



การศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเสริมเสถียรภาพกำแพงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง
STUDY OF SOIL-CEMENT COLUMN TO IMPROVE STABILITY OF SHEET PILE WALL USING
PHYSICAL MODEL

ธนาอด คงสมบุญ¹, สันติ กวินวงศ์ไพบูลย์², พชร วรรณรัตน์³, พิสิทธิ์ ลิ้มปัสสาวาณิช³, อนูปงษ์ สุตระเลข³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²อาจารย์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³นักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการก่อสร้างใต้ดินเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเทคนิคการก่อสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างกันดิน โดยมุ่งหวังเพื่อลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินซึ่งมีหลายวิธี งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงเข็มพืด ศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และการพิบัติของดินบริเวณโดยรอบ รูปแบบของการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ในการวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ ได้แก่ การเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์แนบไปกับกำแพงเข็มพืด การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ปักเว้นระยะทั้งทางด้านดินเชิงรุกและเชิงรับ การเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงกันดิน โดยทำการศึกษาดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางกายภาพในชั้นทรายตัวอย่างที่มีความมุมเสียดทานภายในจากการทดลอง เท่ากับ 29.9° ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแถวตั้งฉากกับกำแพงกันดินในด้านแรงดันดินเชิงรุกเป็นการเพิ่มแรงต้านทานแบบแรงเสียดทานด้านข้างแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ ทำให้กำแพงเข็มพืดมีแรงต้านทานการเคลื่อนตัวจากแรงดันดินได้เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่น

คำสำคัญ: กำแพงกันดิน, เสาเข็ม-ซีเมนต์, แรงดันดินด้านข้าง, แบบจำลองทางกายภาพ, การผสมลิก

ABSTRACT

Nowadays, there is a great increase in underground constructions. Therefore, it is necessary to develop the construction technique to increase efficiency of soil retaining structure. Movement of soil protection system can be decreased by many ways. This research aims to study the use of soil cement column to increase the stability of sheet pile wall by focusing on the movement of wall and soil failure. Three types of soil cement columns are installed: i.e., soil cement columns which attached to the sheet pile wall, soil cement columns which were perpendicular to the sheet pile wall, and soil cement columns which located on both active side and passive side of the sheet pile wall. This research is conducted by using physical sand model, whereas sand internal friction angle is 29.9° . The result shows that by installing the soil cement columns which were perpendicular to sheet

Thanadol Kongsomboon¹, Santi Kawinwongpaibool², Phachara Wannarat³, Pisit Limsupawanich³, Anupong Sootlake³

¹ Assistant Professor, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

² Lecturer, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

³ Student, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

pile in active side can increase a friction resistance around the soil cement column, and increase a stability of retaining wall system and this installation type can decrease wall movement more than other methods.

KEYWORD: retaining wall, soil-cement column, lateral earth pressure, physical model, deep mixing

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารสูง และ โครงสร้างพื้นฐานใต้ดินได้เพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่ดินอ่อนและมีขอบเขตจำกัดในการก่อสร้าง เพื่อลดผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบ การขุดดินที่ระดับความลึกต่างๆ จึงใช้ระบบโครงสร้างกันดินเข้ามาช่วย ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างกันดินจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและการวิเคราะห์พฤติกรรม เพราะการเคลื่อนตัวและการพิบัติของโครงสร้างกันดินนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมไม่แน่นอน การคำนวณว่าโครงสร้างกันดินจะมีการเคลื่อนตัวเท่าไรนั้นยังไม่สามารถคำนวณให้ได้ผลที่แม่นยำ รวมถึงการทดสอบที่หน้างานนั้นมีจำกัด การใช้แบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ลักษณะการพิบัติของดิน อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ รวมถึงการลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้

การออกแบบระบบเพื่อป้องกันการพิบัติและเพิ่มเสถียรภาพของดินคือ การลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ของกำแพงกันดิน การเพิ่มแรงเสียดทาน และเพิ่มความแข็งแรงของดินด้าน Active และ Passive ซึ่งแต่ละวิธีมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินแต่ละรูปแบบ และประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และเลือกใช้รูปแบบกำแพงกันดินที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบโครงสร้างกันดินกับความลึกการขุดที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน
- 2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และการพิบัติของดินบริเวณรอบๆ โครงสร้างกันดิน
- 2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่มีการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละรูปแบบ

3. วัสดุและเงื่อนไขในการวิจัย

- 3.1 การศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาดหนา 24 เซนติเมตร สูง 53 เซนติเมตร กว้าง 44 เซนติเมตร



รูปที่ 1 กล่องแบบจำลองขนาด หนา 24 เซนติเมตร สูง 53 เซนติเมตร กว้าง 44 เซนติเมตร ในห้องปฏิบัติการ

