

การเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้าง  
GROUND DISPLACEMENT SURROUNDING THE CAISSON  
DURING CONSTRUCTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROUND DISPLACEMENT SURROUNDING THE CAISSON  
DURING CONSTRUCTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้าง  
GROUND DISPLACEMENT SURROUNDING THE CAISSON  
DURING CONSTRUCTION

นักศึกษา นายฤทธิภัทร อัมพันแสง รหัสนักศึกษา 62010783  
นางสาวศศิวิมล พรหมนิล รหัสนักศึกษา 62010858  
นางสาวหทัยชนก เสมอหน้า รหัสนักศึกษา 62010994  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม

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

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อุทะเภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 09/06/2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้าง

นายฤทธิภัทร อัมพันธ์แสง รหัสนักศึกษา 62010783

นางสาวศศิวิมล พรหมนิล รหัสนักศึกษา 62010858

นางสาวหทัยชนก เสมอหน้า รหัสนักศึกษา 62010994

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิรุพห์ คำชุม

ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาบริเวณคอขวด เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร โดยทำการศึกษาเทคนิคและวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ชั้นดิน และสร้างแบบจำลองปล่องอุโมงค์กับชั้นดินด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ได้มีการสอบถามจากผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการโดยตรง เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปล่องอุโมงค์ (ปล่องอุโมงค์หมายเลข 2, PS02) ข้อมูลชั้นดินจากการทดสอบ STP (Standard Penetration Test) และการทดสอบหาค่ากำลังดินในแบบสามแกน (Triaxial Test) รวมถึงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Inclinometer) โดยนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้มาสร้างแบบจำลองปล่องอุโมงค์กับข้อมูลชั้นดินในโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของดิน (Soil Displacements), ค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงตามแนวแกน (Axial Force) ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำผลลัพธ์ที่คาดการณ์จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม

# Ground displacement surrounding the caisson during construction

Mr. Rittipat	Ampansang	Student ID. 62010783
Miss Sasiwimon	Phomnin	Student ID. 62010858
Miss Hathaichanok	Sammerna	Student ID. 62010994

Advisor : Assoc.prof. Viroon Kamchoom, Ph.D.

Academic Year 2022

## ABSTRACT

This research study is about ground displacement and surface settlement surrounding the caisson during construction, Project for construction of the Thawi Watthana tunnel in the bottleneck area, Thawi Watthana, Bangkok. Study on method for construction the Tunnel shaft by sinking reinforced concrete caisson, compile and analyze soil layer parameter and model tunnel shaft by PLAXIS 2D. Inquiries were made from those directly involved in the Project for compile about the Tunnel shaft (Tunnel shaft NO.2, PS02), Soil information from STP (Standard Penetration Test) and Triaxial Test. Including installation position of inclinometer by using these information create model of tunnel shaft and soil layer in PLAXIS 2D for study about soil displacement, bending moment and axial force. Then, the predicted results from model by PLAXIS 2D were compared with the field measurement results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม ที่กรุณาให้คำปรึกษาเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา ให้ความรู้ เอาใจใส่ จนปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชา โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงาน และการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ที่เป็นกำลังใจให้กันและกัน คอยให้คำปรึกษา และช่วยสร้างแรงผลักดันในการดำเนินปริญญาานิพนธ์ให้สำเร็จลง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้า ที่ให้กำเนิดข้าพเจ้า และสนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสมาศึกษา และสร้างประโยชน์แก่ประเทศชาติในอนาคต คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

นายฤทธิภัทร	อำพันแสง
นางสาวศศิวิมล	พรมนิล
นางสาวหทัยชนก	เสมอหน้า

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft).....	4
2.2 Inclinator.....	5
2.3 ชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Bangkok subsoils).....	6
2.4 แบบจำลองพฤติกรรมของปล่องอุโมงค์.....	7
2.4.1 แบบจำลอง Mohr-Coulomb.....	8
2.4.2 แบบจำลอง Hardening Soil.....	8
2.5 คุณสมบัติของดินที่มีผลต่อพฤติกรรมปล่องอุโมงค์.....	10
2.5.1 โมดูลัสของดิน (Modulus of soil).....	10
2.5.2 อัตราส่วน Poisson's ratio.....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Relevant research).....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	17
3.2 รายละเอียดและข้อมูลการก่อสร้างปล่องอุโมงค์.....	17
3.3 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการสำรวจดิน.....	18
3.4 วิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของชั้นดิน.....	20
3.5 การเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน.....	21
3.5.1 การเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินโครงการทวิวัฒนาและ โครงการบางน้ำจืด.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การ Calibrate Soil Test.....	22
3.6 ขั้นตอนการก่อสร้างปล่องอุโมงค์.....	22
3.7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด.....	29
3.8 การสร้างแบบจำลองปล่องอุโมงค์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D.....	30
3.8.1 การสร้างแบบจำลองชั้นดินและส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์.....	30
3.8.2 การทำ Stage Construction.....	35
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method, (FEM).....	40
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method, (FEM).....	40
4.1.1 การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement).....	40
4.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement).....	51
4.2 ข้อมูลในสนาม.....	61
4.1.1 Inclinometer.....	62
4.1.2 Settlement Point-Ground.....	66
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม.....	72
4.3.1 การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement).....	72
4.3.2 การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement).....	76
4.4 ผลการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ด้วย PLAXIS 2D.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า Stress-Strain modulus of soil, $E_s$ (Bowles, 1996).....	11
ตารางที่ 2.2 อัตราส่วน Poisson's ratio ของดินชนิดต่าง ๆ (Bowles, 1996).....	14
ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณสถานที่ก่อสร้างของโครงการคลอง ทวีวัฒนา.....	18
ตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของชั้นดิน.....	20
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์.....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นในปล่องอุโมงค์ด้วย PLAXIS 2D.....	82



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา บริเวณคอขวด.....	1
รูปที่ 1.2 รูปแสดงโครงสร้างปล่องอุโมงค์ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลอง ทวีวัฒนา.....	2
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์ (Tunnel shaft).....	4
รูปที่ 2.2 แสดงภาพ 3 มิติ (3D View) ของปล่องอุโมงค์ (Tunnel shaft).....	5
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของ Inclinator (Slope Indicator, Inc.).....	5
รูปที่ 2.4 แสดงการใช้งาน Inclinator (Slope Indicator, Inc.).....	6
รูปที่ 2.5 แสดงสภาพชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Bangkok subsoils) โดยทั่วไป.....	7
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับแบบจำลอง Mohr- Coulomb.....	8
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับแบบจำลอง Hardening Soil.....	9
รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมของดินจริงกับแบบจำลอง Mohr- Coulomb และแบบจำลอง Hardening Soil.....	10
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain modulus (Bowles, 1988).....	11
รูปที่ 2.10 แสดงค่า $E_{50}^{ref}$ และ $E_{ur}^{ref}$ จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบาย น้ำ (Drained Triaxial test).....	12
รูปที่ 2.11 แสดงค่า $E_{oed}^{ref}$ จากผลการทดสอบการยุบอัดตัว (Consolidation Test)....	13
รูปที่ 2.12 อัตราส่วน Poisson's ratio, $\mu$ (Bowles, 1996).....	14
รูปที่ 2.13 แสดงการติดตั้งของปล่องอุโมงค์.....	16
รูปที่ 3.1 ลักษณะของปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา..	18
รูปที่ 3.2 กราฟเปรียบเทียบค่า Undrained shear strength กับความลึก.....	21
รูปที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบค่า Plastic Index กับความลึก.....	21
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress และ Axial Strain.....	22
รูปที่ 3.5 ตรวจสอบการอูทของดิน (Check Heaving), based on Bjerrum and Edie (1956).....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 ขุดสำรวจ (Trial Pit) หาอุปสรรคเพิ่มเติม.....	23
รูปที่ 3.7 กำหนดตำแหน่ง Shaft.....	24
รูปที่ 3.8 ก่อสร้างเสาเข็มเหล็ก (Steel King Post).....	24
รูปที่ 3.9 ก่อสร้างคอนกรีต รับน้ำหนักจากปลายอุโมงค์ (Concrete Ring Beam).....	25
รูปที่ 3.10 การติดตั้งชิ้นงานวงเหล็กชั้นแรก (Steel Cutting Shoe).....	25
รูปที่ 3.11 เตรียมงานติดตั้ง Bracket สำหรับใช้ในการควบคุมระดับปล่องอุโมงค์.....	26
รูปที่ 3.12 ขุดดินในช่วงแรกที่ใช้รถขุดดินได้.....	26
รูปที่ 3.13 ขุดดินในกรณีเป็นดินอ่อน มีน้ำใต้ดิน ใช้ Clam Shell ขุดดินออก.....	27
รูปที่ 3.14 ขุดดินกรณีใต้น้ำ.....	27
รูปที่ 3.15 รายละเอียดงานติดตั้งชุด Hollow Jack, Dywidge Bar สำหรับช่วยดึงรั้งกด จมปล่องอุโมงค์.....	28
รูปที่ 3.16 การติดตั้ง Plat Form และการเท Concrete Plug.....	28
รูปที่ 3.17 งานเหล็กเสริมและเท Base Slab.....	29
รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมดินขณะจมปล่อง อุโมงค์ บริเวณสถานีสูบน้ำ.....	30
รูปที่ 3.19 รูปแสดง Project Properties ในการสร้างแบบจำลอง.....	31
รูปที่ 3.20 รูปแสดงประเภทของชั้นดินและการกำหนดคุณสมบัติของดินแต่ละชั้น.....	31
รูปที่ 3.21 รูปแสดงการแบ่งชั้นดินออกเป็นแต่ละชั้นและใส่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ลงในชั้น ดิน.....	32
รูปที่ 3.22 รูปแสดงการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบโครงสร้างเข้ากับแบบจำลอง ชั้นดิน.....	34
รูปที่ 3.23 รูปแสดงขั้นตอน Initial Phase.....	35
รูปที่ 3.24 รูปแสดงขั้นตอน Install Live Loads.....	35
รูปที่ 3.25 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้งกำแพงของปล่องอุโมงค์.....	36
รูปที่ 3.26 รูปแสดงขั้นตอนการขุดดิน.....	36
รูปที่ 3.27 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้งกำแพงและขุดดินออกจนถึงระยะที่กำหนด.....	37
รูปที่ 3.28 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้ง Concrete Plug.....	37
รูปที่ 3.29 รูปแสดงขั้นตอนการสูบน้ำออก (Dewatering).....	38
รูปที่ 3.30 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้ง Base Slab.....	38
รูปที่ 3.31 รูปแสดงขั้นตอนการทำ Hydrostatic.....	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1-4.21 กราฟแสดง Horizontal Displacement ณ ความลึกและ Phase ต่าง ๆ.....	41
รูปที่ 4.22-4.42 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ ที่ Phase ต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 4.43-4.50 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement ณ ความลึกต่าง ๆ.....	62
รูปที่ 4.51-4.60 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก ณ Phase ต่าง ๆ.....	67
รูปที่ 4.61-4.67 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement.....	72
รูปที่ 4.68-4.77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก.....	76
รูปที่ 4.78-4.97 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ที่ Phase ต่าง ๆ.....	83

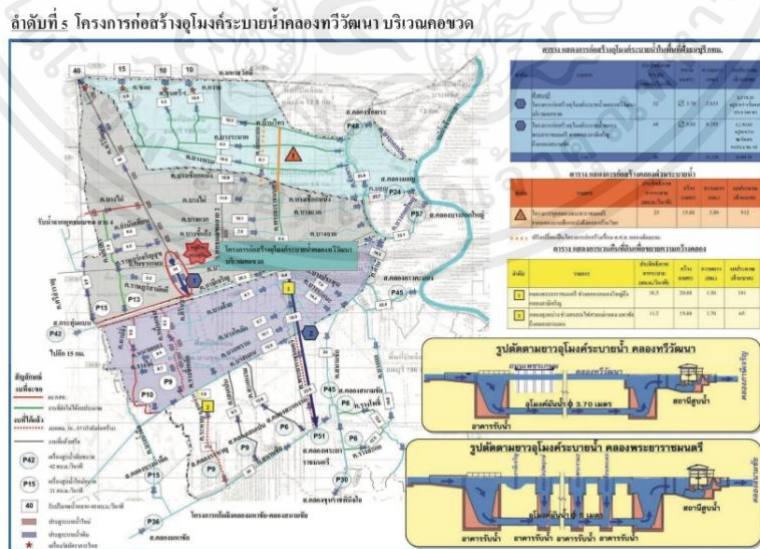
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

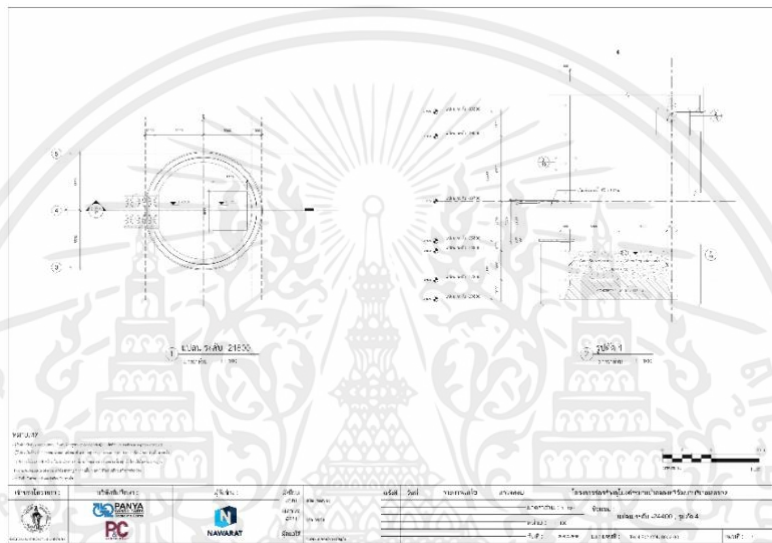
ในปัจจุบันเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้มีการก่อสร้างโครงการทางด้านสาธารณูปโภค การขนส่ง การแก้ไขปัญหาน้ำท่วมและน้ำเสีย โดยการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน เนื่องจากมีความเหมาะสม ทางด้านพื้นที่ที่จำกัดและหลีกเลี่ยงปัญหาต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง เช่น ปัญหา การจราจร ปัญหามลภาวะทางเสียงและอากาศ อีกทั้งยังไม่กระทบมุมมองทางทัศนียภาพที่สวยงาม จึงทำให้มีการนำเทคโนโลยีการก่อสร้างอุโมงค์และปล่องอุโมงค์มาพิจารณาประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา บริเวณคอขวด มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการระบายน้ำในคลองทวีวัฒนาให้สามารถระบายน้ำหลากจากพื้นที่ตอนบนผ่านพื้นที่ กรุงเทพมหานคร ฝั่งธนบุรี เพื่อระบายลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา โครงการแก้มลิง คลองมหาชัย-คลองสนามชัย แม่น้ำท่าจีนและลงสู่อ่าวไทย โดยจะต้องระบายน้ำผ่านคลองทวีวัฒนาประมาณ 32 ลูกบาศก์เมตรต่อ วินาที เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาน้ำท่วมพื้นที่กรุงเทพมหานคร ฝั่งธนบุรี โดยทำการก่อสร้างอุโมงค์ ระบายน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 3.70 เมตร ความยาวประมาณ 2.03 กิโลเมตร ดังแสดงใน รูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา บริเวณคอขวด

ในการก่อสร้างปล่องอุโมงค์จะใช้วิธีการจมปล่องอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) ซึ่งเป็นวิธีการที่จะก่อสร้างผนังปล่องทีละชั้นแล้วจึงทำการจมปล่องลงไปด้วยน้ำหนักของตัวปล่องเองหรืออาจใช้แรงกดจากแม่แรง (Hydraulic jack) ช่วยกดปล่องให้จมเร็วขึ้น โดยโครงสร้างปล่องอุโมงค์ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา จะมีการจมปล่องซึ่งมีความลึกประมาณ 29.80 เมตร จากผิวดินถึงขอบตัด (Cutting shoe) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ในช่วงเริ่มต้นจะมีการเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างโดยรอบ ซึ่งจะต้องมีการเตรียมการป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้น



รูปที่ 1.2 รูปแสดงโครงสร้างปล่องอุโมงค์ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ และนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งภายในปล่องอุโมงค์มาทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม PLAXIS 2D

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ด้วยระบบจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson)
2. เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของชั้นดินที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์

3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวที่ผิวดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ซึ่งเปรียบเทียบจากข้อมูลการวัดโดยเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) และเครื่องมือวัดการทรุดตัว (Settlement Point-Ground) ที่ติดตั้งในดิน กับผลจากการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม PLAXIS 2D

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาจะทำการศึกษาข้อมูลจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา บริเวณคอขวด ในส่วนของปล่องอุโมงค์หมายเลข 2 (PS02) เท่านั้น ซึ่งขอบเขตของการศึกษาประกอบด้วย

1. ศึกษาการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ (Bangkok clays) ด้วยวิธีจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson)
2. ศึกษาพฤติกรรมของดินรอบปล่องอุโมงค์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างปล่องอุโมงค์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

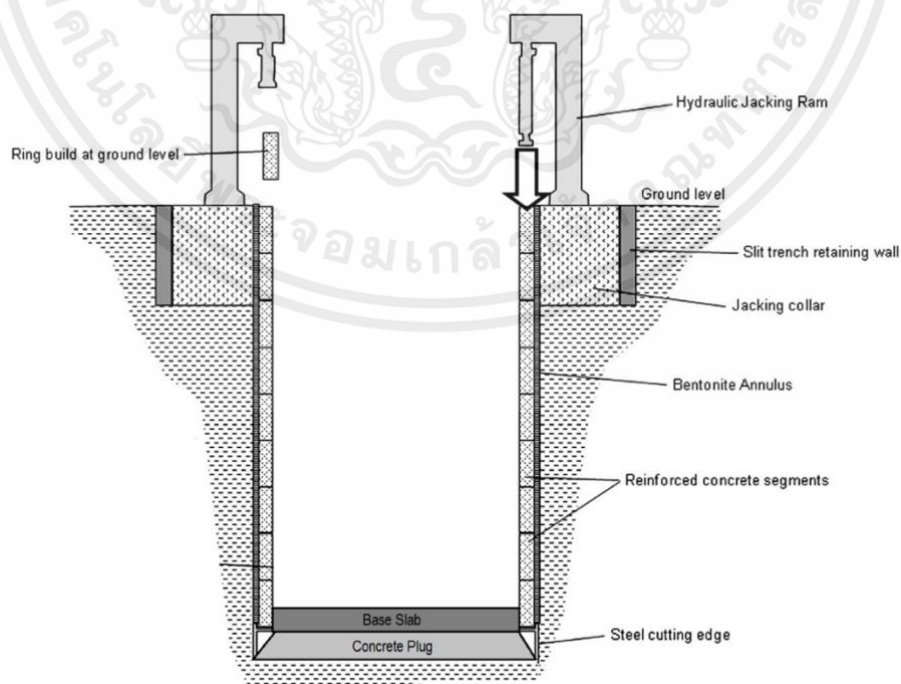
1. เทคนิคและวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งก่อสร้างด้วยวิธีการจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson)
2. ลักษณะชั้นดินในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างและข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง
3. พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์
4. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากสถานที่ก่อสร้างกับผลวิเคราะห์จากโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

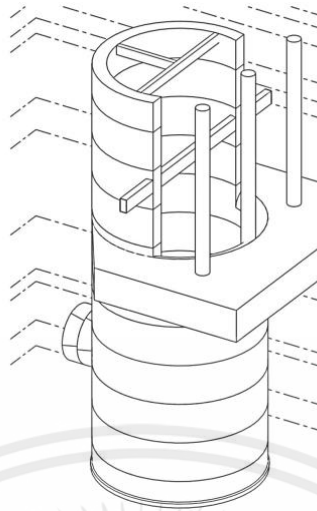
#### 2.1 ปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft)

จากการศึกษาของ (Nonveiller 1987) พบว่าการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) จะใช้น้ำหนักของตัวปล่องอุโมงค์เองสำหรับการจมปล่อง และอาจใช้แรงจากการกดแม่แรง (Hydraulic Jack) โดยจะทำการก่อสร้างผนังปล่องอุโมงค์ชั้นหนึ่งก่อน เริ่มจากการปรับถมดิน เทคอนกรีตหยาบ (Lean concrete) และติดตั้งขอบตัด (Cutting shoe) ที่เป็นส่วนล่างสุดของปล่องอุโมงค์ จากนั้นติดตั้งเหล็กเสริม และท่อ PVC และ Check valve สำหรับฉีดอัด Bentonite ซึ่งสารละลายดังกล่าวช่วยลดแรงเสียดทานของดิน ทำให้ปล่องอุโมงค์มีอัตราการจมเร็วขึ้น ทำการติดตั้งท่อ Sleeve PVC สำหรับเพลาหยุดการจมบ่อ หลังจากนั้นเข้าแบบหล่อคอนกรีตและเทคอนกรีต เมื่อต้องการทำการก่อสร้างผนังปล่องอุโมงค์ชั้นถัดไปให้ใช้วิธีการดิ่งที่กล่าวมาข้างต้น จนเมื่อปลายขอบตัด (Cutting shoe) จมถึงระดับที่ต้องการจึงทำการเท Concrete plug ให้มีความหนาจากปลายขอบตัด (Cutting shoe) ถึง Base slab เมื่อทำการเท Concrete plug เรียบร้อยจึงสูบน้ำในปล่องออก ในระหว่างการก่อสร้างมีการติดตั้ง Inclinomater เพื่อตรวจสอบการเอียงของปล่อง (Tilting) ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.1 ที่แสดงส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft) และรูปที่ 2.2 ที่แสดงรูป 3 มิติ ของปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft)



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft)

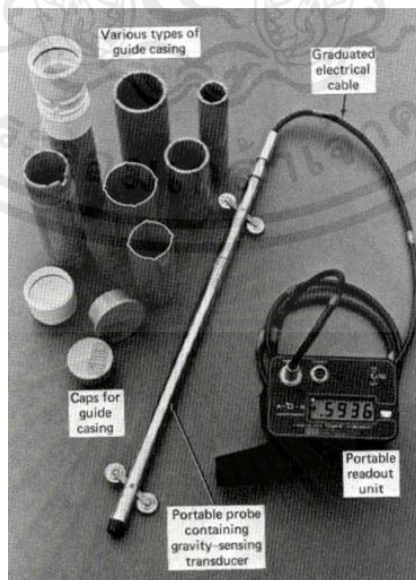
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงภาพ 3 มิติ (3D View) ของปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft)

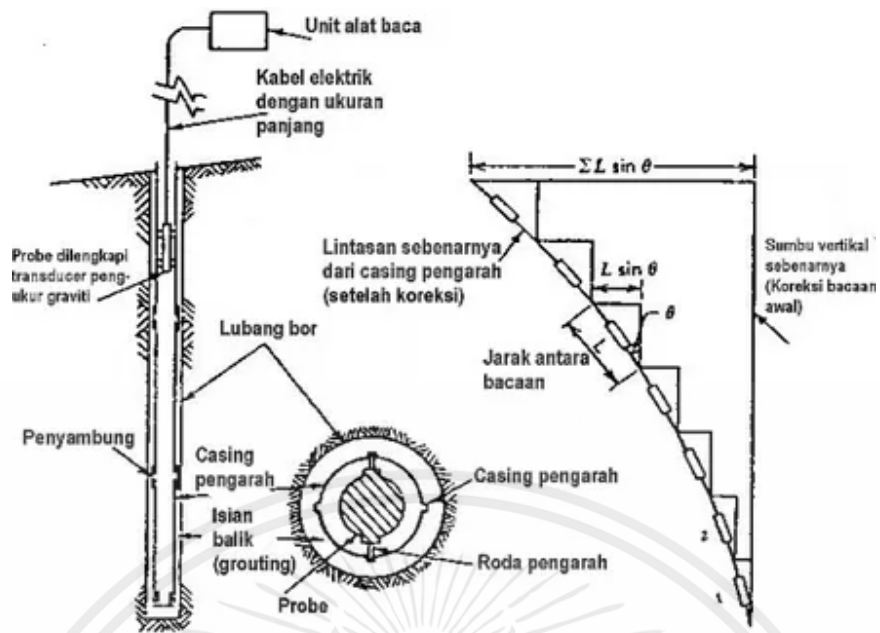
## 2.2 Inclinerometer

Inclinometer คือ อุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งอยู่ในโครงสร้างหรือในดินเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งอธิบายด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อที่ผิดไปจากเดิม จะมีการส่งผ่านข้อมูลเฉลี่ยผ่านท่อในการทดสอบจะมีตัวส่งสัญญาณ (Sensor) เป็นตัวส่งข้อมูลวัดค่าเบี่ยงเบนให้มีความสัมพันธ์ในแกนตั้ง เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับการเคลื่อนตัว จะทำให้ทราบถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน หรือการเอียง (Tilt) ของโครงสร้าง อุปกรณ์โดยทั่วไปของเครื่องมือวัด Inclinerometer แสดงดังรูปที่ 2.3 และการใช้งาน Inclinerometer แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของ Inclinerometer (Slope Indicator, Inc.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการใช้งาน Inclinator (Slope Indicator, Inc.)

### 2.3 ชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Bangkok subsoils)

จากข้อมูลของ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2549) กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลปากอ่าวไทย พื้นที่กรุงเทพมหานครได้รับอิทธิพลจากน้ำท่วมบ่อยครั้งเนื่องจากแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่านตรงกลางของกรุงเทพมหานคร มีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่กระจุกอยู่หนาแน่นในเขตกรุงเทพฯชั้นใน และในปัจจุบันมีการก่อสร้างขนาดใหญ่กระจายทั่วทั้งกรุงเทพมหานคร คุณสมบัติของดินในกรุงเทพมหานครมีการกระจายตัวค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของน้ำทะเลและน้ำจืดที่แตกต่างกันขณะตกตะกอน ส่งผลให้โครงสร้างของดินและปริมาณน้ำในดินแตกต่างกันมาก ซึ่งลักษณะชั้นดินกรุงเทพมหานครโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.1 ชั้นบนสุดเป็นชั้นหน้าดินเป็นการแตกสลายตามสภาพแวดล้อม มีความหนาประมาณ 2-5 เมตร เป็นดินที่ถูกรบกวนทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปมาก โดยผิวด้านบนถูกความร้อนจากแดดทำให้เกิดชั้นหน้าดินแข็ง (Drying crust) และด้านล่างเกิดการกร่อนทางเคมี (Chemical weathering) และเนื้อดินโดนชะล้างจากน้ำที่ซึมลงดิน ทำให้เกิดชั้นดินกักคร่อน (Weathering zone) จากกระบวนการต่าง ๆ ทำให้ชั้นดินมีความชื้นในมวลดินต่ำ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น กำลังเพิ่มขึ้นและปริมาณเกลือแร่ในดินน้อยลง

2.3.2 ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร และหนามากที่สุดบริเวณใกล้กับปากอ่าวไทย มีซากพืชและเปลือกหอยกระจายอยู่ทั่วไป มีเกลือแร่ในดินสูงเนื่องจากเป็นตะกอนน้ำเค็ม โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเม็ดดินเหนียว พันด้วยดินแป้ง แร่ในดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) มีสีเทาเข้ม เนื้ออ่อนนุ่ม ความชื้นในมวลดินสูง

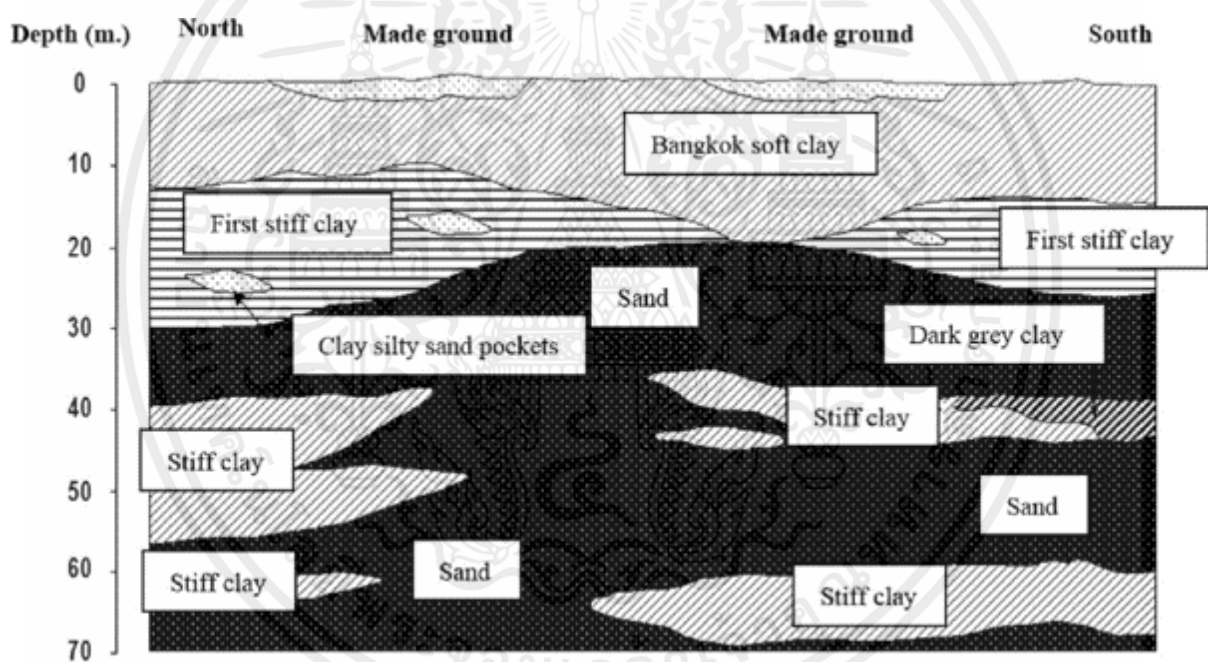
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) มีสีเทาน้ำตาลจนถึงเหลือง ความหนาประมาณ 10 เมตร พบที่ความลึกจากผิวดินประมาณ 15-25 เมตร เป็นชั้นดินที่อยู่ใต้ดินเหนียวอ่อนลงมา ความชื้นในมวลดินต่ำกว่า มีชั้นทรายแทรกอยู่บ้างในบางพื้นที่ พบแร่เหล็กและแมงกานีสเป็นจุดสีเหลืองแดง

2.3.4 ชั้นทราย (Sand) เป็นตะกอนดินที่เกิดจากอิทธิพลของธารน้ำ ที่น้ำตะกอนจากทางตอนเหนือของประเทศไทยมาตกตะกอนบริเวณตอนกลาง ชั้นทรายจะอยู่ตื้นขึ้นทางทิศเหนือของประเทศไทย และอาจมีชั้นดินเหนียวแทรกเป็นช่วง ๆ

ลึกลงจากนี้จะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากสลับกับชั้นดินทราย และในชั้นดินทรายหลายชั้นเป็นแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดินที่สำคัญของกรุงเทพมหานคร

รูปที่ 2.5 แสดงสภาพชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Bangkok subsoils) โดยทั่วไป



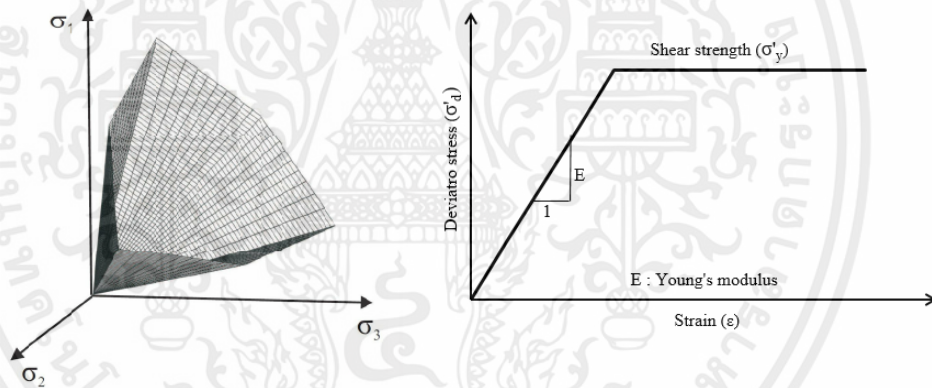
## 2.4 แบบจำลองพฤติกรรมของปล่องอุโมงค์

จำลองพฤติกรรมของปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) จำลองโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดิน (Displacement) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินและปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft) ขณะดำเนินการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft) ตามขนาดของปล่องอุโมงค์ (Tunnel Shaft) และใช้แบบจำลองดินที่สามารถประยุกต์ใช้ได้โปรแกรม PLAXIS 2D 2 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลอง Mohr-Coulomb และแบบจำลอง Hardening Soil

### 2.4.1 แบบจำลอง Mohr-Coulomb

แบบจำลอง Mohr-Coulomb เป็นแบบจำลองพฤติกรรมของดินเชิงเส้นอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ณ ระนาบวิบัติ (Failure plane) ที่เกิดจากน้ำหนักที่มากกระทำต่อดิน โดยเป็นสัดส่วนกับหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress) และคุณสมบัติของดิน ( $c$  และ  $\phi$ ) โดยลักษณะพื้นฐานสำคัญที่มีการพิจารณาในแบบจำลอง Mohr-Coulomb มี 5 ตัว ดังนี้

1. Young's modulus,  $E$  คือ ค่าความแข็งแรงหรือสติฟเนส (Stiffness) สำหรับดินซึ่งมีหน่วยเดียวกับแรง [ $\text{kN/m}^2$ ]
2. Poisson's ratio,  $\nu$  คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวตั้งฉากกับหน่วยแรงต่อความเครียดในแนวเดียวกับหน่วยแรง
3. Cohesion,  $c$  คือ ค่าแรงเชื่อมแน่น หน่วย [ $\text{kN/m}^2$ ]
4. Friction angle,  $\phi$  คือ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน หน่วย [ $^\circ$ ]
5. Dilatancy angle,  $\psi$  คือ ค่ามุมขยายตัวระหว่างเม็ดดิน หน่วย [ $^\circ$ ]

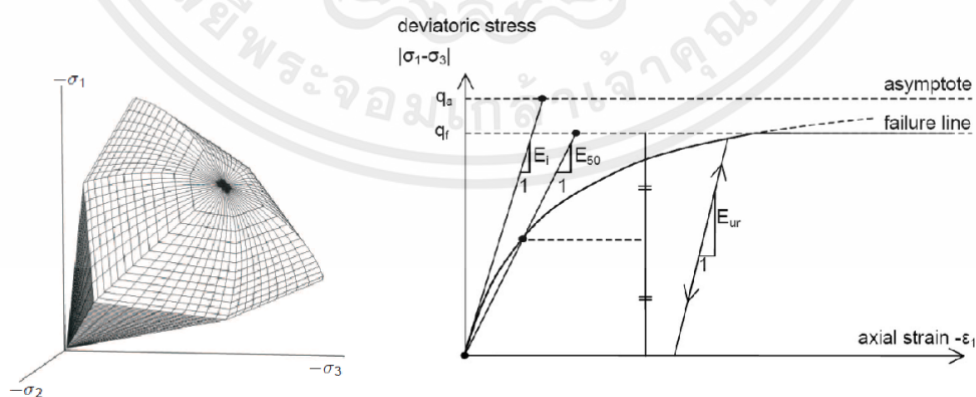


รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb

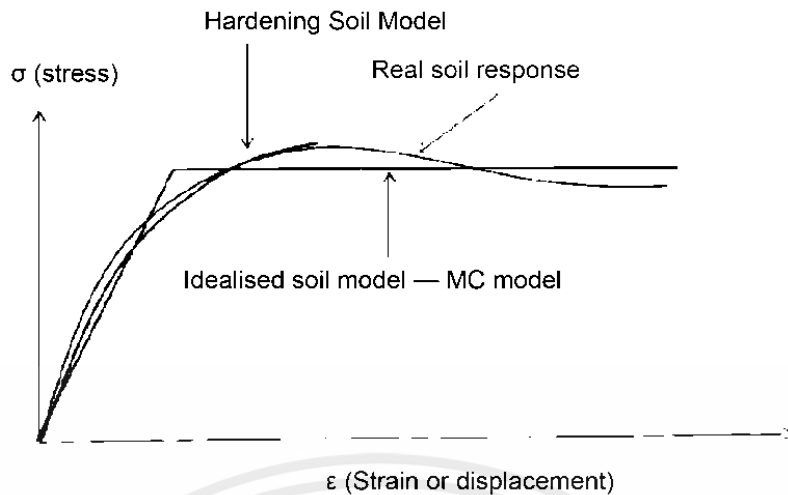
### 2.4.2 แบบจำลอง Hardening Soil

แบบจำลอง Hardening Soil เป็นแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงและเป็นแบบจำลองดินชั้นสูงที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินชนิดต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงทั้งดินอ่อนและดินแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb เมื่อมีน้ำหนักมากกระทำต่อดินค่าความแข็งแรงหรือสติฟเนส (Stiffness) จะลดลงในขณะที่ความเครียดแบบพลาสติกจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยไม่สามารถคืนตัวได้ เช่น กรณีการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (Drained Triaxial test) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกน จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งในช่วงต้นของการทดสอบ โดยลักษณะพื้นฐานสำคัญที่มีการพิจารณาในแบบจำลอง Hardening Soil มี 11 ตัว ดังนี้

1. Cohesion,  $c$  คือ ค่าแรงเชื่อมแน่น หน่วย  $[\text{kN/m}^2]$
2. Friction angel,  $\phi$  คือ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน หน่วย  $[\circ]$
3. Dilatancy angel,  $\Psi$  คือ ค่ามุมขยายตัวระหว่างเม็ดดิน หน่วย  $[\circ]$
4. Young's modulus ที่ 50%,  $E_{50}^{ref}$  คือ ค่าความแข็งแรงหรือสติฟเนส (Stiffness) จากความเครียดแบบพลาสติกจากความเค้นเบี่ยงเบนปฐมภูมิที่ 50% หน่วย  $[\text{kN/m}^2]$
5. Oedometer modulus,  $E_{oed}^{ref}$  คือ ค่าความแข็งแรงหรือสติฟเนส (Stiffness) จากความเครียดแบบพลาสติกจากแรงกดอัดปฐมภูมิ หน่วย  $[\text{kN/m}^2]$
6. Unload-Reload modulus,  $E_{ur}^{ref}$  คือ ค่าความแข็งแรงหรือสติฟเนส (Stiffness) จากความแข็งแรงช่วงการถอนแรงและการให้แรงกลับ (Unloading/Loading) โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ  $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$  หน่วย  $[\text{kN/m}^2]$
7.  $m$  คือ ความแข็งแรงของมวลดินผันแปรกับความเค้น (Stress Dependent Stiffness)
8. Poisson's ratio for unloading-reloading,  $\nu_{ur}$  คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวตั้งฉากกับหน่วยแรงต่อความเครียดในแนวเดียวกับหน่วยแรง สำหรับการถอนแรงและการให้แรงกลับ
9. Reference stress for stiffnesses,  $p^{ref}$  คือ ค่าความเค้นอ้างอิงส่วนใหญ่มีค่าประมาณ  $p^{ref} = 100$  หน่วย  $[\text{kN/m}^2]$
10. Coefficient of earth pressure for normal consolidation,  $K_0^{nc}$  คือ สัมประสิทธิ์ที่แรงดันด้านข้างมีค่าประมาณ  $K_0^{nc} = 1 - \sin\phi$
11. Failure ratio,  $R_f$  คือ อัตราส่วนการพังทลายโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ  $R_f = 0.9$



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain สำหรับแบบจำลอง Hardening Soil



รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมของดินจริงกับแบบจำลอง Mohr-Coulomb และแบบจำลอง Hardening Soil

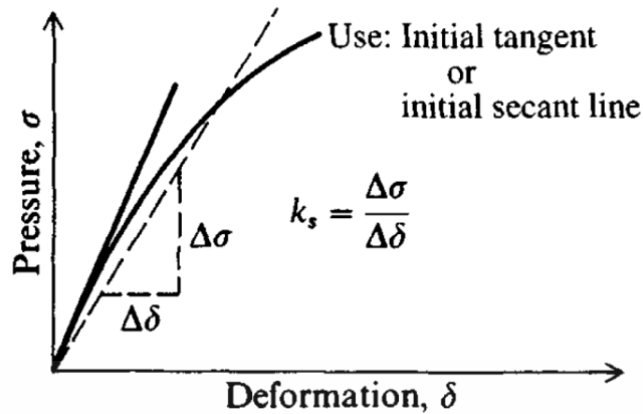
แม้ว่าแบบจำลอง Hardening Soil สามารถจำลองพฤติกรรมของดินได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินได้ใกล้เคียงความเป็นจริง แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการตัวอย่างเช่น ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการอ่อนตัว (Softening) ของมวลดินเนื่องจากสภาวะการขยายตัว (Dilatancy) รวมถึงผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์หลุดร่อนหรือแยกตัว (Debonding) ภายในอนุภาคเม็ดดิน เป็นต้น

## 2.5 คุณสมบัติของดินที่มีผลต่อพฤติกรรมปล่องอุโมงค์

### 2.5.1 โมดูลัสของดิน (Modulus of soil)

โมดูลัสของดิน ( $E_s$ ) เป็นตัวแสดงถึงความต้านทานการเสียรูป (Deformation) ของดินเมื่อน้ำหนักหรือแรงกดอัดมากระทำ โมดูลัสของดินหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด (Stress) และหน่วยการหดตัว (Strain) ได้จากการทดสอบ Triaxial test ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสของดินขึ้นกับคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไปความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง สามารถหาได้จากอัตราส่วนความลาดเอียง (Slope) ของความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress ( $\Delta\sigma$ ) กับ Strain ( $\Delta\epsilon$ ) ในช่วงที่มีการยืดหยุ่น (Elastic) ของดิน (Secant modulus) สำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb จะใช้ค่าโมดูลัสของดิน ( $E_s$  หรือ  $E_0$ ) ดังสมการที่ (2.1) และค่า Stress-Strain modulus of soil,  $E_s$  แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

$$E_s = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad \dots (2.1)$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain modulus (Bowles, 1988)

ตารางที่ 2.1 ค่า Stress-Strain modulus of soil,  $E_s$  (Bowles, 1996)

**Value range\* for the static stress-strain modulus  $E_s$  for selected soils (see also Table 5-6)**

Field values depend on stress history, water content, density, and age of deposit

Soil	$E_s$ , MPa
Clay	
Very soft	2–15
Soft	5–25
Medium	15–50
Hard	50–100
Sandy	25–250
Glacial till	
Loose	10–150
Dense	150–720
Very dense	500–1440
Loess	15–60
Sand	
Silty	5–20
Loose	10–25
Dense	50–81
Sand and gravel	
Loose	50–150
Dense	100–200
Shale	150–5000
Silt	2–20

\*Value range is too large to use an “average” value for design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

