



การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดแบบ T-Shape ในชั้นทรายด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

A PHYSICAL MODELING STUDY OF ARRANGEMENTS OF T-SHAPE SHEET PILES WALL IN SAND BED

ธนาตล คงสมบุญ¹, อุบะ สิริแก้ว², เปติญา นิธินันท์³, สีวกร สร้อยศักดิ์⁴, ศุภวัฒน์ คงพานิชย์กุล⁵

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ²อาจารย์, ^{3,4,5}นักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในเมืองใหญ่ ๆ ความจำเป็นในการใช้พื้นที่ใต้ดินมีมากขึ้น ทำให้มีความต้องการที่จะปรับปรุงระบบป้องกันดินพังในงานขุดดินลึกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น วิธีการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินมีหลายวิธี ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดในรูปแบบ T-shape ด้วยแบบจำลองทางกายภาพในชั้นทรายตัวอย่างที่มีค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ 29.9° โดยมีการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนแกน T (Web) ของกำแพงกันดิน โดยใช้ความยาวเท่ากับ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ด้านหลังกำแพงเข็มพืด ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เนื่องจากการเพิ่มแรงด้านการเคลื่อนตัวและการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของกำแพงกันดิน และพบว่าถ้าความยาวแกน T-shape ของเข็มพืด ยาวกว่าพื้นที่การพิบัติแบบ active จะทำให้กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape สามารถพัฒนาแรงด้านการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่า เข็มพืดแบบที่มีแกน T-shape สั้นที่ความยาวแกนอยู่ใน active zone

คำสำคัญ: ระบบป้องกันดินพัง, กำแพงกันดินชนิดเข็มพืด, เข็มพืด T-Shape, งานขุดดินลึก

ABSTRACT

In the Big City, the need of underground area has been increasing. That is the reason why people need to improve the retaining wall system to be more efficient. There are many usages of technics how to reduce wall movement. This research was the study of T-shape arrangement of sheet pile wall in the physical model using sand as the soil sample which has 29.9° of internal friction angle. We used the different length of web: 5, 10, 15 centimeters installed behind of the excavation side. The increases of soil resistance and area moment of inertia affected the movement behavior in each length of web. We found that the T-shape with the web longer than the failure area of active resisting zone, it could develop more the moving resistance and reduce movement more effectively than the sheet pile with the web placed in the active resisting zone.

KEYWORD: Soil Protection System, Sheet Pile, Deep Excavation Work, T-Shape Sheet Pile

1. บทนำ

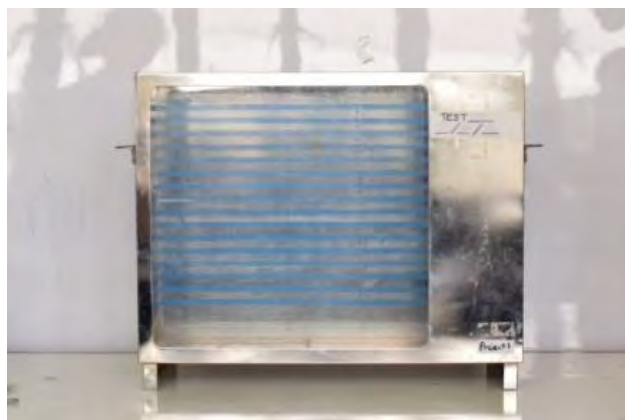
ในปัจจุบันอัตราของการก่อสร้างเพิ่มขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันพื้นที่ในการก่อสร้างน้อยลง ทำให้การก่อสร้างส่วนใหญ่ต้องเป็นการก่อสร้างแบบตึกสูงหรือสูงในชั้นใต้ดิน ปัญหาหนึ่งในงานก่อสร้างอาคารใต้ดินคือปัญหาการเคลื่อนตัวของระบบป้องกันดินพัง เนื่องจากความชื้นชื้นของคุณสมบัติของดิน จึงมีผู้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อคาดเดาพฤติกรรมของดินกับสภาพปัญหาที่แตกต่างออกไป ในทางปฏิบัติไม่สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวได้ผลที่แม่นยำ หรือ ยังไม่สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวที่แน่ชัด การใช้แบบจำลองจึงมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค ระบบการป้องกันดินพังโดยใช้เข็มพืด เป็นระบบที่ได้รับความนิยมและราคาถูก เมื่อเทียบกับระบบกำแพงแบบอื่น แต่กำแพงเข็มพืดสามารถขุดได้ไม่ลึกมากและการเคลื่อนตัวของเข็มพืด ทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ระบบค้ำยัน (strut) การใช้ระบบค้ำยัน 2 เท่า (Double strut) เป็นต้น วิธีที่กล่าวมาจำเป็นต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย ระยะเวลา และเสียพื้นที่ก่อสร้าง หากในกรณีที่มีพื้นที่โดยรอบขุดที่เพียงพอที่จะจัดเรียงตัวเข็มพืดแบบอื่น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเข็มพืด ในการจัดเรียงตัวรูปแบบปกติ และ แบบ T-shape ที่ระยะแตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัว และประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของเข็มพืด สามารถใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และเลือกใช้รูปแบบที่มีความเหมาะสมในอนาคตต่อไป

