

การเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the internal force of existing tunnel due to adjacent pile loading

with program PLAXIS 3D



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2021

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

**หัวข้อโครงการพิเศษ**      การเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ  
the internal force of existing tunnel due to adjacent pile loading with program PLAXIS 3D

**นักศึกษา**

1. ทศนีย์ วงศ์นันทชัย	63015057
2. บัญชา สะแลแม	63015102
3. สรนนท์ สุดสอาด	63015178

**หลักสูตร**                      วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
**สาขาวิชา**                    วิศวกรรมโยธา  
**อาจารย์ที่ปรึกษา**          ผศ.ดร. ประทีป หลือประเสริฐ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ประทีป หลือประเสริฐ รศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม ดร. ช่อธรรม ศรีนิล	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.ชลิตา อุตะเกา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการงานพิเศษ

หัวข้อโครงการงานพิเศษ อัตราการไหลซึมของน้ำในดินปลูกพืชที่มีอายุแตกต่างกัน  
(Saturated permeability of vegetated soils with different plant age.)

CONSTRUCTION

นักศึกษา นายฤกษ์ ติ๊ะใจ รหัสนักศึกษา 63015010  
นายธีรภัทร์ สงบกาย รหัสนักศึกษา 63015089  
นายนราวิษณุ ตรากุล รหัสนักศึกษา 63015093  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม

คณะกรรมการสอบโครงการงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม	คำชุม	
ผศ.ดร. ประทีป หลือประเสริฐ	หลือประเสริฐ	
ดร. ช่อธรรม ศรีนิล	ศรีนิล	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รศ.ดร.ชลิตา อุตะนา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา



# การเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

## โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

นางสาวทัศนีย์ วงศ์นันทชัย รหัสนักศึกษา 63015057

นายบัญชา สะแลแม รหัสนักศึกษา 63015102

นายสรนันท์ สุดสอาด รหัสนักศึกษา 63015178

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประทีป หลีอประเสริฐ

ปีการศึกษา 2564

### บทคัดย่อ

การก่อสร้างที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ทั้งโครงสร้างใต้ดินและโครงสร้างบนดิน ในบางพื้นที่โครงการก่อสร้างที่เกิดขึ้นใหม่อาจจะต้องอยู่ใกล้เคียงกับอุโมงค์ที่มีอยู่เดิม การเกิดผลกระทบซึ่งกันและกัน ย่อมเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างใต้ดินที่ได้รับผลกระทบและเสียหาย จะทำการแก้ไขได้นั้นต้องสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจ ซึ่งต้องใช้เวลาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการป้องกันการเกิดสถานการณ์ดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้ประเมินถึงผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์ทั้ง 2 รูปแบบ คือ อุโมงค์คมนาคมและอุโมงค์ระบบสาธารณูปโภค โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์

# the internal force of existing tunnel due to adjacent pile loading

with program PLAXIS 3D

Miss.Tatsanee Wongnanchai Student ID. 63015057

Mr.Buncha Saleamae Student ID. 63015102

Mr.Sorranan Sudsa-ard Student ID. 63015178

Advisor: Asst. Prof. Dr. Prateep Lueprasert

Academic Year 2021

## ABSTRACT

Increasing construction nowadays, both underground structures and above-ground structures in some areas, new construction projects may be located in close proximity to existing tunnels. mutual impact will inevitably happen. This is especially true for affected and damaged underground structures. To fix it, it must be an economic loss. which requires a huge amount of money Therefore, it is important to prevent such situations from occurring. This research assesses the impact of prestressed piles on two types of tunnels, namely the transport tunnel and the utility tunnel. Using a 3D numerical analysis method, considering the change in force inside the tunnel.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก ผศ.ดร.ประทีป หลือประเสริฐ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง อีกทั้งยังสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดีอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำ ตลอดจนการดูแล เอาใจใส่ ตลอดระยะเวลาการจัดทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณบิดามารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย คอยสนับสนุนการเรียนเสมอมา

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ นางสาวภคจิรา แก้วใส ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Plaxis 3D และสอนความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดามารดา และครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ ตลอดจนคณะครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ทัศนีย์	วงศ์นันทชัย
ปัญญา	สะแลแม
สรนันท์	สุดสอาด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับสมดุล.....	4
2.2.1 การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับสมดุล (Tunnel construction by Tunnel Earth pressure balance shield).....	5
2.2.2 ผนังอุโมงค์ (Tunnel lining).....	5
2.2.3 การอัดฉีดน้ำปูน (Grouting pressure).....	6
2.3 ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา.....	7
2.3.1 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล (MRTA).....	7
2.3.2 โครงการอุโมงค์ไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง (MEA).....	9
2.4 สภาพทางธรณีวิทยา.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เสาคีมรับแรงด้านข้าง.....	13
2.5.1 เสาคีมที่ใช้ในกรุงเทพมหานครปัจจุบัน.....	13
2.5.2 พฤติกรรมการรับแรงเสาคีม.....	13
2.6 พฤติกรรมอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง.....	15
2.7 พื้นที่อิทธิพล (Influence zone).....	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	22
3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์.....	22
3.2 หลักการพิจารณาปัญหา.....	23
3.3 กรณีศึกษา.....	24
3.3.1 ลักษณะชั้นดินในการวิเคราะห์.....	24
3.3.2 ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	24
3.3.3 การวางตัวเสาคีม.....	26
3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	27
3.4.2 คุณสมบัติแบบจำลอง.....	27
3.4.3 ขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	29
3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	29
3.5 การประเมินผล.....	30
3.5.1 การเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์.....	30
3.5.2 ตัวอย่างการคำนวณ.....	31
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	32
4.1 กล่าวนำ.....	32
4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ อ้างอิงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ไฟฟ้า MEA .....	32
4.2.1 อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA.....	33
4.2.2 อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ อ้างอิงลักษณะทาง กายภาพของอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ไฟฟ้า MEA.....	46
4.3.1 อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA.....	46
4.3.2 อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นดิน.....	28
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ.....	28
ตารางที่ 4.1 MRTA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 0.5DT.....	33
ตารางที่ 4.2 MRTA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 0.75DT.....	34
ตารางที่ 4.3 MRTA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 1.0DT.....	35
ตารางที่ 4.4 MRTA กรณีที่2 ที่ระยะ (clearance) = 0.5DT.....	36
ตารางที่ 4.5 MRTA กรณีที่2 ที่ระยะ (clearance) = 0.75DT.....	37
ตารางที่ 4.6 MRTA กรณีที่2 ที่ระยะ (clearance) = 1.0DT.....	38
ตารางที่ 4.7 MEA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 0.5DT.....	39
ตารางที่ 4.8 MEA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 0.75DT .....	40
ตารางที่ 4.9 MEA กรณีที่1 ที่ระยะ (clearance) = 1.0DT.....	41
ตารางที่ 4.10 MEA กรณีที่2 ที่ระยะ (clearance) = 0.5DT.....	42
ตารางที่ 4.11 MEA กรณีที่2 ที่ระยะ (clearance) = 0.75DT.....	43
ตารางที่ 4.12 MEA กรณีที่2ที่ระยะ (clearance) = 1.0DT.....	44

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 สิ่งก่อสร้างใหม่ที่อยู่ติดกับอุโมงค์ประเภทต่างๆ.....	1
รูปที่ 1.2 พื้นที่อิทธิพลโดยพิจารณาจากระดับสัมพัทธ์ของปลายเสาเข็ม กับความลึกอุโมงค์.....	2
รูปที่ 2.1 หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	5
รูปที่ 2.2 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผนังอุโมงค์และหัวเจาะ.....	6
รูปที่ 2.3 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....	7
รูปที่ 2.4 แนวเส้นทางและการแบ่งส่วนก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล.....	8
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRTA) .....	8
รูปที่ 2.6 เส้นทางโครงการอุโมงค์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษา (Chidlom Terminal station).....	9
รูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์สายไฟฟ้า (MEA).....	10
รูปที่ 2.8 สภาพชั้นดินกรุงเทพตลอดแนวการขุดเจาะอุโมงค์.....	11
รูปที่ 2.9 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ.....	12
รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเสาเข็ม.....	13
รูปที่ 2.11 กระเปาะความเค้นของเข็มตันเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม.....	14
รูปที่ 2.12 การเสียรูปของผนังอุโมงค์เนื่องจากการรับแรงของปลายเสาเข็ม ที่ต่างกัน.....	15
รูปที่ 2.13 การเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง.....	16
รูปที่ 2.14 การเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบ.....	16
รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบการเสียรูปของโครงสร้างผนังอุโมงค์ในขั้นตอน การใส่เสาเข็มรับแรง.....	16
รูปที่ 2.16 พื้นที่อิทธิพลที่ใช้ในการก่อสร้างปัจจุบัน.....	17
รูปที่ 2.17 พื้นที่อิทธิพลในการก่อสร้างเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกใกล้เคียงอุโมงค์ เดิมในกรุงเทพฯ.....	18
รูปที่ 2.18 พื้นที่อิทธิพลที่เสนอและเขตอิทธิพลในการศึกษาก่อนหน้านี้.....	18

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.19 เส้นเขตพื้นที่ผลกระทบของการเคลื่อนตัวของดินและเข็มจากการ ขุดอุโมงค์.....	20
รูปที่ 2.20 ข้อเสนอแนะการขุดอุโมงค์ใกล้กับฐานรากเสาเข็มที่มีอยู่เดิม.....	21
รูปที่ 2.21 พื้นที่อิทธิพลของอุโมงค์ส่งน้ำสำหรับเสาเข็มรับแรงที่อยู่ติดกัน.....	21
รูปที่ 3.1 รูปแบบการพิจารณาปัญหา.....	23
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะชั้นดินต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	24
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA ที่ใช้ใน การศึกษา.....	25
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MEA ที่ใช้ใน การศึกษา.....	25
รูปที่ 3.5 แสดงการวางตัวของปลายเสาเข็ม.....	26
รูปที่ 3.6 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	27
รูปที่ 3.7 ผลการเทียบวัดแบบจำลองของอุโมงค์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ....	29
รูปที่ 3.9 แรงภายในอุโมงค์.....	30
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงใน แนวแกนสูงสุด (VMAX) และโมเมนต์ดัดสูงสุด (MMAX) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี 1).....	47
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงใน แนวแกนสูงสุด (VMAX) และโมเมนต์ดัดสูงสุด (MMAX) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี 2) .....	48
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงใน แนวแกนสูงสุด (VMAX) และโมเมนต์ดัดสูงสุด (MMAX) อุโมงค์ MEA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี 1) .....	49
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงใน แนวแกนสูงสุด (VMAX) และโมเมนต์ดัดสูงสุด (MMAX) อุโมงค์ MEA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี 2) .....	50

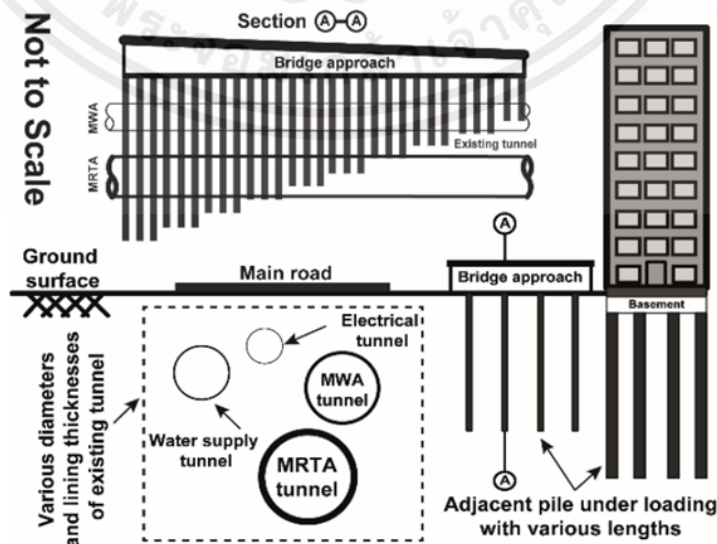
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครมีความก้าวหน้าในการพัฒนาเมืองอย่างมากเพื่อรองรับการขยายตัวของประชากรที่มากขึ้น ในขณะที่พื้นที่บนดินมีอย่างจำกัด ความต้องการของการพัฒนาระบบการคมนาคมและระบบสาธารณูปโภคก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการก่อสร้างใต้ดินจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ในขณะเดียวกันการก่อสร้างอาคารหรือโครงสร้างบนดินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากกรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ดินอ่อน ดังนั้นระบบฐานรากของโครงสร้างบนดินจึงเป็นระบบเสาเข็ม ไม่อาจหลีกเลี่ยงผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมได้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างฐานรากที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการเคลื่อนตัวของอุโมงค์โดยรวม ดังนั้นการประเมินผลกระทบของเสาเข็มรับแรงเคียงข้างต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เพื่อพัฒนาพื้นที่ปลอดภัยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน โครงการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับไฟฟ้าและก๊าซ โครงการอุโมงค์ระบบน้ำประปาและการระบายน้ำ ได้รับความสนใจอย่างยิ่งด้วยเหตุผลการใช้งานของอุโมงค์ที่แตกต่างกันในแต่ละประเภท มิติของอุโมงค์ (tunnel dimension) ซึ่งหมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ภายนอกถึงผนังอุโมงค์ยอมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างอุโมงค์ก็จะมี ความแตกต่างเช่นกัน แม้ว่าแนวเส้นทางของอุโมงค์ (Tunnel alignment) โดยทั่วไปจะวางตัวไปตามแนวถนนใหญ่ เพื่อไม่ให้อุโมงค์ได้รับผลกระทบจากโครงสร้างข้างเคียง

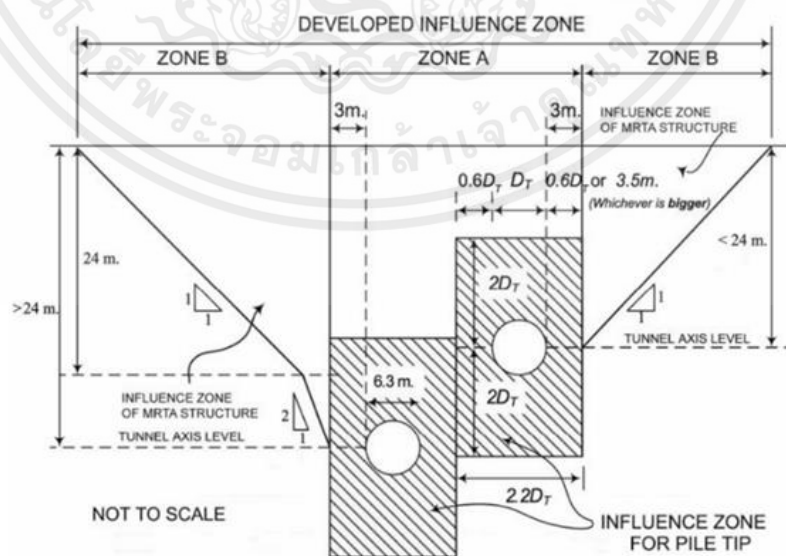


รูปที่ 1.1 สิ่งก่อสร้างใหม่ที่อยู่ติดกับอุโมงค์ประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการศึกษาจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์เสาเข็มรับแรง โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปทางการก่อสร้างอุโมงค์ที่อยู่ใกล้เสาเข็มรับแรงจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง เช่น การศึกษาพบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มกับตำแหน่งอุโมงค์มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มรับแรงแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการขุดเจาะอุโมงค์และเสาเข็มที่อยู่ติดกันโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข ทำให้ดินโดยรอบเกิดการเคลื่อนตัวทั้งแนวตั้งและแนวนอน ต่อมาได้ศึกษาต่อโดยพิจารณาระยะของปลายเสาเข็มที่เพิ่มมากขึ้น และเสนอเป็นพื้นที่อิทธิพลที่ปลอดภัยของการก่อสร้างอุโมงค์ที่จะกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง และใช้วิธีการศึกษาที่แตกต่างกันไป เช่น สังเกตการณ์ภาคสนาม (Field observation) สร้างแบบจำลองทดสอบทางกายภาพ (physical model test) เป็นต้น

จากการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่ส่งผลต่ออุโมงค์ที่มีอยู่พบว่ามีจำนวนน้อยมาก เสาเข็มที่อยู่ติดกับอุโมงค์จะทำให้เกิดการกระจัดของดินซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ และการเคลื่อนตัวของอุโมงค์โดยรวม อีกทั้งยังทำให้ความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มลดลงอีกด้วย การศึกษา ศึกษาเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มเดี่ยวและอุโมงค์ในชั้นทรายพบว่าอุโมงค์ที่มีอยู่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มลดลง ศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มจากการก่อสร้างอาคาร 15 ชั้น ที่มีต่ออุโมงค์รถไฟฟ้าเมืองลอนดอนในประเทศอังกฤษ ได้วิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากเสาเข็ม โดยพิจารณาตำแหน่งปลายเสาเข็มเดี่ยว และดินชั้นเดียว วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) ได้ทำการเพิ่มตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างปลายเสาเข็มกับอุโมงค์ และพิจารณาในดิน 2 กรณี ต่อมาได้เสนอพื้นที่อิทธิพลสำหรับผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่ส่งผลต่ออุโมงค์ แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 พื้นที่อิทธิพลโดยพิจารณาจากระดับสัมพัทธ์ของปลายเสาเข็มกับความลึกอุโมงค์

จากการศึกษาที่ผ่านมา การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากอุโมงค์ที่มีขนาดเดียวและการใช้งานประเภทเดียวกันนั้น คือ อุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) ขนาด 6.30 เมตรและความหนาของผนังอุโมงค์มีขนาด 0.30 เมตร และได้มีการเสนอพื้นที่ปลอดภัยสำหรับผลกระทบที่เกิดจากเสาเข็มรับแรงจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมถึงอุโมงค์ในเขตกรุงเทพมหานครดังนั้นงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลกระทบของระยะห่างเสาเข็มรับแรงข้างเคียงที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการเคลื่อนตัวของอุโมงค์โดยรวมหลังได้รับแรงจากเสาเข็ม โดยศึกษาจากการจำลองอุโมงค์ที่มีขนาดแตกต่างกัน, ความยาวของเสาเข็มที่แตกต่างกัน รวมไปถึงระดับความลึกของชั้นดินที่ต่างกัน วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาเสาเข็มแบบ Load in wall และอ้างอิงข้อมูลจากโครงสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA) และอุโมงค์ไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ซึ่งเป็นอุโมงค์ที่มีอยู่ในกรุงเทพมหานคร และมีมิติของอุโมงค์ที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาพื้นที่ปลอดภัยของอุโมงค์ที่ครอบคลุมมากที่สุด ในเขตกรุงเทพมหานคร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์เมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง โดยพิจารณาจากอุโมงค์ที่มีขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์ที่แตกต่างกัน รวมถึงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน และอุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. วิเคราะห์ผลกระทบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D
2. สภาพทางธรณีวิทยาพิจารณาโดยอ้างอิงคุณสมบัติของชั้นดินในกรุงเทพมหานคร
3. แบบจำลองของผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous ring)
4. การศึกษานี้จะไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์

### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้บรรยายเนื้อหาองค์ความรู้ที่ใช้ในการทำวิจัย แบ่งออกเป็น 6 หัวข้อหลัก คือ 1.การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ประกอบไปด้วย เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผนังอุโมงค์ และการอัดฉีดน้ำปูน 2.ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา ประกอบไปด้วย ข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล (MRTA) ข้อมูลโครงการอุโมงค์ไฟฟ้าใต้ดิน และ ของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) 3. สภาพทางธรณีวิทยา ประกอบไปด้วยข้อมูลชั้นดินกรุงเทพ และน้ำใต้ดิน 4. ฐานรากเสาเข็ม หัวข้อนี้เป็นส่วนเนื้อหาความรู้เกี่ยวกับเสาเข็มที่ใช้ในกรุงเทพ และพฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็ม 5.พฤติกรรมที่อุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง 6. พื้นที่อิทธิพล ซึ่งจะเป็นงานวิจัยในอดีตที่แนะนำพื้นที่ปลอดภัยระหว่างอุโมงค์ที่มีอยู่และเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

### 2.2 การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันสมดุล

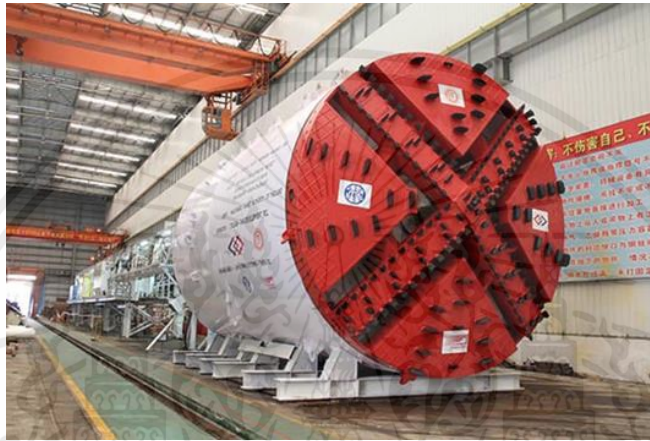
ในปัจจุบัน โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนส่วนใหญ่ได้นำเทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) และหัวเจาะแบบความดันน้ำโคลน (Slurry shield) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลจะมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว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

สำหรับในชั้นดินกรุงเทพฯ การก่อสร้างอุโมงค์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล เนื่องจากสภาพชั้นดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งที่มีความเหมาะสมกับหัวเจาะประเภทนี้ อีกทั้งระดับน้ำใต้ดินยังอยู่ในระดับลึกอีกด้วย

#### 2.2.1 การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันสมดุล (Tunnel construction by Tunnel Earth pressure balance shield)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การก่อสร้างอุโมงค์เป็นการขุดเจาะโดยอาศัยแรงดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามแนวแกนของอุโมงค์พร้อมกับทำการขุดดินซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของดินและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินที่มีความแตกต่างกันตามพื้นที่และระดับความลึกของแต่ละชั้นดิน ซึ่งในการขุดเจาะอุโมงค์ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) ซึ่งหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล (MRTA) เนื่องจากชั้นดินในกรุงเทพฯ เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนจนถึงชั้นดินเหนียวแข็งซึ่งเหมาะกับหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลชนิดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล

### 2.2.2 ผนังอุโมงค์ (Tunnel lining)

โดยทั่วไปผนังอุโมงค์ (Tunnel lining) สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบประกอบไปด้วยผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining) และผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining) ในส่วนของผนังอุโมงค์หลักเป็นโครงสร้างที่ถูกสร้างไว้ก่อนและผนังอุโมงค์ชั้นในจะทำการก่อสร้างด้านในของผนังอุโมงค์หลักโดยมีรายละเอียดของผนังอุโมงค์ทั้ง 2 รูปแบบดังนี้

#### 1) ผนังอุโมงค์หลัก (Primary lining)

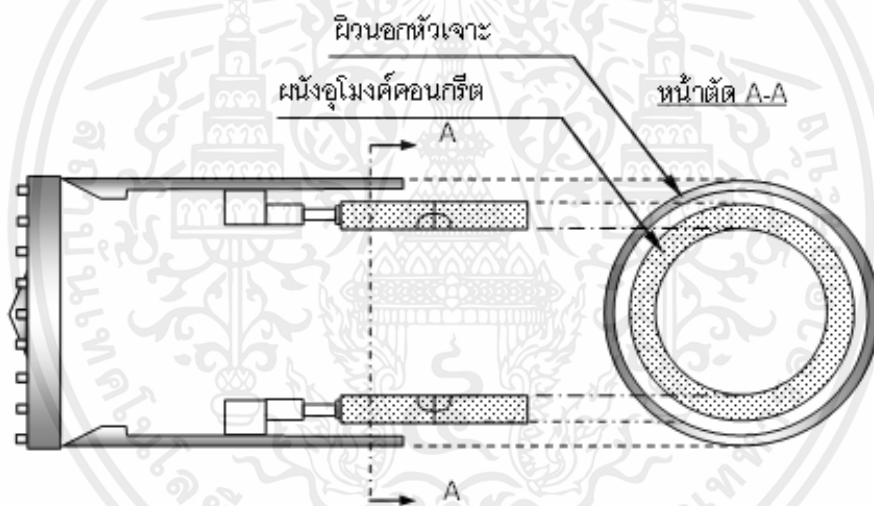
ทำหน้าที่หลักในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกที่มากระทำต่ออุโมงค์โดยรอบนอกจากนี้ผนังอุโมงค์หลักต้องสามารถรับแรงจากกระบอกชาติไฮดรอลิก (Thrust force) จากการขับเคลื่อนของหัวเจาะอุโมงค์ขณะทำการก่อสร้างและสามารถต้านทานความดันย้อนกลับจากการอัดฉีดน้ำปูนบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ (Tail void grouting) เมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อดำเนินการขุดเจาะต่อไปผนังอุโมงค์บริเวณด้านท้ายหัวเจาะที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้วจะต้องทำหน้าที่อย่างสมบูรณ์ในการรับแรงกระทำต่างๆที่เกิดขึ้นทั้งหมด

## 2) ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary lining)

เป็นการป้องกันผนังอุโมงค์หลักจากการสึกกร่อนป้องกันการไหลเข้าของน้ำใต้ดินและช่วยเสริมกำลังของผนังอุโมงค์หลักอีกทั้งผนังอุโมงค์ชั้นในยังช่วยในการปรับวางแนวเส้นทางที่เบี่ยงเบนมากไปในการก่อสร้างอุโมงค์ในบางกรณีการก่อสร้างผนังอุโมงค์ชั้นในอาจไม่มีความจำเป็นหากผนังอุโมงค์หลักมีประสิทธิภาพเพียงพอในการต้านทานการสึกกร่อนและการไหลเข้าของน้ำใต้ดินได้

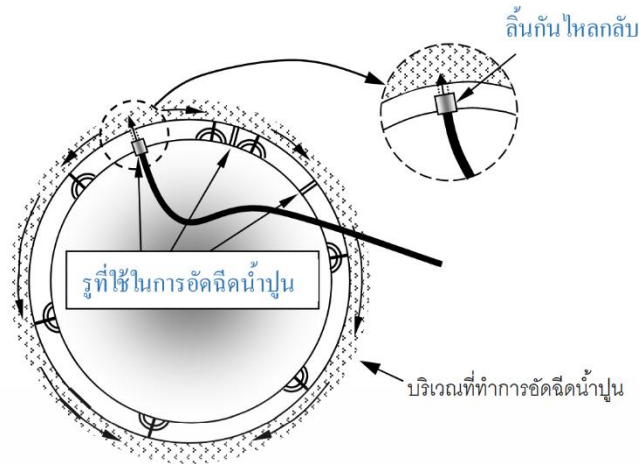
### 2.2.3 การอัดฉีดน้ำปูน

โดยทั่วไปผนังอุโมงค์ที่ประกอบกันเป็นอุโมงค์จะมีขนาดเล็กกว่าหัวเจาะ เพราะว่าการติดตั้งจะเกิดขึ้นภายในส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้นช่องว่างที่เกิดขึ้นโดยรอบ แสดงดังรูปที่ 2.2 จะถูกเติมเต็มด้วยการอัดฉีดน้ำปูน ในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินเปียก ผนัง อุโมงค์จะถูกยึดด้วยสลักเข้าหากันเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ตรงกันข้ามในกรณีที่อุโมงค์ทำการ ก่อสร้างในดินแห้ง ผนังอุโมงค์อาจจะไม่จำเป็นต้องยึดเข้าหากันด้วยสลัก



รูปที่ 2.2 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผนังอุโมงค์และหัวเจาะ

น้ำปูนจะถูกอัดฉีดผ่านรูของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 2.3 ในระหว่างการ อัดฉีด น้ำปูนจะถูกอัดฉีดจากบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์เพื่อที่จะทำให้น้ำปูนสามารถเคลื่อนที่ปิด ช่องว่างโดยรอบ ผนังอุโมงค์ด้วยความดันของการอัดฉีดที่สูง และแรงโน้มถ่วงของตัวน้ำปูนเอง การอัดฉีดจะถูกทำอย่างต่อเนื่อง ด้วยความดันที่สูงในช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ สิ่งที่ควบคุมการอัดฉีดนอกเหนือไปจากปริมาณของน้ำปูนก็คือ ความดันในการอัดฉีดน้ำปูน ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดค่าจากภายในท่อน้ำปูนหรือจากแรงที่กระทำ ต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 2.3 การอัดคือน้ำปูนผ่านรูภายในชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

## 2.3 ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา

### 2.3.1 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน สายเฉลิมรัชมงคล (MRTA)

#### 1) ข้อมูลทั่วไปและแผนที่ตั้ง

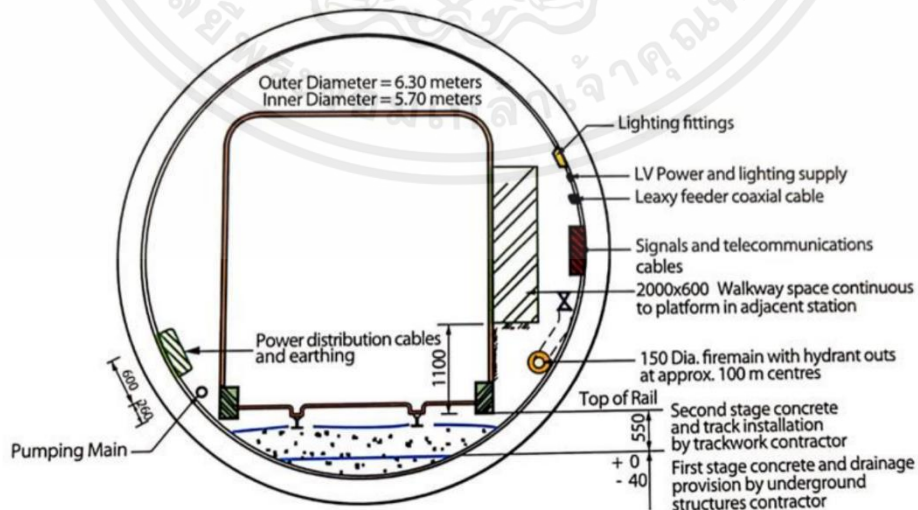
อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA) เป็นโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย โดยมีระยะทาง 20 กิโลเมตรเป็นโครงการใต้ดินตลอดสาย โดยเริ่มต้นที่สถานีรถไฟหัวลำโพงและสิ้นสุดที่สถานีรถบางซื่อ รวมทั้งหมด 18 สถานี ลักษณะของโครงสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ใต้ดินลึกจากผิวถนนประมาณ 15 – 25 เมตร สถานีจะมีความกว้างประมาณ 18 – 25 เมตร ยาวประมาณ 150 – 200 เมตร ซึ่งโครงการได้ถูกออกแบบให้มีระบบป้องกันน้ำท่วมภายในตัวสถานีและอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินพร้อมทั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุและเตือนภัยอัตโนมัติสำหรับการป้องกันอัคคีภัย ภายในอุโมงค์มีการติดตั้งรางวิ่งรถไฟรางที่สาม ทางเดินซ่อมบำรุง อุปกรณ์ระบบระบายอากาศระบบดูดอากาศใต้ชานชาลาและระบบตรวจจับความร้อน รูปแบบโครงการเป็นอุโมงค์คูรางเดี่ยว คือ เดินรถอุโมงค์ละหนึ่งทิศทาง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.7 เมตร หนา 30 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.3 เมตร โดยแผนที่ตั้งแนวเส้นทางและการแบ่งส่วนการก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้แสดงไว้ในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แนวเส้นทางและการแบ่งส่วนก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

## 2) ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA

การใช้เทคนิคการก่อสร้าง การขุดเจาะอุโมงค์ 2 ประเภทมาใช้งาน คือ ใช้วิธีการขุดเจาะโดยหัวเจาะ ซึ่งเป็นวิธีการขุดเจาะที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ทางวิ่งรถไฟฟ้าทั่วไป และวิธีการขุดแล้วกลบกลับ เป็นอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.7 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.3 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 30 เซนติเมตร ส่วนประกอบของอุโมงค์จะประกอบไปด้วยแผ่นคอนกรีตผนังอุโมงค์ (Tunnel Segment) จำนวน 75000 ชิ้น รูปแบบอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินแสดงดังรูป 2.5



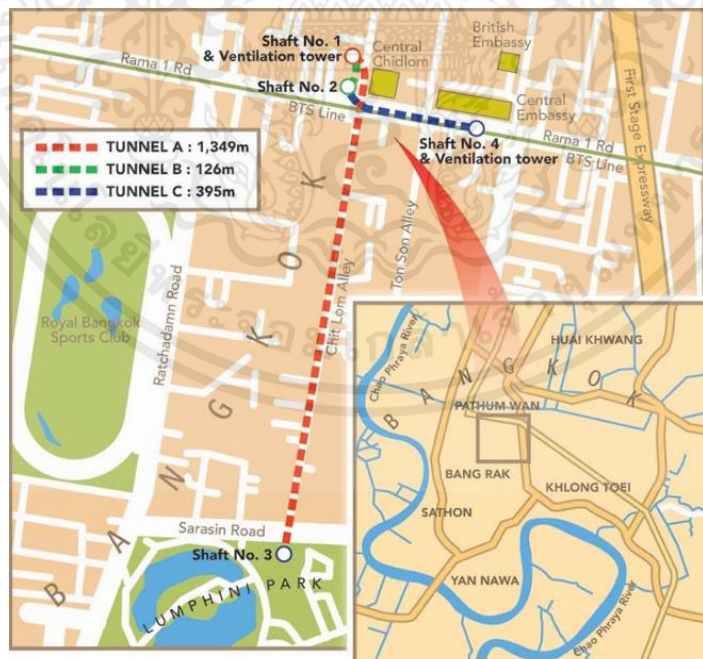
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRTA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 โครงการอุโมงค์ไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

#### 1) ข้อมูลทั่วไปและแผนที่ตั้ง

การไฟฟ้านครหลวง หรือ MEA เป็นรัฐวิสาหกิจสังกัดกระทรวงมหาดไทยเร่งดำเนินโครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดินอย่างต่อเนื่องตามนโยบายรัฐบาล รวมถึงเร่งสร้างพลังงานเพื่อวิถีชีวิตเมืองมหานคร Smart Metro พัฒนาความมั่นคงปลอดภัยความสะดวกสบายให้แก่ประชาชนโครงการดังกล่าวถือเป็นโครงการสำคัญในการวางแผนงานระบบไฟฟ้าอนาคตเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.6 เมตร อยู่ลึกประมาณ 30-40 เมตร ซึ่งประกอบด้วยอุโมงค์จำนวน 2 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทางที่ 1 จากสถานีต้นทางชิดลมไปยังสถานีย่อยลุมพินี เพื่อเชื่อมต่อระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้าจากสถานีต้นทางชิดลมไปยังสถานีย่อยต่างๆ และผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ เช่น สถานีย่อยลุมพินี สถานีย่อยปทุมวัน สถานีย่อยสามย่าน โครงการ One Bangkok เป็นต้น เส้นทางที่ 2 จากสถานีต้นทางชิดลมไปตามถนนสุขุมวิทจนถึงพื้นที่ย่านศูนย์การค้า Central Embassy เพื่อเชื่อมต่อระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้าจากสถานีต้นทางชิดลมไปยังสถานีย่อยต่างๆ และผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ เช่น สถานีย่อยพร้อมพงษ์ สถานีย่อยเอกมัย โครงการ Central Embassy เฟส2 รวมมีความยาวของอุโมงค์ทั้งสิ้นประมาณ 1,800 เมตร แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะช่วยเพิ่มเส้นทางการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินให้ครอบคลุมพื้นที่ในเขตเมืองมหานครมากขึ้น จากปัจจุบันที่สามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ประมาณ 180 เมกะวัตต์ ให้สามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ประมาณ 1,025 เมกะวัตต์



รูปที่ 2.6 เส้นทางโครงการอุโมงค์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษ (Chidlom Terminal station)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอุโมงค์สายไฟฟ้า (MEA)

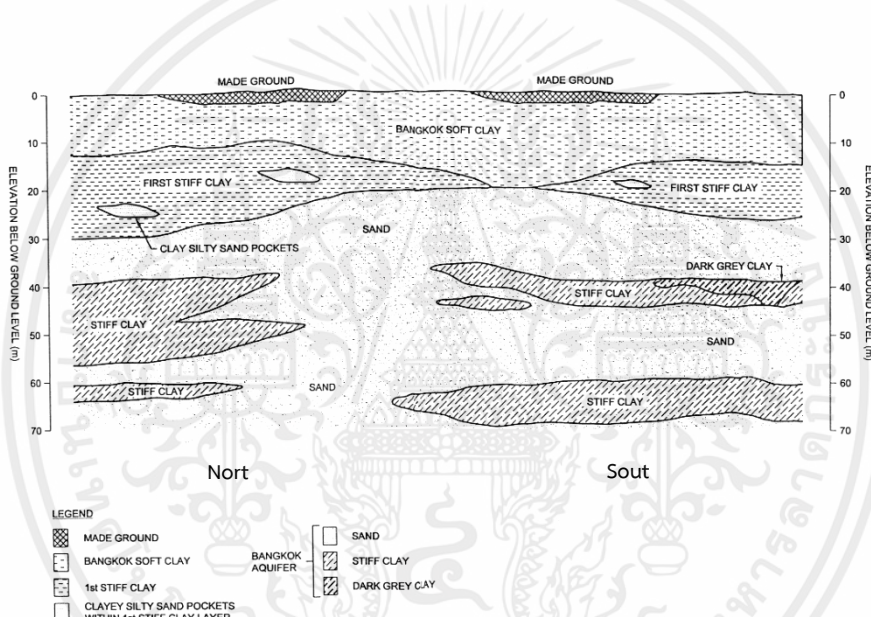
อุโมงค์สายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 230 kV ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.60 เมตร ลึกประมาณ 30 – 40 เมตร ยาว 1800 เมตร เป็นอุโมงค์จ่ายไฟฟ้าที่ขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย การก่อสร้างใช้เทคโนโลยี ด้วยหัวเจาะ (Shield) เป็นแบบ EPB (Earth Pressure Balance) ที่สามารถขุดเจาะอุโมงค์พร้อมกับติดตั้งผนังอุโมงค์ (Tunnel Segments) ได้ในคราวเดียวกัน ลักษณะทางกายภาพคล้ายกับอุโมงค์รถไฟใต้ดิน โดยภาพตัดทางด้านขวางของอุโมงค์ไฟฟ้างี้แสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์สายไฟฟ้า (MEA)

