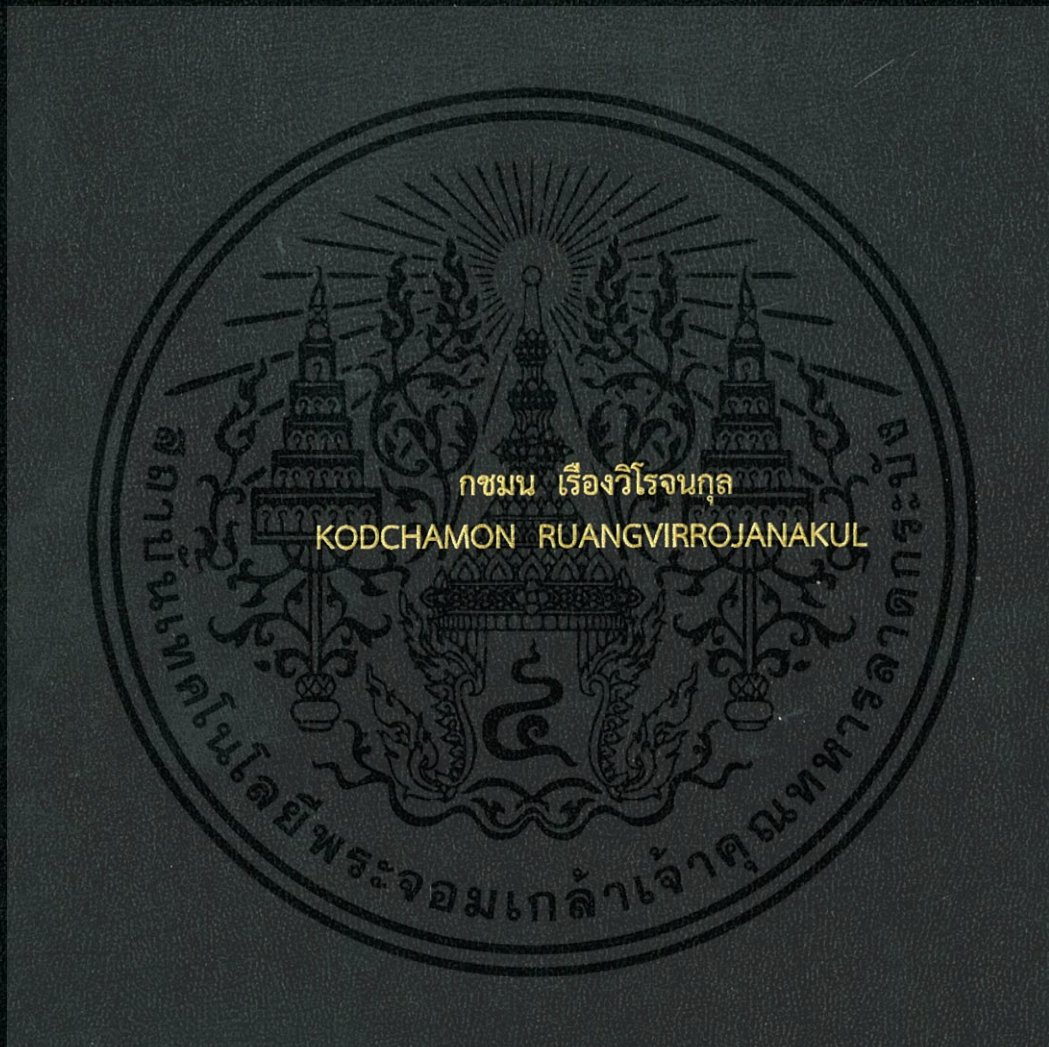


อิทธิพลของขนาดและความหนาของคานาอุโมงค์ต่อการเสีรูปร่างของอุโมงค์
เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

EFFECT OF SIZE AND THICKNESS OF TUNNEL LINING ON TUNNEL
DEFORMATION DUE TO ADJACENT LOADED PILE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-093-219

อิทธิพลของขนาดและความหนาของดาตอูโมงค์ต่อการเสีรูบของอูโมงค์
เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

EFFECT OF SIZE AND THICKNESS OF TUNNEL LINING ON TUNNEL
DEFORMATION DUE TO ADJACENT LOADED PILE



T148647

กชมน เรืองวิโรจนกุล

KODCHAMON RUANGVIRROJANAKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148647
ในเดือนปี 174 2560

b. 00265316
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-093-219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF SIZE AND THICKNESS OF TUNNEL LINING ON TUNNEL
DEFORMATION DUE TO ADJACENT LOADED PILE



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

2016

KMITL-2016-EN-M-093-219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิธิพลของขนาดและความหนาของดาดูโมงค์ต่อการเสีรูปของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง

Thesis Title Effect of Size and Thickness of Tunnel Lining on Tunnel Deformation Due to Adjacent Loaded Pile

นักศึกษา นางสาวกชมน เรืองวิโรจนกุล

รหัสประจำตัว 58601279

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร


หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-093-219

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	
ผศ.ดร.ขนาดล	คงสมบูรณ์	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ศ.ดร.สุชัชวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของขนาดและความหนาของดาดอูโมงค์ต่อการเสีรูปของอูโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง
นักศึกษา	นางสาวกชมน เรืองวิโรจนกุล
รหัสประจำตัว	58601279
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์.ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและความหนาของดาดอูโมงค์ต่อการเสีรูปของอูโมงค์เดิมเนื่องจากผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยมุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของอูโมงค์ กับการเสีรูปที่เกิดขึ้นต่ออูโมงค์ การศึกษานี้เสนอค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างอูโมงค์ (out-of-roundness) เป็นตัวชี้วัดระดับการเสีรูปของผนังอูโมงค์ จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าสามารถได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างอูโมงค์กับพารามิเตอร์ไร้นหน่วยในเทอมอัตราส่วนค่าของขนาดและความหนาของอูโมงค์ นอกจากนี้ระบุได้ว่าจากกรณีชีวิตลักษณะอูโมงค์จาก โครงการอูโมงค์ส่งน้ำเกิดค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างมากกว่าอูโมงค์รถไฟฟ้ายกใต้สถานการณั้รับแรงจากเสาเข็มข้างเคียงเดียวกัน

Title	Effect of size and thickness of tunnel lining on tunnel deformation due to adjacent loaded pile.
Student	Miss.Kodchamon Ruangvirrojanakul
Student ID.	58601279
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Professor.Dr.SuchatveeSuwansawat
Thesis Co-Advisor	Associate Prof.Dr.PornkasemJongpradist

ABSTRACT

This thesis analyzed the influence of size and thickness of lining on tunnel deformation due to adjacent pile under loading on existing tunnels by using numerical analysis. The relationship between the tunnel deformation and the size and thickness of lining is aimed to be established. The out-of-roundness value is proposed in this study to represent the degree of tunnel deformation. From a series of parametric study, a relationship between the out-of-roundness and dimensionless parameter, which include the size and thickness of lining, can be successfully established. The numerical results also reveal that, under same condition regarding to the adjacent loaded pile, the degree of deformation of MWA is larger than that of the MRTA.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์เกี่ยวกับผนังอุโมงค์

ขอขอบคุณ นายประทีป หลือประเสริฐ และนายณฤนาถ เหมะ รุ่งที่ปริญาเอกที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้เป็นอย่างดีและขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ร่วมเป็นกำลังใจสำคัญ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กชมน เรืองวิโรจนกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพฯ.....	4
2.1.1 ข้อมูลโครงการที่ทำการศึกษา.....	5
2.1.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA).....	5
2.1.3 โครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง; Metropolitan Rapid Transit Authority (WMA).....	7
2.2 วิธีการก่อสร้างอุโมงค์โดยหัวเจาะ (Tunnel construction by Tunnel Boring Machine, TBM).....	10
2.2.1 หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	11
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อสร้างอุโมงค์.....	13
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry).....	13
2.3.2 สภาพทางธรณีวิทยา(Geological conditions).....	13
2.3.3 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors).....	14
2.4 พฤติกรรมทั่วไปของเสาเข็มเจาะ.....	14
2.4.1 พฤติกรรมทั่วไป.....	14
2.4.2 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว.....	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การวิเคราะห์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม.....	18
2.5 การวิเคราะห์ผนังอุโมงค์.....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	22
3.1 แนวทางการวิเคราะห์.....	22
3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์จากสองโครงการ MRTA และ MWA.....	23
3.2.1 หลักการพิจารณาปัญหา.....	23
3.2.2 กรณีศึกษา	24
3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
3.3 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ.....	28
3.4 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	33
3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์.....	35
บทที่ 4 การวิเคราะห์และประเมินผล.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์อ้างอิงลักษณะอุโมงค์ ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTAและอุโมงค์ส่งน้ำ MWA.....	39
4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์แตกต่างกัน.....	46
4.3.1 การเปรียบเทียบขนาดอุโมงค์ที่ต่างกัน	46
4.3.2 การเปรียบเทียบความหนาผนังอุโมงค์แตกต่างกัน.....	47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์	49
4.4.1 ศึกษาตัวแปรขนาดอุโมงค์และความหนา.....	49
4.4.2 การสังเคราะห์ข้อมูลระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	50
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยทั่วไป [8][9].....	4
3.1 คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง [24]	27
3.2 คุณสมบัติของวัสดุ [25]	28
3.3 ตารางแสดงการจำลองขนาดอนุโมเมนต์และผนังอนุโมเมนต์ที่ทำการวิเคราะห์.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [10].....	5
2.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA).....	6
2.3 สภาพชั้นดินในส่วนเหนือของโครงการ.....	6
2.4 สภาพชั้นดินในส่วนใต้ของโครงการ.....	7
2.5 เส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำที่ทำการศึกษา.....	8
2.6 สภาพชั้นดินของอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง Metropolitan Rapid Transit Authority (WMA).....	9
2.7 ภาพตัดโครงสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ.....	9
2.8 ส่วนประกอบหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล [12].....	11
2.9 แรงแดันน้ำหัวเจาะ.....	12
2.10 การทำงานของแม่แรงไฮดรอลิกในหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	12
2.11 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว.....	15
2.12 แรงจุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบเสาเข็ม.....	17
2.13 กระเปาะความเค้นของเข็มต้นเดียวและเสาเข็มกลุ่ม.....	18
2.14 ลักษณะการวางตัวของอุโมงค์และเสาเข็มและแนวเขตอิทธิพลใหม่ [3].....	19
2.15 ระยะเวลาตลอดภัยของอุโมงค์ [6].....	20
2.16 ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ [11].....	20
3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์.....	22
3.2 รูปแบบการพิจารณา.....	23
3.3 รูปแบบชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์.....	24
3.4 ภาพตัดแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์.....	25
3.5 รูปแบบการวางตัวของปลายเสาเข็ม.....	26
3.6 แบบจำลองการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.7 แบบจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ในสามมิติ modified after [6].....	29
3.8 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้งและแนวราบ.....	31
3.9 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด.....	33
3.10 แบบจำลองสองมิติ.....	35
3.11 การวิเคราะห์ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ out of roundness.....	36
3.12 ชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11].....	37
3.13 โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างวงกลม [29].....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และviii ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	40
4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	41
4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	41
4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	42
4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	43
4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	43
4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	44
4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	44
4.9 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์.....	45
4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	46
4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	47
4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	48
4.13 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน.....	48
4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดต่างกัน ให้ความหนาผนังอุโมงค์คงที่เท่ากัน 0.30 เมตร.....	49
4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดคงที่ 4.07 เมตร ให้ความหนาผนังอุโมงค์ต่างกัน.....	50
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ viii

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับขนาดอุโมงค์.....	51
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความลึกเสาเข็ม.....	52
4.19 อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์.....	53
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับปัจจัยที่มีผลกระทบ.....	53
4.21 แผนภาพประเมินค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ จากความสัมพันธ์ขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	54
4.22 แผนภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์ เทียบกับเกณฑ์ข้อกำหนด.....	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและปัญหา

ปัจจุบันพื้นที่ก่อสร้างในกรุงเทพมหานครบนดินมีอย่างจำกัด ในขณะที่ความต้องการการพัฒนากระบวนการขนส่งมวลชนและระบบสาธารณูปโภคเพื่อการแก้ปัญหาการจราจรและรองรับการอุปโภคหรือบริโภคสำหรับประชากรกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การก่อสร้างใต้ดินโดยเฉพาะอุโมงค์จึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาดังกล่าว เช่น โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ระบบน้ำประปา ไฟฟ้าและก๊าซ เป็นต้น ซึ่งแนวเส้นทางของอุโมงค์ส่วนใหญ่จะวางตัวไปตามแนวถนนใหญ่ในบริเวณพื้นที่เขตเศรษฐกิจ แต่ด้วยพื้นที่ที่จำกัดในการก่อสร้างบนผิวดิน อนาคตอันใกล้หากมีการก่อสร้างอาคารหรือโครงสร้างพื้นฐานเพื่อแก้ไขปัญหาจราจร เช่น สะพานข้ามแยก อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียงที่มีอุโมงค์ใต้ดินเดิมอยู่ได้ ผลกระทบของการก่อสร้างเหล่านี้อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุโมงค์ ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่ออุโมงค์เดิมเนื่องจากเสาเข็มซึ่งเป็นฐานรากของโครงสร้างที่ใช้รองรับน้ำหนักในพื้นที่ดินอ่อนซึ่งเป็นลักษณะส่วนใหญ่ในกรุงเทพมหานครจึงมีความสำคัญ

การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างใต้ดิน เช่น อุโมงค์ เสาเข็ม และกำแพงกันดิน นั้นมีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากตัวแปรมีจำนวนมาก วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งในปัจจุบันได้พัฒนาและเป็นที่ยอมรับในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนดังกล่าวจึงได้รับความนิยมใช้เพื่อประเมินผลกระทบก่อนการก่อสร้างจริง รวมถึงการใช้ในการออกแบบ เช่น [1] ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อออกแบบโครงสร้างผนังอุโมงค์ในประเทศเนเธอร์แลนด์

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มรับแรงกับอุโมงค์ โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นที่การศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ต่อเสาเข็มรับแรง เช่น [2] พบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มกับตำแหน่งอุโมงค์มีความสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ต่อมา [3] ได้ศึกษาโดยพิจารณาปัจจัยของระยะเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น และเสนอเป็นขอบเขตอิทธิพลของการก่อสร้างอุโมงค์ที่กระทบต่อเสาเข็มข้างเคียง

สำหรับการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมพบว่ายังมีจำนวนที่น้อยมาก เช่น การศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มจากอาคารงานอาคาร 15 ชั้น ที่มีต่ออุโมงค์รถไฟฟ้า ณ เมืองลอนดอน ประเทศอังกฤษ [4] ได้วิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแบบแถวและกลุ่ม แต่งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาระยะปลายเสาเข็มระดับเดียวและวางตัวอยู่ในดินชนิดเดียว ต่อมาในปี วิธีวิเคราะห์ดังกล่าวได้ใช้ในการศึกษาของ [5] โดยเพิ่มปัจจัย คือ ชั้นดินที่อุโมงค์วางตัว 4 กรณี โดยใช้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย

(The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) และเพิ่มการพิจารณาตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างปลายเชื่อมกับอุโมงค์ โดยงานศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาเฉพาะอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว ในปีเดียวกัน [6] ได้นำเสนอพื้นที่อิทธิพลสำหรับผลกระทบที่เกิดจากเสาเข็มรับแรงที่อยู่ข้างเคียงที่มีต่ออุโมงค์โดยใช้การพิจารณาผลกระทบของเสาเข็มแถวที่มีต่ออุโมงค์เดิมในกรณีเดียวกันกับงานวิจัยของ [5]

จากการศึกษาของ [5] [6] ได้ศึกษาขนาดอุโมงค์เพียงขนาดเดียวคืออุโมงค์รถไฟฟ้าขนาด 6.30 เมตร ซึ่งมีขนาดผนังอุโมงค์ขนาดเดียวกัน คือ 0.30 เมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังไม่สามารถครอบคลุมถึง อุโมงค์ที่มีอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโครงสร้างที่เป็นรูปแบบท่อ ขนาดและความหนาจะเป็นอัตราส่วนสัมพันธ์กัน [7] นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่จะประเมินผลกระทบต่ออุโมงค์ในเทอมของขนาดเป็นส่วนใหญ่โดยไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาของอุโมงค์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงที่มีต่อผนังอุโมงค์เดิมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยประเมินความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาของอุโมงค์ที่ต่างกัน กับผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยใช้ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) เป็นตัวชี้วัด ต้นแบบผนังอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority ,MWA)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมอุโมงค์ที่มีขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ต่างกัน เมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกข้างเคียง โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ที่เปลี่ยนแปลงไป
2. เพื่อศึกษาแนวทางประเมินผลกระทบของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มรับแรงวางตัวทางด้านข้างได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. แบบจำลองของผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous ring)
2. การศึกษาวิเคราะห์อุโมงค์เดี่ยวเป็นหลัก โดยมีเสาเข็มวางตัวทางด้านเดียวของอุโมงค์เท่านั้น
3. การศึกษาในส่วนที่หนึ่ง พิจารณากรณีศึกษากรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งเท่านั้น
4. การศึกษาในส่วนที่สอง ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์พิจารณาเพียงกรณีศึกษากรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พิจารณาระดับปลายเสาเข็มที่ tunnel spring line และอุโมงค์วางตัวที่ความลึก 20 เมตร
6. การศึกษาขั้นขั้นตอนการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม
7. การศึกษานี้ไม่คำนึงถึงผลกระทบของท่อเหล็กภายในอุโมงค์ส่งน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

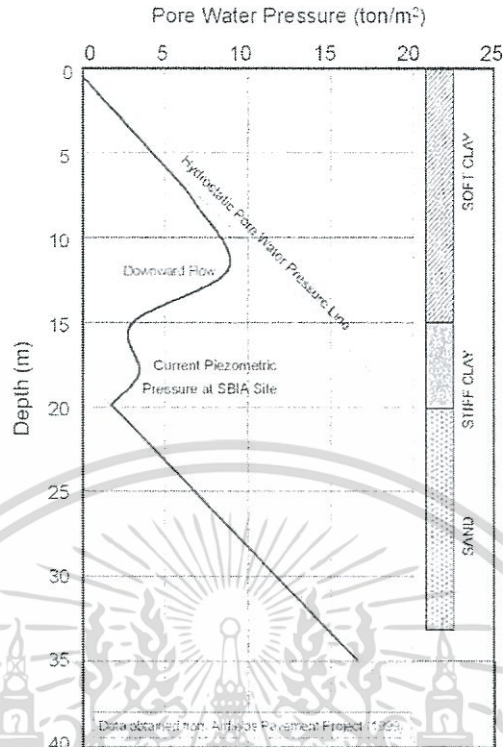
2.1 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพฯ

กรุงเทพฯตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาทำให้มีสภาพชั้นดินที่หลากหลาย ซึ่งการจัดเรียงชั้นดินแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 สามารถแบ่งสภาพชั้นดินออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินถม ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ชั้นทราย (Sand) ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายแน่น (Very dense sand)

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยทั่วไป [8][9]

ประเภทของชั้นดิน	γ (kN/m^3)	c (kN/m^2)	N (blows ft)	E (kN/m^2)	ν	K_0	ϕ
ชั้นดินถม	17	20	-	7,000	0.4	0.7	-
ชั้นดินเหนียวอ่อน	16	15	-	5,000	0.4	0.75	-
ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง	17	20	-	7,000	0.4	0.7	-
ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่หนึ่ง)	19	100	20	50,000	0.3	0.6	-
ชั้นทราย (ชั้นที่หนึ่ง)	20	-	30	70,000	0.3	0.5	36
ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (ชั้นที่สอง)	20	150	30	75,000	0.3	0.5	-
ชั้นทรายแน่น (ชั้นที่สอง)	20	-	35	80,000	0.3	0.4	40

ตั้งแต่ระดับความลึก 6 เมตรจากผิวดิน ความดันน้ำมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non-hydrostatic) ซึ่งเกิดจากการสูบน้ำบาดาล จากการสำรวจพบว่า ในชั้นดินเหนียวความดันน้ำที่วัดได้มีค่าไม่คงที่และค่อนข้างมีค่ากระจายหากนำมาสร้างกราฟ ที่ระดับความลึก 20 เมตร ซึ่งเป็นชั้นทรายพบว่า ความดันน้ำมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่จุดบนสุดของชั้นทรายเป็นต้น แสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [10]

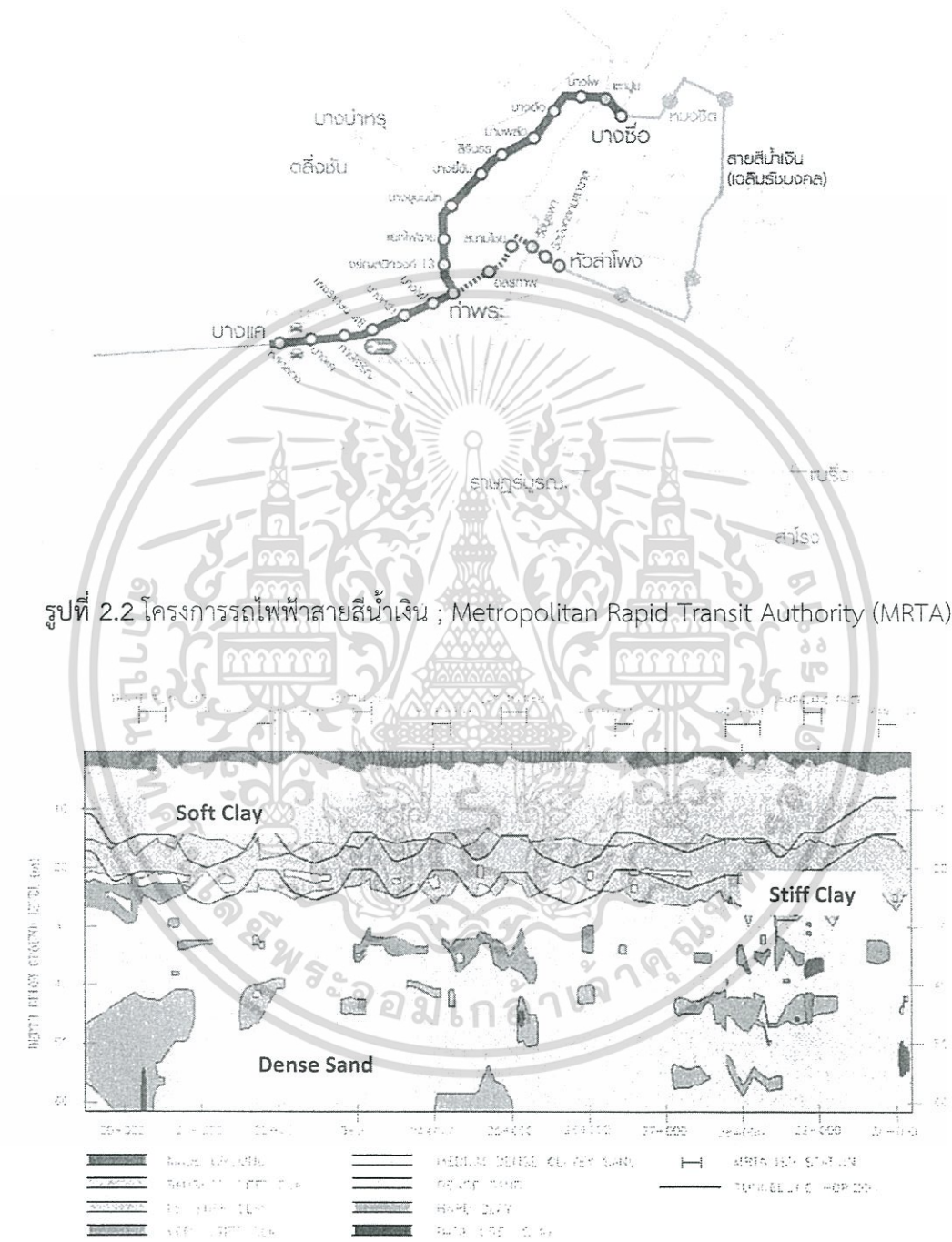
2.1.1 ข้อมูลโครงการที่ทำการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีผลต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม โดยมีปัจจัยศึกษาเพิ่มเติม คือ ขนาดของอุโมงค์ที่แตกต่างกันสองขนาด ประกอบไปด้วยโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าข้ามหอนคร สายเฉลิมรัชมงคล หรือโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง ; Metropolitan Waterworks Authority (MWA) ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลโครงการดังต่อไปนี้

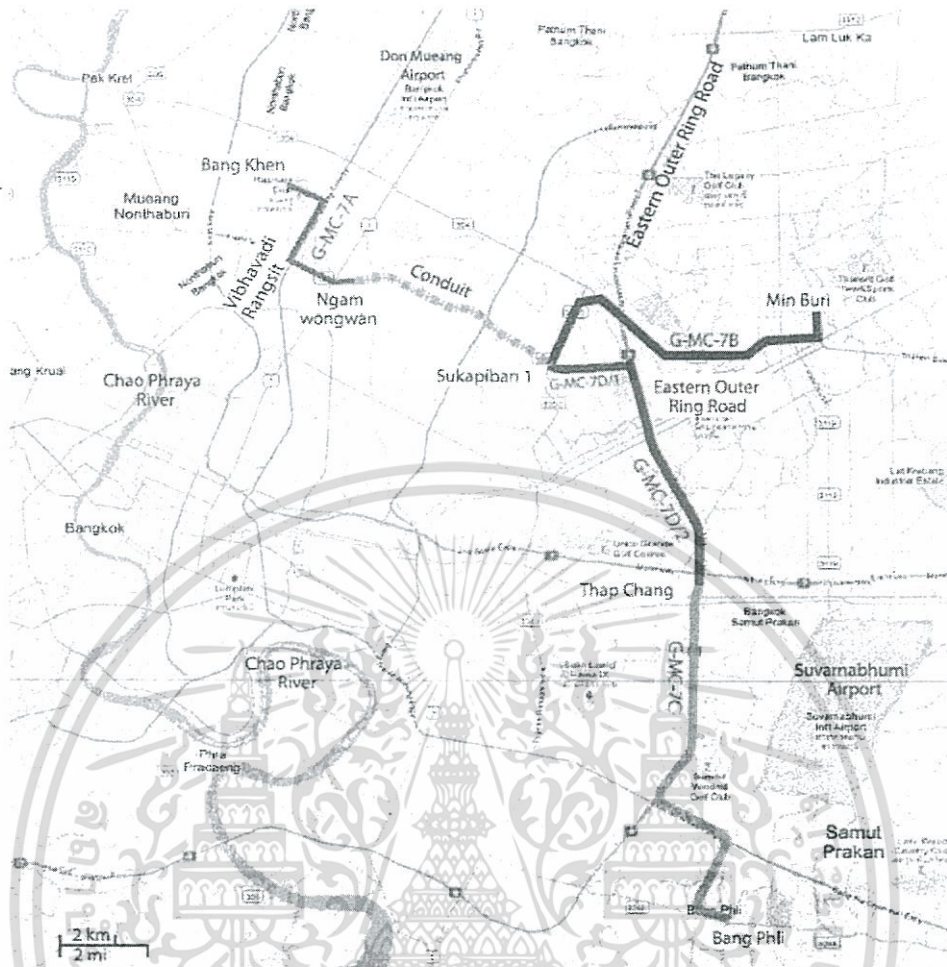
2.1.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA)

โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน เป็นรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย โดยมีเส้นทางอยู่ในเขตพื้นที่ บางซื่อ หัวลำโพง ท่าพระ บางแค ตามรูปที่ 2.2 รูปแบบโครงการเป็นอุโมงค์คู่รางเดี่ยว คือ มีอุโมงค์สองอุโมงค์ขนานกัน และแต่ละอุโมงค์จะเดินรถทางเดียวในช่วงเวลาการเดินรถปกติ โครงสร้างอุโมงค์เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกออกแบบให้มีลักษณะยึดหยุ่น และมีระบบกันน้ำซึมเข้าในอุโมงค์ ภายในอุโมงค์มีการติดตั้งรางวิ่งรถไฟ รางที่สาม ทางเดินซ่อมบำรุง อุปกรณ์ระบบระบาย

อากาศ ระบบดูดอากาศใต้ชานชาลา และระบบตรวจจับความร้อน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.7 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.3 เมตร มีความหนาผนังอุโมงค์ 0.30 เมตร



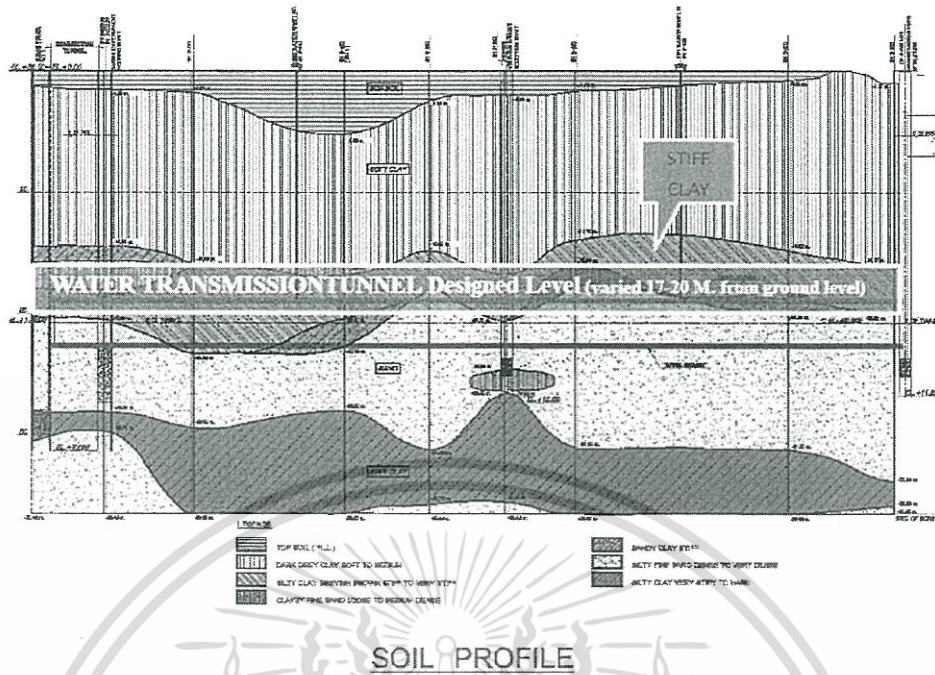
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำที่ทำการศึกษา

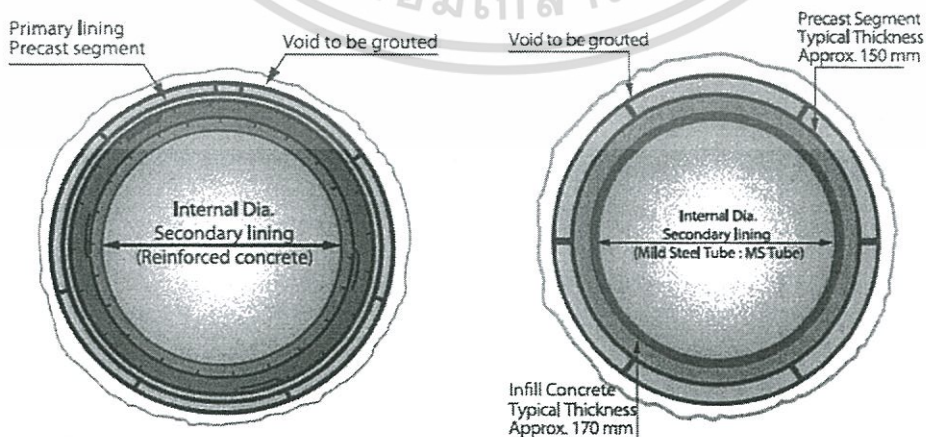
โดยขนาดอุโมงค์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2,000-3,400 มม. วางตัวในชั้น ดินเหนียวแข็ง (stiff clay) ดังรูป 2.6 มีความลึกประมาณ 17-20 เมตร มีตั้งแต่การใช้เทคนิคต่างๆแบบ Manual Shield , Mechanical Shield , Slurry Shield , Semi-Mechanical Shield ในการก่อสร้าง แต่ปัจจุบันได้ไปจนถึงแบบที่ใช้เทคนิคที่ทันสมัยอย่าง EPB Shields ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outside shield diameter) ที่ใช้มีตั้งแต่ 3.16-4.56 ม. ปัจจุบันระบบโครงข่ายอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงมีการขุดเจาะอุโมงค์มากกว่า 130 กิโลเมตร ครอบคลุมจังหวัดนนทบุรี สมุทรปราการและกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 สภาพชั้นดินของอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง Metropolitan Rapid Transit Authority (WMA)

อย่างไรก็ตามการขุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง ได้กำหนดให้มีระบบอัดอากาศในอุโมงค์ เพื่อป้องกันการพังทลายของชั้นดิน แม้ว่าจะมีการออกแบบให้อุโมงค์วางอยู่ในชั้นดินแข็งแล้วก็ตาม แต่การดำเนินงานก่อสร้างผู้รับเหมาไม่สามารถจะรู้สภาพของชั้นดินได้ตลอดแนวการขุดเจาะอุโมงค์ ดังนั้นการขุดเจาะอาจเผชิญกับชั้นทราย (Sand Pocket) หรือชั้นดินอ่อน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระบบอัดอากาศเพื่อต้านทานการพังทลายของดินหน้าหัวขุดเจาะ และเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.7 ภาพตัดโคจรสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ส่งน้ำในยุคแรกของการประปานครหลวง [11] มีขนาดตั้งแต่ 2.0-3.4 ม. ก่อสร้างโดยใช้หัวเจาะแบบเก่า ตามสภาพชั้นดินที่พบในโครงการส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวแข็ง แต่ก็ยังพบชั้นดินแปรปรวนตามแนวอุโมงค์บ้างแห่ง ทำให้เกิด Ground Loss หลายแห่งการก่อสร้างผนังอุโมงค์ในช่วงแรกเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งผนังชั้นนอกและชั้นใน เมื่อเกิดการทรุดตัวเพียงเล็กน้อยจึงทำให้เกิดการรั่ว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำในระบบและก่อให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงและด้านบนของอุโมงค์ส่งน้ำ การประปานครหลวงจึงเปลี่ยนผนังชั้นในเป็นท่อเหล็กเหนียว เนื่องจากลดปัญหาการรั่วซึม ดังรูป 2.7

หัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุลที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.07 ม. เคลื่อนที่ด้วย Hydraulic Jacks ทั้งสิ้น 12 ตัว มีแรงถีบสูงสุด 1200 ตัน แผงควบคุม (Control Panel) ของหัวเจาะจะอยู่บริเวณ Backup Frame ซึ่งผู้ควบคุมจะสามารถทราบสถานะภาพของหัวเจาะได้ตลอดเวลา เพื่อที่จะดำเนินการขุดเจาะให้เป็นไปตามทิศทางที่กำหนด นอกจากนี้ยังสามารถส่งข้อมูลแบบ Real Time ไปยังสำนักงานสนามให้ทราบสถานะภาพได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในระหว่างการขุดเจาะได้มีการตรวจสอบสภาพอากาศภายในอุโมงค์ด้วยเครื่องตรวจอากาศแบบพกพา เพื่อตรวจสอบปริมาณออกซิเจน และก๊าซพิษต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วผนังอุโมงค์ชั้นนอกที่เป็นคอนกรีตมีความกว้าง 1.10-1.20 เมตร. หนา 15 ซม. จำนวน 6 ชั้น ประกอบเป็น 1 วง ที่มีขนาดภายในตั้งแต่ 2.70-3.80 เมตร. ผนังอุโมงค์ชั้นใน (Secondary Lining) วัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับแรงดันน้ำจากการส่งน้ำผ่านระบบสูบน้ำ โดยในบางกรณีอาจต้องรับแรงดันที่สูงถึง 7.5 บาร์ จึงได้รับการออกแบบให้เป็นท่อเหล็กเหนียว ผลิตเป็นท่อนๆ จากโรงงานความยาวท่อนละประมาณ 6 เมตร. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.30-3.40 เมตร. หนา 18 มม. ท่อเหล็กเหนียวต้องได้รับการตรวจสอบคุณภาพจากโรงงานผลิตก่อนขนส่งมาใช้งาน

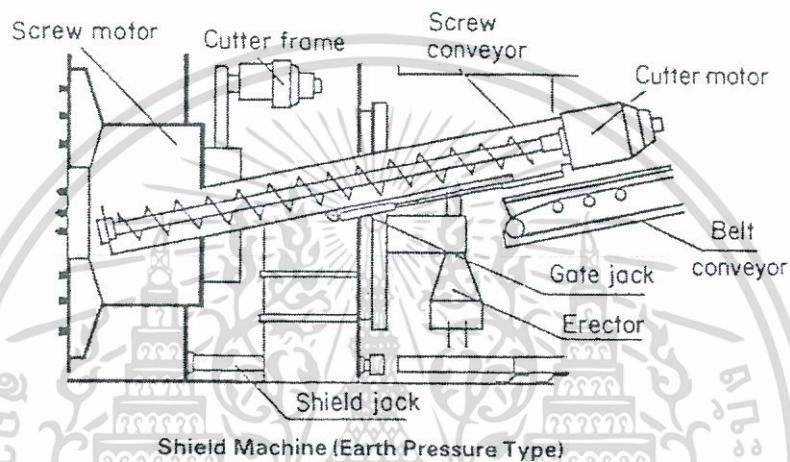
2.2 วิธีการก่อสร้างอุโมงค์โดยหัวเจาะ (Tunnel construction by Tunnel Boring Machine, TBM)

องค์ประกอบทั่วไปของหัวเจาะอุโมงค์ (Tunnel Boring Machine, TBM) อาศัยพื้นฐานของเหล็กรูปทรงกระบอกที่ถูกดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามแนวแกนของอุโมงค์พร้อมกับการขุดดินไปด้วยในเวลาเดียวกัน เสถียรภาพของหัวเจาะอุโมงค์จะเกิดขึ้นหลังจากการขุดเจาะได้ทำการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั่วคราวหรือถาวรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว หัวเจาะอุโมงค์จะทำหน้าที่ด้านทานความดันดินโดยรอบ และป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ในส่วนของช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือหัวเจาะจะถูกปกป้องจากตัวของหัวเจาะเอง นอกจากนี้ การติดตามตรวจวัดเพื่อความปลอดภัยจากความดันและน้ำบริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้หัวเจาะ โดยมีทั้งหัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิด (Open-face type shield) ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้สภาพดินที่ค่อนข้างมีเสถียรภาพและไม่มีย้ำน้ำใต้ดิน อีกทั้งเหมาะกับการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีความยาวไม่มากนัก, หัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจาะค้ำยันแบบหน้าเปิดบางส่วน (Partially open-face type shield) ซึ่งการรักษาเสถียรภาพหน้าหัวเจาะมีทั้งแบบควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติงานเองและระบบอัตโนมัติ , หัวเจาะค้ำยันแบบหน้าปิด (Closed-face type shield) เป็นหัวเจาะที่มีความเหมาะสมกับการขุดเจาะอุโมงค์ภายใต้สภาพดินที่มีเสถียรภาพน้อย หรืออาจเกิดการเคลื่อนตัวของดินได้ง่าย โดยถือว่าเป็นหัวเจาะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังรูป 2.8

2.2.1 หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล [12]

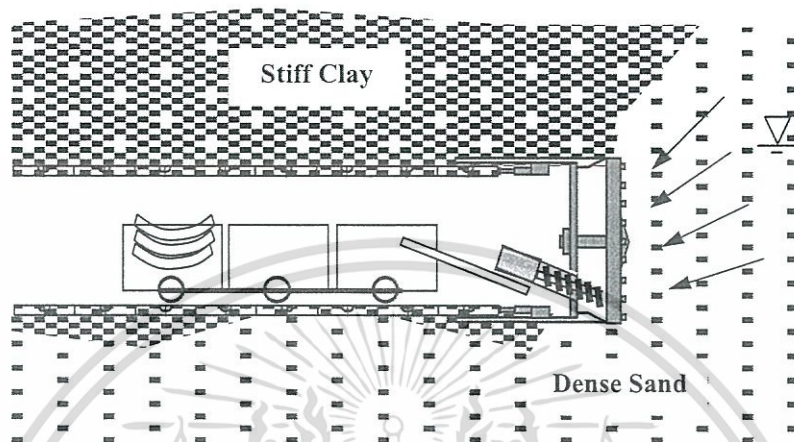
เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล อุโมงค์จะถูกขุดเจาะโดยหัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะ ดินที่ถูกขุดออกจะถูกลำเลียงด้วยเกลียวหมุนลำเลียงดิน (Screw conveyor) และสายพานลำเลียงดิน (Belt conveyor) จากห้องกักดิน (Earth chamber) จากนั้นการลำเลียงดินจะผ่านการขนย้ายโดยรถรางลำเลียงดินหรือใช้ระบบท่อสูบลมเข้ากับเกลียวหมุนลำเลียงดินโดยตรง

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินให้น้อยที่สุด ความดันดินที่หัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะจะต้องคอยติดตามและควบคุม ดังนี้

ก) การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ในแต่ละรอบการขุดเจาะ รูปที่ 2.9 จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยทำการประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณีซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ

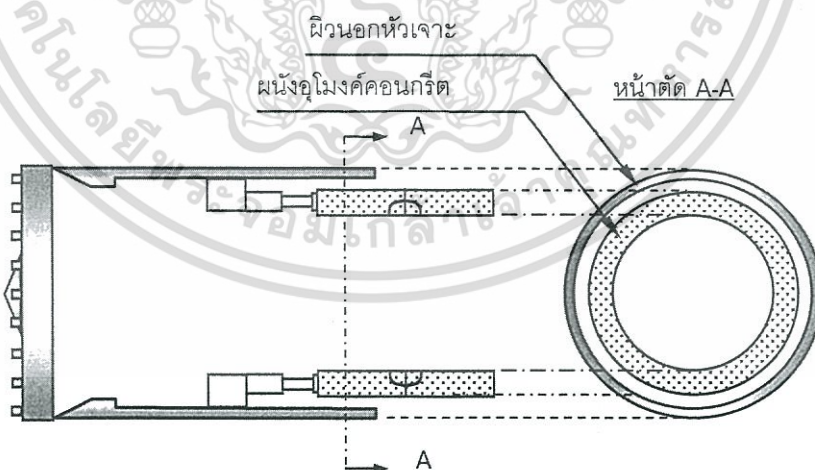
ข) ในระหว่างการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ใช้จะต้องถูกบันทึก ควบคุม และรักษาให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้

ค) ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ทำการกำหนดไว้ก่อนการขุดเจาะ และความดันหน้าหัวเจาะที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการขุดเจาะ ต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะเพื่อใช้อ้างอิง



รูปที่ 2.9 แรงดันหน้าหัวเจาะ

ห้องควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอิมเมจค์ มีหน้าที่ในการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะในขณะทำการขุดเจาะ นอกจากนี้ ความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมในระหว่างการขุดเจาะ ซึ่งการปฏิบัติการของหัวเจาะจะถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของหัวเจาะอยู่ภายใต้แผนผังการควบคุมของความดันที่กำหนด



รูปที่ 2.10 การทำงานของแม่แรงไฮดรอลิกในหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อสร้างอุโมงค์

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry)

1.) ความลึกของอุโมงค์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออุโมงค์ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ และสภาพทางธรณีวิทยา จึงทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างชัดเจน

2.) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) โดยมีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีผลกระทบต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินนั้นเนื่องมาจากปัจจัยนี้จะมีความสัมพันธ์ควบคู่ไปกับทักษะในการควบคุมหัวเจาะหรือระยะเวลาการเรียนรู้ (Learning curve) ของผู้ควบคุมหัวเจาะ และประสิทธิภาพของหัวเจาะ

3.) เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter) เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน อุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ย่อมส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากอุโมงค์ยังมีขนาดใหญ่ปริมาตรในการขุดเจาะจะยิ่งมาก ก็มักก่อให้เกิดการสูญเสียมวลดินเป็นปริมาณที่มากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นธรรมดา

2.3.2 สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions)

1.) สภาพทางธรณีวิทยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ ชนิดของดิน (Soil type) จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของหัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงต่อปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น สภาพทางธรณีวิทยาที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมากที่สุดคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยมีที่มาจากการสังเกตในโครงการที่ผ่านมาในอดีต สาเหตุที่ชั้นดินเหนียวแข็งมีความเหมาะสม เนื่องมาจากมีค่ากำลังรับแรงเฉือน (S_u) ที่สูง ทำให้ดินมีเสถียรภาพในระหว่างที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ รวมทั้งกระบวนการการขนถ่ายดินผ่านสายพานลำเลียงก็เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าที่ต่ำ ทำให้ลดปัญหาการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater seepage) เข้าสู่พื้นที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินเนื่องมาจากการเกิดช่องว่างในเมื่อดิน [13]

2.) ระดับน้ำใต้ดิน (Water table level) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งระดับน้ำใต้ดินเป็นเรื่องที่น่าเป็นห่วงมากสำหรับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระดับความลึกมากจากผิวดิน การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังคงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆ โดยระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำใต้ดินของกรุงเทพฯ ยังคงไม่ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงจากปี พ.ศ. 2522 จนถึงปัจจุบันคือ อยู่ที่ประมาณ 22-24 เมตรจากผิวดิน

2.3.3 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors)

1.) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) การควบคุมปริมาณการขุดดินออกในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ การลำเลียงดินจะเริ่มตันที่บริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะด้วยเกลียวหมุนลำเลียงดิน (Screw conveyor) ในปริมาณที่เหมาะสม ถือเป็นพื้นฐานของวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยสามารถพิสูจน์ได้จากข้อมูลพื้นฐานในอดีต [14]

2.) ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) ซึ่งในการปฏิบัติงานของหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลจะมีการควบคุมหัวเจาะให้อัตราการลำเลียงดินมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปกับความเร็วขณะขุดเจาะ ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอัตราการลำเลียงดินและความเร็วขณะขุดเจาะ

3.) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle) การเปลี่ยนแนวหัวเจาะที่มีมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะที่สูง ย่อมจะทำให้เกิดช่องว่างในปริมาณมากด้านหลังอุโมงค์ ซึ่งเป็นเหตุให้ดินโดยรอบเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น

4.) คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting quality) ประกอบไปด้วย ความดันของการอัดฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ในขณะที่หัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าจะทำให้เกิดช่องว่างบริเวณด้านหลังของหัวเจาะโดยรอบของผนังอุโมงค์ การอัดฉีดน้ำปูนบริเวณช่องว่างด้านหลังที่เกิดขึ้นจึงความจำเป็นเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินลงมาแทนที่ช่องว่างได้

2.4 พฤติกรรมทั่วไปของเสาเข็มเจาะ

2.4.1 พฤติกรรมทั่วไป

เสาเข็มทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักหรือแรงสู่ชั้นดินในลักษณะแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม (Skin friction) และแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End bearing) สามารถแบ่งประเภทของเสาเข็มออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการรับน้ำหนัก

1) เสาเข็มเสียดทานหรือเสาเข็มลอย (Friction/Floating pile) คือเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่

2) เสาเข็มดาล (End bearing pile) คือเสาเข็มที่มีแรงต้านที่ปลายเสาเข็มสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม

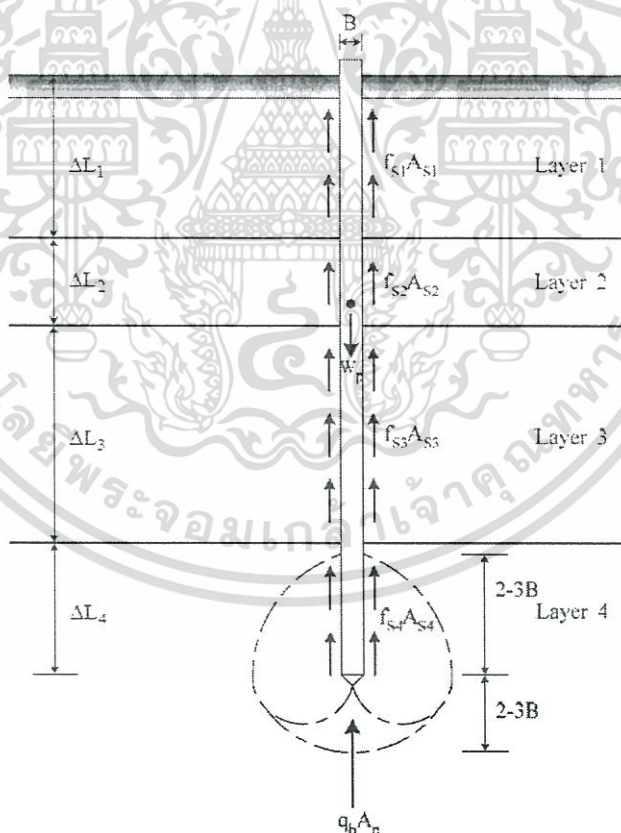
เสาเข็มเจาะมีความแตกต่างจากเสาเข็มตอกตรงที่เสาเข็มประเภทนี้เป็นเสาเข็มที่หล่อในที่ เสาเข็มเจาะเหมาะสำหรับชั้นดินที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำมาก และเป็นดินเชื่อมแน่น (Cohesive soils) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงปานกลาง เช่น ดินเหนียว หรือดินเหนียวปนทราย ความเชื่อมแน่นจะป้องกันไม่ให้หลุมเจาะพังทลาย เสาเข็มเจาะจะมีความเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็มน้อยกว่าเสาเข็มตอก เนื่องจากการตอกเสาเข็มจะทำให้ดินเคลื่อนตัวออกด้านข้าง ส่งผลให้แรงดันดินด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น ในขณะที่ การทำเสาเข็มเจาะจำเป็นต้องขุดดินออก ทำให้แรงดันดินด้านข้างมีค่าเท่าเดิมหรือน้อยลง เสาเข็มประเภทนี้สามารถประยุกต์ใช้กับดินเหนียวอ่อนในแถบกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้

2.4.2 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

เสาเข็มเดี่ยวถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างสู่ดินโดยผ่านความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (Skin friction) และแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End bearing) ความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินคือผลรวมของแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างเสาเข็มและดินตลอดความยาวเสาเข็ม ส่วนแรงแบกทานที่ปลายเข็ม คือกำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเข็ม ดังรูปที่ 2.11 เสาเข็มในชั้นดินเหนียวส่วนมากจะเป็นเสาเข็มเสียดทาน ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกโดยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เพื่อความสะดวกในการออกแบบ (ไม่ต้องพิจารณาความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะรับน้ำหนักบรรทุก) ซึ่งมักจะคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยจากกำลังต้านทานแรงเฉือนรวม (Total shear strength analysis) แม้ว่าการคำนวณโดยใช้กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัยผลจะให้ความละเอียดถูกต้องมากกว่า



รูปที่ 2.11 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Failure load, Q_f) ของเสาเข็มคำนวณได้จากผลรวมของแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินเหนียว (Q_s) และแรงต้านทานที่ปลายเข็ม (Q_b) ดังสมการที่ 2.1

$$Q_f = Q_s + Q_b \quad (2.1)$$

$$P_f = \frac{P_s + P_b}{2.5} \quad (2.2)$$

โดย $P_s = 0.45 \overline{S_u} A_s$

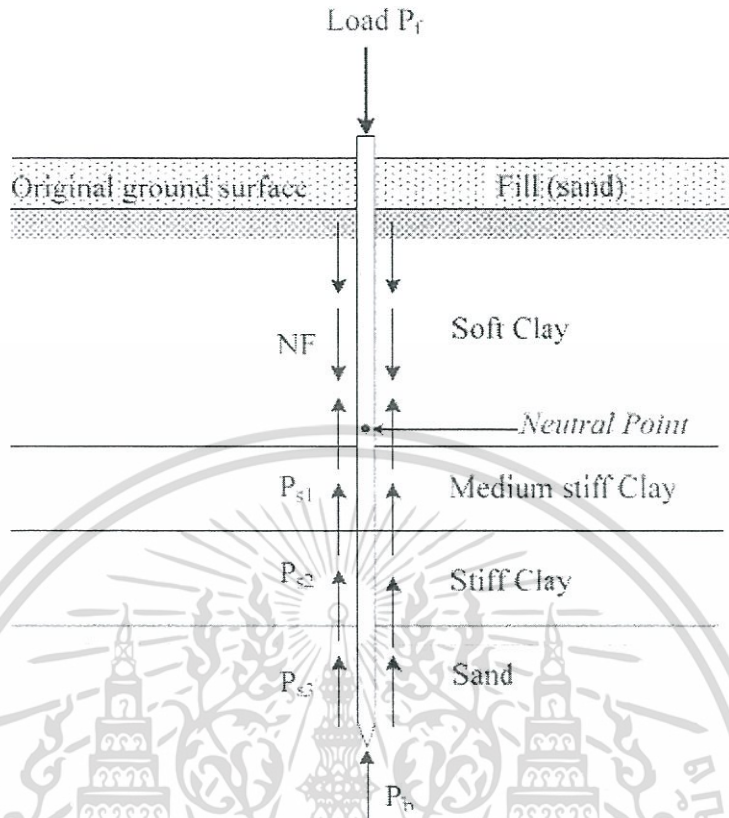
$$P_b = 9w S_u A_b$$

สำหรับเสาเข็มจะใช้ค่า factor ยึดเกาะ (Adhesion factor) $\alpha = 0.45$ และเสนอสมการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยไว้ดังสมการที่ 2.2 เมื่อ w คือตัวคูณปรับลดกำลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.75 สำหรับเสาเข็มที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า 1.0 เมตร ตามลำดับ น้ำหนักบรรทุกยอมให้นำไปใช้ในการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_f = \frac{Q_s + Q_b}{2.5} \quad (2.3)$$

