในการลำเลียงดินไม่ให้พังทลาย ทว่าเมื่ออุโมงค์ถูกขุดเจาะในดินที่มีเสถียรภาพ จะเห็นได้ชัดว่า ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้หัวเจาะอุโมงค์ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันความสำคัญของหัวเจาะไม่ใช่เป็นเพียงแค่ช่วยในการลำเลียงตัวอุโมงค์เพียงเท่านั้น แต่มันยังเป็นเครื่องมือในการขุดเจาะอุโมงค์ให้ยาวออกไปอีกด้วย ดังนั้น เมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่มีสภาพดี จึงเป็นธรรมดาที่จะมีการใช้หัวเจาะแบบง่ายๆ เพื่อช่วยทำให้มีพื้นที่พักสำหรับสิ่งก่อสร้างส่วนต่างๆ ทั้งชุดประกอบขึ้นส่วนผนังอุโมงค์ หน่วยลำเลียงดิน อุปกรณ์เครื่องมือการ Grouting ขณะเดียวกันหัวเจาะก็ยังเปรียบเสมือนเป็นตัวประสานงานระหว่างแนวอุโมงค์ที่ตึ้งขึ้นมาและด้านหน้าของอุโมงค์ ทำให้การขุดเจาะตัวอุโมงค์ให้ยาวออกไปนั้นสามารถทำไปพร้อมกับการขุดดินที่ส่วนหน้าได้อย่างต่อเนื่อง

การใช้หัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์เริ่มจากหัวเจาะสำหรับดินอ่อนที่พัฒนาขึ้นโดย Marc Isambard Brunel ในประเทศอังกฤษ โดย Brunel ได้คิดค้นหัวเจาะวงกลม 2 ชนิดสำหรับมาอาบมาใช้งาน ซึ่งได้จดลิขสิทธิ์ไว้ในปี 1818 หัวเจาะประกอบด้วย หลายส่วนที่แตกต่างกัน ในแต่ละส่วนนี้ คนงานหนึ่งคนสามารถทำงานได้อย่างอิสระและปลอดภัย หัวเจาะประเภทแรกคือ 'screw shield' ซึ่งผิวของหัวเจาะทั้งหมดถูกดันไปข้างหน้าโดยอาศัยแม่แรงไฮดรอลิก (ดังรูปที่ 3.3) หัวเจาะชนิดนี้เรียกได้ว่าเป็นต้นแบบของหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance) ในปัจจุบัน หัวเจาะประเภทที่สอง Brunel แบ่งหัวเจาะเป็นส่วนเล็กๆ ซึ่งสามารถถูกทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยแม่แรง ในขณะที่เดียวกับที่ คนงานในแต่ละส่วนย่อย (Cell) ภายในหัวเจาะจะลำเลียงเอาดินออกด้านหน้าหัวเจาะ แต่ละส่วนย่อยต่างก็สามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน (ดังรูปที่ 3.4) หลังจากที่มีการขุดเจาะในแต่ละรอบได้เสร็จสิ้นลง Thrust jack ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่ด้านหลังของหัวเจาะก็จะมีปฏิกิริยาต่อแนวอุโมงค์ที่ตึ้งขึ้นใหม่หรือ ต่อกับวงแหวนของแม่แรงหลัก และทำให้หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า พร้อมกันกับด้านหน้าของหัวเจาะและอุปกรณ์ที่ช่วยในการวางแผนการขุดเจาะ

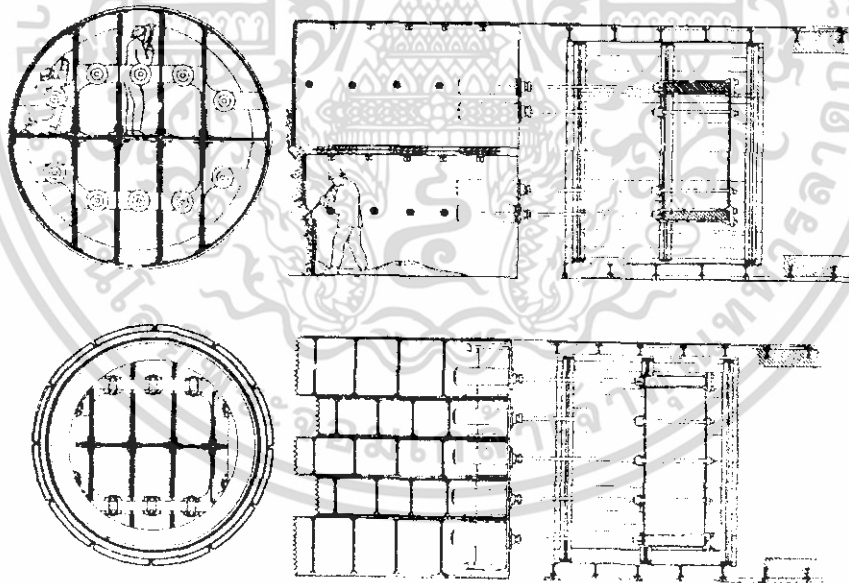
โครงการขุดเจาะอุโมงค์ใต้แม่น้ำเทมส์ในลอนดอนช่วยให้ Brunel ได้เข้าใจหลักการดังกล่าว หัวเจาะแบบ Brunel ทำขึ้นมาจากเหล็กดัด มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และประกอบไปด้วย ช่องที่ติดกันจำนวน 12 ช่อง แต่ละช่องมีความกว้างประมาณ 1 เมตรซึ่งแบ่ง

ออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ ได้แก่ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง แต่ละช่องจะอยู่บนขาที่หมุนได้ 2 อันที่ติดอยู่ด้วยลูกบอลที่ยึดอยู่กับพื้นแนวนๆ 2 อัน แต่ละส่วนจะมีคนงานหนึ่งคน ดังนั้น คนงานทั้งหมดจึงเป็น 36 คน หัวเจาะจะทำงานไปตามแบบดังกล่าว คือ เริ่มจาก แผ่นไม้จะถูกดันเข้าไปในดินโดยอาศัยเพลลาหมุนในแต่ละครั้งเมื่อแผ่นไม้ถอนตัวจากดิน ดินจะถูกขุดออกประมาณ 6 นิ้ว จากนั้นแผ่นไม้ก็จะถูกติดตั้งกลับเข้าที่เดิมและยึดอยู่ด้วยเพลลาหมุน อิฐจะถูกก่อไว้ด้านหลังของหัวเจาะและทำหน้าที่เป็นที่ค้ำสำหรับช่องทั้งหมด กระบวนการทั้งหมดนี้ก็คือหนึ่งรอบของการขุดเจาะ อุโมงค์นี้เริ่มต้นขุดเจาะในปี 1825 และสำเร็จลงอย่างยากเย็นในปี 1843 ภายหลังจากที่ผ่านน้ำท่วมรุนแรงไปถึง 5 ครั้ง ต่อมาการใช้วิธี Compressed air ในหัวเจาะอุโมงค์ก็ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นครั้งแรกโดย Loed Cochran จากนั้นในปี 1869 หัวเจาะอุโมงค์แบบตอนเดียวได้ถูกจดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก โดย Peter W. Barlow ในประเทศอังกฤษ ต่อมา James Henry Greathead ได้ขุดอุโมงค์ได้แม่น้ำเทมส์โดยใช้หัวเจาะแบบ Circular สำหรับในตอนแรก แนวอุโมงค์หลักส่วนต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ หัวเจาะ Greathead 's circular นั้นเป็นต้นแบบของหัวเจาะแบบส่วนหน้าเปิดที่พัฒนาขึ้นมาในภายหลัง หัวเจาะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่หมุนหัวไฟตัดที่ประกอบไปด้วยหลายใบพัดประกอประกกัน ในปี 1959 ได้นำเอาน้ำเป็นตัวค้ำดันหน้าอุโมงค์สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ระบายน้ำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.35 เมตรในประเทศเยอรมนี ในปี 1967 หัวเจาะแบบ Slurry ที่ประกอบด้วยวงล้อสำหรับตัดและระบบกำจัดดินแบบไฮดรอลิก ได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น สำหรับหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance : EPB) ได้ถูกเริ่มใช้ในปี 1966 ในประเทศญี่ปุ่นเช่นเดียวกัน รายละเอียดของพัฒนาการต่างๆ ของหัวเจาะเหล่านี้สามารถหาได้จากการศึกษาของ Stack (1982) และ Maidel et al.(1996)

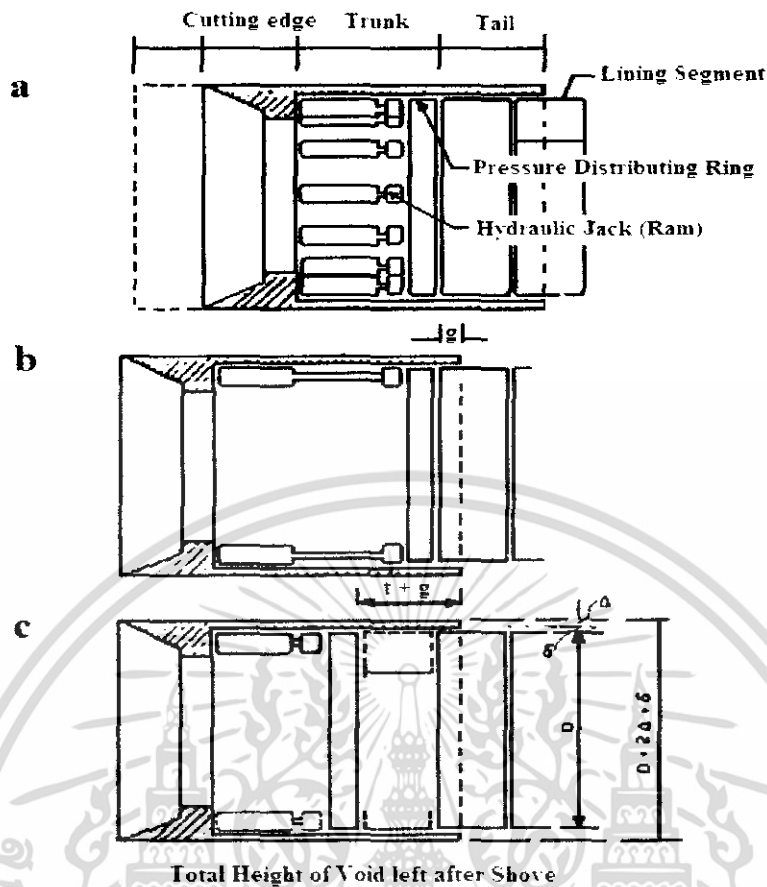
การใช้หัวเจาะอุโมงค์แบบผสมในการเจาะอุโมงค์โดยการใช้อัดอากาศร่วมกับการ grouting ด้วยสารเคมี เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของหน้าตัดดินนั้นไม่เหมาะสมในเรื่องความปลอดภัยและราคา จากจุดนี้จึงนำไปสู่การพัฒนาหัวเจาะ Mechanical shield ที่เป็นแบบส่วนหน้าปิด (Close-face) เรียกว่า Slurry shield และ Earth pressure balance (EPBS) Slurry shield ถูกพัฒนาขึ้นในยุโรป และ EPBS ถูกพัฒนาขึ้นในญี่ปุ่นในปี 1974 (NAITOH , 1985)



รูปที่ 3.3 Marc Brunel's "screw" shield (1818)



รูปที่ 3.4 Marc Brunel's "compartment" shield (1818)



รูปที่ 3.5 หลักการของการขุดเจาะอุโมงค์โดยหัวเจาะอุโมงค์

3.4.2 หลักการทำงานของหัวเจาะอุโมงค์

หลักการทั่วๆ ไปของหัวเจาะมีพื้นฐานมาจาก เหล็กทรงกระบอกที่ประกอบขึ้นมา และดันไปข้างหน้าตามแนวแกนอุโมงค์ ในขณะที่เดียวกันก็ทำหน้าที่ขุดดินออกไปด้วย หัวเจาะ ป้องกันช่องว่างที่ถูกขุดออกจนกระทั่งแนวอุโมงค์ขุดขึ้นดินหรือปลายของแนวอุโมงค์ได้ถูกติดตั้งขึ้น หัวเจาะจะต้องทนทานต่อความดันของดินรอบๆ และป้องกันการไหลของน้ำใต้ดิน ในขณะที่ ช่องว่างเหนือหัวเจาะจะถูกยึดอยู่ด้วยตัวหัวเจาะ การวัดค่าเพื่อป้องกันปากอุโมงค์ จะต้องถูกทำโดย ปรับเปลี่ยนตามสภาพดินและน้ำ การวัดค่า 5 ชนิดที่แตกต่างกันสำหรับรักษาเสถียรภาพของปาก อุโมงค์ได้ถูกอธิบายไว้ วิธีการนี้เป็นข้อดีสำคัญสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ ที่ช่วยให้ดิน สามารถรักษาสภาพของตนเองไว้ได้ตลอดการขุดเจาะ

นอกจากวิธีการในการคำนวณตัวอุโมงค์แล้ว วิธีการการขุดและลำเลียงเอาดินออกก็ ถือเป็นปัจจัยสำคัญของหัวเจาะ การขุดเจาะแบบใช้มือ เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดและใช้ในกรณีพิเศษ เท่านั้น เช่น การขุดเจาะในระยะสั้นๆ ภายใต้สภาพทางธรณีวิทยาที่มีลักษณะเฉพาะ อย่างไรก็ตาม

วิธีปกติก็คือการใช้เครื่องมือในการขุดเจาะซึ่งแบ่งออกเป็น การขุดเจาะแบบ Partial-face และ Full-face หัวเจาะแบบ Partial-face ดังแสดงไว้ใน (เช่น ที่แบ่งเป็น หัวเจาะแบบ Partially open) อุปกรณ์อย่าง เครื่องมือขุดเจาะและใบพัดแบบพิเศษ ได้ถูกนำมาใช้ ซึ่งจะควบคุมด้วยคนหรือเป็นแบบอัตโนมัติก็ได้ สำหรับการขุดเจาะแบบ Full-face (เช่น หัวเจาะแบบ Close-face) นั้นขึ้นอยู่กับสภาพของดินที่ทำการขุดเจาะ จะดำเนินการโดย spoke wheel, rim wheel หรือหัวใบพัดแบบปิด

หัวเจาะแบบส่วนหน้าเปิด (Open-face) เป็นหัวเจาะที่ปราศจากระบบที่มีการให้ความดันที่ปากอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยปกติแล้ว หัวเจาะแบบส่วนหน้าเปิด จะถูกใช้在地ที่ไม่มั่นคงหรือในดินน้ำในดินมีระดับต่ำไว้ก่อน ในกรณีที่ต้องการแรงต้านทานที่ปากอุโมงค์เพื่อต้านกับแรงดันจากพื้นดิน ก็ทำได้โดยอาศัยวิธีทางกล (ดังรูปที่ 3.6 b) ถ้าหากหัวเจาะทำงานอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับน้ำ เพื่อเป็นการป้องกันการไหลเข้าของดิน แรงอัดอากาศจะถูกนำมาใช้ หัวเจาะแบบใช้แรงอัดอากาศ (Compressed air shield, ดังรูปที่ 3.6c และรูปที่ 3.9) สามารถนำมาใช้ได้เช่นเดียวกับ หัวเจาะแบบ Partial-face และ Full-face อากาศจะถูกใช้เป็นตัวป้องกันการไหลของน้ำเข้าสู่หัวเจาะอันเนื่องมาจากการหุดกะทันหัน และตัวอุโมงค์รวมไปถึงช่องใต้อากาศที่ถูกอัดนั้นต้องมีเพื่อไม่ให้อากาศสามารถผ่านไป

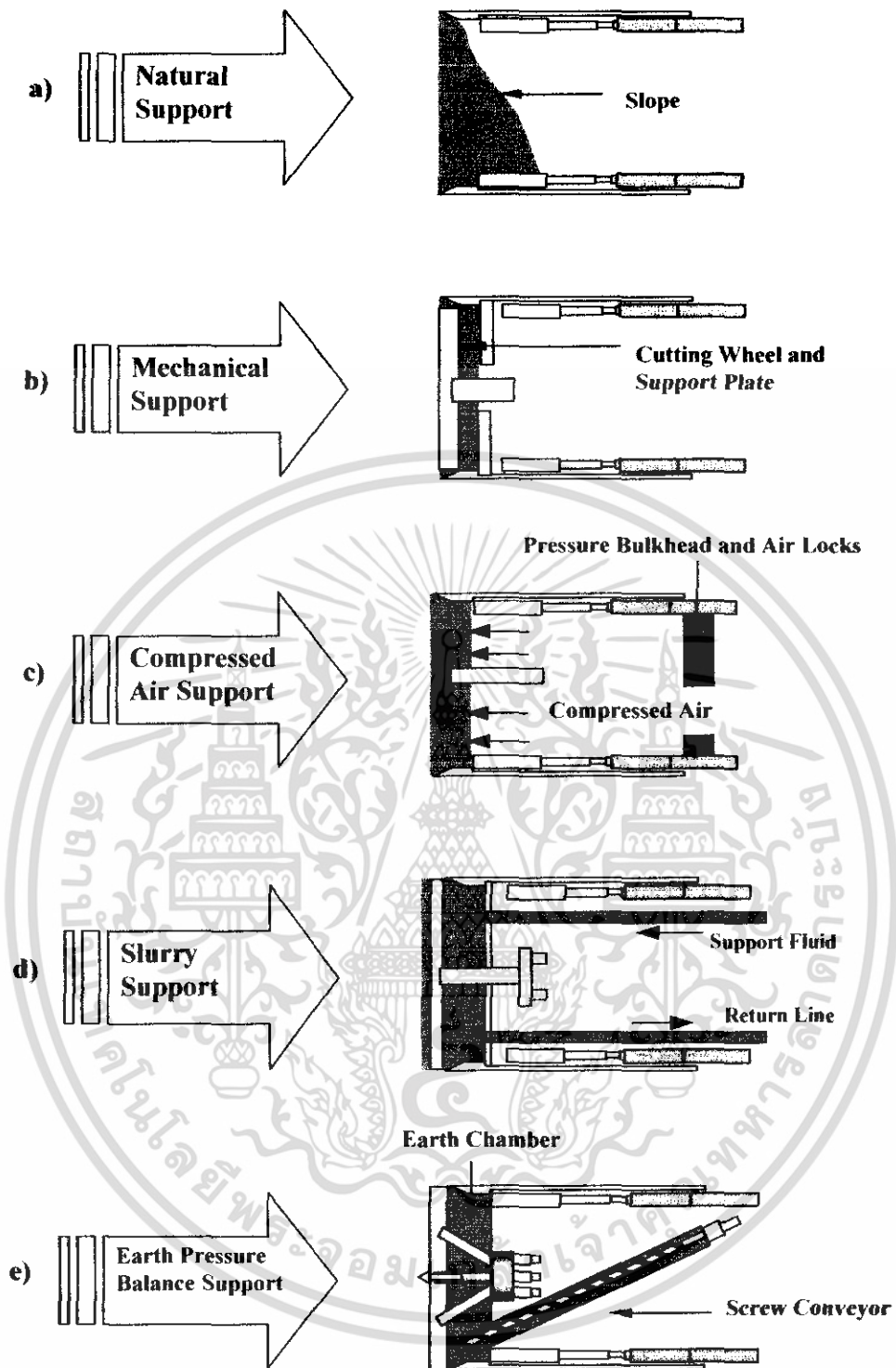
ปากอุโมงค์สามารถค้ำยันและเพิ่มเสถียรภาพโดยแรงดันจากโคลนในหัวเจาะแบบ Slurry (ดังรูปที่ 3.6d และรูปที่ 3.10) สิ่งที่ใช้ในการค้ำยันของปากอุโมงค์ในหัวเจาะแบบ Slurry จะเป็นของเหลวที่มีแรงเสียดทานน้อย ประกอบไปด้วยน้ำและองค์ประกอบเสริมซึ่งสามารถก่อตัวเป็นชั้นที่ไม่สามารถผ่านเข้าได้ที่บริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและดิน ชั้นนี้จะส่งผ่านแรงดันของของเหลวที่ใช้ค้ำยันไปยังปากอุโมงค์ Bentonite เป็นสารที่ใช้ทั่วไปที่เพิ่มเข้าไปในโคลน ในหัวเจาะแบบ EPB (รูปที่ 3.11) องค์ประกอบของดินเองจะช่วยค้ำยันปากอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 e แรงดันภายใต้ช่องดินจำเป็นที่จะต้องถูกรักษาให้เท่ากับแรงดันดินที่กระทำต่อด้านหน้าของหัวเจาะ

เนื่องจากลักษณะทางธรณีที่พิเศษและสภาพที่เป็น Hydro-geological บางครั้งจึงไม่สามารถที่จะขุดเจาะเส้นทางอุโมงค์ทั้งหมดได้ด้วยเครื่องมือในการขุดเจาะเพียงอันเดียว ด้วยเหตุนี้หัวเจาะแบบผสมจึงถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งหัวเจาะนี้สามารถทำงานได้กับรูปแบบทางธรณีที่เปลี่ยนแปลงไป หัวเจาะแบบ Slurry, EPB และแบบผสมถูกจัดเป็นหัวเจาะแบบส่วนหน้า หัวเจาะแบบผสมจะเป็นแบบหลัก หัวเจาะมักจะถูกใช้ในกรณีที่ซึ่งสภาพดินมีลักษณะผสมและมีความเหนียวต่ำและมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างเป็นพลาสติกมากเนื่องจากดินสามารถถูกบีบอัดไปสู่ด้านในอุโมงค์ทางช่องเปิดต่างๆ ด้านหน้า

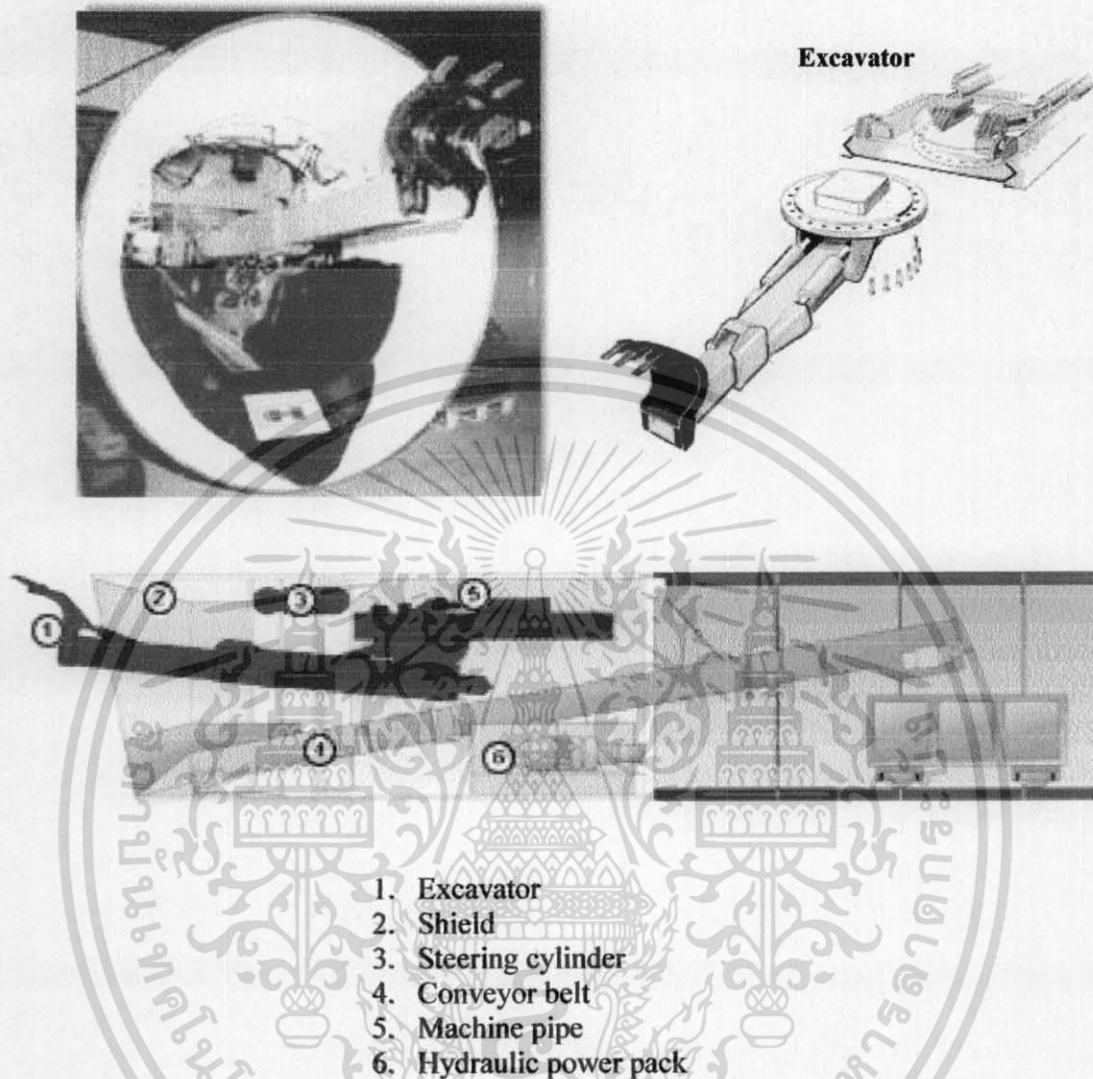
ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โครงการการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนจำนวนมากได้พัฒนาเทคนิคของหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล และ Slurry หัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล มักจะถูกพิจารณาว่าเหมาะสมต่อดินเหนียวหรือดินแข็งซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางที่เป็นก้อนหินใหญ่หรือก้อนกรวด และในที่ซึ่งน้ำเหนือปากอุโมงค์ไม่สูงมากนัก ในอีกทางหนึ่ง ดินยังมีลักษณะผสมผสานและต่อเนื่องมากเท่าใดก็จะยิ่งประสบความสำเร็จในการใช้หัวเจาะนี้ ถึงแม้ว่าหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุลจะสามารถทำงานได้ในดินที่มีสภาพเป็นดินทรายแต่ก็มีปัญหามาก ในทางตรงกันข้าม วิธีการของหัวเจาะแบบ Slurry จะเหมาะสมสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่ไม่มีสภาพเหนียว

สำหรับการเอาดินที่ขุดเจาะออกนั้น ระบบการขนส่งที่พิเศษจะจำเป็นต่อการขนย้ายดินผ่านหัวเจาะไปสู่ผิวหน้า ระบบที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องถูกเลือกจากชนิดของดินที่คาดเอาไว้ วิธีการขุดเจาะที่จะเกิดขึ้น วิธีการค้าขนอุโมงค์ การตัดสินใจนี้จะผลโดยตรงต่อระบบการขนย้ายดินที่ถูกขุดซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

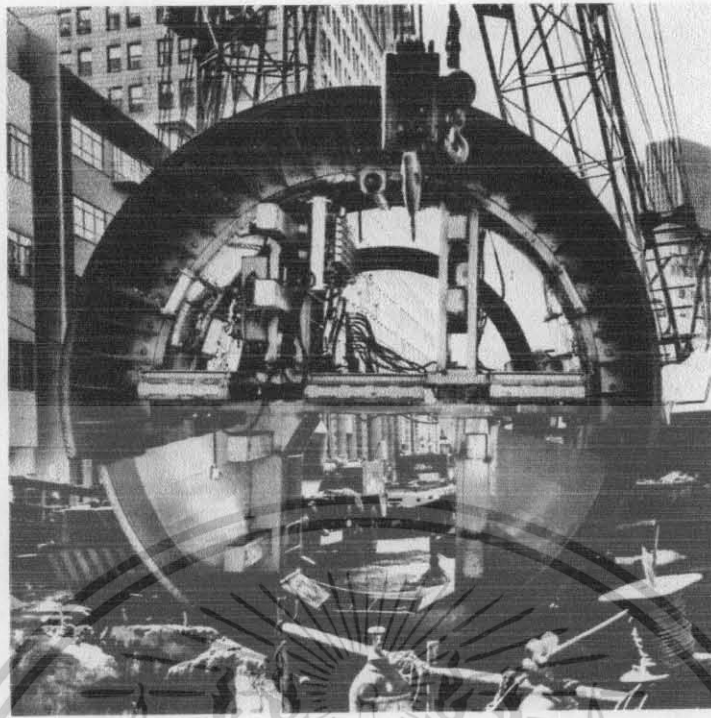




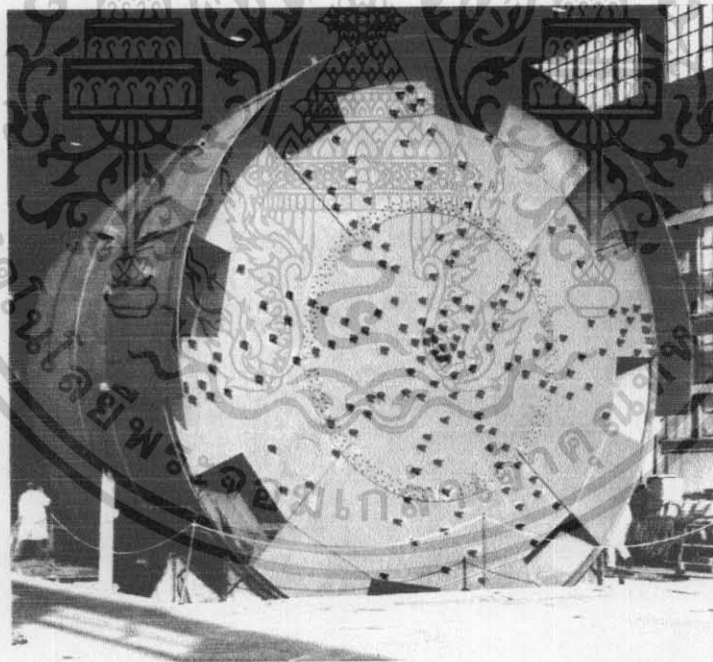
รูปที่ 3.6 การค้ำยันผิวหน้าด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (after Maidl et al., 1996)



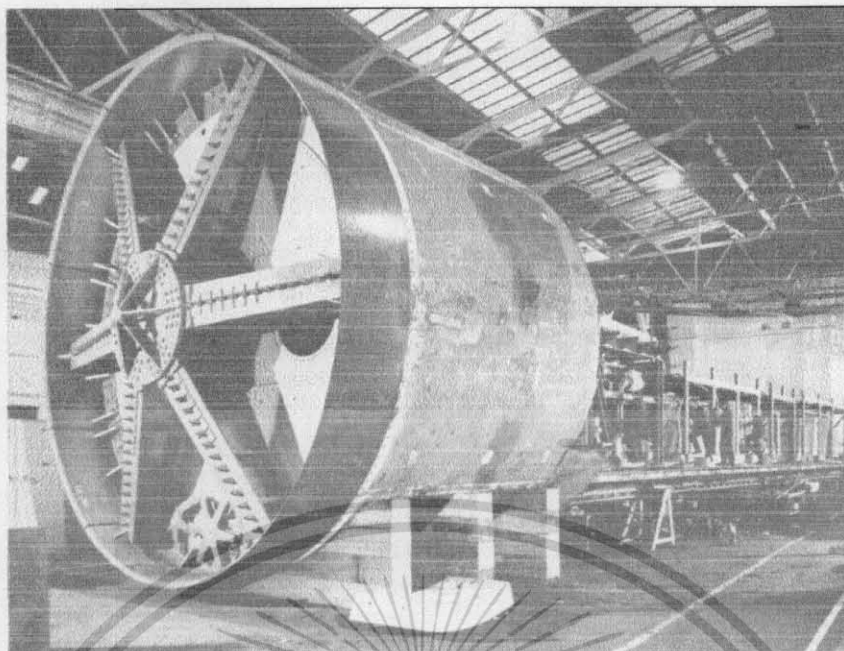
รูปที่ 3.7 Partial face shield (Herrenknecht)



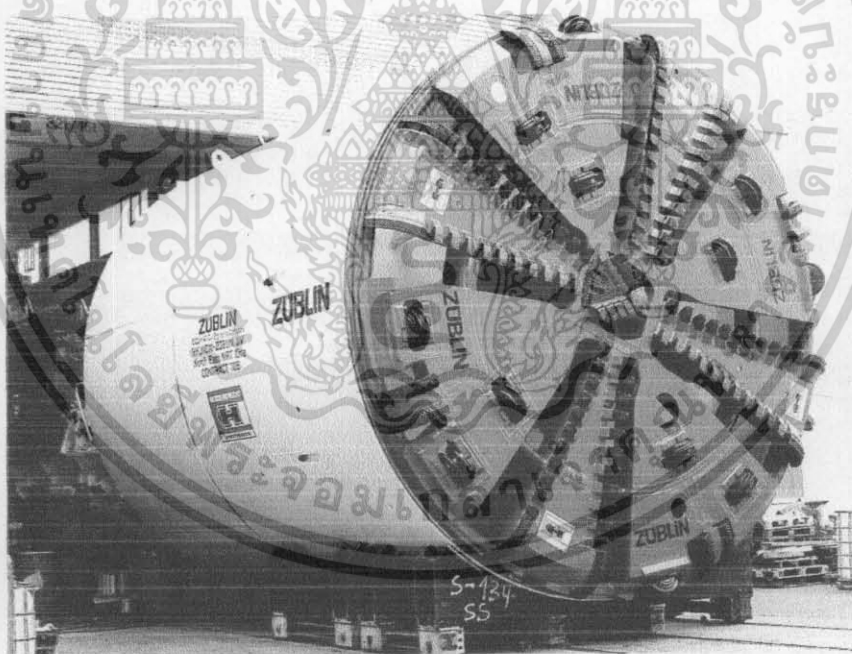
รูปที่ 3.8 หัวชุดเจาะแบบเปิดหน้าที่ใช้ในโครงการ Trans-Bay tube (1969)



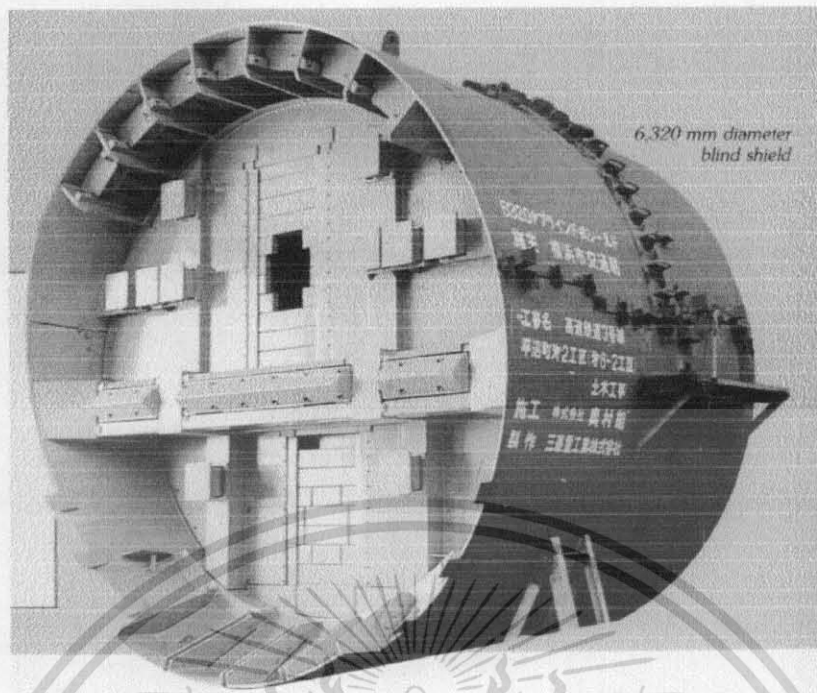
รูปที่ 3.9 หัวชุดเจาะแบบอัดแรงดันอากาศใช้ในโครงการ อุโมงค์ทางด่วนใน Paris (1964)



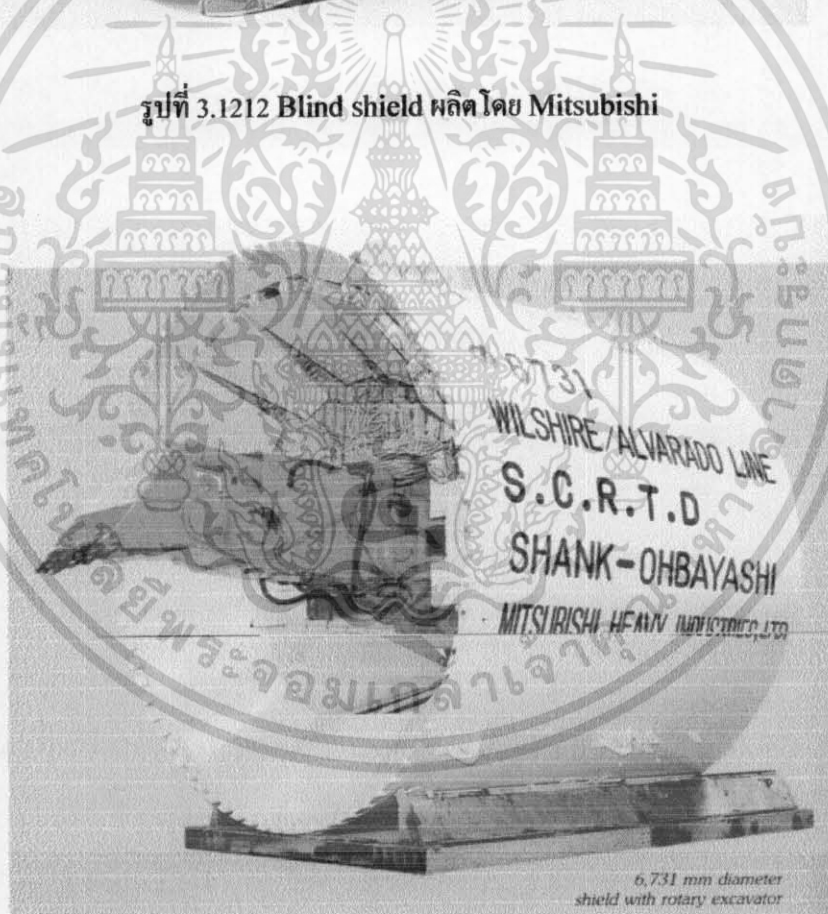
รูปที่ 33.1010 หัวชุดเจาะแบบ Slurry ที่ใช้กับการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำใน Mexico City (1969)



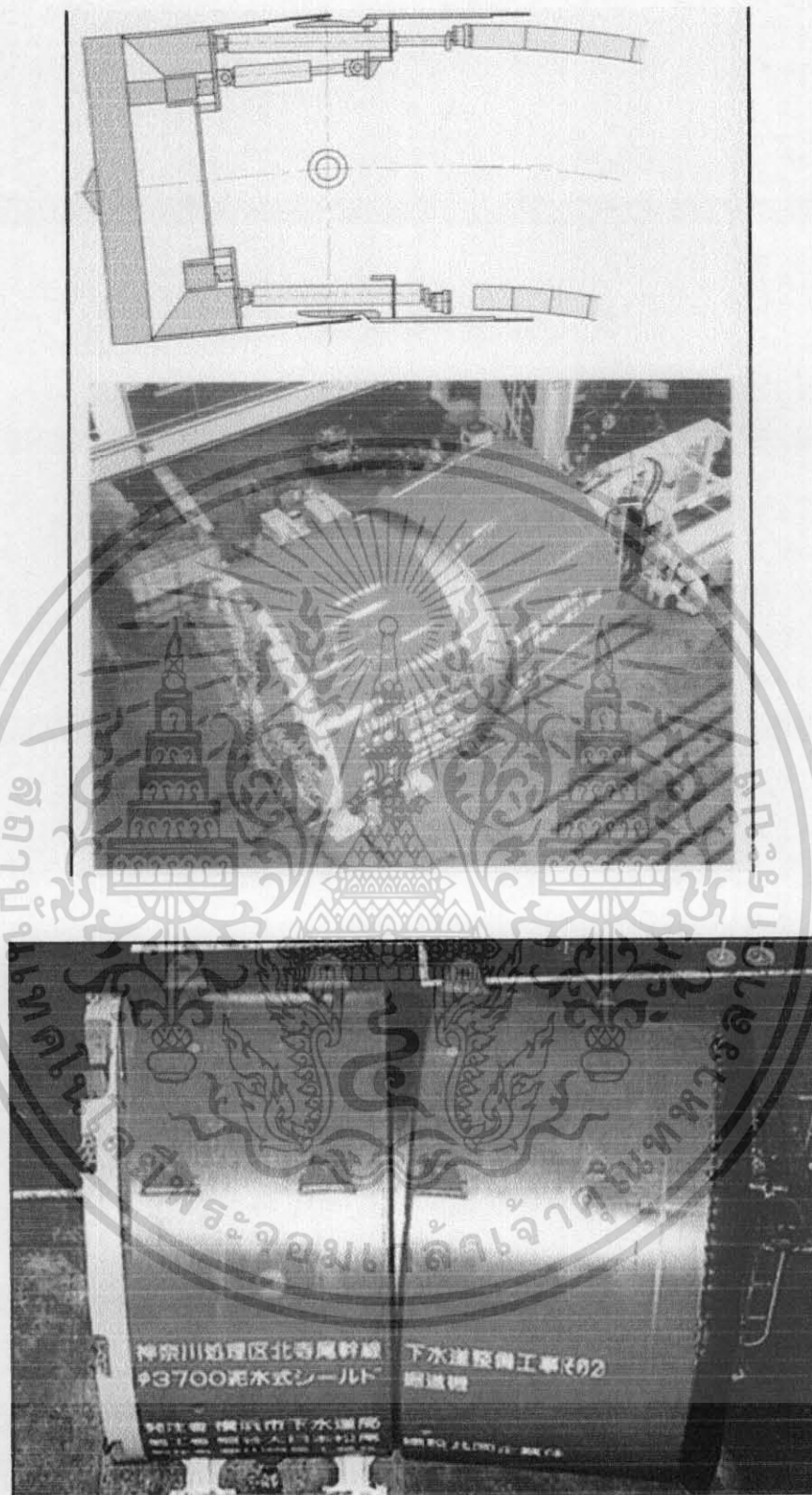
รูปที่ 33.1111 EPB shield ใช้กับโครงการ Singapore MRT



รูปที่ 3.1212 Blind shield พลิต โดย Mitsubishi



รูปที่ 33.1313 Shield with excavator

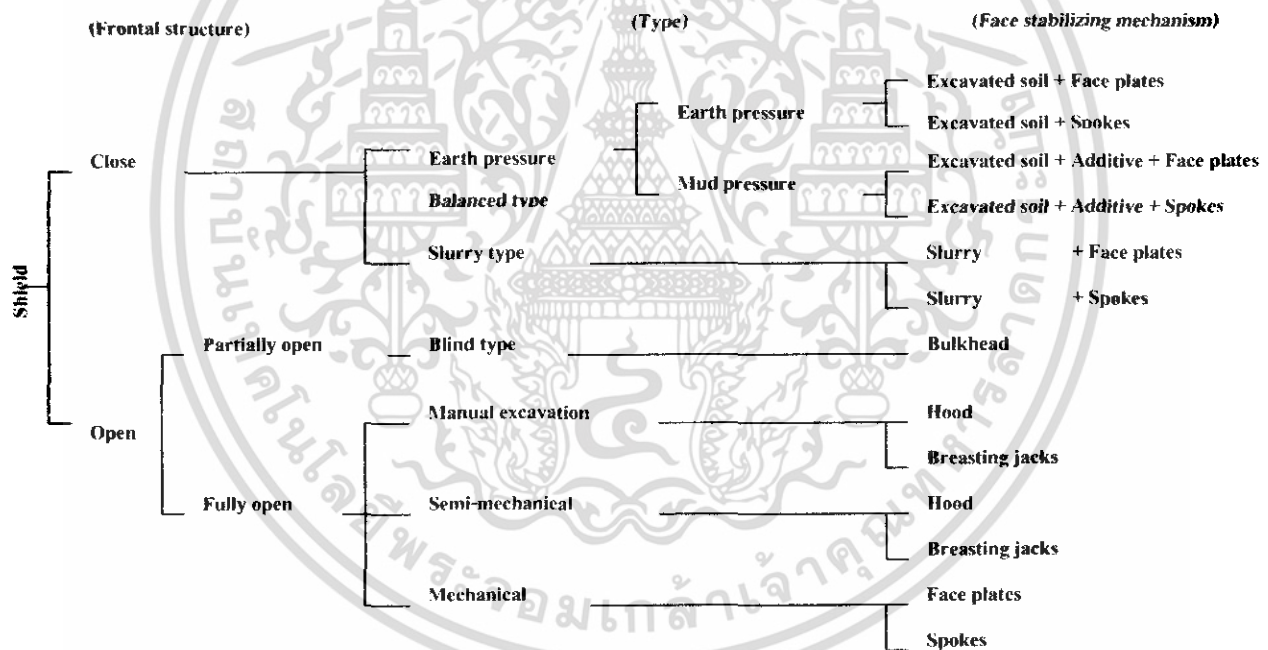


รูปที่ 33.1414 Articulated Shield

3.4.3 การเลือกวิธีการของหัวขุดเจาะอุโมงค์

การจะทำให้การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินมีความปลอดภัยและประหยัดนั้น การเลือกวิธีการและชนิดหัวขุดเจาะอุโมงค์ถือเป็นเรื่องหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการขุดผนังอุโมงค์ (Lining) ฯลฯ นอกเหนือไปจากสภาพของพื้นดิน สภาพของพื้นผิว มิติของส่วนตัด ความยาวของการก่อสร้าง การวางแผนเส้นทางของอุโมงค์ใต้ดินและระยะเวลาการก่อสร้าง

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Machines) มีทั้งแบบหน้าปิดและหน้าเปิด เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) มีประเภทความดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance) และสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry) เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) มีประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) และเปิดเพียงบางส่วน (Partially Open) ประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) แบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบคือ แบบขุดด้วยมือ แบบกึ่งเครื่องยนต์และแบบเครื่องยนต์ ประเภทส่วนหน้าเปิดบางส่วน ได้แก่ หัวขุดเจาะอุโมงค์ แบบ Blind Shield ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์

ตารางที่ 3.1 หลักเกณฑ์การเลือกหัวเจาะ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือแจกจ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง แก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด

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.



3.4.3.1 ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) หัวขุดเจาะอุโมงค์จะมีฝาปิด และมีดินหรือดินเลนอยู่ภายในห้องเก็บระหว่างส่วนหน้าและฝาปิดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่หน้าตัดดินภายใต้ความดัน

ก. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance (EPB) Type Shield Machines) EPB จะเปลี่ยนดินที่ขุดให้เข้ากับความดันโคลน และปรับความดันให้คงที่เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่หน้าตัดดิน เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (EPB) จะประกอบด้วยกลไกของการขุดเพื่อที่จะตัดเฉือนดิน กลไกการผสมผสานเพื่อจะผสมดินที่ขุดออกมาให้เข้ากับความดันน้ำโคลน กลไกการปล่อยดินเพื่อปล่อยดินออกและกลไกการควบคุมที่จะรักษาการกระจายตัวของแรงดันดิน เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (EPB) สามารถแบ่งตามความสามารถของเครื่องฉีดเกี่ยวกับสารที่ฉีดเพิ่มเข้าไปเพื่อเปลี่ยนดินที่ขุดออกมาสู่ความดันโคลน ได้ดังนี้คือเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth Pressure Type Shield Machines) และเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน (Mud Pressure Type Shield Machines)

1. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth Pressure Type Shield Machines) จะตัดเฉือนดินด้วยหัวเครื่องแบบหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบ เติมน้ำที่ว่างระหว่างส่วนหน้าและส่วนฝาปิดตรงหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ด้วยดินผสมและเพิ่มความดันแก่ดินด้วยแรงดันของหัวขุดเจาะอุโมงค์ ความดันของดินจะกระทำต่อส่วนหน้าเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่หน้าตัดดิน แล้วดินก็จะถูกปล่อยและลำเลียงออกมาโดยสายพานลำเลียง ฯลฯ

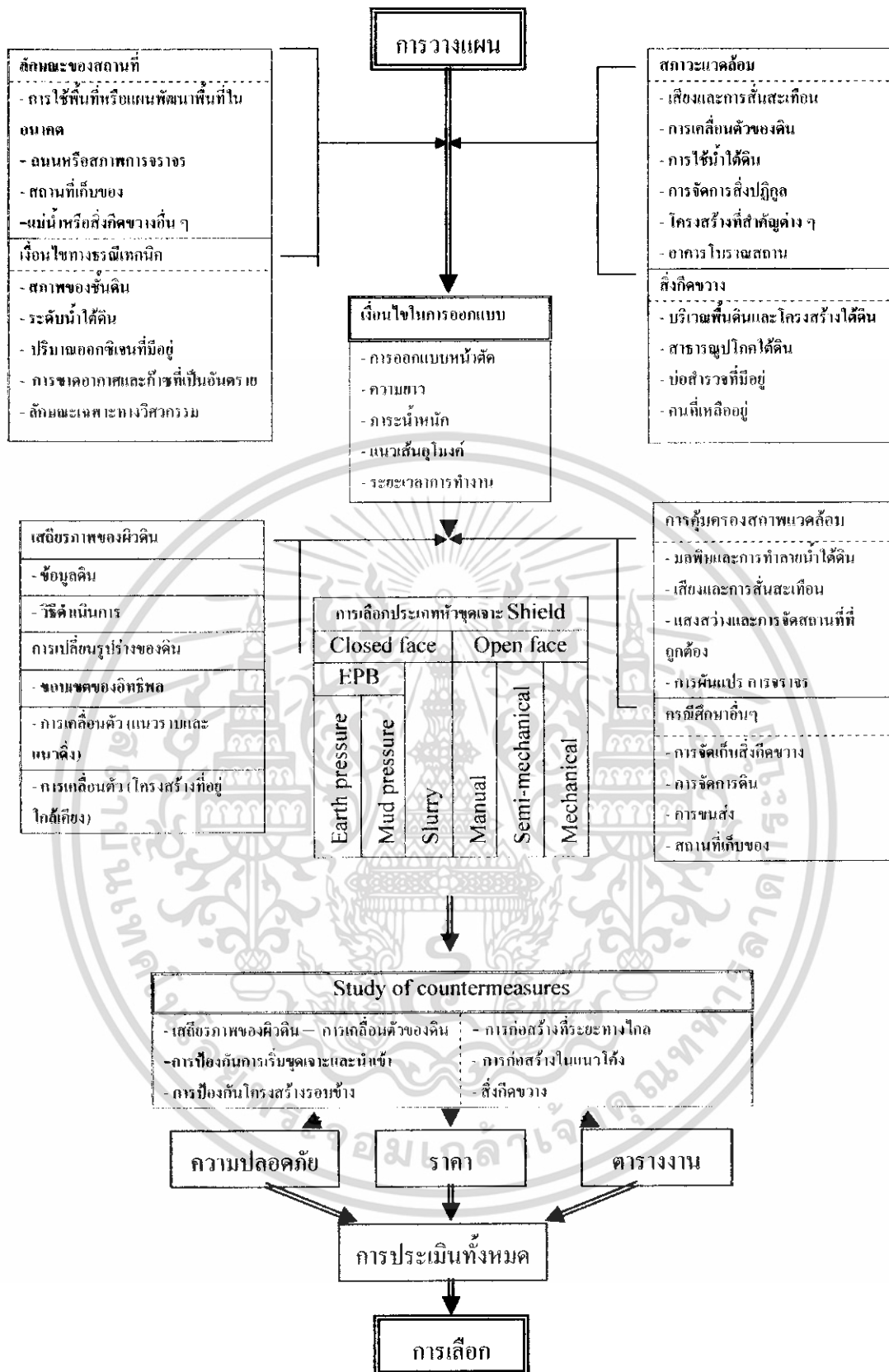
2. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน (Mud Pressure Type Shield Machines) จะฉีดสารที่เพิ่มเข้าไปและผสมกับดินที่ขุดโดยหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบตัว ความดันของโคลนที่มาจากหลอมเหลวจะทำให้เกิดความเสถียรภาพแก่หน้าตัดดินด้วยวิธีการเดียวกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth pressure type shield machines) แล้วดินก็จะถูกปล่อยและลำเลียงออกมาโดยสายพานลำเลียง ฯลฯ

ข. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Machines) คำว่า “Slurry” นั้นแปลว่าน้ำเลน ในเครื่องขุดเจาะนี้จะประยุกต์ใช้น้ำเลนมาเป็นสารละลายปรับสมดุลดินเพื่อช่วยในการปรับสมดุลดินเพิ่มเสถียรภาพแก่หน้าตัดดิน สารละลายปรับสมดุลดินจะถูกหมุนเวียนในการนำส่งดินที่ขุดออกโดยการลำเลียงของเหลว เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยกลไกการขุดดิน อุปกรณ์การป้อนหรือปล่อยสารละลายปรับ

สมดุลดินให้หมุนเวียนและเพิ่มความดันแก่ น้ำเลน และอุปกรณ์ดำเนินการของสารละลายเพื่อจะปรับคุณสมบัติสารละลายไปสู่ระดับที่ใ้ระบุไว้

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) จะเป็นแบบส่วนหน้าที่เปิดเต็มที่หรือเปิดเกือบทั้งหมด เครื่องประเภทนี้จะใช้กับดินที่หน้าดินสามารถคงอยู่ได้ด้วยตนเองหรือมีเสถียรภาพ ส่วนดินประเภทอื่นนั้นควรใช้ตัวช่วยอื่นมาช่วยให้ส่วนหน้าดินสามารถคงอยู่ได้ด้วยตนเอง ส่วนหน้าที่เป็นหัวขุดเจาะอุโมงค์จะปิดเกือบทั้งหมดสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่เปิดบางส่วน ยกเว้นทางออกของดินที่จัดให้อยู่ส่วนหน้าเพื่อที่จะควบคุมการไหลเข้าของดินที่ขุดและเพิ่มเสถียรภาพแก่ส่วนหน้าที่ตัด

1. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Machines) ใช้เพื่อขุดดินด้วยเครื่องสำหรับแฉะหรือดัก เครื่องมือขุดแร่ สิ่งที่ใช้ทุบ ฯลฯ ดินที่ขุดออกมาจะถูกลำเลียงออกมาโดยเครื่องลำเลียงสายพาน รถเข็น และอื่นๆ หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือโดยปกติจะจัดให้มีกลไกการทำให้มีเสถียรภาพของส่วนหน้า เช่น ฝาครอบ แม่แรงโดยขึ้นอยู่กับสภาพของดิน
2. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกึ่งเครื่องยนต์(Semi-Mechanical Type Shield Machines) โดยพื้นฐานจะมาจากเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Machines) ซึ่งจะเพิ่มอุปกรณ์อย่างตัวขุด ตัวโหลด หรือทั้ง 2 อย่าง ระหว่างการขุดส่วนหน้าของเครื่องจักรจะเปิดกว้างมากและทำให้ยากที่จะป้องกันส่วนหน้าที่ตัดเฉือนในระหว่างขุด
3. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบเครื่องยนต์(Mechanical Type Shield Machines) มีลักษณะเฉพาะคือมีหัวเครื่องตัดอยู่บนด้านหน้าของส่วนหน้าที่จะตัดดินโดยอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง หัวเครื่องตัดอาจจะมีการป้องกันส่วนหน้าที่ตัดด้วย
4. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield (Blind Type Shield Machines) จะคลุมปิดส่วนหน้าของเครื่องตัดยกเว้นทางออกดินที่อยู่บริเวณส่วนหน้าของเครื่องจักร โดยทางออกดินนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ ด้านหน้าของส่วนหน้าของเครื่องจะถูกอัดเข้าไปยังพื้นดินเพื่อจะทำให้พื้นดินหลวม อ่อนตัวและขนย้ายไปยังทางออกของดิน เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่ส่วนหน้าดินนั้น ความต้านทานของการปล่อยของดินที่ถูกทำให้เป็นของเหลวควรถูกปรับและนำมาใช้



รูปที่ 33.1616 แสดงแผนภาพของการเลือกวิธีใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์

ตารางที่ 3.2 แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม

Shield type		Closed type						Open type					
		Earth pressure balanced type			Slurry type			Manual excavation type			Semi-mechanical type		
		Earth pressure		Mud pressure	Applicability	Precautions	Applicability	Precautions	Applicability	Precautions	Applicability	Precautions	Applicability
Strata	Soil type	N-value	Applicability	Precautions									
Alluvial clayey soil	Humus	0	x	-	Δ	-	Δ	-	x	-	x	-	-
	Silt and clay	0-2	○	-	○	-	○	Ground movement	Δ	-	x	-	-
	Sandy silt and sandy clay	0-5	○	-	○	-	○	Ground movement	Δ	-	x	-	-
Diluvial clay soil	Loam and clay	5-10	○	-	○	-	○	Ground movement	Δ	-	Δ	Ground movement	Δ
	Sandy loam and sandy clay	10-20	Δ	Plugging due to excavated	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Hard pan (Mudstone)	15-25	Δ	Plugging due to excavated soil	○	-	○	-	○	-	○	-	○
Sandy soil	Sand mixed with silt clay	25 or over	Δ	Plugging due to excavated soil	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Loose sand	50 or over	Δ	Plugging due to excavated soil	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Dense sand	10-15	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
Sand, gravel and boulders	Loose sand and gravel	10-30	Δ	Fine fraction content	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Cemented sand and gravel	30 or over	Δ	Fine fraction content	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Sand and gravel mixed with cobbles	10-40	Δ	Fine fraction content	○	-	○	-	○	-	○	-	○
Sand, gravel and boulders	Sand and gravel mixed with cobbles	40 or over	Δ	Groundwater pressure	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Boulder and cobbles	-	Δ	Screw conveyor specifications*1	○	-	○	-	○	-	○	-	○
		-	Δ	Bit specifications*2	○	-	○	-	○	-	○	-	○
Sand, gravel and boulders	Sand and gravel mixed with cobbles	-	Δ	Bit specifications*2	○	-	○	-	○	-	○	-	○
		-	Δ	Bit specifications*2	○	-	○	-	○	-	○	-	○
		-	Δ	Bit specifications*2	○	-	○	-	○	-	○	-	○

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 A marked 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

ตารางที่ 33.3 การแบ่งประเภทของหัวขุดเจาะแบบ Shield

	Face	Machine Type	Stabilization of Cutting Face	Excavating Method
Shield	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

3.4.3.2 การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดอย่างเดียวในการเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ก็คือการทำให้มีเสถียรภาพของส่วนหน้าในการตัดเฉือน นอกจากสภาพดินและน้ำใต้ดินแล้วนั้น การศึกษาที่สมบูรณ์จะต้องศึกษาถึงเรื่องสิ่งแวดล้อมรอบๆ ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสถานที่ในการสร้าง ความปลอดภัย ทางเศรษฐกิจ ฯลฯ อีกด้วย รูปที่ 3.16 แสดงถึงแผนภาพของการเลือกของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์

การเลือกสถานที่สำหรับปล่องแนวตั้ง (Shaft) และการถ่ายเทสิ่งสกปรกกำลังจะกลายเป็นสิ่งสำคัญมากขึ้นในการเลือกวิธีการก่อสร้าง บันทึกการปฏิบัติงานในอดีตได้วิเคราะห์ปัจจัยในบางกรณี ตารางที่ 3.2 แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม ประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่ดีที่สุดที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละอย่างได้อธิบายไว้ข้างล่าง

ก. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Type Shield Method) EPB มีประเภทความดันของดินและประเภทความดันของโคลน ลำดับแรกเหมาะสำหรับประเภทดินที่สามารถทำให้เป็นของเหลวได้ จากนั้นทำให้เต็มในห้องเครื่องตัด แล้วจึงลำเลียงออกโดยเครื่องสายพานลำเลียง อีกทั้งต้องรักษาส่วนหน้าตัดให้มีเสถียรภาพตลอดเวลา ต่อมาจึงเพิ่มน้ำ น้ำโคลน หรือสิ่งที่เพิ่มเข้าไปยังดินทรายที่ไม่ได้เป็นของเหลวในห้องเครื่องตัดเพื่อจะปรับปรุงการขนย้ายของความดันส่วนหน้า

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth Pressure Type Shield Machines) มีลักษณะเฉพาะเป็นระบบสำหรับการนำเข้ดิน และปรับเปลี่ยนการขุดเจาะของหัวขุดเจาะอุโมงค์ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นจึงไม่ใช่เพียงแต่ทำให้หน้าตัดดินมีเสถียรภาพเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อพื้นดินที่อยู่โดยรอบน้อยที่สุดอีกด้วย ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือการทำงานในส่วนพื้นผิวจะไม่จำเป็น เพราะวามตรการสนับสนุนนั้นเป็นสิ่งที่เกินความจำเป็น

วิธีเกี่ยวกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน (Mud Pressure Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับดินหลายชนิด ซึ่งรวมถึงพื้นดินอ่อนที่มีระดับความแข็งน้อย เช่น ทรายผสมกรวดที่พัดมาทับถมกับน้ำ ทราย โคลนเลนและดินเหนียว สิ่งสะสมเกี่ยวข้องกับซากที่เหลือจากน้ำท่วมและดินที่อ่อนและแข็งสลับกัน การจะอาศัยแต่เพียงเครื่องสายพานลำเลียงที่ปล่อยดินเท่านั้นย่อมไม่เพียงพอ ดังนั้น เพื่อที่จะตัดเฉือนผ่านพื้นดินด้วยความดันที่มาจากความกดดันของน้ำที่สูง การเพิ่มเครื่องป้อนที่เก็บกักความดันต่างๆ การรวมเอาเครื่องสูบลำเลียงส่ง สกปรกและการปรับปรุงในคุณสมบัติของดินที่ขุดจึงควรที่จะต้องศึกษาเพิ่มเติม

ข. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Method) จะประยุกต์ใช้ความดันน้ำเลนที่สูงกว่าความดันน้ำใต้ดินที่ส่วนหน้าเพื่อมาเพิ่มเสถียรภาพแก่ดิน สำหรับส่วนหน้านั้นจะถูกเพิ่มเสถียรภาพ โดยคุณสมบัติสารละลายปรับสมดุลดิน ดังนั้นหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดินจึงมีประสิทธิผลคล้ายกันสำหรับสถานที่ที่มีความดันน้ำใต้ดินสูง เช่นพื้นที่ใต้แม่น้ำและใต้ท้องทะเล

สารละลายปรับสมดุลดินจะถูกสูบจากพื้นดินไปยังส่วนหน้าโดยผ่านท่อป้อนและท่อปล่อยส่วนหน้าจะถูกปิดอย่างสิ้นเชิงด้วยความปลอดภัยในระดับสูง และด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมการทำงานที่ดี ไม่มีความดันส่วนเกินที่ส่งผลกระทบต่อคนรอบข้าง หรือไม่มีการผลักดันกลับของพื้นดินทำให้มีเพียงแค่ผลกระทบเล็กน้อยต่อพื้นดินที่อยู่รอบด้าน นอกจากนี้การทำงานจากพื้นดินก็ไม่ได้จำเป็นเพราะว่าโดยหลักการแล้วนั้นเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ข้อดีนี้เหมือนกับข้อดีของวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน (Earth Pressure Type Shield Method)

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับชนิดของดินหลายชนิดรวมถึงทรายผสมกรวดและโคลนที่น้ำพัดพา ทรายและโคลนเลน ดินเหนียวหรือชั้นที่สลับกันกับพื้นดินที่มีซีเมนต์ที่ไม่แน่น และพื้นดินที่อ่อนหรือกับดินที่มีปริมาณบรรจุน้ำที่สูงซึ่งยากที่จะทำให้ดินคงตัวได้ด้วยตัวเอง ทรายผสมกรวดที่เป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย และ โคลนเลน ดินเหนียว หรือชั้นที่สลับกันที่มีน้ำมากที่อาจส่งผลให้เกิดการทรุดลงของพื้นดินที่มีการไหลเข้าของน้ำ วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Method) อาจจะเป็นการยากในการที่จะรักษาสภาพหน้าตัดให้มีเสถียรภาพในพื้นที่ที่มีการซึมของน้ำสูง หรือในพื้นที่ที่มีก้อนหินใหญ่ทำให้ในกรณีนี้ควรที่จะพิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์ช่วย

ค. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Method) ส่วนหน้าที่อยู่ด้านหน้าของเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Machines) จะเปิดจนทำให้ส่วนหน้าที่อ่อนและแข็ง กรวด ก้อนหินใหญ่ ฯลฯ สามารถได้รับการจัดการอย่างง่ายดายที่สุด ในขณะเดียวกันวิธีเกี่ยวกับการใช้แรงดันลมจะใช้อยู่เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่ส่วนหน้า การใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือจะมีข้อสมมติฐานว่าส่วนหน้าต้องทนทานเป็นเวลาหลายชั่วโมง กระบวนการทางเคมีจะใช้สำหรับดินที่ไม่ก่อรูปเป็นส่วนหน้าที่ยั่งยืน ในเวลาเดียวกันการทำให้ น้ำลดลงจะนำมาใช้เมื่อส่วนหน้าขาดเสถียรภาพเนื่องจากระดับน้ำใต้ดินที่สูงและการไหลเข้ามาของน้ำ

วิธีห้วยเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method) จะเหมาะสมที่สุดสำหรับทรายที่ผสมกับกรวด ซึ่งเป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วมที่หนาแน่น ทรายและโคลนเลนซีเมนต์ และชั้นดินเหนียวเพราะว่าโดยปกติส่วนหน้าจะทนทานในดินประเภทเหล่านี้ ส่วนหน้าจะไม่ทนทานในทรายซึ่งเป็นดินทรายโคลนที่น้ำพัดพามาซึ่งมีความอ่อนมาก โคลนเลนและชั้นดินเหนียว ดังนั้นมาตรการสนับสนุนหนึ่งหรือหลายๆ มาตรการควรจะถูกรวมเข้าด้วยกัน วิธีห้วยเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual excavation type shield method) เป็นรูปแบบแรกของวิธีการด้านห้วยเจาะอุโมงค์(Shield) ทั้งหมด และเป็นที่ยอมรับจนกระทั่งถึงครึ่งหลังของทศวรรษ 1970 ในญี่ปุ่น ในปัจจุบันนี้ไม่นิยมใช้วิธีนี้ โดยสิ่งที่มาแทนก็คือเครื่องจักรห้วยเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด(Close-face type shield machines)ซึ่งใช้เพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าความไม่ไว้วางใจอย่างมากเกี่ยวกับมาตรการสนับสนุนของเครื่องจักรแบบขุดด้วยมือ

ง. วิธีห้วยเจาะอุโมงค์แบบกึ่งเครื่องยนต์(Semi-Mechanical Type Shield Method) ตามหลักการนั้นจะใช้ในพื้นที่ที่สามารถขุดได้ด้วยตนเองได้ ตัวอย่างดินที่สามารถใช้ได้ คือทรายผสมกรวดซึ่งเป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย โคลนเลนที่เป็นซีเมนต์และดินเหนียวมันจะไม่เหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมของดินทรายโคลนซึ่งน้ำพัดพามาที่อ่อน วิธีการการใช้แรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำ การเป็นตะกอนของสารเคมี และมาตรการกรสนับสนุนอื่นๆ อาจจะใช้ร่วมกันเหมือนกับวิธีห้วยเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method)

จ. วิธีห้วยเจาะอุโมงค์แบบเครื่องยนต์(Mechanical Type Shield Method) จะติดตั้งอุปกรณ์ด้วยหัวตัดเฉือนแบบหมุนรอบสำหรับการขุดที่ต่อเนื่อง ส่วนหน้าหัวเครื่องตัดมี 2 ประเภท ประเภทแรกคือประเภทแผ่นหน้าและประเภทที่สองคือชนิดที่คล้ายซี่ล้อรถ ประเภทแผ่นหน้าเหมาะสำหรับส่วนตัดขนาดใหญ่ ส่วนหน้าที่มีนกงและการปรับที่ปรับได้จะช่วยให้เครื่องจักรสามารถดำเนินการผ่านชั้นที่มีกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมาก ประเภทซี่ล้อรถโดยมากจะใช้เพื่อกำจัดกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมากออกจากส่วนตัดเล็กๆที่มีส่วนหน้าค่อนข้างจะมั่นคง เช่นเดียวกับประเภทการขุดด้วยมือและแบบกึ่งเครื่องยนต์ เครื่องจักรห้วยเจาะอุโมงค์แบบเครื่องยนต์(Mechanical Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมเกี่ยวกับซากที่เหลือจากน้ำท่วมที่มีส่วนหน้าสามารถขุดได้ด้วยตนเอง สำหรับในสิ่งสะสมดินโคลนทรายที่น้ำพัดพามาที่โดยปกติส่วนหน้าไม่สามารถขุดได้ด้วยตนเอง การใช้มาตรการช่วย เช่นวิธีแรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำการเป็นตะกอนทางเคมี จะเป็นสิ่งบังคับสำหรับเครื่องจักรห้วยเจาะอุโมงค์แบบเครื่องยนต์(Mechanical Type Shield Machines)

ฉ. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield (Blind Type Shield Method) ส่วน
กันแผ่นดินจะถูกจัดให้อยู่หลังส่วนหน้าเพื่อจะทำให้เครื่องเหมาะสมสำหรับการผ่านพื้นดินที่อ่อน
มาก ส่วนกันจะถูกเปิดบางส่วนเพื่อการขนย้ายดิน หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield จะเหมาะ
ที่สุดสำหรับชั้น โคลนเลนที่เป็นดินทรายโคลนซึ่งน้ำพัดพามาผสมกับทราย มันจะไม่เหมาะสม
สำหรับดินแข็งเพราะว่ามันได้รับการออกแบบเพื่อจะบีบรัดดินโดยผ่านทางเปิด ดินที่มีปริมาณ
ทรายสูงมักจะอุดเครื่องทำให้มันไม่สามารถกลับหน้าต่อไป ถ้าหากดัชนีความคล่องตัวมีสูงเกินไป
อาจทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลเข้าของดินได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการขุดหรือขนย้ายดินออกไป
แรงพุ่งสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield ควรจะทำการคำนวณในขณะที่พิจารณาสภาพ
ดิน อัตราการเปิดส่วนหน้า ฯลฯ สภาพดินที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ค่อนข้างจำกัดมากและยังทำให้
ดินเกิดการเสียรูปค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้หัวขุดเจาะอุโมงค์นี้จึงไม่ได้ถูกนำมาใช้นานแล้ว



ตารางที่ 3.4 แสดง Cutting face stability หลักการและช่วงใช้งาน

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

บทที่ 4

หัวข้อเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

4.1 หัวข้อเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

4.1.1 ข้อกำหนดทั่วไป

ขอบเขตของเนื้อหา

เนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ข้อกำหนดพื้นฐานสำหรับการออกแบบและสร้างหัวข้อเจาะ เพื่อใช้ในการเจาะอุโมงค์รูปหน้าตัดวงกลม และอาจรวมถึงหัวข้อเจาะที่ไม่เป็นวงกลม อันขึ้นอยู่กับความเห็นของวิศวกรผู้รับผิดชอบ

เนื่องจากอุโมงค์ส่วนใหญ่มีรูปหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้นคู่มือเล่มนี้ จึงได้ให้ข้อกำหนดสำหรับหัวข้อเจาะแบบวงกลมที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์ใต้ดิน ข้อกำหนดที่ให้ไว้ในมาตรฐานของคู่มือเล่มนี้ วิศวกรผู้รับผิดชอบสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบหัวข้อเจาะอุโมงค์ใต้ดินที่เป็นรูปหน้าตัดอื่นๆ เช่น รูปตัดวงรี, รูปตัดวงกลมหลายรูป และรูปตัดสี่เหลี่ยม

การออกแบบหัวข้อเจาะ

หัวข้อเจาะนั้นควรได้รับการออกแบบ ให้สามารถเจาะอุโมงค์ใต้ดินได้อย่างปลอดภัยและคุ้มค่าในขณะที่ต้องรองรับน้ำหนักที่กระทำจากพื้นดินโดยรอบ การออกแบบหัวข้อเจาะอุโมงค์ใต้ดินควรพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

(1) คุณสมบัติของดิน

รายการด้านล่างนี้ แสดงถึงรายการประเภทของดินและชั้นดินที่ต้องพิจารณาเป็นกรณีพิเศษ ในการออกแบบหัวข้อเจาะอุโมงค์ใต้ดิน

- ดินเหนียวอ่อน มีความอ่อนไหวสูง
- ดินทรายหลวม มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูง
- ดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง
- ชั้นดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

- ชั้นดินที่มีก้อนหินขนาดใหญ่ หรือท่อนไม้ หรือวัสดุอื่นๆปะปนอยู่
- ชั้นดินผสมระหว่างดินอ่อนและดินแข็ง

(2) ความยาวของอุโมงค์

เมื่อหัวขุดเจาะต้องทำการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีความยาวมากๆ ควรศึกษาอย่างละเอียดถึง การสึกกร่อนและความทนทานของส่วนประกอบต่างๆ ของหัวขุดเจาะ นอกจากนี้การบำรุงรักษา การหยอดน้ำมันหล่อลื่น และการเปลี่ยนอะไหล่ชิ้นส่วนต่างๆ ก็ควรพิจารณาถึงด้วยเช่นกัน

(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)

ถือได้ว่าไม่เป็นการง่ายนัก ในการจัดการรับแรงดันดิน ซึ่งน้ำหนักสูงสุดจะกระทำต่อ หัวขุดเจาะในสถานะคงที่ (Static) เท่านั้น หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินควรมีความสามารถในการถ่ายน้ำหนักแบกทาน ไม่ใช่เพียงแต่น้ำหนักคงที่ (Static loads) ได้เท่านั้น แต่ควรมีความสามารถ ในการถ่ายน้ำหนักที่มีการเคลื่อนที่ (Dynamic loads) ที่กระทำระหว่างกันอย่างซับซ้อนได้ ปัญหาภัยแรง ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการขุดเจาะ ก็สามารถป้องกันได้ โดยการพิจารณาถึงน้ำหนักที่มีการ เคลื่อนที่ (Dynamic loads) นี้ ด้วยความละเอียดรอบคอบ และระมัดระวังเป็นพิเศษ

สำหรับแรงปฏิกิริยาของพื้นดิน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของหัวขุดเจาะ ซึ่งสามารถทำ ให้เกิดการเปลี่ยนรูปทรง (Deformation) ได้นั้น ส่วนใหญ่แล้วมักเป็นกรณีที่ไม่ได้รับการพิจารณา รวม ไว้ในรายการการออกแบบ

(2) แรงดันน้ำ (Water pressure)

สำหรับหัวขุดเจาะแบบปิดด้านหน้า (Closed-face) นั้น ควรได้พิจารณาถึงแรงดัน น้ำ รวมไว้ในรายการการออกแบบด้วย และสำหรับหัวขุดเจาะแบบเปิดหน้านั้น (Open-face) จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงแรงดันน้ำในทุกๆ กรณีไว้ในรายการการออกแบบเสมอ

(3) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead weight)

สมการหาค่าแรงปฏิกิริยา ได้จากการพิจารณาถึงน้ำหนักของหัวขุดเจาะ ดังนี้

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

P_s = แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากน้ำหนักของหัวขุดเจาะ

W = น้ำหนักของหัวขุดเจาะ

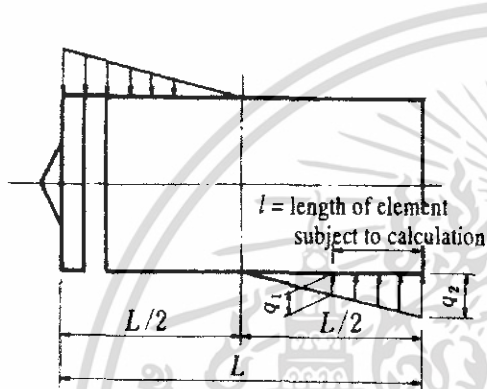
D = เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะ

l = ความยาวของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

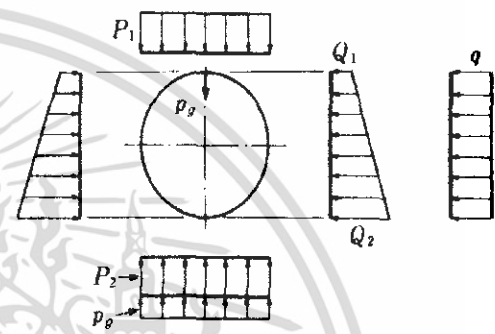
(4) น้ำหนักกระทำเหนืออุโมงค์ (Overburden load)

(5) น้ำหนักกระทำที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง (Load imposed by direction changes)

การทำงานของหัวขุดเจาะจะขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาจากดินโดยรอบ เมื่อเป็นการขุดเจาะในส่วนที่เป็นทางโค้ง รวมทั้งเมื่อหัวขุดเจาะมีการเปลี่ยนทิศทางเกิดขึ้น ซึ่งแรงปฏิกิริยานี้คือน้ำหนักที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทาง (Direction changing load) การหาค่าน้ำหนักสูงสุดนี้โดยมากมักหาค่าโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ด้านหนึ่งของหัวขุดเจาะนั้นอยู่ภายใต้แรงปฏิกิริยากระทำซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันดินเมื่ออยู่นิ่ง (Passive earth pressure) หรือก็คือหัวขุดเจาะอยู่ภายใต้แรงปฏิกิริยา เมื่อแม่แรงเครื่องหนึ่ง ทำการดันหัวขุดเจาะเพียงด้านเดียว น้ำหนักแผ่กระจายที่ใช้ในการหาค่าโดยทั่วไปนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 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)

การหาแรงดันจากการตัดผิวน้ำนั้น ขึ้นอยู่กับประเภทของหัวขุดเจาะ ในกรณีของหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield machine) นั้นก็ขึ้นอยู่กับแรงดันดิน

สำหรับหัวขุดเจาะแบบ Slurry shield ขึ้นอยู่กับแรงดันดินเหลว (Slurry pressure) ในกรณีของการขุดเจาะที่ใช้แรงจากเครื่องจักร จะขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาที่คงเหลือจากแม่แรงดันดิน แรงกระทำนี้กระทำต่อชิ้นส่วนเสริมการรับแรงของหัวขุดเจาะที่ฝักันและที่ผิวแผ่นเรียบ เช่น ที่ลานเสา และ คาคพदान

(7) น้ำหนักจากกรณีอื่นๆ

น้ำหนักจากกรณีพิเศษอื่นๆ ที่กระทำกับหัวขุดเจาะในระหว่างการขุดเจาะนั้น ควรได้รับการพิจารณาแยกเป็นกรณีๆ ไป

การออกแบบโครงสร้างหัวขุดเจาะ

โครงสร้างของหัวขุดเจาะควรได้รับการออกแบบ ในแต่ละองค์ประกอบของหัวขุดเจาะซึ่งทำหน้าที่ต่างๆ ให้มีความปลอดภัย และสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขของน้ำหนักกระทำต่างๆ ในทุกกรณี

ในการออกแบบหัวขุดเจาะนั้น โดยทั่วไปแล้วจะสมมติให้แรงในชิ้นส่วนที่สูงสุด เป็นแรงกระทำรอบๆ หัวขุดเจาะ ส่วนของคาน (Girder) เป็นตัวทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ ส่วนของฝาครอบเครื่องยนต์ (Hood) นั้น ออกแบบเป็นลักษณะเหมือนคานยื่นซึ่งด้านที่ยึดแน่นนั้นจะสมมติให้เป็นกับส่วนของคาน สำหรับหัวขุดเจาะประเภทส่วนหน้าปิดนั้น (Closed-face) หากฝักันและส่วนประกอบอื่นๆ สามารถพิจารณาได้เหมือนชิ้นส่วนฝาครอบซึ่งช่วยรับแรง ส่วนประกอบเหล่านั้นก็สามารถรวมเข้าไว้ในรายการการออกแบบได้ด้วยเช่นกัน

ในการออกแบบ ส่วนของหางหัวขุดเจาะ (Tail) สามารถพิจารณาให้เป็นได้ ดังนี้

- โครงสร้างวงแหวน หรือ
- โครงเปลือกนอกทรงกระบอก ปลายข้างหนึ่งยึดแน่น

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

ความเค้นที่ยอมให้ สำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างหัวขุดเจาะ พิจารณาได้ดังนี้

- ความเค้นที่ยอมให้ ภายใต้ น้ำหนักที่กระทำในระยะยาว (Long-term loading) ได้แก่ แรงดันดินแนวราบและดิ่ง, แรงดันน้ำ, น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักกระทำโดยรอบพิจารณาได้ตามตารางที่ 4.1
- ความเค้นที่ยอมให้ ภายใต้ น้ำหนักที่กระทำในระยะสั้น (Short-term loading) ได้แก่ น้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงทิศทาง พิจารณาได้โดยใช้ตัวประกอบเพิ่มค่าขึ้นจาก ตารางที่ 4.1

- ความเค้นสูงสุดที่ยอมให้ หาได้โดยคูณตัวประกอบ ซึ่งควรเท่ากับ 150% คูณกับความเค้นในตารางที่ 4.1 หรือคูณกับกำลังรับแรงสูงสุดในพิสัยยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ โดยจะเลือกใช้ค่าที่น้อยกว่า

ตารางที่ 4.1 ความเค้นที่ยอมให้ของเหล็ก

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

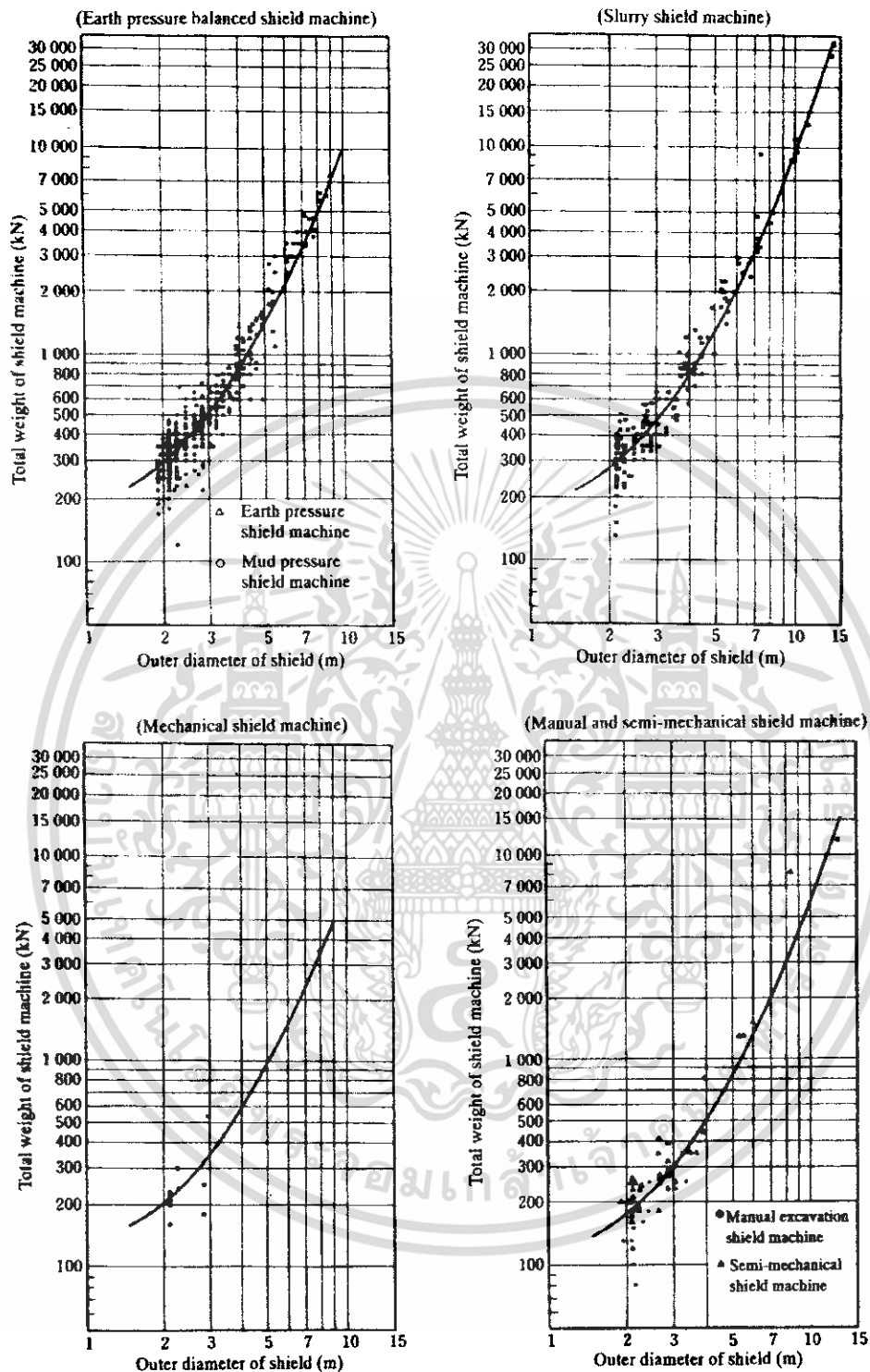
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

สำหรับชั้นส่วนโครงสร้าง ที่ต้องรับแรงกระแทกหรือแรงที่กระทำเข้าไปซ้ำๆ นั้น ควรทำการศึกษาละเอียดเป็นพิเศษ

สำหรับหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล, หัวขุดเจาะแบบ Slurry, และหัวขุดเจาะแบบให้แรงจากเครื่องจักรนั้น ที่ผิวแผ่นเรียบมักจะเสียหายบ่อยครั้ง เนื่องจากแรงเสียดทานของดิน ดังนั้น เพื่อเป็นการทดแทนในส่วนนี้ ชั้นส่วนโครงสร้างที่อยู่ใกล้กับหัวตัด (Cutter head) จึงควรมีจำนวนเผื่อไว้ที่แน่นอนอย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับ ชนิดของดินและความยาวของอุโมงค์

น้ำหนักของหัวขุดเจาะ

น้ำหนักเฉพาะแต่ละชั้นส่วนของหัวขุดเจาะนั้นควรได้พิจารณาไว้ให้ครบถ้วน น้ำหนักชั้นส่วนของหัวขุดเจาะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากหัวขุดเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่า ก็จะมีปัจจัยด้านน้ำหนักที่กระทบต่อการแยกชิ้นส่วน การเคลื่อนย้าย และการจัดวางตำแหน่งหัวขุดเจาะในปล่องปลายเปิด (Shaft) ยิ่งไปกว่านั้น น้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงของหัวขุดเจาะ ก็ยังมีผลกระทบต่อการพิจารณาการทำงานในสภาพที่เป็นดินอ่อน รวมทั้งผู้ออกแบบหัวขุดเจาะก็ควรได้พิจารณาถึงเรื่องนี้ไว้ด้วยเช่นกัน



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

4.1.3 โครงสร้างของหัวขุดเจาะ

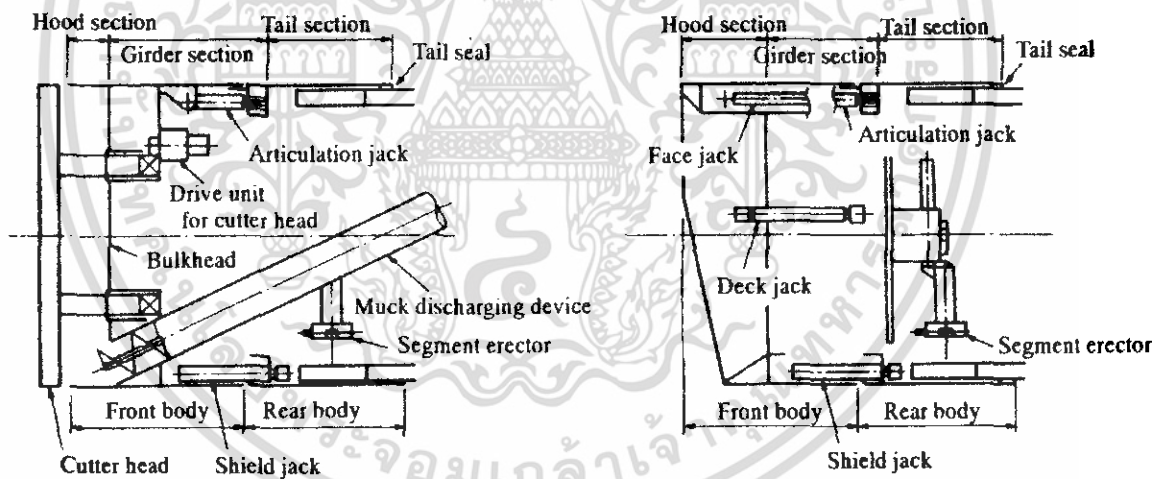
รูปร่างลักษณะของหัวขุดเจาะ

หัวขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินนั้นควรมีลักษณะที่ถูกต้องเหมาะสม ตามหน้าที่ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวขุดเจาะ หัวขุดเจาะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้

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

แหล่งพลังงานและหน่วยควบคุมที่จำเป็นต่อการทำงานของหัวขุดเจาะ จะติดไว้กับหางท้ายของฟันเฟือง ซึ่งดำเนินงานของหัวขุดเจาะ

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ออกแบบควรตัดสินใจ ในการใช้หน่วยข้อต่อ (Articulation Unit) โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวทางอุโมงค์ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ สภาพดิน และลักษณะเงื่อนไขต่างๆตลอดแนวเส้นทาง



รูปที่ 4.4 รูปร่างและลักษณะของหัวขุดเจาะ

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

หัวขุดเจาะส่วนที่อยู่ติดกับหน้าดิน มักจะเป็นอุปกรณ์ซึ่งเป็นกลไกที่เลื่อนปรับได้ ที่ส่วน Head section และ Hood section เพื่อเป็นการลดเครื่องมือที่ไร้คุณค่า

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวชุดเจาะ

- (1) การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวชุดเจาะ ควรพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ของวงผนังอุโมงค์ ช่องห่างที่ส่วนหางหัวชุดเจาะ(Tail) และ ความหนาของ Tail skin plate
- (2) การหาระยะช่องห่างที่ส่วนหาง ต้องพิจารณาถึงรูปร่างและขนาดของวงผนังอุโมงค์ แนวอุโมงค์ การปรับแนวอุโมงค์และการติดส่วนกันการรั่วซึมที่ส่วนหาง

รายละเอียดต่างๆมีดังนี้

(1) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวชุดเจาะ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวชุดเจาะ สามารถหาได้จากสมการข้างล่าง (ดังรูปที่ 4.5)

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

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวชุดเจาะ

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงผนังอุโมงค์

x = ช่องระยะห่างที่ส่วนหาง

l = ความหนาของ Tail skin plate

(2) ระยะช่องห่างของส่วนหาง (Tail clearance)

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาถึง ในการหาระยะช่องห่างที่ส่วนหาง มีดังนี้

- ระยะ x_1 ค่าสุดที่ขอมให้ จำเป็นสำหรับการชุดเจาะในแนวโค้ง และการปรับเบี่ยงเบนทิศทาง (ดังรูปที่ 4.6)

$$x_1 = \delta / 2$$

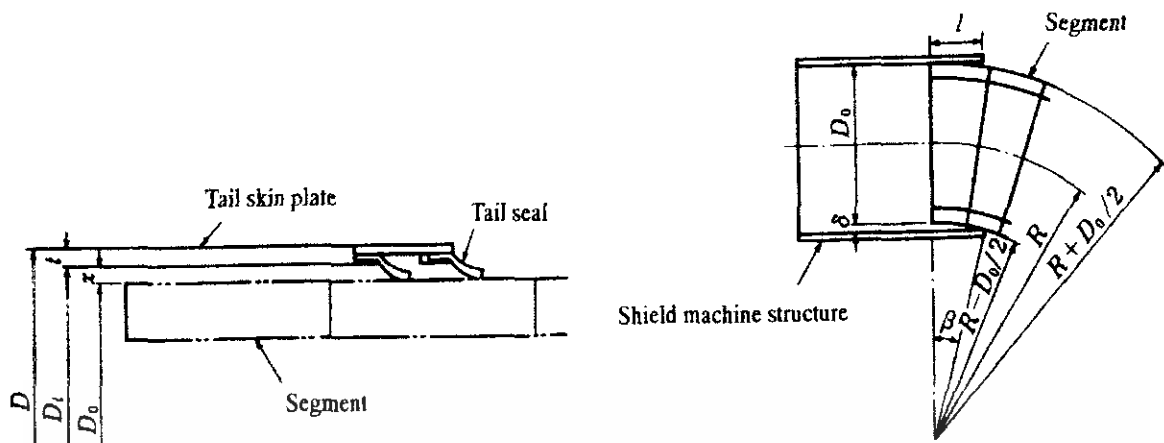
$$\delta = \left(R - \frac{D_o}{2}\right)(1 - \cos \beta) \approx \frac{l^2}{2\left(R - \frac{D_o}{2}\right)}$$

R = รัศมีความโค้งของแนวศูนย์กลางอุโมงค์

l = ความยาวของส่วนหาง

R + D_o/2 = รัศมีความโค้งภายนอก ของวงผนังอุโมงค์

R - D_o/2 = รัศมีความโค้งภายใน ของวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.1 รายละเอียดของส่วนหาง

รูปที่ 4.2 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 ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาอย่างละเอียดรอบคอบ เกี่ยวกับระยะช่องว่างที่ส่วนหาง
(Tail clearance)

ถ้าหากชิ้นผนังอุโมงค์ส่วนหน้าสุด หรือชิ้นส่วนโครงสร้างหัวขุดเจาะที่ป้องกันการ
อุดช่องว่างที่ส่วนหาง ถูกเก็บอยู่ภายในส่วนหางของหัวขุดเจาะแล้ว ควรทำการสำรวจให้มั่นใจได้ว่า
มีระยะช่องว่างที่ส่วนหางมากเพียงพอ (ดังรูปที่ 4.6)

ความยาวของหัวขุดเจาะ

การออกแบบความยาวของหัวขุดเจาะนั้น ต้องนำลักษณะของดิน แนวอุโมงค์ประเภท
ของหัวขุดเจาะ การใช้หน่วยขุดต่อ ความกว้างของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ และระบบการใส่ K
segment มาใช้ในการคำนวณด้วย

สมการสำหรับการออกแบบกำหนดความยาวของหัวขุดเจาะ และส่วนต่างๆ มีดังนี้

$$L_t = l_c + l_M$$

$$l_M = l_H + l_G + l_T$$

L_t = ความยาวของเครื่องจักรหัวขุดเจาะ

l_M = ความยาวของหัวขุดเจาะ

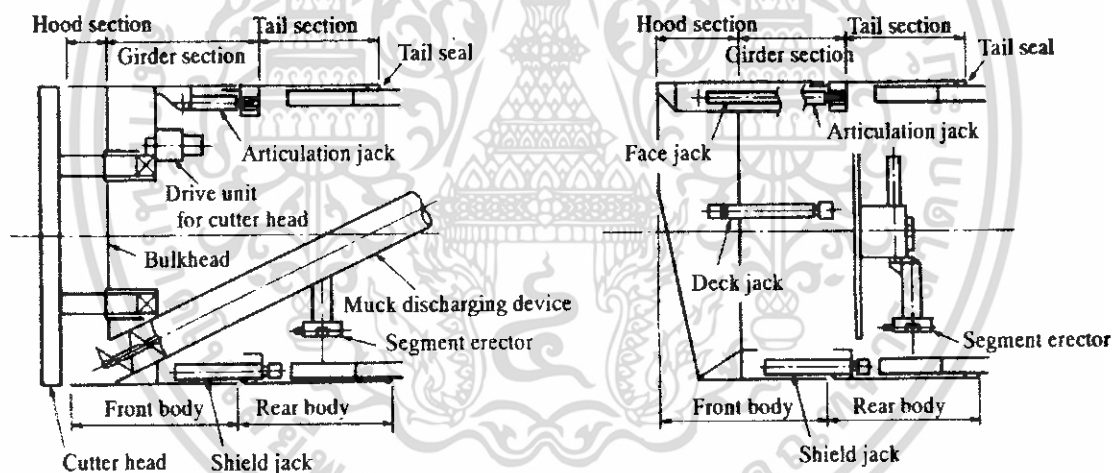
l_c = ความยาวของส่วนขุดตัด

l_H = ความยาวของส่วนหัวครอบ

l_G = ความยาวของส่วนคานใหญ่

l_T = ความยาวของส่วนหาง

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

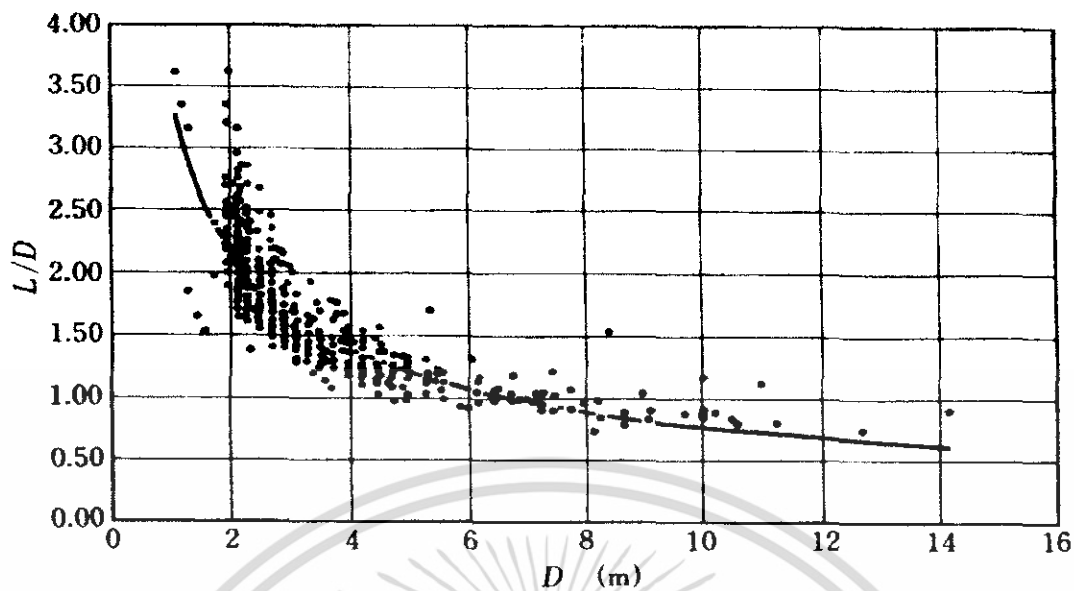


ก. หัวขุดเจาะแบบปิดด้านหน้า (แบบแรงดันดินสมดุล)

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)

หัวขุดเจาะควรออกแบบให้มีความยาวสั้นที่สุด เท่าที่จะเป็นไปได้ตามความเหมาะสมกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกกับความยาวของหัวขุดเจาะแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.8

ส่วนหมวกครอบ (Hood section)

รูปร่างและลักษณะของส่วนหมวกครอบ ควรออกแบบตามลักษณะของดินและประเภทของหัวขุดเจาะ โครงสร้างต่างๆก็ควรมีกำลังรับน้ำหนักที่มากเพียงพอ

ส่วนหมวกครอบช่วยรักษาเสถียรภาพของผิวหน้าดินไว้ อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นเส้นทางสำหรับขนถ่ายดินจากการขุดเจาะไปยังส่วนหางของหัวขุดเจาะอีกด้วย ในกรณีของการขุดด้วยหัวตัดนั้น ระบบการลำเลียงส่งถ่ายดินจากการขุดเจาะนั้นควรพิจารณาตัดสินใจจากรูปร่างและลักษณะของส่วนหมวกครอบ สำหรับหัวขุดเจาะแบบส่วนหน้าปิด (Closed-Face) นั้น ส่วนของหมวกครอบควรออกแบบให้แน่ใจว่า ดินที่ขุดออกมานั้นรวมกันได้อย่างสมบูรณ์

ส่วนคานหลัก (Girder Section)

ช่องว่างที่ต้องการสำหรับจัดวางแม่แรงหัวขุดเจาะ ที่รองหัวตัด หน่วยขับเคลื่อนหัวขุดเจาะ หน่วยข้อต่อ และอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายดิน ควรรวมเข้าไว้ในรายการสำหรับการคำนวณหาความยาวของคานหลัก คานหลักขนาดใหญ่ควรออกแบบให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอ

คานหลักเป็นโครงเฟรมหลักของหัวขุดเจาะ และรองรับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ ส่วนหมวกครอบและส่วนหางของหัวขุดเจาะนั้น ได้รับการออกแบบโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ส่วนของคานหลักจะต้องมีความแข็งแรง (Rigidity) และควรคำนึงถึงเสมอเมื่อทำการออกแบบคานหลัก

ส่วนของคานหลักถูกจัดวางให้พอดีได้ โดยใช้โครงสร้างรูปวงแหวนทั้งที่ด้านหน้าและที่ปลายของส่วนท้าย ในกรณีของหัวขุดเจาะเส้นผ่านศูนย์กลางขาคกลางและขนาดใหญ่ขึ้น

ส่วนประกอบต่างๆมักจะได้รับการเสริมกำลังโดยใช้เสาและคาน

เสาและคานควรทำการออกแบบดังนี้

- สามารถรองรับน้ำหนักที่ส่งถ่ายมาจากส่วนคานหลัก และน้ำหนักที่เกิดตัวประกอบชิ้นส่วนวงผนังอุโมงค์ อุปกรณ์ขนถ่ายดิน โคลน และน้ำหนักจากส่วนท้าย (Rear deck)
- มีช่องว่างที่มาก เพื่อให้สามารถทำการบำรุงรักษาเครื่องมือต่างๆได้ เช่น เครื่องมือไฮดรอลิก เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งท่อและเคเบิลต่างๆ

ส่วนหาง (Tail section)

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

รายละเอียดต่างๆมีดังนี้

- (1) ความยาวของส่วนหาง

ความยาวของส่วนหาง ควรทำการพิจารณาดังนี้

- ต้องมีช่องว่าง เพื่อการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์
- 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

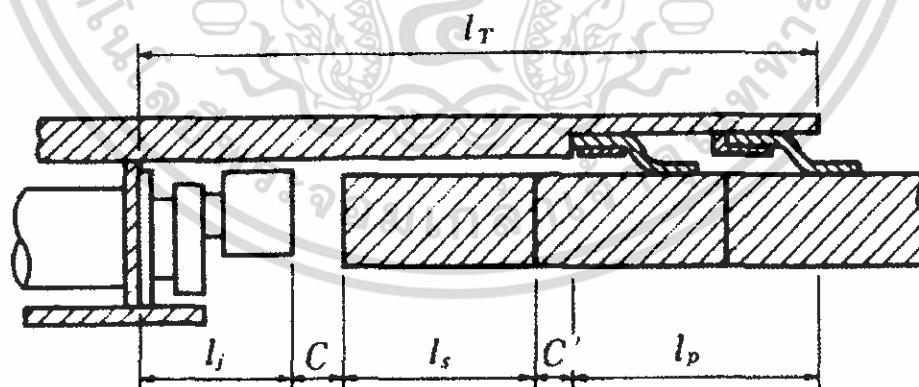
= 100 – 150 มิลลิเมตร (ควรทำการเพิ่มระยะสำหรับการติดตั้ง

K segment ในทิศตามแนวยาว ซึ่งขึ้นกับมุมที่ทำการติดตั้ง

C' = ระยะที่ยอมให้ ภายในส่วนหาง เพื่อใส่ชิ้นส่วน

(2) ความหนาของ Tail skin plate

เป็นการดีกว่า หากออกแบบให้ Tail skin plate มีความหนาน้อยที่สุด ภายใต้ขอบเขตที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทรง (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 การต้านทานต่อแรงดันและความทนทาน

ส่วนปิดช่องว่างที่ส่วนหาง ปิดอยู่ระหว่าง Tail skin plates กับ ผิวนอกของผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งแล้ว เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดิน และน้ำปูนGrouting ไหลเข้าสู่อุโมงค์ใต้ดิน ในกรณีของหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล และหัวขุดเจาะแบบ Slurry shield machines นั้น ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail seal) นี้ จะมีหน้าที่ในการรักษาแรงดัน

ในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์นั้น มักจะไม่ตรงกับศูนย์กลางของวงผนังอุโมงค์ที่ได้ออกแบบไว้ และวงผนังอุโมงค์ที่แท้จริง ก็มักจะมีการเยื้องศูนย์ หรือเป็นรูปวงรีเสมอ โดยเฉพาะเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินตามแนวทางโค้ง ช่องว่างที่ส่วนหางจะไม่สม่ำเสมอ ไม่เท่ากันโดยตลอด ด้วยเหตุนี้ ที่ปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail seal) จึงจำเป็นต้องมีขึ้นเพื่อการต้านทานแรงดันจากการGrout แรงดันจากน้ำเลน และแรงดันจากน้ำใต้ดินที่อยู่ข้าง เมื่อช่องว่างที่ส่วนหาง (Tail clearance) รอบวงอุโมงค์ใกล้เคียงกับค่าที่การออกแบบอย่างไม่สม่ำเสมอ

โดยทั่วไป Tail seal บางชุด ต้องเคยเพิ่มความอัดแน่นของน้ำ ในการหาจำนวนชุดของ Tail seal ที่ต้องใช้ จึงควรพิจารณาถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขุดเจาะ ลักษณะของดิน แรงดันน้ำใต้ดิน และผลจากการเปลี่ยนที่ปิดช่องว่างระหว่างทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วย

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

ความอัดแน่นของน้ำ และความทนทานของที่ปิดช่องว่างส่วนหางสามารถเพิ่มได้ โดยการอุดช่องว่างระหว่างที่ปิดด้วยน้ำมันจารบี เนื่องจาก น้ำมันจารบี หรือน้ำมันหล่อลื่น ต้องถูกใช้เพื่อให้หัวชุดเจาะขับเคลื่อนไปได้ จึงจำเป็นต้องเติมให้เต็มอยู่เสมอ

ในบางครั้ง อาจเกิดแรงกระทำจากชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ไปยัง Tail seal ซึ่งอยู่ห่างกัน โดยเฉพาะเมื่อทำการชุดเจาะอุโมงค์ที่มีระยะทางยาวๆ หรืออุโมงค์ตามแนวโค้ง ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวัสดุของ Tail seal จำนวนของTail seal ที่ใช้และวิธีการในการเติมสารหล่อลื่น

4.1.4 หน่วยชุดตัด

การเลือกหน่วยชุดตัด

การเลือกหน่วยชุดตัดควรพิจารณาจาก การเพิ่มความเร็วในการชุด การประหยัดแรงงาน และความปลอดภัยในการทำงานซึ่งเหมาะสมกับสภาพของหน้าดิน

การเลือกหน่วยชุดตัดควรพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้

- ประเภทของหัวชุดเจาะ
- ประเภทงานหัวชุดตัด
- ประเภทตัวช่วยถ้ำยันของหัวชุดตัด
- แรงบิดของหัวชุดตัด
- หัวส่วนของหัวชุดตัด
- แรงผลักดัน

ประเภทของหัวชุดตัด

การเลือกของหัวชุดตัด สำหรับหัวชุดเจาะแต่ละประเภท (EPB, Slurry, Mechanical) ควรเลือกโดยให้มีความเหมาะสมกับสภาพของดินโดยรอบ และต้องสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาพดินส่วนใหญ่ได้

วัตถุประสงค์ในการใช้หัวชุดตัด คือ เพื่อช่วยความเร็วในการชุดเจาะ ประหยัดกำลังแรงงานและเพิ่มความปลอดภัยในการชุดเจาะเพื่อให้หน้าดินมีเสถียรภาพ ดังนั้นการเลือกประเภทหน้าชุดตัดจึงควรพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้

- ประเภทของหัวชุดตัด
- แรงบิดของหัวชุดตัด

- หักส่วนของหัวขุดตัด
- ประเภทตัวช่วยค้ำยันของหัวขุดตัด
- รอยแยกของหัวขุดตัด
- แรงผลักดัน

(1) ประเภทของหัวขุดตัด

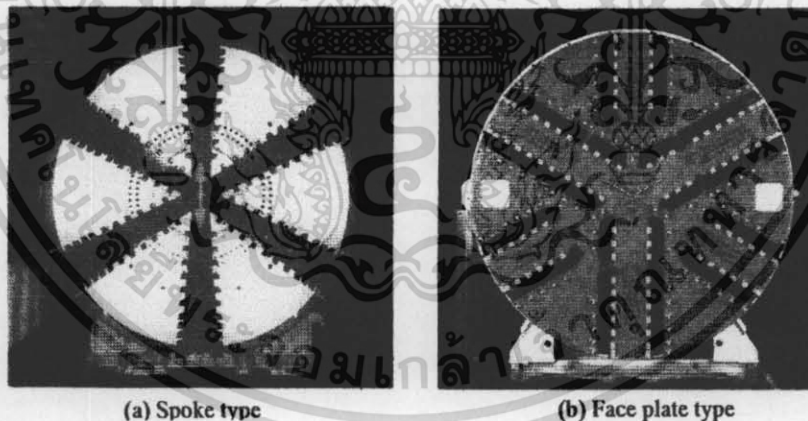
หัวขุดตัดแบบหมุนเป็นชนิดหนึ่งที่กะทัดรัดและใช้งานได้หลากหลาย หัวขุดตัดพิเศษชนิดอื่นๆที่ใช้กัน ได้แก่ หัวตัดแบบเคลื่อนที่และแบบแกว่ง

(2) โครงสร้าง

ในทางโครงสร้างมีประเภทของหัวขุดตัดอยู่ 2 แบบ พื้นฐานคือแพซ์ล้อ (Spoke) และแพหน้าราบ (Face plate) การเลือกประเภทนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งก่อสร้างในที่นั้นและสภาพของดิน ดังรูปที่ 4.10

(3) รูปร่าง

หัวตัดมีรูปร่างหน้าตัดพื้นฐานอยู่ 3 แบบ คือ แบบแบนราบ แบบโค้งเว้า แบบโค้งนูน นอกจากนี้ยังมีหน้าตัดแบบพิเศษซึ่งจัดเรียงหัวขุดเจาะแบบ Multiple และหัวตัดแบบไม่เป็นวงกลม ควรให้ความสนใจถึงการสักร่อนของหัวตัดซึ่งแตกต่างกันไปตามรูปร่างของหัวตัด โดยเฉพาะเมื่อต้องการขุดเจาะอุโมงค์ในเนื้อดินที่มีกรวดปนอยู่



รูปที่ 4.10 ประเภทของหัวตัด

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัด

ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัดควรเลือกให้เหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัด และสภาพของดิน นอกจากนี้ควรเลือกให้เหมาะสมกับเครื่องลำเลียงดินเหลวออก

(1) ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัด

ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัดแสดงดังรูปที่ 4.11

(2) รูปร่างลักษณะ

ลักษณะต่างๆของตัวค้ำยันหัวตัดแตกต่างกันดังนี้

ก) ตัวค้ำยันที่ศูนย์กลาง

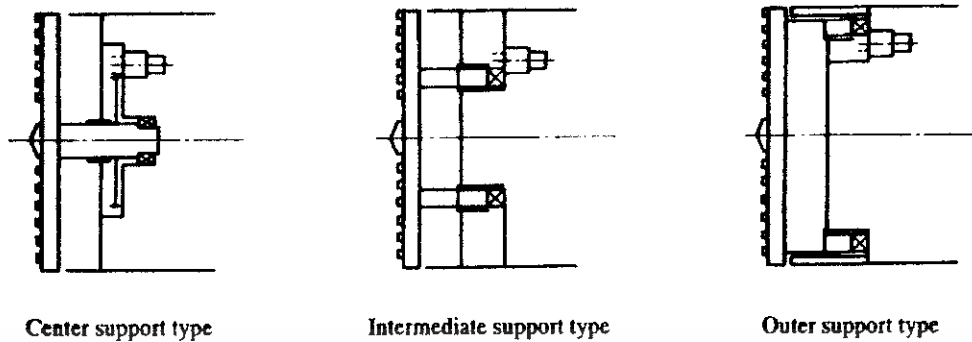
ประเภทนี้มีโครงสร้างที่ธรรมดาใช้งานได้ทั่วไป สำหรับหัวขุดเจาะขนาดเล็กและขนาดกลาง ตัวค้ำยันประเภทนี้สามารถป้องกันการยัดดินของดินเหนียวกับตัวเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเลื่อนหัวตัดได้ง่ายแต่การนำก้อนหินขนาดใหญ่ออกนั้นทำได้ยากเพราะช่วงห่างระหว่างตัวเครื่องมีจำกัด

ข) ตัวค้ำยันที่ช่วงกลาง

ตัวค้ำยันประเภทนี้มีโครงสร้างที่มีความสมดุลดี นิยมใช้งานสำหรับหัวขุดเจาะขนาดกลางและขนาดใหญ่ หากนำตัวค้ำยันประเภทนี้มาใส่กับหัวขุดเจาะขนาดเล็กก็ควรพิจารณาถึงการลำเลียงก้อนหินขนาดใหญ่ออก และการป้องกันดินเหนียวยัดติดกับช่วงกลางของหน้าตัดหัวเจาะ

ค) ตัวค้ำยันที่รอบนอก

ตัวค้ำยันประเภทนี้ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ภายในหัวขุดเจาะ ดังนั้นจึงเป็นการง่ายสำหรับหัวขุดเจาะขนาดเล็กในการลำเลียงเอาก้อนหินขนาดใหญ่ออก มีตัวค้ำยันอยู่ 2 แบบพื้นฐานคือ รูปร่างเป็นวง(กลอง) และรูปร่างแท่งสี่เหลี่ยม(คาน) หากจะใช้ตัวค้ำยันประเภทนี้ก็จำเป็นต้องศึกษาถึงการป้องกันดินเหนียวยัดติดตามวงรอบของหัวเจาะ



Center support type

Intermediate support type

Outer support type

รูปที่ 4.11 ประเภทของตัวค้ำยันหัวตัด

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

แรงบิดของหัวตัด

แรงบิดของหัวตัดควรพิจารณาจากชนิดของดินและประเภทโครงสร้างของหัวขุดเจาะ

(1) การหาค่าแรงบิดของหัวตัด

การหาค่าแรงบิดของหัวตัดควรพิจารณาถึงชนิดของดินรวมทั้งประเภทโครงสร้างและขนาดของหัวขุดเจาะ แรงบิดที่ต้องการ (T_N) ประกอบด้วยแรงบิดส่วนต่างๆ ดังนี้

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

T_N = แรงบิดที่ต้องการ

T_1 = แรงบิดที่จำเป็นเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านทานการขุดเจาะของดิน

T_2 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านทานการเสียดทานของดิน

T_3 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านทานจากการกวนและผสมของดิน

T_4 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงแบกทาน

T_5 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อแรงต้านทานของ bearing seal

T_6 = แรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะต่อการสูญเสียทางกลจากการก่อกวน

(2) สมการแรงบิดของหัวตัด

แรงบิดของหัวตัดสามารถหาได้โดยใช้สมการ

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

T= แรงบิดของหัวตัด

D= เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของหัวขุดเจาะ

α = ตัวคูณประกอบสำหรับแรงบิด

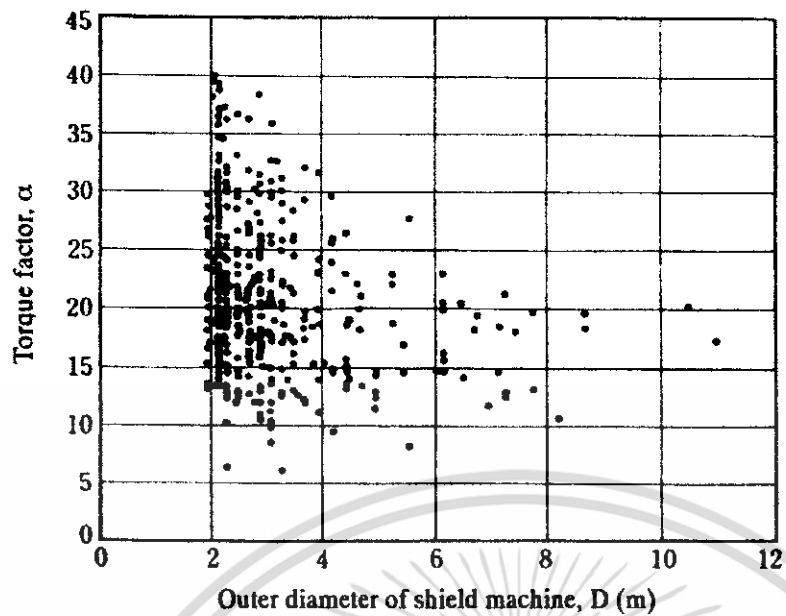
ตัวคูณประกอบสำหรับแรงบิด(α) โดยมากแล้วจะใช้ค่าตามช่วงต่างๆ แม้ว่าความจริงจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขุดเจาะและชนิดของดิน

α = 8-23 สำหรับหัวขุดเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (EPB)

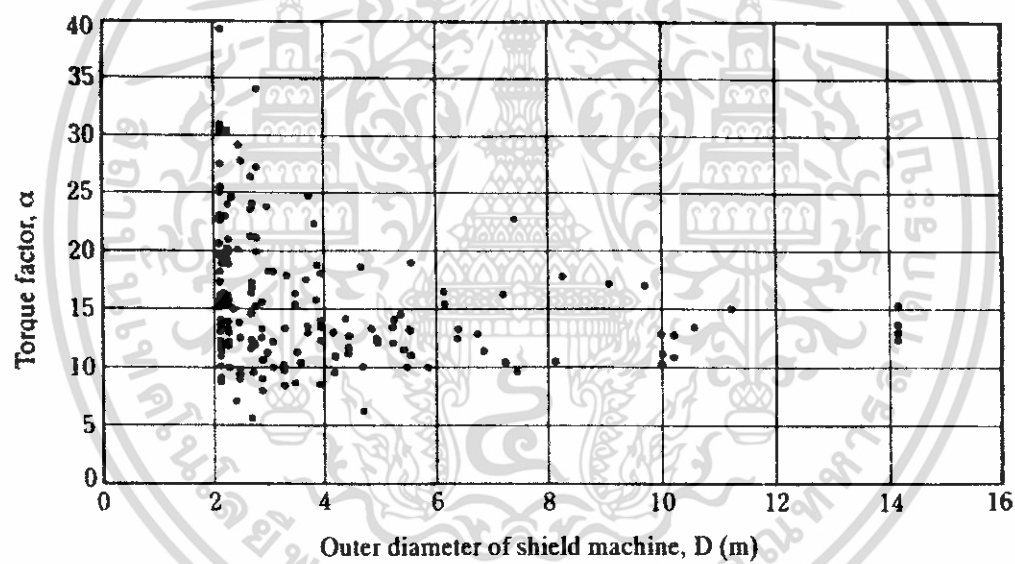
α = 9-15 สำหรับหัวขุดเจาะแบบ Slurry

โดยที่ T มีหน่วยเป็น KNm และ D มีหน่วยเป็น m





(a) Earth pressure balanced shield machine



(b) Slurry shield machine

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอกของหัวคุดเจาะกับตัวคูณประกอบแรงบิด
(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(3) ประเภทของตัวหัวตัด

ประเภทต่างๆของตัวหัวตัดมีลักษณะดังต่อไปนี้

Hydraulic motor: ง่ายต่อการควบคุมแรงบิดและความเร็วในการหมุน นอกจากนี้ยังสามารถปรับทิศทางการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย

Electric motor: มีประสิทธิภาพสูงและช่วยรักษาสภาวะแวดล้อมภายในอุโมงค์ในขณะที่ทำงาน สามารถควบคุมความเร็วการหมุนได้หากใช้แบบมีตัวปรับค่าและง่ายต่อการใช้ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม จำเป็นจะต้องศึกษาวิธีการควบคุมเมื่อต้องปรับทิศทางการเคลื่อนที่

Hydraulic jack: ส่วนใหญ่แล้วใช้สำหรับการขุดเจาะที่ไม่ต่อเนื่องเช่นใช้กับหัวตัดแบบแกว่งไปมา (Oscillating cutters)

รอบแยกของหัวตัด

รูปร่างขนาดและรูปแบบของรอบแยกหัวตัดขึ้นอยู่กับชนิดของดิน เสถียรภาพหน้าดิน และประสิทธิภาพของหัวตัด

(1) รูปร่างและขนาด

รูปร่างและขนาดของรอบแยกถูกกำหนดโดยจำนวนซี่และขนาดของเม็ดกรวดที่เจาะผ่านด้วยหัวขุดเจาะ มีหลายกรณีที่รูปร่างของรอบแยกเป็นเส้นตามแนวซี่และในรูปร่างแบบอื่นๆขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดกรวด โดยทั่วไปแล้วขนาดของรอบแยกหาได้จากขนาดใหญ่ที่สุดของเม็ดกรวดที่พบมีความเป็นไปได้ในการกำหนดขนาดของรอบแยกเพื่อที่จะบดก่อนหินขนาดใหญ่อีกโดยใช้ Roller cutter ที่ติดไว้กับหน้าตัด

(2) อัตราส่วนของการเปิด(Opening ratio)

อัตราส่วนของการเปิดสำหรับรอบแยกของหัวตัด มีสมการดังนี้

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

W_0 = อัตราส่วนของการเปิด

A_i = พื้นที่ทั้งหมดที่เปิดออกในหัวขุดตัด (ไม่รวมพื้นที่หัวสว่านของหัวตัดที่ยื่นออกมา)

A_r = พื้นที่ของหัวตัด

อัตราส่วนการเปิดนั้นโดยมากแล้วอยู่ในช่วง 10-30% สำหรับหัวเจาะแบบ Slurry ส่วนหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (EPB) จะมีอัตราส่วนการเปิดมากกว่าหัวเจาะแบบ Slurry

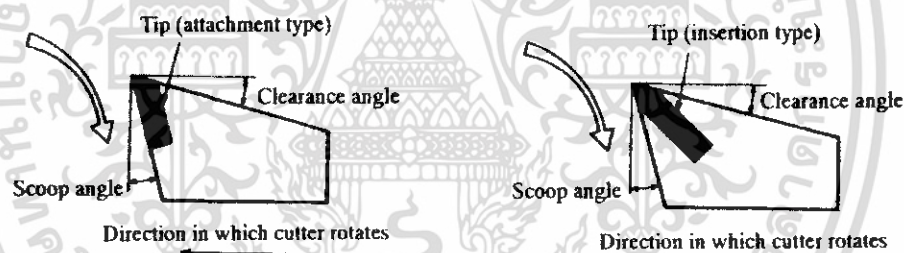
การเพิ่มอัตราส่วนการเปิดนั้นจะเป็นประโยชน์สำหรับหารขุดเจาะในดินเหนียวมาก ๆ เช่น Consolidated clayey soil หากเป็นดินที่มีความเสี่ยงต่อการถล่มลงมา ถ้าหากว่าดินนั้นมีความเสี่ยงในการพังทลายสูง จะต้องทำงานศึกษาอย่างระมัดระวัง เพราะจะมีความเสี่ยงในการขุดเจาะอย่างมาก หากจำเป็นต้องมีหน่วยเปิด ปิด รอบแยกก็ควรคำนึงถึงการป้องกันดินถล่มเข้าไปภายในเครื่องผ่านทางรอบแยกเมื่อเครื่องยนต์หยุดการทำงาน

หัวสว่านของหัวตัด

รูปร่าง วัสดุ และรูปภาพ ของหัวสว่านขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

(1) รูปร่าง

Scoop angle และ Clearance angle ของหัวสว่านควรเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของดิน (ดังรูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.13 รูปร่างของหัวสว่าน (ฟัน)

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

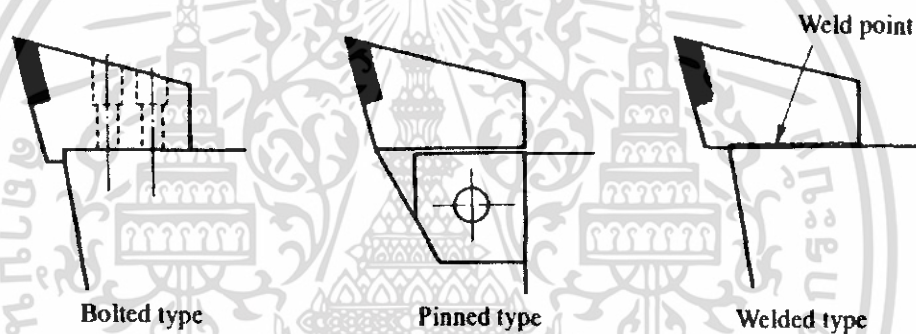
- Consolidated clay
โดยทั่วไปแล้วจะใช้หัวสว่านที่มี Scoop Angle มากๆ
- Gravel layers
โดยทั่วไปแล้วจะใช้หัวสว่านที่มี Scoop Angle น้อย และจำเป็นจะต้องวัดระยะเพื่อป้องกันปลายหัวตัดหักหรือหลุดออกมา

การยื่นออกมาของหัวส่วนต้องพิจารณาโดยการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆดังนี้: การ
คาดการณ์การสึกกร่อนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระยะทางการขุดเจาะ อัตราความก้าวหน้าของงาน
ความเร็วในการหมุนของหัวตัด และความสึกกร่อนของการตัดหากทำการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีความยาว
มากๆควรศึกษาถึงความทนทานของหัวส่วนและวิธีการเปลี่ยนหัวส่วนตามชนิดของดินและระยะทาง
ในการขุดเจาะ

(2) วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ Cemented carbide ในส่วนของปลายหัวส่วน

(3) รูปแบบ

รูปแบบของหัวส่วนควรพิจารณาถึงชนิดของดิน เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขุดเจาะ
ความเร็วในการหมุน และความยาวของอุโมงค์ วิธีการติดหัวส่วนแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ประเภทของการยึดติดหัวส่วน

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

Cutter Bearing Seals

Cutter bearing seals ควรจะสามารถป้องกัน Cutter bearing จากการไหลเข้าของ
ดิน น้ำใต้ดิน และสารผสมเพิ่มอื่นๆ อีกทั้งต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการต้านแรงดันดินใน Cutter
chamber แรงดันน้ำใต้ดิน แรงดันน้ำโคลน แรงดันการฉีดส่วนเสริม และแรงดันอากาศได้

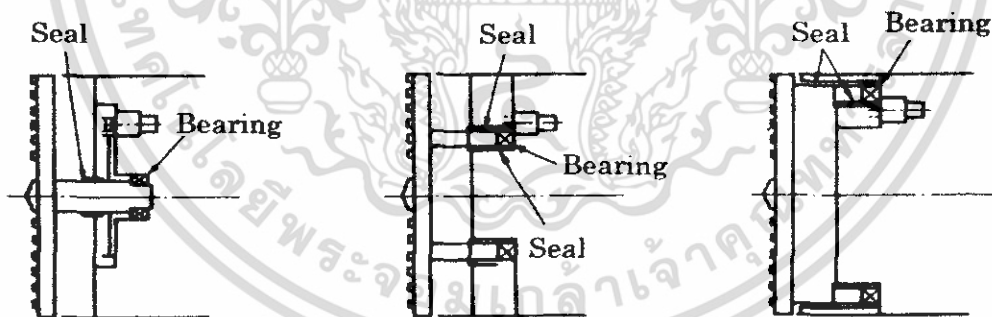
(1) การกำหนดตำแหน่ง ตำแหน่งของ Cutter bearing seals ขึ้นอยู่กับประเภทของ
ตัวค้ำยันหัวขุดตัด (Cutter support) ที่ปิด (Seal) ต้องใส่ให้พอดีกับ Cutter bearing ในตัวค้ำยันหัว
ตัด ดังอธิบายไว้ในเบื้องต้น

(2) วัสดุที่ใช้ ควรจะต้องทนทานต่อแรงดันสีกกร่อน น้ำมัน และความร้อน ดังนั้น เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ดังกล่าวได้ภายใต้สภาวะที่วิกฤตของสภาพดินและแรงดันของน้ำ ส่วนใหญ่แล้วจึงใช้ Nitride rubber และ Polyurethane rubber เป็นวัสดุของ Seal

น้ำหนักกระทำเหนืออุโมงค์ ระดับน้ำใต้ดิน ความดันของสารฉีดเพิ่ม และความยาวอุโมงค์ควรจะต้องนำมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของ Seal ไม่ว่าจะเป็นแบบเดี่ยวหรือแบบหลายๆชั้น Seal ก็ต้องใช้ความเร็วการหมุนรอบของหัวชุดตัด ชนิดสารหล่อลื่น และความดันของสารหล่อลื่น

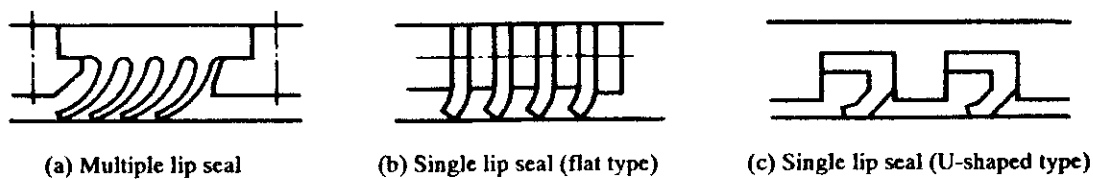
(3) รูปร่าง Cutter bearing seals สามารถใช้ได้ทั้งแบบเดี่ยวหรือแบบหลายๆชั้น วางเรียงเป็นชุด (ดังรูปที่ 4.16) มีการเติมจารบีหรือน้ำมันเพื่อป้องกันการเลื่อนผิวหน้าของ Seal ไม่ให้เกิดการเสียหายจนทำให้ดินผ่านเข้ามาได้

หากแรงดันน้ำสูง ก็จำเป็นต้องศึกษาถึงการลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงดันที่สูงมากระทำต่อ Seal และการลดน้ำหนักที่กระทำบน Seal ทั้งนี้อาจรวมถึงแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการเจาะอุโมงค์ที่มีระยะยาวนั้นต้องศึกษาถึงความทนทานในการเลื่อนไถลของ Seal ภายใต้สภาวะวิกฤตเพื่อความทนทานของ Seal ก็จำเป็นต้องเตรียมการควบคุมตัวอย่างเช่น การควบคุมแรงดันและปริมาณจารบีที่จะอัดเข้าไปหรือเมื่อจะทำการสุมตัวอย่างของเหลวและควบคุมอุณหภูมิของ Bearing seals ก็ต้องใช้ Temperature sensor



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของ Cutter bearing seals

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 4.16 รูปร่างของ Cutter bearing seals

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

หน่วยขุดเจาะเสริม

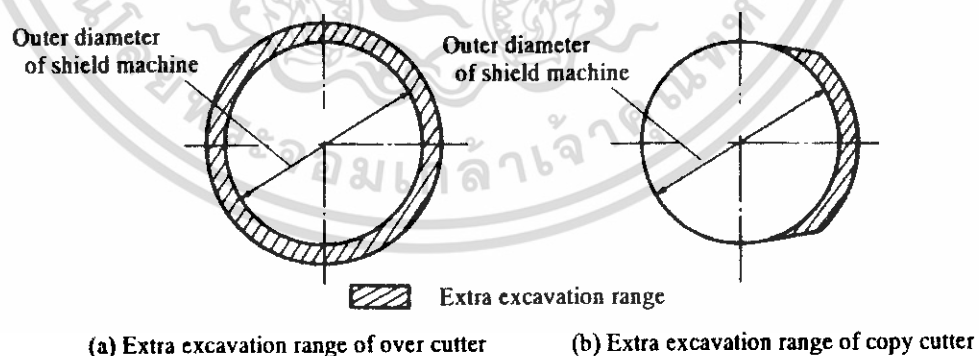
หน่วยขุดเจาะเสริมนี้จะเพิ่มในขั้นตอนการทำงานของหัวขุดเจาะเมื่อต้องการใช้เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของดินและสภาพของการก่อสร้าง

ประเภทของหน่วยขุดเจาะเสริม ได้แก่ แบบ Over cutters และแบบ Copy cutters

(1) Over cutters

การขุดเจาะเพิ่มจะทำรอบๆ ตลอดทั้งอุโมงค์ โดยใช้ Over cutters ซึ่งยื่นออกมาจากหัวขุดตัด (ดังรูปที่ 4.17a)

การควบคุมการขุดเจาะเสริมเกินออกมานั้นอาจปรับเปลี่ยนได้และกำหนดคลงที่เริ่มแรกนั้นส่วนที่ยื่นออกมาของการขุดเจาะตัดเสริมสามารถปรับได้ด้วยไฮดรอลิก ขณะที่หัวส่วนวงนอกจะถูกจัดให้อยู่ริมขอบของหัวตัด



รูปที่ 4.17 ระยะของการขุดเจาะเสริม

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(2) Copy cutters

แบบ Copy cutters จะสามารถขุดเจาะเสริมเป็นรูปส่วนของวงกลมได้ตามระยะต่างๆ ที่ต้องการแม้ว่าส่วนที่ตัดจะยื่นออกจากหัวขุดตัดเหมือนกับ Over cutters (ดังรูปที่ 4.17b)

หลายกรณี Copy cutters ขุดยื่นออกมาโดยใช้กำลังของไฮดรอลิก ทั้งนี้ปริมาณของการขุดเจาะเสริมและระยะของมันควรจะสมารถอ่านค่าและปรับค่าได้ง่ายๆด้วย นอกจากนี้กำลังของหัวตัดเสริมก็จำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ

4.1.5 หน่วยขับเคลื่อน

กำลังผลักรวม

กำลังผลักรวมของหัวขุดเจาะหาได้จากการรวมแรงต้านทานต่างๆที่ต้านทานต่อการขับเคลื่อนของเคลื่อนชนตรวมทั้งส่วนเพื่อเพิ่ม ในขณะที่เคลื่อนเครื่องจะเกิดแรงต้านทานต่อหัวขุดเจาะดังนี้

- 1) การต้านทานจากการเสียดทานหรือการบิดเหินยวกันระหว่างผิวนอกของหัวขุดเจาะกับดินโดยรอบ (F_1)
- 2) การต้านทานจากการเจาะของหัวส่วนในส่วนของหมวกครอบ เมื่อเคลื่อนเครื่อง (F_2)
- 3) การต้านทานที่ผิวหน้าขุดเจาะ (F_3)
 - a.แรงดันภายในห้องเครื่องของหัวขุดเจาะแบบปิดด้านหน้า
 - b.การต้านทานการเคลื่อนที่ของหัวขุดตัดสำหรับหัวขุดเจาะแบบเครื่องชนต์
 - c.แรงปฏิกิริยาจากแม่แรงในกรณีของหัวขุดเจาะแบบใช้มือและแบบกึ่งเครื่องชนต์
- 4) การต้านทานเมื่อเปลี่ยนทิศทาง(แรงต้านทานนี้เกิดตามแนวอูโมงค์และเกิดจากการปรับแก้ทิศทางที่เบี่ยงเบน รวมทั้งการต้านทานจากการปรับเสถียรภาพและการสับัดเพื่อเปลี่ยนทิศทาง)(F_4)
- 5) การต้านทานอันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนผนังอูโมงค์ (segment) กับ Skin plate ที่ส่วนหาง(F_5)
- 6) การต้านทานจากการถูกลากของรถราง(F_6)

ผลรวมของแรงต้านทาน ($\sum F$) สามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้ แรงต้านทานเฉพาะตามประเภทของเครื่องชนตรวมจะต้องศึกษาอย่างละเอียดในการพิจารณาถึงกำลังผลักรวมและส่วนเพื่อเพิ่มที่เหมาะสม