3.2 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย เป็นทรายที่ผ่านการอบ และคัดขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 ซึ่งทดสอบโดย

3.2.1 ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) ASTM D442-63 เพื่อหาขนาดคละของทราย

3.2.2 ใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ASTM 3080 และการปล่อยทรายอิสระสมการ Slope Stability ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope) เพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายใน

3.2.3 ใช้วิธีหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity of Soil) ASTM D854-00[4] เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

3.2.4 ใช้อุปกรณ์ปล่อยทรายเพื่อให้ทรายตกอย่างอิสระและสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด (Sand Raining)

3.2.5 ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร เป็นแบบจำลองกำแพงเข็มพืด และมีส่วนด้านบน

ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร หา Elastic Modulus จาก $\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}$ โดยการกดน้ำหนักในห้องปฏิบัติการ และบันทึกค่าการโก่งตัวสูงสุด

3.2.6 หล่อแท่งซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร ความยาว 12 และ 28 เซนติเมตรเป็นแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ 15 %

3.2.7 ใช้โปรแกรม ImageJ เป็นเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจากตำแหน่งที่กำหนด โดยวัดระยะ Pixel จากภาพถ่าย และใช้ โปรแกรม DxO Optics Pro 10 สำหรับการปรับแก้ Distortion จากความโค้งงอของเลนส์

3.2.8 ไม่ศึกษาผลของแรงดันน้ำ

3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ 1 รูปแบบ Single Wall (รูปที่ 2) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดแบบแฉกเดี่ยว เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับความลึกการขุดที่ระดับต่างๆ รวมทั้งมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ และใช้เป็นตัวเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองอื่นๆ

แบบจำลองที่ 2 รูปแบบ Parallel of Wall (รูปที่ 3) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์โดยมีการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ขนานติดไปกับกำแพงเข็มพืด เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติกับแบบจำลองที่ 1 เมื่อความแข็งแรงของกำแพงเข็มพืดเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1

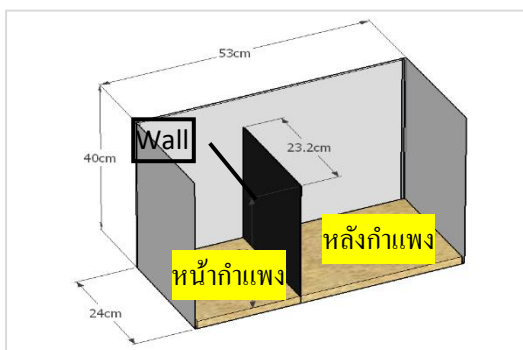
แบบจำลองที่ 3 รูปแบบ Perpendicular at Active (รูปที่ 4) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์โดยเรียงตัวเป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดด้านหลังกำแพง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติกับแบบจำลองที่ 1 เมื่อมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่างแถวเสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทราย

แบบจำลองที่ 4 รูปแบบ Spacing at Active (รูปที่ 5) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีการปักกระจายตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้านหลังกำแพง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติกับแบบจำลองที่ 1 เมื่อมีการเพิ่มกำลังรับแรงของดินบริเวณระนาบการวิบัติทางด้าน active

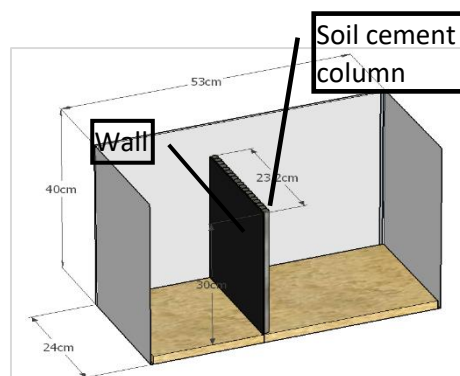
แบบจำลองที่ 5 รูปแบบ Perpendicular at Passive (รูปที่ 6) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์โดยเรียงตัวเป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มพืดด้านหน้ากำแพง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติกับแบบจำลองที่ 1 เมื่อมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่างแถวเสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทรายในด้าน Passive

แบบจำลองที่ 6 รูปแบบ Spacing at Passive (รูปที่ 7) เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีการปักกระจาย

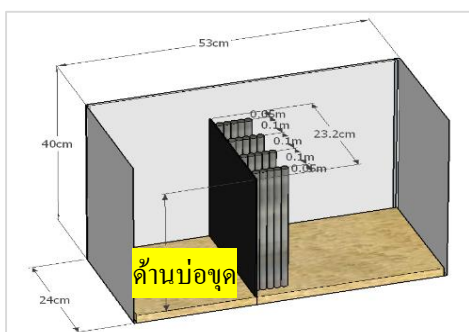
ตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้านหน้ากำแพง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัว และมุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติกับแบบจำลองที่ 1 เมื่อมีการเพิ่มกำลังรับแรงของดินบริเวณหน้าการวิบัติทางด้าน Passive