## 2.4 สภาพทางธรณีวิทยา

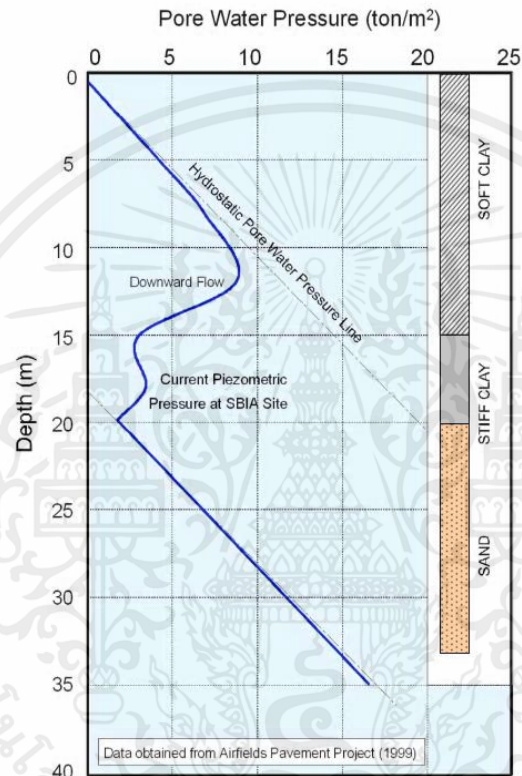
ชั้นดินในกรุงเทพเป็นชั้นดินที่เกิดจากการทับถมในปากลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งระดับผิวดินจะสูงประมาณ 0.5–1 เมตร จากระดับน้ำทะเล โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้ทำการสำรวจสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของดิน ทั้งจากอุปกรณ์ภาคสนามและการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยชั้นดินของกรุงเทพได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งสังเกตได้ว่า ส่วนเหนือจะมีชั้นดินที่เป็นชั้นแยกกันชัดเจน (Uniform Layer) โดยเริ่มต้นจากชั้นดินเหนียวอ่อนลงมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทราย ซึ่งอุโมงค์จะถูกขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งเป็นส่วนมาก อย่างไรก็ตามในส่วนใต้ ชั้นดินจะแตกต่างจากส่วนเหนือ โดยจะไม่พบชั้นดินเหนียวแข็งในบางตำแหน่ง และอุโมงค์ในบางช่วงยังถูกขุดในระดับที่ลึกกว่าส่วนเหนือ ทำให้อุโมงค์ลงไปอยู่ในชั้นทราย ระดับน้ำใต้ดินจะพบที่ระดับลึก 22–24 เมตร



รูปที่ 2.8 สภาพชั้นดินกรุงเทพตลอดแนวการขุดเจาะอุโมงค์

ดินในกรุงเทพ โดยทั่วไปเป็นดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ โดยเมื่อดินจะถูกพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเลและน้ำทะเลจะหนุนกลับเข้ามาตตะกอนทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล ซึ่งดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) หรือดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดที่ราบลุ่มซึ่งชั้นดินตะกอนดังกล่าวพบตั้งแต่พื้นผิวไปถึงระดับความลึก 30 เมตร (ในบริเวณกรุงเทพมหานคร) ส่วนชั้นตะกอนที่รองรับชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพเป็นตะกอนดินเหนียวแข็งปะปนทรายสีเหลืองเทา (Bangkok stiff clay) ชั้นทราย (Sand) ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายแน่น (Very dense sand) ตามลำดับ

ระดับน้ำใต้ดิน (Water table level) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดินซึ่งระดับน้ำใต้ดินเป็นเรื่องที่น่าเป็นห่วงมากสำหรับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระดับความลึกมากจากผิวดิน ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์จะมีความเป็นไปได้อย่างมากที่จะมีน้ำไหลเข้ามาทาง ส่วนหน้าของอุโมงค์ทำให้เป็นอุปสรรคในการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะ อีกทั้งการไหลเข้ามาของระดับน้ำใต้ดิน จะนำมาสู่การทรุดตัวที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ของดินบริเวณเหนืออุโมงค์ได้อีกด้วย โดยความดันน้ำในกรุงเทพฯ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ

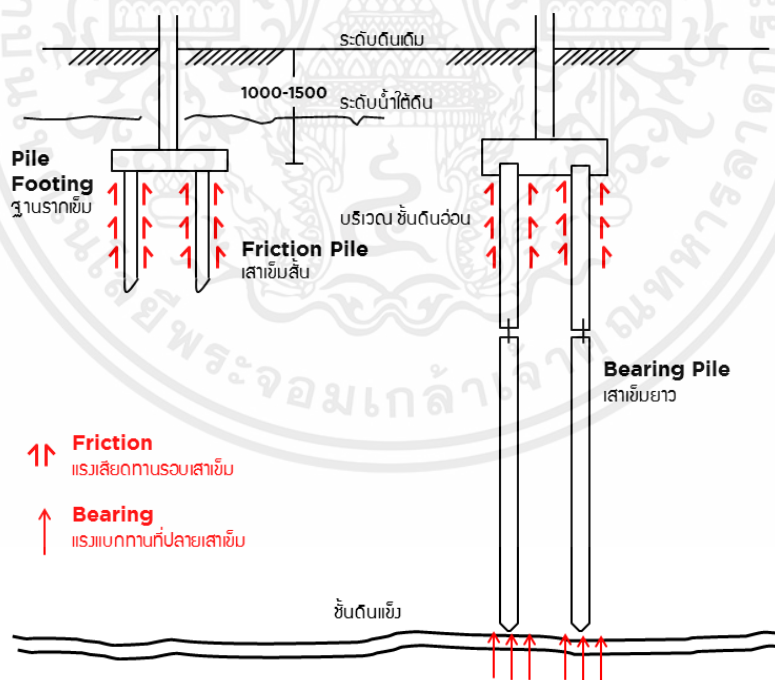
## 2.5 เสาเข็มรับแรงด้านข้าง

### 2.5.1 เสาเข็มที่ใช้ในกรุงเทพในปัจจุบัน

- 1) เสาเข็มคอนกรีตสำเร็จรูป ส่วนใหญ่ใช้ในอาคารขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเสาเข็มหล่อในโรงงาน และขนย้ายไปก่อสร้างซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 7 เมตรถึง 12 เมตร
- 2) เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่หรือเสาเข็มเจาะเป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ดินเป็นแบบหล่อ มักจะใช้เป็นฐานรากขนาดใหญ่หรือในกรณีที่ใช้เสาเข็มตอกจะทำให้อาคารข้างเคียงเกิดการชำรุด เสาเข็มคอนกรีตสำเร็จรูปส่วนใหญ่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 2 เมตร กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะจะสูงมากเพราะสามารถเจาะให้มีความลึกได้ถึง 60 เมตร

### 2.5.2 พฤติกรรมการรับแรงของเสาเข็ม

เมื่อมีน้ำหนักกดทับที่หัวเสาเข็ม เสาเข็มจะถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินจากแรงที่เสาเข็มส่งผ่านชั้นดิน จำแนกได้สองส่วนคือ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Skin friction) เป็นผลรวมของแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างเสาเข็มและดินตลอดหน้าตัดและความยาวของเสาเข็ม ส่วนแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มเป็นกำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเสาเข็ม

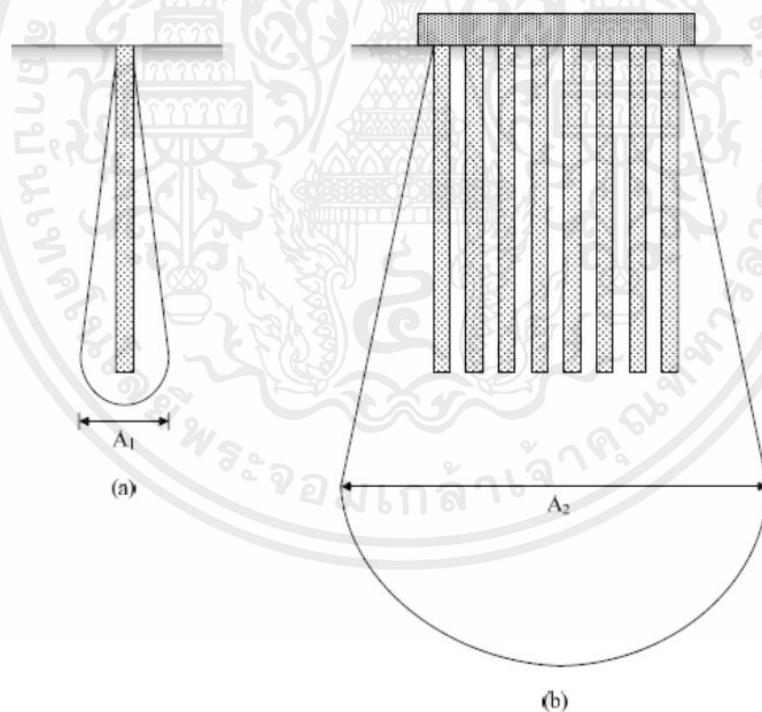
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Failure load,  $Q_f$ ) ของเสาเข็มคำนวณได้จากผลรวมของแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินเหนียว ( $Q_s$ ) และแรงต้านทานที่ปลายเข็ม ( $Q_b$ ) น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.1

$$Q_f = \frac{Q_s + Q_b}{2.5} \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้ FS คืออัตราส่วนความปลอดภัย (Safety factor) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5

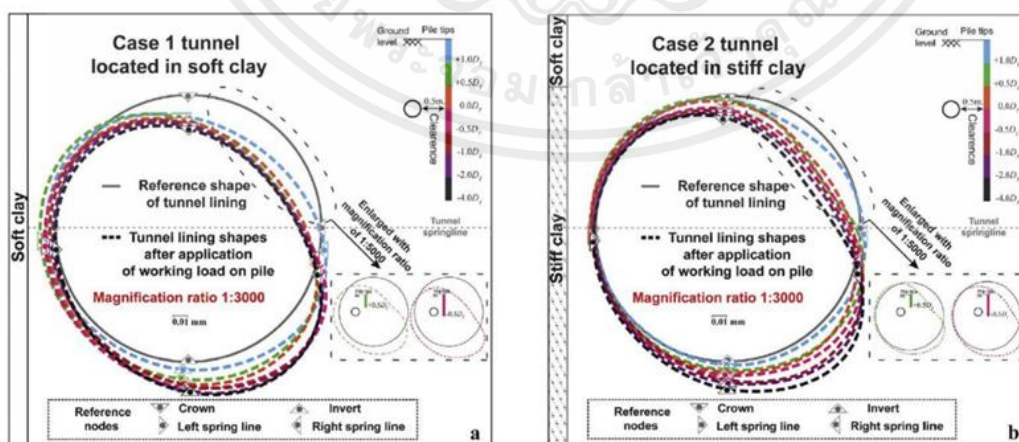
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของฐานรากเสาเข็มไม่จำเป็นต้องเท่ากับผลรวมของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มแต่ละต้นเสมอไป เนื่องจากกระเปาะความเค้นของเสาเข็มหนึ่งต้นและเสาเข็มกลุ่มมีความแตกต่างกันดังรูป 2.11 การทรุดตัวแบบทันที (Immediate settlement) จะเกิดขึ้นขณะก่อสร้างและระหว่างการก่อสร้าง จึงไม่มีผลมากนักต่อโครงสร้างในระยะยาว ส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary settlement) ที่เกิดขึ้นมีผลน้อยมาก เมื่อเทียบกับการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน (Consolidation settlement) ดังนั้น การทรุดตัวที่มีผลต่อโครงสร้างมากที่สุดคือการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน



รูปที่ 2.11 กระเปาะความเค้นของเข็มต้นเดียวและเสาเข็มกลุ่ม

## 2.6 พฤติกรรมที่อุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง

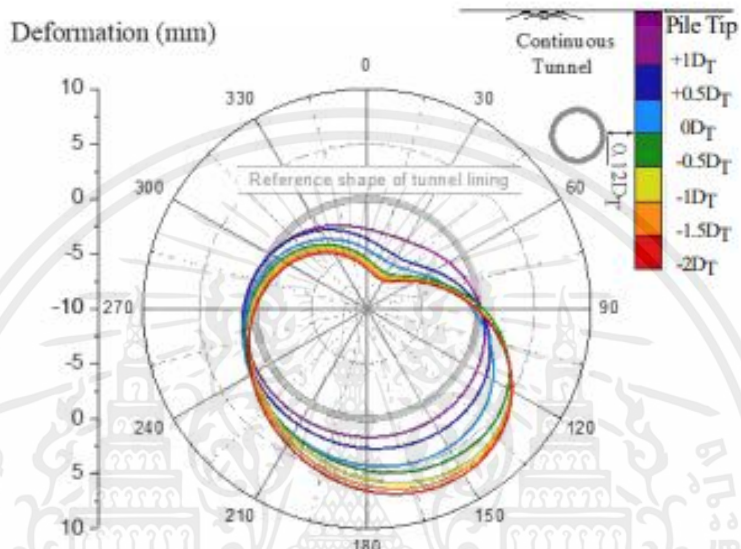
กลไกและพฤติกรรมการเสียรูปอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียงถูกตรวจสอบโดยละเอียดในงานวิจัยว่ากลไกหลักคือการเคลื่อนตัวของดินรอบๆอุโมงค์ ซึ่งยังคงพิจารณาผนังอุโมงค์โดยจำลองอุโมงค์เป็นลักษณะท่อต่อเนื่อง ในสภาพจริงผนังอุโมงค์ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนยึดติดด้วยข้อต่อ ในวงแหวนหนึ่งวงจะประกอบไปด้วย 6-8 ชิ้นส่วน ในการศึกษานี้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่อผนังอุโมงค์ที่มีอยู่เปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ระหว่างการจำลองเป็นแบบชิ้นส่วนประกอบและแบบต่อเนื่องตรวจสอบในแง่ของการเสียรูป พฤติกรรมของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียงวิเคราะห์โดยการจำลองสภาพ ความเค้นของดินก่อนที่จะมีเสาเข็ม หลังจากจำลองสภาพความเค้นในตัวของดินแล้ว จำลองการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยการลบเอลิเมนต์ของดินใน อุโมงค์ออกแล้วใส่เอลิเมนต์ของผนังอุโมงค์เข้ามาเมื่อเสร็จขั้นตอนนี้ ได้กำหนดให้การเคลื่อนตัวเท่ากับศูนย์เพื่อการเริ่มวัดค่าการเคลื่อนตัว ดังนั้นการเสียรูปของผนังอุโมงค์จึงเป็นผลจากเสาเข็มรับแรงเท่านั้น และขั้นตอนที่สองคือการมีอยู่ของเสาเข็มและให้น้ำหนักกระทำตามแนวแกนต่อเสาเข็ม โดยให้น้ำหนักกระทำต่อเสาเข็มเท่ากับค่าแรงที่ใช้งาน (Working load) พบว่าการเคลื่อนที่และการบิดเบี้ยวของอุโมงค์มีลักษณะแบบไม่สมมาตร โดยที่ตำแหน่งชิ้นส่วนด้านบนของผนังอุโมงค์ที่ใกล้ปลายเสาเข็มรับแรงเกิดการเคลื่อนที่ลงและยุบเข้าหาศูนย์กลางอุโมงค์ ในขณะที่ตำแหน่งชิ้นส่วนด้านล่างของผนังอุโมงค์ที่ห่างกับปลายของเสาเข็มรับแรงเคลื่อนที่ออกห่างจากศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งก็คือชิ้นส่วนของอุโมงค์ด้านที่ใกล้เสาเข็มรับแรงหนีห่างออกจากเสาเข็มรับแรง ในขณะที่อีกด้านของผนังอุโมงค์ในชิ้นส่วนเดียวกันทั้งส่วนด้านบนและด้านล่างที่ห่างจากตำแหน่งเสาเข็มรับแรงเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะของปลายเสาเข็มรับแรงอยู่ห่างจากผนังของอุโมงค์ 0.5 Diameter ของอุโมงค์ แสดงดังรูปที่ 2.12



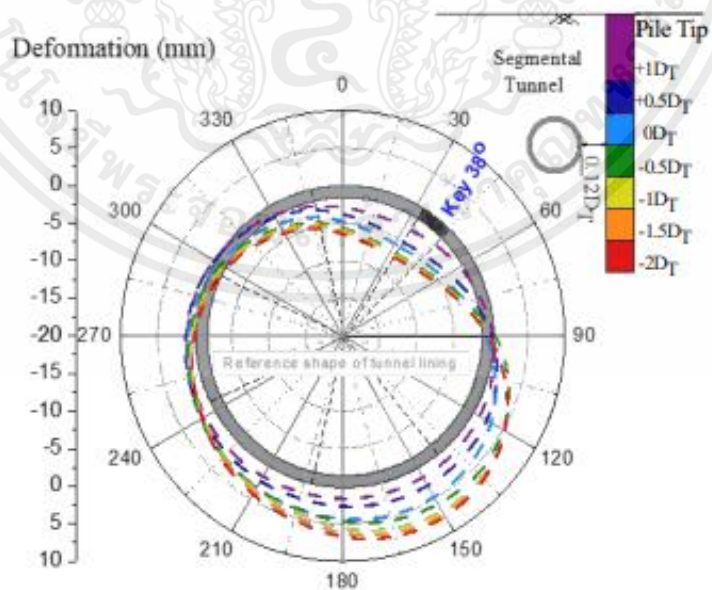
รูปที่ 2.12 การเสียรูปของผนังอุโมงค์เนื่องจากการรับแรงของปลายเสาเข็มที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษา การเสียรูปตามวงรอบของอุโมงค์ที่เกิดจากเสาเข็มรับแรงโดยมีความยาวเสาเข็มต่าง ๆ (ให้น้ำหนักตามแนวแกนต่อเสาเข็มที่แตกต่างกัน) สำหรับผนังอุโมงค์ทั้งสองรูปแบบและการมีตำแหน่งชั้นส่วนคีย์ เช็กเมนต์ที่ต่างกัน โดยไม่พิจารณาการเสียรูปของอุโมงค์ในขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ พบว่าการเคลื่อนที่และการบิดเบี้ยวของอุโมงค์มีลักษณะแบบไม่สมมาตรซึ่งสังเกตได้ชัดเจน ดังรูปที่ 2.13 แสดงการเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง

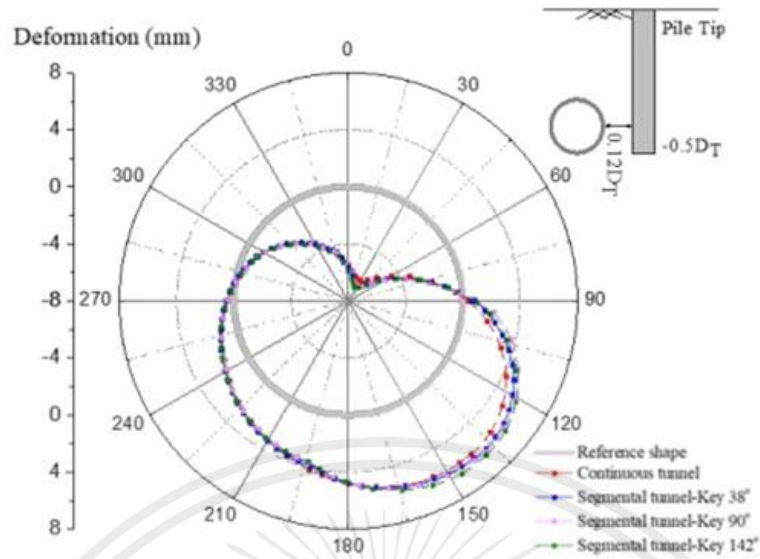


รูปที่ 2.13 การเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2.14 การเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

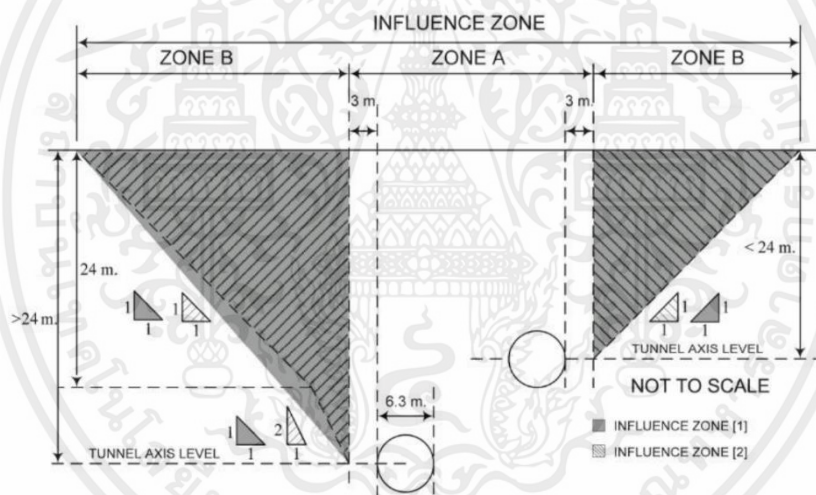


รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบการเสียรูปของโครงสร้างผนังอุโมงค์ในขั้นตอนการใส่เสาเข็มรับแรง

รูปที่ 2.14 สำหรับแบบชิ้นส่วนประกอบ (กรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 38 องศา) เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของปลายเสาเข็มต่างๆจากผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งส่วนด้านขวาของส่วนยอดอุโมงค์ (ด้านใกล้กับเสาเข็ม) เกิดการเคลื่อนที่ลงและยุบเข้าหาศูนย์กลางอุโมงค์ (หนีออกจากเสาเข็ม) ในขณะที่ตำแหน่งส่วนด้านขวาของอุโมงค์ส่วนล่างเกิดการเคลื่อนที่ลงและยึดหนีศูนย์กลางอุโมงค์ (เข้าหาเสาเข็ม) สำหรับด้านซ้ายของ อุโมงค์ (ด้านที่อยู่ห่างจากเสาเข็ม) สังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย การเสียรูปของผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาและแบบชิ้นส่วนประกอบดังรูปที่ 2.14 มีลักษณะการเสียรูปเป็นวงรีหรือรูปไตที่มีแกนหลักเอียงและการเสียรูปของผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบชิ้นส่วนประกอบมากขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็มที่มากขึ้น (แรงที่มากขึ้น) และรูปที่ 2.15 แสดงการเสียรูปของผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบชิ้นส่วนประกอบกรณีปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ  $-0.5 D_T$  จากรูปจะ เห็นว่าลักษณะการเสียรูปของทุกกรณีมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันสังเกตได้ว่าผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบชิ้นส่วนประกอบเกิดการเสียรูปแบบยึดตัวสูงสุดที่ตำแหน่งประมาณ 150 องศาและการเสีย รูปแบบหดตัวสูงสุดที่ตำแหน่งประมาณ 30 องศา เมื่อตรวจสอบอย่างละเอียดพบว่าผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา มีค่าการเสียรูปโดยรวมมากที่สุด (การเสีย รูปแบบยึดตัวและแบบหดตัว) และกรณีคีย์เช็กเมนต์ที่ 38 องศา มีค่าการเสียรูปโดยรวมมากกว่า 90 องศาทั้งนี้ในกรณีนี้ที่ตำแหน่งคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา ส่งผลให้คีย์เช็กเมนต์อยู่ใกล้ปลายเสาเข็ม ( $-0.5D_T$ ) มากที่สุด  $+1D_T +0.5D_T 0D_T -0.5D_T -1D_T -1.5D_T -2D_T$

## 2.7 พื้นที่อิทธิพล

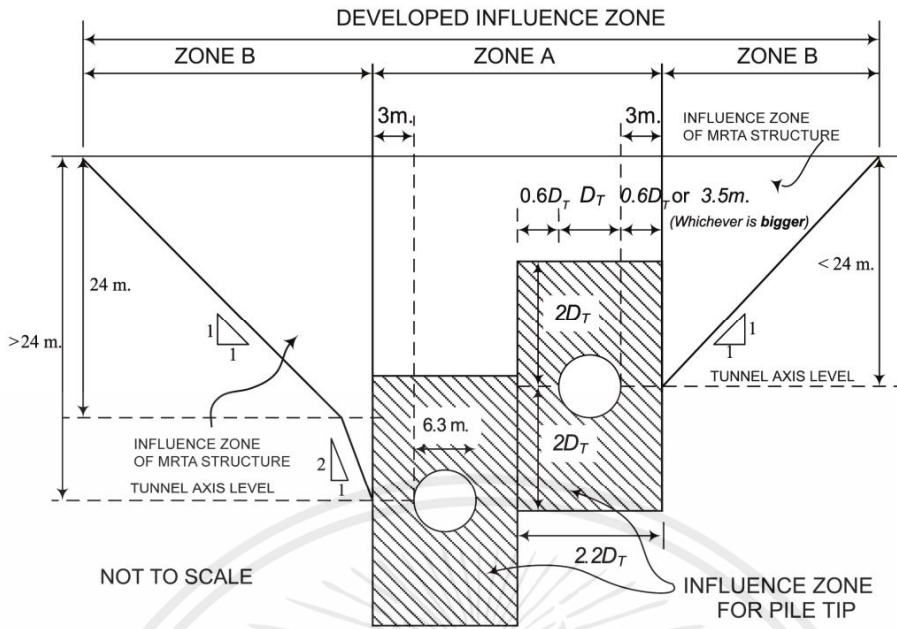
ในประเทศไทยมีการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) ได้มีการใช้เขตอิทธิพล (influence zones) สำหรับการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ที่มีระบบฐานรากแบบเสาเข็มที่ก่อสร้างใกล้เคียงกับอุโมงค์เดิม สำหรับการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ที่มีระบบฐานรากแบบเสาเข็มที่จะก่อสร้างใกล้เคียงกับอุโมงค์เดิม ดังรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงเขตอิทธิพลของโครงการก่อสร้างใหม่ของ Land Transport Authority (LTA) และ Mass Rapid Transit Authority (MRTA) เขตอิทธิพลนี้เกิด จากการสันนิษฐานจากระนาบการเฉือน (Ideal shear plane) จากโมเดลทดลอง เขตอิทธิพลนี้ถูกใช้กับ การก่อสร้างทุกประเภท และถูกนำมาใช้ในการบอกแนวทางระยะระหว่างโครงสร้างข้างเคียงที่กำลังจะก่อสร้างกับอุโมงค์เขตอิทธิพลนี้ส่วนใหญ่แล้วเกิดมาจากประสบการณ์มากกว่าหลักการของความเข้าใจการ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มกับอุโมงค์



รูปที่ 2.16 พื้นที่อิทธิพลที่ใช้ในการก่อสร้างปัจจุบัน

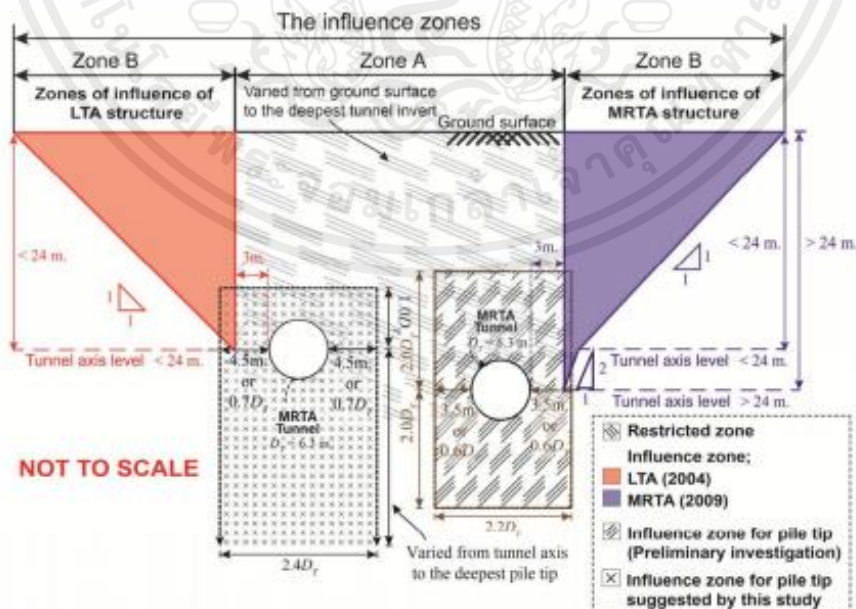
จากผลงานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับพื้นที่ผลกระทบ (Influenced Zone) ร่วมกับประสบการณ์และข้อพิจารณาต่างๆ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวอยู่ ตำแหน่งของปลายเสาเข็มเดี่ยว และระยะห่างระหว่างเสาเข็มเดี่ยวกับอุโมงค์เดิม โดยเป็นการศึกษาเพื่อทำการพัฒนาโซนพื้นที่ปลอดภัยในการก่อสร้างเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกใกล้เคียงอุโมงค์เดิมในกรุงเทพฯ ทำให้เกิดการสร้างเขตอิทธิพลนี้ขึ้นเพื่อแนะนำระยะที่ปลอดภัยในการก่อสร้างข้างเคียงอุโมงค์โดยเขตอิทธิพลนี้มีระยะ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ด้านบนและด้านล่างจากจุดกึ่งกลางอุโมงค์และมีระยะแนวราบ (Clearance) เท่ากับ 0.6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์จากผิวด้านข้างของอุโมงค์ ดังแสดงดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 พื้นที่อิทธิพลในการก่อสร้างเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกใกล้เคียงอุโมงค์เดิมในกรุงเทพฯ

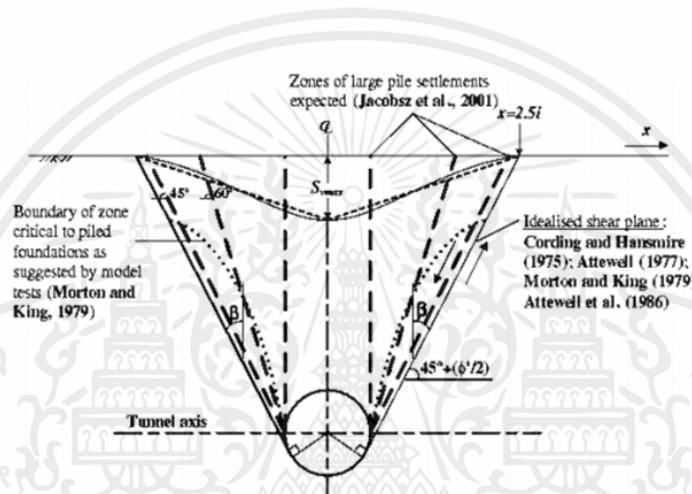
ต่อมาได้มีการศึกษาต่อจากงานวิจัย พบว่าเขตอิทธิพลสำหรับอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจาก เสาเข็มที่รับแรงสามารถมีขนาดที่เล็กกว่าเขตอิทธิพลเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งได้กำหนดเขตอิทธิพลใหม่มีระยะทางด้านบนจากจุดกึ่งกลางของอุโมงค์ เท่ากับ 1.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะทางด้านล่างมีค่าเท่ากับปลายเสาเข็มที่ลึกที่สุด และสำหรับระยะในแนวราบมีค่าเท่ากับ 7.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จากผิว ด้านข้างของอุโมงค์ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 พื้นที่อิทธิพลที่เสนอและเขตอิทธิพลในการศึกษาก่อนหน้านี้

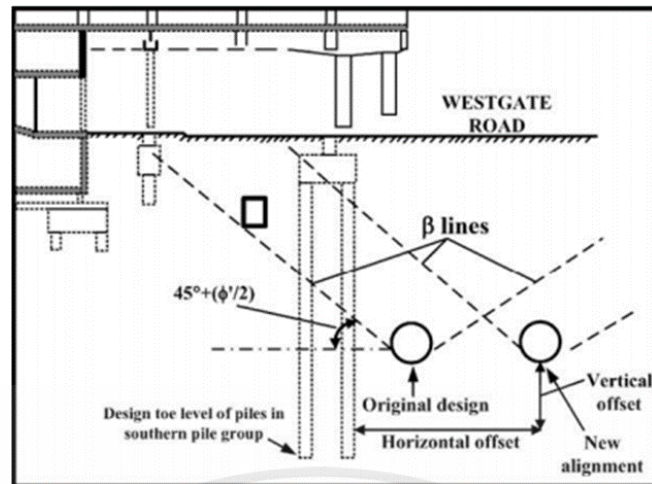
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเสนอว่าเขตพื้นที่ผลกระทบนี้ใช้กำหนดตำแหน่งสัมพัทธ์ของอุโมงค์ต่อฐานรากเสาเข็ม ซึ่งกำหนดเป็นเส้นตรงจากขอบอุโมงค์โดยทำมุม  $\beta$  เรียกว่า  $\beta$  lines ซึ่งเป็นระนาบวิบัติแบบเฉือนเนื่องจากการขุดอุโมงค์ โดยค่า  $\beta$  จะมีค่าเท่ากับ  $45^\circ - \phi'/2$  โดยวัดจากแนวดิ่ง เมื่อ  $\phi'$  คือมุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน จากผลการทดสอบแบบย่อส่วน ระนาบนี้ยังกำหนด โดย Wedge ที่กว้าง  $\pm 2.5i$  ที่ผิวดิน เมื่อ  $i$  เป็นระยะจากเส้นกึ่งกลางอุโมงค์ถึงจุด Inflexion นอกจากนี้ ได้ทำการทดลองโดยแบบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง และยังได้เสนอว่าเขตวิกฤติได้จากการลากเส้นทำมุม  $60^\circ$  วัดจากขอบอุโมงค์ และเขตพื้นที่ผลกระทบได้จากการลากเส้นทำมุม  $45^\circ$  วัดจากขอบอุโมงค์ โดยจะเป็นบริเวณที่เกิดการทรุดตัวของเสาเข็มมากจากการขุดอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



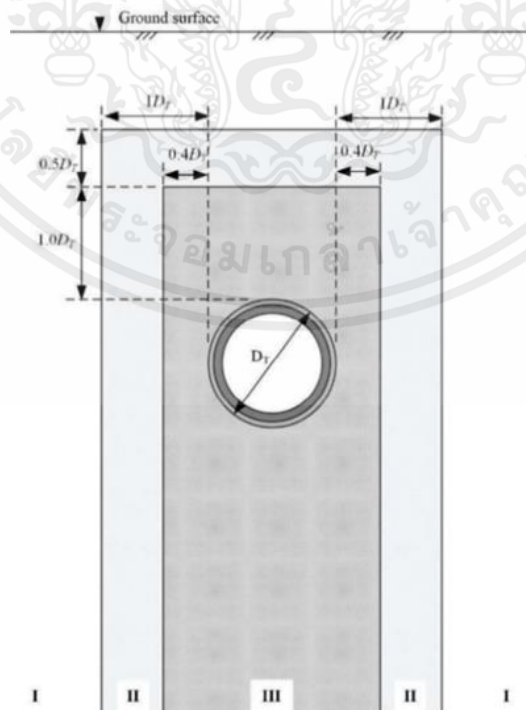
รูปที่ 2.19 เส้นเขตพื้นที่ผลกระทบของการเคลื่อนตัวของดินและเข็มจากการขุดอุโมงค์

โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาถูกประยุกต์ใช้สำหรับการขุดอุโมงค์ใกล้เคียงกับฐานรากอาคารเดิม เช่น เป็นข้อแนะนำการกำหนดตำแหน่งอุโมงค์ในชั้นดินเมืองนิวยอร์ก ที่แนวเดิมทำให้ฐานรากเสาเข็มอยู่ในเขตพื้นที่ผลกระทบของงานก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งต้องวางแนวใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ข้อเสนอแนะการขุดอุโมงค์ใกล้กับฐานรากเสาเข็มที่มีอยู่เดิม

การศึกษา กรณีนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบต่ออุโมงค์ส่งน้ำที่มีอยู่ เนื่องจากเสาเข็มแถวที่อยู่ติดกัน ภายใต้การโหลดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3D (3DFEM) ครอบคลุมเสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ม., 1.5 ม. ระยะห่าง 3 ม., 4.5 ม และอุโมงค์ส่งน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. 4.45 ม. โดยใช้ข้อมูลอุโมงค์การประปานครหลวง (MWA) และคุณสมบัติของดินกรุงเทพมหานครได้รับการพิจารณาในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติผลการวิเคราะห์จะแสดงในเงื่อนไขของทั้งปัจจัยด้านความปลอดภัยและการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ และแนะนำพื้นที่อิทธิพลของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มแถวภายใต้การรับแรง การศึกษานี้ได้แนะนำระยะห่างแนวตั้ง  $1.0D_T$  และ  $1.5D_T$  เป็นขอบเขตของพื้นที่อิทธิพล แสดงดังรูปที่ 2.21



