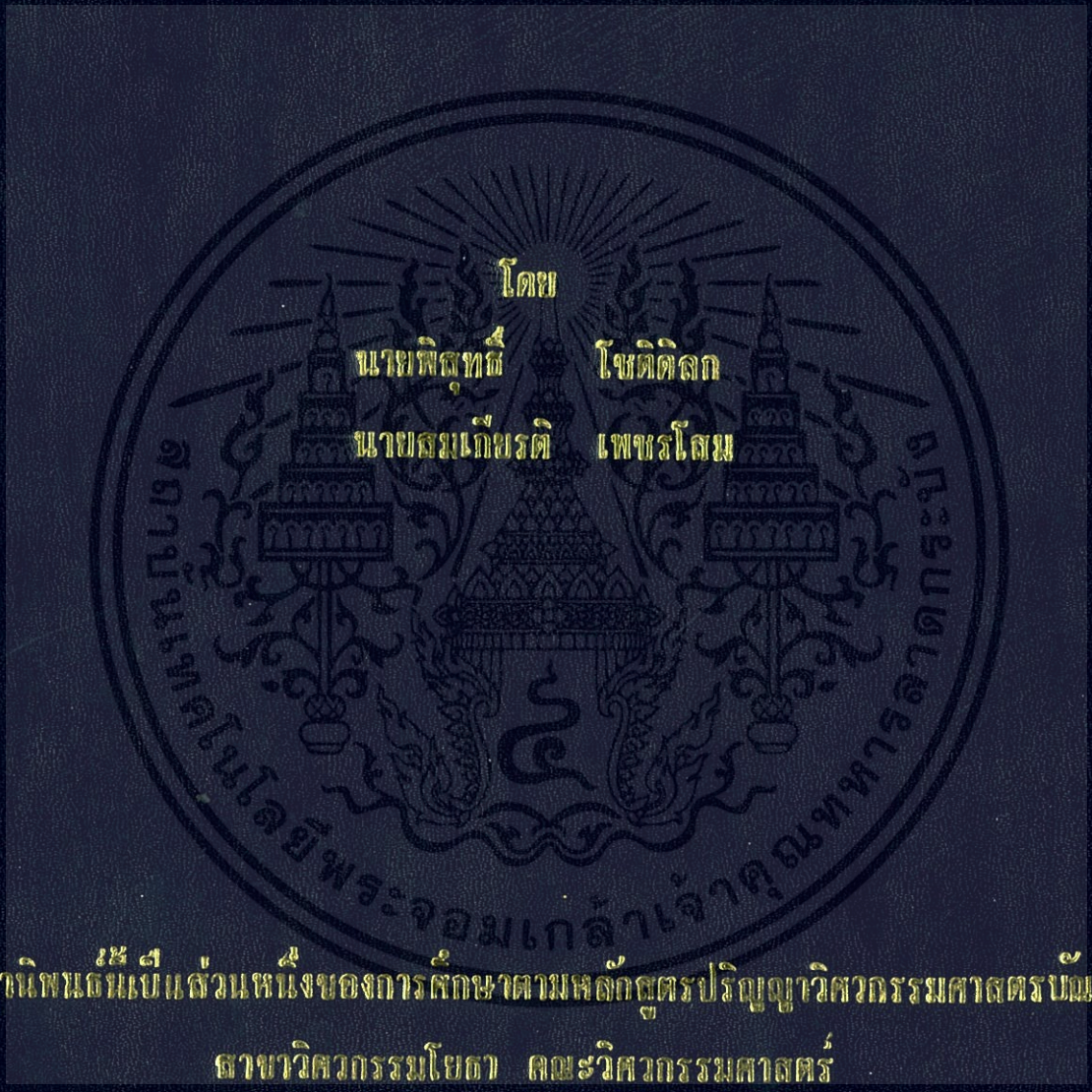
การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดิน
STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION

โดย

นายพิสุทธิ์ โชติดิลก

นายสมเกียรติ เพชรโสม



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดิน
STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION

โดย

นายพิสุทธิ์ โชติดิลก

นายสมเกียรติ เพชรโสม

วพ.
พ786ก
2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61397
วัน,เดือน,ปี 7 ก.ค. 2549

.b 11559524
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION

MR. PISUT CHOTIDILOK
MR. SOMKRIAT PETCHSOM

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
2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดิน STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION
นักศึกษา	นายพิสุทธิ์ โชติดิลก รหัสประจำตัว 44010786
	นายสมเกียรติ เพชรโสม รหัสประจำตัว 44010850
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุชัชวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	
ผศ.สุพจน์	ศรีนิล	
ดร.อุมา	ศรีบุญเรือง	
อ.อุบะ	ศิริแก้ว	
อ.สมเกียรติ	ขวัญพฤกษ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.สุพจน์ ศรีนิล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ เดือน พ.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดิน STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNEL
นักศึกษา	นายพิสุทธิ์ โชติดิลก
	นายสมเกียรติ เพชรโสม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2547

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาถึง รายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินและการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินที่มีรายละเอียดการคำนวณที่ชัดเจน โดยศึกษาจากอุโมงค์ระบายน้ำของพื้นที่เขตพระโขนง ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการพิจารณาออกแบบมี 4 วิธี ได้แก่ ทฤษฎี Terzaghi, Einstien, Muir Wood และทฤษฎี Beam-spring model รวมไปถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการเสริมเหล็กชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ โดยใช้ทฤษฎีกำลังของวิธีการออกแบบเสาสั้นและวิธีการออกแบบคาน

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

ในการเสริมเหล็กตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบพบว่า การออกแบบตามทฤษฎีกำลังของวิธีการออกแบบเสาสั้น จะออกแบบโดยใช้ค่า โมเมนต์คัด แรงตามแนวแกนและแรงเฉือน ส่วนการออกแบบตามวิธีการออกแบบคาน จะใช้เพียงค่าโมเมนต์คัดและแรงเฉือน เท่านั้น จากผลที่ได้ ค่าปริมาณเหล็กเสริมในการออกแบบตามวิธีเสาสั้นจะได้ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า

โครงการพิเศษนี้ยังได้มีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณจากตัวโปรแกรมเดิมให้สามารถใช้งานได้ง่ายและแสดงผลการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ทฤษฎีของ Terzaghi วิศวกรและนักวิจัยจึงสามารถใช้โปรแกรมนี้ในการคำนวณ อีกทั้งยังสามารถหาปริมาณเหล็กเสริมและขนาดของ bolt ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	:	STUDY OF TUNNEL LINING DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNEL
Name	:	MR. PISUT CHOTIDILOK
		MR. SOMKRIAT PETCHSOM
Field	:	CIVIL ENGINEERING
Department	:	CIVIL ENGINEERING
Faculty	:	ENGINEERING
Adviser	:	ASST.PROF.SUCHATVEE SUWANSAWAT

ABSTRACT

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่จะบ่งบอกถึงความกรุณาของ ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษนี้ได้ ตลอดระยะเวลาของงานศึกษานี้ท่านได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงการประพฤติตนให้รู้เห็นถึงความสำคัญของโครงงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับข้อคิดเห็นและคำชี้แนะเกี่ยวกับการเสริมเหล็ก และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา

ขอขอบคุณเพื่อนภาควิศวกรรมโยธาทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ รวมไปถึงนายสันติชล (ปาล์ม) เพื่อนภาควิศวกรรมสารสนเทศที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านการเขียนโปรแกรม

และขอบกล่าวคำขอบคุณทุกสิ่งทุกอย่างที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบให้โดยเฉพาะอย่างยิ่งโอกาสในการศึกษาตลอดหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิตอันถือเป็นเกียรติสูงสุดสำหรับผู้ประพันธ์

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกคนที่ได้มอบความรัก อันเป็นกำลังใจที่ดีสำหรับผู้ประพันธ์ จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายพิสุทธิ์ โชติดิลก
นายสมเกียรติ เพชรโสม
ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฑ
	สารบัญรูป	ฌ
1	**บทนำ**	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
	1.4. ขอบเขตของโครงงาน	2
	1.5. วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน	2
	1.6. ผลประโยชน์ที่จะได้รับในการดำเนินโครงงาน	2
2	**วรรณกรรมปริทัศน์**	
	2.1. กล่าวนำ	3
	2.2. แรงกระทำต่ออุโมงค์ใต้ดิน	3
	2.3. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	4
	2.3.1. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Terzaghi Method	4
	2.3.1.1. แรงดันดิน (Earth Pressure)	4
	2.3.1.2. แรงดันน้ำ	8
	2.3.1.3. น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)	9
	2.3.1.4. น้ำหนักกดทับ (Surcharge Load)	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	2.3.1.5. แรงต้านทาน (Subgrade Reaction)	10
	2.3.1.6. น้ำหนักภายในอุโมงค์	10
	2.3.1.7. น้ำหนักที่เกิดขึ้นในขณะก่อสร้าง	10
	2.3.1.8. ผลกระทบของแรงแผ่นดินไหว	11
	2.3.1.9. น้ำหนักกระทำอื่นๆ	11
	2.3.2. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Einstein Method	11
	2.3.3. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Erdmann Method	13
	2.3.4. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi Method	15
	2.3.5. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein Method	18
	2.3.6. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Erdmann Method	20
3	**มาตรฐานการก่อสร้างและออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน**	
	3.1. กล่าวนำ	22
	3.2. ข้อกำหนดทั่วไปของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน	22
	3.2.1. ขอบเขตของการประยุกต์ใช้	22
	3.2.2. คำนิยาม	29
	3.2.3. กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง	31
	3.3. การสำรวจ	35
	3.3.1. วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	35
	3.3.2. การสำรวจสภาวะของสถานที่ตั้ง	36
	3.3.2.1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง	37
	3.3.2.2. แผนในอนาคต	37
	3.3.2.3. การจัดจำแนกประเภทถนนและสภาวะการจราจร	38
	3.3.2.4. การสามารถหามาได้เกี่ยวกับที่ดินสำหรับการสร้าง	38
	3.3.2.5. สภาพแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล	38
	3.3.2.6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และน้ำเสียสำหรับการสร้าง	39
	3.3.3. การสำรวจที่มีอุปสรรค	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.3.3.1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนและอยู่ใต้ดิน	40
	3.3.3.2. สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดิน	40
	3.3.3.3. บ่อที่ยังใช้และบ่อที่ทิ้งร้าง	41
	3.3.3.4. สถานที่ตั้งสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้และงานแบบชั่วคราว	41
	3.3.3.5. อื่นๆ	41
	3.3.4. การสำรวจเพื่อการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดิน	42
	3.3.4.1 ลักษณะภูมิประเทศ	47
	3.3.4.2.ลักษณะทางธรณีวิทยา	47
	3.3.4.3. สภาพดิน	47
	3.3.4.4. น้ำใต้ดิน	49
	3.3.4.5. สภาพอากาศไร้ออกซิเจน ก๊าซอันตรายและกาซไวไฟ	50
	3.3.5. การสำรวจเพื่อมาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	50
	3.3.5.1. เสียงและการสั่นสะเทือน	51
	3.3.5.2. การเคลื่อนตัวของพื้นดิน	51
	3.3.5.3. ระดับน้ำใต้ดิน	51
	3.3.5.4. อากาศที่ขาดออกซิเจน และก๊าซอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน	51
	3.3.5.5. กากหรือตะกอนสารเคมี	52
	3.3.5.6. สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง	52
	3.3.5.7. อื่นๆ	53
	3.4. การวางแผน	53
	3.4.1. ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์	53
	3.4.1.1. รูปร่างและขนาด	53
	3.4.1.2. รูปร่างของหน้าตัด	59
	3.4.2. การวางแนวเส้นทางอุโมงค์	59
	3.4.3. ภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.4.4. ระดับของอุโมงค์	62
	3.4.5. การเลือกวิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield	63
	3.4.5.1. ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของ หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield	64
	3.4.5.2. การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้ หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield	65
	3.4.6. ผนังอุโมงค์	71
	3.4.7. แผนงานเฉพาะสำหรับการอำนวยความสะดวกในอุโมงค์	73
	3.4.8. มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน	74
	3.4.8.1. สถานการณ์ (1)	74
	3.4.8.2. สถานการณ์ (2)	76
	3.4.9.ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้าง	76
	3.4.10. มาตรการการรักษาสิ่งแวดล้อม	77
	3.4.11. หมายกำหนดการของงาน	78
	3.4.12. การตรวจสอบ การวัด และบันทึกงาน	78
	3.5. ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน	79
	3.5.1. ขอบเขตของการประยุกต์ใช้	79
	3.5.2. คำจำกัดความ	79
	3.5.3. การเลือกโครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์	82
	3.5.4. พื้นฐานของการออกแบบ	84
	3.5.5. ขั้นตอนการออกแบบ	84
	3.5.6. แบบก่อสร้าง	84
	3.6. น้ำหนักบรรทุก	85
	3.6.1. น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ	85
	3.6.2. แรงดันในแนวดิ่งและแนวราบ	86
	3.6.2.1. แรงดันดินในแนวดิ่ง	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.6.2.2. แรงดันดินในแนวราบ	88
	3.6.3. แรงดันน้ำ	88
	3.6.4. น้ำหนักบรรทุกคงที่	89
	3.6.5. ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน	90
	3.6.6. แรงต้านทานของดิน	90
	3.6.7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง	91
	3.6.8. น้ำหนักภายใน	92
	3.6.9. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว	93
	3.6.10. ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง	94
	3.6.11. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง	95
	3.6.12. ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน	95
	3.6.13. น้ำหนักอื่นๆ	96
	3.7. รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)	96
	3.7.1. มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ	101
	3.7.2. วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring)	102
	3.8. การคำนวณโครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)	104
	3.8.1. พื้นฐานของการคำนวณโครงสร้าง	104
	3.8.2. การคำนวณองค์ประกอบของแรง	105
4	**ทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์**	
	4.1. กล่าวนำ	112
	4.2. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi	112
	4.3. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein	115
	4.4. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood	116
	4.5. ทฤษฎีหาแรงกระทำภายในโดยวิธี Beam-spring model	118
	4.5.1. แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง	118
	4.5.2. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	4.5.3. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้าง	119
	4.5.3.1. ปฏิกิริยาของดิน	120
	4.5.3.2. แรงดันน้ำ	121
	4.5.3.2. น้ำหนักของตัวอุโมงค์	121
	4.5.4. แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้ออกแบบในวิธี Beam-spring model	121
5	**ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม**	
	5.1. กล่าวนำ	122
	5.2.พื้นฐานการออกแบบ	122
	5.1.1. วิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง	123
	5.1.1.1. กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด	125
	5.1.1.2. กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง	127
	5.1.1.3. เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง	128
	5.1.2. วิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง	129
	5.1.2.1. การออกแบบหน้าตัครูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว	129
	5.2.1.2. เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง	130
6	**ตัวอย่างการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน**	
	6.1. กล่าวนำ	131
	6.2. การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์	131
	6.2.1. ชิ้นส่วนคอนกรีต	131
	6.2.2. คุณสมบัติของวัสดุ	132
	6.2.3. สภาพชั้นดิน	132
	6.2.4. หาแรงกระทำภายนอก	134
	6.2.5. หา แรงกระทำภายใน	140
	6.2.5.1. โดยทฤษฎีของ Terzaghi	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	6.2.5.2. โดยทฤษฎีของ Einstein	145
	6.2.5.3. ทฤษฎีของ Muir Wood	150
	6.2.5.4. ทฤษฎี Beam-Spring Model	155
	6.3. การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน	160
	6.3.1. ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบเสาสั้น	160
	6.3.2. ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบคาน	163
7	**เปรียบเทียบผลการออกแบบ**	
	7.1. กล่าวนำ	166
	7.2. การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำภายใน	166
	7.3. เปรียบวิธีการออกแบบเหล็กเสริม	168
8	**โปรแกรมช่วยในการคำนวณ Ladkrabang Tunnel Lining Design Version 2.0**	
	8.1. กล่าวนำ	170
	8.2. วัตถุประสงค์	170
	8.3. หลักการ	170
	8.4. วิธีการใช้โปรแกรม	171
	8.5. ข้อจำกัดของโปรแกรม	177
9	**ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ**	
	9.1. กล่าวนำ	178
	9.2. ข้อสรุป	178
	9.3. ข้อเสนอแนะ	179
	บรรณานุกรม	180
	ภาคผนวก แนวทางการเขียนโปรแกรม	ผ1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างจากสูตรทฤษฎี Empirical	14
2.2.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน	17
3.1.	การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์	24
3.2.	กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารประยุกต์ได้	32
3.3.	รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดิน สำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)	43
3.4.	แสดงถึงแผนภาพในการเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เหมาะสม	67
3.5.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง	88
3.6.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต	99
3.7.	แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก	100
3.8.	แสดงขนาดเรียวและองศาของความเรียว	103
4.1.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-Spring Model	119
6.1.	แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 1	132
6.2.	แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 2	133
6.3.	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน	136
6.4.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 1	140
6.5.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 1	140
6.6.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 1	140
6.7.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 1	141
6.8.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 1	141
6.9.	แสดงแรงกระทำรวมที่ได้ในกรณีที่ 1	141
6.10.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 2	143
6.11.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 2	143
6.12.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 2	143
6.13.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 2	143
6.14.	แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 2	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
6.15.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดในกรณีที่ 2	144
6.16.	แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1	146
6.17.	แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2	149
6.18.	แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	151
6.19.	แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	151
6.20.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1	151
6.21.	แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	153
6.22.	แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	153
6.23.	แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2	154
6.24.	แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k_r\delta)$ โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	156
6.25.	แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	156
6.26.	แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k_r\delta)$ โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	158
6.27.	แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	158
7.1.	แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎีต่างๆ	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1.	แสดงหน้าตัดและชั้นดินรอบด้านของอุโมงค์	5
2.2.	การคำนวณเพื่อลดค่าแรงดันดินเหนืออุโมงค์	6
2.3.	แสดงแรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์	7
2.4.	เงื่อนไขของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก	8
2.5.	แสดงลักษณะ Hydrostatic Pressure	9
2.6.	แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวนอนที่จุดต่างๆ	12
2.7.	แสดงลักษณะความลึกถึงศูนย์กลางอุโมงค์	12
2.8.	แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)	13
2.9.	แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอก	14
2.10.	แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี Terzaghi Method	15
2.11.	แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)	18
2.12.	แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอกแบบ Compressibility Ratio (C^*)	19
2.13.	แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอก แบบ Flexibility Ratio (F^*)	19
2.14.	แสดงการกระจายแรงภายในแนวแกนและโมเมนต์ดัดมากที่สุด	20
3.1.	แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ขณะเจาะอุโมงค์	46
3.2.	แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิด Sink Hole	48
3.3.	ระดับความดันน้ำในดินที่ตรวจวัดในโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล	49
3.4.	แสดงองค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ	54
3.5.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน	55
3.6.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย	55
3.7.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ	56
3.8.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิ้ลพลังงาน	57
3.9.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิ้ลสื่อสาร	57
3.10.	แสดรูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.11.	แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์	58
3.12.	แสดงภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์น้อยที่สุดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ Shield	62
3.13	ประเภทของหัวเจาะ Shield	63
3.14.	แสดงถึงแผนภาพของการเลือกของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield	66
3.15.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง	80
3.16.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทประเภทคานคอนกรีต	80
3.17.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ	81
3.18.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค	81
3.19.	แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์	82
3.20.	แสดงแบบจำลองสปริง	91
3.21.	แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ	94
3.22.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี	101
3.23.	แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์	101
3.24.	แสดงแบบแผนของแบบจำลองในการออกแบบ	107
3.25.	แสดงการกระจายของน้ำหนักบรรทุกออกแบบตามจุดประสงค์ต่างๆ	107
3.26.	แสดงการถ่ายโมเมนต์ดัดสู่วงแหวนที่อยู่ติดกัน	109
4.1.	แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี Terzaghi	112
4.2.	แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)	115
4.3.	แสดงลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนประกอบของวิธี Beam-Spring Model	118
4.4.	แสดงแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-Spring Model	119
4.5.	แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนวยาว	120
4.6.	แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-Spring Model	121
5.1	แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
5.2.	การกระจายความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัดภายใต้ผลรวมของแรงดัดและแรงตามแกน	123
5.3.	สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด	126
6.1.	แสดงขนาดของอุโมงค์	131
6.2.	แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 1	133
6.3.	แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 2	134
6.4.	แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวนอนที่จุดต่างๆ	134
6.5.	เงื่อนไขของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก	135
6.6.	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1	142
6.7.	กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1	142
6.8.	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2	144
6.9.	กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2	145
6.10.	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 1	147
6.11.	กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 1	147
6.12.	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 2	149
6.13.	กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 2	150
6.14.	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 1	152
6.15.	กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 1	152
6.16.	กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 2	154
6.17.	กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 2	155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.18.	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	156
6.19.	กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1	157
6.20.	กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	158
6.21.	กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2	159
6.22.	แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสั้น	162
6.23.	แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์วิธีออกแบบคาน	165
7.1.	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Moment Max ของทฤษฎีต่างๆในกรณีที่ 1	167
7.2.	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Moment Max ของทฤษฎีต่างๆในกรณีที่ 2	167
8.1.	แสดงหน้าจอต้อนรับสู่โปรแกรม Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 2.0	171
8.2.	แสดงหน้าจอรับค่า Input	172
8.3.	แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion	172
8.4.	แสดงหน้าจอค่าแนะนำของค่า (k_o) และค่า Subgrade Reaction Factor	173
8.5.	แสดงหน้าจอแสดงค่าแรงกระทำภายใน	174
8.6.	แสดงหน้าจอเมื่อคลิก Detials	174
8.7.	แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก	175
8.8.	แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ	176
8.9.	แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ	176
8.10.	แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1. กล่าวนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเทคโนโลยีการก่อสร้างใหม่ๆ เข้ามาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา โดยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินนี้ก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถช่วยแก้ปัญหาต่างๆได้ และเนื่องจากในปัจจุบันการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ วิธีที่จะใช้ในการดำเนินโครงงาน ขอบเขตของโครงงาน และผลที่จะได้รับในการดำเนินโครงงานนี้

1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากความต้องการการแก้ปัญหาการคมนาคมขนส่ง การระบายน้ำ รวมถึงการส่งน้ำ ในปัจจุบันได้มีการแก้ปัญหาโดยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน แต่เนื่องจากเทคโนโลยีในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินนั้นยังเป็นทฤษฎีที่ใหม่สำหรับคนไทย ทำให้การออกแบบและการก่อสร้างต้องพึ่งพาบุคลากรจากต่างประเทศที่มีความรู้และความชำนาญในเรื่องของอุโมงค์ โดยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในประเทศไทยนั้นก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนในเขตกรุงเทพมหานครได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกต่างๆ การก่อสร้างอุโมงค์ของรถไฟฟ้าใต้ดิน อีกทั้งการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำและส่งน้ำ

ดังนั้นการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินจึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ แต่ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่สำหรับบุคคลากรในประเทศ จึงควรมีการศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดิน เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศได้ในอนาคต

1.3. วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของงานอุโมงค์ใต้ดิน รวมทั้งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบและวิธีคำนวณออกแบบ
2. เปรียบเทียบทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบอุโมงค์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
3. นำเสนอรายละเอียดการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สามารถพัฒนาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4. ขอบเขตของโครงงาน

1. ศึกษาดูงานก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินจากสถานที่ก่อสร้างจริง
2. ศึกษาและวิเคราะห์ทฤษฎีการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน
3. พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ

1.5. วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์
2. พิจารณาการออกแบบวิธีการต่างๆ ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ
3. นำวิธีการออกแบบมาใช้คำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน
4. ศึกษาการเขียนและพัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ให้สามารถใช้งานได้ง่ายแสดงผลรวดเร็วและถูกต้อง

1.6. ผลประโยชน์ที่จะได้รับในการดำเนินโครงงาน

เมื่อทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของงานอุโมงค์ และวิธีการคำนวณออกแบบแล้ว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุโมงค์ใต้ดิน อีกทั้งยังเป็นข้อมูลให้ผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ช่วยในการคำนวณ ซึ่งสะดวกและเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะทำการศึกษาในเรื่องอุโมงค์ใต้ดินได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1. กล่าวนำ

ชัชว์ ไชยวงศ์เหล็ก, วิรัช ประนัดเต และ ศิริพงษ์ นาคทอง (2546) ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ทฤษฎีที่ใช้พบว่า จากการวิเคราะห์แรงกระทำภายนอก พบว่าทั้ง 5 ทฤษฎี แรงกระทำภายนอกในแนวดิ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามความลึกและหน่วยน้ำหนักของดิน ส่วนแรงกระทำในแนวนอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต โดยแรงกระทำภายนอกที่คำนวณได้จะนำไปใช้หาแรงกระทำภายในเพื่อใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์ต่อไป

การวิเคราะห์แรงกระทำภายในพบว่าทฤษฎีของ Terzaghi ใช้หลักการสมดุลของแรงภายนอกที่กระทำต่ออุโมงค์และสมมติฐานอยู่บนบรรทัดฐานของสภาพชั้นดินในกรณีศึกษา ส่วนผลการคำนวณจากทฤษฎีของ Einstein และ Erdmann จะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของดินเป็นหลัก ซึ่งค่าแรงกระทำต่ออุโมงค์ที่คำนวณได้จะมีค่าน้อยกว่าแรงที่ได้จากทฤษฎีของ Terzaghi ดังนั้นหากยึดตามหลักความปลอดภัยทฤษฎีของ Terzaghi จะมีความเหมาะสมมากกว่า รวมทั้งยังได้มีการเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบที่สามารถใช้งานได้ง่าย

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานการศึกษาการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

2.2. แรงกระทำต่ออุโมงค์ใต้ดิน

แรงกระทำต่างๆที่กระทำต่อผนังอุโมงค์เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบโครงสร้างของอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งสามารถบอกชนิดของแรงกระทำต่างๆได้ดังนี้

1. แรงดันดิน (Ground Pressure)
2. แรงดันน้ำ (Water Pressure)
3. น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)
4. น้ำหนักกดทับ (Surcharge Load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แรงต้านทานจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ (Subgrade Reaction) พิจารณาน้ำหนักเพิ่มเติมด้วย เนื่องจากบางกรณีที่อุโมงค์ต้องมีน้ำหนักภายใน เช่น อุโมงค์ขนส่งน้ำ น้ำมันล้วนมีแรงดันภายในค่อนข้างสูง
6. น้ำหนักจากภายในอุโมงค์ (Load from Inside)
7. น้ำหนักขณะทำการก่อสร้าง (Load during Construction State)
8. ผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว (Effects of Earthquake)

น้ำหนักบรรทุกพิเศษ : เนื่องจากการออกแบบกำหนดอายุการใช้งานค่อนข้างจะนานอีก ทั้งการทำนายพฤติกรรมของชั้นดินอาจจะไม่ครอบคลุม หรือเกิดความผิดพลาดขณะทำการก่อสร้างมี ผลทำให้ การรับแรงดันของผนังอุโมงค์ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เช่น ดินเกิดการทรุดตัวมากกว่าที่ออกแบบไว้ อาจจะมาจากการปรับปรุงคุณภาพดินไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ ขาดความชำนาญของผู้ควบคุม และการเจาะอุโมงค์เชื่อมต่อไม่มีการเตรียมการที่ดีใช้เวลานาน ทำให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ หน่วยแรงรอบผนังอุโมงค์ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ หรือการเจออุปสรรคนอกเหนือการออกแบบ ตัวอย่าง การไหลทะลักของดินหน้าหัวเจาะ ดังนั้นต้องมีการปรับแก้ให้ปลอดภัยมากที่สุด

9. ผลกระทบจากอุโมงค์ข้างเคียง (Effects of Adjacent Tunnel)
10. ผลกระทบของการทรุดตัว (Effect of Settlement)
11. น้ำหนักอื่นๆ (Other Loads)

เราสามารถแบ่งชนิดของแรงกระทำได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆได้ โดยข้อ 1-5 คือ Primary Loads และข้อ 6-8 คือ Secondary Loads ข้อ 9-11 คือ Special Loads

2.3. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

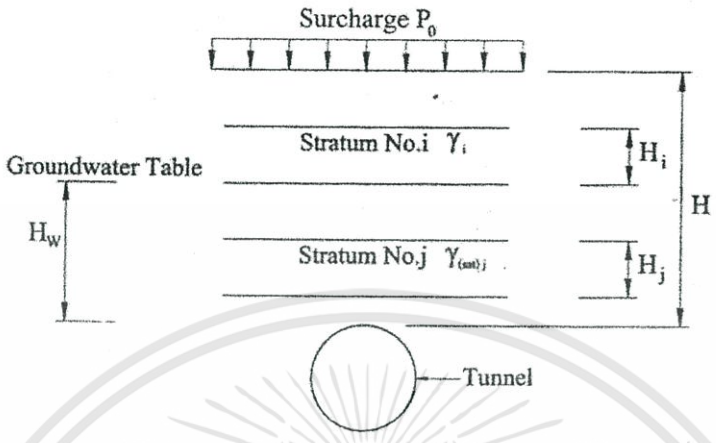
2.3.1. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Terzaghi Method

2.3.1.1. แรงดันดิน (Earth Pressure)

จากรูปที่ 2.1. แสดงภาพตัดขวางและชั้นดินรอบอุโมงค์ การหาแรงดันดินควรจะให้เหมาะสมกับวิธีการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น แรงดันดินควรจะกระทำตามแนวรัศมีของผนังอุโมงค์หรือแบ่งออกเป็นแรงดันด้านบนและแรงดันด้านข้าง อีกกรณี แรงดันด้านบนที่กระทำเหนืออุโมงค์ที่ตำแหน่ง Crown ควรจะเป็น Uniform loads กรณีแรกอุโมงค์อยู่ตื้น น้ำหนักที่กดในแนวดิ่งจะเท่ากับ overbunder pressure ซึ่งในกรณีการออกแบบแรงกระทำสามารถคำนวณได้จากสูตรของ Terzaghi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัง สมการ 2.1. กรณีที่สองอุโมงค์อยู่ลึกมาก การออกแบบอุโมงค์ใต้ดินควรคำนวณเพื่อลดแรงดันดิน เหนืออุโมงค์ ดังสมการ 2.2.



รูปที่ 2.1. แสดงหน้าตัดและชั้นดินรอบด้านของอุโมงค์

$$P_{el} = P_0 + \sum \gamma_i H_i + \sum \gamma_j^i H_j \qquad (2.1.)$$

เมื่อ P_0 = surcharge

γ_i = หน่วยน้ำหนักชั้นที่ i ซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน

H_i = ความหนาของชั้นที่ i ซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน

γ_j^i = หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลชั้นที่ j ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน$(\gamma_{sat(j)} - \gamma_w)$

H_j = ความหนาของชั้นที่ j ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

$$H = \sum H_i + \sum H_j$$

$$h_0 = \frac{B_1\left(1 - \frac{c}{B_1}\gamma\right)}{K_0 \tan\phi}\left(1 - e^{-K_0 \tan\phi \frac{H}{B_1}}\right) + \frac{P_0 e^{-K_0 \tan\phi \frac{H}{B_1}}}{\gamma}$$

$$B_1 = R_0 \cot\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right)$$

$$P_{e1} = \gamma \cdot h_0 \qquad \text{(ตำแหน่งอุโมงค์อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน)}$$

ถ้า $(h_0 \le H_w)$ $\qquad P_{e1} = \gamma' \cdot h_0 \qquad (2.2.)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

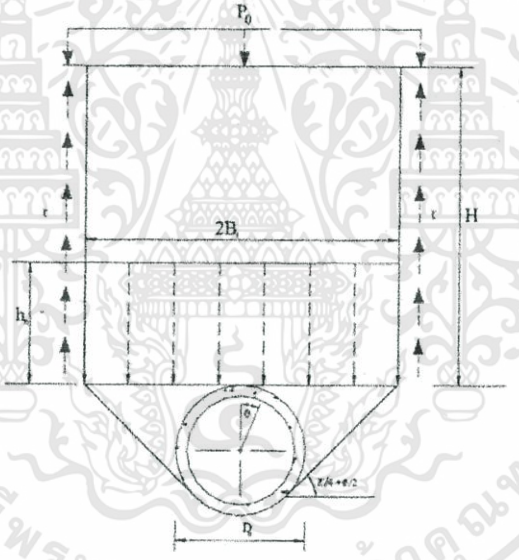
เมื่อ h_0 = ความหนาสำหรับการลดค่าแรงดันดินเหนืออุโมงค์ด้วยหน่วยน้ำหนักของดิน

K_0 = อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านข้างและแรงดันด้านบน

P_{el} = แรงดันดินในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Top ของอุโมงค์

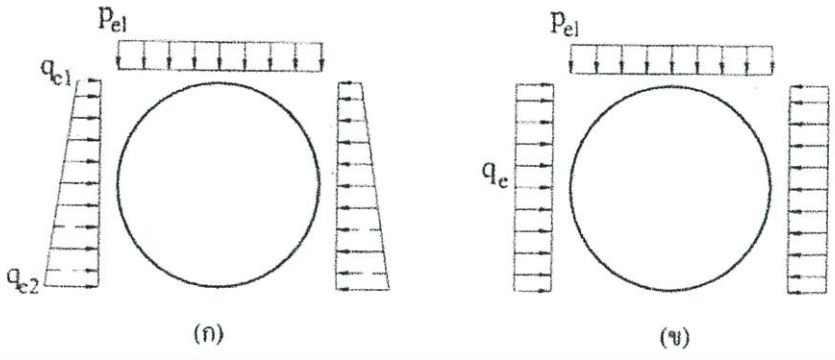
สำหรับหน่วยน้ำหนักของดินที่ใช้ในการคำนวณแรงดันดิน หน่วยน้ำหนักเปียก(Wet Unit Weight) ควรที่จะใช้กับดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน และ หน่วยน้ำหนักจมน้ำ(Submerged Unit Weight) หรือหน่วยน้ำหนักประสิทธิผล ควรจะใช้กับดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ดังรูปที่ 2.1.

จากรูปที่ 2.3. แรงดันดินด้านข้างเป็นแบบ Uniform Loads แปรผันตามหน่วยน้ำหนักของดิน (γ), ความลึก (H) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง (K_0) ซึ่งความลึกที่วัดจากผิวดินถึง Centriod ตำแหน่งเหนือ (Crown) และใต้ (Invert) ตามลำดับ สามารถหาค่าแรงดันด้านข้างได้ ดังสมการที่ 2.3.-2.6.



รูปที่ 2.2. การคำนวณเพื่อลดค่าแรงดันดินเหนืออุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3. แสดงแรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

จากรูปที่ 2.3.(ก) แรงดันดินด้านข้างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สามารถหาค่าแรงดันดินด้านข้างได้ดังสมการที่ 2.3., 2.4., 2.5., 2.6.

$$q_{e1} = K_0\left(P_{e1} + \gamma \cdot \frac{t}{2}\right) \quad \text{(ถ้าตำแหน่งอุโมงค์เหนือระดับน้ำใต้ดิน)} \tag{2.3.}$$

$$q_{e1} = K_0\left(P_{e1} + \gamma' \cdot \frac{t}{2}\right) \quad \text{(ถ้าตำแหน่งอุโมงค์ใต้ระดับน้ำใต้ดิน)} \tag{2.4.}$$

$$q_{e2} = K_0\left\{P_{e1} + \gamma \cdot \left(2R_0 - \frac{t}{2}\right)\right\} \quad \text{(ถ้าตำแหน่งอุโมงค์เหนือระดับน้ำใต้ดิน)} \tag{2.5.}$$

$$q_{e2} = K_0\left\{P_{e1} + \gamma' \cdot \left(2R_0 - \frac{t}{2}\right)\right\} \quad \text{(ถ้าตำแหน่งอุโมงค์ใต้ระดับน้ำใต้ดิน)} \tag{2.6.}$$

เมื่อ q_{e1} = แรงดันดินในแนวนอนที่ตำแหน่ง Crown ของอุโมงค์

q_{e2} = แรงดันดินในแนวนอนที่ตำแหน่ง Invert ของอุโมงค์

รูปที่ 2.3.(ข) ทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็นแรงดันด้านข้างเฉลี่ย ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.7.

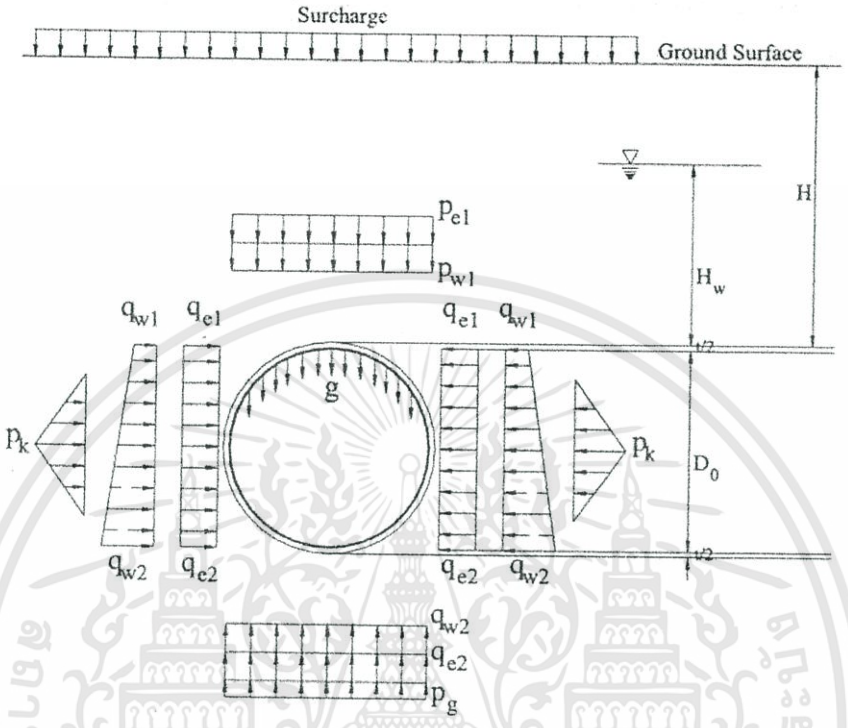
$$q_e = (q_{e1} + q_{e2})/2 \tag{2.7.}$$

เมื่อ q_e = แรงดันดินในแนวนอนเฉลี่ย Spring Line ของอุโมงค์

จากสมการ 2.3. ถึง 2.7. สามารถเลือกนำไปใช้ให้เหมาะสมกับกรณีที่ทำการวิเคราะห์ เช่น ถ้าอุโมงค์อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินก็เลือกใช้สมการ 2.3. และ 2.5. ถ้าอุโมงค์อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้สมการ 2.4. และ 2.6. เมื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีอื่นที่มีลักษณะแรงดันด้านข้างเป็น Uniformed Loads ก็ใช้สมการ 2.7.



รูปที่ 2.4. เงื่อนไขของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก

การคำนวณหาค่าแรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Bottom เป็นผลมาจากแรงต้านน้ำหนักเหนืออุโมงค์รวมถึงน้ำหนักของตัวอุโมงค์ด้วย ดังสมการที่ 2.8.

$$P_{e2} = P_{e1} + P_{w1} + P_g - P_{w2} \tag{2.8.}$$

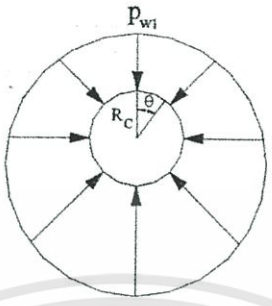
เมื่อ P_{e2} = ค่าแรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Bottom ของอุโมงค์

2.3.1.2. แรงดันน้ำ

แรงดันน้ำที่กระทำกับตัวอุโมงค์เป็นแรงดันแบบ Hydrostatic Pressure ดังรูปที่ 2.5. ผลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อตัวอุโมงค์ เป็นแรงลอยตัวถ้าผลของแรงดันดินในแนวดิ่งอันเนื่องมาจากน้ำหนักเหนืออุโมงค์ และน้ำหนักบรรทุกคงที่มีค่ามากกว่าแรงลอยตัว ความแตกต่างของแรงจะก่อให้เกิดแรงดันดินในแนวดิ่งใต้อุโมงค์ (subgrade reaction) ถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าแรงดันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักเหนืออุโมงค์และน้ำหนักบรรทุก จะทำให้อุโมงค์ลอย ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 2.9. ถึง 2.10.



รูปที่ 2.5. แสดงลักษณะ Hydrostatic Pressure

$$P_{w1} = \gamma_w \cdot H_w \qquad \text{(แรงดันน้ำที่ตำแหน่ง Crown)} \tag{2.9.}$$

$$P_w = P_{w1} + \gamma_w R_c (1 - \cos\theta) \tag{2.10.}$$

เมื่อ R_c = รัศมีของอุโมงค์ถึงจุด Centriod

P_{w1} = ค่าแรงดันน้ำในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Top ของอุโมงค์

จากสมการ 2.10. แสดงแรงดันน้ำที่กระทำ ณ ตำแหน่งต่างๆรอบผนังอุโมงค์ โดยพิจารณามุมเป็นลักษณะตามเข็มนาฬิกาดังรูปที่ 2.5.

2.3.1.3. น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ในแนวดิ่งกระทำจุดศูนย์ถ่วงของอุโมงค์ตลอดทั้งแนว โดยอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.11. และ 2.12. ตามลำดับ

$$P_g = \frac{W}{2\pi R_c} \tag{2.11.}$$

$$P_g = \gamma_c \cdot t \quad \text{(ในกรณีที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม)} \tag{2.12.}$$

เมื่อ P_g = แรงปฏิกิริยาจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

γ_c = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.4. น้ำหนักกดทับ (Surchage Load)

น้ำหนักกดทับจะทำให้แรงดันดินที่กระทำกับตัวอุโมงค์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงจากน้ำหนักต่างๆ เช่น น้ำหนักการจราจรบนถนนและน้ำหนักของอาคาร

2.3.1.5. แรงต้านทาน (Subgrade Reaction)

Subgrade Reaction แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกแรงดันด้านข้าง (P_k) (Spring Line) จะเป็นสัดส่วนกับค่าการเคลื่อนตัวของดิน และค่าแฟคเตอร์ของสัดส่วนดังกล่าวจะถูกกำหนดเป็น ค่าสัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction ซึ่งค่าแฟคเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับ Ground Stiffness และขนาดของอุโมงค์ (รัศมีของอุโมงค์) ค่าความแข็งแกร่ง (Rigidity) ของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของตัวชิ้นส่วน จำนวนจุดต่อ และชนิดของจุดต่อ ส่วนที่สองแรงดันด้านล่าง (q_{e2}) (Bottom) เป็นแรงต้านเนื่องจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ แรงดันน้ำ และอุปกรณ์อื่นๆ ดังรูปที่ 2.4.

2.3.1.6. น้ำหนักภายในอุโมงค์

น้ำหนักกระทำเป็นผลมาจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในอุโมงค์หรือแรงดันน้ำภายในอุโมงค์ควรพิจารณาด้วย ดังสมการ 2.13. ถึง 2.14.

$$2rP_{e2} + \pi r^2 \gamma_w = 2rP_{e1} + 2\pi rP_g \qquad (2.13.)$$

$$P_{e2} = P_{e1} + \pi P_g - \pi\gamma_w / 2 \qquad (2.14.)$$

เมื่อ P_{e2} = แรงดันดินในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Bottom ของอุโมงค์

2.3.1.7. น้ำหนักที่เกิดขึ้นในขณะก่อสร้าง

แรงผลักจากการดันผนัง เมื่อทำการผลิตชิ้นส่วน กำลังของชิ้นส่วนที่ต้านแรงผลักจากการดันผนังควรจะถูกทดสอบก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของแรงที่เกิดจากการดันผนัง ผู้ออกแบบควรที่จะตรวจสอบแรงเฉือนและแรงดัด ซึ่งเป็นผลมาจากการเยื้องศูนย์รวมทั้งตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ น้ำหนักระหว่างการขนส่งและติดตั้งชิ้นส่วน แรงดันของการ Backfill Grouting, น้ำหนักอันเนื่องมาจากกิจกรรมก่อสร้างและน้ำหนักอื่นๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ของ Backup Carriage แรงดันของการ Jack ชิ้นส่วน แรงบิดของการ Cutter Head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.8. ผลกระทบของแรงแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวจะใช้การวิเคราะห์แบบสถิต เช่น วิธี Seismic Deformation วิธี Seismic Coefficient หรือการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์

2.3.1.9. น้ำหนักกระทำอื่นๆ

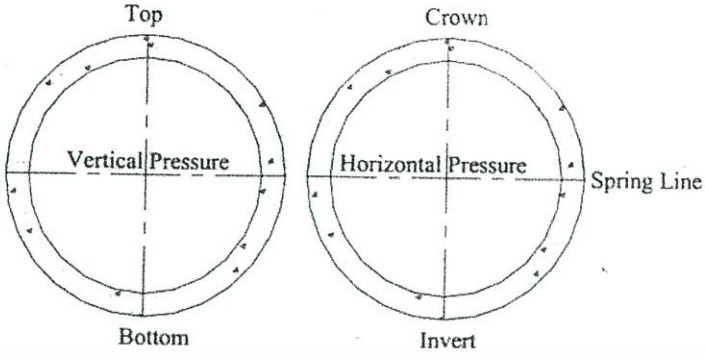
ผลกระทบการปรับแก้ผนังอุโมงค์ และ/หรือ ผลจากการทรุดตัวจะถูกนำมาพิจารณาถ้าจำเป็น จากการศึกษาพิจารณาผลของแรงกระทำในระยะสั้น (Short Term) จะเป็นแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้าง ประกอบชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ (Segment) การถีบ Thrust Jack เพื่อผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนไปข้างหน้าและการ Backfill Grouting เพื่อลด Tail Void ซึ่งดินยังอยู่ในสภาพ Undrained และไม่เกิดการ Consolidation จึงถือเป็นแรงกระทำระยะสั้น

เมื่อประกอบชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ (Segment) และการ Backfill Grouting เพื่อลด Tail Void ซึ่งดินยังอยู่ในสภาพ Undrained และไม่เกิดการ Consolidation ผนังอุโมงค์ก็จะทำหน้าที่รับแรงดันดินทั้งหมด ได้แก่ แรงดันเหนืออุโมงค์ทั้งหมด แรงดันด้านข้างและแรงดันน้ำ

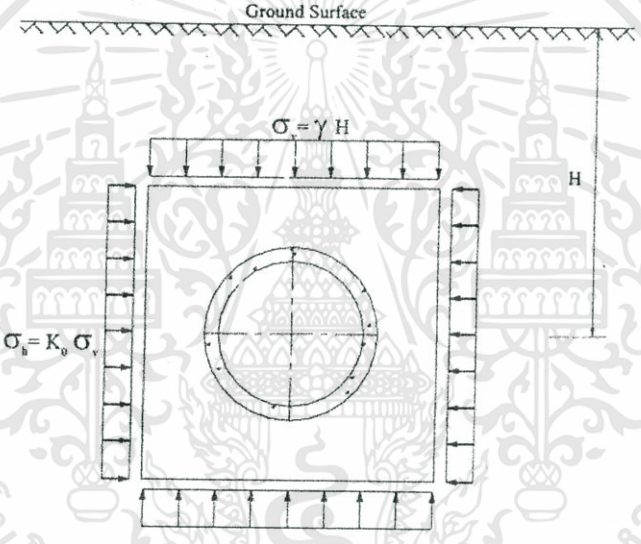
2.3.2. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Einstein Method

วิธีนี้จะใช้หลักการของทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์จะสามารถหาค่า การเสียรูปและแรงที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ได้ โดยมีสมมติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัดเป็นอีลาสติกเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) สามารถพิจารณาแรงกระทำภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ได้เป็น 2 ส่วน คือ แรงกระทำในแนวดิ่ง (Top, Bottom) ความลึกที่ใช้ในการคำนวณจะพิจารณาจากผิวดินถึงศูนย์กลางอุโมงค์ และอันที่สองแรงกระทำในแนวนอน (Crown,Invert,Spring Line) ดังรูปที่ 2.6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6. แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวนอนที่จุดต่างๆ



รูปที่ 2.7. แสดงลักษณะความลึกถึงศูนย์กลางอุโมงค์

แรงกระทำภายนอกในแนวดิ่ง จะอยู่ในสภาวะสมดุล คือ แรงที่ Top อุโมงค์ และแรงที่ Bottom อุโมงค์ ซึ่งมีค่าเท่ากันตลอด หาได้จากสมการ 2.15. ดังรูปที่ 2.7.

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \qquad (2.15.)$$

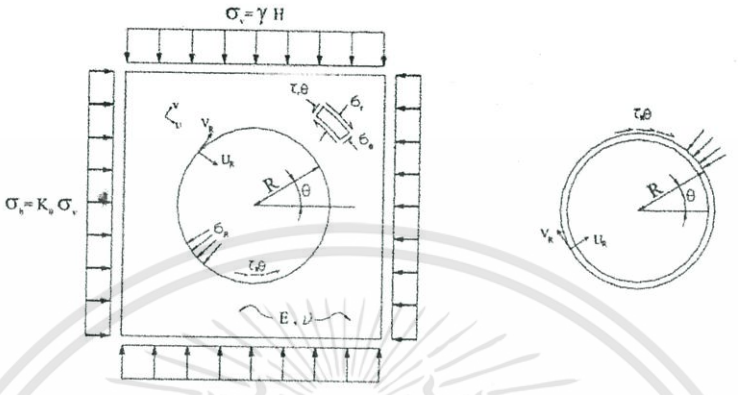
เมื่อ H = ความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางอุโมงค์ (m)

แรงกระทำภายนอกในแนวนอนเท่ากันตลอดเป็นแบบ Uniform load จะอยู่ในสภาวะสมดุล คือ แรงที่ Crown, Invert, Spring Line ของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v \qquad (2.16.)$$

เมื่อ K_0 = ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต



รูปที่ 2.8. แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)

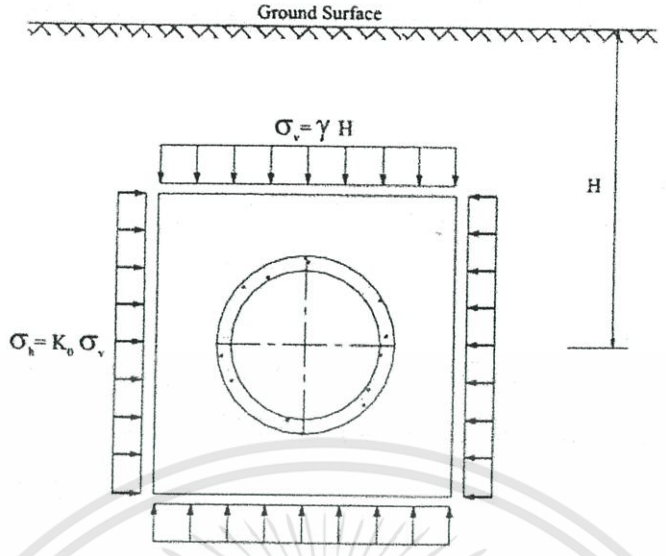
2.3.3. ทฤษฎีแรงกระทำภายนอกของ Erdmann Method

การคำนวณแรงกระทำภายนอกของ Erdmann Method ได้สมมติดินรอบอุโมงค์เป็นเนื้อเดียวกันตลอดพิจารณาแรงกระทำในแนวดิ่งเป็นแบบ Uniform Load จะเท่ากันทั้งตำแหน่ง Top และ Bottom ซึ่งแรงกระทำในแนวนอนก็เช่นเดียวกันเป็นแบบ Uniform Load แรงดันดินด้านข้างจะเท่ากันตลอดความลึก

แรงกระทำในแนวดิ่งจะหาได้จากสมการ

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \qquad (2.17.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9. แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอก

แรงกระทำด้านข้างจะหาได้จากสมการ

$$\sigma_h = K_0 \gamma \cdot H \tag{2.18.}$$

เมื่อ H = ความลึกวัดจากผิวดินถึงศูนย์กลางอุโมงค์ (m)

ตารางที่ 2.1. แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างจากสูตรทฤษฎี Empirical

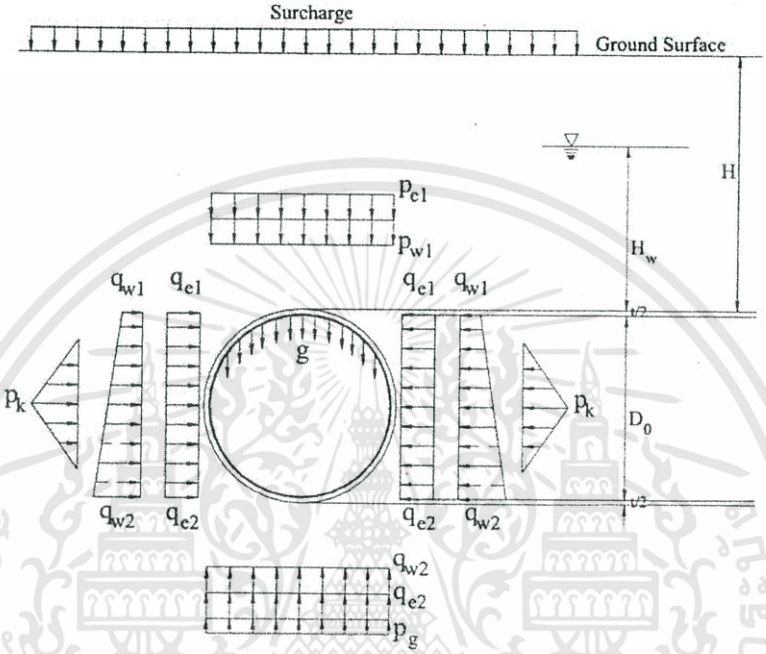
Theory	Vertical Pressure(σ_v)		Horizontal Pressure(σ_h)		
	Top	Bottom	Crown	Spring Line	Invert
Terzaghi	$\gamma_{ava} \cdot H_{top}$	$\gamma_{ava}.H_{bottom}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{top}$	$\frac{K_{0(ava)}\gamma_{ava}(H_{top}+H_{bot})}{2}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{bot}$
Einstein	$\gamma_{ava}.H_{center}$	$\gamma_{ava}.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$
Erdmann	$\gamma_{ava}.H_{center}$	$\gamma_{ava}.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$	$K_{0(ava)}\gamma.H_{center}$

*หมายเหตุ – การเฉลี่ยพารามิเตอร์ต้องเอาความหนาของชั้นดินมาพิจารณาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi Method

จากรูปที่ 2.10. แสดงหน่วยแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ซึ่งจะทำการคำนวณแยกเป็นส่วนๆ แล้วรวมผลการคำนวณแรงกระทำภายนอกทั้งหมดแบ่งได้ ดังนี้



รูปที่ 2.10. แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี Terzaghi Method

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

$$N_1 = \sin^2\theta.P.R_c \qquad (2.19.)$$

$$M_1 = \frac{1}{4}\left(1-2\sin^2\theta\right)P.R_c^2 \qquad (2.20.)$$

เมื่อ N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่ง

M_1 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$N_2 = \cos^2\theta.Q.R_c \tag{2.21.}$$

$$M_2 = \frac{1}{4}(1-2\cos^2\theta)Q.R_c^2 \tag{2.22.}$$

เมื่อ N_2 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

M_2 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

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

$$N_3 = \frac{1}{16}(\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c \tag{2.23.}$$

$$M_3 = \frac{1}{48}(6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta)(Q' - Q)R_c^2 \tag{2.24.}$$

เมื่อ N_3 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

M_3 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k\delta)$

$0 \le \theta \le \frac{\pi}{4}$

$$N_4 = (0.3536\cos^2\theta)(k\delta)R_c \tag{2.25.}$$

$$M_4 = (0.2346 - 0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c^2 \tag{2.26.}$$

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

$$N_4 = (-0.7071\cos\theta + \cos^2\theta + 0.7071\sin^2\theta\cos\theta)(k\delta)R_c \tag{2.27.}$$

$$M_4 = (-0.3487 + 0.5\sin^2\theta + 0.2357\cos^3\theta)(k\delta)R_c^2 \tag{2.28.}$$

เมื่อ N_4 = แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

M_4 = โมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^2}{24\left(\eta E_c I + 0.045kR_c^4\right)} \tag{2.29.}$$

δ = การเสียรูปทางด้านข้างจากแรงดันดินและน้ำ

η = สัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ $\eta = 1$

E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต(kN/m^2)

I = โมเมนต์เฉื่อยของคอนกรีต (m^4)

k = Subgrade Reaction Factor (ดังตารางที่ 3.2.)