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

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

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

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

$$F_4 = R \cdot S$$

$$F_5 = \mu_2 \cdot G_1$$

$$F_6 = \mu_3 \cdot G_2$$

μ_1 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับดิน

μ_2 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับเหล็ก/คอนกรีต

μ_3 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อรถกับราง

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางวงนอกของหัวขุดเจาะ

L = ความยาวของหัวขุดเจาะ

W = น้ำหนักของหัวขุดเจาะ

G_1 = น้ำหนักของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

G_2 = น้ำหนักของเกียร์รถราง

P_m = แรงดันดินเฉลี่ยที่กระทำต่อหัวขุดเจาะ

P_t = แรงดันที่กระทำต่อหัวตัดขุดเจาะ (เช่น แรงปฏิกิริยาต่อแม่แรง, แรงดันดินที่กระทำต่อฝาถ้ำ, แรงดันดินเหลว เป็นต้น)

c = แรงยึดเหนี่ยว Cohesion

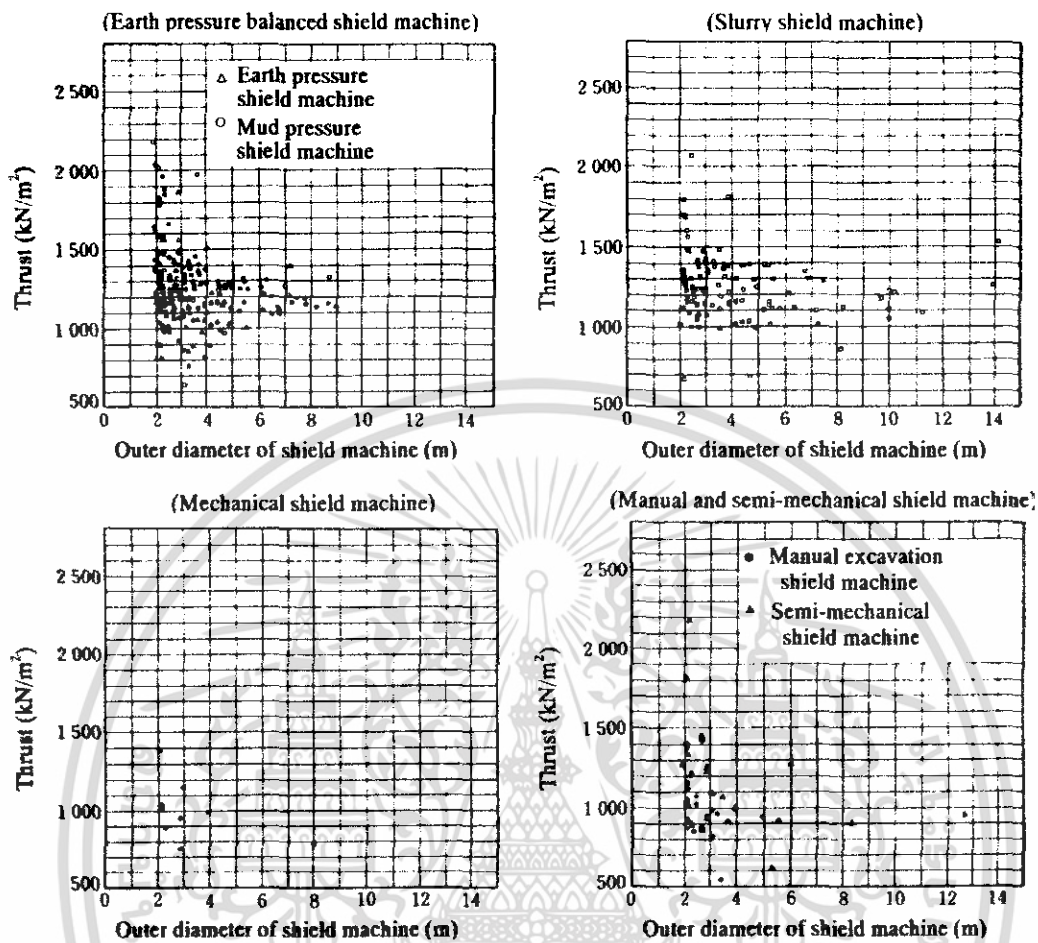
K_p = สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินเมื่ออยู่นิ่ง (passive earth pressure)

R = ความต้านทานแรงดันดิน (แรงหนุน, แรงดันดินเมื่ออยู่นิ่ง, etc.)

l = ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัดขุดเจาะ

t = ความหนาของหัวส่วนที่เจาะเข้าไป

S = พื้นที่ของการดันทานในทิศทางที่ทำการขุดเจาะ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของหัวขุดเจาะกับกำลังผลักดัน

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

การเลือกและวางตำแหน่งแม่แรง

การเลือกและวางตำแหน่งของแม่แรงจะต้องช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของหัวขุดเจาะและประสิทธิภาพในการติดตั้งชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ประเด็นต่อไปนี้เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการเลือกและวางตำแหน่งแม่แรงหัวขุดเจาะ

(1) การเลือกแม่แรงหัวขุดเจาะ

แม่แรงหัวขุดเจาะจะต้องมีโครงสร้างที่กะทัดรัด และทำงานโดยใช้ ไฮดรอลิก ส่วนใหญ่แล้ว แม่แรงมักถูกออกแบบให้ทำงานได้ที่ความดัน Hydraulic สูงถึง 30,000 -- 40,000 kN/m²

(2) การวางตำแหน่งของแม่แรงหัวขุดเจาะ

1) ต้องจัดวางแม่แรงไว้ที่ช่องว่างรอบๆขอบในของ Skin plate อย่างเท่าๆกัน เพื่อให้แรงกระทำรอบวงผนังอุโมงค์อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามระยะห่างของช่องว่างนี้อาจปรับเปลี่ยนไปตามสภาพดินและเงื่อนไขอื่นๆ

2) โดยทั่วไปการวางตำแหน่งแม่แรงนั้นจะต้องให้แกนขนานตามแนวยาวกับแกนหัวขุดเจาะบางกรณีอาจจัดวางให้เกิดการเอียงศูนย์เพื่อป้องกันกระบอกแม่แรง ในกรณีนี้จะต้องพิจารณาถึงแรงดัดที่กระทำต่อกระบอกแม่แรงด้วย

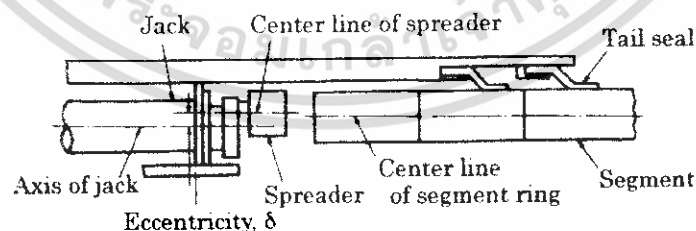
(3) จำนวนแม่แรงหัวขุดเจาะ

กำลังแรงผลักและจำนวนของแม่แรงที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขุดเจาะ กำลังแรงผลักรวม โครงสร้างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์และแนวเส้นของอุโมงค์ ส่วนมากแล้วสำหรับหัวขุดเจาะขนาดกลางและขนาดเล็กจะใช้กำลังแรงผลักแม่แรง 600-1,500 kN แต่สำหรับหัวขุดเจาะขนาดใหญ่ใช้กำลังแรงผลักแม่แรง 2,000-4,000 kN

(4) หัวกด (Spreaders)

1) หัวกดต้องขนติดกับหัวของก้านตูดสูบแต่ละตัวและเชื่อมต่อกับแม่แรงด้วยหมุดยึดหรือข้อต่อทรงกลมเพื่อให้กำลังแรงผลักกระทำต่อขอบผนังอุโมงค์กระจายอย่างสม่ำเสมอ

2) ในบางครั้ง แกนกลางของหัวกดอาจไม่ตรงกับแนวแกนของแม่แรง ให้ถือว่าแรงเอียงศูนย์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้นมีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ยังอาจมีการเปลี่ยนแปลงหัวกดเพื่อให้เหมาะสมกับความหนาของผนังอุโมงค์ซึ่งแตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการติดตั้งหัวกดที่เอียงศูนย์กับผนังอุโมงค์

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

3) ต้องหาขนาดของหัวกดซึ่งไม่ทำให้เกิดแรงส่วนเกินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของผนังอุโมงค์เหล็กและผนังอุโมงค์ RC แบบมีโครงสร้างจะต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโครงในแนวตั้งด้วย

4) วัสดุที่ใช้เป็นหัวกดขึ้นอยู่กับชนิดของผนังอุโมงค์ ซึ่งอาจจำเป็นต้องบุด้านในหัวกด ด้วยยางเพื่อป้องกันขอบของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ผนังอุโมงค์

ระยะการผลึกของแม่แรง

ระยะต้นของแม่แรงหัวชุด จะต้องพอดีกับความกว้างของผนัง รวมทั้งระยะขอบผนัง โดยทั่วไประยะต้นของแม่แรงเท่ากับความกว้างของผนังบวกด้วย 100-150 มิลลิเมตร สำหรับการใส่ K segment ในทิศตามแนวยาวนั้นจำเป็นต้องมีระยะยาวกว่าและขึ้นอยู่กับวงรอบของ K segment และมุมในการใส่

อัตราการผลึกของลูกสูบแม่แรง

การหาความเร็วในการทำงานของแม่แรงจะต้องพิจารณาโดยคำนึงถึงความเร็วในการ เดินหน้าชุดเจาะของหัวชุดและประสิทธิภาพในการก่อสร้างที่ได้ ส่วนใหญ่แล้วแม่แรงจะทำงานใน อัตรา 50-100 มิลลิเมตร/นาที เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการก่อสร้างก็จะต้องเพิ่มอัตราการดัน ของแม่แรงด้วย

4.1.6 ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

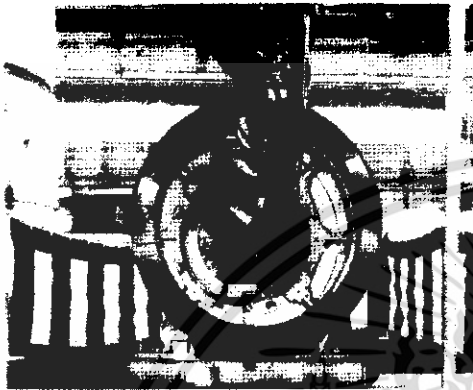
การเลือกชุดติดตั้งผนังอุโมงค์

การเลือกชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ที่เหมาะสมในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ให้มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพนั้นต้องพิจารณาจากชนิดและขนาดของหัวชุดเจาะ ขนาดของ ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ระบบลำเลียงดินและวงจรในการทำงาน

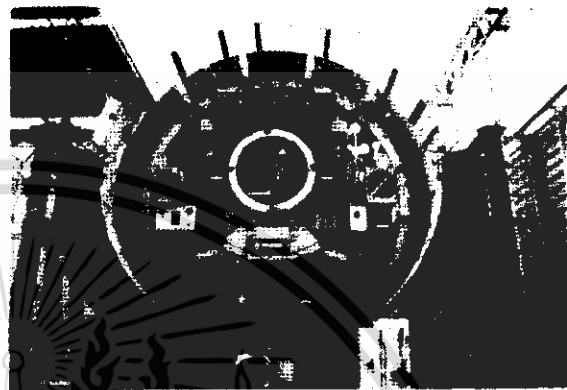
ชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ใช้ในการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ภายในส่วนหางของหัวชุด เจาะ ชุดติดตั้งนี้จึงต้องสามารถหมุน เลื่อน เดินหน้า ถอยหลัง และการยื่นตัวจับผนังอุโมงค์เข้าและออก ซึ่งใช้ระบบเหล่านี้ใช้ระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น

ชุดติดตั้งผนังอุโมงค์นี้จะติดตั้งอยู่บนคานวงแหวนของหัวขุดเจาะนั่นเองหรือไม่เช่นนั้นก็จะติดตั้งบนชุดเกียร์พ่วงซึ่งลากตามท้าย

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



(a) แบบวงแหวน(Ring type)



(b) แบบท่อกกลาง (Hollow shaft type)

รูปที่ 4.20 ประเภทของชุดติดตั้ง

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

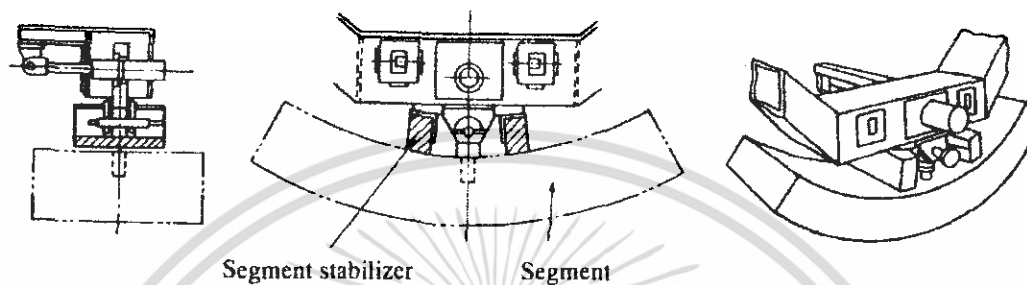
- a) แบบวงแหวน: ชุดติดตั้งแบบวงแหวนมีแขนซึ่งสามารถยื่นออกได้ติดตั้งบนวงแหวนกลางซึ่งรองรับอยู่บนล้อเลื่อนที่ส่วนท้ายของคานวงแหวนหรือในส่วนหางของหัวขุดเจาะติดกับหัวคดผนังอุโมงค์
- b) แบบท่อกกลาง: ชุดติดตั้งแบบท่อกกลางนี้มีแกนการหมุนแนวเดียวกับแนวศูนย์กลางหัวขุดเจาะ สามารถติดตั้งอุปกรณ์ขนส่งลำเลียงดินไว้ในท่อกกลางนี้ได้

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

(3) ชุดประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์อัด โนมัตติ

ชุดประกอบแบบอัตโนมัติสามารถนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- a) เพิ่มความปลอดภัยในการประกอบผนังอุโมงค์
- b) เพิ่มความแม่นยำในการติดตั้ง
- 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 ในระหว่างการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์หรือการเรียงแนวชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ แรงนี้ต้องมีค่ามากกว่า 5 เท่าของน้ำหนักชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ใหญ่ที่สุด
- 2) แรงยก: แรงยกโดยทั่วไปคือ 1.5-2 เท่าของน้ำหนักชิ้นส่วนผนังที่ใหญ่ที่สุด

3) แรงหมุน: ชุดติดตั้งต้องสามารถหมุนและหยุดอยู่กับที่ในขณะที่ทำการยึดจับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ซึ่งหนักที่สุดที่ตำแหน่งสูงสุดได้

4) ความเร็วการหมุน: ความเร็วการหมุนมีแบบความเร็วสูงและต่ำ โดยทั่วไปความเร็วสูงคือ 250-400 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วต่ำคือ 10-50 มิลลิเมตร/วินาที ที่ขอบนอก

5) ความเร็วการยึดเข้า-ออก: ความเร็วในการยึดเข้าและออกของกระบอกไฮดรอลิกในทิศทางตามแนวรัศมี มีอัตราการยึดเข้า-ออกคือ 50-200 มิลลิเมตร/วินาที

6) การเคลื่อนตามแนวยาว: คือระยะทางที่ชิ้นส่วนผนังเคลื่อนที่โดยชุดติดตั้งไปตามแนวทิศทางของอุโมงค์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วคือ 150-300 มิลลิเมตร

7) ความสามารถเพิ่มพิเศษสำหรับชุดติดตั้งผนังอุโมงค์อัตโนมัติ: ชุดติดตั้งอัตโนมัติจำเป็นต้องมีการควบคุมแรงและความเร็วคงที่บรรยายไว้ข้างต้นข้อ 1) ถึงข้อ 5)

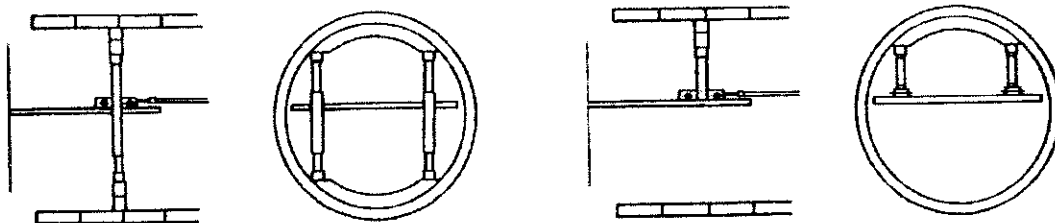
8) แรงดันไฮดรอลิก: แรงดันไฮดรอลิกที่ใช้ในระบบคือ 10,000-20,000 kN/m²

ส่วนเสริมของชุดประกอบผนังอุโมงค์

เพื่อให้การประกอบติดตั้งผนังอุโมงค์มีความถูกต้อง การใช้ส่วนเสริมของชุดประกอบผนังอุโมงค์จะมีประโยชน์อย่างยิ่งเช่น ชุดรักษารูปทรงของวงผนังอุโมงค์

นอกจากการประกอบติดตั้งผนังอุโมงค์ชิ้นส่วนแรกให้ใกล้เคียงกับรูปร่างกลมแล้วนั้น การประกอบผนังอุโมงค์ในชิ้นส่วนถัดมาก็อาจกลายเป็นความยุ่งยากได้เช่นกัน จึงต้องมีวิธีการทำให้การติดตั้งมีความถูกต้องดังนี้

- 1) วิธีการปรับให้ผนังอุโมงค์เป็นวงกลม โดยการใช้แม่แรงไฮดรอลิกยึดติดกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์(ดังรูปที่ 4.22)
- 2) วิธีการปรับให้ผนังอุโมงค์เป็นรูปร่างกลมโดยการให้มีการสัมผัสติดกับผิวด้านในของส่วนหางหัวชุดเจาะ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการตกลงของชิ้นส่วนผนังได้โดยการใช้ชิ้นส่วนผนังส่วนนำ ติดกับผิวในของส่วนหางหัวชุดเจาะ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนหางก็จะมีผลต่อการควบคุมทิศทางของหัวชุดเจาะ ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาให้ดีเสียก่อน



a) ระบบยึดออกทางแนวตั้ง

b) ระบบยึดออกเฉพาะซีกบน

รูปที่ 4.22 ชุดรักษารูปทรงของผนังอุโมงค์

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

4.1.7 ระบบไฮดรอลิก ระบบไฟฟ้า และระบบควบคุม

ระบบไฮดรอลิก

วงจรไฮดรอลิกถูกจัดไว้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ไฮดรอลิกต่างๆ และต้องสามารถหยุดได้อย่างสมบูรณ์ปลอดภัย เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉินขึ้น อุปกรณ์ไฮดรอลิกต่างๆ ต้องพิจารณาเลือกให้เหมาะสมกับเงื่อนไขพิเศษต่างๆ ด้วย

วงจรไฮดรอลิกถูกจัดไว้สำหรับระบบแม่แรงหัวขุดเจาะ ระบบหัวตัด และระบบชุดติดตั้งผนังอุโมงค์ โดยที่กำลังของแต่ละวงจรจะจัดแยกเฉพาะหรืออาจจัดแบ่งร่วมกันระหว่างระบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ก่อสร้างทั่วไปแล้ว วงจรไฮดรอลิกของหัวขุดเจาะเป็นระบบที่ความจุและแรงดันสูงกว่าและจะต้องทำงานภายใต้สภาพการณ์ที่เลวร้าย ดังนั้นในการเลือกและการออกแบบอุปกรณ์จะต้องระมัดระวังและมีข้อที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- แต่ละส่วนประกอบจะต้องทำงานตามการควบคุมสั่งการและส่วนประกอบซึ่งใช้ในการบรรจุจะต้องยึดอย่างมั่นคงอยู่กับที่เมื่อเกิดการกระเทือนสั่นไหว อีกทั้งอุปกรณ์ต่างๆ ต้องยึดแน่นอยู่ที่ตำแหน่งหยุดนิ่งที่ถูกต้องเมื่อไฟฟ้าดับหรือเมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน
- การเลือกอุปกรณ์ไฮดรอลิกต้องมีความทนทานและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดเสียงดังภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความชื้นสูง มีเศษดิน และฝุ่นละออง

- c) น้ำมันหล่อลื่นไฮโดรลิกซึ่งกลั่นจากปิโตรเลียม เช่น JIS K 2213 turbine oil ส่วนใหญ่แล้วใช้กับอุปกรณ์ไฮโดรลิก เนื่องจากความสะอาดของน้ำมันไฮโดรลิกมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดฝุ่นออกจากระบบท่อไฮโดรลิก
- d) ในที่ซึ่งมีการเกิดประกายไฟเกิดขึ้น ต้องทดสอบรอยรั่วของถังน้ำมันโดยการเติมน้ำลงในถังเพื่อทดสอบ

ระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าต่างๆต้องป้องกันให้อยู่ห่างจากน้ำ ความชื้น และป้องกันการสั้นสะเทือน ควรจัดวางไว้ในที่ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน ตรวจสอบ และบำรุงรักษา

เมื่อต้องการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในอุโมงค์ซึ่งมีความชื้นและการรั่วซึมของน้ำ จะต้องพิจารณากรณีต่อไปนี้เป็นพิเศษ

- a) มอเตอร์: สิ่งจำเป็นพื้นฐานสำหรับมอเตอร์คือจะต้องคิดพัฒนาระบบความร้อน ซึ่งออกแบบมาสำหรับใช้งานในภาคสนามได้
- b) แผงควบคุม: แผงควบคุมมอเตอร์ บอร์ดจ่ายไฟ และแผงควบคุมไฟฟ้า ต้องสามารถทนทานต่อสภาพที่มีหยดน้ำในอุโมงค์และออกแบบมาเพื่อใช้งานในภาคสนาม ควรตั้งอยู่ในตำแหน่งซึ่งมีหยดน้ำขึ้นน้อยที่สุด
- c) อุปกรณ์ตรวจจับข้อผิดพลาด: อุปกรณ์ตรวจจับข้อผิดพลาดต้องถูกต้องตามมาตรฐานโครงสร้างและระเบียบความปลอดภัย เช่นเดียวกับข้อบังคับสัญลักษณ์และความปลอดภัยในอุตสาหกรรม
- d) หากภายในอุโมงค์มีแก๊สติดไฟ เช่นมีเทน ก็จำเป็นต้องมีการวัดค่าระดับเพื่อป้องกันการปะทุระเบิดอันเกิดจากสภาวะความเสี่ยงของการทำงานภายในอุโมงค์

ระบบควบคุม

ระบบควบคุมจะต้องออกแบบให้สามารถควบคุมได้ทุกส่วนของหัวขุดเจาะ ทั้งส่วนการขุดเจาะ การเดินหน้าของหัวขุด การลำเลียงดิน การติดตั้งผนังอุโมงค์ และส่วนอื่นๆให้ทำงานกันอย่างสมดุล อีกทั้งต้องสามารถจัดการกับการดำเนินงานที่ผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย โดยในการออกแบบระบบควบคุมนั้นต้องพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้

- a) ต้องสามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพการดำเนินงานในแต่ละส่วนได้อยู่เสมอ และข้อมูลการปฏิบัติงานที่บกพร่องต้องง่ายต่อการอ่านผล

- b) ต้องจัดให้มีการเชื่อมต่อและสัญญาณเตือนเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับส่วนต่างๆ ในกรณีที่เกิดการดำเนินงานผิดพลาด
- c) ในสถานการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับหรือในกรณีฉุกเฉินนั้น แต่ละส่วนต้องพร้อมที่จะหยุดการทำงานและอยู่ในสถานะที่มีความปลอดภัยได้

4.1.8 หน่วยเสริม

หน่วยควบคุมทิศทาง

ต้องสามารถควบคุมทิศทางการทำงานของหัวขุดเจาะได้ ตามสภาพดิน แนวอุโมงค์ และประเภทของหัวขุดเจาะ ได้อย่างเหมาะสม

หน่วยควบคุมทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาทิศทางการทำงานของหัวขุดเจาะ เพื่อให้การเดินหน้าของหัวขุดเจาะเดินหน้าไปตามแนวอุโมงค์ที่ได้วางไว้อย่างถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อทำการขุดเจาะตามแนวโค้งและเนินลาด หน่วยควบคุมทิศทางนี้จะนำมาใช้งานก็ต่อเมื่อไม่สามารถควบคุมทิศทางได้โดยการใช้แค่แม่แรงหัวขุดเจาะเพียงอย่างเดียว ในการออกแบบหน่วยควบคุมทิศทางต้องพิจารณาเพิ่มเติมถึงจุดศูนย์ถ่วงและแรงลอยตัวด้วย ดังนี้

(1) หน่วยควบคุมทิศทาง ต้องมีรูปร่างและความแข็งแรงเหมาะสม ทนทานต่อแรงกดของดินเมื่อเดินหน้าการขุดเจาะ ความแข็งแรงของส่วนประกอบต่างๆของหัวขุดเจาะ ซึ่งอยู่ติดกับหน่วยควบคุมทิศทาง เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

(2) ประเภท รูปร่าง จำนวน และตำแหน่งของหน่วยควบคุมนี้ ต้องทำการพิจารณาจากแนวของอุโมงค์ ความแข็งของชั้นดิน และประเภทของหัวขุดเจาะ ให้มีความเหมาะสม

ระบบควบคุมทิศทางประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1) หน่วยขุดเจาะเสริม : หน่วยขุดเจาะเสริมจะทำหน้าที่ ขุดอุโมงค์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดหัวขุดเจาะ โดยที่ Over cutter และ Copy cutter จะสัมผัสติดกับหัวตัดของหัวขุดเจาะทั้งแบบแรงดันดินสมดุล แบบ Slurry และหัวเจาะแบบเครื่องยนต์ (Mechanical excavation) การขุดเจาะเสริมจะช่วยให้การลดแรงรูดลากของดินและเพิ่มความง่ายในการควบคุมทิศทาง

2) ตัวรับเสถียรภาพ : ปีกที่ยื่นออกจากหัวขุดเจาะในทิศทางการเดินหน้าขุดเจาะนั้น จะช่วยเพิ่มแรงดูดและป้องกันการเลี้ยวหมุนของหัวขุดเจาะ ซึ่งหากปีกเหล่านี้เอียงจะทำให้เกิดแรง หมุนขึ้นได้

3) แผ่นการต้านทาน : แผ่นการต้านทานจะยื่นออกจากหัวขุดเจาะด้วยมุมที่ถูกต้อง ตามทิศทางการเดินขุดเจาะ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มแรงดูดของดินและช่วยควบคุมทิศทางการขุดเจาะ

4) หางเสือ : ปีกหางเสือจะยึดอยู่คงที่ ที่ท้ายของหัวขุดเจาะ เพื่อป้องกันการทรุดตัว และช่วยให้ทิศทางการขุดเจาะมีความถูกต้อง

5) ที่จับยึด : ที่จับยึดจะเกิดแรงต้านทานผนังอุโมงค์ เป็นแรงปฏิกิริยาที่ใช้ควบคุมทิศ ทางการขุดเจาะอุโมงค์

ส่วนข้อต่อ

ส่วนข้อต่อต้องอยู่ในสภาพที่ดีและเหมาะสมกับแนวอุโมงค์ สภาพดิน และประเภท ของหัวขุดเจาะอุโมงค์

เมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ตามแนวโค้ง จำเป็นต้องเตรียมส่วนข้อต่อของหัวขุดเจาะให้ พร้อม ส่วนข้อต่อนี้ทำหน้าที่เชื่อมสองส่วน คือส่วนหน้าและส่วนท้ายของหัวขุดเจาะเข้าไว้ด้วยกัน และ ขอมให้สามารถปรับมุมมองได้ ทั้งนี้วัตถุประสงค์ก็เพื่อลดปริมาณการขุดเจาะเสริมที่จำเป็นในการขุด เจาะตามแนวโค้ง และปรับส่วนประกอบที่ใช้ในการผลักดันหัวขุดเจาะให้เหมาะสมต่อการเลี้ยว

การเลือกส่วนข้อต่อต้องพิจารณาประเด็นต่อไปนี้เป็นพิเศษ

(1) ความแน่นของการอุดกันการรั่วซึมของน้ำทั้งสองฝั่ง

(2) การเชื่อมศูนย์ระหว่างแม่แรงหัวขุดเจาะ กับแนวศูนย์กลางของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

เมื่อมีการเบี่ยงเบนหัวขุดเจาะที่จุดข้อต่อ

(3) สิ่งกีดขวางที่ Screw conveyor หรือท่อขนถ่ายลำเลียงดินภายในหัวขุดเจาะ

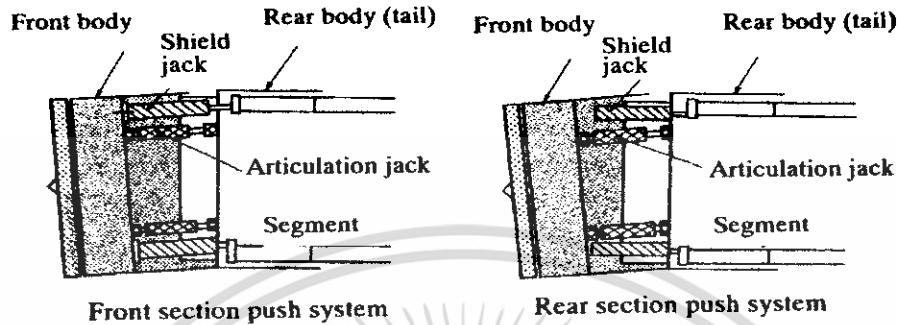
1) ประเภทของส่วนข้อต่อ : ส่วนข้อต่อมีสองประเภท คือ แบบติดกับแม่แรงหัวขุดเจาะซึ่งผลัดจากส่วน หน้า และแบบติดกับแม่แรงซึ่งผลัดออกจากส่วนท้าย

2) กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ : กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อมีสองรูปแบบ คือ

X-Articulation mechanism มีข้อหมุนที่จุดตัด

V-Articulation mechanism ไม่มีข้อหมุนที่จุดตัด

3) กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อเสริม : เพื่อช่วยลดการต้านทานของดินและลดความจำเป็นในการขุดเจาะเสริม อาจจะต้องมีกลไกการทำงานของหัวตัดให้สามารถถอดเปลี่ยนได้ หรือกลไกที่ยอมให้มีการเลื่อนหรือการเอียงของหัวตัดซึ่งเอียงไปทางรัศมีวงในของอุโมงค์ตามแนวโค้ง



รูปที่ 4.23 ประเภทของส่วนข้อต่อ

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

รูปที่ 4.24 กลไกการทำงานของส่วนข้อต่อ

(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

อุปกรณ์งานสำรวจ

อุปกรณ์การสำรวจต้องสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมและมีความถูกต้องแม่นยำภายใต้สภาพแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันสูงในอุโมงค์ใต้ดิน

อุปกรณ์การสำรวจต้องเลือกให้มีความเหมาะสมกับหัวขุดเจาะ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมแนวทางของอุโมงค์ อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้มีดังนี้

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

สำหรับการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของหัวขุดเจาะอัตโนมัติ จะใช้เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์และ Gyro compass

หน่วยฉีดอัดปูนเหลว

หน่วยฉีดอัดปูนเหลวต้องสามารถอัดฉีดปูนให้อุดเต็มช่องว่างในส่วนหางของหัวชุดเจาะ อีกทั้งต้องมีความสะดวกในการดูแลรักษา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกวัสดุ วิธีการฉีดอัด และปริมาณการฉีดอัดที่เหมาะสม

การฉีดอัดปูนเหลวจำเป็นต้องทำการติดตั้งท่อลำเลียงที่ส่วนหางหัวชุดเจาะ หน่วยอัดฉีดต้องสามารถอัดฉีดปูนเหลวได้อย่างต่อเนื่อง ท่ออัดฉีดต้องมีขนาดที่เหมาะสมและอยู่ในตำแหน่งที่ไม่กระทบต่อดินรอบอุโมงค์ และทำความสะอาดต่อทางเข้า

ควรพิจารณาถึงการป้องกันน้ำและดินไหลย้อนกลับเข้าสู่ท่ออัดฉีดเมื่อทำการฉีดอัดปูนเหลว ยิ่งไปกว่านั้นควรเตรียมการทำความสะอาดภายในอุปกรณ์ที่มีการไหลของปูนเหลว เพราะอาจเกิดการแข็งตัวภายในท่อ

เกียร์พ่วง

เกียร์พ่วงลากตามท้ายหัวชุดเจาะ ใช้สำหรับเคลื่อนอุปกรณ์ในการขับหัวชุดเจาะและเพื่อการบรรจุอัดเก็บวัสดุเพิ่มไว้ในนั่งร้านทำหน้าที่ในการลากห้องพักพนักงาน หน่วยไฮดรอลิกและหน่วยไฟฟ้า ซึ่งไม่สามารถตั้งอยู่ในหัวชุดเจาะได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวชุดเจาะเช่นเดียวกับอุปกรณ์การลำเลียงดิน อุปกรณ์ฉีดอัดปูนเหลว และเครื่องจับยึดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ องค์การจัดพื้นที่ว่างในการทำงานให้เหมาะสมไว้ในอุโมงค์ และรูปแบบของเกียร์พ่วงต้องพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้

- 1) การบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆบนเกียร์พ่วง
- 2) การลำเลียงดินที่ขุดและเคลื่อนย้ายผนังอุโมงค์
- 3) ความจำเป็นสำหรับนั่งร้าน

มาตรการในการจัดการความปลอดภัยเป็นสิ่งจำเป็นอีกประการเพราะเป็นการยากที่หัวชุดเจาะอุโมงค์ได้ดินขนาดเล็กจะมีเส้นทางฉุกเฉิน สำหรับมาตรการอื่น เช่น การติดตั้งรถเลื่อนใช้มือโยก เพื่อป้องกันในกรณีที่มีการบาดเจ็บนั้น เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุโมงค์ขนาดใหญ่

เกียร์พ่วงที่ใช้กันมีสองประเภท แบ่งตามรูปแบบของหน้าตัด คือ แบบโครง และแบบด้านเดียว การเลือกประเภทให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดอุโมงค์และเงื่อนไขในการก่อสร้าง

โดยทั่วไปจะคิดรางไว้สำหรับเกียร์พวง หรืออาจจะวางรางอยู่บนฐานรองรับให้พอดีกับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ รถลากจะเคลื่อนโดยการลากจูงหรือเคลื่อนได้ด้วยตัวของมันเอง ก่อนหน้านี้จะเป็นการเชื่อมติดไว้กับหัวขุดเจาะโดยใช้ท่อนเหล็กและเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวขุดเจาะ แล้วต่อมาจึงเป็นการเคลื่อนที่ด้วยตัวของมันเอง ให้เดินตามหัวขุดเจาะ ในการออกแบบลักษณะรูปร่างของเกียร์พวงนั้นต้องพิจารณาในประเด็นด้านความปลอดภัย ตามสภาพในการก่อสร้างด้วย ได้แก่ การจัดช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์กับเกียร์พวงให้เหมาะสม เมื่อทำการขุดเจาะในช่วงที่โค้งมากๆ และต้องมีการป้องกันเกียร์พวงจากการล้มคว่ำหรือการตรวง และการป้องกันจากการที่ไม่สามารถควบคุมได้ เมื่ออยู่บนเนินที่ลาดเอียงมากเกินไป

ระบบน้ำมันหล่อลื่น

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

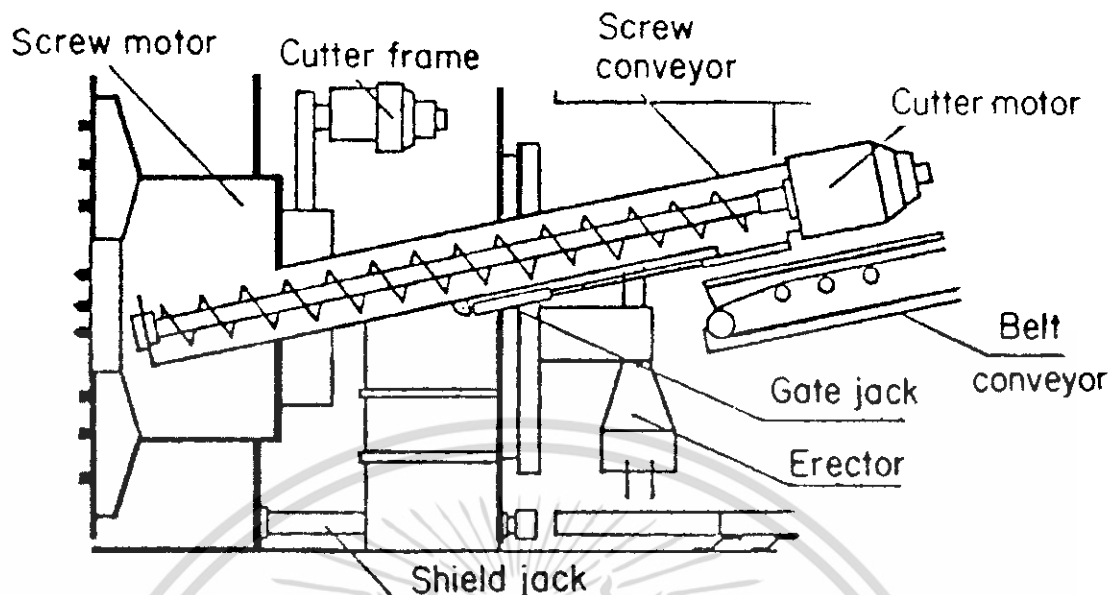
ต้องมีการจัดเตรียมระบบน้ำมันหล่อลื่นไว้อย่างเพียงพอ สำหรับการทำงานของ Cutter bearing, Cutter bearing seal, Reduction gears, Agitator, Screw conveyor และหน่วยเชื่อมต่อต่างๆ การที่จะทำให้หน่วยต่างๆเหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมนั้น ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณตามข้อกำหนดของวิธีการเติม ตามหลักการแล้วนั้นต้องควบคุมดูแลระบบน้ำมันหล่อลื่นเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของวงจรการทำงานของหัวขุดเจาะ

4.2 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ Earth Pressure Balance (EPB)

(1) บทนำ

หลักการพื้นฐานของหัวเจาะแบบ EPB ถูกพัฒนาขึ้นโดย บริษัท Sato Kogyo จำกัด ซึ่งได้พยายามที่จะหาวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน แม้ว่าโครงการจำนวนมากโดยการใช้หัวเจาะแบบ Compressed air และ Slurry ถูกทำสำเร็จขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ทว่าวิธีการนี้ก็มีข้อเสียและข้อจำกัดหลายอย่าง ซึ่งทางบริษัทได้พยายามที่จะแก้ไข ในขณะนั้นหัวเจาะแบบ Slurry ถูกใช้ทั่วไปในการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตาม มันถูกพบว่ามันมีต้นทุนสูงและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่แพง เนื่องจากหัวเจาะแบบ Slurry ต้องมีโรงงานที่แยกกันบนผิวดิน ดังนั้นทางบริษัท Sato Kogyo จึงต้องการหาเครื่องมือ ที่สามารถขุดเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับสภาพทางธรรมชาติ รวมถึงกฎหมายที่ระบุไว้ในหลายๆเมืองในประเทศญี่ปุ่นเอง (Stack 1982) นี่รวมถึงกฎหมายเกี่ยวกับการควบคุมมลภาวะทางน้ำและอากาศ ระบบจัดการน้ำในอุตสาหกรรม การบำบัดของเสีย การรักษาความสะอาด การป้องกันการขาดออกซิเจน และการป้องกันสารพิษในอากาศ เป็นต้น พัฒนาการของหัวเจาะแบบ EPB จึงได้เริ่มขึ้นโดยบริษัท Sato Kogyo ในปี 1963 และจากผลงานวิจัยจำนวนมากทั้งจากในห้องทดลองและในภาคสนาม ในปี 1966 หัวเจาะนี้จึงได้ถูกสร้างขึ้นโดยบริษัท Ishikawajima Harima Heavy Industries จำกัด ในปี 1974 หัวเจาะ EPB อันแรกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 3.72 เมตร ได้ถูกใช้สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ที่มี 1,900 เมตร ในเมืองโตเกียว รูปที่ 4.25 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 คือ ระบบ Earth pressure balance หัวเจาะแบบ EPB มีข้อดีที่เหนือกว่าหัวเจาะแบบอื่นด้วยที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



Shield Machine (Earth Pressure Type)

รูปที่ 4.25 อธิบายส่วนประกอบ Earth Pressure Balance shield โดย Sato Kogyo (1963)

ตารางที่ 4.2 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

(2) การขุดเจาะ

ในเทคนิคการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแบบ EPB อุโมงค์จะถูกขุดเจาะได้โดยหัวไบพัต ดินที่ถูกขุดออกจะถูกเอาออกโดยตัวขนส่งแบบ Screw conveyor และ Belt conveyor ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 และ รูปที่ 4.27 ตามลำดับ จากช่องเก็บดินขนย้ายโดยการป้อนดังรูปที่ 4.28 หรือ

การขนย้ายโดยหั่วรถจักร (รูปที่ 4.29) ในทางปฏิบัติ เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินให้น้อยที่สุด แรงดันของดินที่หั่วใบพัดจะถูกต้องคอยระวังและควบคุมดังนี้

1) แรงดันด้านหน้าที่ตั้งไว้ในรอบการขุดเจาะแต่ละครั้งจำเป็นต้องถูกกำหนดก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยขึ้นกับการออกแบบแนวอุโมงค์และสภาพดินใต้พื้นผิว แรงดันที่ตั้งไว้จะถูกใช้เป็นปัจจัยที่ควบคุมการขุดเจาะทั้งหมด

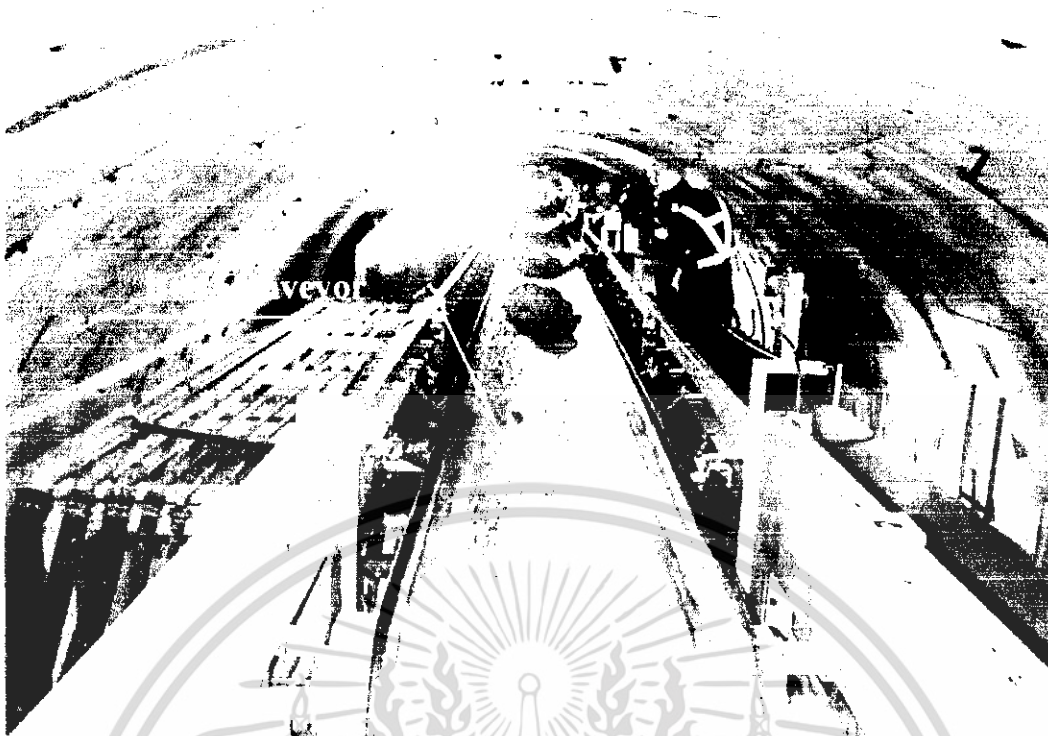
2) ในระหว่างการขุดเจาะ แรงดันจริงๆจำเป็นต้องถูกบันทึกไว้และควบคุมและรักษาไว้ที่ระดับแรงดันที่ตั้งไว้

3) ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ แรงดันที่ตั้งไว้และแรงดันจริงๆ จำเป็นต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะซึ่งจะถูกใช้ในการอ้างอิง

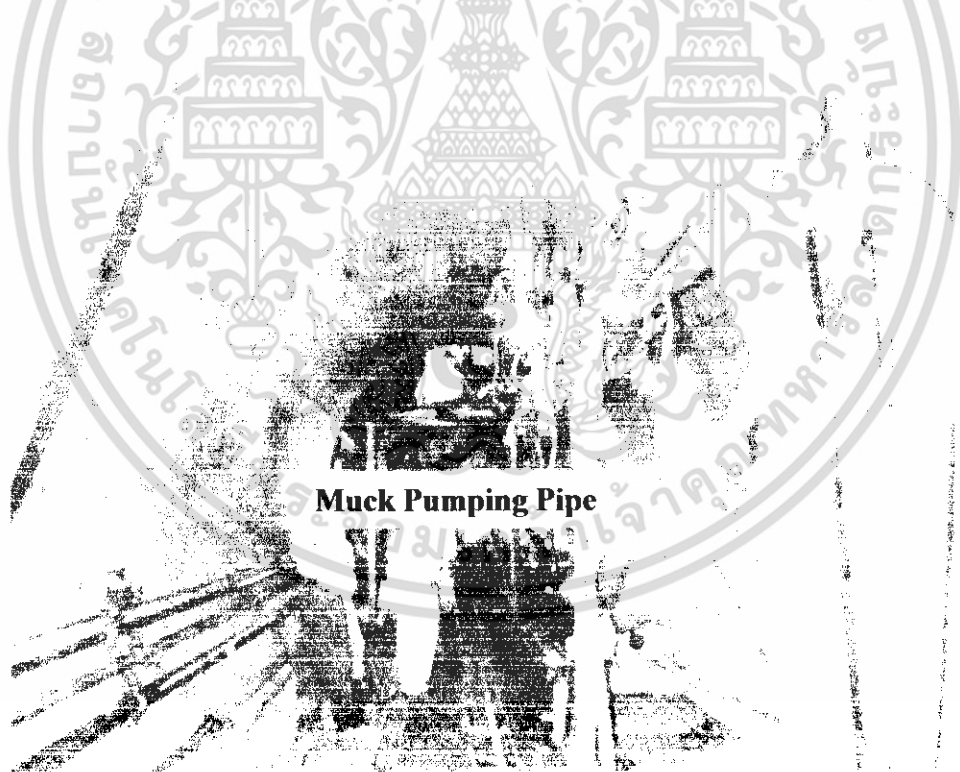
แรงดันที่ตั้งไว้ถูกใช้เป็นปัจจัยควบคุมการขุดเจาะโดยตลอด ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.30 การควบคุมการทำงานของหั่วเจาะจำเป็นต้องคิดตามอย่างใกล้ชิดในการขุดเจาะเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าหั่วเจาะทำงานภายใต้แรงดันที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ การทำงานของหั่วเจาะในห้องควบคุมจำเป็นต้องวัดค่าปัจจัยการทำงานอื่นๆ ทั้งหมดตลอดเวลาที่การขุดเจาะได้เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.31

สิ่งหนึ่งที่พึงระลึกไว้ก็คือ ถ้าใช้วิธีการปั๊มในการขนถ่ายดินที่ถูกขุดออก (รูปที่ 4.28) จะมีข้อสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา ในวิธีการนี้ ท่อขนส่งถูกคิดโดยตรงกับ Screw conveyor ความเร็วในท่อขนส่งจะต้องสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตันเนื่องจากตะกอนดินในท่อ แต่จะต้องไม่สูงไปที่จะทำให้ท่อสึก นอกจากนี้ เนื่องจากวิธีการขุดเจาะด้วยหั่วเจาะ EPB อัตราของการขนส่งดินจำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับแรงดันที่ถูกควบคุมเอาไว้ด้านหน้าของช่องเก็บดิน ตัวควบคุมหั่วเจาะจำเป็นต้องการรักษาสมดุลของอัตราการปั๊มเอาดินออกและการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหั่วเจาะเพื่อที่จะควบคุมแรงดันด้านหน้า

โดยปกติ การขุดเจาะและการเคลื่อนไปด้านหน้าของหั่วเจาะจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เนื่องจากเมื่อใบพัดขุดดินที่ด้านหน้าหั่วเจาะ แม่แรงไฮดรอลิกด้านหลังหั่วเจาะก็จะยืดออกและดันด้านกับแนวอุโมงค์เพื่อผลักดันให้หั่วเจาะเคลื่อนต่อไปข้างหน้า (รูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32) ยกตัวอย่างเช่น ในโครงการรถไฟฟ้า (MRTA) แรงของแม่แรงหั่วเจาะหรือแรงผลักดันจะอยู่ที่ระหว่าง 600 ถึง 1000 ตัน และ Stroke ของแม่แรงอยู่ที่ 1.60 เมตร อย่างไรก็ตามการควบคุมของตำแหน่งที่ตั้ง การเบี่ยงเบนทางแนวราบและแนวตั้ง และการวางแผนก็ยังจำเป็นต้องลดการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหั่วเจาะ โดยทั่วไป ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะถูกบันทึกไว้ตลอดการขุดเจาะในแต่ละรอบ

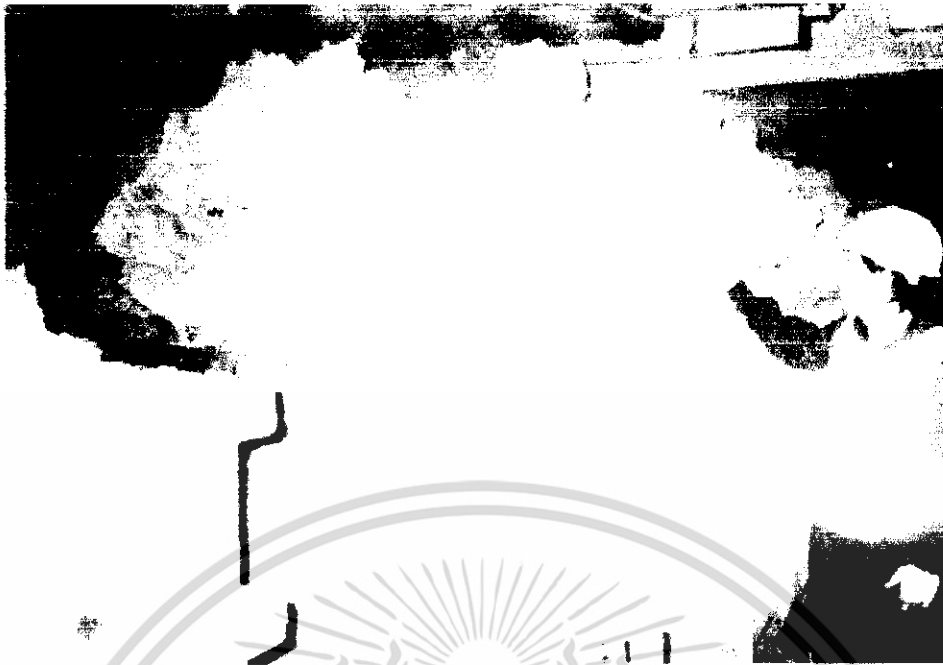


รูปที่ 4.26 สายพานลำเลียงดินที่ขุดออกจาก Screw conveyor (Bangkok-MRTA)



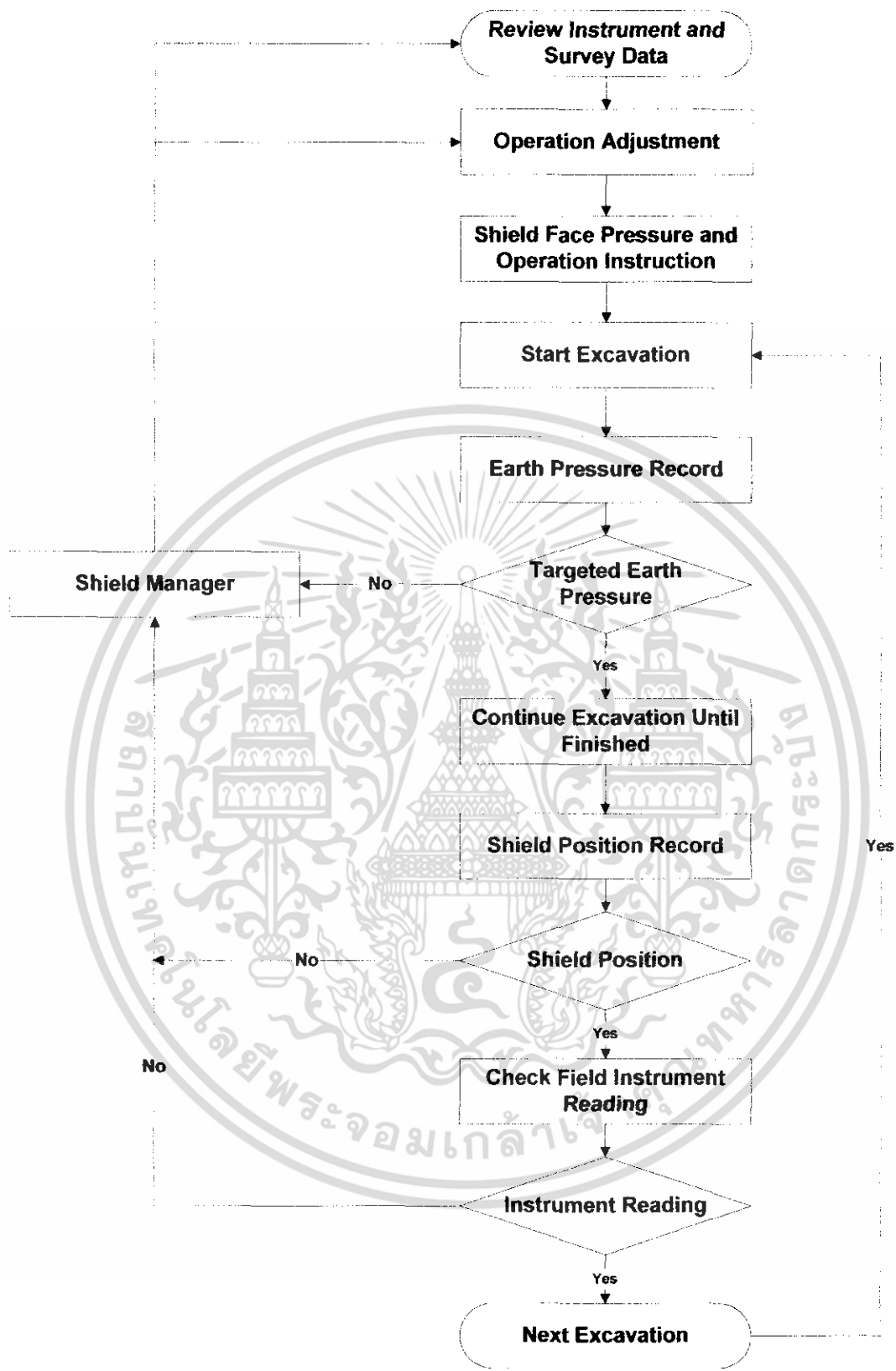
Muck Pumping Pipe

รูปที่ 4.27 ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อโดยตรงกับ Screw conveyor (Bangkok-MRTA)



รูปที่ 4.28 รถจักรลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์ (Bangkok-MRTA)





รูปที่ 4.29 ฟังลำดับการควบคุมการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน



รูป 4.30 จอควบคุมการทำงานของหัวขุดเจาะ แสดงค่าทุกตัวแปรระหว่างการขุดเจาะ

(3) ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ที่ถูกวางเป็นส่วนๆ ของอุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะนั้น จะถูกสร้างขึ้นภายในส่วนหางของกระบอกลูกหัวเจาะ เป็นระบบแบบ One-pass เพื่อเสถียรภาพของปากอุโมงค์ตลอดการก่อสร้าง และการวางแนวอุโมงค์ที่ถาวร รูปที่ 4.33 และ รูปที่ 4.34 แสดงส่วนของแนวอุโมงค์ที่เป็นคอนกรีตที่ใช้

ในโครงการ MRTA ส่วนนี้สร้างขึ้นและติดตั้งเพื่อเพิ่มความทนทาน การวางแผนเป็นส่วนๆ อาจจะใช้ระบบ แบบ Two-pass โดยใช้ส่วนที่สร้างขึ้นชั่วคราวที่ให้เฉพาะการรักษาเสถียรภาพการก่อสร้าง และในครั้งที่สองเป็นการก่อแนวคอนกรีตเพิ่มขึ้นสำหรับใช้อย่างถาวร โดยทั่วไป การวางแผนส่วนของอุโมงค์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าอุโมงค์ที่ขุดเจาะขึ้น เนื่องจากมันมักจะสร้างขึ้นภายในหัวเจาะทรงกระบอกซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือขุดเจาะ ช่องว่างวงแหวนที่เกิดโดยรอบ (รูปที่ 4.35) จะถูกเติมเต็มโดยการฉีดปูนเข้าไป ในดินเปียก การวางแผนของส่วนอุโมงค์มักจะถูกปิดใส่ Curve bolt เพื่อบีบอัดเข้าหากันเพื่อลดการรั่วของน้ำ ในดินแห้ง การวางแผนอุโมงค์ที่อาจจะไม่ได้ Curve bolt ก็เป็นไปได้

(4) Segment erection

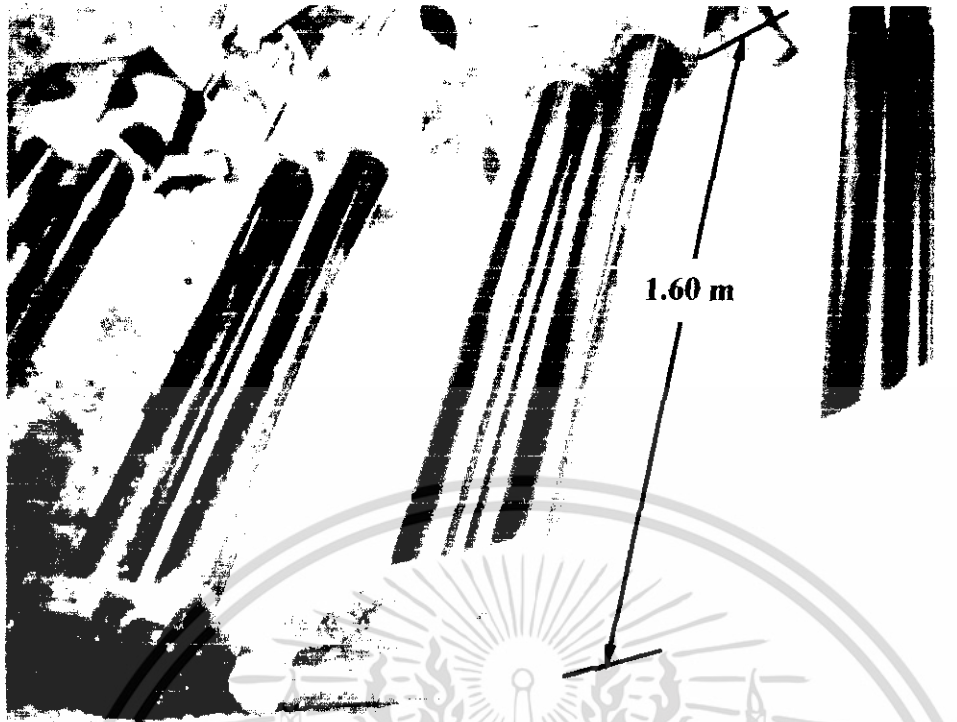
แนวอุโมงค์จะถูกติดตั้งเป็นส่วนๆ ไปโดยใช้อุปกรณ์ที่ตั้งอยู่ในหัวเจาะดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.37 ในโครงการ MRTA วงแหวนส่วนต่างๆ ที่มีความยาว 1.2 คลอดแนวแกนอุโมงค์ และจะมีชิ้นส่วนผนังอุโมงค์คอนกรีต 6 ชิ้นส่วนสำหรับอุโมงค์ทางทิศใต้ และชิ้นส่วนผนังอุโมงค์คอนกรีต 7 ชิ้นส่วนสำหรับอุโมงค์ทิศเหนือ ทั้งคู่จะรวมชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่เป็นปลายเรียกว่า ความแตกต่างของจำนวนชิ้นส่วนผนังอุโมงค์นั้นเนื่องมาจากอุปกรณ์ในการจัดการส่วนของอุโมงค์ที่แตกต่างกันในทิศเหนือและทิศใต้ แต่ละส่วนถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ส่วนโค้งดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 4.38 ถึง รูปที่ 4.40

ในระหว่างการขุดเจาะ คนงานภายในอุโมงค์จะส่งเอาส่วนของอุโมงค์จากที่เก็บของที่ตั้งอยู่บนพื้นดินที่อยู่ระหว่างทาง (รูปที่ 4.34) ชิ้นส่วนที่กลับกันจะเป็นส่วนแรกที่ถูกติดตั้ง ลำดับการติดตั้งที่ถูกต้องจะถูกกำหนดอย่างแน่นอน และการเปลี่ยนแปลงใดๆ จะหมายถึงการสูญเสียเวลาไปสู่อุโมงค์ รายการการติดตั้งขึ้นกับชนิดของวงแหวนและตำแหน่งของการติดตั้งถูกสร้างขึ้นและจัดส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการก่อสร้าง เครื่องคอมพิวเตอร์นี้จะให้ข้อมูลบนค่ากลางที่เหมาะสมของวงแหวนท้ายอุโมงค์เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเจาะ โดยมีการอ้างอิงมาจากตำแหน่งของวงแหวนสุดท้ายที่ถูกวัดหลังจากการขุดเจาะในแต่ละรอบและตำแหน่งที่คาดไว้ในระหว่างรอบการขุดเจาะต่อไป ความถูกต้องของการติดตั้งแนวอุโมงค์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเส้นทางของตัวก่อสร้าง ตัวก่อสร้างจำเป็นที่จะตั้งตำแหน่งส่วนของแนวอุโมงค์ในวงแหวนด้วยความถูกต้อง คลาดเคลื่อนไม่เกินมิลลิเมตรซึ่งวงแหวนของแนวอุโมงค์ต้องมีแรงดันสัมผัสที่มากพอที่จะอัดระหว่างส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน หลังจากการติดตั้งได้เสร็จสิ้นลง ตำแหน่งของแนวอุโมงค์จำเป็นที่จะต้องถูกคิดตามดังรูปที่ 4.41

ชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์สามารถถูกขนย้ายไปที่ตัวก่อสร้างได้สองวิธี คือ 1) โดยการสวนกัน 2) โดยทางด้านเหนือ ในโครงการ MRTA ส่วนของแนวอุโมงค์ได้ถูกขนย้ายไปที่ตัวก่อสร้างในทิศทางที่สวนกันซึ่งใช้อุปกรณ์น้อยกว่าการใช้ทางด้านเหนืออุโมงค์ดังรูปที่ 4.42



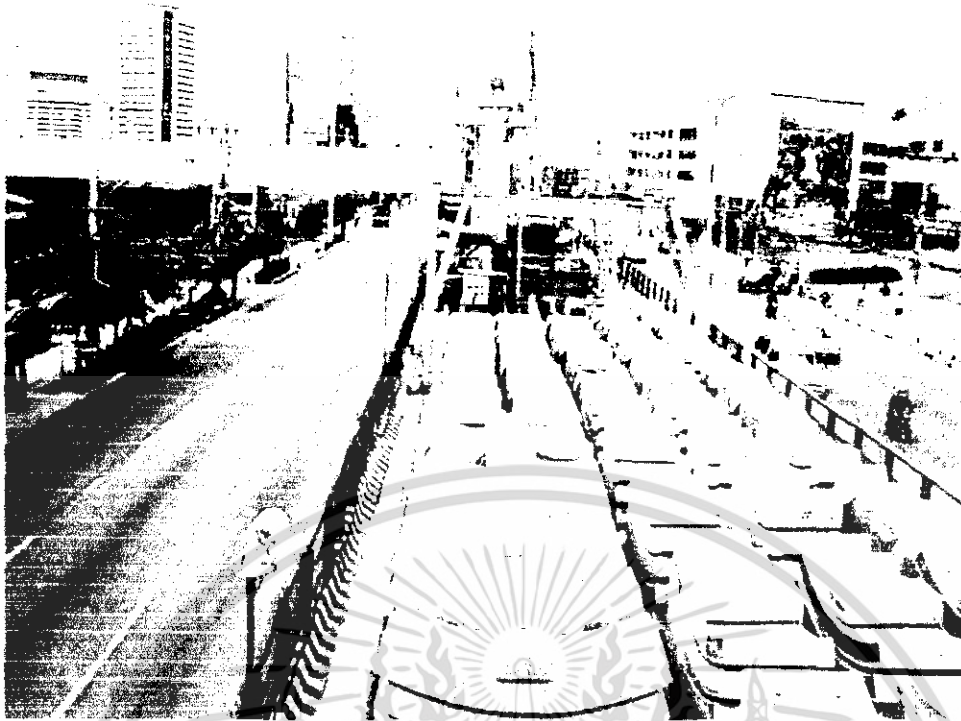
รูปที่ 4.31 แม่แรงไฮดรอลิกอยู่ต่อท้าย EPB shield



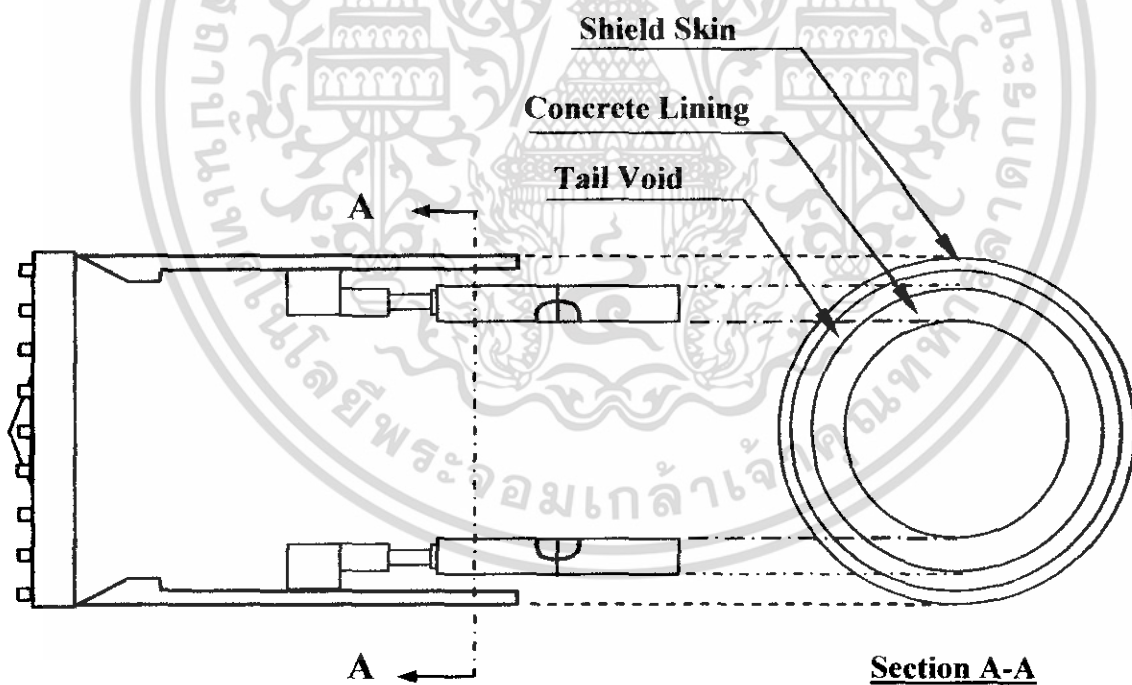
รูปที่ 4.32 การร้าวของแม่แรงด้านผนังอุโมงค์ เมื่อหัวขุดเจาะเดินทางการขุด



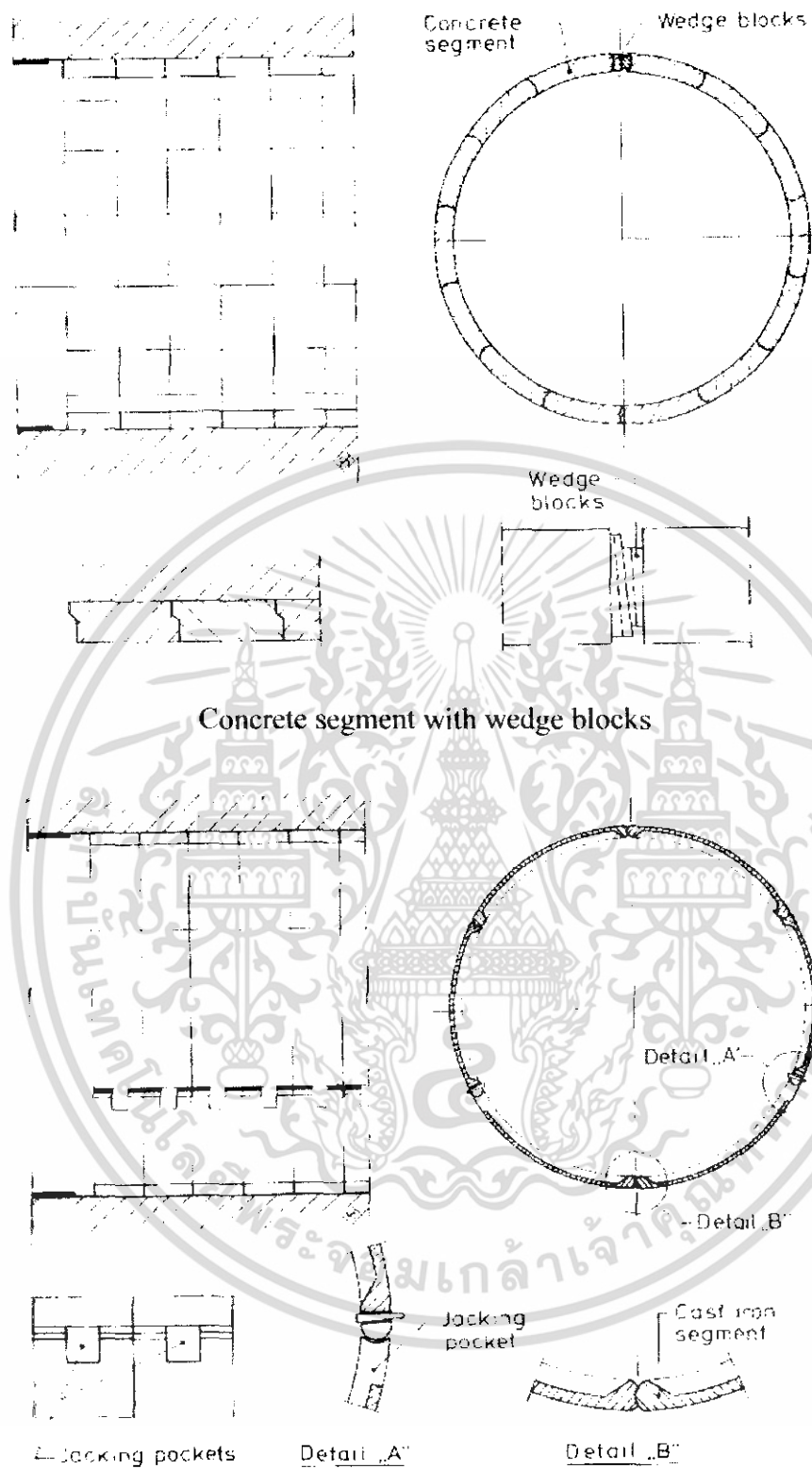
รูปที่ 4.33 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ในโครงการ MRTA กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.34 การจัดเก็บผนังอุโมงค์ (Bangkok-MRTA, Thiam Ruam Mit Station)

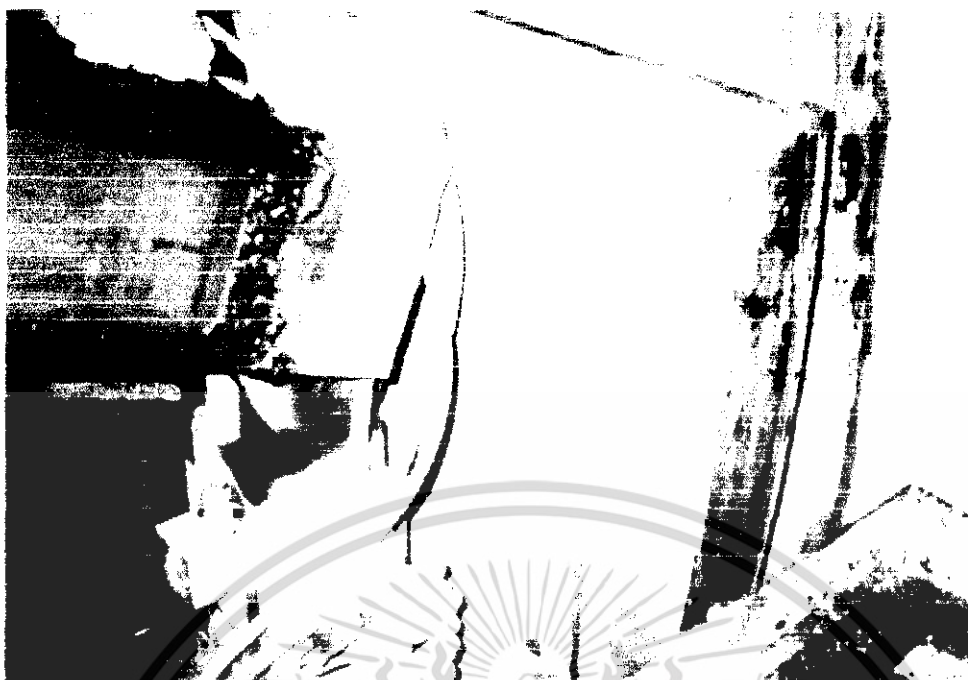


รูปที่ 4.35 แผนผังแสดงช่องว่างที่ส่วนหาง ระหว่างผนังอุโมงค์กับหัวชุดเจาะ

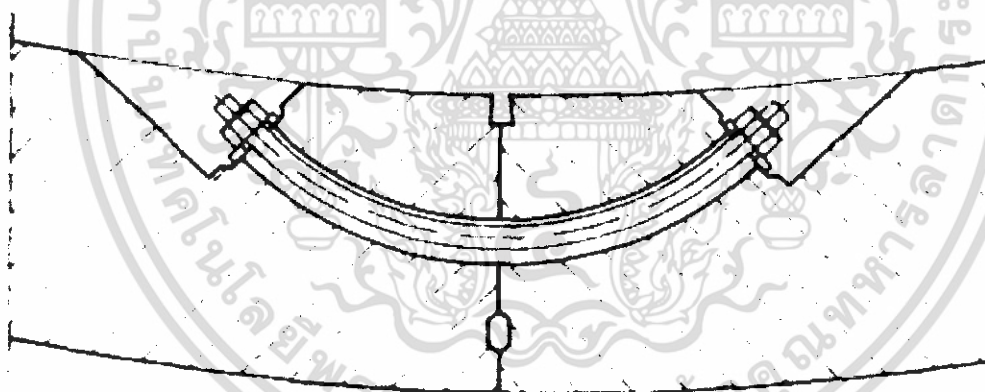


Cast iron segment with jacking pockets

รูปที่ 4.36 แสดงรายละเอียดวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.37 แขนเครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์ ติดตั้งผนังอุโมงค์ตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.38 การเชื่อมต่อชิ้นส่วนวงผนังอุโมงค์ด้วย Curve bolt



รูปที่ 4.39 Curve bolt



รูปที่ 4.40 คนงานกำลังทำการขัน Curve bolt ให้ยึดแน่น



รูปที่ 4.41 การตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งวงผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.42 การขนย้ายชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เข้าสู่เครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์

(5) Tail Void Grouting

ในการใช้หัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะจะใหญ่กว่าแนวอุโมงค์ที่ได้สร้างไว้ เนื่องจาก ข้อแรกก็คือ ผิวของหัวเจาะจะต้องซ้อนทับกับแนวอุโมงค์เพื่อให้การประกอบของวงแหวนอุโมงค์เกิดขึ้นได้ และข้อที่สองก็คือ จะต้องมีย่อว่างระหว่างด้านนอกของแนวอุโมงค์และด้านในของส่วนท้ายเพื่อสามารถเจาะอุโมงค์เป็นแนวโค้งและแก้ไขการวางแนวที่ผิดไปให้ทำขึ้นได้ ดังนั้น จึงทำให้เกิดวงแหวนของช่องว่างรอบๆ ด้านนอกของอุโมงค์เนื่องจากหัวเจาะถูกผลักเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (รูปที่ 4.35) ดังนั้น การฉาบปิดช่องว่างวงแหวนด้านท้ายจึงถูกทำขึ้นเพื่อลดการเสียดสีของดินด้านนอกอุโมงค์

ที่ด้านท้ายของหัวเจาะ จะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายใช้สำหรับป้องกันด้านหลังของหัวเจาะจากน้ำใต้ดิน ดินรอบๆ และของเหลวที่ใช้ค้ำยันหรือปูนสำหรับ Grouting ส่วนปิดผิวด้านท้ายแยกหัวเจาะจากวงแหวนรอบๆ และถูกออกแบบขึ้นเพื่อปิดช่องว่างระหว่างส่วนท้ายและส่วนของแนวอุโมงค์ (รูปที่ 4.43) มันจะต้องทนต่อแรงดันดิน แรงดันน้ำ แรงดันของปูนที่ฉีดอัดเข้าไปซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงมาก โดยปกติวัสดุที่มีความยืดหยุ่นทั้งหมด เช่น ผ้า สำลีไม้ และเชือกจะถูกใช้ยึดใส่ข้อต่อและอุดการสูญเสียอากาศที่ถูกอัด (ในกรณีของหัวเจาะ แบบ Compressed air) หรือป้องกันการรั่วของปูนที่ฉีดอัดไหลเข้าสู่หัวเจาะ ในปัจจุบันนี้ วิธีการนี้ได้ถูกแทนที่โดยการใช้อุณหภูมิด้วยสายไฟ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์รถไฟใต้ดินในกรุงเทพฯ การใช้สายไฟอุณหภูมิซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ได้ถูกยกขึ้นบนส่วนท้ายดังรูปที่ 4.43 สำหรับหัวเจาะ Kawasaki และ Herrenknecht ซึ่งใช้ในโครงการ MRTA มีการอุณหภูมิด้วยสายไฟสามแถว น้ำมันหล่อลื่นได้ถูกฉีดอัดลงไปในช่วงระหว่างแต่ละแถวและเก็บไว้ที่ความดันสูงเพื่อป้องกันน้ำ ดินหรือปูนจากการไหลเข้าไปบริเวณที่ทำการปิดการรั่ว

ปูนได้ถูกฉีดเข้าไปในรูในแต่ละชั้นส่วนผนังอุโมงค์ รูจะพอดีกับตะปูที่เชื่อมส่วนที่ต่อกันและปิดโดยเครื่องอุดตลอดการติดตั้งวงแหวน ในโครงการ MRTA วาล์วพลาสติกที่ไม่สามารถหมุนคืนได้ถูกสร้างขึ้นในส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.44 ตลอดการฉีดอัดปูน ปูนจะถูกฉีดและไหลลงจากรูที่ด้านเหนืออุโมงค์ดังนั้นปูนจึงสามารถแทรกไปสู่ช่องว่างโดยความดันและแรงโน้มถ่วง การฉีดจะถูกทำอย่างต่อเนื่องภายใต้ความดันสูงในช่องว่างที่พัฒนาด้านหลังของท้ายหัวเจาะ พึงระลึกไว้ว่า การฉีดปูนเข้าไป ไม่เพียงควบคุมปริมาตร (เช่น โดยการควบคุมเปอร์เซ็นต์ปูนที่ฉีด) แต่ยังควบคุมความดันด้วย ซึ่งถูกวัดภายในท่อปูนหรือที่ขึ้นส่วนผนังอุโมงค์คอนกรีต ในโครงการ MRTA ความดันถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติให้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 3 bar (300 kPa) ซึ่งเป็นสภาพที่ใช้ออกแบบขึ้นส่วนผนังแนวอุโมงค์ ด้วยความดันที่สูงที่ฉีดเข้าไปช่องว่างจะถูกเติมได้ในเวลาอันสั้นและวัสดุที่ฉีดอัดนี้จะสามารถ

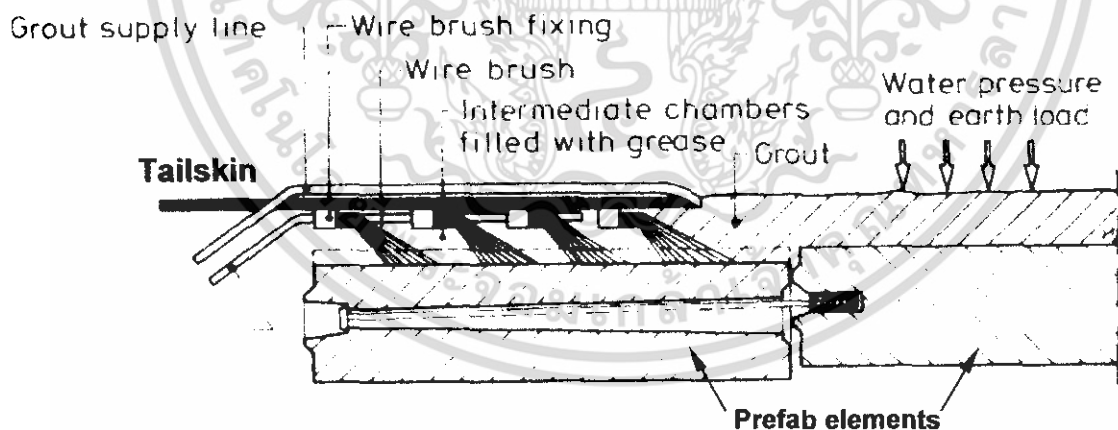
ป้องกันการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งปริมาณและความดันของปูนอุดวัดค่าและ
บันทึกโดยระบบการติดตามวัดค่าในอุโมงค์ที่แต่ละรอบการขุดเจาะ

ปริมาณของปูนที่ฉีดปิดจะถูกควบคุมเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ปูนได้ปิดช่องว่างทั้งหมดได้
เต็ม เปอร์เซ็นต์ของปูนที่เดิมเข้าไปสามารถคำนวณได้จาก

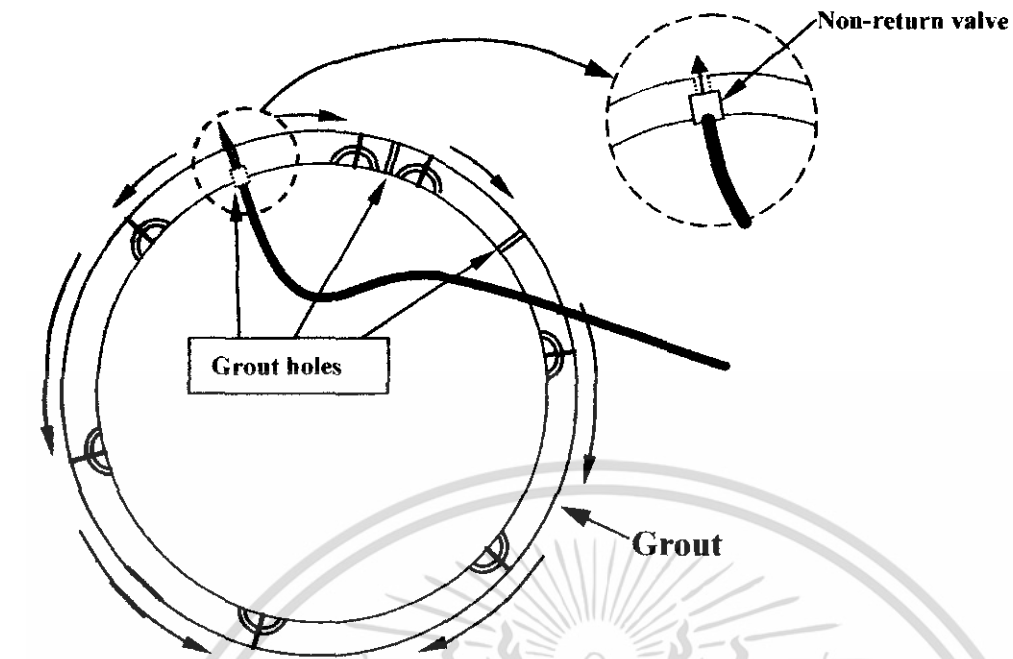
$$\text{ปริมาณปูนที่เดิม (เปอร์เซ็นต์)} = \text{ปริมาณปูน} \times 100 / \text{ปริมาณช่องว่างที่ประมาณได้}$$

ในโครงการ MRTA วัสดุที่ใช้ฉีดปิดประกอบด้วยองค์ประกอบสองตัวเรียกว่า วัสดุ
A และ วัสดุ B วัสดุ A ประกอบด้วย ซีเมนต์ Bentonite และน้ำ วัสดุ B เป็นของเหลวที่ใช้เร่งความเร็ว
(โซเดียมซิลิเกต) ที่ส่วนท้ายของหัวเจาะ วัสดุ A และ B จะถูกผสมดังรูปที่ 4.45 ก่อนที่จะถูกปั๊มเข้าสู่
ที่จะทำการฉีดปิดแต่ละชั้นส่วนผนังอุโมงค์ (พอดีกับวาล์วพลาสติกที่ไม่หมุนคืน) เพื่อปิดช่องว่างวง
แหวนด้านท้ายให้เต็ม

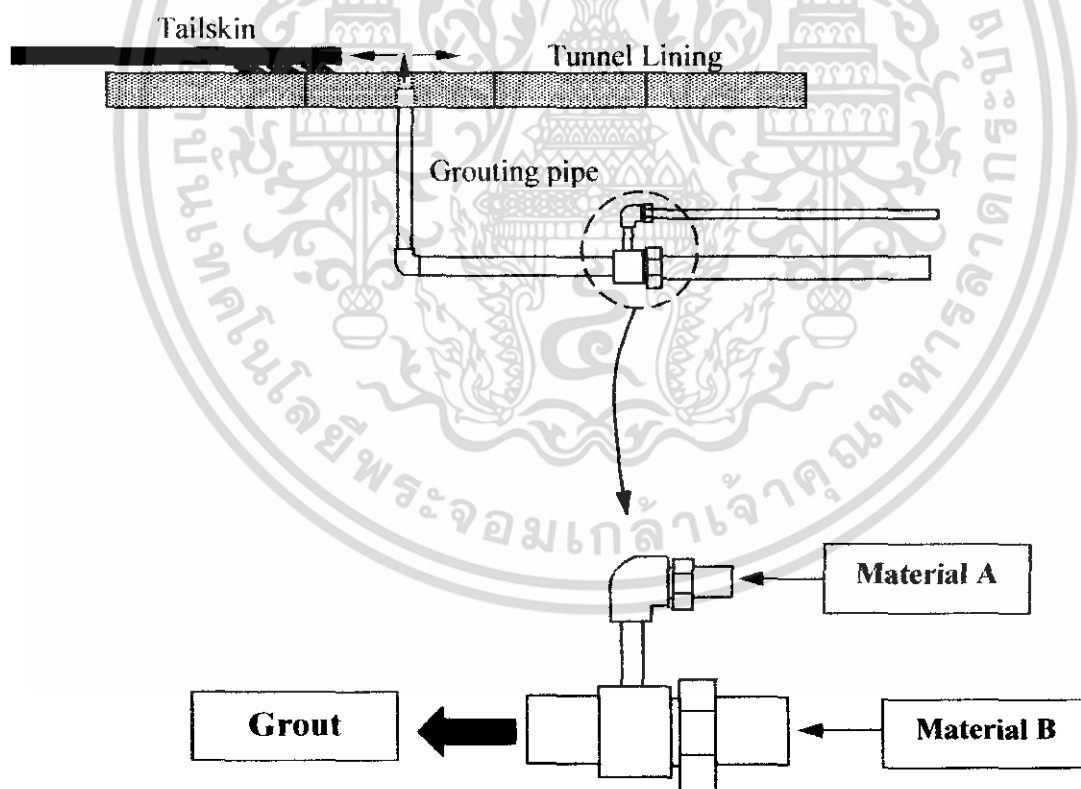
การฉาบปิดครั้งที่สองจะถูกใช้สำหรับปิดช่องว่างที่ยังเหลืออยู่รอบๆ อุโมงค์และเพื่อ
ความแน่นอนว่าการฉาบปิดครั้งแรกนั้นมีความเพียงพอ จากช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ การฉาบปิดครั้งที่สองจะ
ถูกทำขึ้นเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไป 40-120 เมตร ดังนั้น ในโครงการนี้ การฉาบปิดเสร็จสิ้นลงในเวลา 14
วันหลังจากการสร้างวงแหวน โดยทั่วไป ความดันที่ใช้ในการฉาบปิดในครั้งที่สองจะไม่มากกว่า 3 bar



รูปที่ 4.43 Tail skin seal (wire brush seal)



รูปที่ 4.44 การอัดฉีดปูนเหลวผ่านรูในผนังอุโมงค์

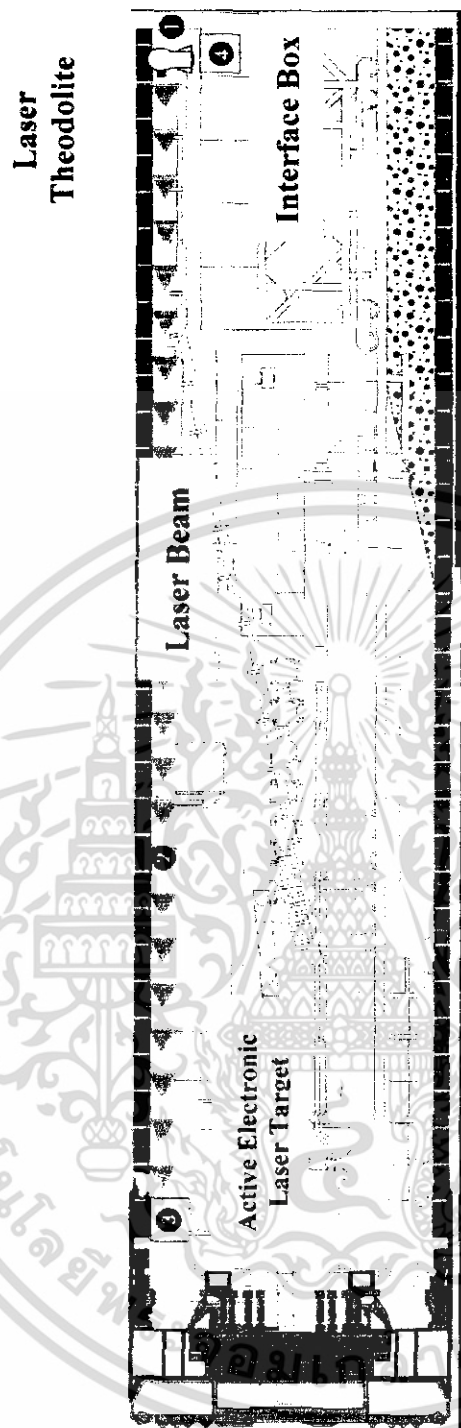


รูปที่ 4.45 การอัดฉีดปูนเหลวโดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน

(6) Guidance system

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะไม่เคยสำเร็จขึ้นได้โดยไม่มีการเบี่ยงเบนของอุโมงค์ไปจากแกนอุโมงค์ที่ตั้งขึ้นมา คนงานที่ขับเคลื่อนหัวเจาะควรจะทราบข้อมูลของตำแหน่งของหัวเจาะที่เทียบกับระนาบของแกนอุโมงค์ที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่องเพื่อจะได้มีการแก้ไขให้ถูกต้อง ดังนั้นเนื่องจากความแม่นยำการคำนึงถึงความถูกต้องของการขับเคลื่อนอุโมงค์และการควบคุมหัวเจาะระหว่างการขุดเจาะ ระบบการสำรวจและนำทางจึงมีความสำคัญมาก

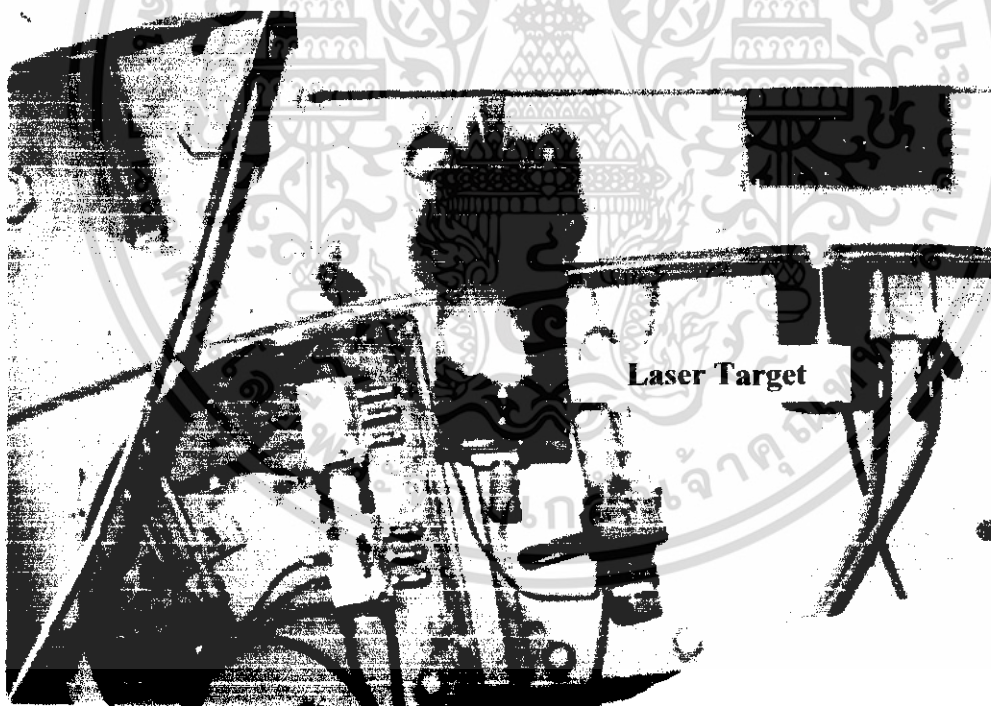
ระบบการสำรวจและนำทางในปัจจุบันนี้ทำให้สามารถติดตามตำแหน่งของหัวเจาะได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 4.46) แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของระบบนำทางหัวเจาะ ในปัจจุบันนี้ ระบบการควบคุมทิศทางที่อาศัยเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอุโมงค์ ไม่ว่าจะเป็นเลเซอร์แบบลำแสงเดี่ยวหรือเครื่องมือที่ติดกล้องเลเซอร์ (รูปที่ 4.47) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อส่งผ่านแสงเลเซอร์ เครื่องมือที่ติดกล้องเลเซอร์นี้จำเป็นต้องถูกติดตั้งขนานไปกับแกนหัวเจาะในช่องสำหรับการสำรวจเพื่อให้เป็นอิสระจากความขรุขระทั้งหมดของหัวเจาะรวมไปถึงระบบสำรอง และเพื่อที่จะกำหนดตำแหน่งของหัวเจาะด้วยลำแสงเลเซอร์ ระบบการกำหนดเป้าหมายจะถูกคิดไว้กับหัวเจาะ (รูปที่ 4.48) และหาตำแหน่งซึ่งเป็นตรงกลางที่แสงเลเซอร์กระทบ ข้อมูลที่ถูกป้อนกลับไปจะอยู่ในรูปของพิกัดแนวนอนและแนวตั้งที่ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งตั้งอยู่ที่ผู้ทำการควบคุมเครื่อง (ดังรูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.50) ระบบนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงต้องการความรู้ที่มากมายจากผู้ทำการควบคุมเครื่องมือ



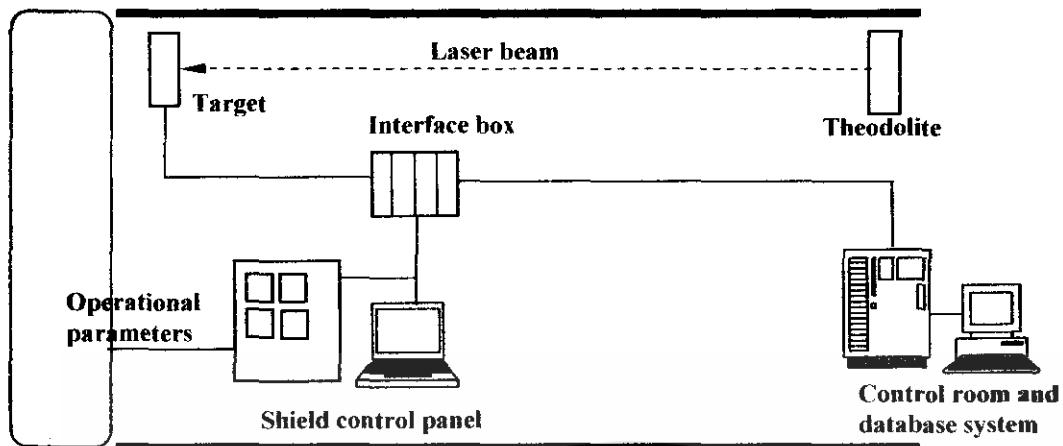
รูปที่ 4.46 ส่วนประกอบของระบบนำทาง



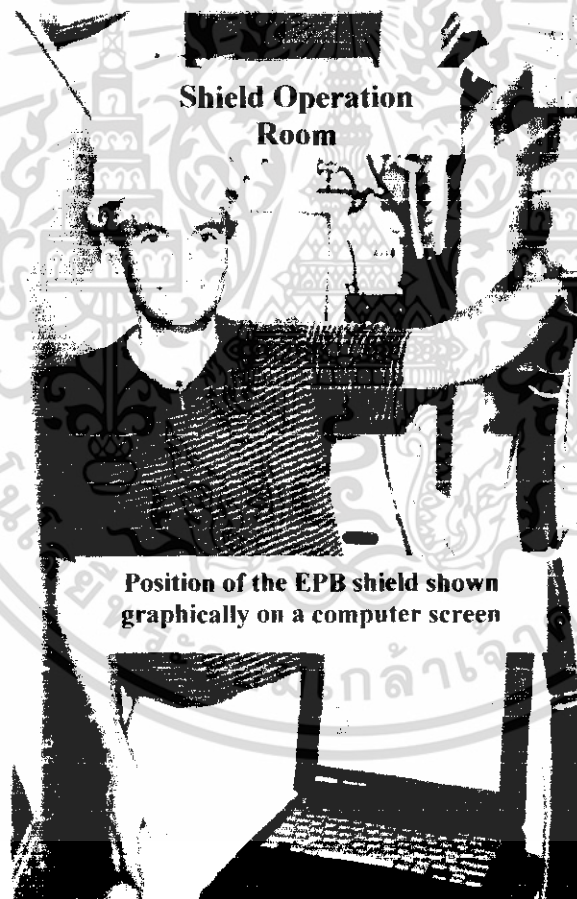
รูปที่ 4.47 Laser theodolite ติดตั้งอยู่หลัง EPB shield



รูปที่ 4.48 Laser target ติดตั้งไว้หลัง EPB shield



รูปที่ 4.49 ระบบแสดงผลควบคุมการขับเคลื่อนหัวชุดเจาะ



รูปที่ 4.50 ระบบข้อมูลการนำทาง ภายในห้องควบคุม

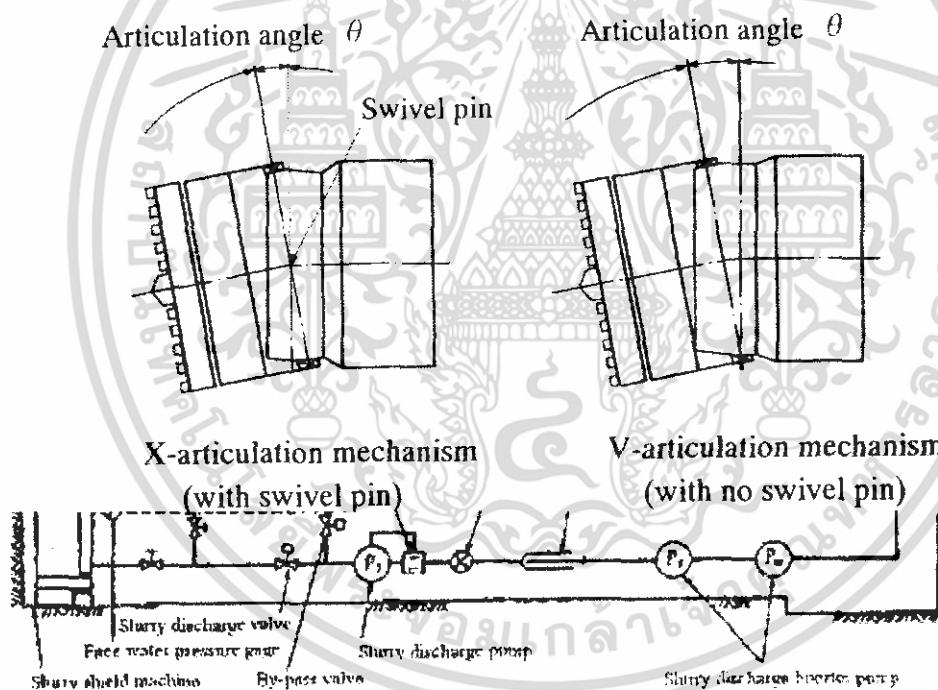
4.3 หัวเจาะแบบ Slurry Shield

(1) ระบบออกแบบสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry Shield

การออกแบบระบบของหัวเจาะแบบ Slurry Shield นั้นต้องคำนึงถึงหน่วยชุดและเคลื่อนที่ หน่วยสร้างเสถียรภาพแก่หน้าตัดดิน ระบบป้อนและปล่อย Slurry และการรักษา Slurry ให้ทำงานได้ดีในการขุดสำหรับสภาพดินที่ทำงาน

โดยการออกแบบจะประกอบด้วยองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- หน่วยชุดและเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำหน้าที่ตัดเจาะดินและทำให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า
- อุปกรณ์สำหรับควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ Slurry การป้อน Slurry หน้าดิน และรักษาความดันของ Slurry เพื่อเพิ่มความดันแก่หน้าตัดดิน
- อุปกรณ์สำหรับขนย้ายดิน
- อุปกรณ์สำหรับแยกดินออกจาก Slurry



รูปที่ 4.51 ระบบการเจาะอุโมงค์โดยหัวเจาะ Slurry shield

ตารางที่ 4.3 สิ่งที่ต้องศึกษาและสำรวจของแต่ละองค์ประกอบ

ระบบ	สิ่งที่ต้องทำการศึกษา	สิ่งที่ต้องสำรวจ
1 เครื่องจักรหัวเจาะ	ใบพัดตัดดิน, bits, ความดันด้านทาน, แรงบิดตัดเฉือน และแรงผลัก	สภาพดิน, น้ำหนักกระทำเหนืออุโมงค์, ระดับน้ำใต้ดิน, ขนาดกรวด, มุมแรงเสียดทานภายในของดิน, แรงยึดเหนี่ยว และการกระจายตัวของเม็ดดิน
2 อุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่น Slurry อุปกรณ์เพิ่มความดัน Slurry	วัสดุและความถ่วงจำเพาะของ Slurry, อัตราการไหลซึม, ความหนืด, ปริมาตรทราย และความหนาแน่นของ Slurry ในแท่งกักควบคุม	สภาพดิน, เสถียรภาพ, สัมประสิทธิ์การไหลซึม, ความดันน้ำส่วนเกิน และปริมาณน้ำ
3 อุปกรณ์ขนย้ายดิน	อัตราการไหลของ Slurry, ขนาดท่อ, การเลือกปั๊ม และ ความดัน Slurry	สภาพดิน, การกระจายตัวของเม็ดดิน, ความถ่วงจำเพาะของดิน, ปริมาณน้ำ, ขนาดกรวดใหญ่สุด
4 อุปกรณ์รักษาสภาพ Slurry	โครงร่างและสมดุลของวัสดุ	สภาพดิน, การกระจายตัวของเม็ดดิน, ปริมาณน้ำ, ความถ่วงจำเพาะ, ระดับเสี่ยงและการสั่น, มาตรฐานการไหล, เกณฑ์ธรรมชาติ และสภาพพื้นที่

(2) โครงสร้างของหัวเจาะ Slurry Shield

การออกแบบโครงสร้างของ Slurry Shield ควรดูจากสภาพดินและเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ โดยต้องออกแบบให้แต่ละองค์ประกอบมีความทนทานที่สูง โดยต้องพิจารณาแต่ละองค์ประกอบดังนี้

1) ประเภทหัวสนับสนุนการตัด (Cutter head support type)

มี 3 ชนิด คือ แบบ Center, Intermediate และ Outer โดยต้องเลือกให้เหมาะสมกับสภาพของดิน

2) หัวตัดเฉือนดิน (Cutter head)

a) แผ่นตัดเฉือนดิน (Cutter Disk)

สิ่งที่ต้องการสำหรับแผ่นตัดเฉือนดินก็คือรูปร่างของแผ่นตัด โดยต้องพิจารณาจากปัจจัยต่อไปนี้ ความทนทานของเสถียรภาพหน้าตัดชั้นระบายโคลน การตรวจห้องเก็บภายใน ความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยน bit และการจัดการกับดินที่มีหินปะปนอยู่

b) อัตราการเปิด (Opening Ratio)

สิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือความกว้างและจำนวนของช่อง

- สำหรับดินที่มีกรวดปะปน ต้องคำนวณหาขนาดท่อปล่อย Slurry โดยความกว้างของช่องจะพิจารณาจากขนาดของก้อนกรวด
- สำหรับดินทราย จำนวนช่องและความกว้างจะต้องทำให้มีค่าน้อยๆ
- สำหรับดินที่เหนียว เพื่อให้ขนย้ายดินได้ง่าย จำนวนช่องที่มากก็ต้องเป็นไปตามความเหมาะสมของขนาด

c) แรงบิด (Torque)

แรงบิดจะพิจารณาจากสภาพของดินและกรวด โดยปกติ แรงบิดสำหรับหัวเจาะ Slurry Shield ต่อความต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวหน้าตัดและความต้านทานการผสมและกวนดินจะน้อยกว่าค่าของหัวเจาะแบบ Earth pressure balanced shield

3) ห้องเก็บ (Cutter chamber)

a) ฝักันควรแข็งแรงและไม่ซึมน้ำเพื่อต้านความดันจาก Slurry โดยขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะ สภาพดิน สภาพการก่อสร้าง อากาศที่ปิด ช่องซ่อมแซม หรืออุปกรณ์สำหรับ Grouting ซึ่งอาจจะอยู่ที่ฝักัน ควรศึกษาให้ละเอียด

b) สถานที่และทิศทางของท่อปล่อยและลำเลียง Slurry ควรคิดจากการไหลของสิ่งสกปรกเข้าออกห้องเก็บ และมีข้อแนะนำเพิ่มเติมว่าควรมีท่อสำรองสำหรับยามฉุกเฉิน

c) เครื่องเขย่าควรติดตั้งเพื่อผสมกวน Slurry ภายในห้องเก็บและป้องกันการอุดตันของทางเข้า Slurry

4) ที่ปิดส่วนหาง (Tail seal)

สำหรับหัวเจาะ Slurry Shield คุณสมบัติของที่ปิด ต้องดีกว่าความดันของ Slurry น้ำใต้ดิน และการ Grouting เป็นสิ่งที่สำคัญ การป้องกันการรั่วซึมจึงต้องใช้ชุด Tail seal นี้

5) อุปกรณ์ขย้ากรวด (Gravel removal facility)

อุปกรณ์ขย้ากรวดเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการขุดดินที่มีก้อนหินปะปนอยู่ ชุดเครื่องแยกจะติดตั้งอยู่ภายในห้องเก็บและตามท่อการปล่อย Slurry กรวดจะถูกแยกโดย 1 ใน 2 วิธี คือการกระแทกทำลายและการคัดกรองออก ชนิดของเครื่องแยกจะพิจารณาจากขนาดและปริมาณของกรวดที่พบ โดยดูจากเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะและขนาดเครื่องแยกด้วย

6) อื่นๆ

แม่แรงล็อก (Jack locks) เนื่องจากหัวเจาะแบบ Slurry shield จะถูกควบคุมโดยความดัน Slurry ที่ผิวหน้าอย่างต่อเนื่อง ระบบไฮดรอลิกทั้งหมดจะติดตั้งให้ล็อกอยู่กลับที่เพื่อป้องกันเครื่องขุดไถกลับเมื่อหยุดการทำงาน เช่นขณะที่กำลังประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

(3) หน่วยเพิ่มเสถียรภาพหน้าตัด (Face stabilization unit)

หน่วยเพิ่มเสถียรภาพหน้าตัดควรจะต้องมีความดัน Slurry ที่สูงพอต้านความดันดินและน้ำที่ผิวหน้าตัด โดยเสถียรภาพที่หน้าตัดเมื่อใช้หัวเจาะ Slurry shield จะมีผลกระทบรวมจากหัวข้อต่อไปนี้

- 1) ความดัน Slurry สมดุลความดันดินและน้ำ
- 2) แผ่นระนาบโคลนที่ผ่านไม่ได้บนหน้าตัด เนื่องจาก Slurry ที่กระทบเหนือดิน
- 3) Slurry จะจมลึกลงดินเข้าไปในหน้าตัดดิน และปรับปรุงความเหนียวแน่นของดิน

ตามที่ได้กล่าวมา ทำให้หน่วยเพิ่มเสถียรภาพหน้าตัดควรจะสามารถควบคุมคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ Slurry โดยหลักๆ ก็คือ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และปริมาณทรายเพื่อควบคุมและรักษาความดันของ Slurry

โดยทั่วไป ความดันของ Slurry ที่ผิวหน้าตัดจะถูกควบคุมโดยการปรับความเร็วการหมุนของปั๊มการป้อนและลำเลียง Slurry ระหว่างการขุดและโดยการปรับวาล์วควบคุมระหว่างหยุดชะงัก ด้วยการเบี่ยงเบนจากการวัดความดัน Slurry จากค่าที่ตั้งไว้แต่แรกเป็นเกณฑ์ ระบบควบคุมอัตโนมัติจำเป็นที่จะต้องยืนยันความสมดุลของการทำงานของปั๊มและวาล์วโดยการตรวจอัตราการป้อน Slurry และความดัน

เสถียรภาพที่หน้าตัดจะถูกประเมินโดยการตรวจสอบจากสภาพของผิวหน้าโดยการวัดค่าดังต่อไปนี้ a) แรงกระทำบนหัวเจาะ b) ปริมาณดินที่ถูกขุด c) ปริมาณของผิวหน้าที่ทรุดพัง

(4) หน่วยการป้อนและลำเลียง Slurry (Slurry feed/discharge unit)

หน่วยการป้อนและลำเลียง Slurry ควรจะสามารถควบคุมความดัน Slurry เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่หน้าตัดขณะที่ลำเลียงดินที่ขุดออกมาด้วยอัตราการเคลื่อนที่ภายใต้สภาพดินที่พบเจอ โดยสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบคือ

1) เงื่อนไขการออกแบบ

เงื่อนไขการออกแบบของ หน่วยการป้อนและลำเลียง Slurry คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะ สภาพดินเหนือน้ำตัด ความยาวอุโมงค์ ความลึกของปล่องแนวตั้ง (Shaft) (น้ำหนักที่กระทำเหนืออุโมงค์), ความเร็วการเคลื่อนที่, ความดันน้ำที่ใช้ควบคุมผิวหน้าตัด และความหนาแน่นของ Slurry

2) ความเร็วเคลื่อนที่วิกฤต (Critical tractive velocity) สำหรับท่อปล่อย Slurry

ในการลำเลียงสารผสมดินและน้ำเลน จะต้องรักษาความเร็วการผสมให้สูงกว่าค่าวิกฤตก่อนที่สารจะเกิดการตกตะกอน ความเร็ววิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการ Durand's formula ดังนี้

$$V_c = F_1 \sqrt{2gd \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}}$$

เมื่อ V_c = ความเร็วเคลื่อนที่วิกฤต

F_1 = ค่าคงที่จากขนาดเม็ดดินและความเข้มข้นของของเหลว

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

g = แรงโน้มถ่วง

ρ = ความหนาแน่นของเม็ดดิน

ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลว

3) ท่อปล่อย Slurry และขนาดของท่อ

a) ขนาด

ขนาดของท่อปล่อย Slurry จะคำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของหัวเจาะและสภาพดินที่หน้าตัด โดยปกติจะใช้ขนาดท่อดังตารางที่ 4.4 นี้

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดท่อป้อนและปล่อย Slurry

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของหัวเจาะ (m)	ขนาดท่อปล่อย (mm)	ขนาดท่อป้อน (mm)
น้อยกว่า 2	50-100	50-100
2-4	80-100	100-200
4-6	100-150	150-200
6-8	150-200	200-250
8-10	200-250	250-300
10-12	250-300	300-350

b) การอุดตัน

ขนาดท่อควรเลือกจากขนาดเม็ดกรวดและสิ่งแปลกปลอมในท่อ ถ้าทำได้ตามนี้ก็จะทำให้ท่อปลอดภัยจากปัญหาการอุดตัน

c) การสึกกร่อน

ในอุโมงค์ขนาดยาวที่เจาะผ่านที่มีทรายและกรวดปะปน การสึกกร่อนของท่อปล่อย Slurry นับเป็นปัญหาอย่างหนึ่ง การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกใช้ท่อที่มีความหนามากขึ้นเพื่อให้สึกกร่อนช้าลง

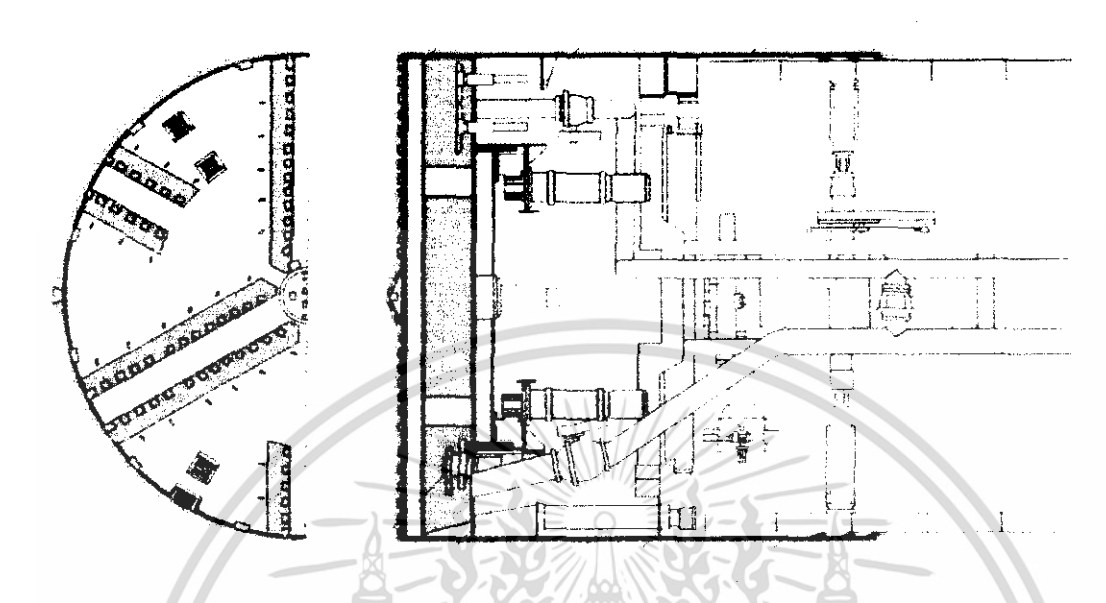
4) การเลือกปั๊มสำหรับการป้อนและปล่อย Slurry

ปั๊มป้อนและปล่อย Slurry ควรมีความจุเพียงพอตามอัตราไหลที่ต้องการ และขนาดของมันควรจะเหมาะสมกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ทว่าในความเป็นจริงนั้นดินที่ขุดออกมาและผ่านปัมนั้นก็ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกด้วย

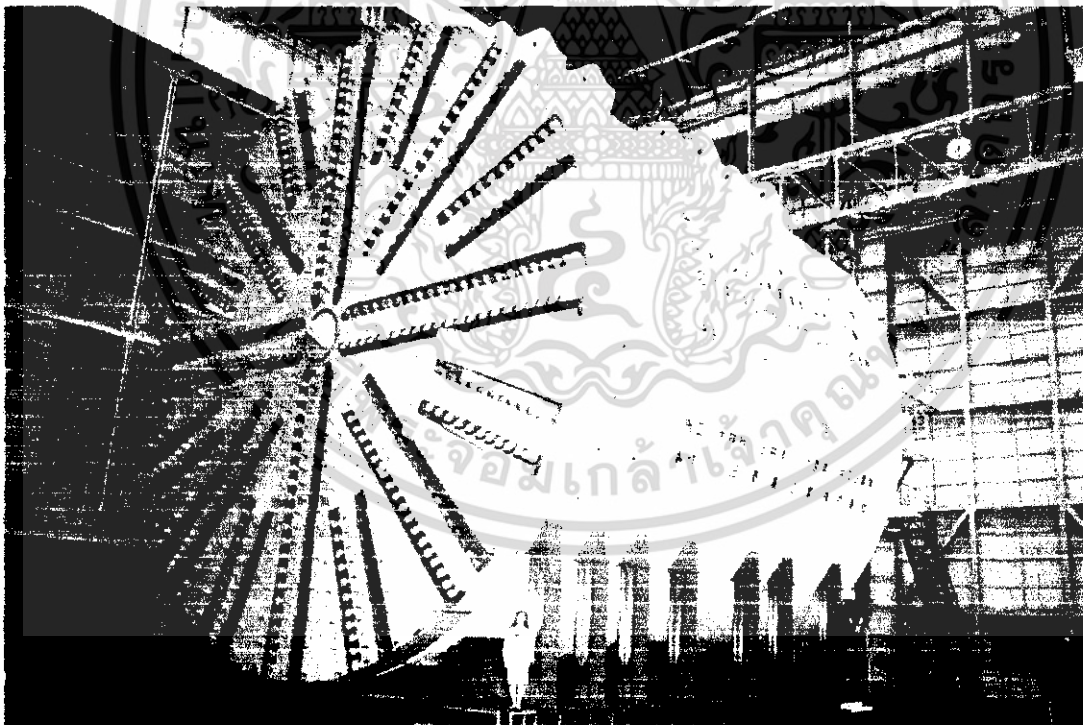
5) อื่นๆ

มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่าควรจัดควาล์วควบคุมการไหลเลี้ยงอัตโนมัติ (Automatic bypass valve control unit) ซึ่งจะทำงานอัตโนมัติผ่านวาล์วนี้เมื่อยามจำเป็น นอกจากนี้ยังควรมีวาล์ว

ปรับความดันฉุกเฉินเพื่อป้องกันปัญหาจากความดันน้ำที่ผิวหน้าตัดดินและป้องกันปรากฏการณ์ช้อนน้ำ



รูปที่ 4.52 แสดงกลไกภายในหัวเจาะแบบ Slurry shield



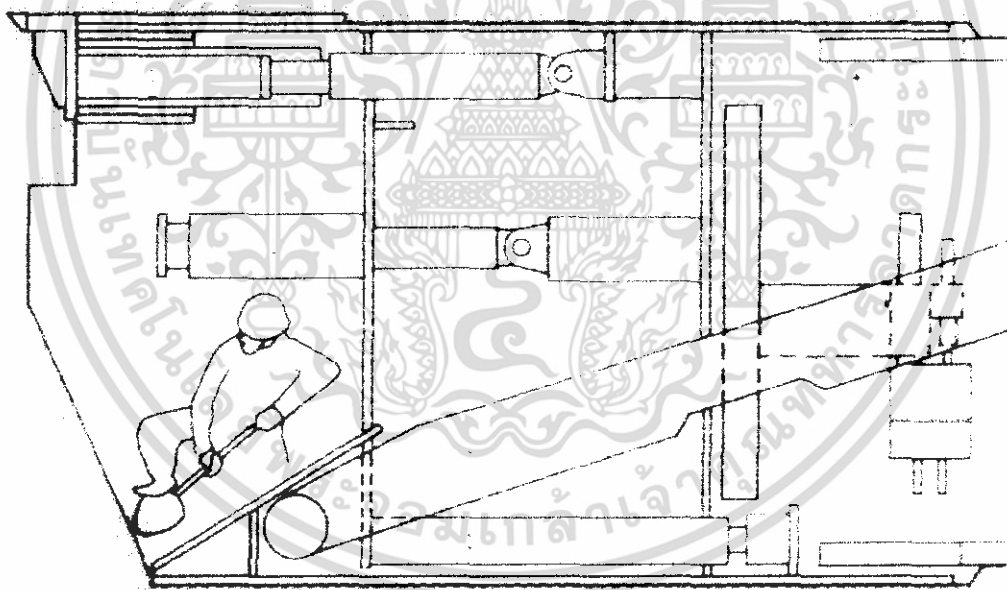
รูปที่ 4.53 หัวเจาะแบบ Slurry Shield

4.4 หัวเจาะแบบ Manual excavation, Semi-mechanical excavation และ Mechanical shield

(1) โครงสร้างของหัวเจาะแบบขุดด้วยมือ (Manual Excavation) และแบบกึ่งเครื่องยนต์ (Semi-mechanical excavation)

หัวเจาะแบบขุดด้วยมือควรจะต้องมีโครงสร้างที่เสริมผิวหน้าขณะเดียวกันก็มีช่องว่างเพียงพอสำหรับการขุด

ในการติดตั้งระบบพลังงานสำหรับลำเลียงดินนั้น หัวเจาะแบบกึ่งเครื่องยนต์จะต้องระวังความปลอดภัยของคนงานและการทำงาน ระบบพลังงานที่ใช้อย่างกว้างขวางก็คือไฮดรอลิกและไฟฟ้าเพราะว่าเป็นพลังงานที่ปลอดภัยสำหรับการทำงานอุโมงค์ และเพราะว่าบรรยากาศในอุโมงค์มักจะมีควันสูง ระดับความดังของเสียงจากแหล่งพลังงานก็ต้องต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้



รูปที่ 4.54 แสดงกลไกการทำงานภายใน Manual shield



รูปที่ 4.55 หัวเจาะแบบ Manual shield

(2) โครงสร้างของหัวเจาะแบบเครื่องยนต์ (Mechanical shield machine)

องค์ประกอบหลักของหัวเจาะแบบเครื่องยนต์มี หน่วยการขุด หน่วยบรรจุดิน และ อุปกรณ์ลำเลียงดิน ดินจะถูกลำเลียงสู่สายพานด้วยถังตก โดยปกติถังตกจะติดอยู่กับหัวตัดดิน (Cutter head)

(3) Face jack devices

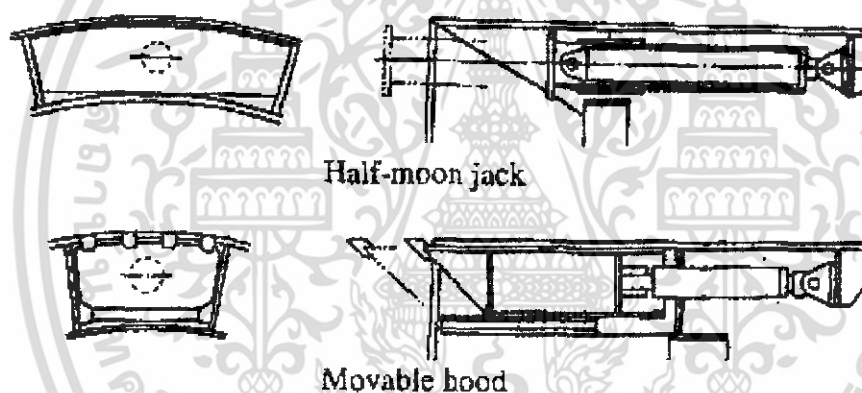
Face jack devices จะใช้ค้ำยันผิวหน้า มันจะช่วยทำให้ผิวหน้ามีเสถียรภาพ โดยอุปกรณ์ต้องวางไว้ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

1) อุปกรณ์และการเลือก Face jack devices

เนื่องจาก Face jack devices มีไว้เพื่อป้องกันผิวหน้าจากการพังทลายของดินและควบคุมการเปลี่ยนรูป มันควรกระทำต่อดิน เพื่อป้องกันดินบีบอัดตัวและแตกพัง และทำให้ผิวหน้าไม่เกิดการพังทลาย อุปกรณ์ควรติดตั้งพร้อมกับ Face jack เพื่อรักษาความดันในขณะที่หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า การออกแบบแรงผลักดันควรให้มีค่าอยู่ที่ $100-350 \text{ kN/m}^2$

a) อุปกรณ์แม่แรงด้านและหลัง (Face and deck jack) จะติดกับด้านหน้าเพื่อต้านผิวหน้า อีกอย่างเนื่องจาก Face jack อาจถูกทำให้เปลี่ยนรูปโดยแรงดันดินที่ไม่สมดุล จึงควรเสริมแรงด้วยอุปกรณ์เสริมอื่นเพิ่ม

b) Half moon jack และ Movable Jack จะถูกใช้ช่วยส่วนด้านบนของผิวหน้า การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เหล่านี้ควรจะต้องระวังไม่ให้มีเม็ดดินลอคเข้าไปในช่องว่างระหว่างส่วนโกลและป้องกันการเปลี่ยนรูปของ Face jack device ภายใต้อาการดันดิน



รูปที่ 4.56 Face jack devices ที่ส่วนบนของหน้าตัด

2) โครงร่างของ Face jack

การจัดเรียง Face jack รอบหน้าตัดและตามขอบนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเจาะ เนื่องจากดินส่วนรอบหวนกรอบของเครื่องจักรนั้นจะถูกควบคุมโดยแรงดันและสามารถที่จะเกิดการพังทลายได้ สิ่งที่จะระวังเป็นพิเศษคือ Face jack ที่อยู่ด้านเหนือหน้าตัด แรงผลักของแม่แรงตัวหนึ่งจะอยู่ที่ประมาณ $100-500 \text{ kN}$ โดยจะขึ้นอยู่กับสภาพดินและพื้นที่โดยรอบที่กระทำต่อแม่แรง

3) ระยะของ Face jack

ระยะของแม่แรงก็คือระยะของแม่แรงหัวเจาะและวิธีการขุด โดยปกติระยะของ Movable hood jack จะมีค่าประมาณ 50% ของแม่แรงพลิกเคลื่อน ระยะของ Face jack อื่นๆ ก็จะมีค่าประมาณ 0-20% ของแม่แรงพลิก

(4) การเลือกเครื่องจักรการขุดและบรรทุก

ในการเลือกเครื่องจักรการขุดและบรรทุกนั้น สภาพดิน สมรรถภาพการทำงาน ช่องว่างสำหรับเครื่องจักรภายในหัวเจาะนั้นล้วนเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณา โดยปกติจะมีการใช้งานที่แตกต่างกันไป ดังนี้

1) เครื่องจักรที่ใช้ทั้งขุดและใช้บรรทุกน้ำหนัก

เครื่องจักรประเภทนี้ส่วนมากจะมีเครื่องดักไฮโดรลิก หรือใบพัดหมุน โดยที่สามารถเคลื่อนไปข้างหน้าหรือถอยหลัง จากข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่ง และขึ้นบนหรือถอยหลังก็ได้

2) เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเท่านั้น

ใบพัดหมุนหรือเครื่องบดจะถูกติดตั้งที่ด้านหน้าของหัวเจาะ ทำให้ใบพัดหมุนหรือเครื่องบดสามารถเคลื่อนไปข้างหน้าหรือถอยหลัง จากข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่ง และขึ้นบนหรือถอยหลังก็ได้

3) เครื่องบรรทุกน้ำหนัก

เครื่องบรรทุกน้ำหนักสำหรับลำเลียงดินที่ขุดออกมาใส่สายพานหรืออุปกรณ์ขนย้าย สายโซ่ลำเลียงที่มีแขนยก ถึงดัก และเครื่องดักของเป็นอุปกรณ์ของเครื่องจักรชนิดนี้

(5) การขนย้ายดิน

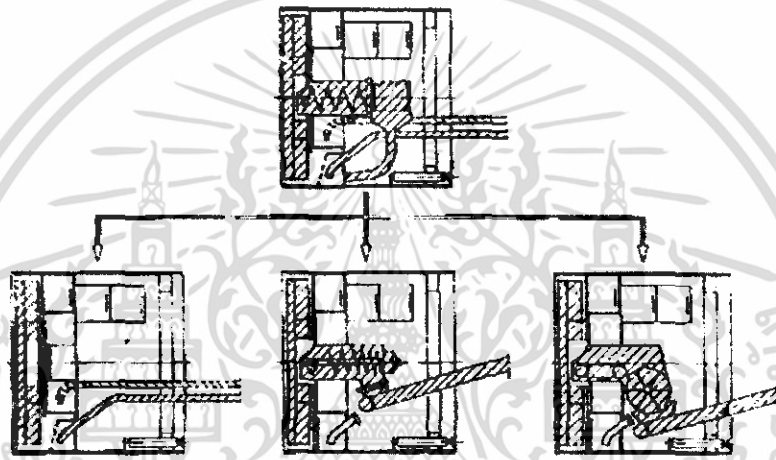
การขนย้ายดินควรเลือกให้เหมาะสมกับสภาพของดิน และแผนการทำงาน อีกทั้งต้องพิจารณาความจุอีกด้วย

การขนย้ายดินจะขนย้ายลำเลียงออกไปทางด้านหลังของหัวเจาะ สายพาน โซ่และสกรู จะถูกใช้เป็นตัวลำเลียงดิน ในกรณีที่ดินปริมาณน้ำในดินต่ำ จะต้องเลือกชนิดการลำเลียงจากหลายวิธีนี้ สำหรับหินก้อนใหญ่ไม่ควรจะใช้วิธีการลำเลียงออก ทว่าควรจะแยกมันออก ในกรณีดินที่มีปริมาณน้ำในดินสูง การลำเลียงควรมีความลาดเอียงที่เหมาะสม ความเร็วที่เหมาะสม และจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ป้องกันการไหลย้อนกลับ เพื่อป้องกันดินไหลย้อนกลับ

คือ แผนการตลาดญี่ปุ่นนั้นต้องการปรับปรุงวิธีเดิมเพื่อขุดดินด้วยเครื่องจักรระบบเดียวโดยไม่ต้องเปลี่ยนระบบการทำงาน

(1) Mixshield

ในปี 1985 หัวเจาะผสมที่เรียกว่า “Mixshield” ถูกจดลิขสิทธิ์โดยบริษัทของ Wayss & Freytag และ Herrenknecht โดยพื้นฐานของระบบเครื่อง Mixshield (รูปที่ 4.60) นั้นมาจาก Hydroshield ซึ่งมี Submerge wall และฝากั้นความดัน การแปลง Earth pressure balance ไปเป็นระบบ Compressed air พร้อมด้วย Rotary feeder นั้นก็เป็นไปได้



รูปที่ 4.60 Mixshield (Wayss & Freytag)

การออกแบบสำคัญของการแปลงการทำงานที่แตกต่างกันก็คือหน่วย Centre-free drive ของ Cutting wheel และการปล่อยให้คิดของ Cutting wheel ในที่แบกทานทรงกระบอก ซึ่งตำแหน่งของ Cutting wheel จะถูกรักษาโดยทรงกระบอกไปพร้อมกัน

ลิขสิทธิ์ของ Mixshield ถูกใช้รูปแบบของ Slurry เป็นหลัก การแปลง Mixshield จากระบบ Slurry มาเป็นระบบหน้าเปิดนั้นถูกใช้ระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ Grauholz ในประเทศ สวิตเซอร์แลนด์

ในปี 1994 การแปลงจาก Slurry เป็น Earth pressure balance ภายในโครงการเดียวกันถูกใช้ครั้งแรกในโครงการ Duisburg Metro องค์ประกอบการทำงานตามลำดับจะถูกติดตั้งในหลุมที่เปิดไว้

ระบบสำรอง Back-up system

ในส่วนของระบบสำรอง การขนส่งขนานทั้งสองต้องมี(ท่อ Slurry และระบบสายพานลำเลียง) ยิ่งไปกว่านั้นยังต้องมีอุปกรณ์สำหรับการทำงาน (Slurry pump, อุปกรณ์ Pipe handling, ตัวบรรจุ, ปัม ฯลฯ) อุปกรณ์เพิ่มเติมจะช่วยลดช่องว่างสำหรับการติดตั้งส่วนที่ไม่ได้ระบุไว้ (หน่วยเสริมของเครื่องจักร การขนย้ายชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ การขนย้ายวัสดุ) หรือช่วยแก้ปัญหาความซับซ้อนและลดต้นทุนลง ฉะนั้นการเลือกระบบทำงานที่เหมาะสมกว่าก็ต้องพิจารณาด้วย

(2) Modular system

ในการพัฒนาหัวเจานั้น ก็ได้มีการพัฒนา Modular system ไปด้วย โดยการพัฒนาไม่เพียงแต่เป็นการพัฒนาการขับเคลื่อนของหัวเจาะผ่านชั้นดินที่แตกต่างกัน แต่ยังรวมถึงสัญญาที่ระบุถึงการซื้อคืนหัวเจาะหลังเสร็จโครงการอีกด้วย โดยกรณีนี้จะช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างไปด้วย

ถ้าองค์ประกอบทั้งหมดสำหรับการทำงานเป็นส่วนหนึ่งของ Modular system องค์ประกอบส่วนเพิ่มเติมก็ไม่จำเป็นสำหรับหัวเจาะ การติดตั้งขนานของ Screw conveyor และ Slurry line สำหรับการขนย้ายวัสดุจะต้องสามารถป้องกันได้ ข้อดีสำคัญของ Modular system ก็คือมันจะไม่เกี่ยวข้องกับระบบการทำงานแต่ละส่วน

เนื่องจากช่องว่างในหัวเจาะและในอุโมงค์ การแปลง Modular system จึงถูกวางไว้ใน ปล่องแนวตั้ง (Shaft) ระหว่างการก่อสร้างรถไฟใต้ดินภายในตัวเมือง อุโมงค์จะถูกแบ่งเป็นตัวสถานีที่มีความยาว 0.5-2 km โดยระยะทางบางส่วนในแผนการ จะต้องแปลงเครื่องจักรให้เหมาะสม ถ้าเครื่องจักรพื้นฐานถูกออกแบบสำหรับการแปลง Modular นี้จะต้องใช้สถานที่ที่ปล่องแนวตั้ง

ในหลายๆครั้ง Modular system ถือเป็นตัวแทนของการแก้ปัญหาการลดต้นทุน ด้วยระบบการทำงานที่แตกต่าง ไม่เพียงแต่องค์ประกอบของเครื่องจักร แต่ยังรวมถึงการติดตั้งในอุโมงค์และบนผิวหน้า อีกทั้งควรพิจารณาถึงต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (15-20%) ของการออกแบบเครื่องจักรอีกด้วย

4.5.2 หลักการของเครื่องจักร

การพัฒนาหัวเจาะแบบผสมนั้นดำเนินการโดยบริษัทของเยอรมนี นี่เป็นเพราะว่าสภาพทางธรณีวิทยาของยุโรป แม้ว่าการพัฒนาและวิจัยจะทำในญี่ปุ่น ทว่ากลับไม่เคยได้ยินว่าญี่ปุ่นต้องการเครื่องจักรที่แปลงได้ เหตุผลหนึ่งก็เนื่องจากสภาพดินของญี่ปุ่นค่อนข้างเหมือนกัน อีกเหตุผลก็

Cutting wheel

การออกแบบ Cutting wheel เพื่อใช้ในหัวเจาะ Slurry shield และ Earth pressure balance นั้นเป็นไปได้ การเปลี่ยน Cutting wheel ก็ไม่ใช่ปัญหาสำคัญ ทว่าก็ต้องใช้ปล่องแนวตั้ง (Shaft)

การขนย้ายวัสดุ (Material Removal)

การขนย้ายวัสดุจากห้องขุดของ Slurry shield (Screw conveyor –Slurry line) และ Earth pressure balance นั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในหัวเจาะแบบผสมจะต้องมีองค์ประกอบทั้ง 2 แบบ ต้องให้มีขนาดใหญ่เท่าที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามมันจะเป็นการยากสำหรับหัวเจาะที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 8.5 เมตร ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องเลือกการทำงานให้เหมาะสมกับพื้นฐานทางธรณีวิทยาของเส้นทาง

อีกอย่างหนึ่ง Earth pressure balance นั้นไม่สามารถติดตั้งเครื่องบดหินในห้อง Excavation chamber ดังนั้นเมื่อแปลงเป็น Slurry การบดหินจึงต้องถูกติดตั้งและหินใหญ่จะถูกขนย้ายออกด้วยมือ

Face Support

การผสม Submerge wall และฝักันความดันเป็นลักษณะสำคัญของ Slurry shield ทว่าใน Earth pressure balance นั้น Submerge wall จะถูกแปลงเป็นฝักันความดัน และต้องออกแบบให้รับน้ำหนักที่มากขึ้น

ในการเปิดส่วนที่ต่ำกว่าของ Submerge wall จะถูกปิด เมื่อใช้ Telescopic screw conveyor และประตูใน Submerge wall ขึ้นตอนนี้สามารถทำงานเป็นส่วนๆ กัน อย่างไรก็ตามคู่มือการทำงานก็เป็นสิ่งที่จำเป็นเสมอ (การล็อก, การรักษาความปลอดภัยขั้นสุดท้าย)

การติดตั้งฝักันความดันสำหรับการทำงานทั้งคู่ต้องรวมในเครื่องจักรพื้นฐานด้วย รวมถึงต้องพิจารณาการทำงานในระบบที่สำคัญกว่า

การติดตั้งเส้นทางอุโมงค์

การติดตั้งเส้นทางอุโมงค์นั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกัน ในพื้นที่ของแขนยกจะต้องมีช่องว่างเพียงพอสำหรับระบบการลำเลียงวัสดุที่แตกต่างกันทั้ง 2 ชนิด

Metro ในปี 1994 ส่วนหัวเจาะแบบที่ 5 ซึ่งผสมระหว่าง Open-faced shield, Earth pressure balance shield, Slurry shield นั้นต้องศึกษาต่อไป ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวเจาะ Earth pressure balance shield ซึ่งมีระบบอัดอากาศ ระบบอัดอากาศเสริมจะถูกใช้เมื่อเข้าไปสู่ห้องการขุด เพื่อซ่อมแซมใบพัดขุดหรือขจัดอุปสรรค

เมื่อหัวเจาะแบบผสมถูกออกแบบขึ้น ลูกค้า ผู้ว่าจ้าง และผู้ผลิตหัวเจาะก็ต้องเผชิญความขัดแย้งกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเครื่องจักร เวลาและต้นทุนเป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินความสำเร็จของโครงการ

