

การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS ON BEHAVIOR OF EXISTING TUNNEL
DUE TO INFLUENCE OF PILE ROW



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-093-014

การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

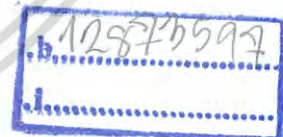
3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS ON BEHAVIOR OF EXISTING TUNNEL
DUE TO INFLUENCE OF PILE ROW



T148695

ณัฐธิดา ขวัญลิขิต
NATTIDA KWANLIKIT

จพ.
ร.ว. 32917
2560
เลขที่ 148695
เลขทะเบียน
ขึ้นเดือนปี 14 มี.ย. 2560



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-093-014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS ON BEHAVIOR OF EXISTING TUNNEL
DUE TO INFLUENCE OF PILE ROW



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-093-014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Thesis Title 3-D Finite Element Analysis on Behavior of Existing Tunnel due to Influence
of Pile Row

นักศึกษา นางสาวณัฐธิดา ขวัญลิขิต

รหัสประจำตัว 58601285

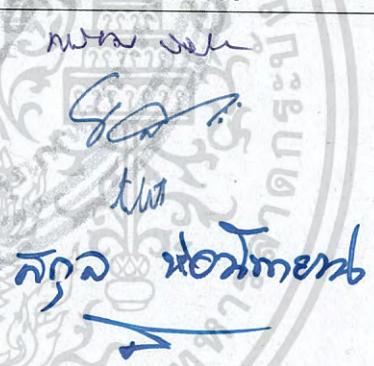
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-093-014

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	
ผศ.ดร.ธนาดล	คงสมบูรณ์	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศิธร	
รศ.ดร.สกุล	ห่อวโนทยาน	
ศ.ดร.สุชัชวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องใช้อย่างถูกต้องตามที่มีการนำไปใช้

วันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจาก
อิทธิพลของเสาเข็มแถวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

นักศึกษา

นางสาวณัฐธิดา ขวัญลิขิต

รหัสประจำตัว

58601285

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)

รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการพัฒนาเมืองในพื้นที่จำกัดต้องอาศัยการก่อสร้างอุโมงค์ โดยเฉพาะการพัฒนา
ระบบการขนส่งมวลชน ซึ่งในบางพื้นที่โครงการก่อสร้างที่เกิดขึ้นใหม่อาจต้องอยู่ใกล้เคียงกับอุโมงค์ที่
มีอยู่เดิม เช่น สะพานข้ามแยกที่มีฐานรากแบบเสาเข็มแถวและมักวางตัวไปตามแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้
ดิน งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของเสาเข็มแถวที่รับแรงต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
แบบ 3 มิติและ 2 มิติ โดยศึกษาผลกระทบต่ออุโมงค์ทั้งในแนวระนาบ (transverse plane) และ
แนวยาว (longitudinal plane) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์
สูงสุด, แรงภายในผนังอุโมงค์, รวมถึงการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมของ
เสาเข็มแถว จากผลการศึกษาพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดมีค่ามากที่สุดเมื่อระดับปลาย
เสาเข็มอยู่ลึกกว่าอุโมงค์ 1 เท่าของขนาดอุโมงค์ ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวภายใน
ผนังอุโมงค์เพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ระยะ $0.9D_T - 1.5D_T$ (D_T = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์) จากขอบ
เสาเข็มต้นริมสุด สำหรับผลการศึกษาแบบจำลองของผลกระทบเสาเข็มแถวในงานวิจัยนี้จำนวน
เสาเข็มที่สามารถสะท้อนถึงผลกระทบของเสาเข็มแถวสำหรับแบบจำลองแบบ 3 มิติ คือ 9 ต้น และ
ผลการวิเคราะห์จาก 2D-FEM มากกว่า 3D-FEM ประมาณ 1.3-1.4 เท่า

Title	3-D Finite Element Analysis on Behavior of Existing Tunnel due to Influence of Pile Row
Student	Miss Nattida Kwanlikit
Student ID.	58601285
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Prof.Dr.Suchatvee Suwansawat
Thesis Co Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pornkasem Jongpradist

ABSTRACT

Tunnels have been increasingly constructed due to urban development in many cities, especially the development of the mass transit system. The new projects are thus unavoidably constructed in the close proximity to the existing tunnels. These structures may require pile rows that are possibly located along the existing tunnel. This study presents the effect of pile row under loading on the existing tunnel by using 3D and 2D finite element analyses. The effects on both transverse plane and longitudinal plane are investigated. The results were illustrated in terms of the change of maximum diameter and internal force of the tunnel lining. The results show that the change of maximum diameter becomes greatest when the pile tip was located $1.0D_T$ underneath the tunnel center. The change of longitudinal bending moment on the tunnel lining increases at the distance of $0.9D_T - 1.5D_T$ from the edge of the last pile. The minimum number of piles required to represent the maximum change mid plane is 9. The simulated tunnel deformation from 2D-FEM is 1.3-1.4 times larger than that from 3D-FEM.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ และ รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุญาตให้ใช้โปรแกรม Plaxis 3D เวอร์ชัน 2013.1

ขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และ บริษัท ดี ทู คอนซัลท์ เอเชีย จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสัญญาเลขที่ MSD58I0137

ขอขอบคุณ ศูนย์นวัตกรรมการก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์พระจอมเกล้าลาดกระบัง (LUTIC) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บิดามารดาที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในการเรียนเสมอมา
สุดท้ายต้องขอขอบคุณนายประทีป หล่อประเสริฐ, นายณัฐนาท เหมะ, นางสาวกชมน เรืองวิโรจนกุล และนางสาวดวงกมล ศิริรักษ์ ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ติดตลอดมา
สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐธิดา ขวัญลิขิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	5
2.2.1 เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	5
2.2.2 ผนังอุโมงค์.....	7
2.2.3 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น.....	8
2.3 การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ.....	10
2.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	13
2.4.1 วิธีการวิเคราะห์.....	13
2.4.2 วิธีการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์.....	14
2.5 ข้อมูลทั่วไปโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA).....	15
2.5.1 แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย.....	15
2.5.2 สภาพทางธรณีวิทยา.....	16
2.6 ฐานรากเสาเข็ม.....	18
2.6.1 พฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็ม.....	18
2.6.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load Capacity).....	19
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม.....	20
2.8 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการวิเคราะห์.....	26
3.1 กล่าวนำ.....	26
3.2 ลักษณะศึกษาที่พิจารณา.....	26
3.3 รูปแบบการวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane).....	29
3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว.....	29
3.3.2 การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว.....	29
3.3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์.....	29
3.3.4 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ.....	29
3.4 การศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal).....	30
3.4.1 การเสียรูปของอุโมงค์ในแนวระนาบ ณ ตำแหน่งต่างๆในแนวยาว.....	30
3.4.2 การเคลื่อนตัวในแนวยาว (longitudinal movement) ของอุโมงค์.....	30
3.4.3 โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์.....	30
3.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	30
3.5.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (โครงข่ายแบบจำลอง).....	30
3.5.2 คุณสมบัติแบบจำลอง.....	31
3.5.3 ขอบเขตแบบจำลองการวิเคราะห์และเงื่อนไขเริ่มต้น.....	32
3.5.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	33
3.5.5 การประเมินผล.....	33
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	37
4.1 กล่าวนำ.....	37
4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane).....	37
4.2.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว.....	37
4.2.2 การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว.....	43
4.2.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์.....	44
4.2.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ.....	52
4.3 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal).....	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก การเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์.....	68
ภาคผนวก ข การปิดตัวของอุโมงค์.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	74



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของชั้นดิน	32
3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างใต้ดินวางตัวใกล้กับอุโมงค์เดิม.....	1
1.2 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	2
2.1 แผนภูมิของคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย MRTA.....	7
2.2 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผนังอุโมงค์และหัวเจาะ.....	8
2.3 ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush).....	9
2.4 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....	9
2.5 การพังทลายของอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์.....	11
2.6 การทรุดตัวของดินตามแนวการขุดเจาะ.....	11
2.7 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะเคลื่อนตัวเข้าสู่ตัวอุโมงค์.....	12
2.8 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะถูกผลักออกจากตัวอุโมงค์.....	12
2.9 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชั้นส่วนเล็กๆ.....	14
2.10 เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงินสถานีหัวลำโพง-สถานีอิสรภาพ.....	15
2.11 สภาพทางธรณีวิทยาโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงิน.....	17
2.12 การถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุก.....	19
2.13 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	21
2.14 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มและระยะห่างระหว่างเสาเข็มแถว.....	22
2.15 โซนอิทธิพล.....	22
2.16 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว.....	24
2.17 การเสียรูประหว่างรอยต่อของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....	25
3.1 ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง.....	27
3.2 รูปแบบของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	28
3.3 ตำแหน่งการวางตัวของปลายเสาเข็ม.....	28
3.4 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	31
3.5 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ.....	31
3.6 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของผิวดินที่ได้จากโครงการ MRTA กับ 3D-FEM [24].....	33
3.7 วิธีคำนวณการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์.....	34
3.8 ตำแหน่งหน้าตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว.....	35
3.9 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....	36
3.10 แสดงทิศทางของโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์.....	36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	39
4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน	40
4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	41
4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง	42
4.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอูโมงค์ (magnification ratio 1:1000).....	43
4.6 แสดงจำนวนเสาเข็มแถวที่เหมาะสมต่อการนำมาจำลอง	44
4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	45
4.8 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน	45
4.9 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	46
4.10 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง	46
4.11 องค์การบิดตัวจากการยึดตัวสูงสุดของผนังอูโมงค์ (α) ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	47
4.12 องค์การบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอูโมงค์ (β) ในชั้นดินเหนียวอ่อน	47
4.13 องค์การบิดตัวจากการยึดตัวสูงสุดของผนังอูโมงค์ (α) ในชั้นดินเหนียวแข็ง	48
4.14 องค์การบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอูโมงค์ (β) ในชั้นดินเหนียวแข็ง	49
4.15 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอูโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน (อัตราส่วน 1:500).....	50
4.16 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอูโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง (อัตราส่วน 1:500).....	51
4.17 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน	52
4.18 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน	53
4.19 ลักษณะกำแพงที่ตีที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ.....	54
4.20 แบบจำลองที่ Schroeder et al.(2004)[1] ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ	54
4.21 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ	55
4.22 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวระนาบ (บวก)	56
4.23 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวระนาบ (ลบ)	56
4.24 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวยาวของผนังอูโมงค์	57
4.25 การเสียรูปในแนวยาวของอูโมงค์ (อัตราส่วน 1:3000).....	58
4.26 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (บวก)	58
4.27 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (ลบ)	59
4.28 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป(ต่อ)

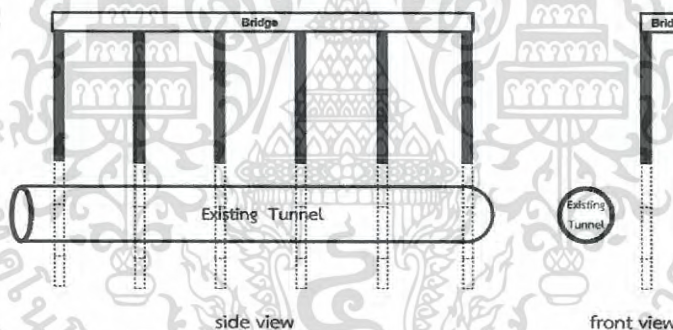
รูปที่	หน้า
4.29 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (บวก)	61
4.30 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (ลบ).....	61
ก.1 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอ้อมสูงสุดในลักษณะยึดตัว, กรณีศึกษาที่ 2.....	68
ก.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอ้อมสูงสุดในลักษณะหัดตัว, กรณีศึกษาที่ 2.....	68
ก.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอ้อมสูงสุดในลักษณะยึดตัว, กรณีศึกษาที่ 3.....	69
ก.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอ้อมสูงสุดในลักษณะหัดตัว, กรณีศึกษาที่ 3.....	69
ข.1 องค์การบิดตัวจากการยึดตัวสูงสุดของผนังอ้อม (α), กรณีศึกษาที่ 2.....	70
ข.2 องค์การบิดตัวจากการหัดตัวสูงสุดของผนังอ้อม (β), กรณีศึกษาที่ 2.....	70
ข.3 องค์การบิดตัวจากการยึดตัวสูงสุดของผนังอ้อม (α), กรณีศึกษาที่ 3.....	71
ข.4 องค์การบิดตัวจากการหัดตัวสูงสุดของผนังอ้อม (β), กรณีศึกษาที่ 3.....	71
ข.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอ้อมในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2 (อัตราส่วน 1:500).....	72
ข.6 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอ้อมในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 3 (อัตราส่วน 1:500).....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงการก่อสร้างใต้ดินและการก่อสร้างอุโมงค์เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาในเขตเมือง เช่น อุโมงค์ส่งน้ำประปา อุโมงค์ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ รวมถึงอุโมงค์ที่ใช้ในการคมนาคม ซึ่งปัจจุบันมีทั้งโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินที่กำลังก่อสร้าง โครงการที่ได้ก่อสร้างแล้วเสร็จ และโครงการที่วางแผนก่อสร้างในอนาคต โดยทั่วไป แนวเส้นทางอุโมงค์ของรถไฟฟ้าใต้ดินมักวางตัวไปตามแนวกิ่งกลางถนนที่เป็นพื้นที่สาธารณะในเขตเมืองซึ่งมักจะติดกับพื้นที่เอกชน จากการขยายตัวของเมืองเพื่อรองรับการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และอื่น ๆ ทำให้อาจมีการก่อสร้างบนพื้นที่เอกชนซึ่งติดกับเขตทางเพิ่มมากขึ้น หรือแม้แต่การก่อสร้างในพื้นที่ถนนของรัฐเอง เช่น สะพานข้ามแยก เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาจราจร เนื่องด้วยพื้นที่มีอย่างจำกัดจึงเป็นเรื่องยากที่จะหลีกเลี่ยงการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ไม่ให้วางตัวใกล้บริเวณที่มีอุโมงค์เดิมวางตัวอยู่ก่อนแล้ว ดังรูปที่ 1.1

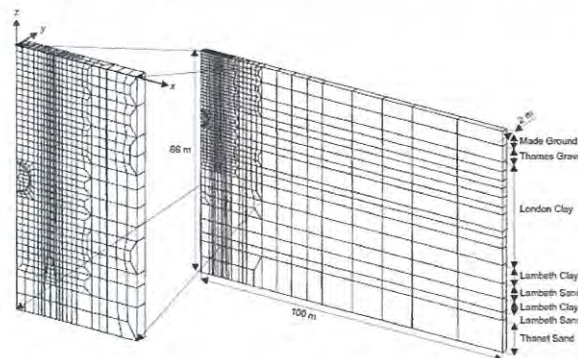


รูปที่ 1.1 โครงสร้างใต้ดินวางตัวใกล้กับอุโมงค์เดิม

ซึ่งการวางตัวของฐานรากลึก(เสาเข็ม)ใกล้กับอุโมงค์เดิมอาจส่งผลกระทบต่อทำให้อุโมงค์เกิดความเสียหายทางด้านเสถียรภาพ (stability) เช่น คอนกรีตผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าว หรือทางด้านการใช้งาน (serviceability) เช่น รางรถไฟบิดตัวเนื่องจากการเสีรูปของผนังอุโมงค์ เป็นต้น ทำให้มีงานศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์-เสาเข็มขึ้น เช่น Schroeder et al.(2004)[1] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) และการเสีรูปของอุโมงค์ โดยประเมินอิทธิพลจากน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำกับเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ ณ กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ โดยกำหนดความลึกของปลายเสาเข็มเพียงระดับเดียวซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับอุโมงค์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยแบบจำลองชิ้นส่วนสมมาตร (symmetry slices) แบบครึ่งเดียวดังรูปที่ 1.2 โดยที่ Schroeder et al.(2004)[1] มองว่าเสาเข็มในแถวมีจำนวนไม่สิ้นสุด ซึ่งการศึกษาดังกล่าวได้เปรียบเทียบกับกรวิเคราะห์แบบ 2 มิติที่ใช้หลักการแปลงค่า (transformation) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสาเข็มและระบุว่ากรณีเสาเข็มแถวสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี 2 มิติได้ แต่ในทางปฏิบัติจะมีจำนวนเสาเข็มในแถวแบบจำกัด ไม่ว่าจะเป็น สะพานข้ามแยก หรือ คอสะพาน (bridge approach) ซึ่งหากมีจำนวนเข็มในแถวที่มากพอ ณ บริเวณตรงกลางของแถว ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดจะมีค่าสูงสุดและเข้าใกล้สภาพแบบสองมิติที่เสมือนมีเสาเข็มในแถวแบบไม่จำกัด ฉะนั้นการประเมินอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) และการประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถวจึงเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้ระดับปลายเสาเข็มที่ความลึกแตกต่างกันบริเวณคอสะพาน (bridge approach) จะส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับต่างๆก็ไม่สามารถละเลยได้ แม้ในอดีต Heama et al.(2015)[2] ได้พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์จาก Schroeder et al.(2004)[1] โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำต่ออุโมงค์ใต้ดินของกรุงเทพมหานคร โดยแบ่งเป็นกรณีศึกษา 4 ชั้นดิน และกำหนดปลายเสาเข็มวางตัวอยู่หลายระดับ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะรูปร่างการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ และหลังจากนั้นในปีเดียวกัน Lueprasert et al.(2015)[3] ได้นำเสนอพื้นที่อิทธิพลจากปลายเสาเข็มที่มีต่ออุโมงค์เดิม (influence zone) โดยใช้ปัจจัยการวิเคราะห์เช่นเดียวกับ Heama et al.(2015)[2] แต่เลือกใช้การพิจารณาพื้นที่อิทธิพลจากเสาเข็มแบบแถวที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งเป็นระยะเดียวที่ถูกใช้ในการจำลองจากข้อจำกัดของ Heama et al.(2015) [2] ซึ่งศึกษาเพียงผลกระทบจากเสาเข็มเดี่ยวที่ระดับความลึกต่างๆ และ Lueprasert et al.(2015)[3] แม้จะศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มแถวแต่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวได้ถูกกำหนดเพียงระยะเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถวเพื่อประเมินหาจำนวนเสาเข็มภายในแถวที่ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดมีค่าสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดและองศาการบิดตัวของอุโมงค์เมื่อปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆ นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมางานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติร่วมด้วย ซึ่งการศึกษาเหล่านี้เป็นการศึกษาผลกระทบต้ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane)



รูปที่ 1.2 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอดีตนักวิจัยส่วนใหญ่มักสนใจศึกษาเพียงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane) ดังงานวิจัยของ [1], [2] และ [3] แต่ในความเป็นจริงอิทธิพลของเสาเข็มแถวในแนวยาวอาจส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ ไม่ว่าจะเป็นการบิดตัวเสียรูปไปในทิศทางต่างๆ ของอุโมงค์ หรือแม้กระทั่งแรงภายในผนังอุโมงค์ และที่ผ่านมาแม้จะมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว เช่น Liao et al.(2008)[4] และ Wu et al.(2015)[5] ได้ศึกษาแรงภายในผนังอุโมงค์ของอุโมงค์ในแนวยาวหลังจากการก่อสร้าง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ นอกจากนี้ Gong et al.(2015)[6] ได้ใช้สมการในการวิเคราะห์เพื่อศึกษา structural safety ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละตำแหน่งของอุโมงค์ในแนวยาว และยังได้บ่งชี้ว่าตำแหน่งที่อันตรายเนื่องจากค่า structural safety ของอุโมงค์ลดลงอยู่ในช่วง $-0.7i$ ถึง $-2.2i$ และ $0.7i$ ถึง $2.2i$ (i คือระยะจุดตัดกลับของอุโมงค์) ซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งของอุโมงค์ในแนวยาว อย่างไรก็ตามการศึกษากฎการของอุโมงค์ในแนวยาวของนักวิจัยเหล่านี้เป็นการศึกษาในกรณีไม่ได้รับผลกระทบจากโครงสร้างข้างเคียง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของเสาเข็มแถวรับน้ำหนักบรรทุกข้างเคียงต่อพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวร่วมกับการศึกษาผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยศึกษาการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวระนาบและการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวยาวของอุโมงค์ ทั้งโมเมนต์ดัดในระนาบ (circumferential bending moment) และโมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment) ของผนังอุโมงค์ ทั้งหมดนี้ศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยแบบจำลองแบบเต็ม (full model)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดของวัตถุประสงค์ได้ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนและระยะห่างของเสาเข็มภายในแถวที่มีต่ออุโมงค์เดิม
2. เพื่อศึกษาโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์โดยพิจารณาจากอุโมงค์ในแนวยาวเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวที่วางตัวอยู่ข้างเคียง
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของอุโมงค์โดยพิจารณาจากอุโมงค์ในแนวยาวเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวที่วางตัวอยู่ข้างเคียง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ PLAXIS 3D (เวอร์ชัน 2013.1) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว กำหนดให้รูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrain analysis) คุณสมบัติของชั้นดินและทางโครงสร้างได้รับจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA)

ขอบเขตการศึกษามีดังนี้

1. แบบจำลองของผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous ring)
2. เสาเข็มแถววางตัวอยู่ด้านข้างของอุโมงค์เพียงด้านเดียว
3. การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์จะไม่คำนึงถึงผลกระทบจากขั้นตอนการขุดเจาะ เสาเข็มและการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์จากขั้นตอนการก่อสร้าง



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้บรรยายเนื้อหาองค์ความรู้ที่ใช้ในการทำวิจัย แบ่งออกเป็น 7 หัวข้อหลัก คือ 1.การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ประกอบไปด้วย เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผนังอุโมงค์ และการอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเจาะและผนังอุโมงค์ 2.การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ 3.การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งได้บรรยายถึงวิธีการวิเคราะห์และวิธีการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ 4.ข้อมูลทั่วไปของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย 5.ฐานรากเสาเข็ม หัวข้อนี้เป็นส่วนเนื้อหาความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็มและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม 6.ความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์-เสาเข็ม และ 7.พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว

2.2 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล

ในปัจจุบัน โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนส่วนใหญ่ได้นำเทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) และหัวเจาะแบบความดันน้ำโคลน (Slurry shield) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลจะมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว (Cohesive soil) และหัวเจาะแบบความดันน้ำโคลนจะมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย (Cohesionless soil) เป็นหลัก

สำหรับในกรุงเทพฯ การก่อสร้างอุโมงค์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล เนื่องจากสภาพดินในกรุงเทพฯ มีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งที่มีความเหมาะสมกับหัวเจาะประเภทนี้ อีกทั้งระดับน้ำใต้ดินยังอยู่ในระดับลึกอีกด้วย

2.2.1 เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล

เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล อุโมงค์จะถูกขุดเจาะโดยหัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะ ดินที่ถูกขุดออกจะถูกลำเลียงด้วยเกลียวหมุนลำเลียงดิน (Screw conveyor) และสายพานลำเลียงดิน (Belt conveyor) จากห้องกักดิน (Earth chamber) จากนั้นการลำเลียงดินจะผ่านการขนย้ายโดยรถรางลำเลียงดินหรือใช้ระบบท่อสูบลำเลียงดินเข้าสู่เกลียวหมุนลำเลียงดินโดยตรง

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินให้น้อยที่สุด ความดันดินที่หัดัดดินด้านหน้าหัวเจาะจะต้องคอยติดตามและควบคุม ดังนี้

1) การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยทำการประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณีซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ

2) ในระหว่างการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ใช้จะต้องถูกบันทึก ควบคุม และรักษาให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้

3) ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ทำการกำหนดไว้ก่อนการขุดเจาะและความดันหน้าหัวเจาะที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการขุดเจาะ ต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะเพื่อใช้อ้างอิง

ห้องควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์มีหน้าที่ในการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะในขณะที่ทำการขุดเจาะ นอกจากนี้ความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมในระหว่างการขุดเจาะจะถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของหัวเจาะอยู่ภายใต้แผนผังการควบคุมของความดันที่กำหนดไว้

นอกจากนี้กรณีที่ใช้วิธีท่อสูบในการลำเลียงดินออกจะมีประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจากท่อสูบลำเลียงดินจะถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับเกลียวหมุนลำเลียงดิน ความเร็วในการลำเลียงดินผ่านท่อสูบจะต้องสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตันเนื่องจากตะกอนดิน และก็ต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้เกิดการสึกกร่อน แต่เนื่องด้วยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล อัตราของการลำเลียงดินจะต้องมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความดันที่ถูกควบคุมบริเวณส่วนหน้าของห้องกักดิน โดยการปฏิบัติการของหัวเจาะจะต้องทำการรักษาสมดุลของอัตราการลำเลียงดินและการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะเพื่อที่จะควบคุมความดันหน้าหัวเจาะตามที่กำหนด

ในปี 2544 [7] ได้ศึกษาศึกษาพฤติกรรมของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance, EPB Shield) ขณะขุดเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน โครงการรถไฟฟ้ามหานครในชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อพิจารณาปัจจัยควบคุมการขุดเจาะที่มีผลต่อการหลุดตัวของผิวดิน การควบคุมการขุดเจาะจะกำหนดอัตราส่วนดินขุด โดยการกำหนดความเร็วรอบของ Screw conveyor เพื่อควบคุมปริมาณดินออกจากห้องพักดิน การกำหนด Face Pressure ต้องให้สอดคล้องกับอัตราส่วนดินขุด พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของหัวเจาะจะมีลักษณะการเลื้อยคล้ายงู ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของแม่แรงในการควบคุมทิศทางการขุดเจาะ การวางตัวของหัวเจาะโดยปกติจะทำมุมเงยเมื่อเทียบกับแนวการขุดเจาะ เพื่อป้องกันการจมเนื่องจากน้ำหนักของหัวเจาะ ซึ่งจะเป็นผลให้เกิด Over-Excavation การควบคุมการหลุดตัวของผิวดิน ทำได้โดยการรักษาความมั่นคงของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ ด้วยการควบคุม Face Pressure ให้มีความเหมาะสมกับสภาพของชั้นดิน และสอดคล้องกับหน่วยแรงดันดินรวมด้านข้างสถิตย์ นอกจากนี้จะต้องควบคุมประสิทธิภาพการทำ Backfill Grouting ด้วยการกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ใช้ให้สอดคล้องกับสภาพของชั้นดินและหน่วยแรงดันดินรวมในแนวดิ่ง และจะต้องควบคุมอัตราส่วนการอุดช่องว่างให้มีค่ามากกว่า 100% เพื่อควบคุมปริมาณการทรุดตัวให้อยู่ในพิกัดที่เหมาะสม ($GL < 2.5\%$) ค่า Face Pressure ในกรณีการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินในชั้นดินเหนียวแข็ง กรุงเทพฯ ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 60-130 kN/square m. หรือ 45-100% ของหน่วยแรงดันดินรวมด้านข้างสถิตย และควบคุมอัตราส่วนดินชุดมีค่าอยู่ระหว่าง 100-115% การทำ Backfill Grouting ควรกำหนดแรงดันมีค่าอยู่ระหว่าง 2-3 bar หรือ 70-100% ของหน่วยแรงดันดินรวมแนวดิ่ง และควบคุมอัตราส่วนการอุดช่องว่างอยู่ในช่วง 110-150%