ตารางที่ 2.2. แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	k (kg/cm^3)
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 $\left(g = \gamma_c t\right)$

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

$$N_5 = \left(\theta \sin\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right)gR_c \tag{2.30.}$$

$$M_5 = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta\right)gR_c^2 \tag{2.31.}$$

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

$$N_5 = \left(-\pi\sin\theta + \theta\sin\theta + \pi\sin^2\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right)gR_c \tag{2.32.}$$

$$M_5 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta)\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta - \frac{1}{2}\pi\sin^2\theta\right)gR_c^2 \tag{2.33.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

61397

เมื่อ N_5 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

M_5 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

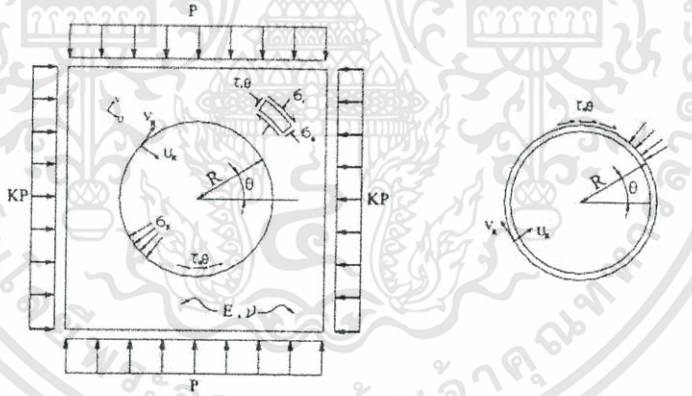
ดังนั้นแรงกระทำทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดังนี้

แรงในแนวแกนทั้งหมด(Total Axial Forces) = $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$ (2.34.)

แรงโมเมนต์ดัดทั้งหมด(Total Moment) = $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5$ (2.35.)

2.3.5. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein Method

วิธีนี้จะใช้หลักการของทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์ จะสามารถหาค่า การเสียรูป และแรงที่เกิดขึ้นภายในผนังอุโมงค์โดยมีสมมติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัด เป็นอีลาสติก เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังรูปที่ 2.11. ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ จะได้สูตรนำมาใช้เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและโมเมนต์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

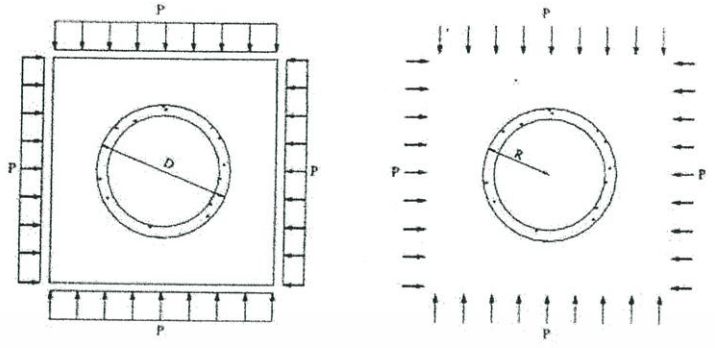


รูปที่ 2.11. แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)

Compressibility Ratio(C^*) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำแบบสมมาตรและสม่ำเสมอ ดังสมการ 2.36. และรูปที่ 2.12. หาค่าได้ดังนี้

$$C^* = \frac{ER(1-v_s^2)}{E_s A_s (1-v^2)} \quad (2.36.)$$

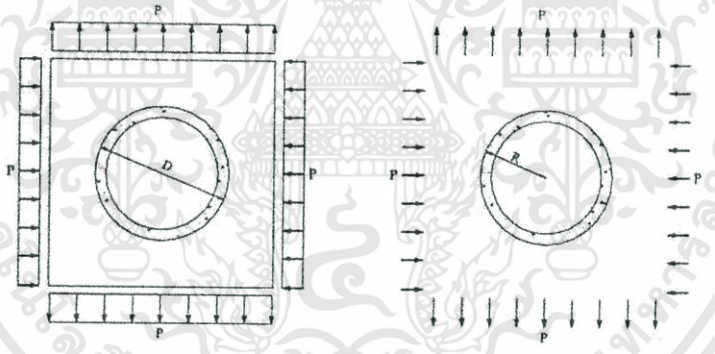
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12. แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอกแบบ Compressibility Ratio (C^*)

Flexibility Ratio (F^*)เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำ แบบไม่สมมาตร ดังสมการ 2.37. และรูปที่ 2.13. หาค่าได้ดังนี้

$$F^* = \frac{ER^3(1-v_s^2)}{E_s I_s(1-v^2)} \tag{2.37.}$$



รูปที่ 2.13. แสดงรูปแบบแรงกระทำภายนอก แบบ Flexibility Ratio (F^*)

$$a_0^* = \frac{C^*F^*(1-\upsilon)}{C^* + F^* + C^*F^*(1-\upsilon)} \tag{2.38.}$$

$$a_2^* = \frac{(F^*+6)(1-\upsilon)}{2F^*(1-\upsilon)+6(5-6\upsilon)} \tag{2.39.}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาแรงภายใน(Axial Forces)

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2}(1+K)(1-a_0^*) + \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \qquad (2.40.)$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \qquad (2.41.)$$

เมื่อ E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอุโมงค์ (kN/m^2)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (kN/m^2)

v_s = Poisson's ของผนังอุโมงค์

v = Poisson's ของดิน

M = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ (kN.m/m)

T = แรงในแนวแกนของผนังอุโมงค์(kN/m)

R = รัศมีของผนังอุโมงค์(m)

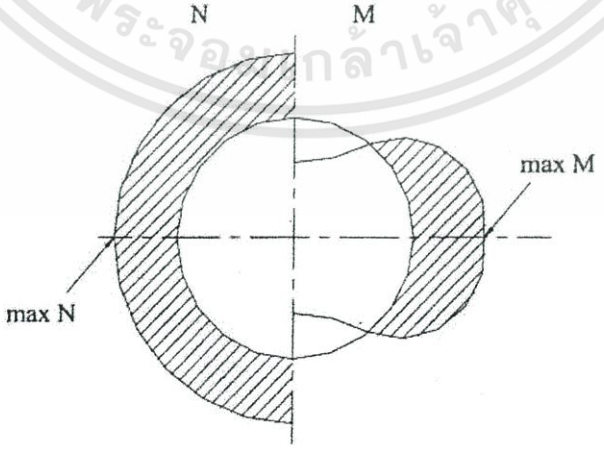
K = สัมประสิทธิ์การกระทำด้านข้างสถิต

P = แรงกระทำในแนวดิ่ง (Overburden Pressure)(kN/m^2)

θ = มุมรอบผนังอุโมงค์ทวนเข็มนาฬิกา

2.3.6. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Erdmann Method

สมมติฐานว่าดินรอบอุโมงค์เป็นเนื้อเดียวกันโดยแรงภายในแนวแกนและโมเมนต์ดัดจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง Spring Line ดังรูปที่ 2.14.



รูปที่ 2.14. แสดงการกระจายแรงภายในแนวแกนและโมเมนต์ดัดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณโมเมนต์ดัดสามารถหาโมเมนต์ดัดสูงสุด (Max-M) ได้ดังสมการ

$$M = \sigma_v (1 - K_0) R^2 \frac{1}{4 + \frac{(3-4v)}{3(1+v)(3-4v)} \times \frac{E_c R^3}{EI}} \qquad (2.42.)$$

การคำนวณแรงดันเหนืออุโมงค์(N_0) สามารถหาได้ดังสมการ

$$N_0 = \sigma_v (1 + K_0) R \frac{1}{2 + (1 - K_0) \frac{2(1-v)}{3(1-2v)(1+v)} \times \frac{E_c R}{EA}} \qquad (2.43.)$$

การคำนวณแรงในแนวแกนมากที่สุด Max($N - N_0$) สามารถหาได้จากสมการ

$$N - N_0 = \sigma_v (1 + K_0) R \frac{1}{2 + \frac{4v(E_c R^3 / EI)}{(3-4v)(12(1+v) + E_c R^3 / EI)}} \qquad (2.44.)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (kN/m^2)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (kN/m^2)

v = Poisson's ของดิน

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าผลการคำนวณที่ได้ไม่ได้แสดงรายการคำนวณที่ชัดเจนทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจ รวมทั้งโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้แสดงผลนั้นยังมีความผิดพลาดในการแสดงผลอยู่ ในโครงงานนี้ก็จะทำการศึกษาและพิจารณาทฤษฎีที่ใช้ออกแบบ เพื่อจัดทำแบบคำนวณที่เหมาะสมที่สามารถใช้ศึกษาและทำความเข้าใจได้ง่าย และจะทำการพัฒนาโปรแกรมแสดงผลการคำนวณให้สามารถใช้งานได้ง่ายและแสดงผลได้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
มาตรฐานการก่อสร้างและออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

3.1. กล่าวนำ

ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินจำเป็นจะต้องศึกษาถึงสิ่งที่จะต้องปฏิบัติเพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินได้อย่างถูกต้องเหมาะสมและที่สำคัญคือ ต้องมีความปลอดภัย โดยในบทนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานรายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่ควรจะต้องทำการศึกษาและนำมาปฏิบัติ

3.2. ข้อกำหนดทั่วไปของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

3.2.1. ขอบเขตของการประยุกต์ใช้

มาตรฐานนี้จะกำหนดวิธีทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจ การวางแผน การออกแบบและการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีการใช้หัวเจาะอุโมงค์ Shield

วิธีการขุดอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method) หมายถึงวิธีการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้เครื่องเจาะอุโมงค์ประเภท Shield มาตรฐานนี้แสดงถึงวิธีการทั่วไปของการก่อสร้างอุโมงค์โดยหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method) ที่ถือว่าเป็นที่เชื่อถือได้และมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีที่เหมาะสมและความสำเร็จที่ได้รับในอดีต รายละเอียดที่ได้ไม่ได้ครอบคลุมในมาตรฐานนี้ ควรได้รับการวินิจฉัยโดยวิศวกรที่ทำหน้าที่ควบคุม

มาตรฐานนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างอื่นๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น การก่อสร้างโดยวิธี Pipe-Jacking และวิธีอื่นๆ ด้วยการปรับแก้ให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดเพิ่มเติมยังสามารถศึกษาได้จากมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องดังที่รวบรวมไว้ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

1. Standard Segment for Shield Tunneling Works / JSCE & Japan Sewage Works Association (1990)
2. Japanese Standard for Mountain Tunneling / JSCE (1996)
3. Japanese Standard for Cut and Cover Tunneling / JSCE (1996)
4. Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structure / JSCE (1996)
5. Standard and Explanation for Japan National Railways Structural Design (Steel Railroad Bridge and Steel and Concrete Composite Railroad Bridge) / JSCE (1983)
6. Specification for Highway Bridge and Explanation / Japan Road Association (1994)
7. Utility Tunnel Design Guideline / Japan Road Association (1986)
8. Japan Industrial Standard (JIS) / Japan Industrial Standard Committee

มีวิธีการการขุดอุโมงค์อื่นๆ นอกจากวิธีการที่ใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method) การเลือกวิธีการที่เหมาะสมจะคำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยเป็นหลักและต้นทุนของโครงการการขุดอุโมงค์ ดังนั้น จึงทำการเสนอแนะถึงความสำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงผลดีและผลเสียของแต่ละวิธี ตาราง 3.1. แสดงการประยุกต์ใช้ของวิธีการหลักในการขุดเจาะอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
วิธีการ	เป็นการใช้ประโยชน์โดยการค้ำยันดินที่อยู่รอบอุโมงค์และการทำคอนกรีตพ่น (Shotcrete) เหล็กยึดหิน (Rockbolts) การค้ำยันด้วยโครงเหล็กและวิธีการอื่นๆ เพื่อให้มีเสถียรภาพ ความต้องการความมั่นคงของผลของส่วนโค้งของดินและการคงตัวได้ด้วยตัวเองของดินบริเวณผิวหน้า เมื่อสองเงื่อนไขนี้ไม่เป็นที่น่าพอใจจะต้องเพิ่มมาตรการเพื่อความปลอดภัย	เครื่องขุดเจาะจะเคลื่อนลงไปในพื้นดินและป้องกันการทรุดลงของดินที่อยู่โดยรอบโดยหัวเจาะShield และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต หัวเจาะ Shield แบบที่มีส่วนหน้าปิดจะเติมช่องด้วยน้ำยาปรับสภาพดิน(Slurry) หรือการนำสิ่งที่ขุดออกพร้อมกับการรับมือกับแรงดันดินและแรงดันน้ำที่ส่วนหน้าของหัวเจาะ Shield หัวเจาะShield แบบเปิดหน้าจะต้องการการคงตัวของหน้าดิน ถ้าไม่เป็นไปตามนั้นก็ใช้มาตรการสนับสนุนต่างๆตามความต้องการของหัวเจาะ Shield แบบเปิดหน้า	เริ่มต้นการขุดจะขุดจากระดับของพื้นดิน การสร้างการถมดินกลับ และทำการฟื้นฟูพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. (ต่อ) การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
สภาวะทางธรณีวิทยาที่ประยุกต์ใช้ได้ (การประยุกต์ใช้ในอดีตและความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงทางสภาวะ)	โดยทั่วไปสามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นดินระหว่างหินแข็งและหินอ่อน มีพื้นฐานอยู่บนสภาพชั้นดินของโครงการ (โดยทั่วไปใช้กับดินที่มีค่า q_U มากกว่า 100 kN/m^2 E_S มากกว่า 10,000 kN/m^2 โดยมีข้อยกเว้นบางอย่าง) สามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมโดยการปรับแก้ความแข็งแกร่งของโครงสร้างรับแรงดิน, วิธีการขุดและมาตรการสนับสนุนต่างๆ	โดยหลักทั่วไป สามารถจะประยุกต์ใช้ได้ในพื้นดินที่เป็นชั้นดินทรายหรือดินเหนียวและหินที่อ่อนมาก (จนถึงค่า q_U 200-300 kN/m^2) สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามสภาพชั้นดิน เมื่อเร็วๆนี้มีการประยุกต์ใช้ในหินที่มีค่า q_U 20,000-30,000 kN/m^2	สามารถประยุกต์ใช้ได้เกือบทุกสภาพชั้นดิน จึงจำเป็นที่จะเลือกระบบการเก็บกักดินที่เหมาะสม มาตรการสนับสนุนต่างๆ ฯลฯ โดยเป็นไปตามคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดิน
การป้องกันน้ำใต้ดิน (เสถียรภาพของดินส่วนหน้า)	ในกรณีของการมีน้ำไหลเข้ามาจำนวนมากจะมีความจำเป็นที่จะนำมาตรการช่วยเข้ามาปฏิบัติเช่น Grouting, Deep Wells, Well Points และ	หัวเจาะShield ประเภทปิดส่วนหน้าไม่ต้องการมาตรการสนับสนุน หัวเจาะShield ประเภทเปิด	ในหลายกรณี ใช้ระบบกำแพงกันดินและ/หรือมาตรการสนับสนุนต่างๆ เช่น การลดระดับน้ำ (Dewatering) และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. (ต่อ) การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
	อุโมงค์ระบายน้ำ	หน้าต้องการมาตรการสนับสนุน	ปรับปรุงดินเพื่อต้องการป้องกันการเกิด Boiling และ Heaving
ความลึกของอุโมงค์	ในรูปแบบ unconsolidated อัตราส่วนของความหนาของดินที่ปกคลุม/เส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ (H/D) จะเล็กน้อย (น้อยกว่า 2) จึงจำเป็นที่จะต้องนำเอามาตรการสนับสนุนมาเพื่อควบคุมการทรุดตัวของอุโมงค์ที่ตำแหน่ง Crown	ความหนาน้อยสุดของดินเหนืออุโมงค์ของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบใช้หัวเจาะ Shield จะเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ Shield ในกรณี Pneumatic Method หรือ Slurry Type Shield Method จะต้องป้องกันการเกิด Blowout ความลึกสูงสุดในการขุดเจาะโดยทั่วไปจะตัดสินจากแรงดันของน้ำใต้ดิน	ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความหนาน้อยสุดของดินเหนืออุโมงค์ ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ที่ความลึก 40 เมตรมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. (ต่อ) การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
รูปร่างหน้าตัดขวาง	ตามกฎทั่วไป ส่วนบนของอุโมงค์ควรจะทำเป็นรูปโค้ง ในการปฏิบัติตามกฎสามารถประยุกต์เปลี่ยนรูปร่างได้ มีความเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดหลังจากการเริ่มต้นการขุด	รูปร่างที่เป็นวงกลมจะเป็นมาตรฐานแต่รูปร่างแบบ Semi-Circles, Multi-Circles และรูปไข่ สามารถใช้ได้เช่นกันโดยการใช้เครื่องกลที่มีหัวเจาะ Shield แบบพิเศษ โดยปกติจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัดขวางในระหว่างการขุด	รูปร่างปกติเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ส่วนที่เป็นรูปร่างซับซ้อนก็จะเป็นไปได้เช่นกัน
พื้นที่หน้าตัดขวาง (พื้นที่ภาคตัดขวางมากสุด ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของหน้าตัดอุโมงค์)	โดยทั่วไป สามารถจะประยุกต์ใช้ได้ถึง 150 m^2 และมีความสำเร็จบ้างในส่วนที่เกินกว่า 200 m^2 มันเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของหน้าตัดในระหว่างการขุดโดยการปรับเกี่ยวกับการจัดการค้ำยันและวิธีการขุด	เส้นผ่านศูนย์กลางของการขุดที่ใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้คือ 14 เมตร โดยปกติในปัจจุบันจะยากที่จะเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ในระหว่างการขุด	ไม่มีข้อจำกัดในด้านขนาดหรือการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ของหน้าตัด อย่างไรก็ดีการเสริมเหล็กที่เพียงพอจะเป็นที่ต้องการสำหรับพื้นที่ที่เป็นมุมในกรณีซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงภาคตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. (ต่อ) การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
การปรับให้ตรง (การประยุกต์ใช้สำหรับการโค้งของอุโมงค์ที่เพิ่มมากขึ้น)	แทบจะไม่มีข้อจำกัดเลย	อุโมงค์ที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้ง/เส้นผ่าศูนย์กลางหัวเจาะ Shield เท่ากับ 3 ทำให้ได้รับผลสำเร็จ	แทบจะไม่มีข้อจำกัด
ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม (การก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียง การจราจรในท้องถนน เสียงและการสั่นสะเทือน)	ถ้าหากการก่อสร้างใกล้เคียงกับสิ่งที่ปลูกสร้างที่มีอยู่จะกำหนดให้มีมาตรการสนับสนุน ในบางกรณีแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่ระบายน้ำใต้ดินในบริเวณเมืองใหญ่อันเนื่องมาจากปัญหาที่พบในวิธีการลดระดับน้ำ (Dewatering) แทบจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดสำหรับการจราจรในท้องถนน ยกเว้นบริเวณที่เป็นปล่องแนวดิ่ง(Shaft) และบริเวณ	ถ้าหากการก่อสร้างใกล้ชิดกับสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่ จะกำหนดให้มีมาตรการสนับสนุน ในบางกรณีมันแทบจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาเลยสำหรับการจรจรในท้องถนน ยกเว้นบริเวณที่เป็นปล่องแนวดิ่ง(Shaft)และบริเวณใกล้เคียง โดยทั่วไปปัญหาของเสียงและการสั่นสะเทือนจะถูกจำกัดในบริเวณที่อยู่ใกล้ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) สามารถทำให้	ถ้าหากการก่อสร้างใกล้ชิดกับสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่ บ่อยครั้งจะกำหนดให้มีการเสริมเพิ่มเติมในสิ่งปลูกสร้างเป็นการชั่วคราว และ/หรือ มาตรการสนับสนุนเนื่องจากการทำงานบางแห่งจะอยู่บนพื้นผิวในระหว่างการก่อสร้างมันก็จะมีผลกระทบต่อการจราจรในท้องถนน ในแต่ละขั้นตอนของการก่อสร้างก็จะมาตรการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1. (ต่อ) การประยุกต์ใช้ของวิธีการหลัก 3 วิธีในการขุดเจาะอุโมงค์

	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบดั้งเดิม	วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Method)	วิธีการเปิดหน้าดินแล้วถมกลับ (Cut & Cover Method)
	ใกล้เคียง โดยทั่วไปเสียงและการสั่นสะเทือนจะถูกจำกัดต่อปัญหาของความใกล้เคียงของทางเข้าสู่อุโมงค์ สามารถที่จะทำให้บรรเทาลงได้โดยใช้ผนังที่เป็นสิ่งกั้นเสียง	บรรเทาลงได้โดยผนังที่เป็นสิ่งกั้นเสียง การจัดที่อยู่ใกล้ที่ทำให้เกิดความเบาบางของเสียงลงและอื่นๆ	สำหรับเสียงและการสั่นสะเทือนเป็นตัวกำหนด

3.2.2. คำนิยาม

หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield คือ อุปกรณ์ขุดเจาะหลักของอุโมงค์ในชั้นดิน จะประกอบด้วย Hood, Ring Grider และ Tail โดยจะเรียกว่า เครื่องจักรขุดเจาะประเภท Shield

วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield tunneling Method) คือ วิธีการขุดอุโมงค์ที่ป้องกันพื้นดินจากการทรุดลงโดยหัวเจาะ Shield และโครงสร้างของผนังอุโมงค์ที่สร้างขึ้นในส่วนท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel) คือ อุโมงค์ที่สร้างขึ้นโดยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) คือ ปล่องแนวดิ่งสำหรับการทำงานสำหรับการขุดอุโมงค์โดยหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ปล่องแนวดิ่งใช้สำหรับการนำเข้าและออก การหมุนรอบ การประกอบและการรื้อถอนเครื่องจักรขุดเจาะประเภท Shield ซึ่งมันใช้สำหรับการขนย้ายดินที่ถูกขุดเจาะ การนำวัสดุเข้าและออก ทางเข้า/ทางออกของคนงาน จุดผ่านของระบบการจ่ายไฟฟ้าและน้ำ การระบายอากาศ และอื่นๆ

ภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel Overburden) คือ ภาระน้ำหนักซึ่งมีระยะทางระหว่างพื้นผิวดินถึงผิวบนของผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ (Lining) คือ โครงสร้างผนังอุโมงค์เพื่อจะให้เกิดความมั่นคงแก่เนื้อที่ว่างของอุโมงค์โดยการทนต่อแรงดันของดินและน้ำ ของผนังอุโมงค์ ประกอบด้วย ชั้นหลัก (Primary) และชั้นใน (Secondary) โดยทั่วไปแล้วผนังอุโมงค์จะเป็นโครงสร้างวงแหวนที่ประกอบขึ้นด้วยส่วนที่สร้างขึ้นไว้ล่วงหน้าแต่จะถูกสร้างขึ้นในบางกรณีด้วยคอนกรีต ที่หล่อกับที่ตามสถานการณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.3. กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง

ก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ จำเป็นจะต้องพิจารณาในเรื่องกฎหมายและระเบียบข้อบังคับขอบเขตของกฎหมาย กระบวนการที่จำเป็นและมาตรการในการทำให้สอดคล้องกับกฎหมายและระเบียบข้อบังคับต่างๆ

การปฏิบัติงานจะได้รับการควบคุมโดยกฎหมายและระเบียบข้อบังคับ งานจะต้องได้รับอนุญาตและอนุมัติโดยเจ้าหน้าที่เกี่ยวข้องฉะนั้นจึงแนะนำให้ทำการตรวจสอบอย่างละเอียดเกี่ยวกับขอบเขตของข้อจำกัด กระบวนวิธีที่จะเป็น และมาตรการที่จะดำเนินการ จะต้องทำการสังเกตว่ามันอาจจะกินเวลานานในการรับการอนุมัติและสังเกตถึงการแปรผันบางอย่างระหว่างคำสั่งของรัฐบาลท้องถิ่น

กฎหมายและข้อระเบียบข้อบังคับเบื้องต้นที่สามารถประยุกต์ได้ในตาราง 3.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2. กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารประยุกต์ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
(การวางแผนเมือง) กฎหมายการวางแผนเมืองและอื่นๆ	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในพื้นที่การวางแผนเกี่ยวกับเมือง เขตชนบทและพื้นที่การปรับใหม่เกี่ยวกับที่ดิน การควบคุมในเรื่องการใช้เนื้อที่วางใต้ดิน
(การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม) กฎหมายอุทยานตามธรรมชาติ กฎหมายอุทยานเมืองใหญ่ พระราชบัญญัติการคุ้มครองทรัพย์สินทางวัฒนธรรม	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในอุทยานแห่งชาติ วนอุทยานกึ่งแห่งชาติ อุทยานจัดการโดยรัฐบาลท้องถิ่นและอุทยานเมืองใหญ่ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในสถานที่ทางประวัติศาสตร์ สถานที่อันสวยงาม พื้นที่อนุสาวรีย์ตามธรรมชาติและพื้นที่สินทรัพย์ทางวัฒนธรรม
(ทะเลและแม่น้ำ) กฎหมายฝั่งทะเล กฎหมายแม่น้ำ กฎหมายช่องขนถ่ายสินค้าและท่าเรือ กฎหมายการบุกเบิกท่อนน้ำสาธารณะ	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนาในพื้นที่อนุรักษ์ชายฝั่งทะเลพื้นที่แม่น้ำพื้นที่ท่าเรือและอื่นๆ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการพัฒนา และการครอบครองผิวน้ำหรือตัวน่านน้ำสาธารณะเช่นแม่น้ำ ทะเลสาบ ทะเลและอื่นๆ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องธุรการบำบัดของเสียมลภาวะทางทะเลและภัยพิบัติทางทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2. (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารประยุกต์ได้

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	เนื้อหาของระเบียบข้อบังคับ
(ถนนและการจราจร) กฎหมายถนน กฎหมายการจราจรบนท้องถนน	การใช้ถนน การครอบครองถนน
(การบิน) กฎหมายเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และศิลปะการบินพลเรือน	ขีดจำกัดความสูงของอาคารเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากเครื่องบิน
(การป้องกันมลภาวะ) กฎหมายทฤษฎีการควบคุมมลภาวะเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม กฎหมายระเบียบข้อบังคับด้านเสียง กฎหมายเกี่ยวกับระเบียบข้อบังคับในเรื่องการการสั่นสะเทือน	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการก่อสร้างสำหรับการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการเสียงและการสั่นสะเทือนเนื่องจากการก่อสร้าง
กฎหมายการกำจัดน้ำเสียและการทำความสะอาดสาธารณะ แนวทางปฏิบัติที่เป็นข้อบังคับเกี่ยวกับตะกอนทางเคมี เทคนิคแนวทางปฏิบัติเกี่ยวกับการป้องกันทางเสียงและการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการก่อสร้าง	ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการการปล่อยลงลำน้ำสาธารณะ ระเบียบข้อบังคับในเรื่องการกำจัดน้ำเสีย ระเบียบข้อบังคับในเรื่องกากหรือตะกอนทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2. (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารประยุกต์ได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2. (ต่อ) กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่สามารประยุกต์ได้

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

3.3. การสำรวจ

3.3.1. วัตถุประสงค์ของการสำรวจ

การสำรวจจะต้องดำเนินการในการปฏิบัติการโดยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield Tunneling) ในสภาวะที่ปลอดภัย รวดเร็ว และประหยัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสำรวจประกอบด้วย

1. การสำรวจสภาวะสถานที่ตั้ง
2. การสำรวจอุปสรรค
3. การสำรวจภูมิประเทศและดิน
4. การสำรวจที่ต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม

การสำรวจจะถูกดำเนินการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐาน อันได้แก่ การวางแผน การออกแบบ การก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ผลของการสำรวจจะใช้สำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์ ให้อยู่ในแนวทางที่เหมาะสม และการเลือกที่จะประยุกต์วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield Tunneling Method) ให้เหมาะสมกับเส้นทางของงานเหล่านั้น มาตรการการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ขนาดของโครงการและรายละเอียดของโครงการ และข้อมูลสำหรับการบำรุงรักษาเกี่ยวกับอุโมงค์หลังจากการเสร็จสิ้นของโครงการ

3.3.2. การสำรวจสภาวะของสถานที่ตั้ง

การสำรวจสภาวะของสถานที่ตั้งถูกกำหนดตามสิ่งต่างๆดังนี้

1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง
2. แผนการในอนาคต
3. การจัดจำแนกในประเภทและสภาพการจราจร
4. ความยุ่งยากในเรื่องการใช้ที่ดินสำหรับการก่อสร้าง
5. สภาวะแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และระบบการเชื่อมต่อของน้ำเสียสำหรับการก่อสร้าง

การสำรวจสภาวะสถานที่ตั้ง จะต้องครอบคลุมสภาวะท้องถิ่นตามการปรับตรงที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ได้ทำรายการไว้ข้างต้น การสำรวจสภาวะสถานที่ตั้งโดยหลักๆจะถูกดำเนินการสำหรับการเลือกเส้นทางอุโมงค์และการวินิจฉัยถึงความเหมาะสมของวิธีขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ขนาดของอุโมงค์และรายละเอียดต่างๆ ข้อมูลที่ได้รับมาจะใช้ ณ เวลาของการก่อสร้างของโครงการด้วยเช่นกัน

3.3.2.1. การใช้ที่ดิน และสิทธิในทรัพย์สินที่เกี่ยวข้อง

วิธีนี้เป็นการสำรวจสภาวะการใช้ที่ดินที่พื้นที่เมืองใหญ่ พื้นที่เกษตร พื้นที่ป่าไม้ แม่น้ำ และทะเลตามเส้นทางอุโมงค์ที่ได้เสนอ ในพื้นที่เมืองจะต้องการสำรวจเพื่อจะระบุถึงการใช้ที่ดินที่ได้กำหนดให้ (ที่อยู่อาศัย ทางการค้า การใช้ทางอุตสาหกรรม ฯลฯ)และระดับของการจัดให้เป็นเมืองใหญ่ การสำรวจสิทธิในด้านทรัพย์สินก็เพื่อจะวินิจฉัยว่าทรัพย์สินที่มีอยู่นั้นมีความเกี่ยวข้องเป็นเจ้าของในทางสาธารณะ หรือในทางส่วนตัวหรือไม่ เพื่อจะตรวจสอบการเรียกร้องสิทธิในทรัพย์สิน และข้อจำกัดเหนือและใต้ดินตามเส้นทางอุโมงค์

3.3.2.2. แผนในอนาคต

ลักษณะนี้เป็นการที่จะตรวจสอบแผนการพัฒนาในอนาคตตามเส้นทางและขนาดของแผนรายการกำหนดและข้อจำกัดที่เกี่ยวกับแผนการพัฒนาแผนงานในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3. การจัดจำแนกประเภทถนนและสภาวะการจราจร

ลักษณะนี้เป็นการที่จะระบุเฉพาะสำหรับการจัดจำแนกประเภทถนนและความสำคัญของพื้นถนน เพื่อศึกษาเกี่ยวกับงานขุดในถนน ปริมาณการจราจรของถนนและอื่นๆ ลักษณะที่ตั้งของปล่องแนวดิ่ง (Shaft) จะสามารถกำหนดด้วยการเคลื่อนย้ายดินที่ขุดและการระคม/การปล่อยจากการระคมของอุปกรณ์และวัสดุในระหว่างการก่อสร้างนอกจากการใช้ที่ได้วางแผนไว้ใดๆ หลังจากการก่อสร้าง จึงแนะนำให้พิจารณาล่วงหน้าเกี่ยวกับผลกระทบที่มีศักยภาพของการทำให้มั่นคงเกี่ยวกับพื้นดินที่จะเป็นสาเหตุจากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

3.3.2.4. การสามารถหามาได้เกี่ยวกับที่ดินสำหรับการสร้าง

ลานของการก่อสร้างรอบๆที่ตั้งปล่องแนวดิ่ง (Shaft) เป็นแผนกงานเฉพาะที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งสำหรับโครงการจากขั้นตอนการเลือกเส้นทางไปจนถึงการเสร็จสิ้นโครงการ ดังนั้นมาตรการที่จำเป็นทั้งหมดจะต้องดำเนินการในการที่จะทำให้ที่ดินสำหรับใช้ในการสร้าง นอกจากนี้จะมีความจำเป็นด้วยเช่นกันที่จะทำให้เกิดความมั่นคงแก่สถานที่จำกัดและเส้นทางการลำเลียงสำหรับดินที่ขุดออก

3.3.2.5. สภาพแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล

นับว่าเป็นเรื่องสำคัญที่จะสำรวจภาคตัดขวางของแม่น้ำ โครงสร้างของริมฝั่งของมันคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่อยู่กับฝั่ง และแผนในอนาคตสำหรับแม่น้ำ และการปรับปรุงสะพานในกรณีอุโมงค์ที่เสนอข้ามหรือไปใกล้แม่น้ำ มันมีความจำเป็นที่จะรักษาความลึกที่เพียงพอและระยะทางจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางที่แม่น้ำไหลผ่านและสะพาน กระบวนวิธีแบบเดียวกัน จะประยุกต์ใช้กับอุโมงค์ที่ดำเนินไปใกล้หรือภายใต้ทะเลสากล และทะเล

3.3.2.6. การจ่ายไฟฟ้า น้ำประปา และน้ำเสียสำหรับการสร้าง

จำเป็นจะต้องตรวจสอบระบบความจุ แรงดัน และความสามารถด้านการจ่ายไฟฟ้าใกล้สถานที่ที่ได้ทำการทำการก่อสร้าง ถ้าหากจำเป็นจะกำหนดให้มีการตระเตรียมระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นกำลังสำรอง ส่วนในด้านน้ำประปาจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่ามีน้ำให้กับเมืองที่สามารถจะหามาได้หรือไม่ และจุดของการต่อของมัน ขนาดของท่อ และจำนวนที่มีอยู่ของน้ำ ส่วนทางด้านเกี่ยวกับระบบน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องยืนยัน ตำแหน่งที่ตั้งการปล่อยออกของมันจำนวนน้ำเสียที่สามารถปล่อยออกได้ และเกณฑ์คุณภาพน้ำ สำหรับการปล่อยออก

3.3.3. การสำรวจที่มีอุปสรรค

การสำรวจที่มีอุปสรรคจะต้องดำเนินการเพื่อระบุชัดเกี่ยวกับรายการดังต่อไปนี้

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

ก่อนการเริ่มต้นการเลือกเส้นทาง จะต้องทำการสำรวจอย่างระมัดระวัง เพื่อจะกำหนดชัดเจนเกี่ยวกับรายการที่อาจจะส่งผลต่อการสร้างอุโมงค์ภายในขอบเขตของอิทธิพลตามเส้นทางของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสำรวจต้องคำนึงถึงความปลอดภัย 2 อย่าง คือ การทำให้มั่นคงปลอดภัยด้านสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้อุโมงค์ และสำหรับการความปลอดภัยของการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ผลการสำรวจจะทำหน้าที่เป็นหลักพื้นฐานสำหรับกาประเมินค่าเกี่ยวกับการทำให้เสียรูปของสิ่งปลูกสร้าง การทำให้แห้งและการทำให้เกิดมลภาวะของบ่อ การทะลักออกของอากาศที่อัดและน้ำเลน อากาศที่รั่วไหลออกมาและน้ำเลน ความดันของดินที่มีต่ออุโมงค์ การรับภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์ และสภาวะการรับภาระแรงอื่นๆ

3.3.3.1. สิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนและอยู่ใต้ดิน

เกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน ประเภทสิ่งปลูกสร้างและรูปแบบของฐานราก การมีอยู่ของห้องใต้ดินและความลึกของฐานรากแบบปกติ และแบบฝังตรึงจะถูกทำการสำรวจ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญด้วยเช่นกันที่จะสำรวจว่ามีการใช้สิ่งปลูกสร้างเหล่านี้ได้ผลอย่างไร และในการที่จะทำการสำรวจต้องติดตั้งด้วยเครื่องมือที่มีความไว

3.3.3.2. สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดิน

สิ่งที่เป็นสาธารณูปการใต้ดินที่จะได้รับการสำรวจตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ สถานที่สำหรับปล่องแนวดิ่ง (Shaft) จะต้องมีการสำรวจที่ถ้วนถี่ ในจุดแรกเริ่มของการสำรวจเป็นการขุดสำหรับการสำรวจ และการมุ่งหวังเกี่ยวกับแผ่นดินไหวจะจำเป็นในบางกรณีที่จะยืนยันถึงตำแหน่งที่ตั้ง ขนาด ความลึกและสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.3. บ่อที่ยังใช้และบ่อที่ทิ้งร้าง

มีความจำเป็นที่จะหาตำแหน่งที่ตั้งของบ่อที่ยังใช้อยู่และบ่อที่ทิ้งร่างด้วยเช่นกันในการที่จะประเมินความเสี่ยงของการทะลักออกและการรวมของน้ำเลนและอากาศที่ขาดออกซิเจนในระหว่างปฏิบัติการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield การขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ในแบบเกี่ยวกับการใช้อากาศต้องการให้มีการสำรวจที่กว้างขวางมากกว่าวิธีการอื่นๆ บ่อถูกทิ้งร้างจะต้องได้รับการจำแนกออกมาเกี่ยวกับสถานที่ตั้งที่วางอยู่บนพื้นฐานของคำกล่าวของเจ้าของบ่อ

3.3.3.4. สถานที่ตั้งสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่เคลื่อนย้ายได้และงานแบบชั่วคราว

มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ให้รวบรวมข้อมูลข่าวสารโดยตรงจากเจ้าของที่ดินเกี่ยวกับเงื่อนไขของสถานที่ตั้งเหล่านี้เนื่องจากมีความเป็นไปได้ของการขุดโดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เผชิญกับอุปสรรคจะต้องถูกเคลื่อนย้ายไปหรือนำขึ้นมาจากพื้นดิน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสำรวจสิ่งที่เคลื่อนย้ายออกมาจากสถานที่ที่ทำการขุดเจาะโดยมีเงื่อนไขและสภาวะของการถมดินกลับและความปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดิน

3.3.3.5. อื่นๆ

ถ้าหากสิ่งที่เป็นสาธารณูปโภค หรือสิ่งปลูกสร้างใต้ดินได้รับการวางแผนที่จะสร้างในอนาคตที่สถานที่ตั้ง ตำแหน่งที่ตั้งของสิ่งทั้งหลายนี้ ขนาดและความลึก จำเป็นจะต้องได้รับการตรวจสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความขัดแย้งต่อกัน ในพื้นที่มีระเบิดที่ไม่ระเบิดซึ่งยังคงสามารถพบได้จึงเป็นคำสั่งที่จะทำให้ได้ผลด้านความปลอดภัยของโครงการได้โดยการเก็บข้อมูลข้อมูลสารเกี่ยวกับตำแหน่งที่อยู่ทีเป็นไปได้ของพวกระเบิดจากผู้อยู่อาศัยในท้องถิ่นและการสำรวจทางธรณีวิทยาในตำแหน่งแรกเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4. การสำรวจเพื่อการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดิน

การสำรวจเพื่อการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินมีการดำเนินการดังต่อไปนี้

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

การสำรวจทางธรณีวิทยา การเจาะและวิธีการอื่นๆ ของการสำรวจจะต้องดำเนินการอย่างเหมาะสม วิศวกรที่รับผิดชอบที่ควบคุมจะต้องกำหนดจุดที่เหมาะสมและรายการสำรวจต่างๆ

สภาพทางภูมิประเทศและธรณีวิทยามีผลต่อการออกแบบและการก่อสร้างในโครงการสร้างอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการสำรวจจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง

รายการและลำดับของการสำรวจภูมิประเทศและชั้นดินได้สรุปในตารางที่ 3.3. แล้วสิ่งที่เพิ่มหรือลดลงของการสำรวจเป็นผลร่วมกันของโครงการที่มีลักษณะเฉพาะ

การสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ และการสำรวจทางธรณีวิทยาเพื่อที่จะเข้าใจสภาพทั่วๆไปของชั้นหินตามเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมีข้อมูลทั้งหมดของการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นระดับชั้นดินที่สามารถจำแนกโดยง่าย หรือชั้นดินซึ่งยากที่จะจำแนกได้ หรือจะเป็นสภาวะปัญหาของดินที่คงอยู่หรือไม่คงอยู่ และอื่นๆอีก เป็นความรับผิดชอบของวิศวกรผู้ควบคุมจะตัดสินใจในการสำรวจขั้นพื้นฐานของการกำหนดขอบเขต และเรื่องอื่นๆซึ่งเป็นผลมาจากการสำรวจเบื้องต้น

ตารางที่ 3.3. รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
วัตถุประสงค์ของการสำรวจ	- ความเข้าใจสภาพทั่วไปของการทำแผนที่และการบอกลักษณะภูมิประเทศ ดินและโครงสร้างชั้นดิน - การทำนายเกี่ยวกับดินที่เป็นปัญหาและพื้นฐานสำหรับการสำรวจสิ่งที่ตามมา	- ความเข้าใจชั้นดิน และสภาพดินตามเส้นทางทั้งหมด - ความเข้าใจคุณสมบัติเทคนิคทางธรณีวิทยา - การตระเตรียมในเรื่องโครงร่างทางธรณีวิทยา	- การสำรวจดินเพื่อเป็นส่วนเสริม - การสำรวจดินในรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งสำหรับการออกแบบและการสร้าง - ข้อมูลข่าวสารการออกแบบสำหรับสภาวะพิเศษ เช่น แผ่นดินไหว
วิธีการของการสำรวจ	- การเก็บและการรวบรวมข้อมูลข่าวสารที่มีอยู่ - เก็บการรวบรวมแลประมวลที่เกี่ยวกับโครงการอื่นมีลักษณะใกล้เคียงกันในอดีต	- การเจาะ(borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test) - เก็บตัวอย่างดิน	- การเจาะ(borings) - การทดสอบคุณสมบัติดินในการหยั่งทะลวง SPT (Standard Penetration Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3. (ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- การสำรวจเอกสาร - สังเกตสภาพทั่วไปในสถานที่ก่อสร้าง	- การสำรวจระดับน้ำใต้ดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure) - การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการทดลอง (การทดสอบทางกายภาพและทางกลศาสตร์)	- เก็บตัวอย่างดิน - การวัดความดันน้ำในโพรงดิน (Porewater Pressure) - การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) - การทดสอบดินในห้องทดลอง - การทดสอบแรงดันด้วย Pressuremeter - สำรวจปัญหาการขาดออกซิเจนและก๊าซที่เป็นอันตรายและก๊าซไวไฟ - Deep Foundation Excavation - PS Logging -
เนื้อหาของการสำรวจ	- การตรวจสอบเอกสาร เช่น แผนที่ต่าง ๆ (แผนที่ทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการทำแผนที่และบอกลักษณะภูมิประเทศ ธรณีวิทยา และเทคนิคทางธรณีวิทยา) - รายงานการสำรวจดินที่มีอยู่ - รายงานการก่อสร้างเกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างที่ได้สร้างก่อน ๆ ในบริเวณใกล้เคียง	- ส่วนประกอบชั้นดิน - ค่า N (Standard Penetration Test - ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ - ระดับน้ำใต้ดิน และความดันน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - การกระจายตัวของเม็ดดิน - ปริมาณความชื้นในดิน - ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน	- ค่า N (Standard Penetration Test - ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถซึมผ่านได้ - ระดับน้ำใต้ดินและความดันของน้ำในโพรงดิน - ตัวอย่างดินที่ขุดมา - กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน - ปริมาณความชื้นในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3. (ต่อ) รายการการสำรวจเกี่ยวกับการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจดินสำหรับโครงการขุดเจาะอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield Tunnel)

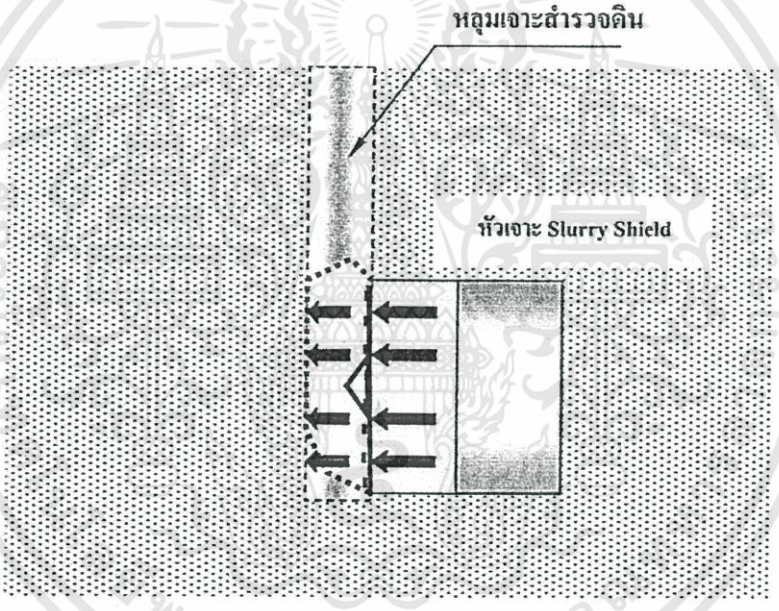
รายการ	การสำรวจเบื้องต้น	การสำรวจพื้นฐาน	การสำรวจในรายละเอียด
	- บ่อและน้ำใต้ดิน - การสังเกตในเรื่องการทำแผนที่ภูมิประเทศ สภาพดิน และพื้นที่โดยรอบ - การทรุดตัวของดิน	- หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการยุบตัวคายน้ำของดิน	- ความถ่วงจำเพาะของดิน - หน่วยน้ำหนักของดิน - หน่วยแรงอัดของดิน - พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน - แรงยึดเกาะในมวลดิน - มุมของความเสียดทานภายในของดิน - คุณสมบัติของการยุบตัวคายน้ำของดิน - ความเร็วและทิศทางของน้ำใต้ดิน - ขนาดและรัศมีของหินกรวด และก้อนหินใหญ่ - โมดูลัส Subgrade Reaction - ความเร็วของคลื่นสั่นสะเทือน - แนวทางการออกแบบเพื่อต้านแผ่นดินไหว

การสำรวจขั้นพื้นฐาน ควรเริ่มด้วยการเจาะสำรวจดิน พร้อมการทดสอบ Standard Penetration Test โดยที่จำนวน ระยะห่าง และความลึกของหลุมเจาะจะถูกกำหนดโดยสภาพภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยา ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจขั้นต้นในบริเวณพื้นที่โดยรอบ โดยทั่วไประยะห่างของหลุมเจาะจะประมาณ 200 ถึง 500 เมตร (JSCE-Japanese Standard)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การสำรวจขั้นรายละเอียดจะดำเนินการในตำแหน่งที่ตั้งที่มีปัญหา ซึ่งวางอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สำรวจมา หลุมที่เจาะสำหรับการสำรวจอาจจะเป็นสาเหตุของการไหลเข้ามาของน้ำและอาจก่อปัญหาขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ Shield ประเภทที่ใช้ Slurry Shield และ Compressed Air Shield เนื่องจากแรงดันและ Slurry อาจรั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.1. จึงจำเป็นต้องเอาใจใส่เป็นพิเศษกับตำแหน่งที่อยู่ของหลุมและการถมดินกลับ



รูปที่ 3.1. แสดงแรงดันจาก Compressed Air หรือ Slurry รั่วไปในช่องว่างในหลุมเจาะขนาดใหญ่ขณะเจาะอุโมงค์

การสำรวจขั้นรายละเอียดจะทำเพื่อเสริมการสำรวจเบื้องต้นและพื้นฐาน โดยจะทำเพื่อเพิ่มจุดสำรวจในตำแหน่งที่อาจเป็นปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบและก่อสร้าง และเพื่อให้ได้ข้อมูลการออกแบบในกรณีเฉพาะ เช่นแผ่นดินไหว การสำรวจประเภทนี้อาจจะประกอบด้วยการวัดขนาดก้อนกรวดสูงสุด การทดสอบแรงดันดินด้วย Pressuremeter การทำ PS-logging และอื่นๆ ดังแสดงในตางราง 3.2. โดยการใช้หลุมเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 ลักษณะภูมิประเทศ

การสำรวจควรเริ่มต้นด้วยการสังเกตและเข้าใจลักษณะภูมิประเทศตามเส้นแนวอุโมงค์ เนื่องจากว่า มันจะสะท้อนถึงสภาพดินใต้พื้นดิน เช่น ถ้าหากสถานที่ที่จะทำการสำรวจอยู่บนภูเขาหรือที่ราบสูงก็มักจะคาดการได้ว่าไม่มีชั้นที่ดินอ่อนอยู่ข้างใต้ และควรจะสังเกตว่าอุโมงค์อาจจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของความดันของดินที่ไม่สมมาตร ถ้าหากเส้นทางไปตามแนวหรือข้ามขอบแนวของที่ต่ำหรือที่ราบสูง

3.3.4.2.ลักษณะทางธรณีวิทยา

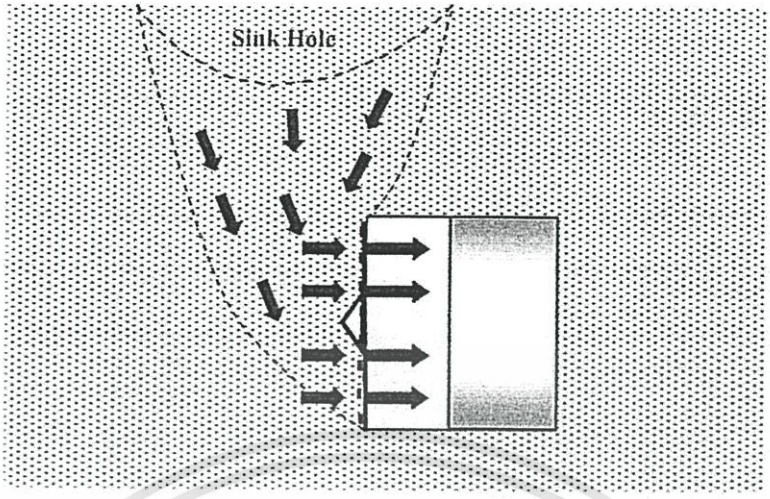
เป็นความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงลักษณะทางธรณีวิทยาใต้พื้นดิน ในพื้นที่ที่ครอบคลุมแนวอุโมงค์ที่กำลังพิจารณาทุกเส้นทาง โดยการเก็บข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับสภาพของดิน โดยการทำการตรวจสอบสถานที่ร่วมไปกับการสำรวจเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลข่าวสารที่เป็นประโยชน์ยังสามารถหาได้จาก วารสารทางวิชาการและหน่วยงานราชการ เช่น กรมทรัพยากรธรณีและกรมชลประทาน เป็นต้น

3.3.4.3. สภาพดิน

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

- ดินเหนียวเกาะติด Cutter และที่อุดตันCutter Chembers ทำให้หัวเจาะไม่สามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้
- การพังทลายของหน้าดิน โดยเฉพาะที่เป็นทรายหลวมที่ส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการทรุดตัวบนผิวดินเป็นหลุมขนาดใหญ่ (Sink Hole) ดังแสดงในรูปที่ 3.2. เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถก่อตัวได้
- ดินที่มีลักษณะเป็นกรวดอาจก่อให้เกิดการสึกกร่อนและทำความเสียหายแก่ Cutter และที่อุดตันท่อลำเลียงดินออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2. แสดงการพังทลายของหน้าดินส่วนหน้าหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิด Sink Hole

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield, EPB) จำเป็นที่ต้องตรวจสอบขนาดใหญ่ที่สุดและรูปร่างของกรวด ความแข็ง ขนาดคละของดิน และค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ เพื่อจะออกวัสดุและรูปร่างของใบตัดและขนาดของช่องเปิดส่วนหน้าของหัวเจาะ สายพานลำเลียงและส่วนประกอบอื่นๆ ให้มีความเหมาะสม

ในกรณีของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดย Pneumatic หรือ Compressed Air ในชั้นทรายหลวมใต้ระดับน้ำใต้ดิน ทรายอาจจะพังทลายและน้ำจะทะลักเข้ามาในส่วนหน้าของหัว ถ้าหากความดันต่ำเกินไป ถ้าหากความดันสูงเกินไปอาจส่งผลให้ทรายเกิดการสั้นและนำไปสู่ปรากฏการณ์ทรายดูด (Quick Sand) ดังนั้นจึงยากที่จะรักษาสมดุลระหว่างความดันภายในและภายนอกซึ่งเป็นผลมาจากความดันดิน และความดันน้ำที่ผสมผสานในดินประเภทนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระยะจากผิวดินถึงอุโมงค์มีค่าน้อยยิ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายบนผิวดิน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบขนาดคละ อัตราส่วนช่องว่าง ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำและค่า Stability Number (N) ของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ

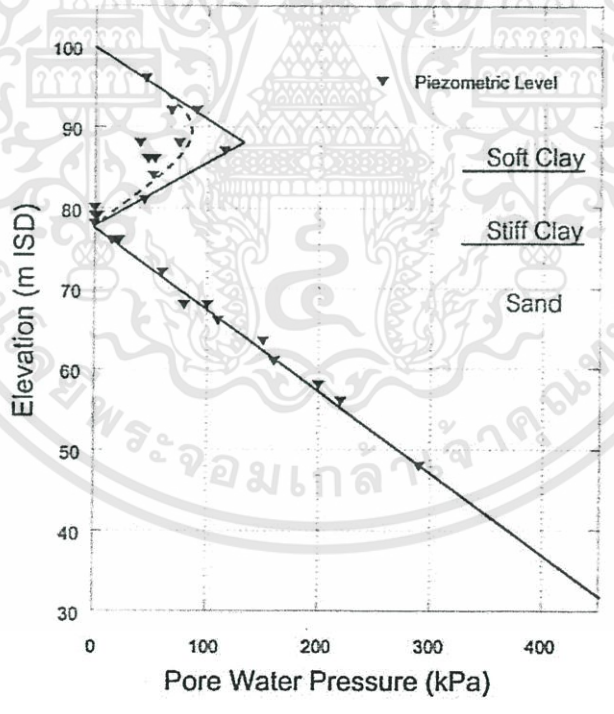
หากต้องการขุดเจาะอุโมงค์ในดินฝุ่น (Silt) หรือดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) มีค่า N ประมาณ 2 หรือน้อยกว่า จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน หน่วยแรงอัดของดิน (Unconfined Compresstion Strength) ค่าการเสียรูปและค่าการยุบตัวคายน้ำของดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ และ การทรุดตัวของดินอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.4. น้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินมักจะทำการวัดในระหว่างการทำการเจาะสำรวจดิน อย่างไรก็ตามควรจะสังเกตว่า ความดันของน้ำในชั้นซึม เช่น ชั้นทรายและชั้นกรวด ที่อยู่ใต้ชั้นทึบน้ำ เช่น ชั้นดินเหนียว ดังกรณีสัณฐานดินกรุงเทพ ไม่ได้มีแรงดันน้ำสถิตย์ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 3.3. จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดความดันน้ำ ในแต่ละชั้นดินโดยละเอียด

ระดับน้ำใต้ดินและระดับความดันน้ำในดินอาจจะผันผวน เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยเฉพาะในฤดูฝน จึงมีความสำคัญที่จะบันทึกสภาวะขณะทำการวัดทุกครั้ง ถ้าหากพบความดันน้ำสูงในชั้นซึมน้ำ จะต้องวัดค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ ทิศทางและความเร็วของน้ำใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของการขุดเจาะ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ สามารถคาดคะเนได้จากการขนาดคละของดิน แต่การทดสอบในที่(In-Situ Test) เช่น Well Piezometer Test ยังคงมีความสำคัญเช่นเดียวกันที่จะวัดสสารในน้ำใต้ดิน เช่น ปริมาณเกลือ



รูปที่ 3.3. ระดับความดันน้ำในดินที่ตรวจวัดในโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.5. สภาพอากาศไร้ออกซิเจน ก๊าซอันตรายและกาซไวไฟ

ถ้าหากชั้นที่เป็นทราย หรือที่เป็นกรวดอยู่ด้วยระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำเนื่องมาจากการสูบน้ำจากบ่อมากจนเกินไป การใช้บ่อลึกและอื่นๆ ภายใต้ชั้นที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ ช่องว่างในชั้นที่สามารถแทรกซึมได้อาจจะบรรจุไปด้วยอากาศที่ขาดออกซิเจนหรือก๊าซที่เป็นอันตราย ก๊าซมีเทนที่รั่วสามารถก่อให้เกิดการระเบิด การมีอยู่ของก๊าซจะตรวจไม่ใช่เฉพาะสำหรับการวางแผนงานเท่านั้น แต่ก็จะทำเพื่อความปลอดภัยด้วยเช่นกัน ก๊าซที่เป็นอันตรายอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ มาตรการเพื่อป้องกันการผุกร่อนของอุโมงค์ และส่วนประกอบที่เป็นเหล็กจะมีความจำเป็นถ้าหากตรวจพบต้องพิจารณาถ้าหากตรวจพบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้าหากตรวจพบก๊าซอันตรายเหล่านี้จะต้องคำนึงถึงมาตรการการระบายอากาศที่พอเพียง และจำเป็นต้องมีมาตรการป้องกันการระเบิดหรือติดไฟ

3.3.5. การสำรวจเพื่อมาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หัวข้อดังต่อไปนี้จะได้รับการสำรวจเมื่อมีความจำเป็นที่จะป้องกันสิ่งแวดล้อม ระหว่างทำการก่อสร้างและหลังจากการสร้างอุโมงค์

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

ตามวิธีการของการป้องกันสิ่งแวดล้อม หัวข้อที่ได้ทำเป็นระบบการป้องกัน จะต้องได้รับการสำรวจก่อนและระหว่างการสร้าง และผลควรจะนำมาใช้สำหรับการออกแบบและการจัดการการก่อสร้างบางหัวข้อของหัวข้อเหล่านี้ควรจะได้รับการสำรวจหลังจากการก่อสร้างตามที่จำเป็นด้วยเช่นกันในการตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.1. เสียงและการสั่นสะเทือน

ควรทำการประเมินผลกระทบของเสียงและการสั้นสะเทือน จากการก่อสร้างทั้งหมดก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อหาวิธีป้องกันโดยเฉพาะพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบมากเป็นพิเศษ เช่น โรงพยาบาล และโรงเรียน

3.3.5.2. การเคลื่อนตัวของพื้นดิน

อาคาร และสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์จะต้องได้รับการสำรวจ ก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อตรวจสอบสภาพอาคารทั่วไป และจัดประเภทของอาคารตามลำดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ เช่นอาคารตึกแถวเก่า 3 ชั้นซึ่งมีเสาเข็มสั้น อาจจะจัดอยู่ในประเภทที่ต้องระมัดระวัง และต้องติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวทั้งก่อนการก่อสร้างระหว่างการก่อสร้างและหลังจากการสร้างเพื่อจะหาจำนวนระดับของการยกระดับขึ้นของพื้นดิน หรือ การจมลงของพื้นดิน

ด้านการทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์เป็นปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินและบนดินให้น้อยที่สุด ดังนั้นการประเมินค่าการทรุดตัวของดินก่อนการก่อสร้างจึงมีความจำเป็นเพื่อหาแนวอิทธิพล (Influenced Zone) และระบุตำแหน่งที่อาจเป็นอันตรายจากการก่อสร้าง อีกทั้งยังใช้เป็นบรรทัดฐานในการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อการรักษาระดับการทรุดตัวให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหรือค่าที่ประมาณไว้ ทั้งนี้เพื่อควบคุมผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างตามแนวเส้นทางของอุโมงค์

3.3.5.3. ระดับน้ำใต้ดิน

ควรทำการสำรวจระดับน้ำใต้ดินและคุณภาพของบ่อน้ำในแนวอิทธิพล เนื่องจากว่าการเปลี่ยนแปลงในระดับน้ำใต้ดิน ที่เกิดจากการก่อสร้างอาจจะกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติและชีวิตของผู้อาศัยหรืออุตสาหกรรมในพื้นที่การก่อสร้าง ควรบันทึกเวลาของการสำรวจระดับน้ำใต้ดินเพราะว่าระดับน้ำใต้ดินผันผวน ตามฤดูกาล

3.3.5.4. อากาศที่ขาดออกซิเจน และก๊าซอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน

ออกซิเจนในที่ว่างจะถูกทำให้หมดสิ้นไป โดยการออกซิเดชั่นของ ปริมาณแร่เหล็กและอินทรีวัตถุในดิน และอากาศที่ขาดออกซิเจนซึ่งเป็นผลตามมา อาจจะถูกผลักดันเข้าไปสู่บ่อใกล้เคียง และชั้นใต้ดิน โดยการประยุกต์ของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์แบบอัดอากาศ (Pneumatic Shield) ในชั้นทราย หรือกรวดที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำภายใต้ชั้นดินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ตำแหน่งที่ตั้งของบ่อ ระดับน้ำของบ่อและรากฐานของโครงสร้างที่จะได้รับผลกระทบ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้าง และการรั่วของอากาศที่ขาดออกซิเจนจะได้รับการตรวจสอบระหว่างการก่อสร้าง การมีอยู่ของก๊าซที่เป็นอันตราย เช่น ก๊าซมีเทน และอื่นๆ จะได้รับการสำรวจก่อนการก่อสร้างโดยการเจาะ ถ้าหากตรวจพบก็จะวัดและตรวจสอบความเข้มข้นของมันก่อนและระหว่างการก่อสร้าง

3.3.5.5. กากหรือตะกอนสารเคมี

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

3.3.5.6. สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง

การลดในสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างและการรีไซเคิลของเสียจากการก่อสร้างจะได้รับการส่งเสริมสำหรับการดำเนินงานแบบราบเรียบ และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเมื่อโครงการขุดอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield อยู่ภายใต้การวางแผนและการออกแบบ และอยู่ระหว่างการก่อสร้างจะต้องจัดให้มีตำแหน่งที่ตั้งเส้นทางการลำเลียงของเสีย และสถานที่การกำจัดขั้นสุดท้าย

สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้างที่ได้จากการสร้างอุโมงค์ประเภทหัวเจาะ Shield (ดินที่เกิดจากการก่อสร้างและของเสียจากการก่อสร้าง) จะถูกกำจัดอย่างเหมาะสมโดยอาศัย “แนวทางปฏิบัติสำหรับการจัดการที่เหมาะสมของสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง”

“สิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการก่อสร้าง” หมายถึง วัสดุที่เกิดขึ้นมาจากการก่อสร้าง

“ดินที่เกิดจากการก่อสร้าง” หมายถึง วัสดุที่เป็นดินที่เกิดขึ้นมาจากการก่อสร้าง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.7. อื่นๆ

การสำรวจปริมาณการจราจรจะดำเนินการเพื่อจะประเมินผลกระทบของยานพาหนะสำหรับการก่อสร้างที่มีต่อการจราจรทั่วไปรอบๆ ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และจะกำหนดเส้นทางยานพาหนะสำหรับการก่อสร้างด้วยเช่นกัน กฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้องจะต้องศึกษาโดยต่อเนื่อง เนื่องจากว่าการประเมินสิ่งแวดล้อมอาจจะกำหนดสำหรับวัตถุประสงค์ทางการรักษาสิ่งแวดล้อม

3.4. การวางแผน

3.4.1. ขนาดและรูปร่างของหน้าตัดภายในอุโมงค์

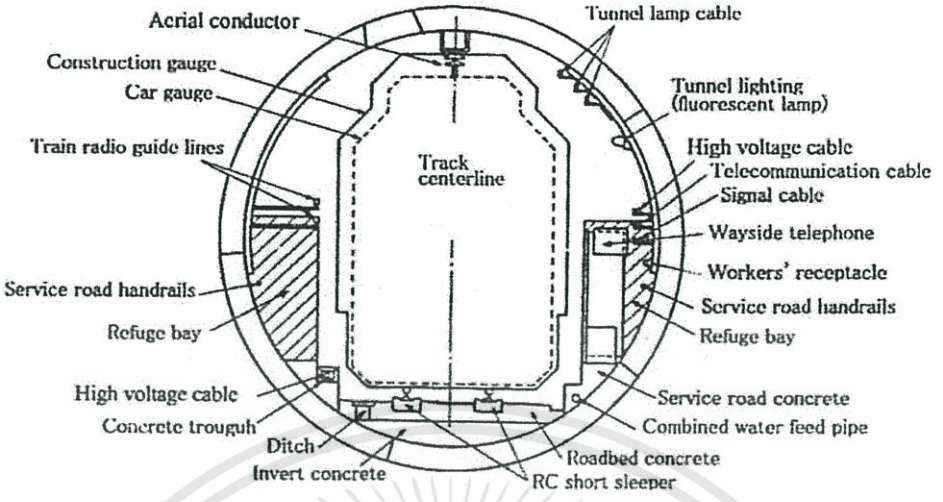
1. รูปร่างและขนาดของส่วนตัดภายในอุโมงค์จะต้องเพียงพอสำหรับการใช้งานของอุโมงค์และจะกำหนดโดยการพิจารณาข้อกำหนดการสร้าง
2. หน้าตัดของหัวเจาะอุโมงค์ Shield โดยทั่วไปเป็นรูปวงกลม

3.4.1.1. รูปร่างและขนาด

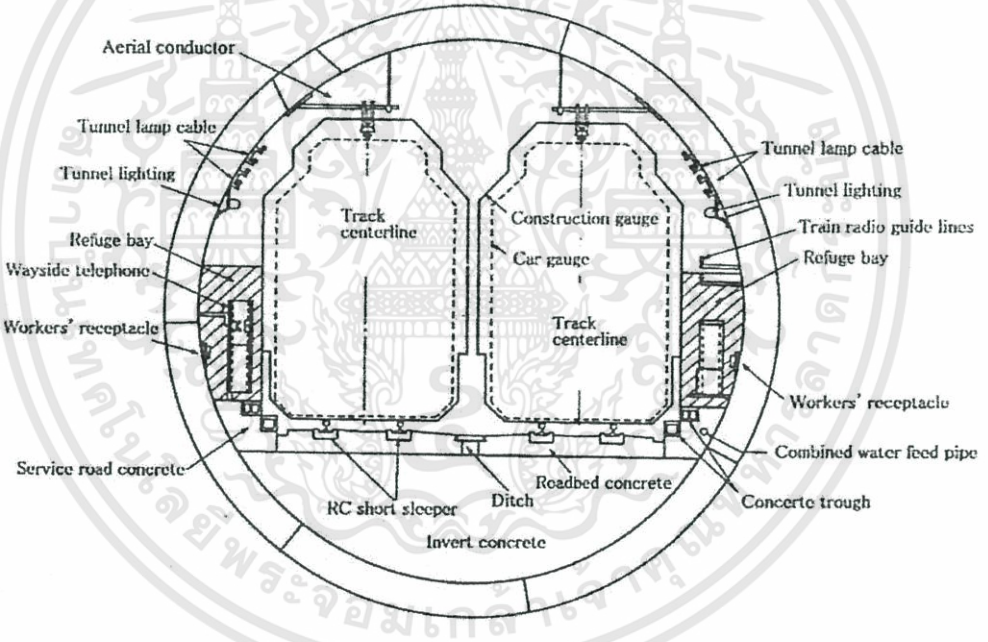
ขนาดของหน้าตัดภายในของอุโมงค์จะกำหนดโดยการพิจารณาหน้าตัดภายในที่กำหนดสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์และหน้าตัดกำหนดสำหรับการก่อสร้าง "มาตรฐานชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์สำหรับการใช้งานอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield " จะเป็นการอ้างอิงที่ดีเมื่อการออกแบบอุโมงค์ด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.8 ถึง 8.3 เมตร

1. ทางรถไฟ อุโมงค์รางเดี่ยว หรืออุโมงค์รางคู่จะถูกเลือกใช้เป็นปกติ หน้าตัดภายในจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาถึงขนาดในการก่อสร้าง ขนาดความกว้างของทางรถไฟในการสร้างและเนื้อที่ว่างที่กำหนดสำหรับการรองรับโครงสร้างราง การซ่อมบำรุงและที่พักและเส้นทางรถไฟ สัญญาณและโทรคมนาคม อุปกรณ์ที่ให้แสงสว่าง แผนกงานเกี่ยวกับการระบายอากาศและการระบายน้ำ หน้าตัดภายในจะต้องกำหนดโดยการพิจารณาถึงค่าความเผื่อของการก่อสร้าง ค่าความเผื่อการสร้างโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 ม.ม. ในแนวตั้งและในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังรูปที่ 3.4(a). และ 3.4(b).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a).



(b).

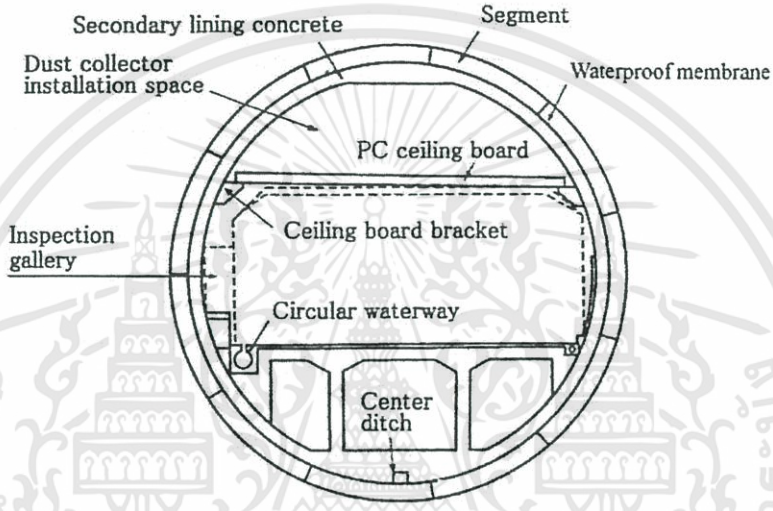
รูปที่ 3.4.แสดงองค์ประกอบของโครงสร้างอุโมงค์รถไฟ

(a). อุโมงค์รางเดี่ยว

(b). อุโมงค์รางคู่

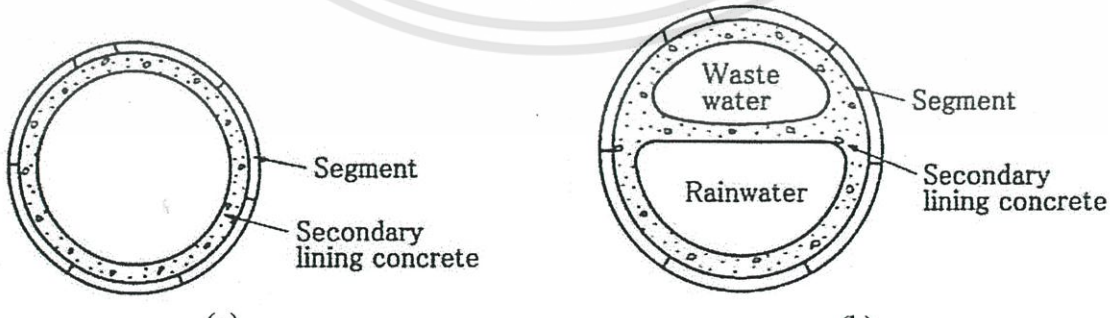
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถนน หน้าตัดภายในจะกำหนดโดยการพิจารณาถึงขนาดสำหรับการก่อสร้าง ต่อการจัดจำแนกประเภทของถนนที่สามารถประยุกต์ได้ในระเบียบข้อบังคับโครงสร้างถนนและเนื้อที่ว่างที่กำหนดสำหรับการบำรุงรักษาและพื้นที่สำหรับท่อระบายอากาศหรือพัดลมและแผนกงานสำหรับอุปกรณ์ติดตั้งส่องสว่าง การป้องกันอุบัติเหตุ การตรวจสอบ การจัดการ การตกแต่งภายใน และป้ายการจราจร ตามปกติจะกำหนดหน้าตัดโดยการเพิ่มค่าความเผื่อของการวางแนวของหัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield) โดยทั่วไปค่าความเผื่อในการสร้างจะอยู่ระหว่าง 50 และ 150 มม. ในแนวตั้ง และในแนวนอนจากศูนย์กลาง ดังแสดงในรูป 3.5.



รูปที่ 3.5. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้เป็นถนน

3. ระบบท่อน้ำเสีย หน้าตัดภายในจะกำหนดโดยการสันนิษฐานถึงการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) หน้าตัดภายในจะต้องเพียงพอสำหรับความเร็วการไหลที่สามารถยอมให้ได้และอัตราการไหลที่ได้ออกแบบ ดังรูป 3.6(a). จะต้องใช้ผนังกั้นเพื่อแบ่งหน้าตัดภายใน ยกตัวอย่างเช่น หน้าตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสียและระบายน้ำฝน ดังรูป 3.6(b).



รูปที่ 3.6. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ระบายน้ำเสีย
(a). รูปตัดทั่วไป (b). รูปตัดแบบ 2 ชั้น

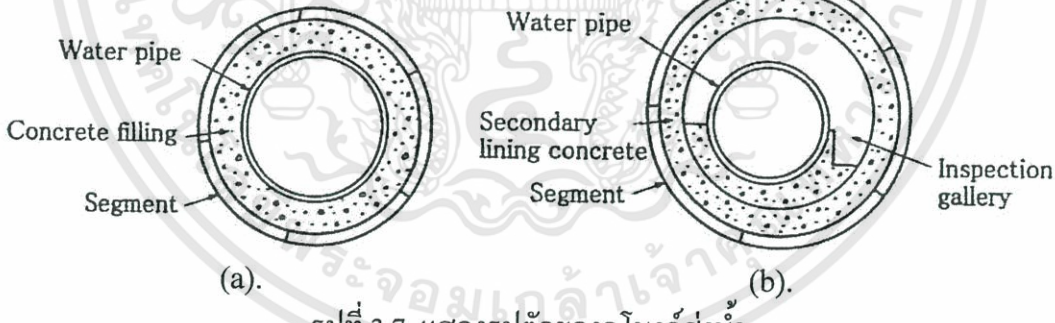
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระบบประปา งานระบบน้ำส่วนใหญ่ประกอบด้วยท่อความดัน อุโมงค์นั้นเป็นคอนกรีตกำลังต่ำที่กำหนดสำหรับท่อความดัน ดั้งนั้น ท่อต่อต้านความดันไฮดรอลิคที่ทำด้วยเหล็ก หรือ เหล็กหล่อที่หลอมเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ซึ่งโดยทั่วไปจะจัดวางไว้ในอุโมงค์ วิธีการที่เป็นตัวอย่างประกอบด้วย

ประเภทเติมคอนกรีต ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 330 ถึง 600 มม. ที่ใหญ่กว่าท่อน้ำโดยรัศมีถูกสร้างขึ้นตามโดยท่อน้ำเหล็กที่เชื่อมต่อหรือท่อเหล็กหล่อที่หลอมเป็นรูปร่างต่างๆได้ในอุโมงค์ ที่ว่างระหว่าง ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเต็มด้วยคอนกรีต นี่คือวิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุด

ที่ว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาค่าความเผื่อการวางแนวของหัวเจาะอุโมงค์ Shield และความหนาต่ำสุดของผนังอุโมงค์ (Lining) ดังรูป 3.7(a).

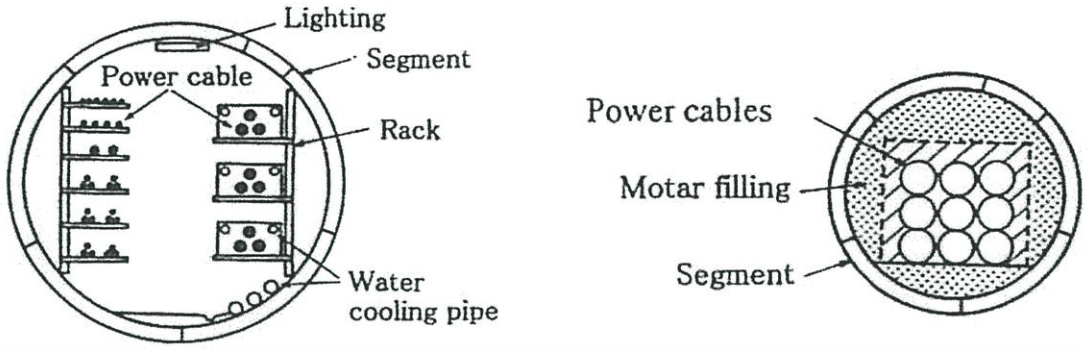
ประเภทอุโมงค์เพื่อการตรวจสอบ หน้าตัดภายในของผนังอุโมงค์หลัก(Primary Lining) จะมีขนาด 950 ถึง 1100 มม. ที่ใหญ่กว่าท่อน้ำโดยรัศมี หน้าตัดของอุโมงค์จะถูกปรับท่อน้ำและส่วนตรวจตรา โดยทั่วไปจะใช้ท่อเหล็กหรือท่อเหล็กหล่อ ที่ว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเป็นส่วนตรวจตรา ดังรูป 3.7(b).



รูปที่ 3.7. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ส่งน้ำ
(a).ประเภทเติมคอนกรีต (b).ประเภทอุโมงค์เพื่อการตรวจสอบ

5. กำลังไฟฟ้า การใช้อุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะอุโมงค์ Shield สำหรับสายการต่อผ่านกำลังไฟฟ้าจะถูกจัดแบ่งประเภทเป็นประเภทตะแกรงและประเภทท่อดิน หน้าตัดภายในของอุโมงค์ประเภทตะแกรงจะตัดสินโดยการพิจารณาส่วนการตรวจตราและที่ว่างสำหรับงานวางสายไฟ ดังรูป 3.8(a). และ 3.8(b). ประเภทแนวท่อดินจะถูกใช้บ่อยๆสำหรับจำนวนเล็กน้อยของสายไฟที่เกี่ยวข้องหน้าตัดจะถูกกำหนดโดยจำนวนของสายไฟที่จะติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

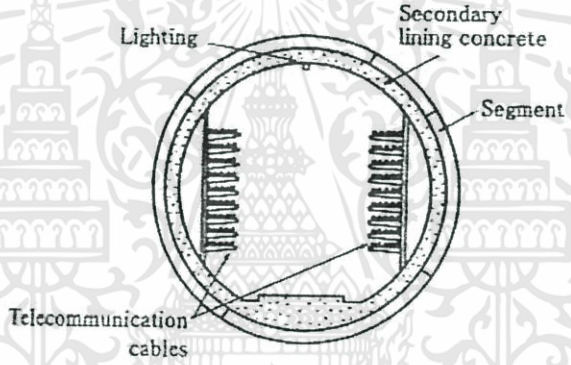


(a). (b).

รูปที่ 3.8. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิ้ลพลังงาน

(a). แบบตะแกรง (b). แบบท่อ

6. โทรคมนาคม หน้าตัดภายในควรตัดสินจากส่วนการตรวจตราและพื้นที่สำหรับสายเคเบิ้ลดังรูป 3.9.



รูปที่ 3.9. แสดงรูปตัดของอุโมงค์ที่ใช้วางสายเคเบิ้ลสื่อสาร

7. ท่อก๊าซ ท่อเหล็กหรือท่อต้านความดันอื่นๆ จะถูกจัดวางในอุโมงค์ 2 ประเภท ตัวอย่าง คือ

ประเภทเติมมอร์ตา ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซประมาณ 650 ถึง 750 มม. หลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ท่อนำก๊าซจะถูกจัดวางและเข้าร่วมในอุโมงค์ ช่องว่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และท่อจะเติมด้วยมอร์ตา

ระยะห่างระหว่างผนังอุโมงค์หลัก(Primary Lining) และท่อก๊าซควรที่จะสามารถวางท่อนั้นได้ เพื่อเป็นระยะเผื่อของอุโมงค์ ดังรูป 3.10(a).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

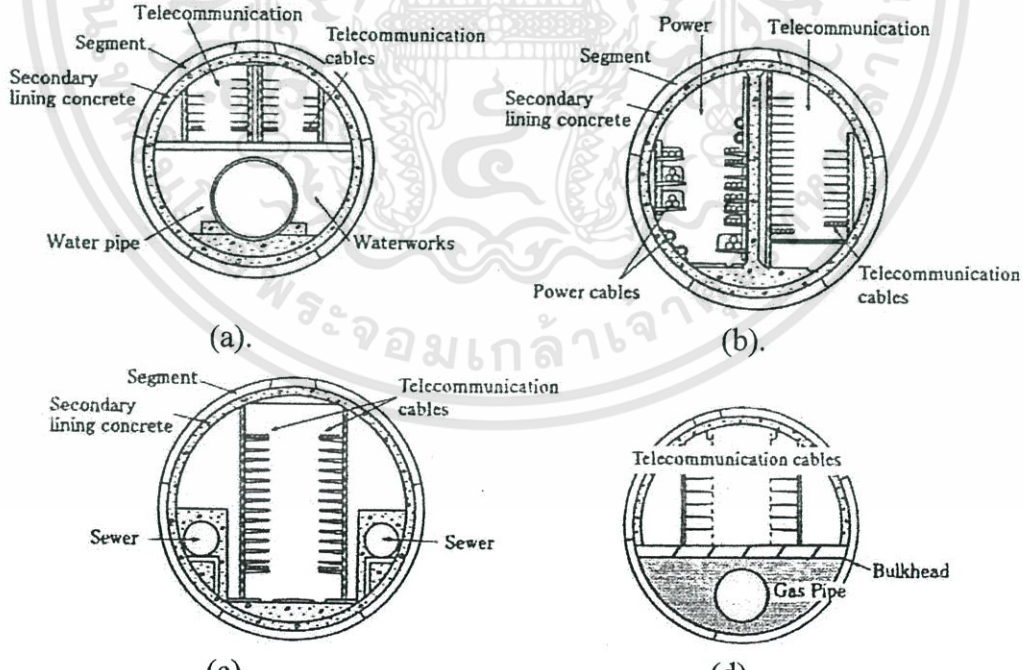
ประเภทอุโมงค์การตรวจสอบผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าขนาดท่อก๊าซโดยรัศมีประมาณ 950 ถึง 1050 มม. หลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ก็จะจัดวางท่อก๊าซดังรูป 3.10(b).

(a). (b).

รูปที่ 3.10. แสดงรูปตัดอุโมงค์วางท่อก๊าซ

(a).ประเภทเติมมอร์ตา (b).ประเภทอุโมงค์การตรวจสอบ

8. อุโมงค์แบบอเนกประสงค์ เมื่อระบบน้ำ การกำจัดน้ำเสีย สายไฟฟ้า สายโทรคมนาคม หรือท่อก๊าซอาจจะถูกจัดวางเข้าในอุโมงค์เดี่ยว หน้าตัดภายในที่ถูกเลือกจะให้เนื้อที่ว่างพอสำหรับการผสมผสานเข้าด้วยกันของการประยุกต์สองอย่างหรือมากกว่านี้ ดังรูป 3.11(a). 3.11(b). 3.11(c). และ 3.11(d).



(a). (b).

(c). (d).

รูปที่ 3.11. แสดงรูปตัดของอุโมงค์เอนกประสงค์

(a). ระบบน้ำและระบบการสื่อสาร (b). ระบบพลังงานและระบบการสื่อสาร

(c). ระบบระบายน้ำเสียและระบบสื่อสาร (d). ท่อก๊าซและระบบสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการที่จะทำให้ผลกระทบของอุบัติเหตุติดตั้งฝากั้นโดยทั่วไปน้อยที่สุด เมื่อรวมถึงท่อก๊าซ จะต้องศึกษาการแรงกระทำและความเค้นในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) เมื่อใช้กำแพงกั้นเป็นส่วนประกอบโครงสร้างในอุโมงค์

3.4.1.2. รูปร่างของหน้าตัด

รูปร่างของหน้าตัดของอุโมงค์ส่วนมากเป็นรูปวงกลมอันเนื่องมาจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. หน้าตัดวงกลม โดยทั่วไปจะเป็นสิ่งที่ต้านทานต่อแรงดันภายนอกได้มากที่สุด
2. หน้าตัดวงกลม จะมีความสะดวกสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และผนังที่เป็นรูปร่างวงกลมถูกผลิตและติดตั้งได้ง่าย
3. หน้าตัดวงกลมจะไม่แสดงปัญหาใดๆ ในกรณีของการหมุนหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

อย่างไรก็ตาม ใช่ว่าหน้าตัดวงกลมจะใช้ได้ในทุกกรณีเสมอไปเนื่องจากความจำเป็นบางโอกาสสำหรับการใช้ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นของเนื้อที่ว่างของอุโมงค์ ข้อจำกัดเกี่ยวกับหน้าที่ของหน้าตัดวงกลม ความยากในการใช้ที่ดิน โครงสร้างของบริเวณใกล้ชิด และพื้นดินปกคลุมที่บาง ในปีที่ผ่านมาเร็วๆนี้ วงกลมคู่และส่วนตัดที่เป็นรูปไข่ และส่วนตัดที่ไม่เป็นวงกลมอื่นๆ จะใช้เพิ่มขึ้นนอกจากส่วนตัดครึ่งวงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและส่วนตัดรูปเกือกม้าของอุโมงค์ตามแบบนิยม

3.4.2. การวางแนวเส้นทางอุโมงค์

- การวางแนวเส้นทางของอุโมงค์จะถูกกำหนดในการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์และเงื่อนไขของการวางแนว เส้นทางที่เชื่อมติดกันหรือเส้นโค้งทีละน้อยจะใช้กันอย่างแพร่หลายในขณะที่พิจารณาถึงตำแหน่งที่ตั้ง อุปสรรค สภาพของพื้นดินและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอื่น ๆ
- การนำมาใช้เกี่ยวกับเส้นโค้งที่มีรัศมีน้อยจะต้องการการศึกษาโดยตลอดเกี่ยวกับการออกแบบและงานก่อสร้าง
- เมื่ออุโมงค์ 2 แห่ง หรือมากกว่าจะทำการสร้างในแบบขนานหรืออุโมงค์ถูกสร้างใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง ฯลฯ การจัดให้เป็นแนวเส้นทางเดียวกันจะต้องวางแผนด้วยการพิจารณาเป็นพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานการณ์ของการวางแนวเส้นทางอุโมงค์ มีดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) จะใช้กันมากในพื้นที่ของเมืองการวางแนวเส้นทางของอุโมงค์จะถูกจำกัด เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของปล่องแนวดิ่ง (Shaft) เงื่อนไขของการใช้พื้นผิว อุปสรรคต่างๆ ผลกระทบต่อโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียง ฯลฯ อย่างไรก็ดี การวางแนวเส้นทางของอุโมงค์จะต้องจัดให้ตรงเท่าที่จะเป็นไปได้และจะผ่านชั้นดินที่ปลอดภัยสำหรับความสะดวกของการขุดอุโมงค์ การไหลเข้าของน้ำและก๊าซอันตรายต่างๆ ฯลฯ การบำรุงรักษาและการจัดการของอุโมงค์หลังจากการก่อสร้างเสร็จสิ้นก็จำเป็นต้องพิจารณาด้วยเช่นกัน
2. ความมีประสิทธิภาพของการขุดเป็นรูปโค้งจะได้รับผลกระทบจากสภาพของดิน ขนาดของภาคตัดขวางของส่วนหน้า ระดับของอุโมงค์ ความยาว ประเภทและโครงสร้างของเครื่องกลหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่จะใช้ และประเภทความกว้างของวงแหวนผนังอุโมงค์และระดับของความเรียวลงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ฯลฯ หัวข้อต่อไปนี้ต้องการการพิจารณาเป็นพิเศษ ดังนี้

รัศมีปกติของเส้นโค้ง (Ordinary Radius of Curve) การขุดตามความโค้งต้องการอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมประกบที่จะมาติดตั้งบนหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield หรือมาตรการสนับสนุนที่จะมาใช้ในขณะเชื่อมประกบไม่ได้ รัศมีที่เป็นจุดเริ่มต้นของเส้นโค้ง (เส้นโค้งที่มีรัศมีเล็กกว่านี้ใดๆเรียกว่าโค้งเฉียบขาด) ตามข้อมูลการปฏิบัติในอดีต รัศมีของโค้งต่ำสุด (R) สำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบปิด (Close Type Shield) จะเป็นดังที่แสดงข้างล่าง (เกี่ยวกับเส้นผ่าศูนย์กลางหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield)

R = 80 m. สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ประมาณ 3 ม.

R = 100 m. สำหรับ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ประมาณ 5.9 ม.

โค้งเฉียบขาด(Shape curves) สำหรับรัศมีเส้นโค้งที่เล็กกว่า การปรับปรุงพื้นดินจะต้องศึกษาเพื่อจะทำให้เกิดความมั่นคงแก่พื้นที่ การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield (อุปกรณ์ที่เชื่อมประกบ ฯลฯ) ประเภทส่วนแบ่งและโครงสร้างและมาตรการต่อต้านอื่นๆ ก็จะเป็นที่ต้องการด้วยเช่นกัน

มุมแหลม (Acute Angles) เพื่อประยุกต์วิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่มีระบบจัดการน้ำหรือการกำจัดน้ำเสีย สายไฟฟ้าหรืออุโมงค์สำหรับโทรคมนาคม อุโมงค์อาจจะต้องการที่จะเลี้ยวอย่างกะทันหันหรือที่จะเชื่อมต่อที่สี่แยกของถนน ฯลฯ ในกรณีดังกล่าว จะสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) สำหรับการปรับใหม่ อุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield จะถูกเชื่อมต่อที่ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) หรือหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ถูกเชื่อมต่อลงใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อมีการผลักดันอุโมงค์ 2 อุโมงค์ในแบบที่ขนานกัน การรับน้ำหนักชั่วคราวและการอัดเติมน้ำปูนที่มีความดันจะต้องถูกย้ายนำมาปฏิบัติก่อนในอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield Tunnel ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องตามมาจากหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ระยะทางที่เหมาะสมจะจัดให้มีขึ้นระหว่างอุโมงค์ที่มีมาก่อนและอุโมงค์ที่มีตามมาภายหลังเพื่อจะป้องกันการทรุดตัวของชั้นดิน และการทำให้เสียรูปของอุโมงค์ที่อยู่ข้างเคียง

ระยะทางระหว่างอุโมงค์ที่ขนานกันสองอุโมงค์ไม่สามารถที่กำหนดให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณเดียวกันได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปมันจะถูกกำหนดจากความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ แต่หากกรณีนี้ไม่ได้ผล จึงใช้มาตรการสนับสนุนประมาณซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทางเคมี การฉีดที่มีความดันสูงและการผสม และวิธีการปรับปรุงพื้นดินอื่นๆ

การก่อสร้างบริเวณใกล้เคียงของงานใต้ดินจะต้องการการสำรวจที่รอบคอบมากในเรื่องเงื่อนไขการออกแบบ และสถานภาพปัจจุบันของสิ่งปลูกสร้าง ระยะห่างที่เพียงพอสำหรับการป้องกันผลกระทบในทางกลับกันของการขุดอุโมงค์ที่มีต่อสิ่งปลูกสร้างใต้ดินจะต้องจัดให้มีข้อกำหนดขึ้น แต่เมื่อระยะห่างที่เพียงพอไม่สามารถบรรลุผลได้ การปรับปรุงดิน การทำโครงสร้างเบื้องล่างเพื่อรองรับน้ำหนักส่วนบน และวิธีที่เหมาะสมอื่นๆจะต้องได้รับการพิจารณา

3.4.3. ภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์

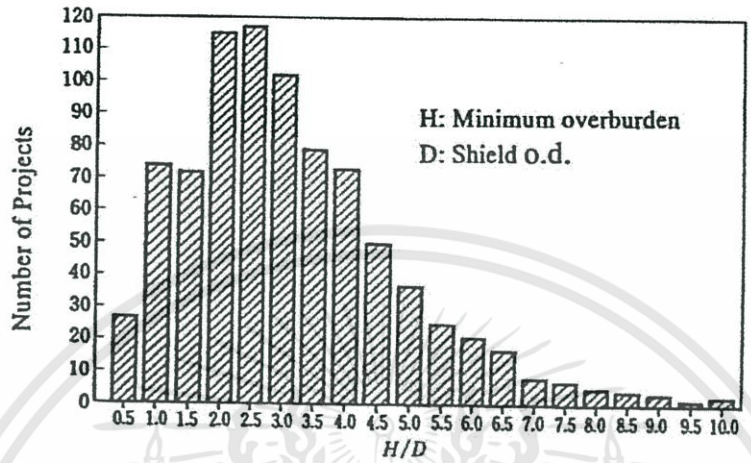
ภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ (Tunnel Overburden) จะกำหนดทั่วไปในการพิจารณาเงื่อนไขของพื้นผิวดิน และโครงสร้างใต้ดิน ธรรมชาติของดิน ขนาดของส่วนตัดของการขุดและวิธีการสร้าง

อุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ควรที่จะคำนึงถึงความลึกในการขุดเจาะ เพื่อจะอำนวยความสะดวกแก่งานก่อสร้าง (การเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรก พืชที่เน่าเปื่อย และอื่นๆ การขนส่งวัสดุและอุปกรณ์ การเข้าและออกของพนักงาน ฯลฯ) การสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) การควบคุมน้ำใต้ดิน การบำบัดน้ำ การบำรุงรักษาและการควบคุมสิ่งปลูกสร้างและการทำงานของท่อ อย่างไรก็ตามจึงจำเป็นที่จะพิจารณาถึงการรับภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ที่เพียงพอเพื่อจะป้องกันผลกระทบในทางกลับกันที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการตัดสินใจเกี่ยวกับความลึกของอุโมงค์

การรับภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ที่กำหนดต่ำสุด โดยทั่วไปจะเป็น 1.0D ถึง 1.5D (D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield) การวางเส้นทางอุโมงค์ตามแนวยาว ซึ่งจะเป็นการตัดสินโดยหลักส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้ของอุโมงค์และการแทรกแซงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่ และมีการบันทึกโครงการตามความเป็นจริงหลายอย่างซึ่งเหล่านี้แสดงถึงการมีการปฏิบัติกับการรับภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์ที่ต่ำกว่าแผนภาพข้างต้น ดังรูป 3.12. เมื่อการรับภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์มีค่าเพียงเล็กน้อย จะต้องศึกษาการใช้มาตรการสนับสนุนที่เพียงพอ



รูปที่ 3.12. แสดงภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์น้อยที่สุดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ Shield

เมื่ออุโมงค์ถูกก่อสร้างใต้แม่น้ำ หรือทะเลจะมีการศึกษาเกี่ยวกับน้ำเลน หรือการรั่วไหลของอากาศ การพ่นออกและการลอยตัวของอุโมงค์เป็นเรื่องสำคัญโดยเฉพาะ

จำนวนที่เพิ่มขึ้นของทางรถไฟ ถนน ระบบการจัดการน้ำ และการบำบัดน้ำเสียจะถูกสร้างขึ้นใต้ดินในพื้นที่เมืองในไม่กี่ปีมานี้ อุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ที่ทำการสร้างขึ้นมาล่าสุดก็จะอยู่ลึกลงไปยิ่งขึ้นเพื่อจะไม่ให้มีอุปสรรคเกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างเหล่านี้ การศึกษาอย่างรอบคอบเกี่ยวกับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ และหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะสำคัญมากเมื่อการรับภาระน้ำหนักข้างบนเหนืออุโมงค์มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

3.4.4. ระดับของอุโมงค์

ระดับของอุโมงค์ จะกำหนดในการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้ การบำรุงรักษาและการจัดการ ฯลฯ

ระดับของอุโมงค์จะกำหนดโดยการพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้โดยทั่วไป อย่างไรก็ตามการถูกจำกัดหลายอย่างก็จะมีอยู่เนื่องมาจากการมีอยู่ของแม่น้ำ งานใต้ดินที่มีอยู่ ระบบสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน และอุปสรรคอื่น ๆ และแผนสำหรับการสร้างแผนกงานเฉพาะต่าง ๆ ฯลฯ

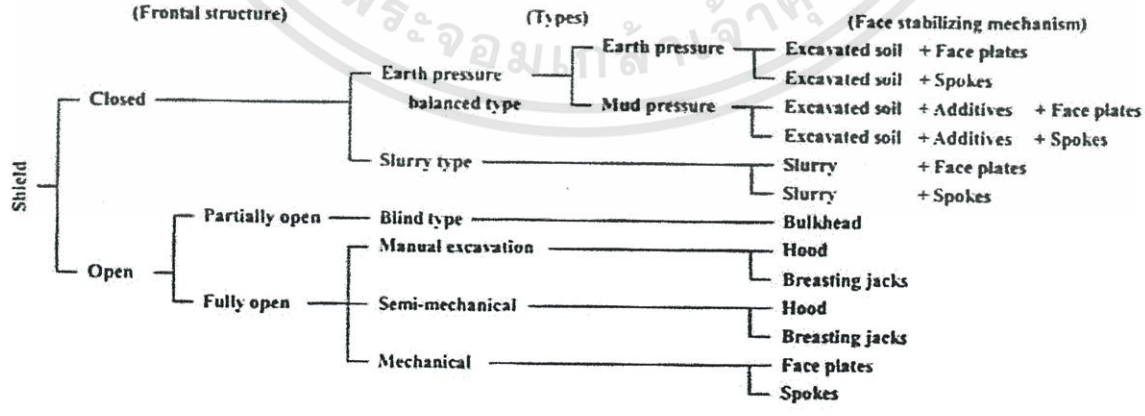
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อระดับเกิน 2% ความมีประสิทธิภาพของงานจะต่ำลงและผลกระทบจากผลที่ตามมาก็จะต้องพิจารณา จะมีความจำเป็นด้วยเช่นกันที่จะจัดให้มีมาตรการด้านความปลอดภัยที่เน้นลักษณะต่างๆ ของความปลอด ระดับของอุโมงค์ใต้ดินหลังจากเสร็จจะได้รับการออกแบบตามปกติให้เล็กลงแต่ควรจะเพียงพอสำหรับการระบายตามธรรมชาติ (ประมาณ 0.2% น้อยที่สุด) ในอุโมงค์ที่ใช้สำหรับถนนทางรถไฟ กำลังไฟฟ้า การโทรคมนาคม ฯลฯ

3.4.5. การเลือกวิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ในการที่จะทำให้มีความสามารถในด้านการก่อสร้างที่ปลอดภัยและประหยัดของอุโมงค์ใต้ดินเงื่อนไขพื้นฐานสำหรับการเลือกวิธีการทำหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ควรจะจัดให้อยู่ในลำดับในการพิจารณาในเรื่องการขุด ผนังอุโมงค์ (Lining) ฯลฯ นอกจากสภาพของพื้นดิน สภาพของพื้นผิว มิติของส่วนตัด ความยาวของการก่อสร้าง การวางแนวเส้นทางของอุโมงค์ใต้ดินและระยะเวลาการก่อสร้าง

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Machines) มีทั้งแบบปิดและแบบเปิดต่อโครงสร้างของส่วนที่อยู่ด้านหน้า เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) มีประเภทความดันดินสมดุล(Earth Pressure Balance)และสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry) และเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) มีประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) และเปิดเพียงบางส่วน (Partially Open) ประเภทเปิดอย่างเต็มที่ (Fully Open) ต่างแบ่งย่อยออกเป็นการขุด การขุดด้วยมือ ประเภทเกิ่งกลไกและกลไกต่อวิธีของการขุด ประเภทส่วนหน้าเปิดบางส่วนจะรวมถึงหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield แบบ Blind Shield ดังรูป 3.13.



รูปที่ 3.13 ประเภทของหัวเจาะ Shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5.1. ลักษณะเฉพาะของแต่ละประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-Face Type Shield Machines) หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิดมีส่วนกั้นเพื่อจะทำให้มีความมั่นคงแก่ส่วนหน้าที่ตัดภายใต้ความกดดัน

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

1. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน(Earth Pressure Type Shield Machines) จะตัดเฉือนดินด้วยหัวเครื่องแบบหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบ เต็มเนื้อที่ว่างระหว่างส่วนหน้าและส่วนกั้นตรงหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ที่มีดินผสมและทำให้มีความดันแก่ดินด้วยแรงพุ่งของหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ความดันของการกระทำของดินบนส่วนหน้าจะถูกทำให้มีความสม่ำเสมอแก่ดิน ดินก็จะถูกปล่อยออกในที่สุดโดยวิธีการของการลำเลียงด้วยสายพานลำเลียง ฯลฯ
2. เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud Pressure Type Shield Machines) จะฉีดสิ่งที่เพิ่มเข้าไปและผสมกับดินที่ขุดโดยหัวเครื่องตัดแบบหมุนรอบตัว ความดันของโคลนที่มาจากการหลอมเหลวจะทำให้เกิดความสม่ำเสมอแก่ส่วนหน้าในวิธีการเดียวกันเช่นเดียวกันกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud pressure type shield machines) ดินจะถูกปล่อยออกมาในที่สุดโดยวิธีการของสายพานลำเลียง ฯลฯ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

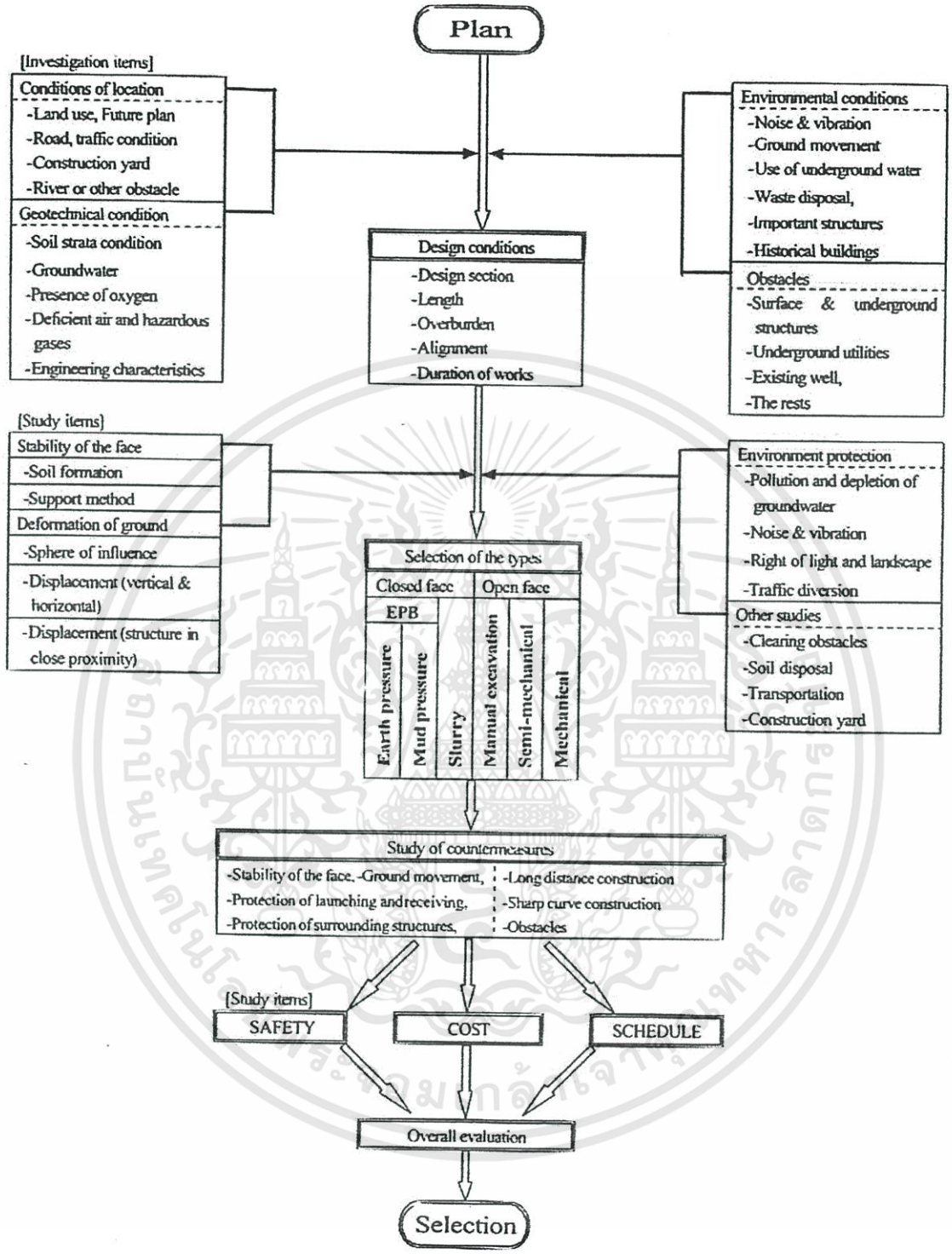
เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทส่วนหน้าเปิด (Open-Face Type Shield Machines) จะใช้กับส่วนหน้าที่เปิดเต็มที่หรือเปิดเกือบทั้งหมด เครื่องประเภทนี้สามารถประยุกต์ได้กับดินที่มีการคงอยู่ของตนเองที่ส่วนหน้า ดินประเภทอื่นสามารถจะได้รับการปรับปรุงโดยมากจากการช่วยเพื่อจะทำให้บรรลุผลการคงอยู่ของตนเองที่ส่วนหน้า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

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

3.4.5.2. การเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดอย่างเดียวในการเลือกวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Tunneling Method) ก็คือการทำให้มีเสถียรภาพของส่วนหน้าในการตัดเฉือน การศึกษาที่สมบูรณ์จะต้องกำหนดในเรื่องสิ่งแวดล้อมรอบๆ ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และสถานที่ในการสร้าง ความปลอดภัย ทางเศรษฐกิจ ฯลฯ นอกจากสภาพดินและน้ำใต้ดิน รูปที่ 3.14. แสดงถึงแผนภาพของการเลือกของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14. แสดงถึงแผนภาพของการเลือกของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strata / Shield types			Closed type						Open type					
			Earth pressure balanced type				Slurry type		Manual excavation type		Semi-mechanical type		Mechanical type	
			Earth pressure		Mud pressure									
	Soil types	N-value	Appli-cability	Precautions	Appli-cability	Precautions	Appli-cability	Precautions	Appli-cability	Precautions	Appli-cability	Precautions	Appli-cability	Precautions
Alluvial clayey soil	Humus	0	×	–	△	Ground movements	△	Ground movements	×		×	–	×	–
	Silt and clay	0-2	○	–	○	–	○	–	△	Ground movements	×	–	×	–
	Sandy silt and sandy clay	0-5	○	–	○	–	○	–	△	Ground movements	×	–	×	–
		5-10	○	–	○	–	○	–	△	Ground movements	△	Ground movements	△	Ground movements
Diluvial clayey soil	Loam and clay	10-20	△	Plugging due to excavated	○	–	○	–	○	–	○	–	△	Plugging due to excavated soil
	Sandy loam and sandy clay	15-25	△	Plugging due to excavated soil	○	–	○	–	○	–	○	–	○	–
		25 or over	△	Plugging due to excavated soil	○	–	○	–	△	Excavator Loader	○	–	○	–
	Hard pan (Mudstone)	50 or over	△	Plugging due to excavated soil	△	Bit wear	△	Bit wear	×	–	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure
Sandy soil	Sand mixed with silty clay	10-15	○	–	○	–	○	–	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure
	Loose sand	10-30	△	Fine fraction content	○	–	○	–	△	Groundwater pressure	×	–	△	Groundwater pressure
	Dense sand	30 or over	△	Fine fraction content	○	–	○	–	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure
Sand, gravel and boulders	Loose sand and gravel	10-40	△	Fine fraction content	○	–	○	–	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure	△	Groundwater pressure
	Cemented sand and gravel	40 or over	△	Groundwater pressure	○	–	○	–	△	Safe excavation*4	△	Groundwater pressure	△	Wear of bits and face plate *4
	Sand and gravel mixed with cobbles	–	△	Screw conveyor specifications *1	○	–	△	Bit specifications *3	△	Bit specifications *4	△	Groundwater pressure *5	△	Wear of bits and face plate *4
	Boulder and cobbles	–	△	Bit specifications *2	△	Bit specifications *2	△	Gravel crushing *3	△	Gravel crushing *4	△	Groundwater pressure *5	×	–

Notes: 1) Applicability symbols:

○: Suitable for the soil conditions in principle. △: 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 soils and entail ground movements.