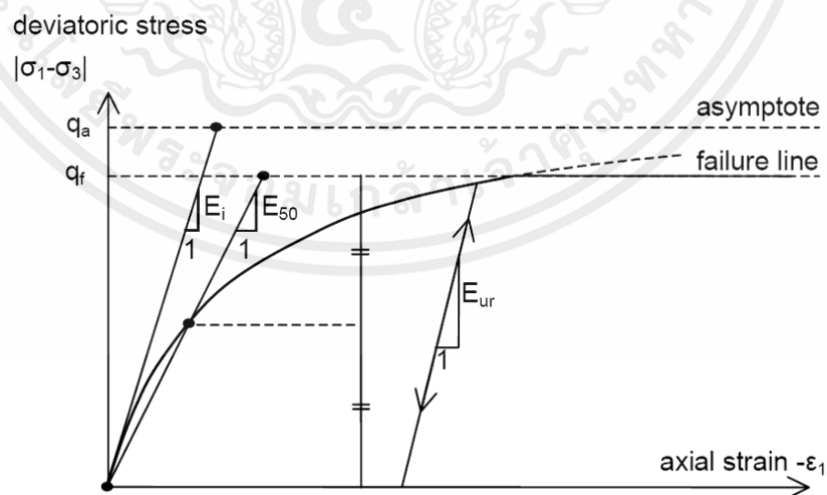
ในส่วนของแบบจำลอง Hardening Soil จะใช้ค่าโมดูลัสของดินที่แตกต่างกัน 3 ค่า ซึ่งแต่ละค่าสามารถหาได้ดังนี้

1.  $E_{50}^{ref}$  หาได้จาก 50% ของความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress ( $\Delta\sigma$ ) กับ Strain ( $\Delta\varepsilon$ ) ในช่วงที่มีการยืดหยุ่น (Elastic) ของดิน (Secant modulus) หรือจาก 50% ของ  $E_0$
2.  $E_{ur}^{ref}$  หาได้จากอัตราส่วนความลาดเอียง (Slope) ของความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress ( $\Delta\sigma$ ) กับ Strain ( $\Delta\varepsilon$ ) ของการทดสอบ Unloading-reloading test ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 2-5 เท่าของ  $E_{50}^{ref}$

ถ้าหากไม่มีการทดสอบ Unloading-reloading test สามารถหาค่า  $E_{ur}^{ref}$  ได้จากสมการที่ (2.2)

$$C_s \approx \frac{2.3(1+e_{init})(1+\nu_{ur})(1-\nu_{ur})p^{ref}}{(1-\nu_{ur})E_{ur}^{ref}K_0} \quad \dots (2.2)$$

- โดยที่
1. กำหนด  $p^{ref} = 100$
  2. คำนวณ  $E_{ur}^{ref}$  จาก  $C_s$  และ  $p^{ref}$
  3. ถ้า  $E_{ur}^{ref}$  ค่าที่คำนวณได้ไม่อยู่ระหว่าง 2-5 เท่าของ  $E_{50}^{ref}$  ให้เปลี่ยนค่า  $p^{ref}$  ให้อยู่ระหว่าง 50-200
  4. ตรวจสอบอีกครั้งให้ค่า  $E_{ur}^{ref}$  อยู่ระหว่าง 2-5 เท่าของ  $E_{50}^{ref}$



รูปที่ 2.10 แสดงค่า  $E_{50}^{ref}$  และ  $E_{ur}^{ref}$  จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ

(Drained Triaxial test)

3.  $E_{oed}^{ref}$  หาได้จากอัตราส่วนความลาดเอียง (Slope) ของความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress ( $\Delta\sigma$ ) กับ Strain ( $\Delta\varepsilon$ ) ของการทดสอบ Consolidation test ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ  $\pm 25\%$  เท่าของ  $E_{50}^{ref}$

สามารถหาค่า  $E_{oed}^{ref}$  ได้จากสมการที่ (2.3)

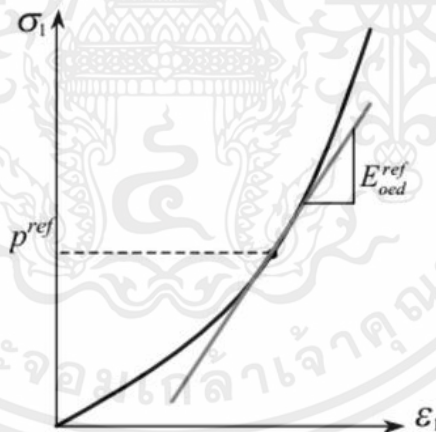
$$C_c = \frac{2.3(1+e_{init})p^{ref}}{E_{oed}^{ref}} \quad \dots (2.3)$$

โดยที่ 1. กำหนด  $p^{ref} = 100$

2. คำนวณ  $E_{oed}^{ref}$  จาก  $C_c$  และ  $p^{ref}$

3. ถ้า  $E_{oed}^{ref}$  ค่าที่คำนวณได้ไม่อยู่ระหว่าง  $\pm 25\%$  เท่าของ  $E_{50}^{ref}$  ให้เปลี่ยนค่า  $p^{ref}$  ให้อยู่ระหว่าง 50-200

4. ตรวจสอบอีกครั้งให้ค่า  $E_{oed}^{ref}$  อยู่ระหว่าง  $\pm 25\%$  เท่าของ  $E_{50}^{ref}$

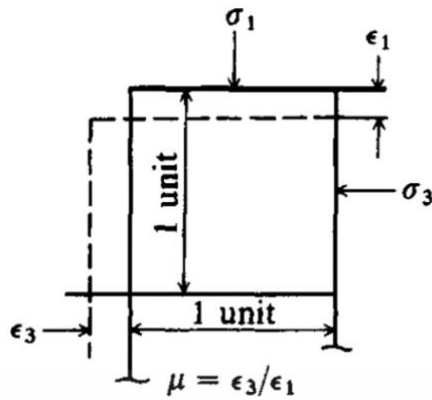


รูปที่ 2.11 แสดงค่า  $E_{oed}^{ref}$  จากผลการทดสอบการยุบอัดตัว (Consolidation Test)

### 2.5.2 อัตราส่วน Poisson's ratio

อัตราส่วน Poisson's ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างหน่วยการยืดหดตัวทางด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตัวตามแนวแกนที่รับน้ำหนัก ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$\mu = \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \quad \dots (2.4)$$



รูปที่ 2.12 อัตราส่วน Poisson's ratio,  $\mu$  (Bowles,1996)

สำหรับดินที่มีคุณสมบัติ Anisotropic soil จะต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรทั้ง 3 แกน แต่ในดินทั่วไป ภายใต้ Isotropic conditions อัตราส่วน Poisson's ratio จะใช้เพียงค่าเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.2 แสดงค่าอัตราส่วน Poisson's ratio ของดินชนิดต่าง ๆ ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วน Poisson's ratio ของดินชนิดต่าง ๆ (Bowles, 1996)

**TABLE 2-7**  
**Values or value ranges for Poisson's ratio  $\mu$**

Type of soil	$\mu$
Clay, saturated	0.4–0.5
Clay, unsaturated	0.1–0.3
Sandy clay	0.2–0.3
Silt	0.3–0.35
Sand, gravelly sand	–0.1–1.00
commonly used	0.3–0.4
Rock	0.1–0.4 (depends somewhat on type of rock)
Loess	0.1–0.3
Ice	0.36
Concrete	0.15
Steel	0.33

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Relevant research)

2.5.1 Fang-Le Peng (2011) ได้วิเคราะห์การวัดภาคสนามและผลจากการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการก่อสร้างด้วยวิธี New Pneumatic Caissons (NPC) ในเชียงใหม่ ซึ่งได้พิสูจน์

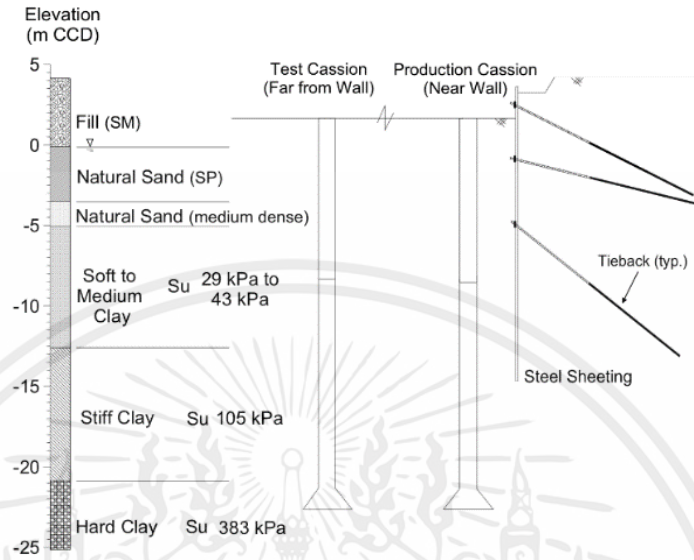
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าวิธี New Pneumatic Caissons เป็นวิธีการสร้างที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ลดระยะเวลาการก่อสร้าง และลดแรงงานลง สำหรับการเคลื่อนตัวของดิน (Deformation) ที่เกิดจากการก่อสร้าง New Pneumatic Caissons นั้นน้อยมากจึงเหมาะสมมากสำหรับการก่อสร้างในเขตเมือง ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่จำลองกระบวนการก่อสร้างทั้งหมดของปล่องอุโมงค์ได้ดี ซึ่งได้พิจารณาทั้งแรงดันอากาศอัด (Compressed air pressure) แรงเสียดทานของผิว (Skin friction) แรงปฏิกิริยาจาก Cutting-edge (Cutting-edge reaction force) และผลกระทบจากการถอนแรง (Unloading) อีกด้วย โดยใช้แบบจำลอง Hardening Soil เพื่อทำการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้สอดคล้องกับผลที่วัดได้ในสนาม และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นแล้วว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปล่องอุโมงค์นั้นสัมพันธ์กับความลึกของการจมของปล่องอุโมงค์ โดยที่เขตอิทธิพลจะอยู่จากผิวดินถึงประมาณ 1.5 เท่าของความลึกทั้งหมดของการจมปล่องอุโมงค์ การทรุดตัวของผิวดินจะลดลงเมื่อระยะห่างของปล่องอุโมงค์เพิ่มมากขึ้น และการเคลื่อนตัวในแนวราบใต้ผิวดิน (Sub-surface horizontal displacement) ยังมีผลกระทบน้อยมากอีกด้วย

2.5.2 ทรงเดช (2543) ได้ศึกษาพฤติกรรมของปล่องอุโมงค์ลึกเพื่อก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำขนาดใหญ่ จากผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของปล่องอุโมงค์จากการติดตั้ง Inclinator 2 ตัว คือ ติดตั้งในผนังปล่องอุโมงค์กับติดตั้งอยู่ในดิน ในทิศทางตรงกันข้ามกับหัวเจาะอุโมงค์ พบว่าการติดตั้ง Inclinator ในผนังปล่องอุโมงค์จะทราบเพียงปล่องอุโมงค์เกิดการพลิกตัวเนื่องจากแรง Thrust force เท่านั้น แต่ผลการตรวจวัดการติดตั้ง Inclinator ในดินแสดงให้เห็นว่าเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบก่อนหรือเกิดไปพร้อมกับการพลิกตัวของปล่องอุโมงค์ อีกทั้งผลการตรวจวัดการติดตั้ง Inclinator ในดินหลังปล่องอุโมงค์แสดงถึงการทรุดตัวของดินที่ฐานปล่องอุโมงค์เนื่องจากน้ำหนักของปล่องอุโมงค์เองและแรง Thrust force และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) แสดงให้เห็นว่าแรงปฏิกิริยาในแนวตั้ง (Vertical sub-grade reaction) ของชั้นดินใต้ฐานปล่องอุโมงค์เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการเอียงตัวของปล่องอุโมงค์ ซึ่งการทรุดตัวของดินที่ฐานปล่องอุโมงค์เนื่องจากน้ำหนักของปล่องอุโมงค์เองและแรง Thrust force ในสภาพการทำงานจริงจะมีแรงเสียดทานทางด้านข้างของผนังปล่องอุโมงค์ (Skin friction) และแรงดันน้ำ (Uplift force) ช่วยต้านทานด้วย

2.5.3 Jeffrey Hoffman ได้ศึกษาการเสยรูปในแนวด้านข้าง (Lateral movements) ของดินที่เกิดจากการติดตั้งปล่องอุโมงค์ โดยเป็นปล่องอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.76 เมตร ถึง 1.5 เมตร โดยจะก่อสร้างปล่องอุโมงค์เป็น 2 แบบคือ ปล่องอุโมงค์ที่อยู่ใกล้กับ Sheet pile กับปล่องอุโมงค์ที่อยู่ไกลกับ Sheet pile ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 ทำการติดตั้ง Inclinator 8 ตัวบริเวณสถานที่ก่อสร้างซึ่งถูกล้อมรอบด้วย Sheet pile ขณะทำการติดตั้งปล่องอุโมงค์ที่อยู่ใกล้กับ Sheet pile และติดตั้ง Inclinator 1 ตัวภายในปล่องอุโมงค์ที่อยู่ใกล้กับ Sheet pile โดยใช้เวลาเป็นตัวกำหนด ในขณะที่ติดตั้ง

ปล่องอุโมงค์ทั้ง 2 แบบ จึงสามารถสรุปได้ว่าปล่องอุโมงค์ที่ถูกติดตั้งไว้ใกล้กับ Sheet pile จะทำให้เกิดความเค้นในดินที่มากกว่าส่งผลให้เกิดการเสียรูปในแนวด้านข้างของดินที่มากกว่าปล่องอุโมงค์ที่ติดตั้งเอาไว้ไกลจาก Sheet pile และมีค่าการเคลื่อนตัวที่มากที่สุดในช่วงดินเหนียว



Cross-section at the Lurie site

รูปที่ 2.13 แสดงการติดตั้งของปล่องอุโมงค์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ และข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในขณะก่อสร้างปล่องอุโมงค์ จากการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา บริเวณคอขวด ซึ่งอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยใช้ระบบการจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) โดยมีรายละเอียดและข้อมูลดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยของโครงการนี้สามารถแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็นหลายส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเทคนิคและวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ด้วยระบบจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson)
2. ศึกษาข้อมูลลักษณะของชั้นดินและคุณสมบัติของดินในบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง
3. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินรอบปล่องอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยการใช้โปรแกรม PLAXIS 2D
4. เปรียบเทียบผลของการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการก่อสร้างปล่องอุโมงค์จากการตรวจวัดในสนามกับผลจากการวิเคราะห์โดยการใช้โปรแกรม PLAXIS 2D
5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 3.2 รายละเอียดและข้อมูลการก่อสร้างปล่องอุโมงค์

ปล่องอุโมงค์บริเวณคลองทวีวัฒนาเป็นปล่องอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก ที่จะดำเนินการก่อสร้างโดยวิธีการจมปล่องคอนกรีต (Sinking reinforced concrete caisson) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ปล่องอุโมงค์จมลงด้วยน้ำหนักของตัวปล่องอุโมงค์เอง โดยจะทำการลดแรงเสียดทานภายในปล่องอุโมงค์ด้วยการขุดดินออกและอาจมีการใช้แม่แรง (Hydraulic jack) บริเวณปากปล่องอุโมงค์ เพื่อเพิ่มแรงกดซึ่งจะช่วยในการจมของปล่องคอนกรีตและควบคุมแนวการจมของปล่องอุโมงค์ ปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาจะมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.00 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.00 เมตร ความหนาของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก 1.00 เมตร และความลึกการจมทั้งหมดโดยประมาณ 29.80 เมตร โดยลักษณะของปล่องอุโมงค์จะเป็นดังที่แสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา

### 3.3 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการสำรวจดิน

สภาพชั้นดินภายในพื้นที่ก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา ประกอบด้วยชั้นดินที่มีความลึกและคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณสถานที่ก่อสร้างของโครงการคลองทวีวัฒนา

ความลึก (ม.)	ชั้นดิน	USCS Group	ลักษณะที่พบ
0.00 - 5.00	หน้าดิน (Top soils)		เป็นหน้าดินความหนาประมาณ 5 เมตร
5.00 - 7.50	ดินเหนียวอ่อนมาก (Very soft clay)	CH	เป็นดินเหนียวสีเทาเข้ม มีค่าความเป็นพลาสติกสูง มีค่า หน่วยแรงเฉือน $S_u = 1.00 \text{ t/m}^2$
7.50 - 10.50	ดินเหนียวอ่อน (Soft clay)	CH	เป็นดินเหนียวสีเทาเข้ม มีค่าความเป็นพลาสติกสูง มีค่า หน่วยแรงเฉือน $S_u = 1.53 \text{ t/m}^2$
10.50 - 13.50	ดินเหนียวแข็งมาก (Very stiff clay)	CH	เป็นดินเหนียวสีเทาเข้ม มีค่าความเป็นพลาสติกสูง มีค่า หน่วยแรงเฉือน $S_u$ อยู่ในช่วงระหว่าง $11.78 - 18.27 \text{ t/m}^2$

13.50 - 15.00	ดินเหนียวแข็งที่สุดปน ตะกอน (Hard silty clay)	CL	เป็นดินเหนียวปนตะกอนสีเทาเข้ม มีค่าความเป็น พลาสติกต่ำ ดินมีค่าการตอกทดลอง (SPT) เท่ากับ 33 Blows/Foot
15.00 - 18.00	ทรายแน่นถึงแน่นมาก (Dense to very dense sand)	SC	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีดินเหนียวปนอยู่ด้วย มีค่า ความเป็นพลาสติกต่ำ ดินมีค่าการตอกทดลอง (SPT) อยู่ในช่วง 35-60 Blows/Foot
18.00 - 22.50	ทรายแน่นถึงแน่นมาก (Dense to very dense sand)	SM	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีตะกอนปนอยู่ด้วย ไม่มีค่า ความเป็นพลาสติกที่ดี ดินมีค่าการตอกทดลอง (SPT) อยู่ในช่วง 49-64 Blows/Foot
22.50 - 24.00	ดินเหนียวแข็งมากปน ตะกอน (Very stiff silty clay)	CL	ดินเหนียวปนตะกอนสีน้ำตาลเข้ม มีค่าความเป็น พลาสติกต่ำ ดินมีค่าการตอกทดลอง (SPT) เท่ากับ 47 Blows/Foot
24.00 - 45.00	ทรายแน่นถึงแน่นมาก (Dense to very dense sand)	SM	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีตะกอนปนอยู่ด้วย ไม่มีค่า ความเป็นพลาสติกที่ดี
45.00 - 46.50	ทรายแน่นมาก (Very dense sand)	SC	เป็นทรายสีน้ำตาลเข้ม และเป็นทรายเม็ดละเอียด ถึงหยาบที่มีดินเหนียวปนอยู่ด้วย มีค่าความเป็น พลาสติกต่ำ
46.50 - 48.00	ทรายแน่นมาก (Very dense sand)	SM	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีตะกอนปนอยู่ด้วย ไม่มีค่า ความเป็นพลาสติกที่ดี
48.00 - 51.00	ทรายแน่นมาก (Very dense sand)	SC	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีดินเหนียวปนอยู่ด้วย มีค่า ความเป็นพลาสติกต่ำ
51.00 - 51.95	ทรายแน่นมาก (Very dense sand)	SM	เป็นทรายสีเทาอมน้ำตาล และเป็นทรายเม็ด ละเอียดถึงหยาบที่มีตะกอนปนอยู่ด้วย ไม่มีค่า ความเป็นพลาสติกที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของชั้นดิน

จากลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการสำรวจดิน ทำให้สามารถออกแบบโมเดลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองปล่องอุโมงค์ได้ โดยจะประกอบไปด้วยแบบจำลอง Mohr–Coulomb Model แบบ Undrained B สำหรับดินเหนียวซึ่งจะใช้ Strength parameter คือ  $C_u$  และ Stiffness parameter คือ  $E_u$  ส่วนแบบจำลอง Mohr–Coulomb Model แบบ Drained สำหรับดินทราย ซึ่งจะใช้ Strength parameter คือ  $C'$ ,  $\phi'$  และ Stiffness parameter คือ  $E'$ ,  $\nu$  และแบบจำลอง Hardening soil model แบบ Undrained A สำหรับดินเหนียว ซึ่งจะใช้ Strength parameter คือ  $C'$ ,  $\phi'$  และ Stiffness parameter คือ  $E_{50}$ ,  $E_{oed}$ ,  $E_{ur}$  ดังแสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของชั้นดิน

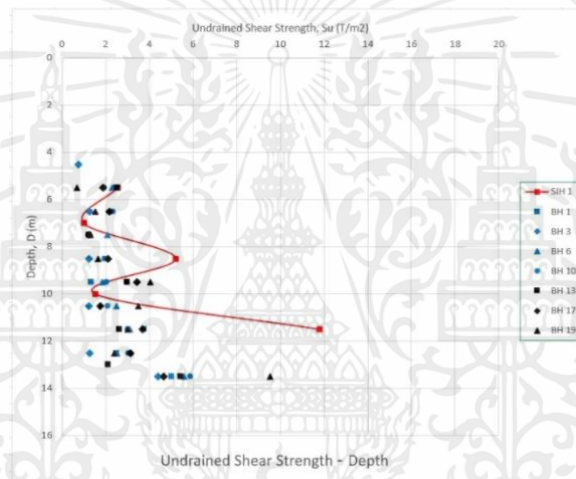
No.	Soil layer	Avg unit weight, $\gamma$	Soil Model	Drainage condition	Strength		Stiffness	
					Parameter	Calibration	Parameter	Calibration
1	Top soil	18.73	MC	Undrained B	$C_u$	UCS	$E_u$	Eu/Cu correlations
2	Very soft clay	15.52	HSS	Undrained A	$C'$ , $\phi'$	Triaxial	$E_{50}$ , $E_{oed}$ , $E_{ur}$	Triaxial + Oedometer
3	Soft clay	15.22	HSS	Undrained A	$C'$ , $\phi'$	Triaxial	$E_{50}$ , $E_{oed}$ , $E_{ur}$	Triaxial + Oedometer
4	Very stiff clay	16.28	MC	Undrained B	$C_u$	SPT N60-cu /correlations	$E_u$	Eu/Cu Correlations
5	Hard silty clay	18.83	MC	Undrained B	$C_u$	SPT N60-cu /correlations	$E_u$	Eu/Cu Correlations
6	Dense to very dense sand	20.30	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
7	Dense to very dense sand	20.00	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
8	Very stiff silty clay	18.83	MC	Undrained B	$C_u$	SPT N60-cu /correlations	$E_u$	Eu/Cu Correlations

No.	Soil layer	Avg unit weight, $\gamma$	Soil Model	Drainage condition	Strength		Stiffness	
					Parameter	Calibration	Parameter	Calibration
9	Dense to very dense sand	20.00	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
10	Very dense sand	20.50	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
11	Very dense sand	20.00	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
12	Very dense sand	20.30	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations
13	Very dense sand	20.00	MC	Drained	$C'$ , $\phi'$	Direct shear test	$E'$ , $\nu$	SPT correlations

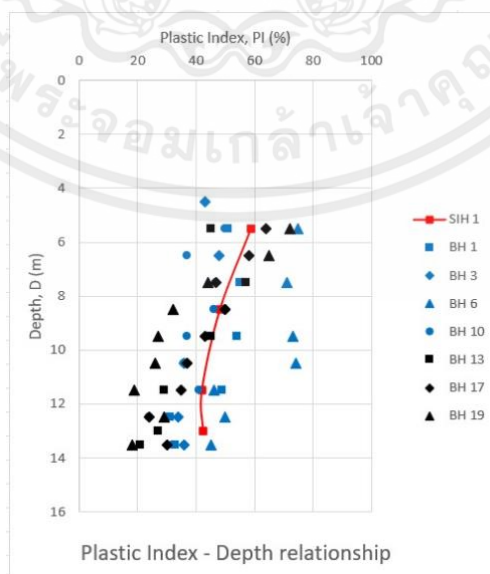
### 3.5 การเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน

#### 3.5.1 การเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินโครงการทวิวัฒนาและโครงการบางน้ำจืด

เนื่องจากผลการทดสอบของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวิวัฒนาไม่มีผลทดสอบของการทดสอบ Triaxial ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ Hardening soil model ได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำข้อมูลผลการทดสอบ Triaxial ของโครงการบางน้ำจืดมาปรับใช้ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากระยะทางระหว่างโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวิวัฒนาและโครงการบางน้ำจืดมีระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ลักษณะของชั้นดินจึงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินในทั้งสองโครงการ โดยจะเปรียบเทียบระหว่างค่า Undrained shear strength กับความลึก และค่า Plastic Index กับความลึก ซึ่งจะได้กราฟเปรียบเทียบของทั้งสองโครงการดังแสดงในรูป 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.2 กราฟเปรียบเทียบค่า Undrained shear strength กับความลึก



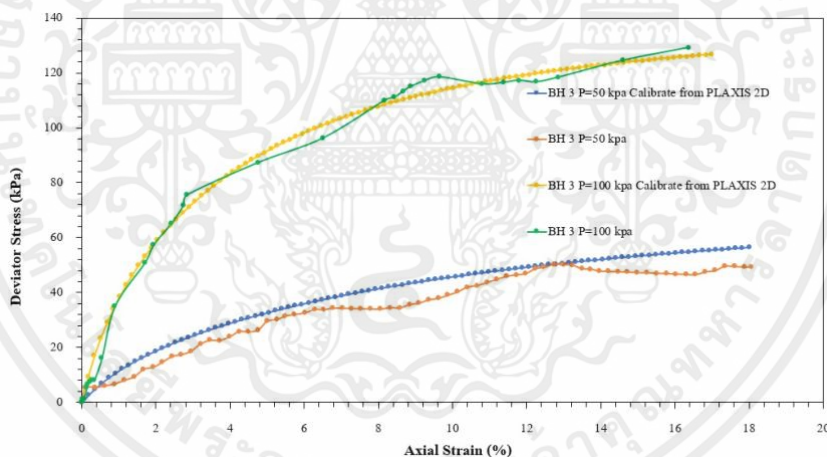
รูปที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบค่า Plastic Index กับความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบของทั้งสองโครงการ จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของดินจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาและโครงการบางน้ำจืดมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า Undrained shear strength จะแสดงให้เห็นถึงค่าความสามารถด้านทานการพิบัติของมวลดินและค่า Plastic index จะแสดงให้เห็นถึงค่าความสามารถด้านทานการเสีรูปของมวลดิน โดยทั้งสองค่านี้เป็นค่าที่มีความสำคัญในการใช้ออกแบบปล่องอุโมงค์ จากผลการเปรียบเทียบที่ได้รับจึงสามารถใช้ผลการทดสอบ Triaxial จากโครงการบางน้ำจืดเพื่อใช้ในการทำ Hardening soil model ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาได้

### 3.5.2 การ Calibrate Soil Test

จากการทำ Hardening soil model ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินได้โดยจะสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress และ Axial Strain ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากในสนาม และเมื่อนำกราฟทั้งสองมาเทียบกันจะเห็นได้ว่ากราฟและค่าจากทั้ง 2 วิธีมีความใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์ในการสร้าง Hardening soil model มีความถูกต้องและสามารถใช้ได้



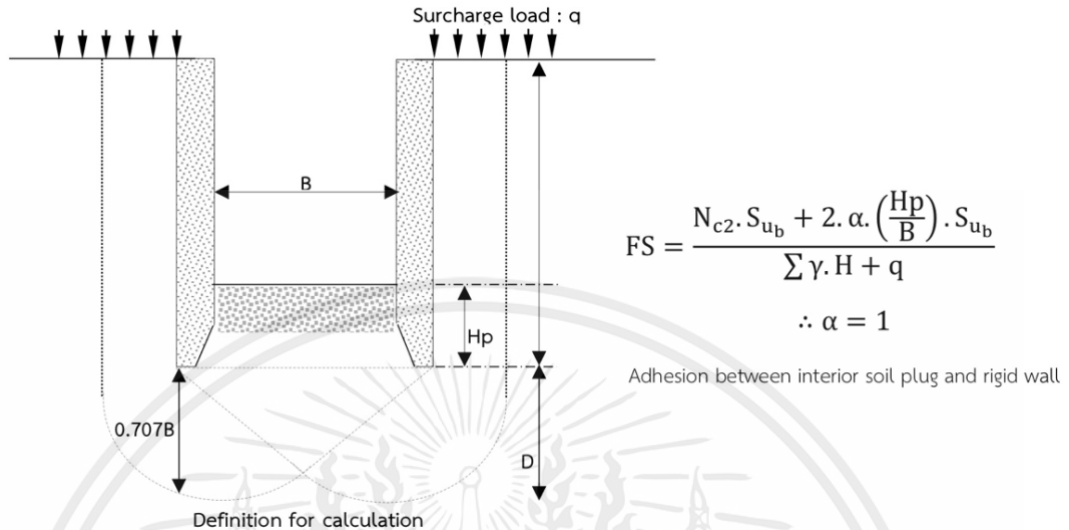
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress และ Axial Strain

### 3.6 ขั้นตอนการก่อสร้างปล่องอุโมงค์

ขั้นตอนการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีจมปล่องคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking reinforced concrete caisson) สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

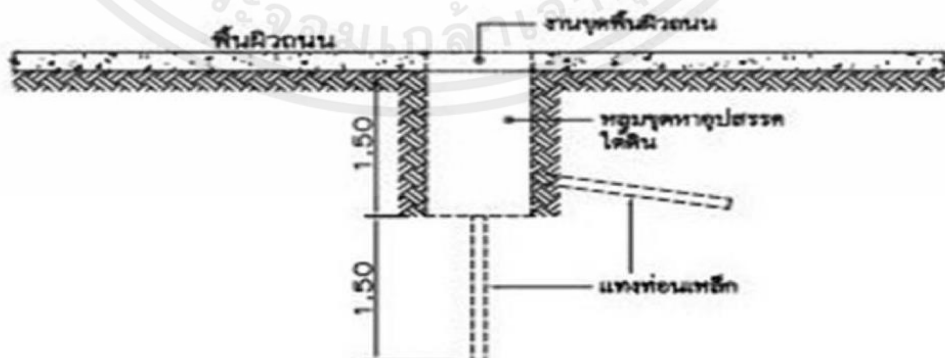
ขั้นตอนที่ 1 เสนอรายการคำนวณ กำหนดและสำรวจพื้นที่ก่อสร้าง

- นำเสนอรายการคำนวณตรวจสอบเสถียรภาพการอูด (Heaving) ของงานดินขณะทำการขุดจมนปล่องอุโมงค์ (Shaft) จากนั้นให้ช่างสำรวจกำหนดขอบเขตพื้นที่ก่อสร้างและตำแหน่งของปล่องอุโมงค์ โดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้าง



รูปที่ 3.5 ตรวจสอบการอูดของดิน (Check Heaving), based on Bjerrum and Eide (1956)

- จัดทำทางเบี่ยงจราจรตามแบบรายละเอียดแผนการจัดจราจร และกำหนดพื้นที่การก่อสร้าง
- เมื่อกำหนดจุดสำหรับขุดสำรวจ (Trial Pit) เพื่อทำการขุดสำรวจหาแนวอุปสรรคใต้ดินหรือแนวของสาธารณูปโภค โดยทำการขุดเปิดพื้นที่ถนกลงไปลึก 1.50 ม. แล้วใช้แท่งเหล็กแทงลงไปแนวตั้งและแนวทางด้านข้างประมาณ 1.50 ม. หลาย ๆ จุดเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่คาดว่าจะเจอแนวอุปสรรคหรือพื้นที่ปลอดภัยที่ปล่องอุโมงค์จะจมลงไปได้ หากพบแนวอุปสรรคใต้ดินหรือแนวของสาธารณูปโภคที่ไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างต่อไปได้ ให้ย้ายแนวอุปสรรคและสาธารณูปโภคใต้ดิน เบี่ยงออกจากตำแหน่งปล่องอุโมงค์



รูปที่ 3.6 ขุดสำรวจ (Trial Pit) หาอุปสรรคเพิ่มเติม

- เมื่อไม่พบอุปสรรค (หรือย้ายแนวอุปสรรคกีดขวางออกแล้ว) ให้ทำการกำหนดตำแหน่งปล่องอุโมงค์ (Shaft) ตามความเหมาะสม



รูปที่ 3.7 กำหนดตำแหน่ง Shaft

- ทำการปิดกั้นพื้นที่ก่อสร้าง ติดตั้งเครื่องหมายความปลอดภัย รวมทั้งสัญญาณไฟต่าง ๆ ขุดลอกหน้าดิน โดยกำหนดขอบเขตและความลึกให้พอดีกับขั้นตอนก่อสร้างถัดไป
- ทำการก่อสร้างคานคอนกรีต (Concrete Ring Beam) รับน้ำหนักจากปล่องอุโมงค์ (Shaft) และเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของปล่องอุโมงค์
- ทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินหรืออุปกรณ์ตรวจสอบพฤติกรรมดินโดยรอบ ขณะก่อสร้างปล่องอุโมงค์ เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 3.8 ก่อสร้างเสาเข็มเหล็ก (Steel King Post)



รูปที่ 3.9 ก่อสร้างคานคอนกรีต รับน้ำหนักจากปลายอุโมงค์ (Concrete Ring Beam)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการติดตั้ง Cutting Shoe และจมปล่องอุโมงค์ (Shaft)

- ปรับระดับพื้นที่ภายใน Concrete Ring Beam โดยเท Lean concrete หน้าประมาณ 15.00-20.00 ซม. ทำการติดตั้งชิ้นงานวงเหล็กชั้นแรก (Steel Cutting Shoe) ลงภายในคานที่ได้กำหนดแนวขอบเขตงานก่อสร้างไว้แล้ว และเริ่มงานโครงสร้างคอนกรีต Cutting Shoe



รูปที่ 3.10 การติดตั้งชิ้นงานวงเหล็กชั้นแรก (Steel Cutting Shoe)

- เทคนิคกรีตโครงสร้างผนังปล่องอุโมงค์ (Shaft) และติดตั้ง Bracket สำหรับรองรับชุดแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ที่มีน้ำหนักควบคุม บริเวณรอบผนังภายนอกปล่องอุโมงค์ สำหรับใช้ในการควบคุมระดับปล่องอุโมงค์ขณะดำเนินการขุดจมปล่องอุโมงค์ (Shaft)



รูปที่ 3.11 เตรียมงานติดตั้ง Bracket สำหรับใช้ในการควบคุมระดับปล่องอุโมงค์

- ทำการขุดดินและจมปล่องอุโมงค์ในแต่ละชั้นความสูงที่ได้หลัโครงสร้างเรียบร้อยแล้วเป็นชั้น ๆ ความสูงที่ได้กำหนดไว้ โดยขั้นตอนการขุดใช้ชุดแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) เป็นตัวปรับระดับและรับน้ำหนักชั้นงานของชั้นนั้น ๆ กรณีที่ต้องการหยุดระดับงานจมบ่อที่ต้องการ ซึ่งจะปรับสมดุลน้ำหนักที่กดประกอบการขุดดินออก ซึ่งจะคำนึงถึงเสถียรภาพของการอุดของดิน (Heaving)



รูปที่ 3.12 ขุดดินในช่วงแรกที่ใช้รถขุดดินได้



รูปที่ 3.13 ขุดดินในกรณีเป็นดินอ่อน มีน้ำใต้ดิน ใช้ Clam Shell ขุดดินออก



รูปที่ 3.14 ขุดดินกรณีใต้น้ำ

- ดำเนินการจมน้ำตามขั้นตอนข้างต้น ในแต่ละชั้นถัดไปจนถึงชั้นสุดท้าย โดยมีการควบคุมระดับของปล่องอุโมงค์ (Shaft) ให้ได้ตามแบบ และดำเนินการตามขั้นตอนการควบคุมคุณภาพ

- กรณีที่จมไม่ลง จะต้องใช้ชุดแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) และเหล็ก Dywidag Bar ร่วมกับ Bracket สำหรับช่วยดึงรั้งจมปล่องอุโมงค์ ประกอบการขุดดินออก



รูปที่ 3.15 รายละเอียดงานติดตั้งชุด Hollow Jack, Dywidag Bar สำหรับช่วยดึงรั้งจมปล่องอุโมงค์  
ขั้นตอนที่ 3 ทำการเท Concrete Plug

- หลังจากได้ขุดดินและจมปล่องอุโมงค์ (Shaft) จนได้ระดับที่ต้องการแล้ว โดยตรวจสอบจากระดับผนังปล่องอุโมงค์ (Shaft) เตรียมการเพื่อจะเท Concrete Plug
- ติดตั้ง Platform เพื่อให้การทำงานสะดวกและปลอดภัย
- ติดตั้งท่อ Tremie ขนาด 6"-8" ภายในปล่องอุโมงค์ ห่างกันทุกระยะประมาณ 1.50-2.00 ม.
- เทคอนกรีตรองพื้นโดยใช้ Concrete Pump ผ่านท่อ Tremie เป็น Loop จากด้านขอบนอกวนเข้าด้านในศูนย์กลางปล่องอุโมงค์ จนได้ความหนาตามที่ได้คำนวณเพื่อให้คอนกรีตรับแรงลอยตัวได้



รูปที่ 3.16 การติดตั้ง Plat Form และการเท Concrete Plug

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสูบน้ำออกจะดำเนินการสูบครึ่งหนึ่งก่อน แล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม. ตรวจสอบระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดำเนินการสูบต่อจนหมด
- ทำความสะอาดผิวคอนกรีต ถ้ามีการรั่วซึมของน้ำ ให้ทำการซ่อมแซมรอยรั่วก่อน โดยการยิงโพน PU

#### ขั้นตอนที่ 4 ทำการลงเหล็กเสริมของพื้นปล่องอุโมงค์ (Base Slab)

- ทำการลงเหล็กเสริมของพื้นปล่องอุโมงค์ (Base Slab) พร้อมทั้ง Hydrophilic Water Stop ที่รอยต่อคอนกรีตพื้นกับผนัง และเทคอนกรีตโครงสร้าง



รูปที่ 3.17 งานเหล็กเสริมและเท Base Slab

- งานติดตั้งบันไดนั่งร้านและ Plate Form แต่ละระดับชั้นก่อนทำงานในส่วนงานก่อสร้างอื่นต่อไป
- ดำเนินการทำงานตามวิธีการก่อสร้างอื่น ๆ เช่น งานขุดเจาะอุโมงค์, งานเก็บรายละเอียดปล่องอุโมงค์, งานติดตั้งระบบ M&E รวมถึงการคืนพื้นสภาพพื้นที่โดยรอบจนเสร็จสมบูรณ์

### 3.7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด

ในการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของดินขณะจมปล่องอุโมงค์ บริเวณสถานีสูบน้ำโดยมีเครื่องมือการตรวจวัดดังนี้

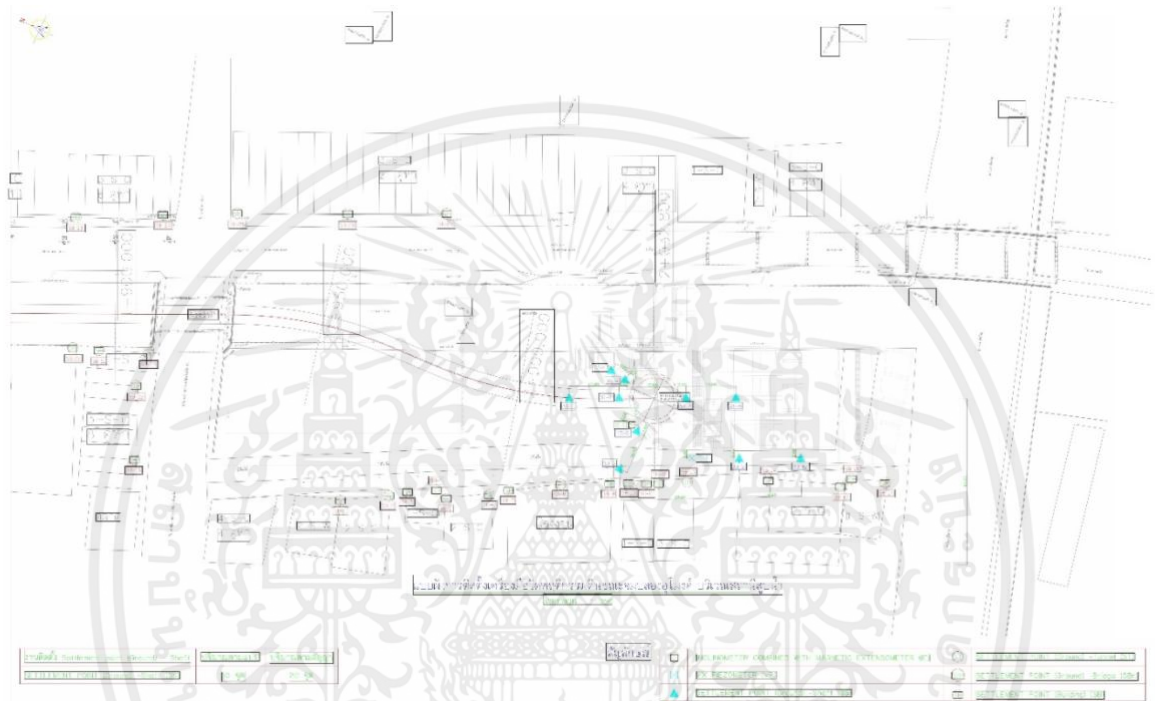
**3.7.1 Inclinomater combine with magnetic extensometer (IE)** โดยตำแหน่งติดตั้งจะติดตั้งห่างจากขอบด้านนอกของปล่องอุโมงค์ประมาณ 2.00 เมตร จำนวน 1 จุด

**3.7.2 Settlement Point-Ground (SS)** โดยติดตั้งบริเวณรอบ ๆ ปล่องอุโมงค์ จำนวน 10 จุด

3.7.3 Settlement Point-Building (SB) โดยติดตั้งที่บริเวณอาคารต่าง ๆ รอบ ๆ ปล่อย  
อุโมงค์ จำนวน 20 จุด

3.7.4 Piezometer (VP) โดยติดตั้งบริเวณข้าง ๆ ปล่อยอุโมงค์ จำนวน 1 จุด

ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมดินขณะจมปล่อยอุโมงค์ บริเวณสถานีสูบน้ำ จะแสดงดังรูป  
3.18

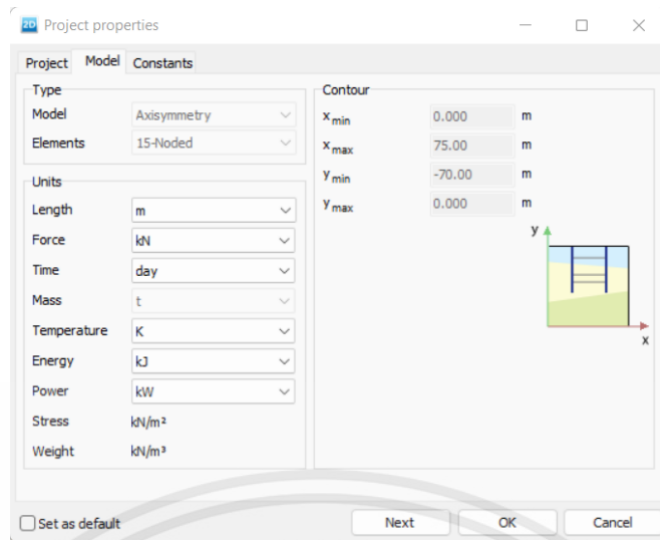


รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมดินขณะจมปล่อยอุโมงค์ บริเวณสถานีสูบน้ำ

