

การประยุกต์ใช้เสาเข็มซีเมนต์ในการเสริมเสถียรภาพระบบป้องกันดินที่ใช้กำแพงไดอาแฟรม
ในงานขุดดินลึก: กรณีศึกษา
SOIL CEMENT COLUMN APPLICATION FOR STABILIZED SOIL PROTECTION SYSTEMS
IN DEEP EXCAVATION WORKS USING DIAPHRAGM WALLS: CASE STUDY

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์*

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Chanchai Submaneewong*

Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

*E-mail: chanchai.s@pnru.ac.th

Received: 08-10-2025

Revised: 20-03-2026

Accepted: 20-03-2026

บทคัดย่อ

ระบบป้องกันดินสำหรับงานขุดดินลึกในเขตเมืองใหญ่ โดยเฉพาะในกรุงเทพฯ จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของดินและความปลอดภัยของระบบป้องกันดิน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง โดยต้องควบคุมค่าการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบขุด ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง เสาเข็มซีเมนต์เป็นวิธีการปรับปรุงดินที่มีประสิทธิภาพ จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างใต้ดินโดยนำระบบเสาเข็มซีเมนต์มาใช้ร่วมกับกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินและเพิ่มความมั่นคงของระบบป้องกันดิน บทความนี้นำเสนอแนวคิดการออกแบบ เทคนิคการก่อสร้าง และกรณีศึกษางานขุดดินลึกที่มีการปรับปรุงและเสริมเสถียรภาพระบบป้องกันดินที่ใช้กำแพงไดอาแฟรมด้วยเสาเข็มซีเมนต์ โดยก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ 2 รูปแบบคือ 1) การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินเชิงรุก (แรงกระทำ) และ 2) การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ (แรงต้าน) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการใช้เสาเข็มซีเมนต์สามารถลดการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยเพิ่มความปลอดภัยของระบบป้องกันดินในระหว่างการขุดดินลึก ทั้งนี้ยังสามารถลดความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียง

คำสำคัญ: เสาเข็มซีเมนต์ กำแพงไดอาแฟรม การเคลื่อนตัวของดิน

ABSTRACT

In deep excavation works within major urban areas particularly in Bangkok, the safety of soil protection systems is concerned. In addition, soil movement must be carefully controlled to prevent the impacts on adjacent nearby structures. Soil cement columns, an effective ground improvement technique, have been applied in underground construction to enhance stability

and reduce soil displacement. This paper presents the design concept, construction techniques, and case studies of deep excavation projects where Diaphragm walls were stabilized with soil-cement columns. Two construction approaches are considered: 1) the arrangement of soil-cement columns to reduce active earth pressure, and 2) the arrangement of soil cement columns to increase passive earth pressure. The study results indicate that the use of soil cement columns can significantly reduce ground movements and enhance the safety of soil protection systems during deep excavation. Moreover, this method helps minimize the risk of damage to nearby structures.

Keywords: Soil cement column, Diaphragm wall, Soil movement

บทนำ

ในปัจจุบันงานขุดดินเพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินขนาดใหญ่ เช่น อาคารชั้นใต้ดิน ปล่องอุโมงค์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน อาคารที่จอดรถใต้ดิน ฯลฯ ที่มีความลึกดินขุดมากในเขตเมืองใหญ่โดยเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพฯ มักจะขุดดินโดยเลือกใช้ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง (Rigid wall) ได้แก่ กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall) หรือกำแพงไดอะแฟรม (Diaphragm wall) ซึ่งเป็นกำแพงกันดินชนิดชุด-หล่อในที่เป็นระบบป้องกันดิน เพื่อลดผลกระทบกับโครงสร้างข้างเคียง (Thasnanipan et al., 2008) โดยการใช้จะพิจารณาปัจจัยร่วมต่าง ๆ ได้แก่ สภาพพื้นที่ ลักษณะชั้นดิน ขั้นตอนการทำงาน และผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงตลอดจนต้นทุนค่าก่อสร้าง

ปัจจุบันด้วยข้อกำหนดการจัดทำรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment, EIA) ในงานก่อสร้าง ซึ่งต้องประเมินผลกระทบจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ทำให้บางโครงการที่มีข้อจำกัดเรื่องระยะห่างจากโครงสร้างข้างเคียง จึงต้องออกแบบระบบป้องกันดินโดยคำนึงถึงผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างงานขุดดิน การใช้เสาดินซีเมนต์ (Soil cement column) มาเสริมเสถียรภาพกำแพงกันดินจึงเป็นแนวคิดที่สามารถออกแบบเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบบ่อขุด ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงได้

ในบางโครงการงานก่อสร้างใต้ดิน อาจมีการเปลี่ยนแปลงระดับขุดภายหลังการก่อสร้างระบบกำแพงกันดินแล้วเสร็จ การออกแบบใหม่จึงต้องมีการปรับปรุงดินโดยใช้เสาดินซีเมนต์มาเสริมเสถียรภาพกำแพงกันดินเดิมให้แข็งแรง เพื่อให้สอดคล้องกับระดับขุดที่มีการเปลี่ยนแปลง

Aye et al. (2007) ศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับขุดในงานก่อสร้างที่ใช้ระบบกำแพงไดอะแฟรม (Diaphragm wall) สามารถใช้เสาดินซีเมนต์มาช่วยเพิ่มเสถียรภาพงานขุดได้ โดยต้องมีการออกแบบและสอบทานติดตามผลการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องจนงานขุดดินแล้วเสร็จ

เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยระบบเสาดินซีเมนต์

เสาดินซีเมนต์จะใช้วิธีการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนหรือทรายหลวม ก่อสร้างในลักษณะเป็นเสาในดิน คล้ายเสาเข็ม โดยปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำและแร่ประกอบในดิน เกิดการแข็งตัว (Cementation) ทำให้ดินมีความแข็งแรงและความทนทานเพิ่มขึ้น

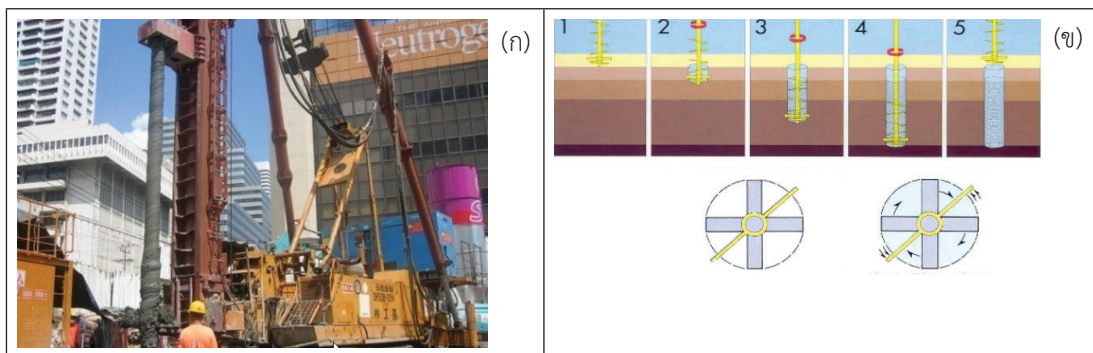
ข้อดีของเสาเข็มซีเมนต์ มีดังนี้

- เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของดินอ่อน
- ลดการซึมผ่านของน้ำใต้ดิน (permeability)
- ลดการทรุดตัว (settlement) ของดินภายใต้น้ำหนักที่มากระทำ
- ลดแรงดันดิน (earth pressure) และเพิ่มแรงต้านที่กระทำต่อโครงสร้างกันดิน
- ลดการเคลื่อนตัวของดิน