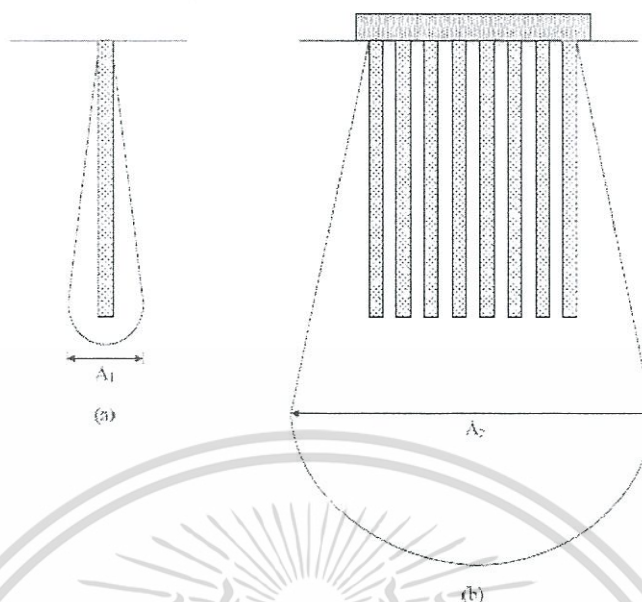
เมื่อกำหนดให้ FS คืออัตราส่วนปลอดภัยรวม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5

แรงกดลงของเสาเข็ม คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมวลดินกับเสาเข็ม อันเป็นผลจากการที่ดินบริเวณรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวมากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็ม สภาพที่ทำให้เกิดแรงกดลง คือปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นที่มีการทรุดตัวน้อยและมีชั้นดินอัดตัวสูง (Highly compressive soil) เช่น ดินเหนียวอ่อน วางตัวอยู่ด้านบน แรงกดลงจะเกิดในชั้นดินเหนียวอ่อน ตั้งแต่หัวเสาเข็มจนถึงจุดสะเทิน (Neutral point) ซึ่งเป็นจุดที่การเคลื่อนตัวของมวลดินกับเสาเข็มประมาณเท่ากัน ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แรงจุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบเสาเข็ม

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของฐานรากเสาเข็มไม่จำเป็นต้องเท่ากับผลรวมของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มแต่ละต้นเสมอไป เนื่องจากกระเปาะความเค้นของเสาเข็มหนึ่งต้นและเสาเข็มกลุ่มมีความแตกต่างกัน ดังรูป 2.13 การทรุดตัวแบบทันที (Immediate settlement) จะเกิดขึ้นขณะก่อสร้างและระหว่างการก่อสร้าง จึงไม่มีผลมากนักต่อโครงสร้างในระยะยาว ส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary settlement) ที่เกิดขึ้นมีผลน้อยมาก เมื่อเทียบกับ การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน (Consolidation settlement) ดังนั้น การทรุดตัวที่มีผลต่อโครงสร้างมากที่สุดคือการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน



รูปที่ 2.13 กระเปาะความเค้นของเข็มตันเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม

2.4.3 การวิเคราะห์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม

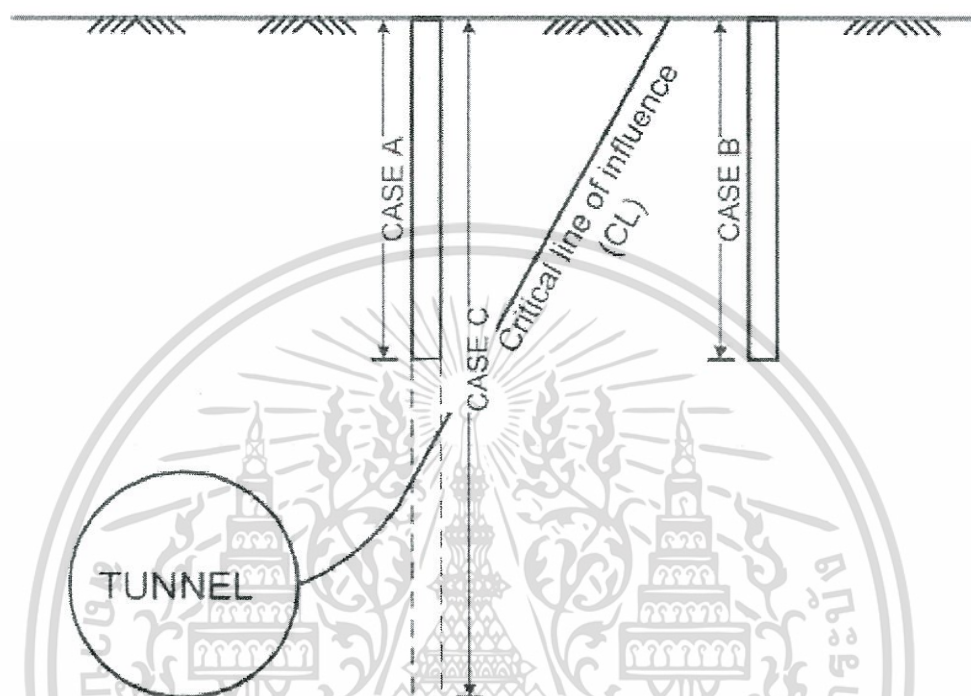
ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขหรือการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีการศึกษาแพร่หลายมากขึ้น เพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านอุโมงค์ [15] [16] จากการศึกษาพบว่า จาก 96% ของงานวิจัยทั้งหมด 65 การวิจัยล่าสุด มีการนำไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีส่วนร่วมกับการศึกษา และส่วนมากเน้นการศึกษาโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติ (2D) ภายใต้สมมติฐานระนาบความเครียด (Plane strain conditions) แต่ความต้องการใช้จำลองสภาวะการก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งจะประกอบไปด้วย แรงดันหน้าหัวเจาะ, ช่องว่างบริเวณหลังหัวเจาะ, ค่าการสูญเสียมวลดินในระหว่างขุดเจาะอุโมงค์ จึงมีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D) เข้ามาจำลองให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ เพื่อการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance) ในชั้นดินเหนียว โดย [17] ซึ่งการจำลองนี้ถูกใช้ในการวิเคราะห์การก่อสร้าง ในซานฟรานซิสโก ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริงในสนาม ค่าที่ได้จากการจำลองโมเดลอยู่ในขอบเขตใกล้เคียงกับค่าจริงในสนาม นอกจากนี้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้นในกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ [18] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติจำลองการก่อสร้างอุโมงค์ ในอุโมงค์ระดับตื้นและระดับลึก โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb การวิเคราะห์เป็นประโยชน์ในการพัฒนาขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการสูญเสียมวลดินได้

[3] ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ เพื่อประเมินผลกระทบต่อเสาเข็มจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กรณีดังรูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์สามารถสร้างแนวเขตอิทธิพลที่ส่งผลกระทบได้ นอกจากนี้ [19] ใช้การวิเคราะห์ในลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

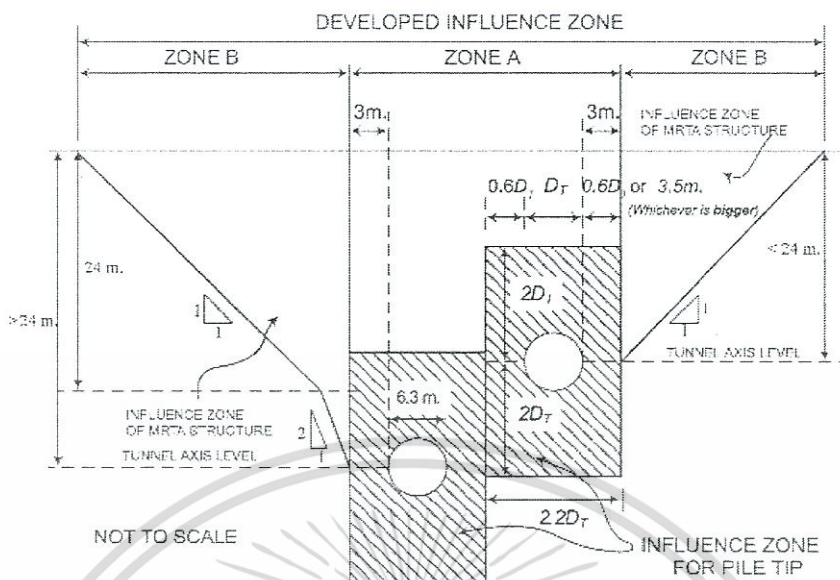
การวิเคราะห์ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มกลุ่มวางตัวด้านข้างอุโมงค์ ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีประโยชน์ทางการประหยัดงบประมาณและเวลาในการวิเคราะห์อีกด้วย



รูปที่ 2.14 ลักษณะการวางตัวของอุโมงค์และเสาเข็มและแนวเขตอิทธิพลใหม่ [3]

นอกจากการศึกษาอิทธิพลจากอุโมงค์กระทบเสาเข็มแล้วนั้น เสาเข็มก็ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ด้วยเช่นกัน อิทธิพลของเสาเข็มใหม่ต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมถูกเสนอโดย [6] ศึกษาระยะเวลาความลึกปลายเสาเข็มที่ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขึ้นอยู่กับชั้นดินที่อุโมงค์วางตัวอยู่และระดับปลายเสาเข็ม นอกจากนี้ยังเสนอขอบเขตพื้นที่อิทธิพลที่มีผลกระทบต่ออุโมงค์ เป็นระยะปลายเสาเข็มใกล้กับอุโมงค์เดิม ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวไม่ควรมียสิ่งก่อสร้างหรือปลายเสาเข็มในระดับนี้ เพราะจะส่งผลกระทบต่อรูปร่างของอุโมงค์อย่างมีนัยยะได้ ดังรูปที่ 2.15

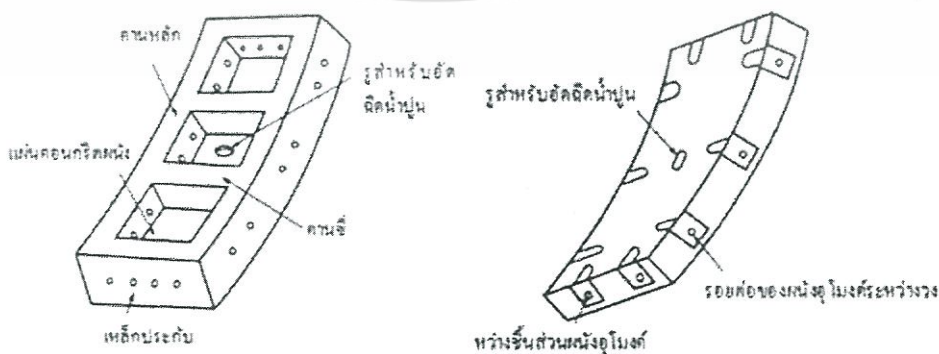
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ระยะปลอดภัยของอุโมงค์ [6]

2.5 การวิเคราะห์ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ มีหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ได้อย่างปลอดภัยและยืนยาว ตลอดอายุการใช้งาน ส่วนรูปแบบของผนังอุโมงค์และขนาดของอุโมงค์ รวมทั้งประเภทของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานของอุโมงค์ ดังรูป 2.14 โดยรูปร่างและขนาดของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานของอุโมงค์ ความหนาของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment height) ส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าตัดอุโมงค์ ที่มาจากการพิจารณาน้ำหนักที่มากกระทำ ความหนาของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะมีค่าประมาณ 4% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ ในกรณีที่อยู่โมงค์มีขนาดใหญ่ และทำการติดตั้งด้วยชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต อัตราส่วนความหนาจะมีค่าประมาณ 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์



รูปที่ 2.16 ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูล [11] พบว่าความหนาผนังอุโมงค์มีความสัมพันธ์กับขนาดอุโมงค์ ดังการ ออกแบบผนังอุโมงค์ในการศึกษาของ [1] โดยใช้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ที่มี อัตราส่วนระหว่างความหนาอุโมงค์ต่อขนาดอุโมงค์ $1/72$ เป็นกรณีศึกษา ได้ค่าอัตราส่วนความหนา อุโมงค์ต่อขนาดอุโมงค์ มีค่าดังสมการ 2.4

$$\frac{t}{D} = \sqrt[3]{\frac{\gamma_u \gamma_w h}{2E_c} \frac{h}{D}} \quad (2.4)$$

โดย E_c คือ ยั่งมอดูลัสของคอนกรีต

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักดินเปียก

γ_u คือ Safety factor for bucking=2.5

h คือ ระยะความลึกอ้างอิง

t คือ ความหนาผนังอุโมงค์

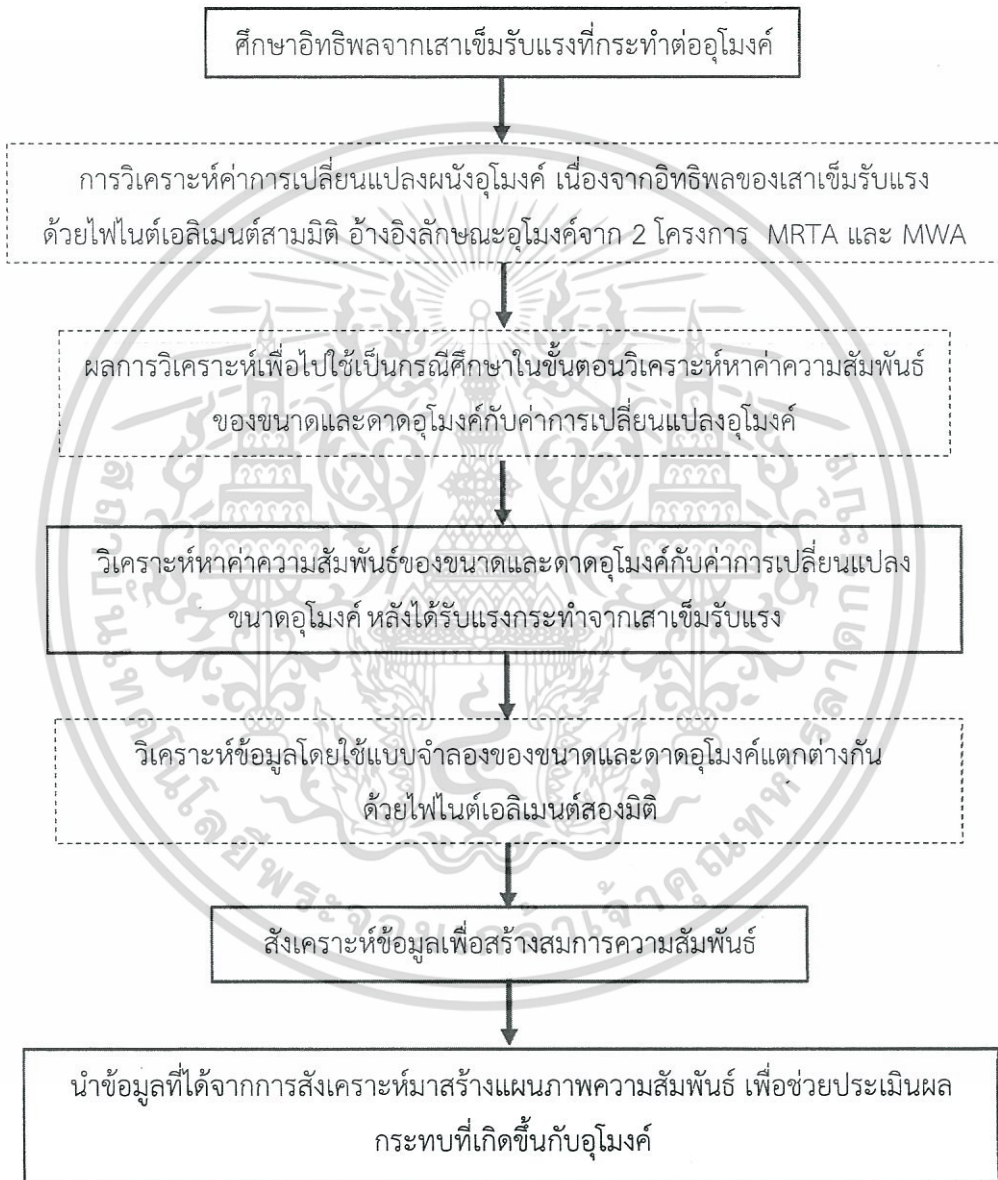
D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์

นอกจากนี้การวิเคราะห์ในรูปแบบโครงสร้างท่อ [7] โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการ วิเคราะห์นั้น อัตราส่วนระหว่างขนาดโครงสร้างและความหนาผนัง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้น ผ่านศูนย์กลางและยังส่งผลกระทบต่อแรงภายในของโครงสร้างนั้นในด้านที่รับแรงกระทำด้วย นอกจากนี้มีการศึกษาในลักษณะคล้ายกันในท่ออะลูมิเนียม ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ใน โครงสร้างผนังบางเปรียบเทียบกับค่าจริงที่เก็บมาได้ [20] โดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีการจำลองโครงสร้างผนังหลายคุณสมบัติได้แก่ Solid element , Shell elements (thick shell and thin shell) เพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างผนังได้ชัดเจนที่สุด ซึ่งแบบจำลองคุณสมบัติ Thin Shell ถือว่าให้ค่าการทำนายที่แม่นยำกว่าการจำลองด้วย Thick shell [21] อุโมงค์ขนาด 6.2 เมตรที่สร้างขึ้นใหม่ใกล้กับอุโมงค์เดิมขนาด 14.5 เมตรที่มีความหนาผนังอุโมงค์ต่างกันในประเทศจีน [22] แบบจำลองในห้องปฏิบัติการทำการทดสอบค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของอุโมงค์เดิมในขณะที่มี อุโมงค์ใหม่ข้ามผ่านและค่าความเค้นในแนวยาวของอุโมงค์เดิมเป็นหลัก จากงานวิจัยนี้พบว่า การศึกษาก่อนหน้านี้มีการให้ความสำคัญถึงขนาดและความหนาอุโมงค์อยู่มาก โดยใช้การศึกษาค่า การเคลื่อนตัวของอุโมงค์สะท้อนพฤติกรรมของผลกระทบได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 แนวทางการวิเคราะห์



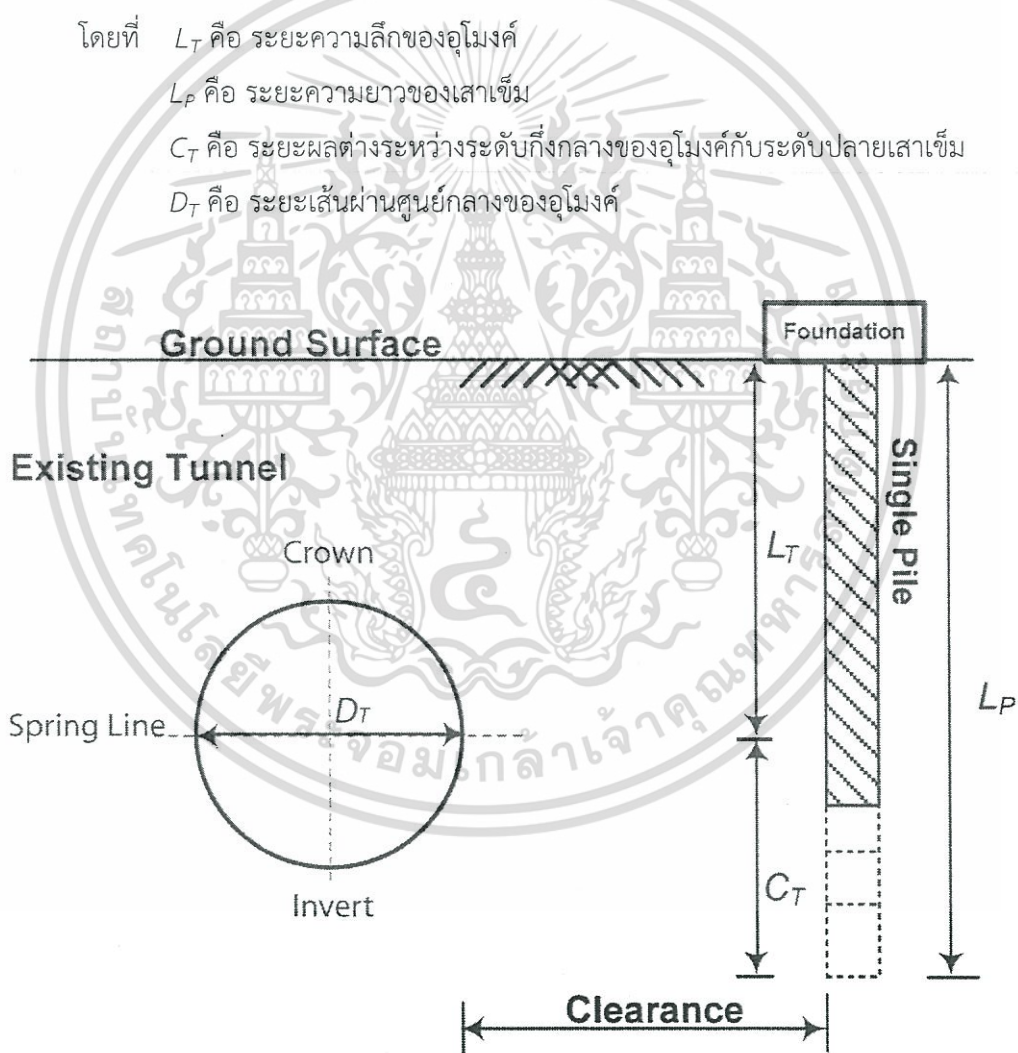
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์จาก 2 โครงการ MRTA และ MWA

3.2.1 หลักการพิจารณาปัญหา

หลักการพิจารณาปัญหาแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยขนาดอุโมงค์และตาดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) โดยมีเสาเข็มที่มีความยาวต่างกันวางตัวอยู่เพียงด้านเดียวของอุโมงค์ และมีระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม (clearance)



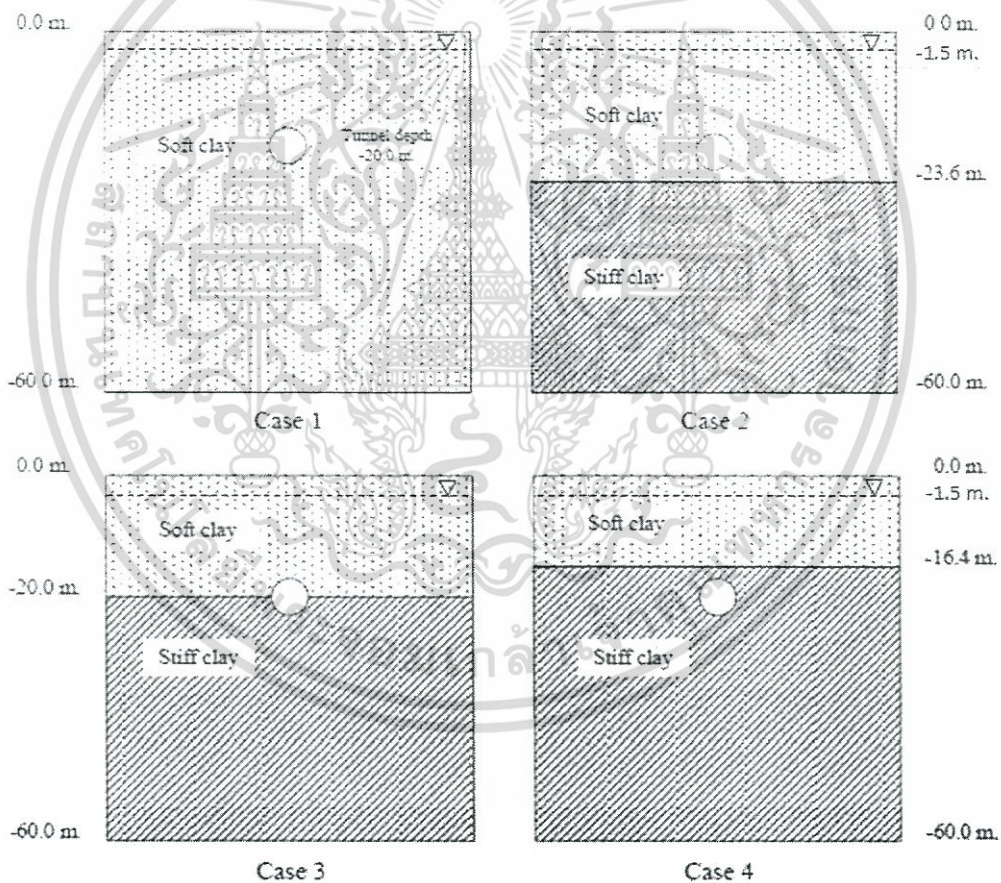
รูปที่ 3.2 รูปแบบการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กรณีศึกษา

1.) ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่กรุงเทพฯ โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี กรณีแรก เป็นกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นกรณีในช่วงกำลังเข้าสู่สถานีของรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA ส่วนกรณีที่ 2, 3 และ 4 เป็นกรณีที่แนวเส้นทางของอุโมงค์ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่ส่วนใหญ่วางตัวอยู่ โดยพิจารณาความลึกอุโมงค์คงที่ที่ระดับ 20 เมตร ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งกำหนดให้อุโมงค์ส่งน้ำ MWA วางตัวอยู่ที่ระดับเดียวกันเพื่อการเปรียบเทียบเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุโมงค์รถไฟฟ้าและอุโมงค์ส่งน้ำ โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ -1.50 เมตรจากผิวดิน