### 3.8 การสร้างแบบจำลองปล่อยอุโมงค์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

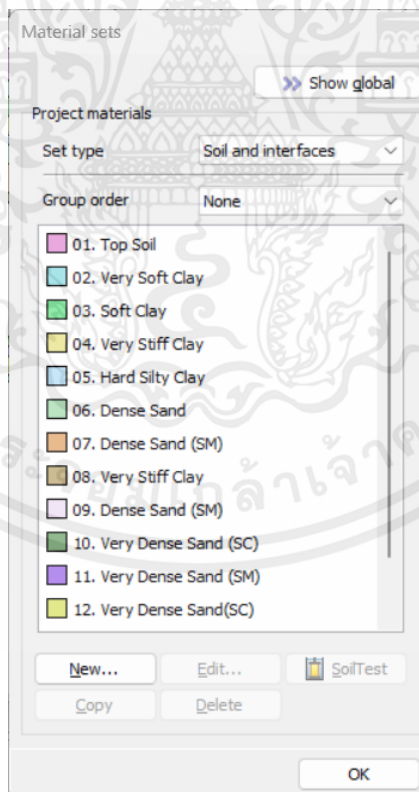
#### 3.8.1 การสร้างแบบจำลองชั้นดินและส่วนประกอบของปล่อยอุโมงค์

ในการสร้างแบบจำลองปล่อยอุโมงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของดินรอบปล่อยอุโมงค์ในระหว่างการก่อสร้างปล่อยอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา จะใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะเลือกเป็นแบบจำลองแบบ Axisymmetry แล้วจึงกำหนดค่า Contour ต่าง ๆ ตามข้อมูลลักษณะของชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ ดังแสดงในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 รูปแสดง Project Properties ในการสร้างแบบจำลอง

จากนั้นจะทำการแบ่งชั้นดินออกเป็นแต่ละชั้นตามข้อมูลลักษณะของชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ แล้วจึงใส่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ลงในชั้นดิน ซึ่งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ จะได้จากค่าการทดสอบที่ทราบจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาและโครงการบางน้ำจืด ดังแสดงในรูป 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 รูปแสดงประเภทของชั้นดินและการกำหนดคุณสมบัติของดินแต่ละชั้น



รูปที่ 3.21 รูปแสดงการแบ่งชั้นดินออกเป็นแต่ละชั้นและใส่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ลงในชั้นดิน

เมื่อทำการใส่ข้อมูลชั้นดินครบแล้วจะทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างต่อไป โดยจะประกอบด้วย ผนังของปล่องอุโมงค์, Base slab และ Concrete Plug แล้วจึงใส่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่า EA และ EI ซึ่งได้จากการคำนวณลงในโครงสร้างแต่ละอัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.22

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์

Structural	E (kPa)	A (m <sup>2</sup> /m)	I (m <sup>4</sup> /m)	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> /m)	w (kN/m/m)
Wall	$2.77 \times 10^7$	1	0.83	$2.77 \times 10^7$	$2.31 \times 10^6$	14.50
Base Slab	$2.96 \times 10^7$	3	2.25	$8.89 \times 10^7$	$6.67 \times 10^7$	37.50

การคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของส่วนประกอบของปล่องอุโมงค์

1) ผนังปล่องอุโมงค์ (Wall)

Properties	Value	Unit
Structure Type	Plate Element	-
Material Type	Elastic	-
EA	$2.768 \times 10^7$	kN/m
EI	$2.307 \times 10^6$	kN m <sup>2</sup> /m
d (Thickness)	1.0	m
w	14.50	kN/m/m

Caisson Sinking Wall Thick = 1.0 m., A = 1.0 m<sup>2</sup>

$$I = \frac{1}{12}bd^3 = \frac{1}{12}(1)(1)^3 = 83.333 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$E_{\text{concrete}} = 15100\sqrt{f_c'} = 15100\sqrt{350} = 282495.1327 \text{ ksc} = 2.771 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$EA = 2.771 \times 10^7 \times 1.0 = 2.771 \times 10^7 \text{ kN/m}$$

$$EI = 2.771 \times 10^7 \times 83.333 \times 10^{-3} = 2.309 \times 10^6 \text{ kN m}^2/\text{m}$$

$$W = (\gamma_{\text{structure}} - 0.5\gamma_{\text{soil}}) \times d_{\text{real}} = (24.5 - 0.5 \times 20) \times 1 = 14.50 \text{ kN/m}$$

## 2) Base Slab

Properties	Value	Unit
Structure Type	Plate Element	-
Material Type	Elastic	-
EA	$8.886 \times 10^8$	kN/m
EI	$6.665 \times 10^8$	kN m <sup>2</sup> /m
d (Thickness)	3.0	m
w	37.50	kN/m/m

Base Slab Thick = 3.0 m., A = 3.0 m<sup>2</sup>

$$I = \frac{1}{12}bd^3 = \frac{1}{12}(1)(3)^3 = 2.25 \text{ m}^4$$

$$E_{\text{concrete}} = 15100\sqrt{f_c'} = 15100\sqrt{400} = 3020000 \text{ ksc} = 2.962 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

$$EA = 2.962 \times 10^8 \times 3.0 = 8.886 \times 10^8 \text{ kN/m}$$

$$EI = 2.962 \times 10^8 \times 2.25 = 6.665 \times 10^8 \text{ kN m}^2/\text{m}$$

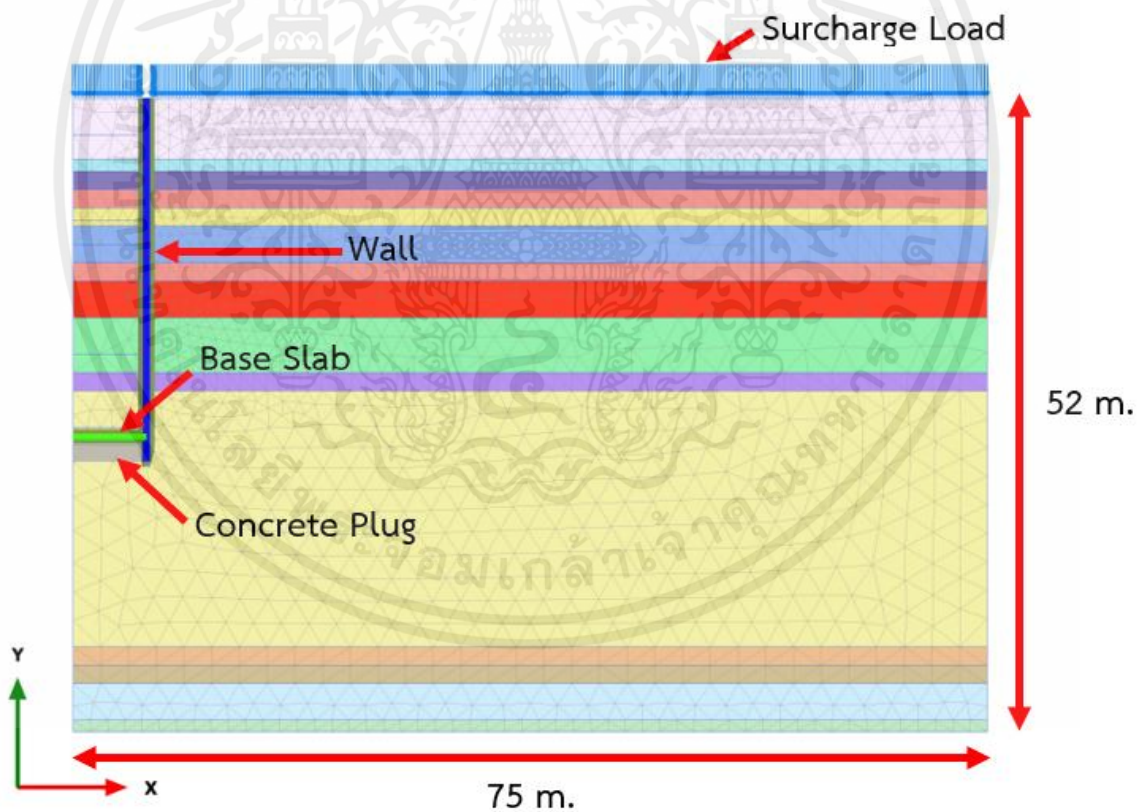
$$W = (\gamma_{\text{structure}} - 0.5\gamma_{\text{soil}}) \times d_{\text{real}} = (24.5 - 0.5 \times 24) \times 3 = 37.50 \text{ kN/m}$$

3) Concrete Plug

Properties	Value	Unit
Structure Type	Soil Element	-
Material Type	Linear Elastic	-
E	$1.987 \times 10^7$	kN/m <sup>2</sup>
$\gamma$	24	kN/m <sup>3</sup>
v	0.2	-

Concrete Plug Thick = 2.0 m.

$$E_{\text{concrete}} = 15100v(fc') = 15100v180 = 202587.76 \text{ ksc} = 1.987 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

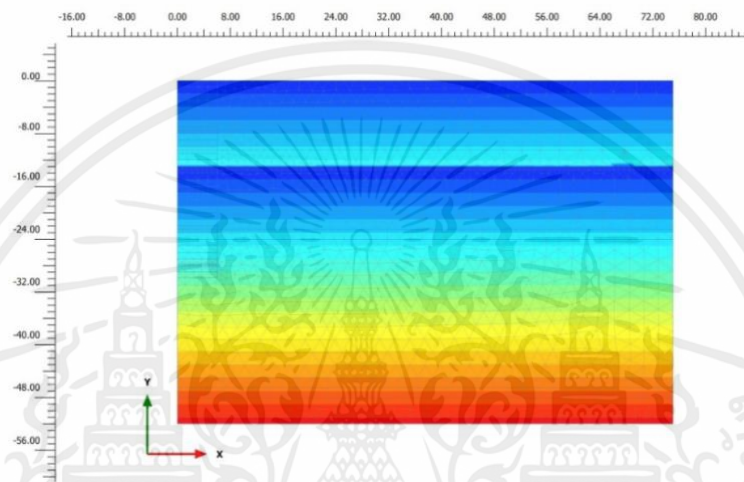


รูปที่ 3.22 รูปแสดงการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบโครงสร้างเข้ากับแบบจำลองของชั้นดิน

### 3.7.2 การทำ Stage Construction

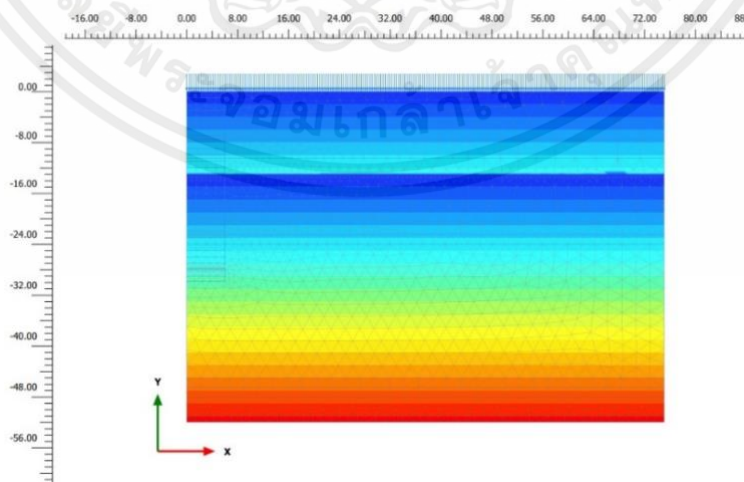
เมื่อทำการสร้างโมเดลจำลองเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการทำ Stage Construction โดยเป็นการจำลองลำดับการก่อสร้างต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมโดยอ้างอิงจากการก่อสร้างในสถานที่จริง โดยจะเริ่มจากขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการ Initial Phase ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกที่แสดงถึงสถานที่ก่อสร้างในขณะที่ยังไม่มีการดำเนินงานใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



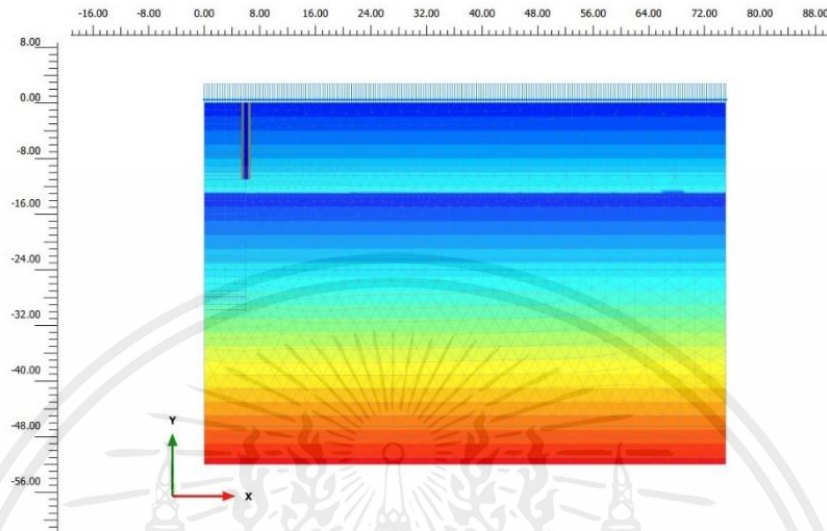
รูปที่ 3.23 รูปแสดงขั้นตอน Initial Phase

2. ขั้นตอนการ Install Live loads ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงถึงการติดตั้งแรงที่เกิดจากน้ำหนักของสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณสถานที่ก่อสร้างขณะทำการก่อสร้าง โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่า Live loads เท่ากับ  $20 \text{ kN/m}^2$  ดังแสดงในรูป 3.24



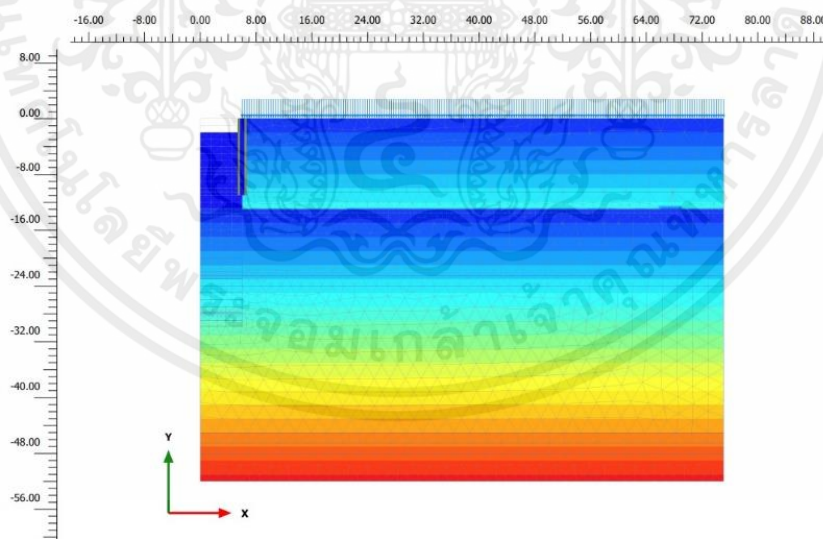
รูปที่ 3.24 รูปแสดงขั้นตอน Install Live Loads

3. ขั้นตอนการติดตั้งกำแพงของปล่องอุโมงค์ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงถึงการติดตั้งกำแพงลงไป 11 เมตร โดยแบ่งเป็นติดตั้งลงไปครั้งที่หนึ่ง 2 เมตร ครั้งที่สอง 3 เมตร ครั้งที่สาม 3 เมตร และครั้งที่สี่ 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.25



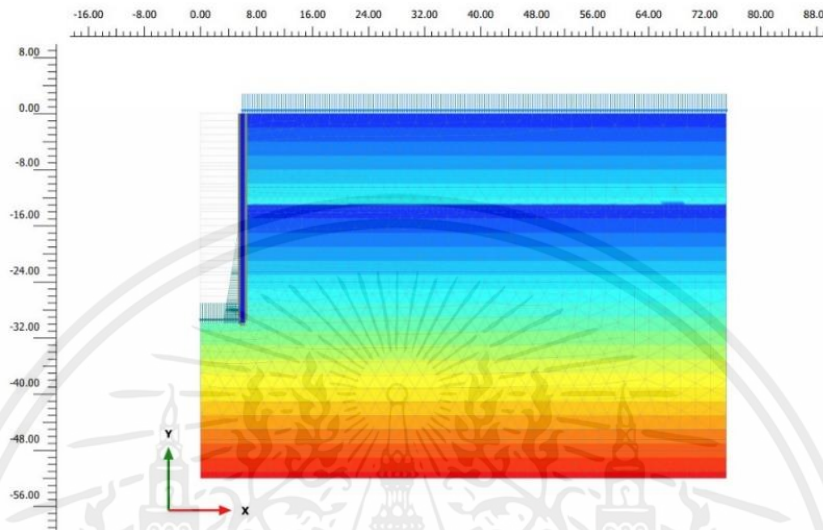
รูปที่ 3.25 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้งกำแพงของปล่องอุโมงค์

4. ขั้นตอนการขุดดิน เป็นขั้นตอนที่จะขุดดินออกเพื่อทำให้ปล่องอุโมงค์สามารถทำการจมปล่องลงไปได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะขุดดินลงไป 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.26



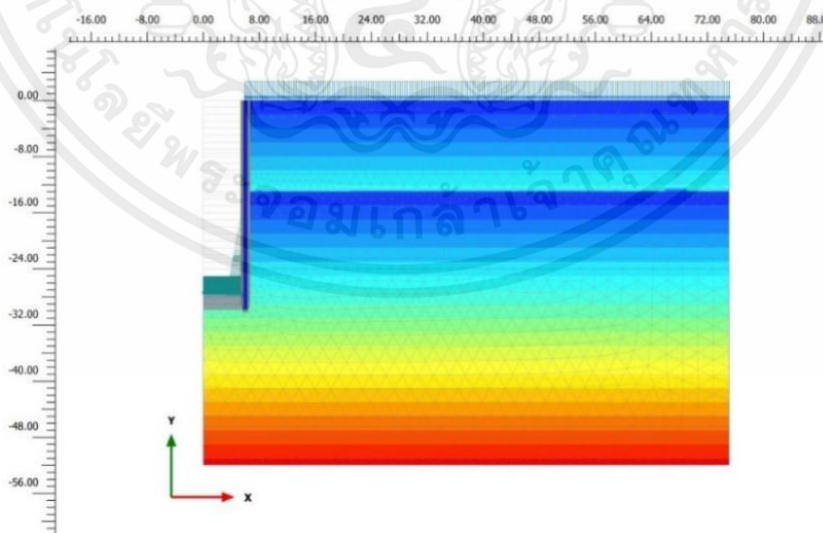
รูปที่ 3.26 รูปแสดงขั้นตอนการขุดดิน

5. ขั้นตอนการติดตั้งกำแพงและขุดดินออก ซึ่งในขั้นตอนนี้คือจะทำการติดตั้งกำแพงครั้งละ 3 เมตรและทำการขุดดินออกครั้งละ 4 เมตร เพื่อที่จะทำให้ปล่องอุโมงค์สามารถทำการจมปล่องลงไปได้ แล้วจึงทำการติดตั้งกำแพงเพิ่มอีก 3 เมตร สลับกับการขุดดินออกจนถึงระดับที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



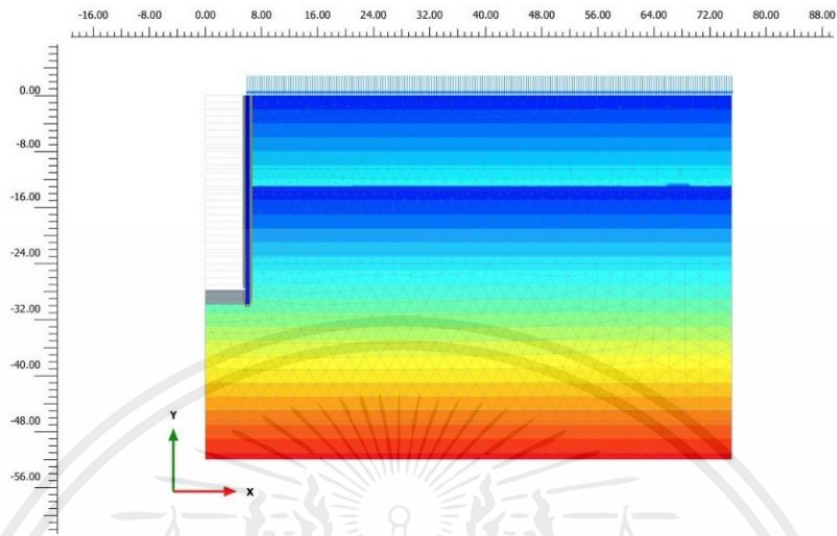
รูปที่ 3.27 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้งกำแพงและขุดดินออกจนถึงระยะที่กำหนด

6. ขั้นตอนการติดตั้ง Concrete Plug ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงถึงการติดตั้ง Concrete Plug ที่บริเวณด้านล่างที่สุดของปล่องอุโมงค์ โดยในการติดตั้งนี้จะติดตั้งใต้น้ำ ไม่จำเป็นต้องสูบน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 3.28



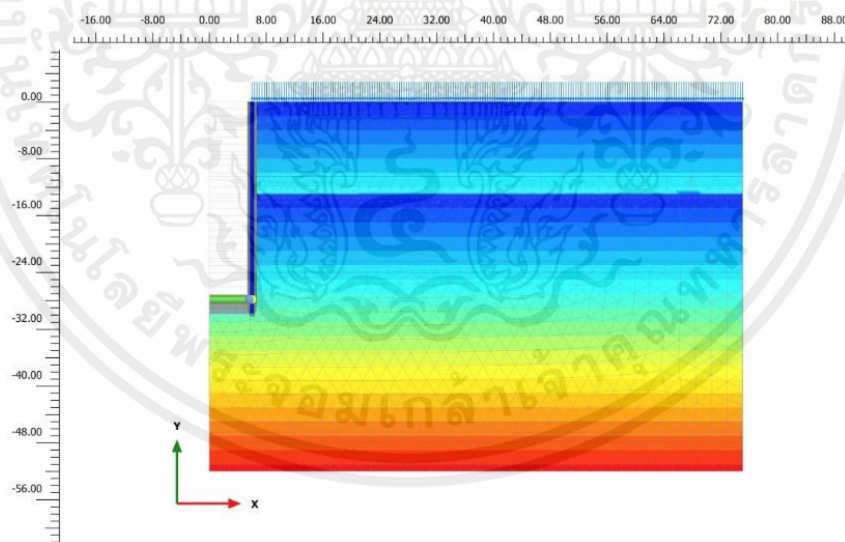
รูปที่ 3.28 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้ง Concrete Plug

7. ขั้นตอนการสูบน้ำออก (Dewatering) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงถึงการสูบน้ำในบริเวณภายใน  
ปล่องอุโมงค์ออกเพื่อเตรียมทำการติดตั้ง Base Slab ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.29



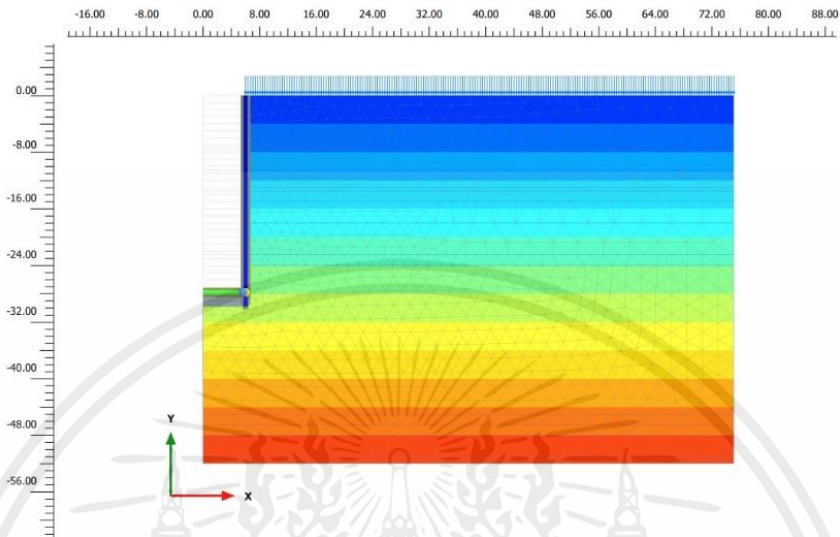
รูปที่ 3.29 รูปแสดงขั้นตอนการสูบน้ำออก (Dewatering)

8. ขั้นตอนการติดตั้ง Base Slab ซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงถึงการติดตั้ง Base Slab เอาไว้ด้านบน  
ของ Concrete Plug ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 รูปแสดงขั้นตอนการติดตั้ง Base Slab

9. ขั้นตอนการทำ Hydrostatic ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้ระดับน้ำใต้ดินภายในดินของสถานที่ก่อสร้างมาอยู่ที่ระดับผิวดิน เพื่อจำลองในสถานะที่มีน้ำอยู่เต็มชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 รูปแสดงขั้นตอนการทำ Hydrostatic

## บทที่ 4

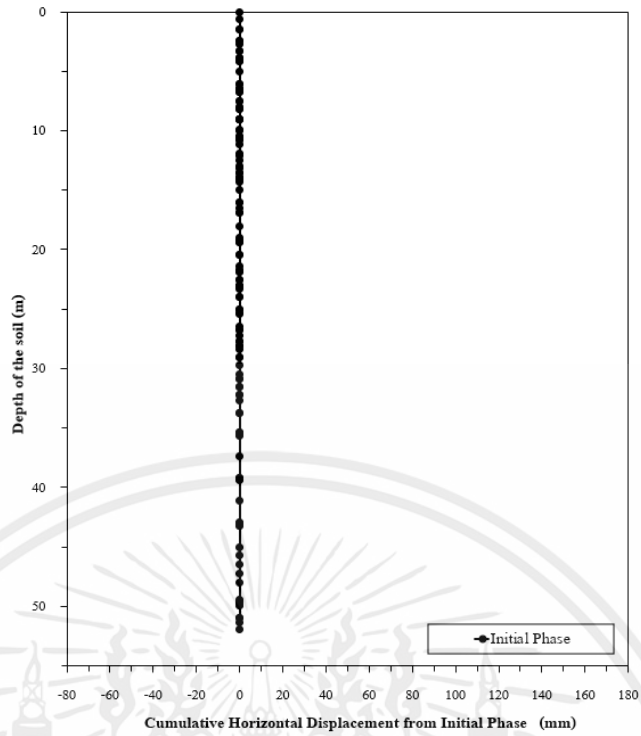
### ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method, (FEM)

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method, (FEM)

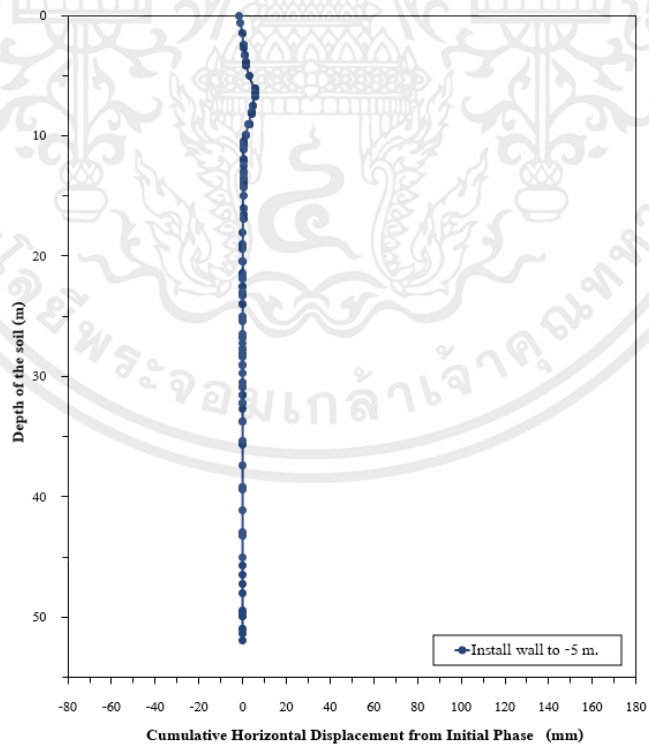
ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดิน เนื่องจากการก่อสร้างด้วยวิธีถมปล่องและที่ระดับน้ำใต้ดิน Hydrostatic ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement) ที่ 2 เมตรจากผนังของปล่องอุโมงค์ภายนอก และการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement) โดยวิธี Finite Element Method ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D จำลองรูปแบบลักษณะชั้นดินตามข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจ (Boring Log) หลุมเจาะที่ SIH 1 ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา ภายใต้แบบจำลอง Axis Symmetry โดยมีชั้นส่วนของดิน (Soil Element) เป็นรูปสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ (Node) ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะแบ่ง Phase จำนวนทั้งหมด 21 Phase อ้างอิงจากการก่อสร้างในสถานที่จริง

##### 4.1.1 การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement)

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement) ที่ 2 เมตรจากผนังของปล่องอุโมงค์ ณ ความลึกต่าง ๆ แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสะสมในแนวนอนของดินจาก Phase เริ่มต้น (Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase) กับความลึก (Depth) โดยการเคลื่อนตัวในแนวนอนของดินที่มีค่าเป็นค่าบวก แสดงว่าดินเคลื่อนตัวออกจากปล่องอุโมงค์และค่าที่เป็นลบแสดงว่าดินเคลื่อนตัวเข้าหาปล่องอุโมงค์ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

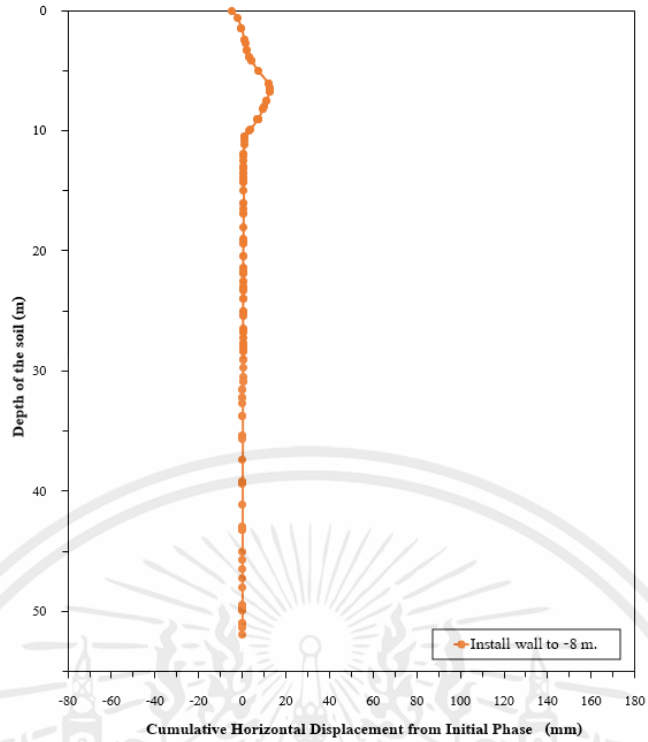


รูปที่ 4.1 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Initial

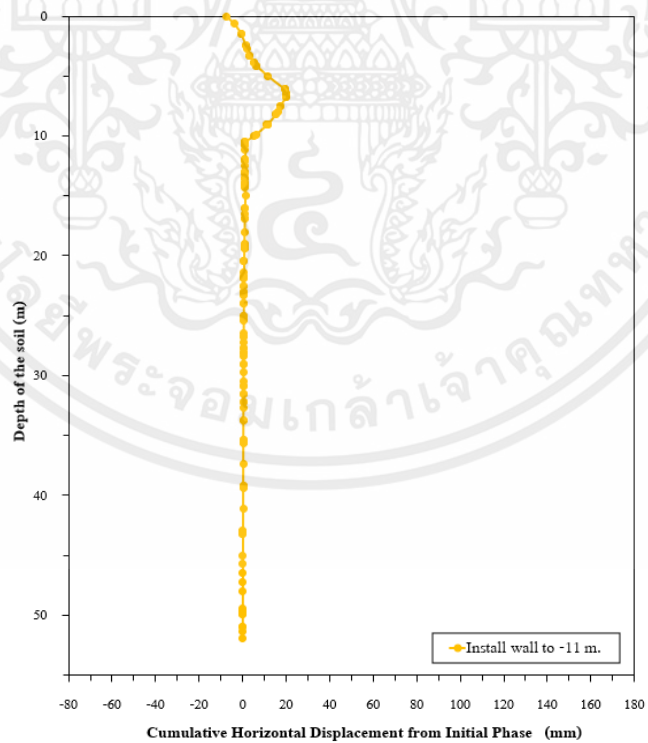


รูปที่ 4.2 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Install wall to -5 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

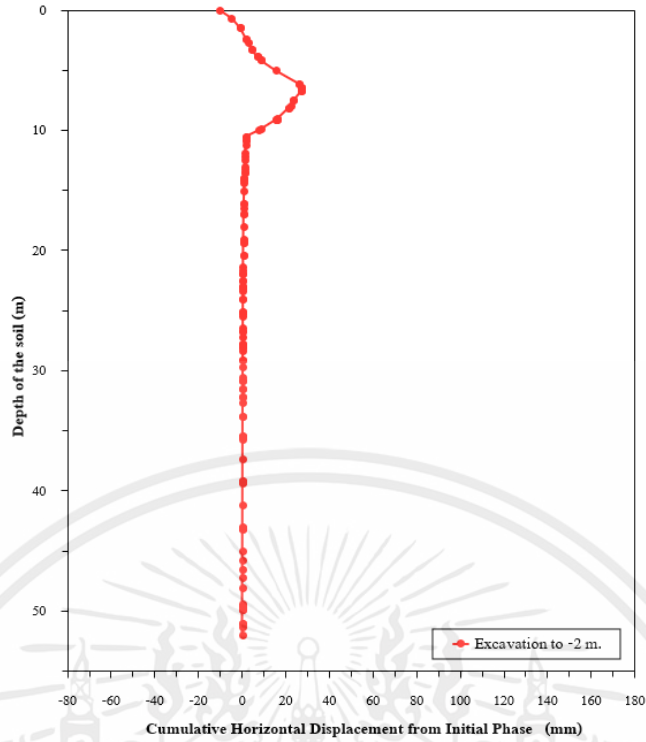


รูปที่ 4.3 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Install wall to -8 m.

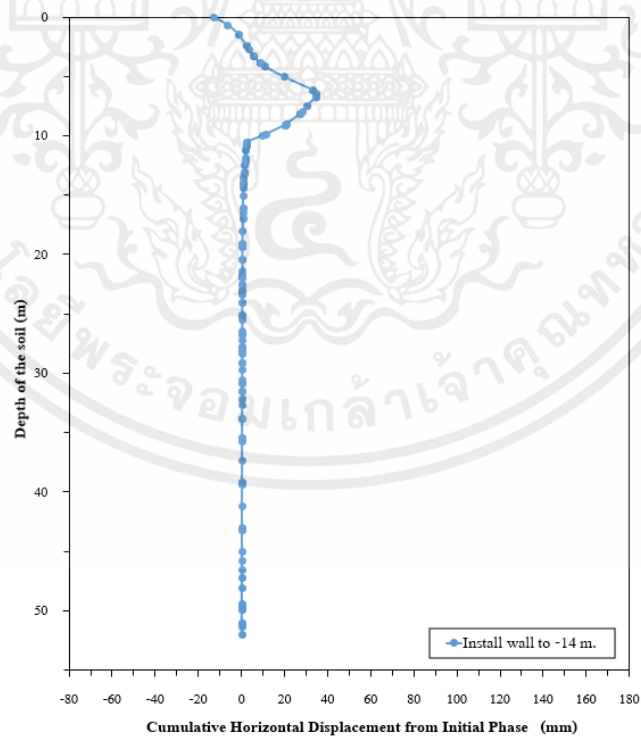


รูปที่ 4.4 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Install wall to -11 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

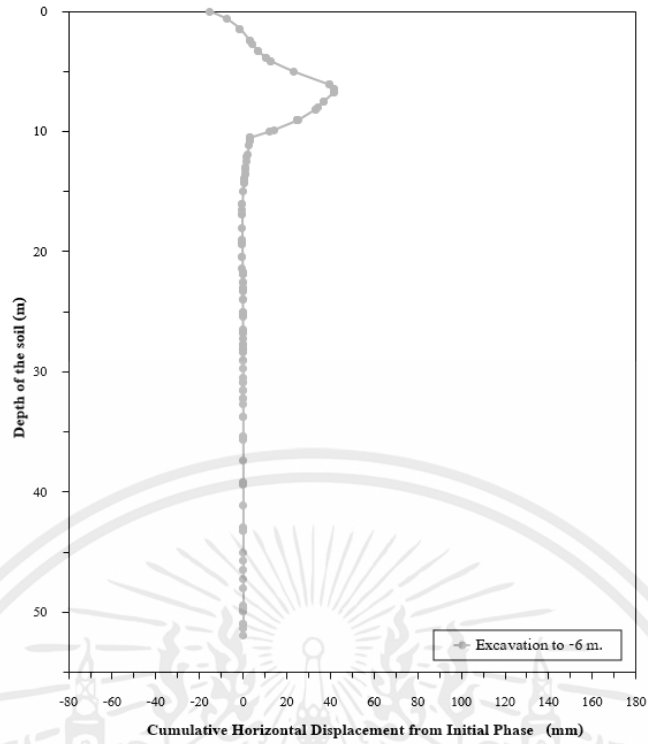


รูปที่ 4.5 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Excavation to -2 m.

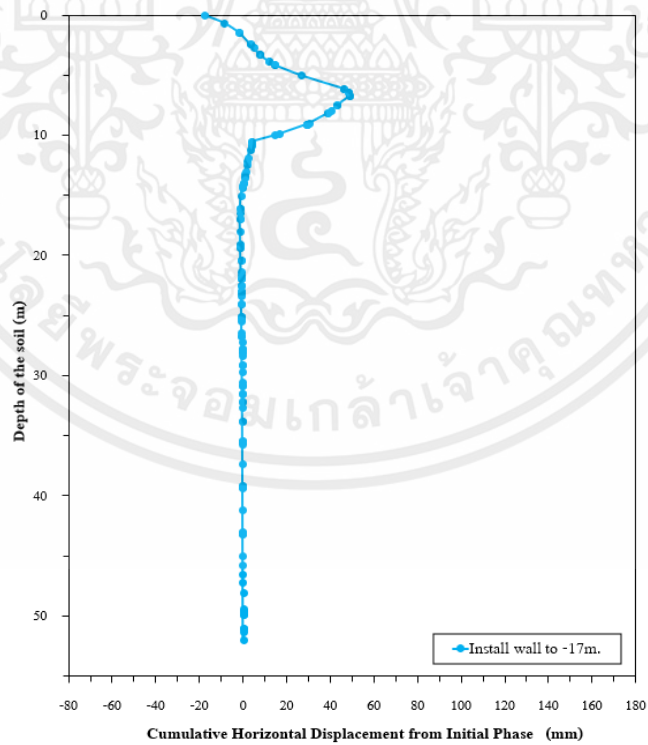


รูปที่ 4.6 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ  
ที่ Phase : Install wall to -14 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

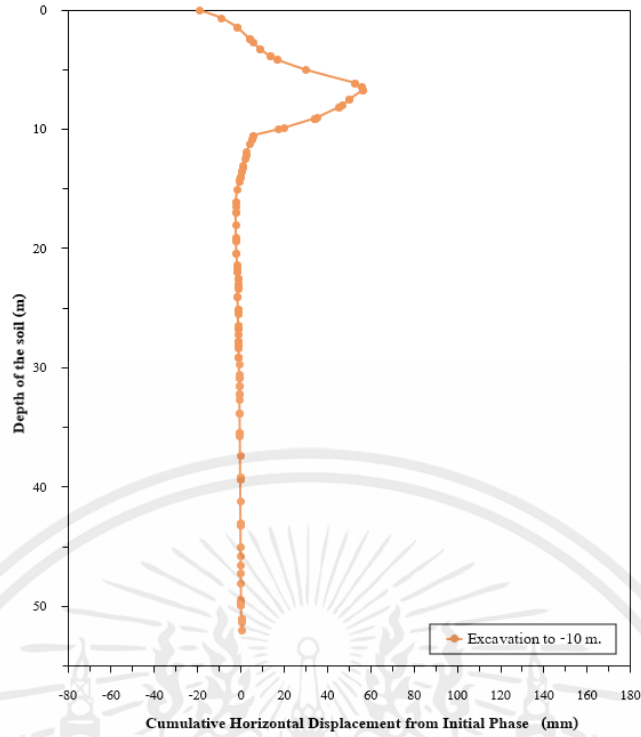


รูปที่ 4.7 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -6 m.

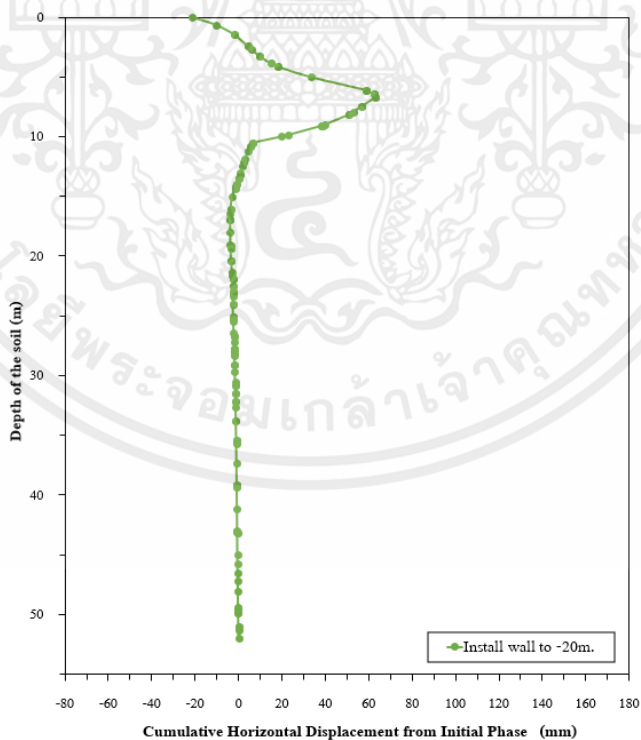


รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install wall to -17 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

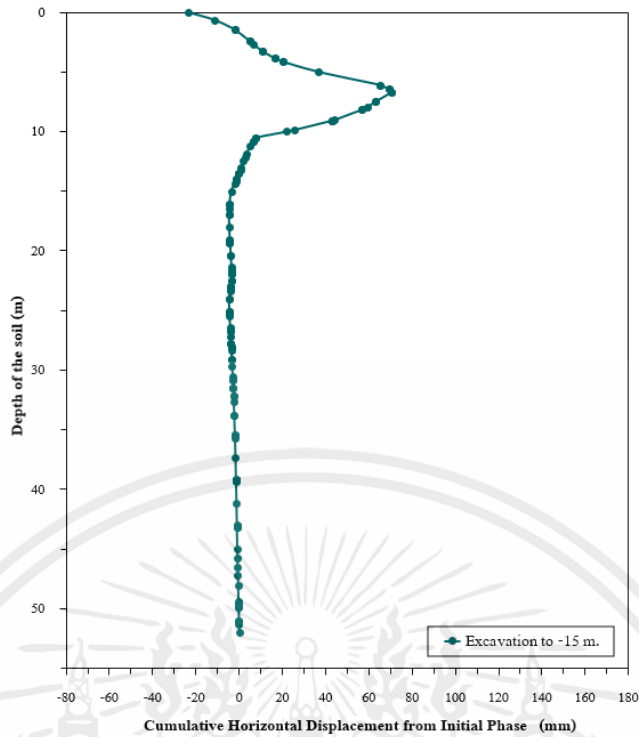


รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -10 m.

