การศึกษาขอบเขตอิทธิพลของการกระจายความเค้นในกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพสำหรับฐานรากเสาเข็มในดินเหนียวโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ

A Study on the Influence Boundaries of Stress Distribution in Physical Model Testing Boxes for Pile Foundations in Clay Soil Using 3D Finite Element Methods

ก้องภพ วัชรเสวี[1] อรรถพล มาลัย[2*] สันติ ไทยยืนวงษ์[3] และ จักราวุธ ตันสกุล[4]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ จ.นครปฐม
[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ จ.ประจวบคีรีขันธ์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
**Corresponding author; E-mail address: attapole.mal@rmutr.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ขอบเขตอิทธิพลของการกระจายความเค้นในกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพสำหรับจำลองฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการกำหนดขนาดกล่องทดลองที่เหมาะสม การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ จำลองพฤติกรรมดินเหนียวด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ เสาเข็มเดี่ยว ฐานรากแผ่ ฐานรากเสาเข็มที่มีระยะห่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (s/D) เท่ากับ 2.5 และ 3 ผลการวิเคราะห์แสดงถึงขอบเขตการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบฐานรากเมื่อรับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติในแต่ละกรณี โดยมีระยะส่งอิทธิพลตามแนวระนาบและแนวดิ่ง ตามลำดับดังนี้ เสาเข็มเดี่ยว แนวระนาบ $9.5D_{pile}$ และแนวดิ่ง $9D_{pile}$ ที่ใต้เสาเข็ม ฐานรากแผ่ แนวระนาบ $1.1D_{raft}$ และแนวดิ่ง $2.8D_{raft}$ ฐานรากเสาเข็ม s/D = 2.5 แนวระนาบ $1.3D_{raft}$ และแนวดิ่ง $22D_{pile}$ ที่ใต้เสาเข็ม และ s/D = 3 แนวระนาบ $1.1D_{raft}$ และแนวดิ่ง 19 D_{pile} ที่ใต้เสาเข็ม โดยกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ จะต้องมีขนาดอย่างน้อย 5 เท่าของระยะอิทธิพล จึงจะสามารถลดผลกระทบจากขอบเขตข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบขนาดกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการกำหนดขอบเขตงานวิเคราะห์เชิงตัวเลขของฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว

คำสำคัญ: กล่องจำลองทางกายภาพ, ฐานรากเสาเข็ม, ดินเหนียว, ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ, Mohr-Coulomb

Abstract

The influence boundaries of stress distribution in a physical model testing box for simulating pile foundations in clay soil were analyzed in this study. The data obtained was used to determine the appropriate dimensions of the testing box. Numerical simulations were conducted using three-dimensional finite element methods, with the clay soil behavior modeled using the Mohr-Coulomb model. The study was divided into four cases: a single pile, a raft foundation, and piled raft foundations with pile spacing-to-diameter ratios (s/D) of 2.5 and 3. The displacement boundaries of the soil surrounding the foundation under loading conditions up to failure were identified. The horizontal and vertical influence zones were determined as follows: for a single pile, $9.5D_{pile}$ horizontally and $9D_{pile}$ vertically at the pile tip; for a raft foundation, $1.1D_{raft}$ horizontally and $2.8D_{raft}$ vertically; for piled raft foundation with s/D = 2.5, $1.3D_{raft}$ horizontally and $22D_{pile}$ vertically at the pile tip; and for piled raft foundation with s/D = 3, $1.1D_{raft}$ horizontally and $19D_{pile}$ vertically at the pile tip. It was found that the physical model testing box must have dimensions at least five times the influence zones to minimize boundary effects. The findings provide a guideline for designing physical model testing boxes and can also be applied to define the numerical analysis boundaries for piled raft foundations in clay soil.

Keywords: Physical model testing box, piled raft foundation, clay soil, three-dimensional finite element, Mohr-Coulomb.

1. คำนำ

แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการถือเป็นหนึ่งในเครื่องมือพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของดินและโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering) โดยสามารถใช้เพื่อสร้างความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับกลไกของการพังทลาย การทรุดตัว การกระจายแรง และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับดิน ทั้งนี้แบบจำลองทางกายภาพยังทำหน้าที่สนับสนุนการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยขั้นสูงที่ต้องการข้อมูลเปรียบเทียบที่แม่นยำและสอดคล้องกับสภาวะจริง งานวิจัยของ Horikoshi และ Randolph [1] รวมถึงงานของ Katzenbach [2] และอื่นๆ[3-4] ได้แสดงให้เห็นถึงการใช้แบบจำลองทางกายภาพในการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มร่วมและโครงสร้างในเขตเมืองที่มีความซับซ้อน ซึ่งเน้นถึงความสำคัญของข้อมูลจากห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