1.1. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการสร้างแบบจำลอง การจำลองการขุด ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบกำแพงกันดิน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการขุดที่ระดับชั้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเข็มพืดจำลอง ในชั้นทราย
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของเข็มพืดและการพิบัติของดินบริเวณรอบข้างเข็มพืดจำลอง
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวของเข็มพืดที่เรียงตัวรูปแบบ T-shape ที่ระยะความกว้างของค้ำยันแตกต่างกัน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) การศึกษาโดยใช้แบบจำลองขนาด 24x53x44 เซนติเมตร



รูปที่ 2 กล่องแบบจำลองขนาด 24x53x44 เซนติเมตร ในห้องปฏิบัติการ

- 2) ดินตัวอย่างเป็นทรายที่ผ่านการอบเพื่อกำจัดน้ำในเม็ดทรายและมีขนาดคละ ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และล้างบนตะแกรงเบอร์ 50
 - 2.1) ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) ASTM D442-63^[3] เพื่อหาขนาดคละของทราย
 - 2.2) ใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) ASTM 3080^[3] และการปล่อยทรายอิสระสมการ Slope stability ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope)^[14] เพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายใน
 - 2.3) ใช้วิธีหาค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity of soil) ASTM D854-00^[3] เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของทราย
 - 2.4) การปล่อยทรายลงในแบบจำลอง ใช้อุปกรณ์ปล่อยทรายเพื่อให้ทรายตกอย่างอิสระและสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด (Sand Raining)
- 3) ใช้แผ่นอะคริลิก หนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 30x23.2 เซนติเมตร เป็นแบบจำลองกำแพงเข็มพืด และมีส่วนด้านบน ขนาด 15x18.2 เซนติเมตร หา Elastic modulus จาก $\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}$ โดยการกดน้ำหนักและบันทึกการโก่งตัวสูงสุด
- 4) ใช้โปรแกรม Adobe illustrator CS6 เป็นเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพืดจากภาพถ่าย และใช้ โปรแกรม DxO Optics Pro 10 สำหรับการปรับแก้ Distortion จากความโค้งงอของเลนส์
- 5) ไม่ศึกษาผลของแรงดันน้ำ



