

การศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืด
โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY THE PATTERN OF SOIL CEMENT FOR SHEET PILES WALL
REINFORCEMENT BY USING FINITE ELEMENT METHOD (FEM)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564
KMITL-2021-EN-M-097-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY THE PATTERN OF SOIL CEMENT FOR SHEET PILES WALL
REINFORCEMENT BY USING FINITE ELEMENT METHOD (FEM)



PANES OPAKULAWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-M-097-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดโดยวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title Study the Pattern of Soil Cement Columns for Sheet Piles Wall
Reinforcement by Using Finite Element Method (FEM)

นักศึกษา นายพนัส โอภากุลวงษ์

รหัสประจำตัว 62601164

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

พ.ศ. 2564

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ศลิษา ไชยพุทธ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการก่อสร้างและออกแบบอาคารสูงในกรุงเทพมหานครนิยมออกแบบให้มีชั้นใต้ดิน เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ได้อย่างคุ้มค่า การก่อสร้างชั้นใต้ดินนิยมใช้กำแพงเข็มพืดเป็นระบบป้องกันแรงดันดินด้านข้าง เนื่องจากระบบกำแพงเข็มพืดใช้พื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างในระบบอื่น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns, SCC) จากกรณีศึกษาประสิทธิภาพของกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) แบบมีค้ำยันในงานขุดดินลึก 7 เมตร โดยมีการศึกษา 3 รูปแบบประกอบด้วย 1) รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ 2) รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และ 3) รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ผลจากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในพื้นที่ก่อสร้าง ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าการใช้รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับขุดดิน สามารถลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดได้มากที่สุด 12.7 % นอกจากนี้รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ยังช่วยให้การขุดดินสามารถทำได้โดยสะดวกมากขึ้นกว่ารูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study the Pattern of Soil Cement Columns for Sheet Piles Wall Reinforcement by Using Finite Element Method (FEM)
Student	Mr. Panes Opakulawong
Student ID.	62601164
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Salisa Chaiyaput

ABSTRACT

Nowadays, in the skyscraper construction in Bangkok always has a basement in order to take the advantage of the space in the building so the basement construction has to use sheet piles to protect it from the lateral earth pressure. Due to sheet piles wall take less space than other protection systems. This research studies types of soil cement columns (SCC) for increasing the efficiency of sheet piles with bracing in 7 meters excavation. It has 3 case studies consist of 1) sheet piles without reinforced SCC, 2) sheet piles with vertical SCC soil side and excavation side and 3) sheet piles reinforced SCC in horizontal axis under the excavation level. Then, observing the horizontal displacement with the Inclinator construction area in order to compare the horizontal displacement from Finite Element Method (FEM) to validate numerical model. In addition, the research finds that the decision to apply sheet piles reinforced SCC in horizontal axis under the excavation level. It can reduce displacement of sheet piles 12.7% and this type is more convenient for excavation work than sheet piles with vertical SCC.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ และ ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบุรณ์ สำหรับคำแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร รศ.สุวัฒน์ ถิระเศรษฐ์ ผศ.ดร.วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์ และผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผศ.ดร.สยาม ยิ้มศิริ ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัทอิโรเซ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลดิน และข้อมูลการก่อสร้างของโครงการ รวมถึงข้อมูลทางด้านเทคนิคที่มีความจำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณนายหฤทส์ถ์ พอบาล ที่ช่วยเหลือเรื่องจีปาะเกือบทุกเรื่องในงานวิจัยนี้ และทุกท่านที่อยู่ในห้องวิจัยอาคารซีซีเอ ชั้นหนึ่ง และชั้นสาม สำหรับสถานที่เขียนบทความ และรูปเล่มงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคุณนายธัมมบุรณ์ สิริศรีสัมฤทธิ์ นายเอกพิศิษฐ์ จันทร์ทอง และ นายณกัป อาแวโต ที่คอยช่วยเหลือในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ดินโดยวิธีไฟฟไนท์เอลิเมนต์ รวมถึงแนะนำแนวทางในการศึกษาจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายปยุตวิช ปานกลาง เพื่อนสนิทที่คอยปรึกษาปัญหาชีวิตเกือบทุกเรื่อง เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้มองเห็นมุมมองในการดำเนินชีวิตในแบบที่ไม่เคยเห็น และหวังว่าจะประสบความสำเร็จไปด้วยกันในชีวิตนี้

ขอขอบพระคุณนายณัฐชนน พันธพานิชย์กุล ที่ช่วยเหลือด้านภาษาอังกฤษที่ผู้วิจัยไม่ถนัดเป็นอย่างมาก ในทุกวิชาเรียนและการสัมมนา

ขอขอบพระคุณนายนิติกร แสงสว่าง นางสาวสิรินาถ ชวนพงษ์พานิช และนายฉัตรดนัย แสงณรงค์ สำหรับการสมัครเรียนปริญญาโทมาด้วยกัน ลงเรียนวิชาต่าง ๆ ไปพร้อม ๆ กับงานเอกสารที่ช่วยกันหา ช่วยกันดู พากันทำไปด้วยกัน รวมถึงปรึกษาเรื่องราวในชีวิตบนโต๊ะอาหารร่วมกัน

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง ญาติ และเพื่อน ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงอีกมากมาย ที่ได้มอบความรัก และกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณตัวผู้วิจัยเอง ที่ไม่ได้ล้มเลิกไประหว่างทาง แม้จะเจออุปสรรคหรือเหตุการณ์ที่ไม่คาดฝันมาโดยตลอดงานวิจัย

พนัส โอภากุลวงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	14
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.3.1 ขอบเขตของการศึกษาด้านพื้นที่ศึกษา.....	14
1.3.2 ขอบเขตของการศึกษาด้านข้อมูล.....	14
1.3.3 ขอบเขตของการศึกษาด้านระเบียบวิธีวิจัย.....	14
1.3.4 ขอบเขตของการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์.....	14
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ระบบกำแพงกันดิน (Retaining Wall).....	16
2.1.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยใช้หลักการของ Rankine.....	16
2.1.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยใช้หลักการของ Coulomb.....	19
2.1.3 การใช้แผนภูมิขอบเขตหน่วยแรงดันดินปรากฏที่เสนอโดย Terzaghi & Peck (Apparent Pressure Envelope diagram by Terzaghi and Peck).....	20
2.2 กำแพงกันดินระบบ Brace Cuts.....	21
2.2.1 หลักการออกแบบระบบกำแพงเข็มพืด.....	21
2.2.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง.....	21
2.2.3 การออกแบบระบบ Braced Cuts.....	22
2.2.4 ข้อพิจารณาในการก่อสร้างระบบโครงสร้างกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile With Brace Cuts).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เสาค้ำดินซีเมนต์ (Soil Cement Column).....	24
2.3.1 การผสมแบบเชิงกล (Mechanical Mixing Method)	24
2.3.2 การผสมแบบแรงดัน (Jet Grouting Method).....	26
2.4 การก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบ Top-Down โดยใช้เสาค้ำดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน	28
2.5 เสาค้ำดินซีเมนต์แนวนอน (Horizontal Soil Cement Column)	29
2.6 หลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Principle of Finite Element Method)	33
2.6.1 การแบ่งชิ้นส่วน (Element Discretization)	33
2.6.2 การเลือกฟังก์ชันของตัวแปรหลัก (Primary Variable Function Selection). 33	
2.6.3 การสร้างสมการของแต่ละชิ้นส่วน (Element Equation).....	34
2.6.4 การสร้างสมการหลัก (Global Equation).....	34
2.6.5 เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions).....	34
2.6.6 การแก้สมการหลัก (Solve the Global Equation).....	34
2.7 ข้อพิจารณาสำหรับปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering Considerations)	34
2.7.1 รูปแบบเรขาคณิตในอุดมคติ (Geometric Idealization)	35
2.7.2 ปัญหาระนาบความเครียด (Plane Strain Problem).....	35
2.8 แบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของดิน (Constitutive Soil Models).....	36
2.8.1 แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model).....	36
2.8.2 แบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model).....	37
2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	39
2.9.1 ค่าพารามิเตอร์ของดิน.....	39
2.9.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกำแพงกันดิน.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.1 ข้อมูลของโครงการ	44
3.1.1 พื้นที่ก่อสร้าง.....	44
3.1.2 ระบบกำแพงกันดิน	45
3.1.3 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 วิธีการขุดดินโดยใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยันทางข้าง (Braced Cuts).....	46
3.2.1 การติดตั้งกำแพงกันดิน	46
3.2.2 การสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์.....	48
3.2.3 การขุดเปิดหน้าดิน	48
3.2.4 การติดตั้งค้ำยันทางข้าง.....	48
3.2.5 การทำงานในชั้นถัดไป.....	49
3.2.6 การขุดดินในชั้นสุดท้าย	50
3.2.7 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้วย FEM.....	50
3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50
3.3.1 ลักษณะชั้นดิน.....	50
3.3.2 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างในสนาม	52
3.3.3 ลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
3.3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์	57
3.3.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดด้วย PLAXIS 2D	59
3.4 การสอบเทียบแบบจำลอง	66
3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา.....	67
3.5.1 รูปแบบ A กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์.....	67
3.5.2 รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง.....	68
3.5.3 รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดิน	71
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....	72
4.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง.....	72
4.2 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด	73
4.2.1 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A.....	74
4.2.2 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B	74
4.2.3 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1 และ B1.2.....	74
4.2.4 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1 และ B2.2.....	74
4.2.5 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนนไ้ระดับบ่อชุดดิน	76
4.3.1 การอุดของดินจากการเสริมกำลังด้วยรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนนไ้ระดับบ่อชุดดิน.....	76
4.3.2 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพีตจากการเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนน	78
4.3.3 ความสัมพันธ์ของขนาดความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนนไ้ระดับบ่อชุดดิน.....	80
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผลการวิจัย	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก ก การตีพิมพ์วารสารวิชาการ.....	87
ภาคผนวก ข ผลเจาะสำรวจชั้นดินและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	96
ภาคผนวก ค ผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพีตในสนามจากการตรวจวัดด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) I-1, I-2 และ I-3	123
ประวัติผู้เขียน.....	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	58
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของกำแพงเข็มพืด.....	58
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของค้ำยันทางข้าง.....	58
ตารางที่ 4.1 ผลสรุปการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดในทุกรูปแบบ.....	73
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อชุด.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาพ Active ของ Rankine.....	17
รูปที่ 2.2 สถานะหน่วยแรงดินเมื่อดินวิบัติในสภาวะแรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure)....	17
รูปที่ 2.3 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาพ Passive ของ Rankine.....	18
รูปที่ 2.4 สถานะหน่วยแรงดินเมื่อดินวิบัติในสภาวะแรงดันดินเชิงรับ (Passive Earth Pressure) ..	18
รูปที่ 2.5 แรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure) ของ Coulomb	19
รูปที่ 2.6 แผนภูมิขอบเขตหน่วยแรงดันดินของ Terzaghi & Peck	20
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้ง	25
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบท่อเดี่ยว (Single Tube).....	26
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบท่อคู่ (Double Tube).....	27
รูปที่ 2.10 การสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบสามท่อ (Triple Tube)	27
รูปที่ 2.11 รูปตัดตามยาวของโครงการโดยแสดงระดับของการขุด ระบบกำแพงกันดิน และตำแหน่ง พื้นชั้นใต้ดิน (พรพจน์ ต้นเส็ง, 2555)	28
รูปที่ 2.12 รูปตัดโดยทั่วไปของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดินกับระบบกำแพงเข็ม พิดในโครงการ UE Square, Khoo et al (1997).....	30
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการทำงานของวิธีเทคนิคการอัดฉีดด้วยท่อคอมโพสิต	31
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการอัดฉีดด้วยท่อคอมโพสิตแบบใหม่.....	32
รูปที่ 2.15 งานขุดดินแบบมีเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนอยู่ในโซนของการเกิดแรงดันดินเชิงรับ.....	32
รูปที่ 2.16 การวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ระดับขุดดินด้วย FEM เสนอโดย Xie et al. (1999)	33
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างปัญหาระนาบความเครียด (Examples of Plane Strain Problem)	35
รูปที่ 2.18 พื้นผิวครากแบบมอร์-คูลอมบ์ในสองมิติ (Mohr-Coulomb Failure Criterion).....	37
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตรกับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย.....	38
รูปที่ 2.20 พื้นผิวครากในแบบจำลองดินอ่อน.....	39
รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า Unconfined Compressive Strength สำหรับดินเหนียว เสนอโดย Pitupakorn (1982)	40
รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า N_q , N_y และ ϕ ที่เสนอโดย Peck, Handson, Thornburn (1974).....	41
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus และค่า S_u ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.24 ค่าดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index, λ) และ ดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, K) ในแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model) เสนอโดย Suched et al (2013).....	43
รูปที่ 3.1 บริเวณพื้นที่ก่อสร้างเขตรักษาพันธุ์ กรุงเทพมหานคร	44
รูปที่ 3.2 ระบบกำแพงกันดินของโครงการ	45
รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในสนาม.....	46
รูปที่ 3.4 กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)	47
รูปที่ 3.5 Diaphragm Wall กำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (Rigid Wall)	47
รูปที่ 3.6 การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วย Jet Grouting Method	48
รูปที่ 3.7 การทำงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันทางข้าง.....	49
รูปที่ 3.8 การขุดดินเพื่อติดตั้งค้ำยันทางข้างให้กำแพงกันดินในชั้นถัดไป.....	49
รูปที่ 3.9 ลักษณะชั้นดินในเขตพื้นที่ก่อสร้างที่ระดับ ± 0.00 ถึง -90.00 เมตร	51
รูปที่ 3.10 ทำการติดตั้งกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อขุดดินและติดตั้งค้ำยัน	52
รูปที่ 3.11 ขุดดินเพื่อติดตั้งค้ำยันในชั้นที่ 2 แล้วทำการขุดดินในระดับสุดท้าย.....	52
รูปที่ 3.12 แบบจำลองของการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมกำลังกำแพงเข็มพืด.....	53
รูปที่ 3.13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A	53
รูปที่ 3.14 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B	54
รูปที่ 3.15 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1	54
รูปที่ 3.16 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.2.....	55
รูปที่ 3.17 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1	55
รูปที่ 3.18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.2.....	56
รูปที่ 3.19 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C	56
รูปที่ 3.20 Project Properties	59
รูปที่ 3.21 Modify Soil Layer.....	60
รูปที่ 3.22 Structure Model.....	60
รูปที่ 3.23 Mesh Model.....	61
รูปที่ 3.24 Initial Phase.....	61
รูปที่ 3.25 Phase 1 ติดตั้งกำแพงเข็มพืดและน้ำหนักแผ่กระจาย.....	62
รูปที่ 3.26 Phase 2 ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกำแพงเข็มพืด	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.27 Phase 3 ขุดดินออกที่ระดับ -0.75 เมตร.....	63
รูปที่ 3.28 Phase 4 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -0.25 เมตร	63
รูปที่ 3.29 Phase 5 ขุดดินออกที่ระดับ -3.45 เมตร.....	64
รูปที่ 3.30 Phase 6 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -2.95 เมตร	64
รูปที่ 3.31 Phase 7 ขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร.....	65
รูปที่ 3.32 การแสดงผลระหว่างทำการคำนวณ (Calculation Phases).....	65
รูปที่ 3.33 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่เกิดจากการตรวจวัดในสนามที่ระยะเวลา 21 วัน	66
รูปที่ 3.34 รูปแบบ A กำแพงเข็มที่แบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์.....	67
รูปที่ 3.35 รูปแบบ B กำแพงเข็มที่ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง.....	68
รูปที่ 3.36 รูปแบบ B1.1 และ B1.2 กำแพงเข็มที่ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งเดียว	69
รูปที่ 3.37 รูปแบบ B2.1 และ B2.2 กำแพงเข็มที่ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งเดียว	70
รูปที่ 3.38 รูปแบบ C กำแพงเข็มที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน	71
รูปที่ 4.1 การสอบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ ระหว่างการตรวจวัดในสนาม กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ระยะเวลา 21 วัน	72
รูปที่ 4.2 การถอดของดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	76
รูปที่ 4.3 การกำหนดความยาวคงที่ [L] เพื่อเปลี่ยนแปลงความหนา [T] ของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	77
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา [T] ของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสูงสุดของดิน โดยในโปรแกรมใช้ค่า [Uy max]	77
รูปที่ 4.5 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	78
รูปที่ 4.6 การกำหนดความหนาคงที่ [T] เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาว [L] ของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	78
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความยาว [L] เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มที่ โดยในโปรแกรมใช้ค่า [Ux max].....	79
รูปที่ 4.8 การกำหนดปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน [V] ให้เป็นค่าคงที่ .	81
รูปที่ 4.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบกำแพงเข็มที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินแบ่งโซนตามลักษณะรูปร่าง (ก) โซน A เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอน (ข) โซน B เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (ค) โซน C เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้ง	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด.....	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวอย่างต่อเนื่องของสังคมเมืองในปัจจุบัน ทำให้อัตราการย้ายถิ่นฐานเข้ามาอาศัยในเมืองมีมากขึ้น ทั้งเพื่ออยู่อาศัย ประกอบอาชีพ หรือเพื่อการศึกษา ทำให้เกิดการแข่งขันทางด้านการก่อสร้างที่อยู่อาศัย โดยเฉพาะการก่อสร้างอาคารสูงในกรุงเทพมหานครมักมีการก่อสร้างชั้นใต้ดินเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของอาคารได้อย่างคุ้มค่า สิ่งที่มาคือการเลือกใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ การก่อสร้างอาคารสูงนิยมออกแบบให้มีการก่อสร้างชั้นใต้ดินเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด โดยการก่อสร้างดำเนินการด้วยการขุดดินที่ใช้กำแพงกันดินเป็นระบบป้องกันแรงดันดิน ทำให้การขุดดินมีเสถียรภาพ การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจึงเป็นส่วนสำคัญเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและช่วยลดผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง

พรพจน์ ดันเส็ง (2555) ได้รายงานการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินที่ใช้ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับเทคนิคการก่อสร้างแบบ Top-Down สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ และการใช้โครงสร้างพื้นของอาคารเป็นค้ำยันถาวรเพื่อลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงการก่อสร้างชั้นใต้ดิน พบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการวิเคราะห์ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัวและแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้ในสนามมาก ดังที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Teparaksa et al (1999)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns, SCC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) แบบมีค้ำยันในงานขุดดินลึก 7 เมตร โดยมีการศึกษากำแพงเข็มพืด 3 รูปแบบ ประกอบด้วย 1) รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ 2) รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และ 3) รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน นำผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในพื้นที่ก่อสร้าง เปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด และรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะแตกต่างกัน ที่มีผลต่อการเสริมกำลังของกำแพงเข็มพืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของรูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะต่าง ๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

1.2.2 เพื่อหาขนาดและรูปร่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด

1.2.3 เพื่ออธิบายพฤติกรรมของรูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีขอบเขตของการศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็น 3 หมวดหมู่ดังนี้

1.3.1 ขอบเขตของการศึกษาด้านพื้นที่ศึกษา

ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของพื้นที่ก่อสร้างนี้ คือบริเวณพื้นที่ติดซอยศรีอยุธยา 8 ถนนศรีอยุธยา เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3.2 ขอบเขตของการศึกษาด้านข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลการก่อสร้างระบบค้ำยันชั่วคราวสำหรับงานขุดดินเพื่อทำโครงสร้างใต้ดิน ด้วยโครงสร้างกำแพงเข็มพืดในงานขุดดินลึก 7 เมตร แบบมีค้ำยัน 2 ชั้น จากบริษัท ฮีโรเซ ประเทศไทย จำกัด

1.3.3 ขอบเขตของการศึกษาด้านระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยได้ศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D Connect Edition V20 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ Plane Strain Condition พิจารณาคุณสมบัติของชั้นดินด้วย Mohr Column Model ในชั้นทรายถมช่วง 10 เมตรแรก และพิจารณาคุณสมบัติของชั้นดินด้วย Soft Soil Model ในช่วงชั้นดินถัดมาทั้งหมด เนื่องจากมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับดินในสนาม

1.3.4 ขอบเขตของการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์

การศึกษานี้ไม่รวมการศึกษาด้านงบประมาณการก่อสร้างของโครงการ ในขั้นตอนการก่อสร้างแต่ละขั้นตอน ทำการศึกษาในด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกคือ ส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำได้โดยการปรับเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ด้วยการตรวจวัดในสนาม โดยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) กับการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และส่วนที่สองคือการศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ในทอมของรูปร่าง ตำแหน่งการวางตัว และปริมาณที่เลือกใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถหาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวที่ดีที่สุด ของรูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะต่าง ๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

1.5.2 สามารถหาขนาดและรูปร่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด

1.5.3 สามารถอธิบายพฤติกรรมของรูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอน

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกำแพงกันดิน (Retaining Wall)

ระบบกำแพงกันดิน เป็นระบบป้องกันแรงดันดินที่เกิดจากการขุดดิน โดยมีค้ำยันทางข้างช่วยรับกำลังที่ถูกถ่ายมาจากกำแพงกันดิน โดยระบบกำแพงกันดินนี้เป็นส่วนช่วยลดการเคลื่อนตัวของแนวราบที่เกิดขึ้นของกำแพงเนื่องจากการขุดดินออก สามารถแบ่งกำแพงกันดินเป็น 2 ประเภทตามความแข็งแรง (Stiffness) คือ กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) และกำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (Rigid Wall) โดยงานศึกษานี้ใช้รูปแบบกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น ได้แก่ ระบบกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) โดยมากใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีความแข็งแรงต่ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถใช้ในงานขุดดินลึกเกินกว่า 11.50 เมตร (วันชัย, 1996)

ในกิจกรรมที่มีการขุดดินที่มีระดับต่างกัน เช่น ก่อสร้างฐานราก การก่อสร้างชั้นใต้ดิน จำเป็นต้องมีโครงสร้างกันดินเพื่อรองรับแรงดันดินที่ไม่เท่ากัน เพื่อรักษาเสถียรภาพ สำหรับแรงที่กระทำกับกำแพงกันดิน ได้แก่

1. แรงดันดินด้านข้าง เป็นแรงกระทำในแนวราบ ประกอบด้วย แรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure) และแรงดันดินเชิงรับ (Passive Earth Pressure)
2. แรงดันเนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน
3. น้ำหนักบรรทุกจรหลังกำแพงกันดินเนื่องจากการกองเก็บวัสดุโดยรอบหลุมขุดขณะก่อสร้างหรือเครื่องจักรที่ใช้ขณะทำงาน รวมถึงสิ่งปลูกสร้างทั่วไปที่อยู่โดยรอบ

2.1.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยใช้หลักการของ Rankine

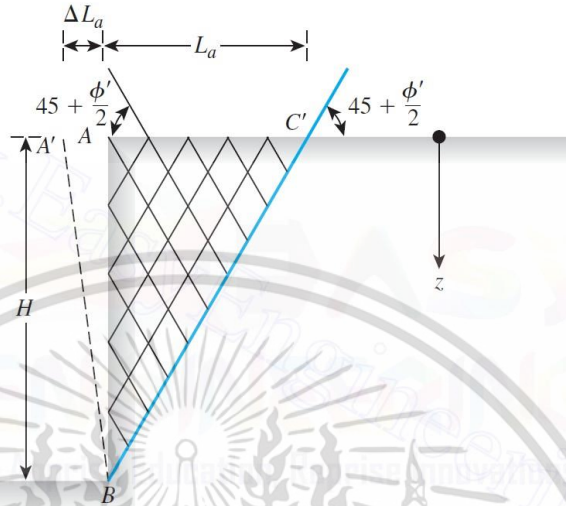
ในขณะที่ทำการขุดดินด้านในหลุมขุดออก จะมีผลทำให้ดินที่อยู่บริเวณด้านหลังกำแพงเริ่มเคลื่อนตัวดันกับกำแพง ซึ่งทำให้กำแพงเกิดการเคลื่อนตัว โดยที่การเคลื่อนตัวเป็นลักษณะการเคลื่อนตัวออกของกำแพงกันดิน ทำให้หน่วยแรงในแนวนอนของดินมีค่าลดลง ขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าคงที่ เมื่อเกิดการวิบัติขึ้น จะเรียกรูปการวิบัติที่เกิดขึ้นว่าเป็นการวิบัติแบบ Rankine Active State โดยที่กำแพงจะเคลื่อนตัวออกจากดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

สามารถพิจารณาหน่วยแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกใด ๆ ได้ ตามกฎการวิบัติตามทฤษฎีของ Mohr-Coulomb โดยมีสมมติฐานคือ

1. กำแพงอยู่ในแนวตั้ง ไม่พิจารณาถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวกำแพง
2. ดินถมหลังกำแพงอยู่ในแนวราบและ ไม่มีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นทั้งในระนาบและแนวตั้ง
3. กำแพงแข็ง และมีความยาวไม่สิ้นสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ดินมีเนื้อสม่ำเสมอ (Homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกแกนที่พิจารณา
5. สภาวะของดินแรกเริ่มต้องอยู่ในสภาพหยุดนิ่งหน่วยแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาโดยใช้วงกลมมอห์ เพื่อหาค่าหน่วยแรงดันดินที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

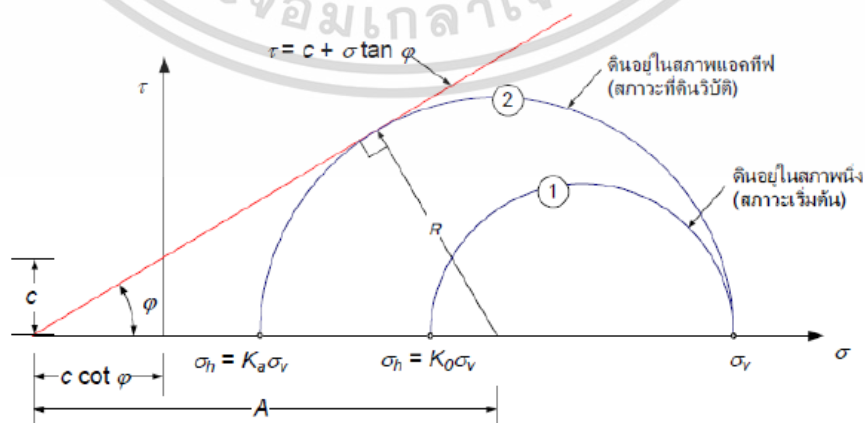


รูปที่ 2.1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาพ Active ของ Rankine

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.1)$$

ในกรณีของดินประเภท Cohesionless soil มี $C = 0$ แรงดันดินด้านข้างจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 สถานะหน่วยแรงดินเมื่อดินร่วบัตในสภาวะแรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญู เตให้เนาไปเซประยชนดานการค้ำ

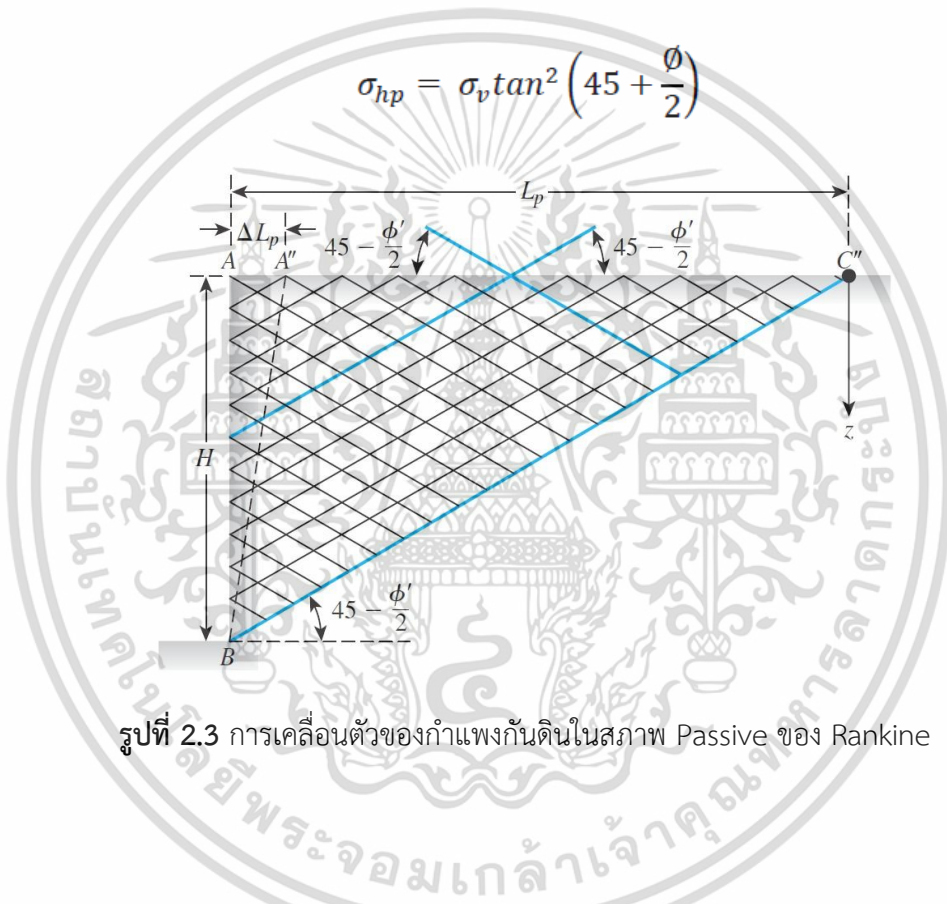
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิบัติของดินแบบสภาวะ Passive เกิดจากการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเข้าหามวลดิน ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดันดินทางข้าง ในขณะที่แรงในแนวตั้งมีค่าเท่าเดิม โดยระนาบของการวิบัติสามารถดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถพิจารณาหน่วยแรงดันดินที่เกิดขึ้นได้ โดยอาศัยวงกลมมอห์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีค่าเท่ากับ

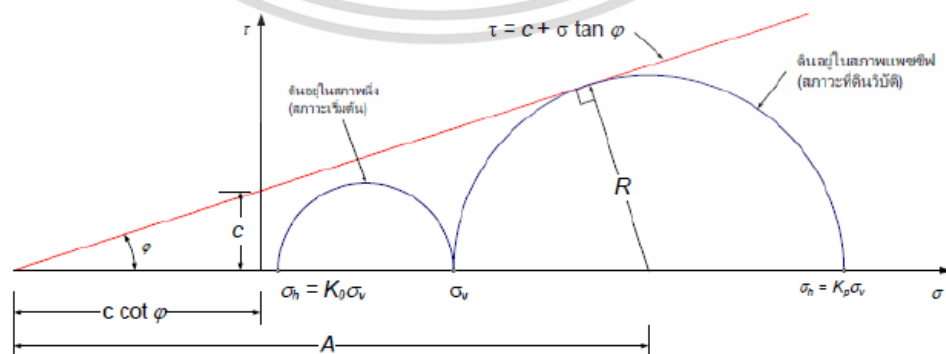
$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \tag{2.3}$$

ในกรณีของดินประเภท Cohesionless soil มี $C = 0$ แรงดันดินด้านข้างจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{hp} = \sigma_v \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาวะ Passive ของ Rankine



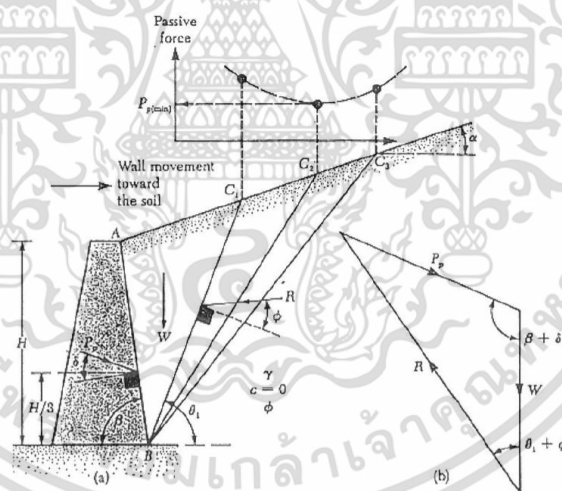
รูปที่ 2.4 สถานะหน่วยแรงดินเมื่อดินวิบัติในสภาวะแรงดันดินเชิงรับ (Passive Earth Pressure)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยใช้หลักการของ Coulomb

สามารถพิจารณาหน่วยแรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกใด ๆ ได้ ตามกฎการวิบัติตามทฤษฎีการวิเคราะห์หน่วยแรงดันข้างด้วยหลักการของ Coulomb (1776) ได้ตั้งสมมุติฐานว่า

1. ดินที่วิเคราะห์ต้องมีคุณสมบัติเป็น Homogeneous และ Isotropic ประกอบด้วยแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction) และแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
2. พื้นผิวของการวิบัติเป็นระนาบ โดยที่ Coulomb คาดว่าควรจะเป็นผิวโค้ง และพื้นผิวของดินที่ถมหลังกำแพงเป็นระนาบ อาจมีความชันได้
3. แรงเสียดทานแผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวการวิบัติ
4. พื้นผิวของการวิบัติเป็นวัตถุแข็ง (Rigid Body)
5. มีแรงเสียดทานระหว่างมวลดินกับผิวของกำแพงกันดิน
6. พิจารณาการวิบัติเป็น Plane Strain

การวิบัติของกำแพงกันดิน ในสภาวะแรงดันดินเชิงรุก จะเกิดเมื่อกำแพงเคลื่อนตัวออกจากมวลดิน และ Coulomb ได้สมมุติระนาบที่สามารถเกิดการวิบัติขึ้นได้ตามแนว BC_1 , BC_2 และ BC_3 เพื่อหาแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งค่าแรงดันนี้เขียนเป็นสมการได้ว่า



รูปที่ 2.5 แรงดันดินเชิงรุก (Active Earth Pressure) ของ Coulomb

$$P_a = 12\gamma H^2 \times K_a \quad (2.5)$$

$$P_p = 12\gamma H^2 \times K_p \quad (2.6)$$

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \phi)}{\sin^2(\beta) \sin^2(\beta - \delta) \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \alpha)}{\sin(\beta - \delta) \sin(\alpha + \beta)} \right]^2} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการประกอบการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

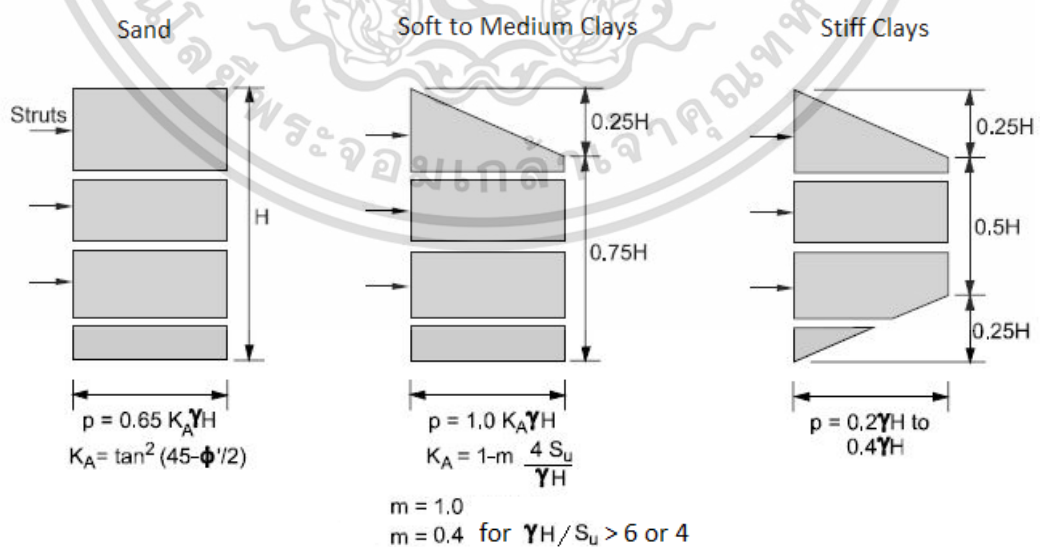
$$K_p = \frac{\sin^2(\beta - \phi)}{\sin^2(\beta)\sin^2(\beta + \delta)\left[1 - \frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\beta + \delta)\sin(\alpha + \beta)}\right]^2} \quad (2.8)$$

2.1.3 การใช้แผนภูมิขอบเขตหน่วยแรงดันดินปรากฏที่เสนอโดย Terzaghi & Peck (Apparent Pressure Envelope diagram by Terzaghi and Peck)

การวิเคราะห์แรงค้ำยันทางข้างที่เกิดขึ้นในขณะก่อสร้างกำแพงกันดินแบบ Braced Cuts โดยเริ่มขั้นตอนตั้งแต่ก่อสร้างกำแพงกันดินลงไปจนถึงระดับดินชุดเป็นอย่างน้อย หรือลึกลงไปกว่าระดับดินชุด จากนั้นจึงขุดดินข้างกำแพงกันดินลงไป แล้วติดตั้งระบบค้ำยันชั้นแรก โดยช่วงนี้กำแพงกันดินจะยังไม่มีการเคลื่อนตัวเข้ามามากนัก เนื่องจากระดับดินชุดก่อนติดตั้งระบบค้ำยันยังไม่ลึกมาก

จากนั้นจึงขุดดินต่อไป เมื่อขุดดินลึกขึ้นกำแพงก็จะถูกผลักให้เคลื่อนตัวเข้ามาในหลุมขุด จึงต้องติดตั้งระบบค้ำยันอีกระดับหนึ่ง ซึ่งแรงดันดินที่เกิดขึ้นในขณะนี้จะไม่เท่ากับแรงดันดินเชิงรุกที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Rankine และ Coulomb

เมื่อขุดดินจนถึงระดับสิ้นสุดที่กั้นบ่อขุด กำแพงกันดินจะเคลื่อนตัวเข้ามาได้อย่างอิสระ เนื่องจากไม่มีค้ำยันที่สิ้นสุดระดับขุด โดยวิธีประมาณแรงดันดินที่เกิดขึ้นที่เสนอโดย Terzaghi & Peck เป็นวิธีที่อาศัยการเก็บข้อมูลแรงในค้ำยันที่เกิดขึ้นในอดีต โดยแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ตามลักษณะของชั้นดิน วิธีนี้ให้ปริมาณแรงดันดินที่เกิดขึ้นมีขนาดมากกว่าแรงดันดินเชิงรุกที่กระทำกับกำแพงประมาณ 20-30 % (วรสิทธิ์, 2556) ซึ่งในชั้นดินกรุงเทพฯ เหมาะสมที่จะใช้โดยแกรมของกรณี Soft to Medium Clays (ประลองยุทธ์, 2545)



รูปที่ 2.6 แผนภูมิขอบเขตหน่วยแรงดันดินของ Terzaghi & Peck

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กำแพงกันดินระบบ Brace Cuts

การสร้างระบบกำแพงกันดินเพื่อป้องกันการพังทลายของดินเมื่อต้องขุดดินลงไปก่อสร้างฐานรากของอาคาร หรือการก่อสร้างฐานรากในพื้นที่อื่นจำกัด และยังมีน้ำหนักจากยานพาหนะที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจนเกิดผลกระทบต่ออาคารเคลื่อนตัวของดินรอบขุดดิน เพื่อลงไปทำงานโครงสร้างใต้ดิน ระบบโครงสร้างชั่วคราวป้องกันดินพังจึงต้องถูกนำมาใช้ กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) เป็นโครงสร้างป้องกันดินรูปแบบหนึ่งที่ถูกเลือกใช้ รูปแบบของกำแพงเข็มพืดมีด้วยกันหลายแบบดังนี้

Cantilever Sheet Pile Walls เป็นการตอกฝังแผ่นกำแพงเข็มพืดให้จมลงไปดินระยะที่ปลายล่างยึดแน่นและรับแรงดันดินด้านข้างได้โดยไม่ล้มตัวลง

Anchored Sheet Pile Walls มีลักษณะคล้ายแบบ Cantilever Sheet Pile Walls แต่เพิ่มการใช้ Anchor หรือ Tie Rod เป็นตัวยึดส่วนบนของกำแพงกันดินเข้ากับดินหรือวัสดุที่มีการนำหนักถ่วงไว้

Brace Cuts หรือ Brace Cofferdam ความมั่นคงแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับตัวเหล็กค้ำยัน (Strut) ซึ่งกำแพงเข็มพืดจะถูกตอกลงไปก่อนการขุดและติดตั้งเหล็กค้ำยันรัดรอบ (Wale) และเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับที่ออกแบบไว้ก่อนเริ่มการขุดดิน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้วิธีการใช้ กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ระบบ Brace Cuts เป็นหลักเพราะเป็นระบบที่พบเห็นทั่วไปในการก่อสร้างในเขตกรุงเทพฯ

2.2.1 หลักการออกแบบระบบกำแพงเข็มพืด

แนวทางในการออกแบบกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ระบบ Brace Cut ในดินเหนียวอ่อนมีข้อคำนึงถึงดังนี้

1. แผ่นกำแพงเข็มพืดต้องสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างจากดิน แรงดันน้ำ และ Surcharge โดยปราศจากการเกิด Buckling ในแผ่นกำแพงเข็มพืด
2. ค้ำยัน (Bracing) ต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานการเคลื่อนตัวของดิน
3. หลีกเลี่ยงการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบควรใช้ระบบ Pre-Load หรือ Jacking กับค้ำยัน
4. ค้ำยัน (Bracing) สามารถถ่ายน้ำหนักไปยังโครงสร้างถาวรได้ และไม่ทำให้โครงสร้างถาวรเกิดอันตราย หรือเสียหาย

5. กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ควรสามารถถอนขึ้นมาใช้ได้อีก

2.2.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง

ระบบ Sheet Pile With Brace Cut ประกอบด้วยแรงดันจากมวลดินถ่ายผ่านเม็ดดิน และแรงดันน้ำเข้าสู่กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) จำเป็นต้องทราบถึงรูปแบบการวิบัติ เพื่อนำไปสู่การจำลองชนิดของการคำนวณ (Model Simulation) ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การออกแบบต้องคำนวณถึงแรงดันทางด้านข้าง (Total Horizontal Stress) การเกิด Heave ในบริเวณที่ขุดดิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไป และเสถียรภาพของระบบกำแพงเข็มพืดทั้งหมด (Overall Stability) การวิบัติที่จะเกิดขึ้นได้ในระบบนี้คือการเกิดดินอูด (Heave) ในบริเวณหลุมขุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงการที่การขุดเป็นบริเวณกว้าง และเกิดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบกำแพง

รูปแบบของ Diagram แสดงแรงดันดินใน Sheet Pile With Brace Cut ที่นิยมใช้มากที่สุดเป็น Diagram ที่นำเสนอโดย Peck (1969) โดยแยกเป็นสมการเพื่อหาแรงดันในทรายและแรงดันในดินในสภาพ Undrained Cohesion มีค่ามุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction , ϕ) เป็นศูนย์

2.2.3 การออกแบบระบบ Braced Cuts

ในการออกแบบ Braced Cuts จะออกแบบแต่ละชั้นส่วนใน Braced Cuts หลังจากทราบค่าแรงดันด้านข้าง (Lateral Earth Pressure) รายละเอียดของการออกแบบแต่ละส่วนมีดังนี้

2.2.3.1 การออกแบบเหล็กค้ำยัน (Strut)

เหล็กค้ำยัน (Strut) เป็นชิ้นส่วนประเภทเสารับแรงอัดวางในแนวนอนที่รับ Bending Moment โดยมีระยะห่างในแนวตั้งไม่น้อยกว่า 2.75 เมตร และการรับน้ำหนักของเหล็กค้ำยัน (Strut) จะขึ้นอยู่กับค่า Slenderness Ratio L/R ของชิ้นส่วนที่จะสร้างเป็นเหล็กค้ำยัน (Strut) คำนวณหาแรงปฏิกิริยาที่กระทำเข้าสู่เหล็กค้ำยัน (Strut) จากแผ่นกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) เมื่อทราบค่าของ Strut Load แล้วสามารถคำนวณหาขนาดหน้าตัดและความยาวของเหล็กค้ำยัน (Strut) โดยวิธีการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัด

2.2.3.2 การออกแบบแผ่นกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall)

1. ออกแบบโดยการพิจารณาค่า Bending Moment สูงสุดที่กระทำกับกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ความกว้างแผ่น 1.00 เมตร
2. ค่า Bending Moment พิจารณาใช้ค่าสูงสุดที่กระทำต่อผนัง
3. คำนวณหาค่า Section Modulus ได้จากวิธีการคำนวณหาชิ้นส่วนต้านทานแรงดัด
4. ค่า Allowable Flexural Stress ของกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) สามารถค้นหาข้อมูลได้จากผู้จำหน่ายหรือผู้ให้เช่าแผ่นกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall)

2.2.3.3 การออกแบบเหล็กค้ำยันรัตรอบ (Wale)

เหล็กค้ำยันรัตรอบ (Wale) เป็นส่วนของโครงสร้างที่ต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างจากกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ซึ่งจะถ่ายแรงเป็นแรงกระจาย (Uniform Horizontal Force) เข้าสู่เหล็กค้ำยันรัตรอบ (Wale)

1. เหล็กค้ำยันรัดรอบ (Wale) เป็นชิ้นส่วนที่เป็นคานต่อเนื่อง คือมี Support ที่ตำแหน่งของเหล็กค้ำยัน (Strut) และมีแรงที่กระทำสู่เหล็กค้ำยันรัดรอบ (Wale) คือแรงดันดินผ่านกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) เป็นลักษณะ Linier หรือ Distribution Load

2. คำนวณหาค่า Bending Moment

3. คำนวณหาค่า Section Modulus และทำตามวิธีคำนวณชิ้นส่วนรับแรงดัด แต่ควรเลือกหน้าตัดให้มีขนาดเท่ากับเหล็กค้ำยัน (Strut) เพื่อความสะดวกในการเชื่อมยึดกัน

เหล็กค้ำยัน (Strut) เป็นส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนที่ถ่ายจากเหล็กค้ำยันรัดรอบ (Wale) และรับแรงจากแนวตั้งที่ถ่ายลงจากเหล็กแผ่นพื้น (Platform) ซึ่งนำมาวางไว้บนโครงสร้างเหล็กค้ำยัน (Strut) เพื่อใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยทั่วไปเหล็กค้ำยันจะมี 2 ชนิด คือ เหล็กค้ำยันทางด้านยาวและด้านขวาง แบ่งเป็นชั้น ๆ ตามระดับความลึกของการขุดและจะติดตั้ง Kirin Jack ไว้ที่เหล็กค้ำยัน (Strut) ด้วยเพื่อทำการอัดแรงล่วงหน้า (Pre-Load) ออกทั้ง 4 ด้านของภายในกำแพงเพื่อประโยชน์ในการรับแรงดันได้ดีขึ้น

เสาค้ำยันหลัก (King Post) เป็นส่วนที่รับแรงจากเหล็กค้ำยัน (Strut) ในแนวตั้งแล้วถ่ายลงสู่ดินทำหน้าที่เหมือนเสาในอาคารขนาดใหญ่ บางที่ยังออกแบบให้เป็นฐานรองรับปั้นจั่นเสาสูง (Tower Crane) ในการขนส่งวัสดุอีกด้วย

2.2.4 ข้อพิจารณาในการก่อสร้างระบบโครงสร้างกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile With Brace Cuts)

1. แนวการติดตั้งแผ่นกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ต้องอยู่ห่างจากขอบฐานรากโดยมีระยะเพียงพอสำหรับการติดตั้งและรื้อถอนไม้แบบฐานราก

2. เสาค้ำยันหลัก (King Post) ที่ทำการตอกเพื่อรับน้ำหนักที่ถ่ายจากเหล็กค้ำยัน (Strut) ต้องมีความยาวตามกำหนดและได้แนวตั้ง

3. เหล็กค้ำยัน (Strut) และเหล็กค้ำยันรัดรอบ (Wale) ต้องได้แนวตรงเพื่อให้สามารถถ่ายแรงได้ตามแนวแกนตามวัตถุประสงค์

4. แนวการเชื่อมของโครงสร้างที่เป็นเหล็กต้องเชื่อมให้ได้ความยาวและขนาดการเชื่อมที่ได้รับการออกแบบมาอย่างเคร่งครัด เพื่อความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้าง

5. ภายหลังจากการติดตั้งระบบกันดินแล้วเสร็จและมีการขุดดินในหลุมขุดแล้วจะต้องมีการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินทุกวันก่อนทำการก่อสร้าง จนกว่าการก่อสร้างในส่วนใต้ดินนั้นแล้วเสร็จ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการพิจารณาเสถียรภาพ (Stability) ของกำแพงกันดินว่ามีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่

2.3 เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column)

สำหรับประเทศไทยเสาเข็มดินซีเมนต์มักนำไปใช้ในงานฐานรากของคันทางเพื่อลดการทรุดตัว (Bergado และคณะ, 1999; Lai และคณะ, 2006) โดยการก่อสร้างนิยมใช้รูปแบบการเรียงตัวของเสาแบบเป็นตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีระยะห่างประมาณ 1.5-2.0 เมตร และเสาเข็มดินซีเมนต์มีความลึกตลอดความหนาชั้นดิน ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปที่ใช้กันในงานปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน แต่ในต่างประเทศนั้นเสาเข็มดินซีเมนต์กลับถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ กันไม่ได้มีเพียงแค่งานฐานรากเท่านั้น และยังมีรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่หลากหลายกันออกไป ลักษณะของงานที่ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นห้าประเภทหลักโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Porbaha และคณะ, 1998; Bruce และคณะ, 2002; และ Topolnicki, 2004) คือ

- 1) งานฐานราก (ญี่ปุ่น, สแกนดิเนเวีย, อเมริกา, ฝรั่งเศส และ โปแลนด์)
- 2) งานระบบค้ำยัน (ญี่ปุ่น, จีน, เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และ เยอรมัน)
- 3) งานปรับปรุงดิน (ญี่ปุ่น, ฟินแลนด์, เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และ เยอรมัน)
- 4) งานบรรเทาการเกิดดินเหลวตัว (ญี่ปุ่น และ อเมริกา)
- 5) งานกำแพงกันน้ำ (ญี่ปุ่น, อเมริกา, เยอรมัน และ โปแลนด์)

เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินในระดับลึก ด้วยแรงเชิงกลจากการหมุนของหัวเจาะหรือจากแรงดันน้ำ ทำให้ชั้นดินแตกตัวแล้วนำซีเมนต์มาผสมในอัตราส่วน 3-15% โดยน้ำหนัก ช่วยยึดติดอนุภาคของเม็ดดิน การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการปรับปรุงกำลังและคุณสมบัติ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของดินอ่อน เหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของดินธรรมชาติที่มีดินเหนียวปนอยู่มาก ในปัจจุบันมีการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น โดยการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การผสมแบบเชิงกล (Mechanical Mixing Method) และการผสมแบบแรงดัน (Jet Grouting Method)

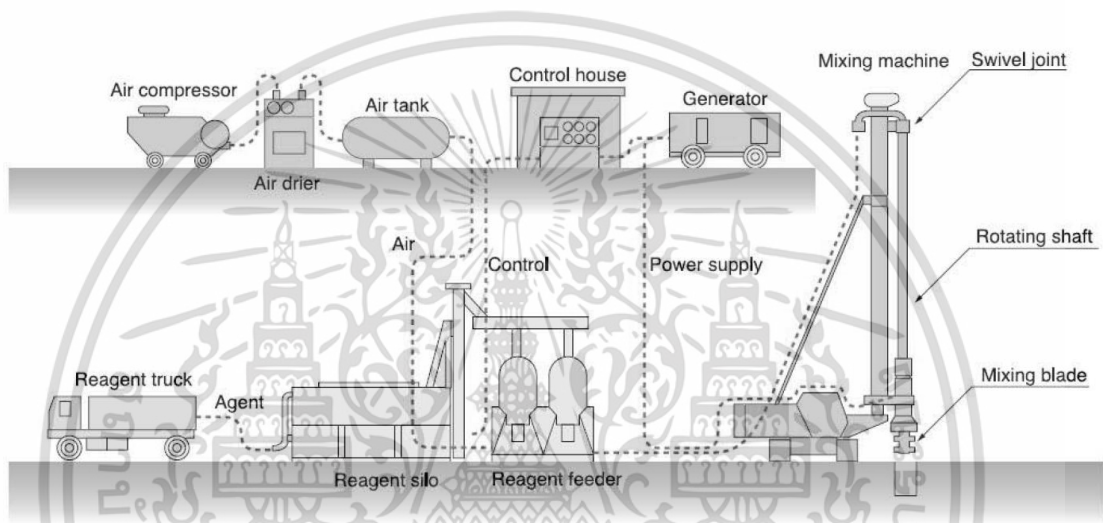
2.3.1 การผสมแบบเชิงกล (Mechanical Mixing Method)

เป็นการผสมโดยใช้ใบพัดของเครื่องจักรผสมซีเมนต์กับดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

2.3.1.1 การผสมโดยใช้ระบบแห้ง (Dry Mixing Method)

เป็นการนำปูนซีเมนต์ผงมาใช้ในการผสมแทนที่น้ำปูน วิธีการผสมใช้เครื่องจักรจะทำการตัดย่อยดินในขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ลง โดยทั่วไปใบพัดผสมจะเป็นคนละใบพัดตัดย่อยดิน เมื่อถึงความลึกที่ปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ ก้านเจาะจะฉีดผงปูนตลอดความลึกชั้นดินโดยผ่านท่อหัวฉีดที่ถูกอัดด้วยอากาศ จากนั้นผงซีเมนต์จะผสมกับดินโดยใบพัดผสมซึ่งจะหมุนกลับทิศทางกันพร้อมกับการชั้ก้านผสมขึ้นสู่ผิวดินในอัตราคงที่

การผสมโดยวิธีนี้จะไม่มีการเติมน้ำให้แก่ดินจึงทำให้ดินที่ถูกปรับปรุงให้ค่ากำลังที่สูงกว่าการใช้ปูน กำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ 28 วัน จะมีค่าเท่ากับ 400 กิโลปาสกาล การทำเสาเข็มดินซีเมนต์โดยวิธีการนี้ไม่จำกัดการใช้สารผสมเพิ่ม ไม่ว่าจะเป็นซีเมนต์หรือปูนขาว ในกรณีปูนขาว ขบวนการทำปฏิกิริยากับน้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำในดินโดยรอบน้อยลงการปรับปรุงจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รูปแบบการก่อสร้างนี้เป็นที่นิยมในประเทศญี่ปุ่น แต่สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการผสมจะเป็นปูนขาว ส่วนใหญ่ประเทศไทยไม่เป็นที่นิยมมากนัก ดินที่เหมาะสมกับวิธีนี้เป็นดินประเภททรายหลวม หรือดินเหนียวอ่อนที่มีค่าความไวตัวสูงมาก และต้องทำภายในระดับน้ำใต้ดิน ขั้นตอนการทำงานของกรรมวิธีแบบแห้งด้วยใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้ง

2.3.1.2 การผสมโดยใช้ระบบเปียก (Wet Mixing Method)

เป็นการใช้น้ำปูนในการปรับปรุง หลักการผสมวัสดุปรับปรุงดินสามารถทำได้ 2 แบบคือ แบบเชิงกลหรือแบบความดันต่ำ และแบบแรงดันสูง โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวในส่วนองวิธีทางกลซึ่ง ขบวนการก่อสร้างจะมีลักษณะคล้ายกับวิธีผสมแบบแห้งโดยอาจมีรูปแบบปลีกย่อยที่แตกต่างอยู่บ้าง วิธีการนี้จะทำการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันขนาด 10-15 บาร์ แล้วทำการตีควนด้วยใบพัดผสมไปพร้อม ๆ กันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีกำลังสูงและมีความยืดหยุ่นน้อยลง โดยในขณะที่กำลังผสมขึ้นใบพัดผสมจะทำการตีควนอีกครั้ง โดยเป็นการหมุนกลับทางกัน จากตอนแรก เครื่องจักรที่ใช้จะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องเจาะเข็ม เพื่อเจาะดินลงไปฉีดน้ำปูนและตีควนที่มีความลึกต่าง ๆ ด้วยใบพัดผสมที่เหมาะสมสำหรับการตีควนดินอ่อนรวมถึงตำแหน่งและฉีดน้ำปูนที่เหมาะสมเช่นกัน วิธีนี้แตกต่างจากกรณีเสาเจาะตรงที่ไม่มีการขุดดินขึ้นมาจากหลุมเจาะทำให้ไม่เกิดปัญหาการพังทลาย หรือตัวดินซีเมนต์คอดกัก ขนาดของเสาตามปกติมัก จะกว้างกว่าของใบพัดตี

