

การหาสตีเฟนของดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพง เสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานชุดดินลึก

ธนกร สุขุมามาศ¹ และ พรพจน์ ต้นเส็ง^{2*}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนองานวิจัยที่เป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังและหาสตีเฟนของดินเหนียว เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับงานชุดดินลึก โดยใช้กำแพงกันดิน 4 รูปแบบที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกัน ได้แก่กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (PW), กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW), และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ในงานวิจัยได้วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงและแรงอัดในค้ำยัน และนำมาใช้วิเคราะห์กลับโดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติและแบบสามมิติเพื่อหาสตีเฟนพารามิเตอร์ในเทอมของ E_u / S_u ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 750-1250 สำหรับกำแพง PW และ 750-2000 สำหรับกำแพง SCCW ในงานวิจัยยังได้พบว่าสตีเฟนแปรผกผันกับความเครียดเฉือนที่ประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้จากการวัดและแรงอัดในค้ำยันที่ได้จากการวิเคราะห์สอดคล้องกับแรงอัดที่วัดได้จริงในสนาม

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, กำแพงกันดิน, การชุดดินลึก, ดินเหนียวอ่อน, ไฟไนท์อีลิเมนต์

¹ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมโยธา ชั้นส่ง และทรัพยากรธรณี-แผน ก(2) สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ +664 422 4495 อีเมล: pompot@sut.ac.th



Determination of clay stiffness with finite element method for ground movement prediction of soil-cement column wall and pile wall reinforced with soil-cement column used in deep excavation

Thanakorn Sukumamas¹ and Pornpot Tanseng^{2*}

Abstract

This paper presents research work on studying behavior of earth retaining system for deep excavation and determines appropriate stiffness of clay for prediction of wall movement using finite element method. Four types of retaining wall constructed in the same subsoil profiles are used in the studies i.e. contiguous pile wall (PW), soil-cement column wall (SCCW), and pile wall reinforced with soil-cement column (SCC). The behavior of wall is observed by measurement of wall movements and strut load at various stages of excavation and used for back-analysis with 2D and 3D finite element. The stiffness of clay in term of E_u / S_u is 750 – 1250 for PW reinforced with SCC and 750-2000 for SCCW. The stiffnesses of clay is inversely proportional to the approximated shear strain from measured wall movement increase. The calculated strut forces agree well with the forces measured from the field.

Keywords: Soil-cement column, retaining wall, deep excavation, soft clay, finite element method

¹ Master Degree Student, Master of Engineering Program in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering, School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. +664 422 4495 email: pornpot@sut.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พื้นที่ในเขตพื้นที่เมืองของกรุงเทพมหานครในอัตราที่สูงมาก พื้นที่พัฒนาส่วนใหญ่มีอยู่จำกัดและมีราคาสูงจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นโครงการพัฒนาส่วนใหญ่จึงพัฒนาไปในทางที่จะเพิ่มเนื้อที่ที่ใช้สอยโดยการก่อสร้างชั้นใต้ดิน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นทั้งจอดรถใต้ดิน สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากจำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันดินพัง ระบบป้องกันดินพังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและวิศวกรรมส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยได้แก่ระบบกำแพงกันดินแบบ sheet pile และระบบค้ำยันชั่วคราว, ระบบกำแพงกันดิน pile wall, และระบบกำแพงกันดิน diaphragm wall ซึ่งวิศวกรสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้เป็นปกติในปัจจุบัน แต่ด้วยความต้องการในการแข่งขันด้านต้นทุน และระยะเวลาในการก่อสร้างจึงได้มีการนำระบบป้องกันดินพังแบบอื่นมาใช้โดยเฉพาะระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์คำนวณยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของวิศวกรผู้ออกแบบและวิศวกรก่อสร้างเท่าใดนัก อีกทั้งงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของระบบกำแพง SCCW ที่ใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินลึกกว่า 6 เมตรยังมีไม่มากนัก โดย [1] และ [2] ได้กล่าวถึงการขุดดินลึกโดยใช้ SCCW เป็นระบบป้องกันดินพังสำหรับงานขุดดินลึก 10.25 เมตร ในชั้นดินเหนียวอ่อน การเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากการระยะฝังของ SCCW มีเพียง 1 เมตร จึงเกิดการวิบัติและทำให้เสาเข็มเสียหายจนต้องออกแบบฐานรากเสาเข็มใหม่ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของ SCCW ที่ใช้สำหรับก่อสร้างบ่อเก็บน้ำและเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวที่วัดได้กับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวได้แก่ความลึกของ SCCW ที่ฝังลงในชั้นดินเหนียวแข็งและการปรับปรุงดินด้านใน ของบ่อ [4] ได้รายงานถึงการขุดดินลึกประมาณ 8.5 เมตร เพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ การขุดใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินถาวร โดยใช้วิธีการเรียงแบบไม่มีการเหลื่อมกันระหว่าง SCC และมีการใช้ SCC แบบปูพรมด้านในของบ่อขุด เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงส่วนที่เป็นคานรัดหัวกำแพงมีค่าประมาณ 240 มิลลิเมตร [5] กล่าวถึงการศึกษา

พฤติกรรมของ SCCW ที่ใช้ร่วมกับ SCCW ที่ก่อสร้างเป็นค้ำยันล่วงหน้าในระดับลึก และได้ใช้ SCCW ที่เรียงเหลื่อมกันระหว่าง SCC เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดวัดโดย inclinometer เป็น 20 มิลลิเมตร [6] ได้กล่าวถึงระบบป้องกันดินพังแบบ soil-cement column ที่ใช้ร่วมกับระบบค้ำยันแบบถาวรและก่อสร้างโดยใช้เทคนิคการก่อสร้างแบบบนลงล่าง top-down ในเชิงพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังพบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสามมิติร่วมกับแบบจำลองดินชนิดอีลาสติคเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวในสนามเป็นอย่างมาก ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังที่ผ่านมาเป็นการเปรียบเทียบระบบกำแพงกันดินต่างรูปแบบในชั้นดินที่แตกต่างกัน จึงมีความแปรปรวนเนื่องจากคุณสมบัติของชั้นดิน, กรรมวิธีการก่อสร้าง และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวกับการก่อสร้างอันทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อนได้มาก ดังนั้นในการวิจัยพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพัง โดยเฉพาะกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีรูปแบบแตกต่างกันจึงควรกระทำในพื้นที่เดียวกันเพื่อขจัดตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังรูปแบบแตกต่างกัน 4 รูปแบบที่ได้ก่อสร้างในบริเวณเดียวกัน โดยกำแพงแต่ละรูปแบบเป็นระบบกำแพงกันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ โดยกำแพงสองรูปแบบแรกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินหลักที่ใช้ระบบค้ำยันและไม่ใช้ระบบค้ำยัน และอีกสองรูปแบบหลังใช้ SCCW ร่วมกับ PW โดยมีการเสริม SCCW ด้านนอกบ่อขุด และด้านในบ่อขุด ในการวิจัยได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแต่ละแบบ และได้เก็บข้อมูลแรงอัดในค้ำยัน ซึ่งได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์กลับโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อหาสตีเฟนส์ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรม

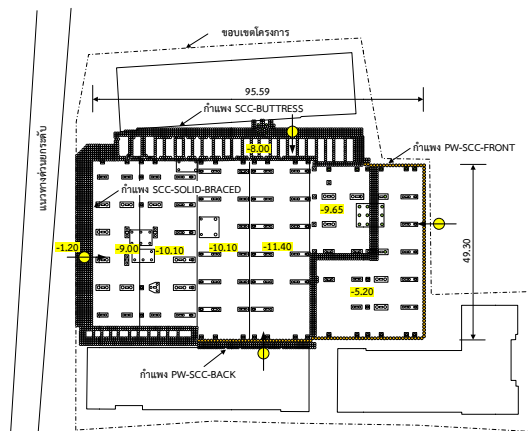
2. วิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่วิจัย

พื้นที่ใช้ในงานวิจัยเป็นโครงการก่อสร้างอาคารขุดพักอาศัย 8 ชั้นจำนวน 5 อาคาร ดังรูปที่ 1 โครงการตั้งอยู่

บนถนนเจริญราษฎร์ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยบริเวณกลางโครงการเป็นชั้นจอดรถใต้ดิน 3 ชั้น มีความกว้าง 49.30 เมตร ยาว 95.59 เมตร ระดับดินขุดลึกที่สุดของโครงการเป็น -11.40 เมตร ระดับดิน

พื้นที่ข้างเคียงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ -1.20 เมตร ทำให้ความลึกมากที่สุดเป็น -10.20 เมตร เมื่อเทียบกับระดับดินของพื้นที่ข้างเคียง



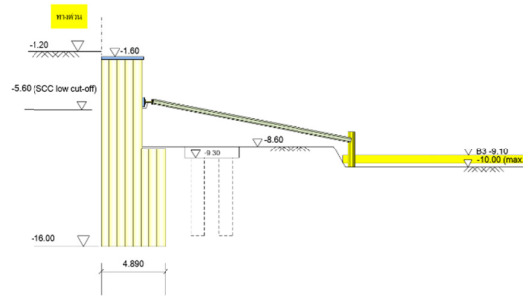
รูปที่ 1 ผังโครงการ

ระบบป้องกันดินพังในโครงการแบ่งเป็น 4 แบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อเรียกกำแพงและคำอธิบาย

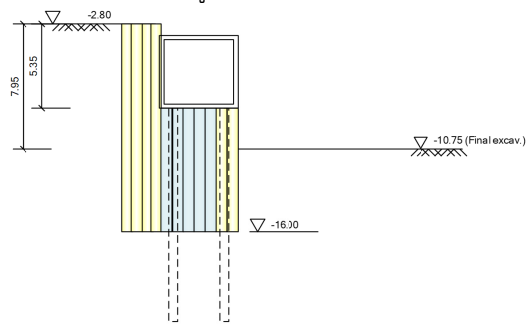
ชื่อเรียกกำแพง	คำอธิบาย
SCC-SOLID-BRACED	SCC ทึบ
SCC-BUTTRESS	SCC ทึบบางส่วน
PW-SCC-FRONT	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหน้า PW
PW-SCC-BACK	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหลัง PW

กำแพง SCC-SOLID-BRACED เป็นกำแพง SCCW เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร ก่อสร้างเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร จำนวน 8 แถว โดยด้านนี้มีระดับดินขุดเป็น -10 เมตร ในด้านนี้ใช้การก่อสร้างโดยก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดินส่วนกลางอาคารก่อน จากนั้นจึงติดตั้งค้ำยันระหว่าง SCCW กับอาคารส่วนที่สร้างเสร็จแล้วดังรูปที่ 2



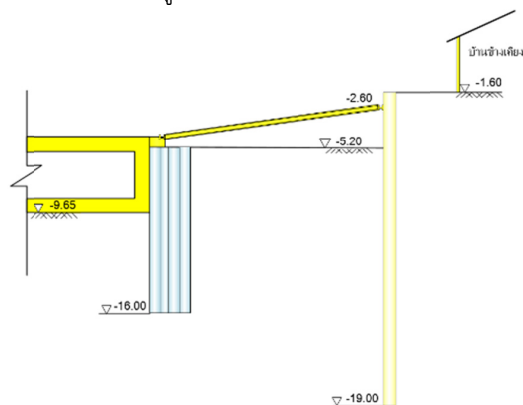
รูปที่ 2 กำแพง SCC-SOLID-BRACED

กำแพง SCC-BUTTRESS เป็นกำแพง SCC ที่ไม่มีการใช้ค้ำยันชั่วคราว กำแพงส่วนทึบเป็น SCC ขนาด 700 มิลลิเมตร จำนวน 4 แถว และมี SCC ที่มีลักษณะเป็นเซลล์ลาร์ด้านในของบ่อขุด ระดับของการขุดมากที่สุดเป็น -10.75 เมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กำแพง SCC-BUTTRESS

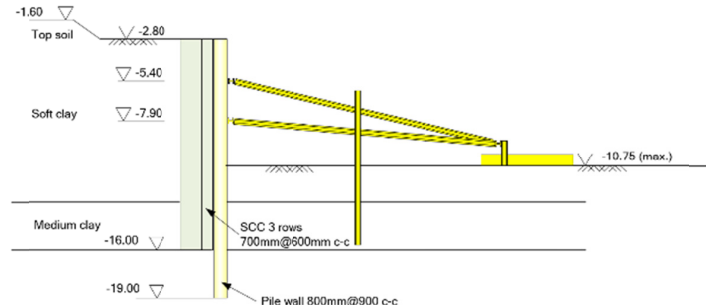
กำแพง PW-SCC-FRONT เป็นกำแพง PW เนื่องจากมีระยะห่างจากพื้นที่ข้างเคียงไม่เพียงพอที่สำหรับสร้างกำแพง SCCW ที่มีความหนาเพียงพอได้ ในด้านนี้มีระดับของการขุดลึกอยู่ที่ -9.65 เมตรซึ่งอยู่ห่างจากแนวกำแพง PW 15 เมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กำแพง PW-SCC-FRONT