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

5) Precautions given represent only the most important factors for the △ marked grounds and types. The asterisks (*) indicate presence of other similarly important precautions. For example, *1: Wear of bit and face plate, bit specifications, *2: Screw conveyor specifications, *3: Countermeasures against slurry leakage, *4: Groundwater pressure, and *5: Over-excavation

6) Mudstone with low strength is considered.

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

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

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดิน(Earth Pressure Type Shield Machines) มีลักษณะเฉพาะเป็นระบบสำหรับการนำเข้าดินในเวลาเดียวกัน และความสามารถขุดเจาะของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ดังนั้นมันจึงเป็นไปได้ที่จะไม่ทำแค่เพียงทำให้มีเสถียรภาพแก่ส่วนหน้าแต่จะทำให้ลดเหลือต่ำสุดเกี่ยวกับผลกระทบต่อพื้นดินที่อยู่โดยรอบด้วยเช่นกัน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือการทำงานในส่วนพื้นผิวจะไม่จำเป็นเพราะว่ามาตรการสนับสนุนจะไม่จำเป็นโดยพื้นฐาน

วิธีเกี่ยวกับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันโคลน(Mud Pressure Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับชนิดของดินที่ใหญ่ที่สุดรวมถึงพื้นดินอ่อนที่มีระดับความแข็งน้อย เช่น ทรายผสมกรวดที่พัดมาทับถมกับน้ำ ทราย โคลนเลนและดินเหนียว สิ่งสะสมเดี่ยวกับซากที่เหลือจากน้ำท่วมและดินที่อ่อนแบะแข็งสลับกัน เครื่องสายพานลำเลียงที่ปล่อยดินเท่านั้นจะไม่พอเพียง อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะตัดเฉือนผ่านพื้นดินด้วยความดันที่มาจากความกดดันของน้ำที่สูงการเพิ่มเครื่องป้อนที่เก็บกักความดันต่างๆ การรวมเอาเครื่องสูบเพื่อขจัดสิ่งสกปรกและการปรับปรุงในคุณสมบัติของดินที่ขุดจะได้ทำการศึกษา

ข. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry Type Shield Method) จะประยุกต์ความดันน้ำเลนที่สูงกว่าความดันน้ำใต้ดินที่ส่วนหน้าเพื่อจะทำให้มีเสถียรภาพ สำหรับความมีเสถียรภาพที่ส่วนหน้าจะได้รับการยกระดับให้สูงขึ้นโดยคุณสมบัติสารละลายปรับสมดุลดิน ดังนั้นหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดินจึงมีประสิทธิผลด้อยเช่นกันสำหรับสถานที่ที่มีความดันน้ำใต้ดินสูง พื้นที่ดังกล่าวจะเป็นใต้แม่น้ำและใต้ท้องทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน(Slurry Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับชนิดของดินหลายชนิดรวมถึงทรายผสมกรวดและโคลนที่น้ำพัดพามาทรายและโคลนเลน ดินเหนียวหรือชั้นที่สลับกันกับพื้นดินที่มีซีเมนต์ที่ไม่แน่น และพื้นดินที่อ่อนหรือกับปริมาณบรรจุน้ำที่สูงกับความยากที่เป็นผลตามมาในการก่อรูปส่วนหน้าที่ตัดที่คงอยู่ด้วยตนเอง ทรายผสมกรวดที่เป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย และโคลนเลน ดินเหนียว หรือชั้นที่สลับกันที่มีน้ำมากที่ส่งผลต่างเป็นไปได้ในการทรุดลงของพื้นดินที่มีการไหลเข้าของน้ำ วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบสารละลายปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield Method) อาจจะพบว่าเป็นการยากในการที่จะรักษาส่วนหน้าตัดให้มีความมั่นคงในพื้นดินที่มีการแทรกซึมของน้ำสูง หรือในพื้นดินที่มีก้อนหินใหญ่ในกรณีนี้การใช้มาตรการช่วยจะได้รับการพิจารณา

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหัวขุดเจาะอุโมงค์(Shield) ทั้งหมด และเป็นที่นิยมกันจนกระทั้งถึงครึ่งหลังของทศวรรษ 1970 ในญี่ปุ่น ในปัจจุบันนี้ไม่ค่อยได้ใช้ สิ่งที่ทำแทนก็คือ เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบมีส่วนหน้าปิด (Close-face type shield machines)ใช้เพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าความไม่ไว้วางใจอย่างมากเกี่ยวกับมาตรการสนับสนุน

ง. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกึ่งกลไก(Semi-Mechanical Type Shield Method) จะใช้ในพื้นดินที่ทนทานอยู่ด้วยตนเองได้ในหลักการ ดินที่สามารถประยุกต์ได้ โดยลักษณะเป็นตัวอย่างจะรวมถึงทรายผสมกรวดซึ่งเป็นซากที่เหลือจากน้ำท่วม ทราย โคลนเลนที่เป็นซีเมนต์และดินเหนียวมันจะไม่เหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมของดินทรายโคลนซึ่งน้ำพัดพามาที่อ่อน วิธีการการใช้แรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำ การเป็นตะกอนของสารเคมี และมาตรการกรสนับสนุนอื่นๆ อาจจะใช้ในการรวมกันเข้าในลักษณะเดียวกัน ดังเช่น ที่ใช้กับวิธีเดียวกับวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบขุดด้วยมือ(Manual Excavation Type Shield Method)

จ. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก(Mechanical Type Shield Method) จะติดตั้งอุปกรณ์ด้วยหัวตัดเฉือนแบบหมุนรอบสำหรับการขุดที่ต่อเนื่อง ส่วนหน้าหัวเครื่องตัดมี 2 ประเภท ประเภทแรกคือประเภทแผ่นหน้าและประเภทที่สองคือชนิดที่คล้ายซี่ล้อรถ ประเภทแผ่นหน้าเหมาะสำหรับส่วนตัดขนาดใหญ่ ส่วนหน้าที่มั่นคงและการปรับที่ปรับได้จะช่วยให้เกิดความสามารถแก่เครื่องที่จะดำเนินผ่านชั้นที่มีกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมาก ประเภทซี่ล้อรถจะใช้บ่อยเพื่อจะขจัดกรวดและหินก้อนใหญ่จำนวนมากออกจากส่วนตัดเล็กๆที่มีส่วนหน้าค่อนข้างจะมั่นคง เช่นเดียวกันกับประเภทการขุดด้วยมือและแบบกึ่งกลไก เครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก (Mechanical Type Shield Machines) จะเหมาะสมสำหรับสิ่งสะสมเกี่ยวกับซากเหลือจากน้ำท่วมที่มีส่วนหน้าทนทานอยู่ด้วยตนเอง การใช้ที่ผสมผสานกันของมาตรการช่วยหนึ่งอย่างหรือมากกว่า เช่นวิธีเกี่ยวกับแรงดันลม การลดหรือขจัดน้ำการเป็นตะกอนทางเคมี จะเป็นเชิงบังคับสำหรับเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบกลไก(Mechanical Type Shield Machines) ในสิ่งสะสมดินโคลนทรายที่น้ำพัดพามาที่โดยปกติจะไม่ก่อรูปส่วนหน้าที่ทนทานอยู่ได้ด้วยตนเอง

ฉ. วิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบ Blind Shield (Blind Type Shield Method) ส่วนกั้นจะถูกจัดให้อย่างเบาบางอยู่หลังส่วนหน้าเพื่อจะทำให้เครื่องเหมาะสมสำหรับการทำเน้นไปข้างหน้าผ่านพื้นดินที่อ่อนมาก ส่วนกั้นจะถูกเปิดบางส่วนเพื่อจะขจัดดิน หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบหัวบอดจะเหมาะที่สุดสำหรับชั้นโคลนเลนที่เป็นดินทรายโคลนซึ่งน้ำพัดพามาผสมกับทราย มันจะไม่เหมาะสมสำหรับดินแข็งเพราะว่ามันได้รับการออกแบบเพื่อจะบีบรัดดินโดยผ่านทางเปิด ดินที่มีปริมาณบรรจุทรายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มักจะอุดเครื่องที่จะทำให้มันไม่สามารถคืบหน้าต่อไป ถ้าหากดัชนีความคล่องตัวมีสูงเกินไป ในทางตรงข้ามการไหลเข้าของดินอาจจะกลายเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่ส่งผลในการขจัดดินมากเกินไป แรงพุ่งสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบหัวบอดควรจะทำการคำนวณในขณะที่พิจารณาสภาพดิน อัตราการเปิดส่วนหน้า ฯลฯ สภาพดินที่สามารถประยุกต์ได้จะถูกจำกัดมากและการทำให้เสียรูปเกี่ยวกับพื้นดินค่อนข้างจะมีมาก สำหรับเหตุผลเหล่านี้ หัวขุดเจาะอุโมงค์แบบหัวบอดไม่ได้ถูกนำมาใช้ นานแล้ว

3.4.6. ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ (Lining) จะถูกพิจารณาให้ปลอดภัย และโครงสร้างต้องต้านทานแรงจากพื้นดิน และแรงดันที่กระทำโดยน้ำ และน้ำหนักต่างๆจากดินโดยรอบ เพื่อที่จะพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนภายในอุโมงค์ และพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานของอุโมงค์ และเงื่อนไขในการก่อสร้าง

หลักสำคัญของผนังอุโมงค์ (Lining) มี 3 ข้อ

1. เพื่อจะทนทานต่อภาระการโหลด บนอุโมงค์ต่างเพียงพอและต่างปลอดภัย
2. เพื่อจะสงวนหน้าที่สำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์
3. เพื่อจะมีโครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขการสร้างอุโมงค์

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของแรงขับอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ (Shield-Driver Tunnel) จะมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับข้อ 3 ที่ได้กล่าวข้างต้น ผนังอุโมงค์ (Lining) จะได้รับการจัดประเภทเป็นผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จากประเด็นความคิดเห็นของการก่อสร้าง ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) โดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่จัดอย่างเหมาะสม ขณะที่ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จะเป็นชนิดคอนกรีตที่หล่อในที่ข้างในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining)

สถานการณ์ที่แสดงถึงคุณลักษณะของผนังอุโมงค์ (Lining) มีดังนี้

1. ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ทำหน้าที่สำหรับค้ำจุนภาระบรรทุก ที่มีต่ออุโมงค์โดยจะแบ่งน้ำหนักบรรทุกระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และ ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining)
2. ผนังอุโมงค์ (Lining) เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของอุโมงค์ต้องสามารถซ่อมบำรุงและสามารถที่จะจัดการได้เมื่อใดที่เปิดให้บริการ ในด้านเกี่ยวกับสภาพที่น้ำไม่เข้า การกั้นน้ำ และความทนทานของผนังอุโมงค์ (Lining)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน้าที่ของผนังอุโมงค์ (Lining) ในระหว่างการสร้างอุโมงค์หรือทางใต้ดินก็คือเพื่อจะรับภาระแรงผลักดันเกี่ยวกับการทำให้คืบหน้าสำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และเพื่อจะทนต่อความดันเกี่ยวกับการเทลงยึดที่เติมด้านส่วนหลัง ผนังอุโมงค์ (Lining) มีหน้าที่เป็นโครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining)ของอุโมงค์อย่างทันทีทันใด แล้วหลังจากที่หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shieldสามารถขุดเจาะได้เพิ่มขึ้น

วิธีการของผนังอุโมงค์ (Lining) ที่ใช้คอนกรีตที่ถูกดันออก ได้นำมาใช้เป็นการใช้แทนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ คอนกรีตสดหรือสิ่งที่เต็มได้เหมือนกันภายใต้ความดันในส่วนปลายของหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ที่สวมกับอุปกรณ์ด้วยรูปแบบภายในและกลไกของการทำให้เกิดความดันของคอนกรีต โครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่ก่อเป็นรูปแบบถูกทำให้เหมาะที่ใช้กับพื้นผิวของพื้นดินที่ถูกขุดเมื่อหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shieldสามารถขุดเจาะได้เพิ่มขึ้น

ช่วงเวลาระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) สามารถจะยาวหรือการเปลี่ยนแปลงการรับภาระโหลด ระหว่างระยะเวลานี้จะยากที่จะทำให้แน่ใจ และมันเป็นการยากด้วยเช่นกันที่จะประเมินการรับภาระโหลดระหว่างผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ด้วยเหตุผลเหล่านี้ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) จะได้รับการออกแบบตามปกติที่จะยึดถือการรับภาระโหลดทั้งหมดบนอุโมงค์หรือในฐานะเป็นโครงสร้างผนังอุโมงค์ (Lining) ที่สำคัญ

หน้าที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จึงเป็นการคุ้มครองผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) โดยการป้องกันการสึกกร่อนและการเสริมกำลังของผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) เป็นงานท้ายสุดสำหรับหน้าที่ของการปรับการวางแนวเส้นทาง การเบี่ยงเบน เส้นทางการกันน้ำและหน้าที่อื่นๆ ที่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์

ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) อาจจะได้รับการละเว้น โดยมีข้อแม้ว่าการกันน้ำของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และการป้องกันการสึกกร่อนจะได้รับการพิจารณาโดยสมบูรณ์ เมื่อผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ได้รับการออกแบบโดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างหลัก ความแข็งเกร็งของอุโมงค์จะเพิ่มขึ้นแต่พฤติกรรมของการประกอบโครงสร้างจะไม่สมบูรณ์ การศึกษาในรายละเอียดและในแบบเฉพาะจะเป็นที่ต้องการเมื่อโครงสร้างลักษณะเฉพาะนี้จะใช้ในโครงการการสร้างอุโมงค์ มาตรการต่อต้านที่ต่อต้านการทรุดตัวไม่เท่ากันและแผ่นดินไหวก็ควรจะจัดให้มีสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นดินที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และการเชื่อมต่อกับปล่องแนวดิ่ง(Shaft)เมื่อทำการออกแบบผนังอุโมงค์ (Lining) สำหรับอุโมงค์ที่มีหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่จะสร้างขึ้นในพื้นดินที่อ่อน

3.4.7. แผนงานเฉพาะสำหรับการอำนวยความสะดวกในอุโมงค์

อุโมงค์จะได้รับการการวางแผนล่วงหน้าเกี่ยวกับการระบายน้ำ การระบายอากาศ แผนกงานเกี่ยวกับการป้องกันภัยพิบัติและความสะดวกอื่นๆ รูหรือปากทางเข้าท่อขนาดใหญ่ ฯลฯ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์ และตามที่กำหนดสำหรับการบำรุงรักษาและการจัดการอุโมงค์

1. ทางรถไฟ อุโมงค์สำหรับทางรถไฟจะต้องติดตั้งด้วยทางผ่าน การระบายน้ำ การระบายอากาศ ไฟฟ้า แผนกป้องกันอุบัติเหตุและอื่นๆ ตามรูปร่างของส่วนตัดอุโมงค์ความยาวอุโมงค์ แผนกงานส่วนนี้ระบบการเดินรถไฟ ฯลฯ แต่ละแผนกงานเฉพาะควารจะได้รับการออกแบบเพื่อตอบสนองความพอใจแก่วัตถุประสงค์
2. ถนน อุโมงค์สำหรับถนนจะต้องติดตั้งด้วยเส้นทางการตรวจ แผนกงานระบายน้ำเส้นทางการบำรุงรักษา การระบายอากาศ อุปกรณ์ส่องสว่าง แผนกงานป้องกันอุบัติเหตุและอื่น ๆตามความยาวของอุโมงค์ และการนับการจราจร แต่ละแผนกควรจะได้รับการออกแบบเพื่อจะสนองความพอใจแก่วัตถุประสงค์
3. การกำจัดน้ำเสีย รูหรือปากทางเข้าท่อขนาดใหญ่ ซึ่งใช้เป็นรูเปิดระหว่างการทำความสะอาด การปฏิบัติการการตรวจของอุโมงค์ขนาดใหญ่การกำจัดน้ำเสียในการบริการ จะจัดให้มีที่ช่วงระหว่างที่เพียงพอ ช่วงระหว่างที่เป็นมาตรฐานคือ 100 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางกายในของอุโมงค์ หรือ 300 เมตร ซึ่งอะไรก็ตามที่น้อยกว่า
4. น้ำประปา อุโมงค์สำหรับน้ำประปาจะต้องจัดให้มีปล่องแนวดิ่ง (Shaft) ที่จุดนูน และจุดเว้าตามการจัดให้เป็นเส้นเดียวกันในแนวยาว เพื่อตอบสนองความพอใจการบำรุงรักษา และการควบคุมความจำเป็น แต่ละช่องจะถูกจัดให้มีลิ้นปิดเปิดอากาศ (ที่จุดนูน) แผนกงานเฉพาะการระบาย (ที่จุดเว้า) ลิ้นปิดเปิดควบคุมน้ำ ช่องหรือปากทางเข้าท่อขนาดใหญ่ ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) แต่ละช่องจะต้องมีช่องหรือทางเข้าท่อขนาดใหญ่เพื่ออำนวยความสะดวก การบำรุงรักษา และการจัดการอุโมงค์ การระบายน้ำ การระบายอากาศ และแผนกงานเฉพาะอื่น ๆ ก็ควรจะติดตั้งด้วยเช่นกันในอุโมงค์ และปล่องแนวดิ่ง (Shaft)
5. เคเบิลกำลัง อุโมงค์ในด้านเกี่ยวกับเคเบิลกำลังอาจจะต้องการช่องหรือปากทางเข้าเพื่อจะบริการอุโมงค์และเพื่อวัตถุประสงค์ของการบำรุงรักษาและการจัดการ ช่องหรือปากทางเข้าควรจะจัดให้มีที่ช่วงระหว่าง 500 ถึง 1,000 เมตร ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าสูง ในด้านรูระบายอากาศก็จะออกแบบด้วยเช่นกันเป็นช่องเปิดทางเข้าหรือทางออก และมาตรการต่อต้านที่ต้านการสูงขึ้นของอุณหภูมิใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ในการบริการและสุขอนามัย และการระบายอากาศสำหรับบุคลากรด้านการตรวจควรจะได้รับการพิจารณาในการออกแบบรูการระบายอากาศควรจะจัดให้มีรูการระบายอากาศที่ประมาณช่วงระหว่าง 500 เมตร สิ่งอำนวยความสะดวกที่เป็นการช่วยที่จำเป็นในอุโมงค์ประกอบด้วยรางสายเคเบิล อุปกรณ์ส่องสว่าง การระบายอากาศ การระบายน้ำ การป้องกันภัยพิบัติ และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ

6. โทรคมนาคม อุโมงค์เกี่ยวกับโทรคมนาคมจำนวนมากจะถูกจัดให้มีปล่องแนวดิ่ง (Shaft) ที่ช่วงระหว่างของ 700 ถึง 1,000 เมตร ที่จะอำนวยความสะดวกแก่ปฏิบัติการในอุโมงค์และสำหรับการจัดสาขา การตรวจ และการติดตั้งอุปกรณ์ส่องสว่างและวัตถุประสงค์อื่น สิ่งอำนวยความสะดวกที่ช่วยเสริมที่จะติดตั้งในอุโมงค์ ประกอบด้วยสิ่งจับยึดเคเบิล อุปกรณ์ส่องสว่าง การระบายอากาศ การจ่ายน้ำหรือการระบายน้ำ และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ ผนังกันไฟและกันน้ำจะติดตั้งตามที่ต้องการ ระบบการตรวจสอบจะติดตั้งในอุโมงค์เพื่อป้องกันอุบัติเหตุจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกควบคุมทางเข้าหรือทางออกบุคลากร และสำหรับวัตถุประสงค์การกระจายเสียงและการสื่อสาร
7. การใช้อเนกประสงค์ อุโมงค์เอนกประสงค์จะต้องออกแบบรองรับสิ่งอำนวยความสะดวกที่เป็นสิ่งช่วย ที่ต้องการโดยการใช้แต่ละอย่าง

3.4.8. มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน

1. สภาพของพื้นดิน ซึ่งหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะผ่านนำไปข้างหน้า และจะสำรวจการก่อสร้างและสภาพอื่นๆ และความจำเป็นของมาตรการช่วยที่จะต้องศึกษาเป็นการล่วงหน้า เพื่อจะทำให้แน่ใจว่ามีความมั่นคงแน่นหนาเกี่ยวกับส่วนหน้าและผนังอุโมงค์ (Lining)ในตอนเริ่มต้น การมาถึงและส่วนตัดที่โค้งเฉียบขาด เมื่อมีการใช้หัวขุดเจาะประเภทปิดส่วนหน้า (Close-Face Type Shield) และความสมดุลของดินเมื่อใช้ หัวขุดเจาะประเภทเปิดส่วนหน้า (Open-Face Type Shield)
2. เมื่อการสร้างอุโมงค์เป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดการทรุดตัว เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเสียรูปของโครงสร้างที่มีอยู่เกี่ยวกับการวางแนวเส้นทางของอุโมงค์ มาตรการสนับสนุนจึงจำเป็นที่จะทำการศึกษา

3.4.8.1. สถานการณ์ (1)

สำหรับด้านวิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบแรงดันดินสมดุล(Earth Pressure Balance Type Shield) และวิธีหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบน้ำเลนปรับสมดุลดิน (Slurry Type Shield) ซึ่งทั้งสองวิธีมีความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบันนั้น ส่วนหน้าจะถูกทำให้มั่นคงจากการใช้ความดันโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือความดันน้ำเลน มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนจะไม่เป็นที่ต้องการมากของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield เหล่านี้ในส่วนตัดธรรมดา อย่างไรก็ตามมาตรการจะต้องได้รับการพิจารณาสำหรับการสร้างในหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่เริ่มต้นและมาถึงของส่วนหน้าตัด และในส่วนตัดเหล่านี้มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนจะเป็นที่ต้องการในส่วนตัดเส้นโค้งที่เฉียบขาดด้วยเช่นกันเพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และทำให้มั่นคงในผนังอุโมงค์ (Lining) เมื่อเร็วๆนี้ได้มีการพัฒนาระบบหนึ่งเพื่อจะลดการใช้มาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุนโดยการปล่อยให้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ตัดผนังและสิ่งที่คล้ายกันที่เก็บกักดินได้โดยตรงโดยปราศจากการทำรูล่วงหน้า

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

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

ในเรื่องของมาตรการที่เป็นสิ่งสนับสนุน กระบวนการทางเคมี การฉีดพ่นด้วยความดันสูงและการผสม และการทำให้เย็นจนแข็งของดินเป็นความตั้งใจที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงแก่ดินและที่จะหยุดการไหลเข้าของน้ำ วิธีการที่เกี่ยวกับการใช้ลมจะใช้ด้วยเหมือนกันเพื่อหยุดการไหลเข้าของน้ำ ฯลฯ การทำให้ลดลงของน้ำก็เป็นการออกแบบที่จะลดการไหลเข้าของน้ำและปรับปรุงพื้นดินโดยการใช้จุดสำคัญของบ่อ บ่อลึก อุโมงค์นำร่องหรือที่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8.2. สถานการณ์ (2)

มาตรการในการป้องกันสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่ประกอบด้วย ผนังที่ตัดออก การหนุนจากส่วนล่าง และวิธีใช้ท่อที่หลังคา ส่วนการฉีดพ่นความดันสูง และการผสม กระบวนการทางเคมี และมาตรการสนับสนุนอื่นๆจะส่งผลกระทบด้วยเช่นกัน

3.4.9.ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้าง

ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และสถานที่ก่อสร้างจะได้รับการวางแผนที่ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสม ขนาดของสิ่งเหล่านี้จะต้องเพียงพอสำหรับการให้มีหน้าที่ที่จำเป็นที่จะทำให้เกิดความสามารถในด้านความปลอดภัย และการดำเนินงานการสร้างที่มีประสิทธิภาพ โดยการพิจารณาเงื่อนไขของเส้นทางของอุโมงค์และงานก่อสร้าง

ปล่องแนวดิ่ง (Shaft) ประกอบด้วยการแยกออกไปของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield การอยู่ระหว่างกลาง การหมุน การมาถึง และช่องอื่น ๆ วิธีการการเชื่อมต่อหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield อยู่ใต้ดินซึ่งได้พัฒนาเมื่อเร็ว ๆ นี้ และวิธีการขุดต่อเนื่องเป็นมุมฉากจะไม่ต้องการปล่องแนวดิ่ง (Shaft) ที่จะผลักดันอุโมงค์

ปัจจัยที่จะศึกษาในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งสำหรับปล่องแนวดิ่ง(Shaft)ในระหว่างสิ่งอื่นๆ จะประกอบด้วย ความใหญ่ของการสร้างอุโมงค์ (ความยาวของอุโมงค์และขนาดของส่วนตัด) การใช้ที่ดินในปัจจุบัน การทำให้ง่ายของการใช้ที่ดิน การขนส่งสิ่งสกปรก การระดมและการลดการระดมวัสดุก่อสร้าง และการทำให้ง่ายของการสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) ขนาดของปล่องแนวดิ่ง (Shaft)จะกำหนดโดยการพิจารณาถึงส่วนตัดของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ประเภทและโครงสร้างของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield วัตถุประสงค์ของการใช้อุโมงค์ ฯลฯ

สถานที่การสร้าง จากลักษณะก็จะต้องตั้งใกล้ช่องที่แยกออกไป สถานที่สร้างจะต้องจัดให้มีเนื้อที่ว่างเพียงพอสำหรับการสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) และสำหรับการขุดอุโมงค์ที่มีหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield การจัดบ้านพักที่ยืนยันว่าเหมาะสม และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ อาจจะติดตั้งได้ที่สถานที่สร้างเพื่อจะปกป้องสิ่งแวดล้อมเมื่อสถานที่ตั้งตั้งอยู่ในเขตเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.10. มาตรการการรักษาสิ่งแวดล้อม

เมื่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบด้าน เป็นไปได้ที่จะได้รับผลกระทบจากการสร้างอุโมงค์ จะต้องเอาใจใส่อย่างเต็มที่ต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม

วิธีการเกี่ยวกับหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield โดยทั่วไปจะได้รับการพิจารณาที่จะให้มีผลกระทบเล็กน้อยต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ การขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield จะดำเนินไปในเวลากลางวันและกลางคืน ในที่ใกล้เคียงพอที่ดินที่เป็นของเอกชนในเขตเมืองในหลานกรณี

สิ่งแวดล้อมอาจจะได้รับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในและรอบๆสถานที่การก่อสร้าง จากการสั่นสะเทือนและเสียงอันเนื่องมาจากการก่อสร้างของปล่องแนวดิ่ง (Shaft) การทำงานของการปั้นจั่น เครื่องสูบน้ำและเครื่องอัดอากาศสำหรับการผลักดันหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield การกำจัดสิ่งสกปรกและการทำงานของอุปกรณ์บำบัดน้ำเลน ที่ส่งผลอย่างเป็นไปได้ในคำร้องเรียนของผู้ที่อยู่อาศัยในท้องถิ่นสถานที่สร้างบางแห่งจะถูกปิดคลุมโดยรั่วป้องกันที่ทำด้วยแผ่นเหล็กควรจะพิจารณาถึงความกลมกลืนกับเพื่อนบ้านในท้องถิ่น

ผลกระทบในทางกลับกันอื่นๆ ทีมีต่อสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยข้อเท็จจริงที่เป็นการกีดขวาง เรื่องของแสงสว่างโดยปล่องแนวดิ่ง (Shaft) การทรุดลงของที่ดินและการยกสูงขึ้น การขจัดน้ำใต้ดินออกไป คุณภาพของน้ำเสื่อมลงและผลกระทบที่มีต่อพื้นผิวและสิ่งปลูกสร้างใต้ดินอันเนื่องมาจากการผ่านของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield และอิทธิพลจากกลุ่มคนอันเนื่องมาจากอากาศที่ขาดออกซิเจน การทะลักออกของน้ำหรือก๊าซ ก๊าซเป็นอันตรายที่เป็นผลมากจากการใช้วิธีเกี่ยวกับก๊าซหรือลม

ความเป็นไปได้เหล่านี้จะต้องทำเป็นการสำรวจได้อย่างเต็มที่ และมีการศึกษาล่วงหน้าและจะต้องดำเนิน มาตรการต่อต้านที่เหมาะสม เพื่อจะปกป้องสิ่งแวดล้อม

ควรจะเอาใจใส่ด้วยเหมือนกันในการที่จะเปลี่ยนแปลงในน้ำใต้ดิน และข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการกีดขวางของแสงสว่าง การแทรกแซงคลื่นวิทยุ เสียง การสั่นสะเทือน มลภาวะทางอากาศ และสิ่งทำนองเดียวกัน ด้วยเช่นกันที่เป็นสาเหตุจากสิ่งปลูกสร้างถาวรที่ผูกพัน (สำหรับการระบายอากาศ ฯลฯ) หลังจากการเสร็จสิ้นโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.11. หมายกำหนดการของงาน

หมายกำหนดการของงานการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield Tunnel จะต้องทำการวางแผนที่มุ่งไปที่การดำเนินกากรที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ ในการพิจารณาถึง ความใหญ่เล็ก การต่อเนื่อง ระยะเวลา และ เงื่อนไขของงาน

รายการงานที่มีผลโดยตางต่อหมายกำหนดการของการขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield คืองานสร้างปล่องแนวดิ่ง (Shaft) งานที่เกี่ยวกับการป้องกันสำหรับปล่องแนวดิ่ง(Shaft)ที่แยกออกไปและเข้ามา การสร้างอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield เอง การขุด การเอาสิ่งสกปรกออก การตั้งตรงของส่วนแบ่งออก การเทปูนลงยึดเพื่อเติมส่วนหลังผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) การติดตั้งและการเคลื่อนย้าย อุปกรณ์ก่อสร้าง ฯลฯ ปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อหมายกำหนดการประกอบด้วย การผลิตหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ และหน่วยของส่วนประกอบ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม สิ่งเหล่านี้ มีอิทธิพลด้วยเช่นกัน ต่องานทั้งหมดตามที่กรณีอาจจะเป็นจนทำให้หมายกำหนดการโดยรวม จำเป็นจะต้องได้รับการตัดสินใจอย่างปะติดปะต่อกันโดยการพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมด

3.4.12. การตรวจสอบ การวัด และบันทึกงาน

เงื่อนไขของงานในระหว่างการผลักดันหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะต้องตรวจสอบหรือวัด เพื่อจะทำให้มั่นใจในความปลอดภัยของการสร้าง จึงขอแนะนำที่จะให้บันทึกผลเหล่านี้อย่างเป็นการสรุป และสงวนสิ่งที่บันทึกสำหรับงานภายหลัง

จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการตรวจสอบ การวัด และการนำเอาบันทึกงาน ฯลฯ มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อจะทำให้มั่นใจในการดำเนินการที่ปลอดภัยของงานขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะShield
2. เพื่อจะอ้างอิงถึงบันทึกงาน ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุของเหตุการณ์ดังกล่าว และในฐานะเป็นข้อ มูลทางเทคนิคสำหรับการแยกออก
3. เพื่อจะรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการบำรุงรักษา การจัดการ การซ่อมแซมและอื่นๆ ของแผนกงานเฉพาะที่ทำเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งเหล่านี้มีความหมายจนทำให้มีความจำเป็นที่จะรักษาบันทึกให้มีความแม่นยำและมีรายละเอียดเฉพาะเท่าที่เป็นไปได้

ข้อมูลเหล่านี้ควรจะจัดเข้าแฟ้ม และรักษาไว้สำหรับการอ้างอิงในอนาคต การตรวจสอบ การวัด และการบันทึกงานในงานขุดอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

ก. การตรวจสอบ

1. สำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทปิดส่วนหน้า (Close-Face Type Shield) ความดันดินในห้องเครื่องตัด ความดันสารละลายที่ส่วนหน้า คุณลักษณะเฉพาะของสารละลาย ส่วนในด้านหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทเปิดส่วนหน้า (Open-Face Type Shield) สภาพของส่วนหน้าและคุณภาพของน้ำที่ไหลเข้า
2. ความดันไฮดรอลิคของ Jacks แรงทอร์คของเครื่องตัด การเคลื่อนที่วกเวียน และความสมดุลของเครื่องตัด การควบคุมปริมาณและความดันของสิ่งที่เทลงยึดเพื่อเติมส่วนหลัง การควบคุมปริมาตรของการปล่อยดินที่ขุด
3. การสรุปของอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield และการเบี่ยงเบนของเส้นศูนย์กลางจากการจัดให้อยู่ในเส้นเดียวกันที่ได้ออกแบบ
4. การเสียรูปของสิ่งปลูกสร้าง และสิ่งอำนวยความสะดวกที่อยู่ใต้ดิน การแทนที่ของพื้นดินและการแปรผันของระดับน้ำใต้ดิน
5. ความเร็วลมที่จุดงาน และสิ่งอำนวยความสะดวกที่อยู่ใต้ดินการแทนที่ของพื้นดินและการแปรผันของระดับน้ำใต้ดิน
6. สำหรับหัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภทเปิดส่วนหน้าที่มีอากาศอัด(Open-Face Type Shield with Compression-Air) คือ ความดันอากาศอัดในอุโมงค์ในระหว่างชั่วโมงทำงาน การบริโภคอากาศ และการรั่ว

ข. การสำรวจและการวัด

1. สำรวจเกี่ยวดับอาคารและบ่อที่มีอยู่
2. ความดันและการแทนที่ ที่เกิดขึ้นภายในหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield หรือผนังอุโมงค์ (Lining) และความดันดิน ความดันน้ำที่กระทำต่อหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield หรือผนังอุโมงค์ (Lining)

ค. บันทึกงาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

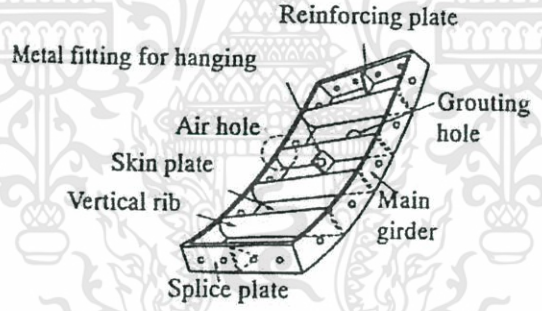
3.5. ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

3.5.1. ขอบเขตของการประยุกต์ใช้

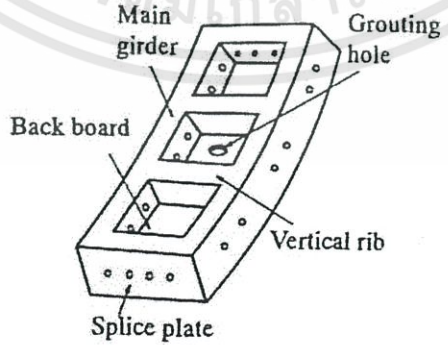
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการออกแบบและผลิตผนังอุโมงค์ (Lining) โดยที่อุโมงค์มีลักษณะเป็นวงกลมและมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้กับอุโมงค์รูปร่างอื่นโดยได้รับความคิดเห็นจากวิศวกรผู้ควบคุม

3.5.2. คำจำกัดความ

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box Type Segment) คือ ชื่อโดยทั่วไปของชิ้นส่วนที่ประกอบด้วย Main Griders และ Splice Plates หรือ Vertical Ribs คำว่าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง (Box Type Segment) ใช้เรียกชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็ก ส่วนชิ้นส่วนที่ทำด้วยคอนกรีต เรียกว่า ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต(Ribbed Type Concrete Segment)



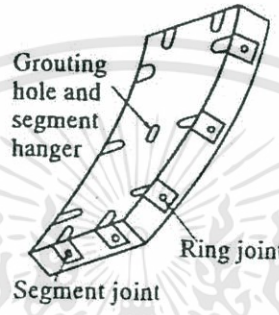
รูปที่ 3.15. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานกล่อง



รูปที่ 3.16. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทประเภทคานคอนกรีต

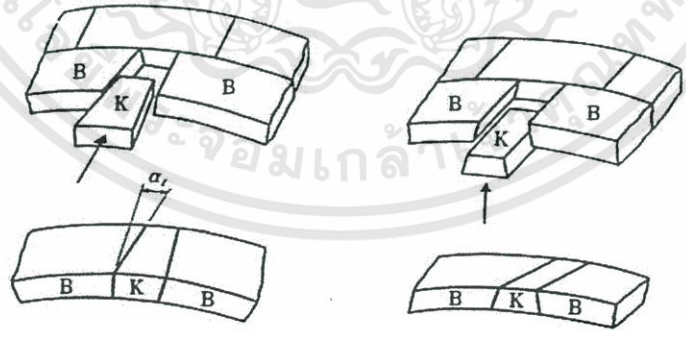
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat Type Segment) คือ ชิ้นส่วนที่อยู่ในรูปแผ่นราบ (Flat Plate) จะเป็นชิ้นส่วนที่เป็นของแข็ง โดยปกติจะทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในส่วนที่จะใช้สำหรับชิ้นส่วนประกอบที่คอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้าที่เป็นชิ้นแทนเหล็กเสริมที่เป็นเส้น



รูปที่ 3.17. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ

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



(a). (b).

รูปที่ 3.18. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค

(a).แบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี (b).แบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

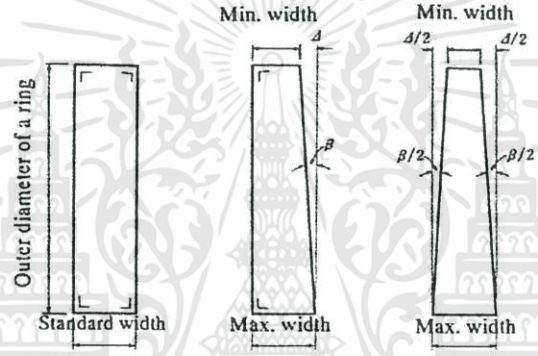
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนชิ้นส่วนประกอบวงแหวน(Number of Division) คือ จำนวนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่ประกอบเป็นวงแหวนอุโมงค์ 1 วงแหวน

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper Ring) คือ วงแหวนที่มีส่วนเรียวให้เล็กลงเพื่อใช้ในการวางโค้งของอุโมงค์หรือเพื่อปรับการเรียงตัวของอุโมงค์

รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในวงแหวนอุโมงค์

รอยต่อวงแหวน (Ring Joint) คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างวงแหวนของอุโมงค์แต่ละวงแหวนเข้าด้วยกัน



(a). (b). (c).

รูปที่ 3.19. แสดงลักษณะด้านข้างของวงแหวนผนังอุโมงค์

(a).วงแหวนผนังอุโมงค์ทางตรง (b).วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียวทางซ้ายหรือทางขวา

(c).วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเอนกประสงค์

3.5.3. การเลือกโครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์

การเลือกความแข็งแรง โครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์ควรเลือกให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้อุโมงค์ สภาพชั้นดินและวิธีการก่อสร้าง

ในหลายกรณี ผนังอุโมงค์ประกอบด้วยผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) และต้องการการบำรุงรักษาภายใน โดยการค้ำยันดินโดยตรงต้องการความเหมาะสมต่อจุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และมีการปฏิบัติงานที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 อื่นๆ ชิ้นส่วนเหล็กหล่อใช้ในงานอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงสภาพชั้นดิน ชิ้นส่วนคอนกรีตของ Box Type หรือ Flat Type จะถูกนำมาเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ ขณะที่ชิ้นส่วนเหล็กหล่อ หรือ เหล็กกล้า จะใช้ในที่ที่พิจารณาแรงกระทำเป็นพิเศษ หรือ ชิ้นส่วนที่ต้องการทำช่องเปิด

เมื่อคำนวณแรงกระทำต่อผนังชิ้นอุโมงค์ การหาค่าที่แน่นอนของคุณสมบัติของโครงสร้างอุโมงค์ เป็นสิ่งสำคัญเพราะฉะนั้นการเลือกโครงการสร้างผนังอุโมงค์ ค่อนข้างที่จะสำคัญที่จะตัดสินใจ ถึงความสำคัญที่จะออกแบบ ของผนังที่ต้องการ

ผนังอุโมงค์ชั้นใน(Secondary Lining) เป็นโครงสร้างภายในผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) เมื่อเร็วๆนี้มีการแทนที่ด้วยการประยุกต์ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) โดยใช้การใส่ท่อ (ท่อเหล็ก, ท่อเหล็กหล่อ ฯลฯ) บริเวณช่องว่าระหว่างท่อกับผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) คือการถมกลับคืน

เมื่อผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) ถือว่าเป็นโครงสร้างถาวรผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จะใช้เพื่อ

1. ป้องกันการกัดกร่อน
2. เพิ่มความแข็งแรง
3. ปรับการเรียงตัวของอุโมงค์
4. กันน้ำซึม
5. ตกแต่งภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4. พื้นฐานของการออกแบบ

การออกแบบผนังอุโมงค์ควรอยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยที่ยอมให้กับจุดประสงค์การใช้อุโมงค์ และควรขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบจากความเค้นที่ยอมให้บนเงื่อนไขที่เพียงพอและเหมาะสมกับการก่อสร้าง งานจะต้องทำโดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพดี

พื้นฐานและหลักการในการออกแบบผนังอุโมงค์ แรงที่ใช้ออกแบบและทางเลือกโครงสร้างควรอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และทฤษฎี และการดำเนินงานว่าสามารถบอกผลสะท้อนกลับได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมแรงของอุโมงค์นั้นซับซ้อน อย่างน้อยที่สุดความปลอดภัยของโครงสร้างเป็นพื้นฐานของการออกแบบ เมื่อเกิดปัญหาของความไม่แน่นอนเพียงเล็กน้อย

การออกแบบผนังอุโมงค์นั้น ความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญไม่เฉพาะหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้วเท่านั้นแต่ขณะก่อสร้างก็ต้องปลอดภัยด้วย

3.5.5. ขั้นตอนการออกแบบ

มีความจำเป็นที่จะต้องอธิบายให้ชัดเจนถึงสภาพ ความคิด ข้อสันนิษฐาน และขั้นตอนการคำนวณ

เนื้อหาของการคำนวณออกแบบควรจะชัดเจนทุกขั้นตอนตามข้างล่าง

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัตถุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. เงื่อนไขการก่อสร้าง
6. วิศวกรผู้ออกแบบ
7. วันที่ประกาศใช้

3.5.6. แบบก่อสร้าง

แบบก่อสร้างควรจะบอกตำแหน่งติดตั้งของโครงสร้าง รูปร่าง ขนาดของโครงสร้างที่สัมพันธ์กับหน้าตัดอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบก่อสร้างต้องมีข้อมูลตามที่กำหนด

1. แรงที่ใช้ออกแบบ
2. ความเค้นที่ยอมให้และอัตราส่วนปลอดภัย
3. ประเภทและคุณสมบัติของวัตถุที่ใช้
4. สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
5. สภาพการก่อสร้าง
6. ชื่อและตำแหน่งของวิศวกรผู้ออกแบบ
7. มาตราส่วน
8. หน่วยที่ใช้

3.6. น้ำหนักบรรทุก

3.6.1. น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ

น้ำหนักบรรทุกที่ควรจะพิจารณาในการแบบผนังอุโมงค์

1. แรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบ
2. แรงดันน้ำ
3. น้ำหนักบรรทุกคงที่
4. น้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน
5. แรงต้านทานของดิน
6. น้ำหนักภายใน
7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง
8. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว
9. ผลกระทบจากอุโมงค์ใกล้เคียง
10. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง
11. ผลกระทบจากการทรุดตัวของชั้นดิน
12. อื่นๆ

ผนังอุโมงค์ (Lining) ต้องได้รับการออกแบบและการรับรองในเรื่องความปลอดภัยของอุโมงค์และการปฏิบัติงานไม่เฉพาะหลังที่ดำเนินการเปิดใช้แล้วแต่ต้องมีความปลอดภัยในระหว่างทำการก่อสร้างด้วย แรงที่จะนำมาประกอบการพิจารณาการออกแบบอาจพิจารณาจากจุดประสงค์การใช้อุโมงค์แรงที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแบ่งแยกได้ 3 ประเภทดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary Loads)

- แรงดันดินในแนวดิ่งและในแนวราบ
- แรงดันน้ำ
- น้ำหนักบรรทุกคงที่
- น้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน
- แรงต้านทานของดิน

น้ำหนักกระทำรอง (Secondary Loads)

- น้ำหนักภายใน
- น้ำหนักจากการก่อสร้าง
- ผลกระทบจากแผ่นดินไหว

น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special Loads)

- ผลกระทบจากอุโมงค์ใกล้เคียง
- ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง
- ผลกระทบจากการทรุดตัวของชั้นดิน
- อื่นๆ

น้ำหนักกระทำหลัก (Primary Loads) เป็นแรงพื้นฐานที่จะต้องนำมาพิจารณาเสมอในการออกแบบ น้ำหนักกระทำรอง (Secondary Loads) จ ะเกิดขึ้นระหว่างทำการก่อสร้างหรือหลังจาก ก่อสร้างอุโมงค์เสร็จแล้ว ซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ สภาพการก่อสร้างและตำแหน่งของอุโมงค์ ในขณะที่น้ำหนักกระทำพิเศษ (Special Loads) จะถูกนำมาพิจารณาโดยเฉพาะตามสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

น้ำหนักบรรทุกเหล่านี้ที่นำมาพิจารณาเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ แต่การวิเคราะห์ผลจากน้ำหนักบรรทุกไม่คงที่จะถูกนำมาใช้เมื่อแผ่นดินไหวมีผลการทบต่ออุโมงค์ การออกแบบผนังอุโมงค์โดยการวิเคราะห์แรงเช่นนี้เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

3.6.2. แรงดันในแนวดิ่งและแนวราบ

ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน แรงดันน้ำใต้ดิน สามารถแบ่งได้ 2 แบบในการหาค่าแรงดันดิน

1. แรงดันน้ำใต้ดินกระทำแยกจากแรงดันดิน (แรงดันประสิทธิผล)
2. แรงดันน้ำใต้ดินกระทำรวมกับแรงดันดิน (แรงดันรวม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในแนวดิ่งจะเป็นน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniform Load) กระทำต่ออุโมงค์ที่ส่วนบน (Crown) ของอุโมงค์ ขนาดของแรงจะพิจารณาจากความหนาของดินเหนืออุโมงค์ รูปร่างหน้าตัดและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังอุโมงค์และสภาพชั้นดิน

แรงดันดินในแนวราบควรจะเป็นแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ และจะแปรผันตามหน่วยน้ำหนักของดินและความลึก โดยจะกระทำที่จุดศูนย์ถ่วงของผนังอุโมงค์ที่ส่วนบน (Crown) และส่วนล่าง (Bottom) ของอุโมงค์ ขนาดของแรงคำนวณจากการคูณแรงดันดินในแนวดิ่งกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

แรงที่กระทำบนผนังอุโมงค์เป็นแรงที่ซับซ้อนพอสมควรและยากต่อการหาค่าที่แน่นอน ตามที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีที่ใช้หาค่าแรงดันดินโดยทั่วไป แรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ตามที่กล่าวข้างต้นอธิบายถึงการหาค่าแรงดันดินโดยไม่คำนึงถึงการผิดรูปของอุโมงค์ แรงดันดินที่กระทำต่ออุโมงค์ที่ ส่วนล่าง (Bottom) ที่พิจารณาคือแรงต้านทานของดิน

การคำนวณหาค่าแรงดันดินมี 2 วิธี หนึ่งคือแยกแรงดันน้ำออกจากแรงดันดิน (แรงดันประสิทธิผล) และอีกวิธีคือรวมแรงดันดินและแรงดันน้ำเข้าด้วยกัน (แรงดันรวม) โดยวิธีแรกจะนำมาประยุกต์ใช้กับดินทรายและวิธีหลังใช้กับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว อาจยกเว้นดินพวกดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)

3.6.2.1. แรงดันดินในแนวดิ่ง

แรงดันดินในแนวดิ่งจะกระทำต่อผนังอุโมงค์ในระยะยาวมันเป็นสิ่งที่ดีกว่าทีไม่ถือว่ามีผลกระทบของดินต่อผนังอุโมงค์จาการที่ดินเหนืออุโมงค์นั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ เพราะฉะนั้นการใช้ Loossening Pressure ในการออกแบบ โดยอาจจะเกิดปัญหาในดินทรายแต่ไม่มีผลต่อดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว มากไปกว่านั้นสภาพของชั้นดินต้องสนใจเพราะแรงดันดินในบางครั้งมีแนวโน้มจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะแรงดันที่กระทำบนท่อที่ฝังดินอยู่ซึ่งดินเหนืออุโมงค์มีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดของอุโมงค์ อาจเป็นไปได้ที่จะใช้สูตร Loossening Pressure ในการหาค่าแรงดันดินในแนวดิ่งโดย ในดินทรายถ้าดินเหนืออุโมงค์มีความหนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่าจะใช้สูตรคำนวณ Loossening Pressure ในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวถ้าความหนาของดินเหนืออุโมงค์หนา 1 ถึง 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์หรือมากกว่า ในดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay $N \geq 8$)จะใช้สูตรคำนวณ Loossening Pressure ในขณะที่ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Slay $4 \leq N < 8$) หรือ ดินเหนียวอ่อน(Soft Clay $2 \leq N < 4$) จะใช้การหาค่าตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.2. แรงดันดินในแนวราบ

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

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างควรหาจากความเกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณออกแบบและวิธีการก่อสร้างไม่ใช่ธรรมชาติของดิน อย่างไรก็ตามเป็นสิ่งที่ยากที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ได้อย่างถูกต้องแต่สามารถหาได้จากค่าที่แสดงในตารางที่ 3.5. การเปลี่ยนแปลงของแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันดินในแนวดิ่งและแนวราบค่อนข้างมาก ดังนั้นควรจะระมัดระวังในการหาค่าหลังจากพิจารณาถึงสภาพชั้นดินและการใช้ประโยชน์จากอุโมงค์

ตารางที่ 3.5. แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

วิธีออกแบบ	ชนิดของดิน	λ
แรงดันประสิทธิผล	ดินทรายแน่นมาก	0.30 - 0.45
	ดินทรายแน่น	0.45 - 0.55
	ดินทรายหลวม	0.50 - 0.60
	ดินเหนียวแข็งมาก	0.35 – 0.45
	ดินเหนียวแข็ง	0.45 – 0.55
	ดินเหนียวปานกลาง	0.45 – 0.55
แรงดันรวม	ดินเหนียวปานกลาง	0.55 – 0.65
	ดินเหนียวอ่อน	0.65 – 0.75
	ดินเหนียวอ่อนมาก	0.75 – 0.85

3.6.3. แรงดันน้ำ

1. ระดับน้ำใต้ดินควรจะกำหนดโดยการออกแบบในด้านความปลอดภัย ความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในขณะก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง
2. แรงดันในแนวดิ่งควรจะกระจายเท่าๆ กันและขนาดของแรงดันควรจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย์ (Hydrostatic Pressure) กระทำบนจุดสูงสุดของอุโมงค์และจุดต่ำสุดของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แรงดันน้ำในแนวราบควรกระจายอย่างสม่ำเสมอและขนาดของแรงจะเป็นแบบแรงดันน้ำแบบสถิตย์ (Hydrostatic Pressure)

แรงดันน้ำกระทำบนผนังอุโมงค์ขณะที่การทำงานของอุโมงค์แสดงความแตกต่างของลักษณะจากสภาพดินเดิมต่อสภาพการก่อสร้าง มันค่อนข้างยากที่คาดเดาแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจริง ระดับน้ำใต้ดินในระยะยาวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติหรืออิทธิพลที่ไม่แน่นอน สำหรับอุโมงค์ที่ตั้งอยู่ในที่ระดับน้ำใต้ดินสูงไม่ต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย ถ้าอยู่ในระดับน้ำใต้ดินต่ำจะต้องนำมาออกแบบเพื่อความปลอดภัย มีความสำคัญมากที่จะต้องหาค่าระดับน้ำใต้ดินให้ถี่ถ้วนเพื่อจะคำนวณแรงดันน้ำ

ถ้าหน่วยน้ำหนักจมน้ำ คือ หน่วยน้ำหนักที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน แรงดันน้ำแบบสถิตย์ (Hydrostatic Pressure) เป็นการเหมาะสมที่จะเป็นแรงดันน้ำที่ใช้ออกแบบ อย่างไรก็ตามการกระจายและขนาดของแรงดันน้ำสามารถหาได้อย่างง่ายโดยทำตามข้อกำหนดของแรงดันดิน

ผลของแรงดันน้ำที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ เป็นแรงลอยตัวถ้าผลของแรงดันดินในแนวดิ่งมากกว่าแรงลอยตัวจะทำให้เกิดแรงต้านทานของดินในแนวดิ่งใต้อุโมงค์ (Subgrade Reaction) ถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าแรงดันดินในแนวดิ่งจะทำให้อุโมงค์ลอย อาจทำให้เกิดความเสียหาย จึงต้องมีการเพิ่มน้ำหนักให้ตัวอุโมงค์โดยการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) หรือเพิ่มน้ำหนักบนผิวดินด้วยตุ้มน้ำหนัก

3.6.4. น้ำหนักบรรทุกคงที่

น้ำหนักบรรทุกคงที่ คือ แรงในแนวดิ่งที่กระจายตามความยาวบริเวณจุดศูนย์ถ่วงของผนังอุโมงค์

ถ้าการกระจายของน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของจุดศูนย์ถ่วงต้องเฉลี่ยค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่

ในระหว่างการก่อสร้างผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ซึ่งจะต้องทำหลังจากผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) มั่นคงแล้วน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ไม่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบผนังอุโมงค์เพราะน้ำหนักของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) จะถูกรับด้วยตัวของมันเอง อย่างไรก็ตามถ้าสมมติให้ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) รับน้ำหนักรวมกับ ผนังอุโมงค์หลัก (Primary Lining) น้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) ควรจะใช้คำนวณด้วยในระหว่างการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหน่วยน้ำหนักที่ใช้คำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผนังอุโมงค์ ถ้ารู้ค่าหน่วยน้ำหนักที่แท้จริงก็ควรนำมาใช้แต่ถ้ารู้ก็สามารถใช้หน่วยน้ำหนักโดยประมาณ 24 – 26 kN/m^3 (สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีต)

3.6.5. ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน

ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน ควรจะกำหนดแรงที่ส่งผ่านที่ใช้พิจารณาความเค้นในพื้นดิน

ผลกระทบของความเค้นในพื้นดินเพราะน้ำหนักที่กระทำบนผิวดินหรือปฏิกิริยาของโครงสร้างฐานรากที่ลดลงตามความลึก เพราะฉะนั้น สามารถพิจารณาระยะไกลๆ จากจุดที่น้ำหนักกระทำ ผลกระทบจากน้ำหนักคงที่บนผิวดินส่วนมากในแรงดันดินที่กระทำต่อผนังอุโมงค์จะลดลง อย่างไรก็ตามไม่ง่ายที่จะเจาะจงระดับของผลกระทบ ผลกระทบเหล่านี้ในแรงดันดินจะแปรผันขึ้นอยู่กับขนาดของน้ำหนัก ประเภทของฐานราก ความลึกระหว่างดินที่อยู่เหนืออุโมงค์กับส่วนล่าง(Bottom) ของฐานรากและสภาพชั้นดิน

สำหรับการคำนวณหาค่าการส่งผ่านของความเค้นในดิน มีวิธีที่ใช้เช่น สูตรของ Boussinesg และ สูตรของ Westergaard

โดยปกติอุโมงค์จะไม่ตั้งอยู่ใต้โครงสร้างโดยตรงแต่จะอยู่ใต้ถนน ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างเหนืออุโมงค์จะต้องตรวจสอบถ้าอุโมงค์อยู่ใกล้เขตถนน

3.6.6. แรงต้านทานของดิน

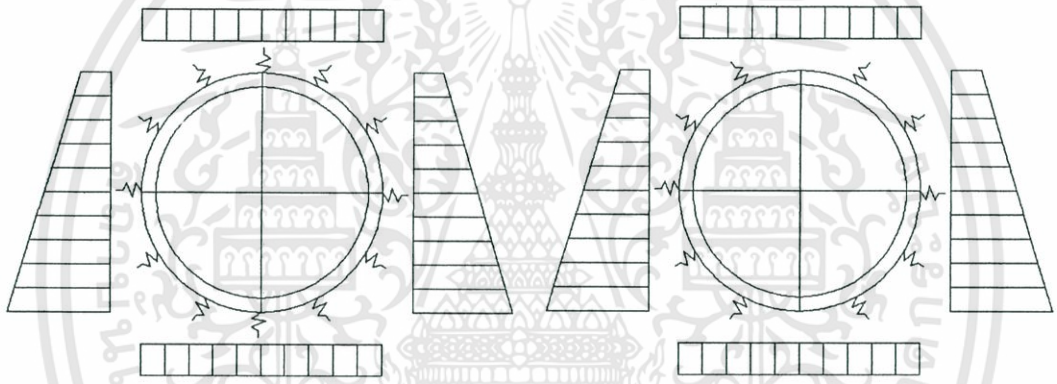
ขอบเขตของการเกิดแรง รูปร่างของการกระจายและความหนาแน่นของแรงต้านทานควรพิจารณาที่รอยต่อโดยวิธีการคำนวณที่ใช้

ท่ามกลางน้ำหนักที่กระทำบนผนังอุโมงค์ แรงต้านทานของดินแตกต่างจากน้ำหนักอื่นที่สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ โดยปกติแรงต้านทานของดินสามารถแยกได้เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนรูปของดินและแรงต้านทานที่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดิน สมัยก่อน การปฏิบัติโดยปกติที่จะระบุรูปร่างการกระจายของแรงต้านทานให้สมดุลกับแรงที่กำหนดได้ขณะที่ต่อมาการสันนิษฐานของ Winkler เป็นพื้นฐานที่ว่าแรงต้านทานเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ใช้ในการคำนวณ แรงต้านทานในแนวดิ่งซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำหนักที่กำหนดได้เป็นแรงต้านทานที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของดินและเป็นแรงต้านทานที่สม่ำเสมอเหมือนกับน้ำหนักที่กำหนดได้ ในอีกด้านหนึ่งแรงต้านทานในแนวราบเป็นแรงต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังอุโมงค์ไปจนถึงชั้นดิน และมีรูปร่างการกระจายของแรงเป็นสามเหลี่ยม ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ตำแหน่ง Spring Line แผ่ออกภายในช่วง ± 45° จาก Spring Line สำหรับการออกแบบสามารถใช้ค่าคงที่ของแรงต้านทานในแนวราบได้จากตาราง

อีกวิธีหนึ่งในการอธิบายถึงแรงกระทำชั้นดินกับผนังอุโมงค์ โดยสมมติให้ชั้นดินเปรียบเสมือนสปริง วิธีนี้แรงต้านทานของดินจะสมมติว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์โดยเป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนรูปของชั้นดิน โดยในยุโรป แบบจำลองจะให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ ส่วนในญี่ปุ่นจะใช้แบบจำลองของ Winkler



(a). (b).