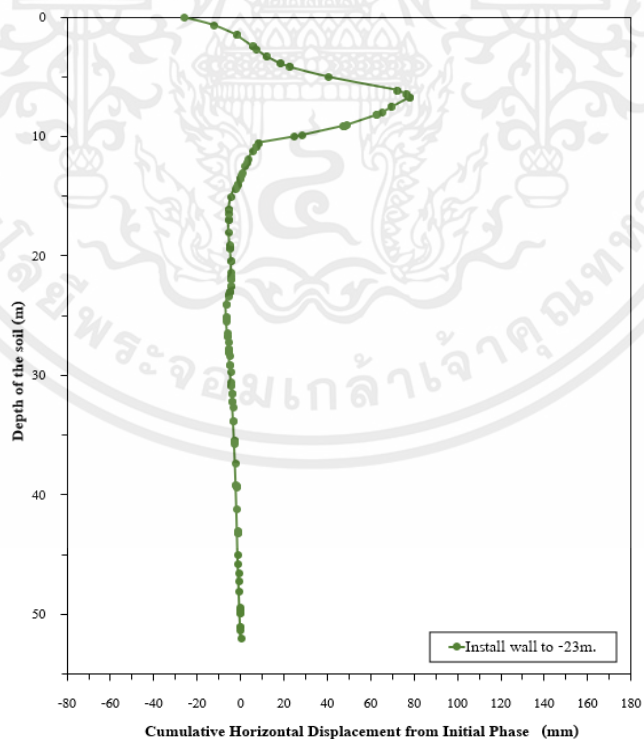


รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install wall to -20 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

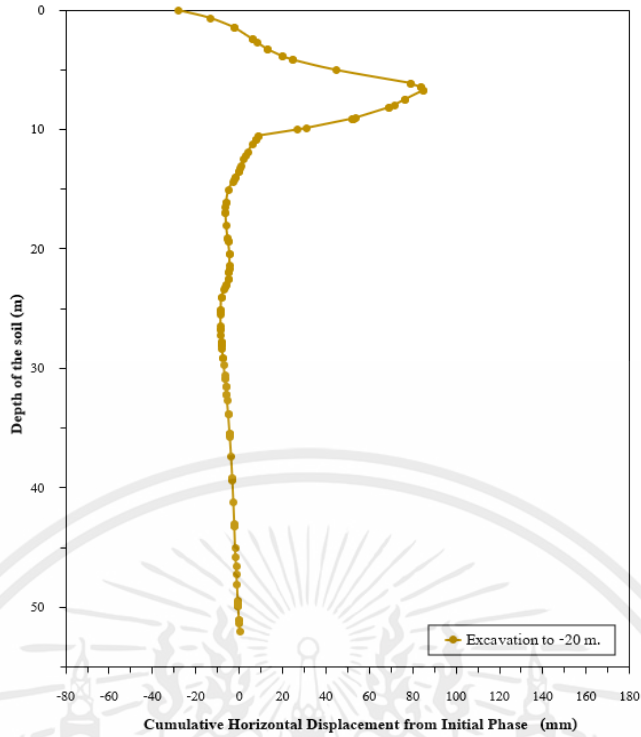


รูปที่ 4.11 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -15 m.

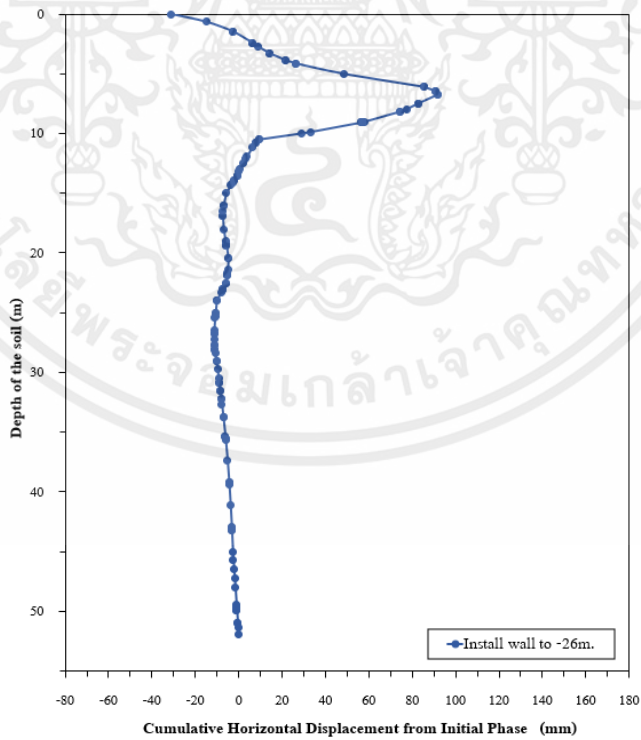


รูปที่ 4.12 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install wall to -23 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

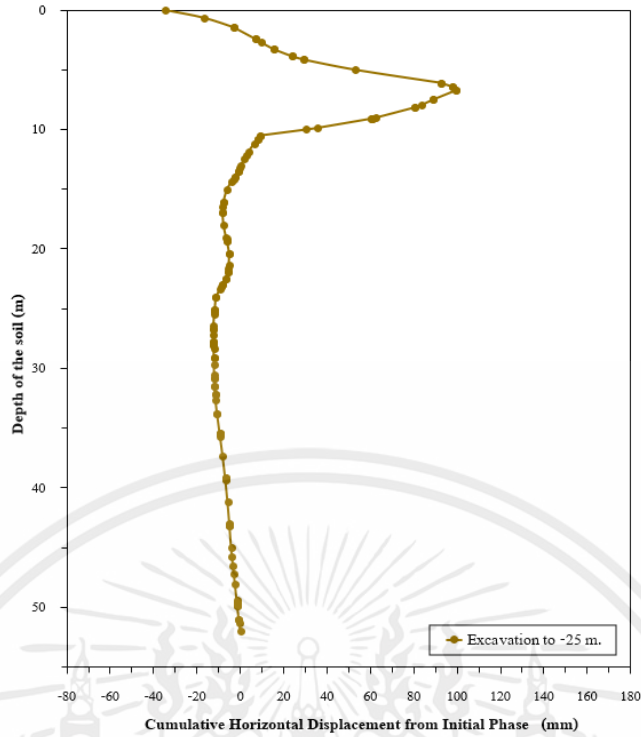


รูปที่ 4.13 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -20 m.

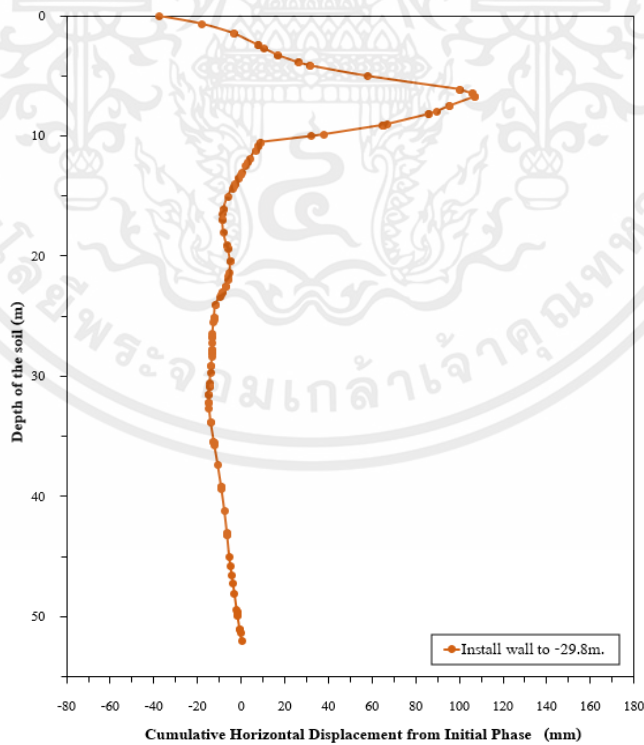


รูปที่ 4.14 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install wall to -26 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

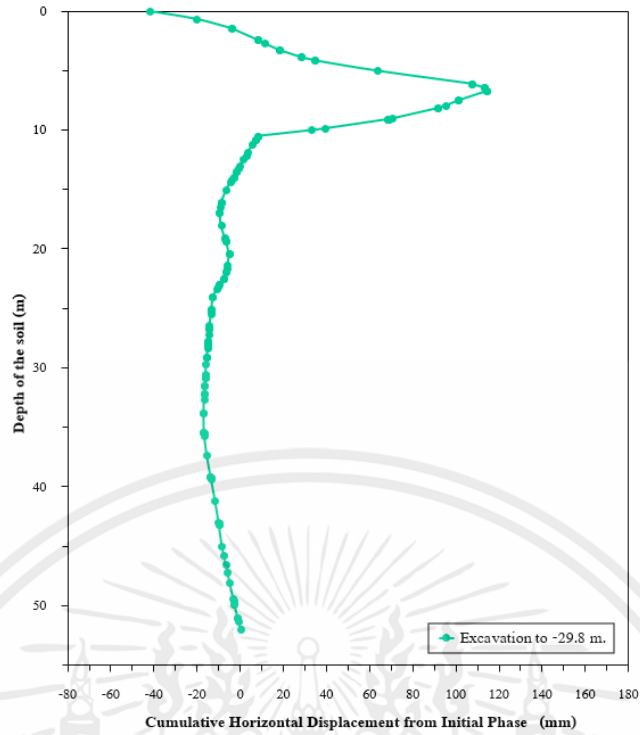


รูปที่ 4.15 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -25 m.

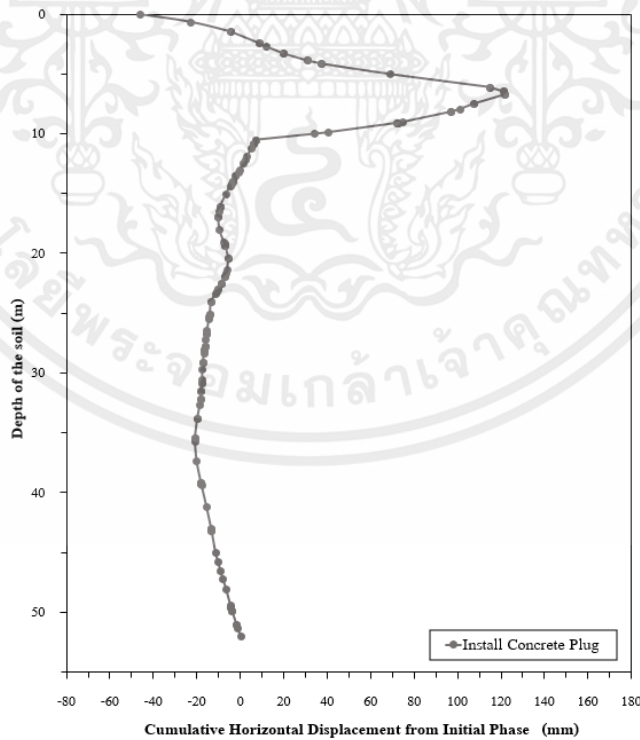


รูปที่ 4.16 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install wall to -29.8 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

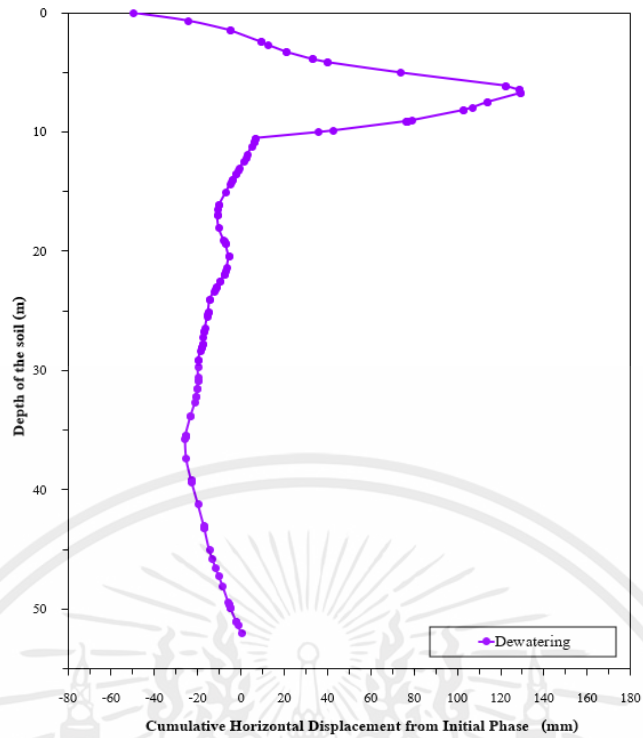


รูปที่ 4.17 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Excavation to -29.8 m.

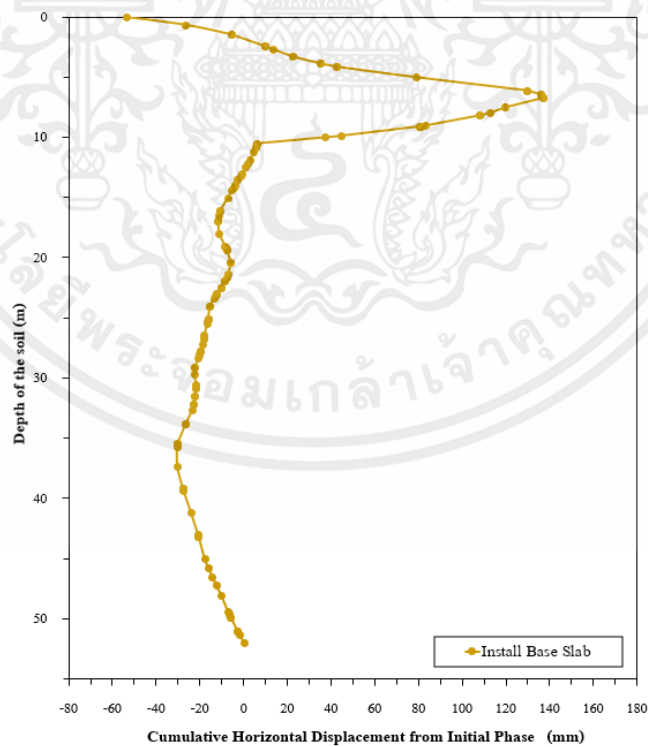


รูปที่ 4.18 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install Concrete Plug

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

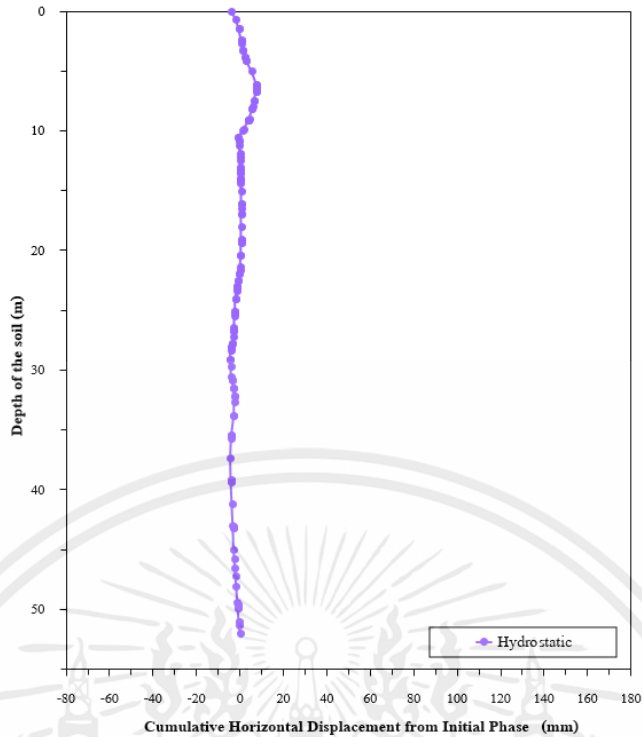


รูปที่ 4.19 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Dewatering



รูปที่ 4.20 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Install Base Slab

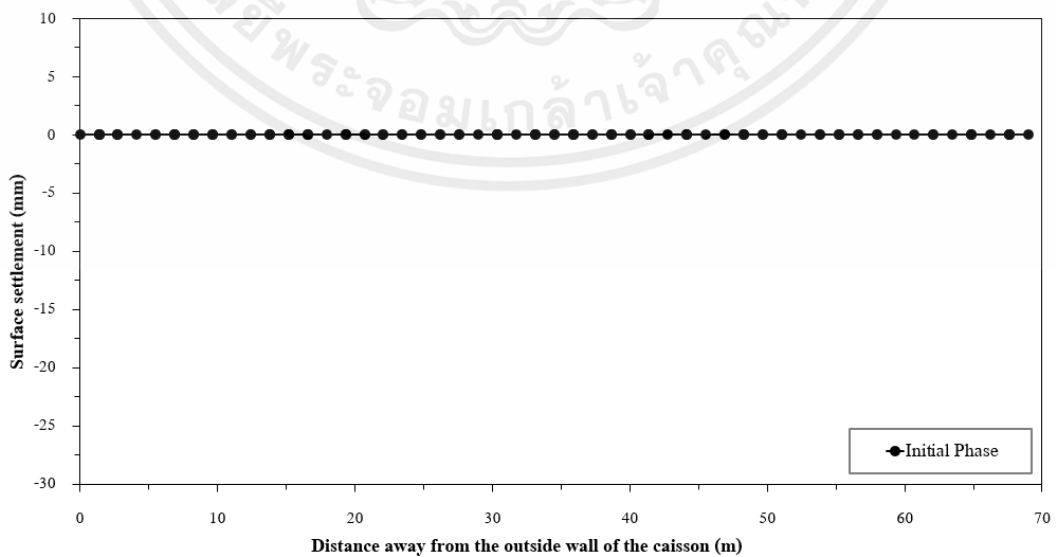
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



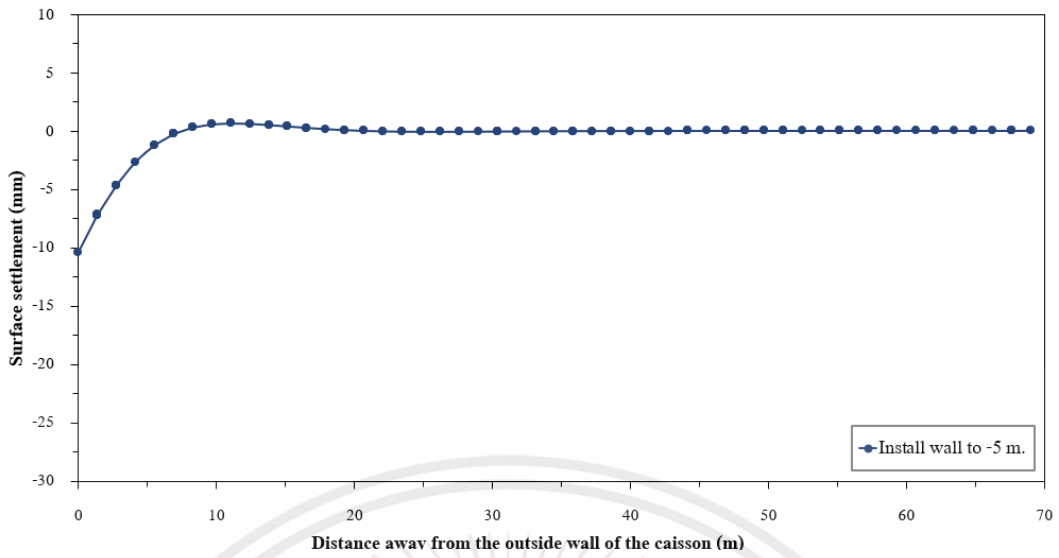
รูปที่ 4.21 กราฟแสดง Horizontal Displacement from Initial Phase ณ ความลึกต่าง ๆ ที่ Phase : Hydrostatic

#### 4.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement)

จากการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement) จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement) กับระยะห่างจากผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก (Distance away from the outside wall of the caisson) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

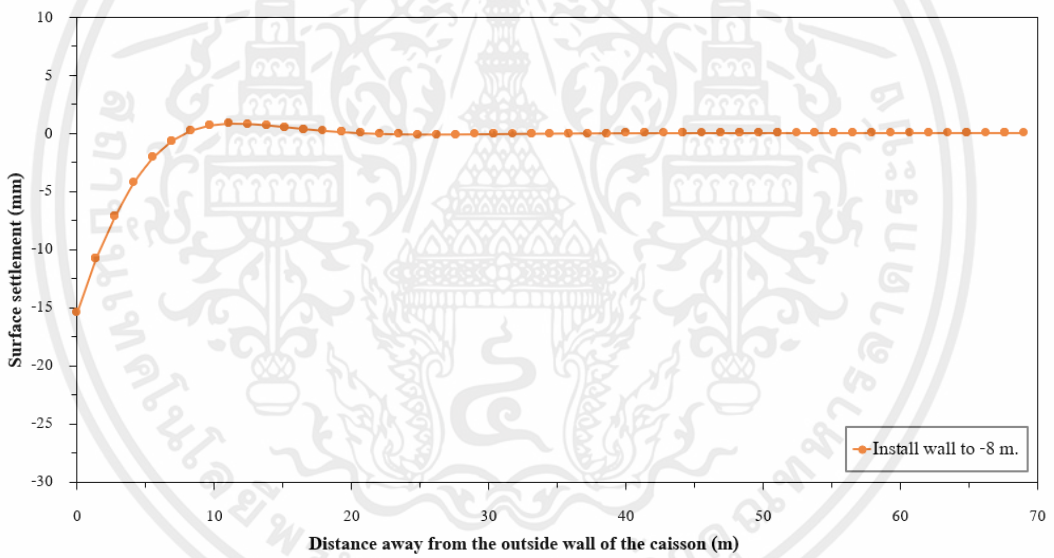


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่ Phase : Initial เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



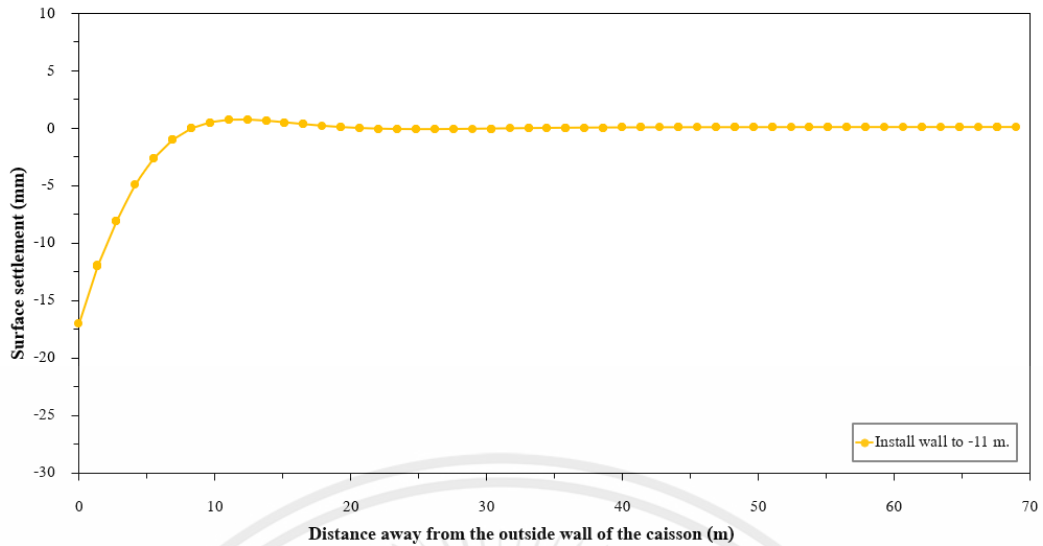
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -5 m.



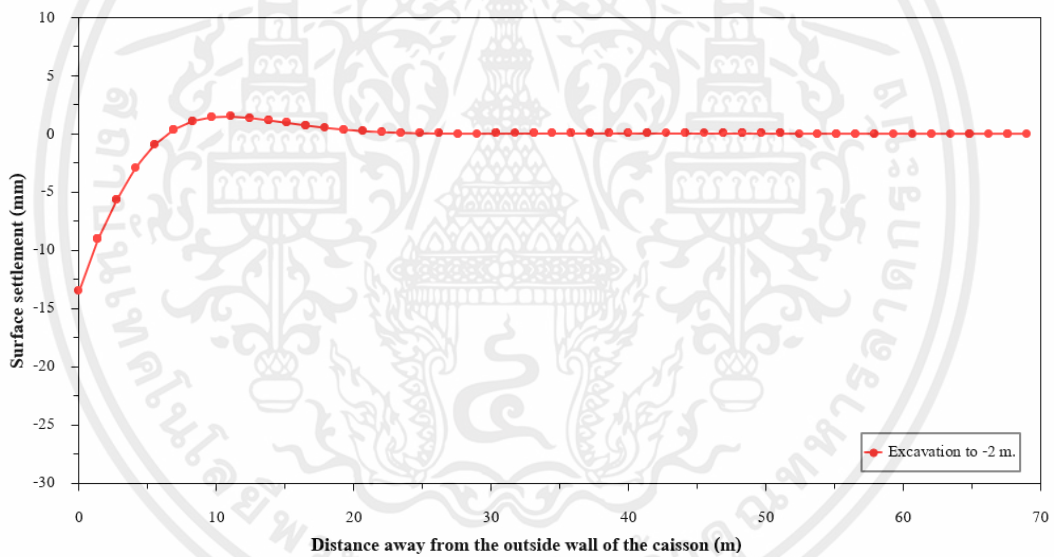
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -8 m.



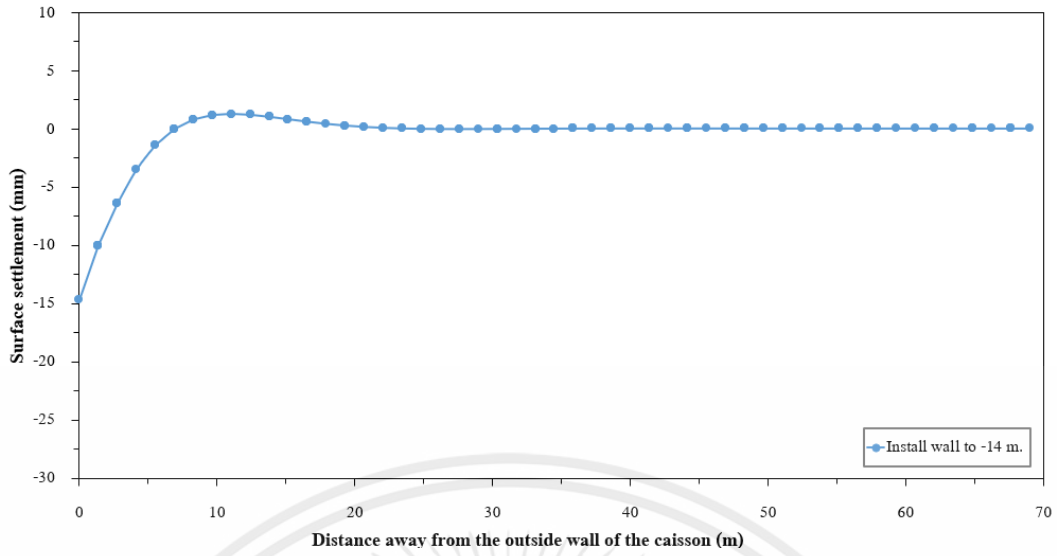
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -11 m.



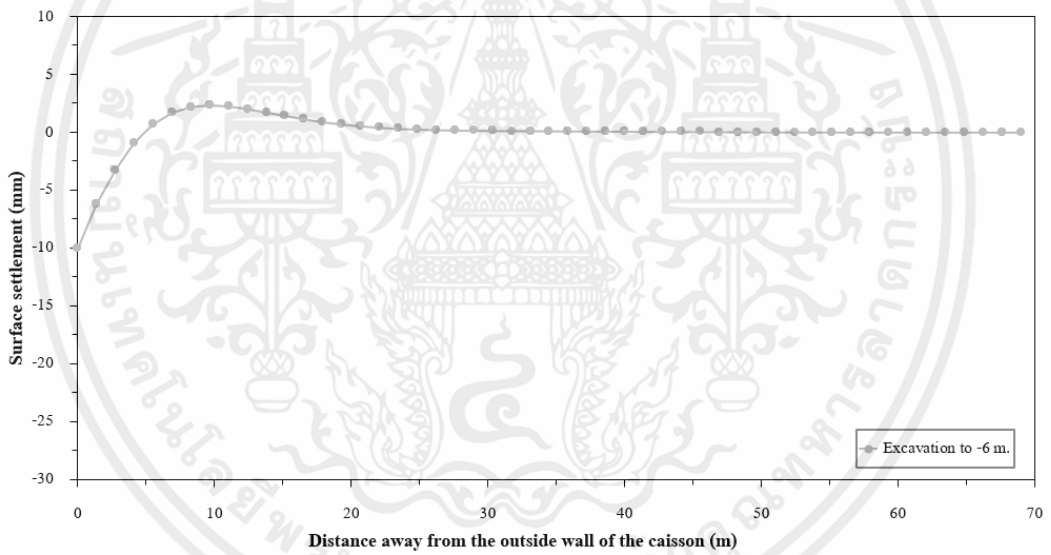
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -2 m.



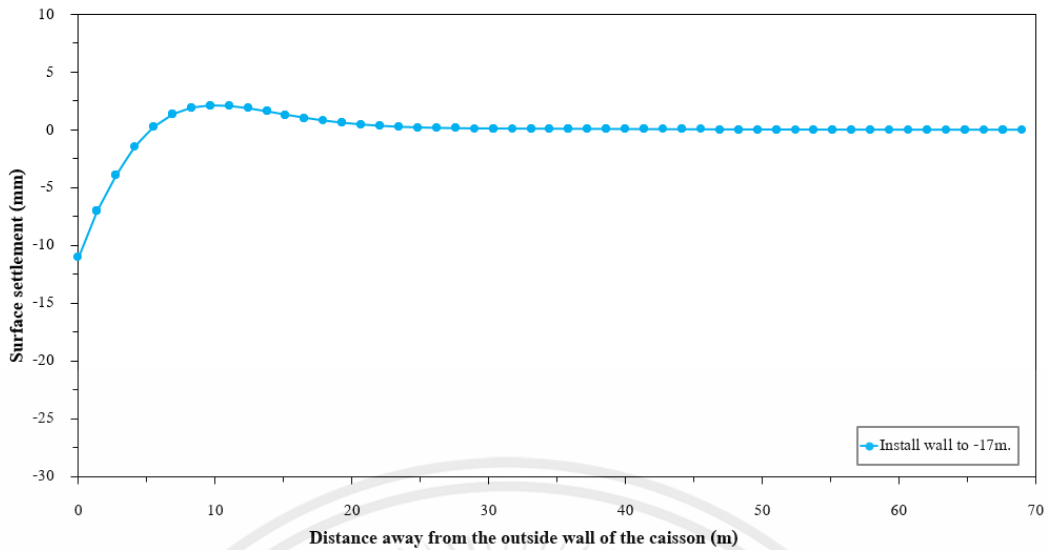
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -14 m.



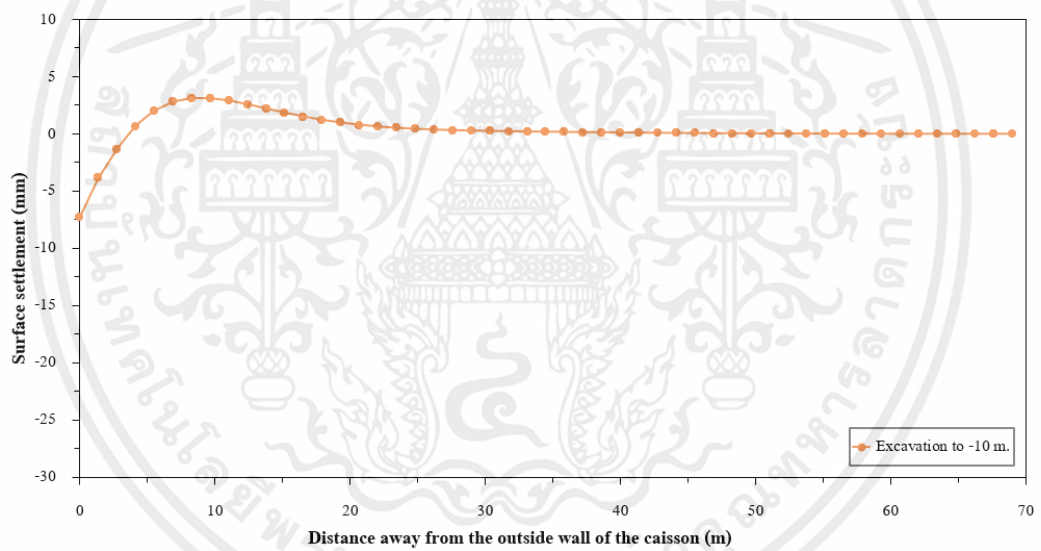
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -6 m.



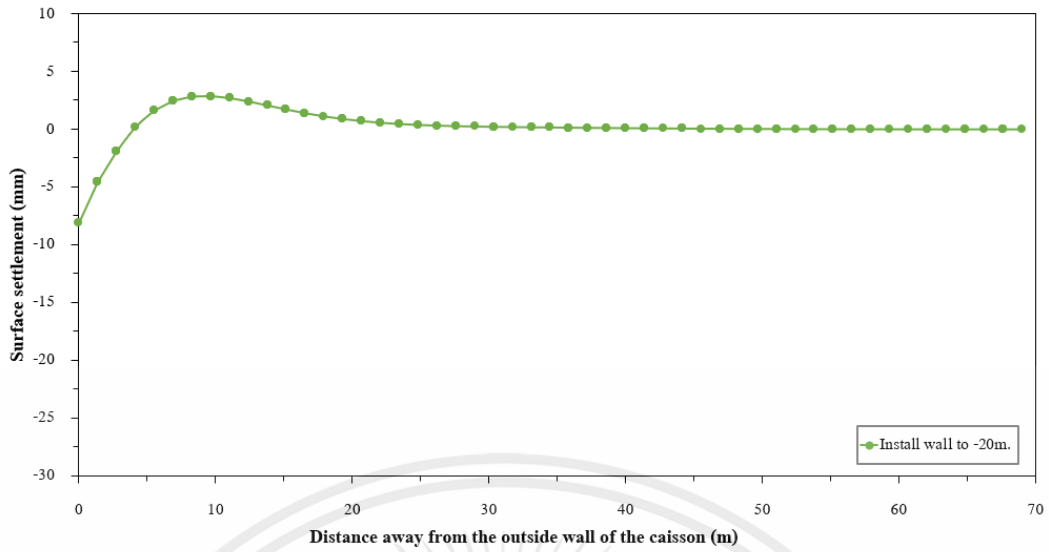
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -17 m.



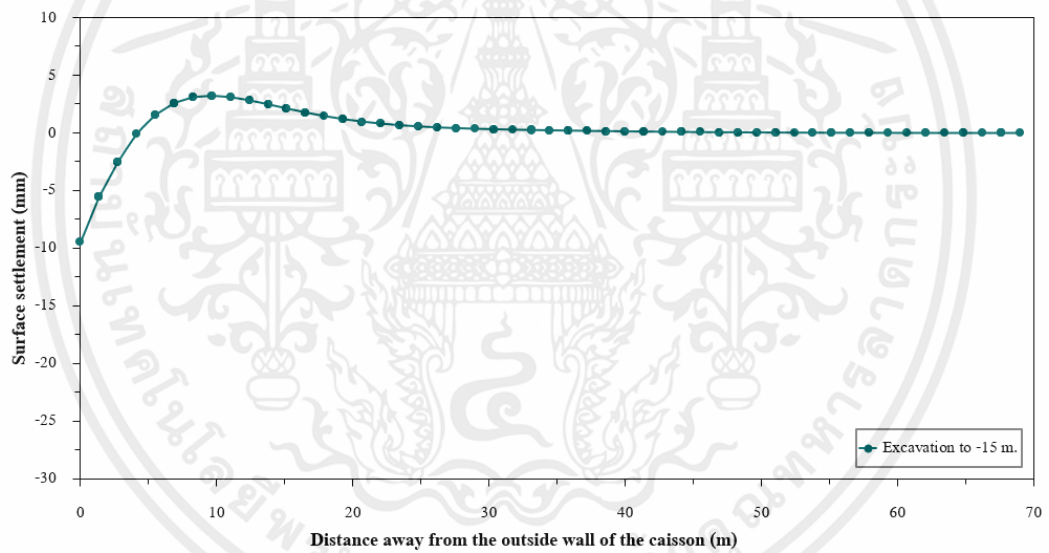
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -10 m.



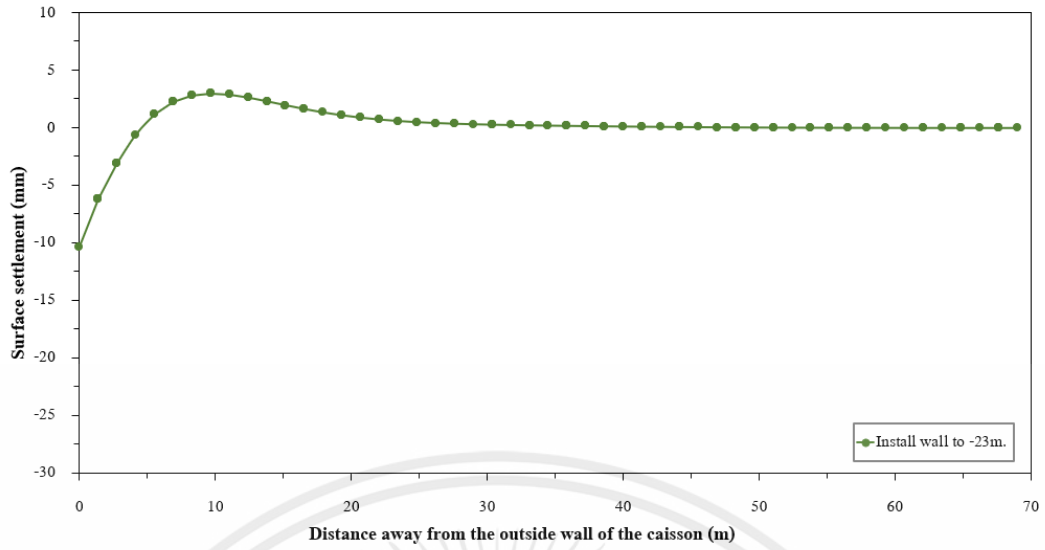
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -20 m.



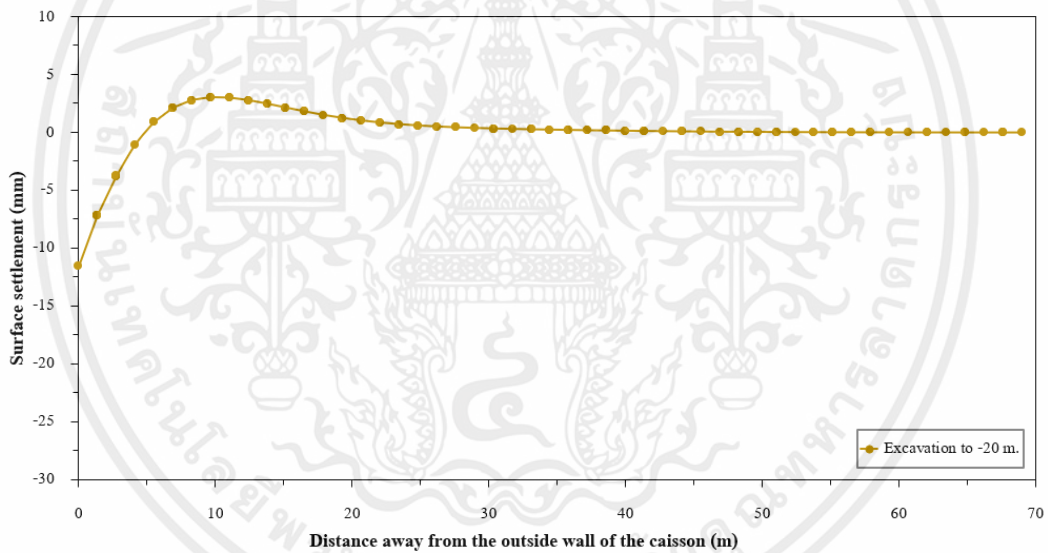
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -15 m.



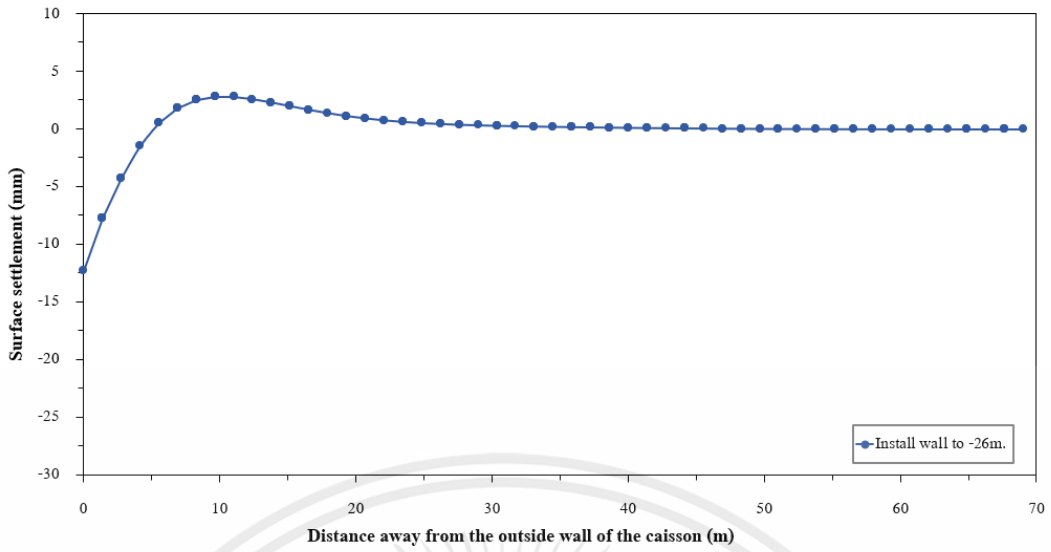
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -23 m.



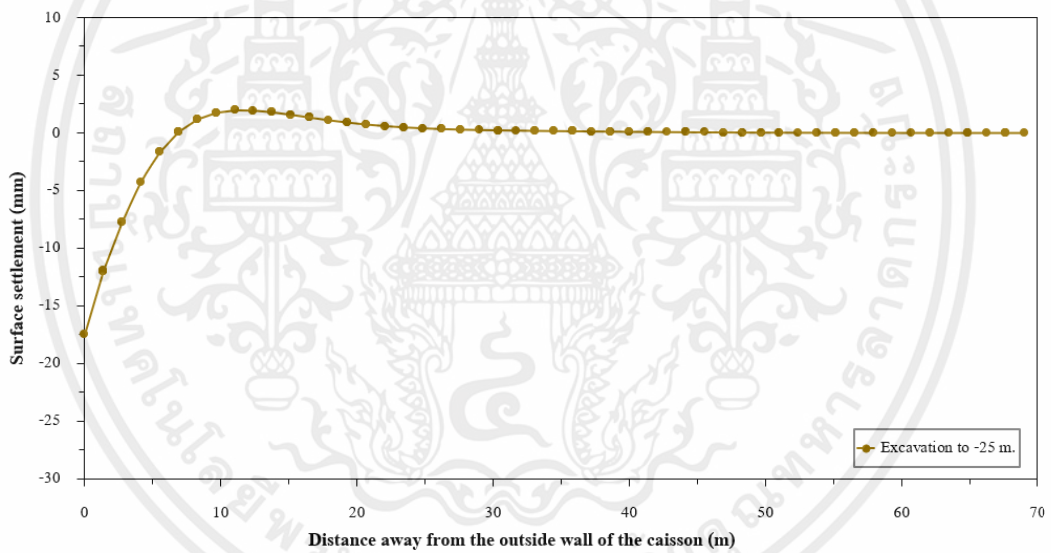
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -20 m.