ควนเล็กน้อย

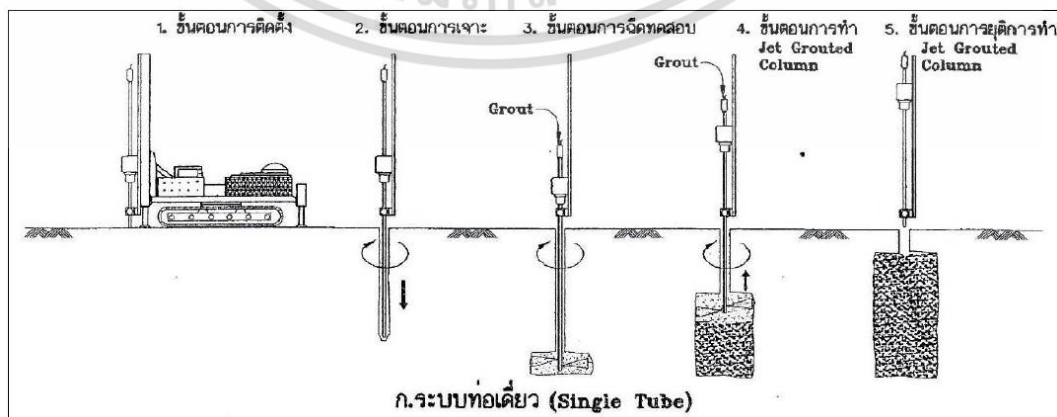
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การผสมแบบแรงดัน (Jet Grouting Method)

เป็นวิธีการปรับปรุง โดยการฉีดน้ำปูนเข้าไปผสมกับดินด้วยความดันในระดับที่สูงมากผ่านรูเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดประมาณ 2 ถึง 4 มิลลิเมตร ที่เรียงตัวอยู่ในแนวรอบส่วนปลายก้านเจาะ เครื่องเจาะจะฉีดน้ำปูนแล้วหมุนก้านเจาะที่ปลายล่างปิด เจาะแหวกดินลงไปช้า ๆ พร้อมทั้งฉีดน้ำหรือปูน (ใช้แรงดันประมาณ 100 บาร์ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของดิน) ตัดดินลงไปด้วยความดันสูงเพื่อทำลายโครงสร้างดิน เมื่อถึงความลึกที่ต้องการปรับปรุง ก้านเจาะจะหมุนพร้อมทั้งดึงขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะเดียวกัน จะฉีดน้ำปูนด้วยความดันสูงในระดับประมาณ 200 ถึง 400 บาร์ ขึ้นกับคุณสมบัติของดินเดิม โดยแรงดันที่ใช้ในการตัดย่อยดินต้องน้อยกว่าแรงดันที่ใช้ฉีดน้ำปูนผ่านรูเล็ก ๆ ออกไปกวนผสมกับดิน กระแสน้ำปูนที่มีความเร็ว 200 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป จะทำงานคล้าย ๆ ใบพัดของเหลวที่มีกำลังทะลุทะลวงตัดย่อยดินทั้งอ่อนและแข็งให้สามารถผสมรวมกับน้ำปูนเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่หมุน และดึงก้านเจาะขึ้นอย่างช้า ๆ จากการศึกษาสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 1 ถึง 2 และปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในช่วง 140 ถึง 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเปียก จะให้ค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดอยู่ในช่วง 600 ถึง 2000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

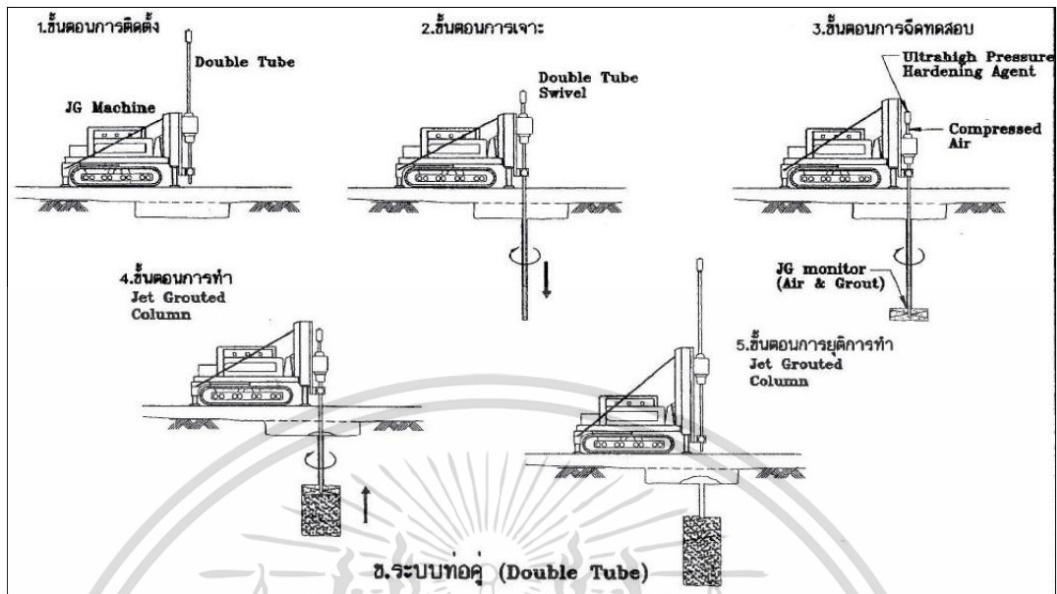
การผสมโดยวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้น้ำปูนในปริมาณที่มากทำให้ในขณะก่อสร้างเกิดการไหลล้น ของน้ำปูนที่มีลักษณะคล้ายโคลนส่วนเกินล้นออกมาที่ผิวดิน จึงต้องทำการดูดเก็บน้ำปูนส่วนนี้แล้วนำไปทิ้ง จากรูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสามรูปแบบที่กล่าวมา คือ การผสมแบบแห้ง การผสมแบบเปียก การผสมด้วยแรงการอัดฉีดแรงดันสูง วิธีการอัดฉีดแรงดันสูงเป็นรูปแบบที่นิยมใช้อย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณลักษณะเด่นหลายประการ เช่น สามารถใช้ได้เฉพาะช่วงความลึกและในทิศทางต่าง ๆ ตามที่ต้องการไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม สามารถใช้ได้กับดินหลายประเภท วิธีการอัดฉีดแรงดันสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลากหลาย ส่งผลให้เป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่มีข้อเสียคือต้องใช้น้ำปูนในปริมาณที่มาก เมื่อน้ำปูนเหลือเป็นส่วนเกินจากการผสมก็จะไหลล้นขึ้นมาบนผิวดินเป็นอุปสรรคการทำงาน และแรงดันที่สูงของการฉีดพ่นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียง ทำให้ต้องมีเทคนิคควบคุมให้ความดันขึ้นด้านบนจากการผสม



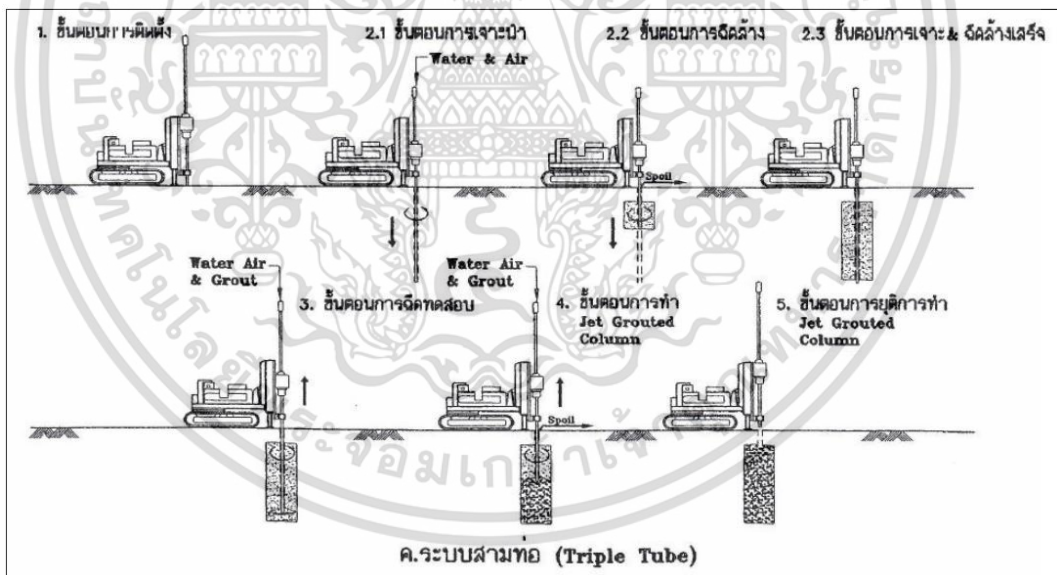
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบท่อเดี่ยว (Single Tube)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบทอคู่ (Double Tube)



รูปที่ 2.10 การสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรระบบสามท่อ (Triple Tube)

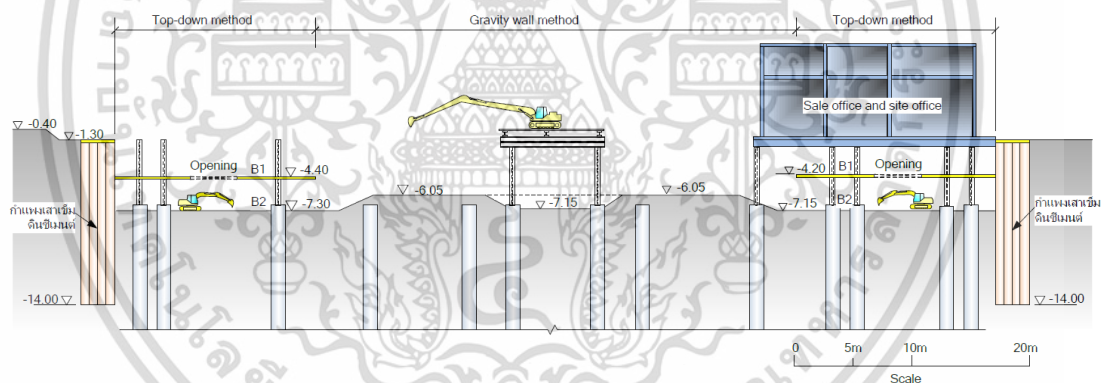
ในการศึกษานี้มีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมแบบแรงดันการผสมแบบแรงดัน (Jet Grouting Method) ตามการออกแบบของผู้ออกแบบของโครงการในการศึกษานี้ และใช้คุณสมบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการใช้งานจริงในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยระบบ Top-Down โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน

พรพจน์ ดันเส็ง (2555) ได้รายงานการเคลื่อนตัวแนวราบของกำแพงกันดินที่ใช้ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับเทคนิคการก่อสร้างแบบ Top-Down สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ และการใช้โครงสร้างพื้นของอาคารเป็นค้ำยันถาวร เพื่อลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงการก่อสร้างชั้นใต้ดิน อาคารคอนโดมิเนียมแห่งหนึ่ง ในซอยสุขุมวิท 31 ที่มีชั้นใต้ดิน 2 ชั้น และขุดดินลึก 7.3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร เรียงขบกัน 100 มิลลิเมตร โดยไม่สลับพื้นปลา ซึ่งได้ความหนาของกำแพงเป็น 2.90 เมตร ปลายกำแพงอยู่ที่ระดับความลึก -14.00 เมตร ปลายกำแพงเข็มพืดฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง 1.00 เมตร

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวแนวราบของเทคนิคงานก่อสร้างแบบขุดเปิดหน้าดินปกติกับเทคนิคการก่อสร้างแบบ Top-Down และนำเสนอเทคนิคการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับการตรวจสอบพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินด้วยเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.11 รูปตัดตามยาวของโครงการโดยแสดงระดับของการขุด ระบบกำแพงกันดิน และตำแหน่งพื้นชั้นใต้ดิน (พรพจน์ ดันเส็ง, 2555)

จากการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยวิธีการก่อสร้างแบบ Top-Down ก็กับการก่อสร้างด้วยวิธีการขุดเปิดหน้าดินปกติ พบว่ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ค้ำยันด้วยพื้นโครงสร้างถาวรก่อนการขุดลึกลงไป จะมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่า 30 มิลลิเมตร ในขณะที่กำแพงที่ก่อสร้างโดยไม่มีค้ำยันเป็นแบบ Gravity Wall มีการเคลื่อนตัวที่สูงถึง 100 มิลลิเมตร โดยผู้วิจัยได้เสนอปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวดังกล่าว คือ คุณภาพของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ และขั้นตอนการก่อสร้างที่เหมาะสม กล่าวโดยสรุปคือ ระบบการก่อสร้างแบบ Top-Down ร่วมกับระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการก่อสร้างแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gravity Wall Method นั้นจำเป็นต้องมีระยะเพียงพอที่จะก่อสร้างกำแพงให้มีความหนาที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการวิเคราะห์ โดยการใช้หน่วยแรงรวมในสภาวะไม่ระบายน้ำ ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัว และแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้ในสนามมาก ดังที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Teparaksa et al, (1999)

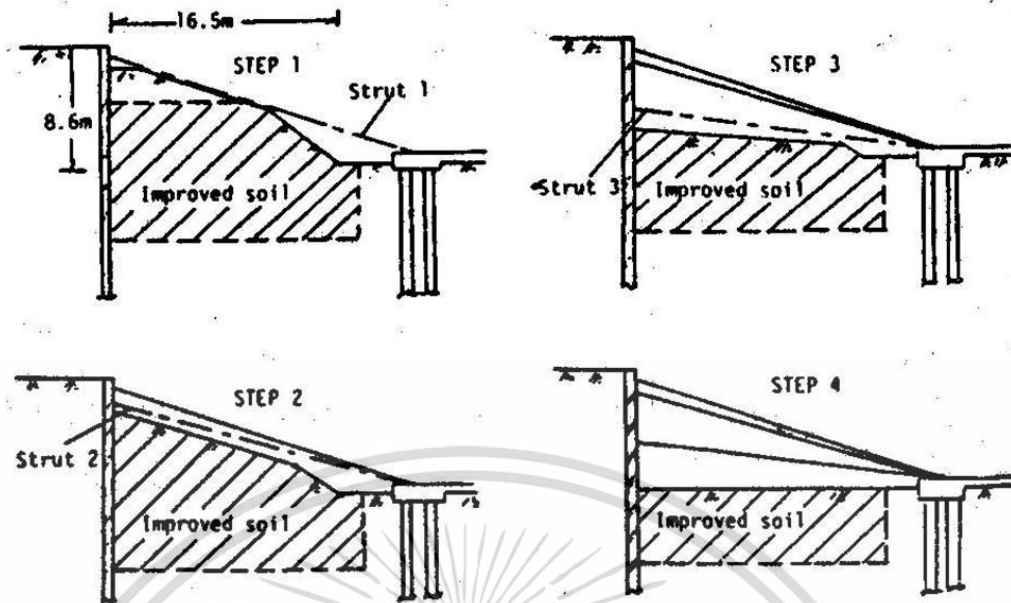
การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นที่ก้นบ่อขุดดินมักจะเป็นจุดที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงที่สุด เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่มีระบบค้ำยันทางข้าง ที่มีหน้าที่ยันกำแพงเอาไว้เหมือนกับช่วงด้านบนของกำแพง ทำให้ดินฝั่งหลังกำแพงสามารถดันกำแพงให้เคลื่อนตัวเข้าหาฝั่งบ่อขุดดินได้อย่างอิสระ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ตัวดินในฝั่งบ่อขุดดิน (Soil Berm) หรือการใช้คอนกรีตรองพื้น (Lean Concrete) เป็นตัวยันกำแพงไว้ชั่วคราว ก่อนเริ่มการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน และยังมีวิธีการปรับปรุงดิน (Soil Improvement) บริเวณชั้นดินใต้ระดับบ่อขุดให้แข็งแรงขึ้นเพื่อช่วยยันกำแพง และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงลง

2.5 เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน (Horizontal Soil Cement Column)

ในงานขุดดินโดยทั่วไป เพื่อลดความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียง มักใช้วิธีการควบคุมการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการขุด โดยปกติจะหมายถึงการใช้ระบบค้ำยันที่เหมาะสมเพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน อย่างไรก็ตาม เมื่อชั้นดินอ่อนที่มีความหนามากอยู่ต่ำกว่าระดับการขุดดินชั้นสุดท้าย การใช้เพียงระบบค้ำยันอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากการเคลื่อนตัวสูงสุดมักเกิดขึ้นต่ำกว่าระดับการขุดดินชั้นสุดท้าย ทำให้ไม่สามารถติดตั้งระบบค้ำยันแบบธรรมดาที่ต่ำกว่าระดับการขุดดินได้

เพื่อเป็นการป้องกันการเคลื่อนตัวที่มากเกินไป บ่อยครั้งจำเป็นต้องปรับปรุงดินที่คาดว่าจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด เนื่องจากเวลามีจำกัด จึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการปรับปรุงดินอย่างรวดเร็ว เช่น การผสมแบบแรงดัน (Jet Grouting Method) และการผสมซีเมนต์ระดับลึก (Deep Cement Mixing) ที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนตัวของดิน และการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินใกล้กับโครงสร้างที่สำคัญ (Gaba, 1990, Lee & Yong, 1991, Tanaka, 1993, Liao and Tsai, 1993, Chew et al., 1997a, Okumura, 1997 and Takada et al., 1998) เทคนิคเหล่านี้อาศัยหลักการของการปรับปรุงดินใต้ระดับของการขุดดินให้มีความแข็งที่จำเป็น เพื่อให้มีการควบคุมการเคลื่อนตัวทางข้างของกำแพงที่ไม่มากจนเกินไป เนื่องจากการบรรเทาความเครียดที่เกิดจากการขุดดิน Yong et al (1998) ดังนั้นจึงมีการจัดเตรียม “ค้ำยัน (Strut)” ในรูปแบบของดินที่ถูกปรับปรุงแล้ว แม้กระทั่งก่อนการขุดดินจะเริ่มขึ้น

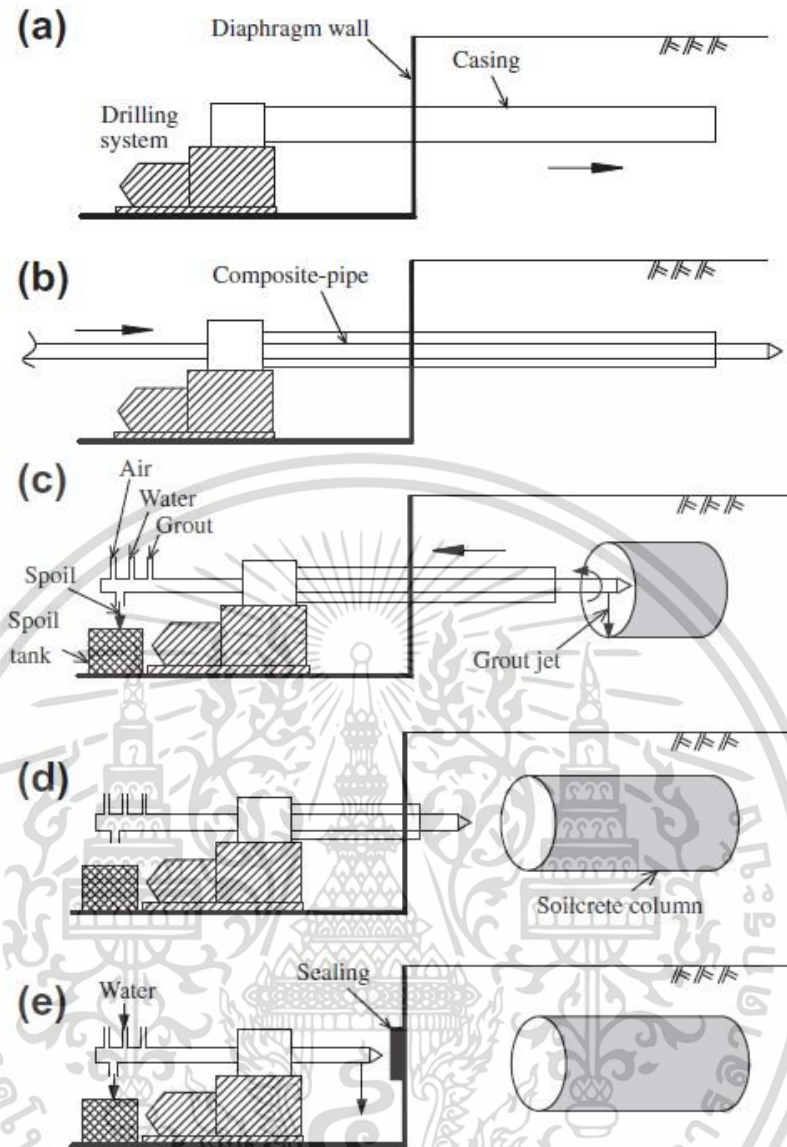
“ค้ำยัน (Strut)” ในรูปแบบของดินที่ถูกปรับปรุงแล้ว ในที่นี้คือเทคนิคการปรับปรุงดินซีเมนต์ที่อยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน เรียกว่า “เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน (Horizontal Soil Cement Column)” ที่วางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ช่วยลดการเคลื่อนตัวทางข้างของกำแพงกันดิน มีตัวอย่างของขั้นตอนการก่อสร้างในโครงการ UE Square ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปตัดโดยทั่วไปของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับระบบกำแพง เข็มพีตในโครงการ UE Square, Khoo et al (1997)

ประสิทธิผลของเทคนิคนี้ในทางปฏิบัติได้รับการยืนยันโดยโครงการขุดดินที่เสร็จสมบูรณ์แล้วเป็นจำนวนมาก (Yong and Lee, 1995 และ Sugawara et al., 1996) ปัจจุบัน วิธีการผสมแบบแรงดันยังคงเป็นแนวทางที่นิยมในการปรับปรุงดินหลายแห่งในสิงคโปร์ วิธีนี้คือการปรับปรุงดินที่ได้ระดับการขุดดินก่อนเริ่มงาน เพื่อให้มีการควบคุมการเคลื่อนตัวของข้างอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้วิธีการผสมปูนซีเมนต์ระดับลึกเพื่อทำให้งานขุดดินลึกมีความเสถียรได้เริ่มทำในสิงคโปร์ในต้นปี 1990 หลังจากเปิดตัวในญี่ปุ่นเมื่อไม่กี่ปีก่อนหน้านั้น Mihashi et al (1987) การใช้เทคนิคเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความสนใจมากขึ้นในการทำความเข้าใจกลไกที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถบรรลุการออกแบบที่คุ้มค่ามากขึ้น

Shui-Long Shen et al (2013) ได้เสนอวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอน ด้วยวิธีการผสมแบบแรงดันแนวราบ (Horizontal Jet Grouting, HJG) จากการใช้เทคนิคการอัดฉีดแบบใหม่ด้วยท่อคอมโพสิต (Composite-Pipe Method) ได้รับการพัฒนาเพื่อขจัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ ที่เกิดจากการก่อสร้าง มีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.13

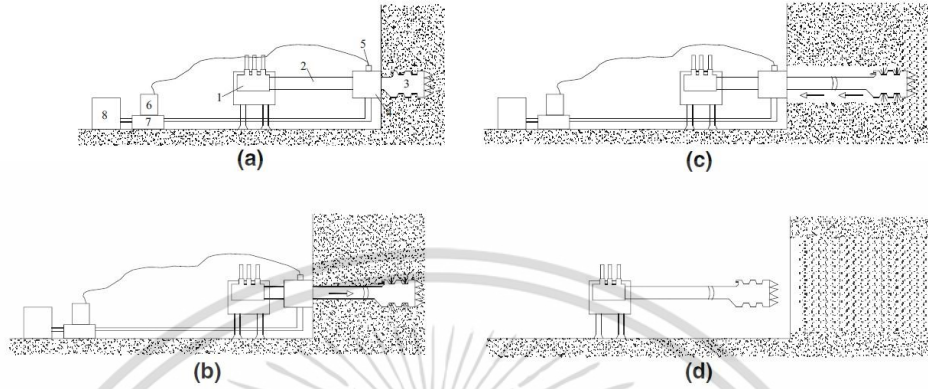


Construction steps: (a) drilling with casing, (b) placement of composite-pipe, (c) jet grouting, (d) removal of the casing and composite-pipe, and (e) cleaning of composite-pipe and sealing the borehole.

รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการทำงานของวิธีเทคนิคการอัดฉีดด้วยท่อคอมโพสิต

Pierre Guy Atangana Njock et al (2017) ได้เสนอความก้าวหน้าล่าสุดในวิธีการผสมแบบแรงดันแนวราบ (Horizontal Jet Grouting, HJG) สำหรับการปรับปรุงพื้นดินอ่อนในเชียงใหม่ รายงานการวิจัยและอภิปรายผลโดยเน้นศึกษากระบวนการชุปแข็งในดินที่ไม่เหนียวเหนอะหนะเป็นพิเศษ นวัตกรรมล่าสุดของวิธี HJG พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ดินทรายมีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม มักเกิดจากกระบวนการดำเนินการแบบดั้งเดิม ดังนั้นท่อคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ จะเป็นการอัดฉีดแบบควบคุมแรงดัน และการควบคุมวิธีการอัดฉีดแนวอนได้ถูกนำไปใช้ลดการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ พบว่าลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเหล่านี้ ถูกพบมีกลไกการทำให้แข็งตัวในทันที สามารถแก้ปัญหาที่ท้าทายได้ เช่น ความสม่ำเสมอในการผสม การสูญเสียสารผสมระหว่างการผสมและการสูบแข็ง และการเคลื่อนตัวของดิน จะมีบทบาทสำคัญในอนาคต

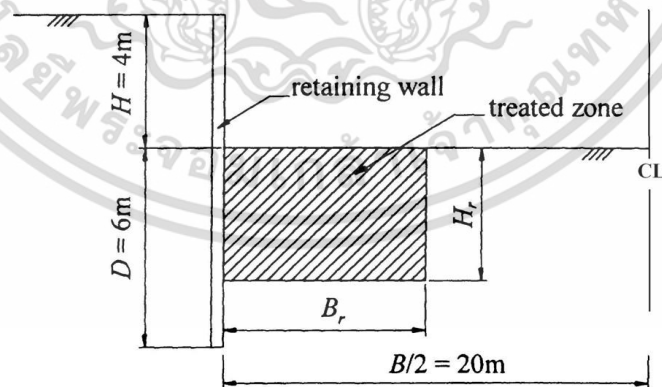


Legend: 1-Drill rig; 2-triple rod; 3-monitor; 4-steel tube; 5-pressure sensor; 6-PLC; 7-pump; 8-tank (storing spoil)

Example of horizontal jet grouting procedure a Installation of equipment, b drilling, c grouting, d completion of a column. 1 Drill rig; 2 triple rod; 3 monitor; 4 steel tube; 5 pressure sensor; 6 PLC; 7 pump; 8 tank (storing spoil)

รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการอัดฉีดด้วยท่อคอมโพสิตแบบใหม่

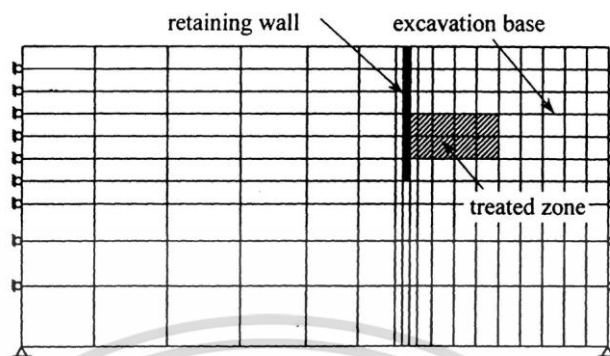
Thanadol (2003) มีการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนด้วยการกำหนดขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) จากการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ในโซนของการเกิดแรงดันดินเชิงรับ (Passive Earth Pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 งานขุดดินแบบมีเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนอยู่ในโซนของการเกิดแรงดันดินเชิงรับ

มีการวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนได้ระดับขุดดินด้วยวิธีแตกต่างกัน หนึ่งในนั้นคือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากเครื่องหมุนเหวี่ยง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Centrifuge) และวิธีการนี้เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เพราะเป็นวิธีที่สามารถหาคำตอบของปัญหาที่มีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การวิเคราะห์เสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ระดับบ่อขุดดินด้วย FEM เสนอโดย Xie et al. (1999)

อย่างไรก็ตามเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินในต่างประเทศ มีการศึกษาประสิทธิภาพในการช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเท่านั้น ยังไม่มีการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินในด้านพฤติกรรม

2.6 หลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Principle of Finite Element Method)

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาเชิงเส้นในสองมิติ (Two-dimensional linear problem) สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 การแบ่งชิ้นส่วน (Element Discretization)

เป็นการแบ่งขอบเขตและรูปร่างของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์ออกเป็นชิ้นส่วน (Element) โดยแต่ละชิ้นส่วนจะถูกกำหนดขอบด้วยจุด ต่อ (Node) หรือบางจุดต่อก็อาจจะอยู่ภายในชิ้นส่วนก็ได้ เพื่อเพิ่มความละเอียดในการคำนวณ

2.6.2 การเลือกฟังก์ชันของตัวแปรหลัก (Primary Variable Function Selection)

การเลือกฟังก์ชันของตัวแปรหลัก ต้องสามารถเชื่อมโยงกันระหว่างจุดต่อได้ ซึ่งตามปกติในทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคนั้น ตัวแปรหลัก (Primary Variable) ที่ใช้ในการคำนวณวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การเคลื่อนตัว (Displacement, u) เมื่อได้ค่าของตัวแปรหลักแล้ว ก็จะสามารถหาค่าตัวแปรรอง (Secondary Variables) อย่างค่าความเค้น และความเครียดได้ โดยฟังก์ชันที่นิยมใช้ในการหาตัวแปรหลักมักใช้ ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การสร้างสมการของแต่ละชิ้นส่วน (Element Equation)

ขั้นตอนการสร้างสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วนนั้นคือ $\{\Delta F_E\} = [K_E]\{\Delta d_E\}$ โดยที่ $[K_E]$ คือเมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย (Element Stiffness Matrix) $\{\Delta F_E\}$ คือเวกเตอร์การเพิ่มของแรง ณ จุดเชื่อมต่อ (Vector of Incremental Element Nodal Forces) และ $\{\Delta d_E\}$ คือเวกเตอร์ของการเพิ่มของการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ (Vector of Incremental Element Nodal Displacements)

2.6.4 การสร้างสมการหลัก (Global Equation)

ขั้นตอนการรวมสมการย่อยของแต่ละ ชิ้นส่วนเป็นสมการหลัก ความสัมพันธ์ของสมการหลัก คือ $\{\Delta F_G\} = [K_G]\{\Delta d_G\}$ โดยที่ $[K_G]$ คือเมทริกซ์สติฟเนสรวม (Global Stiffness Matrix) $\{\Delta F_G\}$ คือเวกเตอร์การเพิ่มของแรงรวม (Vector of All Incremental Nodal Forces) และ $\{\Delta d_G\}$ คือเวกเตอร์ของการเพิ่มของการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งจุด เชื่อมต่อรวม (Vector of All Incremental Nodal Displacements)

2.6.5 เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)

กำหนดเงื่อนไขขอบให้สอดคล้องกับปัญหาจริง เช่น เงื่อนไขด้านแรง (Loading Conditions) ซึ่งจะถูกระบุอยู่ใน $\{\Delta F_G\}$ เงื่อนไขด้านการเคลื่อนที่ (Displacement Conditions) ซึ่งจะถูกระบุอยู่ใน $\{\Delta d_G\}$

2.6.6 การแก้สมการหลัก (Solve the Global Equation)

เนื่องจากสมการหลักมีขนาดใหญ่ มาก และประกอบไปด้วยตัวแปรหลายตัว ส่งผลทำให้ต้องนำเทคนิคในการแก้ระบบสมการเชิงเส้น แบบต่างๆ มาใช้ เพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำในการหาผลเฉลย

2.7 ข้อพิจารณาสำหรับปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering Considerations)

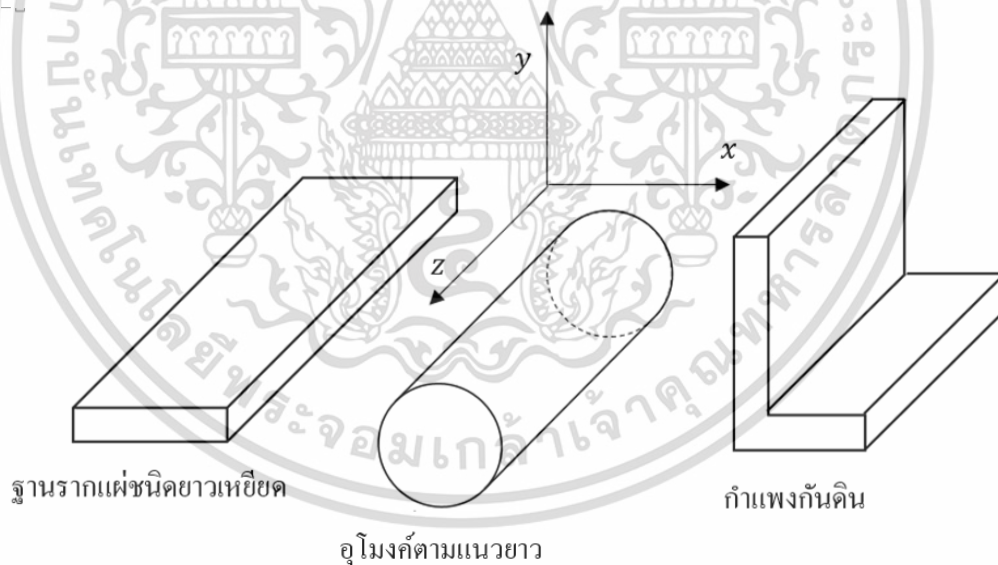
การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิคนั้น มีทฤษฎีบางอย่างที่จะต้องพิจารณาเพิ่มขึ้นนอกเหนือไปจากทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปัญหาวิศวกรรมด้านอื่นๆ เช่น ความเค้นที่ควบคุมพฤติกรรมดินไม่ใช่ความเค้นรวม (Total Stress) แต่เป็นความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) หรือการวิเคราะห์ปัญหาในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Term Condition) จะต้องใช้การวิเคราะห์แบบความเค้นรวม (Total Stress Analysis) ดังนั้นจึงจะนำเสนอข้อพิจารณาพิเศษที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิค

2.7.1 รูปแบบเรขาคณิตในอุดมคติ (Geometric Idealization)

ในบางกรณีของการวิเคราะห์ปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิค อาจจะต้องสมมติปัญหาจริงใน 3 มิติ ที่ยุ่งยากให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น โดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตัวปัญหาเอง ในทางทฤษฎีนั้น ปัญหา 2 มิติในอุดมคติที่พบในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคมีด้วยกัน 2 แบบ คือ ปัญหาระนาบความเครียด (Plane Strain Problem) และปัญหาสมมาตรรอบแกน (Axis-Symmetry)

2.7.2 ปัญหาระนาบความเครียด (Plane Strain Problem)

ปัญหาวิศวกรรมธรณีเทคนิคบางกรณี เช่น ฐานรากแผ่ยาวเหยียด (Strip Footing) ปัญหาอุโมงค์ตามแนวยาว (Longitudinal Tunnel) กำแพงกันดิน (Retaining Wall) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 นั้น สังเกตได้ว่าปัญหาดังกล่าวมาข้างต้นล้วนแต่ยาวมากในทิศทางหนึ่ง (Z Direction) เมื่อเทียบกับความยาวใน 2 ทิศทางที่เหลือในทางทฤษฎี ถ้าแรงที่กระทำ (Applied Forces) หรือข้อจำกัดทางการเคลื่อนที่ (Prescribed Displacements) ที่กระทำต่อโครงสร้างในทิศทางตั้งฉากและเป็นอิสระจากทิศทางด้านยาวที่สุดแล้วนั้น รูปร่างหน้าตัดที่ตั้งฉาก (ระนาบ xy) ยังคงเหมือนเดิมการเคลื่อนที่ในทิศทางด้านที่ยาวที่สุด อาจถูกสมมติให้เป็น 0 ได้ นั่นคือ $w = 0$ และการเคลื่อนที่ในทิศทาง x และ y จะอิสระกับทิศทาง z ดังนั้นนิยามของความเครียดในแบบระนาบความเครียด สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างปัญหาระนาบความเครียด (Examples of Plane Strain Problem)

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\partial w}{\partial z} = 0; \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{\partial w}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = -\frac{\partial w}{\partial y}; \gamma_{xy} = -\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้ยังเหลือความเครียดที่ไม่ทราบค่า 3 ค่าคือ ε_{xx} , ε_{yy} และ γ_{xy} ดังสมการที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเหลือเพียง

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{xx} \\ \Delta\sigma_{yy} \\ \Delta\sigma_{zz} \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{44} \\ D_{51} & D_{52} & D_{54} \\ D_{61} & D_{62} & D_{64} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยปกติแล้วการพิจารณาความเค้นในแบบระนาบความเครียดนั้น มักจะพิจารณาความเค้นในระนาบ xy เท่านั้น ทำให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นตามสมการที่ 2.11 นั้น ลดรูปเหลือเป็นเมทริกซ์จัตุรัส

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{xx} \\ \Delta\sigma_{yy} \\ \Delta\sigma_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{34} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

2.8 แบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของดิน (Constitutive Soil Models)

ก่อนที่วิศวกรจะเลือกใช้แบบจำลองของดิน วิศวกรมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจกับแบบจำลองของดิน เพราะว่าแบบจำลองของแต่ละแบบย่อมมีทั้งข้อดีและข้อเสีย และยังเหมาะกับเงื่อนไขการออกแบบที่แตกต่างออกไป เราสามารถแบ่งกลุ่มแบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของดินได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ แบบจำลองอีลาสติก (Elastic Models) และแบบจำลองอีลาสโตพลาสติก (Elasto-Plastic Models) ข้อดีและข้อเสียของแต่ละกลุ่ม เช่น เป็นที่ทราบกันดีว่า การพิจารณาพฤติกรรมของดินแบบอีลาสติกนั้น ย่อมไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินได้ทั้งหมด ดังนั้นแบบจำลองของดินในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นในการพิจารณาพฤติกรรมแบบ อีลาสโตพลาสติกมากขึ้น เช่น แบบจำลองสำหรับวัสดุเสียดทาน (Frictional Material Model) ที่เรียกว่า มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model) ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในทางปฏิบัติ และแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model) ที่เหมาะสำหรับการจำลองดินเหนียวในประเทศไทย

2.8.1 แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model)

แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์นี้ เป็นที่นิยมมากในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ในแบบจำลองนี้สามารถหาได้ไม่ยากนัก ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์หลัก 5 ตัว คือ ความหนาแน่น (Density, γ) ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) มุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction, ϕ) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability, k) โดยมีที่มาจากการทดสอบในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

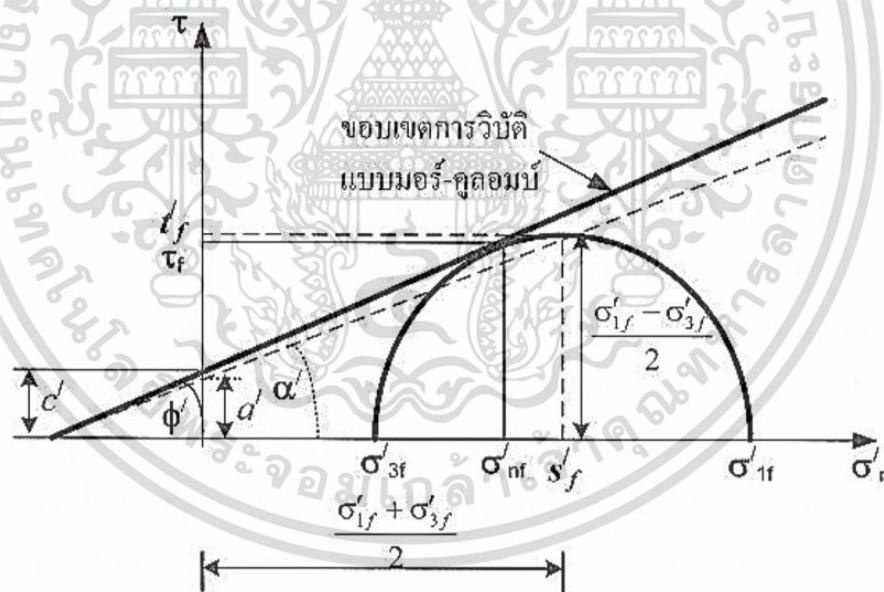
ห้องปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบกล่องแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) หรือว่าการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (CD-Test) ผลการทดสอบทั้งสองจะนำมาวิเคราะห์โดยใช้วงกลมมอร์ ซึ่งการนิยามเงื่อนไขนิยมใช้ตัวแปรความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress, σ') และความเค้นเฉือน (Stress, τ) ดังสมการที่ 2.13

$$\tau_f = c' + \sigma'_{nf} \tan \phi' \quad (2.13)$$

โดยค่า c' และ ϕ' คือค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในตัดแกน (Cohesion Intercept) และมุมแรงเสียดทาน (Angle of Frictional Resistance) และดัชนีล่าง f หมายถึงภาวะวิบัติ (Failure) ในบางครั้งการ พิจารณาความเค้นความเครียดในเงื่อนไขระนาบความเครียด (Plan Strain) สามารถพิจารณาเงื่อนไข มอร์-คูลอมบ์ในนิยามของตัวแปรสองมิติ (s', t) ได้คือ

$$t = a' + s'_f \tan \alpha' \quad (2.14)$$

โดยที่ $\alpha' = \cos \phi'$ และ $\sin \phi' = \tan \alpha'$ แสดงพื้นผิวครากแบบมอร์-คูลอมบ์ที่นิยามโดยใช้ตัวแปรความเค้นตั้งฉาก σ'_n และความเค้นเฉือน τ และตัวแปร (s', t) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 พื้นผิวครากแบบมอร์-คูลอมบ์ในสองมิติ (Mohr-Coulomb Failure Criterion)

2.8.2 แบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model)

สำหรับดินเหนียวที่มีการอัดตัวคายน้ำเกินปกติเพียงเล็กน้อย หากอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำเกินปกติ (Over Consolidation Ratio, OCR) น้อยกว่า 2 จะแนะนำให้ใช้แบบจำลองดินอ่อน เนื่องจากพฤติกรรมความอ่อนตัวในแบบจำลองแคมเคลย์ไม่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอัดตัวคายนํ้าแบบมิติเดียวในแบบจำลองดินอ่อนที่ปรับปรุงจนมีความเหมาะสมมากกว่า (Brinkgreve และ Vermeer, 1998)

แบบจำลองดินอ่อนนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์คล้ายกับแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ มีจุดแตกต่างกันตรงที่การคำนวณ ความแข็ง (Stiffness) ของแบบจำลอง โดยที่แบบจำลองดินอ่อนไม่ใช้โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ในการคำนวณ แต่ใช้ค่าดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index, λ) และ ดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, κ) ในการคำนวณ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain, ε_v) กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean Effective Stress, p') ในรูปของ Logarithmic ดังสมการที่ 2.15

$$\varepsilon_v - \varepsilon_v^0 = -\lambda^* \ln \left(\frac{p'}{p^0} \right) \quad (2.15)$$

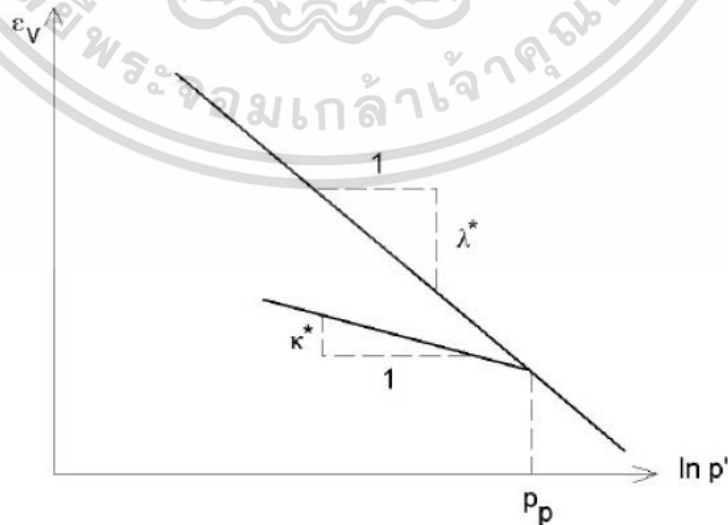
โดยที่ λ^* คือดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index)

เมื่อทำการเพิ่มแรง-ถอนแรงก็จะเกิดเส้นทางที่แตกต่างจากเส้นทางอัดตัวหลัก สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.16

$$\varepsilon_v^e - \varepsilon_v^0 = -\kappa^* \ln \left(\frac{p'}{p^0} \right) \quad (2.16)$$

โดยที่ κ^* คือดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, κ)

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 อัตราส่วนช่องว่าง (e) แฝงอยู่ในรูปความเครียดเชิงปริมาตร ($\varepsilon_v = 1+e$) เมื่อนำมาพล็อตกราฟกึ่งลอการิทึมระหว่างความเครียดเชิงปริมาตรกับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยบนแกนลอการิทึมธรรมชาติ พบความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตรกับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย

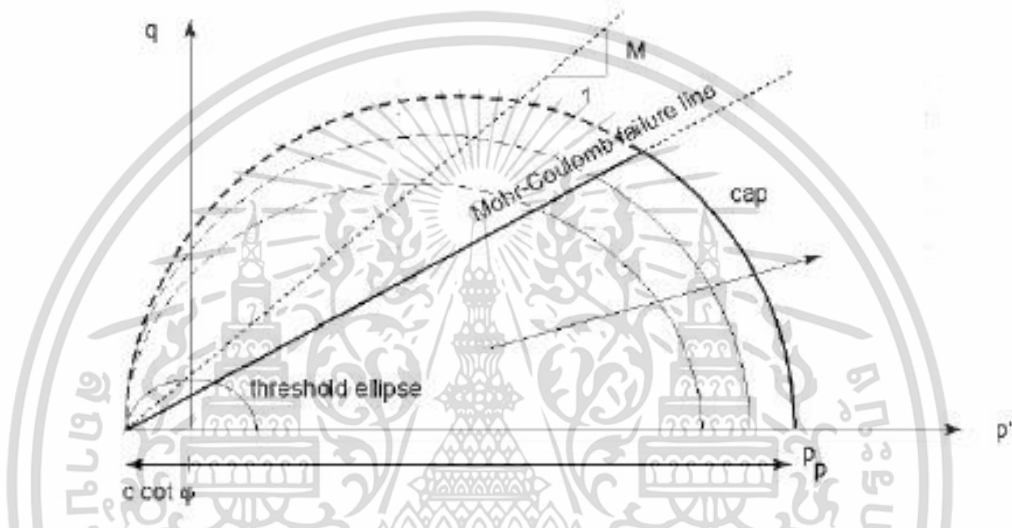
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.16 ในการเพิ่มแรง-ถอนแรงถือว่าเป็นพฤติกรรมอีลาสติก สามารถหาค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.17

$$K_{ur} = \frac{E_{ur}}{3(1-2\nu_{ur})} = \frac{p'}{k^*} \quad (2.17)$$

แบบจำลองซอฟต์แวร์ที่มีฟังก์ชันคราก ลักษณะเป็นวงรีในระนาบของความเค้นประสิทธิผล เฉลี่ยกับความเค้นเบี่ยงเบน ($p'-q$) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 พื้นผิวครากในแบบจำลองดินอ่อน

2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นับเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องแม่นยำ โดยการศึกษาจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินจากหลุมเจาะสำรวจชั้นดินของพื้นที่ศึกษา ที่มีค่าแนะนำหรือเป็นที่ยอมรับตามการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีมาก่อนประกอบด้วย

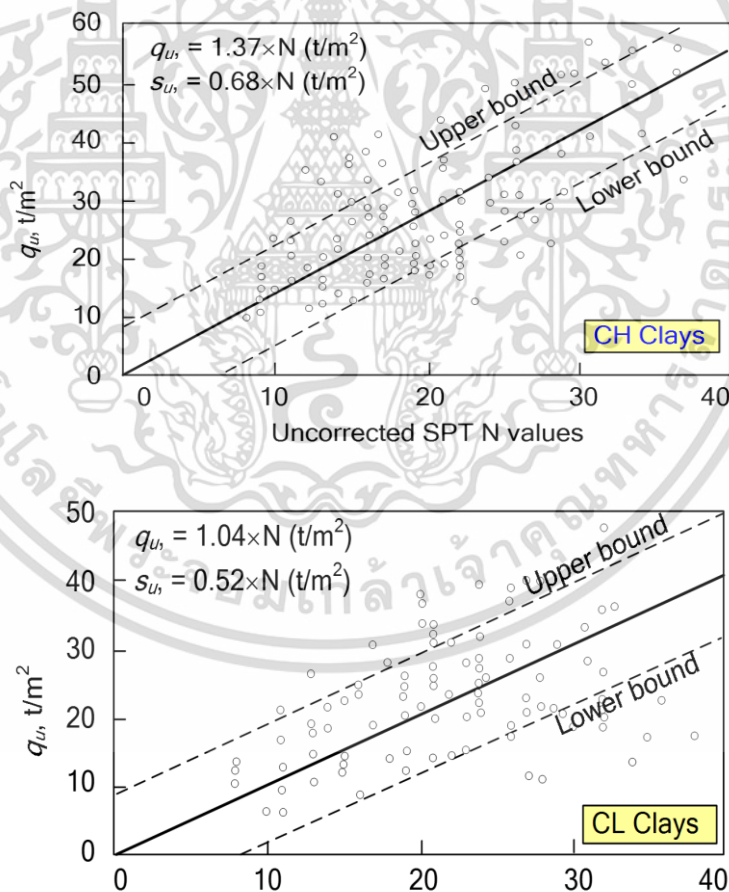
2.9.1 ค่าพารามิเตอร์ของดิน

การเลือกใช้พารามิเตอร์ของดินจำเป็นต้องแบ่งประเภทของดินตามคุณสมบัติของเม็ดดิน โดยเม็ดดินที่เป็นดินทราย เลือกใช้เงื่อนไขแบบระบายน้ำ (Drained Condition) และหากเม็ดดินเป็นประเภทดินเหนียว เลือกใช้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) โดยการศึกษาในขั้นตอนการเจาะสำรวจชั้นดิน เมื่อปล่อยหลุมเจาะสำรวจทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ระดับน้ำใต้ดินวัดได้ภายในหลุมเจาะมีค่าระหว่าง 0.0 ถึง 3.0 เมตร ต่ำกว่าระดับผิวดินปากหลุมเจาะ ทำให้สามารถเลือกการคำนวณในโปรแกรม PLAXIS 2D หากเป็นดินเหนียวจะเลือกใช้ เงื่อนไขแบบระบายน้ำรูปแบบ A (Undrained Condition A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่น (Density, γ) ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำมาจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน แยกเป็นชั้นดินชนิดต่าง ๆ กัน โดยใช้ค่าความหนาแน่นอิ่มตัว (Saturated Density, γ_{sat}) และความหนาแน่นไม่อิ่มตัว (Unsaturated Density, γ_{unsat})

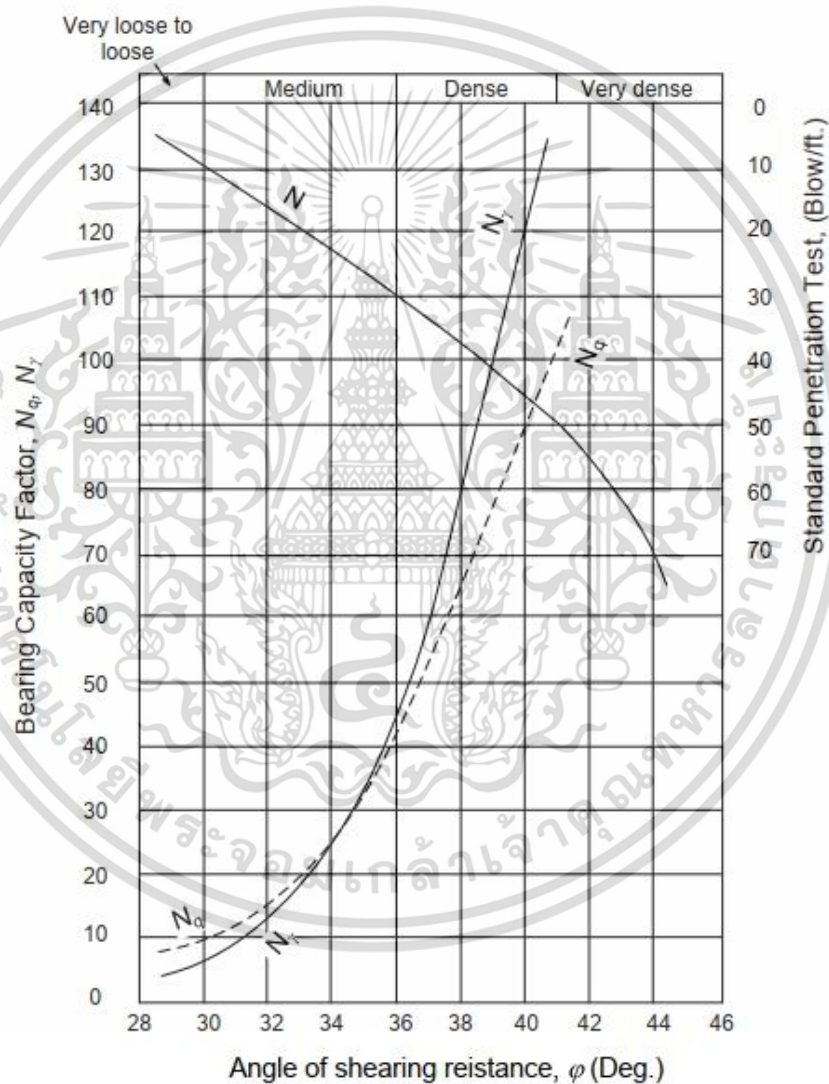
ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทรายจำเป็นต้องใส่ค่าพารามิเตอร์นี้เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณได้ โดยเลือกใช้ค่าน้อย ๆ ประมาณ 1 ถึง 10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ในส่วนของดินเหนียวเมื่อเป็นเงื่อนไขแบบระบายน้ำรูปแบบ A (Undrained Condition A) ค่าที่ใช้จะเป็นค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective Cohesion, C') โดยที่คุณสมบัติของดินเหนียวเมื่อมูมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction, ϕ) มีค่าเท่ากับ 0 องศา ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า Unconfined Compressive Strength สำหรับดินเหนียว Pitupakorn (1982) โดยที่ค่า SPT-N Value นำมาจากหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า Unconfined Compressive Strength สำหรับดินเหนียว เสนอโดย Pitupakorn (1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction, ϕ) ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเป็นเงื่อนไขแบบระบายน้ำรูปแบบ A (Undrained Condition A) ค่าที่ใช้จะเป็นค่ามุมภายในของเม็ดดินประสิทธิผล (Effective Angle of Internal Friction, ϕ') สำหรับดินเหนียวจำเป็นต้องใส่ค่าพารามิเตอร์นี้เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณได้ โดยเลือกใช้ค่าน้อย ๆ ประมาณ 1 องศา ในส่วนของทราย สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า N_q , N_y และ ϕ Peck, Handson, Thornburn (1974) โดยที่ค่า SPT-N Value นำมาจากหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับค่า N_q , N_y และ ϕ ที่เสนอโดย Peck, Handson, Thornburn (1974)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) โดยปกติแล้วสามารถหาได้จากการทดสอบแรงอัดดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength) วิธีการทดสอบนี้คือการกดตัวอย่างดินลงบนพื้นที่หน้าตัดของมวลดิน จะสามารถหาค่าความเค้น (Stress) ได้ พร้อมทั้งวัดการหดตัวที่เกิดขึ้นของมวลดิน จะสามารถหาค่าความเครียด (Strain) ได้ เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะสามารถหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินได้จากความชันของเส้นกราฟ

โมดูลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผล (Effective Modulus of Elasticity, E') โดยปกติแล้วสามารถหาได้จากการทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial Test) เป็นวิธีการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกับสภาพดินจริงในสนาม ซึ่งวิธีการทดสอบนี้คือการกดตัวอย่างดินทั้งสามแกนในเวลาเดียวกัน โดยจะทำการควบคุมอัตราการให้แรงกดกับตัวอย่างดินเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อให้มวลดินสามารถระบายแรงดันน้ำส่วนเกินออกไปได้ จะเหลือเพียงแต่แรงประสิทธิผลในมวลดิน

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเป็นเงื่อนไขแบบระบายน้ำรูปแบบ A (Undrained Condition A) ค่าที่ใช้จะเป็นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผล (Effective Modulus of Elasticity, E') สำหรับทรายในพื้นที่ศึกษาใช้ค่า 1,500 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เป็นค่าที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ทำให้ผลของการเคลื่อนตัวในแนวราบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สอดคล้องกับพฤติกรรมของกำแพงเข็มที่ตรวจวัดได้ในสนาม และในส่วนของดินเหนียว จากที่กล่าวมาว่าคุณสมบัติของดินเหนียวเมื่อมุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction, ϕ) มีค่าเท่ากับ 0 องศา ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จึงสามารถนำไปหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผล ได้โดยใช้ค่าที่เสนอโดย Tanseng (1997) ดังแสดงในรูปที่ 2.23

$E_u = 150S_u$	Bergado et al. (1987)	Bangkok clay เมื่อ PI > 50% จากการศึกษากการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางประกง จากหน้าตัด 30 จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 150S_u$	Tanseng (1997)*	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Flexible wall
$E_u = 250-500S_u$	Tanseng (1997)*	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Rigid wall
$E_u = 500S_u$	วันชัย (1999)	Back Analysis งานก่อสร้างโคอะแฟรมวอลล์สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพ
$E_u = 240S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพ ช่วง Strain 0.1-1.0%

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus และค่า S_u ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index, λ) และ ดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, κ) เป็นค่าที่ใช้ในแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model) เพื่อแทนที่ โมดูลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผล (Effective Modulus of Elasticity, E') ในแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-coulomb model) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และใช้ค่าอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัวตามความลึก (Over Consolidation Ratio, OCR) อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.3 ตามลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

Parameters for Soft Soil Model (SSM) analysis.

