



การระบุกลไกการวิบัติแบบอาร์คในดินเหนียวอ่อนที่อยู่หลังกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอล ตอกเรียงต่อเนื่องด้วยแบบจำลองกายภาพ

วรายุทธ ไชยสุข*

นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พรพจน์ ต้นเส็ง และ วิษณุ คงสมพจน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-0747-0198 อีเมล: joke_warayoot@hotmail.com

รับเมื่อ 23 เมษายน 2558 ตอบรับเมื่อ 6 กรกฎาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 21 ธันวาคม 2558

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการทดสอบแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนเพื่อระบุกลไกการวิบัติของดินระหว่างกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลที่ตอกเรียงต่อเนื่อง ระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ใช้ทดสอบอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างช่องเปิดต่อความกว้างของเสาเข็ม (S_g/B) ได้แก่ 0.1 ถึง 3.0 ในการทดสอบได้ใช้ดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพจากการขุดเปิดหน้าดินแปลงทดสอบที่อยู่จังหวัดสมุทรปราการ การทดสอบกระทำบริเวณใกล้กับจุดเก็บตัวอย่างเพื่อลดการรบกวนตัวอย่างแบบจำลองเสาเข็มตัวแอลแบบย่อส่วนได้รับแรงกระทำโดยใช้แม่แรงชนิดให้แรงกระทำแบบสม่ำเสมอจนแบบจำลองวิบัติ ในระหว่างทดสอบมีการบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของดินระหว่างการให้แรงกระทำ จากภาพถ่ายสามารถระบุการเคลื่อนตัวของดินได้จากลูกปัดที่ติดตั้งไว้บนผิวหน้าดินก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแรงวิบัติต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (P_h/S_u) แปรผกผันกับอัตราส่วนช่องเปิดต่อความกว้าง (S_g/B) โดยมีความสัมพันธ์แบบไฮเปอร์โบล่า แรงวิบัติที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพของเสาเข็มแอลมีค่าต่ำกว่าแรงวิบัติของเสาเข็มกลมที่เสนอโดยวินด์ [9] เนื่องจากรูปร่างของอาร์คแตกต่างกัน ภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบขณะเกิดการวิบัติจะเห็นอาร์คอย่างชัดเจนเมื่อ S_g/B มีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 1.2 และไม่เห็นอาร์คอย่างชัดเจนเมื่อ S_g/B มีค่าระหว่าง 1.6 ถึง 3.0

คำสำคัญ: กำแพงกันดิน เสาเข็มตัวแอล แบบจำลองทางกายภาพ ดินเหนียวอ่อน งานขุดดิน

การอ้างอิงบทความ: วรายุทธ ไชยสุข, พรพจน์ ต้นเส็ง และ วิษณุ คงสมพจน์, “การระบุกลไกการวิบัติแบบอาร์คในดินเหนียวอ่อนที่อยู่หลังกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอล ตอกเรียงต่อเนื่องด้วยแบบจำลองกายภาพ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, หน้า 19–27, ม.ค.–เม.ย. 2559. DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.07.006



Determination of Arch Failure Mechanism in Very Soft Clay Behind L-pile Wall with Physical Models Test

Warayoot Chaiyasook*

Student, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Pornpot Tunseng and Wissanu Kongsompoj

Assistant Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-0747-0198, E-mail: joke_warayoot@hotmail.com

Received 23 April 2015; Accepted 6 July 2015; Published online: 21 December 2015

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

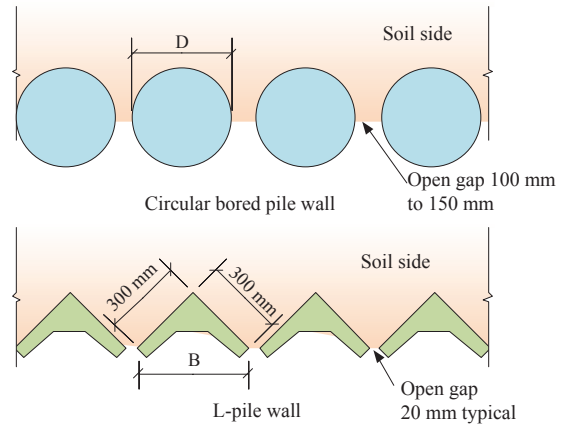
This paper presents physical model tests to verify the failure mechanism of soil behind the gap of contiguous L-pile retaining wall used to support the excavation in soft clay. The ratio of pile gap to pile width (S_g/B) of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, and 3.0 was used. The undisturbed soft clay samples were obtained from an open cut in Samutprakarn province. The physical model tests were conducted in the vicinity of the soil sampling area to avoid the effect of sample disturbance. The pressures were applied to the physical model using screw jack until the failure of soil between the L-piles was observed. The digital photos of soil movement were recorded during the test to monitor the failure mechanism. The test results show that the normalized failure pressures reduce as the gap width ratio (S_g/B) increases. The failure pressure of L-pile is lower than that of circular pile proposed by Winit [9] due to soil arching size. The failure arches are clearly observed in the model with S_g/B of 0.1–1.2, but not with S_g/B of 1.6–3.0.