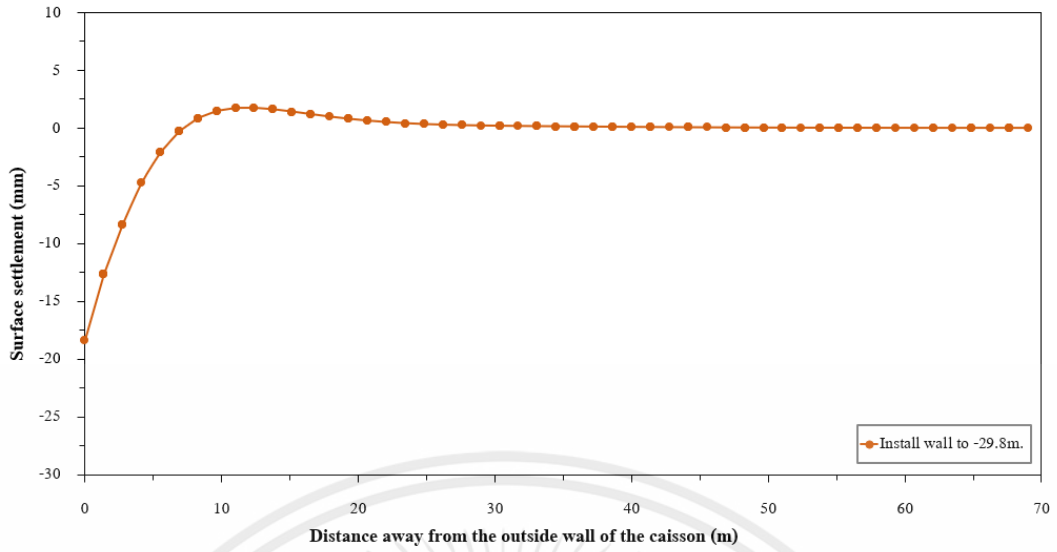
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -26 m.



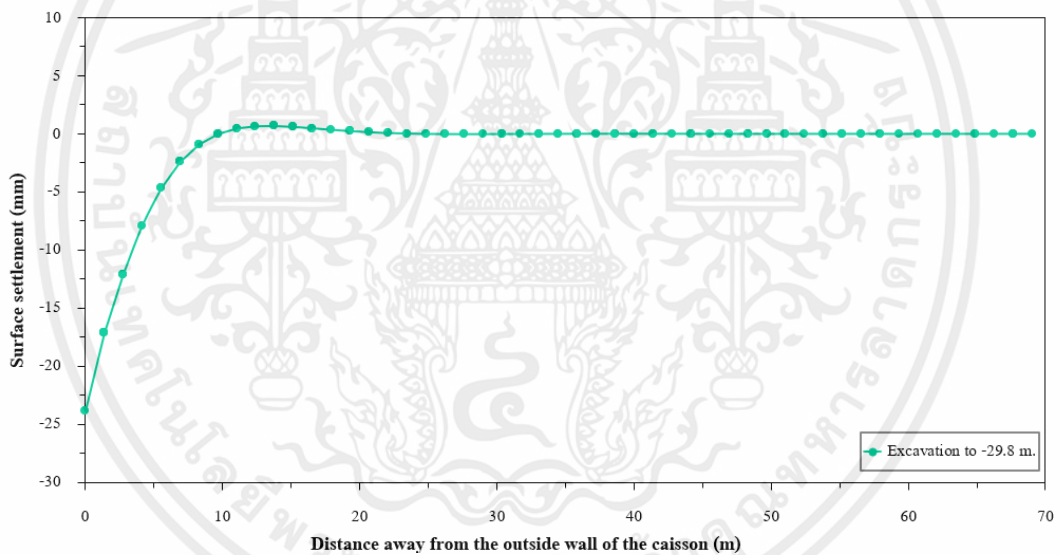
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับ ระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -25 m.



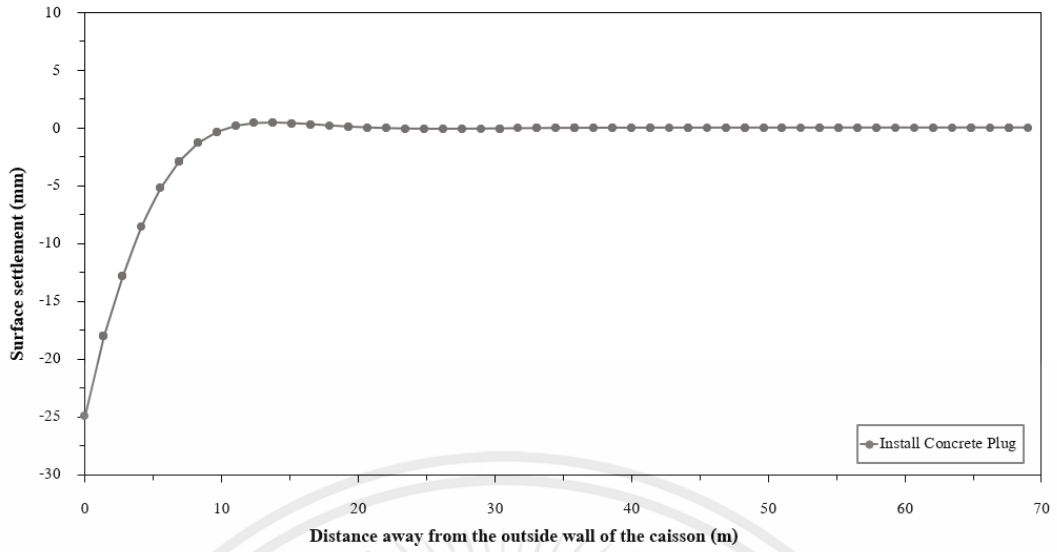
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install wall to -29.8 m.



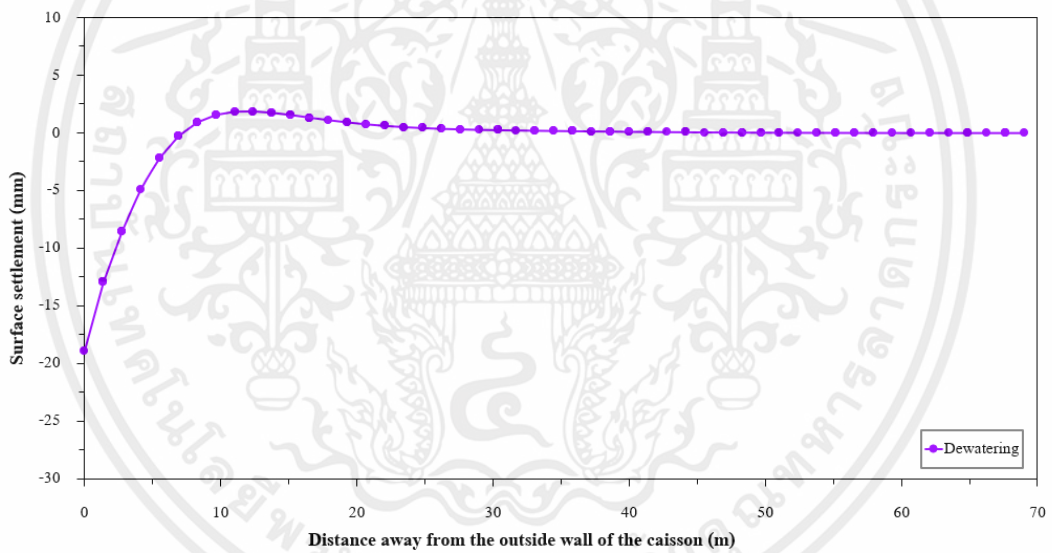
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Excavation to -29.8 m.

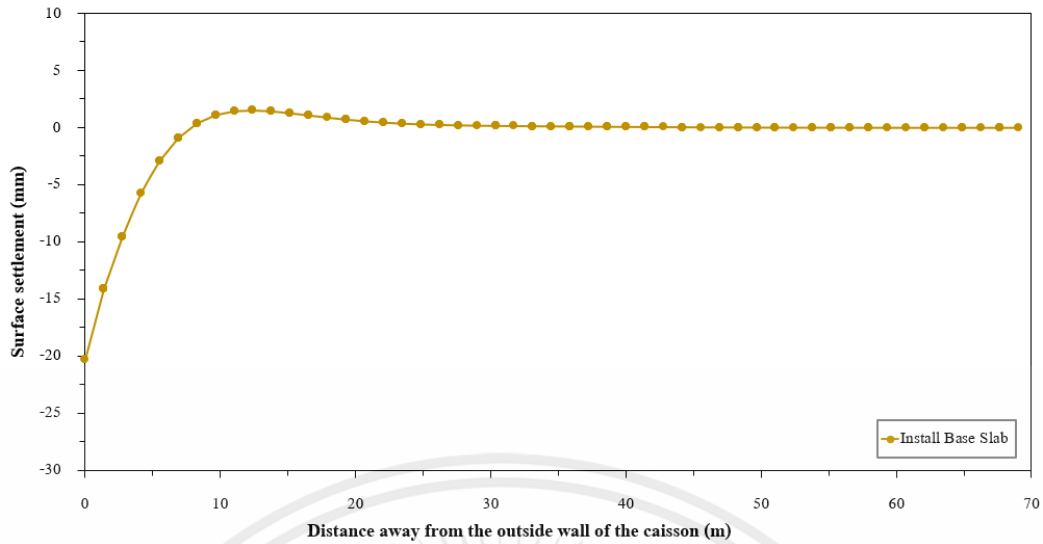


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install Concrete Plug

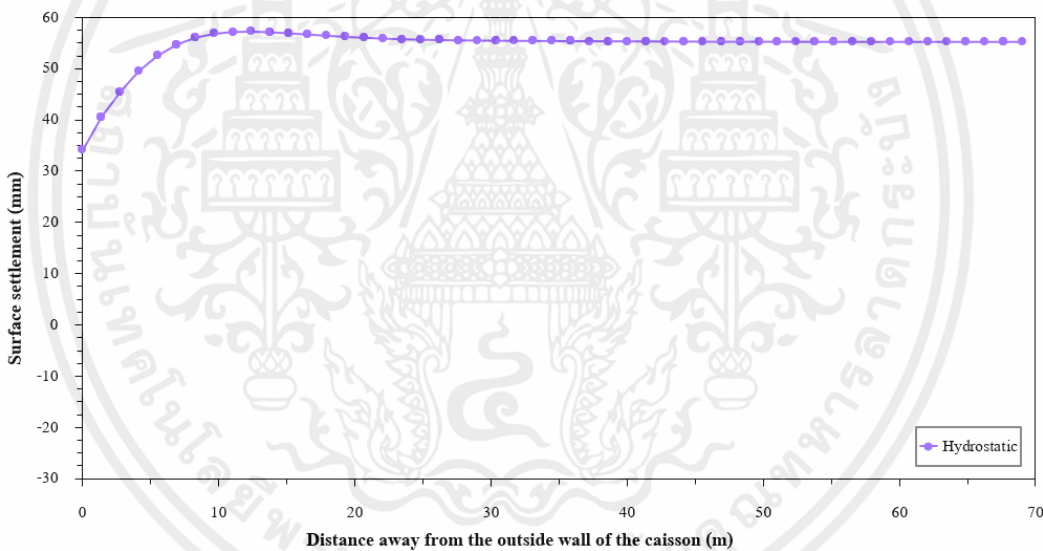


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่ Phase : Dewatering



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่

Phase : Install Base Slab



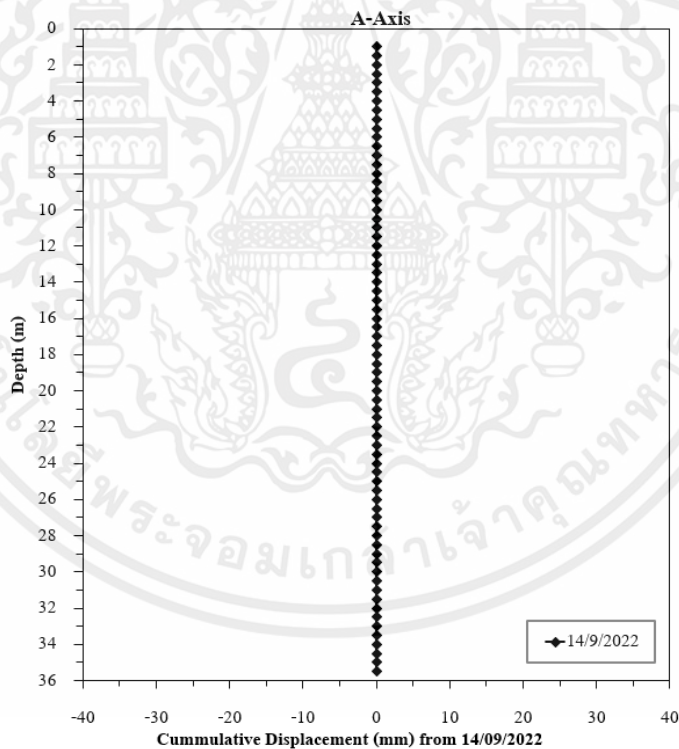
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอกที่ Phase : Hydrostatic

## 4.2 ข้อมูลในสนาม

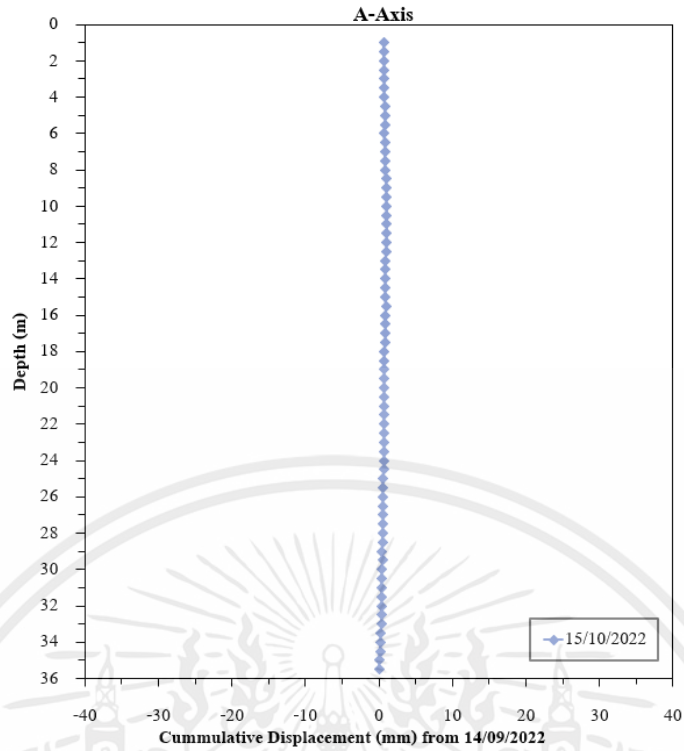
ในการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของดินขณะจมปล่องอุโมงค์ที่นำมาพิจารณา บริเวณสถานีสูบน้ำโดยมีเครื่องมือการตรวจวัด ดังนี้

#### 4.2.1 Inclinator

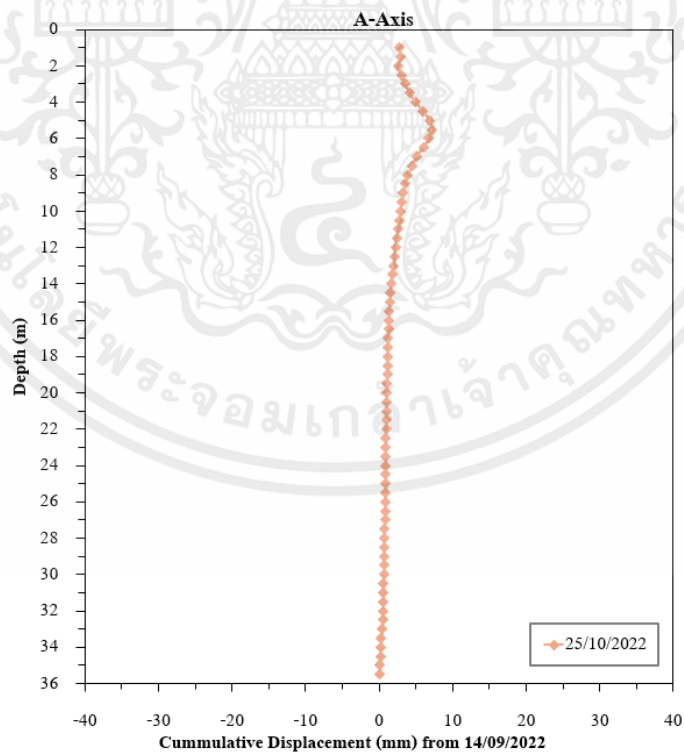
Inclinometer combine with magnetic extensometer (IE) โดยตำแหน่งติดตั้งจะติดตั้งห่างจากขอบด้านนอกของปล่องอุโมงค์ประมาณ 2.00 เมตร จำนวน 1 จุด แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสะสมในแนวนอนของดินจากวันที่ 14/09/2022 (Cumulative Horizontal Displacement from 14/09/2022) กับความลึก (Depth) ความลึกการตรวจวัดทั้งหมดเท่ากับ 35.50 เมตร ในการพิจารณาจะพิจารณาเฉพาะแกน A (A-Axis) หรือแกนที่ตั้งฉากกับปล่องอุโมงค์ โดยการเคลื่อนตัวในแนวนอนของดินที่มีค่าเป็นค่าบวก แสดงว่าดินเคลื่อนตัวออกจากปล่องอุโมงค์และค่าที่เป็นลบแสดงว่าดินเคลื่อนตัวเข้าหาปล่องอุโมงค์ เนื่องจากผลการตรวจวัดในสนามหลังวันที่ 27/01/2023 จะได้รับผลกระทบจากการทำ Trial Jet Grouting ซึ่งอยู่ห่างจากเครื่องมือการตรวจวัดเป็นระยะ 2.25 เมตร หรือห่างจากปล่องอุโมงค์เป็นระยะ 4.25 เมตร ทำให้ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินในสนามที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งจากข้อมูลการตรวจวัดในสนามมีการตรวจวัดที่นำมาพิจารณาทั้งหมด 8 ครั้ง ดังนี้



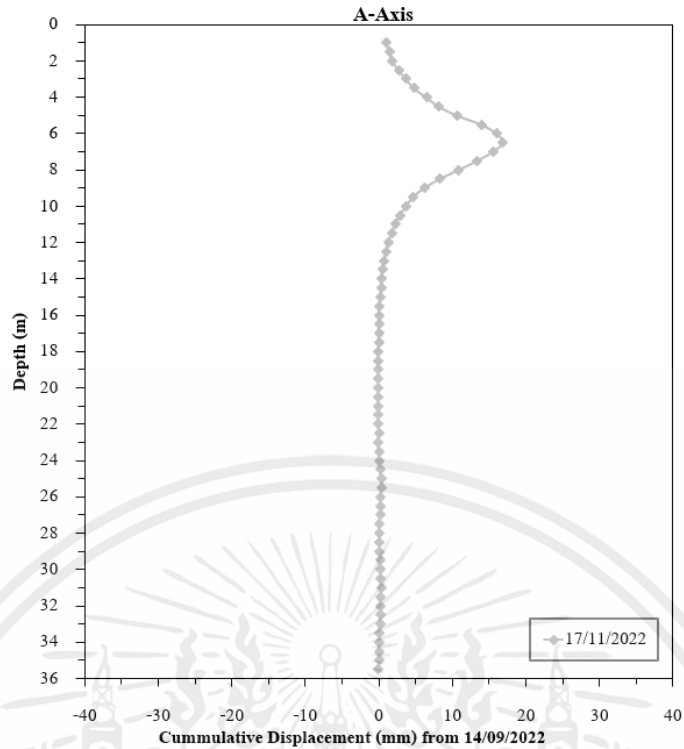
รูปที่ 4.43 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 14/09/2022 (Initial Data)



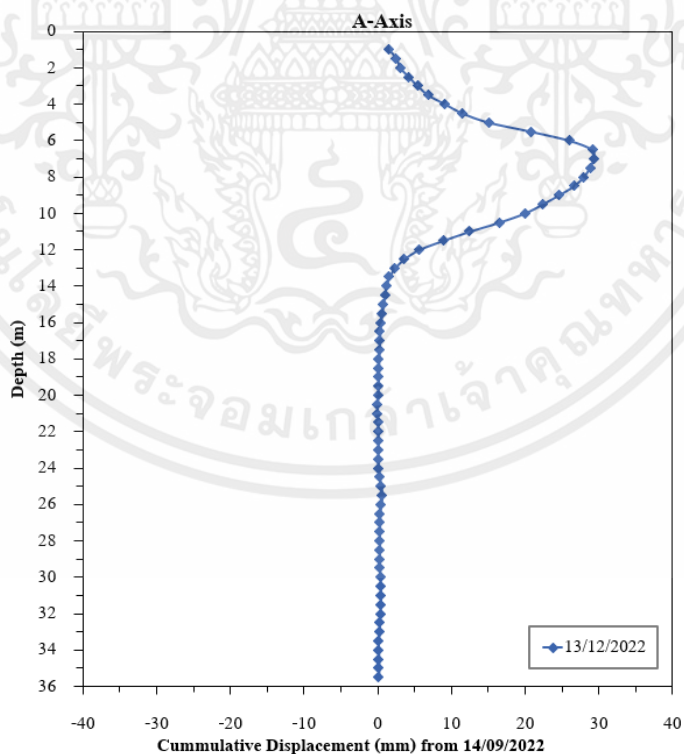
รูปที่ 4.44 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 15/09/2022



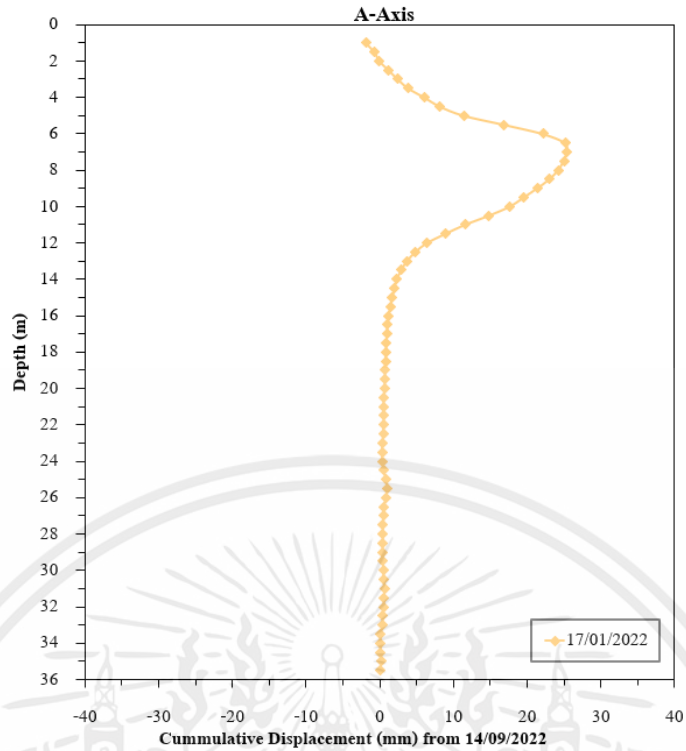
รูปที่ 4.45 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 25/09/2022 (Install wall to -5 m.)



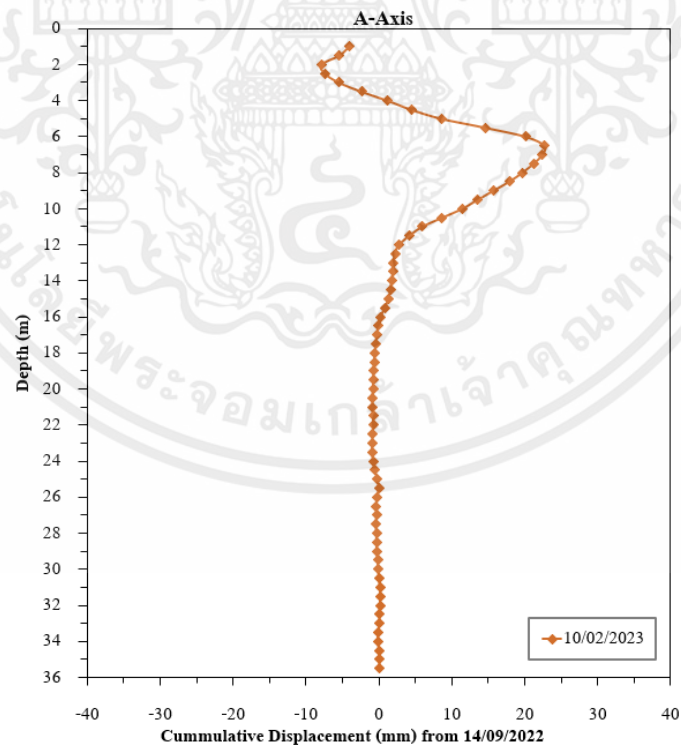
รูปที่ 4.46 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 17/11/2022 (Install wall to -8 m.)



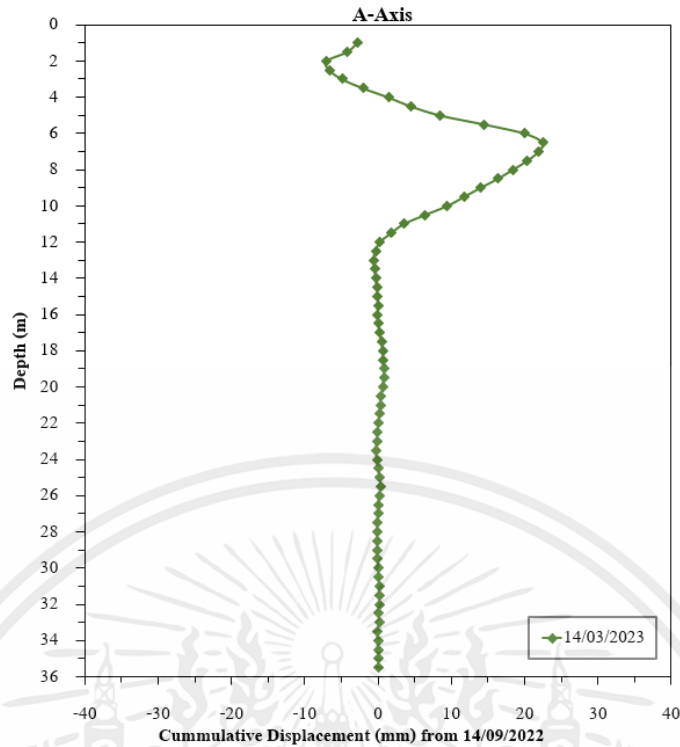
รูปที่ 4.47 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 13/12/2022 (Excavation to -2 m.)



รูปที่ 4.48 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 17/01/2023 (Excavation to -6 m.)



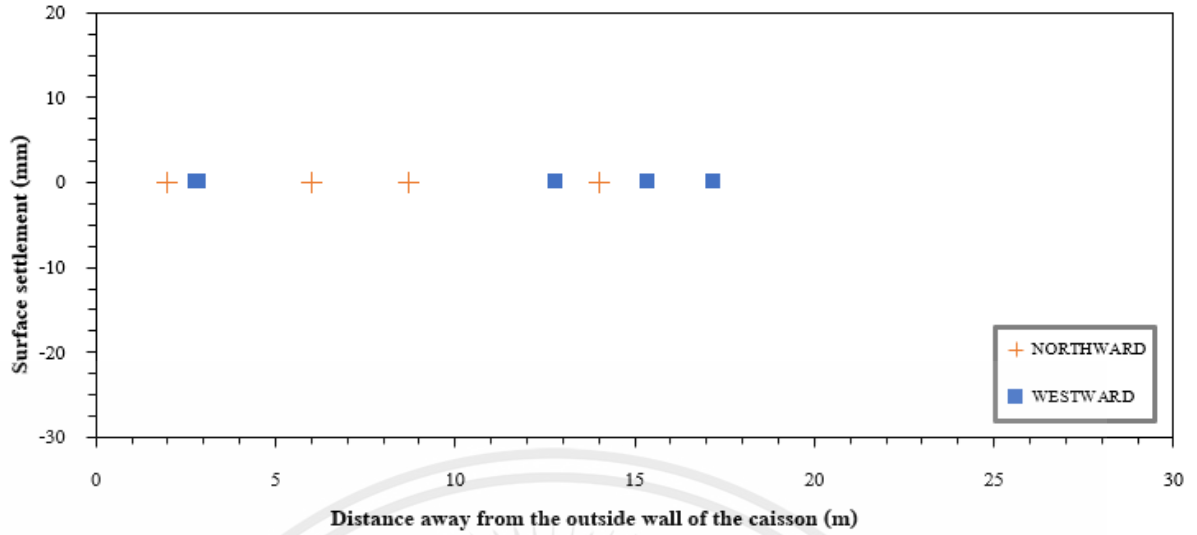
รูปที่ 4.49 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 10/02/2023 (Excavation to -10 m.)



รูปที่ 4.50 กราฟแสดง Cumulative Horizontal Displacement จากวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ ตรวจวัดวันที่ 14/03/2023 (Install wall to -20 m.)

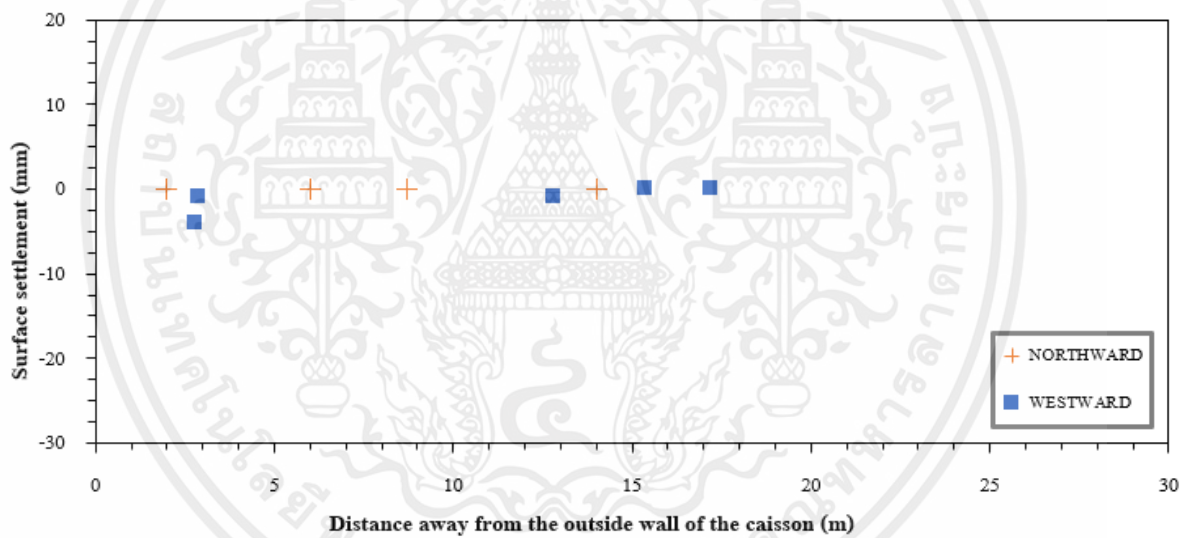
#### 4.2.2 Settlement Point-Ground

Settlement Point-Ground (SS) ติดตั้งบริเวณรอบ ๆ ปล่องอุโมงค์ จำนวน 10 จุด เพื่อวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement) จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement) กับระยะห่างจากผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก (Distance away from the outside wall of the caisson) โดยแบ่งการตรวจวัดเป็น 2 ทิศทางประกอบด้วยทิศเหนือของปล่องอุโมงค์ (Northward) จำนวน 5 ตัว และทิศตะวันตกของปล่องอุโมงค์ (Westward) จำนวน 5 ตัว เนื่องจากผลการตรวจวัดในสนามหลังวันที่ 27/01/2023 จะได้รับผลกระทบจากการทำ Trial Jet Grouting ซึ่งอยู่ห่างจากเครื่องมือการตรวจวัดเป็นระยะ 2.25 เมตร หรือห่างจากปล่องอุโมงค์เป็นระยะ 4.25 เมตร ทำให้ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินในสนามมีค่าการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากข้อมูลการตรวจวัดในสนามที่นำมาพิจารณาทั้งหมด 10 ครั้ง ดังนี้



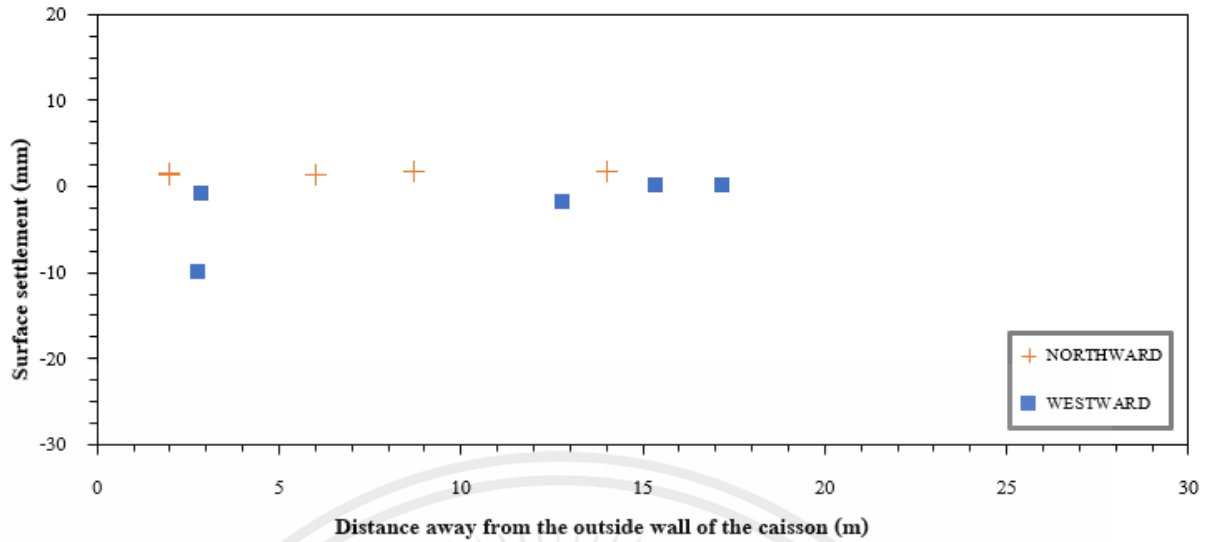
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 18/10/2022 (Initial Data)



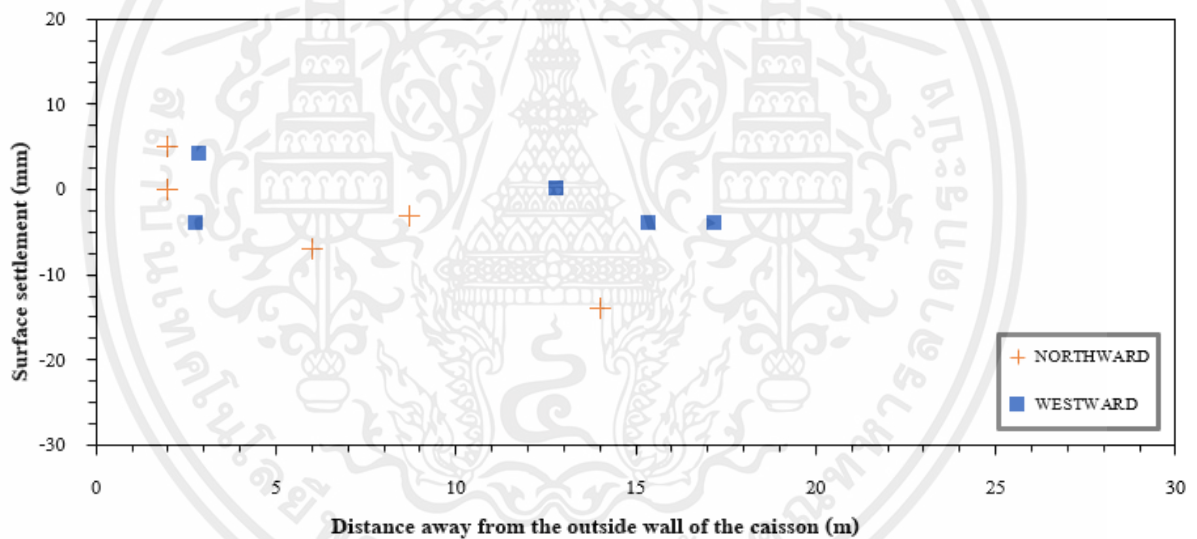
รูปที่ 4.52 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 23/10/2022 (Install wall to -5 m.)



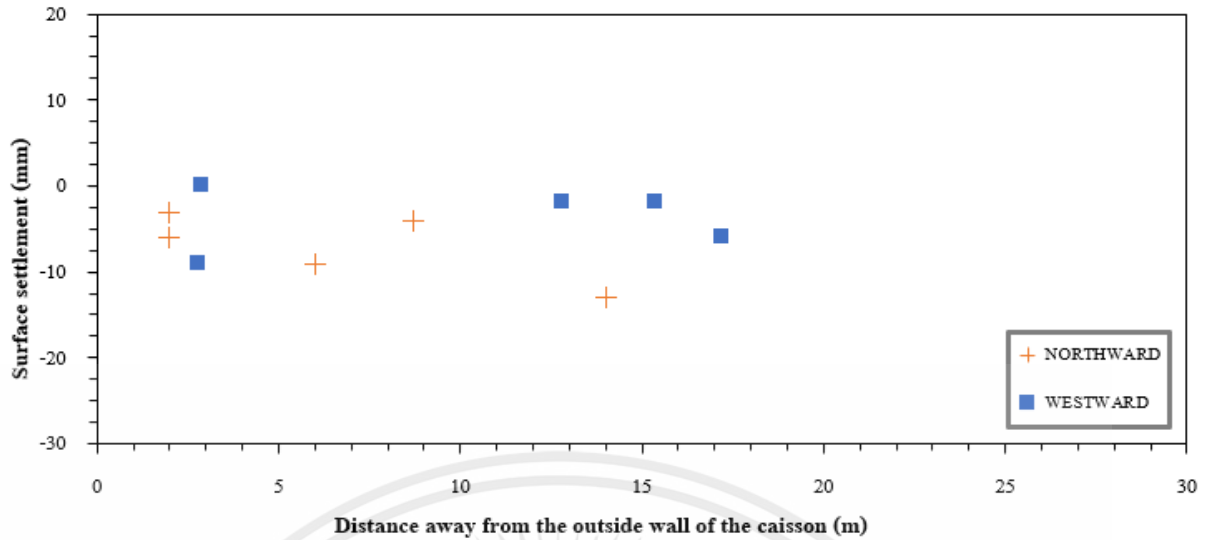
รูปที่ 4.53 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 17/11/2022 (Install wall to -8 m.)



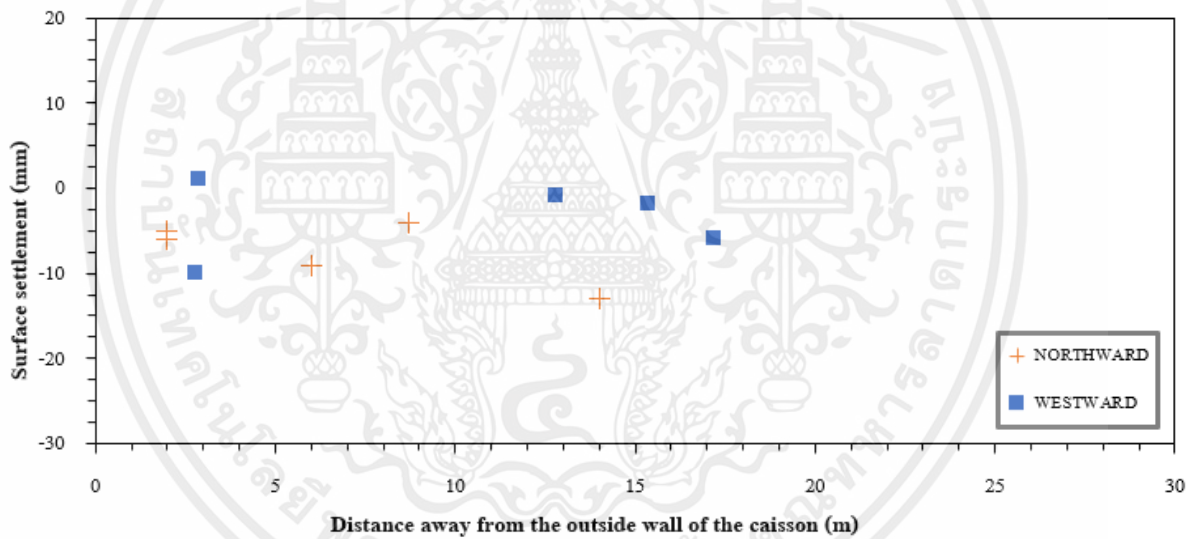
รูปที่ 4.54 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 16/12/2022 (Excavation to -2 m.)



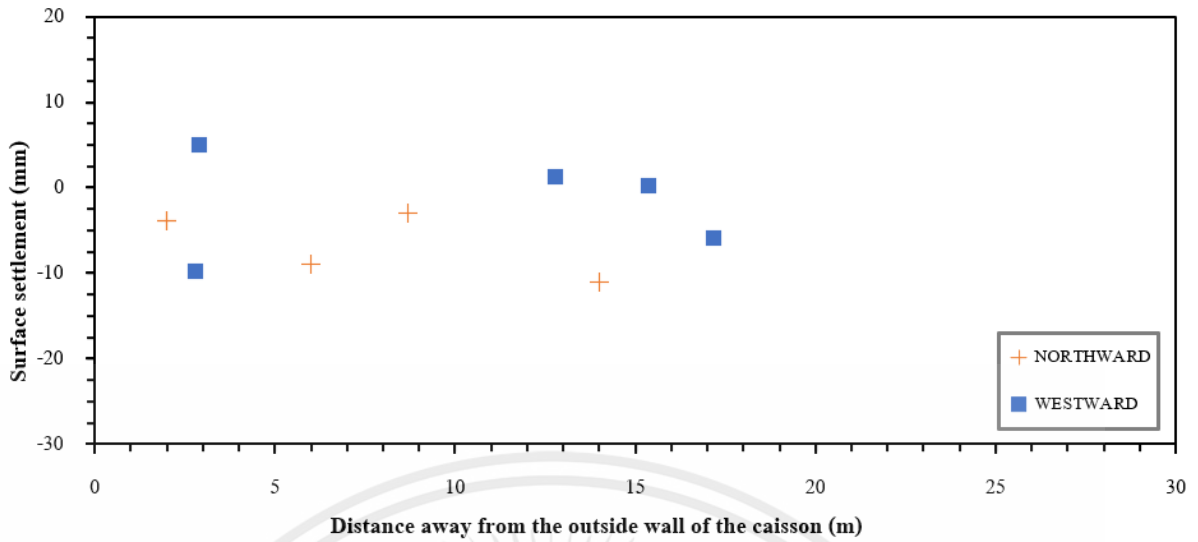
รูปที่ 4.55 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 13/01/2023 (Excavation to -6 m.)



