



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินผลกระทบเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่อการเสียรูปของอุโมงค์หลายขนาด เพื่อเป็นแนวทางการเบื้องต้นในการพัฒนาเขตคุ้มครองอุโมงค์โดยวิธีเชิงตัวเลข
Numerical investigation of adjacent loaded pile impact on tunnel deformation with various tunnel dimensions for a preliminary guideline to develop the tunnel protection zone

ประเภททุน ทุนวิจัยเริ่มต้นสำหรับอาจารย์ใหม่ รหัสโครงการ KREF186105

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร.ประทีป หลือประเสริฐ

นักวิจัยที่เลี้ยง

ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจาก กองทุนวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2561

ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)	การประเมินผลกระทบเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่อการเสีรูปร่างของอุโมงค์หลายขนาดเพื่อเป็นแนวทางการเบื้องต้นในการพัฒนาเขตคุ้มครองอุโมงค์โดยวิธีเชิงตัวเลข
ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ)	Numerical investigation of adjacent loaded pile impact on tunnel deformation with various tunnel dimensions for a preliminary guideline to develop the tunnel protection zone
แหล่งเงิน	กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีงบประมาณ	พ.ศ. 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 100,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัยปี	1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึง 31 กันยายน พ.ศ. 2562
หัวหน้าโครงการ	ดร.ประทีป หลือประเสริฐ
นักวิจัยพี่เลี้ยง	ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
หน่วยงานต้นสังกัด	ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและความหนาของคานาอุโมงค์ต่อการเสีรูปร่างของอุโมงค์เดิมเนื่องจากผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยมุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของอุโมงค์ กับการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นต่ออุโมงค์ การศึกษานี้เสนอค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) เป็นตัวชี้วัดระดับการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์ จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าสามารถได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับพารามิเตอร์ไร้หน่วยในเทอมอัตราส่วนค่าของขนาดและความหนาของอุโมงค์ นอกจากนี้ระบุได้ว่าจากกรณีชีวิตลักษณะอุโมงค์จาก โครงการอุโมงค์ส่งน้ำเกิดค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างมากกว่าอุโมงค์รถไฟใต้ดินภายใต้สถานการณ์รับแรงจากเสาเข็มข้างเคียงเดียวกัน

คำสำคัญ พื้นที่อิทธิพล, การก่อสร้างอุโมงค์, อุโมงค์เดิม, วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์, การเสีรูปร่างของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ABSTRACT

The dissertation 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.

Keywords Influence zone, Tunneling, Existing tunnel, Finite element method, Tunnel deformation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ซึ่งเป็นนักวิจัยที่เลี้ยงให้กับผม โดยท่านได้สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำระเบียบการทำวิจัยที่ดี และคอยชี้แนะข้อผิดพลาดของงานวิจัยให้ผมปรับปรุงโครงการนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้ง รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

และขอขอบพระคุณกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง “ทุนวิจัยเริ่มต้นสำหรับอาจารย์ใหม่” เลขที่ KREF186105 สำหรับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ด้วยใจจริง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นางสาว กชมน กชมน เรืองวิโรจนกุล ซึ่งเป็นผู้ช่วยวิจัยสำหรับโครงการนี้โดยมีความมุ่งมั่นและอดทนซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จในเวลารวดเร็ว



ประทีป หลื่อประเสริฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 แนวคิดของงานวิจัยและวรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	4
2.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	4
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	21
3.1 แนวทางการวิเคราะห์.....	21
3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์จากสองโครงการ MRTA และ MWA.....	23
3.3 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ.....	28
3.4 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	33
3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4 การวิเคราะห์และประเมินผล.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์อ้างอิงลักษณะอุโมงค์ ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA และอุโมงค์ส่งน้ำ MWA.....	39
4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์แตกต่างกัน.....	46
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์.....	49
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก//ก ผลการวิเคราะห์กรณีอื่นๆ.....	61
ภาคผนวก//ข วารสารระดับนานาชาติ.....	61
ภาคผนวก//ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	74
ประวัตินักวิจัย.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [10].....	5
2.2 โครงการรถไฟฟ้ามหานครสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA).....	6
2.3 สภาพชั้นดินในส่วนเหนือของโครงการ.....	6
2.4 สภาพชั้นดินในส่วนใต้ของโครงการ.....	7
2.5 เส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำที่ทำการศึกษา.....	8
2.6 สภาพชั้นดินของอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง.....	9
2.7 ภาพตัดโครงสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ.....	9
2.8 ส่วนประกอบหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล [12].....	11
2.9 แรงดันน้ำหัวเจาะ.....	12
2.10 การทำงานของแม่แรงไฮดรอลิกในหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล.....	12
2.11 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว.....	15
2.12 แรงจุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบเสาเข็ม.....	17
2.13 กระเปาะความเค้นของเข็มตันเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม.....	18
2.14 ลักษณะการวางตัวของอุโมงค์และเสาเข็มและแนวเขตอิทธิพลใหม่ [3].....	19
2.15 ระยะเวลาปลอดภัยของอุโมงค์ [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 แบบจำลองการวิเคราะห์แบบไฟไนต์อีลิเมนต์.....	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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์..... 51
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและปัญหา

ปัจจุบันพื้นที่ก่อสร้างในกรุงเทพมหานครบนดินมีอย่างจำกัด ในขณะที่ความต้องการการพัฒนา ระบบการขนส่งมวลชนและระบบสาธารณูปโภคเพื่อการแก้ปัญหาการจราจรและรองรับการอุปโภคหรือ บริโภคสำหรับประชากรกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การก่อสร้างใต้ดินโดยเฉพาะอุโมงค์จึงเป็นส่วนสำคัญใน การพัฒนาดังกล่าว เช่น โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ระบบน้ำประปา ไฟฟ้าและก๊าซ เป็นต้น ซึ่งแนว เส้นทางของอุโมงค์ส่วนใหญ่จะวางตัวไปตามแนวถนนใหญ่ในบริเวณพื้นที่เขตเศรษฐกิจ แต่ด้วยพื้นที่ที่จำกัด ในการก่อสร้างบนผิวดิน อนาคตอันใกล้หากมีการก่อสร้างอาคารหรือโครงสร้างพื้นฐานเพื่อแก้ไขปัญหา จราจร เช่น สะพานข้ามแยก อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อสร้างในบริเวณใกล้เคียงที่มีอุโมงค์ใต้ดินเดิมอยู่ ได้ ผลกระทบของการก่อสร้างเหล่านี้อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุโมงค์ ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อ ประเมินผลกระทบที่มีต่ออุโมงค์เดิมเนื่องจากเสาเข็มซึ่งเป็นฐานรากของโครงสร้างที่ใช้รองรับน้ำหนักในพื้นที่ ดินอ่อนซึ่งเป็นลักษณะส่วนใหญ่ในกรุงเทพมหานครจึงมีความสำคัญ

การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างใต้ดิน เช่น อุโมงค์ เสาเข็ม และกำแพงกันดิน นั้น มีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากตัวแปรมีจำนวนมาก วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งในปัจจุบัน ได้พัฒนาและเป็นที่ยอมรับในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนดังกล่าวจึงได้รับความนิยมใช้เพื่อ ประเมินผลกระทบก่อนการก่อสร้างจริง รวมถึงการใช้ในการออกแบบ เช่น [1] ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟ นิต์เอลิเมนต์เพื่อออกแบบโครงสร้างผนังอุโมงค์ในประเทศเนเธอร์แลนด์

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มรับแรงกับอุโมงค์ โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นที่ การศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ต่อเสาเข็มรับแรง เช่น [2] พบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มกับ ตำแหน่งอุโมงค์มีความสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ต่อมา [3] ได้ศึกษาโดยพิจารณาปัจจัยของระยะ เสาเข็มเพิ่มมากขึ้น และเสนอเป็นขอบเขตอิทธิพลของการก่อสร้างอุโมงค์ที่กระทบต่อเสาเข็มข้างเคียง

สำหรับการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมพบว่ามีจำนวนที่น้อย มาก เช่น การศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มจากอาคารงานอาคาร 15 ชั้น ที่มีต่ออุโมงค์รถไฟฟ้า ณ เมือง ลอนดอน ประเทศอังกฤษ [4] ได้วิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบ จากเสาเข็มแบบแถวและกลุ่ม แต่งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาระยะปลายเสาเข็มระดับเดียวและวางตัวอยู่ใน ดินชนิดเดียว ต่อมาในปี วิวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวได้ใช้ในการศึกษาของ [5] โดยเพิ่มปัจจัย คือ ชั้นดินที่อุโมงค์ วางตัว 4 กรณี โดยใช้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) และเพิ่มการพิจารณาดำเนินการสัมพัทธ์ระหว่างปลาย

เข็มกับอุโมงค์ โดยงานศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาเฉพาะอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว ในปีเดียวกัน [6] ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นำเสนอพื้นที่อิทธิพลสำหรับผลกระทบที่เกิดจากเสาเข็มรับแรงที่อยู่ข้างเคียงที่มีต่ออุโมงค์โดยใช้การพิจารณาผลกระทบของเสาเข็มแถวที่มีต่ออุโมงค์เดิมในกรณีเดียวกันกับงานวิจัยของ [5]

จากการศึกษาของ [5] [6] ได้ศึกษาขนาดอุโมงค์เพียงขนาดเดียวคืออุโมงค์รถไฟฟ้าขนาด 6.30 เมตร ซึ่งมีขนาดผนังอุโมงค์ขนาดเดียวกัน เช่นกัน 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. เพื่อศึกษาแนวทางการประเมินผลกระทบของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มรับแรงวางตัวทางด้านข้างได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. แบบจำลองของผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous ring)
2. การศึกษานี้วิเคราะห์อุโมงค์เดี่ยวเป็นหลัก โดยมีเสาเข็มวางตัวทางด้านเดียวของอุโมงค์เท่านั้น
3. การศึกษาในส่วนที่หนึ่ง พิจารณากรณีศึกษากรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งเท่านั้น
4. การศึกษาในส่วนที่สอง ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์พิจารณาเพียงกรณีศึกษากรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเท่านั้น
5. พิจารณาระดับปลายเสาเข็มที่ tunnel spring line และอุโมงค์วางตัวที่ความลึก 20 เมตร
6. การศึกษานี้ขั้นตอนการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม
7. การศึกษานี้ไม่คำนึงถึงผลกระทบของท่อเหล็กภายในอุโมงค์ส่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการกำหนดเขตคุ้มครองหรือระยะที่อนุญาตให้มีการก่อสร้างข้างเคียงสำหรับอุโมงค์ที่ใช้งานแตกต่างกันเช่น อุโมงค์รถไฟ อุโมงค์การประปา และอุโมงค์สำหรับไฟฟ้า เป็น
- 2.ศึกษาและกำหนดวิธีการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ระดับปลายเสาเข็ม ระยะห่างจากผนังอุโมงค์ และสภาพของชั้นดิน รวมถึงเลือกกรณีศึกษาที่ต้องการวิเคราะห์ และแบบจำลองพฤติกรรมดินชั้นสูงที่เหมาะสม
- 3.สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โดยวิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D
- 4.ประเมินค่าการเสียรูปของอุโมงค์เพื่อนำไปใช้กำหนดได้ระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างเสาเข็มข้างเคียงและอุโมงค์เดิมหลายขนาด และเป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาเขตคุ้มครองหรือกำหนดเป็นแนวทางการก่อสร้างโครงสร้างข้างเคียงสำหรับอุโมงค์เดิมหลายขนาด
- 5.เตรียมบทความเสนอตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาติและส่งข้อเสนอผลงานข้อเสนอโครงการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินหรือหน่วยงานภายนอกสถาบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

แนวทางการวิเคราะห์วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าผลกระทบของโครงสร้างต่างๆที่มีต่ออุโมงค์ซึ่งพิจารณาในแง่ของการเสียรูปของอุโมงค์ได้นำปัจจัยของขนาดอุโมงค์มาพิจารณาเป็นหลัก ซึ่งไม่สามารถประเมินความอันตรายที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์ได้อย่างถูกต้อง กล่าวคืออุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่เกิดค่าการเสียรูปที่มากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่า หรืออุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่เกิดค่าการเสียรูปที่น้อยกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่าก็ตาม นั้นไม่ได้หมายความว่าอุโมงค์ที่มีค่าการเสียรูปมากกว่าจะได้รับผลกระทบจากโครงสร้างข้างเคียงมากกว่า แต่จากการศึกษาของ Lueprasert et al., (2018) ซึ่งประเมินการเสียรูปของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง โดยนำปัจจัยความหนาของผนังอุโมงค์มาพิจารณาร่วมกับขนาดของอุโมงค์ ซึ่งพบว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่า (เส้นผ่านศูนย์กลางและควาหนาน้อยกว่า) ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงมากกว่า แต่การศึกษาดังกล่าวประเมินผลกระทบของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มที่มีระยะห่างเพียงระยะเดียว ซึ่งถ้าพิจารณาระยะดังกล่าวเพิ่มเติมสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาใช้เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาเขตคุ้มครองหรือข้อกำหนดการก่อสร้างโครงสร้างข้างเคียงที่ใช้กับอุโมงค์ได้หลายขนาด

2.2 การทบทวนวรรณกรรม

2.2.1) สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพฯ

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยทั่วไป [8][9]

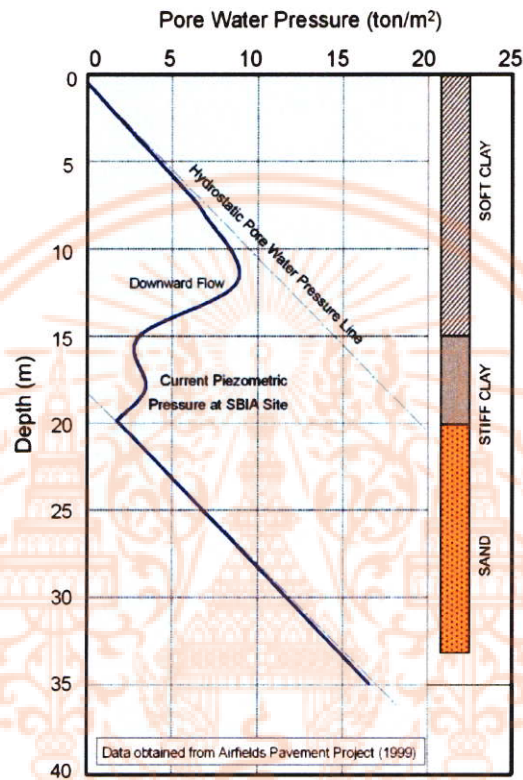
ประเภทของชั้นดิน	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	N (blows/ft)	E (kN/m ²)	ν	K_0	ϕ
ชั้นดินถม	17	20	-	7,000	0.4	0.7	-
ชั้นดินเหนียวอ่อน	16	15	-	5,000	0.4	0.75	-
ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง	17	20	-	7,000	0.4	0.7	-
ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชั้นที่หนึ่ง)	19	100	20	50,000	0.3	0.6	-
ชั้นทราย (ชั้นที่หนึ่ง)	20	-	30	70,000	0.3	0.5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

กรุงเทพฯตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาทำให้มีสภาพชั้นดินที่หลากหลาย ซึ่งการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
จัดเรียงชั้นดินแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 สามารถแบ่งสภาพชั้นดินออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินถม ชั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ชั้นทราย (Sand) ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายแน่น (Very dense sand) ตั้งแต่ระดับความลึก 6 เมตรจากผิวดิน ความดันน้ำมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non-hydrostatic) ซึ่งเกิดจากการสูบน้ำบาดาล จากการสำรวจพบว่า ในชั้นดินเหนียวความดันน้ำที่วัดได้มีค่าไม่คงที่และค่อนข้างมีค่ากระจาย หากนำมาสร้างกราฟ ที่ระดับความลึก 20 เมตร ซึ่งเป็นชั้นทรายพบว่า ความดันน้ำมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่จุดบนสุดของชั้นทรายเป็นดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [10]

2.2.1.1 ข้อมูลโครงการที่ทำการศึกษา

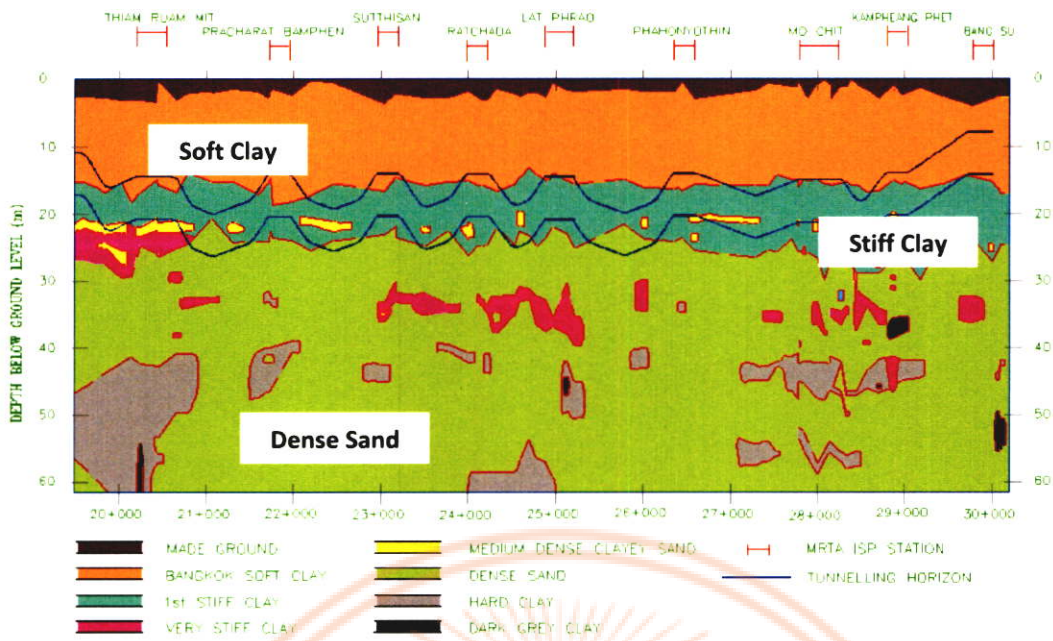
การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีผลต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม โดยมีปัจจัยศึกษาเพิ่มเติม คือ ขนาดของอุโมงค์ที่แตกต่างกันสองขนาด ประกอบไปด้วยโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล หรือโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง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

2.2.1.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ; Metropolitan Rapid Transit Authority

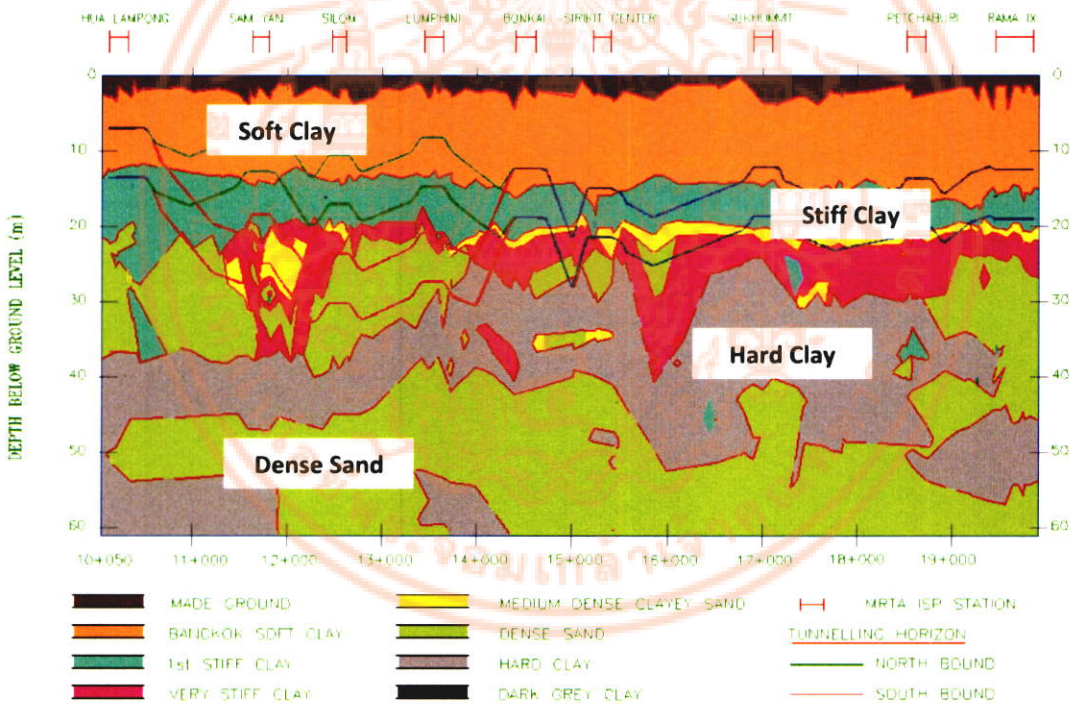
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 สภาพชั้นดินในส่วนเหนือของโครงการ



รูปที่ 2.4 สภาพชั้นดินในส่วนใต้ของโครงการ

2.2.1.3 โครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง ; Metropolitan Rapid Transit Authority (WMA)

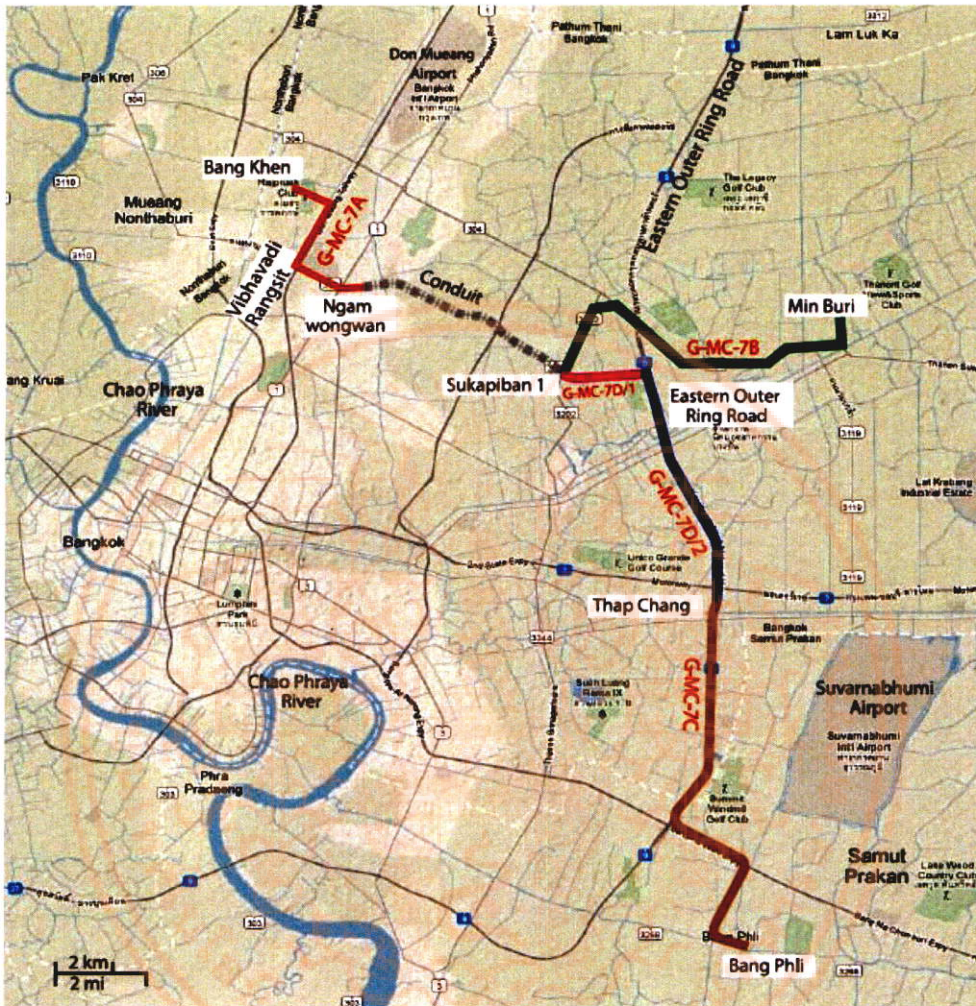
โครงการอุโมงค์ส่งน้ำเป็นหนึ่งในงานขยายกิจการตามโครงการหลักซึ่งประกอบไปด้วย 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเพื่อความรู้ความเข้าใจในบางประเด็นไปใช้ประโยชน์ตามการดำเนินการโครงการหลัก เช่นโครงการระบบน้ำดิบ, โครงการโรงสูบน้ำและถังเก็บน้ำ, โครงการบ่อบาดาล เป็นต้น โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เส้นทางที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลจากโครงการ 7 ในปี 2543-2557 รหัสโครงการ (G-MC-7A) โครงการอุโมงค์ส่งน้ำวางตัวในแนวเส้นทางบางเขน-วิภาวดีรังสิต-งามวงศ์วาน ระยะทางโดยประมาณ 6.7 กิโลเมตร ดังรูปที่ 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.07 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.77 เมตรผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร



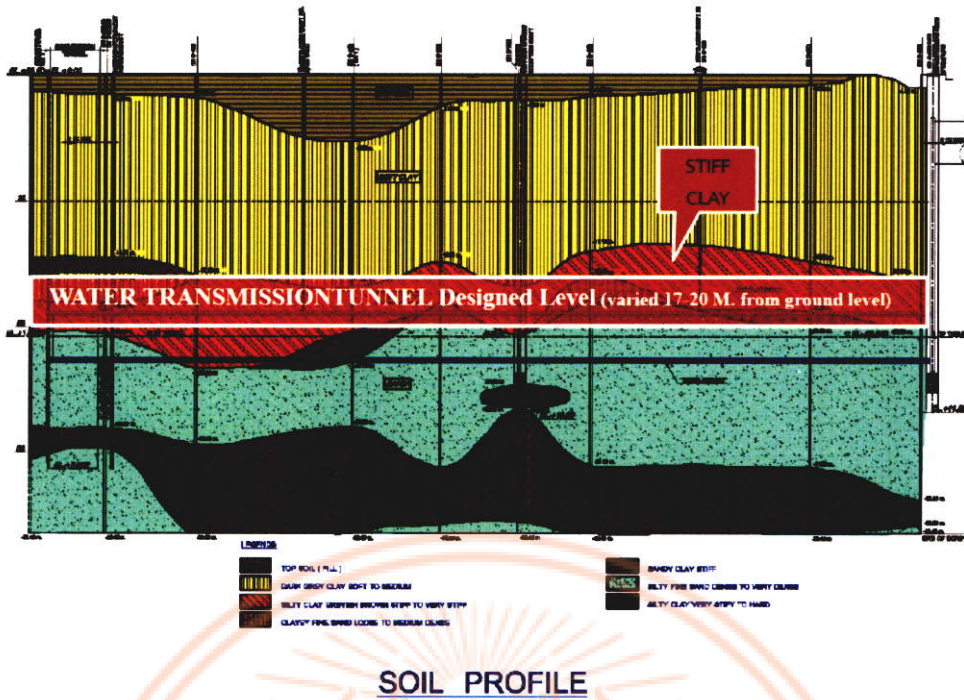
รูปที่ 2.5 เส้นทางอุโมงค์ส่งน้ำที่ทำการศึกษา