การปรับปรุงดินด้วยระบบเสาเข็มซีเมนต์สามารถทำการก่อสร้างได้ 2 วิธี คือวิธีผสมแห้ง (Dry mixing) และวิธีผสมเปียก (Wet mixing) แต่ที่นิยมใช้ในการปรับปรุงดินสำหรับงานขุดดินเป็นวิธีผสมเปียก ซึ่งสามารถก่อสร้างได้ 2 ระบบ ได้แก่ระบบการใช้แรงดันต่ำ (Low pressure grout / Mechanical mixing) กับระบบการใช้แรงดันสูง (High-pressure grout)

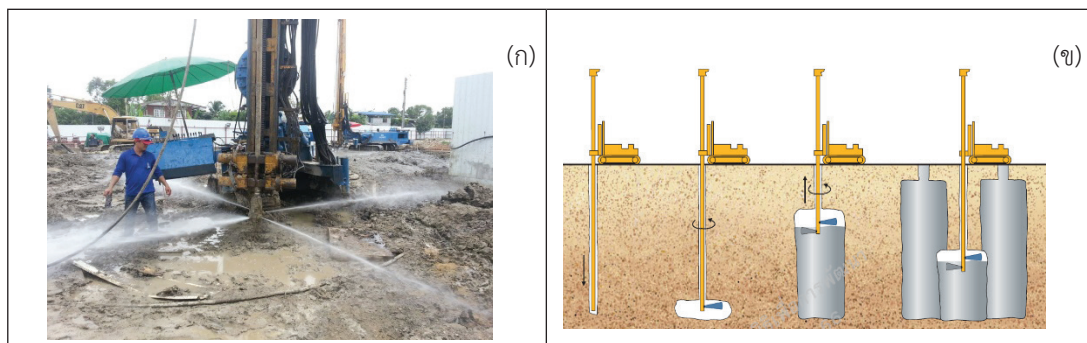
ระบบแรงดันต่ำจะใช้เครื่องผสมระบบ Rotary (ภาพที่ 1) โดยการใช้ใบพัดตีดินให้แตกตัวแล้วทำการผสมดินกับน้ำปูนด้วยแรงดันต่ำประมาณ 10-30 บาร์ แล้วจะใช้ใบพัดตีดินต่อไป ตามความลึกที่ได้ออกแบบ เพื่อให้ น้ำปูนผสมกับดิน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ดินมีกำลังสูงขึ้น

วิธีการผสมโดยใช้แรงดันสูงใช้วิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Jet-grouting technique) โดยการฉีดน้ำด้วยแรงดันสูงประมาณ 200-400 บาร์ผ่านทางหัวฉีด (ภาพที่ 2) เพื่อเป็นทำลายอนุภาคของดินให้แตกตัวโดยละเอียด จนถึงความลึกที่ได้ออกแบบ หลังจากนั้นจะฉีดน้ำผสมซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง พร้อมทั้งยกตีก้านเจาะขึ้นเป็นจังหวะ น้ำปูนซีเมนต์ความดันสูงจะผสมกับดินรวมเป็นเนื้อเดียวกัน การทำงานจะควบคุมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มเจาะจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ



ภาพที่ 1 ระบบแรงดันต่ำ (ก) เครื่องจักร (ข) ขั้นตอนการก่อสร้าง

ที่มา : Submanee Wong et al. (2015)



ภาพที่ 2 การอัดฉีดน้ำด้วยแรงดันสูง (ก) เครื่องจักร (ข) ขั้นตอนการก่อสร้าง

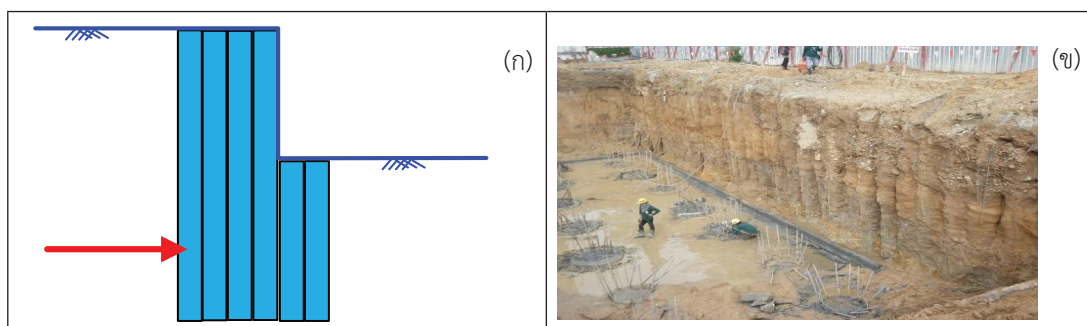
ที่มา : www.soilcrete.co.th

แนวความคิดการปรับปรุงดินโดยใช้เสาเข็มซีเมนต์เพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดิน

แนวความคิดการออกแบบการประยุกต์ใช้ระบบเสาเข็มซีเมนต์มาเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดิน โดยออกแบบให้สามารถลดแรงดันดิน ด้านทานแรงดันดินและลดการเคลื่อนตัวของดิน การใช้เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยระบบเสาเข็มซีเมนต์ สำหรับงานขุดดินสามารถออกแบบเป็น 2 ลักษณะคือ

1. ใช้เสาเข็มซีเมนต์เป็นระบบกำแพงกันดินแบบ Gravity wall โดยออกแบบให้ระบบเสาเข็มซีเมนต์ซึ่งเจาะขบกันและจัดเรียงเป็น Block มีเสถียรภาพด้วยน้ำหนักตัวเอง ในลักษณะไม่มีระบบค้ำยัน ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งต้องสามารถต้านทานการเลื่อนไถล (Sliding) การหมุนพลิกคว่ำ (Overturning) และรับน้ำหนักแบกทานของดิน (Bearing capacity) ได้อย่างปลอดภัย (Submaneeewong & Siripoun, 2015)

2. ใช้เสาเข็มซีเมนต์มาเสริมเสถียรภาพของระบบกำแพงกันดิน โดยก่อสร้างจัดเรียงเสาเข็มซีเมนต์ให้ติดกับกำแพงกันดิน ดังแสดงในภาพที่ 4 และภาพที่ 5