Keywords: Retaining Wall, L-section Pile, Physical Model, Soft Clay, Excavation

1. บทนำ

ในการก่อสร้างใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งพื้นที่ถูกจำกัดด้วยสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงเช่นในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำเป็นจะต้องใช้ระบบกำแพงกันดินที่ต้องสามารถต้านทานแรงดันดินด้านข้างได้โดยไม่เกิดการวิบัติและการเคลื่อนตัวของกำแพงต้องไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง ระบบกำแพงกันดินที่วิศวกรโยธาคุ้นเคยนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ กำแพงกันดินเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Wall) ซึ่งมีความสามารถในการรับโมเมนต์ตัดได้คงที่ตลอดทั้งแผ่น ส่วนกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ซึ่งเรียกกันว่า ไดอะแฟรมวอลล์ (Diaphragm Wall) ใช้สำหรับงานขุดลึกและในกรณีที่จำกัดการเคลื่อนตัว กำแพงอีกรูปแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมเพิ่มขึ้นได้แก่ กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall) กำแพงชนิดนี้เป็น การนำเอาเสาเข็มมาตอกหรือเจาะเรียงกันโดยไม่มี ส่วนใดของเสาเข็มเหลื่อมกัน การก่อสร้างเสาเข็มชนิดนี้ จำเป็นต้องเว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็มให้เพียงพอที่จะสามารถตอกหรือเจาะเสาเข็มต้นถัดไปได้ ในปัจจุบันเสาเข็มตอกหน้าตัดรูปตัวแอลได้ถูกนำมาใช้เป็นกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง (Contiguous L-pile Wall: CLPW) สำหรับการขุดเพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินที่ไม่ลึกมาก จากเดิมที่ต้องใช้กำแพงเข็มพืดเหล็กชั่วคราว แต่ด้วยเหตุที่การถอนเข็มพืดมักก่อให้เกิดการทรุดตัวของดินตามมาเนื่องจากการไหลของดินเข้าแทนที่ปริมาตรของเข็มพืดที่ถูกถอนออก การทรุดนี้ควบคุมได้ค่อนข้างยากถึงแม้ว่าจะใช้วิธีอัดน้ำปูนผสมเบนโทไนท์เพื่อเข้าไปในช่องว่างระหว่างถอนเข็มพืดแล้วก็ตาม ดังนั้นเสาเข็มตัวแอลซึ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจึงได้ถูกนำมาใช้ เนื่องจากสามารถทิ้งไว้ในดินหลังจากก่อสร้างเสร็จ อีกทั้งเสาเข็มรูปตัวแอลสามารถมีความยืดหยุ่นในการจัดเรียงให้มีรูปแบบตามความต้องการได้เป็นอย่างดี รูปที่ 1 เป็นรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มรูปตัวแอลที่นิยมใช้สำหรับเป็นกำแพงกันดินที่ความลึกของการขุดไม่เกิน 5 เมตร

ในส่วนของกำแพงกันดินลักษณะอื่นได้แก่ กำแพง



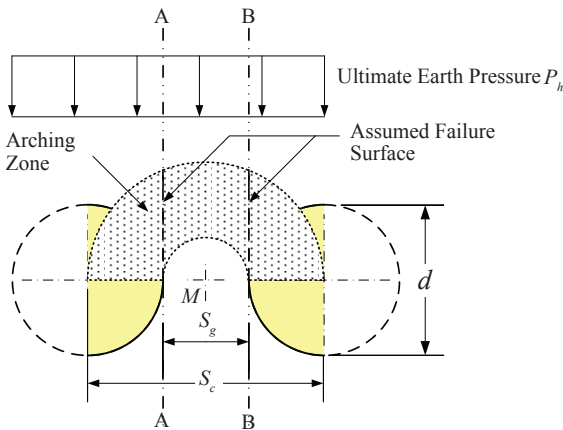
รูปที่ 1 รูปแบบของระบบกำแพงกันดินระหว่าง CPW และ LP

เสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall: CP Wall) ซึ่งเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในที่โดยใช้ดินเป็นแบบ โดยได้มีการเว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็มไว้เพื่อให้สามารถตอกหรือเจาะเสาเข็มต้นที่อยู่ติดกันได้ เมื่อเปรียบเทียบด้านสติเฟนแล้วกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสติเฟนที่สูงกว่ากำแพงเข็มพืดเหล็กมาก แต่ในทางกลับกันกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่จะมีราคาที่สูงกว่ากำแพงเข็มพืดเหล็ก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เช่นเดียวกับการออกแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องหน้าตัดอื่น ๆ ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเป็นสิ่งที่ต้องกำหนดเป็นอันดับแรก สำหรับเสาเข็มเจาะกลมนั้นได้มีการแนะนำระยะระหว่างเสาเข็มเป็น 100 มิลลิเมตร [1], [2] โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้ไม่ขึ้นกับขนาดของเสาเข็ม ในบางกรณีดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงจึงทำให้สามารถเว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นได้

ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็ม S_g กับกำลังต้านทานต่อการไหล P_h ซึ่งเป็นหน่วยแรงวิบัติในกรณีของดินเหนียวในสภาวะไม่ระบายน้ำและหน่วยแรงรวมได้ศึกษาไว้โดย ประจิด [3] ซึ่งได้สมมุติกลไกการวิบัติของดินที่ถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของกำแพง CBP ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กลไกการวิบัติของดินระหว่างช่องว่างของเสาเข็ม CP Wall ที่มีแรงดันดินกระทำจนถึงจุดวิบัติ [3]

กลไกการวิบัติดังรูปที่ 2 นี้ได้ถูกสมมุติขึ้นเพื่อหาคำนวณหน่วยแรงวิบัติ โดยกลไกการวิบัติสมมุติให้การวิบัติเกิดขึ้นแบบเฉือนผ่านบริเวณอาร์คที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็ม แนวอาร์คมีความกว้างเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แนวการเฉือนผ่านอาร์คเป็นแนวขนานกับทิศทางแรงดันดิน จากกลไกการวิบัตินี้ประจิด [3] ได้คำนวณหน่วยแรงวิบัติในรูป S_u/P_h ที่สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างผิวของเสาเข็ม S_g และเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม d ได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{S_u}{P_h} = \frac{S_g}{\sqrt{\frac{d}{2}(d+S_g)}} \quad (1)$$

โดยที่

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

S_g = ระยะห่างระหว่างผิวของเสาเข็ม

S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ

P_h = แรงดันดินด้านข้างประลัย (Ultimate Earth Pressure)

Ito [4] ได้ศึกษาถึงแรงวิบัติของ CPW ในดินทรายนั้น โดยสมมุติให้อาร์คเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มและสามารถต้านทานแรงดันดินที่อยู่หลังกำแพงได้ งานวิจัยทั้งสองนี้

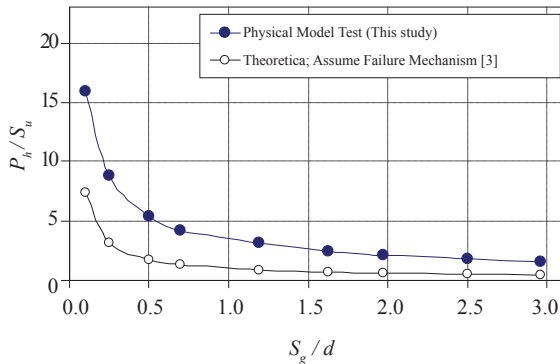
ใช้วิธีสมมุติกลไกการวิบัติขึ้นมาโดยไม่มีการทดสอบทางกายภาพยืนยัน

ในการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพกับปัญหาที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาของงานวิจัยนี้ได้แก่ การศึกษากลไกการวิบัติของดินที่อยู่เหนืออุโมงค์ ซึ่งนำเสนอโดย Atkinson [5] โดยในการทดสอบได้บันทึกภาพถ่ายเพื่อศึกษากลไกการวิบัติและบันทึกแรงวิบัติที่เกิดขึ้นโดยในการทดสอบสามารถระบุกลไกการวิบัติเริ่มต้นและกลไกการวิบัติสุดท้ายโดยอาศัยภาพถ่ายระหว่างการทดสอบด้วย