รูปที่ 3.20. แสดงแบบจำลองสปริง
(a). แบบจำลองที่ให้ชั้นดินปกคลุมอุโมงค์โดยรอบ
(b). แบบจำลองของ Winkler

3.6.7. น้ำหนักจากการก่อสร้าง

น้ำหนักจากการก่อสร้างที่ควรพิจารณา มีดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักชั่วคราวที่กระทำบนชิ้นส่วนขณะขั้นตอนการก่อสร้าง จากขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วนจนถึงขั้นตอนหลังจากการทำให้แข็งของการอัดฉีดน้ำปูน(Grouting) เพื่อเติมเต็มช่องว่างในส่วนท้าย ที่สะสมกัน เรียกว่า น้ำหนักจากการก่อสร้าง น้ำหนักนี้จะใช้พิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนจากความสัมพันธ์ของวิธีการก่อสร้าง

เป็นการยากที่จะกำหนดน้ำหนักจากการก่อสร้างได้แม่นยำ เพราะมันจะแปรผันขึ้นกับสภาพชั้นดินและสภาพการทำงาน ฯ อย่างไรก็ตาม สำคัญมากที่จะต้องทำความเข้าใจในน้ำหนักจากการก่อสร้าง เพราะการหาค่าที่เหมาะสมและผลสะท้อนของมันในการออกแบบจะนำไปสู่การใช้งานที่เข้าใจได้ง่ายของชิ้นส่วนและความมั่นคงและการปฏิบัติที่มีประสิทธิภาพ

1. แรงผลักดันของแม่แรงกดหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Jacks) เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของอุโมงค์ในขณะที่หัวขุดเจาะอุโมงค์(shield) เคลื่อนที่ไปข้างหน้า
2. แรงดันจากการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) เมื่อทำการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) โดยการฉีดวัสดุเข้าไปที่ช่องว่างในส่วนท้ายแรงดันจากการ อัดฉีดน้ำปูน (Grouting) จะกระทำเป็นน้ำหนักเพียงชั่วคราวบริเวณรอบๆ รูที่อัดฉีดน้ำปูน (Grouting)
3. น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง น้ำหนักจากการดำเนินการติดตั้ง ใช้ออกแบบตะขอที่ยกชิ้นส่วนต้องศึกษาอิทธิพลของตะขอต่อแต่ละชิ้นส่วนขณะประกอบเป็นวง
4. อื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา น้ำหนักจากการก่อสร้างอื่นๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ของ Backup Carriage น้ำหนักที่กำหนดโดยประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield) ฯลฯ

3.6.8. น้ำหนักภายใน

น้ำหนักภายในคือ น้ำหนักที่กระทำด้านในผนังอุโมงค์หลังจากอุโมงค์เสร็จแล้วและกำหนดตามสภาพความเป็นจริง

น้ำหนักภายในจะแตกต่างไปตามวัตถุประสงค์ของอุโมงค์ ความปลอดภัยของโครงสร้างของผนังอุโมงค์จะต้องรองรับน้ำหนักประเภทนี้ด้วย

การศึกษาถึงน้ำหนักนี้โดยปกติจะละเว้น นอกจากอุโมงค์จะอยู่ในชั้นดินที่อ่อนมาก อย่างไรก็ตามน้ำหนักภายในจะถูกพิจารณาถึงอิทธิพลต่อกำลังและการเปลี่ยนรูปของอุโมงค์

สำหรับอุโมงค์ที่ภายในจะมีแรงดันน้ำ ต้องการการเลือกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม รวมถึง ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) และนำสิ่งที่จำเป็นมาศึกษา แล้วนำไปรวมกับน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นที่ใช้ออกแบบ ในการศึกษานี้ แรงดันดินและแรงดันน้ำที่กระทำต่ออุโมงค์ควรจะระมัดระวังในการกำหนดและการรับรองความปลอดภัยของอุโมงค์

3.6.9. ผลกระทบจากแผ่นดินไหว

เมื่อคาดว่าจะเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหวควรศึกษาตามความสำคัญของอุโมงค์และพิจารณาถึงสภาพที่ตั้งของอุโมงค์ สภาพโดยรอบของชั้นดิน การเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น รายละเอียดโครงสร้างของอุโมงค์และสภาพอื่นๆ ที่จำเป็น

ผลกระทบจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างใต้ดินโดยปกติพิจารณาจาก

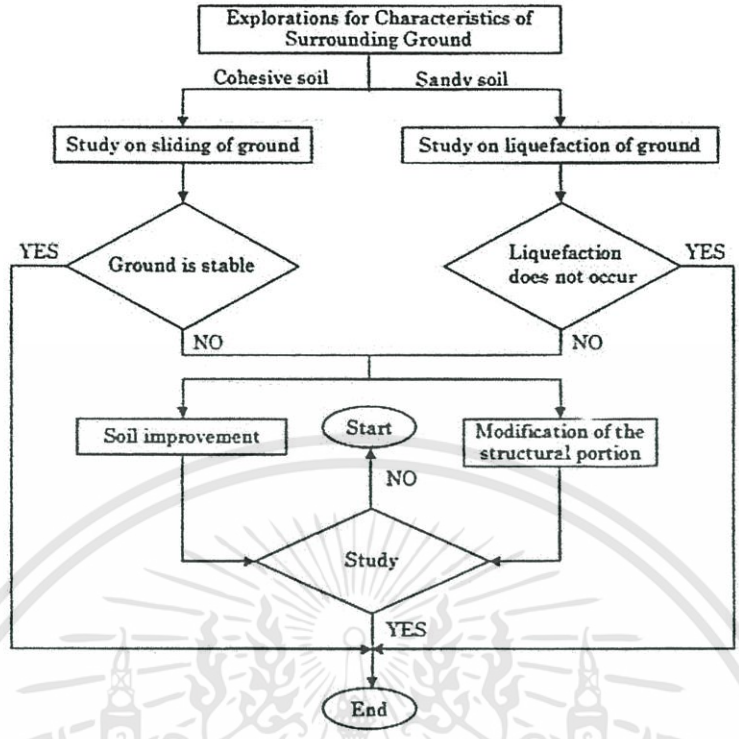
เมื่อน้ำหนักของอุโมงค์เปรียบเทียบกับดินที่อุโมงค์อยู่นั้นอุโมงค์จะเบากว่า เพราะฉะนั้นแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่กรทำต่ออุโมงค์ แรงเฉื่อยของอุโมงค์มีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินโดยรอบ ผลที่ตามมาคือ อุโมงค์จะสั่นเกือบจะเหมือนกับชั้นดิน ถ้าดินเหนืออุโมงค์มากกว่าความลึกที่แน่นอน เพราะฉะนั้นผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะน้อยเมื่อเทียบกับอุโมงค์และความหนาของดินเหนืออุโมงค์ และในดินที่มีความสม่ำเสมอ เปรียบเทียบกับอุโมงค์ที่สร้างโดยวิธีอื่น เช่น วิธีขุดและปิดหน้าดิน (Cut & Cover) อุโมงค์ที่ใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield จะเคลื่อนไหวไปกับชั้นดินได้มากกว่า เพราะความแข็งเกร็งของอุโมงค์มีน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่ออุโมงค์ที่อยู่ในสภาพดังต่อไปนี้ ควรจะทำการศึกษาเพราะผลกระทบจากแผ่นดินไหวจะมีมาก

1. บริเวณที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงทันที เช่น จุดเชื่อต่อระหว่างอุโมงค์ใต้ดินกับปล่องแนวดิ่ง (Shaft)
2. เมื่ออุโมงค์อยู่ในชั้นดินอ่อน
3. เมื่อสภาพชั้นดินทางธรณีวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงความลึกของหินดินดานอย่างทันทีทันใด
4. เมื่อการวางตัวของอุโมงค์เป็นโค้งที่ค่อนข้างแหลม

โดยปกติการศึกษาเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่มีผลต่ออุโมงค์จะทำ 3 สิ่งคือ

1. ความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ
2. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางขวาง
3. การศึกษาทางจลน์ของอุโมงค์ในทางยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21. แสดงขั้นตอนการศึกษาความมั่นคงของอุโมงค์และดินโดยรอบ

3.6.10. ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง

เมื่อสร้างอุโมงค์ขนานกับอุโมงค์ที่มีอยู่ สภาพชั้นดินโดยรอบ ตำแหน่งของอุโมงค์ที่สัมพันธ์กับอุโมงค์อื่น เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและวิธีการก่อสร้าง ควรจะนำมาพิจารณา ถ้าจำเป็นต้องพิจารณาว่า อุโมงค์มีปฏิกิริยาอย่างไรต่ออุโมงค์อื่นและผลกระทบซึ่งกันและกันขณะที่ทำการก่อสร้าง

การสร้างอุโมงค์ 2 อุโมงค์หรือมากกว่า อุโมงค์ควรจะตั้งขนานกันและใกล้ๆกันในแนวราบหรือตามแนวยาวสำหรับความยาวที่แน่นนอน ความหลวมของดินมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาของอุโมงค์และผลกระทบจากการก่อสร้างควรจะนำมาพิจารณา และถ้าจำเป็นต้องมีมาตรการที่เหมาะสม เช่น การเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ หรือเพิ่มมาตรการ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินและป้องกันการเปลี่ยนรูปของดิน

หัวข้อที่ต้องพิจารณาก่อนก่อสร้างอุโมงค์ขนานมีดังนี้

1. ตำแหน่งของอุโมงค์ที่สัมพันธ์กับอุโมงค์อื่น
2. สภาพของดินรอบอุโมงค์
3. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์
4. เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างของอุโมงค์ที่กำลังจะสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ที่ใช้ในการก่อสร้าง
6. น้ำหนักที่เกิดในช่วงเวลาการก่อสร้าง

3.6.11. ผลกระทบจากการทำงานบริเวณใกล้เคียง

เมื่อคาดว่าโครงสร้างอื่นจะถูกสร้างบริเวณใกล้เคียงขณะที่ก่อสร้างหรือหลังจากขุดเจาะอุโมงค์ การประเมินควรจะทำถ้าอาจเกิดผลกระทบที่เลวร้าย

มีหลายกรณีที่อุโมงค์หรือโครงสร้างอื่น สร้างพร้อมกันหรือหลังจากการก่อสร้างอุโมงค์จะมีผลกระทบจากการที่ดินโดยรอบถูกรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขณะทำงาน การเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ การป้องกันที่เหมาะสมหรือการปรับปรุงดินอาจจะจำเป็น

ควรทำการเปลี่ยนเงื่อนไขในการคำนวณเมื่อ

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

3.6.12. ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน

ผลการทบจากการทรุดตัวควรทดสอบเมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน

เมื่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน ต้องสนใจว่าดินมีคุณสมบัติอย่างไร หลังจากขั้นตอกการก่อสร้างอุโมงค์ ผลการทบจากการทรุดตัวของดิน มีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงผลการทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์และจุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวดิ่ง (Shaft)

ก. อุโมงค์

ผลกระทบจากการทรุดตัวของดินต่ออุโมงค์สามารถศึกษาได้ 2 ทางคือ

1. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวของอุโมงค์ในทางขวาง
2. ศึกษาถึงผลกระทบของการทรุดตัวไม่เท่ากันของอุโมงค์ในทางยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. จุดต่อระหว่างอุโมงค์กับปล่องแนวดิ่ง (Shaft)

แนวโน้มความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปรากฏที่จุดต่อของอุโมงค์กับปล่องแนวดิ่ง (Shaft) เพราะความแตกต่างของโครงสร้างจะเชื่อมต่อที่ตำแหน่งนี้เพราะฉะนั้นจะป้องกันการเกิดความเค้นโดยการใช้จุดต่อที่ยืดหยุ่น

3.6.13. น้ำหนักอื่นๆ

ก่อนการทดสอบควรพิจารณาถึงผลกระทบของน้ำหนักอื่นที่อาจเป็นไปได้ในการออกแบบผนังอุโมงค์

3.7. รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกกำหนดการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยจะทำให้ง่ายในการก่อสร้าง และให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ปัจจัยหลักและการพิจารณาทั่วๆไป กำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment Ring)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ถูกกำหนดซึ่งได้บรรยายไว้ในหัวข้อรูปร่าง และขนาดของหน้าตัดภายในอุโมงค์ โดยความต้องการช่องว่างภายในของอุโมงค์และความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secodary Lining)

2. ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment) (ความหนา)

ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าตัด ซึ่งการพิจารณาหลักๆมาจากเงื่อนไขของน้ำหนัก (Load) เช่น สภาพของดิน หรือภาระน้ำหนักเหนืออุโมงค์ (Overburden) แต่บางกรณีกำหนดโดยวัตถุประสงค์ของการใช้งาน และความสามารถในการใช้งานของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

ความสูงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะมีค่าประมาณ 4% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ จะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งได้แก่ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต (Ribbed Type Concrete Segment) ซึ่งมีอัตราส่วนความสูงประมาณ 5%ของเส้นผ่านศูนย์กลาง

3. ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

มีความต้องการให้ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment) มีขนาดจำกัด เพื่อความสะดวกในการขนย้าย และการประกอบวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) และโครงสร้างของหน้าตัดโค้งเหมือนกับในรูปของความยาวส่วนท้ายของหัวขุดเจาะอุโมงค์ Shield ในขณะที่เพื่อเป็นการปรับลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ปรับลดจำนวนของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และจำนวนของร่องสลักเกลียว(bolt) ที่จะต้องดูแลการรั่วไหลของน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ถ้าพิจารณาถึงระยะเวลาความรวดเร็วในการก่อสร้างจะต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีขนาดที่กว้างมาก จึงต้องมีการกำหนดพิจารณาให้เหมาะสมจากงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต รวมทั้งดูถึงราคาต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งานของอุโมงค์อีกด้วย

ตามที่ได้มีการบันทึกข้อมูลงานก่อสร้างที่ผ่านมาแล้วในอดีต ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300 - 1500 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับหน้าตัดของอุโมงค์

สำหรับ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทเหล็ก (Iron Segment) ความกว้างอยู่ระหว่าง 750-1200 มม.

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete Segment) ความกว้างอยู่ระหว่าง 900-1200 มม.

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ใช้กันอยู่ที่ 1000 มม. ถูกนำมาใช้กันทั่วๆไป

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแรกชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางรัศมีของอุโมงค์ รูปแบบที่สองชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามยาวของอุโมงค์ ส่วนรูปแบบที่สามชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) เป็นแบบผสมผสานระหว่างรูปแบบ 1 และ 2 ซึ่งความยาวของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางรัศมีของอุโมงค์จะสั้นกว่าของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เอ (A Segment) และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์บี (B Segment)

การก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต สำหรับอุโมงค์รถไฟวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะถูกแบ่งออกประมาน 6 – 11 ชิ้นส่วน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 6 - 8 ชิ้นส่วน สำหรับอุโมงค์ที่ใช้สำหรับระบายน้ำ น้ำเสีย สายโทรเลขใต้ดินโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5 - 7 ชิ้นส่วน

ในมาตรฐานการออกแบบอุโมงค์ประเภทหัวขุดเจาะ Shield ได้ทำการกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทเหล็ก (Iron Segment) และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคอนกรีต (Concrete Segment) ดังตารางที่ 3.6. และ 3.7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6. แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีต

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนอุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวงแหวน
1800 - 2000	750	100 125	5
2150 - 3350	900 1000	100(200) 125	5
3350 - 4800	900 1000	125(225) 150 175(250) 200(275)	6
5100 - 6000	900 1000	175 200 225 250 275 300	6
(6300 - 6900)	900 1000	250 275 300	7
(7250 - 8300)	900 1000	275 300 320 350	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7. แสดงรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เหล็ก

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนอุโมงค์ใต้ดิน (มิลลิเมตร)	ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	ความหนาของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (มิลลิเมตร)	จำนวนชิ้นส่วนในวงแหวน
1800 - 2000	750	75 100	6
2150 - 2550	900 1000	100 125	6
2750 - 3350	900 1000	100 125 150	6
3350 - 4050	900 1000	125 150 175	7
4300 - 4800	900 1000	150 175	7
5100 - 5700	900 1000	175 200 225	7
6000	900 1000	200 225	7
(6300 - 6900)	900 1000	250 275	7
(7250 - 8300)	900 1000	300 320 350	8

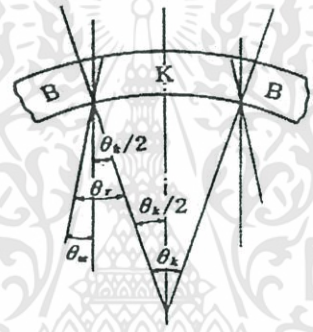
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1. มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบ

มุมของรอยต่อและมุมของการประกอบจะถูกกำหนดการพิจารณาถึงการส่งผ่านขององค์ประกอบแรงความง่ายของการประกอบ สภาพของโครงสร้าง และความง่ายในการผลิตชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

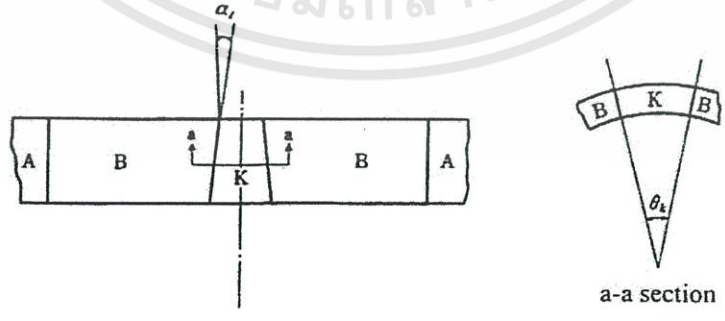
สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางของรัศมีอุโมงค์ มุมของรอยต่อ (α_r) จะได้มาดังสมการ

$$\alpha_r = \frac{\theta_k}{2} + \omega \qquad (3.1.)$$



รูปที่ 3.22. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ภายในอุโมงค์ตามรัศมี

โดย ω เป็นมุมอยู่ในขอบเขตการประกอบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) และโดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 2-5 องศา อย่างไรก็ตามมุมที่เล็กกว่านี้อาจจะให้ผลที่ดีกว่า ภายใต้สภาพที่ว่าความสามารถในการใช้งานจะไม่สูญไป ในการกำหนดเจาะจงจะเสนอประมาณ 3 องศา



รูปที่ 3.23. แสดงชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เคแบบใส่ตามแนวยาวของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมุมของรอยต่อมีขนาดใหญ่ รอยต่อของผิวหน้าชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะสามารถหลุดออกได้โดยง่าย ทำให้การส่งผ่านแรงตามแนวแกนและแรงเฉือนเป็นไปอย่างยากลำบาก เพราะฉะนั้นมุมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (θ_k) ต้องทำให้มีขนาดที่เล็กลง มุมของรอยต่อจะมีขนาดใหญ่เฉพาะสำหรับอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กซึ่งควรจะต้องพิจารณาในกรณีนี้เป็นพิเศษ

สำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (K Segment) ที่ใส่ในทิศทางตามแนวยาวของอุโมงค์แสดงดังรูป โดยปกติจะไม่มีมุมของรอยต่อ(α_r) แต่มุมของการประกอบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (α_l) ต้องถูกนำมาพิจารณาในสภาพของการก่อสร้าง รวมถึงความยาวของเครื่องจักรหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Machine) และการสอดแทรกระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และรอยต่อของวงรอบ มุมของการประกอบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 17 – 24 องศา ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของโครงสร้าง เมื่อมุมของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์เค (θ_k) มีค่ามุมกว้างมากและชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีความหนามาก จะมีการกำหนดมุมที่แน่นอนสำหรับระบบรอยต่อและการประกอบ

3.7.2. วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring)

จำนวนของความกว้าง และความเรียวของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) จะถูกกำหนดโดยการวางแนวของอุโมงค์ สภาพของดินโดยรอบอุโมงค์ การอัดฉีดน้ำปูน ความแข็งเกร็งของระบบรอยต่อกับการประกอบ ผลที่ได้ของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และขอบเขตของการก่อสร้าง

วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) มีอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกใช้สำหรับการวางแนวโค้งของอุโมงค์ และอีกรูปแบบหนึ่งใช้สำหรับการปรับแก้แนว วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) สำหรับการวางแนวโค้งของอุโมงค์ที่ลดลงทีละน้อยโดยปกติจะออกแบบดังเช่นการทำให้มีความเรียวลงเท่ากันกับวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ใช้สำหรับการปรับแก้การวางแนว ดังนั้นจำนวนวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ต้องการใช้จะไม่จำเป็นที่จะต้องการเพิ่มขึ้น

จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ที่ต้องการสำหรับการปรับแนวจะแตกต่างกันตามอัตราส่วนของหน้าตัดการวางโค้งทีละน้อยและหน้าตัดการวางโค้งเฉียบขาดภายในหน้าตัดของการก่อสร้าง หรือไม่ก็เป็นการปรับแนวของอุโมงค์ เช่น โค้งตัวเอส (S-sharpes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสภาพของดินโดยรอบ จำนวนของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) โดยปกติที่ต้องการจะใช้สำหรับการปรับแนวอยู่ที่ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงแหวนที่ต้องการสำหรับหน้าตัดที่ติดต่อเนื่องกัน

อย่างไรก็ตามหน้าตัดการวางโค้งที่ลดลงทีละน้อย ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Taper Ring) สำหรับการใช้ปรับแนวทางยาว จะใช้ 3-5 % ของจำนวนทั้งหมดของวงรอบที่ต้องการจะถูกเตรียมสำหรับหน้าตัดที่ต่อเนื่องกัน

ความกว้างสูงสุดของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered ring) ที่เป็นเหล็กที่ใช้สำหรับโค้งอื่นๆนอกเหนือจากโค้งทีละน้อยมีค่ามากกว่า 250 มม. ส่วนความกว้างของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว(Tapered Ring) ที่เป็นคอนกรีตมีค่ามากกว่า 750 มม.

ความเรียวถูกกำหนดโดยรูปแบบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ความกว้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) รัศมีความโค้ง การประเมินอัตราการใช้วงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ในหน้าตัดโค้ง ผลที่ได้จากวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) และช่องว่างช่วงท้ายเป็นต้น การก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีตได้กำหนดความเรียวและมุมของความเรียวดังตารางที่ 3.8.

ความเรียวและมุมของความเรียวสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 10 เมตร หรือมีรูปร่างไม่ปกติจะต้องปรึกษาวิศวกรเพื่อขอคำแนะนำ

อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ต่อวงแหวนมาตรฐานในการก่อสร้างที่ผ่านมาในอดีต ถูกใช้ด้วยอัตราส่วน 2 : 1 และที่พบเห็นกันบ่อยๆ ได้แก่ 3 : 1, 1 : 1, 4 : 1 และ 3 : 2 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ 2 : 1 หรือใหญ่กว่าถูกนำมาใช้ การพิจารณาจะถูกทดแทนด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ไม่ถูกเชื่อมกันตรงรอยต่อที่ติดต่อเนื่องกัน ในอุโมงค์ที่มีรัศมีขนาดใหญ่ เช่น อุโมงค์รถไฟ อุโมงค์ถนน อัตราส่วนการใช้การผสมของวงแหวนผนังอุโมงค์แบบเรียว (Tapered Ring) ต่อวงแหวนมาตรฐานจะอยู่ที่ 1 : 1 หรือน้อยกว่า

ตารางที่ 3.8. แสดงขนาดเรียวและองศาของความเรียว

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของวงแหวนอุโมงค์ใต้ดิน(D_o) เมตร	$D_o < 4$	$4 \le D_o < 6$	$6 \le D_o < 8$	$8 \le D_o < 10$	$10 \le D_o$
Terper (มิลลิเมตร)	15-75	30-80	30-90	40-90	40-70
Terper Angle.	20'-115'	20'-70'	15'-50'	15'-35'	10'-25'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8. การคำนวณโครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)

3.8.1. พื้นฐานของการคำนวณโครงสร้าง

หลักเกณฑ์การคำนวณโครงสร้าง

1. การคำนวณโครงสร้างสำหรับอุโมงค์ จะถูกกำหนดภายใต้น้ำหนัก (Loads) ในแต่ละระยะในระหว่างการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้าง
2. ออกแบบน้ำหนักสำหรับหน้าตัดของอุโมงค์จะถูกกำหนดโดยสมมติขึ้นมาในเงื่อนไขที่เป็นไปได้ในหน้าตัดอุโมงค์ ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมในการออกแบบ
3. การคำนวณที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนของแรงหรือการเสียรูปสำหรับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่เป็นคอนกรีต การคำนวณจะถูกทำโดยละเลยการเสริมเหล็กและสมมติว่าหน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตใช้เป็นตัวที่มีผลบังคับ

การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกทำด้วยการพิจารณาถึงน้ำหนักที่กระทำต่ออุโมงค์ต่อการก่อสร้างสำหรับอายุการใช้งานหลายๆปี หลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จดังนี้

1. การพิจารณาถึงความมั่นคง องค์ประกอบของแรง และการเสียรูปในระหว่างระยะเวลาทันทีทันใดหลังจากการก่อสร้างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ประกอบกับการแข็งตัวของวัสดุอัดฉีดน้ำปูนเพื่ออุดรู
2. การพิจารณาองค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และการเสียรูปเนื่องจากการผลักดันของแม่แรงกดหัวขุดเจาะอุโมงค์ (Shield Jacks)
3. การพิจารณาองค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และการเสียรูปเนื่องจากแรงดันของการอัดฉีดน้ำปูน
4. พิจารณาโครงสร้างของโค้งเฉียบขาด (Sharp Curve)
5. พิจารณาในกรณีการเปลี่ยนอย่างฉับพลันของดิน
6. พิจารณารอยต่อของอุโมงค์และปล่องแนวดิ่ง (Shaft)
7. พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โครงการก่อสร้างบริเวณใกล้เคียง และอื่นๆที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมารบกวนอุโมงค์ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2. การคำนวณองค์ประกอบของแรง

องค์ประกอบแรงของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะถูกคำนวณในการพิจารณาคุณสมบัติของโครงสร้าง รัศมีของวงรอบ Segment ที่ใช้สำหรับการคำนวณโครงสร้างจะถูกกำหนดเป็นรัศมีของจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของอุโมงค์

องค์ประกอบของแรงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆของน้ำหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงปฏิกิริยาของดินซึ่งรูปร่างของโครงสร้างวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) สภาพต่างๆเหล่านี้จะถูกทำให้แน่ชัดดังนี้

วงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะประกอบด้วยหลายๆ ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ซึ่งจะประกอบกันด้วยสลักเกลียว (Bolts) การเสียรูปในวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะใหญ่กว่าวงแหวนด้วยความแข็งเกร็งของการดัดที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความแข็งเกร็งเท่ากันกับหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) สิ่งนี้เพราะว่าความแข็งเกร็งของรอยต่อมีความแข็งเกร็งน้อยกว่าหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ด้วยเหตุนี้ มันจึงมีความสำคัญที่จะกำหนดเกี่ยวกับการหาค่าการลดลงของความแข็งเกร็งที่รอยต่อสำหรับการคำนวณองค์ประกอบแรง นอกจากนี้สลักเกลียว(Bolts) ที่ใช้เชื่อมรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) และรอยต่อวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring)ถูกทำให้เลื่อมกัน โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นมันมีความสำคัญในการหาค่าผลของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ที่ติดต่อกันสำหรับการคำนวณออกแบบ

รูปร่างสำหรับการคำนวณออกแบบถูกแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ โดยการหาค่ารอยต่อดังนี้

ก. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment Ring) เป็นวงแหวนด้วยความแข็งเกร็งของการดัดที่สม่ำเสมอ

1. การละเว้นการลดลงของความแข็งเกร็งที่รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) วงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ถูกกระทำด้วยความแข็งเกร็งของการดัดที่สม่ำเสมอ (EI) ซึ่งเท่ากับหน้าตัดหลักของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment)
2. สัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งเกร็งของการดัด (ηน้อยกว่าเท่ากับ 1) แนะนำให้หาค่าความแข็งเกร็งของรอยต่อ วงแหวนถูกกระทำกันอย่างสม่ำเสมอแต่ความแข็งเกร็งน้อยกว่า (วงแหวนแข็งที่มีความแข็งเกร็งของการดัดเท่ากัน) ความแข็งเกร็งของการดัดแทนด้วย ηEI ส่วนการแบ่งโมเมนต์ดัดแสดงเป็นเครื่องหมายโดยเสนอเป็นอัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์ดัด(ξ) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์ของหน้าตัดหลักมีค่าเท่ากับ $(1+\xi)M$

โมเมนต์ของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) มีค่าเท่ากับ $(1-\xi)M$

การบรรยายรูปร่างในหัวข้อ 1 เป็นลักษณะที่ไม่ซับซ้อนและรูปแบบของการกระจายน้ำหนักถูกมานำเสนอ การใช้วิธีคำนวณสำหรับวงแหวนด้วยความแข็งเกร็งของการดัดที่สม่ำเสมอและการกระจายน้ำหนักร่วมกัน ซึ่งเรียกว่า วิธีการคำนวณปกติ

การบรรยายรูปร่างในหัวข้อ 2 เป็นรูปร่างที่ศึกษาด้วยเหตุด้วยผลซึ่งใช้ความเกี่ยวข้องของวิธีการคำนวณปกติถ้าการกระจายน้ำหนักร่วมกันถูกใช้แล้วค่าη = 1, ξ = 0 ถูกแทนที่ วิธีนี้กลายเป็นเหมือนว่าวงแหวนแข็งด้วยความแข็งเกร็งของการดัดเต็มที่ซึ่งเรียกว่า วิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

ข. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) เป็นวงแหวนที่มีหลายจุดหมุน

รูปร่างแบบนี้ใช้ในสหราชอาณาจักร และรัสเซีย ที่ซึ่งสภาพต่างๆของดินมีคุณลักษณะที่ดี ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ถูกติดตั้งตามรอยต่อที่ต่อเนื่องกันเพื่อตระเตรียมรับแรงปฏิกิริยาของดินที่คาดว่าจะมีต่อวงแหวนการเสียรูป

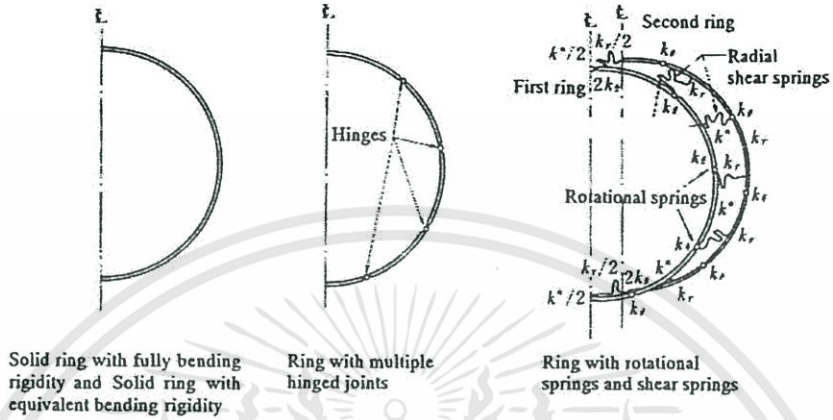
ค. สมมติวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) เป็นวงแหวนที่ประกอบด้วย สปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring)

วงแหวนประกอบด้วยสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) ที่ทำหน้าที่เชื่อมรอยต่อวงแหวน และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) ที่เชื่อมวงแหวนของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ซึ่งถูกหาค่าตามผลของรอยต่อระหว่างวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ในการตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน รูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน ซึ่งสามารถหาค่าผลของวงแหวนที่ติดต่อกัน

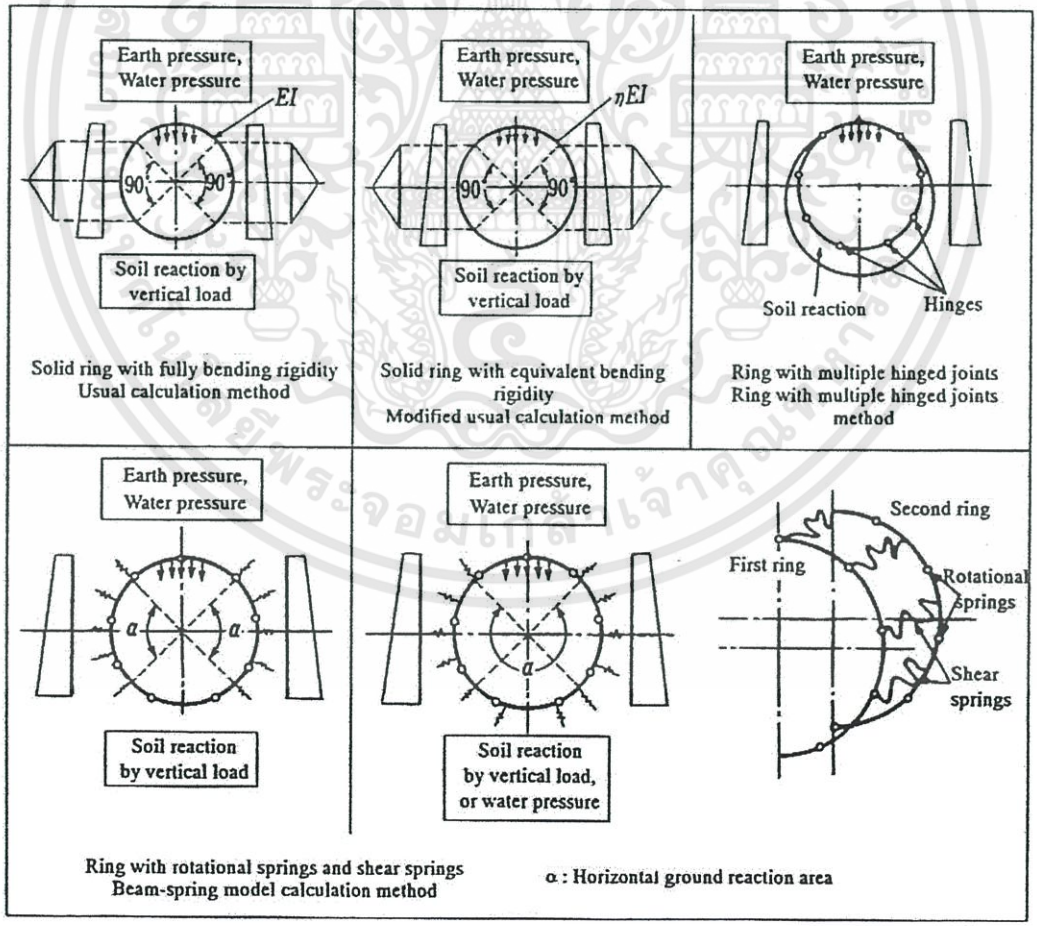
การหารูปร่างที่เหมาะสมเพื่อคำนวณองค์ประกอบแรงขึ้นอยู่กับสภาพต่างๆที่ให้มา เช่น การใช้งานอุโมงค์ สภาพต่างๆของดิน การออกแบบน้ำหนัก โครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ความต้องการความแม่นยำในการวิเคราะห์ การพิจารณาอย่างรอบคอบจะเป็นตัวเลือกรูปร่างในการออกแบบ แผนผังรูปร่างต่างๆของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) แสดงในรูป 3.24. และการกระจายวัตถุประสงค์ของรูปร่างแสดงในรูป3.25.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีการบรรยายถึง Beam-Spring Model ซึ่งใช้ความยืดหยุ่นของดินแทนแรงปฏิกิริยาของดินในแนวดิ่ง และใช้ความยืดหยุ่นดิน (Spring) แทนแรงปฏิกิริยาของน้ำหนักบรรทุกคงที่ การคำนวณสมมติว่าความยืดหยุ่นของดินใช้ตามสมมติฐานของWinkler



รูปที่ 3.24. แสดงแบบแผนของแบบจำลองในการออกแบบ



รูปที่ 3.25. แสดงการกระจายของน้ำหนักบรรทุกออกแบบตามจุดประสงค์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณรูปร่างในการออกแบบมีดังนี้

1. วิธีการคำนวณปกติ

วิธีนี้ถูกเสนอในปี1960 และใช้อย่างกว้างขวางในประเทศญี่ปุ่น รูปร่างการกระจายน้ำหนักร่วมกัน แรงปฏิกิริยาของดินในแนวดิ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอ และแรงปฏิกิริยาแนวราบของดินเป็นสามเหลี่ยมกระจายระหว่าง 45° ถึง 135° จากยอดของทั้งสองข้าง การเสียรูปทางแนวราบของวงแหวนที่เส้น Spring line ซึ่งจะกำหนดขนาดของแรงปฏิกิริยาแนวราบของดินเป็นความแตกต่างซึ่งขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาของดินที่ได้มาจากน้ำหนักคงที่ของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) จะถูกนำมาพิจารณา สมการการคำนวณแสดงในบทที่ 4 แต่สมการ จะเป็นลักษณะพิเศษเฉพาะของวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง แต่ถ้า η =1 สมการจะได้มาซึ่งวิธีการคำนวณปกติ

2. วิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

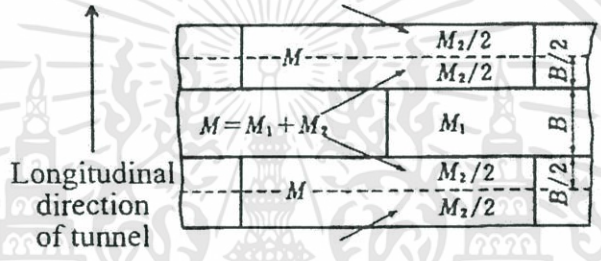
อย่างที่รู้กันว่าการตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนควรจะเสริมกำลังความอ่อนแอของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ในความแข็งเกร็ง ซึ่งจะไม่ถูกกำหนดถึงผลการหาค่าของวงแหวนที่ติดต่อกันในปี1960 น้ำหนักต่างๆมากมายที่นำมาทดสอบถูกนำให้ได้มาซึ่งข้อมูลการเสียรูปของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งยึดติดรอยต่อด้วยสลักเกลียว (Bolt) แนวคิดของสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งเกร็งในการดัด (η) ถูกเสนอแนะโดยผลลัพธ์ของการทดสอบอย่างละเอียดและการวิเคราะห์ถึงสมมติฐาน

ยิ่งกว่านั้นในตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน การเสียรูปของวงแหวนจะกว้างกว่าวงแหวนแข็งด้วยความแข็งเกร็งของการดัดเต็มที่ ในสภาพต่างๆที่ไม่ดีของดินค่า η ไม่ส่งผลต่อขนาดขององค์ประกอบแรง แต่ในคุณลักษณะที่ดีกว่าของสภาพต่างๆของดินตรงที่แรงปฏิกริยาของดินได้มาจากวงแหวนของการเสียรูปซึ่งสามารถถูกคาดว่าจะมี η ที่ส่งผลต่อขนาดขององค์ประกอบแรงอย่างมาก ค่า η ขึ้นอยู่กับสภาพดินซึ่งเหมือนกับรูปแบบของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) คุณสมบัติโครงสร้างของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) วิธีการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน และคุณสมบัติโครงสร้างของวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งค่าถูกกำหนดโดยประสบการณ์ในการพิจารณาของผลลัพธ์การทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อ และการบันทึกข้อมูลโครงการที่ผ่านมาในอดีต การพิจารณาอย่างรอบคอบจะให้กำหนดค่าของ η เพราะถ้า η ถูกประมาณค่าของมันต่ำเกินไปจะส่งผลต่อปฏิกิริยาของดินที่มีค่ามากเกินไป และผลที่สุดขององค์ประกอบแรงก็จะมีค่าที่ต่ำไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกกรณีหนึ่ง รอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะเป็นจุดหมุน (Hinge) ส่วนของโมเมนต์ดัดจะไม่ถูกโยกย้ายไปที่รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) แต่ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) ที่ติดต่อกันจะต้องมีการตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนโดยการต้านทานแรงเฉือนที่รอยต่อของวงแหวนอุโมงค์

อัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์ดัด(ξ) เป็นอัตราส่วนของ $\frac{M_2}{M}$ ในรูป 3.26. โดย M_2 เป็นโมเมนต์ดัดซึ่งถูกโยกย้ายจากวงรอบที่อยู่ติดกัน และM เป็นโมเมนต์ดัดถูกคำนวณมาจากวงแหวนสม่ำเสมอของ ηEI ในความแข็งเกร็ง ξ ถูกกำหนดโดยประสบการณ์และผลลัพธ์ของการทดสอบพฤติกรรมเช่นเดียวกับ η



รูปที่ 3.26. แสดงการถ่ายโมเมนต์ดัดสู่วงแหวนที่อยู่ติดกัน

ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผลกระทบของความแข็งเกร็งการดัด(η) และอัตราส่วนการโยกย้ายของโมเมนต์ดัด(ξ) ถูกทำให้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน มันถูกคาดการณ์ว่าถ้า η ได้ใกล้เคียง 1 ค่า ξ ได้ใกล้เคียง 0 และถ้าη ได้น้อยกว่า1 ค่าξ ได้ใกล้เคียง 1 อีกนัยหนึ่งก็คือว่าความแข็งเกร็งของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เหมือนราวกับของหน้าตัดหลัก (η=1) ไม่มีโมเมนต์ดัดถูกโยกย้ายไปยังวงแหวนที่ติดกัน และถ้ารอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เป็นจุดหมุนโมเมนต์ดัดทั้งหมดถูกโยกย้ายไปยังวงแหวนที่อยู่ติดกัน แต่มันจะถูกทำให้รู้ว่าถ้ารอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เป็นจุดหมุน (Hinge) เมื่อวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ถูกล้อมรอบด้วยดินค่าξ จะไม่เป็น 0 ผลของการบวกค่า η และ ξ ดูเหมือนว่าจะมีค่าเป็น 1 เสมอ

แรงอัดตามแนวแกนที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดในดิน เหล่านี้ได้มาจากการทดสอบพฤติกรรมของดิน มันถูกพิสูจน์ว่า η ของอุโมงค์มีขนาดใหญ่กว่าวงแหวนของการทดสอบ และค่า ξ ของอุโมงค์มีขนาดเล็กกว่าวงแหวนของการทดสอบ การออกแบบน้ำหนักมีความไม่แน่ชัดในการผสมผสานของ η = 1 และ ξ = 0 ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบ ในรายละเอียดอื่นๆที่ค่าη = 1 และ ξ = 0 ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้กับชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทแผ่นราบ (Flat Type Segment) ค่า η = 0.8 และ ξ = 0.3 ถูกแสดงสำหรับอ้างอิงในรายละเอียดของค่าที่นำมาใช้จากการทดสอบพฤติกรรมสำหรับวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์(Segment ring) ด้วยการเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวนว่าค่าη = 0.8-0.6 และ ξ = 0.3-0.5 สมการของหน้าตัดแรงสำหรับวิธีการคำนวณปกติ และวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุงถูกแสดงในบทที่ 4 ที่ผ่านมาเร็วๆนี้ค่าของη และ ξ ที่ใช้ในวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุงถูกตรวจสอบด้วยการคำนวณตัวเลขโดย Beam-Spring Model ซึ่งจะอธิบายในวิธีที่4

3. วิธีการคำนวณวงรอบด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุน

วิธีนี้ให้ประโยชน์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆของดินที่ดีในต่างประเทศ รอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) จะเป็นจุดหมุน

วงแหวนด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุนเป็นโครงสร้างที่ไม่มั่นคงโดยตัวของมันเอง แต่มันจะมั่นคงก็ต่อเมื่อถูกรองรับด้วยดิน เพราะฉะนั้นมันสำคัญที่จะหาค่าการกระจายน้ำหนักกระทำบนวงแหวนและแรงปฏิกิริยาของดิน มันจะถูกพิจารณาอย่างดีในการกำหนดหรือไม่มันก็เหมาะสมสำหรับสภาพของดินซึ่งเท่ากับแรงปฏิกิริยาของดินในพื้นที่กว้างที่คาดว่าจะมี การกระจายน้ำหนักร่วมกันถูกใช้สำหรับน้ำหนักกระทำภายนอกและสมมติฐานของ Winkler ถูกประยุกต์สำหรับปฏิกิริยาของดินต่อการเสียรูปของวงแหวนอุโมงค์

วิธีการคำนวณอื่นๆสำหรับวงแหวนรอยต่อที่เป็นจุดหมุนถูกทำการหาวิธีแก้ปัญหาสำหรับรูปร่างนี้ ซึ่งใน 1 รอยต่อถูกสมมติให้ปลดจุดหมุน การเสียรูปถูกคำนวณและตรวจสอบสำหรับความปลอดภัย ไม่นานมานี้มันสามารถถูกคำนวณเกี่ยวกับตัวเลขโดยการใช้สปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) สำหรับแต่ละจุดหมุน และการแทนที่ค่า 0 สำหรับค่าของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring)

โมเมนต์ดัดที่ถูกคำนวณด้วยวิธีนี้พิจารณาน้อยและมากโดยออกแบบให้เกิดประโยชน์สูงสุดแล้วดำเนินการได้ อีกกรณีหนึ่งเงื่อนไขของดินโดยรอบมีอิทธิพลในการตัดสินใจสำหรับความปลอดภัยของอุโมงค์ มีการศึกษาที่พอเพียงจะนำไปดำเนินการสำหรับสิ่งรบกวนของดินโดยรอบต่อเนื่องด้วยโครงสร้างบริเวณใกล้เคียงหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จหรือการกันซึมน้ำของอุโมงค์

ในต่างประเทศ สภาพของดินที่มีคุณลักษณะที่ดี การเชื่อมรอยต่อด้วยสลักเกลียว (Bolt) ถูกใช้ติดตั้งวงแหวน และการเคลื่อนย้ายวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ที่เป็นโครงสร้างหลายจุดหมุน หลังจากน้ำหนักกระทำก็จะมีความมั่นคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วิธีการคำนวณBeam-spring model

วิธีนี้หาค่าการลดลงของความแข็งเกร็งการดัดและผลของรอยต่อต่อการตระเตรียมความเลื่อมของวงแหวน โดยใช้รูปร่างชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) พิจารณาเป็นคานโค้งหรือคานต่อเนื่องและรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment) เชื่อมด้วยสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และรอยต่อวงแหวนเชื่อมด้วย สปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring)

ถ้าค่าของสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) ถูกแทนที่เท่ากับ 0 และค่าของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) เท่ากับ 0 ในรูปร่างนี้ ซึ่งมันจะกลายเป็นโครงสร้างที่มีหลายจุดหมุน ดังนั้นถ้ามีการแทนแบบไม่สิ้นสุดมันจะเป็นเหมือนวงแหวนแข็งด้วยความแข็งเกร็งของการดัดเต็มที่ ฉะนั้นวิธีนี้เป็นหนึ่งของผลกระทบของวิธีทั้งหลายในการแสดงวิธีการต้านทานวงแหวนชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ซึ่งมันจะประกอบด้วยวิธีการคำนวณปกติและวิธีการคำนวณวงรอบด้วยรอยต่อที่เป็นจุดหมุน นอกจากการหาค่าผลกระทบของวงแหวนที่ต่อกันในการตระเตรียมรับความเลื่อมของวงแหวน

การกระจายน้ำหนักร่วมกันใช้มากสำหรับวิธีนี้ ในบางกรณีแรงปฏิกิริยาของดินกระทำเหมือนกับความยืดหยุ่น (Spring) ของดินซึ่งมันถูกประยุกต์สำหรับน้ำหนักที่ไม่สมมาตร

ผลของตำแหน่งรอยต่อและการผสมผสาน และหน่วยแรงเฉือนบนวงแหวนของรอยต่อถูกหาค่าในวิธีนี้ ค่าคงที่ของสปริงเชื่อมวงแหวน (Rotation Spring) และสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) เป็นปกติที่จะถูกกำหนดจากการทดสอบพฤติกรรม สำหรับสมมติฐานของวิธีการคำนวณของค่าคงที่เหล่านี้ถูกนำมาเสนอด้วย

โมเมนต์ดัดบนหน้าตัดหลักจะมีค่าต่ำ ถ้าค่าคงที่ของสปริงเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ (Shear Spring) น้อย มันเป็นการสมมติที่ไม่สิ้นสุดสำหรับความปลอดภัย

วิธีนี้ใช้สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ของอุโมงค์ถนน และอุโมงค์รถไฟ นอกจากนี้มันใช้สำหรับอุโมงค์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกับเงื่อนไขการออกแบบที่ยุ่งยากหรือสำหรับการหาค่าผลลัพธ์การคำนวณของวิธีการคำนวณปกติและวิธีการคำนวณปกติแบบปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

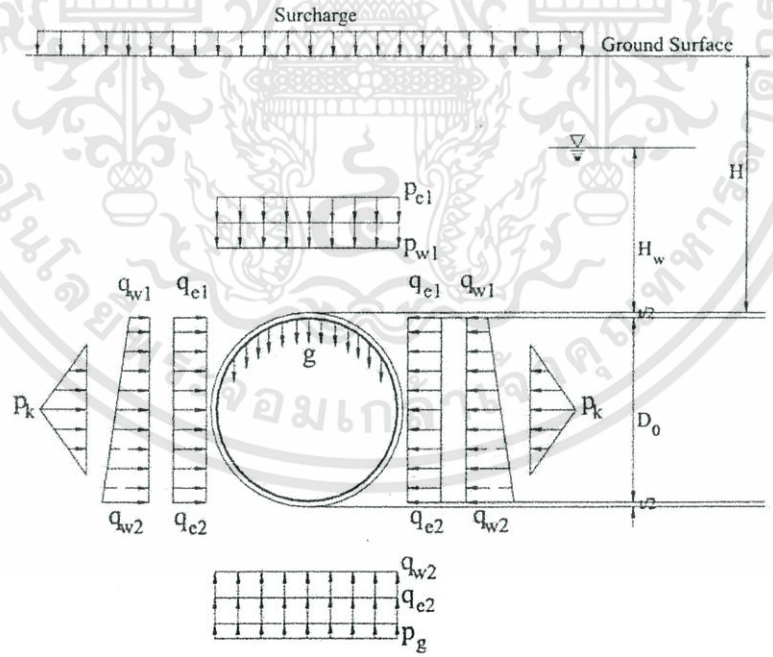
บทที่ 4
ทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์

4.1. กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการหาแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์ที่ได้จากแต่ละทฤษฎีแล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์ต่อไป โดยมีทฤษฎีที่จะนำมาเรียบเทียบ ได้แก่ ทฤษฎีของ Terzaghi Einstein Muir Wood และทฤษฎี Beam-Spring Model

4.2. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Terzaghi

จากรูปที่ 4.1. แสดงหน่วยแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ซึ่งจะทำการคำนวณแยกเป็นส่วนๆ แล้วรวมผลการคำนวณแรงกระทำภายนอกทั้งหมดแบ่งได้ ดังนี้



รูปที่ 4.1. แสดงลักษณะแรงกระทำภายนอกของ ทฤษฎี Terzaghi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$M_1 = \frac{1}{4}\left(1 - 2\sin^2\theta\right)P \cdot R_c^2 \qquad (4.1.)$$

$$N_1 = \sin^2\theta \cdot P \cdot R_c \qquad (4.2.)$$

$$Q_1 = -P \cdot R_c \cdot \sin\theta\cos\theta \qquad (4.3.)$$

เมื่อ M_1 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่ง

N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่ง

Q_1 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่ง

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

$$M_2 = \frac{1}{4}\left(1 - 2\cos^2\theta\right)Q \cdot R_c^2 \qquad (4.4.)$$

$$N_2 = \cos^2\theta \cdot Q \cdot R_c \qquad (4.5.)$$

$$Q_2 = Q \cdot R_c \cdot \sin\theta\cos\theta \qquad (4.6.)$$

เมื่อ M_2 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_2 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_2 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

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

$$M_3 = \frac{1}{48}\left(6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta\right)\left(Q' - Q\right)R_c^2 \qquad (4.7.)$$

$$N_3 = \frac{1}{16}\left(\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta\right)\left(Q' - Q\right)R_c \qquad (4.8.)$$

$$Q_3 = \frac{1}{16}\left(\sin\theta + 8\sin\theta\cos\theta - 4\sin\theta\cos^2\theta\right)\left(Q' - Q\right) \cdot R_c \qquad (4.9.)$$

เมื่อ M_3 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

N_3 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

Q_3 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k\delta)$

$0 \le \theta < \frac{\pi}{4}$

$$M_4 = (0.2346 - 0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c^2 \quad (4.10.)$$

$$N_4 = (0.3536\cos\theta)(k\delta)R_c \quad (4.11.)$$

$$Q_4 = 0.3536\sin\theta \cdot (k\delta)R_c \quad (4.12.)$$

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

$$M_4 = (-0.3487 + 0.5\sin^2\theta + 0.2357\cos^3\theta)(k\delta)R_c^2 \quad (4.13.)$$

$$N_4 = (-0.7071\cos\theta + \cos^2\theta + 0.7071\sin^2\theta\cos\theta)(k\delta)R_c \quad (4.14.)$$

$$Q_4 = (\sin\theta\cos\theta - 0.7071\cos^2\theta\sin\theta)(k\delta)R_c \quad (4.15.)$$

เมื่อ M_4 = โมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

N_4 = แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

Q_4 = แรงเฉือนที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ $(g = \gamma_c t)$

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

$$M_5 = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta\right)g \cdot R_c^2 \quad (4.16.)$$

$$N_5 = \left(\theta\sin\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right)g \cdot R_c \quad (4.17.)$$

$$Q_5 = -\left(\theta\cos\theta + \frac{1}{6}\sin\theta\right)g \cdot R_c \quad (4.18.)$$

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

$$M_5 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta)\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta - \frac{1}{2}\pi\sin^2\theta\right)g \cdot R_c^2 \quad (4.19.)$$

$$N_5 = \left(-\pi\sin\theta + \theta\sin\theta + \pi\sin^2\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right)g \cdot R_c \quad (4.20.)$$

$$Q_5 = \left\{(\pi - \theta)\cos\theta - \pi\sin\theta\cos\theta - \frac{1}{6}\sin\theta\right\}g \cdot R_c \quad (4.21.)$$

เมื่อ M_5 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

N_5 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

Q_5 = แรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงกระทำทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมของแรงดังนี้

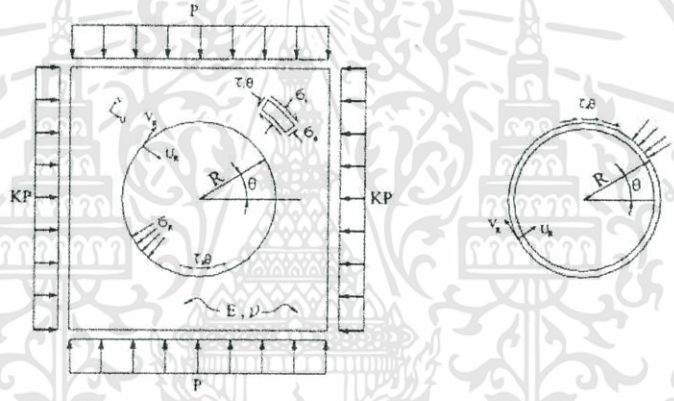
แรงในแนวแกนทั้งหมด(Total Axial Forces) = $N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$ (4.22.)

