

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 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 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

การก่อสร้างอาคารสูงนิยมออกแบบให้มีการก่อสร้างชั้นใต้ดินเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด การก่อสร้างดำเนินการด้วยการขุดดินโดยใช้กำแพงเข็มพืดเป็นระบบป้องกันแรงดันดิน ทำให้การขุดดินมีเสถียรภาพ การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจึงเป็นส่วนสำคัญเพื่อป้องกันความ

เสียหายที่อาจเกิดขึ้นและกระทบกับพื้นที่ข้างเคียง

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

พืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวนอนใต้ระดับขุดดิน [1] นำผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วยมาตรวัดการเอียงตัว (Inclinometer) ในพื้นที่ก่อสร้าง เปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด และรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะแตกต่างกัน ที่มีผลต่อการเสริมกำลังของกำแพงเข็มพืด

2. การสร้างแบบจำลอง

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

2.1. ลักษณะชั้นดิน

ข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ในเขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 1

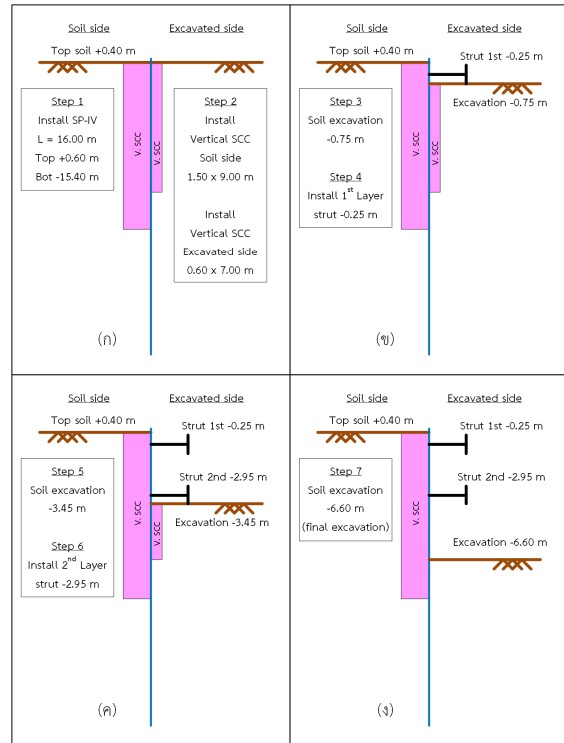


รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินในเขตพื้นที่ก่อสร้าง

2.2. ขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม

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

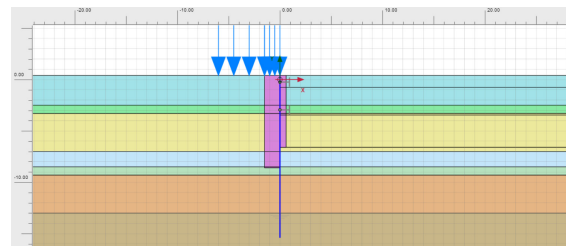
ในรูปที่ 2 (ข) และ (ค) เมื่อติดตั้งระบบค้ำยันครบ 2 ชั้น จึงทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้ายที่ -6.60 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (ง)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม

2.3. ลักษณะของแบบจำลอง

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



รูปที่ 3 แบบจำลองของการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมกำลังกำแพงเข็มพืด

2.4. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง FEM 2 มิติ นั้น เป็นพารามิเตอร์ที่นำมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน สำหรับพารามิเตอร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบในเขตพื้นที่กรุงเทพเลือกใช้ และใช้อย่างแพร่หลาย ในโครงการก่อสร้าง แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง คือ

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

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ Material Model แบบ Mohr-Coulomb Model

Material Set		Depth		Density		Strength		Stiffness	
Layer	Soil Type	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

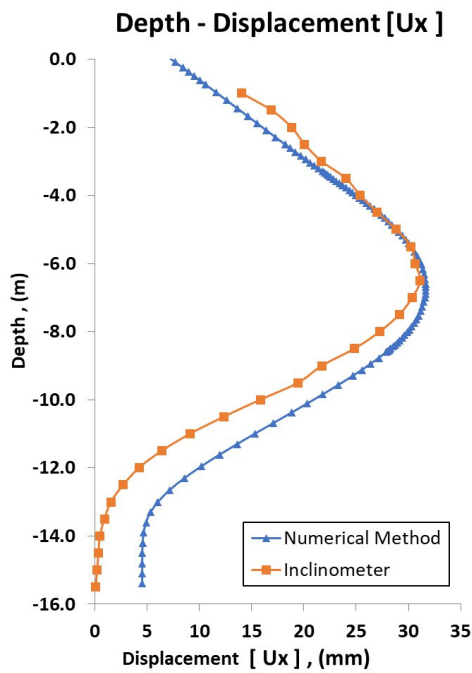
Material Set		Depth		Density		Strength		Stiffness	
Layer	Soil Type	Top (m)	Bot (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	C_u (kN/m ²)	ϕ (Degree)	Lambda λ	Kappa K
6	Stiff silty clay	-9.3	-13.0	15.7	13.7	67	10	0.290	0.0280
7	Stiff to very stiff silty clay	-13.0	-19.0	19.3	17.3	100	10	0.012	0.0011
8	Very 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