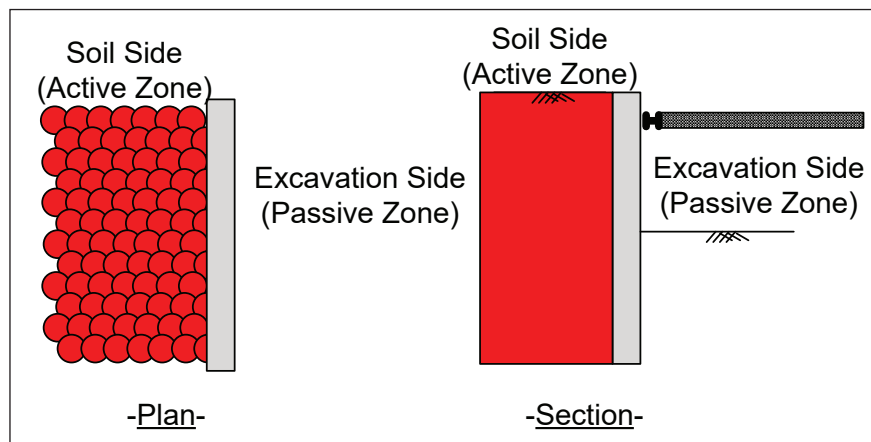
ภาพที่ 3 งานขุดดินโดยใช้เสาเข็มซีเมนต์รูปแบบ Gravity wall (ก) รูปแบบแนวคิด (ข) รูปตัวอย่างงานขุด

ที่มา : Submaneeewong & Siripoun (2015)

รูปแบบการจัดวางเสาเข็มซีเมนต์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพกำแพงกันดิน โดยทำการก่อสร้างจัดเรียงเสาเข็มซีเมนต์ให้ติดกับกำแพงกันดิน มี 2 รูปแบบ ดังนี้

1. การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ (Active earth pressure)

การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ จะออกแบบเสาเข็มซีเมนต์โดยก่อสร้างเป็นแบบขบกัน (Block type) ด้านหลังกำแพงกันดินโซนแรงกระทำ (Active zone) เพื่อลดแรงดันดินที่กระทำซึ่งดังแสดงในภาพที่ 4

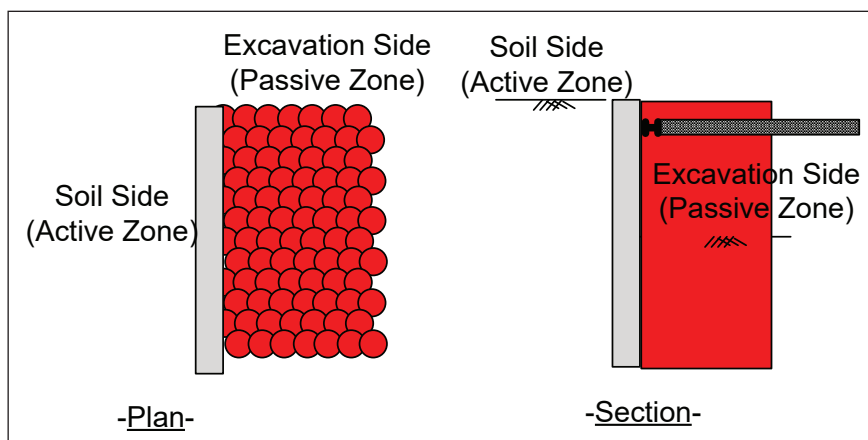


ภาพที่ 4 การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ

การจัดเรียงรูปแบบนี้ จะช่วยลดแรงกระทำจากแรงดันดิน ทำให้โมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดิน และค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินลดลง โดยอาจไม่จำเป็นต้องก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์จากระดับผิวดินทั้งนี้รูปแบบและระดับ/ตำแหน่ง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในแต่ละกรณีไป

2. การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงต้าน (Passive earth pressure)

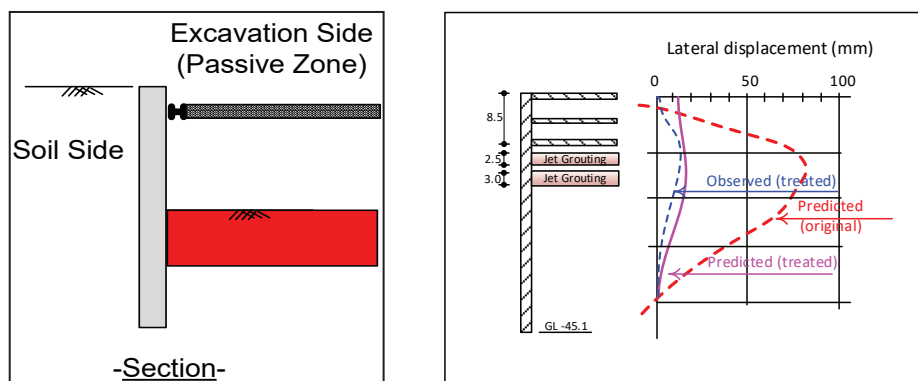
การจัดวางเสาเข็มซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงต้าน จะออกแบบเสาเข็มซีเมนต์โดยก่อสร้างเป็นแบบขบกัน (Block type) ด้านหน้ากำแพงกันดินที่โซนแรงต้าน (Passive zone) เพื่อเพิ่มแรงต้านของกำแพงกันดินดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การจัดวางเสาดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงดัน

การจัดเรียงรูปแบบนี้ โดยทั่วไปจะก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ตั้งแต่ผิวดิน เพื่อเพิ่มแรงดันในแต่ละชั้นตอนการขุดดินและติดตั้งค้ำยัน ซึ่งจะช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวตามเวลา (Creep) ของดินจากชั้นตอนการติดตั้งค้ำยันในแต่ละชั้น ในกรณีก่อสร้างเสาดินซีเมนต์บริเวณใต้ระดับดินขุด (ภาพที่ 6) เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพดินอัด (Heave) ใต้บ่อขุด และช่วยเพิ่มแรงต้านการเคลื่อนที่ของกำแพง เปรียบเสมือนติดตั้งค้ำยันอีกชั้นใต้บ่อขุดก่อนการขุดดิน จะทำให้เสถียรภาพของกำแพงกันดินสูงขึ้นและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจะลดลง (Tan et al., 2003) และทำให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการรูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น (Tanseng & Boonkert, 2023)

จากการศึกษาของ Sugawara et al. (1996) พบว่าสำหรับงานขุดดินโครงการ Bugis Junction สิงคโปร์ พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในกรณีทำการปรับปรุงดินด้วยเสาดินซีเมนต์ มีค่าน้อยกว่าค่าออกแบบ ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงดิน (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 การจัดวางเสาดินซีเมนต์เพื่อเพิ่ม ภาพที่ 7 ผลกระทบของงานปรับปรุงดินในโครงการ
แรงดันดินด้านใต้ระดับดินขุด Bugis Junction, สิงคโปร์

ที่มา : Sugawara et al. (1996)

บทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาการใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์มาเสริมเสถียรภาพของกำแพงไดอาแฟรม (Diaphragm wall) ในงานขุดดินลึก โดยใช้หลักการจัดวางรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อให้ลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ (active earth pressure) และรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงต้าน (Passive earth pressure)

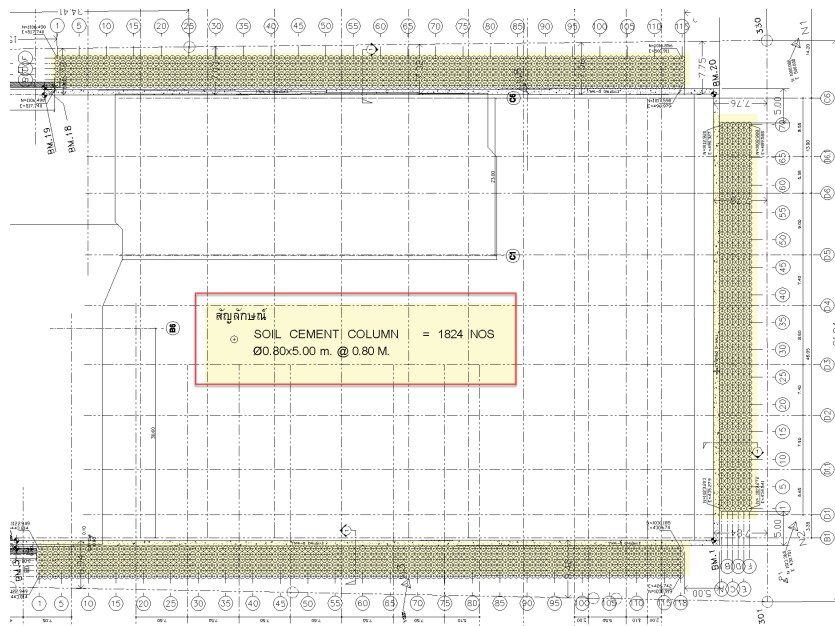
กรณีศึกษาที่ 1: การปรับปรุงดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ Diaphragm wall

1. ลักษณะโครงการ

โครงการนี้ตั้งอยู่ริมถนนสุขุมวิท กรุงเทพฯ พื้นที่ข้างเคียงประกอบด้วย อาคารบ้านพักอาศัย และอาคารชุดคอนโดมิเนียมโดยมีพื้นที่ติดโครงการและมีระยะร่น 6 เมตรโดยรอบ

กรณีศึกษาเป็นงานขุดดินลึกประมาณ 13.7 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 4 ชั้น แต่เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการที่มีการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์เสร็จ พ.ศ. 2540 โดยได้ออกแบบและก่อสร้าง Diaphragm wall หนา 80 เซนติเมตร ลึก 21.0 เมตร สำหรับงานขุดดินใต้ดินลึก 3 ชั้น ที่ความลึกขุดประมาณ -11.0 เมตร จากผิวดินแล้วเสร็จ หลังจากเกิดวิกฤตการณ์เศรษฐกิจจึงถูกทิ้งร้างมาเกือบ 20 ปี

ภายหลังมีการรื้อฟื้นโครงการโดยทำการออกแบบงานขุดดินใหม่เพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นใต้ดินจาก 3 ชั้นเป็น 4 ชั้น ทำให้ความลึกดินขุดที่เคยออกแบบไว้ที่ -11.0 เมตร ต้องออกแบบใหม่ที่ -13.7 เมตร โดยใช้โครงสร้าง Diaphragm wall เดิม การออกแบบจึงต้องประยุกต์ใช้ การปรับปรุงดินโดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ติดด้านหลัง Diaphragm wall โซนแรงกระทำ (Active zone) เพื่อลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ (ภาพที่ 8) ตลอดจนออกแบบตำแหน่งระดับค้ำยัน และกำหนดขั้นตอนงานขุดดินใหม่เพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยใช้ระบบก่อสร้างล้างชั้นบน แล้วเพิ่มค้ำยันชั่วคราวเป็น 3 ชั้น เพื่อให้ Diaphragm wall เดิมสามารถรับแรงได้



ภาพที่ 8 พังโครงการงานขุดดินลึก 13.7 เมตร

ที่มา : แบบก่อสร้างโครงการงานขุดดินลึกประมาณ 13.7 เมตร ริมถนนสุขุมวิท กรุงเทพฯ

2. ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการงานขุดดินลึกประมาณ 13.7 เมตร

ลักษณะชั้นดินโครงการประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน หนาประมาณ 13 เมตร หลังจากนั้นพบชั้นดินเหนียวแข็ง ที่ความลึกประมาณ -17.2 เมตร จากผิวดิน และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ประมาณ -1.0 เมตร จากผิวดิน ลักษณะชั้นดินโครงการ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะชั้นดินโครงการงานขุดดินลึกประมาณ 13.7 เมตร

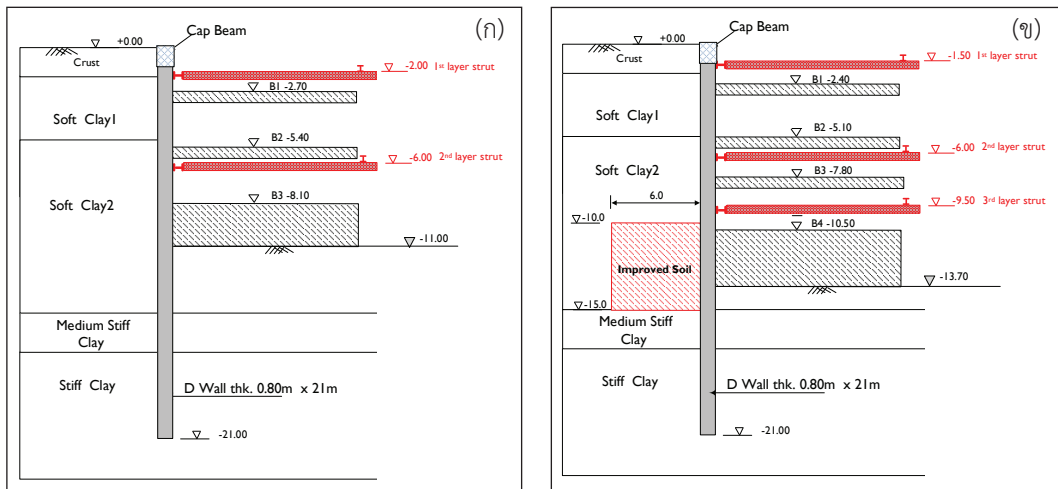
ความลึก (ม.)		ลักษณะชั้นดิน	กำลังรับแรงเฉือนดิน, Su	ค่าทดสอบมาตรฐาน, SPT
จาก	ถึง		(ตัน/ตารางเมตร)	(ครั้ง/ฟุต)
0	1.0	Pavement/top soil	-	-
1.0	5.0	Soft Clay 1	1.3	-
5.0	15.0	Soft Clay 2	1.8	-
15.0	17.2	Medium Stiff Clay	4.0	-
17.2	19.5	Stiff Clay		18

3. แนวคิดการออกแบบ

โครงการนี้ในอดีตได้มีการออกแบบและก่อสร้าง Diaphragm wall แล้วเสร็จ Diaphragm wall ที่ก่อสร้างไว้หนา 0.80 เซนติเมตร ลึก 21.0 เมตร เหล็กเสริมได้ออกแบบสำหรับงานขุดดินลึก -11.0 เมตร โดยในแบบกำหนดมีค้ำยันชั่วคราว 2 ชั้นที่ระดับ -2.0 เมตร และ -6.0 เมตร (ภาพที่ 9 (ก))

เมื่อถึงขั้นตอนงานขุดดิน ทางโครงการได้มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นใต้ดินโดยกำหนดระดับงานขุดใหม่เพิ่มเป็นระดับ -13.7 เมตร จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า โมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ระดับงานขุดใหม่สูงเกินกว่าเหล็กเสริม Diaphragm wall ที่ก่อสร้างไว้แล้ว จะสามารถรับได้

แนวทางแก้ปัญหาจึงกำหนดให้ทำการปรับปรุงดินเพื่อเสริมเสถียรภาพด้านหลัง Diaphragm wall เพื่อลดแรงกระทำ ด้วยระบบเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร แบบเรียงชิดกันจำนวน 6 แถว ที่ระดับ -10.0 เมตร ถึง -15.0 เมตร กำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ 5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และแก้ไขระบบค้ำยันชั่วคราวเป็น ชั้น ที่ระดับ -1.5 เมตร -6.0 เมตร และ -9.5 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 9 (ข)

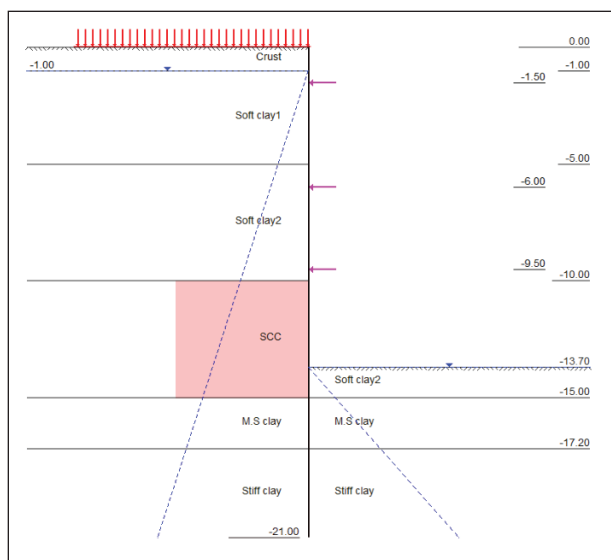


ภาพที่ 9 รูปตัดงานชุดดิน (ก) รูปแบบเดิม (ข) รูปแบบปรับปรุง

4. ผลการวิเคราะห์

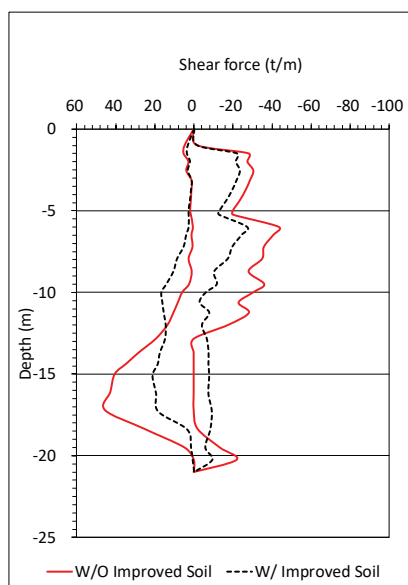
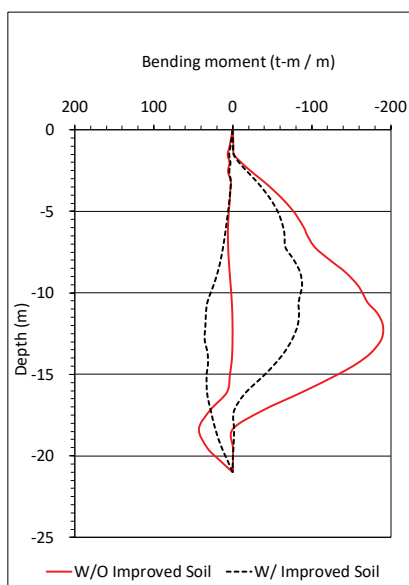
ก่อนการวิเคราะห์ ผู้ออกแบบจะทำการจัดวางตำแหน่งค้ำยันให้สอดคล้องกับระดับชุดและพื้นที่ชั้นใต้ดินในแต่ละชั้น ตามข้อมูลใหม่ที่ได้เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นทำการลงจัดวางตำแหน่งโชนการปรับปรุงดินด้วยเสาตึ้นซีเมนต์ด้านหลัง Diaphragm wall แล้วจึงทำการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัด แรงเฉือนและค่าการเคลื่อนตัว ซึ่งผลวิเคราะห์พบว่าโชนการปรับปรุงดินด้วยเสาตึ้นซีเมนต์ที่เหมาะสมคือที่ระดับ -10.0 เมตร ถึง -15.0 เมตร ซึ่งให้ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ที่ระบบป้องกันดิน Diaphragm wall เดิม ภายใต้เหล็กเสริมที่ติดตั้งไว้แล้ว สามารถรับได้ จึงกำหนดค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall เพื่อใช้สอบทานความถูกต้องในการออกแบบ

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรม Diaphragm wall ตามขั้นตอนการชุดดินใหม่ที่กำหนดขึ้น ใช้วิธีจำลองพฤติกรรมของคานที่วางอยู่บนสปริง (Beam on elasto-plastic spring) ซึ่งเป็นวิธีที่คำนวณแรงที่เกิดขึ้นใน Diaphragm wall และแสดงค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเปรียบเทียบกับระหว่างกรณีมีการปรับปรุงดิน และไม่มีการปรับปรุงดิน ซึ่งพบว่าการปรับปรุงดินช่วยลดโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 10



SUMMARY OF BENDING MOMENT ENVELOPE

SUMMARY OF SHEAR FORCE ENVELOPE



ภาพที่ 10 ผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของ Diaphragm wall

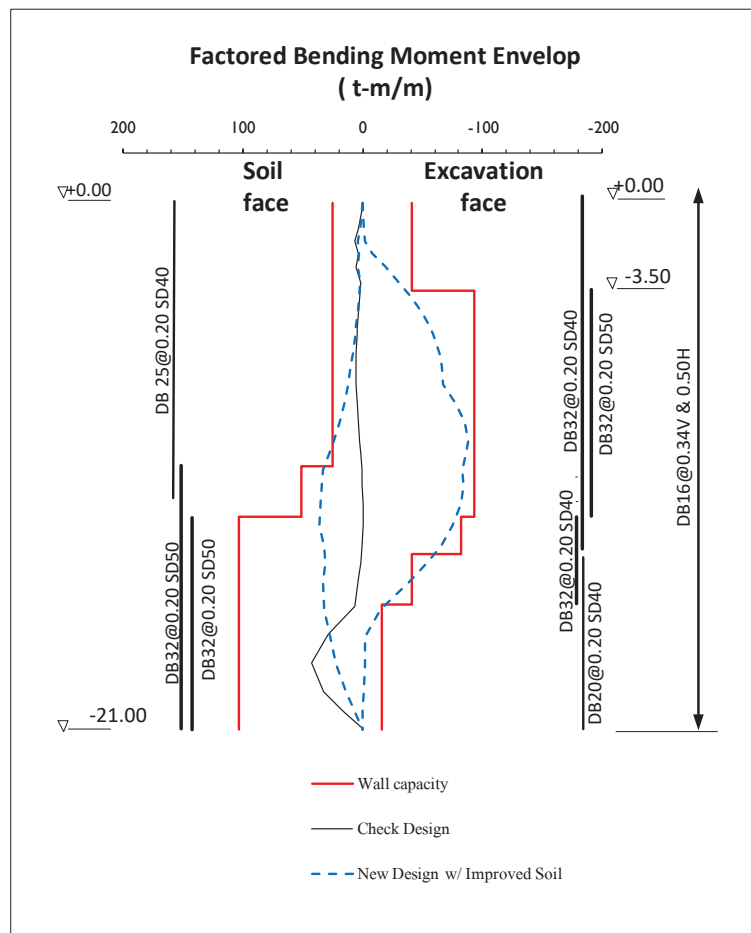
ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของ Diaphragm wall พบว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของ Diaphragm wall เดิม ดังแสดงในภาพที่ 11

5. การตรวจวัดทางธรณีเทคนิค

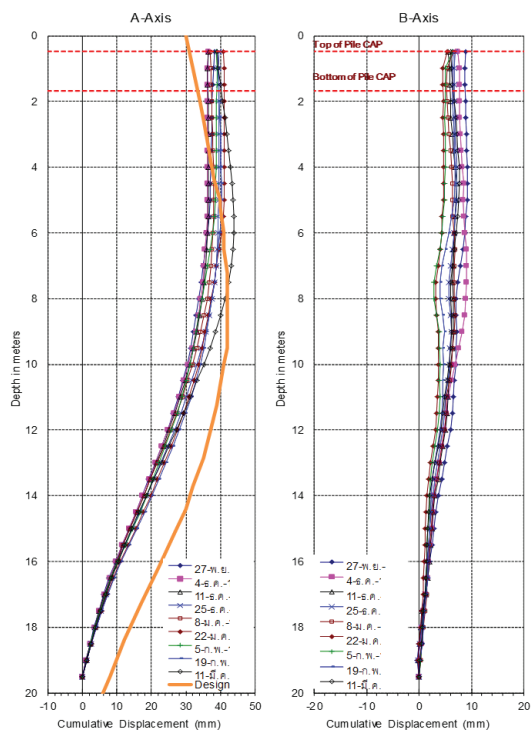
การสอบทานความถูกต้องในการออกแบบ โดยใช้การวัดค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ด้วย Inclinometer ที่ติดตั้งโดยรอบข้อุด ในทุก ๆ ขั้นตอนการขุดดินและติดตั้งค้ำยัน พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้สอดคล้องกับค่าการประเมินในขั้นตอนการออกแบบ (ภาพที่ 12) ซึ่งช่วยลดแรงกระทำด้วยการปรับปรุงดินบริเวณที่ออกแบบไว้ ทำให้ Diaphragm wall เดิม มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับงานขุดดินที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับดินขุดมากกว่าเดิม

6. สรุปผลการดำเนินการ

กรณีศึกษาโครงการนี้ เป็นงานขุดดินที่เพิ่มจำนวนชั้นใต้ดินและความลึกดินขุดจากเดิม ประมาณ 13.7 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 4 ชั้น โดยใช้ Diaphragm wall เดิมที่ออกแบบและก่อสร้างมาก่อน งานออกแบบจึงต้องทำการลดแรงดันดินที่กระทำต่อ Diaphragm wall โดยการเสริมเสถียรภาพด้วยเสาดินซีเมนต์ ผลการขุดดินพบว่า ค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงระดับดินขุดที่มากกว่าเดิม ไม่กระทบกับความสามารถในการต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนของ Diaphragm wall เดิม



ภาพที่ 11 ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของ Diaphragm wall

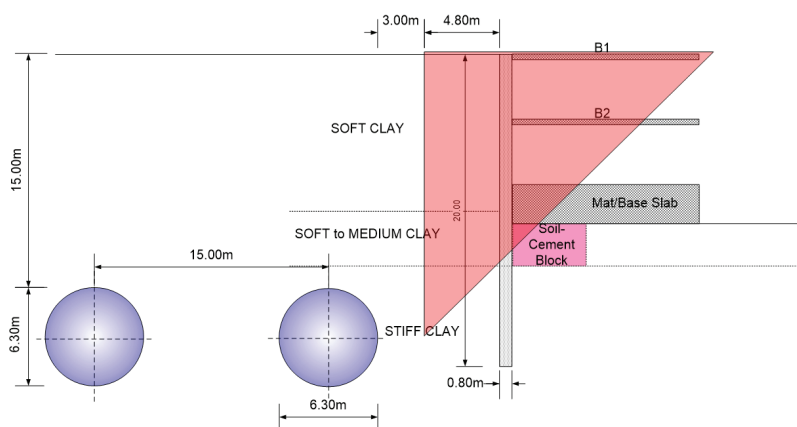


ภาพที่ 12 ผลการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ที่วัดได้

กรณีศึกษาที่ 2: การปรับปรุงดินโดยใช้เสาตึ้นซีเมนต์เพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงดัน Diaphragm wall

1. ลักษณะโครงการ

กรณีศึกษาเป็นงานขุดดินลึกประมาณ 11.0 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 2 ชั้น ตั้งอยู่ริมถนน ห่างจากแนวอุโมงค์รถไฟ. ในแนวราบ ประมาณ 7.5–9.0 เมตร โดยโครงการตั้งอยู่ในเขตที่อาจถูกกระทบตามกฎหมายเพิ่มเติมคุ้มครองความปลอดภัยของโครงสร้างใต้ดินของระบบรถไฟฟ้าตามโครงการรถไฟฟ้ามหานครซึ่งกำหนดเป็นเขตที่อาจถูกกระทบ (Influence zone) ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 Influence zone ของระบบรถไฟฟ้าตามโครงการรถไฟฟ้ามหานคร

2. ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการลิกประมาณ 11.0 เมตร

ลักษณะชั้นดินโครงการประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน จากระดับผิวดินจนถึงความลึก 15.0 เมตร จึงเริ่มพบชั้นดินเหนียวแข็ง โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ประมาณ -1.0 เมตรจากผิวดิน ลักษณะชั้นดินแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะชั้นดินโครงการลิกประมาณ 11.0 เมตร

ความลึก (เมตร)		ลักษณะชั้นดิน	กำลังรับแรงเฉือน	ค่าตอกทดสอบ
จาก	ถึง		ดิน, S_u	มาตรฐาน, SPT
			(ตัน/ตารางเมตร)	(ครั้ง/ฟุต)
0	2.0	Pavement/top soil	-	-
2.0	3.0	Soft Clay	2.0	-
3.0	12.0	Very Soft Clay	1.2	-
12.0	15.0	Medium Stiff Clay	3.5	-
15.0	17.0	Stiff Clay	-	12
17.0		Stiff Clay	-	25

3. แนวคิดการออกแบบ

ในเขตดำเนินการระบบรถไฟฟ้า กฎหมายห้ามก่อสร้างโครงสร้างใด ๆ เว้นแต่จะได้รับอนุญาตถ้าถูกต้องตามหลักเกณฑ์ข้อกำหนดทางวิศวกรรม ซึ่งรายละเอียดที่สำคัญบางข้อดังนี้

- การก่อสร้างต้องไม่ทำให้เกิดน้ำหนักรวมบนดินเกิน 5 ตัน/ตารางเมตร
- การเคลื่อนตัวที่เป็นผลจากการก่อสร้างจะต้องไม่ให้เกิดการเสียรูปของรางรถไฟฟ้าเกินกว่า 3 มิลลิเมตร ในระยะ 6 เมตร หรือไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวรวมของโครงสร้างสถานีหรืออุโมงค์ในระยะใด ๆ เกิน 6 มิลลิเมตร
- การก่อสร้างเสาเข็มหรือ Diaphragm wall จะต้องไม่ให้เกิดแรงสั่นสะเทือนอันจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง

ตามข้อกำหนดของ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย โครงการนี้ตั้งอยู่ในเขตที่อาจกระทบ จึงต้องควบคุมค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรถไฟฟ้า ไม่เกิน 6 มิลลิเมตร เพื่อลดผลกระทบกับรถไฟฟ้า งานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโครงการนี้จึงออกแบบใช้ Diaphragm wall หนา 80 เซนติเมตร ลึก 20 เมตร เป็นระบบป้องกันดิน ขุดดินด้วยระบบก่อสร้างล้างชั้นบน โดยใช้ค้ำยันชั่วคราว 2 ชั้น

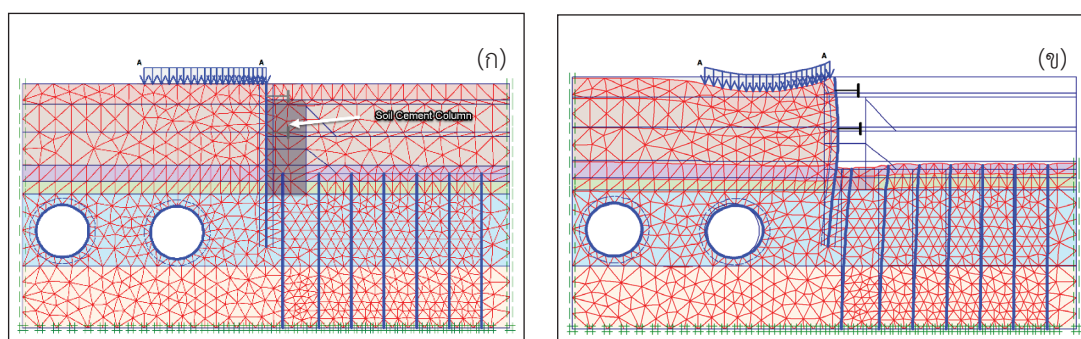
สำหรับบริเวณ Diaphragm wall ด้านที่ติดแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน การออกแบบได้มีการเสริมเสถียรภาพด้านหน้า Diaphragm wall หรือด้านดินขุด ด้วยเสาเข็มซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตรแบบขบกันจำนวน 6 แถว กว้างรวม 5.5 เมตร ความยาว 13.5 เมตร จากผิวดิน (ภาพที่ 14) โดยกำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำไม่น้อยกว่า 5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เพื่อช่วยเพิ่มแรงดันดินด้านในให้มากขึ้นและลดการคืบ (creep) ของดิน ในระหว่างรอการติดตั้งค้ำยันในแต่ละชั้น และทำการขุดดินโดยใช้ชุดแบบมีคันดิน (soil berm) เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงให้น้อยลง (Thasnanipan et al., 2006) โดยรูปตัดงานขุดดินแสดงในภาพที่ 15



4. ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แนว Diaphragm wall ด้านติดแนวอุโมงค์รถไฟฟ้า เป็นด้านที่ต้องควบคุมการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบกับการเคลื่อนตัวของแนวอุโมงค์ ซึ่งต้องวิเคราะห์โดยเน้นดูผลการเคลื่อนตัวของดินและอุโมงค์รถไฟฟ้า จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Finite Element Method; FEM

ผลการวิเคราะห์ FEM (ภาพที่ 16) และตารางที่ 3 พบว่าการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้านหน้ากำแพงหรือด้านขุด (Excavation side) ในลักษณะ Soil cement block กว้างรวม 5.5 เมตร ลึก -13.5 เมตร เพื่อเพิ่มแรงต้าน (Passive force) จะช่วยลดการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall และการเสียรูป/เคลื่อนตัวของอุโมงค์ ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ที่ 26.54 มิลลิเมตร โดยการเสียรูป/เคลื่อนตัวของอุโมงค์มีค่า 5.97 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด



ภาพที่ 16 ผลการวิเคราะห์ FEM การปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้านหน้า (ก) ก่อนขุดดิน (ข) หลังขุดดิน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ FEM

ผลวิเคราะห์	การเคลื่อนตัวของ อุโมงค์รถไฟฟ้า (มิลลิเมตร)	การเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall (มิลลิเมตร)	การทรุดตัวมากที่สุดของดิน (มิลลิเมตร)
ไม่มีการเสริมเสถียรภาพ Diaphragm wall	6.88	40.57	38.22
เสริมเสถียรภาพ Diaphragm wall ด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้านหน้ากำแพง	5.97	26.54	25.79

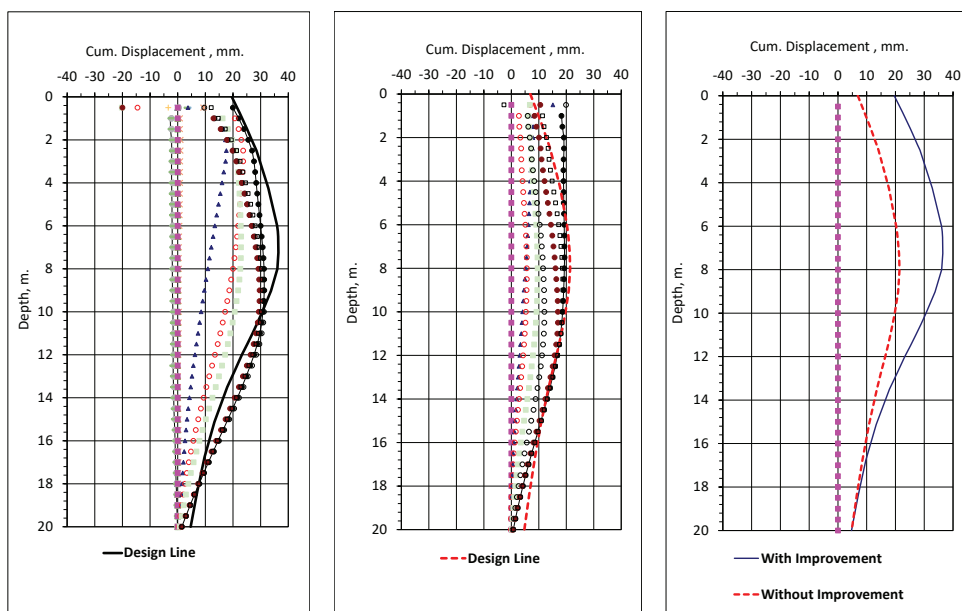
5. การตรวจวัดทางธรณีเทคนิค

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ในระหว่างงานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินตามขั้นตอนการก่อสร้างที่ออกแบบไว้ในแต่ละขั้นตอนได้มีการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall โดย Inclinator ทั้ง 5 ท่อ พบว่าภายหลังการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินแล้วเสร็จ แนว Diaphragm wall ด้านที่ไม่มีการทำการปรับปรุงดิน ค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดที่วัดได้คือ 28.5 มิลลิเมตร (ท่อ Inclinator I-5) สำหรับด้านที่มีการปรับปรุงดินที่อยู่ติดแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน มีค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุด 18.5 มิลลิเมตร วัดจากท่อ Inclinator I-4

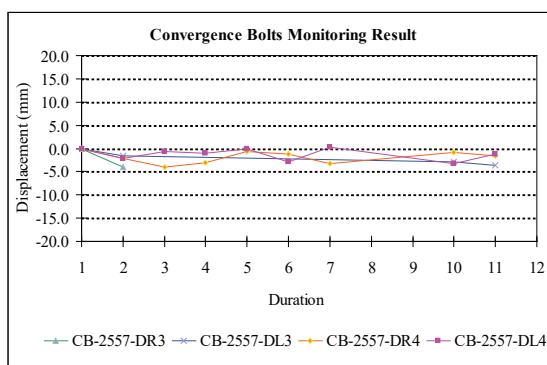
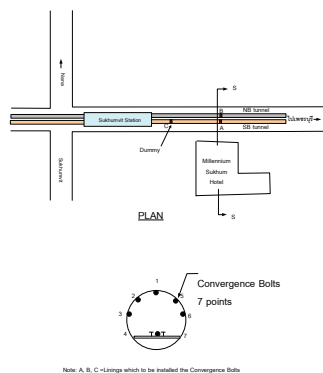
ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall แสดงในภาพที่ 17 และผลตรวจวัดการเคลื่อนตัว/เสียรูปของอุโมงค์ ด้วย Convergence bolt ที่ติดตั้งในอุโมงค์พบว่า การเสียรูปมากที่สุดมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 18)

6. สรุปผลการดำเนินการ

กรณีศึกษาโครงการนี้ เป็นงานขุดดินลึกประมาณ 11.0 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 2 ชั้น ซึ่งอยู่ติดแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินได้ดินได้ ถนนไฮดรอลิก ซึ่งต้องควบคุมไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างอุโมงค์ โดยใช้ระบบป้องกันดิน Diaphragm wall ที่เสริมเสถียรภาพด้วยเสาเข็มซีเมนต์ ผลการขุดดินพบว่าค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall และการเคลื่อนตัว/เสียรูปของอุโมงค์ ที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ ไม่ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน



ภาพที่ 17 การเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall (ก) ผลวิเคราะห์ (ข) I-4; ด้านที่มีการปรับปรุงดิน (ค) I-5; ด้านที่ไม่มีการปรับปรุงดิน



ภาพที่ 18 ตำแหน่งผลตรวจวัดการเคลื่อนตัว/เสียรูปของอุโมงค์ ด้วย Convergence bolt

บทสรุป

แนวทางการออกแบบระบบป้องกันดินสำหรับงานขุดดินลึก จะต้องพิจารณาข้อมูลประกอบในด้านต่าง ๆ ได้แก่สภาพหน้างาน แบบก่อสร้างและแบบสถาปัตยกรรม ที่กำหนดระดับขุดดินที่ชัดเจน จะทำให้การออกแบบระบบป้องกันดินในส่วนการเลือกใช้ประเภทกำแพงกันดินและระบบค้ำยัน เกิดประสิทธิภาพทั้งในด้านความปลอดภัย ด้านราคาค่าก่อสร้าง ตลอดจนผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง

การประยุกต์ใช้ระบบเสาดินซีเมนต์ (Soil cement column) มาเพิ่มเสถียรภาพของ Diaphragm wall เพื่อให้สามารถลดแรงดันดิน ด้านทานแรงดันดินและลดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบขุด ตามกรณีศึกษา ในบทความนี้ เป็นวิธีที่ให้ผลสำเร็จอย่างมีนัย แต่อย่างไรก็ตามการเสริมเสถียรภาพของ Diaphragm wall ด้วยระบบเสาดินซีเมนต์ จะต้องทำการออกแบบให้ตรงตามพฤติกรรมการรับแรงที่ต้องการ และในขณะขุดดินเพื่อก่อสร้างต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคเพื่อสอบทานความถูกต้องของการออกแบบ

อย่างไรก็ตามการออกแบบการเสริมเสถียรภาพของ Diaphragm wall ด้วยระบบเสาดินซีเมนต์ จะต้องคำนึงถึงสภาพพื้นที่ก่อสร้างโดยรอบ Diaphragm wall ที่ต้องมีพื้นที่เพียงพอที่จะจัดเรียงเสาดินซีเมนต์ในลักษณะ ขบกันเป็น Block ตลอดจนสภาพดินเดิมที่จะก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ต้องเป็นดินเหนียวอ่อนหรือทรายหลวม ซึ่งเป็นลักษณะดินที่สามารถทำการก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- Aye, Z. Z., Submanee Wong, C., Bunyarak, T., & Chanchad, C. (2007). **Application of observation method in diaphragm wall support basement excavation.** International Symposium on Tunnelling for Urban Development. Pattaya City, Thailand.
- Submanee Wong, C., & Siripoun, V. (2015). **Application of soil cement column wall in deep excavation works without bracing system.** In Proceeding of the 2nd National Exhibition and Conference of Geotechnical Engineering Society of Thailand, Bangkok. (In Thai)
- Sugawara, S., Shigenawa, S., Gotoh, H., & Hosoi, T. (1996). **Large-scale jet grouting for pre-strutting in soft clay.** In Proceeding of IS-Tokyo 1996/2nd International conference on Ground Improvement geosystems: Vol 1.
- Tan, T. S., Yong, K. Y., Goh, T. L., & Kongsomboon, T. (2003). **Behaviour of an embedded improved soil layer in an excavation.** Proceedings of Underground Singapore 2003 Conference, Nanyang Technological University, Singapore, 22–23 May 2003, pp. 317–324.
- Tanseng, P., & Boonkert, B. (2023). **Performance of soil cement column wall for a tunnel construction in bangkok soft clay.** In Proceedings of the 28th National Convention on Civil Engineering, Phuket: PSU, Hadyai Campus. (In Thai)

- Thasnanipan, N., Singtokaw, K., & Submaneewong, C. (2006). **Case study: Excavation technique for basement construction adjacent to existing subway tunnels.** In Proceedings of the 11th National Convention on Civil Engineering, Phuket: Kasetsart University, KPS Campus. (In Thai)
- Thasnanipan, N., Singtokaw, K., & Submaneewong, C. (2008). **Wall movement induced by underground construction.** In Proceedings of the 13rd National Convention on Civil Engineering, Chon buri: Sripatum University (In Thai)