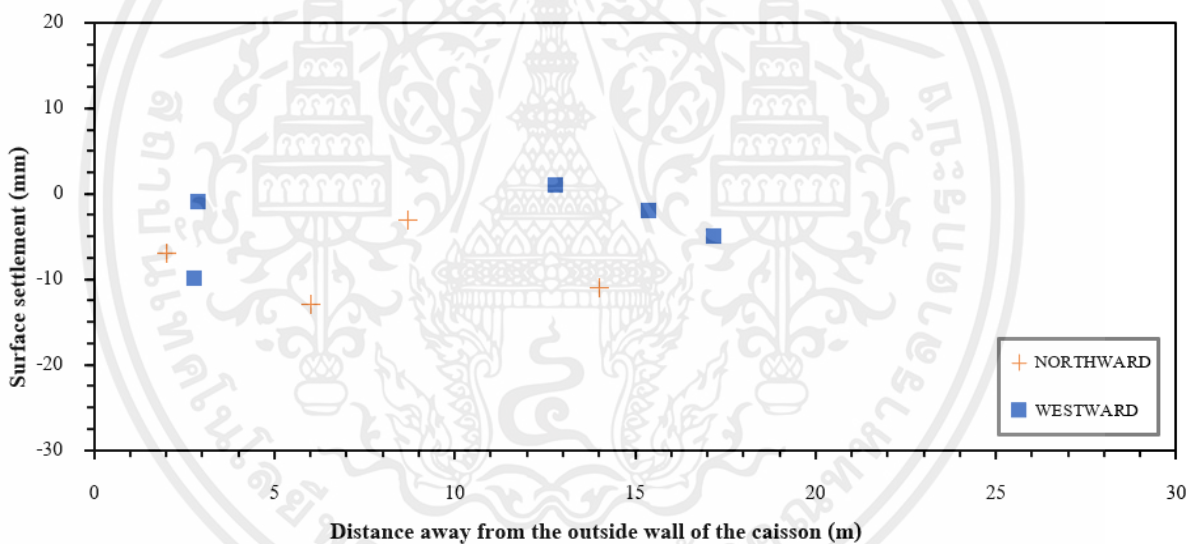
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 27/01/2023 (Install wall to -14 m.)



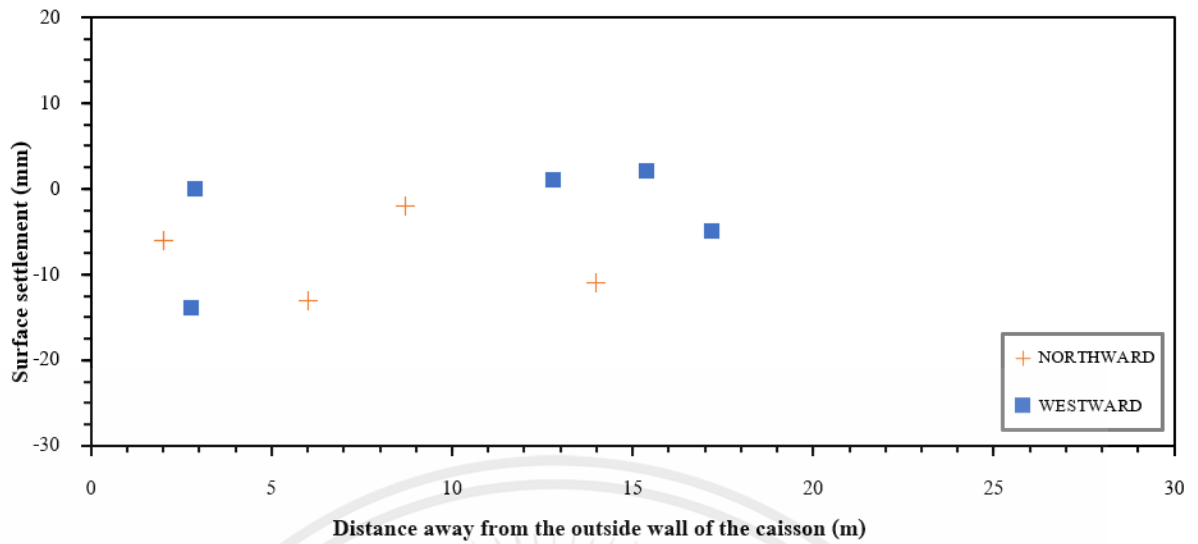
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 27/01/2023 (Excavation to -10 m.)



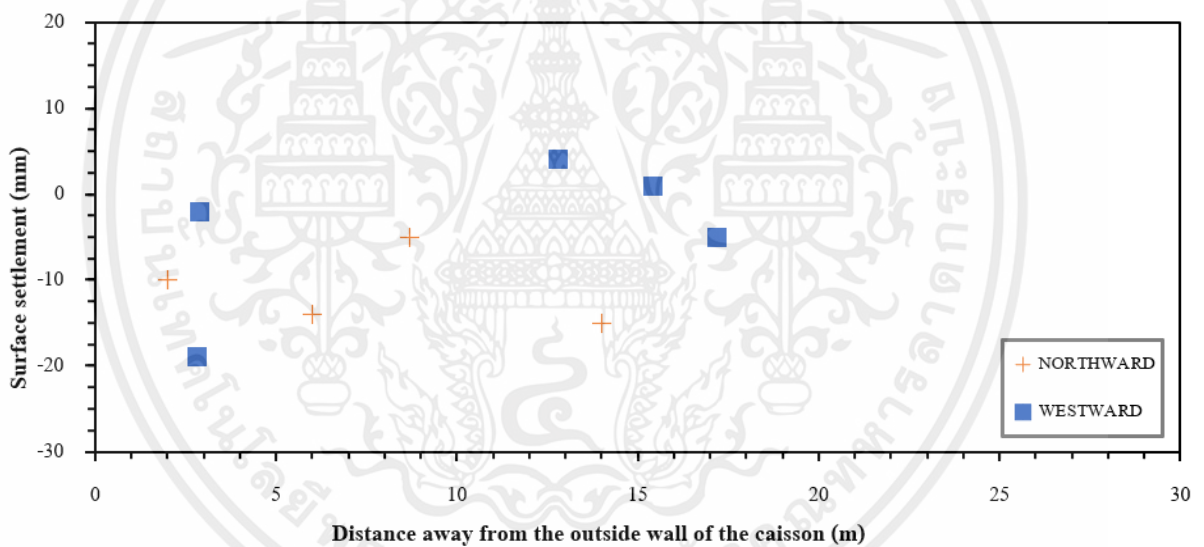
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 27/01/2023 (Excavation to -15 m.)



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 27/01/2023 (Install wall to -17 m.)



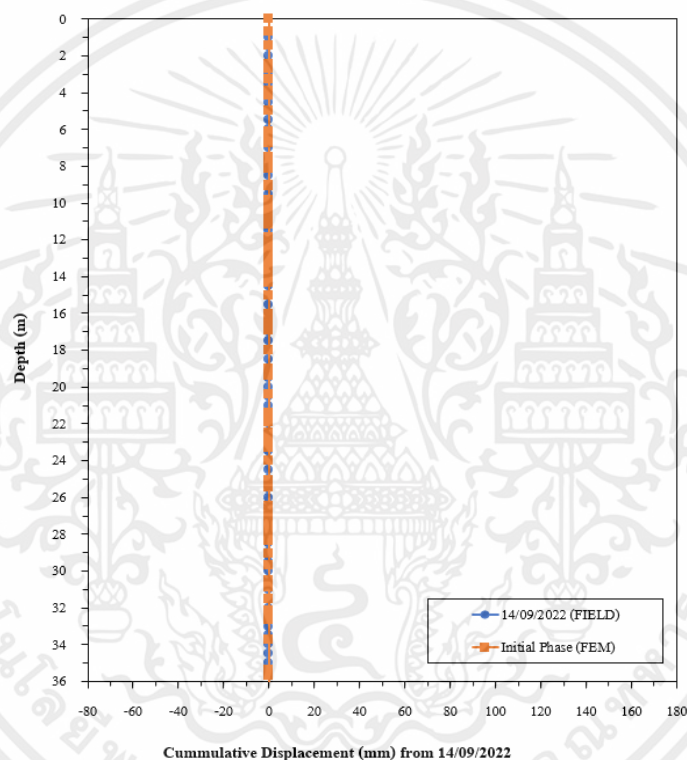
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก

ตรวจวัดวันที่ 27/01/2023 (Install wall to -20 m.)

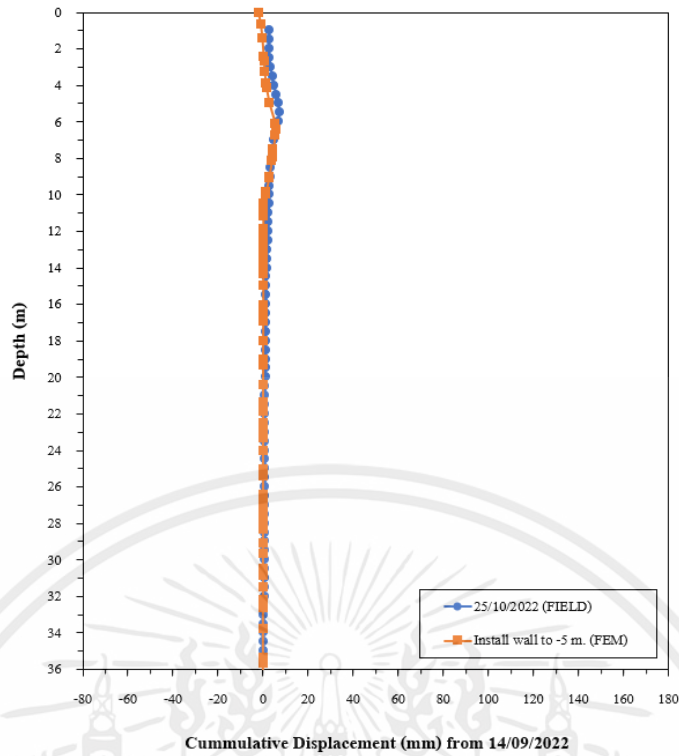
### 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม

การประมาณการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบปล่องอุโมงค์ ด้วยวิธี Finite Element Method จากโปรแกรม PLAXIS 2D เปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดที่ได้จากสนาม โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement) และการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement) ขณะก่อสร้างด้วยวิธีจมปล่องในแต่ละขั้นตอนของการก่อสร้างจะได้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method จากโปรแกรม PLAXIS 2D เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามดังนี้

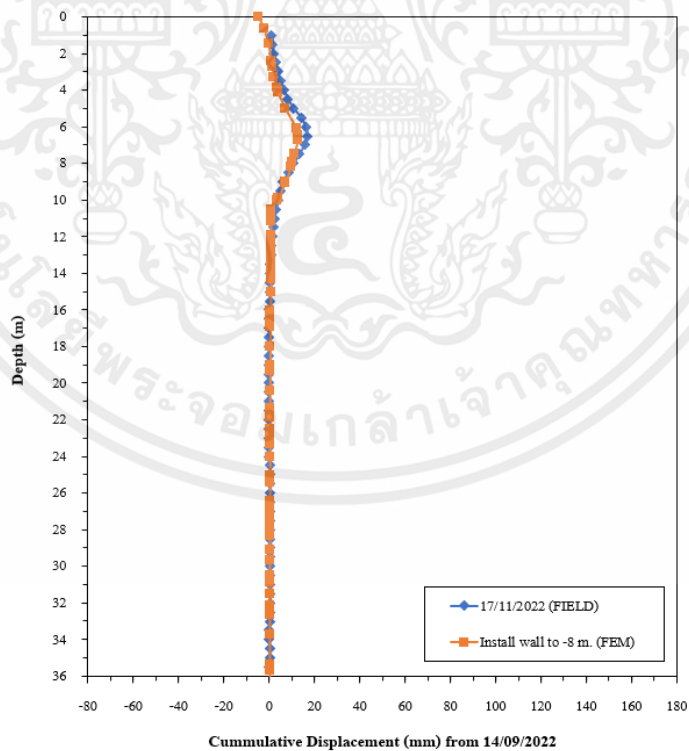
#### 4.3.1 การเคลื่อนตัวในแนวนอนของดิน (Horizontal movement)



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในวันที่ 14/09/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ (Initial Data)

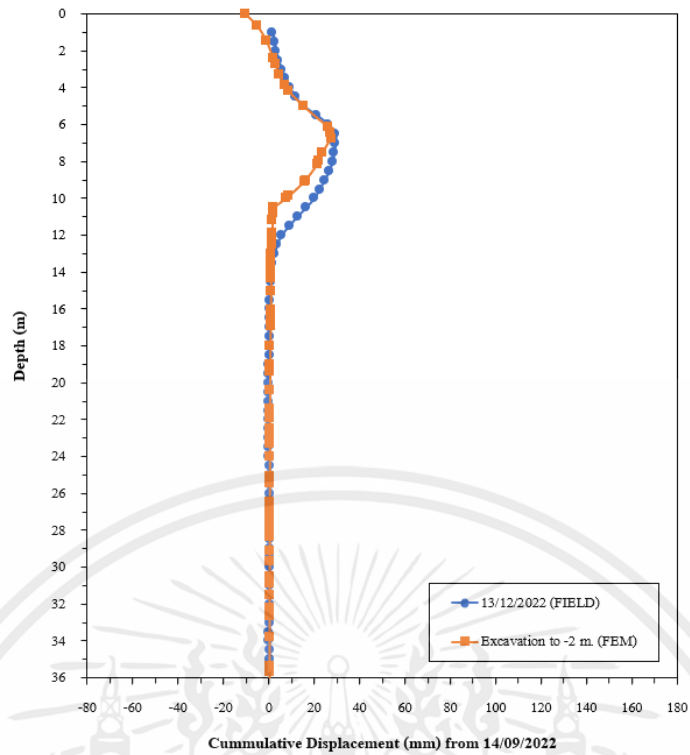


รูปที่ 4.62 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 25/10/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ (Install wall to -5 m.)

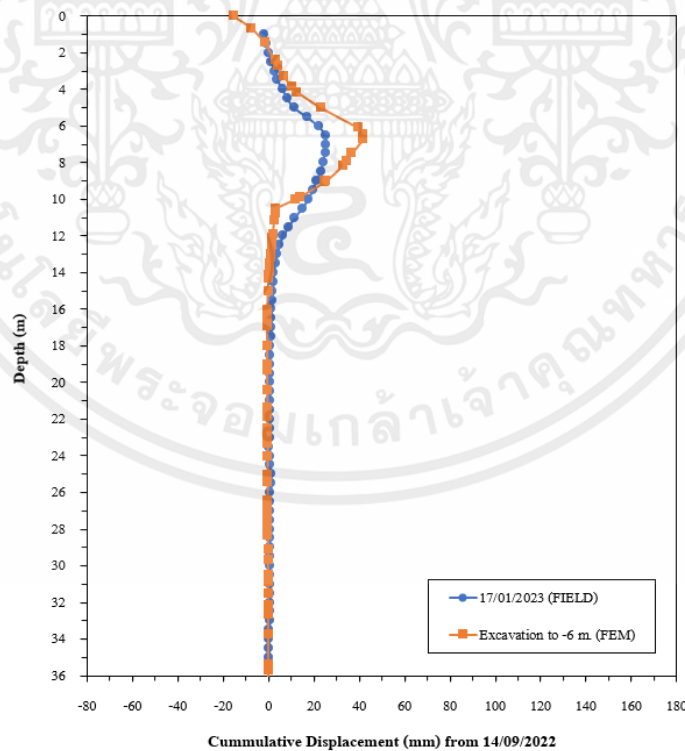


รูปที่ 4.63 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 17/11/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ (Install wall to -8 m.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

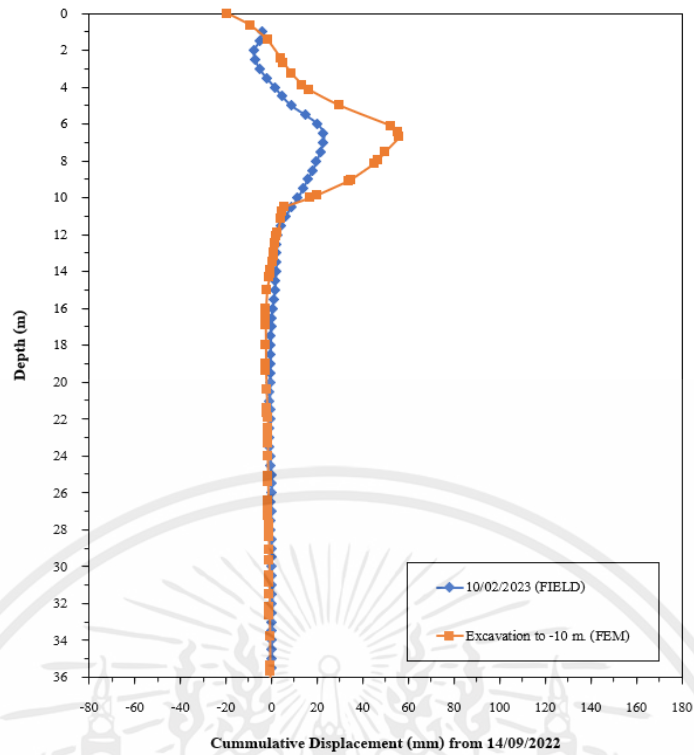


รูปที่ 4.64 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 13/12/2022 ณ ความลึกต่าง ๆ (Excavation to -2 m.)

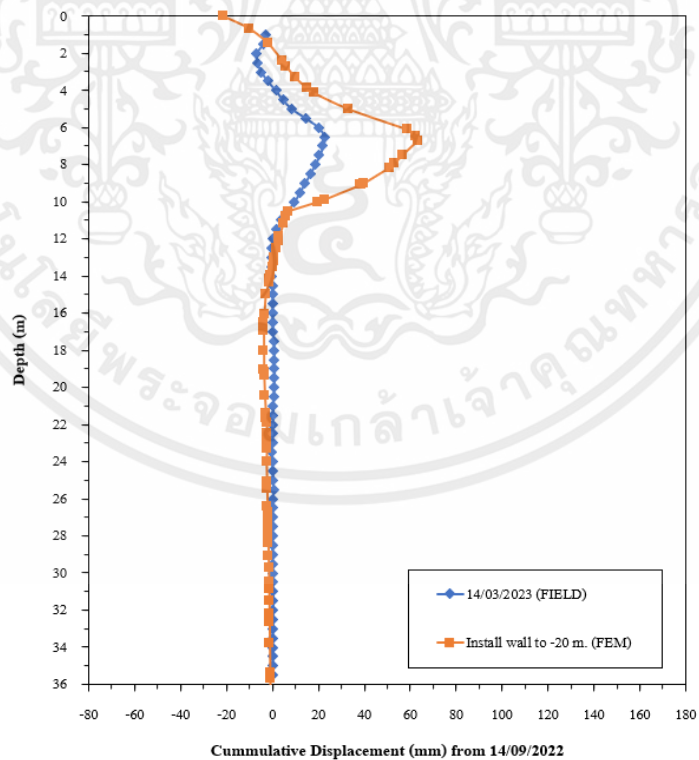


รูปที่ 4.65 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 17/01/2023 ณ ความลึกต่าง ๆ (Excavation to -6 m.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

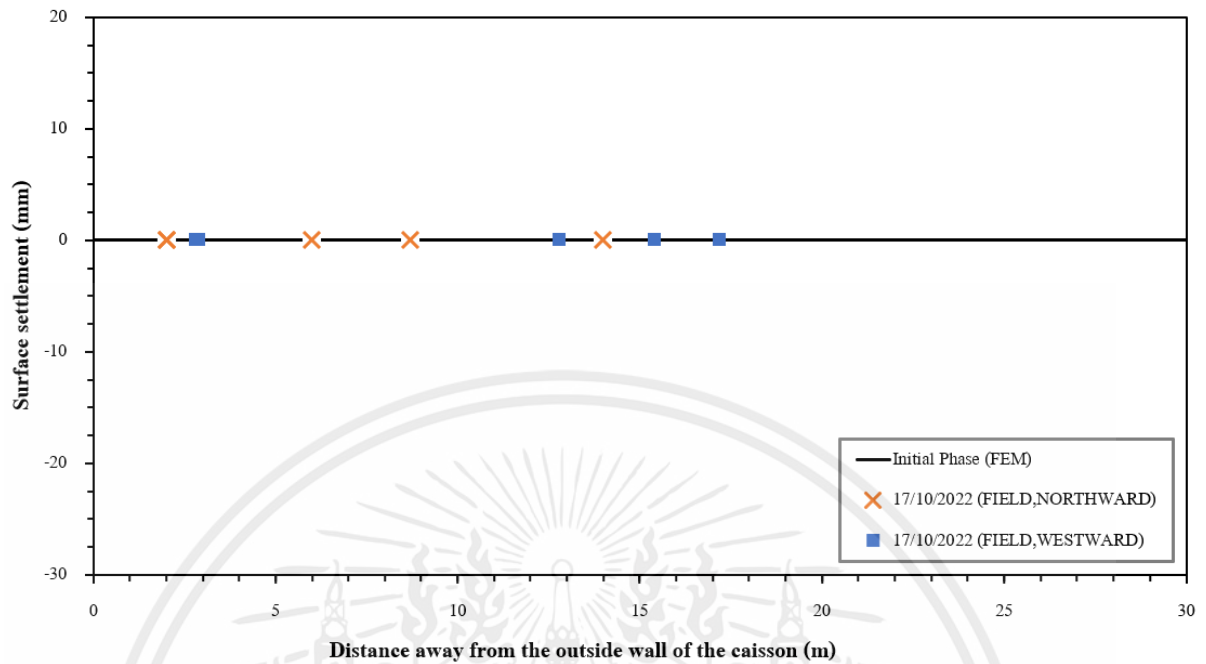


รูปที่ 4.66 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที่ 10/02/2023 ณ ความลึกต่าง ๆ (Excavation to -10 m.)

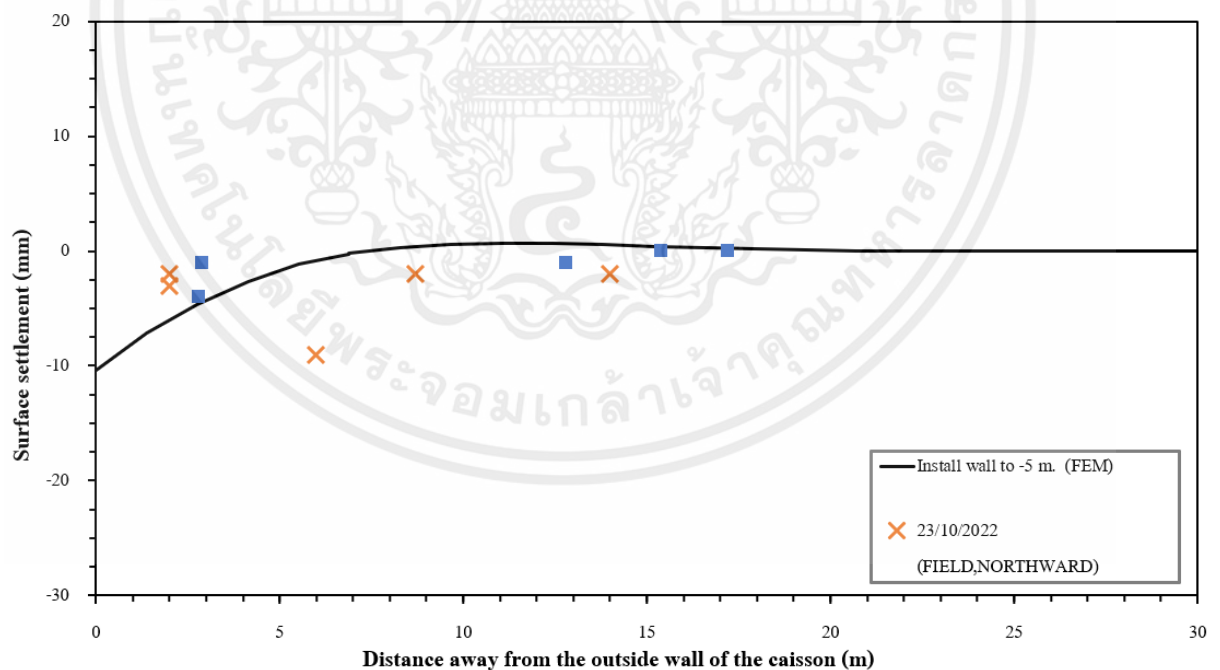


รูปที่ 4.67 กราฟแสดง การเปรียบเทียบ Cumulative Horizontal Displacement จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที่ 14/03/2023 ณ ความลึกต่าง ๆ (Install wall to -20 m.)

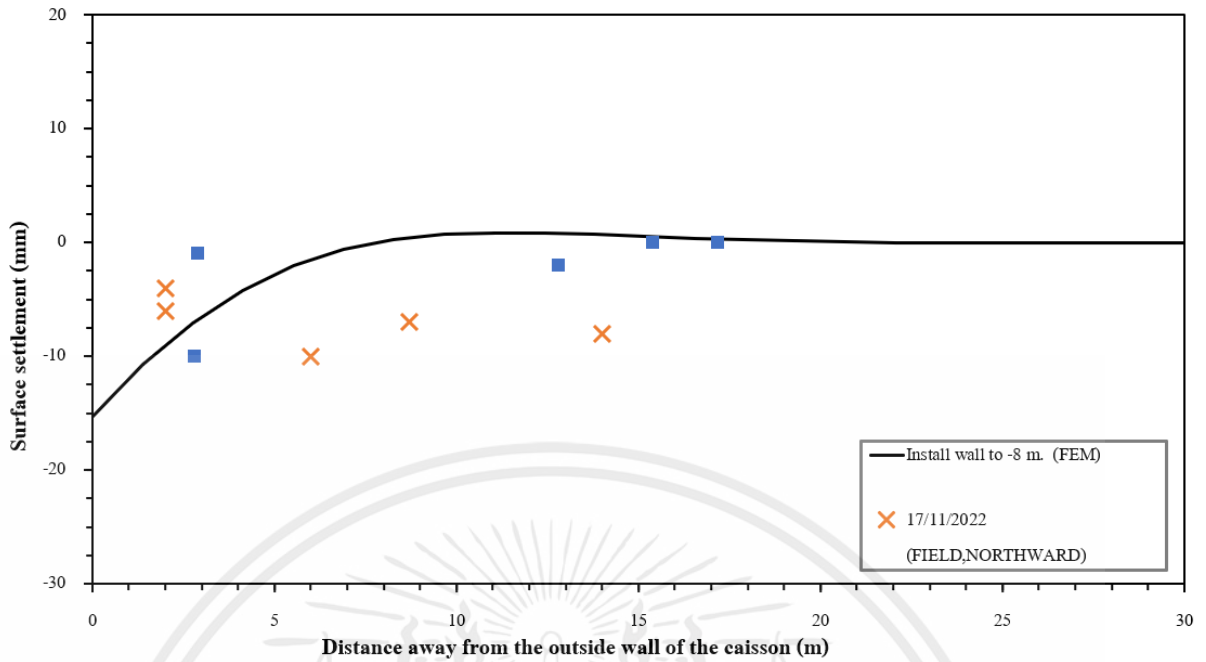
### 4.3.2 การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement)



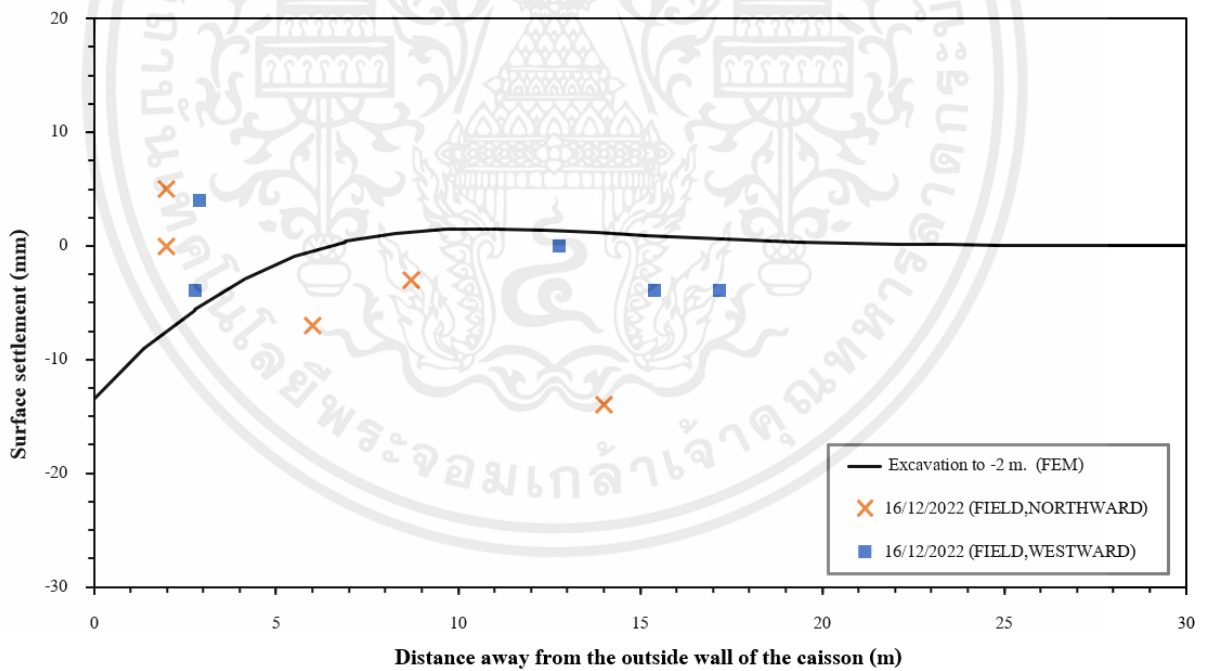
รูปที่ 4.68 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 17/10/2022 (Initial Data)



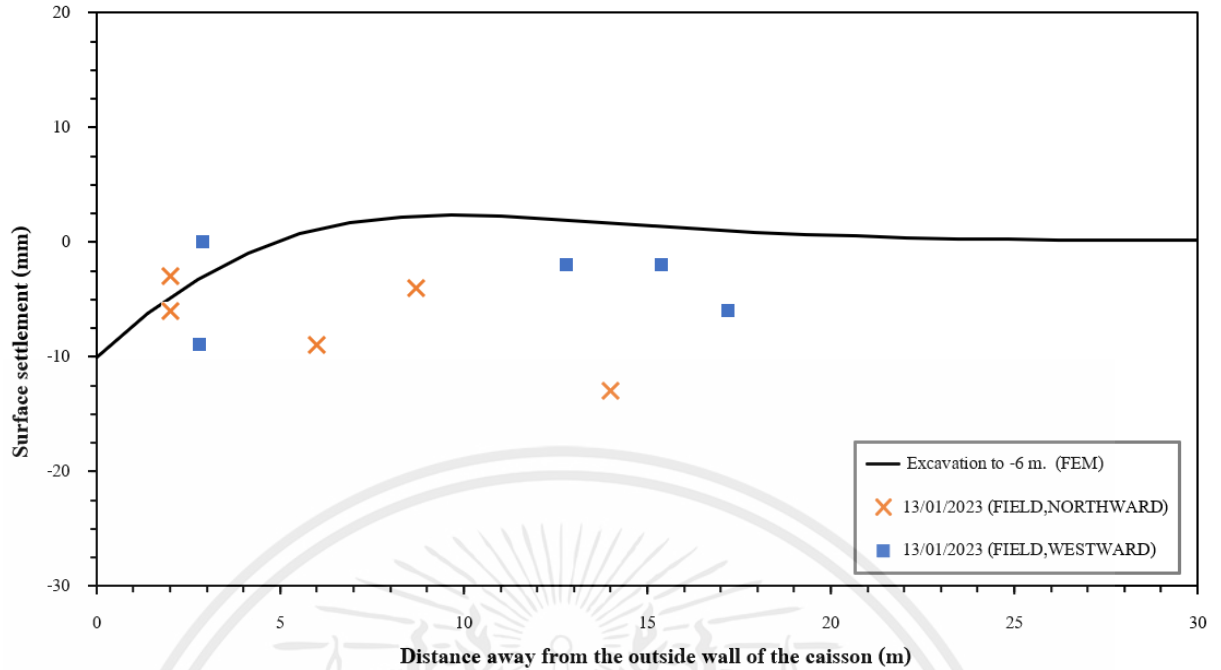
รูปที่ 4.69 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในที 23/10/2022 (Install wall to -5 m.)



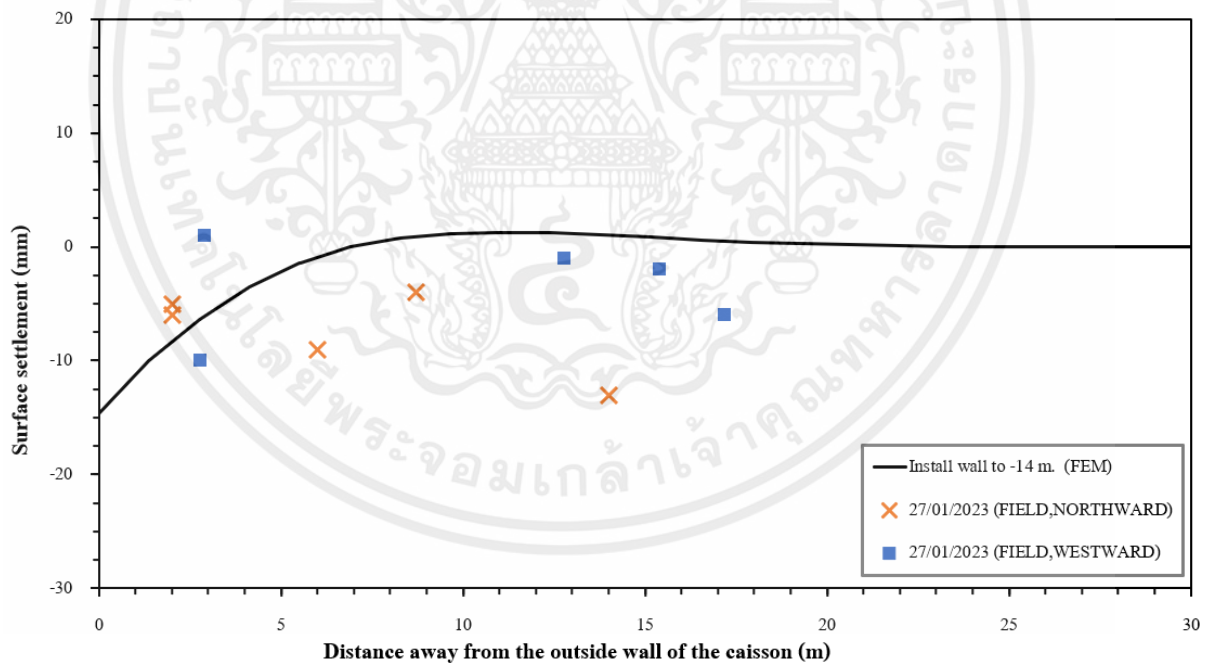
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามใน วันที่ 17/11/2022 (Install wall to -8 m.)



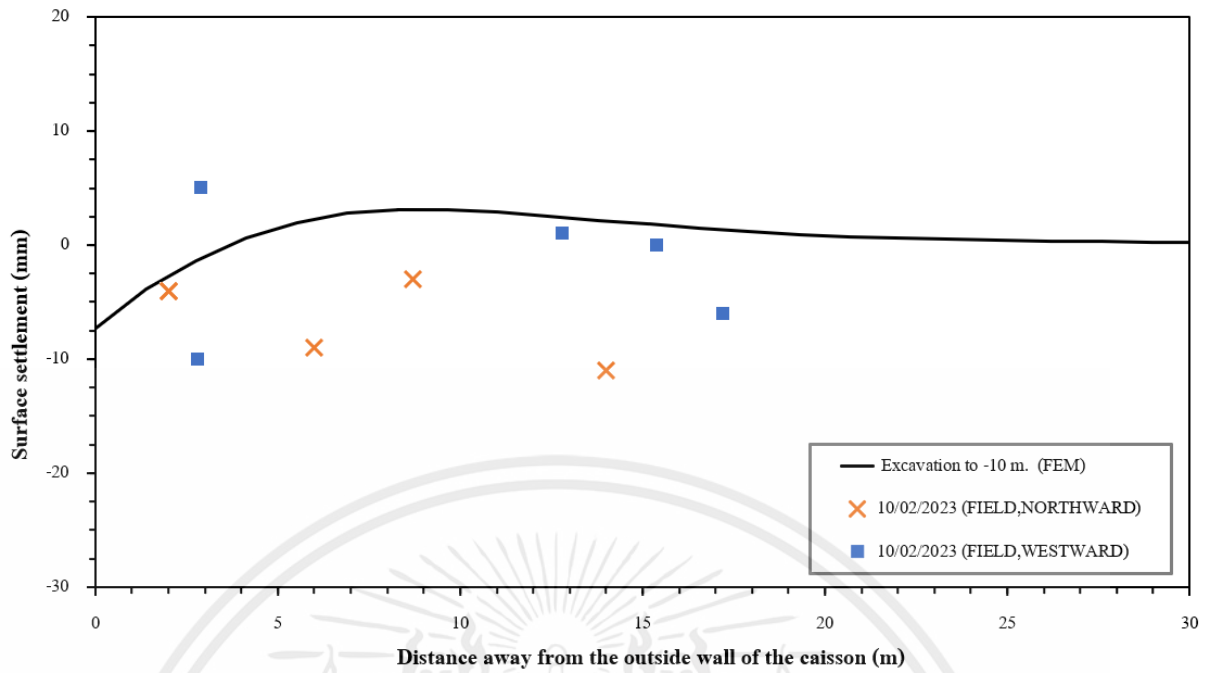
รูปที่ 4.71 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามใน วันที่ 16/12/2022 (Excavation to -2 m.)



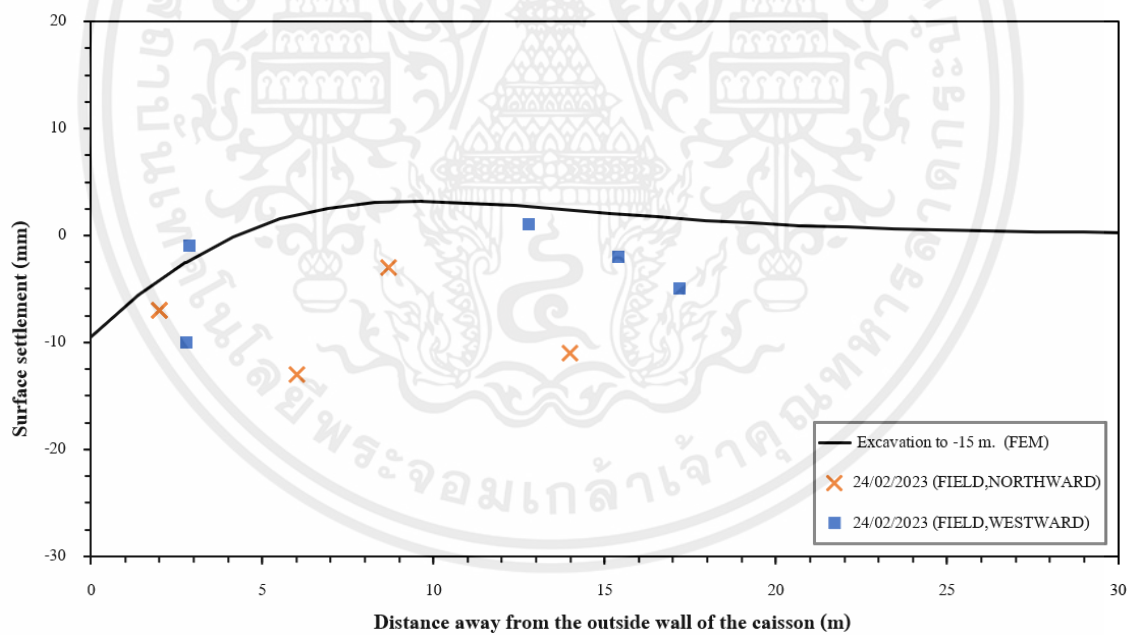
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามใน วันที่ 13/01/2023 (Excavation to -6 m.)



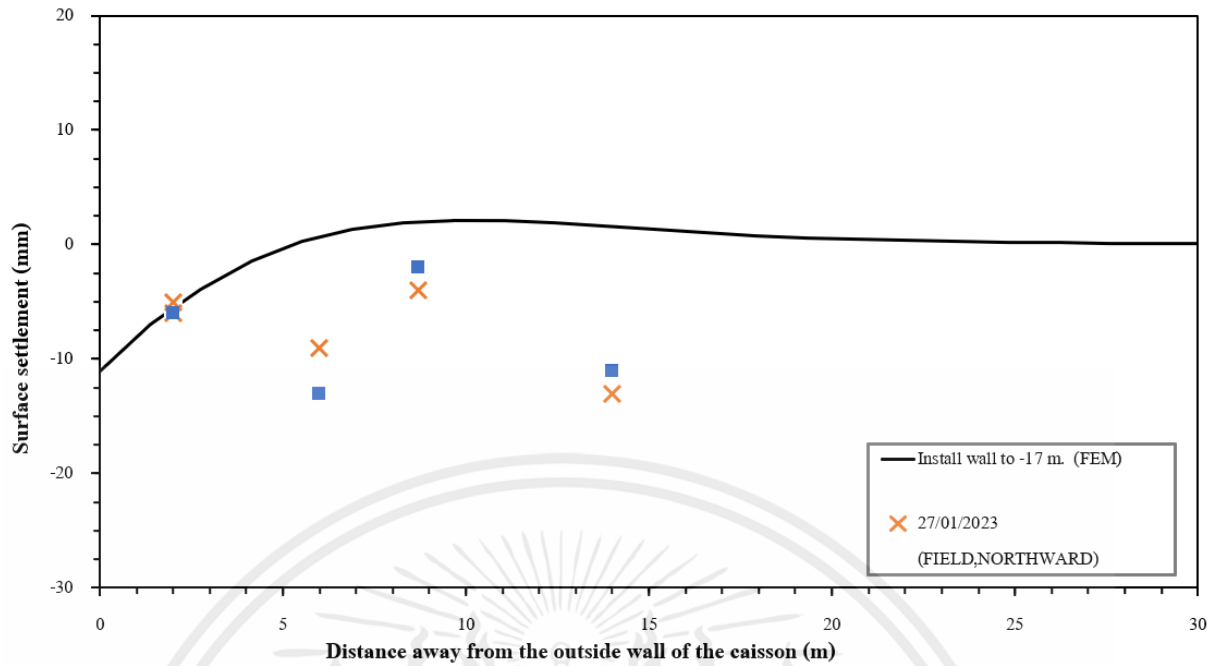
รูปที่ 4.73 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามใน วันที่ 27/01/2023 (Install wall to -14 m.)