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

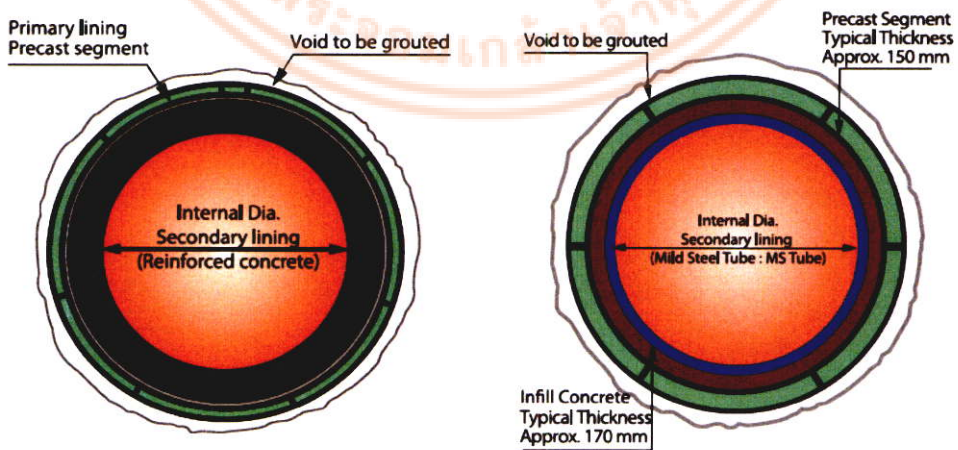
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 สภาพชั้นดินของอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง Metropolitan Rapid Transit Authority (WMA)

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



รูปที่ 2.7 ภาพตัดโค้งโครงสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

องค์ประกอบทั่วไปของหัวเจาะอุโมงค์ (Tunnel Boring Machine, TBM) อาศัยพื้นฐานของหลักการทรงกระบอกที่ถูกดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามแนวแกนของอุโมงค์พร้อมกับทำการขุดดินไปด้วยในเวลาเดียวกัน เสถียรภาพของหัวเจาะอุโมงค์จะเกิดขึ้นหลังจากการขุดเจาะได้ทำการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั่วคราวหรือถาวรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว หัวเจาะอุโมงค์จะทำหน้าที่ด้านทานความดันดินโดยรอบ และป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ในส่วนของช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือหัวเจาะจะถูกปกป้องจากตัวของหัวเจาะเอง นอกจากนี้ การติดตามตรวจวัดเพื่อความปลอดภัยจากความดันและน้ำบริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้หัวเจาะ โดยมีทั้งหัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิด (Open-face type shield) ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้สภาพดินที่ค่อนข้างมีเสถียรภาพและไม่มีน้ำใต้ดิน อีกทั้งเหมาะกับการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีความยาวไม่มากนัก, หัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิดบางส่วน (Partially open-face type shield) ซึ่งการรักษาเสถียรภาพหน้าหัวเจาะมีทั้งแบบควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติงานเองและระบบอัตโนมัติ, หัวเจาะค้ำยันแบบหน้าปิด (Closed-face type shield) เป็นหัวเจาะที่มีความเหมาะสม

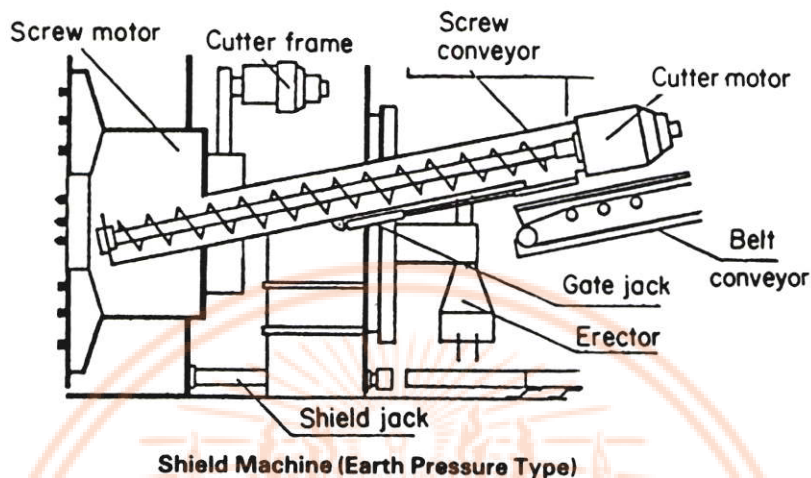
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กับการขุดเจาะอุโมงค์ภายใต้สภาพดินที่มีเสถียรภาพน้อย หรืออาจเกิดการเคลื่อนตัวของดินได้ง่าย โดยถือว่าเป็นหัวเจาะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังรูป 2.8

2.2.2.1 หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล [12]

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

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินให้น้อยที่สุด ความดันดินที่หัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะจะต้องคอยติดตามและควบคุม ดังนี้

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

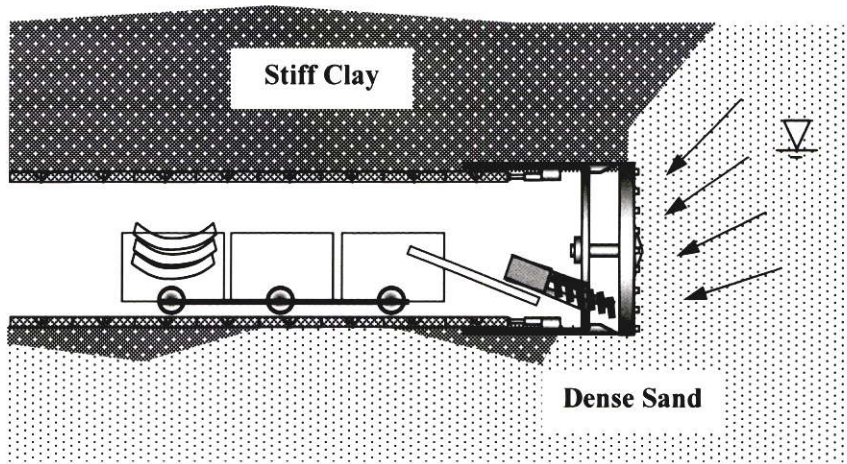
ข) ในระหว่างการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ใช้จะต้องถูกบันทึก ควบคุม และรักษาให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้

ค) ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดไว้ก่อนการขุดเจาะและความดันหน้าหัวเจาะที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการขุดเจาะ ต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะเพื่อใช้อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

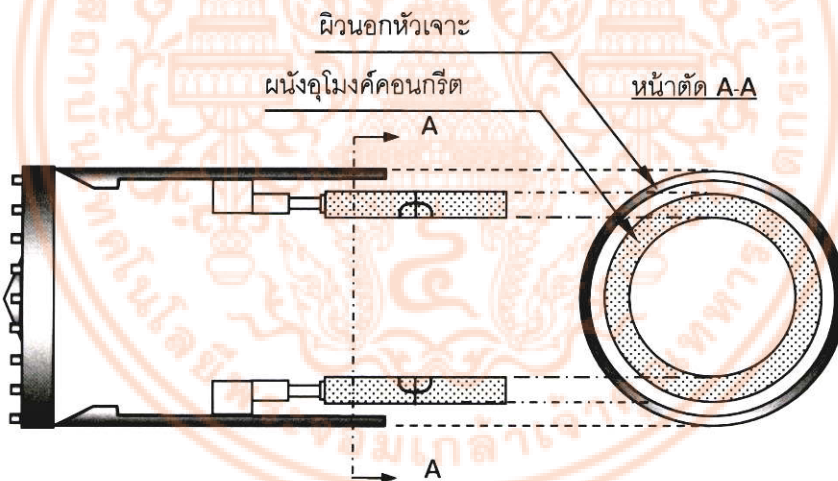
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 แรงดันหน้าหัวเจาะ

ห้องควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ มีหน้าที่ในการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะในขณะที่ทำการขุดเจาะ นอกจากนี้ ความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมในระหว่างการขุดเจาะ ซึ่งการปฏิบัติการของหัวเจาะจะถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของหัวเจาะอยู่ภายใต้แผนผังการควบคุมของความดันที่กำหนด



รูปที่ 2.10 การทำงานของแม่แรงไฮดรอลิกในหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล

2.2.3) ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อสร้างอุโมงค์

2.2.3.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry)

1.) ความลึกของอุโมงค์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ และสภาพทางธรณีวิทยา จึงทำให้

เอกสารนี้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างชัดเจน ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

2.2.3.2 สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions)

1.) สภาพทางธรณีวิทยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ ชนิดของดิน (Soil type) จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของหัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงต่อปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น สภาพทางธรณีวิทยาที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมากที่สุดคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยมีที่มาจาก การสังเกตในโครงการที่ผ่านมาในอดีต สาเหตุที่ชั้นดินเหนียวแข็งมีความเหมาะสม เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงเฉือน (c_u) ที่สูง ทำให้ดินมีเสถียรภาพในระหว่างที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ รวมทั้งกระบวนการการขนถ่ายดินผ่านสายพานลำเลียงก็เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าที่ต่ำ ทำให้ลดปัญหาการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater seepage) เข้าสู่พื้นที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินเนื่องมาจากการเกิดช่องว่างในเม็ดดิน [13]

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

2.2.3.3 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors)

1.) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) การควบคุมปริมาณการขุดดินออกในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ การลำเลียงดินจะเริ่มต้นที่บริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะด้วยเกลียวหมุนลำเลียงดิน (Screw conveyor) ในปริมาณที่เหมาะสม ถือเป็นพื้นฐานของวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยสามารถพิสูจน์ได้จากข้อมูลพื้นฐาน

ในอดีต [14] ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.) ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) ซึ่งในการปฏิบัติงานของหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลจะมีการควบคุมหัวเจาะให้อัตราการลำเลียงดินมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปกับความเร็วขณะขุดเจาะ ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอัตราการลำเลียงดินและความเร็วขณะขุดเจาะ

3.) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle) การเปลี่ยนแนวหัวเจาะที่มีมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะที่สูง ย่อมจะทำให้เกิดช่องว่างในปริมาณมากด้านหลังอุโมงค์ ซึ่งเป็นเหตุให้ดินโดยรอบเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น

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

2.2.4) พฤติกรรมทั่วไปของเสาเข็มเจาะ

2.2.4.1 พฤติกรรมทั่วไป

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

1) เสาเข็มเสียดทานหรือเสาเข็มลอย (Friction/Floating pile) คือเสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่

2) เสาเข็มตาล (End bearing pile) คือเสาเข็มที่มีแรงต้านที่ปลายเสาเข็มสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม

เสาเข็มเจาะมีความแตกต่างจากเสาเข็มตอกตรงที่เสาเข็มประเภทนี้เป็นเสาเข็มที่หล่อในที่ เสาเข็มเจาะเหมาะสำหรับชั้นดินที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำมาก และเป็นดินเหนียวแน่น (Cohesive soils) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงปานกลาง เช่น ดินเหนียว หรือดินเหนียวปนทราย ความเหนียวแน่นจะป้องกันไม่ให้หลุมเจาะพังทลาย เสาเข็มเจาะจะมีความเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็มน้อยกว่าเสาเข็มตอก เนื่องจากการตอกเสาเข็มจะทำให้ดินเคลื่อนตัวออกด้านข้าง ส่งผลให้แรงดันดินด้านข้างเพิ่มขึ้น ในขณะที่การทำเสาเข็มเจาะจำเป็นต้องขุดดินออก ทำให้แรงดันดินด้านข้างมีค่าเท่าเดิมหรือน้อยลง เสาเข็มประเภทนี้สามารถประยุกต์ใช้กับดินเหนียวอ่อนในแถบกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้

2.2.4.2 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

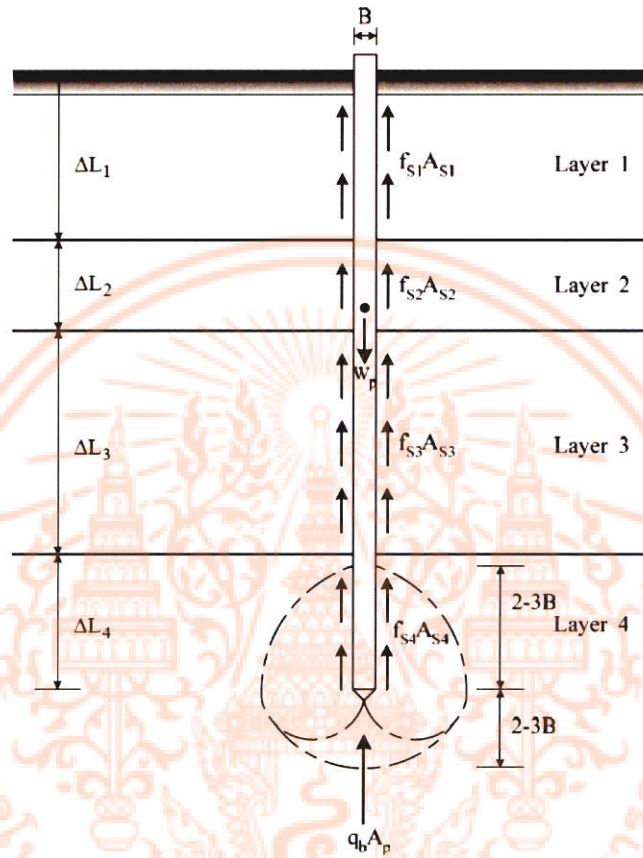
เสาเข็มเดี่ยวถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างสู่ดินโดยผ่านความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (Skin friction) และแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End bearing) ความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน คือผลรวม

ของแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างเสาเข็มและดินตลอดความยาวเสาเข็ม ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำเห็นว่าไม่เหมาะสมในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แรงแบกทานที่ปลายเข็ม คือกำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเข็ม ดังรูปที่ 2.11 เสาเข็มในชั้นดินเหนียว ส่วนมากจะเป็นเสาเข็มเสียดทาน ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกโดยแรงเสียดทานรอบ เสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เพื่อความสะดวกในการออกแบบ (ไม่ต้องพิจารณาความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะรับน้ำหนักบรรทุก) ซึ่งมักจะคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยจากกำลังต้านทานแรงเฉือนรวม (Total shear strength analysis) แม้ว่าการคำนวณโดยใช้กำลังต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลจะให้ความละเอียดถูกต้องมากกว่า



รูปที่ 2.11 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

น้ำหนักบรรทุกประลัย (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 $P_s = 0.45 \overline{S_u} A_s$

$$P_b = 9wS_u A_b$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

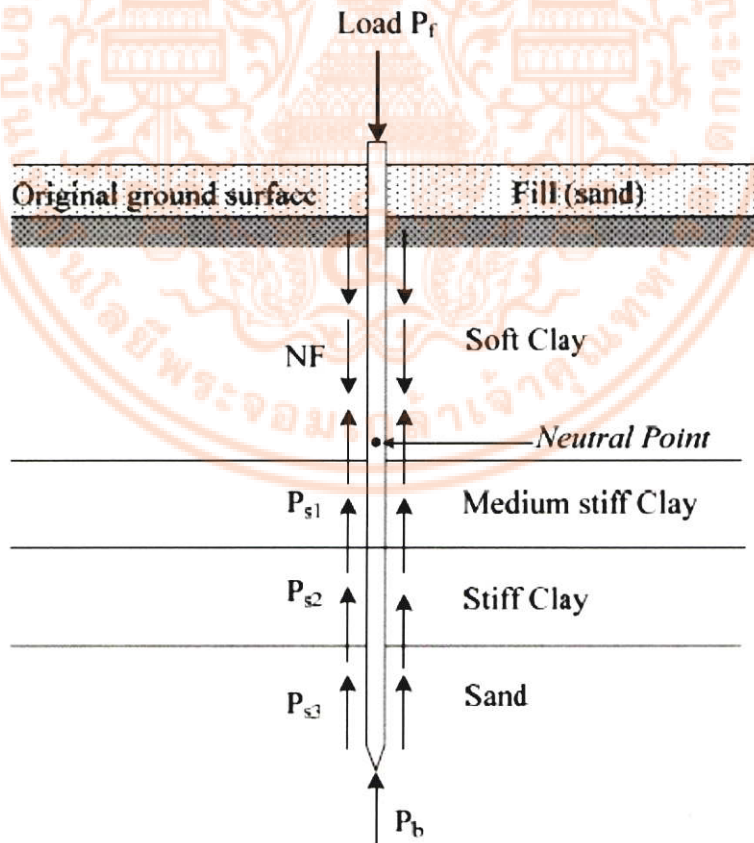
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

เมื่อกำหนดให้ FS คืออัตราส่วนปลอดภัยรวม ควรมิต่างอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5

แรงดูดลงของเสาเข็ม คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมวลดินกับเสาเข็ม อันเป็นผลจากการที่ดินบริเวณรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวมากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็ม สภาพที่ทำให้เกิดแรงดูดลง คือ ปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นที่มีการทรุดตัวน้อยและมีชั้นดินอัดตัวสูง (Highly compressive soil) เช่น ดินเหนียวอ่อน วางตัวอยู่ด้านบน แรงดูดลงจะเกิดในชั้นดินเหนียวอ่อน ตั้งแต่หัวเสาเข็มจนถึงจุดสะเทิน (Neutral point) ซึ่งเป็นจุดที่การเคลื่อนตัวของมวลดินกับเสาเข็มประมาณเท่ากัน ดังรูป 2.12

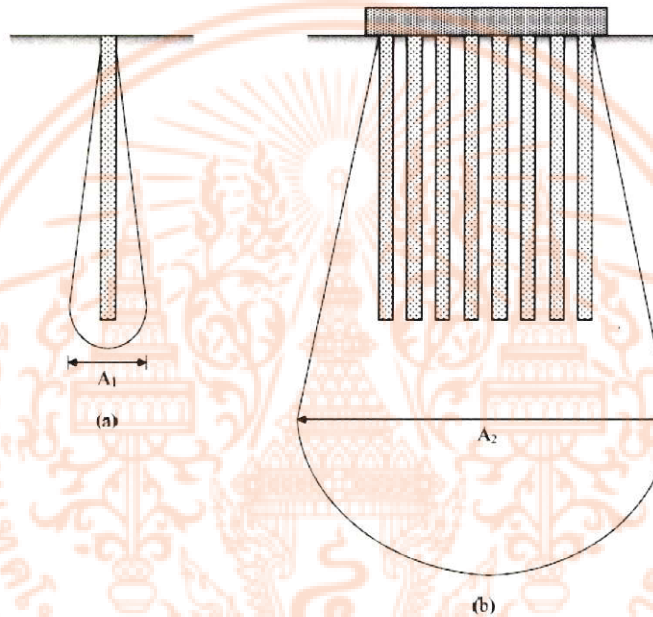


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น เพื่อการศึกษาระดับชั้นปริญญาโทขึ้นไป ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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



รูปที่ 2.13 กระเปาะความเค้นของเข็มต้นเดียวและเสาเข็มกลุ่ม

2.2.4.3 การวิเคราะห์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม

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

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ เพื่อการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแรงดัน

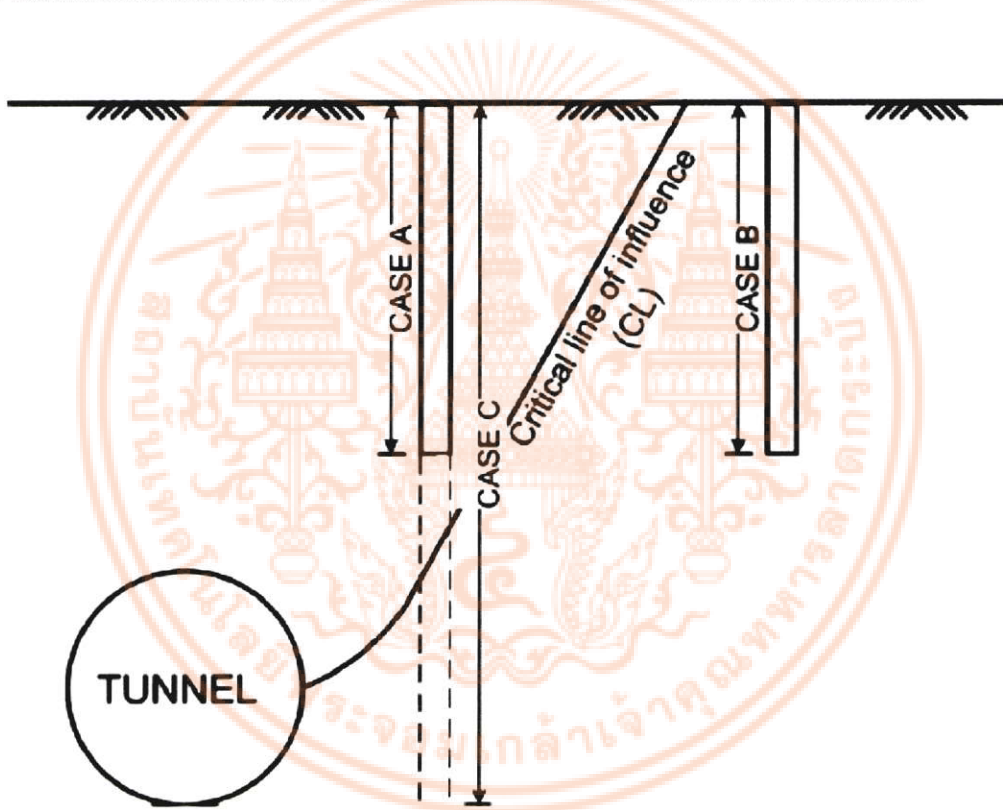
ดินสมดุล (Earth pressure balance) ในชั้นดินเหนียว โดย [17] ซึ่งการจำลองนี้ถูกใช้ในการวิเคราะห์การแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ก่อสร้าง ในชานพานซิสโก ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริงในสนาม ค่าที่ได้จากการจำลอง โมเดลอยู่ในขอบเขตใกล้เคียงกับค่าจริงในสนาม นอกจากนี้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้นในกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ [18] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติจำลอง การก่อสร้างอุโมงค์ ในอุโมงค์ระดับตื้นและระดับลึก โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb การวิเคราะห์เป็น ประโยชน์ในการพัฒนาขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์และค่าการสูญเสียมวลดินได้

[3] ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ เพื่อประเมินผลกระทบต่อเสาเข็มจากการ ก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กรณีดังรูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์สามารถสร้างแนวเขต อิทธิพลที่ส่งผลกระทบได้ นอกจากนี้ [19] ใช้การวิเคราะห์ในลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่เป็นการวิเคราะห์ ผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มกลุ่มวางตัวด้านข้างอุโมงค์ ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิ เมนต์สามมิติ มีประโยชน์ทางการประหยัดงบประมาณและเวลาในการวิเคราะห์อีกด้วย



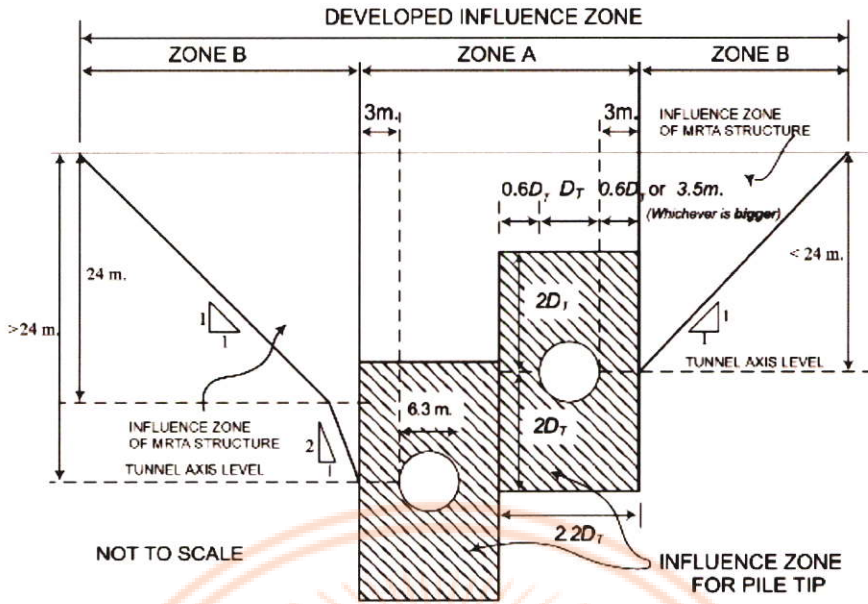
รูปที่ 2.14 ลักษณะการวางตัวของอุโมงค์และเสาเข็มและแนวเขตอิทธิพลใหม่ [3]

นอกจากการศึกษาอิทธิพลจากอุโมงค์กระทบเสาเข็มแล้วนั้น เสาเข็มก็ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ด้วย เช่นกัน อิทธิพลของเสาเข็มใหม่ต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมถูกเสนอโดย [6] ศึกษาระยะเวลาความสึกปลายเสาเข็มที่ ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขึ้นอยู่กับชั้นดินที่ อุโมงค์วางตัวอยู่และระดับปลายเสาเข็ม นอกจากนี้ยังเสนอขอบเขตพื้นที่อิทธิพลที่มีผลกระทบต่ออุโมงค์

เป็นระยะปลายเสาเข็มใกล้กับอุโมงค์เดิม ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวไม่ควรมีสิ่งก่อสร้างหรือปลายเสาเข็มในระดับนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต เพราะจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอุโมงค์อย่างมีนัยยะได้ ดังรูปที่ 2.15

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

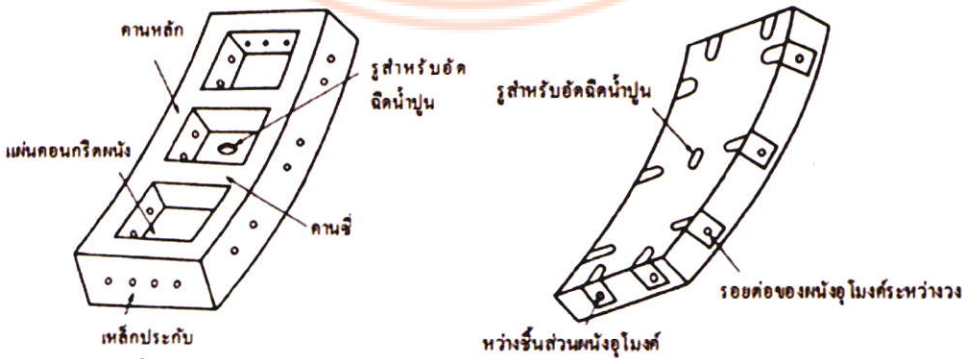
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 ระยะปลอดภัยของอุโมงค์ [6]

2.2.5) การวิเคราะห์ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์ มีหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ได้อย่างปลอดภัยและยืนยาวตลอดอายุการใช้งาน ส่วนรูปแบบของผนังอุโมงค์และขนาดของอุโมงค์ รวมทั้งประเภทของชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานของอุโมงค์ ดังรูป 2.14 โดยรูปร่างและขนาดของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานของอุโมงค์ ความหนาของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (Segment height) ส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าตัดอุโมงค์ ที่มาจากการพิจารณาน้ำหนักที่มากกระทำ ความหนาของชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะมีค่าประมาณ 4% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์ ในกรณีที่อุโมงค์มีขนาดใหญ่ และทำการติดตั้งด้วยชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ประเภทคานคอนกรีต อัตราส่วนความหนาจะมีค่าประมาณ 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์



รูปที่ 2.16 ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากข้อมูล [11] พบว่าความหนาผนังอุโมงค์มีความสัมพันธ์กับขนาดอุโมงค์ ดังการออกแบบผนังอุโมงค์ในการศึกษาของ [1] โดยใช้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ที่มีอัตราส่วนระหว่างความหนาอุโมงค์ต่อขนาดอุโมงค์ $1/72$ เป็นกรณีศึกษา ได้ค่าอัตราส่วนความหนาอุโมงค์ต่อขนาดอุโมงค์ มีค่าดังสมการ 2.4