กำแพง PW-SCC-BACK เป็นกำแพง PW เสริมด้วย SCCW เนื่องจากมีพื้นที่ไม่กว้างพอที่จะสร้างกำแพง SCCW เป็น Gravity Wall ได้ และใช้ค้ำยันชั่วคราว

2 ชั้น ที่ติดตั้งหลังจากการก่อสร้างฐานรากส่วนกลางอาคารเสร็จ ดังรูปที่ 5

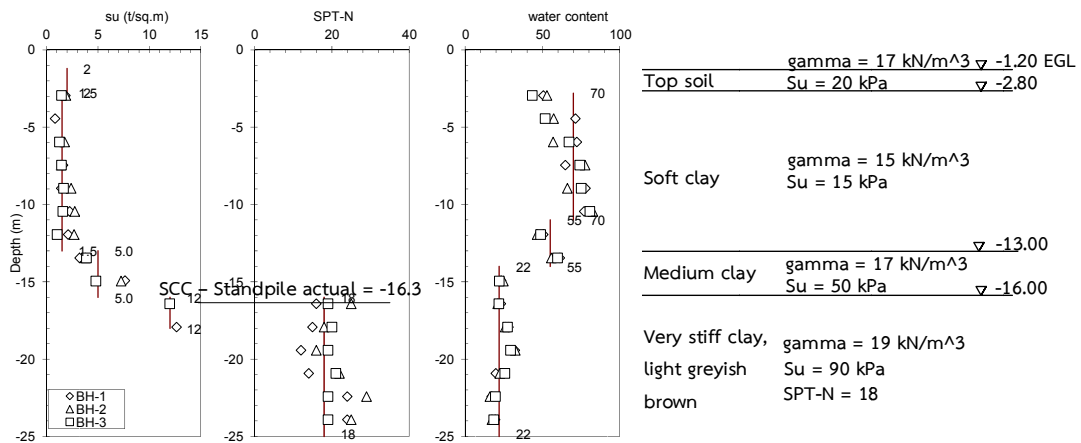


รูปที่ 5 กำแพง PW-SCC-BACK

2.2 ข้อมูลชั้นดิน

ในการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดินโครงการจำนวน 3 หลุม โดยรูปที่ 6 เป็นรูปตัดชั้นดินและคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล ชั้นดิน

ประกอบไปด้วยชั้นดินส่วนบนหนา 2.8 เมตร วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10.2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากอีกมากกว่า 45 เมตร จากผิวดิน

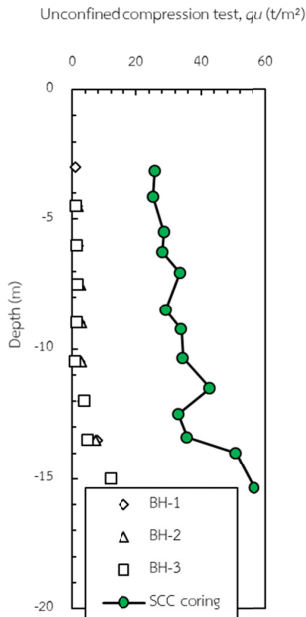


รูปที่ 6 รูปตัดชั้นดิน

2.3 เสาค้ำดินซีเมนต์

เสาค้ำดินซีเมนต์ในโครงการนี้ก่อสร้างโดยใช้ระบบเชิงกลและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ โดยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็น 200 กิโลกรัมต่อดินเดิม 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 1 ต่อ 1 ส่วน อัตราคก้านผสมนั้นสัมพันธ์กับอัตราการส่งน้ำปูนซึ่งมีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 เมตรต่ออนาที ส่วนความเร็วรอบ

ของการหมุนก้านขึ้นกับลักษณะดินแต่ละชนิดซึ่งก้านเจาะจะหมุน 30-40 รอบต่อนาทีในชั้นดินเหนียวอ่อนเมื่อก่อสร้างเสาค้ำดินซีเมนต์เรียบร้อยแล้วได้สุ่มเจาะก้านตัวอย่างขึ้นมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ได้ผลดังรูปที่ 7 ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์อยู่ที่ 25 ตันต่อตารางเมตรในชั้นดินเหนียวอ่อนและ 45 ตันต่อตารางเมตรในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง



รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์

2.4 การวัดการเคลื่อนตัวและแรงอัดในค้ำยัน

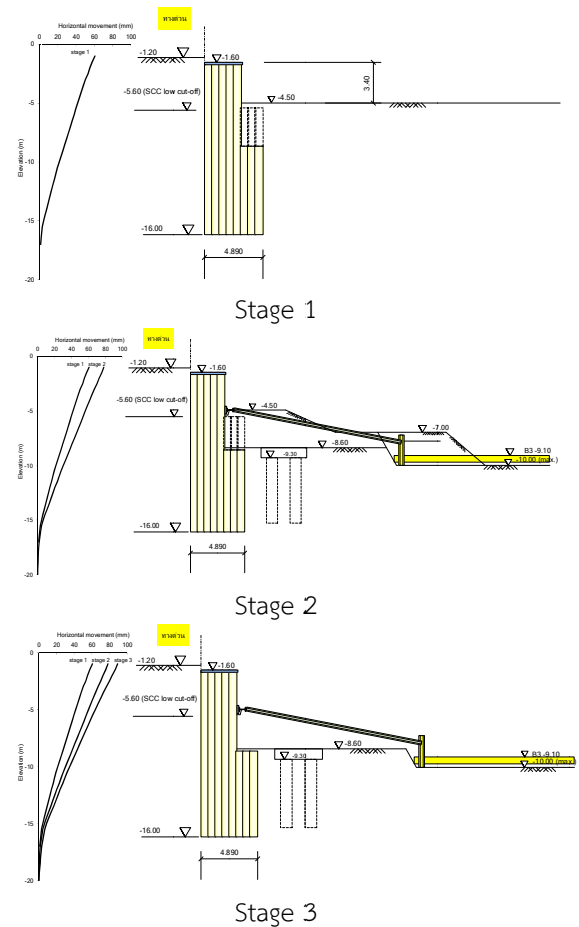
ในการวิจัยได้ติดตั้งท่อ inclinometer ไว้จำนวน 4 จุดในกำแพงแต่ละแบบ และทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงทุกชั้นตอนการก่อสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับดินขุดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการวัดแรงอัดในค้ำยันใช้สเตรนเกจ (strain gauge) สองตัวที่ติดตั้งไว้กับค้ำยันชั่วคราว โดยสเตรนเกจตัวแรกได้ติดตั้งไว้ที่แกนสะเทินของค้ำยัน และสเตรนเกจอีกตัวหนึ่งติดตั้งในทิศทางที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดเนื่องจากแรงภายนอกเพื่อชดเชยความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิเนื่องจากค้ำยันอยู่กลางแจ้ง