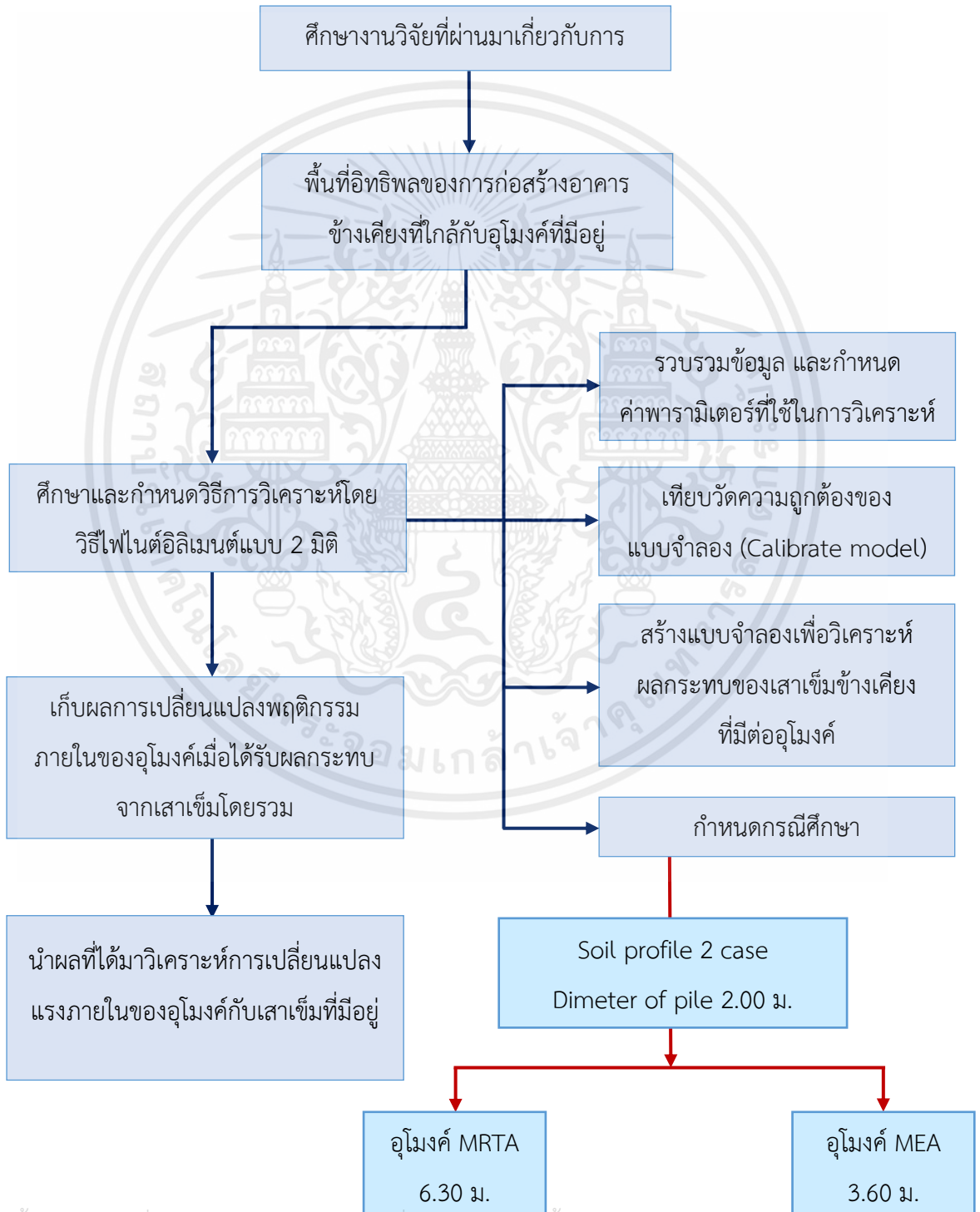
รูปที่ 2.21 พื้นที่อิทธิพลของอุโมงค์ส่งน้ำสำหรับเสาเข็มรับแรงที่อยู่ติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

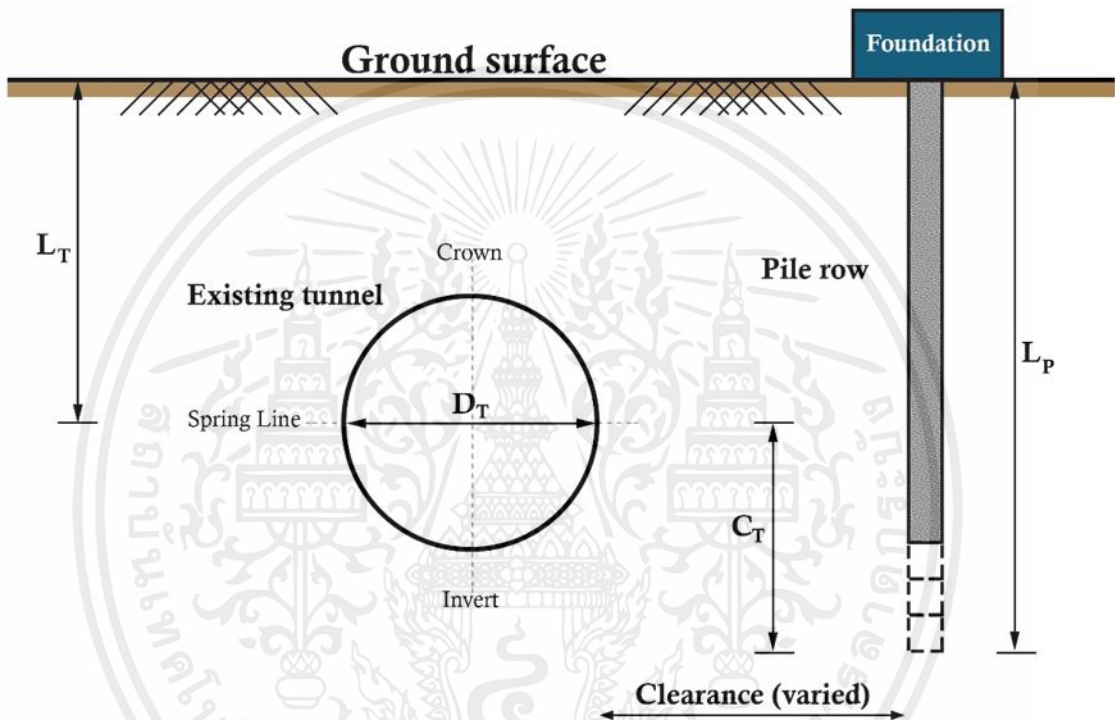
## ขั้นตอนการวิเคราะห์

### 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์



### 3.2 หลักการพิจารณาปัญหา

หลักการวิเคราะห์ปัญหา โดยจะวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์และความหนาอุโมงค์ที่ใช้จะต่างกัน โดยอ้างอิงจากลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) และอุโมงค์สายส่งไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) โดยเสาเข็มที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 เมตร และ มีความลึกของเสาเข็มต่างกันวางตัวอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอุโมงค์ และมีระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม (clearance) แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบการพิจารณาปัญหา

- โดยที่
- $L_T$  คือ ระยะความลึกของอุโมงค์
  - $D_T$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์
  - $C_T$  คือ ระยะห่างระหว่างระดับกึ่งกลางของอุโมงค์กับระดับปลายเสาเข็ม
  - $L_P$  คือ ระยะความลึกของเสาเข็ม

### 3.3 กรณีศึกษา

#### 3.3.1 ลักษณะชั้นดินในการวิเคราะห์

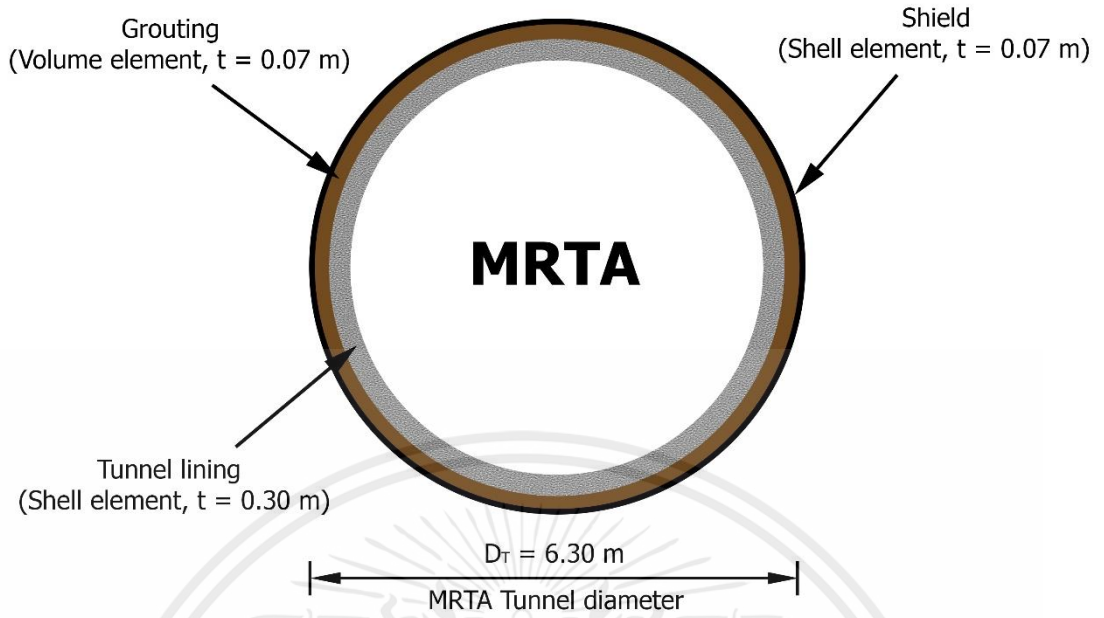
ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาจากโครงสร้างอุโมงค์ที่อยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ พิจารณาจากการวางโครงสร้างอุโมงค์ที่ระดับความลึกใต้ดินวัดจากระดับผิวดิน 20 เมตร ในลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ซึ่งจะพิจารณารวางโครงสร้างอุโมงค์ทุกขนาดที่ระดับความลึกเดียวกันจากระดับผิวดิน 20 เมตร เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุโมงค์คมนาคมและอุโมงค์สาธารณูปโภค โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -1.50 เมตร จากผิวดิน



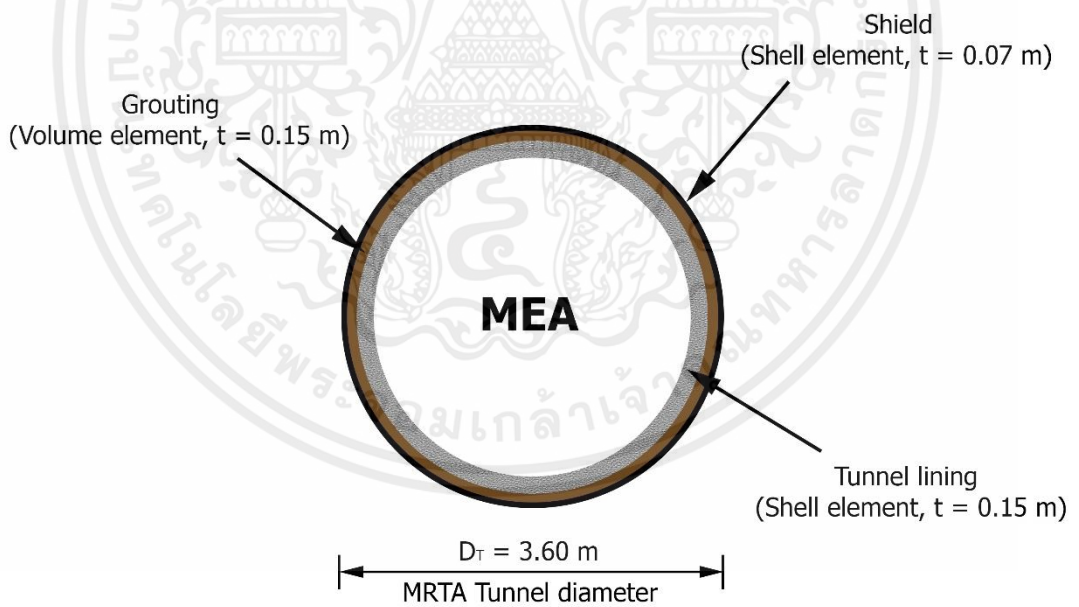
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะชั้นดินต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 3.3.2 ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

อุโมงค์ใต้ดินสำหรับการคมนาคมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน สายสีน้ำเงิน (MRTA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.70 เมตร แสดงในรูปที่ 3.3 และอุโมงค์ใต้ดินสำหรับสาธารณูปโภคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยอุโมงค์ส่งสายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.60 เมตร ผังอุโมงค์มีความหนา 0.15 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA ที่ใช้ในการศึกษา



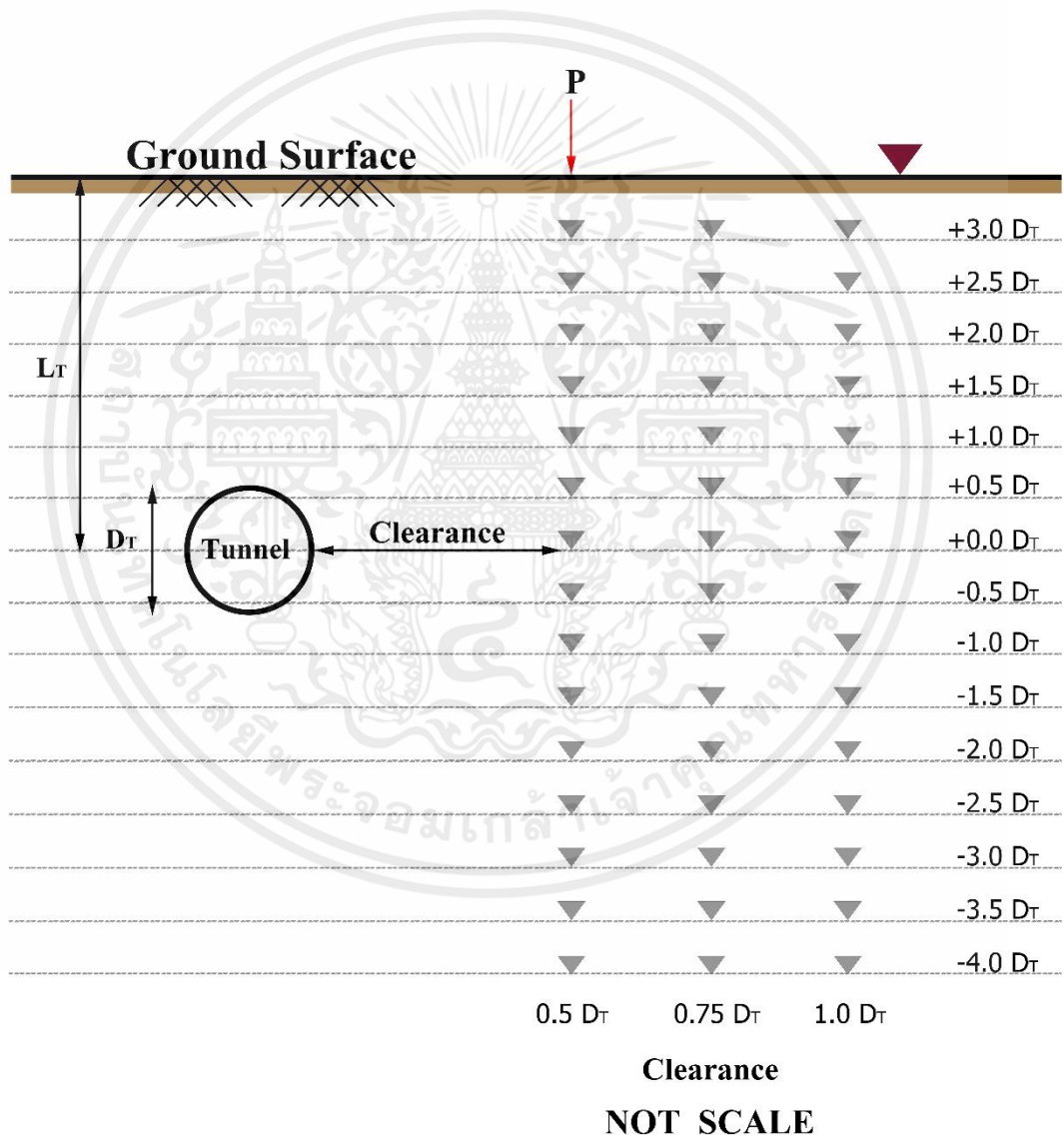
Shield
  Grouting
  Tunnel lining
 NOT SCALE

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MEA ที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การวางตัวของปลายเสาเข็ม

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้กำหนดให้เสาเข็มรับแรงเป็นแบบกำแพง (Load in wall) เสาเข็มรับแรงกระทำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 และ 1.0 ม. วางตัวอยู่ทางด้านขวาของอุโมงค์และระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม 3 ระยะ (clearance) ได้แก่  $0.5D_T$ ,  $0.75D_T$  และ  $1.0D_T$  และตำแหน่งของปลายเสาเข็ม (Pile Tip) นับตั้งแต่กึ่งกลางอุโมงค์เป็นระยะ  $+0.5D_T$  เมตร เหนือแนวกึ่งกลางของอุโมงค์ และ  $-0.5D_T$  ใต้แนวกึ่งกลางอุโมงค์ ( $D_T$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์) โดยกำหนดให้มีความลึกของเสาเข็มเกิน 50 เมตร โดยจำนวน  $D_T$  ขึ้นอยู่กับขนาดของอุโมงค์ แสดงดังรูปที่ 3.5

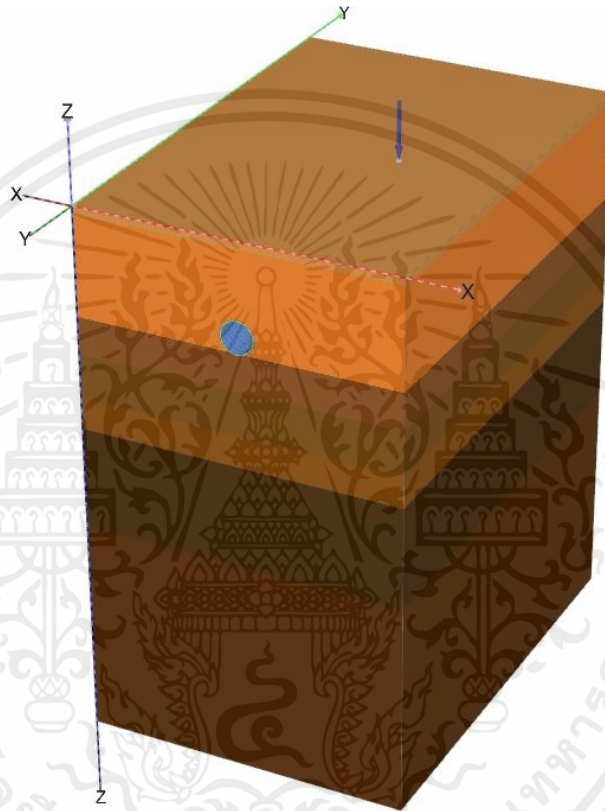


รูปที่ 3.5 แสดงการวางตัวของปลายเสาเข็ม

### 3.4 การวิเคราะห์ผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ลักษณะโครงข่าย (Mesh) ของแบบจำลอง มีขนาดความกว้าง 60 เมตร และ สูง 100 เมตร แสดงดังรูป 3.6 โดยเสาเข็มถูกวางตัวทางด้านขวาของอุโมงค์ที่ระยะ (Clearance) 0.5DT, 0.75DT และ 1.0D<sub>T</sub> โดยกำหนดแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained analysis) โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D