ในการจำลองทางกายภาพของโครงสร้างทางปฐพีกลศาสตร์ ขนาดของกล่องทดลองถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง โดยเฉพาะในกรณีที่กล่องมีขนาดเล็กเกินไป อาจเกิดผลกระทบจากขอบเขต (Boundary Effect) ที่ส่งผลให้เกิดการสะท้อนแรงที่ผิดธรรมชาติ หรือจำกัดการกระจายความเค้นของดิน ส่งผลให้ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้างได้อย่างครบถ้วน งานวิจัยจำนวนมากในอดีต [5-8] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มและฐานรากในวัสดุที่เป็นทรายซึ่ง

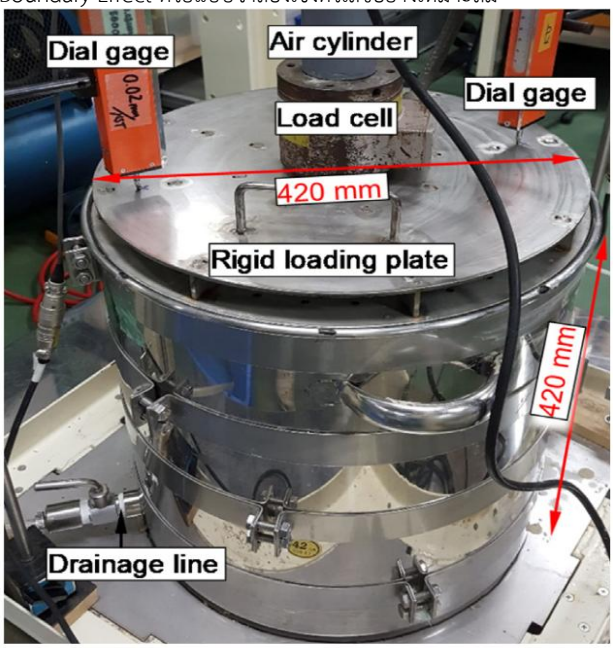
มีคุณสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างเสถียร และสามารถควบคุมการทดลองได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม การศึกษาที่ใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุทดสอบยังมีไม่มากนัก เช่น งานของ Hoang และ Matsumoto [3-4] ที่ชี้ให้เห็นถึงความซับซ้อนในการควบคุมพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนที่ไวต่อการเสียรูปและการทรุดตัว การกำหนดขนาดของกล่องทดลองจึงต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของงาน เช่น การจำลองอุโมงค์ เขื่อน หรือฐานราก ซึ่งแต่ละกรณีล้วนมีระยะอิทธิพลของการกระจายความเค้นที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขอบเขตอิทธิพลของการกระจายความเค้นในกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพสำหรับจำลองฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการกำหนดขนาดกล่องทดลองที่เหมาะสม เพื่อลดผลกระทบจากขอบเขตในงานวิจัยเชิงกายภาพและเชิงตัวเลข การศึกษานี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D Finite Element Method) โดยจำลองพฤติกรรมของดินเหนียวด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb และศึกษาพฤติกรรมของฐานรากใน 4 กรณี ได้แก่ กรณีเสาเข็มเดี่ยว ฐานรากแผ่ ฐานรากเสาเข็มแบบกลุ่มที่มีอัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (*s/D*) เท่ากับ 2.5 และ 3 เพื่อเปรียบเทียบระยะอิทธิพลในแนวระนาบและแนวดิ่งสำหรับกำหนดขนาดกล่องที่เหมาะสม

2. ขอบเขตและระเบียบวิธีการศึกษา

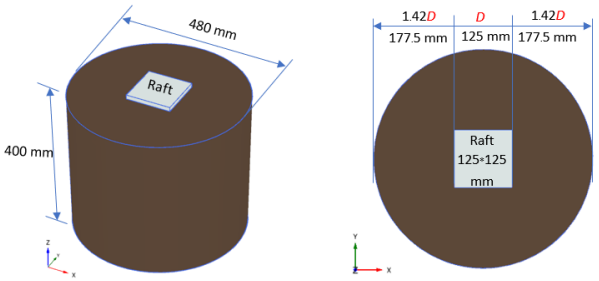
2.1 ต้นแบบกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