Layer	Soil type	Depth (m)	λ^*	κ^*	ν_{ur}	K_o^{nc}
1	MG	0–2.5	HSM			
2	BSC	2.5–12	0.12	0.02	0.2	0.7
3	MC	12–14	0.1	0.009	0.2	0.6
4	1st SC	14–20	0.045	0.009	0.2	0.5
5	CS	20–21.5	HSM			
6	2nd SC	21.5–26	0.045	0.009	0.2	0.5
7	HC	26–45	0.006	0.0009	0.2	0.5

Remarks:

1. The strength parameters (ϕ' and c'), dilatancy angle (ψ) and bulk unit weight for the SSM analysis are the same as those for the HSM analysis (Table 7).
2. HSM is adopted for the Made Ground (MG) and Clayey Sand (CS) layers.

รูปที่ 2.24 ค่าดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index, λ) และ ดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, κ) ในแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model) เสนอโดย Suched et al (2013)

2.9.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกำแพงกันดิน

แบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนของกำแพงกันดิน (Retaining Wall) และส่วนค้ำยัน (Strut) โดย ใช่วัสดุเป็นเหล็กที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) เท่ากับ 2.04×10^6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการหาขนาดพื้นที่หน้าตัด (Cross Section Area) และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia) โดยทั้งสองส่วนนี้เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดจากผู้จัดจำหน่าย สามารถเลือกขนาดและค่าพารามิเตอร์ได้ตามต้องการ

บทที่ 3

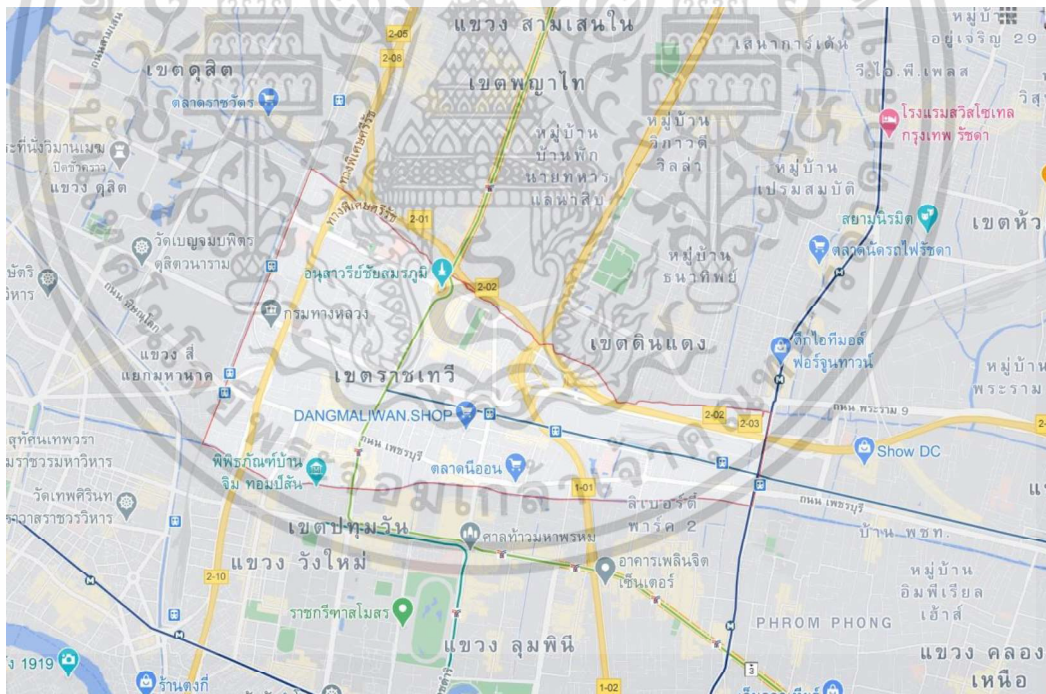
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดด้วยการตรวจวัดในสนาม โดยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) กับการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และส่วนที่สองคือการศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ในเทอมของขนาดรูปร่าง และตำแหน่งการวางตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เลือกใช้ มีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ข้อมูลของโครงการ

3.1.1 พื้นที่ก่อสร้าง

โครงการก่อสร้างอาคารสูงเป็นที่พักอาศัย และมีชั้นใต้ดิน 2 ชั้น ก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยบริษัท ฮีโรเซ ประเทศไทย จำกัด ตั้งอยู่ติดถนนศรีอยุธยา เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.1 บริเวณพื้นที่ก่อสร้างเขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

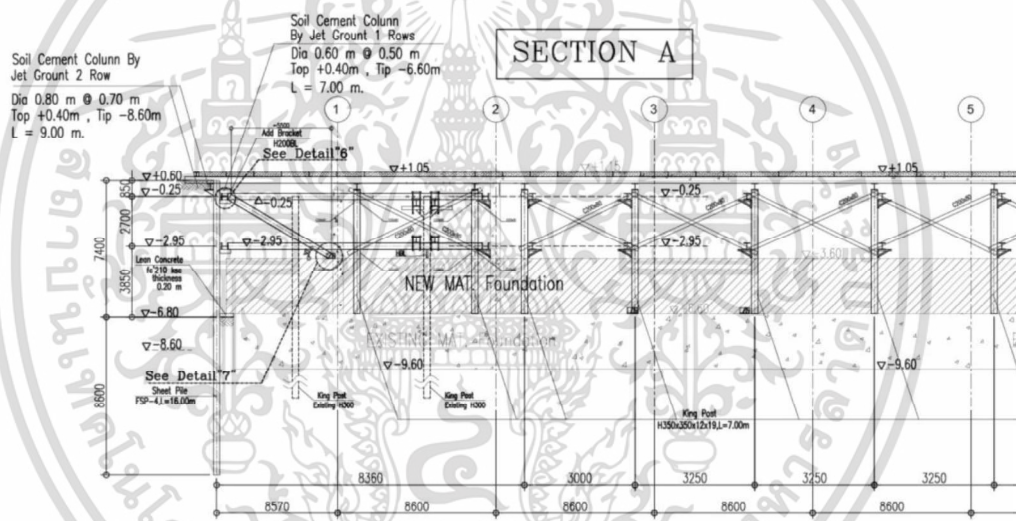
3.1.2 ระบบกำแพงกันดิน

โครงการใช้ระบบกำแพงกันดินเป็นกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) Type IV ยาว 16 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกอบทั้งสองฝั่งของกำแพงเข็มพืด

เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ติดตั้งฝั่งดินหลังกำแพงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร เรียงต่อกันจำนวน 2 แถว มีระยะห่างระหว่างต้น 0.70 เมตร ก่อสร้างตั้งแต่ผิวหน้าดินลึกลงไปจนมีความยาวแห่งดินซีเมนต์รวม 9.00 เมตร

เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ติดตั้งฝั่งดินขุดหน้ากำแพงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร เรียงต่อกันจำนวน 1 แถว มีระยะห่างระหว่างต้น 0.50 เมตร ก่อสร้างตั้งแต่ผิวหน้าดินลึกลงไปจนมีความยาวแห่งดินซีเมนต์รวม 7.00 เมตร

มีการก่อสร้างด้วยระบบ Top-Down วิธีการขุดดินทำโดยใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยันทางข้างรูปแบบ Braced Cuts

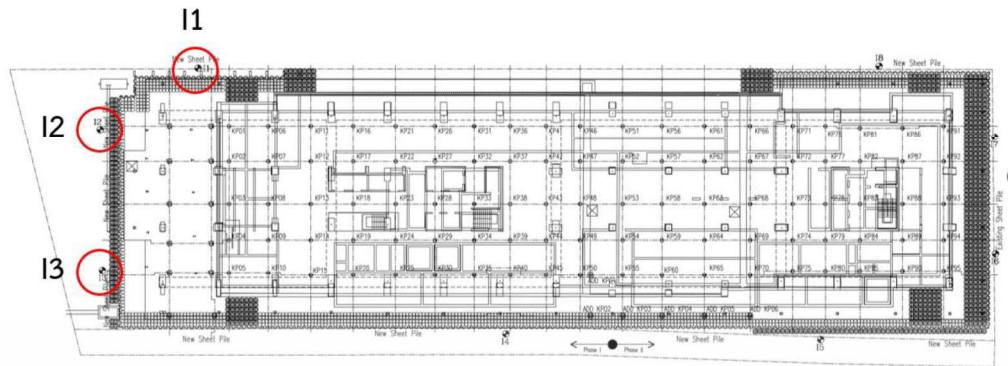


รูปที่ 3.2 ระบบกำแพงกันดินของโครงการ

3.1.3 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดในสนามทำได้โดยการใช้มาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ที่ถูกติดตั้งไว้กับกำแพงเข็มพืดในขั้นตอนการตอกกำแพงเข็มพืดลงที่ดิน ตำแหน่งของมาตรวัดการเอียงตัวถูกกำหนดให้กระจายตัวกันในพื้นที่ก่อสร้างเพื่อสังเกตการเคลื่อนตัวของกำแพงในทุกขั้นตอน โดยในการศึกษานี้เลือกใช้ผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่ถูกวัดโดยมาตรวัดการเอียงตัว 13 เนื่องจากเป็นจุดที่เริ่มงานขุดดินบริเวณนี้เป็นจุดแรก และมีลักษณะของกำแพงเข็มพืดเรียงติดกันมีความยาวที่เพียงพอต่อการศึกษา โดยที่ไม่มีผลของมุมกำแพงเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



I1, I2 and I3 = Inclinator No. 1, 2 and 3

รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในสนาม

3.2 วิธีการขุดดินโดยใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยันทางข้าง (Braced Cuts)

การขุดดินโดยใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยันทางข้าง เป็นการขุดดินที่ใช้พื้นที่น้อยกว่าวิธีการขุดดินแบบกำหนดความลาดชัน เนื่องจากวิธีนี้กำแพงมีหน้าที่รับแรงดันดินทางข้างแทนการให้ดินรับน้ำหนักของตัวเองแบบวิธีการขุดดินแบบกำหนดความลาดชัน จึงเหมาะแก่การใช้ในพื้นที่ก่อสร้างที่ทำการก่อสร้างตัวอาคารเต็มขอบเขตของพื้นที่ แต่วิธีนี้ต้องใช้ความระมัดระวังเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีหลายส่วนต้องตรวจสอบ และเฝ้าระวังในทุกขั้นตอนการก่อสร้าง โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดิน มีวิธีการก่อสร้างดังนี้

3.2.1 การติดตั้งกำแพงกันดิน

การติดตั้งกำแพงกันดินล้อมรอบบริเวณที่จะทำการขุดดิน ขั้นตอนนี้ถือเป็นการกำหนดรูปแบบการทำงานทั้งหมดของงานขุดดิน เนื่องจากกำแพงกันดินในแต่ละรูปแบบมีลักษณะการใช้งาน ลักษณะการติดตั้งหรือก่อสร้างไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ ระดับความลึกของการขุดดิน งบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยทั่วไปกำแพงกันดินมีหลายลักษณะสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) และกำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (Rigid Wall)

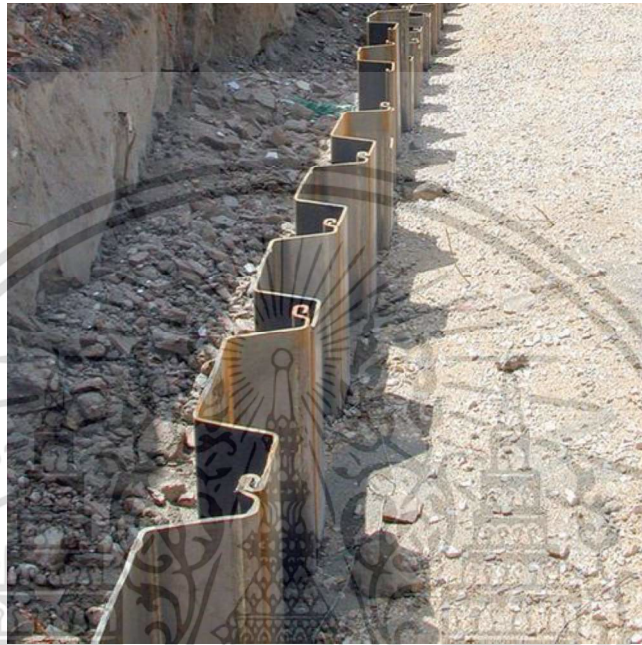
ในขั้นตอนนี้จะทำการปักเสาชั่วคราว (King Post) เพื่อเป็นฐานให้กับเหล็กค้ำยัน (Strut) และมีเสาชั่วคราวของสะพาน (State Post) เพื่อเป็นฐานให้กับพื้นที่ที่มีไว้ให้เครื่องจักรทำงานได้

3.2.1.1 กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)

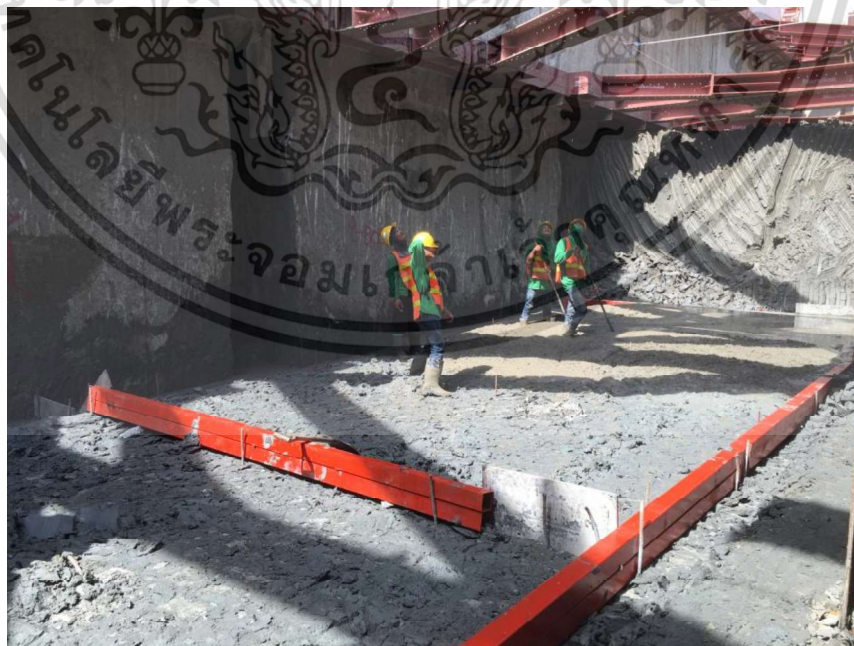
มีลักษณะการเคลื่อนตัวที่สูง เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia, I) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) มีค่าน้อย เหมาะกับการขุดดินไม่ลึกมาก แต่มีข้อดีคือใช้งบประมาณน้อย มีการใช้งานเป็นทั้งโครงสร้างถาวร และโครงสร้างชั่วคราว

3.2.1.2 กำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (Rigid Wall)

มีลักษณะการเคลื่อนตัวที่น้อย เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia, I) และ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) มีค่าสูง เหมาะกับการขุดดินลึก แต่มีข้อเสียคือใช้งบประมาณที่สูง โดยส่วนใหญ่มักเป็นโครงสร้างถาวร



รูปที่ 3.4 กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)



รูปที่ 3.5 Diaphragm Wall กำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (Rigid Wall)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ใช้เครื่องจักรระบบท่อคู่เพื่อปั้นดิน โดยแรงดันที่ใช้ในการตัดย่อยดินต้องน้อยกว่าแรงดันที่ใช้ฉีดน้ำปูนผ่านรูเล็ก ๆ ออกไปกวนผสมกับดิน กระแสน้ำปูนที่มีความเร็วประมาณ 200 เมตรต่อวินาที หรือสูงกว่า จะทำงานคล้าย ๆ ใบพัดของเหลวที่มีกำลังทะลุทะลวงตัดย่อยดินทั้งอ่อนและแข็งให้สามารถผสมรวมกับน้ำปูนเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่หมุน และดึงก้านเจาะขึ้นอย่างช้า ๆ วิธีการอัดฉีดแรงดันสูงเป็นรูปแบบที่นิยมใช้อย่างมากในปัจจุบัน โดยตำแหน่งในการสร้างคือ บริเวณหน้ากำแพงกันดินในฝั่งชุด และบริเวณหลังกำแพงกันดิน เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของกำแพงกันดิน



รูปที่ 3.6 การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วย Jet Grouting Method

3.2.3 การขุดเปิดหน้าดิน

ทำการขุดดินออกในระยะแรกตามระยะที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ เพื่อติดตั้งค้ำยันทางข้าง เมื่อทำการขุดดินจากบ่อขุดแล้ว ควรย้ายดินที่ขุดขึ้นมาออกนอกระยะของกำแพงกันดิน เพื่อลดน้ำหนักทับแผ่กระจาย (Surcharge) หากไม่นำออกนอกระยะให้เพียงพอ จะส่งผลต่อความแข็งแรงของกำแพงกันดินและทำให้กำแพงกันดินเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นได้

3.2.4 การติดตั้งค้ำยันทางข้าง

ทำการติดตั้งค้ำยันทางข้างเพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพง ในขั้นตอนนี้เมื่อติดตั้งค้ำยันทางข้างแล้ว ต้องมีการ Pre-Loading ของระบบค้ำยันตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ด้วย เนื่องจากเป็นการให้แรงดันกำแพงกันดิน และเพื่อให้แน่ใจว่ารอยต่อของเหล็กค้ำยัน (Strut) มีความแน่นสามารถรับแรงตามแนวแกนได้



รูปที่ 3.7 การทำงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันทางข้าง

3.2.5 การทำงานในชั้นถัดไป

เมื่อทำการขุดดินและติดตั้งค้ำยันทางข้างในชั้นแรกแล้ว ในชั้นถัดไปจะทำการขุดดินเพื่อติดตั้งค้ำยันทางข้างแบบเดิมซ้ำอีก ไปจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ ในชั้นตอนนี้ควรมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินทุกครั้งที่มีการขุดดินจนเปลี่ยนระดับความลึกของบ่อขุด เพื่อเป็นการเฝ้าระวังความปลอดภัยของบ่อขุด



รูปที่ 3.8 การขุดดินเพื่อติดตั้งค้ำยันทางข้างให้กำแพงกันดินในชั้นถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การขุดดินในชั้นสุดท้าย

เมื่อทำการติดตั้งค้ำยันชั้นสุดท้ายแล้วจึงทำการขุดดินจนถึงระดับความลึกสุดท้าย และเมื่อเสร็จสิ้นการขุดดินแล้ว ต้องรีบทำการก่อสร้างในชั้นตอนต่อไปเพื่อลดระยะเวลาการเคลื่อนตัวของกำแพงให้น้อยที่สุด และขณะทำการก่อสร้างฐานราก หรือในชั้นตอนการก่อสร้างชั้นใต้ดิน ควรมีการเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินอย่างต่อเนื่องไปจนจบชั้นตอนการก่อสร้าง

3.2.7 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้วย FEM

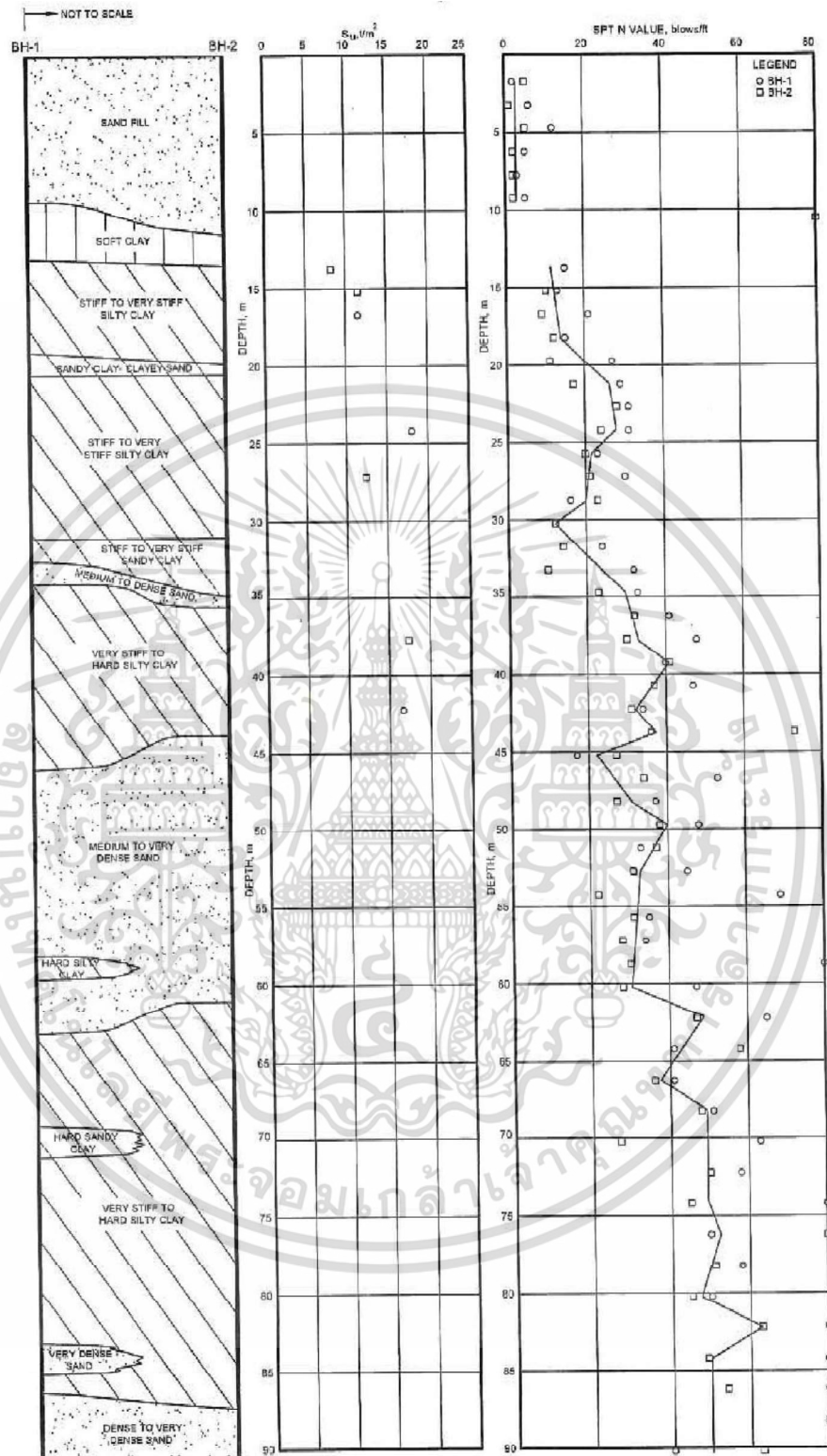
ในส่วนการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำได้โดยการจำลองรูปแบบชั้นตอนการก่อสร้างให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง จากการก่อสร้างด้วยวิธี Braced Cuts ที่ถูกจำลองในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้การสอบเทียบผลการเคลื่อนตัวของกำแพงมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแบบมีค้ำยันทางข้าง จะมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ที่ระดับสุดท้ายของการขุดดิน เนื่องจากที่ระดับกันบ่อขุดดิน มีการเคลื่อนตัวของกำแพงอย่างอิสระ เพราะไม่มีการค้ำยันทางข้าง

3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย FEM แบบ 2 มิติ ต้องคำนึงถึงข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักในการคำนวณ มีข้อมูลที่ใช้คือ หลุมเจาะสำรวจชั้นดิน รูปแบบของโครงสร้าง และขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างกำแพงเข็มพืด

3.3.1 ลักษณะชั้นดิน

ลักษณะชั้นดินของการศึกษานี้ นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ในเขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร ชั้นดินช่วง 10 เมตรแรกเป็นทรายถม ชั้นถัดมาเป็นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 4 เมตร ช่วง -13.00 ถึง -31.00 เมตร เป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก มีชั้นทรายหนาประมาณ 1.00 เมตร แทรกตัวอยู่ที่ระดับ -19.00 เมตร โดยโครงการนี้ใช้ซีพีไพล์ยาว 16 เมตร ปลายกำแพงเข็มพืดอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก

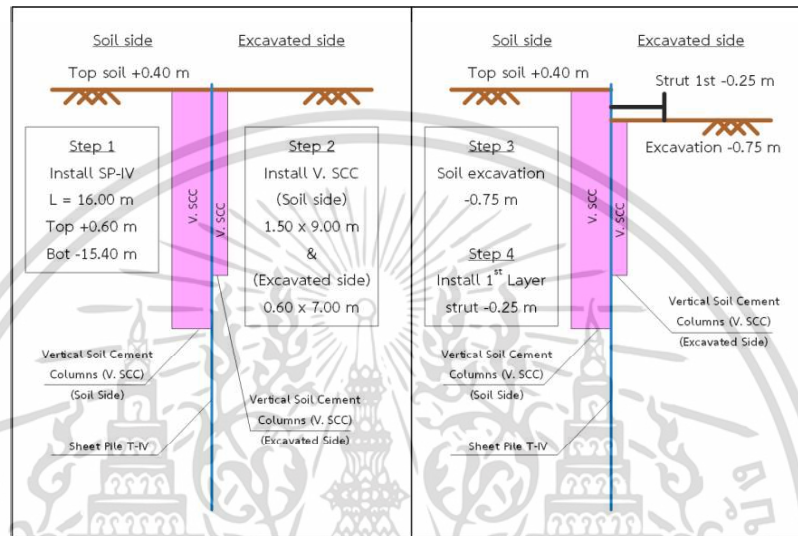


รูปที่ 3.9 ลักษณะชั้นดินในเขตพื้นที่ก่อสร้างที่ระดับ ± 0.00 ถึง -90.00 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

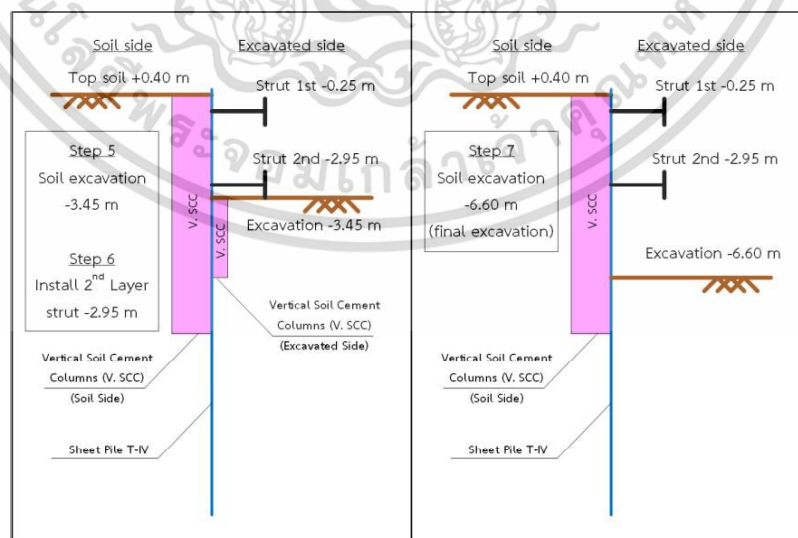
3.3.2 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างในสนาม

ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างในสนามประกอบด้วย การติดตั้งกำแพงเข็มพืด การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ประกอบกับกำแพงเข็มพืดทั้งสองฝั่ง ขนาด 0.60x7.00 เมตร ในฝั่งดินขุดหน้ากำแพง และขนาด 1.50x9.00 เมตร ในฝั่งดินหลังกำแพง จากนั้นทำการขุดดินเพื่อติดตั้งระบบค้ำยันด้วย H-Beam 350x350x12x19 มม. ในชั้นแรกที่ระดับ -0.25 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ทำการติดตั้งกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อขุดดินและติดตั้งค้ำยัน

ทำการขุดดินเพื่อติดตั้งระบบค้ำยันในชั้นที่ 2 ที่ระดับ -2.95 เมตร เมื่อติดตั้งระบบค้ำยันครบ 2 ชั้น จึงทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้ายที่ -6.60 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11

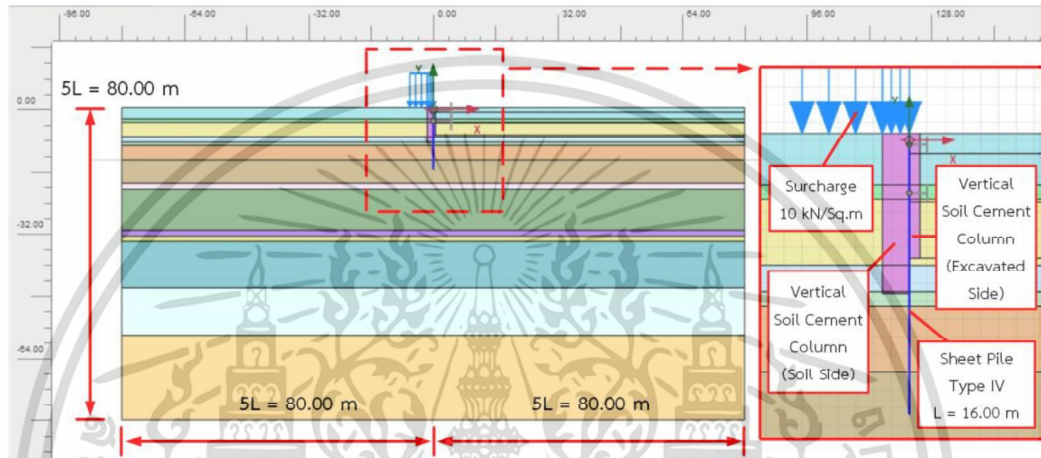


รูปที่ 3.11 ขุดดินเพื่อติดตั้งค้ำยันในชั้นที่ 2 แล้วทำการขุดดินในระดับสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

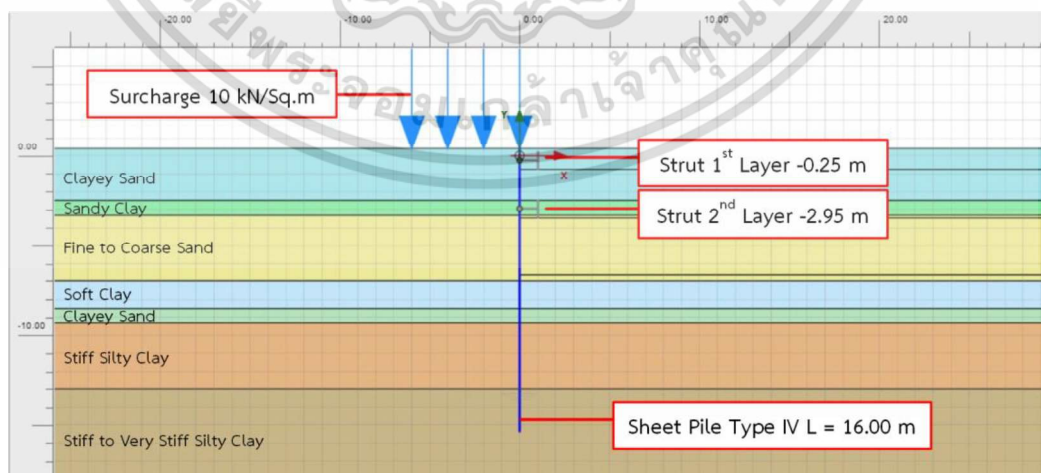
กำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ในแบบจำลองใช้ Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร ใช้ขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็น 5 เท่าของความยาวกำแพงเข็มพืด ยึดออกไปทางด้านซ้าย ขวา และด้านล่างของแบบจำลอง เป็นระยะ 80.00 เมตร เพื่อดูผลกระทบของการเคลื่อนตัวจากแบบจำลอง รูปแบบ Plan Strain วิเคราะห์ด้วย Mohr Coulomb Model และ Soft Soil Model ใช้น้ำหนักแผ่นกระจาย 10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แบบจำลองของการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมกำลังกำแพงเข็มพืด

3.3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร เพียงอย่างเดียว แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.13

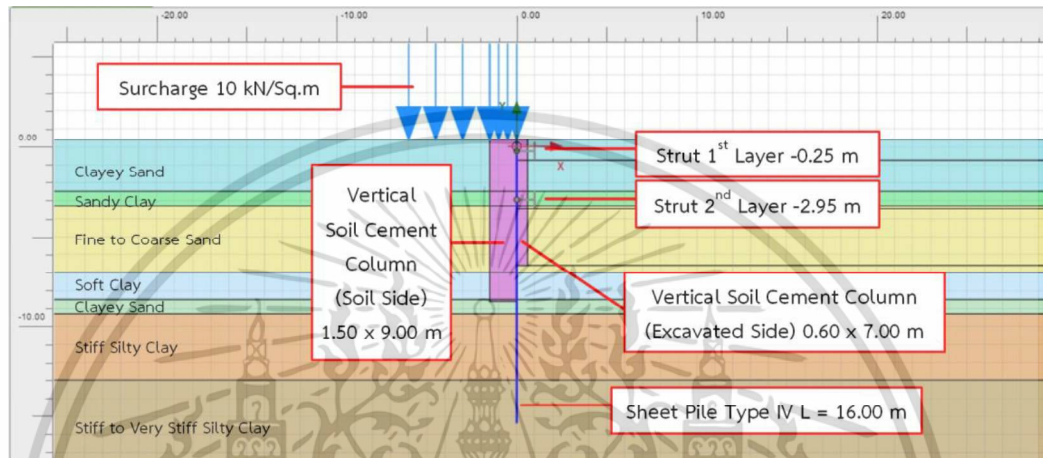


รูปที่ 3.13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B

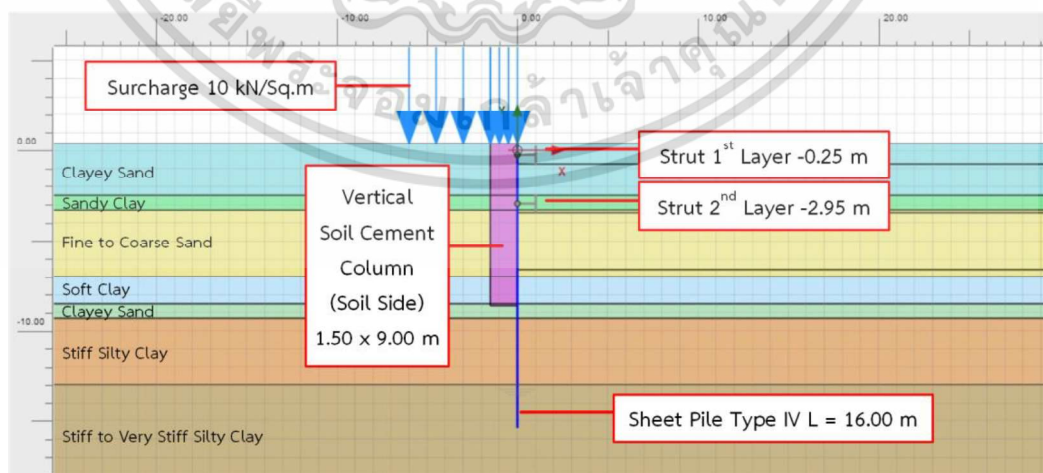
เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกับกำแพงเข็มพืดทั้งสองฝั่ง ขนาด 0.60x7.00 เมตร ในฝั่งดินขุดหน้ากำแพง และขนาด 1.50x9.00 เมตร ในฝั่งดินหลังกำแพง แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B

3.3.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกับกำแพงเข็มพืดในฝั่งดินหลังกำแพงขนาด 1.50x9.00 เมตร (ลึกกว่าระดับขุดดิน) แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.15

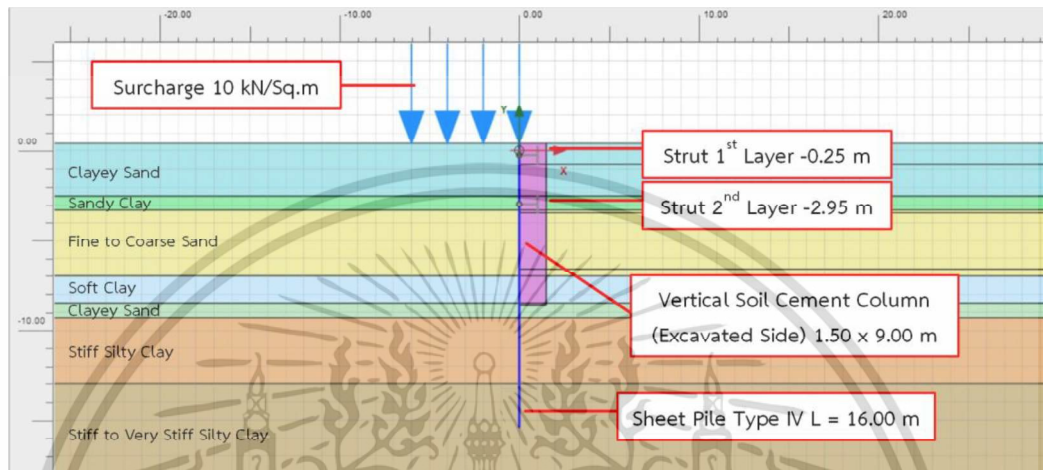


รูปที่ 3.15 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.2

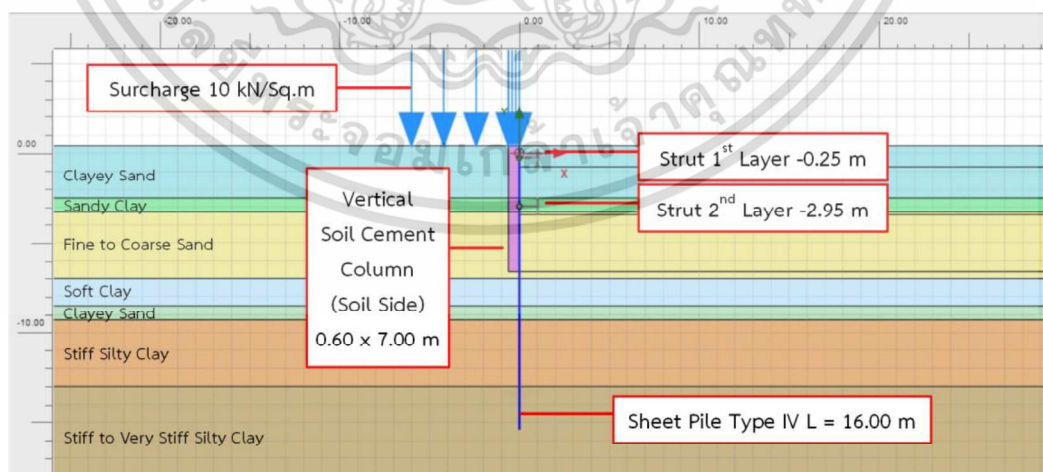
เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกับกำแพงเข็มพืดในฝั่งดินขุดหน้ากำแพงขนาด 1.50x9.00 เมตร (ลึกกว่าระดับขุดดิน) แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.2

3.3.3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกับกำแพงเข็มพืดในฝั่งดินหลังกำแพง ขนาด 0.60x7.00 เมตร (เสมอระดับขุดดิน) แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.17

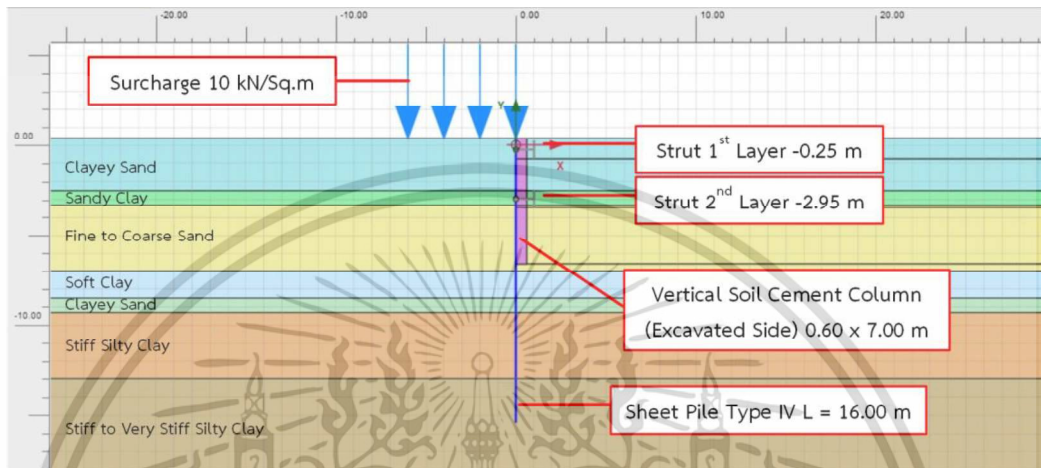


รูปที่ 3.17 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.2

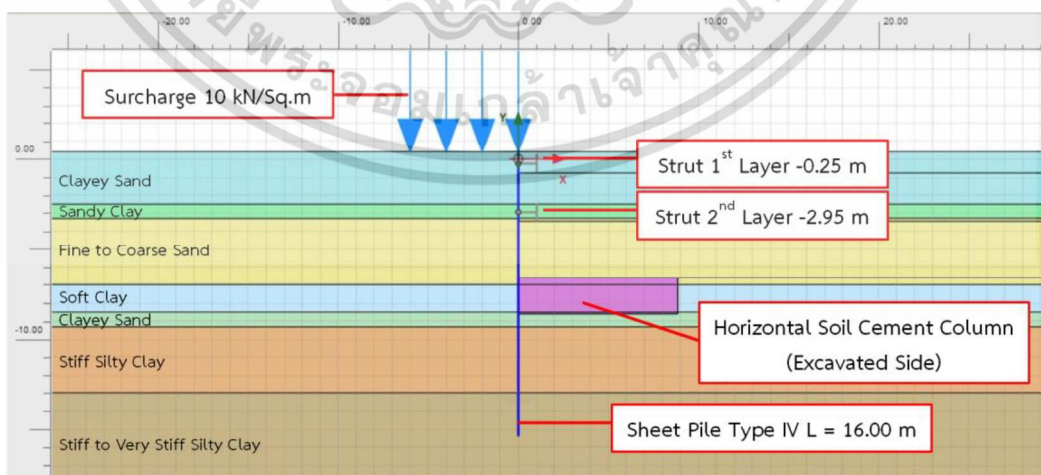
เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกับกำแพงเข็มพืดในฝั่งดินขุดหน้ากำแพง ขนาด 0.60x7.00 เมตร (เสมอระดับขุดดิน) แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.2

3.3.3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยกำแพงเข็มพืด Sheet Piles Type IV ยาว 16.00 เมตร มีเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน มีขนาดเท่ากับผลรวมของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้งที่ประกบกำแพงเข็มพืด ในฝั่งดินขุดหน้ากำแพงและฝั่งดินหลังกำแพง ที่ปรากฏในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B แล้วทำการขุดด้วยวิธี Braced Cuts ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง FEM 2 มิติ นั้น เป็นพารามิเตอร์ที่นำมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน สำหรับพารามิเตอร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบในเขตพื้นที่กรุงเทพเลือกใช้งาน และใช้อย่างแพร่หลายในโครงการก่อสร้าง แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MCM) ถูกใช้ในชั้นดินช่วงแรกใกล้ผิวดิน กับใช้ในเสาเข็มดินซีเมนต์ และแบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model, SSM) ถูกใช้ในชั้นดินถัดลงมาในบริเวณปลายของกำแพงเข็มพืดตลอดจนไปถึงดินในชั้นสุดท้าย

3.3.4.1 แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-coulomb model)

เป็นรูปแบบของแบบจำลองที่เป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ในแบบจำลองนี้สามารถหาได้ไม่ยากนัก ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์หลัก 5 ตัวคือ ความหนาแน่น (Density , γ) ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion , C) มุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction , ϕ) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity , E) และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability , k) แบ่งการคำนวณตามชนิดดินได้ 2 แบบคือ Drained ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 8.64×10^{-2} เมตร/วัน และ Undrained ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 8.64×10^{-4} เมตร/วัน ในแบบจำลองนี้ใช้ค่า Poisson's Ratio 0.30 ในดิน และ 0.495 ในเสาเข็มดินซีเมนต์โดยแบบจำลองใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3.4.2 แบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model)

รูปแบบของแบบจำลองดินอ่อนนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์คล้ายกับแบบจำลอง Mohr-Coulomb มีจุดแตกต่างกันตรงที่การคำนวณ ความแข็ง (Stiffness) ของแบบจำลอง Soft Soil ไม่ใช่โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity , E) แบบปกติในการคำนวณ แต่ใช้ค่าดัชนีการอัดตัวดัดแปร (Modified Compression Index, λ) และ ดัชนีการบวมตัวดัดแปร (Modified Swelling Index, κ) ที่ถูกคำนวณมาจาก โมดูลัสความยืดหยุ่นของดินในสภาวะแตกต่างกันของดินชนิดต่าง ๆ (Suched ed al., 2013) โดยใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เท่ากับ 0.15 และอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัวตามความลึก (Over Consolidation Ratio, OCR) เท่ากับ 1.2 แบ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำตามชนิดดินได้ 2 แบบคือ Drained และ Undrained เหมือนกับแบบจำลอง Mohr-Coulomb โดยแบบจำลองใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Soil Type	Depth		Density		Strength		Stiffness		
	Top m	Bot m	γ_{sat} kN/m ³	γ_{unsat} kN/m ³	C' kPa	ϕ' Degree	E' kPa	λ $\times 10^{-3}$	κ $\times 10^{-3}$
Clayey Sand	+0.4	-2.5	16.2	14.2	1	25	1,500		
Sandy Clay	-2.5	-3.3	16.2	14.2	20	25	3,061		
Fine to Coarse Sand	-3.3	-7.0	16.2	14.2	1	26	1,500		
Soft Clay	-7.0	-8.5	16.2	14.2	27	25	4,002		
Clayey Sand	-8.5	-9.3	16.2	14.2	1	26	1,500		
Stiff Silty Clay	-9.3	-13.0	15.7	13.7	67	10		290	28.0
Stiff to Very Stiff Silty Clay	-13.0	-19.0	19.3	17.3	100	10		12	1.1
Very Stiff Silty Clay	-19.0	-20.5	19.9	17.9	112	10		12	1.1
Stiff to Very Stiff Silty Clay	-20.5	-31.0	19.9	17.9	120	10		6	0.9
Very Stiff Silty Clay	-31.0	-32.5	19.9	17.9	122	10		6	0.9
Fine to Medium Sand	-32.5	-34.0	19.9	17.9	1	34		6	0.9
Very Stiff to Hard Clay	-34.0	-46.0	20.1	18.1	133	10		6	0.9
Dense to Very Dense Sand	-46.0	-58.0	20.1	18.1	1	37		6	0.9
Hard Silty Clay	-58.0	-80.0	20.4	18.4	227	10		6	0.9
Soil Cement Column			20.0	18.0	78	0	39,240		

3.3.4.3 พารามิเตอร์ของกำแพงเข็มพืดและค้ำยันทางข้าง

กำแพงเข็มพืดและระบบค้ำยันทางข้างใช้โครงสร้างเหล็กเป็นหลัก มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของเหล็กเท่ากับ 2.0×10^8 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของกำแพงเข็มพืด

Item	EA kN/m	EI kN.m ² /m	d m	W kN/m/m	M all kN/m/m
Sheet Pile Type-IV	4,850,000	77,200	0.44	1.86	442.00

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของค้ำยันทางข้าง

Item	Area m ²	E kN/m
H350x350x12x19 mm	0.01739	3,477,095

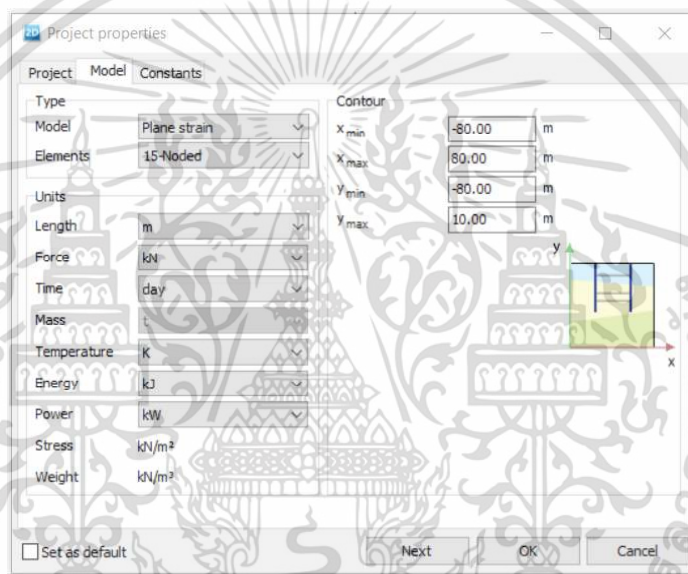
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดด้วย PLAXIS 2D

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเบื้องต้นแล้ว ส่วนถัดมาคือการกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างให้เป็นไปตามสภาพหน้างานจริง และถูกต้องตามคู่มือการใช้โปรแกรม มีขั้นตอนดังนี้

3.3.5.1 การกำหนดค่าพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำหนดให้เป็น Plane Strain และ Elements 15-Noded ให้ค่าหน่วยน้ำหนักน้ำเท่ากับ 10.00 KN/m^3 โดยขอบเขตของแบบจำลอง $x(\text{min})$, $x(\text{max})$, $y(\text{min})$, และ $y(\text{max})$ เท่ากับ $-80, 80, -80, 10 \text{ m}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.20

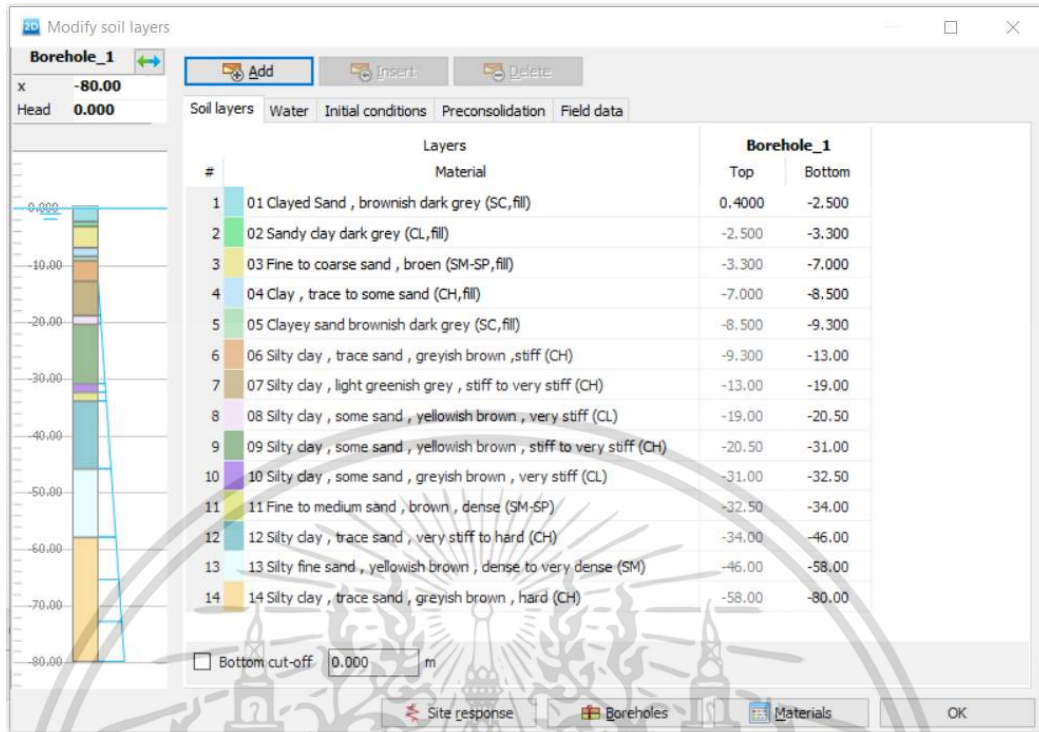


รูปที่ 3.20 Project Properties

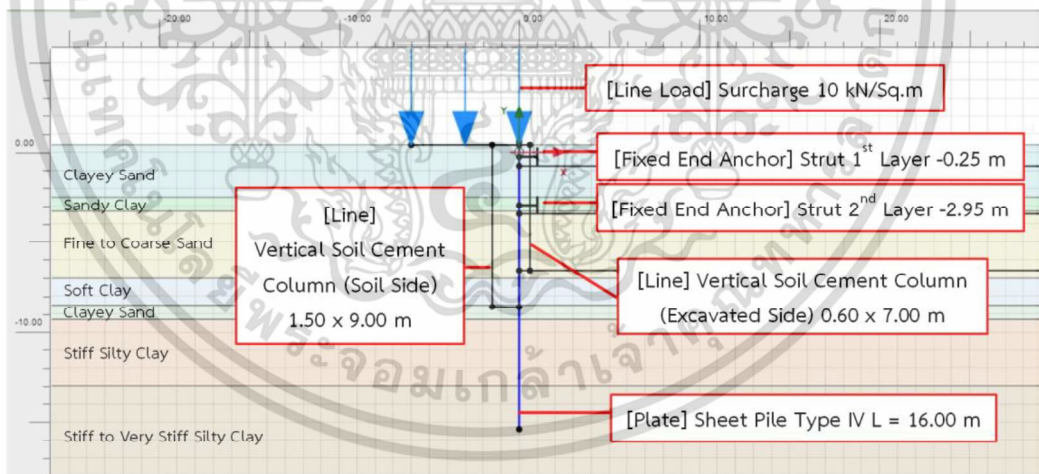
3.3.5.2 การกำหนดข้อมูลดินและโครงสร้าง

กำหนดข้อมูลของดิน (Material Sets) ในประเภท Soil and Interfaces ตามชั้นดินที่ได้แบ่งชั้นดินไว้ เพื่อสร้าง Borehole ตามลักษณะของชั้นดิน พร้อมทั้งกำหนดค่า Modify Soil Layers แสดงถึง Geometry และตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21