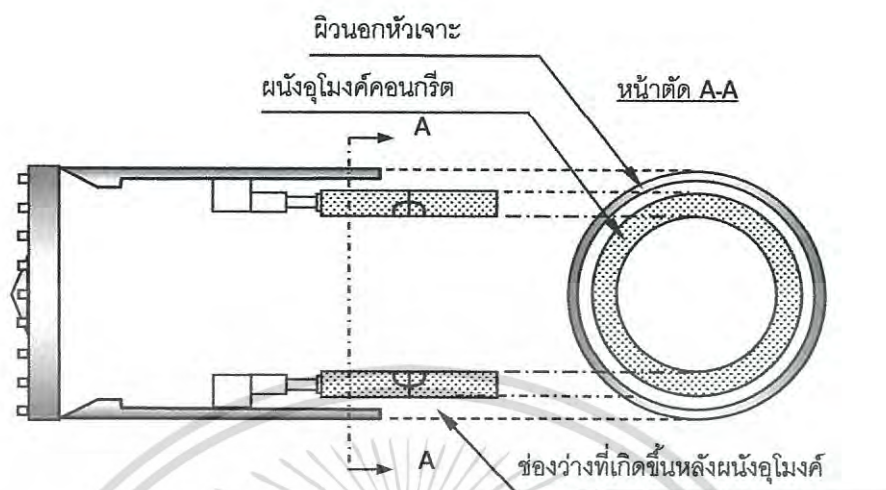
2.2.2 ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ โดยที่จะทำการติดตั้งบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบผนังถาวรในขั้นตอนเดียว (One-pass) เป็นระบบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขในการรักษาเสถียรภาพของการก่อสร้าง และใช้เป็นผนังอุโมงค์ถาวรในส่วนเดียวกัน โดยรูปที่ 2.1 แสดงผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) ในส่วนผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบสองขั้นตอน (Two-pass) จะประกอบด้วยผนังอุโมงค์ชั่วคราวที่ติดตั้งขึ้นเพื่อเสถียรภาพในการก่อสร้างเท่านั้น แล้วหลังจากนั้นจึงทำการติดตั้งผนังอุโมงค์ถาวร โดยทั่วไปผนังอุโมงค์ที่ประกอบกันเป็นอุโมงค์จะมีขนาดเล็กกว่าหัวเจาะ เพราะว่าการติดตั้งจะเกิดขึ้นภายในส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นโดยรอบแสดงไว้ใน รูปที่ 2.2 จะถูกเติมเต็มด้วยการอัดฉีดน้ำปูน ในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินเปียก ผนังอุโมงค์จะถูกยึดด้วยสลักเข้าหากันเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ตรงกันข้ามในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินแห้ง ผนังอุโมงค์อาจจะไม่จำเป็นต้องยึดเข้าหากันด้วยสลัก



รูปที่ 2.1 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย

MRTA[8]

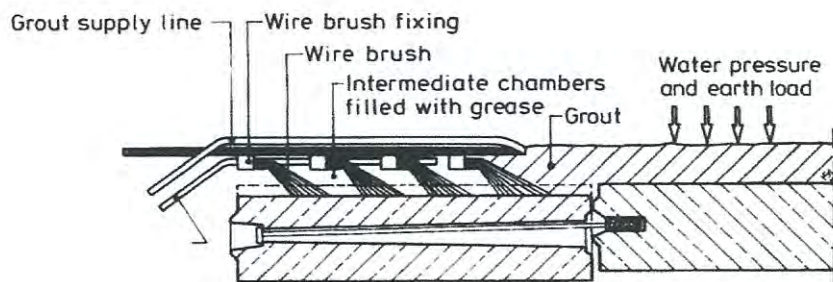


รูปที่ 2.2 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผนังอุโมงค์และหัวเจาะ[8]

2.2.3 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น

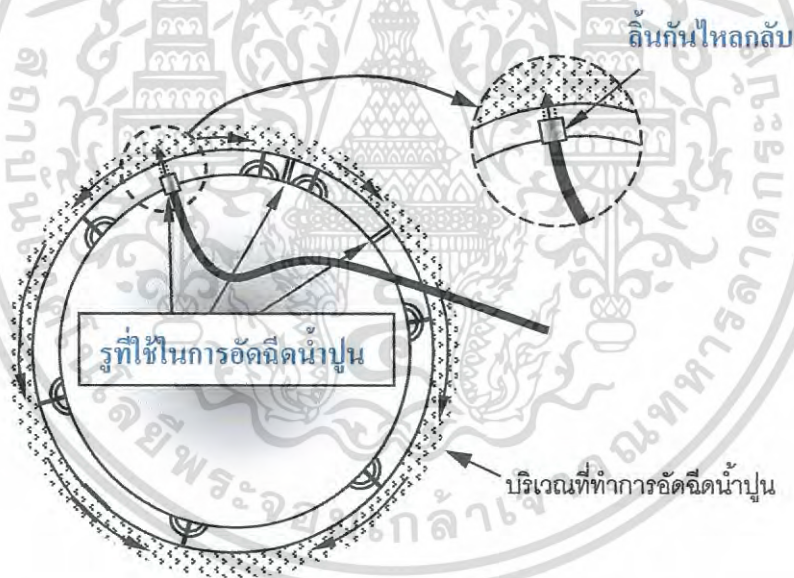
วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์เนื่องจาก 1) ผิวของหัวเจาะจะต้องซ้อนกับแนวอุโมงค์ เพื่อให้การประกอบผนังอุโมงค์เกิดขึ้นได้ในบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ และ 2) จะต้องมียูนิทช่องว่างระหว่างบริเวณผิวด้านนอกผนังอุโมงค์และบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ เพื่อที่จะทำให้หัวเจาะสามารถขุดเจาะอุโมงค์เป็นแนวโค้ง และแก้ไขการวางแนวที่ผิดพลาดได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิดช่องว่างโดยรอบผนังอุโมงค์ขณะที่หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า นำมาซึ่งการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปิดช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่อุโมงค์

โดยบริเวณด้านท้ายหัวเจาะจะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายเพื่อป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดินโดยรอบ และน้ำปูนจากการอัดฉีดเพื่ออุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ ส่วนปิดผิวด้านท้ายหัวเจาะจะแยกออกมาจากส่วนท้ายหัวเจาะ และถูกออกแบบขึ้นเพื่อปิดรอยต่อระหว่างส่วนท้ายและผนังอุโมงค์ เพื่อให้สามารถที่จะทนต่อความดันดิน ความดันน้ำ และความดันน้ำปูนที่ค่อนข้างสูงดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.3 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนปิดผิวด้านท้ายในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายคือ แปรงลวดเหล็ก (Wire brush) ที่ได้ทำการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่น โดยหัวเจาะ Kawasaki และ Herrenknecht ที่ใช้ในโครงการนี้จะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายที่เป็นแปรงลวดเหล็กจำนวน 3 แถว ช่องว่างในแต่ละแถวจะมีน้ำมันหล่อลื่นความดันสูงบรรจุอยู่เพื่อป้องกันน้ำ ดินหรือน้ำปูนจากการแทรกซึมเข้ามาสู่พื้นที่ปิดผิวด้านท้าย



รูปที่ 2.3 ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush) [8]

น้ำปูนจะถูกอัดฉีดผ่านรูของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 2.4 ในระหว่างการอัดฉีด น้ำปูนจะถูกอัดฉีดจากบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์เพื่อที่จะทำให้น้ำปูนสามารถเคลื่อนที่ปิดช่องว่างโดยรอบผนังอุโมงค์ด้วยความดันของการอัดฉีดที่สูง และแรงโน้มถ่วงของตัวน้ำปูนเอง การอัดฉีดจะถูกทำอย่างต่อเนื่องด้วยความดันที่สูงในช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ สิ่งที่ควบคุมการอัดฉีดนอกเหนือไปจากปริมาณของน้ำปูนก็คือ ความดันในการอัดฉีดน้ำปูน ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดค่าจากภายในท่อน้ำปูนหรือจากแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 2.4 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์[8]

ในโครงการรถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ค่าความดันดังกล่าวจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 3 บาร์ (300 กิโลปาสกาล) ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่สามารถรับได้ ด้วยความดันในการอัดฉีดที่สูงทำให้ช่องว่างรอบอุโมงค์ถูกเติมเต็มภายในระยะเวลาอันสั้น และสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณด้านท้ายหัวเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ การติดตามตรวจวัดปริมาตรและความดันในการอัดฉีดน้ำปูนจะถูกบันทึกค่าไว้ในทุกรอบของการขุดเจาะ

2.3 การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ

ปัจจุบันงานก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะได้มีการพัฒนาทั้งทางด้านเทคโนโลยีและเทคนิควิธีการก่อสร้างมากขึ้น มีความทันสมัย มีความปลอดภัยมากกว่าในอดีต จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียงน้อยลงจนสามารถขุดเจาะในบริเวณพื้นที่ชุมชนได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวของดินยังคงเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงทั้งโครงสร้างที่ผิวดินและโครงสร้างใต้ดินอยู่โดยตลอด ซึ่งการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมี 2 ลักษณะคือ

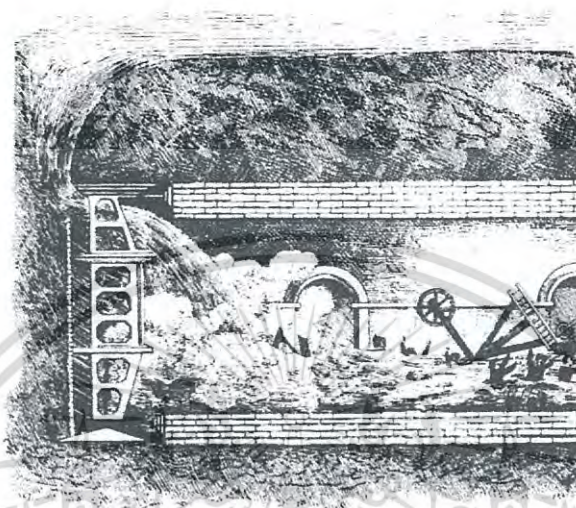
- 1) การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างหรือในช่วงระยะเวลาที่สั้น (Short term deformations)
- 2) การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในช่วงระยะยาวหรือหลังจากทำการก่อสร้าง (Long term deformations)

การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างหรือในช่วงระยะเวลาที่สั้น มักจะเป็นการเคลื่อนตัวที่มีขนาดมากที่สุดและอันตรายที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์ การเคลื่อนตัวลักษณะนี้มีสาเหตุหลักมาจาก “การสูญเสียมวลดิน” (Ground loss) และทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินที่เรียกว่า “การทรุดตัวทันทีทันใด” (Immediate settlement) โดยเกิดขึ้นจากการที่มวลดินรอบอุโมงค์เคลื่อนตัวเข้าสู่ช่องเปิด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) ขณะทำการก่อสร้าง และหากอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน น้ำก็จะไหลเข้าสู่ช่องเปิดด้วยเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการขุดเจาะ ในกรณีของการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในระยะยาว จะเกิดจากความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) ของดินเพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ ทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินจากปัญหา “การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดิน” (Consolidation settlement) การเคลื่อนตัวลักษณะนี้จะเกิดขึ้นทีละน้อยแต่ต่อเนื่องเป็นเวลานานหลังจากการก่อสร้างอุโมงค์ได้เสร็จสิ้นไปแล้ว การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินขณะขุดเจาะอุโมงค์เป็นปัญหาสำคัญมากในอดีต ซึ่งวิธีการขุดเจาะยังไม่ทันสมัยเหมือนในปัจจุบัน การสูญเสียมวลดินอาจเกิดขึ้นทันทีทันใดและรุนแรงจนไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากการไหลตัวเข้าอย่างรวดเร็วของดินและน้ำเข้าสู่อุโมงค์ ดังตัวอย่างที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์โดย เซอร์มาร์ค โอแฮมบาร์ด บรูเนล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 เป็นผลทำให้อุโมงค์พังทลาย อย่างไรก็ตาม ปัญหารุนแรงดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ได้มีการพัฒนาระบบป้องกันการพังทลายของดิน เช่น การใช้ความดันอากาศ ความดันของเหลว หรือความดันดินภายในห้องกักดินต้านความดันดินด้านนอกหน้าหัวเจาะขณะทำการขุดเจาะ โดยการสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ (Shield machine หรือ Tunnel boring machine (TBM)) จะแบ่งเป็นลักษณะเบื้องต้นดังต่อไปนี้ [9]

- 1) การสูญเสียมวลดินทางด้านหน้าของหัวเจาะ (Face loss)
- 2) การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ (Over-cutting)

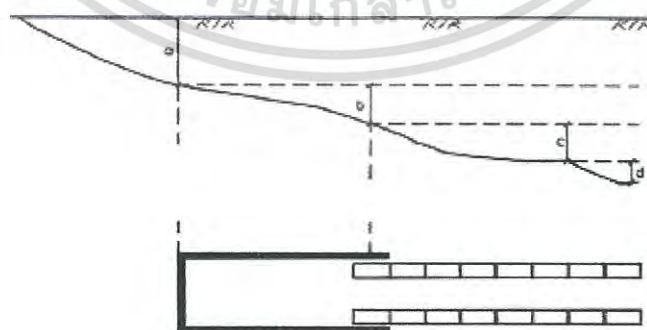
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การสูญเสียมวลดินจากการก้มหรือเงยหัวเจาะ (Pitching loss)
- 4) การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน (Ground disturbance)
- 5) การสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนท้ายหัวเจาะ (Tail void closure)



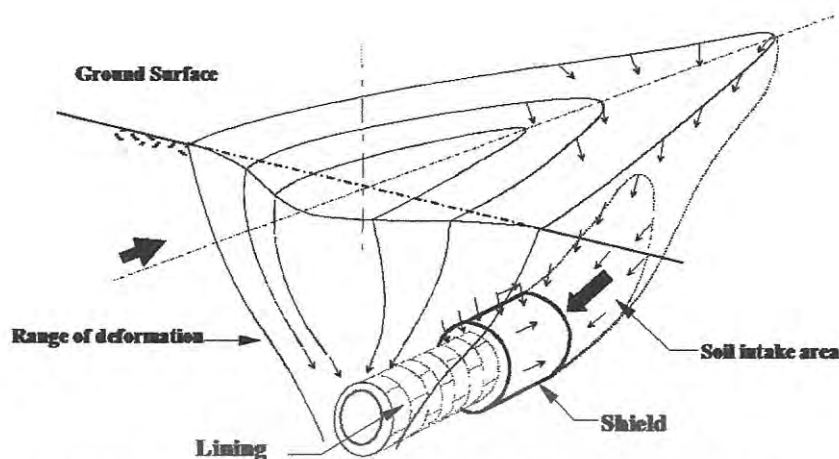
รูปที่ 2.5 การพังทลายของอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์[8]

การสูญเสียมวลดินในแต่ละลักษณะที่ได้กล่าวมาจะเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ และปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ ซึ่งในส่วนของการปัจจัยการควบคุมหัวเจาะก็จะต้องคำนึงถึงการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะ การควบคุมแนวเส้นทางของหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และท้ายที่สุดก็คือคุณภาพของผู้ปฏิบัติงาน ทั้งหมดนี้ล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้การสูญเสียมวลดินที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และการทรุดตัวของดินตามแนวการขุดเจาะ[10]เป็นไปดังรูปที่ 2.6

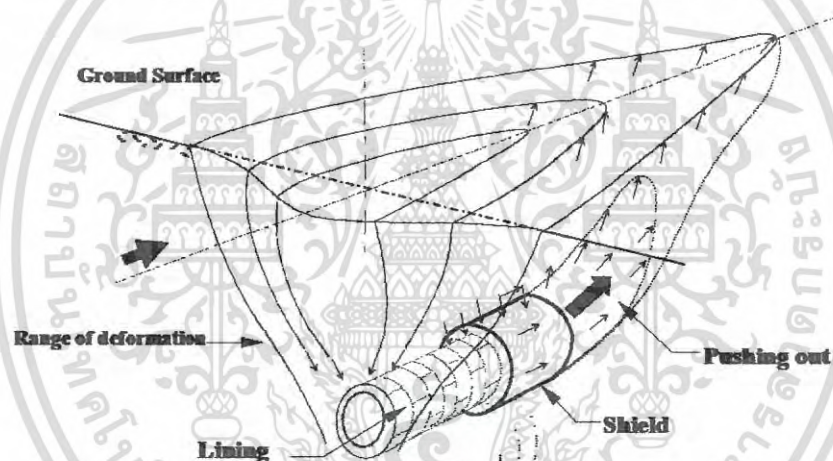


รูปที่ 2.6 การทรุดตัวของดินตามแนวการขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะเคลื่อนตัวเข้าสู่ตัวอุโมงค์[8]



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะถูกผลักออกจากตัวอุโมงค์[8]

การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวบนผิวดินเป็นแนวยาว (Longitudinal settlement) และแนวขวาง (Transverse settlement) ของแนวอุโมงค์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหลุม (Sink hole) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่ตัวอุโมงค์ โดยสามารถสร้างความเสียหายต่อผิวถนนและโครงสร้างข้างเคียงทั้งที่ผิวดินและใต้ดิน อย่างไรก็ตาม ควรตั้งข้อสังเกตว่า การเคลื่อนตัวของดินในทิศทางตรงกันข้าม หรือการผลักดินออกจากตัวอุโมงค์ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน หากความดันหน้าหัวเจาะมีค่าสูงกว่าความดันดินด้านนอกดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ในกรณีนี้ก็สามารถสร้างความเสียหายได้ด้วยเช่นกันโดยทำให้เกิดการบุดันที่ผิวดินและอาจสร้างปัญหาต่อฐานรากเสาเข็มที่อยู่ในแนวก่อสร้าง

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยหัวเจาะในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมากโดยมีการใช้หัวเจาะที่ทันสมัยและมีวิธีการรักษาเสถียรภาพระหว่างการขุดเจาะเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน อย่างไรก็ตาม

ตาม ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอและมักจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง ดังนั้น เพื่อที่จะป้องกันปัญหานี้จึงควรต้องหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน โดยพบว่า นอกจากปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยาที่เป็นปัจจัยสำคัญแล้ว ยังมีปัจจัยด้านการควบคุมและพฤติกรรมของหัวเจาะที่มีความซับซ้อน ดังนั้น การหาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของดินและหัวเจาะจึงมีความจำเป็น เพื่อให้สามารถเข้าใจและประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะนำไปสู่การป้องกันและแก้ไขอย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [11, 12]

ในปัจจุบันการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์งานด้านโครงสร้างต่างๆ และงานทางธรณีวิทยาอย่างแพร่หลาย เพราะใช้งานง่ายและสะดวกกว่าวิธีการอื่น อีกทั้งสามารถใช้ในงานที่สภาพทางธรณีวิทยาซับซ้อน เช่น การออกแบบอุโมงค์ที่วางตัวอยู่ในชั้นดินผสมหรืออุโมงค์ที่ก่อสร้างในตำแหน่งที่ใกล้กัน ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างดินและผนังอุโมงค์ (Soil-structure interaction) ปัญหาผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงบนผิวดินและใต้ดิน เช่น อาคารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ โบราณสถาน วัด หรือสถานที่ที่มีความสำคัญ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการคือ แบ่งโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ออกเป็นชิ้นส่วน (Element) เล็กๆ โดยจุดที่ชิ้นส่วนมาบรรจบกันเรียกว่าจุดต่อ (Node) หากกำหนดตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นส่วน จะสามารถหาความเครียดได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนนั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ (Matrix) เช่นเดียวกันจะสามารถหาความเครียดได้ หากทราบค่าการเคลื่อนตัวที่จุดนั้น และสามารถหาความเค้นได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด

ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างชิ้นส่วน (Geometric shape of element) หลายชนิดแต่รูปร่างที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ คือ ชิ้นส่วนในมิติเดียว และชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยม เช่น การวิเคราะห์ความเค้นในแต่ละระนาบ ถ้าใช้ชิ้นส่วนสามเหลี่ยมจะวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าชิ้นส่วนอื่น

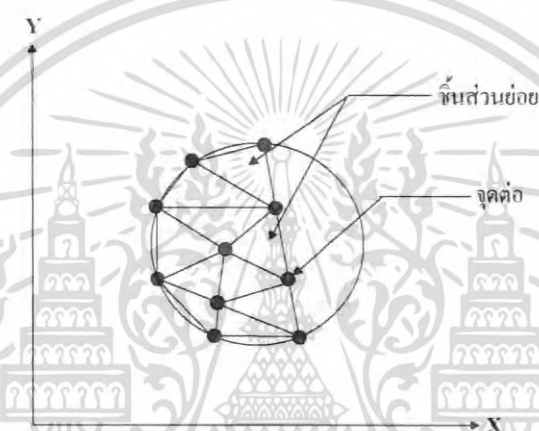
การวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยาในงานอุโมงค์นั้น นิยมใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์ เสถียรภาพของดินโดยรอบอุโมงค์ ขอบเขตและแนวการเคลื่อนตัวของดินทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ ผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงทั้งบนผิวดินและใต้ดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ ผลกระทบจากเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ และผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่สอง เป็นต้น

2.4.1 วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปัญหาทางธรณีเทคนิคโดยใช้หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการวิเคราะห์ โดยทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ จำนวนหนึ่ง ซึ่งชิ้นส่วนเล็กๆนี้เรียกว่า ชิ้น

ส่วนย่อย (Element) และชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้เชื่อมติดกันด้วยจุดที่เรียกว่า จุดต่อ (Node) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9

หลังจากนั้น ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้วนำชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์รวมอีกครั้ง เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมด สำหรับการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของแต่ละชิ้นส่วนย่อย จะพิจารณาว่าเป็นผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของจุดต่อของชิ้นส่วนย่อยนั้นๆ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่นี้สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันการเสียรูป (Displacement function) และจากผลของแรงภายนอกรวมทั้งคุณสมบัติของชิ้นส่วนย่อย ทำให้สามารถหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้



รูปที่ 2.9 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ

2.4.2 วิธีการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

ในการวิเคราะห์แรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เช่น ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ค่าแรงเฉือน (Shear force) และค่าแรงตามแนวแกน (Axial force) สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่งเป็นการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) โดยใช้การกำหนดค่า Contraction cavity ส่วนวิธีที่สองใช้การกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

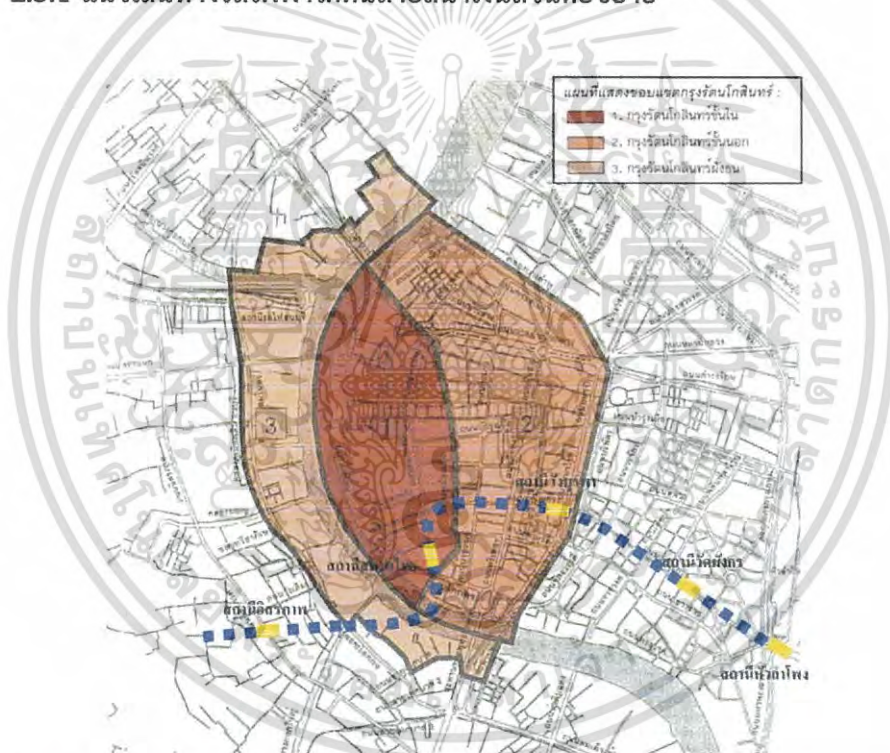
1. วิธีการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) วิธีนี้เป็นการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน โดยค่าที่นำมาป้อนนั้น นิยมนำมาจากประสบการณ์การขุดเจาะอุโมงค์ของโครงการที่ผ่านมาในอดีต โดยสำหรับประเทศไทยกรณีโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลมีขอบเขตค่าการสูญเสียมวลดินอยู่ที่ 0.5-3.0 เปอร์เซ็นต์ [13] โดยในขั้นตอนของการคำนวณ (Calculation step) สามารถให้ป้อนค่าการสูญเสียมวลดินในรูปของค่า Contraction cavity ได้

2. วิธีการกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) วิธีการนี้มีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าวิธีการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน โดยในวิธีการนี้ต้องทำการสมมติค่า Stress

relief ก่อน จากนั้นจึงวิเคราะห์แรงกระทำและการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นจากการกำหนดค่า Stress relief โดยอ้างอิงจาก Mair et. al. (1993)[14] ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำนายการเคลื่อนตัวของดินของ Peck (1969)[15] โดยที่รูปร่างการทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์นั้นสามารถประมาณโดยใช้สมการ Gaussian ได้ จากนั้นทำการตรวจสอบว่าค่าการทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ และไม่สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างข้างเคียง แล้วจึงทำการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) จากค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน ได้ค่าการสูญเสียมวลดินที่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของหัวเจาะต่อไป ส่วนค่าโมเมนต์ดัด ค่าแรงตามแนวแกน และค่าแรงเฉือนที่ได้ ก็นำไปคำนวณหาหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

2.5 ข้อมูลทั่วไปโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA)

2.5.1 แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย



รูปที่ 2.10 เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงินสถานีหัวลำโพง-สถานีอิสรภาพ[7]

แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินในโครงการส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงินแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มออกจากสถานีหัวลำโพงซึ่งเป็นสถานีเดิมของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ขุดเจาะตามถนนพระราม 4 ในแนวทิศตะวันตกผ่านถนนเจริญกรุง คลองผดุงกรุงเกษม พื้นที่เมืองเยาวราช จนถึงแยกวัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม จึงเลี้ยวซ้ายไปตามถนนมหาไชยผ่านหน้าโรงเรียนวัดราชบพิธ ตลาดปากคลองตลาด แล้วลอดใต้แม่น้ำเจ้าพระยาข้ามไปฝั่งธนบุรี ผ่านใกล้บริเวณวัดกัลยา ตัดผ่านถนนอิสรภาพ และสิ้นสุดก่อนถึงบริเวณสี่แยกท่าพระ รวมเป็นระยะทางประมาณ 5,500 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 สภาพทางธรณีวิทยา

พื้นที่บริเวณสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร ผ่านถนนเจริญกรุงและถนนเยาวราช ซึ่งเคยเป็นพื้นที่ราบลุ่มและน้ำท่วมถึง ทำให้การจัดเรียงตัวของชั้นดินเป็นดังรูป 2.11 โดยช่วงความลึก 3 เมตรแรกเป็นดินถม หลังจากนั้นเป็นชั้นของดินเหนียวอ่อนโดยมีความลึกอยู่ในช่วง 3 - 12 เมตรจากผิวดิน ถัดจากชั้นดินเหนียวอ่อน เป็นชั้นดินเหนียวปานกลาง ความหนาประมาณ 3-4 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ที่มีความหนาของชั้นประมาณ 10 เมตร ส่วนชั้นถัดไปเป็นชั้นดินทรายที่ 1 ที่มีความหนาของชั้น 5 เมตร ต่อมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากและชั้นดินทรายที่ 2 รายละเอียดลักษณะทั่วไปของชั้นดินต่างๆมีดังนี้