รูปที่ 3 การทดสอบเพื่อหา Elastic Modulus ของกำแพงจำลอง

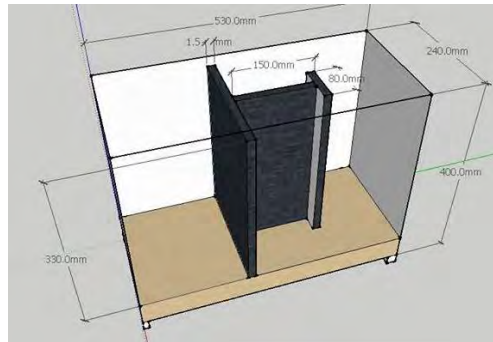
2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ 1 กำแพงเข็มพืดแบบแผงเดี่ยว Single wall เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกำแพงเข็มพืดกับระยะการขุดที่ระดับชั้นต่าง ๆ มุมที่เกิดขึ้นจากระนาบการพิบัติ

แบบจำลองที่ 2 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบริบตั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 5 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาโดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1 ใช้แผ่นอะคริลิกแบบเดียวกัน ที่ติดตั้งครีบริบตั้งฉากขนาด 29x5 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบริบขนาด 8 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 3 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบริบตั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 10 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาโดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1 ใช้แผ่นอะคริลิกแบบเดียวกัน ที่ติดตั้งครีบริบตั้งฉากขนาด 29x10 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบริบขนาด 8 เซนติเมตร

แบบจำลองที่ 4 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape wall เป็นการจำลองกำแพงเข็มพืดที่เสริมครีบทั้งฉากกับแนวเดิมที่มีความยาว 15 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษา โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองที่ 1 ใช้แผ่นอะคริลิกแบบเดียวกัน ที่ติดตั้งครีบทั้งฉากขนาด 29x15 เซนติเมตร ส่วนปีกติดกับครีบทั้งขนาด 8 เซนติเมตร



รูปที่ 4 แบบจำลองกำแพงเข็มพืด แบบ T-shape ที่ความยาว 150 มิลลิเมตร

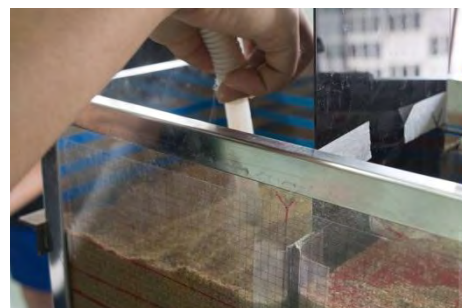
2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วิธีเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองในแบบจำลอง

- 1) กำหนดค่า parameter ของคุณสมบัติของทรายตัวอย่าง หาระยะของระนาบการพังทลายจากแรงดันดินแบบ active
- 2) เตรียมแบบจำลอง พร้อมอุปกรณ์ปล่อยทรายและจำลองการขุดดิน
- 3) เททรายลงในแบบจำลองให้ได้ระดับดินตามที่กำหนดไว้ และนำกำแพงเข็มพืดจำลองแบบที่กำหนด ติดตั้งปรับให้ได้ระดับในแนวตั้ง
- 4) ปล่อยทรายด้วยเทคนิค Sand Rain โดยกำหนดระยะความสูง 25 เซนติเมตรเหนือผิวทรายให้ตกอย่างอิสระลงในแบบจำลองเป็นชั้น โดยใช้ทรายสีแสดงถึงระดับทุก ๆ 2 เซนติเมตร จนได้ระดับทรายที่ 28 เซนติเมตร
- 5) ติดตั้งกล้องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกับแบบจำลอง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของแบบจำลองเข็มพืด



รูปที่ 5 ติดตั้งกล้องถ่ายรูปเพื่อบันทึกค่าการเคลื่อนตัว
วิธีทดลองแบบจำลองเข็มพืด



รูปที่ 6 การจำลองการขุดด้วยการดูดทรายในแบบจำลอง

- 1) จำลองการขุดดินด้วยด้วยการดูทรายในแบบจำลอง
- 2) บันทึกภาพผลการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพิคที่ระยะความสูงทุก ๆ 1 เซนติเมตร
- 3) ดูทรายจนพบว่าเกิดระนาบการพังที่ด้านหลังกำแพง
- 4) บันทึกค่ามุมการเฉือนพังที่จุดพิคและการเคลื่อนตัว
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการเรียงตัวที่กำหนด