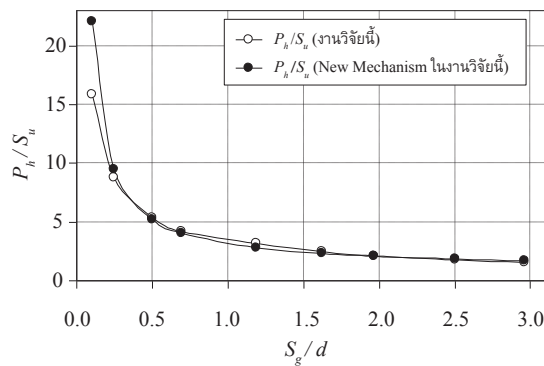
Chevalier *et al.* [6] กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Behavior) เป็นกลไกที่สำคัญและพบบ่อยในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะวิศวกรรมด้านธรณีเทคนิค เช่น งานปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การหลุดตัวของดินคันทาง เป็นต้น

Terzaghi [7] ได้อธิบายถึงพฤติกรรมแนวโค้งรับแรงว่าเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปที่เกิดขึ้นในดิน การก่อสร้างใต้ดินจะใช้แนวโค้งรับแรงนี้ให้เป็นประโยชน์ โดยลดแรงดันดินส่วนเกินจากการกระจายแรงไปสู่โครงสร้าง และยังต้านแรงดันดินด้านข้างได้อีกด้วย เช่นเดียวกับ Einstein [8] และการกระจายแรงในดินจะทำให้ดินเสียรูปในขณะที่ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ

วินิตย์ [9] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิบัติกับระยะห่างเสาเข็มกลม และศึกษาถึงกลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มของดินเหนียวอ่อนในการวิจัยได้สร้างเครื่องทดสอบแบบจำลอง โดยพิจารณาให้แบบจำลองเป็นแบบความเครียดระนาบ (Plane Strain) การทดสอบใช้ดินตัวอย่างแบบก้อน (Block Sample) จากการขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน ทดสอบแบบจำลองย่อส่วนโดยให้แรงกระทำแบบควบคุมการเคลื่อนตัว การทดสอบกระทำจนดินที่อยู่ระหว่างชอกเสาเข็มวิบัติ ระหว่างการทดสอบได้บันทึกภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินโดยอาศัยลูกบิดที่วางไว้บนผิวของตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงดันดินวิบัติในเทอม P_h/S_u แปรผกผันกับระยะห่าง



รูปที่ 3 เปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติที่กำหนดโดยใช้สมการ [1] กับแรงดันดินวิบัติจากการทดสอบทางกายภาพ



รูปที่ 4 กลไกการวิบัติของดินที่ได้จากการบันทึกภาพระหว่างการทดสอบเพื่อใช้สร้างสมการแบบปิด

ระหว่างชอกเสาเข็ม S_g/d เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้สมการที่ 1 แล้วพบว่าค่าแรงวิบัติที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพนั้นสูงกว่าที่ได้จากการสมมุติกลไกการวิบัติขึ้นมา ดังรูปที่ 3

วินิตย์ [9] ยังได้พัฒนาสมการแบบปิด (Close form Solution) ขึ้นมาโดยใช้กลไกการวิบัติของดินระหว่างชอกเสาเข็มที่เกิดขึ้นจริงเมื่อดินวิบัติดังรูปที่ 4

จากกลไกการวิบัติสามารถสร้างสมการรูปปิดได้ดังสมการที่ ซึ่งสามารถใช้ทำนายหน่วยแรงวิบัติของดินระหว่างชอกเสาเข็มได้เป็นอย่างดี

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\left((S_g + d) + \frac{\alpha d \pi}{2\sqrt{2}} \right)}{S_g} \quad (2)$$

โดยที่

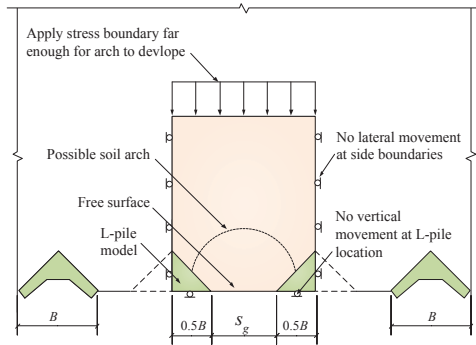
สำหรับในกรณีของ CLPW นั้นยังไม่เคยมีการพัฒนา กลไกการวิบัติเชิงทฤษฎีขึ้นและยังไม่มี การทดสอบกับแบบจำลองเชิงกายภาพแต่อย่างใด งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเป้า ไปยังการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงวิบัติกับระยะห่างและการหา กลไกการวิบัติเพื่อนำมา ใช้พัฒนาเป็นสมการรูปปิดของเสาเข็มรูปตัวแอลต่อไป