แรงโมเมนต์ดัดทั้งหมด(Total Moment) = $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5$ (4.23.)

แรงเฉือนทั้งหมด(Total Shear Forces) = $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$ (4.24.)

4.3. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Einstein

วิธีนี้จะใช้หลักการของทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์ จะสามารถหาค่า การเสียรูป และแรงที่เกิดขึ้นภายในผนังอุโมงค์โดยมีสมมติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัด เป็นอีลาสติก เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังรูปที่ 4.2. ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ จะได้สูตรนำมาใช้เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและโมเมนต์ที่กระทำต่อผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.2. แสดงการจำลองโมเดล เป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Einstein,1979)

การหาแรงภายกระทำใน

$$\frac{T}{PR} = \frac{1}{2}(1+K)(1-a_0^*) + \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \qquad (4.25.)$$

$$\frac{M}{PR^2} = \frac{1}{2}(1-K)(1-2a_2^*)\cos 2\theta \qquad (4.26.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4. ทฤษฎีแรงกระทำภายในของ Muir Wood

วิธีนี้มีพื้นฐานอยู่บนข้อสมมติว่า Circular Lining เกิด Deformation เป็นรูปวงรีใน Elastic Ground และไม่คิด Shear Stress ระหว่าง Lining กับดิน และสมมติให้อุโมงค์ถูกล้อมรอบด้วย Elastic Ground แบบสมบูรณ์ ในวิธีนี้ Bending Moment ใน Lining จะเป็นดังสมการข้างล่างนี้

$$P_o = P - Q' \tag{4.27.}$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times \left(P + Q'\right) \tag{4.28.}$$

$$Q_2 = \frac{E \times R_O{}^3}{E_C (1+\nu) \cdot 12 \cdot I} \tag{4.29.}$$

$$S_T = \frac{P_o \times (1 + 2Q_2)}{2 \times \left(1 + \frac{Q_2 \cdot (3 - 2\nu)}{3 - 4\nu}\right)} \tag{4.30.}$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4\nu) \times \frac{P_o}{2} - (2 \cdot Q_2 + (4 - 6\nu)) \times S_T \tag{4.31.}$$

$$S_{N2} = 4 \cdot Q_2 + 5 - 6\nu \tag{4.32.}$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} \tag{4.33.}$$

$$Q = \frac{E_C \times R_O}{E(1+\nu) \cdot (R_O - R_I)} \tag{4.34.}$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1+Q} \tag{4.35.}$$

$$N_B = \Delta P \times R_O \tag{4.36.}$$

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

$$M_1 = \frac{R_O{}^2}{6}(2S_N + S_T)\cos 2\theta \tag{4.37.}$$

$$N_1 = -\frac{R_O}{3}(S_N + 2S_T)\cos 2\theta + N_B \tag{4.38.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M_1 = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงภายนอก

N_1 = แรงภายในแนวแกนที่เกิดจากแรงภายนอก

แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ $(g = \gamma_c t)$

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

$$M_2 = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta\right) g \cdot R_c^2 \qquad (4.39.)$$

$$N_2 = \left(\theta\sin\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right) g \cdot R_c \qquad (4.40.)$$

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

$$M_2 = \left(-\frac{\pi}{8} + (\pi - \theta)\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta - \frac{1}{2}\pi\sin^2\theta\right) g \cdot R_c^2 \qquad (4.41.)$$

$$N_2 = \left(-\pi\sin\theta + \theta\sin\theta + \pi\sin^2\theta - \frac{1}{6}\cos\theta\right) g \cdot R_c \qquad (4.42.)$$

เมื่อ M_5 = โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

N_5 = แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์

แรงโมเมนต์ดัดทั้งหมด(Total Moment) = $M_1 + M_2$ (4.43.)

แรงในแนวแกนทั้งหมด(Total Axial Forces) = $N_1 + N_2$ (4.44.)

ซึ่ง K_O = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

R_O = รัศมีถึงผิวด้านนอกของ Lining

R_C = รัศมีถึงแนวแกนกลางของ Lining

E_C = Young's Modulus of Lining

E = Young's Modulus ของดินหรือหิน

I = Moment of Inertia ของ Lining ต่อหน่วยความยาวของอุโมงค์

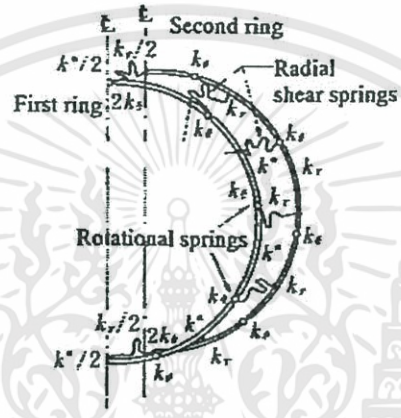
ν = Poisson's ratio สำหรับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5. ทฤษฎีหาแรงกระทำภายในโดยวิธี Beam-Spring Model

4.5.1. แนวคิดของรูปร่างโครงสร้าง

รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบจะถูกยึดด้วย Bolt เหตุก็เพื่อลดความตายตัวของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบ ปรับลดในรอยต่อที่ตายตัวเนื่องจากรูปร่างโดยใช้ Rotation Spring สำหรับยึดติดวงแหวนข้างเคียงในแนวรอยต่อตามเส้นรอบวง และใช้ Shear Spring ตามรอยต่อแนวยาวของอุโมงค์



รูปที่ 4.3. แสดงลักษณะรูปร่างชิ้นส่วนประกอบของวิธี Beam-spring model

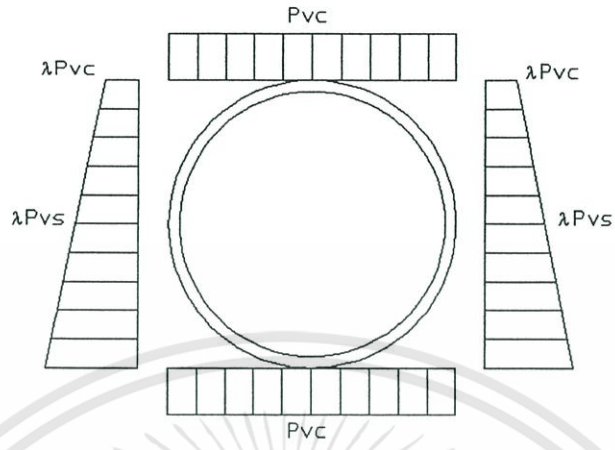
วิธี Beam-spring model ซึ่งถูกใช้งานในลักษณะรูปร่างซึ่งประกอบด้วย ชิ้นส่วนประกอบโดยเฉพาะที่เหมือนคาน รอยต่อโดยรอบใช้Rotation spring และรอยต่อตามแนวความยาว (ring joint)ใช้Shear spring สำหรับความมั่นคงของ Rotation spring และ Shear spring จะถูกกำหนดโดยการคำนวณมาจากการทดลอง

4.5.2. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินและแรงดันน้ำ

ดินทราย	ดินและน้ำ พิจารณาแยกกัน
ดินเหนียว	ดินและน้ำ พิจารณารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3. แนวคิดที่ใช้สำหรับแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้าง



รูปที่ 4.4. แสดงแรงดันดินแนวดิ่งและแรงดันดินทางข้างของวิธี Beam-Spring Model

แรงดันดินแนวดิ่งถูกสมมติให้เป็นน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอกระทำที่ตำแหน่ง Crown และ Invert วงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ โดยที่ Total Overburden Pressure หรือ Loosening Earth Pressure ทั้งคู่จะใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันดินแนวดิ่ง ตามกฎค่าตัวแปรกำลังใช้สำหรับคำนวณ Loosening Earth Pressure ถูกกำหนดจากการทดสอบดิน ดังตาราง 4.1.

สำหรับแรงดันดินทางข้าง แรงกระทำแผ่ที่ไม่สม่ำเสมอถูกนำไปประยุกต์ ในการกระจายนี้กำหนดค่าโดยการเพิ่มจำนวนของแรงดันแนวดิ่งสำหรับการคำนวณออกแบบที่กระทำที่ Top ของอุโมงค์โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง (λP_{vc}) และกำหนดอีกค่าโดยการเพิ่มจำนวนของแรงดันแนวดิ่งสำหรับการคำนวณออกแบบที่กระทำที่ Spring Line ของอุโมงค์โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง(λP_{vs})ถูกกระจายขยายพื้นที่ไปยังตำแหน่งต่ำสุดของอุโมงค์

ฉะนั้นวิธีการคำนวณนี้ ค่าแรงดันดินทางข้างจะน้อยกว่าที่ตำแหน่งต่ำสุดของการคิดตามวิธีที่ถือตามตำราทั่วๆไป ซึ่งก็สรุปได้ว่าแรงดันดินทางข้างจะมีการกระจายค่าน้อยตามความลึก

ตารางที่ 4.1. แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-spring model

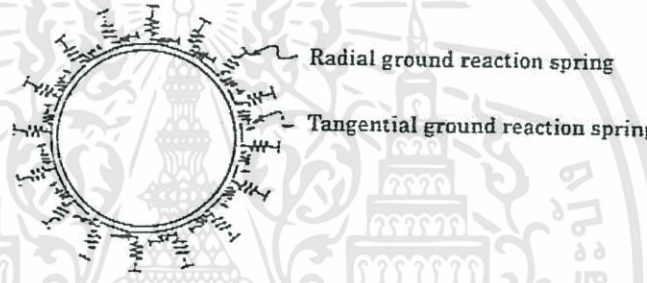
ชนิดของดิน	k_o
ดินทรายแน่นมาก	0.45
ดินทรายแน่น	0.45 - 0.50
ดินทรายหลวม	0.50 - 0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.(ต่อ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวิธี Beam-spring model

ชนิดของดิน	k_o
ดินเหนียวแข็งมาก	-
ดินเหนียวแข็ง	0.50 – 0.60
ดินเหนียวปานกลาง	0.50 – 0.60
ดินเหนียวอ่อน	0.60 – 0.70
ดินเหนียวอ่อนมาก	0.70 – 0.80

4.5.3.1. ปฏิกิริยาของดิน



รูปที่ 4.5. แสดงระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และตามแนวยาว

แรงปฏิกิริยาของดินจะถูกสมมติให้รองรับโดยระบบ Spring กระทำในทิศทางตามแนวรัศมี และทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสของอุโมงค์ และพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในสัดส่วนของการแทนที่ในชิ้นส่วนประกอบ หลักเกณฑ์การสมมตินี้ แรงปฏิกิริยาของดินถูกกำหนดโดยการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงปฏิกิริยาของดินโดยการแทนที่ ระบบ Spring เฉพาะทิศทางตามแนวรัศมีเท่านั้นจะถูกพิจารณาสำหับการออกแบบใช้งาน

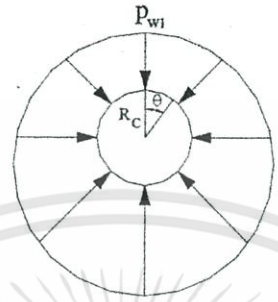
ค่าสัมประสิทธิ์ (k_r) ของแรงปฏิกิริยาของดินตามแนวรัศมีในวิธี Beam-Spring Model จะถูกกำหนดโดยใช้สมการ

$$k_r = \frac{3E_O}{(1+\nu)(5-6\nu)R_C} \qquad (4.45.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2. แรงดันน้ำ

พิจารณาเปลี่ยนตามความลึก แรงดันน้ำใต้ดินมีท่าทีที่กระทำต่อศูนย์กลางของอุโมงค์จากตำแหน่งใดๆที่ถูกสมมติ ดูรูป 4.5.



รูปที่ 4.6. แสดงแรงดันน้ำใต้ดินของวิธี Beam-Spring Model

4.5.3.2. น้ำหนักของตัวอุโมงค์

น้ำหนักของตัวอุโมงค์จะถูกสมมติให้เป็นแรงที่มากระทำที่กระจายสม่ำเสมอ ในทิศทางตามแนวดิ่ง ตามแกนสะเทินของอุโมงค์

4.5.4. แนวคิดของเงื่อนไขที่ใช้ออกแบบในวิธี Beam-Spring Model

ก่อนจะมีการนำเสนอวิธี Beam-Spring Model ได้มีการตรวจวัดในสนาม การทดลอง การวิเคราะห์ เหล่านี้ได้ถูกนำมาปฏิบัติกับวิธีการทดสอบแบบลองผิดลองถูก ทำให้ได้แนวคิดที่เกี่ยวกับแรงดันดินแนวดิ่ง แรงดันน้ำ และการควบคุมแรงดันดินและแรงดันน้ำ ซึ่งมันถูกค้นพบว่าสัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ)เป็นรายละเอียดที่เป็นผลกระทบสำคัญต่อความไหวของจำนวนค่าของแรงภายในหน้าตัด

สัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ) เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในความไหวของค่า $+M_{max}$ หลังจากที่มีการคำนวณซ้ำๆหลายๆรอบ

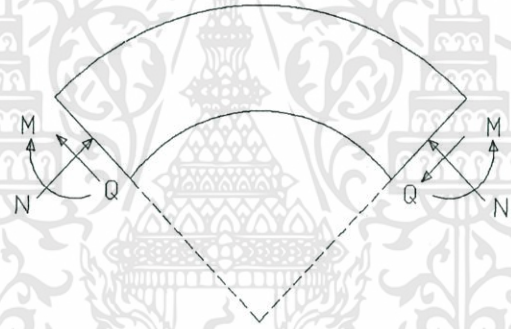
ในชั้นของดินเหนียวอ่อน การคำนวณ $+M_{max}$ เป็นค่าต่ำสุดสำหรับแรงดันดินแนวดิ่ง (Total Overburden Earth Pressure) ที่ความลึกที่แน่ชัดเมื่อสัมประสิทธิ์แรงดันทางข้าง(λ)เป็นค่าคงที่ การตรวจวัดในสนามแสดงผลลัพธ์ให้เห็นว่าแรงดันดินแนวดิ่งที่กระทำมีค่า 70-80 % ของ Total Overburden Pressure ซึ่งสิ่งนี้แสดงว่าต้องมีการศึกษากรณีนี้สู่การลดแรงดันดินแนวดิ่งเพื่อทำให้แน่ใจว่าเป็นการออกแบบที่คงระเบียบแบบแผนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ทฤษฎีการออกแบบเหล็กเสริม

5.1. กล่าวนำ

เนื่องด้วยผนังอุโมงค์ใต้ดินจะต้องรับแรงที่มากระทำภายในผนังอุโมงค์ใต้ดิน แรงต่างๆที่มากระทำอันได้แก่ โมเมนต์ดัด (Bending Moment) แรงตามแนวแกน (Axial Force) และแรงเฉือน (Shear Force) ดังรูป 5.1. ซึ่งแรงทั้งสามเหล่านี้ที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้ต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมในผนังอุโมงค์ใต้ดิน เพื่อที่จะทำให้ผนังอุโมงค์ใต้ดินสามารถรับภาระต่างๆได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยในบทนี้จะกล่าวทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตามวิธีกำลัง



รูปที่ 5.1 แสดงแรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

5.2. พื้นฐานการออกแบบ

วิธีการออกแบบเหล็กเสริมที่ผู้เขียนได้นำเสนอมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการออกแบบเสาสั้นและวิธีการออกแบบคาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1. วิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง

กำลังขององค์ภายใต้แรงดัด M_n และแรงตามแนวแกน P_n จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสองข้อคือความสมดุลของแรงภายในและการสอดคล้องของความเครียด รูปที่ 5.2. แสดงภาวะทั่วไปของหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม ภายใต้ผลรวมของแรงดัดและแรงตามแนวแกน จะหาแรงดึงหรือแรงอัดในเหล็กเสริมได้จากความสัมพันธ์กับความเครียด ณ ตำแหน่งของเหล็กเสริมนั้น

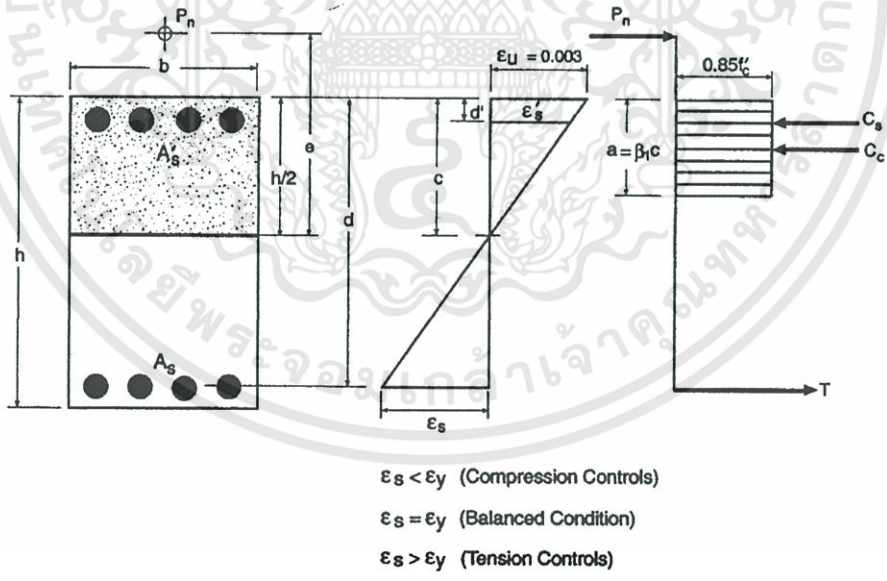
$$T = A_s f_s = A_s\left(E_s \varepsilon_s\right) \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_s < \varepsilon_y \qquad (5.1a.)$$

หรือ $$T = A_s f_y \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \qquad (5.1b.)$$

$$C_s = A_s' f_s' = A_s'\left(E_s \varepsilon_s'\right) \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_s' < \varepsilon_y \qquad (5.2a.)$$

หรือ $$C_s = A_s' f_y \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon_s' \geq \varepsilon_y \qquad (5.2b.)$$

$$C_c = 0.85 f_c' ba \qquad (5.3.)$$



รูปที่ 5.2. การกระจายความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัด
ภายใต้ผลรวมของแรงดัดและแรงตามแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f_s' = \frac{6120(c-d')}{c} \le f_y$ (5.4.)

$$f_s = \frac{6120(c-d')}{c} \le f_y \quad (5.5.)$$

และจะหากำลังระบุในการรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ (P_n และ M_n) ได้จากสภาวะสมดุลของหน้าตัด

จากความสมดุลของแรงจะได้

$$P_n = C_c + C_s + T \quad (5.6.)$$

จากความสมดุลของโมเมนต์รอบศูนย์ถ่วงของหน้าตัด

$$M_n = P_n e = C_c(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + C_s(\frac{h}{2} - d') + T(d - \frac{h}{2}) \quad (5.7.)$$

ถ้ารู้สภาวะของความเครียดก็จะหา P_n และ M_n ได้ทันที ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของสภาวะความเครียดสมดุล เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก ($\varepsilon_s = \varepsilon_y$) พร้อมกับความเครียดในผิวคอนกรีตภายใต้แรงอัดถึงจุดอัดแตก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \varepsilon_y} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{2040000}} = \frac{6120}{6120 + f_y} \quad (5.8.)$$

ดังนั้น $a_b = \frac{6120}{6120 + f_y}\beta_1 d$ (5.9.)

และ $\frac{\varepsilon_s'}{\varepsilon_u} = \frac{c_b - d'}{c_b}$ (5.10.)

ดังนั้น $\varepsilon_s' = 0.003(1 - \frac{d'}{c_b}) = 0.003(1 - \frac{d'}{d}\frac{6120 + f_y}{6120})$ (5.11.)

และ $f_s' = E\varepsilon_s'$ แต่ต้องไม่เกิน f_y (5.12.)

จากความสมดุลของแรง

$$P_{nb} = 0.85 f_c' a_b b + A_s' f_s' + A_s f_y \quad (5.13a.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$P_{nb} = 0.85\beta_1 f_c' bd \frac{6120}{6120 + f_y} \qquad (5.13b.)$$

จากความสมดุลของโมเมนต์

$$M_n = P_{nb} e_b = 0.85 f_c' b a_b (\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + A_s' f_y (\frac{h}{2} - d') + A_s f_y (d - \frac{h}{2}) \qquad (5.14.)$$

กำลังรับผลรวมของแรงตามแนวแกนและแรงดัด ที่สภาวะความเครียดสมดุล เป็นเพียงแค่กรณีหนึ่งในหลายกรณีที่อาจจะเกิดขึ้นในหน้าตัดซึ่งสามารถแบ่งแยกออกไปได้อีก 2 กรณี คือ กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด และกรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง ดังจะนำเสนอดังต่อไปนี้

5.2.1.1. กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_n) มากกว่าแรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุล (P_{nb}) หรือมีระยะเยื้องศูนย์ (e) น้อยกว่าระยะเยื้องศูนย์ที่สภาวะสมดุล (e_b) องค์อาคารจะวิบัติโดยการอัดแตกของคอนกรีตในระหว่างที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงจะน้อยกว่าจุดคราก หรืออาจอยู่ภายใต้แรงอัดด้วย การออกแบบและวิเคราะห์ในกรณีนี้ จะใช้การลองผิดลองถูกโดยการสมมติค่าของความลึกของแกนสะเทิน(c) ร่วมกับความสอดคล้องของความเครียดและสมการสมดุล หรืออาจจะใช้การประมาณโดยวิธีของ Whitney

วิธีของ Whitney จะให้ค่าในการออกแบบที่ต่ำกว่าค่าจริงที่ได้จากการลองผิดลองถูก ยกเว้นแต่เมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำมีค่าเข้าใกล้แรงตามแนวแกนที่สภาวะสมดุลวิธีของ Whitney จะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีของWhitney ถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัยสมมติฐานตามที่แสดงในรูปที่ 5.3. ดังต่อไปนี้

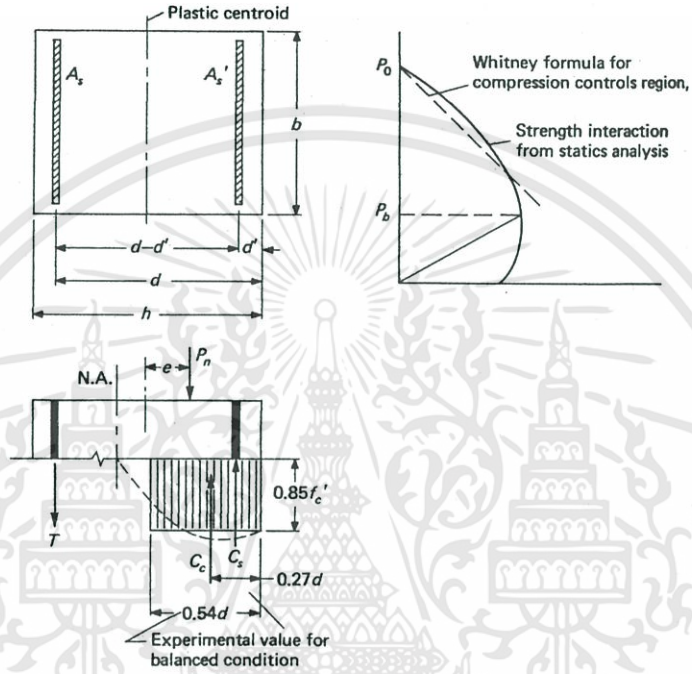
- มีการวางเหล็กเสริมแถวเดียวแบบสมมาตรรอบแกนรับแรงดัด
- เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก
- ไม่คิดพื้นที่ของคอนกรีตซึ่งถูกแทนที่โดยพื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- ความลึกของรูปกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้าเทียบเท่าของหน่วยแรงในคอนกรีต a = 0.54d ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่สภาวะสมดุลขององค์อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- ความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและแรงดัดภายใต้อิทธิพลของแรงอัดถือว่าเป็นเชิงเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 ถ้ารวมโมเมนต์รอบแนวเหล็กเสริมรับแรงดึงจะได้

$$P_n(e+\frac{d-d'}{2}) = C_c(d-\frac{a}{2}) + C_s(d-d') \qquad (5.15.)$$

โดยที่ $C_c = 0.85f_c'ba = 0.85f_c'b(0.54d) = 0.459bdf_c'$ (5.16a.)



รูปที่ 5.3. สมมติฐานของ Whitney สภาวะภายใต้อิทธิพลของแรงอัด

$$C_c(d-\frac{a}{2}) = 0.459f_c'bd(d-\frac{0.54d}{2}) = \frac{1}{3}f_c'bd^2 \qquad (5.16b.)$$

$$C_s = A_s'f_y \qquad (5.16c.)$$

แทนค่า สมการ (5.16b.) และ (5.16c.) ลงใน (5.15.) จะได้

$$P_n = \frac{\frac{1}{3}f_c'bd^2}{e+\frac{1}{2}(d-d')} + \frac{A_s'f_y(d-d')}{e+\frac{1}{2}(d-d')} = \frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2}+\frac{3(d-d')h}{2d^2}} + \frac{A_s'f_y}{\frac{e}{d-d'}+\frac{1}{2}} \qquad (5.16d.)$$

เมื่อ $e=0: P_n = P_o = 0.85f_c'bh + f_y(A_s+A_s') = 0.85f_c'bh + 2f_yA_s'$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าข้างบนลงในสมการ (5.16d.) จะได้

$$0.85f_c'bh+2f_yA_s'=\frac{f_c'bh}{0+\frac{3(d-d')h}{2d^2}}+\frac{A_s'f_y}{0+\frac{1}{2}} \qquad (5.16e.)$$

$$\frac{3(d-d')h}{2d^2}=\frac{1}{0.85}=1.18 \qquad (5.16f.)$$

แทนค่าสมการ (1.16c.) ลงใน (1.16d.) จะได้

$$P_n=\frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2}+1.18}+\frac{A_s'f_y}{\frac{e}{d-d'}+0.5} \qquad (5.17.)$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความชะลูด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s'=\left(P_n-\frac{f_c'bh}{\frac{3he}{d^2}+1.18}\right)\left(\frac{\frac{e}{d-d'}+0.5}{f_y}\right) \qquad (5.18.)$$

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

5.2.1.2. กรณีภายใต้อิทธิพลของแรงดึง

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมติให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก้วย และใช้ $A_s' = A_s$ จะได้

$$P_n = 0.85 f_c' ba \qquad , a = \frac{P_n}{0.85 f_c'} \tag{5.19.}$$

$$M_n = P_n e = 0.85 f_c' ba(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + A_s' f_y(\frac{h}{2} - d') + A_s f_y(d - \frac{h}{2})$$

$$= 0.85 f_c' ba(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + A_s f_y(d - d') \tag{5.20.}$$

แทนค่า P_n และ a จากสมการ (5.19.) ลงใน (5.20.)

$$P_n e = P_n(\frac{h}{2} - \frac{P_n}{1.7 f_c' b}) + A_s f_y(d - d') \tag{5.21.}$$

$$\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n(\frac{h}{2} - e) - A_s f_y(d - d') = 0 \tag{5.22.}$$

หรือถ้ารู้ P_n และ M_n จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และถ้าเลือกหน้าตัดขององค์อาคารให้เป็นแบบเสาสั้น (ไม่ต้องคำนึงผลของอัตราความชะลูด) จะหาปริมาณเหล็กเสริมที่ด้านหนึ่งด้านใดของแกนสมมาตรได้

$$A_s = \frac{\frac{P_n^2}{1.7 f_c' b} - P_n(\frac{h}{2} - e)}{f_y(d - d')} \tag{5.23.}$$

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

5.2.1.3. เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบเสาสั้นโดยวิธีกำลัง

- แสดงค่า N_u ,P_u และ V_u
- กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53(1 + 0.0071\frac{N_u}{A_g}) \tag{5.24.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริม

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \qquad (5.25.)$$

- เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม
- ระยะเรียงของเหล็กปลอกคือค่าน้อยที่สุดจาก

$$s = \frac{A_s f_s d}{V_s} \qquad (5.26a.)$$

$$s = \frac{A_s f_y}{3.5 b_w} \qquad (5.26b.)$$

$$s = \frac{d}{2} \qquad (5.26c.)$$

5.2.2. วิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

ในการออกแบบองค์อาคารรับแรงดัด เช่น คานและแผ่นพื้น จะต้องลดค่ากำลังระบุของหน้าตัด (Nominal Strength, M_n) ลงด้วยตัวคูณลดกำลัง ϕ เพื่อที่จะได้มาซึ่งกำลังที่ใช้ในการออกแบบ (Design Strength, ϕM_n) ขององค์อาคารนั้น และกำลังที่ใช้ในการออกแบบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (Required Strength, M_u)

ทุกองค์อาคารภายใต้แรงดัดจะต้องถูกปฏิบัติให้เป็นไปตามข้อกำหนดในด้านกำลัง และนอกเหนือจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อกำหนดในด้านการใช้งาน ซึ่งควบคุมการแตกร้าวขององค์อาคาร โดยจะอยู่ในรูปแบบของการจัดวางเหล็กเสริม และที่สำคัญที่สุดก็คือการแอ่นตัวขององค์อาคาร

5.2.2.1. การออกแบบหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว

การออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวเป็นมีตอนได้ดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าโดยประมาณของอัตราส่วนการเสริมเหล็กรับแรงดึง ρ ซึ่งต้องไม่เกิน $0.75\rho_b$ และไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมให้ ซึ่งอัตราส่วนเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล ρ_b หาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f_c'}{f_y}\left(\frac{6120 f_y}{6120 + f_y}\right) \qquad (5.27.)$$

โดยที่ $\beta_1 = 0.85$; $f_c' \leq 280$ kg/cm^2 (5.28a.)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{(f_c' - 280)}{70} \text{ ; } 280 < f_c' \leq 560 \text{ kg/cm}^2$$

(5.28b.)

$$\beta_1 = 0.65 \text{ ; } f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2 \qquad (5.28c.)$$

2. เมื่อหาค่า ρ ได้แล้ว โดยที่ $\rho_{min} <= \rho <= 0.75\rho_b$

โดยที่ $$R_n = \rho f_y\left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_{c'}}\right) \qquad (5.29.)$$

3. จากขั้นตอนที่ 3 หาค่าใหม่ของ ρ จากสมการที่(5.30.)

โดยที่ $$\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f_c'}}\right) \qquad (5.30.)$$

4. หาปริมาณเหล็กเสริม A_s ที่ต้องการ

$$As = \rho bd \qquad (5.31.)$$

โดยที่ ρ เป็นค่าแก้ไขที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

5.2.1.2. เหล็กรับแรงเฉือนของวิธีการออกแบบคานโดยวิธีกำลัง

- แสดงค่า แรงเฉือนที่กระทำบนหน้าตัดและคูณตัวคูณเพิ่มแล้ว (V_u)
- กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.53 f_c' bd \qquad (5.32.)$$

- แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กเสริมใช้สมการ 5.25.
- เลือกขนาดเหล็กเสริมที่เหมาะสม
- ระยะเรียงของเหล็กปลอกใช้เงื่อนไขตามสมาการ 5.26a. 5.26b. และ 5.26c.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ตัวอย่างการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน

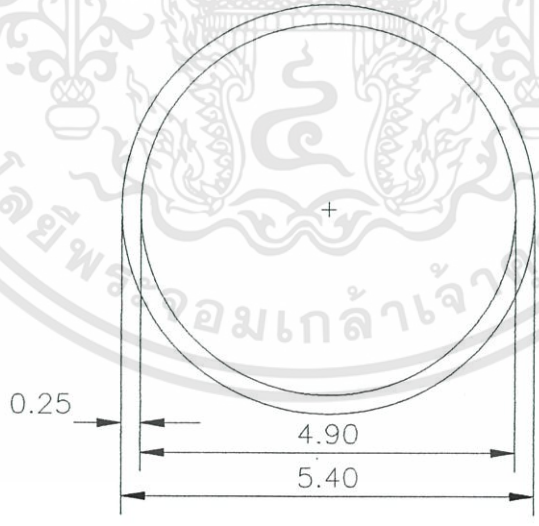
6.1. กล่าวนำ

ในบทนี้จะแสดงรายการคำนวณจากทฤษฎีต่างๆ โดยใช้โครงการอุโมงค์ระบายน้ำของพื้นที่เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร เป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบนอก 5.40 เมตร ความหนาของอุโมงค์ 0.25 เมตร โดยศูนย์กลางของอุโมงค์อยู่ที่ความลึก 23.525 เมตรจากผิวดิน

6.2. การออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

กรณีที่ 1 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นทรายแน่น (Dense Sand)
กรณีที่ 2 อุโมงค์วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay)

6.2.1. ชิ้นส่วนคอนกรีต



รูปที่ 6.1. แสดงขนาดของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบนอกของอุโมงค์, D_o = 5.40 เมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงขอบในของอุโมงค์, D_i = 4.90 เมตร
ความหนาของผนัง, t = 0.25 เมตร
ความกว้างของชิ้นส่วน, b = 1.20 เมตร
จำนวนชิ้นส่วนใน 1 วง = 6 ชิ้น

6.2.2. คุณสมบัติของวัสดุ

กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2

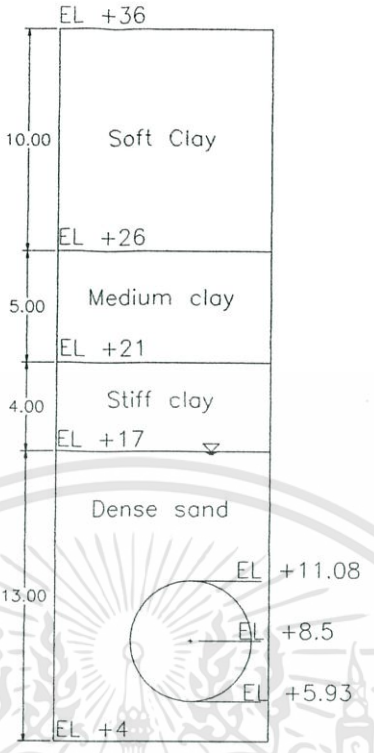
คอนกรีต ; $f_c' = 400$ kg/cm^2
$E_c = 30 \times 10^4$ kg/cm^2
เหล็กเสริม ; SD 40 ; $f_y = 4000$ kg/cm^2
SR 24 ; $f_y = 2400$ kg/cm^2

6.2.3. สภาพชั้นดิน

ตารางที่ 6.1. แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 1

Layer	Level	γ kN/m^3	ϕ' (°)	S_u kN/m^2	E kN/m^2	ν	k_o
Soft clay	0-10	16	15	20	4000	0.3	0.65
Medium clay	10-15	17	20	50	10000	0.3	0.65
Stiff clay	15-19	18	20	100	25000	0.3	0.65
Dense sand	19-28	20	30	-	45000	0.25	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

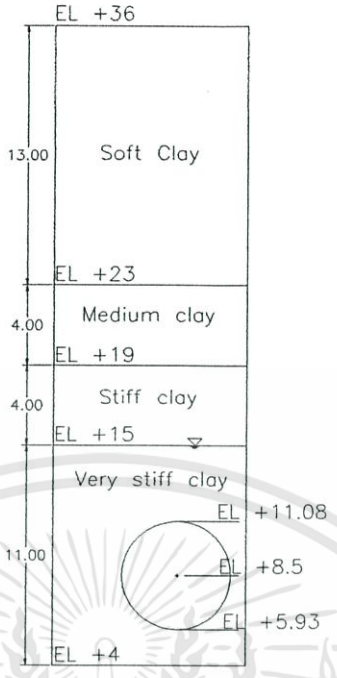


รูปที่ 6.2. แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 1

ตารางที่ 6.2. แสดงสภาพชั้นดินในกรณีที่ 2

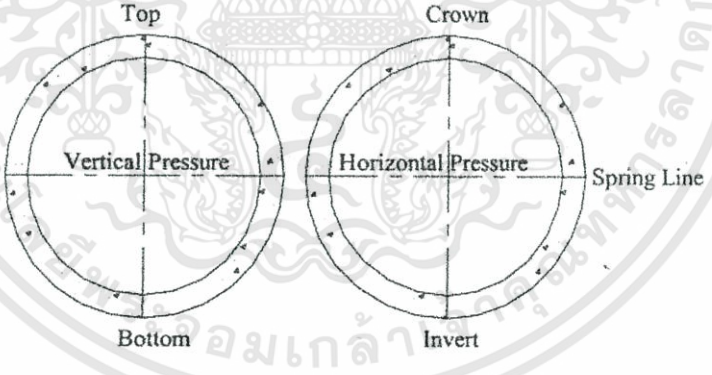
Layer	Level	γ kN/m^3	ϕ' (°)	S_u kN/m^2	E kN/m^2	ν	k_o
Soft clay	0-13	16	15	20	4000	0.3	0.65
Medium clay	13-17	17	20	50	10000	0.3	0.65
Stiff clay	17-21	18	20	100	25000	0.3	0.65
Very stiff clay	21-33	18	25	100	35000	0.3	0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



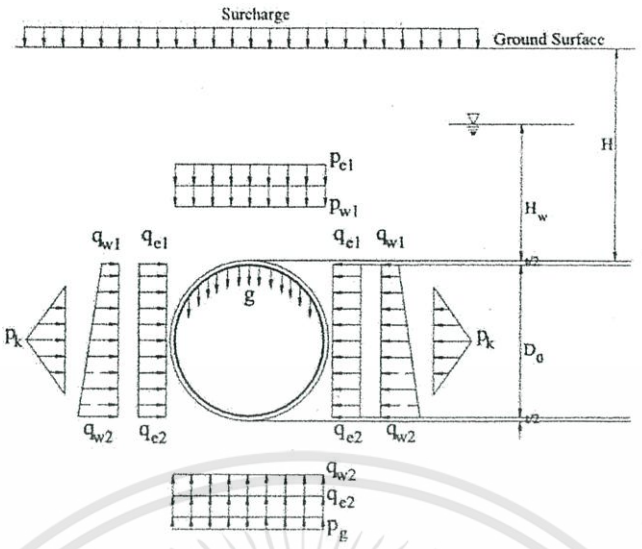
รูปที่ 6.3. แสดงสภาพชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ในกรณีที่ 2

6.2.4. หาแรงกระทำภายนอก



รูปที่ 6.4. แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวนอนที่จุดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5. เงื่อนไขของน้ำหนักที่กระทำจากวิธีสมการอีลาสติก

กรณีที่ 1

แรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Top

-แรงดันดิน

$$p_{e1} = (16\times10)+(17\times5)+(18\times4)+[(20-10)\times5.92] = 376.2 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w1} = 10\times5.92 = 59.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Bottom

-แรงดันดิน

$$p_{e2} = 376.2+[(20-10)\times5.4] = 430.2 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w2} = 59.2+(10\times5.4) = 113.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Crown

-แรงดันดิน

$$q_{e1} = (0.5\times376.2) = 188.10 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w1} = 59.2 \text{ kN/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Invert

-แรงดันดิน

$q_{e2} = (0.5 \times 430.2) = 215.10 \text{ kN/m}^2$

-แรงดันน้ำ

$q_{w2} = 113.2 \text{ kN/m}^2$

แรงต้านทานในแนวนอน ($k \cdot \delta$)

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454 k R_c^4)}$$

โดยที่ ; $P = p_{e1} + p_{w1} = 435.40 \text{ kN/m}^2$

$Q = q_{e1} + q_{w1} = 247.30 \text{ kN/m}^2$

$Q' = q_{e2} + q_{w2} = 328.30 \text{ kN/m}^2$

δ = การเสียรูปทางด้านข้างจากแรงดันดินและน้ำ

η = สัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ $\eta = 1$

E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต(kN/m^2)

I = โมเมนต์เฉื่อยของคอนกรีต (m^4)

k = Subgrade Reaction Factor (ดังตาราง)

ตารางที่ 6.3. แสดงค่าสัมประสิทธิ์ k แปรผันตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	k (kg/cm^3)
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1.2 \times 0.25^3}{12} = 0.00156 \text{ m}^4/\text{ring}$$

$$I = \frac{0.00156}{1.2} = 0.00130 \text{ m}^4/\text{m}$$

$$E_c = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

จากตาราง $k = 20000 \text{ kN/m}^3$

R_c = รัศมีของอุโมงค์ถึงจุด Centriod = 2.575 m

แทนค่าแล้วได้ $$\delta = \frac{[(2 \times 435.40) - 247.30 - 328.30]2.575^4}{24\left(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 20000 \times 2.575^4\right)}$$

$$\delta = 0.00685$$

ดังนั้น $$k \cdot \delta = 20000 \times 0.00685 = 137 \text{ kN/m}^2$$

แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์(p_g)

$$p_g = \pi \cdot g$$

$$g = \frac{W}{2\pi \cdot R_c}$$

$$W = \frac{\pi\left(D_o^2 - D_i^2\right)\gamma_c}{4}$$

โดยที่ ; W = น้ำหนักของอุโมงค์

γ_c = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต(26 kN/m^3)

$$W = \frac{\pi\left(5.4^2 - 4.9^2\right) \times 26}{4} = 105.16 \text{ kN/m}$$

$$g = \frac{105.16}{2\pi \cdot 2.575} = 6.50 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น $$p_g = \pi \cdot 6.5 = 20.42 \text{ kN/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2

แรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Top

-แรงดันดิน

$$p_{e1} = (16\times13) + (17\times4) + (18\times4) + [(18-10)\times3.92] = 379.36 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w1} = 10\times3.92 = 39.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวดิ่งที่ตำแหน่ง Bottom

-แรงดันดิน

$$p_{e2} = 379.36 + [(18-10)\times5.4] = 422.56 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$p_{w2} = 39.2 + (10\times5.4) = 93.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Crown

-แรงดันดิน

$$q_{e1} = (0.65\times379.36) = 246.58 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w1} = 39.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงดันในแนวราบที่ตำแหน่ง Invert

-แรงดันดิน

$$q_{e2} = (0.65\times422.56) = 274.66 \text{ kN/m}^2$$

-แรงดันน้ำ

$$q_{w2} = 93.2 \text{ kN/m}^2$$

แรงต้านทานในแนวนอน ($k\cdot\delta$)

$$\delta = \frac{(2P - Q - Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454kR_c^4)}$$

โดยที่ ; $P = p_{e1} + p_{w1} = 418.56 \text{ kN/m}^2$

$Q = q_{e1} + q_{w1} = 285.78 \text{ kN/m}^2$

$Q' = q_{e2} + q_{w2} = 367.86 \text{ kN/m}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1.2 \times 0.25^3}{12} = 0.00156 \text{ m}^4/\text{ring}$$

$$I = \frac{0.00156}{1.2} = 0.00130 \text{ m}^4/\text{m}$$

$$E_c = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

จากตาราง $k = 40000 \text{ kN/m}^3$

R_c = รัศมีของอุโมงค์ถึงจุด Centriod = 2.575 m

แทนค่าแล้วได้ $$\delta = \frac{[(2 \times 418.56) - 285.78 - 367.86]2.575^4}{24\left(1 \times 30 \times 10^6 \times 0.00130 + 0.0454 \times 40000 \times 2.575^4\right)}$$

$$\delta = 0.00283$$

ดังนั้น $$k \cdot \delta = 40000 \times 0.00280 = 113.13 \text{ kN/m}^2$$

แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์(p_g)

$$p_g = \pi \cdot g$$

$$g = \frac{W}{2\pi \cdot R_c}$$

$$W = \frac{\pi\left(D_o^2 - D_i^2\right)\gamma_c}{4}$$

โดยที่ ; W = น้ำหนักของอุโมงค์

γ_c = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต(26 kN/m^3)

$$W = \frac{\pi\left(5.4^2 - 4.9^2\right) \times 26}{4} = 105.16 \text{ kN/m}$$

$$g = \frac{105.16}{2\pi \cdot 2.575} = 6.50 \text{ kN/m}^2$$

ดังนั้น $$p_g = \pi \cdot 6.5 = 20.42 \text{ kN/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.5. หา แรงกระทำภายใน

6.2.5.1. โดยทฤษฎีของ Terzaghi

กรณีที่ 1

ตารางที่ 6.4. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	721.74	0.00	-721.74	0.00	721.74
N_1 (kN/m)	0.00	560.58	1121.16	560.58	0.00
Q_1 (kN/m)	0.00	-560.58	0.00	560.58	0.00

ตารางที่ 6.5. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	-409.94	0.00	409.94	0.00	-409.94
N_2 (kN/m)	636.80	318.40	0.00	318.40	636.80
Q_2 (kN/m)	0.00	318.40	0.00	-318.40	0.00

ตารางที่ 6.6. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_3 (kN-m/m)	-55.95	-7.91	67.14	7.91	-78.32
N_3 (kN/m)	65.18	42.93	0.00	61.36	143.40
Q_3 (kN/m)	0.00	42.93	13.04	-61.36	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-108.13	-14.02	137.48	-14.02	-108.13
N_4 (kN/m)	124.78	88.22	0.00	88.22	124.78
Q_4 (kN/m)	0.00	88.22	0.00	-88.22	0.00

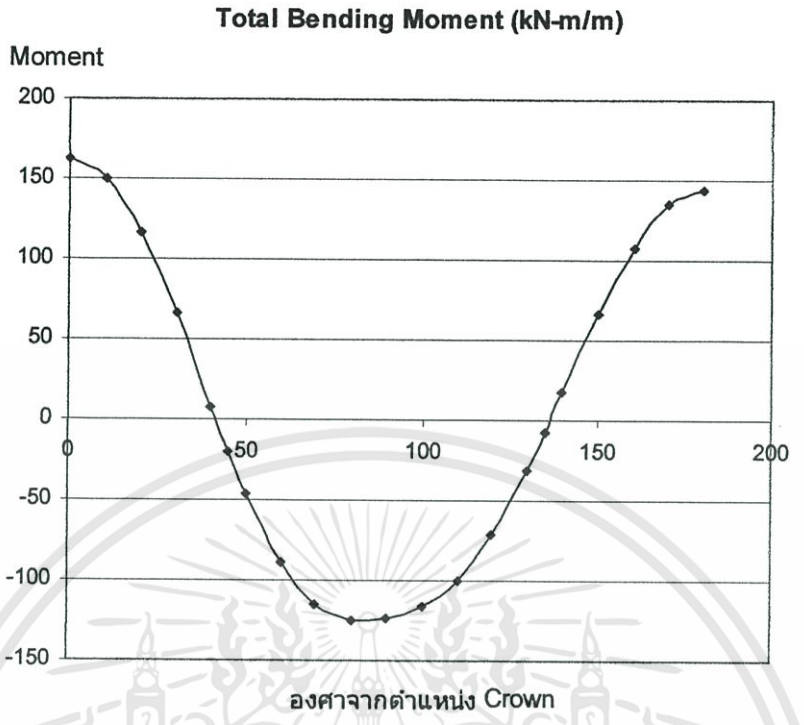
ตารางที่ 6.8. แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_5 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_5 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79
Q_5 (kN/m)	0.00	-11.27	-2.79	15.02	0.00

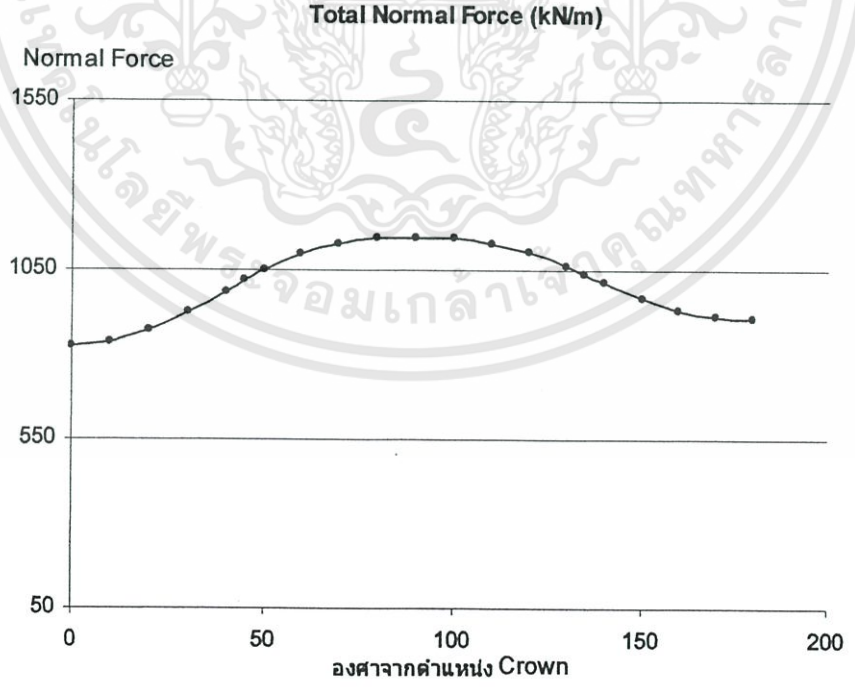
ตารางที่ 6.9. แสดงแรงกระทำรวมที่ได้ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	162.59	-20.49	-124.11	-7.55	144.34
N_T (kN/m)	823.97	1017.45	1147.45	1038.23	907.76
Q_T (kN/m)	0.00	-122.30	10.25	107.62	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1



รูปที่ 6.7. กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2

ตารางที่ 6.10. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	693.83	0.00	-693.83	0.00	693.83
N_1 (kN/m)	0.00	538.90	1077.97	538.90	0.00
Q_1 (kN/m)	0.00	-538.90	0.00	538.90	0.00

ตารางที่ 6.11. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	-473.73	0.00	473.73	0.00	-473.73
N_2 (kN/m)	735.88	367.94	0.00	367.94	735.88
Q_2 (kN/m)	0.00	367.94	0.00	-367.94	0.00

ตารางที่ 6.12. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวนอนแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_3 (kN-m/m)	-56.69	-8.02	68.03	8.02	-79.37
N_3 (kN/m)	66.05	43.50	0.00	62.18	145.31
Q_3 (kN/m)	0.00	43.50	13.21	-62.18	0.00

ตารางที่ 6.13. แสดงแรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอนในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-89.27	-11.58	113.49	-11.58	-89.27
N_4 (kN/m)	103.01	72.83	0.00	72.83	103.01
Q_4 (kN/m)	0.00	72.83	0.00	-72.83	0.00

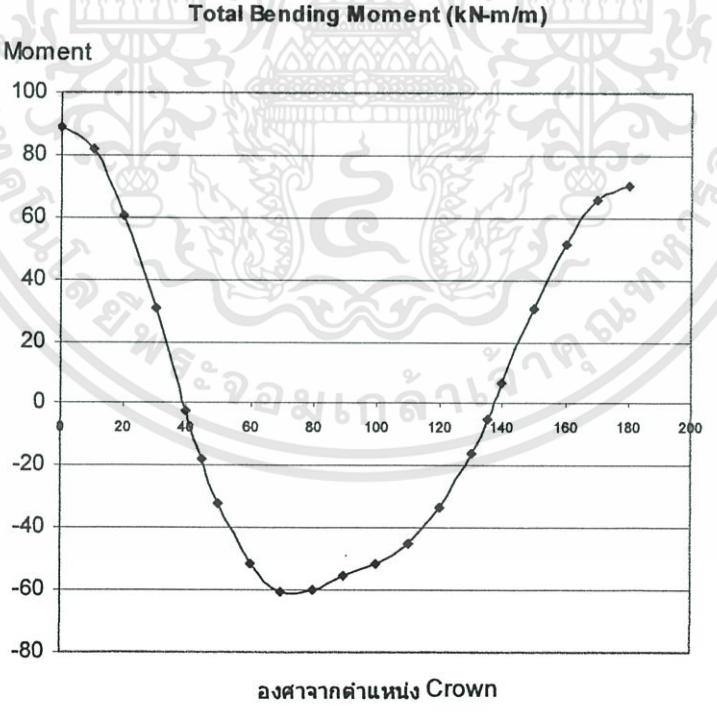
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.14. แสดงแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_5 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_5 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79
Q_5 (kN/m)	0.00	-11.27	-2.79	15.02	0.00