กล่องทดสอบทางกายภาพที่ใช้ในงานของ Hoang และ Matsumoto (2020) [3-4] ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง ผลิตจากวัสดุสแตนเลส โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 420 มิลลิเมตร และใช้ในการจำลองฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว Kasaoka clay นั้น ได้ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางต้นแบบเบื้องต้นสำหรับการออกแบบขนาดกล่องจำลองในงานศึกษานี้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขอบเขตอิทธิพลของ Boundary Effect ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 กล่องทดสอบทางกายภาพสำหรับการศึกษาฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว (อ้างอิงจาก [3])

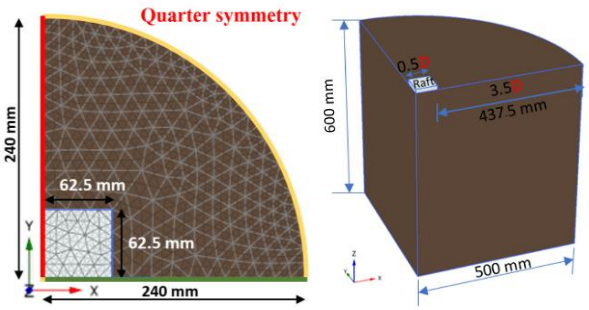
2.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2 กล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพขนาดเริ่มต้น OB

ในการศึกษานี้ ออกแบบขนาดกล่องทดสอบทางกายภาพ โดยมีขนาดกล่องเริ่มต้น (Original Boundary: OB) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 480 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 400 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่เกิดจาก Boundary Effect จึงกำหนดกล่องทดสอบขนาดขยาย (Extended Boundary: EB) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1000 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 600 มิลลิเมตร ขนาดกล่องเป็นการจำลองในแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาอิทธิพลของขอบเขตต่อพฤติกรรมของดินและฐานราก และใช้เป็นแนวทางสำหรับการขยายขนาดกล่องในการทดลองทางกายภาพในลำดับถัดไป

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ การจำลองใช้แบบสมมาตรหนึ่งในสี่ quarter symmetry เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ โดยมีขนาดกล่องเริ่ม OB และ EB เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากขอบเขต ทั้งในแนวราบและแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 3 พร้อมทั้งเงื่อนไขขอบเขต โดยกำหนดพื้นผิวด้านบนของแบบจำลองกำหนดให้เป็นแบบอิสระ (Free) ขอบด้านนอกที่แสดงด้วยเส้นสีเหลืองถูกกำหนดให้ Ux และ $Uy = 0$ เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y ขอบด้านแนวสีแดง ระนาบ x = 0 กำหนด $Ux = 0$ ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ขอบด้านแนวสีเขียว y = 0 กำหนด $Uy = 0$ ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y และขอบด้านล่างของแบบจำลองจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง $Uz = 0$ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการรองรับของดินฐานรากอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ได้มีการปรับความละเอียดของโครงข่ายองค์ประกอบจำกัด (Mesh) ในบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการทรุดตัวมาก แบบจำลองในการวิเคราะห์ มีทั้งหมด 95,173 nodes และ 45,324 elements โดยแบ่งการจำลองเชิงตัวเลขเป็น 4 กรณี ดังนี้



(ก) (ข)