รูปที่ 3.6 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

#### 3.4.2 คุณสมบัติของแบบจำลอง

คุณสมบัติของแบบจำลองใช้ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินในกรุงเทพฯ ซึ่งได้รับการตรวจสอบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงจากการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์และการขุดดินลึกในอดีต แสดงดังตารางที่ 3.1 แบบจำลองชั้นดินกำหนดให้เป็น HS small ในส่วนของผนังอุโมงค์และเสาเข็มกำหนดให้มีคุณสมบัติแบบ Linear elastic แสดงดังตารางที่ 3.2 โดยคุณสมบัติของเสาเข็มเจาะได้ใช้ค่า Young's Modulus of Concrete ของเสาเข็มสามารถคำนวณได้จากงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ผนังอุโมงค์ใช้แบบจำลองเป็นแบบ Shell element ส่วนเสาเข็มเจาะและชั้นดินใช้การจำลองแบบ Solid element

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นดิน (Heama N.,2015)

Soil type	Made ground	Soft clay	Medium clay	1 <sup>st</sup> Stiff clay	1 <sup>st</sup> Clayey sand	2 <sup>nd</sup> Stiff clay	Hard clay
Material model	Hardening Soil	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small
$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	45,600	5,000	20,000	60,000	80,000	60,000	60,000
$E_{50}^{re}$ (kPa)	45,600	5,000	20,000	60,000	80,000	60,000	60,000
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	136,800	15,000	100,000	180,000	240,000	180,000	180,000
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	16.5	17.5	19.5	19	20	20
$\nu$ (-)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
$\phi$ (o)	25	27	27	28	33	28	28
C (kPa)	1	5	15	25	0	30	40
$\gamma_{0.7}$	-	0.08	0.11	0.12	0.014	0.12	0.15
m (-)	1	1	1	1	0.5	1	1
$P_{ref}$ (kPa)	-	100	100	100	100	100	100

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ (Srikaewsai,2020)

EPB Elements	Young modulus [E] (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio [ν]	Unit weight [γ] (kN/m <sup>3</sup> )
Tunnel lining and pile	31 × 10 <sup>6</sup>	0.20	24
EPB shield	210 × 10 <sup>6</sup>	0.28	78
Grouting layer	1 × 10 <sup>6</sup>	0.30	21
Infill concrete (Seconded lining)	31 × 10 <sup>6</sup>	0.20	24
Steel pipe	200 × 10 <sup>6</sup>	0.20	78.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 ขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 1) ขอบเขตของแบบจำลอง

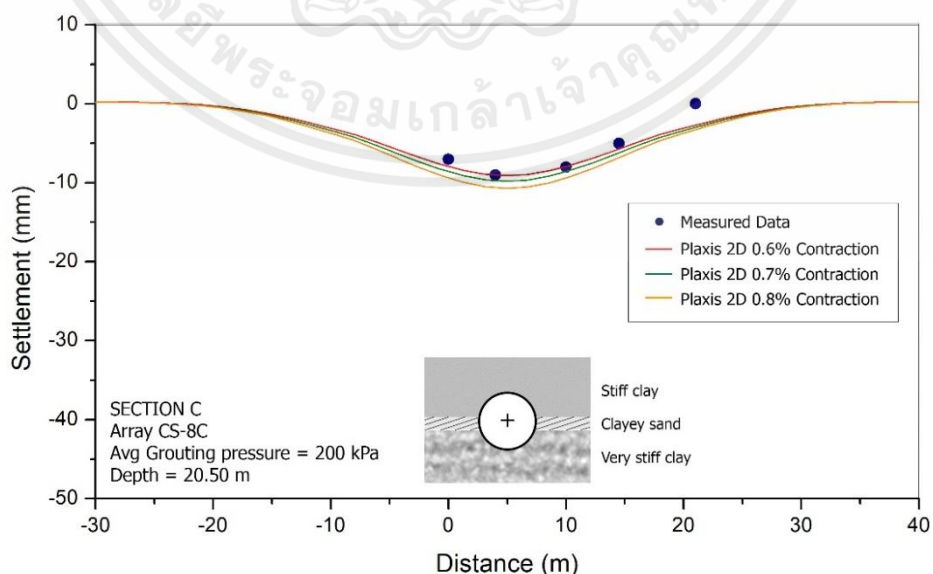
สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง ได้กำหนดให้ด้านข้างของแบบจำลองเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้ แต่ไม่อนุญาตให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ ด้านล่างของแบบจำลองไม่อนุญาตให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ และด้านบนของแบบจำลองอนุญาตให้มีการเคลื่อนตัวอิสระ

#### 2) เงื่อนไขเริ่มต้น

ในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น การกระจายความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) ในแนวตั้งและแนวราบขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของดินและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ( $k_0$ ) ของดินแต่ละชั้น ซึ่งหน่วยน้ำหนักของดินและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างอ้างอิงมาจากข้อมูลชั้นดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRT)

### 3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การเทียบวัดแบบจำลอง (Calibration model) โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือ PLAXIS 2D เวอร์ชัน 2021 โดยขึ้นส่วนต่างๆการวิเคราะห์ประกอบ (element) รูปทรงพีระมิดสามเหลี่ยม (Tetrahedron) แบบจุดต่อ (node) โดยขั้นตอนการเทียบวัดแบบจำลองของอุโมงค์และเสาเข็มจะเป็นขั้นตอนที่สร้างความน่าเชื่อถือและถูกต้องให้กับแบบจำลองก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ โดยเทียบกับข้อมูลชั้นดินในช่วง Section CS-8C ซึ่งประกอบด้วยชั้นดินเหนียวแข็ง (stiff clay) ดินเหนียวปนทราย (Clay sand) และชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Very stiff clay) โดยมีแบบจำลองที่มีขนาดความกว้าง 80 เมตร และสูง 60 เมตร



รูปที่ 3.7 ผลการเทียบวัดแบบจำลองของอุโมงค์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ

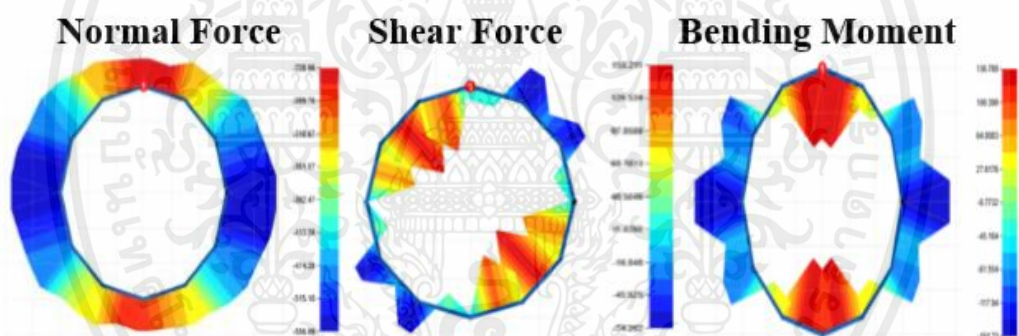
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวที่ได้ผิวดินมีค่าใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับผลตรวจวัด (MRTA monitoring data) ของ Section CS-8C ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ค่า Contraction ที่ 0.6% และผลการเทียบวัดของเสาเข็มรับแรงกระทำที่ระดับความลึกต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่เสาเข็มจะรับได้คำนวณตามวิธี Alpha-method โดยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 2.5 และกำหนดให้แบบจำลองของเสาเข็มถูกกำหนดให้อยู่ในชั้นดินก่อนแล้ว ด้วยวิธี wish in place โดยไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างเข็ม

### 3.5 การประเมินผล

#### 3.5.1 การเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงภายในซึ่งได้แก่ แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด จะไม่คำนึงการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง จะศึกษาผนังอุโมงค์ขณะที่ได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเท่านั้น โดยเราจะอ้างอิงค่าจากอุโมงค์ก่อนทำการขุดเจาะเสาเข็ม มาเป็นค่าเปรียบเทียบบทการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์



รูปที่ 3.9 แรงภายในอุโมงค์

#### 3.5.2 ตัวอย่างการคำนวณ

จากรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นแรงปกติ แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดตามแนวอุโมงค์ที่เกิดจากการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์ จากการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D ได้ทำการแบ่งแรงภายในที่เกิดขึ้นออกเป็น 3 ส่วน คือแรงเริ่มแรก (initial force) , แรงในแนวแกน (Axial force) และโมเมนต์ดัด (bending moment) โดยเราจะพิจารณาจากค่าแรงภายในสูงสุด ของแต่ละระยะ (clearance) จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมจึงได้ค่าออกมาดังนี้

1) ตัวอย่างดินที่ 2 ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$  ที่ความลึกอุโมงค์ 20 ม.

แรงเริ่มแรก (initial force) ก่อนการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$V_{\max}$ (kN/m)	-637.917
$M^+_{\max}$ (kN·m /m)	2.060
$M^-_{\max}$ (kN·m /m)	-5.151

แรงในแนวแกน (Axial force) หลังการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$V_{\max}$ (kN/m)	-1033.764
-------------------	-----------

โมเมนต์ดัด (bending moment) หลังการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$M^+_{\max}$ (kN·m/m)	29.007
$M^-_{\max}$ (kN·m /m)	-30.027

จะได้ค่าแรงภายในที่เปลี่ยนแปลงไปจากผลกระทบเสาเข็ม ดังนี้

แรงในแนวแกน (Axial force) =  $-1033.764 - (-637.917) = -395.847$  kN/m

โมเมนต์ดัดบวก (bending moment) , (+) =  $29.007 - 2.060 = 26.947$  kN·m /m

โมเมนต์ดัดลบ (bending moment) , (-) =  $-30.027 - (-5.151) = -24.876$  kN·m /m

จากผลการคำนวณข้างต้น โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย แสดงให้เห็นว่าหลังจากทำการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์ ที่ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$  ความลึกอุโมงค์ 20 ม. ค่าแรงในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น 395.847 kN/m โมเมนต์ดัดบวกมีค่าเพิ่มขึ้น 26.947 kN·m /m และโมเมนต์ดัดลบมีค่าเพิ่มขึ้น 24.876 kN·m /m

## บทที่ 4

# ผลการวิเคราะห์

### 4.1 กล่าวนำ

บทนี้ได้บรรยายถึงผลการวิเคราะห์พื้นที่อิทธิพลของเสาเข็มต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม โดยจะเปรียบเทียบผลกระทบของเสาเข็มที่กระทำต่ออุโมงค์ 2 ขนาด คือ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRTA) และ อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า (MEA) ในกรณีที่ 1 อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในอุโมงค์ โดยนำมาเสนอในรูปแบบตารางและกราฟ เปรียบเทียบค่าความแตกต่าง เพื่อนำมาประเมินการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ที่มีอยู่เดิม เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

### 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ อ้างอิงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ไฟฟ้า MEA

หัวข้อนี้แสดงผลกระทบของเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์ ที่ทำให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ โดยจะพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงแรงภายในซึ่งได้แก่ แรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดของอุโมงค์หลังจากได้รับแรงของเสาเข็ม จะไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการเคลื่อนตัวสูงสุดของตำแหน่งอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง โดยเสาเข็มจะถูกวางไว้ด้านขวาของอุโมงค์ในระยะ Clearance เท่ากับ  $0.5D_T$ ,  $0.75D_T$  และ  $1.0D_T$  (โดยที่  $D_T$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์) จะมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของอุโมงค์ 2 ขนาดแตกต่างกันไปตามลักษณะทางกายภาพ ประกอบไปด้วย อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA 6.30 ม. และอุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA 3.60 ม. จำลองเสาเข็มขนาด 2.00 ม. เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกน และโมเมนต์ดัดของอุโมงค์หลังจากรับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงภายใน ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ )

#### 4.2.1 อุโมงค์รถไฟใต้ดิน MRTA

1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

แรงเริ่มแรก (initial force) ก่อนการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$$V_{\max} = -639.898885 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max}^+ = 2.277588 \text{ kN}\cdot\text{m /m}$$

$$M_{\max}^- = -5.329301 \text{ kN}\cdot\text{m /m}$$

ตารางที่ 4.1 MRTA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-8.959732	-2.089956	1.263435
2.5	-23.241416	-5.919121	4.832591
2	-54.166026	-14.826898	13.497178
1.5	-86.757905	-23.545135	22.408396
1	-125.78763	-30.224189	31.111267
0.5	-164.16788	-28.779442	29.751832
0	-183.5195	-21.179443	22.803353
-0.5	-273.09236	-45.327984	44.039365
-1	-239.27392	-57.655569	57.405021
-1.5	-231.48678	-72.709023	58.907277
-2	-228.53537	-73.22335	57.421615
-2.5	-224.26787	-71.336331	55.761125
-3	-220.95251	-69.077501	54.435752
-3.5	-216.573	-66.12634	52.642979
-4	-213.47468	-63.989566	51.16416
-4.5	-210.64453	-62.152892	50.04138
-5	-208.82427	-61.057576	49.338468

ตารางที่ 4.2 MRTA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $0.75D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-8.374219	-2.125797	1.132446
2.5	-21.801092	-6.093112	4.845172
2	-51.509719	-15.15601	13.830798
1.5	-80.472688	-22.836511	22.117555
1	-111.38939	-27.286978	28.603065
0.5	-139.24406	-24.459371	25.856824
0	-151.2453	-17.293182	17.459706
-0.5	-246.0311	-34.717954	34.48491
-1	-217.13029	-44.511633	45.382679
-1.5	-195.749	-55.657251	49.796921
-2	-194.11669	-60.824017	48.938484
-2.5	-192.12487	-60.946031	47.144449
-3	-188.80583	-58.563629	45.434808
-3.5	-186.06461	-56.172408	43.93545
-4	-184.04786	-54.199821	42.871336
-4.5	-182.6341	-53.01624	42.095843
-5	-181.80508	-52.386291	41.735872

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 MRTA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $1.0D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-7.642095	-2.08033	0.961519
2.5	-19.949067	-6.006703	4.682078
2	-46.689018	-14.739008	13.67797
1.5	-70.55574	-21.231514	21.07286
1	-97.529933	-24.282606	25.735516
0.5	-116.90156	-20.717441	22.163211
0	-124.12185	-14.164647	13.675667
-0.5	-216.27273	-27.104033	28.17606
-1	-194.19163	-35.641904	36.117236
-1.5	-136.76802	-39.470239	33.447848
-2	-111.8271	-32.729994	26.997044
-2.5	-95.322029	-26.817768	21.518702
-3	-80.712554	-21.152144	17.245166
-3.5	-68.444924	-16.65456	14.176715
-4	-59.243399	-13.559038	12.170289
-4.5	-52.051261	-11.880327	10.817775
-5	-48.149856	-11.237	10.038161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกลากไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

แรงเริ่มแรก (initial force) ก่อนการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$$V_{\max} = -637.917 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max}^+ = 2.060376 \text{ kN}\cdot\text{m /m}$$

$$M_{\max}^- = -5.151101 \text{ kN}\cdot\text{m /m}$$

ตารางที่ 4.4 MRTA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-8.713446	-0.734397	0.73491
2.5	-22.727377	-2.353536	2.841231
2	-53.825326	-6.043607	7.459683
1.5	-90.377427	-9.604757	11.77819
1	-140.8693	-14.859048	16.083217
0.5	-358.99223	-48.734188	53.791068
0	-395.84644	-24.876077	26.946781
-0.5	-327.24041	-16.467026	19.393682
-1	-319.45265	-26.921494	23.2917
-1.5	-308.75018	-39.630079	28.617406
-2	-285.03722	-42.266198	29.371251
-2.5	-254.93983	-37.987028	27.782115
-3	-231.05875	-32.236924	25.679859
-3.5	-212.94235	-26.761048	23.568175
-4	-205.0383	-24.022949	22.441852
-4.5	-201.17496	-22.311085	21.664194
-5	-201.55795	-21.825198	21.384388

ตารางที่ 4.5 MRTA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $0.75D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-7.974697	-0.584007	0.549512
2.5	-20.672851	-1.902196	2.447221
2	-50.339899	-4.992445	6.649536
1.5	-83.246425	-7.600047	10.25577
1	-122.24572	-9.785511	12.546135
0.5	-306.54477	-32.122084	30.686071
0	-316.41538	-16.118653	13.588546
-0.5	-260.08233	-2.43069	8.385286
-1	-254.51967	-8.201369	4.364396
-1.5	-255.82369	-16.869256	10.927321
-2	-249.90109	-26.06788	17.012135
-2.5	-232.404	-28.441338	19.393012
-3	-212.37111	-25.961583	19.258611
-3.5	-195.89817	-22.301738	18.218073
-4	-183.54583	-18.728323	16.941667
-4.5	-178.20684	-16.711802	16.150415
-5	-177.19403	-15.808751	15.748304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 MRTA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $1.0D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
3	-7.101422	-0.407871	0.335384
2.5	-18.227413	-1.370204	1.972527
2	-45.782985	-3.905221	5.858013
1.5	-72.930583	-5.988811	8.710446
1	-101.5316	-7.162528	9.903452
0.5	-248.93673	-19.767138	18.441154
0	-242.71431	-11.313993	10.008864
-0.5	-197.23578	-5.436964	5.536397
-1	-191.6132	-4.755554	2.605729
-1.5	-195.0832	-8.81986	4.788946
-2	-203.20311	-13.926696	8.024004
-2.5	-200.41308	-18.773261	11.70312
-3	-187.9871	-19.677668	13.374771
-3.5	-175.44437	-18.047076	13.485299
-4	-163.54086	-15.409614	12.831982
-4.5	-156.31325	-13.225102	12.103675
-5	-153.83032	-12.091027	11.654018

สรุปผล อุโมงค์รถไฟใต้ดิน MRTA จากกรณีที่ 1 และ 2 อุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (กรณีที่ 1) จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่า อุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (กรณีที่ 2)

## 4.2.1 อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA

1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

แรงเริ่มแรก (initial force) ก่อนการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$$V_{\max} = -639.898885 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max}^+ = 0.289975 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

$$M_{\max}^- = 3.257399 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

ตารางที่ 4.7 MEA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	293.2832	2.186216	-0.1592
5	286.3743	1.707458	0.244514
4.5	280.6615	1.428529	0.638045
4	272.1457	0.790354	1.352817
3.5	260.5462	-0.07985	2.370303
3	246.0081	-1.46607	3.782333
2.5	228.8471	-3.59027	5.737987
2	211.104	-6.28033	8.39736
1.5	191.3288	-9.24462	11.86223
1	157.7507	-11.0256	14.91187
0.5	137.361	-9.7877	12.99792
0	158.1134	-2.51519	4.316452
-0.5	139.3483	-5.34447	7.355012
-1	150.5043	-6.92348	9.136493
-1.5	158.5553	-8.53582	9.958989
-2	159.6225	-8.04539	10.35526
-2.5	170.7644	-6.94232	9.662701
-3	184.4837	-5.32404	8.718289
-3.5	196.55	-4.72939	7.842715
-4	206.5588	-4.29532	7.120624