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

โดย E_c คือ ย้งมอดูลัสของคอนกรีต

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักดินเปียก

γ_u คือ Safety factor for bucking=2.5

h คือ ระยะความลึกอ้างอิง

t คือ ความหนาผนังอุโมงค์

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์

นอกจากนี้การวิเคราะห์ในรูปแบบโครงสร้างท่อ [7] โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์นั้น อัตราส่วนระหว่างขนาดโครงสร้างและความหนาผนัง ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง และยังส่งผลกระทบต่อแรงภายในของโครงสร้างนั้นในด้านที่ได้รับแรงกระทำด้วย นอกจากนี้มีการศึกษาในลักษณะคล้ายกันในท่ออะลูมิเนียม ศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ในโครงสร้างผนังบางเปรียบเทียบกับค่าจริงที่เก็บมาได้ [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] แบบจำลองในห้องปฏิบัติการทำการทดสอบค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของอุโมงค์เดิมในขณะที่มีอุโมงค์ใหม่ข้ามผ่านและค่าความเค้นในแนวยาวของอุโมงค์เดิมเป็นหลัก จากงานวิจัยนี้พบว่าการศึกษาก่อนหน้านี้มีการให้ความสำคัญถึงขนาดและความหนาอุโมงค์อยู่มาก โดยใช้การศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของอุโมงค์สะท้อนพฤติกรรมของผลกระทบได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 แนวทางการวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์จาก 2 โครงการ MRTA และ MWA

3.2.1 หลักการพิจารณาปัญหา

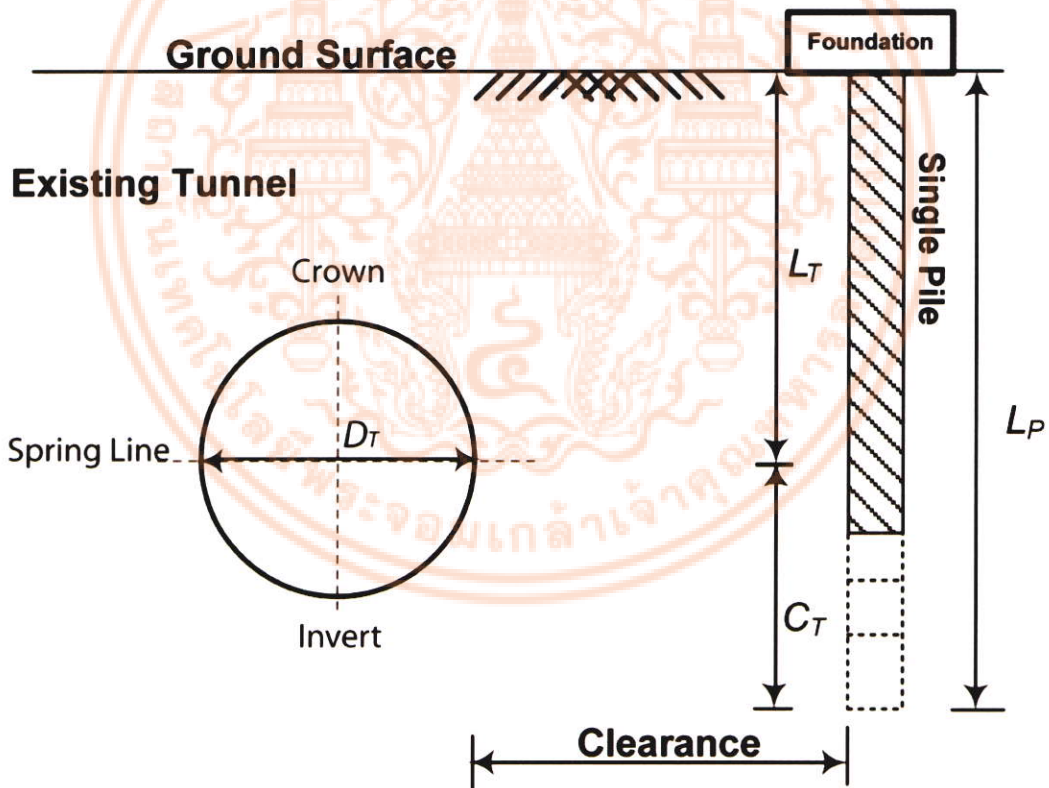
หลักการพิจารณาปัญหาแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยขนาดอุโมงค์และตาดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) โดยมีเสาเข็มที่มีความยาวต่างกันวางตัวอยู่เพียงด้านเดียวของอุโมงค์ และมีระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม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

โดยที่ L_T คือ ระยะความลึกของอุโมงค์

L_P คือ ระยะความยาวของเสาเข็ม

C_T คือ ระยะผลต่างระหว่างระดับกึ่งกลางของอุโมงค์กับระดับปลายเสาเข็ม

D_T คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์



รูปที่ 3.2 รูปแบบการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

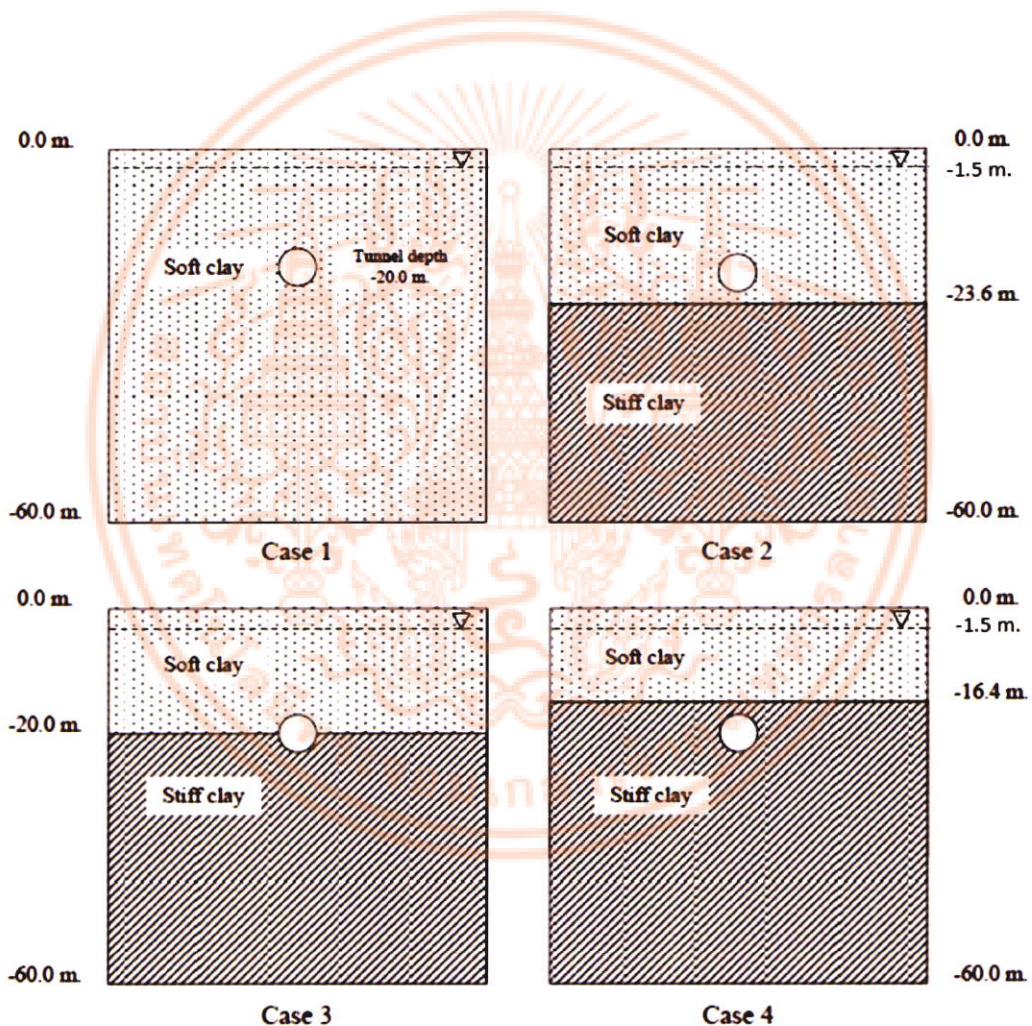
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 วางตัวอยู่ที่ระดับเดียวกัน เพื่อการเปรียบเทียบเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างอุโมงค์รถไฟฟ้าและอุโมงค์ส่งน้ำ โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ -1.50 เมตร จากผิวดิน



รูปที่ 3.3 รูปแบบชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์

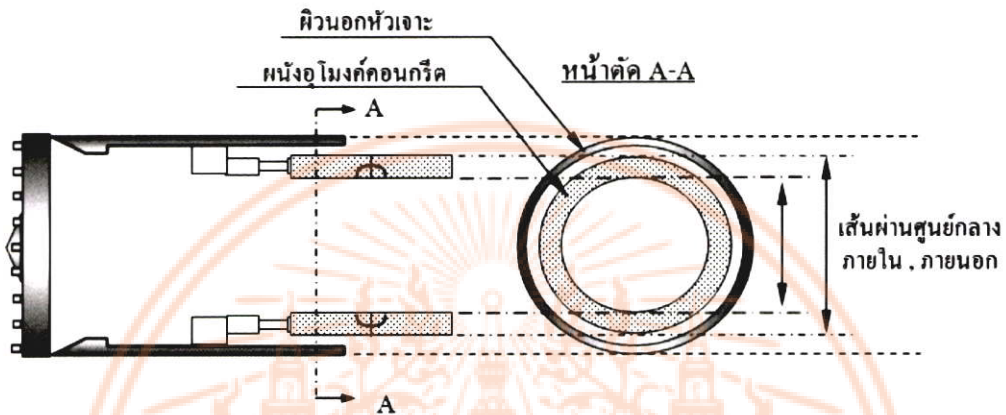
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.) ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์

การวิเคราะห์จะกำหนดให้อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.4 โดยแบบจำลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอุโมงค์อ้างอิงสองขนาด ประกอบไปด้วยอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 6.30 และ 5.70 เมตรตามลำดับ และอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 4.07 และ 3.77 เมตรตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ภาพตัดแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์

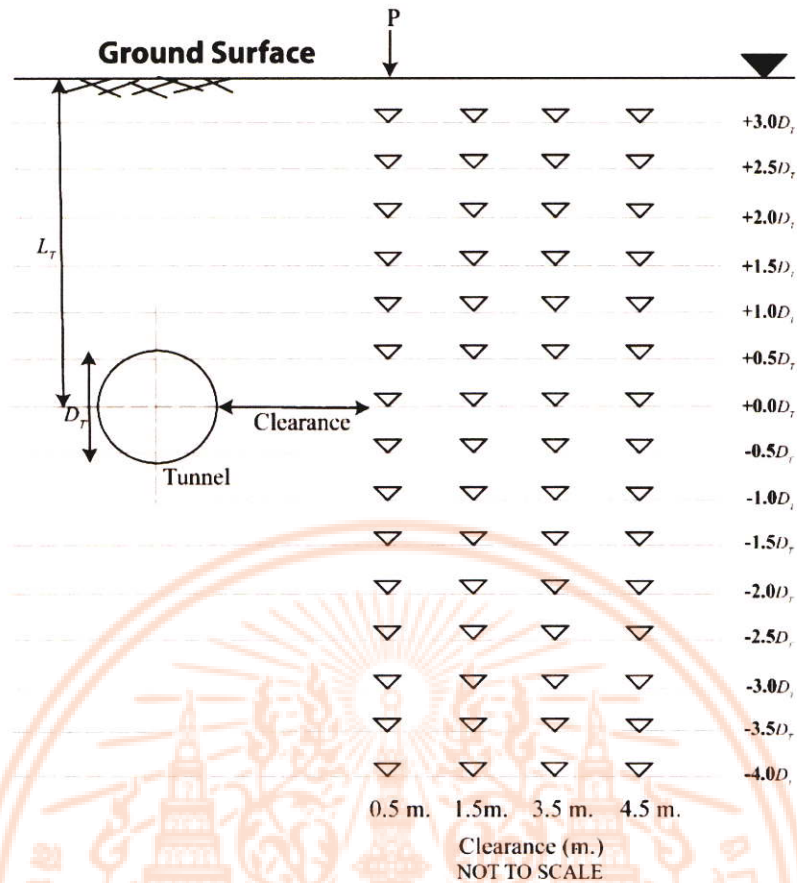
3.) ลักษณะของเสาเข็มและตำแหน่งที่ใช้พิจารณา

การศึกษาครั้งนี้กำหนดให้เสาเข็มเป็นแบบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 รูปแบบการวางตัวของปลายเสาเข็ม

3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

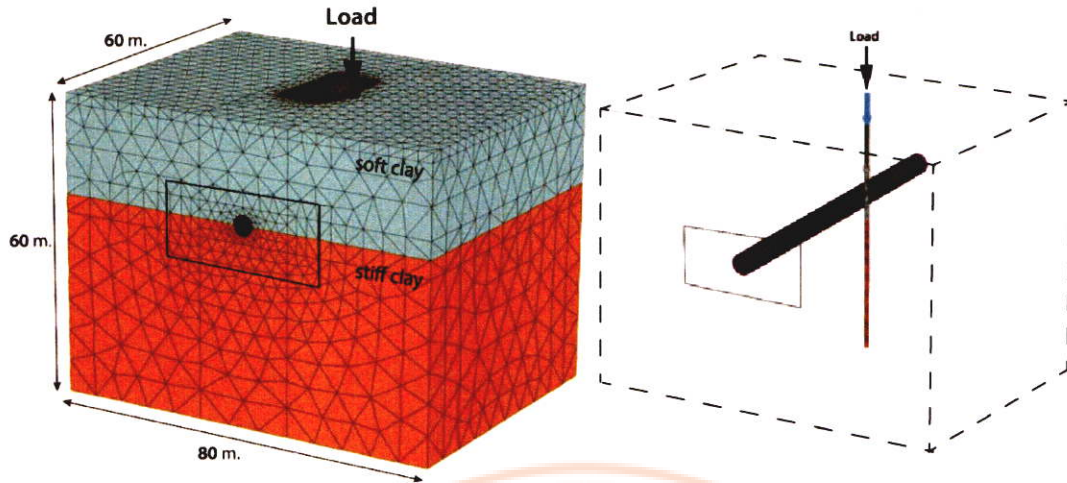
1.) ลักษณะแบบจำลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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
$E_{50}^{r_0} (kPa)$	5,000	60,000
$E_{ur}^{ref} (kPa)$	15,000	180,000
$\gamma_{sat} (kN / m^3)$	16	18
ν'	0.33	0.33
$\phi (^\circ)$	22	22
$C (kPa)$	5	18
M	1	1
$P_{ref} (kPa)$	100	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 ผิวด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระในทุกทิศทาง และการวิเคราะห์ในการศึกษานี้เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrain analysis) โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของความเค้นสุทธิของชั้นดิน (effective stress) แนวตั้งและแนวราบถูกกำหนด ด้วยค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (unit weight) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K_0 เพิ่มขึ้นตามระดับ ความลึกของชั้นดิน โดยกำหนดระดับน้ำใต้ดินเป็นแบบ Piezometric drawdown

3.3 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

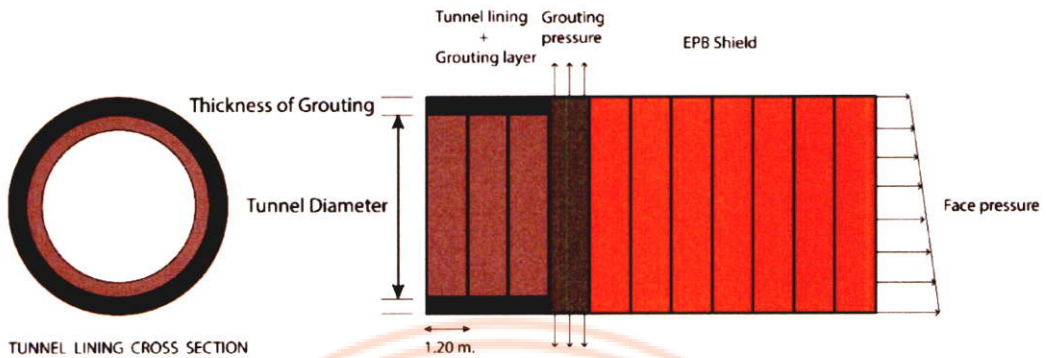
ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อเทียบวัดความถูกต้องของแบบจำลอง (verify model) โดยขั้นการสร้างได้อ้างอิงจากงานวิจัย [26] ซึ่งรูปแบบการก่อสร้างแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 การจำลองขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะปรับแรงดันดินสมดุล Earth pressure balance shield (EPB Shield) กำหนดให้ความกว้างของชั้นส่วนมีขนาด 1.20 เมตร ซึ่งมีความกว้างเท่ากับขนาดของผนังอุโมงค์ในโครงการจริงที่ใช้อยู่ มีจำนวนทั้งสิ้น 50 วง รวมระยะทาง 60 เมตร สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1. การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยทำการประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณีซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ ซึ่งกำหนดให้มีค่า 150-200 kPa. [10] โดยมีค่าการสูญเสียมวลดินที่ 0.40 เปอร์เซนต์ อ้างอิงการเปรียบเทียบข้อมูลจริงจากงานวิจัย [6] หัวเจาะปรับความดินสมดุลนี้จะมีการทำงานระยะทางรวม 8.4 เมตรหรือจำลองให้เป็นวงรอบประมาณ 7 วง ขั้นตอนที่ 2. การใส่ค่าแรงดันดินน้ำปูน 200 kPa. บริเวณดินโดยรอบตามแนวเส้นรอบวงการขุดเจาะ เพื่อค้ำยันดินบริเวณรอบบริเวณการขุดตามแนวรัศมีไม่ให้เกิดการพังทลายหรือ

เสียรูป ขั้นตอนที่ 3. เปลี่ยนค่าแรงดันดินน้ำปูนเป็นปูนชนิดแข็ง บริเวณช่องว่างระหว่างหัวเจาะกับผนัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อุโมงค์ และใส่ชั้นส่วนผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติดังหัวข้อ 3.2.3 ทำตามขั้นตอนจนได้ระยะทางทั้งสิ้น 60 เมตร วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลเปรียบเทียบอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการ MRTA และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ MWA โดยพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้ง , 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 กำหนดให้นำหนักบรรทุกยอมให้ (Allowable load) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ การศึกษา ซึ่งการวิเคราะห์จะคิดหลังจากการจำลองเสาเข็มรับแรงในแต่ละความลึกซึ่งผลการวิเคราะห์ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จะไม่พิจารณาการเสียวรูปจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยวิธีการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์

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

$$\Delta\phi_v = \phi_{v2} - \phi_{v1} \tag{3.1}$$

$$\Delta\phi_H = \phi_{H2} - \phi_{H1} \tag{3.2}$$

การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง กำหนดให้ ϕ_{v1} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ϕ_{v2} แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

$$\phi_{v1} = \sqrt{[(X_c - X_l)]^2 + [(Y_c + Y_l)]^2} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ทางวิชาการ (ไม่แสวงหาผลกำไร) กรุณาอย่าเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

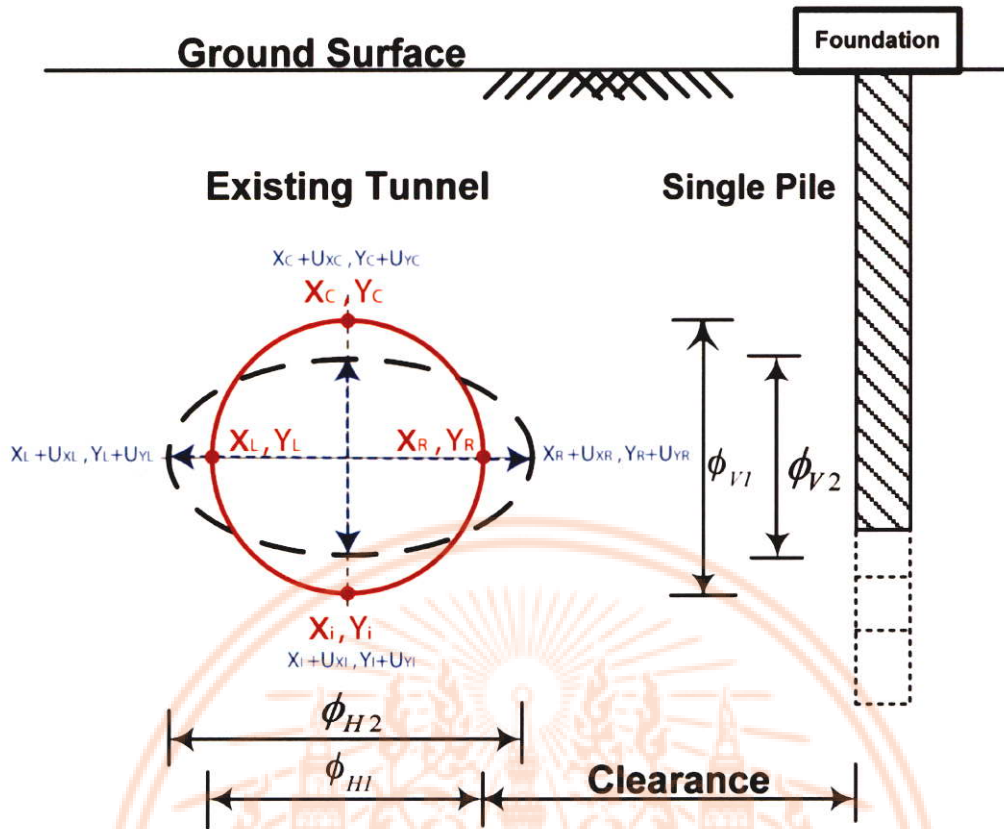
X_L+U_{XL}, Y_L+U_{YL} แสดงค่าพิกัดของจุดด้านซ้ายของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ

X_R+U_{XR}, Y_R+U_{YR} แสดงค่าพิกัดของจุดด้านขวาของอุโมงค์ หลังได้รับแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.8 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้งและแนวนอน

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ อาจจะไม่สมมาตรเสมอไป หากมีการเปลี่ยนแปลงนอกจากแนวแกนสมมาตร ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวนอนไม่ใช่ค่าวิกฤตที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุด ($\Delta\phi_{C-MAX}$, $\Delta\phi_{E-MAX}$) จะช่วยให้สามารถหาค่าที่แม่นยำและเป็นค่าที่วิกฤตที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มลบก้อนก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.9

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

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

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

กระทำจากเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

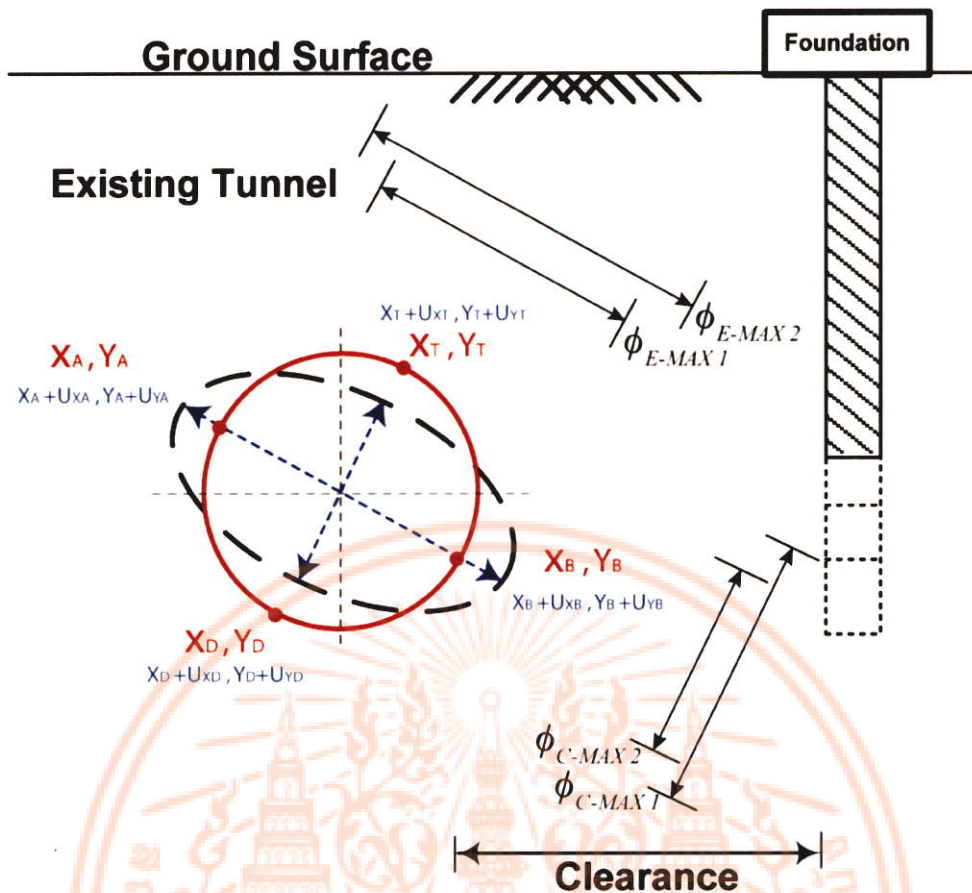
$X_A + U_{XA}$, $Y_A + U_{YA}$ แสดงค่าพิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด

3.4 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตาดอุโมงค์

ขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันและส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ เลือกใช้การจำลองแบบสองมิติ ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เพิ่มเติมระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ อาศัยหลักการพิจารณาลักษณะการจำลองสามมิติแต่ไม่พิจารณาค่าการสูญเสียมวลดินในระหว่างก่อสร้างอุโมงค์ แต่พิจารณาขนาดของอุโมงค์ (D) หลายขนาดและหลายความหนาผนังอุโมงค์มากขึ้น เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์

จากการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ อ่างอิงลักษณะอุโมงค์ในโครงการ MRTA และ MWA ในหัวข้อ 3.3 อุโมงค์ทั้งสองนี้มีข้อมูลลักษณะอุโมงค์ที่แตกต่างกันทั้งด้านขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ไม่สะท้อนถึงผลกระทบที่แท้จริง เนื่องจากผลการวิเคราะห์แสดงผลในเทอมของขนาดของอุโมงค์เพียงอย่างเดียว

ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตาดอุโมงค์กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ของเพื่อการศึกษามากกว่าที่จะนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พิจารณาในรูปแบบระนาบความเครียด (plane strain) หรือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ซึ่งจำลองให้เสาเข็มเดี่ยวอยู่ในดินและคุณสมบัติเป็น Solid element โดยปรับเปลี่ยนแรงกระทำลงเสาเข็มเป็นค่าแรงกระทำต่อพื้นที่ F/A วิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดที่แรงลงเข็มเพียงต้นเดียว เพื่อเป็นตัวแทนการวิเคราะห์ในลักษณะเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำวางตัวข้างขวาของอุโมงค์ ดังนั้นการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ คือ PLAXIS 2D การวิเคราะห์ในครั้งนี้เลือกพิจารณาในกรณีศึกษาจากขั้นตอนที่ 3.2 ซึ่งจะได้กรณีที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มมากที่สุด (ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของอุโมงค์สูงสุด) และระดับที่ปลายเสาเข็ม $-1.0D_T$ เป็นระดับที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุดเป็น กรณีศึกษา โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้ดังนี้ 1. จำลองอุโมงค์ที่มีการก่อสร้างเสร็จแล้ว ประกอบด้วยการขุดดินและการจำลองผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติดังตาราง 3.1 และ 3.2 2. จำลองในระหว่างให้น้ำหนักกระทำที่บนเสาเข็ม ซึ่งค่าแรงที่กระทำต่อเสาเข็มคำนวณได้จากวิธี alpha-method โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ (Safety factor) 2.5 กำหนดให้การวิเคราะห์ในการศึกษานี้ใช้น้ำหนักบรรทุกยอมให้ (Allowable load) เหมือนกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 และทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวทั้งสองด้านของอุโมงค์ เพื่อให้ความละเอียดในการวิเคราะห์สมมาตรกันทั้งสองด้าน ใส่น้ำหนักลงเสาเข็มด้านขวาเพียงด้านเดียวตามระยะปลายเสาเข็มที่พิจารณา กำหนดขอบเขตพื้นที่ที่มีความละเอียดในการวิเคราะห์บริเวณใกล้อุโมงค์ทั้งแนวราบและแนวตั้งให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์มากกว่าบริเวณอื่น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดและต่ำสุด โดยมีคุณสมบัติของชั้นดินและสภาวะขอบเขตของแบบจำลองเหมือนกับหัวข้อ 3.2.4 และ 3.2.5 ตามลำดับ วิธีการจำลองดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการจำลองขนาดอุโมงค์และผนังอุโมงค์ที่ทำการวิเคราะห์