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

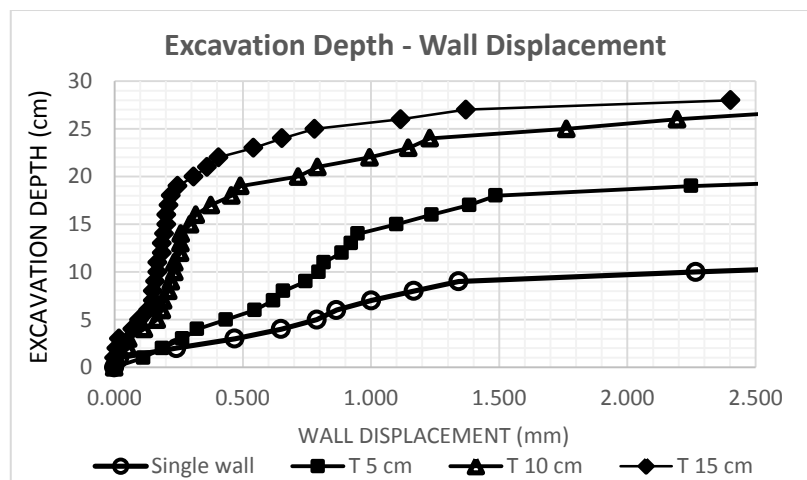
ดินมีคุณสมบัติเป็น SP (Poorly Graded Sand) จากผลการทดสอบ Direct shear พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 29.9° ผลจากการทดสอบด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope) พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 31.5° ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เท่ากับ 2.604

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของกำแพงตัวอย่าง

ผลการทดสอบด้วยการนำกำแพงกันดินจำลองไปทดสอบได้ค่า Elastic modulus เท่ากับ 58199.88 KSC

3.3 ผลการศึกษาแบบจำลอง

การศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของแบบจำลองระบบกำแพงกันดิน ใช้กราฟในการแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกของการขุดกับการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพิค

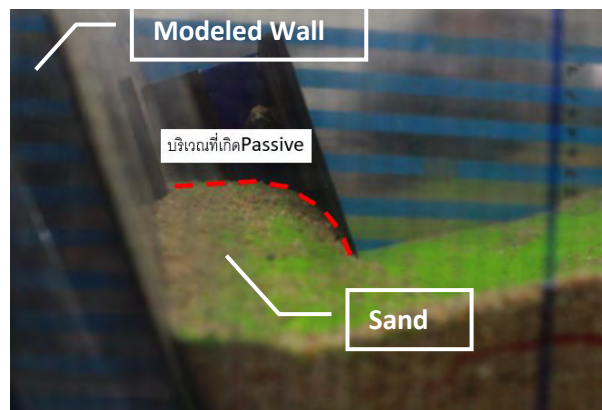


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการขุดดิน กับระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มพิคเฉลี่ย พบว่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความลึกในการขุด ในการช่วงแรกการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อผ่านจุดความลึกหนึ่ง การเคลื่อนตัวต่อการขุด 1 เซนติเมตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟลดความชันไป ในแบบจำลอง

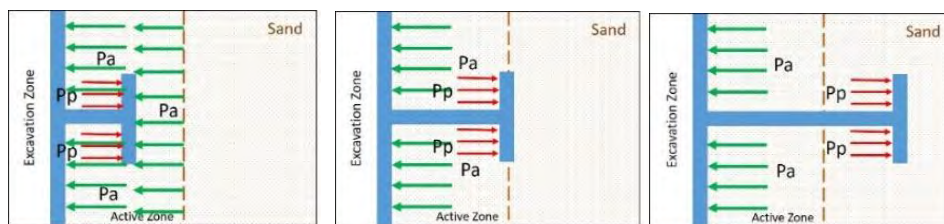
ที่ 2 กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape ที่ความยาวแกน 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความยาวสั้นกว่าระยะระนาบการพิบัติ มีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นน้อยกว่า แบบจำลองที่ 1 เทียบกับที่ระยะจุดเดียวกัน เมื่อเริ่มขุดที่ระยะ 22 ถึง 23 เซนติเมตร กำแพงล้มอย่างทันทีทันใด ในแบบจำลอง ที่ 3 และ 4 ที่ความยาวแกน T-shape 10 และ 15 เซนติเมตร สามารถขุดต่อได้จนถึงปลายของกำแพงเข็มพืดที่ความลึก 28 เซนติเมตร แบบจำลองนี้ไม่ปรากฏระนาบพิบัติให้เห็น ระบบกำแพงกันดินมีความมั่นคงสูงกว่าสองแบบแรกอย่างเห็นได้ชัด

การเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Area Moment of Inertia) ด้วยกำแพงแบบ T-Shape ทำให้กำแพงสามารถคงอยู่ได้อยู่ในระยะหนึ่ง ทำให้การเคลื่อนตัวน้อยกว่ารูปแบบ Single Wall แต่เมื่อแรงเนื่องจากสภาวะ Active เพิ่มมากขึ้นเพียงพอ กำแพงล้มลงอย่างทันทีทันใด เนื่องจาก ความแข็ง (rigid) ที่เพิ่มขึ้น เป็นเพียงความแข็งของกำแพงที่ทำให้กำแพงไม่เกิดการคด (Bending) แต่เป็นการพลิกคว่ำ (Overturning) และ ลื่น ไถล (sliding) เหมือนกับ Gravity Wall แทน

แรงเนื่องจากสภาวะ Passive ที่กำแพงที่ปีกของตัว T ในรูปแบบตัว T-shape ส่วนแกน 5 เซนติเมตร พบว่า ดินตัวอย่างบริเวณด้านในปีกของตัว T เกิดการพิบัติเป็นลักษณะของสภาวะ Passive แต่เนื่องจากแรงของ Passive ที่จะต้านแรงจากกำแพงไม่เพียงพอ ทำให้สามารถต้านทานการพิบัติได้เพียงระยะขุดช่วงแรก



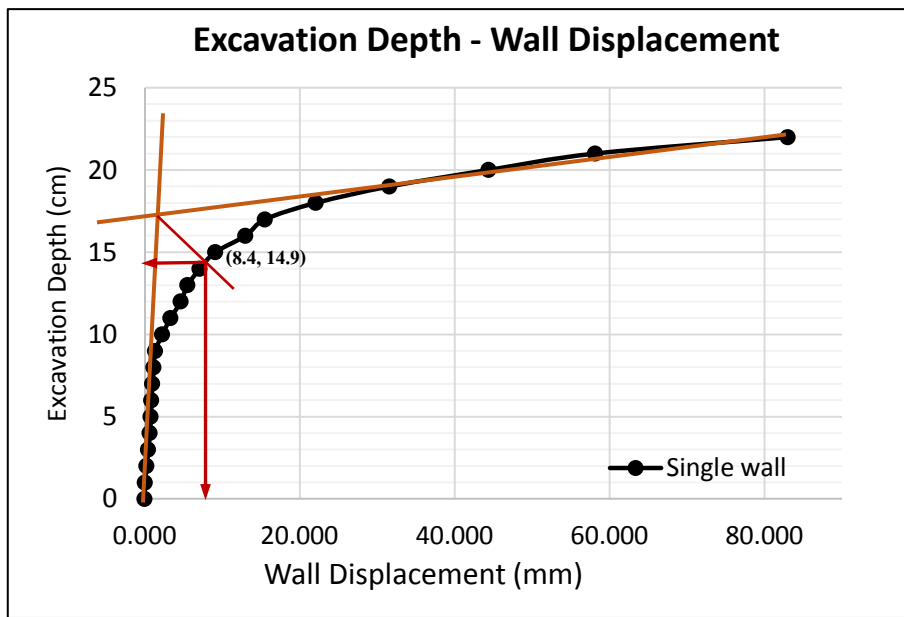
รูปที่ 8 บริเวณที่เกิดสภาวะ Passive ที่ส่วนปีกของตัว T ในแบบจำลองรูปแบบ ความยาวแกน 5 เซนติเมตร