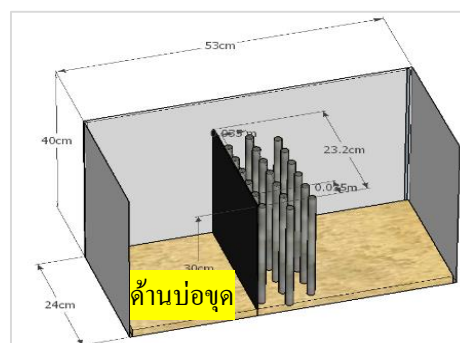
รูปที่ 2 แบบจำลองที่ 1 รูปแบบ Single Wall



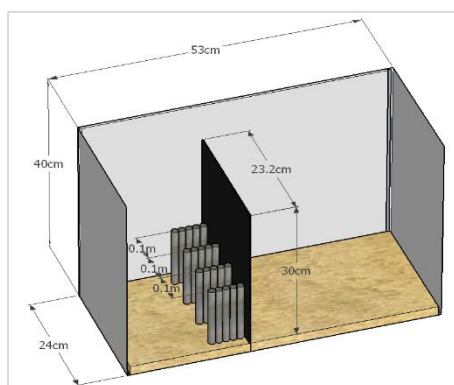
รูปที่ 3 แบบจำลองที่ 2 รูปแบบ Parallel of Wall



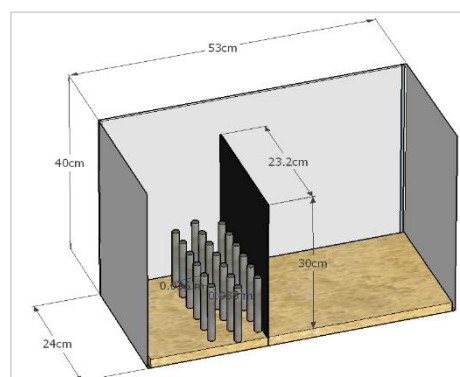
รูปที่ 4 แบบจำลองที่ 3 รูปแบบ Perpendicular at Active



รูปที่ 5 แบบจำลองที่ 4 รูปแบบ Spacing at Active



รูปที่ 6 แบบจำลองที่ 5 รูปแบบ Perpendicular at Passive



รูปที่ 7 แบบจำลองที่ 6 รูปแบบ Spacing at Passive

4. วิธีเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

- 4.1 ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของทราย และประเมินระนาบการวิบัติ
- 4.2 เตรียมแบบจำลอง พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทรายและอุปกรณ์จำลองการขุดดิน
- 4.3 เททรายลงในแบบจำลองและปรับให้ได้ระดับตามที่กำหนดไว้ และนำกำแพงเข็มพืดจำลองและเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองติดตั้งตามรูปแบบที่กำหนด โดยติดตั้งให้ได้ระดับในแนวดิ่ง
- 4.4 โรยทรายโดยกำหนดระยะความสูง 25 เซนติเมตร เหนือผิวทราย ให้ตกอย่างอิสระลงในแบบจำลองเป็นชั้น โดยใช้ทรายสีแสดงถึงระดับ ทุกๆ 2 เซนติเมตร จนได้ระดับทรายที่ความสูง 28 เซนติเมตร
- 4.5 ติดตั้งกล้องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกับแบบจำลอง เพื่อบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของกำแพง



รูปที่ 8 ติดตั้งกล้องถ่ายรูปเพื่อบันทึกค่าการเคลื่อนตัว



รูปที่ 9 การจำลองการขุดด้วยการดูดทรายในแบบจำลอง

5. วิธีทดลองแบบจำลองเข็มพืดและเสาเข็มดินซีเมนต์

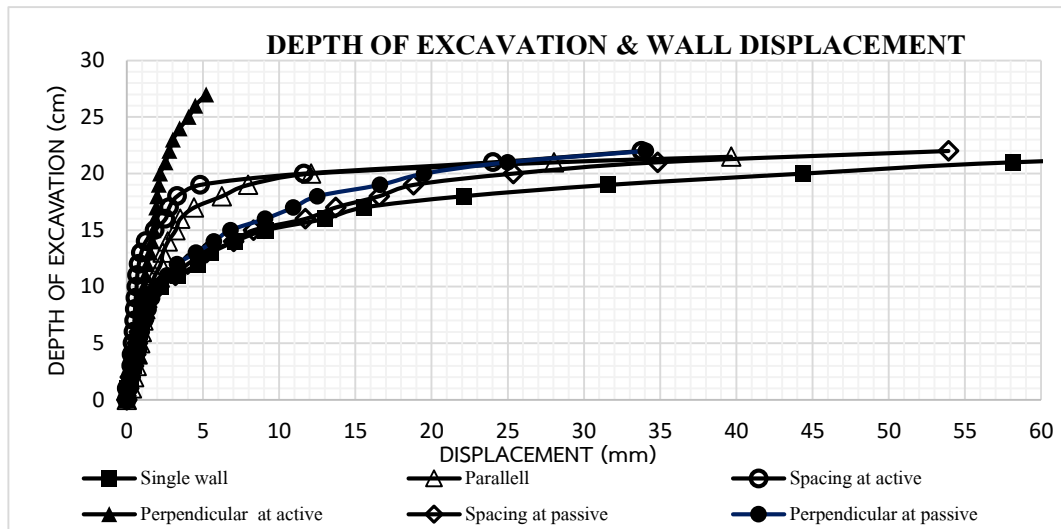
- 5.1 จำลองการขุดดินด้วยการดูดทรายในแบบจำลอง
- 5.2 บันทึกภาพการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดที่ระยะความลึกการขุดทุกๆ 1 เซนติเมตร
- 5.3 ทำการดูดทรายจนสังเกตเห็นการเกิดระนาบวิบัติที่ด้านหลังกำแพง
- 5.4 บันทึกค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงจากตำแหน่งเดิมและคำนวณการเลื่อนพังที่จุดพิบัติ
- 5.5 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ตามที่กำหนด

6. ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้เริ่มทำการทดสอบหาคูณสมบัติของดินทรายตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองได้ค่าทรายตัวอย่างมีคูณสมบัติเป็น Poorly Graded Sand (SP) และผลการทดสอบ Direct Shear Test พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 29.9° และผลการทดสอบปล่อยทรายลงอย่างอิสระพบว่ากองทรายมีความลาดเอียงตามธรรมชาติ (Angle of Repose) ใกล้เคียงกับมุมเสียดทานภายใน โดยมีค่า (ϕ) = 31.5° ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.604 และทำการคำนวณความแข็งแรงของกำแพงเข็มพืดจำลองได้ค่า Elastic Modulus เท่ากับ 58,199.88 Ksc.

6.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้วยแบบจำลอง

การศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้วยแบบจำลองระบบกำแพงกันดิน ใช้กราฟในการแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกของการขุดกับการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืด ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดินกับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดเฉลี่ยของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ

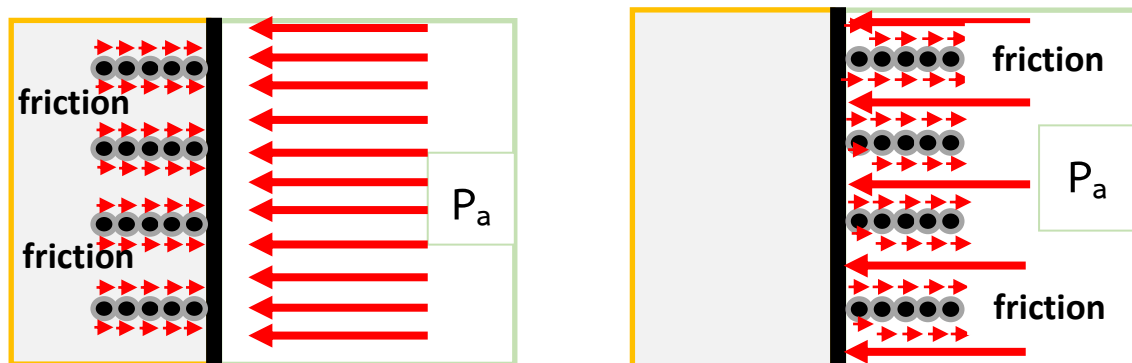
การเคลื่อนตัวของกำแพงเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความลึกในการขุด ในการขุดช่วงแรกการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อผ่านจุดความลึกหนึ่ง การเคลื่อนตัวต่อการขุดในเซนติเมตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดพิบัติ ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟเปลี่ยนความชันไป ในแบบจำลองที่ 5 และ 6 รูปแบบ Perpendicular และ Spacing at Passive มีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 ไม่มากนัก ในช่วงการขุด 15 เซนติเมตรแรกในแบบจำลองที่ 2 และ 4 รูปแบบ Parallel และ Spacing at Active มีการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 เมื่อเทียบกับที่ระยะขุดเดียวกัน ในแบบจำลองที่ 3 รูปแบบ Perpendicular at Active มีการเคลื่อนตัวของกำแพงน้อยมาก สามารถขุดต่อได้จนถึงฐานของกำแพงเข็มพืดที่ความลึก 28 เซนติเมตร และยังไม่ปรากฏระนาบพิบัติให้เห็น