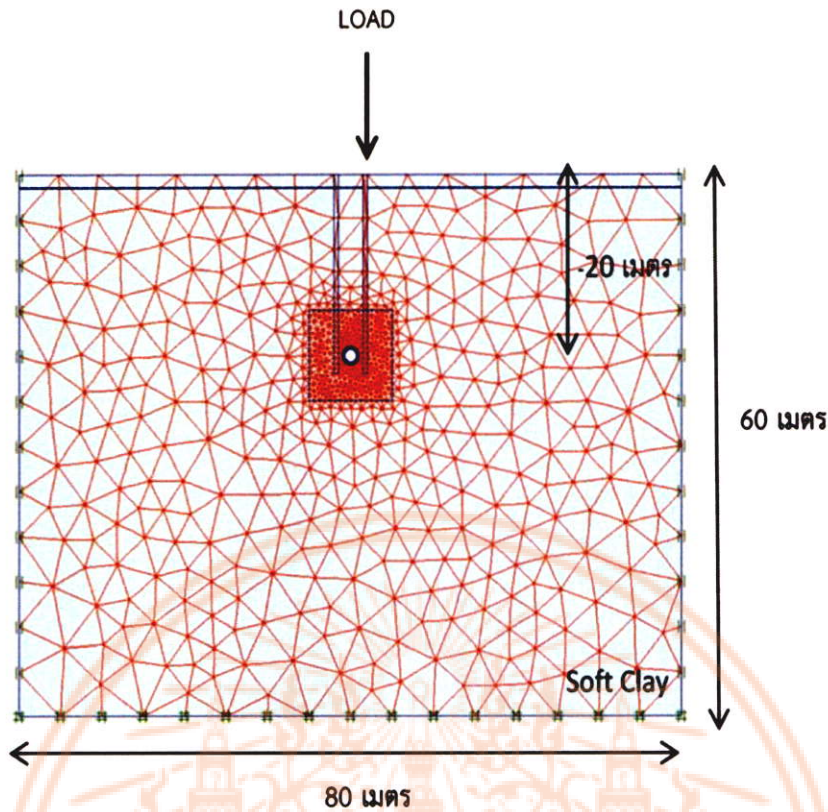
ขนาดอุโมงค์ (เมตร)	2.00	4.07	5.00	6.30	8.00	10.00
--------------------	------	------	------	------	------	-------

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.10 แบบจำลองสองมิติ

3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์

ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ศึกษา ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลขนาดและผนังอุโมงค์หลายกลุ่มโดยมีอัตราส่วน $\frac{r}{l}$ (อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์) อัตราส่วนนี้บ่งบอกคุณสมบัติของผนังอุโมงค์ที่ทำการวิเคราะห์ในการศึกษานี้และเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบผนังอุโมงค์ในปัจจุบัน ข้อมูลโครงการส่วนใหญ่อยู่ในคุณสมบัติอัตราส่วน Thick shell กับ Solid element ซึ่งจากโปรแกรมการวิเคราะห์สองมิตินี้แบ่งการจำลองได้สองแบบ 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 หากพิจารณาในเทอมดังกล่าวพบว่า มีทฤษฎีคล้ายคลึงกับการหาค่าความเครียดในชั้นส่วนผนังอุโมงค์ (Bending strain

in surface lining) [28] ดังสมการที่ 3.14 การแสดงค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ได้ดังสมการ 3.13 ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการรศึกษเท่านั้น ไม่อนุยู่ ติเห็นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แสดงให้เห็นพฤติกรรมรูปร่างที่ไม่แน่นอนได้เป็นอย่างดีและใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาเชิงวิศวกรรมเครื่องกล [29] ดังรูป 3.11

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

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

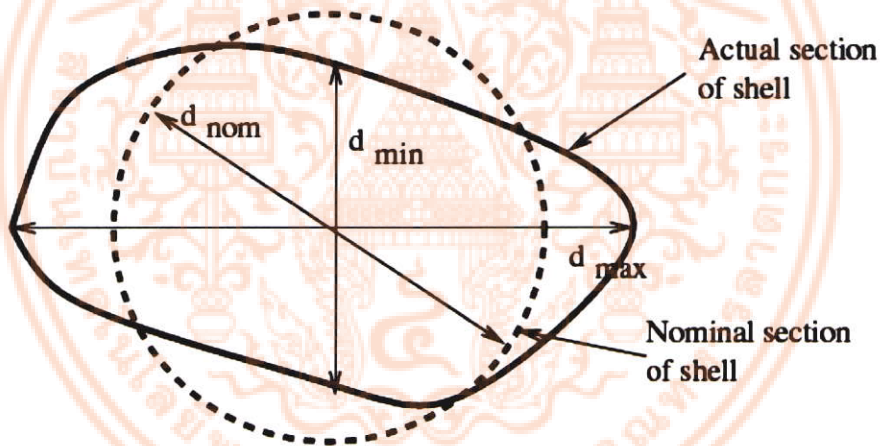
โดย D_{\max} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

D_{\min} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์ ก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางความหนาของผนังอุโมงค์

R คือ ความยาวรัศมีของอุโมงค์



รูปที่ 3.11 การวิเคราะห์ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ out of roundness

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

สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ

ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของผนังอุโมงค์มีดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. ความหนาของผนังอุโมงค์ (t) โดยทั่วไปการออกแบบผนังอุโมงค์นั้น จะพิจารณาให้แบ่งเป็น ชั้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์ (segmental lining) ซึ่งสมมติฐานของการพิจารณาความสามารถ ด้านทานการเคลื่อนตัวชั้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์นั้นจะอยู่ในรูปของคานที่มีหน้าตัดแบบ สี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) เท่ากับ $bt^3/12$ ซึ่ง b คือ ความกว้างของชั้นส่วนประกอบของผนังอุโมงค์นั้นจะพิจารณาที่ความยาว 1 เมตร และ อัตราส่วน 12 คือ ค่าคงที่ ดังนั้นพจน์ที่เหลือที่ใช้ในสมมติฐานสำหรับความหนาของอุโมงค์นี้ คือ t^3

2. ขนาดของอุโมงค์หรือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) สมมติฐานความสัมพันธ์ของค่าการ เปลี่ยนแปลงขนาดของผนังอุโมงค์กับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้น จะถูกพิจารณาในเทอมของ โมเมนต์ ความเฉื่อยสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างวงกลมซึ่งการพิจารณาจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกหรือขนาดที่ยาว ที่สุดของอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.13 ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อย ที่นำมาพิจารณาจะเท่ากับ MR^2 หรือ $MD^2/4$ ซึ่ง M คือมวลของผนังอุโมงค์ และ 4 เป็นค่าคงที่ ดังนั้นพจน์ที่เหลือที่ใช้ในสมมติฐานสำหรับความหนาของ อุโมงค์นี้ D^2

3. ความยาวของเสาเข็ม (h) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำบนเสาเข็ม โดยเข็มที่มีความยาว มากกว่าก็จะรับแรงได้มากขึ้น (พิจารณาในกรณีเสาเข็มวางตัวอยู่ในชั้นดินเดียวกัน)

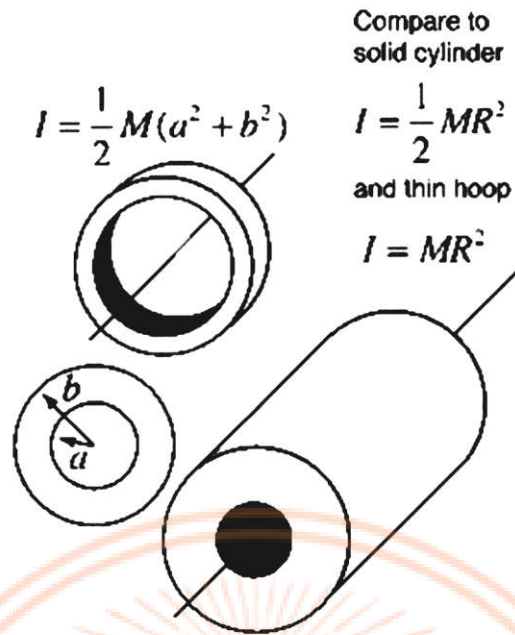


รูปที่ 3.12 ชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างวงกลม [30]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 (ไม่พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์) 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 แสดงความยาวเสาเข็มในทอมอัตราส่วนต่อความลึกอุโมงค์ (L_P/L_T) ซึ่งคือตำแหน่งสัมพัทธ์ในแนวตั้งระหว่างปลายเข็มกับอุโมงค์ โดยที่ $L_P/L_T = 1$ คือปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเดียวกับอุโมงค์ ถ้า L_P/L_T มีค่าน้อยกว่า 1 และมากกว่า 1 แสดงถึงปลายเสาเข็มอยู่เหนือระดับอุโมงค์และปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าระดับอุโมงค์ ตามลำดับ ค่า $\Delta\phi_H$ ของอุโมงค์ทั้งสองขนาดดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่ออุโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับแรงที่มีความยาวปลายเสาเข็มต่างกัน และอยู่ห่างจากอุโมงค์ 0.5 กับ 4.5 เมตร เมื่ออุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน กราฟความสัมพันธ์ของการเสียรูปในทอมของ $\Delta\phi_H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานที่อาจารย์ผู้จัดทำไว้เพื่อประโยชน์ทางการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

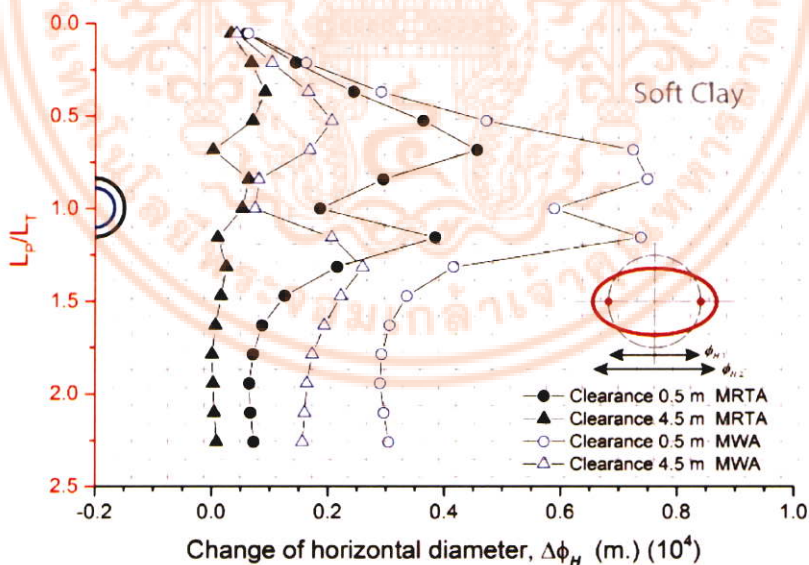
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เปลี่ยนแปลงในรูปร่างเดียวกัน โดยที่ระยะ Clearance ที่ 0.5 เมตร จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าระยะ 4.5 เมตร โดยค่าจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่ระยะปลายเสาเข็ม $0.75L_T$ จะเห็นว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) มีค่ามากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) และมียุคมากที่สุด ณ จุดนี้ จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ระดับเดียวกับอุโมงค์ และการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ปลายเสาเข็ม $1.25L_T$ หรือบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จะลดลงอีกถึงระยะปลายเสาเข็ม $1.5L_T$ และเริ่มลดลงคงที่ที่ระยะปลายเสาเข็ม $1.5L_T$ 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 $0.75L_T$ และลดลงเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับเดียวกับอุโมงค์ หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ระดับ $1.25L_T$ หลังจากนั้นลดลงเล็กน้อยแล้วคงที่ที่ระดับ $1.50L_T$ เป็นต้นไป แตกต่างกันที่ค่า $\Delta\phi_{C-MAX}$ จะเปลี่ยนรูปในลักษณะการหดตัว ดังแสดงด้วยเครื่องหมายลบ (-)

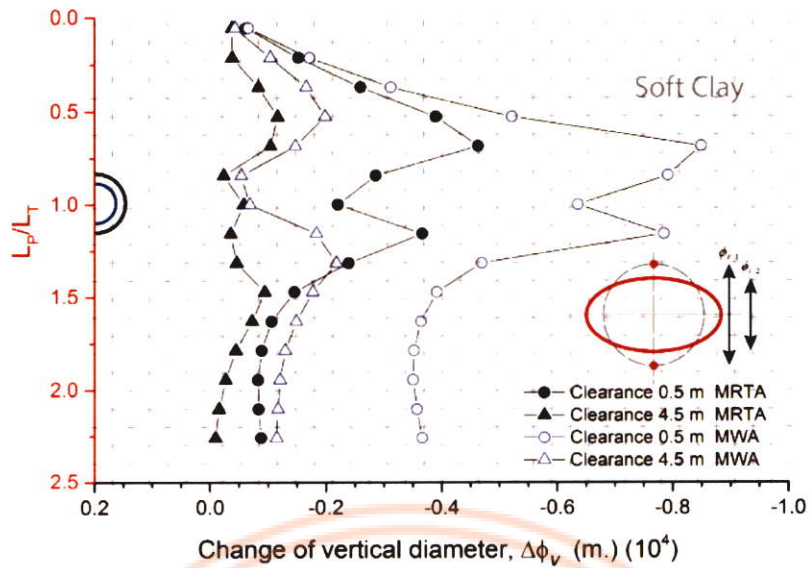


รูปที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

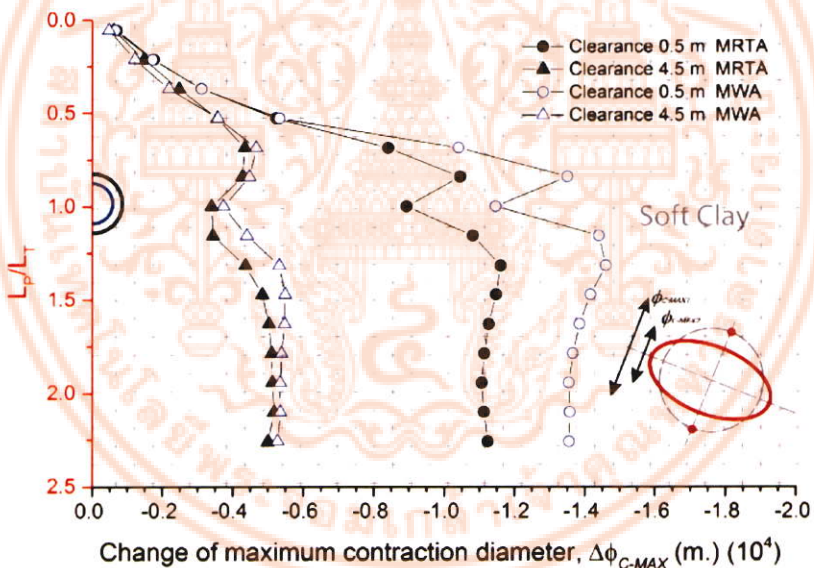
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

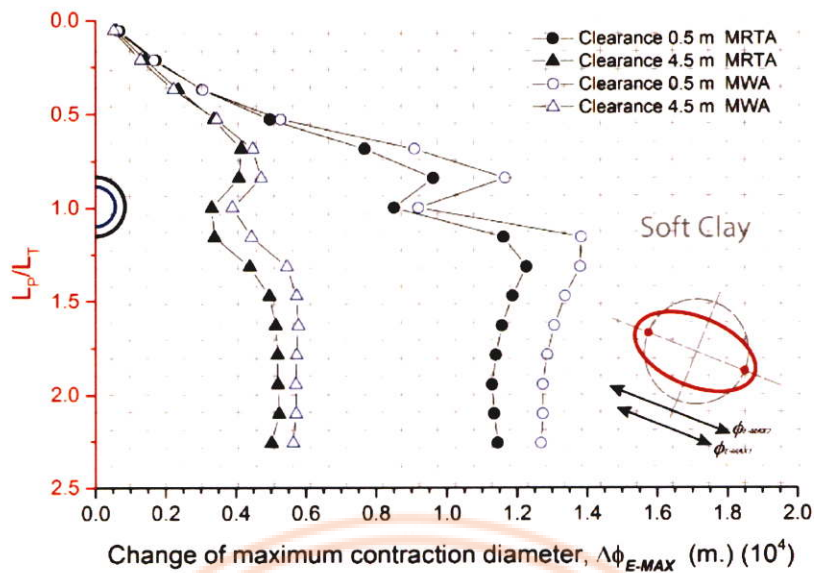


รูปที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

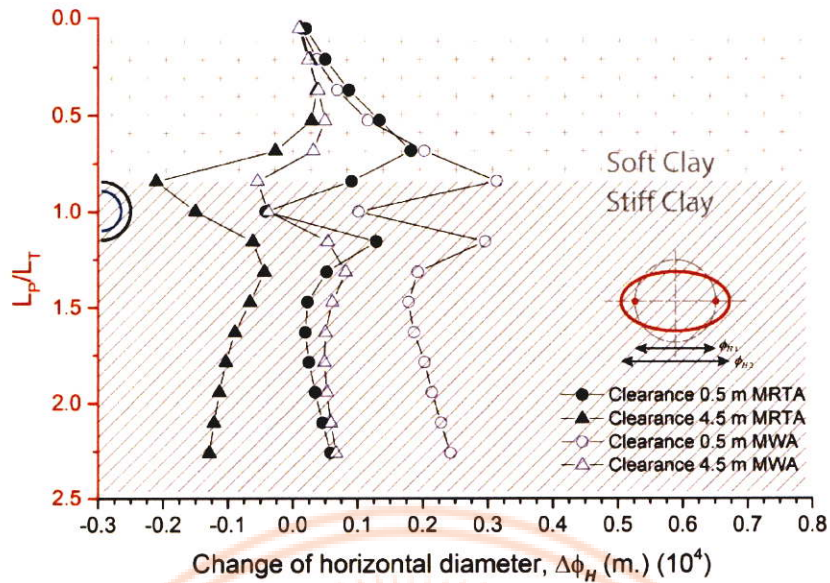
ในรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีที่อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง พบว่าความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบ $\Delta\phi_v, \Delta\phi_H$ ต่อความยาวเสาเข็มมีลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งที่ระยะ Clearance 0.5 เมตรมีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าในระยะ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

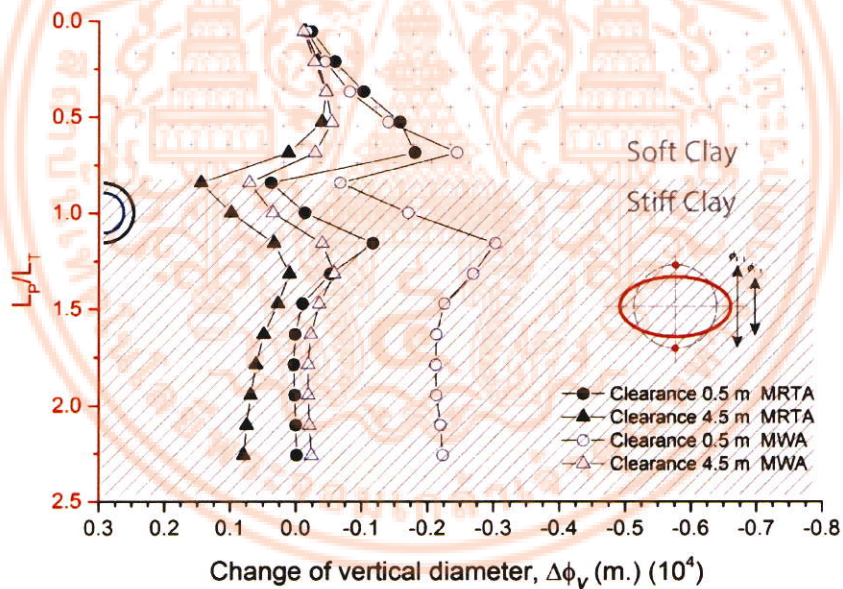
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวราบ กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

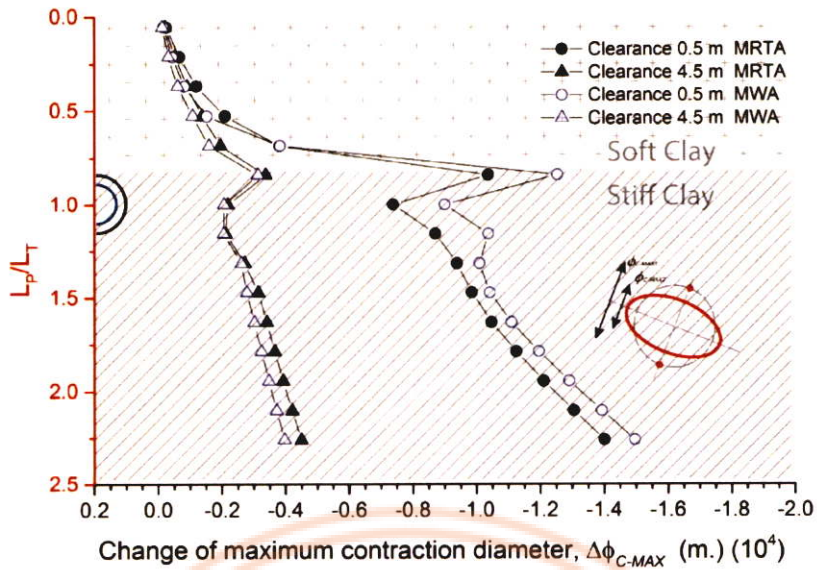


รูปที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

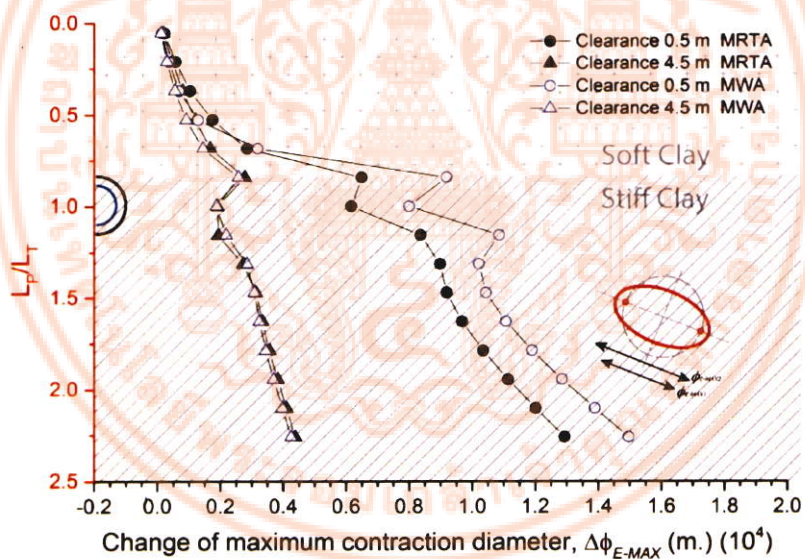
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

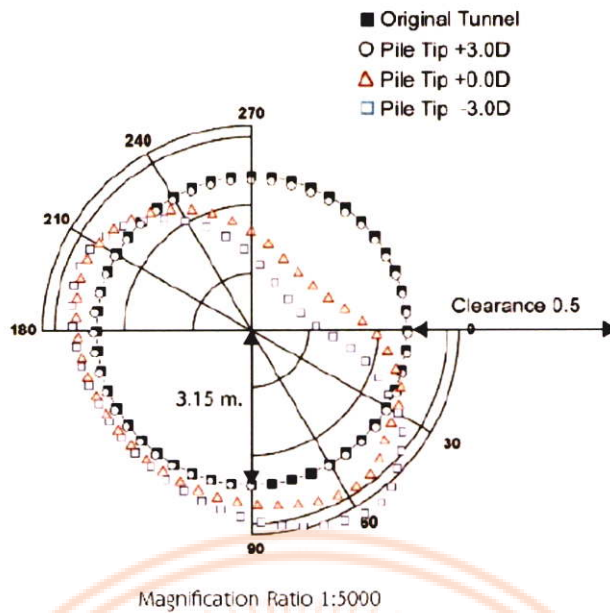


รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของผนังอุโมงค์

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มนั้น อุโมงค์มีการเสียรูปมาสมมาตรตามแนวแกนแต่มีลักษณะคล้ายเม็ดถั่วที่มีการบิดตัวตามเข็มนาฬิกาเล็กน้อย 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) ในกรณีศึกษาเกิดการเสียรูปที่มากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) อย่างไรก็ตามความหนาของผนังอุโมงค์ส่งน้ำ MWA (อุโมงค์ขนาด 4.07 เมตร มีผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร) บางกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA (อุโมงค์ขนาด 6.30 เมตร มีผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร) โดยที่อุโมงค์ขนาดเล็กกว่ามีผนังอุโมงค์บางกว่าถึงสองเท่า ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์อุโมงค์ส่งน้ำ (MWA) ได้รับอิทธิพลในแง่ของการเสียรูปมากกว่าอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) แต่พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ทั้งสองขนาดมีการสัมพันธ์ระหว่างปลายเข็มกับอุโมงค์ที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามการเสียรูปของผนังอุโมงค์ทั้งสองไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดอุโมงค์ที่อ้างอิงจากโครงการ MRTA หรือ WMA จะได้รับความเสียหายมากกว่ากันเนื่องจากมีขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน

4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ที่ แต ก ต่ า ง

เอกสารนี้ ~~กัน~~ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

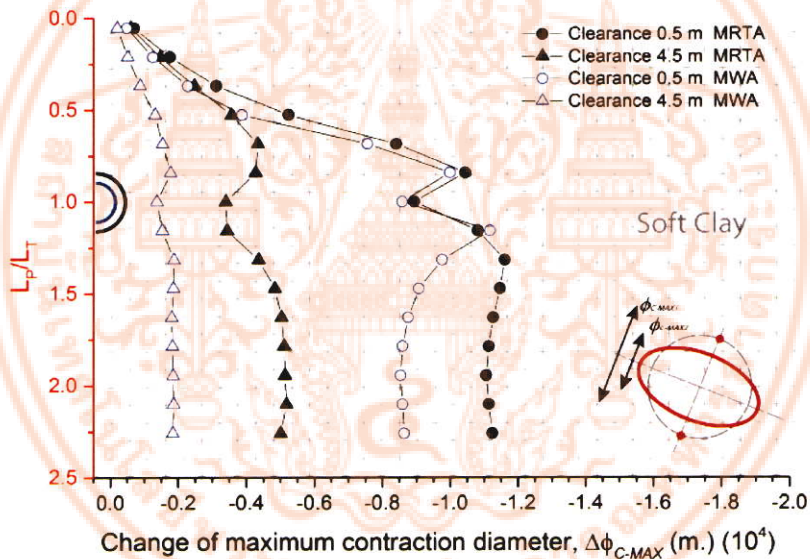
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากหัวข้อก่อนหน้าคือการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม ยังมีข้อจำกัดทางด้านขนาดอุโมงค์และความหนาของผนังอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จึงได้เปรียบเทียบผลกระทบระหว่างขนาดอุโมงค์และความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบที่ระยะ Clearance 0.5 , 4.5 เมตรโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยกรณีศึกษาที่ 2 , 3 และ 4 จะนำไปแสดงผลในภาคผนวก

4.3.1 การเปรียบเทียบขนาดอุโมงค์ที่ต่างกัน 2 ขนาด

โดยกำหนดให้มีความหนาผนังอุโมงค์เท่ากับ 0.30 เมตร และขนาดอุโมงค์ต่างกันอ้างอิงขนาดจากโครงการ MRTA เท่ากับ 6.30 เมตร WMA เท่ากับ 4.07 เมตร เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยการแปรเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุดและสูงสุดของอุโมงค์ทั้งสองขนาด