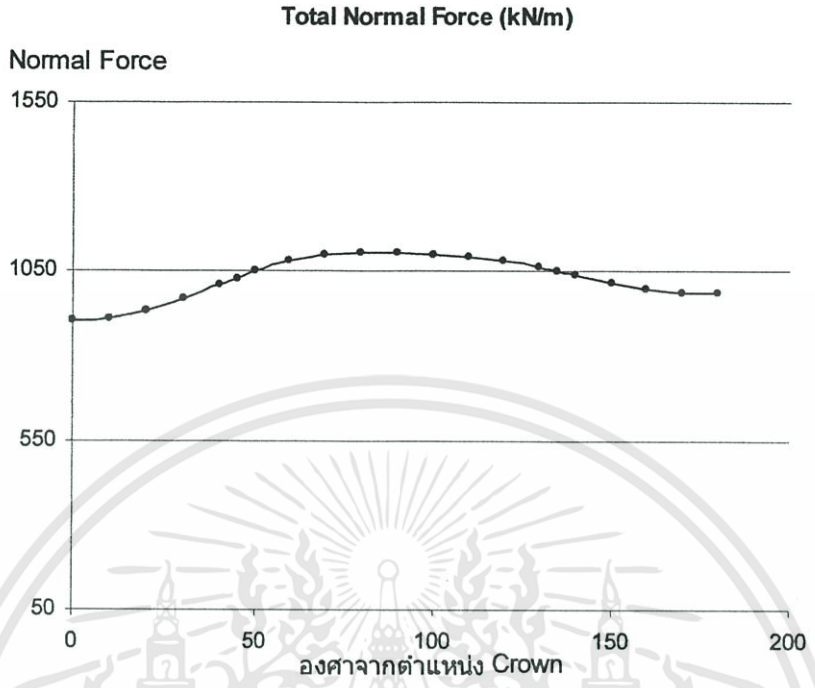
ตารางที่ 6.15. แสดงแรงกระทำทั้งหมดในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	89.01	-18.15	-55.50	-1.44	70.46
N_T (kN/m)	902.15	1030.49	1104.08	1051.52	986.99
Q_T (kN/m)	0.00	-65.90	10.42	50.97	0.00



รูปที่ 6.8. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9. กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Terzaghi ในกรณีที่ 2

6.2.5.2. โดยทฤษฎีของ Einstein

กรณีที่ 1

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

$$C^* = \frac{45000 \times 2.7(1-0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.25(1-0.29^2)} = 0.017$$

Flexibility Ratio $\left(F^*\right)$ เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของดินและอุโมงค์ ภายใต้แรงกระทำ แบบไม่สมมาตร หาค่าได้ดังนี้

$$F^* = \frac{45000 \times 2.7^3(1-0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.0013(1-0.29^2)} = 23.25$$

$$a_0^* = \frac{0.017 \times 23.25(1-0.29)}{0.017 + 23.25 + 0.017 \times 23.25(1-0.29)} = 0.012$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_2^* = \frac{(23.25+6)(1-0.29)}{2\times 22.56(1-0.29)+6(5-6\times 0.29)}0.395$$

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

เมื่อ E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอุโมงค์ ($30\text{x}10^6$ kN/m^2)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (45000 kN/m^2)

v_s = Poisson's ของผนังอุโมงค์(0.25)

v = Poisson'sเฉลี่ยของดิน(0.29)

M = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ (kN-m/m)

T = แรงในแนวแกนของผนังอุโมงค์(kN/m)

R = รัศมีของผนังอุโมงค์(2.7 m)

K = สัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้างเฉลี่ย(0.62)

P = แรงกระทำในแนวดิ่ง (Overburden Pressure)(t/m^2)

$$\gamma_{ave} = \frac{(16\times 10)+(17\times 5)+(18\times 4)+(20\times 13)}{32} = 18.03 \text{ kN/ m}^3$$

$$P = (18.03\times 19)+[(18.03-10)\times 8.5]+(10\times 8.5) = 495.83 \text{ kN/ m}^2$$

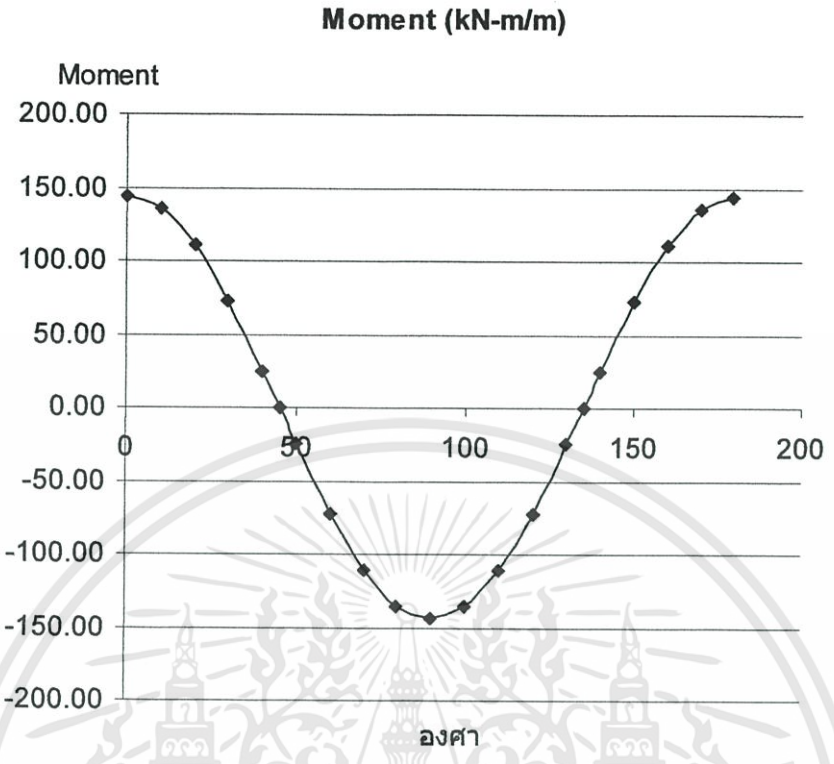
θ = มุมรอบผนังอุโมงค์ทวนเข็มนาฬิกา

As = พื้นที่หน้าตัดของผนัง (0.25m^2/m)

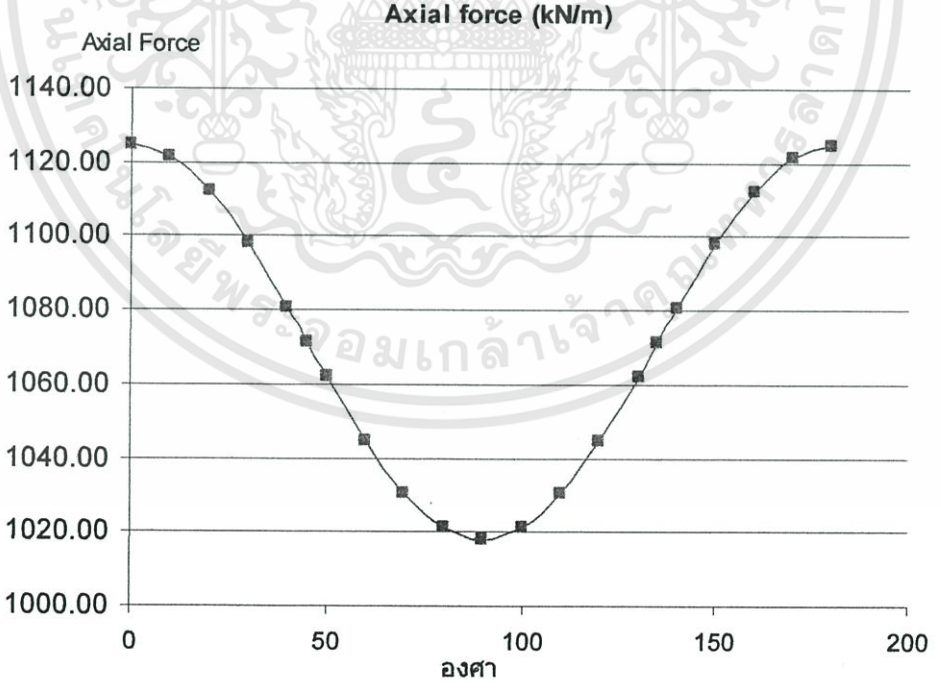
ตารางที่ 6.16. แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	144.22	0.00	-144.22	0.00	144.22
T (kN/m)	1125.87	1072.45	1019.04	1072.45	1125.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 1



รูปที่ 6.11. กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2

$$C^* = \frac{35000 \times 2.7(1-0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.25(1-0.30^2)} = 0.013$$

$$F^* = \frac{35000 \times 2.7^3(1-0.25^2)}{30 \times 10^6 \times 0.0013(1-0.30^2)} = 18.20$$

$$a_0^* = \frac{0.013 \times 18.20(1-0.30)}{0.013 + 18.20 + 0.013 \times 18.20(1-0.30)} = 0.009$$

$$a_2^* = \frac{(18.20+6)(1-0.30)}{2 \times 18.20(1-0.30) + 6(5-6 \times 0.30)} 0.379$$

เมื่อ E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอุโมงค์ (30×10^6 kN/m^2)

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (35000 kN/m^2)

v_s = Poisson's ของผนังอุโมงค์(0.25)

v = Poisson'sเฉลี่ยของดิน(0.30)

M = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ (kN-m/m)

T = แรงในแนวแกนของผนังอุโมงค์(kN/m)

R = รัศมีของผนังอุโมงค์(2.7 m)

K = สัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้างเฉลี่ย(0.65)

P = แรงกระทำในแนวดิ่ง (Overburden Pressure)(t/m^2)

$$\gamma_{ave} = \frac{(16 \times 13) + (17 \times 4) + (18 \times 4) + (18 \times 11)}{32} = 17.06 \text{ kN/ m}^3$$

$$P = (17.06 \times 21) + [(17.06 - 10) \times 6.5] + (10 \times 6.5) = 469.15 \text{ kN/ m}^2$$

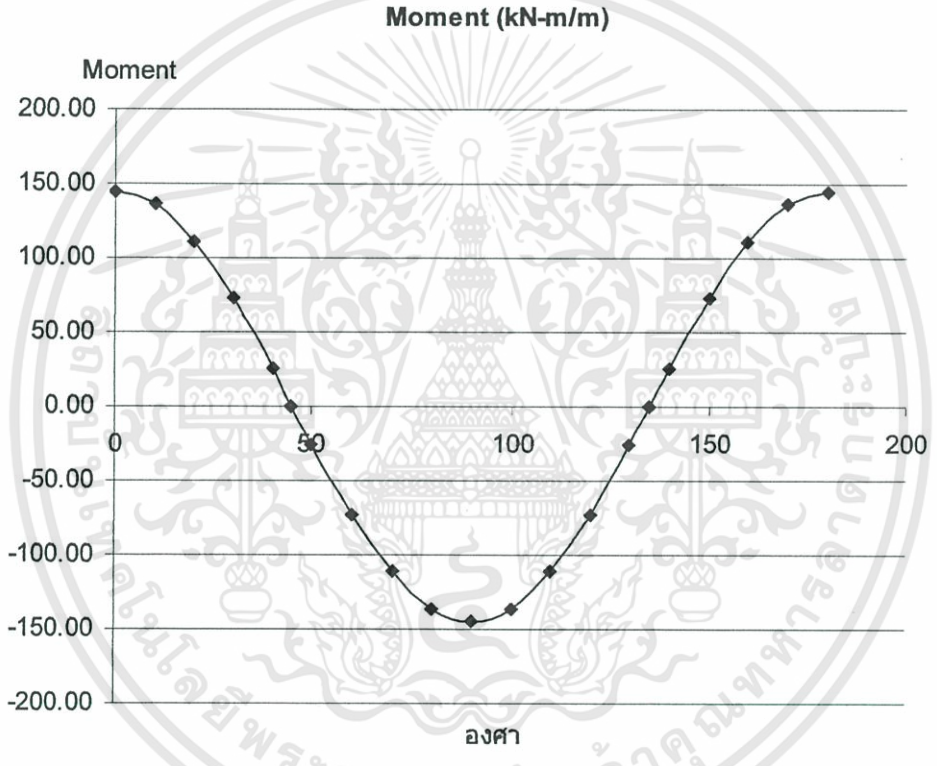
θ = มุมรอบผนังอุโมงค์ทวนเข็มนาฬิกา

As = พื้นที่หน้าตัดของผนัง (0.25m^2/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

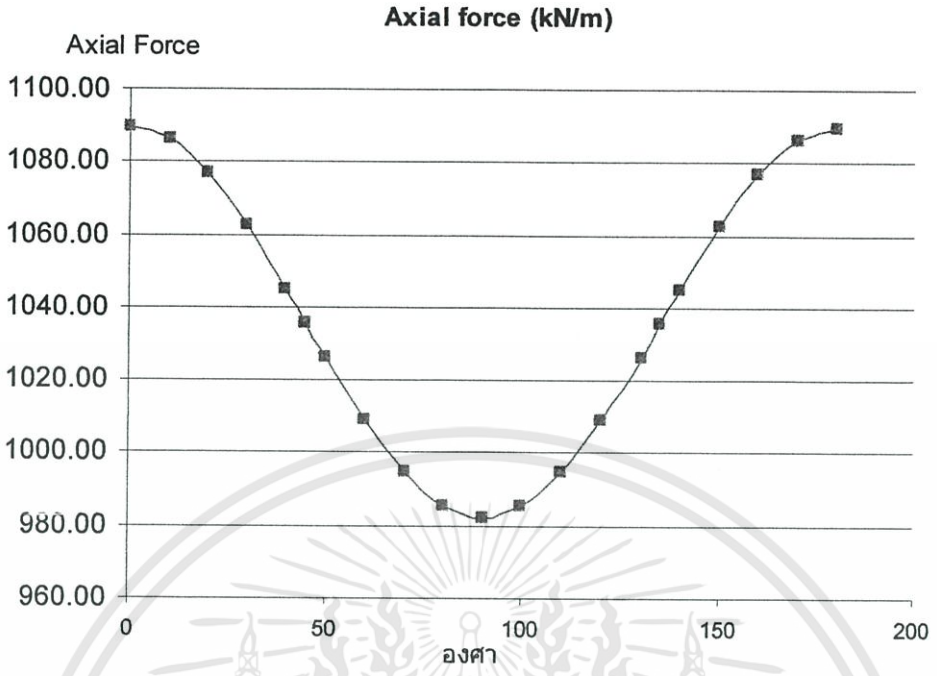
ตารางที่ 6.17. แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎี Einstein ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M (kN-m/m)	144.84	0.00	-144.84	0.00	144.84
T (kN/m)	1089.27	1035.63	981.98	1035.63	1089.27



รูปที่ 6.12. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13. กราฟแสดงค่า Axial Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Einsteinในกรณีที่ 2

6.2.5.3. ทฤษฎีของ Muir Wood

กรณีที่ 1

$$P_o = 435.4 - 328.3 = 107.1 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (435.4 - 328.3) = 381.25 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_2 = \frac{45000 \times 2.7^3}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot 12 \cdot 0.0013} = 1.45$$

$$S_T = \frac{107.1 \times (1 + (2 \times 1.45))}{2 \times \left(1 + \frac{1.45 \cdot (3 - (2 \cdot 0.3))}{3 - (4 \cdot 0.3)}\right)} = 71.21$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4 \cdot 0.3) \times \frac{107.1}{2} - (2 \cdot 1.45 + (4 - 6 \cdot 0.3)) \times 71.21$$

$$S_{N1} = -74.51$$

$$S_{N2} = (4 \cdot 1.45) + 5 - (6 \cdot 0.3) = 9.01$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} = \frac{-74.51}{9.01} = -8.27$$

$$Q = \frac{45000 \times 2.7}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot (2.7 - 2.45)} = 0.0125$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1+Q} = \frac{381.25}{1+0.0125} = 377.15 \text{ kN/m}^2$$

$$N_B = \Delta P \times R_O = 377.15 \times 2.7 = 1018.3 \text{ kN/m}$$

ตารางที่ 6.18. แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	66.42	0.00	-66.42	0.00	66.42
N_1 (kN/m)	897.57	1018.30	1139.34	1018.30	897.57

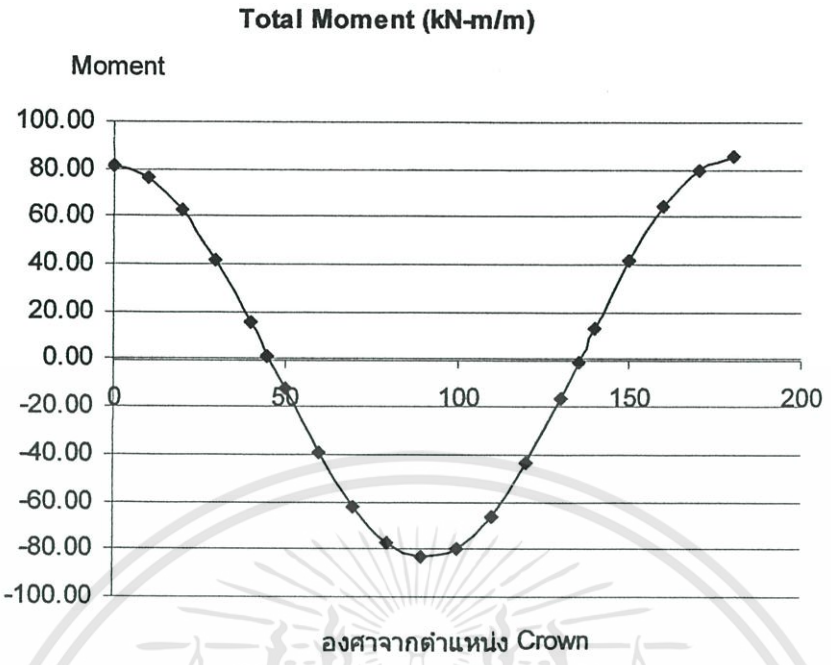
ตารางที่ 6.19. แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_2 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79

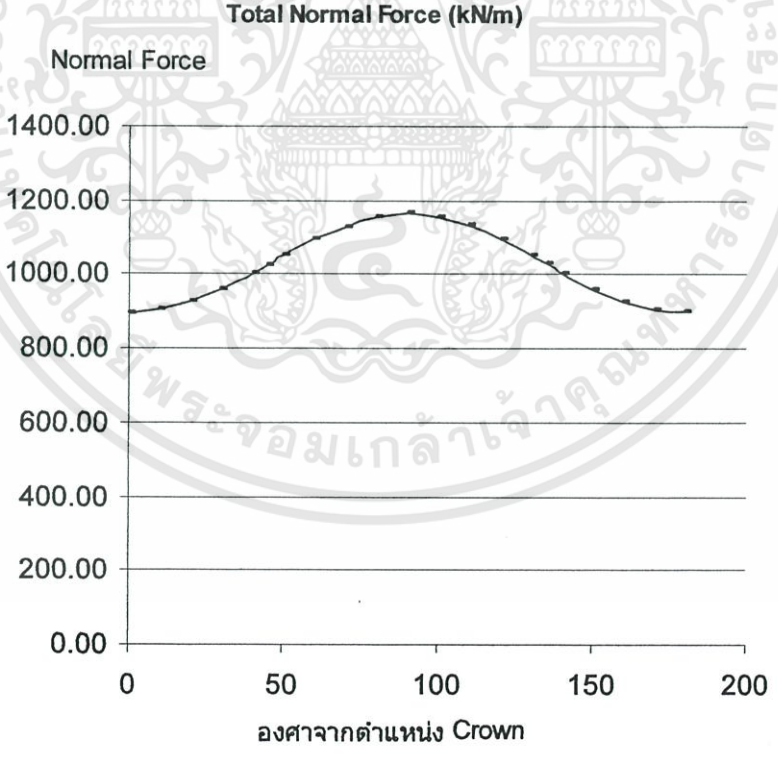
ตารางที่ 6.20. แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	81.28	1.44	-83.35	-1.44	-85.41
N_T (kN/m)	894.78	1025.62	1165.33	1027.97	900.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 1



รูปที่ 6.15. กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2

$$P_o = 418.56 - 367.86 = 50.7 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{BAR} = 0.5 \times (418.56 + 367.86) = 393.21 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_2 = \frac{35000 \times 2.7^3}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot 12 \cdot 0.0013} = 1.13$$

$$S_T = \frac{50.7 \times (1 + (2 \times 1.13))}{2 \times \left(1 + \frac{1.13 \cdot (3 - (2 \cdot 0.3))}{3 - (4 \cdot 0.3)}\right)} = 32.97$$

$$S_{N1} = 3 \times (3 - 4 \cdot 0.3) \times \frac{50.7}{2} - (2 \cdot 1.13 + (4 - 6 \cdot 0.3)) \times 32.97$$

$$S_{N1} = -10.16$$

$$S_{N2} = (4 \cdot 1.13) + 5 - (6 \cdot 0.3) = 7.72$$

$$S_N = \frac{S_{N1}}{S_{N2}} = \frac{-10.16}{7.72} = -1.32$$

$$Q = \frac{\times 2.7}{30 \times 10^6 (1 + 0.3) \cdot (2.7 - 2.45)} = 0.0097$$

$$\Delta P = \frac{P_{BAR}}{1 + Q} = \frac{393.21}{1 + 0.0097} = 389.43 \text{ kN/m}^2$$

$$N_B = \Delta P \times R_O = 389.43 \times 2.7 = 1051.46 \text{ kN/m}$$

ตารางที่ 6.21. แรงภายในที่เกิดจากแรงภายนอกในแนวดิ่งของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_1 (kN-m/m)	36.85	0.00	-36.85	0.00	36.85
N_1 (kN/m)	993.30	1051.46	1109.62	1051.46	993.30

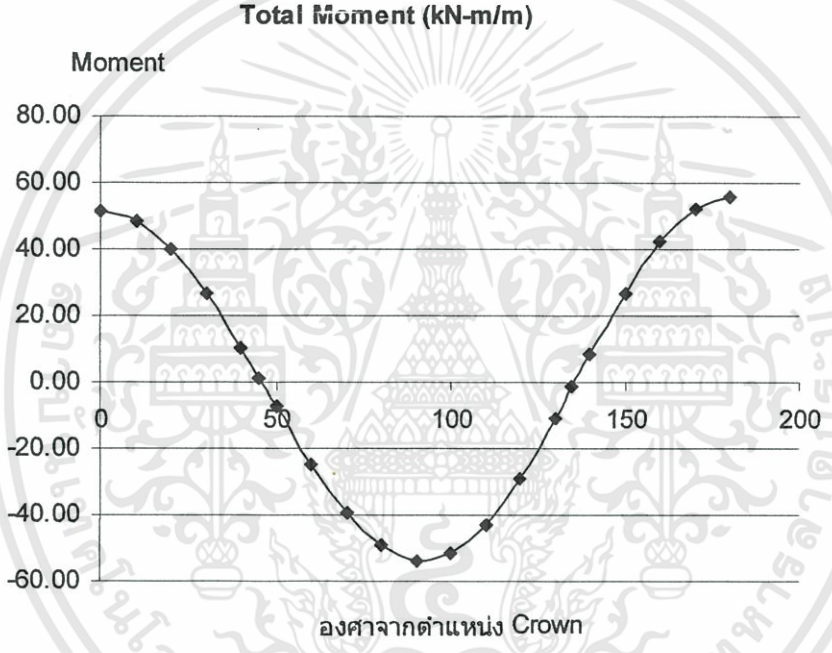
ตารางที่ 6.22. แรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_2 (kN-m/m)	14.86	1.44	-16.92	-1.44	18.99
N_2 (kN/m)	-2.79	7.32	26.29	9.67	2.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

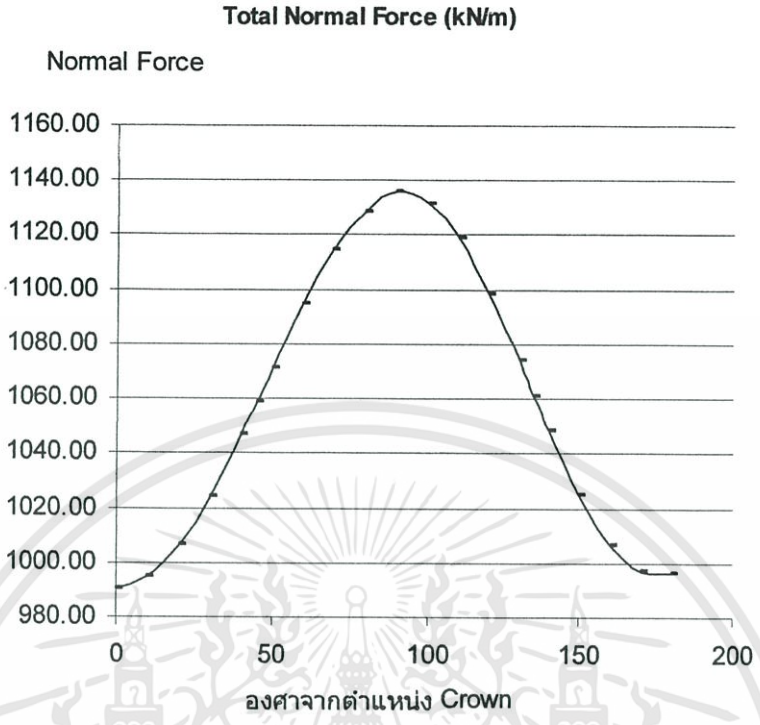
ตารางที่ 6.23. แสดงแรงกระทำทั้งหมดของทฤษฎี Muir Wood ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	51.71	1.44	-53.78	-1.44	55.84
N_T (kN/m)	990.51	1058.78	1135.91	1061.13	996.09



รูปที่ 6.16. กราฟแสดงค่า Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17. กราฟแสดงค่า Normal Force ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Muir Woodในกรณีที่ 2

6.2.5.4. ทฤษฎี Beam-Spring Model

ใช้สมการของ Terzaghi ในการหาค่าของแรงกระทำภายในแต่จะเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำเนื่องจากแรงต้านทานในแนวนอน

โดยเปลี่ยนค่า Subgrade Reaction Factor

กรณีที่ 1

$$k_r = \frac{3E_O}{(1+\nu)(5-6\nu)R_C}$$

$$k_r = \frac{3(45000)}{(1+0.25)(5-6\cdot 0.25)\cdot 2.575} = 11983 \text{ kN/m}^3$$

$$\delta = \frac{[(2\times 435.40)-247.30-328.30]2.575^4}{24\left(1\times 30\times 10^6\times 0.00130+0.0454\times 11983\times 2.575^4\right)}$$

$$\delta = 0.00859$$

ดังนั้น $k\cdot\delta = 11983\times 0.00859 = 102.99 \text{ kN/m}^2$

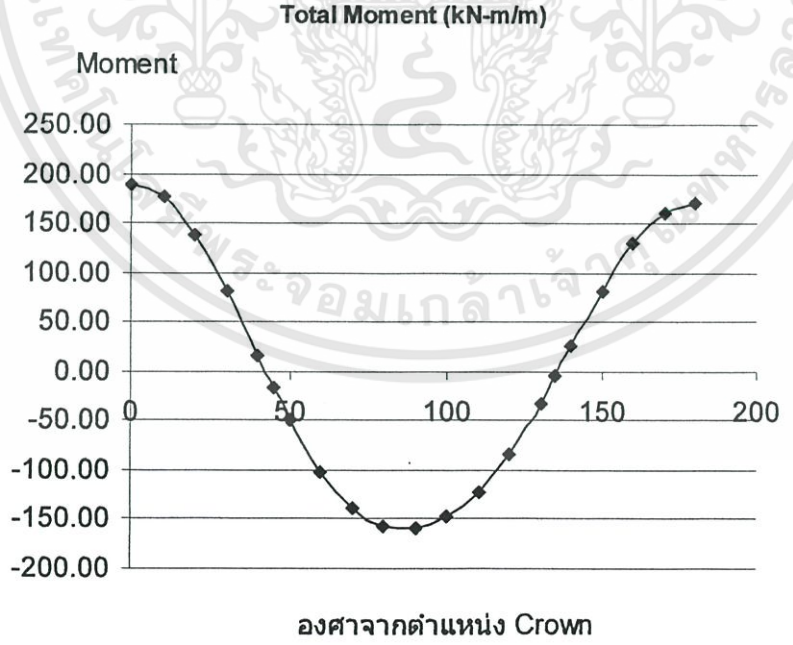
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่6.24. แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k_r\delta)$
โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-81.27	-10.54	103.32	-10.54	-81.27
N_4 (kN/m)	93.78	66.30	0.00	66.30	93.78
Q_4 (kN/m)	0.00	66.30	0.00	66.30	0.00

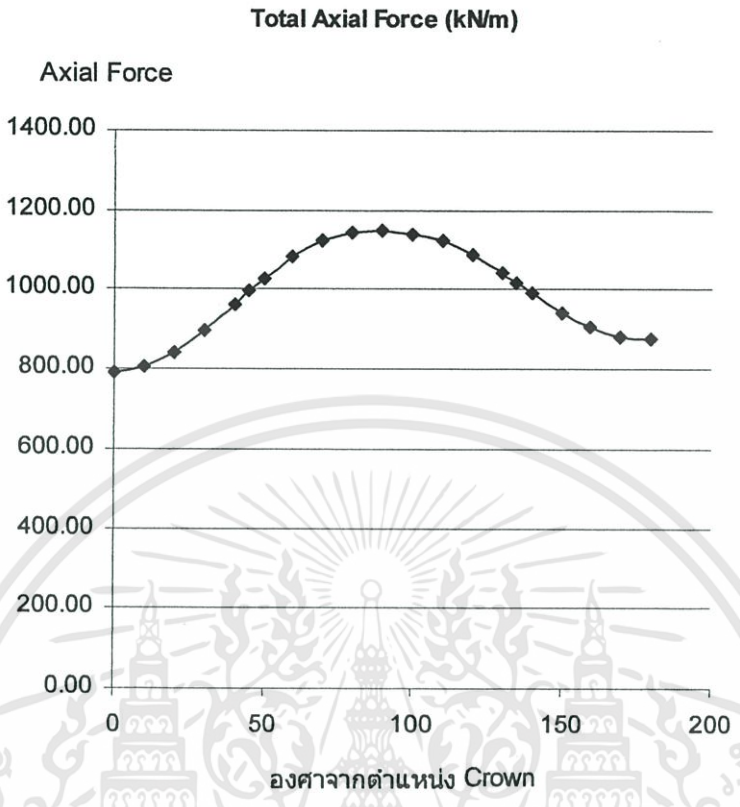
ตารางที่ 6.25. แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	189.45	-17.01	-158.27	-4.07	171.21
N_T (kN/m)	792.96	995.53	1147.45	1016.31	876.76
Q_T (kN/m)	0.00	-144.22	10.25	129.54	0.00



รูปที่ 6.18. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.19. กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2

$$k_r = \frac{3E_O}{(1+\nu)(5-6\nu)R_C}$$

$$k_r = \frac{3(35000)}{(1+0.3)(5-6\cdot 0.3)\cdot 2.575} = 9802 \text{ kN/m}^3$$

$$\delta = \frac{(2P-Q-Q')R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454 k R_c^4)}$$

$$\delta = \frac{[(2\times 418.56)-285.78-367.86]2.575^4}{24(1\times 30\times 10^6\times 0.00130 + 0.0454\times 9802\times 2.575^4)}$$

$$\delta = 0.00574$$

ดังนั้น $k\cdot\delta = 9802\times 0.00574 = 56.26 \text{ kN/m}^2$

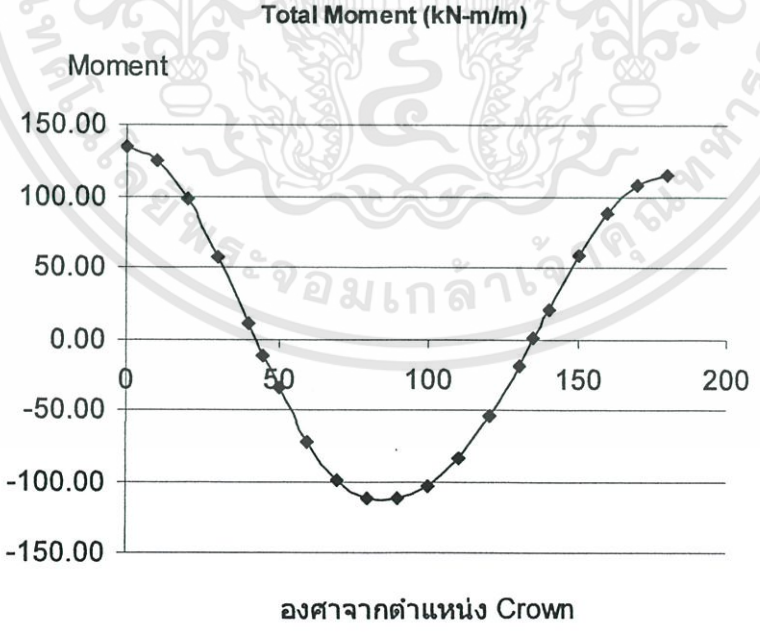
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่6.26. แรงภายในที่เกิดจากแรงต้านทานในแนวนอน $(k_r\delta)$
โดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_4 (kN-m/m)	-44.39	-5.76	59.44	-5.76	-44.39
N_4 (kN/m)	51.22	36.21	0.00	36.21	51.22
Q_4 (kN/m)	0.00	36.21	0.00	-36.21	0.00

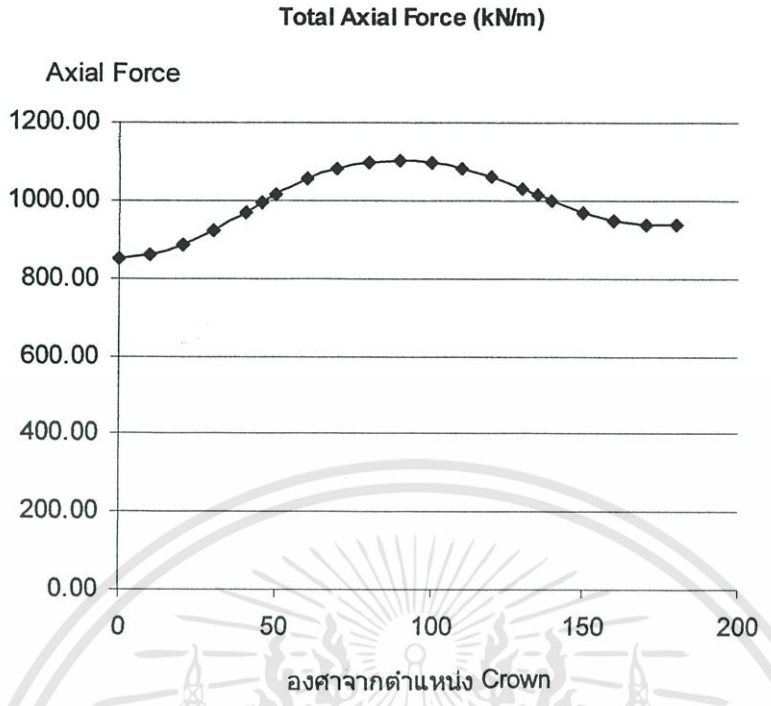
ตารางที่ 6.27. แรงกระทำทั้งหมดทฤษฎีโดยทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

θ	0°	45°	90°	135°	180°
M_T (kN-m/m)	133.88	-12.33	-112.56	0.82	115.34
N_T (kN/m)	850.36	993.87	1104.08	1014.91	935.20
Q_T (kN/m)	0.00	-102.51	10.42	87.58	0.00



รูปที่ 6.20. กราฟแสดง Total Moment ที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21. กราฟแสดง Total Normal Forceที่ตำแหน่งต่างๆจากทฤษฎี Beam-Spring Model ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3. การคำนวณเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน

ตัวอย่างการคำนวณการเสริมเหล็กในผนังอุโมงค์ใต้ดิน ใช้วิธีออกแบบเสาสั้น และวิธีออกแบบคาน โดยอ้างอิงตัวอย่างมาจากบทที่ 4 ในการคำนวณออกแบบอุโมงค์ โดยใช้ค่าแรงกระทำภายในจากทฤษฎี Terzaghi ชั้น Dense Sand ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

M_{max} = 162.59 kN-m/m
N_{max} = 1147.45 kN/m
V_{max} = 122.3 kN/m

แปลงเป็นกิโลกรัม(kg) 1 kg = 10 N

M_{max} = 16259 kg-m/m
N_{max} = 114745 kg/m
V_{max} = 12230 kg/m

6.3.1. ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบเสาสั้น

$$\beta_1 = 0.85 \; ; \; f_c' \leq 280 \;\; \text{kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{(f_c' - 280)}{70} \; ; \; 280 < f_c' \leq 560 \;\; \text{kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0.65 \; ; \; f_c' > 560 \;\; \text{kg/cm}^2$$

$f_c' = 400$ kg/cm^2

ดังนั้น $\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{(400 - 280)}{70} = 0.76$

ระยะหุ้มคอนกรีต สัมผัสดิน 4 cm. ไม่สัมผัสดิน 3 cm. (สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 6 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิผล,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 25 - 3 - 0.6 - \frac{1.6}{2} = 20.60 \text{ cm.}$$

กำลังที่ต้องการ

$$M_u = 1.2 \times 1.4 \times 16259 = 27315 \text{ kg-m}$$
$$P_u = 1.2 \times 1.4 \times 114745 = 192772 \text{ kg}$$
$$V_u = 1.2 \times 1.4 \times 12230 = 20546 \text{ kg}$$

โดยที่ 1.2 คือ ความกว้างของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

1.4 คือ ตัวปรับค่าของวิธีกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{27315}{192772} = 14.20cm.$$

กำลังระบุ : $0.1f_c'A_g = 0.1\times 400\times 120\times 25 = 120000\ kg.$

เมื่อเทียบกับ P_u แล้วใช้ $\phi = 0.7$ จะได้

$$P_n = \frac{192772}{0.7} = 275389\ kg.$$
$$M_n = \frac{27315}{0.7} = 39021\ kg\cdot m.$$
$$V_n = \frac{20546}{0.7} = 29351\ kg.$$

ที่สภาวะความเครียดสมดุล :

$$c_b = \frac{6120d}{6120+f_y} = \frac{6120\times 20.6}{6120+4000} = 12.50cm.$$
$$a_b = \beta_1 c_b = 0.76\times 12.50 = 9.5\ cm.$$

ถ้าสมมติให้ $A_s = A_s'$ และ $f_s = f_s' = f_y$

จะได้ $P_{nb} = 0.85f_c'a_b b = 0.85\times 400\times 9.5\times 120 = 387600\ kg.$

จะเห็นว่า P_n น้อยกว่า P_{nb} แสดงว่าหน้าตัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดึง

$$A_s = \frac{\frac{P_n^2}{1.7f_c'b} - P_n\left(\frac{h}{2}-e\right)}{f_y(d-d')} = \frac{\frac{275389^2}{1.7\times 400\times 120} - 275389\left(\frac{25}{2}-14.2\right)}{4000(20-4.4)} = 21.57\ cm.^2$$

เลือกใช้ DB 16 จำนวน 11 เส้น ได้ $A_s = A_s' = 22.11\ \text{cm}^2$. จะได้

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} = \frac{2\times 22.11}{120\times 25} = 0.014$$ ซึ่งต้องอยู่ระหว่าง 0.01 และ 0.08

$0.01 < \rho < 0.08$ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ดังนั้นใช้เหล็กเสริม DB 16 จำนวน 11 เส้น ทั้งบนและล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กรับแรงเฉือน

$N_u = P_u = 192772$ kg
$V_u = 20546$ kg

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

$$V_c = 0.53(1+0.0071\frac{N_u}{A_g})f_c'bd = 0.53(1+0.0071\times\frac{192772}{25\times120})\sqrt{400}\times120\times20.6$$

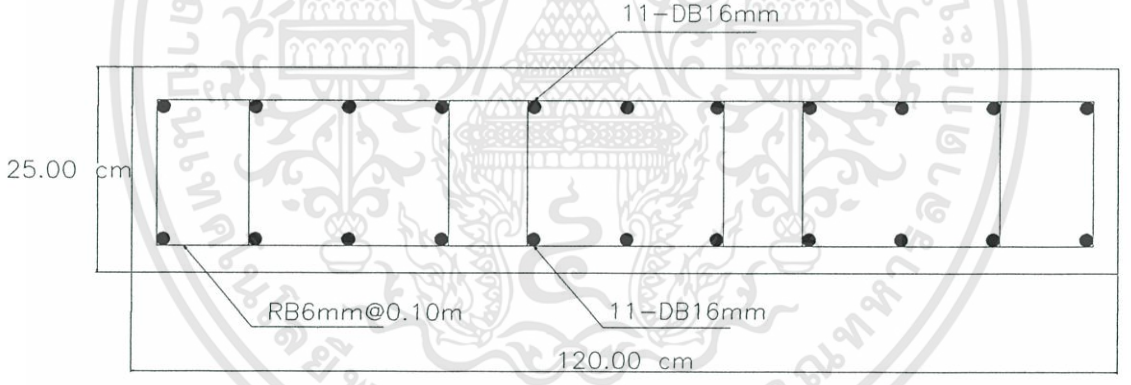
$V_c = 38157.81$ kg $> V_n$.

ดังนั้น ใช้ RB 8 จำนวน 10 ขา (Av=8x0.283=2.83 cm.)

ระยะเรียงมากสุด $s_{max} = \frac{Av\cdot f_s}{3.5b} = \frac{2.26\times2400}{3.5\times120} = 12.89$ cm.

หรือ $s_{max} = \frac{d}{2} = \frac{20.6}{2} = 10.30$ cm.

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 6 mm. @ 0.10 m.



รูปที่ 6.22. แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์ตามวิธีออกแบบเสาสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2. ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีออกแบบคาน

$M_T = 162.59$ kN-m/m

$M_{\max} = M_T \cdot b = 162.59 \times 1.2 = 195.11$ kN-m/ring

โมเมนต์ที่ต้องการ $M_u = M_{\max} \cdot$ ตัวคูณเพิ่มกำลัง ; (ตัวคูณเพิ่มกำลัง=1.4)

$M_u = 195.11 \times 1.4 = 273.15$ kN-m/ring $= 27315$ kg-m/ring

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \text{ ; } (\phi = 0.9 \text{ สำหรับแรงดัด})$$

โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบ $M_n = \frac{27315}{0.9} = 30350$ kg-m/ring

ระยะหุ้มคอนกรีต สัมผัสดิน 4 cm. ไม่สัมผัสดิน 3 cm. (สมมติใช้เหล็ก DB 16 mm, เหล็กปลอก RB 6 mm)

ดังนั้นความลึกประสิทธิผล,

d = ความหนาผนัง-ระยะหุ้ม-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก-เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็ก/2

$$d = 25 - 3 - 0.6 - \frac{1.6}{2} = 20.60 \text{ cm.}$$

$\beta_1 = 0.85$; $f_c' \le 280$ kg/cm^2

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{(f_c' - 280)}{70} \text{ ; } 280 < f_c' \le 560 \text{ kg/cm}^2$$

$\beta_1 = 0.65$; $f_c' > 560$ kg/cm^2

$f_c' = 400$ kg/cm^2

ดังนั้น $\beta_1 = 0.85 - 0.05\frac{(400 - 280)}{70} = 0.76$

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f_c'}{f_y}\left(\frac{6120}{6120 + f_y}\right)$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \times 0.76 \times 400}{4000}\left(\frac{6120}{6120 + 4000}\right) = 0.0391$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b = 0.75 \times 0.0391 = 0.0293$$

$$R_{n,\max} = \rho_{\max} f_y \left(1 - \frac{\rho_{\max} f_y}{1.7 f_{c'}}\right)$$

$$R_{n,\max} = 0.0293 \times 4000 \left(1 - \frac{0.0293 \times 4000}{1.7 \times 400}\right) = 97.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{n,\max} = R_{n,\max} bd^2$$

$$M_{n,\max} = 97.000 \times 1.2 \times 20.6^2 = 49395.50 \text{ kg-m}$$

โมเมนต์สูงสุดที่รับได้

$$M_{u,\max} = \phi \cdot M_{n,\max} = 0.9 \times 49395.50 = 44455.95 \text{ kg-m} > M_u \text{ O.K.}$$

$$R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \frac{30350}{1.2 \times 20.6^2} = 59.600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f_c'}}\right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \times 400}{4000}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 59.600}{0.85 \times 400}}\right) = 0.0165$$

ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$As = \rho bd = 0.0165 \times 120 \times 20.6 = 40.79 \text{ cm}^2\text{/ring}$$

ใช้เหล็ก DB 16 mm (As = 2.01 cm^2) ใช้เหล็ก $= \frac{40.79}{2.01} = 20.29$ เส้น

ดังนั้นใช้ 21 เส้น (As = 2.01x21= 42.21 cm^2) O.K.

ระยะเรียง = ช่องว่าง/จำนวนเส้น $= \frac{120 - (2 \times 3) - (2 \times 0.6)}{21} = 5.37$ cm. ใช้ 5.00 cm.

ระยะคอนกรีตหุ้มถึงผิวเหล็กเสริม, C_c = 3+0.6 = 3.6 cm.

หน่วยแรงในเหล็กเสริม, $f_s = 0.6 f_y = 0.6 \times 4000 = 2400$ kg/cm^2

ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้, $s = \frac{90000}{f_s} - 2.5C_c = \frac{90000}{2400} - (2.5 \times 3.6) = 28.50$ cm.

ระยะเรียงที่ใช้ 5.00 cm. < ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้ O.K.

ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม $= 5.0 - (2 \times 0.8) = 3.4$ cm. > 2.5 cm. O.K.

เนื่องจากรับโมเมนต์ลบด้วยจึงใส่เหล็กทั้งบนและล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กรับแรงเฉือน

$$Q_T = 122.30 \text{ kN/m}$$

$$V_{max} = Q_T \cdot b = 122.30 \times 1.2 = 146.76 \text{ kN/ring}$$

แรงเฉือนที่ต้องการ

$V_u = V_{max} \cdot$ ตัวคูณเพิ่มกำลัง ; (ตัวคูณเพิ่มกำลัง=1.4)

$$V_u = 146.76 \times 1.4 = 205.46 \text{kN/ring} = 20546 \text{ kg/ring}$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} \quad ; \ (\phi = 0.85 \text{ สำหรับแรงเฉือน})$$

แรงเฉือนที่ใช้ออกแบบ

$$V_n = \frac{20546}{0.85} = 24171.76 \text{ kg/ring}$$

แรงเฉือนที่คอนกรีตรับได้

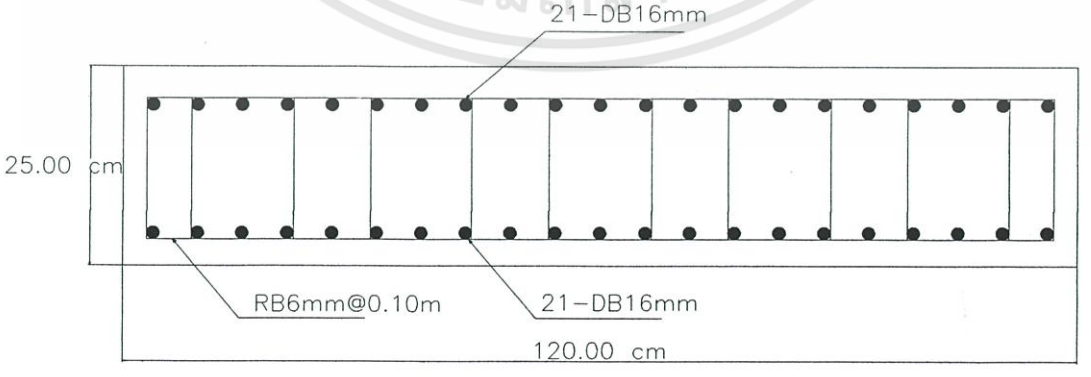
$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd = 0.53 \times \sqrt{400} \times 120 \times 20.6 = 26203.2 \text{ kg.} > V_n$$

ดังนั้น ใช้ RB 6 จำนวน 10 ขา (Av=10x0.283=2.83 cm.)

ระยะเรียงมากสุด $s_{max} = \frac{Av \cdot f_s}{3.5b} = \frac{2.83 \times 2400}{3.5 \times 120} = 16.17$ cm.

หรือ $s_{max} = \frac{d}{2} = \frac{20.6}{2} = 10.30$ cm.

ดังนั้นใช้เหล็กปลอก RB 6 mm. @ 0.10 m.