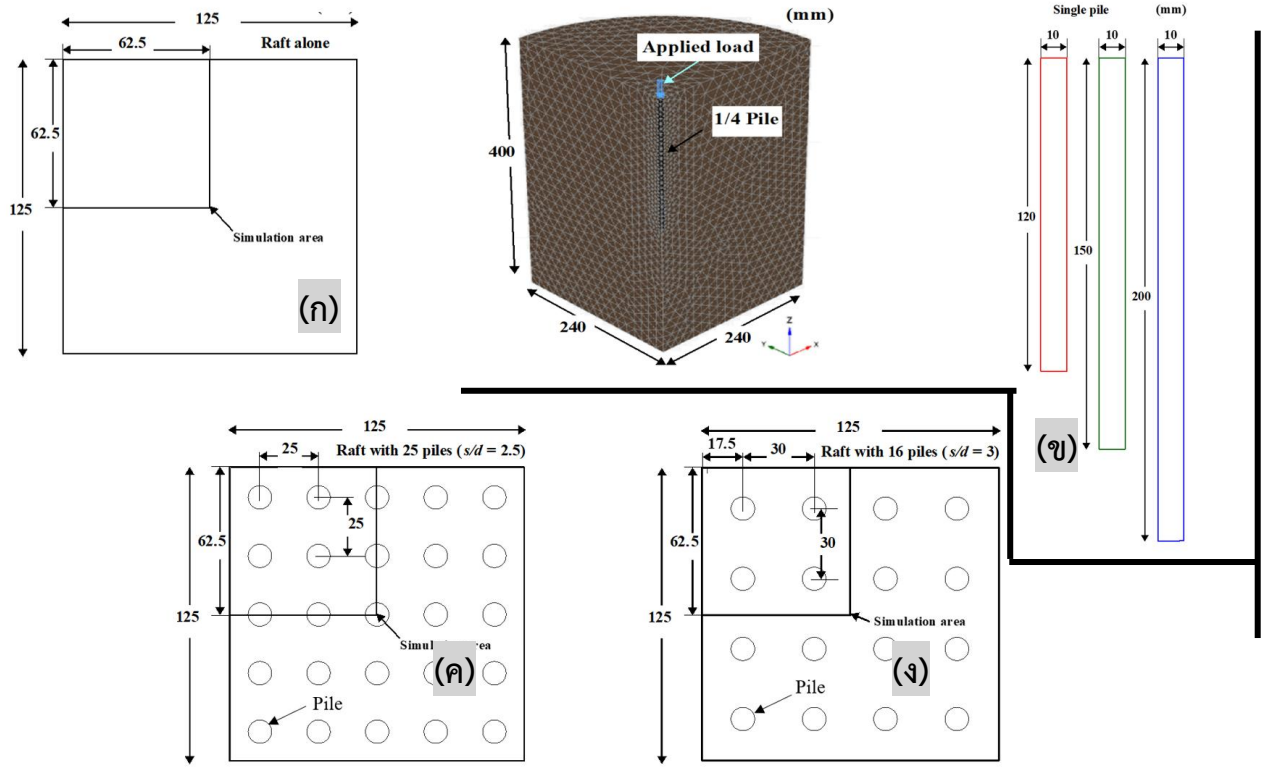
รูปที่ 3 ลักษณะโครงข่ายแบบจำลองกล่องขนาด (ก) OB และ (ข) EB ที่ใช้ในการวิเคราะห์ 3D-FEM

2.3 ข้อมูลดินและพารามิเตอร์

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูล "ดินเหนียวกรุงเทพ" ในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นดินอ่อนที่พบทั่วไปในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล[9-13] โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญ เช่น ความสามารถในการอัดตัวสูง ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น และมีค่าความต้านทานแรงเฉือนต่ำ ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินได้อย่างถูกต้อง จึงได้กำหนดคุณสมบัติทางกลของดินเหนียวกรุงเทพตามค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ วัสดุดิน (Soil) และวัสดุฐานราก (Foundation) ซึ่งประกอบด้วยเสาเข็มและฐานรากแผ่ในส่วนของวัสดุดิน เป็นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ซึ่งจำลองพฤติกรรมด้วยแบบจำลอง (Mohr-Coulomb: MC) ซึ่งคำนวณค่า E จากสมการ $E = 500S_u$ ตามสมการเชิงประจักษ์ของ Jamiolkowski et al. [14] สำหรับวัสดุฐานราก เสาเข็มทำจากพลาสติก ABS และฐานรากแผ่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม

โดยทั้งสองแบบจำลองด้วยพฤติกรรมโมดูลัสของความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear Elastic: LE) ดังแสดงในตารางที่ 1 วัสดุของเสาเข็มและฐานรากจำลองในแบบ solid element ถูกแบ่งออกเป็นหนึ่งในสี่ส่วน ตามหลักการของ Quarter Symmetry ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 4 รูปแบบการจำลองฐานรากแผ่ (ก) เสาเข็มเดี่ยว (ข) ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม s/D = 2.5 (ค)และ s/D = 3 (ง) ในงานวิเคราะห์ FEM

Case 1: เสาเข็มเดี่ยว (Single pile) ความยาว 120, 150, 200 มม.
Case 2: ฐานรากแผ่ (Raft alone) ขนาด 125 x 125 มม.
Case 3: ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม (Piled raft) 25 ต้น (s/D = 2.5) ความยาวเข็ม 120 และ 200 มม.
Case 4: ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม (Piled raft) 16 ต้น (s/D = 3) ความยาวเข็ม 120 และ 200 มม.