กำหนดรูปแบบโครงสร้างโดยใช้ Plate แทนกำแพงเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ใช้ Fixed End Anchor แทนเหล็กค้ำยัน (Strut) ใช้ Line Load แทนค่าน้ำหนักแผ่กระจาย และใช้ Line เพื่อลากเส้นรูปร่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) และทำการกำหนดค่าตามพารามิเตอร์ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.22



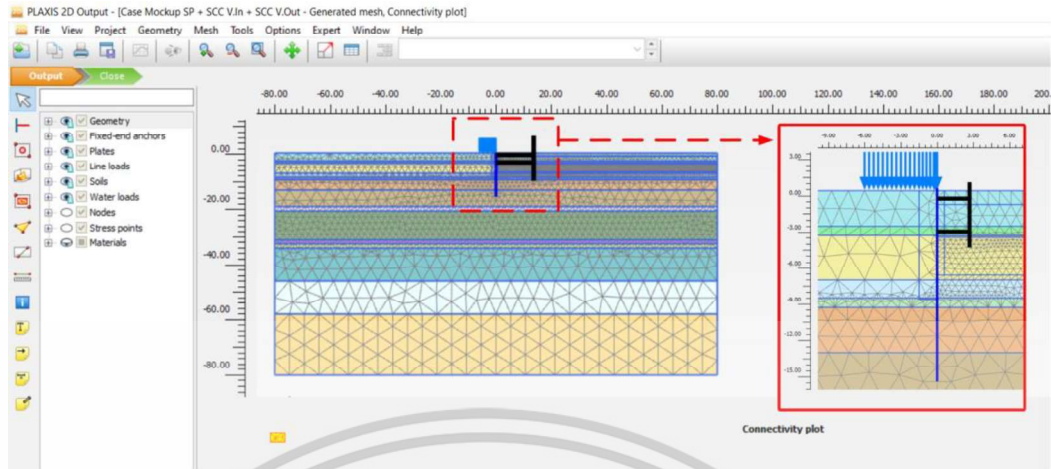
รูปที่ 3.21 Modify Soil Layer



รูปที่ 3.22 Structure Model

กำหนด Mesh เพื่อแบ่งจุดคำนวณโปรแกรม เลือกความละเอียดเป็นระดับ ละเอียดมาก (Very Fine) โดยความละเอียดมีผลต่อความแม่นยำและระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

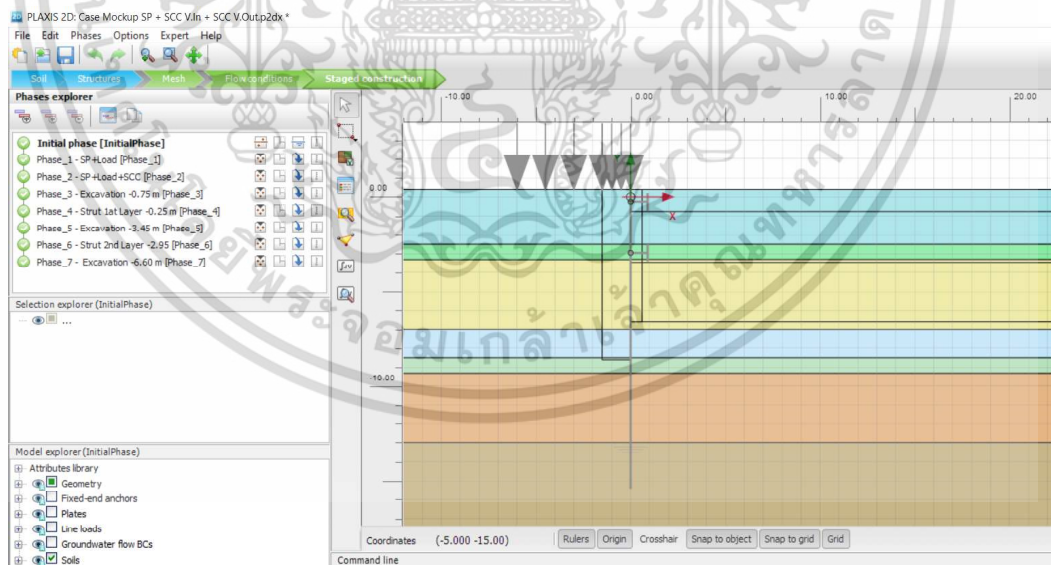


รูปที่ 3.23 Mesh Model

3.3.5.3 การกำหนดขั้นตอนการก่อสร้าง

ในขั้นตอนการก่อสร้างเลือก Staged Construction เพื่อกำหนดรูปแบบการคำนวณให้ เป็นไปตามขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม และเลือกรูปแบบการคำนวณให้สอดคล้องกับคำแนะนำของ โปรแกรม มีลำดับของ Staged Construction ดังนี้

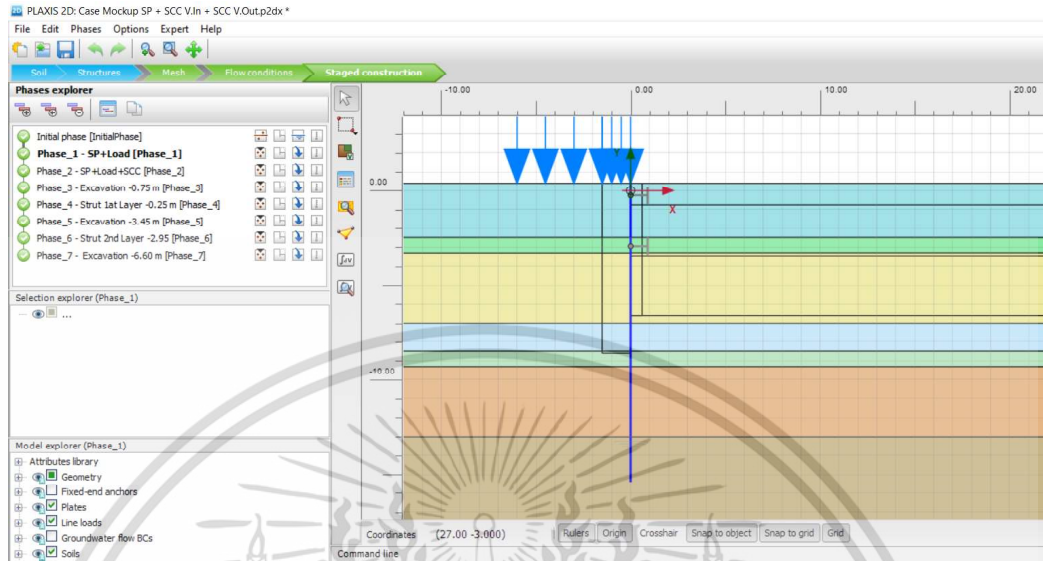
1. Initial Phase เป็นลำดับแรกของขั้นตอน มีเพียงชั้นดินที่กำหนดไว้เท่านั้น



รูปที่ 3.24 Initial Phase

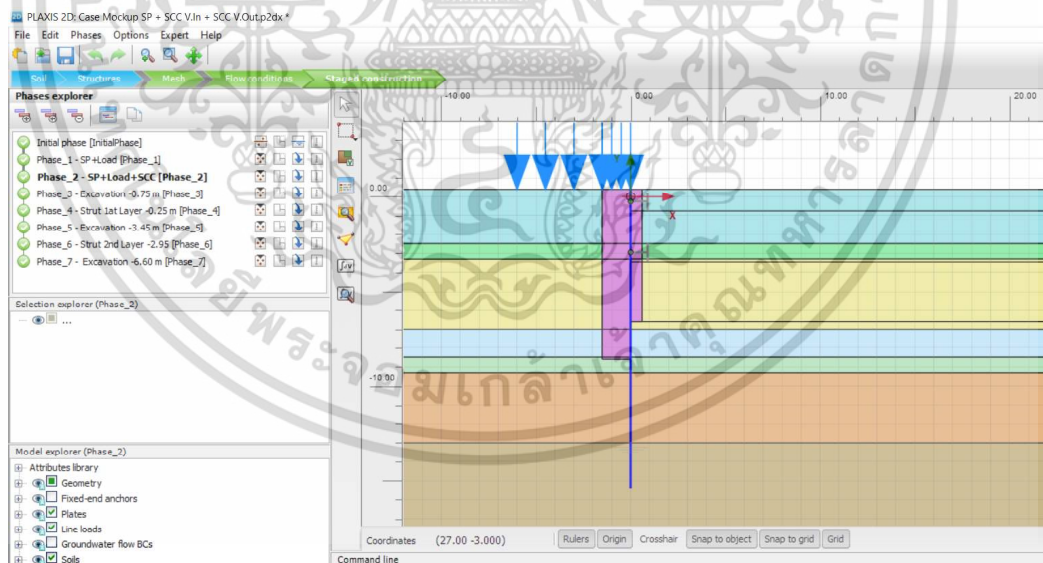
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Phase 1 ติดตั้งกำแพงเข็มพืดยาว 16.00 เมตร และเลือก Surcharge Load 10 kN/m^2



รูปที่ 3.25 Phase 1 ติดตั้งกำแพงเข็มพืดและน้ำหนักแผ่กระจาย

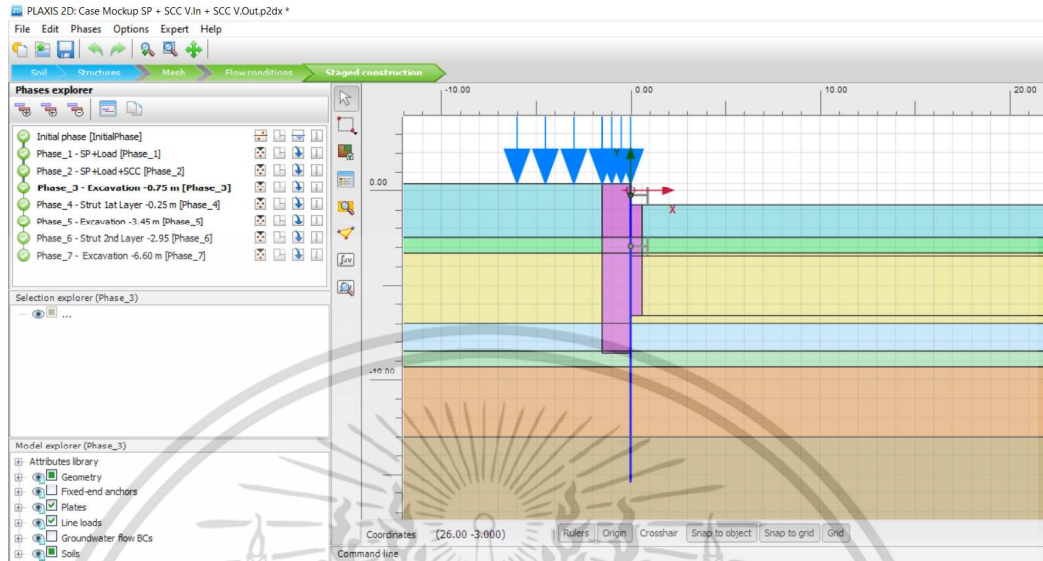
3. Phase 2 ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ประกอบกำแพงเข็มพืดทั้งสองฝั่ง



รูปที่ 3.26 Phase 2 ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ประกอบกำแพงเข็มพืด

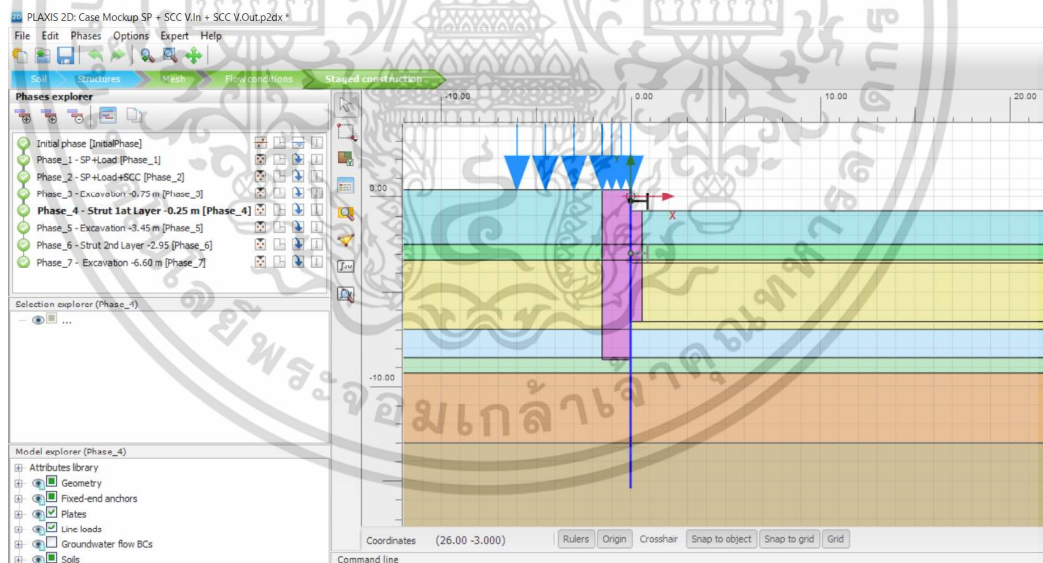
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Phase 3 ขุดดินออกที่ระดับ -0.75 เมตร เพื่อติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut)



รูปที่ 3.27 Phase 3 ขุดดินออกที่ระดับ -0.75 เมตร

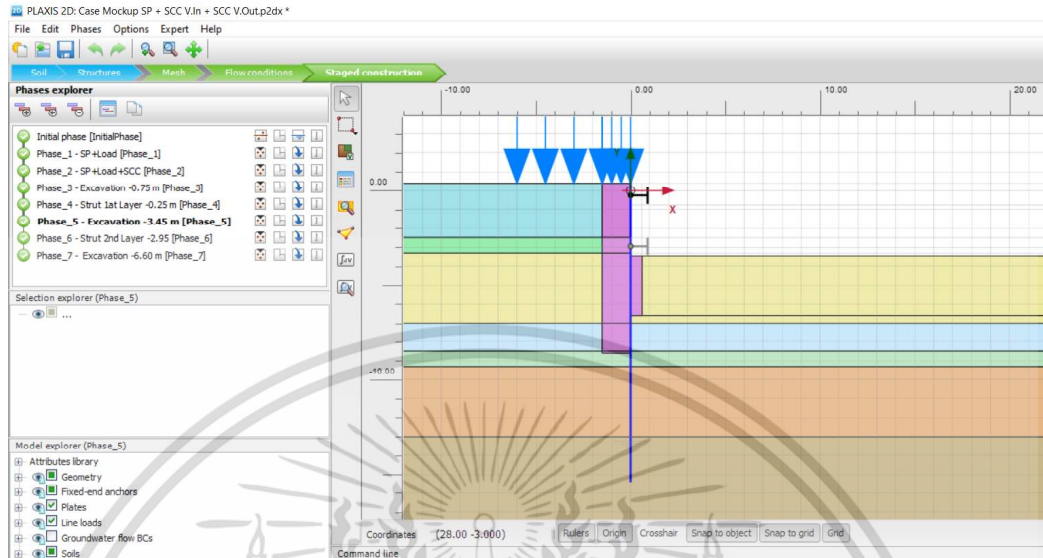
5. Phase 4 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -0.25 เมตร



รูปที่ 3.28 Phase 4 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -0.25 เมตร

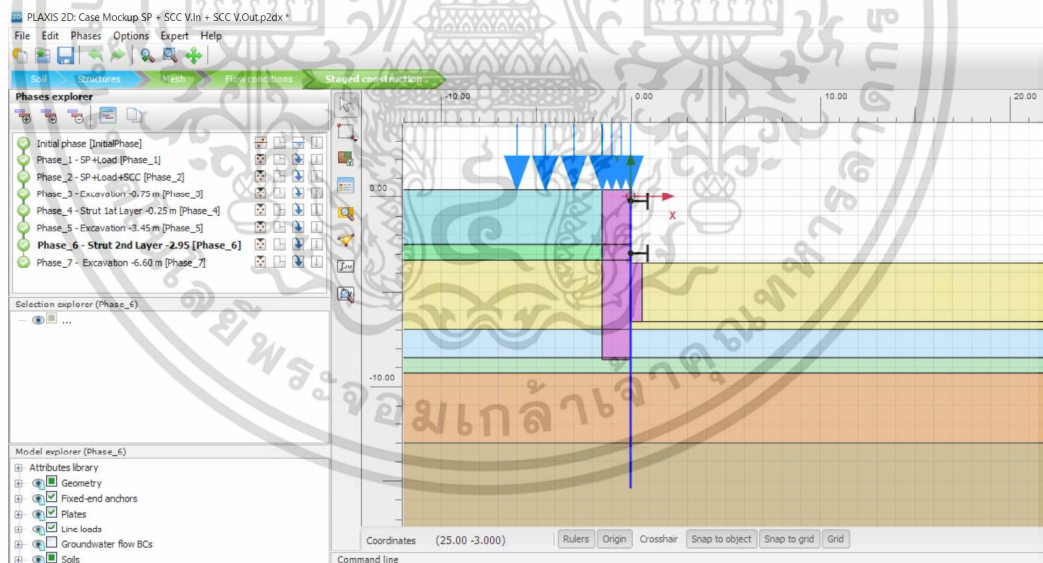
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Phase 5 ขุดดินออกที่ระดับ -3.45 เมตร เพื่อติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut)



รูปที่ 3.29 Phase 5 ขุดดินออกที่ระดับ -3.45 เมตร

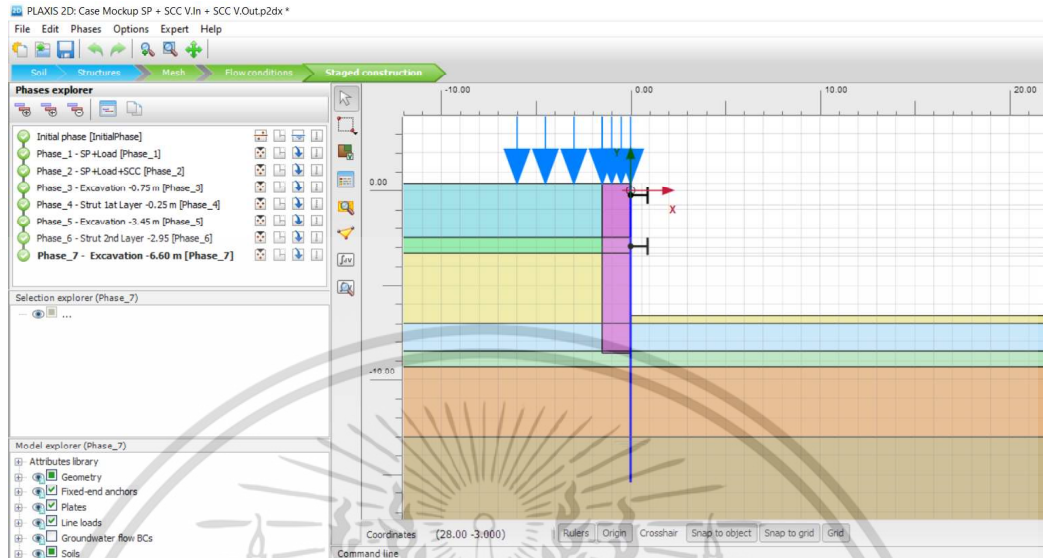
7. Phase 6 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -2.95 เมตร



รูปที่ 3.30 Phase 6 ติดตั้งเหล็กค้ำยัน (Strut) ที่ระดับ -2.95 เมตร

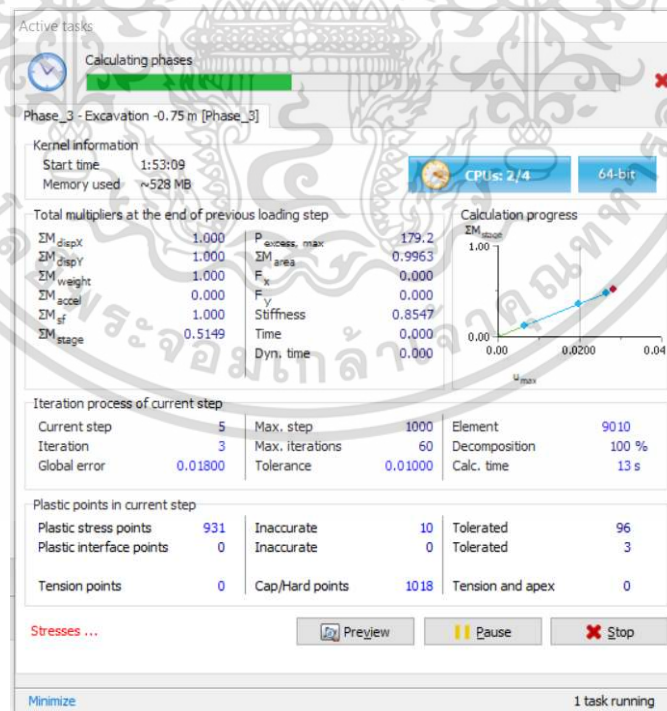
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Phase 7 ขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร



รูปที่ 3.31 Phase 7 ขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร

เมื่อครบทุกขั้นตอน ทำการ Run แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดูการเคลื่อนตัวของกำแพง
เข็มพืดที่เกิดขึ้น และนำผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดไปวิเคราะห์ผล

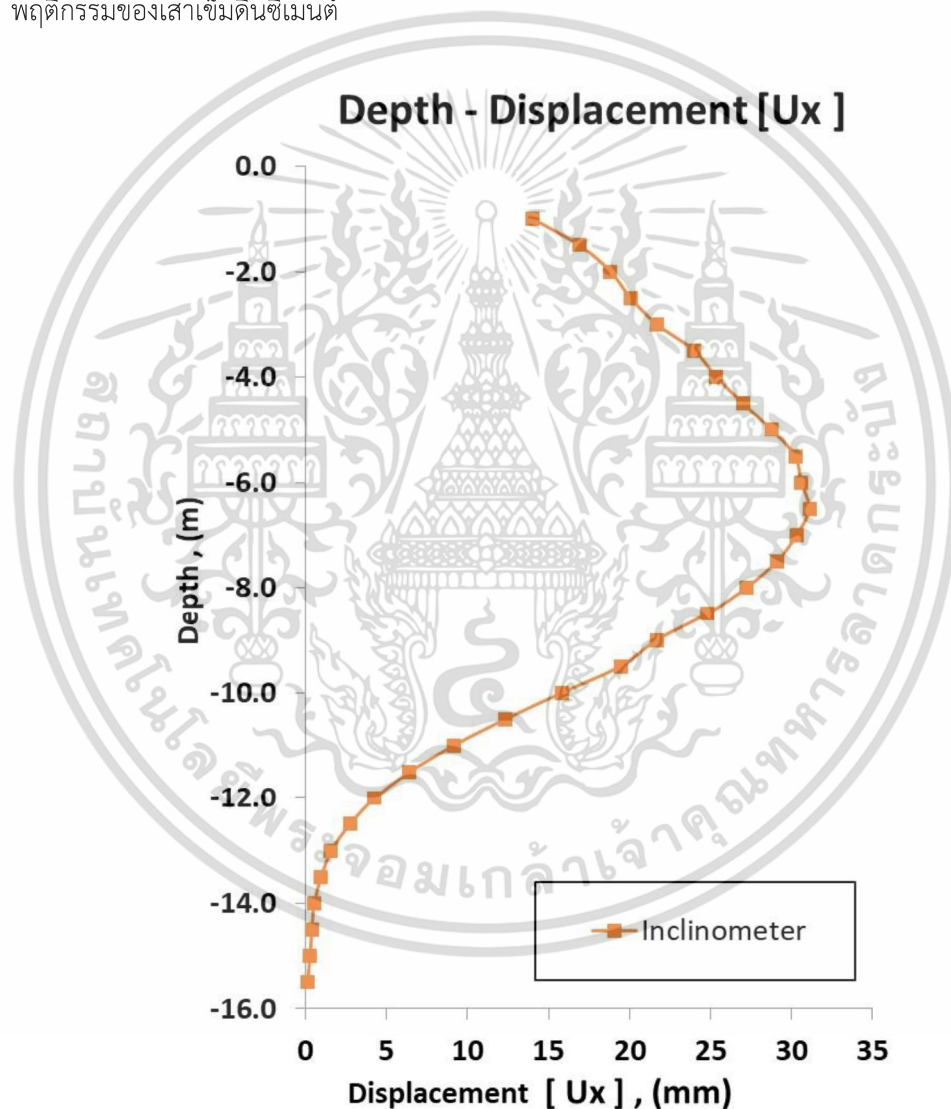


รูปที่ 3.32 การแสดงผลระหว่างการคำนวณ (Calculation Phases)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสอบเทียบแบบจำลอง

การตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม โดยมาตรวจวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ที่ติดตั้งในขั้นตอนการฝังกำแพงเข็มพืด เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างในแต่ละชั้นตอน เพื่อใช้ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำได้โดยเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวหลังการขุดดินในระดับสุดท้ายที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้ในสนาม ที่ 21 วัน เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.33 เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 3.33 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดจากการตรวจวัดในสนามที่ระยะเวลา 21 วัน

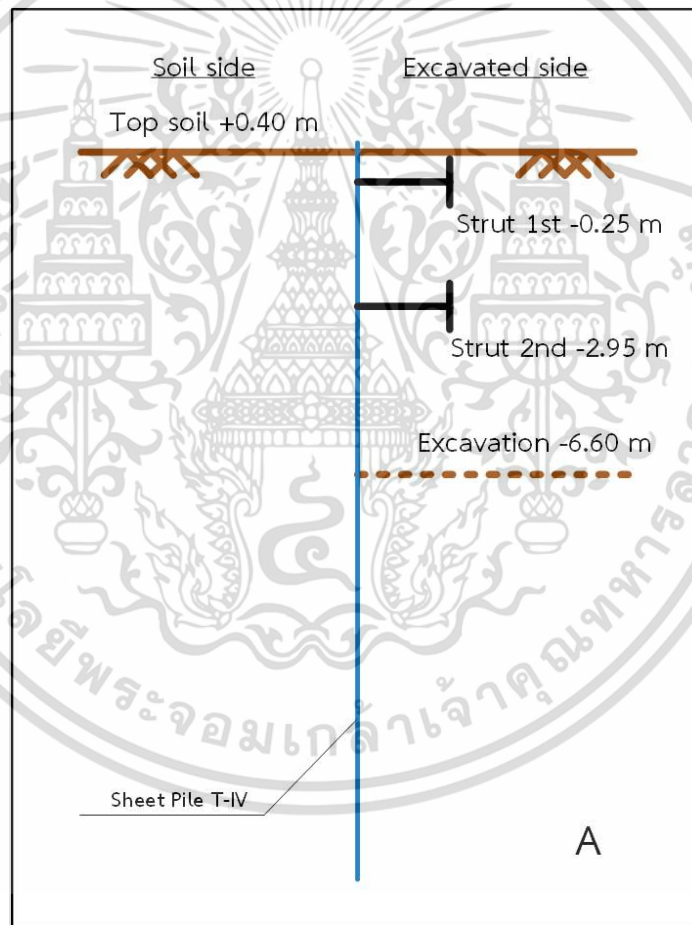
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เจ็อนไซที่ใช้ในการศึกษา

เจ็อนไซที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบตามลักษณะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปแบบ A คือ กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบ B คือ กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง และรูปแบบ C คือ รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด และศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ในการช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด

3.5.1 รูปแบบ A กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น ไม่มีการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้กำแพงเข็มพืดในการรับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินนอกกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 3.34

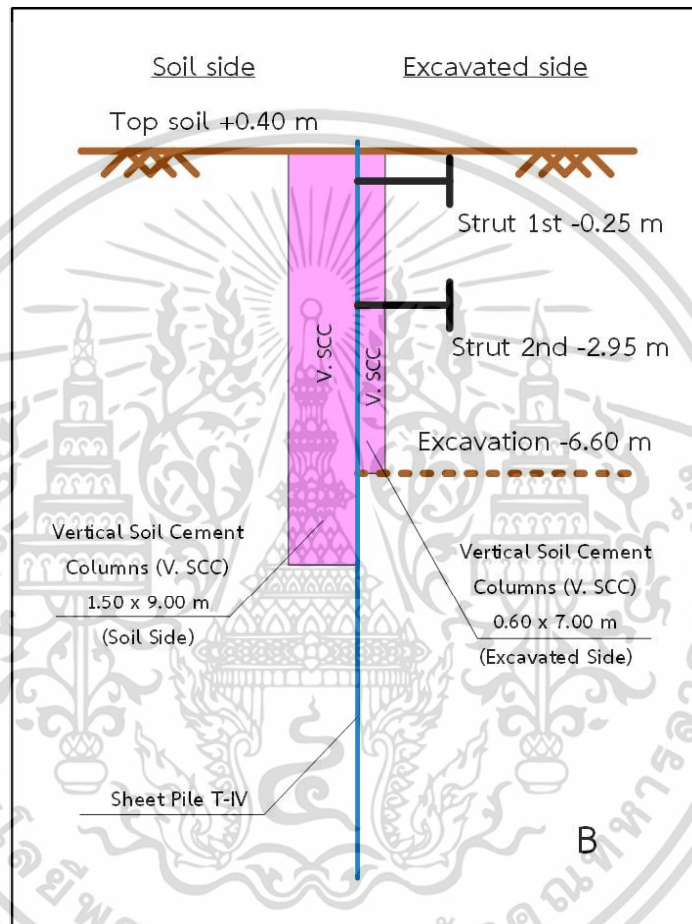


รูปที่ 3.34 รูปแบบ A กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งประกบทั้งสองฝั่งของกำแพง คือฝั่งดินหลังกำแพง และฝั่งป่อขุดหน้ากำแพง เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด เป็นรูปแบบที่นิยมใช้ตามโครงการก่อสร้างในปัจจุบัน และสร้างจากรูปแบบจริงของโครงการก่อสร้างที่ใช้อ้างอิงกับข้อมูลของงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.35



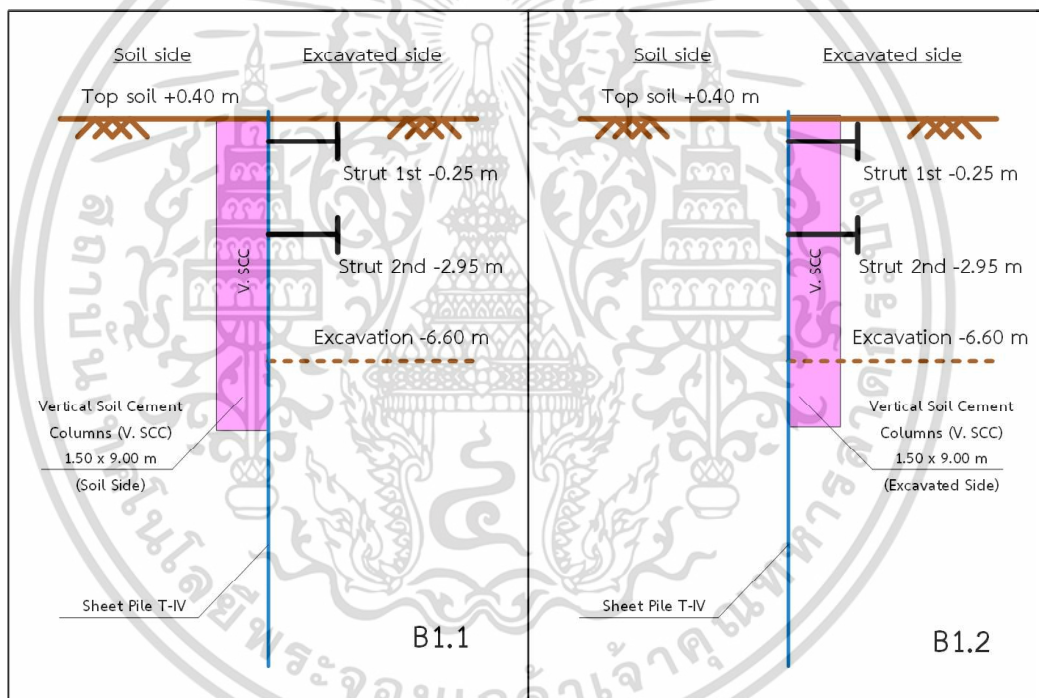
รูปที่ 3.35 รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง

ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อศึกษาผลการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด โดยการสร้างแบบจำลองแยกย่อยลงไปอีก 2 ชุด ที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน และเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน แต่ตำแหน่งของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่คนละฝั่งของกำแพงเข็มพืด แบ่งรูปแบบการศึกษาตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งได้ 2 รูปแบบ คือ

3.5.2.1 รูปแบบ B1.1 และ B1.2 เสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้ง ขนาด 1.50 x 9.00 m ปลายเสาค้ำดินซีเมนต์วางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน

เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ระหว่างแบบจำลองรูปแบบ B1.1 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังดินหลังกำแพง (Soil Side) เพียงฝั่งเดียว กับรูปแบบ B1.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated Side) เพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.36

เสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความกว้าง 1.50 เมตร ความลึก 9.00 และความลึกของเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้ง อยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร ในฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated Side) จะหลงเหลือเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งที่ถูกขุดออกไม่หมด เนื่องจากมีบางส่วนอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน

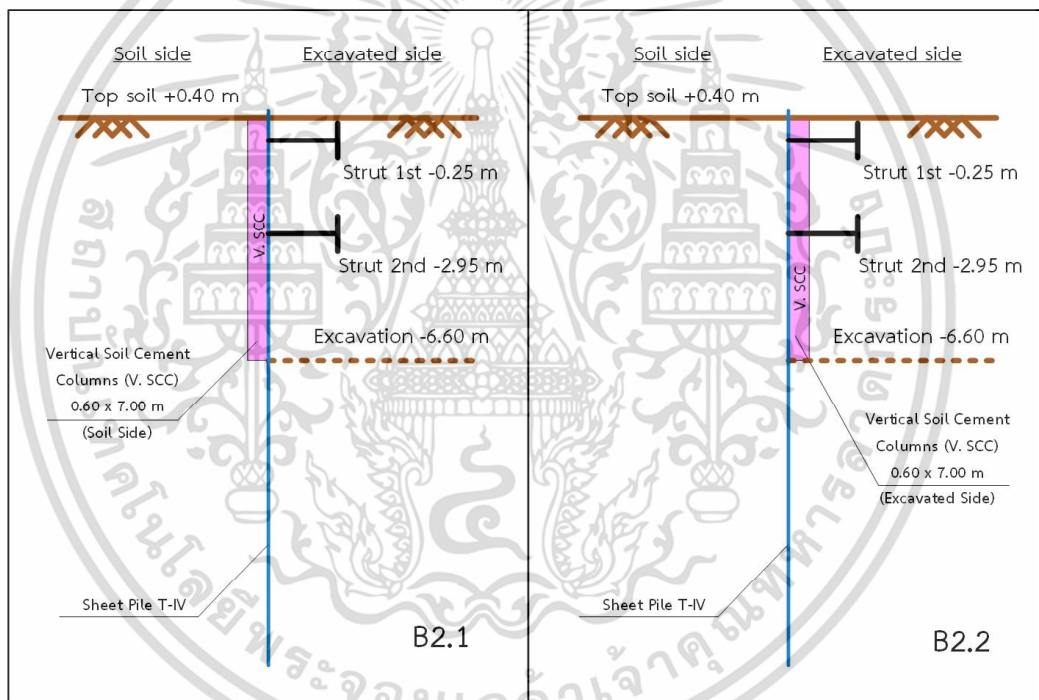


รูปที่ 3.36 รูปแบบ B1.1 และ B1.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังเดียว

3.5.2.2 รูปแบบ B2.1 และ B2.2 เสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้ง ขนาด 0.60 x 7.00 m ปลายเสาค้ำดินซีเมนต์วางตัวอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน

เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ระหว่างแบบจำลองรูปแบบ B1.1 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังดินหลังกำแพงเพียงฝั่งเดียว (Soil Side) กับรูปแบบ B1.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated Side) เพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.37

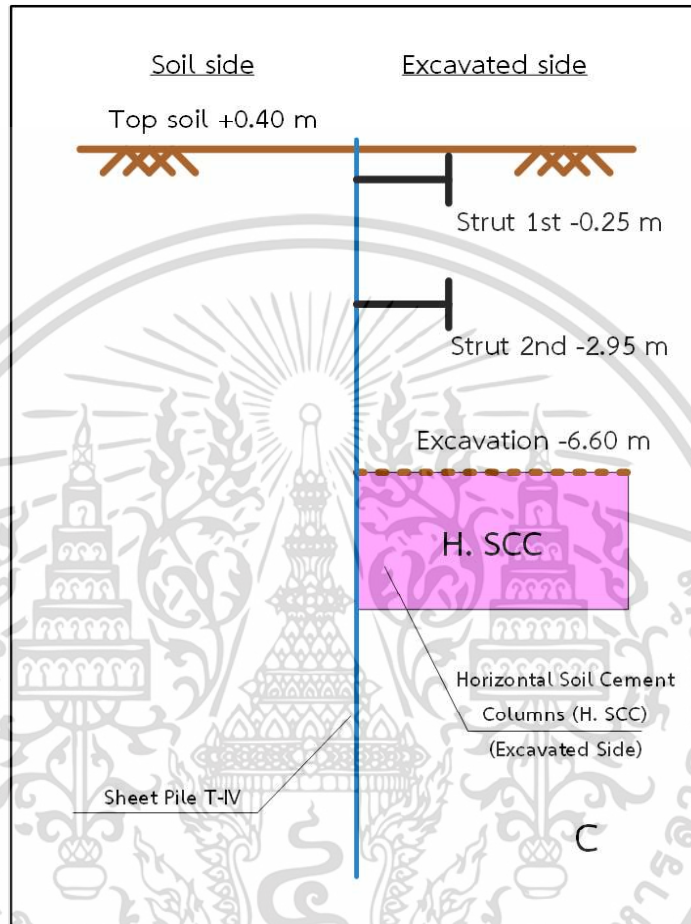
เสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความกว้าง 0.60 เมตร ความลึก 7.00 และความลึกของเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้ง อยู่ที่ระดับบ่อขุดดิน เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร ในฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated Side) จะไม่หลงเหลือเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งใต้ระดับบ่อขุดดิน



รูปที่ 3.37 รูปแบบ B2.1 และ B2.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาค้ำดินซีเมนต์แนวตั้งฝังเดี่ยว

3.5.3 รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ดังแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 รูปแบบ C กำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดินนี้ มีคุณสมบัติและปริมาตรเทียบเท่ากับแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง โดยมีจุดที่ต่างกันคือรูปร่างและตำแหน่งที่วางตัวอยู่เท่านั้น เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร จะหลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนอยู่ทั้งหมด ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แนวอน ช่วยเสริมกำลังของกำแพงเข็มพืดได้อย่างต่อเนื่อง

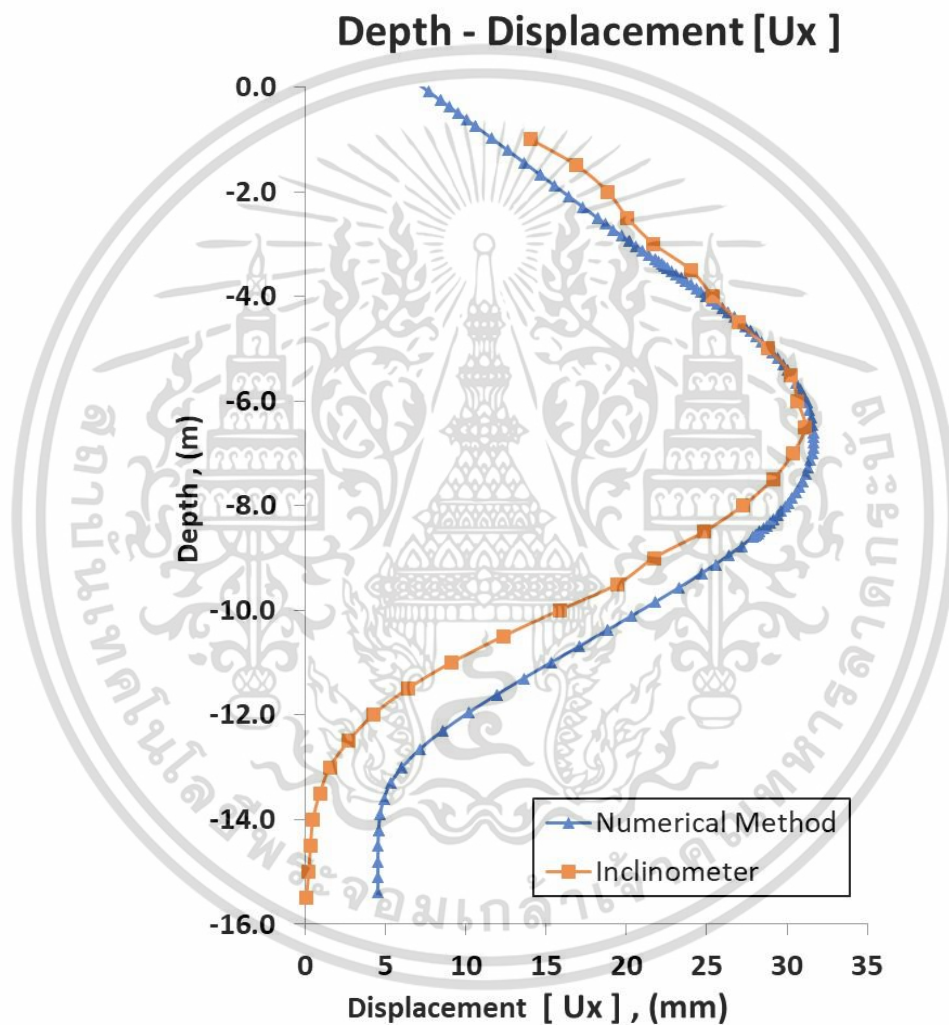
เมื่อศึกษารูปแบบกำแพงเข็มพืดรูปแบบหลักครบทั้ง 3 รูปแบบ คือ รูปแบบ A, B และ C แล้ว (รวมถึงรูปแบบย่อย B1.1, B1.2, B2.1 และ B2.2 ด้วย) จะทำการหารูปแบบที่ดีที่สุดจากทุกรูปแบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดต่อไป

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง

ในหัวข้อนี้เป็นผลการสอบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ระหว่างการตรวจวัดในสนาม กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระยะเวลา 21 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสอบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ระหว่างการตรวจวัดในสนาม กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ระยะเวลา 21 วัน

เมื่อทำการสอบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด จนมีรูปแบบใกล้เคียงกัน แล้ว สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำมาใช้ศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ได้

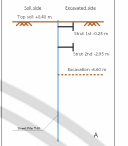
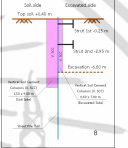
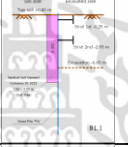
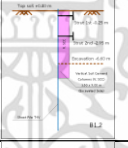

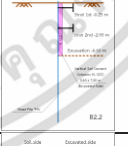
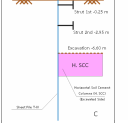
ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด

ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลสรุปการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดในทุกๆรูปแบบ

Type	Description	Figure	Depth m	MHD mm
A	กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์		-5.78	38.0
B	กำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง		-6.70	31.7
B1.1	กำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง มีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับบ่อขุดดิน (SS)		-6.60	32.7
B1.2	กำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง มีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับบ่อขุดดิน (ES)		-6.32	32.4
B2.1	กำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง มีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (SS)		-6.03	36.8
B2.2	กำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง มีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (ES)		-6.03	36.7
C	กำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน		-5.52	27.6

หมายเหตุ Depth คือ ระดับที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดจาก FEM

MHD คือ Maximum Horizontal Displacement จาก FEM

SS คือ Soil Side ฝั่งดินหลังกำแพง

ES คือ Excavated Side ฝั่งดินขุดหน้ากำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 38.0 มิลลิเมตร ที่ความลึก -5.78 เมตร มีค่ามากกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองทั้งหมด เนื่องจากมีเพียงกำแพงเข็มพืดเท่านั้นที่รับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินหลังกำแพง (Soil Side) การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นนี้ เกิดหลังจากการขุดดินทันที กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวก่อนที่ระบบค้ำยันจะถูกติดตั้ง ทำให้แรงที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันของรูปแบบนี้ มีค่าน้อยกว่าแรงในระบบค้ำยันของรูปแบบอื่นที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ประกบกกำแพงเข็มพืด

4.2.2 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 31.7 มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.70 เมตร มีค่าลดลงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A เนื่องจากการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และเพิ่มโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดินบริเวณรอบกำแพงเข็มพืด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบป้องกันการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ส่งผลให้การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดลดลง

4.2.3 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1 และ B1.2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน (SS) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 32.7 มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.60 เมตร เมื่อทำการขุดดิน เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพง (Soil Side) ไม่ถูกขุดออก ทำให้ผลของการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดินยังคงอยู่

ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน (ES) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 32.4 มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.32 เมตร เมื่อทำการขุดดิน เกิดการสูญเสียแรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated Side) ถูกนำออกไป เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบก่อนที่ระบบค้ำยันถูกติดตั้ง และแรงที่เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกขุดออกเคยต้านไว้ จะถูกถ่ายแรงให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ยังคงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ทำให้ตำแหน่งที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดถูกยกขึ้นมาให้สูงขึ้นเหนือระดับเดิม

4.2.4 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1 และ B2.2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (SS) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 36.8 มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.32 เมตร เมื่อทำการขุดดิน เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพง (Soil Side) ไม่ถูกขุดออก ทำให้ผลของการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดินยังคงอยู่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.03 เมตร มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B1.1 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน (SS) แตกต่างกันที่ขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ประกบกับกำแพงเพียงเท่านั้น และเนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันนี้ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดไม่เท่ากัน โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าย่อมลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดได้มากกว่า

ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.2 กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีปลายเสาเข็มวางตัวอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (ES) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 36.7 มิลลิเมตร ที่ความลึก -6.03 เมตร เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งเหลืออยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ทำให้แรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ ถูกถ่ายแรงให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน ระบบค้ำยันในรูปแบบนี้จึงมีแรงในระบบมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B2.1 กับรูปแบบ B2.2 พบว่าแทบไม่มีความต่างกันเลยในเรื่องของการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด หรือระดับที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด เพราะว่าขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเท่ากัน แตกต่างกันที่แรงในระบบค้ำยันของรูปแบบ B2.2 มีค่าหน่วยแรงมากกว่ารูปแบบ B2.1 เท่านั้น

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ทั้งหมด 5 แบบจำลอง พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดได้ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งที่เกาะไปกับกำแพงเข็มพืด มีส่วนช่วยเพิ่มความหนาให้กับกำแพง แต่ไม่สามารถรับโมเมนต์ได้ เป็นกำแพงกันดินที่มีค่าความแข็งแแกร่ง (Stiffness) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.2.5 ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ C กำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 27.6 มิลลิเมตร ที่ความลึก -5.52 เมตร มีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองอื่นทั้งหมด เนื่องจากมีเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน และไม่ถูกนำออกเนื่องจากการขุดดิน ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ทำหน้าที่เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดได้อย่างต่อเนื่อง ลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 27.4 % จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ A กำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 12.7 % จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบ B กำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ในปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เท่ากัน

เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน สามารถเปลี่ยนระดับความลึกที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดให้อยู่ในระดับที่สูงขึ้นเหนือจากระดับเดิม และเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินมีการรับแรงด้วยแรงเสียดทานที่ผิว (Skin Friction) และ แรงแบกทาน (End Bearing)

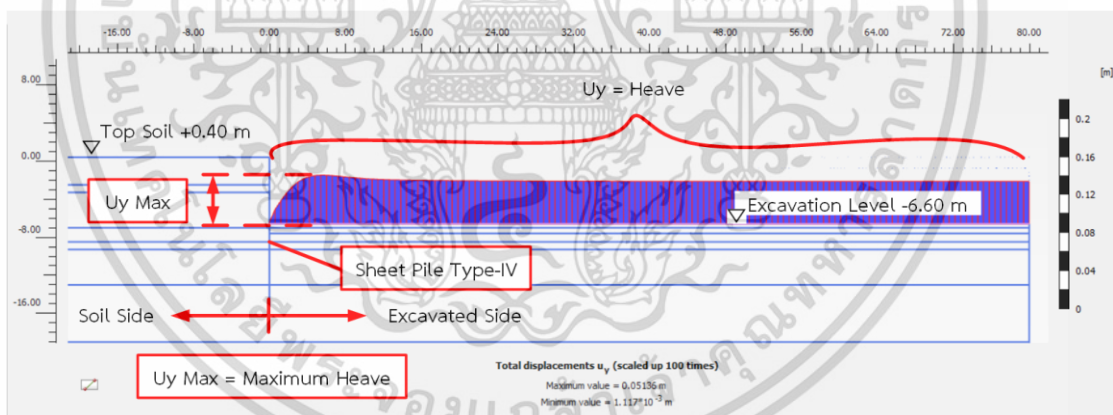
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

เมื่อศึกษารูปแบบกำแพงเข็มพืดรูปแบบหลักครบทั้ง 3 รูปแบบ คือ รูปแบบ A, B และ C แล้ว (รวมถึงรูปแบบย่อย B1.1, B1.2, B2.1 และ B2.2 ด้วย) พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนสามารถลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดได้มากที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ ในเทอมของความ [T] ความยาว [L] และปริมาตร [V] โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปริมาณการูดของดิน (Heave) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Displacement) ของกำแพงเข็มพืด

4.3.1 การูดของดินจากการเสริมกำลังด้วยรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

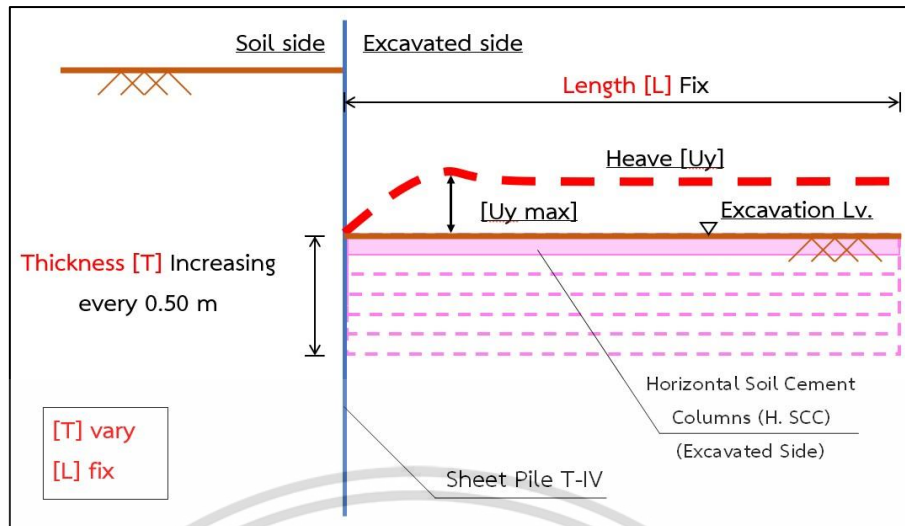
การูดเป็นการบวมตัวของดินที่กั้นบ่อขุดดิน เนื่องจาก Bearing Capacity ที่เกิดจากดินหลังกำแพงบ่อขุดดิน มักเกิดจากการขุดดินในชั้นดินเหนียว ซึ่งค่าการูดของดินใต้บ่อขุดนี้ จะทำให้กำแพงกั้นดินถูดันตามมา แรงดันดินนี้อาจดันเสาเข็มที่ทำเสร็จแล้วในบ่อขุด ให้เคลื่อนตัวออกจากตำแหน่ง คอนกรีตที่เตรียมเทไว้ที่กั้นบ่อขุดอาจแตกหักเสียหายได้ ค่าการูดของดินที่กั้นบ่อขุดจึงเป็นสิ่งที่ต้องควบคุมให้มีการูดขึ้นของดินให้น้อยที่สุด โดยเมื่อทำการปรับปรุงดินใต้บ่อขุดดินให้เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชั้นดิน จะสามารถลดการูดที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.2 การูดของดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

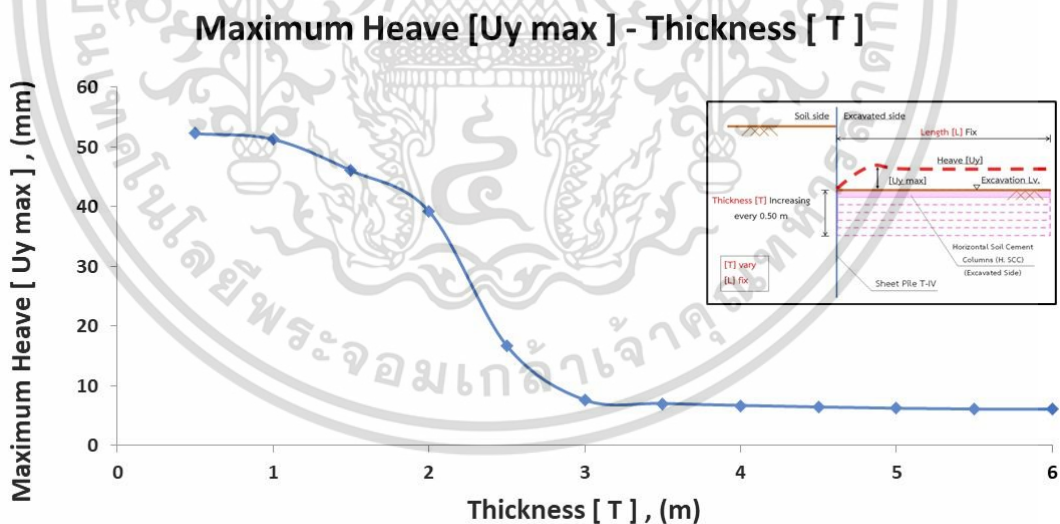
การศึกษาในเทอมของความหนา [T] ทำได้โดยการกำหนดค่าความยาว [L] ของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เป็นค่าคงที่ แล้วทำการปรับขนาดความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดต่าง ๆ เพื่อดูการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสูงสุด (Maximum Vertical Displacement, Maximum Heave) โดยในโปรแกรมคำนวณใช้ค่า [Uy Max] ณ จุดที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสูงสุด เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับกำแพงเข็มพืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การกำหนดความยาวคงที่ $[L]$ เพื่อเปลี่ยนแปลงความหนา $[T]$ ของเสาเข็มดินซีเมนต์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการอุดของดิน พบว่าการเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้บ่อขุดดินครั้งละ 0.50 เมตร ตลอดความกว้างของบ่อขุดดิน ทำให้การอุดของดินมีปริมาณลดลงทุกครั้ง que เพิ่มความหนา และเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีความหนาตั้งแต่ 3.0 เมตร ขึ้นไป พบว่าปริมาณการอุดของดินมีค่าน้อยลงจนเกือบเป็นค่าคงที่