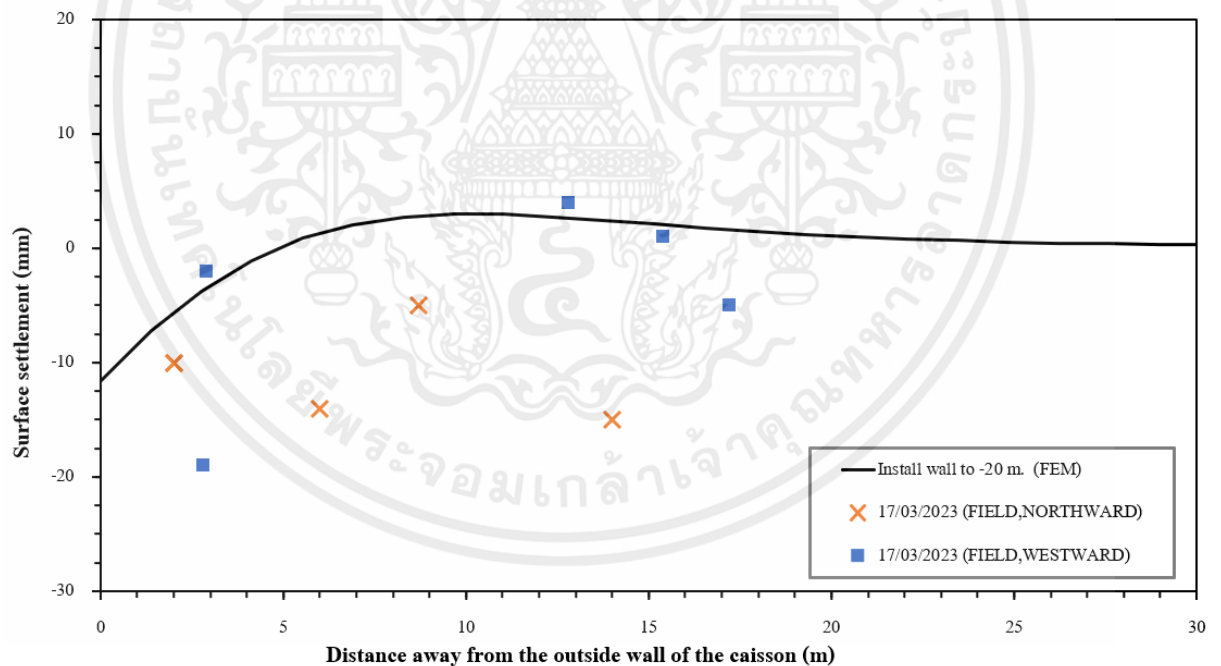
รูปที่ 4.74 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในวันที่ 10/02/2023 (Excavation to -10 m.)



รูปที่ 4.75 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามในวันที่ 24/02/2023 (Excavation to -15 m.)



รูปที่ 4.76 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามวันที่ 27/01/2023 (Install wall to -17 m.)



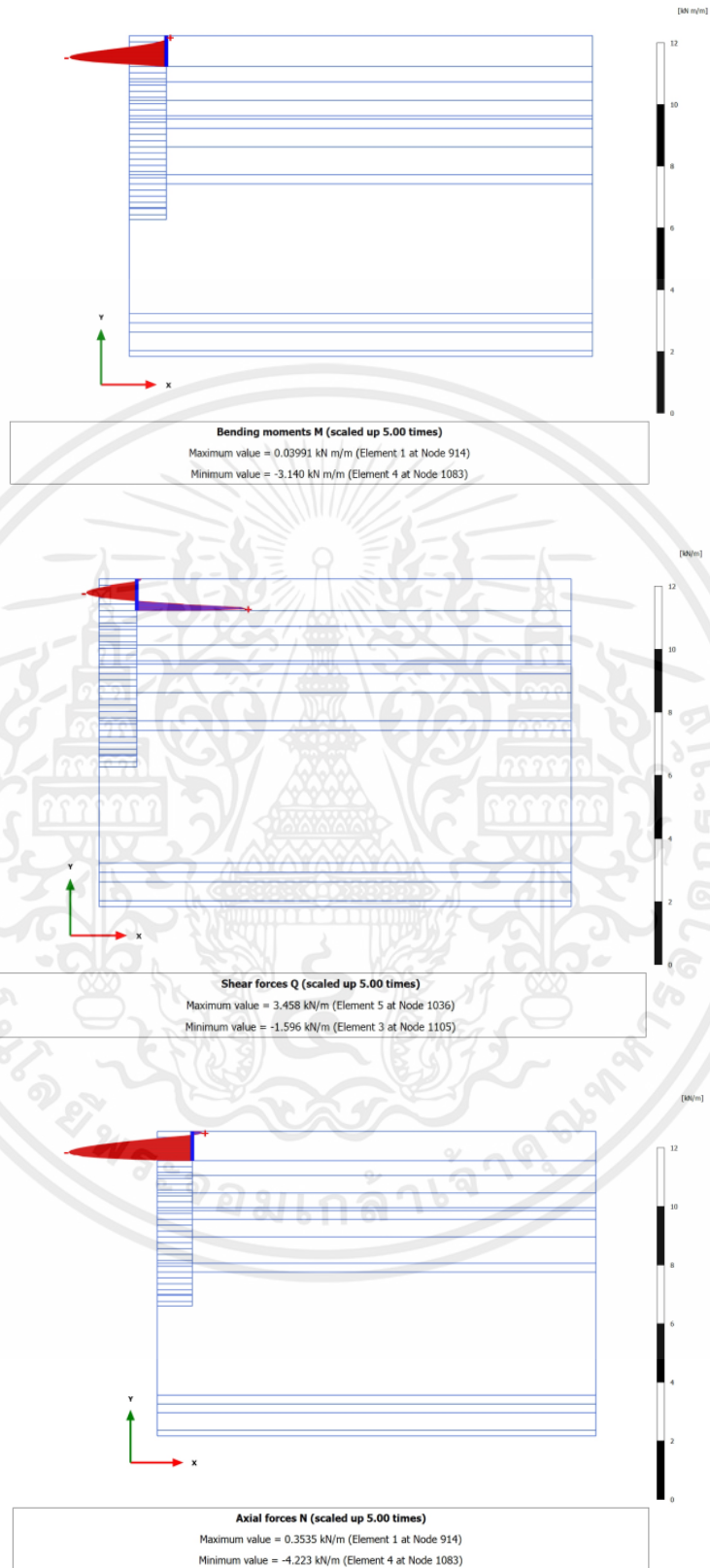
รูปที่ 4.77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ผิวดินกับระยะห่างผนังปล่องอุโมงค์ด้านนอก จากผลการวิเคราะห์ FEM และการตรวจวัดในสนามวันที่ 17/03/2023 (Install wall to -20 m.)

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ด้วย PLAXIS 2D

การวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ด้วยวิธี Finite Element Method ซึ่งแรงภายในที่พิจารณานี้ประกอบด้วย โมเมนต์ดัด (Bending Moment), แรงเฉือน (Shear Force) และแรงตามแนวแกน (Axial Force) โดยในการวิเคราะห์ที่ใช้การจำลองรูปแบบลักษณะชั้นดินตามข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจ (Boring Log) หลุมเจาะที่ SIH 1 ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนาขณะก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีการถมปล่องและที่ระดับน้ำใต้ดิน Hydrostatic ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาลักษณะปัญหาเป็น 2 มิติ ภายใต้แบบจำลอง Axis Symmetry ขนาดความกว้างของแบบจำลองประมาณ 75 เมตร และขนาดความสูงของแบบจำลองประมาณ 51.95 เมตร น้ำหนักบรรทุกที่ผิวดินซึ่งกระทำต่อโครงสร้างของปล่องอุโมงค์ของ การก่อสร้างด้วยวิธีการถมปล่องซึ่งกำหนดให้ใช้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ผิวดินเท่ากับ  $20 \text{ kPa/m}^2$  ซึ่งในการจำลองขนาดโครงสร้างของปล่องอุโมงค์จะจำลองตามปล่องอุโมงค์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองทวีวัฒนา มีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.00 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.00 เมตร ความหนาของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก 1.00 เมตร และความลึกการถมทั้งหมดโดยประมาณ 29.80 เมตร จำลองโครงสร้างด้วย Plate Structure คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ด้วยวิธี Finite Element Method การคิดค่าความแข็ง (Stiffness) ของปล่องอุโมงค์ซึ่งแสดงในรูปค่า Moment of Inertia รวมทั้งคติน้ำหนักของโครงสร้างปล่องอุโมงค์ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Compressive Strength of Concrete) ที่ใช้ในการหล่อผนังของปล่องอุโมงค์เท่ากับ 350 ksc ส่วนของพื้นปล่องอุโมงค์เท่ากับ 400 ksc ผลการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะก่อสร้างปล่องอุโมงค์ด้วยวิธีการถมปล่อง พบว่าโมเมนต์ดัดมีค่ามากที่สุดขณะที่ install base slab เท่ากับ  $192.7 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุดขณะที่ install base slab เท่ากับ  $-130.7 \text{ kN/m}$  ส่วนแรงเฉือนมีค่ามากที่สุดขณะที่ dewatering เท่ากับ  $209.2 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุดขณะที่ install base slab เท่ากับ  $-126.9 \text{ kN/m}$  สดท้ายแรงตามแนวแกนมีค่ามากที่สุดขณะที่ install concrete plug เท่ากับ  $363.4 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุดขณะที่ excavation to  $-15.0 \text{ m}$ . เท่ากับ  $-210.0 \text{ kN/m}$  และระดับน้ำใต้ดิน Hydrostatic พบว่าโมเมนต์ดัดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $311.2 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุด เท่ากับ  $-150.4 \text{ kN/m}$  ส่วนแรงเฉือนมีค่ามากที่สุด เท่ากับ  $373.0 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุด เท่ากับ  $-189.5 \text{ kN/m}$  สดท้ายแรงตามแนวแกนมีค่ามากที่สุด เท่ากับ  $143.7 \text{ kN/m}$  ค่าน้อยที่สุด เท่ากับ  $-469.8 \text{ kN/m}$  จากผลการวิเคราะห์แรงภายในปล่องอุโมงค์ โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงตามแนวแกน ที่มากที่สุดในแต่ละขั้นตอนของการก่อสร้าง สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

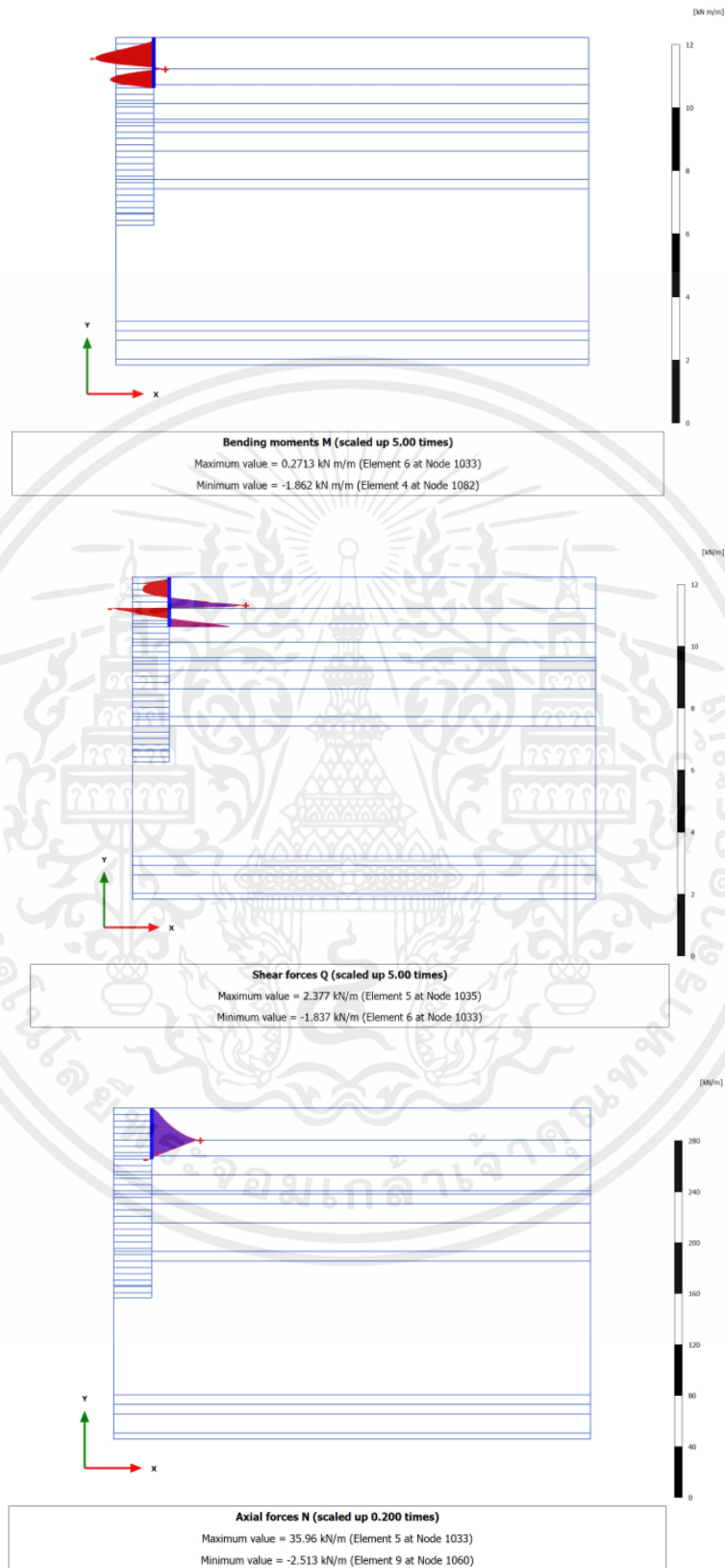
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นในปล่องอุโมงค์ด้วย PLAXIS 2D

Stage construction	โมเมนต์ดัด (kN/m)		แรงเฉือน (kN/m)		แรงตามแนวแกน (kN/m)	
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด
Install wall to -5.0 m.	0.040	-3.140	3.458	-1.596	0.354	-4.223
Install wall to -8.0 m.	0.271	-1.862	2.377	-1.837	35.96	-2.153
Install wall to -11.0 m.	0.672	-1.528	2.231	-2.316	43.43	-26.72
Excavation to -2.0 m.	2.805	-7.561	15.27	-9.745	18.72	-51.84
Install wall to -14.0 m.	1.557	-6.920	10.95	-10.80	22.17	-47.28
Excavation to -6.0 m.	28.17	-26.10	43.36	-26.66	0.202	-86.41
Install wall to -17.0 m	25.60	-25.61	40.42	-25.32	18.83	-83.55
Excavation to -10.0 m.	27.14	-21.86	55.67	-30.97	26.45	-101.8
Install wall to -20.0 m.	25.04	-21.30	52.94	-29.85	44.63	-99.61
Excavation to -15.0 m.	10.06	-8.730	15.44	-20.57	0.206	-210.0
Install wall to -23.0 m.	10.14	-8.147	16.28	-19.67	0.213	-195.8
Excavation to -20.0 m.	29.52	-55.53	43.06	-23.88	0.228	-173.4
Install wall to -26.0 m.	29.50	-55.76	42.47	-24.29	4.390	-157.1
Excavation to -25.0 m.	37.78	-49.82	50.32	-23.69	104.4	-68.14
Install wall to -29.8 m.	38.99	-50.31	51.21	-26.60	133.3	-66.27
Excavation to -29.8 m.	47.66	-44.74	69.91	-47.23	331.8	-53.84
Install concrete plug	49.02	-44.26	72.83	-50.63	363.4	-51.62
Dewatering	190.8	-47.87	209.2	125.4	162.7	-95.37
Install base slab	192.7	-130.7	203.3	-126.9	206.7	-62.17
Hydrostatic	311.2	-150.4	373.0	-189.5	143.7	-469.8



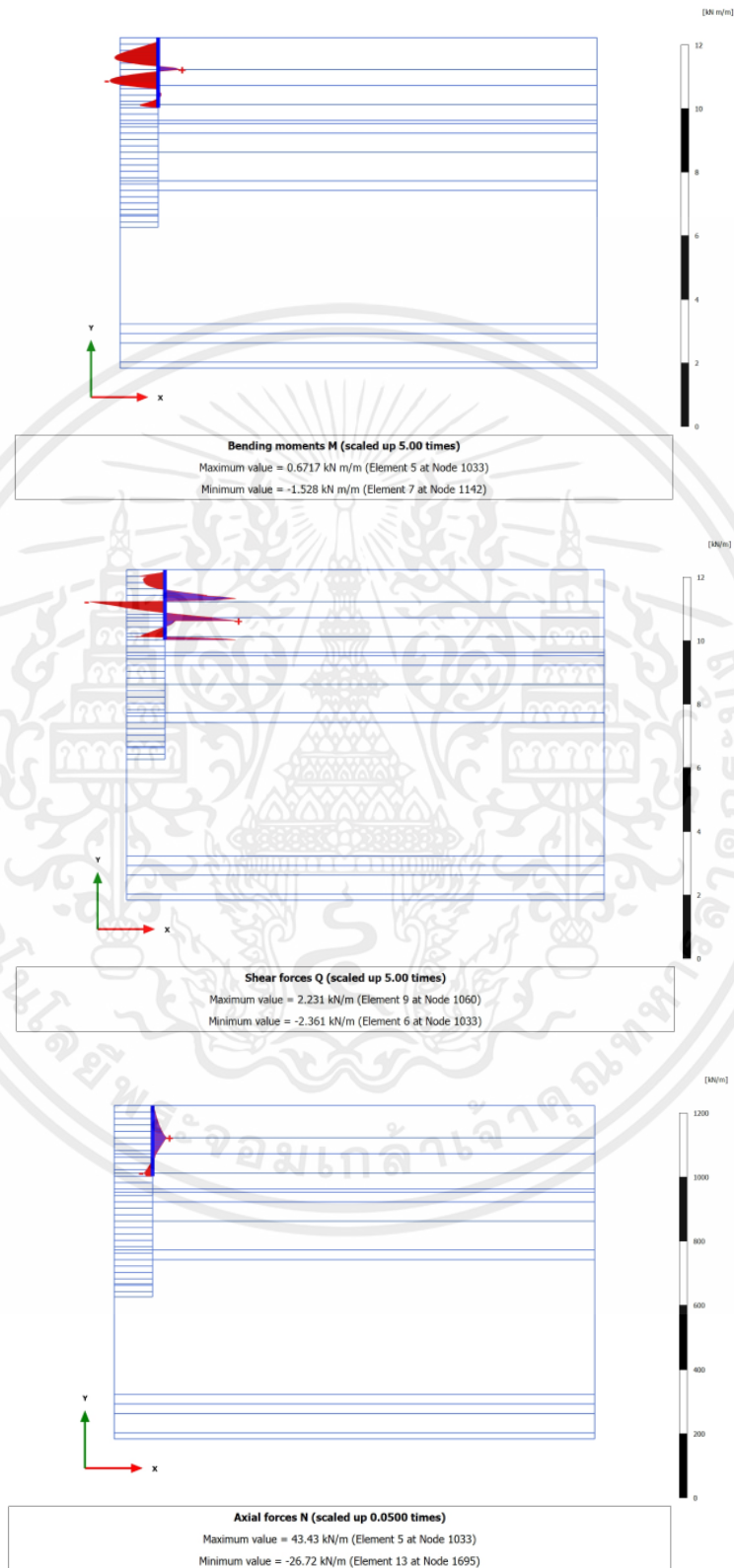
รูปที่ 4.78 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -5.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและเที่ยงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



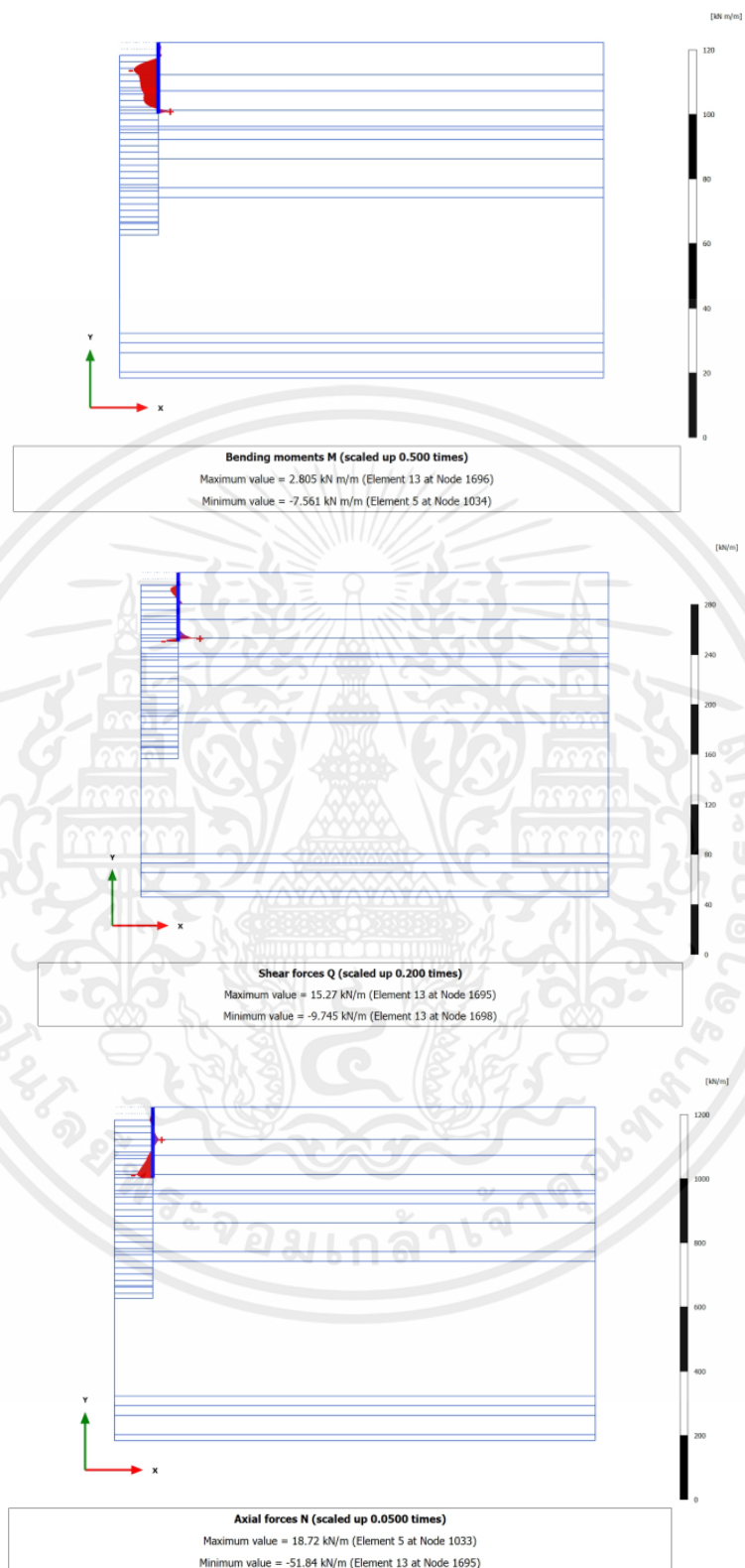
รูปที่ 4.79 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -8.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและเที่ยงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



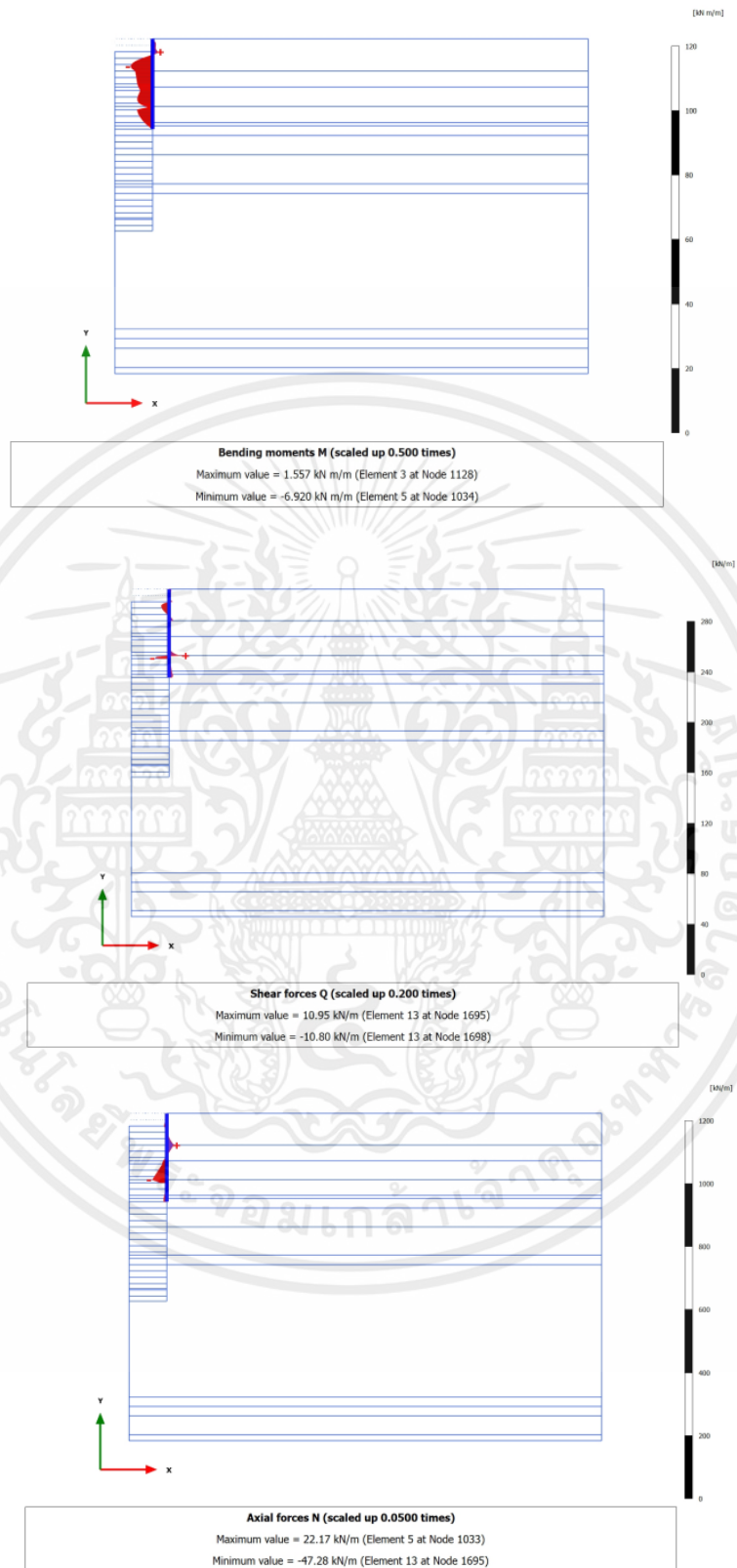
รูปที่ 4.80 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -11.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



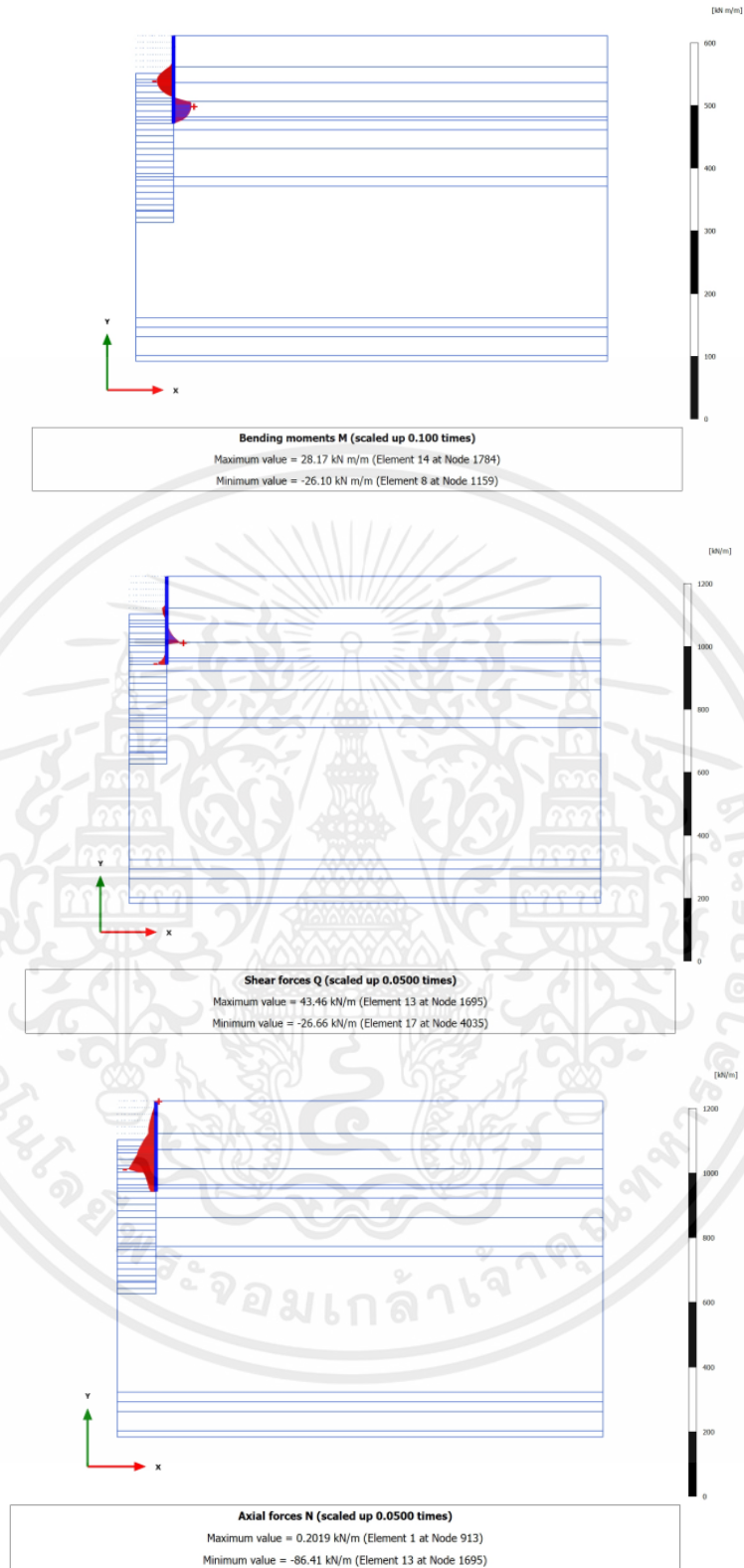
รูปที่ 4.81 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -2.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



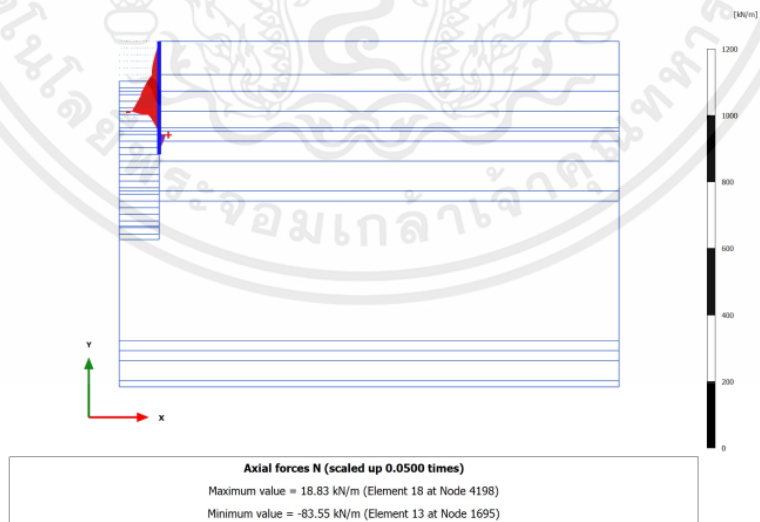
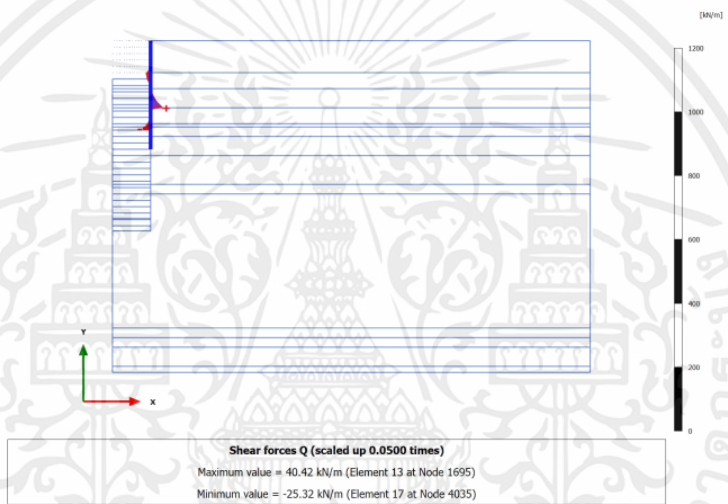
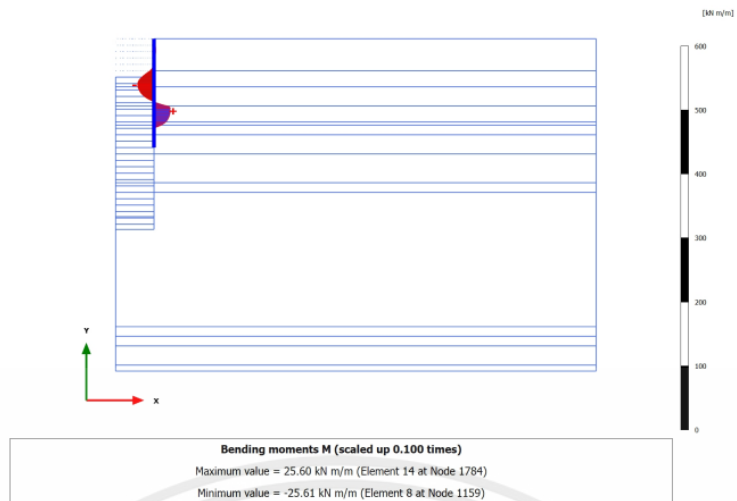
รูปที่ 4.82 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -14.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและเที่ยงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

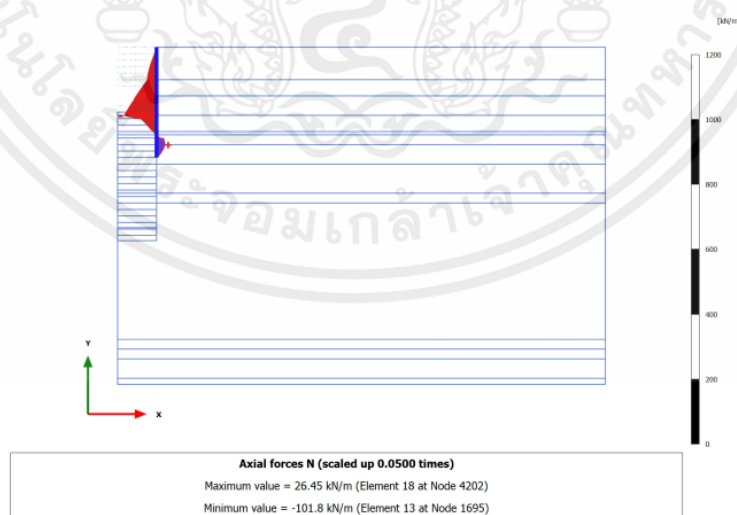
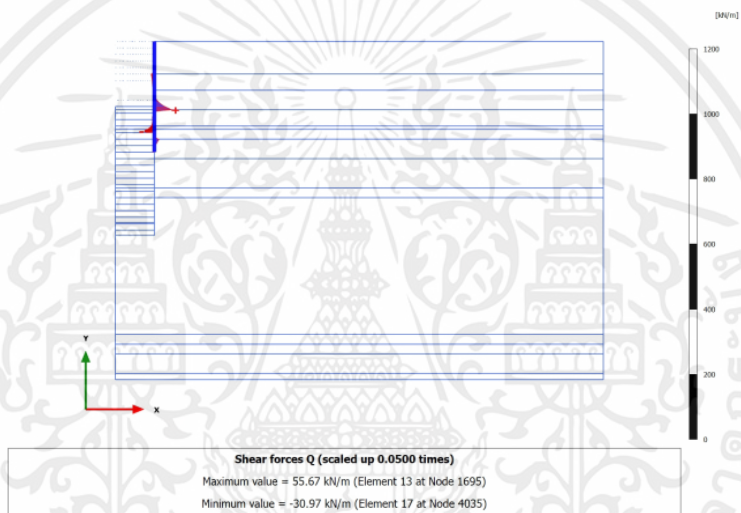
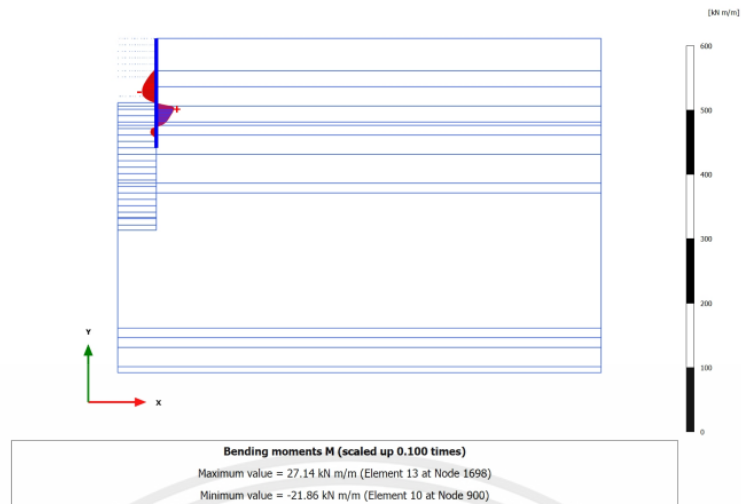


รูปที่ 4.83 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -6.0 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

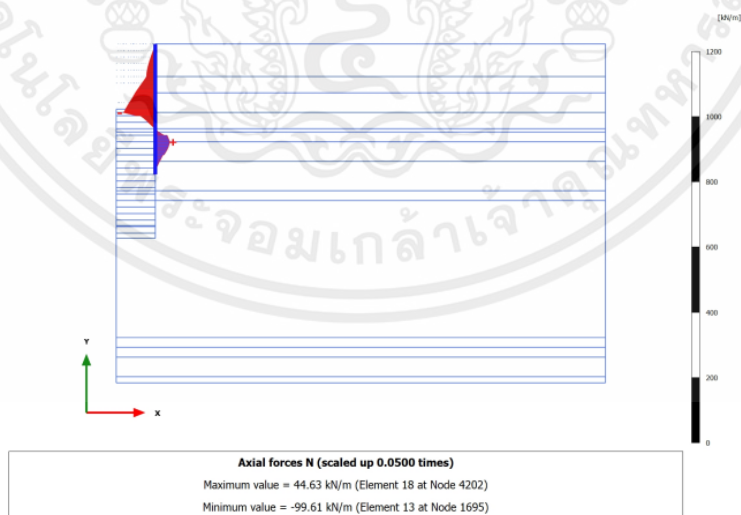
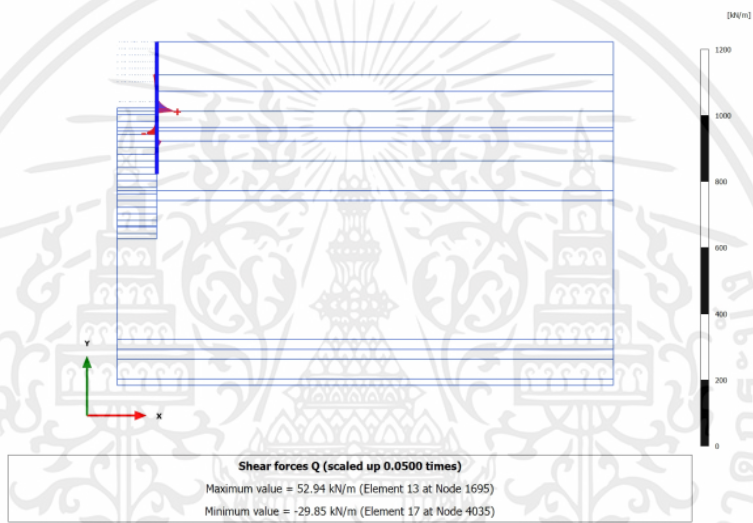
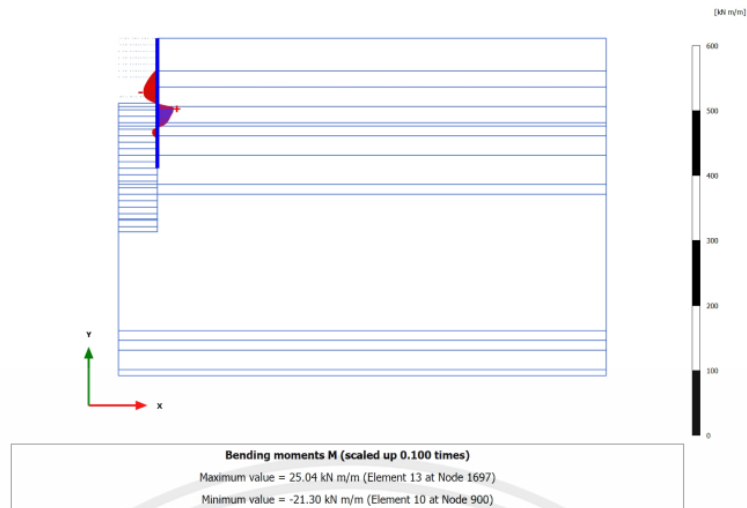


รูปที่ 4.84 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -17.0 m.

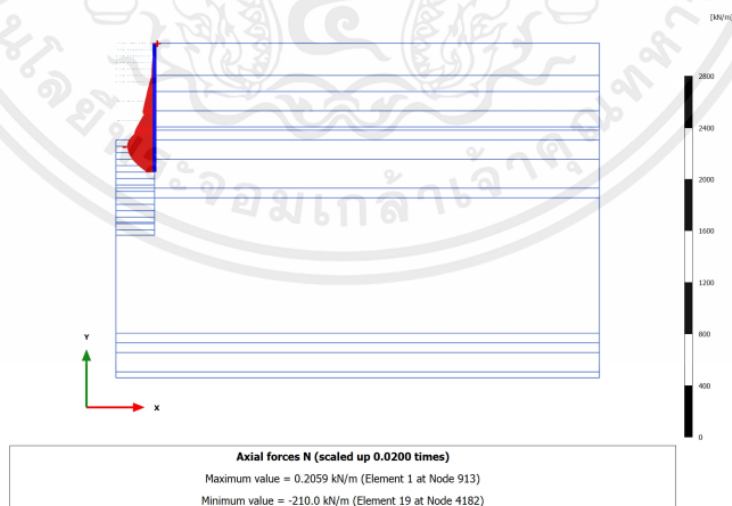
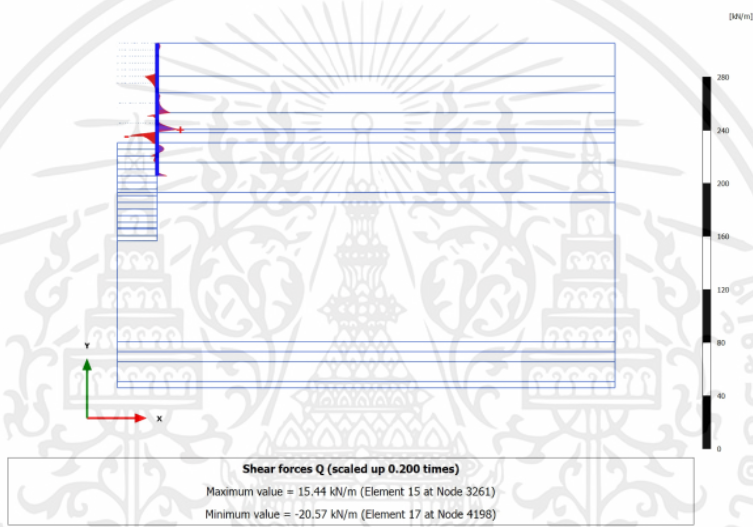
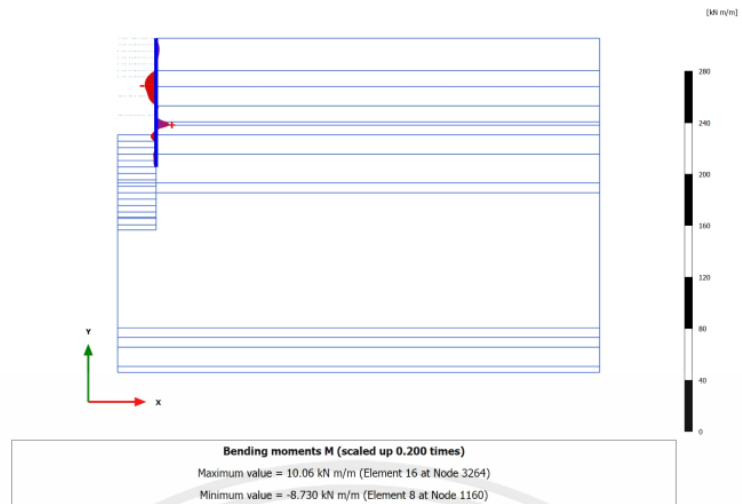


รูปที่ 4.85 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -10.0 m.