รูปที่ 6.23. แสดงหน้าตัดการเสริมเหล็กของผนังอุโมงค์วิธีออกแบบคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
เปรียบเทียบผลการออกแบบ

7.1. กล่าวนำ

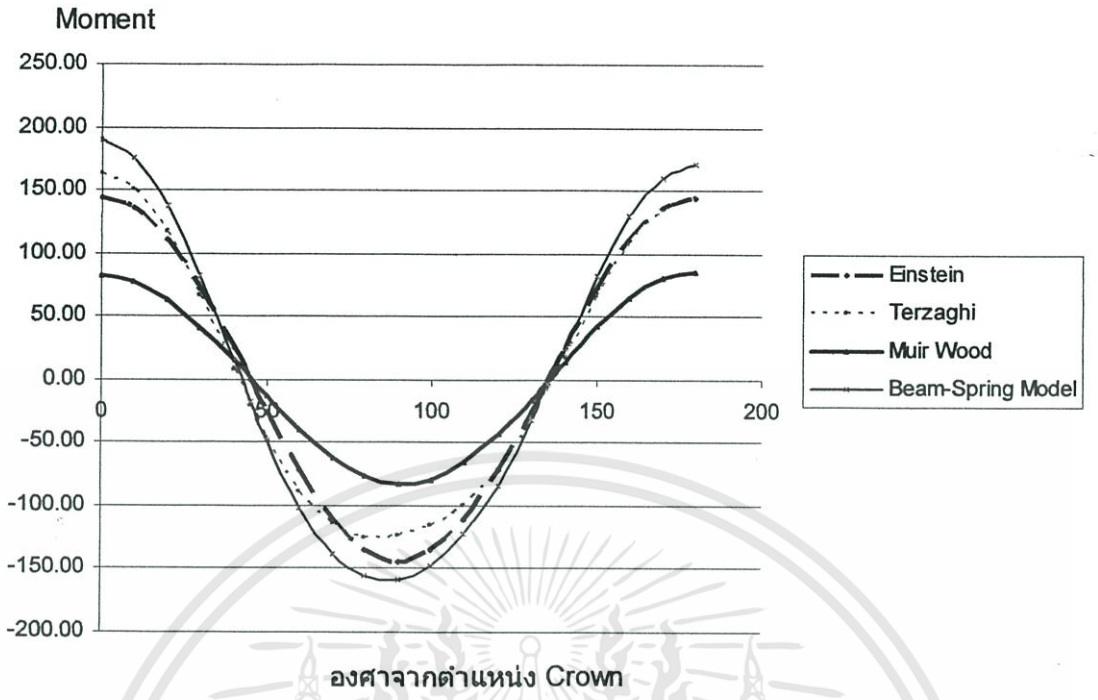
ในบทนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำภายในที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีต่างๆ ในบทที่ 4 รวมถึงเปรียบเทียบวิธีการเสริมเหล็กทั้ง 2 วิธีในบทที่ 5 แล้วสรุปถึงความเหมาะสมในการใช้ทฤษฎีในการคำนวณผนังอุโมงค์ใต้ดิน

7.2. การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำภายใน

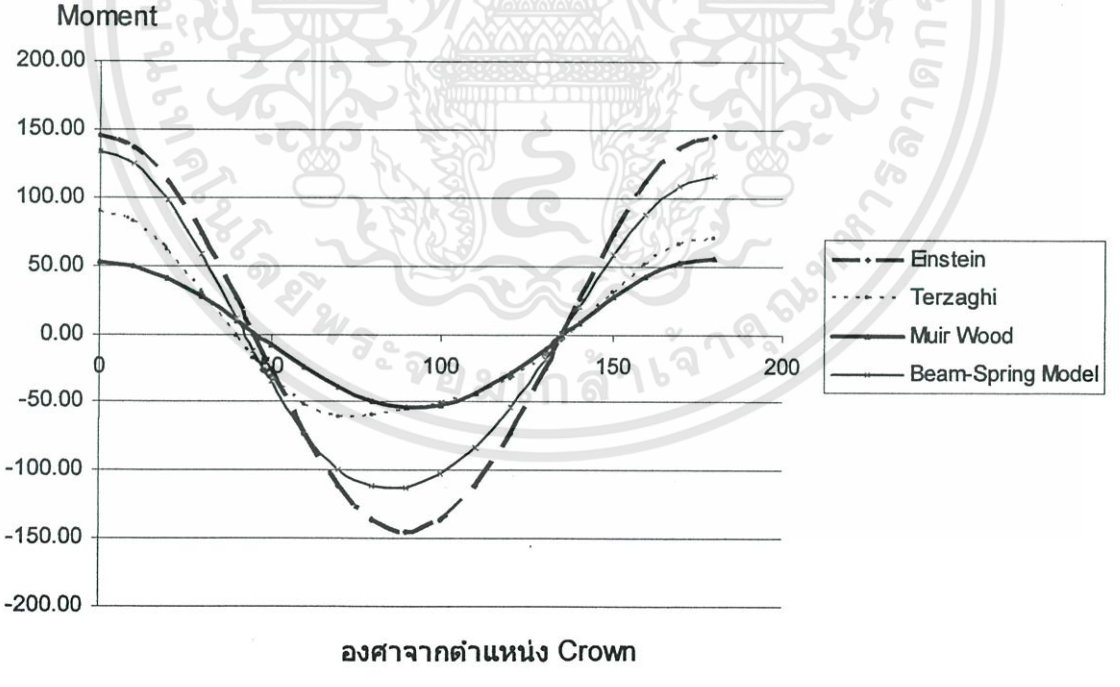
ตารางที่ 7.1. แสดงค่าแรงกระทำภายในของทฤษฎีต่างๆ

ทฤษฎี	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	M_{max} (kN-m/m)	N_{max} (kN/m)	M_{max} (kN-m/m)	N_{max} (kN/m)
Terzaghi	162.59	1147.45	89.01	1104.08
Einstein	144.22	1125.87	144.84	1089.27
Muir Wood	85.41	1165.33	55.84	1135.91
Beam-Spring Model	189.45	1147.45	133.88	1104.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1. กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Moment max ของทฤษฎีต่างๆในกรณีที่ 1



รูปที่ 7.2. กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Moment max ของทฤษฎีต่างๆในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการหาแรงกระทำภายในจากทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะพบว่า

1. ใน Case 1 อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นทราย ทฤษฎี Beam-Spring Model จะให้ค่า Moment Max มากที่สุด ส่วนใน Case 2 ที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง ทฤษฎีของ Einstein จะให้ค่า Moment Max มากที่สุด
2. ทฤษฎีของ Einstein จะให้ค่า Moment Max ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งในดินทราย และดินเหนียวแข็ง
3. ค่า Moment max ที่ได้จากทฤษฎี Muir Wood จะมีค่าน้อยที่สุดในทั้ง 2 Case เมื่อเทียบกับทฤษฎีอื่น
4. ค่า Axial Force Max ของทั้ง 2 Case จะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ทฤษฎีของ Muir Wood แต่ก็ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่า Axial Force Max ของทฤษฎีอื่นๆ

จากการศึกษาทฤษฎีการหาแรงกระทำภายใน ในที่นี้จะเลือกทฤษฎีที่เหมาะสมต่อการออกแบบเพื่อความปลอดภัย โดยทฤษฎีของ Terzaghi เป็นทฤษฎีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ออกแบบอุโมงค์ที่อยู่ในดินทราย และทฤษฎีของ Einstein เหมาะสมที่จะนำมาใช้ออกแบบอุโมงค์ที่อยู่ในดินเหนียว ทฤษฎีของ Muir Wood นั้นมีค่าน้อยเหมาะสมที่จะนำมาใช้เมื่อคำนึงถึงด้านความประหยัด

7.3. เปรียบวิธีการออกแบบเหล็กเสริม

จากผลการหาปริมาณเหล็กเสริมจากวิธีที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะพบว่า

1. วิธีการออกแบบเสาสั้น พื้นที่เหล็กเสริมที่ได้มาจะต้องมีการตรวจสอบให้อยู่ในมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับวิธีการออกแบบเสาสั้น ก็คือ $0.01 < \rho < 0.08$ ซึ่งในตัวอย่างนี้ค่าที่ได้ $\rho = 0.014$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ แต่ในบางกรณีก็อาจจะไม่อยู่ในช่วงที่เกณฑ์กำหนดซึ่งจากผู้ที่ทำการศึกษาได้พบก็จะมีรายละเอียดที่จะแสดงอันได้แก่

- พื้นที่เหล็กเสริม(A_s) ที่คำนวณได้เกิดติดลบขึ้น นั่นก็แสดงว่า พื้นที่ของคอนกรีตก็เพียงพอต่อการรับแรงแล้ว แต่ตามมาตรฐานก็ต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปโดยให้ $\rho = 0.01$ ซึ่งถือเป็นค่าต่ำสุดที่ยอมให้ หรืออาจจะปรับลดขนาดของ Segment Ring ให้มีขนาดที่ลดลงก็ได้
- ค่า $\rho > 0.08$ ต้องมีการปรับขนาดของ Segment Ring ให้มีขนาดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมเพื่อลดปริมาณเหล็กเสริมให้ต่ำลง

2. วิธีการออกแบบคาน ในที่นี้การคำนวณจะคิดเฉพาะเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว แล้วพิจารณาให้ใช้เหล็กเสริมเท่ากันทั้งส่วนบนและส่วนล่างของ Segment Ring เนื่องจากต้องรับโมเมนต์ลบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมในผนังอุโมงค์ใต้ดิน ค่าปริมาณเหล็กเสริมของทั้ง 2 วิธีขึ้นอยู่กับค่าแรงกระทำภายในที่นำมาใช้พิจารณาออกแบบในที่นี้จะทำการเลือกใช้วิธีออกแบบเสาสั้นในการออกแบบ เพราะเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบคานสิ่งที่พบก็คือ วิธีออกแบบเสาสั้นพิจารณาแรงที่ครอบคลุมมากกว่าวิธีการออกแบบคาน และปริมาณเหล็กเสริมของวิธีทั้งสองวิธีการออกแบบเสาสั้นให้ปริมาณเหล็กเสริมที่ต่ำกว่า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
โปรแกรมช่วยในการคำนวณ
Ladkrabang Tunnel Lining Design Version 2.0

8.1. กล่าวนำ

โปรแกรม Visual Basic 6 สามารถออกแบบโปรแกรมให้ใช้งานง่ายเหมือน Windows ซึ่งช่วยให้เข้าใจการทำงานได้ไม่ยาก และคำนวณผลการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้มีชื่อว่า Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 2.0 โดยใช้ทฤษฎีของ Terzaghi คำนวณหาค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาสั้นของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบเหล็กเสริม ผลที่ได้คือค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด แรงในแนวแกนสูงสุด แรงเฉือนสูงสุดและค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ ซึ่งนำค่าที่ได้ไปออกแบบต่อไป

8.2. วัตถุประสงค์

1. โปรแกรมนี้เขียนขึ้นเพื่อใช้ช่วยในการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ได้สะดวกและรวดเร็ว
2. เพื่อให้บุคคลผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้ได้
3. เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างอุโมงค์ต่อไป

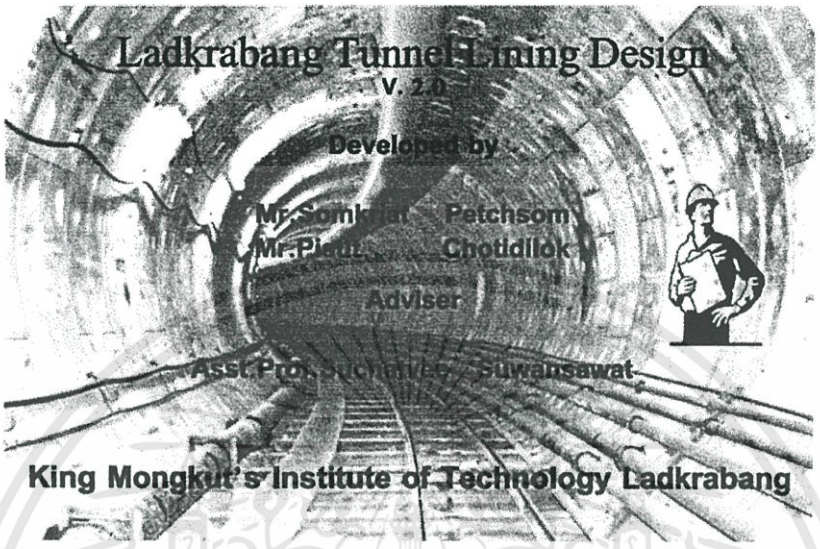
8.3. หลักการ

1. โปรแกรมนี้ได้ใช้สูตรการคำนวณออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินคือ Terzaghi เพื่อหาค่าแรงกระทำภายในและใช้วิธีออกแบบเสาสั้นของการออกแบบตามวิธีกำลังในการออกแบบเหล็กเสริม แล้วเขียนออกมาเป็นโปรแกรมโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0
2. ตัวโปรแกรมจะเข้าสู่การรับค่าและคำนวณต่อไป โดยสูตรของ Terzaghi ซึ่งสามารถบอกค่าโมเมนต์ดัด แรงในแนวแกนและค่าแรงเฉือนที่ 0 – 180 องศาและแสดงค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด แรงในแนวแกนสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดออกมา
3. โปรแกรมจะแสดงค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ พร้อมแบบก่อสร้างของหน้าตัดผนังอุโมงค์ใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4. วิธีการใช้โปรแกรม

1. เข้าสู่โปรแกรมโดยเรียกไฟล์ Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 2.0.exe

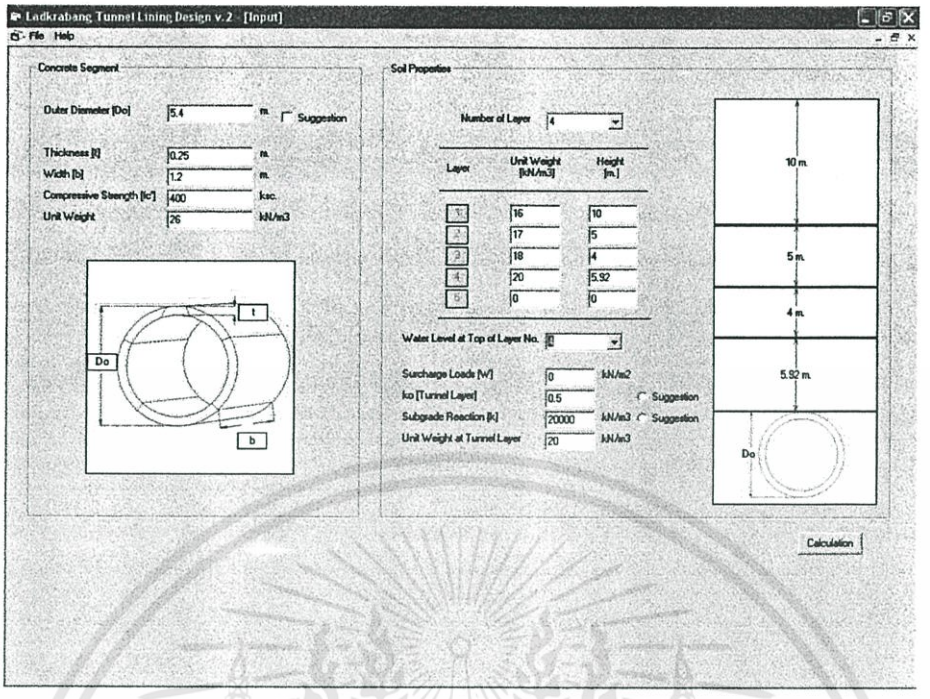


รูปที่ 8.1. แสดงหน้าจอต้อนรับสู่โปรแกรม Ladkrabang Tunnel Lining Design V. 2.0

เมื่อเข้าสู่โปรแกรม หน้าแรกจะเป็นหน้าต่าง Input ซึ่งเป็นหน้าต่างที่จะต้องใส่ค่าตามที่ต้องการ โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

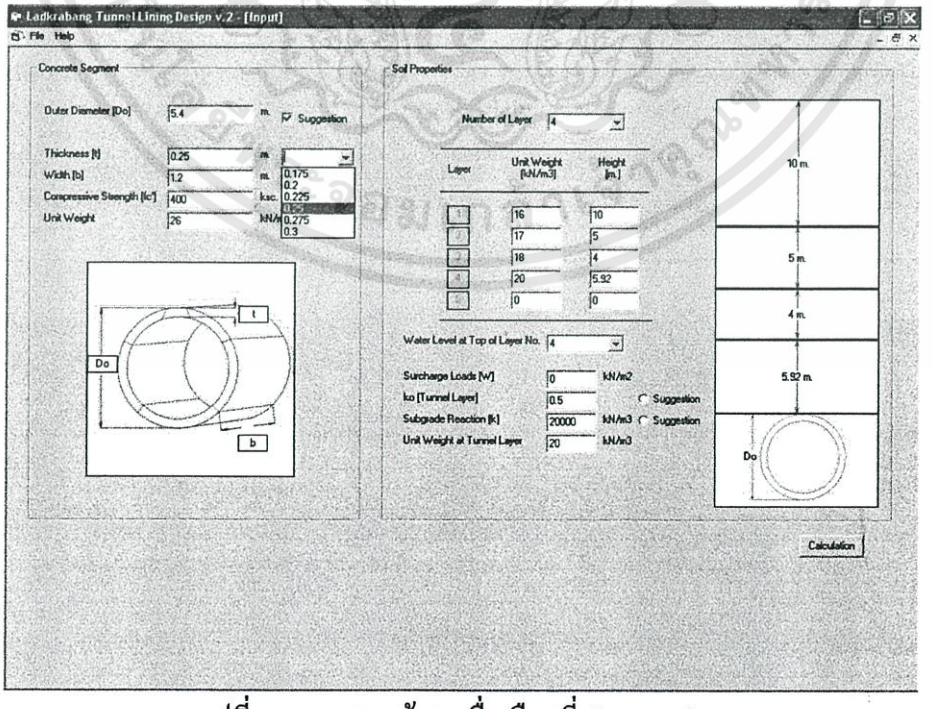
- Concrete Segment เป็นส่วนที่จะ Input ค่าที่เกี่ยวกับส่วนประกอบของวงแหวนผนังอุโมงค์ (Segment Ring) ได้แก่ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (Outer Diameter) ความหนาของผนังอุโมงค์ (Thickness) ความกว้างของวงแหวนประกอบผนังอุโมงค์ (Width) ค่า f_c' และค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (24-26 kN/m^3)
- Soil Properties เป็นส่วนที่จะ Input ค่าของสภาพชั้นดินในบริเวณที่ต้องออกแบบ โดยเริ่มจากการใส่ค่าจำนวนชั้นดิน (Number of Layer) จากนั้นใส่ค่าหน่วยน้ำหนักของดินและความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการใส่ค่า ระดับน้ำใต้ดิน Surcharge Load สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_o) ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ ค่า Subgrade Reaction Factor ของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่ และค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินที่อุโมงค์อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.2. แสดงหน้าจอรับค่า Input

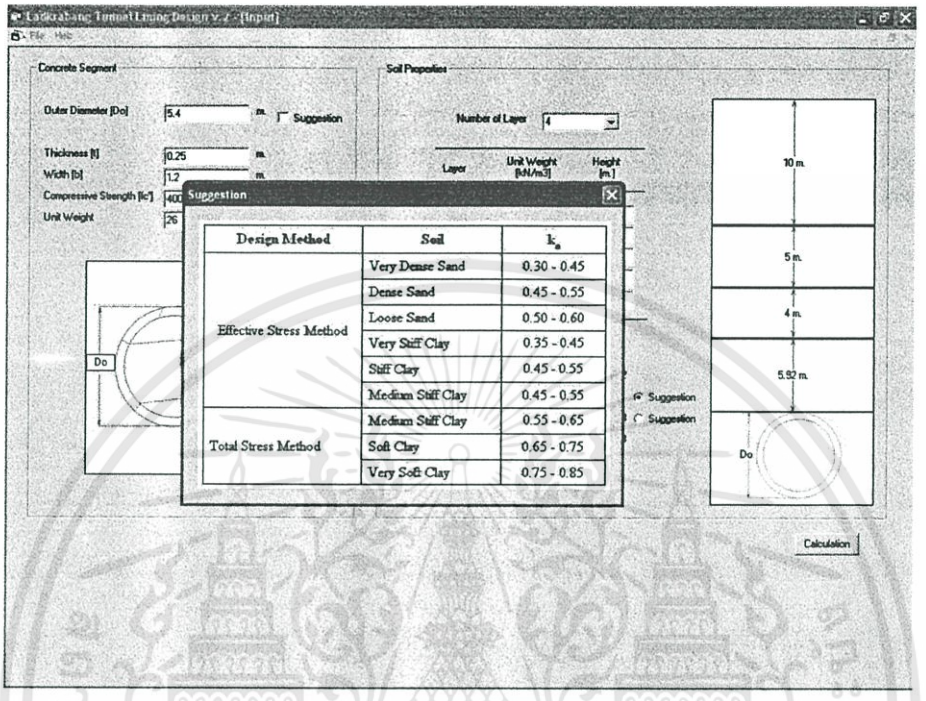
ถ้าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ (Outer Diameter) อยู่ในช่วงที่มีการก่อสร้างเป็นมาตรฐาน จะสามารถเลือกที่ Suggestion ได้ เมื่อเลือกที่ Suggestion ปรากฏตัวเลือกของความหนาของผนังอุโมงค์ (Thickness) และ ความกว้างของวงแหวนประกอบผนังอุโมงค์ (Width) ที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งจะใช้หรือไม่ก็ได้



รูปที่ 8.3. แสดงหน้าจอเมื่อเลือกที่ Suggestion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

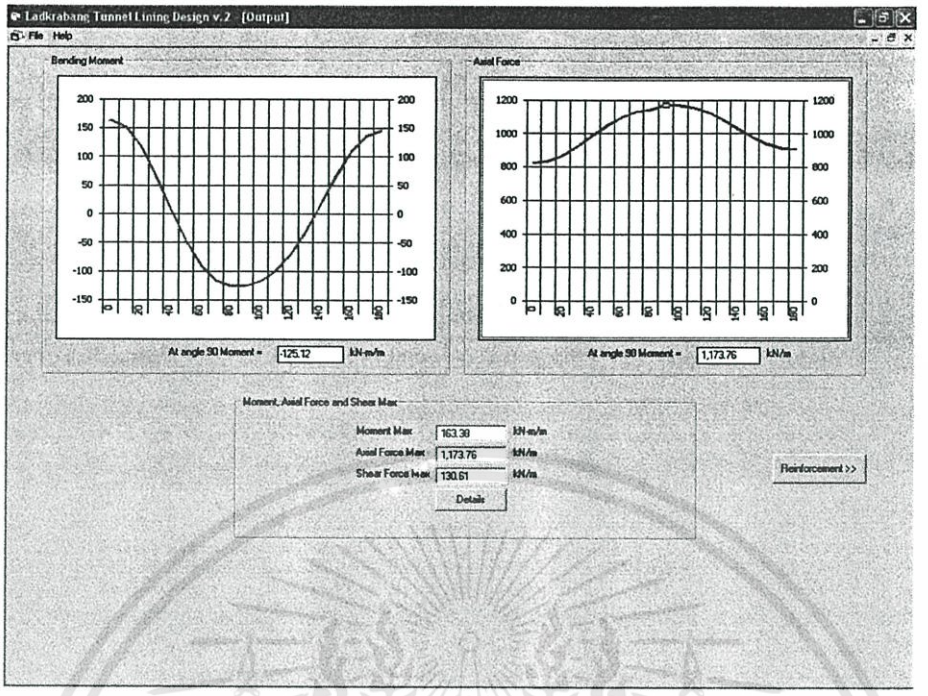
ถ้าต้องการค่าแนะนำของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_o) หรือค่า Subgrade Reaction Factor ให้คลิกที่เลือก Suggestion



รูปที่ 8.4. แสดงหน้าจอค่าแนะนำของค่า (k_o) และค่า Subgrade Reaction Factor

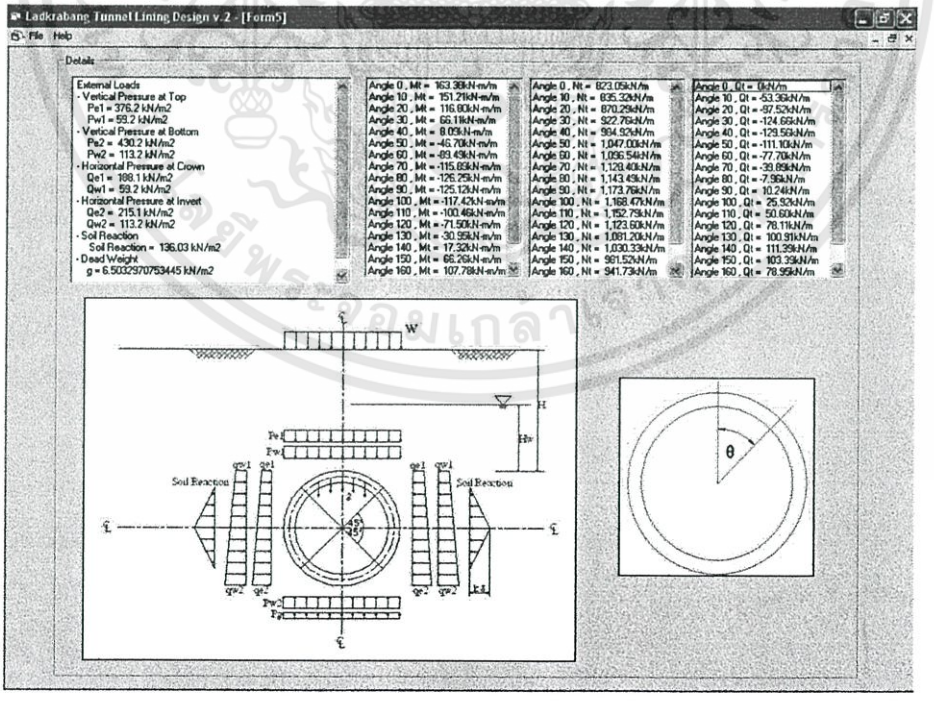
2. เมื่อคลิกปุ่ม Calculation ในหน้าแรก หน้าต่างผลการคำนวณก็แสดงขึ้น โดยจะประกอบด้วยกราฟแสดงค่า Bending Moment และ Axial Force ซึ่งแกนตั้งแสดงค่าแรง แกนนอนแสดงค่าองศาจาก Crown รวมถึงค่า Moment Max, Axial Force Max และ Shear Force Max

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.5. แสดงหน้าจอแสดงค่าแรงกระทำภายใน

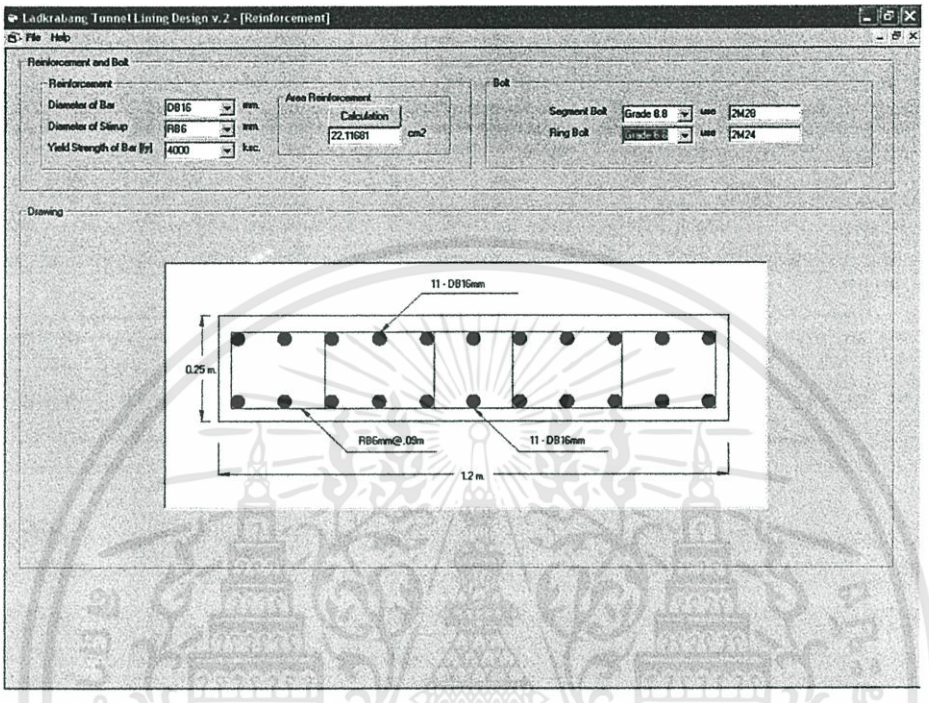
ถ้าต้องการดูรายละเอียดค่าที่ได้จากการคำนวณ ให้คลิกที่ปุ่ม Details หน้าต่างแสดงรายละเอียดจะแสดงขึ้น



รูปที่ 8.6. แสดงหน้าจอเมื่อคลิก Detials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

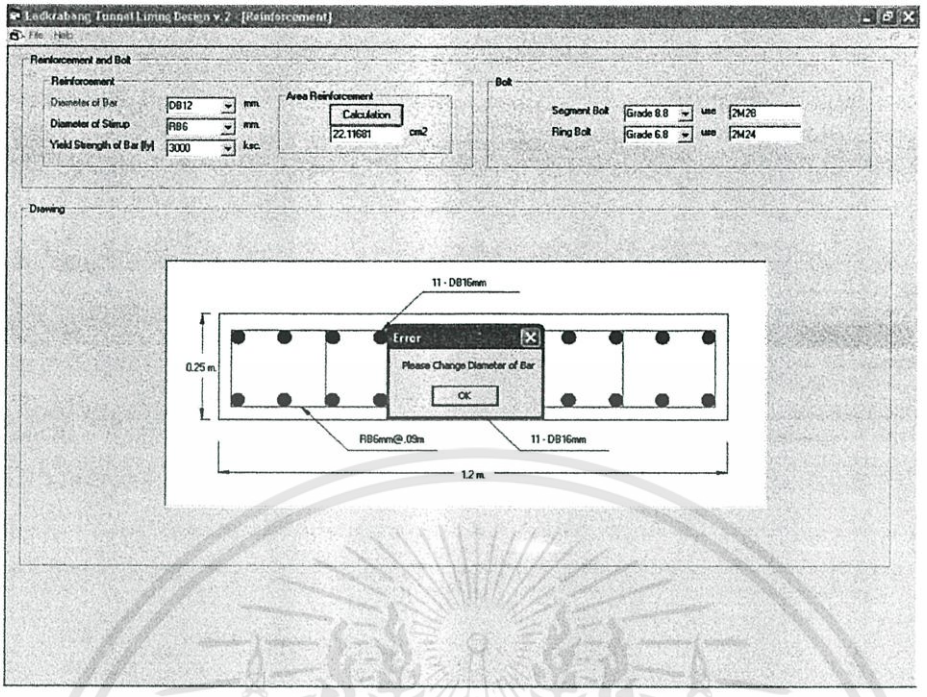
3. หน้าต่างการเสริมเหล็ก โดยเลือกขนาดของเหล็กเสริม (Diameter of Bar) ขนาดเหล็กปลอก (Diameter of Stirrup) และค่า f_y ของเหล็กเสริม แล้วคลิกที่ปุ่ม Calculation จะได้ค่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ หลังจากนั้นก็เลือก Grade ของ Segment Bolt และ Ring Bolt



รูปที่ 8.7. แสดงหน้าจอการเสริมเหล็ก

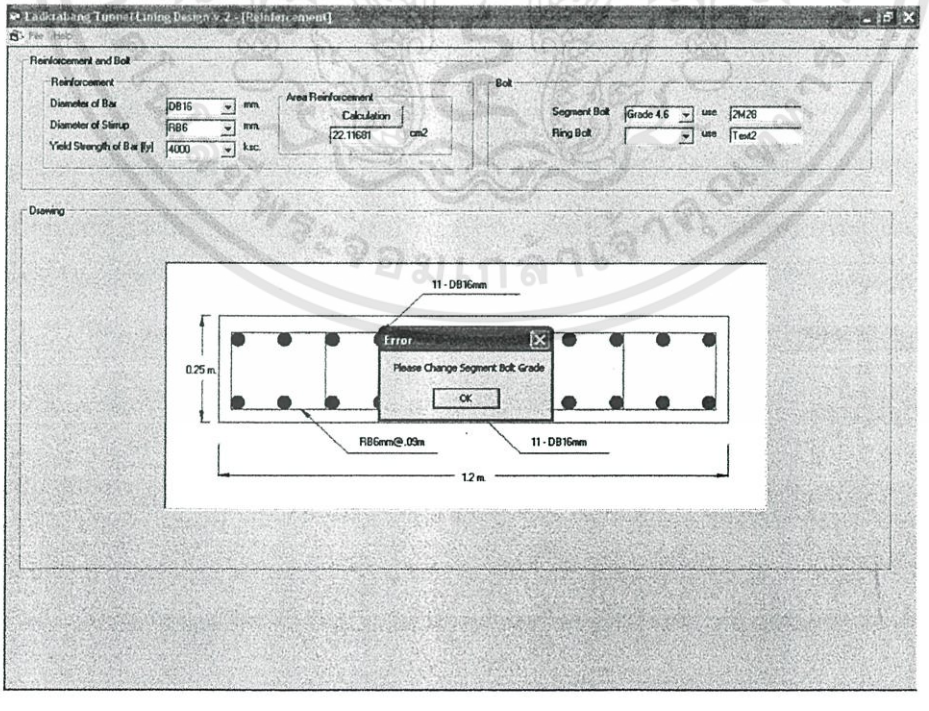
ถ้าขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Diameter of Bar”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



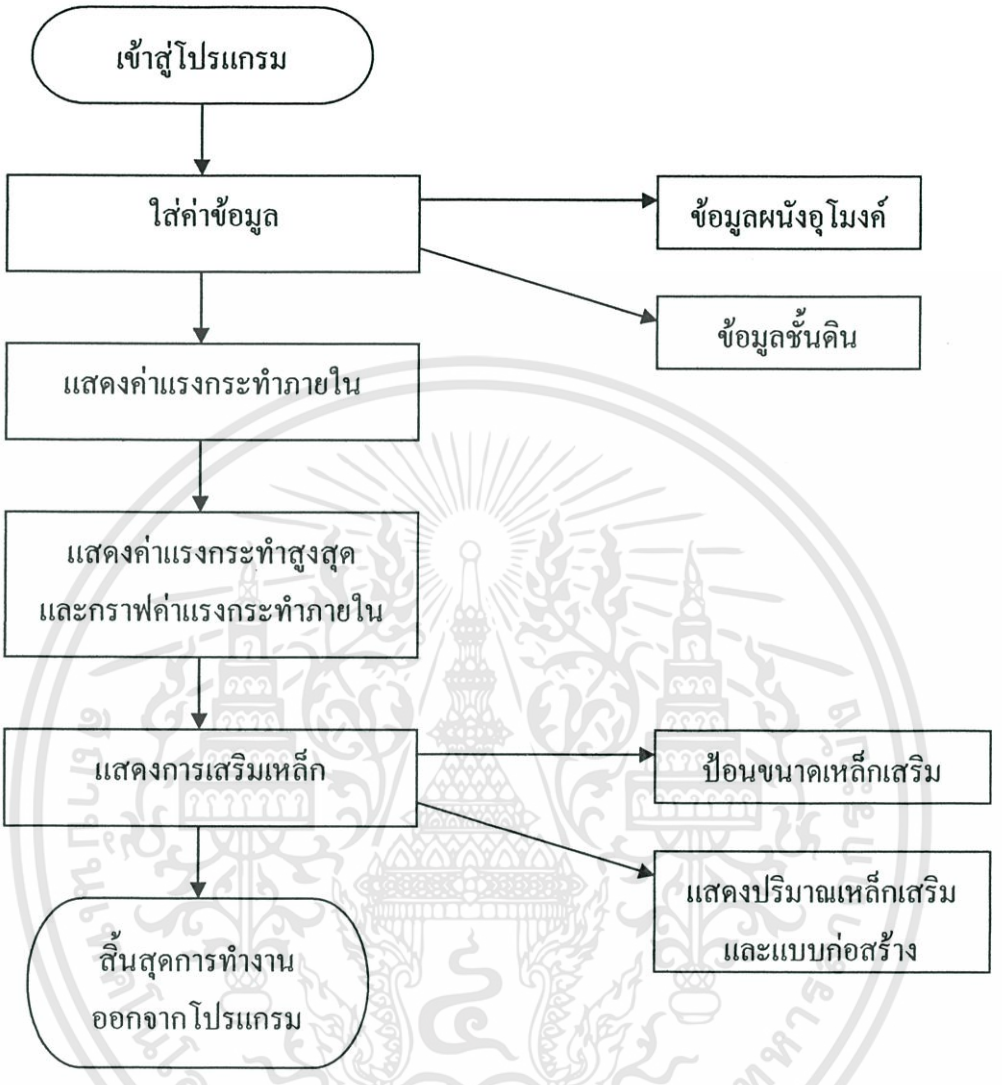
รูปที่ 8.8. แสดงหน้าจอเมื่อขนาดของเหล็กเสริมที่เลือกไม่เพียงพอ

ถ้า Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอจะปรากฏข้อความ “Please Change Segment Bolt” หรือ “Please Change Ring Bolt”



รูปที่ 8.9. แสดงหน้าจอเมื่อ Grade ของ Bolt ที่เลือกไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.10. แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

8.5. ข้อจำกัดของโปรแกรม

1. การวิเคราะห์แรงดันดินจะยอมให้วิเคราะห์เพียง 5 ชั้น แต่สามารถแก้ไขตัวโปรแกรมให้รับมากขึ้นได้
2. เป็นโปรแกรมที่ใช้ทฤษฎี Terzaghi เพียงทฤษฎีเดียวแต่ก็เป็นทฤษฎีที่ในปัจจุบันนิยมใช้
3. การเสริมเหล็กกำหนดค่าที่น้อยที่สุดคือ 1% ซึ่งในการใช้งานจริงอาจใช้ค่าน้อยสุดต่ำกว่า 1% ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9
ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

9.1. กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปของโครงงานพิเศษที่ได้ทำมาทั้งหมดและรวมถึงข้อเสนอแนะจากการที่ได้ศึกษาโครงงานพิเศษนี้

9.2. ข้อสรุป

1. การขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดิน โดยในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดก็คือ การเจาะอุโมงค์ใต้ดินโดยใช้หัวเจาะ Shield
2. ในการที่จะทำให้การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินเกิดความปลอดภัยและประหยัด เงื่อนไขพื้นฐานสำหรับการเลือกประเภทหัวเจาะ Shield ควรจัดให้อยู่ในขั้นการพิจารณาการขุด ผนังอุโมงค์ใต้ดินฯลฯ นอกจากสภาพของพื้นดิน สภาพของพื้นผิว มิติของส่วนตัด ความยาวของการก่อสร้าง การจัดเรียงตัวของอุโมงค์ใต้ดินและระยะเวลาการก่อสร้าง
3. การสำรวจควรปฏิบัติด้วยด้วยความปลอดภัย รวดเร็วและประหยัด
4. การเลือกความแข็งแรง โครงสร้างและประเภทของผนังอุโมงค์ควรเลือกให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้อุโมงค์ สภาพชั้นดินและวิธีการก่อสร้าง
5. ผนังอุโมงค์ใต้ดินปัจจุบันนิยมใช้คอนกรีต เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอนกรีตทันสมัยมากขึ้น ผลิตได้ง่ายและราคาก็ต่ำกว่าประเภทอื่นแต่ก็ขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินว่าเป็นอย่างไร ควรจะใช้ผนังประเภทไหนแบบใดควรพิจารณาถึงวิความปลอดภัย ความแข็งแรง และด้านราคาด้วย
6. อาจจะต้องเพิ่มผนังอุโมงค์รองในการใช้ประโยชน์ของอุโมงค์ใต้ดินบางกรณี เช่นอุโมงค์ระบายน้ำเสียที่ต้องใช้ผนังอุโมงค์รองเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
7. แรงที่กระทำต่ออุโมงค์สามารถพิจารณาได้หลายวิธี การนำไปใช้ควรดูที่ความนิยมและความน่าเชื่อถือเป็นหลัก โดยพิจารณาจากความสำเร็จของอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา
8. การออกแบบอุโมงค์นิยมใช้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด เพื่อนำค่า โมเมนต์ดัดที่ได้มาทำการออกแบบเหล็กเสริม เพราะฉะนั้นควรนำค่าจากทฤษฎีที่พิจารณาแล้วว่ามีความเหมาะสมมาใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การออกแบบเสริมเหล็กสามารถออกแบบได้หลายวิธี ควรเลือกวิธีที่มีความเหมาะสม ครอบคลุมถึงแรงกระทำภายในที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ใต้ดินและประหยัดวัสดุ
10. การใช้โปรแกรมช่วยคำนวณเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะสามารถแสดงผลการคำนวณได้รวดเร็วและสะดวกต่อการที่จะศึกษา

9.3. ข้อเสนอแนะ

1. หนังสือเล่มนี้สามารถนำมาศึกษาถึงรายละเอียดการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน และใช้ในการศึกษาถึงการออกแบบโดยมีขั้นตอนการออกแบบที่ละเอียดและสามรถเข้าใจได้ง่าย
2. โปรแกรมที่เขียนขึ้นเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาการออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดิน
3. การออกแบบโดยวิธี Beam-Spring Model ควรจะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในบางส่วน โดยเฉพาะการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ (η) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ (η) ที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้เป็นค่าเดียวกับของทฤษฎี Terzaghi ซึ่งในความจริงนั้นค่าที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่า 1 แต่ในการศึกษายังมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะระบุค่าสัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ (η) ที่เหมาะสม
4. ควรลองศึกษาการออกแบบเหล็กเสริมโดยทฤษฎีอื่น ซึ่งอาจจะให้ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมมากกว่าทฤษฎีตามที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้
5. หนังสือเล่มนี้มีประโยชน์ต่อวิศวกรของประเทศไทย ช่วยให้มีความรู้ในด้านการก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดินเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถทำงานด้านการก่อสร้างผนังอุโมงค์ใต้ดินในประเทศไทยได้โดยไม่ต้องใช้บุคลากรจากต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์, แหลมทอง เหล่าคงถาวร และ วสันต์ชัย ชวศิริกุลฑล, 2536.การออกแบบผนังอุโมงค์ใต้ดินสำหรับดินกรุงเทพฯ. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ชัชว์ ไชยวงศ์เหล็ก, วิรัช ประนัดเต และ ศิริพงษ์ นาคทอง, 2546. การศึกษาการออกแบบและก่อสร้างผนังอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- ปิยะณัฐ แสงจันทร์, 2546. การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่ออุโมงค์ใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Japan Society of Civil Engineers, 1996. Japanese Standard For Shield Tunneling. Third Edition. Japan : Toshindo Co.,Ltd.
- ดร. ศรีกริช หิรัญมาศ, มกราคม 2544. คอนกรีตเสริมเหล็ก-พฤติกรรมและการออกแบบ-ตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

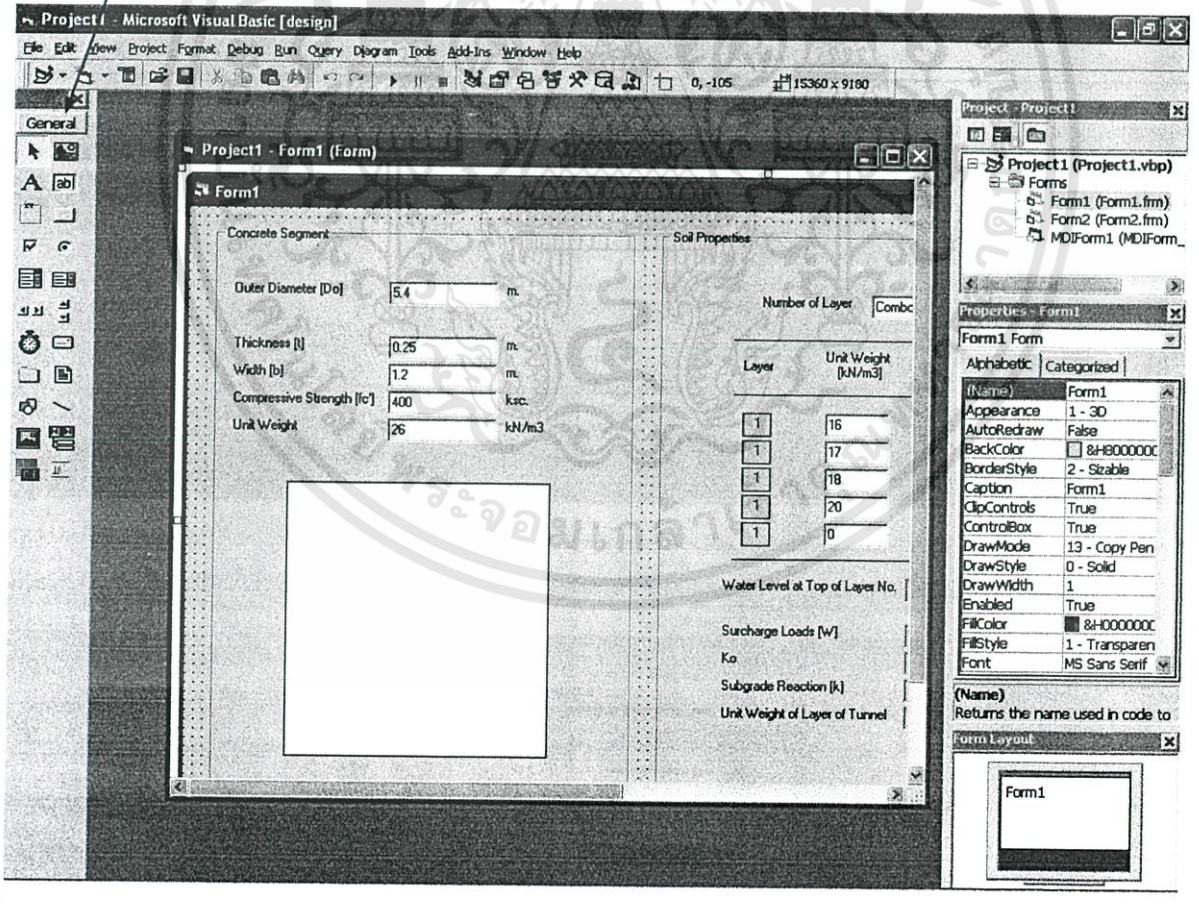
แนวทางการเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำโปรแกรมมาปรับปรุงได้โดยไฟล์ทั้งหมดจะเก็บไว้ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยโปรแกรมเขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เริ่มจากการจัด Layout ของวัตถุต่างๆ เมื่อจัด Layout เสร็จแล้ว ก็จะทำการเขียน Code เพื่อให้วัตถุต่างๆที่จัด Layout ไว้ทำงานตามที่ต้องการ

หน้าต่างวัตถุแบบต่างๆที่จะนำมาใส่ในฟอร์มเพื่อใช้งาน โดยคลิกที่ปุ่มแล้วมาที่ฟอร์มเพื่อวางบนฟอร์มโดยลากเมาส์แล้วปล่อยบนฟอร์มจะปรากฏวัตถุนั้นขึ้นมา จากนั้นทำการปรับแต่งคุณสมบัติที่หน้าต่างคุณสมบัติและลักษณะการทำงานของวัตถุโดยแก้ไขที่ Code

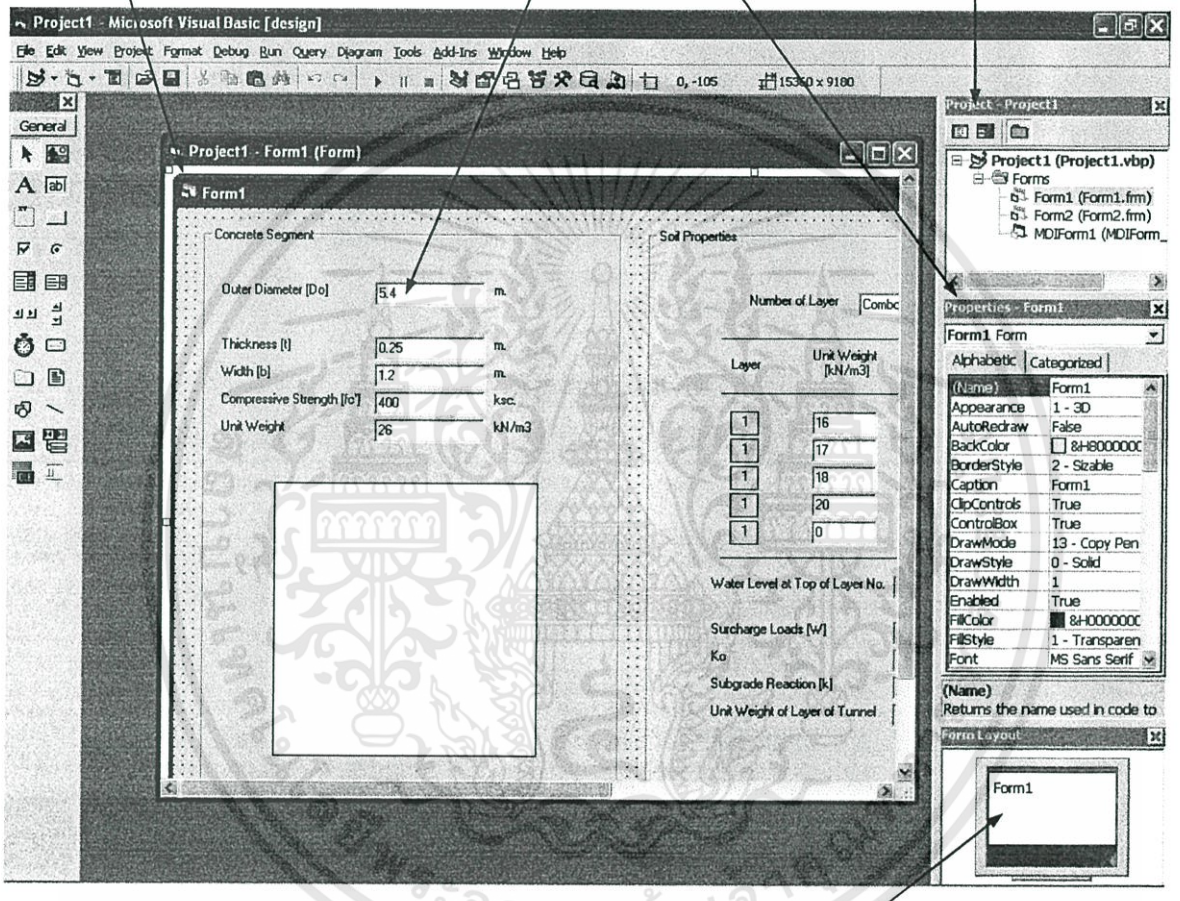


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่างวัตถุของฟอร์มที่เลือก

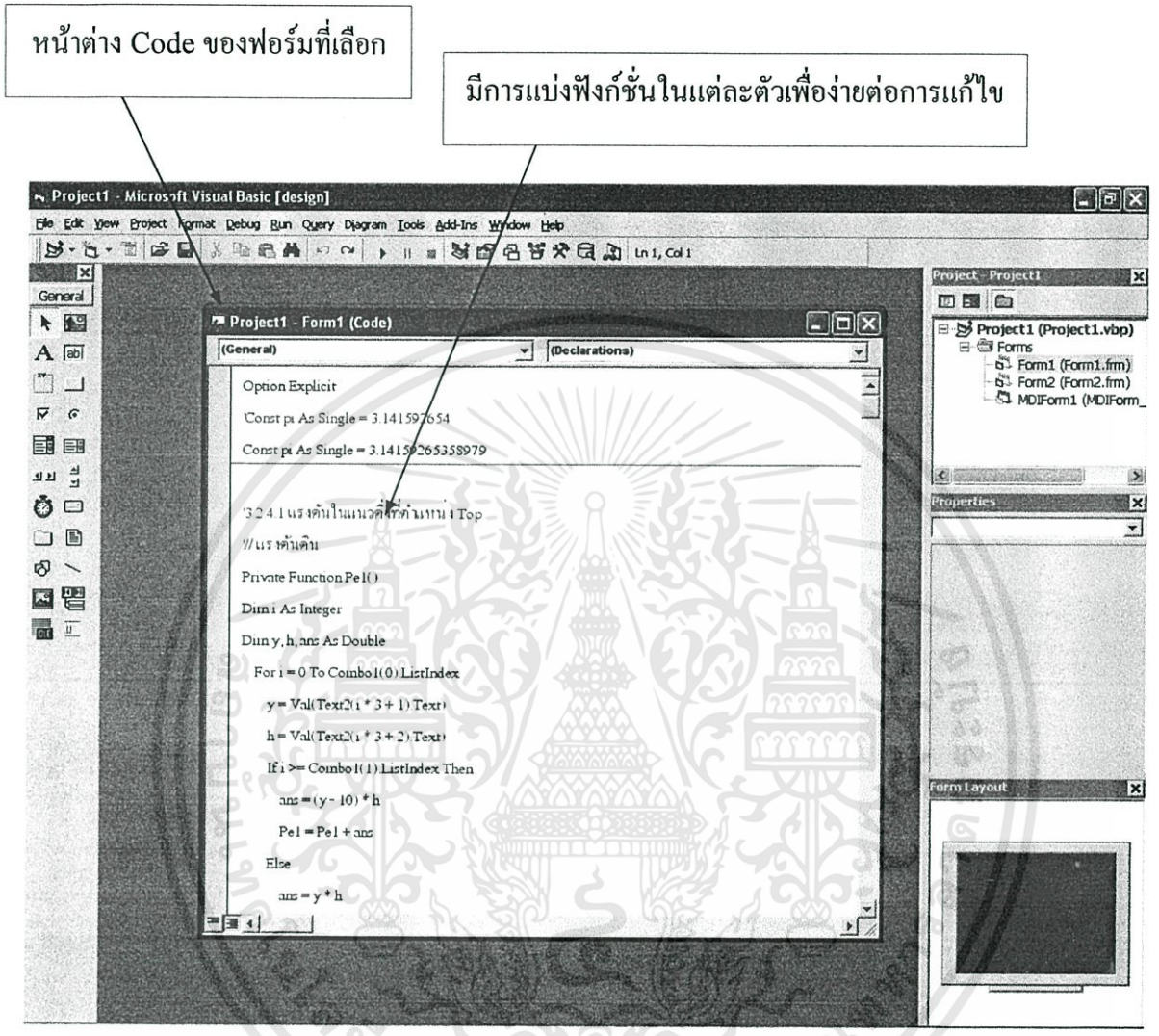
วัตถุที่เลือกจะมีคุณสมบัติตามหน้าต่างคุณสมบัติทางด้านขวา สามารถปรับแต่งคุณสมบัติต่างๆได้โดยผู้ใช้ต้องมีความรู้ด้าน Visual basic บ้าง

หน้าต่างฟอร์ม



หน้าต่าง Layout เพื่อกำหนดให้หน้าต่างฟอร์มปรากฏที่ส่วนใดของหน้าจอคอมพิวเตอร์เมื่อรันโปรแกรม

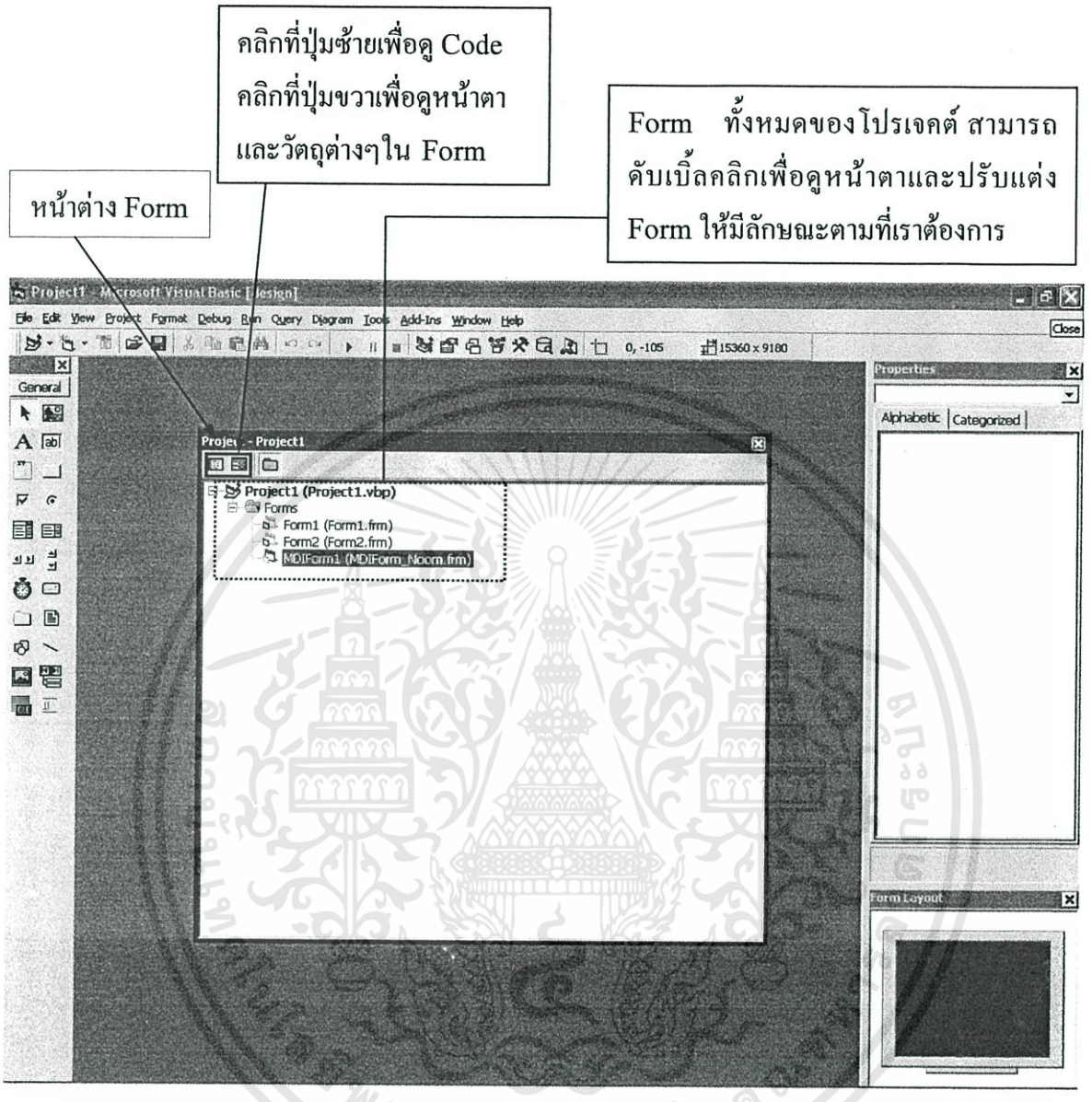
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วัตถุต่างๆเราสามารถปรับแต่งหน้าตาและการทำงานเมื่อมีการกระทำต่อวัตถุนั้นๆได้ โดยสามารถดู Code เพื่อแก้ไขปรับปรุงได้ ซึ่งต้องมีความรู้ทางด้านการเขียนโปรแกรมมาก่อนและมีการศึกษาการใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 มาแล้ว เพื่อให้สามารถเข้าใจได้อย่างรวดเร็ว

เราสามารถดู Code ของวัตถุต่างได้ง่ายๆ โดยดับเบิ้ลคลิกวัตถุต่างๆที่อยู่บนฟอร์ม หากฟอร์มใดยังไม่มีการสั่งการกระทำ ก็ไม่มีการเขียน Code ขึ้น (ส่วนใหญ่การกระทำที่จะเกิดขึ้นเมื่อโปรแกรมทำงานจะเป็นการคลิกที่วัตถุ นอกนั้นก็เป็นการใส่ค่า, การเลือก เป็นต้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฟอร์มทั้งหมดเป็น MDI (Multiple Document Interface) คือมีฟอร์มหลักได้แก่ ฟอร์มชื่อ Ladkrabang และฟอร์มที่เหลือคือฟอร์มลูก ลักษณะของฟอร์มแบบนี้ใช้งานกับโปรเจคต์ที่มีหลายฟอร์ม ทำให้สามารถเปิดหน้าต่างฟอร์มลูกอื่นๆได้พร้อมกันทีเดียวหลายๆตัว โดยฟอร์มหลักหรือฟอร์มแม่จะมีแค่ฟอร์มเดียวและไม่จำเป็นต้องมีลักษณะหน้าตาเลยก็ได้แต่ต้องมี code เพื่อให้โปรแกรมเริ่มต้นทำงาน

โปรแกรมนี้สามารถเข้าใจได้ไม่ยากนักเพราะไม่ซับซ้อน และผู้ทำโปรแกรมหวังจะพัฒนาตัวโปรแกรมให้ดีขึ้นไปกว่านี้ หากมีปัญหาสงสัยกับการใช้งานสามารถสอบถามได้ที่อีเมล์ด้านล่าง

Email: en_noom24@hotmail.com

Email: pisut42@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้