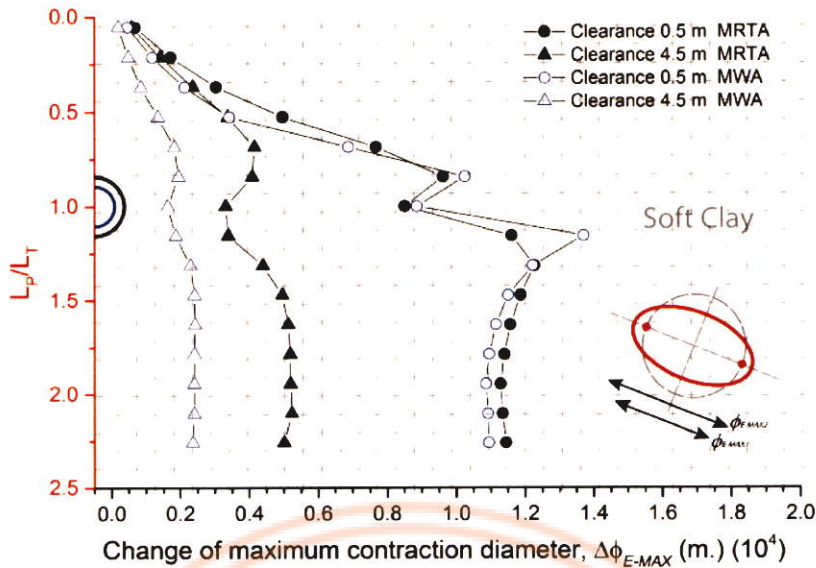


รูปที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ต่ำสุด กรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

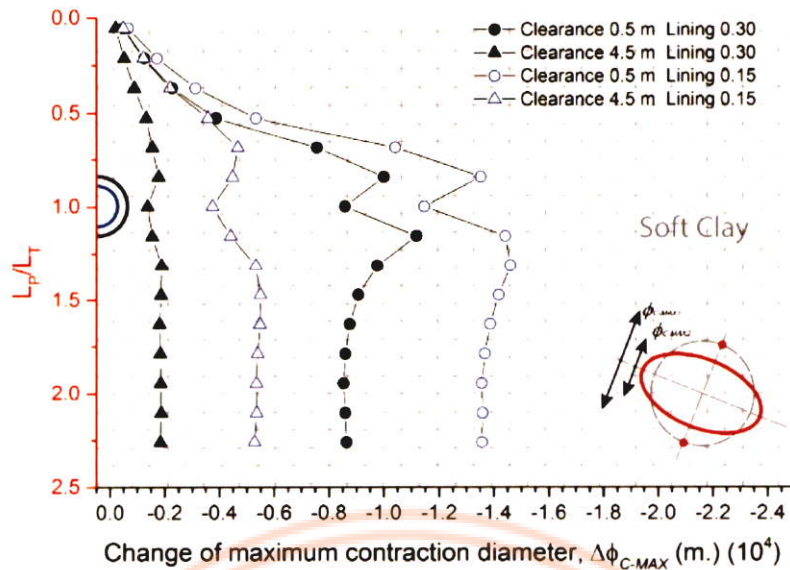
โดยกำหนดให้ขนาดอุโมงค์เท่ากัน มีขนาดอุโมงค์ 4.07 เมตร เท่ากับขนาดอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (MWA) เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยการแปรเปลี่ยนความหนาผนังอุโมงค์

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 แสดงให้เห็นว่าผนังอุโมงค์ที่ความหนาต่างกัน ส่งผลกระทบบึงค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเช่นเดียวกัน

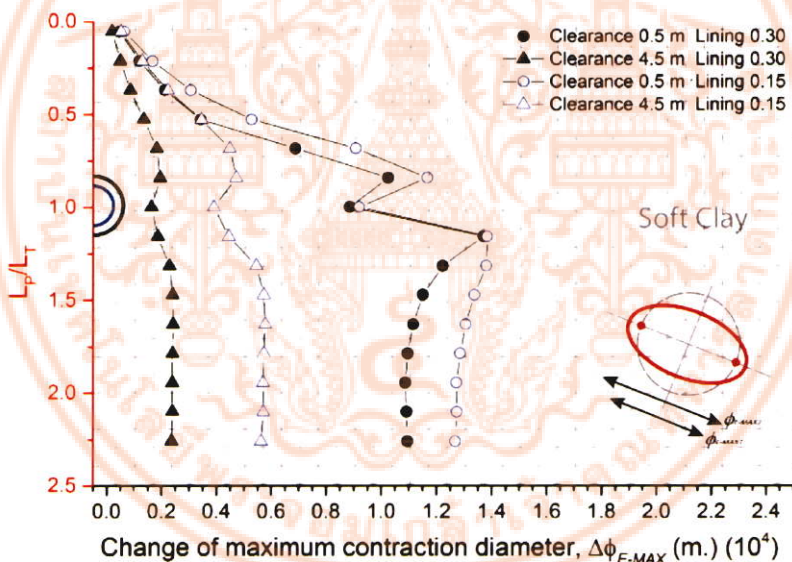
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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 อุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงMWA 4.07 เมตร ผนัง

อุโมงค์หนา 0.15 เมตร อุโมงค์ลักษณะใดได้รับผลกระทบหรือความเสียหายมากกว่า จึงได้ทำการวิเคราะห์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่ออื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

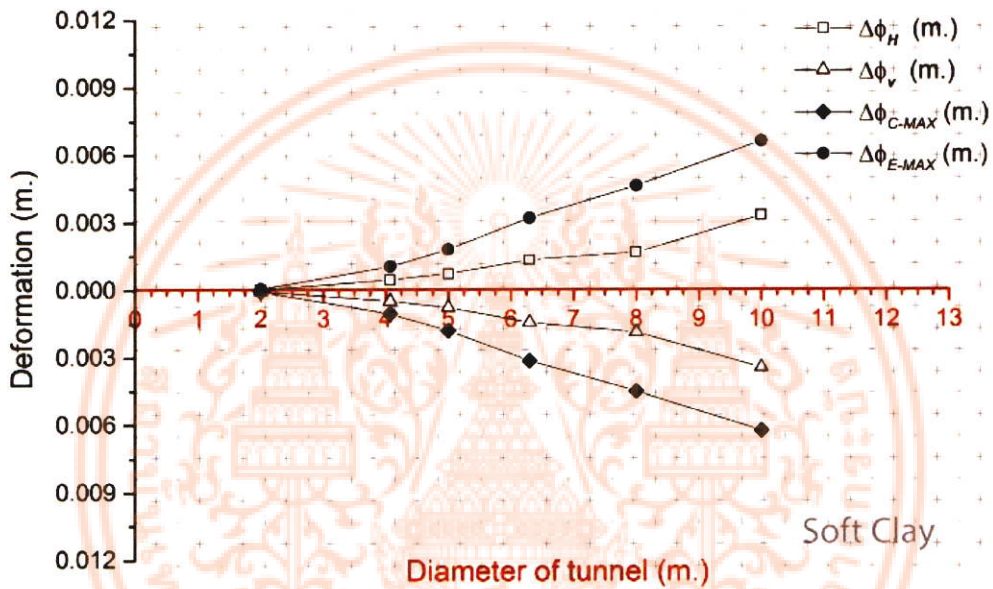
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 โดยวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ที่ระยะปลายเสาเข็มคงที่ $1.0D_T$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ผนังอุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุด



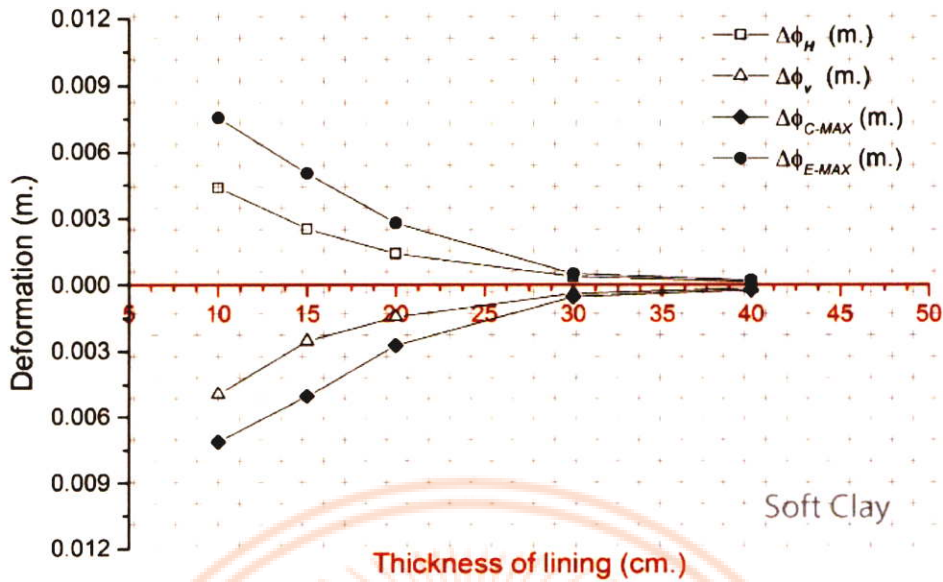
รูปที่ 4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดต่างกัน ให้ความหนาผนังอุโมงค์คงที่เท่ากับ 0.30 เมตร

รูปที่ 4.14 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในแนวตั้ง ราบ สูงสุดและต่ำสุดจากการวิเคราะห์เปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์หลายขนาดโดยมีความหนาของผนังอุโมงค์คงที่เท่ากับ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ขนาดคงที่ 4.07 เมตร ให้ความหนาผนังอุโมงค์ต่างกัน

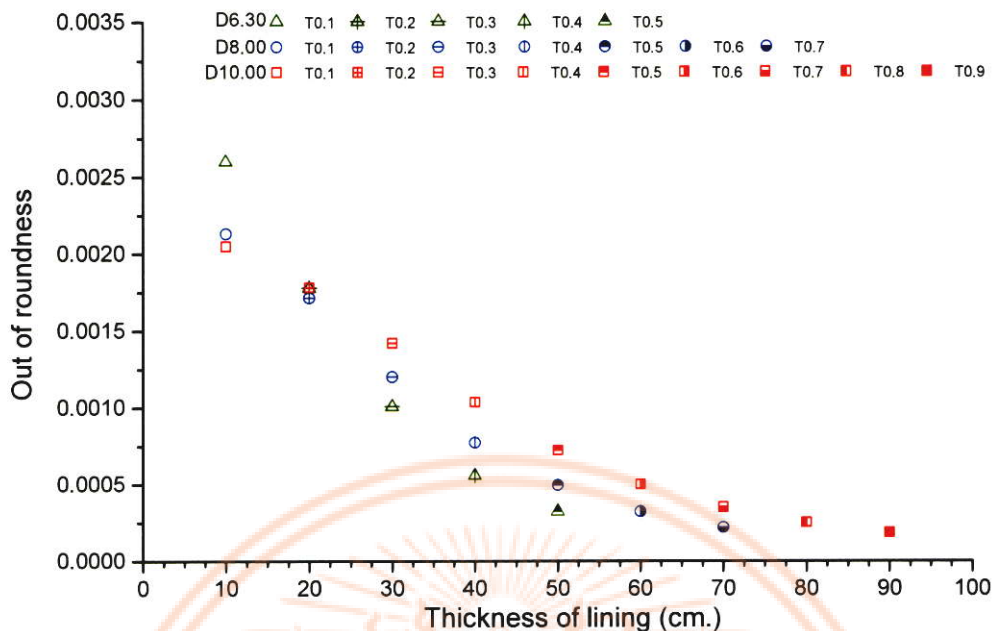
4.4.2 การสังเคราะห์ข้อมูลระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์

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

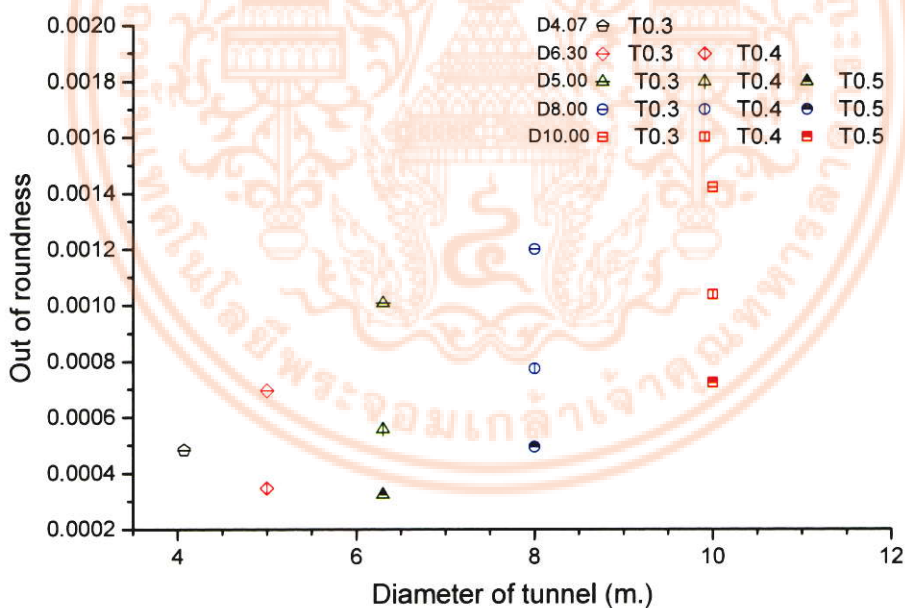
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์

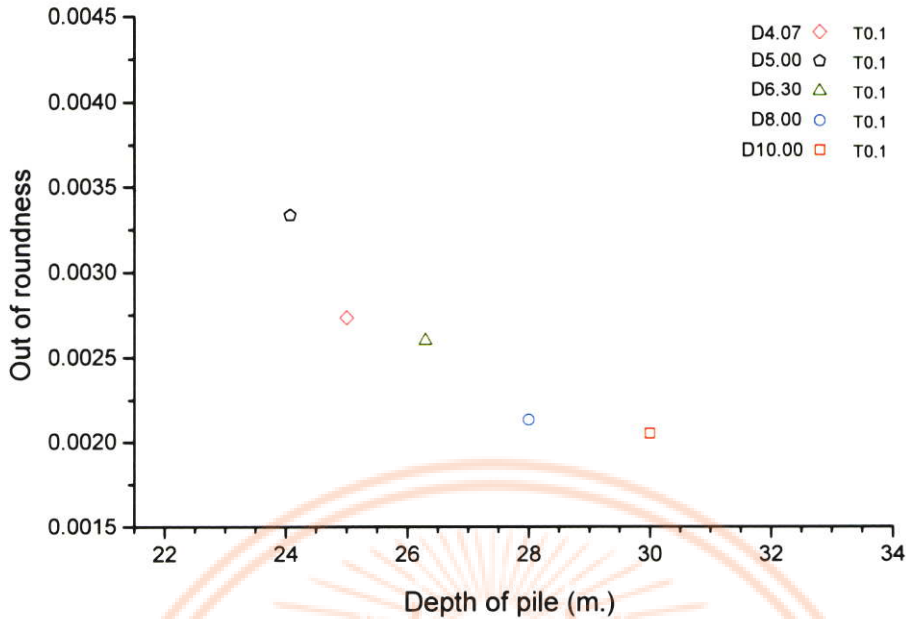


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับขนาดอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับความสึกเสาะเข็ม

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับค่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพบว่าค่าความหนาผนังอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์ และความสึกเสาะเข็ม มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยที่ค่าความหนาผนังอุโมงค์ t แปรผกผันกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์, ขนาดอุโมงค์ D แปรผันโดยตรงกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างและความยาวเสาเข็ม h แปรผกผันกับค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ จากข้อมูลการวิเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่การสร้างสมการและกราฟความสัมพันธ์ในหัวข้อถัดไป

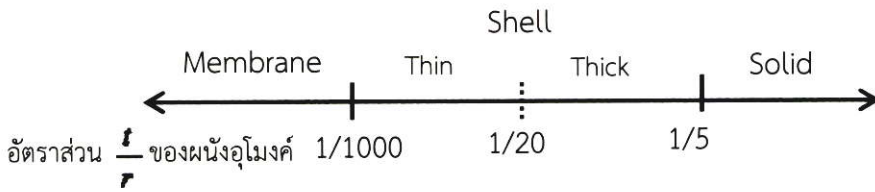
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

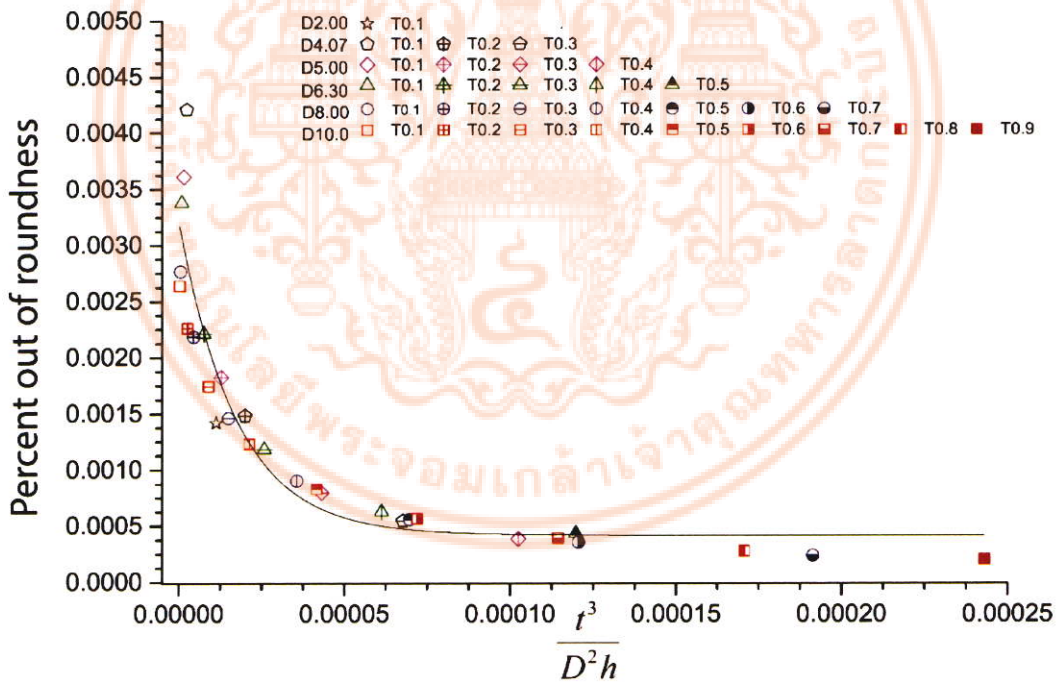


รูปที่ 4.19 อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาผนังอุโมงค์

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

$$y = y_0 + Ae^{R_0 x} \quad (4.1)$$

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



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์กับปัจจัยที่มีผลกระทบ

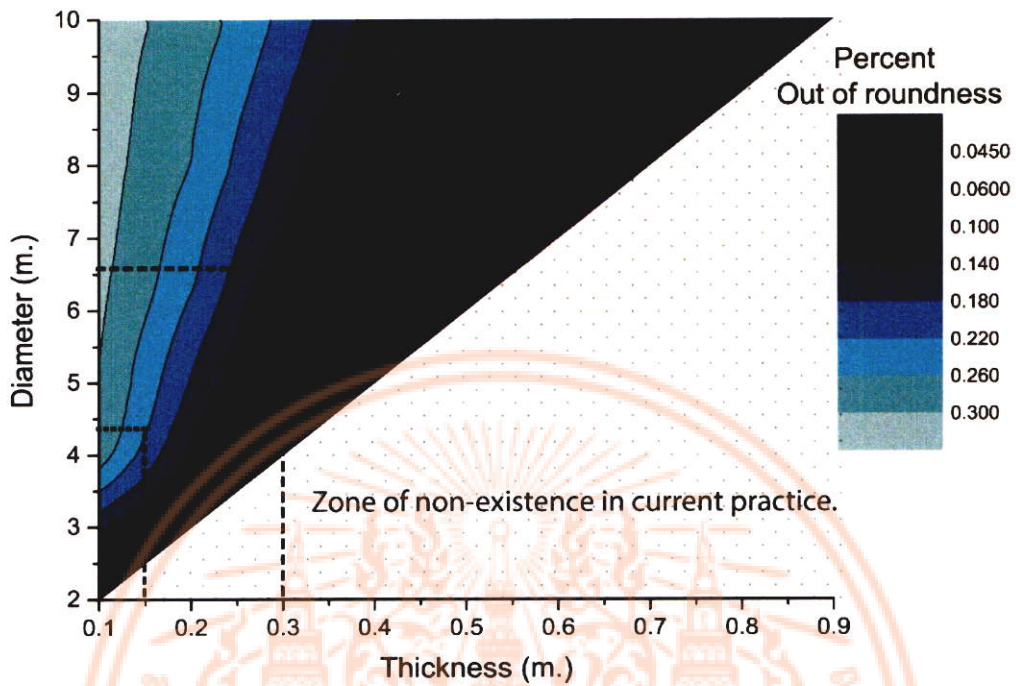
จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.20 แกน x แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ แกน y แสดงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง การศึกษาข้อมูลอัตราส่วนขนาดอุโมงค์กับความหนาผนังอุโมงค์

ในช่วงขนาดและความหนาต่างกัน ถูกทำให้อยู่ในแนวโน้มนเดียวกัน โดยมีแนวโน้มนดังสมการ 4.1 และ 4.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นนำขนาดและความหนาที่ต่างกันแทนค่าในสมการ 4.2 และเสนอแผนภาพแสดงค่าที่ได้จากสมการดังกล่าว 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 ช่วยชี้วัดผลกระทบในทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ได้จริงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อก่อนหน้า

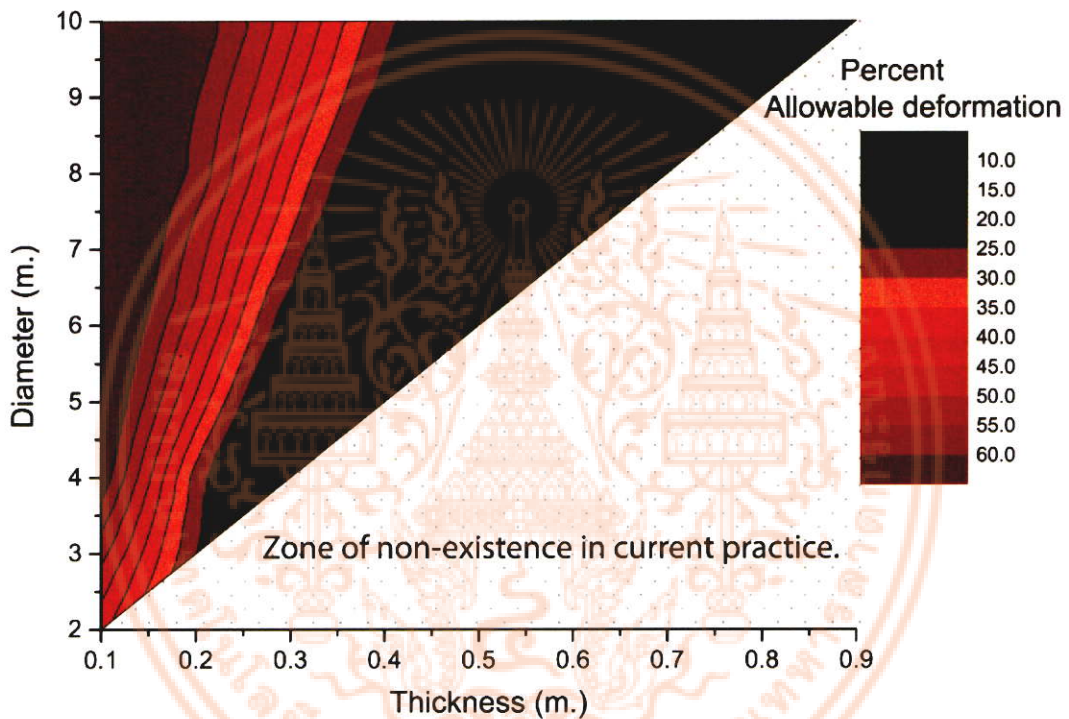
จากแผนภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ช่วยประเมินค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้า MRTA (ขนาด 6.30 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.30 เมตร) และอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง MWA (ขนาด 4.07 เมตร ผนังอุโมงค์หนา 0.15 เมตร) จากรูป 4.21 พบว่าจากลักษณะอุโมงค์อ้างอิงในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยส่วนมากการเปลี่ยนแปลงอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ จะอยู่ในรูปค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังจากได้รับแรงกระทำจากโครงสร้างข้างเคียงนั้นมีข้อกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับอุโมงค์ไว้อย่างชัดเจน จากการศึกษาอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6.4 เมตรในประเทศสิงคโปร์ โดยค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำไม่ควรเกิน 15 มิลลิเมตรในทุกทิศทางของผนังอุโมงค์ (Allowable deformation) เพื่อให้สะดวกในการใช้งานแผนภาพมากขึ้น จึงได้ทำการเสนอแผนภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การเสีรูปของอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและความหนาของดาดูโมงค์ต่อผลการเสียรูปของอุโมงค์จากเสาเข็มรับแรงที่ที่อยู่ใกล้เคียงโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษามุ่งเน้นตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยใช้ค่าการเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (out-of-roundness) เป็นตัวชี้วัดกับปัจจัยทั้งสองดังกล่าว พร้อมกับตรวจสอบลักษณะอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) และโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority ,MWA) ผลการวิเคราะห์ในการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1.ผลกระทบของผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเดี่ยว จากทั้ง 4 กรณีการศึกษา ค่าการเปลี่ยนแปลงของผนังอุโมงค์สูงสุดและต่ำสุด ในกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่ามากที่สุดที่ระดับปลายเสาเข็มต่ำกว่าระดับอุโมงค์หนึ่งเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($-1.0D_T$) ในขณะที่กรณีที่มีชั้นดินเหนียวแข็งเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังอุโมงค์ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับความลึกปลายเสาเข็ม ในกรณีศึกษานี้พิจารณาที่ระยะปลายเสาเข็มเหนืออุโมงค์สามเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($+3.0D_T$) ถึงต่ำกว่าระดับอุโมงค์สี่เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($-4.0D_T$)

2.ขนาดอุโมงค์ (D) , ความหนาของผนังอุโมงค์ (t) และระดับปลายเสาเข็ม (h) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางผนังอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

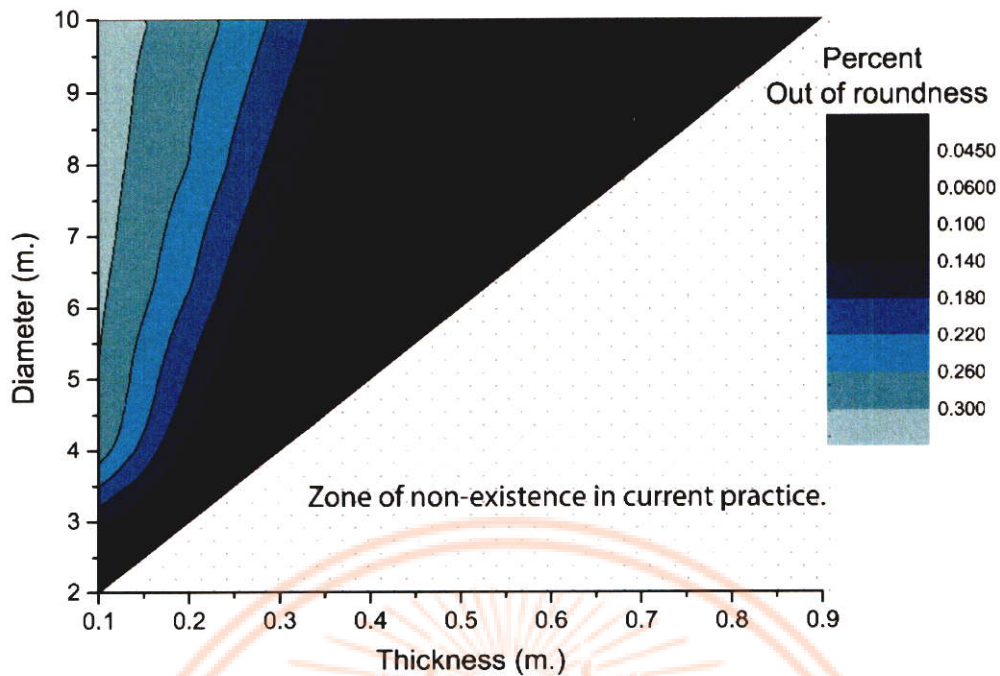
3.จากการวิเคราะห์จะได้สมการความสัมพันธ์และแผนภาพค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังอุโมงค์ในทอม Out of roundness หลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มร่วมกับขนาดและความหนาของผนังอุโมงค์ เพื่อช่วยในการประเมินค่าการเคลื่อนตัวหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม เป็นแผนภาพเปอร์เซ็นต์การเสียรูปของผนังอุโมงค์ ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



4. ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดในเทอมค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลังได้รับแรงกระทำกับขนาดอุโมงค์ ($\frac{\Delta_{\max}}{D}$) สามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมหลังได้รับผลกระทบจากเสาเข็ม โดยสะท้อนครอบคลุมถึงปัจจัยด้านขนาดและความหนาผนังอุโมงค์แล้ว ซึ่งพบว่าจากการศึกษาอ้างอิงขนาดอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง ได้รับผลกระทบในแง่การเสียรูปมากกว่า อุโมงค์รถไฟฟ้าแม้จะมีขนาดอุโมงค์ที่เล็กกว่า นอกจากนี้ยังสามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์โดยเทียบจากเกณฑ์ข้อกำหนดได้จากแผนภาพ

อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้วิเคราะห์เพียงกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับฐานอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 ซัพ-
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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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. Rukdeechai, 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



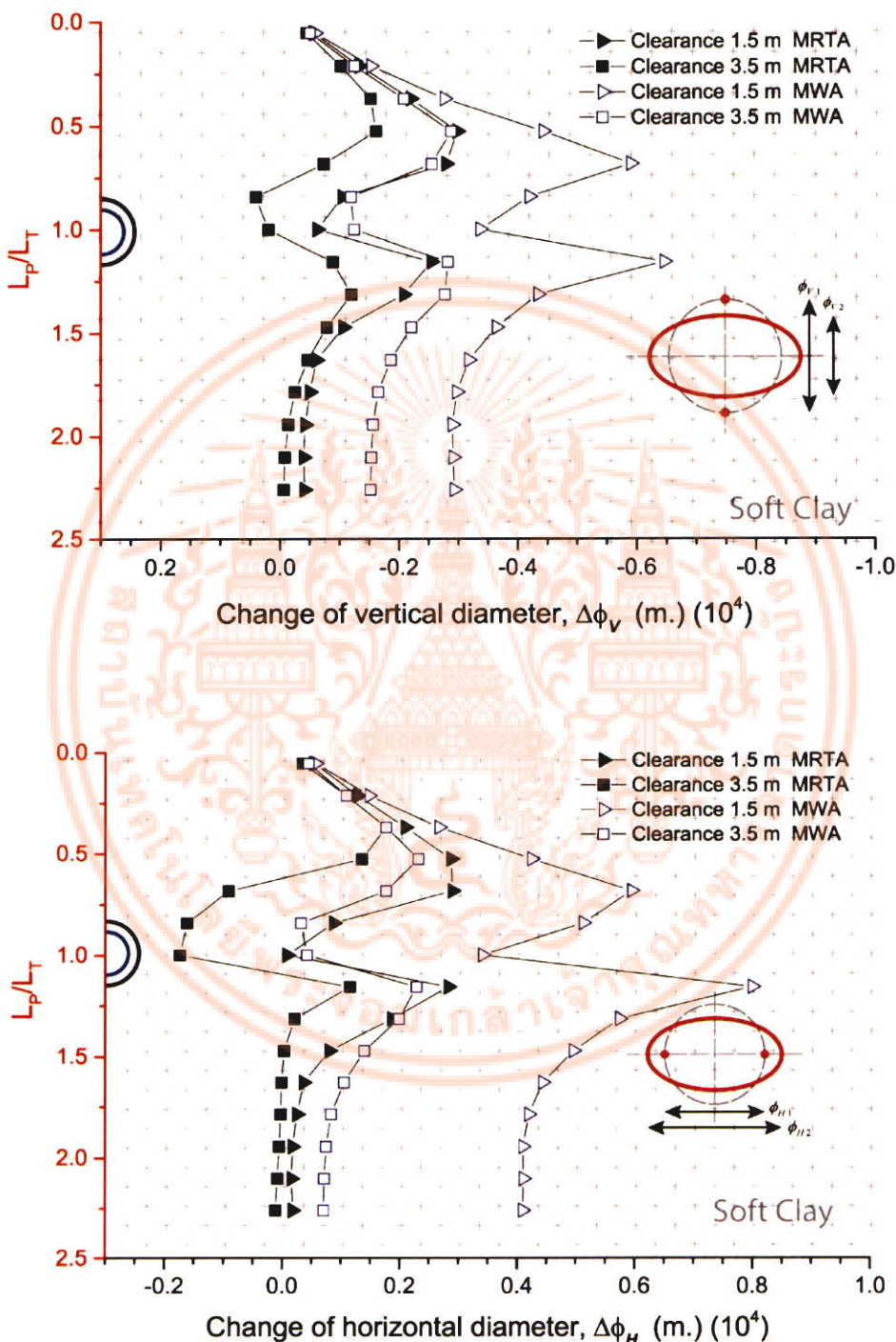
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก

ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ในกรณีที่ 1 Clearance 1.5 และ 3.5 เมตร



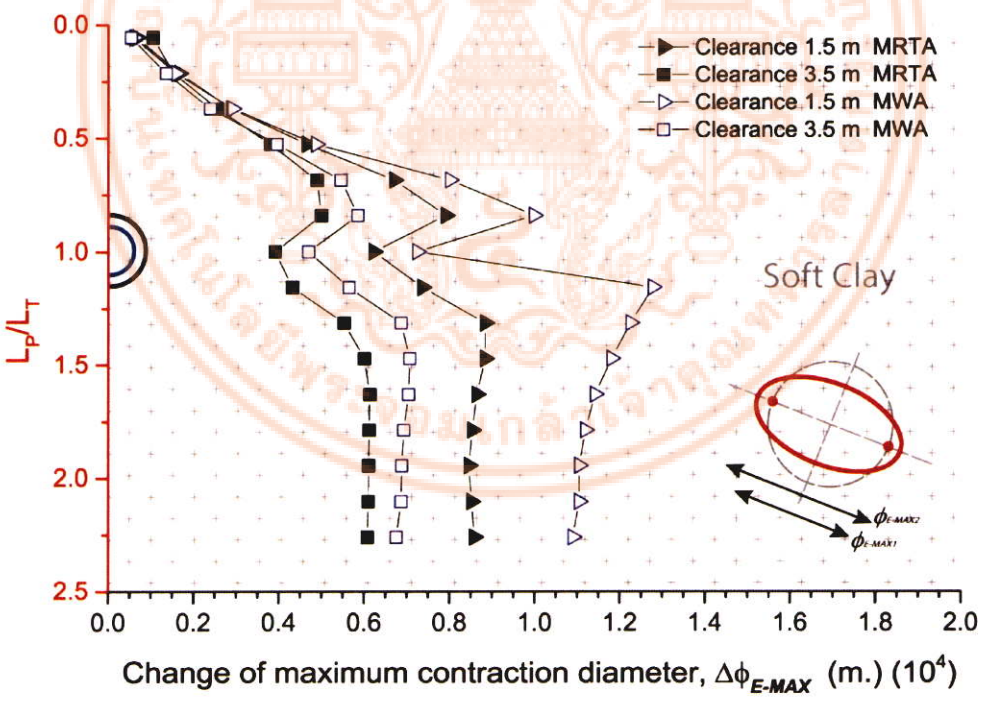
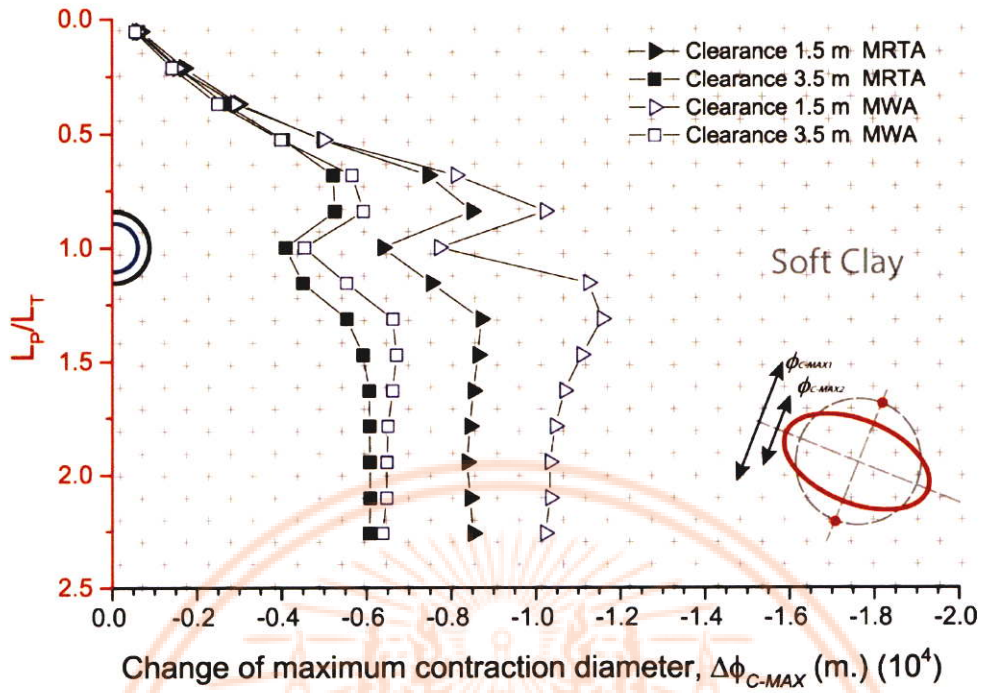
รูปที่ ก.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวนอน ในกรณีที่ 1 อ้างอิง

ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

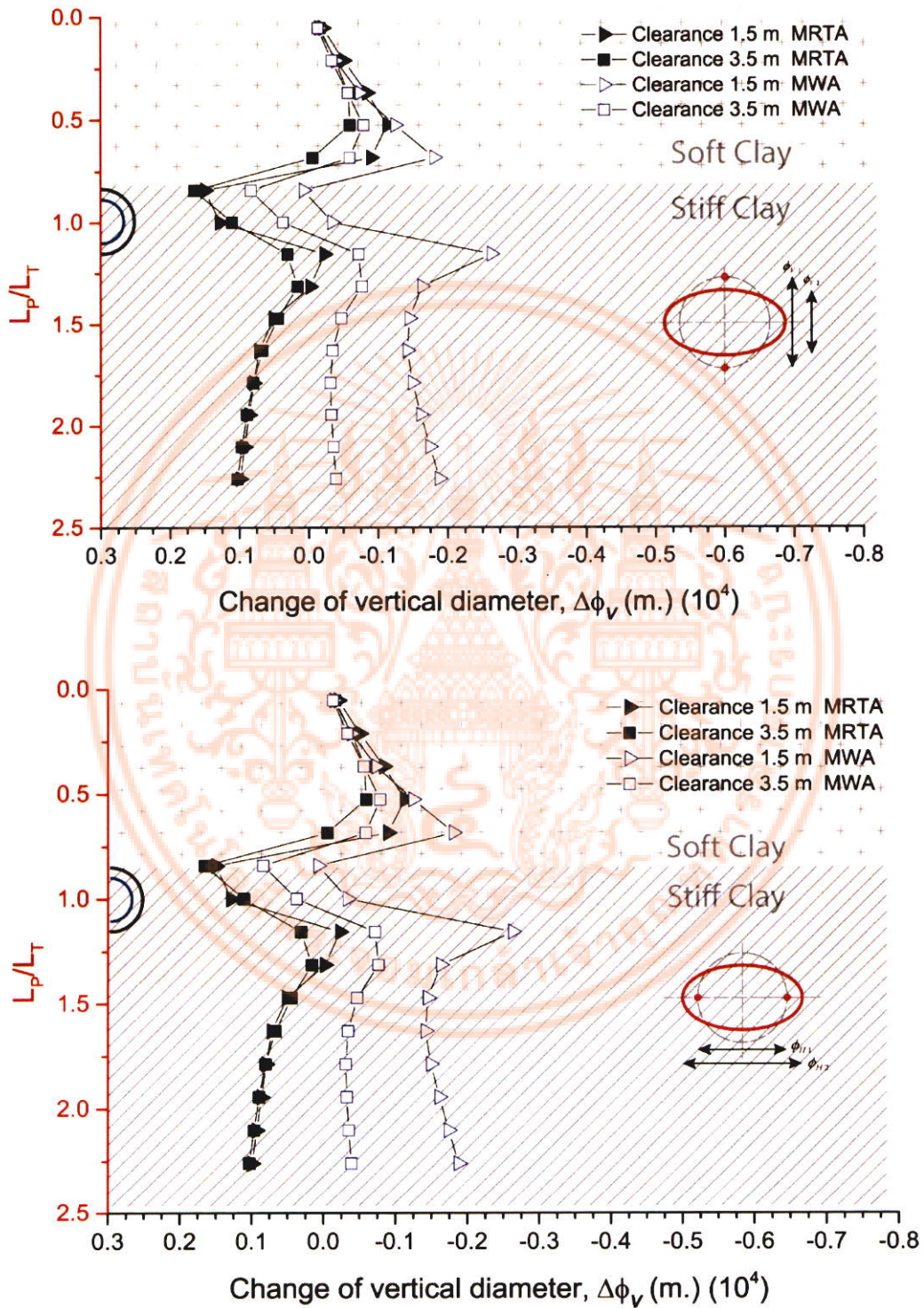
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 1 อ่างอิง ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ในกรณีที่ 4 Clearance 1.5 และ 3.5 เมตร



รูปที่ ก.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งและแนวราบ ในกรณีที่ 4 อ้างอิง

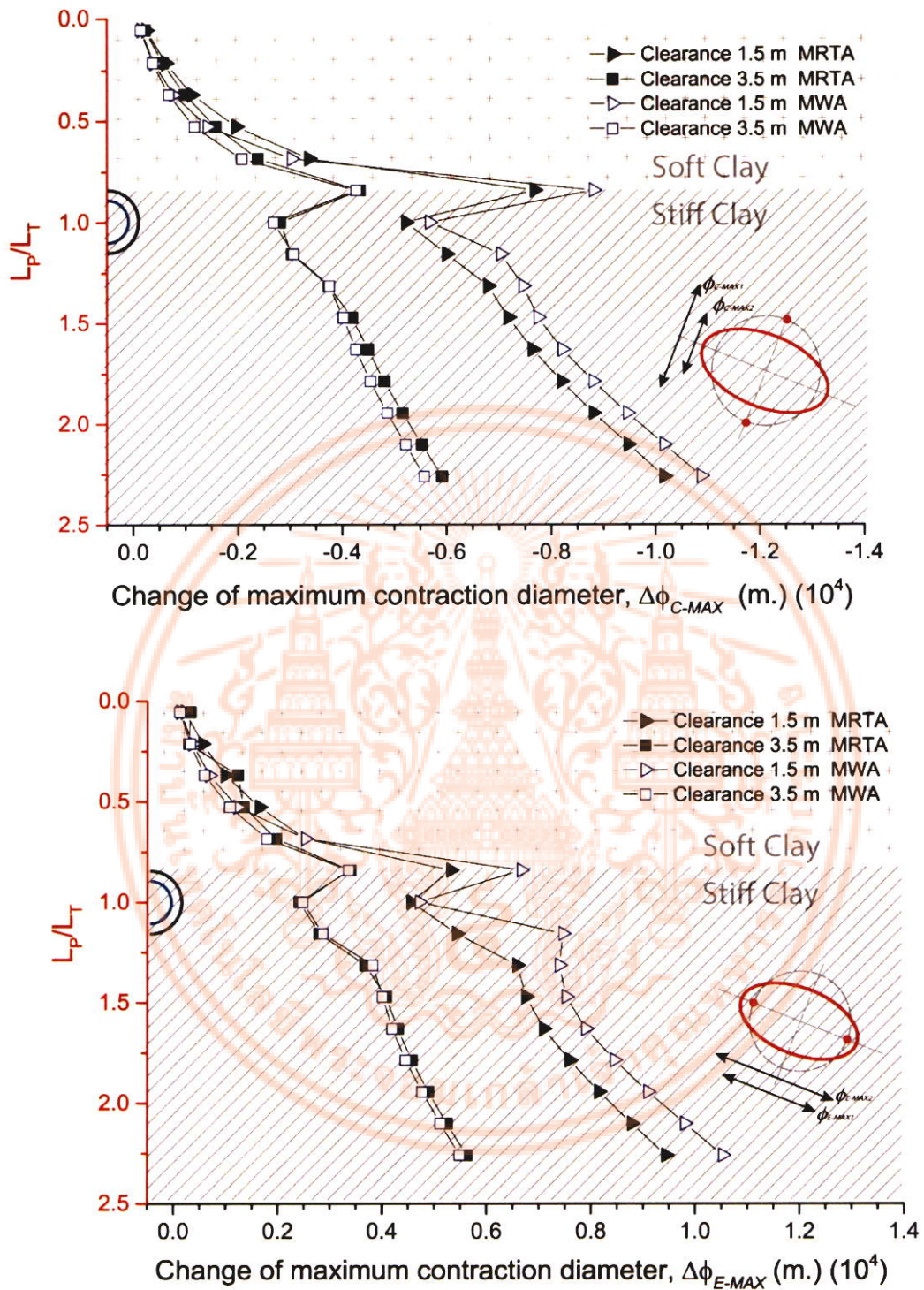
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



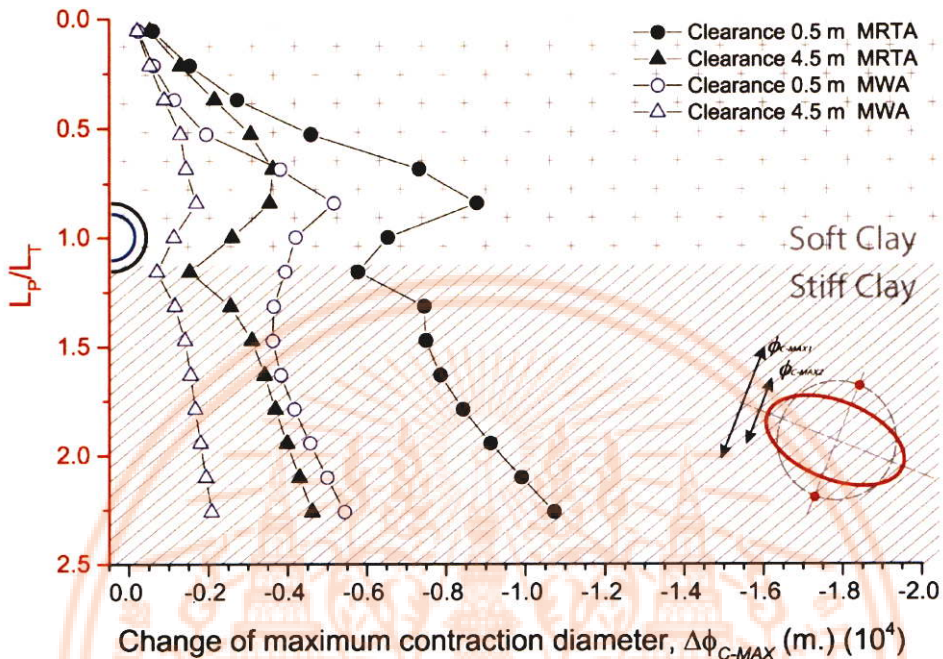
รูปที่ ก.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 อ้างอิง ลักษณะอุโมงค์ของ MRTA และ MWA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

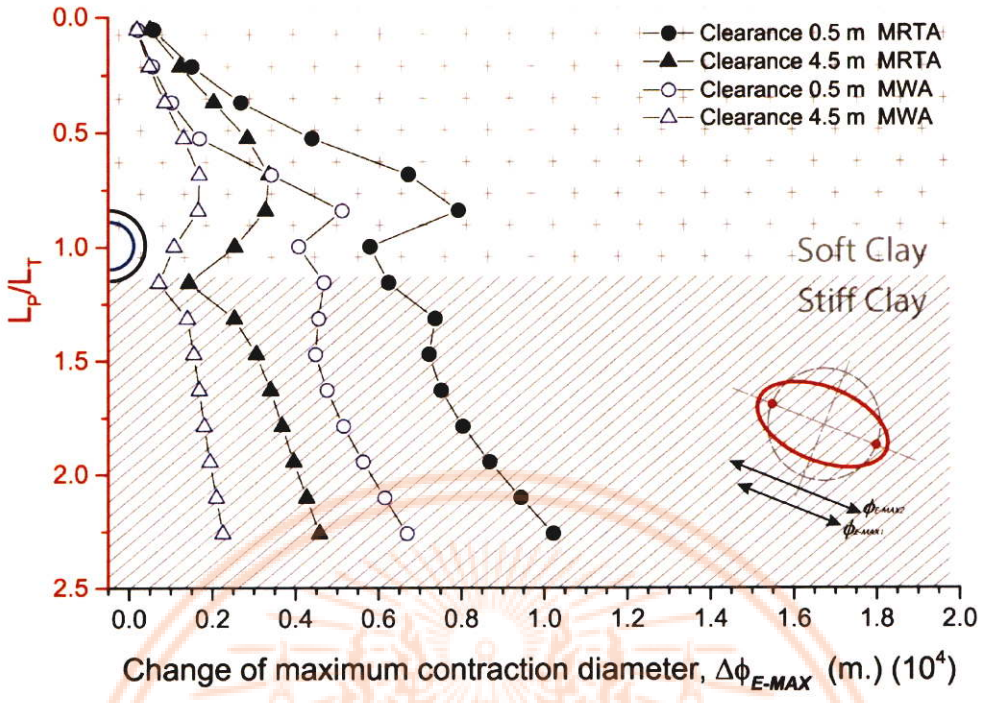
ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์มีความหนาเท่ากับ 0.30 เมตร



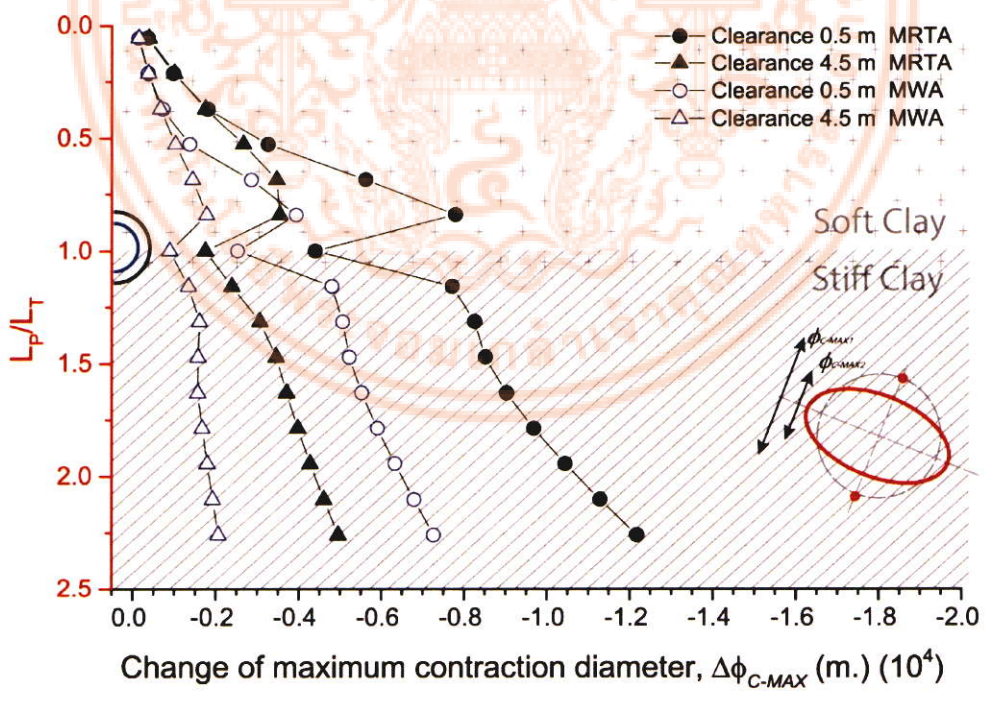
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

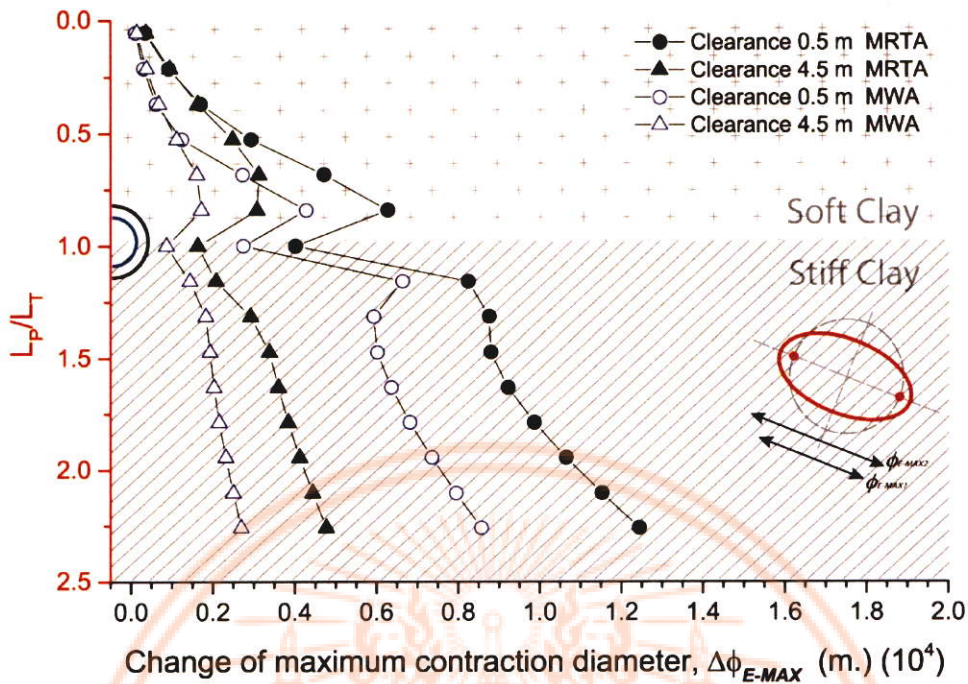
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