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-4.5	213.5136	-3.97735	6.60199
-5	218.4621	-3.72325	6.226588
-5.5	221.655	-3.56997	6.012996
-6	224.9038	-3.37686	5.790236
-6.5	224.5426	-3.42356	5.830266
-7	224.9221	-3.40402	5.799786
-7.5	224.727	-3.42071	5.813124
-8	224.357	-3.45253	5.851261
-8.5	223.9015	-3.50859	5.953781

ตารางที่ 4.8 MEA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $0.75D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	293.3155	2.181744	-0.16109
5	291.421	1.673105	0.268735
4.5	280.7074	1.379625	0.692527
4	271.9622	0.687436	1.474959
3.5	260.38	-0.23396	2.575341
3	246.4314	-1.80646	4.076433
2.5	230.5407	-3.96512	6.10106
2	215.1932	-6.49303	8.675209
1.5	194.8921	-8.81973	11.49908
1	172.7634	-9.69034	13.1397
0.5	166.1257	-7.46857	10.39525
0	190.3034	-2.11496	4.18101
-0.5	169.857	-4.22934	5.469167
-1	184.0502	-3.5408	5.563684
-1.5	192.4548	-4.6076	6.778922
-2	192.1637	-6.56548	7.97097
-2.5	198.9443	-6.61897	8.158227
-3	206.7067	-5.56144	7.843522
-3.5	216.3512	-4.18047	7.282167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-4	224.4463	-3.53637	5.38906
-4.5	230.4318	-3.28904	5.333537
-5	235.1266	-3.06704	5.316331
-5.5	237.7862	-2.92132	5.323073
-6	240.8759	-2.7344	5.357296
-6.5	240.337	-2.78408	5.340656
-7	240.6526	-2.76934	5.581273
-7.5	240.664	-2.77385	5.826595
-8	240.3627	-2.79861	6.229077
-8.5	240.0836	-2.84012	6.716025

ตารางที่ 4.9 MEA กรณีที่ 1 ที่ระยะ (clearance) =  $1.0D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	293.3523	2.178523	-0.16323
5	286.5489	1.621239	0.3155
4.5	280.085	1.249842	0.827413
4	271.4827	0.544834	1.662557
3.5	260.2709	-0.49063	2.845132
3	247.0616	-2.16265	4.423808
2.5	232.8876	-4.24909	6.451124
2	220.6114	-6.44581	8.770144
1.5	203.0757	-8.11411	10.87886
1	190.2496	-8.21402	11.39177
0.5	194.3121	-5.8184	8.475864
0	221.4203	-1.49047	3.585221
-0.5	196.0909	-3.68644	5.115348
-1	208.1602	-2.621	4.024893
-1.5	217.5367	-2.09006	4.584809
-2	215.2219	-3.75144	5.817731
-2.5	219.7845	-4.95238	6.448759
-3	226.4048	-4.9381	6.557802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-3.5	232.8557	-4.18599	6.362069
-4	239.9818	-3.21663	5.992061
-4.5	244.683	-2.57357	5.663376
-5	248.5956	-2.42547	5.332228
-5.5	250.678	-2.32309	5.107626
-6	252.9682	-2.17734	4.894447
-6.5	252.5271	-2.22745	4.912936
-7	252.7353	-2.23134	4.900226
-7.5	252.684	-2.24263	4.898915
-8	252.4085	-2.26995	4.918458
-8.5	251.9801	-2.30828	4.952237

2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์กวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

แรงเริ่มแรก (initial force) ก่อนการขุดเจาะเสาเข็มบริเวณข้างเคียงอุโมงค์

$$V_{\max} = -639.898885 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max}^+ = 0.289975 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

$$M_{\max}^- = 3.257399 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

ตารางที่ 4.10 MEA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $0.5D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	306.599587	2.405444	-0.124958
5	301.030675	2.076749	0.214661
4.5	296.859903	1.78279	0.500161
4	290.366239	1.347878	0.912692
3.5	281.194474	0.750161	1.446236
3	269.104028	-0.028652	2.095499
2.5	254.712997	-0.941957	2.897602
2	240.27766	-1.844268	3.965946
1.5	207.961276	-3.225377	5.515111
1	155.67773	-6.787762	9.711383

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5	40.483733	-14.096583	17.470887
0	10.863925	-6.513261	10.987516
-0.5	56.581232	-8.245028	14.357531
-1	66.880839	-12.065013	16.486627
-1.5	79.916693	-14.371581	16.160908
-2	98.615064	-13.887197	13.976914
-2.5	122.86965	-11.776955	11.605753
-3	141.755849	-9.644846	9.98945
-3.5	159.043182	-7.532695	8.656647
-4	171.81179	-6.02769	7.818384
-4.5	181.51083	-4.922872	7.220001
-5	189.108555	-4.110546	6.777619
-5.5	192.142379	-3.770999	6.583968
-6	194.284105	-3.54118	6.450626
-6.5	194.998429	-3.430603	6.384384
-7	194.957426	-3.385359	6.357407
-7.5	194.084083	-3.405177	6.374434
-8	193.017592	-3.441568	6.40847
-8.5	191.651105	-3.526092	6.470872

ตารางที่ 4.11 MEA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $0.75D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	306.620968	2.407909	-0.128346
5	301.234086	2.095194	0.190954
4.5	296.911092	1.790787	0.487684
4	290.413422	1.354806	0.897175
3.5	281.390399	0.770243	1.425351
3	270.048923	0.044968	2.064298
2.5	257.170915	-0.763317	2.83319
2	244.397013	-1.462031	3.772202
1.5	218.172059	-2.138222	4.88043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	314.76788	-4.208131	6.573133
0.5	72.798265	-9.942251	12.312556
0	42.457742	-4.870943	7.260843
-0.5	90.148278	-4.936843	9.663003
-1	96.595553	-5.955072	10.585489
-1.5	101.980225	-8.19018	11.220301
-2	113.54504	-9.474775	10.843463
-2.5	131.43436	-9.193645	9.77653
-3	149.021642	-8.059436	8.727375
-3.5	164.270798	-6.708688	7.822652
-4	178.779563	-5.265802	6.984927
-4.5	189.611463	-4.152705	6.401754
-5	198.156435	-3.283283	5.933968
-5.5	202.984539	-2.80825	5.664018
-6	205.41299	-2.54493	5.508399
-6.5	206.566179	-2.396756	5.417197
-7	206.801813	-2.318486	5.368881
-7.5	206.441682	-2.284255	5.350456
-8	205.60312	-2.289131	5.355543
-8.5	204.572105	-2.323004	5.380534

ตารางที่ 4.12 MEA กรณีที่ 2 ที่ระยะ (clearance) =  $1.0D_T$

Pile Tip	Axial , kN/m	Moment (-) , kN·m /m	Moment (+) , kN·m /m
5.5	306.646493	2.41056	-0.132097
5	301.172085	2.098947	0.18234
4.5	296.400229	1.778408	0.49576
4	289.981506	1.353209	0.900352
3.5	281.357821	0.787957	1.430723
3	270.974043	0.123775	2.057545
2.5	259.995383	-0.550707	2.752233
2	248.657861	-1.067949	3.549341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5	227.65623	-1.306793	4.368903
1	200.631676	-2.044188	4.945929
0.5	108.587715	-6.120436	7.933963
0	83.771863	-2.884451	4.550741
-0.5	129.458622	-1.976513	5.573602
-1	133.561068	-2.171788	5.870538
-1.5	134.847508	-3.235509	5.947676
-2	140.113143	-4.587721	6.344349
-2.5	153.622354	-5.266462	6.502233
-3	166.014211	-5.183204	6.432385
-3.5	179.886329	-4.516262	6.076844
-4	191.332635	-3.73817	5.70455
-4.5	201.670277	-2.908606	5.298667
-5	210.298434	-2.170045	4.911129
-5.5	214.765945	-1.76292	4.675939
-6	217.269441	-1.526469	4.53083
-6.5	218.680076	-1.379096	4.440157
-7	219.190683	-1.296125	4.385459
-7.5	218.942351	-1.254896	4.361712
-8	218.315598	-1.239523	4.356805
-8.5	217.298749	-1.249107	4.369356

สรุปผล อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA จากกรณีที่ 1 และ 2 อุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (กรณีที่ 1) จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่า อุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) (กรณีที่ 2)

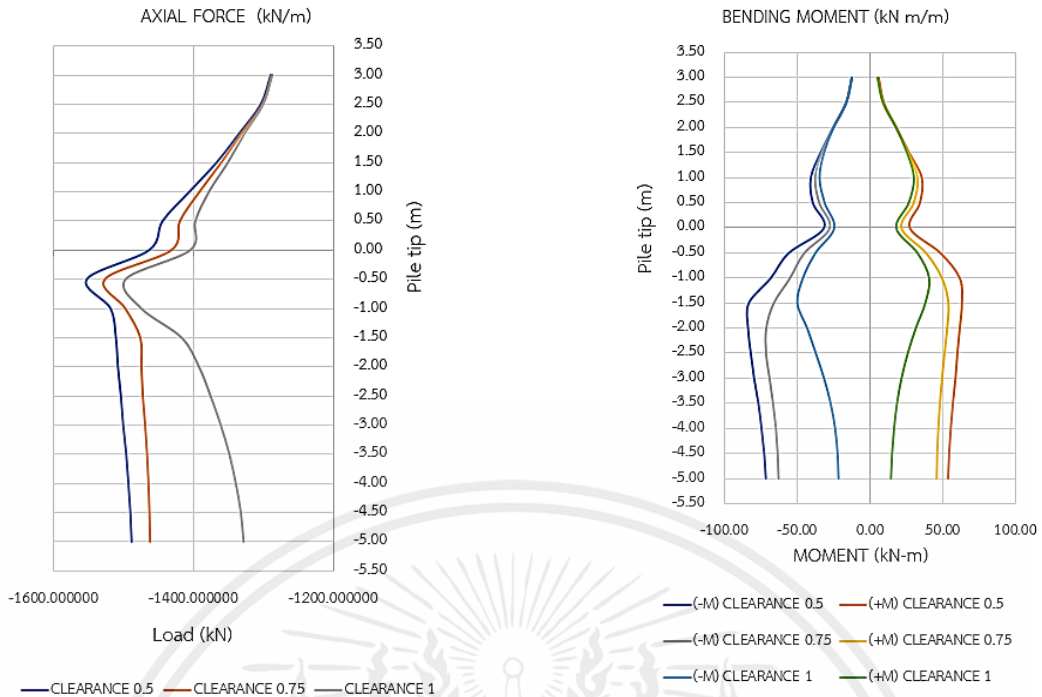
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในเมื่อพิจารณาอุโมงค์ 2 รูปแบบ ในชั้นดิน 2 กรณี จะเห็นได้ว่า อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่า อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA ที่ระยะ Clearance ที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า และอุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่าอุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) เนื่องจากค่า stiffness ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งน้อยกว่าดินเหนียวแข็ง

#### 4.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ อ้างอิงลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ไฟฟ้า MEA

หัวข้อนี้แสดงผลกระทบของเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์ ที่ทำให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ของอุโมงค์ 2 ขนาดแตกต่างกันไปตามลักษณะทางกายภาพ ประกอบไปด้วย อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA 6.30 ม. และอุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA 3.60 ม. จำลองเสาเข็มขนาด 2.00 ม. โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของ การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในอุโมงค์ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกน และโมเมนต์ดัดของอุโมงค์หลังจากรับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยนำผลมาเสนอในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบค่าความแตกต่าง

##### 4.3.1 อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA

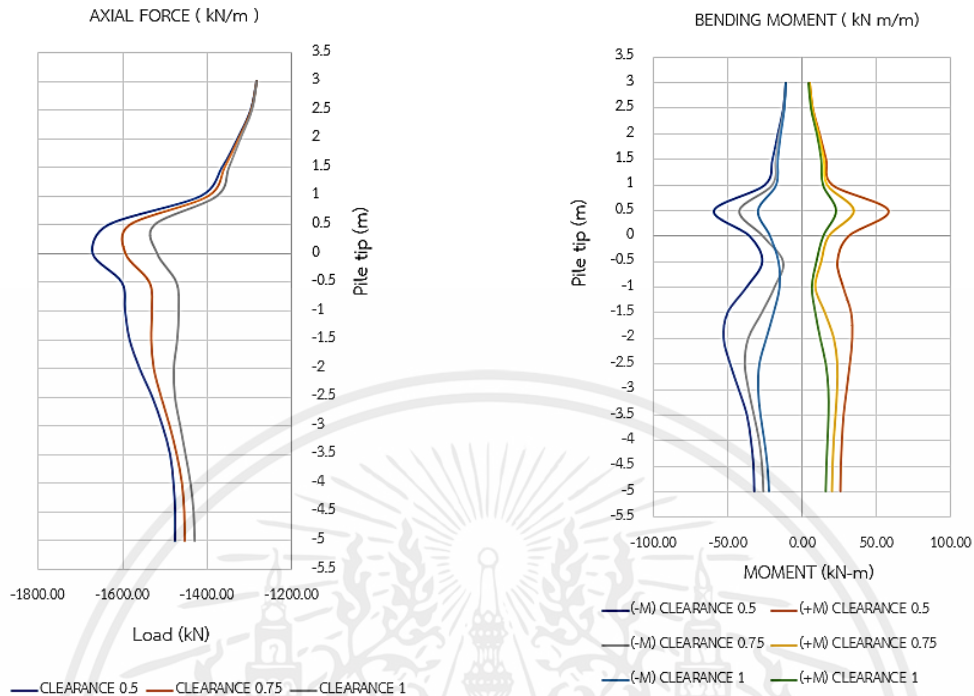
1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 1)

จากรูปที่ 4.1 ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $-0.5DT$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และค่าลดลงที่น้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-1.5DT$  ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $-1.0DT$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และค่าลดลงที่น้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0DT$  สำหรับกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็ง โมเมนต์เกิดค่าลดลงน้อยที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเส้น Spring line ( $0.0DT$ )

## 2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

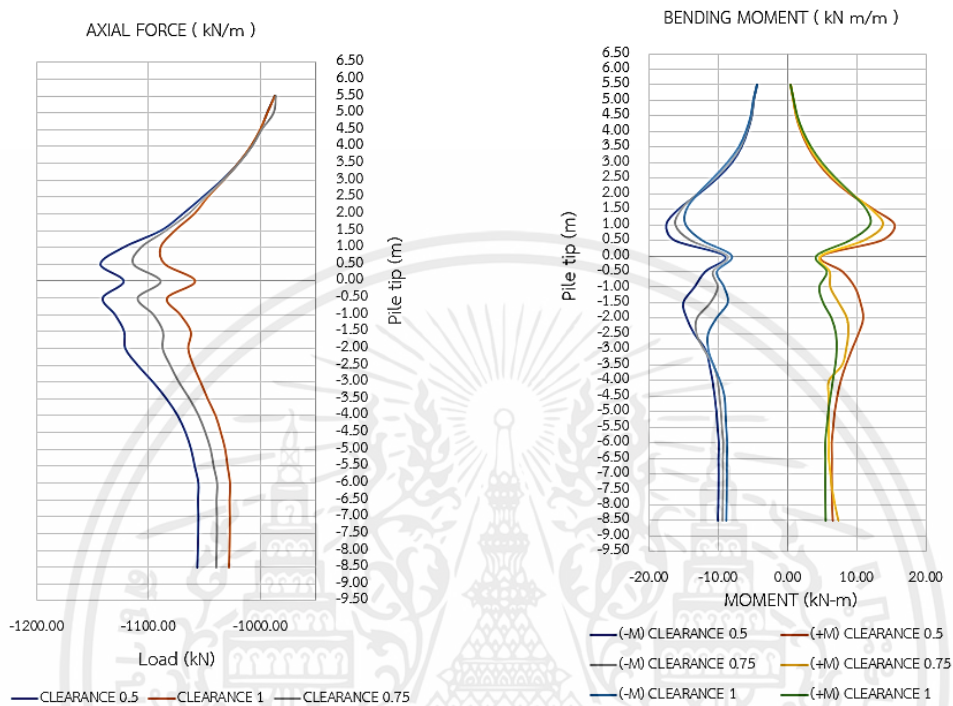


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 2)

จากรูปที่ 4.2 ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เส้น Spring line ( $0.0D_T$ ) สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-0.5D_T$  ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$  สำหรับกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน โมเมนต์เกิดค่าลดลงน้อยที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $(-0.5D_T)$

### 4.3.1 อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA

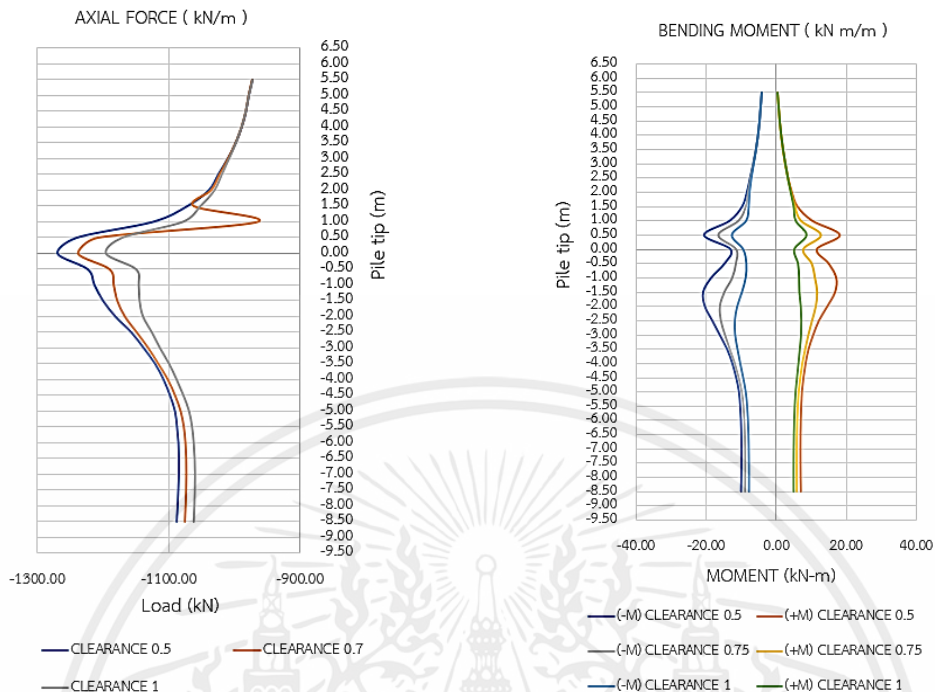
1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์กวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์คัตสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MEA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี ที่ 1)