ตัวอย่างที่ดีสำหรับปัญหานี้ได้แก่โครงการ Galleria Aurelia ที่กรุงโรม ปี 1983 หลังจากการเจาะด้วยการเปิดหน้าส่วนแรกในดินเหนียวที่เสถียรภาพ หัวเจาะแบบ Open-faced shield ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.64 เมตรก็ถูกแปลงให้เป็นหัวเจาะ Slurry shield เนื่องจากรายงานสภาพทางธรณีวิทยาบ่งชี้ความเป็นดินทรายภายในดิน การแปลงเครื่องใช้เวลาถึง 3 เดือน และโชคร้ายที่พบว่าหัวเจาะยังอยู่ห่างจากดินทรายอีกประมาณ 100 เมตร ด้วยเหตุผลด้านเวลาการแปลงเครื่องนั้นไม่สามารถที่จะทำได้ ดังนั้นจึงต้องขุดดินเหนียวด้วยระบบ Slurry ที่มีต้นทุนสูงและเพิ่มมาตรการที่ซับซ้อน เช่น การตั้งโรงงานบนผิวดิน

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมและลำดับการทำงานภายในโครงการเดียวกัน เวลาที่ใช้ในการแปลงเครื่องจักรก็ควรจะได้รับการพิจารณาถึง ไม่ใช่เพียงแค่พิจารณาถึงการแปลงวิธีการเท่านั้นแต่ยังต้องคำนึงความปลอดภัยอีกด้วย การเพิ่มและติดตั้งอุปกรณ์ภายในอุโมงค์อาจได้ผลเช่นเดียวกับการแปลงเครื่องจักรก็เป็นได้

4.5.1 แผนการพัฒนา

สิ่งที่ต้องออกแบบก็คือ

- การออกแบบหัวเจาะให้สามารถทำงานได้ทั้งสองวิธี
- การออกแบบระบบ Modular system

(1) หัวเจาะแบบผสมซึ่งรวมอุปกรณ์สำหรับวิธีการที่แตกต่างกัน

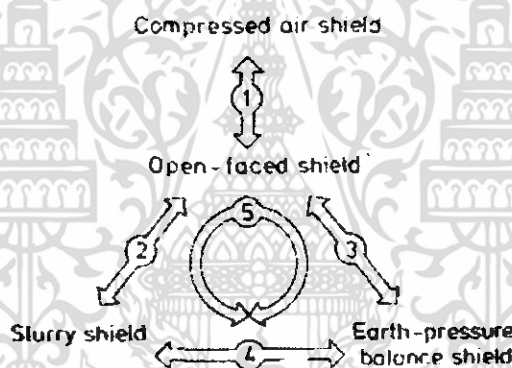
จากการเปรียบเทียบการทำงานของหัวเจาะ Slurry shield กับ Earth pressure balance ทำให้ทราบถึงความแตกต่างของแต่ละชิ้นส่วนอุปกรณ์ รวมทั้งยังแตกต่างในการขุดและติดตั้งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

4.5 หัวเจาะแบบผสม Combined Shield

วิศวกรซึ่งทำการขุดเจาะอุโมงค์นั้นมักจะผันถึงการขุดเจาะดินที่มีสภาพแตกต่างกัน ด้วยเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียว บริษัทผลิตและผู้ว่าจ้างจึงได้ผลิตหัวเจาะขึ้นใหม่ เช่น “Polysield (ของ Voest Alpine) หรือ “Mixshield” (ของ Wayss & Freytag) ฯลฯ

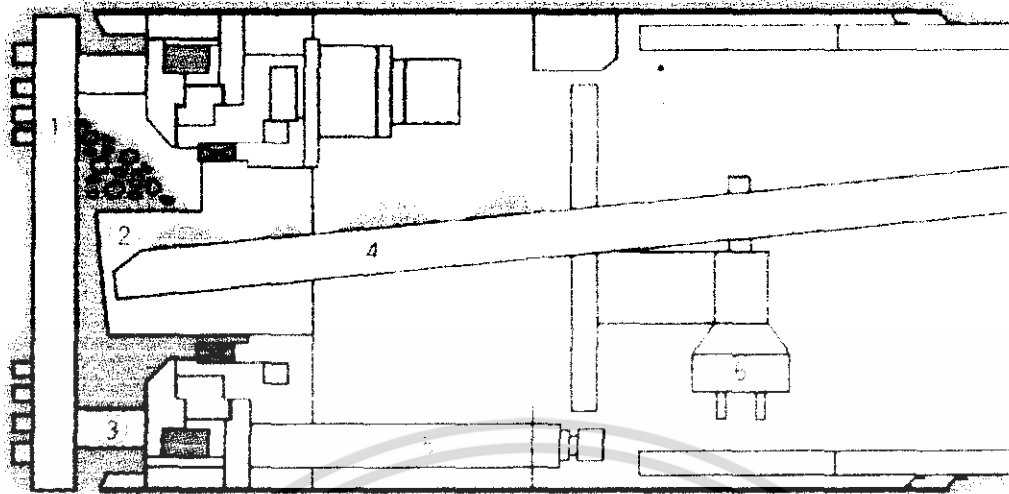
ประเภทของหัวเจาะต่างๆ ได้ถูกบรรยายค้างข้างต้นไปแล้ว ทว่าวิธีการทั้งหลายก็ยังมีข้อจำกัดทั้งทางด้านนิเวศวิทยาและด้านเศรษฐศาสตร์อยู่ ทั้งหัวเจาะแบบ Slurry shield และ หัวเจาะแบบ Earth pressure balance shield

โดยหัวเจาะแบบผสม(Combined shield) มาจากแนวคิดที่ว่าหัวเจาะจะต้องสามารถปรับใช้กับสภาพทางธรณีวิทยาและสภาพทางชลศาสตร์ของดิน โดยมีหลักการพื้นฐานมาจากการสร้างเสถียรภาพแก่ดิน รวมถึงอุปกรณ์ ระบบการขนส่งและเครื่องมือต่างๆ ทั้งหมด

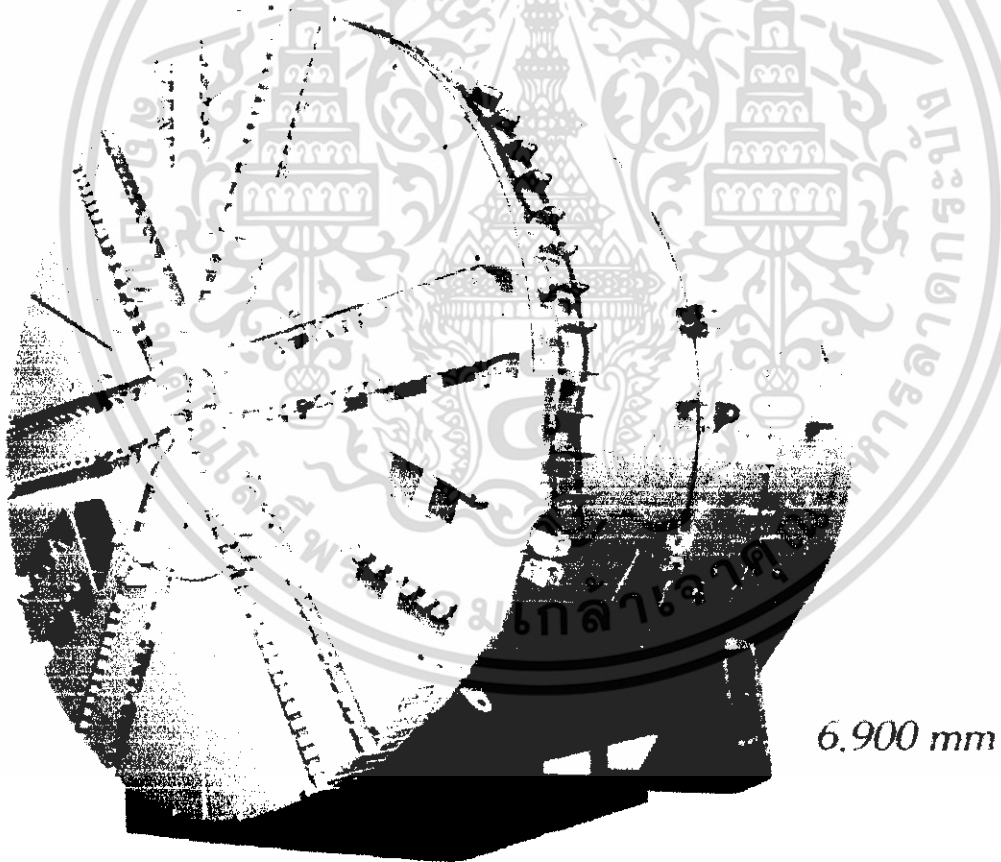


รูปที่ 4.59 การผสมระหว่างหัวเจาะ

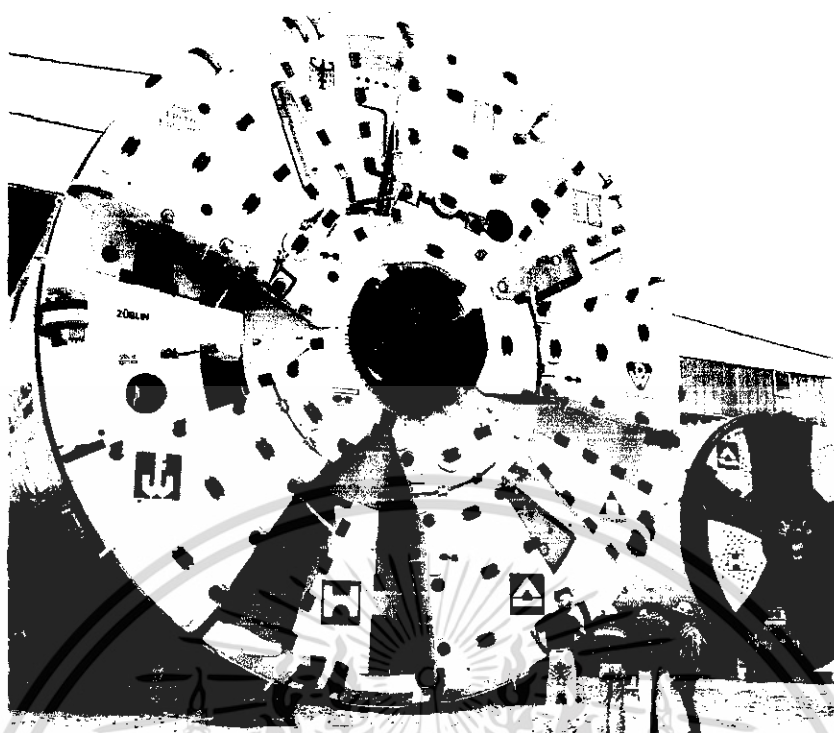
จากรูปที่ 4.59 การผสมแบบที่ 1 เป็นการผสมระหว่างหัวเจาะแบบ Compressed air shield กับ Open-faced shield การผสมแบบที่ 2 ระหว่างหัวเจาะแบบ Slurry shield กับ Open-faced shield และแบบที่ 3 ระหว่างหัวเจาะ Earth pressure balance กับ Open-faced shield ล้วนถูกพัฒนาไปไกล ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดสำหรับหัวเจาะผสมระหว่าง Slurry shield กับ Open-faced shield คือการขุดเจาะอุโมงค์ Grauholz ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สำหรับตัวอย่างของการขุดเจาะโดยหัวเจาะผสมแบบ Earth pressure balance กับ Open-faced shield ได้แก่โครงการอุโมงค์ The Channel tunnel ด้วยหัวเจาะทางทะเลบนชายฝั่งของฝรั่งเศส ส่วนหัวเจาะแบบที่ 4 ที่ผสมระหว่าง Slurry Shield กับ Earth pressure balance shield นั้นถูกทดลองใช้ครั้งแรกในโครงการ Duisburg



รูปที่ 4.57 แสดงกลไกการทำงานภายใน Mechanical shield



รูปที่ 4.58 หัวเจาะแบบ Mechanical shield

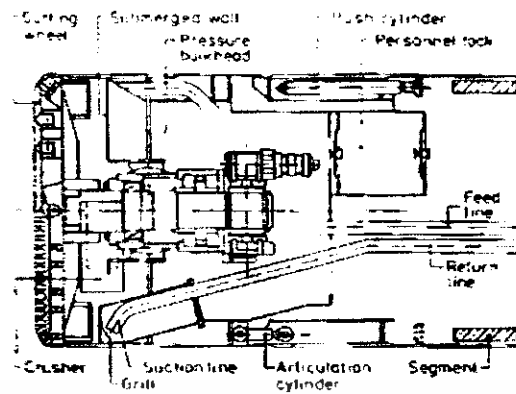


รูปที่ 4.61 Mix shield ใช้ในโครงการ Fourth Elb Tunnel, Germany

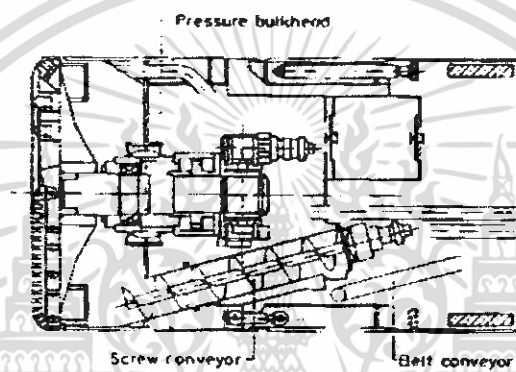
(2) Polyshield

คล้ายกับ Mixshield พื้นฐานการทำงานของ Polyshield คือหัวเจาะแบบ Slurry shield ซึ่งถอดวงจร Slurry ออก และสามารถแปลงเป็น Earth pressure balance ได้ด้วยระบบการขนย้ายวัสดุ หรือแปลงเป็นแบบ Open-face ด้วยการขยายสายพานลำเลียงต่อไปยัง Excavation Chamber

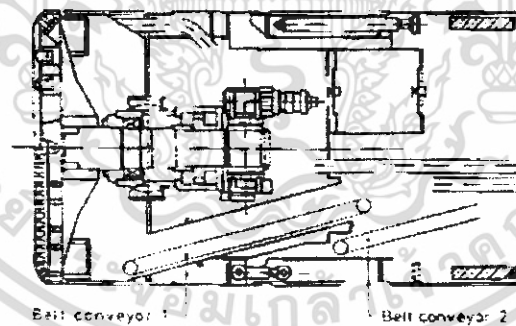
ในกันยายน 1993 การผลิต Polyshield ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7.40 เมตรได้ถูกสร้างขึ้นสำเร็จ มันถูกใช้งานในปารีสเพื่อเชื่อมต่อใต้ดินระหว่างรถไฟสาย TGV ตะวันออก และ TGV ตะวันตก โครงการระหว่างเมือง Gare de l'Est และ Gare st.-Lazare ซึ่งยาว 1,600 m โดยผ่านดินที่มีสภาพธรณีวิทยาที่แตกต่างกันถึง 3 ประเภท การแปลงจาก Slurry เป็น Earth pressure balance หรือ Open-face จึงเป็นสิ่งจำเป็น



a) Slurry support



b) Earth-pressure support



c) Mechanical support

รูปที่ 4.62 Polyshield (Voest Alpine)

4.6 การบำรุงรักษาหัวชุดเจาะ

การตรวจสอบและบำรุงรักษา

หัวชุดเจาะต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษา ตามช่วงเวลาที่กำหนดให้พร้อมเมื่อต้องการใช้งานเสมอ ทั้งนี้เพื่อรักษาขีดความสามารถในการปฏิบัติงาน และป้องกันอุบัติเหตุและการพังเสียหาย

รายการการตรวจสอบและบำรุงรักษามีดังนี้

(1) การตรวจสอบประจำวัน

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

อุปกรณ์ไฮดรอลิกและเครื่องกรอง

(2) การตรวจสอบตามช่วงเวลาต่างๆ

1) การตรวจสอบรายเดือน

ถึงระบบน้ำมัน

ตรวจสอบรายละเอียดต่างๆของมอเตอร์ ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่น การวัดการต้านทานของฉนวน และการป้องกันน้ำ

ตรวจสอบแผงควบคุม เคเบิล และอุปกรณ์ต่างๆ ตรวจสอบ Relay สำหรับการสับหรือ การวัดการต้านทานของฉนวนและตรวจสอบท่อต่างๆว่าเสียหายหรือไม่

2) การตรวจสอบทุกๆครึ่งปี

ตรวจสอบน้ำมันไฮดรอลิกและน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งต้องทำโดยผู้ผลิตน้ำมันไฮดรอลิกนั้น

(3) การบำรุงรักษาระหว่างช่วงที่มีการหยุดการขุดเจาะ

หากจำเป็นต้องขยายเวลาในการหยุดการขุดเจาะ ต้องทำการบำรุงรักษาดังนี้

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



บทที่ 5

ผนังอุโมงค์

5.1 ผนังอุโมงค์

5.1.1 หน้าที่ของผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ (Lining) จะต้องมีความปลอดภัย และสามารถต้านทานแรงจากดิน โขบริบ และแรงดันจากน้ำ รวมถึงน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ตลอดการใช้งาน ให้เหมาะสมสำหรับจุดประสงค์การนำใช้งานของอุโมงค์ และเงื่อนไขในการก่อสร้าง

หน้าที่หลักของผนังอุโมงค์ (Lining) มี 3 ข้อ คือ

1. ต้องสามารถต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์อย่างเพียงพอและปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน
2. ต้องตอบสนองการใช้งานที่ต้องการ
3. ต้องเหมาะสมกับวิธีการก่อสร้าง

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของแรงขับอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield-Driver tunnel) จะมีความเกี่ยวข้องกับข้อ 3 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผนังอุโมงค์ (Lining) แบ่งประเภทเป็น ผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) ผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) โดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างที่ถูกสร้างไว้ก่อน ขณะที่ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) อาจเป็นแบบคอนกรีตหล่อในที่หรือเป็นโครงสร้างสำเร็จรูป เช่น ท่อเหล็กกล้าโดยจะติดไว้ด้านในของผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining)

ลักษณะของผนังอุโมงค์มีดังนี้

1. ผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) ทำหน้าที่สำหรับค้ำยันน้ำหนักบรรทุก ที่มีต่ออุโมงค์โดยสมมติว่าน้ำหนักบรรทุกจะแบ่งกระทำระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining)
2. ผนังอุโมงค์ ต้องไม่เป็นอุปสรรคต่อการบำรุงรักษาเมื่อเปิดใช้งาน อีกทั้งยังต้องสามารถป้องกันการทะลักเข้าของน้ำใต้ดิน และมีอายุการใช้งานตามที่ได้ออกแบบไว้
3. หน้าที่ของผนังอุโมงค์ ต้องสามารถรับแรงผลัก (Thrust force) จากการขับเคลื่อนของหัวเจาะอุโมงค์ขณะทำการก่อสร้างได้ และสามารถต้านทานแรงดันย้อนกลับจากการฉีดอัดน้ำปูนหลัง

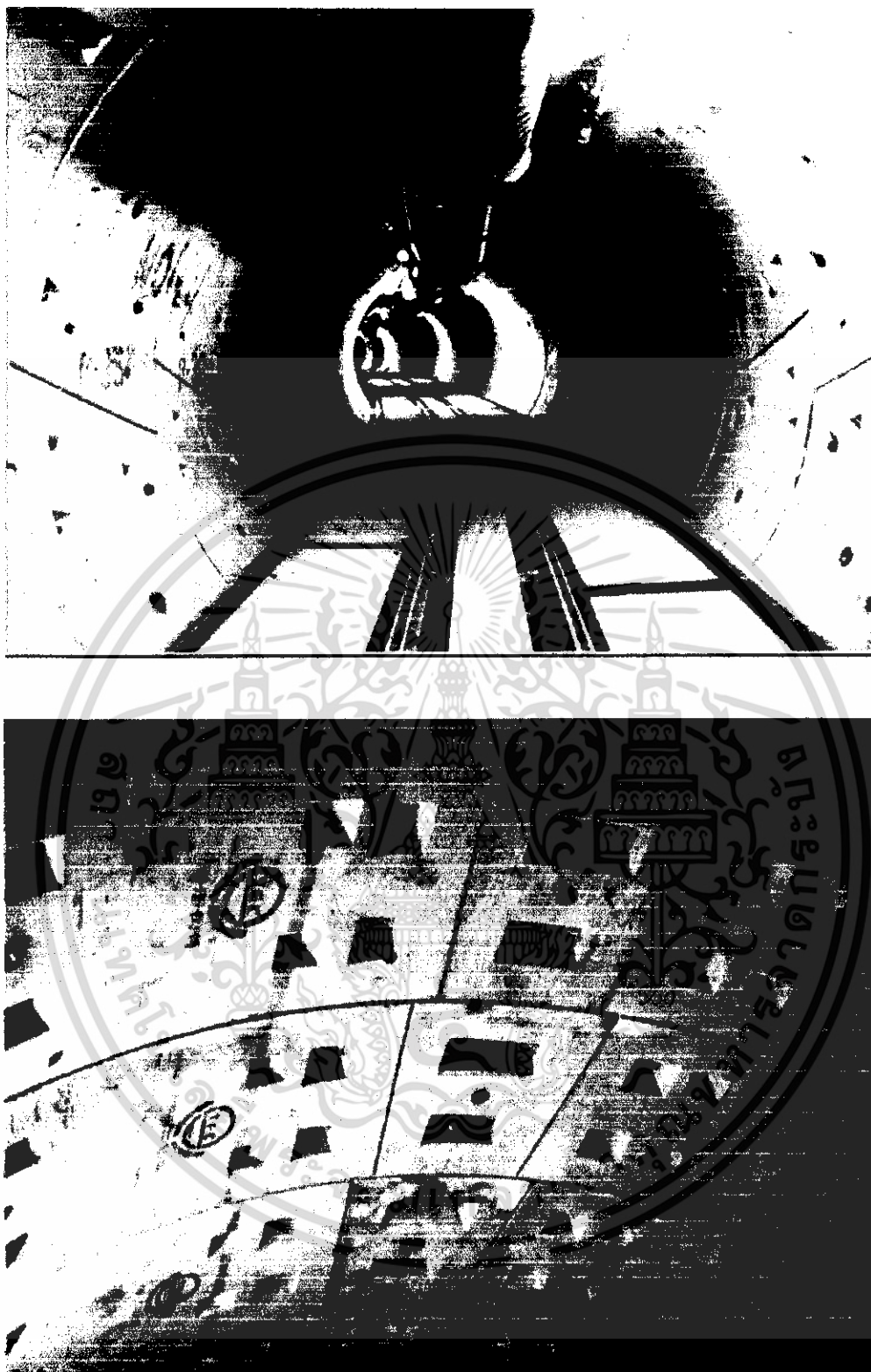
หัวเจาะ (Tail void grouting) อีกทั้งผนังอุโมงค์จะต้องทำหน้าที่อย่างสมบูรณ์ หลังจากหัวเจาะอุโมงค์เดินหน้าไป

ในปัจจุบันยังมีวิธีการหล่อคอนกรีตในที่ เพื่อทดแทนการใช้ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ โดยหัวเจาะอุโมงค์เป็นอุปกรณ์สำหรับฉีดคอนกรีตและไม้แบบเพื่อหล่อเป็นผนังคอนกรีตขณะขับเคลื่อนหัวเจาะ อย่างไรก็ตามยังคงไม่เป็นที่นิยม มีความซับซ้อนกว่าการใช้ผนังอุโมงค์แบบเดิม และควบคุมคุณภาพได้ยาก

แม้ว่าผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) จะแบ่งการรับแรงกระทำ อย่างไรก็ตามในระยะยาวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำต่ออุโมงค์ ซึ่งยากที่จะประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) จะได้รับการออกแบบที่จะรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำต่ออุโมงค์

หน้าที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) คือการป้องกันผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) จากการสึกกร่อน ป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดิน และช่วยเสริมกำลังของผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) อีกทั้งผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) ยังช่วยในการปรับวงแนวเส้นทางที่เบี่ยงเบนมากไปในการก่อสร้างอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) อาจได้รับการสะเทิน โดยมีข้อแม้ว่าการกั้นน้ำของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และการป้องกันการสึกกร่อนได้รับการพิจารณาโดยสมบูรณ์ เมื่อผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) ได้รับการออกแบบโดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างหลัก ความแข็งแรงของอุโมงค์จะเพิ่มขึ้นแต่พฤติกรรมของโครงสร้างประกอบจะไม่สมบูรณ์ การศึกษาในรายละเอียดมีความจำเป็นเมื่อเป็นโครงสร้างลักษณะเฉพาะนี้ถูกใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ มาตรการรับมือสำหรับการทรุดตัวไม่เท่ากันและแผ่นดินไหวก็ควรจัดให้มีสำหรับพื้นดินที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และเชื่อมต่อกับปล่องแนวตั้ง (Shaft) เมื่อทำการออกแบบผนังอุโมงค์ (Lining) สำหรับอุโมงค์ที่มีหัวเจาะอุโมงค์ในชั้นดินที่อ่อน



รูปที่ 5.1 พนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

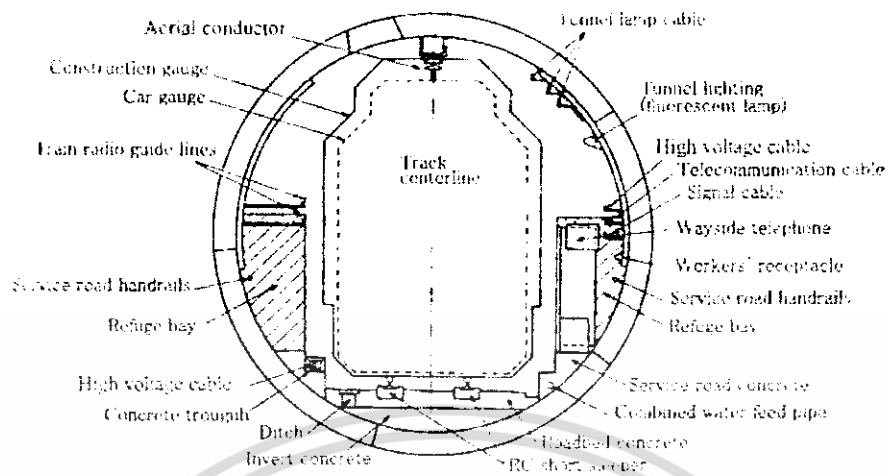
5.1.2 ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์

1. รูปร่างและขนาดของหน้าตัดภายในอุโมงค์จะต้องเพียงพอสำหรับการใช้งานของอุโมงค์และจะกำหนดโดยการพิจารณาจากข้อกำหนดการก่อสร้าง
2. หน้าตัดของหัวเจาะอุโมงค์ โดยทั่วไปเป็นรูปวงกลม

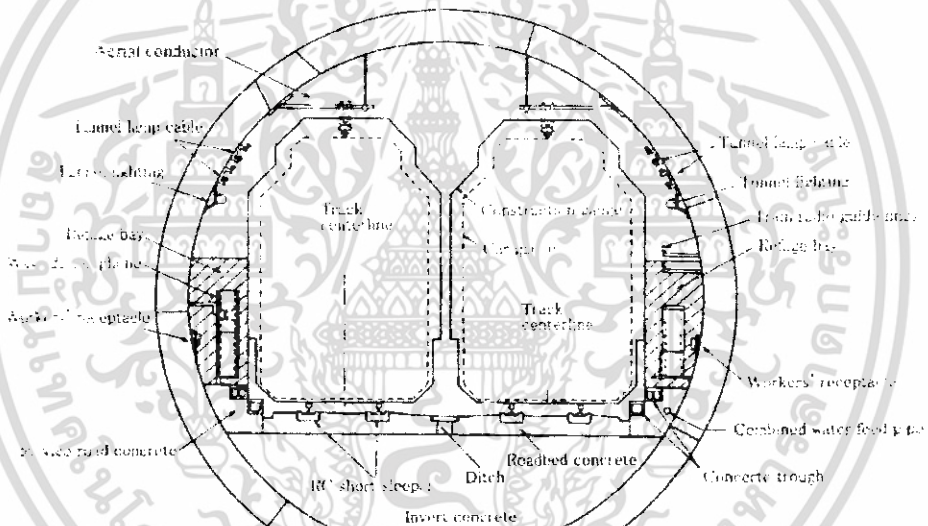
5.1.2.1 รูปร่างและขนาด

ขนาดของหน้าตัดภายในของอุโมงค์จะถูกกำหนดจากการพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์และหน้าตัดกำหนดสำหรับการก่อสร้าง “มาตรฐานชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์สำหรับการใช้งานอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ” จะเป็นการอ้างอิงที่ดีเมื่อออกแบบอุโมงค์ด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.8 ถึง 8.3 เมตร

1. อุโมงค์รถไฟ โดยปกติจะเป็นอุโมงค์รางเดี่ยว หรืออุโมงค์รางคู่ หน้าตัดภายในจะถูกกำหนดโดยพิจารณาถึงความจำเป็นสำหรับการใช้งาน เช่น ขนาดความกว้างของทางรถไฟ และพื้นที่ว่างที่กำหนดสำหรับการรองรับโครงสร้างราง การซ่อมบำรุงและที่พักและเส้นทางรถไฟ ระบบอาณัติสัญญาณและโทรคมนาคม อุปกรณ์ที่ให้แสงสว่าง แผนกงานเกี่ยวกับการระบายอากาศและการระบายน้ำ หน้าตัดภายในจะต้องกำหนดโดยการพิจารณาถึงค่าเผื่อของการก่อสร้าง โดยทั่วไปค่าเผื่อจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 มม. ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังรูปที่ 5.2(ก) และ รูปที่ 5.2(ข)



(ก).



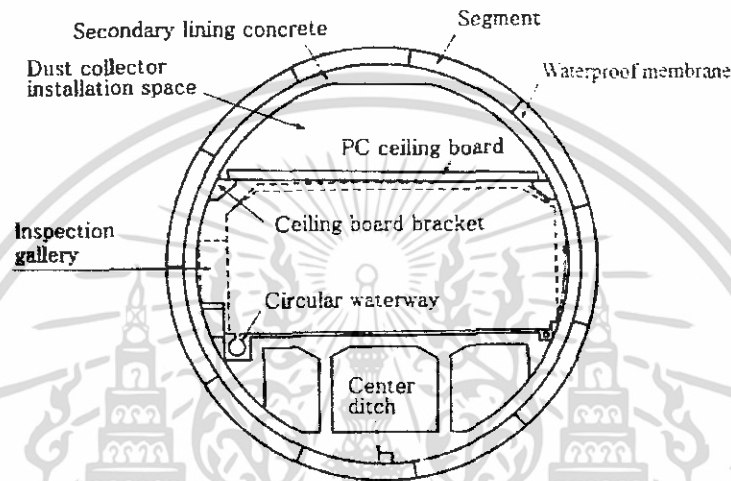
(ข).

รูปที่ 5.2 องค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ

(ก). อุโมงค์รางเดี่ยว

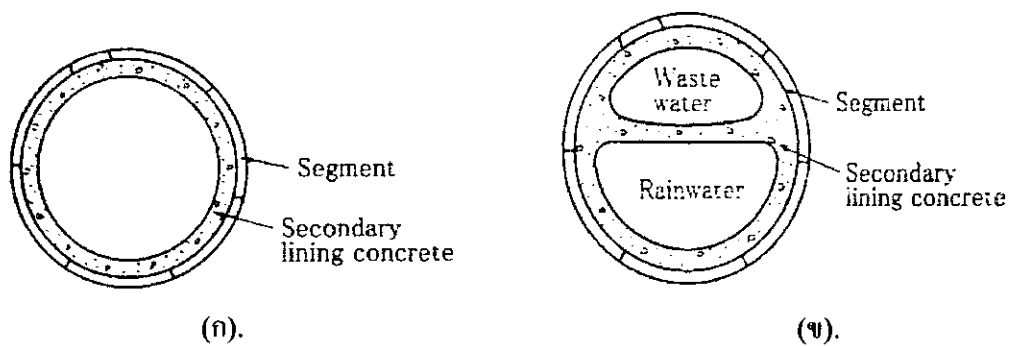
(ข). อุโมงค์รางคู่

2. อุโมงค์ถนน หน้าตัดภายในจะถูกกำหนดโดยพิจารณาถึงขนาดสำหรับการก่อสร้าง โดยจัดจำแนกเป็นประเภทของถนนตามระเบียบข้อบังคับโครงสร้างถนน และต้องมีพื้นที่ว่างที่สำหรับการบำรุงรักษาและพื้นที่สำหรับท่อระบายอากาศหรือพัดลมและอุปกรณ์ส่องสว่าง ระบบป้องกันอุบัติเหตุ การตกแต่งภายใน ป้ายการจราจร และระบบจัดการหรือตรวจสอบการจราจร ตามปกติจะกำหนดหน้าตัดโดยเพิ่มค่าความเผื่อของการวางแนวของหัวขุดเจาะอุโมงค์ โดยทั่วไปค่าความเผื่อในการสร้างจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 มม. ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน

3. อุโมงค์ท่อน้ำเสีย หน้าตัดภายในจะกำหนดโดยการสันนิษฐานถึงการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) หน้าตัดภายในจะต้องเพียงพอสำหรับความเร็วการไหลที่สามารถยอมรับได้ (Allowable flow velocity) และอัตราการไหลที่ได้ออกแบบ (Planned flow rate) ดังรูปที่ 5.4 (ก). อาจมีผนังกันเพื่อแบ่งตามลักษณะใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น หน้าตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสียและระบายน้ำฝนที่ใส่วางกัน ดังรูปที่ 5.4 (ข).



รูปที่ 5.4 รูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย

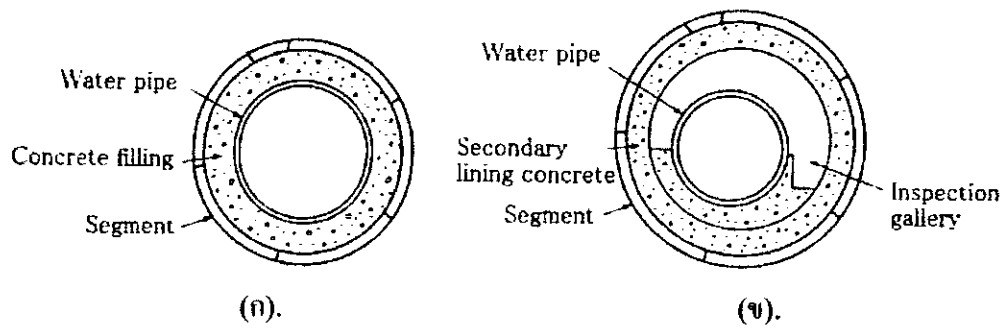
(ก). รูปตัดทั่วไป (ข). รูปตัดแบบ 2 ชั้น

4. อุโมงค์ส่งน้ำ งานระบบส่งน้ำส่วนใหญ่จะต้องใช้เป็นท่อความดัน (Pressure pipes) ทำจากเหล็กกล้า หรือเหล็กหล่อมักจะถูกจัดวางไว้ในอุโมงค์ วิธีการที่เป็นตัวอย่างประกอบด้วย

4.1) ประเภทเติมคอนกรีต (Concrete filling type) ส่งน้ำภายในอุโมงค์หลัก (Primary lining) ภายนอกจะมีรัศมีกว้างกว่าอุโมงค์ส่งน้ำภายในประมาณ 330 ถึง 600 มม. ซึ่งเป็นเหล็กกล้าหรือท่อเหล็กรับแรงดัน โดยช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และท่อเหล็กจะถูกเติมด้วยคอนกรีต นี่เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด

ช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และท่อเหล็กจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาค่าเผื่อของแนวอุโมงค์ที่ก่อสร้างด้วยหัวเจาะอุโมงค์ และความหนาต่ำสุดของผนังอุโมงค์ (Lining) ดังรูปที่ 5.5 (ก).

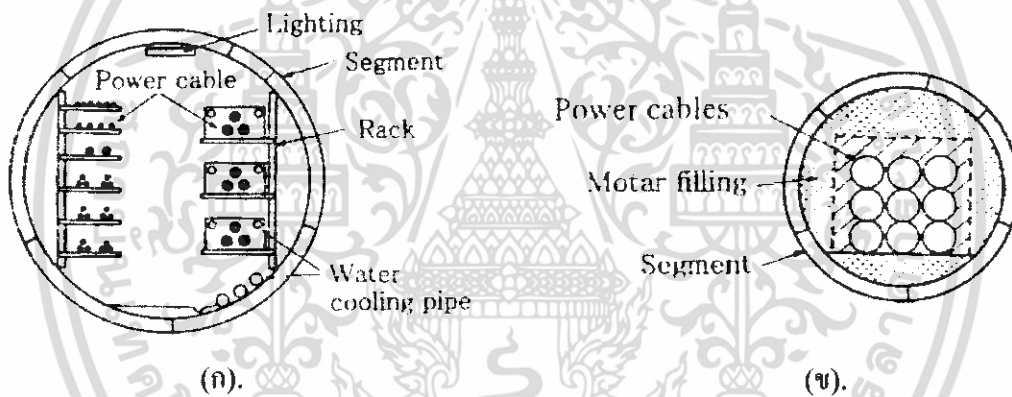
4.2) อุโมงค์ประเภทมีพื้นที่ตรวจสอบ (Inspection gallery type) หน้าตัดภายในของผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) จะมีรัศมีใหญ่กว่าท่อเหล็กภายใน 950 ถึง 1100 มม. หน้าตัดของอุโมงค์จะต้องมีขนาดเพียงพอสำหรับท่อส่งน้ำและส่วนตรวจสอบ โดยทั่วไปจะใช้ท่อเหล็กหรือท่อเหล็กหล่อมาเป็นท่อน้ำ ช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และท่อส่งน้ำจะเป็นพื้นที่สำหรับการเข้าตรวจสอบ ดังรูปที่ 5.5 (ข).



รูปที่ 5.5 รูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ

(ก).ประเภทเติมคอนกรีต (ข).ประเภทอุโมงค์เพื่อการตรวจสอบ

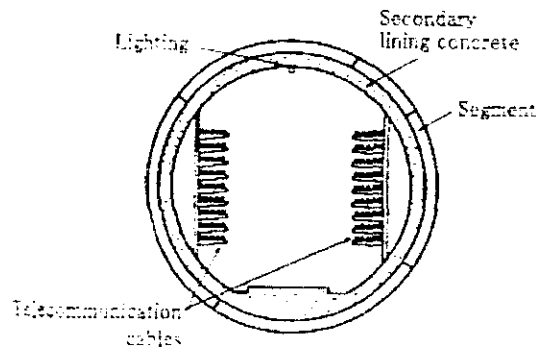
5. อุโมงค์สายส่งกระแสไฟฟ้า จะถูกแบ่งเป็นประเภทชั้นรอง (Rack) และประเภทท่อ(Duct bank) หน้าตัดภายในของอุโมงค์ประเภทชั้นรองจะพิจารณาจากพื้นที่การเข้าตรวจสอบและพื้นที่ว่างสำหรับงานวางสายไฟ ดังรูปที่ 5.6(ก). และ รูปที่ 5.6 (ข). ประเภทท่อจะถูกใช้ในกรณีสำหรับจำนวนสายไฟที่น้อย หน้าตัดจะถูกกำหนดโดยจำนวนของสายไฟที่จะติดตั้ง



รูปที่ 5.6 รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้ในการวางสายส่งกระแสไฟฟ้า

(ก). แบบชั้นรอง (ข). แบบท่อ

6. อุโมงค์ที่ใช้วางระบบโทรคมนาคม หน้าตัดภายในควรพิจารณาจากส่วนเข้าตรวจสอบ และพื้นที่สำหรับการติดตั้งสายเคเบิลดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 รูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางระบบโทรคมนาคม

7. อุโมงค์ส่งก๊าซ ท่อเหล็กกล้าหรือท่อรับแรงดัน จะถูกจัดวางในอุโมงค์ใน 2 ลักษณะ คือ

7.1) ประเภทเติมมอร์ตาร์ (Mortar filling type) พนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) ภายนอกจะมีรัศมีใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซภายในประมาณ 650 ถึง 750 มม. หลังจากการติดตั้งพนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) ท่อก๊าซจะถูกจัดวางในอุโมงค์ โดยช่องว่างระหว่างพนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) และท่อก๊าซจะเติมเต็มด้วยมอร์ตาร์ ระยะห่างระหว่างพนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) และท่อก๊าซจะคำนึงถึงค่าระยะเผื่อของแนวการก่อสร้างอุโมงค์ ดังรูปที่ 5.8 (ก).

7.2) ประเภทมีพื้นที่ตรวจสอบ (Inspection gallery type) โดยพนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) จะมีรัศมีใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซโดยรัศมีประมาณ 950 ถึง 1050 มม. หลังจากการติดตั้งพนักอุโมงค์หลัก (Primary lining) และ พนักอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) แล้วจึงจัดวางท่อก๊าซ ดังรูปที่ 5.8 (ข).

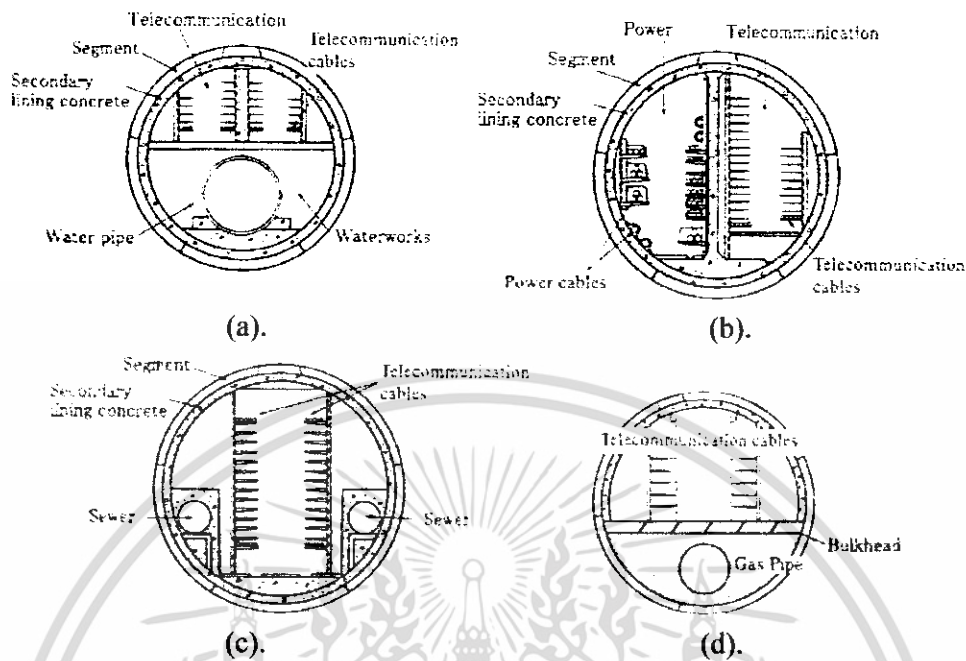


รูปที่ 5.8 รูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ

(a).ประเภทเติมมอร์ตาร์ (b).ประเภทมีพื้นที่ตรวจสอบ

8. อุโมงค์อเนกประสงค์ (Multiple use tunnel) เมื่อระบบส่งน้ำ ระบายน้ำเสีย สายส่งกระแสไฟฟ้า สายส่งระบบโทรคมนาคม หรือท่อก๊าซอาจจะถูกจัดวางเข้าไปในอุโมงค์เดี่ยว หนึ่งตัด

ภายในควรมีพื้นที่ว่างพอสำหรับการผสมผสานการประยุกต์ใช้งานสองอย่างหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 5.9 (ก). รูปที่ 5.9 (ข). รูปที่ 5.9 (ค). และ รูปที่ 5.9 (ง).



รูปที่ 5.9 แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์

- (a). ระบบน้ำและระบบโทรคมนาคม (b). ระบบสายส่งกระแสไฟฟ้าและระบบโทรคมนาคม
(c). ระบบระบายน้ำเสียและระบบโทรคมนาคม (d). ท่อก๊าซและระบบโทรคมนาคม

เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากอุบัติเหตุให้น้อยที่สุด ผนังกันแยกระหว่างระบบควรถูกติดตั้งให้ถูกต้องและมีความหนาเพียงพอในกรณีที่มีท่อก๊าซอยู่ด้วย อีกทั้งจะต้องศึกษาแรงกระทำและความเค้นในผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) เมื่อใช้ผนังกันเป็นส่วนประกอบโครงสร้างภายในอุโมงค์

5.1.2.2 รูปร่างของหน้าตัด (Shape of tunnel section)

รูปร่างของหน้าตัดของอุโมงค์ส่วนมากเป็นรูปร่างกลมอันเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. โดยทั่วไปหน้าตัดวงกลมจะสามารถต้านทานต่อแรงกระทำภายนอกได้มากที่สุด
2. หน้าตัดวงกลมนั้นสะดวกสำหรับการก่อสร้างด้วยหัวเจาะอุโมงค์ และขึ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่เป็นรูปร่างวงกลมถูกผลิตและติดตั้งได้ง่าย

3. หน้าตัดวงกลมจะไม่มีผลกระทบ ในกรณีของการหมุนตัว (Rolling) ของหัวเจาะอุโมงค์ขณะทำการก่อสร้าง

อย่างไรก็ตาม ใ้ว่าหน้าตัดวงกลมจะใช้ได้ในทุกกรณีเนื่องจากความจำเป็นในการใช้พื้นที่ว่างของอุโมงค์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อจำกัดในการใช้งาน ข้อจำกัดในการใช้ที่ดิน โครงสร้างข้างเคียง และพื้นดินปกคลุมที่ด้วย ในปัจจุบัน วงกลมคู่และหน้าตัดรูปไข่ และหน้าตัดที่ไม่เป็นวงกลมแบบอื่นๆ ถูกใช้เพิ่มขึ้นนอกจากหน้าตัดครึ่งวงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและหน้าตัดรูปเกือบมาของอุโมงค์ที่นิยมกัน

5.1.3 การวางแผนเส้นทางอุโมงค์ (Tunnel Alignment)

- การวางแผนเส้นทางของอุโมงค์จะถูกกำหนดในการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์และเงื่อนไขของการวางแผน การออกแบบแนวเส้นทางตรงหรือแนวโค้งที่ระมัดระวังซึ่งมีปัญหาน้อยในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่อาจมีอุปสรรคจากสภาพดิน สถานสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอื่นๆ
- การใช้แนวเส้นทางอุโมงค์โค้งที่มีรัศมีน้อยจะต้องมีการศึกษาผลกระทบตั้งแต่การออกแบบและขณะทำการก่อสร้าง
- เมื่อมีการก่อสร้างอุโมงค์คู่ หรือมากกว่าในแนวขนานกันหรืออุโมงค์อยู่ใกล้กับสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง เช่น เสาเข็ม สะพาน อาคารหรืออุโมงค์เดิม ฯลฯ การวางแผนเส้นทางจะต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความปลอดภัยของโครงสร้างอุโมงค์และอุโมงค์ข้างเคียง (สุชีวีร์ 2548 และ Suwansawat 2007)

สถานการณ์ของการวางแผนเส้นทางอุโมงค์ มีดังต่อไปนี้

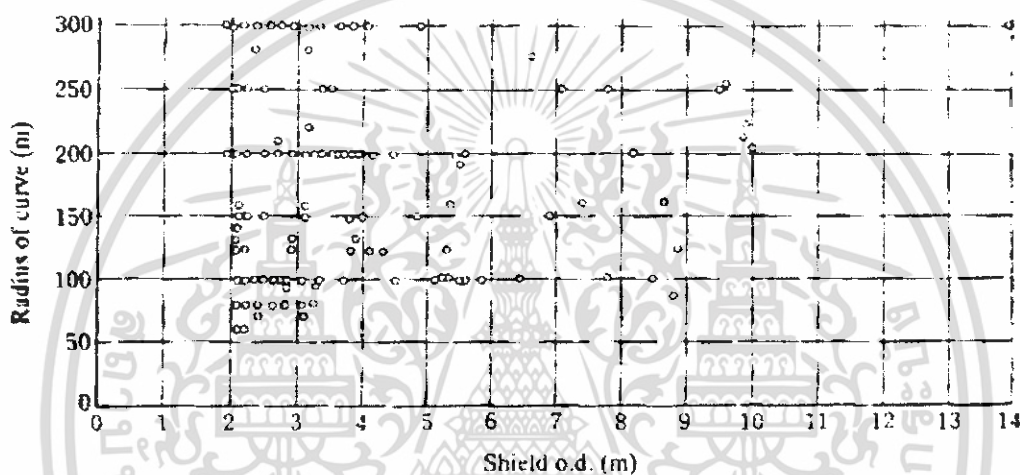
1. เนื่องจากวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling method) มักจะใช้ใน พื้นที่เขตเมืองเป็นส่วนใหญ่โดยแนวเส้นทางของอุโมงค์จะถูกจำกัด จากตำแหน่งที่ตั้งของปล่อง แนวโค้ง (Shaft) ลักษณะของพื้นที่บนดิน อุปสรรคต่างๆ และผลกระทบต่อโครงสร้างที่อยู่ข้างเคียง อย่างไรก็ตาม การวางแผนเส้นทางของอุโมงค์จะต้องจัดให้เป็นเส้นตรงเท่าที่จะเป็นไปได้ และจะผ่านชั้นดินที่ปลอดภัยในการขุดเจาะอุโมงค์เช่น ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ที่มีการไหลเข้าของน้ำได้ดินน้อยและปราศจากก๊าซอันตราย อีกทั้งการบำรุงรักษาและการจัดการของอุโมงค์หลังจากการก่อสร้างเสร็จสิ้นก็จำเป็นต้องพิจารณาด้วยเช่นกัน
2. ประสิทธิภาพของการขุดเจาะอุโมงค์ในแนวโค้งขึ้นอยู่กับสภาพของดิน ขนาดหน้าตัดอุโมงค์ ระดับของอุโมงค์ ความยาว ประเภทและโครงสร้างของหัวเจาะอุโมงค์ที่ใช้ และประเภทความ

กว้างของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์และระดับความเร็ว (Tapered) ของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ หัวข้อต่อไปนี้จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนี้

แนวโค้งรัศมีปกติ (Ordinary Radius of Curve) การขุดตามแนวโค้งจะต้องใช้หัวเจาะที่มีส่วนเชื่อมต่อ (Articulation) หรือมาตรการสนับสนุน รัศมีที่เป็นจุดเริ่มต้นของเส้นโค้ง (เส้นโค้งที่มีรัศมีเล็กกว่านี้ใดๆเรียกว่า Sharp curve) ตามข้อมูลการปฏิบัติในอดีต(รูปที่ 5.10) รัศมีของโค้งต่ำสุด (R) สำหรับหัวเจาะอุโมงค์แบบหน้าปิด (Close type shield) จะเป็นดังที่แสดงข้างล่าง (เกี่ยวกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะอุโมงค์)

$R = 80 \text{ m.}$ สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะอุโมงค์ ประมาณ 3 ม.

$R = 100 \text{ m.}$ สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะอุโมงค์ ประมาณ 5.9 ม.



Note: Both completed projects and projects being planned are included. Only those projects that did not, or will not use auxiliary measures and the articulation device are counted. "Shield o.d. 8 to 10m" includes railroad projects being planned. "Nine meters and above" has few performance data, and the radius of curve mentioned is for the railroad purpose. This radius of curve was determined by considering the purpose of use.

รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะกับรัศมีความโค้ง

โค้งรัศมีแคบ(Shape curves) สำหรับรัศมีเส้นโค้งที่แคบกว่าแนวรัศมีปกติ การปรับปรุงดิน (Ground improvement) อาจต้องนำมาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของดิน โครงสร้างหัวเจาะอุโมงค์และอุปกรณ์ที่มีส่วนเชื่อมต่อ (Articulation) และมาตรการป้องกันอื่นๆ จะต้องนำมาพิจารณา

โค้งหักศอก (Acute Angles) ในการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ/ระบายน้ำเสีย สายส่งกระแสไฟฟ้า หรืออุโมงค์สำหรับวางระบบโทรคมนาคมอาจจำเป็นต้อง มีแนวเส้นทางที่เลี้ยวหัก

สอก เพื่อเชื่อมต่อได้สี่แยกของถนน ในกรณีนี้จะต้องสร้างปล่อง (Shaft) ในจุดเชื่อมต่อเพื่อปรับแนวอุโมงค์

3. ในกรณีของอุโมงค์คู่ขนานที่ต้องก่อสร้างใกล้กัน จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ตัวที่สอง ต่ออุโมงค์ตัวแรก ดังแสดงใน สุวรรณสวัสดิ์ (2548) พบว่า แรงดันด้านหน้าหัวเจาะ (Face pressure) และแรงดันจากการฉีดอัดน้ำปูน (Grouting pressure) ของหัวเจาะตัวที่สองจะทำให้ผนังอุโมงค์ตัวแรกเสียรูป อีกทั้งการทรุดตัวของผิวดินในกรณีของอุโมงค์คู่จะมีมากกว่าอุโมงค์เดี่ยว (สุวรรณสวัสดิ์ 2547)

ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดใช้คำนวณระยะห่างระหว่างอุโมงค์ที่เหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อย่างไรก็ตามควรมากกว่า 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง หากอยู่ใกล้กว่านี้อาจจำเป็นต้องพิจารณาใช้การปรับปรุงดินหรือการใช้ Jet grouting เพื่อรักษาเสถียรภาพขณะทำการก่อสร้าง อีกทั้งการควบคุมหัวเจาะจะต้องระมัดระวังมากขึ้น

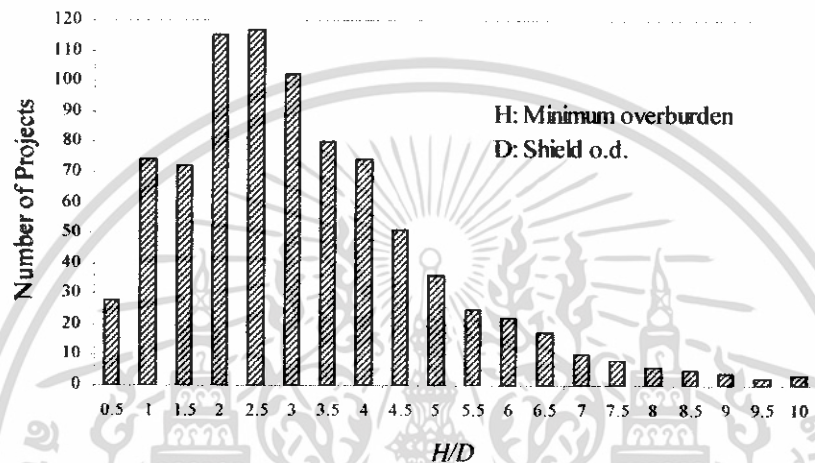
การก่อสร้างบริเวณใกล้เคียงของงานใต้ดินจะต้องมีการสำรวจอย่างรอบ และสิ่งปลูกสร้างปัจจุบัน ระยะห่างที่เพียงพอสำหรับการป้องกันผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ต้องจัดให้มี แต่เมื่อมีระยะห่างที่น้อยมาก การปรับปรุงดิน การทำโครงสร้างเพื่อรองรับน้ำหนัก (Underpinning) และวิธีที่เหมาะสมอื่นๆจะต้องนำมาพิจารณา

5.1.4 น้ำหนักบรรทุกด้านบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel Overburden)

น้ำหนักบรรทุกด้านบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel overburden) สามารถคำนวณหาได้จากการพิจารณาเงื่อนไขของผิวดิน และ โครงสร้างใต้ดิน ธรรมชาติของดิน ขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ และวิธีการก่อสร้าง

อุโมงค์ที่ก่อสร้างโดยหัวเจาะ มักจะพยายามออกแบบให้อยู่ใกล้ผิวดินมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ทั้งนี้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่การทำงานก่อสร้าง การเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรก การขนส่งวัสดุและอุปกรณ์ การเข้าและออกของคนงานและวิศวกร การสร้างปล่องแนวตั้ง (Shaft) การควบคุมน้ำใต้ดิน การบำรุงรักษาและการควบคุมการทำงานของหัวเจาะและอุปกรณ์สนับสนุน อีกทั้งสะดวกต่อการใช้งานเมื่อก่อสร้างเสร็จ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาถึงการรับน้ำหนักบรรทุกด้านบนเหนืออุโมงค์ให้เพียงพอเพื่อจะป้องกันผลกระทบต่อโครงสร้างผิวดินและสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงสภาพชั้นดินที่เหมาะสมสำหรับการขุดเจาะ และโดยทั่วไปความลึกของดินจะประมาณ 1.0D ถึง 1.5D (D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะอุโมงค์) อย่างไรก็ตามการวางแผนเส้นทางอุโมงค์ตามแนวยาว จะพิจารณาถึงวัตถุประสงค์การใช้งานของอุโมงค์ และสิ่งปลูกสร้างที่กีดขวางแนวเส้นทางเป็นสำคัญ จากการศึกษาของ JSCE 1998 ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่ามีหลายโครงการอุโมงค์ในญี่ปุ่นที่ความลึกของดินเหนืออุโมงค์น้อยกว่า 1.0D อย่างไรก็ตาม หากมีความจำเป็นต้องขุดเจาะอุโมงค์ในระดับดิน จะต้องมีการป้องกันการทรุดตัวของดินเช่น การทำการปรับปรุงดิน



รูปที่ 5.11 แสดงการนำหนักเหนืออุโมงค์น้อยที่สุดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ Shield

เมื่ออุโมงค์ถูกก่อสร้างได้แม่น้ำหรือทะเล จะต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับน้ำโคลน (Slurry) ที่ใส่ในกรณีของหัวเจาะแบบน้ำโคลน (Slurry shield) หรือการรั่วไหลของอากาศหากใช้หัวเจาะแบบแรงดันอากาศ (Compressed air) และการลอยตัวของอุโมงค์

จำนวนที่เพิ่มขึ้นของทางรถไฟ ถนน ระบบส่งน้ำ และการบำบัดน้ำเสียที่ถูกสร้างขึ้นใต้ดินในพื้นที่เมืองในปัจจุบัน ทำให้อุโมงค์จะอยู่ลึกลงไปยิ่งขึ้นเพื่อหลบอุโมงค์ตัวอื่น ดังนั้นเมื่ออุโมงค์อยู่ในระดับลึก น้ำหนักบรรทุกจากดินโดยรอบยังมีมากขึ้น ทำให้จะต้องออกแบบอุโมงค์ให้มีความหนามากขึ้น

5.1.5 ระดับของอุโมงค์ (Grade of tunnel)

ระดับของอุโมงค์ จะถูกกำหนดโดยการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การบำรุงรักษา และการจัดการเป็นหลัก

ระดับของอุโมงค์จะกำหนดโดยการพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยทั่วไป อย่างไรก็ตามการถูกจำกัดหลายอย่างก็จะมีอยู่เนื่องมาจากการมีอยู่ของแม่น้ำ งานใต้ดิน ที่มีอยู่ ระบบสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน และอุปสรรคอื่น ๆ

เมื่อระดับของอุโมงค์เกิน 2% จะทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานต่ำลงและผลกระทบจากผลที่ตามมาก็ต้องพิจารณา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดให้มีมาตรการด้านความปลอดภัย ระดับของอุโมงค์ใต้ดินหลังจากเสร็จจะได้รับการออกแบบตามปกติให้เล็กลงแต่ ควรจะเพียงพอสำหรับการระบายตามธรรมชาติ (ประมาณ 0.2% น้อยที่สุด) ในอุโมงค์ที่ใช้สำหรับถนน ทางรถไฟ กำลังไฟฟ้า การโทรคมนาคม ฯลฯ

5.1.6 แผนงานเฉพาะสำหรับการอำนวยความสะดวกในอุโมงค์

อุโมงค์จะได้รับการวางแผนล่วงหน้าเกี่ยวกับการระบายน้ำ การระบายอากาศ แผนงานเกี่ยวกับการป้องกันภัยพิบัติและความสะดวกอื่นๆ รูหรือปากทางเข้าที่ขนาดใหญ่ ฯลฯ ตามความวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์ และตามที่กำหนดสำหรับการบำรุงรักษาและการจัดการอุโมงค์

1. ทางรถไฟ อุโมงค์สำหรับทางรถไฟจะต้องติดตั้งด้วยทางผ่าน การระบายน้ำ การระบายอากาศ ไฟฟ้า แผนกป้องกันอุบัติเหตุและอื่นๆ ตามรูปร่างของส่วนตัดอุโมงค์ความยาวอุโมงค์ แผนกงานส่วนนี้ ระบบการเดินรถไฟ ฯลฯ แต่ละแผนงานเฉพาะควรจะได้รับการออกแบบเพื่อตอบสนองความพอใจแก่วัตถุประสงค์
2. ถนน อุโมงค์สำหรับถนนจะต้องติดตั้งด้วยเส้นทางตรวจสอบ แผนกงานระบายน้ำเส้นทาง การบำรุงรักษา การระบายอากาศ อุปกรณ์ส่องสว่าง แผนกงานป้องกันอุบัติเหตุและอื่นๆ ตามความยาวของอุโมงค์ และการนับการจราจร แต่ละแผนกควรจะได้รับการออกแบบเพื่อจะสนองความพอใจแก่วัตถุประสงค์
3. การกำจัดน้ำเสีย รูหรือปากทางเข้าที่ขนาดใหญ่ ซึ่งใช้เป็นรูเปิดระหว่างการทำความสะดวก การปฏิบัติการตรวจสอบของอุโมงค์ขนาดใหญ่การกำจัดน้ำเสียในการบริการ จะจัดให้มีที่ช่วงระหว่างที่เพียงพอ ช่วงระหว่างที่เป็นมาตรฐานคือ 100 เมตร ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของอุโมงค์ หรือ 300 เมตร ซึ่งจะไรก็ตามที่น้อยกว่า
4. น้ำประปา อุโมงค์สำหรับน้ำประปาจะต้องจัดให้มีปล่องแนวตั้ง (Shaft) ที่จุดนูน และจุดเว้า ตามการจัดให้เป็นเส้นเดียวกันในแนวยาว เพื่อตอบสนองความพอใจการบำรุงรักษา และการควบคุมความจำเป็น แต่ละช่องจะถูกจัดให้มีลิ้นปิดเปิดอากาศ (ที่จุดนูน) แผนกงานเฉพาะการระบาย (ที่จุดเว้า) ลิ้นปิดเปิดควบคุมน้ำ ช่องหรือปากทางเข้าที่ขนาดใหญ่ ปล่องแนวตั้ง (Shaft) แต่ละช่องจะต้องมีช่องหรือทางเข้าที่ขนาดใหญ่เพื่ออำนวยความสะดวก การ

บำรุงรักษา และการจัดการอุโมงค์ การระบายน้ำ การระบายอากาศ และแผนงานเฉพาะอื่น ๆ ก็ควรจะติดตั้งด้วยเช่นกันในอุโมงค์ และปล่องแนวตั้ง (Shaft)

5. เकेเบิลกำลัง อุโมงค์ในด้านเกี่ยวกับเคเบิลกำลังอาจจะต้องการช่องหรือปากทางเข้าเพื่อจะบริการ อุโมงค์และเพื่อวัตถุประสงค์ของการบำรุงรักษาและการจัดการ ช่องหรือปากทางเข้าควรจะจัดให้มีที่ช่วงระหว่าง 500 ถึง 1,000 เมตร ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าสูง ในด้านระบายอากาศก็จะ ออกแบบด้วยเช่นกันเป็นช่องเปิดทางเข้าหรือทางออก และมาตรการต่อต้านที่ด้านการสูงขึ้นของ อุณหภูมิในอุโมงค์ในการบริการและสุขอนามัย และการระบายอากาศสำหรับบุคลากรด้านการ ตรวจสอบควรจะได้รับการพิจารณาในการออกแบบบูรณาการระบายอากาศควรจะจัดให้มีรูการระบาย อากาศที่ประมาณช่วงระหว่าง 500 เมตร สิ่งอำนวยความสะดวกที่เป็นการช่วยที่จำเป็นใน อุโมงค์ประกอบด้วยรางสายเคเบิล อุปกรณ์ส่องสว่าง การระบายอากาศ การระบายน้ำ การ ป้องกันภัยพิบัติ และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ
6. ไตรศนาคม อุโมงค์เกี่ยวกับไตรศนาคมจำนวนมากจะถูกจัดให้มีปล่องแนวตั้ง (Shaft) ที่ ช่วงระหว่างของ 700 ถึง 1,000 เมตร ที่จะอำนวยความสะดวกแก่ปฏิบัติการในอุโมงค์และ สำหรับการจัดสาขา การตรวจ และการติดตั้งอุปกรณ์ส่องสว่างและวัตถุประสงค์อื่น สิ่งอำนวยความสะดวกที่ช่วยเสริมที่จะติดตั้งในอุโมงค์ ประกอบด้วยสิ่งจับยึดเคเบิล อุปกรณ์ส่องสว่าง การระบายอากาศ การจ่ายน้ำหรือการระบายน้ำ และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ พลังงานไฟ และกันน้ำจะติดตั้งตามที่ต้องการ ระบบการตรวจสอบจะติดตั้งในอุโมงค์เพื่อป้องกันอุบัติเหตุ จัดการสิ่งอำนวยความสะดวก ควบคุมทางเข้าหรือทางออกบุคลากร และสำหรับวัตถุประสงค์ การกระจายเสียงและการสื่อสาร
7. การใช้เนกประสงค์ อุโมงค์เนกประสงค์จะต้องออกแบบรองรับสิ่งอำนวยความสะดวกที่เป็น สิ่งช่วย ที่ต้องการโดยการใช้แต่ละอย่าง

5.1.7 มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน

1. สภาพของพื้นดิน ซึ่งหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะผ่านเข้าไปข้างหน้า และจะสำรวจการ ก่อสร้างและสภาพอื่นๆ และความจำเป็นของมาตรการช่วยที่จะต้องศึกษาเป็นการล่วงหน้า เพื่อ จะทำให้แน่ใจว่ามีความมั่นคงแน่นอนหนาเกี่ยวกับส่วนหน้าและผนังอุโมงค์ (Lining) ในตอนเริ่มต้น การมาถึงและส่วนตัดที่โค้งเรียบขนาด เมื่อมีการใช้หัวขุดเจาะประเภทปิดส่วนหน้า (Close-Face Type Shield) และความสมดุลของดินเมื่อใช้ หัวขุดเจาะประเภทเปิดส่วนหน้า (Open-Face Type Shield)

สำหรับด้านวิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Type Shield) และวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบน้ำเลนปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield) ซึ่งทั้งสองวิธีมีความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบันนี้ ส่วนหน้าจะถูกทำให้มั่นคงจากการใช้ความดันโคลน หรือความดันน้ำเลน มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนจะไม่ใช่ที่ต้องการมากของหัวขุดเจาะอุโมงค์ เหล่านี้ในส่วนตัดธรรมดา อย่างไรก็ตามมาตรการจะต้องได้รับการพิจารณาสำหรับการสร้างในหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เริ่มต้นและมาถึงของส่วนหน้าตัด และในส่วนตัดเหล่านี้มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนจะเป็นที่ต้องการในส่วนตัดเส้นโค้งที่เฉียบขาดด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และทำให้มั่นคงในผนังอุโมงค์ (Lining) เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนาระบบหนึ่งเพื่อจะลดการใช้มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนโดยการปล่อยให้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ตัดผนังและสิ่งที่คล้ายกันที่เก็บกักดินได้โดยตรงโดยปราศจากการทำรูล่วงหน้า

วิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Type Shield) และวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบน้ำเลนปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield) จำเป็นที่จะใช้มาตรการที่เป็นสิ่งช่วยบางอย่าง เช่น กระบวนการทางเคมี การฉีดพ่นที่มีความดันสูงและการผสม การทำให้เย็นจนแข็งของพื้นดิน และวิธีการใช้แรงดันลมเมื่อทำงานในชั้นของก้อนหินใหญ่ หรือกรวดขนาดใหญ่ด้วยการรับภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์ที่น้อย หรือในเงื่อนไขพิเศษอื่นใด ที่ทำให้ยากสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield เหล่านี้จะดำเนินต่อไป จึงควรจะเอาใจใส่เป็นพิเศษเมื่อใช้วิธีเกี่ยวกับแรงดันลมเพราะว่า สภาพการทำงานสามารถถูกทำให้เลวลงได้ ความมีประสิทธิภาพในงานลดลง และการขาดจำนวนออกซิเจนที่ไปถึงเนื้อเยื่อ และอาการอื่นๆ ในระหว่างงานสามารถได้รับผลจากการใช้ของมัน

หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบเปิดส่วนหน้า (Open-Face Type Shield) ที่ความสำคัญของมันถูกทำให้ลดลงในปีที่ผ่านมา ต้องการการทำให้มีเสถียรภาพในส่วนหน้าและการปฏิบัติการไหลเข้าของน้ำสำหรับการสร้างที่ปลอดภัย และที่จะสนองความพอใจต่อรายการกำหนดที่ได้วางแผนไว้ มาตรการที่เป็นการสนับสนุนจะมีความสำคัญด้วยเช่นกันที่จะทำให้มีเสถียรภาพแก่พื้นดินและป้องกันพื้นผิวที่รวมมาด้วย และการเคลื่อนไหวของพื้นดินที่อยู่ใกล้เคียง

ในเรื่องของมาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน กระบวนการทางเคมี การฉีดพ่นด้วยความดันสูงและการผสม และการทำให้เย็นจนแข็งของดินเป็นความตั้งใจที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงแก่ดิน และที่จะหยุดการไหลเข้าของน้ำ วิธีการที่เกี่ยวกับการใช้ลมจะใช้ด้วยเหมือนกันเพื่อหยุดการไหลเข้าของน้ำ ฯลฯ การทำให้ลดลงของน้ำก็เป็นการออกแบบที่จะลดการไหลเข้าของน้ำและปรับปรุงพื้นดินโดยการใช้จุดสำคัญของบ่อ บ่อลึก อุโมงค์นำร่องหรือที่เหมือนกัน

2. เมื่อการสร้างอุโมงค์เป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดการทรุดตัว เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเสียรูปของโครงสร้างที่มีอยู่เกี่ยวกับการวางแผนเส้นทางของอุโมงค์ มาตรการสนับสนุนจึงจำเป็นที่จะทำการศึกษา

มาตรการในการป้องกันสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่ประกอบด้วย หน้าที่ตัดออก การหนุนจากส่วนล่าง และวิธีใช้ท่อที่ลังกา ส่วนการฉีดพ่นความดันสูง และการผสมกระบวนการทางเคมี และมาตรการสนับสนุนอื่นๆจะส่งผลกระทบด้วยเช่นกัน

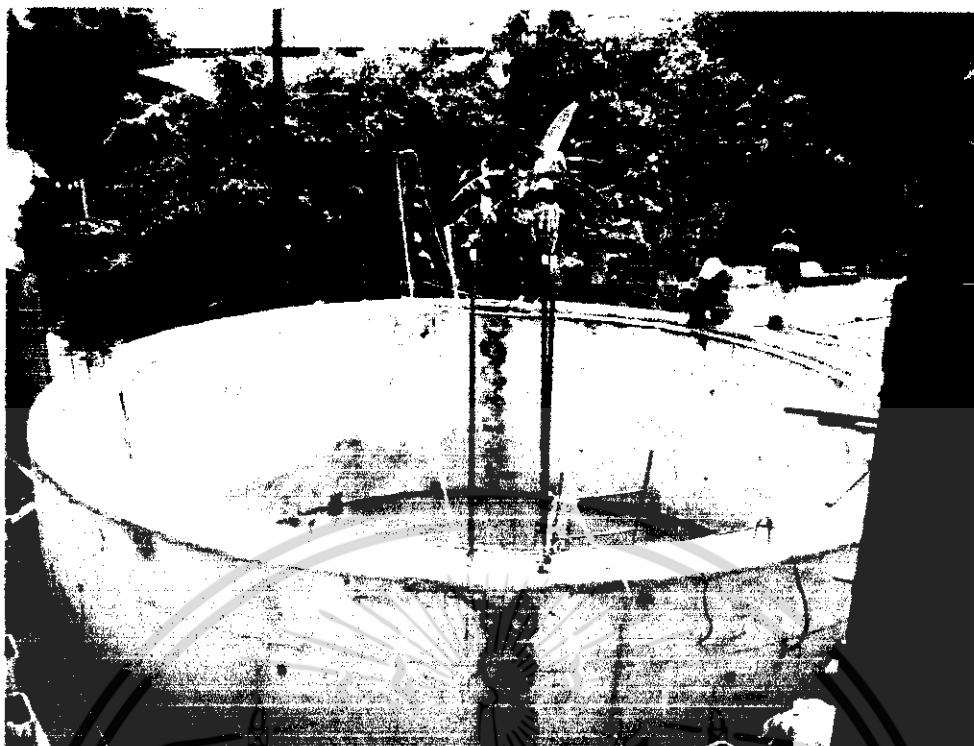
5.1.8 ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้าง

ปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้างจะได้รับการวางแผนที่ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสม ขนาดของสิ่งเหล่านี้จะต้องเพียงพอสำหรับการให้มีหน้าที่ที่จำเป็นที่จะทำให้เกิดความสามารถในด้านความปลอดภัย และการดำเนินงานการสร้างที่มีประสิทธิภาพ โดยการพิจารณาเงื่อนไขของเส้นทางของอุโมงค์และงานก่อสร้าง

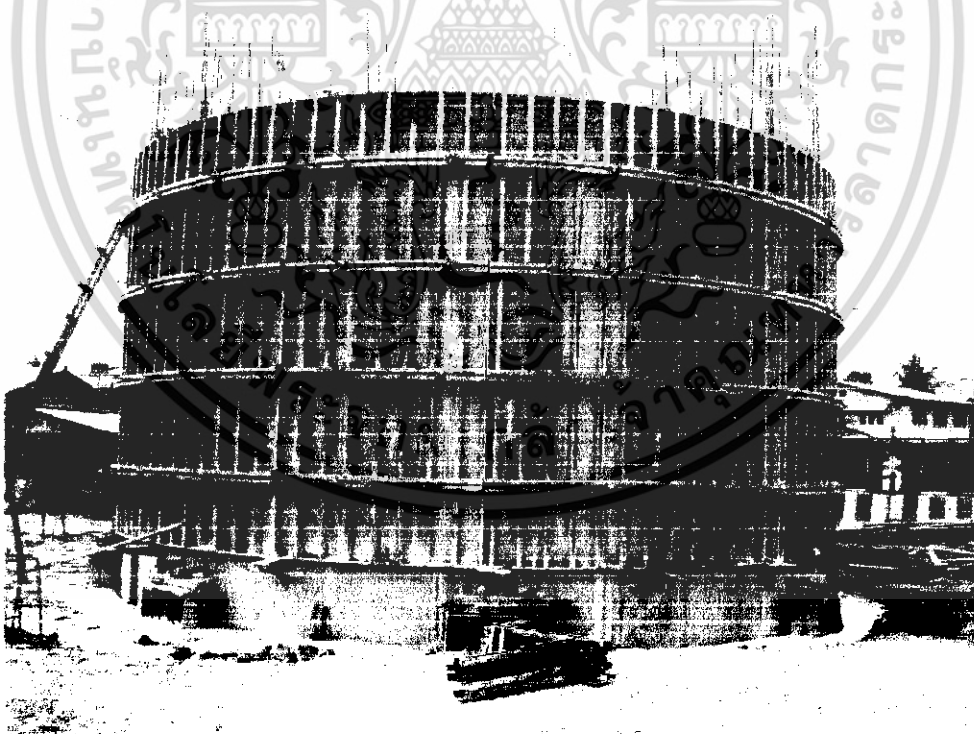
ปล่องแนวตั้ง (Shaft) มีไว้สำหรับการแยกออกไปของหัวขุดเจาะอุโมงค์ การอยู่ระหว่างกลาง การหมุน การมาถึง และช่องอื่น ๆ วิธีการเชื่อมต่อหัวขุดเจาะอุโมงค์อยู่ใต้ดินซึ่งได้พัฒนาเมื่อเร็ว ๆ นี้ และวิธีการขุดต่อเนื่องเป็นขุมลากละไม่ต้องการปล่องแนวตั้ง (Shaft) ที่จะผลักดันอุโมงค์

ปัจจัยที่จะศึกษาในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งสำหรับปล่องแนวตั้ง (Shaft) ในระหว่างสิ่งอื่นๆ จะประกอบด้วย ความใหญ่ของการสร้างอุโมงค์ (ความยาวของอุโมงค์และขนาดของส่วนตัด) การใช้ที่ดินในปัจจุบัน การทำให้ง่ายของการใช้ที่ดิน การขนส่งสิ่งสกปรก การขนส่งและการลดการขนส่งวัสดุก่อสร้าง และการทำให้ง่ายของการสร้างปล่องแนวตั้ง (Shaft) ขนาดของปล่องแนวตั้ง (Shaft) จะกำหนดโดยการพิจารณาถึงส่วนตัดของหัวขุดเจาะอุโมงค์ ประเภทและโครงสร้างของหัวขุดเจาะอุโมงค์ วัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์ ฯลฯ

สถานที่การสร้าง จากลักษณะก็จะต้องตั้งใกล้ช่องที่แยกออกไป สถานที่สร้างจะต้องจัดให้มีเนื้อที่ว่างเพียงพอสำหรับการสร้างปล่องแนวตั้ง (Shaft) และสำหรับการขุดอุโมงค์ที่มีหัวขุดเจาะอุโมงค์ การจัดบ้านพักที่ยืนยันว่าเหมาะสม และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ อาจจะคิดได้ที่สถานที่สร้างเพื่อจะปกป้องสิ่งแวดล้อมเมื่อสถานที่ตั้งตั้งอยู่ในเขตเมือง



รูปที่ 5.12 ปล่องแนวตั้ง (Shaft)



รูปที่ 5.13 การก่อสร้างปล่องแนวตั้ง (Shaft)

5.1.9 มาตรการการรักษาสิ่งแวดล้อม

เมื่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบด้าน เป็นไปได้ที่จะได้รับผลกระทบจากการสร้างอุโมงค์ จะต้องเอาใจใส่อย่างเต็มที่ต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม

วิธีการเกี่ยวกับหัวข้อเจาะอุโมงค์จะมีผลกระทบเล็กน้อยต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ โดยปกติการขุดอุโมงค์ประเภทหัวข้อเจาะ จะดำเนินไปในเวลากลางวันและกลางคืนในที่ใกล้เคียงที่ดินที่เป็นของเอกชนในเขตเมืองในหลายกรณี

สิ่งแวดล้อมอาจจะได้รับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในและรอบๆสถานที่การก่อสร้าง จากการสั่นสะเทือนและเสียงอันเนื่องมาจากการก่อสร้างของปล่องแนวดิ่ง (Shaft) การทำงานของการปั่นจั่น เครื่องสูบน้ำและเครื่องอัดอากาศสำหรับการผลักดันหัวข้อเจาะอุโมงค์ การกำจัดสิ่งสกปรกและการทำงานของอุปกรณ์บำบัดน้ำเสีย ที่อาจทำให้เกิดคำร้องเรียนจากผู้ที่อยู่อาศัยในท้องถิ่นสถานที่ที่สร้างบางแห่งจะถูกปิดคลุมโดยแผ่นป้องกันที่ทำด้วยแผ่นเหล็ก โดยควรพิจารณาถึงความกลมกลืนกับเพื่อนบ้านในท้องถิ่น

ผลกระทบในทางกลับกันอื่นๆ ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยข้อเท็จจริงที่เป็น การกีดขวาง เรื่องของแสงสว่างโดยปล่องแนวดิ่ง (Shaft) การทรุดลงของที่ดินและการยกสูงขึ้น การขจัดน้ำใต้ดินออกไป คุณภาพของน้ำเสื่อมลงและผลกระทบที่มีต่อพื้นผิวและสิ่งปลูกสร้างใต้ดินอันเนื่องมาจากการผ่านของหัวข้อเจาะอุโมงค์ และอิทธิพลจากกลุ่มคนอันเนื่องมาจากอากาศที่ขาดออกซิเจน การทะลักออกของน้ำหรือก๊าซ ก๊าซเป็นอันตรายที่เป็นผลมาจากการใช้วิธีเกี่ยวกับ ก๊าซหรือลม

ความเป็นไปได้เหล่านี้จะต้องดำเนินการสำรวจได้อย่างเต็มที่ และมีการศึกษาล่วงหน้าและจะต้องดำเนิน มาตรการต่อต้านที่เหมาะสม เพื่อจะปกป้องสิ่งแวดล้อม

ควรเอาใจใส่ด้วยเหมือนกันในการที่จะเปลี่ยนแปลงในน้ำใต้ดิน และข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการกีดขวางของแสงสว่าง การแทรกแซงคลื่นวิทยุ เสียง การสั่นสะเทือน มลภาวะทางอากาศ และสิ่งที่เกิดจากสิ่งปลูกสร้างถาวร (สำหรับการระบายอากาศ ฯลฯ) หลังจากการเสร็จสิ้นโครงการ

5.1.10 หมายกำหนดการของงาน

หมายกำหนดการของงานการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield Tunnel จะต้องทำการวางแผนที่มีนัยสำคัญไปที่การดำเนินการที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ ในการพิจารณาถึงความใหญ่เล็ก การต่อเนื่อง ระยะเวลา และ เงินใจของงาน

รายการงานที่มีผลโดยตรงต่อหมายกำหนดการของการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ คืองานสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) งานที่เกี่ยวกับการป้องกันสำหรับปล่องแนวดิ่ง(Shaft)ที่แยกออกไปและเข้ามา การสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะเอง การขุด การเอาสิ่งสกปรกออก การตั้งตรงของส่วนแบ่งออก การเทปูนลงยึดเพื่อเติมส่วนหลังผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) การติดตั้งและการเคลื่อนย้าย อุปกรณ์ก่อสร้าง ฯลฯ ปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อหมายกำหนดการ ประกอบด้วย การผลิตหัวขุดเจาะอุโมงค์ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ และหน่วยของส่วนประกอบ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม สิ่งเหล่านี้ มีอิทธิพลด้วยเช่นกัน ต่องานทั้งหมดตามที่กรณีอาจจะเป็น จนทำให้หมายกำหนดการ โดยรวม จำเป็นจะต้องได้รับการตัดสินใจอย่างปะติดปะต่อกันโดยการพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมด

5.1.11 การตรวจสอบ การวัด และบันทึกงาน

เงินใจของงานในระหว่างการผลักดันหัวขุดเจาะอุโมงค์ จะต้องตรวจสอบหรือวัด เพื่อจะทำให้มั่นใจในความปลอดภัยของการสร้าง จึงขอแนะนำที่จะให้บันทึกผลเหล่านี้เป็นการสรุป และส่งวนสิ่งที่บันทึกสำหรับงานภายหลัง

จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการตรวจสอบ การวัด และการนำเอาบันทึกงาน ฯลฯ มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อจะทำให้มั่นใจในการดำเนินการที่ปลอดภัยของงานขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ
2. เพื่อจะอ้างอิงถึงบันทึกงาน ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุของเหตุการณ์ดังกล่าว และในฐานะเป็นข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการแยกออก
3. เพื่อจะรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการบำรุงรักษา การจัดการ การซ่อมแซมและอื่นๆ ของแผนงานเฉพาะที่สำเร็จสิ้น

สิ่งเหล่านี้มีความหมายจนทำให้มีความจำเป็นที่จะรักษามันก็ให้มีความแม่นยำ และมีรายละเอียดเฉพาะเท่าที่เป็นไปได้

ข้อมูลเหล่านี้ควรจะต้องจัดเข้าเพิ่ม และรักษาไว้สำหรับการอ้างอิงในอนาคต การตรวจสอบ การวัด และการบันทึกงานในงานชุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

ก. การตรวจสอบ

1. สำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทปิดส่วนหน้า (Close-face type shield) ความดันดินในห้องเครื่องตัด ความดันสารละลายที่ส่วนหน้า คุณลักษณะเฉพาะของสารละลาย ส่วนในด้านหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทเปิดส่วนหน้า (Open-face type shield) สภาพของส่วนหน้าและคุณภาพของน้ำที่ไหลเข้า
2. ความดันไฮดรอลิกของ Jacks แรงบิด (Torque) ของเครื่องตัด การเคลื่อนที่วงเวียน และความสมดุลของเครื่องตัด การควบคุมปริมาณและความดันของสิ่งที่เพ่งยึดเพื่อเติมส่วนหลัง การควบคุมปริมาตรของการปล่อยดินที่ขุด
3. การสรุปของอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ และการเบี่ยงเบนของเส้นศูนย์กลางจากการจัดให้อยู่ในเส้นเดียวกันที่ได้ออกแบบ
4. การเสียรูปของสิ่งปลูกสร้าง และสิ่งอำนวยความสะดวกที่อยู่ใต้ดิน การแทนที่ของพื้นดินและการแปรผกผันของระดับน้ำใต้ดิน
5. ความเร็วลมที่จุดงาน และสิ่งอำนวยความสะดวกที่อยู่ใต้ดินการแทนที่ของพื้นดินและการแปรผกผันของระดับน้ำใต้ดิน
6. สำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทเปิดส่วนหน้าที่มีอากาศอัด (Open-Face Type Shield with Compression-Air) คือ ความดันอากาศอัดในอุโมงค์ในระหว่างชั่วโมงทำงาน การบริโภคอากาศและการรั่ว

ข. การสำรวจและการวัด

1. สำรวจเกี่ยวกับอาคารและบ่อที่มีอยู่
2. ความดันและการแทนที่ ที่เกิดขึ้นภายในหัวขุดเจาะอุโมงค์ หรือผนังอุโมงค์ (Lining) และความดันดิน ความดันน้ำที่กระทำต่อหัวขุดเจาะอุโมงค์ หรือผนังอุโมงค์ (Lining)

ค. บันทึกงาน

1. การลงรายการงาน ร่างตามที่ได้สร้างขึ้น (แผน ข้อคิด รูปร่างตามแนวยาวและภาคตัดขวาง ฯลฯ) ข้อมูลดิน
2. ภาพยนตร์ ภาพ วิดีโอ ฯลฯ

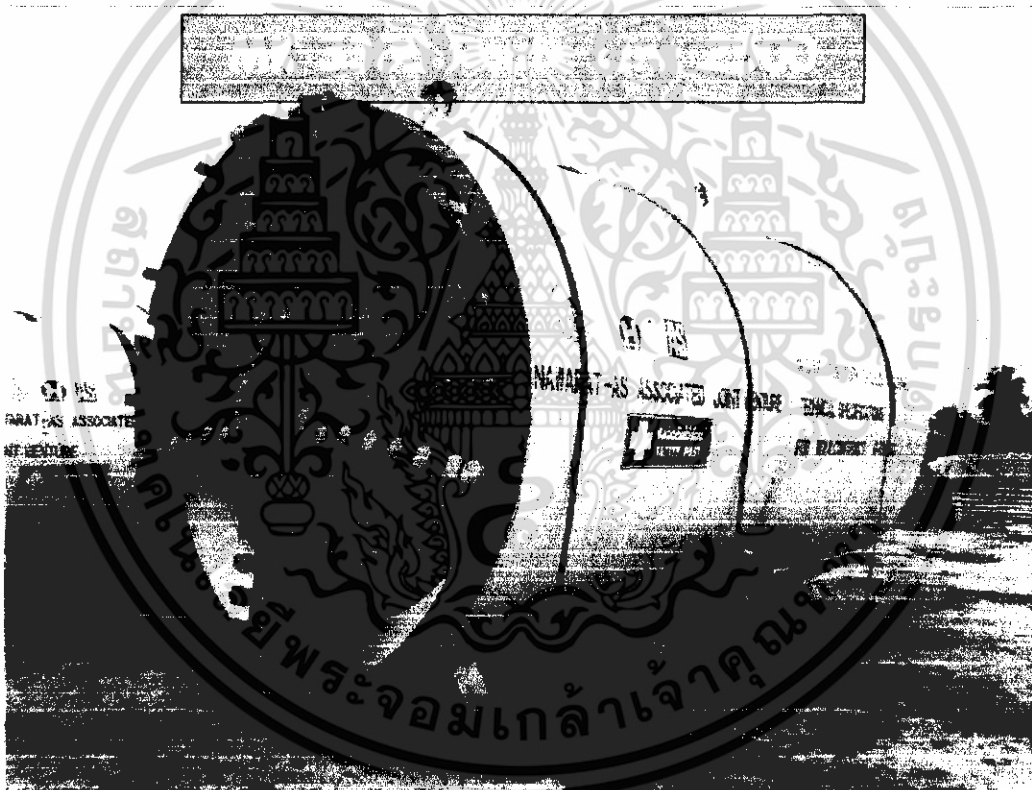
5.2 ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

5.2.1 ขอบเขตของการประยุกต์ใช้

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการออกแบบและผลิตผนังอุโมงค์ (Lining) โดยที่อุโมงค์มีลักษณะเป็นวงกลมและมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้กับอุโมงค์รูปร่างอื่นตามความคิดเห็นจากวิศวกรผู้ควบคุม

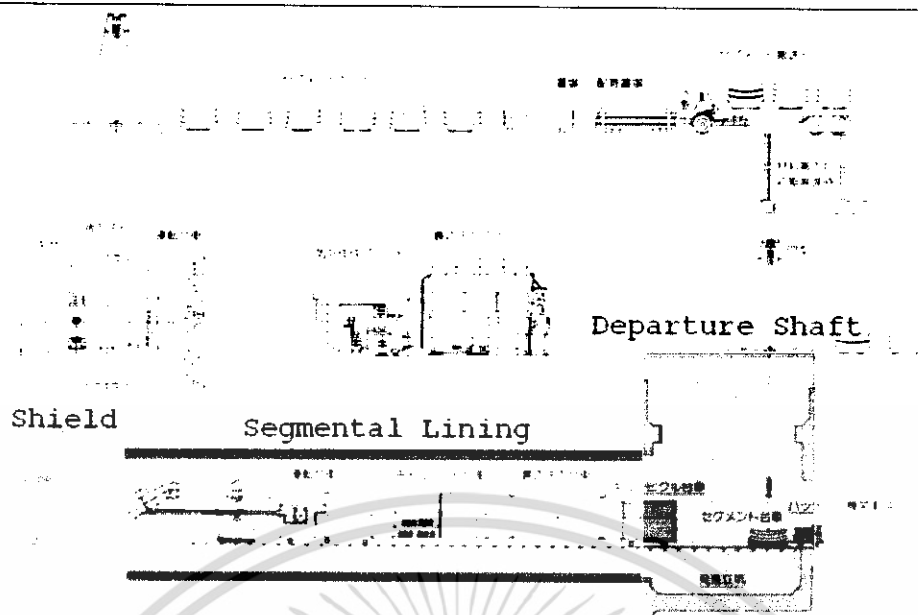
5.2.2 คำจำกัดความ

หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) คือ อุปกรณ์ขุดเจาะหลักของอุโมงค์ในชั้นดิน จะประกอบด้วย Hood, Ring Girder และ Tail โดยจะเรียกว่า เครื่องจักรขุดเจาะประเภท Shield



รูปที่ 5.14 หัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภท Earth pressure balance shield

วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling method) คือวิธีการขุดอุโมงค์ที่ป้องกันพื้นดินจากการทรุดลงโดยหัวเจาะอุโมงค์ และ โครงสร้างของผนังอุโมงค์ที่สร้างขึ้นในส่วนท้าย



รูปที่ 5.15 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์

อุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel) คือ อุโมงค์ที่สร้างขึ้นโดยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์

ปล่องแนวตั้ง (Shaft) คือ ปล่องแนวตั้งสำหรับการทำงานสำหรับการขุดอุโมงค์โดยหัวขุดเจาะอุโมงค์ ปล่องแนวตั้งใช้สำหรับการนำเข้าและออก การหมุนรอบ การประกอบและการรื้อถอนเครื่องจักรขุดเจาะประเภท Shield ซึ่งมันใช้สำหรับการขนย้ายดินที่ถูกขุดเจาะ การนำวัสดุเข้าและออก ทางเข้า/ทางออกของคนงาน จุดผ่านของระบบการจ่ายไฟฟ้าและน้ำ การระบายอากาศ และอื่นๆ

ภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel Overburden) คือ ภาระน้ำหนักซึ่งมีระยะทางระหว่างพื้นผิวดินถึงผิวบนของผนังอุโมงค์

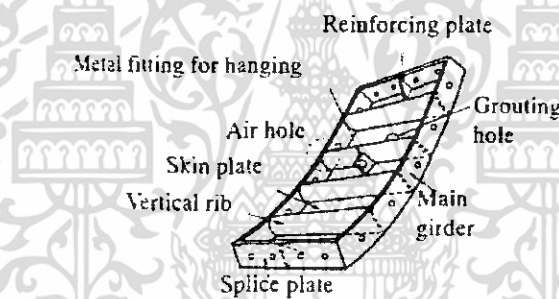
ผนังอุโมงค์ (Lining) คือ โครงสร้างผนังอุโมงค์เพื่อจะให้เกิดความมั่นคงแก่เนื้อที่ว่างของอุโมงค์โดยการทนต่อแรงดันของดินและน้ำ ของผนังอุโมงค์ ประกอบด้วย ชั้นหลัก (Primary) และ ชั้นที่สอง (Secondary) โดยทั่วไปแล้วผนังอุโมงค์จะเป็นโครงสร้างวงแหวนที่ประกอบขึ้นด้วยส่วนที่สร้างขึ้นไว้ล่วงหน้าแต่ละจะถูกสร้างขึ้นในบางกรณีด้วยคอนกรีต ที่หล่อกับที่ตามสถานการณ์

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) คือ ส่วนของผนังอุโมงค์สำหรับการขุดอุโมงค์โดยวิธีการใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ โดยทั่วไปก็คือ มันจะทำได้ด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กหรือทำได้ด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่เป็นเหล็ก จะประกอบกันเข้าเพื่อสร้างรูปเป็นวงกลม Multi-Circles หรือรูปร่างอื่นๆ

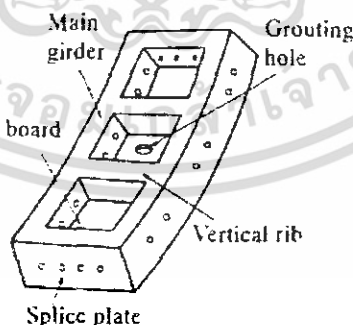
การอัดฉีดน้ำปูน (Backfill Grouting) คือ การเทน้ำปูนลงเติมเต็มช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ และดิน (ช่องว่างของส่วนท้าย) โดยการอัดฉีดน้ำปูน

ความหนาของผนังอุโมงค์ คือ ความหนาของผนังอุโมงค์ภายในหน้าตัด

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)

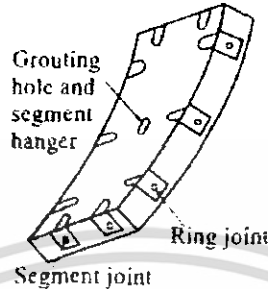


รูปที่ 5.16 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง



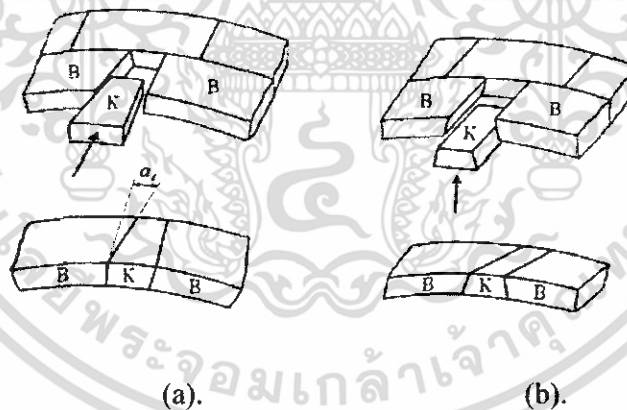
รูปที่ 5.17 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat type segment) คือ ชิ้นส่วนที่อยู่ในรูปแผ่นราบ (Flat plate) จะเป็นชิ้นส่วนที่เป็นของแข็ง โดยปกติจะทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในส่วนที่จะใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบที่คอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้าที่เป็นชิ้นแทนเหล็กเสริมที่เป็นเส้น



รูปที่ 5.18 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) คือ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) จะมี 2 รูปแบบแยกตามการประกอบเข้า รูปแบบแรกจะใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี ส่วนอีกรูปแบบจะใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์



รูปที่ 5.19 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค

(a).แบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี (b).แบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

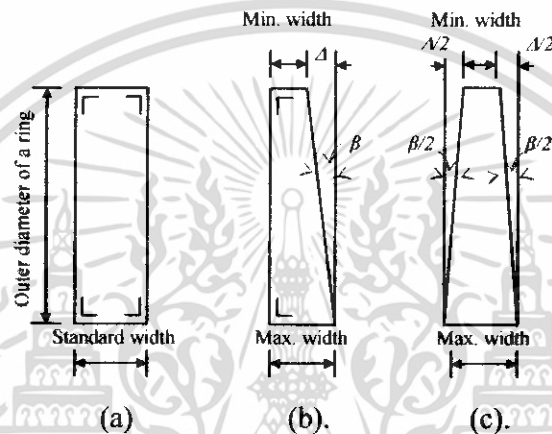
จำนวนชิ้นส่วนประกอบวงแหวน (Number of Division) คือ จำนวนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ประกอบเป็นวงแหวนอุโมงค์ 1 วงแหวน

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper ring) คือ วงแหวนที่มีส่วนเรียวให้เล็กลง
เพื่อใช้ในการวางโค้งของอุโมงค์หรือเพื่อปรับการเรียงตัวของอุโมงค์

รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่าง
ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในวงแหวนอุโมงค์

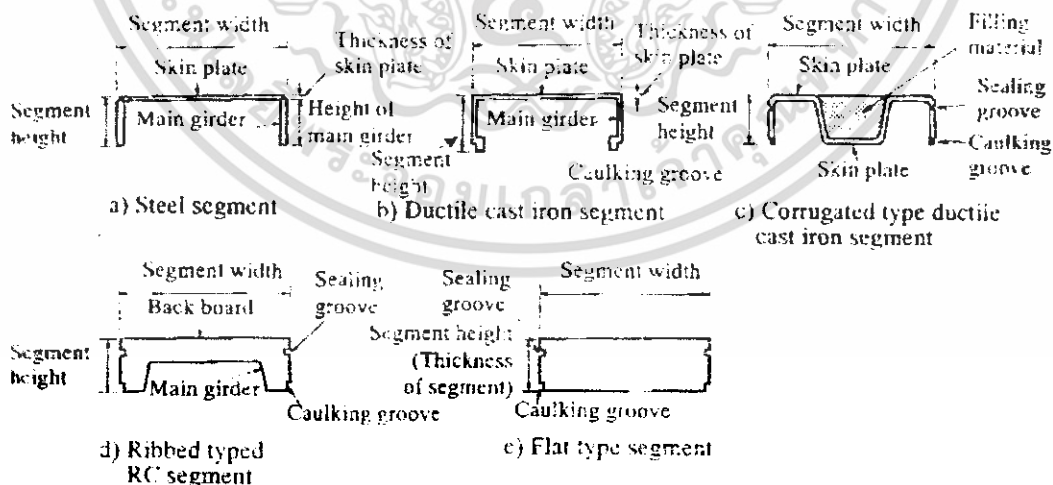
รอยต่อวงแหวน (Ring joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างวงแหวนของอุโมงค์แต่ละ
วงแหวนเข้าด้วยกัน

Splice plate คือ แผ่นโครงสร้างที่ใช้เชื่อมจุดต่อ



รูปที่ 5.20 แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์

- (a). วงแหวนผนังอุโมงค์ทางตรง (b). วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียวทางซ้ายหรือทางขวา
(c). วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเอียงประสม



รูปที่ 5.21 หน้าตัดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

5.2.3 การเลือกโครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์

การเลือกความแข็งแรง โครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์ควรเลือกให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้อุโมงค์ สภาพชั้นดินและวิธีการก่อสร้าง

ในหลายกรณี ผนังอุโมงค์ประกอบด้วยผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) และต้องการการบำรุงรักษาภายใน โดยการค้ำยันดินโดยตรง ต้องการความเหมาะสมต่อจุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และมีการปฏิบัติงานที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์

ผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) รูปแบบโดยทั่วไปจะใช้ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box type segment) หรือชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat type segment) Flat type ยึดติดด้วย สลักเกลียว (Bolt) ชิ้นส่วนสามารถแยกประเภทโดยวัสดุที่ใช้ผลิต

การเลือกประเภทของชิ้นส่วนควรใช้ความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์ สภาพชั้นดิน และวิธีการก่อสร้าง ปัจจุบันชิ้นส่วนคอนกรีตหรือเหล็ก มีมาตรฐานมิติ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และความกว้างที่ใช้สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง เช่น งานส่งน้ำ ระบายน้ำ ส่วนขนาดใหญ่ เช่น รถไฟใต้ดิน โดยใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตเป็นหลัก ชิ้นส่วนเหล็กหล่อ ใช้ในงานอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงสภาพชั้นดิน ชิ้นส่วนคอนกรีตของ Box type หรือ Flat type จะถูกนำมาเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ ขณะที่ชิ้นส่วนเหล็กหล่อ หรือ เหล็กกล้า จะใช้ในที่ที่พิจารณาแรงกระทำเป็นพิเศษ หรือ ชิ้นส่วนที่ต้องการทำช่องเปิด

เมื่อคำนวณแรงกระทำต่อผนังชั้นอุโมงค์ การหาค่าที่แน่นอนของคุณสมบัติของโครงสร้างอุโมงค์ เป็นสิ่งสำคัญเพราะฉะนั้นการเลือกโครงสร้างผนังอุโมงค์ ก่อนข้างที่จะสำคัญต่อการตัดสินใจ ถึงความสำคัญที่จะออกแบบผนังที่ต้องการ

ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) เป็นโครงสร้างภายในผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) ที่สร้างขึ้นโดยใช้คอนกรีตที่หล่อในที่ เมื่อเร็ว ๆ นี้มีการแทนที่ด้วยการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) โดยใช้การใส่ท่อ (ท่อเหล็ก, ท่อเหล็กหล่อ ฯลฯ) บริเวณช่องว่างระหว่างท่อกับผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) คือการถมกลับคืน

เมื่อผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) ถือว่าเป็นโครงสร้างถาวรผนังอุโมงค์
ชั้นใน (Secondary lining) จะใช้เพื่อ

1. ป้องกันการกัดกร่อน
2. เพิ่มความแข็งแรง
3. ปรับการเรียงตัวของอุโมงค์
4. กันน้ำซึม
5. ตกแต่งภายใน ซึ่งยกตัวเช่นอุโมงค์ทางรถไฟซึ่งก่อสร้างผนังอุโมงค์ชั้นในเพื่อลดเสียงและการ
สั่นที่จะเกิดขึ้น หลังอุโมงค์เสร็จ

5.2.4 พื้นฐานของการออกแบบ

การออกแบบผนังอุโมงค์ควรอยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยที่ยอมให้กับ
จุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และควรขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบจากความเค้นที่ยอมให้บนเงื่อนไขที่
เพียงพอและเหมาะสมกับการก่อสร้าง งานจะต้องทำโดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพดี

พื้นฐานและหลักการ ในการออกแบบผนังอุโมงค์ แรงที่ใช้ออกแบบและทางเลือก
โครงสร้างควรอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และทฤษฎี และการดำเนินงานที่สามารถบอกผล
สะท้อนกลับ ได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมแรงของอุโมงค์นั้นซับซ้อน อย่างน้อยที่สุด
ความปลอดภัยของโครงสร้างเป็นพื้นฐานของการออกแบบ เมื่อเกิดปัญหาของความไม่แน่นอน
เพียงเล็กน้อย

การออกแบบผนังอุโมงค์นั้น ความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญไม่เฉพาะหลังจากการ
ก่อสร้างเสร็จแล้วเท่านั้นแต่ขณะก่อสร้างก็ต้องมีความปลอดภัยด้วย

5.2.5 ขั้นตอนการออกแบบ

มีความจำเป็นที่จะต้องอธิบายให้ชัดเจนถึงสภาพ ความคิด ข้อสันนิษฐาน และ
ขั้นตอนการคำนวณ

เนื้อหาของการคำนวณออกแบบควรจะชัดเจนทุกขั้นตอนตามข้างล่าง

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. เงื่อนไขการก่อสร้าง

6. วิศวกรผู้ออกแบบ
7. วันที่ประกาศใช้

5.2.6 แบบก่อสร้าง

แบบก่อสร้างควรระบุตำแหน่งติดตั้งของโครงสร้าง รูปร่าง ขนาดของ
โครงสร้าง ที่สัมพันธ์กับหน้าตัดอย่างชัดเจน

แบบก่อสร้างต้องมีข้อมูลตามที่กำหนด

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. สภาพการก่อสร้าง
6. ชื่อและตำแหน่งของวิศวกรผู้ออกแบบ
7. มาตรฐาน
8. หน่วยที่ใช้

5.3 รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

5.3.1 รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกกำหนดตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยจะทำให้ง่ายในการก่อสร้าง และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ปัจจัยหลักและการพิจารณาทั่วไป ในการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment ring)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ถูกกำหนดซึ่งได้บรรยายไว้ในหัวข้อรูปร่าง และขนาดของหน้าตัดภายในอุโมงค์ โดยขึ้นอยู่กับความต้องการช่องว่างภายในของอุโมงค์และความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (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 โดยเฉพาะที่ใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต (Ribbed Type Concrete Segment) อัตราส่วนความสูงจะกลายเป็นประมาณ 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง

3. ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

มีความต้องการให้ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีขนาดจำกัด เพื่อความสะดวกในการขนย้าย และการประกอบวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment ring) และโครงสร้างของหน้าตัดโค้ง ให้เหมือนกับในความยาวส่วนท้ายของหัวขุด

เจาะอุโมงค์ ในขณะที่เพื่อเป็นการปรับลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ปรับลดจำนวนของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และจำนวนของ ร่องสลักเกลียว(Bolt) ที่จะต้องดูแลการรั่วไหลของน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ถ้าพิจารณาถึงความ รวดเร็วในการก่อสร้างจะต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีขนาดที่กว้างขึ้น จึง ต้องมีการกำหนดพิจารณาให้เหมาะสมจากงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต รวมทั้งดูถึงราคา ต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งานของอุโมงค์อีกด้วย

ตามที่ได้มีการบันทึกข้อมูลงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต ความกว้างของ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300-1500 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับหน้าตัด ของอุโมงค์ สำหรับ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ทำจากเหล็ก (Iron Segment) ความกว้างอยู่ ระหว่าง 750-1200 มม. สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete segment) ความกว้างอยู่ระหว่าง 900-1200 มม.

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) 1000 มม. ถูกลำบากใช้กันทั่วไป

4. 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 รูปแบบ ที่สองชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามยาวของอุโมงค์ ส่วน รูปแบบที่สามชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) เป็นแบบผสมผสานระหว่างรูปแบบ 1 และ 2 ซึ่งความยาวของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางรัศมีของ อุโมงค์จะสั้นกว่าของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เอ (A Segment) และชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์บี (B Segment)

การก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต สำหรับอุโมงค์รถไฟวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (Segment ring) จะถูกแบ่งออกประมาณ 6 – 11 ชิ้นส่วน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 6 - 8

ชิ้นส่วน สำหรับอุโมงค์ที่ใช้สำหรับระบายน้ำ น้ำเสีย สายโทรเลขใต้ดินโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5 - 7 ชิ้นส่วน

ในมาตรฐานการออกแบบอุโมงค์ประเภทห้วยคจะทำการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทเหล็ก (Iron segment) และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete segment) ดังตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต

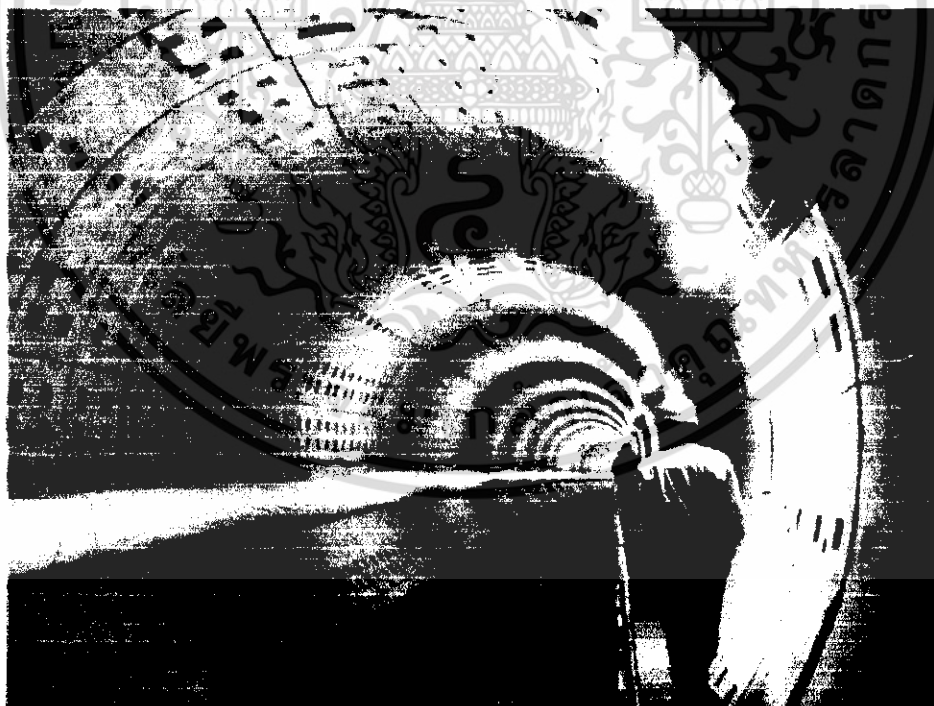
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของวงแหวน อุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของ ชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวง แหวน
1800 - 2000	900	100	5
	1000	125	
2150 - 3350	900	100(200)	5
	1000	125	
3550 - 4800	900	125(225)	6
	1000	150	
		175(250)	
		200(275)	
5100 - 6000	900	175	6
	1000	200	
		225	
		250	
		275	
		300	
(6300 - 6900)	900	250	7
	1000	275	
		300	
(7250 - 8300)	900	275	8
	1000	300	
		320	
		350	

ตารางที่ 5.2 แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์หลัก

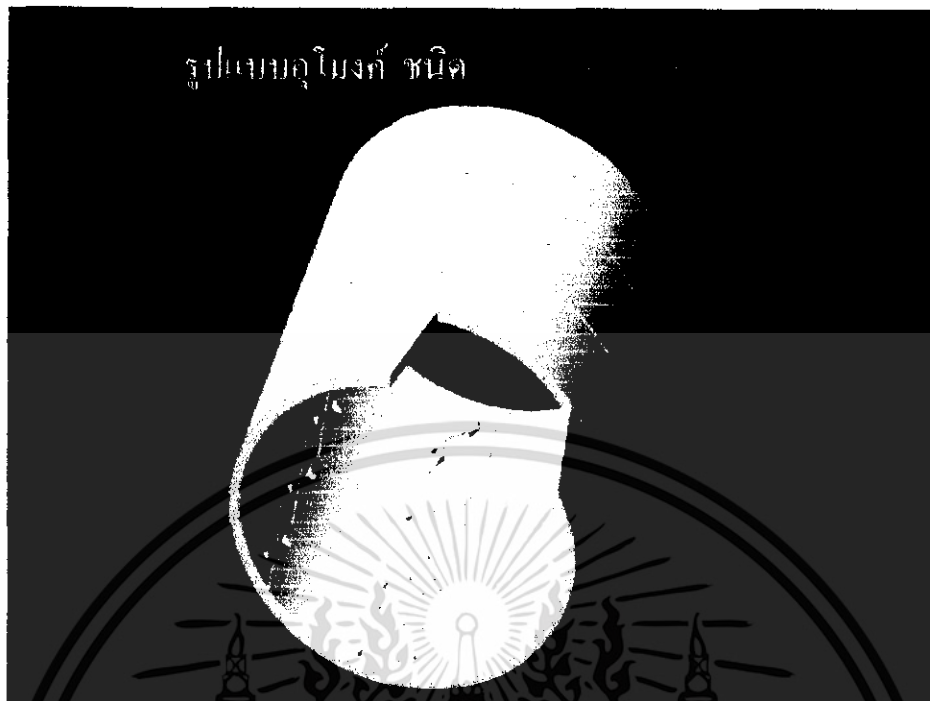
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของวงแหวน อุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของ ชิ้นส่วนประกอบผนัง อุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวง แหวน
1800 - 2000	750	75 100	6
2150 - 2550	900 1000	100 125	6
2750 - 3350	900 1000	100 125 150	6
3550 - 4050	900 1000	125 150 175	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



รูปที่ 5.22 แบบจำลองผนังอุโมงค์ชนิด Typical



รูปที่ 5.23 ผนังอุโมงค์ ชนิด Typical



รูปที่ 5.24 แบบจำลองผนังอุโมงค์ชนิด Trapezoidal segment



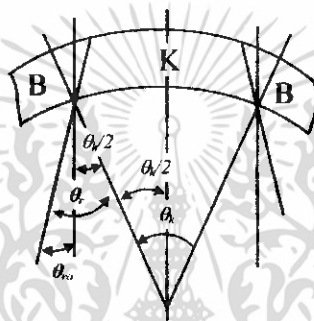
รูปที่ 5.25 ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ชนิด Trapezoidal segment

5.3.2 มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ

มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบจะถูกกำหนดการพิจารณาถึงการถ่ายแรงขององค์ประกอบแรง ความง่ายของการประกอบ สภาพของโครงสร้าง และความง่ายในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

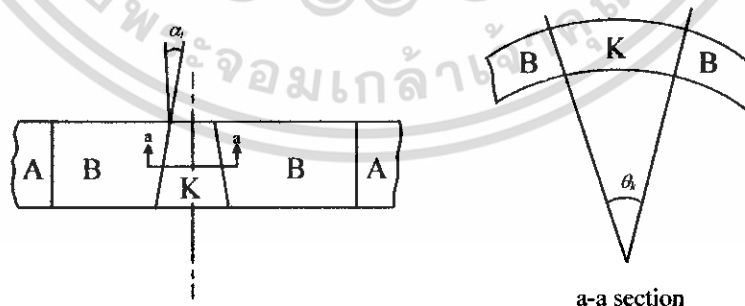
สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางของรัศมีอุโมงค์ มุมของรอยต่อ (α_r) จะได้มาดังสมการ

$$\alpha_r = \frac{\theta_k}{2} + \omega$$



รูปที่ 5.26 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี

โดย ω เป็นมุมอยู่ในขอบเขตการประกอบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) และโดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 2-5 องศา อย่างไรก็ตามมุมที่เล็กกว่านี้อาจจะให้ผลที่ดีกว่าหากว่าไม่ทำให้สูญเสียสมรรถภาพการทำงาน ในกรณีพิเศษอื่นประมาณ 3 องศาถือเป็นค่าที่แนะนำ



รูปที่ 5.27 แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

เมื่อมุมของรอยต่อมีขนาดใหญ่ รอยต่อของผิวหน้าชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะสามารถหลุดออกได้โดยง่าย ทำให้การส่งผ่านแรงตามแนวแกนและแรงเฉือน เป็นไปอย่างยากลำบาก เพราะฉะนั้นมุมของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (θ_k) ต้องทำให้มีขนาด ที่เล็กลง มุมของรอยต่อจะต้องมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะสำหรับอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กซึ่งควรจะต้องพิจารณาในกรณีนี้เป็นพิเศษ

สำหรับชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามแนวยาว ของอุโมงค์แสดงดังรูป โดยปกติจะไม่มีมุมของรอยต่อ (α_k) แต่มุมของการประกอบชั้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (α_k) ต้องถูกนำมาพิจารณาในสภาพของการก่อสร้าง รวมถึงความยาวของ เครื่องจักรหัวเจาะอุโมงค์ (Shield machine) และการสอดแทรกกระหว่างรอยต่อของชั้น ส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และรอยต่อของวงรอบ มุมของการประกอบของชั้นส่วน ประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 17 – 24 องศา ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของ โครงสร้าง เมื่อมุมของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (θ_k) มีค่ามุมที่กว้างและชั้นส่วนประกอบ ผนังอุโมงค์ (Segment) มีความหนาแน่น จะมีการกำหนดมุมที่แน่นอนสำหรับระบบรอยต่อและ การประกอบ เมื่อมุมของการประกอบนั้นใหญ่เกินไปหรือความยาวของหัวเจาะยาวเกินไป

5.3.3 วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring)

จำนวน ความกว้าง และความยาวของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) จะถูกกำหนดโดยการวางแผนของอุโมงค์ สภาพของดินโดยรอบอุโมงค์ การอัดค้ำน้ำปูน ความแข็งแรงของระบบรอยต่อกับการประกอบ ผลที่ได้ของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และขอบเขตของการก่อสร้าง

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) มีอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกใช้ สำหรับการวางแผนโค้งของอุโมงค์ และอีกรูปแบบหนึ่งใช้สำหรับการปรับแก้แนว วงแหวนผนัง อุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) สำหรับการวางแผนโค้งของอุโมงค์ที่ลดลงทีละน้อยโดยปกติจะ ออกแบบดังเช่นการทำให้มีความยาวเหมาะสมกับวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่ใช้สำหรับการปรับแก้การวางแผน ดังนั้นจำนวนวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่ต้องการใช้นั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มขึ้น

จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่ต้องการสำหรับการ ปรับแนวจะแตกต่างกันตามอัตราส่วนของหน้าตัดการวางแผนโค้งที่ลดลง (Gradual curve) และหน้า ตัดการวางแผนโค้ง Sharp curve ภายในหน้าตัดของการก่อสร้าง หรือไม่ก็เป็นการปรับแนวของอุโมงค์

เช่น โค้งตัวเอส (S-shaped curve) หรือสภาพของดินโดยรอบ จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) โดยปกติที่ต้องการใช้สำหรับการปรับแนวอยู่ที่ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงแหวนที่ต้องการสำหรับหน้าตัดที่ติดต่อเนื่องกัน

อย่างไรก็ตามหน้าตัดการวางโค้งที่ลดลงทีละน้อย ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper ring) สำหรับการปรับแนวทางยาว จะใช้ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงรอบที่ต้องการจะถูกเตรียมสำหรับหน้าตัดที่ติดต่อเนื่องกัน

สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก ความกว้างสูงสุดของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียวสำหรับการปรับแก้แนวและโค้งที่ลดลงทีละน้อยจะเท่ากับหรือน้อยกว่าความกว้างมาตรฐาน สำหรับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เหล็กหล่อและคานคอนกรีต (Ribbed RC) นั้น ความกว้างที่เพิ่มความเรียวไปหนึ่งเท่าครึ่งจะถูกนำมาใช้อยู่เสมอ ความกว้างสูงสุดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แผ่นเรียบมักจะมีขนาดเล็กกว่าความกว้างมาตรฐาน อย่างไรก็ตามในหลายปีที่ผ่านมาความกว้างที่เพิ่มความเรียวไปหนึ่งเท่าครึ่งของความกว้างมาตรฐานก็นิยมนำมาใช้

ความกว้างสูงสุดของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่เป็นเหล็กที่ใช้สำหรับโค้งอื่นๆนอกเหนือจากโค้งที่ละน้อยมีค่ามากกว่า 250 มม. ส่วนความกว้างของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่เป็นคอนกรีตมีค่ามากกว่า 750 มม.

ความเรียวถูกกำหนดโดยรูปแบบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ความกว้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) รัศมีความโค้ง การประเมินอัตราการใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ในหน้าตัดโค้ง ผลที่ได้จากวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) และช่องว่างช่วงท้าย เป็นต้น สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 75 mm เนื่องจากความจำกัดของการจัดเรียงเหล็กเสริม

ความเรียวและมุมของความเรียวสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 10 เมตร หรือมีรูปร่างไม่ปกติจะต้องปรึกษาวิศวกรเพื่อขอคำแนะนำ

อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) และวงแหวนมาตรฐานในการก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต ปกติจะใช้อัตราส่วน 2 : 1 และที่พบเห็นกันบ่อยๆได้แก่ 3 : 1, 1 : 1, 4 : 1 และ 3 : 2 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ 2 : 1 หรือใหญ่กว่านั้นก็ถูกนำมาใช้ การพิจารณาจะถูกทดแทนด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ไม่ถูกเชื่อมกันตรงรอยต่อที่ติดต่อเนื่องกัน ในอุโมงค์ที่มีรัศมีขนาดใหญ่ เช่น อุโมงค์รถไฟ อุโมงค์ถนน

อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ต่อวงแหวนมาตรฐานจะอยู่ที่ 1 : 1 หรือน้อยกว่านั้น

ตารางที่ 5.3 แสดงขนาดเรียวและองศาของความเรียว

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนอุโมงค์(D_o) เมตร	$D_o < 4$	$4 \leq D_o < 6$	$6 \leq D_o < 8$	$8 \leq D_o < 10$	$10 \leq D_o$
Taper (มิลลิเมตร)	15-75	30-80	30-90	40-90	40-70
Taper Angle	20'-115'	20'-70'	15'-50'	15'-35'	10'-25'

5.3.4 ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate และ Backboard

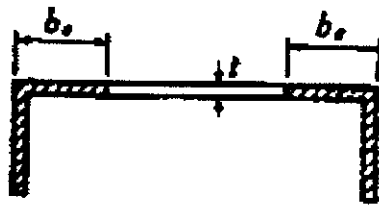
ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate และ Backboard นั้นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับโครงสร้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ โดยมี Main girder, Vertical rib และ Splice plate (หลังจากนี้จะเรียกว่า Main girder และ Rib) เป็นตัวรับแรงที่เกิดขึ้นบน Skin plate

จาก ในกรณีนี้ ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate จะถูกออกแบบโดยพิจารณาจาก

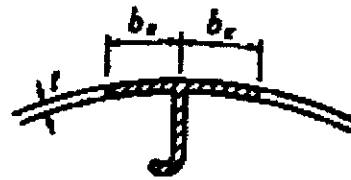
- 1) สภาพความเค้น
- 2) ความหนาของ Skin plate
- 3) ความกว้างของ Main girder หรือ Rib
- 4) การประสานกันของ Main girder และ Skin plate

สำหรับโครงสร้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรตรวจสอบและพิจารณาใช้จากความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate

- 1) สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ทำจากเหล็ก เมื่อติดตั้ง Main girder และ Rib และ Skin plate เรียบร้อยแล้วนั้น ความกว้างประสิทธิภาพ (b_c) จะคำนวณได้จาก



(a) Main girder



(b) Vertical rib

รูปที่ 5.28 ความกว้างประสิทธิภาพของ Skin plate

ก) ค่าความเค้นของ Main girder และความแข็งแรงของวงแหวนขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะคำนวณหาความกว้างประสิทธิภาพได้ดังนี้

$$b_c = 25t \text{ (สำหรับข้างเดียว)}$$

โดยค่า $2 b_c$ ต้องไม่มากกว่าความยาวระหว่าง Main girder และค่า t คือความหนาประสิทธิภาพของ Skin plate

ข) ค่าความเค้นของ Vertical rib หรือ Splice plate ที่เกิดขึ้นจากแรงผลักของแม่แรงของหัวเจาะ (Shield jack) จะคำนวณหาความกว้างประสิทธิภาพได้ดังนี้

$$b_c = 20t \text{ (สำหรับข้างเดียว)}$$

โดยค่า b_c ต้องไม่มากกว่าความยาวระหว่าง Vertical Rib โดยค่า t คือความหนาทั้งหมดของ Skin plate

นอกจากนั้น ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จากเหล็กกล้ายังสามารถพิจารณาเป็นโครงสร้างแบบแผ่นซึ่งมี Skin plate, Vertical rib และ Splice plate อีกอย่างความกว้างประสิทธิภาพอาจต้องลดลงเพื่อลดปัญหาการงอของ Main girder

2) ความกว้างประสิทธิภาพของ Backboard ของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทกล่องจะหาได้จาก

ก) ค่าความเค้นของ Main girder และความแข็งแรงของวงแหวนขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์สามารถใช้ความกว้างทั้งหมดมาเป็นความกว้างประสิทธิภาพ

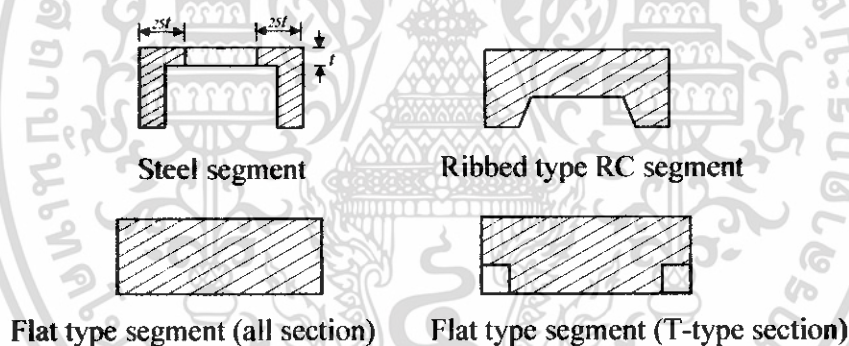
ข) ค่าความเค้นของ Vertical rib หรือ Splice plate ที่เกิดขึ้นจากแรงหลักของแม่แรงของหัวเจาะ (Shield jack) สามารถคำนวณโดยใช้ความกว้างทั้งหมดของ Backboard มาเป็นความกว้างประสิทธิผล

5.3.5 ค่าความเค้นของหน้าตัดหลัก (Stress of main section)

ค่าความเค้นของหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะคำนวณโดยใช้แรงที่มีค่าสูงสุดโดยสมมติให้เป็นคานตรง

ถ้าโมเมนต์คดและบวกสูงสุด และแรงตามแนวแกนอยู่จุดเดียวกัน ค่าแรงเฉือนสูงสุด โมเมนต์คดและแรงตามแนวแกนจะอยู่ที่จุดเดียวกัน

ในวิธีการคำนวณแบบปรับปรุง (Modified usual calculation method) ส่วนหนึ่งของโมเมนต์คดซึ่งกระทำต่อจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ จะส่งผ่านไปยังชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ติดกันผ่านจุดต่อของวงแหวน ดังนั้นเมื่อคำนวณหาหน้าตัดหลัก อัตราการถ่ายแรงของโมเมนต์คด (ξ) ควรจะต้องนำมาคำนวณด้วย



รูปที่ 5.29 หน้าตัดประสิทธิภาพของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เป็นคานโค้ง ทว่าสามารถพิจารณาเป็นคานตรง นี้สืบเนื่องมาจากอัตราส่วนความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ต่อรัศมีความโค้งนั้นมีค่าประมาณ 1/10 ปัจจัยอื่นนั่นคือ Main girder สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทกล่องจะถูกรองรับโดย Vertical rib อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ หน้าตัดหลักจึงสามารถคำนวณเป็นคานตรงซึ่งโมเมนต์คดและแรงตามแนวแกน หรือแรงเฉือน โมเมนต์คด และแรงตามแนวแกนถูกกำหนดขึ้นอย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าอัตราความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ต่อรัศมีความโค้งเพิ่มขึ้น ก็

ควรต้องระวังเนื่องจากจะมีความต่างระหว่างการคำนวณผลของค่าความเค้นของคานตรงและค่าความเค้นของคานโค้ง

หน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กจะเกิดจาก Main girder และ Splice plate และหน้าตัดประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนจะแสดงในรูปที่ 5.29 ความหนาของ Main girder ควรพิจารณาโดยผลกระทบจากการงอ ยิ่งไปกว่านั้นหน้าตัดประสิทธิภาพสำหรับต้านแรงเฉือนก็คือ Main girder เท่านั้น อย่างไรก็ตามหากออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกน รวมทั้งแรงเบกทานสำหรับแรงเฉือน ก็สามารถละเว้นไม่คำนวณการรับแรงเฉือนได้

หน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีตจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือแบบคานคอนกรีต (Ribbed typed RC) และแบบแผ่นเรียบ (Flat type) สำหรับแบบคานคอนกรีต จะมีหน้าตัดแบบ T-type ซึ่งเกี่ยวเนื่องจาก Main girder และ Backboard ส่วนสำหรับแบบแผ่นเรียบ มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยม อย่างไรก็ตามสำหรับแบบแผ่นเรียบ หากหน้าตัดมีการพ่องไปเนื่องจากจุดต่อหรือการติดตั้งก็สามารถพิจารณาเป็น T-type ได้

สำหรับการคำนวณค่าความเค้นซึ่งสัมพันธ์กับ โมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกน ค่า Tensile stress ของคอนกรีตจะไม่นำมาใช้ และค่าความเค้นจะถูกคำนวณจากระยะทางจากแนวแกนกลางของหน้าตัด ค่าความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = \frac{Q}{b \cdot d}$$

เมื่อ

Q : ค่าแรงเฉือนสูงสุด

b : สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม ใช้ความกว้างทั้งหมด

สำหรับหน้าตัด T type ใช้ความกว้าง width of web

d : ความสูงประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม หากค่าความเค้นเฉือนมีค่าเกินกว่าค่าความเค้นเฉือนที่ยอมให้ (τ_u) ก็จะต้องจัดโครงค้ำเพิ่มขึ้น หน้าตัดของโครงค้ำกว้างกว่าหน้าตัดทั้งหมดจะคำนวณได้โดย

$$A_v = \frac{Q_v \cdot s}{\sigma_{sa} \cdot d}$$

$$Q_v \geq Q - Q_c$$

$$Q_c = 1/2 \cdot \tau_u \cdot b \cdot d$$

เมื่อ

A_v : หน้าตัดทั้งหมดของโครงค้ำสำหรับระยะทาง

s : ระยะห่างระหว่างโครงค้ำ

Q_v : ค่าแรงเฉือนบนโครงค้ำ

Q_c : ค่าแรงเฉือนบนคอนกรีต

ค่า Bond stress (τ_o) ของการเสริมแรงหลักสำหรับคอนกรีตคำนวณได้จาก

$$\tau_o = \frac{Q}{U \cdot d}$$

U เป็นผลรวมของความยาวรอบนอกของการเสริมแรงหลัก เมื่อโครงค้ำเป็นตัวรับแรงแบกทาน Q มีค่า $1/2$ ของค่านับ

5.3.6 การคำนวณจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

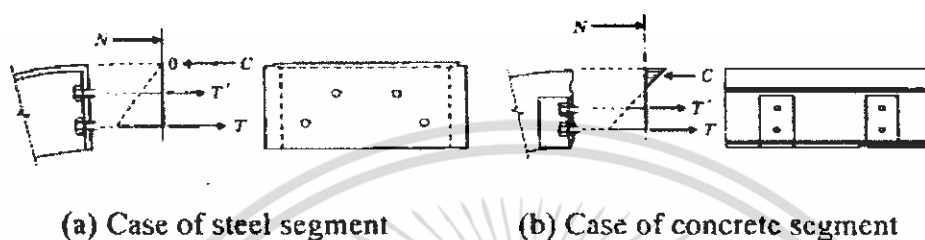
จุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะต้องคำนวณให้ถูกต้องตามวิธีการใช้ในการคำนวณส่วนประกอบแรงของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1) จุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ถ้าออกแบบวงแหวนผนังอุโมงค์ให้เป็นวงแหวนแข็งซึ่งมีความแข็งแรงตัดเต็มที่ การคำนวณจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ก็ควรใช้ความแข็งแรงและความแข็งแรงเท่ากันกับที่ใช้ในหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

ดังนั้น การคำนวณปกติสำหรับคำนวณจุดต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรใช้องค์ประกอบของแรงสำหรับวงแหวนผนังอุโมงค์ ค่าโมเมนต์คดงอและลบสูงสุด และแรงตามแนวแกนที่จุดเดียวกัน และค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์คด และแรงตามแนวแกนที่จุดเดียวกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นตามวงแหวนของผนังอุโมงค์ อย่างไรก็ตามมันเป็นไปไม่ได้ที่ความแข็งแรงและความแข็งแรงจะเท่ากันในทุกจุดต่อ ดังนั้นการคำนวณจึงขึ้นอยู่กับหลักการออกแบบที่ว่าวงแหวนผนังอุโมงค์ถูกติดตั้งเพื่อเตรียมรับการเลื่อนของวงแหวน ซึ่งยอมให้ผลกระทบจากการประกอบครอบคลุมส่วนหนึ่งขององค์ประกอบแรง

ในบางกรณี โมเมนต์คัตจะถูกถ่ายแรงผ่านไปยังจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ และจะลดลงเนื่องจากโมเมนต์คัตถูกกระจายไปยังชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ข้างเคียง

สำหรับการคำนวณแบบปรับปรุง การออกแบบของประกอบแรงของจุดต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ โมเมนต์คัตสามารถออกแบบให้ลดลงเนื่องจากการอัตราถ่ายแรงโมเมนต์คัต



รูปที่ 5.30 การกระจายค่าความเค้นคัตบนจุดต่อของหน้าคัต

สำหรับสลักเกลียว ในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก ความเค้นของสลักเกลียวจะถูกคำนวณโดยใช้แบบจำลองว่าขอบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เป็นจุดต่อสำคัญของการหมุนคัตในรูปที่ 5.30 สลักเกลียวจะถูกพิจารณาเป็นเหล็กรับแรงคัตในการคำนวณความเค้นของสลักเกลียวในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต ดังนั้นหน้าคัตของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะถูกออกแบบเหมือนเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับความหนาของ Splice plate จะถูกคำนวณจากความเค้นที่เกิดขึ้นบนสลักเกลียวในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก ทั้งแบบแผ่นเรียบ (Flat type) และแบบคานคอนกรีต (Ribbed typed RC) สำหรับแบบคานคอนกรีตนั้น นอกจากเรื่องนี้แล้ว แรงเฉือนและความเค้นแบกทานรอบ Splice plate ยังต้องใช้คำนวณอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นในประเภทอื่นๆ ประสิทธิภาพของจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีตจะถูกพิจารณาจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ Yield strength ต่อหน้าคัตหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

ในแบบจำลอง Beam-spring model สมมติว่าวงแหวนของผนังอุโมงค์เป็นวงแหวนซึ่งมีสปริงจำนวนมาก องค์ประกอบของแรงจะสามารถคำนวณโดยตรงที่ตำแหน่งจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด แรงตามแนวแกนและแรงเฉือนจะสามารถคำนวณและใช้วิธีที่เหมาะสมได้ ในกรณีนี้จุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรออกแบบให้สอดคล้องกับค่าคงที่สำหรับสปริงที่ใช้ในการคำนวณหาแรง

2) จุดต่อของวงแหวน ในกรณีผลกระทบจากการประกบกันซึ่งถูกคาดจากการเตรียมรับการเกิด Stagger มันจำเป็นที่จุดต่อของวงแหวนมีความแข็งแรงและความแข็งแรงที่ถ่ายแรงและลดค่าโมเมนต์คัตไปสู่ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ข้างเคียง เหมือนกันกับตำแหน่งของจุดต่อซึ่งต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง

สำหรับการออกแบบจุดต่อวงแหวน นอกจาก Beam-spring model องค์ประกอบของแรงสำหรับการออกแบบนั้นไม่สามารถคำนวณได้ ด้วยเหตุนี้การออกแบบสลักเกลียวที่จุดต่อวงแหวนด้วยวิธีการคำนวณแบบปกติและวิธีการคำนวณแบบปรับปรุง ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดเท่ากับสลักเกลียวเชื่อมจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ บางครั้งอาจใช้สลักเกลียวจุดต่อวงแหวนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและค่าความแข็งแรงต่ำ

ในการออกแบบจุดต่อวงแหวน จะต้องคำนวณผลกระทบอุโมงค์ที่เกิดจากแผ่นดินไหวและการทรุดตัวของดินและผลกระทบจากการก่อสร้างด้วย

5.3.7 การคำนวณ Skin plate และ Backboard

ในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบกล่อง (Box type) แรงกระทำบนอุโมงค์จะถ่ายผ่าน Skin plate หรือ Backboard ไปยัง Vertical Rib ของ Main girder, Splice plate, ฯลฯ แรงกระทำบน Skin plate และ Backboard จะพิจารณาเป็นแรงแผ่กระจาย ไปใช้คำนวณขนาดและเนื่องจากว่าทุกด้านของ Skin plate และ Backboard เป็นโครงสร้างที่ยึดแน่น

ในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบกล่อง มี Main girder 2 ชั้น ใช้ในการคำนวณซึ่งช่องว่างระหว่าง Vertical rib จะเล็กกว่าความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ซึ่งเหมือนกับรัศมีของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ขนาดแรงแบกทานของ Skin plate และ Backboard จะถูกคำนวณจากแบบจำลอง

ก) Limit design method ของแผ่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีจุดรองรับแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง

ข) Limit design method ของเคเบิลซึ่งมีจุดรองรับแบบปกติที่สองข้าง

ค) Elastic design method ของแผ่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีจุดรองรับแบบยึดแน่นทั้งสี่ข้าง

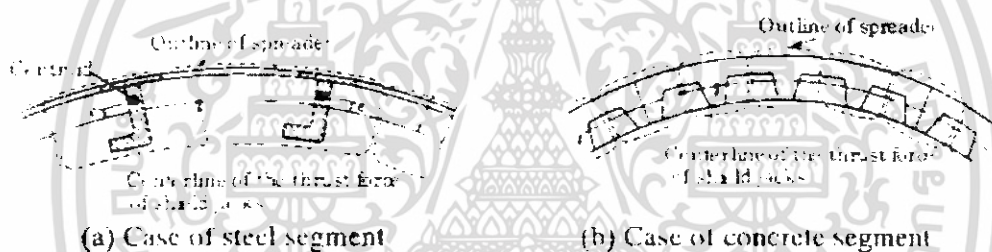
เนื่องจากความหนาและอัตราขนาดของ Skin plate แบบจำลองพื้นฐานออกแบบสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กคือ แบบ ก. และ ข. ส่วนสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบกล่องคือ แบบ ก. สำหรับขนาดแรงแบกทานของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กจะคำนวณโดยใช้วิธี ก.และข.