3. วิธีการวิจัย

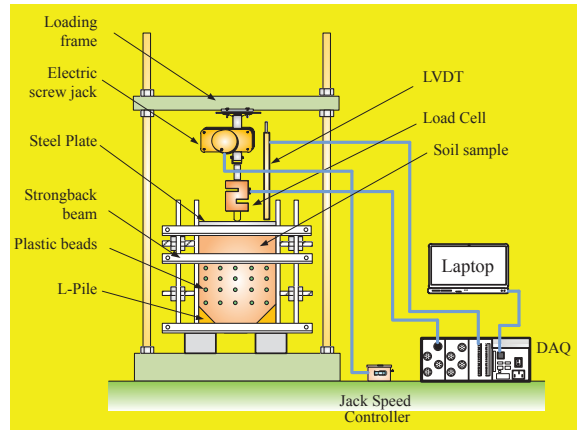
การวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพของเสาเข็มรูปตัวแอลที่มีสัดส่วน 1 : 4.24 ดังแสดงใน ตารางที่ 1 และขอบเขตการจำลองเป็นไปตามรูปที่ 5 การจัดรูปแบบทดสอบให้เป็นแบบความเครียดในระนาบ โดยที่ขอบทั้งสองข้างที่อยู่ตรงแกนสมมาตรของเสาเข็ม ถูกดันไว้ด้วยแผ่นเหล็กและรองรับด้วยคานแข็งเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ดินส่วนที่อยู่ระหว่างช่องว่างสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ บริเวณที่เป็นเสาเข็มแอลรองรับด้วยแท่นวัสดุแข็ง ขอบเขตด้านที่มีแรงกระทำอยู่ห่างจากช่องเปิดมากพอที่จะทำให้อาร์คพัฒนาได้อย่างเต็มที่

ตารางที่ 1 สัดส่วนการจำลองที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเสาเข็มแอลขนาดจริง 300 × 300 มิลลิเมตร

S_g/B	ระยะห่างระหว่างผิวเสาเข็มตัวแอลจริง (มม.)	สัดส่วนการจำลอง
0.1	110	1:4.24
0.3	130	1:4.24
0.5	150	1:4.24
0.7	170	1:4.24
1.2	175	1:5.3
1.6	210	1:5.3
2.0	237.5	1:5.3
2.5	210	1:7.1
3.0	237.5	1:7.1



รูปที่ 5 ขอบเขตของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลเรียงต่อเนื่อง



รูปที่ 7 การจัดเครื่องมือทดสอบ



รูปที่ 6 การติดตั้งแบบจำลองเข้ากับเครื่องทดสอบในสนาม

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่ใช้ทดสอบ

ปริมาณน้ำในดิน	129
ขีดจำกัดเหลว	120
ขีดจำกัดพลาสติก	65
กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	14.7 kPa
Sensitivity	10

ในการทดสอบจะพลิกตัวอย่างให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อให้สามารถทดสอบในแฟรมทดสอบได้อีกทั้งยังสะดวกต่อการติดตั้งเครื่องมือวัดและบันทึกภาพขณะทดสอบ ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทดสอบจริง และรูปที่ 7 ซึ่งเป็นรูปวาดการทดสอบ ในงานวิจัยได้ทำให้ระยะช่องว่างในเทอมของความกว้างด้านทแยง B ของเข็มรูปตัวแอลเป็น S_g/B และระยะ S_g/B ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0

ในการทดสอบแบบจำลองใช้ดินเหนียวอ่อนมากที่ตำบลบางบ่อ อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ โดยเก็บตัวอย่างจากบ่อดินลึก 3 เมตร ตารางที่ 2 เป็นคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่ใช้ทดสอบในแบบจำลอง

การเก็บตัวอย่างโดยใช้กล่องเหล็กขนาด $300 \times 250 \times 100$ มิลลิเมตร กดลงในดินแล้วใช้ลวดขึงตั้งด้านใต้ของตัวอย่างก่อนเลื่อนดินขึ้นแผ่นรองแล้วยกดินขึ้นจากนั้นตัดแต่งดินให้เป็นไปตามขนาด แล้วติดตั้งเสาเข็มรูปตัวแอลที่หล่อคอนกรีตเป็นรูปสามเหลี่ยม ก่อนปิดแผ่นอะคริลิกหนาแล้วรัดด้วยคานเหล็กเพื่อไม่ให้เกิดความเครียดตั้งฉากกับแบบจำลองได้ติดเม็ดลูกบิดบนผิวหน้าตัวอย่างเพื่อใช้สังเกตการเคลื่อนตัวของดินในแบบจำลองขณะทดสอบ จากนั้นพลิกตัวอย่างตั้งขึ้นแล้วติดตั้งในแฟรมทดสอบ ในการทดสอบใช้แม่แรงแบบเกลียวที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมอัตราทดด้วยวงจรควบคุมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ แม่แรงนี้กดแผ่นเหล็กซึ่งทำหน้าที่กระจายการเคลื่อนตัวของตัวอย่างให้สม่ำเสมอ อัตราทดทดสอบที่ใช้ควบคุมไว้ที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้อัตราความเครียดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ตามการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวกับดินเหนียว ซึ่งดินในแบบจำลอง