ชั้นที่ 1 : ดินถมและเศษวัสดุเป็นชั้นบนสุดที่เป็นพวกวัสดุถม (Very loose to medium dense silty sand) และพวกเศษฝุ่นร่อน (Medium to stiff silty clay) ที่มีสีค่อนข้างเหลืองและเทา ความหนาของชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 2-5 เมตรและค่า SPT N value อยู่ในช่วง 2-21 blow/ft ค่า Water content ในชั้นนี้อยู่ที่ระหว่าง 10%-35% ระดับน้ำใต้ดินสามารถพบได้ที่ชั้นนี้

ชั้นที่ 2 : Very soft to soft clay ชั้นนี้อยู่ที่ความลึก 3-12 เมตรประกอบด้วย Medium gray to dark gray very soft to soft clay ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 10-25 kPa และค่า Water content มีค่า 60%-105%

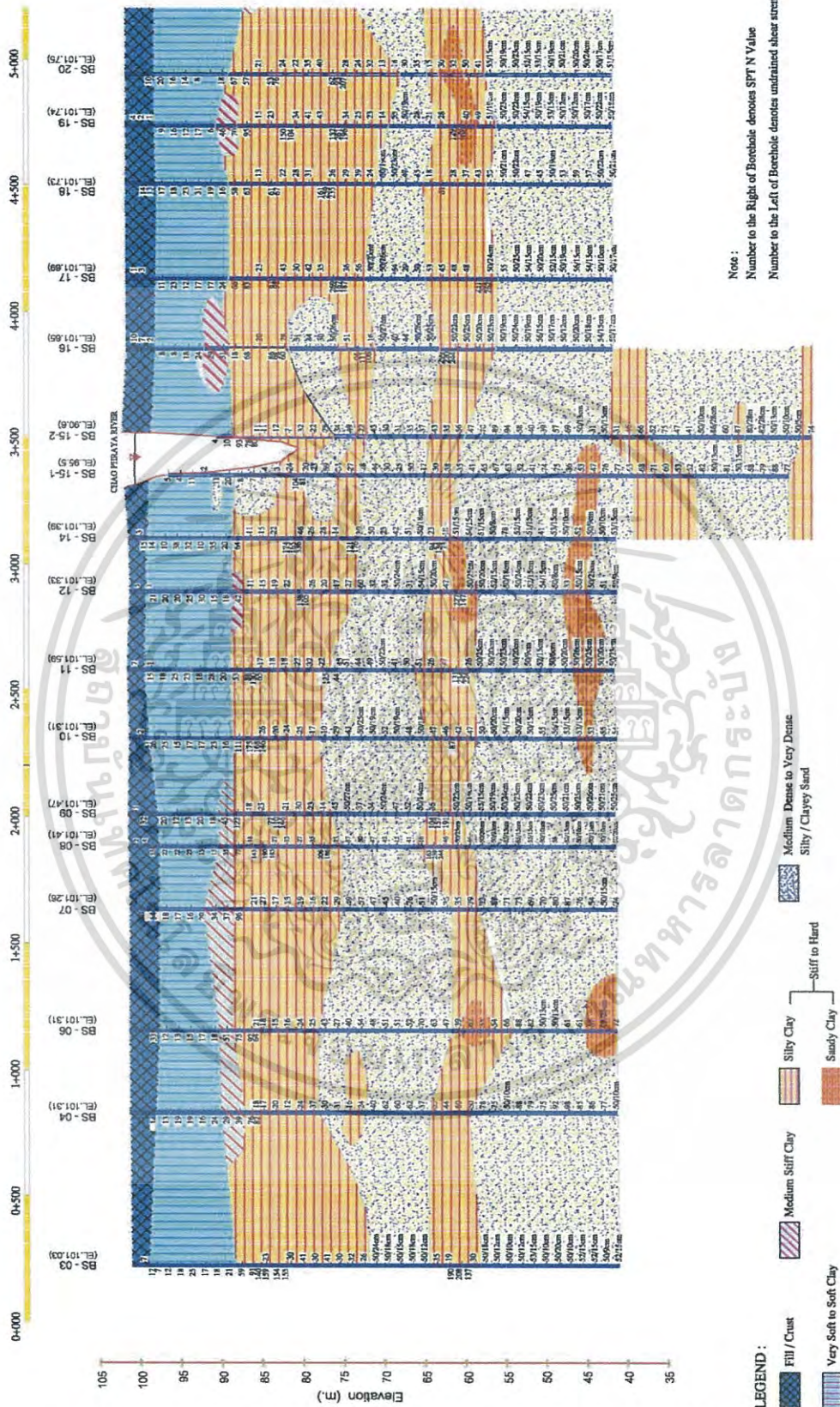
ชั้นที่ 3 : Medium stiff clay ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Dark gray to brownish gray, Medium stiff clay อยู่ใต้ชั้น Soft clay มีความหนา 3-4 เมตร ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 26-47 kPa และค่า Water content มีค่า 31%-62%

ชั้นที่ 4 : Stiff to hard clay ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Yellowish to light grayish brown, Stiff to very stiff clay อยู่ที่มีความลึก 15-25 เมตร บางจุดจะพบ Sandy soil ด้วย ค่า SPT N value มีค่าระหว่าง 9-35 blow/ft และค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 75-162 kPa และค่า Water content มีค่าระหว่าง 15-32%

ชั้นที่ 5 : Medium dense to very dense sand ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Medium to very dense clayey and silty sand with yellowish to grayish brown อยู่ที่มีความลึกประมาณ 35-40 เมตร และค่า Water content มีค่า 12-25% ค่า SPT N value > 20 blow/ft

ชั้นที่ 6 : Very stiff to hard clay ชั้นนี้ประกอบด้วย Light gray to grayish brown, Very stiff to hard clay มีความหนา 10-12 เมตร และค่า Water content มีค่า 15%-22% ค่า SPT N value > 30 blow/ft

ชั้นที่ 7 : Very dense sand ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Silty sand and poorly graded sand with silt, Yellowish brown to brownish gray พบที่ปลายสุดของหลุมเจาะสำรวจที่ 60-65 เมตร ค่า SPT N value > 50 blow/ft ปลายเข็มเจาะขนาดใหญ่มักจะวางที่ชั้นนี้เพื่อให้ได้ค่า Bearing capacity สูงที่สุด



รูปที่ 2.11 สภาพทางธรณีวิทยาโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงิน[16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ฐานรากเสาเข็ม

2.6.1 พฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็ม[17]

เสาเข็มเมื่อติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใดๆแล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดินเนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็ม ชั้นดินและเสาเข็มก็จะยังไม่มีเคลื่อนที่ดังในรูป 2.12ก ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็มก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางแรง ในขณะเดียวกันดินที่เกาะอยู่ข้างๆผิวเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเสาเข็มเข้ามาร่วมด้วย ผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม และมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า “น้ำหนักบรรทุกสูงสุด” (Ultimate Pile Capacity) ดังสมการที่ 2.1 ในกรณีที่เป็นชั้นดินหลายชนิดตลอดความยาวเข็ม จะมีการถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินจากผิว (Friction Load Transfer) ได้ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าการเคลื่อนตัวจะใกล้เคียงกันก็ตาม ดินที่แข็งแรงกว่าจะสามารถถ่ายน้ำหนักได้มากกว่าดินอ่อนในระดับการเคลื่อนตัวเท่ากัน น้ำหนักที่ถ่ายลงในชั้นดินส่วนใหญ่เป็นการถ่ายที่ส่งผ่านทางผิวเข็ม (Friction Resistance) ประมาณ 90% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ส่วนที่ปลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End Bearing) เพียง 10% เท่านั้น แต่จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการคลายแรงต้านที่ผิวเข็มของดินส่วนบน แต่สัดส่วนของการถ่ายแรงเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามลักษณะดิน เช่นในกรณีของเข็มที่ยังลงถึงชั้นดินแข็ง การถ่ายน้ำหนักจะเกิดขึ้นที่ปลายส่วนใหญ่หรือทั้งหมด เพราะเข็มเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย ชั้นดินก็จะรับน้ำหนักได้มาก ในขณะที่ดินรอบผิวเข็มยังไม่สามารถถ่ายน้ำหนักได้เลย ดังนั้นในการวิเคราะห์แรงต้านของเสาเข็ม เราจึงแบ่งแรงต้านออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เกิดที่ผิวของเข็ม และส่วนที่เกิดที่ปลายเสาเข็ม เข็มที่มีแรงต้านส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวเข็ม เรามักจะเรียกว่า “Friction Pile” ส่วนเข็มที่ยังบนชั้นดินแข็งมากหรือชั้นหิน ซึ่งมีการถ่ายเทน้ำหนักที่ปลายเข็มเป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่า “End Bearing Pile”

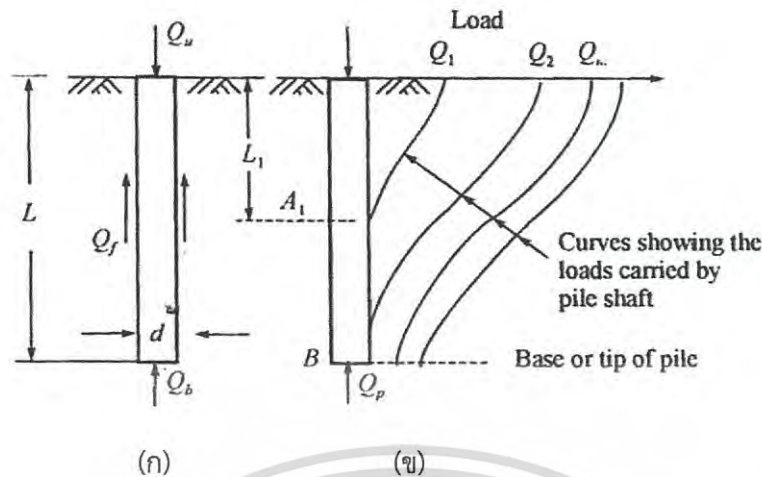
$$Q_u = Q_{ub} + Q_{uf} \quad (2.1)$$

โดยที่

Q_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

Q_{ub} = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Capacity)

Q_{uf} = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction Capacity)



รูปที่ 2.12 การถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุก;(ก)เสาเข็มเดี่ยว, (ข)เส้นโค้งการถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุก[18]

รูป 2.12ข. เป็นเส้นโค้งแสดงการถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุกตามความยาวเสาเข็มซึ่งวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัด

2.6.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load Capacity)

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวสามารถคำนวณได้จากผลรวมของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction Capacity) และปลายเสาเข็ม (End Bearing Capacity) ซึ่งการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็มเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$Q_{ub} + W = A_b(N_c c_{ub} + \gamma L_{pile}) \quad (2.2)$$

โดยที่ W คือน้ำหนักของเสาเข็ม, A_b คือพื้นที่สัมผัสที่ปลายเสาเข็ม, c_{ub} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนในสถานะไม่ระบายน้ำของดิน (Undrained shear strength) ที่ระดับปลายเสาเข็ม, N_c คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับน้ำหนัก, L_{pile} คือความยาวของเสาเข็ม และโดยปกติแล้วน้ำหนักของเสาเข็ม W มีค่าเท่ากับพจน์ของ $A_b L_{pile}$ ดังนั้นจึงเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$Q_{ub} = A_b N_c c_{ub} \quad (2.3)$$

ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ผิวเสาเข็มสามารถคำนวณได้สองวิธีคือ α -method และ β -method แต่ในที่นี้จะขอลำถึงเพียงวิธี α -method เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเมื่อเสาเข็มวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวจากการแนะนำโดย Skempton (1959) [18] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$Q_{uf} = A_s \alpha c_u \quad (2.4)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวเสาเข็มและดินเหนียว, $\overline{C_u}$ คือกำลังต้านทานแรงเฉือนในสถานะไม่ระบายน้ำของดิน (Undrained shear strength), และ α คือตัวคูณประกอบยึดเกาะ (Adhesion factor)

เมื่อจะนำไปใช้ออกแบบจะต้องมีอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) มาทอนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลงไปเป็นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Allowable Pile Capacity), Q_w ดังสมการ 2.5

$$Q_w = \frac{\zeta(Q_{ub} + Q_{af})}{F} \quad (2.5)$$

โดยที่ ζ คือตัวคูณน้ำหนักบรรทุกใช้งานให้มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับเสาเข็มเดี่ยว และน้อยกว่า 1.0 เมื่อเป็นเสาเข็มกลุ่ม. F คืออัตราส่วนความปลอดภัย ซึ่ง Skempton (1959) [18], แนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับเสาเข็มที่มีขนาดปกติ หากว่าเสาเข็มมีขนาดใหญ่ให้เพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยขึ้น

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม

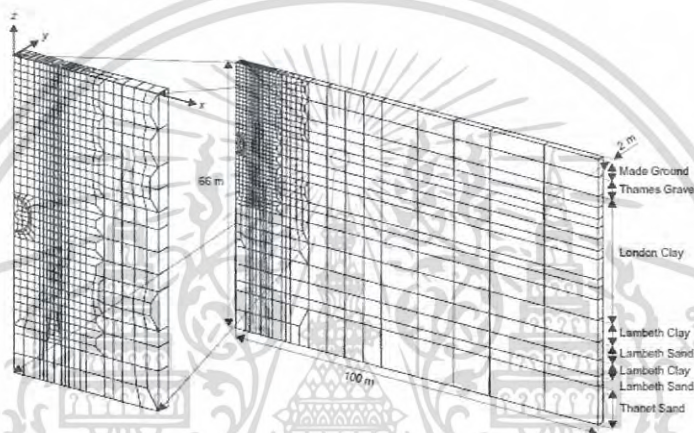
Mroueh และ Shahrour(2002)[19] ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียง โดยพิจารณาทั้งผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม จากผลการวิเคราะห์พบว่า การขุดเจาะอุโมงค์ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวและแรงภายในของเสาเข็ม โดยเฉพาะเมื่อเสาเข็มวางตัวใกล้อุโมงค์ การกระจายของแรงจากการขุดเจาะอุโมงค์จะส่งผลกระทบต่อแรงภายในผนังอุโมงค์มากขึ้นอยู่กัระยะห่างของระดับปลายเสาเข็มกับอุโมงค์ หากระดับปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าส่วนท้องของอุโมงค์ก็จะมีส่งผลกระทบต่อเสาเข็มมาก สำหรับปฏิกริยาระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์และเสาเข็มกลุ่ม พบว่าเสาเข็มแถวหน้าของกลุ่มจะได้รับอิทธิพลจากการขุดเจาะมากที่สุดโดยแรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มแถวหน้าจะมีค่ามากกว่าเสาเข็มแถวหลังของกลุ่มเป็นจำนวนมาก

Schroeder et al.(2004)[1] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) และค่าการเสียรูปของอุโมงค์สูงสุดที่ยอมรับได้ โดยประเมินอิทธิพลจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ ณ กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ในการจำลองได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวอยู่ทั้ง 2 ด้านของอุโมงค์ กรณีที่ 2 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวทางด้านขวาของอุโมงค์เพียงด้านเดียว โดยทั้ง 2 กรณีศึกษาได้จำลองให้ขอบเสาเข็มวางตัวห่างจากขอบของอุโมงค์ (clearance) ที่ระยะต่างๆ 4 ระยะ จากผลการวิเคราะห์พบว่า อุโมงค์จะเกิดการบิดตัวเมื่อมีเสาเข็มวางตัวอยู่เพียงด้านเดียว ซึ่งการบิดตัว การเคลื่อนตัว และการเสียรูปของอุโมงค์เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะ clearance ลดน้อยลง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

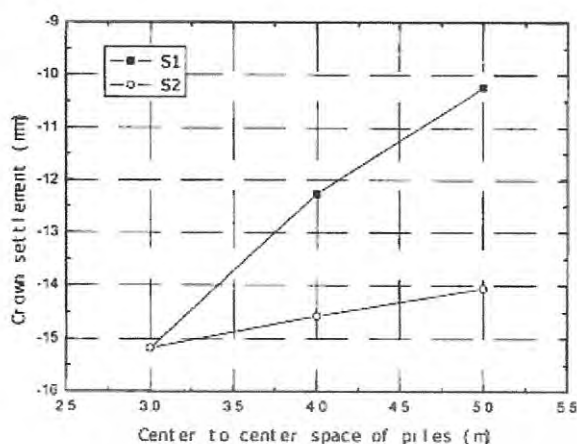
ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยของตัวเองในปี 2002 ที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติในการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ โดยได้มองเสาเข็มแถวเป็นกำแพง และมีการแปลงค่า Young's Modulus of Concrete จากเสาเข็มเพื่อใช้สำหรับกำแพง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และในงานวิจัยยังได้นำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองแบบ 3 มิติด้วยแบบจำลองชิ้นส่วนสมมาตรแบบครึ่งเดียว ดังรูปที่ 2.13 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของอุโมงค์จากการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ มีค่าใกล้เคียงกับแบบ 3 มิติ

$$E_{pile}(\pi D_{pile}^2 / 4) = E_{wall} t_{wall} \quad (2.6)$$



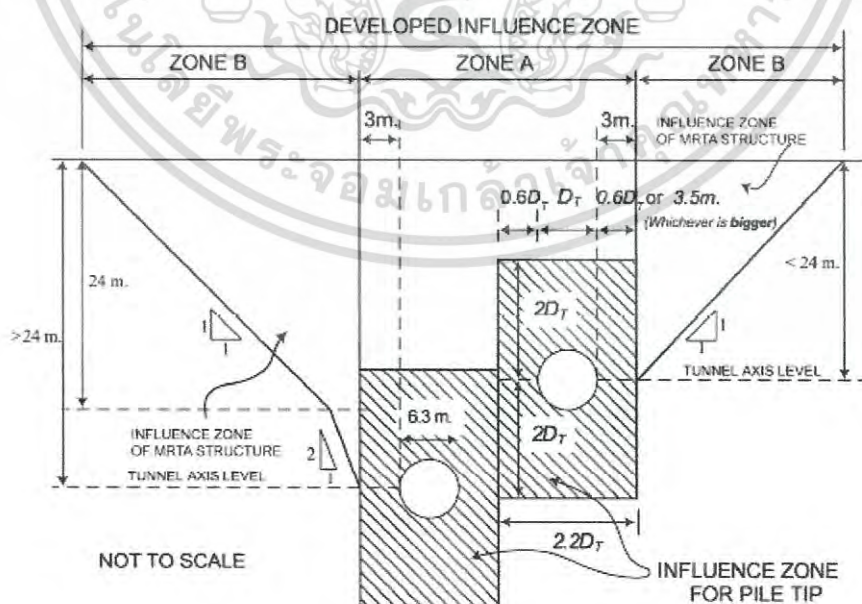
รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

Yan et al.(2006)[20] ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติประเมินอิทธิพลของเสาเข็มแถวรับน้ำหนักบรรทุกต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม โดยเสาเข็มแถววางตัวอยู่ทางด้านขวาของอุโมงค์เพียงด้านเดียว ปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับอุโมงค์ที่ระดับ 70 เมตรจากผิวดิน และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing, S_1), ระยะห่างระหว่างเสาเข็มแถว (S_2), และระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์ถึงขอบเสาเข็ม (clearance, S_3) ซึ่งการจำลองเสาเข็มแถวในแบบจำลอง 2 มิติจะมีลักษณะเป็นกำแพง และมีการแปลงค่า Young's Modulus of Concrete จากเสาเข็มเพื่อใช้สำหรับกำแพงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ[1] การแสดงผลในงานวิจัยฉบับนี้อยู่ในเทอมของค่าการทรุดตัวของอุโมงค์ ณ จุดยอด (crown) ของอุโมงค์เพียงจุดเดียว จากผลการวิเคราะห์พบว่า การทรุดตัวของอุโมงค์ลดน้อยลงเมื่อ S_1 และ S_2 เพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ชัดว่า S_1 มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของอุโมงค์มากกว่า S_2 ดังรูปที่ 2.14 และในทำนองเดียวกันเมื่อ S_3 เพิ่มขึ้น ค่าการทรุดตัวของอุโมงค์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มและระยะห่างระหว่างเสาเข็มแถว

Lueprasert et al.(2015)[3] ศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมด้วยวิธีไฟเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยศึกษาผลกระทบจากทั้งเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มแถว และสร้างโซนอิทธิพลขึ้นจากผลกระทบที่ได้รับจากเสาเข็ม โดยจำลองให้อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดิน 4 ลักษณะ กำหนดให้ขอบของเสาเข็มวางตัวห่างจากขอบอุโมงค์ (clearance) เป็น 4 ระยะ และมีการจำลองให้ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆ จากการศึกษพบว่า ตำแหน่งของปลายเสาเข็มและชนิดของดินที่อุโมงค์วางตัวอยู่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสียรูปของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิม ส่งผลให้ได้รับโซนอิทธิพลในแนวตั้งที่แตกต่างกันเมื่ออุโมงค์วางตัวในชั้นดินลักษณะต่างๆ แต่ในท้ายที่สุดได้แนะนำโซนที่ปลอดภัยที่สุดคือ ปลายเสาเข็มควรวางตัวเหนือและใต้ระดับแนวแกนอุโมงค์ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ ดังรูปที่ 2.15



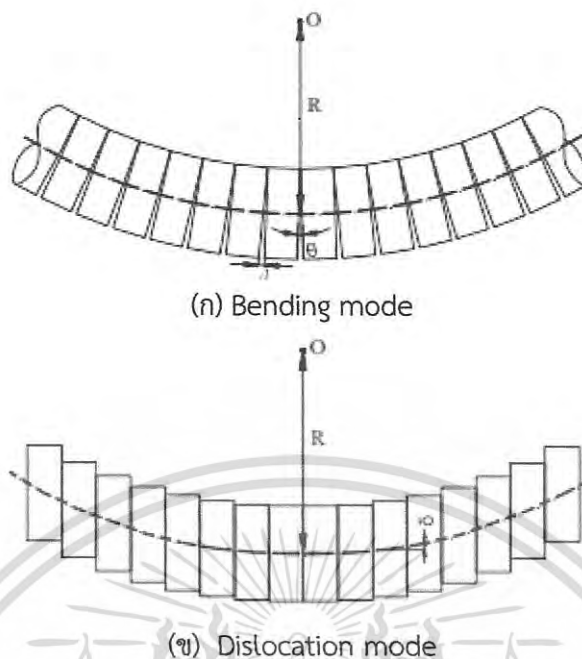
รูปที่ 2.15 โซนอิทธิพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว

Liao et al.(2008)[4] ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ศึกษาพฤติกรรมของแรงภายในผนังอุโมงค์ตามแนวยาว (longitudinal) ของอุโมงค์ โดยศึกษาจากหน้าตัดตามขวาง (cross section) ของผนังอุโมงค์ ประเด็นที่ Liao et al. ศึกษาได้แก่ ผลกระทบของ ground stiffness ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์และโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ผลกระทบของ bending stiffness และ shear stiffness ที่มีต่อค่าโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การออกแบบผนังอุโมงค์ควรลดค่า bending stiffness แต่เพิ่มค่า shear stiffness เพื่อลดแรงที่เพิ่มขึ้นภายในผนังอุโมงค์และเพื่อเพิ่มควมมีเสถียรภาพของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) ภายใต้การทรุดตัวที่แตกต่างกันของผิวดิน

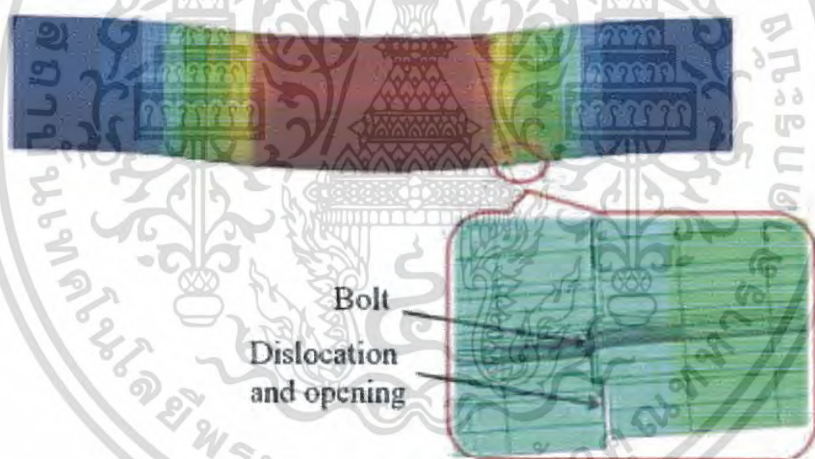
Wu et al.(2015)[5] ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างอุโมงค์ในแนวยาว โดยพิจารณา shearing dislocation ระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบอุโมงค์ เน้นศึกษาอิทธิพลของ shear stiffness ต่อรอยต่อของอุโมงค์ รวมถึงแรงภายในผนังอุโมงค์ทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ได้สร้างแบบจำลองอย่างง่ายด้วยทฤษฎีของ Timoshenko beam เป็นอุโมงค์ที่วางตัวในชั้นดินอ่อนของประเทศจีนที่ขุดเจาะโดยใช้หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (EPB) อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเป็น 6.2 และ 5.5 เมตร ตามลำดับ ชิ้นส่วนประกอบมีขนาดความกว้าง 1 เมตร [5]ได้บรรยายไว้ว่ารอยต่อระหว่างชิ้นส่วนประกอบเป็นส่วนที่อันตรายต่อโครงสร้างอุโมงค์มากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยต่อในแนว circumferential ระหว่างชิ้นส่วนประกอบเป็นปัจจัยหลักในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาวสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ (ดังรูปที่ 2.16) คือ 1.Bending mode เนื่องจากชิ้นส่วนประกอบเกิดการหมุนรอบจุดศูนย์กลางของแนวโค้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ ทำให้เกิดแรงอัดภายในคอนกรีตชั้นฝั่งหนึ่ง ส่งผลให้อีกฝั่งเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อ (opening of the joints) และแรงดึงที่สลัก (tension of bolts) 2.Dislocation mode เกิดจากการเคลื่อนตัวระหว่างชิ้นส่วนประกอบ ส่งผลให้อุโมงค์เกิดการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน การเสียรูปทั้ง 2 รูปแบบสัมพันธ์กับการเสียรูปแบบโค้งงอเนื่องจากโมเมนต์ดัดและการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนจากการส่งผ่านของน้ำหนักบรรทุกในทิศทางตามแนวยาว จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อ shear stiffness ลดลง ทำให้องศาการหมุนของอุโมงค์และช่องว่างระหว่างรอยต่อลดลง แต่การเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อเพิ่มขึ้น ในส่วนของแรงภายในผนังอุโมงค์มีค่าลดลงเมื่อ shear stiffness ลดน้อยลง และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ shear stiffness เท่ากับ 0.01