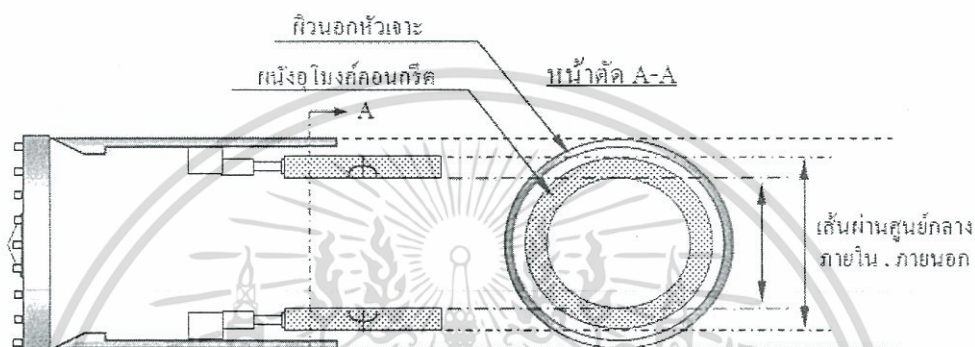


รูปที่ 3.3 รูปแบบชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์

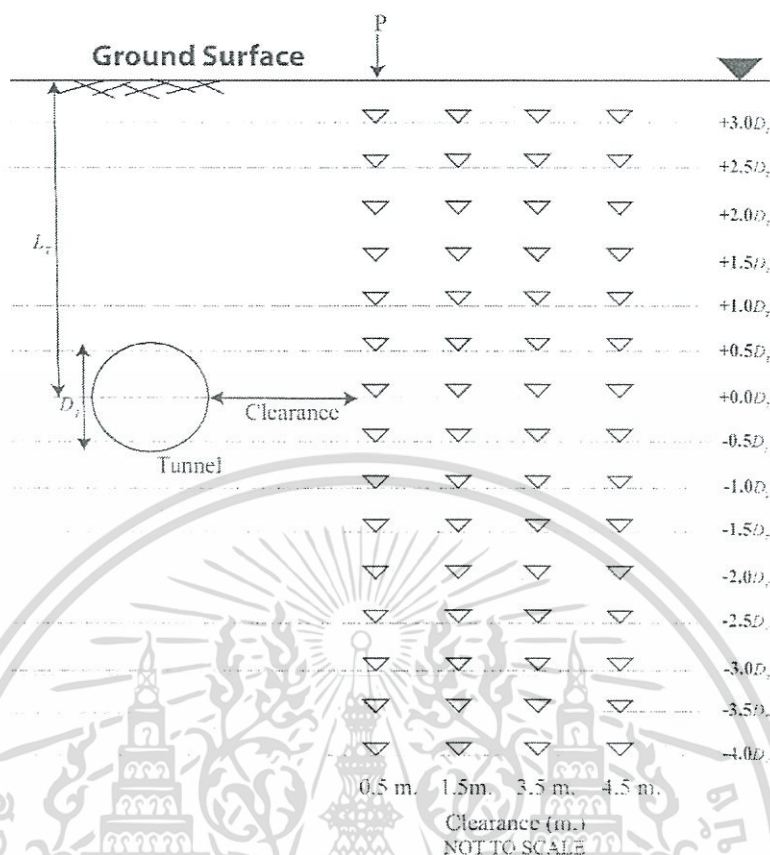
การวิเคราะห์จะกำหนดให้อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.4 โดยแบบจำลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอุโมงค์อ้างอิงสองขนาด ประกอบด้วยอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 6.30 และ 5.70 เมตร ตามลำดับ และอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 4.07 และ 3.77 เมตรตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ภาพตัดแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์

3.) ลักษณะของเสาเข็มและตำแหน่งที่ใช้พิจารณา

การศึกษานี้กำหนดให้เสาเข็มเป็นแบบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตรวางตัวอยู่ทางด้านขวาของอุโมงค์ และระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม 4 ระยะ (clearance) คือ 0.5 , 1.5 , 3.5 และ 4.5 เมตร ตำแหน่งของปลายเสาเข็มนับตั้งแต่กึ่งกลางอุโมงค์เป็นระยะ $3.0D_T$ เหนือแนวกึ่งกลางของอุโมงค์ถึง $4.0D_T$ ใต้ระดับกึ่งกลางของอุโมงค์ โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของระยะปลายเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.5

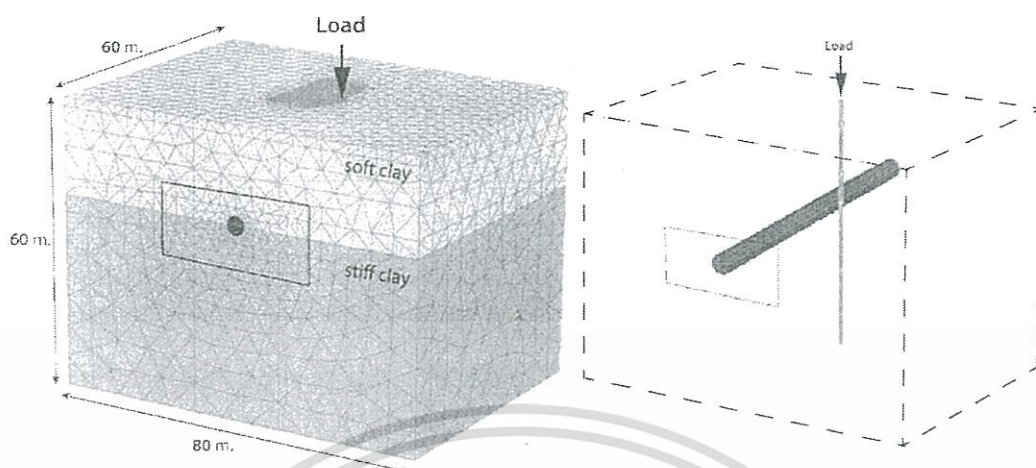


รูปที่ 3.5 รูปแบบการวางตัวของปลายเสาเข็ม

3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

1.) ลักษณะแบบจำลอง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ได้ใช้ซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ คือ PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1 โดยชั้นส่วนต่างๆ ในการวิเคราะห์ (element) เป็นรูปทรงพีระมิดสามเหลี่ยม (Tetrahedron) แบบจุดต่อ (node) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์จะแบ่งเป็นสอง ขั้นตอน คือ 1. ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ 2. จำลองขั้นตอนของเสาเข็มรับแรงกระทำ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ ขั้นตอนการจำลองการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองมีขนาดกว้าง 80 เมตร ยาว 60 เมตร และมีความลึกแบบจำลอง 60 เมตรจากผิวดิน มีการกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่มีความละเอียดในการวิเคราะห์พื้นที่บริเวณใกล้อุโมงค์ทั้งแนวราบและแนวตั้งให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์มากกว่าบริเวณอื่น โดยมีความละเอียดในการวิเคราะห์ทั้งหมดประมาณ 280,000 element ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

2.) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง (material properties)

คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการเทียบวัดจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงเทพมหานคร ดังตารางที่ 3.1 [3] ชั้นดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นชั้นดินจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน ชั้นดินเหนียวและชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น กำหนดให้มีคุณสมบัติชั้นดินเป็นแบบ Hardening Soil model (HS) ซึ่งเป็นแบบจำลองชั้นดิน (soil model) ที่เหมาะสมกับสภาพชั้นดินของกรุงเทพฯ [23] ดังตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มซึ่งกำหนดคุณสมบัติให้เป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง [24]

Soil layer	Soft Clay	Stiff Clay
Material Model	HS	HS
E (kPa)	-	-
E_{oed}^{ref} (kPa)	5,000	5,000
E_{50}^e (kPa)	5,000	60,000
E_{ur}^{ref} (kPa)	15,000	180,000
γ_{sat} (kN / m ³)	16	18
ν'	0.33	0.33
ϕ (°)	22	22
C (kPa)	5	18
M	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Soil layer	Soft Clay	Stiff Clay
P_{ref} (kPa)	100	95

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ [25]

	Young Modulus (E) (kN/m^2)	Poisson's ratio (ν_c)	Unit weight (γ_c) (kN/m^2)
Tunnel lining and Pile	3.1×10^7	0.20	24
Grouting Concrete	1×10^6	0.30	21

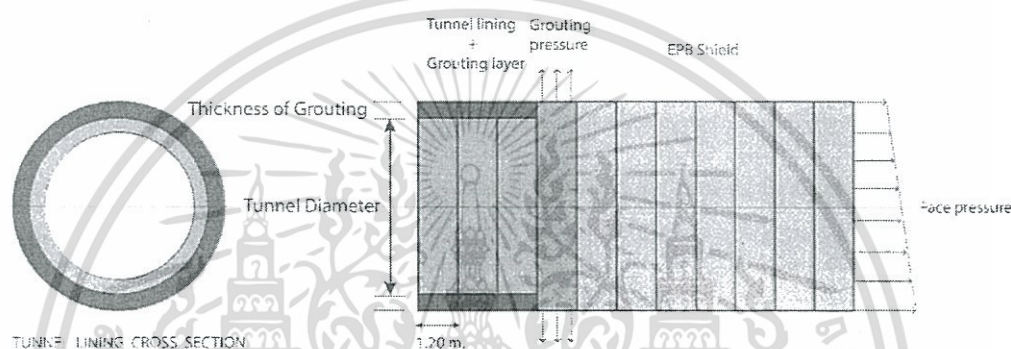
3.) สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองมีผลต่อผลการวิเคราะห์ จึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยสภาวะขอบเขต (boundary condition) กำหนดให้บริเวณด้านข้าง ด้านหน้า และด้านหลัง ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวราบแต่ปล่อยให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างอิสระ ส่วนสภาวะขอบเขตบริเวณด้านล่างจะถูกกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง ผิวด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทาง และการวิเคราะห์ในการศึกษานี้เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrain analysis) โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของความเค้นสุทธิของชั้นดิน (effective stress) แนวตั้งและแนวราบถูกกำหนดด้วยค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (unit weight) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K_0 เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของชั้นดิน โดยกำหนดระดับน้ำใต้ดินเป็นแบบ Piezometric drawdown

3.3 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อเทียบวัดความถูกต้องของแบบจำลอง (verify model) โดยขั้นการสร้างได้อ้างอิงจากงานวิจัย [26] ซึ่งรูปแบบการก่อสร้างแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 การจำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุล Earth pressure balance shield (EPB Shield) กำหนดให้ความกว้างของชั้นส่วนมีขนาด 1.20 เมตร ซึ่งมีความกว้างเท่ากับขนาดของผนังอุโมงค์ในโครงการจริงที่ใช้อยู่ มีจำนวนทั้งสิ้น 50 วง รวมระยะทาง 60 เมตร สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1. การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยทำการประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณีซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ ซึ่งกำหนดให้มีค่า 150-200 kPa. [10] โดยมีค่าการสูญเสียเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลดินที่ 0.40 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงการเปรียบเทียบข้อมูลจริงจากงานวิจัย [6] หัวเจาะปรับความดิน สมดุลนี้จะมีการทำงานระยะทางรวม 8.4 เมตรหรือจำลองให้เป็นวงรอบประมาณ 7 วง ขั้นตอนที่ 2. การใส่ค่าแรงดันดินน้ำปูน 200 kPa. บริเวณดินโดยรอบตามแนวเส้นรอบวงการขุดเจาะ เพื่อค้ำยันดิน บริเวณรอบบริเวณการขุดตามแนวรัศมีไม่ให้เกิดการพังทลายหรือเสียรูป ขั้นตอนที่ 3. เปลี่ยนค่าแรงดันดินน้ำปูนเป็นปูนชนิดแข็ง บริเวณช่องว่างระหว่างหัวเจาะกับผนังอุโมงค์ และใส่ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติดังหัวข้อ 3.2.3 ทำตามขั้นตอนจนได้ระยะทางทั้งสิ้น 60 เมตร วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูล เปรียบเทียบอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการ MRTA และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ MWA โดยพิจารณา ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้ง , แนวราบ และสูงสุดต่ำสุด



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ในสามมิติ modified after [6]

เมื่อก่อสร้างอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการจำลองของเสาเข็มรับแรง ซึ่งชั้นส่วนของเสาเข็มจะถูกกำหนดให้อยู่ในชั้นดินและไม่คิดถึงขั้นตอนการก่อสร้าง (wish-in-place) ซึ่งค่าแรงที่กระทำต่อเสาเข็มคำนวณได้จากวิธี alpha-method [27] โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ (Safety factor) เท่ากับ 2.5 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกยอมให้ (Allowable load) ถูกใช้ในการวิเคราะห์การศึกษา ซึ่งการวิเคราะห์จะคิดหลังจากการจำลองเสาเข็มรับแรงในแต่ละความลึก ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จะไม่พิจารณาค่าการเสียรูปจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยวิธีการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์แนวตั้งและแนวราบนั้น $(\Delta\phi_v, \Delta\phi_H)$ พิจารณาในเทอมของผลต่างค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางหลังได้รับและก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.8

$$\Delta\phi_v = \phi_{v2} - \phi_{v1} \quad (3.1)$$

$$\Delta\phi_H = \phi_{H2} - \phi_{H1} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง กำหนดให้ ϕ_{r1} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ϕ_{r2} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

$$\phi_{r1} = \sqrt{[(X_c - X_l)]^2 + [(Y_c + Y_l)]^2} \quad (3.3)$$

$$\phi_{r2} = \sqrt{[(X_c + U_{xc}) - (X_l + U_{xl})]^2 + [(Y_c + U_{yc}) - (Y_l + U_{yl})]^2} \quad (3.4)$$

โดย X_c, Y_c แสดงค่าพิกัดของจุดด้านบนของอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำ

X_l, Y_l แสดงค่าพิกัดของจุดด้านล่างของอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำ

$X_c + U_{xc}, Y_c + U_{yc}$ แสดงค่าพิกัดของจุดด้านบนของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ

$X_l + U_{xl}, Y_l + U_{yl}$ แสดงค่าพิกัดของจุดด้านล่างของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ

การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบ กำหนดให้ ϕ_{H1} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ϕ_{H2} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

$$\phi_{H1} = \sqrt{[(X_L - X_R)]^2 + [(Y_L + Y_R)]^2} \quad (3.5)$$

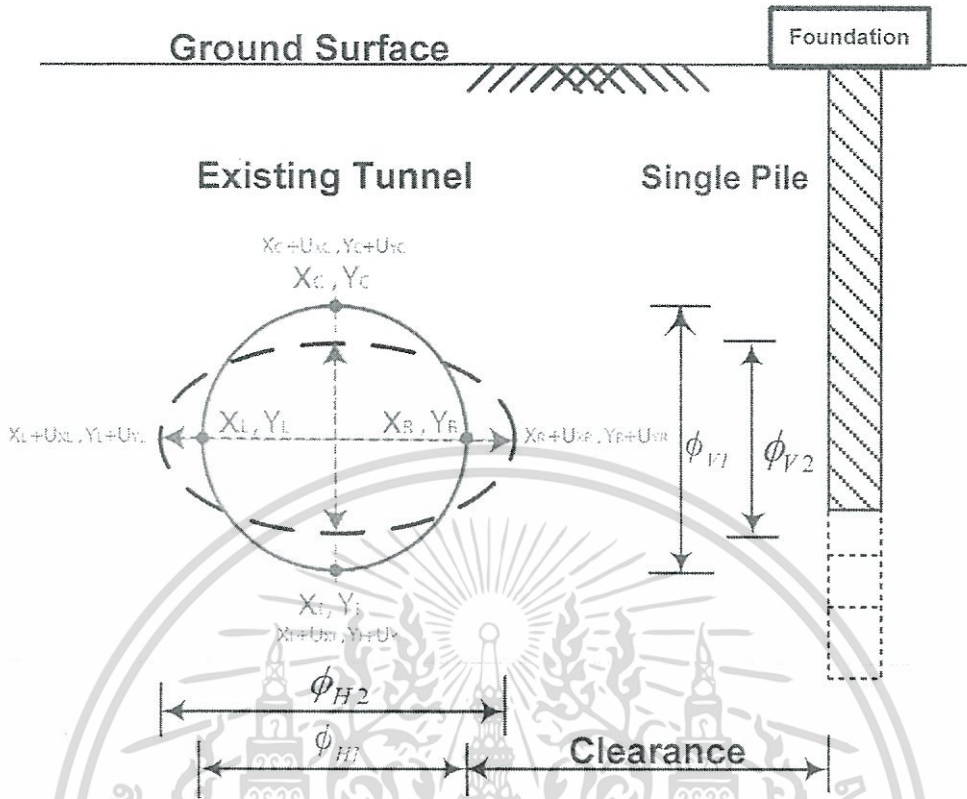
$$\phi_{H2} = \sqrt{[(X_L + U_{xl}) - (X_R + U_{xr})]^2 + [(Y_L + U_{yl}) - (Y_R + U_{yr})]^2} \quad (3.6)$$

โดย X_L, Y_L แสดงค่าพิกัดของจุดด้านซ้ายของอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำ

X_R, Y_R แสดงค่าพิกัดของจุดด้านขวาของอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำ

$X_L + U_{xl}, Y_L + U_{yl}$ แสดงค่าพิกัดของจุดด้านซ้ายของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ

$X_R + U_{xr}, Y_R + U_{yr}$ แสดงค่าพิกัดของจุดด้านขวาของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ



รูปที่ 3.8 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้งและแนวราบ

อย่างไรก็ตามการคำนวณการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ อาจจะไม่สมมาตรเสมอไป หากมีการเปลี่ยนแปลงนอกแกนสมมาตร ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบไม่ใช่ค่าวิกฤตที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) จะช่วยให้สามารถหาค่าที่แม่นยำและเป็นค่าที่วิกฤตที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มลบก้อนก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.9

$$\Delta\phi_{C-MAX} = \phi_{C-MAX2} - \phi_{C-MAX1} \quad (3.7)$$

$$\Delta\phi_{E-MAX} = \phi_{E-MAX2} - \phi_{E-MAX1} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด กำหนดให้ ϕ_{C-MAX1} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ϕ_{C-MAX2} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

$$\phi_{C-MAX1} = \sqrt{[(X_T - X_D)]^2 + [(Y_T + Y_D)]^2} \quad (3.9)$$

$$\phi_{C-MAX2} = \sqrt{[(X_T + U_{XT}) - (X_D + U_{XD})]^2 + [(Y_T + U_{YT}) - (Y_D + U_{YD})]^2} \quad (3.10)$$

โดย X_T, Y_T แสดงค่าพิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

X_D, Y_D แสดงค่าพิกัดจุดตรงข้ามพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

$X_T + U_{XT}, Y_T + U_{YT}$ แสดงค่าพิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด หลังได้รับแรงกระทำ

$X_D + U_{XD}, Y_D + U_{YD}$ แสดงค่าพิกัดจุดตรงข้ามพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุดหลังได้รับแรงกระทำ

การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด กำหนดให้ ϕ_{E-MAX1} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ϕ_{E-MAX2} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

$$\phi_{E-MAX1} = \sqrt{[(X_A - X_B)]^2 + [(Y_A + Y_B)]^2} \quad (3.11)$$

$$\phi_{E-MAX2} = \sqrt{[(X_A + U_{XA}) - (X_B + U_{XB})]^2 + [(Y_A + U_{YA}) - (Y_B + U_{YB})]^2} \quad (3.12)$$

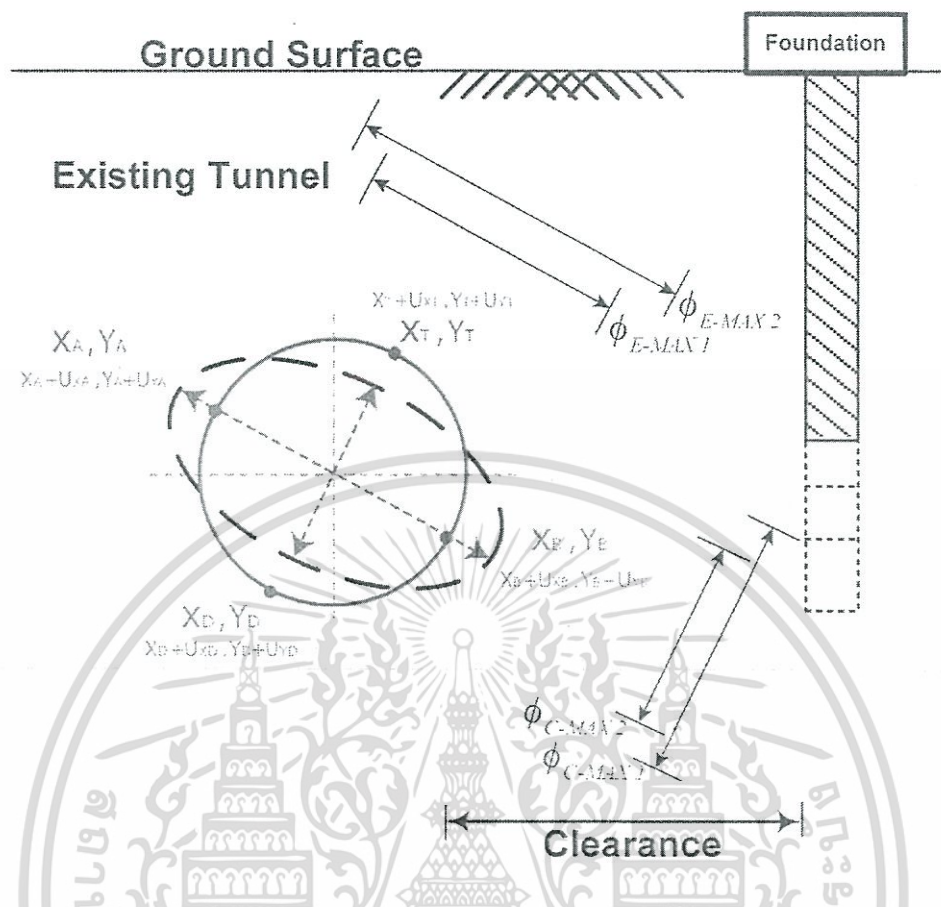
โดย X_A, Y_A แสดงค่าพิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

X_B, Y_B แสดงค่าพิกัดจุดตรงข้ามพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

$X_A + U_{XA}, Y_A + U_{YA}$ แสดงค่าพิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำ

$X_B + U_{XB}, Y_B + U_{YB}$ แสดงค่าพิกัดจุดตรงข้ามพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด

3.4 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตาดูโมงค์

ขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันและส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ เลือกรูปแบบจำลองแบบสองมิติในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เพิ่มเติมระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ อาศัยหลักการพิจารณาค่ายกับการจำลองสามมิติแต่ไม่พิจารณาค่าการสูญเสียมวลดินในระหว่างก่อสร้างอุโมงค์ แต่พิจารณาขนาดของอุโมงค์ (D_T) หลายขนาดและหลายความหนาผนังอุโมงค์มากขึ้น เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์

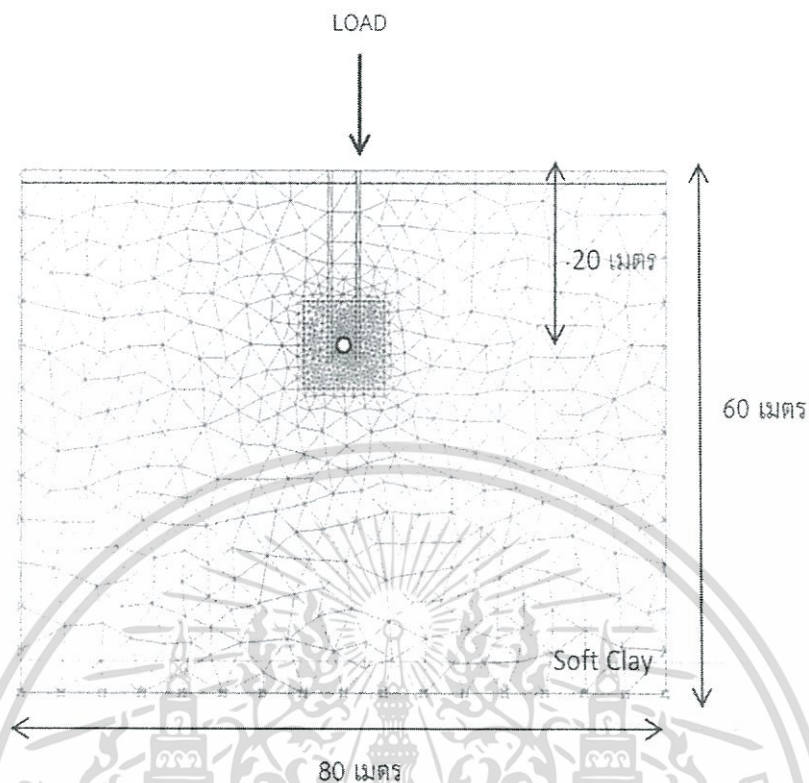
จากการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ อ้างอิงลักษณะอุโมงค์ในโครงการ MRTA และ MWA ในหัวข้อ 3.3 อุโมงค์ทั้งสองนี้มีข้อมูลลักษณะอุโมงค์ที่แตกต่างกันทั้งด้านขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ไม่สะท้อนถึงผลกระทบที่แท้จริงเนื่องจากผลการวิเคราะห์แสดงผลในเทอมของขนาดของอุโมงค์เพียงอย่างเดียว

ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและดาดอโมงค์กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น เพื่อจะช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์เนื่องจากกรณีศึกษาที่นำมาพิจารณามีจำนวนหลายกรณี จึงพิจารณาในรูปแบบระนาบความเครียด (plane strain) หรือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ซึ่งจำลองให้เสาเข็มเตี้ยอยู่ในดินและคุณสมบัติเป็น Solid element โดยปรับเปลี่ยนแรงกระทำลงเสาเข็มเป็นค่าแรงกระทำต่อพื้นที่ F/A วิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดที่แรงลงเข็มเพียงต้นเดียว เพื่อเป็นตัวแทนการวิเคราะห์ในลักษณะเข็มเตี้ยรับแรงกระทำวางตัวข้างขวาของอูโมงค์ ดังนั้นการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะ ใช้ซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ คือ PLAXIS 2D การวิเคราะห์ในครั้งนี้เลือกพิจารณาในกรณีศึกษาจากขั้นตอนที่ 3.2 ซึ่งจะได้กรณีที่อูโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มมากที่สุด (ค่าการเปลี่ยนขนาดของอูโมงค์สูงสุด) และระดับที่ปลายเสาเข็ม $-1.0D_T$ เป็นระดับที่อูโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุดเป็น กรณีศึกษา โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้ดังนี้ 1. จำลองอูโมงค์ที่มีการก่อสร้างเสร็จแล้ว ประกอบด้วยการขุดดินและการจำลองผนังอูโมงค์ ให้มีคุณสมบัติดังตาราง 3.1 และ 3.2 2. จำลองในระหว่างให้น้ำหนักกระทำที่บนเสาเข็ม ซึ่งค่าแรงที่กระทำต่อเสาเข็มคำนวณได้จากวิธี alpha-method โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ (Safety factor) 2.5 กำหนดให้การวิเคราะห์ในการศึกษาใช้น้ำหนักบรรทุกยอมให้ (Allowable load) เหมือนกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 และทำการจำลองโดยการเปลี่ยนขนาดอูโมงค์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร , 4.07 เมตร , 5.0 เมตร , 6.30 เมตร , 8.0 เมตร และ 10.0 เมตร และความหนาตั้งแต่ 10-90 เซนติเมตร ดังตารางที่ 3.3 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวทั้งสองด้านของอูโมงค์ เพื่อให้ความละเอียดในการวิเคราะห์สมมาตรกันทั้งสองด้าน ใส่น้ำหนักลงเสาเข็มด้านขวาเพียงด้านเดียวตามระยะปลายเสาเข็มที่พิจารณา กำหนดขอบเขตพื้นที่ให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์บริเวณใกล้อูโมงค์ทั้งแนวราบและแนวตั้งให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์มากกว่าบริเวณอื่น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางอูโมงค์สูงสุดและต่ำสุด โดยมีคุณสมบัติของชั้นดินและสภาวะขอบเขตของแบบจำลองเหมือนกับหัวข้อ 3.2.4 และ 3.2.5 ตามลำดับ วิธีการจำลองดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการจำลองขนาดอูโมงค์และผนังอูโมงค์ที่ทำการวิเคราะห์

ขนาดอูโมงค์ (เมตร)	2.00	4.07	5.00	6.30	8.00	10.00
--------------------	------	------	------	------	------	-------