3. ผลการวิจัย

3.1 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัด

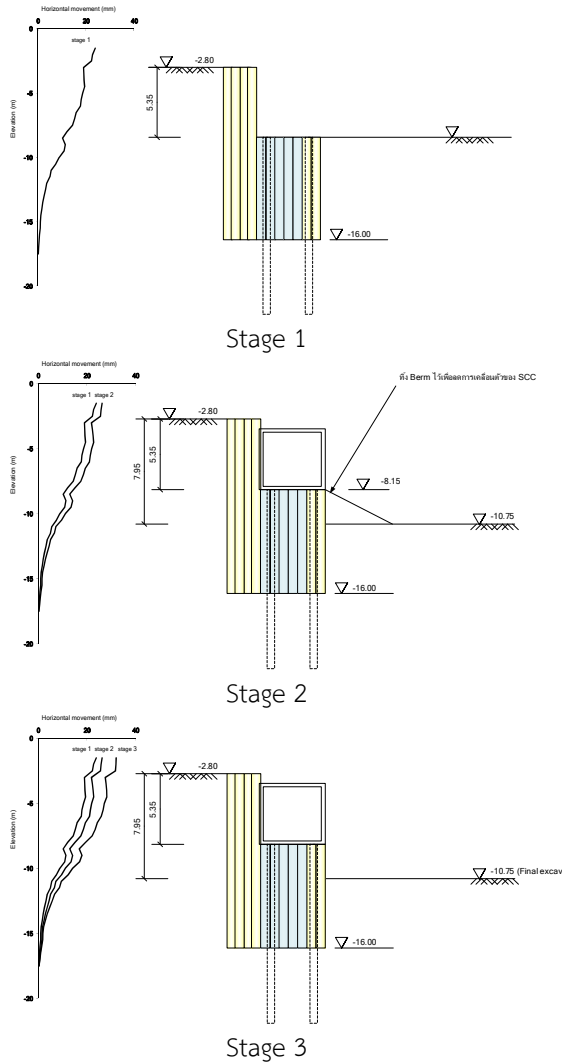
รูปที่ 8 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED ซึ่งมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นแบบคานยื่น โดยมีการเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ส่วนบนของกำแพง การเคลื่อนตัวในขั้นตอนที่ 1 ที่มีระดับการขุดเป็น -4.50 เมตร เป็น 60.70 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อติดตั้งค้ำยันชั่วคราวและขุดดินบริเวณกลางโครงการจนถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้น

เป็น 78.26 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเมื่อขุดดินส่วนที่ติดกับกำแพงออกเป็น 89.24 มิลลิเมตร ในส่วนนี้ได้ติดตั้งสเตรนเกจไว้ในค้ำยันเพื่อวัดแรงอัดโดยค่าแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 16 ถึง 23 ตัน

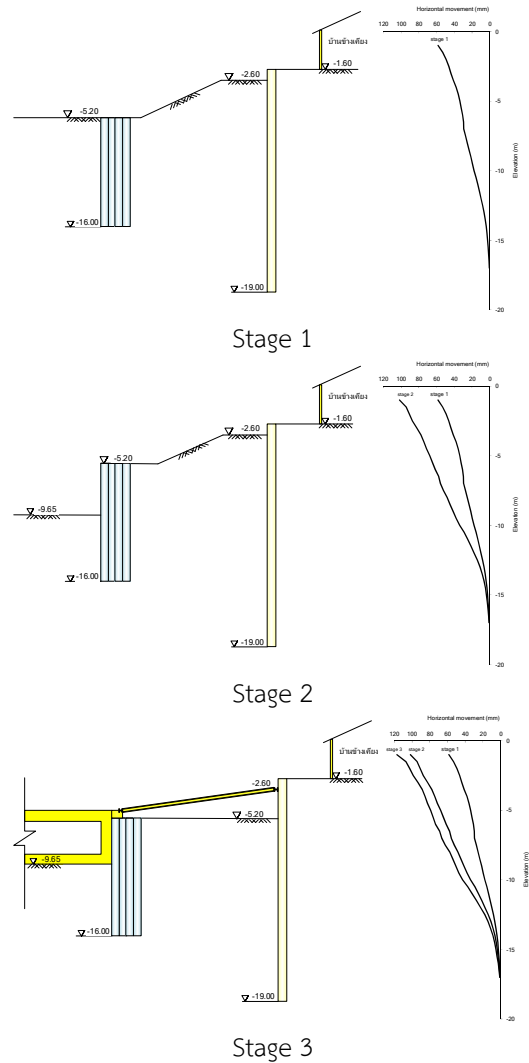


รูปที่ 8 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 9 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS ในขั้นตอนการขุดถึงระดับ -8.15 เมตร มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 23.91 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อก่อสร้างถึงเก็บน้ำใต้ดินคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วขุดดินบริเวณส่วนกลางโครงการถึงระดับ -10.75 เมตร และยังคงทิ้งลาดดินไว้ บางส่วนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 26.31 มิลลิเมตร และเมื่อขุดลาดดินบริเวณหน้ากำแพงจนหมดการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 32.13 มิลลิเมตร