รูปที่ 2.16 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว

Gong et al.(2015)[6] บรรยายเกี่ยวกับ shearing effect และ flattening effect ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดขวางของอุโมงค์ (cross section) ซึ่งมีสาเหตุจากการทรุดตัวแตกต่างกันในแนวยาวของอุโมงค์ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ที่มีมาตั้งแต่อดีตในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อออกแบบจุดเชื่อมต่อของผนังอุโมงค์ โดยเน้นนำเสนอพฤติกรรมในแนววงรอบ (circumferential) ขึ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ รวมทั้ง structural safety และ serviceability ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งในแนวยาว (longitudinal) ของอุโมงค์ และได้ตั้งสมมติฐานการพังทลายของโครงสร้างไว้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อแรงภายในผนังอุโมงค์ทำงานร่วมกัน ซึ่งก็คือแรงในแนวแกน (axial force, N) และโมเมนต์ดัด (bending moment, M) รวมถึงแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ผนังอุโมงค์คอนกรีตสามารถรับได้ (N_{ult}, M_{ult}) สามารถคำนวณได้ดังนี้ $FS_1 = \sqrt{N_{ult}^2 + M_{ult}^2} / \sqrt{N^2 + M^2}$ ในส่วนของแรงเฉือน (shear force, Q) ไม่ได้นำมาคำนวณหา structural safety เนื่องจากส่งผลน้อย และในการคำนวณหา serviceability ของผนังอุโมงค์ได้ใช้การเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในการคำนวณเนื่องจากปัญหาอันเกิดจากความสามารถในการใช้งานของอุโมงค์อย่างเช่น น้ำรั่วซึม คอนกรีตแตกร้าว สิ่งเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ สามารถคำนวณได้ดังนี้ $FS_2 = 0.6\%D / \max(\Delta_r, 2\Delta_h)$ และยังได้เปิดเผยว่าตำแหน่งที่อันตรายที่สุด ไม่ใช่ตำแหน่งที่อุโมงค์เกิดการทรุดตัวสูงสุด แต่เป็นตำแหน่งในช่วง $-0.7i$ ถึง $-2.2i$ และ $0.7i$ ถึง $2.2i$ (i คือระยะจุดดัดกลับของอุโมงค์) เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่ค่า structural safety และ serviceability ของอุโมงค์ลดลง

Wang et al.(2014)[21] ได้จำลองกลไกการพังของรอยต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และสลักในแนวยาวภายใต้การทรุดตัวที่แตกต่างกันของดินในแนวยาวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ได้มีการสร้างวงผนังอุโมงค์และสลักในแบบจำลอง น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ความดันดินรอบอุโมงค์หลังจากการก่อสร้างและ displacement load จากค่าตรวจวัดจริงของการทรุดตัวที่แตกต่างกันตามแนวยาวของดิน มีการพิจารณาปฏิกริยาระหว่างเดือยผนังอุโมงค์สลักและรูใส่สลัก จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การเสียรูประหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในแนว circumferential joints ประกอบด้วยช่องว่างระหว่างรอยต่อ (opening) และการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อ (dislocation) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะเกิดขึ้นที่ส่วนยอดและท้องของอุโมงค์เมื่อมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเค้นในสลักเข้าใกล้ค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดการพังภายใต้แรงดึง และสลักที่ส่วนยอดและส่วนท้องของอุโมงค์จะพังก่อนเนื่องจากเกิดแรงดึงสูงสุด ในส่วนของการเสียรูปของผนังอุโมงค์เกิดขึ้นสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางของแบบจำลอง



รูปที่ 2.17 การเสียรูประหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

บทที่ 3

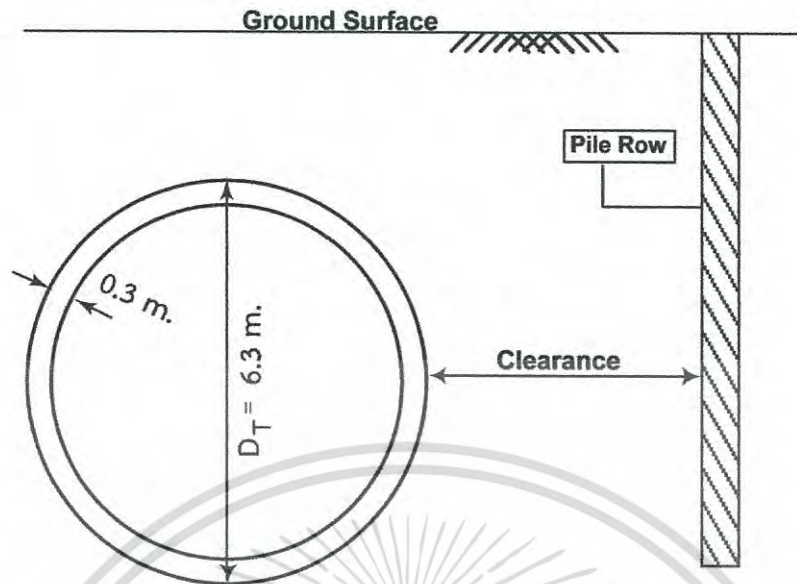
วิธีการวิเคราะห์

3.1 กล่าวนำ

บทนี้บรรยายถึงวิธีการวิเคราะห์หัตถิพลของเสาเข็มแถวที่มีต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 อธิบายถึงลักษณะการศึกษาที่พิจารณาซึ่งประกอบด้วย ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง รูปแบบชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตำแหน่งการวางตัวของเสาเข็มในแบบจำลอง ส่วนที่ 2 อธิบายถึงรูปแบบการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane) ได้แก่ การศึกษาหัตถิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว การเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์ และการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal axis) ซึ่งเป็นการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์และโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่างๆในแนวยาวของอุโมงค์ และส่วนที่ 4 บรรยายถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติของแบบจำลอง ทั้งคุณสมบัติของชั้นดินแต่ละชั้น คุณสมบัติของเสาเข็มเจาะและผนังอุโมงค์ ขอบเขตแบบจำลองและเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์และสุดท้ายวิธีการประเมินผลต่างๆได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ การบิดตัวของอุโมงค์ การเคลื่อนตัวในแนวยาว และการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

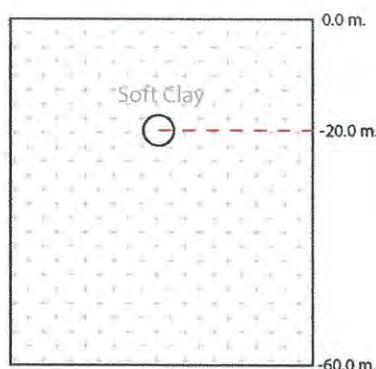
3.2 ลักษณะศึกษาที่พิจารณา

งานวิจัยนี้ใช้สภาพทางธรณีวิทยาจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) เป็นกรณีศึกษา โดยความหนาผนังอุโมงค์เท่ากับ 0.3 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ภายในและภายนอกเท่ากับ 5.7 เมตร และ 6.3 เมตร ตามลำดับ วางตัวอยู่ที่ระดับความลึกคงที่ 20 เมตร จากระดับผิวดิน ดังรูปที่ 3.1

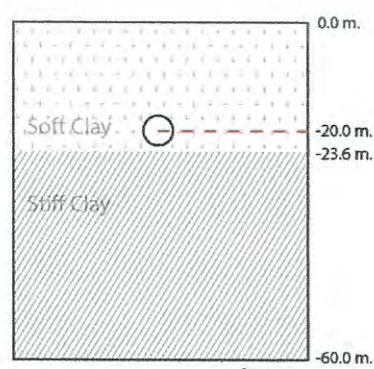


รูปที่ 3.1 ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง

โดยกรณีศึกษาจะแบ่งเป็น 4 กรณี ดังนี้ 1. อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งหมด (soft clay) 2. อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ที่มีดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวแข็ง (stiff clay) 3. อุโมงค์วางตัวระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (soft clay) และดินเหนียวแข็ง (stiff clay) และ 4. อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง (stiff clay) ที่มีดินชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ดังรูปที่ 3.2 ก, ข, ค และ ง ตามลำดับ และการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้เสาเข็มแถวรับแรงกระทำเป็นเสาเข็มเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 และ 1.5 เมตร ขึ้นอยู่กับเรื่องที่ทำการศึกษา ซึ่งมีการจำลองให้ปลายเสาเข็มแถววางตัวที่ระดับความลึกต่างๆ โดยความลึกของปลายเสาเข็มที่ระดับตื้นสุด คือ $3D_T$ เหนือแนวแกนอุโมงค์จนถึงระดับลึกที่สุด คือ $4D_T$ ใต้แนวแกนอุโมงค์ (D_T คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์) ดังรูปที่ 3.3 ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing, S) มีระยะต่างๆดังนี้ 3, 5, 7 และ 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม นอกจากนี้ได้กำหนดให้เสาเข็มแถววางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) เป็นระยะต่างๆ

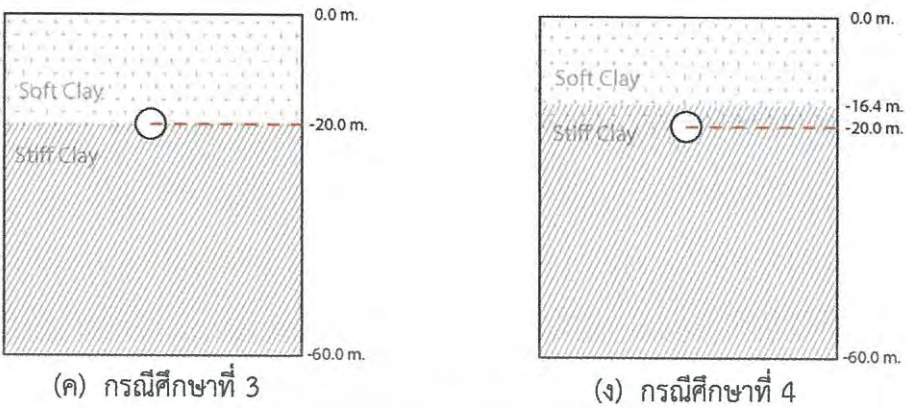


(ก) กรณีศึกษาที่ 1

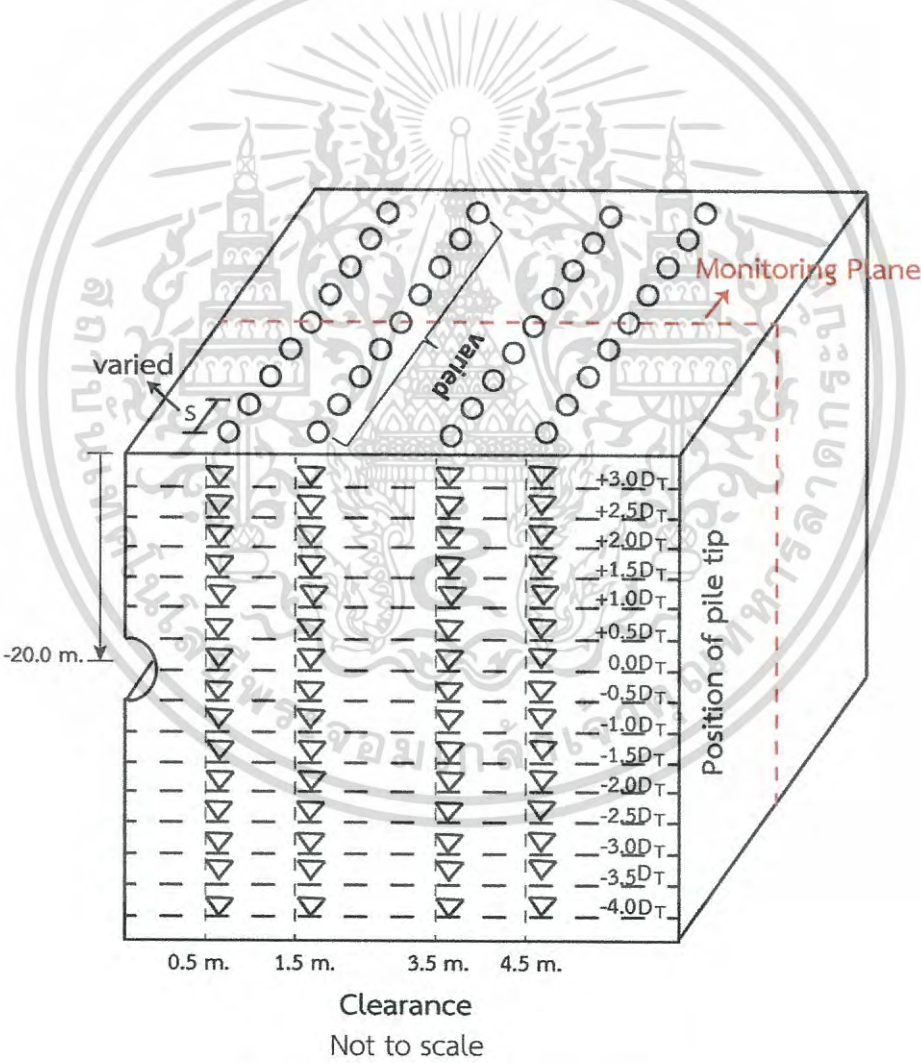


(ข) กรณีศึกษาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 รูปแบบของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการวางตัวของปลายเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 รูปแบบการวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane)

ในหัวข้อนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่เสาเข็มภายในแถวมีขนาด 1.0 เมตร โดยแสดงผลในแนวระนาบ (transverse plane) โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงผลที่หน้าตัดบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลอง (monitoring plane) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์เรื่องต่างๆดังนี้

3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing)

การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว กำหนดให้เสาเข็มแถว 7 ต้นวางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) เป็นระยะ 0.5 และ 4.5 เมตร ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing, S) คือ $3D_p$, $5D_p$, $7D_p$ และ $10D_p$ (D_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม) และจำลองให้อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 1 และ 4 ดังรูปที่ 3.2 การประเมินหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์ได้พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในแนวแกนที่มีการยืด (extension) และหดตัว (contraction) มากที่สุด โดยรายละเอียดวิธีการประเมินผลจะอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.5.5 ซึ่งอ้างอิงวิธีการวิเคราะห์จากงานวิจัยก่อนหน้า[3]

3.3.2 การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว

อย่างไรก็ตามจำนวนของเสาเข็มภายในแถวอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงวิเคราะห์จำนวนของเสาเข็มภายในแถวที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นตัวแทนของเสาเข็มแถวเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์ที่มากที่สุดในหัวข้อถัดไป โดยใช้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวที่น้อยที่สุดคือ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

3.3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์

การศึกษาในหัวข้อนี้ กำหนดให้เสาเข็มแถว 9 ต้นวางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) เป็นระยะต่างๆดังนี้ 0.5, 1.5, 3.5 และ 4.5 เมตร มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และจำลองให้อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาทั้ง 4 แบบ ซึ่งการประเมินหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์ได้พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในแนวแกนที่มีการยืด (extension) และหดตัว (contraction) มากที่สุดเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว เพิ่มเติมคือการบิดตัวของอุโมงค์ ซึ่งอ้างอิงวิธีการวิเคราะห์จากงานวิจัย [2]

3.3.4 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยศึกษาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ใน

แนวแกนที่มีการยืด (extension) และหดตัว (contraction) มากที่สุด กำหนดให้ใช้สภาวะแรงดันน้ำใต้ดินที่เหมือนกัน โดยศึกษาจากกรณีที่อยู่โมเมนต์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งหมด (กรณีศึกษาที่ 1) เท่านั้น เสาเข็มแถววางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ (clearance) เป็นระยะ 0.5 เมตร ซึ่งในการศึกษาด้วยแบบจำลอง 3 มิติ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ จะใช้หลักการแปลงค่า (transformation) ของเสาเข็มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Schroeder et al.(2004)[1]

3.4 การศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal)

3.4.1 การเสีรูปร่างของอุโมงค์ในแนวระนาบ ณ ตำแหน่งต่างๆในแนวยาวของอุโมงค์

การศึกษาการเสีรูปร่างของอุโมงค์ในแนวระนาบ ณ ตำแหน่งต่างๆในแนวยาวของอุโมงค์ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากเสาเข็มแถว กำหนดให้เสาเข็มขนาด 1.0 และ 1.5 เมตร จำนวน 9 ต้น วางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) เป็นระยะ 0.5 เมตร มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และศึกษาขณะที่ปลายเสาเข็มแถววางตัวอยู่ระดับที่ทำให้อุโมงค์เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดสูงสุด โดยจำลองให้อยู่โมเมนต์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 1 เท่านั้น ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในแนวแกนที่มีการยืดตัว (extension) มากที่สุด

3.4.2 การเคลื่อนตัวในแนวยาว (longitudinal movement) ของอุโมงค์

การศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวยาวของอุโมงค์ ใช้แบบจำลองเดียวกับหัวข้อ 3.4.1 ซึ่งจะศึกษาเพียงแค่ส่วนยอด (crown) และส่วนท้อง (invert) ของอุโมงค์เท่านั้น โดยจะพิจารณาปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวยาวตลอดความยาวของอุโมงค์

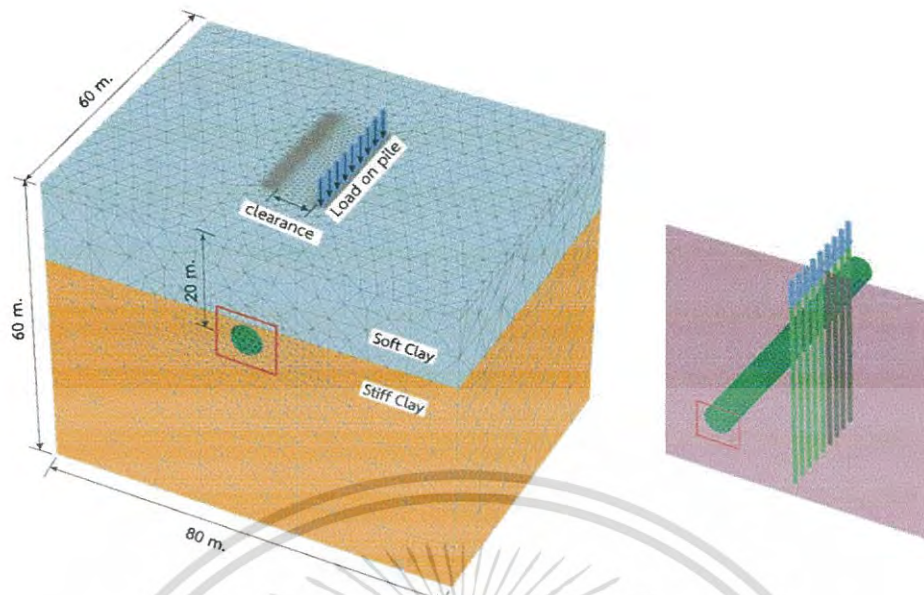
3.4.3 โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

การศึกษาโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ใช้แบบจำลองเดียวกับหัวข้อ 3.4.1 เช่นเดียวกัน โดยจะแสดงผลในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ทั้งโมเมนต์ดัดในระนาบ (circumferential bending moment) และโมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment)

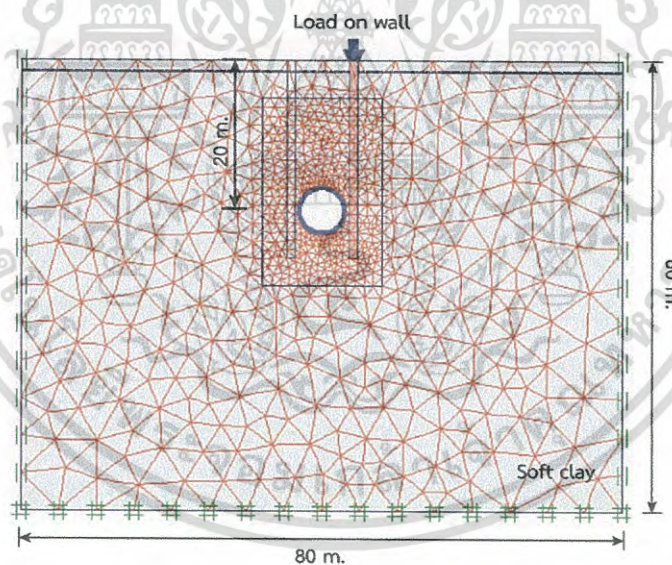
3.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.5.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (โครงข่ายแบบจำลอง)

ลักษณะโครงข่าย (mesh) ของแบบจำลอง มีขนาดความกว้าง 80 เมตร ($\approx 12.5 D_T$) ความยาว 60 เมตร ($\approx 9.5 D_T$) และความลึก 60 เมตร ($\approx 9.5 D_T$) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เสาเข็มแถววางตัวด้านขวามือของอุโมงค์ที่ระยะ clearance ต่างๆ และกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrained analysis) และรูปที่ 3.5 สำหรับการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ในหัวข้อที่ 3.3.4 เท่านั้น



รูปที่ 3.4 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.5 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ

3.5.2 คุณสมบัติแบบจำลอง

คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพที่ใช้ในการจำลองได้รับการตรวจสอบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงจากการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์และการขุดดินลึก[22]ในอดีต ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แบบจำลองชั้นดินกำหนดให้มีคุณสมบัติแบบ Hardening soil Model (HS) ในส่วนของผนังอุโมงค์และเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้มีคุณสมบัติแบบ linear elastic ดังตารางที่ 3.2 โดยในงานวิจัยนี้ผนังอุโมงค์ใช้แบบจำลองแบบ shell element ส่วนเสาเข็มเจาะและชั้นดินใช้การจำลองแบบ solid element

สำหรับการจำลองแบบ 2 มิติ ที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.3.4 จำลองโดยใช้คุณสมบัติของชั้นดินและผนังอุโมงค์ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 แต่ในส่วนคุณสมบัติของเสาเข็มเจาะได้ใช้ค่า Young's Modulus of Concrete ที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 2.6 ในงานวิจัยของ Schroeder et al.(2004)[1] ในหัวข้อ 2.7

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นดิน [22]

Soil layer	Material model	E' [kPa]	E_{oed}^{ref} [kPa]	E_{50}^{re} [kPa]	E_{ur}^{ref} [kPa]	γ_{sat} [kN/m ³]	N	ϕ [°]	C [kPa]	M	P_{ref} [kPa]
Soft Clay	HS	-	5000	5000	15000	16	0.33	22	5	1	100
Stiff Clay	HS	-	60000	60000	180000	18	0.33	22	18	1	95

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ [22]

	Young's Modulus of Concrete, E kN/m ²	Poisson's ratio of concrete, ν (-)	Unit weight of Concrete, γ_c kN/m ³
เสาเข็มเจาะ, ผนังอุโมงค์	3.1×10^7	0.20	24

3.5.3 ขอบเขตแบบจำลองการวิเคราะห์และเงื่อนไขเริ่มต้น

ขอบเขตแบบจำลอง

สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง (boundary condition) ได้กำหนดให้ด้านข้างของแบบจำลองสามารถเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้แต่ไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวนอน ส่วนด้านล่างของแบบจำลองไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวนอน และสำหรับด้านบนกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวแบบอิสระ

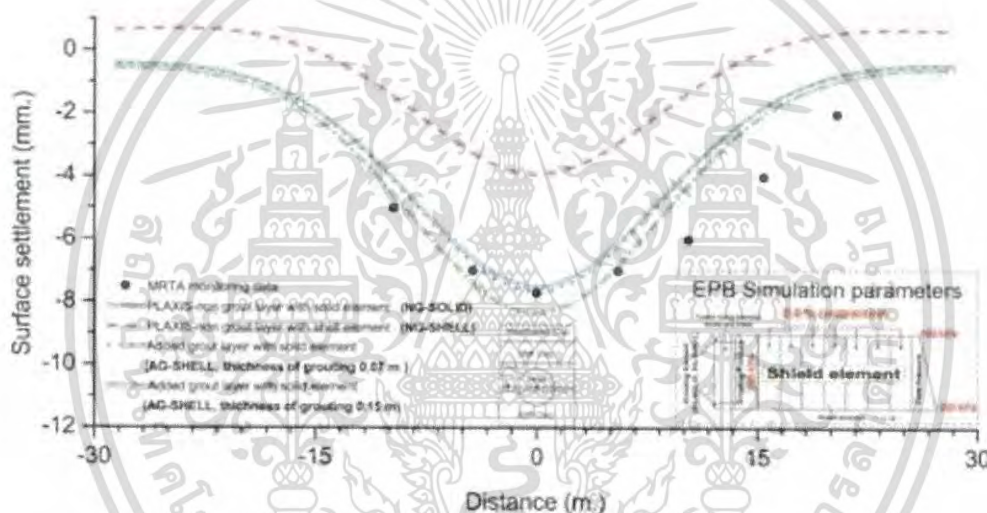
เงื่อนไขเริ่มต้น

ในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น การกระจายของความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งและแนวนอนขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของดินและสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_0) ของแต่ละชั้นดิน ซึ่งหน่วยน้ำหนักดิน และ k_0 ของแต่ละชั้นดินได้มาจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRT) [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แบ่งเป็นสองขั้นตอน เริ่มจากการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีที่ปรับปรุงจากคู่มือของซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ (PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1) ที่เสนอโดย Lueprasert et al. (2016) [24] เมื่อทำการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของผิวดินเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดจากโครงการ MRTA ดังรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวของผิวดินมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด (MRTA monitoring data) ขั้นตอนที่สอง วิเคราะห์เสาค้ำรับแรงกระทำที่ระดับความลึกต่างๆ โดยน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยที่เสาค้ำรับได้คำนวณตามวิธี α -method [18] ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 2.5 และกำหนดให้แบบจำลองของเสาค้ำรับใช้วิธี wish in place คือ ชิ้นส่วน (element) ของเสาค้ำรับจะถูกกำหนดให้อยู่ในชั้นดินก่อนแล้ว โดยไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้าง



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของผิวดินที่ได้จากโครงการ MRTA กับ 3D-FEM [24]

3.5.5 การประเมินผล

การเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ ($\Delta\phi$) จะไม่คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.7 และคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.4 โดยจะทำการวิเคราะห์ผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่ง monitoring plane (หัวข้อ 3.3) และตำแหน่งต่างๆในแนวยาวของอุโมงค์ (หัวข้อ 3.4.1) ดังรูปที่ 3.8

โดยที่ X_w, Y_w = พิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ
 U_{xw}, U_{yw} = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด
 X_z, Y_z = พิกัดตรงข้ามของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ
 U_{xz}, U_{yz} = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด

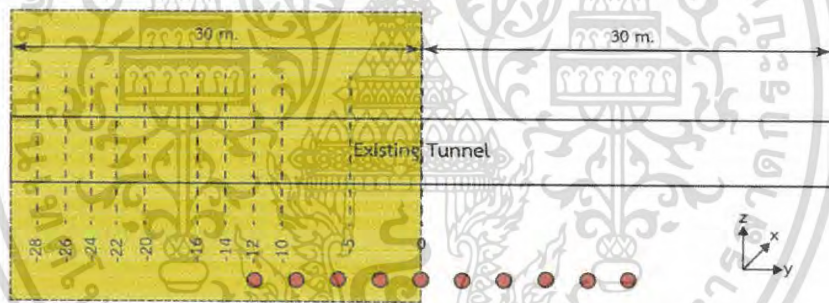
$\Delta\phi_{E-MAX}$ = ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในลักษณะยืดตัว (extension)

$$\Delta\phi_{E-MAX} = \phi_{E-MAX2} - \phi_{E-MAX1} \quad (3.4)$$

เมื่อ
$$\phi_{E-MAX2} = \sqrt{[(X_i + U_{xi}) - (X_j + U_{xj})]^2 + [(Y_i + U_{yi}) - (Y_j + U_{yj})]^2} \quad (3.5)$$

$$\phi_{E-MAX1} = \sqrt{[X_i - X_j]^2 + [Y_i - Y_j]^2} \quad (3.6)$$

โดยที่ X_i, Y_i = พิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ
 U_{xi}, U_{yi} = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด
 X_j, Y_j = พิกัดของจุดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ
 U_{xj}, U_{yj} = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งหน้าตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว

การบิดตัวของอุโมงค์

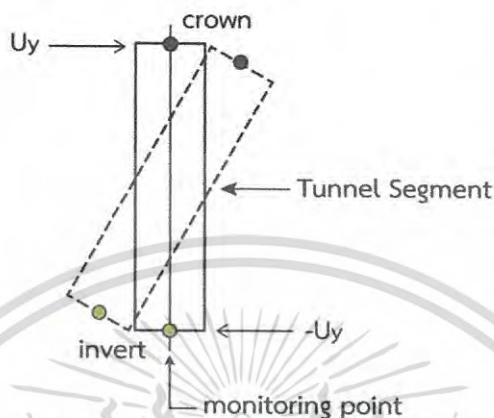
การวิเคราะห์การบิดตัวของอุโมงค์จะไม่คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง และจะทำการวิเคราะห์ผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่ง monitoring plane เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.7 และคำนวณได้จากสมการที่ 3.7 และ 3.8

$$\alpha = 90^\circ - \arctan((Y_j + U_{yj}) / (X_j + U_{xj})) \quad (3.7)$$

$$\beta = \arctan((Y_z + U_{yz}) / (X_z + U_{xz})) \quad (3.8)$$

การเคลื่อนตัวในแนวยาว (longitudinal movement)

ค่าการเคลื่อนตัวในแนวยาวที่ได้จากตลอดความยาวของอุโมงค์ ณ ส่วนยอด (crown) และส่วนท้อง (invert) ดังรูปที่ 3.9 จะไม่คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

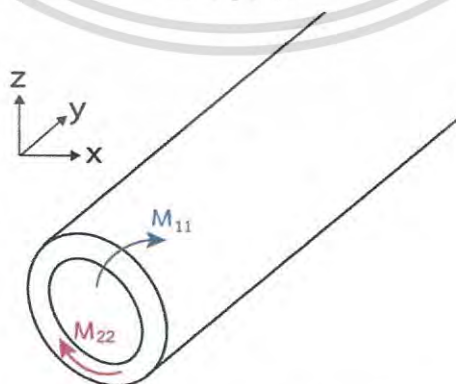
การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์จะทำการวิเคราะห์ทั้งโมเมนต์ดัดในระนาบ (circumferential bending moment, M_{22}) และโมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment, M_{11}) ของผนังอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.9 จากหน้าตัดตามขวาง ณ จุดต่างๆของอุโมงค์ในแนวยาว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.9

ΔM = ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

$$\Delta M = M_2 - M_1 \quad (3.9)$$

โดยที่ M_1 = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ก่อนได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแถว

M_2 = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์หลังได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแถว



รูปที่ 3.10 แสดงทิศทางของโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

4.1 กล่าวนำ

บทนี้บรรยายถึงผลการวิเคราะห์อิทธิพลของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลกระทบต่อกองค้ำในแนวระนาบ (transverse plane) และ พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) สำหรับในส่วนแรกได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 4 หัวข้อย่อย ได้แก่ ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว, การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว, การเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์ สุดท้ายคือเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ และส่วนที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) ซึ่งจะแสดงให้เห็นการเสียรูปของอุโมงค์ ณ หน้าตัดต่างๆของอุโมงค์ในแนวยาวและการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ทั้งโมเมนต์ดัดในระนาบ (circumferential bending moment, M_{22}) และโมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment, M_{11})

4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อกองค้ำในแนวระนาบ (transverse plane)

ในหัวข้อนี้เป็นการบรรยายถึงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่เสาเข็มภายในแถวมีขนาด 1.0 เมตร โดยแสดงผลในแนวระนาบ (transverse plane) ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์จากหน้าตัดบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลอง (monitoring plane) ดังรูปที่ 3.3 โดยผลการวิเคราะห์แบ่งเป็นเรื่องต่างๆดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing)

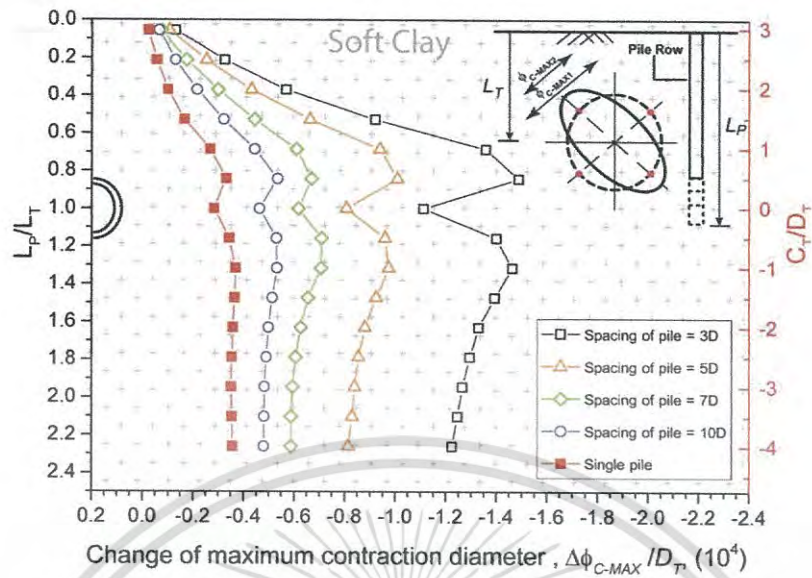
หัวข้อนี้บรรยายถึงผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถว 7 ต้นวางตัวอยู่ด้านขวาของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิม มีระยะ clearance เท่ากับ 0.5 และ 4.5 เมตร โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวคือ 3, 5, 7 และ 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเป็นปัจจัยหลัก จึงไม่คำนึงถึงจำนวนของเสาเข็มภายในแถวที่สามารถสะท้อนถึงพฤติกรรมของเสาเข็มแถว ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) และดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) ที่ระดับความลึก 20 เมตร และจำลองให้ปลายเสาเข็มแถวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆ เริ่มที่ $0.06L_T$ หรือ $3.0D_T$ ถึง $2.3L_T$ หรือ $-4.0D_T$ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงอยู่ในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว (extension) และหดตัว (contraction) ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวและหดตัว กำหนดให้แกน y ด้านซ้ายเป็นอัตราส่วนระหว่างระดับความลึกเสาเข็มต่อความลึกอุโมงค์ (L_p / L_T) ด้านขวาเป็นอัตราส่วนระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

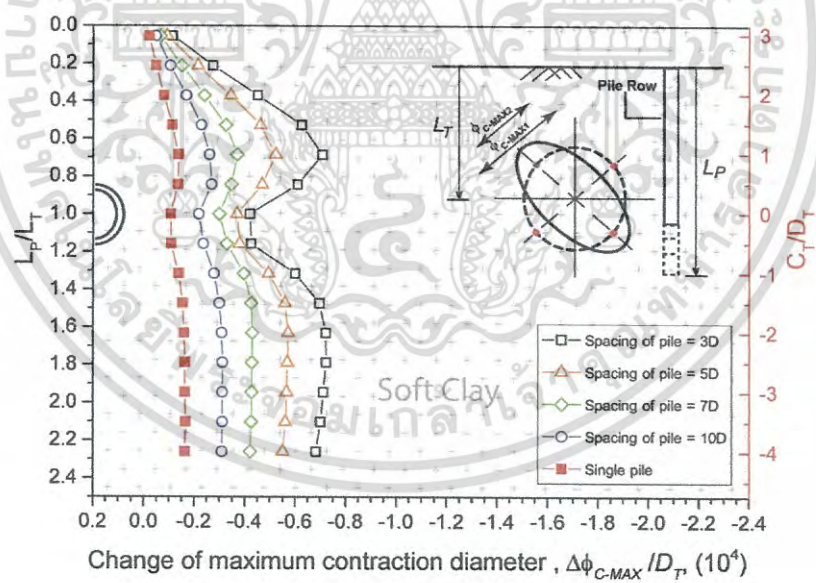
ผลต่างของความลึกระหว่างอุโมงค์และปลายเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์ (C_T / D_T) แกน x เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์ ($\Delta\phi / D_T$) โดยค่าบวก (+) แทนการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว ค่าลบ (-) แทนการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัว

รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) เป็นกราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว (extension) ในชั้นดินเหนียวอ่อนเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวที่มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็ม (spacing) แตกต่างกัน ($3D_p$, $5D_p$, $7D_p$ และ $10D_p$) โดยเปรียบเทียบกับอิทธิพลจากเสาเข็มเดี่ยว จากกราฟพบว่าเมื่อระดับปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนืออุโมงค์ ($0.0L_T - 0.8L_T$) ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความลึกปลายเสาเข็มเพิ่มขึ้นจนเกิดค่าสูงสุดที่ระดับ $0.8L_T$ หรือ $0.5D_T$ หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ลดลงอย่างเด่นชัดเมื่อปลายเสาเข็มวางตัว ณ แนวแกนอุโมงค์ จากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนเกิดค่าสูงสุดที่ระดับ $1.3L_T$ หรือ $-1.0D_T$ และค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวจะลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ $-1.0D_T$

และพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวมีค่ามากที่สุดเมื่อเสาเข็มแถวที่มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และค่าจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3 เท่า เป็น 5, 7 และ 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวก็ยังคงมากกว่าอิทธิพลจากเสาเข็มเดี่ยว และเมื่อระยะ clearance เพิ่มขึ้นจากระยะ 0.5 เมตร เป็นระยะ 4.5 เมตร ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์มีค่าลดลง สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัว (contraction) ในชั้นดินเหนียวอ่อนดังรูปที่ 4.2 กราฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในลักษณะยืดตัว (extension)



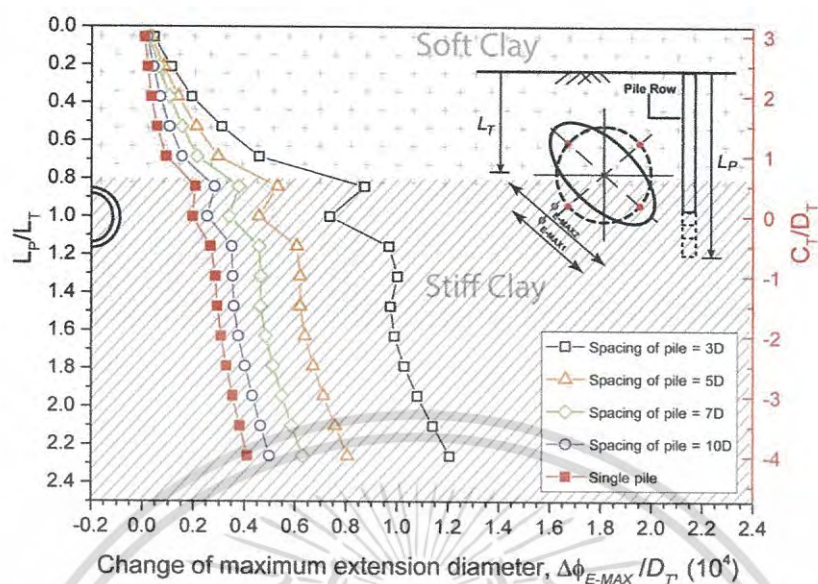
(ก) Clearance 0.5 เมตร



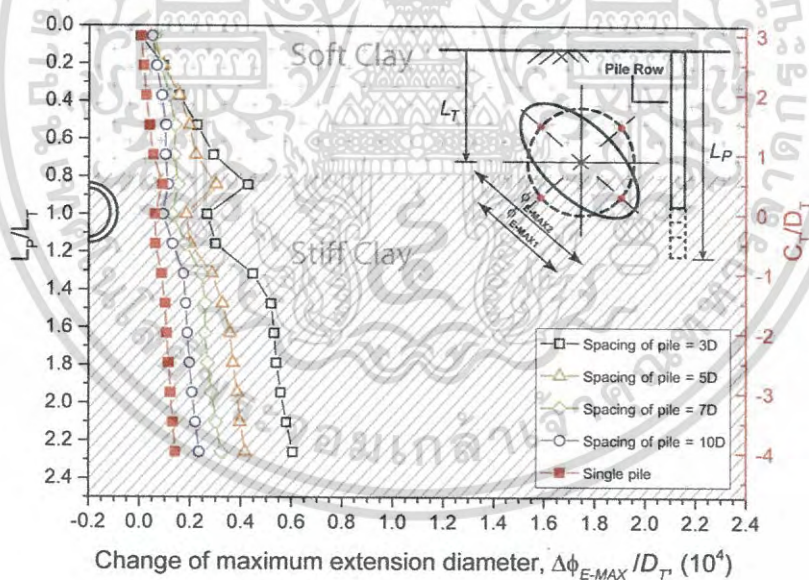
(ข) Clearance 4.5 เมตร

รูปที่ 4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดตุ้มสูงสุด ณ ลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Clearance 0.5 เมตร

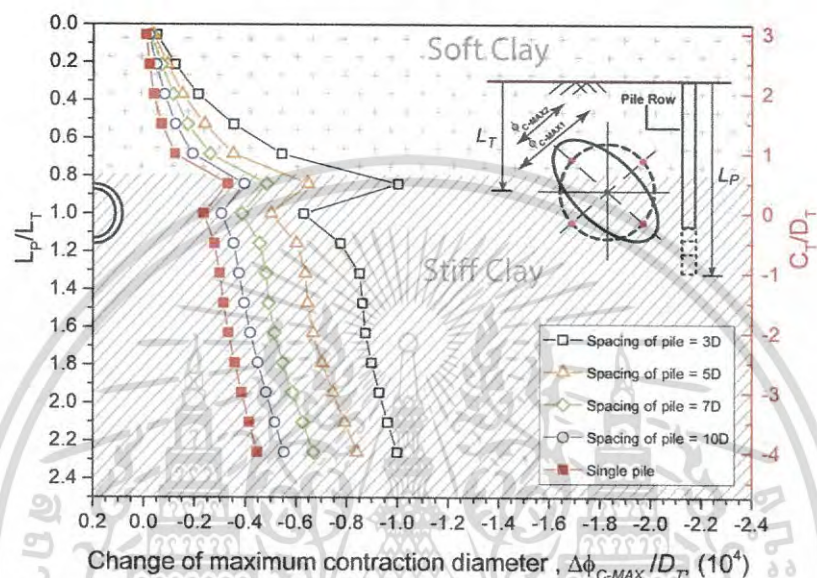


(ข) Clearance 4.5 เมตร

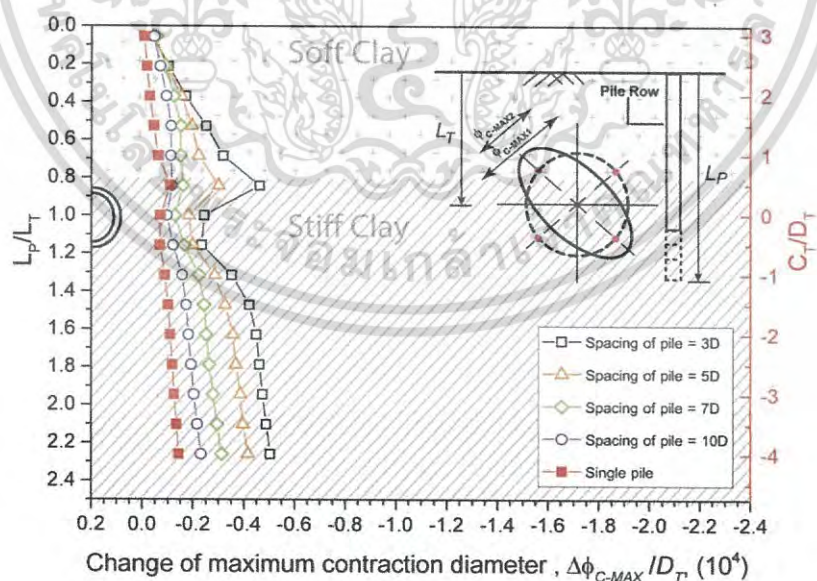
รูปที่ 4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอู้งค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวและหดตัวในชั้นดินเหนียวแข็งดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับเมื่ออู้งค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน แตกต่างกันเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ $1.3L_T$ หรือ $-1.0D_T$ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอู้งค์สูงสุดทั้งในลักษณะยึดตัวและหดตัวเพิ่มขึ้นทีละน้อยเมื่อความลึกระดับปลายเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น



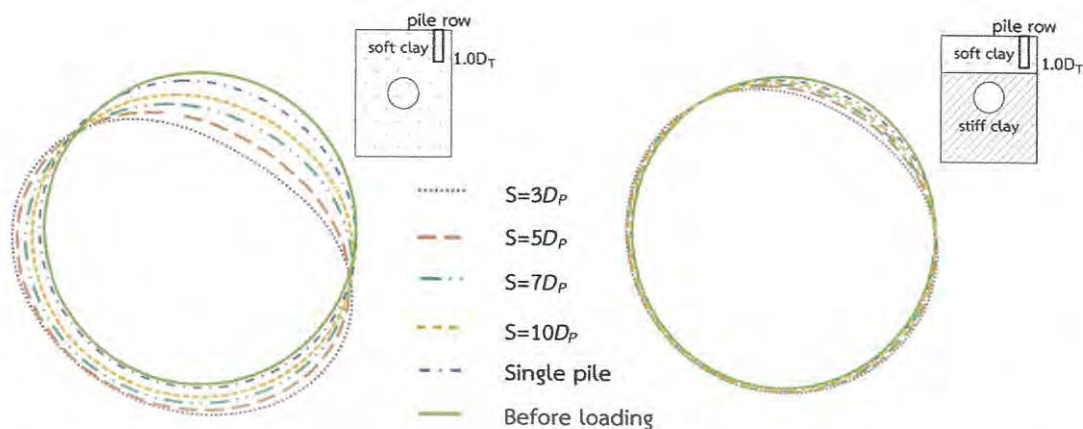
(ก) Clearance 0.5 เมตร



(ข) Clearance 4.5 เมตร

รูปที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอู้งค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

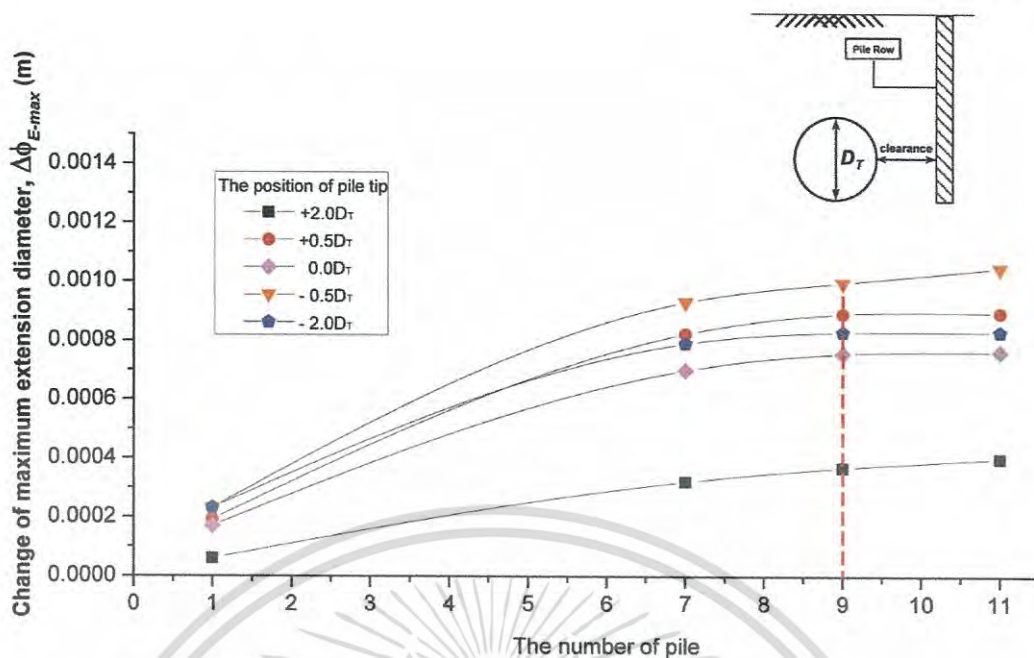
(ข) อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ (magnification ratio 1:1000)

รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอุโมงค์เนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวและเสาเข็มเดี่ยว โดยความลึกปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ $1.0D_T$ มีระยะ clearance เท่ากับ 0.5 เมตร เมื่ออุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง ดังรูป ก และ ข ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอุโมงค์เนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวลดน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเพิ่มมากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์เนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวยังคงมากกว่าเสาเข็มเดี่ยวอย่างชัดเจน และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์เมื่อวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนมีมากกว่าเมื่อวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง ดังนั้นแม้ว่าระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวจะมากแต่ยังคงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นผลกระทบที่ได้รับจากเสาเข็มแถว ไม่สามารถพิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวได้

4.2.2 การประเมินแบบจำลองของจำนวนเสาเข็มแถว

เนื่องจากจำนวนของเสาเข็มภายในแถวอาจส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นหัวข้อนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนเสาเข็มภายในแถวที่แตกต่างกันต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว (extension) โดยจำลองให้เสาเข็มจำนวน 1, 7, 9 และ 11 ต้น ที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม วางตัวด้านขวาของอุโมงค์โดยมีระยะ clearance เท่ากับ 0.5 เมตร และปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับความลึก $+2.0D_T$, $+0.5D_T$, $0.0D_T$, $-0.5D_T$ และ $-2.0D_T$ โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเสาเข็มภายในแถวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนเสาเข็มภายในแถวมากกว่า 9 ต้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดคงที่ ดังนั้นเสาเข็มจำนวน 9 ต้น จึงเป็นจำนวนที่เพียงพอต่อการใช้เป็นตัวแทนของเสาเข็มแถวเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane)



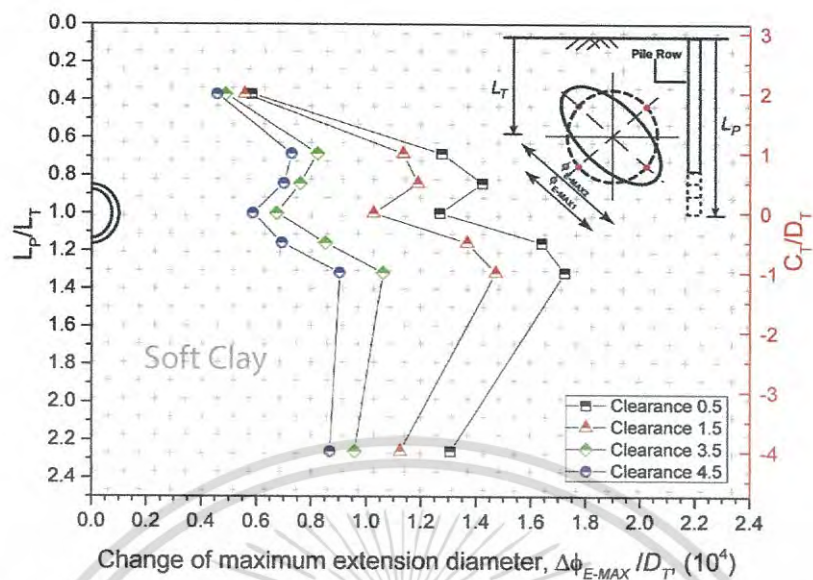
รูปที่ 4.6 แสดงจำนวนเสาเข็มแถวที่เหมาะสมต่อการนำมาจำลอง

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์

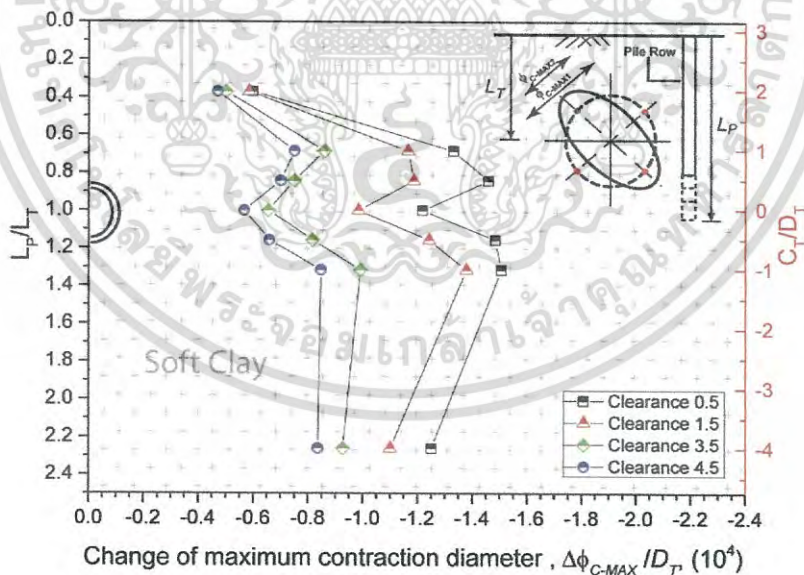
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์เนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวจำนวน 9 ต้น โดยกำหนดให้เสาเข็มแถววางตัวห่างจากอุโมงค์มีระยะ clearance ต่างๆดังนี้ 0.5, 1.5, 3.5 และ 4.5 เมตร มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม อุโมงค์วางตัวในชั้นดินทั้ง 4 กรณีศึกษาที่ระดับความลึก 20 เมตร และได้จำลองให้ปลายเสาเข็มแถวอยู่ที่ระดับความลึกต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงอยู่ในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดลักษณะยืดตัว (extension) และหดตัว (contraction) เช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) ดังหัวข้อ 4.2.1 เพิ่มเติมคือการบิดตัวของอุโมงค์

การเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์

ดังรูปที่ 4.7-4.8 และ 4.9-4.10 เป็นกราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว (extension) และหดตัว (contraction) ในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) และดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) ตามลำดับ ซึ่งกราฟทั้งหมดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) และพบว่าเมื่อระยะ clearance เพิ่มขึ้นค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดลดน้อยลง