ความหนาผนังอูโมงค์(เมตร)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
--------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



รูปที่ 3.10 แบบจำลองสองมิติ

3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์

ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ศึกษา ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลขนาดและผนังอุโมงค์หลายกลุ่มโดยมีอัตราส่วน $\frac{r}{t}$ (อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์) อัตราส่วนนี้บ่งบอกคุณสมบัติของผนังอุโมงค์ที่ทำการวิเคราะห์ในการศึกษานี้และเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์ในปัจจุบัน ข้อมูลโครงการส่วนใหญ่อยู่ในคุณสมบัติอัตราส่วน Thick shell กับ Solid element ซึ่งจากโปรแกรมการวิเคราะห์ทั้งสองมิตินี้แบ่งการจำลองได้สองแบบ shell element , solid element การจำลองสองแบบนี้มีข้อดีข้อเสียต่างกัน การศึกษานี้ใช้แบบจำลองผนังบาง (Shell element) เพราะสะดวกในการจำลองหลายกรณีศึกษาและง่ายต่อการเปลี่ยนขนาดความหนาผนังอุโมงค์ จากการศึกษา [26] พบว่าการจำลองผนังอุโมงค์ด้วยวิธี Shell element ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าจริงที่เก็บได้ในสนาม จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอุโมงค์กับขนาดความหนาของผนังอุโมงค์ โดยทำการศึกษาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดและต่ำสุด ซึ่งอยู่ในเทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out of roundness) ในทฤษฎี circularity of shell structure หากพิจารณาในเทอมดังกล่าวพบว่ามีความคล้ายคลึงกับการหาค่าความเครียดในชั้นส่วนผนังอุโมงค์ (Bending strain in surface lining) [28] ดังสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 การแสดงค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ ได้ดังสมการ 3.13 ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมรูปร่างที่ไม่แน่นอนได้เป็นอย่างดีและใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาเชิงวิศวกรรมเครื่องกล [29] ดังรูป 3.11

$$\text{Out of Roundness} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{3d}{R} \left(\frac{\Delta D}{D} \right) \quad (3.14)$$

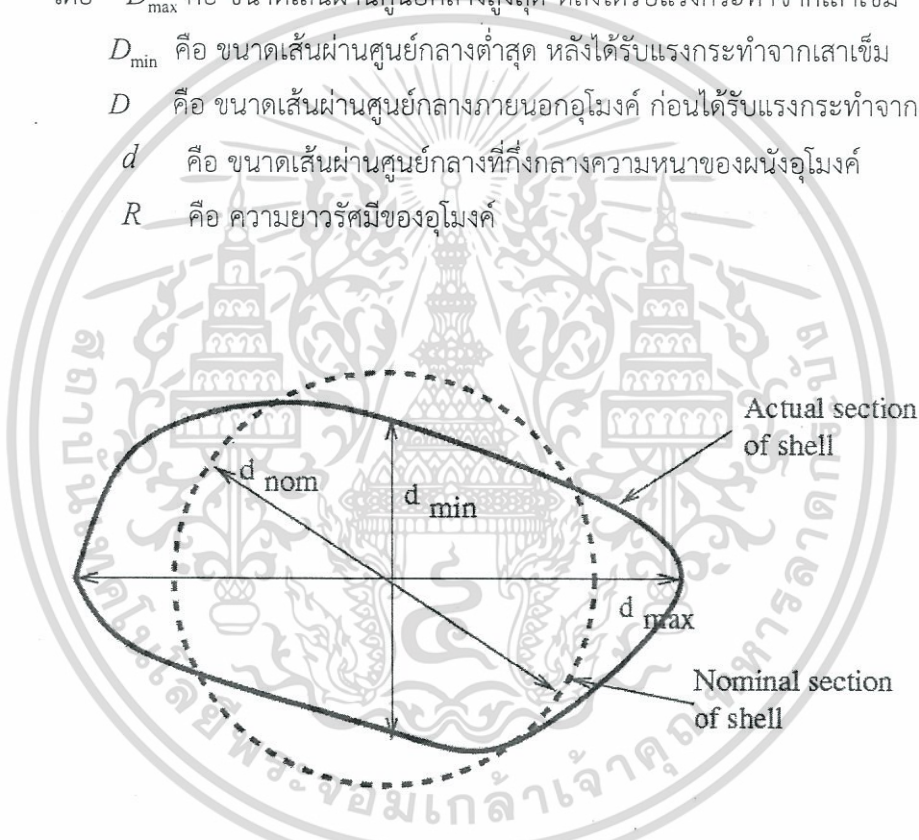
โดย D_{\max} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำจากเสาะเข็ม

D_{\min} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด หลังได้รับแรงกระทำจากเสาะเข็ม

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาะเข็ม

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางความหนาของผนังอุโมงค์

R คือ ความยาวรัศมีของอุโมงค์



รูปที่ 3.11 การวิเคราะห์ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ out of roundness

ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด, ต่ำสุด ในเทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของอุโมงค์ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์ ระดับความลึกที่อุโมงค์วางตัว ชั้นดินที่อุโมงค์วางตัว รวมถึงขนาดความยาวเสาะเข็ม ฯลฯ การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเบี่ยงเบนผนังอุโมงค์ จึงจำลองการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ เพื่อหาความสัมพันธ์และศึกษาพฤติกรรมของปัจจัยดังกล่าวข้างต้น

สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของผนังอุโมงค์มีดังนี้

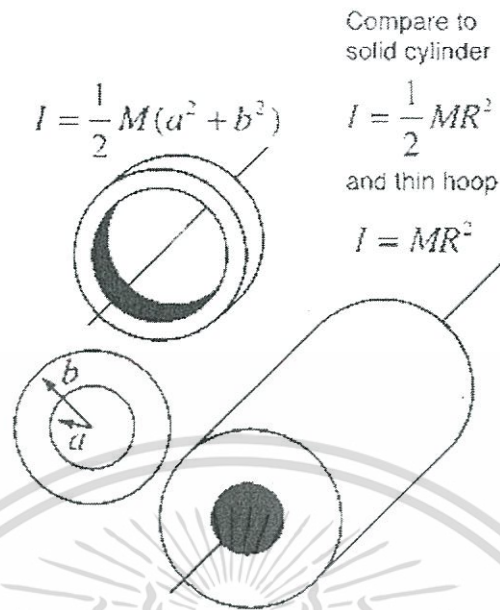
1. ความหนาของผนังอุโมงค์ (t) โดยทั่วไปการออกแบบผนังอุโมงค์นั้น จะพิจารณาให้แบ่งเป็นชิ้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์ (segmental lining) ซึ่งสมมติฐานของการพิจารณาความสามารถต้านทานการเคลื่อนตัวขึ้นชิ้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์นั้นจะอยู่ในรูปของคานที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) เท่ากับ $bt^3/12$ ซึ่ง b คือความกว้างของชิ้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์นั้นจะพิจารณาที่ความยาว 1 เมตร และ อัตราส่วน 12 คือค่าคงที่ ดังนั้นพจน์ที่เหลือที่ใช้ในสมมติฐานสำหรับความหนาของอุโมงค์นี้ คือ t^3

2. ขนาดของอุโมงค์หรือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) สมมติฐานความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของผนังอุโมงค์กับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้น จะถูกพิจารณาในเทอมของโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างวงกลมซึ่งการพิจารณาจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหรือขนาดที่ยาวที่สุดของอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.13 ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อย ที่นำมาพิจารณาจะเท่ากับ MR^2 หรือ $MD^2/4$ ซึ่ง M คือมวลของผนังอุโมงค์ และ 4 เป็นค่าคงที่ ดังนั้นพจน์ที่เหลือที่ใช้ในสมมติฐานสำหรับความหนาของอุโมงค์นี้ D^2

3. ความยาวของเสาเข็ม (h) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำบนเสาเข็ม โดยเข็มที่มีความยาวมากกว่าก็จะรับแรงได้มากขึ้น (พิจารณาในกรณีเสาเข็มวางตัวอยู่ในชั้นดินเดียวกัน)



รูปที่ 3.12 ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11]



รูปที่ 3.13 โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างวงกลม [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์และประเมินผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้ส่วนแรกจะเปรียบเทียบผลกระทบของเสาเข็มรับแรงกระทำต่ออุโมงค์สองขนาด คือ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และ อุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง MWA ในกรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูป ค่าการเปลี่ยนแปลงของผนังอุโมงค์ที่เปลี่ยนไปหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ในแนวแกนตั้ง , แนวราบ รวมถึงค่าต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_V, \Delta\phi_H, \Delta\phi_{C-MAX}, \Delta\phi_{E-MAX}$) ตามลำดับ ส่วนที่สองจะแสดงความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์ที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์สูงสุดด้วยการศึกษาเชิงตัวแปรเพื่อหาความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) พร้อมกับการประเมินผลกระทบของอุโมงค์ทั้ง 2 ขนาดด้วยค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) และค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อค่าที่ยอมรับได้ของผนังอุโมงค์ (Allowable deformation)

4.2 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์อ้างอิงลักษณะอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ส่งน้ำ MWA

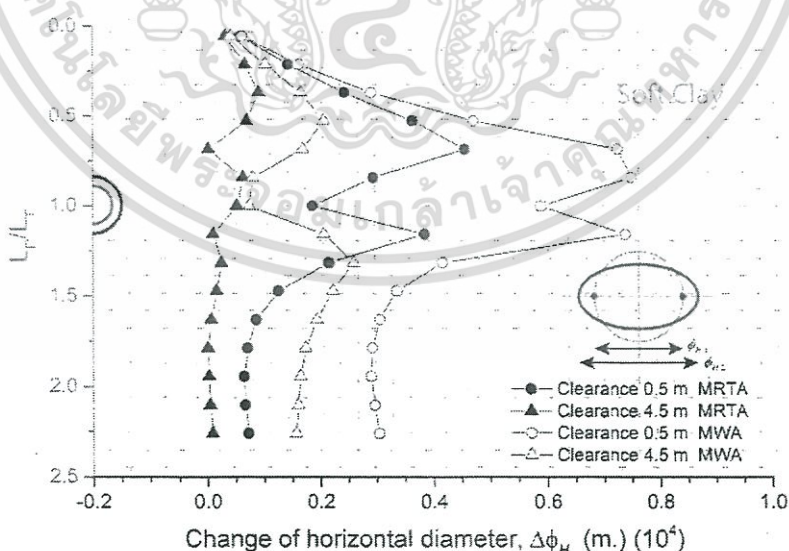
หัวข้อนี้แสดงผลกระทบของเสาเข็มรับแรงกระทำต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม กรณีอุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนกรณี 1 และกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งกรณี 4 ทำการจำลองสองกรณีในระยะห่าง 0.5 , 4.5 เมตร โดยพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระหว่างที่มีเสาเข็มรับแรงวางตัวข้างเคียงเท่านั้น (ไม่พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์) รูปที่ 4.1 แกน x แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ ($\Delta\phi_V, \Delta\phi_H, \Delta\phi_{C-MAX}, \Delta\phi_{E-MAX}$) ในหน่วยเมตร เครื่องหมาย (-) แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ในลักษณะหดตัว (shortening) และเครื่องหมาย (+) แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ในลักษณะยืดตัว (widening) สำหรับแกน y แสดงความยาวเสาเข็มในเทอมอัตราส่วนต่อความลึกอุโมงค์ (L_P/L_T) ซึ่งคือตำแหน่งสัมพัทธ์ในแนวตั้งระหว่างปลายเข็มกับอุโมงค์ โดยที่ $L_P/L_T = 1$ คือปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเดียวกับอุโมงค์ ถ้า L_P/L_T มีค่าน้อยกว่า 1 และมากกว่า 1 แสดงถึงปลายเสาเข็มอยู่เหนือระดับอุโมงค์และปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าระดับอุโมงค์ตามลำดับ ค่า $\Delta\phi_H$ ของอุโมงค์ทั้งสองขนาดดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่ออุโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงที่มีความยาวปลายเสาเข็มต่างกัน และอยู่ห่างจากอุโมงค์ 0.5 กับ 4.5 เมตร เมื่ออุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน กราฟความสัมพันธ์ของการเสียรูปในเทอมของ $\Delta\phi_H$ กับความยาวเสาเข็มของอุโมงค์ทั้งสองขนาดอ้างอิงจากโครงการ (MRTA และ MWA) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปร่างเหมือนกัน โดยที่ระยะ Clearance ที่ 0.5 เมตร จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าระยะ 4.5 เมตร โดยค่าจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่ระยะปลายเสาเข็ม $0.75L_T$ จะเห็นว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) มีค่ามากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) และมีค่ามากที่สุด ณ จุดนี้ จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ระดับเดียวกับอุโมงค์ และการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ปลายเสาเข็ม $1.25L_T$ หรือบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จะลดลงอีกถึงระยะปลายเสาเข็ม $1.5L_T$ และเริ่มลดลงครั้งที่ระยะปลายเสาเข็ม $1.5L_T$ ถึง $2.25L_T$

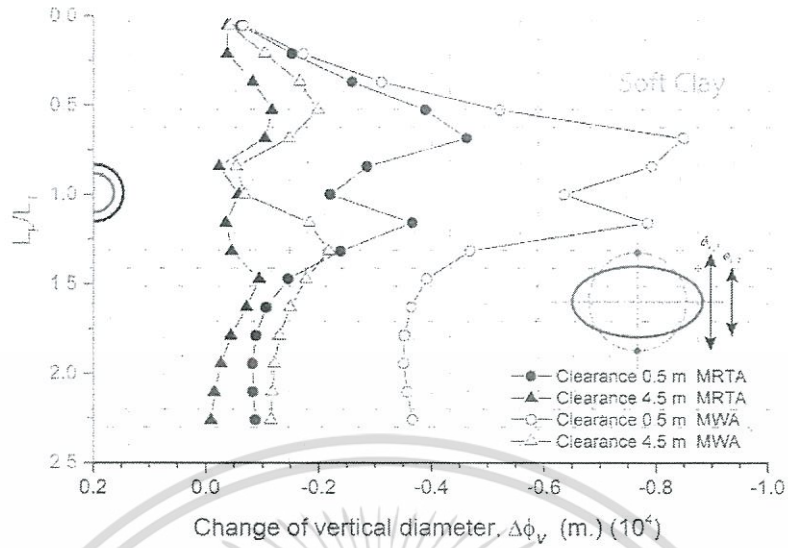
การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง ($\Delta\phi_v$) แสดงดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 4.1 เหมือนกันทั้งแง่ของขนาดและแนวโน้ม แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งเปลี่ยนรูปในลักษณะการหดตัว ดังแสดงด้วยเครื่องหมายลบ (-)

นอกจากนี้ รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดและต่ำสุด $\Delta\phi_{C-MAX}, \Delta\phi_{E-MAX}$ ของอุโมงค์ทั้งสองขนาดอ้างอิงจากโครงการ (MRTA และ MWA) โดยค่าการเปลี่ยนแปลงที่ระยะ Clearance 0.5 เมตร เสาเข็มวางตัวใกล้กับอุโมงค์จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ระยะ 4.5 เมตร โดยค่าจะเพิ่มขึ้นในระยะแรกถึงระดับ $0.75L_T$ และลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ระดับเดียวกับอุโมงค์ หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ระดับ $1.25L_T$ หลังจากนั้นลดลงเล็กน้อยแล้วครั้งที่ระดับ $1.50L_T$ เป็นต้นไป แตกต่างกันที่ค่า $\Delta\phi_{C-MAX}$ จะเปลี่ยนรูปในลักษณะการหดตัว ดังแสดงด้วยเครื่องหมายลบ (-)

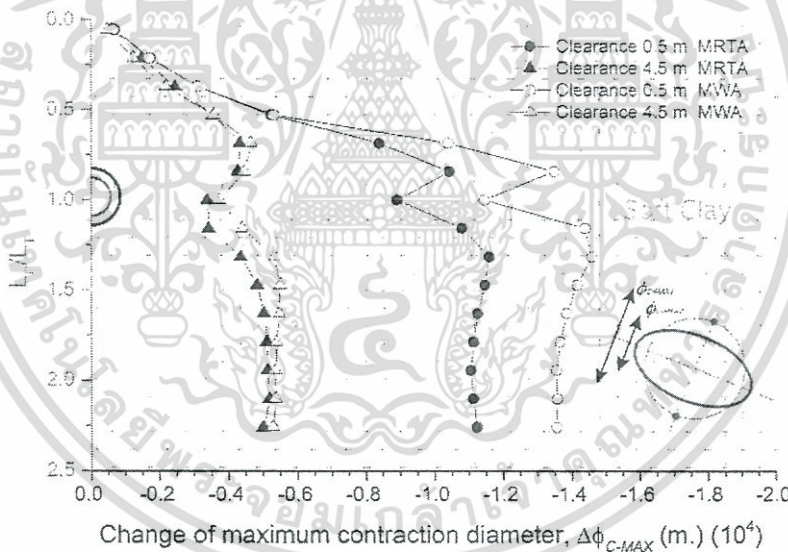


รูปที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

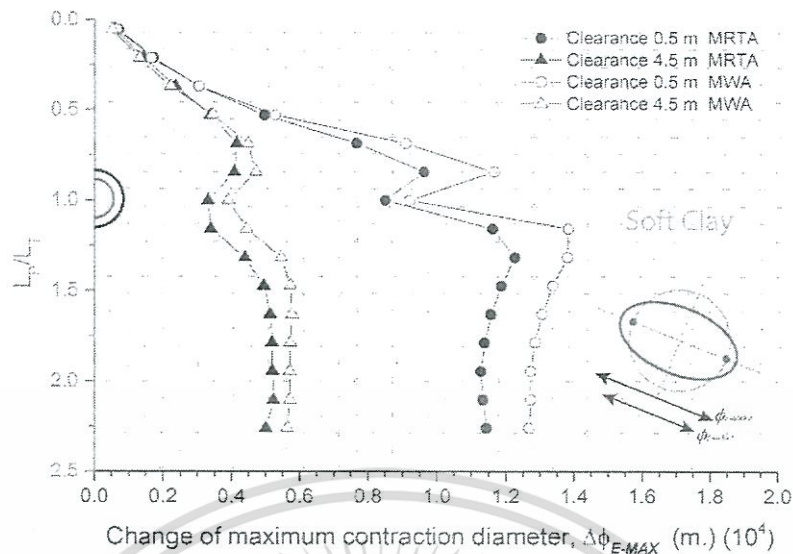


รูปที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ค้ำต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

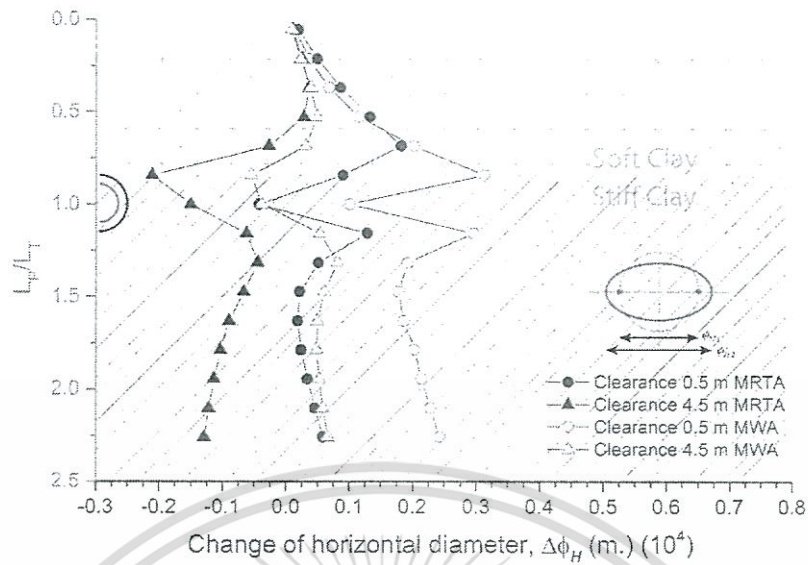
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



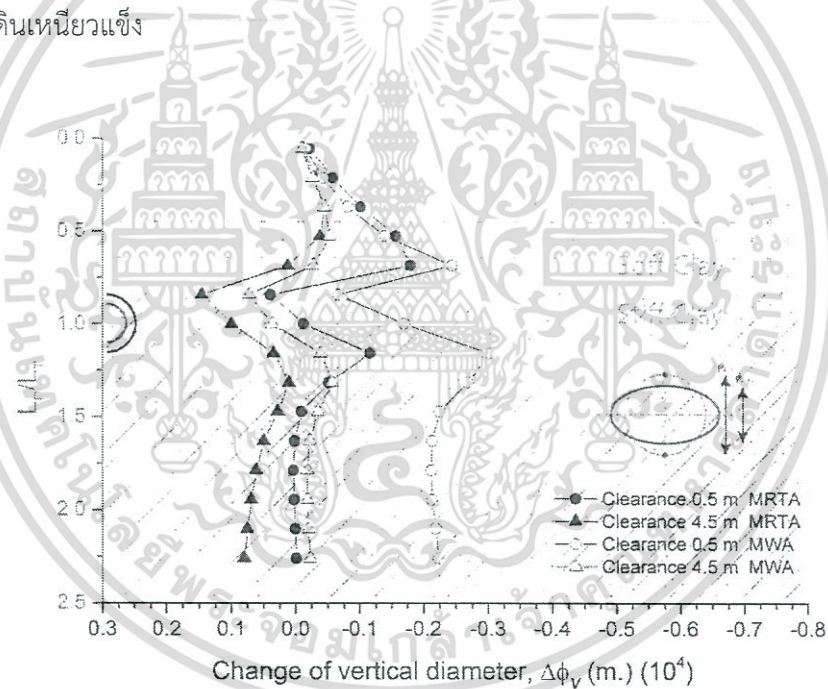
รูปที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

ในรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง พบว่าความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบ $\Delta\phi_v$, $\Delta\phi_H$ ต่อความยาวเสาเข็มมีลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งที่ระยะ Clearance 0.5 เมตรมีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าในระยะ 4.5 เมตร โดยระยะแรกค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับปลายเสาเข็ม = 16.40 เมตร (ระดับที่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน) หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงจะลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ระดับเดียวกับอุโมงค์และกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ระยะ $1.25L_T$ หลังจากนั้นจะลดลงครั้งที่ระดับ $1.25L_T$ ถึง $2.25L_T$ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง $\Delta\phi_v$ จะเปลี่ยนรูปในลักษณะการหดตัว ดังแสดงด้วยเครื่องหมายลบ (-)

นอกจากนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดและต่ำสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) ในระยะที่ปลายเสาเข็มอยู่เหนืออุโมงค์ในช่วงระยะ $0.0L_T$ ถึง $1.0L_T$ คล้ายกับในกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นในระยะแรกและมีค่าลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ระดับเดียวกับอุโมงค์ แต่ในระยะที่ปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าส่วนล่างของอุโมงค์ ค่าการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มมากขึ้น ตามความลึกของปลายเสาเข็ม รูปที่ 4.7 และ 4.8

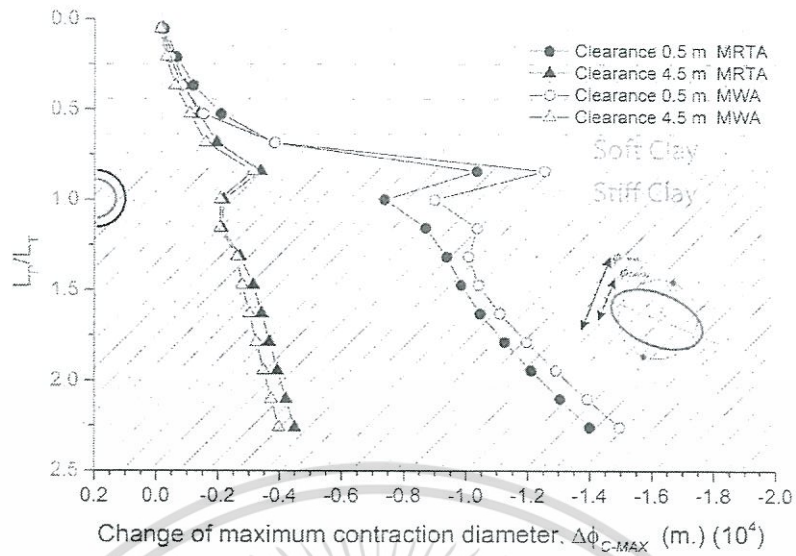


รูปที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

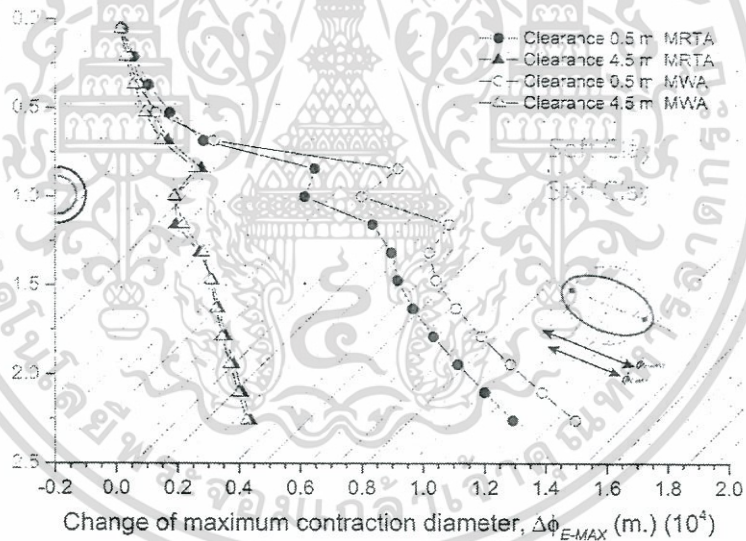


รูปที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

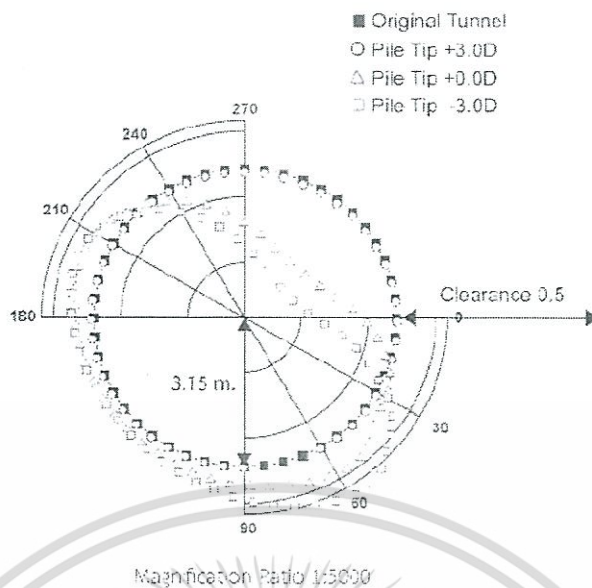


รูปที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง



รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มนั้น อุโมงค์มีการเสีรูปร่างตามแนวแกนแต่มีลักษณะคล้ายเม็ดถั่วที่มีการบิดตัวตามเข็มนาฬิกาเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด $\Delta\phi_C-MAX$, $\Delta\phi_E-MAX$ สามารถสะท้อนถึงผลกระทบต่ออุโมงค์และรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปของอุโมงค์ได้ชัดเจนกว่าแนวตั้งและแนวราบ $\Delta\phi_V$, $\Delta\phi_H$ ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้ จะนำเสนอเพียงแค่ว่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุดเท่านั้น โดยแสดงที่ระยะ Clearance 0.5 และ 4.5 เมตร ซึ่งเป็นผลกระทบที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ส่วนระยะ Clearance 1.5 และ 3.5 เมตร จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก

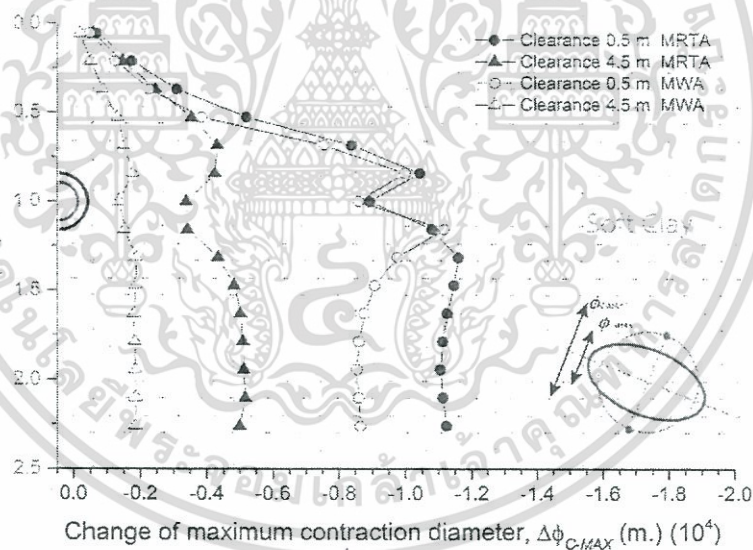
จากผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.3, 4.4, 4.7 และ 4.8 แสดงให้เห็นว่าขนาดอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) ในกรณีศึกษาเกิดการเสีรูปร่างที่มากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) อย่างไรก็ตามความหนาของผนังอุโมงค์ส่งน้ำ MWA (อุโมงค์ขนาด 4.07 เมตร มีผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร) บางกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA (อุโมงค์ขนาด 6.30 เมตร มีผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร) โดยที่อุโมงค์ขนาดเล็กกว่ามีผนังอุโมงค์บางกว่าถึงสองเท่า ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์อุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) ได้รับอิทธิพลในแง่ของการเสีรูปร่างมากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) แต่พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ทั้งสองขนาดมีการสัมพันธ์ระหว่างปลายเข็มกับอุโมงค์ที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์ทั้งสองไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดอุโมงค์ที่อ้างอิงจากโครงการ MRTA หรือ WMA จะได้รับความเสียหายมากกว่ากันเนื่องจากมีขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน

4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ที่แตกต่างกัน

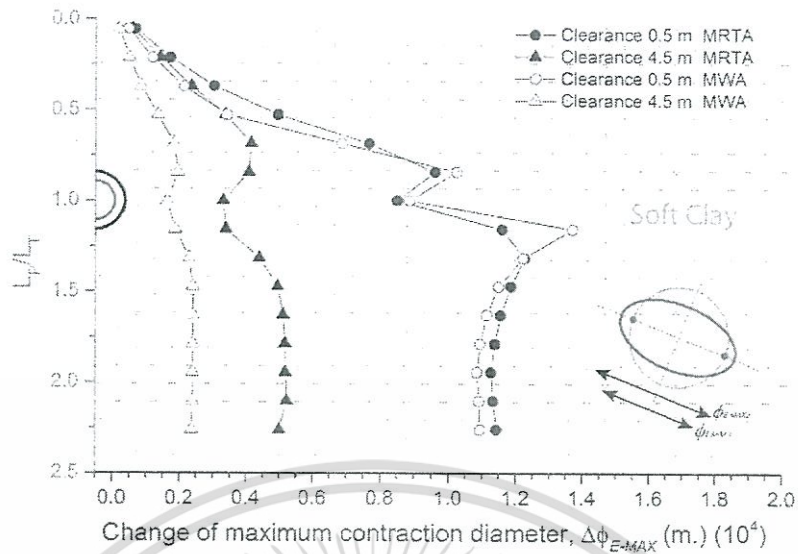
จากหัวข้อก่อนหน้านี้การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ยังมีข้อจำกัดทางด้านขนาดอุโมงค์และความหนาของผนังอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จึงได้เปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบที่ระยะ Clearance 0.5 , 4.5 เมตร โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยกรณีศึกษาที่ 2 , 3 และ 4 จะนำไปแสดงผลในภาคผนวก

4.3.1 การเปรียบเทียบขนาดอุโมงค์ที่ต่างกัน 2 ขนาด

โดยกำหนดให้มีความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน 0.30 เมตร และขนาดอุโมงค์ต่างกันอ้างอิงขนาดจากโครงการ MRTA เท่ากับ 6.30 เมตร WMA เท่ากับ 4.07 เมตร เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยการแปรเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุดของอุโมงค์ทั้งสองขนาด



รูปที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน



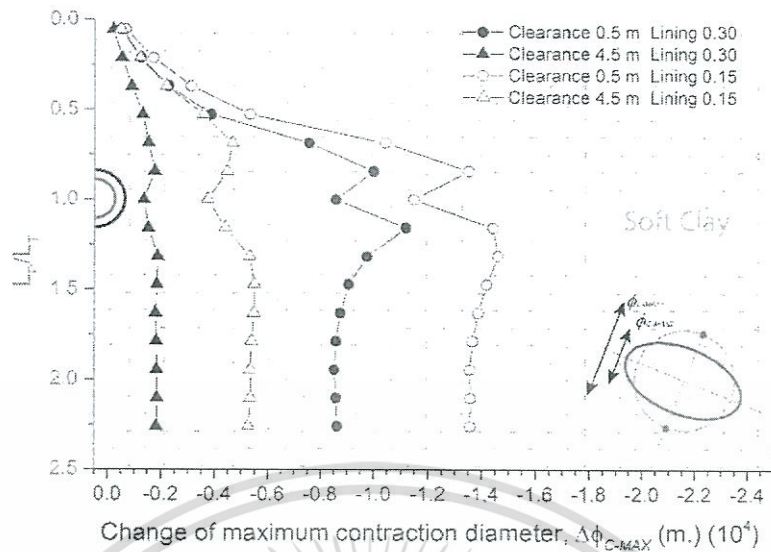
รูปที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) ดังรูปที่ 4.11 และ 4.11 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน หัวข้อ 4.2 ที่กล่าวมาแล้ว พบว่าที่ระยะห่าง 0.5 เมตรค่าการเปลี่ยนแปลงต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันจนไม่สามารถแยกได้ แต่ที่ระยะห่าง 4.5 เมตร ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ที่อ้างอิงขนาดจากโครงการ MRTA มีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าอุโมงค์ส่งน้ำ MWA อย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าขนาดอุโมงค์มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

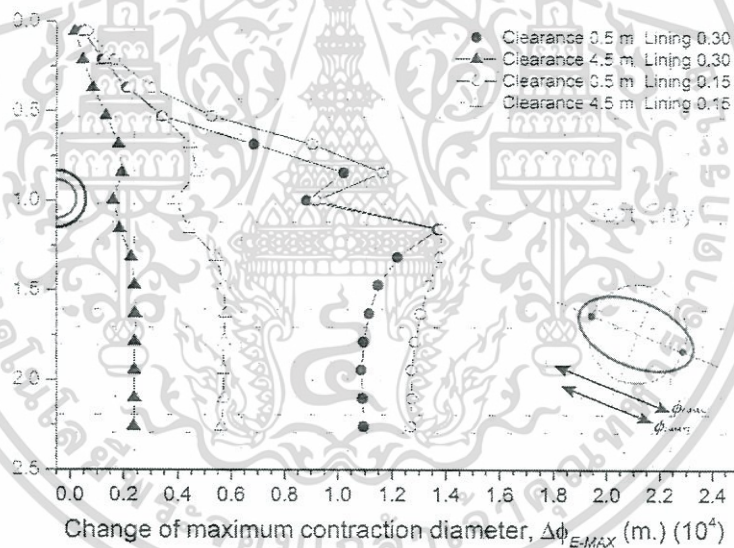
4.3.2 การเปรียบเทียบความหนาผนังอุโมงค์แตกต่างกัน 0.15 เมตร และ 0.30 เมตร

โดยกำหนดให้ขนาดอุโมงค์เท่ากัน มีขนาดอุโมงค์ 4.07 เมตร เท่ากับขนาดอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยการแปรเปลี่ยนความหนาผนังอุโมงค์

ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) ดังรูปที่ 4.12 , 4.13 มีค่าการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.3.1 ที่กล่าวมา โดยที่ระยะห่าง 0.5 และ 4.5 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร ได้รับผลกระทบมากกว่าผนังอุโมงค์ที่หนา 0.30 เมตร แสดงให้เห็นว่าผนังอุโมงค์ที่มีความหนาต่างกัน ส่งผลกระทบบึงค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 4.13 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

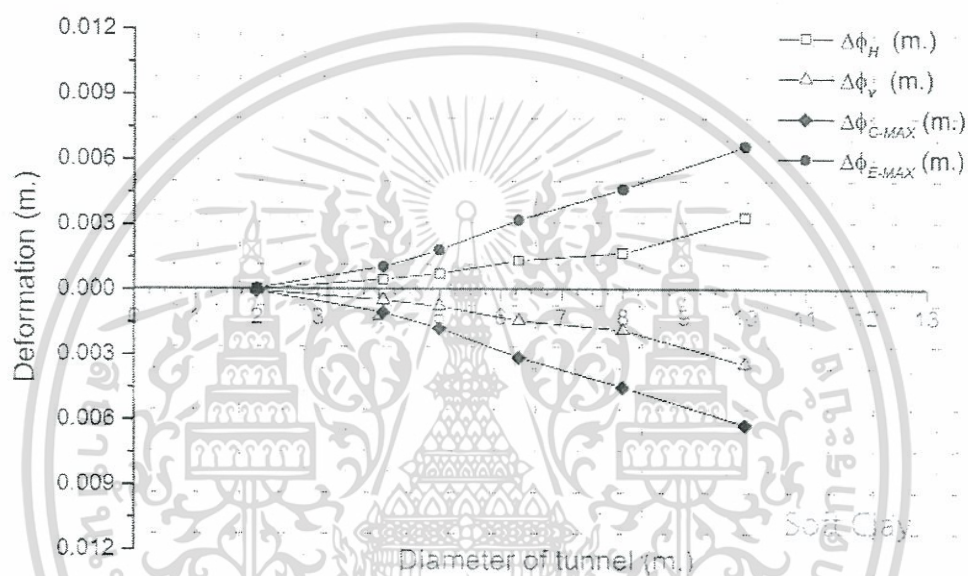
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.3 ขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ในแนวต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งผลการวิเคราะห์ยังไม่สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าขนาดอ้างอิงจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA 6.30 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร หรือ อุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง MWA 4.07 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร อุโมงค์ลักษณะใดได้รับผลกระทบหรือความเสียหายมากกว่า จึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์

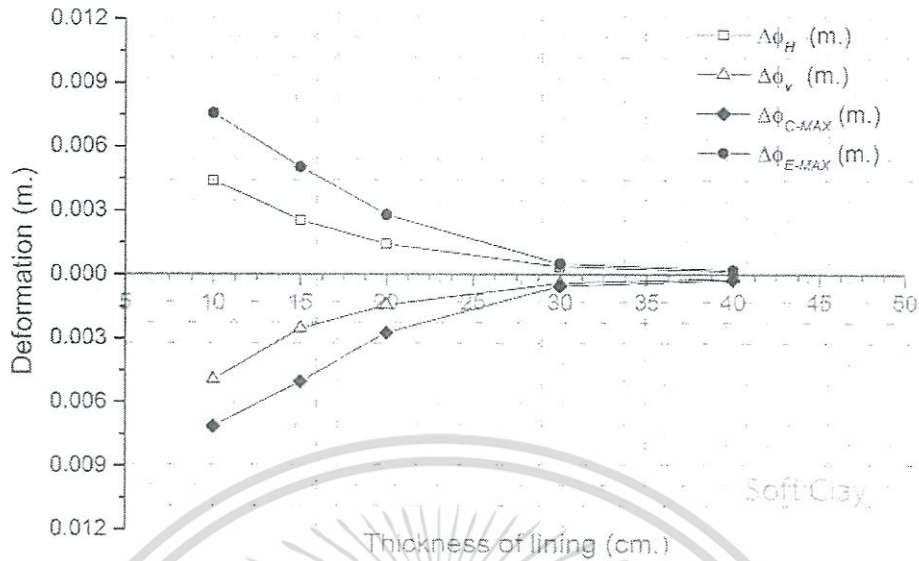
4.4.1 ศึกษาตัวแปรขนาดอุโมงค์และความหนา

โดยจำลองขนาดอุโมงค์ 6 ขนาด ประกอบด้วยอุโมงค์ 2.0 , 4.07 , 5.0 , 6.30 , 8.0 และ 10.0 เมตร กำหนดให้ความหนาผนังอุโมงค์อยู่ระหว่าง 10-40 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้กันทั่วไปในการออกแบบผนังอุโมงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบของทั้งสองตัวแปรที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ โดยวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ที่ระยะปลายเสาเข็มคองที่ $-1.0D_T$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ผนังอุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุด



รูปที่ 4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดต่างกัน ให้ความหนาผนังอุโมงค์คงที่เท่ากับ 0.30 เมตร

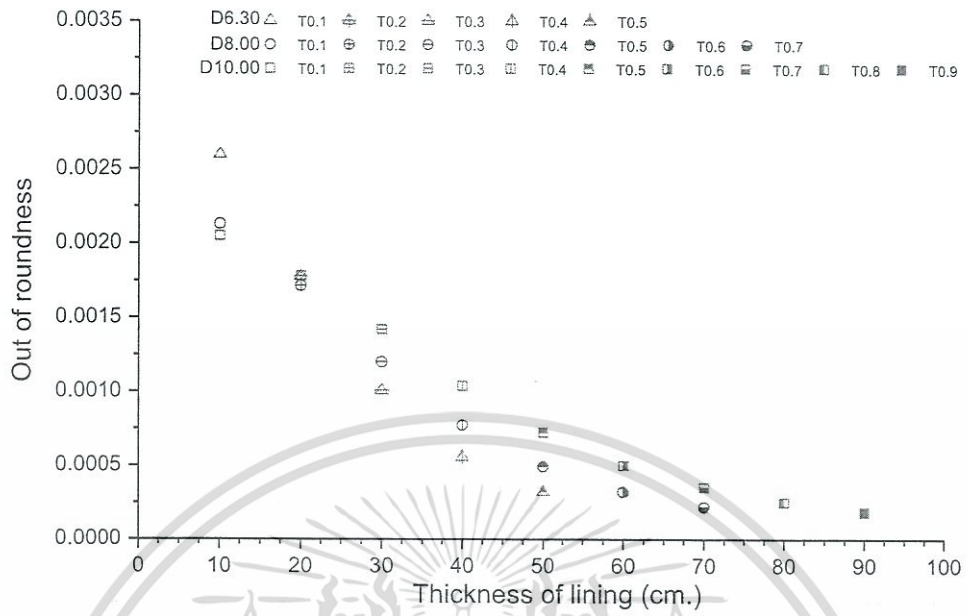
รูปที่ 4.14 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง ราบ สูงสุด และต่ำสุดจากการวิเคราะห์เปลี่ยนขนาดอุโมงค์หลายขนาดโดยมีความหนาของผนังอุโมงค์คงที่เท่ากับ 0.30 เมตร โดยแกน x แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในหน่วย เมตร แกน y แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม พบว่ายิ่งอุโมงค์มีขนาดใหญ่ขึ้นผลกระทบจากแรงกระทำจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดของอุโมงค์ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ขนาดอุโมงค์คงที่ 4.07 เมตร อ้างอิงตามขนาดอุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) และเปลี่ยนผนังอุโมงค์หนา 10 , 15 , 20 , 30 และ 40 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.15 พบว่าอุโมงค์ที่บางได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงมากกว่าอุโมงค์ที่มีผนังอุโมงค์หนากว่า



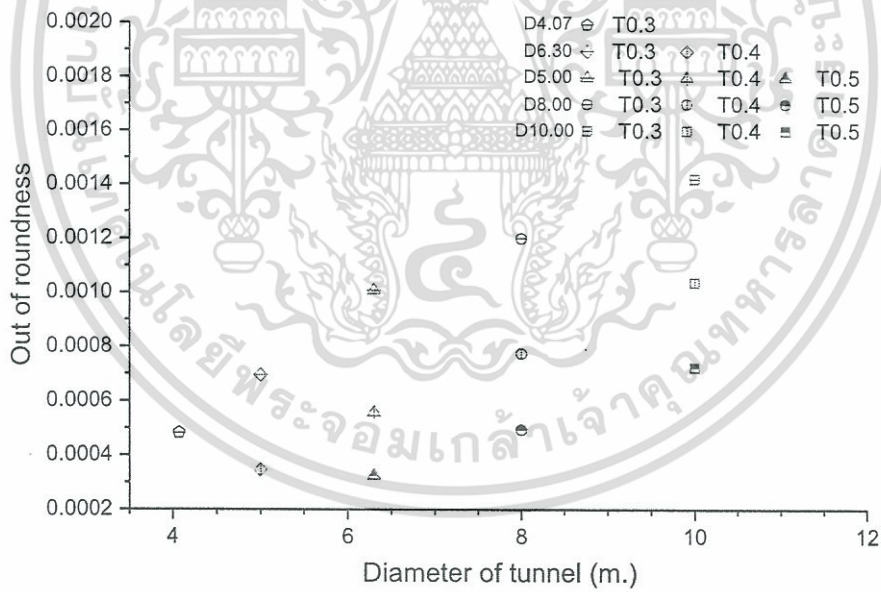
รูปที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดคงที่ 4.07 เมตร ให้ความหนาผนังอุโมงค์ต่างกัน

4.4.2 การสังเคราะห์ข้อมูลระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอุโมงค์กับขนาดความหนาของผนังอุโมงค์ โดยทำการศึกษาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ในทิศทางต่ำสุดและสูงสุดนั้น ค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมากถ้าเทียบกับขนาดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงศึกษาเพิ่มเติมในเทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) สามารถสะท้อนพฤติกรรมค่าการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มรับแรง จากการศึกษาร่วมกับความหนาผนังอุโมงค์ t , ขนาดอุโมงค์ D และความยาวเสาเข็ม h โดยจะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังรูปที่ 4.16 4.17 4.18 ตามลำดับ

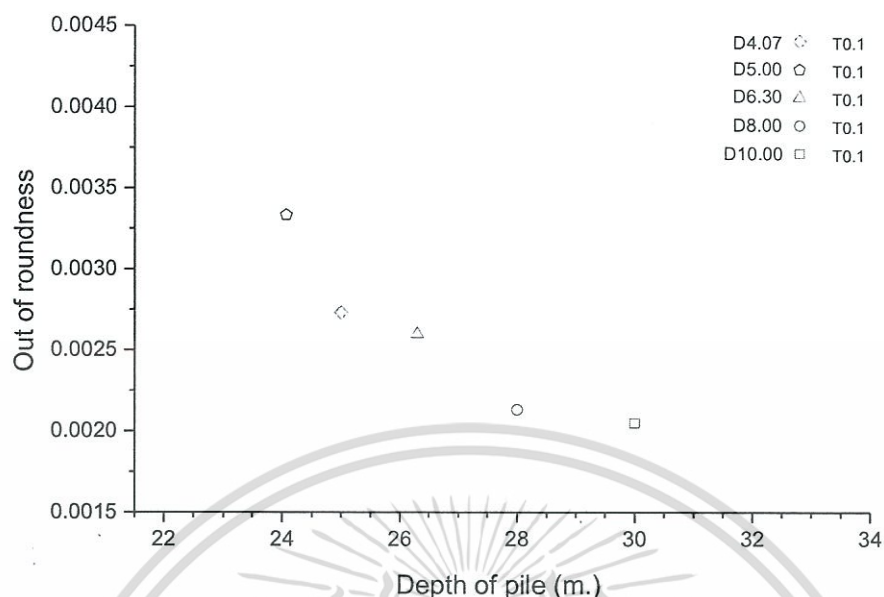


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับขนาดอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

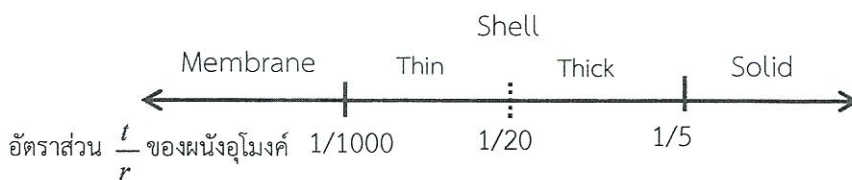


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความลึกเสาเข็ม

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับค่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาผนังอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์ และความลึกเสาเข็ม มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยที่ค่าความหนาผนังอุโมงค์ t แปรผกผันกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์ D แปรผันโดยตรงกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างและความยาวเสาเข็ม h แปรผกผันกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ จากข้อมูลการวิเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่การสร้างสมการและกราฟความสัมพันธ์ในหัวข้อถัดไป

4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์

จากข้อมูลความสัมพันธ์ก่อนหน้านี้ ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลขนาดและผนังอุโมงค์หลายกลุ่ม โดยมีอัตราส่วน $\frac{t}{r}$ (อัตราส่วนความหนาผนังต่อรัศมีอุโมงค์) ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถบ่งบอกคุณสมบัติของผนังอุโมงค์ที่ทำการวิเคราะห์และเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์อีกด้วย ผนังอุโมงค์ส่วนใหญ่ที่มีการก่อสร้างในปัจจุบันมีอัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์ อยู่ในช่วงของ Thick shell ถึง solid element ดังรูปที่ 4.19 อย่างไรก็ตามสำหรับคุณสมบัติของชิ้นส่วนแบบจำลอง (elements) และกำหนดคุณสมบัติของผนังอุโมงค์ในแบบจำลองเป็นแผ่นบาง (Thin shell) ซึ่งในการก่อสร้างปัจจุบันโครงสร้างอาคารในเขตเมืองมีการใช้ฐานรากเสาเข็มเดียวในชั้นดินเหนียวอ่อนจำนวนน้อย ฐานรากแบบเสาเข็มแถวจึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้ได้จำลองความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแถว

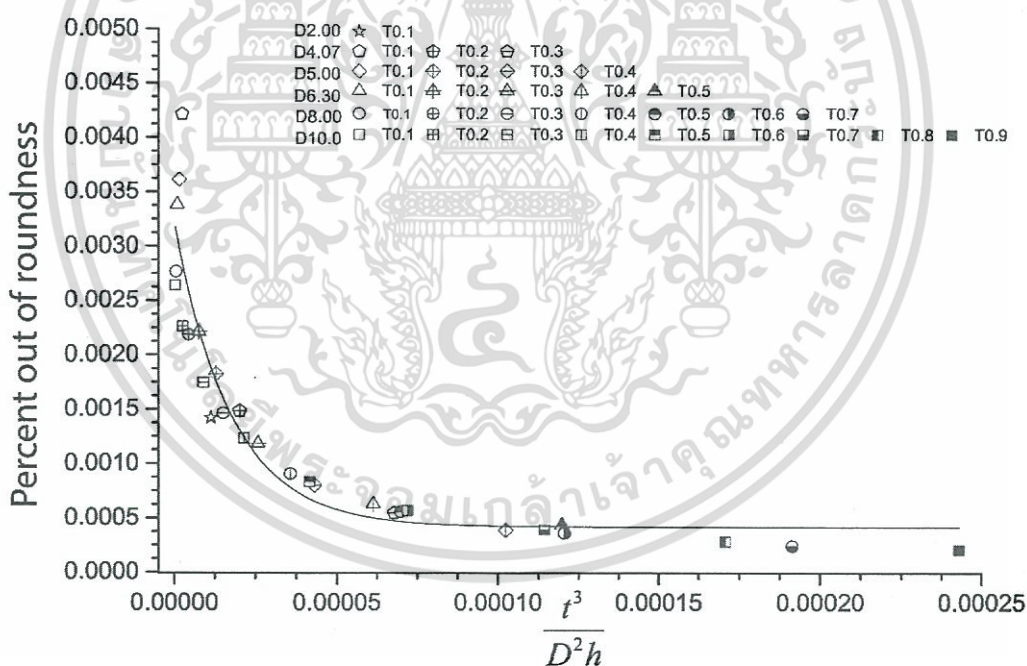


รูปที่ 4.19 อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์

สมการในเทอมของค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ได้ดังรูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์มีแนวโน้มเข้าใกล้กันในทุก ๆ กรณีศึกษา และสามารถหาสมการทำนายเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ในรูปแบบ Exponential equation ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$y = y_0 + Ae^{R_0x} \tag{4.1}$$

$$\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100 = 0.00042 + 0.0028e^{-57443.25 \times \frac{t^3}{D^2h}} \tag{4.2}$$

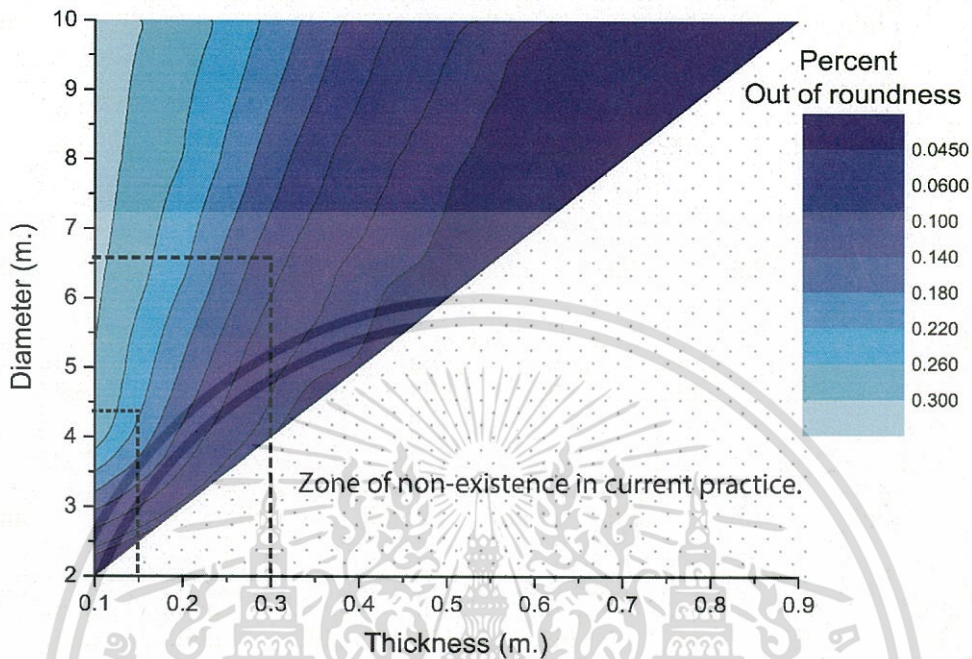


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับปัจจัยที่มีผลกระทบ

จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.20 แกน x แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ แกน y แสดงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง การศึกษาข้อมูลอัตราส่วนขนาดอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์ ในช่วงขนาดและความหนาต่างๆกัน ถูกทำให้อยู่ในแนวโน้มเดียวกัน โดยมีแนวตั้งสมการ 4.1 และ 4.2 จากนั้นนำขนาดและความหนาที่ต่างกันแทนค่าในสมการ 4.2 และเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภาพแสดงค่าที่ได้จากสมการดังกล่าว โดยแกน x แสดงขนาดความหนาผนังอุโมงค์ (เมตร) แกน y แสดงขนาดอุโมงค์ (เมตร)