กายภาพมีการเคลื่อนตัวช้าพอที่จะจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริง วัดแรงกดทดสอบด้วยเซลล์วัดแรง (Load Cell) และวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้วย LVDT ที่ต่อเข้ากับ DAQ และคอมพิวเตอร์บันทึกภาพการทดสอบด้วยกล้องดิจิทัลที่ตั้งไว้บนขาตั้งกล้องที่ใช้ระยะห่างเหมาะสมที่จะไม่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของภาพถ่าย

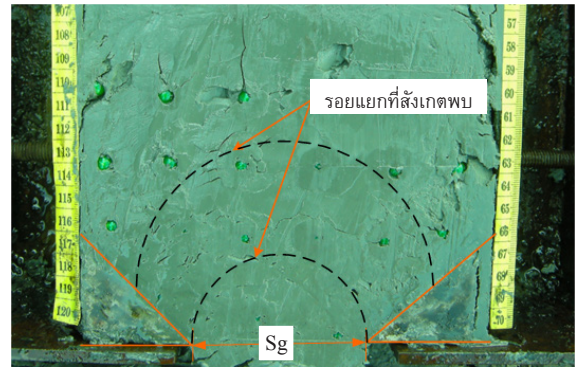
ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่การเก็บตัวอย่างขึ้นจากบ่อจนกระทั่งทดสอบเสร็จใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที ดังนั้นดินเหนียวจึงอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนนั้นเก็บที่บริเวณห่างจากบริเวณเก็บตัวอย่างทดสอบแบบจำลองไม่เกิน 1 เมตร ดังนั้นดินตัวอย่างในแบบจำลองและดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนจึงอยู่ในสภาวะเดียวกัน

ทุกผิวสัมผัสระหว่างดินกับผนังเครื่องมือทดสอบได้ทาสารหล่อลื่นที่ไม่ทำปฏิกิริยากับดินเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานผิว แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นหลังจากทาสารหล่อลื่นแล้วน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงกดทดสอบ

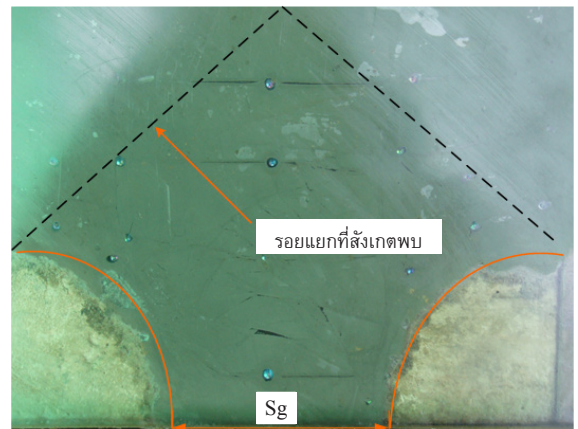
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

รูปที่ 8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างในแบบจำลอง ซึ่งสามารถจัดแบ่งความสัมพันธ์ได้เป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มที่หนึ่งมีชอกเข็มแคบ S_g/B เป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.2 ซึ่งกลุ่มนี้หน่วยแรงต้านทานของดินระหว่างชอกเสาเข็มพัฒนาจนถึงจุดประลัยแล้วเกิดการอ่อนตัว (Softening) เนื่องจากในช่วงแรงดันทำให้ดินระหว่างชอกเสาเข็มเคลื่อนตัวและเกิดอาร์คขึ้นอย่างสมบูรณ์ระหว่างเสาเข็มสองต้นที่อยู่ไม่ห่างกันนัก ดังรูปที่ 9

ซึ่งภาพถ่ายของรอยเฉือนที่เกิดขึ้นในดินในกรณี S_g/B เป็น 0.7 อาร์คที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มนี้สามารถพัฒนาแรงต้านต่อการไหลออกของดินในชอกเสาเข็มได้เมื่อเพิ่มแรงกดทดสอบจนอาร์คเกิดการพังทลายกำลังของดินลดลงจนทำให้เกิดการอ่อนตัวขึ้น กลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่ชอกเข็มกว้าง S_g/B เป็น 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 สำหรับกลุ่มนี้กำลังต้านทานได้พัฒนาขึ้นจนถึงจุดประลัยแล้ว