เมื่อออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์สำหรับการใช้งานที่ยาวนาน จำเป็นที่
จะต้องพิจารณาถึงการสึกกร่อนของ Skin plate หรือเพิ่มการป้องกันการสึกกร่อนด้วย

5.3.8 การคำนวณ Vertical rib

Vertical rib ถูกออกแบบเป็นเสาสั้นเพื่อต้านแรงผลักของแม่แรง ทว่า
ขณะเดียวกันมันก็ช่วยป้องกันการงอของ Main girder

แรงผลักของแม่แรงถูกรองรับโดยหน้าตัดประสิทธิผลรวมถึง Vertical rib หรือ
Splice plate และส่วนหนึ่งของ Skin plate ซึ่งครอบคลุมโดยแรงกดหรือแหวนกด แรงกระทำแบบ
ทานโดยหน้าตัดประสิทธิผลจะแปรผันตามตำแหน่งของแม่แรง Vertical rib และ Splice plate
ในอีกทางหนึ่ง แรงกระทำก็คือค่าเฉลี่ยของแรงผลักจากแม่แรงซึ่งแบ่งออกโดย Vertical rib และ
จุดต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักของแม่แรงและ Vertical rib

จุดที่กระทำของแรงผลักจากแม่แรงมักจะ ไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด
ประสิทธิผล และมันจะเลื่อนไปตามรอบวง อย่างไรก็ตามผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นจาก
Vertical rib ซึ่งเบี่ยงไปตามรอบวง จะถูกพิจารณาว่าไม่เกี่ยวข้องกับการออกแบบรายละเอียดของ
Vertical rib แม้แต่น้อย ด้วยเหตุนี้การเบี่ยงของแรงกระทำจึงละเว้นไว้ไม่นำมาคิด

5.4 รายละเอียดการออกแบบสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

5.4.1 โครงสร้างจุดต่อ

โครงสร้างจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรออกแบบโดยพิจารณาถึงความแข็งแรง การติดตั้ง คุณภาพและการป้องกันการซึมน้ำ

ระบบการติดตั้งและต่อเชื่อมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์สามารถแยกได้เป็นจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในแนวรัศมี จุดต่อระหว่างวงแหวนตามแนวอุโมงค์ การต่อเชื่อมชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ก็แบ่งประเภทของจุดต่อออกได้ดังนี้

1) จุดต่อแบบสลักเกลียวและน็อต (Bolt and nut joint) นี่เป็นจุดต่อที่นิยมกันมากที่สุดสำหรับการต่อเชื่อมชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และวงแหวน แผ่นประกอบจะถูกบีบอัดโดยสลักเกลียว และยึดชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

ในกรณีที่ ขนาดของสลักเกลียวและรูสลักเกลียวมีค่าต่างกัน จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ควรพิจารณาถึงผลกระทบของแรงจากการก่อสร้างที่อาจเพิ่มด้วย ซึ่งขนาดรูสลักเกลียวมาตรฐานนั้น ตารางที่ 5.4จะเป็นตารางสำหรับสลักเกลียวสั้นของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กและแบบแผ่นเรียบ (Flat type) และในตารางที่ 5.5 นั้นจะเป็นตารางสำหรับสลักเกลียวยาวซึ่งใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต (Ribbed typed RC)

2) จุดต่อแบบบานพับ (Hinge coupler joint) จุดต่อนี้จะถูกใช้เป็นส่วนต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทหลายบานพับ จุดต่อที่นิยมที่สุดสำหรับแบบบานพับนี้คือจุดต่อแบบข้อต่อรูปห่วงใส่สลัก ซึ่งนิยมใช้ในประเทศสหราชอาณาจักรและรัสเซียซึ่งมีสภาพดินที่ค่อนข้างดี ระบบนี้จะช่วยลดโมเมนต์คด ทว่าจุดต่อชนิดนี้ไม่นิยมในญี่ปุ่นซึ่งสภาพดินไม่ค่อยดี และมีระดับน้ำใต้ดินสูง

3) จุดต่อแบบหมุด (Pin coupler joint) ส่วนมากจะใช้เชื่อมต่อระหว่างวงแหวน แต่อาจใช้เชื่อมต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในบางครั้ง หน้าที่หลักของจุดต่อวงแหวนคือทำให้ไม่เกิดผลกระทบจากการเลื่อนของวงแหวนซึ่งยอมให้แรงเฉือนถูกป้องกัน โดยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ข้างเคียง จุดต่อวงแหวนนั้นต้องทำให้ยึดแน่นเพื่อทำให้มั่นใจในความต่อเนื่องของแนวอุโมงค์และช่วยป้องกันอุโมงค์จากการรั่วซึมของน้ำ จุดต่อชนิดนี้เหมาะกับระบบการติดตั้งแบบอัดโน้มติ ช่องว่างระหว่างหมุดและรูหมุดดูได้จากตารางที่ 5.4

4) จุดต่อแบบลิ้ม (Wedge joint) จุดต่อชนิดนี้ใช้ทั้งเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และเชื่อมระหว่างวงแหวน โดยการใช้ลิ้มเชื่อมต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน ซึ่งจุดต่อนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบแผ่นเรียบ (Flat type)

5) จุดต่อแบบสตั๊กและร่อง (Tongue and groove joint) จุดต่อชนิดนี้นิยมใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างวงแหวน ทว่าบางครั้งก็อาจใช้เชื่อมชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์องค์ประกอบของจะถูกถ่ายไปยังชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ข้างเคียงโดยจุดต่อชนิดนี้ การประกอบจุดต่อนี้ให้แน่นย៉ำน้นค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม ก็ต้องดูแลและระวังขณะทำการประกอบติดตั้ง โดยปกติจุดต่อนี้จะดีขึ้นหากมีจุดต่อแบบอื่นมาช่วยเสริม ซึ่งช่วยในการบีบอัดเพื่อรักษาความต่อเนื่องของแนวอุโมงค์และป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

จุดต่อนี้จะเป็นจุดที่อันตรายสำหรับการรับแรงที่สุดสำหรับแนวผนังอุโมงค์ ดังนั้นรายละเอียดของจุดต่อควรพิจารณาเพื่อให้รับแรงได้สูงสุด ซึ่งควรต้องทดสอบคุณสมบัติหลายอย่าง โดยเฉพาะทั้งคุณภาพและสมรรถภาพ

ระบบการติดตั้งผนังอุโมงค์อัตโนมัติถูกใช้ จะต้องเลือกระบบจุดต่อให้มีประสิทธิภาพ ในกรณีใช้จุดต่อนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในการวางแผน จะต้องตรวจสอบความแข็งแรงและการติดตั้งก่อนที่จะออกแบบ

ตารางที่ 5.4 ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กและแบบแผ่นเรียบ

Diameter of bolt (mm)	16	18	20	22	24	27	30	33	36
Diameter of bolt hole (mm)	19	21-23	23-25	25-27	27-29	30-32	33-36	36-39	39-41

ตารางที่ 5.5 Box segment of concrete (without sheaths)

Diameter of bolt (mm)	27	30	33
Diameter of bolt hole (mm)	32-33	35-38	38-41

5.4.2 การจัดวางสลักเกลียว

เมื่อเป็นชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบแผ่นเรียบ การจัดวางสลักเกลียวสำหรับจุดต่อในทิศความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรออกแบบโดยพิจารณาการถ่ายความเค้นผ่านจุดต่อด้วยการบังคับจัดวางเหล็กเส้น สมรรถภาพของการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบเรียบ และสมมูลของหน้าตัดที่พร้อมไป ในกรณีของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบคอนกรีตซึ่งมีขนาดบาง สลักเกลียว 3 ตัวสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรจัดวางเป็นระนาบเดียว สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่หนา สลักเกลียวควรจัดวางเป็นระนาบคู่สำหรับจุดต่อ โดยมีสลักเกลียว 2 ตัววางอยู่ในระนาบด้านนอก และสลักเกลียว 3 ตัวจัดวางในระนาบด้านในเพื่อเตรียมรับมือการเลื่อม สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบกล่องคอนกรีตซึ่งมีความหนา กว่าแบบปกติควรเพิ่มสลักเกลียวที่จุดต่อเพื่อทำให้มีความแข็งแรงและแข็งแกร่งเพียงพอที่จุดต่อ

สลักเกลียวสำหรับจุดต่อวงแหวนควรจัดวางเป็นระนาบเดียวที่ $1/4$ ถึง $1/2$ ของความสูงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จากด้านใน โดยไม่เกี่ยวข้องกับชนิดและความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ สำหรับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์แบบแผ่นเรียบ การเว้นระยะสลักเกลียวขึ้นอยู่กับประสบการณ์ที่ผ่านมาในการพิจารณาความแข็งแรง หน้าตัดพร้อมที่น้อยที่สุด และการจัดเรียงเหล็กสมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และจุดต่อวงแหวน ในกรณีชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบกล่องคอนกรีต สลักเกลียว 2 ตัวควรจัดวางในแต่ละกล่อง สำหรับประเภทอื่น การจัดวางสลักเกลียวควรจัดวางช่องว่างโดยพิจารณาการเตรียมรับมือการเลื่อมและชิ้นส่วนผนังอุโมงค์แบบเรียบสำหรับความโค้งของอุโมงค์ และเมื่อใช้จุดต่อแบบหมุน การจัดวางหมุนจะเหมือนกับการจัดวางสลักเกลียว

5.4.3 Vertical rib

เมื่อออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก Vertical rib ก็ควรจัดวางให้มีระยะห่างเช่นกัน และอย่างน้อยควรมี Vertical rib 2 ตัวสำหรับด้านแรงกดเพื่อรองรับและถ่ายแรงจากแรงผลักของแม่แรงหัวเจาะ แผ่นประกอบจะจัดว่าเป็น Vertical rib ตัวหนึ่ง

ถ้าจำนวนของ Vertical rib น้อยกว่าที่ต้องการ แรงผลักของแม่แรงหัวเจาะอาจไม่สามารถถ่ายแรงไปได้ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความเค้นที่คาดไม่ถึงขึ้นบน Main girder

5.4.4 การป้องกันการรั่วซึมของน้ำ (Waterproofing)

การป้องกันน้ำรั่วซึมเข้าสู่อุโมงค์นั้นเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะส่งผลถึงความสามารถในการขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงผลกระทบจากดินและผิวหน้าเนื่องจากการสูญเสียน้ำของน้ำใต้ดิน และการใช้หลังเสริมการก่อสร้าง รอยรั่วซึมน้ำเป็นสาเหตุให้อุโมงค์มีสภาพเสื่อมลงและลดอายุการใช้งานของอุโมงค์อีกด้วย

การปิดและอุดรอยรั่วน้ำตามจุดต่อนั้นจำเป็นสำหรับการป้องกันการรั่วซึม โดยปกติวัสดุที่ใช้ปิดจะถูกวางไว้ที่ร่องตามแนวผิวหน้า สำหรับวัสดุที่ใช้อุดรอยรั่วควรอุดในร่องอื่นตามผิวหน้าของจุดต่อหลังประกอบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

การป้องกันอื่นก็อาจทำที่รูสลักเกลียวและรูสำหรับอัดฉีดน้ำปูน หลังชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ซึ่งอาจถูกขุดถ้าจำเป็น

สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กล้น ไม่จำเป็นต้องมีร่องสำหรับการอุดรอยรั่ว

5.4.5 รูสำหรับอัดฉีดน้ำปูน (Grouting hole)

ในหลายๆ กรณี จะมีรูอัดฉีดน้ำปูน 1 รูต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ 1 ชิ้นเพื่อใช้สำหรับอัดฉีดน้ำปูน ทว่าเร็วนี้ จำนวนของรูอัดฉีดน้ำปูนได้ลดลงเพื่อป้องกันปัญหาจากการรั่วซึมของน้ำเข้ามายังรูอัดฉีดน้ำปูน

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูอัดฉีดน้ำปูนควรออกแบบโดยแบบโดยพิจารณาถึงวัสดุที่จะอัดฉีดเข้าไป โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของรูอัดฉีดน้ำปูนควรมีค่าประมาณ 50 mm

วัสดุ รูปร่าง ขนาดและตำแหน่งของรูอัดฉีดน้ำปูนควรออกแบบโดยพิจารณาถึงความปลอดภัย ความสามารถในการทำงาน ถ้าหากว่ารูอัดฉีดน้ำปูนถูกใช้เป็นตะขอสำหรับยกชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

5.4.6 ความสามารถในการทำงาน การจัดเรียงและการยึดของเหล็กเสริมแรง

1) การจัดเรียงเหล็กเส้นควรพิจารณาถึงพฤติกรรมการเสริมแรง การตัด การเทคอนกรีต และตำแหน่งของการเสริมแรง

- 2) ระยะในแนวนอนระหว่างการเสริมแรงหลักควรกว้างกว่า $5/4$ ของขนาดหินที่ใหญ่ที่สุด และเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรง ระยะในแนวตั้งระหว่างการเสริมแรงหลัก ถ้าจัดเรียงเป็น 2 แถวหรือมากกว่านั้น ควรกว้างกว่า 20 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรง
- 3) สำหรับการเชื่อมต่อเหล็กเสริมนั้น ไม่อนุญาตให้มีในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ในกรณีจำเป็น การเชื่อมต่อควรออกแบบโดยพิจารณาถึงรายละเอียดและเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ชนิดของการเชื่อมต่อ และการเทคอนกรีตเติมลงในช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม
- 4) ปลายของเหล็กเสริมควรยึดแน่นในคอนกรีตด้วยการงอขอ หรือการเชื่อมต่อ
- 5) คอนกรีตที่ใช้ควรพิจารณาถึงคุณภาพคอนกรีต เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ความแม่นยำในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ หรือสิ่งแวดล้อมของอุโมงค์ ความสำคัญและความคงทนของอุโมงค์โดยวิศวกรผู้ควบคุม

ในปกติคอนกรีตที่หล่อหุ้มจะมีความหนามากกว่า 13 mm ทว่าในคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมสำหรับการเสริมเหล็กในจุดเชื่อมต่อวงแหวนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แบบเรียบจะระบุไว้ว่าต้องมากกว่า 10 mm คอนกรีตหุ้มและเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะแสดงในตารางที่ 5.6 คอนกรีตหุ้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีผนังอุโมงค์ชั้นในหรือต้องออกแบบอุโมงค์ในสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นไหว

ตารางที่ 5.6 เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมและคอนกรีตหุ้ม

เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายเหล็กเส้น	ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีตไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริม	คอนกรีตหุ้ม (mm)
under D16	D10	over 35	over 17
D19 – D22	D10 – D13	35 – over 40	16-21
D25	D13	over 45	over 20

5.4.7 การป้องกันการสั่นไหวและการเกิดสนิม

สถิติบันทึกไว้ว่าซีเมนต์และเรซินจะถูกทาไว้ที่ด้านหลังของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำในอุโมงค์และการเป็นถ่านของคอนกรีต สำหรับอีกสถิติคือโครงการที่อยู่ใต้ทะเลจะมีการผสมกากแร่โลหะ ซีเมนต์ ผุ่นผงซิลิกาเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความรั่วซึมจากน้ำและความทนทาน ในกรณีที่คล้ายกันนี้ค่าความเค้นที่ยอมให้ของเหล็กเสริมจะถูกลดลงเพื่อควบคุมรอยแตกของคอนกรีต

เมื่อไม่นานมานี้ ระบบควบคุมตำแหน่งของหัวเจาะได้ถูกพัฒนาขึ้นและทำให้การผิดพลาดทางน้อยลงไปอย่างมาก นี่รวมถึงการปรับปรุงวัสดุประกอบรั้วซึ่งลดการรั่วซึมของน้ำภายในอุโมงค์ ส่วนในที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ทั้งยังมีความแห้งและความชื้นสลับกันไปมา จะต้องเพิ่มการป้องกันการสึกกร่อนและการเกิดสนิมภายในอุโมงค์ รวมถึงสลักเกลียวและแผ่นประกบ (Splice plate) ที่อยู่ด้านหลังของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ด้วย

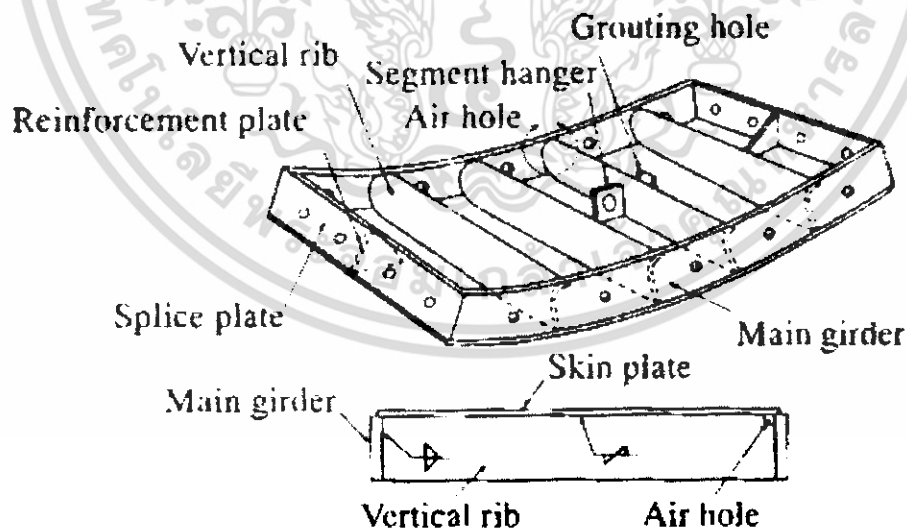
5.4.8 รายละเอียดการออกแบบอื่นๆ

1) การเชื่อมโลหะ : การเชื่อมโลหะควรทำให้ถูกต้องตามวิธีการและขั้นตอนที่ถูกต้องและมีคุณภาพ

2) รูอากาศ (Air hole) : สำหรับผนังอุโมงค์ชั้นในที่ควรติดตั้งเมื่อใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็กหรือเหล็กหล่อเป็นผนังอุโมงค์หลักนั้น ทำให้ยากต่อการเติมคอนกรีตลงแท่งซึ่งล้อมรอบด้วย Main girder และ Vertical rib เนื่องจากช่องว่างอากาศ จึงต้องมีการติดตั้งรูอากาศไว้สำหรับถ่ายเทอากาศ ที่มุมของ Vertical rib ดังในรูปที่ 5.32

3) แผ่นเสริมแรง (Reinforcement plate) : สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์นั้นต้องมีการใช้แผ่นเสริมแรงเพื่อเสริมแรงของแผ่นประกบและเพิ่มความแข็งแรงของจุดต่อ

4) การป้องกันการแตกหักที่มุมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต : สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต จะต้องมีการป้องกันการแตกหักที่มุมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



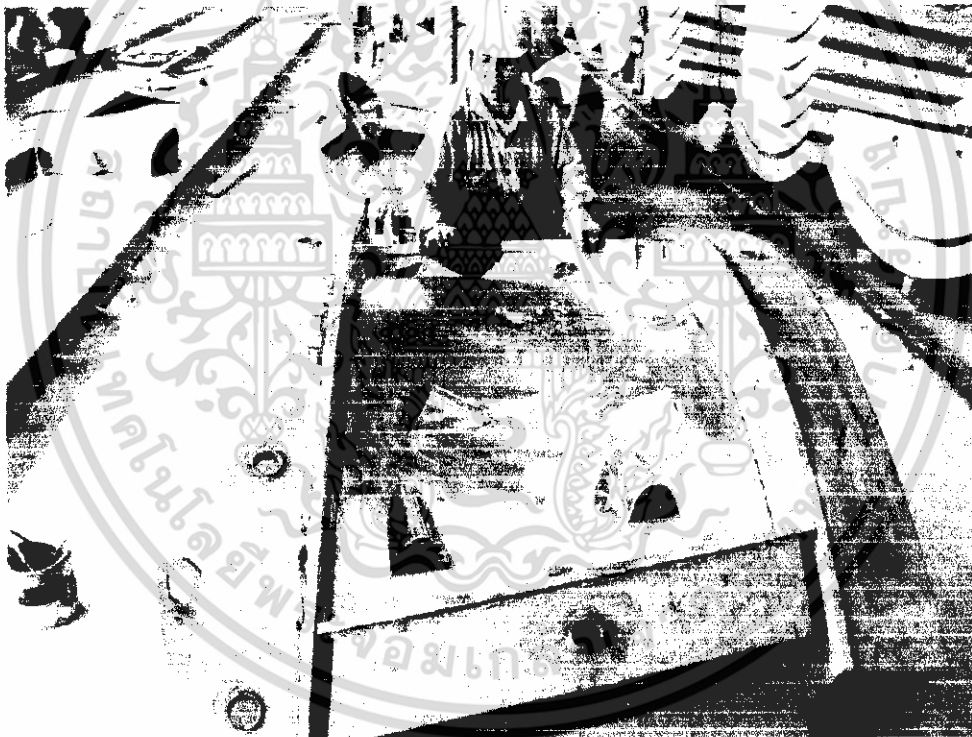
รูปที่ 5.32 รูอากาศของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก

5.5 การผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

5.5.1 พื้นฐานทั่วไป

- 1) โรงงานผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ควรวาดรูปของชิ้นส่วน แผนผังการผลิต ขั้นตอนการผลิต โดยได้รับความเห็นจากวิศวกรผู้รับผิดชอบก่อนเริ่มการก่อสร้าง
- 2) การผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์นั้น สิ่งสำคัญไม่ได้เพียงแต่การกำหนดรูปร่างและคุณภาพเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงค่าเผื่ออีกด้วย

สำหรับรูปที่ 5.33- รูปที่ 5.37 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 5.33 การเตรียมแบบหล่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

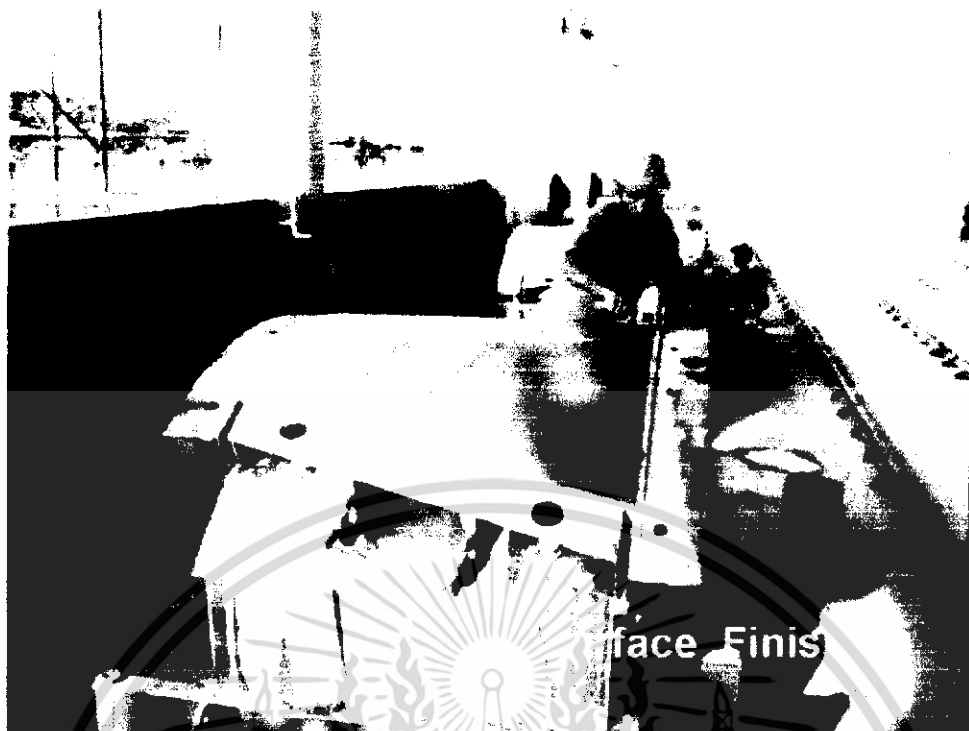


รูปที่ 5.34 การตรวจสอบเหล็กเสริมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 5.35 การเทคอนกรีตลงแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 การตกแต่งผิวหน้าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



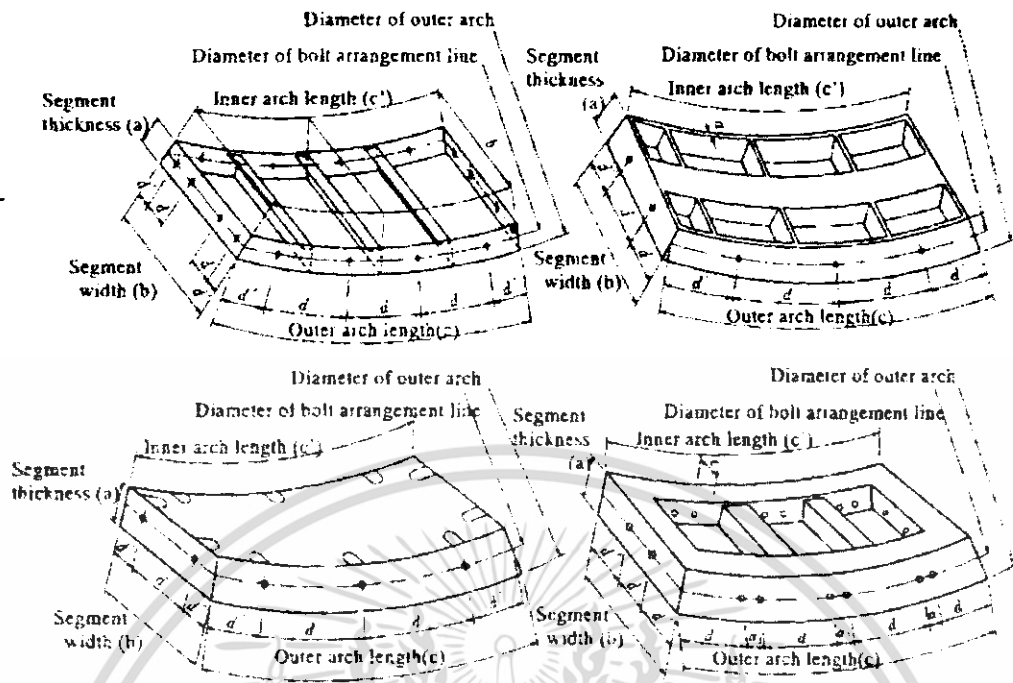
รูปที่ 5.37 การบ่มชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

5.5.2 ค่าเผื่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

ค่าเผื่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นส่วนประกอบ ผนังอุโมงค์ วัสดุที่ใช้ วิธีการผลิต และวัตถุประสงค์ของการใช้ ดังนั้นจึงไม่มีกฎที่ตายตัว ค่าที่ขอม ให้จะแสดงในตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.38

ตารางที่ 5.7 แสดงระยะที่ยอมให้ (หน่วย :mm)

ชนิด		ชิ้นส่วนประกอบผนัง				ชิ้นส่วนประกอบผนัง				ชิ้นส่วนประกอบผนัง			
ค่า		อุโมงค์เหล็กกล้า				อุโมงค์ เหล็กหล่อ				อุโมงค์คอนกรีต			
ความหนา(a)		± 1.5				+5.0 -1.0 ³⁾				+5.0 -1.0 ³⁾			
ความกว้าง (b)		± 1.5				± 0.5				± 1.0			
ความยาวโค้ง (c)		± 1.5				± 0.5				± 1.0			
ระยะระหว่างรูสลักเกลียว (d,d')		± 1.0				± 0.5				± 1.0			
ความหนาของแต่ละส่วน (e)		-				-1.0 ³⁾				-1.0 ³⁾			
ความ กลมของ วงแหวน ชิ้นส่วน ผนัง อุโมงค์ ตามยาว	เส้นผ่าน ศูนย์กลางของ ชิ้นส่วนผนัง อุโมงค์(D ₀) m	D ₀ <4	4≤ D ₀ <6	6≤ D ₀ <8	8≤ D ₀ <10	D ₀ <4	4≤ D ₀ <6	6≤ D ₀ <8	8≤ D ₀ <10	2≤ D ₀	4≤ D ₀ <6	6≤ D ₀ <8	8≤ D ₀ <10
	เส้นผ่าน ศูนย์กลางของ แนวการจัดเรียง สลักเกลียว	±7	±10	±10	±15	±5	±7	±8	±12	±7	±10	±10	±15
	เส้นผ่าน ศูนย์กลางความ โค้งด้านนอก	±7	±10	±15	±20	±7	±10	±15	±20	±7	±10	±15	±20



รูปที่ 5.38 การวัดขนาด

5.5.3 การตรวจสอบ

สิ่งที่โรงงานควรตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพมีดังนี้

- 1) การตรวจสอบวัสดุ
- 2) การตรวจสอบรูปร่างภายนอก
- 3) การตรวจสอบขนาดความกว้าง
- 4) การตรวจสอบการทดลองติดตั้ง
- 5) การตรวจสอบพฤติกรรม
- 6) การตรวจสอบอื่นๆ ตามแต่ความจำเป็น

การทดสอบความแข็งแรงจะมีการทดสอบการตัด การตัดของจุดต่อ การทดสอบแรงหลัก การทดสอบ Grout hole การทดสอบเหล่านี้จะใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต เหล็กหล่อ วัสดุประกอบ ซึ่งพฤติกรรมไม่สามารถดูได้จากรูปร่างภายนอก ขนาดและความกว้าง รวมทั้งยังจำเป็นสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่มีรูปร่างพิเศษ

บทที่ 6

การขุดเจาะและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

6.1 ข้อกำหนดทั่วไป (General Requirement)

6.1.1 การวางแผนงานก่อสร้าง (Construction Planning)

ก่อนที่จะเริ่มงานก่อสร้าง ควรทำความเข้าใจถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขต และตารางเวลาทำงานให้ละเอียดถี่ถ้วนเสียก่อน และควรมีเอกสารประกอบงานออกแบบ รายละเอียดพิเศษที่สอดคล้องกับสภาพทางธรณีวิทยาที่ได้ทำการสำรวจมา รวมถึงปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น ความปลอดภัย และวิธีการก่อสร้าง

6.2 การสำรวจสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน

6.2.1 วัตถุประสงค์ของการสำรวจ

การสำรวจสำหรับวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling) นั้นต้องมีความปลอดภัย รวดเร็ว และประหยัด

การสำรวจประกอบด้วย

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

การสำรวจจะถูกดำเนินการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐาน อันได้แก่ การวางแผน การออกแบบ การก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ผลของการสำรวจจะใช้สำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์ ให้อยู่ในแนวทางที่เหมาะสม และการเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling method) ให้เหมาะสมกับเส้นทางของงานเหล่านั้น มาตรการการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ขนาดของโครงการและรายละเอียดของโครงการ และข้อมูลสำหรับการบำรุงรักษาเกี่ยวกับอุโมงค์หลังจากการเสร็จสิ้นของโครงการ

6.2.2 การสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง

การสำรวจสภาพสถานที่ตั้งถูกกำหนดตามสิ่งต่างๆดังนี้

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

การสำรวจสภาพสถานที่ตั้ง จะต้องครอบคลุมตามหัวข้อที่ได้ทำรายการไว้ข้างต้น การสำรวจสภาพสถานที่ตั้งโดยหลักๆจะถูกดำเนินการสำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์และการวินิจฉัยถึงความเหมาะสมของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling method) ขนาดของอุโมงค์และรายละเอียดต่างๆ ข้อมูลที่ได้รับมาจะใช้เมื่อทำการก่อสร้างโครงการด้วยเช่นกัน

1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง

วิธีนี้เป็นการสำรวจสถานะการใช้ที่ดินของพื้นที่เมืองใหญ่ พื้นที่เกษตร พื้นที่ป่าไม้ แม่น้ำและทะเลตามเส้นทางอุโมงค์ที่ได้เสนอ ในพื้นที่เมืองจะต้องสำรวจเพื่อจะระบุถึงการใช้ที่ดินที่ได้กำหนดให้ (ที่อยู่อาศัย ทางการค้า การใช้ทางอุตสาหกรรม ฯลฯ) และระดับของการจัดให้เป็นเมืองใหญ่ การสำรวจสิทธิในด้านทรัพย์สินก็เพื่อจะวินิจฉัยว่าทรัพย์สินที่มีอยู่มีความเกี่ยวข้องเป็นเจ้าของในทางสาธารณะ หรือในทางส่วนตัวหรือไม่ เพื่อจะตรวจสอบการเรียกร้องสิทธิในทรัพย์สิน และข้อจำกัดเหนือและใต้ดินตามเส้นทางอุโมงค์

2. แผนการในอนาคต

ลักษณะนี้เป็นการตรวจสอบแผนการพัฒนาในอนาคตตามเส้นทางและขนาดของแผนรายการกำหนดและข้อจำกัดที่เกี่ยวกับแผนการพัฒนาแผนงานในอนาคต

3. การจัดจำแนกประเภทถนนและสภาวะการจราจร

ลักษณะนี้เป็นการระบุเฉพาะสำหรับการจัดจำแนกประเภทถนนและความสำคัญของพื้นถนน เพื่อศึกษาเกี่ยวกับงานชุดในถนน ปริมาณการจราจรของถนนและอื่นๆ ลักษณะที่ตั้งของ Shaft สามารถกำหนดได้โดยการเคลื่อนย้ายดินที่ขุด และการลำเลียง/การปล่อยจากการลำเลียงของอุปกรณ์ และวัสดุในระหว่างการก่อสร้าง นอกจากการใช้ที่ได้วางแผนไว้แล้วนั้นก็ควรพิจารณาล่วงหน้าเกี่ยวกับผลกระทบที่มีผลต่อเสถียรภาพของพื้นดินที่เกิดจากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield tunnel) หลังจากการก่อสร้าง

4. ความยุ่งยากในเรื่องการใช้ที่ดินสำหรับการก่อสร้าง

งานของการก่อสร้างรอบๆที่ตั้ง Shaft เป็นแผนงานเฉพาะที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งสำหรับโครงการจากขั้นตอนการเลือกเส้นทางไปจนถึงการเสร็จสิ้นโครงการ ดังนั้นมาตรการที่จำเป็นทั้งหมดจะต้องดำเนินการสำหรับที่ดินที่ใช้ในการสร้าง นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นด้วยเช่นกันที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพแก่สถานที่และเส้นทางของการลำเลียงสำหรับดินที่ขุดออก

5. สภาพแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล

นับว่าเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องสำรวจภาคตัดขวางของแม่น้ำ โครงสร้างของริมฝั่ง คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่อยู่ริมฝั่ง และแผนในอนาคตสำหรับแม่น้ำ และการปรับปรุงสะพานในกรณีอุโมงค์ที่ข้ามหรือไปใกล้แม่น้ำ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องรักษาให้มีความลึกที่เพียงพอและระยะทางจากทางที่แม่น้ำไหลผ่านและสะพาน โดยวิธีการแบบเดียวกันนี้จะประยุกต์ใช้กับอุโมงค์ที่ดำเนินการใกล้หรืออยู่ภายใต้ทะเลสาบ และทะเล

6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และน้ำเสียสำหรับการสร้าง

จำเป็นจะต้องตรวจสอบระบบความจุ แรงดัน และความสามารถด้านการจ่ายไฟฟ้าใกล้สถานที่ที่ได้ทำการทำการก่อสร้าง ถ้าหากจำเป็นจะต้องกำหนดให้มีการเตรียมระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นกำลังสำรอง ส่วนในด้านน้ำประปาจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่ามีน้ำให้กับเมืองหรือไม่ รวมถึงจุดของการต่อ ขนาดของท่อ และปริมาณน้ำที่มีอยู่ ส่วนทางด้านที่เกี่ยวกับระบบน้ำเสียจำเป็นที่จะต้องยืนยัน ตำแหน่งที่ตั้งการปล่อยน้ำเสียออก ปริมาณน้ำเสียที่สามารถปล่อยออกได้ และเกณฑ์คุณภาพน้ำที่จะปล่อยออก

6.2.3 การสำรวจสิ่งที่เป็นอุปสรรค

การสำรวจที่มีอุปสรรคจะต้องดำเนินการเพื่อให้ทราบชัดเกี่ยวกับรายการดังต่อไปนี้

1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่เหนือดินและใต้ดิน
2. ปัจจัยที่เป็นสาธารณูปการที่อยู่ใต้ดิน
3. บ่อที่ยังใช้ได้ และบ่อที่ถูกทิ้งร้าง
4. สถานที่ตั้งของสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้ และงานชั่วคราว
5. อื่นๆ

ก่อนการเริ่มต้นการเลือกเส้นทาง จะต้องทำการสำรวจอย่างระมัดระวัง เพื่อจะกำหนดอย่างชัดเจนเกี่ยวกับรายการที่อาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอุโมงค์ภายในขอบเขตของอิทธิพลตามเส้นทางของอุโมงค์

การสำรวจต้องคำนึงถึงความปลอดภัย 2 อย่าง คือ การทำให้สิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้อุโมงค์นั้นมั่นคงปลอดภัย และความปลอดภัยของการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ ผลการสำรวจจะเป็นหลักพื้นฐานสำหรับการประเมินค่าเกี่ยวกับการทำให้เสียรูปของสิ่งปลูกสร้าง การทำให้แห้งและการทำให้เกิดมลภาวะของบ่อ การทะลักออกของอากาศที่อัดและน้ำเลน อากาศที่รั่วไหลออกมาและน้ำเลน ความดันของดินที่มีต่ออุโมงค์ การรับภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์ และสภาวะการรับภาระแรงอื่นๆ

1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนและอยู่ใต้ดิน

เกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน ประเภทสิ่งปลูกสร้างและรูปแบบของฐานราก การมีอยู่ของห้องใต้ดินและความลึกของฐานรากแบบปกติ และแบบฝังตื้นจะถูกทำการสำรวจ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญด้วยเช่นกันที่จะสำรวจว่ามีการใช้สิ่งปลูกสร้างเหล่านี้ได้ผลอย่างไร และในการที่จะทำการสำรวจต้องติดตั้งด้วยเครื่องมือที่มีความไว

2. สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดิน

สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดินที่ทำการสำรวจตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ สถานที่สำหรับ Shaft จะต้องมีการสำรวจที่ละเอียดถี่ถ้วน ในจุดแรกเริ่มของการสำรวจเป็นการขุดสำหรับการสำรวจ และการคาดการณ์เกี่ยวกับแผ่นดินไหวจะจำเป็นสำหรับกรณีที่ต้องการยืนยันถึงตำแหน่งที่ตั้งขนาด ความลึกและสภาวะ

3. บ่อที่ยังใช้และบ่อที่ทิ้งร้าง

มีความจำเป็นที่จะหาตำแหน่งที่ตั้งของบ่อที่ยังใช้อยู่และบ่อที่ทิ้งร้างด้วยเช่นกันในการที่จะประเมินความเสี่ยงของการทะลักออกและการรวมของน้ำเลนและอากาศที่ขาดออกซิเจนในระหว่างปฏิบัติการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ การขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะแบบใช้อากาศจะต้องมีการสำรวจที่กว้างขวางมากกว่าวิธีการอื่นๆ บ่อที่ถูกทิ้งร้างจะต้องได้รับการจำแนกออกมาเกี่ยวกับสถานที่ตั้งที่วางอยู่บนพื้นฐานของค่ากล่าวของเจ้าของบ่อ

4. สถานที่ตั้งสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้และงานแบบชั่วคราว

มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรวบรวมข้อมูลข่าวสาร โดยตรงจากเจ้าของที่ดินเกี่ยวกับเงื่อนไขของสถานที่ตั้งเหล่านี้ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ของการขุดโดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ เมื่อเผชิญกับอุปสรรคนั้น อุปสรรคจะต้องถูกเคลื่อนย้ายไปหรือนำขึ้นมาจากพื้นดิน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสำรวจสิ่งที่เคลื่อนย้ายออกมาจากสถานที่ทำการขุดเจาะ โดยมีเงื่อนไขและสถานะของการถมดินกลับและความปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดิน

5. อื่นๆ

ถ้าหากสิ่งที่เป็นสาธารณูปโภค หรือสิ่งปลูกสร้างใต้ดินได้รับการวางแผนที่จะสร้างในอนาคตที่สถานที่ตั้ง ตำแหน่งที่ตั้งของสิ่งทั้งหลายนี้ ขนาดและความลึก จำเป็นจะต้องได้รับการตรวจสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความขัดแย้งต่อกัน ในพื้นที่ที่มีระเบิดซึ่งยังไม่ระเบิดและยังคงสามารถพบได้ จำเป็นที่จะต้องเพิ่มความปลอดภัยของโครงการ โดยการเก็บข้อมูลข้อมูลสารเกี่ยวกับตำแหน่งที่อยู่ที่เป็นไปได้ของพวกระเบิดจากผู้อยู่อาศัยในท้องถิ่นและการสำรวจทางธรณีวิทยาในตำแหน่งแรกเริ่ม

6.2.4 การสำรวจเพื่อการจัดทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจสภาพดิน

การสำรวจเพื่อการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินมีการดำเนินการดังต่อไปนี้

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

การสำรวจทางธรณีวิทยา การเจาะและวิธีการอื่นๆ ของการสำรวจจะต้องดำเนินการอย่างเหมาะสม วิศวกรที่รับผิดชอบที่ควบคุมจะต้องกำหนดจุดที่เหมาะสมและรายการสำรวจต่างๆ

สภาพทางภูมิประเทศและธรณีวิทยามีผลต่อการออกแบบและการก่อสร้างในโครงการ
สร้างอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการสำรวจจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง

รายการและลำดับของการสำรวจภูมิประเทศและชั้นดินได้สรุปในตารางที่ 6.1 แล้วสิ่งที่
เพิ่มหรือลดลงของการสำรวจเป็นผลร่วมกันของโครงการที่มีลักษณะเฉพาะ

การสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ และการสำรวจทางธรณีวิทยา
จะเป็นการสำรวจเพื่อที่จะเข้าใจสภาพทั่วไปของชั้นหินตามเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์

การมีข้อมูลทั้งหมดของการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นระดับชั้นดินที่สามารถจำแนกโดยง่าย
หรือชั้นดินซึ่งยากที่จะจำแนกได้ หรือจะเป็นสถานะปัญหาของดินที่คงอยู่หรือไม่คงอยู่ และอื่นๆอีก
เป็นความรับผิดชอบของวิศวกรผู้ควบคุมที่จะตัดสินใจในการสำรวจชั้นพื้นฐานของการกำหนดขอบเขต
และเรื่องอื่นๆซึ่งเป็นผลมาจากการสำรวจเบื้องต้น

ตารางที่ 6.1รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	- ความเข้าใจสภาพทั่วไปของการทำแผนที่และการบอกลักษณะภูมิประเทศดินและโครงสร้างชั้นดิน - การทำนายเกี่ยวกับดินที่เป็นปัญหาและพื้นฐานสำหรับการสำรวจสิ่งที่ตามมา	- ความเข้าใจชั้นดินและสภาพดินตามเส้นทางทั้งหมด - ความเข้าใจคุณสมบัติเทคนิคทางธรณีวิทยา - การเตรียมในเรื่องโครงสร้างทางธรณีวิทยา	- การสำรวจดินเพื่อเป็นส่วนเสริม - การสำรวจดินในรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบที่สำคัญซึ่งสำหรับการออกแบบและการสร้าง - ข้อมูลข่าวสารการออกแบบสำหรับสถานะพิเศษ เช่น แผ่นดินไหว
วิธีการของการสำรวจ	- การเก็บและการรวบรวมข้อมูลข่าวสารที่มีอยู่ - การเก็บรวบรวมและประมวลโครงการอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในอดีต	- การเจาะ(Borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test) - เก็บตัวอย่างดิน	- การเจาะ(Borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test) เก็บตัวอย่างดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure)

ตารางที่ 6.1 (ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับ
โครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- การสำรวจเอกสาร - สังเกตสภาพทั่วไปในสถานที่ก่อสร้าง	- การสำรวจระดับน้ำใต้ดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure) - การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการทดลอง (การทดสอบทางกายภาพและทางกลศาสตร์)	- 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 และ ความดันน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - การกระจายตัวของเม็ดดิน	- ค่า N_c (Standard Penetration Test) - ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ - ระดับน้ำใต้ดินและความดันของน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

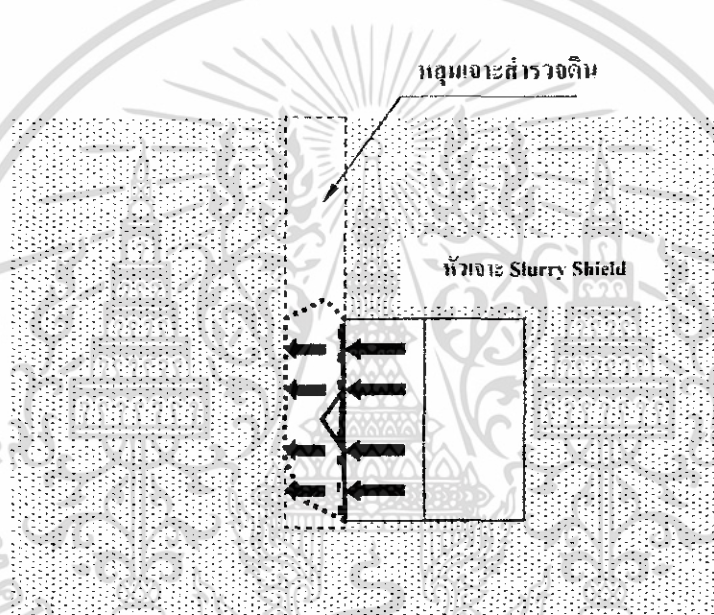
ตารางที่ 6.1 (ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับ
โครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- รายงานการสำรวจดินที่มีอยู่ - รายงานการก่อสร้างเกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่ได้สร้างก่อนในบริเวณใกล้เคียง - บ่อและน้ำใต้ดิน - การสังเกตในเรื่องการทำแผนที่ภูมิประเทศสภาพดิน และพื้นที่โดยรอบ - การทรุดตัวของดิน	- ปริมาณความชื้นในดิน - ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน - หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะ ในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการบดตัวคายน้ำของดิน	- ปริมาณความชื้นในดิน - ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน - หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะ ในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการบดตัวคายน้ำของดิน - ความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน - ขนาดและรัศมีของหินกรวด และก้อนหินใหญ่ - โมดูลัส Subgrade Reaction - ความเร็วของคลื่นต้นสะเทือน - แนวทางการออกแบบเพื่อต้านแผ่นดินไหว

การสำรวจชั้นพื้นฐาน ควรเริ่มด้วยการเจาะสำรวจดิน พร้อมการทดสอบ Standard Penetration Test โดยที่จำนวน ระยะห่าง และความลึกของหลุมเจาะจะถูกกำหนดโดยสภาพภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจชั้นดินในบริเวณพื้นที่โดยรอบ โดยทั่วไประยะห่างของหลุมเจาะจะประมาณ 200 ถึง 500 เมตร (JSCE-Japanese Standard) อัตราส่วนที่ใช้รูปตัดตามยาวของชั้นดินธรรมดา คือ 1 : 1,000 ถึง 1 : 5,000 ตามแนวราบและ 1 : 200

ถึง 1 : 500 ตามแนวดิ่ง หรือตามความสะดวกของการใช้งาน โครงร่างทางธรณีวิทยาจะมีลักษณะของชั้นดิน และค่า N ของชั้นดินแต่ละชั้น ซึ่งแสดงถึงปัญหาทางธรณีวิทยาที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ

การสำรวจชั้นรายละเอียดจะดำเนินการในตำแหน่งที่ตั้งที่มีปัญหา ซึ่งวางอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สำรวจมา หลุมที่เจาะสำหรับการสำรวจอาจจะเป็นสาเหตุของการไหลเข้ามาของน้ำและอาจก่อปัญหาขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะประเภทที่ใช้ Slurry shield และ Compressed air shield เนื่องจากแรงดันและ Slurry อาจรั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จึงจำเป็นต้องเอาใจใส่เป็นพิเศษกับตำแหน่งที่อยู่ของหลุมและการถมดินกลับ



รูปที่ 6.1 แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ขณะเจาะอุโมงค์

การสำรวจชั้นรายละเอียดจะทำให้เสริมการสำรวจเบื้องต้นและพื้นฐาน โดยจะดำเนินการเพื่อเพิ่มจุดสำรวจในตำแหน่งที่อาจเป็นปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบและก่อสร้าง และเพื่อให้ได้ข้อมูลการออกแบบในกรณีเฉพาะ เช่น แผ่นดินไหว การสำรวจประเภทนี้อาจจะประกอบด้วย การวัดขนาดก้อนกรวดที่ใหญ่ที่สุด การทดสอบแรงดันดินด้วย Pressuremeter การทำ PS-logging และอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 โดยการให้หลุมเจาะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น

1. ลักษณะภูมิประเทศ

การสำรวจควรเริ่มต้นด้วยการสังเกตและเข้าใจลักษณะภูมิประเทศตามเส้นแนวอุโมงค์ เนื่องจากว่า มันจะสะท้อนถึงสภาพดินใต้พื้นดิน เช่น ถ้าหากสถานที่ที่จะทำการสำรวจอยู่บนภูเขาหรือที่ราบสูงก็จะคาดการณ์ได้ว่าไม่มีชั้นที่ดินอ่อนอยู่ข้างใต้ และควรจะสังเกตว่าอุโมงค์อาจจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของความดันดินที่ไม่สมมาตร ถ้าหากเส้นทางไปตามแนวหรือข้ามขอบแนวของที่ต่ำหรือที่ราบสูง

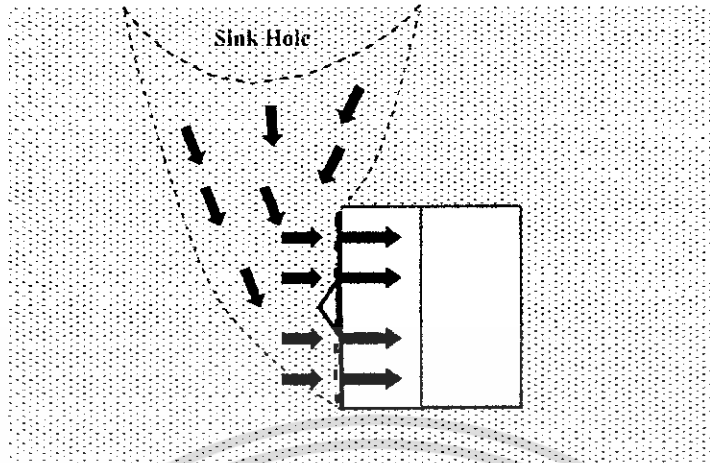
2. ลักษณะทางธรณีวิทยา

เป็นความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงลักษณะทางธรณีวิทยาใต้พื้นดิน ในพื้นที่ที่ครอบคลุมแนวอุโมงค์ที่กำลังพิจารณาทุกเส้นทาง โดยการเก็บข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับสภาพของดิน โดยการทำการตรวจสอบสถานที่ร่วมไปกับการสำรวจเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลข่าวสารที่เป็นประโยชน์ยังสามารถหาได้จาก วารสารทางวิชาการและหน่วยงานราชการ เช่น กรมทรัพยากรธรณีและกรมชลประทาน เป็นต้น

3. สภาพดิน

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ Slurry shield ที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะ จะต้องทำการสำรวจขนาด รูปร่าง ความแข็ง และเปอร์เซ็นต์ของกรวด ขนาดคละหรือค่าสัมประสิทธิ์ Coefficient of Uniformity (C_u) ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังต่อไปนี้

- ดินเหนียวเกาะติด Cutter และอุดตันที่ Cutter chambers ทำให้หัวเจาะไม่สามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้
- การพังทลายของหน้าดิน โดยเฉพาะที่เป็นทรายหลวมที่ส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการทรุดตัวบนผิวดินเป็นหลุมขนาดใหญ่ (Sink hole) ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถก่อดำได้
- ดินที่มีลักษณะเป็นกรวดอาจก่อให้เกิดการสึกกร่อนและทำความเสียหายแก่ Cutter และอุดตันท่อลำเลียงดินออก



รูปที่ 6.2 แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิด Sink Hole

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield, EPB) จำเป็นที่ต้องตรวจสอบรูปร่างและขนาดใหญ่สุดของกรวด ความแข็งแรง ขนาดกะของดิน และค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ เพื่อจะออกแบบวัสดุรูปร่างของใบตัดและขนาดของช่องเปิดส่วนหน้าหัวเจาะ สายพานลำเลียงและส่วนประกอบอื่นๆ ให้มีความเหมาะสม

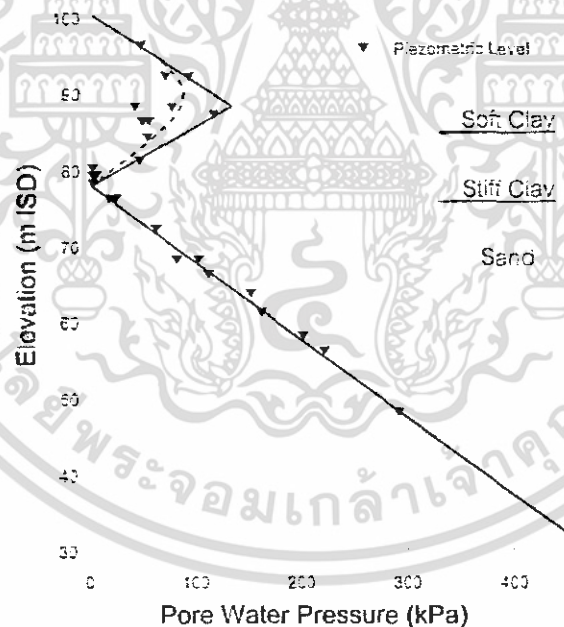
ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดย Pneumatic หรือ Compressed Air ในชั้นทรายหลวมได้ระดับน้ำใต้ดิน ทรายอาจจะพังทลายและน้ำจะทะลักเข้ามาในส่วนหน้าของหัว ถ้าหากความดันต่ำเกินไป ถ้าหากความดันสูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทรายคุด (Quick Sand) ดังนั้นจึงยากที่จะรักษาสสมดุลระหว่างความดันภายในและภายนอกซึ่งเป็นผลมาจากความดันดิน และความดันน้ำที่ผสมผสานในดินประเภทนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระยะจากผิวดินถึงอุโมงค์มีค่าน้อยยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายบนผิวดิน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบขนาดกะ อัตราส่วนช่องว่าง ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำและค่า Stability number (N) ของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ

หากต้องการขุดเจาะอุโมงค์ในดินฝุ่น (Silt) หรือดินเหนียวอ่อนมาก (Very soft clay) ซึ่งมีค่า N ประมาณ 2 หรือน้อยกว่า จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed sample) เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน หน่วยแรงอัดของดิน (Unconfined compression strength) ค่าการเสียดรูปและค่าการยุบตัวคายน้ำของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ และการทรุดตัวของดินอย่างมีประสิทธิภาพ

4. น้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินมักจะทำการวัดในระหว่างการทำการเจาะสำรวจดิน อย่างไรก็ตามควรจะสังเกตว่า ความดันของน้ำในชั้นขี้น้ำ เช่น ชั้นทรายและชั้นกรวด ที่อยู่ใต้ชั้นทับน้ำ เช่น ชั้นดินเหนียว ดังกรณีฐานดินกรุงเทพ ไม่ได้มีแรงดันน้ำสถิตยระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 6.3 จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดความดันน้ำ ในแต่ละชั้นดินโดยละเอียด

ระดับน้ำใต้ดินและระดับความดันน้ำในดินอาจจะผันผวน เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยเฉพาะในฤดูฝน จึงมีความสำคัญที่จะบันทึกสภาวะขณะทำการวัดทุกครั้ง ถ้าหากพบความดันน้ำสูงในชั้นขี้น้ำจะต้องวัดค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ ทิศทางและความเร็วของน้ำใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ สามารถคาดคะเนได้จากขนาดผลของดิน แต่การทดสอบในที่(In-situ test) เช่น Well piezometer test ยังคงมีความสำคัญเช่นเดียวกันที่จะวัดสสารในน้ำใต้ดิน เช่น ปริมาณเกลือ



รูปที่ 6.3 ระดับความดันน้ำในดินที่ตรวจวัดในโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

5. สภาพอากาศไร้ออกซิเจน ก๊าซอันตรายและก๊าซไวไฟ

ถ้าหากชั้นที่เป็นทราย หรือที่เป็นกรวดอยู่มีระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่าเนื่องมาจากการสูบน้ำจากบ่อมากจนเกินไป การใช้บ่อลึกและอื่นๆ ภายใต้ชั้นที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ ช่องว่างในชั้นที่สามารถแทรกซึมได้อาจจะบรรจุไปด้วยอากาศที่ขาดออกซิเจนหรือก๊าซที่เป็นอันตราย ก๊าซมีเทนที่รั่วสามารถก่อให้เกิดการระเบิด การตรวจปริมาณก๊าซไม่ใช่เฉพาะสำหรับการวางแผนงานเท่านั้น แต่จะทำได้เพื่อความปลอดภัยด้วย ก๊าซที่เป็นอันตรายอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ มาตรการเพื่อป้องกันการผุกร่อนของอุโมงค์ และส่วนประกอบที่เป็นเหล็กจะมีความจำเป็น ถ้าหากตรวจพบก๊าซอันตรายเหล่านี้ จะต้องคำนึงถึงมาตรการการระบายอากาศที่พอเพียง และจำเป็นต้องมีมาตรการป้องกันการระเบิดหรือติดไฟ

6.2.5 การสำรวจเพื่อหามาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หัวข้อดังต่อไปนี้ จะได้รับการสำรวจเมื่อจำเป็นที่จะต้องป้องกันสิ่งแวดล้อม ระหว่างทำการก่อสร้างและหลังจากการสร้างอุโมงค์

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

ตามวิธีการของการป้องกันสิ่งแวดล้อม หัวข้อที่ได้ทำเป็นระบบการป้องกัน จะต้องได้รับการสำรวจก่อนและระหว่างการสร้าง และผลที่ได้ควรจะนำมาใช้สำหรับการออกแบบและการจัดการการก่อสร้างบางหัวข้อของหัวข้อเหล่านี้ควรจะได้รับการสำรวจหลังจากการก่อสร้างตามที่จำเป็น ด้วยเช่นกันในการตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม

1. เสียงและการสั่นสะเทือน

ควรทำการประเมินผลกระทบของเสียงและการสั่นสะเทือน จากการก่อสร้างทั้งหมด ก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อหาวิธีป้องกันโดยเฉพาะพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบมากเป็นพิเศษ เช่น โรงพยาบาล และโรงเรียน

2. การเคลื่อนตัวของพื้นดิน

อาคาร และสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์จะต้องได้รับการสำรวจ ก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อตรวจสอบสภาพอาคารทั่วไป และจัดประเภทของอาคารตามลำดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ เช่นอาคารตึกแถวเก่า 3 ชั้นซึ่งมีเสาเข็มสั้น อาจจะถูกจัดอยู่ในประเภทที่ต้องระมัดระวัง และต้องติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวทั้งก่อนการก่อสร้างระหว่างการก่อสร้างและหลังจากการก่อสร้างเพื่อจะหาจำนวนระดับของการยกกระด้างขึ้นของพื้นดิน หรือ การจมลงของพื้นดิน

ด้านการทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์เป็นปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินและบนดินให้น้อยที่สุด ดังนั้นการประเมินค่าการทรุดตัวของดินก่อนการก่อสร้างจึงมีความจำเป็นเพื่อหาแนวอิทธิพล (Influenced zone) และระบุตำแหน่งที่อาจเป็นอันตรายจากการก่อสร้าง อีกทั้งยังใช้เป็นบรรทัดฐานในการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อการรักษาระดับการทรุดตัวให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหรืออยู่ในค่าที่ประมาณไว้ ทั้งนี้เพื่อควบคุมผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์

3. ระดับน้ำใต้ดิน

ควรทำการสำรวจระดับน้ำใต้ดินและคุณภาพของบ่อน้ำในแนวอิทธิพล เนื่องจากว่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน ที่เกิดจากการก่อสร้างอาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ และชีวิตของผู้อยู่อาศัยหรืออุตสาหกรรมในพื้นที่การก่อสร้าง ควรบันทึกเวลาของการสำรวจระดับน้ำใต้ดิน เพราะวาระดับน้ำใต้ดินผันผวน ตามฤดูกาล

4. อากาศที่ขาดออกซิเจน และก๊าซอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน

ออกซิเจนในที่ว่างจะถูกทำให้หมดสิ้นไป โดยการออกซิเดชันของ ปริมาณแร่เหล็ก และอินทรีย์วัตถุในดิน และอากาศที่ขาดออกซิเจนซึ่งเป็นผลตามมา อาจจะถูกผลักดันเข้าไปสู่บ่อไกล่เคียง และชั้นใต้ดินโดยการประยุกต์ของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบอัดอากาศ (Pneumatic shield) ในชั้นทราย หรือกรวดที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าได้ชั้นดินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้

ดังนั้น ตำแหน่งที่ตั้งของบ่อ ระดับน้ำของบ่อและรากฐานของโครงสร้างที่จะได้รับผลกระทบ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้าง และการรั่วของอากาศที่ขาดออกซิเจนจะได้รับการตรวจสอบระหว่างการก่อสร้าง การมีอยู่ของก๊าซที่เป็นอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน และอื่นๆ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้างโดยการเจาะ ถ้าหากตรวจพบก็จะวัดและตรวจสอบความเข้มข้นของมันก่อนและระหว่างการก่อสร้าง

5. กากหรือตะกอนสารเคมี

คุณภาพของน้ำในบ่อและแหล่งน้ำอื่น เช่น คลองหรือแม่น้ำ อาจได้รับผลกระทบจากการรั่วซึมของน้ำปูน (Grout material) หรือสารละลายเบนโทไนท์ จากการทำงานของหัวเจาะ ดังนั้น จะต้องสำรวจและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระหว่างการก่อสร้างเป็นระยะ

6. สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง

การลดสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างและการรีไซเคิลของเสียจากการก่อสร้าง จะได้รับการส่งเสริมสำหรับการดำเนินงานแบบราบเรียบ และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเมื่อโครงการขุดอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ อยู่ภายใต้การวางแผนและการออกแบบ และอยู่ระหว่างการก่อสร้าง จะต้องจัดให้มีตำแหน่งที่ตั้งเส้นทางของการลำเลียงของเสีย และสถานที่การกำจัดขั้นสุดท้าย

สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างที่ได้จากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ (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 เนื่องจากการประเมินสิ่งแวดล้อมอาจจะกำหนดสำหรับวัตถุประสงค์ทางการรักษาสังแวดล้อม

6.2.6 การควบคุมงานสำรวจและการวางแผนสำหรับงานอุโมงค์ใต้ดิน

ลักษณะทางเรขาคณิตของอุโมงค์ใต้ดิน (Tunnel geometry)

ก) ความสัมพันธ์ของแนวศูนย์กลางเส้นทางกับแนวศูนย์กลางอุโมงค์

สำหรับระบบขนส่งสาธารณะนั้น โดยทั่วไปแล้ว แนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ จะไม่เป็นแนวเดียวกัน เนื่องจากเงื่อนไขบังคับในการขุดเจาะ แนวศูนย์กลางของเส้นทาง เป็นตัวควบคุมพื้นฐานในระหว่างการวางผังของระบบ อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างอุโมงค์ได้คินั้น ต้องมีหลักที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน ซึ่งบุคลากรภาคสนามของผู้รับเหมาและวิศวกร มักจะใช้ แนวศูนย์กลางของอุโมงค์ เพื่อเป็นหลักในการควบคุมอุโมงค์ มากกว่าเลือกใช้แนวศูนย์กลางของเส้นทาง

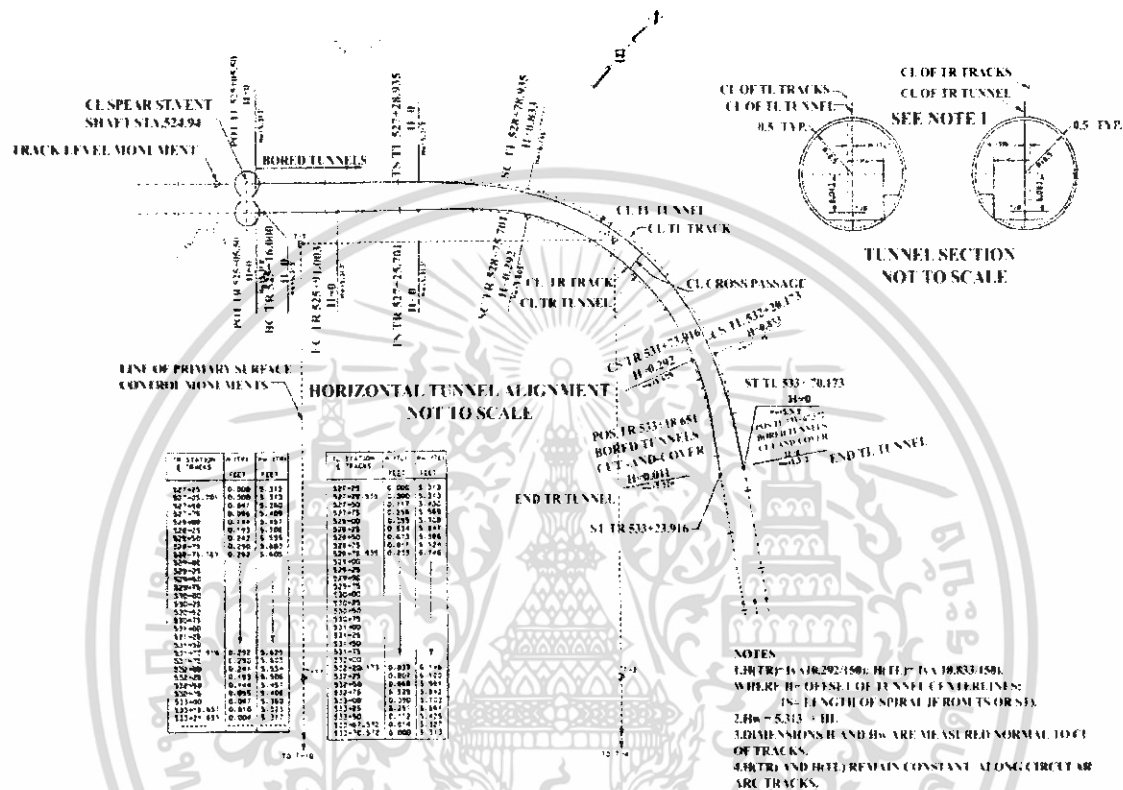
ระยะตั้งฉากตามแนวราบและแนวตั้ง จากแนวศูนย์กลางของเส้นทาง ถึงแนวศูนย์กลางของอุโมงค์แปรผันกับการยกกระดี่ขึ้นของเส้นทาง แนวศูนย์กลางอุโมงค์ตามแนวโค้งได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน(ดังรูปที่ 6.4) ดังนั้นแนวศูนย์กลางอุโมงค์จึงควรพัฒนาให้ประกอบด้วย เส้นสัมผัสรอบวง, เส้นรอบวง และรูปตัด และการประมาณแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ตามทฤษฎีต้องอยู่ภายใต้เกณฑ์ความเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ (0.25 นิ้ว) แนวศูนย์กลางนี้ควรรวมเข้าไว้ในแบบก่อสร้างของหนังสือสัญญาก่อสร้างอุโมงค์ได้คินและการควบคุมอุโมงค์ทั้งหมดก็ควรตั้งอยู่บนพื้นฐานนี้เช่นกัน

รายการระบุตำแหน่งโคออดิเนตของจุด, แรงเบกทานรอบวงของอุโมงค์, ค่าระดับของจุด และความลาดชันที่ระยะห่างกัน 5 ฟุต ตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์ ก็ควรได้ระบุไว้ในเอกสารสัญญาการก่อสร้าง โดยเหตุที่การตั้งสถานีตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์และแนวศูนย์กลางของเส้นทางนั้นแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของรัศมีของแนวโค้ง 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 ดำเนินไปตามระยะทางทั้งหมดซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ก็รวมหลายๆโครงการก่อสร้างเข้าไว้ด้วยกัน

ถ้าระบบขนส่งสาธารณะมีจุดศูนย์กลางของระบบ ประกอบด้วยเส้นทางหลายสาขา ในทิศทางที่ต่างกันั้น ก็ควรกำหนดจุดศูนย์กลางนี้ให้เป็นสถานี 0+00 การขยายสถานีออกไป ตามเขตพื้นที่รอบๆเมือง รวมทั้งการขยายเส้นทางในอนาคตนั้น ก็จะสามารถทำได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาของการลำดับการตั้งสถานี

ข) เส้นทางงานสำรวจ

เส้นทางของการก่อสร้างนั้น ดำเนินตามเส้นทางจากการสำรวจ เพื่อให้พนักงานก่อสร้างได้ทำการติดตั้งหัวขุดเจาะหรือเครื่องมือและอุปกรณ์ เส้นทางการทำงานอาจจะดำเนินไปตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์หรือตามจุดตำแหน่งของเลเซอร์ ส่วนใหญ่แล้วเส้นทางในการทำงานนั้น มีความถูกต้องได้ โดยการทำการรอบ (Traverse survey)



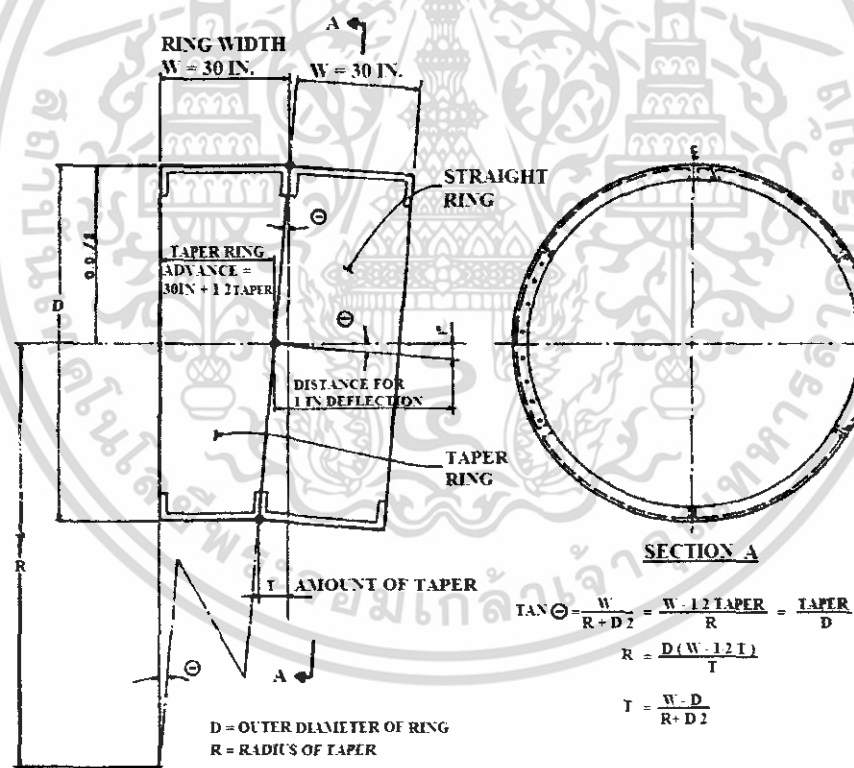
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแนวศูนย์กลางของเส้นทางและแนวศูนย์กลางอุโมงค์

ก) ผนังอุโมงค์และวงผนังอุโมงค์แบบเรียว (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 นั้นเข้าสักรัดต่อกัน รวมทั้งปีกยื่นของผนังอุโมงค์วงสุดท้ายที่ส่วนหางของเครื่องขุดเจาะด้วย เพื่อประกอบกันเป็นวงผนังอุโมงค์ขนาดมาตรฐาน กว้าง 2.5 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 17.5 ฟุต ผนังอุโมงค์ขนาดมาตรฐานนั้นออกแบบมาเพื่อต่อกันเป็นแนวโค้ง ให้ได้รัศมีมากกว่า 1,500 ฟุต ส่วนผนังอุโมงค์แบบพิเศษซึ่งมีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายนอก 18.0 ฟุต ได้รัศมีของแนวโค้งอุโมงค์น้อยกว่า 1,500 ฟุต ซึ่งตามแนวโค้งเหล่านี้จะต้องมีช่องว่างมากพอสำหรับส่วนที่ยื่นออกจากตัวรถไฟใต้ดิน

หากมีการก่อสร้างอุโมงค์ตามแนวตรงเป็นส่วนมาก ก็ควรจะทำการประกอบผนังอุโมงค์สำหรับแนวตรงนั้นตามปกติ ยกเว้นสำหรับวงอุโมงค์ที่มีการเบี่ยงเบนไปด้านใดด้านหนึ่ง อันเนื่องมาจากวงอุโมงค์ที่ผิดรูปทรงไป ดังนั้นสำหรับแนวอุโมงค์โค้ง ทั้งแนวโค้งและแนวราบ จึงต้องใช้วงผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper ring) ในการเปลี่ยนทิศทางของอุโมงค์ตามแนวโค้งและแนวราบ ความกว้างของวงผนังอุโมงค์นี้ได้แก่ 30, 29.25, 28.75 และ 28 นิ้ว (ดังรูปที่ 6.5 และตารางที่ 6.2) รัศมีแนวโค้งของอุโมงค์เป็นตัวกำหนดประเภทและจำนวนของ Taper ring ที่ต้องการ ตาราง 6.2 แสดงให้เห็นถึง Taper ring ของอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 17.5 ฟุต ซึ่งลดขนาดลง 0.75 นิ้ว ประกอบกันเป็นอุโมงค์ที่มีรัศมีแนวโค้ง 621.25 ฟุต แต่สำหรับแนวโค้งที่มีรัศมีมากกว่านี้ จะต้องใช้ Taper ring สลับกันกับวงอุโมงค์ของแนวตรง จึงจะได้รัศมีแนวโค้งที่ยาวขึ้น



รูปที่ 6.5 ลักษณะทางเรขาคณิตของ Taper ring

ตารางที่ 6.2 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 วงผนังอุโมงค์ตามแนวตรงและ Taper ring ที่ต้องการ ก่อนเริ่มการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งการประมาณจำนวนผนังอุโมงค์ทั้ง 2 ชนิดตามหลักทางทฤษฎีนั้น ตั้งอยู่บนพื้นฐานของค่ารัศมีและความยาวของแนวโค้ง ซึ่งสัมพันธ์กันรวมทั้งลักษณะทางเรขาคณิตของ Taper ring อีกด้วย จำนวนของ Taper ring ที่ต้องการจริง ๆ นั้น จะมากกว่าจำนวนที่ได้จากทางทฤษฎีเสมอ ทั้งนี้เนื่องจาก Taper ring จำนวนหนึ่งจะถูกใช้ไปกับการแก้ไข ในกรณีที่มีการขุดเจาะอุโมงค์เอนออกจากแนว เพื่อเพิ่มความใกล้เคียงในการหาจำนวนวงผนังอุโมงค์ที่ต้องการจริงๆ จึงได้ทำการเปรียบเทียบจำนวนผนังอุโมงค์ที่ได้ติดตั้งจริง กับจำนวน Taper ring ที่ได้จากทฤษฎี ที่ใช้สำหรับอุโมงค์ตามแนวโค้ง ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ข้อกำหนดของวงผนังอุโมงค์แนวตรงและ Taper ring ตามรัศมีแนวโค้งที่ต่างกัน

				Tunnel Lined with 2.5-ft Wide Steel Lining Rings.		
				17.5-ft Diameter		18.0-ft Diameter
				Straight Tunnel	1.785-ft Radius Tunnel	655-ft Radius Tunnel
Theoretical number Of rings required	Straight Rings		Line	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 ในตารางที่ 6.3 นั้นแสดงถึง ความยาวของอุโมงค์เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งคำนวณได้โดยการคูณจำนวนวงผนังอุโมงค์ด้วยความกว้างของผนัง ซึ่งความยาวนี้ต้องลดลงอีกเนื่องจากเศษที่ลดลงของ Taper ring ที่ได้ติดตั้ง

การติดตั้ง Taper ring นั้น โดยทั่วไปแล้วส่วนกว้างที่สุดของชิ้นส่วน จะวางลงตามแนวแกนราบ และคัง ดังนั้นการเปลี่ยนทิศทางจึงเกิดขึ้นตามแนวราบหรือแนวคังเท่านั้น อย่างไรก็ตาม มีบ่อยครั้งที่ส่วนกว้างที่สุดของ Taper ring ต้องวางอยู่ที่ตำแหน่งอื่น เนื่องจากความจำเป็นของการต่อเชื่อมวงอุโมงค์ เมื่อเป็นเช่นนี้ การเปลี่ยนทิศทางจึงเกิดขึ้นได้ทั้งระนาบแนวราบและแนวคังควบคู่กับ Taper clock ที่แสดงดังรูปที่ 6.6 ช่วยให้สะดวกต่อการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการ

เปลี่ยนทิศทางการแนวราบและแนวตั้ง ตามตำแหน่งของ Taper ring ที่แตกต่างกันไปในการใช้ Taper clock นั้น จะใช้แบบจำลองที่ติดไว้บนกระดานแข็ง และวงผนังภายในจะถูกแยกออกจากวงผนังภายนอก วงผนังภายนอกจะถูกหมุนให้ได้ตำแหน่งตามที่วงผนังอุโมงค์ได้ถูกติดตั้งไว้ ก่อนที่จะทำการพิจารณาถึง Taper ring

สำหรับ Taper ring ตามตำแหน่งที่แสดงดังรูปที่ 6.5 นั้น จะมีส่วนที่ยื่นออก 0.15 ฟุต และเอียงออกทางซ้าย 0.057 ฟุต ซึ่งจะต้องดึงอุโมงค์กลับไปทางขวาให้ได้ตามแนว หากไม่ต้องการให้อุโมงค์เกิดการยกระดับนั้น จะต้องทำการเวียนสลักขีด 2 รู ของ Taper ring ไปตามเข็มนาฬิกา จึงจะทำให้ส่วนที่ยื่นออกหายไป และเอียงออกทางซ้าย 0.06 ฟุต อย่างไรก็ตาม ดังที่กล่าวมานั้น เนื่องจากจุดเชื่อมต่อของวงผนังอุโมงค์ที่ใช้จัดเรียงแนวกับวงผนังอุโมงค์ที่ติดกันนั้น จะมีผลกระทบต่อผนังอุโมงค์ โดยทำให้กำลังการรับแรงลดน้อยลงได้



รูปที่ 6.6 Taper clock.

6.2.7 การสำรวจทางธรณีวิทยา

การสำรวจทางธรณีวิทยามีเนื้อหาดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการสำรวจ
2. ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการเจาะสำรวจชั้นดิน
3. ความร่วมมือและการฝึกอบรม
4. การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์
5. คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินสำหรับงานอุโมงค์
6. ขอบเขตของธรณีเทคนิคสำหรับโครงการ
7. เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเจาะ
8. การใช้เครื่องมือในการติดตาม

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการสำรวจ

มีความมุ่งหมายเพื่อที่จะหาขอบเขตและความหนาแน่นดินที่แน่นอน ในบริเวณหนึ่งๆ พร้อมวิเคราะห์หาคุณสมบัติของชั้นดินเหล่านั้นทั้งด้านกายภาพ และทางด้านวิศวกรรม โดยทั่วไปจะเจาะสำรวจทดสอบภาคสนามและเก็บตัวอย่างชั้นจากแต่ละความลึกเพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบค่าในห้องปฏิบัติการ วิศวกรผู้ออกแบบจะไม่สามารถออกแบบได้หากปราศจากการสำรวจพื้นที่และขาดข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินที่ถูกต้องและเพียงพอ

2. ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการวางแผนการเจาะสำรวจชั้นดิน

ก.) ผลกระทบจากสภาพชั้นดินที่แปรปรวน

- เมื่อมีการสำรวจชั้นดิน อาจพบว่าสภาพชั้นดินแปรปรวน หรือไม่ตรงกับที่ได้คาดไว้จากข้อมูลเดิมในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวางแผน กำหนดตำแหน่ง และจำนวนหลุมเจาะสำหรับการออกแบบแต่ละ โครงการ ควรสังเกตว่าการเจาะสำรวจนี้จะได้เพียงข้อมูลทางความลึก ณ ตำแหน่งหลุมเจาะเท่านั้น โดยจะไม่ทราบข้อมูลชั้นดินในบริเวณอื่นหรือชั้นดินระหว่างหลุมเจาะ นอกจากจะใช้หลักการประมาณ หรือคาดคะเน โดยวิธีการลากเส้นเชื่อมโยงลักษณะเฉลี่ยของชั้นดินแต่ละชั้นจากข้อมูลชั้นดินที่ทราบคุณสมบัติแล้วจากหลุมเจาะสำรวจจริงเท่านั้น กรณีที่พบว่าชั้นดินในพื้นที่โครงการมีความแปรปรวนมาก อาจจัดแยกขอบเขตพื้นที่ตามลักษณะหรือชนิดของชั้นดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงคล้ายคลึงกัน การแบ่งแยกขอบเขตพื้นที่นี้อาจจัดตามลักษณะทางกายภาพ หรือ

ลักษณะคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมหรือตามตัวแปรค่าเฉพาะของดิน (Soil parameter) หรือตามความอ่อน-แข็ง หรือตามความหลวม-แน่น ของแต่ละชั้นดินเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจำแนกประเภทดินให้ออกแบบได้อย่างเหมาะสมตามกลุ่มชั้นดินที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีผลกระทบจากปัจจัยสภาพชั้นดินเช่นนี้ จึงควรมีการตรวจสอบปรับแก้ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่ได้พบจากสถานที่จริงอย่างใกล้ชิดโดยวิศวกรผู้ชำนาญการอีกครั้ง

ข.)ผลกระทบจากคุณภาพการเก็บตัวอย่างชั้นดินและคุณภาพการวิเคราะห์ทดสอบ

- ผู้ออกแบบไม่ได้ปรับแก้ค่าทดสอบที่ได้โดยตรงจากสนาม หรือไม่เข้าใจถึงสภาพชั้นดินที่มีปัญหา เมื่อนำผลการแปลค่าการสำรวจหรือการทดสอบที่คลาดเคลื่อนมาใช้ โดยเฉพาะเมื่อมีผลกระทบของคุณภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง

ระหว่างการก่อสร้างหากพบว่า ข้อมูลหรือสภาพชั้นดินที่คลาดเคลื่อนหรือผิดแผกไปจากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจก่อนหน้านี้ จะต้องมีการประสานงาน หรือรายงานให้วิศวกรผู้ออกแบบได้แก้ไขแบบหรือแก้ไขรายการคำนวณ หรือแก้ไขการเจาะสำรวจตรวจสอบใหม่ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพชั้นดินที่ค้นพบว่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลใหม่ที่เป็นจริงตรงกับแนวคิดในการออกแบบ ตลอดจนการกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างตามลำดับของงานแต่ละชนิด ซึ่งผู้ออกแบบได้เคยวางแผน ระบุ และรับรู้เข้าใจในหลักการไว้ก่อนแล้ว

ค.)ผลกระทบจากข้อมูลที่ได้อาจการเฝ้าตรวจวัดระหว่างการก่อสร้าง

- เพื่อให้โครงสร้างมั่นคงไม่เกิดการเสียหายในภายหลัง วิศวกรผู้ออกแบบมักจะตั้งสมมติฐานหรือกำหนดแบบจำลอง โครงการให้อยู่ในกรณีวิกฤต หรือสมมุติให้มีปัจจัยเสี่ยงสูงซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ถ้าข้อมูลที่ได้รับระหว่างการออกแบบไม่ชัดเจนหรือไม่น่าเชื่อถือ สมมติฐานที่เกินจริงยอมทำให้ได้โครงสร้างขนาดใหญ่และไม่ประหยัด แต่ถ้าเจ้าของโครงการนั้นยอมให้มีการปรับปรุง หรือแก้ไขแบบได้บางส่วนเมื่อได้รับข้อมูลเพิ่มเติมจากการคอยเฝ้าติดตามสังเกตในระหว่างการก่อสร้าง ก็จะทำให้วิศวกรผู้ออกแบบเชื่อมั่นและสามารถคำนวณโครงสร้างบนพื้นฐานของความเป็นจริง ทำให้สามารถประหยัดค่าก่อสร้างของโครงการลงได้อีกมาก

การออกแบบโดยวิธีดังกล่าวข้างต้น เรียกว่า วิธีเฝ้าติดตามระหว่างการก่อสร้าง (Observation method) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานใต้ดินที่มีตัวแปรมากหรือมีความเสี่ยงสูง จำเป็นต้องมีการวัดค่าและเฝ้าติดตามพฤติกรรมของชั้นดินอย่างใกล้ชิดด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลที่รวดเร็วและสะดวกในทางปฏิบัติ เช่น การวัดแรงดันน้ำใต้ดิน

การบันทึกระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลง การวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อนำมาปรับแก้แบบ เช่น งานอุโมงค์ รถไฟฟ้าใต้ดิน หรืองานขุดเปิดดินในระดับลึก

ในการออกแบบวิศวกรรมปฐพีด้วยวิธีการเผด็จศึกตามระหว่างการก่อสร้าง เริ่มต้นด้วยการเจาะสำรวจดินเพื่อตรวจสอบชั้นดินอ่อน หรือชั้นดินที่มีการทรุดตัวสูง ซึ่งคาดว่าจะเกิดปัญหาในการก่อสร้าง จากนั้นจึงจัดให้มีมาตรการตรวจวัด เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลและนำข้อมูลจากบริเวณที่คาดว่าจะทำให้เกิดปัญหานั้น หรือข้อมูลจากบริเวณข้างเคียง มาคำนวณปรับแก้ระหว่างการก่อสร้างได้ทันที

3. ความร่วมมือและการฝึกอบรม

โครงการใต้ดินต่างๆ ที่มีแนวความคิดพื้นฐานสำหรับงานทางด้านธรณีวิทยาหรือธรณีเทคนิคจะต้องมีทิศทาง กฎระเบียบต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถทำได้โดยการสำรวจทางธรณีเทคนิค (Geotechnical investigation)

ธรณีเทคนิคมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องเข้าใจและต้องนำไปใช้ได้อย่างถูกต้อง สำหรับพนักงานทุกคน ไม่ใช่เฉพาะวิศวกรธรณีเทคนิค

วิศวกรธรณีเทคนิคหรือผู้ที่ชำนาญแต่ละคนจะต้องเข้าใจและมีความเอาใจใส่แก่ลูกทีมทุกคน เนื่องจากงานอุโมงค์ต้องการความเข้มงวดทางด้านธรณีเทคนิคอย่างมากจึงต้องมีการอบรม การฝึกหัดต่างๆ ที่ดี โดยวิศวกรธรณีเทคนิคและวิศวกรปฐพี และต้องมีการควบคุมการปฏิบัติและมีการประเมินผลด้วย

4. การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์

การจำแนกดินสำหรับงานอุโมงค์จะใช้ระบบ Unified soil classification (UC) การจำแนกชนิดของดินโดยระบบ UC นี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเนื้อดิน (Textural characteristics) สำหรับเม็ดดินหยาบที่มีฝุ่น (ดินเม็ดละเอียด) ปนอยู่น้อย จะไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ แต่สำหรับดินเม็ดละเอียดที่ขนาดเม็ดดินมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินจะประเมินคุณสมบัติด้วยการเขียนจุด (Plot) ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity index , PI) ในแผนภูมิพลาสติกซีดี ในการจำแนกชนิดของดินแบบ UC คุณสมบัติของดินต่อไปนี้จะเป็นพื้นฐานในการจำแนกชนิดของดิน

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

การจำแนกชนิดของดินแบบ UC เป็นวิธีการจำแนกชนิดของดินที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดสำหรับงานทั่วไป

ตารางที่ 6.4 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
			ML	Silt
	Silts and Clays (Liquid limit 50 or more)	Organic	OL	Organic Clay
		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

ในเมื่อดินหยาบ เช่น ทราบ ความแข็งแรง (Strength) ของมันมักจะถูกประมาณโดยการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน(Standard Penetration Test , SPT) ซึ่งจะถูกทำให้เป็นมาตรฐานโดยประมาณเป็น Relative density โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 140 ปอนด์ เป็นน้ำหนักทดสอบ และค่า Relative density จะถูกประเมินอย่างหยาบๆได้จากค่า “N” หรือ blows/ft ดังตารางที่ 6.5

ถ้ารับดินเม็ดละเอียดความแข็งแรง (Strength) ของดินจะอธิบายได้ในเทอมของ Consistency หรือ Undrained shear strength ดังตารางที่ 6.5

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

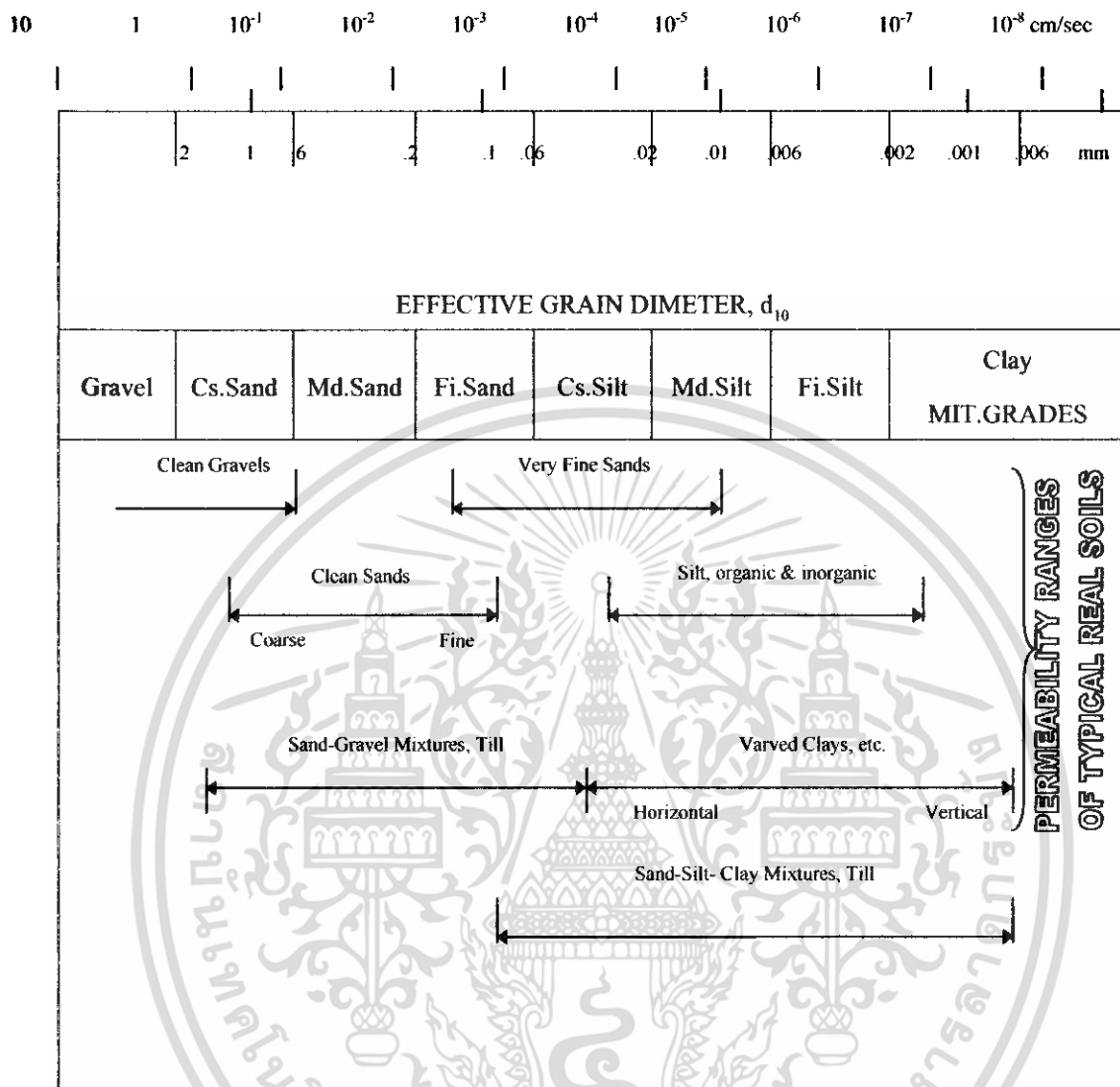
Relative Density	Standard Penetration Resistance (N-value) blows/ft	
very loose	0 to 4	Easily penetrated with ½-in. rebar pushed by hand
loose	4 to 10	Easily penetrated several inches with ½-in. rebar pushed by hand
medium dense	10 to 30	Easily to moderately penetrated with ½-in. rebar driven by 5-lb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

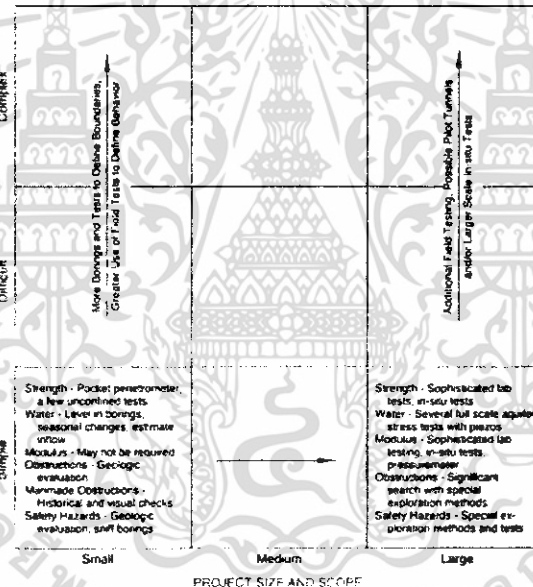
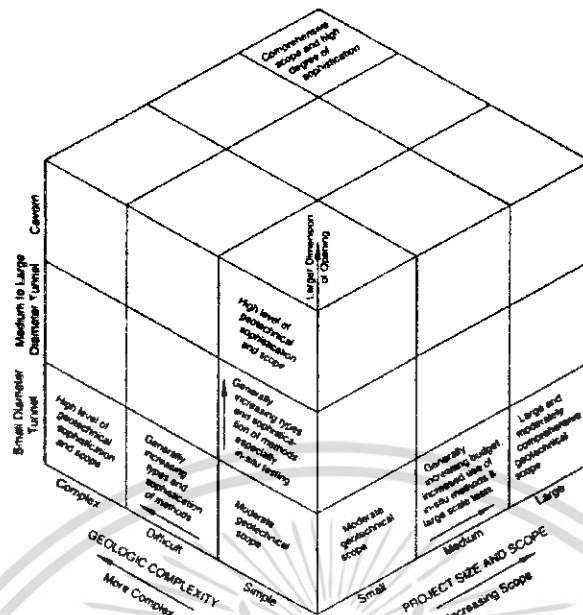
สำหรับค่าความซึมน้ำ (Permeability) บางทีอาจจะประมาณจากขนาดของเม็ดดิน หรือวัดในสนาม ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและค่าความซึมน้ำ

6. ขอบเขตของธรณีเทคนิคสำหรับ โครงการ

การสำรวจทางธรณีเทคนิคต้องมีการทำกิจกรรมต่างๆ ให้เหมาะสมกับโครงการ กล่าวคือถ้าโครงการมีขนาดเล็กและงานธรณีวิทยาไม่ซับซ้อนการสำรวจทางธรณีเทคนิคก็ไม่ต้องมีขนาดใหญ่มากนัก ซึ่งความสัมพันธ์ของธรณีวิทยาและองค์ประกอบของโครงการแสดงดังรูปที่ 6.8 ซึ่งมันช่วยให้เห็นภาพได้ว่าจะต้องมีการสำรวจทางธรณีเทคนิคมากน้อยแค่ไหนจึงจะเหมาะสมกับโครงการ และจากรูปจะเห็นได้ว่าถ้างานธรณีเทคนิคมากขึ้นก็จะทำให้งานทางด้านธรณีวิทยาซับซ้อนมากขึ้นด้วย



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของธรณีวิทยาและองค์ประกอบของโครงการ

7. เครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเจาะ

โครงการที่ใช้เครื่องจักรในการขุดเจาะจำเป็นต้องมีการสำรวจทางธรณีเทคนิคเป็นพิเศษ ส่วนรายละเอียดปลีกย่อยนั้นจะต้องมีการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการใช้เครื่องจักรและการเลือกใช้นิคมของเครื่องจักร และนอกจากนั้นจะต้องมีข้อมูลสำหรับเครื่องจักรเหล่านั้น เช่น ต้องรู้กำลัง

รับแรงอัดสูงสุดสำหรับเครื่องจักรตั้งแต่ข้อมูลทางด้านการสึกกร่อนและปัจจัยต่างๆเพื่อที่จะทำนาย อัตราการทะลุวง เป็นต้น เครื่องจักรต่างๆจึงต้องมีการพัฒนาและมีการทดสอบเป็นพิเศษเพื่อที่จะทำนายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆซึ่งมีผลกระทบต่อเครื่องจักรเหล่านั้น สำหรับเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์จะต้องมีลักษณะพิเศษดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 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.

8. การใช้เครื่องมือในการติดตาม

การใช้เครื่องมือในการทำงานเพื่อที่จะติดตามและควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์ จะทำให้ได้ผลประโยชน์จากการใช้เครื่องมือคือ

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

6.2.8 การสำรวจขณะทำการก่อสร้าง

การสำรวจขณะทำการก่อสร้างประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

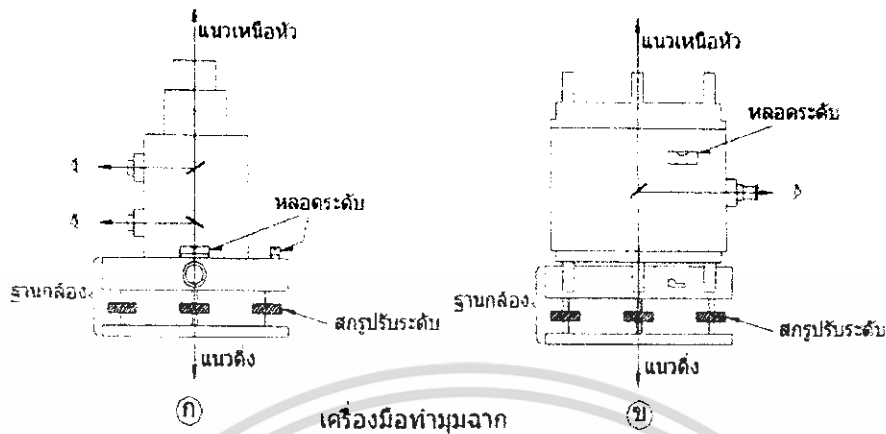
1. การถ่ายค่าพิทคลงสู่ใต้ดิน
2. ระบบนำทางของแนวอุโมงค์
3. มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ
4. การบังคับหัวเจาะในโค้ง
5. แบบของแนวอุโมงค์
6. รายงานประจำวัน

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การถ่ายค่าพิทคลงสู่ใต้ดิน

การถ่ายค่าพิทคลงสู่ใต้ดิน วัตถุประสงค์การถ่ายพิทคลงและระดับลงสู่ใต้ดิน คือเพื่อนำค่าเหล่านี้ไปบังคับหัวเจาะให้เดินตามแนวที่ออกแบบ โดยเริ่มสำรวจออกจากหมุดบังคับทางราบและทางตั้งบนพื้นดิน เครื่องมือสำรวจและการดำเนินงานมีดังนี้

ก.) เครื่องมือทำฉาก (รูปที่ 6.9) เป็นเครื่องมือสำรวจใช้สำหรับถ่ายจุดข้างบนลงสู่ข้างล่าง(หรือสลับกัน) เครื่องมือชนิดนี้เหมาะสมกับงานอุโมงค์ที่มีความลึกมาก เป็นเครื่องมือทำฉากใช้แสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์เป็นแสงสีแดง (แสงกล้า) ทำขึ้นโดยใช้แสงส่องลงบนปรมาณูธาตุบางธาตุ ทำให้แสงเดินทางไปเป็นคลื่นในทิศทางเดียวในระยะไกลๆ โดยทั่วไปใช้แก๊สฮีเลียมกับนีออน เป็นกำเนิดแสงเลเซอร์ จุดเลเซอร์จะมีขนาดขึ้นอยู่กัระยะทางเช่นระยะทาง 100 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. เป็นต้น ความถูกต้องของแนวตั้ง 1/30,000 หรือระยะตั้ง 30 ม. ความคลาดเคลื่อน 1 มม.



รูปที่ 6.9 เครื่องมือทำมุมฉาก

การดำเนินงานในสนาม เมื่อปล่องตั้งจุดถึงระดับที่กำหนดให้(หรือสถานีเสร็จแล้ว) จำเป็นต้องถ่ายพิกัดบนดินลงสู่ใต้ดิน ใช้วิธีหนึ่งปล่องต่อสองจุด

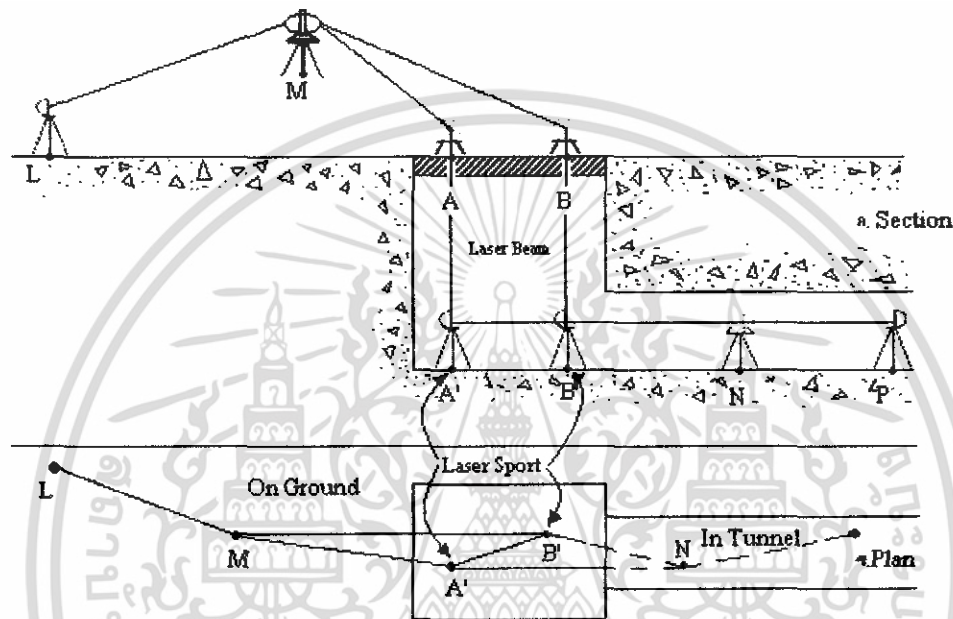
- เจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. ให้ทะลุฝาปิดปล่อง รูทั้งสองห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ตั้งเครื่องมือทำมุมฉากกับรูทั้งสองแล้วประกอบชุดเลเซอร์
- หมายจุดเลเซอร์ข้างล่างแล้ววัดระยะราบระหว่างจุดเลเซอร์ทั้งสองซึ่งจะให้เป็นเส้นฐานต่อไป
- จุดข้างล่างจะมีพิกัดฉากเท่ากับจุดข้างบน

ข้อแนะนำ : ที่ตั้งเครื่องต้องแข็งแรงและไม่กระเทือน จุดข้างล่างควรตั้งบนพื้นคอนกรีตที่แข็งแรงเช่นฝังแผ่นโลหะลงในคอนกรีต การหาจุดข้างบนโดยใช้ฉากรองรับ เช่น หมายจุดบนกระจก เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนทางมุมเป็นส่วนกลับกับระยะห่างระหว่างสองจุด ถ้าเป็นไปได้จุดทั้งสองควรอยู่ในแนวเส้นทางออกแบบ ถ้าหากมีความจำเป็น ควรขยายเส้นฐานและทำสารบัญหมุดเพื่อสะดวกในการค้นหา กรณีเป็นอุโมงค์ควรทำแยกกันแล้วตรวจสอบความคลาดเคลื่อนภายหลัง

ข.) การถ่ายค่าพิกัดทางราบ(ดูรูปที่6.10) มีวัตถุประสงค์ต้องการค่าพิกัดฉากไปยังจุดเลเซอร์ทั้งสอง ทั้งบนดินและใต้ดิน สมมุติ A , B และ A' , B' เป็นจุดเลเซอร์, LMเป็นหมุดวงรอบบนดิน ที่ทราบค่าพิกัดฉาก, N และP เป็นจุดวงรอบใต้ดิน

- ตั้งกล้องแนวจุด M ทำการวัดมุมราบ LMB และBMAแล้ววัดระยะราบMA และ MB

- ตั้งกล้องจุด N ทำการวัดมุมราบ $A'NB'$ และ $B'NP$ แล้ววัดระยะราบ NA' , NB' และ NP ชี้แนะนำ วัดมุมราบและระยะราบหลาย ๆ ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย เลือกเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง, ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือก่อนหรือหลังทำการวัด, จุด A, B และ A', B' เป็นจุดตั้งเป้า ไม่จำเป็นต้องวัดมุมราบ อาจจะสร้างโครงข่ายบนบนดินเพิ่มอีก 1 จุด ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จุด A' และ B'



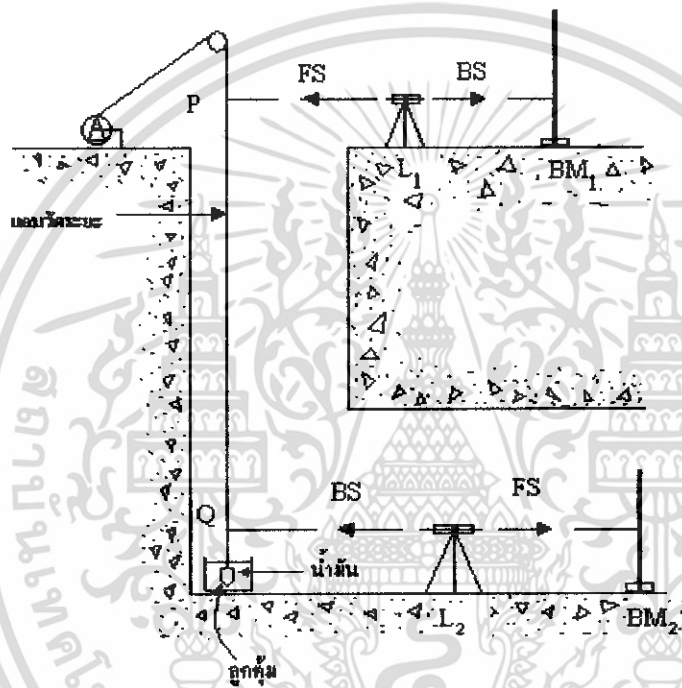
รูปที่ 6.10 การถ่ายพิกัดทางราบ

การคำนวณ ขั้นตอนการคำนวณหาพิกัดจาก จุด N และ P

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

ค.) การถ่ายค่าพิคตทางคัง (รูปที่ 6.11) การถ่ายค่าระดับบนดินลงสู่ใต้ดินมีหลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือสำรวจ และการดำเนินงาน ขั้นตอนการถ่ายระดับโดยตรงมี ดังนี้

- หย่อนแถบวัดระยะลงในแนวคังโดยผูกน้ำหนักที่ปลายข้างหนึ่ง
- ตั้งกล้องระดับ L_1 ทำการอ่านไม้ระดับบน BM_1 และแถบวัดระยะ
- ตั้งกล้องระดับ L_2 ทำการอ่านแถบวัดระยะ และไม้ระดับบน BM_2
- คำนวณระยะคัง PQ คือผลต่างค่าที่อ่านได้
- คำนวณระดับ $BM_2 = \text{ระดับ } BM_1 + BS (\text{บน } BM_1) - PQ - FS (\text{บน } BM_2)$



รูปที่ 6.11 การถ่ายค่าพิคตทางคัง

ข้อแนะนำ

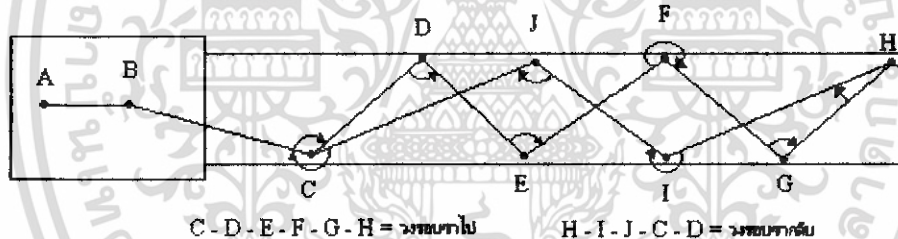
- ปรับแก้แถบวัดระยะเช่น แรงคัง อุณหภูมิ ความยาวไม่มาตรฐาน เป็นต้น
- แข่งดูคังลงในน้ำมันเครื่องเพื่อชะลอความแกว่ง
- ขณะปฏิบัติงาน หยุดการเป่าลมชั่วคราว หรือเลือกเวลาปฏิบัติ
- ทำการอ่านหลาย ๆ ครั้ง และหลายตำแหน่ง ของแถบวัดระยะ

ง.) วงรอบและระดับในอุโมงค์ (รูปที่ 6.12) การวางโครงข่ายหมุดบังคับทางราบในอุโมงค์ โดยจะสร้างวงรอบเป็นรูปพื้นปลาทั้งขาไปและขากลับ ทั้งนี้เพื่อจัดการหักเหของแสง ทำการ

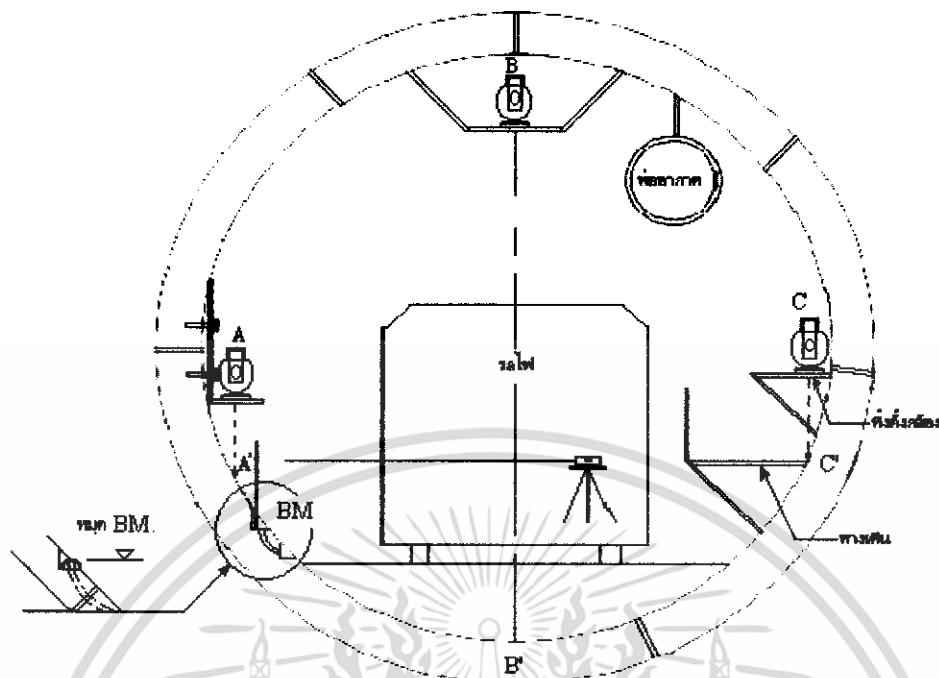
วัดมุมและระยะทางทั้งขาไปและจากกลับ แล้วคำนวณความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบกันและตรวจสอบความถูกต้องของผลงาน รวมถึงความสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดให้

หมุดวงรอบควรตั้งอยู่บนหิ้ง (รูปที่ 6.13) ประกอบด้วยแผ่นเหล็กติดกับขาเหล็กยึดเข้ากับแหวน ตำแหน่งสูงประมาณ 1.50 ม. เจาะรูตรงแผ่นเหล็กเพื่อสอดสกรูยึดกลึง แล้วหมายจุดตั้งกล้องบนวงแหวน จุดวงรอบควรห่างกันประมาณ 50 – 60 ม.

การสร้างหมุด BM ในอุโมงค์อาจใช้หมุดวงรอบก็ได้ หรือหาที่เหมาะสมกว่า และออกงานสะดวก เช่น อาจเลือก BM ไว้ตามจุดถาวรของวงแหวน เป็นต้น ทำระดับไปและกลับโดยวิธีอ่านตามสายใย ตรวจสอบความถูกต้องของผลงาน และคาดหวังอยู่ในเกณฑ์กำหนด $12 \text{ มม. } \sqrt{k}$, (k ระยะวงรอบระดับ ขาไปหรือจากกลับ คิดเป็นกม.) ทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของสายใยก่อนหรือหลังปฏิบัติงาน ทำสารบัญหมุดทั้งหมุดวงรอบ และหมุด BM, ทำการตรวจสอบพิกัดจากและระดับหมุด BM เป็นช่วง ๆ ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลง หรือการขยับของวงแหวน ใช้ค่าใหม่เสมอเพื่อนำทางให้หัวเจาะเดินไปยังจุดมุ่งหมาย



รูปที่ 6.12 วงรอบและระดับในอุโมงค์



รูปที่ 6.13 หมุดวงรอบ

2. ระบบนำทางของอุโมงค์

ระบบนำทางของอุโมงค์ ในปัจจุบันเครื่องมือสำรวจได้พัฒนาขึ้นมากกว่าเดิม เพื่อให้ทำงานได้รวดเร็ว มีความละเอียดสูง ประหยัดกำลังคน และย่นระยะเวลาทำงาน

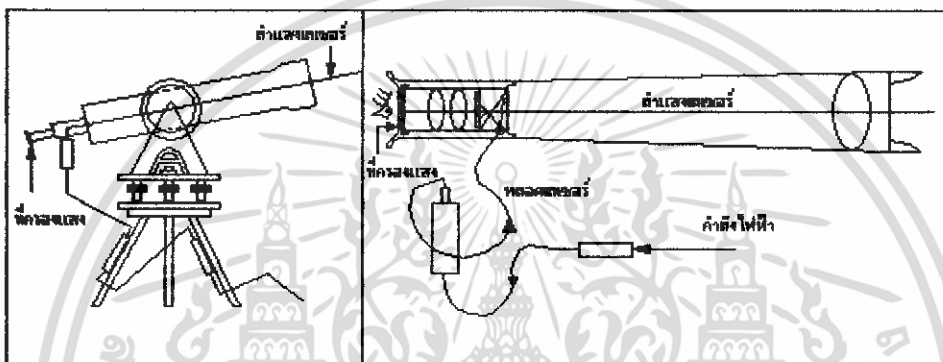
ระบบนำทางการขุดเจาะอุโมงค์ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือ และอุปกรณ์หลาย ๆ ส่วน แต่ละส่วนทำงานคนละหน้าที่แล้วนำไปประมวลผล โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ และ โปรแกรมเพื่อให้การขุดเจาะเป็นไปตามความต้องการ การประมวลผลที่ออกมาทำการตรวจสอบโดยการเก็บข้อมูลทางสนาม ระบบนำทางในปัจจุบันมีหลายวิธี ดังนี้

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

ก.) กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์ (รูปที่ 6.14) กล้องที่ใช้เป็นกล้องแนวธรรมดาแต่ใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นแนวตั้งไปกระทบเป้ารับแสงจะได้ระยะทางที่สททาง จุดตั้งกล้องต้องทราบพิกัดฉากและระดับ

หน้าที่ของกล้องแนวใช้แสงเลเซอร์

- ตั้งค่าแอซิมูทจากจุดตั้งกล้องส่งไปยังเป้าหลัง
- หมุนกล้องให้ค่าแอซิมูทของแนวออกแบบ เป็นแนวที่กำลังจะเจาะ
- วัดมุมตั้งไปยังจุดเลเซอร์ และวัดระยะทาง



รูปที่ 6.14 กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์



รูปที่ 6.15 การใช้กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์

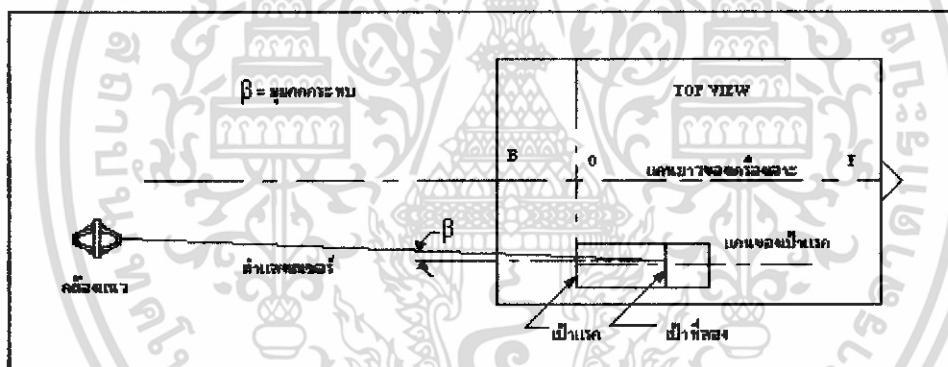
ข.) หน่วยรับแสงเลเซอร์ (รูปที่ 6.16) หน่วยรับแสงเลเซอร์ทำด้วยโลหะรูปทรงกระบอกขนาดหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 0.15 ม. ยาวประมาณ 0.50 ม. และน้ำหนัก 30 กก. ด้านหน้าเป็นเป้าหรือจอรับแสงเลเซอร์ คือเป้าที่หนึ่ง และภายในกระบอกมีจอรับแสงเลเซอร์ คือเป้าที่สอง หน่วยนี้จะติดตั้งด้านท้ายของเครื่องเจาะในตำแหน่งกล้องมองเห็น ทรงกระบอกสามารถหมุนในระนาบตั้งและขยับไปทางซ้ายหรือขวาได้ ทั้งนี้เพื่อให้รับแสงเลเซอร์ตลอดเวลาการเจาะอุโมงค์

หน้าที่หน่วยรับแสงเลเซอร์

- เป้าที่หนึ่งจะให้ตำแหน่งจุดเลเซอร์เทียบกับแกนของมันเอง
- เป้าที่สองจะให้มุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ คือมุมระหว่างแนวแสงกระทำกับแกนยาวของทรงกระบอก

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นมีดังนี้

- มีบางสิ่งบางอย่างบังแสงเลเซอร์หรือกำลังของแสงเลเซอร์อยู่นอกเกณฑ์
- มีแสงรบกวนภายนอกหรือหากจุดเลเซอร์ตกขอบเป้า มุมตกกระทบจะวัดไม่ได้
- ในกรณีเป้าขยับออกจากลำแสง ให้ขยับเป้าเข้าหา แล้วป้อนค่าใหม่เข้าหน่วยควบคุมการทำงาน



รูปที่ 6.16 หน่วยรับแสงเลเซอร์

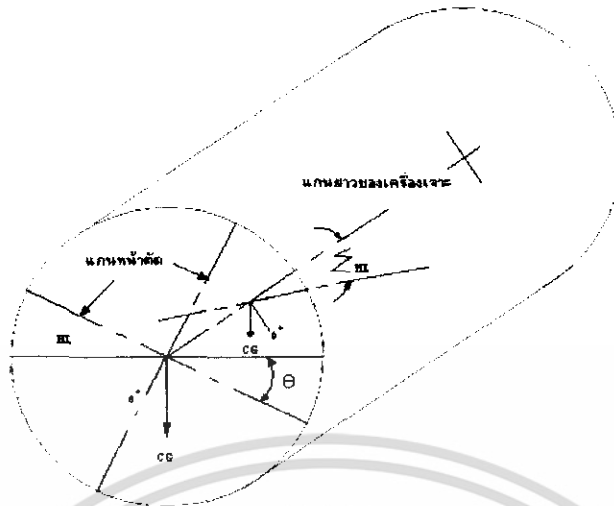


รูปที่ 6.17 เป้ารับแสงเลเซอร์

ค.) หน่วยวัดภาระของหัวเจาะ (รูปที่ 6.18) หน่วยวัดภาระอากาศของเครื่องเจาะเป็น กล้องโลหะ สี่เหลี่ยมผืนผ้าวางในแนวตั้ง จะติดตั้งภายในเครื่องเจาะ และตั้งในตำแหน่งที่หมายไว้ข้าง กล้อง ภายในกล้องมีเซนเซอร์หรือหลอดไฟรับอากาศของเครื่องเจาะ แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่ง ต่อไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง หน้าที่หน่วยวัดสถานะของเครื่องเจาะ

- วัดการหมุนตัวของเครื่องเจาะ บอกเป็นมุมขององศา หรือระยะที่ออกเป็น มม. ต่อระยะคืบ 1 ม.
- วัดการก้มหรือเงยของเครื่องเจาะ บอกเป็นมุมองศา หรือระยะที่ออกเป็น มม. ต่อระยะคืบ 1 ม.

ค่ามุมที่ได้ใช้หลักการแกนของเครื่องเจาะกระทำกับแนวคืบคูดของโลก



รูปที่ 6.18 หน่วยวัดการะของหัวเจาะ

ง.) หน่วยรวบรวมข้อมูล (รูปที่ 6.19) หน่วยรวบรวมข้อมูลเป็นกล่องโลหะ สี่เหลี่ยมผืนผ้า หาดั้งด้านท้าย หรือในห้องบังคับเครื่องเจาะ หน้าที่ของหน่วยรวบรวมข้อมูล

- กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยรับแสงเลเซอร์
- กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยวัดสถานะของเครื่องเจาะ
- จัดหากำลังไฟฟ้าให้กับหน่วยรับแสงเลเซอร์
- เตรียมส่งข้อมูลไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง

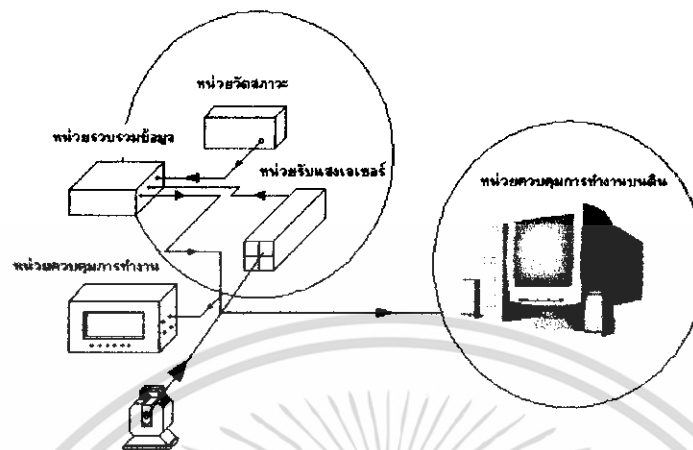
จ.) หน่วยควบคุมการทำงาน (รูปที่ 6.19) เป็นหน่วยสุดท้ายของระบบการทำงานคือมีจอแสดงผล มีหน่วยประเมินผล และ โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อคำนวณค่าที่จำเป็น เช่น ตำแหน่งหัวเจาะ ขณะนั้นและจุดเลเซอร์ ขนาดและทิศทางการหมุนตัว ขนาดและทิศทางการเอียงของเครื่องเจาะ และสามารถป้อนข้อมูลต่าง ๆ เช่น ค่าออฟเซตทางราบและทางดิ่ง ทิศทางราบและทิศทางดิ่ง และค่าคงที่ หรือมิติของเครื่องเจาะ มีหลายแบบ เช่น วางกับพื้นและจะติดตั้งไว้ในห้องที่อยู่ท้ายเครื่องเจาะมองเห็นได้ถนัด ป้องกันสิ่งรบกวนภายนอก มีสายไฟรับข้อมูลจากหน่วยที่กล่าวไว้แล้ว

หน้าที่ของหน่วยควบคุมการทำงาน

- เป็นศูนย์กลางของการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่ต้น
- รับข้อมูลจากหน่วยรวบรวมข้อมูลและป้อนข้อมูลจากผู้ควบคุม
- หาความเบี่ยงเบนแนวเจาะกับแนวออกแบบเป็นกราฟิก และตัวเลข
- ควบคุมโปรแกรมการคำนวณและจัดพิมพ์เอกสารรายงานประจำวัน

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับหน่วยนี้

- เมื่อโปรแกรมมีปัญหาจะมีผลต่อเนื่องทั้งระบบ
- ไม่ได้รับข้อมูลจากหน่วยที่เกี่ยวข้อง หรือข้อมูลมีปัญหา

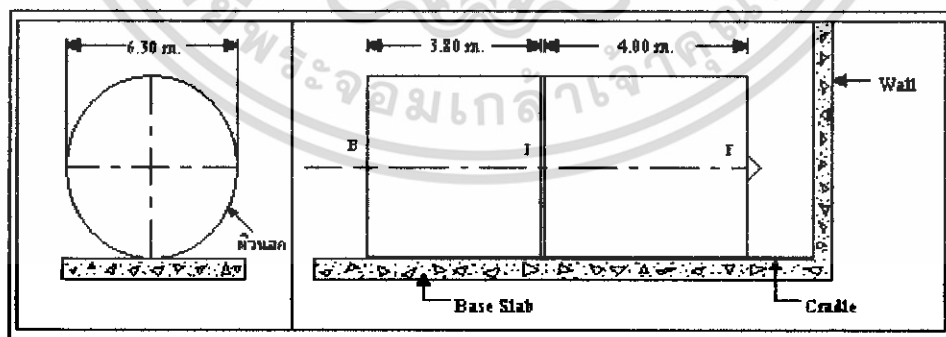


รูปที่ 6.19 หน่วยรวบรวมข้อมูลและหน่วยควบคุมการทำงาน

3. มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ

มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ (รูปที่ 6.20) เครื่องเจาะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหัวยาวประมาณ 4 ม. และส่วนท้ายยาวประมาณ 3.8 ม. ตรงรอยต่อเป็นกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก ทั้งนี้เพื่อช่วยให้เครื่องเจาะขยับตัวในการเคลื่อนที่ และแรงกดตัวที่หัวเจาะ รัศมีภายนอก 6.30 ม.