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) ที่ติดตั้งในชั้นตอนการฝังกำแพงเข็มพืด เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างในแต่ละชั้นตอน

การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ทำได้โดยเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวหลังการขุดดินในระดับสุดท้ายที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้ในสนามที่ 21 วัน เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพจริง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวระหว่างแบบจำลองกับการตรวจวัดในสนามที่ระยะเวลา 21 วัน

3. เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา

เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

3.1. รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น ไม่มีการเสริม

กำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้กำแพงเข็มพืดในการรับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินนอกกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก)

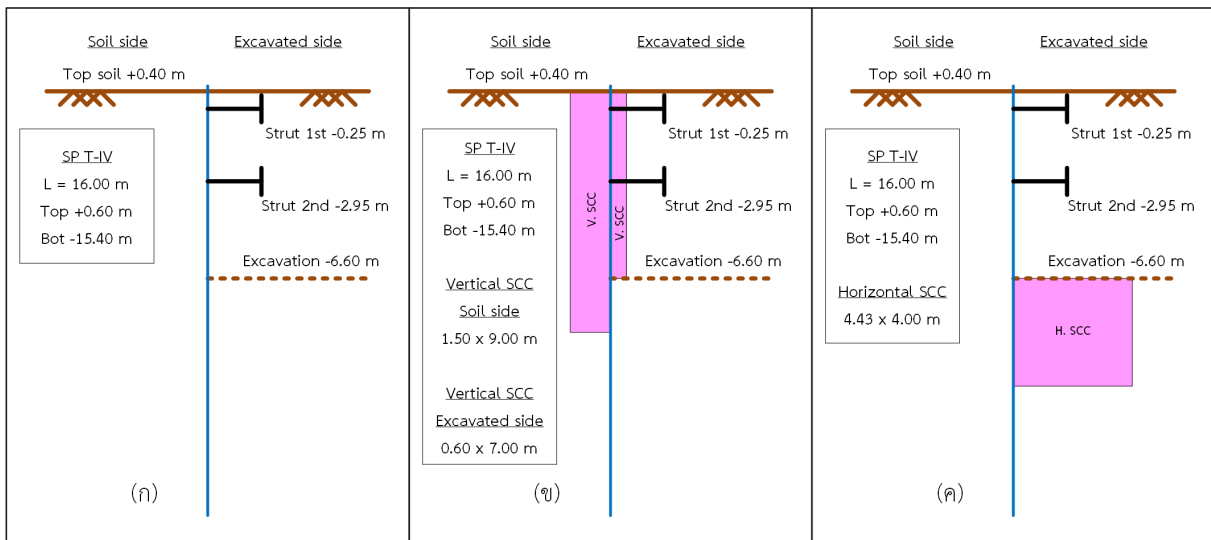
3.2. รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งประกอบทั้งสองฝั่งของกำแพง คือฝั่งดินหลังกำแพง และฝั่งบ่อขุดหน้ากำแพง เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด เป็นรูปแบบที่นิยมใช้ตามโครงการก่อสร้างในปัจจุบัน และสร้างจากรูปแบบจริงของโครงการก่อสร้างที่ใช้อ้างอิงกับข้อมูลของงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)

ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้งที่ใช้ในแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด โดยการสร้างแบบจำลอง 2 ชุด ที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน และเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน แต่ตำแหน่งของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่คนละฝั่งของกำแพงเข็มพืด แบ่งรูปแบบการศึกษาตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งได้ 2 รูปแบบ คือ