รูปที่ 9 ลักษณะของแรงเนื่องจากสภาวะ Passive และ Active ในรูปแบบ T-shape 5, 10, 15 เซนติเมตรตามลำดับ

เมื่อเปลี่ยนความยาวแกนให้อยู่นอก Active Zone เป็น 15 เซนติเมตร แรง Passive ของกำแพงส่วนตัว T เกิดด้านนอก Active Zone จึงสามารถพัฒนาแรงต้านทานแรงจาก Active ได้อย่างเต็มที่

ผลการศึกษาแบบจำลองของการพัง ณ จุดพิบัติ จากกราฟด้วยวิธี graphical method^[4] แบบจำลอง T-shape 5 cm กับ T-shape 10 cm มีค่าระยะจุดที่จุดพิบัติใกล้เคียงกันเนื่องจากแบบจำลองทั้งสองมีความยาวไม่เกินพื้นที่ Active Zone ประสิทธิภาพของ T-Shape ถูกรบกวนจากระนาบพิบัติของสภาวะ Active ส่วนแบบจำลอง T-shape 15 cm มีการติดตั้งปีก T ขาวออกนอกระนาบการพิบัติ (Active Failure Zone) ส่งผลให้มีการถูกรบกวนจากระนาบพิบัติของสภาวะ Active น้อยกว่า สามารถขุดได้ลึกกว่าแบบจำลองรูปแบบอื่น ๆ



รูปที่ 10 ตัวอย่างการหาจุดพิบัติของแบบจำลองที่ 1 Single Wall

ตารางที่ 1 แสดงจุดพิบัติของแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ

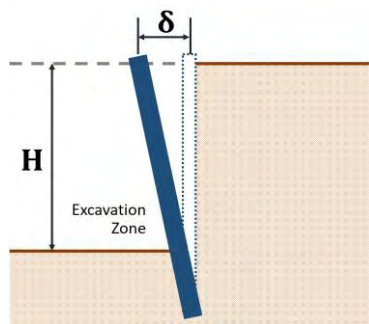
รูปแบบ	ระยะจุดถึงจุดพิบัติ (cm)	การเคลื่อนตัวถึงจุดพิบัติ (cm)
Single wall	14.9	8.4
T-shape 5 cm	21.1	5.4
T-shape 10 cm	21.3	0.84
T-shape 15 cm	23.5	0.62

ตารางที่ 2 แสดงค่ามุมเสียดทานภายในของแบบจำลอง

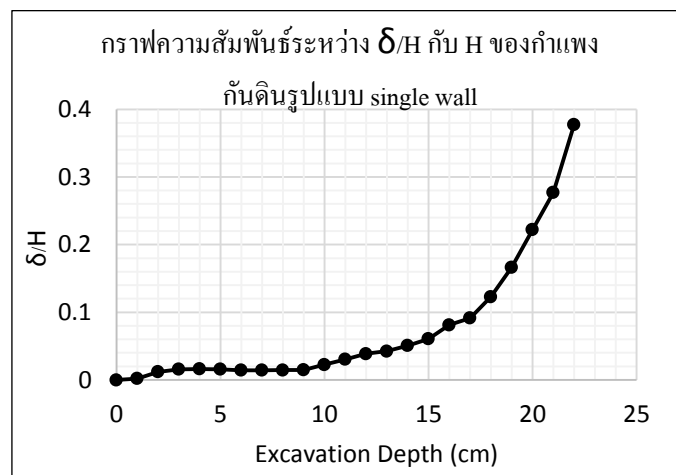
ที่	รูปแบบ	มุม $45 + \frac{\phi}{2}$ ที่เกิดขึ้น (องศา)		มุม ϕ (องศา)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	Single Wall	64.5	66	39	42
2	T-shape (5 ซม.)	62.5	60	35	30
3	T-shape (10 ซม.)	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			
4	T-shape (15 ซม.)	ไม่ปรากฏระนาบพิบัติ			