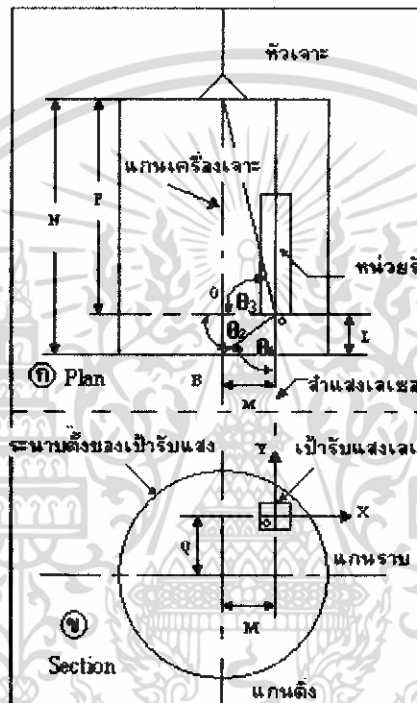
ก.) การตรวจสอบตำแหน่งก่อนเจาะ เครื่องเจาะตั้งอยู่บนคานเหล็กและรองรับด้วยพื้นคอนกรีตหนาและแข็งแรง คานเหล็กจะเคลื่อนขึ้นลง และไปซ้ายขวาได้เล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อให้แกนของหัวเจาะอยู่ในตำแหน่งที่ออกแบบ



รูปที่ 6.20 มิติและตำแหน่งของเครื่องเจาะ

ทำการติดตั้งหน่วยต่าง ๆ ที่จะใช้นำทาง ดังได้กล่าวไว้แล้ว ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการติดตั้ง เช่นการหมุนตัว และการก้มหรือเงยของแกนหัวเจาะ หมายตำแหน่งจุดเริ่มเจาะบนกำแพง โดยใช้กล้องแนว และเครื่องวัดระยะ อีดีเอ็ม

ข.) จุดสำรวจในเครื่องเจาะ (รูปที่ 6.21) จุดสำรวจในเครื่องเจาะเป็นจุดสำคัญที่จะบอกตำแหน่งของหัวเจาะคือจุด B และจุด F จุดทั้งสองอยู่ในแกนกลางของเครื่องเจาะ จุด B และจุด F อยู่ที่ท้ายและหัวของเครื่องเจาะตามลำดับ ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ที่มีดังนี้



รูปที่ 6.21 จุดสำรวจในเครื่องเจาะ

L = ระยะราบเป็นระยะระหว่างระนาบตั้งที่ผ่านจุดสำรวจ B และจุดตัดกลางเป้ารับแสง

M = ระยะราบเป็นระยะระหว่างแกนยาวเครื่องเจาะ และแกนยาวเป้ารับแสง

N = ระยะราบเป็นระยะระหว่าง จุดสำรวจ B , F

P = ระยะราบเป็นระยะระหว่าง จุดสำรวจ F และ O

Q = ระยะตั้งเป็นระยะกลางเป้ารับแสง และแกนราบ (หน้าตัดเครื่องเจาะ)

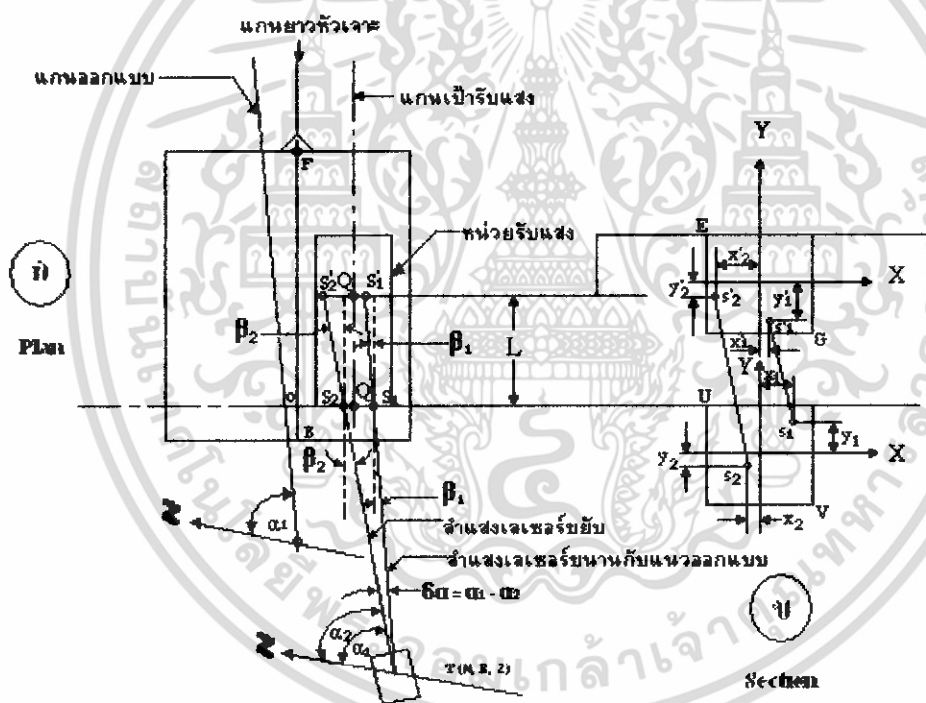
θ = ระหว่างด้านที่กำหนดให้

ค.) ตำแหน่งจุดเลเซอร์ (รูปที่ 6.22) แนวลำแสงเลเซอร์จะเป็นแนวเล็งของกล้อง และจะขนานกับแนวออกแบบ ดังนั้น จุดเลเซอร์จะตกลงบนเป้าแรก ณ ที่ใดที่หนึ่ง ขึ้นอยู่กับการขยับแกนเครื่องเจาะ ถ้าหากตกบริเวณตรงกลางจะได้ค่าถูกต้องกว่าที่อื่น กำหนด UV เป็นระนาบตั้งที่ผ่านเป้า

หน้าเป้าแรก x_1, y_1 เป็นพิกัดฉากของจุดเลเซอร์ S_1 แสงเลเซอร์ที่เลี้ยวผ่านเป้าแรกไปกระทบเป้าที่สองที่อยู่ภายในหน่วยเป้ารับแสง คือ EG จะได้ค่าพิกัดทางราบ x'_1, y'_1, β_1 เป็นมุมตกกระทบ จากค่าคงที่ของหน่วยเป้ารับแสง สามารถคำนวณ β_1 ได้ ในระบบนี้ จะใช้เซนเซอร์รองรับแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ออกเป็นตัวเลขคู่ที่หน่วยควบคุมการทำงาน

ข้อสังเกตมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์

- ถ้าหากจุด S_1 ตกกลางเป้าแรกและกลางเป้าที่สองแกนหัวเจาะจะขนานกับแนวออกแบบได้ $\beta = 0$
- ถ้าหากจุด S_1 ตกกลางเป้าแรกและ $x'_1 \neq 0$ แกนหัวเจาะเอียงไปข้างใดข้างหนึ่งของแนวออกแบบ ขึ้นอยู่กับเครื่องหมาย x'_1 ได้ β
- ถ้าหาก $x_1 = x'_1$ ลำแสงเลเซอร์จะขนานกับแกนเป้ารับแสง ได้ $\beta = 0$



รูปที่ 6.22 ตำแหน่งจุดเลเซอร์

- เครื่องเจาะกัมหรือเฆย (รูปที่ 6.23) ขนาดและทิศทางหัวเจาะจะกัมหรือเฆยคู่ได้จากหน่วยวัดสภาวะของเครื่องเจาะ ภายในมีเซนเซอร์รับขนาดและทิศทางแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าลงไปที่หน่วยรวบรวมข้อมูล และหน่วยควบคุมการทำงาน ซึ่งจะเปิดคูได้ทีหน้าจอแสดงผล

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

ค่าเบี่ยงเบนเมื่อเทียบกับแนวราบดังนี้

$O'O_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่ระนาบตั้งผ่านเป้าแรก

$F'F_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่หัวเจาะ

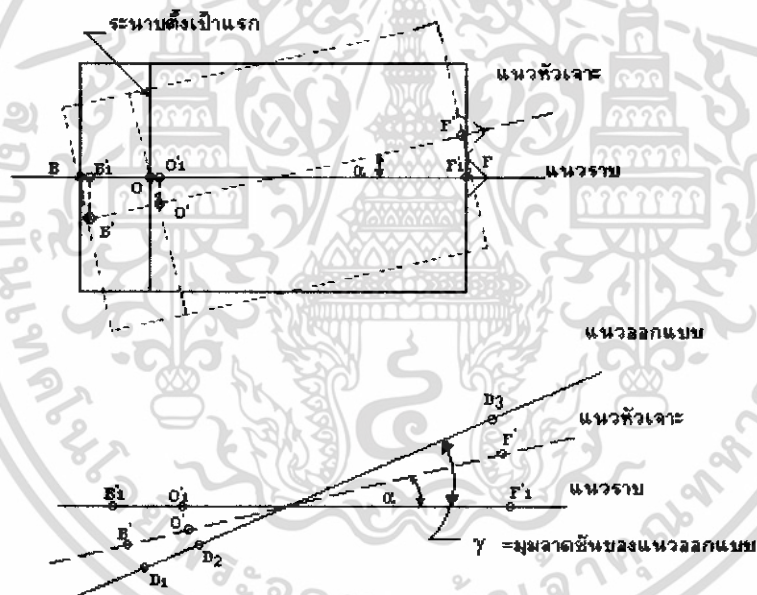
$B'B_1'$ = ค่าเบี่ยงเบนทางตั้งที่ท้ายหัวเจาะ

ค่าเบี่ยงเบนเมื่อเทียบกับแนวออกแบบดังนี้

D_2O' เกิดที่ระนาบตั้งผ่านเป้าแรก

D_3F' เกิดที่หัวเจาะ

D_1B' เกิดที่ท้ายหัวเจาะ

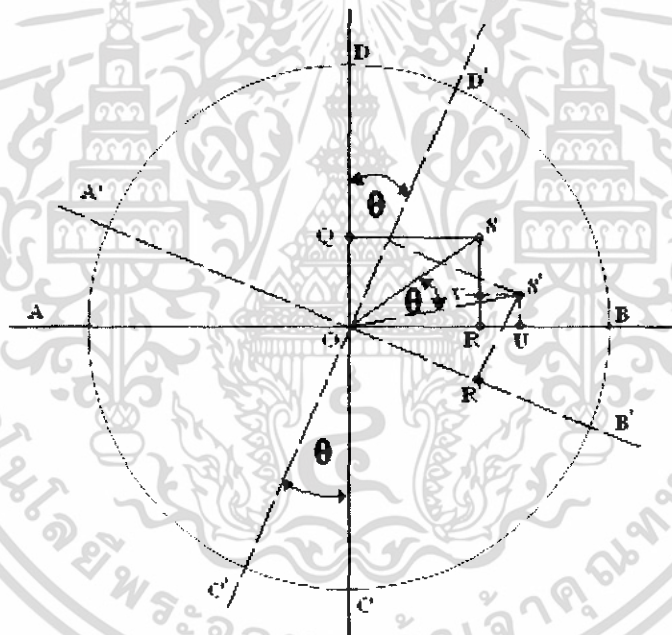


รูปที่ 6.23 เครื่องเจาะก้มหรือเอียง

- เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง (รูปที่ 6.24) ทำให้น้ำตัดของเครื่องเจาะหมุนรอบแกนยาว ดังนั้นค่าพิกัดของจุดเลเซอร์เปลี่ยนตำแหน่งออกจากแนวปกติ จะมีผลต่อค่าคงที่ของเครื่องเจาะดังนี้

AB และ CD เป็นแกนของหัวเจาะในสภาวะปกติ $A'B'$ 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
- คำนวณหาพิสัยฉาก และระดับจุด U
- ถ้าย้ายไปยังจุด O และไปที่จุดสำรวจ B และ F
- แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าออกแบบ เพื่อหาค่าเบี่ยงเบน



รูปที่ 6.24 เครื่องเจาะหมุนรอบตัวเอง

4. การบังคับหัวเจาะในทางโค้ง

การบังคับหัวเจาะในทางโค้ง คือการบังคับหัวเจาะเดินตามการออกแบบที่เป็นโค้งทางราบและ โค้งทางตั้ง ซึ่งเป็นการยากที่จะบังคับหัวเจาะให้เดินตามเส้นทางที่กำหนดให้ คือหัวเจาะจะขยับไปมาประมาณ 5 ซม. ทำการแบ่งโค้งออกเป็นคอร์ดสั้นๆ เช่นกำหนดขอบนอกของเครื่องเจาะห่างจาก

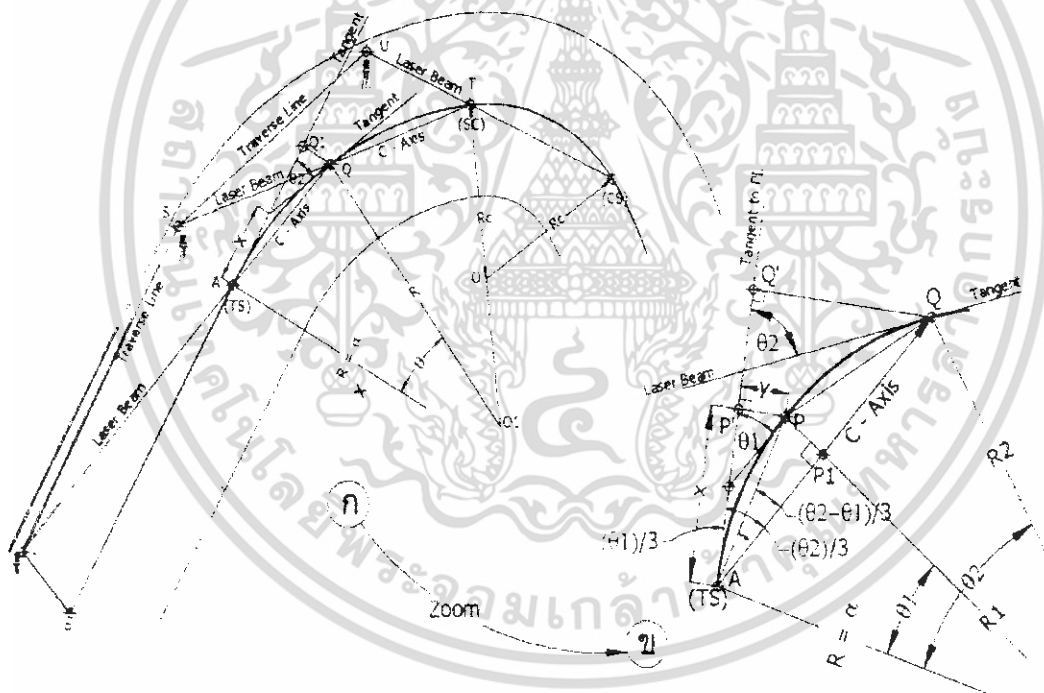
ข.) โค้งสไปรัล (รูปที่ 6.26) การบังคับหัวเจาะในโค้งสไปรัลจะสะดวกกว่าในโค้งวงกลมเพราะว่าค่าออฟเซตน้อยกว่า แต่มีการคำนวณยุ่งยากที่จะให้เป็นไปตามสภาวะทางเรขาคณิต

- 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
- คำนวณ APP_1 ทราบมุม PAP_1 และคอร์ด AP คำนวณระยะออฟเซต PP_1 ได้

ขั้นตอนให้หัวเจาะไปถึงจุด P

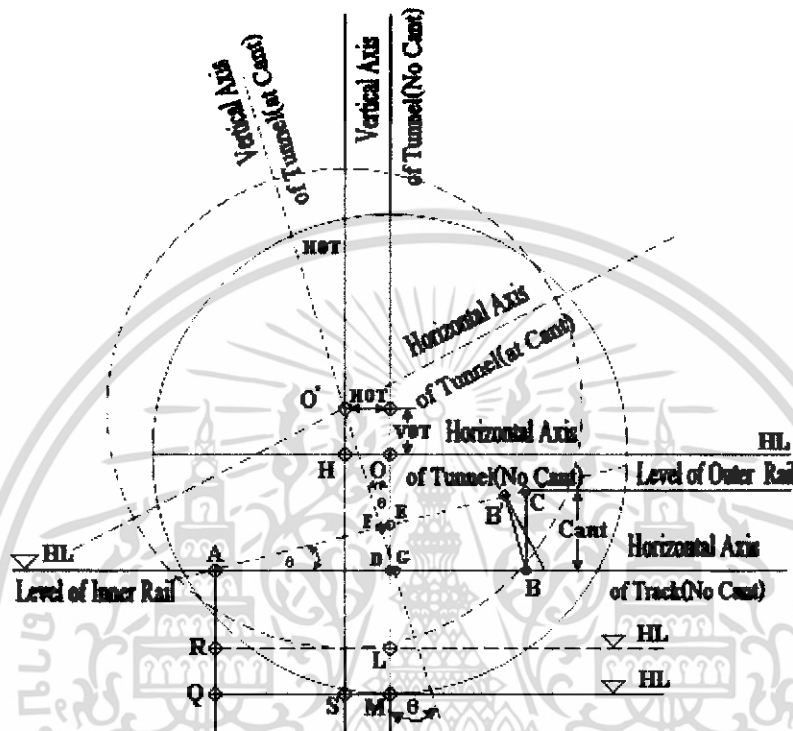
- ป้อนระยะออฟเซตล่วงหน้า PP_1 เข้ากับหน่วยควบคุมการทำงาน
- ป้อนระยะคาดการณ์ล่วงหน้าเข้ากับหน่วยควบคุมการทำงาน คือ ระยะ AP
- บังคับเครื่องเจาะเดินไปข้างหน้าจนกระทั่งได้ค่าตามข้อที่ 1 และ 2

ในทำนองเดียวกันให้เครื่องเจาะเดินทางจาก P ไป Q ต้องคำนวณล่วงหน้า ดังได้กล่าวไว้แล้ว



รูปที่ 6.26 โค้งสไปรัล

ค.) ระยะออฟเซตหัวเจาะ คือการหาระยะออฟเซตของหัวเจาะที่ออกจากแนวปกติ ระยะนี้จะคำนวณที่หัวเจาะอยู่ในโค้งที่ยกระดับแบบหมุนรอบขอบในของราง ดังรูปที่ 6.27 เป็นโค้งเดี่ยวซ้าย

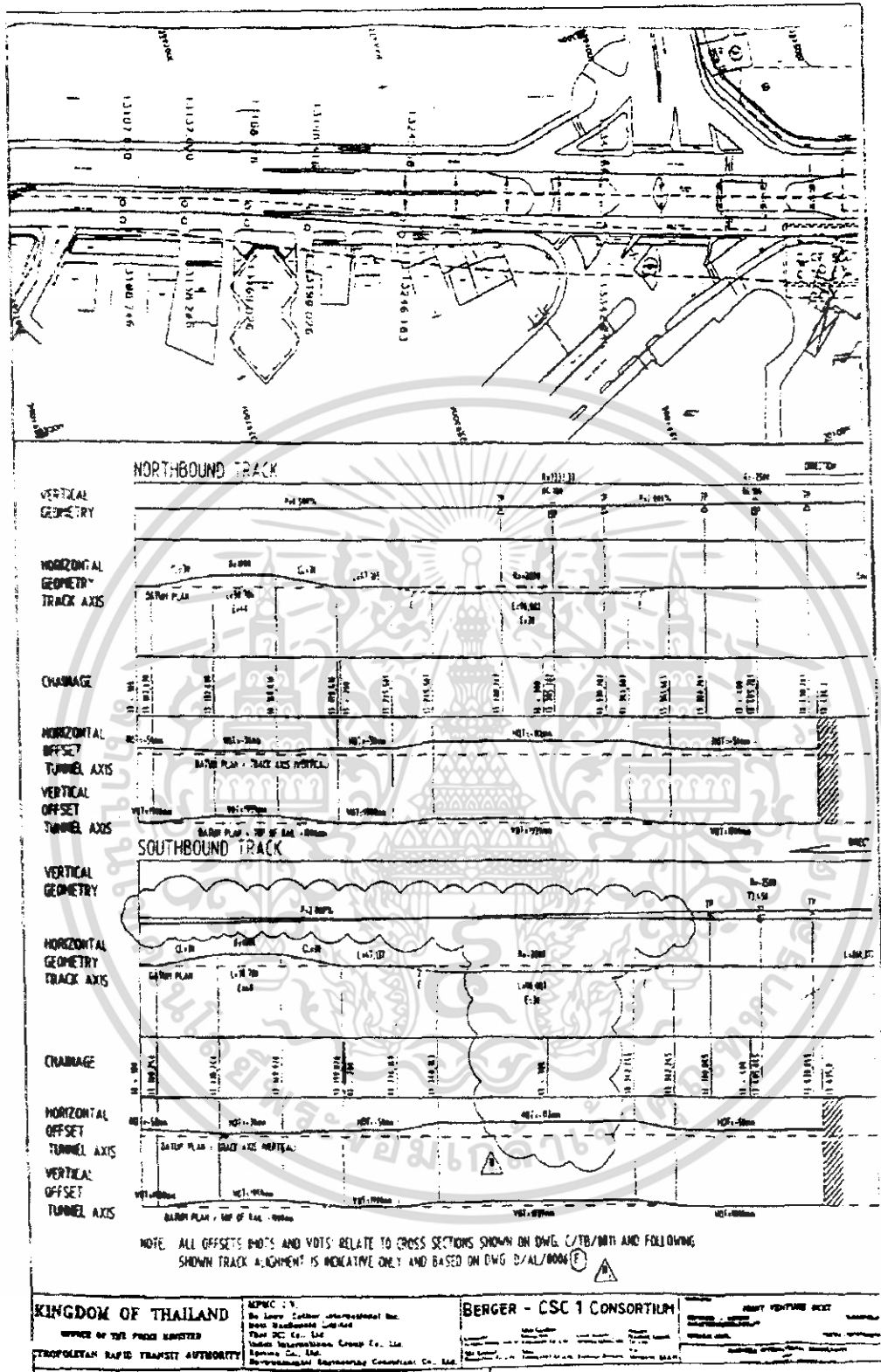


รูปที่ 6.27 ระยะออฟเซตหัวเจาะ

O เป็นจุดศูนย์กลางของหัวเจาะในโค้งปกติ, AB เป็นความกว้างของราง, D เป็นจุดกลางช่วงราง, O' เป็นจุดศูนย์กลางของหัวเจาะในโค้งที่ยกระดับ, A เป็นจุดหมุน ทำการยกระดับ 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 จุด คือ จุดแรกเป็นแบบสำรวจเพื่อนออกแบบ ใช้พิกัดเป็น ยูทีเอ็มกริดและระดับน้ำทะเลปานกลาง จุดที่สองเป็นการสำรวจเพื่อการก่อสร้าง ใช้พิกัดฉาก และระดับสมมุติ ทั้งนี้เพื่อการสะดวกในการให้ตำแหน่งสิ่งปลูกสร้าง แบบทั้งสองจุดจะเริ่มต้นที่จุดเดียวกันแต่คนละพิกัด ระยะระหว่างสถานีอาจจะไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกรออกแบบใหม่ให้เหมาะสม



รูปที่ 6.28 แบบแปลนทางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.) แบบแปลน (รูปที่ 6.28) แบบแปลนทางราบของเส้นทางรถไฟ มีมาตราส่วน 1 : 1,000 คือช่องแนวกริดทุก ๆ 100 ม. เป็นกระดาษเขียนแบบขนาด A3 สิ่งปรากฏมีดังนี้

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

ข.) แบบโปรไฟล์ (รูปที่ 6.29) แบบโปรไฟล์ของ เส้นทางรถไฟ ใช้มาตราส่วนทางราบ 1 : 1,000 ใช้โค้งวงกลมแทน โค้งแนวตั้ง กำกับความยาวรัศมี และความยาวโค้ง ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

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

ค.) แบบขุดเจาะอุโมงค์ (รูปที่ 6.28) แบบขุดเจาะอุโมงค์เป็นการขยายให้เห็นตำแหน่ง หัวเจาะที่อยู่ในแนวตรง และแนวโค้ง

- แบบเส้นทาง เป็นแบบแสดงทิศทางของโค้งเลี้ยวซ้าย หรือ เลี้ยวขวา ของเส้นทางที่กำหนดให้ บอกความยาวโค้ง, รัศมีโค้งวงกลม, ระยะยกโค้ง และระยะทาง ของจุดสัมผัส
- แบบระยะออฟเซต (รูปที่ 6.27) ระยะออฟเซตมีได้สองทาง คือ ออฟเซตทางราบ และออฟเซตทางตั้ง หมายถึงหัวเจาะจะต้องขยับออกจากปกติเล็กน้อยเมื่อเข้าโค้ง ค่าออฟเซตได้จากการคำนวณและออกแบบให้พื้นสิ่งปลูกสร้าง
- แบบออฟเซตทางราบ คือระยะทางราบ วัดจากหน้าตัดที่ผ่านหัวเจาะปกติกับหัวเจาะ ที่ขยับเนื่องจากการยกโค้ง คือ OH
- แบบออฟเซตแนวตั้ง คือระยะตั้งวัดจากหน้าตัดที่ผ่านหัวเจาะปกติกับหัวเจาะที่ขยับเนื่องจากการยกโค้ง คือ O'H

6. รายงานประจำวัน

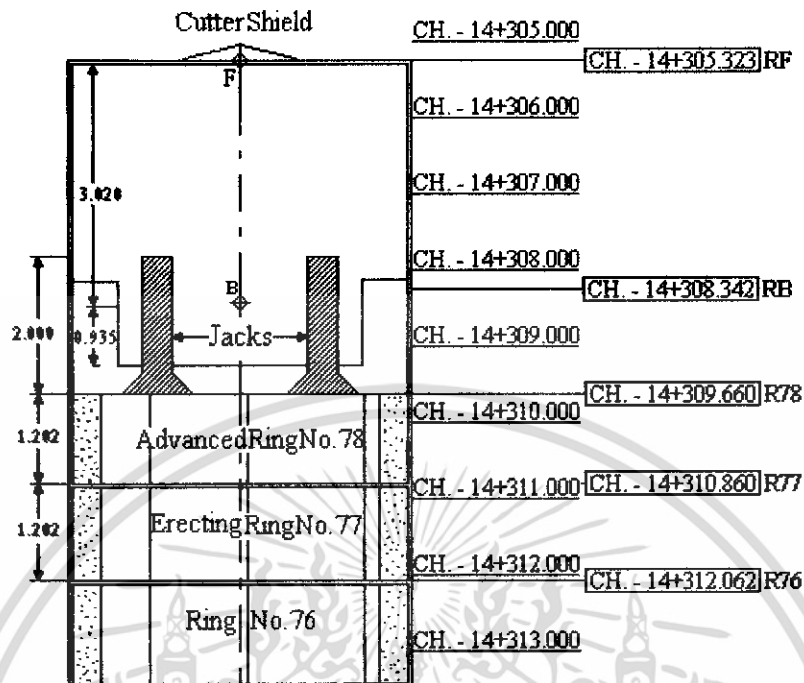
รายงานประจำวัน รายงานประจำวันแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ รายงานตำแหน่งเครื่องเจาะ และรายงานตำแหน่งของวงแหวน

ก.) ตำแหน่งของเครื่องเจาะ (รูปที่ 6.29 และรูปที่ 6.30) เป็นตำแหน่งสุดท้ายของแกนเครื่องเจาะที่หยุดเพื่อจะประกอบวงแหวน ข้อมูลของหัวเจาะที่หยุดอยู่กับที่มีดังนี้

- กราฟฟิคแสดงแกนของหัวเจาะหรือ B ไป F สามารถวัดได้จากกราฟฟิคนั้น
- ตัวเลขได้จากการวัดความยาวของแม่แรงและค่าออกแบบ ค่าต่างความยาวของแม่แรง (รูปที่ 6.32)
- แถบแผนภูมิ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แสดงถึงการเจาะเสร็จไปแล้ว
- แถบแผนภูมิ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเจาะตั้งแต่ต้น
- กราฟฟิคแสดงตำแหน่งจุดเลเซอร์เมื่อหัวเจาะหยุด ซึ่งสามารถวัดพิกัด x และ y ได้
- ช่วงระยะเวลาการเจาะที่แล้วเสร็จต่อ 1 วงแหวน

รายงานที่สองแสดงผลของการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ B และ F (รูปที่ 6.33)

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



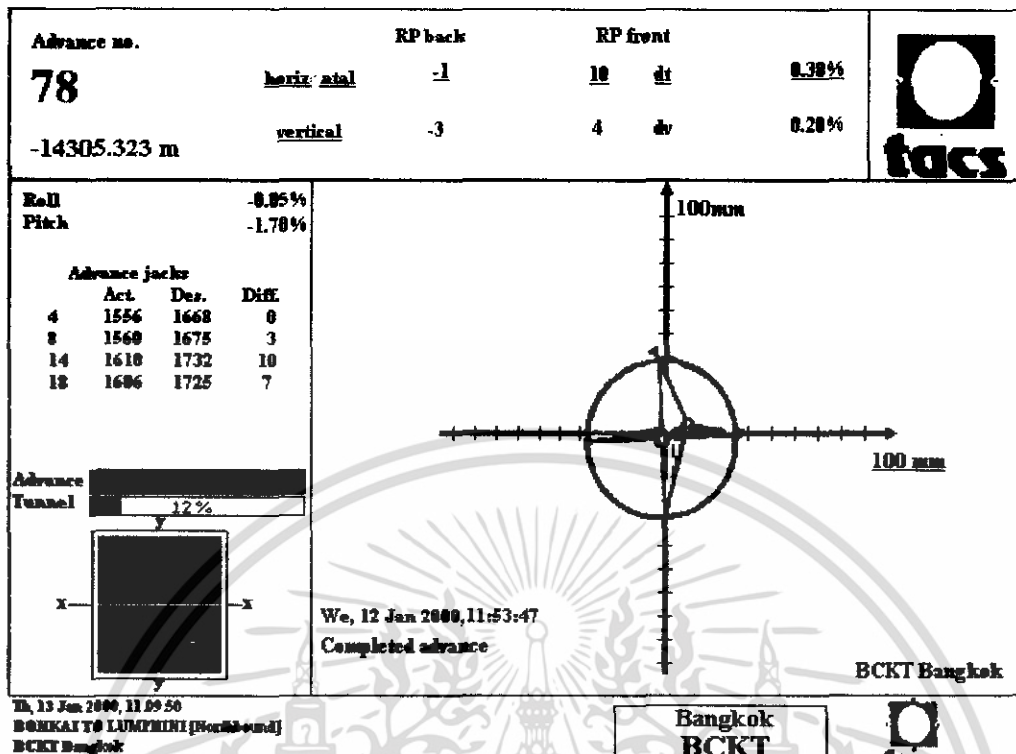
รูปที่ 6.29 ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ

ข้อมูลจุดตั้งกล้องมีดังนี้

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

ข้อมูลเพิ่มเติม มีดังนี้

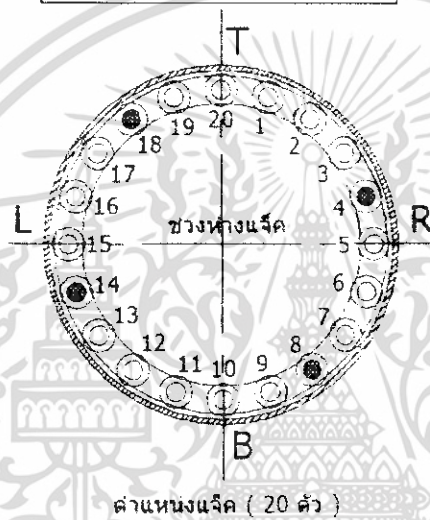
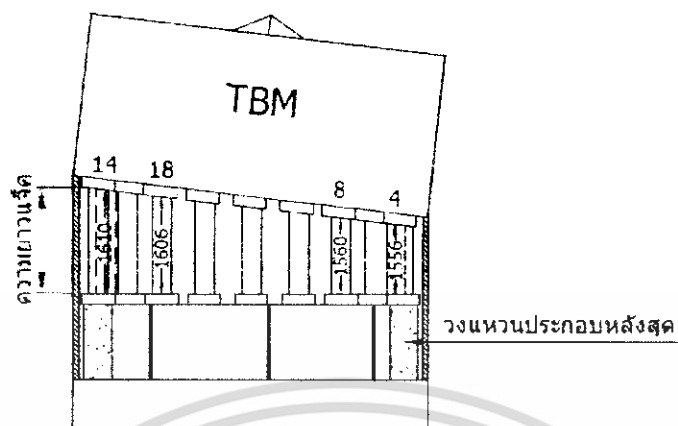
- ระยะทางท่อนหัวและท่อนท้ายของเครื่องเจาะ
- ระยะระหว่างวงแหวน (ผิวด้านนอก) และผนังหัวเจาะ
- พิกัดฉากและกำลังของจุดเลเซอร์



รูปที่ 6.30 ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะ



รูปที่ 6.31 ระยะของแม่แรงหัวขุดเจาะ

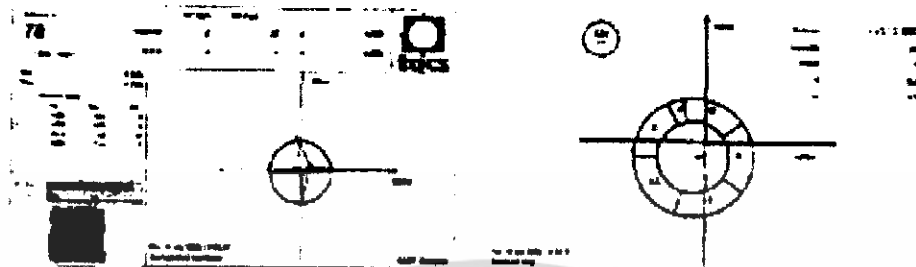


รูปที่ 6.32 ระยะผลึกของแม่แรงหัวชุดเจาะ

BCKS - BCKS-1)
 Project BCKT Bangkok
 Tunnel RONKAI TO LUMPHINI (Northbound)

Ring nr 77
 Advance no 78

Advance record



Date of ring erection: Wed 12 Jan 2000, 10:55:37

TBM data, Chainage RP back: -14308.342m

	Act.	Des.	Diff.
Hor. angle	318.62872	318.20662	0.42210
Vert. angle	1.70	1.50	0.20
Heading	400320.582	400320.582	0.000
Heading	25972.740	25972.740	0.000
Level	82.616	82.616	0.000

TBM data, Chainage RP front: -14305.323m

	Act.	Des.	Diff.
Hor. angle	318.62872	318.20662	0.42210
Vert. angle	1.70	1.50	0.20
Heading	400317.686	400317.686	0.000
Heading	25973.813	25973.813	0.000
Level	82.664	82.664	0.000

Ring data, Chainage: -14310.860m

	Act.	Des.	Diff.
Hor. angle	317.87089	318.08200	-0.21111
Vert. angle	1.51	1.50	0.01
Heading	400312.990	400312.990	0.000
Heading	25972.031	25972.040	-0.009
Level	82.651	82.654	-0.003

Laser station: 64065

	Act.	Des.	Diff.
Chainage	-14315.835m	-14315.835m	0.000
Heading	400317.827m	400317.827m	0.000
Distance	17.882m	17.882m	0.000

Jack extension before ring erection	ATC station extension back	Clearance	ZED
10.000 4.1000	10.118 0.00	0.000	XS 01 1.00 0.0
10.000 0.1000	10.118 0.00	0.000	YS 112 1.00 0.0

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

Bangkok
 BCKT



รูปที่ 6.33 แสดงผลของการคำนวณตำแหน่งของจุดสำรวจ

ข.) ตำแหน่งของวงแหวน (รูปที่ 6.33 ซีกด้านบนขวา)

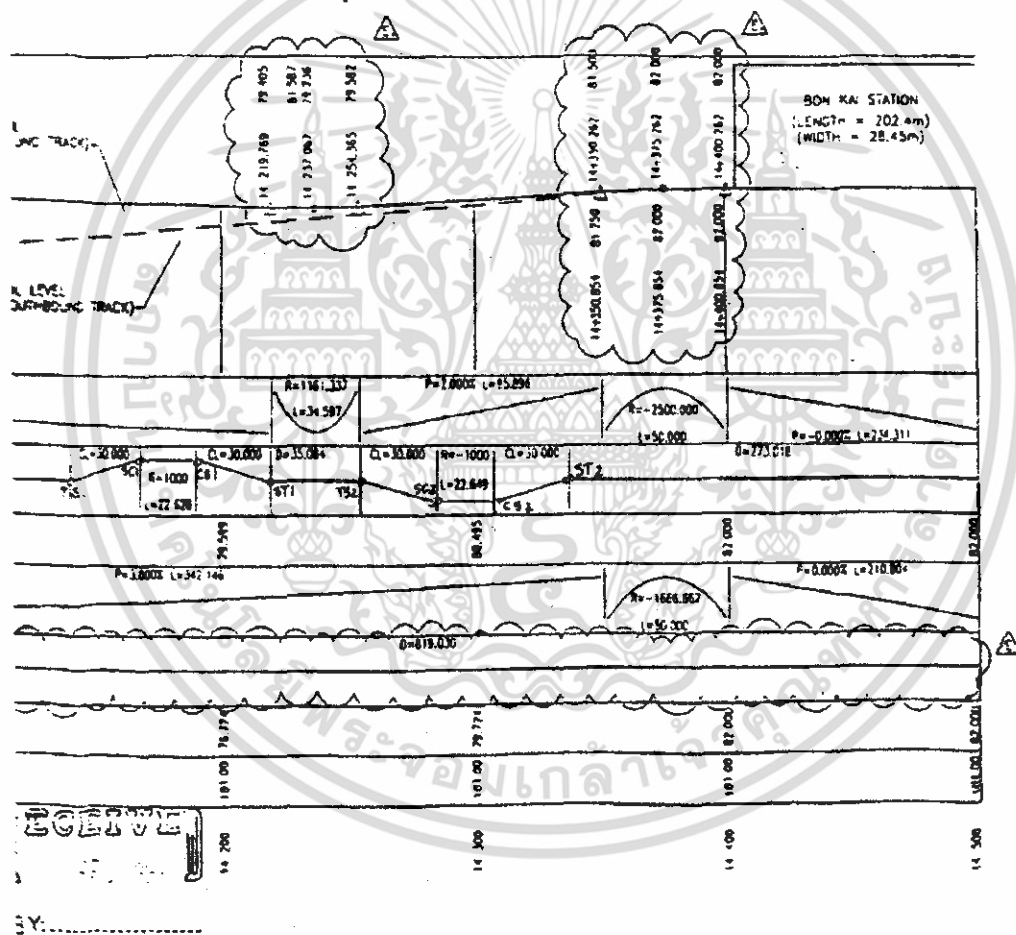
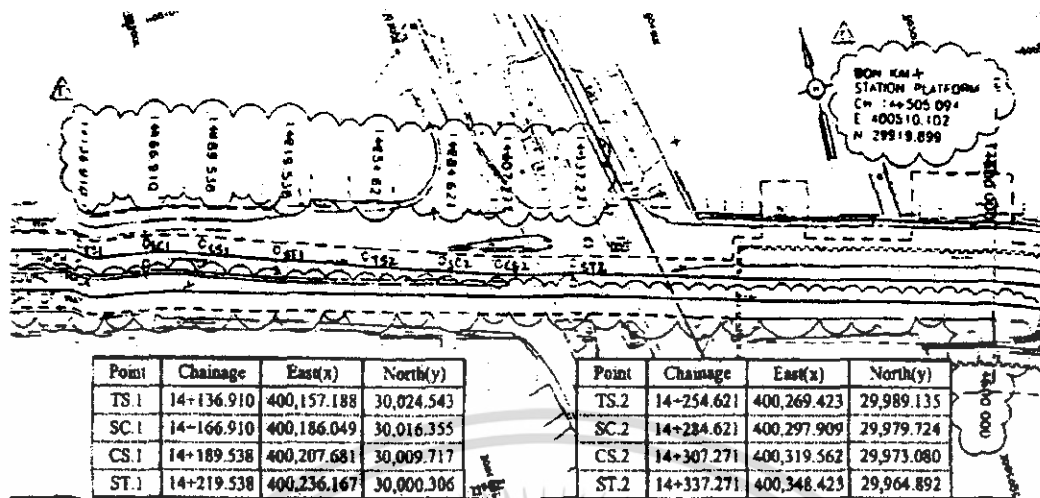
- ระยะทาง ของแหวนอยู่ที่ขอบหน้า
- ผลต่างแอมิจูระหว่างแกนกลางของวงแหวนที่วางกับออกแบบ
- ผลต่างระหว่างการก้มหรือเียงของแกนกลางของวงแหวนที่วางกับออกแบบ
- ช่องว่างระหว่างผิวนอกวงแหวนไปผิวด้านในของเครื่องเจาะ
- กราฟฟีกกลม ๆ แสดงตำแหน่งการวางวงแหวนแกนของวงแหวนที่ออกแบบและแสดงทิศทางแกนของวงแหวนที่วาง (วัตถุจากกราฟฟีกได้)
- ตัวเลขแสดงค่าเบี่ยงเบนทางราบและทางตั้ง ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ข้อสังเกต ตามรูปวงแหวนขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์มีอยู่ 6 ชั้น มีความหนา 30 ซม. แต่ละชั้นความยาวคอร์ดต่างกัน ยกเว้น A1, A2 , และ A3 ตำแหน่งการประกอบขึ้นอยู่กับนวออกแบบเช่นโค้งทางราบและ โค้งทางตั้งจะใช้ชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ K วางในตำแหน่งต่างกัน , ความสัมพันธ์ระหว่างหัวเจาะกับวงแหวน รูปที่ 6.29

ตารางด้านล่างนี้ แสดงรายการ การคำนวณค่าพิกัดและระดับที่ออกแบบวงแหวนที่ 77 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงแหวนที่ติดตั้งไปแล้ว

ตารางที่ 6.7 รายการคำนวณค่าพิกัดและระดับ

CSCI : 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-off. (m.)	Y-off. (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	400.4083586	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



รูปที่ 6.34 ตำแหน่งจุดสำรวจบทที่ 6

6.3 การดำเนินการก่อสร้าง (Execution)

6.3.1 ปล่องแนวตั้ง (Shaft)

(1) ปล่องแนวตั้งจัดว่าเป็นโครงสร้างถาวรชนิดหนึ่งที่ต้องทำการก่อสร้าง ซึ่งจะต้องนำเศษดินที่ทำการขุดเจาะออก และทำการนุภายในอาคารไปพร้อมๆกับการขุดเจาะเพื่อให้เป็นไปตามตารางเวลาที่ได้ระบุไว้ ปล่องแนวตั้งสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ได้ 4 ประเภท ดังนี้

(1.1) ปล่องแนวตั้งบริเวณทางออก จะก่อสร้างบริเวณปากทางออกโดยเป็นตำแหน่งที่จะนำหัวเจาะ อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆลงไป ซึ่งจะต้องขนย้ายดินที่ขุดออกเพื่อเตรียมพื้นที่การทำงาน การบำรุงรักษาสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้นก็ถือว่าเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องจัดการให้อยู่ในสภาพที่ดี จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆสิ่งที่จะต้องระมัดระวัง เช่น เรื่องเสียง การสั่นสะเทือน การเคลื่อนตัวของดิน การจราจร มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ และชั่วโมงการทำงาน ถ้ามีปัญหาใดปัญหาหนึ่งเกิดขึ้นในการทำงานแล้ว ก็จะส่งผลกระทบต่อ จนทำให้งานมีความล่าช้ากว่าที่กำหนดไว้ในตารางเวลาอย่างไม่สามารถคาดการณ์ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบสิ่งเหล่านี้ก่อนเริ่มการก่อสร้าง

(1.2) จากวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ดังที่กล่าวมา ปล่องแนวตั้งระหว่างกลางนั้น จะถูกก่อสร้างเป็นโครงสร้างถาวรที่กึ่งกลางอุโมงค์ หรือเพื่อเป็นการตรวจสอบหัวเจาะ

(1.3) ปล่องแนวตั้งบริเวณทางเข้า จะถูกสร้างในบริเวณปลายของอุโมงค์ และจะเป็นตำแหน่งที่รื้อถอนและนำหัวเจาะออกไป

(1.4) ปล่องแนวตั้งบริเวณทางโค้ง จะถูกสร้างขึ้นในกรณีที่หัวเจาะไม่สามารถเลี้ยวได้ในรัศมีความโค้งที่น้อยๆ หรือเพื่อเปลี่ยนทิศทางการขุดเจาะภายในปล่องแนวตั้งในกรณีของการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะตัวเดียวกัน

(2) การออกแบบโครงสร้างปล่องแนวตั้งจะต้องคำนึงถึงขนาดของหัวเจาะ การนำหัวเจาะลงไป และขึ้นส่วนของหัวเจาะ วิธีการเริ่มการก่อสร้าง ความปลอดภัยจากแรงปฏิกิริยาในการก่อสร้าง และสภาพแวดล้อม

(2.1) โดยทั่วไปขนาดช่องว่างในปล่องแนวตั้งบริเวณทางออกจะมีขนาด 0.75-1.0 เมตร จากด้านข้างทั้งสองของหัวเจาะ และจะต้องจัดเตรียมพื้นที่ให้พอดีกับด้านหน้าและหลังของหัวเจาะ ในการดำเนินการจะเป็นการขนย้ายดินออกในระหว่างที่หัวเจาะทำการเจาะ หรือเป็นการนำขึ้นส่วนของหัวเจาะลงไป ปล่องแนวตั้ง ระยะห่างด้านล่างจะต้องคำนวณไว้ก่อนล่วงหน้าโดยพิจารณาถึง ส่วนประกอบของหัวเจาะและการระบายน้ำออกจากอุโมงค์

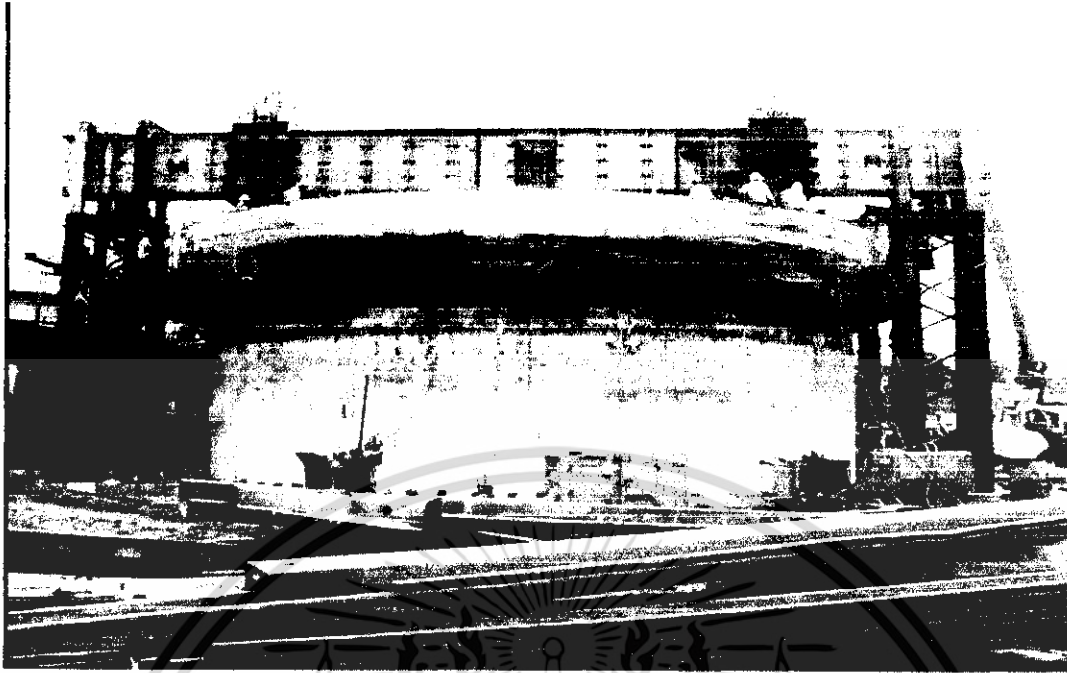
(2.2) ตำแหน่งที่วางหัวเจาะ จะต้องออกแบบให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำหนักและการเคลื่อนตัวของหัวเจาะในระหว่างการขุดเจาะได้ ในเวลาชั่วคราว

(2.3) แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทำงาน จะกระทำต่อผนังของปล่องแนวตั้งหรือคันท่ออยู่ด้านท้ายของหัวเจาะ หรือเป็นแรงปฏิกิริยาที่มาจากโครงเหล็ก ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงที่จะเกิดขึ้นเหล่านี้ไว้ล่วงหน้าด้วย

(2.4) ในการเปิดกำแพงเพื่อนำหัวเจาะเข้าสู่ปล่องแนวตั้งนั้น จะต้องออกแบบให้กำแพงสามารถต้านทานแรงคันทันที่มีอยู่ภายนอก และต้องออกแบบให้สามารถพังกำแพงได้ง่าย ขนาดของช่องเปิดจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางนอกสุดของหัวเจาะประมาณ 10-20 เซนติเมตร ต้องมีความทนทานและมีพื้นที่ทางเข้าในการติดตั้งเครื่องจักรด้วย ในช่องเปิดของปล่องแนวตั้งตรงทางเข้าจะมีขนาดใหญ่กว่านี้เล็กน้อย

(3) ในการก่อสร้างปล่องแนวตั้ง จะต้องใช้วิธีที่ประหยัดและปลอดภัย และยังคงคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยา สภาพของท้องถนน การจราจร และผลกระทบที่เกิดจากสภาพแวดล้อมตลอดทั้งเสียง และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง

ปล่องแนวตั้งจะทำการก่อสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์โดยจะทำการก่อสร้างโดยใช้การเจาะเปิดหน้าดิน (Open-cut) หรือใช้เคซอน (Caisson) หัวเจาะก็สามารถใช้งานในปล่องแนวตั้งได้ ในการก่อสร้างจะต้องเลือกวิธีที่ปลอดภัยที่สุดและประหยัดที่สุด โดยจะพิจารณาถึงขนาดปล่องแนวตั้ง สภาพทางธรณีวิทยา สภาพของถนน ปริมาณการจราจร สภาพสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ในกรณีที่ปล่องแนวตั้งไม่สามารถก่อสร้างในแนวเส้นทางอุโมงค์ได้ จำต้องเลือกตำแหน่งที่อยู่ห่างออกไป จะต้องมีการก่อสร้างทางเชื่อมต่อระหว่างปล่องแนวตั้งกับแนวอุโมงค์โดยให้มีระยะทางสั้นที่สุด



รูปที่ 6.35 ปล้องแนวตั้ง Shaft



รูปที่ 6.36 การชุบปล้องแนวตั้ง (Shaft)

6.3.2 ทางออกและทางเข้าของหัวเจาะ (Departing and Arrival of Shield Machine)

(1) ในกรณีเริ่มต้นทำการขุดเจาะนั้น จำต้องวางหัวเจาะไว้ในตำแหน่งที่ถูกต้องตามที่ได้วางแผนไว้ จากนั้นจึงนำหัวเจาะลงสู่ดิน ในการขุดเจาะด้วยหัวเจาะนั้นจะต้องทำด้วยความระมัดระวังให้เป็นไปตามแนวเส้นทางที่ได้วางไว้ โดยไม่ก่อให้เกิดอันตราย ไม่ว่าจะเป็นอันตรายจากส่วนของกำแพงปล่องแนวค้ำที่หลงเหลืออยู่ สภาพแวดล้อมของถนน สาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน เป็นต้น

หัวเจาะจะเริ่มทำการขุดเจาะตามขั้นตอน ประกอบด้วยการผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยแม่แรงจากจุดเริ่มต้น โดยใช้แรงปฏิกิริยาจากโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนชั่วคราวในปล่องแนวค้ำ ให้เคลื่อนตัว แล้วจึงทำการขุดเจาะดินไปตามเส้นทางอุโมงค์

(1.1) การวางตำแหน่งของหัวเจาะ หมายถึง การประกอบชิ้นส่วนและชุดของหัวเจาะในตำแหน่งที่เหมาะสม ในปล่องแนวค้ำ ถ้าในกรณีที่คำนวณไว้ว่าจะมีการทรุดตัวของดินอ่อนหลังจากที่ได้นำหัวเจาะลงสู่ชั้นดินนั้น จะต้องจัดตำแหน่งให้อยู่ในระดับที่สูงกว่าที่ได้ออกแบบไว้หลายเซนติเมตร



รูปที่ 6.37 การขนย้ายหัวเจาะลงทางปล่องแนวค้ำ (Shaft)

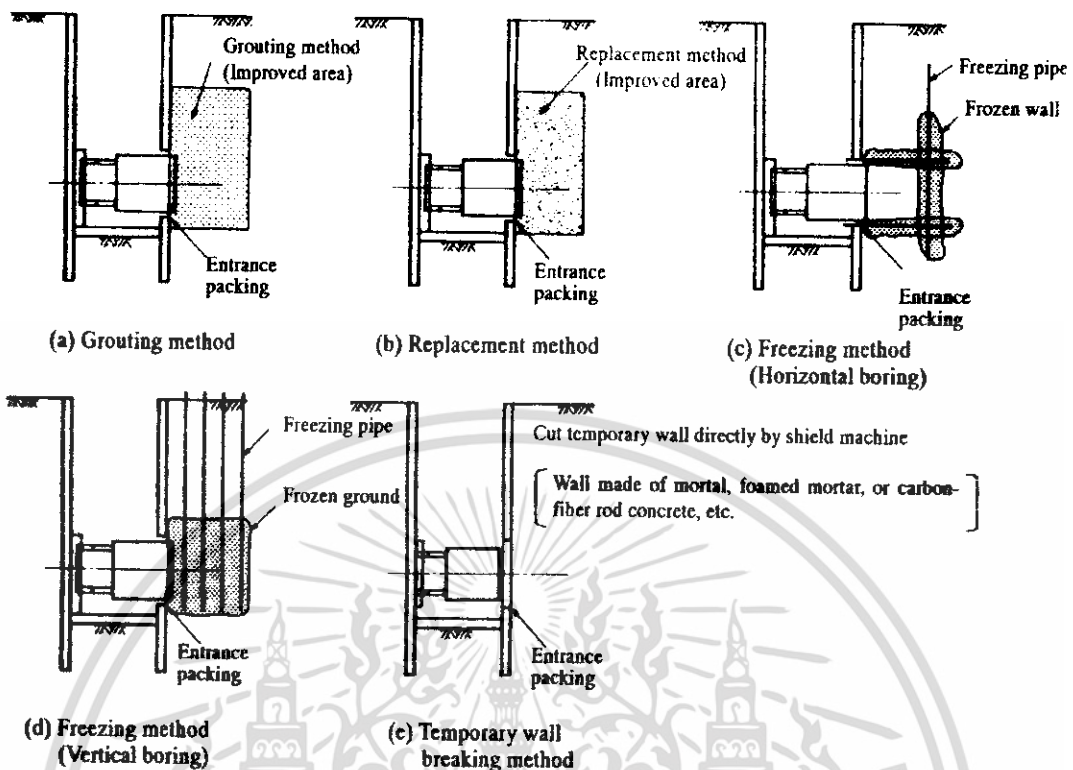


รูปที่ 6.38 การติดตั้งหัวเจาะ

(1.2) อุปกรณ์ยึดรั้ง (Back anchor facility) จะประกอบด้วยชิ้นส่วนชั่วคราวและคานรูปตัว H เป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงผลัดกันจากแม่แรงที่ทำให้หัวเจาะเคลื่อนตัวได้

(1.3) การเปิดหน้าทางเข้า (Entrance opening) ในการพังกำแพงเพื่อเปิดเป็นทางเข้าของหัวเจาะ และการเสี่ยงต่อการพังทลายของดิน ดังนั้นการทำลายกำแพงชั่วคราวจะต้องทำด้วยความรวดเร็วและระมัดระวัง โดยใช้ชิ้นส่วนขนาดเล็กกับการถ้ายันจากทางด้านหน้าของหัวเจาะ โดยปกติแล้วทางเข้าจะทำเป็นคอนกรีตปิดผนึก หรือเป็นทางเข้าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งจะต้องติดตั้งไปตลอดความยาวของทางเข้าของหัวเจาะเพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้าง

(1.4) วิธีเริ่มการดำเนินการ (Method of starting) จะต้องคำนึงถึงสถานะของเงื่อนไขต่างๆ เช่น ดิน น้ำใต้ดิน ชนิดของหัวเจาะ ระดับความลึกที่มากเกินไป และสภาพการทำงาน วิธีเริ่มการทำงานสามารถแยกออกได้



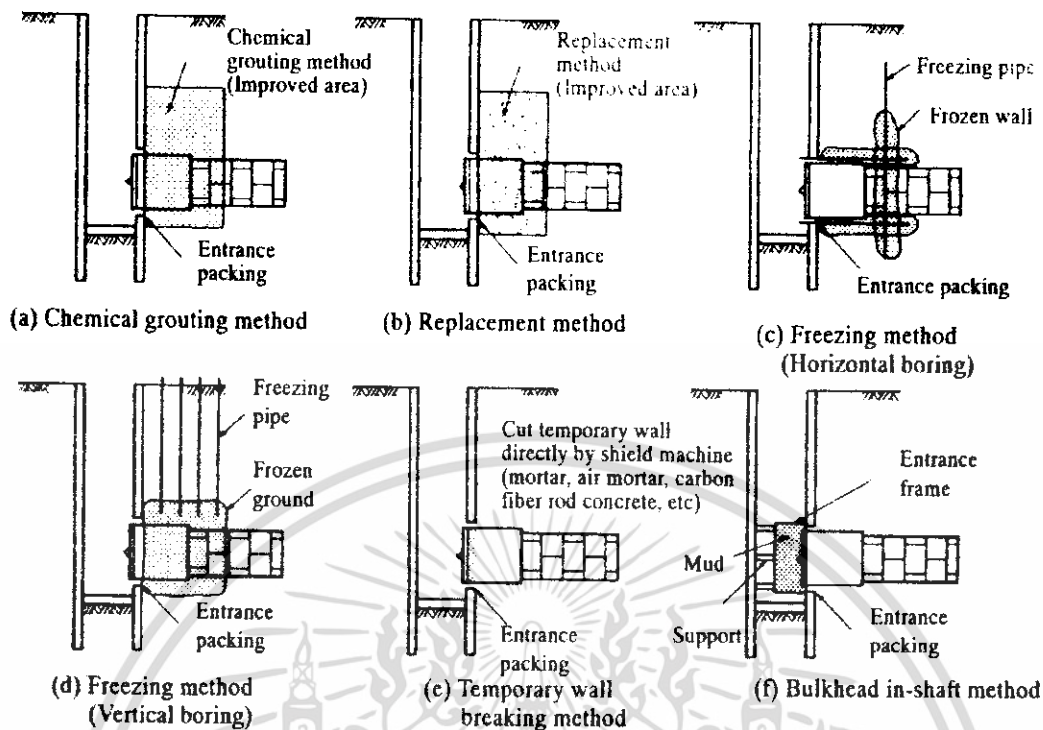
รูปที่ 6.39 ตัวอย่างวิธีการนำหัวเจาะออกจากกำแพงปล่องแนวตั้ง
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ข้อควรระวังเมื่อนำหัวเจาะลงสู่ดิน จะมีวิธีเริ่มต้นที่ต่างกันออกไปตามแต่วิธีการนำหัวเจาะที่ใช้และวิธีการ โดยทั่วไปจะต้องให้ความสำคัญกับสิ่งกีดขวางที่ยังคงเหลืออยู่ในขณะทำลายกำแพง เช่น ดินที่อุดตันอยู่ ความล้าช้าของ Countermeasures เนื่องจากการไหลของดินและน้ำเข้ามาในช่องว่างระหว่างปล่องแนวตั้งกับหัวเจาะอย่างไม่ได้คาดหมาย

(2) ในกรณีของทางเข้า ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องมีการวัดขนาดให้ถูกต้อง และเครื่องจักรจะต้องขับเคลื่อนไปด้านหน้าตามแนวทางที่ได้วางไว้ จนถึงตำแหน่งที่ระบุไว้ด้วยความระมัดระวัง โดยไม่ให้มีอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพของถนน สาธารณูปโภคใต้ดิน เป็นต้น โดยควรศึกษาหัวข้อในต่อไปนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ก่อนที่จะดำเนินการ

(2.1) วิธีการสร้างเสถียรภาพให้แก่ดินที่อยู่รอบๆ ต้องใช้ทางเข้าที่เป็นแบบ Entrance packing

(2.2) วิธีการสำรวจตำแหน่งของหัวเจาะเพื่อที่จะให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ให้ถึงกำแพง และการสื่อสารระหว่างในและนอกอุโมงค์



รูปที่ 6.40 ตัวอย่างแสดงวิธีการเข้าของหัวเจาะ

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

เพียงใด

(2.3) ตำแหน่งใดที่ต้องใช้ความเร็วในการขับเคลื่อนที่ต่ำ และต้องใช้ความเร็วต่ำ

(2.4) สิ่งที่แปลกปลอมที่เข้ามาในหัวเจาะทำให้หัวเจาะมีแรงดันลดลง

(2.5) จำเป็นต้องมีค้ำยันต้านทางแรงของดินที่อยู่บริเวณทางเข้าปล่องแนวตั้ง เพื่อการขับเคลื่อนหัวเจาะและตัว Countermeasure ของหัวเจาะ

(2.6) จังหวะและวิธีการทำลายกำแพง

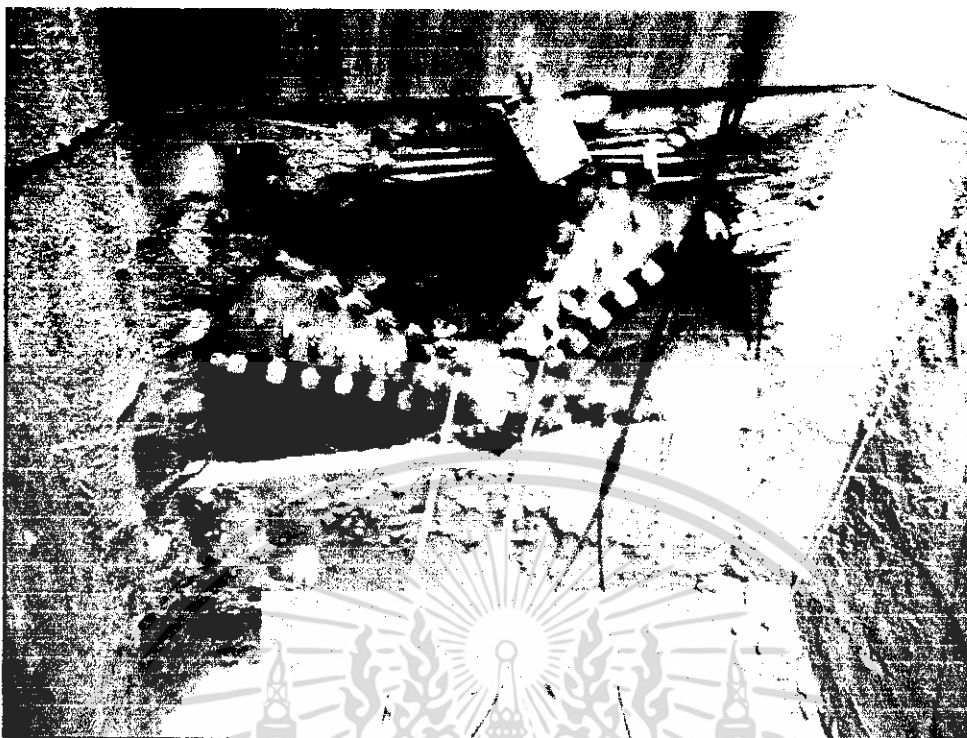
(2.7) Countermeasure ที่ด้านทานดินและน้ำที่ไหลเข้าพื้นที่ว่างระหว่างทางเข้า

กำแพง

(2.8) ตำแหน่งที่หัวเจาะจะหยุดในกรณีที่หัวเจาะถูกทิ้งไว้ได้ดิน

(2.9) วิธีการถมกลับในพื้นที่ทางเข้าบริเวณใกล้เคียง

(2.10) เครื่องมือชั่วคราว เช่น ตัวอุ้มหัวเจาะในทางเข้าปล่องแนวตั้ง ในกรณีที่หัวเจาะถูกนำลงมาทางปล่องแนวตั้ง



รูปที่ 6.41 หัวเจาะกำลังเข้าสู่ปล่องแนวตั้ง

6.3.3 การขับเคลื่อนหัวเจาะไปข้างหน้า (Advancement)

หัวเจาะจะต้องขับเคลื่อนไปตามศูนย์กลางของอุโมงค์ตามที่ได้ออกแบบไว้อย่างเที่ยงตรง ในขณะที่แม่แรงจะทำการผลักดันหัวเจาะไปด้านหน้า โดยจะต้องรักษาเสถียรภาพของดินไว้พร้อมๆ กันด้วย

(1) จำนวนของแม่แรงและตำแหน่งจะต้องเลือกให้เพียงพอที่จะดันให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ แม่แรงจะพิจารณาเลือกโดยคำนึงถึงความโค้ง และระดับลาดเอียงของแนวเส้นทาง อาจจะเลือกใช้แม่แรงเพียงผลักดันหัวเจาะด้านเดียวเพื่อให้การขับเคลื่อนในแนวโค้ง ลาดเอียง และเพื่อปรับแก้แนวเส้นทาง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณออกแบบสมรรถนะของแม่แรง จำนวนที่ต้องใช้ และตำแหน่งติดตั้งไว้ก่อนแล้ว แรงผลักดันจากแม่แรงจะต้องมีมากพอ ในเส้นทางโค้งจะมีอุปกรณ์ติดตั้งที่ใช้ในการเชื่อมต่อ แรงดันที่ต้องการ โดยขึ้นอยู่กับสภาพของดิน ชนิดของหัวเจาะ ปริมาณดินที่ขุดเจาะ และรัศมีความโค้ง ซึ่งจะต้องมีการควบคุมดูแลอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้น

(2) การบำรุงรักษาเสถียรภาพของการขุดเจาะ การขับเคลื่อนหัวเจาะและการขุดเจาะต้องดำเนินการไปพร้อมๆ กัน ปริมาณการขุดเจาะและอัตราการเคลื่อนที่จะต้องมีการปรับแก้ไปในแต่ละ

สภาพการ ดังนั้นจะต้องมีมาตรการป้องกันการขุดเจาะในปริมาณที่มากจนเกินไป สิ่งกีดขวางที่อยู่ในห้องเครื่อง และจะต้องมีการรักษาเสถียรภาพของการทำงานเอาไว้ อีกนัยหนึ่งเครื่องขุดเจาะประเภท Open-Face จะขับเคลื่อนไปพร้อมกับการขุดเจาะหรือทันทีที่ขุดเจาะเสร็จแล้ว ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับสภาพของดิน

(3) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหัวเจาะ เช่น ชั้นส่วนต่างๆ จะต้องมีการป้องกัน จะต้องพิจารณาค่าของความแข็งแรงในการรับแรงกดอัดจากแรงผลักดันหัวเจาะที่มาจากแม่แรง ซึ่งจะต้องให้มีแรงที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด จะเป็นการดีกว่าถ้าเลือกใช้แม่แรงหลายตัวเพื่อที่จะช่วยลดแรงที่จะเกิดขึ้นให้น้อยลง นอกจากนี้แล้วในเส้นทางโค้ง และทางลาดเอียงจะต้องเลือกใช้แม่แรงมากส่วนที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

(4) หัวเจาะต้องขุดเจาะไปตามแนวเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้อย่างแม่นยำ โดยพยายามให้หัวเจาะมีการเอียง ลาด หรือกลิ้งตัวให้น้อยที่สุด ขณะที่ทำการขุดเจาะแม่แรงจะออกแรงผลักดันให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ที่วางไว้เพื่อขุดเจาะดิน เมื่อถึงทางโค้ง หรือทางลาดเอียงจะต้องขับเคลื่อนโดยใช้แม่แรงแบบแยกส่วนและอาจจะต้องใช้ขนาดที่เล็กลง ชั้นส่วนที่ใช้ในการตัดหน้าดินจะต้องจัดให้มีทิศทางตั้งฉากกับศูนย์กลางของอุโมงค์มากที่สุด การเอียงตัว การสั่นตัวไปมาของหัวเจาะมีสาเหตุหลายประการ เช่น แรงปฏิกิริยาที่มาจากดิน แรงผลักดันจากแม่แรง คุณลักษณะเฉพาะของหัวเจาะ และสภาพของดิน ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องแก้ไขให้อยู่ในแนวที่ได้ออกแบบไว้ก่อนที่จะมีการถอนออกเส้นทางมากกว่านี้ เป็นเรื่องธรรมดาที่หัวเจาะจะอยู่ในลักษณะหน้าคว่ำ (Nose-Down) เพราะว่าดินที่มีความอ่อนนุ่มและ/หรือ โครงสร้างของหัวเจาะ มีการใช้แม่แรงในส่วนล่างมากกว่าส่วนบน ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์หมุนขึ้น จะต้องยึดถือแนวเส้นทางที่ได้มากจากผลสำรวจให้ถูกแนวก่อนที่หัวเจาะจะเบี่ยงออกไปจากแนวเส้นทาง ถ้าสภาพของดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันแล้ว หัวเจาะอาจจะเบี่ยงเบนออกไปจากแนวเส้นทางได้ ดังนั้นจึงต้องมีการระบุถึงตำแหน่งที่สภาพของดินมีการเปลี่ยนแปลงไว้ด้วย

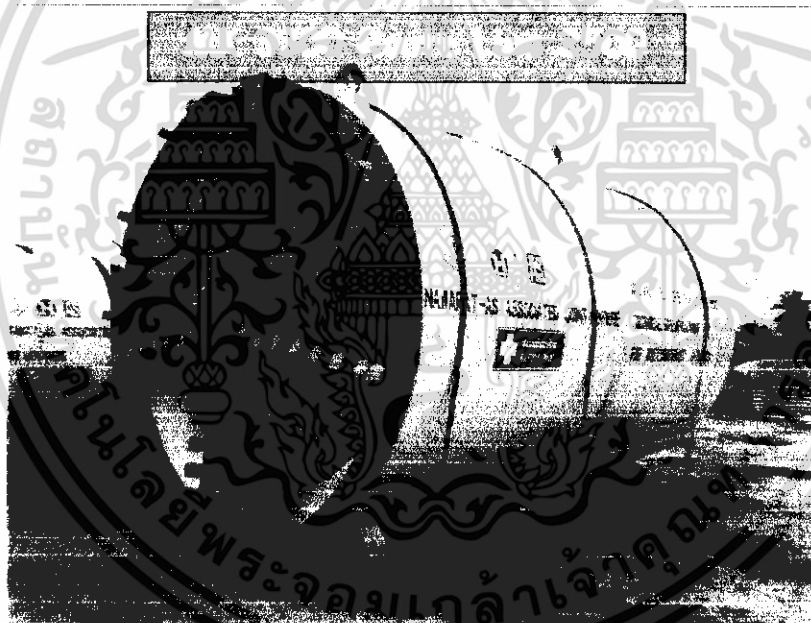
6.3.4 การขุดเจาะ เสถียรภาพของดิน และการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะประเภท EPB

จะต้องรักษาเสถียรภาพของหน้าดินเอาไว้ในขณะที่ทำการขุดเจาะ โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาของดินและเส้นทางศูนย์กลางของอุโมงค์

(1) จะต้องมีการควบคุมแรงดันในห้องขุดเจาะดิน และปริมาณดินที่ได้ขุดเจาะไปแล้วเพื่อรักษาเสถียรภาพของดินเอาไว้ ต้องมีการใส่สารผสมเพิ่มตามสภาพของดิน เพื่อปรับแต่งสภาพการไหลและความฝืดตัวให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ในขณะที่หัวเจาะ EPB ทำการขุดเจาะดิน ดินที่ถูกขุดเจาะออกมานั้นจะไหลเข้าสู่ในส่วนของหัวเจาะที่เรียกว่าห้องขุดเจาะดิน (Cutter chamber) และดินเหล่านี้จะถูกลำเลียงออกมาด้วยสกรูลำเลียง (Screw conveyor) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งอยู่ที่หัวเจาะ การนำดินที่ขุดเจาะแล้วออกมานั้นเป็นการตอบสนองต่ออัตราการขุดเจาะดินของหัวเจาะ การรักษาเสถียรภาพของดินจะทำได้โดยใช้แรงดันในห้องขุดเจาะ ซึ่งจะต้องรักษาแรงดันไว้ให้มีปริมาณที่เพียงพอในการรักษาเสถียรภาพของดิน

ต้องมีการตรวจวัดแรงดันดิน และปริมาณการขุดเพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียง และอัตราการขุดเจาะของหัวเจาะ ต้องควบคุมอัตราการหมุนของใบมีดขุดเจาะดินและแรงผลักของแม่แรงเพื่อรักษาเสถียรภาพของหน้าดินเอาไว้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6.42 หัวเจาะแบบ EPB

(2) ในการเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจะต้องพิจารณาถึงวิธีการที่ใช้ในการขุดเจาะ วิธีการขนย้ายดินออก และคุณสมบัติของดิน สมรรถนะของเครื่องมือที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมกับกำหนดการขุดเจาะ จะต้องเครื่องมือสำหรับจัดการกับสิ่งปนเปื้อนที่มากับดิน

(2.1) สภาพของดิน : ดินที่ถูกขุดเจาะออกมาจะเข้าไปอยู่ในห้องด้านในหัวหัวเจาะ ซึ่งดินเหล่านี้จะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทั้งการไหลและปริมาณน้ำที่มีให้เพียงพอที่จะลำเลียง

ออกไปด้วยสกรูล้ำเลียงได้ เพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันให้เพียงพอกับการรักษาเสถียรภาพของดินได้อย่างปลอดภัย และมีการขนย้ายดินที่ถูกขุดเจาะออกมาในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้หัวเจาะสามารถทำการขุดเจาะต่อไปได้ ถ้าดินที่ถูกขุดเจาะเป็นดินเหนียวที่มีมุมเสียดทานระหว่างเม็ดดินน้อยหรือเป็นโคลนคม จะทำการปั่นด้วยหัวใบมีด (Cutter head) เพื่อให้สามารถไหลได้ เช่นเดียวกันกับค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) เพื่อให้มีค่าน้อย จึงต้องมีการปั่นกวนในห้องขุดเจาะและในสกรูล้ำเลียง แล้วจึงปล่อยออกจากสกรูล้ำเลียงต่อไป

อีกกรณีหนึ่ง คือดินมีลักษณะเป็นทรายที่มีมุมเสียดทานภายในมากหรือเป็นกรวด ซึ่งทำการปรับปรุงคุณสมบัติการไหลตัวและการป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดินเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการฉีดอัดสารผสมเพิ่มดินเข้าไปผสมกันเพื่อให้มีการไหลได้มากขึ้นและลดค่าการซึมผ่านได้ที่มีอยู่ให้น้อยลงด้วย

(2.2) สารผสมเพิ่ม : ในหัวเจาะชนิด EPB จะทำการฉีดสารผสมเพิ่มที่หน้าดินหรือในห้องขุดเจาะดินนั้นก็ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ต่อไปนี้

- เพื่อเพิ่มค่าการไหลตัวได้ของดินที่ถูกเจาะออกมาแล้วอยู่ใน ห้องขุดเจาะดิน
- เพื่อปั่นกวนดินที่ถูกเจาะออกมาให้มีค่า Permeability ต่ำลง
- เพื่อป้องกันไม่ให้ดินที่ถูกเจาะออกมานั้นติดกับใบมีดที่ตัดดิน และจะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อไปนี้
- การลดการเสียดสีกับ ใบมีดขุดเจาะดิน
- การลดลงของแรงหมุนของหัวขุดเจาะและของสกรูล้ำเลียง

ในการเลือกสารผสมเพิ่มจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของดินและวิธีที่ใช้ในการขนย้ายดินออก คุณสมบัติของสารผสมเพิ่มที่ต้องการมีดังต่อไปนี้

- ทำให้ดินไหลตัวได้มากขึ้น
- สามารถผสมกับดินได้ง่าย
- ไม่แยกตัว
- ไม่เป็นอันตราย

สารผสมเพิ่มที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 4 ประเภทดังนี้

1. ประเภทแร่ธาตุ (Mineral type): มีอนุภาคที่ละเอียด เช่น ดินเหนียวและเบนโทไนท์ (Bentonite) เติมนลงในดินเพื่อปรับปรุงการไหลตัวและ ค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดิน สาร

ประเภทนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่าสามารถนำไปใช้กับดินได้หลายประเภท แต่ก็ต้องมีเครื่องจักรสำหรับผสมสารนี้ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าประเภทอื่นๆ และยังคงมีแท่งค้ำบรรจุด้วย

2. ประเภทสารกระตุ้นบริเวณพื้นผิวด้านนอก (Surface active agent type) : ได้แก่ สารประเภทโฟม (Foam) ซึ่งทำมาจากสารอ็อกซิเจนเข้าไป จะทำการฉีดอัดเข้าไปในดิน สารประเภทนี้จะไปป้องกันไม่ให้ดินเกาะกับใบมีดตัดดิน และยังช่วยเพิ่มการไหลตัวและค่าการซึมผ่านได้ให้กับดินอีกด้วย โฟมจะสลายไปเองได้ ดังนั้นจึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด

3. ประเภทโพลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำได้สูง : สารประเภทนี้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้หลายร้อยเท่าของตัวมันเอง และจะมีสภาพคล้ายกับเจลลี่ ไม่เจือจางในน้ำได้ดิน 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

สารผสมเพิ่มที่ต้องผสมที่ภายนอกแล้วจึงสูบเข้าไปในหัวเจาะ หรือในห้องชุดเจาะดิน วิธีการควบคุมปริมาณสารเพิ่มที่ฉีดอัดเข้าไป ส่วนมากจะใช้อัตราการชุดเจาะดินของหัวเจาะเป็นตัวควบคุม ซึ่งปริมาณที่จะฉีดอัดจะมีปริมาณคงที่อยู่ที่ในระดับหนึ่ง โดยจะใช้อัตราการชุดเจาะเป็นตัวปรับแก้ให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

(2.3) การควบคุมแรงดันภายในห้องชุดเจาะดิน : ในหัวเจาะ EPB จะต้องมีการปรับแก้แรงดันในห้องชุดเจาะอย่างเหมาะสมเพื่อให้หน้าดินยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยปกติแล้วถ้าแรงดันมีมากจนเกินไปก็จะทำให้มีการทะลักของดินที่อยู่ในห้องชุดเจาะดินมีน้อย ทำให้เสี่ยงต่อการทะลักของน้ำเข้ามาและทำลายหน้าดินให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ถ้าหากแรงดันมีมากจนเกินไปก็จะทำให้แรงผลักดันที่อยู่ในห้องชุดเจาะต้องมากขึ้น ทำให้อัตราการชุดเจาะลดลง นอกจากนี้ยังทำให้มีการทะลักของดินที่อยู่ในห้องชุดเจาะพุ่งออกมาด้านนอกได้

ในการควบคุมแรงดันในห้องชุดเจาะ จะใช้แรงดันดินในสถานะปกติเป็นขอบเขตบนของแรงดันในห้องชุดเจาะ เพื่อลดการทรุดตัวของพื้นดิน ใช้แรงดันดินในสถานะที่ถูกกระตุ้นเป็นขอบเขตล่างเพื่อรักษาเสถียรภาพของดินไว้ แม้ว่าจะมีการทรุดตัวอยู่บ้างก็ตาม

วิธีการควบคุมแรงดันในห้องชุดเจาะและการชุดเจาะของเครื่องจักรมีดังนี้

- ควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียง
- ควบคุมความเร็วของแรงผลักที่ส่งมาจากแม่แรง
- ควบคุมทั้งอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงและความเร็วของแรงผลักจากแม่แรง

(2.4) การตรวจสอบเสถียรภาพของหน้าดิน : แม้ว่าจะเป็นวิธีที่ไม่สามารถกระทำได้โดยตรง แต่ก็มีใช้กันทั่วไป โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันดินไว้ที่ Bulkhead ของหัวเจาะ ส่วนวิธีที่สามารถกระทำได้โดยตรงคือ การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีทั้งแบบหน้าสัมผัส (Contact type) และแบบไร้สัมผัส (Non-contact type) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดมีดินที่หลวมและมีรูโพรงอยู่ได้

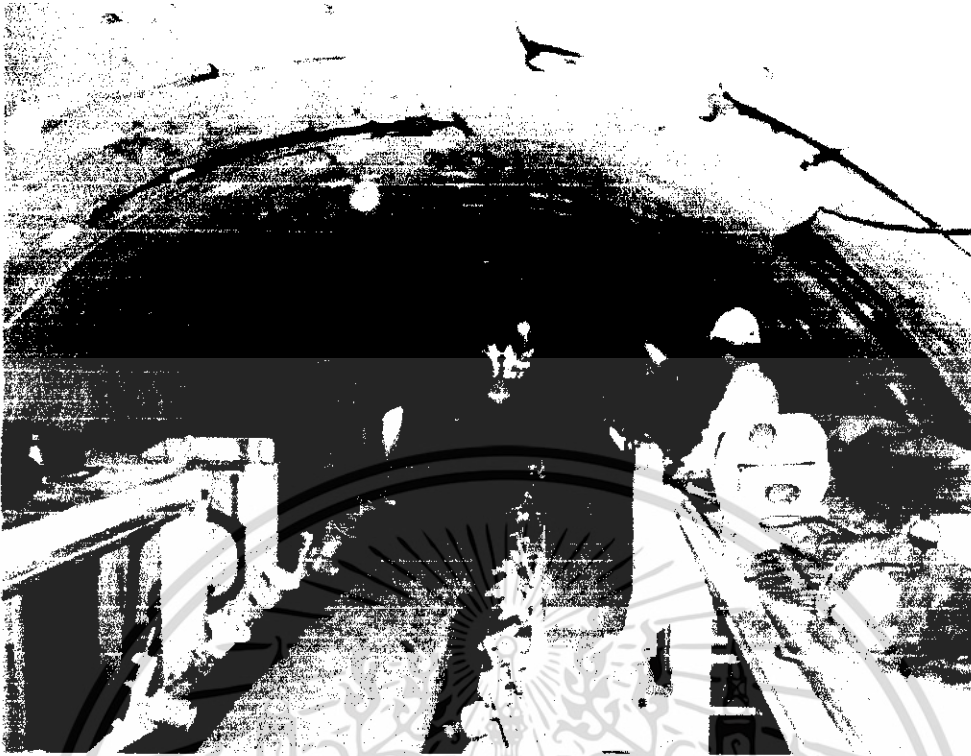
(2.5) การควบคุมปริมาณขุดเจาะ : การนำดินออกจากห้องขุดเจาะจำเป็นต้องทำให้สัมพันธ์กับปริมาณการขุดเจาะ เพื่อให้การขุดเจาะดินดำเนินไปได้อย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพของดินไปในตัว

อย่างไรก็ตามปริมาตรและน้ำหนักของดินจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากการพองตัว การแปรผันของหน่วยน้ำหนักในดิน ชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ฉีดอัดเข้าไป และวิธีการขนย้ายดินออก จึงเป็นการยากในการวัดปริมาณของการขุดเจาะที่ได้ อย่างแน่นอน ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของดินที่ขุดได้นั้นสามารถเปลี่ยนสถานะได้ ตั้งแต่กึ่งของแข็ง (Semi-solid) ไปถึงของไหล (Liquid) ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะป้องกันการพังทลายของหน้าดิน และการหลุดตัวของดิน เพียงแค่ควบคุมปริมาตรของดินอย่างเดียว ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมแรงดันในห้องขุดเจาะและปริมาตรของดินที่ขุดเจาะออกมาด้วย

(3) การลำเลียงดินจะต้องพิจารณาจากวิธีการขุด การขนดินและคุณลักษณะของดิน โดยขนาดของการลำเลียงดินจะต้องวางแผนไว้

(3.1) วิธีการขนถ่ายดินออก (Discharging method) : มีหลายวิธีที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจากห้องขุดเจาะ EPB เช่น ใช้รถขน ใช้การสูบลูก และใช้การสูบโดย Slurry เป็นต้น

(3.2) การกำจัดดินที่ขุดเจาะออกมา : ถ้าดินมีลักษณะที่เป็นโคลน คล้ายของไหล จะจัดให้อยู่ในกลุ่มของของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะต้องมีการปรับสภาพระดับปานกลาง ก่อนที่จะมีการขนย้ายออกไป

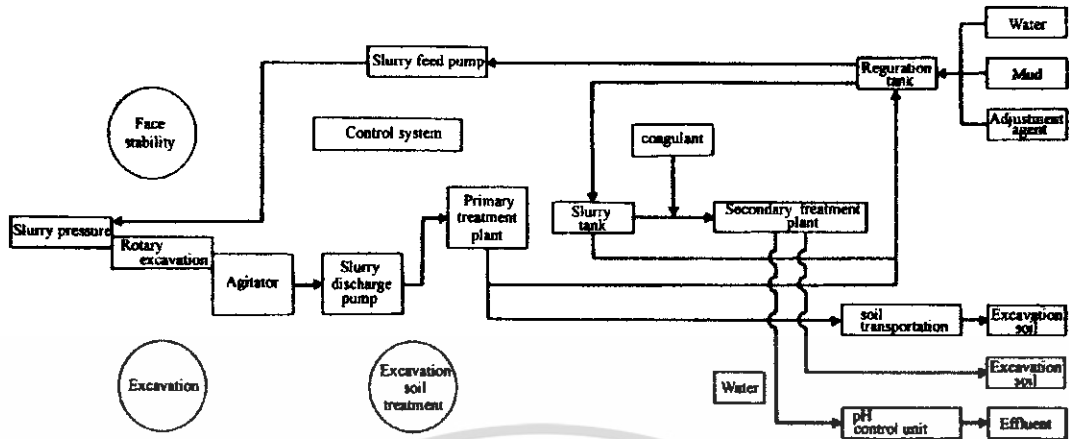


รูปที่ 6.43 การลำเลียงดินออกจากหัวเจาะ โดยสายพานลำเลียง

6.3.5 การขุดเจาะ เสถียรภาพของหน้าดินและการกำจัดดินที่ขุดเจาะออกมาของหัวเจาะประเภท Slurry (Slurry Shield)

(1) จะต้องมีการรักษาเสถียรภาพของหน้าดินอย่างปลอดภัย โดยคำนึงถึงสภาพของดิน และหน้าตัดขวางของอุโมงค์ ในวิธีการใช้หัวเจาะประเภท Slurry นั้น ตัว Slurry จะเป็นตัวที่คอยรักษาเสถียรภาพของหน้าดินและเป็นตัวที่ทำหน้าที่ขนย้ายดินออกไป โดยใช้หัวใบมีดในการขุดเจาะดินแบบอัดโนมิติ เพื่อรักษาระบบสาธารณูปโภคที่อยู่บนผิวดิน

การขุดเจาะอุโมงค์ การรักษาเสถียรภาพของหน้าดินและการนำดินที่ขุดเจาะได้ออกมาจากหัวเจาะ จะต้องพิจารณาให้เป็นหนึ่งระบบ โดยระบบนี้ถูกออกแบบมาให้สอดคล้องกับคุณสมบัติและสมรรถนะของเครื่องมือแต่ละชนิด ระบบของหัวเจาะแสดงเป็น โครงร่างในรูปที่ 6.44



รูปที่ 6.44 ระบบของหัวขุดเจาะแบบ Slurry Shield
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

ต้องมีการคำนวณระบุเกณฑ์กำหนดที่ต้องควบคุมปริมาณดินที่ต้องทำการขุดเจาะคุณภาพของตัว Slurry เอง สภาพของหน้าดิน การฉีดอัดน้ำปูน ปริมาตรการไหลของ Slurry และความเร็วในการขนถ่ายดินของ Slurry ซึ่งจะต้องมีการติดตามดูแลและควบคุมอย่างระมัดระวัง

(2) คุณภาพของ Slurry จะต้องควบคุมตามสภาพของดิน เพื่อให้มีเชื้อหุ้มดินโคลน (Mud film) บนหน้าดินอย่างเพียงพอ และต้องมีการควบคุมแรงดันที่หน้าดินพร้อมกับปริมาณที่ขุดเจาะเช่นเดียวกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1.1) การควบคุมแรงดันของตัว Slurry : แรงดันของ Slurry จะต้องถูกควบคุมภายใต้ขอบเขตความปลอดภัยของเสถียรภาพของหน้าดิน ขอบเขตของการควบคุมนั้นจะต้องออกแบบไว้ล่วงหน้า โดยใช้เงื่อนไขทางธรณีวิทยาและแรงดันของดิน/น้ำ โดยปกติแล้วถ้าแรงดันใน Slurry มีค่าต่ำเกินไปอาจทำให้ดินพังทลายลงมาได้ ถ้าแรงดันมีค่ามากเกินไปอาจทำให้เกิดการปะทุของ Slurry ออกมาได้ ขอบเขตของแรงดันของ Slurry จะใช้ค่าของแรงดันดินในสภาวะปกติเพื่อให้มีการทรุดตัวน้อย กำหนดให้แรงดันดินในสภาวะที่ถูกกระตุ้นเป็นขอบเขตล่าง เพื่อให้อย่างน้อยที่สุดก็ยังจะสามารถรักษาเสถียรภาพของดินไว้ได้ แม้ว่าหน้าดินจะมีบางส่วนที่ทรุดตัวลงมาบ้างก็ตาม

(1.2) การตรวจสอบเสถียรภาพของหน้าดิน : วิธีที่ใช้โดยทั่วไปในการตรวจสอบและควบคุมแรงดันในห้องขุดเจาะนั้น จะใช้การติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำ (Water pressure gauge) ไว้ที่ตัว Bulkhead ส่วนวิธีที่สามารถกระทำได้โดยตรงคือ การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีทั้งแบบหน้าสัมผัส (Contact type) และแบบไร้สัมผัส (Non-contact type) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดมีดินที่หลวมและมีรูโพรงอยู่ได้

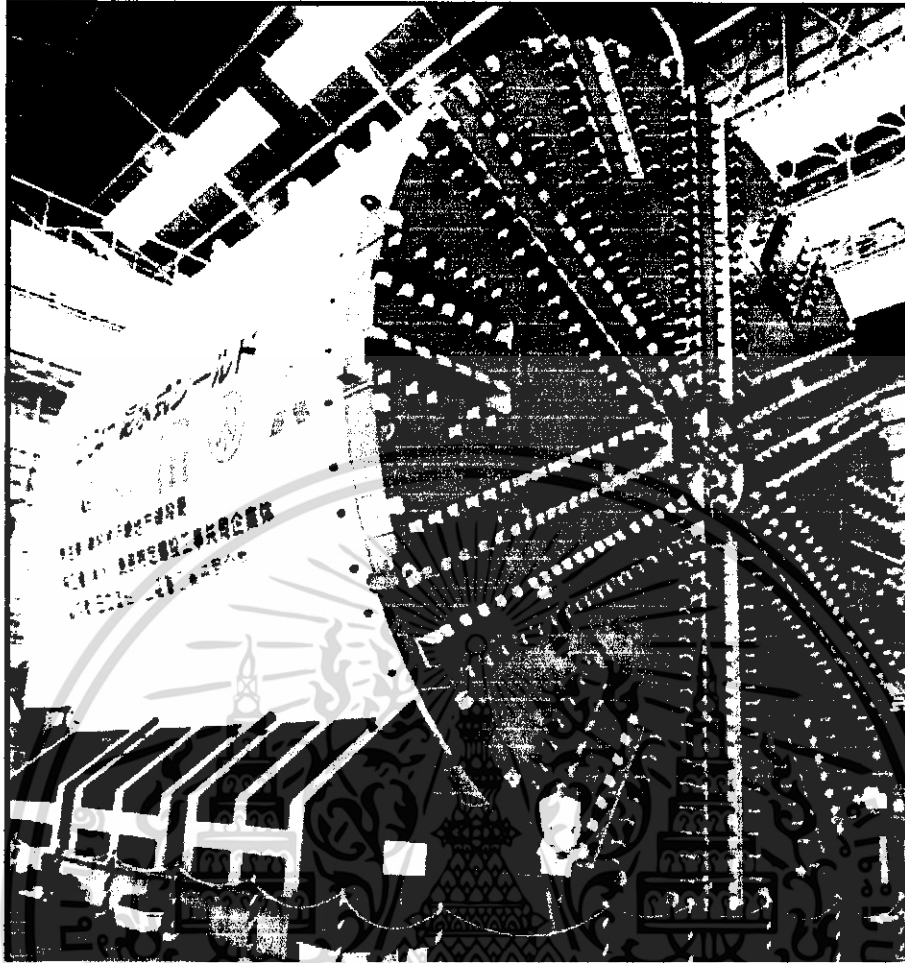
(1.3) การควบคุมปริมาตรการขุดเจาะดิน : การขุดเจาะดินจำเป็นต้องมีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ปริมาณดินที่ขุดออกมานั้นเท่ากับปริมาณดินที่ถูกขนย้ายออกไปจากหัวเจาะ จะสามารถพิจารณา สภาพของหน้าดินและปริมาตรการขุดเจาะได้จากค่าความต่างระหว่างปริมาตรของดินที่ขุดได้และ น้ำหนักแห้ง (Dry weight) ของดินที่ขุด ซึ่งจะทำให้การคำนวณข้อมูลที่ได้มาจากมาตรวัดการไหล (Flow meter) และมาตรวัดความหนาแน่น (Density meter) ที่ติดตั้งไว้ที่ทางเข้าและทางออกของดิน ใน Slurry

(3) การเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการรักษาสภาพ Slurry นั้นจะต้องเหมาะสมกับการ กระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน และให้สัมพันธ์กับกำหนดการทำงานที่ได้วางแผนไว้ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

(1.1) วิธีการขนย้าย : ดินที่ขุดเจาะออกมาจะถูกกวาดและผสมกันในห้องขุดเจาะ ด้วย เครื่องกวาดและจะถูกสูบออกมาไว้ที่ผิวดิน บนผิวดิน กรวดและทรายจะถูกแยกออกจากกันโดย อัตโนมัตด้วยเครื่องมือในขั้นต้น จากนั้นจะผสมสารก่อให้เกิดการควบแน่นลงไปใน Slurry เพื่อให้ ดินเหนียวและโคลนมีความแข็งแรงจนสามารถขนออกไปได้ หลังจากที่ได้ขนย้ายทรายและดินเหนียว ออกไปแล้ว จะต้องมีการปรับความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และค่าความหนืด โดยการเติมน้ำ ดิน เหนียว เบนโทไนท์ และสารเพิ่มความหนืดลงไป จากนั้นก็จะเริ่มกระบวนการใหม่เช่นนี้อีกครั้งต่อไปเรื่อยๆ

(1.2) การขนย้ายดินออก : ปริมาณน้ำในดินและสารเร่งให้จับตัวเป็นก้อนที่ผสมลงใน ดินจะต้องเหมาะสมกับมาตรฐานของสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ขนย้ายออกไปได้อย่างไม่มีปัญหา

โดยทั่วไปแล้วดินที่ถูกคัดแยกด้วยเครื่องจักรในขั้นต้นนั้นจะถือว่าดินนั้นใช้ประโยชน์ ไม่ได้ แต่ในขั้นที่สอง ก้อนดินจะถูกเอาน้ำออกจนแข็งเป็นก้อน ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามหน่วยงานต่างๆ และก้อนดินเหล่านั้น สำหรับประเทศญี่ปุ่นจัดว่าเป็นของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 6.45 หัวเจาะแบบ Slurry

6.3.6 การขุดเจาะดิน การรักษาเสถียรภาพของหน้าดิน และการขนย้ายดินออกจากหัวเจาะประเภท Open – Face

(1) การขุดเจาะดินด้วยเครื่องขุดเจาะที่ใช้มือ แบบกึ่งเครื่องจักรกล และหัวเจาะแบบเครื่องจักรกล จะต้องทำการขุดเจาะไปในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพของหน้าดิน พร้อมกับระบบที่ค้ำยันหน้าดินที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาเลือกจากสภาพของดินทางธรณีวิทยา และขนาดของหน้าดินที่จะต้องทำให้หลวมตัวน้อยลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1.1) วิธีการใช้เครื่องมือขุดเจาะที่ใช้มือ : จะใช้วิธีนี้ในการขุดเจาะดินเมื่อทำการขุดเจาะด้วยเครื่องจักรไปแล้ว และหน้าดินสามารถตั้งตัวอยู่ได้โดยไม่ทรุดตัวลงมา โดยจะทำการเจาะดินภายในฝาคูบ ซึ่งเป็นการเปิดหน้าดินแบบเฉพาะที่ จากนั้นต้องหาแม่แรงมาค้ำยันไว้ทันทีที่ขุดเจาะเสร็จสมบูรณ์

(1.2) วิธีการใช้เครื่องขุดเจาะแบบกึ่งเครื่องจักรกล : จะใช้วิธีนี้ในกรณีที่หน้าดินสามารถทรงตัวอยู่ได้ด้วยตัวของมันเอง และขนาดของหน้าตัดดินค่อนข้างใหญ่ ควรจะเลือกใช้เครื่องมือประเภทนี้ให้สอดคล้องกับความยาวตลอดทั้งอุโมงค์ ขนาดของหน้าดิน และกำลังรับแรงอัดของดิน เนื่องจากจะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการขุดเจาะเอาไว้ด้วย จึงเป็นการยากที่จะจัดตั้งแม่แรง ยิ่งไปกว่านั้น หน้าดินที่ไม่มีก้ำกั้นขนาดใหญ่จะต้องมีการป้องกันการพังทลายอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ

(1.3) วิธีการใช้หัวเจาะแบบเครื่องจักรกล : กระบวนการตั้งแต่การขุดเจาะจนถึงการขนย้ายดินออก จะกระทำโดยเครื่องจักร โดยทั้งสิ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบกึ่งเครื่องจักรกล การทรุดตัวของผิวดินและการเกิดช่องว่างในดินมีโอกาที่จะเกิดขึ้นได้ เพราะว่ามี การขุดเจาะที่มากจนเกินไป และมีการพังทลายของหน้าดินในบางส่วน ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลปริมาณการขุดเจาะและสภาพของหน้าดินอย่างระมัดระวัง ในชั้นของหินโคลน (Mudstone) และชั้นของกรวดที่อัดตัวกันเป็นก้อน จะมีการเสียดสี ขีดข่วนกับใบมีดขุดเจาะดิน ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลอัตราการขุดเจาะให้เหมาะสม

(2) ระบบการขนย้ายดินจะต้องเลือกให้สอดคล้องกับวิธีการที่ขุดเจาะ คุณสมบัติของดินและกำหนดการขุดเจาะ ดินที่ขุดเจาะออกมาจะถูกขนย้ายด้วยสายพานลำเลียง หรือโดยสกรูลำเลียง และขนย้ายออกจากอุโมงค์ด้วยรถขนดิน หรือใช้การสูบลูกออกไป

6.3.7 การบุผนังภายในอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง (Primary Lining)

โดยทั่วไปหลังจากที่ทำการขุดเจาะเสร็จแล้ว จะต้องติดตั้งผนังด้านในอุโมงค์ในชั้นที่หนึ่งทันที โดยจะต้องดำเนินการด้วยความถูกต้องและปลอดภัยในทิศทางที่ขุดเจาะเสร็จ

(1) การติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นที่หนึ่ง : เมื่อหัวเจาะทำการขุดเจาะดินอยู่ก็สามารถถูกผลักให้ถอยกลับมาได้ด้วยแรงดันดินที่อยู่ด้านหน้า หรือด้วยแรงดันในห้องขุดเจาะดิน ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งชิ้นส่วนของผนังด้วยแม่แรงตามแนวทางอุโมงค์ที่ได้ขุดเจาะไว้แล้ว ชิ้นส่วนของผนังโดยปกติแล้วจะสร้างให้มีส่วนที่ยื่นออกมาเพื่อยึดเกี่ยวกับชิ้นส่วนข้างเคียง ต้องทำการติดตั้งอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการกลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อที่ถูกต้อง ส่วนของสลักเกลียวของชิ้นส่วนผนัง (Segment) จะต้องเชื่อมกับอีกชิ้นส่วนหนึ่งได้พอดีและปลอดภัย โดยจะใช้เครื่องจักรในการติดตั้ง (Erector) ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้จะต้องมีความแม่นยำเพื่อให้สลักของแต่ละชิ้นแนบสนิทกันพอดี และเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนอื่นๆด้วย

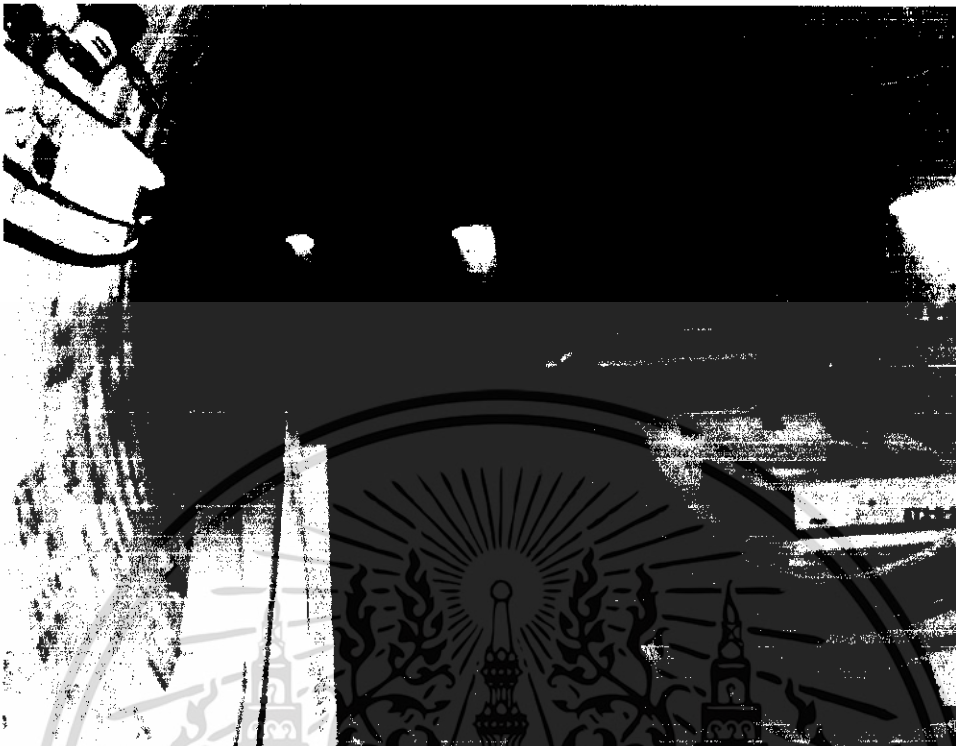
(2) การรักษารูปทรงของชิ้นส่วนผนัง : การติดตั้งชิ้นส่วนผนังรูปวงแหวนอย่างถูกต้องรูปทรงและปลอดภัย การรักษาสภาพหน้าตัดดินในอุโมงค์และความรวดเร็วในการก่อสร้าง การป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับชิ้นส่วนของผนัง การปรับปรุงคุณสมบัติความฝืดของน้ำ และการลดการทรุดตัวของดิน ทั้งหมดนี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง ในขณะที่ทำการติดตั้งจะต้องให้ความสนใจกับรูปทรงวงแหวนของชิ้นส่วนผนัง จะต้องขันสลักเกลียวให้แน่นเพื่อป้องกันการหลวม หลังจากที่ยื่นส่วนผนังถูกผลักออกมาจากทางท้ายของหัวเจาะ จะเสี่ยงต่อการเกิดการเสียรูปที่มาจากแรงดันดินหรือมาจากแรงดันของการฉีดอัดน้ำปูนได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการดูแลรักษาความโค้งของชิ้นส่วนให้ดี

(3) การขันสลักเกลียวของชิ้นส่วนและการขันให้แน่นอีกครั้ง : จะต้องขันสลักเกลียวด้วยแม่แรงให้แน่น ปลอดภัย และไม่ให้อายุชิ้นส่วนผนังเสียรูป เนื่องจากแรงผลักดันจะถูกถ่ายจากส่วนหัวเจาะมายังชิ้นส่วนของผนัง จึงต้องมีการขันซ้ำให้แน่นอีกครั้งในบริเวณที่พื้นอิทธิพลของแรงผลักดันไปแล้ว

(4) การประกอบชิ้นส่วนอัตโนมัติ : ชิ้นส่วนผนังจะถูกขนย้ายมายังตำแหน่งที่ติดตั้งด้วยรถขนาดเล็ก หัวเจาะจะทำการป้อนชิ้นส่วนเข้าเครื่องติดตั้งผนังที่อยู่ภายในหัวเจาะ แล้วทำการติดตั้งโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวทั้งอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติได้มีการปรับพัฒนาแล้วในปัจจุบัน



รูปที่ 6.46 การขนย้ายชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 6.47 การลำเลียงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ภายในอุโมงค์

6.3.8 การฉีดอัดน้ำปูนกลับ (Backfill Grouting)

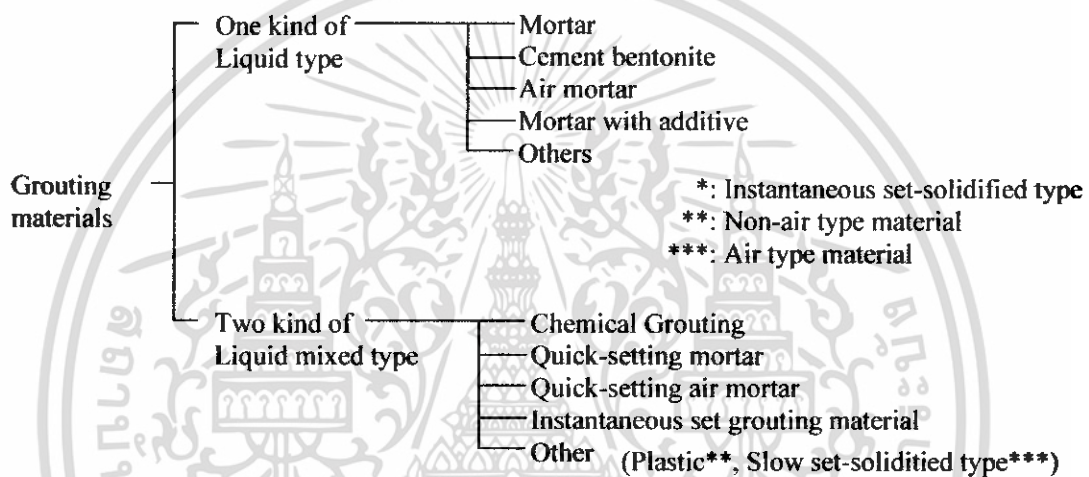
การทำการฉีดอัดน้ำปูนจะทำโดยใช้วัสดุและวิธีการฉีดอัดที่เหมาะสมที่สุด โดยจะต้องทำการฉีดอัดน้ำปูนในขณะที่หัวเจาะทำการขุดเจาะไปด้วย หรือในทันทีที่หัวเจาะได้เคลื่อนตัวออกไปแล้ว ดังนั้นช่องว่างที่จะเกิดขึ้นจะถูกอุดสนิทอย่างสมบูรณ์ และยังช่วยป้องกันการหลวมตัวของดินหรือการทรุดตัวของดินได้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นการป้องกันการไหลของน้ำเข้ามาจากทางรอยต่อของชิ้นส่วนของผนัง ช่วยรักษาเสถียรภาพชิ้นส่วนวงแหวนให้แน่นหนาขึ้น และช่วยป้องกันการรั่วไหลของน้ำจากท่อระบายน้ำเข้ามาในอุโมงค์อีกด้วย

- (1) วัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดน้ำปูน : วัสดุที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้
 - ไม่มีการแยกตัว
 - ไม่สูญเสียคุณสมบัติการไหลตัว
 - มีปริมาตรลดลงเล็กน้อยหลังการฉีดอัด
 - มีกำลังขึ้นสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับกำลังของดินในเวลาอันสั้น
 - มีความเผ็ดตัวในปริมาณพอดี

โดยทั่วไปแล้วในกรณีดินที่มีความแข็งแรงอยู่แล้วจะไม่มีจำเป็นในการฉีดอัดน้ำปูนเข้าไป แต่จะใช้สารประเภท One-liquid เพียงตัวเดียวในการฉีดอัดซึ่งถือว่าเพียงพอแล้ว อย่างไรก็ตามในกรณีของดินเหนียวที่ไม่แข็งแรงหรือดินทรายที่สามารถพังทลายได้จึงต้องมีการฉีดอัดสารเข้าไปพร้อมๆกับการขุดเจาะ ดังนั้นจึงต้องใช้สารประเภท Two- liquid ฉีดเข้าไป

คุณสมบัติสารประเภท One-liquid มีดังต่อไปนี้

- จะต้องมีความไหลตัวเพียงพอ
- สามารถอุดรอยรั่วได้
- ไม่มีการแยกตัวหรือแข็งจนกว่าจะแข็งตัว



รูปที่ 6.48 วัสดุทั่วไปในการฉีดอัดน้ำปูน
 (จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

คุณสมบัติของสารประเภท Two-liquid จะมีลักษณะไหลตัวได้ก่อนการฉีดอัดและจะกลายมาเป็น Thixotropic ในระหว่างหรือหลังการฉีดอัด

- สามารถฉีดอัดเข้าไปในพื้นที่ที่จำกัดได้
- สามารถกำหนดระยะเวลาแข็งตัวได้
- ถ้าจำเป็นควรมีความแข็งแรง(Strength) ที่ขึ้นเร็ว

(2) จังหวะเวลาในการฉีดอัดน้ำปูน : โดยทั่วไปแล้วจะทำการฉีดอัดไปพร้อมกันหรือในทันทีที่บุผนังอุโมงค์เสร็จ ในกรณีที่ทำไปพร้อมๆกันนั้น จะต้องฉีดอัดน้ำปูนผ่านท่อไปที่แผ่นงานที่อยู่ด้านท้ายของหัวเจาะหรือฉีดอัดเข้าไปตามรูในชั้นส่วนของผนังพร้อมกับการขุดเจาะอุโมงค์

ส่วนการทำแบบทันทีทันใดหลังจากขุดเจาะดินนั้นจะทำการฉีดอัดสารเข้าไปหลังจากที่ทำการขุดเจาะไปแล้ว

(3) วิธีการฉีดอัดน้ำปูน : จะทำการฉีดอัดไปตามรู ช่องว่างของชั้นส่วนผนังหรือฉีดอัดผ่านทางท่อไปยังแผ่นงานที่อยู่ท้ายหัวเจาะ วัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดจะลำเลียงไปโดยรพ่วงขนาดเล็ก แต่ก็สามารถทำการสูบออกมาโดยตรงจากเครื่องจักรที่อยู่บนผิวดินได้ เพื่อที่จะป้องกันวัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดหรือน้ำได้ดินที่เป็นส่วนเกินจะเข้ามา ต้องฉีดอัดจากระดับที่ท้ายหัวเจาะให้ทำหน้าที่เป็นตัวหุ้มป้องกันสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าไปในหัวเจาะ



รูปที่ 6.49 การ Grouting

(4) แรงดันที่ใช้ในการฉีดอัด : โดยทั่วไปจะใช้แรงดันอยู่ที่ $100 - 300 \text{ kN/m}^2$ อย่างไรก็ตามกำลังความแข็งแรงของชั้นส่วนผนัง แรงดันดิน แรงดันน้ำใต้ดิน และแรงดันใน Slurry ควรจะพิจารณาให้สอดคล้องกัน เพื่อดังค่าแรงดันของการฉีดอัดได้ถูกต้อง การฉีดอัดน้ำปูนควรจะฉีดอัดเพื่อให้แรงดันกระทำทั่วพื้นผิวของชั้นส่วนวงแหวน เนื่องจากสาเหตุของการรั่วซึมเข้าสู่ดิน การเจาะทะลุเข้าไปในดินด้วยแรงฉีดอัด การสูญเสียน้ำ และการตัดหน้าดินที่มากเกินไป ทำให้ปริมาณของ

สารที่ใช้ในการฉีดยึดต้องเพิ่มขึ้นถึง 150-200% ของปริมาณช่องว่างตามทฤษฎี (พื้นที่หน้าตัดของหัวเจาะลบด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนวงแหวน) โดยปกติการฉีดยัดน้ำปูนจะถูกควบคุมแรงดันหรือไม่ก็ ปริมาตร ถ้าเป็นไปได้ควรจะควบคุมทั้งสองอย่างทั้งแรงและปริมาตร

(5) การควบคุมคุณภาพ : เนื่องจากการฉีดยัดน้ำปูนในการอุดเจาะรูโม่เป็นสิ่งสำคัญจึงต้องมีการดูแลและควบคุมคุณภาพของวัสดุที่ใช้ด้วย และยังจำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพตามระยะเวลาที่กำหนด โดยจะต้องทำการตรวจวัดค่าของอัตราการไหล ความหนืด อัตราการแข็งตัว และกำลังรับแรงกดอัดตามกำหนดด้วย

(6) ผลกระทบจากการฉีดยัดน้ำปูนและแรงผลักดันที่ถูกผลักส่งมา : จุดประสงค์ของการฉีดยัดน้ำปูน เพื่อป้องกันดินเกิดการหลวมตัวและเพื่อถ่ายแรงผลักดันจากแม่แรงไปยังดิน เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์นี้ จะต้องทำการอุดรูรั่ว และช่องว่างที่มีให้หมดทุกจุด

6.3.9 การกันน้ำ (Waterproofing)

การกันน้ำจะต้องกระทำด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับสภาพการทำงานเพื่อที่จะบรรลุจุดประสงค์ของการอุดเจาะรูโม่ให้ได้

เนื่องจากส่วนมากการก่อสร้างรูโม่จะทำการก่อสร้างในระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน จึงต้องมีการป้องกันแรงดันที่มาจากน้ำใต้ดินซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรั่วซึม และทำให้เกิดผลกระทบมากมายซึ่งจะก่อให้เกิดความยากลำบากในภายหลัง

การกันน้ำในการบุผนังรูโม่จะทำได้โดยการอุดรอยรั่ว การคล็อกกิ้ง (Caulking) และการอุดช่องว่างระหว่างสลักเกลียว และรูสำหรับการฉีดยัดน้ำปูน

(1) การอุดช่องว่าง : การอุดช่องว่างเป็นการใช้วัสดุเข้าไปอุดในช่องว่างที่รอยต่อหลังชิ้นส่วนผนังรูโม่ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้มีดังต่อไปนี้

- ต้องมีความยืดหยุ่นและไม่สูญเสียความฝืดน้ำ ภายใต้แรงผลักดันที่กระทำซ้ำๆ ต่อชิ้นส่วนของผนังหรือการเสีรูของชิ้นส่วนของผนัง
- สามารถทนต่อแรงผลักดันของแม่แรงและความฝืดของสลักเกลียวได้
- จะต้องไม่มีผลกระทบต่อรูปทรงของชิ้นส่วนผนัง
- ต้องมีการยึดติดระหว่างวัสดุอื่นและตัวมันเองได้ดี

- ต้องทนต่อสภาพสีกกร่อน ด้านทานสารเคมีได้ และมีความทนทาน
- ใช้งานได้ดี และคงรูปเสมือนเป็นเนื้อเดียวกับสลักเกลียวและชิ้นส่วนผนัง

วัสดุที่ใช้รวมทั้งยางอินวูลคาไซด์บิวทิว (Unvulcazied butyl rubber) ยางบิวทิลขึ้นรูป (Butyl rubber) ยางสังเคราะห์พิเศษ และหัวสารไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) โดยสารไฮโดรฟิลิกหรือโพลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำได้มาผสมกับยางธรรมชาติหรือยูรีเทน (Urethane) ซึ่งนิยมใช้กันในปัจจุบัน

ในบริเวณที่ตัวกันน้ำสึกหรองได้ง่าย เช่น วงแหวนกันน้ำในชั้นทราย ตัวกันน้ำที่อุดอยู่ในบริเวณข้อต่อ จะต้องมีการซ่อมแซมอยู่เป็นประจำ

(2) การคล็อกกิ้ง (Caulking) : เป็นวิธีการใช้วัสดุคล็อกกิ้งในบริเวณด้านในของร่องของข้อต่อในชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ซึ่งจะถูกยึดติดไว้อย่างแน่นหนา

(3) วัสดุหลักๆของการคล็อกกิ้งที่นิยมใช้ คือ น้ำยางอีพ็อกซี่ (Epoxy) ไธโอคอล (Thiokol) และน้ำยางยูเรีย (Urea Resin) จะทำการคล็อกกิ้งที่ชิ้นส่วนผนังที่สลักข้อต่อที่ทำการขันให้แน่นอีกครั้ง

(4) การป้องกันน้ำบริเวณสลักของชิ้นส่วนผนังและรูฉีดน้ำปูน : จะใช้ตัวกรอมเม็ท (Grommet) สอดแทรกเข้าไประหว่างเกลียวของสลักเกลียวกับรูที่ใส่สลักเกลียว เพื่อให้สลักเกลียวในชิ้นส่วนผนังนั้นแน่นยิ่งขึ้น และเป็นตัวที่อุดช่องว่างที่อยู่รอบ ๆ สลักเกลียวเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำเข้ามาสู่สลักเกลียวได้

6.3.10 การบุผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining)

การบุผนังในชั้นนี้จะทำหลังจากที่ได้ทำการดูแลรักษาสภาพผนังในชั้นแรกอย่างดีแล้ว เช่น การทำการกันน้ำ และการทำความสะอาด

(1) การทำการก่อสร้างการบุผนังอุโมงค์ชั้นในนั้นขึ้นอยู่กับกรอบแบบอุโมงค์คอนกรีตที่นำมาติดตั้งว่ามีการเสริมเหล็กหรือไม่เพื่อเสริมแรงในการบุขึ้นส่วนผนัง การป้องกันการกัดกร่อน การกันน้ำ การปรับแก้แนวเส้นทางอุโมงค์ การป้องกันการสั่นสะเทือน การปรับผิวหน้าอุโมงค์ให้เรียบ อุโมงค์ในบางกรณีจะมีการฝังท่อสำเร็จรูปตามแนวอุโมงค์ไว้ด้วย เพื่อประโยชน์ในการเป็นทางเดินน้ำ จากนั้นจะทำการอุดช่องว่างในท่อด้วยคอนกรีต หรือมอร์ตาร์เพื่อป้องกันการเข้ามาของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ การบุผนังครั้งที่สองนี้จะต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการยากที่จะเดิมเนื้อ

คอนกรีตเข้าไปในช่องว่างที่ยังเหลืออยู่ จะต้องทำการอุดด้วยน้ำปูนหรือมอร์ตาร์ หรือจะเป็นวัสดุอื่นที่ผ่านทางท่อฉีดอัดน้ำปูนและต้องติดตั้งท่อไล่อากาศไว้ด้วย

(2) การเตรียมพื้นที่ : ก่อนที่จะทำการบดพื้นนั้น จะต้องขันตัวสลักเกลียวที่อยู่ในชั้นส่วนผนังให้แน่นขึ้นอีกครั้ง ต้องทำความสะอาดทุกชั้นส่วนของผนังและต้องอุดรอยร้าวของผนังทุกรูที่มีอยู่ให้เรียบร้อย

(3) การรักษาระดับความหนาของการบดผนังและหน้าตัดค้ำในอุโมงค์ : ความหนาของการบดผนังนั้นจะต้องคำนึงถึงสภาวะของการออกแบบ การดำเนินการติดตั้งตัวคอนกรีต และปริมาณการปรับแก้สำหรับแนวเส้นทางอุโมงค์ หรือการดำเนินการติดตั้งท่อสำเร็จรูป การดูแลรักษาสภาพของโครงสร้างภายในอุโมงค์เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด

(4) การถอดแบบหล่อคอนกรีตออก : ช่วงจังหวะที่ถอดแบบออกนั้นจะต้องครบกำหนดเวลาที่คอนกรีตขึ้นรูปได้ที่แล้ว ถ้าถอดเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการถอดแบบจะต้องเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยอาศัยประสบการณ์จากการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีขนาดคล้ายกันก่อนหน้านี้ หรือใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแทน การถอดแบบคอนกรีตจะต้องกระทำหลังจากที่คอนกรีตมีกำลังถึงที่ได้ระบุไว้

(5) การป้องกันการแตกร้าวและการกันน้ำ : มีอยู่สองขั้นตอนในการจัดการกับรอยร้าวในคอนกรีต หนึ่งคือขั้นตอนการผสมคอนกรีต และสองคือวิธีการก่อสร้าง

ข้อกำหนดในการผสมคอนกรีตมีดังนี้

- ลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ต่อหน่วยลงเพื่อที่จะลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) หรือใช้สารผสมเพิ่มจำพวกฟลายแอส (Flyash) หรือใช้ซีเมนต์ประเภทFurnace

- ลดปริมาณน้ำที่ใช้ต่อหน่วยเพื่อป้องกันการแตกร้าวจากการหดตัวแล้วคายน้ำ

- ศึกษาการใช้เออี (AE) ในการลดปริมาณสารปนเปื้อน

ข้อกำหนดสำหรับการดำเนินการติดตั้งคอนกรีตมีดังนี้

- ต้องให้เวลาคอนกรีตขึ้นรูปอย่างเพียงพอก่อนการถอดแบบ

- หลีกเลี่ยงการเทคอนกรีตบริเวณกว้างในครั้งเดียว

- ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อคอนกรีต และต้องมีระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอ

- ติดตั้งฉนวนในบริเวณรอยต่อ ข้อต่อ

6.3.11 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะตั้งแต่สองตัวขึ้นไป

ในกรณีของการก่อสร้างที่ใช้หัวเจาะตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะต้องใส่ใจกับความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์ทั้งสองตัวเป็นพิเศษ ต้องมีการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินและอุโมงค์อย่างระมัดระวัง ถ้าจำเป็นก็ควรนำวิธีอื่นมาช่วย

ในกรณีของการใช้หัวเจาะตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ไม่ว่าจะขุดเจาะดินในแนวราบหรือแนวตั้งก็ตาม จะต้องมีการติดตามดูแลผลกระทบระหว่างอุโมงค์ทั้งสองเป็นพิเศษ และจะต้องใช้วิธีการก่อสร้างที่ปลอดภัยโดยคำนึงถึงสภาพของดิน วิธีการขุดเจาะ เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดอุโมงค์ และระยะห่างระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง ผลที่ได้นั้นก็จะเป็นการนำมาใช้ดำเนินการต่อไป ถ้าจำเป็นก็ต้องมีการตรวจวัดค่าอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการป้องกันการคลายตัวของดิน และการเสีรูปร่างของอุโมงค์

(1) ผลกระทบระหว่างอุโมงค์: ผลกระทบจะขึ้นอยู่กับสภาพของการก่อสร้างอย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่มีต่ออุโมงค์มีดังนี้

- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ใช้แรงผลักดันหรือลากเข้า ในการขุดเจาะอุโมงค์
- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ หัวเจาะถูกลากเข้าโดยมีเส้นทางตัดผ่านกับเส้นทางขุดเจาะอีกเส้นทางหนึ่งหรือไม่
- อุโมงค์ที่ถูกขุดเจาะก่อนหน้านี้ หัวเจาะถูกผลักเข้าไปในเส้นทางที่ทำการฉีดค้ำน้ำปูนของอีกหัวเจาะหนึ่งหรือไม่
- อุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะในปัจจุบันนั้นเคลื่อนตัวเข้าไปในดินที่มีการหลวมตัวเนื่องมาจากการขุดเจาะจากหัวเจาะก่อนหน้านี้หรือไม่

ในเส้นทางที่ตัดผ่านกันดังหัวข้อด้านบนนี้จะส่งผลกระทบให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ การเสีรูปร่าง และการวิบัติของสลักเกลียว การรั่วไหลของน้ำเข้ามาในอุโมงค์ และเกิดการทรุดตัวของอุโมงค์มากขึ้นได้ จึงต้องมีการคำนึงถึงความจำเป็นในการดำเนินการขุดเจาะให้เหมาะสม

(2) การติดตามผลของสภาพดินอุโมงค์: การติดตามพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของหน้าดิน การเสีรูปร่างของอุโมงค์ การทรุดตัว และการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ตลอดเวลา เนื่องจากว่าสภาพของดินและวิธีการก่อสร้างนั้นไม่เหมือนกับที่ได้คำนวณไว้เสมอไป จำเป็นต้องใช้การดำเนินการติดตามอย่างแม่นยำโดยใช้เครื่องวัดการทรุดตัวของดิน (Ground settlement gauge) อินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer) เครื่องวัดแรงดันดิน (Earth Pressure gauge) พิโซมิเตอร์ (Piezometer)

และคอนเวอร์เจนซ์มิเตอร์ (Convergence meter) ถ้าตรวจพบสิ่งผิดปกติใดๆ จะต้องรีบดำเนินการจัดการทันที และต้องหาสาเหตุให้พบ ภายใต้อาการการณ์ที่ผิดปกติ อาจจะต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้าง หรือใช้วิธีการตรวจวัดอื่นๆเพิ่มเติม

6.3.12 การตัดผ่านแม่น้ำ (River Crossing)

ในกรณีที่อยู่ใกล้ตัดผ่านได้แม่น้ำ จะต้องมีการควบคุมการก่อสร้างให้ปลอดภัยมากขึ้น โดยคำนึงถึงสภาพของดินและน้ำที่ได้ทำการศึกษามาแล้ว

สิ่งที่ควรคำนึงถึงเมื่อมีการก่อสร้างภายใต้แม่น้ำมีดังนี้

(1) การสำรวจสภาพดินและน้ำใต้ดิน : โดยทั่วไปสภาพของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และน้ำใต้ดินจะไหลอย่างรวดเร็วภายใต้หน้าตัดของแม่น้ำ เนื่องจากสภาพของดินและน้ำใต้ดินเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้วิธีการขุดเจาะ และรายละเอียดอื่นๆ

(2) เสถียรภาพของหน้าดิน : ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าหากดินและน้ำใต้ดินนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน แรงดันของน้ำอาจจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับแรงดันส่วนเกิน (Overburden) ที่ก้นของแม่น้ำ แรงดันในห้องขุดเจาะก็ต้องควบคุมให้เข้ากับแรงดันดินและน้ำใต้ดิน ถ้าแรงดันน้ำมีค่ามากกว่าแรงดันในห้องหัวเจาะแล้ว ก็จำเป็นต้องมีการเตรียมการป้องกันการลอยตัวของอุโมงค์ และการเสีรูปของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ต้องดูแลเสถียรภาพของหน้าดินและการรั่วซึม หรือใช้การเป่าลมใส่สิ่งแปลกปลอมต่างๆที่จะเข้ามา

(3) การป้องกันอิทธิพลของเขื่อนกั้นน้ำและโครงสร้างของแม่น้ำ : อิทธิพลของเขื่อนและโครงสร้างของแม่น้ำนั้นจะส่งผลต่อการทำการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งจะต้องมีการประมาณการ และมีการตรวจวัดเพิ่มเติมเพื่อใช้ข้อมูลในเวลาที่เหมาะสม

(4) อื่นๆ : จำเป็นต้องติดต่อกับสำนักงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับแม่น้ำนั้น เนื่องจากอาจมีข้อห้ามต่างๆในการก่อสร้างและต้องทำการเตรียมการไว้ล่วงหน้า เช่น การกั้นน้ำ ซึ่งจะต้องมีการเตรียมการไว้ด้วย

6.3.13 การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้น (Tunnel Construction with Shallow Cover)

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

(1) การควบคุมแรงดันดิน : การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้นจะมีแรงดันส่วนเกินน้อย ดังนั้นช่วงของแรงดันดินที่ยอมให้มีได้จึงมีค่าน้อยตาม แรงดันตัวอื่นอาจกลายเป็นตัวที่ส่งผลกระทบอย่างร้ายแรงก่อนหน้าดินที่ทำการขุดเจาะก็เป็นได้

(2) การฉีดอัดน้ำปูน : ในพื้นที่ที่ตื้นนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อผิวดินและสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดินในบริเวณนั้นได้ โดยจะทำให้เกิดช่องว่างในดินขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการฉีดอัดน้ำปูนเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน วัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดจะต้องมีกำลังความแข็งแรงที่ขึ้นเร็ว จะต้องทำการฉีดอัดน้ำปูนไปพร้อมๆกับการขุดเจาะอุโมงค์

(3) การทำงานภายใต้สภาวะพิเศษ : ในบริเวณที่ตัดผ่านแม่น้ำจำเป็นต้องศึกษาถึงการลอยตัวของอุโมงค์ และการบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนของผนังในอุโมงค์ เพื่อให้หน้าดินมีเสถียรภาพ และป้องกันการรั่วซึมของสิ่งแปลกปลอมอื่นๆได้ ในที่ที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ในระดับตื้นนี้จะมีบ้านพักอาศัยที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงสาเหตุจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนได้ ควรหลีกเลี่ยงการทำงานก่อสร้างในตอนกลางคืนด้วย

6.3.14 การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับลึก

การก่อสร้างในระดับลึกนั้นจะต้องทำการศึกษาวิธีการก่อสร้าง เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ โดยพิจารณาถึงสภาพใต้ดิน และต้องมีการตรวจวัดเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการก่อสร้างนั้นปลอดภัย

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

(1) หัวเจาะ : สำหรับหัวเจาะในอุโมงค์ลึก การตรวจสอบทุกชั้นไม่ว่าจะเป็นใบมีดตัดดิน ดินที่ขุดเจาะออกมา อีกทั้งระบบการขุดเจาะจะต้องนำมาพิจารณาทำการป้องกัน

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

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

- อุปกรณ์ขนย้ายดินออกจากหัวเจาะ : จะต้องมีการทำงานอย่างคงที่อย่างต่อเนื่อง ภายใต้แรงดันน้ำสูงๆ ได้ นอกจากนี้ยังต้องเตรียมตัวเคลือบสำหรับเพลาหมุนในหัวเจาะประเภท Slurry เพื่อให้ทำงานในแรงดันน้ำสูงๆ ได้เช่นกัน รวมทั้งต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กันน้ำในกรณีฉุกเฉินไว้ด้วย

- อุปกรณ์ในการขับเคลื่อน : ต้องใช้แม่แรงและระบบไฮดรอลิกที่มีสมรรถนะสูง เพื่อเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นด้วย

(2) ชิ้นส่วนผนังของอุโมงค์ : จะต้องมีการเตรียมสิ่งเหล่านี้สำหรับผนังอุโมงค์ที่อยู่ลึกมากๆ วัสดุกันน้ำ ตัวกันน้ำบริเวณ ช่องว่างของสลักเกลียวและรูสำหรับฉีดอัดน้ำปูน และแรงที่มาจากการทำงานขุดเจาะ เหน้ แรงผลักดันของแม่แรงที่ใช้ในการฉีดอัดน้ำปูน ตัวสลักที่อยู่ในแนวราบจะเสี่ยงต่อแรงดันด้านนอกมากเป็นพิเศษ

6.3.15 การก่อสร้างอุโมงค์ในบริเวณโค้งหักศอก (Tunnel Construction with Sharp Curve)

เมื่อต้องทำการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก จะต้องมีการวัดค่าเพื่อให้แน่ใจว่าปลอดภัยและต้องทำการก่อสร้างอย่างถูกต้องตามสภาพของใต้ดิน และต้องมีการป้องกันการเสียรูป การเคลื่อนตัวของอุโมงค์จากแรงปฏิกิริยาจากแม่แรงด้วย

เมื่อมีการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก ค่าต่อไปนี้จะต้องทำการวิเคราะห์อย่างละเอียด และต้องมีการตรวจวัดอย่างถูกต้อง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการดำเนินการก่อสร้างเป็นไปอย่างปลอดภัยและถูกต้อง ได้แก่ สภาพของดิน แนวเส้นทางอุโมงค์ หัวเจาะ ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ การเปิดหน้าดิน การตรวจวัดค่าต่างๆ การฉีดอัดน้ำปูน

โดยปกติแล้วรัศมีโค้งในทางปฏิบัติมีแนวโน้มว่าจะมีค่ามากกว่าค่ารัศมีทางทฤษฎี ดังนั้นจึงต้องทำการวัดค่าถึงขอบเขตที่จำเป็น

ค่าดังต่อไปนี้มีผลต่อการก่อสร้างในโค้งหักศอก

(1) หัวเจาะ

- ความยาวของหัวเจาะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เป็นข้อต่อเชื่อมระหว่างหัวเจาะ
- ต้องมีการติดตั้งใบมีดขุดเจาะสำรอง
- ถ้าของแรงดันและแรงหมุนเหวี่ยงใบมีดขุดเจาะดินจะต้องมีมากพอ และทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปข้างหน้าได้ด้วยแม่แรงแยกส่วนเท่าที่จะเป็นไปได้

(2) ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

- ชิ้นส่วนที่จะใช้ต้องมีความเรียบมาก
- ต้องมีความกว้างน้อย
- พื้นผิวด้านนอกและช่วงข้อต่อของสลักเกลียวจะต้องมีการเสริมแรงเพื่อป้องกันแรงกระทำที่เอียงศูนย์

นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือการเพิ่มพื้นที่ว่างที่ท้ายหัวเจาะ โดยลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วนของวงแหวนลงสำหรับโค้งหักศอกโดยเฉพาะ

(3) การเปิดหน้าดิน : ยิ่งเปิดหน้าดินกว้างก็ยิ่งทำการก่อสร้างได้ง่ายขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดปัญหาดินหลวมตามมา การฉีดอัดน้ำปูนจะทำได้ และจะเกิดการเสียรูปของอุโมงค์ เนื่องจากมีแรงต้านทานแรงผลักดันจากแม่แรงที่น้อยลงนั่นเอง การเปิดหน้าดินจึงต้องทำให้น้อยที่สุดและต้องรักษาเสถียรภาพของดินไปในตัวด้วย อย่างไรก็ตามขอบเขตของการเปิดหน้าดินจะต้องใหญ่มากพอสำหรับเหตุการณ์สุดวิสัยด้วย

(4) มาตรการเสริม : ถ้าลักษณะใต้ดินมีลักษณะร่วนมากจะต้องมีการฉีดอัดน้ำปูนโดยใช้สารเคมีหรือใช้การฉีดอัดแรงดันสูง และใช้วิธีการผสมกันเพื่อป้องกันการเกิดการหลวมตัวของดินที่เป็นผลมาจากการขุดเปิดหน้าดิน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าดินมีแรงปฏิกิริยาอย่างพอเพียง

(5) การฉีดอัดน้ำปูน : เมื่อทำการก่อสร้างในโค้งหักศอกจะต้องทำการติดตั้งชิ้นส่วนของผนังโดยทันทีเพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้แรงปฏิกิริยาที่มีต่อแรงขับเคลื่อนของหัวเจาะจะต้องไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียรูป การเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ และเบี่ยงเบนออกนอกแนวเส้นทางที่กำหนดไว้ ในการฉีดอัดน้ำปูนจะต้องใช้วัสดุที่ไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรหลังจากทำการฉีด

อัดไปแล้ว จะต้องมีการเพิ่มความแข็งแรงที่ขึ้นเร็วในช่วงเริ่มต้นและมีกำลังที่ใกล้เคียงกับของดิน จึงจำเป็นต้องทำการฉีดอัดน้ำปูนทันทีในกรณีที่มีการขุดเปิดหน้าดินมากขึ้น

(6) การสำรวจแนวเส้นทาง : ทำการสำรวจแนวเส้นทางเพื่อที่จะรักษาแนวเส้นทางเดิมไว้ ยังมีความจำเป็นต้องควบคุมเส้นทางมากเท่าใดก็ต้องทำการสำรวจมากครั้งขึ้นเท่านั้น

6.3.16 การก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน (Steep Gradient Tunnel Construction)

การทำก่อสร้างในทางลาดชัน ระบบการขนส่งและดินที่ขุดเจาะได้ และอุปกรณ์ที่ปลอดภัยจะต้องพิจารณานำมาใช้งานเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพดินและมาตรการดูแลรักษา เพื่อให้มั่นใจได้ว่ามีความปลอดภัยในการก่อสร้าง

การก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชันจำเป็นต้องมีมาตรการพิเศษสำหรับการขนส่ง อุปกรณ์ อุปกรณ์ด้านความปลอดภัย การเพิ่มสมรรถนะของหัวเจาะ การเปลี่ยนแปลงและการเสริมแรงในผนังคอนกรีต

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

หัวข้อต่อไปนี้จะต้องให้ความสนใจและมีมาตรการที่มีประสิทธิภาพให้เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน

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

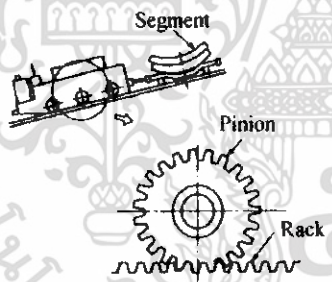
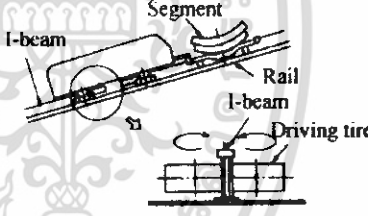
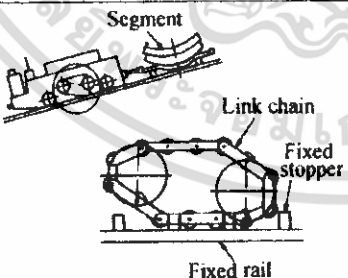
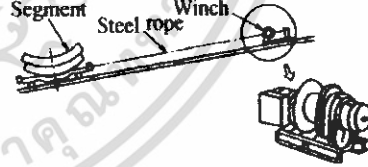
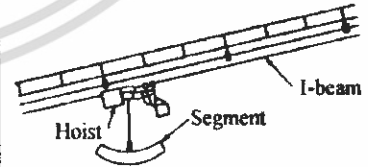
(2) หัวเจาะ : เนื่องจากหัวขุดเจาะคือส่วนที่อยู่หน้าสุดของหัวเจาะ ถ้ามีน้ำหนักที่ถ่วงมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการคว่ำหน้าลงของหัวเจาะได้ เพราะฉะนั้นขนาดแม่แรงที่ใช้ในส่วนล่างต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะรักษาระดับเอาไว้ได้

(3) ขึ้นส่วนของผนังอุโมงค์ : เมื่อติดตั้งขึ้นส่วนผนังรูปวงแหวนนั้น ตัวติดตั้งจะทำงานได้ยากเนื่องจากมีพื้นที่ที่จำกัดในทางลาดชัน

(4) การฉีดค้อน้ำปูน : ในการก่อสร้างอุโมงค์ในทางลาดชัน จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยหลังจากทำการฉีดค้อน้ำปูนไปแล้ว และจะต้องมีกำลังที่ขึ้นเร็วจนเท่ากับกำลังของคน

(5) การขนส่งอุปกรณ์ในอุโมงค์ : นำระบบรางปกติมาใช้ในทางลาดชันแล้วก็จะทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงจากการไถลของรถรางขนส่งอุปกรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้การขนส่งระบบหนึ่งในที่แสดงต่อไปนี้ (อ้างอิงรูปที่ 6.50)

- ระบบรางและเฟืองขับ (Rack and pinion system)
- ระบบโซ่คล้อง (Link chain system)
- ระบบขับเคลื่อนด้วยล้อยาง (Rubber tire System)
- ระบบรถถ่วง (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 6.50 อุปกรณ์การขนส่งในอุโมงค์ที่มีความลาดชัน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(6) การนำหัวเจาะเข้าและออก : เมื่อหัวเจาะเริ่มขุดเจาะที่ทางลาดชันจะยิ่งเสี่ยงต่อการไถลออกนอกเส้นทางจึงควรมีการป้องกันไว้ด้วย เมื่อหัวเจาะมาถึงบริเวณทางลาดชันที่เป็นทางขึ้นจะต้องให้ส่วนท้ายของหัวลงมาก่อน แล้วส่วนบนค่อยตามลงมา จะต้องมีการป้องกันการป้องกันดินหลวมหรือการไหลเข้าของน้ำเหนือบริเวณหัวเจาะของปล่องแนวดิ่ง

(7) การดำเนินการในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชัน : ถ้าระยะรัศมีความโค้งมีค่าน้อยมากในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชันแล้ว หัวเจาะจำเป็นต้องใช้ข้อต่อพ่วงกับแม่แรงในแนวดิ่งด้วย เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนผนังหรือการเคลื่อนตัว ต้องมีการฉีดอัดน้ำปูนอย่างถูกวิธี

(8) การไหลเข้าของน้ำ : ในทางลาดลงจะยิ่งทำให้น้ำไหลเข้าได้มากขึ้นและง่ายขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมการป้องกันการไหลเข้าของน้ำไว้อย่างดี

6.3.17 การก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระยะทางยาว (Long-distance tunnel construction)

ถ้าต้องการก่อสร้างอุโมงค์ในบริเวณทางที่มีความยาวมากๆ ควรจะใช้หัวเจาะประเภท Close-face เพื่อความทนทานและประสิทธิภาพของหัวเจาะ อุปกรณ์ก่อสร้างจะต้องใช้ให้เหมาะสมกับสภาพของใต้ดินและจะต้องมีการดูแลด้านการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดเสียงด้วย

โดยทั่วไปแล้วตัวอุโมงค์ที่มีความยาวที่มากกว่า 1.5 กิโลเมตรจัดว่าเป็นการก่อสร้างอุโมงค์ในระยะยาวได้ หัวข้อต่อไปนี้จะคำนึงถึงเมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์เป็นทางยาว โดยใช้หัวเจาะชนิด Closed-Type

(1) ความทนทาน : หัวข้อต่อไปนี้จะได้นำมาพิจารณาสำหรับความทนทานในแต่ละสภาพของใต้ดิน ประเภทของหัวเจาะและสภาพการก่อสร้าง นอกจากนี้ ความทนทานของหัวขุดเจาะ หัวขุดเจาะดิน ไบมีดขุดเจาะดิน ตัวเคลือบไบมีดและท้ายหัวเจาะ ก็ได้นำมาพิจารณาด้วย

- หัวขุดเจาะดิน : การเสียดสีที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ความเร็วที่ใช้ในการขับเคลื่อน ความเร็วของการขุดเจาะดิน และความสามารถในการไหลตัวของวัสดุที่ถูกขุดเจาะออกมา ในอดีตการเสียดสีอย่างรุนแรงจะเห็นได้จากขอบนอกของวงแหวนและเส้นรอบวงของหัวขุดเจาะ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันการเสียดสีอย่างดี มีการเชื่อมเหล็กที่ทนต่อการเสียดสีและแทรกส่วนประกอบที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษด้วย

- ไบมีดขุดเจาะดิน : การเสียดสีและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับไบมีดจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ทำการก่อสร้าง สภาพของดิน รูปร่างของไบมีด ชนิดของวัสดุที่เป็นไบมีดและจำนวนไบมีดต่อการ

หมุนตัดหน้าดิน อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักของการเสียดสีก็คือ สภาพของดินและระยะห่างของใบมีด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่ทนต่อการเสียดสี เช่น ใบมีดแบบพรีคัตติง (Precutting) ใบมีดแบบจาน และใบมีดแบบชั้นบันไดเป็นต้น

- การเคลือบเพื่อเพิ่มความทนทาน : ต้องมีการเคลือบใบมีด และชิ้นส่วนที่ต้องเผชิญกับการเสียดสี ต้องเลือกใช้วัสดุเคลือบที่ทนต่อการเสียดสีได้ดี หรือทำการห่อหุ้มแบบหลายชั้น แล้วทำการอัดจาระบีเข้าไปเพื่อปรับปรุงความฝืดน้ำและลดการเสียดสีลง
- ท่อ Slurry และท่อปล่อยน้ำออก : ในชั้นดินที่เป็นทรายและกรวดจะทำให้ท่อ Slurry สึกหรอได้ง่าย จึงต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาเพื่อให้มีการสึกหรอช้าลง

(2) การบำรุงรักษา : การบำรุงรักษาที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการยืดอายุความทนทานให้แก่หัวเจาะ และป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจนไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับใบมีดชุดเจาะโดยปกติแล้วการเสียดสีจะเกิดขึ้นที่ชั้นนอกสุดของใบมีดที่ระยะห่างของใบมีดที่มากที่สุด จึงต้องมีการดูแลรักษาอย่างดี

(3) การเปลี่ยนใบมีดตัดดิน : การเปลี่ยนใบมีดและการเคลือบท้ายหัวเจาะจะต้องกระทำบ่อยครั้งในการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีระยะทางยาว สำหรับรายละเอียดในการเปลี่ยนใบมีด การเคลือบท้ายหัวเจาะ จะต้องคำนึงถึงวิธีการเปลี่ยนที่สะดวกในระหว่างการก่อสร้างด้วย (ยกเว้นตัวหุ้มนอกสุด)

(4) เครื่องจักรและอุปกรณ์ : ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระยะทางยาว ระบบการขนย้ายดินออกอาจจะถูกจำกัด ดังนั้นเพื่อที่จะทำงานได้มากขึ้น ลดความเสี่ยงต่อความไม่ปลอดภัยและงานที่ยุ่งยาก และเพื่อปรับปรุงคุณภาพของอุโมงค์และสถานะการทำงาน การขนส่งวัสดุอัดโนมิตี การติดตั้งชิ้นส่วนผนังอัดโนมิตี และการฉีดอัดน้ำปูนแบบอัดโนมิตีจะต้องนำมาใช้

(5) ความปลอดภัยและสุขภาพ : ในการก่อสร้างอุโมงค์ระยะทางยาว สภาพการทำงานจำเป็นต้องมีการปรับปรุง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับความปลอดภัยและสุขภาพติดตั้งอยู่ เช่น หีบน้ำ หี้อาบน้ำและห้องพักผ่อนสำหรับคนงานเป็นต้น

6.3.18 การเปลี่ยนใบมีดชุดเจาะดิน (Cutter Bits Change)

การเสียดสี ความทนทานและวิธีการเปลี่ยนใบมีดจะต้องนำมาพิจารณาในระบะทางการทำงานที่ยาวนานและสภาพของใต้ดินนั้นๆ

ใบมีดจำเป็นต้องเปลี่ยนเมื่อเกิดการสึกหรอ หรือปลายใบมีดเกิดความเสียหาย การเสียดสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของหัวเจาะ ลักษณะของดิน ระยะห่างของใบมีด รูปทรงและวัสดุที่นำมาทำเป็นใบมีด จะต้องคำนึงถึงความทนทาน การเสียดสีที่เกิดขึ้นกับใบมีด และการคำนวณไว้ด้วยว่า ควรเปลี่ยนใบมีดที่ตำแหน่งใด เมื่อใด

มาตรการสำหรับความปลอดภัยในการก่อสร้างที่พึงกระทำมีดังนี้

(1) ประมาณค่าการเสียดสี : โดยทั่วไปแล้ว จะประมาณค่าการเสียดสีที่เกิดขึ้นได้

จากสมการ

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

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 โดยจะเลือกจากพื้นฐานข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ที่คล้ายๆ กันมาใช้

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

(3) การเปลี่ยนใบมีด : ในการเปลี่ยนใบมีดในระหว่างทำการก่อสร้างจะต้องพิจารณาถึงความง่ายในการเปลี่ยนด้วย โดยจะใช้การติดตั้งด้วยหมุด (Pin) หรือสลักเกลียว ในกรณีที่ใบมีดต้องทำการเปลี่ยนในอุโมงค์ หน้าตัดของดินจะต้องมีเสถียรภาพมากพอโดยมีวิธีเสริม เช่น การฉีดอัดน้ำปูน การกดอัดอากาศ หรือการแช่แข็งดิน เพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้าง

6.3.19 การต่อเชื่อมอุโมงค์ใต้ดิน (Underground Tunnel Construction)

หลังจากที่ได้ปรับแก้ตำแหน่งของหัวเจาะที่ใช้ทั้งสองตัวแล้ว ก็มาถึงการเชื่อมต่อเส้นทางโดยที่ชั้นใต้ดินยังคงมีเสถียรภาพอยู่