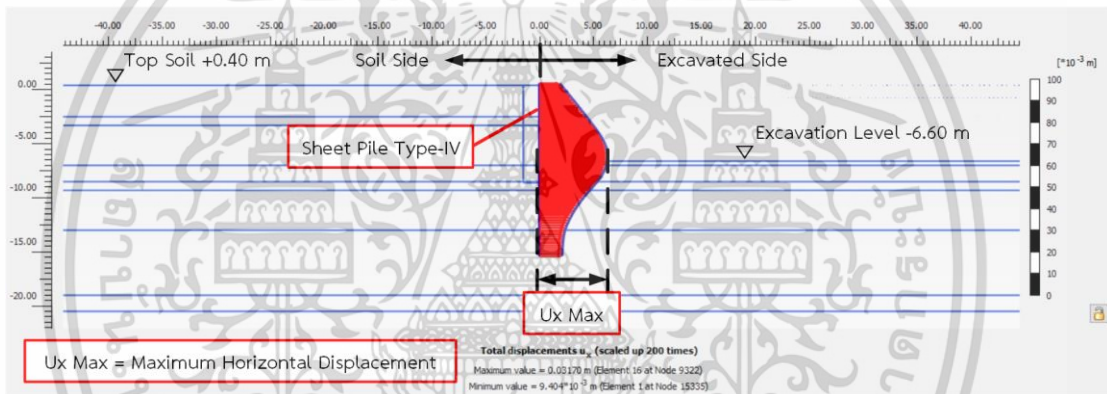
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา $[T]$ ของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสูงสุดของดิน โดยในโปรแกรมใช้ค่า $[Uy \max]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

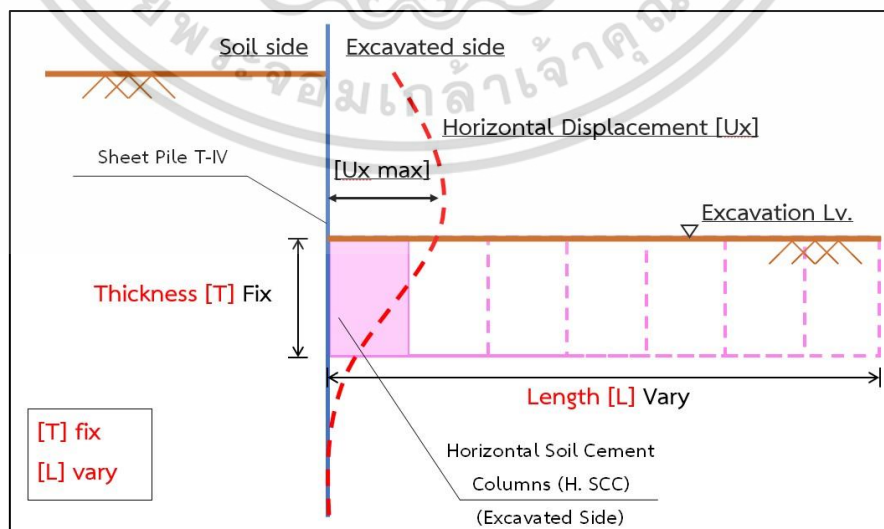
4.3.2 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดจากการเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอน

จากการเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน สามารถลดปริมาณการออกของดินได้ ในทางกลับกันหากทำการเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน โดยที่ความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดินยังคงเดิม จะเป็นการลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด

การทดลองเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ในเทอมของความยาว [L] ทำได้โดยการกำหนดค่าความหนา [T] ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ให้เป็นค่าคงที่มีขนาดความหนาเป็น 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 เมตร แล้วทำการปรับขนาดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดต่าง ๆ เพื่อดูการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด (Maximum Horizontal Displacement) ของกำแพงเข็มพืด โดยในโปรแกรมคำนวณใช้ค่า [Ux Max]



รูปที่ 4.5 การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

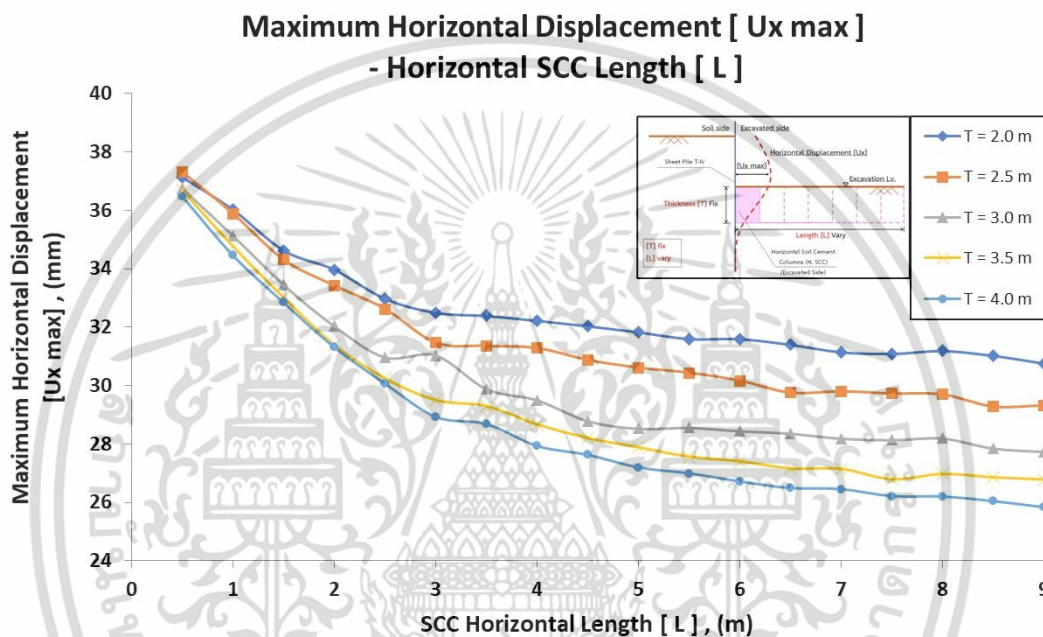


รูปที่ 4.6 การกำหนดความหนาคงที่ [T] เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาว [L] ของเสาเข็มดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็น ใบนี้หรือเอกสารนี้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนในทอมของความยาว [L] โดยการกำหนดความหนา [T] ของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นค่าคงที่ ขนาด 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 เมตร เพื่อสังเกตการณ์การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด พบว่าการเพิ่มความยาวครั้งละ 0.50 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดลงได้ และเมื่อเพิ่มขนาดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนจนมีความยาวตั้งแต่ 3.0 เมตร ขึ้นไป อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าน้อยลง และเมื่อเพิ่มความยาวมากกว่า 7.0 เมตร การเคลื่อนตัวในแนวราบก็แทบไม่ลดลงไปกว่านี้แล้ว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความยาว [L] เสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด โดยโปรแกรมใช้ค่า [Ux max]

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ทั้งในทอมของความหนาและความยาว พบว่าการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ที่มีขนาดความหนา 3.0 เมตร และขนาดความยาว 3.0 เมตร จะทำให้บ่อขุดดินมีเสถียรภาพ และใช้ปริมาณเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสม

แต่เมื่อการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ที่มีขนาดความหนาเกินกว่า 3.0 เมตร และขนาดความยาวเกินกว่า 7.0 เมตร การลดการเคลื่อนตัวจะไม่มีนัยสำคัญมากนัก สำหรับโครงการขุดดินลึก 7 เมตร ซึ่งเป็นโครงการของการศึกษานี้

4.3.3 ความสัมพันธ์ของขนาดความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

จากการศึกษาขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนในเทอมของความหนาและความยาว พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดมีค่าลดลง ปริมาณการอุดของดินมีปริมาณน้อยลง และเมื่อเพิ่มขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงจุดหนึ่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัว และปริมาณการอุดของดิน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นค่าคงที่ จึงทำการทดลองเกี่ยวกับปริมาตร V ของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน หาได้จากผลคูณของความหนา T และความยาว L ของเสาเข็มดินซีเมนต์ และเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยระบบ 2 มิติ ทำให้ปริมาตรมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อเมตร ดังสมการที่ 5.1

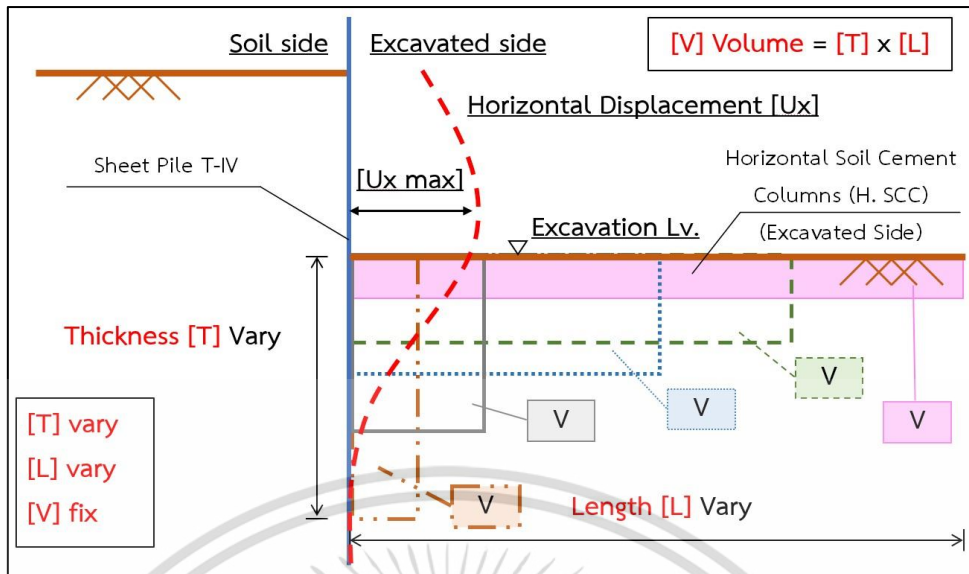
$$V = T \times L \quad (5.1)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน (m^3/m)

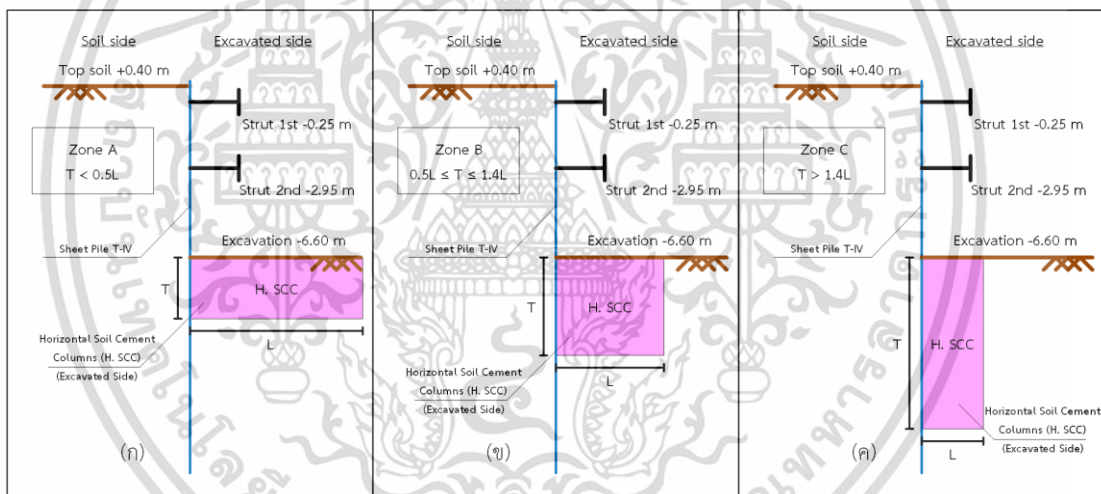
T คือความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน (m)

L คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน (m)

ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาและความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน เพื่อเป็นแนวทางให้กับเจ้าของโครงการที่จะใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด โดยจะยังคงใช้ปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินให้เท่ากับปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง เหมือนกับที่ได้เคยออกแบบไว้ในหลาย ๆ โครงการที่มีการขุดดิน ด้วยการกำหนดให้เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินมีปริมาตรคงที่ แล้วทำการเปลี่ยนขนาดความหนาในแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ครึ่งละ 0.50 เมตร ส่งผลให้ความยาวลดลงเป็นอัตราส่วนกัน เนื่องจากปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การกำหนดปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน [V] ให้เป็นค่าคงที่



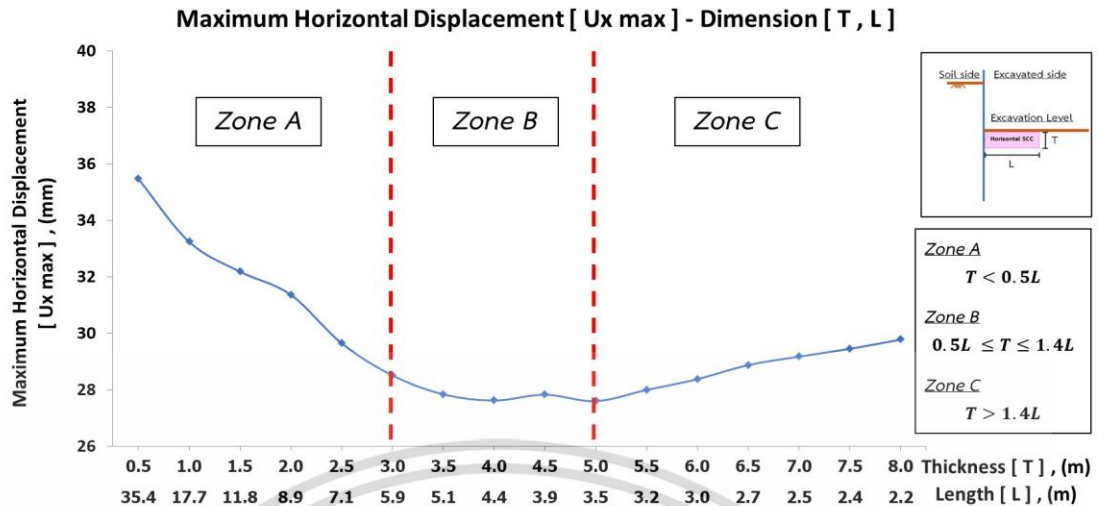
รูปที่ 4.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินแบ่งโซนตามลักษณะรูปร่าง (ก) โซน A เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอน (ข) โซน B เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (ค) โซน C เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้ง

ผลการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งตามความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ 3 โซน คือ โซน A การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น โซน B การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงจนถึงจุดที่น้อยที่สุดตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และโซน C การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่

4.10 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดความหนาและความยาวได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุด

โซน	ความสัมพันธ์	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด [$U_x \max$]
A	$T < 0.5L$	[$U_x \max$] ลดลงตามความหนา [T] ที่เพิ่มขึ้น
B	$0.5L \leq T \leq 1.4L$	[$U_x \max$] ลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดตามความหนา [T] ที่เพิ่มขึ้น
C	$T > 1.4L$	[$U_x \max$] เริ่มกลับตัวเพิ่มขึ้นตามความหนา [T] ที่เพิ่มขึ้น

การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดช่วงแรกในโซน A มีเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ทำหน้าที่เป็นเสมือนค้ำยันถาวร เนื่องจากไม่ถูกขุดออกไปในระหว่างการทำงานขุดดิน และขณะที่ความหนา [T] เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดในช่วงนี้จะค่อย ๆ ลดลงตามความหนา [T] ที่เพิ่มขึ้น

การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดช่วงถัดมาในโซน B มีเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ที่ความหนา [T] เพิ่มขึ้นและความยาว [L] ลดลง จนขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์แวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด มีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดเกิดขึ้นน้อยที่สุดในทุกช่วง เนื่องจากปริมาตร [V] คงที่ หากมีความหนา [T] หรือความยาว [L] ด้านใดด้านหนึ่งมีขนาดมากเกินไป ประสิทธิภาพในการช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจะเพิ่มขึ้นน้อยมากจนแทบไม่เพิ่มขึ้นเลย และในขณะเดียวกันขนาดของอีกด้านหนึ่งจะน้อยจนไม่สามารถช่วยต้าน

การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดช่วงสุดท้ายในโซน C มีเสาเข็มดินซีเมนต์ แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ที่ความหนา [T] เพิ่มขึ้นมาก และความยาว [L] ลดลงจนมีลักษณะเป็น เสาเข็มดินซีเมนต์แผ่นบางในแนวตั้งวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด [Ux Max] ของกำแพงเข็มพืด จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความหนา [T] ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์ แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินในรูปแบบนี้ มีลักษณะเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งวางตัวประกบกำแพง เข็มพืด ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความแข็งแกร่ง (Stiffness) ให้กับกำแพงเพียงเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D สามารถจำลองพฤติกรรมได้อย่างแม่นยำ และพบว่ารูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินมีประสิทธิภาพสูงสุดจากทั้ง 3 รูปแบบ สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบ 12.7 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และ 27.4 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

เมื่อศึกษารูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน พบว่าขนาดความหนาและความยาวที่ใกล้เคียงกันจะมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวที่ดีที่สุด โดยที่ความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินที่หนามากกว่า 2 เมตร ขึ้นไป สามารถลดปริมาณการรูดของดินที่ระดับบ่อขุดดินได้ดี แต่เมื่อเพิ่มความหนามากกว่า 3 เมตรขึ้นไป ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวจะไม่เพิ่มขึ้นกว่านี้แล้ว ในขณะที่ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความยาว 3 ถึง 4 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดได้ดี แต่เมื่อความยาวเกิน 4 เมตร ขึ้นไป การลดการเคลื่อนตัวจะไม่มีนัยสำคัญมากนัก

รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ไม่เกิดขวางในขณะขุดดินเนื่องจากวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน สามารถค้ำยันกำแพงกันดินได้ก่อนการขุดดิน เป็นการค้ำยันในจุดที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงที่สุด และเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินที่มีความหนามากกว่าความยาวมาก ๆ หมายถึงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีลักษณะแนวตั้ง วางตัวแนบไปกับกำแพงเข็มพืด เป็นเพียงการเพิ่มความแข็งแกร่ง (Stiffness) ให้กับระบบกำแพงกันดินเท่านั้น (เสมือนเป็นการเพิ่มความหนาของกำแพงเท่านั้น) ซึ่งเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกก่อสร้างให้เป็นส่วนหนึ่งของกำแพงเข็มพืด เสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะนี้ มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังกำแพงเข็มพืดได้น้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการวิเคราะห์ค่าเชิงตัวเลขเท่านั้น สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขขึ้นได้ ผู้ใช้จึงควรพึงระวังไว้เสมอ

คุณสมบัติของชั้นดินที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงตัวแทนของภาพรวมชั้นดินในพื้นที่ศึกษาเท่านั้น หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ ควรมีการเจาะสำรวจชั้นดินเพื่อประเมินคุณสมบัติชั้นดินที่จะนำมาสร้างแบบจำลองให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่นำไปใช้

บรรณานุกรม

- ธนกร สุขุมามาศ. 2561. “พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชนาดล คงสมบูรณ์ และคณะ 2562. “การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำแพงเข็มพีตในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 30(2)
- ชยานันท์ บุญยรักษ์, ซอว์ ซอว์ เอย์, เฉลิมพล เตชะกำธร, ณิชชัย โปรงมณี และณัฐพล ทศนนิพันธ์, (ผู้รวบรวม) 2557. **ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย** กรุงเทพมหานคร
- ปิยะ รัตนสุวรรณ และวรรณสิริ พันธุ์ไธ. 2555. “การวิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี.” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 23(2)
- พรพจน์ ต้นเส็ง 2555. “การก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน” การสัมมนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก 2555.
- พัลลภ วิสุทธ์เมธานุกุล. 2558. “คู่มือวิศวกรรมฐานราก” กรุงเทพมหานคร: วิ.พรินทร์
- พิทยา แจ่มสว่าง 2561. “การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมโยธา (Applications of Soil Cement in Civil Engineering Works).” กรุงเทพมหานคร: วรรณกวี
- มณฑิเยร กังศศิเทียม. 2547. “กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม” สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์
- วารากร ไม้เรียง และสมพงศ์ โรจน์กั้งสตาล. 2553. “คู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ : กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ” ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วิจิต นามวิเศษ. 2556. “พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top-down ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศลิษา ไชยพุทธ. 2562. “เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน (Ground Improvement Techniques).” ศูนย์จำหน่ายตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Chana Phutthananon, Pornkasem Jongpradist, Pattaramon Jongpradist, Daniel Diasd and Julien Baroth. 2020. "Parametric analysis and optimization of T-shaped and conventional deep cement mixing column-supported embankments." **Computer and Geotechnics**. (122). DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103555
- Dennes T. Bergado and Glen A. Lorenzo. 2005. "A full-scale study on cement deep mixing in soft Bangkok clay." Elsevier Geo-Engineering Book Series. **Science Direct**. (3), 305-325. DOI: 10.1016/S1571-9960(05)80014-X
- Meepon, I., Voottipruex, P., & Jamsawang, P. 2016. "Behaviors of soil cement columns and stiffened soil cement column wall in shallow excavation." **Lowland technology international: the official journal of the International Association of Lowland Technology**. 18(3). 197-208
- Pierre Guy Atangana Njock, Jack Shuilong Shen, Giuseppe Modoni, Arul Arulrajah. 2017. "Recent Advances in Horizontal Jet Grouting (HJG): An Overview." **Arabian journal for Science and Engineering**. DOI: 10.1007/s13369-017-2752-3
- PLAXIS. 2020. "PLAXIS 2D-Reference Manual Last Updated: September 01, 2020, Connect Edition 20.04." Bentley
- PLAXIS. 2020. "PLAXIS 2D-Tutorial Manual Last Updated: June 04, 2020, Connect Edition 20.03." Bentley
- Shui-Long Shen, Zhi-Feng Wang, Wen-Juan Sun, Lin-Bing Wang, Suksun Horpibulsuk. 2013. "A field trial of horizontal jet grouting using the composite-pipe method un the soft deposits of Shanghai." **Tunnelling and Underground Space Technology**. (35), 142-151. DOI: 10.1016/j.tust.2013.01.003
- Suched Likitlersuang, Chanaton Surarak, Dariusz Wanatowski, Erwin Oh, Arumugam Balasubramaniam 2013. "Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT." **Soils and Foundations** 53(5), 756-773. DOI: 10.1016/j.sandf.2013.08.013
- Teparaksa Wanchai. 2550. "Analytical Sheet Pile Displacement for Deep Braced Excavation in Soft Bangkok Clay." **ISRM International Symposium**, Melbourne, Australia
- Thanadol Kongsomboon. 2003. "Behaviour of An Embedded Improved Soil Berm in An Excavation." Natioal University of Singapore. Singapore.



ภาคผนวก ก
การตีพิมพ์วารสารวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
STUDY THE PATTERN OF SOIL CEMENT COLUMNS FOR SHEET PILES WALL REINFORCEMENT BY USING FINITE
ELEMENT METHOD (FEM)

นายพนัส โอภากุลวงษ์^{1,*}, รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ² และ ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์³

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*Corresponding author address: panes.opa@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการก่อสร้างและออกแบบอาคารสูงในกรุงเทพมหานครนิยมออกแบบให้มีชั้นใต้ดินเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ได้อย่างคุ้มค่า การก่อสร้างชั้นใต้ดินนิยมใช้กำแพงเข็มพืดเป็นระบบป้องกันแรงดันดินด้านข้าง เนื่องจากระบบกำแพงเข็มพืดใช้พื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างในระบบอื่น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns, SCC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกำแพงเข็มพืด (Sheet pile) แบบมีค้ำยันในงานขุดดินลึก 7 เมตร โดยมีการศึกษา 3 รูปแบบประกอบด้วย รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และรูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับขุดดิน ผลจากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในพื้นที่ก่อสร้าง ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสมช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด จากการศึกษาพบว่าการใช้รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับขุดดิน สามารถลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดได้มากที่สุด 12.7% นอกจากนี้รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับขุดดิน ยังช่วยให้การขุดดินสามารถทำได้โดยสะดวกมากขึ้นกว่ารูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, กำแพงเข็มพืด, งานขุดดิน, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Nowadays, in the skyscraper construction in Bangkok always has a basement in order to take the advantage of the space in the building so the basement construction has to use sheet piles to protect it from the lateral earth pressure. Due to sheet piles wall take less space than other protection systems. This research studies types of soil cement columns (SCC) for increasing the efficiency of sheet piles with bracing in 7 meters excavation. It has 3 case studies consist of sheet piles without reinforced SCC, sheet piles with vertical SCC soil side and excavation side, sheet piles reinforced SCC in horizontal axis under the excavation level. Then, observing the horizontal displacement with the inclinometer construction area in order to compare the horizontal displacement from Finite Element Method (FEM). In addition, investigating the types of soil cement columns for decreasing the displacement finds that the decision to apply sheet piles reinforced SCC in horizontal axis under the excavation level. It can reduce displacement of sheet piles 12.7% and this type is more convenient for excavation work than sheet piles with vertical SCC.

Keywords: Soil Cement Column, Sheet Piles, Excavation Work, Finite Element

1. บทนำ

การก่อสร้างอาคารสูงนิยมออกแบบให้มีการก่อสร้างชั้นใต้ดิน เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด การก่อสร้างดำเนินการด้วยการขุดดินโดยใช้กำแพงเข็มพืดเป็นระบบป้องกันแรงดันดิน ทำให้การขุดดินมีเสถียรภาพ การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจึงเป็นส่วนสำคัญเพื่อป้องกันความ

เสียหายที่อาจเกิดขึ้นและกระทบกับพื้นที่ข้างเคียง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns, SCC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกำแพงเข็มพืด (Sheet pile) แบบมีค้ำยันในงานขุดดินลึก 7 เมตร โดยมี การศึกษากำแพงเข็มพืด 3 รูปแบบ ประกอบด้วย รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และรูปแบบกำแพงเข็ม

ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวอนได้ระดับขุดดิน [1] นำผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในพื้นที่ก่อสร้าง เปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากทฤษฎีวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มตีด และรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะแตกต่างกัน ที่มีผลต่อการเสริมกำลังของกำแพงเข็มตีด

2. การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย FEM แบบ 2 มิติ ต้องคำนึงถึงข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักในการคำนวณ มีข้อมูลที่ใช้คือ หลุมเจาะสำรวจชั้นดิน รูปแบบของโครงสร้าง และขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างกำแพงเข็มตีด เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด

2.1. ลักษณะชั้นดิน

ข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ในเขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 1

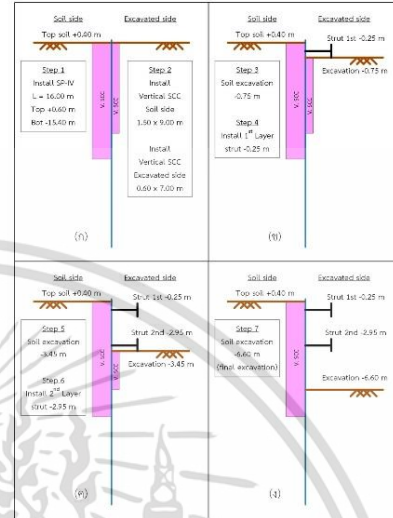


รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินในเขตพื้นที่ก่อสร้าง

2.2. ขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม

ขั้นตอนการก่อสร้างในสนามประกอบด้วย การติดตั้งกำแพงเข็มตีด การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ประกอบกับกำแพงเข็มตีดทั้งสองฝั่ง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) จากนั้นทำการขุดดินเพื่อติดตั้งระบบค้ำยันด้วย H-Beam 350x350x12x19 มม. จำนวน 2 ชั้น ดังแสดง

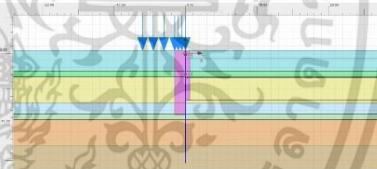
ในรูปที่ 2 (ข) และ (ค) เมื่อติดตั้งระบบค้ำยันครบ 2 ชั้น จึงทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้ายที่ -6.60 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (ง)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม

2.3. ลักษณะของแบบจำลอง

กำแพงเข็มตีด (Sheet piles) ในแบบจำลองใช้ Sheet Piles type IV [2] ยาว 16 เมตร ค้ำยันด้วย H-Beam 350x350x12x19 มม. จำนวน 2 ชั้น เช่นเดียวกับในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองของการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมกำลังกำแพงเข็มตีด

2.4. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง FEM 2 มิติ นั้น เป็นพารามิเตอร์ที่นำมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน สำหรับพารามิเตอร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบในเขตพื้นที่กรุงเทพเลือกใช้ และใช้อย่างแพร่หลายในโครงการก่อสร้าง แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1. MOHR-COULOMB MODEL, MCM

เป็นรูปแบบของแบบจำลองที่เป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ในแบบจำลองนี้สามารถหาได้ไม่ยากนัก ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์หลัก 5 ตัวคือ ความหนาแน่น (Density, γ) ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) มุมภายในของเม็ดดิน (Angle of Internal Friction, ϕ) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability, k) [3] แบ่งการคำนวณตามชนิดดินได้ 2 แบบคือ Drained ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 8.64×10^{-2} เมตร/วัน และ Undrained ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 8.64×10^{-4} เมตร/วัน โดยแบบจำลองใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1

2.4.2. SOFT SOIL MODEL, SSM

รูปแบบของแบบจำลองดินอ่อนนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์คล้ายกับแบบจำลอง Mohr-Coulomb มีจุดแตกต่างกันตรงที่การคำนวณความแข็ง (Stiffness) ของแบบจำลอง Soft Soil ไม่ใช้โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ในการคำนวณ แต่ใช้ค่า

Lambda, λ และ Kappa, K ในการคำนวณ [4] โดยใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เท่ากับ 0.15 และอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัวตามความลึก (Over Consolidation Ratio, OCR) เท่ากับ 1.2 แบ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำตามชนิดดินได้ 2 แบบคือ Drained และ Undrained เหมือนกับแบบจำลอง Mohr-Coulomb โดยแบบจำลองใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2

2.5. การสอบเทียบแบบจำลอง

การตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวัดในสนาม โดยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ที่ติดตั้งในชั้นตอมการฝังกำแพงเข็มน้ำ เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอน

การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ทำได้โดยเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวหลังการขุดดินในระดับสุดท้ายที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้ในสนามที่ 21 วัน เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพจริง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ Material Model แบบ Mohr-Coulomb Model

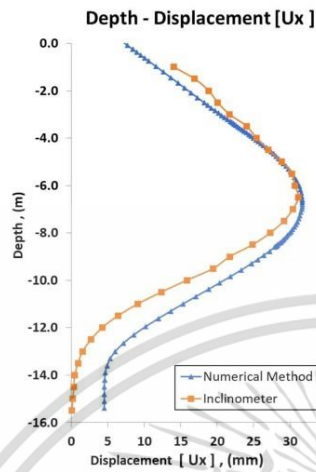
Layer	Material Set	Soil Type	Depth		Density		Strength		Stiffness	
			Top (m)	Bot (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	C_u (kN/m ²)	ϕ (Degree)	E (kN/m ²)	Poisson's Ratio
1	Clayey sand		+0.4	-2.5	16.2	14.2	1	25	1,500	0.3
2	Sandy clay		-2.5	-3.3	16.2	14.2	20	25	3,061	0.3
3	Fine to coarse sand		-3.3	-7.0	16.2	14.2	1	26	1,500	0.3
4	Soft clay		-7.0	-8.5	16.2	14.2	27	25	4,002	0.3
5	Clayey sand		-8.5	-9.3	16.2	14.2	1	26	1,500	0.3
SCC	Soil Cement Column				20.0	18.0	78	0	39,240	0.495

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ Material Model แบบ Soft Soil Model

Layer	Material Set	Soil Type	Depth		Density		Strength		Stiffness	
			Top (m)	Bot (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	C_u (kN/m ²)	ϕ (Degree)	Lambda λ	Kappa K
6	Stiff silty clay		-9.3	-13.0	15.7	13.7	67	10	0.290	0.0280
7	Stiff to very stiff silty clay		-13.0	-19.0	19.3	17.3	100	10	0.012	0.0011
8	Very stiff silty clay		-19.0	-20.5	19.9	17.9	112	10	0.012	0.0011
9	Stiff to very stiff silty clay		-20.5	-31.0	19.9	17.9	120	10	0.006	0.0009
10	Very stiff silty clay		-31.0	-32.5	19.9	17.9	122	10	0.006	0.0009
11	Fine to medium sand		-32.5	-34.0	19.9	17.9	1	34	0.006	0.0009
12	Very stiff to hard clay		-34.0	-46.0	20.1	18.1	133	10	0.006	0.0009
13	Dense to very dense sand		-46.0	-58.0	20.1	18.1	1	37	0.006	0.0009
14	Hard silty clay		-58.0	-80.0	20.4	18.4	227	10	0.006	0.0009

GTE-13-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวระหว่างแบบจำลองกับการตรวจวัดในสนามที่ระยะเวลา 21 วัน

3. เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา

เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

3.1. รูปแบบกำแพงเข็มที่ค้ำยันไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน 2 ชั้น ไม่มีการเสริม

กำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้กำแพงเข็มที่ค้ำยันในการรับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินนอกกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก)

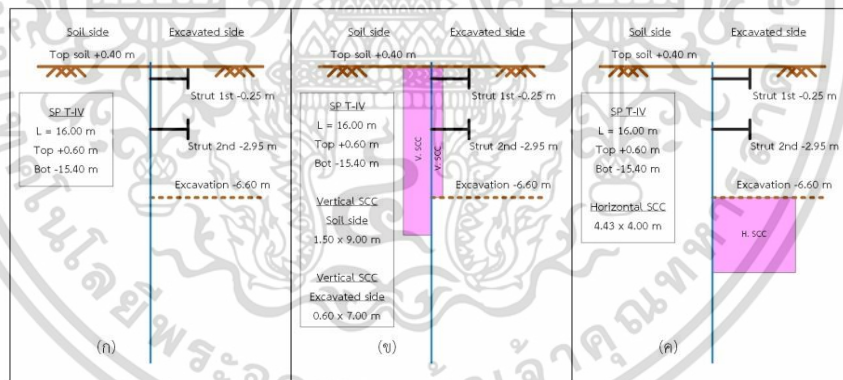
3.2. รูปแบบกำแพงเข็มที่ค้ำยันประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งประกบทั้งสองฝั่งของกำแพง คือฝั่งหลังกำแพง และฝั่งบ่อขุดหน้ากำแพง เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน เป็นรูปแบบที่นิยมใช้ตามโครงการก่อสร้างในปัจจุบัน และสร้างจากรูปแบบจริงของโครงการก่อสร้างที่ใช้อ้างอิงกับข้อมูลของงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)

ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้งที่ใช้ในแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลของการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน โดยการสร้างแบบจำลอง 2 ชุด ที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน และเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน แต่ตำแหน่งของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่คนละฝั่งของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน แบ่งรูปแบบการศึกษาตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งได้ 2 รูปแบบ คือ

3.2.1. รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน

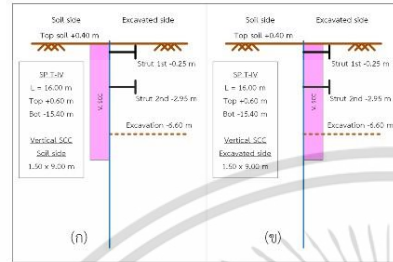
เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ค้ำยัน ระหว่างแบบจำลองกำแพงเข็มที่ค้ำยันด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพงเพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) กับแบบจำลองกำแพงเข็มที่ค้ำยันประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพงเพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข)



รูปที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ก) รูปแบบกำแพงเข็มที่ค้ำยันไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (ข) รูปแบบกำแพงเข็มที่ค้ำยันประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง และ (ค) รูปแบบกำแพงเข็มที่ค้ำยันเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

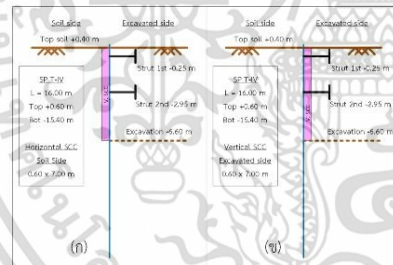
เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความกว้าง 1.50 เมตร ความลึก 9.00 และความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร จะหลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่บางส่วนไว้ระดับขุดดิน



รูปที่ 6 แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง 1.50 x 9.00 m. (ก) ฝั่งดินหลังกำแพง (ข) ฝั่งขุดดินหน้ากำแพง

3.2.2. รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ที่เหนือระดับขุดดิน

เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มตอม เหมือนกับหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน แต่ทำการเปลี่ยนขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นความกว้าง 0.60 เมตร และความลึก 7.00 โดยระดับเสาเข็มดินซีเมนต์ล่างสุดอยู่ที่ -6.60 เมตร ทอดถึงระดับขุดดินชั้นสุดท้าย เมื่อทำการขุดดินออกจะไม่หลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ใต้ระดับขุดดิน ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และ (ข)



รูปที่ 7 แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง 0.60 x 7.00 m. (ก) ฝั่งดินหลังกำแพง (ข) ฝั่งขุดดินหน้ากำแพง

3.3. รูปแบบกำแพงเข็มตอมเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับขุดดิน

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มตอม 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับขุดดิน เพื่อช่วยการเคลื่อน

ตัวในแนวราบของกำแพงเข็มตอม ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค)

แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนใต้ระดับขุดดินนี้ มีคุณสมบัติและปริมาตรเทียบเท่ากับแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง โดยมีจุดที่ต่างกันคือรูปร่างและตำแหน่งที่วางตัวอยู่เท่านั้น เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร จะหลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนอยู่ทั้งหมด ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยเสริมกำลังของกำแพงเข็มตอมได้อย่างต่อเนื่อง

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มตอมจากแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

แบบจำลองในหัวข้อ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มตอมแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่ามากกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองอื่นทั้งหมด เนื่องจากมีเพียงกำแพงเข็มตอมที่รับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินหลังกำแพง การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นหลังจากการขุดดินทันที ทำให้แรงที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันของแบบจำลองนี้ มีค่าสูงกว่าแรงในระบบค้ำยันของแบบจำลองอื่นที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์

แบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มตอมประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่าลดลงจากรูปแบบ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มตอมแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) เนื่องจากการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบระบายน้ำ (S_v) และเพิ่มโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดิน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มตอมมีค่าลดลง

แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) เมื่อทำการขุดดิน เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพงไม่ถูกขุดออก ทำให้ผลของการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบระบายน้ำ (S_v) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดินยังคงอยู่

ขณะที่แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน ในฝั่งขุดดินหน้ากำแพง (Excavated side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) เมื่อทำการขุดดินเกิดการสูญเสียแรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งขุดดินหน้ากำแพงถูกนำออกไป เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบก่อนที่ระดับค้ำยันถูกติดตั้ง และแรงที่เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งขุดดินหน้ากำแพงเคยต้าน ถูกถ่ายแรงให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ยังคงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ใต้ระดับขุดดิน ทำให้ตำแหน่งการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดถูกยกขึ้นมาสูงขึ้นเหนือระดับเดิม

ตารางที่ 3 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดและระดับความลึกที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มตีด

No.	Model	Figure	Level (m)	MHD (mm)
3.1	รูปแบบกำแพงเข็มตีดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์	รูปที่ 5 (ก)	-5.78	38.0
3.2	รูปแบบกำแพงเข็มตีดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง	รูปที่ 5 (ข)	-6.70	31.7
3.2.1	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน (Soil side)	รูปที่ 6 (ก)	-6.60	32.7
3.2.1	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน (Excavated side)	รูปที่ 6 (ข)	-6.32	32.4
3.2.2	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับขุดดิน (Soil side)	รูปที่ 7 (ก)	-6.03	36.8
3.2.2	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับขุดดิน (Excavated side)	รูปที่ 7 (ข)	-6.03	36.7
3.3	รูปแบบกำแพงเข็มตีดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดิน	รูปที่ 5 (ค)	-5.52	27.6

หมายเหตุ : MHD คือ Maximum Horizontal Displacement

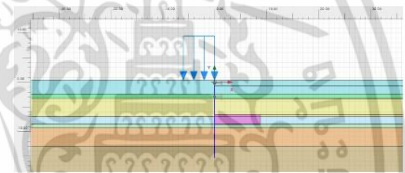
แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.2 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับแบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) ทุกประการ

ขณะที่แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.2 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับขุดดิน ในฝั่งขุดดินหน้ากำแพง (Excavated side) ดังแสดงรูปที่ 7 (ข) เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งเหลืออยู่ใต้ระดับขุดดิน ทำให้แรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ ถูกถ่ายโอนให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน ระบบค้ำยันในรูปแบบนี้จึงมีแรงในระบบมากที่สุด

จากการศึกษาแบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มตีดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ทั้งหมด 5 แบบจำลอง พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง สามารถเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ของกำแพงเข็มตีด และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบได้

แบบจำลองในหัวข้อ 3.3 รูปแบบกำแพงเข็มตีดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดิน ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองอื่นทั้งหมด เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน วางตัวอยู่ใต้ระดับขุดดิน และไม่ถูกนำออกเนื่องจากการขุดดิน ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ทำหน้าที่เสริมกำลังกำแพงเข็มตีดได้อย่างต่อเนื่อง ลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 27.4 % จากแบบจำลองในหัวข้อ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มตีดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 12.7 % จากแบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มตีดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ในปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เท่ากัน และสามารถเปลี่ยนระดับความลึกที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มตีดให้อยู่ในระดับสูงขึ้น พฤติกรรมของจุดที่เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนวางตัวอยู่ มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับฐานรองรับแบบยึดแน่น (Fixed supports)

จากผลการศึกษาแบบจำลอง 3.1, 3.2 และ 3.3 ทั้ง 3 รูปแบบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนสามารถลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มตีดได้มากที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดินเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดรูปร่าง ในทอมของคานหนา และความยาว โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปริมาณการขุดของดิน (Heave) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Displacement) ของกำแพงเข็มตีดที่เกิดขึ้นหลังการขุดดินในขั้นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 8



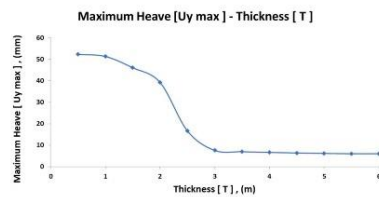
รูปที่ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดิน

4.1. การขุดของดินจากรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับขุดดิน

การขุดเป็นการขุดตัวของดินที่กั้นฝั่งขุดเนื่องจาก Bearing Capacity ที่เกิดจากดินหลังกำแพงขุดออกขุดดิน มักเกิดจากการขุดดินในชั้นดินเหนียว เมื่อทำการปรับปรุงดินใต้ขุดดินให้เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชั้นดินจะสามารถลดการขุดที่เกิดขึ้นได้

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ทำการปรับปรุงดินใต้ขุดดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน พบว่าการเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ขุดดินครั้งละ 0.50 เมตร ตลอดความกว้างของขุดดิน ทำให้การขุดของดินมีปริมาณลดลงทุกครั้งที่เพิ่มความหนา และเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีความหนาตั้งแต่ 3.0 เมตร ขึ้นไป พบว่าปริมาณการขุดของดินมีค่าน้อยลงจนเกือบเป็นค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 9

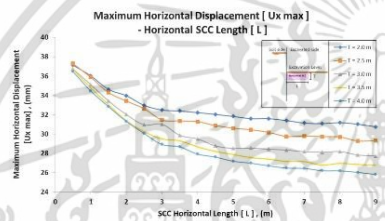
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของความหนาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอน กับปริมาณการอุทของดินสูงสุด

4.2. การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดจากการเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอน

การเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนสามารถลดปริมาณการอุทของดินได้ และเมื่อทำการเพิ่มความยาวโดยที่ความหนายังคงเดิม พบว่าเป็นการลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนกับการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติด

ผู้วิจัยทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนในเทอมของความ

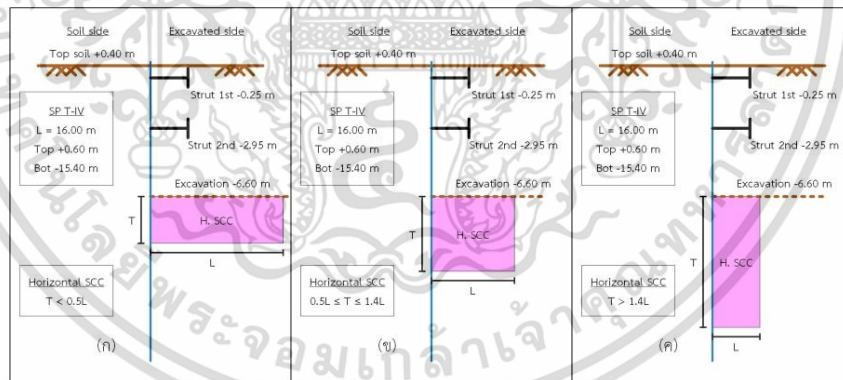
ยาว โดยการกำหนดความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นค่าคงที่ขนาด 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 เมตร เพื่อเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติด พบว่าการเพิ่มความยาวครั้งละ 0.50 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดได้ และเมื่อเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนจนมีความยาวตั้งแต่ 3.0 เมตร ขึ้นไป อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 10

4.3. ความสัมพันธ์ของขนาดความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับชุด

จากการศึกษาขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนในเทอมของความหนาและความยาว พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดมีค่าลดลง ปริมาณการอุทของดินมีปริมาณน้อยลง และเมื่อเพิ่มขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงจุดหนึ่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัว และปริมาณการอุทของดิน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นค่าคงที่

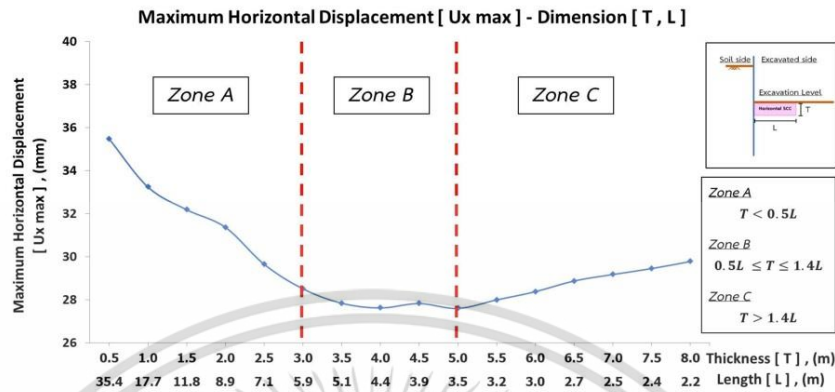
ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาและความยาวโดยใช้ปริมาตรเท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ด้วยการกำหนดให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีปริมาตรคงที่ ทำการเพิ่มความหนาความยาวครั้งละ 0.50 เมตร ทำให้ความยาวลดลงเป็นอัตราส่วนกันเนื่องจากปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 11

ผลการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดในแบบจำลองสามารถแบ่งตามความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ 3 โซน คือ โซน A การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น โซน B การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงจนถึงจุดที่น้อยที่สุดตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และ โซน C การเคลื่อนตัวในแนวราบเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำแพงเข็มที่ติดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับชุดชนิด (ก) โซน A เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวอน (ข) โซน B เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ค) โซน C เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพิค

5. สรุปผลการศึกษา

รูปแบบกำแพงเข็มพิคเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดินมีประสิทธิภาพสูงสุดจากทั้ง 3 รูปแบบ สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบ 12.7 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพิคประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้ง และ 27.4 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพิคแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปแบบกำแพงเข็มพิคเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดิน สามารถค้ำยันกำแพงกันดินได้ก่อนการขุดดิน และไม่เกิดขวางในขณะขุดดินเนื่องจากวางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน

เมื่อศึกษารูปแบบกำแพงเข็มพิคเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดิน พบว่าขนาดความหนาและความยาวที่ใกล้เคียงกันจะมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวที่ดีที่สุด

ความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดินที่หนามากกว่า 2 เมตร ขึ้นไป สามารถลดการปริมาตรการขุดของดินที่ระดับกันบ่อขุดดินได้ดี แต่เมื่อเพิ่มความหนามากกว่า 3 เมตรขึ้นไป ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวจะไม่เพิ่มขึ้นกว่านี้แล้ว

ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดินมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความยาว 3 ถึง 4 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพิคได้ดี แต่เมื่อความยาวเกิน 4 เมตร การลดการเคลื่อนตัวจะไม่ค่อยสำคัญมากนัก

เสาเข็มดินซีเมนต์แนวอนได้ระดับบ่อขุดดินที่มีความหนามากกว่าความยาวมาก ๆ หมายถึงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีลักษณะแนวตั้ง วางตัวแนบไปกับกำแพงเข็มพิค เป็นเพียงการเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับระบบกำแพงกันดินเท่านั้น เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกก่อสร้างให้เป็นส่วนหนึ่งของกำแพงเข็มพิค เสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะนี้ มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังกำแพงเข็มพิคได้น้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำสั่งสอนขอขอบพระคุณทุนวิจัยเลขที่ KREF046012 ในการใช้งานโปรแกรม PLAXIS และขอขอบพระคุณบริษัท อีโรเซ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษา

7. การอ้างอิง

- [1] Thanadol Kongsomboon (2003). Behaviour of An Embedded Improved Soil Berm in An Excavation. National University of Singapore. Singapore.
- [2] พัลลภ วิสุทธ์เมธานุกูล (2558). คู่มือวิศวกรรมฐานราก, กรุงเทพมหานคร
- [3] Meepon, I., Voottipruex, P., & Jamsawang, P. (2016). Behaviors of soil cement columns and stiffened soil cement column wall in shallow excavation. Lowland technology international: the official journal of the International Association of Lowland Technology, 18(3), 197-208.
- [4] Suched Likittersuang, Chanaton Surarak, Dariusz Wanatowski, Erwin Oh, Arumugam Balasubramaniam (2013). Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT. Soils and Foundations 53(5), 756-773. DOI: 10.1016/j.sandf.2013.08.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOIL REPORT

รายงานผลการเจาะสำรวจดิน

โครงการ XT PHAYATHAI

ถนนศรีอยุธยา

กรุงเทพมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. การเจาะสำรวจและทดสอบในสนาม	1
3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	2
4. ลักษณะชั้นดิน	2
5. ระดับน้ำใต้ดิน	3
6. ข้อเสนอแนะ	3
7. รายการทั่วไป	4
8. ภาคผนวก	10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ 28 กันยายน 2561

1. บทนำ

การเจาะสำรวจดินสำหรับโครงการ XT PHAYATHAI ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร ได้เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยทำการเจาะสำรวจจำนวน 2 หลุม ความลึก 90 เมตรจากผิวดินขณะสำรวจ พื้นที่โครงการและตำแหน่งหลุมเจาะพิจารณาในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของรายงานฉบับนี้ เพื่อแสดงลักษณะชั้นดินที่พบในหลุมเจาะและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ข้อเสนอแนะในการออกแบบฐานรากอย่างประหยัดและปลอดภัย

2. การเจาะสำรวจและทดสอบในสนาม

การเจาะสำรวจได้กระทำโดยใช้เครื่องเจาะชนิด Rotary วิธีการเจาะในช่อง 1-2 เมตรแรก ให้วิธีการเจาะโดยใช้ Auger และที่ระดับความลึกลงไปใช้วิธีการแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำผสม Bentonite ใส่เพื่อป้องกันหลุมพัง

การเก็บตัวอย่างดิน ได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพโดยใช้กระบอกขนาด ϕ 2 1/4" x 50 ซม. เก็บตัวอย่างในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) ในชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายโดยใช้กระบอกผ่าซีกแบบมาตรฐานพร้อมกับการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ขณะทำการเก็บตัวอย่างด้วย วิธีการเก็บตัวอย่างทั้ง 2 แบบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1587 และ D 1586 ตามลำดับ

การทดสอบ SPT กระทำโดยการตอกกระบอกผ่าซีกมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 34.9 มม. (1 3/8 นิ้ว) ภายนอก 50.8 มม. (2 นิ้ว) เพื่อเก็บตัวอย่าง การตอกใช้ตุ้มหนัก 63.5 กก. ชนิด Safety Hammer ยกสูง 76 ซม. นับจำนวนครั้งที่ตอกซึ่งทำให้กระบอกผ่าซีกจมลงไปในดินได้ 45 ซม. ถึงจำนวนครั้งที่ตอกในระยะ 30 ซม. หลังเป็นค่า SPT N - VALUE มีหน่วยเป็นครั้ง/30 ซม. ซึ่งค่านี้จะบอกความแน่นหรือกำลังของดินได้อย่างคร่าวๆ

นอกจากนี้ได้ทำการสังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสนามโดยใช้ Pocket Penetrometer ด้วย

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดินที่ได้จากสนาม จะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินต่อไป การทดสอบประกอบด้วย

1. หาความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ (Natural moisture content)
2. หาความหนาแน่นเปียก (Wet density) ของตัวอย่างดินเหนียว
3. ทดสอบ Atterberg limits เฉพาะบางตัวอย่างดินเหนียว
4. ทดสอบ Sieve analysis เฉพาะบางตัวอย่างดินทราย
5. ทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนแบบอั้นเดรน (Undrained) โดยการทำการ Unconfined Compression Test เฉพาะบางตัวอย่างดินเหนียว

วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM และผลที่ได้จากการทดสอบแสดงอยู่ในภาคผนวกของรายงานฉบับนี้

4. ลักษณะชั้นดิน

สรุปลักษณะชั้นดินจากการเจาะสำรวจ 2 หลุมได้ดังต่อไปนี้

ความลึก, เมตร		ชนิดดิน	ค่า SPT N. ครั้ง/ฟุต
BH-1	BH-2		
0.0 – 9.3	0.0 – 11.5	ทรายถม	-
9.3 – 13.0	11.5 – 13.5	ดินเหนียวอ่อน	-
13.0 – 19.0	13.5 – 19.8	ดินเหนียวปนซิลต์แข็งถึงแข็งมาก	9 – 21
19.0 – 20.5	19.8 – 20.5	ดินเหนียวปนทราย – ทรายปนดินเหนียว	11 – 27
20.5 – 31.0	20.5 – 31.0	ดินเหนียวปนซิลต์แข็งถึงแข็งมาก	12 – 31
31.0 – 32.5	31.0 – 34.8	ดินเหนียวปนทรายแข็งถึงแข็งมาก	10 – 24
32.5 – 34.0	34.8 – 35.5	ทรายแน่นปานกลางถึงแน่น	23 – 32
34.0 – 46.0	35.5 – 43.8	ดินเหนียวปนซิลต์แข็งมากถึงดานแข็งมาก	17 – 48
46.0 – 63.0	43.8 – 61.0	ทรายแน่นปานกลางถึงแน่นมาก พบดินเหนียวปนซิลต์ดานแข็งมากแทรกที่ 58 – 59.5 เมตรของ BH-1	22 – 73
63.0 – 86.2	61.0 – 87.3	ดินเหนียวปนซิลต์แข็งมากถึงดานแข็งมาก	27 – 96
86.2 – 90.45	87.3 – 90.45	ทรายแน่นถึงแน่นมาก	40 – 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 แสดงลักษณะชั้นดินระหว่างหลุมเจาะ, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอินเดรน (Su) และค่า SPT N พล็อตเทียบกับความลึก

สำหรับรายละเอียดของแต่ละชั้นดินสามารถพิจารณาได้จาก log of boring และ summary of test result ภายในภาคผนวก

5. ระดับน้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินวัดในหลุมเจาะ 24 ชั่วโมง ภายหลังจากเสร็จสิ้นการเจาะมีค่าระหว่าง 0.0-3.0 เมตร ต่ำกว่าระดับผิวดินปากหลุมเจาะ

อย่างไรก็ตาม ระดับน้ำใต้ดินจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละฤดูกาล

6. ข้อเสนอแนะ

แนะนำให้ใช้ฐานรากเสาเข็มเจาะจะเหมาะสมกับโครงการฯ โดยพิจารณาให้ปลายเสาเข็มฝังจมอยู่ในชั้นทรายแน่นถึงแน่นมากหรือชั้นดินเหนียวปนซิลต์ดานแข็งมาก ซึ่งระดับความลึกปลายเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มต่อต้นที่ต้องการ และปัญหาในการก่อสร้างเสาเข็ม แนะนำให้ทำ Pile Integrity Tests และ Pile Load Tests ด้วย