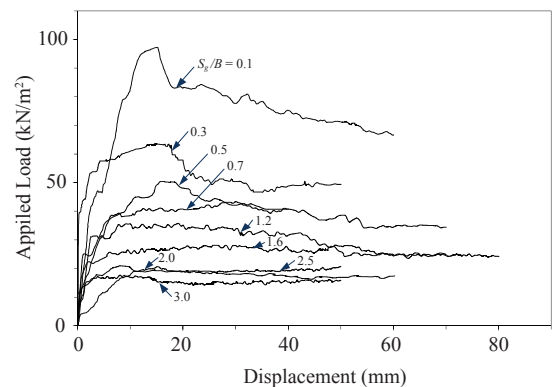


L-Pile (This study)

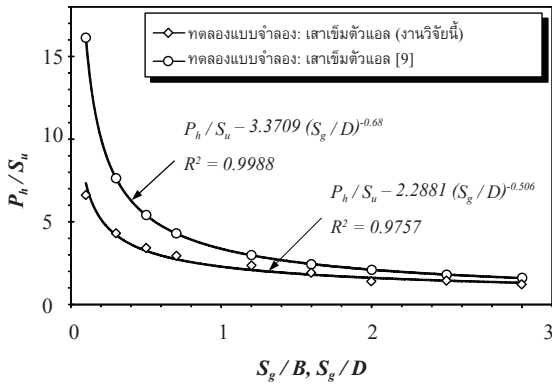


Circular pile (Haema, 2010)

รูปที่ 8 เปรียบเทียบภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (Final Crack) ของเสาเข็มรูปตัวแอลและเสาเข็มรูปวงกลม ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g/B, D = 0.7$



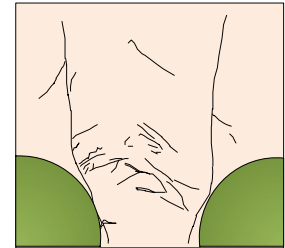
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินที่กระทำต่อแบบจำลองกับการเคลื่อนตัวของดิน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบ P_h/S_u กับ S_g/B จากผลการทดสอบเสาเข็มตัวแอล และเสาเข็มกลม [9]



L-pile (This Study)



Circular Pile (Haema, 2011)

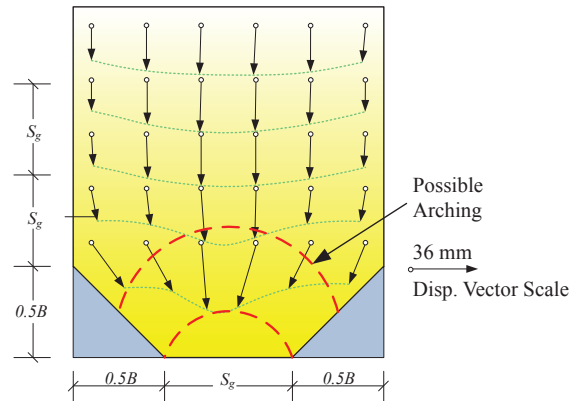
รูปที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของเสาเข็มรูปตัวแอลกับเสาเข็มรูปวงกลม

ไม่เกิดการอ่อนตัว สาเหตุเกิดจากการที่อาร์คมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับกว้างจึงมีกำลังต้านทานที่ต่ำและพังได้ง่ายกำลังต้านทานแรงดันดินที่เกิดขึ้นจากอาร์คจึงไม่แสดงอย่างเด่นชัดเหมือนกับกลุ่มแรก

เมื่อนำแรงดันดินวิกฤติ P_h/S_u และระยะขอกเสาเข็ม S_g/B มาทำให้อยู่ในรูปไร้มิติแล้วสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งเห็นได้ว่าแรงดันดินวิกฤติ P_h/S_u แปรผกผันกับระยะขอกเสาเข็ม S_g/B โดยมีสมการเป็น ดังสมการที่ 3 โดยมีค่า $R^2 = 0.9757$

$$\frac{P_h}{S_u} = 2.2881(S_g/B)^{-0.506} \quad (3)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับแรงวิกฤติของเสาเข็มกลมที่เสนอโดยวินิตย์[9] แล้วพบว่าแรงวิกฤติของเสาเข็มตัวแอลต่ำกว่าแรงวิกฤติของเสาเข็มกลม เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอาร์คที่เกิดขึ้นในกรณีของเสาเข็มกลมมีขนาดที่ใหญ่กว่าอาร์คที่เกิดขึ้นในกรณีของเสาเข็มตัวแอล อีกทั้งส่วนโค้งของเสาเข็มกลมที่รองรับอาร์คทำให้เกิดแรงต้านทานต่อการไหลของจุดรองรับอาร์คที่สูงกว่าเสาเข็มกลมรูปที่ 11 เป็นแนวรอยเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเมื่อวิบัติ เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มกลมของวินิตย์ [9] กับการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มตัวแอลในงานวิจัยนี้ ช่วยยืนยันได้ว่าลักษณะของอาร์คที่เกิดขึ้น