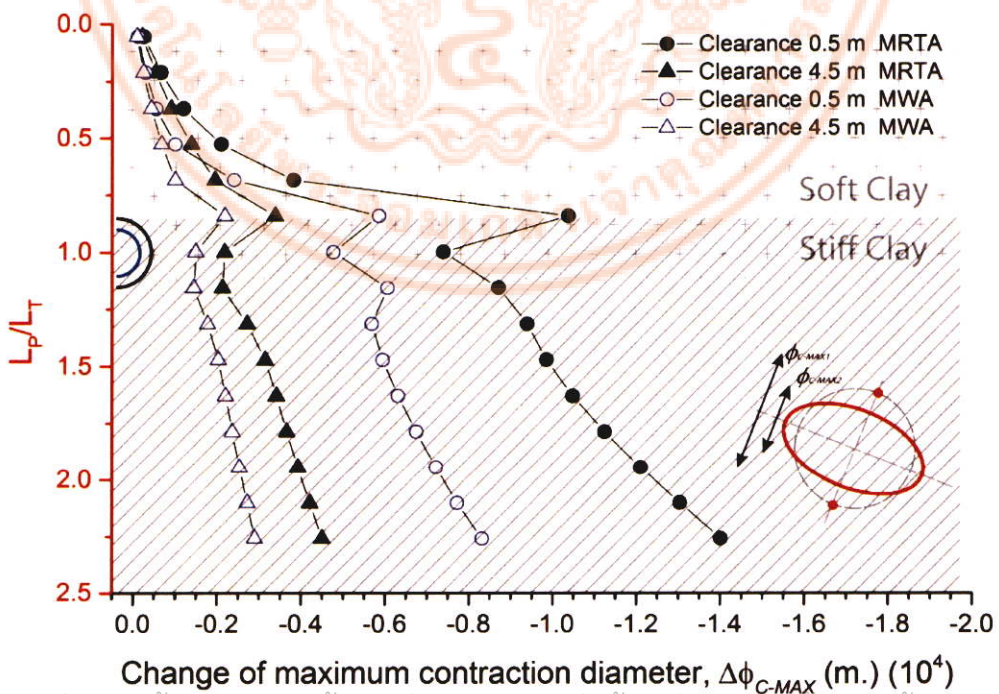


รูปที่ ก.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 2 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน





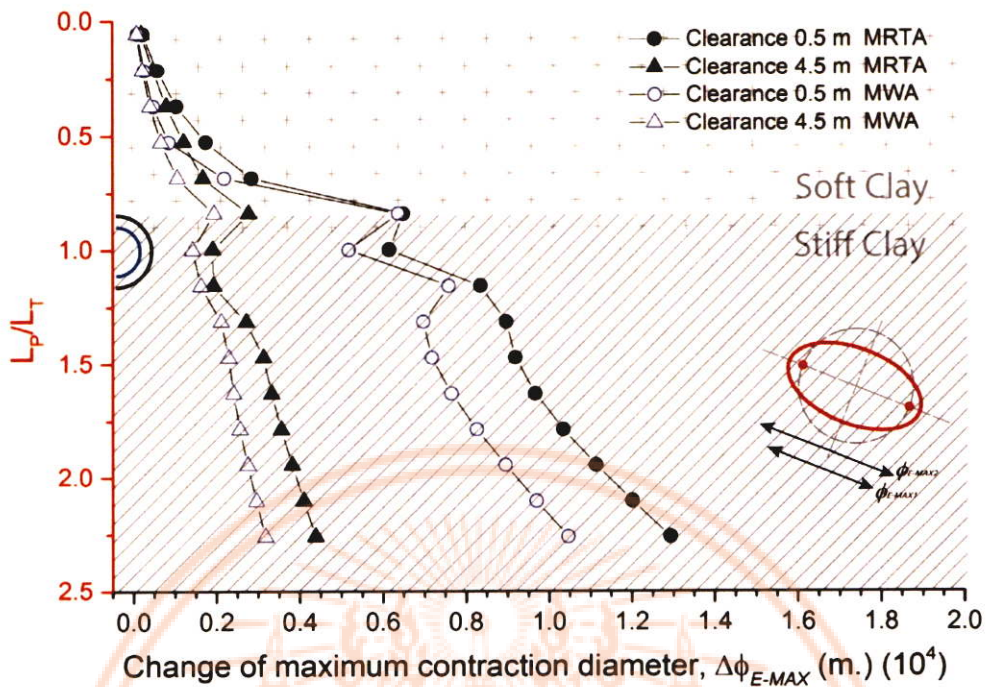
รูปที่ ก.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุดในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



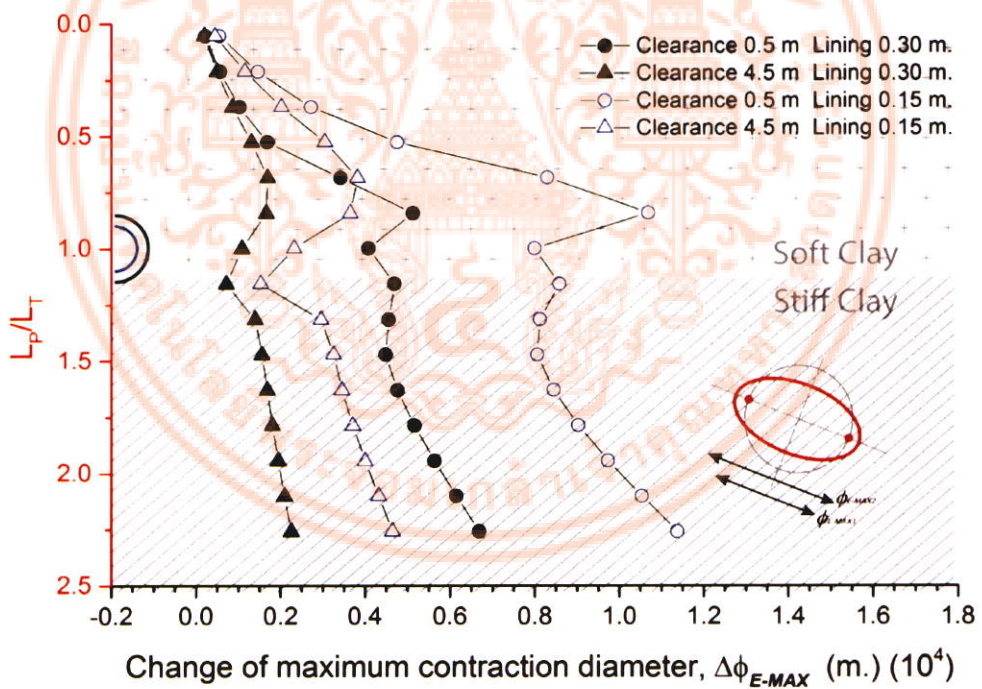
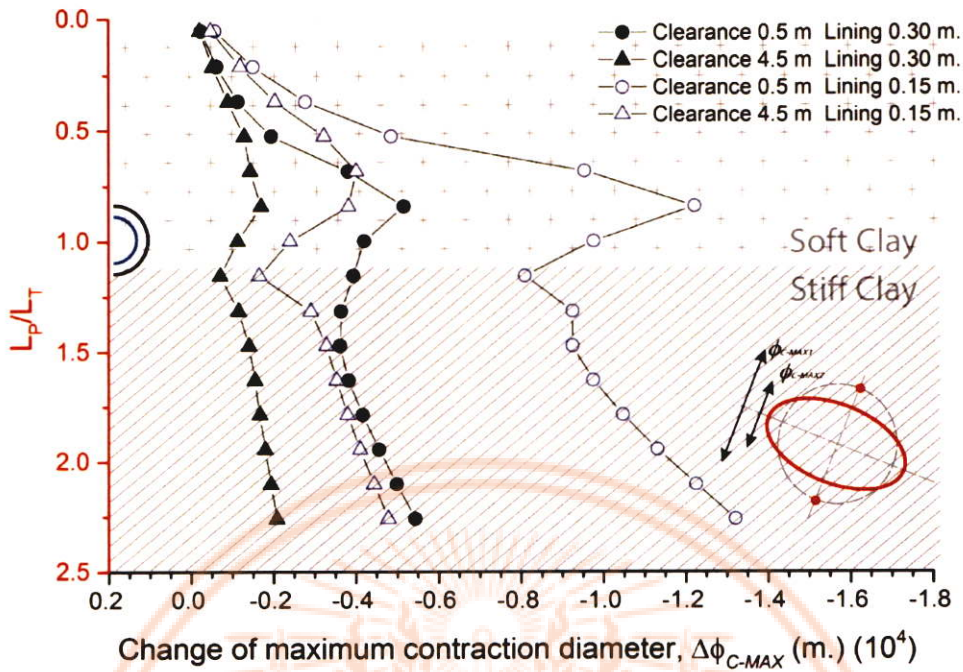
รูปที่ ก.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ ความหนาผนังอุโมงค์เท่ากัน

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาผนังอุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์มีขนาดอุโมงค์เท่ากัน 4.07 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

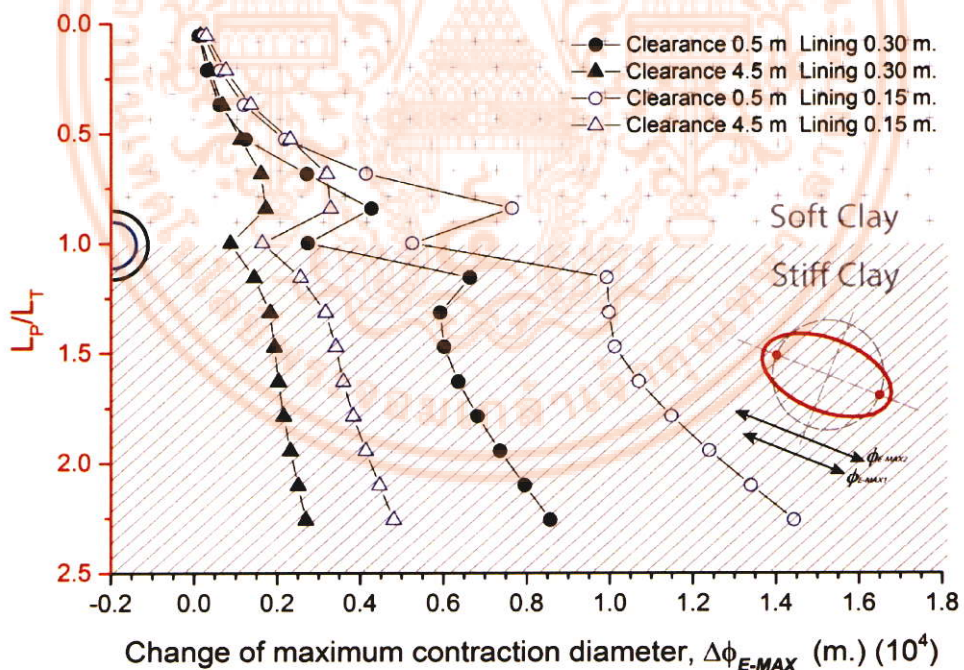
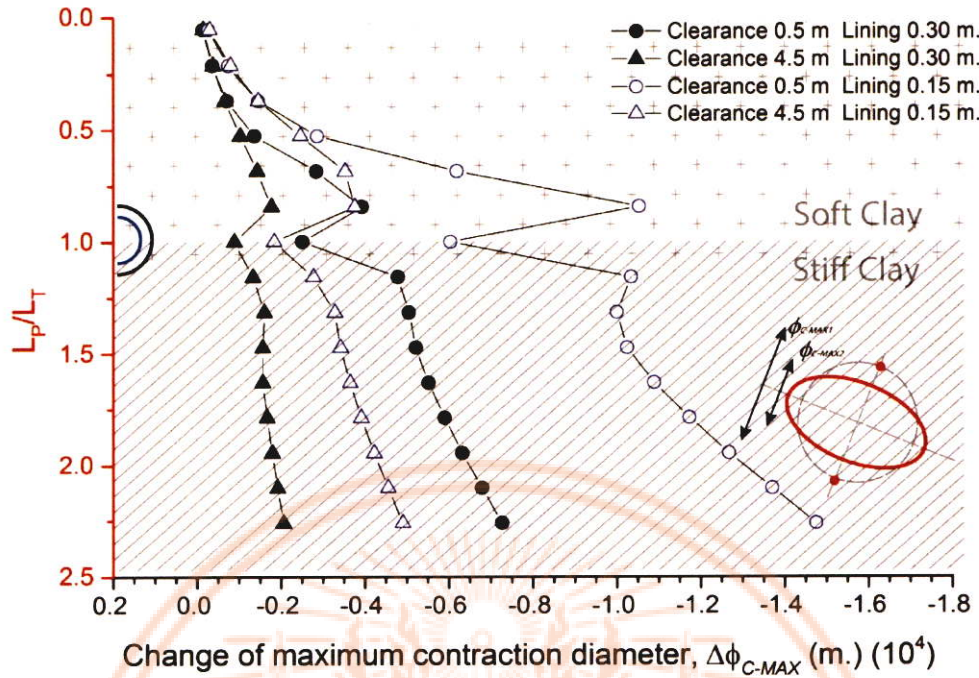


รูปที่ ก.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 2 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

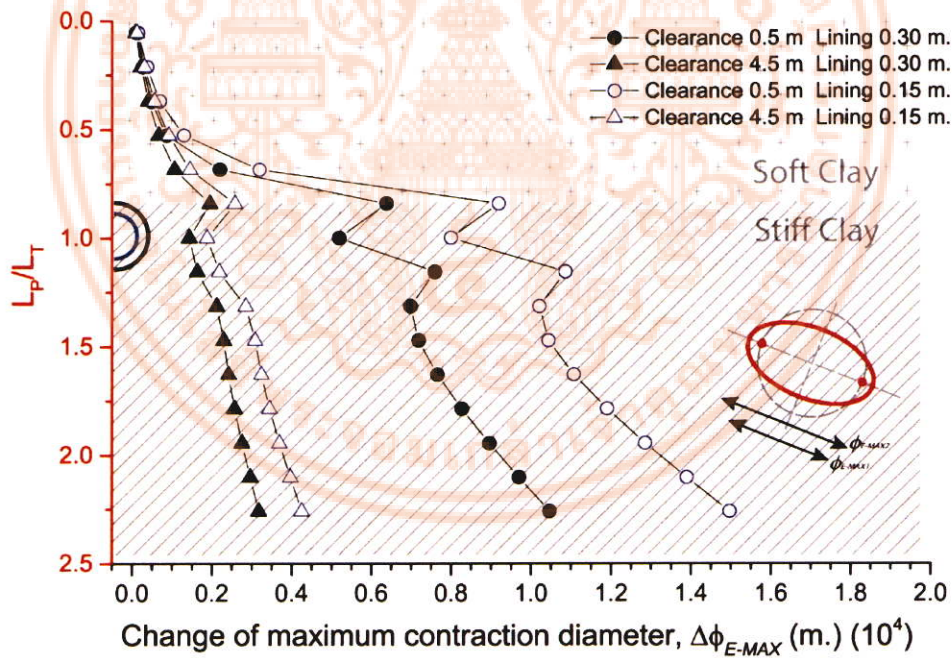
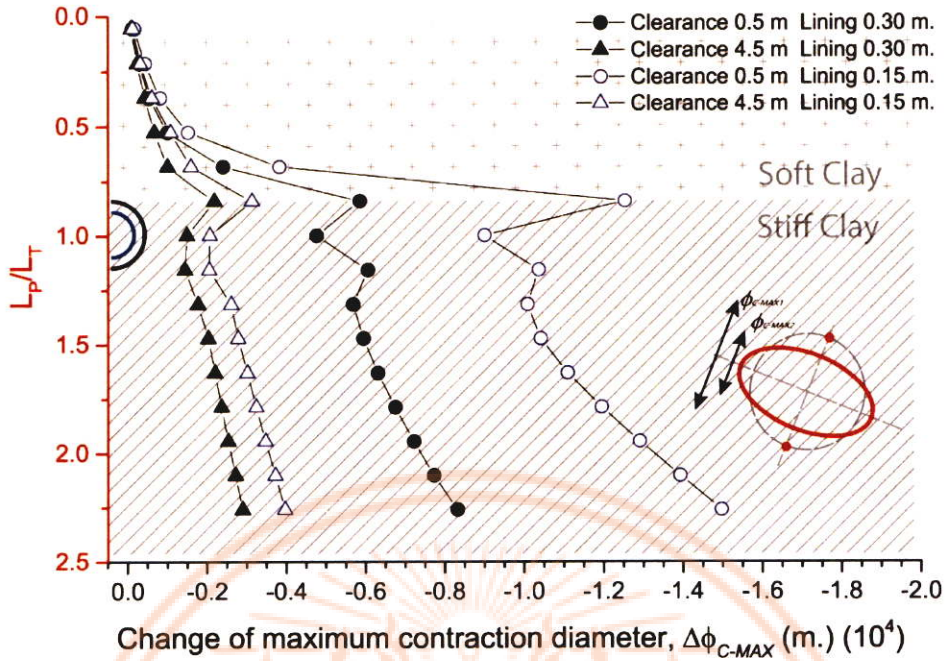


รูปที่ ก.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 3 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่ำสุดและสูงสุด ในกรณีที่ 4 ของอุโมงค์ขนาดเท่ากัน

DEPENDENCE OF TUNNEL DEFORMATION DUE TO ADJACENT PILE UNDER LOADING ON TUNNEL GEOMETRY

*Prateep Lucprasert¹, Pornkasem Jongpradist², Kodchamon Ruangvirrojanakul³ and Suchatvee Suwansawat¹

¹Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

³Sansiri Public Company Limited, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Received: 27 Nov. 2018, Revised: 30 Dec. 2018, Accepted: 10 Jan. 2019

ABSTRACT: With rapid urbanization, large number of tunnels with various dimensions have been constructed for transportation and utility systems in many big cities. At the same time, the constructions of infrastructures using a pile foundation system are also necessary in urban area. With limited space, the existing tunnels can be inevitably impacted by the newly constructed pile-supported structures. With various design criteria of tunnel lining, the size and thickness are varied from project to project. With an adjacent pile under loading, different degrees of impact on these tunnels are expected. This study numerically investigates the effect of tunnel diameter and lining thickness on tunnel deformation due to adjacent pile under loading. The MRTA and WMA tunnels in Bangkok subsoil are chosen as the reference cases for investigation. From a series of parametric study, a relationship between the tunnel deformation and dimensionless parameter, which include the size and thickness of lining, can be successfully established.

Keywords: Existing tunnel, Tunnel size, Lining thickness, Out-of-roundness, Pile under loading, Numerical analysis

1. INTRODUCTION

To deal with the problem of limited space in major cities, large number of tunnels, e.g. transportation tunnels, electricity tunnels and water supply tunnels, have been constructed for transportation and utility systems. At the same time, more new infrastructures are also constructed in these urban areas, e.g. flyovers and tall buildings, all of which require pile foundation. The piles of these new structures are inevitably close to existing tunnels as shown in Fig. 1.

Several previous studies [1-5] reveal that the piles under loading can induce the change of stress state and deformation of surrounding soils resulting to an impact on existing tunnels. An assessment on the stability and integrity of the tunnels due to the impact of piles under loading is thus essential. Although different assessment methods in terms of tunnel deformation are considered in the previous researches [1-5], a specific tunnel diameter and thickness were considered in each study. In engineering practice, with various purposes of tunnel utilization, the tunnel diameter (D) and lining thickness (t) are varied. Bakker and Blom [6] investigated the parameters to get the most economic tunnel design by using analytical method, the study indicates that the ratio between lining thickness and tunnel diameter (t/D) is the key design parameter and has strong influence on a tunnel deformation.

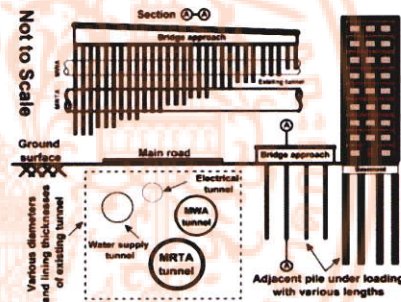


Fig. 1 newly structures constructed to adjacent existing tunnels.

Therefore, the effect of tunnel size and lining thickness on the tunnel deformation due to adjacent pile under loading are investigated by finite element method (FEM) in this study. The Mass Rapid Transit Authority (MRTA) Blue Line extension project and Metropolitan Waterworks Authority (MWA) tunnels in Bangkok subsoil are chosen as the reference cases for the investigation. From a series of parametric study, a simple relationship between the tunnel deformation and dimensionless parameter, which include the diameter and thickness of lining, can be established as a guideline for tunnel assessment due to loaded pile.

2. CHARACTERISTICS OF CASE STUDIES

The characteristics of the MRTA and MWA tunnel projects in Bangkok subsoil with groundwater condition as piezometric drawdown are considered to investigate the effect of tunnel diameter and lining thickness on tunnel deformation due to loaded pile as depicted in Fig. 2a. The MRTA and MWA tunnels having outer diameters of 6.30 m and 4.07 m, lining thicknesses of 0.30 m and 0.15 respectively, are located at the depth, L_T , of 20 m below the ground surface. The Bangkok subsoil based on the actual tunnel alignment of those projects where the tunnel located in stiff clay is considered. While, a tunnel in the soft clay referred to as the tunnel transition section, is also considered in this study. The elevations of pile tip with respect to the spring line level considered and the clearances normalized by the outer tunnel diameter (D) are also shown in Fig. 2 b.

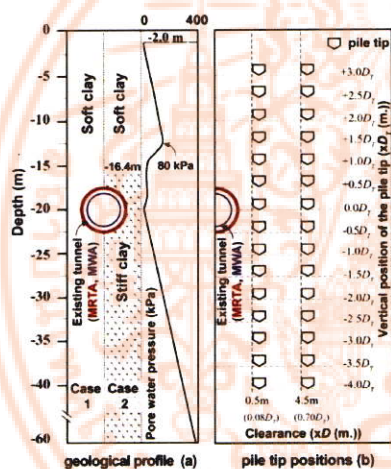


Fig. 2 Illustration of geological profile (a) and pile tip positions (b) considered in this study.

3. ANALYSIS METHOD

The FE analysis consists of two parts. The primary investigation of the effects of size and thickness of tunnel lining on tunnel deformation due to loaded pile are firstly performed by 3D-FEM. The parametric analysis, where various diameters and thicknesses of lining are considered, is conducted to establish a relationship between the tunnel deformation and dimensionless parameter in terms of a simple equation. The details of analysis method are described in the subsequent sections.

3.1 Finite Element Model

3.1.1 Mesh

An example of 3D FE mesh, the tunnel constructed in stiff clay, indicating the relevant geometry, soil profile and element discretization is illustrated in Fig. 3. To simulate a tunnelling problem in three-dimensional model, the FE model is sufficiently extended to avoid the boundary effect. From previous study [7], a distance of $4.0 D$ in lateral and longitudinal directions from the centre of FE model are sufficient. Thus, the meshed domain had an extent of 60 m ($\approx 9.5 D$) in the vertical and longitudinal directions and 80 m ($\approx 12.5 D$) in the transverse direction.

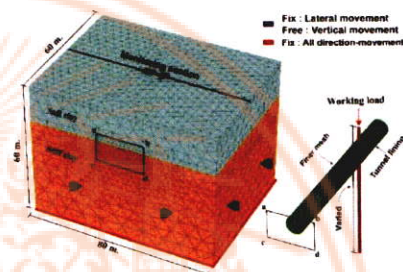


Fig. 3 Example of finite element mesh for the tunnel constructed in stiff clay.

The monitoring section was defined at the centre of longitudinal direction. The soil stratum and bored pile were discretized into the 10-node tetrahedral elements or volume elements. The 6-node triangular plate elements were used to simulate the tunnel lining. The finer discretization mesh with suitable aspect ratio was used to accommodate the accuracy of the solutions, especially in the zone between pile and tunnel. The PLAXIS version 2013 software was implemented for mesh generation and analysis [8].

3.1.2 Analysis condition

For initial stress state, the vertical and horizontal effective stresses were determined by given unit weight of soil and coefficient of static earth pressure, K_0 , for all strata. The pore water pressure was also generated by giving piezometric drawdown condition. The undrained analysis was considered.

In order to control the displacement boundary condition, the horizontal movement were restricted but allowed for vertical movements at the lateral boundaries of the mesh. The bottom boundary of the mesh is fixed (no vertical and horizontal movements). These conditions were applied to all finite element models throughout the study.

3.1.3 Material properties

The concrete lining and bored pile were assumed to be a linear elastic as shown in Table 1. The value of interface friction (R_{micr}) between the surrounding soil and structural elements (EPB, tunnel lining or bored piles) was chosen to be 0.9 in the study

The Hardening Soil (HS) model which is successfully employed in simulation of various kinds of geotechnical works in soft ground [9-12] is adopted. The HS model parameters as presented in Table 2 were mainly calibrated from laboratory testing results of soil samples together with the field measurement conducted by Prust [13]. The parameters have been used to analyse the tunnel work in Bangkok [5], [14].

Table 1 Material properties of the bore pile and tunnel lining [14].

	Young modulus [E] (kN/m ²)	Poisson's ratio [ν]	Unit weight [γ] (kN/m ³)
Tunnel lining	31 × 10 ⁶	0.20	24
Bored pile			

Table 1 Soil model parameters [5], [14], [15]

Soil layer	Soft clay	Stiff clay
Material model	Hardening Soils (HS model)	
F_{vol}^{ref} (kPa)	5,000	63,158
E_{50}^{ref} (kPa)	5,000	63,158
E_{ur}^{ref} (kPa)	15,000	189,474
γ_{sat} (kN/m ³)	16	18
ν_{vol} (-)	0.2	0.2
ϕ (°)	22	22
\dot{c} (kPa)	5	18
m (-)	1	1
p_{ref} (kPa)	100	100

3.2. Analysis Process

The simulation process, which is carried out by 3D FEA, is divided into two stages. The tunnelling process with the Earth Pressure Balance (EPB) shield method is simulated by following the method proposed by Lucprasert [16]. The tunnelling process was verified by comparing measured surface settlement of MRTA and the structural forces of previous researches [17 - 18]. The second stage is to assess the tunnel deformation due to the application of the axial load to the single pile modelled as wished-in-place. The

applied load is the predetermined working load based on the alpha method [19]. The tunnel deformation is assessed by using the method proposed by Lueprasert [5] as shown in Fig. 4.

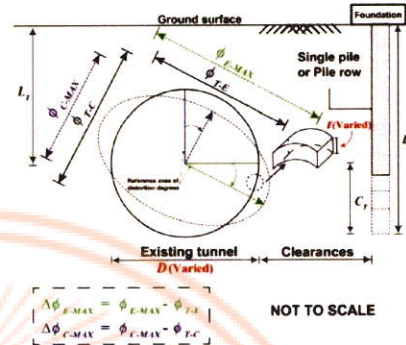


Fig. 4 The schematic of the assessment method in terms of the maximum changes in tunnel diameter.

The figure shows the assessment method used to trace the maximum tunnel deformation due to adjacent loaded pile located on single side of the existing tunnel. The assessment method in terms of the maximum extension change ($\Delta\phi_{E-MAX}$) and the maximum contraction change ($\Delta\phi_{C-MAX}$) are denoted the largest changes in tunnel diameters due to effects of pile under loading as widening and shortening behaviour respectively. The tunnel diameter and lining thickness are varied to assess the maximum changes in tunnel diameter. Note that only the deformation due to an adjacent pile under loading is considered; that due to the excavation process is not included.

The second part is to establish a relationship between the tunnel deformation in terms of the maximum changes in tunnel diameter and dimensionless parameters from a series of parametric study conducted by 2D FEA. The effect of adjacent row pile on the existing tunnel, which can be more serious than that of single pile in engineering practice, is investigated. Various lining thicknesses and tunnel diameters as tunnel ratio, (lining thickness to tunnel diameter t/D) are modelled to analyse the relationship of various tunnel ratios and tunnel deformation. Generally, with conservative design of tunnel lining, the ratio of lining thickness to tunnel diameter can be classified into a thick shell structure. However, from the previous study [20], the results indicate that either thin or thick shell element can give a reasonably accurate distortion of cylindrical tubes. Thus, the thin shell structure formulated in PLAXIS code, is adopted to model the tunnel lining in this study.

4. ANALYSIS RESULTS

The analysis results are comprised of two parts: the first one is the investigation of the effects of adjacent pile under loading on the maximum change in tunnel diameter, $\Delta\phi_{E-MAX}$ or $\Delta\phi_{C-MAX}$ of different tunnel diameters based on MRTA and MWA projects. For the second part, the relationship between the out-of-roundness and dimensionless parameters is carried out to establish the relevant equation and the chart indicating the effects of loaded pile on allowable tunnel deformations referred from Land and Transport Authority (LTA) code [21].