ตารางที่ 1 แนะนำตัวอย่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มคอนกรีตสำหรับเจาะ (Bored Pile)

รูปที่ 4 แสดงหน่วยแรงเสียดทานผิวสะสมประลัย และหน่วยแรงต้านทานปลายเข็มประลัย พล็อตเทียบกับความลึก



รายการทั่วไป

ในอาคารเดียวกันปลายฐานรากควรจะอยู่ในสภาพชั้นดิน และคุณสมบัติของการทรุดตัวเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการทรุดตัวของอาคาร อันสืบเนื่องจากลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินที่รองรับฐานรากแตกต่างกัน

ความลึกเสาเข็มที่แน่นอน จะต้องตรวจสอบด้วยค่า Blow Count ในขณะที่ตอกเทียบกับชั้นดินที่ใกล้จุดเจาะสำรวจดินและจุดการทดสอบเสาเข็ม

สำหรับฐานรากแผ่ ความลึกแน่นอนจะต้องตรวจสอบกับสภาพชั้นดินขณะทำการขุด เพื่อที่จะวางฐานรากบริเวณตำแหน่งเฉพาะนั้นอย่างละเอียด โดยวิศวกรที่มีประสบการณ์ที่นั่นและควรจะบดอัดดินเดิมก่อนที่จะมีการวางฐานรากบนชั้นดินนั้นเพื่อให้ความแน่นของชั้นดินที่รองรับฐานรากเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

ถ้ากำลังแบกทาน (Bearing Capacity) ของชั้นดินเพื่อรับฐานรากแผ่ไม่มากพอและจำเป็นต้องใช้ฐานรากขนาดใหญ่กว่าเพื่อรับน้ำหนักเสา ขนาดของฐานรากควรจะได้มีการทดสอบว่าจะใหญ่จนไปชิดกับฐานรากตัวถัดไปที่อยู่ข้างเคียงหรือไม่ โดยทั่วไปถ้าพื้นที่ของฐานรากรวมกันแล้วมากกว่าครึ่งของพื้นที่ที่จะก่อสร้างทั้งหมดแล้ว ฐานรากรวม (mat foundation) ควรจะออกแบบเพื่อใช้รับน้ำหนักของอาคารทั้งหมดแทนฐานรากเดี่ยว (isolate footing)

สภาพดินและค่าแนะนำดังกล่าว ยึดถือจากข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจที่มีบริเวณสภาพดินระหว่างหลุมเจาะอาจมีความแตกต่างไป ฉะนั้นควรมีวิศวกรผู้เชี่ยวชาญทางปฐพีกลศาสตร์ของดินคอยตรวจสอบประจำระหว่างที่ลงมือทำฐานราก เพื่อให้ผู้รับเหมาสามารถปฏิบัติให้เป็นไปตามคำแนะนำที่ให้ไว้ และหากข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับไม่ถูกต้องทางผู้ออกแบบหรือผู้ว่าจ้างควรจะแจ้งให้ทางบริษัท ทราบทันที เพื่อจะได้แก้ไขให้ถูกต้องตามความเหมาะสมต่อไป

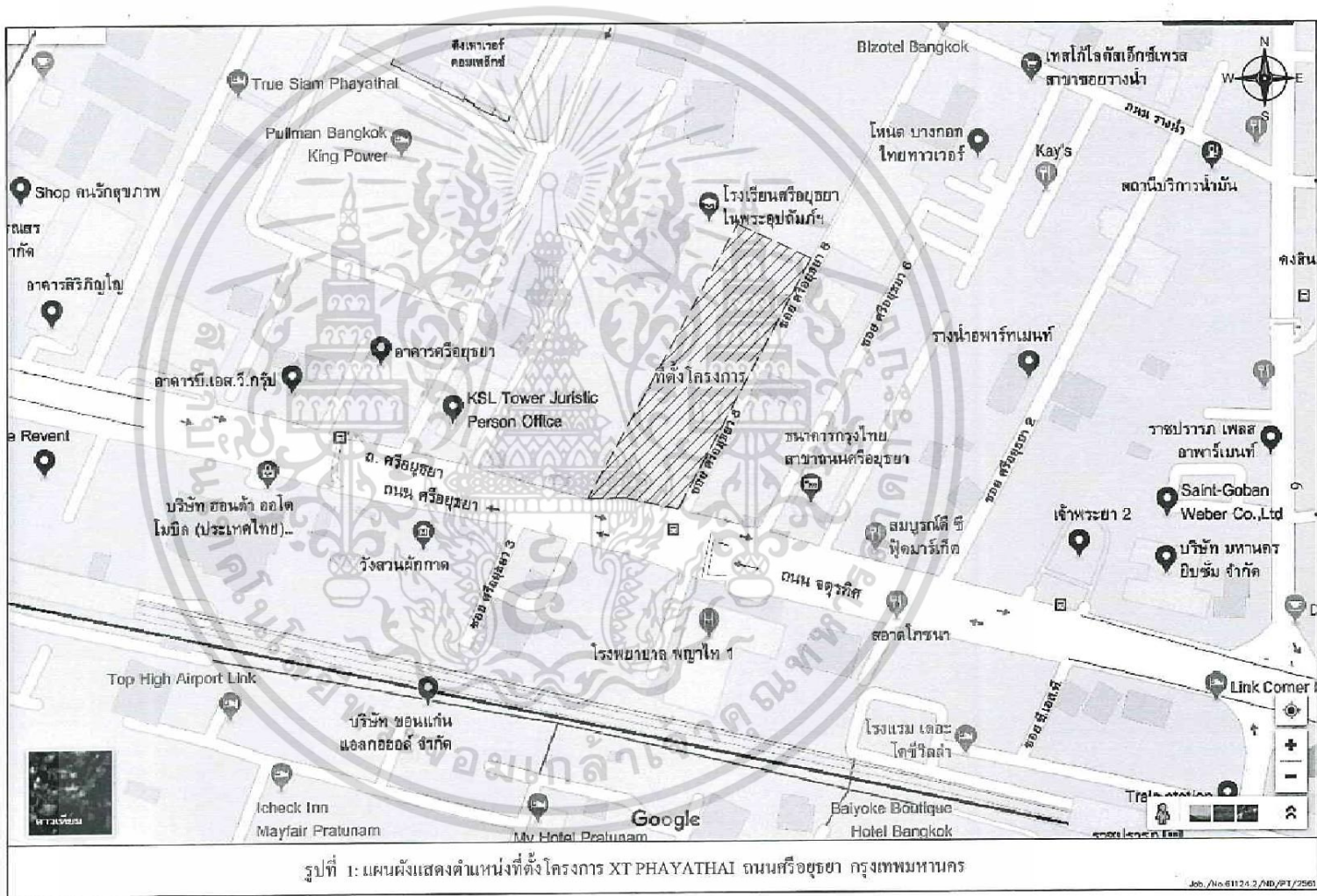
รายงานฉบับนี้ทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางสำหรับวิศวกร ผู้คำนวณงานฐานรากของอาคารและโครงสร้างเท่านั้น งานออกแบบระบบฐานรากยังคงเป็นดุลยพินิจของผู้ออกแบบ หรือวิศวกรผู้รับผิดชอบตามจรรยาบรรณแห่งวิชาชีพ

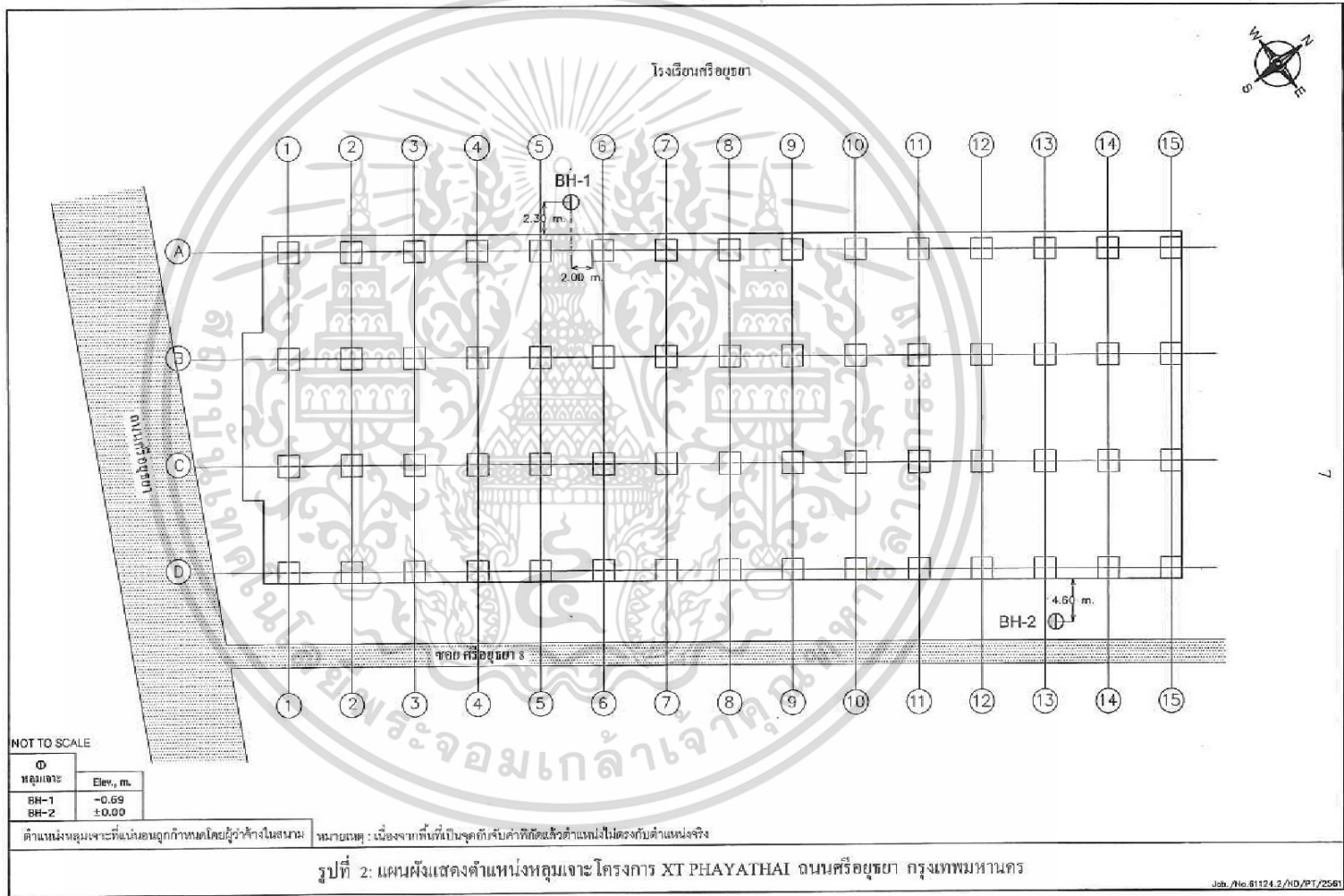
ตารางที่ 1 แนะนำตัวอย่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มคอนกรีตสำหรับเจาะ (Bored Pile)

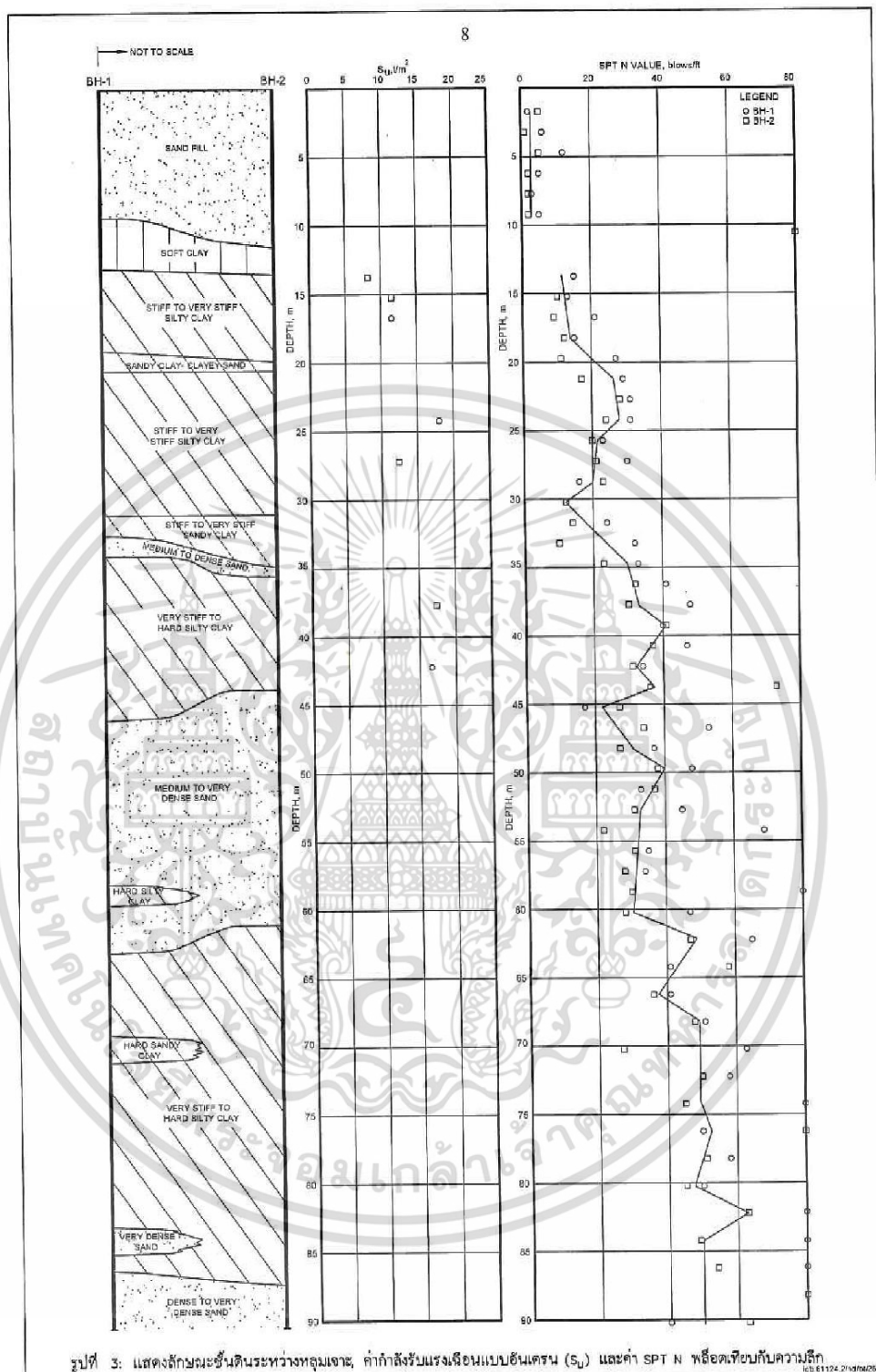
หลุมเจาะ	ขนาดของ เสาเข็ม เมตร	ระดับความลึก ปลายเข็ม เมตร	หน่วยแรง เฉียดทานผิว ตัน/เมตร	แรง เฉียดทานผิว ตัน	หน่วยแรง ต้านปลายเข็ม ตัน/ม ²	แรง ต้านปลายเข็ม ตัน	กำลังรับน้ำหนัก ประลัยของเสาเข็ม ตัน	กำลังรับน้ำหนัก ปลอดภัยของเสาเข็ม ตัน
BH-1 - 2	φ - 1.00	52	267	839	290	228	1067	427
	φ - 1.20	52	267	1007	290	328	1335	534
	φ - 1.50	52	267	1258	290	512	1770	708
	φ - 1.00	54	293	920	300	236	1156	462
	φ - 1.20	54	293	1105	300	339	1444	578
	φ - 1.50	54	293	1381	300	530	1911	764
	φ - 1.00	56	319	1002	300	236	1238	495
	φ - 1.20	56	319	1203	300	339	1542	617
	φ - 1.50	56	319	1503	300	530	2033	813

หมายเหตุ

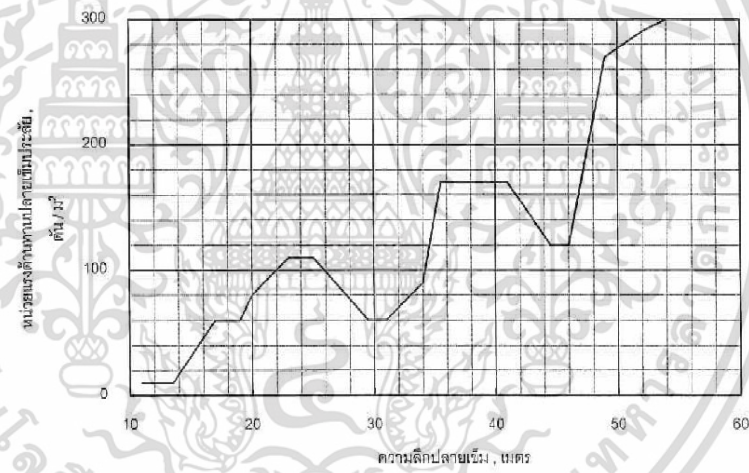
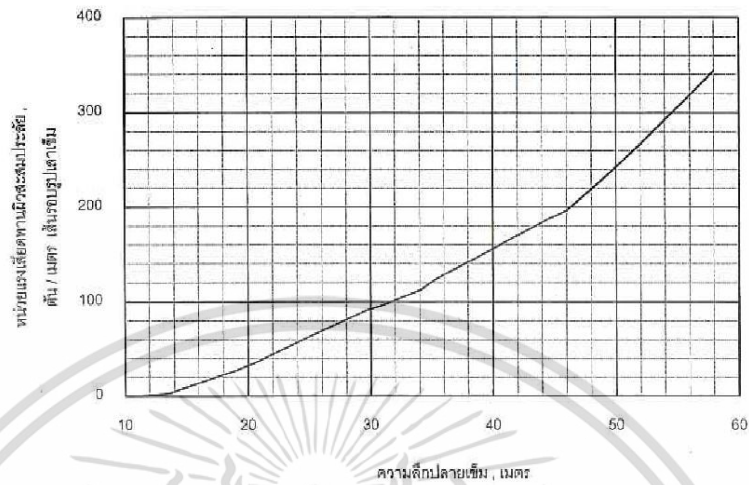
- 1) ใช้ค่าพิถีความปลอดภัย (F.S) เท่ากับ 2.5 และไม่ได้พิจารณาผลกระทบของหน่วยแรงเฉียดทานผิวลบ
- 2) ระดับความลึกปลายเข็มวัดเทียบกับผิวดินขณะสำรวจ, ในการคำนวณกำหนดให้หัวเข็มอยู่ที่ 11 เมตรต่ำจากผิวดิน
- 3) แนะนำให้ทำ Pile Integrity Tests และ Pile Load Tests ด้วย
- 4) ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างเสาเข็มว่าจะรับน้ำหนักที่แนะนำข้างบนได้หรือไม่โดยเลือกใช้ค่าที่น้อยกว่า







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงหน่วยแรงเสียดทานผิวระฆังประลัด และหน่วยแรงต้านทานปลายเข็มประลัด พลัดเทียบกับความลึก สำหรับหลุม BH-1-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

- 1) ผลการทดสอบและวิเคราะห์ ประกอบด้วย
 - SUMMARY OF TEST RESULTS
 - LOG OF BORING
 - ภาพถ่ายแสดงตำแหน่งหลุมเจาะ
- 2) LIST OF TERMS USED
- 3) การจำแนกและบรรยายลักษณะของดิน
- 4) UNIFIED SOIL CLASSIFICATION
- 5) CHARACTERISTICS PERTINENT TO EMBANKMENT AND FOUNDATIONS
- 6) หลักการออกแบบฐานรากเสาเข็ม
- 7) REFERENCE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร														
DATE		28/9/2018		BORING No.		BH-1		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		+-0.0 m.		
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT %			WET UNIT WEIGHT γ_m	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH σ_{m^2}					STANDARD PENETRATION(N) (blow/ft)	
	FROM	TO		LL	PL	PI		% FINER						UNCONFINED SHEAR		TORVANE SHEAR		UU TEST		POCKET PENETRATION
								No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Qu/2	Qu'/2	Qv	Qv'	Su		
SS-01	1.50	1.95	30.4					97	92	82	57	33	SC							2
SS-02	3.00	3.45	30.1										CL/SM						1.3	6
SS-03	4.50	4.95	13.9					86	61	69	35	11	SM-SP							12
SS-04	6.00	6.45	13.6										SM-SP							5
SS-05	7.50	7.95	31.0										CH/SM							3
SS-06	9.00	9.45	22.8					100	96	91	62	32	SC/CH							5
ST-07	10.50	11.00		(No Recovery)									(CH)							
ST-08	12.00	12.50		(No Recovery)									(CH)							
SS-09	13.50	13.95	27.6	55.6	22.1	33.5	1.95						CH						8.8	15
SS-10	15.00	15.45	26.1				1.99						CH						10.5	13
SS-11	16.50	16.95	27.3				1.99						CH	11.50					16.5	21
SS-12	18.00	18.45	27.3				2.00						CH						15.5	15
SS-13	19.50	19.95	23.9				2.03				100	73	CL							27
SS-14	21.00	21.45	22.7				1.96						CH						21.5	29
SS-15	22.50	22.95	21.0				2.09						CH				0.00		22.0	31
SS-16	24.00	24.45	23.5				2.02						CH	18.07				22.5+		31
SS-17	25.50	25.95	19.7				2.10						CH							23
SS-18	27.00	27.45	20.7				2.07						CH						22.5	30
SS-19	28.50	28.95	28.3				1.95						CH						13.8	16
SS-20	30.00	30.45	25.2	50.1	21.2	28.9	1.99						CH						12.0	12
SS-21	31.50	31.95	22.6							100	98	73	CL						13.0	24

11

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร													
DATE		28/9/2018		BORING No.		BH-1		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		+-0.0 m.	
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT			WET UNIT WEIGHT t/m ³	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m ²					STANDARD PENETRATION (blow/ft)
	M.			%				% FINER						UNCONFINED SHEAR	TORVANE SHEAR		UU TEST	POCKET PENETRATION	
	FROM	TO		LL.	PL.	PI.		No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Qu/2	Qu'/2	Qv	Qv'		
SS-22	33.00	33.45	17.2						100	57	10	SM-SF							32
SS-23	34.50	34.95	20.7				2.03					CH						22.5	33
SS-24	36.00	36.45	19.2				2.09					CH						22.5+	41
SS-25	37.50	37.95	20.4				2.04					CH						22.5+	48
SS-26	39.00	39.45	20.2				2.10					CH						22.5+	40
SS-27	40.50	40.95	19.3				2.07					CH						22.5+	47
SS-28	42.00	42.45	19.9				2.10					CH	16.66					22.5+	34
SS-29	43.50	43.95	20.5				2.08					CH						21.5	36
SS-30	45.00	45.45	22.5				2.08					CH						15.5	17
SS-31	46.50	46.95	25.9							100	30	SM							53
SS-32	48.00	48.45	22.1						100	99	98	24	SM						37
SS-33	49.50	49.95	12.2									SM							48
SS-34	51.00	51.45	15.2						100	99	87	51	10	SM-SF					33
SS-35	52.50	52.95	23.6									SM							45
SS-36	54.00	54.45	15.9									SM							69
SS-37	55.50	55.95	13.9									SM							35
SS-38	57.00	57.45	10.8									SM							34
SS-39	58.50	58.95	18.6				2.16					CH							83
SS-40	60.00	60.45	11.7						98	90	77	48	11	SM-SF					47
SS-41	62.00	62.45	17.9						100	99	95	76	13	SM				22.5+	65
SS-42	64.00	64.45	24.5	52.2	26.0	26.2	1.97							CH					41

12

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร														
DATE		28/9/2018		BORING No.		BH-1		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		+ - 0.0 m.		
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT			WET UNIT WEIGHT $\frac{t}{m^3}$	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m^2					STANDARD PENETRATION(N) (blow/ft)	
	M.			%				% FINER						UNCONFINED SHEAR		TORVANE SHEAR		UU TEST		POCKET PENETRATION
	FROM	TO		LL.	PL.	PI.		No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Qu/2	Qu'/2	Qv	Qv'	Su		
SS-43	66.00	66.45	17.6															22.5+	41	
SS-44	68.00	68.45	24.2				1.36												22.5+	51
SS-45	70.00	70.45	19.4							100	67								63	
SS-46	72.00	72.45	17.9				2.06												22.5+	58
SS-47	74.00	74.45	18.8				2.08												22.5+	90
SS-48	76.00	76.45	17.1				2.15												22.5+	50
SS-49	78.00	78.45	17.3				2.11												22.5+	58
SS-50	80.00	80.45	15.4				2.12												22.5+	50
SS-51	82.00	82.30	22.6					100	98	92	78								22.5+	50/6"
SS-52	84.00	84.45	14.0					100	97	91	60	13								84
SS-53	86.00	86.30	25.1					Ⓢ	100	99	79									50/6"
SS-54	88.00	88.45	15.4					88	87	85	50	10								90
SS-55	90.00	90.45	22.7																	40

13

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร													
DATE		28/09/2018		BORING No.		BH-2		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		- 3.0 m	
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT			WET UNIT WEIGHT γ_{m^3}	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH τ/m^2					STANDARD PENETRATION (blow/ft)
	M.			%				% FINER						UNCONFINED SHEAR	TORVANE SHEAR	UU TEST	POCKET PENETRATION		
	FROM	TO		LL.	PL.	PI.		No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Q _w /2	Q _u /2	Q _v	Q _v '	S _u	
SS-01	1.50	1.95	16.1																5
SS-02	3.00	3.45		(No Recovery)															1
SS-03	4.50	4.95	16.3				100	98	92	57	10	SM-SP							5
SS-04	6.00	6.45	16.8									SM-SP							2
SS-05	7.50	7.95	18.0				76	66	53	27	10	SM-SP							2
SS-06	9.00	9.45	15.3									SM-SP							2
SS-07	10.50	10.63	19.8				74	71	69	58	12	SM-SP							50/6*
ST-08	12.00	12.50	60.9	64.5	22.4	42.1	1.61					CH						1.3	
ST-09	13.50	14.00	23.7				2.00					CH	8.25					7.0	
SS-10	15.00	15.45	25.3				1.99					CH	11.50					12.5	10
SS-11	16.50	16.95	27.1				1.96					CH						11.3	9
SS-12	18.00	18.45	32.9				1.83					CH						15.0	12
SS-13	19.50	19.95	28.8				1.93			100	94	CH/SC							11
SS-14	21.00	21.45	18.5				2.10					CH						16.3	17
SS-15	22.50	22.95	21.2				1.96					CH						18.0	28
SS-16	24.00	24.45	23.4				2.02					CH						18.0	24
SS-17	25.50	25.95	25.8				1.94					CH						15.5	20
SS-18	27.00	27.45	26.5				1.96					CH	12.38					16.3	21
SS-19	28.50	28.95	25.2				1.97					CH						16.3	23
SS-20	30.00	30.45	25.0	41.1	23.0	18.1	2.00					CL						8.8	12
SS-21	31.50	31.95	21.1					100	97	96	89	60	CL					7.5	14

14

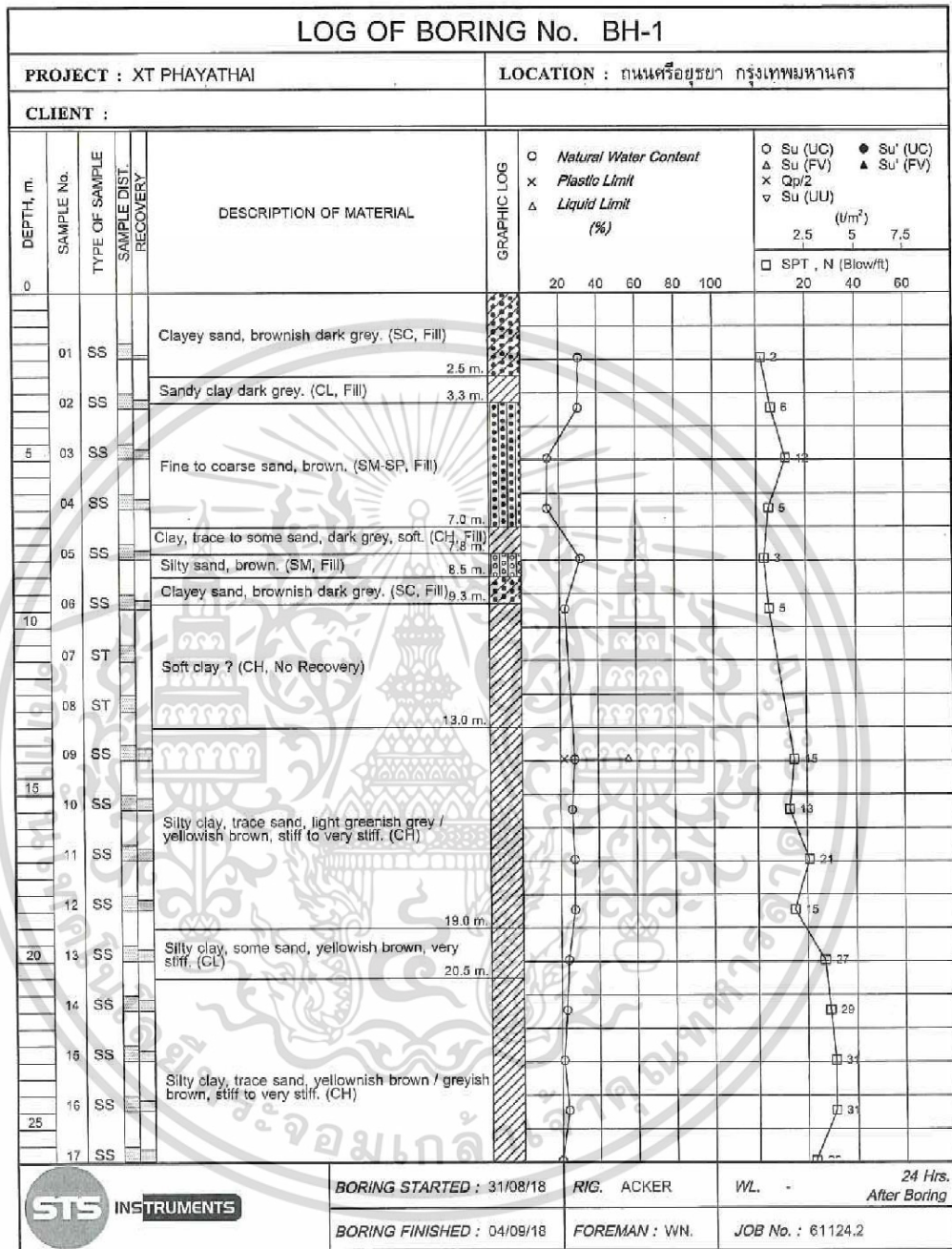
STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร														
DATE		28/09/2018		BORING No.		BH-2		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		- 3.0 m		
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT %			WET UNIT WEIGHT γ_{un}	SIEVE ANALYSIS % FINER					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH t/m^2					STANDARD PENETRATION (%) (blow/ft)	
	FROM	TO		LL.	PL.	PI.		No.	No.	No.	No.	No.		UNCONFINED SHEAR		TORVANE SHEAR		UU TEST		POCKET PENETRATION
														3/8"	4	10	40	200		
SS-22	33.00	33.45	23.9				2.09						CL						7.5	10
SS-23	34.50	34.95	17.6					100	99	98	66	11	CL/SM-SP						2.5	23
SS-24	36.00	36.45	20.2				2.10						CH						18.8	32
SS-25	37.50	37.95	21.7				2.00						CH	17.39					20.5	30
SS-26	39.00	39.45	19.7				2.09						CH						22.5+	41
SS-27	40.50	40.95	18.0				2.16						CH						22.5+	37
SS-28	42.00	42.45	18.7				2.16						CH						15.5	31
SS-29	43.50	43.95	14.5							100	54	35	CH/SM						10.5	73
SS-30	45.00	45.45	16.0							100	98	29	9	SM-SP						27
SS-31	46.50	46.95	15.3							100	95	40	9	SM-SP						34
SS-32	48.00	48.45	14.4										SM-SP							27
SS-33	49.50	49.95	16.1							100	99	97	54	10	SM-SP					38
SS-34	51.00	51.45	14.4										SM-SP							37
SS-35	52.50	52.95	15.4							100	94	50	10	SM-SP						31
SS-36	54.00	54.45	17.4										SM-SP							22
SS-37	55.50	55.95	18.0							100	97	73	10	SM-SP						31
SS-38	57.00	57.45	16.6										SM-SP							28
SS-39	58.50	58.95	16.0							100	95	39	9	SM-SP						30
SS-40	60.00	60.45				(No Recovery)							(SM)							28
SS-41	62.00	62.45	19.9	49.5	21.5	28.0	2.15						CH						18.0	47
SS-42	64.00	64.45	18.1				2.08						CH						22.5+	58

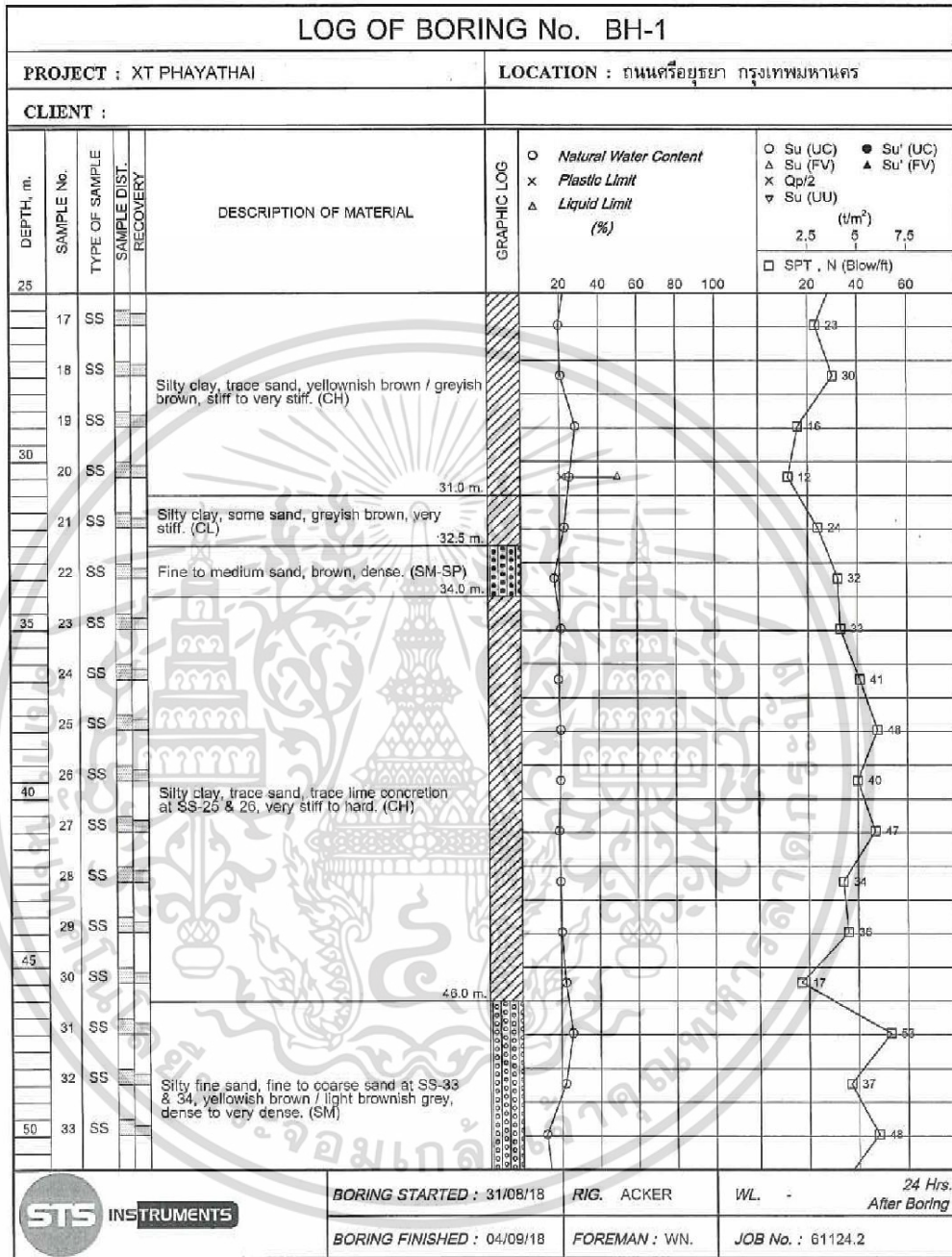
15

STS INSTRUMENTS COMPANY LIMITED
SUMMARY OF TEST RESULTS

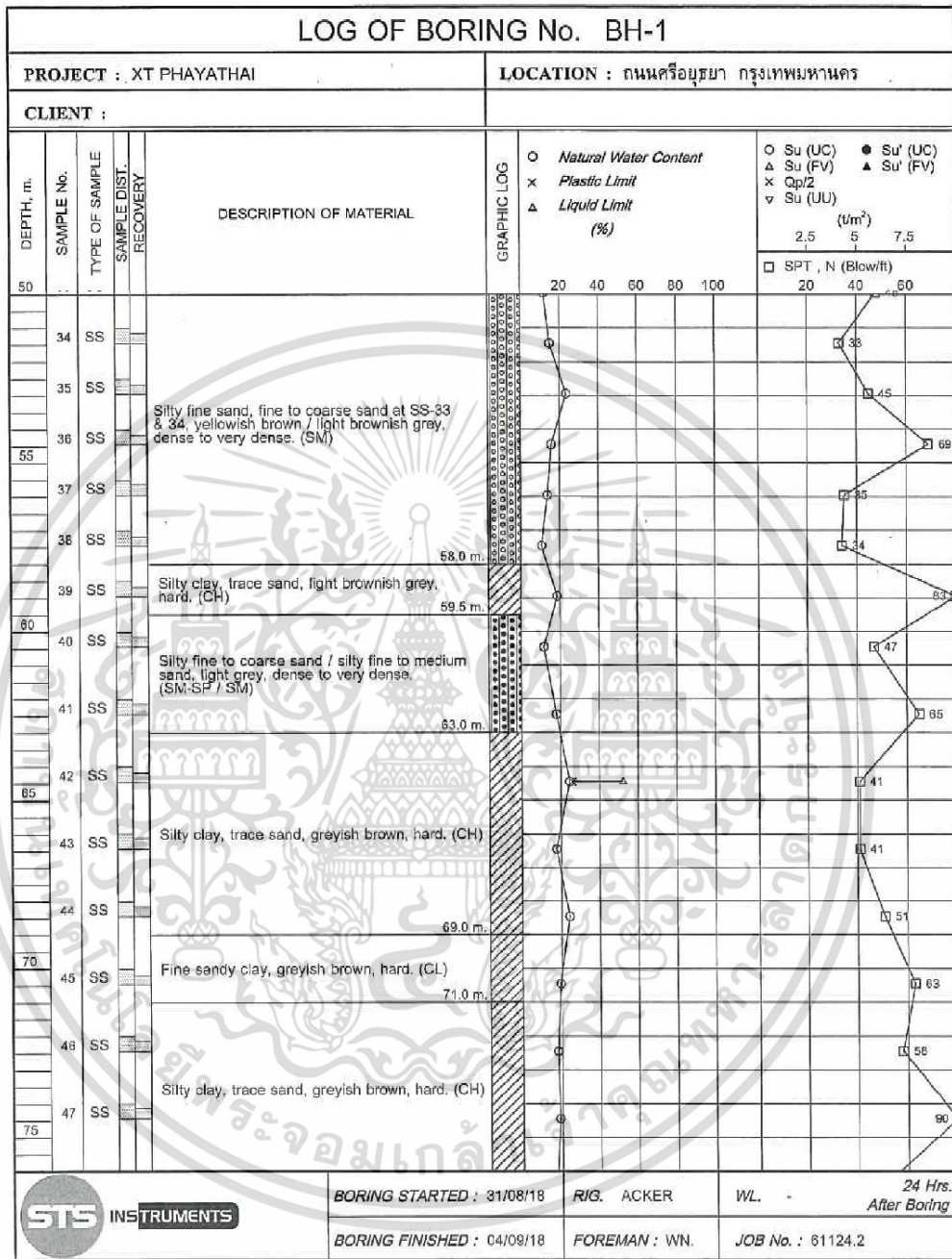
PROJECT		XT PHAYATHAI		LOCATION		ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร														
DATE		28/09/2018		BORING No.		BH-2		JOB No.		61124.2		BY		PT		OBSERVED W.L.		- 3.0 m		
SAMPLE No.	DEPTH		WATER CONTENT %	ATTERBERG LIMIT %			WET UNIT WEIGHT γ_{wet}	SIEVE ANALYSIS					CLASSIFICATION	UNDRAINED SHEAR STRENGTH τ/m^2					POCKET PENETRATION	STANDARD PENETRATION(S) (blow/ft)
	M.			LL.	PL.	PI.		% FINER						UNCONFINED SHEAR		TORVANE SHEAR		UU TEST		
	FROM	TO						No. 3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200		Qu/2	Qu'/2	Qv	Qv'	Su		
SS-43	66.00	66.45	25.9				1.99						CH						22.5+	36
SS-44	68.00	68.45	13.7				2.18						CH						21.5	48
SS-45	70.00	70.45	18.4				2.09						CH						17.0	27
SS-46	72.00	72.45	15.8				2.26						CH						22.5+	50
SS-47	74.00	74.45	22.9				2.02						CH						22.5+	45
SS-48	76.00	76.45	14.0				2.20						CH						22.5+	95
SS-49	78.00	78.45	18.1				2.13						CH						22.5	51
SS-50	80.00	80.45	18.0				2.11						CH						22.5+	45
SS-51	82.00	82.45	18.1				2.11						CH						22.5+	63
SS-52	84.00	84.45	21.6				2.07						CH						22.5+	49
SS-53	86.00	86.45	18.7	41.7	17.4	24.3	2.10						CL						22.5+	54
SS-54	88.00	88.45	14.3					100	99	91	41	12	SM-SP							80
SS-55	90.00	90.45	18.6						100	99	76	13	SM							63



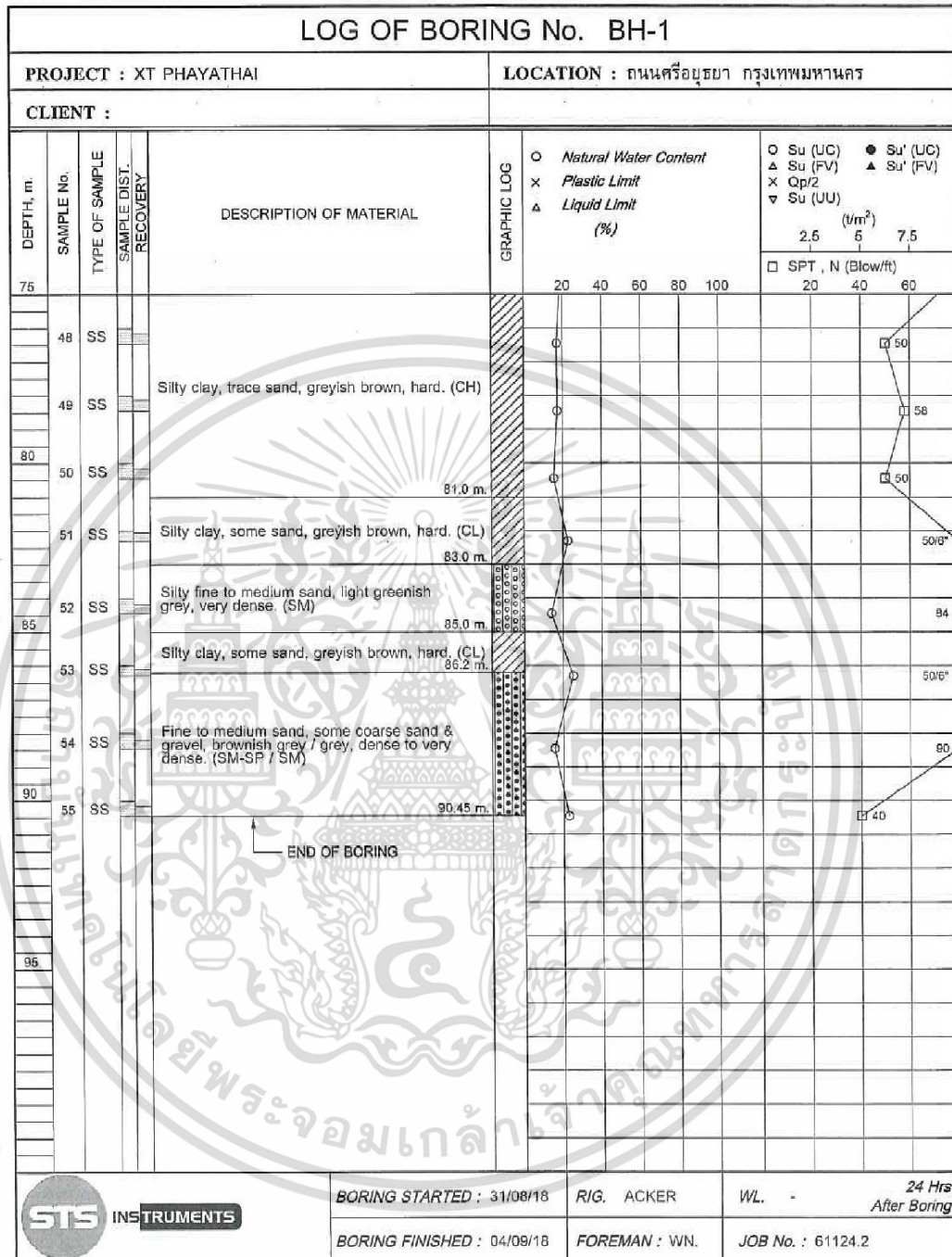
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



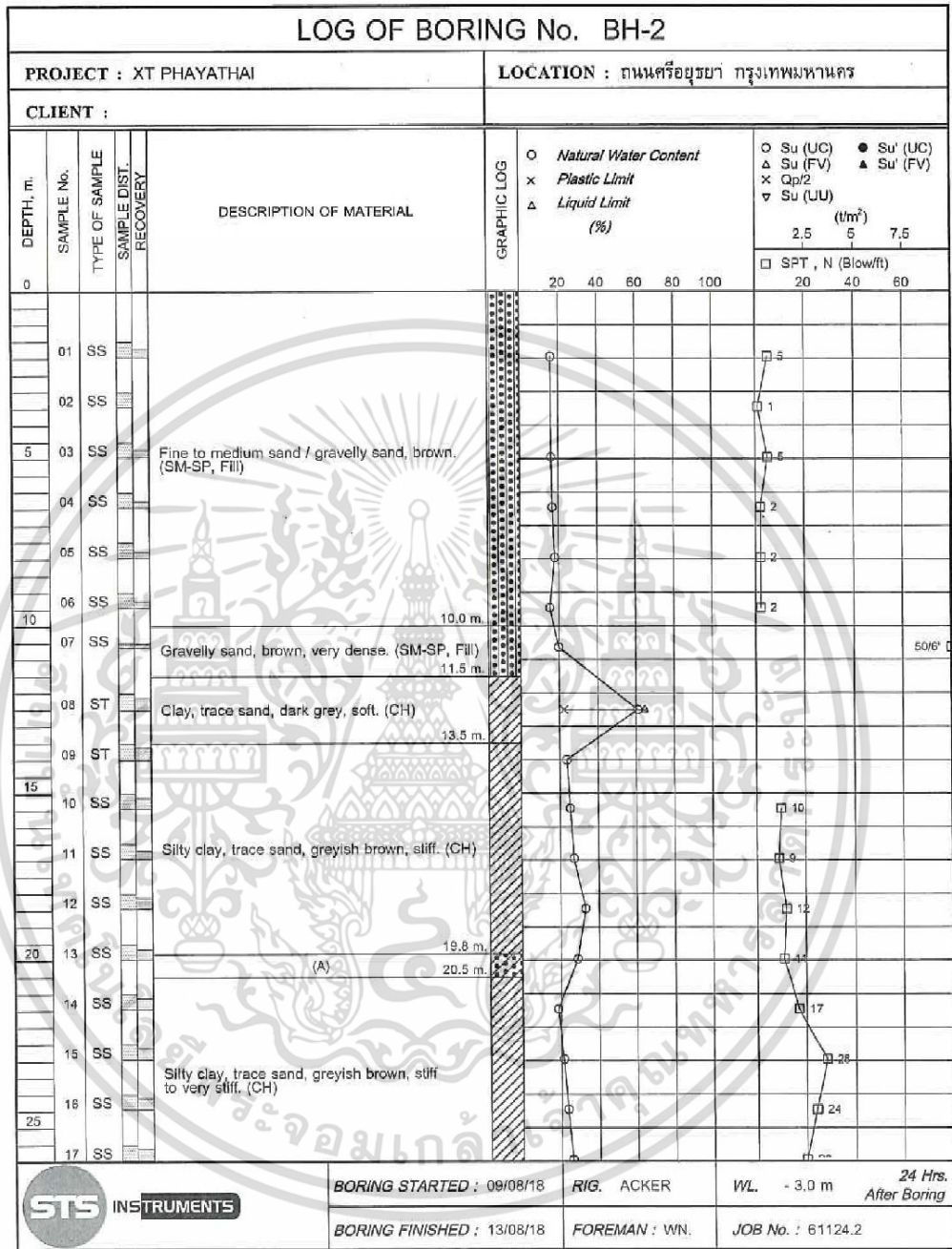
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



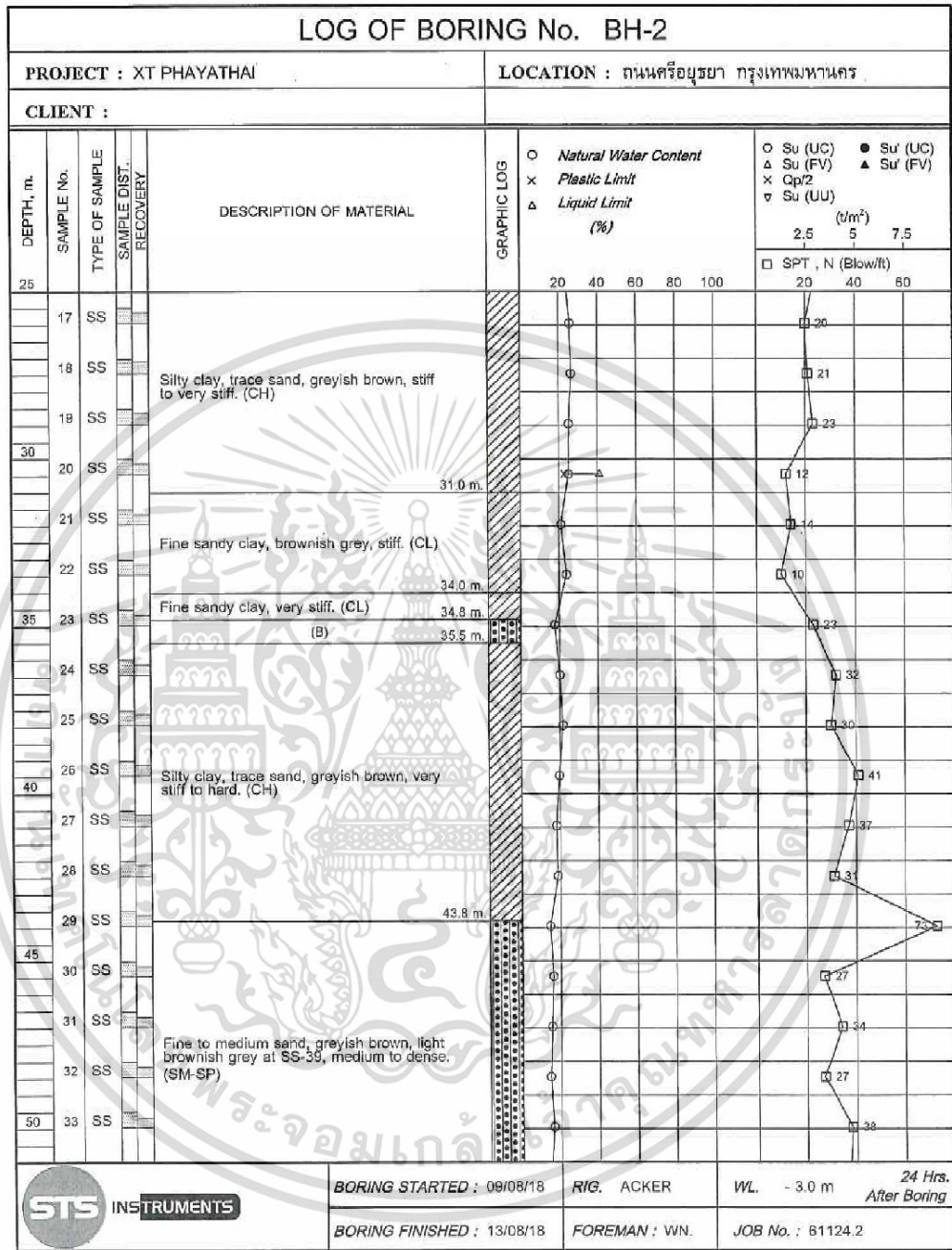
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



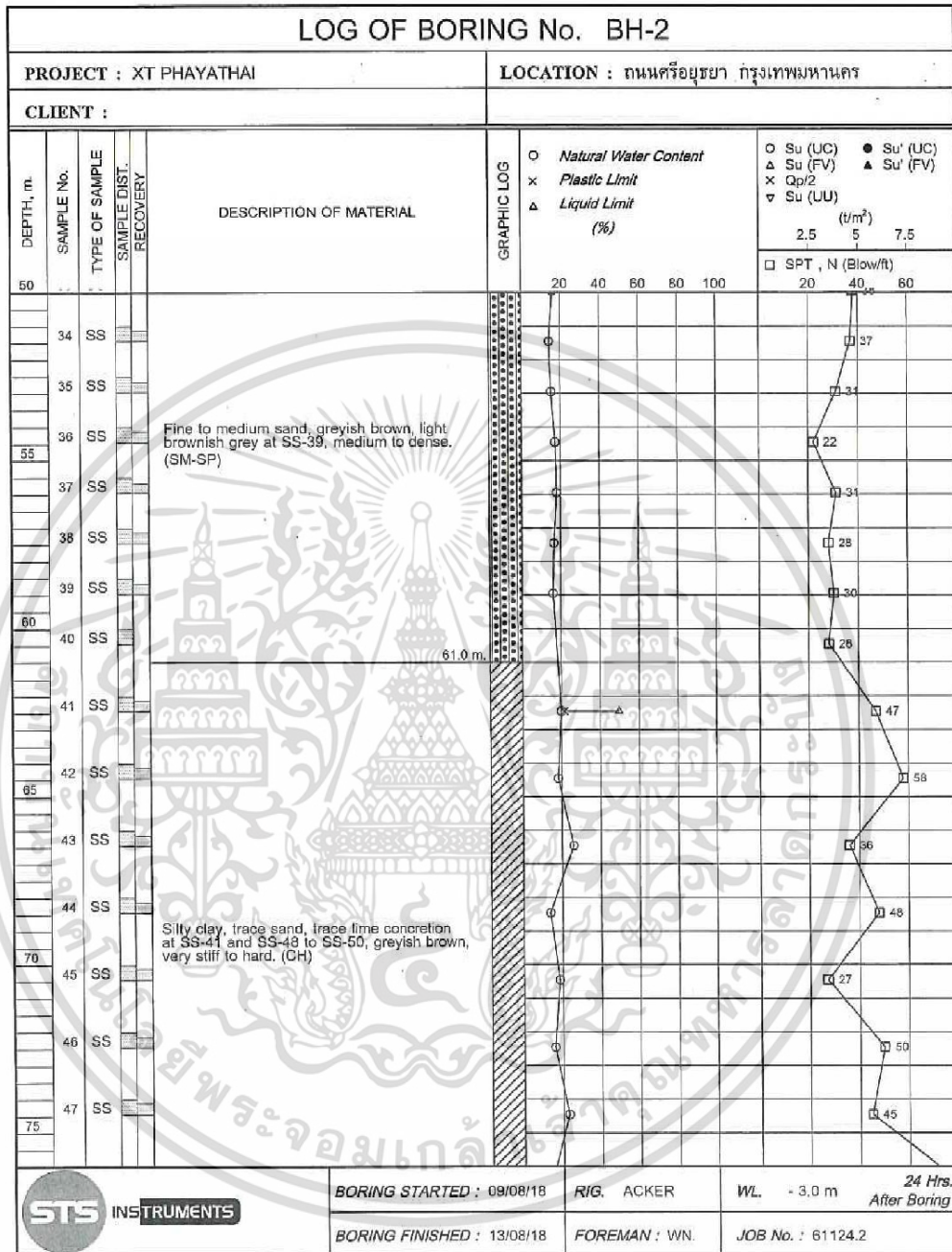
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