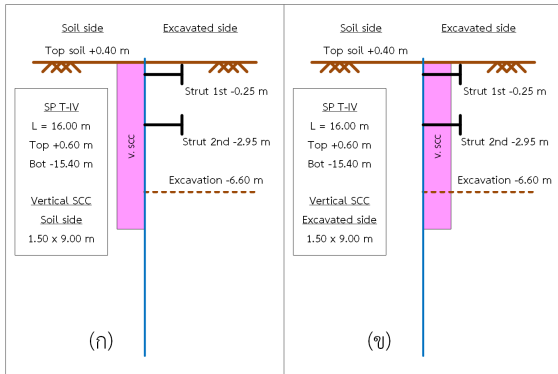
3.2.1. รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน

เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ระหว่างแบบจำลองกำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพงเพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) กับแบบจำลองกำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพงเพียงฝั่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข)



รูปที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ก) รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (ข) รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง และ (ค) รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

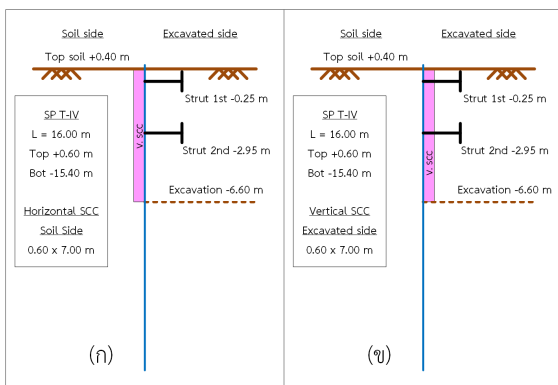
เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งของทั้งสองแบบจำลองมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความกว้าง 1.50 เมตร ความลึก 9.00 และความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร จะหลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่บางส่วนใต้ระดับบ่อขุดดิน



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

3.2.2. รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ที่เหนือระดับบ่อขุดดิน

เป็นรูปแบบเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด เหมือนกับหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน แต่ทำการเปลี่ยนขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นความกว้าง 0.60 เมตร และความลึก 7.00 โดยระดับเสาเข็มดินซีเมนต์ล่างสุดอยู่ที่ -6.60 เมตร พอดีกับระดับขุดดินชั้นสุดท้าย เมื่อทำการขุดดินออกจะไม่หลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และ (ข)



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

3.3. รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

เป็นแบบจำลองของกำแพงเข็มพืดค้ำยัน 2 ชั้น เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน เพื่อช่วยลดการเคลื่อน

ตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืด ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค)

แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินนี้ มีคุณสมบัติและปริมาตรเทียบเท่ากับแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง โดยมีจุดที่ต่างกันคือรูปร่างและตำแหน่งที่วางตัวอยู่เท่านั้น เมื่อทำการขุดดินออกที่ระดับสุดท้าย -6.60 เมตร จะหลงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนอยู่ทั้งหมด ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยเสริมกำลังของกำแพงเข็มพืดได้อย่างต่อเนื่อง

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดจากแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

แบบจำลองในหัวข้อ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่ามากกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองอื่นทั้งหมด เนื่องจากมีเพียงกำแพงเข็มพืดเท่านั้นที่รับแรงดันดินทั้งหมดจากฝั่งดินหลังกำแพง การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นหลังจากการขุดดินทันที ทำให้แรงที่เกิดขึ้นในระบบค้ำยันของแบบจำลองนี้ มีค่าน้อยกว่าแรงในระบบค้ำยันของแบบจำลองอื่นที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์

แบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่าลดลงจากรูปแบบ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) เนื่องจากการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และเพิ่มโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดิน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดมีค่าลดลง

แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) เมื่อทำการขุดดิน เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งดินหลังกำแพงไม่ถูกขุดออก ทำให้ผลของการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของดินยังคงอยู่

ขณะที่แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน ในฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) เมื่อทำการขุดดินเกิดการสูญเสียแรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพงถูกนำออกไป เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบก่อนที่ระบบค้ำยันถูกติดตั้ง และแรงที่เสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพงเคยต้าน ถูกถ่ายแรงให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ยังคงเหลือเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ทำให้ตำแหน่งการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดถูกยกขึ้นมาสูงขึ้นเหนือระดับเดิม

ตารางที่ 3 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดและระดับความลึกที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด

No.	Model	Figure	Level (m)	MHD (mm)
3.1	รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์	รูปที่ 5 (ก)	-5.78	38.0
3.2	รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง	รูปที่ 5 (ข)	-6.70	31.7
3.2.1	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน (Soil side)	รูปที่ 6 (ก)	-6.60	32.7
3.2.1	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน (Excavated side)	รูปที่ 6 (ข)	-6.32	32.4
3.2.2	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (Soil side)	รูปที่ 7 (ก)	-6.03	36.8
3.2.2	รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน (Excavated side)	รูปที่ 7 (ข)	-6.03	36.7
3.3	รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน	รูปที่ 5 (ค)	-5.52	27.6