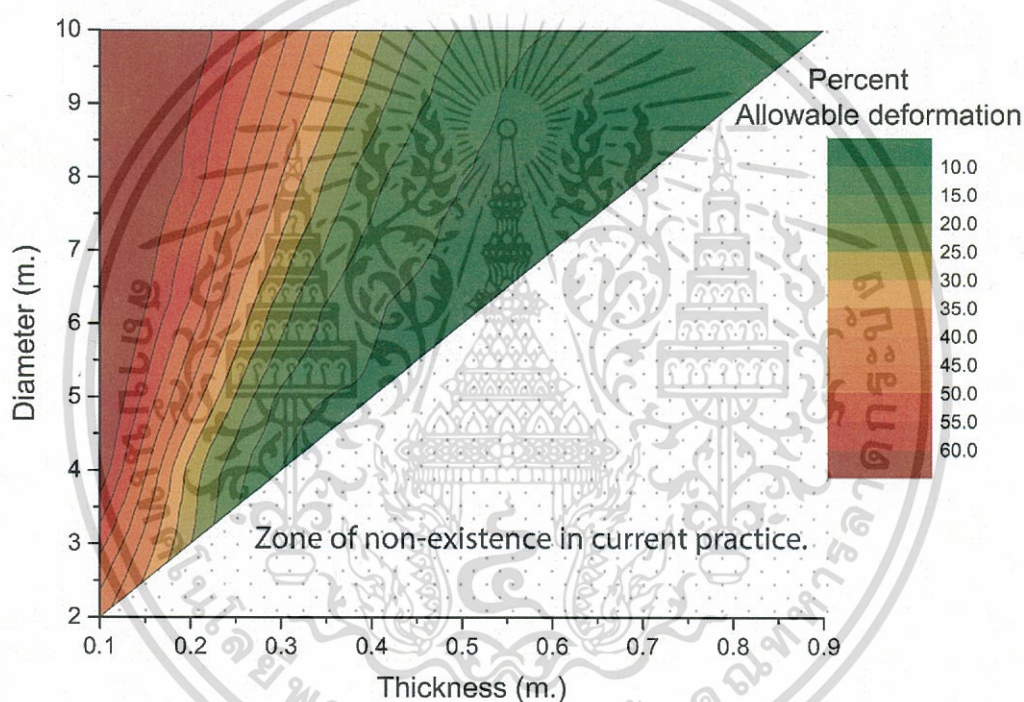
รูปที่ 4.21 แผนภาพประเมินค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ จากความสัมพันธ์ขนาดและความหนาผนังอุโมงค์

จากรูปที่ 4.21 สามารถช่วยประเมินค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ จะได้เปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มรับแรง

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.4.1 อุโมงค์ที่มี (ขนาดใหญ่กว่าหรือผนังอุโมงค์บางกว่า) ย่อมได้รับแรงกระทำต่อผนังอุโมงค์มากกว่า (อุโมงค์ขนาดเล็กหรือผนังหนากว่า) หากนำมาพิจารณาจากแผนภาพรูป 4.21 ช่วยชี้วัดผลกระทบในเทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ได้จริงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อก่อนหน้า

จากแผนภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ช่วยประเมินค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA (ขนาด 6.30 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร) และอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง MWA (ขนาด 4.07 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร) จากรูป 4.21 พบว่าจากลักษณะอุโมงค์อ้างอิงในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ MWA มีค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์มากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA จึงบอกได้ว่าอุโมงค์ส่งน้ำจะได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงมากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า

โดยส่วนมากการเปลี่ยนแปลงอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ จะอยู่ในรูปค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังจากได้รับแรงกระทำจากโครงสร้างข้างเคียงนั้นมีข้อกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับอุโมงค์ไว้อย่างชัดเจน จากการศึกษาอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6.4 เมตรในประเทศสิงคโปร์ โดยค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำไม่ควรเกิน 15 มิลลิเมตรในทุกทิศทางของผนังอุโมงค์ (Allowable deformation) เพื่อให้สะดวกในการใช้งานแผนภาพมากขึ้น จึงได้ทำการเสนอแผนภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การเสียรูปของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ ในเทอมของอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ โดยเทียบจากเกณฑ์ข้อกำหนดของสิงคโปร์เป็นหลัก ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แผนภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์ เทียบกับเกณฑ์ข้อกำหนด

จากรูป 4.22 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์ เทียบกับเกณฑ์ข้อกำหนด (Allowable deformation) โดยแกน x แสดงค่าขนาดความหนาผนังอุโมงค์ (เมตร) แกน y แสดงค่าขนาดอุโมงค์ (เมตร) โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์ 100% จะมีค่าเท่ากับเกณฑ์ข้อกำหนด 15 มิลลิเมตร ซึ่งจากการศึกษานี้ส่วนใหญ่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์จะอยู่ไม่เกิน 80% ของเกณฑ์ข้อกำหนด

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและความหนาของดาตอโมงค์ต่อผลการเสีรูปร่างของอูโมงค์จากเสาเข็มรับแรงที่ที่อยู่ใกล้เคียงโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษามุ่งเน้นตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยใช้ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างอูโมงค์ (out-of-roundness) เป็นตัวชี้วัดกับปัจจัยทั้งสองดังกล่าว พร้อมกับตรวจสอบลักษณะอูโมงค์อ้างอิงจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) และโครงการอูโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority ,MWA) ผลการวิเคราะห์ในการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

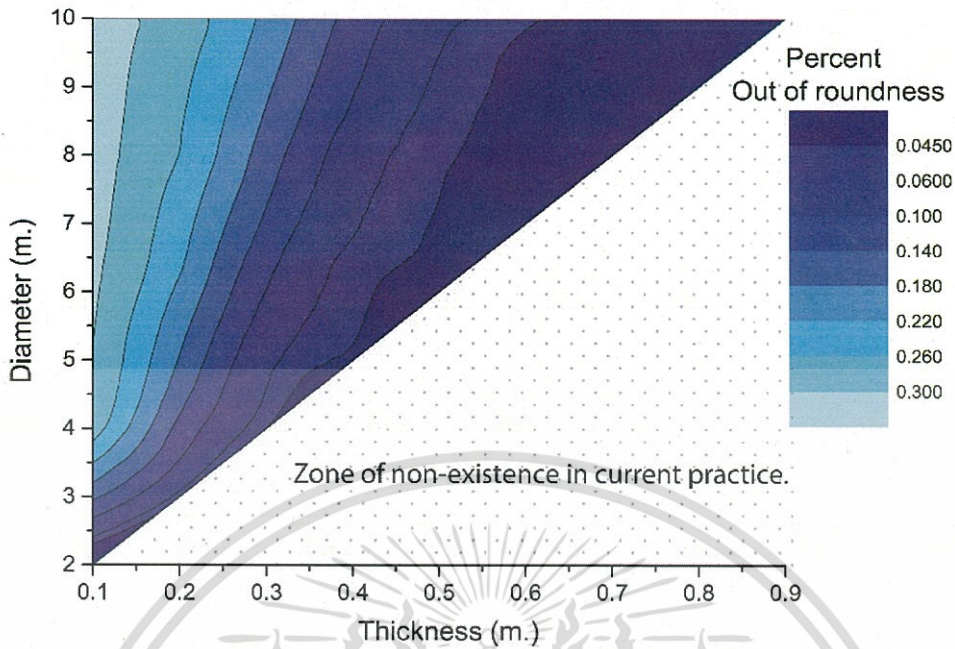
1.ผลกระทบของผนังอูโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเดี่ยว จากทั้ง 4 กรณีการศึกษา ค่าการเปลี่ยนแปลงของผนังอูโมงค์สูงสุดและต่ำสุด ในกรณีอูโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่ามากที่สุดที่ระดับปลายเสาเข็มต่ำกว่าระดับอูโมงค์หนึ่งเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (-1.0D_T) ในขณะที่กรณีที่มีชั้นดินเหนียวแข็งเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอูโมงค์ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับความลึกปลายเสาเข็ม ในกรณีศึกษานี้พิจารณาที่ระยะปลายเสาเข็มเหนืออูโมงค์สามเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (+3.0D_T) ถึงต่ำกว่าระดับอูโมงค์สี่เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (-4.0D_T)

2.ขนาดอูโมงค์ (D) , ความหนาของผนังอูโมงค์ (t) และระดับปลายเสาเข็ม (h) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอูโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

3.จากการวิเคราะห์จะได้สมการความสัมพันธ์และแผนภาพค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอูโมงค์ในทอม Out of roundness หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มร่วมกับขนาดและความหนาของผนังอูโมงค์ เพื่อช่วยในการประเมินค่าการเคลื่อนตัวหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม เป็นแผนภาพเปอร์เซ็นต์การเสีรูปร่างของผนังอูโมงค์ ดังนี้

$$\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100 = 0.00042 + 0.0028e^{-57443.25 \times \frac{t^3}{D^2 h}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4. ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดในเทอมค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำกับขนาดอุโมงค์ ($\frac{\Delta \max}{D}$) สามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมหลังได้รับผลกระทบจากเสาเข็ม โดยสะท้อนครอบคลุมถึงปัจจัยด้านขนาดและความหนาผนังอุโมงค์แล้ว ซึ่งพบว่าจากการศึกษาอ้างอิงขนาดอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปา นครหลวง ได้รับผลกระทบในแง่การเสีรูปร่างมากกว่า อุโมงค์รถไฟฟ้าแม้จะมีขนาดอุโมงค์ที่เล็กกว่า นอกจากนี้ยังสามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์โดยเทียบจากเกณฑ์ข้อกำหนดได้จากแผนภาพ

อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้วิเคราะห์เพียงกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับฐานอุโมงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bakker K.J. and C.B.M.Blom C.B.M. “Ultimate limit state design for linings of bored tunnels.” *Geomechanics and tunneling*, 2, No.4, 2009. pp.345-358
- [2] Mroueh H. and Shahrour I. “Three-dimension finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundation.” *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 2002. pp. 217-230
- [3] Jongpradist P., Kaewsri T., Sawatparnich A., Suwansawat S., Youwai S., Kongkitkul W. and Sunitsakul J. “Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses.” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 34, 2013. pp. 96-109.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Sadowski A. J., Rotter J. M. “Solid or shell finite element to model thick cylindrical tubes and shells under global bending.” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 74, 2013. pp. 143-153.
- [8] Phien-wej N. and Humza M. “Numerical modeling of diaphragm wall behavior in Bangkok soil using hardening soil model.” *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 2012.
- [9] Photayanuvat C., Phien-wej N. and Suwansawat S. “Design aspects of the Bangkok Blue Line Extension.” *Proc. The 31th World tunnel congress*, Turkey, 2005.
- [10] 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

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์. วิศวกรรมอุโมงค์. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ มิน เซอร์วิส ซีพี-พลาย. 2554.
- [12] Stack B. Handbook of Mining and Tunneling Machinery. John Wiley and Sons, New York .1982
- [13] Clough G. W., Sweeney B.P. and Finno R. J. "Measured soil response to EPB shield tunneling." *Journal of geotechnical engineering*, vol. 109, no.2, 1982. pp. 131-149
- [14] Moh Z. C., Hwang R. N., and Ju D. H. "Ground movements around tunnels in soft ground." *Proc. of int. symp. on geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Balkema, Rotterdam, 1996. p.725-730
- [15] Negro A., and Queiroz B. I. P. "Prediction and performance of soft ground tunnels." *Geotechnical Aspects Underground Construction Soft Ground*, Balkema, Tokyo, Japan, 2000. pp: 409-418
- [16] Farias M.M.D, Junior A.H.M. and Assis A.P.D. "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations." *Tunnel. Underground Space Technol*, 19, 2004. pp.283-293.
- [17] Abu-Farsakh M. Y., Voyiadjis G. Z. "Computational model for the simulation of the shield tunneling process in cohesive soils." *Int J Numer Anal Met Geomech*. 23(1). 1999. pp.23-44.
- [18] Galli G., Grimaldi A. and Leonardi A. "Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining." *Comput. Geotech.*, 31, 2004, pp. 171-183.
- [19] Basile F. "A practical method for the non-linear analysis of piled rafts". *Proc. 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2-6 September 2013. pp. 2675-2678
- [20] Kyriakides S. and Shaw P.K. "Response and stability of elasto plastic circular pipes under combined bending and external pressure." *Int. J. Solids Struct.*, 18, 1982. pp.957-73.
- [21] Timoshenko S.P. and Woinowsky-Krieger S. **Theory of plates and shells.** McGraw- Hill International Editions. 1959.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [22] Li P., Du S., Mac X., Yin Z., and Shen S. “Centrifuge investigation into the effect of new shield tunneling on an existing underlying large-diameter tunnel.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42 (2014). pp. 59–66.
- [23] Schanz T., Vermeer P. A. and Bonnier P. G. “The hardening soil model: formulation and verification” *Beyond 2000 in Computational Geotechnics 10 years of Plaxis*, Balkema, Rotterdam, 1999. pp. 281–296.
- [24] T. Rukdeechuai, P. Jongpradist, A. Wonglert and T. Kaewsri, 2009 “Influence of soil models on numerical simulation of geotechnical works in Bangkok subsoil”, *J. of EIT Research and Development*, vol. 20, pp. 17-28.
- [25] Kasper T. and Meschke G. “A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground.” *Int. J. Numerical Analytical Methods Geomechanic.*, 28, 2004. pp1441-1460.
- [26] Lueprasert P., Jongpradist P., Heama N., Ruengwirojjanakul K. and Suwansawatt S. “3D finite element analysis of earth pressure balance shield tunnel excavation using shell element and grouting layer” *International Conference on Geotechnique.6 th.* C-3051. 2016.
- [27] Skempton A. W. “Cast in-situ bored piles in London Clay”, *Geotechnique*, vol. 9, 1959. pp. 153-173.
- [28] Mohamad H. , Soga K. , Bennett P. J. and Mair R. J. “Performance Monitoring of a Secant-Piled Wall Using Distributed Fiber Optic Strain Sensing” , *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*, Vol. 137, Issue 12 , 2011.
- [29] Gillie M. “Measures of Circularity for shell structures.” *J. Struct. Eng.*, 137 (10) , 2011. pp.1241-1243.
- [30] Elert G. “The physic hypertextbook.”: Physics.info 2010. 2007.

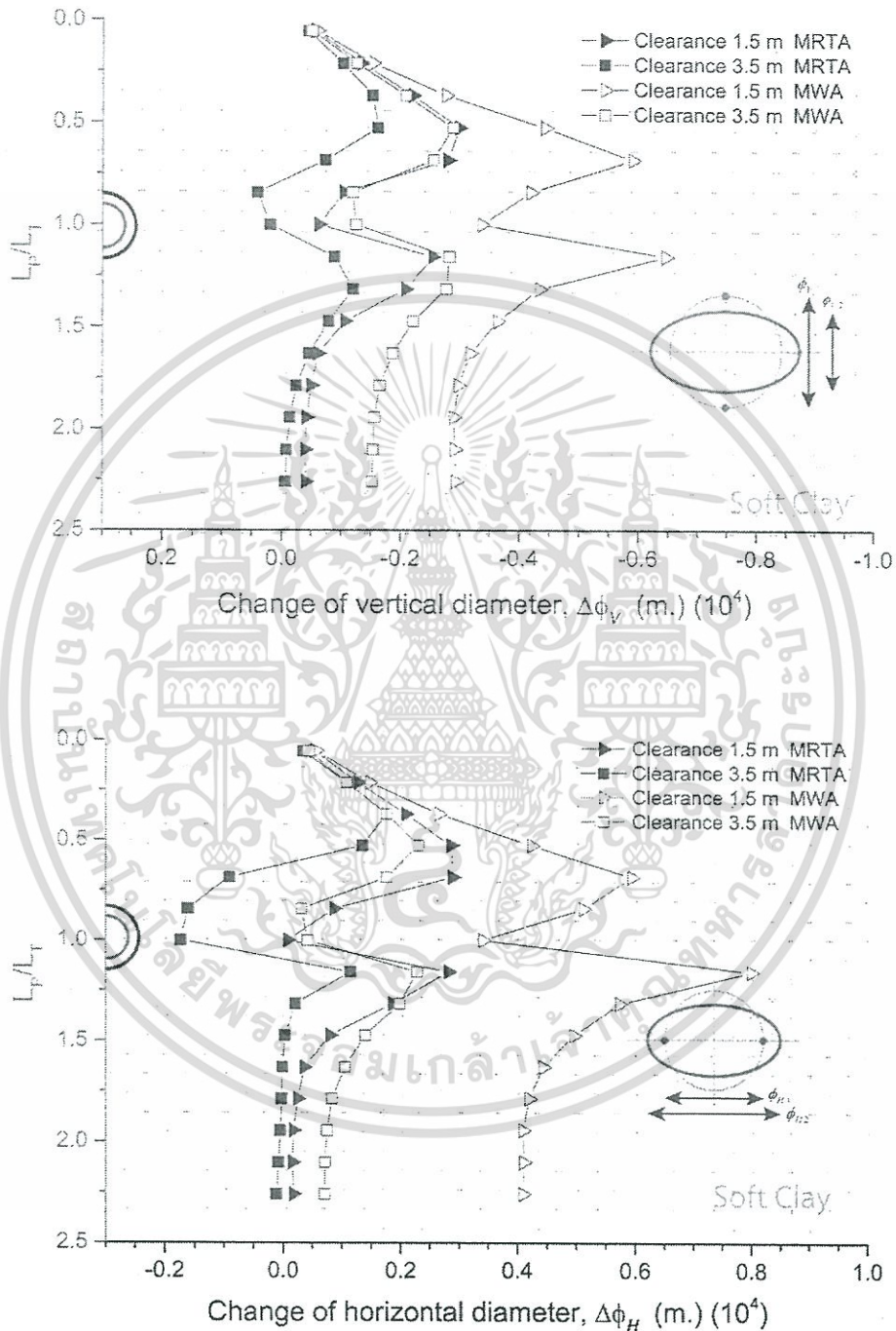


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

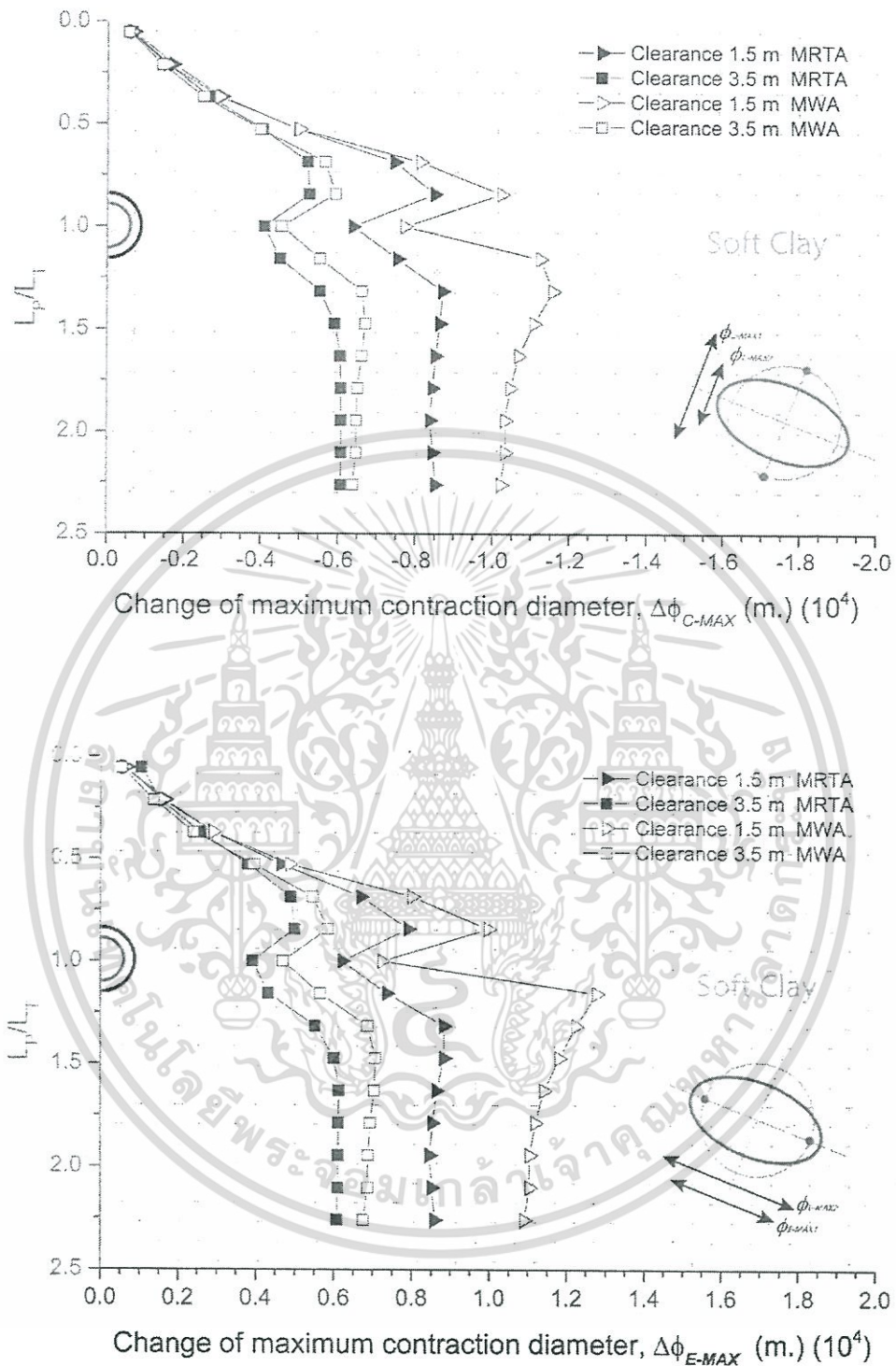
ภาคผนวก

ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ในกรณีที่ 1 Clearance 1.5 และ 3.5 เมตร



รูปที่ ก.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบ ในกรณีที่ 1 อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

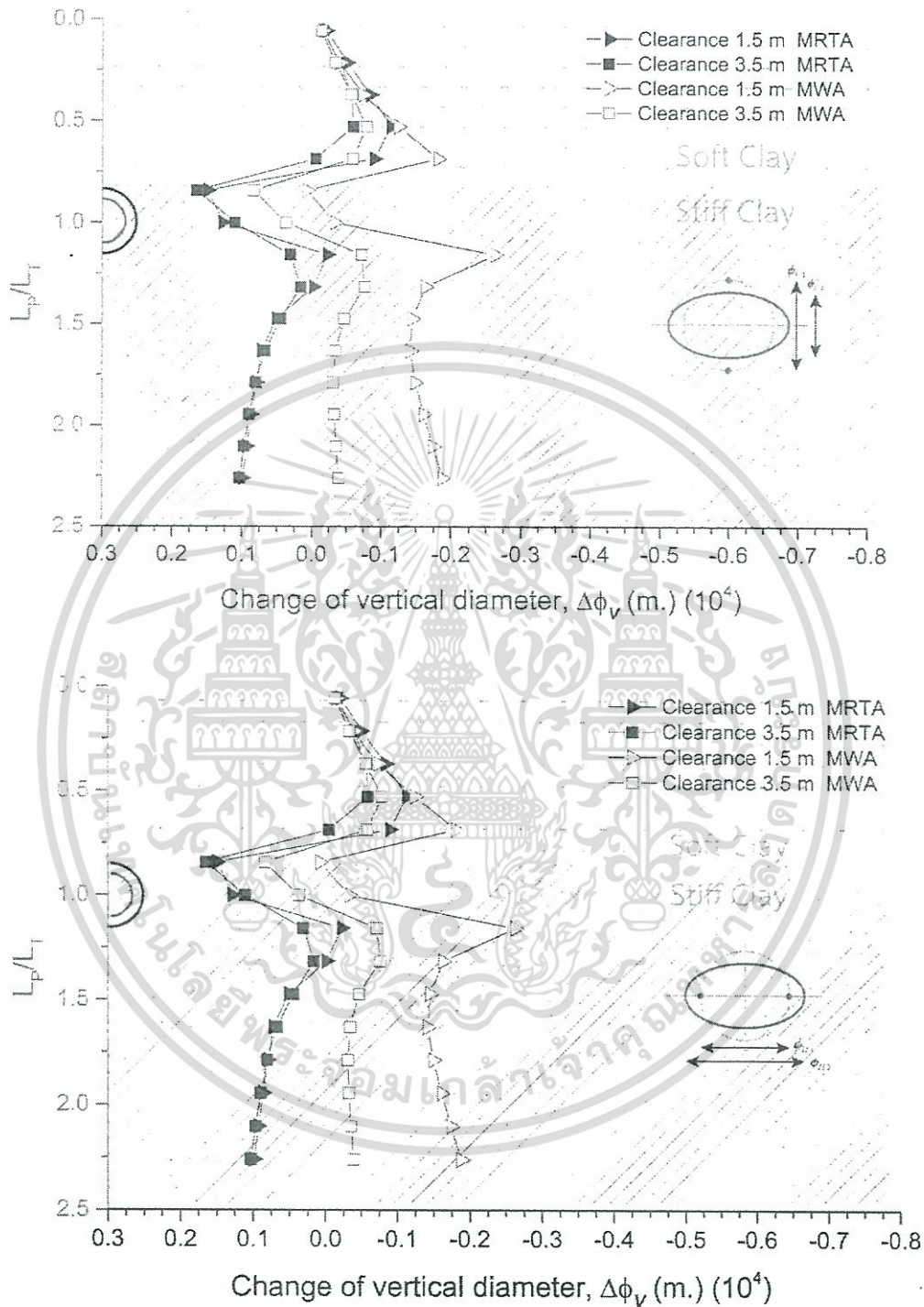
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 1 อ้างอิงลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