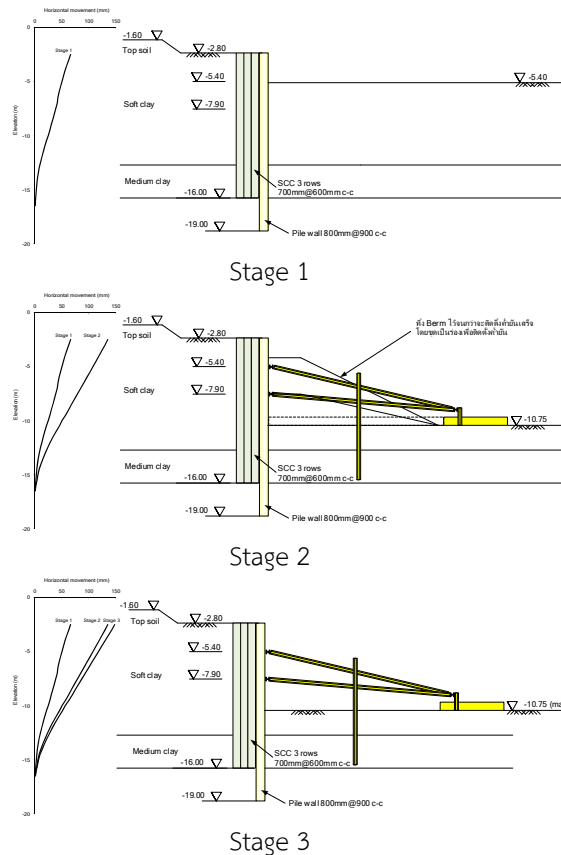
รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 10 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT เมื่อขุดดินถึงระดับ -8.2 เมตร โดยคงลาดดินหน้ากำแพงไว้ การเคลื่อนตัวสูงสุดของ PW เป็น 58.36 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินบริเวณกลางโครงการออกจนถึงระดับ -9.65 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ 101.88 มิลลิเมตร และหลังจากก่อสร้างชั้นใต้ดินส่วนกลางแล้วเสร็จได้ติดตั้งค้ำยันชั่วคราวระหว่าง PW กับโครงสร้างส่วนกลาง แล้วขุดดินหน้า PW ออก การเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเป็น 117.09 มิลลิเมตร

รูปที่ 11 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK ซึ่งกำแพงชนิดนี้เป็นกำแพง PW เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้านหลังกำแพง ซึ่งเมื่อขุดดินถึงระดับ -5.40 เมตร การเคลื่อนตัวมีลักษณะเป็นแบบคานยื่นและมีค่าสูงสุดเป็น 66.66 มิลลิเมตร หลังจากนั้นขุดดินและก่อสร้างชั้นใต้ดินบริเวณกลางโครงการโดยเว้นลาดดินหน้า PW ไว้แล้วติดตั้งค้ำยันระหว่าง PW กับชั้นใต้ดินส่วนนี้แล้ว การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 135.78 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินถึงระดับ -10.75 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 148.69 มิลลิเมตร

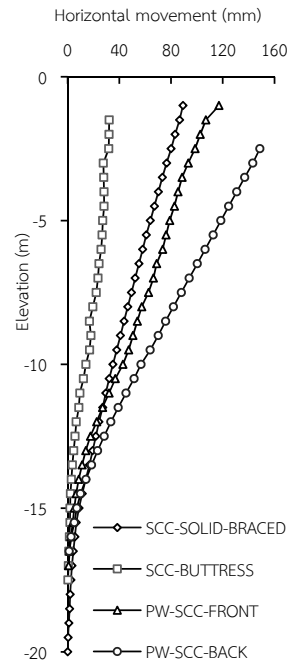


รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK

ตารางที่ 2 แสดงค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่วัดจริงในสนามของกำแพงแต่ละแบบที่ทำการวัดด้วย Inclinometer

ชนิดของกำแพง	ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)
SCC-SOLID-BRACED	89.24
SCC-BUTTRESS	32.13
PW-SCC-FRONT	117.09
PW-SCC-BACK	148.69

รูปที่ 12 เป็นการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงทั้ง 4 แบบ ซึ่งกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดคือ กำแพง SCC-BUTTRESS ส่วนกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดคือ กำแพง PW-SCC-BACK



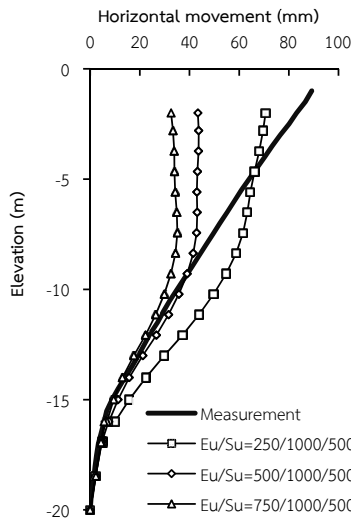
รูปที่ 12 การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพง

3.2 การวิเคราะห์หักกลับโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

งานวิจัยได้ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D และ PLAXIS 3D ในการจำลองการขุดดินแต่ละแบบ โดยในกรณีกำแพงแบบ SCC-SOLID-BRACED, PW-SCC-FRONT, และ PW-SCC-BACK ที่รูปตัดขวางกำแพงมีความสม่ำเสมอใช้การวิเคราะห์แบบสองมิติ ส่วน กรณีกำแพงแบบ SCC-BUTTRESS เป็นกำแพงที่มีรูปตัดขวางไม่คงที่ที่ใช้การวิเคราะห์แบบสามมิติ โดยใช้แบบจำลองดินแบบอีลาสติกเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ อาศัยเกณฑ์การวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) และพฤติกรรมของดินเป็นแบบหน่วยแรงรวมไม่ระบายน้ำ (undrained total stress) เหตุที่ใช้แบบจำลองดินชนิดนี้เนื่องจากงานวิจัยต้องการวิเคราะห์หักกลับเพื่อหาสตีเฟนสพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของดิน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินโครงการ ซึ่งปกติแล้วจะมีผลการทดสอบเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนกว่านั้นส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ต้องวิเคราะห์

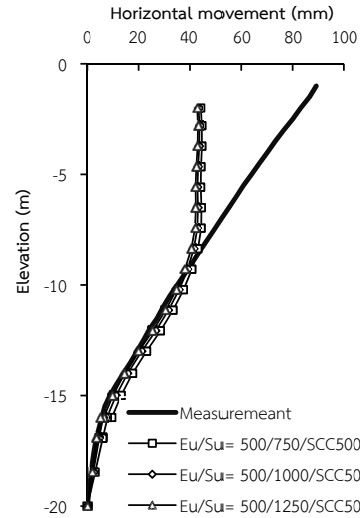
โดยอาศัยหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลที่ส่วนใหญ่แล้วในงานชุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินทั่วไปจะไม่มีการทดสอบหาพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลนี้ การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาค่าสติฟเนสที่เหมาะสมเนื่องจากการชุดของกำแพงแต่ละแบบ จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยแปรผันค่าสติฟเนส ของดินเหนียวอ่อน และกรณีที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง

3.2.1 การวิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินของกำแพง SCC-SOLID-BRACED



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

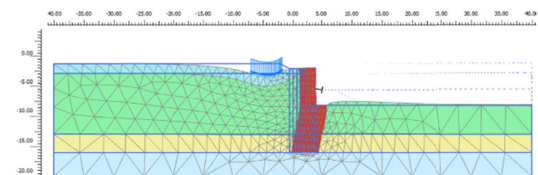
รูปที่ 13 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 750$



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

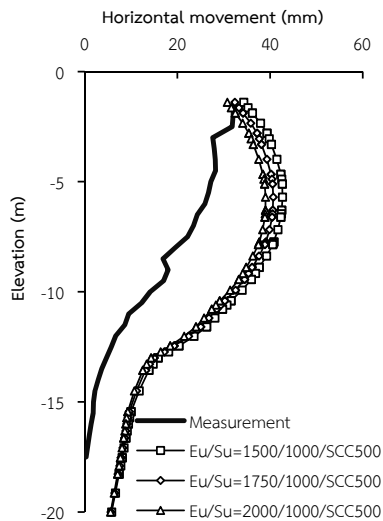
รูปที่ 14 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$

ค่าสติฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-SOLID-BRACED คือ $E_u / S_u = 750$ และ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 15 แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-SOLID-BRACED

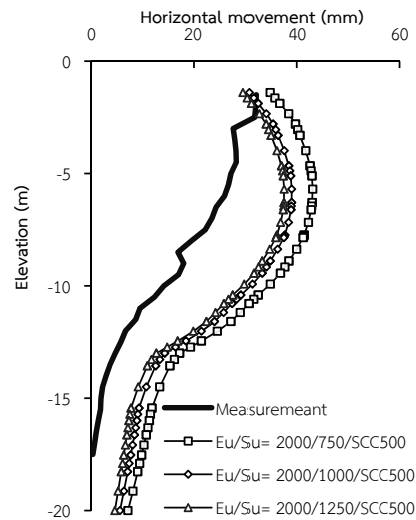
3.2.2 การวิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่า สติฟเนสของดินของกำแพง SCC-BUTTRESS



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์ที่กลับโดยแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง SCC-BUTTRESS

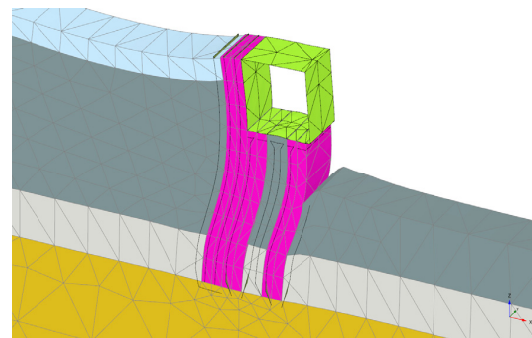
รูปที่ 16 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 1500, 1750 และ 2000 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนส ของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 2000$

รูปที่ 17 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนส ของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 2000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-BUTTRESS

ค่าสติฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-BUTTRESS คือ $E_u / S_u = 2000$ และ $E_u / S_u = 1250$

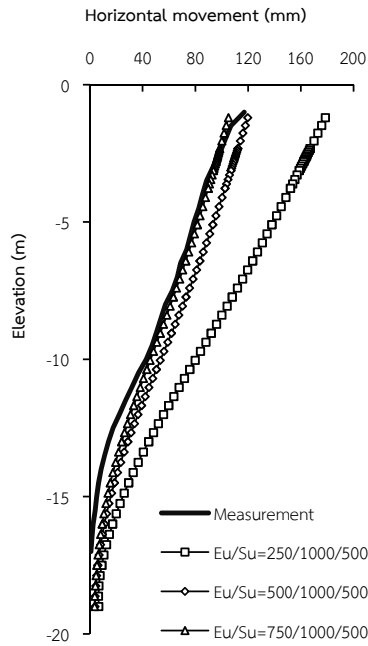


รูปที่ 18 แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-BUTTRESS

3.2.3 การวิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่า สติฟเนสของดินของกำแพง PW-SCC-FRONT

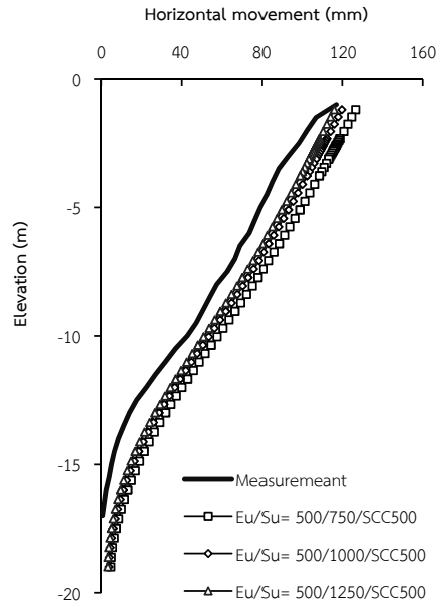
รูปที่ 19 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์ที่กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด

ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 750$



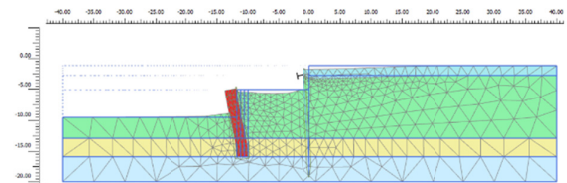
รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 20 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 20 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-FRONT

ค่าสตีฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของ กำแพง PW-SCC-FRONT คือ $E_u / S_u = 750$ และ $E_u / S_u = 1250$

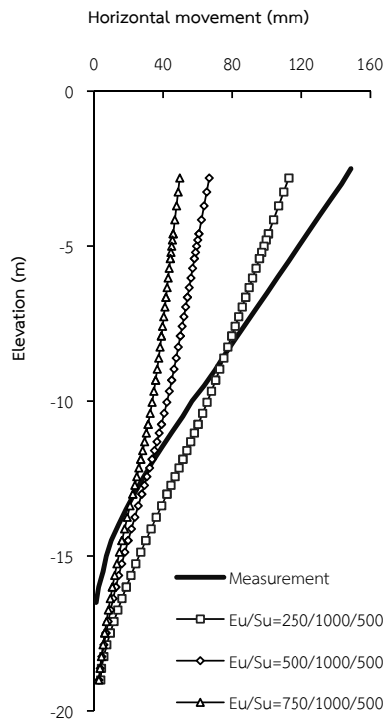


รูปที่ 21 แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-FRONT

3.2.4 การวิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินของกำแพง PW-SCC-BACK

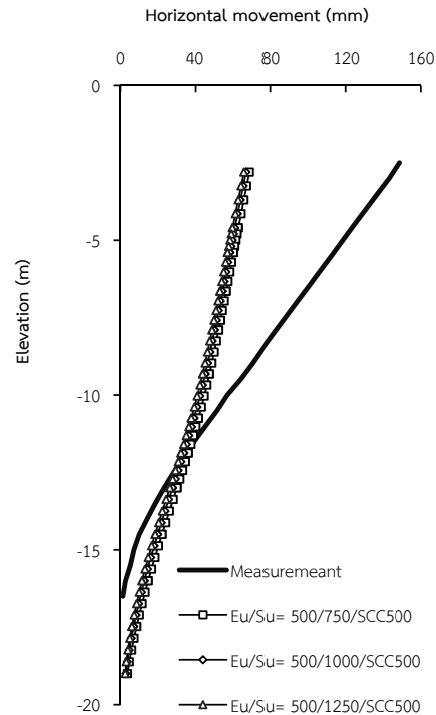
รูปที่ 22 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดิน

เหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 250$



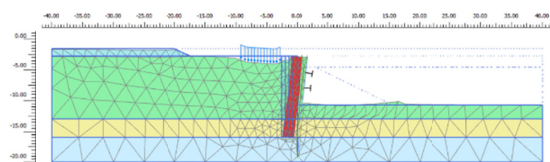
รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK

รูปที่ 23 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 23 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-BACK

ค่าสติฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-BACK คือ $E_u / S_u = 250$ และ $E_u / S_u = 1250$

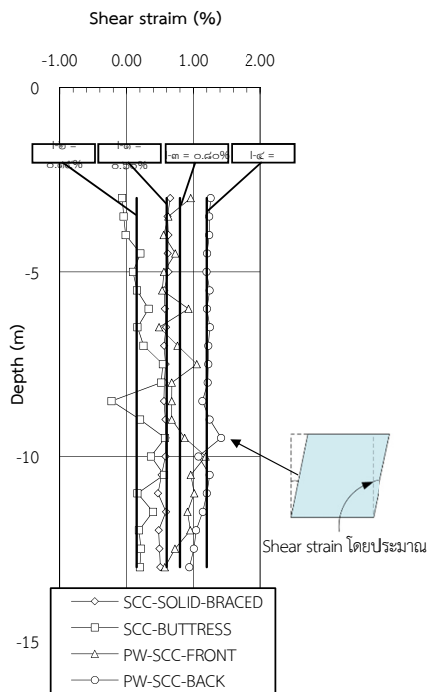


รูปที่ 24 แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-BACK

ตารางที่ 3 แสดงค่าสถิติเฟสของชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนามของกำแพงแบบต่างๆ

ชื่อเรียกกำแพง	(Eu/Su) กรณีที่ 1 (ดินเหนียวอ่อน)	(Eu/Su) กรณีที่ 2 (ดินเหนียวแข็ง)
SCC-SOLID-BRACED	750	1250
SCC-BUTTRESS	2000	1250
PW-SCC-FRONT	750	1250
PW-SCC-BACK	250	1250

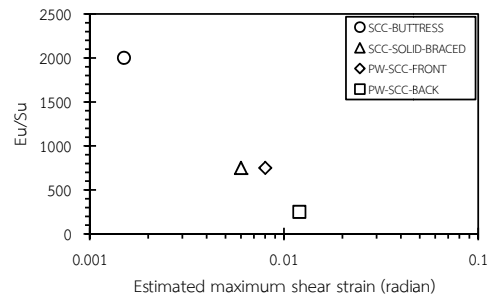
จากผลการวิเคราะห์หาค่าสถิติเฟสที่เหมาะสม เนื่องจากการขุดของกำแพงแต่ละแบบใน 2 กรณี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ค่า E_u/S_u ของดินต่ำ จะทำให้กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงขึ้น และเมื่อใช้ค่า E_u/S_u ของดินที่สูงขึ้นพบว่ากำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ต่ำลง



รูปที่ 25 ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบ

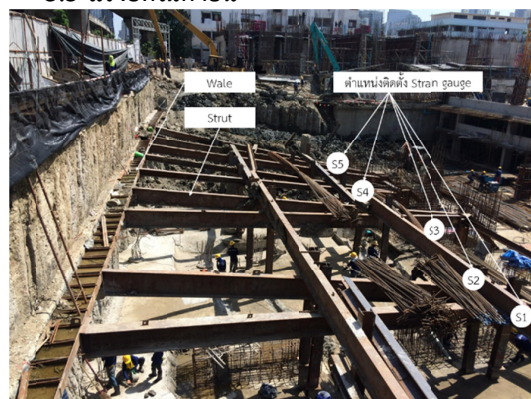
จากรูปที่ 25 เป็นความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบซึ่งมีความลึกอยู่ที่ระดับ -3.00 เมตร ถึง -13.00 เมตร โดยกำแพงแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่า Shear strain เท่ากับ 0.60%, 0.15%, 0.80% และ 1.20% ตามลำดับ เมื่อ