หมายเหตุ : MHD คือ Maximum Horizontal Displacement

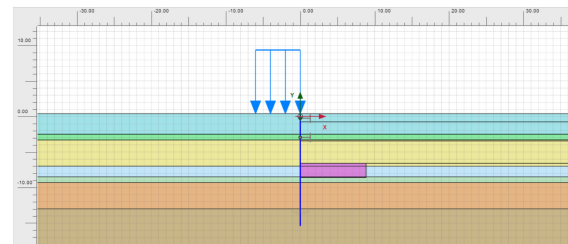
แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.2 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแบบจำลองในหัวข้อ 3.2.1 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดดิน ในฝั่งดินหลังกำแพง (Soil side) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) ทุกประการ

ขณะที่แบบจำลองในหัวข้อ 3.2.2 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งมีความลึกอยู่เหนือระดับบ่อขุดดิน ในฝั่งบ่อขุดดินหน้ากำแพง (Excavated side) ดังแสดงรูปที่ 7 (ข) เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้งเหลืออยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน ทำให้แรงต้านการเคลื่อนตัวในแนวราบ ถูกถ่ายแรงให้เข้าสู่ระบบค้ำยัน ระบบค้ำยันในรูปแบบนี้จึงมีแรงในระบบมากที่สุด

จากการศึกษาแบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ทั้งหมด 5 แบบจำลอง พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง สามารถเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ของกำแพงเข็มพืด และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบได้

แบบจำลองในหัวข้อ 3.3 รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) พบการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของแบบจำลองอื่นทั้งหมด เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน วางตัวอยู่ใต้ระดับบ่อขุดดิน และไม่ถูกนำออกเนื่องจากการขุดดิน ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ทำหน้าที่เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดได้อย่างต่อเนื่อง ลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 27.4 % จากแบบจำลองในหัวข้อ 3.1 รูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และลดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด 12.7 % จากแบบจำลองในหัวข้อ 3.2 รูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แนวตั้ง ในปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เท่ากัน และสามารถเปลี่ยนระดับความลึกที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืดให้อยู่ในระดับสูงขึ้น พฤติกรรมของกำแพง ณ จุดที่เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนวางตัวอยู่ มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับฐานรองรับแบบยึดแน่น (Fixed supports)

จากผลการศึกษาแบบจำลอง 3.1, 3.2 และ 3.3 ทั้ง 3 รูปแบบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนสามารถลดการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดได้มากที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดินเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดรูปร่าง ในทอมของความหนา และความยาว โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปริมาณการดูดของดิน (Heave) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Displacement) ของกำแพงเข็มพืด ที่เกิดขึ้นหลังการขุดดินในชั้นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 8

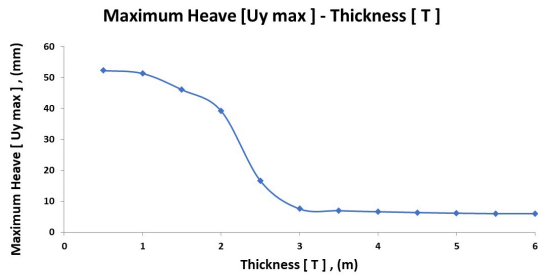


รูปที่ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

4.1. การดูดของดินจากรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้ระดับบ่อขุดดิน

การดูดเป็นการบวมตัวของดินที่กั้นบ่อฝังขุดเนื่องจาก Bearing Capacity ที่เกิดจากดินหลังกำแพงนอกบ่อขุดดิน มักเกิดจากการขุดดินในชั้นดินเหนียว เมื่อทำการปรับปรุงดินใต้บ่อขุดดินให้เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชั้นดินจะสามารถลดการดูดที่เกิดขึ้นได้