การเพิ่มความมั่นคงของระบบกำแพงกันดินด้วยวิธีเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Area Moment of Inertia) ของกำแพงกันดิน กำแพงเข็มพืดจำลองรูปแบบ Parallel (แบบจำลองที่ 2) และ Perpendicular (แบบจำลองที่ 3) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำแพงสามารถคงอยู่ได้อย่างอยู่ในระยะการขุดช่วงหนึ่ง ทำให้การเคลื่อนตัวน้อยกว่ารูปแบบ Single Wall แต่เมื่อขุดดินออกลึกมากขึ้น แรงเนื่องจากสภาวะ Active เพิ่มขึ้นเพียงพอ กำแพงจะมีการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแท่ง Cement Column เสริมความแข็ง (Rigid) ของกำแพง กำแพงจึงไม่เกิดการคด (Bending) แต่เป็นการพลิกคว่ำ (Overturning) และ การลื่นไถล (Sliding) เหมือนกับ Gravity Wall

การเพิ่มความมั่นคงของระบบกำแพงกันดินด้วยวิธีเพิ่มแรงเสียดทานด้านข้างแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ด้านแรงดันดินเชิงรุก (Active) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นด้านข้างของแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ (แบบจำลองที่ 3) เปรียบเหมือนแรงช่วยต้านการเคลื่อนที่ของ

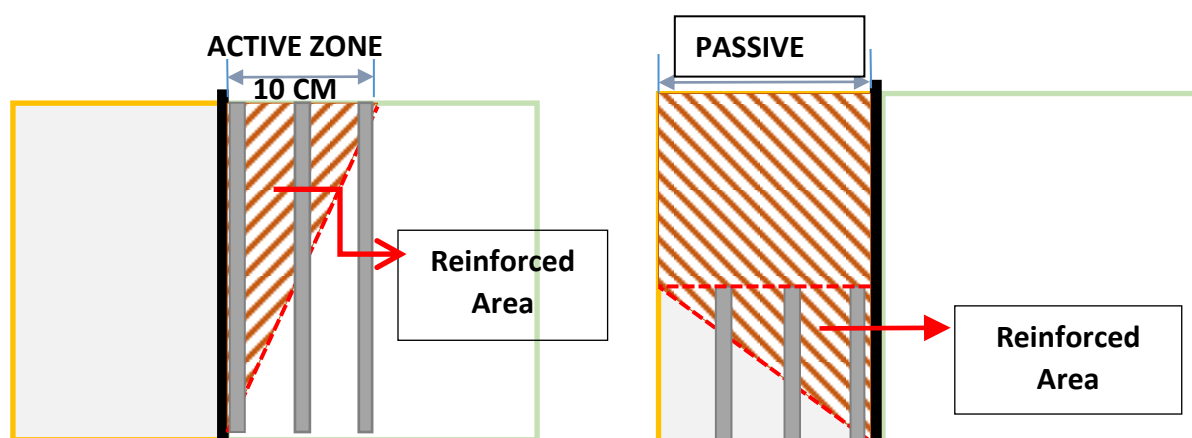
กำแพง ทำให้กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวน้อยมากในช่วงระยะชุดแรก แต่เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น แรงเนื่องจากสภาวะ Active มากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ทำให้กำแพงเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็ว และล้มลงอย่างทันทีทันใด

ด้านแรงดันดินเชิงรับ (Passive) แรงเสียดทานด้านข้างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นเปรียบเหมือนแรงช่วยต้านการเคลื่อนตัวของกำแพง แต่เนื่องจากมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นน้อยกว่าด้านแรงดันดินเชิงรุก กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ในช่วงระยะชุดแรก เพราะช่วงแรกมีน้ำหนักรกดทับจากดินทรายด้านบนอยู่แรงเสียดทานช่วงต้นจึงยังสูง ประกอบกับแรงดันดินเชิงรุกช่วงต้นยังน้อยด้วย แต่เมื่อชุดทรายออกจนเลระดับหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่งผลให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นทรายลดน้อยลง และแรงดันดินเชิงรุกสูงขึ้น ทำให้กำแพงมีเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจนพิบัติ



รูปที่ 11 ลักษณะแรงต้านจากแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มดินซีเมนต์(Top View)