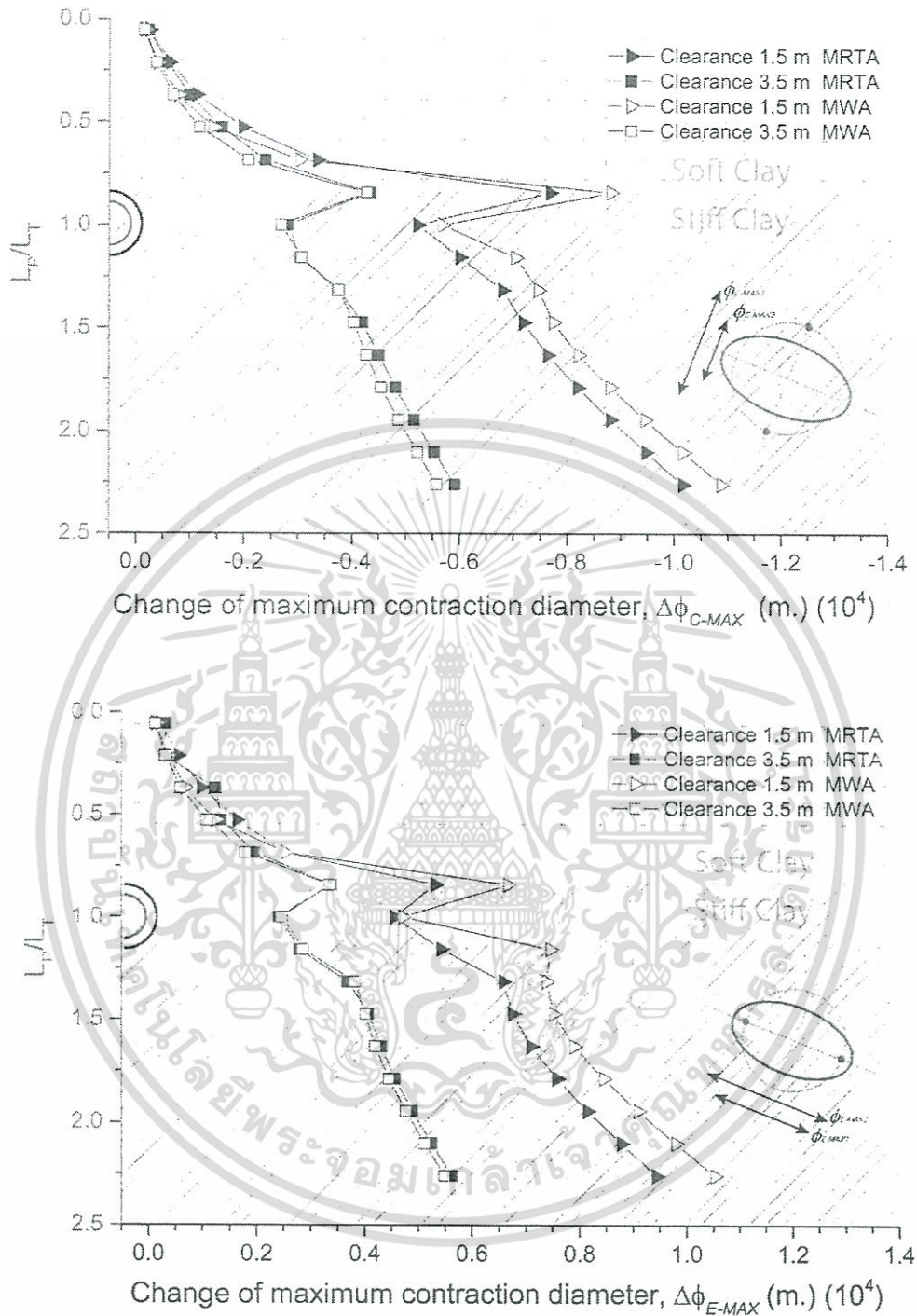
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ในกรณีที่ 4 Clearance 1.5 และ 3.5 เมตร



รูปที่ ก.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบ ในกรณีที่ 4 อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

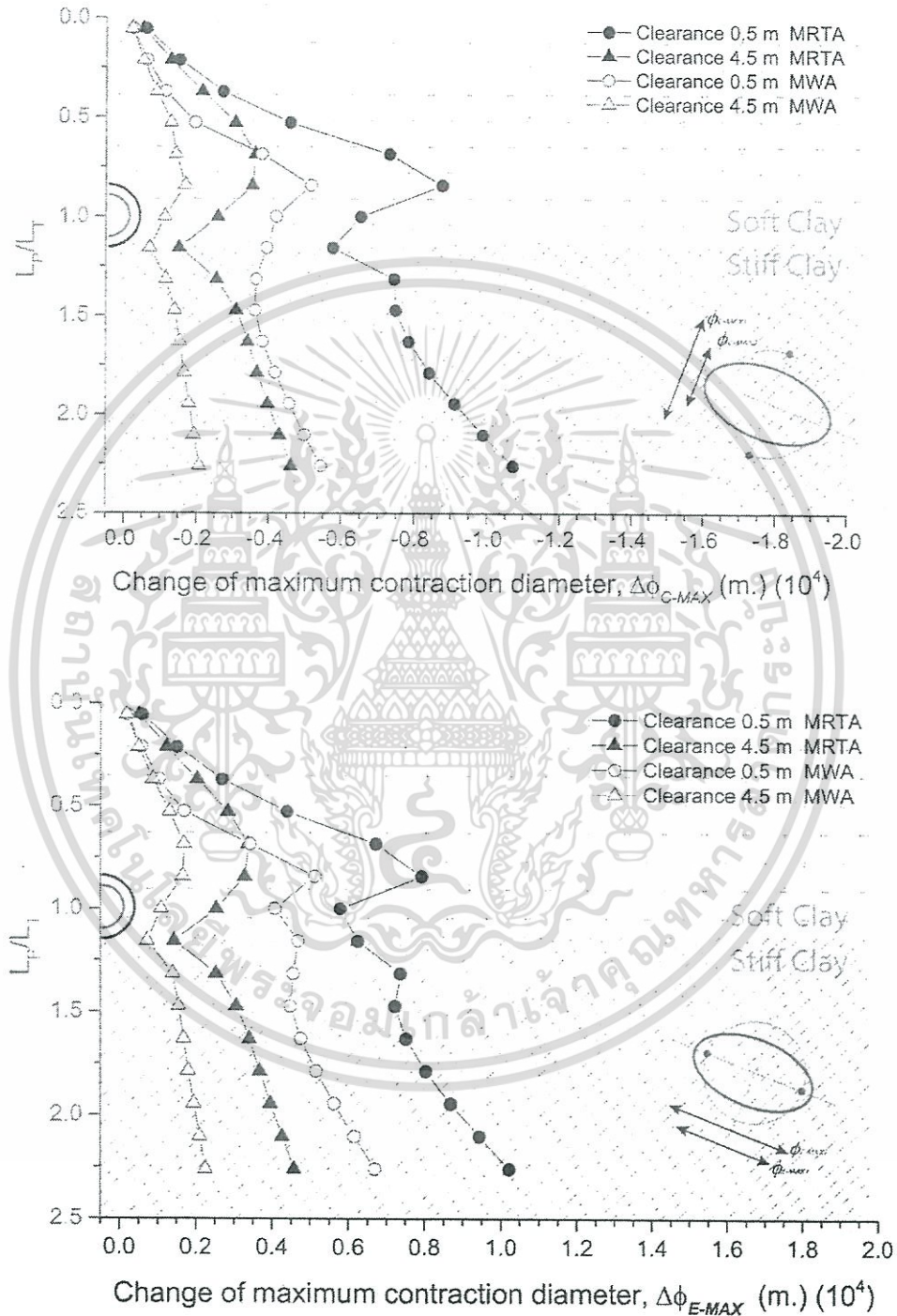
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

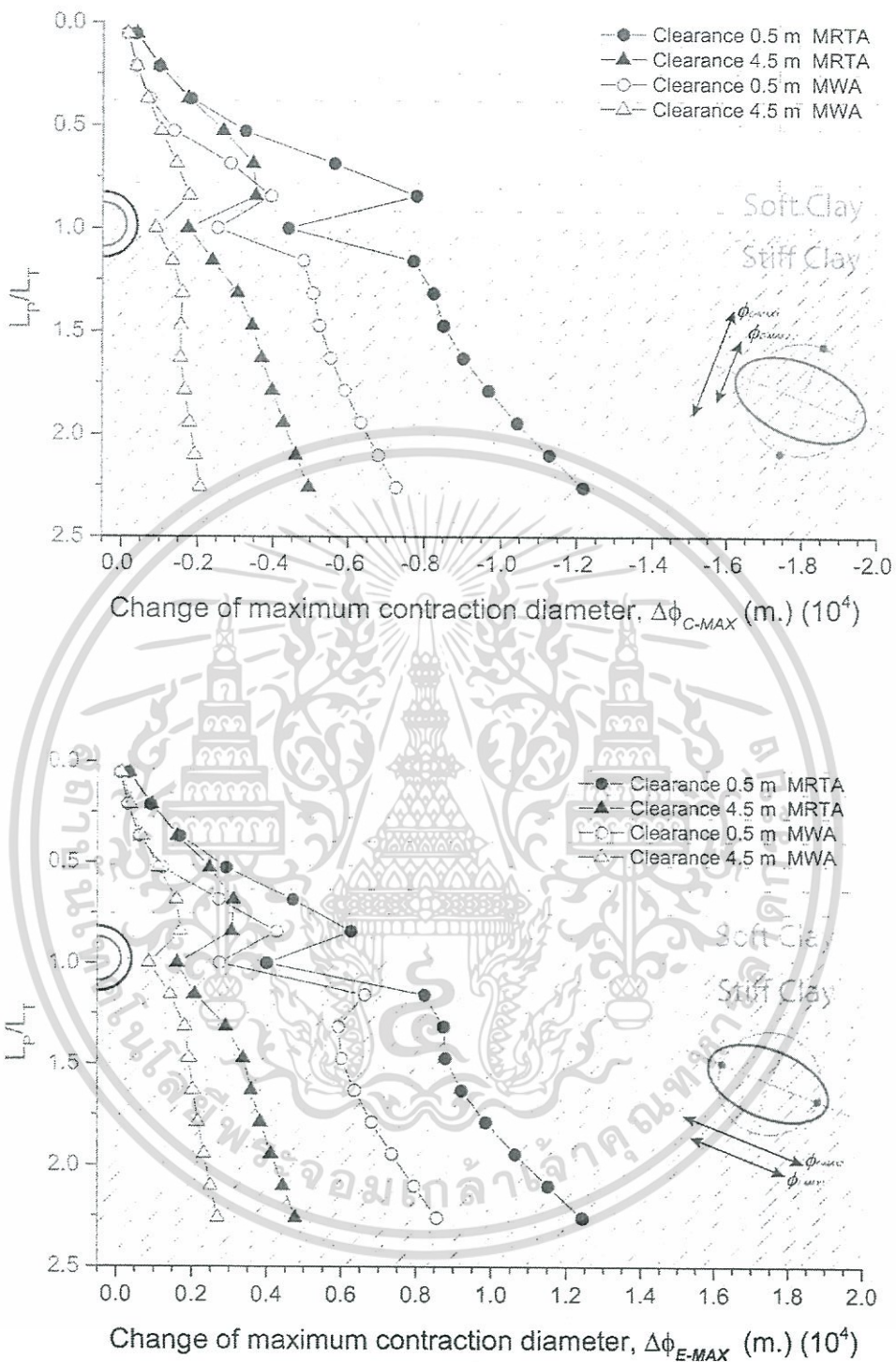
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์มีความหนาเท่ากัน
0.30 เมตร



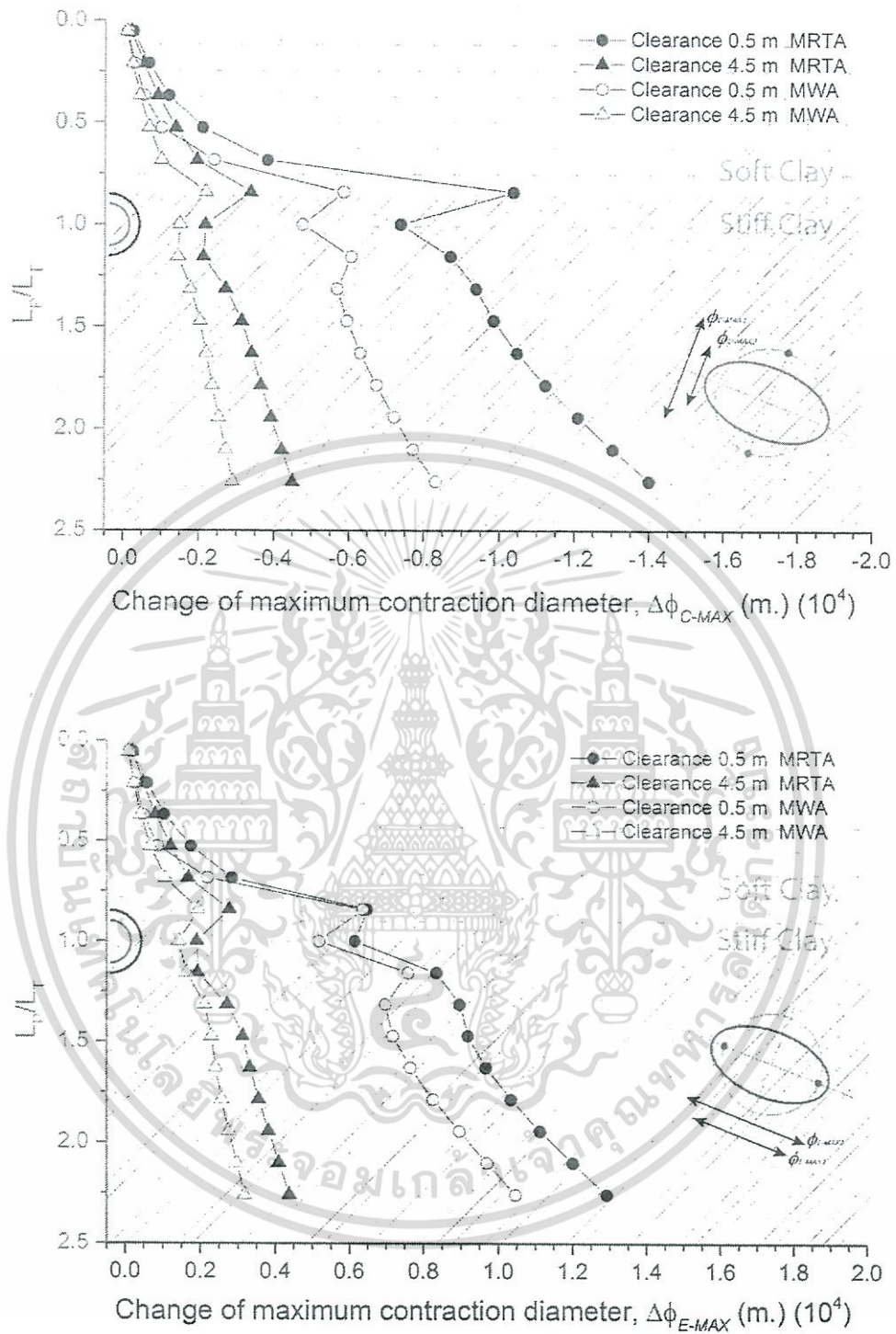
รูปที่ ก.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 2 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

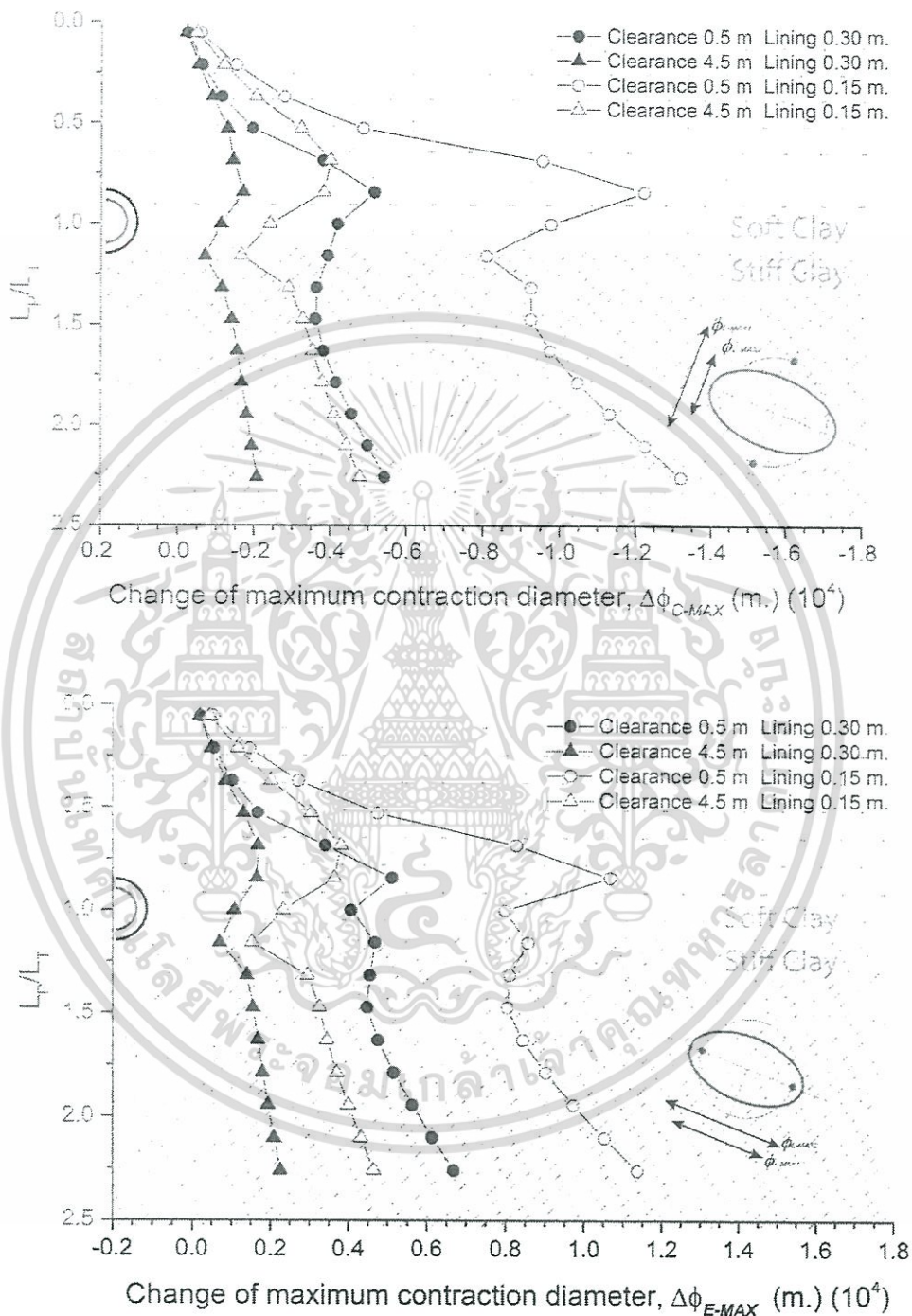


รูปที่ ก.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

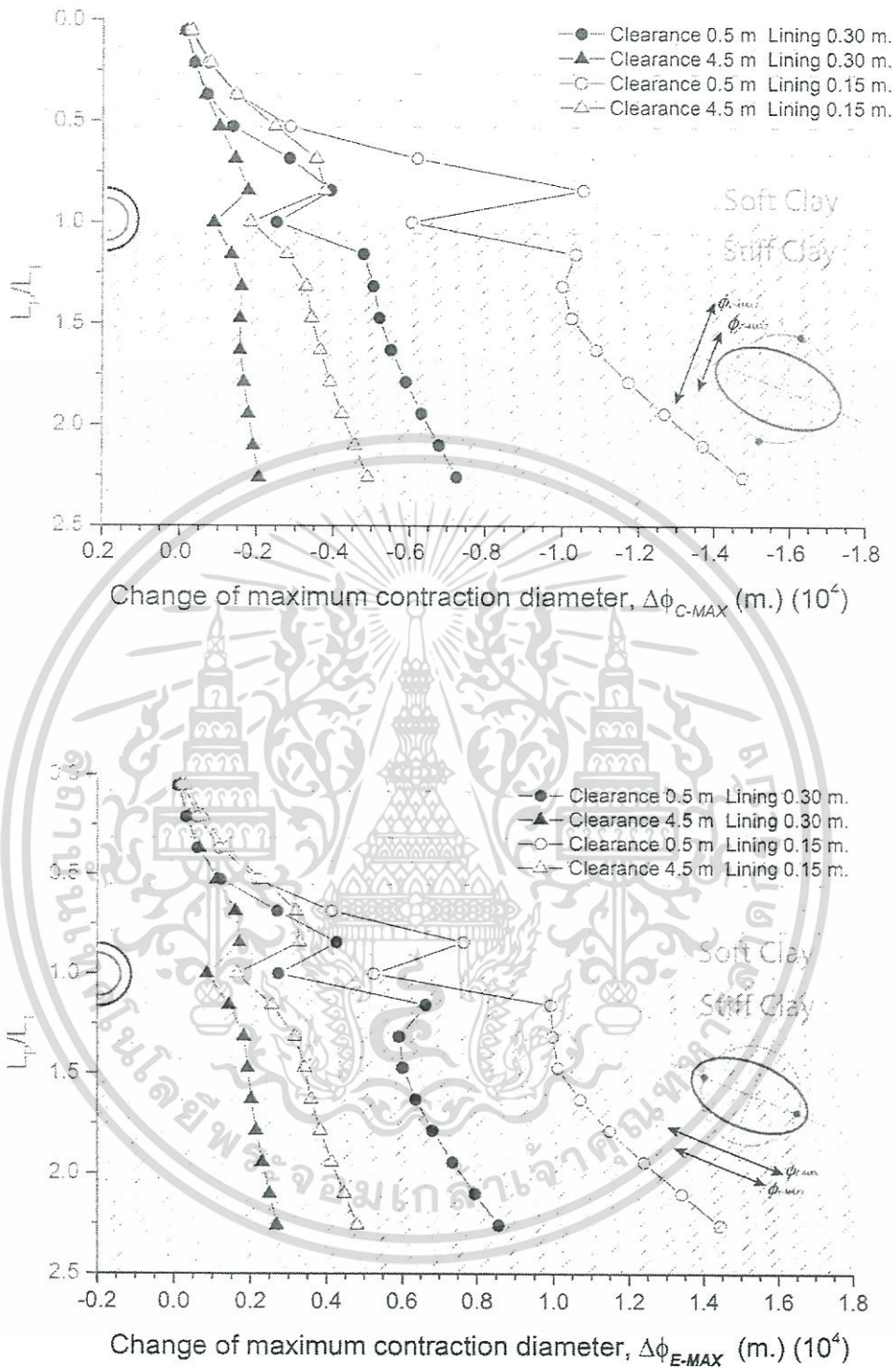
ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์มีขนาดอุโมงค์เท่ากัน

4.07 เมตร



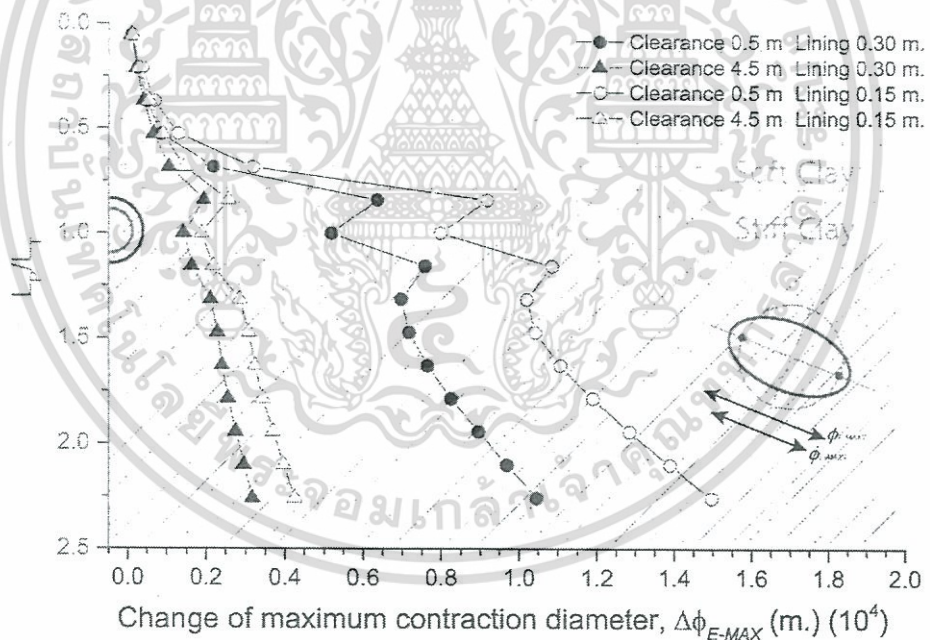
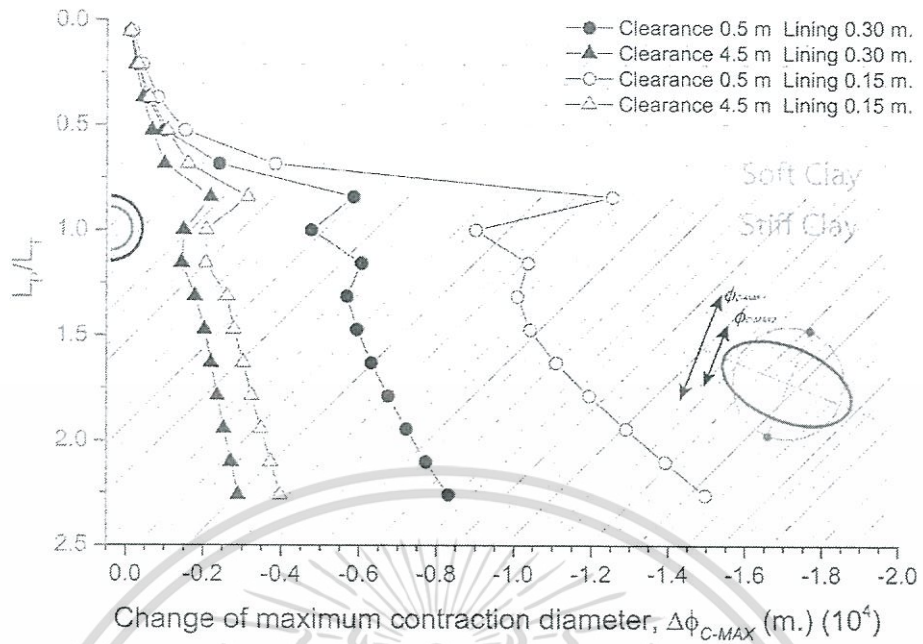
รูปที่ ก.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 2 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 3 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวกชมน เรืองวิโรจน์กุล
 วัน เดือน ปีเกิด 5 ตุลาคม 2535
 ที่อยู่ 2002 หมู่ 2 ตำบลคลองจิก อำเภอบางปะอิน
 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160

ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2559 กชมน เรืองวิโรจน์กุล , พรเกษม จงประดิษฐ์ , สุชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ และ
 ประทีป หลือประเสริฐ, “ผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงที่อยู่ข้างเคียงต่อ
 อุโมงค์ที่ขนาดต่างกัน”, บทความประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่21 ,2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้