รูปที่ 12 เวกเตอร์ของการเคลื่อนตัวของมวลดินตั้งแต่เริ่มทดสอบจนวิบัติที่ (ระยะ $S_g/B = 0.7$)

ในกรณีของเสาเข็มกลมนั้นใหญ่กว่าและจุดรองรับของอาร์คยันกับเสาเข็มกลมได้ดีกว่าเสาเข็มตัวแอล

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวของลูกบิดสามารถเขียนเป็นเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของดินในแบบจำลองได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของดินเป็นการพยายามไหลออกบริเวณช่องเปิด โดยการเคลื่อนตัวบริเวณผิวของเสาเข็มตัวแอลมีลักษณะขนานไปกับผิวของเสาเข็มทำให้อาร์คที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มถูกผลักให้ไหลได้ง่าย ซึ่งเป็นหลักฐานยืนยันอีกประการว่าเหตุใดแรงวิกฤติของเสาเข็มตัวแอลจึงต่ำกว่าแรงวิกฤติของเสาเข็มกลม



5. สรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ในกรณีของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวแอล แรงดันดินวิบัติ P_h / S_u แปรผกผันกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม S_g / B โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปไฮเปอร์โบล่า

5.2 รูปแบบการวิบัติเมื่อตัวอย่างดินทดสอบถูกกดจนวิบัติเป็นรอยแตกในดินที่มีแนวโน้มเป็นอาร์ค เกิดขึ้นสองบริเวณ คือบริเวณเหนือเสาเข็มและบริเวณช่องว่างระหว่างเสาเข็มซึ่งสอดคล้องกับกลไกการวิบัติที่เสนอโดย Jirapapha [3] แต่ไม่พบแนวการวิบัติแบบเฉือนผ่านอาร์คลงมา

5.3 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองกายภาพของเข็มกลมที่เสนอโดยวินิตย์ [9] พบว่าค่าแรงวิบัติของเข็มแอลต่ำกว่าแรงวิบัติของเข็มกลม เนื่องจากรูปร่างของเสาเข็มตัวแอล มีพื้นผิวสัมผัสดินมีความลาดเอียงเข้าหาช่องเปิด ทำให้อาร์คที่เกิดขึ้นพังทลายได้ง่ายกว่าอาร์คที่เกิดในกรณีเสาเข็มกลม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณพงศ์ธร พรายมณี ที่ให้ความอนุเคราะห์แปลงที่ดินสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. A. Gaba, B. Simpson, W. Powrie, and D. R. Beadman, *Embedded retaining walls—guidance for economic design (C580)*, CIRIA, London, 2003.
- [2] J. P. North-Lewis and G. H. A. Lyons, *Contiguous bored piles. Diaphragm walls and anchorages*,

Institution of civil engineers, London, 1975, pp. 189–194.

- [3] P. Jirapapha, “Using of contiguous bored pile for underground construction in Bangkok subsoils,” in *Proc. of underground construction*, Bangkok, Thailand, 1996.
- [4] T. Ito and T. Matsui, “Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Pile,” *Soil and Foundations*, vol.15, no. 4, pp. 45–59, 1975.
- [5] J. H. Atkinson, E. T. Brown, and D. M. Potts, “Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand,” *Tunnels and Tunneling*, vol. 7, no 3, pp. 81–87, 1975.
- [6] B. Chevalier, G. Combe, and P. Villard, “Load transfers and arching effects in granular soil layer,” in *18^{eme} Congres Francais de Mecanique*, Grenoble 27–31 about 2007.
- [7] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*, New York: John Wiley and Sons, 1943, pp. 66–76.
- [8] H. H. Einstein, C. W. Schwartz, W. Steiner, M. M. Baligh, and R. E. Levitt, “Improved Design for Tunnel Supports,” *Analysis Method and Ground Structure Behavior*, vol. 2, MIT, DOT-05-60136, 1980.
- [9] W. Haema, “Influence of Pile Spacing on Lateral Resistance of Contiguous Bored Pile Wall for Deep Excavation,” Master Thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2010.