จากรูปที่ 4.3 ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และค่าลดลงน้อยที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มวางที่ระดับเส้น Spring line ( $0.0D_T$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $(-0.5D_T)$  และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$  ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ที่ระดับ  $+1.0D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$  สำหรับกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็ง โมเมนต์เกิดค่าลดลงน้อยที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเส้น Spring line ( $0.0D_T$ )

## 2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MEA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณี ที่ 2)

จากรูปที่ 4.4 ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เส้น Spring line ( $0.0D_T$ ) สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าลดลงที่น้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-0.5D_T$  ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าลดลงที่น้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$  สำหรับกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน โมเมนต์เกิดค่าลดลงน้อยที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเส้น Spring line ( $0.0D_T$ )

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์เดิม ในกรณีเสาเข็มวางตัวเพียงด้านเดียวของอุโมงค์ จากผลการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์สูงสุดในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการก่อสร้างข้างเคียงอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRTA) ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มต่ออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง กรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เส้น Spring line ( $0.0D_T$ ) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $-1.0D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง สำหรับกรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$

2. อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า (MEA) ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มต่ออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง กรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เส้น Spring line ( $0.0D_T$ ) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ที่ระดับ  $+1.0D_T$  สำหรับกรณีวางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง สำหรับกรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน จะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ที่ระดับ  $+0.5D_T$  และค่าลดลงที่ละน้อยเมื่อปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าระดับ  $-2.0D_T$

3. การเปลี่ยนแปลงแรงภายในเมื่อพิจารณาอุโมงค์ 2 รูปแบบ ในชั้นดิน 2 กรณี จะเห็นได้ว่า อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่าอุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA ที่ระยะ Clearance ที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า และอุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงภายในมากกว่าอุโมงค์ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) เนื่องจากค่า stiffness ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งน้อยกว่าดินเหนียวแข็ง

4. เป็นไปได้ว่าการเพิ่มกำลังของโครงสร้างในผนังอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มที่อยู่ติดกันนั้นมีความสำคัญและไม่สามารถละเลยได้ แรงโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นที่เป็นไปได้เนื่องจากการก่อสร้างในอนาคตควรได้รับการพิจารณาในการออกแบบผนังในอุโมงค์ มิฉะนั้น จะต้องตรวจสอบผนังอุโมงค์ว่าสามารถต้านทานแรงเพิ่มเติมเนื่องจากการก่อสร้างที่วางแผนไว้ได้หรือไม่

**ข้อแนะนำ** การวิเคราะห์ในการศึกษานี้ ได้ทำการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นการพิจารณาจากเสาเข็มเพียง 1 ขนาด และยังไม่ครอบคลุมอุโมงค์ทุกประเภทในใต้ดินกรุงเทพมหานคร อีกทั้งยังไม่สามารถบอกได้ถึงผลกระทบหากมีการใช้เสาเข็มที่ขนาดหลากหลายมากกว่านี้อาจจะต้องพิจารณาเพิ่มเติม



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Lueprasert P., Jongpradist P., Ruangvirrojanakul K., Suwansawat S “**Dependence of Tunnel Deformation Due to Adjacent Pile Under Loading on Tunnel Geometry**” International Journal of GEOMATE Feb., 2019 Vol.16, Issue 54, pp.193 - 199
- [2] Mroueh H. and Shahrour I., “**Three-Dimension Finite Element Analysis of The Interaction Between Tunneling and Pile Foundation**” International Journal for Numerical Analytical Method in Geomechanics, 2002, pp. 217-230
- [3] Dias T. and Bezuijen A., “**Data Analysis of Pile–Tunnel Interaction**” Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 141, 2015, pp. 251–255
- [4] Jongpradist P., Kaewsri T., Sawatparnich A., Suwansawat S., Youwai S., Kongkitkut W. and Sunitsakul J “**Development of Tunneling Influence Zones for Adjacent Pile Foundation by Numerical Analyses**” Tunn. Undergr. Space Technol., vol. 34, 2013, pp.96-109
- [5] Mair, R.J., Taylor, R.N., Bracegirdle, A., “**Subsurface Settlement Profiles Above Tunnels in Clays**” Géotechnique, 43 (2), 1993, pp. 315-320
- [6] Lee, Y.-J., Bassett, R.H., “**A Model Test and Numerical Investigation on The Shear Deformation Patterns of Deep Wall-Soil-Tunnel Interaction**” Can. Geotech. J. 43, 2006, 1306–1323.
- [7] Malhotra M., Sahu V., Srivastava A and Misra A. “**Impact of Pile Foundation Adjacent to Tunnels in Sandy Stratum**” Indian Academy of Sciences, 2019 44:184
- [8] Schroeder F. C., Potts D. M. and Addenbrooke T. I. “**The Influence of Pile Group Loading on Existing Tunnels**” Geotechnique, vol. 54, 2004. pp. 351-362.
- [9] Heama N., Suwansawat S., Lueprasert P. and Jongpradist P. “**Study of Lining Behavior Affected by Adjacent Loading Pile in MRTA Blue Line Project**” Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2015.
- [10] Lueprasert P., Jongpradist P., Charoenpak K., Chaipanna P. and Suwansawat S. “**Three Dimensional Finite Element Analysis For Preliminary Establishment Of Tunnel Influence Zone Subject To Pile Loading**”, Maejo Int. J. of science technology, vol. 9, 2015. pp. 209-223.
- [11] Lueprasert P., Jongpradist P., Jongpradist P., and Suwansawat S. “**Numerical Investigation of Tunnel Deformation Due to Adjacent Loaded Pile and Pile-Soil-Tunnel Interaction**” Tunneling and underground space technology, 70, 2017, pp. 166-181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ “วิศวกรรมอุโมงค์”, ครั้งที่2, กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ มินิ เซอร์วิส ซัพพลาย 2554
- [13] ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน “การก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์ในประเทศไทย” พิมพ์ครั้งที่1 สำนักพิมพ์ หจก.พีริ-วัน 2557
- [14] Brundan W. , Danno H. , “Tunnel boring machines for extremely tight radius curves” Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, 2020, pp. 241-248.
- [15] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี “โครงการพัฒนาเขตคุ้มครองและมาตรการป้องกันท่อส่งน้ำและอุโมงค์ส่งน้ำจากการก่อสร้างในบริเวณข้างเคียง” กรกฎาคม 2561
- [16] Suwansawat S. “Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks.” Ph.D.Thesis of Massachusetts Institute of Technology,2002
- [17] สมชาย จิราวัฒน์นาการ , กฤษดา ตระกูลจั่นนาค และ พรเกษม จงประดิษฐ์ “A Study on Responses of Tunnel Segmental Lining due to Adjacent Loaded Pile by Numerical Analysis” The 24 th National Convention on Civil Engineering, 2019
- [18] Land Transport Authority, “Code of Practice for Railway Protection”, Development and Building Control Department, Singapore, 2004.
- [19] Mass Rapid Transit Authority of Thailand, “Restrictive Guideline for Protection Zone in Blue Line Project”, Engineering Specifications for MRT Tunnels, Bangkok, 2009 (in Thai)
- [20] Yong-JooLee, Richard H.Bassett “Influence Zones for 2D Pile-Soil-Tunnelling Interaction Based on Model Test and Numerical Analysis” Tunnelling and Underground Space Technology, May 2007, Pages 325-342
- [21] P. Jongpradis., N. Haema and P. Lueprasert “Influence of Pile Row Under Loading on Existing Tunnel” Tunnels and Underground, April 2019, pp. 5711-5719.
- [22] Srikaewsai P., Heama N., Lueprasert P and Suwansawat S. “Investigation of Tunnel Response Due to The Effect of Adjacent Loaded Pile Row by 3d Simulation Analysis” Geotechnique, Construction Materials & Environment, Kyoto, Japan, 3-5 November 2021 pp. 122-127.
- [23] 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.
- [24] Lueprasert P., Jongpradis P., Heama N., Ruengwirojjanakul K and Suwansawat S. “3D FEA of EPB Shield Tunnel Excavation Using Shell Element and Grouting Layer” Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Prust R. E., Davies J. and Hu S. “Pressure meter Investigation for Mass Rapid Transit in Bangkok, Thailand”. Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board. 2005. pp. 207-217.

[26] ณัฐธิดา ขวัญลิขิต “การวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ” 2560

[27] Skempton A.W. “Cast in-situ Bored Piles in London Clay”, Geotechnique. vol. 9. 1959. pp. 153-173.

[28] กชมน เรืองวิโรจนกุล “อิทธิพลของขนาดและความหนาของคานาอุโมงค์ต่อการเสีรูปของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง” 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

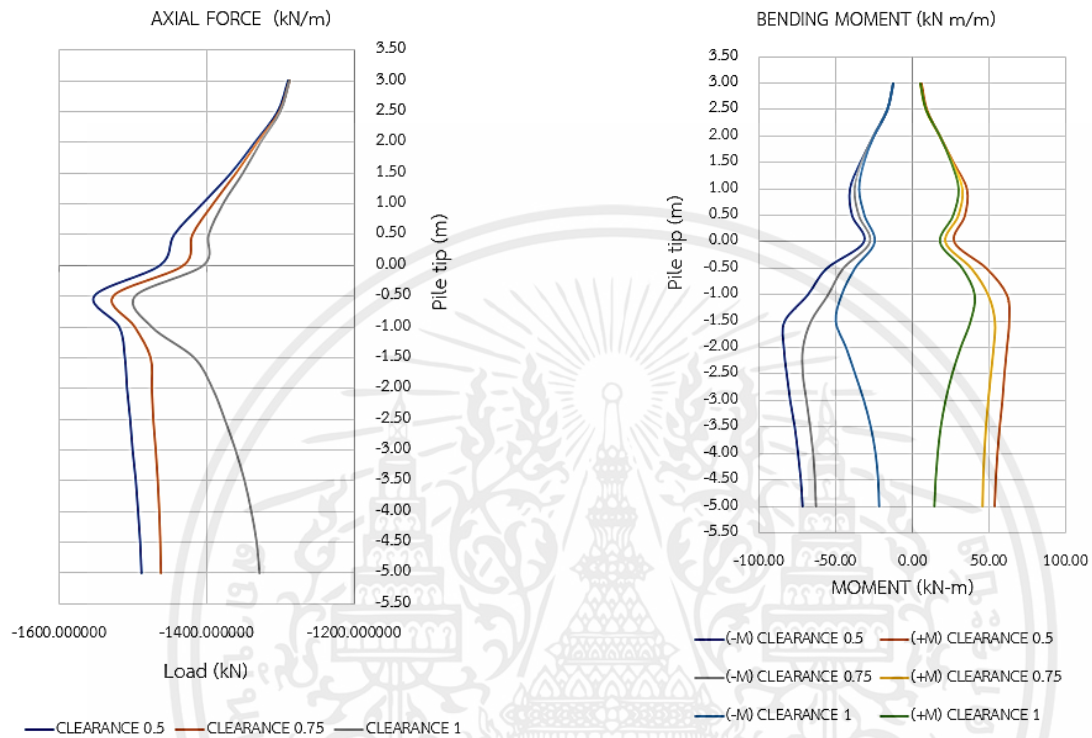


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

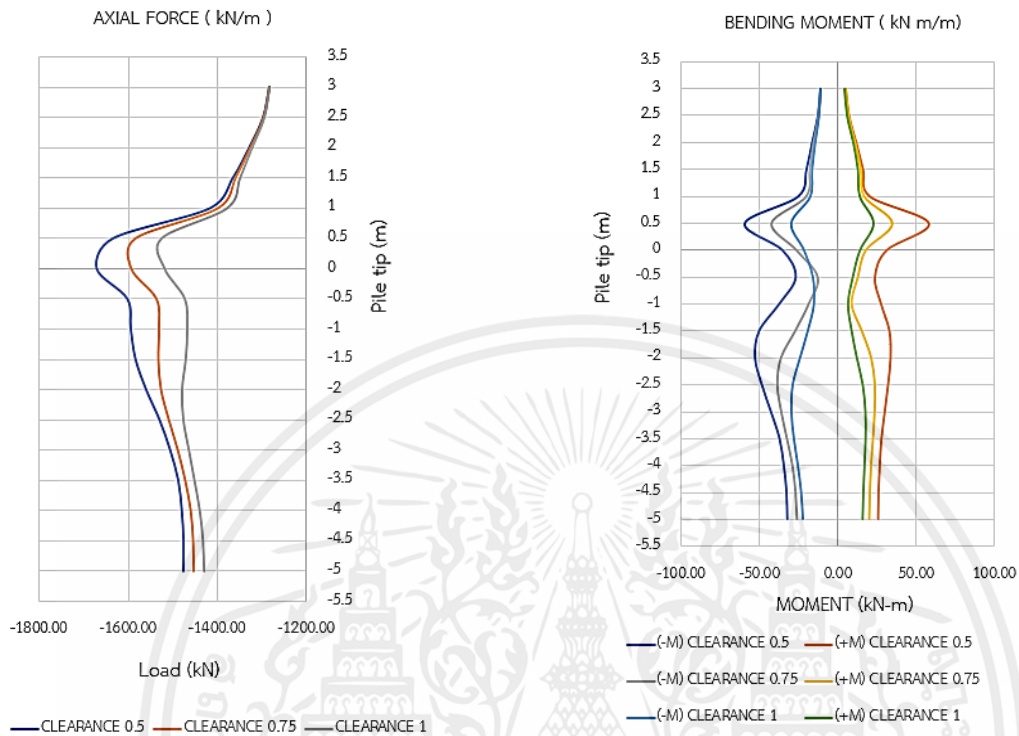
### อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA

1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์กวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์  
ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 1)

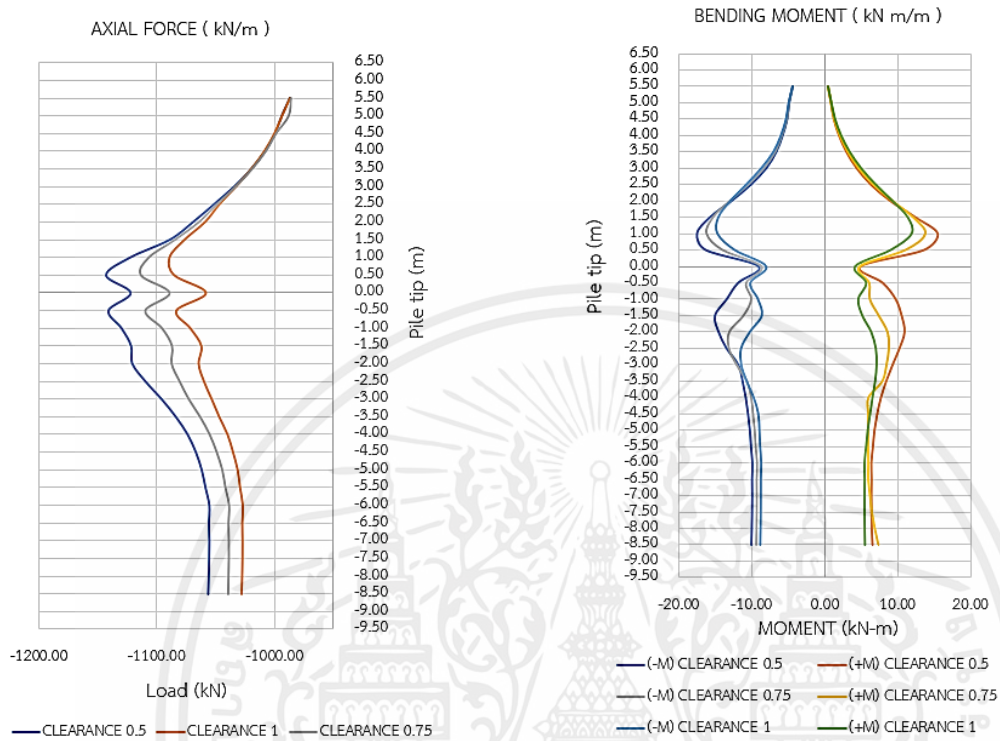
## 2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ตัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MRTA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 2)

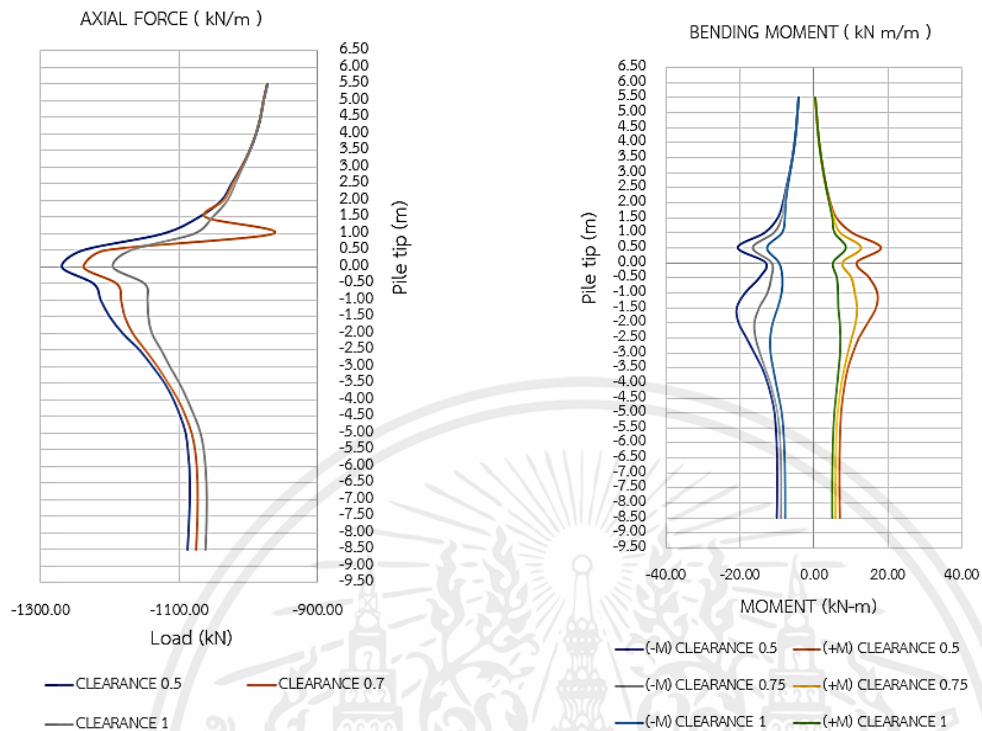
## อุโมงค์ส่งสายไฟฟ้า MEA

1) กรณีที่ 1 โครงสร้างอุโมงค์ถูกวางไว้ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MEA เสาเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 1)

## 2) กรณีที่ 2 โครงสร้างอุโมงค์ถูกลากวางไว้บนชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)



รูปเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในของอุโมงค์ในลักษณะแรงในแนวแกนสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) และโมเมนต์  
 ดัดสูงสุด ( $M_{MAX}$ ) อุโมงค์ MEA เส้าเข็ม 1.0 ม. (กรณีที่ 2)