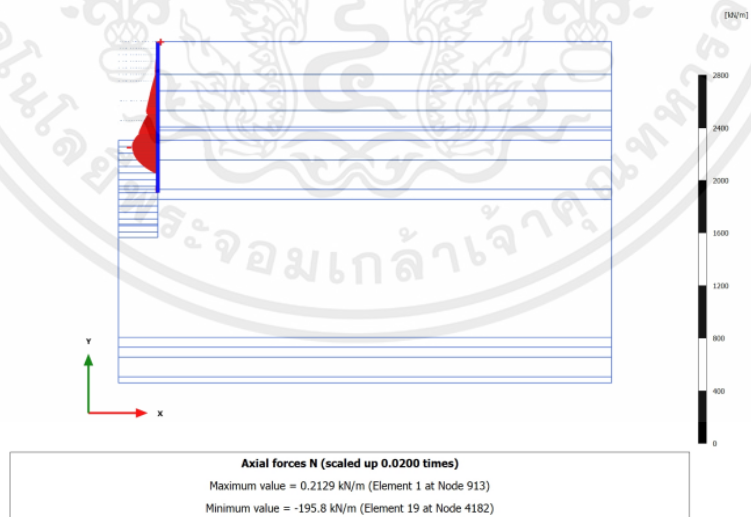
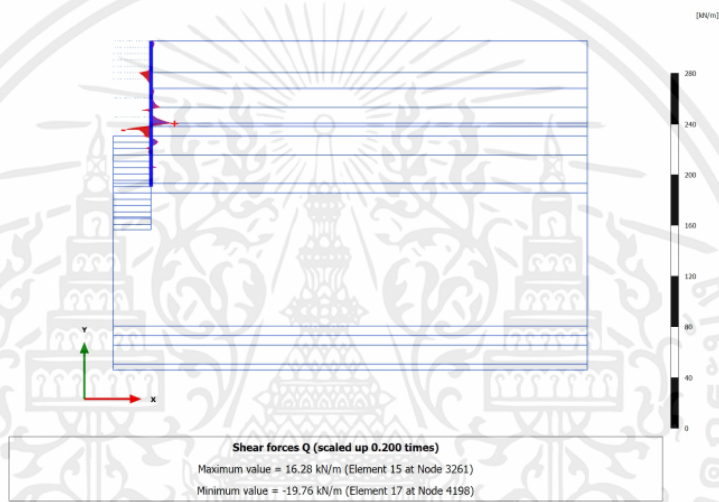
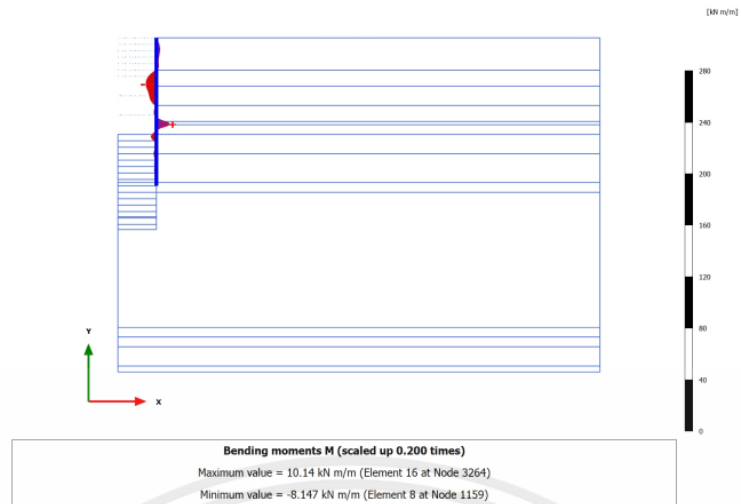
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



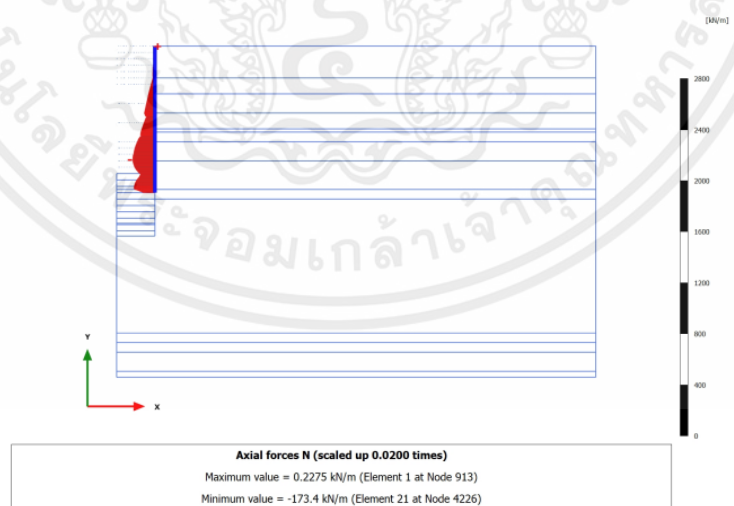
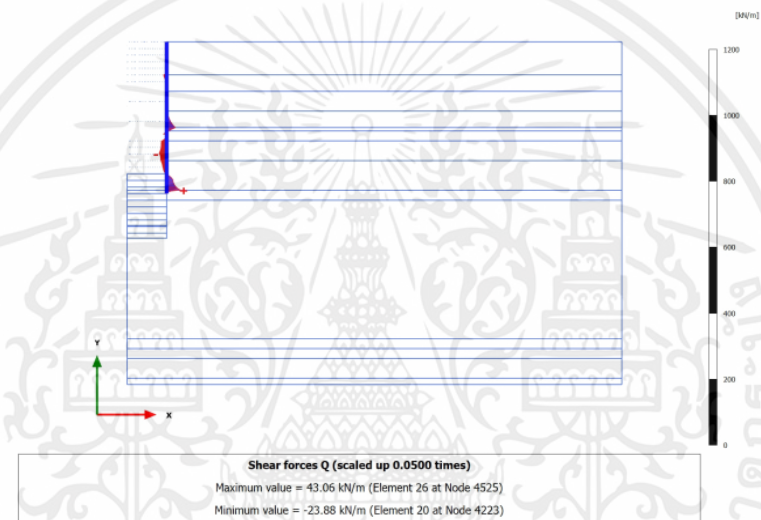
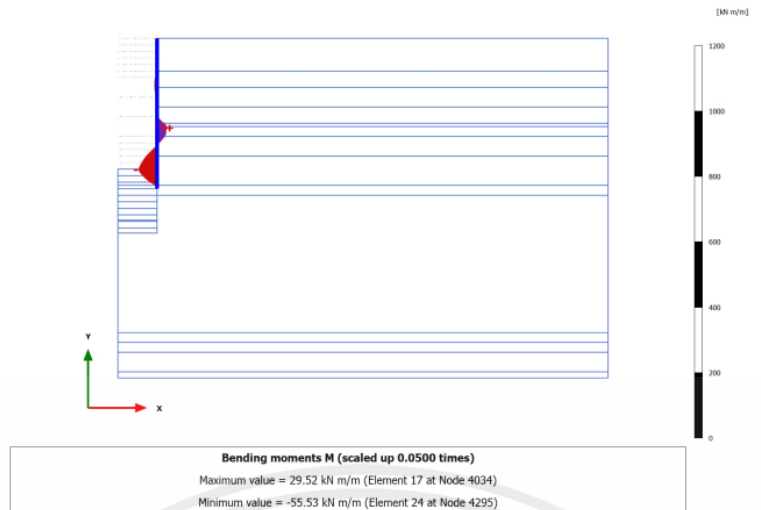
รูปที่ 4.86 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -20.0 m



รูปที่ 4.87 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -15.0 m.

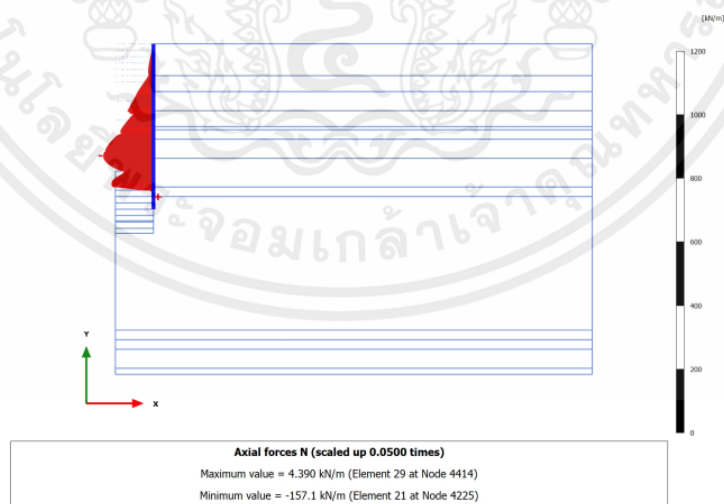
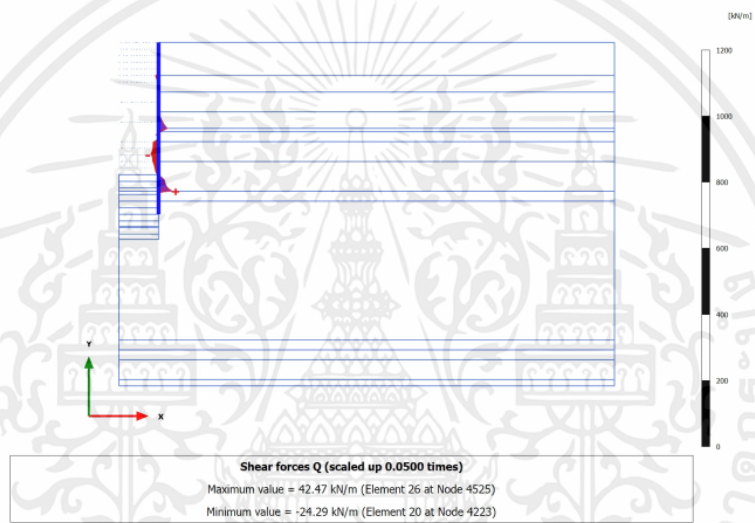
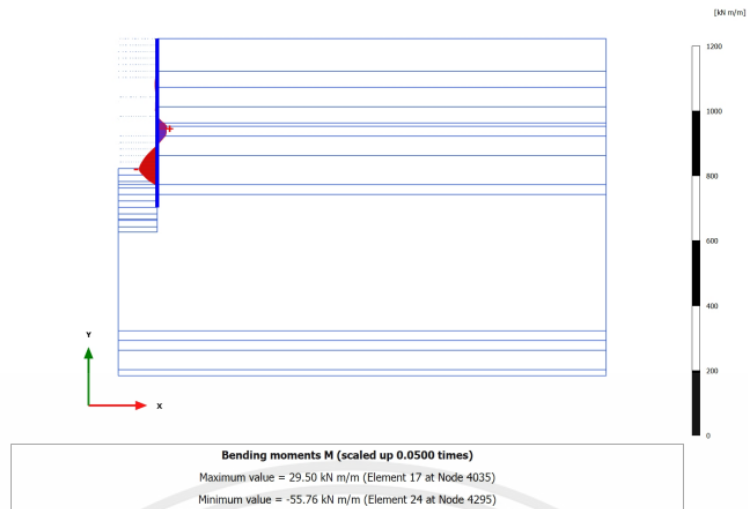


รูปที่ 4.88 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -23.0 m

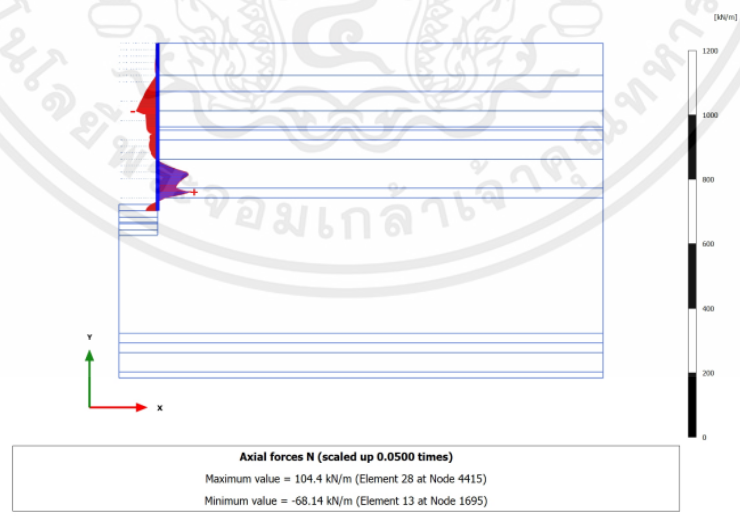
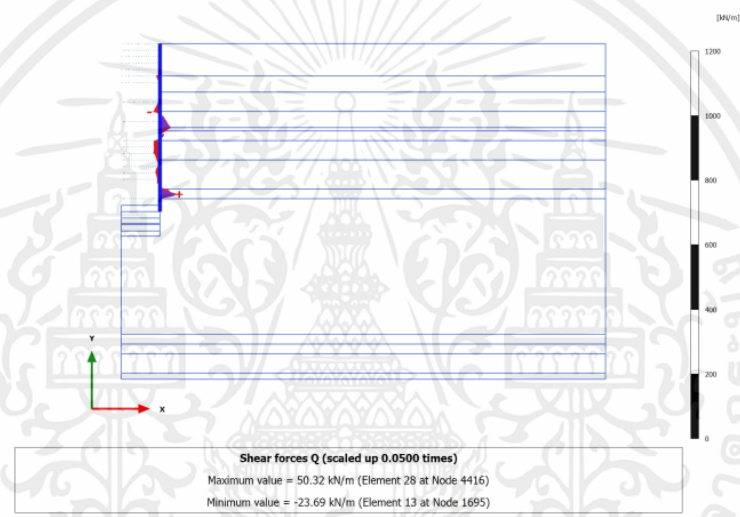
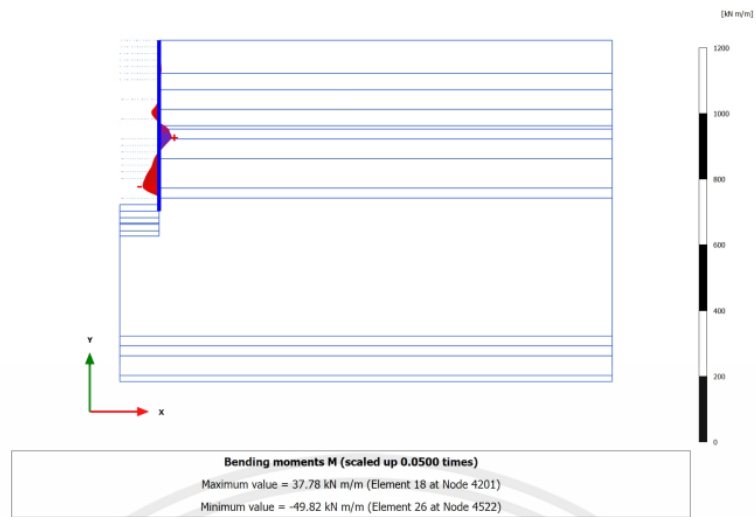


รูปที่ 4.89 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -20.0 m.

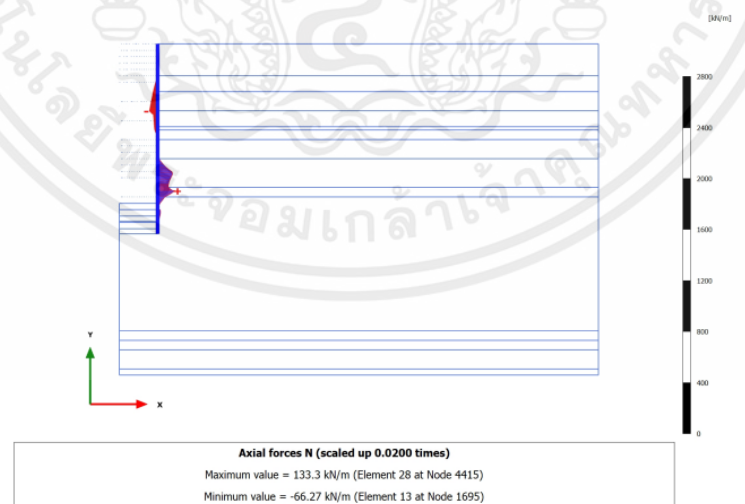
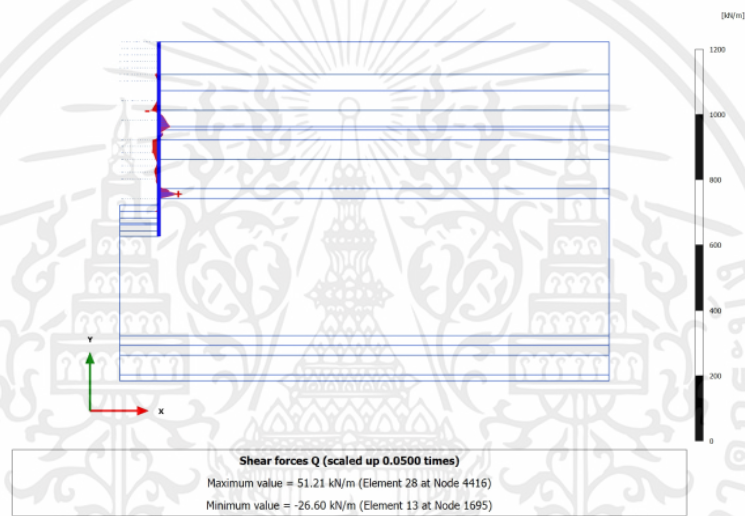
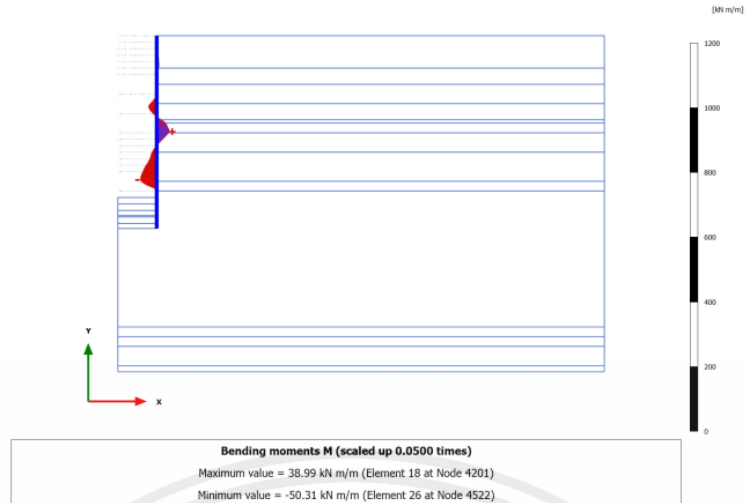
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



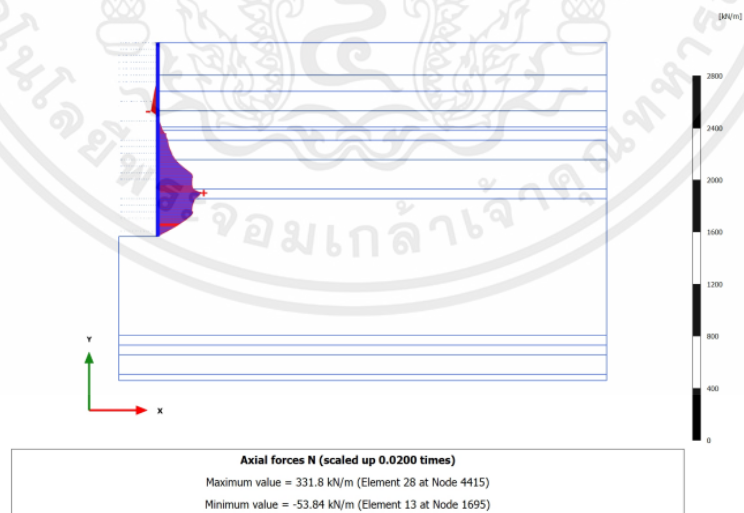
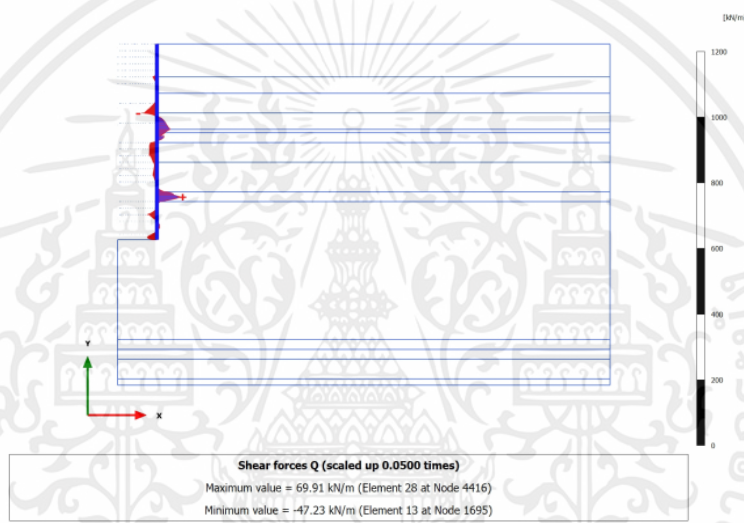
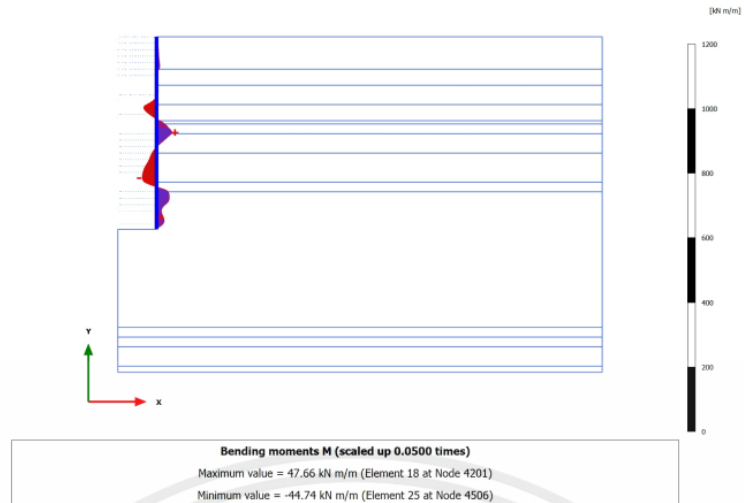
รูปที่ 4.90 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -26.0 m



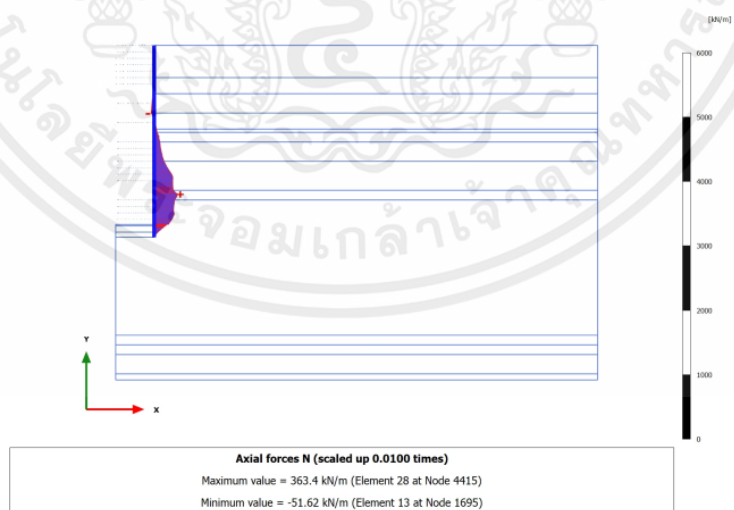
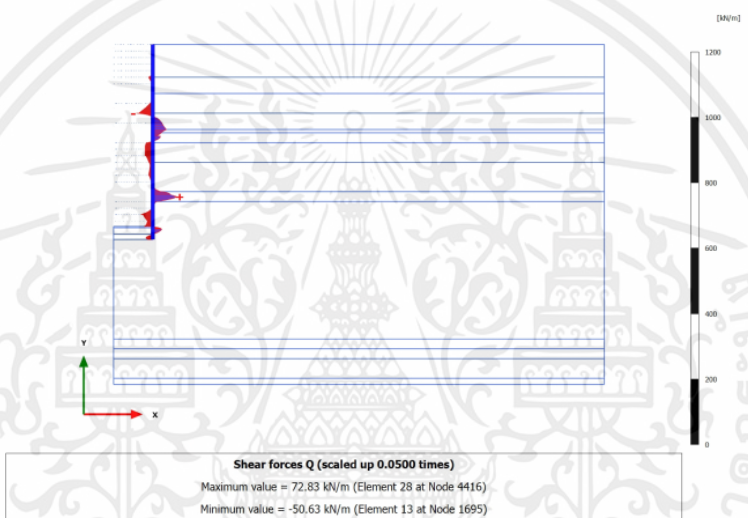
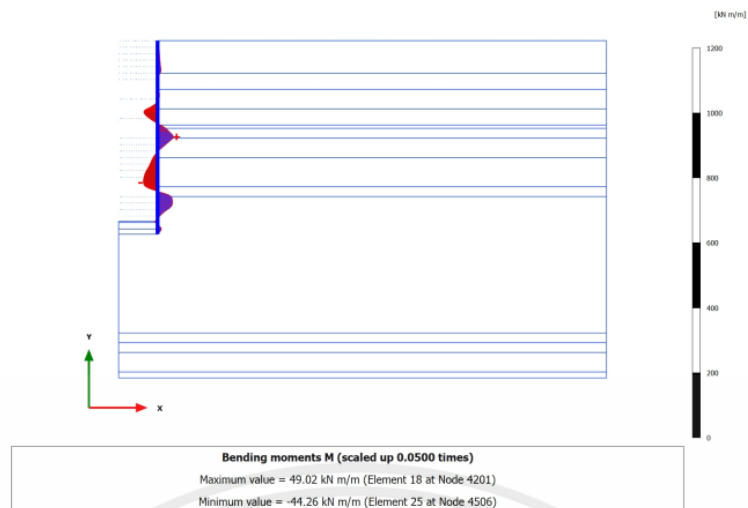
รูปที่ 4.91 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -25.0 m.



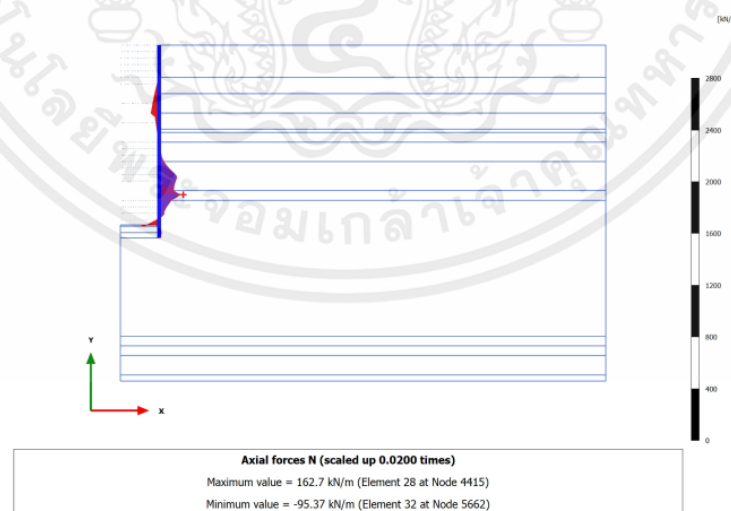
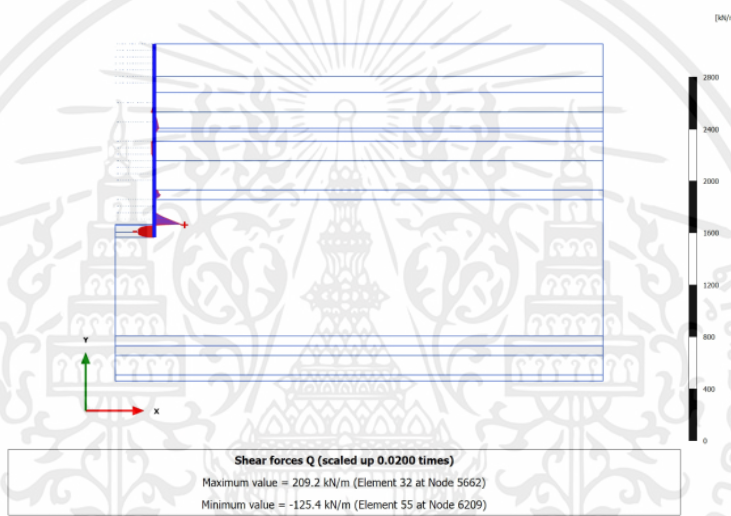
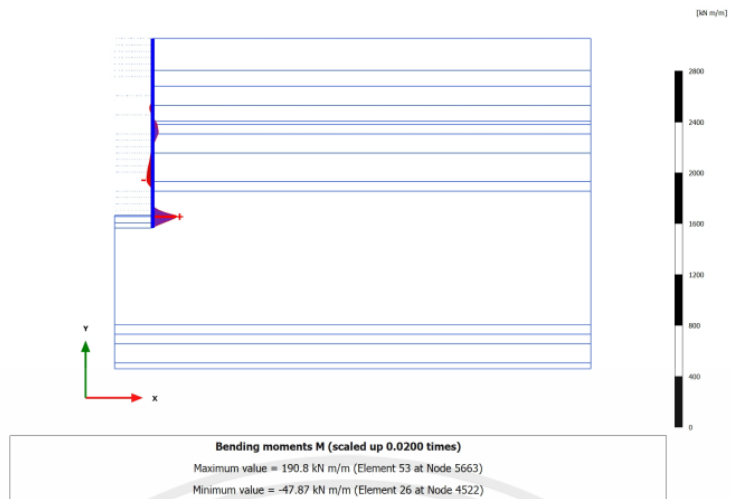
รูปที่ 4.92 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install wall to -29.8 m.



รูปที่ 4.93 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Excavation to -29.8 m.

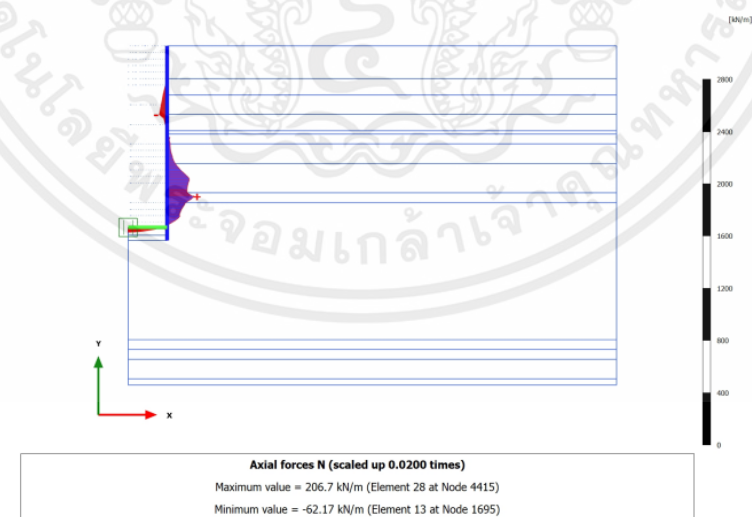
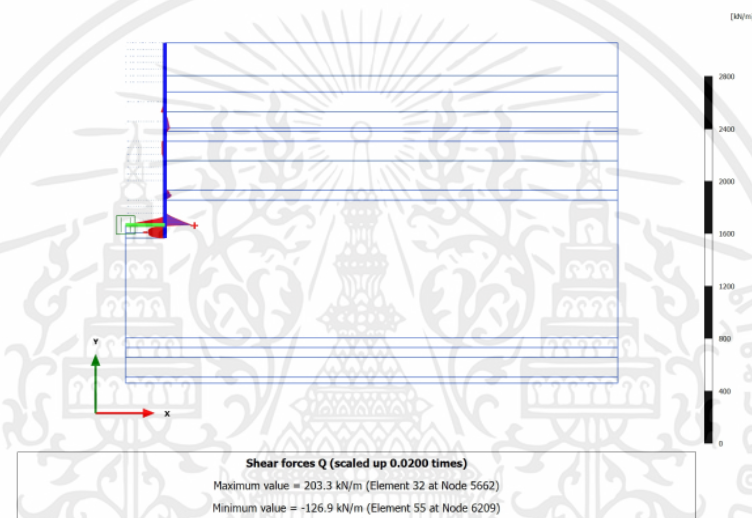
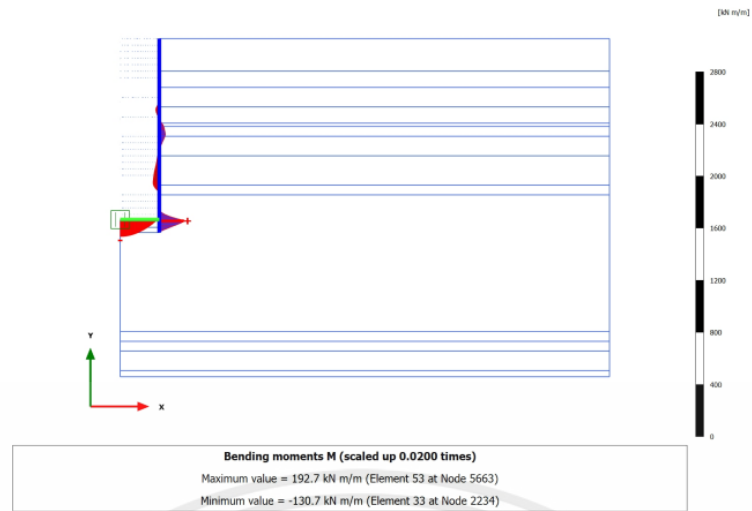


รูปที่ 4.94 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install concrete plug

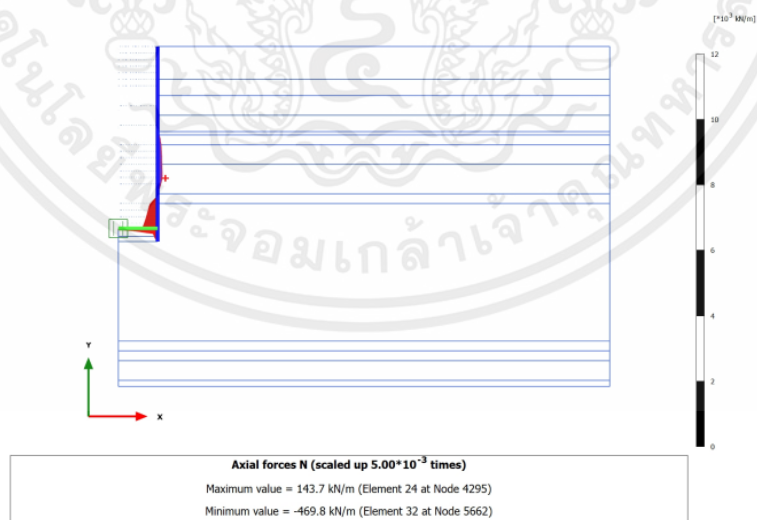
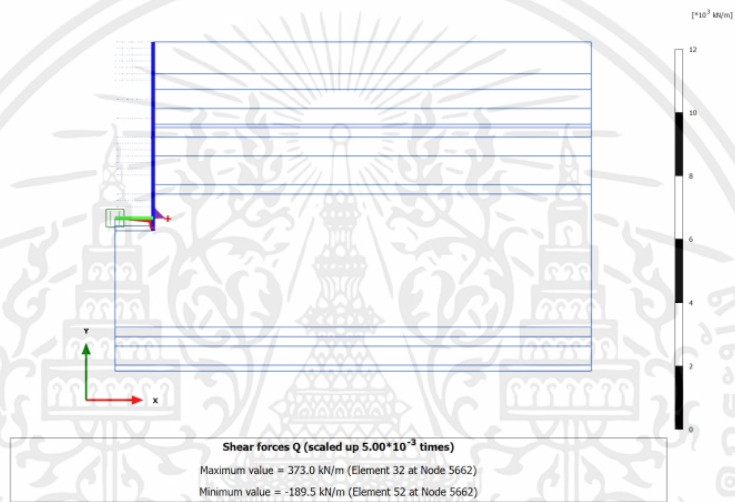
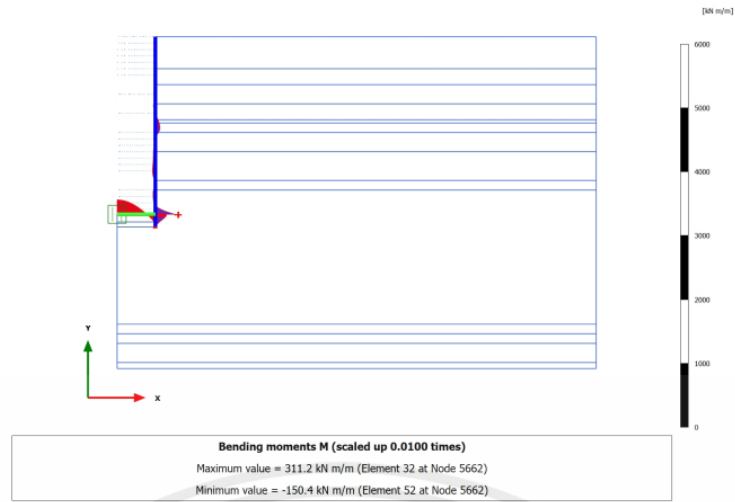


รูปที่ 4.95 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Dewatering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.96 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ Install base slab



รูปที่ 4.97 แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นของปล่องอุโมงค์ขณะที่ระดับน้ำใต้ดิน Hydrostatic

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์นี้ได้จากการศึกษาข้อมูลเทคนิคการก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยใช้วิธีการจมนปล่องอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลดินต่าง ๆ ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างเพื่อสร้างแบบจำลองของปล่องอุโมงค์โดยอ้างอิงจากข้อมูลจริงจากการก่อสร้าง ซึ่งใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ในการสร้างแบบจำลอง แล้วจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในการก่อสร้าง ทั้งนี้สามารถสรุปผลการวิเคราะห์และมีข้อเสนอแนะดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

5.1.1 จากผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบปล่องอุโมงค์ที่ได้จากการติดตั้ง Inclinator จำนวน 1 จุด ซึ่งติดตั้งอยู่ในดินที่ห่างจากปล่องอุโมงค์ 2 เมตร เมื่อนำผลจากการตรวจวัดที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าทิศทางการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณรอบปล่องอุโมงค์มีแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของดินไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน แต่เนื่องจากในช่วงหลังการทำ Trial Jet Grouting พบว่าค่าการเคลื่อนตัวของดินในสนามมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทำ Trial Jet Grouting

5.1.2 จากผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของดินในบริเวณรอบปล่องอุโมงค์ที่ได้จากการติดตั้ง Settlement Point-Ground (SS) โดยติดตั้งบริเวณรอบ ๆ ปล่องอุโมงค์ จำนวน 10 จุด เมื่อนำผลจากการตรวจวัดที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าค่าการทรุดตัวของดินในบริเวณรอบปล่องอุโมงค์มีค่าการทรุดตัวที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงหลังจากมีการทำ Trial Jet Grouting พบว่าค่าการทรุดตัวของดินในสนามมีการทรุดตัวมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทำ Trial Jet Grouting

5.1.3 จากผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น นอกจากทำให้ทราบค่าของการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบปล่องอุโมงค์และการทรุดตัวของดินบริเวณรอบปล่องอุโมงค์แล้ว ยังทำให้ทราบถึงค่าของแรงตามแนวแกน (Axial Force), แรงเฉือน (Shear Force) และ โมเมนต์ดัด (Bending Moment) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของปล่องอุโมงค์ ซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อได้ในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของปล่องอุโมงค์ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย

1. ควรมีการสำรวจพื้นที่ก่อสร้างจริง เพื่อเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การทดสอบต่าง ๆ รวมทั้งสอบถามวิศวกรหรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการโดยตรง
2. ศึกษาหาตัวแปรเพิ่มเติมหรือปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดิน เพื่อขยายขอบเขตของงานวิจัย



## รายการอ้างอิง

Mr.Songdech Kaenpubcha. (2005). **BEHAVIOR OF DEEP WORKING SHAFT FOR CONSTRUCTION OF A BIG FLOOD DIVERSION TUNNEL.** (Thesis). Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Jeffrey Hoffman, Jill Roboski S.M. ASCE, Richard J. Finno, M ASCE. (2004). **GROUND MOVEMENTS CAUSED BY CAISSON INSTALLATION AT THE LURIE EXCAVATION PROJECT.** (Research). Department of Civil and Environmental Engineering, Northwestern University, Evasnton, IL.

Fang-Le Peng, Hai-Lin Wang, Yong Tan, Zheng-Ling Xu and Yao-Liang Li. (2011). **FIELD MEASUREMENTS AND FINITE-ELEMENT METHOD SIMULATION OF A TUNNEL SHAFT CONSTRUCTION PNEUMATIC CAISSON METHOD IN SHANGHAI SOFT GROUND.** (Paper). J. Geotech. Geoenviron. Eng.

Brinkgreve, R. B. J., Broere, W., and Waterman, D. (2003). **PLAXIS version 8 material models manual.** Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

พรพจน์ ตันเส็ง. (2011). **วิศวกรรมฐานราก FOUNDATION ENGINEERING.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Chanaton Surarak, Suched Likitlersuang, Dariusz Wanatowski, Arumugam Balasubramaniam, Erwin Oh, Hong Guan. (2012). **Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays.** The Japanese Geotechnical Society.

ธานินทร์ พงศ์รุจิกร. (1985). **เทคนิคในการประมาณค่าการทรุดตัวของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร.** (วิทยานิพนธ์). วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย