



เทคโนโลยีดินลึกโดยใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริม  
เสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดหล่อในที่  
Deep excavation technique by using  
soil cement column system to stabilize diaphragm wall

ชาญชัย ทรัพย์มีวงศ์\* วราที ศิริปุณยว์ และ ธนาดา คงสมบูรณ์<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> บริษัท ชลศรีกรีฑ จำกัด จ.กรุงเทพฯ

<sup>†</sup> บริษัท ชลศรีกรีฑ จำกัด จ.กรุงเทพฯ

<sup>‡</sup> ภาควิชาการรับน้ำดิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบกำแพงลึกกันดินชนิดหล่อในที่ (Diaphragm Wall; D-Wall) มีการนำมายังหลาย ๆ โครงการในกรุงเทพฯ สำหรับงานดินลึกเพื่อค้ำอิฐสำเร็จรูป ให้ดินที่ต้องการลดน้ำหนาผลกระทบต่อโครงสร้าง ข้างเคียง ด้วยช่องว่างด้านการอุดแบบก่ออิฐสำเร็จรูปในร่องหลัก เสริมหรือความหนาของ D-wall ที่ไม่เพียงพอหรืออ่อนยวบจากการเคลื่อนตัวของ D-wall ที่สูงกำหนดเพิ่มเติมในบางโครงการ แนวคิดการอุดแบบโดยการประยุกต์ใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) มาเพิ่มเสถียรภาพของ D-wall โดยอุดแบบให้สามารถต้านทานแรงดันดินและลดการเคลื่อนตัวของดิน บทความนี้จะนำเสนอการศึกษาเทคนิคงานดินลึกที่มีการประยุกต์ใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับกำแพงกันดินชนิดหล่อในที่และหุ่นดินด้วยวิธีก่อสร้างจากล่างขึ้นบนโดยจะนำเสนอแนวคิดการอุดแบบ, เทคนิคการก่อสร้างและกระบวนการควบคุมคุณภาพในการทำงาน

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, งานดินลึก, กำแพงกันดิน, แฟร์ม วอลล์

## Abstract

Diaphragm wall has been used for current excavation works in Bangkok city area to reduce the effect of excavation on adjacent area during the construction. With the limitation of design and construction in reinforcement and thickness of wall or the special criteria of allowable wall movement, Design concept by using soil cement column systems for stabilizing of D-wall have been applied to resist the lateral force and movement of soil. This paper presents the case study of deep excavation technique by using soil cement column system to stabilize D-wall with bottom up construction method. The design concept, construction method and also the quality control in working processes will be presented.

**Keywords:** Soil Cement Column, Jet Grout, Diaphragm Wall, Deep Excavation

## 1. บทนำ

เสาเข็มดินซีเมนต์ คือเทคโนโลยีการปรับปรุงดินโดยวิธีการผสมปูนซีเมนต์กับดิน ซึ่งสามารถทำการผสมได้ 2 วิธี ที่นิยมใช้ ได้แก่ระบบการใช้แรงดันต่ำ (Low Pressure Grout) คับระบบการใช้แรงดันสูง (High Pressure Grout) ระบบแรงดันต่ำจะใช้เครื่องผสมระบบ Rotary (รูปที่ 1) โดยการใช้ใบพัดตีดินแล้วทำการผสมดินกับน้ำปูนด้วยแรงดันต่ำแล้วจะใช้ใบพัดตีดินต่อไป เพื่อให้น้ำปูนผสมกับดิน เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น



รูปที่ 1 เครื่องผสมระบบ Rotary ระบบแรงดันต่ำ

วิธีการผสมโดยการใช้แรงดันสูงใช้วิธีการฉีดซีกน้ำปูน (Jet Grouting Technique) โดยการฉีดด้วยแรงดันสูง (รูปที่ 2) เพื่อเป็นทำลายอุบัติช่องดินให้แตกตัวโดยละเอียด ก่อนที่จะซีกน้ำมันผสมซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงประมาณ 200–400 บาร์ผ่านหัวหัวฉีด Nozzle พร้อมทั้งยกศักดิน้ำเจาะซึ่งเป็นจังหวะ น้ำปูนซีเมนต์ความดันสูงจะตัดด้วยตันให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน การทำงานจะควบคุมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ระดับความลึกที่ต้องการ

\* ผู้ที่ขอรับคิชชอร์บบทความ: ชาญชัย ทรัพย์มีวงศ์

E-mail address: t\_chanchai@yahoo.com



รูปที่ 2 การอัดฉีดด้วยแรงดันสูง

การใช้เทคนิคการปรับปรุงดินด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ สำหรับงานชุดดินสามารถออกแบบเป็น 2 ลักษณะคือ

- ใช้เป็นระบบกำแพงกันดินแบบ Gravity Wall เพื่อเพิ่มเสถียรภาพงานชุด
- ใช้เสริมเสถียรภาพของระบบกำแพงกันดิน

#### 1.1 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นระบบบ่องกันดินสำหรับงานชุด

สำหรับงานชุดดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นระบบบ่องกันดินโดยไม่ต้องใช้ระบบค้ำยันกำแพงขั่วครัว (รูปที่ 3) ให้หลักการออกแบบงานชุดโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นตัวพัฒนากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของบ่องชุด ซึ่งจะแสดงถึงค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ของระบบ ดังนั้นคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นสิ่งที่สำคัญ ระบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับระบบบ่องกันดินในงานชุดดิน จึงเลือกใช้วิธีการผสมด้วยระบบเปียก ที่สามารถกำหนดและควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ได้ดี



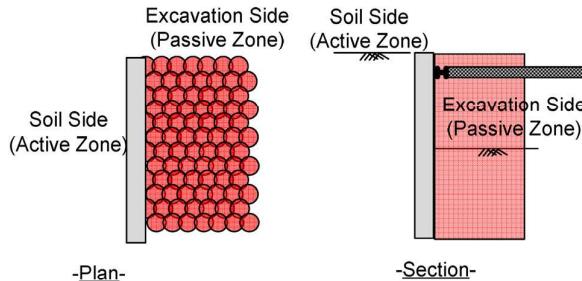
รูปที่ 3 งานชุดดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นระบบบ่องกันดินโดยไม่ต้องใช้ระบบค้ำยันกำแพงขั่วครัว

#### 1.2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพของระบบกำแพงกันดิน

ข้อดีของการปรับปรุงดินโดยใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ เสริมเสถียรภาพของกำแพงกันดิน เพื่อช่วยลดแรงดันดินเชิงรุก-แรงกระทำ (Active Earth Pressure), ช่วยเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ-แรงดัน (Passive Earth Pressure) ซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ในแต่ละชั้นดินงานชุดดิน รูปแบบการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพกำแพงกันดิน มีดังนี้

- การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินด้าน

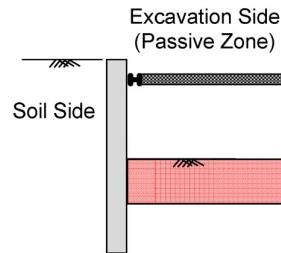
การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินด้าน จะออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์โดยก่อสร้างเป็นแบบขบกัน (Block Type) ด้านหน้ากำแพงกันดินโซนแรงดัน (Passive Zone) ดังแสดงในรูปที่ 4



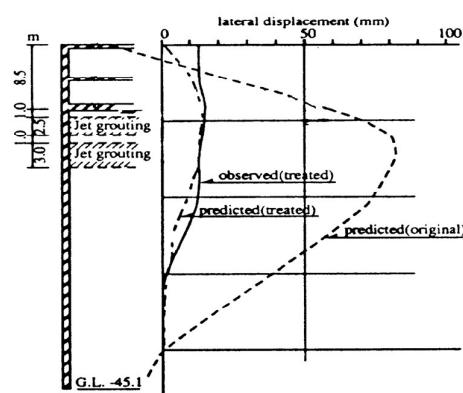
รูปที่ 4 การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินด้าน

การจัดเรียงรูปแบบนี้ โดยทั่วไปจะก่อสร้างเสาเข็มดินตั้งแต่ผิวดิน เพื่อเพิ่มแรงดันในแต่ละชั้นดินจากการขุดดินและติดตั้งค้ำยัน ซึ่งจะช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวตามเวลา (Creep) ของดินจากค้ำยันหนอนการติดตั้งค้ำยันในแต่ละชั้น ในกรณีก่อสร้างเสาเข็มดินต์บีเวนให้ระดับดินชุด (รูปที่ 5) เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพดินอุด (Heave) ให้บ่อชุด และช่วยเพิ่มแรงดันการเคลื่อนที่ของกำแพง เปรียบเสมือนติดตั้งค้ำยันอีกชั้นได้บ่อชุดก่อนการขุดดิน (Pre-strutting) จะทำให้เสถียรภาพของกำแพงกันดินสูงขึ้นและ การเคลื่อนตัวของกำแพงจะลดลง [1]

จากการศึกษาของ Sugawara et al. [2] สำหรับงานชุดดินโครงการ Bugis Junction สิงคโปร์ พบว่าการเคลื่อนตัวในการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยระบบบ่องกันดินปูนแรงดันสูง มีค่าน้อยกว่าค่าออกแบบ (Predict) ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงดิน (รูปที่ 6)



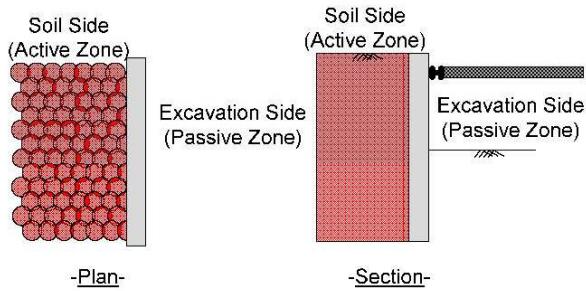
รูปที่ 5 การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดันดินด้านให้ระดับดินชุด



รูปที่ 6 ผลกระทบของงานปรับปรุงดินในโครงการ Bugis Junction, สิงคโปร์

- การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินกระทำ

การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินกระทำ จะออกแบบ เสาเข็มดินซีเมนต์โดยก่อสร้างเป็น แบบบล็อก (Block Type) ด้านหลัง กำแพงกันดินโซลูชันแรงกระทำ (Active Zone) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อลดแรงดันดินกระทำ

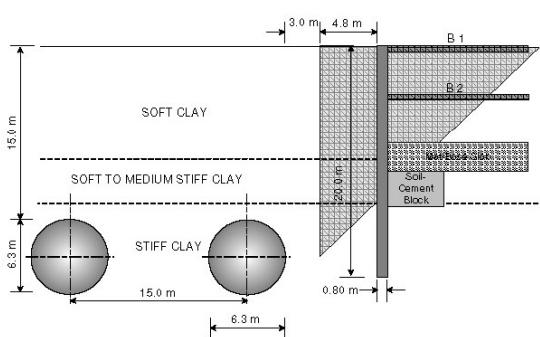
การจัดเรียงรูปแบบนี้ จะช่วยลดแรงกระทำจากแรงดันดิน ทำให้ โน้มเน้นที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดิน และการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ลดลง โดยไม่จำเป็นที่จะก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จากระดับผิวดิน ทั้งนี้ รูปแบบและระดับ/ตำแหน่ง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ที่จะทำให้เกิด ประสิทธิผลในแต่ละกรณี

บทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาด้วยวิธีการที่มีการประยุกต์ใช้ ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเส้นทางของกำแพงกันดินนิดชุดหล่อในที่ สำหรับงานชุดดินลึก 2 โครงการ ที่มีการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่ม แรงดัน และการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อลดแรงกระทำ

## 2. กรณีศึกษาการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มแรงดัน

### 2.1 ลักษณะโครงการ

กรณีศึกษาเป็นงานชุดดินลึกประมาณ 11.0 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 2 ชั้น (รูปที่ 8) ตั้งอยู่ริมถนนอโศก-สุขุมวิท (ถนนอโศกมนตรี) ห่างจาก อุ่นเมืองฯ รฟม.ประมาณ 7.5 – 9.0 เมตร [3] โดยโครงการตั้งอยู่ในเขตที่อาจ ถูกผลกระทบตามกฎหมายเพิ่มเติมคุ้มครองความปลอดภัยของโครงสร้างได้ใน ของระบบไฟฟ้าตามโครงการไฟฟ้ามหานครซึ่งกำหนดเป็นเขตที่อาจ ถูกผลกระทบ (Influence Zone)



รูปที่ 8 Influence Zone ของระบบไฟฟ้าตามโครงการไฟฟ้ามหานคร

### 2.2 ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการ

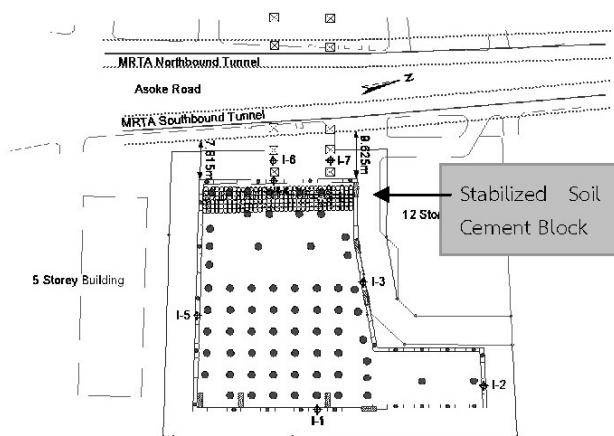
ลักษณะชั้นดินโครงการประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน จากระดับผิวดิน จนถึงความลึก 15 เมตร โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ประมาณ -1.00 เมตร จากผิวดิน ลักษณะชั้นดินแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะชั้นดินโครงการ

ความลึก (ม.)	ชั้นดิน	Su (t/m <sup>2</sup> )	SPT (blows/ft)
จาก	ถึง		
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	-
17.0		Stiff Clay	12
			25

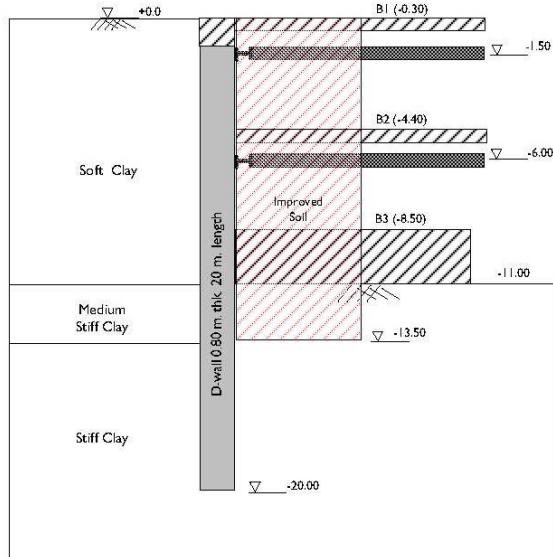
### 2.3 แนวคิดการออกแบบ

เพื่อลดผลกระทบกับอุ่นเมืองฯ รฟม. งานชุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน โครงการนี้เลือกแบบใช้ Diaphragm Wall หนา 80 ซม. สีก 20 เมตร เป็นระบบบล็อกกันดิน ชุดดินวัสดุระบบก่อสร้างล่างชั้นบน ใช้ค้ายัน 2 ชั้น และได้มีการออกแบบใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 ม. แบบบล็อก (Block Type) กว้างรวม 5.0 ม. สีก -13.5 ม. จากผิวดิน บริเวณแนว D-wall ที่ติดแนวอุ่นเมืองครตไฟฟ้าใต้ดิน (รูปที่ 9) โดยทำการ ปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของดินหน้า D-Wall หรือด้านดินชุด (Excavation side) ให้มีกำลังรับแรงเฉือน ( $q_u$ ) ไม่น้อยกว่า 10 ตัน / m<sup>2</sup> เพื่อช่วยเพิ่มแรงดันดินด้าน (Passive Earth Pressure) ให้มากขึ้นและลด การเคลื่อนไหว (Creep) ของดิน ในระหว่างรอการติดตั้งค้ายันในแต่ละชั้น และทำการขุดดินโดยใช้ชุดแบบมีคันดิน (Berm) เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวของ กำแพงให้น้อยลง



รูปที่ 9 ผังโครงการงานชุดดินลึก 11.0 ม.

งานชุดดินใช้ระบบก่อสร้างจากกล่องชั้นบนซึ่งต้องทำการออกแบบระบบ ค้ายันเหล็ก และเนื่องจากข้อจำกัดของการเคลื่อนตัวของ D-Wall เพื่อลด ผลกระทบจากแนวอุ่นเมืองครตไฟฟ้าใต้ดิน ในการออกแบบจึงต้องใช้ค้ายันคู่ (Double Strut) เพื่อให้ได้ Stiffness ที่สูง ซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของ D-wall รูปที่ 10 งานชุดดินแสดงในรูปที่ 10

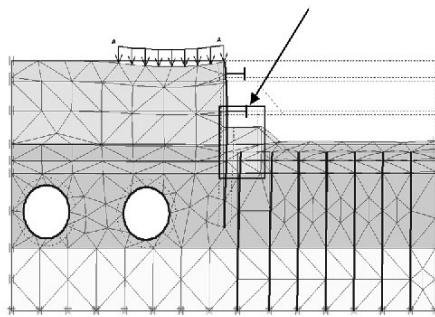


รูปที่ 10 รูปตัดงานชุดดินลึก 11.00 ม.

#### 2.4 ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แนว D-Wall ด้านติดแนวน้ำอุ่นคือไฟฟ้า เป็นด้านที่ต้องควบคุมการเคลื่อนตัวของ D-Wall ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบกับการเคลื่อนตัวของแนวอุ่น ผลการวิเคราะห์ FEM (รูปที่ 11) พบว่าการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเม็นต์ด้านหน้ากำแพง หรือด้านขด (Excavation Side) ในลักษณะ Soil Cement Block ก้างรวม 6.0 ม. ลึก -13.5 เพื่อเพิ่มแรงต้าน (Passive Force) จะช่วยลดการเคลื่อนตัวของ D-Wall ซึ่งพบว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าการเคลื่อนตัวของ D-Wall ที่ 26.54 มม.

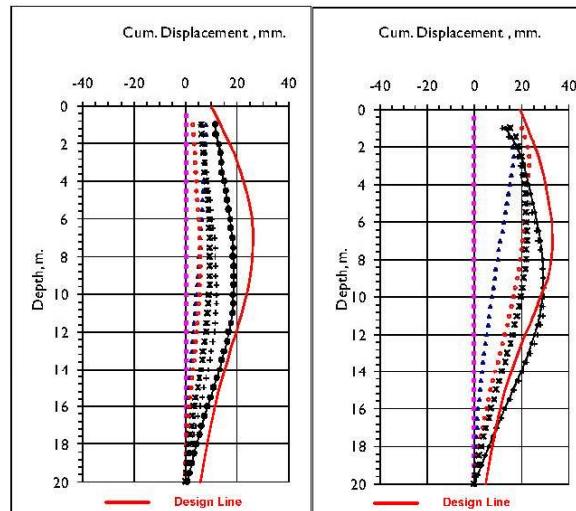
Stabilized Soil Cement Block



รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ FEM การปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเม็นต์ด้านหน้า

#### 2.5 การตรวจสอบด้วยเครื่องมือเทคนิค

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของ D-wall ในระหว่างงานชุดดินเพื่อก่อสร้างขึ้นได้ด้วยตามขั้นตอนการก่อสร้างที่ออกแบบไว้ ในแต่ละขั้นตอนได้มีการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของ D-wall โดย Inclinometer ทั้ง 5 ห้องที่ไม่มีการทำการปรับปรุงดิน ค่าการเคลื่อนตัวมากสุดที่วัดได้คือ 28.5 มม. (ห้อง Inclinometer I-5) สำหรับห้องที่มีการปรับปรุงดินที่อยู่ด้านหน้าอุ่นคือไฟฟ้าได้ดิน มีค่าการเคลื่อนตัวมากสุด 18.5 มม. (ห้อง Inclinometer I-4) ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวของ D-Wall แสดงในรูปที่ 12



ก. I-4; มีการปรับปรุงดิน

ข. I-5; ไม่มีการปรับปรุงดิน

รูปที่ 12 ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวของ D-Wall

### 3. กรณีศึกษาการจัดตั้งเสาเข็มดินซีเม็นต์เพื่อลดแรงดันดินกระทำ

#### 3.1 ลักษณะโครงการ

กรณีศึกษาเป็นงานชุดดินลึกประมาณ 13.70 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 4 ชั้น (รูปที่ 13) ตั้งอยู่ริมถนนพระราม 1 แต่เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการที่ D-Wall ได้ถูกก่อสร้างมาต่อหน้า โดยทั้งร้างมาเกือบ 10 ปี การออกแบบงานชุดดินพื้นก่อสร้างนั้นได้ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้นต่ำดินเจ็ทอิงประยุกต์ใช้ D-Wall เดิม โดยประยุกต์ใช้ การปรับปรุงดินและเปลี่ยนห้องตอนและตำแหน่งค้างขัน เพื่อให้ D-Wall เดิมสามารถรับแรงได้

#### 3.2 ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการ

ลักษณะชั้นดินโครงการ แสดงไว้ในตารางที่ 2

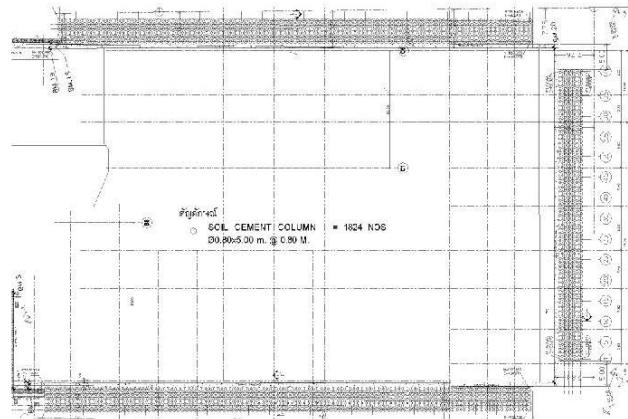
ตารางที่ 2 ลักษณะชั้นดินโครงการ

ความลึก (ม.)		ชั้นดิน	Su (t/m <sup>2</sup> )	SPT (blows/ft)
จาก	ถึง			
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
19.5		Very Stiff Clay		30

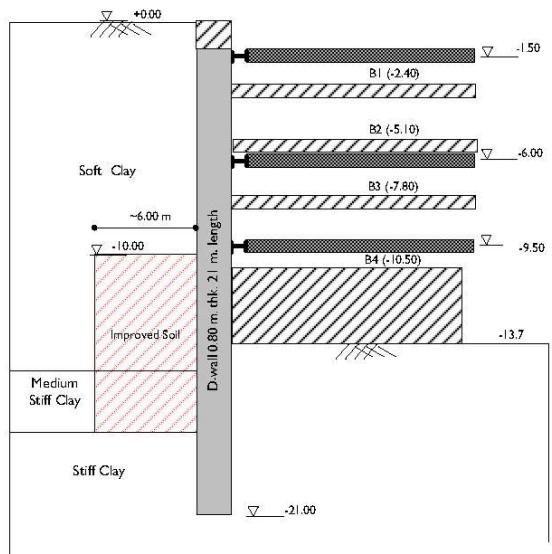
#### 3.3 แนวคิดการออกแบบ

จากการศึกษาการออกแบบตามแบบเดิมพบว่า D-Wall ที่ก่อสร้างได้หนา 0.80 ม. เหล็กเสริมได้ออกแบบสำหรับงานชุดดินลึก -11.0 เมตร โดยมีค้างขันชั่วคราว 2 ชั้นที่ความลึก -2.00 และ -6.00 ม. (รูปที่ 14)

สำหรับโครงการนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นให้ดินโดยกำหนดคระดับชุดใหม่เป็น -13.70 ม. จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า โภมเมนต์ที่เกิด



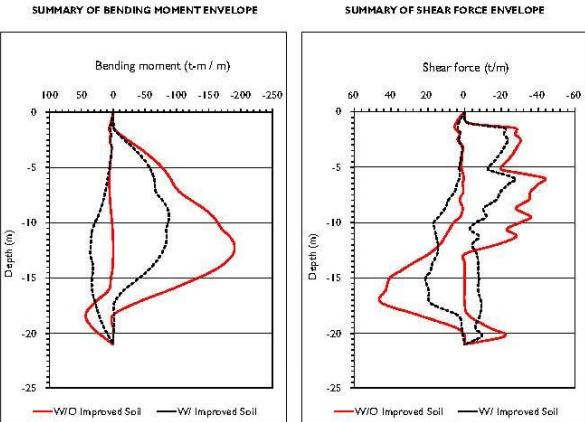
รูปที่ 13 ผังโครงสร้างฐานชุดเดินลึก 13.70 ม.



รูปที่ 14 รูปด้วยงานชุดเดินลึก 13.70 ม.

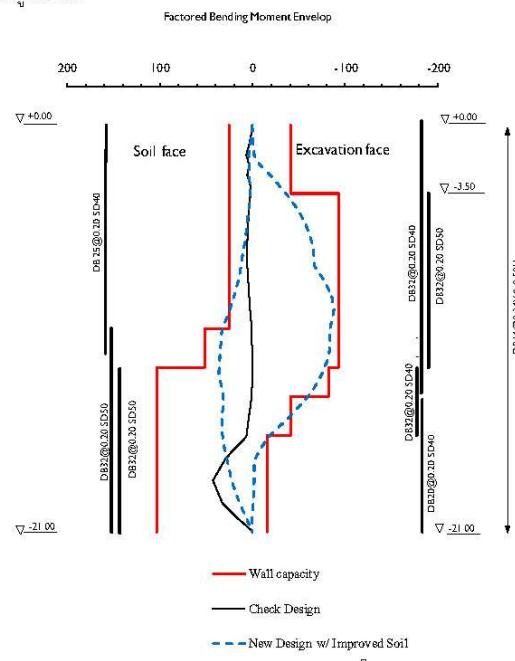
### 3.4 ผลการวิเคราะห์

จากระดับงานชุดที่เพิ่มขึ้น ขึ้นแรกทำการจัดวางตำแหน่งค้ำยันให้สอดคล้องกับระดับชุดและพื้นที่นี้ได้ด้านในแต่ละชั้น หลังจากนั้นทำการลองจัดวางตำแหน่งใช้ในการปรับปรุงดิน (Improved Zone) เพื่อตรวจสอบค่าไมเมเนต์ตัด แรงเสื่อมและค่าการเคลื่อนตัว เพื่อให้สอบทานความถูกต้องในการออกแบบ ผลการวิเคราะห์พุทธิกรรม D-Wall ภายใต้เหล็กเสริมที่มีอยู่เดิม พบว่าการกำหนดโภนการปรับปรุงที่ระดับ -10.0 ม. ถึง -15.0 ม. ให้ค่าไมเมเนต์ตัดและแรงเสื่อม ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลวิเคราะห์ค่าไมเมเนต์ตัดและแรงเสื่อม

ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของ D-Wall พบว่าไมเมเนต์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับความสามารถในการต้านทานไมเมเนต์ตัดของ D-Wall เดิม ดังแสดงในรูปที่ 16

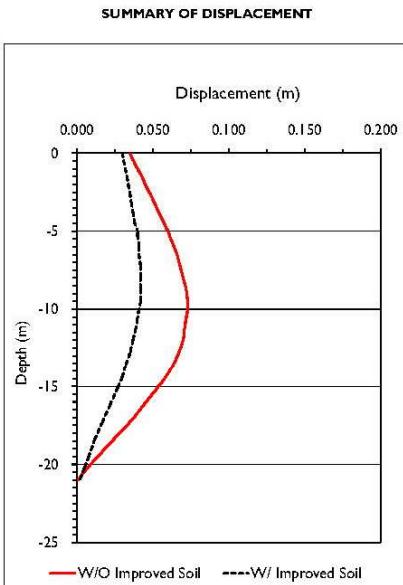


รูปที่ 16 ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของ D-Wall

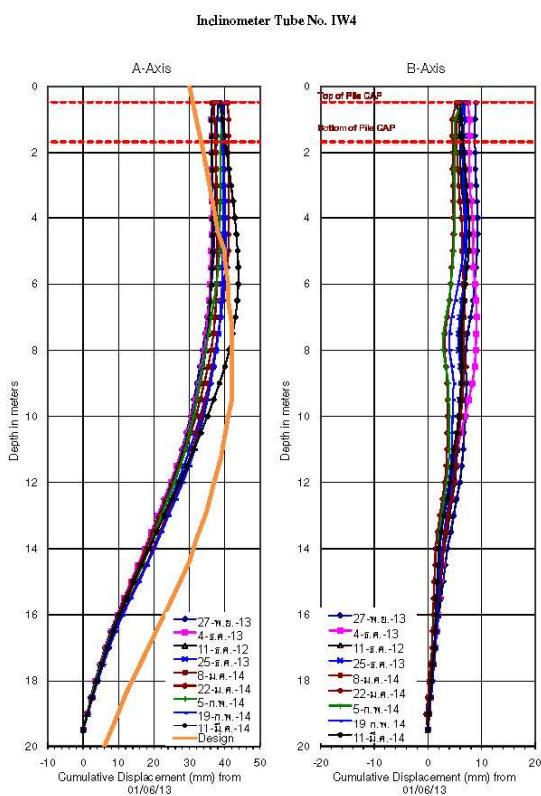
ผลวิเคราะห์ทำการเคลื่อนตัวของ D-Wall ภายหลังการปรับปรุงดินแสดงในรูปที่ 17 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวมากสุดมีค่าประมาณ 40 มม.

### 3.5 การตรวจสอบทางธรณีเทคนิค

การสอบทานความถูกต้องในการออกแบบ โดยให้การตัดค่าการเคลื่อนตัวของ D-Wall ด้วย Inclinometer ที่ติดตั้งโดยรอบบ่อขุด ในทุกๆ ขั้นตอน การขุดดันและติดตั้งค้ำยัน พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้สอดคล้องกับค่าการประเมินในขั้นตอนการออกแบบ (รูปที่ 18) จึงสามารถมั่นใจได้ว่า การลดแรงกระทำด้วยการปรับปรุงดินบริเวณที่ออกแบบไว้ ทำให้ D-Wall เดิม มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับงานชุดเดินที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับดินขุ่นมากกว่าเดิม



รูปที่ 17 ผลการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของ D-Wall ภายหลังการปรับปรุงดิน



รูปที่ 18 ผลการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัว D-Wall ด้วย inclinometer

#### 4. บทสรุป

การอุดดินชั้นดินด้วยการประยุกต์ใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) มาเพิ่มเส้นทางภาพของ D-Wall ในรูปแบบการจัดเรียง Block ของเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อให้สามารถลดแรงดันดิน, ด้านท่านแรงดันดินและลดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบขึ้น การ

จัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถจัดเรียงได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการอุดดินโดยอาจจัดเรียงด้านหน้ากำแพงกันดิน (Passive Zone) เพื่อเพิ่มแรงด้านหน้าหรือจัดเรียงด้านหลังกำแพง (Active Zone) เพื่อลดแรงกระทำอย่างไรก็ตามในขณะดินเพื่อก่อสร้างต้องมีติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคเพื่อสอบทานความถูกต้องของการอุดดิน บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาเทคนิคด้านชุดดินลึกที่มีการประยุกต์ใช้ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับกำแพงกันดินชนิดดูด-หล่อในที่ และชุดดินด้วยวิธีก่อสร้างจากล่างโดยจัดเรียง 2 รูปแบบ คือจัดเรียงด้านหน้ากำแพงกันดิน (Passive Zone) และจัดเรียงด้านหลังกำแพง (Active Zone) ผลการก่อสร้างสำเร็จดี

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บมจ. ซีพีไอ, บจ. ชลอร์กิริส เทคโนโลยี และผู้เกี่ยวข้องในโครงการ กรณีศึกษา ที่ช่วยสนับสนุนข้อมูลประกอบการเขียนบทความ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Thiam, S, T, Teik, L, G and Kongsomboon. "Behavior of an Embedded Improved Soil layer in an Excavation". Underground Singapore, 2003.
- [2] Sugawara, S., Shigenawa, S., Gotoh, H. and Hosoi, T. "Large-Scale Jet Grouting for Pre-Strutting in soft Clay" Proc. of IS-Tokyo '96/2nd Int. Conf. On Ground Improvement Geosystems, Tokyo, vol 1., 1996.
- [3] ณรงค์ ทัศนนิพนธ์, กมล สิงโนไทร์ และชาญชัย ทรัพย์มณฑลวงศ์, "กรณีศึกษาเทคนิคดินดีนเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินใกล้แนววางโครงสร้างไฟฟ้าใต้ดิน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, จ. ภูเก็ต, พ.ศ.2549.

## การประยุกต์ใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ ในงานขุดดินลึกโดยปราศจากการรับค้ำยัน

### Application of Soil Cement Column wall in Deep Excavation Works without Bracing System

ชาญชัย ทรัพย์มีเรือง์ และวราห์ ศิริปุณย์

Chanchai Submaneeuwong and Vara Siripoun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>บริษัท ไทยซีเมนต์คอลัมน์ จำกัด

E-mail: vara6207@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยใช้ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถออกแบบงานขุดดินโดยไม่ต้องใช้ระบบค้ำยัน กำแพงชั่วคราวหรือระบบค้ำยันกำแพงถาวร ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาการก่อสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับงานขุดดินลักษณะเดียวกัน โดยใช้กำแพงเสาเข็มพีดีเพล็กหรือกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องซึ่งต้องใช้ระบบค้ำยันกำแพง บทความนี้จะนำเสนอแนวคิดการออกแบบระบบป้องกันดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีอัดฉีดน้ำปูน และกรณีศึกษาทักษิณงานขุดดินลึก 10 เมตร โดยใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ ปราศจากการรับค้ำยันกำแพง

#### Abstract

Basement excavation work using soil cement column wall system can be designed without the need of temporary or permanent wall-bracing method. This method can reduce the cost and construction time compared to the excavation with sheet pile wall or contiguous pile wall system which requires the wall - bracing system.

This paper presents the design methodology of soil protection system by using soil cement column wall, the construction techniques of soil cement column using jet grouting method and a case study of deep excavation technique of 10 meters depth using soil cement wall without wall bracing system.

#### 1. คำนำ

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานราก ห้องใต้ดิน หรือบ่อบำบัดในชั้นดินหนืดที่ต้องใช้ทรัพยากรากลมถึงแผ่นปานกลาง สามารถเลือกใช้ระบบป้องกันดินหลายรูปแบบได้แก่ การใช้ระบบกำแพงกันดินแข็ง กำแพงเข็มพีดีเพล็ก (Sheet Pile Wall), กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Pile Wall) หรือ กำแพงชนิดขุด - หล่อในที่ (Diaphragm Wall) ร่วมกับระบบค้ำยันชั่วคราว (Temporary Bracing) หรือ ระบบค้ำยันถาวร (Permanent Bracing)

การเลือกใช้ระบบป้องกันดินแบบใด ต้องพิจารณาปัจจัยเรื่องการเคลื่อนตัวของดิน(ทรงค์ และคณะ, 2550 [1]) โดยพิจารณา率 รวมกับต้นทุนค่าก่อสร้างปัญหาอุปสรรค ณ สถานที่ก่อสร้าง และระยะเวลาการก่อสร้าง เพื่อเลือกระบบป้องกันดินสำหรับงานขุดดินให้เกิดประสิทธิผล

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของดิน ได้แก่

- สภาพดินและคุณสมบัติของดิน
- การเปลี่ยนแปลงความเค้นในมวลดิน
- ระดับน้ำใต้ดินและการเปลี่ยนแปลง
- ขนาดบ่อบาดาล
- ความแข็งแรงของตัวกำแพงกันดิน
- วิธีการก่อสร้าง
- ความแข็งแรงของระบบค้ำยันกำแพงและจำนวนค้ำยัน
- เทคโนโลยีการปรับปรุงคุณสมบัติดิน

สำหรับงานขุดดินที่ไม่ลึกมากนัก สามารถออกแบบโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column, SCC) เป็นระบบป้องกันดินโดยไม่ต้องใช้ระบบค้ำยันกำแพง

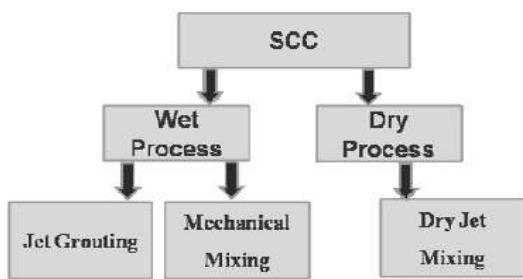
ชั้วครา (รูปที่ 1) วิธีนี้สามารถเพิ่มเสียรภาพของบ่อขุด, ป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน, ป้องกันน้ำได้ดีน้ำหลอมซึมเข้ามาในบ่อขุด ได้ดี ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาการก่อสร้าง



รูปที่ 1 งานขุดดิน โดยใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

## 2. การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถก่อสร้างใน 2 ระบบ ได้แก่ การก่อสร้าง SCC ด้วยระบบแห้ง และการก่อสร้าง SCC ด้วยระบบเปียก แสดงในรูปที่ 2

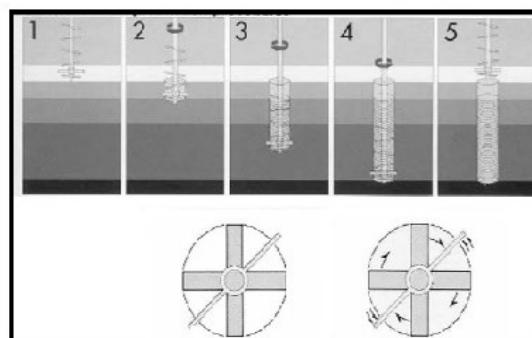


รูปที่ 2 ระบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

วิธีการผสมด้วยระบบเปียก มี 2 วิธี ที่นิยมใช้ ได้แก่ ระบบการใช้แรงดันต่ำ (Low Pressure Grout) กับระบบการใช้แรงดันสูง (High Pressure Grout) ระบบแรงดันต่ำจะใช้เครื่องผสมระบบ Rotary (รูปที่ 3) โดยการใช้ใบพัดดึงดินแล้วทำการผสมดินกับน้ำปูนด้วยแรงดันต่ำแล้วจะใช้ใบพัดดึงดินต่อไป เพื่อให้น้ำปูนผสมกับดิน (รูปที่ 4) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น



รูปที่ 3 เครื่องผสมระบบ Rotary ระบบแรงดันต่ำ

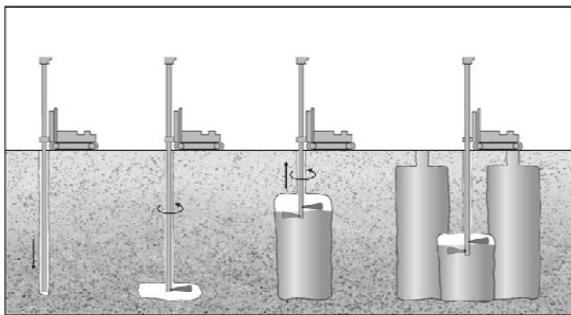


รูปที่ 4 ขั้นตอนก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการใช้แรงดันต่ำ

การผสมโดยการใช้แรงดันสูง ใช้วิธีการอัดฉีดฉีดน้ำปูน (Jet Grouting Technique) โดยการฉีดน้ำด้วยแรงดันสูง (รูปที่ 5) เพื่อเป็นตัวถ่ายอนุภาคของดินให้แตกตัวโดยละเอียด ก่อนที่จะฉีดน้ำผสมซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง ประมาณ 200 – 400 บาร์ ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขป แสดงในรูปที่ 6



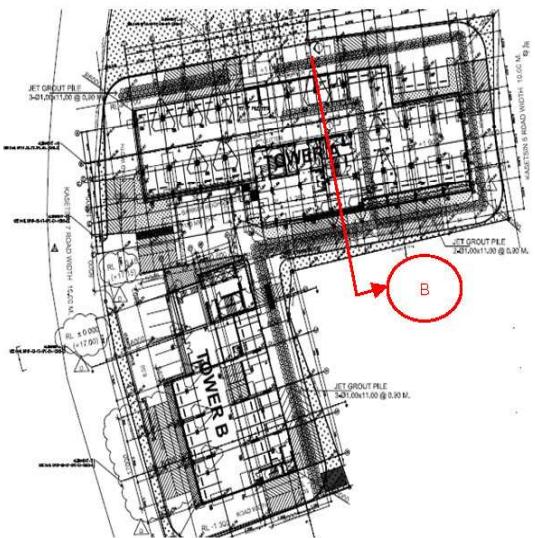
รูปที่ 5 การอัดฉีดฉีดน้ำด้วยแรงดันสูง



รูปที่ 6 ขั้นตอนก่อสร้างเสาเข็มดินซึ่งมันต์ด้วยการอัดฉีดน้ำปูน

### 3. กรณีศึกษางานบุดดินลึก 10 เมตร โดยประยุกต์ใช้ เสาเข็มดินซึ่งมันต์เป็นระบบป้องกันดิน

กรณีศึกษาโครงการนี้ เป็นงานบุดดินลึกประมาณ 10 เมตร เพื่อก่อสร้างชั้นไดคินที่ พัทยา จังหวัดชลบุรี ผังบริเวณแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผังบริเวณโครงการ

#### 3.1 ลักษณะชั้นดิน

ลักษณะชั้นดินโครงการ ประกอบด้วยชั้นทรายเนินปาน กวางซึ่งแน่นมาก จากระดับผิวดินจนถึงความลึก 11 เมตร โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ประมาณ -5.00 เมตรจากผิวดิน ลักษณะชั้นดินแสดงไว้ในตารางที่ 1

#### ตารางที่ 1 ลักษณะชั้นดินโครงการ

ความลึก (ม.)		ชั้นดิน	ความหนา (ม.)	SPT
จาก	ถึง			
0	2.0	Medium dense sand	2.0	16
2.0	4.5	Medium dense sand	2.5	20
4.5	7.0	Very dense sand	2.5	50
7.0	9.0	Medium dense sand	2.0	15
9.0	10.5	Medium dense sand	1.5	22
10.5		Medium dense sand		50

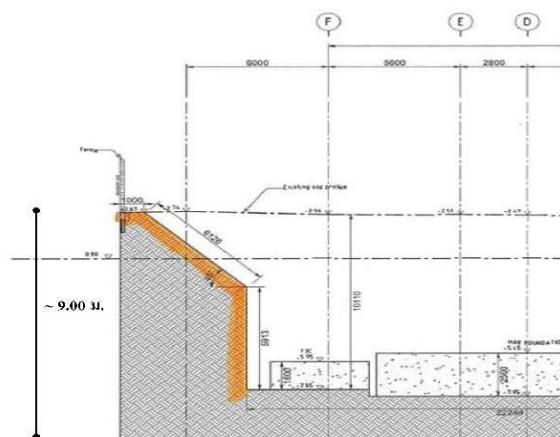
#### 3.2 ความเป็นมา

วิธีการก่อสร้างเดิมสำหรับโครงการนี้เป็นการบุดเปิดหน้าดินในลักษณะเชิงลาดคันดิน (Berm) โดยไม่มีระบบป้องกันดิน ดังแสดงในรูปที่ 8 การบุดดินได้ดำเนินการจนถึงความลึกประมาณ 4-5 เมตร เริ่มเกิดปัญหาดินเคลื่อนตัว จึงหยุดการก่อสร้างและหาแนวทางแก้ไขและป้องกัน

แนวทางแก้ปัญหานี้บ่งชี้ว่าต้องทำการติดตั้งกำแพงกันดินที่เหมาะสม แต่จากการศึกษาความเป็นไปได้พบว่า จากสภาพหน้างาน ถ้าจะใช้ Sheet Pile เป็นกำแพงกันดินร่วมกับระบบค้ำยันชั่วคราว การติดตั้ง Sheet Pile ไม่สามารถตอกได้ เนื่องจากสภาพชั้นทรายเป็นชั้นทรายแน่น และถ้าจะก่อสร้างกำแพงกันดินดินแบบแข็ง (Rigid Wall) เช่น Pile Wall หรือ Diaphragm Wall จะพบปัญหานี้เนื่องจากระดับดินมีการบุดดินออก (รูปที่ 9) ทำให้พื้นที่ก่อสร้างไม่เพียงพอ โดยถ้าจะก่อสร้าง Pile Wall หรือ Diaphragm Wall ต้องทำการถอนกลับ หรือก่อสร้างสะพาน (Platform) ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าก่อสร้างเพิ่มสูงมากและใช้ระยะเวลาการก่อสร้างใช้เวลานานขึ้น

แนวทางแก้ไขนี้ความเป็นไปได้และกระบวนการบริหารโครงการน้อยสุดคือการเลือกใช้การก่อสร้างเสาเข็มดินซึ่งมันต์โดยระบบเปียกด้วยวิธีอัดฉีดน้ำปูนแรงดันสูง (Jet Grouting) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของงานบุดดินที่ได้ดำเนินการ

ชุดไปแล้ว และออกแบบต่อเนื่องให้สามารถทำการขุดต่อไป  
จนถึงความลึกประมาณ 10 เมตร



รูปที่ 8 การขุดเปิดหน้าดินในลักษณะลาดกันดิน (Section B)

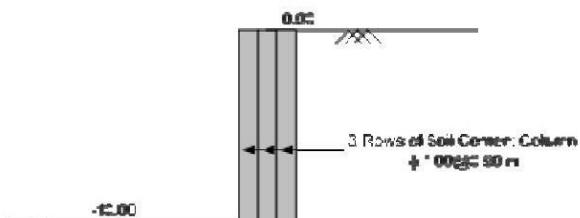


รูปที่ 9 สภาพหน้างานมีการขุดเปิดหน้าดิน 4 - 5 เมตร

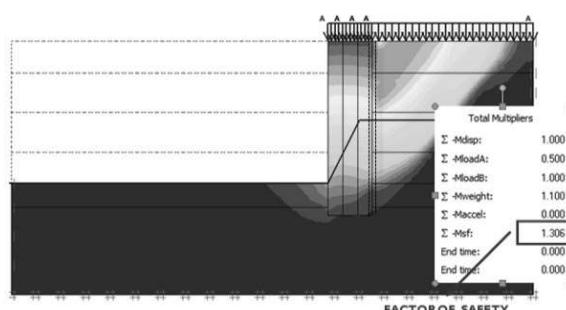
### 3.3 แนวคิดการออกแบบ

#### 3.3.1 การออกแบบเมืองต้น

การออกแบบเสื่อมร้าบพางานชุด ภายหลังการปรับปรุงดินตามหน้าตัด Section B ในรูปที่ 7 และ 8 โดยออกแบบก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตร ลึก -11.00 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 0.90 เมตร จำนวน 3 แท่ง (รูปที่ 10) โดยค่าพารามิเตอร์จะพิจารณาผลของระดับน้ำใต้ดินที่ส่วนราstra ได้บวบกวนโครงการ ผลวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) โดยใช้วิธีการคำนวณแบบการลดค่ากำลังรับแรงของดิน (Phi/C Reduction) และกำหนด Interface ตรงผิวสัมผัสระหว่าง SCC กับดิน ได้ค่าสัดส่วนความปลอดภัย 1.306 ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 หน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ φ 1.00@0.90 ม.  
สำหรับชุดดิน -10 เมตร

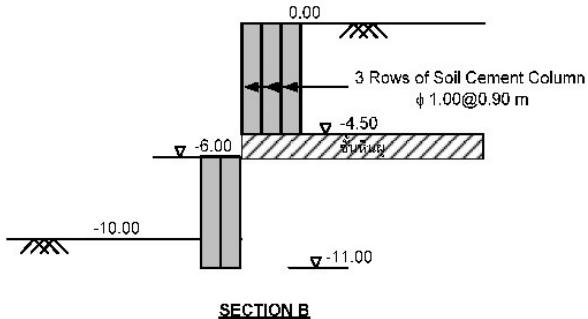


รูปที่ 11 ผลวิเคราะห์สัดส่วนความปลอดภัย ในการ  
ออกแบบเมืองต้น

#### 3.3.2 การออกแบบแก้ปัญหาตามสภาพจริง

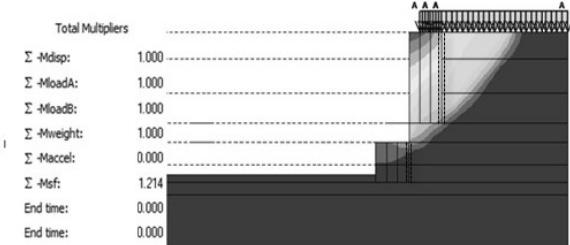
ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ พบรัญหาอุปสรรคการก่อสร้าง กล่าวคือเมื่อเวลาถึงความลึกประมาณ -4.5 เมตรจากผิวดิน พบร่องรอยเจาะไม่สามารถลงต่อไปได้

จากการตรวจสอบข้อมูลดิน ตามตารางที่ 1 พบร่องรอยที่ระดับความลึก -4.50 ถึง -7.00 เป็นชั้นทรายแน่น แต่สภาพชั้นดินที่พบร่องรอยเป็นชั้นทินทุนประมาณ 1.50 - 2.00 เมตร ทำให้ไม่สามารถเจาะต่อไปได้ แนวทางแก้ปัญหาคือการสกัดชั้นพินโดยออก แล้วทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ชุดใหม่อีก 2 แท่ง โดยออกแบบใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตร ระยะห่าง 0.90 เมตร ที่ระดับความลึก -6.00 เมตร ถึง -11.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 หน้าตัดแก้ไขเสาเข็มดินซีเมนต์  $\phi 1.00 @ 0.90 \text{ m}$ .

เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์จากการก่อสร้างที่พืบชี้หินใหญ่ทำให้มีระหบสีของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้รับต้นบุหุต ด้านนี้ การวิเคราะห์จึงต้องทำการวิเคราะห์ในลักษณะของ Gravity Wall ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพงานบุหุตในลักษณะของ Gravity Wall ด้วย FEM ได้ค่าสัดส่วนความปลดภัย 1.214 ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยมีค่าวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 13 ผลวิเคราะห์สัดส่วนความปลดภัย ในลักษณะ Gravity Wall ในการออกแบบแก้ไข

ตารางที่ 2 ค่าการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบบ่อหุต

การเคลื่อนตัว	$\delta_h$ (มม.)	$\delta_v$ (มม.)
ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (Extreme Total Displacement)	5.20	1.85
ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของดิน ที่ระยะ $x = 1.0 \text{ m}$ . หลังแนว SCC	4.21	3.10

หมายเหตุ

\* $\delta_h$  การเคลื่อนตัวด้านข้าง

\* $\delta_v$  การทรุดตัว

### 3.4 การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์และงานบุหุต

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยการอัดฉีดน้ำปูนระบบแรงดันสูง โดยการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 250 กิโลกรัมต่อลบ. เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ 50 ตันต่อลบ. เมตร ก่อนการก่อสร้างจริง ได้มีการก่อสร้างต้นตัวอย่างเพื่อสอบเทียบพารามิเตอร์ ในเรื่องแรงดันและระยะและความเร็วในการขอกก้าน แล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้นทดสอบ

การควบคุมคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้กำหนดให้มีการสุ่มเจาะเก็บตัวอย่าง (Coring) เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บุหุตที่สองหลังจากทดสอบสูงสุดแล้วในรูปที่ 15

การควบคุมงานบุหุต ได้กำหนดวิธีการบุหุตดินโดยก่อนทำการบุหุตดิน ได้กำหนดให้มีการทำการลดระดับน้ำใต้ดิน (Dewatering) ในบางโซนเพื่อลดระดับน้ำใต้ดินภายในโครงการ นอกจากนี้จะควบคุมน้ำหนักสมบทภานอก (Surcharge Load) ไม่ให้เกิน 1 ตัน / ตร. เมตรตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 15 การก่อสร้างเสาเข็มดินชิเม็นต์ชุดที่ส่องหลังจากถักตัวหินผอออก

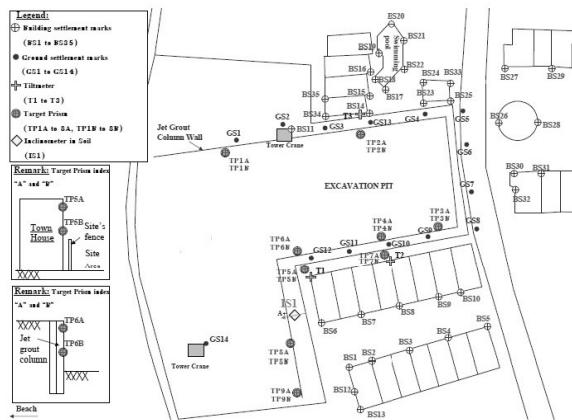
รูปที่ 16 สถาพหน่วยงานหลังขุดดินถึงระดับประมาณ -10 เมตร พบร่วมระบบป้องกันดินโดยใช้เสาเข็มดินชิเม็นต์ซึ่งมีเส้นทางตามการออกแบบ



รูปที่ 16 สถาพหน่วยงานหลังขุดดินถึงระดับ ประมาณ -10 เมตร

### 3.5 การตรวจวัดทางชารณ์เทคนิค

เครื่องมือตรวจวัดทางชารณ์เทคนิคสำหรับโครงการนี้ที่ได้ทำการติดตั้ง ประกอบด้วย เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน ใช้ Inclinometer, เครื่องมือวัดการทรุดตัว ใช้ Settlement Plate และเครื่องมือวัดการเอียงตัวของอาคาร ใช้ Tiltmeter ผังติดตั้งเครื่องมือวัดแสดงในรูปที่ 17

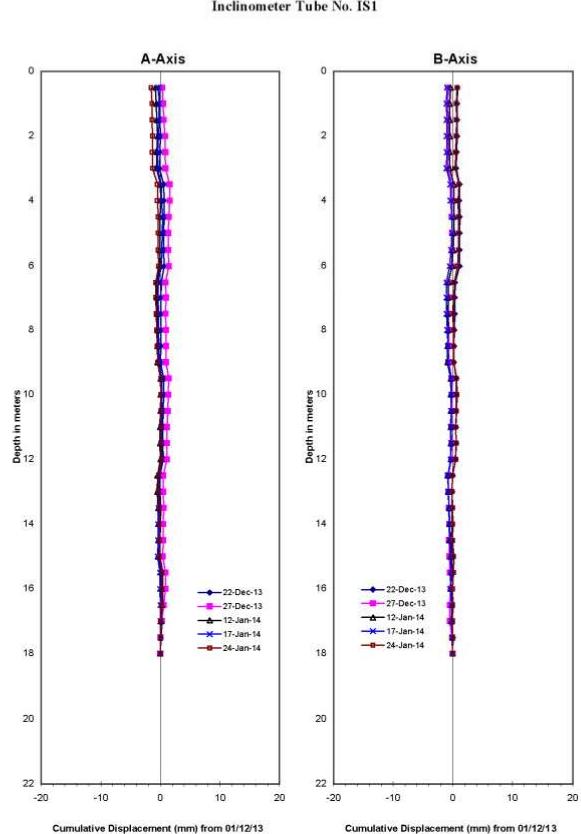


รูปที่ 17 ผังแสดงตำแหน่งเครื่องมือวัดทางชารณ์เทคนิค

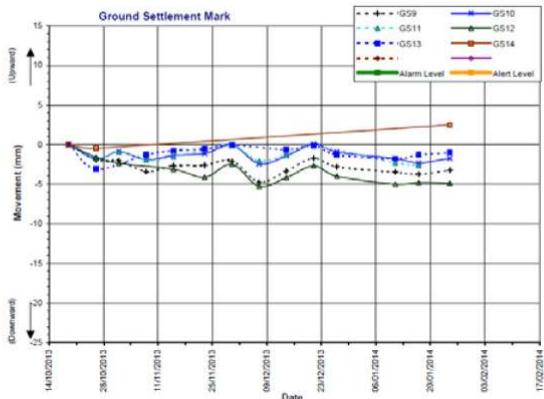
ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วย Inclinometer ที่ติดตั้งในดินหลังแนวเสาเข็มดินชิเม็นต์ แสดงในรูปที่ 18 ซึ่งพบว่าค่าการเคลื่อนตัวมากสุดคือ 1.57 มม. ไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้คือ 4.21 มม.

ตัวอย่างผลการวัดค่าการทรุดตัวโดยใช้ Settlement Plate ที่ติดตั้งในดินหลังแนวเสาเข็มดินชิเม็นต์ ตำแหน่ง GS 13 แสดงในรูปที่ 19 ซึ่งพบว่าค่าการทรุดตัวมากสุดคือ 3.06 มม. ไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้คือ 3.10 มม.

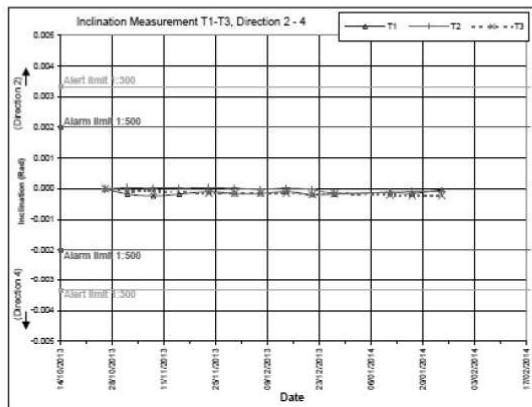
ตัวอย่างผลการวัดค่าการเอียงตัวของอาคารที่อยู่ติดโครงการ โดยใช้ Tiltmeter ที่ติดตั้งในเสาอาคาร แสดงในรูปที่ 20 ซึ่งพบว่าค่าการเอียงตัวมากสุดคือ 1:4545 ไม่เกินค่าเตือนภัย (Alarm Level) ที่ 1:500



รูปที่ 18 ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วย Inclinometer



รูปที่ 19 ผลการวัดค่าการทรุดตัวโดยใช้ Settlement Plate



รูปที่ 20 ผลการวัดค่าการการเอียงตัวของอาคาร

#### 4. บทสรุป

การประยุกต์ใช้ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ สำหรับงานบุคลดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน โดยไม่ต้องใช้ระบบถ้าข่ายกำแพง สามารถออกแบบและก่อสร้างได้ ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ, การควบคุมคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์ และวิธีการบุคลดิน ตลอดจนตรวจสอบ พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบบ่อบุค เพื่อให้การบุคลดินสำเร็จตามที่ได้ออกแบบ และเกิดประสิทธิผล ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาการก่อสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับงานบุคลดินลักษณะเดียวกัน โดยใช้กำแพงเสาเข็มพีซีเหล็กหรือกำแพงเสาเข็มเรียบต่อเนื่องซึ่งต้องใช้ระบบถ้าข่ายกำแพง

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ณรงค์ พศนพินพันธ์, กนล ลิงห์ โภแก้ว และชาญชัย ทรัพย์บัณฑิตวงศ์, "การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่เกิดจาก การบุคลดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน", เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พ.ศ. 2550