มีการเชื่อมต่ออุโมงค์ใต้ดินอยู่สองวิธี : วิธีแรกคือการเชื่อมต่อโดยมุ่งหน้าเข้าหากัน เพื่อเชื่อมเส้นทาง (Head-on) อีกทางหนึ่งคือ การเชื่อมต่อทางด้านข้าง ตำแหน่งของหัวเจาะจะต้องมีการศึกษาว่าควรอยู่ตำแหน่งใด การทำให้ดินมีเสถียรภาพจากการเชื่อมต่ออุโมงค์ก็นับว่าเป็นสิ่งจำเป็น

เมื่อหัวเจาะเชื่อมต่ออุโมงค์ด้วยวิธี Head-on จะต้องมีการฉีดอัดดินด้วยสารเคมี การฉีดอัดแรงดันสูง การใช้แบบผสมผสานกัน หรือใช้วิธีการแช่แข็งเหมือนที่ใช้น้ำไป เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุโมงค์ก็มีที่พัฒนาขึ้นมาบ้างแล้วในปัจจุบัน

เมื่ออุโมงค์ถูกเชื่อมต่อแล้ว ต้องมีการปรับปรุงพื้นที่ระหว่างกันให้เหมาะสม ในเวลาเดียวกันต้องมีการเสริมแรงในอุโมงค์เพื่อป้องกันความเสียหายใดๆที่จะเกิดขึ้นในอุโมงค์หลังจากที่เชื่อมต่อแล้ว

6.3.20 การขยายพื้นที่ใต้ดิน (Underground Space Enlargement)

การขยายพื้นที่ใต้ดินจะต้องใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมกับสภาพของดินนั้นๆ การป้องกันเส้นทางอุโมงค์เกิดการเสียรูปเนื่องมาจากแรงดันดินที่ไม่สมมาตรกัน

สิ่งจำเป็นสำหรับการขยายพื้นที่ในชั้นใต้ดินมีดังนี้

- การก่อสร้างโครงสร้างสถานีเช่น สถานีรถไฟใต้ดินระหว่าง 2 อุโมงค์
- การก่อสร้างพื้นที่สำหรับเครื่องจักรกลในการทำงานหรือก่อสร้างพื้นที่สำหรับทำงาน ในชั้นใต้ดิน
- การก่อสร้างสาขาย่อยของอุโมงค์หรือการเชื่อมต่ออุโมงค์ด้วยมุมค่าหนึ่ง

โดยทั่วไปการขุดเจาะหน้าดินจะเปิดกว้างขึ้นอีกเมื่อมีการก่อสร้างขยายพื้นที่ว่างในใต้ดินขึ้น ในกรณีนี้ เนื่องจากดินได้เกิดการหลวมขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ จึงจำเป็นต้องรักษาเสถียรภาพของดินเอาไว้โดยใช้วิธีการลำรอง การขยายพื้นที่ใต้ดินต้องกระทำอย่างระมัดระวัง โดยทำการขุดเจาะเปิดหน้าดินเป็นส่วนๆ และค้ำยันดินไว้ด้วยค้ำยันเหล็กหรือชิ้นส่วนผนังพิเศษ

วิธีการก่อสร้างแบบพิเศษในการขยายพื้นที่ของอุโมงค์ที่มีอยู่โดยการใช้ชิ้นส่วนของผนังและเครื่องมือในการขุดเจาะ และการขยายพื้นที่ทางด้านข้างของอุโมงค์

6.3.21 การรื้อถอนสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดิน (Removal of Underground Obstruction)

เมื่อมีการรื้อถอนสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้ดิน จะต้องมีการดูแลความเรียบร้อยเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการก่อสร้างนั้นปลอดภัย โดยใช้ข้อมูลของการสำรวจหาสิ่งกีดขวาง

โดยทั่วไปสิ่งกีดขวางที่อยู่ชั้นใต้ดิน จะถูกรื้อถอนออกไปก่อนที่การขุดเจาะอุโมงค์จะเริ่มขึ้น ในบางกรณีสิ่งกีดขวางต้องทำการรื้อถอนภายในตัวอุโมงค์ สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงในการรื้อถอนมีดังนี้

(1) การรื้อถอนจากผิวดิน : หลังจากการรื้อถอนสิ่งกีดขวางบนผิวดินแล้วจะต้องทำการถมกลับคืนด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้หัวเจาะสามารถเคลื่อนผ่านไปได้อย่างปลอดภัยจากสิ่งกีดขวางจากส่วนที่เหลือค้างอยู่ หรือจากการถมกลับที่ไม่ดีพอ

(2) การรื้อถอนจากภายในตัวอุโมงค์ : จะต้องทำการฉีดอัดดินด้วยสารเคมีหรือฉีดอัดด้วยสารเคมีพร้อมกับการอัดอากาศจะต้องทำ เมื่อทำการฉีดอัดด้วยสารเคมีโดยการฉีดเข้าไปรอบๆ หัวเจาะ ต้องไม่ให้สารเคมีที่ใช้หลุดเข้าไปในตัวเคลื่อนโบมีคได้ เมื่อคนงานมีความจำเป็นต้องออกไปข้างนอกกำแพงกันดินเพื่อไปรื้อถอนสิ่งกีดขวางในหัวเจาะประเภท Closed-face ต้องมีการติดตั้งท่อฉีดอัดน้ำปูนไปที่หน้าดินและท่อระบายน้ำในบริเวณหัวขุดเจาะดินด้วย

6.4 มาตรการเสริม (Auxiliary Measures)

6.4.1 ทั่วไป

เมื่อชั้นดินเกิดความไม่เสถียรและพังทลายจากการขุดเจาะหน้าดิน หรือเกิดการทรุดตัวจากการขุดอุโมงค์ในบริเวณผิวดินที่ได้วางแผนไว้ ควรมีมาตรการให้ดินมีเสถียรภาพ เช่น วิธีการฉีดอัดหน้าดินด้วยสารเคมี วิธีการฉีดอัดแรงดันสูง และการผสมดิน วิธีการแช่แข็งดิน วิธีการลดน้ำ วิธีการใช้แรงดันลม หรือรวมวิธีการทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยคำนึงถึงสภาพของดิน ประเภทของหัวเจาะ และสภาพสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากดินจะไร้เสถียรภาพที่ตำแหน่งทางเข้าหรือบริเวณอาคารระบายอากาศ ที่หน้าตักโค้งหักศอก ที่ตำแหน่งการขุดเจาะในระดับดิน และที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับ โครงสร้างที่มีอยู่ จึงต้องมีการใช้มาตรการเสริมเหล่านี้ในกรณีที่เป็น

6.4.2 วิธีการฉีดอัดดินด้วยสารเคมี (Chemical Grouting Method)

ในวิธีการฉีดอัดจะต้องมีการคำนวณวัสดุที่จะต้องใช้ พื้นที่ที่ต้องฉีดอัด ลักษณะของดินตามสภาพทางธรณีวิทยาและสิ่งแวดล้อม

วิธีการใช้สารเคมีในการฉีดอัดดินจะช่วยเพิ่มกำลังและลดค่าซึมผ่านได้ของดินให้มากขึ้น โดยการฉีดอัดสารเคมีเข้าไปตามช่องว่างและรอยแยกของดิน

เมื่อมีการรื้อถอนกำแพงส่วนที่ตกค้างอยู่ที่ทางเข้าของหัวเจาะในอาคารระบายอากาศ ดินในตำแหน่งนั้นจะถูกเปิดไว้เป็นเวลานาน ดังนั้นการฉีดอัดสารเคมีจะไปช่วยหยุดการซึมของน้ำได้ ดินและช่วยเพิ่มกำลังของดินด้วย

การฉีดอัดด้วยสารเคมีจะใช้ในกรณีต่อไปนี้

- บริเวณที่หัวเจาะอีกตัวผ่านเข้ามาใกล้หรืออยู่ใต้โครงสร้างที่สำคัญ หรือระบบสาธารณูปโภคที่สำคัญที่อยู่ใต้ดิน
- บริเวณที่หัวเจาะผ่านหรือตัดผ่านบริเวณแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล
- บริเวณที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์อยู่ใกล้กับสถานที่ก่อสร้างได้ดินอื่นๆ
- บริเวณที่แรงดันส่วนเกินมีค่าน้อย
- บริเวณที่ต้องการเปลี่ยนใบมีดของหัวเจาะ

- บริเวณที่ทำการขยายพื้นที่ของอุโมงค์
- เพื่อการสร้างกำแพงต้านทานแรง และกำแพง Cut-off สำหรับการควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์ในโค้งหักศอก
- เพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศในการใช้แรงดันลบ
- เพื่อหลีกเลี่ยงการหลวมตัวของดินที่มาจากการขุดเจาะดิน

วิธีการฉีดอัดและวัสดุที่ใช้จะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสม และให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการฉีดอัด ซึ่งจะต้องเป็นไปตามสภาพทางธรณีวิทยา และชนิดของหัวเจาะที่ใช้

6.4.3 วิธีการใช้การฉีดอัดแรงดันสูงและการผสมดิน

เมื่อเลือกที่จะใช้วิธีฉีดอัดแรงดันสูงและผสมดินแล้วจะต้องทำการตรวจสอบสภาพของสถานที่ก่อสร้าง สภาพทางธรณีวิทยา และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รอบรอบ

การฉีดอัดด้วยแรงดันสูงและการผสมสารเข้าไปในดินเป็นวิธีที่ใช้เพื่อสร้างเป็นเสาดิน (Soil Column) ในดินโดยการแทนที่ดินหรือผสมสารเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเข้าไปในดินโดยใช้การฉีดอัดแรงดันสูง โดยปกติแล้วการฉีดอัดโดยใช้แรงดันสูงนี้จะนำมาใช้โดยมีวัตถุประสงค์คล้ายกับการฉีดอัดด้วยสารเคมี

อย่างไรก็ตามกำลังของดินที่สูงขึ้นและการกั้นน้ำจะได้ผลดีกว่าการฉีดอัดด้วยสารเคมี วิธีการฉีดอัดแรงดันสูงและผสมสารเข้าไปในดินจะต้องกระทำภายใต้การดูแลอย่างเหมาะสม หัวข้อต่อไปนี้จะได้นำมาใช้ในการพิจารณาด้วย

- การออกแบบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาจะต้องเป็นไปตามสภาพของดินและความเร็วในการยกตัวของเสา และจะต้องคำนึงถึงการแยกชั้นของเสาด้วย
- ในชั้นกรวดหรือชั้นดินแข็ง จะต้องกระทำอย่างรอบคอบ เนื่องจากขึ้นรูปและออกแบบขนาดเสาได้ยาก
- เนื่องจากชั้นดินไม่ได้สม่ำเสมอและมีการรั่วซึมของโคลนเลนอยู่ จึงต้องใส่ใจให้มาก เมื่อมีการขนย้ายโคลนเลนออก ก็ต้องมีการควบคุมอัตราการฉีดอัดให้เท่ากับอัตราที่ขนย้ายออก
- เมื่อมีการฉีดอัดแรงดันสูงเพื่อทำอันเดอร์พิน (Underpin) ค่ากำลังแรงแบกทานของดินจะยังไม่สมบูรณ์จนกระทั่งวัสดุที่ฉีดอัดนั้นแข็งตัวเพียงพอ ดังนั้นจะ

กระทบต่อโครงสร้างของอันเดอร์พินเหล่านั้น จึงต้องทำการก่อสร้างอย่าง
ระมัดระวัง

การควบคุมคุณภาพในการปรับระดับหัวเสาเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อไม่ให้มีการเอียงของเสา
ที่ยังไม่ได้ทำการกดอัดบนหัวเสาได้

6.4.4 วิธีการแช่แข็งดิน (Ground Freezing Method)

เมื่อเลือกใช้วิธีแช่แข็งดิน จะต้องมีการตรวจสอบสภาพทางธรณีวิทยาและสภาพพื้นที่
ของโครงการ รวมทั้งคุณลักษณะของวิธีที่ใช้อย่างเคร่งครัด

เมื่อวิธีการแช่แข็งถูกเลือกใช้ จะต้องคำนึงถึงหัวข้อต่อไปนี้

(1) การแช่แข็งดินนั้นจะต้องมีการติดตามควบคุมอุณหภูมิของดิน ถ้าอุณหภูมิใน
อุโมงค์สูงมาก จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่เป็นฉนวนความร้อนแบบวงจรความเค็มเข้ามาช่วย เนื่องจาก
ความเค็มจะช่วยดูดซับอุณหภูมิที่สูงและความชื้นให้น้อยลง และจึงทำการเปิดหน้าดินเพื่อแช่แข็งต่อไป

(2) จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรอยแตกในท่อวงจรความเค็ม ซึ่งจะทำให้เกิดการ
รั่วซึมของความเค็มเข้าสู่ดินได้ โดยปกติแล้วจะมีการทดสอบท่อวงจรความเค็มด้วยแรงดันหลังจากการ
ติดตั้ง และการขุดเจาะใกล้เคียงบริเวณที่จะต้องกระทำหลังจากที่ติดตั้งท่อเข้าสู่ตำแหน่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(3) เมื่อมีการไหลของน้ำใต้ดิน (ความเร็วจะอยู่ที่ประมาณ 1 เมตรถึง 5 เมตรต่อวัน)
ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการแช่แข็งดินได้ จำเป็นต้องพิจารณาการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นทรายและกรวด
ที่คาดว่าจะมีน้ำใต้ดินอยู่มาก และมีการซึมผ่านสูง ถ้าเป็นไปได้จำเป็นต้องลดความเร็วในการไหลของ
น้ำใต้ดินด้วยการฉีดอัดด้วยสารเคมี

(4) เมื่อตำแหน่งที่แช่แข็งมีส่วนสัมผัสกับโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน จำเป็นต้องทำการแช่
แข็งโครงสร้างนั้นด้วย เนื่องจากอาจจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในภายหลัง ซึ่งจะเป็นอุปสรรค
ในการแช่แข็งดินได้ ในกรณีที่ใช้การแช่แข็งดินในส่วนที่ตัดผ่านกับแม่น้ำไปแล้ว บริเวณระหว่างกัน
แม่น้ำหรือทะเลสาบกับส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไปก็ต้องมีการตรวจสอบด้วย

(5) แม้ว่ากำลังของดินจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงแล้วก็ตาม ก็ไม่ได้หมายความว่า
ดินที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบที่มีค่าน้อยกว่า 10% จะมีกำลังสูงขึ้นตามที่ได้อธิบายเอาไว้ ยิ่งไปกว่านั้น

การทำการแช่แข็งดินในบริเวณชายฝั่งจำเป็นต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำเค็ม อาจจะเข้ามาทำลายโครงสร้างกำลังของดินที่ถูกแช่แข็งได้

(6) จะเกิดการยกตัวของดินขึ้นเมื่อทำการแช่แข็งและเกิดการทรุดตัวลงมาเมื่อมีการละลาย ขนาดของการยกตัวและทรุดตัวของดินนั้นจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะของดิน ระยะเวลาแช่แข็ง ขนาดบริเวณที่ทำการแช่แข็ง ความเร็วในการละลาย และสภาพของน้ำหนักรรทุก โดยทั่วไปขนาดของการยกตัวและทรุดตัวจะมีค่าน้อยในชั้นทรายและกรวด มีค่าสูงในชั้นดินเหนียว ดินโคลนหรือในดินที่มีสารอินทรีย์มาก มีวิธีที่จะช่วยลดการทรุดตัวของดินได้โดยการเร่งการละลายของน้ำแข็งโดยใช้น้ำร้อนช่วยในการละลาย แล้วใช้การฉีดอัดสารเคมีเข้าไปในช่องว่างของดิน

เมื่อเลือกที่จะใช้วิธีการแช่แข็งดินก็จำเป็นต้องหมั่นตรวจสอบ โครงสร้างที่อยู่ด้านข้างหรือบริเวณใกล้เคียง และ โครงสร้างที่อยู่ใต้ดินอย่างดี รวมทั้งต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์ว่าจะได้รับผลกระทบจากการแช่แข็งอย่างไรบ้างโดยละเอียดถี่ถ้วน

6.4.5 วิธีลดน้ำ (Dewatering Method)

เมื่อเลือกใช้วิธีลดน้ำจะต้องพิจารณาตรวจสอบสภาพทางธรณีวิทยา และสภาพของพื้นที่โครงการ รวมทั้งคุณลักษณะของวิธีที่ใช้ด้วย

เมื่อค่าการซึมผ่านได้ของดินมีค่าสูง และยังมีการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามา ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายในการเปิดหน้าดินได้ จึงต้องใช้วิธีการลดน้ำเพียงอย่างเดียวหรือใช้พร้อมกับวิธีอื่นๆ

วิธีนี้จะใช้กับชั้นของทรายตะกอนและกรวดปนทรายที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านประมาณ 10^{-1} - 10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที วิธีการลดน้ำจะก่อให้เกิดการทรุดตัวของดินและการลดระดับน้ำในบ่อสูบให้ต่ำลงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบบริเวณ โครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงที่อาจจะได้รับอิทธิพลจากการลดน้ำไว้ล่วงหน้า

6.4.6 วิธีการใช้แรงดันลม (Pneumatic Method)

เมื่อจะใช้แรงดันลมจะต้องคำนวณผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้าอย่างละเอียดจากแรงดันอากาศ การลดแรงดันอากาศ และการสิ้นสุดกระบวนการอัดอากาศ

(1) การใช้งาน : จะต้องคำนึงถึงวิธีการขับเคลื่อนแรงลมอย่างรอบคอบ เนื่องจากอาจจะไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ภายใต้อาการการใช้งานต่างๆ เช่น ในความลึกที่มีมากเกินไป ลักษณะของดินและน้ำใต้ดิน

(2) ผลกระทบของแรงดันอากาศที่มีต่อเสถียรภาพในการเปิดหน้าดิน : ผลกระทบของแรงดันอากาศที่มีต่อการรักษาเสถียรภาพในการเปิดหน้าดินสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทดังนี้

- ป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดินและป้องกันการพังทลายที่มากจากการเปิดหน้าดิน
- เป็นตัวขยับในการเปิดหน้าดินโดยใช้แรงดันอากาศ
- เป็นการปรับปรุงกำลังของดินตะกอนหรือตะกอนทรายจากการลดน้ำโดยอัด

อากาศเข้าไป

(3) ผลกระทบของการกดอัดอากาศตามสภาพทางธรณีวิทยา : โดยทั่วไปผลกระทบของการกดอัดอากาศที่มีต่อสภาพทางธรณีวิทยามีดังนี้

- หินกรวด

เนื่องจากมีช่องว่างที่อากาศสามารถผ่านได้มากและคาดว่าจะมีการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาได้ในปริมาณมาก ทำให้มีการรั่วซึมของอากาศออกไปจากการใช้แรงดันอากาศได้ ดังนั้นผลกระทบที่มากจากการกดอัดอากาศจึงยังไม่เห็นชัดเจนนัก และผลกระทบที่มากจากการก้ำกั้นการเปิดหน้าดินก็ไม่สามารถคาดการณ์ได้เช่นกัน

- ชั้นดินปนทราย

เนื่องจากค่าของอากาศที่ผ่านได้มีค่าสูง การใช้อากาศในการอัดแรงดันจึงต้องใช้ในปริมาณมาก เมื่อมีการใช้แรงดันสูงจะทำให้เกิดแรงดันมากที่สุดที่จำกัดไว้ในที่ตื้น จะทำให้เกิดการระเบิดได้ แม้ว่าการไหลเข้าของน้ำใต้ดินจะมีค่าน้อยกว่าในชั้นดินกรวดก็ตามแต่เป็นการยากที่จะป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดินได้ ดังนั้นการพังทลายของการเปิดหน้าดินจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำไหลเข้ามา

- ชั้นดินโคลน

เนื่องจากค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดินชนิดนี้มีค่าน้อย และการกักอากาศในดินประเภทนี้ค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพ เมื่อมีการดำเนินการอัดอากาศอย่างเหมาะสม การป้องกันการไหลเข้าของน้ำก็สามารถทำได้โดยไม่มีการระเบิดออก ถ้ามีการควบคุมแรงดันอากาศได้อย่างเหมาะสมกับแรงดันดินส่วนเกินในที่ที่ลึกต่างๆ หน้าที่ดินจะถูกค้ำยันด้วยแรงดันอากาศและการปรับปรุงกำลังของดินโดยผลที่ได้จากการลดน้ำ

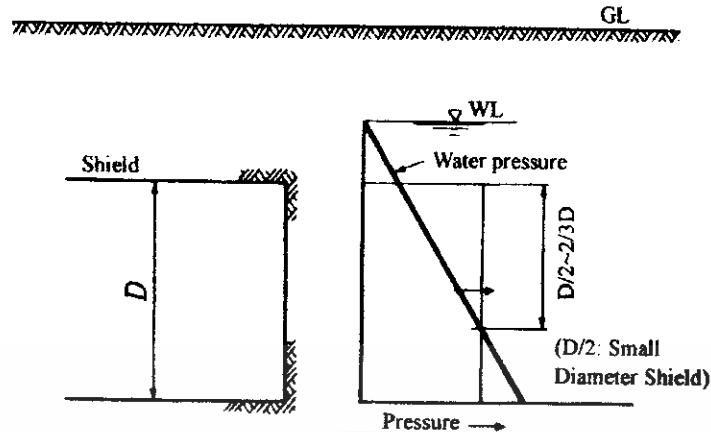
- **ชั้นดินเหนียว**

ถ้าดินมีความอ่อนมากและการเปิดหน้าดินไม่มีเสถียรภาพก็สามารถใช้วิธีการอัดอากาศเพื่อใช้เป็นค้ำยันของหน้าดินและเป็นการเพิ่มกำลังของดินจากการลดน้ำได้

- **ชั้นดินที่มีความหลากหลายของดินหลายประเภท**

ตามปกติแล้วดินส่วนมากจะประกอบไปด้วยชั้นดินหลายประเภท และมีความซับซ้อนแรงดันของน้ำใต้ดินที่มีอยู่จะมีความไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีชั้นที่น้ำอยู่ด้วย เช่น ลักษณะของดินที่แม้ว่าจะเป็นชั้นดินทรายหรือกรวดก็ตาม ถ้ามีค่าที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ในปริมาณที่ต่ำเนื่องจากมีชั้นของดินเหนียวหรือดินตะกอนปะปนอยู่ ในกรณีที่มีชั้นที่น้ำ 2 ชั้นที่มีค่าแรงดันน้ำต่างกันอยู่ จะต้องใช้แรงดันอากาศที่มีค่าต่ำกว่า ถ้าแรงดันของน้ำใต้ดินมีค่าน้อยจะเกิดการรั่วไหลของอากาศในปริมาณมาก ถ้าแรงดันน้ำใต้ดินมีค่ามากน้ำก็จะไหลเข้ามาในอุโมงค์ ปกติแล้วการใช้แรงดันลมจะกระทำได้ลำบาก ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่ามากกว่า 1×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที

(4) การคำนวณค่าความดันอากาศ : โดยทั่วไปแล้วการคำนวณค่าความดันอากาศจะอยู่บนพื้นฐานของแรงดันของน้ำใต้ดินที่ตำแหน่งที่จะทำการขุดเจาะเป็นหลัก โดยคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เป็นการยากที่จะให้แรงดันอากาศมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดดิน เนื่องจากยากที่จะหาแรงดันที่เหมาะสมเพื่อให้เท่ากันตลอดหน้าตัดดินเพื่อทดแทนค่าความต่างของแรงดันน้ำและดินที่ด้านบนและด้านล่างของหน้าดิน โดยปกติแล้วจะตั้งให้แรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันของน้ำใต้ดินอยู่ที่ระหว่าง $D/2$ และ $D/3$ จากด้านบนของการเปิดหน้าดิน ใช้ $D/2$ ในอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสำหรับดินเหนียวที่มีค่ายอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อย ต้องใช้แรงดันอากาศค่าน้อยๆ (อ้างอิงรูปที่ 6.51)



รูปที่ 6.51 วิธีการคำนวณหาแรงดันอากาศ
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

(5) การสำรวจการก่อสร้างล่วงหน้า เครื่องมือวัดการรั่วไหลของอากาศ และ
ช่วงเวลาในการดำเนินการกดอัดอากาศ : หัวข้อต่อไปนี้จะต้องนำมาพิจารณาในการป้องกันการรั่วไหล
ของอากาศและการระเบิดออกมาของอากาศ

- การสำรวจการก่อสร้างล่วงหน้าและเครื่องมือวัดค่า

เนื่องจากการรั่วไหลของอากาศที่ไม่มีออกซิเจนและการปนเปื้อนของบ่อสูบน้ำ อาจจะ
เกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องมีการสำรวจบ่อสูบน้ำและชั้นใต้ดินภายในรัศมี 1 กิโลเมตรรอบๆแนวเส้นทาง
อุโมงค์

ถ้ามีโครงการใต้ดินอื่นๆที่กำลังดำเนินการก่อสร้างหรือตึก อาคารต่างๆ ตอม่อสะพาน
ระบบสาธารณูปโภคต่างๆที่อยู่ใต้ดิน และทางเดินใต้ดินที่อยู่ใกล้กับแนวเส้นทางอุโมงค์แล้วจะต้องทำ
การวิเคราะห์อย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีการหลวมตัวมาก่อนแล้วจากโครงการก่อน
หน้านี้ หรือในชั้นดินที่สามารถให้อากาศซึมผ่านได้ จำเป็นต้องให้การฉีดอัดด้วยสารเคมีเพื่อป้องกันการ
รั่วไหลของอากาศและการระเบิด

- ช่วงเวลาที่สิ้นสุดการดำเนินการอัดอากาศ

ควรหลีกเลี่ยงการหยุดอัดอากาศแบบทันทีทันใด การสิ้นสุดการอัดอากาศควรจะ
กระทำด้วยความระมัดระวังในขณะที่มีการเฝ้าสังเกตการณ์พฤติกรรมของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ
ทรุดตัวของดินและการไหลบ่าเข้าของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

6.5 การเคลื่อนตัวของดินและการป้องกันโครงสร้างที่มีอยู่

6.5.1 การเคลื่อนตัวของดินและมาตรการการป้องกัน

การเคลื่อนตัวของดินเป็นผลสืบเนื่องมาจากการวางแผนและการออกแบบอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และสภาพการก่อสร้างซึ่งสามารถทำให้ดินเคลื่อนตัวน้อยลงได้โดยใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม และมีการควบคุมการก่อสร้างอย่างรอบคอบ

(1) สาเหตุการเกิดและกลไกของการเคลื่อนตัวของดิน : สาเหตุการเกิดการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมีดังนี้

- ความไม่สมดุลของแรงดันน้ำใต้ดินและดินที่หน้าดิน : ถ้าอัตราการขุดเจาะ และอัตราการขนย้ายดินออกนั้นเกิดขึ้นไม่พร้อมกันในหัวเจาะแบบ EPB หรือ Slurry ก็ตาม จะทำให้มีความแตกต่างของแรงดันขึ้นระหว่างแรงดันภายในห้องของตัวหัวเจาะเอง กับแรงดันดินและน้ำใต้ดินที่อยู่ภายนอก ทำให้น้ำดินเกิดความไม่สมดุล ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินได้ ถ้าแรงดันภายในตัวห้องหัวเจาะมีค่าน้อยกว่าแรงดันดินที่อยู่ภายนอกจะเกิดการทรุดตัวของดินขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันในห้องหัวเจาะมีมากจนเกินไปก็จะทำให้ดินถูกยกตัวขึ้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดมาจากแรงดันที่หน้าตัดดินลดลง และเกิดการเสียรูปแบบ Elasto-plastic จากการเพิ่มแรงดัน

- การรบกวนดินในระหว่างการขุดเจาะ : การรบกวนดินเป็นสาเหตุมาจากการขุดเจาะดินและแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของหัวเจาะ และดินซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวหรือยกตัวของดินได้ โดยเฉพาะในการควบคุมแนวเส้นทางขุดเจาะในบริเวณส่วนโค้งต้องทำให้ดีเนื่องจากจะทำให้เกิดการหลวมตัวของดินได้

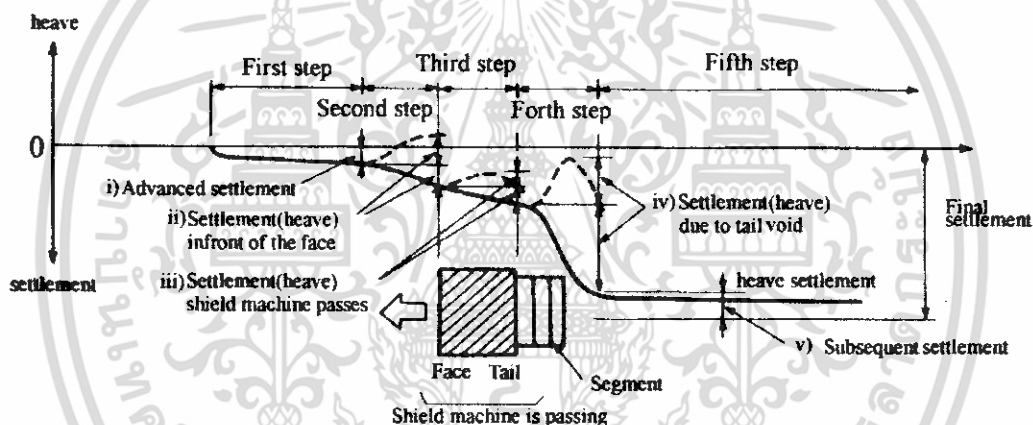
- ช่องว่างด้านท้ายที่เกิดขึ้นและการฉีดอัดน้ำปูนกลับเข้าไปไม่เพียงพอ : เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นด้านท้ายซึ่งดินจะถูกค้ำยันไว้ด้วยแผ่นเหล็กนั้น เป็นสาเหตุในการเสียรูปและการทรุดตัวของดินได้ นี่คือการเสียรูปทาง Elasto-plastic โดยมีสาเหตุมาจากค่าความเค้นที่ลดลง ขนาดของการทรุดตัวของดินจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดน้ำปูน ระยะเวลา ตำแหน่งที่ทำการฉีดอัด แรงดัน และปริมาณที่ใช้ในการฉีดอัด ถ้าแรงดันที่ใช้ในการฉีดอัดในชั้นดินเหนียวมีมากจนเกินไปจะทำให้เกิดการยกตัวของดินขึ้น

- การเสียรูปและการเปลี่ยนตำแหน่งของการบุผนังอุโมงค์หลัก : ถ้าสลักเกลียวไม่ได้ทำการขันให้แน่นพอจะทำให้ชิ้นส่วนของผนังวงแหวนเกิดการเสียรูปได้ การทรุดตัวที่มากขึ้นของดินตามพื้นที่ว่างด้านท้ายที่มากขึ้น หรือการเสียรูปของการบุผนังอุโมงค์ที่เป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกที่ไม่สมดุลหลังจากถูกผลักออกจากทางด้านท้ายหัวเจาะ

- การลดระดับของน้ำใต้ดิน : ถ้ามีการรั่วซึมหรือการไหลเข้าของน้ำในผนังอุโมงค์หลัก จะเกิดการลดระดับของน้ำใต้ดินให้ต่ำลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวของดินได้ เป็นการทรุดตัวที่มีสาเหตุมาจากการรวมตัวกันของดิน เพราะว่าค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มมากขึ้น

(2) ลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน : การเคลื่อนตัวของดินเนื่องมาจากการขุดเจาะดินนั้นมีลักษณะการรวมกันอย่างซับซ้อนทั้งการยกตัวและการทรุดตัวของดินที่มีสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นห้าขั้นตอนตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 6.52 ขั้นตอน (i) และ (ii) จะเกิดขึ้นก่อนที่บริเวณเส้นทางที่หัวเจาะผ่าน และขั้น (iii) เกิดบริเวณที่ทางผ่านของหัวเจาะ ขั้น (iv) และ (v) จะเกิดหลังจากที่หัวเจาะได้ผ่านไปแล้ว

วิธีการก่อสร้างอาจจะต้องมีการปรับปรุงให้เป็นไปตามพื้นฐานของการเสีรูปของดินที่ได้ทำการวิเคราะห์มา



รูปที่ 6.52 การแยกประเภทการเคลื่อนตัวของดินเนื่องมาจากการขุดเจาะของหัวเจาะดิน
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

i) การทรุดตัวล่วงหน้า : จะเกิดในบริเวณส่วนหน้าของเส้นทางที่หัวเจาะผ่าน มีสาเหตุเนื่องมาจากการลดระดับของระดับน้ำใต้ดินในชั้นดินทราย และในชั้นดินที่มีความอ่อนมากๆ อาจจะมีการไหลของดินที่หน้าตัดดินได้

ii) การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณด้านหน้าของหน้าตัดดิน : การทรุดตัวหรือยกตัวประเภทนี้จะเกิดในบริเวณส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งจะมีสาเหตุมาจากแรงดันดินหรือแรงดันน้ำใต้ดินเกิดความไม่สมดุล

iii) การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณหัวเจาะ : การทรุดตัวหรือยกตัวประเภทนี้มีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานระหว่างตัวหัวเจาะกับดิน หรือการรบกวนดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะดินในปริมาณที่มากเกินไป

iv) การทรุดตัว (ยกตัว) ในบริเวณท้ายหัวเจาะ : การทรุดตัวหรือยกตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างกะทันหันหลังจากที่หัวเจาะทำการขุดเจาะผ่านไป แล้ว มีสาเหตุมาจากช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะที่มีหรือแรงดันจากการฉีดอัดน้ำปูนที่มีมากเกินไป การทรุดตัวในการขุดเจาะอุโมงค์ ส่วนมากจะเป็นการทรุดตัวในประเภทนี้

v) การทรุดตัวสืบเนื่อง : การทรุดตัวประเภทนี้จะเกิดในชั้นดินเหนียวที่มีความอ่อน ที่ถูกทำให้เกิดการหลวมตัวหรือถูกรบกวนสมดุลของดิน

(3) ขนาดและการกระจายการเคลื่อนตัวของดิน : รูปร่างหน้าตัดของการทรุดตัวในช่วงสุดท้าย โดยทั่วไปจะมีลักษณะสมมาตรกับศูนย์กลางของอุโมงค์ และคล้ายกับโค้งกลับหัว ขนาดและขอบเขตของการทรุดตัวจะแปรผันตามสภาพของดินและสัดส่วนของความลึกต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ ในดินจากน้ำท่วม หรือในดินตะกอนน้ำพา การเสียรูปของดินจะมีค่าน้อยลงเมื่อขึ้นไปถึงผิวผิวดินด้านบน อีกทางหนึ่ง การทรุดตัวในบริเวณผิวดินจะมีลักษณะคล้ายกับการทรุดตัวของดินในบริเวณที่อยู่ใกล้อุโมงค์ แม้ว่าอัตราส่วนความลึกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะจะมีค่ามากก็ตาม

(4) มาตรการการป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน : ทุกสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการทรุดตัวของดินจะต้องกำจัดให้หมดสิ้นไป เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัว มาตรการป้องกันมีดังต่อไปนี้

- การป้องกันการไม่สมดุลของแรงดันที่หน้าตัดดิน : ในหัวเจาะแบบ EPB แรงดันในห้องขุดเจาะจะถูกควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ และอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงให้เหมาะสมกับแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดิน ต้องมีการฉีดอัดสารเติมแต่งเข้าไปในห้องขุดเจาะเพื่อเพิ่มการเคลื่อนตัวของดินที่ถูกเจาะออกมาให้เป็นไปตามทฤษฎีมากขึ้น และเพื่อหลีกเลี่ยงการเพิ่มช่องว่างในห้องหัวเจาะ

ในหัวเจาะแบบ Slurry คุณภาพของ Slurry จะต้องควบคุมให้เหมาะสมกับค่าการซึมผ่านได้ของดิน เพื่อให้แรงดันใน Slurry มีความสมดุลกับแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดินที่หน้าตัดดิน

- มาตรการป้องกันการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ : จะต้องมีการควบคุมทิศทางในการขุดเจาะเพื่อป้องกันการออกนอกเส้นทาง เพื่อให้แรงเสียดทานระหว่างหัวเจาะและดินมีค่าน้อยลงและการรบกวนสภาพดินก็จะน้อยลงเช่นกัน

- มาตรการป้องกันการทรุดตัวที่มาจากช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะ และป้องกันการยกตัวของดินที่เป็นผลมาจากการฉีดอัดน้ำปูนกลับเข้าไปในดิน : การฉีดอัดน้ำปูนจะต้องกระทำไปพร้อมๆกับการขุดเจาะดิน วัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดจะต้องมีคุณสมบัติที่ซึมผ่านได้ดี และมีกำลังที่

เหมาะสมในทางธรณีวิทยา การฉีดอัดครั้งที่สองจะทำการอุดเข้าไปในช่องว่างเพื่อลดการทรุดตัวของดิน ในชั้นดินเหนียวตะกอนน้ำพาจะต้องควบคุมการฉีดอัดไม่ให้เกินสาเหตุของการยกตัวของดินและการรบกวนสมดุลของดินจากแรงดันที่ใช้ในการฉีดอัดได้

- มาตรการป้องกันการเสวยรูปของผนังอุโมงค์หลัก : ชั้นส่วนผนังรูปวงแหวนจะต้องรักษาสภาพรูปทรงของชั้นส่วนไว้ และจะต้องขันสลักเกลียวให้แน่นเพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวเสวยรูปของรูปทรงวงแหวนได้

- มาตรการป้องกันการลดระดับของน้ำใต้ดิน : การติดตั้งชั้นส่วนผนังต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเพื่อลดการเอียงค้ำแหน่ง และการเกิดช่องว่าง มาตรการป้องกันน้ำจะต้องนำมาใช้กับส่วนรอยต่อและรูสำหรับฉีดอัดน้ำปูนอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

(5) การคาดการณ์และติดตามการเคลื่อนตัวของดิน : การลดการเคลื่อนตัวของดิน โดยให้มีค่าการเคลื่อนตัวของดินที่ยอมรับได้โดยใช้พื้นฐานข้อมูลย้อนหลังในอดีต หรือใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Finite-element method ของการขุดเจาะอุโมงค์ไว้ล่วงหน้า หลังจากเริ่มทำการขุดเจาะอุโมงค์ จะต้องมีการติดตามระดับของผิวดินไปตลอดแนวเส้นศูนย์กลางและตามแนวเส้นทางสองข้างอุโมงค์ ผลการตรวจสอบจะนำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมการขุดเจาะในส่วนต่างๆต่อไป

6.5.2 การก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียงและการป้องกันสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิม

ถ้าในเส้นทางการขุดเจาะที่ได้วางไว้มีอยู่ใกล้กับ โครงสร้างที่มีอยู่เดิม จำเป็นต้องใช้ มาตรการป้องกัน จะต้องมีการติดตามตรวจสอบสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่เดิมในระหว่างการก่อสร้าง และ จะต้องสำรวจหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งก่อสร้างเหล่านั้นอย่างรอบคอบด้วย

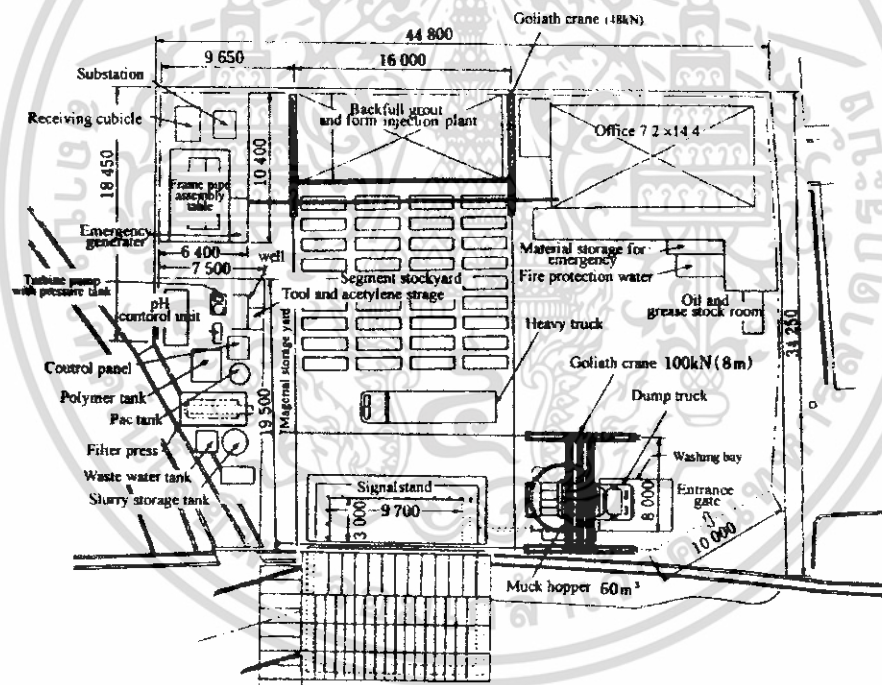
ถ้ามีสิ่งก่อสร้างเดิมอยู่ใกล้กับพื้นที่ที่จะทำการขุดเจาะ จะต้องมีการสำรวจก่อนการก่อสร้าง และประเมินพฤติกรรมและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่ในบริเวณใกล้เคียงด้วย การขุดเจาะอุโมงค์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกร้าวในสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการป้องกันที่เหมาะสม ในระหว่างทำการก่อสร้าง จิตการควบคุมที่ใช้จะต้องผูกมัดด้านความปลอดภัย (Safety factor) เข้าไปเพิ่มให้เป็นที่ยอมรับ การขุดเจาะอุโมงค์จะต้องดำเนินการไปตามนั้น ถ้าจำเป็นก็ ทำการจัดตั้งระบบการควบคุมขึ้นมาเพื่อติดตามตรวจสอบผล เพื่อไว้สำหรับใช้ในอนาคตได้

6.6 เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)

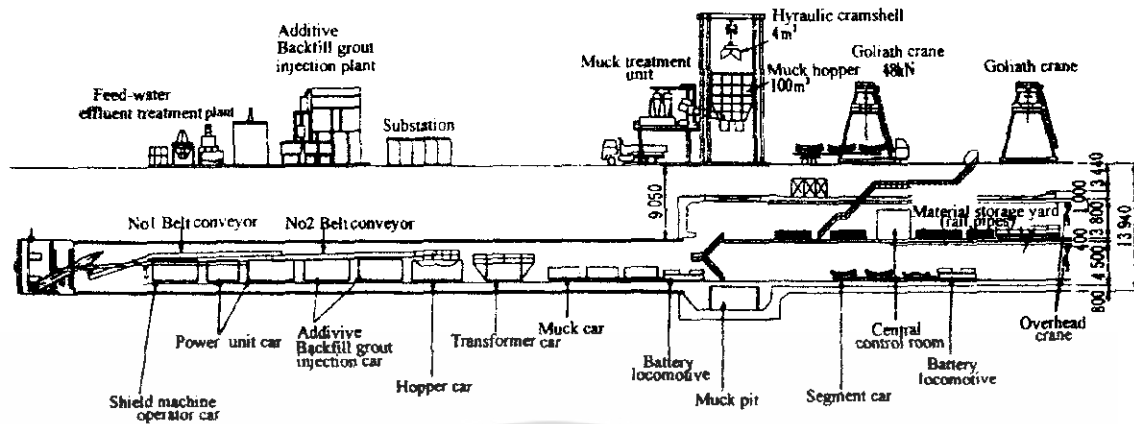
6.6.1 เครื่องจักรขนาดใหญ่และอุปกรณ์เครื่องมือ (Plant and Equipment)

เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานก่อสร้างนั้น จะต้องมีความเหมาะสมและสมรรถนะที่เพียงพอเหมาะสมกับแผนกำหนดการและวิธีการก่อสร้าง

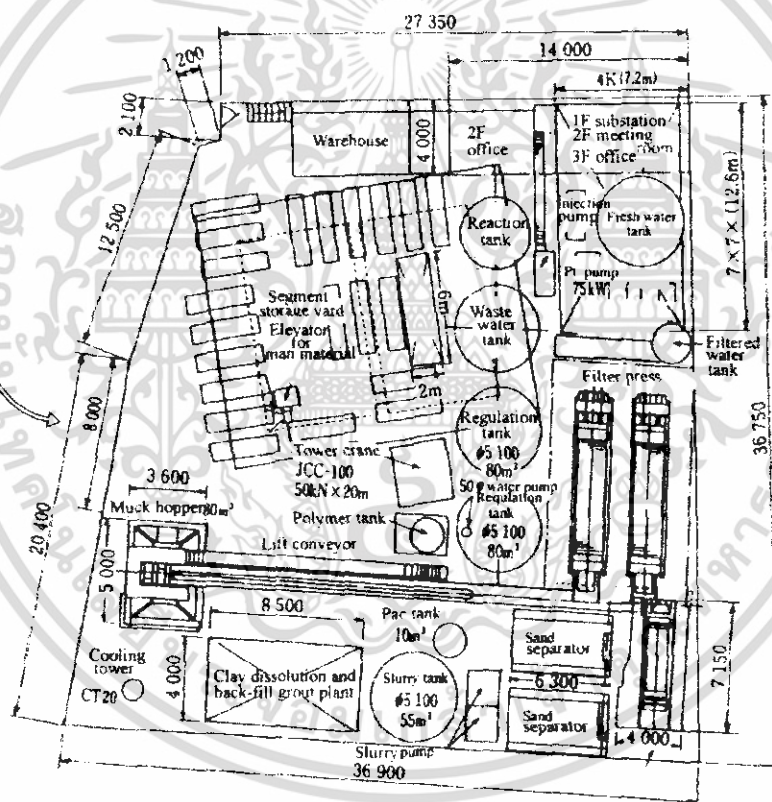
อุปกรณ์ที่ใช้ในหน้างานรวมถึงสถานที่เก็บวัสดุ เครื่องมือขนย้ายดิน วัสดุที่รับเข้ามา เครื่องมืออำนวยความสะดวกในการขนส่ง เครื่องมือเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือสื่อสาร อุปกรณ์ระบายอากาศ อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัยและความปลอดภัย และเครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นใน ในวิธีการก่อสร้างบางวิธีจะมีเครื่องจักรในการผสมสารผสมเพิ่ม (Slurry plant) เครื่องจักรสำหรับคัดแยกหินออกและจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการควบคุมการก่อสร้างด้วย



รูปที่ 6.53 แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ EPB
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

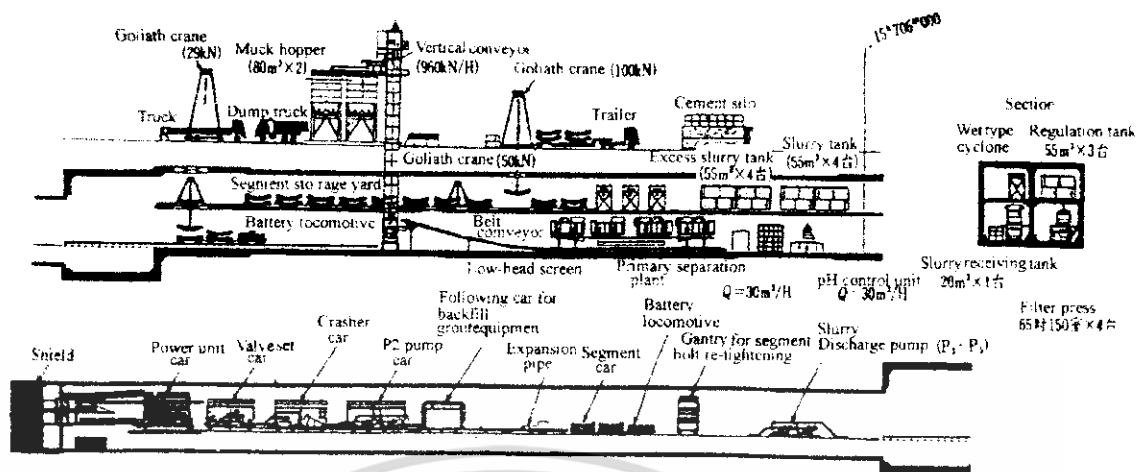


รูปที่ 6.54 รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ EPB
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)



รูปที่ 6.55 แผนผังด้านบนสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.56 รูปตัดด้านข้างสำหรับหัวเจาะแบบ Slurry
(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

6.6.2 สถานที่เก็บวัสดุและโรงเก็บอุปกรณ์ (Material Storage Yard and Warehouse)

สถานที่เก็บวัสดุและ โรงเก็บอุปกรณ์จะต้องมีพื้นที่อย่างเพียงพอสำหรับการเก็บรักษาวัสดุทั้งแบบชั่วคราวและถาวร (เช่น ชิ้นส่วนผนัง กำแพง นั่งร้าน และอุปกรณ์ก่อสร้าง)

6.6.3 เครื่องมือสำหรับการขนย้ายดินออก (Muck Removal Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการขนย้ายดินออกจะต้องสอดคล้องกับแผนการทำงานโดยคำนึงถึงวงจรการขุดดินและสภาพของหน้างาน

เครื่องมือที่ใช้ในการขนย้ายจะต้องมีการพิจารณาสมรรถนะในหลายๆด้านอย่างเพียงพอ เช่น ระบบการขนย้ายดินในและนอกอุโมงค์ เพื่อรื้อถอนดินที่ตำแหน่งขุดเจาะ เพื่อให้สอดคล้องกับการขุดเจาะดิน และวิธีการที่ใช้

ระบบขนย้ายดินที่ขุดเจาะโดยใช้ตัว Hopper ในการขนย้ายจากกันของปล้องแนวคังมีดังต่อไปนี้

(1) ระบบการขนย้ายดินในอุโมงค์

- ระบบราง
- ระบบสายพานลำเลียง
- ระบบรถยก

- ระบบสเลอรี่

(2) ระบบการขนย้ายดินที่ปล่องแนวดิ่ง : ระบบการขนย้ายจะทำการขนย้ายดินด้วยรถขนดินหรือโดยวิธีอื่น แล้วนำขึ้นทางปล่องแนวดิ่งด้วย Hopper หรือ Stockpile ประเภทของเครื่องมือมีดังต่อไปนี้

- ระบบเครนแบบขาห้อย (Gantry Crane System)
- ระบบแกรบฮอปเปอร์ (Grab Hopper System)
- ระบบสคิปทาวเวอร์ (Skip Tower System)
- ระบบลำเลียงในแนวดิ่ง (Vertical Conveyor System)

ระบบการขนย้ายดินที่ปล่องแนวดิ่งนับเป็นระบบสำคัญที่ทำการรวมดินที่ขนย้ายออกมาที่บริเวณนี้ จึงต้องมีการพิจารณาเลือกใช้ระบบอย่างรอบคอบที่สุด

(3) ระบบการขนย้ายดินแบบต่อเนื่อง : จะใช้ระบบท่อลำเลียงเพื่อการขนย้ายดินออกอย่างต่อเนื่องจากตัวอุโมงค์ขึ้นไปจนถึงผิวดิน ระบบการลำเลียงโดยใช้ท่อเป็นระบบที่มีคุณภาพสูงเนื่องจากได้รวมระบบการลำเลียงทั้งแนวราบและแนวดิ่งไว้ด้วยกัน ระบบนี้จะช่วยลดการจราจรในตัวอุโมงค์ลงทำให้มีความปลอดภัยขึ้น และยังช่วยลดแรงงานโดยอัตโนมัติ

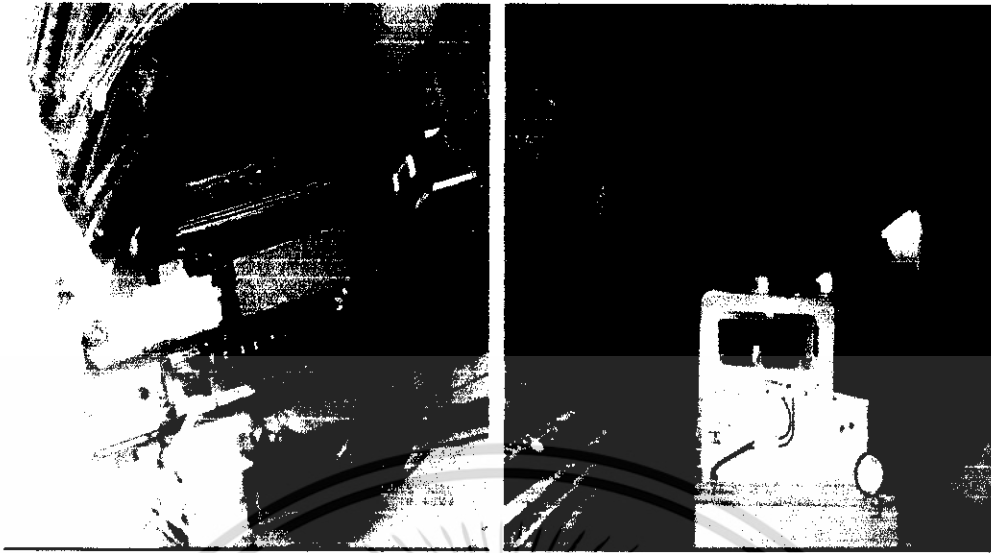
(4) เครื่องลำเลียงแบบ Hopper : ปริมาณความจุของ Hopper จะต้องเพียงพอกับการกักเก็บดินที่ถูกขุดเจาะออกมา เพื่อให้เป็นไปตามกระบวนการขุดเจาะที่ได้วางแผนไว้

6.6.4 เครื่องมือขนส่งวัสดุ (Material Handling Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการขนส่งวัสดุนั้นจะต้องพิจารณาให้เป็นไปตามกำหนดการส่ง รอบเวลา และการจัดสรรตามแต่ละส่วนของงาน

ระบบการขนส่งวัสดุจำเป็นต้องออกแบบให้เคลื่อนที่ได้ทั้งในและนอกบริเวณหน้างาน โดยไม่รบกวนระบบที่ทำการขนย้ายดินออกมา

ระบบขนส่งวัสดุในอุโมงค์(รูปที่ 6.57) : ระบบบรรจกรางเป็นที่นิยมใช้ในการขนส่งวัสดุในอุโมงค์มากที่สุด



รูปที่ 6.57 ระบบขนส่งวัสดุในอุโมงค์

ระบบการขนส่งวัสดุในปล่องแนวตั้ง(รูปที่ 6.58) : ระบบที่ใช้จะเป็นเครนแบบขาห้อย (Gantry) หรือแบบเป็นแขนของปั้นจั่น (Jib) ซึ่งจะเน้นการเคลื่อนของระบบการขนส่งวัสดุที่เข้าและออกปล่องแนวตั้งเป็นหลัก



รูปที่ 6.58 ระบบการขนส่งวัสดุในปล่องแนวตั้ง

ระบบการขนส่งวัสดุอย่างต่อเนื่อง : ระบบการขนส่งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์โดยอัตโนมัติ เพื่อขนส่งชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์อย่างต่อเนื่องจากผิวดินจนถึงหน้างานที่อยู่ใต้ดิน เมื่อใช้ระบบ

ดังกล่าวจะต้องมีการรักษาความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ โดยใช้ระบบเซ็นเซอร์ตรวจสอบตลอดทั้งระบบ มีปุ่มหยุดฉุกเฉิน และศูนย์กลางควบคุมระบบ

6.6.5 เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้า (Electric Power Supply Facilities)

เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องติดตั้งและดูแลรักษาให้เป็นไปตามมาตรฐานด้านเทคนิคไฟฟ้า (Electric Technical Standard) และกฎหมายความปลอดภัยและสุขภาพในงานอุตสาหกรรม

ต้องมีการห่อหุ้มฉนวนประเภทกันน้ำกับตัวเครื่อง ในกรณีที่เครื่องมือจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความต่างศักย์ที่สูงมาก หรือสูงเป็นพิเศษ จะใช้ฉนวนและสายเคเบิลสำหรับสายไฟฟ้าเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการช็อตของไฟฟ้า (Electric Shock)

เครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ใต้ดิน : การเลือกเครื่องมือด้านไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการใช้และระยะทางยาวรวมของอุโมงค์

จะต้องมีจุดจ่ายไฟอิสระตั้งอยู่ในหน่วยงานเพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉินที่เกิดไฟดับหรือมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น

6.6.6 อุปกรณ์ส่องสว่าง (Lighting Facilities)

อุปกรณ์ส่องสว่างจะต้องทำการติดตั้งตามบริเวณที่ทำงานและทางเดิน แสงสว่างที่อยู่ในอุโมงค์จะต้องมีความสว่างมากเพียงพอสำหรับความปลอดภัย และต้องมีอุปกรณ์ป้องกันสภาพสิ่งแวดล้อม สภาพอากาศติดตั้งไว้ด้วย

จำเป็นต้องมีแสงสว่างอย่างน้อย 70 ลักซ์ในพื้นที่ที่ทำงานในอุโมงค์ และ 20 ลักซ์ในที่อื่นๆ ไฟฉุกเฉินจะมีการติดตั้งไว้ตลอดทางเดิน ทางเข้า ทางออก และบันได เพื่อช่วยให้คนงานสามารถหาทางออกจากอุโมงค์ได้ในกรณีที่เกิดไฟดับ

6.6.7 ระบบติดต่อสื่อสาร (Communication System)

ระบบติดต่อสื่อสารระหว่างพื้นที่ที่ทำงานแต่ละส่วนจะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือ และระบบสัญญาณเตือนในกรณีฉุกเฉิน เพื่อติดตามและควบคุมการทำงานในอุโมงค์ และเพื่อรักษาความปลอดภัยในการทำงานในชั้นใต้ดินด้วย

6.6.8 อุปกรณ์ในการระบายอากาศ (Ventilation Facilities)

จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ระบายอากาศให้มีอากาศบริสุทธิ์ในอุโมงค์ เพื่อรักษา สภาพแวดล้อมในการทำงานให้ปลอดภัยและสะอาด

6.6.9 ทางเดินและบันไดที่ปลอดภัย (Safety Walkway and Stair)

จะต้องมีทางเดินและบันไดที่ถูกติดตั้งอย่างปลอดภัยและทอดยาวไปถึงบริเวณหน้างาน

6.6.10 เครื่องมือสูบน้ำและจ่ายน้ำ (Water Supply and Discharge Facilities)

เครื่องมือสูบน้ำและจ่ายน้ำที่ติดตั้งจะต้องมีปริมาณความสามารถในการสูบน้ำมากพอตามที่ ได้คาดการณ์อัตราการใช้น้ำไว้ จะต้องมีการดูแลรักษาเครื่องมืออย่างเหมาะสมในระหว่างที่ทำการ ก่อสร้าง

6.6.11 อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัยและดับเพลิง (Fire Fighting and Fire Prevention Facilities)

จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับดับเพลิงและป้องกันอัคคีภัยติดตั้งไว้ในบริเวณหน้างานเพื่อ ป้องกันอัคคีภัย

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

ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบและเตือนภัยเกี่ยวกับก๊าซ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุการระเบิด หรืออันตรายของก๊าซในบริเวณที่ทำงาน

เมื่อได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าในบริเวณที่จะทำการก่อสร้างนั้นอาจมีสภาพทางธรณีที่มีการเจือปนของก๊าซไวไฟ อากาศที่ไร้ออกซิเจน หรือก๊าซที่เป็นอันตราย ที่คาดว่าจะเกิดการระเบิดขึ้นได้ จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบและเตือนภัยเกี่ยวกับก๊าซไว้ในบริเวณที่ทำการก่อสร้าง และเพื่อที่จะให้อุปกรณ์ระบายอากาศช่วยในการเจือจางก๊าซพิษในระหว่างขุดเจาะอุโมงค์ได้

เครื่องมือตรวจจับก๊าซไวไฟ : เมื่อคาดการณ์ไว้ว่าอาจจะมีก๊าซไวไฟอยู่ จำเป็นต้องทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจจับก๊าซ และบันทึกผลรวมทั้งอุปกรณ์ในการเตือนภัยก็ต้องมีการติดตั้ง ข้อควรระวังในการระเบิดหรือติดไฟของก๊าซจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการระเบิดเช่นกัน การติดตั้งเครื่องมือจะต้องทำตามมาตรฐานสำหรับการป้องกัน โครงสร้างจากการระเบิดตามประเภทของก๊าซ ตารางที่ 6.8 แสดงวิธีการป้องกันโครงสร้างประเภทต่างๆ

ตารางที่ 6.8ประเภทของการ ป้องกัน โครงสร้างจากการระเบิดของก๊าซ
(จากJAPANESE 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 an acceptably safe level

เครื่องมือตรวจสอบก๊าซอันตราย : ถ้าคาดว่ามีความเสี่ยงที่ไร้ออกซิเจนหรือก๊าซอันตราย จะต้องมีการติดตามตรวจสอบ จดบันทึก และติดตั้งอุปกรณ์เตือนภัยเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ

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

ในการเริ่มการทำงานของหัวเจาะจะต้องออกแบบอุปกรณ์ที่ช่วยในการเลี้ยว เข้า และออก เพื่อให้เป็นไปตามกำหนดการก่อสร้าง และต้องทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีที่ปลอดภัยที่สุดด้วยเช่นกัน

6.6.14 เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งผนังอุโมงค์หลักจะต้องสามารถใช้งานได้ดี ทำการติดตั้งได้อย่างแม่นยำ และง่าย โดยคำนึงถึงวัสดุ ขนาดรูปร่าง และมิติของชิ้นส่วนผนังเป็นต้น

6.6.15 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการฉีดอัดน้ำปูน (Backfill Grouted Facilities)

เครื่องมือดังกล่าวจะใช้ในขั้นตอนการฉีดอัดน้ำปูน ซึ่งจะต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถอุดช่องว่างด้านท้ายของการขุดเจาะได้โดยสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่ได้วางแผนไว้

6.6.16 เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังครั้งที่สอง (Secondary Lining Facilities)

เครื่องมือที่ใช้ในการบุผนังอุโมงค์ชั้นในจะต้องมีสมรรถนะมากพอที่จะทำงานให้เป็นไปตามแผนการที่ได้วางไว้ และต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ลักษณะในการบุผนังมีอยู่สองประเภทคือ การขึ้นรูปด้วยตัว Traveler และการนำมาประกอบเอง โดยปกติแล้วแบบ Traveler จะเป็นที่ยอมรับมากกว่า ส่วนแบบประกอบขึ้นส่วนจะใช้เฉพาะหน้าตัดแบบพิเศษหรืออุโมงค์ที่มีความขรุขระเท่านั้น

ตัว Traveler มีอยู่สามประเภทคือ ประเภทพับเก็บไม่ได้ ประเภทคานเข็ม และประเภทพับเก็บได้ ประเภทที่พับเก็บไม่ได้นั้นจะใช้เมื่อมีการบุผนังทีละส่วน ประเภทคานเข็มใช้เมื่อบุผนังขึ้นส่วนแบบทรงกลมในคราวเดียวกัน ประเภทพับเก็บได้ใช้กับขึ้นส่วนของโครงสร้างที่มีเหลี่ยมอยู่ ซึ่งจะง่ายต่อการเคลื่อนที่ในผิวโค้ง

6.6.17 เครื่องมือที่ใช้ในการอัดอากาศและเครื่องมือที่ใช้ในการอัดแรงดันลม

เครื่องมือที่ใช้ในการอัดแรงดันลม ตัวเป่าลมและตัวเครื่องสำรองจะต้องดำเนินการอัดแรงดันลมตามปริมาตรอากาศที่ได้กำหนดไว้ โดยอุปกรณ์จะมีตัวล็อก อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ทำความเย็น แท็งก์รองรับและท่อจ่ายอากาศ ต้องทำการอัดอากาศที่มีความสะอาด ในอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม

เครื่องมือที่ใช้ในการอัดอากาศ เมื่อทำการอัดอากาศในบริเวณหน้าดินหรือบริเวณอื่น ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดไว้ให้พร้อม

สมรรถนะของเครื่องจักร : โดยปกติแล้วอัตราการใช้อากาศสำหรับวิธีการขับเคลื่อนด้วยแรงลม จะถูกประมาณค่าจากปริมาตรรวมจากหัวข้อต่อไปนี้

- ก) การรั่วซึมออกจากหน้าดิน
- ข) การรั่วซึมเข้ามาที่ด้านท้ายของหัวเจาะและผนังอุโมงค์หลัก
- ค) การรั่วซึมที่ตัวล็อก

ปริมาตรหลักๆของการรั่วซึมมาจากหัวข้อต่อไปนี้ ก) อัตราการรั่วซึมขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่านได้ของดินและอากาศ หน้าตัดขวางของหัวเจาะ แรงอากาศที่ถูกกดอัด และการปกคลุมดินที่อยู่เหนืออุโมงค์ขึ้นไป สำหรับปริมาตรการรั่วซึมจาก ข) นั้นแปรผันตามสภาพของผนังอุโมงค์หลัก การเคลือบวัสดุ และการฉีดอัดน้ำปูนหลังจากที่ทำการบดผนังแล้ว

สูตรสำหรับการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้โดย Johnanssen Hewett มีดังนี้

$$Q = \alpha D^2$$

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

ค่าสัมประสิทธิ์ของดิน คำนวณโดยใช้หัวข้อทั้ง 3 ในตอนต้น และพิจารณาข้อมูลในกรณีที่เกิดขึ้นในอดีตรวบรวม

โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของดินจะมีค่าอยู่ที่ 3.65 สำหรับดินปกติ และ 7.3 สำหรับดินทรายและกรวด ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะใช้ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องมือที่ใช้ในการสูบลมอัด

อากาศได้ ในความเป็นจริงแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของค่าที่ได้จากการคำนวณ
สมการนี้

6.6.18 ระบบที่ใช้ในการควบคุมวิธีการขุดเจาะโดยใช้หัวเจาะประเภท EPB

ระบบที่ใช้ในการควบคุมหัวเจาะ EPB นั้นจะต้องมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ
ในขณะที่ทำการรักษาเสถียรภาพของการเปิดหน้าดิน ไปในตัวด้วย

ในหัวเจาะแบบ EPB นั้น แรงดันดินและแรงดันจากน้ำใต้ดินจะถูกค้ำยันโดยดินที่ถูก
ขุดออกมาที่อยู่ในห้องขุดเจาะของหัวเจาะ แรงดันในห้องขุดเจาะจะถูกควบคุมด้วยสกรูลำเลียง และถูก
ลำเลียงออกมาที่ทางออก การลำเลียงดินที่ออกมาจะมีสัดส่วนเป็นไปตามการขุดเจาะของหัวเจาะ ดังนั้น
การรวมระบบการทำงานย่อยๆเหล่านี้ไว้ในระบบควบคุมเพียงหนึ่งเดียวนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ ตามปกติ
แล้วในระบบการควบคุมนั้นจะทำการตรวจวัดและติดตามข้อมูลที่ทำให้การขุดเจาะ เช่น สภาพของหน้าตัด
ใบมีด แรงดันในห้องตัดดิน อัตราการขุดเจาะ และปริมาณของดินที่ขุดเจาะออกมาได้ และปริมาณ
กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขุดเจาะ การสูบลินออก เป็นต้น

ฟังก์ชันหลักที่จำเป็นต่อระบบควบคุมมีดังนี้

- ก. การควบคุมแรงดันดินที่หน้าตัดดิน : ควบคุมความเร็วในการขุดเจาะเพื่อให้สมดุล
กับแรงดันดิน/น้ำที่หน้าตัดดิน และแรงดันดินในห้องขุดเจาะ
- ข. การควบคุมปริมาณการขนย้ายดิน : ควบคุมอัตราการหมุนของสกรูลำเลียงเพื่อให้
สมดุลกับปริมาณของดินที่เข้าและออก
- ค. การควบคุมฉีดอัดสารผสมเพิ่ม : จัดเตรียมปริมาณสารเติมแต่งให้เหมาะสมกับดิน
แต่ละชนิดเพื่อรักษาสภาพการไหลตัวได้ภายใต้ปริมาณดินที่มีอยู่ในห้องตัดดิน
- ง. การควบคุมการบันทึกผลการขุดเจาะ : การติดตามการทำงานของหัวเจาะจะทำที่
ห้องดำเนินการหรือศูนย์กลางควบคุม และเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงาน แสดงข้อมูลที่ได้และ
วิเคราะห์ และทำการบันทึกผลข้อมูล

6.6.19 เครื่องมือสำหรับแปรโคลนใน Slurry เป็นก้อนดินแข็ง

เครื่องมือแปรรูปให้อยู่ในสถานะของแข็งนี้จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปของโคลนที่ถูก
ขุดเจาะออกมาเป็น สถานะที่สะดวกต่อการขนย้ายดินออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการแปรสถานะของโคลนมีดังนี้

ตากให้แห้งด้วยแสงแดด

ใช้ผงซีเมนต์และปูนขาว

ใช้สารเคมีแต่งประเภทโพลีเมอร์

6.6.20 การควบคุมการทำงานสำหรับหัวเจาะประเภท Slurry

การควบคุมจะควบคุมวงจรการทำงานของหัวเจาะแบบ Slurry และควบคุมเสถียรภาพของแรงดันน้ำในบริเวณหน้าตัดดิน เพื่อให้การขุดเจาะอุโมงค์เป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

การทำงานของหัวเจาะแบบ Slurry จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบลมเพื่อทำให้เกิดแรงดันที่บริเวณหน้าตัดดิน เครื่องสูบลมสำหรับการสูบลมเข้าและออก เครื่องสูบลมทุกตัวจะต้องทำงานพร้อมกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบสำหรับการควบคุมรวม โดยปกติแล้วระบบจะทำการตรวจวัดแรงดันที่หน้าตัดดิน พิกัดของหัวเจาะ สถานะของเครื่องจักรใน Slurry และ โอนถ่ายข้อมูลเหล่านี้ไปยังศูนย์การควบคุมกลางเพื่อควบคุมการทำงานต่อไป

ฟังก์ชันการทำงานหลักที่จำเป็นสำหรับเครื่องมือการควบคุมการทำงานมีดังนี้

การควบคุมแรงดันดิน/น้ำ ที่หน้าตัดดิน : ควบคุมอัตราการไหลเข้าและออกเพื่อให้มีความสมดุลระหว่าง แรงดันดิน/น้ำที่หน้าตัดดินและแรงดันใน Slurry ในห้องขุดดิน

การควบคุมคุณภาพของ Slurry : ปรับแก้และรักษาคุณภาพของ Slurry หลังจากทำการแยกทรายและอนุภาคดินออกจากกันเพื่อกลับมาทำงานเป็นวัฏจักรอีกครั้ง

การควบคุมวงจรการทำงานของ Slurry : ทำการติดตาม ตรวจวัด ควบคุมแรงดันน้ำในหัวขุดเจาะและปริมาณการไหล

การควบคุมการบันทึกผลการขุดเจาะดิน : ติดตามการทำงานของหัวขุดเจาะที่ห้องดำเนินการหรือห้องศูนย์กลางควบคุม และเก็บรวบรวมข้อมูล แสดงข้อมูล วิเคราะห์และบันทึกผลที่ได้

6.6.21 เครื่องมือดูแลรักษาตัว Slurry (Slurry Treatment Facilities)

เครื่องมือนี้จะสามารถแยกน้ำและดินจากการขนย้ายออกจาก Slurry และจะต้องมีความจุมากพอเพื่อที่จะรักษาอัตราความเร็วกับอัตราการขุดเจาะอุโมงค์

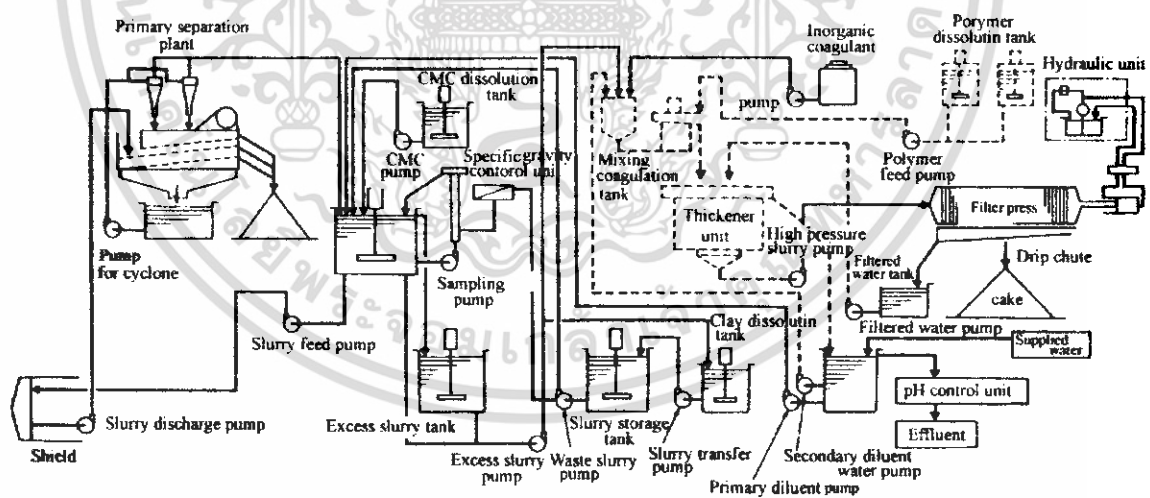
การขนย้ายดินโคลนใน Slurry ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายของไหลจะถูกแยกของแข็งกับน้ำออกจากกัน เครื่องมือนี้จะทำการปรับแก้สภาพตัว Slurry เพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้งานได้อีกครั้ง

เครื่องมือดูแลรักษา Slurry นั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ เครื่องมือดูแลรักษาชั้นดินชั้นที่สอง และชั้นที่สาม โดยทั่วไปการทำงานในชั้นดินจะให้ความสำคัญกับการแยกทรายในดินปนทราย และชั้นที่สองจะให้ความสำคัญกับการแยกดินเหนียวในชั้นดินปนดินเหนียว

(3) ชั้นดิน : เครื่องมือนี้จะทำการแยกทราย กรวด ดินเหนียว และดินตะกอนที่มีอนุภาคที่ใหญ่กว่า 75 ไมโครเมตร จาก Slurry ที่นำออกมาโดยใช้วิธีทางกายภาพในการแยก โดยทั่วไปแล้วจะใช้ทั้งวิธีการร่อนด้วยตะแกรงและการหมุนแบบเปียก (Wet-type cyclone)

(4) ชั้นที่สอง : สารปนเปื้อนส่วนเกินได้แก่ ตะกอนละเอียดที่มีอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ดินเหนียว และอนุภาคคอลลอยด์จะแยกได้ยาก ดังนั้นจะต้องเติมสารเร่งตกตะกอนลงใน Slurry เพื่อให้จับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นจึงทำการลดน้ำโดยใช้ปั๊มคอก และทำการกดอัดด้วยเครื่องค่อ โดยทั่วไปจะใช้ตัวกดอัดแบบกรอง

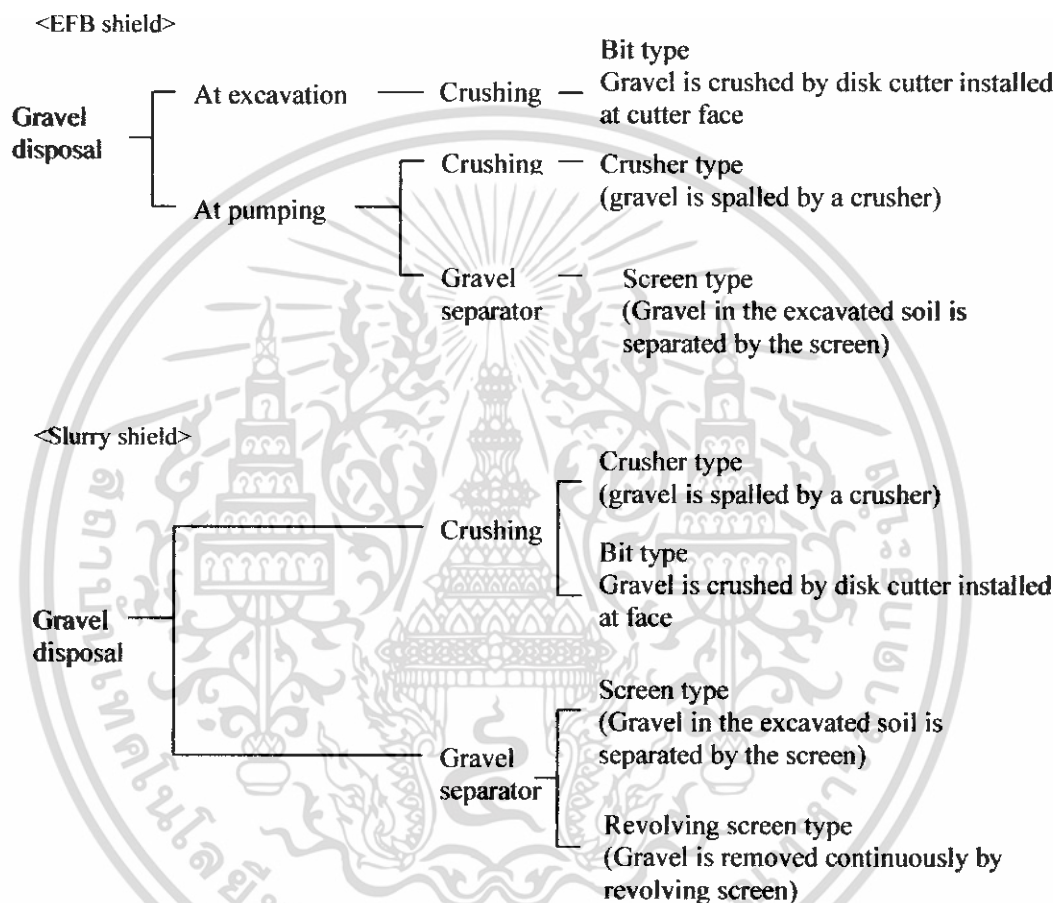
(5) ชั้นที่สาม : น้ำที่ได้จากชั้นตอนที่สองนั้นโดยปกติจะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูง จะต้องใช้เครื่องมือปรับสภาพให้เป็นกลางและไล่น้ำออกจากชั้นตอนที่สองและควบคุมความชุ่ม



รูปที่ 6.59 ขั้นตอนการดูแลรักษา Slurry โดยใช้สารเร่งการตกตะกอนแบบโพลิเมอร์
(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

6.6.22 ขั้นตอนการแยกกรวดออก (Gravel Removal Facilities)

ขั้นตอนการแยกกรวดจะต้องสามารถแยกและทำการบดละเอียดได้อย่างต่อเนื่อง โดยขั้นตอนการแยกกรวดออกแสดงในรูปที่ 6.60 การเลือกวิธีที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของกรวดหรือสถานที่ซึ่งสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้



รูปที่ 6.60 ขั้นตอนการแยกและคัดกรวดออก

(จาก JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

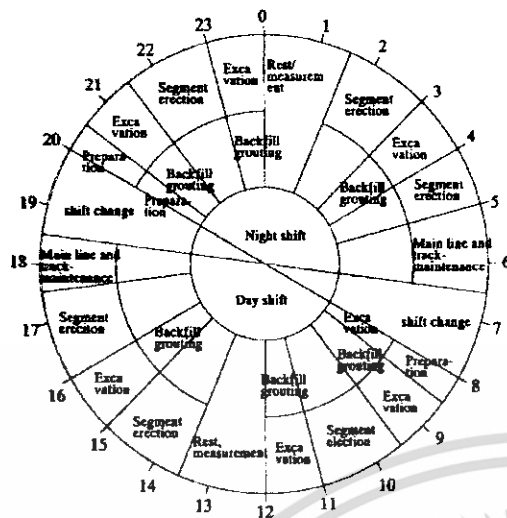
6.7 การควบคุมการทำงานในภาคสนาม

6.7.1 การควบคุมตารางการทำงาน (Schedule Control)

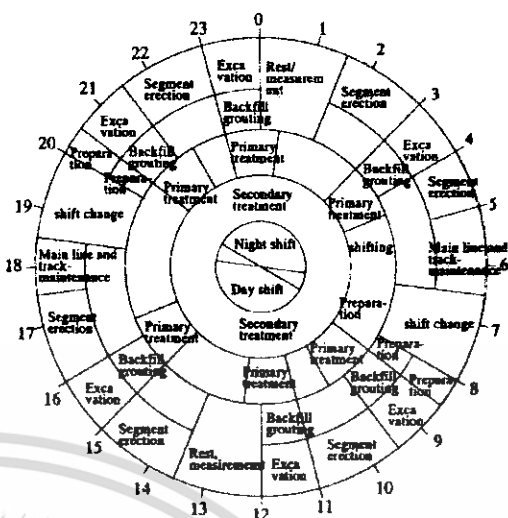
ขั้นตอนการทำงานจะต้องมีการติดตามผลอยู่เสมอ และต้องจัดการระบบการทำงานไม่ให้เบี่ยงเบนออกจากที่ได้วางแผนไว้ กำหนดการของการทำงานทั้งหมดจะต้องถูกควบคุมเพื่อให้โครงการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยปราศจากอุปสรรคใดๆ

(1) ทบทวนวงจรวเวลา : การจัดท่วงรอบเวลาของการทำงานใน 1 รอบจะต้องจัดทำขึ้นมาเนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญเพื่อใช้ในการทบทวนการทำงานตามตารางงาน เพราะว่าสามารถเป็นตัวแทนในการกำหนดการทำงานทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบวงรอบเวลาซึ่งเป็นตัวที่จะสามารถสะท้อนให้เห็นถึงสภาพการทำงานที่แท้จริงได้ จะได้นำขั้นตอนการทำงานจริงมาเปรียบเทียบกับตารางการทำงาน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าขั้นตอนนั้นเป็นไปตามกำหนดการเดิม นอกจากนี้ยังต้องตระหนักถึงการขนส่งวัสดุและดิน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาพการจราจรในเมือง สถานที่สำหรับการขนย้ายวัสดุและดิน) ความปลอดภัยในการทำงาน ชั่วโมงต้องห้ามในการทำงานเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบๆ อาคารระบบอากาศ และสภาพทางเศรษฐกิจอื่นๆ ถ้าแผนการทำงานล่าช้ากว่ากำหนดเดิมหนึ่งช่วง จำเป็นต้องทำการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานใหม่ วงรอบเวลาดังกล่าวที่สร้างขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 6.61

(2) การเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้าง : เมื่อขั้นตอนการทำงานล่าช้ากว่ากำหนดการเดิม จะต้องมีการวิเคราะห์ถึงการทำงานเป็นพิเศษซึ่งจะส่งผลต่อกำหนดการทั้งหมดของโครงการ จากนั้นจึงพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานที่เหมาะสมต่อไป



(a) EPB shield



(b) Slurry shield

รูปที่ 6.61 ตัวอย่างรายละเอียดของวงรอบการทำงาน
(จากJAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING)

6.7.2 การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)

ก่อนใช้วัสดุชิ้นหลักและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุโมงค์ จะต้องมีการทดสอบและตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่าเป็นไปตามข้อกำหนดในส่วนของคุณภาพ รูปทรง มิติ กำลัง และอื่นๆ

วัสดุบางตัวที่เกิดการแตกหักเสียหายได้ง่าย จำเป็นต้องมีการดูแลการขนย้ายและการเก็บรักษาให้ดีเป็นพิเศษ

การทดสอบและการตรวจสอบ : หัวข้อต่อไปนี้คือวัสดุและผลิตภัณฑ์หลักๆ ที่จะต้องถูกทดสอบและตรวจสอบ

- (1) ชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์
- (2) หัวชุดเจาะ
- (3) วัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดน้ำปูน
- (4) สารกักน้ำสำหรับการบุผนังอุโมงค์หลัก : การกักเลือกสารกักน้ำที่ใช้ในการบุ

ผนังอุโมงค์หลักต้องเป็นไปตามข้อกำหนดและสภาพการทำงานที่มีคุณภาพ สารกักน้ำต้องผ่านการ

ทดสอบความเหนียว ความยืดหยุ่น กำลัง ความต้านทาน ความทนทานต่อสารเคมี และระยะเวลาการแข็งตัว

(5) คอนกรีตที่ปูผนังอุโมงค์ชั้นใน

6.7.3 การจัดการการทำงาน (Management of work)

เมื่ออยู่ในขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ สภาพของหน้าดิน การเบี่ยงเบนจากแนวเส้นศูนย์กลาง การเสียรูปและการแตกหักของชิ้นส่วนของผนัง การรั่วซึมของน้ำ และการทรุดตัวของพื้นดิน จะต้องมีการติดตามตรวจสอบตลอดเวลา และจะต้องควบคุมการทำงานให้เป็นไปตามขั้นตอน มีการสำรวจและตรวจวัดเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนด

ต้องมีการควบคุมการทำงานโดยใช้การสำรวจและการวัดซึ่งบ่งบอกถึงสภาพการทำงานที่เป็นจริง ผลการสำรวจ และการตรวจวัดจะต้องจดบันทึกเป็นบันทึกประจำวัน

(1) การควบคุมหน้าตัดดิน : การเปรียบเทียบสภาพหน้าตัดดินจริงกับการบันทึกการสำรวจก่อนการก่อสร้างเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำ ต้องลงรายละเอียดไว้ในการสำรวจด้วย จำเป็นมากโดยเฉพาะดินเหล่านี้

- ก. ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพอย่างกะทันหัน มีจุดอ่อนค้ำที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้และไม่ค่อยพบในโครงการก่อนหน้านี้เลย
- ข. บริเวณที่มีแหล่งน้ำอยู่ข้างเคียงหรือตัดผ่านแหล่งน้ำ
- ค. ดินที่มีการหลวมตัวหรือมีระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงขึ้นจากการรั่วซึมของน้ำในท่อระบายน้ำหรือแอ่งน้ำ
- ง. ดินที่มีชั้นหินที่บางมากจนไม่สามารถทำการสำรวจพบในทางธรณีวิทยาได้

ในกรณีของหัวเจาะชนิด Closed-face จะต้องมีการวัดค่าตามหัวข้อต่อไปนี้ด้วย

- ก. แรงผลักดัน แรงหมุนใบมีดตัดหน้าดิน แรงหมุนของสกรูลำเลียง และความเร็วของการขับเคลื่อน
- ข. แรงดันในห้องขุดเจาะดิน แรงดันใน Slurry เป็นต้น
- ค. ปริมาณดินที่ถูกขุดเจาะออกมา

(2) การควบคุมแรงผลักดัน การขุดเจาะ การค้ำยัน และดินที่ถูกขุดเจาะออกมา : การควบคุมแรงดัน และการควบคุมการขุดเจาะดิน การทำสถิติสภาพหน้าดิน และการขนย้ายดินออก

(3) การควบคุมการบุผนังอุโมงค์หลัก : คุณภาพของการบุผนังอุโมงค์หลักจะส่งผลต่อการเสียรู/การเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนของผนัง น้ำหนักบรรทุกของดินที่ไม่สมมาตรที่กระทำต่อตัวอุโมงค์ การทรุดตัวของผิวดิน การรั่วซึมของน้ำ และการขับเคลื่อนอย่างถูกต้องได้ การคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการทำให้มั่นใจได้ว่าการติดตั้งผนังอุโมงค์นั้นได้รูปทรงกลมจริงๆ และขณะเดียวกันก็หลีกเลี่ยงความเสียหายและการหลุดร่วงของชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ได้

(4) การควบคุมการฉีดอัดน้ำปูน : การฉีดอัดที่ไม่สามารถส่งผลต่อตัวอุโมงค์ เช่น ทำให้น้ำหนักบรรทุกของดินที่กระทำแบบอสมมาตร มีการทรุดตัวของผิวดิน การรั่วซึมของน้ำ ตลอดจนการบุผนังอุโมงค์ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการเลือกวัสดุที่ใช้ในการฉีดอัด การออกแบบการผสมคอนกรีต (Mixing design) แรงดันที่ใช้ในการฉีดอัด ปริมาณการฉีดอัดและวิธีการฉีดอัดอย่างรอบคอบ

(5) การควบคุมการบุผนังอุโมงค์ชั้นใน : การบุผนังอุโมงค์ชั้นในนั้นจะส่งผลกระทบต่อความทนทาน ความฝืดน้ำและการดูแลรักษาอุโมงค์ในอนาคต ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษากการออกแบบการผสม การติดตั้ง วิธีการบ่มและระยะเวลาการออกแบบอย่างละเอียดถี่ถ้วน ความหนาที่ใช้ในการบุผนังและมิติด้านในอุโมงค์จะต้องทำอย่างสอดคล้องตามแผนการก่อสร้างที่ได้วางไว้

6.8 การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ (Safety and Health Administration)

ในการก่อสร้างจะต้องมีการป้องกันอุบัติเหตุ มีการปฏิบัติงานด้วยความปลอดภัยและข้อห้ามต่างๆ ด้วยการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและสุขภาพ

1) รหัสและข้อความที่เกี่ยวข้อง : จาก The Industrial Safety and Health Law และองค์กรที่เกี่ยวข้องกับด้านกฎหมายบัญญัติขึ้นเพื่อความปลอดภัยและสุขภาพของแรงงาน และเพื่อจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่ดี นอกจากนี้ยังมีแนวทางด้านความปลอดภัยมากมายที่ถูกจัดตั้งขึ้นมา ซึ่งจะต้องทำการจดบันทึกสิ่งเหล่านี้ ทั้งข้อกำหนด และแนวทางสำหรับความปลอดภัยในโครงการก่อสร้าง

2) แผนการรายงานการก่อสร้าง

3) การบริหารจัดการความปลอดภัย : การจัดการที่ดีนั้นไม่ควรเพียงแต่ออกกฎข้อห้ามเพื่อความปลอดภัยเท่านั้น แต่ควรส่งเสริมการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุให้มากขึ้น โดยจัดให้มีสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ดีและสร้างความปลอดภัยในการทำงานและสุขภาพให้กับคนงานด้วย

4) การอบรมด้านความปลอดภัยและข้อห้ามในการทำงาน : เนื่องจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการบริหารจัดการด้านการก่อสร้างที่ไม่ดี ทำให้คนงานขาดความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ และการดูแลรักษาที่ไม่ดีพอ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการอบรมด้านความปลอดภัยขึ้นในกรณีที่มีการจ้างงานเข้ามาใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งงาน และเมื่อคนงานจะต้องทำงานในพื้นที่ที่อันตราย

5) การตรวจสอบด้านความปลอดภัย : เนื่องจากการตรวจสอบความปลอดภัยในแต่ละหัวข้อนั้นจะแตกต่างกันไปตามสภาพของงาน วิธีการทำงาน เครื่องมือที่ใช้ และขั้นตอนการทำงาน จึงต้องจัดตั้งกฎข้อบังคับให้เหมาะสมกับแต่ละสภาพของงาน จัดตั้งการตรวจสอบสำหรับงานแต่ละประเภท บัญชีที่ตรวจสอบ (Inspection list) จะต้องถูกจัดทำขึ้นและบันทึกผลการตรวจสอบลงไปด้วย จะต้องจัดทำกฎระเบียบในการตรวจวัดและบันทึกผลของปริมาณออกซิเจนที่มีในอากาศและปริมาณก๊าซไวไฟด้วย

6.8.1 การจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่ดีในที่ทำงาน (Providing Good Working Environment)

ต้องปฏิบัติตามขั้นตอนกฎระเบียบต่างๆเพื่อรักษาความปลอดภัยและสุขอนามัยที่ดีในสภาพแวดล้อมในการก่อสร้าง

สภาพแวดล้อมในการทำงานที่ดีจะต้องดำเนินการให้มีทั้งในการขุดเจาะอุโมงค์ที่อยู่ใต้ดินและบนพื้นดิน เพื่อให้มีความปลอดภัยและถูกสุขอนามัย ต้องมีระบบระบายอากาศ แสงสว่างทางเดิน ที่เพียงพอ และกำจัดสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายในอุโมงค์ให้หมดไป ข้อกำหนดเหล่านี้ต้องมีก็เพื่อให้เป็นไปตามแผนการที่วางไว้

การระบายอากาศ : การระบายอากาศเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการรักษาความปลอดภัยและสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงานในอุโมงค์ ดังนั้นในการวางแผนวิธีการระบายอากาศ และเครื่องมือที่ใช้นั้นจะต้องพิจารณาถึงสภาพทางธรณีวิทยา ขนาดของหัวเจาะ วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ และกำหนดการก่อสร้าง ถ้าเป็นไปได้ที่จะมีอากาศที่ไร้ออกซิเจนหรือก๊าซที่เป็นอันตรายอยู่ ยังต้องมีระบบอากาศที่ดีพอ จะต้องจัดให้ระบบระบายอากาศที่มีสมรรถนะเพียงพอสำหรับกรณีที่เกิดเหตุไม่คาดคิดด้วย (โดยปกติแล้วคนงานจะใช้อากาศบริสุทธิ์ในการหายใจ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที) เมื่อมีอากาศที่ไร้ออกซิเจนหรือก๊าซอันตรายอยู่ จะต้องจัดให้มีก๊าซออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่มากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีก๊าซไวไฟและก๊าซพิษอยู่ ค่าออกซิเจนจะต้องน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ ชีคเริ่มต้นของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟตามข้อบังคับของรัฐบาล แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 ซึ่งคำนวณไว้แล้วไม่ว่าจะอยู่ในอันตรายหรือไม่ก็ตาม ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายใต้การทำงาน จำเป็นต้องทำการตรวจวัดและรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 37 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.9 รายชื่อของก๊าซพิษและก๊าซไวไฟ

(จาก JAPANESE 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	-	Hypoixia 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	-	Hypoixia and anoxia	18 %	-
Methane (CH ₄)	0.6	Colorless, no smell	5.3/14	Explosion	1.5 % ⁵⁾	-

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 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 จะต้องมียแสงสว่างที่เพียงพอที่หน้างาน ตัวติดตั้งผนังอุโมงค์ ส่วนที่ทำงานกับเครื่องจักรต่างๆ บริเวณที่ทำการผัดกลับและบริเวณสายพานลำเลียง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้มีแสงสว่างอย่างน้อยที่สุด 70 ลักซ์

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

การระบายน้ำ : จะต้องเตรียมการให้มีการระบายน้ำอย่างเพียงพอ เพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนการขุดเจาะอุโมงค์ จะต้องมีการจัดเตรียมระบบระบายน้ำฉุกเฉินและมาตรการสำรองในกรณีที่มีการไหลบ่าของน้ำเข้ามาโดยไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า ทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ

ทางเดิน : จะต้องมีการจัดระเบียบความปลอดภัยสำหรับทางเดินเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากการจราจร ทางเดินจะต้องมีความกว้างที่มากพอ เพื่อที่ไมให้คนงานต้องสัมผัสโดนกับพาหนะที่เคลื่อนที่เข้า-ออก ต้องมีพื้นผิวที่เรียบและมีแสงสว่างเพียงพอ

อุปกรณ์ป้องกันอันตราย : จะต้องมีหมวกนิรภัย อุปกรณ์ช่วยหายใจ หน้ากาก ที่อุดหู เพื่อลดเสียง แวนดานิรภัย ถุงมือป้องกันการสั่นสะเทือน ชุดเปียก และอุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น จะต้องบังคับให้คนงานใส่อุปกรณ์เหล่านี้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น

6.8.2 การควบคุมแรงดันที่ใช้แรงดันลม (Pneumatic Pressure Control)

เมื่อเลือกใช้วิธีอัดอากาศ สภาพการทำงานจะเสี่ยงอันตรายและมีหลายสิ่งที่ต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยและสุขภาพที่ดีด้วย เช่น การใช้อุปกรณ์ในการอัดอากาศ สุขภาพของคนงานในสภาวะมีแรงดันและสภาวะปกติ การป้องกันอุบัติเหตุ จะต้องนำความปลอดภัยและสุขภาพที่ดีในการทำงานภายใต้แรงดันสูงมาใช้ นอกจากนี้แล้วยังมีกฎข้ออื่นๆอีก

(1) ในปกติทั่วไป : จะต้องมีการควบคุมดูแลจำนวนคนที่อยู่ในอุโมงค์โดยจัดทำป้ายชื่อ หรือใช้การตรวจโดยการขานชื่อ และห้ามนำวัตถุไวไฟทุกชนิดเข้าไปในอุโมงค์ ยิ่งไปกว่านั้นยังห้ามถือวัสดุใดๆที่เป็นเชื้อเพลิงเข้าไปในอุโมงค์

(2) อุปกรณ์อัดอากาศ : ต้องใช้อุปกรณ์ที่เชื่อถือได้ในการอัดอากาศ จะต้องมีการ
กำลังสำรองไว้ในกรณีที่อุปกรณ์ใช้มีกำลังตกลง

(3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการและการดูแลรักษาการกดอัดอากาศ : จะต้องมีการ
แจ้งให้คนงานทราบถึงการสื่อสารและสัญญาณที่ใช้สำหรับเครื่องมือในการอัดอากาศ การดำเนินการกด
อัดอากาศต้องเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ และการอัดอากาศจะต้องดำเนินการด้วยกลุ่มคนเพียงกลุ่มเดียว
เท่านั้น

6.8.3 อุบัติเหตุและอุบัติภัย (Accident and Disasters)

จะต้องมีการป้องกันอุบัติภัยที่จะเกิดขึ้นในอุโมงค์ จะต้องมีการป้องกันอุบัติเหตุและ
อุบัติภัยที่มีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ไม่เหมาะสม สภาพการทำงานและวิธีการทำงาน
ที่แปลกประหลาดในอุโมงค์

(1) การป้องกันอัคคีภัย : การพิจารณาถึงอัคคีภัยในอุโมงค์ในบางกรณีก็ยากที่จะ
แยกแยะสาเหตุการเกิดได้อย่างแน่ชัด จึงจำเป็นที่จะต้องจัดให้มีมาตรการสำหรับการป้องกันอัคคีภัยขึ้น
โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวิธีการอัดอากาศ ซึ่งจะต้องให้ความใส่ใจกับคนงานที่ทำงานในที่ที่อากาศไม่มีการ
ถ่ายเท ต้องจัดให้มีอุณหภูมิที่ติดไฟได้อยู่ในระดับต่ำ ต้องใส่ใจกับความเร็วในการถูกลามของเพลิงไหม้
และการดับเพลิงภายใต้สภาวะมีแรงดัน

ตามกฎหมายด้านอัคคีภัยได้ระบุอย่างชัดเจนว่าน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงชั้นดี ถ้าน้ำมันดับ
จำนวนหนึ่งอยู่ในอุโมงค์น้อยกว่าที่กฎหมายกำหนดก็จะใช้กฎหมายเทศบาลในการควบคุมปริมาณการ
มีวัตถุไวไฟที่น้อยที่สุด สำหรับการมีจำนวนที่มากกว่านั้นก็จะใช้กฎหมายอัคคีภัยในการควบคุมปริมาณ
การมีวัตถุไวไฟ วิธีที่ดีที่สุดในการป้องกันอัคคีภัยคือ การลดปริมาณวัตถุไวไฟที่มีในอุโมงค์ที่จะเป็นไป
ได้ ลดการใช้ไฟในอุโมงค์ให้น้อยลง และจัดตั้งหน่วยงานด้านป้องกันอัคคีภัยขึ้นมาเพื่อรับผิดชอบด้าน
นี้โดยเฉพาะ จะต้องจัดการแหล่งกำเนิดอัคคีภัยและวัตถุไวไฟ ต้องมีเครื่องมือสำหรับดับเพลิงติดตั้งไว้
และต้องมีมาตรการในการดับเพลิงด้วย

(2) การป้องกันอุบัติภัยจากการระเบิดของก๊าซ : การทำการขุดเจาะดินในบริเวณที่
ได้ระบุด้านล่างนี้ ซึ่งเสี่ยงต่อการระเบิดของก๊าซและการเผาไหม้ในอุโมงค์ได้ เนื่องจากก๊าซที่ติดไฟได้
เช่น ก๊าซมีเทน จะพุ่งตัวออกมาจากดินและแยกตัวออกมาจากน้ำในอุโมงค์

ก. ชั้นสลัดจ์ (Sludge) ในดินที่ถูกถมใหม่ของหนองน้ำและแอ่งน้ำหรืออ่าวที่มี
มลพิษสูง

ข. พื้นที่ที่มีผลผลิตของก๊าซมีเทนอยู่

ค. ชั้นดินที่มีชีวมีสอยู่มาก

จากการพิจารณาชั้นดินในหัวข้อข้างบนแล้วจะเห็นว่ามีความจำเป็นในการสำรวจพื้นที่ที่จะต้องการขุดเจาะ และยังต้องทำการสำรวจสภาพแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียง การสำรวจทางธรณีวิทยาและทางชลศาสตร์จะต้องมีการสำรวจก่อนอย่างเพียงพอก่อนที่จะมีการขุดเจาะ ในพื้นที่ที่น่าจะมีก๊าซไวไฟอยู่ควรจะต้องทำการตรวจสอบด้วยการเจาะหลุมสำรวจ ควรจะมีการปรับปรุงดินพิจารณาชนิดของหัวเจาะที่ใช้ เลือกใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการระเบิดจากก๊าซได้

ในกรณีที่มีก๊าซไวไฟอยู่ก็ควรจะมีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ โดยจะต้องทำการศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในการระบายอากาศ วิธีการระบายอากาศ ประสิทธิภาพของการระบายอากาศอย่างรอบคอบ

(3) การป้องกันอากาศที่ไร้ออกซิเจน และก๊าซพิษ : ในพื้นที่ที่ถูกปิดกั้นจากสภาวะภายนอกหรือในที่ที่มีการระบายอากาศที่ไม่ดีจะทำให้เกิดปัญหากับอากาศที่ไร้ออกซิเจนและก๊าซพิษได้ เนื่องจากมีการใช้ออกซิเจนในอากาศไปจนหมด มีการรั่วของก๊าซ (มีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไสโครเจน ซัลเฟต เป็นต้น) ไหลไปตามอากาศที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ ดังนั้นในกรณีทำงานโดยใช้หัวเจาะจำเป็นต้องมีการเจาะหลุมสำรวจก่อนในบริเวณที่จะทำการขุดเจาะและในพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อให้ทราบข้อมูลของก๊าซพิษและอากาศที่ไร้ออกซิเจนไว้ล่วงหน้า

อากาศที่ไร้ออกซิเจนอาจจะเกิดในอุโมงค์ในกรณีทำการขุดเจาะในชั้นดินต่อไปนี้

- ชั้นทรายหรือกรวดที่ไม่มีหรือมีน้ำได้ดินเพียงเล็กน้อยในชั้นดินที่ถูกชั้นที่บดน้ำ

ประกอบอยู่

ของแมงกานีส

- ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของสารที่สามารถแยกสลายได้ เช่นเกลือของเหล็กและเกลือ

- ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน อีเทน เป็นต้น

- ชั้นดินที่มีองค์ประกอบของชีวมีส และสารประกอบอินทรีย์อยู่

- ชั้นดินที่มี หรือน่าจะมีน้ำพุที่มีกรดคาร์บอนิก

- ชั้นดินที่มี Stagnation ที่อากาศไร้ก๊าซออกซิเจน

- พื้นที่ที่มีการใช้อากาศอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียง

จะต้องมีการสำรวจทางธรณีวิทยาอย่างเพียงพอหรือให้หน่วยงานก่อสร้างอื่นที่ทำการเสร็จเรียบร้อยแล้วหรืออยู่ในระหว่างการก่อสร้างจะต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีพอเพื่อป้องกัน

อุบัติเหตุที่มาจากกาชาก้าชออกซิเจนได้ และเพื่อให้ภายในอุโมงค์มีกาชออกซิเจนอย่างเพียงพอ และจะทำให้ปริมาณกาชพิษเจือจางลงได้

จะต้องมีการจดบันทึกการตรวจวัดกาชออกซิเจน และกาชพิษในอากาศตามสภาพที่สัมพันธ์กันตามข้อกำหนดของ Prevention of Anoxia เป็นต้น

(4) การป้องกันปัญหาที่เกิดจากแรงดันสูง : เมื่อทำงานภายใต้สภาวะมีแรงดันอยู่ คนงานจะเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยเกี่ยวกับ Dysbarism ได้ อาจจะเป็นไนตัส และป่วยจากกาชไนโตรเจน เป็นต้น จึงต้องป้องกันปัญหาสุขภาพจากการทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดัน โดยจัดการเชิงบังคับเวลาการทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดัน มีการปรับสภาพในห้องความดันก่อน มีการลดปริมาณกาชทุกครั้งทำงานเสร็จ ใช้วิธีการทางการแพทย์ที่เหมาะสม คนงานที่จะต้องทำงานในพื้นที่ที่มีแรงดันจะต้องมีการตรวจสุขภาพ และต้องผ่านการทดสอบซึ่งจะทำทุกๆหกเดือน

(5) การป้องกันอันตรายจากการยก การขนย้าย และบนราง : เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องป้องกันคนงานจากอุบัติเหตุในการขนย้ายวัสดุหรือดินในอาคารระบายอากาศ และในหน่วยงานก่อสร้าง เพื่อให้บรรลุเป้าหมายนี้ จะต้องมีการป้องกันเป็นขั้นตอน รวมทั้งการป้องกันการสัมผัสและการใช้ อุปกรณ์ป้องกันการตก โดยพิจารณาถึงความปลอดภัยในขั้นตอนการติดตั้ง และการจัดลำดับของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องด้วย

6.8.4 การช่วยชีวิตเหตุฉุกเฉิน (Emergency and Rescuing Action)

จำเป็นต้องมีมาตรการเหล่านี้โดยการจัดตั้งหน่วยงานสำหรับกรณีฉุกเฉินหรืออุบัติเหตุที่เกิดขึ้น

จะต้องจัดให้มีอุปกรณ์ที่จำเป็นในกรณีที่มีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้น เช่น เครื่องมือสื่อสาร และจะต้องมีสำรองและเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งานตลอดเวลา ต้องมีระบบสื่อสารระหว่างภายในและภายนอกอุโมงค์ และต้องจัดตั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องขึ้นมาด้วย

(1) เครื่องมือสื่อสาร : ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับสัญญาณเตือนภัย อุปกรณ์สำหรับการประกาศทั้งในและนอกสถานที่ก่อสร้าง โดยต้องจัดลำดับการเตรียมพร้อมเอาไว้ และต้องมีการดูแลรักษาอยู่ตลอดเวลา ควรจะจัดให้มีเครื่องมือสื่อสารแบบไร้สายไว้ นอกเหนือจากเครื่องมือสื่อสารระบบธรรมดาทั่วไปแล้ว

(2) อุปกรณ์ในการอพยพคนและเครื่องป้องกัน : เครื่องช่วยหายใจ เช่น เครื่องช่วยหายใจแบบอากาศและออกซิเจน อุปกรณ์ช่วยอพยพคน เช่น ไฟนำทางแบบพับเก็บได้ จะต้องจัดให้มีไว้ในพื้นที่ที่สำคัญๆ เส้นทางอพยพจะต้องมั่นใจได้ว่าคนงานทุกคนรับรู้ และทราบว่ายู่ตรงจุดไหน

(3) การปฐมพยาบาลเบื้องต้น : ในกรณีที่คนงานได้รับบาดเจ็บและป่วยในระหว่างการทำงานจะต้องได้รับการปฐมพยาบาลขั้นต้น และจัดให้อยู่ในพื้นที่ที่โล่งมีอากาศถ่ายเทได้สะดวก

(4) วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในกรณีฉุกเฉิน : เมื่อการขุดเจาะอุโมงค์ถูกพักเป็นเวลานาน ในกรณีของเครื่องขุดเจาะแบบ Open-faced type จะต้องจัดให้มีมาตรการเตรียมการไว้ให้มีวัสดุเพียงพอในการขุดช่องว่างในดินสำหรับหน้าดินที่ทำการขุดเปิดทั้งหมด

(5) เครื่องมือทางการแพทย์ในกรณีฉุกเฉิน : ตามพระราชบัญญัติความปลอดภัยและสุขภาพในการทำงานภายในแรงดันสูง จะต้องมีการทางการแพทย์ไว้รองรับเมื่อคนงานทำงานในที่ที่มีแรงดัน 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หรือมากกว่านี้ และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ใช้ในกรณีฉุกเฉินด้วย

6.9 การเกิดไฟไหม้และผนังป้องกันไฟ

6.9.1 ไฟไหม้ในอุโมงค์

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

ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่การเกิดไฟไหม้ในอุโมงค์ได้ดินจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มจำนวนอุโมงค์และปริมาณการจราจร ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณประชากรและการกระจุกตัวในเมือง ตารางที่ 6.10 แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ และรูปที่ 6.62 แสดงถึงรูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ได้ดิน ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มว่าต้องเกิดไฟไหม้ในอุโมงค์เพิ่มมากขึ้นในอนาคต โดยเฉพาะอุโมงค์รถยนต์ อย่างไรก็ตามต้องมีมาตรการป้องกันไฟไหม้กับผู้ใช้และ โครงสร้างอุโมงค์ได้ดิน

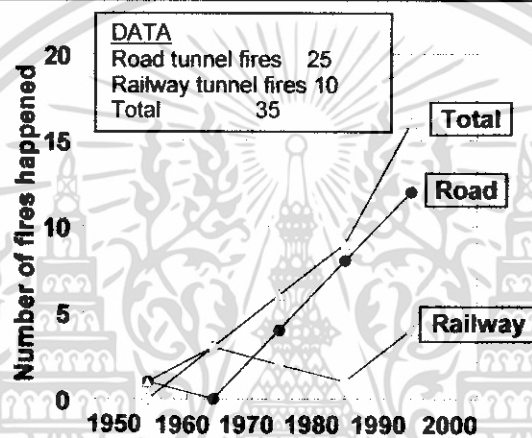
ตารางที่ 6.10 แสดงสถิติไฟไหม้ในอุโมงค์ในประเทศญี่ปุ่น

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

ตารางที่ 6.11 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'Arme	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
Gotthard	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=1.51m 30cm of spalling of lining
Seljestad	Norway	2000	45min	W6	
Kitzsteinhorn mountain railway	Austria	2000	2hrs30	D155	
Gotthard	Swiss	2001	37hrs	D11 W4	Fall off the ceiling
Daegu subway	Korea	2003		D192 W145	Lining spalled



รูปที่ 6.62 รูปแบบไฟไหม้ในอุโมงค์ใต้ดิน

6.9.2 ความเสียหายจากผนังอุโมงค์ที่เกิดไฟไหม้

ตัวอย่างความเสียหายของผนังอุโมงค์เนื่องจากไฟไหม้ดังนี้

1) Hokuriku Tunnel

เป็นอุโมงค์รถไฟยาว 13.8 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่ Fukai ประเทศญี่ปุ่น เกิดไฟไหม้ ปี 1972

สาเหตุเกิดจากรถตู้เสบียงอาหารบนขบวนรถไฟ มีผู้เสียชีวิต 30 คน บาดเจ็บ 714 คน

2) Nipponzaka Tunnel

เป็นอุโมงค์ทางด่วน เจาะผ่านภูเขาเป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่ Shizuka เกิดไฟ

ไหม้ในปี 1979 สาเหตุเกิดจากรถบรรทุกน้ำมันชนกัน ใช้เวลา 7 วันในการดับเกิดการ

พังทลายของพื้น เพดานและผนังอุโมงค์คอนกรีตเป็นระยะทาง 1,122 เมตร มีผู้เสียชีวิต

7 คน บาดเจ็บ 189 คน ใช้เวลาซ่อมแซม 2 เดือนใช้งบประมาณ 33 ล้านดอลลาร์

3) Moorfleet Tunnel (รูปที่ 6.63)

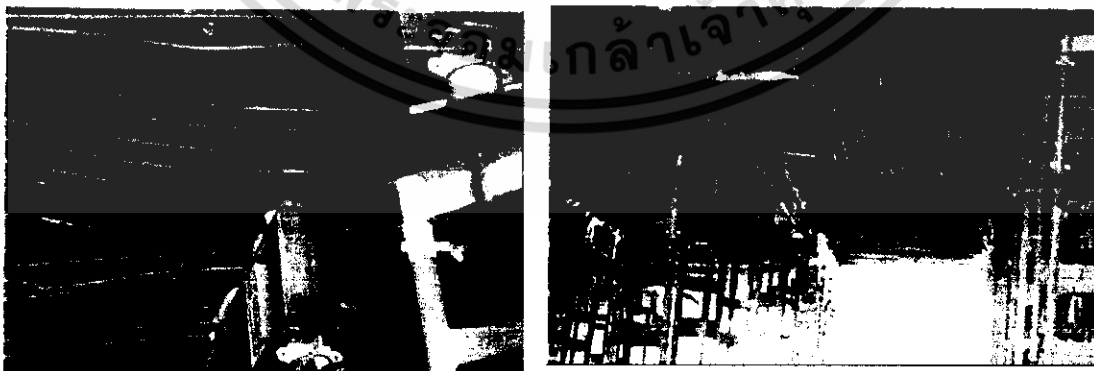
อุโมงค์นี้เป็นอุโมงค์เปิดแบบ RC box กว้าง 13.5 เมตร สูง 3.5 พื้นเพดานเป็น Prestress concrete slabหนา 1 เมตร ความยาวรวม 243 เมตร ตั้งอยู่ใกล้เมือง Hamburg เกิดไฟไหม้ในปี 1968 สาเหตุจากรถบรรทุก Polyethyleneหนัก 4 ตัน เกิดการกระแทะหลุดอย่างมากที่เพดานและผนังอุโมงค์ ทำให้สามารถมองเห็นลวดอัดแรงที่ขี้ออก



รูปที่ 6.63 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Moorfleet

4) Summit Tunnel (รูปที่ 6.64)

อุโมงค์สูง 7 เมตร ยาว 2.7 กิโลเมตร ตั้งอยู่ที่สหราชอาณาจักร เกิดเหตุไฟไหม้ในปี 1984 ต้นเหตุเกิดจากรถบรรทุก Gasolineหนัก 600 ตัน วัตถุหมกมุ่นในคอนกรีตได้สูงถึง 1200 °C ทำให้คอนกรีตเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6.64 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Summit

5) Mont Blanc Tunnel (รูปที่ 6.65)

เกิดเหตุเพลิงไหม้ในเดือนมีนาคม ปี 1999 ใช้เวลาในการซ่อมแซมนานถึง 3 ปี จากรายงานใช้งบประมาณซ่อมแซม 27 ล้านเหรียญสหรัฐ



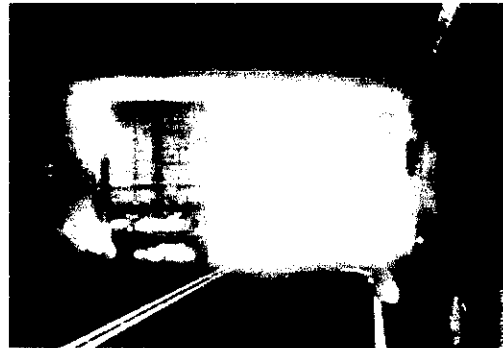
รูปที่ 6.65 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Mont Blanc

6) Gotthard Tunnel (รูปที่ 6.66)

อุโมงค์ตั้งอยู่ใน Switzerland มีความยาว 16.9 กิโลเมตร เกิดเพลิงไหม้ในเดือนตุลาคมปี 2001 จากการชนกันของรถบรรทุก ทำให้พื้นคอนกรีตเพดานร่วงพังลงมา และวัดอุณหภูมิในคอนกรีตได้สูงถึง 1200 °C มีผู้เสียชีวิต 11 คน ใช้เวลาในการซ่อมแซม 2 เดือน หลังจากเหตุไฟไหม้ในอุโมงค์ ทำให้ปริมาณผู้ใช้รถยนต์เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นเป็น 18000 คัน/วัน



(a)



(b)

รูปที่ 6.66 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard



(c)

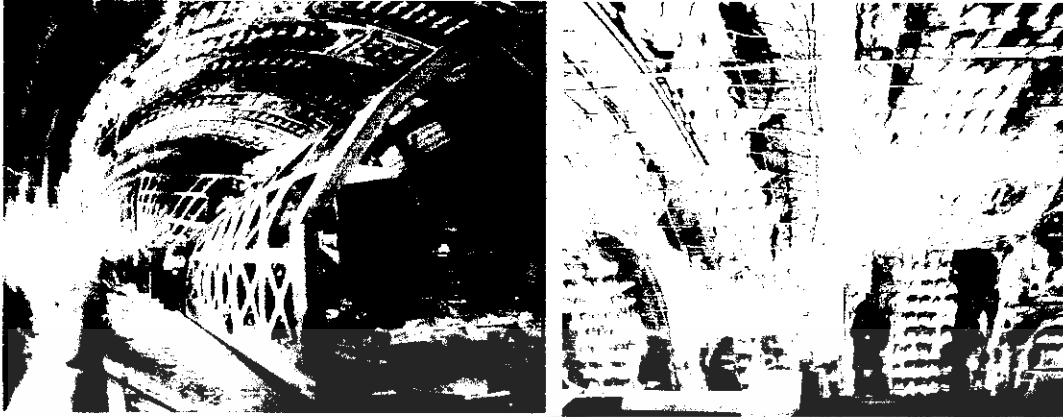


(d)

รูปที่ 6.66 (ต่อ) ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Gotthard

7) Euro Tunnel (รูปที่ 6.67)

เกิดเหตุเพลิงไหม้ในเดือนพฤศจิกายนปี 1996 เป็นอุโมงค์ TBM shield หลังจากเกิดเหตุหนึ่งอุโมงค์ได้รับความเสียหายอย่างหนักและดูเหมือนว่าจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ ทว่าคืนรอบๆ อุโมงค์ประกอบด้วยชั้นหินที่มีเสถียรภาพน่าจะเป็นเหตุผลหนึ่งที่ช่วยป้องกันการพังทลายของทั้งหมด แม้ว่าผนังอุโมงค์จะได้รับความเสียหายอย่างหนัก การซ่อมแซมใช้เวลานานถึง 6 เดือน ความสูญเสียคิดเป็นมูลค่าถึง 350 ล้านดอลลาร์สหรัฐ



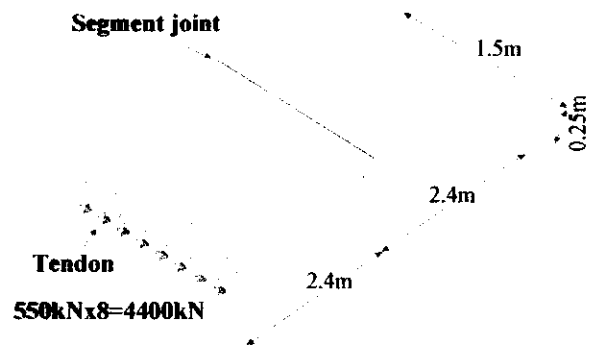
รูปที่ 6.67 ความเสียหายจากไฟไหม้ในอุโมงค์ Euro Tunnel

6.9.3 การป้องกันไฟสำหรับผนังอุโมงค์ใต้ดิน

6.9.3.1 การทดสอบไฟไหม้กับผนังอุโมงค์

รูปที่ 6.68 แสดงถึง แสดงถึงการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ใช้ในอุโมงค์ TBM shield แต่ละตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย จุดเชื่อมต่อชิ้นส่วน 2 จุด เชื่อมต่อกันในทิศทางเส้นรอบวง และทำการอัดแรงตามแรงอัดที่ออกแบบ แต่ละชิ้นส่วนมีความยาว 2.5 เมตร กว้าง 1.5 เมตร และหนา 0.25 เมตร

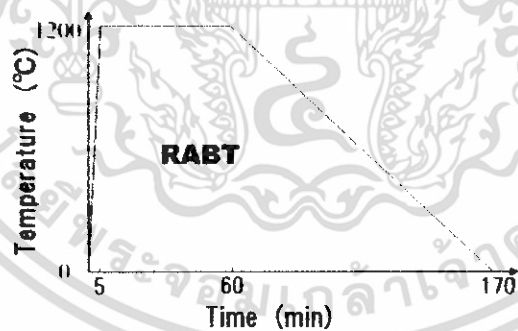
มาตรการป้องกันไฟไหม้ทำได้ 3 ประเภท คือ Board Type ,Silica fiber blanket type และ Spray mortar type ดังแสดงในรูปที่ 6.69 ตัวอย่างเหล่านี้จะถูกทดสอบภายใต้ RABT 60 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.70 ซึ่งให้ความร้อนสูงสุด 1200 °C นาน 1 ชั่วโมง ทำให้ได้พลังงาน 100 MW อีกทั้งยังทดสอบตัวอย่างที่ไม่มีการป้องกันไฟ เพื่อใช้เปรียบเทียบอีกด้วย รูปที่ 6.71 แสดงชุดตัวอย่างทดสอบในเตาหลอม



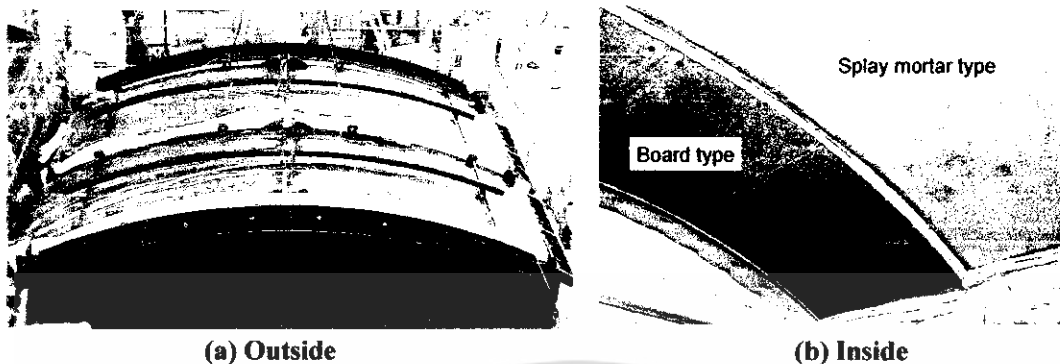
รูปที่ 6.68 ตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 6.69 การติดตั้งการป้องกันไฟ



รูปที่ 6.70 โค้งของความร้อนสำหรับการทดสอบ (RABT)



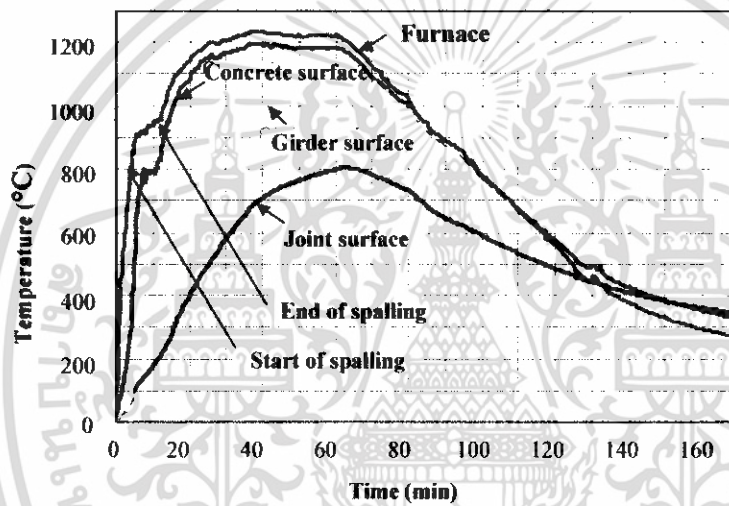
รูปที่ 6.71 ชุดตัวอย่างทดสอบ

6.9.3.2 ผลการทดสอบไฟไหม้ผนังอุโมงค์

รูปที่ 6.72 แสดงถึงการพังทลายของผิวคอนกรีต รูปที่ 6.73 แสดงถึงอุณหภูมิที่วัดได้ในชั้นส่วนผนังอุโมงค์ที่ไม่มีการป้องกันไฟระหว่างที่ได้รับความร้อน การสังเกตผลการทดสอบทำอย่างต่อเนื่องโดยใช้กล้องวีดีโอบันทึกในระหว่างการทดสอบ การกะเทาะของคอนกรีตสำหรับชั้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเตาหลอมสูงถึง 800°C หลังจากนั้นจะเกิดการกะเทาะหลุดออกอย่างต่อเนื่องนานประมาณ 10 นาที ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิเตาหลอมอยู่ต่ำกว่าไค้ความร้อนที่ได้วางแผนไว้ หลังจากการกะเทาะออกของคอนกรีตเสร็จสิ้นแล้วอุณหภูมิในเตาหลอมจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งดังแสดงในรูป ซึ่งดูเหมือนว่าจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความชื้นที่ยังคงอยู่ในเนื้อคอนกรีต อุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของเตาหลอมแต่อุณหภูมิของผิวเหล็ก ต่ำกว่าที่ผิวคอนกรีตซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากคุณสมบัติในการนำความร้อนที่สูงกว่า การกะเทาะหลุดออกนี้เกิดตลอดทั่วทั้งผิวหน้าคอนกรีต ความลึกมากที่สุด คือ 60.2 มม. ซึ่งมากกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ทำให้สามารถมองเห็นเหล็กเสริมได้ วัสดุอุดป้องกันน้ำที่ทำจากยางที่ขยายตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำนั้นถูกเผาไหม้จนหมด



รูปที่ 6.72 แสดงถึงการพังทลายของผิวคอนกรีต



รูปที่ 6.73 อุณหภูมิที่ยังขึ้นส่วนที่ไม่มีการป้องกันไฟ

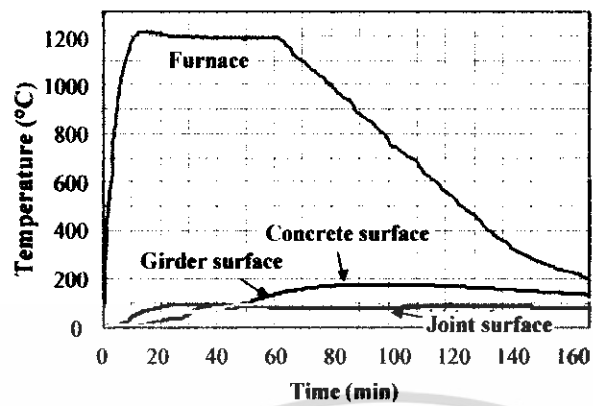
รูปที่ 6.74 แสดงถึงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างที่มีการป้องกันไฟแต่ละวิธีในระหว่างที่รับความร้อน อุณหภูมิในเตาหลอมใกล้เคียงกับต้นแบบของ RABT อุณหภูมิผิวหน้าของคอนกรีตถูกรักษาไว้ให้ต่ำกว่า 260°C สำหรับตัวอย่างที่ป้องกันโดย Board type และ Blanket type ต่ำกว่า 200°C สำหรับตัวอย่างที่ป้องกันโดย Spray mortar type ไม่เกิดการกระเทาะให้สังเกตเห็นได้ทั้ง 3 รูปแบบ มาตรการป้องกันทุกวิธีนั้นเพียงพอต่อความต้องการในการป้องกันไฟไหม้

การทดสอบแรงอัดและการวัดคาร์บอนจะกระทำแกนของชิ้นส่วนที่ได้รับความร้อน แล้วกำลังแรงอัดคอนกรีตที่ทดสอบด้วยตัวอย่างทรงกระบอก ก่อนการทดสอบไฟไหม้คือ $60\text{--}63\text{ N/mm}^2$ หลังจากได้รับความร้อนแล้วกำลังลดลงถึงครึ่งหนึ่งของกำลังก่อนการรับความร้อน แต่สำหรับกำลังแรงอัดคอนกรีตของชิ้นส่วนที่ป้องกันไฟไหม้นั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เมื่อได้รับความร้อน

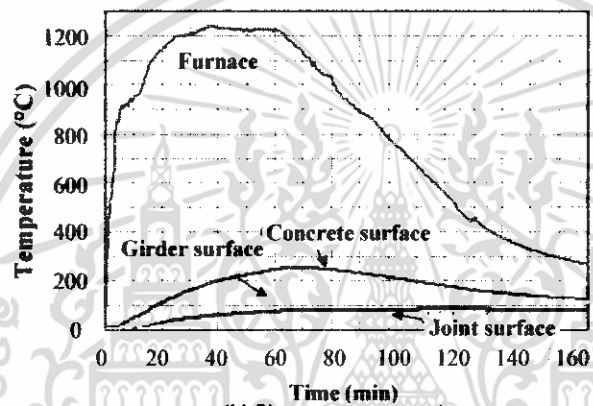
ค่า Young's Modulus ของชิ้นส่วนที่ไม่ป้องกันลดลงหนึ่งในสี่ส่วน และมีการรับบ่อนเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนด้วยหากไม่มีการป้องกันผิวหน้า ซึ่งการป้องกันทั้ง 3 วิธีจะช่วยป้องกันการเกิดคาร์บอนในชิ้นส่วนคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 6.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดที่กระจายในคอนกรีตกับคาร์บอนที่เกิดขึ้น คอนกรีตในส่วนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 500°C หรือมากกว่านี้จะปรากฏให้เห็นถึงคาร์บอน

จากการทดสอบนี้ทำให้ได้ข้อมูลดังนี้

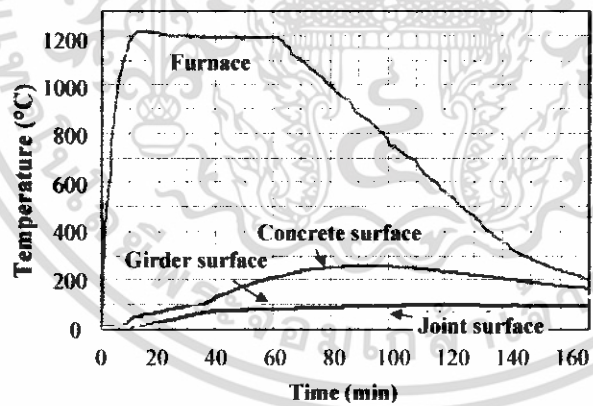
1. เกิดการกะเทาะของคอนกรีต และมีความลึกถึง 60 มม. เมื่อไม่มีการป้องกันไฟที่ผิวหน้า
2. กำลังแรงอัดของคอนกรีตลดลงครึ่งหนึ่งของค่ากำลังในภาวะปกติและ Young's Modulus ลดลงหนึ่งในสี่ส่วนเมื่อได้รับความร้อน
3. เกิดคาร์บอนในคอนกรีตเนื่องจาก Portlandite resolution ที่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 500°C
4. อุณหภูมิของแกนเหล็กและจุดเชื่อมต่อที่เป็นเหล็กสูงเกินกว่าขีดจำกัดเมื่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



(a) Spray type

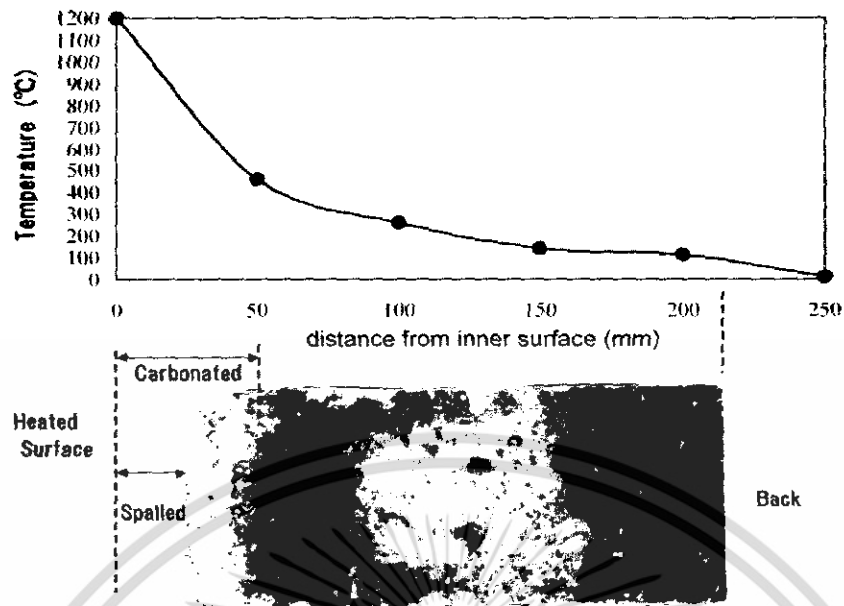


(b) Slab and beam type



(c) Board type

รูปที่ 6.74 อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันไฟ



รูปที่ 6.75 Carbonation by the heating

6.9.3.3 การใช้งานวิธีป้องกันไฟไหม้

ตัวอย่างการใช้มาตรการป้องกันไฟไหม้สำหรับผนังอุโมงค์มีดังนี้

1. Elbe Tunnel

อุโมงค์ Elbe ตั้งอยู่ใน Hamburg ประเทศเยอรมนี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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 6.76 เป็นการติดตั้งการป้องกันไฟแบบ Board type ในอุโมงค์ Elbe



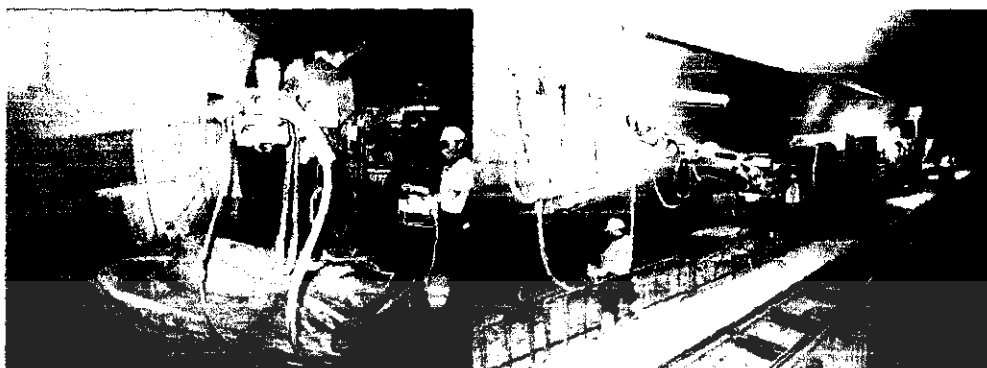
รูปที่ 6.76 การติดตั้ง Board type ในอุโมงค์ Elbe

2. Westerschelde Tunnel

Westerschelde Tunnel ตั้งอยู่ทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ของ Netherlands ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.3 ม. ยาว 17.2 กม. ใช้การป้องกันไฟไหม้แบบ Spray mortar type มีการพิจารณาออกแบบการป้องกันไฟดังนี้

- ตั้งสมมติฐานของอุณหภูมิตาม RWS (อุณหภูมิสูงสุด 1350°C)
- ใช้การฉีดพ่น Mortar ที่ผสมฉนวนกันความร้อน (Vermiculite spray mortar) ในการป้องกันไฟไหม้
- ความหนาการฉีดพ่น 45 มม.