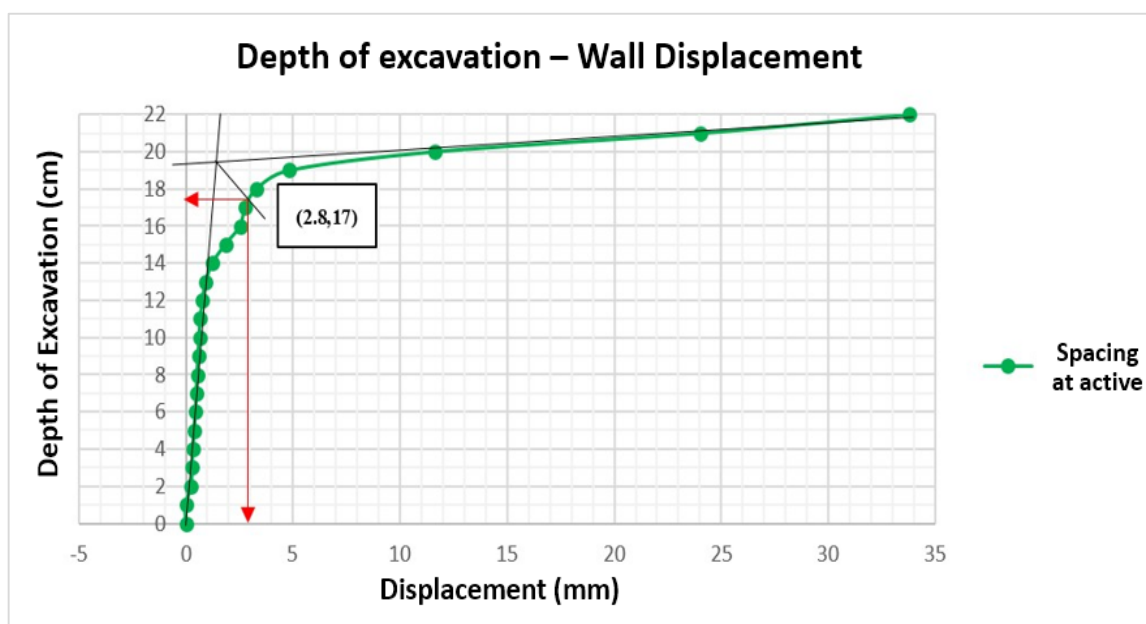
การเพิ่มความมั่นคงของระบบกำแพงกันดินด้วยวิธีการเสริมกำลังรับแรงของดิน การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ เสริมกำลังรับแรงของดินในด้าน Active และ Passive ชั้นดินพัฒนาแรงดันดินภายในกลุ่มของเสาเข็มดินซีเมนต์ ทำให้การเคลื่อนตัวของมวลดินถูกกันขวางด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การเคลื่อนตัวจึงเกิดขึ้นอย่างจำกัด ส่งผลให้กำแพงคงอยู่ได้ในระยะชุดช่วงแรก แต่เมื่อแรงเนื่องจากสภาวะ Active เพิ่มขึ้นและมากกว่ากำลังต้านที่ถูกลดลงใน Passive Zone กำแพงจะเคลื่อนตัวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนเกิดการพิบัติ



รูปที่ 12 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Active และ Passive บริเวณที่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์

6.2 ผลการศึกษาแบบจำลองของการพัง ณ จุดพิบัติ จากกราฟด้วยวิธี Graphical Method^[5]

แบบจำลองการเรียงเสาเข็มซีเมนต์แบบ Perpendicular at Passive กับ แบบจำลองการเรียงแบบ Spacing at Passive มีค่าระยะขุดที่จุดพิบัติใกล้เคียงกัน และแตกต่างจากรูปแบบ Single Wall ไม่มากนัก เนื่องจากแบบจำลองทั้งสองอยู่ในด้าน Passive ซึ่งพัฒนาแรงด้านการเคลื่อนตัวได้น้อย เพราะต้องจำกัดความสูงของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มความลึกในการขุด ส่วนแบบจำลอง Perpendicular at Active มีพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มดินซีเมนต์และชั้นทรายมากกว่า ทำให้เกิดแรงด้านการเคลื่อนตัวจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น และไปต้านทานระนาบพิบัติของสภาวะ Active ทำให้สามารถขุดได้ลึกกว่าแบบจำลองรูปแบบอื่นๆ



รูปที่ 13 ตัวอย่างวิธีการหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 4 Spacing at Active

ตารางที่ 1 ตารางแสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ

รูปแบบ	ระยะขุดถึงจุดพิบัติ (cm)	การเคลื่อนตัวถึงจุดพิบัติ (cm)
Single Wall	14.9	8.4
Parallel	17.6	5.7
Spacing at Active	17.0	2.8
Perpendicular at Active	21.6	2.6
Spacing at Passive	15.4	8.2
Friction at Passive	15.4	6.8

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่ามุมการพิบัติที่เกิดขึ้นของมวลดินในแบบจำลอง (Angle, θ)