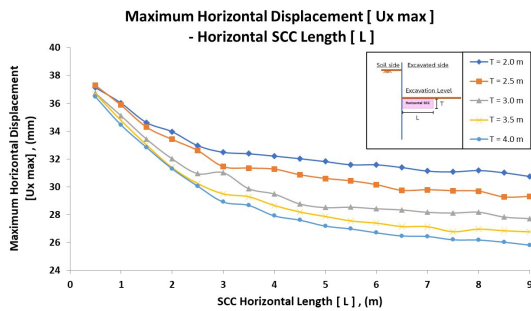
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ทำการปรับปรุงดินใต้บ่อขุดดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน พบว่าการเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนใต้บ่อขุดดินครั้งละ 0.50 เมตร ตลอดความกว้างของบ่อขุดดิน ทำให้การดูดของดินมีปริมาณลดลงทุกครั้ง ที่เพิ่มความหนา และเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีความหนาตั้งแต่ 3.0 เมตร ขึ้นไป พบว่าปริมาณการดูดของดินมีค่าน้อยลงจนเกือบเป็นค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของความหนาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนกับปริมาณการูดของดินสูงสุด

4.2. การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดจากการเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอน

การเพิ่มความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนสามารถลดปริมาณการูดของดินได้ และเมื่อทำการเพิ่มความยาวโดยที่ความหนายังคงเดิม พบว่าเป็นการลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนกับการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติด

ผู้วิจัยทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนในเทอมของความ

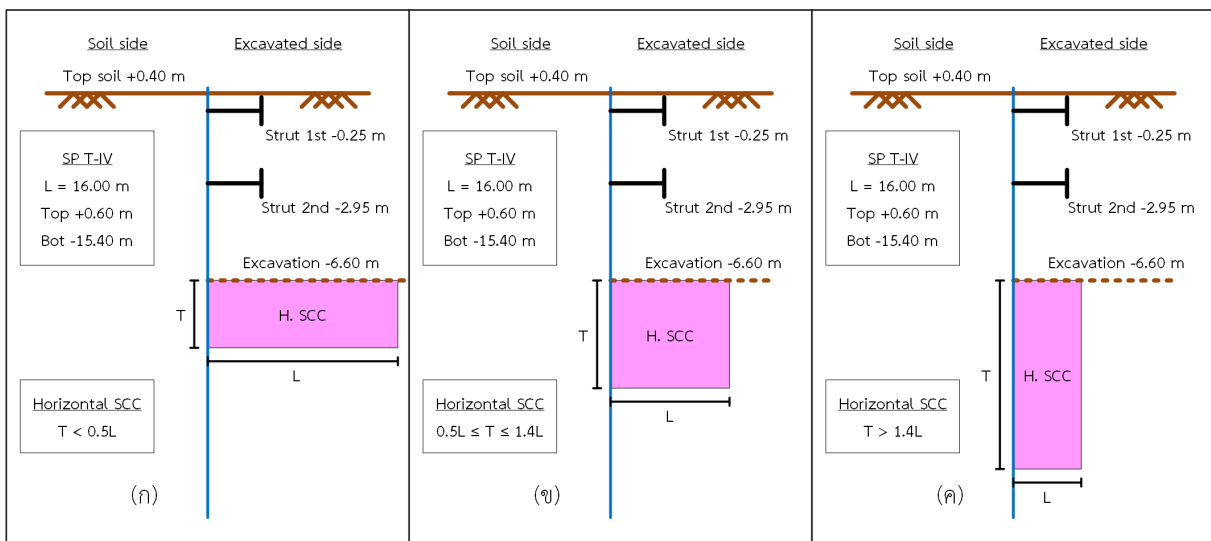
ยาว โดยการกำหนดความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นค่าคงที่ขนาด 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 เมตร เพื่อสังเกตการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติด พบว่าการเพิ่มความยาวครั้งละ 0.50 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดได้ และเมื่อเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนจนมีความยาวตั้งแต่ 3.0 เมตร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

4.3. ความสัมพันธ์ของขนาดความหนาและความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุด

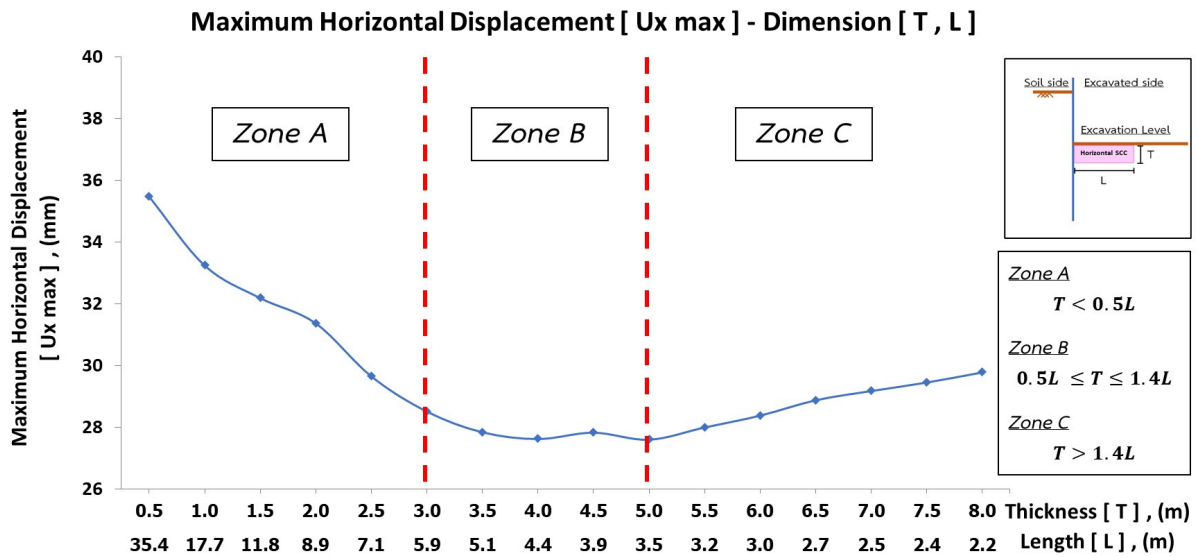
จากการศึกษาขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนในเทอมของความหนาและความยาว พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ การเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดมีค่าลดลง ปริมาณการูดของดินมีปริมาณน้อยลง และเมื่อเพิ่มขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงจุดหนึ่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัว และปริมาณการูดของดิน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นค่าคงที่

ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาและความยาวโดยใช้ปริมาตรเท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์แนวดิ่ง ด้วยการกำหนดให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีปริมาตรคงที่ ทำการเพิ่มขนาดความหนาครั้งละ 0.50 เมตร ทำให้ความยาวลดลงเป็นอัตราส่วนกันเนื่องจากปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 11

ผลการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มที่ติดในแบบจำลองสามารถแบ่งตามความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ 3 โซน คือ โซน A การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น โซน B การเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงถึงจุดที่น้อยที่สุดตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และโซน C การเคลื่อนตัวในแนวราบเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำแพงเข็มที่ติดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดิน (ก) โซน A เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอน (ข) โซน B เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าใกล้เคียงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ข) โซน C เสาเข็มดินซีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวดิ่ง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดินกับการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของกำแพงเข็มพืด

5. สรุปผลการศึกษา

รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดินมีประสิทธิภาพสูงสุดจากทั้ง 3 รูปแบบ สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบ 12.7 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพืดประกบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวดิ่ง และ 27.4 % จากรูปแบบกำแพงเข็มพืดแบบไม่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดิน สามารถค้ำยันกำแพงกันดินได้ก่อนการขุดดิน และไม่เกิดขวางในขณะขุดดินเนื่องจากวางตัวอยู่ได้ระดับขุดดิน

เมื่อศึกษารูปแบบกำแพงเข็มพืดเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดิน พบว่าขนาดความหนาและความยาวที่ใกล้เคียงกันจะมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวที่ดีที่สุด

ความหนาของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดินที่หนามากกว่า 2 เมตร ขึ้นไป สามารถลดการปริมาตรการขุดของดินที่ระดับขุดดินได้ดี แต่เมื่อเพิ่มความหนามากกว่า 3 เมตรขึ้นไป ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวจะไม่เพิ่มขึ้นกว่านี้แล้ว

ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดินมี ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความยาว 3 ถึง 4 เมตร สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงเข็มพืดได้ดี แต่เมื่อความยาวเกิน 4 เมตร การลดการเคลื่อนตัวจะไม่ค่อยสำคัญมากนัก

เสาเข็มดินซีเมนต์แนวนอนได้ระดับขุดดินที่มีความหนามากกว่าความยาวมาก ๆ หมายถึงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีลักษณะแนวตั้ง วางตัวแนบไปกับกำแพงเข็มพืด เป็นเพียงการเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับระบบกำแพงกันดินเท่านั้น เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกก่อสร้างให้เป็นส่วนหนึ่งของกำแพงเข็มพืด เสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะนี้ มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังกำแพงเข็มพืดได้น้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำสั่งสอนขอขอบพระคุณทุนวิจัยเลขที่ KREF046012 ในการใช้งานโปรแกรม PLAXIS และขอขอบพระคุณบริษัท ฮีโรเซ (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 วิสุทธิ์เมธานุกูล (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 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