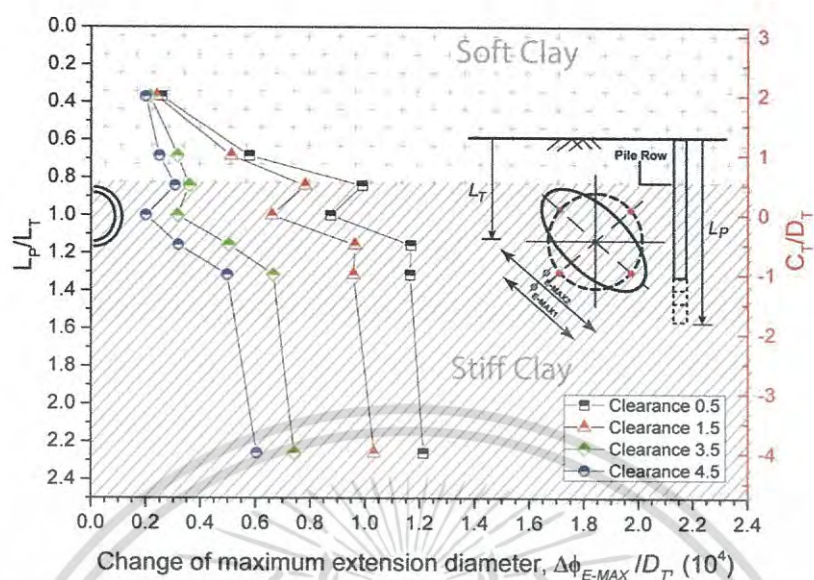


รูปที่ 4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

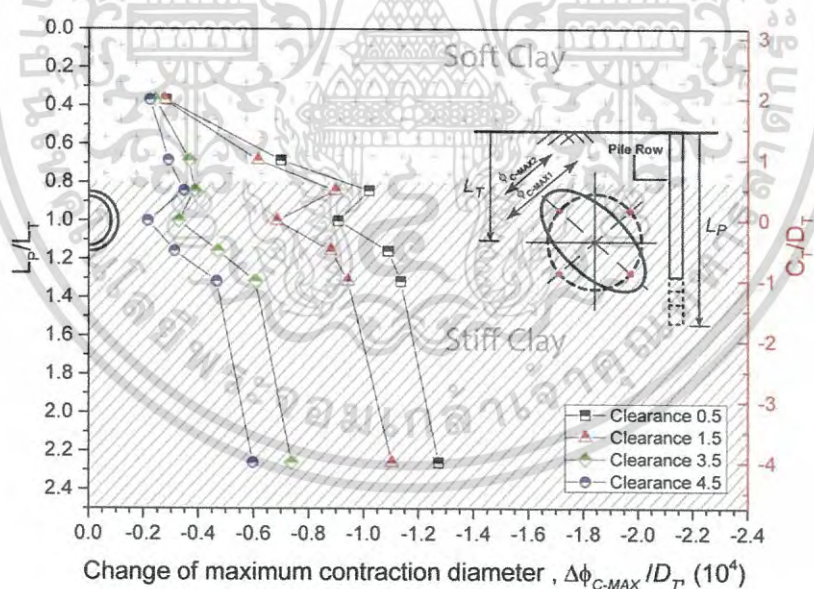


รูปที่ 4.8 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอูโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง

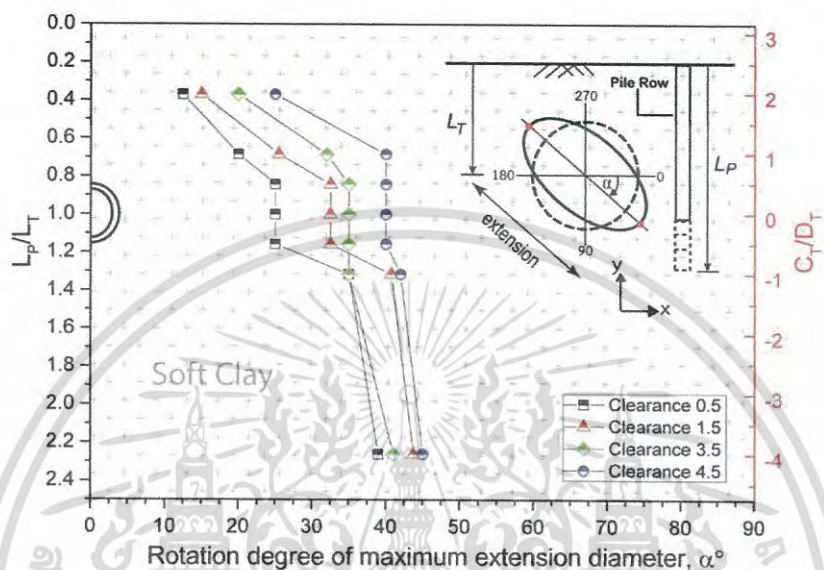


รูปที่ 4.10 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง

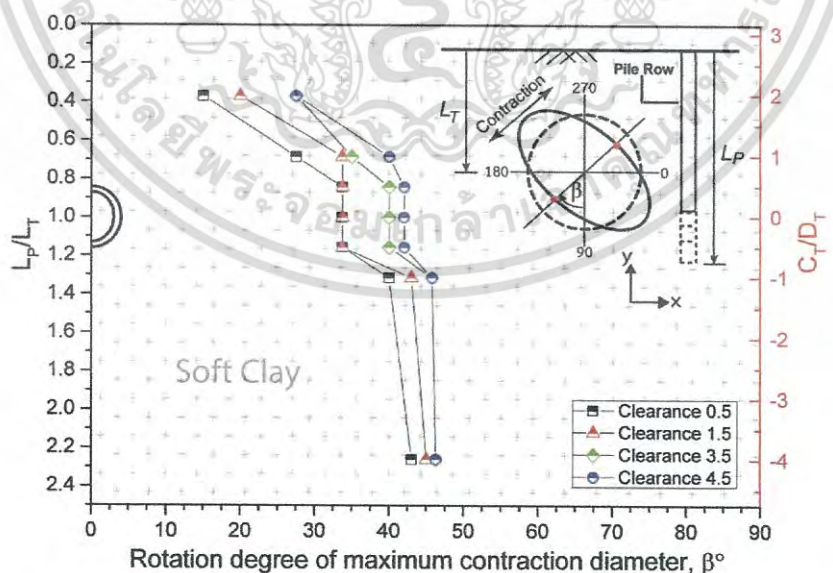
สำหรับกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 นั้น ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวและยืดตัวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) สามารถดูกราฟได้จากภาคผนวก ก

การบิดตัวของอุโมงค์

ผลการวิเคราะห์การบิดตัวของอุโมงค์แสดงอยู่ในเทอมขององศาการบิดตัวของผนังอุโมงค์จากการยืดตัว (α) และหดตัว (β) สูงสุดของผนังอุโมงค์ ดังรูปที่ 4.11-4.14



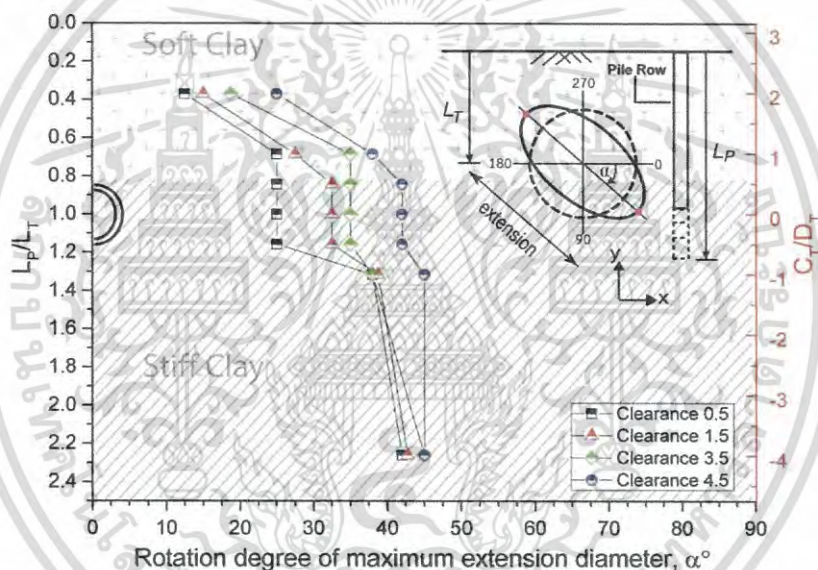
รูปที่ 4.11 องศาการบิดตัวจากการยืดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (α) ในชั้นดินเหนียวอ่อน



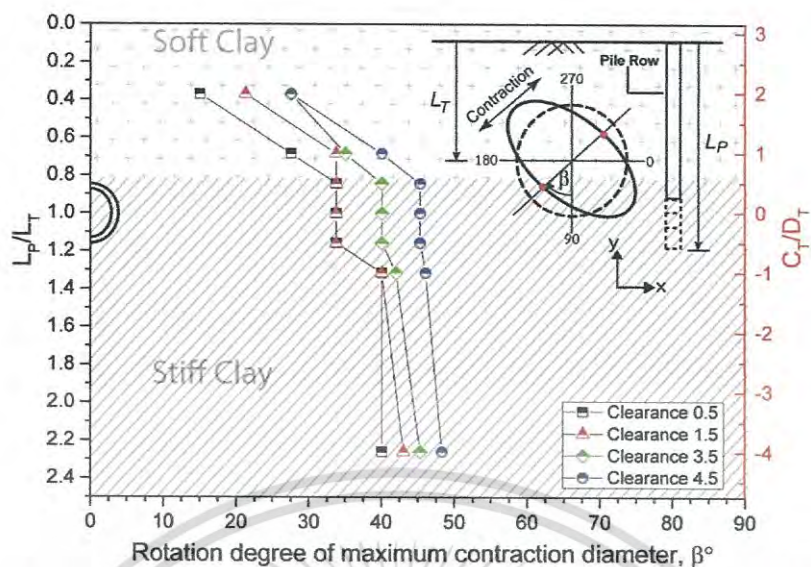
รูปที่ 4.12 องศาการบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (β) ในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นกราฟแสดงค่าองศาการบิดตัวจากการยืดตัวและหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) ตามลำดับ พบว่าเมื่อระดับปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนืออุโมงค์ ($0.0L_T - 0.8L_T$) องศาการบิดตัวของอุโมงค์เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความลึกปลายเสาเข็มเพิ่มขึ้นจนเกิดค่าสูงสุดที่ระดับ $0.8L_T$ หรือ $0.5D_T$ หลังจากนั้นองศาการบิดตัวจะคงที่เมื่อระดับปลายเสาเข็มวางตัวในช่วงที่อุโมงค์วางตัวอยู่ ($0.8L_T - 1.2L_T$) จากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงระดับ $1.3L_T$ หรือ $-1.0D_T$ และองศาการบิดตัวของผนังอุโมงค์จะเริ่มคงที่เมื่อวางตัวต่ำกว่าระดับ $1.3L_T$ สำหรับองศาการบิดตัวจากการยืดตัวและหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) ดังรูป 4.13-4.14 และกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข กราฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับองศาการบิดตัวจากการยืดตัวและหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1)

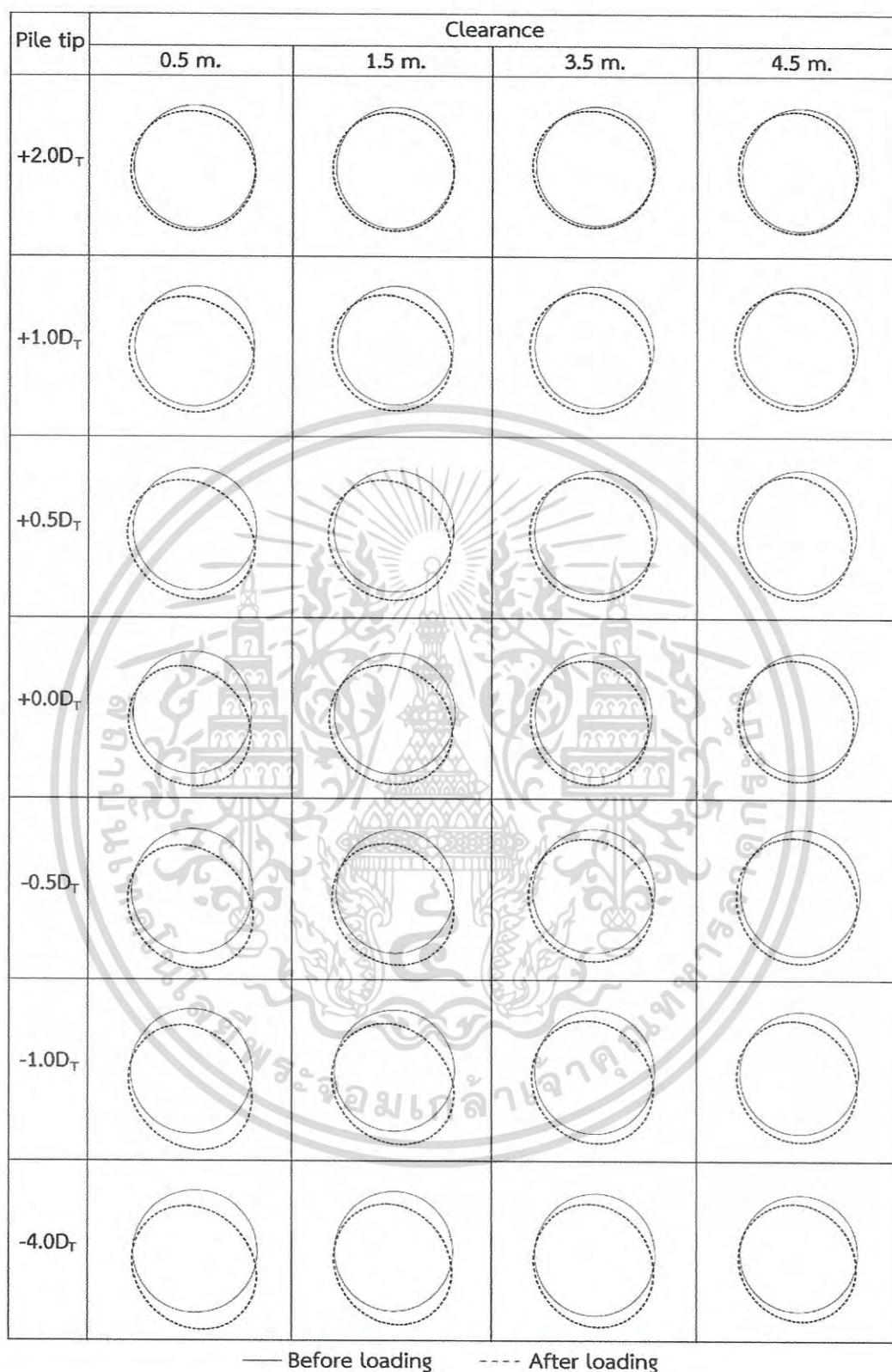


รูปที่ 4.13 องศาการบิดตัวจากการยืดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (α) ในชั้นดินเหนียวแข็ง



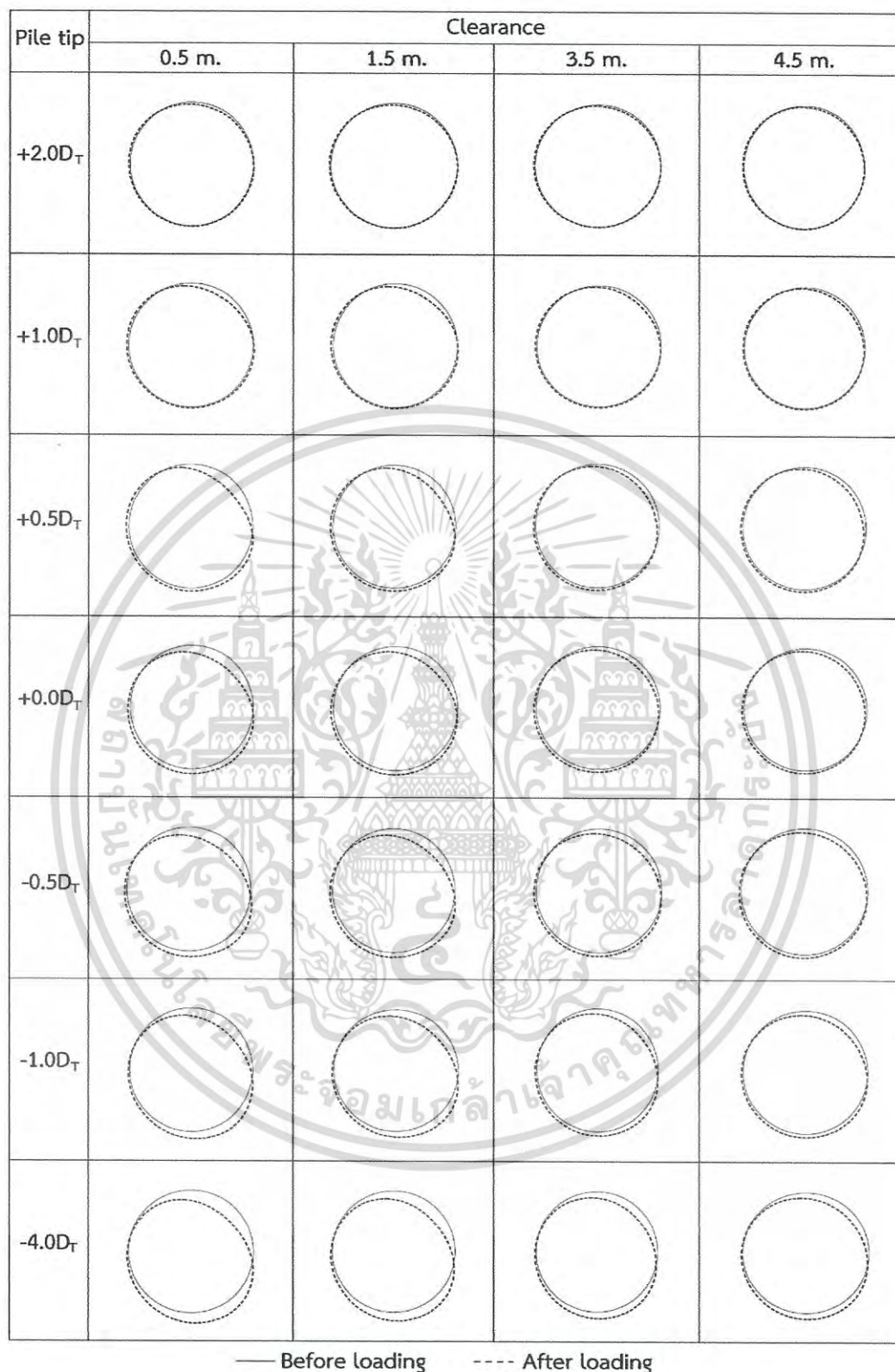
รูปที่ 4.14 องศาการบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (β) ในชั้นดินเหนียวแข็ง

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) และดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) ตามลำดับ พบว่าอุโมงค์มีการบิดตัวไปในทิศทางที่เสาเข็มแถววางตัวอยู่และบิดตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับปลายเสาเข็มยิ่งวางตัวลึกลงจนถึงระดับ $-1.0D_t$ องศาการบิดตัวของอุโมงค์เริ่มคงที่ สำหรับกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 แสดงไว้ในภาคผนวก ข นั้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการบิดตัวของอุโมงค์เป็นไปในลักษณะเดียวกับเมื่ออุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 1 และ 4 และการเสียรูปของอุโมงค์เมื่อวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) มีมากกว่าในกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2, 3 และ 4 อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน (อัตราส่วน 1:500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



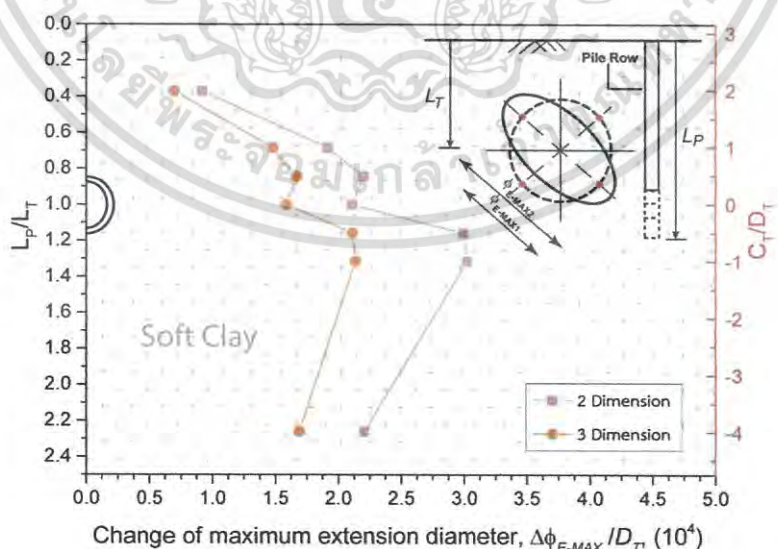
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง (อัตราส่วน 1:500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

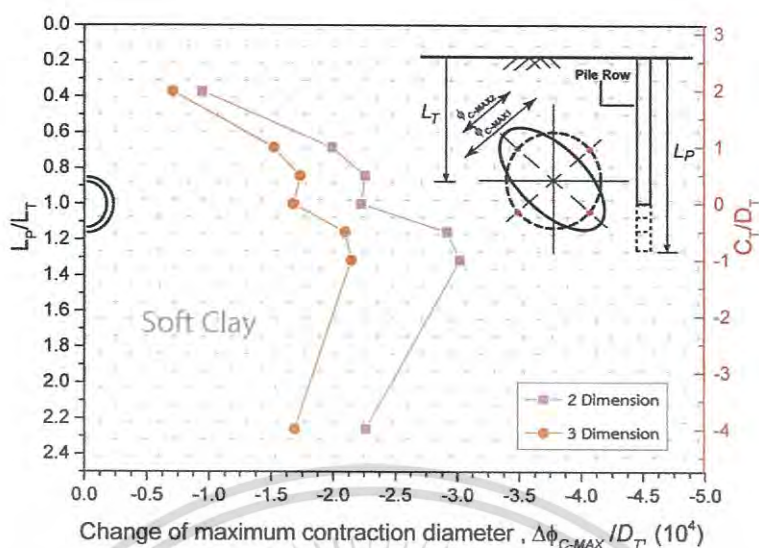
จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่องูโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane) พบว่าเมื่อปลายเสาเข็มแฉวงตัวเข้าใกล้จุดยอดของกูโมงค์ (crown) มากเพียงใด การเสียรูปของกูโมงค์จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกูโมงค์ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของดินบริเวณปลายเสาเข็ม ซึ่งการเสียรูปของกูโมงค์เมื่อวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) มีมากกว่าเมื่อวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง (กรณีศึกษาที่ 4) เนื่องจากค่า stiffness ของดินเหนียวอ่อนน้อยกว่าดินเหนียวแข็ง แต่เมื่อปลายเสาเข็มวางตัวที่ระดับกึ่งกลางของกูโมงค์ (spring line) การเสียรูปของกูโมงค์ลดน้อยลง อาจเกิดจากกูโมงค์ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของดินที่ปลายเสาเข็มเพียงแค่บางส่วนของกูโมงค์เท่านั้น จากนั้นเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับกึ่งกลางกูโมงค์ การเสียรูปของกูโมงค์จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จนเกิดค่าสูงสุดที่ระดับ $-1.0D_T$ อาจเป็นผลจาก skin friction ตลอดความยาวเสาเข็มทำให้ดินรอบๆ เสาเข็มเคลื่อนตัว และการเสียรูปของกูโมงค์จะลดลงทีละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ $-1.0D_T$ ซึ่งอาจเป็นเพราะ skin friction เกิดการ full mobilize อย่างเต็มที่แล้วในกรณีที่ปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน แต่หากเป็นกรณีที่ปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง การเสียรูปของกูโมงค์ยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มยิ่งวางตัวลึกลง อาจเป็นผลจาก skin friction ยังสามารถเพิ่มขึ้นได้เรื่อยๆ

4.2.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดกูโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 2 และ 3 มิติ

หัวข้อนี้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ (2D-FEM) และ 3 มิติ (3D-FEM) โดยจะทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดกูโมงค์สูงสุดของกูโมงค์ เมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแฉวง และมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 3 เมตร ($3D_p$) ระยะห่างระหว่างขอบกูโมงค์ถึงขอบเสาเข็ม (clearance) เท่ากับ 0.5 เมตร เมื่อกูโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งหมด (กรณีศึกษาที่ 1) เท่านั้น



รูปที่ 4.17 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดกูโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

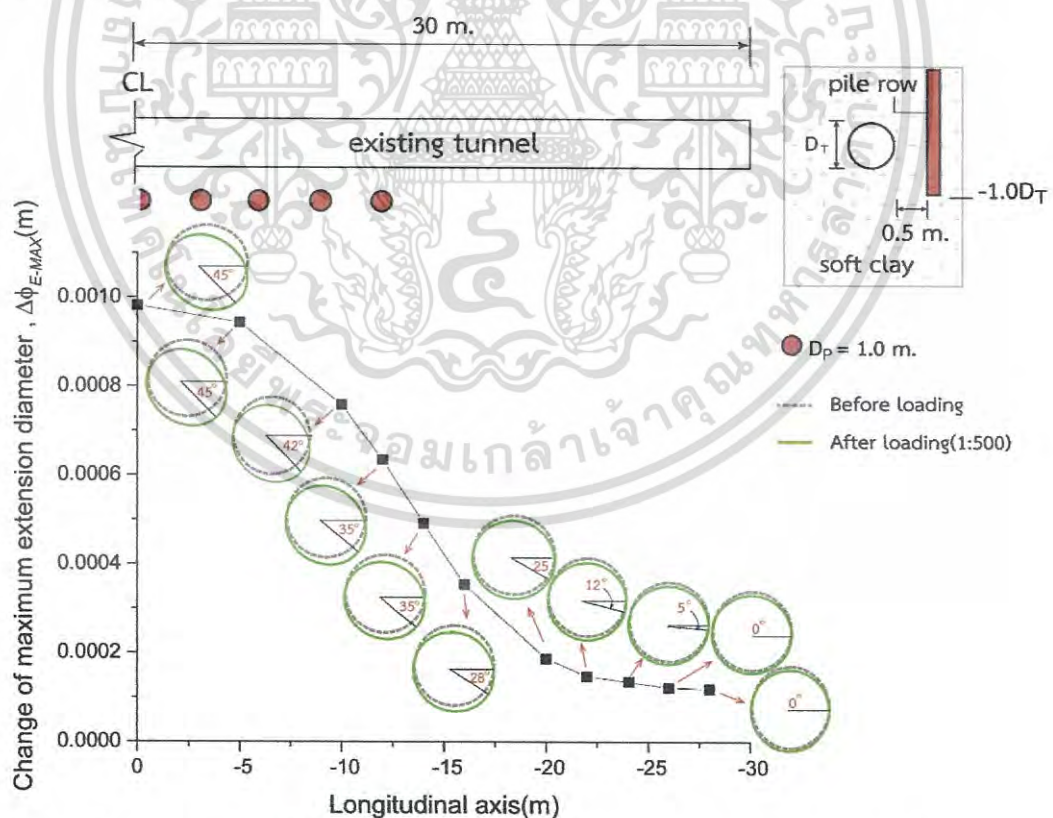


รูปที่ 4.18 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นกราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว (extension) และหดตัว (contraction) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D-FEM และ 3D-FEM พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์มีลักษณะคล้ายกันโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่ปลายเสาเข็มอยู่เหนือดุมงค์ และมีค่ามากที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ $1.3L_T$ หรือ $-1.0D_T$ แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2D-FEM จะมีค่ามากกว่าจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี 3D-FEM ประมาณ 1.3-1.4 เท่า เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ ที่ไม่สามารถจำลองเสาเข็มแฉกได้ ซึ่งทางโปรแกรมจะจำลองให้เสาเข็มแฉกมีลักษณะเป็นกำแพงพืด ดังรูปที่ 4.19 ทำให้ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์มีมากกว่า ในการศึกษาพบว่ามีความแตกต่างจากการศึกษาในอดีตของ Schroeder et al.(2004) [1] ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มแฉกต่อดุมงค์โดยใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่นเดียวกัน แต่ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับงานของ [1] น่าจะเกิดจากรูปแบบของแบบจำลองมีความแตกต่างกัน โดยแบบจำลองเสาเข็มแฉกของ [1] เป็นแบบจำลองชิ้นส่วนสมมาตร (symmetry slices) แบบครึ่งเดียว (กรอบสี่เหลี่ยม) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 แต่ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้แบบจำลองแบบเต็ม (full model) ซึ่งแบบจำลองแบบเต็มนี้ควรจะสะท้อนผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องมากกว่าแบบจำลองชิ้นส่วนสมมาตรแบบครึ่งเดียว