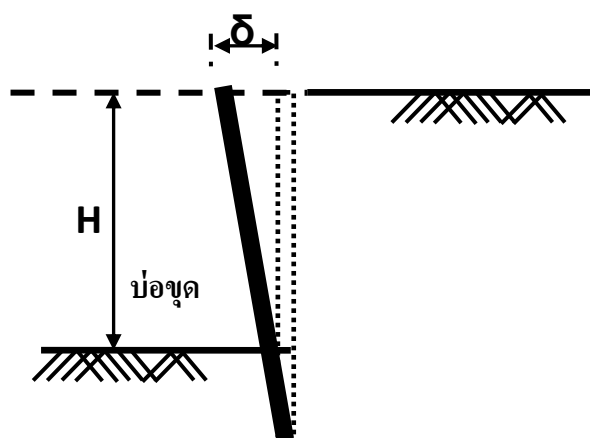
รูปแบบ	มุม $45+\frac{\theta}{2}$ ที่เกิดขึ้น (องศา)		มุม θ (องศา)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Single Wall	64.5	66	39	42
Parallel of Wall	62	64	35	30
Spacing at Active	73	76	56	62
Perpendicular at Active	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			
Spacing at Passive	69	71	48	52
Perpendicular at Passive	69	66	48	42

เมื่อทำการพิจารณาศึกษามุมของการพิบัติของชั้นทรายในแบบจำลอง พบว่า

1. แบบจำลอง Single Wall และ Parallel มีค่ามุม θ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเสริมเสาดินซีเมนต์ของแบบจำลอง Parallel of Wall เป็นการเพิ่มเพียงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพง ซึ่งไม่ได้รับกวนพื้นที่ในระนาบพิบัติ ทำให้ระนาบการวิบัติใกล้เคียงกับ Single Wall

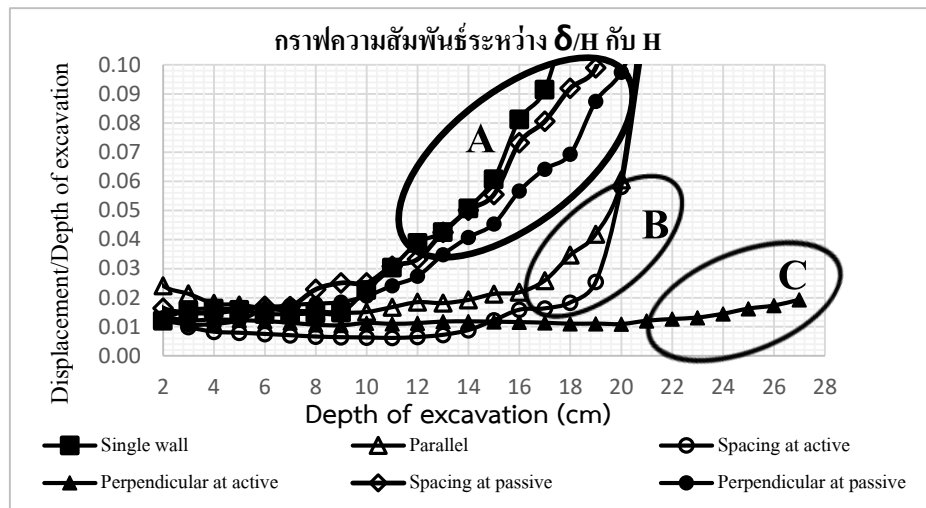
2. แบบจำลอง Spacing at Active และ Perpendicular at Active มีค่ามุม θ มากกว่า Single Wall อย่างมาก เนื่องจากการติดตั้งเสาดินซีเมนต์ทั้ง 2 รูปแบบ ไปรบกวนการพัฒนากำลังด้าน Active ทำให้ไม่สามารถพัฒนากำลังได้เต็มที่ ระนาบการพิบัติที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนไป โดยพื้นที่ที่เกิดระนาบการวิบัติลดลง เมื่อเทียบกับรูปแบบ Single Wall

6.3 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดินด้วยอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$



รูปที่ 14 ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพง (δ)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $\frac{\delta}{H}$ กับ $\frac{\delta}{H}$ ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยที่ δ คือระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่หัวกำแพงกันดิน และ H คือระดับการขุดดินด้านหน้ากำแพงกันดิน สามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดิน และอธิบายพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบดังนี้



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของกำแพงกันดิน (ช่วง $\frac{\delta}{H}$ ตั้งแต่ 0-0.1)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน δ/H กับ H ของระบบกำแพงกันดินแต่ละรูปแบบ สามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้โดยการแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มพฤติกรรม คือแบบกลุ่ม A B และ C ดังรูป คือ