จากตารางสังเกตได้ว่า การพังของลาดดินในแบบจำลองกำแพงกันดิน แบบ T-shape 5 เซนติเมตร เป็นการพังแบบทันทีทันใด กำแพงตัว T ครอบคลุมระนาบการพิบัติ จึงส่งผลให้มุมน้อยลงและเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพิบัติ

การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินด้วยอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$



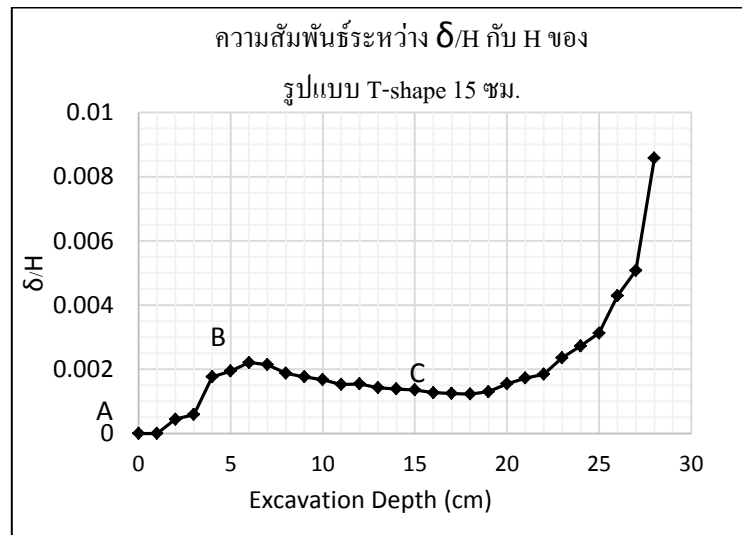
รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวของกำแพง (δ)



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H และระยะการขุด (H)

อัตราส่วนระหว่าง $\frac{\delta}{H}$ (การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงหารระดับการขุด) สามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกันดินในงานขุดดิน และอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการพัฒนาแรงดันดินเชิงรับ เมื่อเพิ่มส่วนของ T-Shape

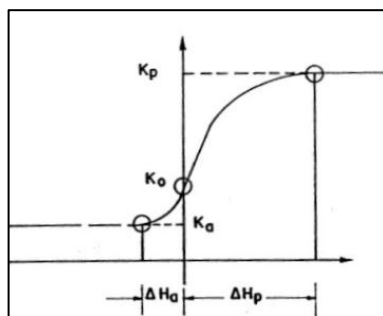
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ Single wall ในช่วงแรกของการขุด อัตราของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ เมื่อเทียบกับความลึกของการขุด และตั้งแต่ 10 เซนติเมตร เป็นต้นไป พบว่า อัตราการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับความลึกของการขุด



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\frac{\delta}{H}$ กับ H ของระบบกำแพงกันดินรูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน(web) เท่ากับ 15 เซนติเมตร สามารถอธิบายแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินต่อความลึกได้โดยการแบ่งช่วงของการขุดได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วง A ถึง B ในช่วงนี้เป็นช่วงพัฒนาแรง passive โดยการพัฒนาแรง passive นั้นจำเป็นต้องเกิดระยะการเคลื่อนตัวระยะหนึ่งก่อนที่จะเกิดแรง passive ซึ่งกระทำต่อระบบกำแพงกันดิน ตามทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างในรูปที่ 14 โดยที่จุด B เป็นจุดที่แรงด้านได้ถูกพัฒนาจนสามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของกำแพงเนื่องจากแรง active ได้



รูปที่ 14 การเคลื่อนตัวและแรงดันดินด้านข้าง [5]

2. ช่วง B ถึง C ในช่วงนี้เป็นช่วงการทำงานของแรง passive ในส่วน T-Shape ของกำแพงโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัว มีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกในการขุด ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าลดลง(ประสิทธิภาพดี) เนื่องจากเกิดแรง passive ด้านการเคลื่อนที่ โดยที่จุด C เป็นจุดที่เกิดแรงด้านถึงประสิทธิภาพสูงสุด

3. ช่วง C เป็นต้นไป ในช่วงนี้เป็นช่วงที่แรงกระทำมีค่ามากกว่าแรงต้านของกำแพงที่พัฒนาเต็มที่แล้ว ส่งผลให้ค่า $\frac{\delta}{H}$ มีค่าเพิ่มขึ้น (ประสิทธิภาพลดลง) อีกครั้ง ประสิทธิภาพของระบบลดลง รูปแบบ T-shape ที่มีความยาวส่วนแกน (web) เท่ากับ 10 เซนติเมตร สามารถอธิบายแนวโน้มเช่นเดียวกับ รูปแบบ 15 เซนติเมตร ส่วนรูปแบบ T-Shape ที่มีความยาวส่วนแกน (web) เท่ากับ 5 เซนติเมตร มีแนวโน้มการพัฒนาแรงต้านส่วน T-Shape ที่ไม่ชัดเจน

4. อภิปรายผลการวิจัย

แบบจำลองในห้องปฏิบัติการสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีได้อย่างมีประสิทธิภาพพอสมควร

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถ้าความยาวแกน T-shape ของเข็มพืด ยาวกว่าพื้นที่การพิบัติแบบ Active Failure Zone จะทำให้กำแพงเข็มพืดแบบ T-shape สามารถพัฒนาแรงต้านการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพลดการเคลื่อนตัวได้ดีกว่า เข็มพืดแบบที่มีแกน T-shape สั้นที่ความยาวแกนอยู่ใน Active zone อย่างไรก็ตาม แบบจำลองรูปแบบ T-shape ต้องมีการเคลื่อนตัวเริ่มต้นถึงระยะหนึ่งก่อนเพื่อพัฒนาแรงเนื่องจากสภาวะ Passive เต็มที่ในส่วน T-shape ของกำแพงก่อนพัฒนาแรงต้านทานที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jirayut Seubsuk. (1991). *Lateral Earth Pressure*, Search from <http://jirayutsu.blogspot.com/2011/10/04-011-304-foundation-engineering.html>
- [2] Suksun Horpibulsuk. (1990). *Foundation Engineering*. Search from <http://eng.sut.ac.th/ce/oldce/Suksun/Chapter5.pdf>
- [3] Laemthong Laokhongthavorn.,et,at (1992). *Soil Mechanics Laboratory Handbook*, Civil Engineering, KMITL, Bangkok.
- [4] 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. Harvard University Cambridge.
- [5] Warakorn Mairaing (19xx). *Engineering, Course Book*, Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok.
- [6] Thanadol Kongsomboon (1996). *Foundation Engineering, Course Book*, Civil Engineering, KMITL, Bangkok
- [7] Sakkarach Y.,Siwanon C., Supachai J., (2014). *A STUDY PHYSICAL MODELING OF RETAINING WALL SYSTEM IN SANDBED*. Special project. Thailand: Civil Engineering, KMITL
- [8] Punlop Visudmedanukul(1995). *Foundation Engineering Handbook* Bangkok: Se-Education Public Company Limited.
- [9] Bowles, J.E.,(1988). *Foundation Analysis and Design*. 4th Edition. McGraw-Hill Book Company. Singapore.
- [10] Braja, M.Das., (1990). *Principles of Foundation Engineering*. PWS-KENT Publishing Company. USA.
- [11] HIROSE & CO., Ltd. *SCB method (Sheet pile Counterfort-type bracing method)*. Japan Retrieved from <http://www.hirose-net.com/english/tec/heavy00/heavy05.html>