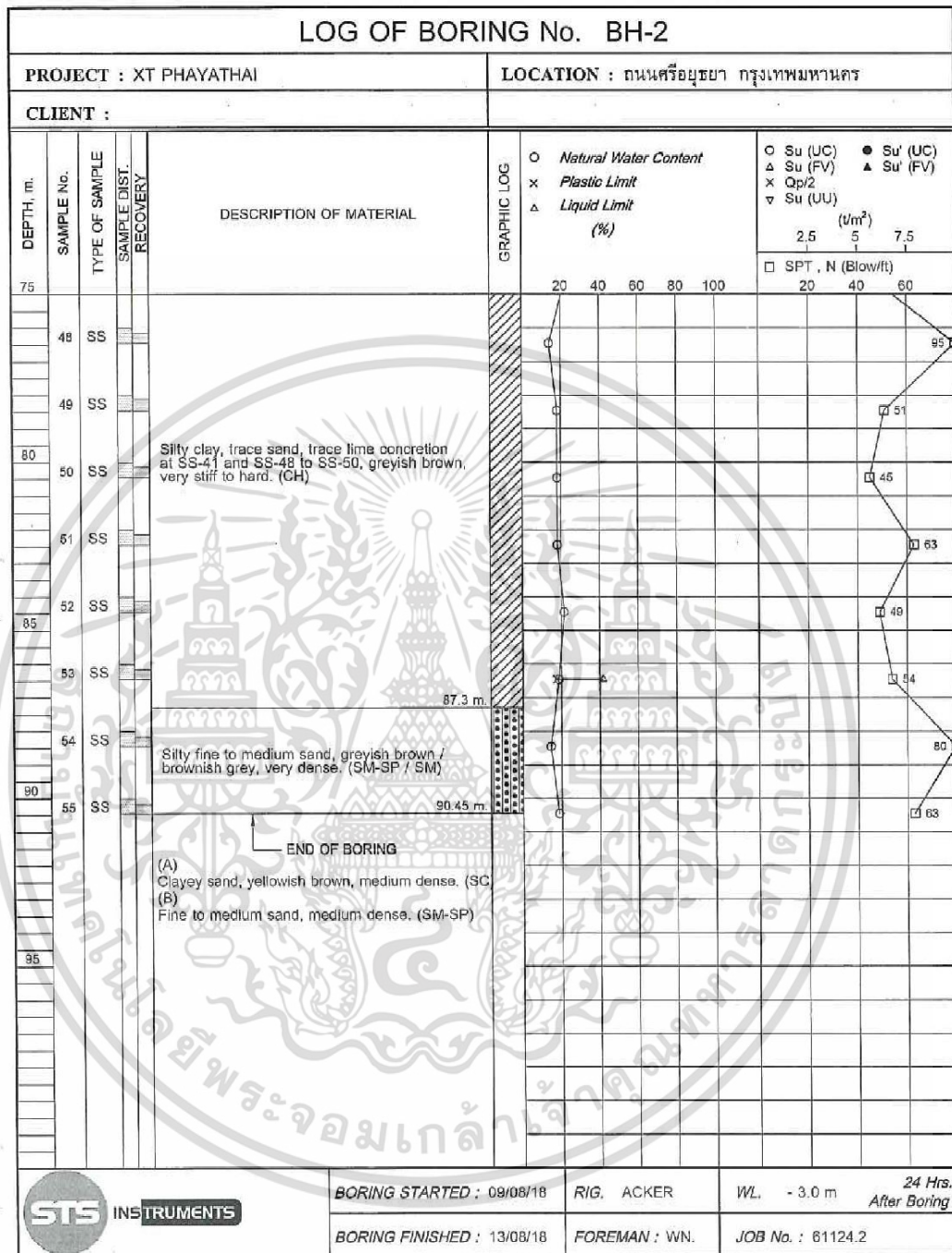
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

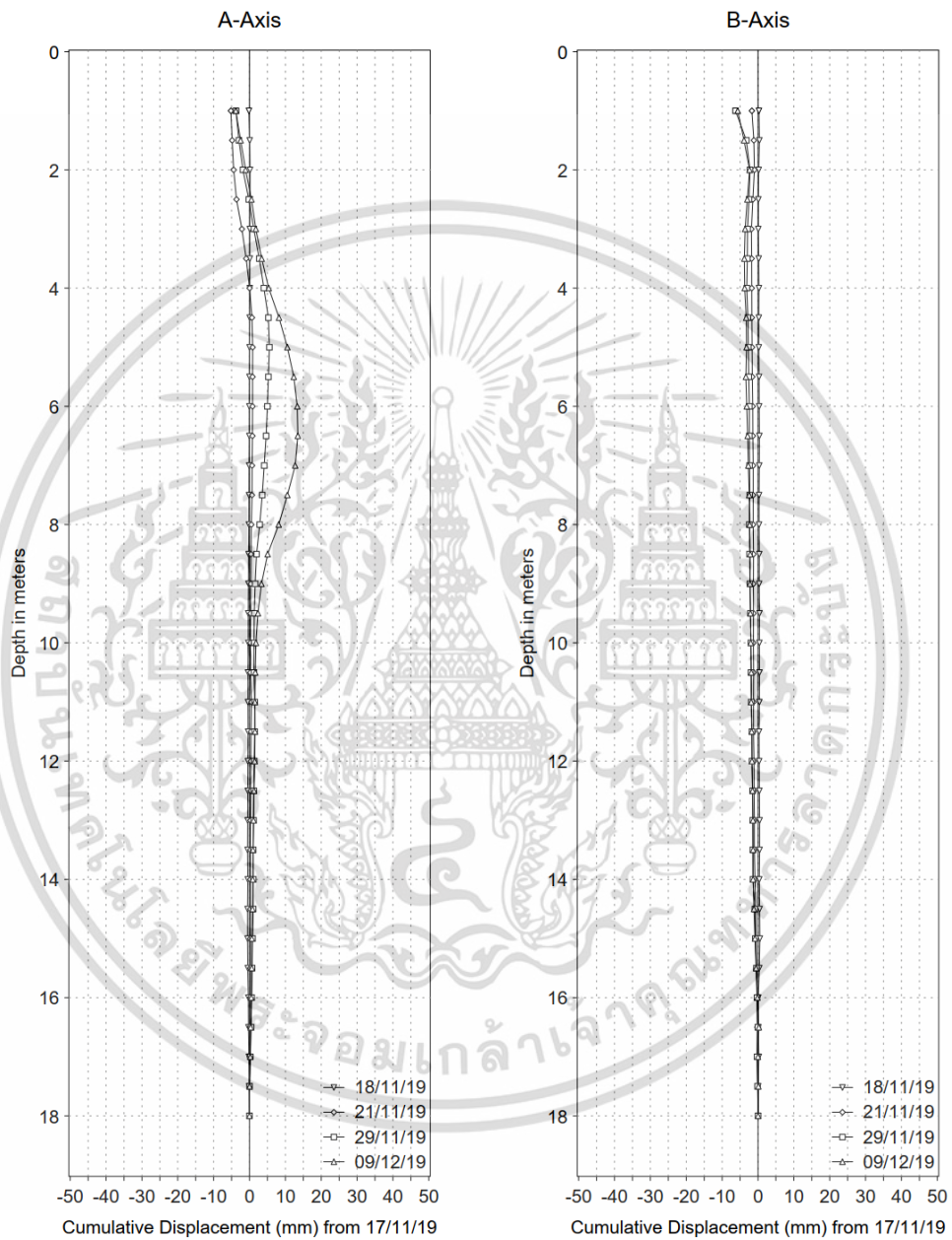


ภาคผนวก ค
ผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดในสนามจากการตรวจวัด
ด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) I-1, I-2 และ I-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) I-1

โครงการ XT Phayathai
Inclinometer Tube No.I-1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-1

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

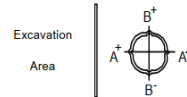
INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : 1

SENSOR # : 28399

STD.DEV. : A: 9.30 B: 16.90



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-22	-40	0.18	-117.71	-48	-32	-0.16	515.49
1.50	-121	53	-1.74	-117.89	-39	4	-0.43	515.65
2.00	-660	604	-12.64	-116.15	-36	4	-0.40	516.08
2.50	-876	801	-16.77	-103.51	-1	-34	0.33	516.48
3.00	-972	901	-18.73	-86.74	65	-106	1.71	516.15
3.50	-1053	980	-20.33	-68.01	154	-183	3.37	514.44
4.00	-1124	1051	-21.75	-47.68	247	-277	5.24	511.07
4.50	-1109	1029	-21.38	-25.93	308	-391	6.99	505.83
5.00	-1025	957	-19.82	-4.55	557	-567	11.24	498.84
5.50	-959	895	-18.54	15.27	586	-616	12.02	487.60
6.00	-886	822	-17.08	33.81	639	-663	13.02	475.58
6.50	-784	725	-15.09	50.89	699	-730	14.29	462.56
7.00	-699	632	-13.31	65.98	749	-776	15.25	448.27
7.50	-640	585	-12.25	79.29	727	-806	15.33	433.02
8.00	-492	413	-9.05	91.54	830	-846	16.76	417.69
8.50	-420	348	-7.68	100.59	853	-894	17.47	400.93
9.00	-319	245	-5.64	108.27	885	-919	18.04	383.46
9.50	-177	106	-2.83	113.91	845	-881	17.26	365.42
10.00	-70	-2	-0.68	116.74	846	-878	17.24	348.16
10.50	6	-105	1.11	117.42	807	-841	16.48	330.92
11.00	238	-299	5.37	116.31	880	-913	17.93	314.44
11.50	316	-380	6.96	110.94	811	-851	16.62	296.51
12.00	392	-455	8.47	103.98	826	-861	16.87	279.89
12.50	477	-535	10.12	95.51	887	-932	18.19	263.02
13.00	571	-633	12.04	85.39	954	-998	19.52	244.83
13.50	614	-695	13.09	73.35	911	-971	18.82	225.31
14.00	595	-664	12.59	60.26	897	-909	18.06	206.49
14.50	532	-592	11.24	47.67	890	-931	18.21	188.43
15.00	466	-524	9.90	36.43	1039	-1077	21.16	170.22
15.50	385	-443	8.28	26.53	1320	-1353	26.73	149.06
16.00	282	-338	6.20	18.25	1565	-1608	31.73	122.33
16.50	130	-213	3.43	12.05	1621	-1685	33.06	90.60
17.00	154	-227	3.81	8.62	1447	-1474	29.21	57.54
17.50	207	-274	4.81	4.81	1402	-1431	28.33	28.33

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-1

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

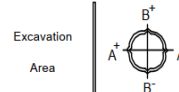
INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : 2

SENSOR # : 28399

STD.DEV. : A : 10.30 B : 15.30



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-40	-32	-0.08	-117.82	0	-42	0.42	519.98
1.50	-130	65	-1.95	-117.74	-2	-15	0.13	519.56
2.00	-661	566	-12.27	-115.79	-28	3	-0.31	519.43
2.50	-873	800	-16.73	-103.52	11	-37	0.48	519.74
3.00	-973	898	-18.71	-86.79	80	-107	1.87	519.26
3.50	-1054	980	-20.34	-68.08	162	-182	3.44	517.39
4.00	-1126	1051	-21.77	-47.74	264	-283	5.47	513.95
4.50	-1110	1029	-21.39	-25.97	321	-383	7.04	508.48
5.00	-1028	962	-19.90	-4.58	561	-562	11.23	501.44
5.50	-958	897	-18.55	15.32	603	-617	12.20	490.21
6.00	-885	823	-17.08	33.87	646	-663	13.09	478.01
6.50	-784	724	-15.08	50.95	712	-729	14.41	464.92
7.00	-697	632	-13.29	66.03	762	-776	15.38	450.51
7.50	-647	587	-12.34	79.32	746	-801	15.47	435.13
8.00	-492	414	-9.06	91.66	845	-844	16.89	419.66
8.50	-421	347	-7.68	100.72	859	-889	17.48	402.77
9.00	-317	246	-5.63	108.40	890	-916	18.06	385.29
9.50	-179	105	-2.84	114.03	861	-880	17.41	367.23
10.00	-68	-3	-0.65	116.87	854	-876	17.30	349.82
10.50	8	-105	1.13	117.52	814	-840	16.54	332.52
11.00	241	-300	5.41	116.39	890	-898	17.88	315.98
11.50	320	-379	6.99	110.98	816	-851	16.67	298.10
12.00	396	-454	8.50	103.99	833	-862	16.95	281.43
12.50	476	-533	10.09	95.49	897	-930	18.27	264.48
13.00	570	-633	12.03	85.40	966	-997	19.63	246.21
13.50	612	-695	13.07	73.37	929	-976	19.05	226.58
14.00	592	-667	12.59	60.30	909	-909	18.18	207.53
14.50	531	-593	11.24	47.71	899	-933	18.32	189.35
15.00	467	-525	9.92	36.47	1052	-1085	21.37	171.03
15.50	381	-448	8.29	26.55	1327	-1353	26.80	149.66
16.00	282	-343	6.25	18.26	1570	-1608	31.78	122.86
16.50	127	-216	3.43	12.01	1630	-1696	33.26	91.08
17.00	152	-229	3.81	8.58	1454	-1477	29.31	57.82
17.50	205	-272	4.77	4.77	1414	-1437	28.51	28.51

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-1

DEPTH : 17.50 M.

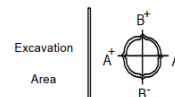
DESCRIPTION : INITIAL READING

INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : Average

SENSOR # : 28399



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-31	-36	0.05	-117.77	-24	-37	0.13	517.74
1.50	-126	59	-1.85	-117.82	-21	-6	-0.15	517.61
2.00	-661	585	-12.46	-115.97	-32	4	-0.36	517.76
2.50	-875	801	-16.75	-103.52	5	-36	0.41	518.11
3.00	-973	900	-18.72	-86.77	73	-107	1.79	517.71
3.50	-1054	980	-20.34	-68.05	158	-183	3.41	515.92
4.00	-1125	1051	-21.76	-47.71	256	-280	5.36	512.51
4.50	-1110	1029	-21.39	-25.95	315	-387	7.02	507.16
5.00	-1027	960	-19.86	-4.57	559	-565	11.24	500.14
5.50	-959	896	-18.55	15.30	595	-617	12.11	488.91
6.00	-886	823	-17.08	33.84	643	-663	13.06	476.80
6.50	-784	725	-15.09	50.92	706	-730	14.35	463.74
7.00	-698	632	-13.30	66.01	756	-776	15.32	449.39
7.50	-644	586	-12.30	79.31	737	-804	15.40	434.08
8.00	-492	414	-9.06	91.60	838	-845	16.83	418.68
8.50	-421	348	-7.68	100.66	856	-892	17.48	401.85
9.00	-318	246	-5.64	108.34	888	-918	18.05	384.38
9.50	-178	106	-2.84	113.97	853	-881	17.34	366.33
10.00	-69	-3	-0.67	116.81	850	-877	17.27	348.99
10.50	7	-105	1.12	117.47	811	-841	16.51	331.72
11.00	240	-300	5.39	116.35	885	-906	17.91	315.21
11.50	318	-380	6.98	110.96	814	-851	16.65	297.31
12.00	394	-455	8.49	103.99	830	-862	16.91	280.66
12.50	477	-534	10.11	95.50	892	-931	18.23	263.75
13.00	571	-633	12.04	85.40	960	-998	19.58	245.52
13.50	613	-695	13.08	73.36	920	-974	18.94	225.95
14.00	594	-666	12.59	60.28	903	-909	18.12	207.01
14.50	532	-593	11.24	47.69	895	-932	18.27	188.89
15.00	467	-525	9.91	36.45	1046	-1081	21.27	170.63
15.50	383	-446	8.29	26.54	1324	-1353	26.77	149.36
16.00	282	-341	6.23	18.26	1568	-1608	31.76	122.60
16.50	129	-215	3.43	12.03	1626	-1691	33.16	90.84
17.00	153	-228	3.81	8.60	1451	-1476	29.26	57.68
17.50	206	-273	4.79	4.79	1408	-1434	28.42	28.42

END OF RECORDS

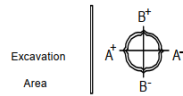
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 9.20 B : 15.60



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-31	-36	0.05	-44	-28	-0.16	-0.21	-0.15
1.50	-126	59	-1.85	-133	60	-1.93	-0.08	0.06
2.00	-661	585	-12.46	-650	597	-12.47	-0.01	0.14
2.50	-875	801	-16.76	-871	799	-16.70	0.06	0.15
3.00	-973	900	-18.73	-972	900	-18.72	0.01	0.09
3.50	-1054	980	-20.34	-1052	982	-20.34	0.00	0.08
4.00	-1125	1051	-21.76	-1124	1050	-21.74	0.02	0.08
4.50	-1110	1029	-21.39	-1109	1027	-21.36	0.03	0.06
5.00	-1027	960	-19.87	-1026	957	-19.83	0.04	0.03
5.50	-959	896	-18.55	-960	894	-18.54	0.01	-0.01
6.00	-886	823	-17.09	-884	823	-17.07	0.02	-0.02
6.50	-784	725	-15.09	-782	722	-15.04	0.05	-0.04
7.00	-698	632	-13.30	-696	631	-13.27	0.03	-0.09
7.50	-644	586	-12.30	-645	583	-12.28	0.02	-0.12
8.00	-492	414	-9.06	-487	407	-8.94	0.12	-0.14
8.50	-421	348	-7.69	-419	347	-7.66	0.03	-0.26
9.00	-318	246	-5.64	-314	245	-5.59	0.05	-0.29
9.50	-178	106	-2.84	-177	106	-2.83	0.01	-0.34
10.00	-69	-3	-0.66	-68	-7	-0.61	0.05	-0.35
10.50	7	-105	1.12	6	-106	1.12	0.00	-0.40
11.00	240	-300	5.40	241	-297	5.38	-0.02	-0.40
11.50	318	-380	6.98	321	-381	7.02	0.04	-0.38
12.00	394	-455	8.49	395	-458	8.53	0.04	-0.42
12.50	477	-534	10.11	478	-536	10.14	0.03	-0.46
13.00	571	-633	12.04	571	-635	12.06	0.02	-0.49
13.50	613	-695	13.08	612	-692	13.04	-0.04	-0.51
14.00	594	-666	12.60	597	-667	12.64	0.04	-0.47
14.50	532	-593	11.25	532	-594	11.26	0.01	-0.51
15.00	467	-525	9.92	461	-524	9.85	-0.07	-0.52
15.50	383	-446	8.29	373	-441	8.14	-0.15	-0.45
16.00	282	-341	6.23	278	-342	6.20	-0.03	-0.30
16.50	129	-215	3.44	123	-209	3.32	-0.12	-0.27
17.00	153	-228	3.81	150	-225	3.75	-0.06	-0.15
17.50	206	-273	4.79	203	-267	4.70	-0.09	-0.09

END OF RECORDS

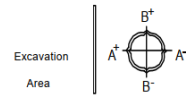
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 9.20 B : 15.60



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-24	-37	0.13	-1	-4	0.03	-0.10	0.27
1.50	-21	-6	-0.15	-21	-22	0.01	0.16	0.37
2.00	-32	4	-0.36	-32	-6	-0.26	0.10	0.21
2.50	5	-36	0.41	7	-36	0.43	0.02	0.11
3.00	73	-107	1.80	70	-99	1.69	-0.11	0.09
3.50	158	-183	3.41	155	-179	3.34	-0.07	0.20
4.00	256	-280	5.36	253	-286	5.39	0.03	0.27
4.50	315	-387	7.02	316	-387	7.03	0.01	0.24
5.00	559	-565	11.24	550	-567	11.17	-0.07	0.23
5.50	595	-617	12.12	589	-620	12.09	-0.03	0.30
6.00	643	-663	13.06	639	-662	13.01	-0.05	0.33
6.50	706	-730	14.36	705	-734	14.39	0.03	0.38
7.00	756	-776	15.32	756	-781	15.37	0.05	0.35
7.50	737	-804	15.41	735	-807	15.42	0.01	0.30
8.00	838	-845	16.83	819	-857	16.76	-0.07	0.29
8.50	856	-892	17.48	854	-897	17.51	0.03	0.36
9.00	888	-918	18.06	883	-916	17.99	-0.07	0.33
9.50	853	-881	17.34	851	-885	17.36	0.02	0.40
10.00	850	-877	17.27	848	-877	17.25	-0.02	0.38
10.50	811	-841	16.52	811	-842	16.53	0.01	0.40
11.00	885	-906	17.91	886	-915	18.01	0.10	0.39
11.50	814	-851	16.65	809	-852	16.61	-0.04	0.29
12.00	830	-862	16.92	824	-862	16.86	-0.06	0.33
12.50	892	-931	18.23	896	-920	18.16	-0.07	0.39
13.00	960	-998	19.58	957	-1002	19.59	0.01	0.46
13.50	920	-974	18.94	918	-987	19.05	0.11	0.45
14.00	903	-909	18.12	897	-903	18.00	-0.12	0.34
14.50	895	-932	18.27	893	-929	18.22	-0.05	0.46
15.00	1046	-1081	21.27	1066	-1078	21.44	0.17	0.51
15.50	1324	-1353	26.77	1339	-1363	27.02	0.25	0.34
16.00	1568	-1608	31.76	1567	-1606	31.73	-0.03	0.09
16.50	1626	-1691	33.17	1624	-1682	33.06	-0.11	0.12
17.00	1451	-1476	29.27	1460	-1482	29.42	0.15	0.23
17.50	1408	-1434	28.42	1407	-1443	28.50	0.08	0.08

END OF RECORDS

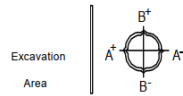
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 10.00 B : 13.50



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-31	-36	0.05	-47	-19	-0.28	-0.33	-5.18
1.50	-126	59	-1.85	-160	68	-2.28	-0.43	-4.85
2.00	-661	585	-12.46	-714	612	-13.26	-0.80	-4.42
2.50	-875	801	-16.76	-948	877	-18.25	-1.49	-3.62
3.00	-973	900	-18.73	-1032	963	-19.95	-1.22	-2.13
3.50	-1054	980	-20.34	-1098	1030	-21.28	-0.94	-0.91
4.00	-1125	1051	-21.76	-1157	1086	-22.43	-0.67	0.03
4.50	-1110	1029	-21.39	-1112	1046	-21.58	-0.19	0.70
5.00	-1027	960	-19.87	-1032	953	-19.85	0.02	0.89
5.50	-959	896	-18.55	-958	897	-18.55	0.00	0.87
6.00	-886	823	-17.09	-884	821	-17.05	0.04	0.87
6.50	-784	725	-15.09	-782	719	-15.01	0.08	0.83
7.00	-698	632	-13.30	-694	632	-13.26	0.04	0.75
7.50	-644	586	-12.30	-629	582	-12.11	0.19	0.71
8.00	-492	414	-9.06	-489	409	-8.96	0.08	0.52
8.50	-421	348	-7.69	-416	345	-7.61	0.08	0.44
9.00	-318	246	-5.64	-315	243	-5.58	0.06	0.36
9.50	-178	106	-2.84	-175	107	-2.82	0.02	0.30
10.00	-69	-3	-0.66	-67	-5	-0.62	0.04	0.28
10.50	7	-105	1.12	7	-73	0.80	-0.32	0.24
11.00	240	-300	5.40	240	-313	5.53	0.13	0.56
11.50	318	-380	6.98	319	-383	7.02	0.04	0.43
12.00	394	-455	8.49	395	-458	8.53	0.04	0.39
12.50	477	-534	10.11	480	-539	10.19	0.08	0.35
13.00	571	-633	12.04	572	-633	12.05	0.01	0.27
13.50	613	-695	13.08	613	-696	13.09	0.01	0.26
14.00	594	-666	12.60	594	-667	12.61	0.01	0.25
14.50	532	-593	11.25	532	-596	11.28	0.03	0.24
15.00	467	-525	9.92	466	-527	9.93	0.01	0.21
15.50	383	-446	8.29	386	-445	8.31	0.02	0.20
16.00	282	-341	6.23	283	-343	6.26	0.03	0.18
16.50	129	-215	3.44	137	-209	3.46	0.02	0.15
17.00	153	-228	3.81	159	-234	3.93	0.12	0.13
17.50	206	-273	4.79	210	-270	4.80	0.01	0.01

END OF RECORDS

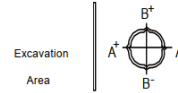
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 10.00 B : 13.50



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-24	-37	0.13	-22	20	-0.42	-0.55	-1.69
1.50	-21	-6	-0.15	-36	-6	-0.30	-0.15	-1.14
2.00	-32	4	-0.36	-9	-18	0.09	0.45	-0.99
2.50	5	-36	0.41	28	-52	0.80	0.39	-1.44
3.00	73	-107	1.80	76	-97	1.73	-0.07	-1.83
3.50	158	-183	3.41	160	-178	3.38	-0.03	-1.76
4.00	256	-280	5.36	256	-278	5.34	-0.02	-1.73
4.50	315	-387	7.02	318	-377	6.95	-0.07	-1.71
5.00	559	-565	11.24	550	-568	11.18	-0.06	-1.64
5.50	595	-617	12.12	592	-609	12.01	-0.11	-1.58
6.00	643	-663	13.06	644	-659	13.03	-0.03	-1.47
6.50	706	-730	14.36	702	-725	14.27	-0.09	-1.44
7.00	756	-776	15.32	753	-778	15.31	-0.01	-1.35
7.50	737	-804	15.41	739	-803	15.42	0.01	-1.34
8.00	838	-845	16.83	831	-842	16.73	-0.10	-1.35
8.50	856	-892	17.48	863	-887	17.50	0.02	-1.25
9.00	888	-918	18.06	889	-915	18.04	-0.02	-1.27
9.50	853	-881	17.34	855	-880	17.35	0.01	-1.25
10.00	850	-877	17.27	849	-873	17.22	-0.05	-1.26
10.50	811	-841	16.52	817	-838	16.55	0.03	-1.21
11.00	885	-906	17.91	891	-899	17.90	-0.01	-1.24
11.50	814	-851	16.65	819	-836	16.55	-0.10	-1.23
12.00	830	-862	16.92	835	-852	16.87	-0.05	-1.13
12.50	892	-931	18.23	897	-918	18.15	-0.08	-1.08
13.00	960	-998	19.58	965	-993	19.58	0.00	-1.00
13.50	920	-974	18.94	921	-957	18.78	-0.16	-1.00
14.00	903	-909	18.12	899	-892	17.91	-0.21	-0.84
14.50	895	-932	18.27	896	-921	18.17	-0.10	-0.63
15.00	1046	-1081	21.27	1052	-1062	21.14	-0.13	-0.53
15.50	1324	-1353	26.77	1321	-1346	26.67	-0.10	-0.40
16.00	1568	-1608	31.76	1569	-1596	31.65	-0.11	-0.30
16.50	1626	-1691	33.17	1641	-1683	33.24	0.07	-0.19
17.00	1451	-1476	29.27	1445	-1463	29.08	-0.19	-0.26
17.50	1408	-1434	28.42	1411	-1424	28.35	-0.07	-0.07

END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการ XT Phayathai

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-1

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : CURRENT # 3

ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

DATE 17-Nov-19 INITIAL READING 3 CURRENT READING 6

DATA SET # 3

6

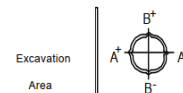
SENSOR # 28399

28399

STD.DEV.

A : 11.80

B : 14.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-31	-36	0.05	-77	-1	-0.76	-0.81	-3.76
1.50	-126	59	-1.85	-202	98	-3.00	-1.15	-2.95
2.00	-661	585	-12.46	-733	676	-14.09	-1.63	-1.80
2.50	-875	801	-16.76	-944	873	-18.17	-1.41	-0.17
3.00	-973	900	-18.73	-1049	974	-20.23	-1.50	1.24
3.50	-1054	980	-20.34	-1116	1047	-21.63	-1.29	2.74
4.00	-1125	1051	-21.76	-1186	1114	-23.00	-1.24	4.03
4.50	-1110	1029	-21.39	-1124	1045	-21.69	-0.30	5.27
5.00	-1027	960	-19.87	-1014	945	-19.59	0.28	5.57
5.50	-959	896	-18.55	-945	882	-18.27	0.28	5.29
6.00	-886	823	-17.09	-867	803	-16.70	0.39	5.01
6.50	-784	725	-15.09	-758	701	-14.59	0.50	4.62
7.00	-698	632	-13.30	-672	603	-12.75	0.55	4.12
7.50	-644	586	-12.30	-600	557	-11.57	0.73	3.57
8.00	-492	414	-9.06	-446	372	-8.18	0.88	2.84
8.50	-421	348	-7.69	-399	333	-7.32	0.37	1.96
9.00	-318	246	-5.64	-303	297	-5.40	0.24	1.59
9.50	-178	106	-2.84	-173	105	-2.78	0.06	1.35
10.00	-69	-3	-0.66	-67	-5	-0.62	0.04	1.29
10.50	7	-105	1.12	8	-82	0.90	-0.22	1.25
11.00	240	-300	5.40	241	-301	5.42	0.02	1.47
11.50	318	-380	6.98	325	-385	7.10	0.12	1.45
12.00	394	-455	8.49	398	-464	8.62	0.13	1.33
12.50	477	-534	10.11	480	-536	10.16	0.05	1.20
13.00	571	-633	12.04	575	-639	12.14	0.10	1.15
13.50	613	-695	13.08	613	-694	13.07	-0.01	1.05
14.00	594	-666	12.60	595	-668	12.63	0.03	1.06
14.50	532	-593	11.25	540	-601	11.41	0.16	1.03
15.00	467	-525	9.92	474	-531	10.05	0.13	0.87
15.50	383	-446	8.29	391	-452	8.43	0.14	0.74
16.00	282	-341	6.23	287	-349	6.36	0.13	0.60
16.50	129	-215	3.44	165	-202	3.67	0.23	0.47
17.00	153	-228	3.81	156	-245	4.01	0.20	0.24
17.50	206	-273	4.79	209	-274	4.83	0.04	0.04

END OF RECORDS

Record By : WC

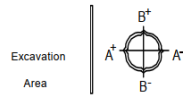
STS Instruments Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 3 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 29-Nov-19
 DATA SET # 3 6
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 11.80 B : 14.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-24	-37	0.13	-153	134	-2.87	-3.00	-6.25
1.50	-21	-6	-0.15	-55	64	-1.19	-1.04	-3.25
2.00	-32	4	-0.36	-22	-16	-0.06	0.30	-2.21
2.50	5	-36	0.41	26	-55	0.81	0.40	-2.51
3.00	73	-107	1.80	79	-105	1.84	0.04	-2.91
3.50	158	-183	3.41	164	-194	3.58	0.17	-2.95
4.00	256	-280	5.36	239	-267	5.06	-0.30	-3.12
4.50	315	-387	7.02	314	-374	6.88	-0.14	-2.82
5.00	559	-565	11.24	555	-557	11.12	-0.12	-2.68
5.50	595	-617	12.12	588	-609	11.97	-0.15	-2.56
6.00	643	-663	13.06	642	-663	13.05	-0.01	-2.41
6.50	706	-730	14.36	702	-728	14.30	-0.06	-2.40
7.00	756	-776	15.32	750	-778	15.28	-0.04	-2.34
7.50	737	-804	15.41	751	-802	15.53	0.12	-2.30
8.00	838	-845	16.83	830	-845	16.75	-0.08	-2.42
8.50	856	-892	17.48	853	-886	17.39	-0.09	-2.34
9.00	888	-918	18.06	876	-915	17.91	-0.15	-2.25
9.50	853	-881	17.34	841	-882	17.23	-0.11	-2.10
10.00	850	-877	17.27	842	-881	17.23	-0.04	-1.99
10.50	811	-841	16.52	808	-836	16.44	-0.08	-1.95
11.00	885	-906	17.91	869	-903	17.72	-0.19	-1.87
11.50	814	-851	16.65	812	-852	16.64	-0.01	-1.68
12.00	830	-862	16.92	823	-854	16.77	-0.15	-1.67
12.50	892	-931	18.23	888	-930	18.18	-0.05	-1.52
13.00	960	-998	19.58	951	-1002	19.53	-0.05	-1.47
13.50	920	-974	18.94	917	-976	18.99	-0.01	-1.42
14.00	903	-909	18.12	861	-898	17.59	-0.53	-1.41
14.50	895	-932	18.27	882	-933	18.15	-0.12	-0.88
15.00	1046	-1081	21.27	1029	-1067	20.96	-0.31	-0.76
15.50	1324	-1353	26.77	1318	-1342	26.60	-0.17	-0.45
16.00	1568	-1608	31.76	1556	-1597	31.53	-0.23	-0.28
16.50	1626	-1691	33.17	1659	-1680	33.39	0.22	-0.05
17.00	1451	-1476	29.27	1438	-1477	29.15	-0.12	-0.27
17.50	1408	-1434	28.42	1395	-1432	28.27	-0.15	-0.15

END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

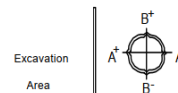
TUBE NO. : I-1

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : CURRENT # 4

ACTIVITY : Final Depth

	INITIAL READING	CURRENT READING
DATE	17-Nov-19	09-Dec-19
DATA SET #	3	7
SENSOR #	28399	28399
STD.DEV.	A : 9.70	B : 14.90



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-31	-36	0.05	-101	26	-1.27	-1.32	-3.81
1.50	-126	59	-1.85	-212	115	-3.27	-1.42	-2.49
2.00	-661	585	-12.46	-731	678	-14.09	-1.63	-1.07
2.50	-875	801	-16.76	-935	862	-17.97	-1.21	0.56
3.00	-973	900	-18.73	-1056	981	-20.37	-1.64	1.77
3.50	-1054	980	-20.34	-1153	1078	-22.31	-1.97	3.41
4.00	-1125	1051	-21.76	-1270	1192	-24.62	-2.86	5.38
4.50	-1110	1029	-21.39	-1229	1143	-23.72	-2.33	8.24
5.00	-1027	960	-19.87	-1120	1045	-21.65	-1.78	10.57
5.50	-959	896	-18.55	-1011	940	-19.51	-0.96	12.35
6.00	-886	823	-17.09	-899	826	-17.25	-0.16	13.31
6.50	-784	725	-15.09	-755	680	-14.35	0.74	13.47
7.00	-698	632	-13.30	-593	520	-11.13	2.17	12.73
7.50	-644	586	-12.30	-529	459	-9.88	2.42	10.56
8.00	-492	414	-9.06	-336	262	-5.98	3.08	8.14
8.50	-421	348	-7.69	-338	261	-5.99	1.70	5.06
9.00	-318	246	-5.64	-268	196	-4.64	1.00	3.36
9.50	-178	106	-2.84	-153	77	-2.30	0.54	2.36
10.00	-69	-3	-0.66	-60	-12	-0.48	0.18	1.82
10.50	7	-105	1.12	8	-114	1.22	0.10	1.64
11.00	240	-300	5.40	238	-298	5.36	-0.04	1.54
11.50	318	-380	6.98	323	-387	7.10	0.12	1.58
12.00	394	-455	8.49	399	-468	8.67	0.18	1.46
12.50	477	-534	10.11	481	-545	10.26	0.15	1.28
13.00	571	-633	12.04	575	-643	12.18	0.14	1.13
13.50	613	-695	13.08	620	-696	13.16	0.08	0.99
14.00	594	-666	12.60	595	-671	12.66	0.06	0.91
14.50	532	-593	11.25	537	-607	11.44	0.19	0.85
15.00	467	-525	9.92	463	-532	9.95	0.03	0.66
15.50	383	-446	8.29	389	-452	8.41	0.12	0.63
16.00	282	-341	6.23	285	-356	6.41	0.18	0.51
16.50	129	-215	3.44	137	-214	3.51	0.07	0.33
17.00	153	-228	3.81	157	-247	4.04	0.23	0.26
17.50	206	-273	4.79	208	-274	4.82	0.03	0.03

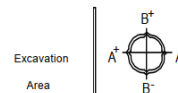
END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-1 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 4 ACTIVITY : Final Depth
 DATE 17-Nov-19 INITIAL READING CURRENT READING 09-Dec-19
 DATA SET # 3 7
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 9.70 B : 14.90



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-24	-37	0.13	-108	52	-1.60	-1.73	-5.62
1.50	-21	-6	-0.15	-102	67	-1.69	-1.54	-3.89
2.00	-32	4	-0.36	-13	-39	0.26	0.62	-2.35
2.50	5	-36	0.41	28	-73	1.01	0.60	-2.97
3.00	73	-107	1.80	84	-117	2.01	0.21	-3.57
3.50	158	-183	3.41	142	-192	3.34	-0.07	-3.78
4.00	256	-280	5.36	230	-262	4.92	-0.44	-3.71
4.50	315	-387	7.02	312	-381	6.93	-0.09	-3.27
5.00	559	-565	11.24	553	-590	11.43	0.19	-3.18
5.50	595	-617	12.12	574	-612	11.86	-0.26	-3.37
6.00	643	-663	13.06	622	-661	12.83	-0.23	-3.11
6.50	706	-730	14.36	691	-727	14.18	-0.18	-2.88
7.00	756	-776	15.32	735	-771	15.06	-0.26	-2.70
7.50	737	-804	15.41	726	-804	15.30	-0.11	-2.44
8.00	838	-845	16.83	821	-845	16.66	-0.17	-2.33
8.50	856	-892	17.48	851	-903	17.54	0.06	-2.16
9.00	888	-918	18.06	872	-922	17.94	-0.12	-2.22
9.50	853	-881	17.34	839	-886	17.25	-0.09	-2.10
10.00	850	-877	17.27	829	-882	17.11	-0.16	-2.01
10.50	811	-841	16.52	806	-851	16.57	0.05	-1.85
11.00	885	-906	17.91	876	-901	17.77	-0.14	-1.90
11.50	814	-851	16.65	803	-853	16.56	-0.09	-1.76
12.00	830	-862	16.92	820	-857	16.77	-0.15	-1.67
12.50	892	-931	18.23	884	-928	18.12	-0.11	-1.52
13.00	960	-998	19.58	953	-1000	19.53	-0.05	-1.41
13.50	920	-974	18.94	911	-984	18.95	0.01	-1.36
14.00	903	-909	18.12	893	-895	17.88	-0.24	-1.37
14.50	895	-932	18.27	883	-916	17.99	-0.28	-1.13
15.00	1046	-1081	21.27	1030	-1065	20.95	-0.32	-0.85
15.50	1324	-1353	26.77	1304	-1337	26.41	-0.36	-0.53
16.00	1568	-1608	31.76	1551	-1585	31.36	-0.40	-0.17
16.50	1626	-1691	33.17	1639	-1703	33.42	0.25	0.23
17.00	1451	-1476	29.27	1446	-1469	29.15	-0.12	-0.02
17.50	1408	-1434	28.42	1400	-1452	28.52	0.10	0.10

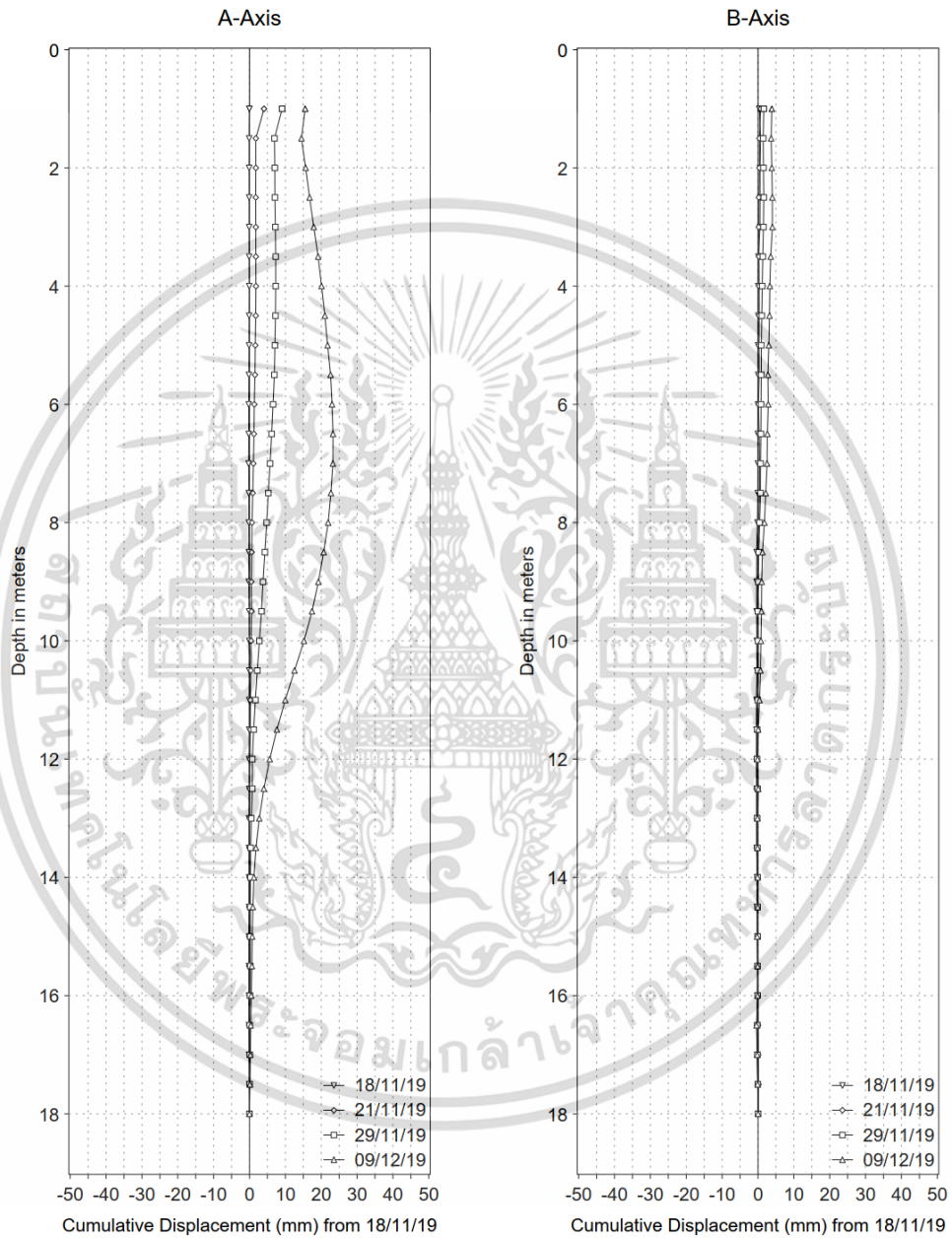
END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) I-2

โครงการ XT Phayathai
Inclinometer Tube No.I-2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-2

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

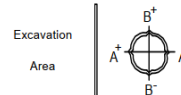
INITIAL READING

DATE : 18-Nov-19

DATA SET # : 1

SENSOR # : 28399

STD.DEV. : A: 4.80 B: 12.00



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-264	186	-4.50	-475.19	-326	309	-6.35	-120.17
1.50	-471	393	-8.64	-470.69	-173	126	-2.99	-113.82
2.00	-698	625	-13.23	-462.05	-67	34	-1.01	-110.83
2.50	-785	713	-14.98	-448.82	-36	0	-0.36	-109.82
3.00	-892	827	-17.19	-433.84	-97	97	-1.94	-109.46
3.50	-980	916	-18.96	-416.65	-285	234	-5.19	-107.52
4.00	-940	873	-18.13	-397.69	-312	276	-5.88	-102.33
4.50	-787	724	-15.11	-379.56	-356	317	-6.73	-96.45
5.00	-494	424	-9.18	-364.45	-333	292	-6.25	-89.72
5.50	-125	59	-1.84	-355.27	-154	110	-2.64	-83.47
6.00	-45	-18	-0.27	-353.43	-67	44	-1.11	-80.83
6.50	-366	304	-6.70	-353.16	-141	103	-2.44	-79.72
7.00	-752	689	-14.41	-346.46	-226	186	-4.12	-77.28
7.50	-1190	1132	-23.22	-332.05	-329	274	-6.03	-73.16
8.00	-1420	1361	-27.81	-308.83	-398	343	-7.41	-67.13
8.50	-1346	1284	-26.30	-281.02	-433	385	-8.18	-59.72
9.00	-1210	1148	-23.58	-254.72	-390	362	-7.52	-51.54
9.50	-853	787	-16.40	-231.14	-212	161	-3.73	-44.02
10.00	-802	736	-15.38	-214.74	-123	82	-2.05	-40.29
10.50	-808	747	-15.55	-199.36	-81	35	-1.16	-38.24
11.00	-808	741	-15.49	-183.81	-46	7	-0.53	-37.08
11.50	-793	727	-15.20	-168.32	13	-50	0.63	-36.55
12.00	-748	682	-14.30	-153.12	61	-67	1.28	-37.18
12.50	-725	659	-13.84	-138.82	78	-104	1.82	-38.46
13.00	-689	621	-13.10	-124.98	-3	-34	0.31	-40.28
13.50	-638	577	-12.15	-111.88	-33	-3	-0.30	-40.59
14.00	-624	560	-11.84	-99.73	-94	62	-1.56	-40.29
14.50	-569	500	-10.69	-87.89	-174	145	-3.19	-38.73
15.00	-520	457	-9.77	-77.20	-229	199	-4.28	-35.54
15.50	-619	555	-11.74	-67.43	-278	237	-5.15	-31.26
16.00	-637	574	-12.11	-55.69	-350	303	-6.53	-26.11
16.50	-719	648	-13.67	-43.58	-385	353	-7.38	-19.58
17.00	-758	700	-14.58	-29.91	-335	308	-6.43	-12.20
17.50	-802	731	-15.33	-15.33	-307	270	-5.77	-5.77

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-2

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

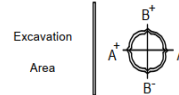
INITIAL READING

DATE : 18-Nov-19

DATA SET # : 2

SENSOR # : 28399

STD.DEV. A : 4.50 B : 10.20



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-265	192	-4.57	-475.62	-340	304	-6.44	-120.20
1.50	-473	396	-8.69	-471.05	-177	141	-3.18	-113.76
2.00	-695	626	-13.21	-462.36	-66	40	-1.06	-110.58
2.50	-786	715	-15.01	-449.15	-33	-6	-0.27	-109.52
3.00	-893	825	-17.18	-434.14	-123	84	-2.07	-109.25
3.50	-982	917	-18.99	-416.96	-287	237	-5.24	-107.18
4.00	-944	877	-18.21	-397.97	-307	274	-5.81	-101.94
4.50	-790	728	-15.18	-379.76	-354	319	-6.73	-96.13
5.00	-492	417	-9.09	-364.58	-324	288	-6.12	-89.40
5.50	-126	60	-1.86	-355.49	-142	117	-2.59	-83.28
6.00	-46	-20	-0.26	-353.63	-67	46	-1.13	-80.69
6.50	-370	306	-6.76	-353.37	-146	107	-2.53	-79.56
7.00	-753	688	-14.41	-346.61	-224	191	-4.15	-77.03
7.50	-1203	1129	-23.32	-332.20	-322	302	-6.24	-72.88
8.00	-1423	1361	-27.84	-308.88	-399	358	-7.57	-66.64
8.50	-1346	1285	-26.31	-281.04	-427	382	-8.09	-59.07
9.00	-1202	1147	-23.49	-254.73	-364	359	-7.23	-50.98
9.50	-848	788	-16.36	-231.24	-212	163	-3.75	-43.75
10.00	-803	738	-15.41	-214.88	-119	89	-2.08	-40.00
10.50	-811	748	-15.59	-199.47	-78	38	-1.16	-37.92
11.00	-810	742	-15.52	-183.88	-38	8	-0.46	-36.76
11.50	-794	726	-15.20	-168.38	12	-50	0.62	-36.30
12.00	-747	681	-14.28	-153.16	59	-69	1.28	-36.92
12.50	-723	660	-13.83	-138.88	88	-105	1.93	-38.20
13.00	-686	622	-13.08	-125.05	7	-34	0.41	-40.13
13.50	-640	571	-12.11	-111.97	-25	-4	-0.21	-40.54
14.00	-623	560	-11.83	-99.86	-89	62	-1.51	-40.33
14.50	-568	501	-10.69	-88.03	-167	149	-3.16	-38.82
15.00	-523	457	-9.80	-77.34	-223	201	-4.24	-35.66
15.50	-623	557	-11.80	-67.54	-278	244	-5.22	-31.42
16.00	-639	574	-12.13	-55.74	-351	314	-6.65	-26.20
16.50	-719	650	-13.69	-43.61	-381	356	-7.37	-19.55
17.00	-758	700	-14.58	-29.92	-334	316	-6.50	-12.18
17.50	-801	733	-15.34	-15.34	-298	270	-5.68	-5.68

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-2

DEPTH : 17.50 M.