1. กลุ่ม A ได้แก่รูปแบบ Perpendicular และ Spacing at Passive โดยในช่วงระยะแรก กำแพงมีการเคลื่อนตัวไม่มาก ระบบกำแพงกันดินมีความแข็งแรงอยู่ทำให้กราฟมีความชันน้อย โดยที่ประสิทธิภาพการต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าเท่ากับ 0.025 ที่ความลึกเท่ากับ 10 เซนติเมตร หลังจากระยะขุดที่ 10 เซนติเมตรเป็นต้นไป อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า δ/H มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดินลดลง โดยสามารถอธิบายรูปแบบทั้งสองได้จากแรงด้านฝั่ง Passive นั้นยังไม่สามารถพัฒนาแรงต้านทานได้เนื่องจากระยะการขุดในช่วงแรกนั้นยังน้อย มวลดินเกิดการเคลื่อนตัวน้อย ยังไม่เพียงพอในการพัฒนาแรง Passive ที่ได้รับการเสริมกำลังได้ จึงส่งผลให้พฤติกรรมเคลื่อนตัวเหมือนกับ Single Wall

2. กลุ่ม B ได้แก่การเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบ Parallel และ Spacing at Active โดยในช่วงระยะแรก การต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าลดลง หมายถึงประสิทธิภาพก่อนขุดที่ช่วงความลึก 0 ถึง 16 เซนติเมตร ตั้งแต่ระยะขุดที่ 16 เซนติเมตรเป็นต้นไป อัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า δ/H มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีค่ามาก ยิ่งทำให้กราฟมีความชันสูงขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดินลดลง โดยสามารถอธิบายรูปแบบการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองได้ว่าเป็นการเพิ่มค่า Stiffness ของกำแพง และ

การเสริมกำลังของดินในด้าน Active สามารถต้านแรง Active ได้ถึงจุดๆหนึ่ง คือที่ความลึกก่อนถึงความลึก 16 เซนติเมตร เมื่อระยะการขุดลึกขึ้น จนเกิดแรง Active มีค่ามากกว่าแรงต้านจากการเสริมกำลังที่เกิด การเคลื่อนตัวของกำแพงจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

3. กลุ่ม C ได้แก่การเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบ Perpendicular at Active การต้านทานการเคลื่อนตัว (δ/H) มีค่าต่ำมาก ซึ่งหมายถึงระบบกันดินมีประสิทธิภาพสูง และ ความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อระดับความลึกในการขุดเพิ่มขึ้น แสดงว่า ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงน้อยกว่ารูปแบบอื่นมาก แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวได้ดีที่สุด สามารถอธิบายได้ว่า การเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์แบบนี้มีแรงต้านจากแรงเสียดทานเกิดขึ้นที่รอบแถวเสาเข็มดินซีเมนต์ และแถวเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ใน Active โซนนี้ยังไปรบกวนการพัฒนาการเสริมกำลัง Active ของมวลดิน ทำให้กำแพงมีการเคลื่อนตัวน้อยมาก

7. อภิปรายผลการวิจัย

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ถูกจำลองรูปแบบการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแถวตั้งฉากกับกำแพงเข็มน้ำทางด้านแรงดันดินเชิงรุก (Active Zone) มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากกำแพงกันดินมีความแข็ง (rigid) ที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมแนวเสาเข็มดินซีเมนต์ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงสูงขึ้น ทำให้กำแพงเกิดการดัด (Bending) ได้น้อย อีกทั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ติดตั้งในพื้นที่ Active Zone ยังไปรบกวนการพัฒนาแรงสภาวะ Active ทำให้เกิดการพัฒนากำลังเชิงรุกได้อย่างไม่เต็มที่ เพราะเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ในพื้นที่การพิบัติ อีกทั้งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับชั้นทรายโดยรอบยังสามารถช่วยต้านทานแรงจากสภาวะ Active ได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Casagrande, Arthur (1936). "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance". Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering. 3. Harvard University Cambridge.
- [2] Sakkarach Y., et al. (2014). A STUDY PHYSICAL MODELING OF RETAINING WALL SYSTEM IN SANDBED. Special project. Thailand: Civil engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
- [3] Jirayut Seubsuk. (1991). *Lateral Earth Pressure*, Search from <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [4] Suksun Horpibulsuk. (1990). *Foundation Engineering*. Search from <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [5] Wichit Namwiset (2013). BEHAVIOR OF SOIL CEMENT COLUMN WALL USED FOR DEEP EXCAVATION WITH TOP-DOWN SYSTEM IN BANGKOK SOFT CLAY. Master Thesis. Civil Engineering, Suranaree University of Technology. Nakhon ratchasima Thailand:
- [6] Laemthong Laokhongthavorn., et, at (1992). Soil Mechanics Laboratory Handbook, Civil Engineering, KMITL, Bangkok.
- [7] Thanadol Kongsomboon (1996). Foundation Engineering, Course Book, Civil Engineering, KMITL, Bangkok