4.1 Investigation of Effect of Tunnel Diameter and Lining Thickness on Maximum Change in Tunnel Diameter

4.1.1 Different tunnel diameters

The lining thickness of 0.30 based on MRTA tunnel are fixed while the tunnel diameters of 4.07 and 6.30 m, which referred to MWA and MRTA tunnel diameters respectively, are modelled to investigate the impact of the adjacent bored pile under loading.

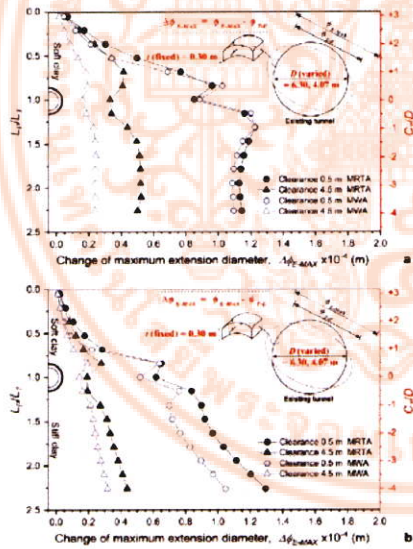


Fig. 5 The maximum extension changes of tunnel diameter due to pile under loading for different tunnel diameters. (a) for a tunnel located in soft clay, (b) for a tunnel located in stiff clay

Because the previous research [5] reveals that both the trend and magnitude of $\Delta\phi_{E-MAX}$ and $\Delta\phi_{C-MAX}$ are almost identical to each other, so only the results for $\Delta\phi_{E-MAX}$ are shown herein. $\Delta\phi_{E-MAX}$ for the tunnel located in soft clay and stiff clay against various normalized pile tip level to tunnel depth (L_p/L_T) and clearance of 0.5 and 4.5 m are illustrated in Figs. 5a and b, respectively. The normalized distance from tunnel spring line to tunnel diameter, C_T/D , are also provided on the right side of the y-axis.

For tunnel located in soft clay (Fig. 5a), $\Delta\phi_{E-MAX}$ of 6.30 m tunnel is slightly larger than that of 4.07 m tunnel, especially the loaded pile located at clearance of 0.5 m. $\Delta\phi_{E-MAX}$ increases with increasing L_p when the pile tip is located above the tunnel crown ($C_T/D \geq 0.5$) and becomes decreasing before increasing again. When the pile tip is located below the tunnel invert, $-0.5 D$, $\Delta\phi_{E-MAX}$ slightly increases and reaches the maximum value at the pile tip located approximately $-1.0 D$. When pile tip is located in the range of $-2.0 D$ to $-4.0 D$, $\Delta\phi_{E-MAX}$ remains almost constant.

For the case of the tunnel located in stiff clay as shown in Fig 5b, the larger $\Delta\phi_{E-MAX}$ of 6.30 m tunnel can be clearly observed, especially in the range of pile tip located below tunnel invert. The $\Delta\phi_{E-MAX}$ are generally smaller than those of tunnel located in soft clay, especially when the pile tip is located in soft clay. When the pile tip is extended into stiff clay ($+0.5 D$), the $\Delta\phi_{E-MAX}$ drastically increases because of a larger working load on bored pile.

By considering the constant lining thickness of 0.30 m, the result described above indicates that the tunnel diameter has influence on the tunnel deformation due to nearby loaded pile.

4.1.2 Different lining thicknesses

The distribution patterns of $\Delta\phi_{E-MAX}$ for both cases are similar to those of $\Delta\phi_{E-MAX}$ from the previous section (different tunnel diameters) for the same case as shown in Fig. 6. The $\Delta\phi_{E-MAX}$ of tunnel with the lining thickness of 0.15 m is clearly larger than that with the lining thickness of 0.30 m. This indicates that the lining thickness has an influence on the tunnel deformation due to pile under loading.

Fig 7 shows the maximum extension change in tunnel diameter, $\Delta\phi_{E-MAX}$, on y-axis against the varied tunnel diameter and lining thickness as shown in Figs. 7a and b, respectively, on x-axis. The maximum effect of the loaded pile located at $-1.0 D$ and clearance of 0.5 m on $\Delta\phi_{E-MAX}$ obtained from the previous section is considered with different tunnel diameters and lining thicknesses.

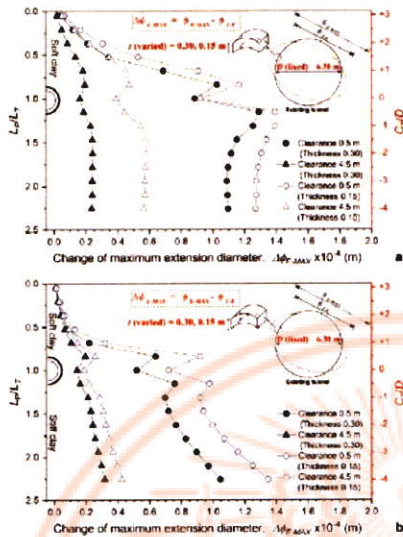


Fig. 6 The maximum extension changes of tunnel diameter due to a pile under loading for different lining thicknesses. (a) for a tunnel located in soft clay, (b) for a tunnel located in stiff clay

For different tunnel diameters (lining thickness of 0.30 m is fixed) as depicted in Fig7a, $\Delta\phi_{E,MAX}$ increases with increasing tunnel diameter. By considering different tunnel thicknesses (tunnel diameter of 4.07 m is fixed) as depicted in Fig7b, the decreasing of $\Delta\phi_{E,MAX}$ with increasing lining thickness can be seen. This can evidently confirm that the tunnel diameter and lining thickness parameters have strongly influence on the effects of loaded pile on the tunnel deformation.

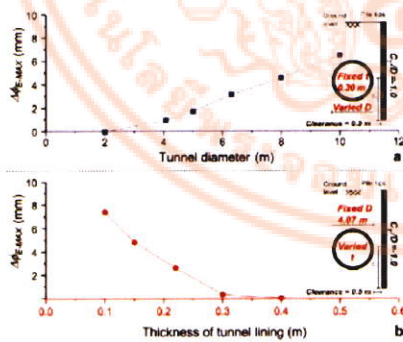


Fig. 7 The effects of different tunnel diameters and lining thicknesses on the maximum extension changes of tunnel diameter.

4.2 Application of Tunnel Deformation in Preliminary Assessment of Tunnels with Various Diameters and Lining Thicknesses

To assess the tunnel deformation in this section, inferring from assessment method of bending strain in surface lining [22] and the principal of circularity shell structures (e.g., pipelines, tanks, and steel lining), the unsymmetrically distortional shapes can be assessed by the percentage of out-of-roundness defined in terms of parameters including the minimum, maximum, and nominal diameters of a distorted structure as shown in Eq. (1) [23].

$$\text{Out-of-roundness (\%)} = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \times 100 \quad (1)$$

Where D_{max} and D_{min} denote for the maximum and minimum tunnel diameters after distortion. The dimensionless parameter, which relatively involves with the lining thickness (t) and the tunnel diameter (D), is established from the moment of inertia of tunnel lining and the length of bored pile (L_p). The L_p implies the magnitude of applied axial load of bored pile. The moment of inertia of 1 m wide tunnel lining is $t^3/12$, whereas $\pi D^2/4$ represents the tunnel size. Based on the preliminary investigation, it reveals that the tunnel deformation increases as tunnel size and pile length increase and the thickness decreases. Therefore, the dimensionless parameter is postulated as ratio of lining thickness to tunnel diameter and length of bored pile as $t^3/D \cdot L_p$.

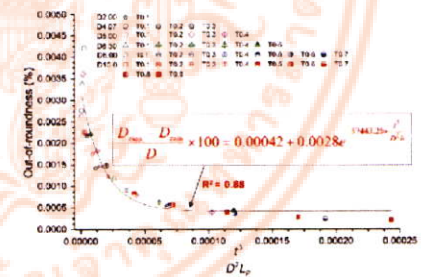


Fig. 8 The relationship between out-of-roundness and influencing factors on the tunnel deformation.

Series of parametric study regarding relative influencing factors on the tunnel deformation due to adjacent bored pile as mentioned above, is conducted using the 2D-FE to synthetically establish the simple equation in this section. The tunnel located in soft clay and pile tip located at $-1.0 D$ and clearance of 0.5 m resulting to the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

maximum value of tunnel deformation are chosen. The tunnel diameter and lining thickness are varied between 2.0 to 10.0 m and 0.10 to 0.90 m respectively, in the analyses.

Fig. 8 shows the plotted between out-of-roundness and the dimensionless parameters as t^3/D^2L_p . An equation can be obtained by the curve fitting method with the coefficient of determination (R^2) of 0.88 as shown in Eq. 2.

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

According to the allowable tunnel deformation of 15 mm for averaged tunnel diameter about 6.40 m regulated by LTA [17], it is postulated herein that the allowable deformation of tunnels with other sizes can be considered so as to keep the ratio of allowable deformation-to-tunnel-diameter constant. By using the Eq.2, tunnel deformation in terms of $D_{\max} - D_{\min}$ for various tunnel diameters and lining thicknesses can be calculated. Together with the allowable tunnel deformation, the chart for estimating the percentage of tunnel deformation can be established as shown in Fig 9. The chart provides the preliminary assessment of the impact for adjacent loaded pile.

The interpretation from the chart using the geometrics of MRTA and MWA tunnels reveals that the percentage between maximum possible deformation to allowable value of MRTA tunnel is smaller than that of the MWA tunnel. This is because the serviceability regarding train operation governs the design concept of MRTA. In other words, the MRTA tunnel is safer than the MWA tunnel.

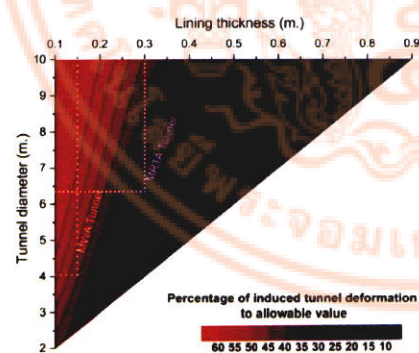


Fig. 9 The assessment chart for tunnels with various tunnel diameters and lining thicknesses.

5. CONCLUSION

The effect of tunnel diameters and lining thickness on tunnel deformation due to adjacent pile under loading is numerically investigated by choosing the MRTA and WMA tunnels in Bangkok subsoil as the reference cases. Series of parametric study regarding relative influencing factors on the tunnel deformation due to adjacent loaded pile, e.g. tunnel diameter, lining thickness, pile length, is conducted. The results can conclude as follows:

1. The tunnel diameter and lining thickness have strong influence on the tunnel deformation due to adjacent loaded pile.
2. The proposed parameters, t^3/D^2L_p , can appropriately capture the tunnel deformation in terms of out-of-roundness due to adjacent loaded pile for various tunnel diameters and thicknesses.
3. With a certain criterion, it is possible to establish a chart that can be used to assess the degree of the tunnel deformation due to adjacent pile under loading for the existing tunnel with various diameters and lining thicknesses.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the financial support from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMIL Research Fund) under Grant "Research Seed Grant for New Lecturer" (KREF186105).

7. REFERENCES

- [1] Schroeder F.C., Potts D.M. and Addenbrooke T.I., The influence of pile group loading on existing tunnels. *Geotechnique* 54 (6), 2004, pp.351-362.
- [2] Yao J., Taylor R.N. and McNamara A.M., The Effects of Loaded Bored Piles on Existing Tunnels. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - 6th International Symposium (IS-Shanghai)*, 2008, pp. 735-41.
- [3] Heama N., Jongpradist P., Lueprasert P. and Suwansawat S., Investigation on tunnel responses due to adjacent loaded pile by 3D finite element analysis. *International Journal of GEOMATE*, Vol.12, Issue 31, 2017, pp. 63-70.
- [4] 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 International Journal of Science and Technology*, Vol. 9, 2015, pp. 209-223.

- [5] Lueprasert P., Jongpradist P., Jongpradist P. and Suwansawat S., 2017. Numerical Investigation of Tunnel Deformation Due to Adjacent Loaded Pile and Pile-Soil-Tunnel Interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 70, 2018, pp. 166-81.
- [6] Bakker K.J. and Blom C.B.M., Ultimate Limit State Design for Linings of Bored Tunnels. *Geomechanics and Tunneling*, Vol.2(4), 2009, pp. 345-58.
- [7] Mroueh H., and Shahrour I., A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23(1), 2008, pp.38-45.
- [8] Brinkgreve R., Engin E. and Swolfs W., PLAXIS Version 2013 manual, 2013.
- [9] Pramthawee, P., Jongpradist, P. and Kongkitkul, W., Evaluation of Hardening Soil Model on Numerical Simulation of Behaviors of High Rockfill Dams, *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, Vol.33(3), 2011, pp. 325-334
- [10] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Yensri, P. and Jamsawang, P., Dependence of ultimate bearing capacity and failure behavior of T-shaped deep cement mixing piles on enlarged cap shape and pile strength, *Computers and Geotechnics*, Vol. 95, 2018, pp. 27-41.
- [11] Wonglert, A., Jongpradist, P., Jamsawang, P. and Larsson, S., Bearing Capacity and Failure Behaviors of Floating Stiffened Deep Cement Mixing Columns under Axial Load, *Soils and Foundations*, Vol. 58, 2018, pp. 446-461.
- [12] Waichita, S., Jongpradist, P. and Jamsawang, P., Characterization of deep cement mixing wall behavior using wall-to excavation shape factor, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 83, 2019, pp. 243-253.
- [13] Prust R.E., Davies J., and Hu S., Pressure meter Investigation for Mass Rapid Transit in Bangkok Thailand *Journal of the Transportation Research Board* 1928, 2005, pp. 207-217.
- [14] 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. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 34, 2013, pp. 96-109.
- [15] Rukdeechuai T., Jongpradist P., Wonglert A. and Kaewsri T., Influence of soil models on numerical simulation of geotechnical works in Bangkok subsoil. *EIT Research and Development Journal*, Vol. 20, 2009, pp. 17-28.
- [16] Lueprasert P., Jongpradist P. and Suwansawat S., 3D-FEM of EPB shield tunnel excavation using shell element and grouting layer, *International Journal of GEOMATE*, Vol.12, Issue 31, 2017, pp. 51-57.
- [17] Working Group No. 2 ITA., Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining Elsevier Science Ltd Published, 2000.
- [18] Moller S., Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Doctoral Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2006.
- [19] Skempton A. W., Cast In-Situ Bored Piles in London Clay. *Geotechnique*, Vol. 9(4), 1959, pp. 153-73
- [20] Sadowski Adam J., and Michael Rotter J., Solid or Shell Finite Elements to Model Thick Cylindrical Tubes and Shells under Global Bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 74, 2013, pp. 143-53.
- [21] Land Transport Authority (LTA), Code of Practice for Railway Protection, October 2004 ed. Development and Building Control Department, Singapore, 2004.
- [22] Mohamad H., Kenichi S., Adam P., and Peter J. B., Performance Monitoring of a Secant-Piled Wall Using Distributed Fiber Optic Strain Sensing *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137(12), 2011, pp. 1236-43.
- [23] European Committee for Standardization (CEN), Design of steel structures, Part 1-6 general rules: Supplementary rules for shell structures. Eurocode 3. Brussels, Belgium, 1999.

Copyright © Int. J. of GEOMATE. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ค

บัญชี รับ-จ่าย เงินทุน รหัส KREF186105

วันที่	รายการ	เงินฝากธนาคาร			รายจ่าย		
		รับ	จ่าย	คงเหลือ	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ	รวม
	งบประมาณ				5,000.00	95,000.00	100,000.00
	ค่าใช้จ่ายงวดที่ 1				0	95,000.00	95,000.00
	งบประมาณคงเหลือ				0	0	5,000.00
	เปิดบัญชีธนาคาร	500.00	0.00	500.00			0.00
	ดอกเบี้ยธนาคาร	0.00	0.00	500.00			0.00
	ได้รับเงินจากกองทุนวิจัย	95,000.00	0.00	95,500.00			0.00
	ค่าเดินทาง	0.00	0.00	95,500.00	2,500.00		2,500.00
	ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	0.00	95,000.00	500.00		90,000.00	90,000.00
	ค่าวัสดุสำนักงาน	0.00	0.00	500.00		2,500.00	2,500.00
	รวม	95,500.00	95,000.00	500.00	2,500.00	92,500.00	95,000.00
	เงินคงเหลือจากงบวิจัย			500.00	2,500.00	2,500.00	5,000.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พร้อมเอกสารแนบค่าใช้จ่ายทุนและสมุดบัญชี



บริษัท แพนโซนิค จำกัด
PANASONICS CO., LTD.

สำนักงานใหญ่: 604/3 อาคารพณิชยภัณฑ์ ชั้น 3 ห้อง 302 ถนนเพชรบุรี แขวงถนนเพชรบุรี เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทร. 02-255-8521, 02-255-8701 (ศูนย์รวม) 02-254-9797, 02-252-9883 คิว. 3302 แฟกซ์. 02-255-8701
HEAD OFFICE: 604/3 PANTIP PLAZA, 3rd FLOOR ROOM 302 PETCHBURI RD., RAJTHEVIEE, BANGKOK 10400
TEL. 02-255-8521, 02-255-8701 (DIRECT) 02-254-9797, 02-252-9883 EXT. 3302 FAX: 02-255-8701

ใบเสร็จรับเงิน
RECEIPT

ต้นฉบับ
ORIGINAL

(ไม่ใช่ใบกำกับภาษี)

เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0105642070123

เอกสารออกเป็นชุด

เลขที่ No. P1809488

วันที่ Date 28/09/61

ชื่อลูกค้า Customer	สดาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ใบสั่งซื้อเลขที่ Purchase Order No.	
ที่อยู่ Address	เลขที่ 1 ซอยจตุรภุช 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 TAX ID: 0994000160623 (สำนักงานใหญ่)	พนักงานขาย Salesman Name	02
		กำหนดชำระเงิน Payment Term	

ลำดับที่ No.	รหัสสินค้า Code	รายการ Description	จำนวน Qty.	ราคาต่อหน่วย Unit Price	ส่วนลด Discount		จำนวนเงิน Amount	
					%	Amount		
1		CPU INTEL I7	1	12,500.00			12,500.00	
2		MAINBOARD MAXIMUS	1	9,100.00			9,100.00	
3		DDR-RAM 16GB	1	5,400.00			5,400.00	
4		VGA CARD 11GB	1	29,500.00			29,500.00	
5		SSD 256GB	1	3,200.00			3,200.00	
6		HARDDISK 8TB	3	8,900.00			26,700.00	
7		POWER ATX	1	2,500.00			2,500.00	
ผิด ตก ออกเงิน								

1. ใบเสร็จรับเงินฉบับนี้จะสมบูรณ์เมื่อมีอาชงเห็นของผู้รับมอบค่างานและผู้รับเงินของบริษั และเช็คของฝากผ่านธนาคารแล้ว
This receipt will be valid only with Authorized Signature and Cashier and the cheque is cleared by the bank.
2. หากชำระเงินเกินกว่ากำหนดจะคิดดอกเบี้ย 1.5% ต่อเดือน
If payment is not paid maturity, we will charge 1.5% per month for interest.
3. กรณีชำระเงินด้วยเช็คพร้อมส่งจ่ายในนาม บริษัท แพนโซนิค จำกัด
Kindly make your payment by crossed cheque payable to PANSONIC CO.,LTD.

รวมราคา Sub Total	88,900.00
ภาษีมูลค่าเพิ่ม Value Added Tax 7%	6,223.00
จำนวนเงินรวมทั้งสิ้น Grand Total	95,123.00

จำนวนเงินรวมทั้งสิ้น เก้าหมื่นห้าพันหนึ่งร้อยยี่สิบสามบาทถ้วน

ชำระเงินโดย Payment By เงินสด Cash เช็ค Cheque บัตรเครดิต Credit Card _____
ธนาคาร Bank สาขา Branch _____ เลขที่ No. _____ วันที่ Due Date _____

ผู้รับสินค้า Received By	ผู้ส่งสินค้า Delivered By	ผู้รับเงิน Cashier	ผู้รับมอบอำนาจ Authorized Signature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อบัญชี
NAME

KREF186105 กระทำการแทนโดย นายประทีป
หนังสือประเสริฐ และ นายบรรดาศา จาตุรงค์ศรี

ธนาคารไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน)
SIAM COMMERCIAL BANK PUBLIC COMPANY LIMITED

0088 สาขาเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร

เลขที่บัญชี
ACCOUNT NO. 088-264068-6

บัญชีเงินฝากออมทรัพย์
SAVINGS ACCOUNT

0008221998

8221998

• เงินฝากนี้ได้รับคุ้มครองจากสถาบันคุ้มครองเงินฝากตามจำนวนที่กหนดไว้ในกฎหมาย
• การทำรายการโดยโมโหอัตโนมัติที่มีระยะเวลาตั้งแต่ 3 เดือนขึ้นไป เมื่อลูกค้านำสมุดฝาก
มาที่สาขาธนาคาร สาขาฝากและถอนในแต่ละเดือนจะปรากฏเป็นยอดรวมรายการ
ฝากและถอนที่คิดขึ้นในเดือนนั้นๆ อย่างรายการ

PS25(2)

วันที่ DATE	รายการ TRC	บัญชี WITHDRAWAL	ฝาก DEPOSIT	คงเหลือ BALANCE	ยอดรวม M.T. TD
28/08/18	CO	+++++	500.00	+++++	500.00 19120
25/09/18	GN	+++++	95,000.00	+++++	95,500.00 19120
26/09/18	XW	-----	95,000.00	+++++	500.00 19120
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					

บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account)

บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account)

บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account) - บัญชีเงินฝากออมทรัพย์ประเภทออมทรัพย์ (Savings Account)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายประทีป หลือประเสริฐ
เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 3 สิงหาคม 2528 อายุ 32 ปี

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมโยธา	สจล.	2560
วศ.ม.	วิศวกรรมโยธา	สจล.	2556
วศ.บ.	วิศวกรรมโยธา	สจล.	2552

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ Tunnel construction, Pile-soil-tunnel interaction, Numerical method, Geotechnical engineering

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2555	Grant PHD Research and Researcher for Industry (RRI)	Thailand Research Fund (TRF)
2555	ทุนเรียนดี	สจล.
2552	Thailand Research Fund Master Research (TRF-MAG)	Thailand Research Fund (TRF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับนานาชาติ)

- [1] **Lueprasert, P., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Suwansawat, S., 2017.** Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 70, 166–181.
- [2] Heama, N., Jongpradist, P., **Lueprasert, P., Suwansawat, S., 2017.** Investigation on tunnel responses due to adjacent loaded pile by 3D finite element analysis. Int. J. GEOMATE 12, 63–70.
- [3] **Lueprasert, P., Jongpradist, P., Suwansawat, S., 2017.** Tunneling simulation in soft ground using shell elements and grouting layer. Int. J. GEOMATE 12, 52-58
- [4] **Lueprasert, P., Jongpradist, P., Charoenpak, K., Chaipanna, P., Suwansawat, S., 2015.** Three dimensional finite element analysis for preliminary establishment of tunnel influence zone subject to pile loading. Maejo Int. J. Sci. Technol. 9, 209–223.

การเสนอผลงานวิชาการ (ระดับนานาชาติ)

- [1] Heama, N., Jongpradist, P., **Lueprasert, P., Suwansawat, S., 2016.** Tunnel Lining Response due to Adjacent Loaded Pile-Numerical Investigation. Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and environment, Bangkok, Thailand.
- [2] **Lueprasert, P., Jongpradist, P., Heama, N., Ruengwirojjanakul, K., Suwansawat, S., 2016.** 3D-FEA of EPB shield tunnel excavation using shell element and grouting layer. Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and environment, Bangkok, Thailand.
- [3] **Lueprasert, P., Jongpradist, P & Suwansawat, S., 2011.** Applying 2D for 3D Finite Element Analysis in The Bangkok MRT Blue Line South Extension Project. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC) 2011, Helsinki, Finland.
- [4] **Lueprasert, P., Suwansawat & Jongpradist, P., 2010.** Excavation Scenario Analysis for NATM Tunnel in Bangkok Subsoil. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC) 2010, Vancouver, Canada.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

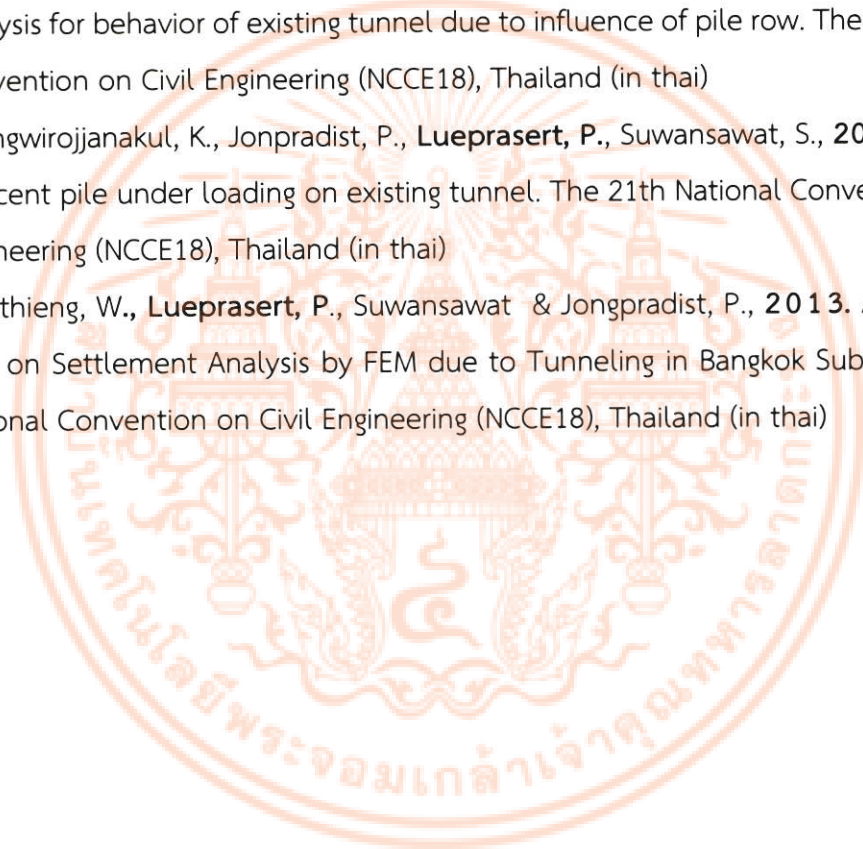
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [5] **Lueprasert, P., Suwansawat & Jongpradist, P., 2010.** 3-D of NATM Excavation for Bangkok MRT Blue Line South Extension. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC) 2009, Budapest, Hungary.
- [6] **Lueprasert, P., Suwansawat & Jongpradist, P., 2008.** The First Applying of NATM for the Extension MRTA Project in Bangkok. Conference of ASEAN Federation of Engineering Organization Bangkok, Thailand (CAFEO'26)

การเสนอผลงานวิชาการ (ระดับชาติ)

- [1] Kwanlikit, N., Jonpradist, P., **Lueprasert, P., Suwansawat, S., 2016.** 3-D Finite Element Analysis for behavior of existing tunnel due to influence of pile row. The 21th National Convention on Civil Engineering (NCCE18), Thailand (in thai)
- [2] Ruengwirojjanakul, K., Jonpradist, P., **Lueprasert, P., Suwansawat, S., 2016.** Impact of adjacent pile under loading on existing tunnel. The 21th National Convention on Civil Engineering (NCCE18), Thailand (in thai)
- [3] Tumthieng, W., **Lueprasert, P., Suwansawat & Jongpradist, P., 2013.** Application of ANN on Settlement Analysis by FEM due to Tunneling in Bangkok Subsoil. The 18th National Convention on Civil Engineering (NCCE18), Thailand (in thai)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.