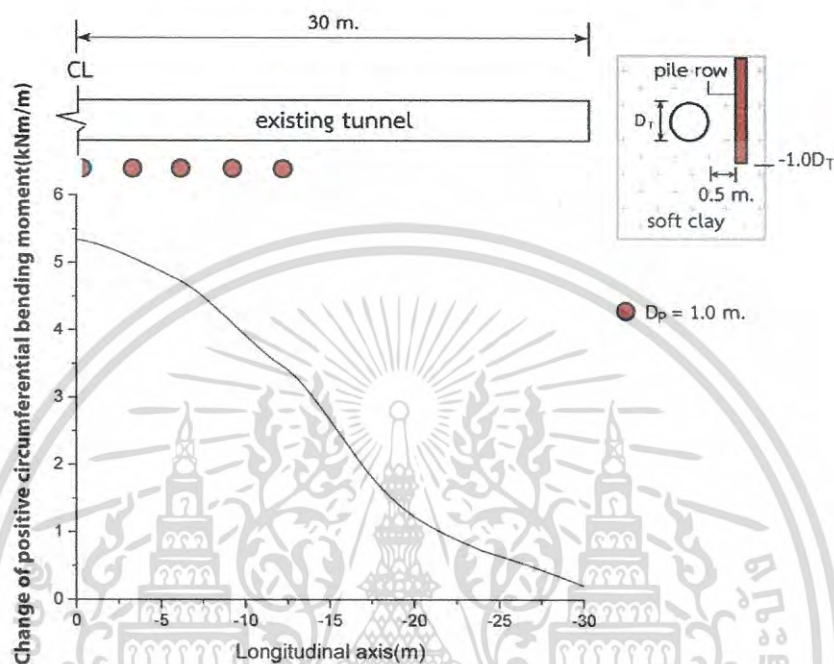
4.3 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal)

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการศึกษาการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวนอน (ดังรูปที่ 3.3) ณ ตำแหน่ง monitoring plane เพียงตำแหน่งเดียว แต่นอกจากการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวนอน แบบ 2 มิติ จากงานวิจัยของ Gong et al.(2015)[6] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว จากงานวิจัยนี้พบว่าค่าการทรุดตัวในแนวยาวที่ไม่เท่ากันและมีลักษณะเป็นแบบ Gaussian curve นั้นเมื่อแสดงค่าจุดดัดกลับ (inflection point) จะสามารถบ่งบอกถึงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดในผนังอุโมงค์มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและส่งผลทำให้ค่า structural safety ลดลง ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวอยู่ในช่วง $-0.7i$ ถึง $-2.2i$ และ $0.7i$ ถึง $2.2i$ (i คือระยะจุดดัดกลับของอุโมงค์) ดังนั้นหัวข้อนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวทั้งการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวนอน ณ ตำแหน่งต่างๆในแนวยาวของอุโมงค์ (รูปที่ 3.8) และโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ทั้งโมเมนต์ดัดในแนวนอน (circumferential bending moment, M_{22}) และโมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment, M_{11}) ดังรูปที่ 3.10 เมื่ออุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน (กรณีศึกษาที่ 1) มีเสาเข็มแถววางตัวทางด้านขวาห่างจากขอบผนังอุโมงค์ 0.5 เมตร ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม โดยศึกษาจากความยาวของอุโมงค์เพียงครั้งเดียว

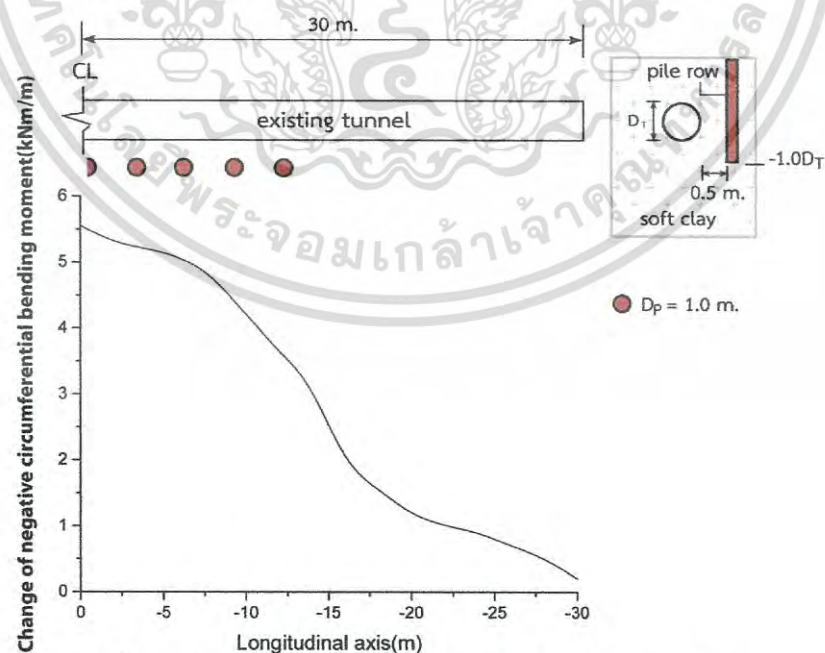


รูปที่ 4.21 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ

รูปที่ 4.21 เป็นกราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆของอุโมงค์ในแนวยาว เมื่อปลายเสาเข็มแถวตัวที่ระดับ $-1.0D_T$ ซึ่งเป็นระดับที่อุโมงค์เกิดการเสียรูปสูงสุด จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดและองศาการบิดตัวของอุโมงค์ลดลงเมื่อตำแหน่งยังถอยห่างออกจาก 0 หรือ monitoring plane



รูปที่ 4.22 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (บวก)

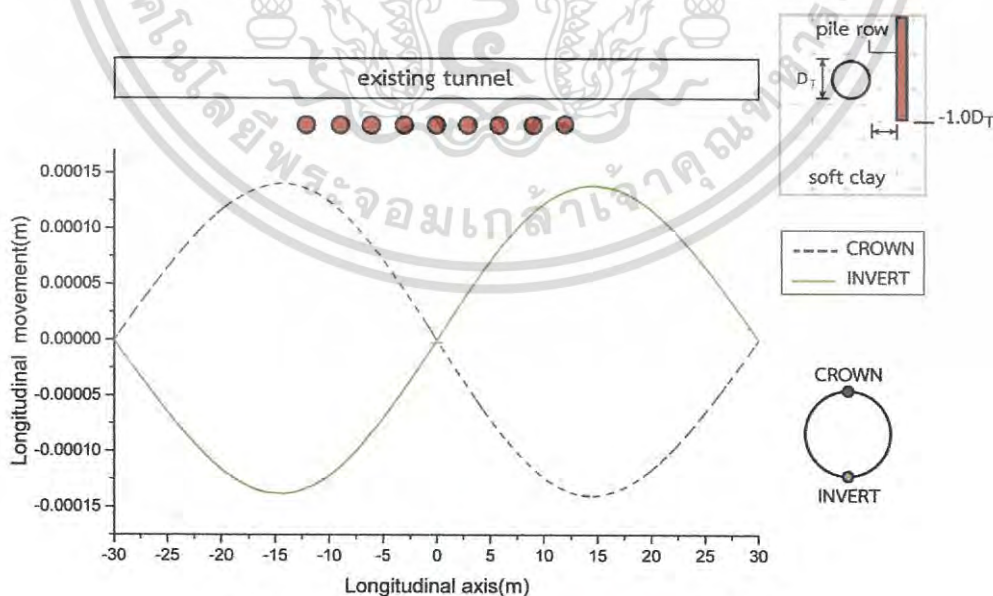


รูปที่ 4.23 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (ลบ)

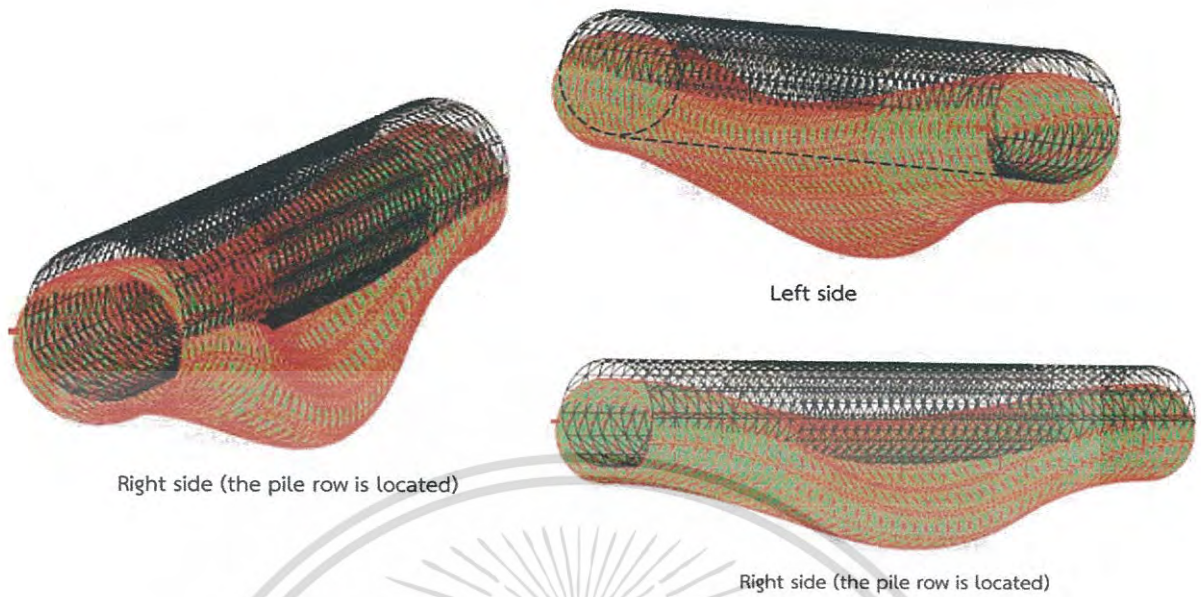
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 และ 4.23 เป็นกราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวระนาบของโมเมนต์บวกลบและโมเมนต์ลบ ตามลำดับ ขณะปลายเสาเข็มแฉกวางตัวที่ระดับ $-1.0D_T$ จากกราฟจะเห็นว่าค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดของทั้งบวกลบมีค่ามากที่สุด ณ ตำแหน่ง monitoring plane และลดน้อยลงเรื่อยๆเมื่อยิ่งห่างจากตำแหน่ง monitoring plane ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในรูปที่ 4.21

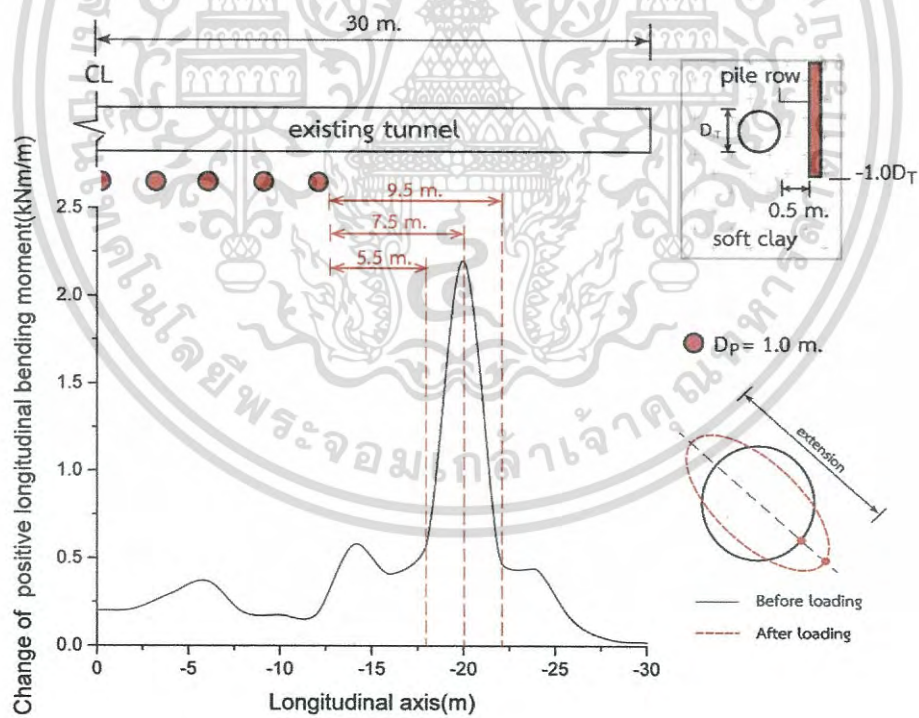
แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวระนาบจะลดน้อยลงมากจนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อยิ่งห่างออกจากตำแหน่ง monitoring plane เนื่องจากการเสียรูปในแนวระนาบแบบ 2 มิติที่ลดน้อยลงดังรูป 4.21 ที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่สำหรับการเสียรูปในแนวยาว (longitudinal) ของอุโมงค์ไม่ได้เป็นเช่นนั้น สามารถเห็นได้จากรูปที่ 4.24 เป็นกราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวยาว ณ ส่วนยอด (crown) และส่วนท้อง (invert) ของอุโมงค์ เมื่อปลายเสาเข็มวางตัวที่ระดับ $-1.0D_T$ พบว่าเมื่อยิ่งห่างออกจากตำแหน่ง monitoring plane ค่าการเคลื่อนตัวค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเกิดค่าสูงสุดที่ระยะ ± 15 เมตร หลังจากนั้นค่าจะค่อยๆลดน้อยลง และผลจากการเสียรูปในแนวยาวดังรูปที่ 4.25 ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเป็นดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 เป็นกราฟแสดงค่าโมเมนต์ดัดที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวยาวของโมเมนต์บวกลบและโมเมนต์ลบ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวภายในผนังอุโมงค์ค่อนข้างคงที่จาก 0 ถึงตำแหน่ง -18 เมตร (5.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง -20 เมตร (7.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) และค่าจะเริ่มลดลงจนถึงตำแหน่ง -22 เมตร (9.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวจะลดน้อยลงและเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 4.24 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวยาวของผนังอุโมงค์

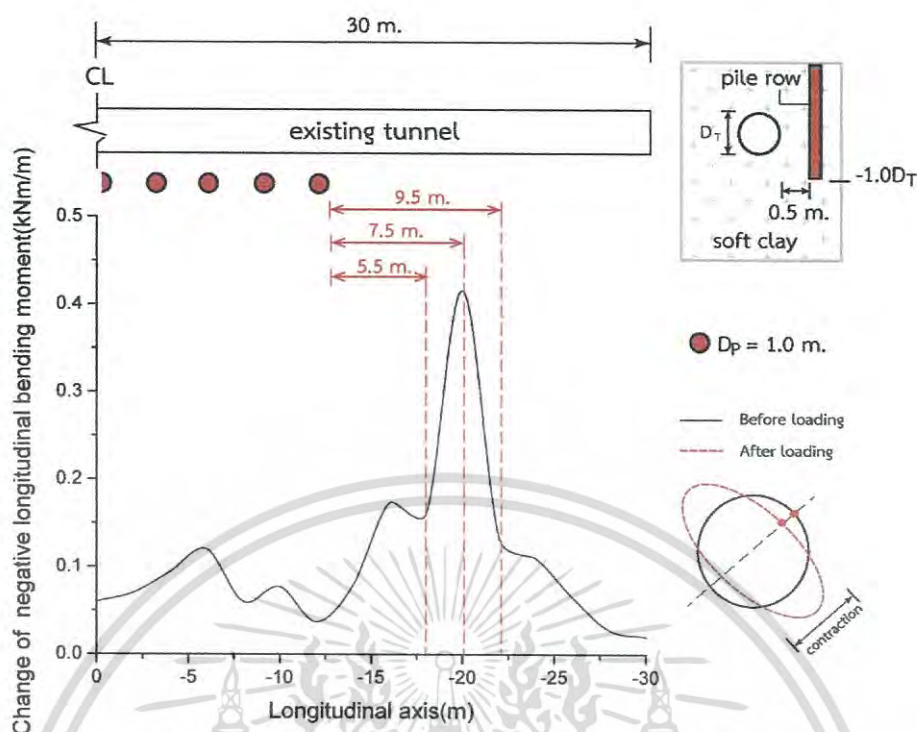


รูปที่ 4.25 การเสียรูปในแนวยาวของอุโมงค์ (อัตราส่วน 1:3000)



รูปที่ 4.26 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (บวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (ลบ)

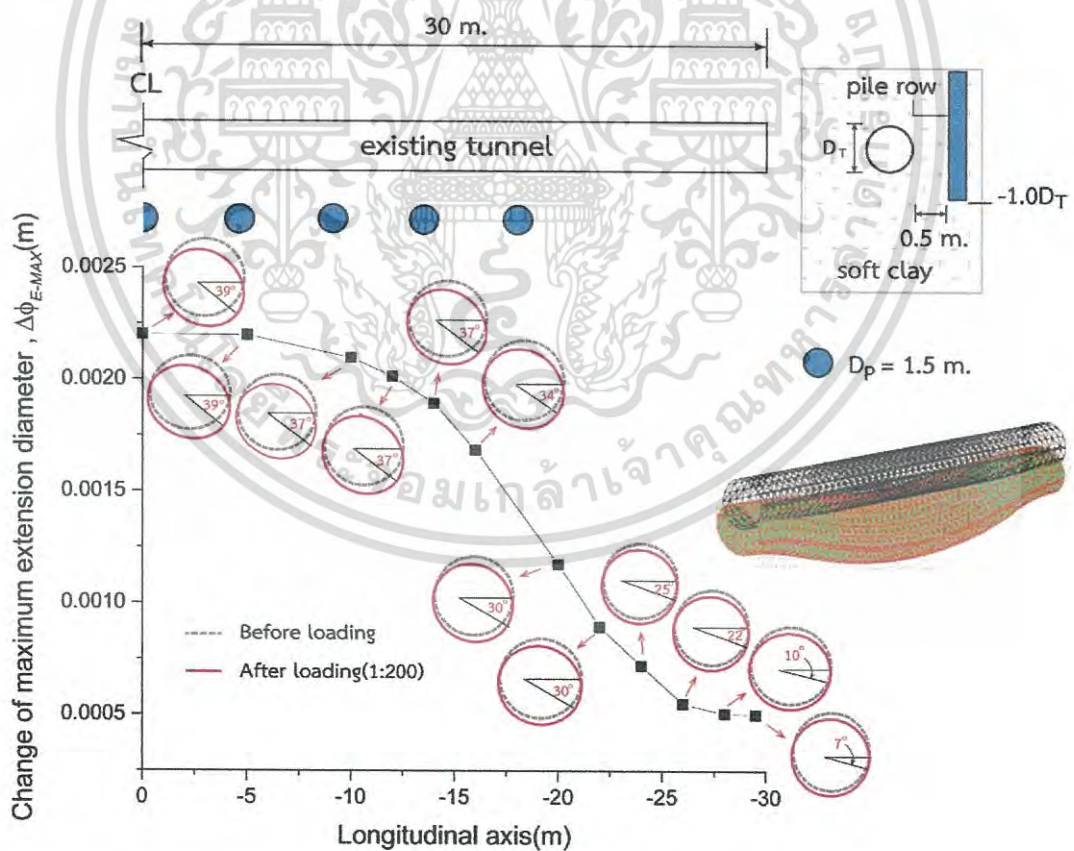
สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ของทั้งในแนวระนาบและแนวยาวของอุโมงค์อีกฝั่งหนึ่ง คาดว่าแนวโน้มค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกราฟที่ 4.22, 4.23, 4.26 และ 4.27 จากกราฟทั้งสี่จึงสามารถบอกได้ว่าตำแหน่ง monitoring plane เป็นจุดที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวระนาบสูงสุดเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อุโมงค์เกิดการเสียรูปในแนวระนาบสูงสุด และบริเวณ 5.5 เมตร ถึง 9.5 เมตร จากขอบเสาเข็มต้นริมสุด เป็นตำแหน่งที่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 7.5 เมตร

และเพื่อเพิ่มความเข้าใจในหัวข้อนี้ให้มากยิ่งขึ้นจึงได้ศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยัดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆและค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเมื่อได้รับอิทธิพลจากเสาเข็มขนาด 1.5 เมตร พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ดังรูปที่ 4.28 กราฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกรณีเมื่ออุโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มขนาด 1.0 เมตร (รูปที่ 4.21) และพบว่าในช่วงระยะ -26 ถึง -28 เมตร เป็นช่วงที่iongศาการบิดตัวของอุโมงค์เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าช่วงอื่นๆดังในรูป ซึ่งจะสอดคล้องกับตำแหน่งที่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปมากดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวภายในผนังอุโมงค์ค่อนข้างคงที่จาก 0 ถึงตำแหน่ง -24 เมตร (5.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง -26 เมตร (7.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) และค่าจะเริ่มลดลงจนถึงตำแหน่ง -28 เมตร (9.5 เมตรจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวจะ

ลดน้อยลง จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าแม้ขนาดของเสาเข็มภายในแถวจะเปลี่ยนขนาดจาก 1.0 เมตร เป็น 1.5 เมตร แต่ตำแหน่งที่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อวัดระยะจากขอบเสาเข็มต้นริมสุดยังคงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับกรณีที่เสาเข็มมีขนาด 1.0 เมตร ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าระยะที่ทำให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเพิ่มสูงขึ้นอาจขึ้นอยู่กับขนาดของอุโมงค์ (D_T)

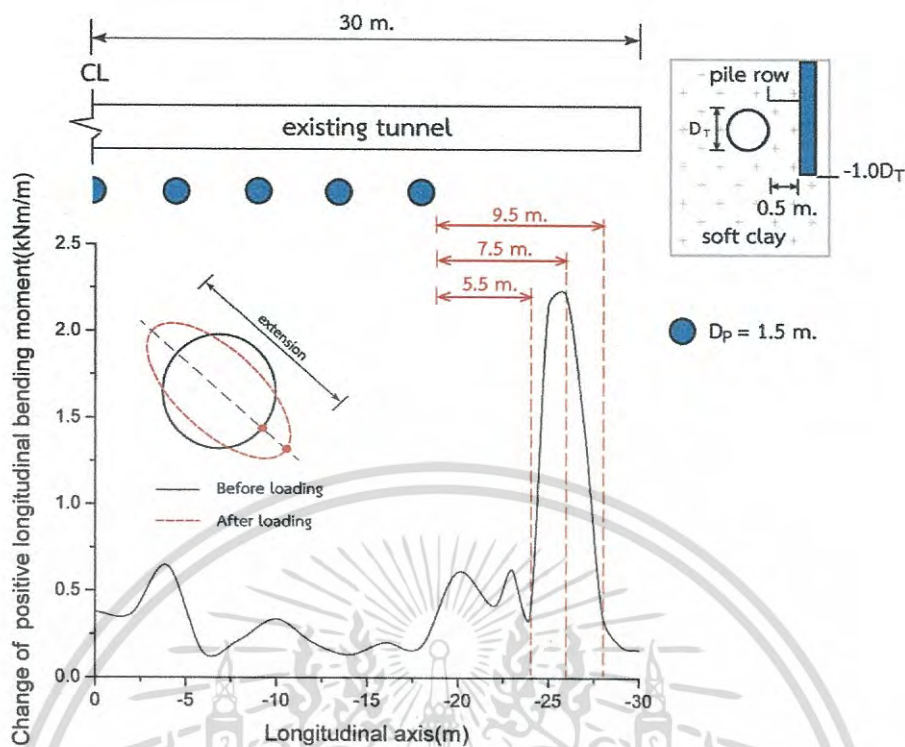
ดังนั้นการพิจารณาถึงความปลอดภัยของอุโมงค์นอกจากตำแหน่ง monitoring plane ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในแนวระนาบสูงสุด ควรพิจารณาเพิ่มบริเวณ $0.9D_T$ ถึง $1.5D_T$ (วัดระยะจากขอบเสาเข็มต้นริมสุด) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้ไม่สามารถจำลองให้ขอบเขตแบบจำลองยาวเกินกว่า 60 เมตร เนื่องจากข้อจำกัดทางความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ จึงยังอาจมีอิทธิพลของขอบเขตที่อาจยาวไม่พอ (boundary effect) และเป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองอุโมงค์เพียงขนาดเดียว ดังนั้นเพื่อเป็นประโยชน์ในอนาคตต่อการศึกษาตำแหน่งที่ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาวเพิ่มสูงขึ้น ควรขยายขอบเขตแบบจำลองให้ยาวเกินกว่า 60 เมตร และจำลองโดยการเปลี่ยนขนาดของอุโมงค์

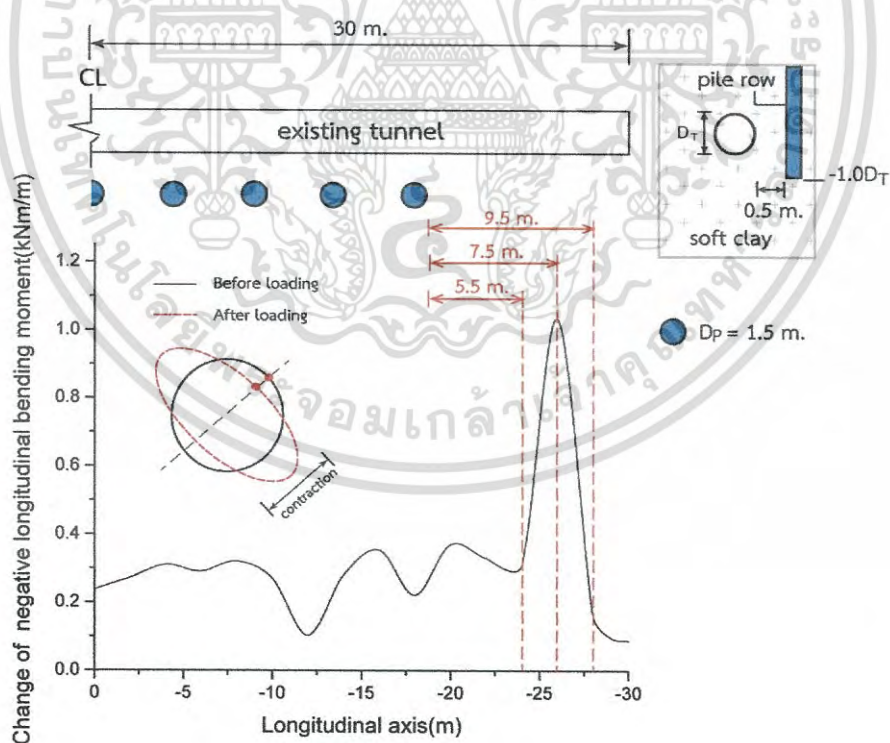


รูปที่ 4.28 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยึดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (บวก)



รูปที่ 4.30 ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดในแนวยาว (ลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม ในกรณีเสาเข็มแถววางตัวเพียงด้านเดียวของอุโมงค์ จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวระนาบ (transverse plane) และแนวยาว (longitudinal direction) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากเสาเข็มแถวมีค่ามากกว่าเสาเข็มเดี่ยว และมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) ลดลง และยังคงมากกว่าเสาเข็มเดี่ยว แม้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวจะมากถึง 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แสดงให้เห็นว่าต้องพิจารณาปัญหาเสาเข็มแถวถึงมีระยะห่างกันในแถวมาก ไม่สามารถพิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวได้

2. ด้วยเหตุที่ในทางปฏิบัติ จะมีจำนวนเสาเข็มในแถวแบบจำกัด ซึ่งหากมีจำนวนเข็มในแถวที่มากพอ ณ บริเวณตรงกลางของแถว ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดจะมีค่าสูงสุดและเข้าใกล้สภาพแบบสองมิติที่เสมือนมีเสาเข็มในแถวแบบไม่จำกัด ผลการศึกษาระบุน้ำจำนวนเสาเข็มที่ทำให้เกิดสภาพแบบนั้นคือ 9 ต้น นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีสามมิติ

3. ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดมีค่ามากที่สุดเมื่ออุโมงค์และเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าจะลดลงทีละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ $-1.0D_T$ แต่ในกรณีปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับปลายเสาเข็มมีความลึกเพิ่มมากขึ้น

4. การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดจากการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ มากกว่า 3 มิติ ประมาณ 1.3-1.4 เท่า ดังนั้นควรใช้การวิเคราะห์แบบ 3 มิติด้วยแบบจำลองแบบเต็ม (full model) แม้จะต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่าก็ตามเพื่อแลกกับความสามารถในการวิเคราะห์ได้อย่างครอบคลุมทั้งแนวระนาบ (transverse plane) และแนวยาว (longitudinal plane) ของอุโมงค์

5. การพิจารณาถึงความปลอดภัยของอุโมงค์ นอกจากพิจารณาตำแหน่งที่อุโมงค์เกิดการเสียรูปสูงสุดในแนวระนาบที่สามารถใช้ระนาบกึ่งกลางของเสาเข็มแถวเป็นตัวแทนแล้ว ควรพิจารณาผลกระทบในแนวยาวเพิ่มบริเวณ $0.9D_T$ ถึง $1.5D_T$ (วัดระยะจากขอบเสาเข็มด้านริมสุด) ซึ่งเป็นบริเวณที่ควรมีการติดตามหรือตรวจสอบผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่ออุโมงค์

อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นการพิจารณาจากอุโมงค์เพียงขนาดเดียว และระดับปลายเสาเข็มได้ทำการพิจารณาถึงเพียงระดับ 45.2 เมตรจากระดับผิวดิน ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับดังกล่าวนั้น อิทธิพลของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ยังไม่หมดไป จึงไม่สามารถบอกได้ว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออุโมงค์จะมีความมากสุดหากปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schroeder F.C., Potts D.M. and Addenbrooke T.I. "The Influence of Pile Group on Existing Tunnels" **Geotechnique**. vol.54, no. 6. May 2004. pp. 351-362.
- [2] Heama N., Suwansawat S., Lueprasert P. and Jongpradist P. "Study of Lining Behavior Affected by Adjacent Loading Pile in MRTA Blue Line Project" **The 21st National Convention on Civil**. vol 21.
- [3] Lueprasert P., Jongpradist P., Charoenpak P., P. Chaipanna. and Suwansawat S. "Three Dimensional Finite Element Analysis for Preliminar Establishment of Tunnel Influence Zone Subject to Pile Loading". **Maejo Int. J. Sci. Technol.** vol.9. July 2015. pp. 209-233.
- [4] Liao S.-M., Peng F.-L. and Shen S.-L. "Analysis of Shearing Effect on Tunnel Induced by Load Transfer along Longitudinal Direction" **Tunnelling and Underground Space Technology**. no. 23. 2008. pp. 421-430.
- [5] Wu H.-N., Shen S.-L., Liao S.-M. and Yin Z.-Y. "Longitudinal Structural Modelling of Shield Tunnels Considering Shearing Dislocation between Segmental Rings". **Tunnelling and Underground Space Technology**. no. 50. 2015. pp. 317-323.
- [6] Gong W., Juang C.-H., Huang H., Zhang J. and Luo Z. "Improved Analytical Model for Circumferential Behavior of Jointed Shield Tunnels Considering the Longitudinal Differential Settlement" **Tunnelling and Underground Space Technology**. no. 45. 2015. pp. 153-165.
- [7] กิรติ เมืองแสน. "พฤติกรรมของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุลในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินในดินกรุงเทพฯ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [8] สุขขีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์. วิศวกรรมอุโมงค์. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ มิน เซอร์วิส ซัพพลาย. 2552.
- [9] สุขขีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์. "ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ". **วารสารโยธาสาร**. 2549. หน้า 22-28.
- [10] ITA-AITES WG. "Settlements Induced by Tunneling in Soft Ground". **Tunnelling and Underground Space Technology**. no. 22. 2007. pp. 119-149.
- [11] Potts D.M. and Zdravkovic L. **Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Theory**. London, Thomas Telford. 1999.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [12] สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. **วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550.
- [13] พิชกร ศรีจันทร์ทอง และสุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์. “การศึกษาปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม,” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14**, นครราชสีมา. 2552.
- [14] Mair R. J., Taylor R. N., and Bracegirdle A. “Subsurface Settlement Profiles above Tunnels in Clays”. **Geomechanique**. vol.43. No. 2. 1993. pp.315-320.
- [15] Peck R. B. “Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics”. **Geomechanique**. vol.19. no. 2. pp.171-187.
- [16] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. 2009. “Restrictive Guideline for Protection Zone in Blue Line Project”. **Engineering Specifications for MRT Tunnels**.
- [17] วรากร ไหมเรียง. **วิศวกรรมฐานราก**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2526.
- [18] Skempton A.W. “Cast in-situ Bored Piles in London Clay”. **Geotechnique**. vol. 9. 1959. pp. 153-173.
- [19] Mroueh H. and Shahrour I. “Three-Dimension Finite Element Analysis of the Interaction between Tunneling and Pile Foundations”. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. 26. 2002. pp.217-230.
- [20] Yan J.-Y., Zhang Z.-X., Huang H.-W. and Wang R.-L. “Numerical Simulation of Interaction between Pile Foundation and Adjacent Tunnel”. **Underground Construction and Ground Movement**. 2006. No. 155. pp.240-247.
- [21] Wang Z., Wang L., Li L. and Wang J. “Failure Mechanism of Tunnel Lining Joints and Bolts with uneven Longitudinal Ground Settlement”. **Tunnelling and Underground Space Technology**. no. 40. 2014. pp. 300-308.
- [22] Rukdeechuai T., Jongpradist P., Wonglert A. Wonglert, and Kaewsri T. “Influence of Soil Models on Numerical Simulation of Geotechnical Works in Bangkok Subsoil”. **EIT Research and Development Journal**. vol. 20. no. 3. 2009. pp. 17-28.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [23] Prust R. E., Davies J. and Hu S. "Pressuremeter Investigation for Mass Rapid Transit in Bangkok, Thailand". *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board.* 2005. pp. 207-217.
- [24] Lueprasert P., Jongpradist P. and Suwansawat S. "Tunneling Simulation in Soft Ground using Shell Elements and Grouting Layer". *International Journal of Geomate.* Vol.12. 26 Nov 2016. pp.51-57.



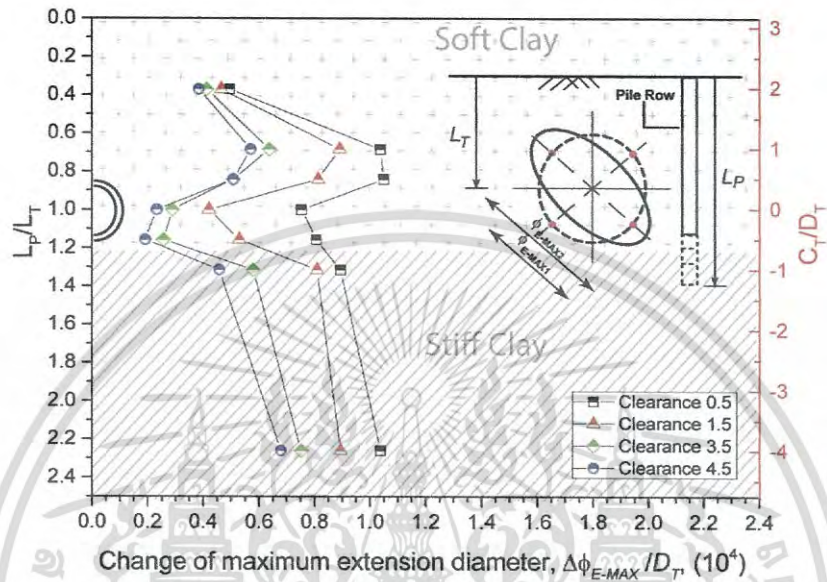
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



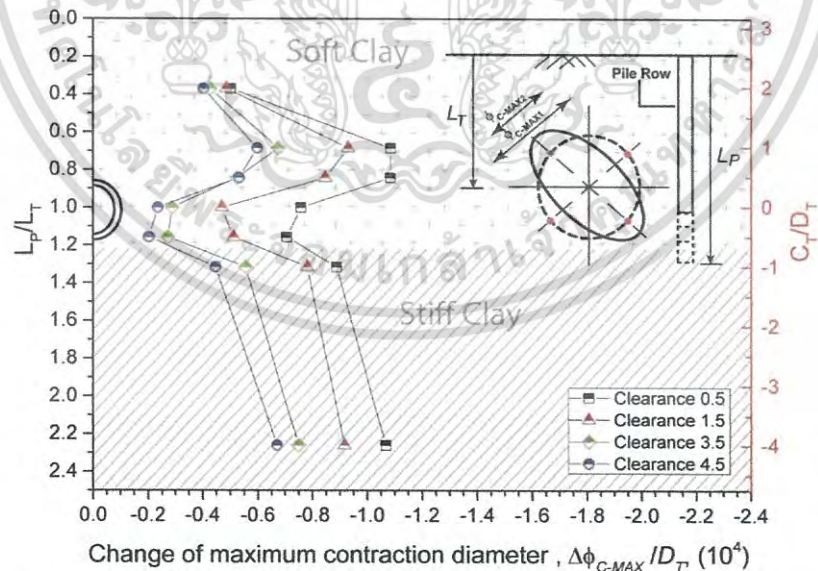
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์

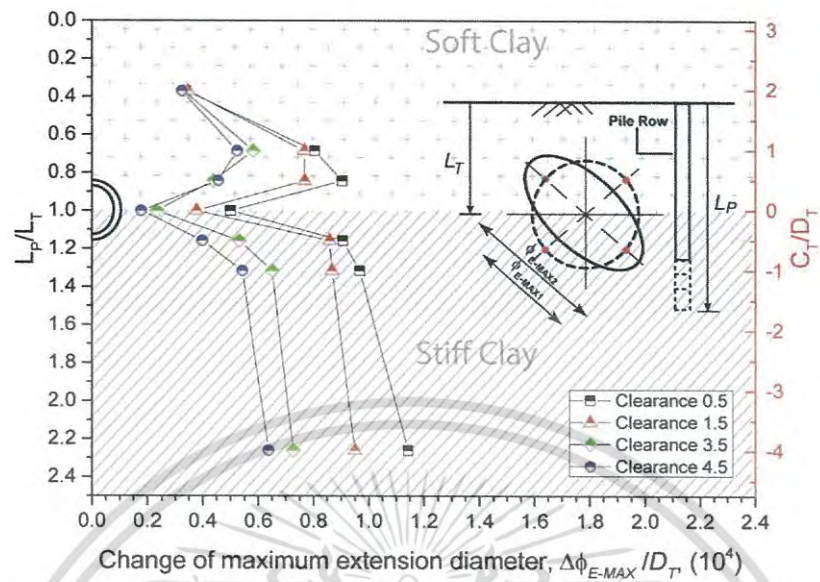


รูปที่ ก.1 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว, กรณีศึกษาที่ 2

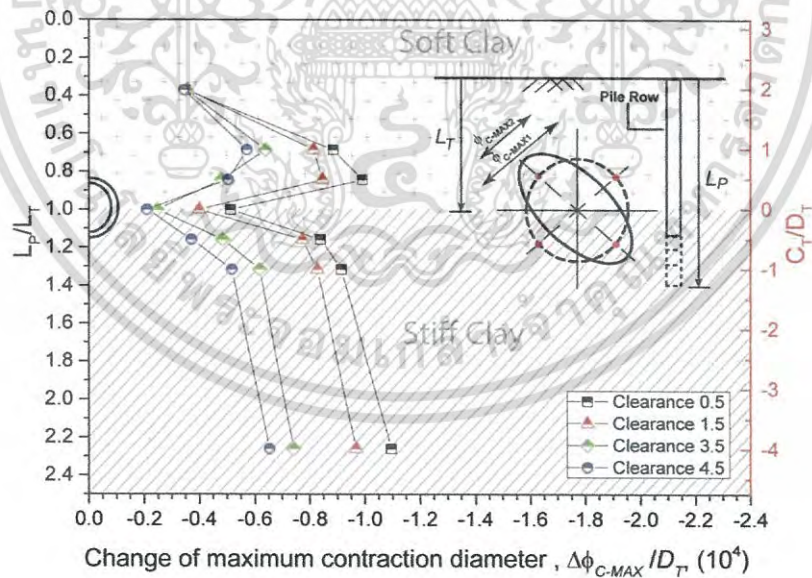


รูปที่ ก.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัว, กรณีศึกษาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์สูงสุดในลักษณะยืดตัว, กรณีศึกษาที่ 3

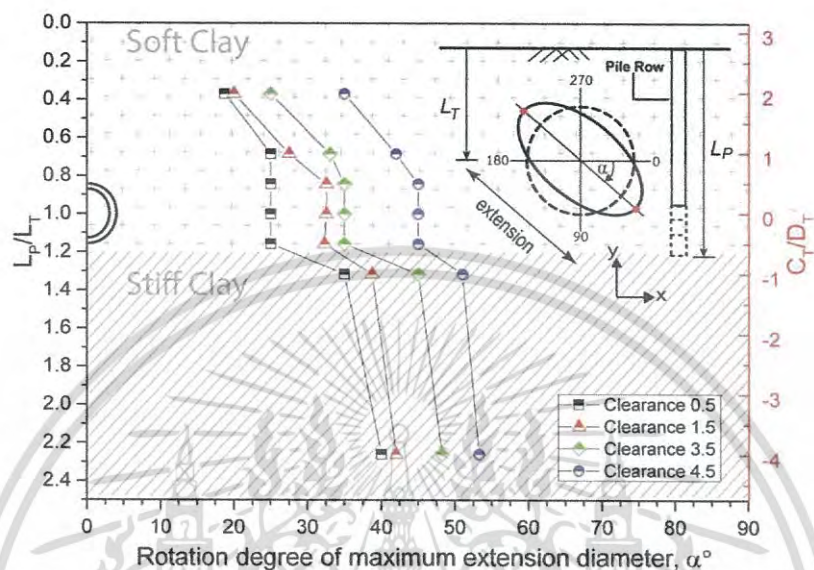


รูปที่ ก.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดุมงค์สูงสุดในลักษณะหดตัว, กรณีศึกษาที่ 3

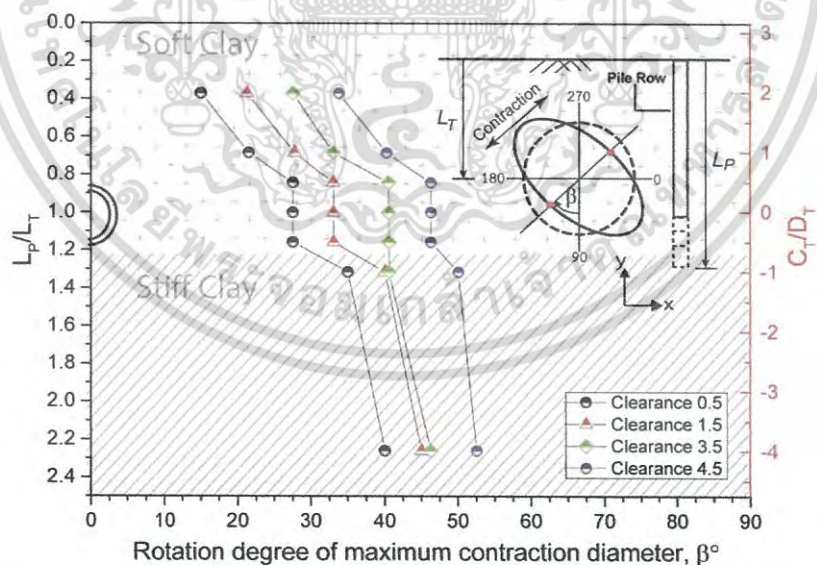
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การบิดตัวของอุโมงค์

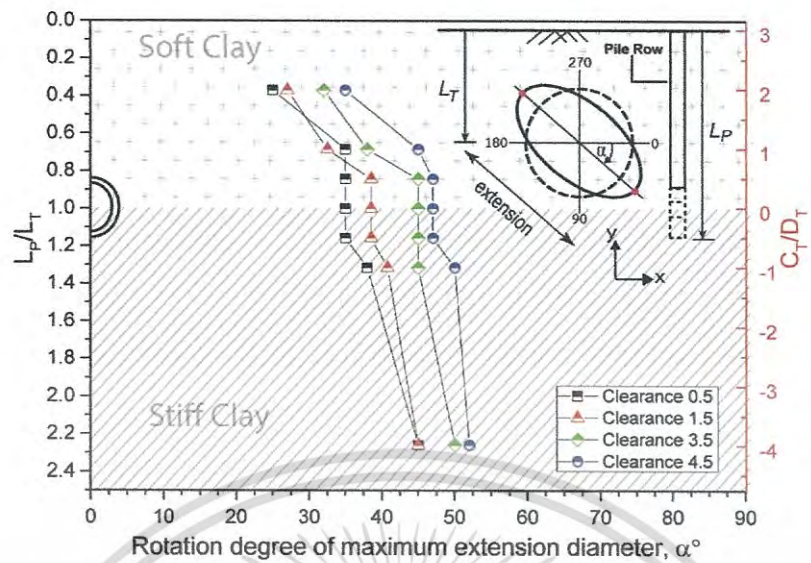


รูปที่ ข.1 องค์การบิดตัวจากการยืดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (α), กรณีศึกษาที่ 2

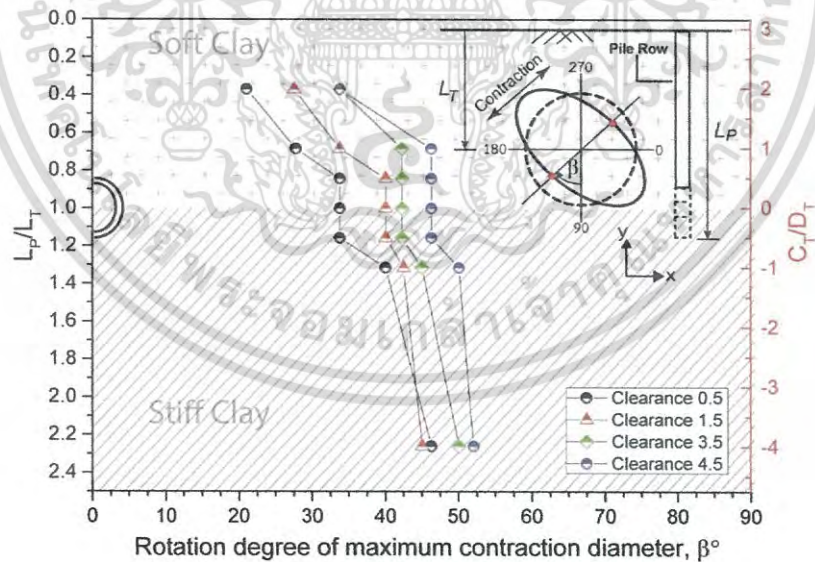


รูปที่ ข.2 องค์การบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (β), กรณีศึกษาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

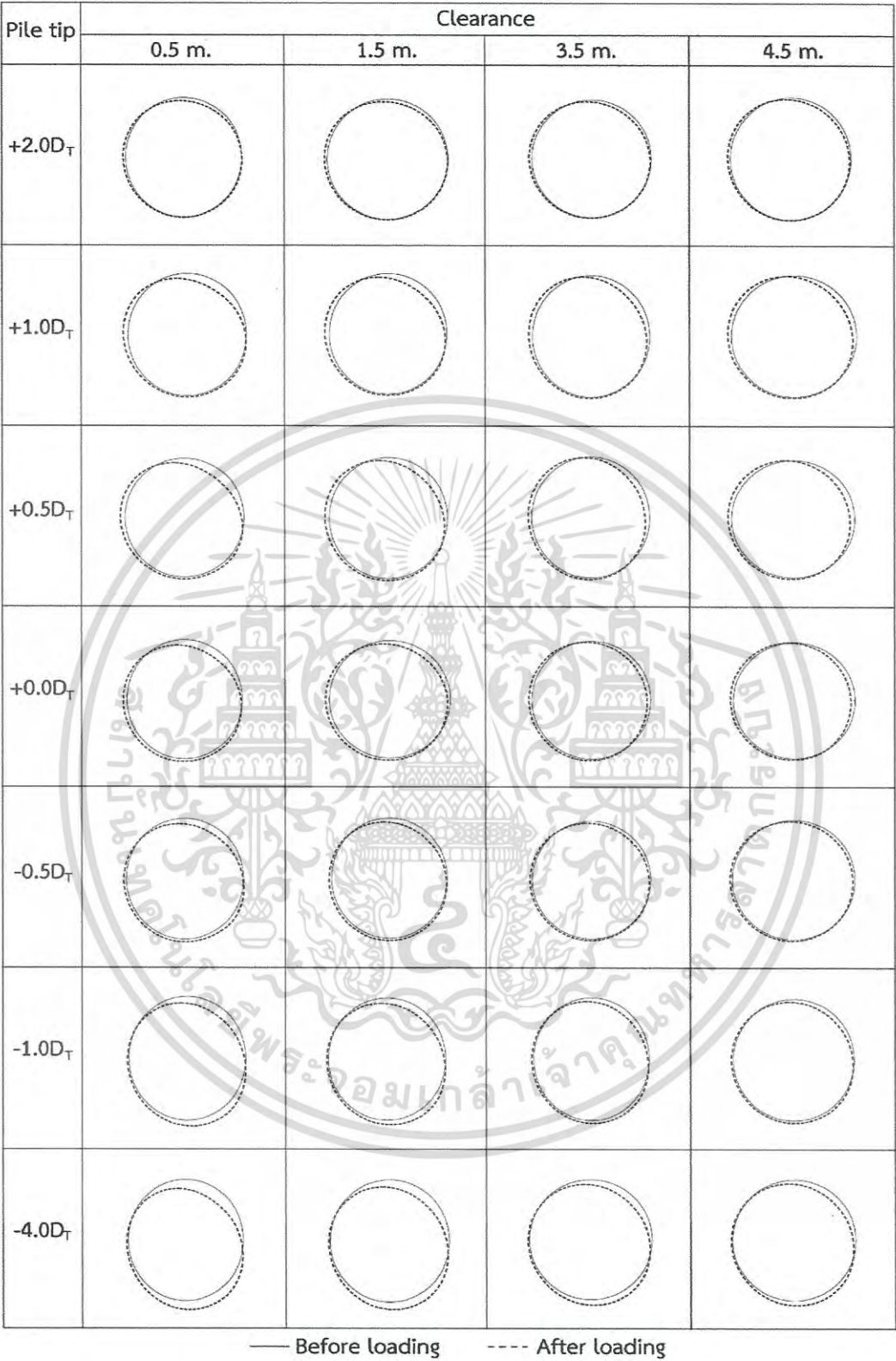


รูปที่ ข.3 องค์การปิดตัวจากการยืดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (α), กรณีศึกษาที่ 3



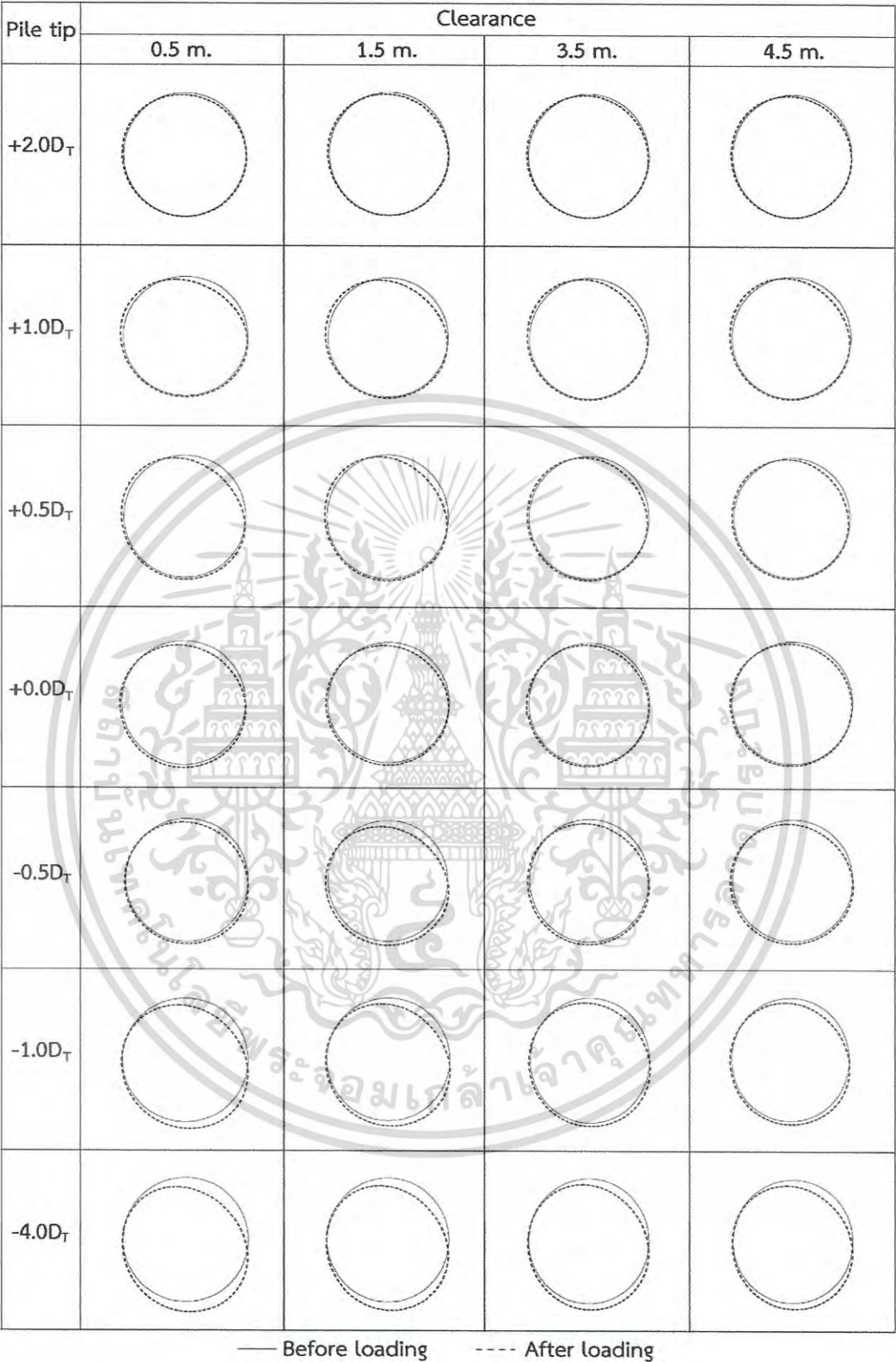
รูปที่ ข.4 องค์การปิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (β), กรณีศึกษาที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 2 (อัตราส่วน 1:500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในชั้นดินกรณีศึกษาที่ 3 (อัตราส่วน 1:500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวณัฐธิดา ขวัญลิขิต
วัน เดือน ปีเกิด 20 กันยายน 2535 ที่ปัตตานี
ที่อยู่ 10 ถนนเกลือ ซ.3 ต.อาเนาะรู อ.เมือง จ. ปัตตานี 94000
โทร. 081-959-1643

ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2559 ณัฐธิดา ขวัญลิขิต , พรเกษม จงประดิษฐ์ , ประทีป หลือประเสริฐ และ สุชัชวีร์
สุวรรณสวัสดิ์, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของ
เสาเข็มแถวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ”, บทความประชุมวิชาการโยธา
แห่งชาติ ครั้งที่ 21 ,2559