เปรียบเทียบกับรูปที่ 12 จะพบว่าผลสอดคล้องกัน คือ กำแพงที่มีอัตราร้อยละของ Shear strain มากจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างมาก และกำแพงที่มีอัตราร้อยละของ Shear strain น้อยจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างน้อย และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับตารางที่ 3 พบว่าเมื่อค่า Shear strain ที่มีค่าน้อย จะทำให้ค่า E_u/S_u ของดินสูง และค่า Shear strain ที่มีค่าสูง จะทำให้ค่าสถิติเฟส E_u/S_u ของดินต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากกำแพง SCC-BUTTRESS มีค่า Shear strain เท่ากับ 0.16% ซึ่งค่าสถิติเฟส E_u/S_u ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนาม เท่ากับ 2,000 และกำแพง PW-SCC-BACK มีค่า Shear strain เท่ากับ 1.20% ซึ่งค่าสถิติเฟส E_u/S_u ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนามเท่ากับ 250 ซึ่งแปรผกผันกัน โดยค่า Shear strain จากการวัดจริงในสนามจะใช้ประมาณค่าสถิติเฟส E_u/S_u ของการวิเคราะห์กลับก่อนการก่อสร้างในพื้นที่ใกล้เคียงได้ในอนาคต



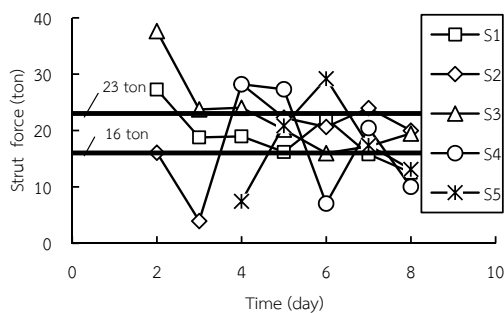
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับสถิติเฟสที่เหมาะสมในเทอมของ E_u/S_u

3.3 แรงอัดในค้ำยัน



รูปที่ 27 แสดงตำแหน่ง Wale, Strut และ Strain gauge

รูปที่ 27 ภาพแสดงตำแหน่ง Wale ,Strut และ Strain gauge โดยแรงอัดในค้ำยันเกิดจากแรงดันดิน ด้านหลังกำแพงส่งถ่ายผ่านรัดครอบ (Wale) มายัง ค้ำยัน (Strut) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันโดย PLAXIS 2D กำหนดค่า E_u / S_u ของดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็ง, และดินซีเมนต์ เท่ากับ 500, 1,000 และ 500 ตามลำดับ แรงอัดที่ได้ เท่ากับ 25.7 ตัน



รูปที่ 28 แรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยัน

รูปที่ 28 เป็นแรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยันได้ทำการวัด ด้วย Strain gauge ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จริงในสนาม โดยทำการเก็บค่าทุกครั้งที่มีการขุดลาดดินออกอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าแรงอัดในค้ำยัน (Strut) มีค่าเท่ากับ 25.7 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับแรงอัดที่ได้จากการวัดจริงในสนาม ซึ่งในช่วงแรก (ทำการขุดลาดดินออกยังไม่หมด) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าสูง เนื่องจากรัดครอบ (Wale) มีการโค้งงอ จึงทำให้ค้ำยันรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงหลัง (ทำการขุดลาดดินออกหมดแล้ว) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าลดลงเนื่องจากรัดครอบ (Wale) เล็กมีการโค้งตัวทำให้แรงอัดมีค่าลดลง ค่าโดยเฉลี่ยของแรงอัดในค้ำยันเท่ากับ 16-23 ตัน ซึ่งค่าที่วัดได้จริงในสนามและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่ากลับมาก่าใกล้เคียงกัน

4. สรุป

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการวัดการเคลื่อนตัวในสนามของกำแพง ทั้ง 4 รูปแบบที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกันแสดงให้เห็นว่า กำแพง SCCW ที่ก่อสร้างให้มีความหนาเพียงพอได้แก่ SCC-BUTRESS มีการเคลื่อนตัวด้านข้างอยู่ที่ 32.13

มิลลิเมตร สำหรับการขุดลึก 7.95 เมตรโดยไม่ใช้ค้ำยัน ซึ่งเป็นชนิดกำแพงที่เกิดการเคลื่อนตัวต่ำที่สุด ถัดมาเป็น SCCW ที่มีความหนาน้อยกว่าและต้องใช้ค้ำยันด้านข้าง 1 จุดโดยมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 89.24 มิลลิเมตร ที่ความลึกของการขุด 8.8 เมตร ส่วนในกรณีของ PW เสริมด้วย SCC และใช้ค้ำยันด้านข้างนั้นมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 117.09 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้ด้านในบ่อขุด และมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 148.69 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุด

4.2 ค่าสติเฟนเนส E_u / S_u ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของดิน ก่อนการก่อสร้างสำหรับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ SCCW-SOLID-BRACED คือ 750 และ SCC-BUTTRESS คือ 2000 ส่วน E_u / S_u ที่เหมาะสมสำหรับ PW เสริมด้วย SCC ไว้ด้านในบ่อขุดมีค่าเป็น 750 และเมื่อเสริมไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุดมีค่าเป็น 250

4.3 สติเฟนเนส E_u / S_u ของชั้นดินเหนียวแข็งไม่ส่งอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ค่าที่แนะนำให้ใช้ในการวิเคราะห์ไม่ควรต่ำกว่า 1250

4.4 แรงอัดในค้ำยันชั่วคราวซึ่งได้จากการวัดจริงในสนามมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 16-23 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 25.7 ตันซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท ไชมิส แอสเสท จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินการเก็บข้อมูลในโครงการ และขอขอบพระคุณบริษัท สแตนดีไฟล์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Tay, Jet grouting an alternative to sheet pile method for basement excavation, proceeding of conference on foundation and underground construction, Bangkok, Thailand, 1991. (in Thai)



- [2] T.Sutabutr, Deformation analysis of Deep Excavation in Bangkok Subsoils, master thesis, Asian Institute of Technology, Thailand, 1992. (in Thai)
- [3] P. Samanrattanasatien, The study on behavior of cement column retaining wall during construction, master thesis, King Mongkut's University of Technology, Thonburi, Thailand, 2002. (in Thai)
- [4] N. Wisuttiapat, Movement behavior of deep cement mixing column for retaining structure, master thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 2005. (in Thai)
- [5] P. Tanseng, Soil-cement column wall with wall-strut to minimize ground movement for a road tunnel construction in Bangkok subsoils, World Tunnel Congress (WTC2012), Bangkok, 2012. (in Thai)
- [6] P. Tanseng and V. Namwiset , Performance of soil-cement column retaining wall used with top-down construction method for basement construction in Bangkok subsoil. Proceedings of ISSMGE TC207, international conference on soil structure interaction underground structures, Saint Petersburg, Russia, 2014. (in Thai)