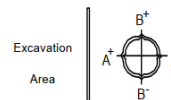
DESCRIPTION : INITIAL READING

INITIAL READING

DATE : 18-Nov-19

DATA SET # : Average

SENSOR # : 28399



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-265	189	-4.54	-475.41	-333	307	-6.40	-120.19
1.50	-472	395	-8.67	-470.87	-175	134	-3.09	-113.79
2.00	-697	626	-13.22	-462.21	-67	37	-1.04	-110.71
2.50	-786	714	-15.00	-448.99	-35	-3	-0.32	-109.67
3.00	-893	826	-17.19	-433.99	-110	91	-2.01	-109.36
3.50	-981	917	-18.98	-416.81	-286	236	-5.22	-107.35
4.00	-942	875	-18.17	-397.83	-310	275	-5.85	-102.14
4.50	-789	726	-15.15	-379.66	-355	318	-6.73	-96.29
5.00	-493	421	-9.14	-364.52	-329	290	-6.19	-89.56
5.50	-126	60	-1.85	-355.38	-148	114	-2.62	-83.38
6.00	-46	-19	-0.27	-353.53	-67	45	-1.12	-80.76
6.50	-368	305	-6.73	-353.27	-144	105	-2.49	-79.64
7.00	-753	689	-14.41	-346.54	-225	189	-4.14	-77.16
7.50	-1197	1131	-23.27	-332.13	-326	288	-6.14	-73.02
8.00	-1422	1361	-27.83	-308.86	-399	351	-7.49	-66.89
8.50	-1346	1285	-26.31	-281.03	-430	384	-8.14	-59.40
9.00	-1206	1148	-23.54	-254.73	-377	361	-7.38	-51.26
9.50	-851	788	-16.38	-231.19	-212	162	-3.74	-43.89
10.00	-803	737	-15.40	-214.81	-121	86	-2.07	-40.15
10.50	-810	748	-15.57	-199.42	-80	37	-1.16	-38.08
11.00	-809	742	-15.51	-183.85	-42	8	-0.50	-36.92
11.50	-794	727	-15.20	-168.34	13	-50	0.63	-36.43
12.00	-748	682	-14.29	-153.14	60	-68	1.28	-37.05
12.50	-724	660	-13.84	-138.85	83	-105	1.88	-38.33
13.00	-688	622	-13.09	-125.02	2	-34	0.36	-40.21
13.50	-639	574	-12.13	-111.93	-29	-4	-0.26	-40.57
14.00	-624	560	-11.84	-99.80	-92	62	-1.54	-40.31
14.50	-569	501	-10.69	-87.96	-171	147	-3.18	-38.78
15.00	-522	457	-9.79	-77.27	-226	200	-4.26	-35.60
15.50	-621	556	-11.77	-67.49	-278	241	-5.19	-31.34
16.00	-638	574	-12.12	-55.72	-351	309	-6.59	-26.16
16.50	-719	649	-13.68	-43.60	-383	355	-7.38	-19.57
17.00	-758	700	-14.58	-29.92	-335	312	-6.47	-12.19
17.50	-802	732	-15.34	-15.34	-303	270	-5.73	-5.73

END OF RECORDS

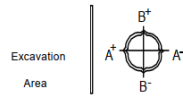
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 4.10 B : 9.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-265	189	-4.54	-260	187	-4.47	0.07	-0.03
1.50	-472	395	-8.67	-473	395	-8.68	-0.01	-0.10
2.00	-697	626	-13.23	-696	627	-13.23	0.00	-0.09
2.50	-786	714	-15.00	-786	715	-15.01	-0.01	-0.09
3.00	-893	826	-17.19	-892	827	-17.19	0.00	-0.08
3.50	-981	917	-18.98	-982	918	-19.00	-0.02	-0.08
4.00	-942	875	-18.17	-941	873	-18.14	0.03	-0.06
4.50	-789	726	-15.15	-786	725	-15.11	0.04	-0.09
5.00	-493	421	-9.14	-489	424	-9.13	0.01	-0.13
5.50	-126	60	-1.86	-123	55	-1.78	0.08	-0.14
6.00	-46	-19	-0.27	-46	-20	-0.26	0.01	-0.22
6.50	-368	305	-6.73	-369	302	-6.71	0.02	-0.23
7.00	-753	689	-14.42	-759	691	-14.50	-0.08	-0.25
7.50	-1197	1131	-23.28	-1196	1132	-23.28	0.00	-0.17
8.00	-1422	1361	-27.83	-1423	1361	-27.84	-0.01	-0.17
8.50	-1346	1285	-26.31	-1346	1283	-26.29	0.02	-0.16
9.00	-1206	1148	-23.54	-1216	1147	-23.63	-0.09	-0.18
9.50	-851	788	-16.39	-851	792	-16.43	-0.04	-0.09
10.00	-803	737	-15.40	-801	739	-15.40	0.00	-0.05
10.50	-810	748	-15.58	-810	748	-15.58	0.00	-0.05
11.00	-809	742	-15.51	-808	743	-15.51	0.00	-0.05
11.50	-794	727	-15.21	-792	726	-15.18	0.03	-0.05
12.00	-748	682	-14.30	-745	683	-14.28	0.02	-0.08
12.50	-724	660	-13.84	-722	660	-13.82	0.02	-0.10
13.00	-688	622	-13.10	-686	623	-13.09	0.01	-0.12
13.50	-639	574	-12.13	-639	574	-12.13	0.00	-0.13
14.00	-624	560	-11.84	-624	560	-11.84	0.00	-0.13
14.50	-569	501	-10.70	-565	502	-10.67	0.03	-0.13
15.00	-522	457	-9.79	-519	460	-9.79	0.00	-0.16
15.50	-621	556	-11.77	-620	557	-11.77	0.00	-0.16
16.00	-638	574	-12.12	-638	574	-12.12	0.00	-0.16
16.50	-719	649	-13.68	-722	650	-13.72	-0.04	-0.16
17.00	-758	700	-14.58	-762	702	-14.64	-0.06	-0.12
17.50	-802	732	-15.34	-804	736	-15.40	-0.06	-0.06

END OF RECORDS

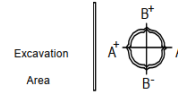
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 4.10 B : 9.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-333	307	-6.40	-355	322	-6.77	-0.37	0.36
1.50	-175	134	-3.09	-161	132	-2.93	0.16	0.73
2.00	-67	37	-1.04	-65	39	-1.04	0.00	0.57
2.50	-35	-3	-0.32	-30	0	-0.30	0.02	0.57
3.00	-110	91	-2.01	-95	62	-1.57	0.44	0.55
3.50	-286	236	-5.22	-278	239	-5.17	0.05	0.11
4.00	-310	275	-5.85	-306	280	-5.86	-0.01	0.06
4.50	-355	318	-6.73	-349	318	-6.67	0.06	0.07
5.00	-329	290	-6.19	-320	303	-6.23	-0.04	0.01
5.50	-148	114	-2.62	-142	112	-2.54	0.08	0.05
6.00	-67	45	-1.12	-65	46	-1.11	0.01	-0.03
6.50	-144	105	-2.49	-143	104	-2.47	0.02	-0.04
7.00	-225	189	-4.14	-221	192	-4.13	0.01	-0.06
7.50	-326	288	-6.14	-313	290	-6.03	0.11	-0.07
8.00	-399	351	-7.50	-379	351	-7.30	0.20	-0.18
8.50	-430	384	-8.14	-421	392	-8.13	0.01	-0.38
9.00	-377	361	-7.38	-370	368	-7.38	0.00	-0.39
9.50	-212	162	-3.74	-211	166	-3.77	-0.03	-0.39
10.00	-121	86	-2.07	-118	93	-2.11	-0.04	-0.36
10.50	-80	37	-1.17	-67	38	-1.05	0.12	-0.32
11.00	-42	8	-0.50	-35	14	-0.49	0.01	-0.44
11.50	13	-50	0.63	7	-45	0.52	-0.11	-0.45
12.00	60	-68	1.28	58	-67	1.25	-0.03	-0.34
12.50	83	-105	1.88	89	-99	1.88	0.00	-0.31
13.00	2	-34	0.36	10	-30	0.40	0.04	-0.31
13.50	-29	-4	-0.25	-25	10	-0.35	-0.10	-0.35
14.00	-92	62	-1.54	-84	69	-1.53	0.01	-0.25
14.50	-171	147	-3.18	-174	152	-3.26	-0.08	-0.26
15.00	-226	200	-4.26	-227	202	-4.29	-0.03	-0.18
15.50	-278	241	-5.19	-274	244	-5.18	0.01	-0.15
16.00	-351	309	-6.60	-345	318	-6.63	-0.03	-0.16
16.50	-383	355	-7.38	-380	356	-7.36	0.02	-0.13
17.00	-335	312	-6.47	-341	312	-6.53	-0.06	-0.15
17.50	-303	270	-5.73	-313	269	-5.82	-0.09	-0.09

END OF RECORDS

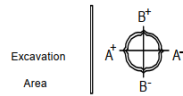
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 4.20 B : 11.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-265	189	-4.54	-150	79	-2.29	2.25	4.04
1.50	-472	395	-8.67	-464	401	-8.65	0.02	1.79
2.00	-697	626	-13.23	-695	626	-13.21	0.02	1.77
2.50	-786	714	-15.00	-786	717	-15.03	-0.03	1.75
3.00	-893	826	-17.19	-892	827	-17.19	0.00	1.78
3.50	-981	917	-18.98	-982	918	-19.00	-0.02	1.78
4.00	-942	875	-18.17	-939	872	-18.11	0.06	1.80
4.50	-789	726	-15.15	-784	719	-15.03	0.12	1.74
5.00	-493	421	-9.14	-480	424	-9.04	0.10	1.62
5.50	-126	60	-1.86	-117	51	-1.68	0.18	1.52
6.00	-46	-19	-0.27	-41	-22	-0.19	0.08	1.34
6.50	-368	305	-6.73	-363	295	-6.58	0.15	1.26
7.00	-753	689	-14.42	-746	676	-14.22	0.20	1.11
7.50	-1197	1131	-23.28	-1183	1124	-23.07	0.21	0.91
8.00	-1422	1361	-27.83	-1414	1359	-27.73	0.10	0.70
8.50	-1346	1285	-26.31	-1342	1280	-26.22	0.09	0.60
9.00	-1206	1148	-23.54	-1215	1146	-23.61	-0.07	0.51
9.50	-851	788	-16.39	-845	782	-16.27	0.12	0.58
10.00	-803	737	-15.40	-794	736	-15.30	0.10	0.46
10.50	-810	748	-15.58	-806	745	-15.51	0.07	0.36
11.00	-809	742	-15.51	-804	739	-15.43	0.08	0.29
11.50	-794	727	-15.21	-787	725	-15.12	0.09	0.21
12.00	-748	682	-14.30	-745	681	-14.26	0.04	0.12
12.50	-724	660	-13.84	-719	658	-13.77	0.07	0.08
13.00	-688	622	-13.10	-686	619	-13.05	0.05	0.01
13.50	-639	574	-12.13	-641	572	-12.13	0.00	-0.04
14.00	-624	560	-11.84	-624	559	-11.83	0.01	-0.04
14.50	-569	501	-10.70	-567	499	-10.66	0.04	-0.05
15.00	-522	457	-9.79	-521	458	-9.79	0.00	-0.09
15.50	-621	556	-11.77	-618	558	-11.76	0.01	-0.09
16.00	-638	574	-12.12	-637	577	-12.14	-0.02	-0.10
16.50	-719	649	-13.68	-720	652	-13.72	-0.04	-0.08
17.00	-758	700	-14.58	-757	702	-14.59	-0.01	-0.04
17.50	-802	732	-15.34	-801	736	-15.37	-0.03	-0.03

END OF RECORDS

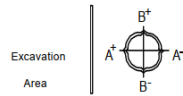
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 4.20 B : 11.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-333	307	-6.40	-329	277	-6.06	0.34	0.71
1.50	-175	134	-3.09	-172	138	-3.10	-0.01	0.37
2.00	-67	37	-1.04	-66	22	-0.88	0.16	0.38
2.50	-35	-3	-0.32	-37	-7	-0.30	0.02	0.22
3.00	-110	91	-2.01	-119	88	-2.07	-0.06	0.20
3.50	-286	236	-5.22	-288	240	-5.28	-0.06	0.26
4.00	-310	275	-5.85	-315	269	-5.84	0.01	0.32
4.50	-355	318	-6.73	-358	313	-6.71	0.02	0.31
5.00	-329	290	-6.19	-322	299	-6.21	-0.02	0.29
5.50	-148	114	-2.62	-136	106	-2.42	0.20	0.31
6.00	-67	45	-1.12	-81	51	-1.32	-0.20	0.11
6.50	-144	105	-2.49	-151	107	-2.58	-0.09	0.31
7.00	-225	189	-4.14	-232	181	-4.13	0.01	0.40
7.50	-326	288	-6.14	-320	276	-5.96	0.18	0.39
8.00	-399	351	-7.50	-387	342	-7.29	0.21	0.21
8.50	-430	384	-8.14	-430	379	-8.09	0.05	0.00
9.00	-377	361	-7.38	-377	352	-7.29	0.09	-0.05
9.50	-212	162	-3.74	-203	174	-3.77	-0.03	-0.14
10.00	-121	86	-2.07	-118	90	-2.08	-0.01	-0.11
10.50	-80	37	-1.17	-68	40	-1.08	0.09	-0.10
11.00	-42	8	-0.50	-34	5	-0.39	0.11	-0.19
11.50	13	-50	0.63	22	-55	0.77	0.14	-0.30
12.00	60	-68	1.28	61	-65	1.26	-0.02	-0.44
12.50	83	-105	1.88	83	-104	1.87	-0.01	-0.42
13.00	2	-34	0.36	6	-26	0.32	-0.04	-0.41
13.50	-29	-4	-0.25	-33	10	-0.49	-0.18	-0.37
14.00	-92	62	-1.54	-88	68	-1.56	-0.02	-0.19
14.50	-171	147	-3.18	-174	147	-3.21	-0.03	-0.17
15.00	-226	200	-4.26	-228	203	-4.31	-0.05	-0.14
15.50	-278	241	-5.19	-279	247	-5.26	-0.07	-0.09
16.00	-351	309	-6.60	-351	316	-6.67	-0.07	-0.02
16.50	-383	355	-7.38	-387	357	-7.44	-0.06	0.05
17.00	-335	312	-6.47	-339	312	-6.51	-0.04	0.11
17.50	-303	270	-5.73	-287	271	-5.58	0.15	0.15

END OF RECORDS

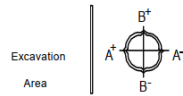
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 3 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 29-Nov-19
 DATA SET # 3 6
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 6.10 B : 12.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-265	189	-4.54	-159	85	-2.44	2.10	9.07
1.50	-472	395	-8.67	-474	402	-8.76	-0.09	6.97
2.00	-697	626	-13.23	-701	626	-13.27	-0.04	7.06
2.50	-786	714	-15.00	-793	718	-15.11	-0.11	7.10
3.00	-893	826	-17.19	-899	829	-17.28	-0.09	7.21
3.50	-981	917	-18.98	-984	914	-18.98	0.00	7.30
4.00	-942	875	-18.17	-943	869	-18.12	0.05	7.30
4.50	-789	726	-15.15	-785	713	-14.98	0.17	7.25
5.00	-493	421	-9.14	-485	416	-9.01	0.13	7.08
5.50	-126	60	-1.86	-110	37	-1.47	0.39	6.95
6.00	-46	-19	-0.27	-28	-40	0.12	0.39	6.56
6.50	-368	305	-6.73	-349	280	-6.29	0.44	6.17
7.00	-753	689	-14.42	-730	663	-13.93	0.49	5.73
7.50	-1197	1131	-23.28	-1178	1104	-22.82	0.46	5.24
8.00	-1422	1361	-27.83	-1398	1336	-27.34	0.49	4.78
8.50	-1346	1285	-26.31	-1325	1255	-25.80	0.51	4.29
9.00	-1206	1148	-23.54	-1191	1120	-23.11	0.43	3.78
9.50	-851	788	-16.39	-823	757	-15.80	0.59	3.35
10.00	-803	737	-15.40	-774	707	-14.81	0.59	2.76
10.50	-810	748	-15.58	-787	719	-15.06	0.52	2.17
11.00	-809	742	-15.51	-786	717	-15.03	0.48	1.65
11.50	-794	727	-15.21	-778	706	-14.84	0.37	1.17
12.00	-748	682	-14.30	-764	666	-14.30	0.00	0.80
12.50	-724	660	-13.84	-712	644	-13.56	0.28	0.80
13.00	-688	622	-13.10	-681	612	-12.93	0.17	0.52
13.50	-639	574	-12.13	-637	568	-12.05	0.08	0.35
14.00	-624	560	-11.84	-622	557	-11.79	0.05	0.27
14.50	-569	501	-10.70	-569	501	-10.70	0.00	0.22
15.00	-522	457	-9.79	-524	458	-9.82	-0.03	0.22
15.50	-621	556	-11.77	-617	549	-11.66	0.11	0.25
16.00	-638	574	-12.12	-636	571	-12.07	0.05	0.14
16.50	-719	649	-13.68	-717	651	-13.68	0.00	0.09
17.00	-758	700	-14.58	-757	699	-14.56	0.02	0.09
17.50	-802	732	-15.34	-796	731	-15.27	0.07	0.07

END OF RECORDS

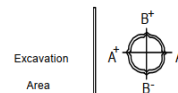
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 3 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 18-Nov-19 29-Nov-19
 DATA SET # 3 6
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 6.10 B : 12.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-333	307	-6.40	-331	294	-6.25	0.15	1.60
1.50	-175	134	-3.09	-179	138	-3.17	-0.08	1.45
2.00	-67	37	-1.04	-74	39	-1.13	-0.09	1.53
2.50	-35	-3	-0.32	-34	-11	-0.23	0.09	1.62
3.00	-110	91	-2.01	-101	80	-1.81	0.20	1.53
3.50	-286	236	-5.22	-281	226	-5.07	0.15	1.33
4.00	-310	275	-5.85	-306	266	-5.72	0.13	1.18
4.50	-355	318	-6.73	-354	309	-6.63	0.10	1.05
5.00	-329	290	-6.19	-321	292	-6.13	0.06	0.95
5.50	-148	114	-2.62	-145	111	-2.56	0.06	0.89
6.00	-67	45	-1.12	-57	54	-1.11	0.01	0.83
6.50	-144	105	-2.49	-143	95	-2.38	0.11	0.82
7.00	-225	189	-4.14	-226	186	-4.12	0.02	0.71
7.50	-326	288	-6.14	-318	272	-5.90	0.24	0.69
8.00	-399	351	-7.50	-383	341	-7.24	0.26	0.45
8.50	-430	384	-8.14	-417	386	-8.03	0.11	0.19
9.00	-377	361	-7.38	-361	363	-7.24	0.14	0.08
9.50	-212	162	-3.74	-205	176	-3.81	-0.07	-0.06
10.00	-121	86	-2.07	-118	91	-2.09	-0.02	0.01
10.50	-80	37	-1.17	-82	43	-1.05	0.12	0.03
11.00	-42	8	-0.50	-29	8	-0.37	0.13	-0.09
11.50	13	-50	0.63	16	-51	0.67	0.04	-0.22
12.00	60	-68	1.28	51	-62	1.13	-0.15	-0.26
12.50	83	-105	1.88	87	-114	2.01	0.13	-0.11
13.00	2	-34	0.36	6	-22	0.28	-0.08	-0.24
13.50	-29	-4	-0.25	-26	6	-0.32	-0.07	-0.16
14.00	-92	62	-1.54	-91	61	-1.52	0.02	-0.09
14.50	-171	147	-3.18	-176	146	-3.22	-0.04	-0.11
15.00	-226	200	-4.26	-229	189	-4.18	0.08	-0.07
15.50	-278	241	-5.19	-277	246	-5.23	-0.04	-0.15
16.00	-351	309	-6.60	-345	304	-6.49	0.11	-0.11
16.50	-383	355	-7.38	-387	357	-7.44	-0.06	-0.22
17.00	-335	312	-6.47	-346	312	-6.58	-0.11	-0.16
17.50	-303	270	-5.73	-308	270	-5.78	-0.05	-0.05

END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

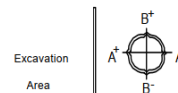
TUBE NO. : I-2

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : CURRENT # 4

ACTIVITY : Final Depth

	INITIAL READING	CURRENT READING
DATE	18-Nov-19	09-Dec-19
DATA SET #	3	7
SENSOR #	28399	28399
STD.DEV.	A : 4.70	B : 13.60



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-265	189	-4.54	-215	137	-3.52	1.02	15.52
1.50	-472	395	-8.67	-530	453	-9.83	-1.16	14.50
2.00	-697	626	-13.23	-753	679	-14.32	-1.09	15.66
2.50	-786	714	-15.00	-848	771	-16.19	-1.19	16.75
3.00	-893	826	-17.19	-959	880	-18.39	-1.20	17.94
3.50	-981	917	-18.98	-1034	961	-19.95	-0.97	19.14
4.00	-942	875	-18.17	-993	914	-19.07	-0.90	20.11
4.50	-789	726	-15.15	-833	761	-15.94	-0.79	21.01
5.00	-493	421	-9.14	-541	456	-9.97	-0.83	21.80
5.50	-126	60	-1.86	-151	73	-2.24	-0.38	22.63
6.00	-46	-19	-0.27	-67	-12	-0.55	-0.28	23.01
6.50	-368	305	-6.73	-372	298	-6.70	0.03	23.29
7.00	-753	689	-14.42	-728	659	-13.87	0.55	23.26
7.50	-1197	1131	-23.28	-1164	1089	-22.53	0.75	22.71
8.00	-1422	1361	-27.83	-1361	1295	-26.56	1.27	21.96
8.50	-1346	1285	-26.31	-1276	1206	-24.82	1.49	20.69
9.00	-1206	1148	-23.54	-1123	1053	-21.76	1.78	19.20
9.50	-851	788	-16.39	-741	674	-14.15	2.24	17.42
10.00	-803	737	-15.40	-671	605	-12.76	2.64	15.18
10.50	-810	748	-15.58	-687	614	-13.01	2.57	12.54
11.00	-809	742	-15.51	-697	622	-13.19	2.32	9.97
11.50	-794	727	-15.21	-698	622	-13.20	2.01	7.65
12.00	-748	682	-14.30	-670	599	-12.69	1.61	5.64
12.50	-724	660	-13.84	-661	593	-12.54	1.30	4.03
13.00	-688	622	-13.10	-644	574	-12.18	0.92	2.73
13.50	-639	574	-12.13	-614	543	-11.57	0.56	1.81
14.00	-624	560	-11.84	-613	542	-11.55	0.29	1.25
14.50	-569	501	-10.70	-562	489	-10.51	0.19	0.96
15.00	-522	457	-9.79	-522	449	-9.71	0.08	0.77
15.50	-621	556	-11.77	-613	543	-11.56	0.21	0.69
16.00	-638	574	-12.12	-635	566	-12.01	0.11	0.48
16.50	-719	649	-13.68	-715	641	-13.56	0.12	0.37
17.00	-758	700	-14.58	-753	692	-14.45	0.13	0.25
17.50	-802	732	-15.34	-796	726	-15.22	0.12	0.12

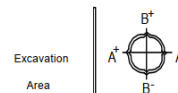
END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-2 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 4 ACTIVITY : Final Depth
 DATE 18-Nov-19 09-Dec-19
 DATA SET # 3 7
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 4.70 B : 13.60



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	-333	307	-6.40	-348	275	-6.23	0.17	3.84
1.50	-175	134	-3.09	-198	130	-3.28	-0.19	3.67
2.00	-67	37	-1.04	-85	32	-1.17	-0.13	3.86
2.50	-35	-3	-0.32	-45	-12	-0.33	-0.01	3.99
3.00	-110	91	-2.01	-106	48	-1.54	0.47	4.00
3.50	-286	236	-5.22	-273	226	-4.99	0.23	3.53
4.00	-310	275	-5.85	-317	258	-5.75	0.10	3.30
4.50	-355	318	-6.73	-354	301	-6.55	0.18	3.20
5.00	-329	290	-6.19	-319	277	-5.96	0.23	3.02
5.50	-148	114	-2.62	-164	106	-2.70	-0.08	2.79
6.00	-67	45	-1.12	-59	29	-0.88	0.24	2.87
6.50	-144	105	-2.49	-146	94	-2.40	0.09	2.63
7.00	-225	189	-4.14	-220	156	-3.76	0.38	2.54
7.50	-326	288	-6.14	-319	259	-5.78	0.36	2.16
8.00	-399	351	-7.50	-373	321	-6.94	0.56	1.80
8.50	-430	384	-8.14	-427	365	-7.92	0.22	1.24
9.00	-377	361	-7.38	-386	347	-7.33	0.05	1.02
9.50	-212	162	-3.74	-207	150	-3.57	0.17	0.97
10.00	-121	86	-2.07	-114	82	-1.96	0.11	0.80
10.50	-80	37	-1.17	-71	18	-0.89	0.28	0.69
11.00	-42	8	-0.50	-23	-10	-0.13	0.37	0.41
11.50	13	-50	0.63	24	-56	0.80	0.17	0.04
12.00	60	-68	1.28	49	-58	1.07	-0.21	-0.13
12.50	83	-105	1.88	87	-125	2.12	0.24	0.08
13.00	2	-34	0.36	-2	-37	0.35	-0.01	-0.16
13.50	-29	-4	-0.25	-32	-2	-0.30	-0.05	-0.15
14.00	-92	62	-1.54	-102	55	-1.57	-0.03	-0.10
14.50	-171	147	-3.18	-171	132	-3.03	0.15	-0.07
15.00	-226	200	-4.26	-237	203	-4.40	-0.14	-0.22
15.50	-278	241	-5.19	-276	239	-5.15	0.04	-0.08
16.00	-351	309	-6.60	-334	296	-6.30	0.30	-0.12
16.50	-383	355	-7.38	-394	364	-7.58	-0.20	-0.42
17.00	-335	312	-6.47	-344	314	-6.58	-0.11	-0.22
17.50	-303	270	-5.73	-312	272	-5.84	-0.11	-0.11

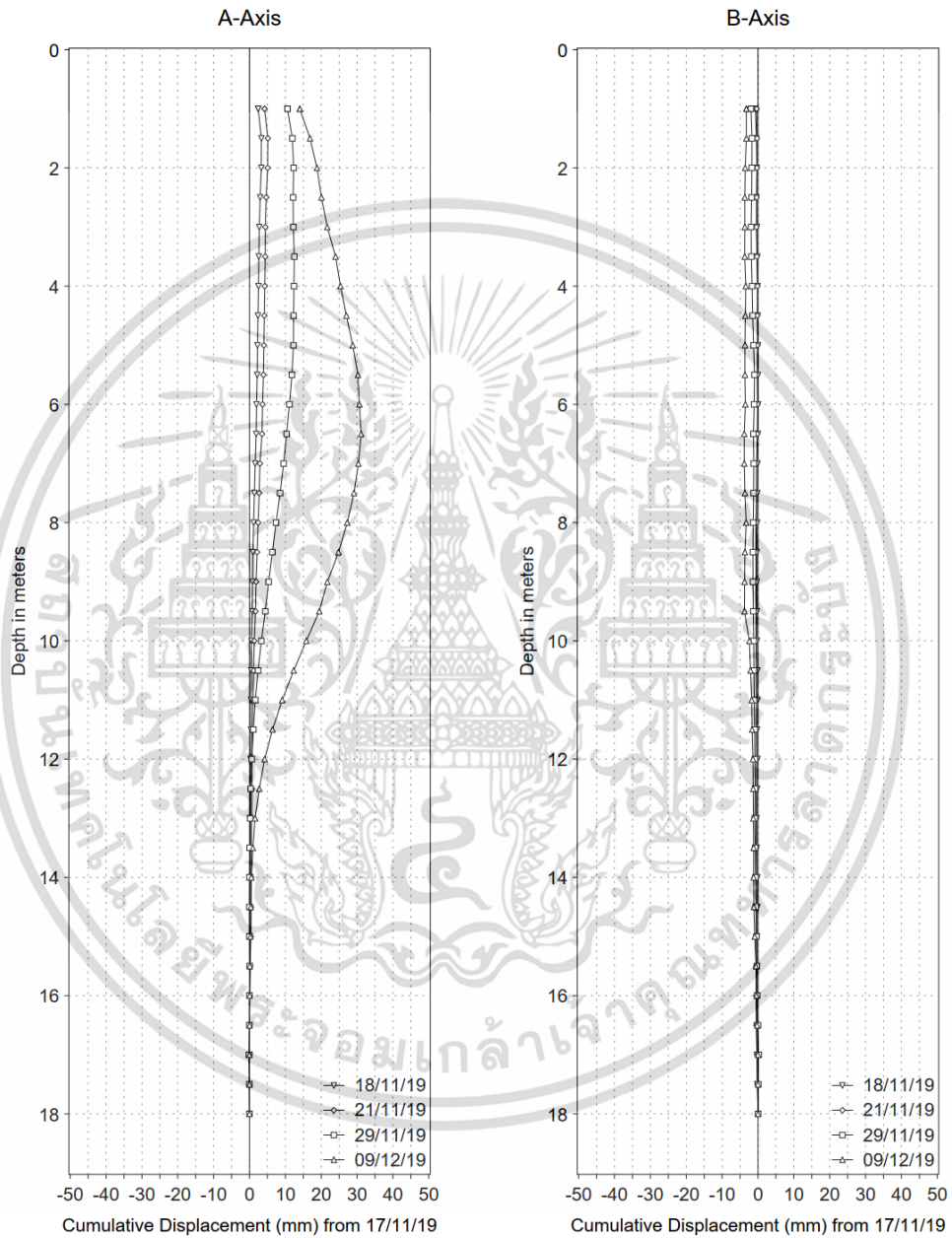
END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) I-3

โครงการ XT Phayathai
Inclinometer Tube No.I-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-3

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

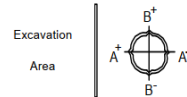
INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : 1

SENSOR # : 28399

STD.DEV. : A: 8.80 B: 11.70



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-607	535	-11.42	398.86	364	-404	7.68	300.02
1.50	-659	588	-12.47	410.28	368	-413	7.81	292.34
2.00	-639	574	-12.13	422.75	387	-420	8.07	284.53
2.50	-641	579	-12.20	434.88	277	-318	5.95	276.46
3.00	-647	591	-12.38	447.08	175	-195	3.70	270.51
3.50	-897	814	-17.11	459.46	-8	5	-0.13	266.81
4.00	-921	861	-17.82	476.57	-84	36	-1.20	266.94
4.50	-966	905	-18.71	494.39	-118	76	-1.94	268.14
5.00	-951	889	-18.40	513.10	-131	83	-2.14	270.08
5.50	-887	828	-17.15	531.50	-162	117	-2.79	272.22
6.00	-743	703	-14.46	548.65	-172	127	-2.99	275.01
6.50	-257	192	-4.49	563.11	8	-50	0.58	278.00
7.00	118	-183	3.01	567.60	247	-296	5.43	277.42
7.50	406	-470	8.76	564.59	524	-572	10.96	271.99
8.00	634	-705	13.39	555.83	878	-917	17.95	261.03
8.50	833	-902	17.35	542.44	1064	-1088	21.52	243.08
9.00	961	-1011	19.72	525.09	1063	-1112	21.75	221.56
9.50	954	-1032	19.86	505.37	1090	-1128	22.18	199.81
10.00	1013	-1082	20.95	485.51	1041	-1068	21.09	177.63
10.50	1066	-1132	21.98	464.56	927	-950	18.77	156.54
11.00	1119	-1187	23.06	442.58	797	-824	16.21	137.77
11.50	1160	-1229	23.89	419.52	694	-719	14.13	121.56
12.00	1205	-1250	24.55	395.63	615	-659	12.74	107.43
12.50	1311	-1378	26.89	371.08	514	-550	10.64	94.69
13.00	1341	-1405	27.46	344.19	464	-487	9.51	84.05
13.50	1417	-1478	28.95	316.73	437	-464	9.01	74.54
14.00	1513	-1575	30.88	287.78	400	-415	8.15	65.53
14.50	1636	-1703	33.39	256.90	395	-413	8.08	57.38
15.00	1702	-1758	34.60	223.51	360	-398	7.58	49.30
15.50	1835	-1912	37.47	188.91	395	-444	8.39	41.72
16.00	1901	-1954	38.55	151.44	413	-460	8.73	33.33
16.50	1871	-1925	37.96	112.89	454	-502	9.56	24.60
17.00	1845	-1902	37.47	74.93	457	-501	9.58	15.04
17.50	1845	-1901	37.46	37.46	255	-291	5.46	5.46

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-3

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : INITIAL READING

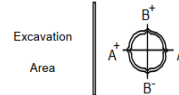
INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : 2

SENSOR # : 28399

STD.DEV. : A : 9.40 B : 13.70



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-608	534	-11.42	399.09	360	-403	7.63	298.81
1.50	-659	587	-12.46	410.51	378	-418	7.96	291.18
2.00	-636	573	-12.09	422.97	392	-420	8.12	283.22
2.50	-643	578	-12.21	435.06	284	-311	5.95	275.10
3.00	-648	591	-12.39	447.27	187	-202	3.89	269.15
3.50	-897	817	-17.14	459.66	-6	9	-0.15	265.26
4.00	-922	862	-17.84	476.80	-88	41	-1.29	265.41
4.50	-966	906	-18.72	494.64	-121	74	-1.95	266.70
5.00	-951	891	-18.42	513.36	-135	81	-2.16	268.65
5.50	-888	827	-17.15	531.78	-160	122	-2.82	270.81
6.00	-753	705	-14.58	548.93	-174	128	-3.02	273.63
6.50	-260	189	-4.49	563.51	5	-57	0.62	276.65
7.00	119	-177	2.96	568.00	252	-290	5.42	276.03
7.50	407	-469	8.76	565.04	516	-566	10.82	270.61
8.00	636	-706	13.42	566.28	882	-924	18.06	259.79
8.50	835	-907	17.42	542.86	1067	-1094	21.61	241.73
9.00	967	-1008	19.75	525.44	1066	-1116	21.82	220.12
9.50	947	-1030	19.77	505.69	1088	-1128	22.16	198.30
10.00	1014	-1079	20.93	485.92	1038	-1069	21.07	176.14
10.50	1067	-1130	21.97	464.99	924	-948	18.72	155.07
11.00	1122	-1182	23.04	443.02	796	-822	16.18	136.35
11.50	1162	-1228	23.90	419.98	698	-717	14.15	120.17
12.00	1204	-1245	24.49	396.08	607	-656	12.63	106.02
12.50	1301	-1376	26.77	371.59	512	-535	10.47	93.39
13.00	1342	-1402	27.44	344.82	459	-485	9.44	82.92
13.50	1418	-1486	29.04	317.38	436	-453	8.89	73.48
14.00	1515	-1577	30.92	288.34	390	-408	7.98	64.59
14.50	1639	-1705	33.44	257.42	395	-410	8.05	56.61
15.00	1703	-1759	34.62	223.98	358	-405	7.63	48.56
15.50	1840	-1908	37.48	189.36	389	-433	8.22	40.93
16.00	1903	-1958	38.61	151.88	407	-453	8.60	32.71
16.50	1877	-1930	38.07	113.27	452	-496	9.48	24.11
17.00	1853	-1906	37.59	75.20	450	-475	9.25	14.63
17.50	1854	-1907	37.61	37.61	244	-294	5.38	5.38

END OF RECORDS

Record By : WC

STS Instruments Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

TUBE NO. : I-3

DEPTH : 17.50 M.

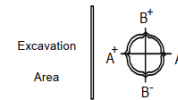
DESCRIPTION : INITIAL READING

INITIAL READING

DATE : 17-Nov-19

DATA SET # : Average

SENSOR # : 28399



DEPTH M.	A AXIS				B AXIS			
	A+	A-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)	B+	B-	INCR.DEV (MM.)	CUM.DEV. (MM.)
1.00	-608	535	-11.42	398.98	362	-404	7.66	299.42
1.50	-659	588	-12.47	410.40	373	-416	7.89	291.76
2.00	-638	574	-12.11	422.86	390	-420	8.10	283.88
2.50	-642	579	-12.21	434.97	281	-315	5.95	275.78
3.00	-648	591	-12.39	447.18	181	-199	3.80	269.83
3.50	-897	816	-17.13	459.56	-7	7	-0.14	266.04
4.00	-922	862	-17.83	476.69	-86	39	-1.25	266.18
4.50	-966	906	-18.72	494.52	-120	75	-1.95	267.42
5.00	-951	890	-18.41	513.23	-133	82	-2.15	269.37
5.50	-888	828	-17.15	531.64	-161	120	-2.81	271.52
6.00	-748	704	-14.52	548.79	-173	128	-3.01	274.32
6.50	-259	191	-4.49	563.31	7	-54	0.60	277.33
7.00	119	-180	2.99	567.80	250	-293	5.43	276.73
7.50	407	-470	8.76	564.82	520	-569	10.89	271.30
8.00	635	-706	13.41	556.06	880	-921	18.01	260.41
8.50	834	-905	17.39	542.65	1066	-1091	21.57	242.41
9.00	964	-1010	19.74	525.27	1065	-1114	21.79	220.84
9.50	951	-1031	19.82	505.53	1089	-1128	22.17	199.06
10.00	1014	-1081	20.94	485.72	1040	-1069	21.08	176.89
10.50	1067	-1131	21.98	464.78	926	-949	18.75	155.81
11.00	1121	-1185	23.05	442.80	797	-823	16.20	137.06
11.50	1161	-1229	23.90	419.75	696	-718	14.14	120.87
12.00	1205	-1248	24.52	395.86	611	-658	12.69	106.73
12.50	1306	-1377	26.83	371.34	513	-543	10.56	94.04
13.00	1342	-1404	27.45	344.51	462	-486	9.48	83.49
13.50	1418	-1482	29.00	317.06	437	-459	8.95	74.01
14.00	1514	-1576	30.90	288.06	395	-412	8.07	65.06
14.50	1638	-1704	33.42	257.16	395	-412	8.07	57.00
15.00	1703	-1759	34.61	223.75	359	-402	7.61	48.93
15.50	1838	-1910	37.48	189.14	392	-439	8.31	41.33
16.00	1902	-1956	38.58	151.66	410	-457	8.67	33.02
16.50	1874	-1928	38.02	113.08	453	-499	9.52	24.36
17.00	1849	-1904	37.53	75.07	454	-488	9.42	14.84
17.50	1850	-1904	37.54	37.54	250	-293	5.42	5.42

END OF RECORDS

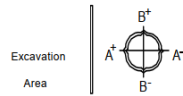
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 8.80 B : 12.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-608	535	-11.43	-654	577	-12.31	-0.88	2.42
1.50	-659	588	-12.47	-659	587	-12.46	0.01	3.30
2.00	-638	574	-12.12	-624	556	-11.80	0.32	3.29
2.50	-642	579	-12.21	-634	564	-11.98	0.23	2.97
3.00	-648	591	-12.39	-644	581	-12.25	0.14	2.74
3.50	-897	816	-17.13	-896	808	-17.04	0.09	2.60
4.00	-922	862	-17.84	-917	853	-17.70	0.14	2.51
4.50	-966	906	-18.72	-961	899	-18.60	0.12	2.37
5.00	-951	890	-18.41	-947	883	-18.30	0.11	2.25
5.50	-888	828	-17.16	-880	819	-16.99	0.17	2.14
6.00	-748	704	-14.52	-746	696	-14.42	0.10	1.97
6.50	-259	191	-4.50	-251	173	-4.24	0.26	1.87
7.00	119	-180	2.99	128	-194	3.22	0.23	1.61
7.50	407	-470	8.77	417	-481	8.98	0.21	1.38
8.00	635	-706	13.41	643	-716	13.59	0.18	1.17
8.50	834	-905	17.39	841	-912	17.53	0.14	0.99
9.00	964	-1010	19.74	966	-1016	19.82	0.08	0.85
9.50	951	-1031	19.82	961	-1042	20.03	0.21	0.77
10.00	1014	-1081	20.95	1016	-1086	21.02	0.07	0.56
10.50	1067	-1131	21.98	1074	-1130	22.04	0.06	0.49
11.00	1121	-1185	23.06	1122	-1183	23.05	-0.01	0.43
11.50	1161	-1229	23.90	1169	-1233	24.02	0.12	0.44
12.00	1205	-1248	24.53	1201	-1252	24.53	0.00	0.32
12.50	1306	-1377	26.83	1320	-1374	26.94	0.11	0.32
13.00	1342	-1404	27.46	1343	-1405	27.48	0.02	0.21
13.50	1418	-1482	29.00	1420	-1479	28.99	-0.01	0.19
14.00	1514	-1576	30.90	1517	-1580	30.97	0.07	0.20
14.50	1638	-1704	33.42	1639	-1703	33.42	0.00	0.13
15.00	1703	-1759	34.62	1699	-1761	34.60	-0.02	0.13
15.50	1838	-1910	37.48	1850	-1912	37.62	0.14	0.15
16.00	1902	-1956	38.58	1897	-1961	38.58	0.00	0.01
16.50	1874	-1928	38.02	1870	-1931	38.01	-0.01	0.01
17.00	1849	-1904	37.53	1851	-1904	37.55	0.02	0.02
17.50	1850	-1904	37.54	1852	-1902	37.54	0.00	0.00

END OF RECORDS

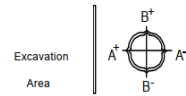
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 1 ACTIVITY : คั่น Preload Layer 1

DATE 17-Nov-19 18-Nov-19
 DATA SET # 3 4
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 8.80 B : 12.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	362	-404	7.66	352	-385	7.37	-0.29	-0.73
1.50	373	-416	7.89	375	-403	7.78	-0.11	-0.44
2.00	390	-420	8.10	402	-414	8.16	0.06	-0.33
2.50	281	-315	5.96	278	-304	5.82	-0.14	-0.39
3.00	181	-199	3.80	181	-189	3.70	-0.10	-0.25
3.50	-7	7	-0.14	-3	14	-0.17	-0.03	-0.15
4.00	-86	39	-1.25	-86	45	-1.31	-0.06	-0.12
4.50	-120	75	-1.95	-113	92	-2.05	-0.10	-0.06
5.00	-133	82	-2.15	-125	86	-2.11	0.04	0.04
5.50	-161	120	-2.81	-153	132	-2.85	-0.04	0.00
6.00	-173	128	-3.01	-168	127	-2.95	0.06	0.04
6.50	7	-54	0.61	19	-52	0.71	0.10	-0.02
7.00	250	-293	5.43	255	-294	5.49	0.06	-0.12
7.50	520	-569	10.89	526	-569	10.95	0.06	-0.18
8.00	880	-921	18.01	887	-923	18.10	0.09	-0.24
8.50	1066	-1091	21.57	1071	-1082	21.53	-0.04	-0.33
9.00	1065	-1114	21.79	1074	-1106	21.80	0.01	-0.29
9.50	1089	-1128	22.17	1097	-1116	22.13	-0.04	-0.30
10.00	1040	-1069	21.09	1037	-1061	20.98	-0.11	-0.26
10.50	926	-949	18.75	929	-945	18.74	-0.01	-0.15
11.00	797	-823	16.20	803	-827	16.30	0.10	-0.14
11.50	696	-718	14.14	693	-711	14.04	-0.10	-0.24
12.00	611	-658	12.69	622	-656	12.78	0.09	-0.14
12.50	513	-543	10.56	529	-542	10.71	0.15	-0.23
13.00	462	-486	9.48	462	-481	9.43	-0.05	-0.38
13.50	437	-459	8.96	431	-449	8.80	-0.16	-0.33
14.00	395	-412	8.07	397	-410	8.07	0.00	-0.17
14.50	395	-412	8.07	409	-408	8.17	0.10	-0.17
15.00	359	-402	7.61	368	-388	7.56	-0.05	-0.27
15.50	392	-439	8.31	411	-422	8.33	0.02	-0.22
16.00	410	-457	8.67	428	-451	8.79	0.12	-0.24
16.50	453	-499	9.52	466	-479	9.45	-0.07	-0.36
17.00	454	-488	9.42	459	-476	9.35	-0.07	-0.29
17.50	250	-293	5.43	248	-273	5.21	-0.22	-0.22

END OF RECORDS

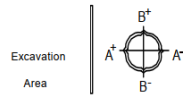
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 11.70 B : 12.90



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-608	535	-11.43	-656	579	-12.35	-0.92	4.20
1.50	-659	588	-12.47	-657	585	-12.42	0.05	5.12
2.00	-638	574	-12.12	-620	553	-11.73	0.39	5.07
2.50	-642	579	-12.21	-630	566	-11.96	0.25	4.68
3.00	-648	591	-12.39	-648	588	-12.36	0.03	4.43
3.50	-897	816	-17.13	-891	808	-16.99	0.14	4.40
4.00	-922	862	-17.84	-917	855	-17.72	0.12	4.26
4.50	-966	906	-18.72	-961	899	-18.60	0.12	4.14
5.00	-951	890	-18.41	-943	885	-18.28	0.13	4.02
5.50	-888	828	-17.16	-878	813	-16.91	0.25	3.89
6.00	-748	704	-14.52	-742	696	-14.38	0.14	3.64
6.50	-259	191	-4.50	-235	158	-3.93	0.57	3.50
7.00	119	-180	2.99	130	-193	3.23	0.24	2.93
7.50	407	-470	8.77	422	-482	9.04	0.27	2.69
8.00	635	-706	13.41	652	-719	13.71	0.30	2.42
8.50	834	-905	17.39	850	-916	17.66	0.27	2.12
9.00	964	-1010	19.74	974	-1016	19.90	0.16	1.85
9.50	951	-1031	19.82	965	-1051	20.16	0.34	1.69
10.00	1014	-1081	20.95	1026	-1089	21.15	0.20	1.35
10.50	1067	-1131	21.98	1080	-1135	22.15	0.17	1.15
11.00	1121	-1185	23.06	1129	-1191	23.20	0.14	0.98
11.50	1161	-1229	23.90	1171	-1235	24.06	0.16	0.84
12.00	1205	-1248	24.53	1208	-1247	24.55	0.02	0.88
12.50	1306	-1377	26.83	1303	-1384	26.87	0.04	0.66
13.00	1342	-1404	27.46	1350	-1408	27.58	0.12	0.62
13.50	1418	-1482	29.00	1423	-1481	29.04	0.04	0.50
14.00	1514	-1576	30.90	1523	-1569	30.92	0.02	0.46
14.50	1638	-1704	33.42	1640	-1705	33.45	0.03	0.44
15.00	1703	-1759	34.62	1722	-1763	34.85	0.23	0.41
15.50	1838	-1910	37.48	1844	-1914	37.58	0.10	0.18
16.00	1902	-1956	38.58	1906	-1956	38.62	0.04	0.08
16.50	1874	-1928	38.02	1876	-1931	38.07	0.05	0.04
17.00	1849	-1904	37.53	1853	-1899	37.52	-0.01	-0.01
17.50	1850	-1904	37.54	1853	-1901	37.54	0.00	0.00

END OF RECORDS

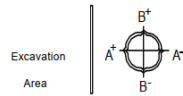
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 2 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 1

DATE 17-Nov-19 21-Nov-19
 DATA SET # 3 5
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 11.70 B : 12.90



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	362	-404	7.66	357	-398	7.55	-0.11	-0.37
1.50	373	-416	7.89	368	-425	7.93	0.04	-0.26
2.00	390	-420	8.10	391	-427	8.18	0.08	-0.30
2.50	281	-315	5.96	282	-321	6.03	0.07	-0.38
3.00	181	-199	3.80	173	-193	3.66	-0.14	-0.45
3.50	-7	7	-0.14	-18	12	-0.30	-0.16	-0.31
4.00	-86	39	-1.25	-75	46	-1.21	0.04	-0.15
4.50	-120	75	-1.95	-113	83	-1.96	-0.01	-0.19
5.00	-133	82	-2.15	-126	83	-2.09	0.06	-0.18
5.50	-161	120	-2.81	-161	129	-2.90	-0.09	-0.24
6.00	-173	128	-3.01	-164	131	-2.95	0.06	-0.15
6.50	7	-54	0.61	21	-62	0.83	0.22	-0.21
7.00	250	-293	5.43	251	-293	5.44	0.01	-0.43
7.50	520	-569	10.89	526	-572	10.98	0.09	-0.44
8.00	880	-921	18.01	879	-929	18.08	0.07	-0.53
8.50	1066	-1091	21.57	1060	-1093	21.53	-0.04	-0.60
9.00	1065	-1114	21.79	1069	-1113	21.82	0.03	-0.56
9.50	1089	-1128	22.17	1091	-1123	22.14	-0.03	-0.59
10.00	1040	-1069	21.09	1045	-1058	21.03	-0.06	-0.56
10.50	926	-949	18.75	927	-944	18.71	-0.04	-0.50
11.00	797	-823	16.20	800	-822	16.22	0.02	-0.46
11.50	696	-718	14.14	694	-718	14.12	-0.02	-0.48
12.00	611	-658	12.69	613	-657	12.70	0.01	-0.46
12.50	513	-543	10.56	528	-533	10.61	0.05	-0.47
13.00	462	-486	9.48	460	-487	9.47	-0.01	-0.52
13.50	437	-459	8.96	433	-457	8.90	-0.06	-0.51
14.00	395	-412	8.07	391	-411	8.02	-0.05	-0.45
14.50	395	-412	8.07	399	-414	8.13	0.06	-0.40
15.00	359	-402	7.61	355	-406	7.61	0.00	-0.46
15.50	392	-439	8.31	414	-426	8.40	0.09	-0.46
16.00	410	-457	8.67	413	-446	8.59	-0.08	-0.55
16.50	453	-499	9.52	457	-480	9.37	-0.15	-0.47
17.00	454	-488	9.42	449	-473	9.22	-0.20	-0.32
17.50	250	-293	5.43	245	-286	5.31	-0.12	-0.12

END OF RECORDS

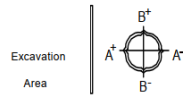
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 3 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 29-Nov-19
 DATA SET # 3 6
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 9.10 B : 14.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-608	535	-11.43	-677	599	-12.76	-1.33	10.60
1.50	-659	588	-12.47	-681	605	-12.86	-0.39	11.93
2.00	-638	574	-12.12	-635	559	-11.94	0.18	12.32
2.50	-642	579	-12.21	-651	577	-12.28	-0.07	12.14
3.00	-648	591	-12.39	-667	601	-12.68	-0.29	12.21
3.50	-897	816	-17.13	-895	808	-17.03	0.10	12.50
4.00	-922	862	-17.84	-921	852	-17.73	0.11	12.40
4.50	-966	906	-18.72	-967	900	-18.67	0.05	12.29
5.00	-951	890	-18.41	-934	866	-18.00	0.41	12.24
5.50	-888	828	-17.16	-860	788	-16.48	0.68	11.83
6.00	-748	704	-14.52	-709	661	-13.70	0.82	11.15
6.50	-259	191	-4.50	-226	141	-3.67	0.83	10.33
7.00	119	-180	2.99	165	-232	3.97	0.98	9.50
7.50	407	-470	8.77	462	-527	9.89	1.12	8.52
8.00	635	-706	13.41	684	-758	14.42	1.01	7.40
8.50	834	-905	17.39	887	-958	18.45	1.06	6.39
9.00	964	-1010	19.74	1006	-1059	20.65	0.91	5.33
9.50	951	-1031	19.82	1007	-1084	20.91	1.09	4.42
10.00	1014	-1081	20.95	1061	-1127	21.88	0.93	3.33
10.50	1067	-1131	21.98	1102	-1173	22.75	0.77	2.40
11.00	1121	-1185	23.06	1147	-1215	23.62	0.56	1.63
11.50	1161	-1229	23.90	1181	-1252	24.33	0.43	1.07
12.00	1205	-1248	24.53	1215	-1268	24.83	0.30	0.64
12.50	1306	-1377	26.83	1310	-1389	26.99	0.16	0.34
13.00	1342	-1404	27.46	1345	-1412	27.57	0.11	0.18
13.50	1418	-1482	29.00	1423	-1484	29.07	0.07	0.07
14.00	1514	-1576	30.90	1513	-1579	30.92	0.02	0.00
14.50	1638	-1704	33.42	1635	-1708	33.43	0.01	-0.02
15.00	1703	-1759	34.62	1700	-1756	34.56	-0.06	-0.03
15.50	1838	-1910	37.48	1842	-1909	37.51	0.03	0.03
16.00	1902	-1956	38.58	1900	-1960	38.60	0.02	0.00
16.50	1874	-1928	38.02	1876	-1939	38.15	0.13	-0.02
17.00	1849	-1904	37.53	1845	-1895	37.40	-0.13	-0.15
17.50	1850	-1904	37.54	1847	-1905	37.52	-0.02	-0.02

END OF RECORDS

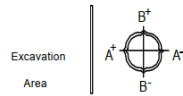
Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 3 ACTIVITY : หลัง Preload Layer 2

INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 29-Nov-19
 DATA SET # 3 6
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 9.10 B : 14.10



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	362	-404	7.66	355	-384	7.39	-0.27	-1.94
1.50	373	-416	7.89	387	-405	7.92	0.03	-1.67
2.00	390	-420	8.10	401	-415	8.16	0.06	-1.70
2.50	281	-315	5.96	288	-323	6.11	0.15	-1.76
3.00	181	-199	3.80	187	-188	3.75	-0.05	-1.91
3.50	-7	7	-0.14	-20	15	-0.35	-0.21	-1.86
4.00	-86	39	-1.25	-91	50	-1.41	-0.16	-1.65
4.50	-120	75	-1.95	-124	98	-2.22	-0.27	-1.49
5.00	-133	82	-2.15	-135	105	-2.40	-0.25	-1.22
5.50	-161	120	-2.81	-149	123	-2.72	0.09	-0.97
6.00	-173	128	-3.01	-158	121	-2.79	0.22	-1.06
6.50	7	-54	0.61	4	-46	0.50	-0.11	-1.28
7.00	250	-293	5.43	253	-294	5.47	0.04	-1.17
7.50	520	-569	10.89	534	-568	11.02	0.13	-1.21
8.00	880	-921	18.01	882	-924	18.06	0.05	-1.34
8.50	1066	-1091	21.57	1072	-1087	21.59	0.02	-1.39
9.00	1065	-1114	21.79	1062	-1105	21.67	-0.12	-1.41
9.50	1089	-1128	22.17	1099	-1107	22.06	-0.11	-1.29
10.00	1040	-1069	21.09	1042	-1062	21.04	-0.05	-1.18
10.50	926	-949	18.75	935	-934	18.69	-0.06	-1.13
11.00	797	-823	16.20	803	-805	16.08	-0.12	-1.07
11.50	696	-718	14.14	695	-711	14.06	-0.08	-0.95
12.00	611	-658	12.69	615	-648	12.63	-0.06	-0.87
12.50	513	-543	10.56	528	-538	10.66	0.10	-0.81
13.00	462	-486	9.48	461	-473	9.34	-0.14	-0.91
13.50	437	-459	8.96	440	-448	8.88	-0.08	-0.77
14.00	395	-412	8.07	389	-410	7.99	-0.08	-0.69
14.50	395	-412	8.07	390	-400	7.90	-0.17	-0.61
15.00	359	-402	7.61	352	-398	7.50	-0.11	-0.44
15.50	392	-439	8.31	395	-426	8.21	-0.10	-0.33
16.00	410	-457	8.67	401	-443	8.44	-0.23	-0.23
16.50	453	-499	9.52	447	-485	9.32	-0.20	0.00
17.00	454	-488	9.42	458	-497	9.55	0.13	0.20
17.50	250	-293	5.43	261	-289	5.50	0.07	0.07

END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai

LOCATION : ถนนศรีอยุธยา

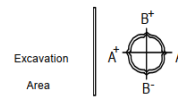
TUBE NO. : I-3

DEPTH : 17.50 M.

DESCRIPTION : CURRENT # 4

ACTIVITY : Final Depth

	INITIAL READING	CURRENT READING
DATE	17-Nov-19	09-Dec-19
DATA SET #	3	7
SENSOR #	28399	28399
STD.DEV.	A : 8.50	B : 18.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	A+	A-	INCR.DEV	A+	A-	INCR.DEV		
1.00	-608	535	-11.43	-752	677	-14.29	-2.86	14.03
1.50	-659	588	-12.47	-758	682	-14.40	-1.93	16.89
2.00	-638	574	-12.12	-706	630	-13.36	-1.24	18.82
2.50	-642	579	-12.21	-730	654	-13.84	-1.63	20.06
3.00	-648	591	-12.39	-781	690	-14.71	-2.32	21.69
3.50	-897	816	-17.13	-958	891	-18.49	-1.36	24.01
4.00	-922	862	-17.84	-1012	937	-19.49	-1.65	25.37
4.50	-966	906	-18.72	-1060	989	-20.49	-1.77	27.02
5.00	-951	890	-18.41	-1028	958	-19.86	-1.45	28.79
5.50	-888	828	-17.16	-915	840	-17.55	-0.39	30.24
6.00	-748	704	-14.52	-778	723	-15.01	-0.49	30.63
6.50	-259	191	-4.50	-227	146	-3.73	0.77	31.12
7.00	119	-180	2.99	174	-248	4.22	1.23	30.35
7.50	407	-470	8.77	498	-566	10.64	1.87	29.12
8.00	635	-706	13.41	757	-826	15.83	2.42	27.25
8.50	834	-905	17.39	986	-1063	20.49	3.10	24.83
9.00	964	-1010	19.74	1072	-1129	22.01	2.27	21.73
9.50	951	-1031	19.82	1141	-1202	23.43	3.61	19.46
10.00	1014	-1081	20.95	1189	-1257	24.46	3.51	15.85
10.50	1067	-1131	21.98	1223	-1296	25.19	3.21	12.34
11.00	1121	-1185	23.06	1257	-1321	25.78	2.72	9.13
11.50	1161	-1229	23.90	1262	-1344	26.06	2.16	6.41
12.00	1205	-1248	24.53	1266	-1338	26.04	1.51	4.25
12.50	1306	-1377	26.83	1370	-1430	28.00	1.17	2.74
13.00	1342	-1404	27.46	1370	-1439	28.09	0.63	1.57
13.50	1418	-1482	29.00	1437	-1506	29.43	0.43	0.94
14.00	1514	-1576	30.90	1518	-1587	31.05	0.15	0.51
14.50	1638	-1704	33.42	1638	-1715	33.53	0.11	0.36
15.00	1703	-1759	34.62	1709	-1768	34.77	0.15	0.25
15.50	1838	-1910	37.48	1831	-1925	37.56	0.08	0.10
16.00	1902	-1956	38.58	1894	-1963	38.57	-0.01	0.02
16.50	1874	-1928	38.02	1871	-1938	38.09	0.07	0.03
17.00	1849	-1904	37.53	1842	-1907	37.49	-0.04	-0.04
17.50	1850	-1904	37.54	1847	-1907	37.54	0.00	0.00

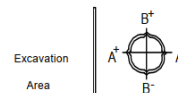
END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCLINOMETER MONITORING RESULTS

PROJECT : XT Phayathai
 LOCATION : ถนนศรีอยุธยา
 TUBE NO. : I-3 DEPTH : 17.50 M.
 DESCRIPTION : CURRENT # 4 ACTIVITY : Final Depth
 INITIAL READING CURRENT READING
 DATE 17-Nov-19 09-Dec-19
 DATA SET # 3 7
 SENSOR # 28399 28399
 STD.DEV. A : 8.50 B : 18.30



DEPTH M.	INITIAL DATA			CURRENT DATA			INCR.DISP MM.	CUM.DISP MM.
	B+	B-	INCR.DEV	B+	B-	INCR.DEV		
1.00	362	-404	7.66	370	-397	7.67	0.01	-3.24
1.50	373	-416	7.89	395	-424	8.19	0.30	-3.25
2.00	390	-420	8.10	398	-423	8.21	0.11	-3.55
2.50	281	-315	5.96	282	-316	5.98	0.02	-3.66
3.00	181	-199	3.80	199	-182	3.81	0.01	-3.68
3.50	-7	7	-0.14	-42	3	-0.45	-0.31	-3.69
4.00	-86	39	-1.25	-85	28	-1.13	0.12	-3.38
4.50	-120	75	-1.95	-115	66	-1.81	0.14	-3.50
5.00	-133	82	-2.15	-133	81	-2.14	0.01	-3.64
5.50	-161	120	-2.81	-174	122	-2.96	-0.15	-3.65
6.00	-173	128	-3.01	-161	109	-2.70	0.31	-3.50
6.50	7	-54	0.61	13	-50	0.63	0.02	-3.81
7.00	250	-293	5.43	234	-289	5.23	-0.20	-3.83
7.50	520	-569	10.89	501	-552	10.53	-0.36	-3.63
8.00	880	-921	18.01	894	-944	18.38	0.37	-3.27
8.50	1066	-1091	21.57	1069	-1096	21.65	0.08	-3.64
9.00	1065	-1114	21.79	1056	-1126	21.82	0.03	-3.72
9.50	1089	-1128	22.17	1036	-1046	20.82	-1.35	-3.75
10.00	1040	-1069	21.09	1029	-1048	20.77	-0.32	-2.40
10.50	926	-949	18.75	907	-932	18.39	-0.36	-2.08
11.00	797	-823	16.20	799	-812	16.11	-0.09	-1.72
11.50	696	-718	14.14	682	-708	13.90	-0.24	-1.63
12.00	611	-658	12.69	603	-661	12.64	-0.05	-1.39
12.50	513	-543	10.56	519	-529	10.48	-0.08	-1.34
13.00	462	-486	9.48	458	-485	9.43	-0.05	-1.26
13.50	437	-459	8.96	441	-455	8.96	0.00	-1.21
14.00	395	-412	8.07	389	-412	8.01	-0.06	-1.21
14.50	395	-412	8.07	386	-396	7.82	-0.25	-1.15
15.00	359	-402	7.61	347	-382	7.29	-0.32	-0.90
15.50	392	-439	8.31	393	-418	8.11	-0.20	-0.58
16.00	410	-457	8.67	397	-456	8.53	-0.14	-0.38
16.50	453	-499	9.52	441	-487	9.28	-0.24	-0.24
17.00	454	-488	9.42	455	-486	9.41	-0.01	0.00
17.50	250	-293	5.43	254	-290	5.44	0.01	0.01

END OF RECORDS

Record By : WC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพนัส โอภากุลวงษ์
วัน เดือน ปีเกิด 24 กรกฎาคม 2535 ที่พิจิตร
ที่อยู่ 5/45 หมู่ 4 ตำบลดอนทอง อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000
ประวัติการศึกษา: พ.ศ. 2558 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานชุดดินด้วยระบบกำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ด้วย PLAXIS 2D
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:
พ.ศ. 2558 - 2561 วิศวกรโยธา บริษัท นันทวัน จำกัด
พ.ศ. 2563 - ปัจจุบัน วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
พ.ศ. 2564 พนัส โอภากุลวงษ์, ศลิษา ไชยพุทธ, ธนาถ คงสมบูรณ์ (2564). การศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้