รูปที่ 6.77อธิบายถึงการติดตั้งการป้องกันไฟไหม้แบบ Spray mortar type ในอุโมงค์



รูปที่ 6.77 การป้องกันไฟไหม้แบบ Spray mortar type ในอุโมงค์ Westerschelde

6.10 มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม

6.10.1 มาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อมทั่วไป

จะต้องดำเนินการจัดทำมาตรการสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อมในที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาสืบหาสาเหตุที่จำเป็นและปฏิบัติเพื่อลดปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

(1) สืบหาสาเหตุที่สำคัญก่อนการทำงาน : หัวข้อดังต่อไปนี้ถ้าจำเป็นก็ควรทำการสืบหา ตรวจสอบ เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบๆ

สำรวจระบบสาธารณูปโภคและอาคารที่จะต้องใส่ใจเป็นพิเศษที่อาจได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือน และเสียงรบกวน เช่น โรงเรียน ศูนย์เลี้ยงเด็ก โรงพยาบาล/คลินิก ห้องสมุด บ้านพักคนชรา อาคารที่พักอาศัยของทางราชการ และการเสียบรูป การทรุดตัวของโครงสร้างถนน สะพานและตอม่อ เป็นต้น

สำรวจสภาพแวดล้อมการใช้ชีวิตของประชาชนในเขตที่อยู่อาศัย

สำรวจความสั่นสะเทือนและเสียงที่มีอยู่เดิม

สำรวจการใช้ประโยชน์จากน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียง

(2) กฎหมายและข้อห้ามที่เกี่ยวข้อง : กฎหมายและข้อห้ามที่ควบคุมคุณภาพของน้ำมลพิษทางอากาศ มลพิษทางดิน การสั่นสะเทือน การทรุดตัวของดิน เป็นต้น

(3) มาตรการหลักสำหรับการรักษาสภาพแวดล้อม

ก. ในการวางแผนด้านเทคนิคนั้น ผู้วางแผนจะต้องเลือกใช้วิธีการทำงานที่เหมาะสมที่สุด โดยเครื่องมือการก่อสร้างและวิธีการที่ใช้จะต้องคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมไว้ล่วงหน้า และยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น คุณภาพในการทำงาน ต้นทุนในการทำงาน ระยะเวลาในการทำงานและความปลอดภัย

ข. เมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์จะต้องคำนึงไปตามเส้นทางของถนนและสิ่งสำคัญก็คือต้องใส่ใจกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเขตที่อยู่อาศัย ในกรณีนี้ควรจะมีการประชุมก่อนทำการก่อสร้าง เป็นต้น เพื่อให้การทำงานสามารถดำเนินไปได้ด้วยความเข้าใจและช่วยเหลือซึ่งกันและกันของผู้ที่อยู่อาศัย

6.10.2 การควบคุมด้านเสียง (Noise Control)

สำหรับการป้องกันมลภาวะทางเสียง จำเป็นที่จะต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามข้อกำหนดและกฎหมาย และปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลของการสำรวจที่ได้มา

เนื่องจากแหล่งกำเนิดเสียงจากการก่อสร้างอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของผู้คนได้ จึงจำเป็นที่จะต้องสืบหาพื้นฐานของเสียงเดิม และสภาพสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบๆ ในขั้นตอนการวางแผน จากข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการทำงาน อุปกรณ์การก่อสร้างที่ก่อให้เกิดเสียงน้อย และมีมาตรการ ป้องกันเพื่อความเข้าใจของผู้ที่อยู่อาศัย จึงจำเป็นต้องให้ความใส่ใจกับระบบการจัดการหน้างานก่อสร้าง

(1) ข้อกำหนดและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ก. กฎหมายข้อกำหนดทางด้านเสียง ควบคุมเสียงตามประเภทของงานอย่างเด่นชัด เช่น การก่อสร้าง

ข. กฎข้อบังคับ มีแหล่งกำเนิดเสียงบางที่ ที่ต้องปฏิบัติตามข้อบังคับของเทศบาล 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 ใช้ตัวป้องกันเสียง และตัวครอบป้องกันเสียงกับเครื่องจักร การติดตั้งตัวหุ้มกันเสียง

ข. ใช้อุปกรณ์ และเครื่องจักรอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เสียงดังจนเกินไป

ค. ทบทวนการกระจายตัวของเสียง

ง. ติดตั้งอุปกรณ์กำจัดเสียง

ในที่ที่มีความถี่ของเสียงต่ำจากการสั่นสะเทือน แนะนำให้ทำการป้องกัน เช่น ใช้การสั่นสะเทือนเข้าหักล้าง หรือ เปลี่ยนความถี่ของการสั่นสะเทือน

6.10.3 การควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration Control)

เพื่อป้องกันการรบกวนจากการสั่นสะเทือนจากสถานที่ก่อสร้างจำเป็นต้องกระทำอย่างเหมาะสมให้สอดคล้องกับการสำรวจในชั้นดิน และให้อยู่ภายใต้กฎข้อบังคับทางด้านกฎหมายสำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือน

เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่มาจากการทำงานนั้นไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์เท่านั้นแต่ยังส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของบ้านที่อยู่อาศัยและสาธารณูปโภค (ความเสียหาย) ซึ่งสิ่งนี้สามารถควบคุมได้

(1) แหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนหลัก แหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในกรณีของการขุดเจาะอุโมงค์ก็เกือบจะเหมือนกับในกรณีของเสียง แต่จะทำการพิจารณาถึงการสั่นสะเทือนของหัวขุดเจาะอุโมงค์ชนิด Slurry โดยเฉพาะการขุดเจาะในที่ดินจะต้องให้ความสนใจมากเนื่องจากจะเป็นตัวกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจากการขุดเจาะดินได้

(2) ข้อกำหนดและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ก. กฎหมายข้อห้ามสำหรับการสั่นสะเทือน ซึ่งจะควบคุมการสั่นสะเทือนจากประเภทของงานเช่นการก่อสร้างแบบพิเศษ

ข. กฎข้อบังคับของเทศบาล ในบางแห่ง แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนจะถูกควบคุมโดยกฎของเทศบาลนอกเหนือจากการทำการก่อสร้างแบบพิเศษ

(3) การสำรวจในชั้นดิน จะต้องทำการสำรวจในเบื้องต้นในเรื่องของการสั่นสะเทือนคล้ายกับวิธีของเสียง แต่ความเข้มของการสั่นสะเทือนจะแตกต่างกันตามระยะทางและสภาพทางธรณีวิทยา

(4) การป้องกัน สำหรับแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนมีวิธีการป้องกันตามหัวข้อต่อไป นี้ ซึ่งจะรวมถึงการเปลี่ยนแปลงเวลาการทำงานเพื่อให้สอดคล้องกับการชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

ก. เลือกใช้วิธีการทำงานหรือเครื่องจักรที่ลดการสั่นสะเทือน หรือเลือกใช้ทั้งสองอย่างในเวลาเดียวกัน

ข. ติดตั้งลูกยาง สปริงแรงดันลม เป็นต้น เพื่อลดเป็นฉนวนลดแรงสั่นสะเทือน

ค. เลือกสถานที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องจักร

6.10.4 การป้องกันมลพิษทางน้ำ (Prevention of Water Pollution)

เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำที่มาจากการทำงานก่อสร้าง จะต้องมีการควบคุมดูแลควบคุมให้เป็นไปตามกฎหมายและข้อบังคับเพื่อที่จะป้องกันมลพิษที่จะเกิดกับน้ำในสาธารณะ

(1) กฎข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง กฎข้อบังคับที่เกี่ยวกับมลพิษทางน้ำมีดังนี้

ก. กฎหมายเกี่ยวกับมลพิษทางน้ำ ซึ่งจะกำหนดมาตรฐานของน้ำที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำสาธารณะ จากโรงงานหรือการดำเนินการใดๆ ที่มีรายชื่อกำหนดอยู่ในข้อกฎหมาย

ข. กฎหมายเกี่ยวกับท่อระบายน้ำทิ้ง ซึ่งจะควบคุมมลพิษในน้ำทิ้ง

ค. กฎหมายน้ำในแม่น้ำ ซึ่งจะกำหนดมลพิษของน้ำที่จะปล่อยลงสู่แม่น้ำ (50 m³/วัน หรือมากกว่านั้น)

ง. กฎหมายปกป้องแหล่งประมง ซึ่งจะควบคุมงานก่อสร้างเป็นต้นในเขตที่อยู่ภายใต้กฎหมายการปกป้องแหล่งประมง

จ. กฎหมายอุทยานแห่งชาติ จะควบคุมด้านมลพิษมีทั้ง พระราชบัญญัติควบคุมน้ำทิ้ง พระราชบัญญัติการจัดการขยะมูลฝอย และพระราชบัญญัติดูแลแหล่งประมงในปัจจุบัน ดังนั้นการระบายน้ำทิ้งจึงถูกควบคุมโดยพระราชบัญญัติ

ฉ. แนวทางสำหรับการก่อสร้างโดยใช้สารเคมีในการ Grout ขันดิน ซึ่งจะกำหนดถึงการเลือกใช้ การออกแบบ และวิธีการดำเนินการเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดกับสุขภาพของมนุษย์และมลพิษในน้ำใต้ดิน เนื่องจากการใช้สารเคมีในการ Grout

(2) มาตรการป้องกัน ก่อนที่จะเริ่มทำการก่อสร้างจะต้องมีการตรวจสอบกฎหมายข้อห้ามและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบที่จะได้รับจากมลพิษทางน้ำ เพื่อที่จะทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สาธารณะ ปริมาณและคุณภาพของน้ำทิ้ง จะถูกตรวจวัดและทำเป็นรายงานเพื่อรายงานต่อองค์กรที่ดูแลด้านนี้

ก. หัวข้อในการสำรวจ

- ระบบ, ปริมาณน้ำ ปริมาณและคุณภาพและสถานภาพการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำ
ที่จะทำการปล่อยน้ำทิ้งลงไป

- ข้อห้ามและกฎหมาย เช่นมาตรฐานน้ำทิ้ง กระบวนการและขั้นตอนการรายงาน
เป็นต้น

- คุณภาพ, ปริมาณเป็นต้น ของมลพิษทางน้ำ หรือน้ำทิ้งที่ใช้ในกระบวนการ
รายงานเป็นต้น

- วิธีการบำบัด สลัดจ์ตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัด

ข. วิธีการบำบัด

- การทำให้สารแขวนลอย : ติดตั้งห้องกรวด, แท้งค์สำหรับตกตะกอน หรือ แท้งค์
สำหรับการตกตะกอนทางเคมี โดยอาศัยการจับตัวเป็นก้อน

- สลัดจ์ : ทำให้เป็นของแข็งด้วยการรีดน้ำออกหรือใช้วิธีการลดความชื้น

- น้ำทิ้งในขั้นตอนสุดท้าย : ปล่อยให้ไหลผ่าน แท้งค์ตกตะกอน หรือรีดตะกอน

- ค่า pH : ต้องปรับค่า pH ในน้ำที่เป็นกรด – ด่าง ให้เป็นกลางก่อนปล่อยออกไป

- น้ำมัน : น้ำมันที่ปะปนอยู่ในน้ำทิ้งจะต้องถูกนำออกด้วยวิธีพัดพาออกไปหรือใช้

การควบคุม

6.10.5 มาตรการสำหรับน้ำใต้ดิน (Measures for Groundwater)

ถ้าการขุดคูมอส์ส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดินจะต้องมีมาตรการที่ดีพอในการสำรวจ
เพื่อให้สอดคล้องกับความจำเป็น

จะต้องคอยดูแลควบคุมเสถียรภาพของหน้างาน จากวิธีการที่ใช้เช่น วิธีการลดน้ำ
วิธีการใช้แรงดันลม วิธีการ Grout ด้วยสารเคมีเป็นต้น ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดินได้ ก่อน
เริ่มงานก่อสร้างจะต้องทำการสำรวจสถานะการใช้ประโยชน์ จากน้ำใต้ดินรอบๆ สถานที่ก่อสร้างเพื่อ
ใช้มาตรการที่เหมาะสมได้

(1) การสำรวจ

ก. การสำรวจระดับดินและระดับน้ำ คุณภาพ และทิศทางการไหลรอบๆ สถานที่
ก่อสร้างเพื่อความเข้าใจถึงแนวโน้มที่มี

ข. สำรวจสถานะของบ่อ สระ อ่างเก็บน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บ่อน้ำสำหรับจ่ายน้ำ
ไว้ใช้ภายใน และหรือเพื่อการพาณิชย์

(2) มาตรการ

ก. วิธีช่วย : ป้องการการลดระดับของน้ำใต้ดินได้โดยการใช่วิธีช่วยอย่างเหมาะสม เช่น วิธีใช้แรงดันลม การ Grout ด้วยสารเคมี การแช่แข็ง การตัดขาดกำแพง เป็นต้น เพื่อรักษาระดับน้ำเอาไว้ ในกรณีนี้ นอกจาก สภาพทางธรณีวิทยาแล้ว แรงดันส่วนเกิน ส่วนประกอบของดิน สภาพแวดล้อมรอบๆสถานที่ก่อสร้าง เช่น บ่อน้ำ จะต้องให้ความสำคัญในการพิจารณาด้วย

ข. การป้องกันมลพิษทางน้ำ เนื่องมาจากการ Grout ด้วยสารเคมี : เมื่อมีการใช้สารเคมีในการ Grout จะต้องคอยติดตามดูแลโดยจัดให้มีการตรวจวัดรอบๆสถานที่

6.10.6 การป้องกันปัญหาสำหรับร่างกายมนุษย์จากการขาดออกซิเจน (Hypoxia/Anoxia)

ก่อนที่จะใช้วิธีแรงดันลมจะต้องมีการป้องกัน ผลกระทบที่จะส่งผลกระทบต่อบริเวณรอบๆจากการรั่วซึมของอากาศที่ขาดออกซิเจนได้

ก่อนทำการใช้วิธีแรงดันลมจะต้องมีการสำรวจสภาพทางธรณีวิทยาและน้ำใต้ดิน บริเวณรอบๆสถานที่ก่อสร้างอย่างเพียงพอ เนื่องจากการใช้วิธีนี้จะทำให้เกิดการรั่วซึมจึงควรมีการจัดการกับการใช้แรงดันลมอย่างเหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับแรงดันและต้องมีการเฝ้าติดตามการรั่วไหลที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกัน ไฮโปเซียและแอนโนเซีย

(1) ข้อกำหนดและกำหนดที่เกี่ยวข้อง

ก. พระราชบัญญัติป้องกัน Anoxia : จะต้องทำการสำรวจ และตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศที่ไร้ออกซิเจนและก๊าซพิษ

ข. กฎข้อบังคับสำหรับความปลอดภัยและสุขภาพในโรงงาน : จะต้องเลือกใช้วิธีการทำงานและมาตรการสำหรับการทำงานกับสิ่งแวดล้อมในกรณีที่มีอากาศที่ไร้ออกซิเจน

(2) มาตรการ

ก. ทำการสำรวจและทบทวนก่อนที่งานจะเริ่มขึ้น : ถ้ามีความเป็นไปได้ว่าจะมีการรั่วของออกซิเจนในอากาศออกมาก็ควรทำการสำรวจในหัวข้อต่อไปนี้ ก่อนที่จะเริ่มงาน

- แรงดันอากาศที่เหมาะสมสำหรับสภาพทางธรณีวิทยาและน้ำใต้ดิน
- ความสัมพันธ์กับโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการ และโครงการในอดีตที่ในบริเวณที่ใกล้เคียง

- ความสัมพันธ์ระหว่างบ่อน้ำ โครงสร้าง และวัตถุที่ฝังไว้รอบๆ สถานที่ก่อสร้าง

ข. มาตรการป้องกัน

- การตรวจวัดและเฝ้าสังเกตการณ์รั่วซึม : ทำการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนโดยมีศูนย์กลางที่บ่อน้ำ หรือห้องตัดดินที่อยู่ใต้ดิน และจะต้องทำการตรวจวัดภายในรัศมี 1 กิโลเมตรรอบๆ สถานที่ก่อสร้างด้วย

- มาตรการการป้องกัน

o วิธีการเสริมจะใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของอากาศไร้ออกซิเจน

o จะต้องถมกลบบ่อน้ำเก่า ที่อยู่ใกล้บริเวณที่ก่อสร้าง ถ้าเป็นไปได้ควรทำการศึกษาบ่อน้ำที่อยู่ใกล้ตลอดโครงการ

o เมื่อมีการรั่วของก๊าซขึ้น ควรมีมาตรการที่เหมาะสมเช่น การห้ามเข้าเค็ดขาด

6.10.7 การดูแลรักษา และการขนย้ายออกอย่างเหมาะสม

ดินที่ถูกขุดเจาะออกมาจะต้องมีการรักษาสภาพและทำการขนย้ายออกไปอย่างเหมาะสม

ดิน(Muck) คือผลผลิตที่ได้มาจากการก่อสร้างซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ สลัดจ์ที่ได้มาจากการทำงาน ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของ “ของทิ้ง” จะต้องการบำบัดและขนย้ายออกไปอย่างถูกวิธี โดยสลัดจ์เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการก่อสร้างซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำอยู่สูงและมีดินที่มีอนุภาคที่ละเอียด สามารถนำสลัดจ์มาใช้ใหม่ได้โดยผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพเพิ่มลดของทั้งลงและรักษาสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้นด้วย วิธีการบำบัดระดับกลางที่เหมาะสมจะต้องเลือกเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านคุณภาพและคุณลักษณะของผลผลิตที่ได้ออกมา

6.11 การตรวจสอบและบำรุงรักษาสภาพอุโมงค์ใต้ดิน

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาได้มีการคำนึงถึงโครงสร้างพื้นฐานของอุโมงค์ที่ใช้งาน โดยเฉพาะในอเมริกาที่มีการก่อสร้างก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากมีอายุการใช้งานมาก การสร้างใหม่นั้นมีต้นทุนสูงมาก การฟื้นฟูให้คงสภาพเดิมจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

การฟื้นฟูสภาพอุโมงค์จึงเกิดความนิยมอย่างรวดเร็ว เพื่อขนส่งน้ำ ยานพาหนะต่างๆ ที่จำเป็นต่อความเจริญในเมือง การฟื้นฟูให้คงสภาพเดิมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อความเจริญในเมือง

6.11.1 วิธีการตรวจสอบอุโมงค์เพื่อการฟื้นฟูสภาพ

ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลออกแบบ

สิ่งที่สำคัญในการฟื้นฟูสภาพอุโมงค์คือ ความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างเดิมและกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป รวมถึงแผนต่างๆ ตลอดจนข้อจำกัดเงื่อนไขต่างๆ ของอุโมงค์นั้น ๆ

แผนและข้อจำกัดต่าง ๆ นั้น ได้มาจากข้อมูลทางวิศวกรรม เช่น รูปถ่าย บันทึกการก่อสร้าง ข้อมูลทางสังคม ประวัติศาสตร์

ข้อมูลทางประวัติศาสตร์จะบอกเราถึงระบบการทำงานของอุโมงค์ รายการคำนวณที่จำเป็น แผนการก่อสร้าง รวมถึงเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง

จุดประสงค์การตรวจสอบสภาพอุโมงค์

จุดประสงค์ของการสำรวจนั้นเพื่อการตรวจเอกสาร สภาพทางกายภาพ ข้อจำกัดพื้นฐานเพื่อการหาคุณสมบัติต่างๆ ของระบบอุโมงค์ สภาพหรือเงื่อนไขต่างๆ จะทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานของอุโมงค์เพื่อการป้องกันความเสียหายทางโครงสร้าง รวมถึงสภาพการลงทุนที่เกิดขึ้น

สภาพต่างๆ ของอุโมงค์ทำให้เราทราบถึงการนำไปใช้ เช่น ระบบขนส่งต่างๆ ระยะเวลาที่ทำการปิดปรับปรุง รวมถึงอุโมงค์ที่ใช้ในการถ่ายเทของเหลว เช่น น้ำ ทั้งทางกายภาพ และการใช้ขนส่งยานพาหนะในระยะทางที่ห่างไกล (ROVs) ซึ่งมักจะได้จากอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก คือ

เดินผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 60 นิ้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่ต่ำลงไปจากพื้นดิน อาจมีการบันทึกภาพจากวิดีโอ เพื่อบันทึกประโยชน์ใช้สอยและสภาพทางกายภาพต่างๆ

ในอุโมงค์ที่ขนถ่ายของเหลว การตรวจสอบอาจยากขึ้น แต่อย่างไรก็มีความคล้ายคลึงกับอุโมงค์ที่ขนถ่ายยานพาหนะต่างๆเช่นกัน

การตรวจสอบการทำงานของกนงานและเครื่องมือที่ใช้

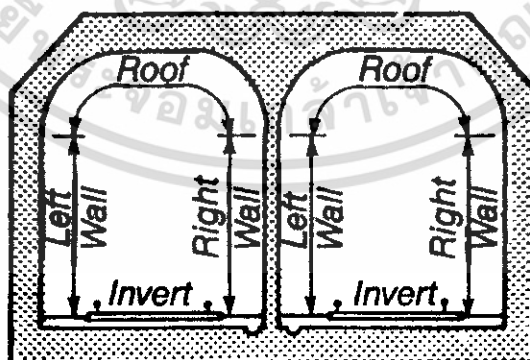
อุโมงค์ที่ขนถ่ายยานพาหนะควรมีคนงานทีมละ 3 คน เพื่อดูแลพื้นที่หน้าตัดต่างๆของอุโมงค์ ดังรูปที่ รูปที่ 6.78 ถึง รูปที่ เมื่อการก่อสร้างดำเนินไป จำเป็นต้องมีการตรวจสอบการทำงานของกนงานเหล่านี้ โดยมีการจดบันทึกเอาไว้ อุโมงค์ต่างๆควรมีการสำรวจในเวลาใกล้เคียงกันเพื่อการเปรียบเทียบตามตารางที่ 6.12

ได้ดังนี้

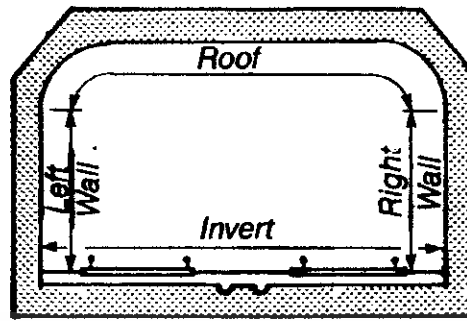
เงื่อนไขของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในระบบอุโมงค์นั้นแบ่ง

- เครื่องมือเดี่ยว
- เครื่องมือที่เป็นชุด
- เครื่องมือเพื่อความปลอดภัย

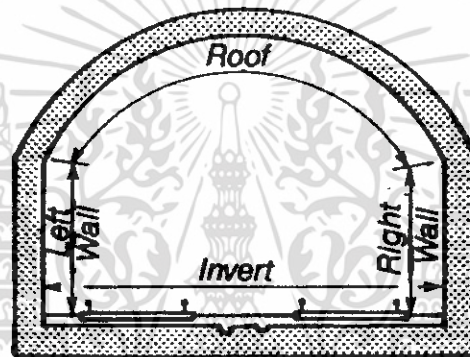
เครื่องมือต่าง ๆ นั้นแยกตามประเภทการนำไปใช้ เช่นเป็นแบบอันเดี่ยวๆ หรือแบบเป็นชุด โดยเครื่องมือเพื่อความปลอดภัย นั้นก็ใช้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมืออื่นๆ



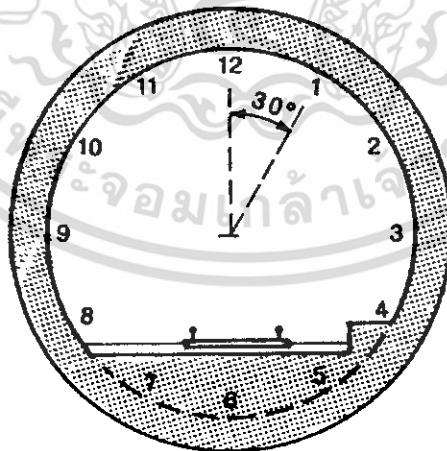
รูปที่ 6.78 กล้องของอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์คู่
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 6.79 กล้องอุโมงค์ทั่วไป แบบอุโมงค์เดี่ยว
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 6.80 อุโมงค์แบบส่วนโค้งหลังคา แบบอุโมงค์เดี่ยว
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 6.81 รูปแบบอุโมงค์แบบวงกลม
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

ตารางที่ 6.12 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 ¼ inch (3-6 mm)	P-2	Loss of section -%
C-3	¼ inch to ½ inch (6-12 mm)	P-3	Out of plane –H=Horz. , V=Vert.
C-4	Grater than ½ 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 ¼ inch (3-6 mm)	Steel Liner Plate Flanges	
J-3	Joint greater than ½ 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)
- กล้อง 38 มม.
- ฟิล์ม 35 มม.
- ชุดปฐมพยาบาล
- เครื่องควบคุมระบบไฟฟ้า

- เครื่องสังเกตการณ์ air quality

เครื่องมือเดี่ยว

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

นอกจากนี้ยังอาจต้องใช้เครื่องมือต่างๆเพื่อการตรวจสอบ รวมถึงเครื่องมือเพื่อการสำรวจ และทดสอบ แตกต่างตามสิ่งที่ต้องการตรวจสอบ

เครื่องมือที่ใช้เพื่อความปลอดภัย

ส่วนที่สำคัญมากสุดในการตรวจสอบ คือความปลอดภัย และการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยทุกขั้นตอน ต่อทั้งผู้ที่เป็เจ้าของและผู้ให้บริการความปลอดภัยต่างนั้ต้องมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

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

ความรับผิดชอบเพื่อความปลอดภัย

ความปลอดภัยเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อทุกคน และเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นหน้าที่ของบุคคลต่อไปนี้

- ผู้จัดการ โครงการ
- รองผู้จัดการ โครงการ
- ผู้ตรวจสอบอาวุโส
- ผู้ตรวจสอบ
- คนงานทุกคน

เครื่องมือเพื่อความปลอดภัย จำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- มีการป้องกันต่อทุกคน
- เห็นชัดและทันทั่วทั้งที่

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบนั้นอาจสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

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

ขั้นตอนการตรวจสอบและเอกสารสำคัญต่างๆ

ตัวแปรเพื่อการตรวจสอบก็เป็นสิ่งสำคัญในการประเมินคุณภาพ และการรายงานผลการดำเนินงาน เพื่อการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมให้เป็นไปตามมาตรฐานตามตารางที่ 6.12

การตรวจสอบอุโมงค์เบื้องต้น

กระทำโดยผู้ตรวจสอบอาวุโสซึ่งรวมถึง วิศวกรโครงสร้าง วิศวกรธรณี นักวิชาการ ซึ่งต้องมีการตรวจสอบร่วมกันอย่างถูกต้องเหมาะสมตาม Guideline ที่ทำการตกลงร่วมกันตาม มาตรฐาน เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามตารางการทำงานที่กำหนด

การควบคุมการสำรวจ

การตรวจสอบอุโมงค์นั้นจำเป็นต้องมีระบบที่เข้าใจตรงกัน มีพื้นฐานดังต่อไปนี้

- ต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะเวลายาวนานระยะหนึ่ง
- ต้องมีทีมตรวจสอบที่ดำเนินการรวดเร็ว
- ลดต้นทุนโครงการและไม่เกิดความสับสน

นอกจากนี้ต้องมีความถูกต้องแม่นยำในตำแหน่งและโครงสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 6.78 ถึง รูปที่ 6.80 โดยอุโมงค์วงกลมนั้น เป็นไปดังรูปที่ 6.81

การ Calibrate ของทีมตรวจสอบ

Calibration เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนแปลง ก็คือต้องมีความเป็นมืออาชีพและมี มาตรฐาน ให้สามารถตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การประกันคุณภาพโครงการ

เพื่อความมั่นใจในความสำเร็จ โคนต้องมีมาตรฐานของการเก็บข้อมูล ซึ่ง ประสิทธิภาพต่างๆนั้นสามารถได้มาจากสิ่งต่างๆต่อไปนี้

- การตรวจสอบจุดที่มี Defect ของอุโมงค์
- การบริหารจัดการกับข้อมูลต่างๆ
- การรายงานผลที่ถูกต้อง
- การพัฒนาในเรื่องของสัญญาณก่อสร้าง

การตรวจสอบประจำ

อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆต้องมีการดูแลอย่างสม่ำเสมอ ตามตารางที่ การตรวจสอบใน เรื่องเอกสารนั้นแบ่งตามประเภทต่างๆของอุโมงค์

ส่วนประกอบโครงสร้างพิเศษ

อุโมงค์บางชนิดมีการก่อสร้างที่พิเศษ เช่น อุโมงค์รถไฟ ซึ่งต้องมีการตรวจตราอย่างสม่ำเสมอตามประเภท

โครงสร้างพิเศษ

โครงสร้างของอุโมงค์บางอย่างมีความพิเศษขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งการก่อสร้างก็มีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจมีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ในลักษณะตัวแปรที่ใช้ต่างกัน

ส่วนประกอบหลักของกระบวนการตรวจสอบมีความแตกต่าง จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพต่างๆตามแต่ละชนิดของอุโมงค์

เงื่อนไขของการสำรานั้นต้องมีรายละเอียดเพียงพอในเรื่องของผนัง เพดาน เป็นต้น

ขั้นตอนการจัดการข้อมูล

กระบวนการบริหารจัดการกับข้อมูลนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก โดยเฉพาะเอกสารต่างๆ เพื่อประกันคุณภาพของการตรวจสอบนี้

เอกสารบันทึก

แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- เอกสารทั่วไป
- เอกสารรายงาน Defects ของอุโมงค์
- เอกสารรายงาน Defect

เอกสารทั่วไป

บันทึกเหตุการณ์ต่างๆ ไป เรื่องความปลอดภัย

แบบฟอร์มข้อมูล

เป็นไปตามมาตรฐาน

เอกสารที่แสดงรูปถ่าย

โดยใช้กล้อง 35 มม. แสดงข้อมูลเพื่อความชัดเจนมากขึ้น

การทดสอบพิเศษ

แสดงได้ดัง 9kik'muj 6.13

ตารางที่ 6.13 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 Pulse Velocity	Elastic Modulus (If the density and Poisson's Ratio are known)	Surface and 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	

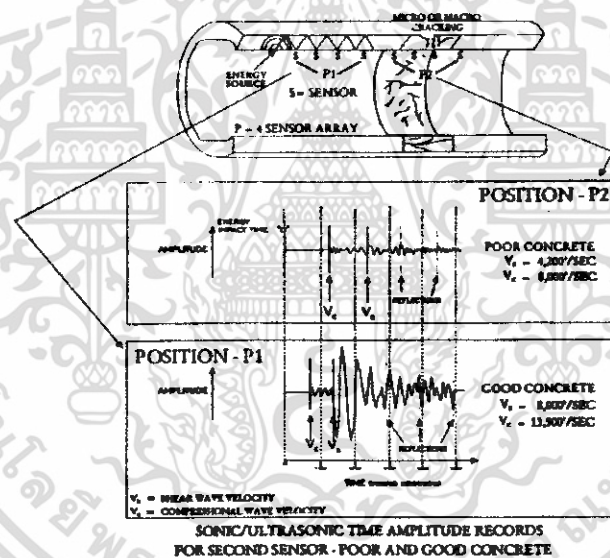
Test Method	Cracks		Chemical Alteration	Delamination	Rebar	Moduli Values	Strength
	Macro	Micro					
Sonic/ultrasonic compressional, shear velocity & attenuation	0	0	0	0		0	0
Sonic/Ultrasonic Reflection/Resonances				0		..	0
Radar		..	..	..	0		
Thermography		..	..	..			

0 Best use of method

.. Dependent on favorable conditions

รูปที่ 6.82 วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับคอนกรีต
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

รูปที่ 6.82 นั้น เทคนิคต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะที่แตกต่างกันของแต่ละวัสดุ เช่น อุณหภูมิ การนำไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติต่างๆ เป็นต้น การแตกหัก ความชื้น เป็นต้น



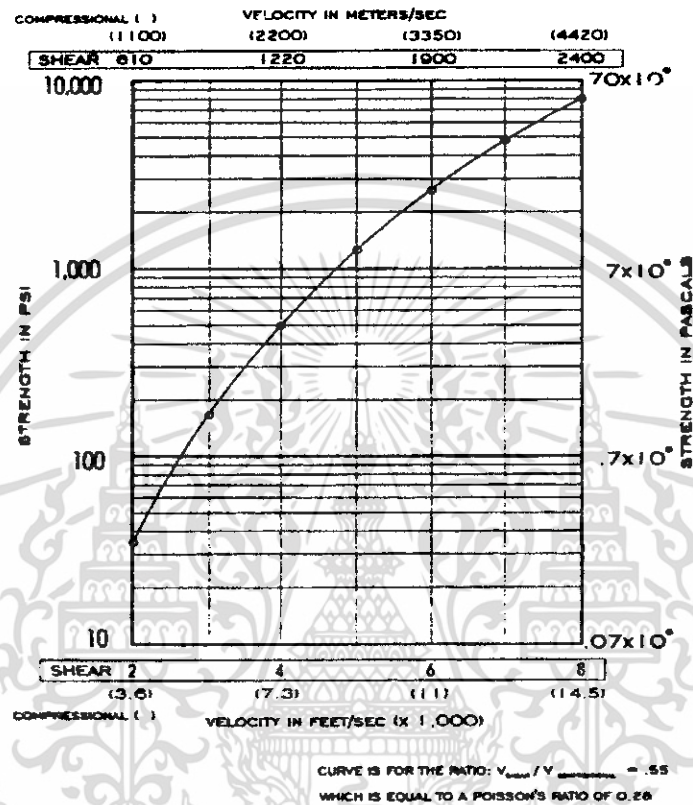
รูปที่ 6.83 การทดสอบ Sonic/ultrasonic และแนวท่อ ของอุโมงค์
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

ในอุโมงค์นั้นมีหลายตัวแปรที่ต้องมีการวิเคราะห์ออกมา ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงของอุโมงค์
- รายละเอียดจุดที่เกิดความเสียหาย หรือรอยแตก
- จุดที่เป็นโครงสร้างโลหะ
- จุดที่เป็นส่วนบางและส่วนหนา
- จุดที่เป็นส่วนที่เป็นรูปทรงแท่ง

เครื่องมือวัดโดยใช้ Ultrasonic ใช้เพื่อวัดค่า Transit time ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- วัดความเร็ว และค่า Stasticity
- วัดหาจุดที่มีรบกวน รอยต่อ รอยแตก ต่างๆ ดังรูปที่ 6.83 และ รูปที่ 6.84



รูปที่ 6.84 ความแข็งแรงของคอนกรีตกับความเร็ว
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การนำเสนอข้อมูล

ใช้โปรแกรม Spreadsheet ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อแยกประเภทข้อมูลต่างๆ รวมถึงโปรแกรม Computer aid drafting (CAD)

โปรแกรมที่ใช้ต้องสามารถแยกประเภท มีมาตรฐาน รวมถึงมีระบบในการเปรียบเทียบข้อมูลในแต่ละชุด อย่างรวดเร็ว

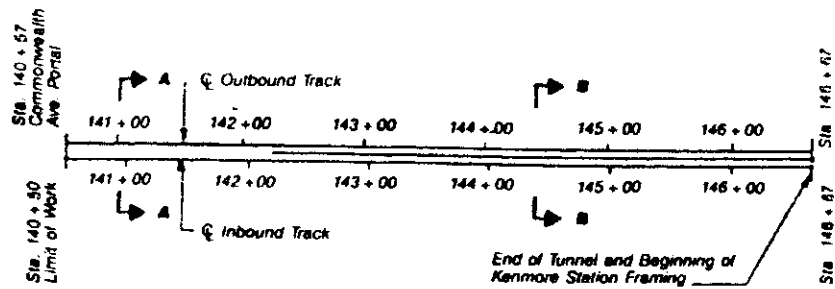
ในระหว่างการสำรวจนั้น เราใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการสำรวจที่รวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6.85 และรูปที่ 6.86 และแสดงข้อมูล CAD ในรูปที่ 6.87 ในส่วนของ Defect , พื้นที่หน้าตัด และ ข้อมูลเบื้องต้น

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 SUOOORT
13+50	L	C2	0.0	13.0	0.0	M				OLD PORTAL, END CENTER WALL

รูปที่ 6.85 ตัวอย่างข้อมูลการตรวจสอบที่สมบูรณ์แบบ
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

GREEN LINE INSPECTION COPLEY STATION TO ARLINGTON STATION INBOUND REHAB SUMMARY						
STARION	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	W
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 6.86 ตัวอย่างผลการสรุปข้อมูล
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



Tunnel Track Plan



STATION		SPALLS				DELAN	CRACKS				KXP.JOINTS		
FROM	TO	S-1	S-2	S-3	S-4	0	C-1	C-2	C-3	C-4	S-1	S-2	S-3
		SF(D)	SF(D)	SF(D)	SF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	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 6.87 แสดงข้อมูลของหนังสือสัญญา

(จาก Tunnel Engineering Handbook)

การประเมินผลข้อมูล

ได้มาจากข้อมูลเบื้องต้นของการออกแบบ การตรวจสอบนั้นจะทำการเปรียบเทียบอย่างเหมาะสม เกี่ยวกับสภาพทางกายภาพ และสภาวะแวดล้อม รวมถึงตัวอย่างทดสอบพิเศษ รายงานที่สรุปออกมานั้นต้องสามารถอธิบายสาเหตุและสิ่งที่เกิดขึ้นได้ ในส่วนของ Defect ต่างๆ

6.11.2 การซ่อมแซมอุโมงค์

การซ่อมแซมต้องมีความทนทาน นำไปใช้ได้เร็ว รวมถึงมีความปลอดภัย จึงมีการซ่อมแซมแบ่งเป็นประเภทต่างๆดังนี้

6.11.2.1 การซ่อมแซมคอนกรีต

การซ่อมแซมอุโมงค์คอนกรีตต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรง
- ความทนทาน
- สภาพแวดล้อม
- เวลาที่สามารถใช้ได้ตามปกติ

วิธีการฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีต

คือการทดแทนโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุใหม่ที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน มี 3 วิธีการคือ

- Replacing
- Shotcreting
- Grouting

ซึ่งวัสดุที่ใช้ในวิธีต่างๆมีดังต่อไปนี้

- คอนกรีตซีเมนต์พอร์ตแลนด์
- Polymer- PCC
- Epoxy – PCC
- Polymer mortar
- Epoxy mortar
- Special cement

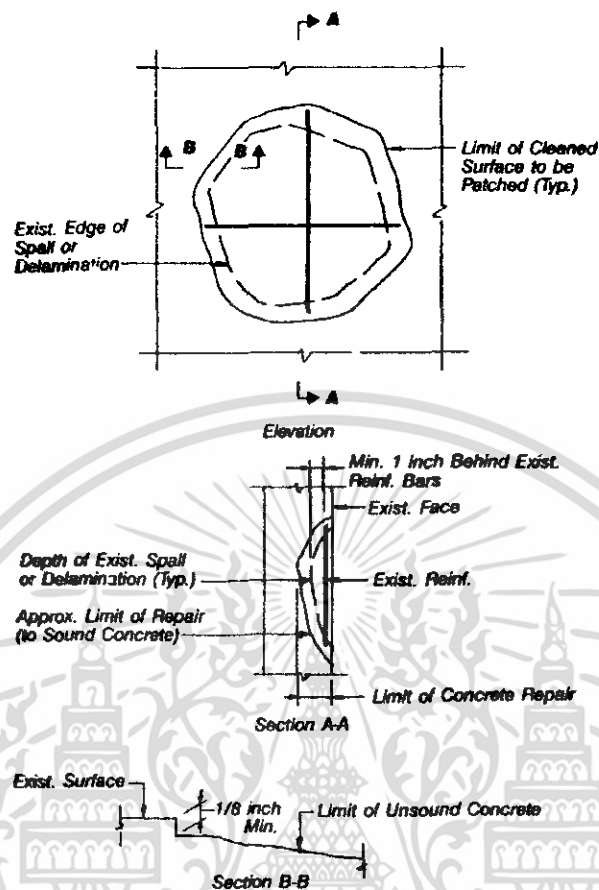
การเลือกวิธีการและวัสดุที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ค่อยการนำไปใช้ การติดตั้ง

ตลอดจนการซ่อมแซม

การเตรียมพื้นผิว

การเตรียมพื้นผิวนั้นประกอบไปด้วย

- การขจัดสิ่งสกปรก
- การชำระล้างสนิม และการกัดเซาะจาก R.C.
- การซ่อมแซมหรือการแทนที่ตามต้องการ



รูปที่ 6.88 แสดงหน้าตัดของการซ่อมแซมคอนกรีต
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

3 ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.88

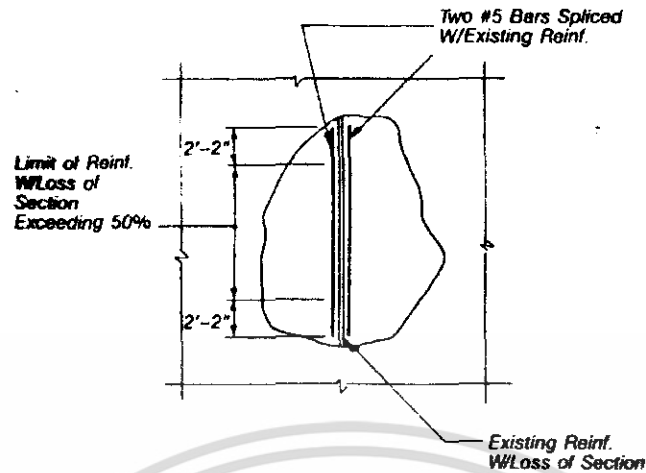
การชำระล้างด้วยความดันน้ำที่มากนั้นเป็นสิ่งไม่ควร เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหาย

ต่อสายส่งสัญญาณต่างๆ

การซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก

การซ่อมแซมเป็นไปตามมาตรฐาน ACI ดังรูปที่ 6.89 ซึ่งเน้นไปตามการออกแบบ

โครงสร้าง



รูปที่ 6.89 รายละเอียดของรอยต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

คอนกรีตที่หล่อในที่

มีวิธีการ 2 วิธี คือ

- การขนถ่ายวัสดุโดยใช้ราง
- การขนถ่ายโดยใช้ Slick line

การขนถ่ายด้วยวิธีการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ทว่ามีประสิทธิภาพดี แต่ก็สามารถก่อให้เกิดปัญหาได้หลายอย่างอาทิเช่น บริเวณผนัง ซึ่งคอนกรีตนี้จำเป็นต้องมีการยึดเกาะกันมากเป็นพิเศษ

ในความเป็นจริงนั้น การเพิ่มการยึดเกาะเป็นเรื่องยาก เพราะต้องมีการเลือกใช้ซีเมนต์ที่มีคุณภาพสูง ประกอบการใช้สัดส่วนที่เหมาะสมก็เป็นเรื่องที่มีความละเอียดสูง ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ที่ต้องการอย่างเจาะจง

Polymer Cementitious Mortars

Polymer ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- กันน้ำ
- กันความเย็นได้
- เพิ่มการยึดเกาะ
- ลด Shrinkage

- เพิ่ม Set time

Acrylic copolymers (Acs) เป็นโพลีเมอร์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเหล่านี้มากที่สุด ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้มันมักมีปริมาณน้อยและเทลงไปในความหนาประมาณ 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 6.14

ตารางที่ 6.14 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

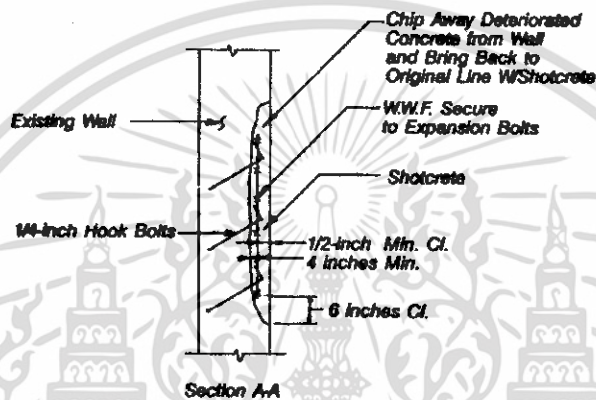
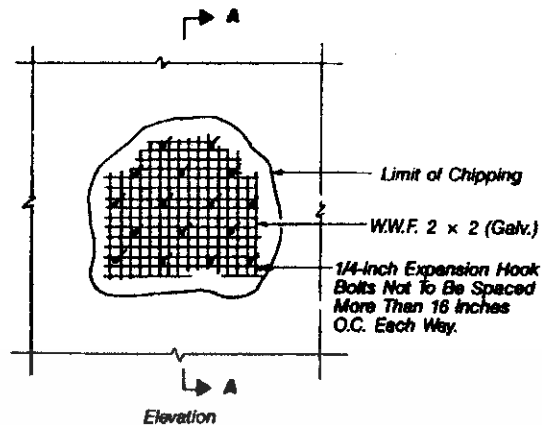
Grouting

Grouting เป็นวิธีการที่จะเติมช่องว่างต่างๆให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ป้องกันการซึมของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6.90

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 6.90 รายละเอียดการซ่อมแซม Shotcrete
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

6.11.2.2 การซ่อมแซมรอยแตก

การซ่อมแซมโครงสร้างรอยแตก

รอยแตกมักจะมาจากการเกิด Shrinkage หรือแรงจากภายนอก ทำให้เกิดการซึมของน้ำและการกัดเซาะ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องซ่อมแซมเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- อุดรอยร้าวพื้นผิวด้วยเจล
- ติดตั้ง Injection port
- ฉีด Epoxy resin ไปตามรอยแตก

การฉีด Epoxy resin ไปตามรอยแตกโดยการใช้ความดันสูง ไม่ควรเกิน 100 psi แต่ที่ใช้ในการทำงานนั้นคือ 40 psi

การควบคุมการรั่วซึมของอุโมงค์โดยการฉีดสารไปตามรอยแตก

การอุดรอยแตกที่ไม่ใช่แค่รอยแตกที่เกิดจากโครงสร้างนั้นมีต้นทุนมาก เช่นจากการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ เพราะ Resin สามารถควบคุมได้แค่โครงสร้างแต่ไม่สามารถควบคุมการไหลของน้ำใต้ดินได้ ซึ่งสามารถจะควบคุมได้ด้วย Grouting ซึ่งมี 2 ประเภทได้แก่

Particle Grouts โดยใช้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 2 ซึ่งมีสารพิษน้อยกว่า แต่มีอายุที่ไม่นาน

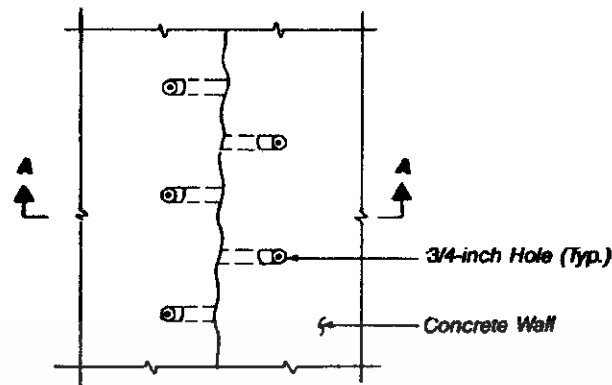
Chemical Grouts มีความหลากหลายโดยมีตัวอย่างดังนี้

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

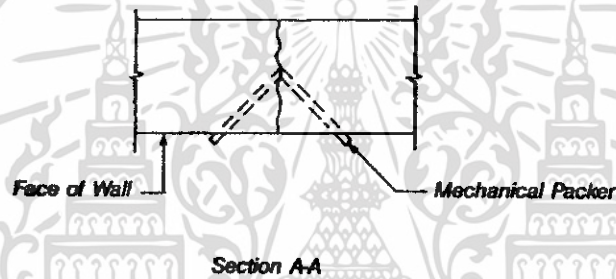
ประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด

การ Grouting นั้นมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- Injection port ต้องติดตั้งถูกต้องที่ รูปที่ 6.91
- Mechanical packer ต้องติดตั้งอย่างแน่นหนา
- พื้นผิวของรอยแตกนั้นต้องสะอาด ใช้ระบบ Hydraulic pump



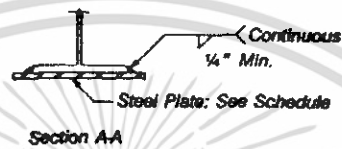
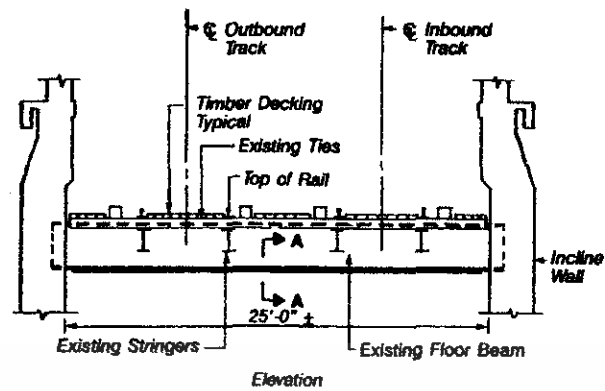
Elevation



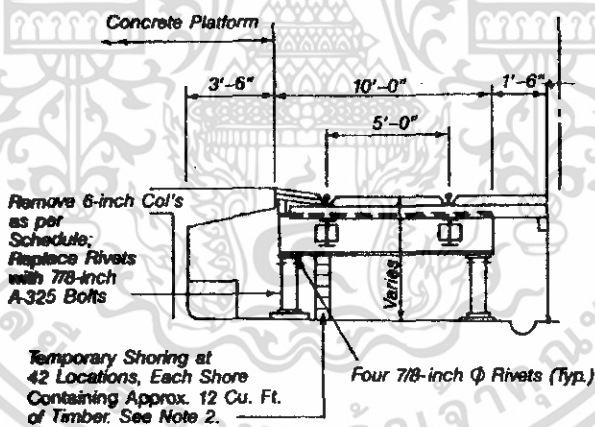
รูปที่ 6.91 การติดตั้ง Ports ของการ Grout โดยใช้สารเคมี
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

6.11.2.3 การซ่อมแซมโลหะ

นิยมใช้ Cast iron ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ ASIC ซึ่งใช้การซ่อมแซมโดย Steel plate หรือการใช้โครงสร้างใหม่ต่อเติมเข้าไป ดังรูปที่ 6.92 และ รูปที่ 6.93 ซึ่งมีการใช้สลักเกลียวตามมาตรฐาน ASTM A325 หรือ A490 การทาสีเหล็กเป็นวิธีที่ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดเซาะได้อย่างดี



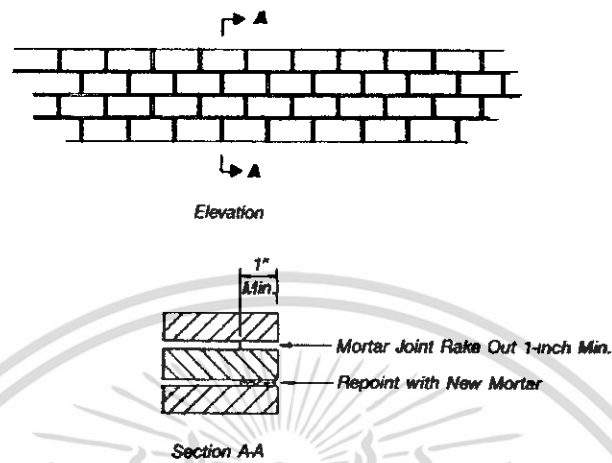
รูปที่ 6.92 การซ่อมแซมแบบ โครงเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)



รูปที่ 6.93 การเปลี่ยนชิ้นส่วนของเหล็ก
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

6.11.2.4 การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง

เราจะใช้ Cementitious mortar ดังรูปที่ 6.94



รูปที่ 6.94 การซ่อมแซมอิฐบล็อกก่อสร้าง
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

6.11.2.5 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 หรือความเค้น

Precast concrete segmental liners

สามารถควบคุมโดยใช้ Epoxy resin ซึ่งสามารถควบคุมได้โดย

- การใช้ Chemical grout

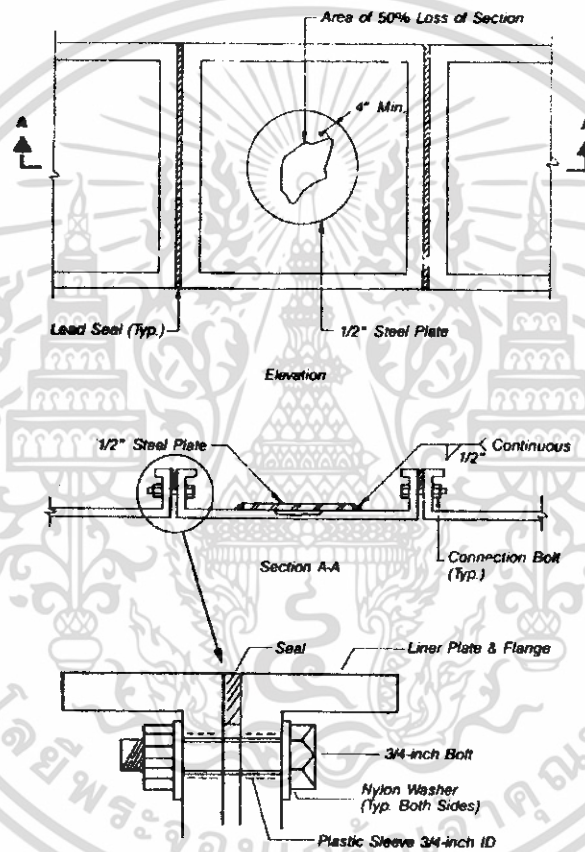
- การอุดรอยรั่วที่รอยต่อ
- การติดตั้ง Gasket

Steel segmental liners

รอยรั่วที่เกิดกับ Steel segmental liners นั้นเราจะใช้ Cementitious grout หรือ Chemical grout

การกัดเซาะที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เราจะใช้ Insulating sleeves หรือ Jacket ในรูปที่

6.95



รูปที่ 6.95 การซ่อมแซมเหล็กแผ่นแนวทาง
(จาก Tunnel Engineering Handbook)

Cast iron segmental liners

เราจะใช้ Cementitious หรือ Chemical grout เพื่ออุดรอยรั่วบริเวณรอยต่อ และ การกัดเซาะที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เราจะใช้ Insulating sleeves หรือ Jacket ได้เช่นกัน

6.11.2.6 ต้นทุนการซ่อมแซม

ตารางที่ 6.15 แสดงถึงชนิดและความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ในการซ่อมแซมและฟื้นฟูโครงสร้างให้กลับสภาพเดิม ต้นทุนการก่อสร้างแสดงในตารางที่ 6.16 ในส่วนของต้นทุนวัสดุที่ใช้ราคาประมูลใน Boston

ตารางที่ 6.15 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 6.16 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		

6.12 ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์

6.12.1 กล่าวนำ

ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ที่จะกล่าวถึงในโครงการพิเศษนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะปัญหาหลักๆที่มักจะเกิดขึ้นจริงขณะกำลังก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้มาจากการที่กลุ่มโครงการพิเศษของข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาจากการก่อสร้างจริง และจากผู้เชี่ยวชาญในด้านการก่อสร้างอุโมงค์ จึงสามารถที่จะระบุได้ว่าปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอุโมงค์จริง พร้อมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์เป็นแนวทางที่ผู้เชี่ยวชาญได้ชี้แนะถึงแนวทางการแก้ไข ซึ่งทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้รวบรวมปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์และแนวทางการแก้ไขปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์แสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

6.12.2 ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์

ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ที่ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้กล่าวถึงนี้ล้วนแต่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงขณะก่อสร้างอุโมงค์ในปัจจุบัน

6.12.2.1 ปัญหาการทรุดตัวของหัวเจาะที่วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน

ปัญหา - เนื่องจากบางช่วงของอุโมงค์จะวางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน ดังนั้นเมื่อหัวเจาะหยุดการเคลื่อนที่ขณะประกอบผนังอุโมงค์ หรือหยุดเนื่องจากตรงกับวันหยุดอาจทำให้หัวเจาะมีการทรุดตัวลงจากระดับเดิม เนื่องจากตัวหัวเจาะมีน้ำหนักมาก และชั้นดินเหนียวอ่อนมีกำลังรับน้ำหนักของหัวเจาะไม่ไหว จึงทำให้หัวเจาะเกิดการทรุดตัว

การแก้ไข - หากว่าการทรุดตัวมีไม่มาก สามารถแก้ไขได้โดยเมื่อเริ่มทำการเจาะอีกครั้งก็ใช้ขาถีบไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ด้านล่างถีบดันหัวเจาะเพื่อให้หัวเจาะกลับเข้าสู่ระดับเดิมที่ได้ออกแบบไว้อีกครั้งหนึ่ง

6.12.2.2 ปัญหาการแตกร้าวของผนังอุโมงค์เมื่อส่วนหางของหัวเจาะมากระแทกขณะเลี้ยงโค้ง

ปัญหา – ในส่วนของหัวเจ้านั้นจะมีผนังของหัวเจาะคลุมผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้ว ดังนั้นเวลาเข้าโค้งที่มีความโค้งมากๆ ส่วนท้ายของหัวเจาะอาจไปเบียดกับผนังอุโมงค์ได้ และทำให้ตัวอุโมงค์เกิดการแตกร้าวได้

การแก้ไข – ปัญหานี้จะเกิดขึ้นน้อยมาก หากว่าโค้งไม่มีความโค้งที่มากเกินไป และจะมีการใช้ชั้นผนังอุโมงค์พิเศษ หรือที่เรียกว่า เทเปอร์ (Taper) ซึ่งสามารถปรับผนังอุโมงค์ให้มีความโค้งได้ตามความโค้งของอุโมงค์ที่ต้องการ จึงทำให้ปัญหาการเบียดกระแทกระหว่างส่วนหางของหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ลดลงไป

6.12.2.3 ปัญหาการแตกของชั้นผนังอุโมงค์เนื่องจากผิวหน้าไม่ได้ระนาบดังเดียวกัน

ปัญหา – การออกแบบให้หัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าจะต้องใช้ไฮดรอลิกเป็นตัวขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยจะติดกับผิวหน้าของผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จล่าสุด ดังนั้นถ้าผิวหน้าของชั้นผนังอุโมงค์ไม่ได้อยู่ในระนาบดังเดียวกันกับขาคีบไฮดรอลิกแล้วเวลาขับเคลื่อนจะทำให้เกิดเป็น Point load กระทำที่ผิวหน้าของชั้นผนังอุโมงค์ จึงอาจทำให้ชั้นผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าวได้

การแก้ไข – การแก้ไขคือขณะที่ทำการประกอบชั้นผนังอุโมงค์นั้น ผู้ประกอบต้องประกอบด้วยความระมัดระวัง ให้ชั้นผนังอุโมงค์อยู่ในระนาบดังเดียวกันทุกชั้นและถ้าหากชั้นผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าวก็ให้ทำการสกัดชั้นส่วนบริเวณที่แตกออก แล้วทำความสะอาดให้ดีจากนั้นจึงทาสีด้วยน้ำยาประสาน Bonding agent จากนั้นจึงฉาบปิดด้วย Polymer modified leveling mortar ซึ่งวัสดุฉาบนี้จะมีแรงต้านทานเท่ากับชั้นผนังอุโมงค์ทำให้สามารถรับแรงได้

6.12.2.4 ปัญหาบ่อเก็บดินเต็ม

ปัญหา – เนื่องจากการก่อสร้างนั้นระยะเวลาในการก่อสร้างเป็นตัวแปรที่สำคัญเป็นอย่างมาก เพราะถ้าใช้เวลามากจะทำให้ส่งผลถึงค่าก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งในโครงการก่อสร้างนี้เวลาเป็นตัวแปรที่สำคัญด้วย ดังนั้นทางบริษัทผู้รับเหมาจึงมีการให้เงินรางวัล (Bonus) แก่ผู้ที่ทำงานในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์ โดยจะมีอัตราแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับจำนวนวงที่ทำการก่อสร้างได้ในแต่ละกะงาน เพราะฉะนั้นคนงานทุกคนจึงทำงานกันอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้งานมากที่สุด และเมื่อทำงานมาก

ดินที่ขุดขึ้นมาก็จะมีจำนวนมากด้วย แต่เนื่องจากพื้นที่ในการก่อสร้างบ่อเก็บดินมีจำกัด ความสามารถในการเก็บดินก็เลยมีจำกัดด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการขนดินออกจากบ่อเก็บดินไปทิ้งข้างนอกซึ่งทางบริษัทผู้รับเหมาได้ให้บริษัทอื่นมาขนดินนี้ออกไปอีกที แต่เนื่องจากการที่รถบรรทุกต้องใช้เวลาในการวิ่งในตอนกลางวัน จึงวิ่งได้ในเวลากลางคืนเท่านั้น จึงทำให้การขนดินออกทำได้ช้า เลยทำให้ดินเต็มบ่อเร็ว และบางที่บริษัทขนดินก็ไม่มาขนดิน จึงทำให้ดินเต็มบ่อ และการเจาะอุโมงค์ก็ไม่สามารถทำได้จึงต้องหยุดงานไป

การแก้ไข – การแก้ไขปัญหานี้ในเรื่องนี้นั้นสามารถทำได้ทางเดียวก็คือต้องเพิ่มเที่ยวรถขนดินให้มากขึ้นเพียงพอต่อการต้องการในการขนดิน และต้องมีการปรับเงินบริษัทขนดินหากไม่มาขนดินออกไป

6.12.2.5 ปัญหาขบวนการไฟตกราง

ปัญหา – เนื่องจากการต่อรางรถไฟเป็นการต่อแบบชั่วคราว ซึ่งบางทีก็จะได้ระดับเดียวกันตรงรอยต่อจึงทำให้ล้อรถไฟสะดุดและตกรางได้ และสาเหตุของการตกรางอีกข้อหนึ่งก็คือคนขับรถไฟด้วยความเร็วสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้

การแก้ไข – ต้องให้คนขับรถไฟขับรถภายใต้ความเร็วที่กำหนดไว้ และเวลาประกอบรางรถไฟต้องพยายามประกอบให้ได้ระดับเดียวกันมากที่สุด

6.12.2.6 ปัญหาเสาเข็มสะพานกีดขวางแนวการก่อสร้างอุโมงค์

ปัญหา - ในเส้นทางก่อสร้างอุโมงค์บางแห่งที่จะต้องลอดผ่านใต้สะพานอาจจะเจอปัญหาคือ จะพบเสาเข็มของสะพานขวางเส้นทางของอุโมงค์อยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเจาะผ่านเสาเข็มของสะพานไป ซึ่งจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มต้นที่ถูกตัดนั้นเสียไป

การแก้ไข – ทำได้โดยการอัดน้ำปูน (Jet grout) ลงไปบริเวณเสาเข็มต้นที่ถูกตัด เพื่อให้ดินรอบๆเสาเข็มสามารถรับกำลังได้มากขึ้น และเพิ่มเสาเข็มให้มี End bearing มากขึ้น โดยที่กำลังรับเสาเข็มจะต้องเท่ากับตอนที่ยังไม่ได้ตัดเสาเข็ม

6.12.2.7 ปัญหาหัวเจาะไม่เหมาะกับสภาพดินที่เป็นจริงในโรงงาน

ปัญหา – ความเป็นจริงทางบริษัทผู้ผลิต ได้ทำการเจาะสำรวจดินเป็นจุดๆเท่านั้น โดยลืมคำนึงถึงว่าสภาพชั้นดินในกรุงเทพมหานคร นั้นเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก ดังนั้นถ้าชุดเจาะสภาพดินที่เป็นดินเหนียวอ่อนก็จะใช้ข้อมูลตรงนี้ไปทำการออกแบบหัวเจาะ แต่ในความเป็นจริงจะมีสภาพดินที่แตกต่างกันไป ซึ่งส่วนมากจะมีสภาพที่แข็งกว่าที่นำตัวอย่างไปใช้ในการออกแบบ จึงทำให้เกิดปัญหาในเวลาเจาะดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเข้าโค้ง สามารถเข้าโค้งได้ช้ามากหรือบางครั้งเข้าโค้งแทบไม่ได้เลย

การแก้ไข – คิดให้ความยาวของหัวเจาะสั้นลงไปโดยการตัดส่วนที่เรียกว่า Tail seal ออกไป จะทำให้ลดปัญหาลงไปได้มาก

6.12.2.8 ปัญหาน้ำท่วมขังในบริเวณการเจาะอุโมงค์

ปัญหา – ในการก่อสร้างอุโมงค์จะมีน้ำเป็นตัวช่วยให้เกิดการเจาะที่ง่ายและสะดวกรวดเร็วขึ้น โดยการนำน้ำใส่เข้าไปในหัวเจาะ เพื่อให้ดินเกิดความอ่อนตัวและเกิดความหนืด ง่ายต่อการลำเลียงออกไปทิ้งข้างนอก แต่ก็มีบางครั้งที่คนควบคุมน้ำใส่น้ำมากเกินไป จนเกิดการไหลย้อนมาทาง Screw conveyor เกิดความสกปรกและเกิดน้ำท่วมขังในบริเวณหน้านางานนั้น และก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ ง่ายและยากต่อการทำงาน เช่น การเดินไถล การทำงาน Survey ที่ลำบากมากยิ่งขึ้น

การแก้ไข – ต้องระมัดระวังในการควบคุมน้ำ และควบคุมน้ำออกจากบริเวณการก่อสร้างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

6.12.2.9 ปัญหาเรื่องอากาศและฝุ่นละอองภายในสถานที่ก่อสร้าง

ปัญหา – เนื่องจากเป็นการทำงานในชั้นใต้ดิน แน่นอนว่าอากาศจะต้องมีน้อยหรือแทบจะไม่มีเลยถ้าทำการก่อสร้างไปในระยะทางที่ไกลไปเรื่อยๆ และยังมีฝุ่นละอองจากการก่อสร้างด้วย

การแก้ไข - จัดให้มีพัดลมดูดอากาศจากด้านบนบริเวณปากบ่อลงไปภายในอุโมงค์ นอกจากนั้นแล้วต้องมีการป้องกันตัวเองด้วย โดยการสวมหน้ากากป้องกันฝุ่นละอองให้รัดกุม

6.12.2.10 ปัญหาแนวอุโมงค์จริงอยู่นอกแนวที่ออกแบบไว้

ปัญหา – การควบคุมให้หัวเจาะเคลื่อนที่ นอกจากจะต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความชำนาญเป็นพิเศษแล้วลักษณะและคุณสมบัติของดินที่จะทำการขุดเจาะก็มีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สำคัญในการทำให้หัวเจาะเคลื่อนที่ออกนอกแนวที่ได้ออกแบบไว้

การแก้ไข – การแก้ไขสามารถแก้ไขได้โดยใช้ไฮโดรลิกในด้านการที่เลี้ยวออกเพื่อให้กลับสู่แนวเดิม ถ้าหากไม่เข้าแนวอุโมงค์ก็จะใช้ขาเบรคซึ่งเป็นท่อนเหล็กเสียบออกไปด้านข้างของอุโมงค์ ด้านที่ต้องการให้เลี้ยวเข้าเพื่อเป็นจุดหมุนให้หัวเจาะเคลื่อนเข้าสู่แนวเดิมที่ออกแบบไว้

6.12.2.11 ปัญหาชุดอุปกรณ์เป็นส่วนของหัวเจาะเกิดการชำรุดเสียหาย

ปัญหา – เนื่องจากช่วงระยะเวลาในการทำการก่อสร้างนั้นจะทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นหัวเจาะก็จะทำงานตลอดเกือบ 24 ชั่วโมงด้วย จึงส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆ เสียหายได้เพราะต้องทำงานตลอด 24 ชั่วโมงทุกวัน

การแก้ไข – การแก้ไขนั้นทำได้ยาก เพราะไม่สามารถหยุดพักเครื่องได้เพราะจะทำให้การทำงานหยุดชะงัก ดังนั้นควรเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นไว้สำหรับซ่อมแซมให้พร้อม เพราะเมื่อเกิดความเสียหายแล้วจะสามารถซ่อมแซมได้ทันที

6.12.2.12 ปัญหาน้ำใต้ดินซึมเข้ามาภายในอุโมงค์

ปัญหา – เนื่องจากอุโมงค์บางตำแหน่งวางผ่านบริเวณที่มีน้ำใต้ดินอยู่ และถ้าหากบริเวณนั้นการประกอบอุโมงค์ไม่ดีพอ เกิดช่องว่างระหว่างชั้นผนังอุโมงค์ก็อาจทำให้น้ำใต้ดินภายนอกรั่วซึมเข้ามาภายในอุโมงค์ได้

การแก้ไข – ถ้าเราแน่ใจว่าปริมาณน้ำมีเพียงเล็กน้อยก็อาจปล่อยให้ซึมเข้ามาจนกว่าจะแห้ง แต่ถ้ามีปริมาณมากก็ควรจะทำการอุดรูรั่วรั้น ที่สำคัญต้องสังเกตดูด้วยว่าน้ำที่รั่วเข้ามานั้นมีเศษดินตะกอนปะปนมาด้วยหรือเปล่า เพราะถ้ามีอาจทำให้ดินด้านบนเกิดการทรุดตัวได้ และส่งผลถึงถนนหรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียงได้

6.13 ราคาการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

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

6.13.1 การประมาณราคาการก่อสร้าง

การประมาณราคาการก่อสร้างเป็นวิธีการที่ใช้คำนวณหาค่าใช้จ่ายของโครงการก่อสร้าง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีแล้วแต่วัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ โดยจัดแบ่งรูปแบบของการประมาณราคาออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การประมาณราคาอย่างหยาบ เป็นการประมาณราคาในขณะที่แบบรูปและรายการยังไม่สมบูรณ์เรียบร้อย หรืออยู่ในช่วงที่กำลังวางแผนแนวคิดของโครงการเบื้องต้น ซึ่งในการวางแผนโครงการขั้นต้น เจ้าของโครงการจะต้องการทราบถึงต้นทุนของโครงการอย่างคร่าวๆ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการลงทุน และวางแผนจัดการด้านงบประมาณเบื้องต้นก่อนที่จะมีการประมาณราคาอย่างละเอียดตามมาอีกครั้งหนึ่ง ในส่วนของผู้รับเหมาการประมาณราคาอย่างหยาบนี้จะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายของโครงการ ก่อนที่จะตัดสินใจเข้าร่วมประกวดราคา ทั้งยังสามารถนำการประมาณราคาอย่างหยาบมาเปรียบเทียบกับราคาอย่างละเอียดได้อีกด้วย การประมาณราคาอย่างหยาบจะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายของโครงการได้อย่างรวดเร็ว โดยการนำข้อมูลจากประสบการณ์ของผู้ที่เคยทำงานนี้มาแล้วในอดีตมาทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายของโครงการ ซึ่งความถูกต้องของการประมาณราคาจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลและประสบการณ์ของผู้ประมาณราคา โดยทั่วไปจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5-40% จากค่าใช้จ่ายจริง

2. การประมาณราคาอย่างละเอียด เป็นการประมาณราคาจากแบบรูปและรายการที่สมบูรณ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เจ้าของโครงการและผู้รับเหมาทราบถึงราคาการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เพื่อใช้ในการตั้งราคากลางของเจ้าของโครงการ และใช้ในการประมาณราคาเพื่อเข้าร่วมประกวดราคาของผู้รับเหมา รวมถึงการนำไปใช้สำหรับควบคุมต้นทุนค่าใช้จ่ายและวางแผนการจัดซื้อ

วัสดุก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพ โดยการประมาณราคาจะต้องทำการศึกษาแบบรูปและรายการอย่างละเอียด สำรวจปริมาณงานและวัสดุที่จะต้องใช้ รวมถึงแรงงาน เครื่องมือเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น การจัดเตรียมสถานที่ก่อสร้าง บริเวณกองเก็บวัสดุ เป็นต้น

การประมาณราคาก่อสร้างมีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องนับตั้งแต่เจ้าของงาน วิศวกร ผู้ออกแบบ ตลอดจนผู้รับเหมาก่อสร้าง โดยเจ้าของงานซึ่งอาจจะเป็นหน่วยงานราชการหรือเอกชน หากทราบราคาก่อสร้างโดยประมาณก่อนการออกแบบ ก็จะได้ใช้พิจารณากำหนดวงเงินหรืองบประมาณเพื่อการก่อสร้างนั้น หรือในทางกลับกัน จะได้ใช้กำหนดขอบเขตของงานที่จะทำการก่อสร้างให้เหมาะสมกับวงเงินหรืองบประมาณที่เจ้าของงานมีอยู่ สำหรับวิศวกร หรือผู้ออกแบบก็จะได้ใช้ในการศึกษาหาความเหมาะสมของโครงการกับงบประมาณที่มี และภายหลังจากการออกแบบก็ต้องประมาณราคาอย่างละเอียดเพื่อใช้กำหนดเป็นราคากลางเสนอแก่เจ้าของงานเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกผู้รับเหมา รวมถึงการต่อรองราคาต่อไป และในส่วนของผู้รับเหมาที่จะต้องประมาณราคาเพื่อใช้ในการเสนอราคาแก่เจ้าของงาน ซึ่งหากการประมาณราคาผิดพลาดก็อาจจะทำให้ผู้รับเหมาเสนอราคาสูงเกินไป ก็จะไม่ได้งานนั้น หรือถ้าเสนอราคาต่ำไป ก็จะทำงานนั้นไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายหรือขาดทุนได้

การประมาณราคาอย่างหยาบหรือการประมาณราคาเบื้องต้นจะใช้เมื่อต้องการทราบราคาของสิ่งก่อสร้างอย่างคร่าวๆ ในขั้นแรกของการวางแผนการก่อสร้าง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของโครงการ สำหรับกำหนดวงเงินหรืองบประมาณในการก่อสร้าง หรือเพื่อใช้ในการกำหนดรูปแบบและขนาดของโครงการให้เพียงพอกับงบประมาณที่มี การประมาณแบบนี้เป็นวิธีการที่ทำได้รวดเร็ว แต่มีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้วิธีการประมาณที่เหมาะสม ความพร้อมของสถิติและข้อมูลในอดีต เนื่องจากความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ดังกล่าว ทำให้การประมาณราคาควรต้องมีการคิดเปอร์เซ็นต์เผื่อไว้ 20-30% โดยขึ้นอยู่กับสถิติและข้อมูลในอดีต ถ้ามีสถิติและข้อมูลในอดีตพร้อม การเผื่อก็จะน้อยกว่ากรณีที่มีสถิติและข้อมูลในอดีตไม่พร้อม

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การเลือกใช้การประมาณราคาด้วยวิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำราคาที่ได้ไปใช้ โดยถึงแม้ว่าการประมาณราคาอย่างละเอียดจะให้ราคาที่ใกล้เคียงความจริงมากกว่าการประมาณราคาอย่างหยาบแต่ก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าเช่นกัน ดังนั้นถ้าหากเจ้าของโครงการหรือผู้รับเหมาต้องการที่จะทราบราคาก่อสร้างของโครงการภายในระยะเวลาจำกัด การใช้การประมาณราคาอย่างหยาบก็จะทำให้ทราบราคาได้ก่อนการประมาณราคาอย่างละเอียด สำหรับการประมาณราคาอย่างหยาบนี้นี้มีความเกี่ยวข้องกับหลักการทางสถิติและ

การเก็บข้อมูลค่าก่อสร้างของโครงการในอดีต ซึ่งนำไปสู่วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสิ่งที่จะก่อสร้างกับราคาค่าก่อสร้าง

6.13.2 ข้อมูลราคา

ตารางที่ 6.17 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

ตารางที่ 6.18 รายละเอียดงานก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

ปี	ชื่อโครงการ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	ราคารวม (บาท)
2544	สถานีย่อยหมามข	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	สถานีย่อยสะพานคำ	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	โครงการจิตรลดา	1.5	8,612	607,645,412
2538	โครงการถนนศรีนครินทร์	1.5	4,322	214,777,628

ตารางที่ 6.19 ดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง

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

ตารางที่ 6.20 คำนวณค่าจ้างแรงงาน

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

ตารางที่ 6.21 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวมมาได้จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

เลขแถว	งานทั่วไป		งานอุปสรรค		งานป่อ		งานอุโมงค์		งานอุปกรณ์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
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	933063330	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 6.22 แสดงข้อมูลที่ปรับสภาพแล้วของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

ร.เลข	งานทั่วไป		งานอุปสรรค		งานบ่อ		งานอุโมงค์		งานอุปกรณ์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
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	19864250	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	183845086
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.23 แสดงข้อมูลราคาค่าต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

ประเภทงาน	งานทั่วไป		งานอุปสรค		งานบ่อ		งานอุโมงค์		งานอุปกรณ์		ราคารวม	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ตารางที่ 6.24 แสดงข้อมูลราคาต่อเมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ประปา

โครงการ	งานทั่วไป		งานอุปสรด		งานป่อ		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
ความเอียง	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

6.13.3 ปัจจัยที่มีผลกับราคาก่อสร้างอุโมงค์

1) Fire protection

จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของอุโมงค์

1. อุโมงค์ขนส่งมวลชน จำเป็นจะต้องมีการติดตั้งเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้
อุโมงค์เมื่อเกิดอุบัติเหตุ หรือ เหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด หรือขึ้นอยู่กับ การออกแบบ และจุดคุ้มทุนใน
การติดตั้งระบบว่ามีความสมควรที่จะติดตั้งหรือไม่

2. อุโมงค์ส่งน้ำ ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบบ Fire protection เพราะ
ความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุเกี่ยวกับไฟมีน้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย

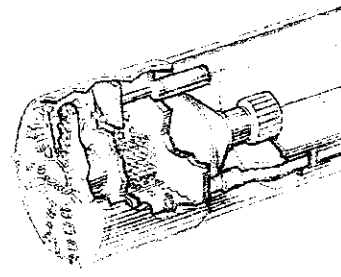
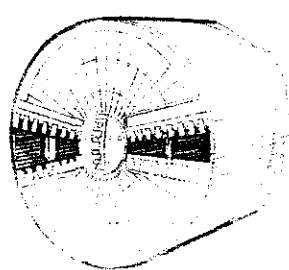
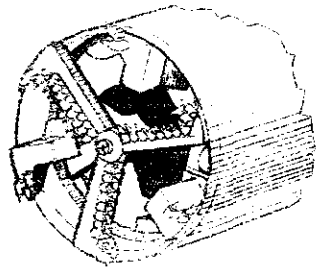
เมื่อเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยของอุโมงค์ทั้งสองลักษณะ จะเห็นว่าอุโมงค์ที่มี
ระบบ Fire protection จะมีราคาต่อหน่วยที่สูงกว่าจากการเพิ่มขึ้นของระบบ ซึ่งบางโครงการราคา
ของ Fire protection อาจจะมีราคาที่สูงกว่าราคาก่อสร้างอุโมงค์เสียอีก

2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์

1. เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับราคาก่อสร้างอุโมงค์ จะเกี่ยวข้องกับ การหาวิธีการ
ที่เหมาะสมในการขุดเจาะอุโมงค์ ในเรื่องของราคา ผลกระทบในการดำเนินงานก่อสร้างจะ
เกี่ยวข้องกับการลำเลียง วัสดุ อุปกรณ์ เข้าออกภายในอุโมงค์ ซึ่งมีจำนวนมาก ทำให้การดำเนินงาน
ก่อสร้างมีความล่าช้า

2. ขนาดของอุโมงค์ที่มีความแตกต่างกัน จะทำให้

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

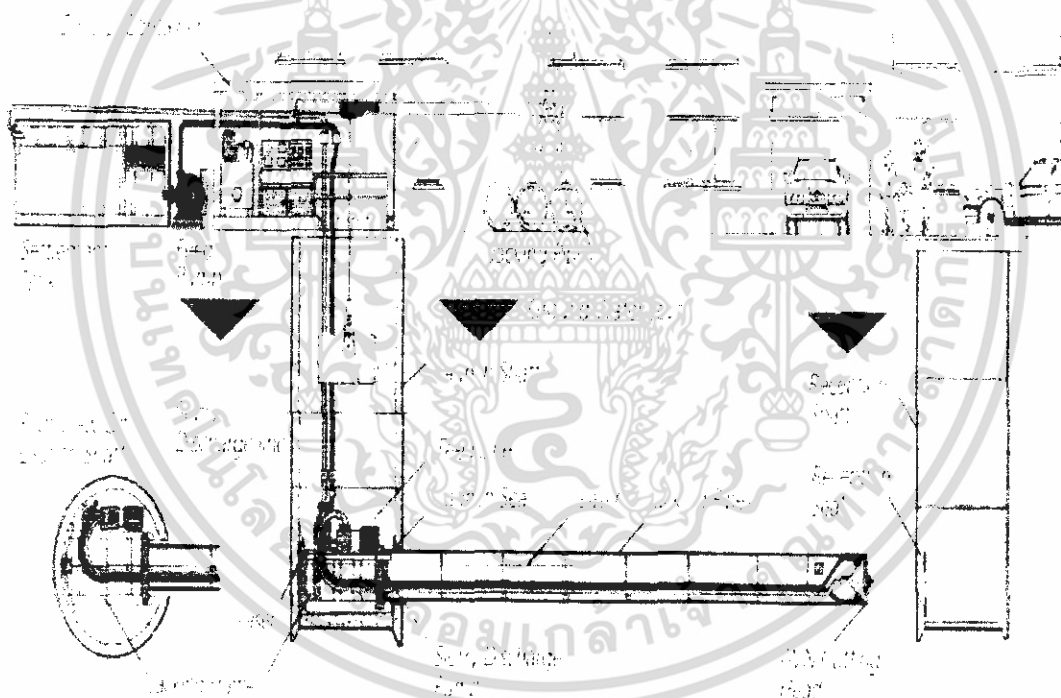


Tunnel boring machine

Earth pressure balance

Slurry

รูปที่ 6.96 รูปแสดงหัวเจาะชนิดต่างๆ



รูปที่ 6.97 แสดงวิธีการขุดเจาะแบบ Pipe jacking

3) Ground improvement

1. ลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ของอุโมงค์ จะมีผลทำให้มีการทำ Ground improvement ที่แตกต่างกัน ทั้งปริมาณงาน และราคาที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณงาน ปัญหาทางหน้างาน ระดับน้ำใต้ดิน การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารที่มีการเจาะผ่าน ซึ่งราคาที่เพิ่มขึ้น จะมีความไม่แน่นอน จะต้องมีการคิดราคาในส่วนนี้ละเอียดมากๆ

2. ความแตกต่างของราคา ของอุโมงค์ขนส่งมวลขน และ อุโมงค์ส่งน้ำ ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในส่วนของ Ground improvement

- อุโมงค์ขนส่งมวลขน จะมีจำนวนของสถานี อาคารผู้โดยสาร และอื่นๆ เกี่ยวกับโครงสร้างอาคารมาก และในการขุดเจาะ จะต้องมีการเสริมความแข็งแรงของดินบริเวณดังกล่าว เพื่อการขุดเจาะที่สะดวก ทำให้ขั้นตอนการก่อสร้างในการทำ Ground improvement มีมาก
- อุโมงค์ส่งน้ำ จะมีการทำ Ground improvement เฉพาะในการขุดเจาะ และผ่านโครงสร้างอาคาร หรือผ่าน Shaft เท่านั้น

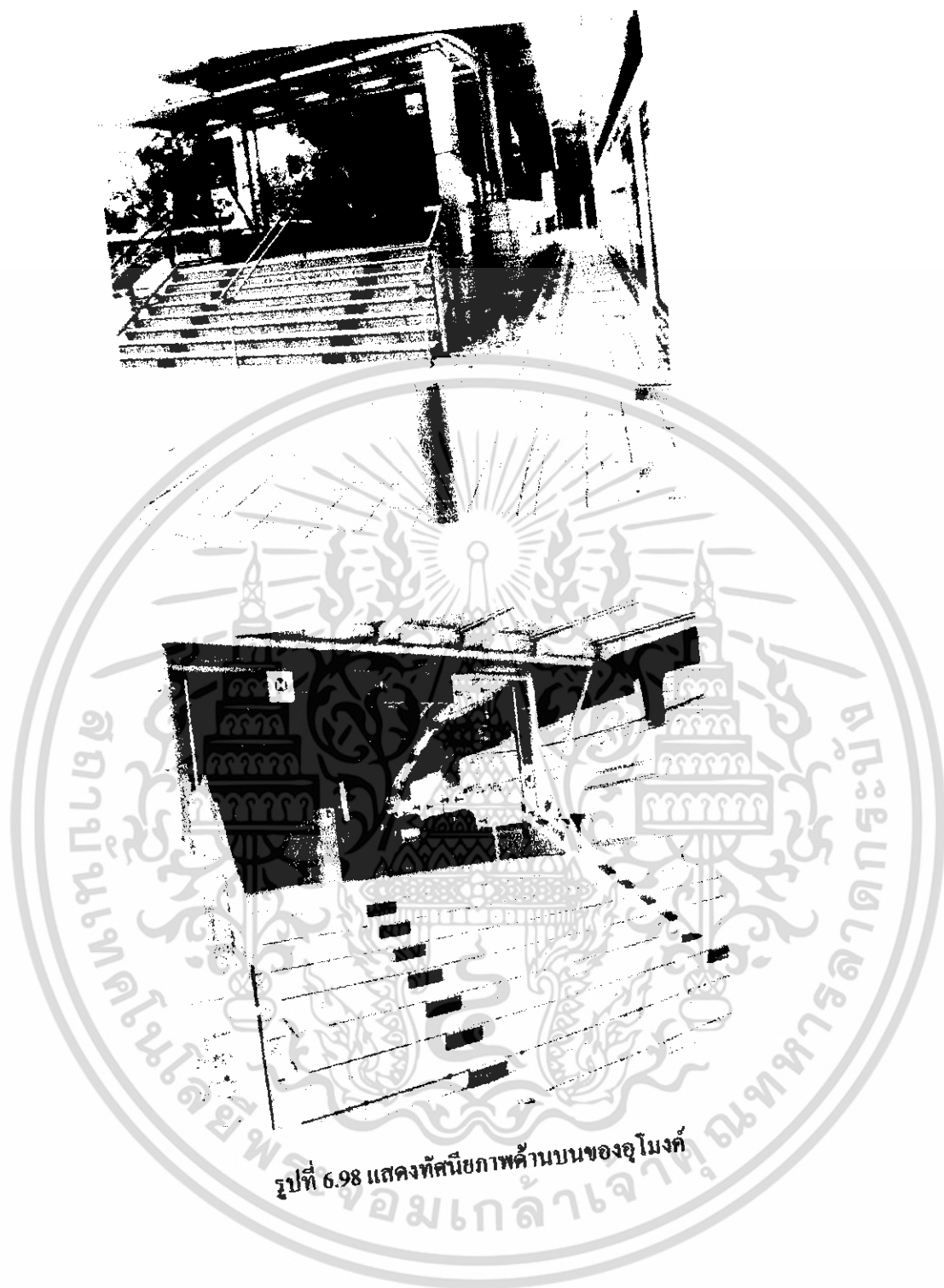
เพราะฉะนั้นไม่ว่าจะทำอุโมงค์ ที่มีการใช้งานในลักษณะใด ราคาที่เพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปัญหาหน้างาน และลักษณะของการใช้งาน

4) ระยะทางและความยาวของอุโมงค์

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

5) ทัศนียภาพของโครงการ

ขึ้นอยู่กับกรอบแบบ และ ที่ตั้งของโครงการ ว่าเส้นทางของแนวอุโมงค์ ผ่านสถานที่สำคัญหรือไม่ จะต้องมีการหลบหลีก หรือเปลี่ยนแปลงอย่างไร การปรับปรุงทัศนียภาพด้านบน และภายในอุโมงค์ ทั้งหลาย จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของราคาก่อสร้างทั้งสิ้น



รูปที่ 6.98 แสดงทัศนียภาพด้านบนของอุโมงค์

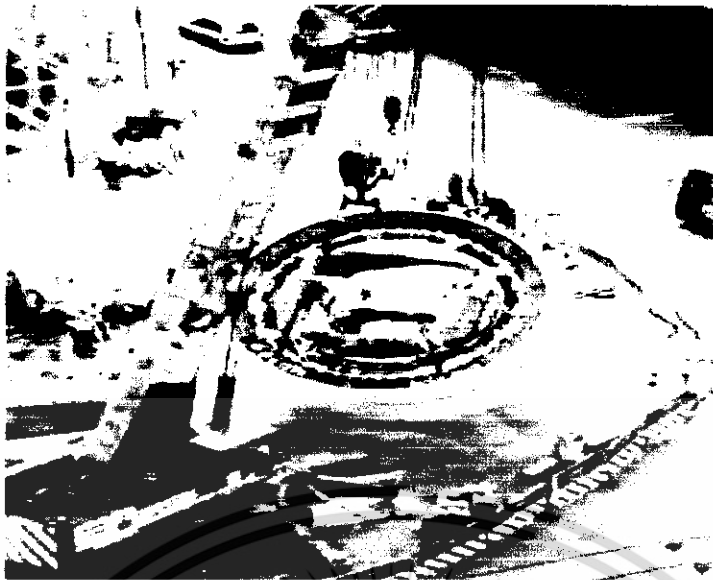
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.99 แสดงทัศนียภาพภายในของอุโมงค์

6) สถานที่ตั้งของโครงการ

มีผลต่อการดำเนินงานก่อสร้าง และ การขนส่ง สถานที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรมาก การจราจรที่แออัด จะมีการดำเนินการก่อสร้าง และ การขนส่งที่ยากลำบากมากขึ้น การลำเลียงชิ้นส่วนอุโมงค์ หรือการขนถ่ายมาสู่หน้างาน จะมีความยากลำบาก และล่าช้ามาก จะทำงานได้สะดวกในเวลากลางคืน



รูปที่ 6.100 แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีความแออัด



รูปที่ 6.101 แสดงสถานที่ก่อสร้างที่มีพื้นที่ในการก่อสร้างมาก

7) ระดับความลึกของอุโมงค์

ความลึกจะมีผลกับราคา ในเรื่องของ การขุดเจาะ การลำเลียงดิน ระบบอัดอากาศ
ความปลอดภัยในการทำงาน

8) ระยะเวลาในการก่อสร้าง

ขี้งานก่อสร้างมีความล่าช้ามากเท่าไร ก็จะทำให้เกิดราคาที่เพิ่มขึ้นจาก อัตราดอกเบี้ย ค่าดำเนินงานในการก่อสร้างในส่วนของค่าแรง ค่าปรับตามสัญญาการก่อสร้าง และอื่นๆ ซึ่งมีผลเสียดังต่อโครงการทั้งสิ้น จะต้องมีการจัดการที่ดี ทำงานให้เป็นไปตามแผนงานที่วางไว้เสมอ จึงจะไม่มีผลกระทบต่อราคาค่าก่อสร้าง

9) สถานที่เก็บวัสดุอุปกรณ์

จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการขนส่ง ความสะดวกในการขนส่ง ราคาในการเช่าพื้นที่ ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ถ้ามีการกำหนดสถานที่ผิดพลาด จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่เพิ่มขึ้น แต่ในบางโครงการ ขอมที่จะเช่าที่ดินในราคาที่สูง เพื่อการขนส่งที่มีระยะทางที่สั้นลง ค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่น้อยลง มากกว่าราคาเช่าที่ดินที่ถูก แต่มีราคาในการขนส่งที่สูง



รูปที่ 6.102 แสดงสถานที่เก็บชิ้นส่วนอุโมงค์

จากการรวบรวมปัจจัยต่างๆ สามารถจะสรุปผลที่ได้ว่า ราคาค่าก่อสร้างอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง วิธีการก่อสร้าง รูปแบบการใช้งาน การคั่นแต่ง ความยาวของอุโมงค์ ระบบป้องกันภัย ระบบรักษาความปลอดภัย และอื่นๆ เพราะฉะนั้นในการประมาณราคาค่าก่อสร้าง จะต้องมึข้อมูลต่างๆที่แม่นยำ ถึงจะทำให้การประมาณราคาอุโมงค์มีความเที่ยงตรง และ ใกล้เคียง กับค่าก่อสร้างจริงมากที่สุด

6.13.4 ผลจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับราคาค่าก่อสร้างอุโมงค์

เนื่องจากจำนวนในการก่อสร้างอุโมงค์ประปา และ อุโมงค์ขนส่งมวลชน ในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก ทำให้รูปแบบของราคาค่าก่อสร้างยังคงมีไม่มากนัก แต่อาจจะแบ่งได้ ตามลักษณะการใช้งานของอุโมงค์ คือ อุโมงค์ส่งน้ำ และอุโมงค์ขนส่งมวลชน

โดยเมื่อดูจากลักษณะการใช้งานแล้ว อุโมงค์ขนส่งมวลชน จะมีปัจจัยที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างมีราคาที่สูงกว่า ถึงแม้ว่า ขนาดของอุโมงค์จะมีขนาดที่เท่ากันก็ตาม เนื่องจากอุโมงค์ขนส่งมวลชน จำเป็นจะต้องมี ระบบรักษาความปลอดภัย เพื่อรักษาชีวิตของประชาชน รูปแบบการตกแต่ง ความสวยงาม สถานีโดยสารและจุดเชื่อมต่อต่างๆ ทั้งหลายเหล่านี้จะต้องมีการก่อสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น

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

บทที่ 7

การออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

7.1 คำนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์ที่ได้จากแต่ละทฤษฎี แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ต่อไป โดยมีทฤษฎีที่จะนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ทฤษฎีของ JSCE, Einstein, Erdmann, Muir Wood และทฤษฎี Beam-spring model

7.2 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ JSCE

7.2.1 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ

ผนังอุโมงค์ (Lining) ต้องได้รับการออกแบบและการรับรองในเรื่องความปลอดภัยของอุโมงค์และการปฏิบัติงานไม่เฉพาะหลังที่ดำเนินการเปิดใช้แล้ว แต่ต้องมีความปลอดภัยในระหว่างทำการก่อสร้างด้วย แรงที่จะนำมาประกอบการพิจารณาการออกแบบจะสามารถแบ่งแยกได้ 3 ประเภทดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงประเภทของน้ำหนักที่กระทำ

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary loads)	1. แรงดันดินในแนวตั้งและในแนวนอน 2. แรงดันน้ำ 3. น้ำหนักบรรทุกคงที่ 4. น้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน 5. แรงต้านทานของดิน
น้ำหนักกระทำรอง (Secondary loads)	6. น้ำหนักภายใน 7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง 8. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว
น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special loads)	9. ผลกระทบจากอุโมงค์ใกล้เคียง 10. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง 11. ผลกระทบจากการทรุดตัวของชั้นดิน 12. อื่นๆ

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary loads) เป็นแรงพื้นฐานที่จะต้องนำมาพิจารณาเสมอในการออกแบบ น้ำหนักกระทำรอง (Secondary loads) จะเกิดขึ้นระหว่างทำการก่อสร้างหรือหลังจาก ก่อสร้างอุโมงค์เสร็จแล้ว ซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ สภาพการก่อสร้างและตำแหน่งของอุโมงค์ ในขณะที่น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special loads) จะถูกนำมาพิจารณาโดยเฉพาะตามสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

น้ำหนักบรรทุกเหล่านี้ที่นำมาพิจารณาเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ แต่การวิเคราะห์ผลจากน้ำหนักบรรทุกไม่คงที่จะถูกนำมาใช้เมื่อแผ่นดินไหวมีผลกระทบต่ออุโมงค์ การออกแบบผนังอุโมงค์โดยการวิเคราะห์แรงเช่นนี้เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

7.2.2 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 แรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ตามที่กล่าวข้างต้นอธิบายถึงการหาค่าแรงดันดินโดยไม่คำนึงถึงการบิดรูปของอุโมงค์ แรงดันดินที่กระทำต่ออุโมงค์ที่ ส่วนล่าง (Bottom) ที่พิจารณาคือแรงด้านทานของดิน

การคำนวณหาค่าแรงดันดินมี 2 วิธี หนึ่งคือแยกแรงดันน้ำออกจากแรงดันดิน (แรงดันประสิทธิผล) และอีกวิธีคือรวมแรงดันดินและแรงดันน้ำเข้าด้วยกัน (แรงดันรวม) โดยวิธี

แรกจะนำมาประยุกต์ใช้กับดินทรายและวิธีหลังใช้กับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว ทว่าวิธีแรกก็อาจนำมาใช้กับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวแต่มีเสถียรภาพสูงอย่างพวกดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

7.2.2.1 แรงดันดินในแนวดิ่ง

แรงดันดินในแนวดิ่งจะกระทำต่อผนังอุโมงค์ในระยะยาว มันเป็นเรื่องที่คิดว่าที่ไม่ถือว่าผลกระทบของดินต่อผนังอุโมงค์จากการที่ดินเหนื่ออุโมงค์นั้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการใช้ Loosening pressure ในการออกแบบ โดยอาจจะเกิดปัญหาในดินทรายแต่ไม่มีผลต่อดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว ยิ่งกว่านั้นก็ต้องดูสภาพของชั้นดินเพราะแรงดันดินในบางครั้งมีแนวโน้มจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะแรงดันที่กระทำบนท่อที่ฝังดินอยู่ ทว่าหากดินเหนื่ออุโมงค์มีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ อาจเป็นไปได้ที่จะใช้สูตร Loosening pressure ในการหาค่าแรงดันดินในแนวดิ่งโดย ในดินทรายถ้าดินเหนื่ออุโมงค์มีความหนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่าจะใช้สูตรคำนวณ Loosening pressure ในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวถ้าความหนาของดินเหนื่ออุโมงค์หนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่า 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

7.2.2.2 แรงดันดินในแนวราบ

คล้ายกับแรงดันดินในแนวดิ่ง เป็นเรื่องยากที่จะประมาณแรงดันดินในแนวราบให้ถูกต้อง โดยหาได้จากการคูณกันระหว่างแรงดันดินในแนวดิ่งกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง หรืออาจจะสมมติให้แรงดันดินในแนวดิ่งที่หาได้นั้นเป็นน้ำหนักที่กระทำอยู่ที่ส่วนบน (Crown) ซึ่งน้ำหนักบรรทุกนี้จะเพิ่มอัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อความลึกของชั้นดินวัดจากส่วนบน (Crown) สามารถนำมาใช้หาค่าแรงดันดินในแนวราบได้

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างควรหาจากความเกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณออกแบบและวิธีการก่อสร้างไม่ใช่ธรรมชาติของดิน อย่างไรก็ตามเป็นสิ่งที่ยากที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ได้อย่างถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงของแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันดินในแนวดิ่งและแนวราบก่อนข้างมาก ดังนั้นควรจะระมัดระวังในการหาค่าหลังจากพิจารณาถึงสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างและสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยา

วิธีออกแบบ	ชนิดของดิน	λ	k (kN/mm ³)
แรงดัน ประสิทธิผล	ดินทรายแน่นมาก	0.30 - 0.45	30 - 50
	ดินทรายแน่น	0.45 - 0.55	10 - 30
	ดินทรายหลวม	0.50 - 0.60	0 - 10
	ดินเหนียวแข็งมาก	0.35 - 0.45	30 - 50
	ดินเหนียวแข็ง	0.45 - 0.55	10 - 30
	ดินเหนียวปานกลาง	0.45 - 0.55	5 - 10
แรงดันรวม	ดินเหนียวปานกลาง	0.55 - 0.65	5 - 10
	ดินเหนียวอ่อน	0.65 - 0.75	0 - 5
	ดินเหนียวอ่อนมาก	0.75 - 0.85	0

7.2.3 แรงดันน้ำ

1. ระดับน้ำใต้ดินควรจะกำหนดโดยการออกแบบในด้านความปลอดภัย ความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในขณะก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง
2. แรงดันในแนวตั้งควรกระจายเท่าๆ กันและขนาดของแรงดันควรจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic pressure) กระทำบนจุดสูงสุดของอุโมงค์และจุดต่ำสุดของอุโมงค์
3. แรงดันน้ำในแนวราบควรกระจายอย่างสม่ำเสมอและขนาดของแรงจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic pressure)

แรงดันน้ำกระทำบนผนังอุโมงค์ขณะที่การทำงานของอุโมงค์แสดงความแตกต่างของลักษณะจากสภาพดินเดิมต่อสภาพการก่อสร้าง มันค่อนข้างยากที่คาดเดาแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจริง ระดับน้ำใต้ดินในระยะยาวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติหรืออิทธิพลที่ไม่แน่นอน สำหรับอุโมงค์ที่ตั้งอยู่ในที่ระดับน้ำใต้ดินสูงไม่ต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย ถ้าอยู่ในระดับน้ำใต้ดินต่ำจะต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย มีความสำคัญมากที่จะต้องหาที่ระดับน้ำใต้ดินให้ถ่วงเพื่อจะคำนวณแรงดันน้ำ

ถ้าหน่วยน้ำหนักจมน้ำ คือ หน่วยน้ำหนักที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน แรงดันน้ำแบบสถิตย (Hydrostatic pressure) นั้นก็เหมาะสมที่จะเป็นแรงดันน้ำที่ใช้ออกแบบ อย่างไรก็ตามการกระจายและขนาดของแรงดันน้ำสามารถหาได้อย่างง่ายโดยทำตามข้อกำหนดของแรงดันดิน

ผลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ เป็นแรงลอยตัวถ้าผลของแรงดันดินในแนวตั้งมากกว่าแรงลอยตัวจะทำให้เกิดแรงต้านทานของดินในแนวตั้งใต้อุโมงค์ (Subgrade reaction) ถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าแรงดันดินในแนวตั้งและน้ำหนักบรรทุกคงที่จะทำให้อุโมงค์ลอย อาจทำให้เกิดความเสียหาย จึงต้องมีการเพิ่มน้ำหนักให้ตัวอุโมงค์โดยการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) หรือเพิ่มน้ำหนักบนผิวดินด้วยค้อนน้ำหนัก

7.2.4 น้ำหนักบรรทุกคงที่

น้ำหนักบรรทุกคงที่ คือ แรงในแนวตั้งที่กระจายตามความยาวบริเวณจุดศูนย์ถ่วงของผนังอุโมงค์

หน่วยน้ำหนักของผนังอุโมงค์หลักสามารถคำนวณได้จาก

$$g_1 = \frac{W_1}{2\pi \cdot R_c}$$

เหมือนกันกับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทกล่อง (Box type) ถ้าการกระจายของน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของจุดศูนย์ถ่วง 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 ถ้ารู้ค่าน้ำหนักที่แท้จริงก็ควรนำมาใช้ สำหรับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่หล่อในที่ก็สามารถหาได้โดยอ้างอิงจากตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แสดงหน่วยน้ำหนักของวัสดุ (kN/m^3)

	ผนังอุโมงค์หลัก			ผนังอุโมงค์ชั้นใน	
	คอนกรีต	เหล็กกล้า	เหล็กหล่อ	คอนกรีต	คอนกรีตเสริมเหล็ก
หน่วยน้ำหนัก	26.0	78.5	72.5	23.5	25.0

7.2.5 ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน

ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน ควรจะพิจารณาการถ่ายแรงดันในพื้นที่ดิน

ผลกระทบของความเค้นในพื้นที่ดินเพราะน้ำหนักที่กระทำบนผิวดินหรือปฏิกิริยาของโครงสร้างฐานรากที่ลดลงตามความลึก เพราะฉะนั้น สามารถพิจารณาระยะไกลๆ จากจุดที่น้ำหนักกระทำ ผลกระทบจากน้ำหนักกึ่งที่บนผิวดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์จะลดลง อย่างไรก็ดีตามไม่ยากที่จะเจาะจงระดับของผลกระทบ ผลกระทบเหล่านี้ในแรงดันดินจะแปรผันขึ้นตามขนาดของน้ำหนัก ประเภทของฐานราก ความตึงเครียดระหว่างดินที่อยู่เหนืออุโมงค์กับส่วนล่าง(Bottom) ของฐานรากและสภาพชั้นดิน

สำหรับการคำนวณหาการถ่ายความเค้นในดิน มีวิธีที่ใช้เช่น สูตรของ Boussinesq และ สูตรของ Westergaard วิวิเคราะห์ตัวเลขอย่าง FEM เป็นต้น สำหรับวิธีอื่นขึ้นอยู่กับวินิจัยของวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน

โดยปกติอุโมงค์จะไม่ตั้งอยู่ใต้โครงสร้างโดยตรงแต่จะอยู่ใต้ถนน ผลกระทบจากตีก่อสร้างเหนืออุโมงค์จะต้องตรวจสอบถ้าอุโมงค์อยู่ใกล้ขอบถนน

7.2.6 แรงต้านทานของดิน

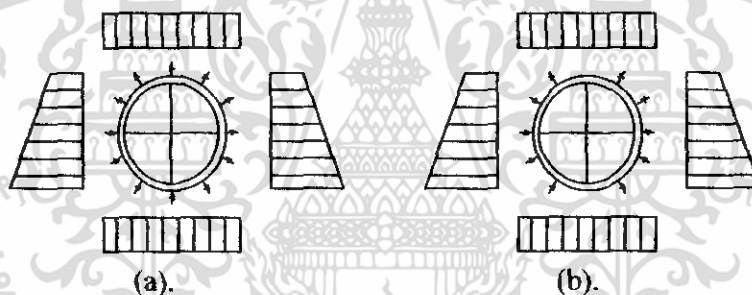
ขอบเขตของการเกิดแรง รูปร่างของการกระจายและความหนาแน่นของแรงต้านทานควรพิจารณาเชื่อมกับวิธีการคำนวณที่ใช้

ท่ามกลางน้ำหนักที่กระทำบนผนังอุโมงค์ แรงต้านทานของดินแตกต่างจากน้ำหนักอื่นที่สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ โดยปกติแรงต้านทานของดินสามารถแยกได้เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนรูปของดินและแรงต้านทานที่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดินสมัยก่อน โดยปกติการปฏิบัติจะระบุรูปร่างการกระจายของแรงต้านทานให้สอดคล้องกับแรงที่กำหนด

ได้ ขณะที่ต่อมาการสันนิษฐานของ Winkler ได้สมมติว่าแรงต้านทานเกี่ยวข้องกับารเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน

วิธีที่ใช้ในการคำนวณ แรงต้านทานในแนวตั้งซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำหนักที่กำหนดได้ เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของดินและเป็นแรงต้านทานที่สม่ำเสมอเหมือนกับน้ำหนักที่กำหนดได้ ในอีกด้านหนึ่งแรงต้านทานในแนวราบเป็นแรงต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน และมีรูปร่างการกระจายของแรงเป็นสามเหลี่ยม ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ตำแหน่ง Spring line แผลออกภายในช่วง $\pm 45^\circ$ จาก Spring line สำหรับการออกแบบจะใช้วิธีการคำนวณปกติ และสัมประสิทธิ์แรงปฏิกิริยาดินในแนวราบซึ่งพิจารณาจากสภาพชั้นดินซึ่งดูได้จากตารางที่ 7.2

อีกวิธีหนึ่งในการอธิบายถึงแรงกระทำชั้นดินกับผนังอุโมงค์ คือสมมติให้ชั้นดินเปรียบเสมือนสปริง วิธีนี้แรงต้านทานของดินจะสมมติว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์โดยเป็นส่วนสำคัญกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดิน โดยในยุโรป แบบจำลองจะให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ ส่วนในญี่ปุ่นจะใช้แบบจำลองของ Winkler



รูปที่ 7.1 แสดงแบบจำลองสปริง

(a). แบบจำลองที่ให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ

(b). แบบจำลองของ Winkler

7.2.7 น้ำหนักจากการก่อสร้าง

น้ำหนักจากการก่อสร้างที่ควรพิจารณา มีดังนี้

1. แรงผลักดันของแม่แรงกดหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield jacks)
2. แรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting)
3. น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง
4. อื่นๆ

น้ำหนักชั่วคราวที่กระทำบนชิ้นส่วนขณะขั้นตอนการก่อสร้าง จากขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วนจนถึงขั้นตอนหลังจากการทำให้แข็งของการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) เพื่อเติมเต็มช่องว่างในส่วนท้าย ที่สะสมกัน เรียกว่า น้ำหนักจากการก่อสร้าง น้ำหนักนี้จะใช้พิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนจากความสัมพันธ์ของวิธีการก่อสร้าง

เป็นการยากที่จะกำหนดน้ำหนักจากการก่อสร้างได้แม่นยำ เพราะมันจะแปรผันขึ้นกับสภาพชั้นดินและสภาพการทำงาน ฯ อย่างไรก็ตาม สำคัญมากที่จะต้องทำความเข้าใจน้ำหนักจากการก่อสร้าง เพราะการหาค่าที่เหมาะสมและผลสะท้อนของมันในการออกแบบจะนำไปสู่การใช้งานที่เข้าใจได้ง่ายของชิ้นส่วนและการปฏิบัติงานที่มีประสิทธิภาพ

1. แรงผลักดันของแม่แรงกดหัวชุดเจาะอุโมงค์ (Shield jacks) เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของอุโมงค์ในขณะที่หัวชุดเจาะอุโมงค์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

2. แรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) เมื่อทำการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) โดยการฉีดเข้าไปที่ช่องว่างในส่วนท้ายแรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูนจะกระทำเป็นน้ำหนักเพียงชั่วคราวบริเวณรอบๆ รูที่อัดฉีดน้ำปูน

3. น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง ใช้ออกแบบตะขอยึดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ต้องศึกษาอิทธิพลของตะขอยึดแต่ละชิ้นส่วนขณะประกอบชิ้นส่วนเป็นวงแหวน

4. อื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา น้ำหนักจากการก่อสร้างอื่นๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ของ Backup carriage น้ำหนักที่กำหนดโดยประเภทของหัวชุดเจาะอุโมงค์ ฯลฯ

7.2.8 น้ำหนักภายใน

น้ำหนักภายในคือน้ำหนักที่กระทำด้านในผนังอุโมงค์หลังจากอุโมงค์เสร็จแล้ว และกำหนดตามสภาพความเป็นจริง

น้ำหนักภายในจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ ความปลอดภัยของโครงสร้างของผนังอุโมงค์จะต้องรองรับน้ำหนักประเภทนี้ด้วย

การศึกษาถึงน้ำหนักนี้โดยปกติจะละเว้น นอกจากอุโมงค์จะอยู่ในชั้นดินที่อ่อนมากอย่างไรก็ตามน้ำหนักภายในจะถูกพิจารณาถึงอิทธิพลต่อกำลังและการเปลี่ยนรูปของอุโมงค์

สำหรับอุโมงค์ที่ภายในจะมีแรงดันน้ำ ต้องการการเลือกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมรวมถึง ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) และนำสิ่งที่จำเป็นมาศึกษา แล้วนำไปรวมกับน้ำหนักอื่นที่ใช้ออกแบบ ในการศึกษานี้ แรงดันดินและแรงดันน้ำที่กระทำต่ออุโมงค์ควรจะมีผลระบับในการกำหนดและการรับรองความปลอดภัยของอุโมงค์

7.2.9 ผลกระทบจากแผ่นดินไหว

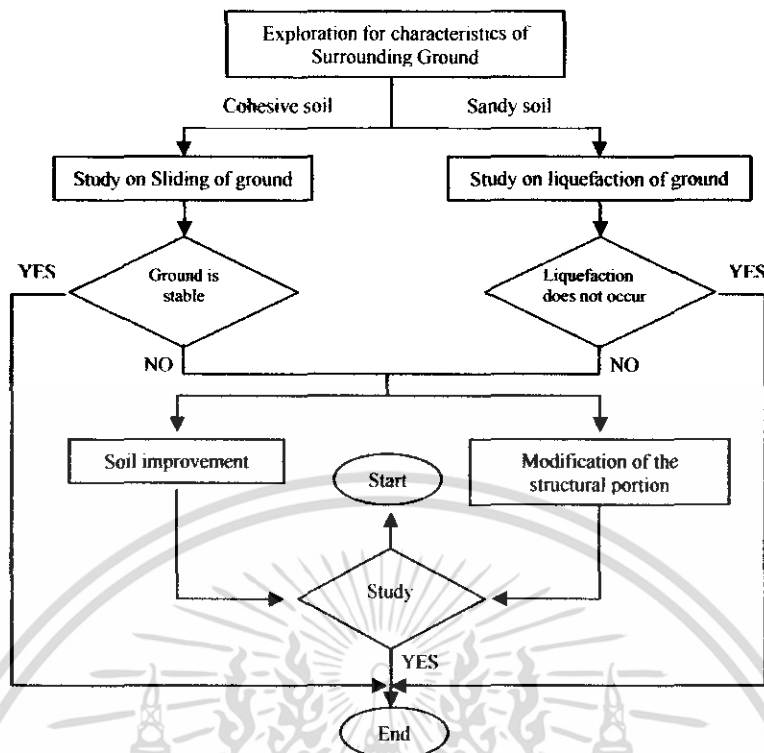
เมื่อคาดว่าจะเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหวควรศึกษาตามความสำคัญของอุโมงค์ และพิจารณาถึงสภาพที่ตั้งของอุโมงค์ สภาพโดยรอบของชั้นดิน การเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น รายละเอียดโครงสร้างของอุโมงค์และสภาพอื่นๆ ที่จำเป็น

เมื่อนำหน้าของอุโมงค์เปรียบเทียบกับดินที่อุโมงค์อยู่นั้นอุโมงค์เบาว่า เพราะฉะนั้นเมื่อแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวกระทำต่ออุโมงค์ แรงเฉื่อยของอุโมงค์จะมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินโดยรอบ ผลที่ตามมาคือ อุโมงค์จะสั่นเหวี่ยงจะเหมือนกับชั้นดิน ถ้าดินเหนืออุโมงค์มากกว่าความลึกที่แน่นอน เพราะฉะนั้นผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะน้อยเมื่อเทียบกับอุโมงค์และความหนาของดินเหนืออุโมงค์ และในดินที่มีความสม่ำเสมอ เปรียบเทียบกับอุโมงค์ที่สร้างโดยวิธีอื่น เช่น วิธีขุดและปิดหน้าดิน(Cut & Cover) อุโมงค์ที่ใช้หุ้มเจาะอุโมงค์จะเคลื่อนไหวไปกับชั้นดินได้มากกว่า เพราะความแข็งแกร่งของอุโมงค์มีน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่ออุโมงค์ที่อยู่ในสภาพดังต่อไปนี้ ควรจะทำการศึกษาเพราะผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะมีมาก

1. บริเวณที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงทันที เช่น จุดเชื่อมต่อระหว่างอุโมงค์ใต้ดินกับปล่องแนวตั้ง (Shaft)
2. เมื่ออุโมงค์อยู่ในชั้นดินอ่อน
3. เมื่อสภาพชั้นดินทางธรณีวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงความลึกของหินดินดานอย่างทันทีทันใด
4. เมื่อการวางตัวของอุโมงค์เป็นโค้ง Sharp curve
5. เมื่ออุโมงค์อยู่ในชั้นทรายที่หลวม

โดยปกติการศึกษาเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่มีผลต่ออุโมงค์จะทำ 3 สิ่งคือ

1. ความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ
2. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางขวาง
3. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางยาว



รูปที่ 7.2 แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดิน โดยรอบ

7.2.10 ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง

เมื่อสร้างอุโมงค์ขนานกับอุโมงค์ที่มีอยู่ สภาพชั้นดินโดยรอบ ตำแหน่งของอุโมงค์จะสัมพันธ์กัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและวิธีการก่อสร้างก็ควรจะต้องนำมาพิจารณา ถ้าจำเป็นต้องพิจารณาว่า อุโมงค์มีปฏิกิริยาอย่างไรต่ออุโมงค์อื่นและผลกระทบซึ่งกันและกันขณะที่ทำการก่อสร้าง ก็ควรต้องพิจารณาด้วย

การสร้างอุโมงค์ 2 อุโมงค์หรือมากกว่า อุโมงค์ควรจะต้องขนานกันและใกล้ๆกันในแนวราบหรือตามแนวยาวสำหรับความยาวที่แน่นอน ความหลวมของดินมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาของอุโมงค์และผลกระทบจากการก่อสร้างควรจะต้องนำมาพิจารณา และถ้าจำเป็นก็ต้องมีมาตรการที่เหมาะสม เช่น การเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ หรือเพิ่มมาตรการ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินและการป้องกันการเปลี่ยนรูปของดิน

หัวข้อที่ต้องพิจารณาก่อนก่อสร้างอุโมงค์ขนานมีดังนี้

1. ตำแหน่งของอุโมงค์ที่สัมพันธ์กับอุโมงค์อื่น
2. สภาพของดินรอบอุโมงค์
3. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแต่ละอุโมงค์

4. เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างของอุโมงค์ที่กำลังจะสร้าง
5. ประเภทของห้วยคุเจาะอุโมงค์ ที่ใช้ในการก่อสร้าง
6. น้ำหนักที่เกิดในช่วงเวลาการก่อสร้าง

7.2.11 ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง

เมื่อคาดว่าโครงสร้างอื่นจะถูกสร้างบริเวณใกล้เคียงขณะที่ก่อสร้างหรือหลังจากขุดเจาะอุโมงค์ การประเมินควรจะทำถ้าอาจเกิดผลกระทบที่เลวร้าย

มีหลายกรณีที่อุโมงค์หรือโครงสร้างอื่น สร้างพร้อมกันหรือหลังจากการก่อสร้าง อุโมงค์จะมีผลกระทบจากการที่ดิน โดยรอบถูกรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขณะทำงาน การเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ การป้องกันที่เหมาะสมหรือการปรับปรุงดินอาจจะจำเป็น

ควรทำการเปลี่ยนเงื่อนไขในการคำนวณเมื่อ

1. เมื่อโครงสร้างใหม่จะสร้างเหนืออุโมงค์โดยตรง หรือ ใกล้เคียง สิ่งที่เปลี่ยนคือ น้ำหนักบรรทุกเหนือผิวดิน
2. เมื่อดินเหนือหรือใต้อุโมงค์โดยตรงถูกขุด สิ่งที่เปลี่ยนคือ เงื่อนไขของแรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบและคุณสมบัติของดิน เช่น ค่าคงที่ของแรงต้านทานของดิน
3. เมื่อดินด้านข้างของอุโมงค์ถูกรบกวน สิ่งที่เปลี่ยนคือ แรงดันดินหรือแรงต้านทานด้านข้าง
4. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของแรงดันน้ำ

7.2.12 ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน

ผลกระทบจากการทรุดตัวควรทดสอบเมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน

เมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน ต้องสนใจว่าดินมีคุณสมบัติอย่างไร หลังจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งส่งผลต่อการทรุดตัวของดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์และจุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวดิ่ง (Shaft)

ก. อุโมงค์

ผลกระทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์สามารถศึกษาได้ 2 ทางคือ

1. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวของอุโมงค์ในทางขวาง
2. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวไม่เท่ากันของอุโมงค์ในทางยาว

ข. จุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวตั้ง (Shaft)

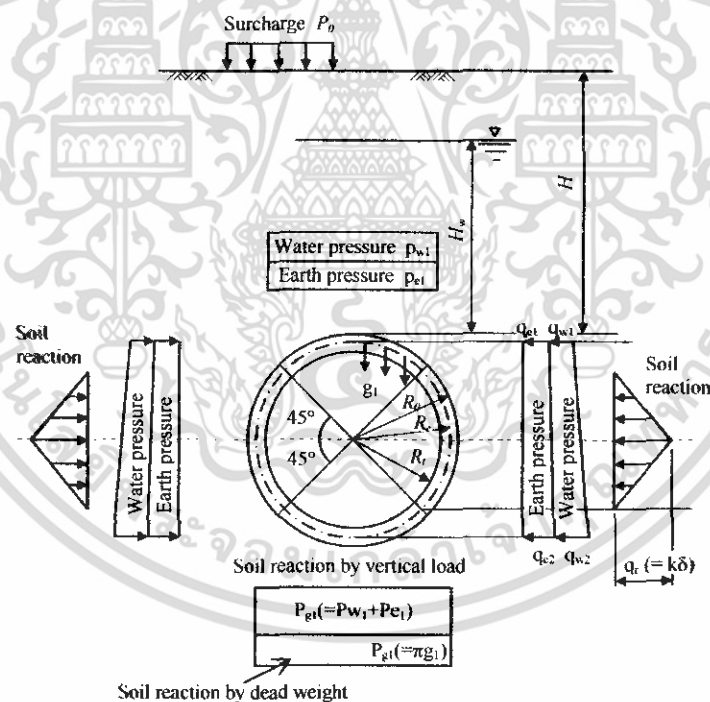
แนวโน้มความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปรากฏที่จุดต่อของอุโมงค์กับปล่องแนวตั้ง (Shaft) เพราะความแตกต่างของโครงสร้างจะเชื่อมต่อที่ตำแหน่งนี้เพราะฉะนั้นจะป้องกันการเกิดความเค้นโดยใช้จุดต่อที่ยืดหยุ่น ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากการทรุดตัวไม่กันจากรากของปล่องแนวตั้ง (Shaft)

7.2.13 น้ำหนักอื่นๆ

ก่อนการทดสอบควรพิจารณาถึงผลกระทบของน้ำหนักอื่นๆที่อาจเป็นไปได้ในการออกแบบผนังอุโมงค์

7.2.14 การคำนวณองค์ประกอบแรงของ JSCE

รูปที่ 7.3 จะแสดงหน่วยแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์จากข้างดิน ซึ่งจะทำให้การคำนวณแยกเป็นส่วนต่างๆ แล้วนำแรงกระทำภายนอกทั้งหมดมาคำนวณ ซึ่งแรงภายนอกทั้งหมดแบ่งได้ ดังนี้



รูปที่ 7.3 แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี JSCE

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง ($P = P_{e1} + P_{w1}$)

$$M_1 = \frac{1}{4}(1 - 2\sin^2 \theta)P \cdot R_c^2 \quad (7.1.)$$

$$N_1 = \sin^2 \theta \cdot P \cdot R_c \quad (7.2.)$$

$$Q_1 = -P \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (7.3.)$$

เมื่อ M_1 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง
 N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง
 Q_1 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวตั้ง

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน ($Q = q_{e1} + q_{w1}$)

$$M_2 = \frac{1}{4}(1 - 2\cos^2 \theta)Q \cdot R_c^2 \quad (7.4.)$$

$$N_2 = \cos^2 \theta \cdot Q \cdot R_c \quad (7.5.)$$

$$Q_2 = Q \cdot R_c \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (7.6.)$$

เมื่อ M_2 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน
 N_2 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน
 Q_2 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยม ($Q' = q_{e2} + q_{w2}$)

$$M_3 = \frac{1}{48}(6 - 3\cos \theta - 12\cos^2 \theta + 4\cos^3 \theta)(Q - Q')R_c^2 \quad (7.7.)$$

$$N_3 = \frac{1}{16}(\cos \theta + 8\cos^2 \theta - 4\cos^3 \theta)(Q - Q')R_c \quad (7.8.)$$

$$Q_3 = \frac{1}{16}(\sin \theta + 8\sin \theta \cos \theta - 4\sin \theta \cos^2 \theta)(Q - Q') \cdot R_c \quad (7.9.)$$

เมื่อ M_3 = โมเมนต์คัตที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน
 N_3 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน
 Q_3 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน ($k\delta$)

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{4} \quad M_4 = (0.2346 - 0.3536\cos \theta)(k\delta)R_c^2 \quad (7.10.)$$

$$N_4 = (0.3536\cos \theta)(k\delta)R_c \quad (7.11.)$$

$$Q_4 = 0.3536\sin \theta \cdot (k\delta)R_c \quad (7.12.)$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_4 = (-0.3487 + 0.5 \sin^2 \theta + 0.2357 \cos^3 \theta)(k\delta)R_c^2 \quad (7.13.)$$

$$N_4 = (-0.7071 \cos \theta + \cos^2 \theta + 0.7071 \sin^2 \theta \cos \theta)(k\delta)R_c \quad (7.14.)$$

$$Q_4 = (\sin \theta \cos \theta - 0.7071 \cos^2 \theta \sin \theta)(k\delta)R_c \quad (7.15.)$$

เมื่อ M_4 = โมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน
 N_4 = แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน
 Q_4 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^2}{24(\eta E_c I + 0.045 k R_c^4)} \quad (7.16.)$$

เมื่อ δ = การเสียรูปทางด้านข้างจากแรงดันดินและน้ำ
 η = สัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ $\eta = 1$
 E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (kN/m^2)
 I = โมเมนต์เฉื่อยของคอนกรีต (m^4)
 k = Subgrade reaction factor (ดังตารางที่ 7.4.)

ตารางที่ 7.4. แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	$k(kg/cm^3/cm)$
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

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ ($g = \gamma_c l$)

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M_5 = \left(\frac{3}{8} \pi - \theta \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c^2 \quad (7.17.)$$

$$N_5 = \left(\theta \sin \theta - \frac{1}{6} \cos \theta \right) g \cdot R_c \quad (7.18.)$$

$$Q_5 = -\left(\theta \cos \theta + \frac{1}{6} \sin \theta\right) g \cdot R_c \quad (7.19.)$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$$

$$M_5 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta) \sin \theta - \frac{5}{6} \cos \theta - \frac{1}{2} \pi \sin^2 \theta\right) g \cdot R_c^2 \quad (7.20.)$$

$$N_5 = \left(-\pi \sin \theta + \theta \sin \theta + \pi \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cos \theta\right) g \cdot R_c \quad (7.21.)$$

$$Q_5 = \left\{(\pi - \theta) \cos \theta - \pi \sin \theta \cos \theta - \frac{1}{6} \sin \theta\right\} g \cdot R_c \quad (7.22.)$$

เมื่อ M_5 = โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

N_5 = แรงภายในที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

Q_5 = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

ดังนั้นแรงกระทำทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดังนี้

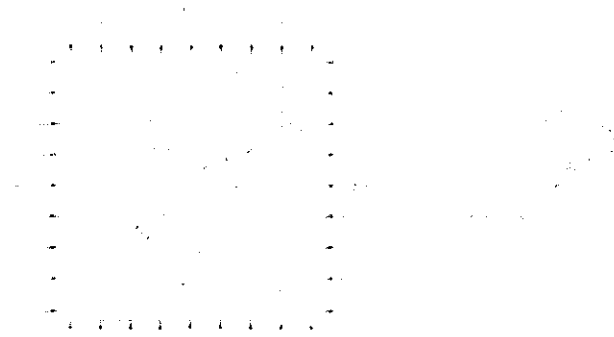
$$\text{แรงในแนวแกนทั้งหมด (Total axial forces)} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 \quad (7.23.)$$

$$\text{แรงโมเมนต์คัตทั้งหมด (Total moment)} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 \quad (7.24.)$$

$$\text{แรงเฉือนทั้งหมด (Total shear forces)} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (7.25.)$$

7.3 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

วิธีนี้จะใช้หลักการของทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์ จะสามารถหาค่าการเสียรูปและแรงที่เกิดขึ้นภายในผนังอุโมงค์โดยมีสมมติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัดและเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังรูปที่ 7.4 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ ได้สูตรนำมาใช้เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและโมเมนต์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ดังสมการที่ 7.25 และ 7.26



รูปที่ 7.4 แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein, 1979)

Compressibility ratio (C^*) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำแบบสมมาตรและสม่ำเสมอ หาค่าได้ดังนี้

$$C^* = \frac{ER(1-\nu_s^2)}{E_s A_s (1-\nu^2)} \quad (7.26.)$$

Flexibility ratio (F^*) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำแบบไม่สมมาตร หาค่าได้ดังนี้

$$F^* = \frac{ER^3(1-\nu_s^2)}{E_s I_s (1-\nu^2)} \quad (7.27.)$$

$$a_0^* = \frac{C^* F^* (1-\nu)}{C^* + F^* + C^* F^* (1-\nu)} \quad (7.28.)$$

$$a_2^* = \frac{(F^* + 6)(1-\nu)}{2F^* (1-\nu) + 6(5-6\nu)} \quad (7.29.)$$

เมื่อ a_0^* และ a_2^* เท่ากับค่าคงที่ได้จากความสัมพันธ์ Stress-displacement

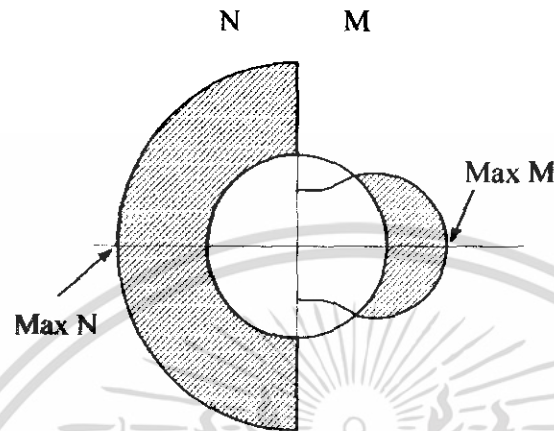
การหาแรงกระทำภายใน

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2}(1+K)(1-a_0^*) + \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \quad (7.30.)$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \quad (7.31.)$$

7.4 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Erdmann

สมมติฐานว่าดินรอบอุโมงค์เป็นเนื้อเดียวกัน โดยแรงภายในแนวแกนและโมเมนต์คัตจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง Spring line ดังรูป



รูปที่ 7.5 แสดงการกระจายแรงภายในแนวแกนและโมเมนต์คัตมากที่สุด

การคำนวณโมเมนต์คัตสามารถหาโมเมนต์คัตสูงสุด (Max-M) ได้ดังสมการ

$$M = \sigma_r (1 - K_0) R^2 \frac{1}{4 + \frac{(3 - 4\nu)}{3(1 + \nu)(3 - 4\nu)} \times \frac{E_c R^3}{EI}} \quad (7.32.)$$

การคำนวณแรงดันเนื้ออุโมงค์ (N_0) สามารถหาได้จากสมการ

$$N_0 = \sigma_r (1 + K_0) R \frac{1}{2 + (1 - K_0) \frac{2(1 - \nu)}{3(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \times \frac{E_c R}{EA}} \quad (7.33.)$$

การคำนวณแรงในแนวแกนสูงสุด $\text{Max}(N - N_0)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$N - N_0 = \sigma_r (1 + K_0) R \frac{1}{2 + \frac{4\nu(E_c R^3 / EI)}{(3 - 4\nu)(12(1 + \nu) + E_c R^3 / EI)}} \quad (7.34.)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (kN/m^2)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (kN/m^2)

ν = Poisson's ratio ของดิน

7.5 ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

วิธีนี้มีพื้นฐานอยู่บนข้อสมมติฐานว่าผนังอุโมงค์รูปวงกลมจะเกิดการเสียรูปเป็นรูปวงรีใน Elastic ground และไม่คิดค่าความเค้นเฉือนระหว่างผนังอุโมงค์กับดิน โดยที่สมมติให้อุโมงค์ถูกล้อมรอบด้วย Elastic ground แบบสมบูรณ์ โดยค่าโมเมนต์คัตสูงสุดใผนังอุโมงค์จะเป็นดังนี้

$$P_V = P_{e1} + P_{w1} \quad (7.35.)$$

$$P_H = K_0(P_{e1} + \gamma D) + P_{w2} \quad (7.36.)$$

$$P_o = P_V - P_H \quad (7.37.)$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (P_V + P_H) \quad (7.38.)$$

$$Q_2 = \frac{E \times R_o^3}{E_c(1+\nu) \cdot 12 \cdot I} \quad (7.39.)$$

$$S_T = \frac{P_o \times (1 + 2Q_2)}{2 \times \left(1 + \frac{Q_2 \cdot (3 - 2\nu)}{3 - 4\nu}\right)} \quad (7.40.)$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4\nu) \times \frac{P_o}{2} - (2 \cdot Q_2 + (4 - 6\nu)) \times S_T \quad (7.41.)$$

$$S_{N2} = 4 \cdot Q_2 + 5 - 6\nu \quad (7.42.)$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} \quad (7.43.)$$

$$Q = \frac{E_c \times R_o}{E(1+\nu) \cdot (R_o - R_i)} \quad (7.44.)$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1 + Q} \quad (7.45.)$$

แรงภายในที่เกิดจากแรง P_o

$$M_1 = \frac{R_o^2}{6} (2S_N + S_T) \cos 2\theta \quad (7.46.)$$

$$N_1 = -\frac{R_o}{3} (S_N + 2S_T) \cos 2\theta \quad (7.47.)$$

$$S_1 = -\frac{R_o}{3} (2S_N + S_T) \sin 2\theta \quad (7.48.)$$

แรงภายในที่เกิดจากแรง P_{BAR}

$$N_2 = \Delta P \times R_o \quad (7.49.)$$

$$\text{แรงโมเมนต์คัตทั้งหมด (Total Moment)} = M_1 \quad (7.50.)$$

$$\text{แรงในแนวแกนทั้งหมด(Total axial forces)} = N_1 + N_2 \quad (7.51.)$$

$$\text{แรงเฉือนทั้งหมด(Total shear forces)} = S_1 \quad (7.52.)$$

- ซึ่ง
- K_O = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง
 - R_O = รัศมีถึงผิวด้านนอกของอุโมงค์
 - R_I = รัศมีถึงแนวแกนกลางของอุโมงค์
 - E_C = Young's modulus ของอุโมงค์
 - E = Young's modulus ของดินหรือหิน
 - I = Moment of inertia ของอุโมงค์ต่อหน่วยความยาวของอุโมงค์
 - ν = Poisson's ratio สำหรับดิน

7.6 ทฤษฎีหาแรงกระทำภายในโดยวิธี Beam-spring model

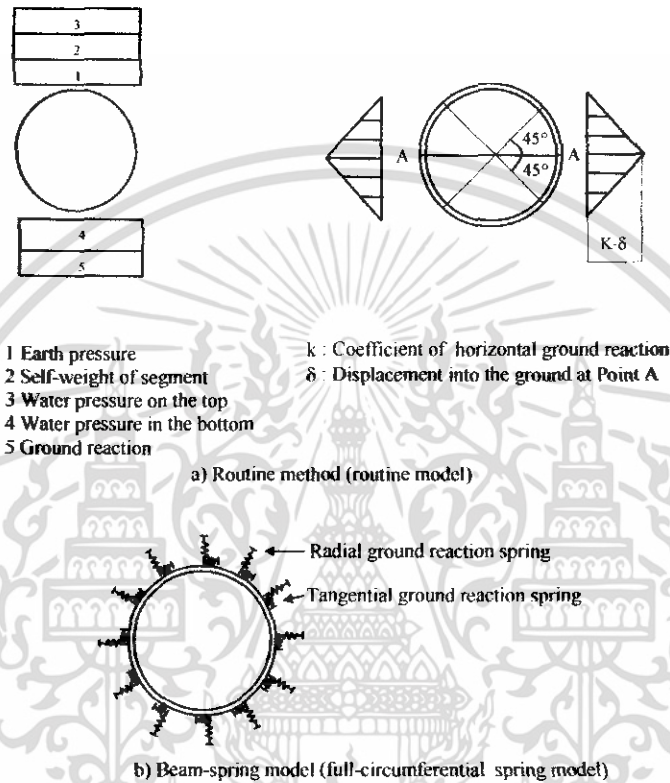
การออกแบบผนังอุโมงค์ที่ขุดเจาะโดยหัวเจาะอุโมงค์โดยทฤษฎีต่างๆ นั้น จะใช้วิธีการคิดคำนวณอย่างง่ายในการคำนวณหาค่าแรงดันดิน (Earth pressure) แรงดันน้ำ (Water pressure) และแรงปฏิกิริยาจากดิน (Ground reaction) โดยไม่พิจารณาค่าของตัวเชื่อมยึด (Joint) หรือสลักเกลียวที่เชื่อมยึดระหว่างวงแหวนผนังอุโมงค์ด้วย ดังนั้นผลของการคำนวณจึงไม่ตรงกับค่าความเป็นจริง ทำให้ค่าความปลอดภัยที่ได้นั้นอาจไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อไปได้

สำหรับวิธี Beam-spring model นี้เหมาะจะใช้สำหรับการคำนวณแรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่อย่าง เช่น อุโมงค์รถไฟ โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. เข้าใจสถานะที่แท้จริงของแรงดันดิน แรงดันน้ำและแรงปฏิกิริยาจากดิน ที่กระทำต่อชิ้นส่วนผนังอุโมงค์
2. สร้างแบบจำลองที่ถูกต้องสำหรับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่มีตัวเชื่อมยึด
3. เสนอแนวคิดใหม่สำหรับตำแหน่งของแรงที่กระทำ

7.6.1 แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง

เนื่องจากตัวเชื่อมยึดระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ คือ สลักเกลียว (Bolt) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ลดลงในตัวเชื่อมยึดจะนำมาออกแบบแบบจำลองโดยใช้ Rotation spring สำหรับการเชื่อมยึดเข้ากับวงแหวนข้างเคียง และ Shear spring จะถูกสมมติขึ้นมาใช้ในแบบจำลอง



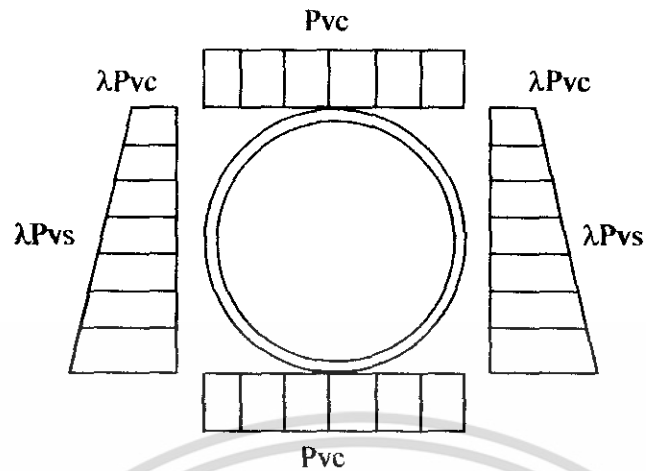
รูปที่ 7.6 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ โดยวิธีทั่วไปและวิธี Beam-spring model

วิธี Beam-spring model นี้จะสมมติให้ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่สมบูรณ์เป็นคาน ตัวเชื่อมยึดรอบวงแหวนเป็น Rotation spring และตัวเชื่อมยึดตามแนวยาวเป็น Shear spring โดยค่าคงที่ของ Rotation spring และ Shear spring นั้นหาค่าได้จากสมการการคำนวณซึ่งได้ผลเหมือนกันกับการทดลอง

7.6.2 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ

ดินทราย	ดินและน้ำ พิจารณาแยกกัน
ดินเหนียว	ดินและน้ำ พิจารณารวมกัน

7.6.3 แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้าง



รูปที่ 7.7 แสดงแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-spring model

แรงดันดินแนวดิ่งถูกสมมติให้เป็นแรงกระจายที่กระทำทั้งด้านบนและด้านล่างของวงแหวน โดยมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกทุกของดินที่กระทำต่ออุโมงค์ (Overburden pressure) หรือ ค่า Loosening earth pressure ค่าตัวแปรความแข็งแรงที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่า Loosening earth pressure นั้น ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 7.5)

ตารางที่ 7.5 แสดงค่าตัวแปรความแข็งแรงที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่า Loosening earth pressure
โดยวิธี Beam-spring model

Kind of earth		Internal friction angle(ϕ : °)		Cohesion(c : kn/m^3)	
		Evaluation through the triaxial test	Evaluation with the N value only	Evaluation through the triaxial test	Evaluation with the N value only
Sandy soil	$15 < N$	Safe value to be determined by taking the number of data and variation into account	$\phi = 0.9(0.3 N + 27)$	$C = 0.5 C_{\text{test}}$	0
	$10 < N \leq 15$		0		0
	$0 < N \leq 10$	Total overburden pressure (not the loosening earth pressure) to be used as earth pressures		Total overburden pressure (not the loosening earth pressure) to be used as earth pressures	
Clayey soil	$8 < N$	0	0	$C = 0.5 C_{\text{test}}$	$C = 0.5(100N/16)$
	$4 < N \leq 8$	0	0		0
	$0 < N \leq 4$	Total overburden pressure (not the loosening earth pressure) to be used as earth pressures		Total overburden pressure (not the loosening earth pressure) to be used as earth pressures	

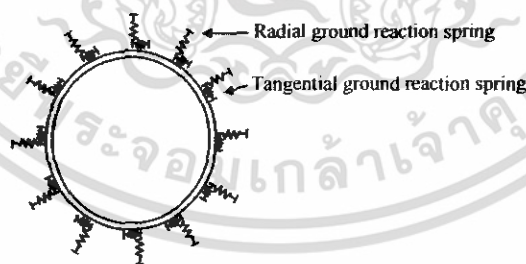
สำหรับแรงกระทำทางข้างนั้น แรงกระจายจะแปรผันไปตามแรงดันเช่นกัน โดยค่าแรงกระทำทางข้างนั้นหาได้จากแรงดันแนวลิ่งที่กระทำต่อด้านบนของอุโมงค์คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางข้างดังที่แสดงในตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 แสดงค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างระหว่างวิธีทั่วไปกับวิธี
Beam-spring model

Evaluation of the Soil quality		N value guideline	Routine method		Beam-spring mode	
			Coefficient of lateral earth pressure	Concept of soil/water	Coefficient of lateral earth pressure	Concept of soil/water
Sandy soil	Very dense	$30 \leq N$	0.35 to 0.45	Soil/water separated	0.45	Soil/water separated
	Dense	$15 \leq N < 30$	0.45 to 0.55		0.45 to 0.50	
	Loose	$N < 15$	0.50 to 0.60		0.50 to 0.60	
Clayey soil	Hard	$28 \leq N$	0.35 to 0.45	Soil/water integrated	—	Soil/water integrated
	Stiff	$8 \leq N < 25$	0.45 to 0.55		0.40 to 0.50	
	Medium stiff	$4 \leq N < 8$	0.45 to 0.55		0.50 to 0.60	
	Soft	$2 \leq N < 4$	0.55 to 0.65		0.60 to 0.70	
	Very soft	$N < 2$	0.65 to 0.75		0.70 to 0.80	

จากการคำนวณวิธีนี้จะทำให้ค่าแรงดันดินทางข้างที่ได้มีค่าน้อยกว่าการคำนวณแบบปกติ โดยแรงดันดินทางข้างมีพื้นที่น้อยกว่า

(1.) ปฏิกริยาของดิน



รูปที่ 7.8 แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนววง

แรงปฏิกริยาจากดินจะถูกสมมติให้เป็นระบบสปริงที่กระทำโดยรอบแนวรัศมีและเส้นวงแหวนของอุโมงค์ โดยสมมติฐานนี้ค่าแรงปฏิกริยาของดินจะมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์แรงปฏิกริยาของดินคูณกับค่าการแทนที่ โดยนิยมใช้สปริงในแนวรัศมีมาพิจารณาออกแบบ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกิริยาจากดินในแนวรัศมี (k_r) ในวิธี Beam-spring model จะหาค่าได้จากสมการของ Muir Wood ดังนี้

$$k_r = \frac{3E_o}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c} \quad (7.53.)$$

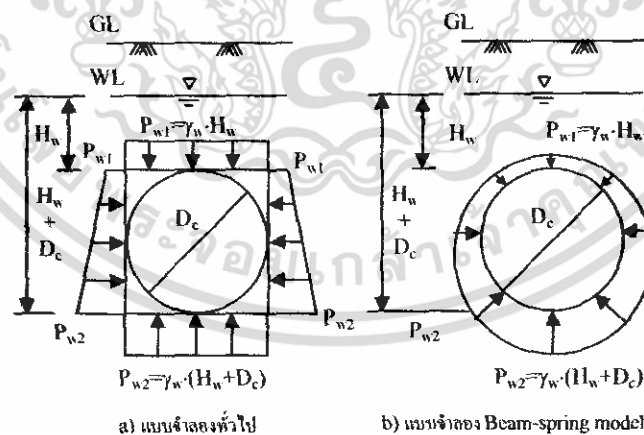
ค่า " $k_r \times R_c$ " จากสมการของ Muir Wood นั้นแสดงในตารางที่ 7.3.

ตารางที่ 7.7 แสดงสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง คูณกับรัศมีของอุโมงค์ในแบบจำลอง Beam-spring model (N/mm^2)

		During curing of grouting	After curing of grouting	N value guideline
Sandy soil and clayey soil	Very dense	35 to 47	55 to 90	$30 \leq N < 50$
	Dense	21.5 to 35	28 to 55	$15 \leq N < 30$
	Medium dense, loose	to 21.5	to 28	$N < 15$
	Hard	31.5 to	46 to	$25 \leq N$
	Stiff	13 to 31.5	15 to 46	$8 \leq N < 25$
	Medium stiff	7 to 13	7.5 to 15	$4 \leq N < 8$
	Soft	3.5 to 7	3.8 to 7.5	$2 \leq N < 4$
	Very soft	To 3.5	to 3.8	$N < 2$

(2.) แรงดันน้ำ

พิจารณาให้การเปลี่ยนตามความลึกของแรงดันน้ำใต้ดินมีค่าที่กระทำต่อศูนย์กลางของอุโมงค์จากตำแหน่งใดๆ ที่ถูกสมมติ รูป 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-spring model

(3.) น้ำหนักของตัวอุโมงค์

แรงปฏิกิริยาของดินที่เกิดจากน้ำหนักคงที่จะถูกสมมติให้เป็นแรงปฏิกิริยาแบบกระจายในแนวตั้งที่สมดุล ในทางตรงกันข้าม Beam-spring model นี้ แรงปฏิกิริยาจากดินจะถูกสมมติให้สอดคล้องกับการแทนที่ของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ภายในดิน

7.6.4 แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้ออกแบบในวิธี Beam-spring model

ก่อนที่จะมีการใช้วิธีออกแบบใหม่นี้ ได้มีการทดสอบภาคสนาม การวิจัยและการวิเคราะห์ มาก่อนหน้า โดยใช้วิธีลองผิดลองถูกทดสอบแนวคิดทั้งแรงดันดินแนวตั้ง แรงดันน้ำ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางข้าง (λ) จะมีผลต่อค่าแรงที่เกิดขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์ของดินดินทางข้าง λ นี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของ $+M_{max}$ หลังจากที่ทำการศึกษาทดลองซ้ำแล้วซ้ำอีก

สังเกตได้ว่า ในชั้นดินเหนียวอ่อน การคำนวณ $+M_{max}$ จะกลายเป็นค่าที่น้อยสำหรับแรงดันดินในแนวตั้ง (รวมถึงน้ำหนักดินบรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์) ที่ความลึกแน่นอนเมื่อสัมประสิทธิ์แรงดันดินทางข้างเป็นค่าคงที่ ผลจากการทดสอบภาคสนามแสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันดินแนวตั้งเป็น 70-80% ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์

ตารางที่ 7.8 แสดงการคำนวณแรงโมเมนต์บวกสูงสุด $+M_{max}$ ในหน้าตัดอุโมงค์ โดยเปรียบเทียบวิธีการออกแบบทั่วไปกับวิธี Beam-spring model

Site	Ground around tunnel	N value	Tunnel outside diameter (m)	Coefficient of ground reaction $k(kN/m^2)$		Coefficient of lateral pressure (λ)		Soil/water pressure		Vertical earth pressure for design		$+M_{max}$ (kN-m)		$+M_{max}$ ratio New/Routine
				Routine	New	Routine	New	Routine	New	Routine	New	Routine	New	
1	Ae	2	7.2	0	1000	0.65	0.7	Separated	Separated	Total overburden	Total overburden	178.6	183.6	1.03
2	Ae	0 to 3	7.0	0	1000	0.75	0.75	Integrated	Integrated	Total overburden	Total overburden	185.1	190.6	1.03
3	Ae	15	5.3	10000	8100	0.55	0.45	Separated	Separated	Total overburden	Separated	73.4	53.4	0.73
4	Dc	20	7.0	10000	7400	0.55	0.45	Separated	Separated	Total overburden	Separated	100.9	71.8	0.71
5	Ds	30	7.0	30000	10000	0.45	0.45	Separated	Separated	Total overburden	Separated	125.2	121.4	0.97
6	Ds	50	5.3	50000	18600	0.35	0.45	Separated	Separated	Separated	Separated	54.7	28.3	0.52
7	Ds	7 to 50	5.4	30000	12000	0.45	0.45	Separated	Separated	Loosening	Separated	88.6	59.8	0.67

7.7 ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม

7.7.1 กล่าวนำ

เนื่องด้วยผนังอุโมงค์ใต้ดินจะต้องรับแรงที่มากกระทำภายในผนังอุโมงค์ใต้ดิน อันได้แก่ โมเมนต์ดัด (Bending moment) แรงตามแนวแกน (Axial force) และแรงเฉือน (Shear force) ดังรูป 7.10 ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นทั้งสามนี้จะส่งผลให้ต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมในผนังอุโมงค์ใต้ดิน เพื่อที่จะทำให้ผนังอุโมงค์ใต้ดินสามารถรับแรงต่างๆ ได้โดยไม่เกิดความเสียหายโดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตามวิธีกำลัง



รูปที่ 7.10. แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

7.7.2 พื้นฐานการออกแบบ

วิธีการออกแบบเหล็กเสริมที่ผู้เขียนได้นำเสนอมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการออกแบบเสาต้น และวิธีการออกแบบคาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.7.2.1 วิธีการออกแบบเสาต้นโดยวิธีกำลัง

วิธีนี้จะออกแบบโดยแรงดัด M_n และแรงตามแนวแกน P_n ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสองข้อ คือ ความสมดุลของแรงภายในและการสอดคล้องของความเครียด รูปที่ 7.11 แสดงภาวะทั่วไปของหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม ภายใต้ผลรวมของแรงดัดและแรงตามแนวแกน จะหาแรงดึงหรือแรงอัดในเหล็กเสริมได้จากความสัมพันธ์กับความเครียด ณ ตำแหน่งของเหล็กเสริมนั้น

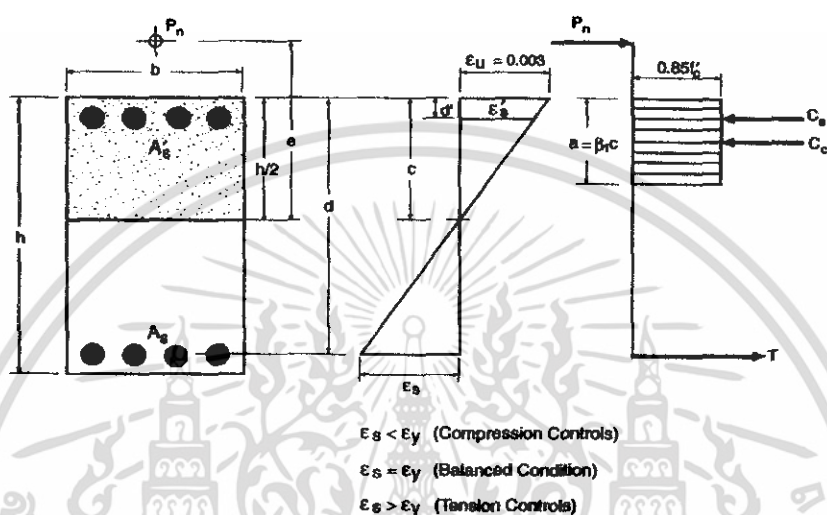
$$T = A_s f_s = A_s (E_s \epsilon_s) \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s < \epsilon_y \quad (7.54a.)$$

$$\text{หรือ } T = A_s f_y \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s \geq \epsilon_y \quad (7.54b.)$$

$$C_s = A_s' f_s' = A_s' (E_s \epsilon_s') \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s' < \epsilon_y \quad (7.55a.)$$

$$\text{หรือ } C_s = A_s' f_y \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s' \geq \epsilon_y \quad (7.55b.)$$

$$C_c = 0.85 f_c' b a \quad (7.56.)$$



รูปที่ 7.11 การกระจายความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัด

ภายใต้ผลรวมของแรงคัดและแรงตามแกน

$$\text{โดยที่ } f_s' = \frac{6120(c-d')}{c} \leq f_y \quad (7.57.)$$

$$f_s = \frac{6120(c-d')}{c} \leq f_y \quad (7.58.)$$

และจะหาค่าลัษณะในการรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ (P_n และ M_n) ได้จากสมภาวะสมดุลของหน้าตัด

จากความสมดุลของแรงจะได้

$$P_n = C_c + C_s + T \quad (7.59.)$$

จากความสมดุลของโมเมนต์รอบศูนย์ถ่วงของหน้าตัด

$$M_n = P_n e = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (7.60.)$$

ถ้ารู้สถานะของความเครียดก็จะหา P_n และ M_n ได้ทันที ยกตัวอย่าง เช่นในกรณี
ของสถานะความเครียดสมดุล เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก ($\epsilon_s = \epsilon_y$) พร้อมกับความเครียด
ในผิวคอนกรีตภายใต้แรงอัดถึงจุดอัดแตก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{2040000}} = \frac{6120}{6120 + f_y} \quad (7.61.)$$

$$\text{ดังนั้น } a_b = \frac{6120}{6120 + f_y} \beta_1 d \quad (7.62.)$$

$$\text{และ } \frac{\epsilon_s'}{\epsilon_u} = \frac{c_b - d'}{c_b} \quad (7.63.)$$

$$\text{ดังนั้น } \epsilon_s' = 0.003 \left(1 - \frac{d'}{c_b} \right) = 0.003 \left(1 - \frac{d'}{d} \frac{6120 + f_y}{6120} \right) \quad (7.64.)$$

$$\text{และ } f_s' = E \epsilon_s' \quad \text{แต่ต้องไม่เกิน } f_y \quad (7.65.)$$

จากความสัมพันธ์ของแรง

$$P_{nb} = 0.85 f_c' a_b b + A_s' f_s' + A_s f_y \quad (7.66a.)$$

ถ้า $f_s' = f_y$ และ $A_s' = A_s$ จะได้

$$P_{nb} = 0.85 \beta_1 f_c' b d \frac{6120}{6120 + f_y} \quad (7.66b.)$$

จากความสัมพันธ์ของโมเมนต์

$$M_n = P_{nb} e_b = 0.85 f_c' b a_b \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (7.67.)$$

กำลังรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและแรงดัด ที่สภาวะความเครียดสมดุล เป็นเพียงแค่กรณีหนึ่งในหลายกรณีที่อาจจะเกิดขึ้นในหน้าตัดซึ่งสามารถแบ่งแยกออกไปได้อีก 2 กรณี คือ กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด และกรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง ดังจะนำเสนอต่อไปนี้

(1.) กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_n) มากกว่าแรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุล (P_{nb}) หรือมีระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) น้อยกว่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่สภาวะสมดุล (e_b) องค์อาคารจะวิบัติโดยการอัดแตกของคอนกรีตในระหว่างที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงจะน้อยกว่าจุดคราก หรืออาจอยู่ภายใต้แรงอัดด้วย การออกแบบและวิเคราะห์ในกรณีนี้ จะใช้การลองผิดลองถูกโดยการสมมติค่าของค่าสัมประสิทธิ์ของแกนสะเทิน (c) ร่วมกับความสัมพันธ์ของความเครียดและสมการสมดุล หรืออาจจะใช้การประมาณโดยวิธีของ Whitney

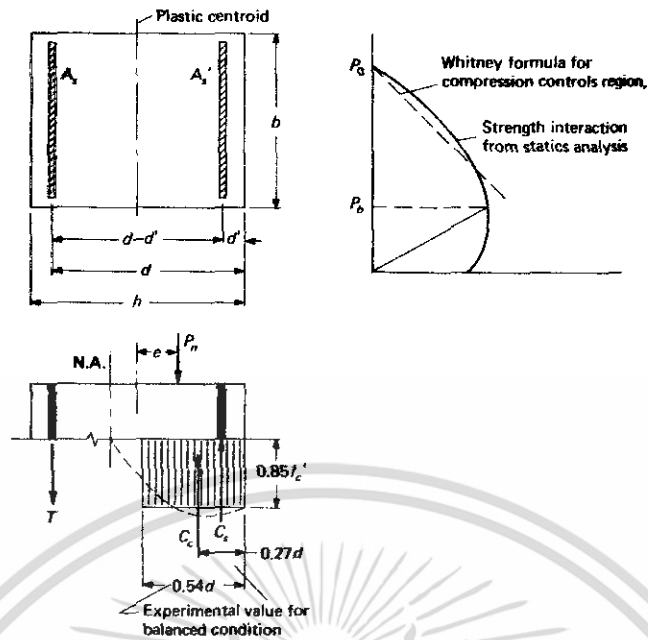
วิธีของ Whitney จะให้ค่าในการออกแบบที่ต่ำกว่าค่าจริงที่ได้จากการลองผิดลองถูก ยกเว้นแต่เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำมีค่าเข้าใกล้แรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุลวิธีของ Whitney จะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีของ Whitney ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยสมมติฐานตามที่แสดงในรูปที่ 7.12 ดังต่อไปนี้

- มีการวางเหล็กเสริมแถวเดียวแบบสมมาตรรอบแกนรับแรงดัด
- เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก
- ไม่คิดพื้นที่ของคอนกรีตซึ่งถูกแทนที่โดยพื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- ความลึกของรูปกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้าเทียบเท่าของหน่วยแรงในคอนกรีต $a = 0.54d$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่สภาวะสมดุลขององค์อาคารรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
- ความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและแรงดัดภายใต้อิทธิพลของแรงอัดถือว่าเป็นเชิงเส้นตรง

จากรูปที่ 7.12 ถ้ารวมโมเมนต์รอบแนวเหล็กเสริมรับแรงดึงจะได้

$$P_n(e + \frac{d-d'}{2}) = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d') \quad (7.68.)$$

$$\text{โดยที่ } C_c = 0.85 f'_c b a = 0.85 f'_c b (0.54d) = 0.459 b d f'_c \quad (7.69a.)$$



รูปที่ 7.12 สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

$$C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.459 f_c' b d \left(d - \frac{0.54d}{2} \right) = \frac{1}{3} f_c' b d^2 \quad (7.69b.)$$

$$C_s = A_s' f_y \quad (7.69c.)$$

แทนค่า สมการ (7.63b.) และ (7.63c.) ลงใน (7.62.) จะได้

$$P_u = \frac{\frac{1}{3} f_c' b d^2}{e + \frac{1}{2} (d - d')} + \frac{A_s' f_y (d - d')}{e + \frac{1}{2} (d - d')} = \frac{\frac{f_c' b h}{3} e}{d^2 + \frac{3(d - d')h}{2d^2}} + \frac{A_s' f_y}{\frac{e}{d - d'} + \frac{1}{2}} \quad (7.69d.)$$

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 (7.63d.) จะได้

$$0.85 f_c' b h + 2 f_y A_s' = \frac{\frac{f_c' b h}{3}}{0 + \frac{3(d - d')h}{2d^2}} + \frac{A_s' f_y}{0 + \frac{1}{2}} \quad (7.69e.)$$

$$\frac{3(d-d')h}{2d^2} = \frac{1}{0.85} = 1.18 \quad (7.69f.)$$

แทนค่าสมการ (7.63c.) ลงใน (7.63d.) จะได้

$$P_n = \frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2} + 1.18} + \frac{A_s'f_y}{\frac{e}{d-d'} + 0.5} \quad (7.70.)$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความชะลูด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s' = \left(P_n - \frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{e}{d-d'} + 0.5}{f_y} \right) \quad (7.71.)$$

จะต้องเสริมเหล็ก A_s' นี้ทั้งสองด้านของแกนสมมาตร ทำให้ได้ปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมด $A_{st} = 2A_s'$

(2.) กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง

เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_n) น้อยกว่าแรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุล (P_{nb}) หรือเมื่อระยะเยื้องศูนย์ (e) มากกว่าระยะเยื้องศูนย์ที่สภาวะสมดุล (e_b) องค์อาคารจะวิบัติโดยเริ่มต้นจากที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก ในระหว่างที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัดจะถึงจุดครากหรือน้อยกว่าก็ได้

การวางเหล็กเสริมให้สมมาตรรอบแกนรับแรงดัด ($A_s' = A_s$) เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป เพื่อรับการกลับทิศทางของแรงในองค์อาคารรับแรงตามแนวแกนและแรงดัด เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวางเหล็กกลับทางในการก่อสร้าง

ถ้าสมมติให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดครากด้วย และใช้ $A_s' = A_s$ จะได้

$$P_n = 0.85 f_c' b a \quad , a = \frac{P_n}{0.85 f_c'} \quad (7.72.)$$

$$\begin{aligned} M_n &= P_n e = 0.85 f_c' b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2} \right) \\ &= 0.85 f_c' b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d') \end{aligned} \quad (7.73.)$$

แทนค่า P_n และ a จากสมการ (7.72.) ลงใน (7.73.)

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{P_n}{1.7 f_c' b} \right) + A_s f_y (d - d') \quad (7.74.)$$

$$\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right) - A_s f_y (d - d') = 0 \quad (7.75.)$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความขะดุด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s = \frac{\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right)}{f_y (d - d')} \quad (7.76.)$$

จะต้องเสริมเหล็ก A_s นี้ทั้งสองด้านของแกนสมมาตร ทำให้ได้ปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมด $A_{st} = 2A_s$

(3.) เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง

แสดงค่า N_u , P_u และ V_u

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \left(1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g} \right) \quad (7.77.)$$

แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริม

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (7.78.)$$

เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม

ระยะเรียงของเหล็กปลอกคือค่าน้อยที่สุดจาก

$$16 \text{ เท่าของเหล็กขึ้น} \quad (7.79a.)$$

$$48 \text{ เท่าของเหล็กปลอก} \quad (7.79b.)$$

$$\text{ด้านแคบของเสา} \quad (7.79c.)$$

$$s = \frac{A_s f_y}{3.5b_w} \quad (7.79d.)$$

7.7.2.2 วิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

ในการออกแบบของอาคารรับแรงดัด เช่น คานและแผ่นพื้น จะต้องลดค่ากำลังระบุของหน้าตัด (Nominal strength, M_n) ลงด้วยตัวคูณลดกำลัง ϕ เพื่อที่จะได้มาซึ่งกำลังที่ใช้ในการออกแบบ (Design strength, ϕM_n) ของอาคารนั้น และกำลังที่ใช้ในการออกแบบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (Required strength, M_u)

ทุกองค์อาคารภายใต้แรงดัดจะต้องถูกปฏิบัติให้เป็นไปตามข้อกำหนดในด้านกำลัง และนอกเหนือจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อกำหนดในด้านการใช้งาน ซึ่งควบคุมการแตกร้าวขององค์อาคาร โดยจะอยู่ในรูปแบบของการจัดวางเหล็กเสริม และที่สำคัญที่สุดก็คือการแอ่นตัวขององค์อาคาร

(1.) การออกแบบหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดัดอย่างเดียว

การออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดัดอย่างเดียวมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าโดยประมาณของอัตราส่วนการเสริมเหล็กรับแรงดึง ρ ซึ่งต้องไม่เกิน $0.75\rho_b$ และไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ ซึ่งอัตราส่วนเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล ρ_b หาได้จากสมการ

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{6120 f_y}{6120 + f_y} \right) \quad (7.80.)$$

โดยที่ $\beta_1 = 0.85 ; f_c' \leq 280 \text{ kg/cm}^2$ (7.81a.)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} ; 280 < f_c' \leq 560 \text{ kg/cm}^2 \quad (7.81b.)$$

$$\beta_1 = 0.65 ; f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2 \quad (7.81c.)$$

2. เมื่อหาค่า ρ ได้แล้ว โดยที่ $\rho_{\min} \leq \rho \leq 0.75\rho_b$

โดยที่ $R_n = \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_c'} \right)$ (7.82.)

3. จากขั้นตอนที่ 2 หาค่าใหม่ของ ρ

โดยที่ $\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0.85 f_c'}} \right)$ (7.83.)

4. หาปริมาณเหล็กเสริม A_s ที่ต้องการ

$$A_s = \rho b d \quad (7.84.)$$

โดยที่ ρ เป็นค่าแก้ไขที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

(2.) เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบกานโดยวิธีกำลัง

- แสดงค่า แรงเฉือนที่กระทำบนหน้าตัดและจุดตัวจุดเพิ่มแล้ว (V_u)
- กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53 f_c' b d \quad (7.85.)$$

- แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริมใช้สมการ 7.78.

- เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม
- ระยะเรียงของเหล็กปลอกใช้เงื่อนไขตามสมการ 7.69a, 7.69b. และ 7.69c.

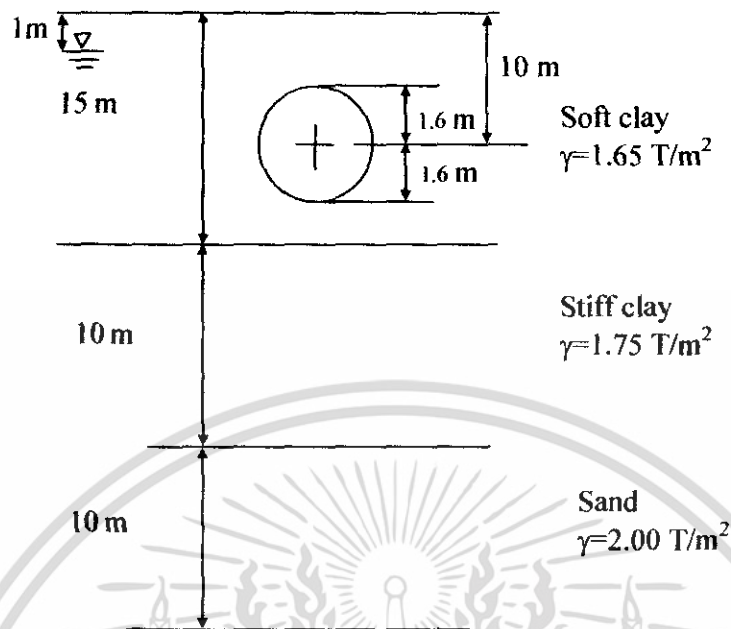
7.8 ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงภายในที่กระทำต่ออุโมงค์

ในหัวข้อนี้จะแสดงรายการคำนวณจากทฤษฎีต่างๆ โดยมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 8 กรณี โดยอุโมงค์มีรายละเอียดดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9. แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ

ตัวแปร	ความหมาย	ค่าที่ใช้	หน่วย
R_0	รัศมีภายนอกอุโมงค์	1.6	m
γ	หน่วยน้ำหนักของดิน	ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน	T/m^2
θ	องศาวัดจากส่วน Crown ไปตามเข็มนาฬิกา	0-180	องศา
ν	อัตราส่วนปัวซองของดิน	0.5	-
ν_s	อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต	0.3	-
E	โมดูลัสของดิน	Soft clay = 6250 Medium clay = 10000 Stiff clay = 52800 Sand = 52800	kPa
E_c	โมดูลัสของคอนกรีต	$15200\sqrt{f'_c}$	kPa
f'_c	กำลังอัดประลัย	300	ksc
t	ความหนาของผนังคอนกรีต	0.125	m
b	ความกว้างของชั้นส่วนผนังอุโมงค์	1	m
K_0	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต	Soft clay = 0.75 Medium clay = 0.70 Stiff clay = 0.65 Sand = 0.5	-
f_y	กำลังดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม	3000	ksc

7.8.1 กรณีที่ 1 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.13 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 1

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.224	0.191	-2.493	-0.197	2.762
N_T (T/m)	15.315	17.422	20.502	17.108	12.723
Q_T (T/m)	0.000	-2.867	-0.534	3.617	0.000

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	1.634	0.000	-1.634	0.000	1.634
T (T/m)	24.078	23.057	22.036	23.057	24.078

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	1.973
Max Normal Force (T/m)	18.439

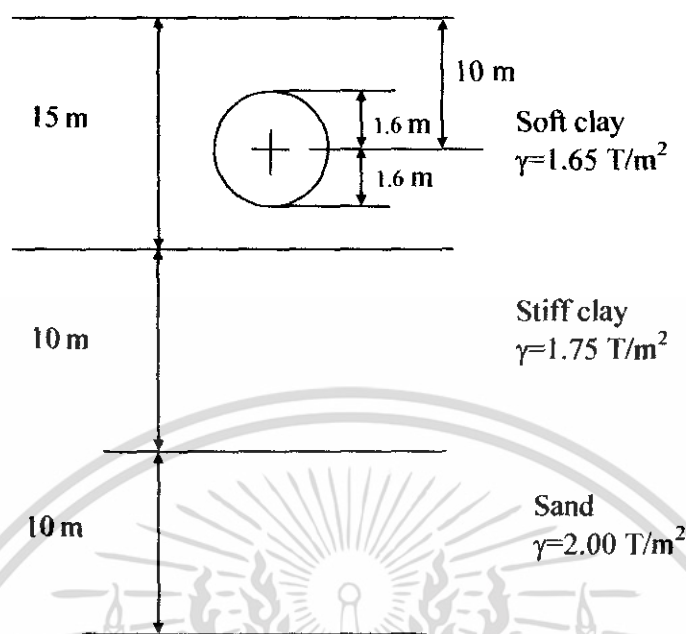
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	-1.298	0.000	1.298	0.000	-1.298
N_T (T/m)	25.419	23.248	21.077	23.248	25.419
S_T (T/m)	0.000	1.622	0.000	-1.622	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.268	0.197	-2.549	-0.191	2.806
N_T (T/m)	14.900	17.215	19.674	16.900	12.308
Q_T (T/m)	0.000	-2.927	-0.534	3.558	0.000

7.8.2 กรณีที่ 2 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.14 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณี 2

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M_r \text{ (T-m/m)}$	1.436	0.079	-1.547	-0.082	1.658
$N_r \text{ (T/m)}$	5.471	7.054	9.121	7.170	4.726
$Q_r \text{ (T/m)}$	0.000	-1.854	-0.227	2.170	0.000

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M \text{ (T-m/m)}$	0.743	0.000	-0.743	0.000	0.743
$T \text{ (T/m)}$	10.944	10.480	10.016	10.480	10.944

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	0.899
Max Normal Force (T/m)	8.381

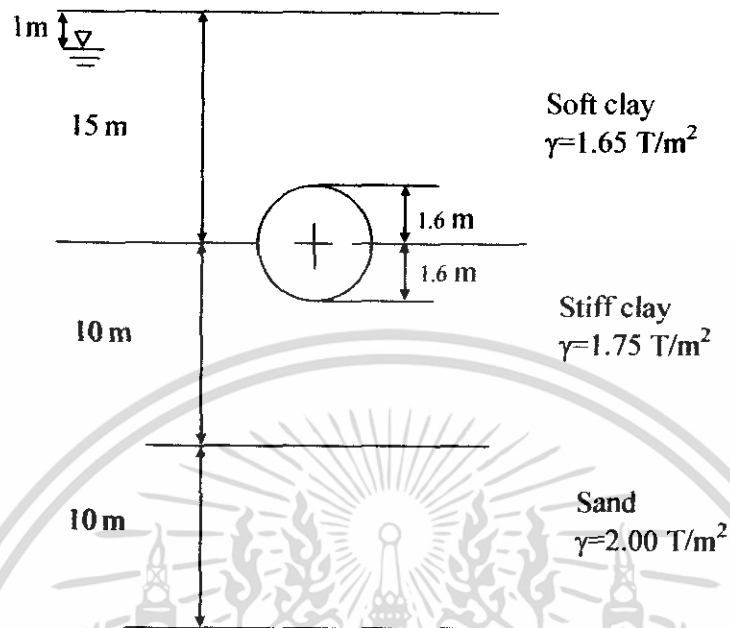
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	-0.076	0.000	0.076	0.000	-0.076
N_T (T/m)	9.005	8.878	8.750	8.878	9.005
S_T (T/m)	0.000	0.095	0.000	-0.095	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	1.411	0.076	-1.515	-0.086	1.633
N_T (T/m)	5.711	7.174	9.599	7.290	4.965
Q_T (T/m)	0.000	-1.820	-0.227	2.204	0.000

7.8.3 กรณีที่ 3 อุโมงค์วางตัวอยู่ในระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.15 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 3

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.477	0.162	-2.705	-0.167	2.932
N_T (T/m)	28.76	31.316	34.729	31.118	26.645
Q_r (T/m)	0.00	-3.200	-0.453	3.835	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	2.442	0.000	-2.442	0.000	2.442
T (T/m)	35.763	34.327	32.711	34.237	35.763

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	3.669
Max Normal Force (T/m)	24.666

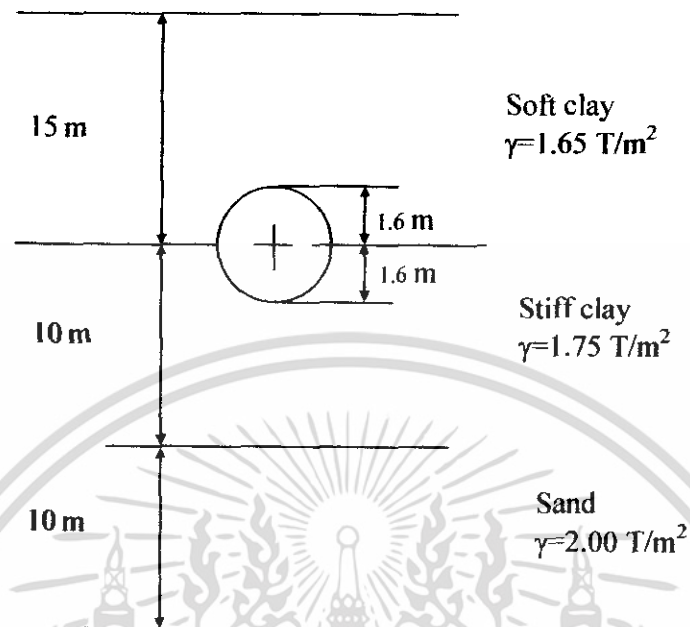
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	-0.676	0.000	0.676	0.000	-0.676
N_T (T/m)	36.250	35.119	33.989	35.119	36.250
S_T (T/m)	0.000	0.845	0.000	-0.845	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	4.025	0.179	-4.263	-0.222	4.574
N_T (T/m)	42.688	42.944	53.145	46.842	40.033
Q_T (T/m)	0.00	-3.183	-0.453	3.851	0.00

7.8.4 กรณีที่ 4 อุโมงค์วางตัวอยู่ในระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และอยู่เหนือกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.16 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 4

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	1.689	0.049	-1.759	-0.053	1.828
N_T (T/m)	9.675	11.720	14.120	11.952	9.419
Q_T (T/m)	0.00	-2.187	-0.145	2.387	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	1.088	0.000	-1.808	0.000	1.088
T (T/m)	15.934	15.254	14.574	15.254	15.934

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	1.635
Max Normal Force (T/m)	10.990

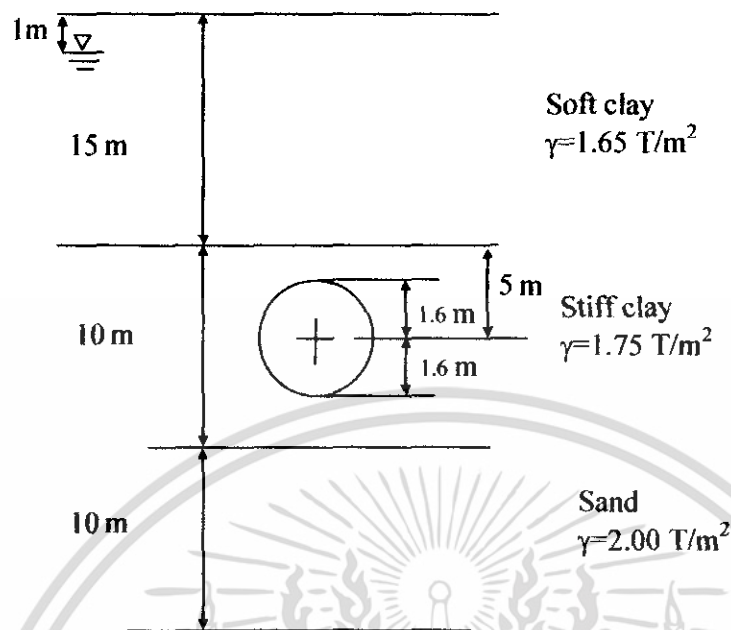
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	0.546	0.000	-0.546	0.000	0.546
N_T (T/m)	11.852	12.766	13.679	12.766	11.852
S_T (T/m)	0.000	-0.682	0.000	0.682	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	1.578	0.035	-1.618	-0.068	1.717
N_T (T/m)	9.889	11.827	14.457	12.059	9.633
Q_T (T/m)	0.00	-3.860	-0.238	4.777	0.00

7.8.5 กรณีที่ 5 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.17 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 5

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M_r \text{ (T-m/m)}$	4.145	0.015	-4.429	-0.212	4.713
$N_r \text{ (T/m)}$	38.592	43.146	48.725	42.797	35.820
$Q_r \text{ (T/m)}$	0.00	-5.363	-0.564	6.156	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M \text{ (T-m/m)}$	1.228	0.000	-1.228	0.000	1.228
$T \text{ (T/m)}$	44.946	44.179	43.412	44.179	44.946

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	1.974
Max Normal Force (T/m)	25.781

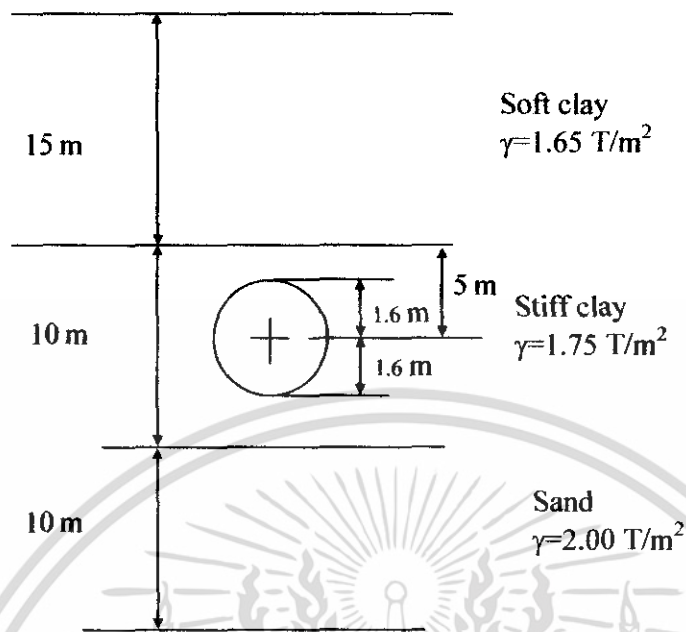
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	-0.181	0.000	0.181	0.000	-0.181
N_T (T/m)	48.997	48.647	48.298	48.647	48.997
S_T (T/m)	0.000	0.227	0.000	-0.227	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	4.181	0.146	-4.347	-0.264	4.740
N_T (T/m)	42.202	46.958	54.329	46.625	39.489
Q_T (T/m)	0.00	-4.969	-0.564	6.551	0.00

7.8.6 กรณีที่ 6 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.18 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 6

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M_T \text{ (T-m/m)}$	3.356	0.091	-3.483	-0.098	3.609
$N_T \text{ (T/m)}$	11.831	15.860	20.426	0.524	0.077
$Q_T \text{ (T/m)}$	0.00	-4.350	-0.257	4.709	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M \text{ (T-m/m)}$	0.542	0.000	-0.542	0.000	0.542
$T \text{ (T/m)}$	19.829	19.491	19.152	19.491	19.829

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	0.871
Max Normal Force (T/m)	11.374

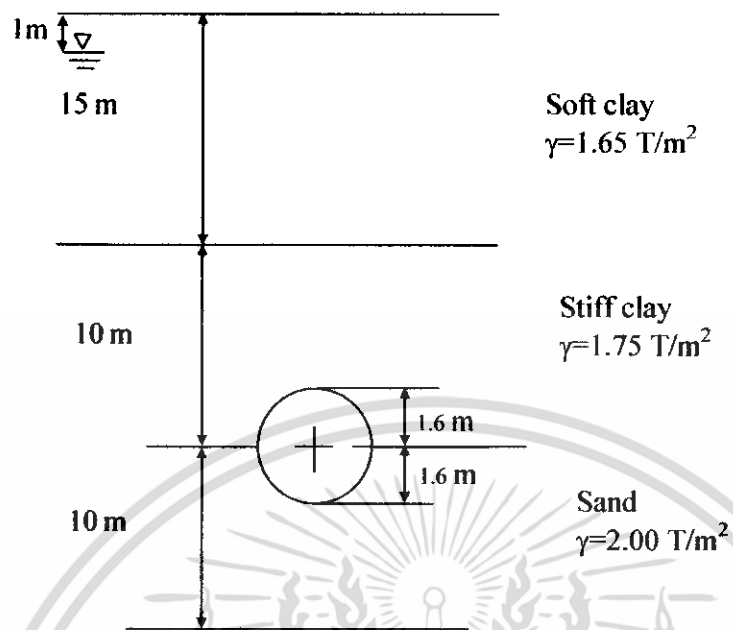
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	0.802	0.000	-0.802	0.000	0.802
N_T (T/m)	16.802	18.347	19.893	18.347	16.802
S_T (T/m)	0.000	-1.003	0.000	1.003	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.831	0.023	-2.599	-0.167	3.084
N_T (T/m)	12.846	16.369	22.456	16.450	11.920
Q_T (T/m)	0.00	-3.632	-0.257	5.427	0.00

7.8.7 กรณีที่ 7 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.19 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 7

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_r (T-m/m)	4.239	0.104	-4.383	-0.112	4.527
N_r (T/m)	49.962	55.085	60.799	55.123	48.835
Q_r (T/m)	0.00	-5.368	-0.290	5.903	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	2.206	0.000	-2.206	0.000	2.206
T (T/m)	51.877	50.499	49.120	50.499	51.877

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	3.546
Max Normal Force (T/m)	29.469

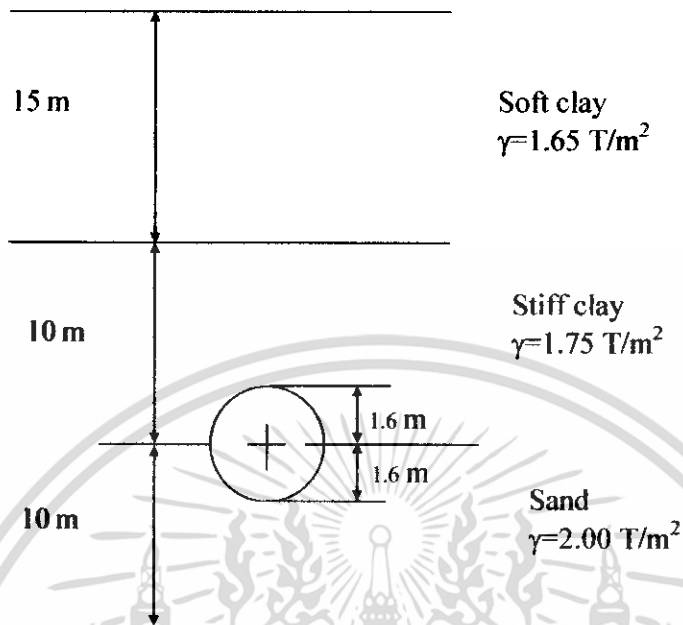
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	1.208	0.000	-1.208	0.000	1.208
N_T (T/m)	57.866	60.193	62.520	60.193	57.866
S_T (T/m)	0.000	-1.510	0.000	1.510	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	3.540	0.013	-3.494	-0.204	3.827
N_T (T/m)	51.314	55.761	63.500	55.799	50.187
Q_T (T/m)	0.00	-4.541	-0.290	6.859	0.00

7.8.8 กรณีที่ 8 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย และอยู่เหนือกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.20 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 8

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	3.451	-0.008	-3.227	0.002	3.423
N_T (T/m)	17.049	21.647	26.349	22.116	17.768
Q_T (T/m)	0.00	-4.484	0.017	4.456	0.00

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	0.967	0.000	-0.967	0.000	1.000
T (T/m)	22.753	22.149	21.544	22.149	22.753

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	1.555
Max Normal Force (T/m)	12.925

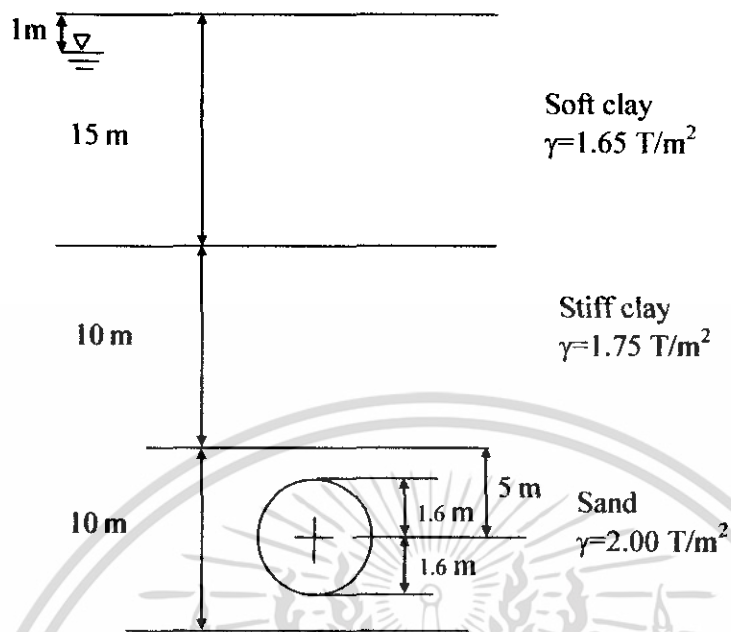
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.191	0.000	-2.191	0.000	2.191
N_T (T/m)	17.698	21.187	26.141	21.920	17.698
S_T (T/m)	0.000	-2.739	0.000	2.739	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	2.514	-0.130	-2.246	-0.121	2.486
N_T (T/m)	18.859	22.553	29.965	23.021	19.578
Q_T (T/m)	0.00	-3.259	0.017	5.735	0.00

7.8.9 กรณีที่ 9 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินทราย และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.21 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 9

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	7.976	0.197	-8.247	-0.212	8.518
N_T (T/m)	58.329	67.904	78.470	67.608	55.714
Q_T (T/m)	0.000	-10.346	-0.538	11.103	0.000

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (T-m/m)	5.100	0.000	-5.100	0.000	5.100
T (T/m)	75.152	71.965	68.777	71.965	75.152

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	12.314
Max Normal Force (T/m)	49.329

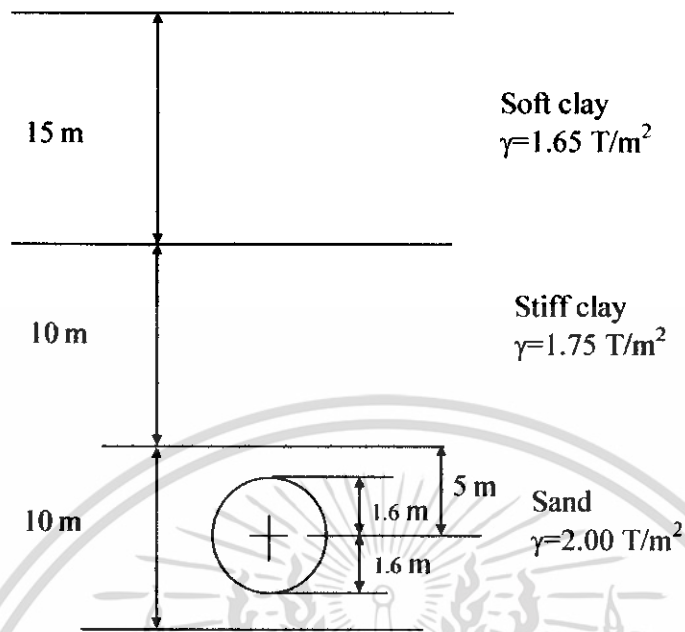
(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	0.597	0.000	-0.597	0.000	0.597
N_T (T/m)	70.109	72.490	75.872	72.490	70.109
S_T (T/m)	0.000	-0.747	0.000	0.747	0.000

(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	7.602	0.148	-7.771	-0.261	8.144
N_T (T/m)	59.052	68.266	79.914	67.970	56.437
Q_T (T/m)	0.000	-9.835	-0.538	11.614	0.000

7.8.10 กรณีที่ 10 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินทราย และอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน



รูปที่ 7.22 แสดงชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวในกรณีที่ 10

(1.) ทฤษฎี JSCE

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M_T \text{ (T-m/m)}$	7.188	0.085	-7.301	-0.098	7.414
$N_T \text{ (T/m)}$	16.188	25.238	34.791	25.372	15.419
$Q_T \text{ (T/m)}$	0.000	-9.334	-0.231	9.655	0.000

(2.) ทฤษฎี Einstein

θ	0°	45°	90°	135°	180°
$M \text{ (T-m/m)}$	2.228	0.000	-2.228	0.000	2.228
$T \text{ (T/m)}$	32.833	31.683	30.048	31.441	32.833

(3.) ทฤษฎี Erdmann

Max Bending moment (T-m/m)	5.380
Max Normal Force (T/m)	21.552

(4.) ทฤษฎี Muir Wood

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	0.902	0.000	-0.902	0.000	0.902
N_T (T/m)	23.034	27.386	31.738	27.386	23.034
S_T (T/m)	0.000	-1.111	0.000	1.128	0.000

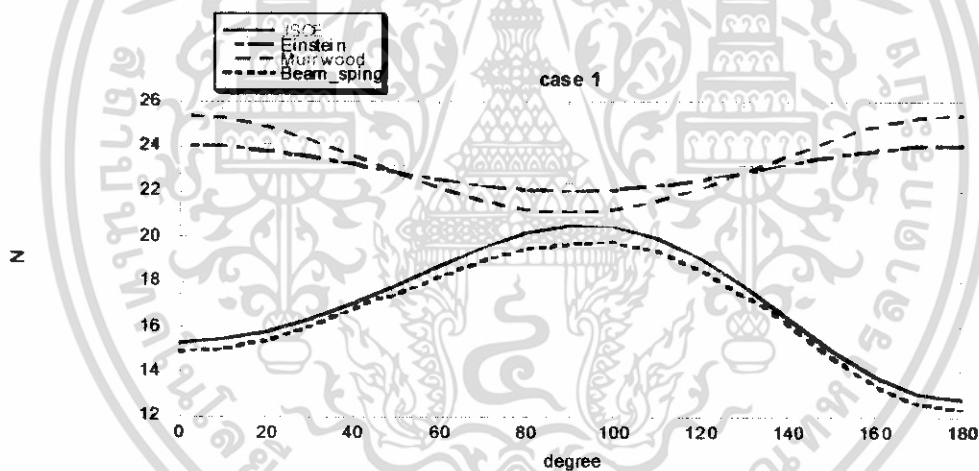
(5.) ทฤษฎี Beam spring model

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (T-m/m)	6.744	0.027	-6.738	-0.155	6.971
N_T (T/m)	17.044	25.667	36.502	25.801	16.275
Q_T (T/m)	0.000	-8.728	-0.231	10.260	0.000

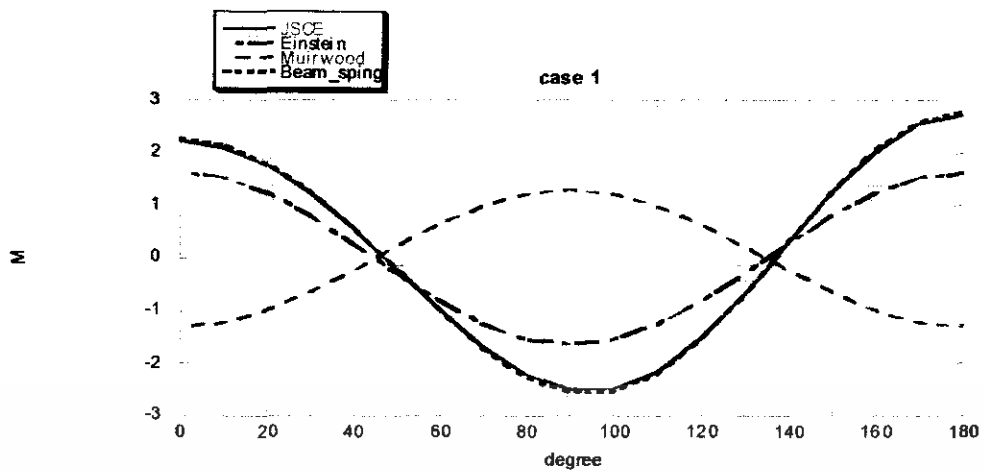
7.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ

กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

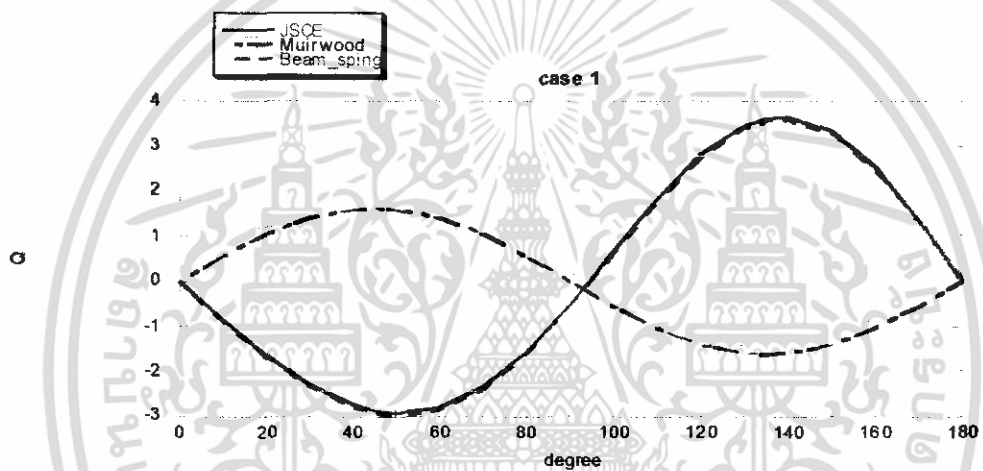
ทฤษฎี	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน			เหนือระดับน้ำใต้ดิน		
	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)
JSCE	2.762	20.502	3.650	1.658	9.121	2.172
Einstein	1.634	24.078	-	0.743	10.944	-
Erdmann	1.973	18.438	-	0.896	8.381	-
Muir Wood	1.298	25.419	1.622	0.076	9.005	0.095
Beam-Spring Model	2.806	19.765	3.595	1.633	9.599	2.204



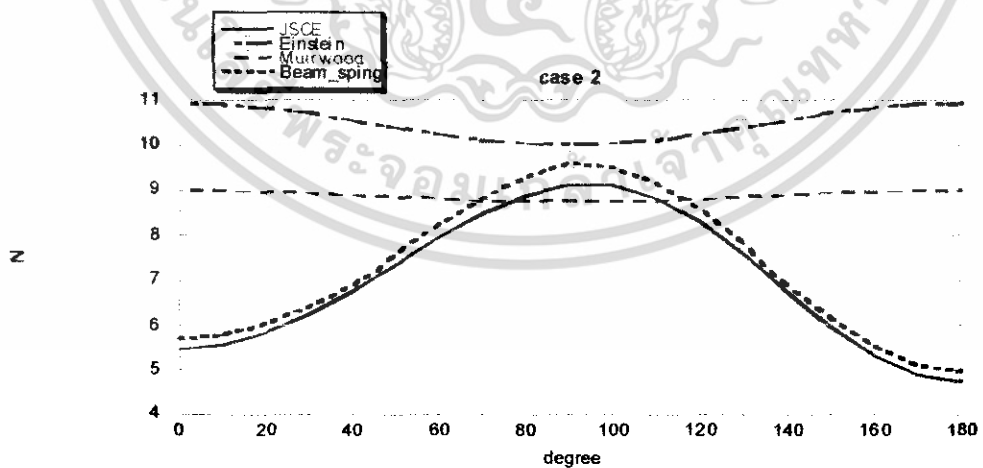
รูปที่ 7.23 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 1



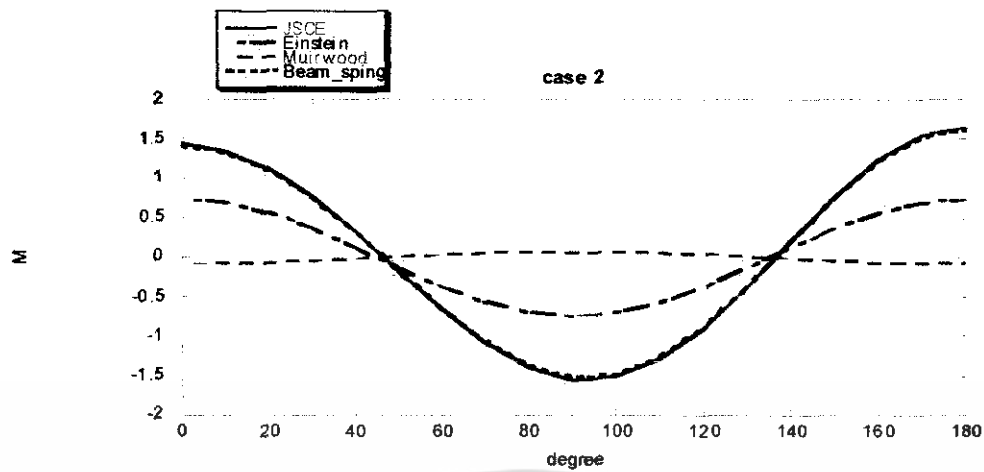
รูปที่ 7.24 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 1



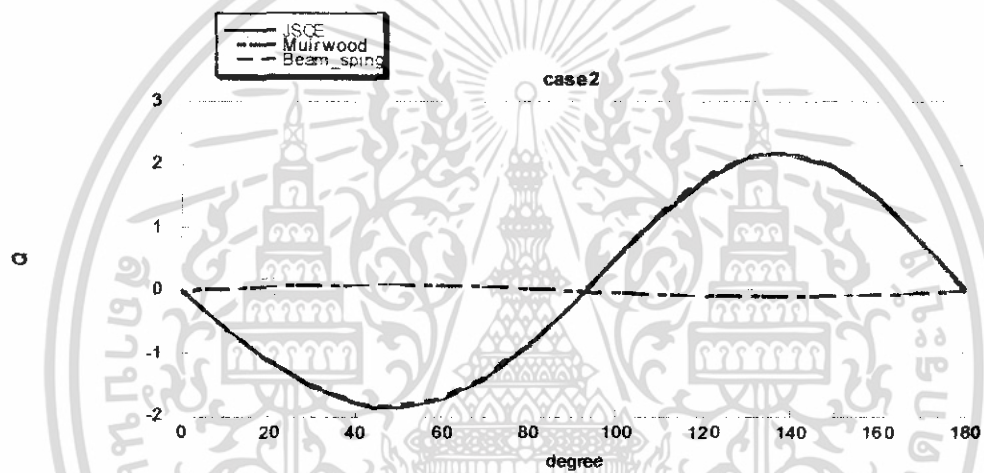
รูปที่ 7.25 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.26 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 2



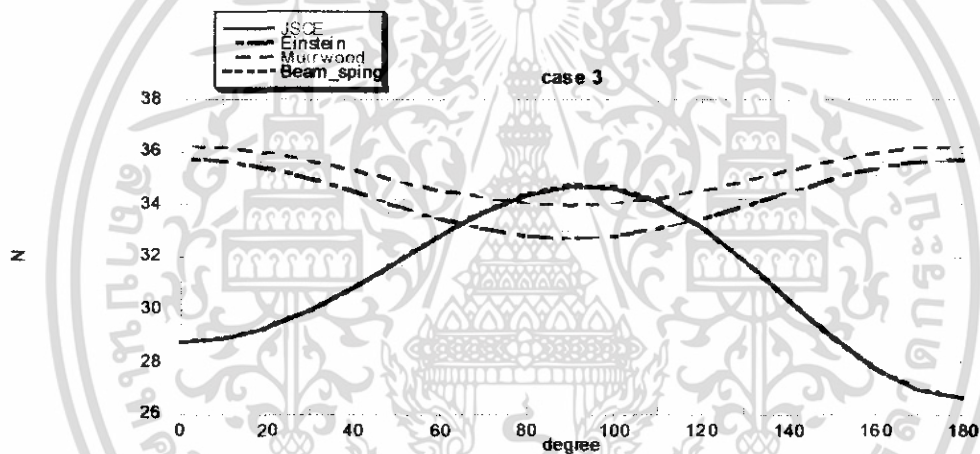
รูปที่ 7.27 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 2



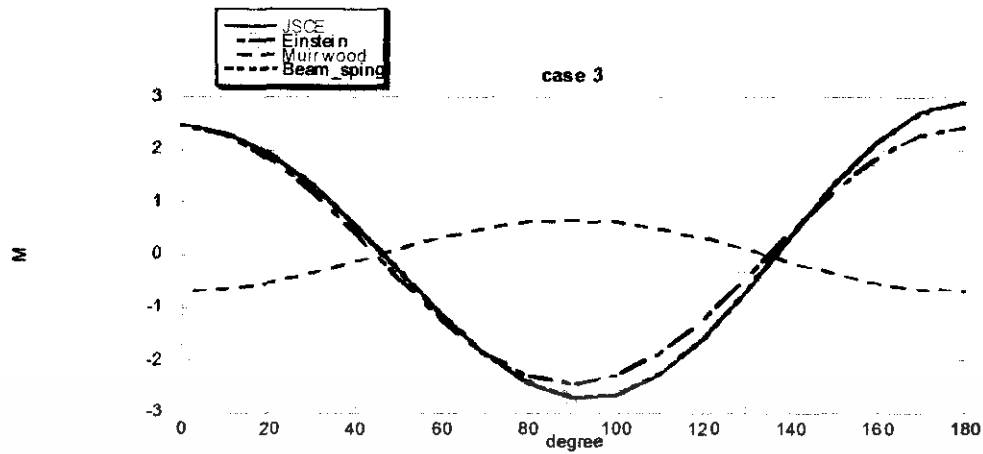
รูปที่ 7.28 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 อุโมงค์วางตัวอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง

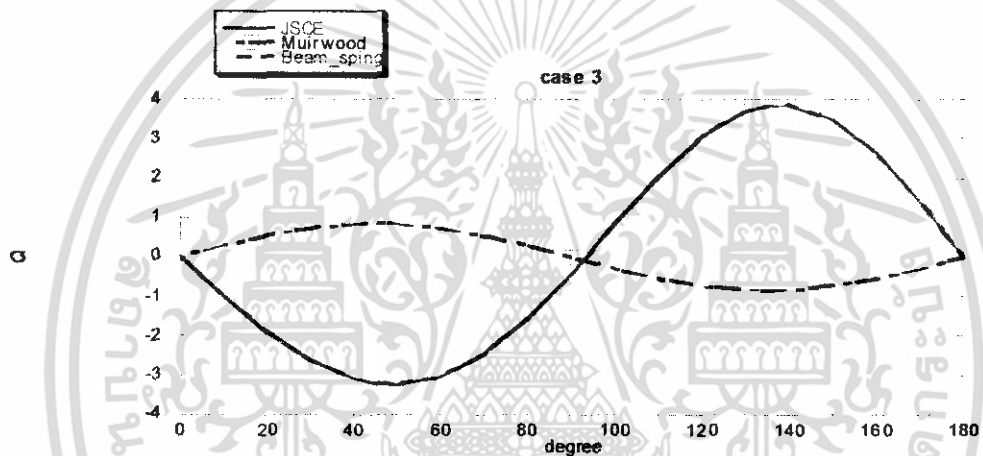
ทฤษฎี	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน			เหนือระดับน้ำใต้ดิน		
	$M_{\max}$ (T-m/m)	$N_{\max}$ (T/m)	$Q_{\max}$ (T/m)	$M_{\max}$ (T-m/m)	$N_{\max}$ (T/m)	$Q_{\max}$ (T/m)
JSCE	2.932	34.729	3.850	1.828	14.120	2.387
Einstein	2.442	35.763	-	1.088	15.934	-
Erdmann	3.669	24.666	-	1.634	10.990	-
Muir Wood	0.676	36.250	0.845	0.546	13.679	0.682
Beam-Spring Model	2.920	34.775	3.865	1.717	14.547	2.538



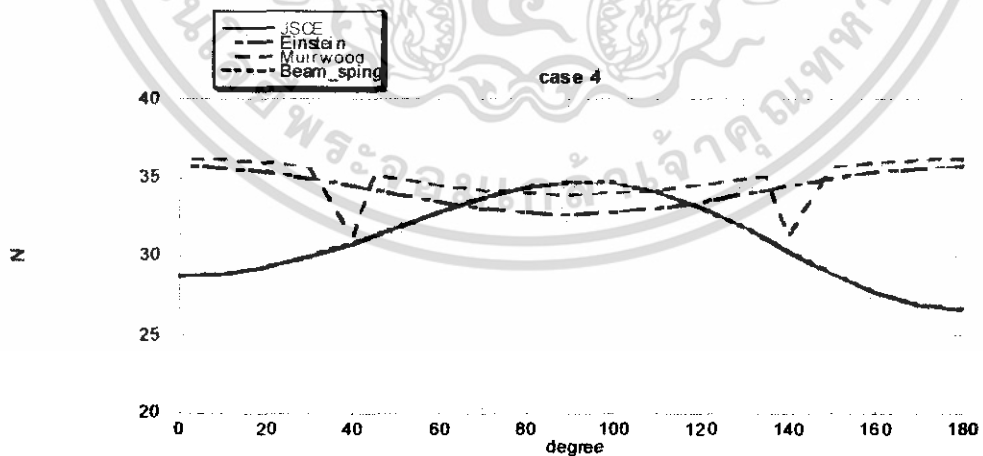
รูปที่ 7.29 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 3



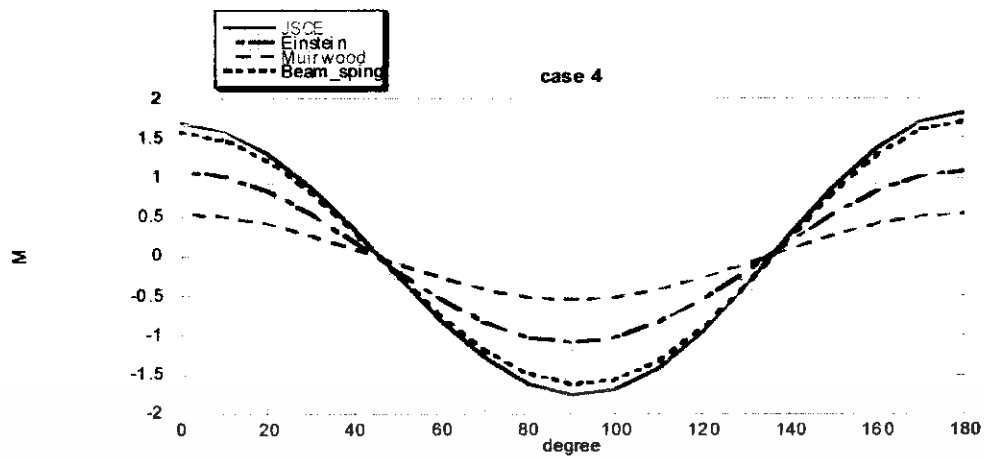
รูปที่ 7.30 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 3



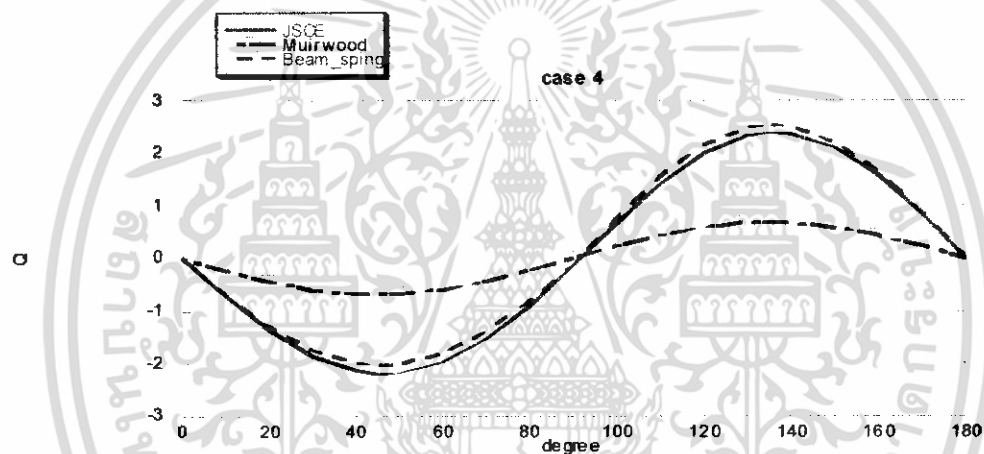
รูปที่ 7.31 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 3



รูปที่ 7.32 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 4



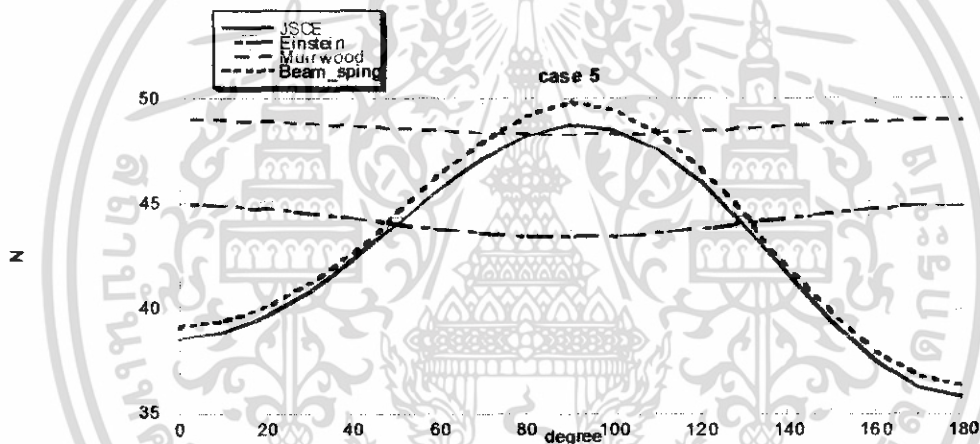
รูปที่ 7.33 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์ดัดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 4



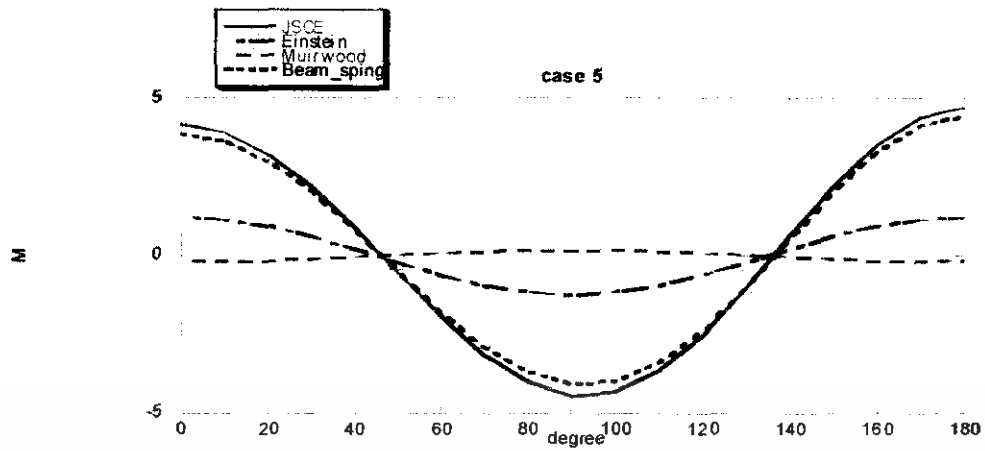
รูปที่ 7.34 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 4

กรณีที่ 5 และกรณีที่ 6 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

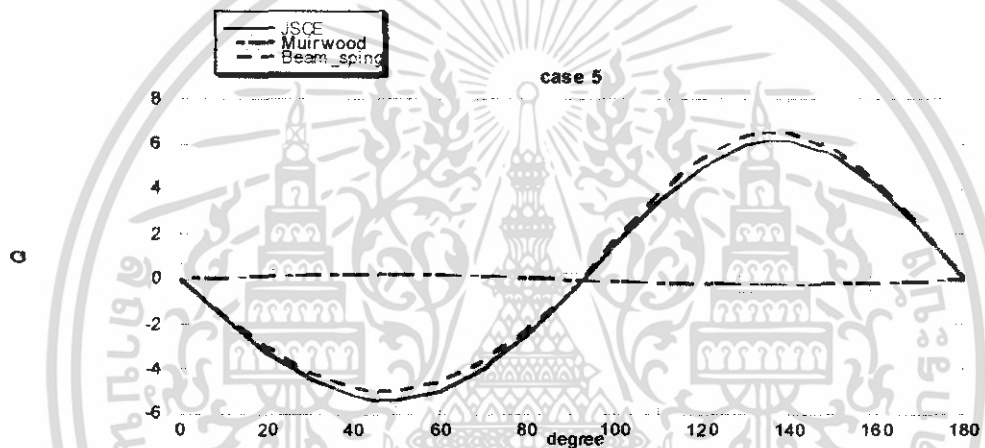
ทฤษฎี	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน			เหนือระดับน้ำใต้ดิน		
	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)
JSCE	4.713	48.725	6.156	3.609	20.426	4.709
Einstein	1.228	44.946	-	0.542	19.829	-
Erdmann	1.973	25.781	-	0.870	11.373	-
Muir Wood	0.181	48.997	0.227	0.802	19.893	1.003
Beam-Spring Model	4.425	49.839	6.551	3.084	22.456	5.427



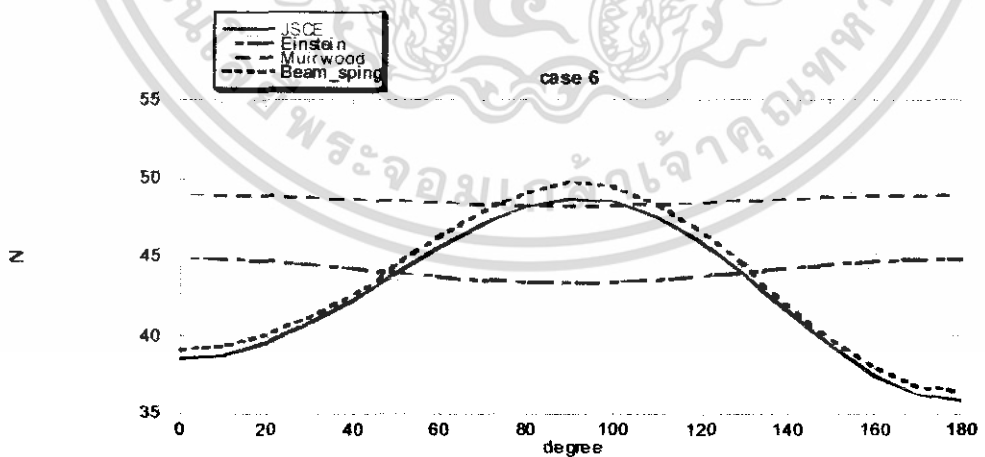
รูปที่ 7.35 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 5



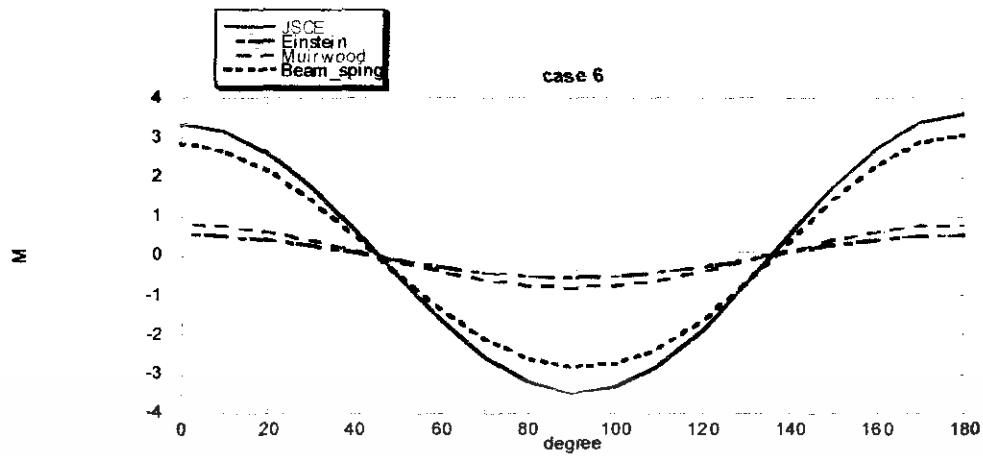
รูปที่ 7.36 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 5



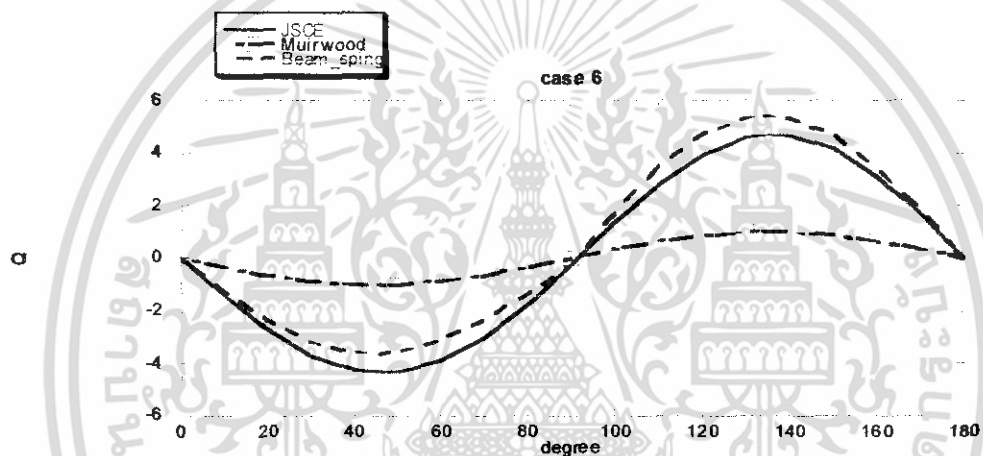
รูปที่ 7.37 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 5



รูปที่ 7.38 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 6



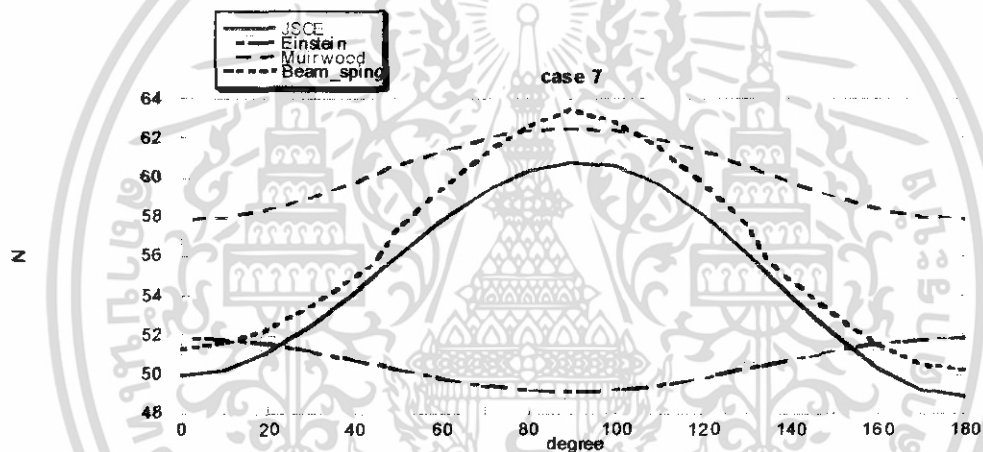
รูปที่ 7.39 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 6



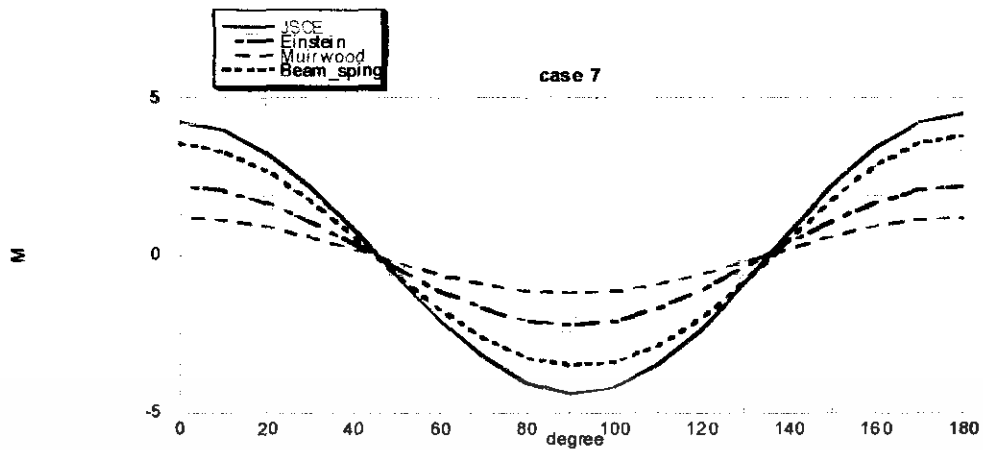
รูปที่ 7.40 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 6

กรณี 7 และกรณี 8 อุโมงค์วางตัวอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวแข็งและดินทราย

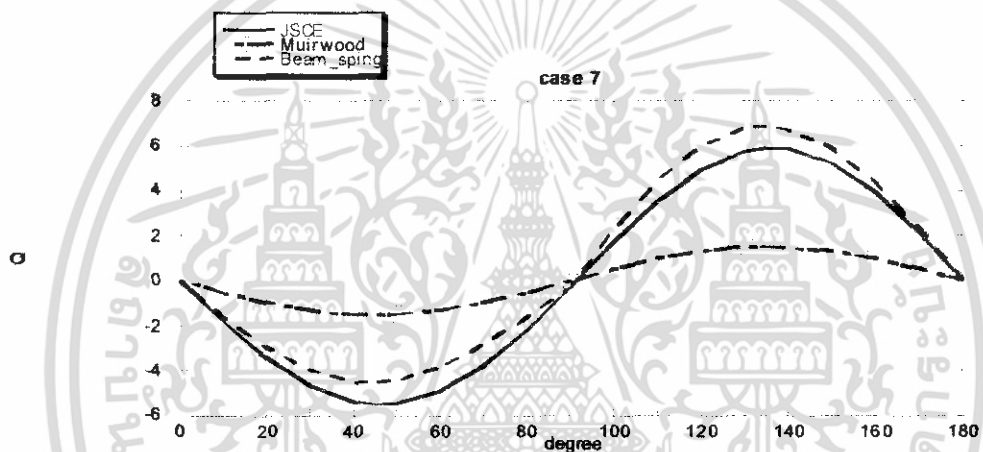
ทฤษฎี	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน			เหนือระดับน้ำใต้ดิน		
	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)
JSCE	4.527	60.799	5.903	3.423	26.349	4.456
Einstein	2.206	51.877	-	0.967	22.753	-
Erdmann	3.545	29.468	-	1.555	12.924	-
Muir Wood	1.208	62.520	1.510	2.191	26.141	2.739
Beam-Spring Model	3.827	63.500	6.859	2.486	29.965	5.769



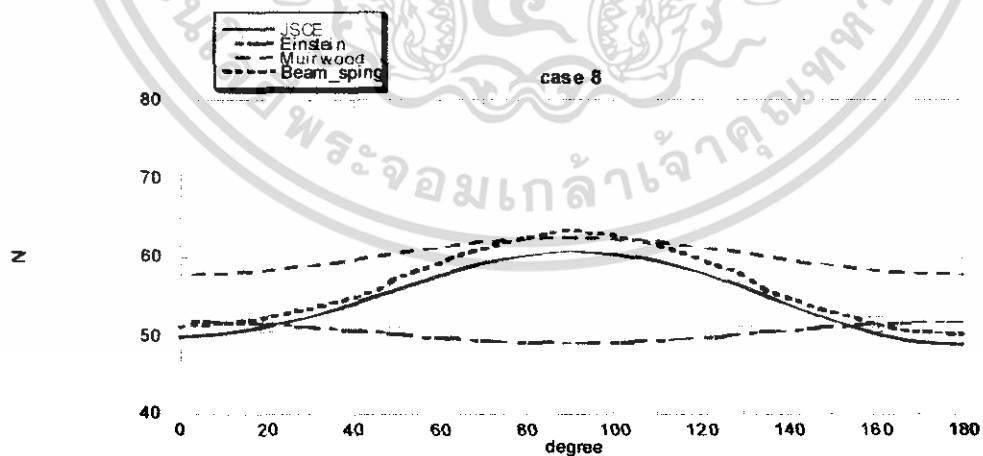
รูปที่ 7.41 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณี 7



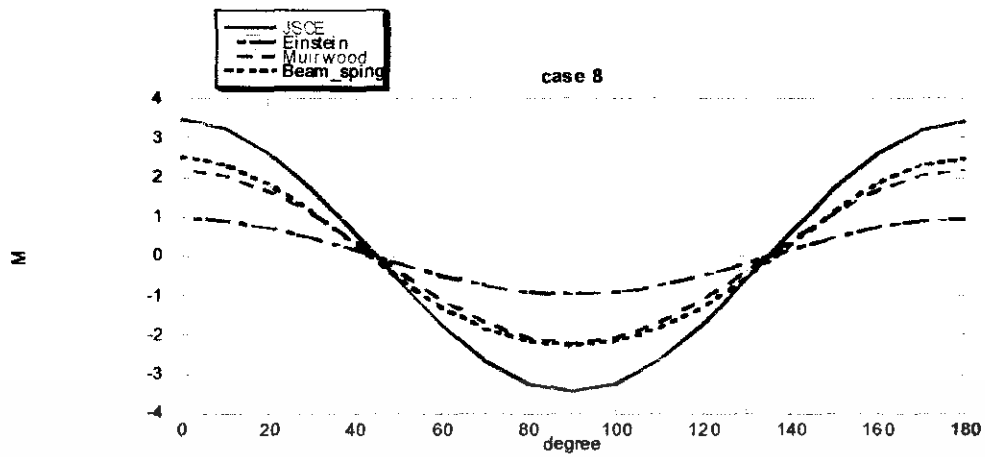
รูปที่ 7.42 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์ดัดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 7



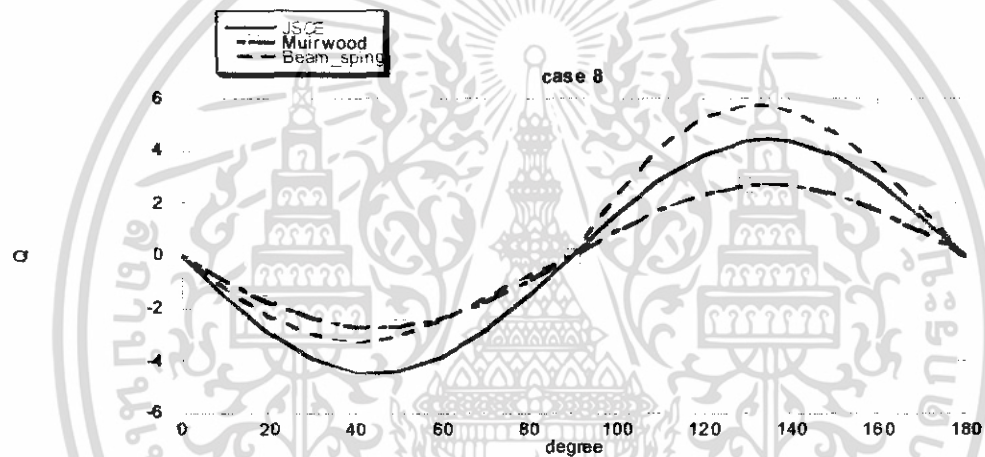
รูปที่ 7.43 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 7



รูปที่ 7.44 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 8



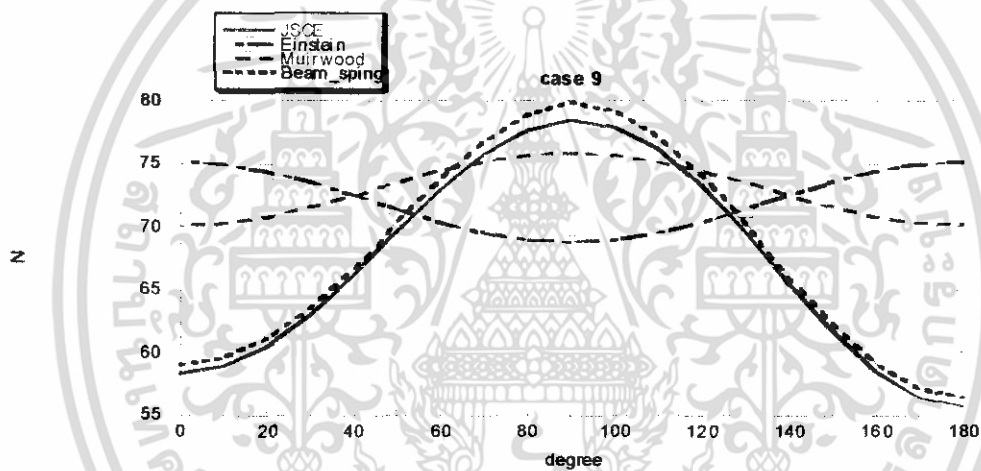
รูปที่ 7.45 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คัตทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 8



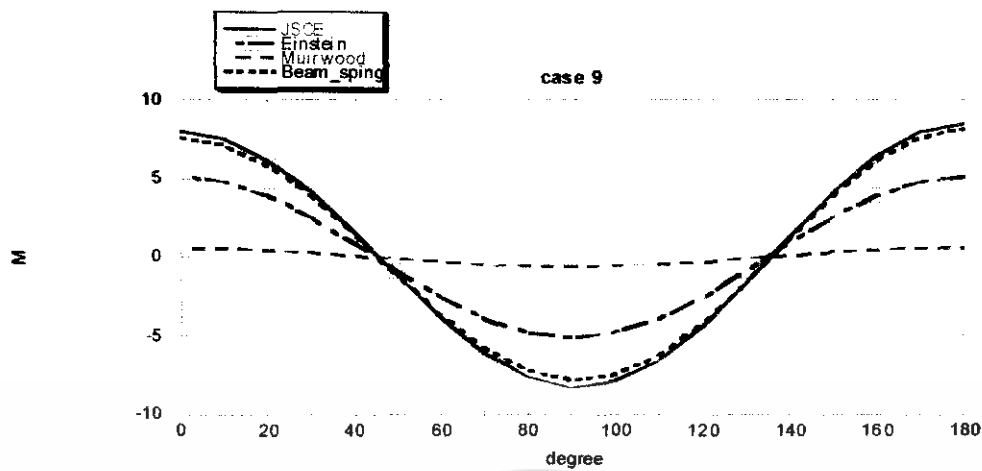
รูปที่ 7.46 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 8

กรณีที่ 9 และกรณีที่ 10 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินทราย

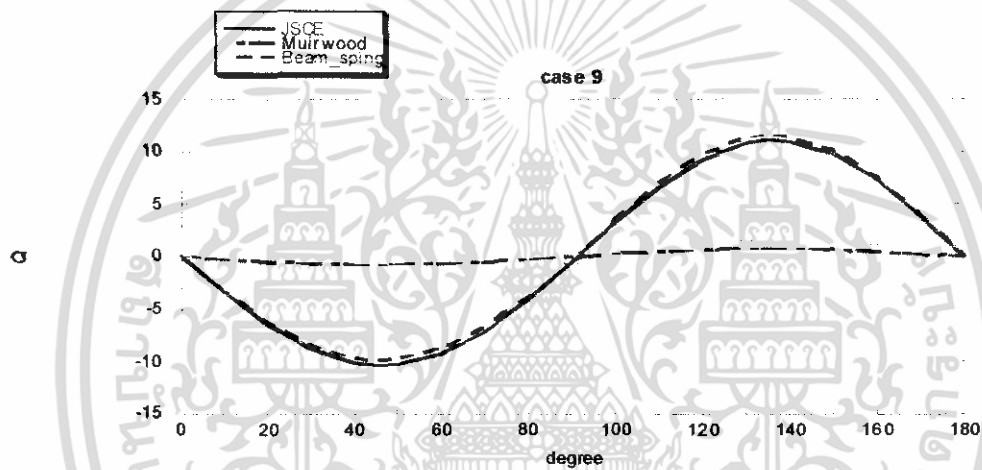
ทฤษฎี	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน			เหนือระดับน้ำใต้ดิน		
	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)	M_{max} (T-m/m)	N_{max} (T/m)	Q_{max} (T/m)
JSCE	8.518	78.470	11.103	7.414	34.791	9.655
Einstein	5.100	75.152	-	2.228	32.833	-
Erdmann	12.313	49.329	-	5.379	21.551	-
Muir Wood	0.597	75.872	0.747	0.902	31.738	1.128
Beam-Spring Model	8.144	79.914	11.614	6.971	36.502	10.26



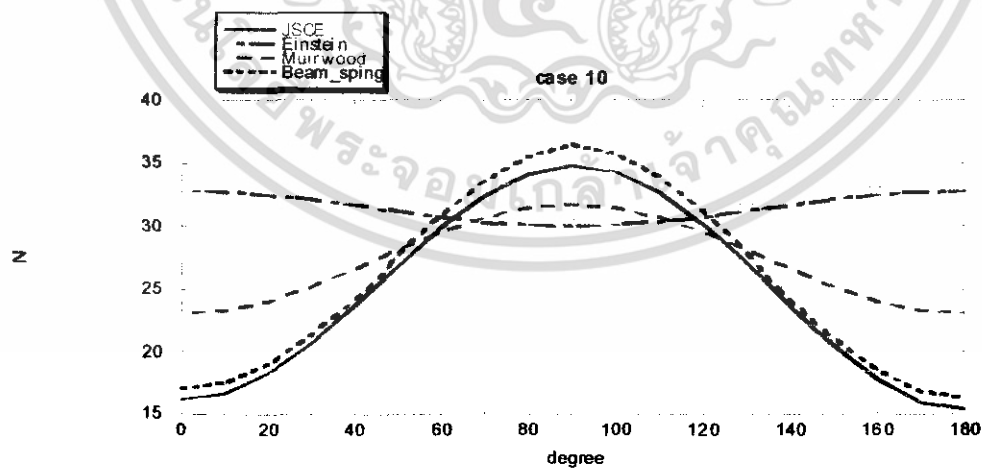
รูปที่ 7.47 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 9



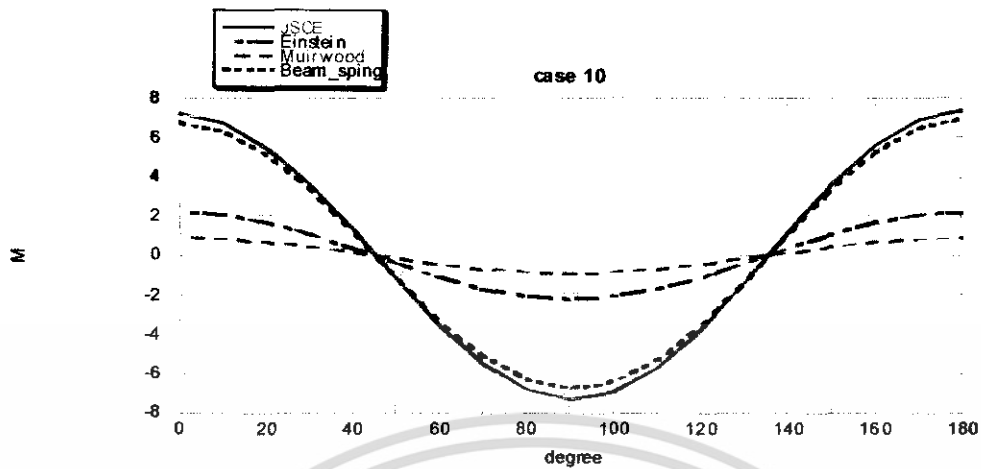
รูปที่ 7.48 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์ดัดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 9



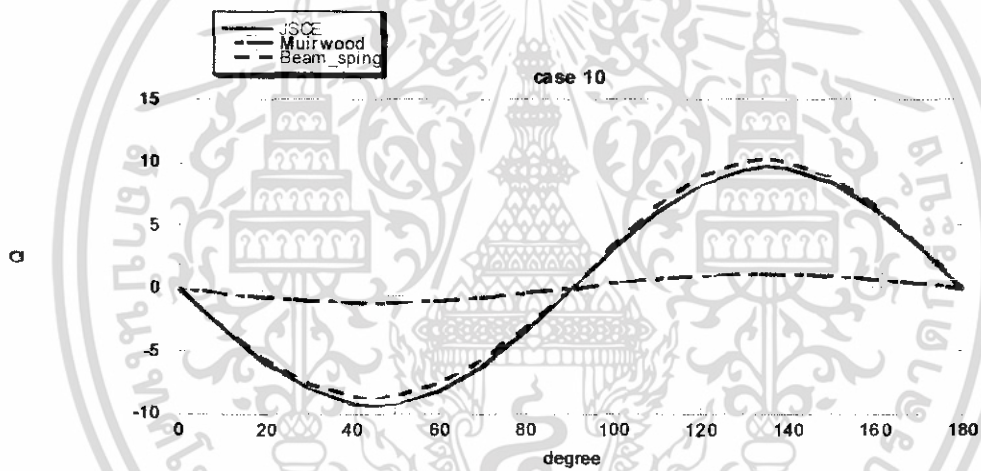
รูปที่ 7.49 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 9



รูปที่ 7.50 แสดงการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 10



รูปที่ 7.51 แสดงการเปรียบเทียบแรงโมเมนต์คดทั้ง 4 วิธี ในกรณีที่ 10



รูปที่ 7.52 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 10

7.10 การเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าแรงกระทำภายในสูงสุดในแต่ละกรณี

จากผลการหาแรงกระทำภายในจากทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบทั้ง 10 กรณี เมื่อนำค่าโมเมนต์สูงสุด แรงแนวแกนสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน นั้น จะพบว่าค่าสูงสุดในแต่ละกรณีจะมีทฤษฎีที่ให้แรงกระทำสูงสุดต่างกัน โดยแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.10 แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในแต่ละกรณี

การวางตัวอุโมงค์	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	เหนือระดับน้ำใต้ดิน
Soft clay	Beam-spring model	JSCE
Soft clay & Stiff clay	JSCE	JSCE
Stiff clay	JSCE	JSCE
Stiff clay & Sand	JSCE	JSCE
Sand	JSCE	JSCE

ตารางที่ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าแรงแนวแกนสูงสุดในแต่ละกรณี

การวางตัวอุโมงค์	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	เหนือระดับน้ำใต้ดิน
Soft clay	JSCE	Beam-spring model
Soft clay & Stiff clay	Beam-spring model	Beam-spring model
Stiff clay	Beam-spring model	Beam-spring model
Stiff clay & Sand	Beam-spring model	Beam-spring model
Sand	Beam-spring model	Beam-spring model

ตารางที่ 7.12 แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ให้ค่าแรงเฉือนสูงสุดในแต่ละกรณี

การวางตัวอุโมงค์	ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน	เหนือระดับน้ำใต้ดิน
Soft clay	JSCE	Beam-spring model
Soft clay & Stiff clay	Beam-spring model	Beam-spring model
Stiff clay	Beam-spring model	Beam-spring model
Stiff clay & Sand	Beam-spring model	Beam-spring model
Sand	Beam-spring model	Beam-spring model

7.11 การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน

ตัวอย่างการคำนวณการเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน ใช้วิธีออกแบบเสาต้น และวิธีออกแบบคานโดยอ้างอิงตัวอย่างมาจากหัวข้อข้างต้น ในการคำนวณออกแบบอุโมงค์ โดยใช้ค่าแรงกระทำภายในจากทฤษฎี JSCE

$$\beta_1 = 0.85 \quad ; \quad f_c' \leq 280 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(f_c' - 280)}{70} \quad ; \quad 280 < f_c' \leq 560 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.65 \quad ; \quad f_c' > 560 \quad \text{kg/cm}^2$$

จาก $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$

$$\text{ดังนั้น} \quad \beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{(300 - 280)}{70} = 0.84$$

7.11.1 วิธีออกแบบเสาต้น

7.11.1.1 ตัวอย่างการคำนวณเหล็กเสริมจากกรณีที่ 1 ดินเหนียวอ่อน อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำ

ใต้ดิน

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 2.762 \quad \text{T-m/m} \\ N_{\max} &= 20.502 \quad \text{T/m} \\ V_{\max} &= 3.650 \quad \text{T/m} \end{aligned}$$

แปลงเป็นกิโลกรัม(kg) $1 \text{ T} = 1000 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 2762 \quad \text{kg-m/m} \\ N_{\max} &= 20502 \quad \text{kg/m} \\ V_{\max} &= 3650 \quad \text{kg/m} \end{aligned}$$

ใช้ระยะหุ้มคอนกรีต 3 cm.

(สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 9 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 12.5 - 3 - 0.9 - \frac{1.6}{2} = 7.8 \text{ cm.}$$

กำลังที่ต้องการ

$$M_u = 1.0 \times 1.4 \times 2760 = 3864 \text{ kg-m}$$

$$P_u = 1.0 \times 1.4 \times 20502 = 28702.8 \text{ kg}$$

$$V_u = 1.0 \times 1.4 \times 3650 = 5110 \text{ kg}$$

โดยที่ 1.0 คือ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1.4 คือ ตัวปรับค่าของวิธีกำลัง

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{3864}{28702.8} = 13 \text{ cm.}$$

$$\text{กำลังระบุ : } 0.1 f'_c A_g = 0.1 \times 300 \times 100 \times 12.5 = 37500 \text{ kg.}$$

เมื่อเทียบกับ P_u แล้วใช้ $\phi = 0.7$ จะได้

$$P_n = \frac{28702.8}{0.7} = 41004 \text{ kg.}$$

$$M_n = \frac{3864}{0.7} = 5520 \text{ kg} \cdot \text{m.}$$

$$V_n = \frac{3650}{0.7} = 5214 \text{ kg.}$$

ที่สถานะความเครียดสมดุล :

$$c_b = \frac{6120d}{6120 + f_y} = \frac{6120 \times 7.8}{6120 + 5000} = 4.29 \text{ cm.}$$

$$a_b = \beta_1 c_b = 0.84 \times 4.29 = 3.60 \text{ cm.}$$

ถ้าสมมติให้ $A_s = A'_s$ และ $f_s = f'_s = f_y$

$$\text{จะได้ } P_{nb} = 0.85 f'_c a_b b = 0.85 \times 300 \times 3.60 \times 100 = 91800 \text{ kg.}$$

จะเห็นว่า P_n น้อยกว่า P_{nb} แสดงว่าหน้าตัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดึง

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{\frac{P_n^2}{1.7 f'_c b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right)}{f_y (d - d')} \\ &= \frac{\frac{41004^2}{1.7 \times 300 \times 100} - 41004 \left(\frac{12.5}{2} - 13 \right)}{5000 (7.8 - 4.7)} = 19.98 \end{aligned}$$

เลือกใช้ DB 16 จำนวน 10 เส้น ได้ $A_s = A'_s = 20.10 \text{ cm}^2$. จะได้

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} = \frac{2 \times 20.1}{100 \times 12.5} = 0.032 \text{ ซึ่งต้องอยู่ระหว่าง 0.01 และ 0.08}$$

$0.01 < \rho < 0.08$ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

การออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน

$$N_u = P_u = 28702.8 \text{ kg}$$

$$V_u = 5214 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$\phi V_c = (0.85)(0.53)(1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g}) f_c' b d = 0.53(1 + 0.0071 \times \frac{28702.8}{12.5 \times 100}) \sqrt{300} \times 100 \times 7.8$$

$$\phi V_c = 7078 \text{ kg} > V_u$$

ดังนั้น ใช้ RB 9 จำนวน 8 ขา ($A_v = 8 \times 0.63 = 5.67 \text{ cm.}$)

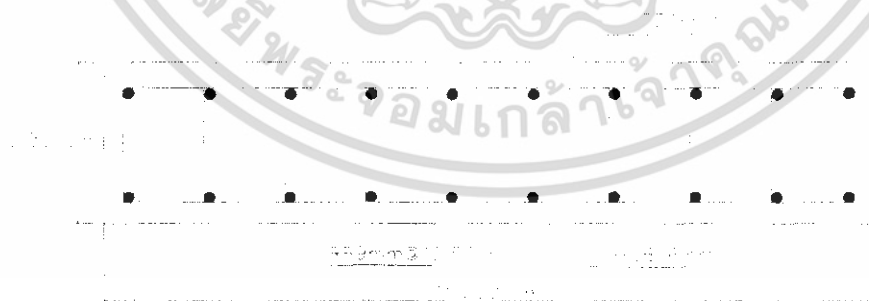
ระยะเรียงมากที่สุด 16 เท่าของเหล็กขึ้น $16(1.60) = 25.60 \text{ cm}$

48 เท่าของเหล็กปลอก $48(0.60) = 28.80 \text{ cm}$

ด้านแคบของเสา 12.50 cm

$$s = \frac{A_s f_y}{3.5 b_w} = \frac{5.67 \times 2400}{3.5 \times 100} = 38.8 \text{ cm}$$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 9 mm. @ 12.50 m.



รูปที่ 7.53 แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสั้นในกรณีที่ 1

7.11.1.2 ตัวอย่างการคำนวณเหล็กเสริมจากกรณีที่ 5 ดินเหนียวแข็ง อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้

ดิน

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 4.713 & \text{T-m/m} \\ N_{\max} &= 48.725 & \text{T/m} \\ V_{\max} &= 6.156 & \text{T/m} \end{aligned}$$

แปลงเป็นกิโลกรัม(kg) $1 \text{ T} = 1000 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 4713 & \text{kg-m/m} \\ N_{\max} &= 48725 & \text{kg/m} \\ V_{\max} &= 6156 & \text{kg/m} \end{aligned}$$

ใช้ระยะหุ้มคอนกรีต 3 cm.

(สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 9 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

$d = \text{ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก}/2$

$$d = 12.5 - 3 - 0.9 - \frac{1.6}{2} = 7.8 \text{ cm.}$$

กำลังที่ต้องการ

$$M_u = 1.0 \times 1.4 \times 4713 = 6598.2 \text{ kg-m}$$

$$P_u = 1.0 \times 1.4 \times 48725 = 68215 \text{ kg}$$

$$V_u = 1.0 \times 1.4 \times 6156 = 8618.4 \text{ kg}$$

โดยที่ 1.0 คือ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1.4 คือ ตัวปรับค่าของวิธีกำลัง

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{6598.2}{68215} = 9.67 \text{ cm.}$$

กำลังระบุ : $0.1 f'_c A_g = 0.1 \times 300 \times 100 \times 12.5 = 37500 \text{ kg.}$

เมื่อเทียบกับ P_u แล้วใช้ $\phi = 0.7$ จะได้

$$P_n = \frac{68215}{0.7} = 97450 \text{ kg.}$$

$$M_n = \frac{6598.2}{0.7} = 9426 \text{ kg} \cdot \text{m.}$$

$$V_n = \frac{8618.4}{0.7} = 12312 \text{ kg.}$$

ที่สถานะความเครียดสมดุล :

$$c_b = \frac{6120d}{6120 + f_y} = \frac{6120 \times 7.8}{6120 + 5000} = 4.29 \text{ cm.}$$

$$a_b = \beta_1 c_b = 0.84 \times 4.29 = 3.60 \text{ cm.}$$

ถ้าสมมติให้ $A_s = A'_s$ และ $f_s = f'_s = f_y$

$$\text{จะได้ } P_{nb} = 0.85 f'_c a_b b = 0.85 \times 300 \times 3.60 \times 100 = 91800 \text{ kg.}$$

จะเห็นว่า P_n มากกว่า P_{nb} แสดงว่าหน้าตัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

$$A_s' = \left(P_n - \frac{f_c' b h}{\frac{3 h e}{d^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{e}{d - d'} + 0.5}{f_y} \right)$$

$$= \left(97450 - \frac{300 \times 100 \times 12.5}{\frac{3 \times 12.5 \times 9.67}{7.8^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{9.67}{7.8 - 4.7} + 0.5}{5000} \right) = 32.52$$

เลือกใช้ DB 16 จำนวน 17 เส้น ได้ $A_s = A'_s = 34.17 \text{ cm}^2$. จะได้

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} = \frac{2 \times 32.52}{100 \times 12.5} = 0.0520 \text{ ซึ่งต้องอยู่ระหว่าง } 0.01 \text{ และ } 0.08$$

$0.01 < \rho < 0.08$ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

การออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน

$$N_u = P_u = 97450 \text{ kg}$$

$$V_u = 12312 \text{ kg}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$\phi V_c = (0.85)(0.53) \left(1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g} \right) f_c' b d = 0.53 \left(1 + 0.0071 \times \frac{97450}{12.5 \times 100} \right) \sqrt{300} \times 100 \times 7.8$$

$$\phi V_c = 9455 \text{ kg} < V_u.$$

แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริม

$$V_s = V_u - \phi V_c = 12312 - 9455 = 2857 \text{ kg}$$

ดังนั้น ใช้ RB 9 จำนวน 8 ขา ($A_v = 8 \times 0.63 = 5.67 \text{ cm}^2$)

ระยะเรียงมากที่สุด 16 เท่าของเหล็กชั้น $16(1.60) = 25.60 \text{ cm}$

48 เท่าของเหล็กปลอก $48(0.60) = 28.80 \text{ cm}$

ด้านแคบของเสา 12.50 cm

$$s = \frac{A_s f_y}{3.5 b_w} = \frac{5.67 \times 2400}{3.5 \times 100} = 38.8 \text{ cm}$$

$$s = \frac{\phi A_s f_y d}{V_s} = \frac{0.85 \times 5.67 \times 2400 \times 7.8}{2857} = 31.57$$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 9 mm. @ 12.50 m.

รูปที่ 7.54 แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสั้นในกรณีที่ 5

7.11.1.3 ตัวอย่างการคำนวณเหล็กเสริมจากกรณีที่ 9 คันทวย ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 8.518 & \text{T-m/m} \\ N_{\max} &= 58.329 & \text{T/m} \\ V_{\max} &= 11.103 & \text{T/m} \end{aligned}$$

แปลงเป็นกิโลกรัม(kg) $1 \text{ T} = 1000 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 8518 & \text{kg-m/m} \\ N_{\max} &= 58329 & \text{kg/m} \\ V_{\max} &= 11103 & \text{kg/m} \end{aligned}$$

ใช้ระยะหุ้มคอนกรีต 3 cm.

(สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 9 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 12.5 - 3 - 0.9 - \frac{1.6}{2} = 7.8 \text{ cm.}$$

กำลังที่ต้องการ

$$M_u = 1.0 \times 1.4 \times 8518 = 11925.2 \text{ kg-m}$$

$$P_u = 1.0 \times 1.4 \times 58329 = 81660.6 \text{ kg}$$

$$V_u = 1.0 \times 1.4 \times 11103 = 15544.2 \text{ kg}$$

โดยที่ 1.0 คือ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1.4 คือ ตัวปรับค่าของวิธีกำลัง

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{11925.2}{81660.6} = 14 \text{ cm.}$$

กำลังระบุ : $0.1 f'_c A_g = 0.1 \times 300 \times 100 \times 12.5 = 37500 \text{ kg.}$

เมื่อเทียบกับ P_u แล้วใช้ $\phi = 0.7$ จะได้

$$P_n = \frac{81660.6}{0.7} = 116658 \text{ kg.}$$

$$M_n = \frac{11925.2}{0.7} = 17036 \text{ kg} \cdot \text{m.}$$

$$V_n = \frac{15544.2}{0.7} = 22206 \text{ kg.}$$

ที่สถานะความเครียดสมดุล :

$$c_b = \frac{6120d}{6120 + f_y} = \frac{6120 \times 7.8}{6120 + 5000} = 4.29 \text{ cm.}$$

$$a_b = \beta_1 c_b = 0.84 \times 4.29 = 3.60 \text{ cm.}$$

ถ้าสมมติให้ $A_s = A'_s$ และ $f_s = f'_s = f_y$

$$\text{จะได้ } P_{nb} = 0.85 f'_c a_b b = 0.85 \times 300 \times 3.60 \times 100 = 91800 \text{ kg.}$$

จะเห็นว่า P_n มากกว่า P_{nb} แสดงว่าหน้าตัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

$$A_s' = \left(P_n - \frac{f_c' b h}{\frac{3he}{d^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{e}{d-d'} + 0.5}{f_y} \right)$$

$$= \left(116658 - \frac{300 \times 100 \times 12.5}{\frac{3 \times 12.5 \times 14}{7.8^2} + 1.18} \right) \left(\frac{\frac{14}{7.8-4.7} + 0.5}{5000} \right) = 78.68$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_g} = \frac{2 \times 78.68}{100 \times 12.5} = 0.1258 \text{ ซึ่งต้องอยู่ระหว่าง 0.01 และ 0.08}$$

ค่า ρ มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

หน้าตัดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์นี้ไม่เหมาะสมสำหรับการรับแรงภายในที่ชั้นดินทรายความลึก 30 เมตร จึงควรเพิ่มหน้าตัดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์หรือเพิ่มความหนาของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ใหม่

7.11.2 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบคาน

7.11.2.1 กรณีที่ 1 ดินเหนียวอ่อน อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

$$M_{\max} = 2762 \text{ kg-m/m}$$

$$M_{\max} = M_T \cdot b = 2762 \times 1.0 = 2762 \text{ kg-m/ring}$$

โมเมนต์ที่ต้องการ $M_u = M_{\max} \cdot \text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง}$; (ตัวคูณเพิ่มกำลัง=1.4)

$$M_u = 2762 \times 1.4 = 3866.8 \text{ kg-m/ring}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \text{ ; } (\phi = 0.9 \text{ สำหรับแรงดัด})$$

$$\text{โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบ } M_n = \frac{3866.8}{0.9} = 4296 \text{ kg-m/ring}$$

ไม้สับผัดคิน 3 cm. (สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 6 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก/

2

ใช้ระยะหุ้มคอนกรีต 3 cm.

(สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 9 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพ,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 12.5 - 3 - 0.9 - \frac{1.6}{2} = 7.8 \text{ cm.}$$

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f'_c \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right)}{f_y}$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \times 0.84 \times 300 \left(\frac{6120}{6120 + 5000} \right)}{5000} = 0.0235$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.75 \times 0.0235 = 0.0177$$

$$R_{n,\max} = \rho_{\max} f_y \left(1 - \frac{\rho_{\max} f_y}{1.7 f'_c} \right)$$

$$R_{n,\max} = 0.0177 \times 5000 \left(1 - \frac{0.0177 \times 5000}{1.7 \times 400} \right) = 76.99 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{n,\max} = R_{n,\max} b d^2$$

$$M_{n,\max} = 76.99 \times 1.0 \times 7.8^2 = 4684.25 \text{ kg-m}$$

โมเมนต์สูงสุดที่รับได้

$$M_{u,\max} = \phi \cdot M_{n,\max} = 0.9 \times 4684.25 = 4215.8 \text{ kg-m} \cong M_u$$

เลือกใช้อัตราส่วนเหล็กสูงสุด $\rho_{\max} = 0.0177$

ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_s = \rho b d = 0.0177 \times 100 \times 7.8 = 13.81 \text{ cm}^2/\text{ring}$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm ($A_s = 2.01 \text{ cm}^2$) ใช้เหล็ก = $\frac{13.81}{2.01} = 7$ เส้น

ดังนั้นใช้ 7 เส้น ($A_s = 2.01 \times 7 = 14.07 \text{ cm}^2$) O.K.

ระยะเรียง = ช่องว่าง/จำนวนเส้น = $\frac{100 - (2 \times 3) - (2 \times 0.6)}{7} = 13.25 \text{ cm.}$ ใช้ 13 cm.

ระยะคอนกรีตหุ้มถึงผิวเหล็กเสริม, $C_c = 3 + 0.6 = 3.6 \text{ cm.}$

หน่วยแรงในเหล็กเสริม, $f_s = 0.6 f_y = 0.6 \times 5000 = 3000 \text{ kg/cm}^2$

ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้, $s = \frac{90000}{f_s} - 2.5 C_c = \frac{90000}{3000} - (2.5 \times 3.6) = 21 \text{ cm.}$

ระยะเรียงที่ใช้ 13.00 cm. < ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้ O.K.

ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม = $13.0 - (2 \times 0.8) = 11.6 \text{ cm.} > 2.5 \text{ cm.}$ O.K.

เนื่องจากรับโมเมนต์ลบด้วยจึงใส่เหล็กทั้งบนและล่าง

เหล็กรับแรงเฉือน

$$Q_T = 3650 \text{ kg/m}$$

$$V_{\max} = Q_T \cdot b = 3650 \times 1.0 = 3650 \text{ kg/ring}$$

แรงเฉือนที่ต้องการ

$$V_u = V_{\max} \cdot \text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง} ; (\text{ตัวคูณเพิ่มกำลัง} = 1.4)$$

$$V_u = 3650 \times 1.4 = 5110 \text{ kg/ring}$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} ; (\phi = 0.85 \text{ สำหรับแรงเฉือน})$$

แรงเฉือนที่ใช้ออกแบบ

$$V_n = \frac{5110}{0.85} = 6011 \text{ kg/ring}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} b d = 0.53 \times \sqrt{300} \times 100 \times 7.8 = 7160 \text{ kg.} > V_n$$

ดังนั้น ใช้ RB 6 จำนวน 7 ขา ($A_v = 7 \times 0.28 = 1.96 \text{ cm.}$)

$$\text{ระยะเรียงมากที่สุด} \quad s_{\max} = \frac{A_v \cdot f_s}{3.5 b} = \frac{1.96 \times 3000}{3.5 \times 100} = 16.8 \text{ cm.}$$

หรือ

$$s_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{12.5}{2} = 6.25 \text{ cm.}$$

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 6 mm. @ 0.06 m.

รูปที่ 7.55 แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบคาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

โปรแกรมช่วยในการคำนวณ

Ladkrabang Tunnel Lining Design Version 3.0

8.1 กล่าวนำ

โปรแกรม Visual Basic 6 สามารถออกแบบและเขียนโปรแกรมให้ใช้งานง่ายเหมือน Windows ซึ่งทำให้เข้าใจการทำงานได้ไม่ยาก และคำนวณผลการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้มีชื่อว่า Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0 โดยใช้ทฤษฎีของ JSCE คำนวณหาค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาต้นของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบ เหล็กเสริม ผลที่สามารถหาได้คือค่าโมเมนต์คัตสูงสุด แรงในแนวแกนสูงสุด แรงเฉือนสูงสุดและค่า ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ ซึ่งนำค่าที่ได้ไปใช้ออกแบบต่อไป

8.2 วัตถุประสงค์

ยิ่งขึ้น

1. โปรแกรมนี้เขียนขึ้นเพื่อช่วยการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ให้สะดวกและรวดเร็ว
2. เพื่อให้บุคคลผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้
3. เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างอุโมงค์ต่อไป

8.3 หลักการ

1. โปรแกรมนี้ได้ใช้สูตรการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ได้คือนคือ JSCE เพื่อหา ค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาต้นของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบเหล็กเสริม แล้วเขียนออกมาเป็นโปรแกรมโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0

2. ตัวโปรแกรมจะเข้าสู่การรับค่าและคำนวณต่อไป โดยสูตรของ JSCE ซึ่งสามารถ บอกค่าโมเมนต์คัต แรงในแนวแกนและค่าแรงเฉือนที่ 0 – 180 องศาและแสดงค่าโมเมนต์คัตสูงสุด แรง ในแนวแกนสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดออกมา

3. โปรแกรมจะแสดงค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ พร้อมแบบก่อสร้างของหน้าตัดผนังอุโมงค์ได้คืน

8.4 วิธีการใช้โปรแกรม

1. เข้าสู่โปรแกรมโดยเรียกไฟล์ Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 3.0.exe

เมื่อเข้าสู่โปรแกรม หน้าแรกจะเป็นหน้าต่าง Input ซึ่งเป็นหน้าต่างที่จะต้องใส่ค่าตามที่ต้องการ โดยแบ่งเป็น 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 โดยเริ่มจากการใส่ค่าจำนวนชั้นดิน (Number of layer) จากนั้นใส่ค่าหน่วยน้ำหนักของดินและความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการใส่ค่า ระดับน้ำใต้ดิน Surcharge load สัมประสิทธิ์แรงคืนดินด้านข้าง (k_o) ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ ค่า Subgrade reaction factor ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ และค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่

Concrete Segment

Outer Diameter (Do) 5.4 m Suggestion

Thickness (t) 0.25 m

Width (b) 1.2 m

Compressive Strength (fc) 400 t/c

Unit Weight 26 kN/m³

Soil Properties

Number of Layer 4

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Height (m)
16	16	10
17	17	5
18	18	4
20	20	5.92
0	0	0

Water Level at Top of Layer No. 4

Surcharge Loads (w) 0 kN/m²

Ko (Tunnel Layer) 0.5 Suggestion

Subgrade Reaction (k) 20000 kN/m³ Suggestion

Unit Weight of Tunnel Layer 20 kN/m³

Calculation

รูปที่ 8.1 แสดงหน้าจอรับค่า Input

ถ้าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (Outer diameter) อยู่ในช่วงที่มีการก่อสร้างเป็นมาตรฐาน จะสามารถเลือกที่ Suggestion ได้ เมื่อเลือกที่ Suggestion ปกติแล้วเลือกของความหนาของผนังอุโมงค์ (Thickness) และ ความกว้างของวงแหวนประกอบผนังอุโมงค์ (Width) ที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งจะใช้หรือไม่ก็ได้

Concrete Segment

Outer Diameter (Do) 5.4 m Suggestion

Thickness (t) 0.25 m

Width (b) 1.2 m

Compressive Strength (fc) 400 t/c

Unit Weight 26 kN/m³

Soil Properties

Number of Layer 4

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Height (m)
16	16	10
17	17	5
18	18	4
20	20	5.92
0	0	0

Water Level at Top of Layer No. 4

Surcharge Loads (w) 0 kN/m²

Ko (Tunnel Layer) 0.5 Suggestion

Subgrade Reaction (k) 20000 kN/m³ Suggestion

Unit Weight of Tunnel Layer 20 kN/m³

Calculation

รูปที่ 8.2 แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion

ถ้าต้องการค่าแนะนำของค่าสัมประสิทธิ์แรงคั่นดินด้านข้าง (k_o) หรือค่า Subgrade reaction factor ให้คลิกที่เลือก Suggestion

Concrete Segment

Outer Diameter (Do) 5.4 m Suggestion Number of Layers 4

Thickness (t) 0.25 m

Width (B) 1.2 m

Compressive Strength (f_c) 40

Unit Weight 26

Soil Properties

Layer Unit Weight (γ) Height (m)

10 m

5 m

4 m

5.92 m

Do

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 Stiff Clay	0.35 - 0.45
	Stiff Clay	0.45 - 0.55
	Medium Stiff Clay	0.45 - 0.55
Total Stress Method	Medium Stiff Clay	0.55 - 0.65
	Soft Clay	0.65 - 0.75
	Very Soft Clay	0.75 - 0.85

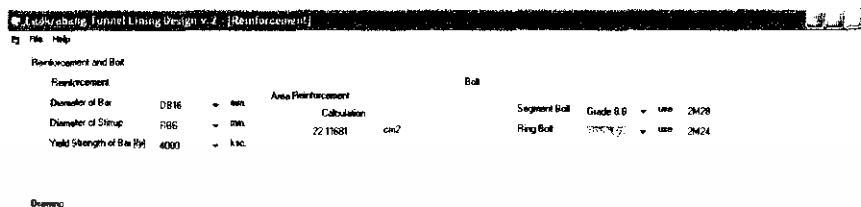
Suggestion

Calculation

รูปที่ 8.3 แสดงหน้าจอคำแนะนำของค่า (k_o) และค่า Subgrade Reaction Factor

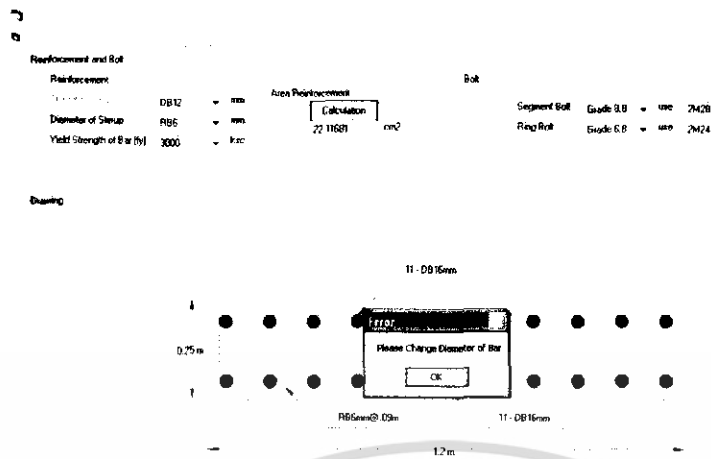
2. เมื่อคลิกปุ่ม Calculation ในหน้าแรก หน้าต่างผลการคำนวณจะแสดงขึ้น โดยจะประกอบด้วยกราฟ แสดงค่า Bending moment และ Axial force ซึ่งแกนตั้งแสดงค่าแรง แกนนอนแสดงค่าองศาจาก Crown รวมถึงค่า Moment max, Axial force max และ Shear force max

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



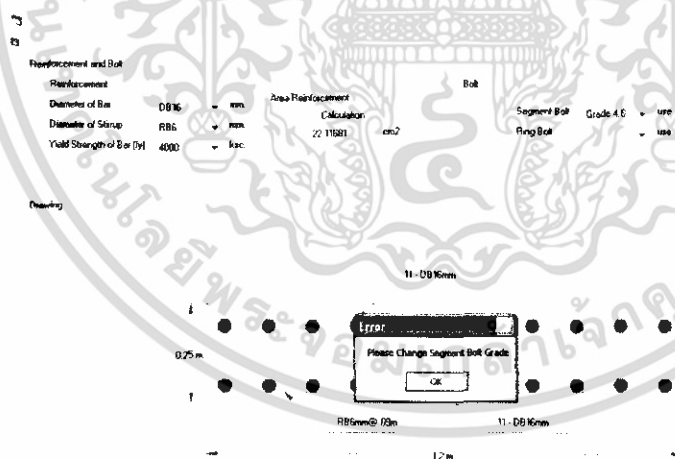
รูปที่ 8.6 แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก

ถ้าขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Diameter of Bar”

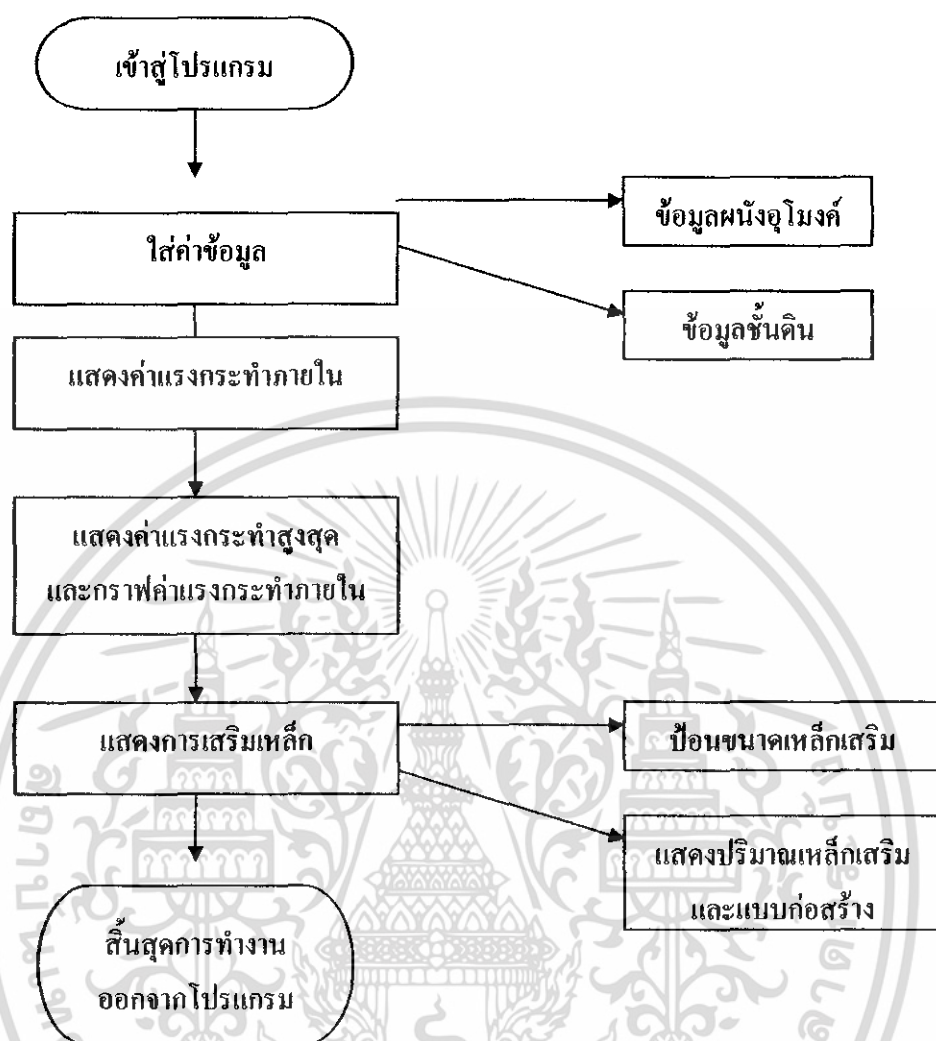


รูปที่ 8.7 แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ

ถ้า Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Segment Bolt” หรือ “Please Change Ring Bolt”



รูปที่ 8.8 แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ



รูปที่ 8.9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

8.5 ข้อกำหนดของโปรแกรม

1. การวิเคราะห์แรงดันดินจะยอมให้วิเคราะห์เพียง 5 ชั้น แต่สามารถแก้ไขตัวโปรแกรมให้รับมากขึ้นได้
2. เป็นโปรแกรมที่ใช้ทฤษฎี JSCE เพียงทฤษฎีเดียวแต่ก็เป็นทฤษฎีที่ในปัจจุบันนิยมใช้
3. การเสริมเหล็กกำหนดค่าที่น้อยที่สุดคือ 1% ซึ่งในการใช้งานจริงอาจใช้ค่าน้อยสุดต่ำกว่า 1% ก็ได้

บทที่ 9

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

9.1. กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปของโครงการงานพิเศษที่ได้ทำมาทั้งหมดและรวมถึงข้อเสนอแนะจากการที่ได้ศึกษาโครงการงานพิเศษนี้

9.2 ข้อสรุป

1. ทฤษฎี Einstein และทฤษฎี Erdmann ไม่สามารถใช้คำนวณหาค่าแรงเฉือนสูงสุดได้
2. ทฤษฎี Erdmann ไม่สามารถใช้คำนวณหาแรงกระทำภายในที่มุมต่างๆ ได้
3. ค่า Moment max และ Shear Force max ที่ได้จากทฤษฎี Muir Wood จะมีค่าน้อยที่สุดในทุกกรณี เมื่อเทียบกับทฤษฎีอื่น
4. ทฤษฎีของ Muir Wood นั้นมีค่าน้อยเหมาะสมที่จะนำมาใช้เมื่อคำนึงถึงด้านความประหยัด
5. ค่า Axial force max ที่ได้จากทฤษฎี Erdmann จะมีค่าน้อยที่สุดในทุกกรณี เมื่อเทียบกับทฤษฎีอื่น
6. ค่า Moment max เกือบทุกกรณีจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ทฤษฎีของ JSCE ยกเว้นกรณีที่อุโมงค์วางตัวในดินเหนียวอ่อนและอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเท่านั้น โดยค่า Moment max สูงสุดในกรณีที่ 1 จะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ทฤษฎี Einstein แต่ทว่าก็มีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี JSCE
7. ค่า Axial force max เกือบทุกกรณีจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ทฤษฎี Beam-spring model
8. ค่า Shear force max ทุกกรณีจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ทฤษฎี Beam-spring model
9. เมื่ออุโมงค์อยู่ลึกขึ้นค่าโมเมนต์คัตและแรงแนวแกนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น
10. แรงกระทำภายในของอุโมงค์ที่คำนวณโดยทฤษฎี JSCE และ Beam-spring model จะมีค่ามากกว่าทฤษฎีของ Einstein ,Erdmann และ Muir Wood เนื่องจากพิจารณาจากแรงภายนอกที่กระทำค่อนข้างครอบคลุมตรงกับพฤติกรรมความจริง สำหรับทฤษฎี Einstein, Erdmann จะพิจารณาค่าแรงภายนอกเพียงแรงกระทำแนวตั้ง ทฤษฎี Muir Wood จะพิจารณาจากแรงภายนอกเพียงแรงกระทำแนวตั้งและแนวนอนเท่านั้น
11. ค่าแรงกระทำภายในต่างๆ ของทฤษฎี JSCE และ Beam-spring model จะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณี
12. ทฤษฎี Beam-spring model ควรมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมมากขึ้นอีก เนื่องจากยังเป็นทฤษฎีใหม่

13. อุโมงค์ที่วางตัวในตำแหน่งเดียวกัน เมื่อมีระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือตัวอุโมงค์จะมีค่าโมเมนต์คดมากกว่าเมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับอุโมงค์
14. การคำนวณค่าแรงกระทำภายในของอุโมงค์ที่วางตัวระหว่าง 2 ชั้นดินในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดินชั้นล่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง เนื่องจากในพฤติกรรมจริงจะทำให้เกิดค่าโมเมนต์คดมากกว่า
15. ทฤษฎีทั้ง 5 นี้จะสามารถคำนวณแรงภายในเมื่ออุโมงค์วางตัวอยู่ระหว่าง 2 ชั้นดินได้ แต่อาจไม่เหมาะสมนักจึงควรมีการศึกษาใช้ทฤษฎีอื่นเพิ่มเติม
16. การขุดเจาะอุโมงค์ได้ดินสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดิน โดยในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดก็คือ การเจาะอุโมงค์ได้ดินโดยใช้หัวเจาะอุโมงค์
17. ผนังอุโมงค์ได้ดินปัจจุบันนิยมใช้คอนกรีต เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอนกรีตทันสมัยมากขึ้นผลิตได้ง่ายและราคาก็ต่ำกว่าประเภทอื่นแต่ก็ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินว่าเป็นอย่างไร ควรจะใช้ผนังประเภทไหนแบบใดควรพิจารณาถึงความปลอดภัย ความแข็งแรง และด้านราคาด้วย
18. การออกแบบเสริมเหล็กสามารถออกแบบได้หลายวิธี ควรเลือกวิธีที่มีความเหมาะสม ครอบคลุมถึงแรงกระทำภายในที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ได้ดินและประหยัควัสดุ
19. การออกแบบด้วยวิธีเสาต้นจะสามารถพิจารณาถึงค่าโมเมนต์คดและแรงแนวแกน แต่การออกแบบด้วยวิธีออกแบบคานจะพิจารณาเฉพาะค่าโมเมนต์คดเป็นหลัก เพราะฉะนั้นหากอุโมงค์อยู่ในระดับลึกมีค่าโมเมนต์คดมาก วิธีออกแบบคานอาจจะไม่สามารถใช้ได้
20. หากอุโมงค์อยู่ในระดับที่ลึก จะต้องพิจารณาถึงหน้าตัดชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ที่เหมาะสมด้วย ไม่เช่นนั้นหน้าตัดอุโมงค์ที่เลือกอาจไม่สามารถรับแรงกระทำภายในที่เกิดขึ้นได้
21. อุโมงค์ที่อยู่ลึกขึ้น จะยังต้องใช้จำนวนเหล็กเสริมมากขึ้น

9.3. ข้อเสนอแนะ

1. หนังสือเล่มนี้สามารถนำมาศึกษาถึงรายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ได้ดิน และใช้ในการศึกษาถึงการออกแบบโดยมีขั้นตอนการออกแบบที่ละเอียดและสามารถเข้าใจได้ง่าย
2. การออกแบบโดยวิธี Beam-Spring Model ยังเป็นทฤษฎีใหม่ซึ่งต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม
3. หากอุโมงค์วางตัวระหว่างชั้นดิน 2 ชั้นการใช้ทฤษฎีต่างๆ ในหนังสือเล่มนี้อาจยังไม่เหมาะสมนัก ควรพิจารณาใช้ทฤษฎีอื่นเพิ่มเติม
4. ควรลองศึกษาการออกแบบเสริมโดยทฤษฎีอื่น ซึ่งอาจจะให้ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมมากกว่าทฤษฎีตามที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้

5. หนังสือเล่มนี้มีประโยชน์ต่อวิศวกรของประเทศไทย ช่วยให้มีความรู้ในด้านการก่อสร้างผนังอุโมงค์
ได้ดินเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถทำงานด้านการก่อสร้างผนังอุโมงค์ได้ดินในประเทศไทยได้โดยไม่ต้อง
ใช้บุคลากรจากต่างประเทศ



บรรณานุกรม

- ศุภชัย สุวรรณสวัสดิ์, แหลมทอง เหล่าคงถาวร และ วสันต์ชัย ขวศิริกุลชล, 2536. การออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินสำหรับดินกรุงเทพฯ. ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ชัชว ไซวงศ์เหล็ก, วิรัช ประนัดเด และ ศิริพงษ์ นาคทอง, 2546. การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ. ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ดำรงค์ดี โมรียูเร, เนติวิธ มายขุนทด และ กิจสุเมธ พุ่มมะริน, 2548. คู่มือและซอฟต์แวร์ออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน. ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- มนเชียร กังคิเทียม, 2543. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรม ชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์.
- 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.