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัสดุ

วัสดุ	แบบจำลอง	γ (kN/m^3)	E (kPa)	ν	S_u (kPa)
<u>Soil</u>					
Soft clay	Mohr-Coulomb	14	8750	0.31	17.5
<u>Foundation</u>					
Pile (Plastic ABS)	Linear Elastic	10.2	2.4×10^4	0.40	
Raft (Aluminum plate)	Linear Elastic	26.15	2.0×10^8	0.17	

E = 500S_u for soft clay (Jamiolkowski et al. [14])
Piles and raft are modeled by solid element

2.4 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์

ในการประเมินความเหมาะสมของขนาดกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์ออกเป็น 3 ประการ:

1. ตรวจสอบแรงสูงสุดที่ทำให้ดินเกิดการพังทลายหรือวิบัติ ซึ่งเป็นเกณฑ์หลักในการพิจารณาความมั่นคงของฐานราก
2. พิจารณารูปแบบและขนาดของการเสียรูป (deformation) ที่เกิดขึ้นในดินโดยรอบฐานราก เพื่อตรวจสอบว่าการเคลื่อนตัวของดินส่งผลกระทบต่อขอบเขตจำลองหรือไม่
3. หากข้อ 2. “ไม่” หยุดการวิเคราะห์ หากข้อ 2. “ใช่” มีผลกระทบ ทำการขยายขอบเขต (ใช้การจำลองการวิเคราะห์แบบ EB)

การจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการตั้งค่าเริ่มต้นของการวิเคราะห์ (Initial Condition) โดยกำหนดความเค้นเริ่มต้นจากค่าสัมประสิทธิ์ความดันดินในสภาวะอยู่นิ่ง (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0) สำหรับดินเหนียวกรุงเทพ จากนั้นจำลองการวางฐานรากเสาเข็มตามเงื่อนไขของแต่ละกรณีศึกษา ได้แก่ เสาเข็มเดี่ยว ฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็มแบบกลุ่ม จำลองการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกลงบนฐานรากจนถึงจุดที่ดินเกิดการวิบัติ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นและตรวจสอบระยะอิทธิพลของการกระจายความเค้นในแต่ละกรณี โดยเปรียบเทียบระยะอิทธิพลทั้งในแนวระนาบและแนวดิ่งที่ได้จากแต่ละกรณี เพื่อนำไปสู่ข้อเสนอแนะขนาดของกล่องทดสอบที่เหมาะสมที่สุด

3. ผลการวิเคราะห์

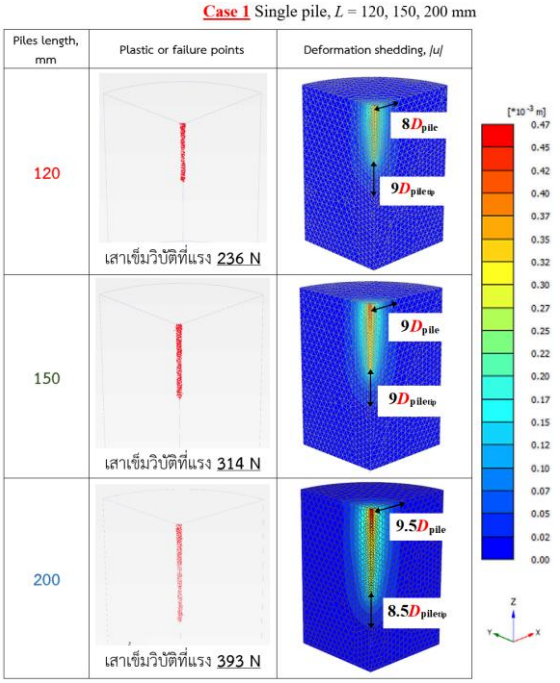
3.1 เสาเข็มเดี่ยว

จากผลการศึกษาการจำลองพฤติกรรมเสาเข็มเดี่ยว ที่ความยาวแตกต่างกัน 3 ขนาด แสดงในรูปที่5 พบว่า ความยาวของเสาเข็มมีผลต่อกำลังรับแรงสูงสุดอย่างชัดเจน โดยเสาเข็มที่มีความยาว 120 มม., 150 มม. และ 200 มม. มีค่ากำลังรับแรงสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติเท่ากับ 236 N, 314 N และ 393 N ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าเสาเข็มที่มีความยาวเพิ่มขึ้นสามารถถ่ายแรงไปยังชั้นดินได้ดีกว่า จึงมีกำลังรับแรงสูงสุดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์บริเวณที่วัสดุเสาเข็มเกิดการวิบัติ พบว่าการวิบัติเกิดขึ้นตามแนวความยาวของเสาเข็มในรูปแบบของโซนพลาสติก (Plastic zone) อย่างชัดเจน ส่วนผลการเสียรูปของดินโดยรอบเสาเข็ม Deformation shedding พบว่าความลึกของโซนการเสียรูปมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้น โดยมีระยะลึกตั้งแต่ประมาณ 8.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ($8.5D_{pile}$) สำหรับเสาเข็มความยาว 200 มม. และเพิ่มเป็นประมาณ $9D_{pile}$ เมื่อความยาวเสาเข็มลดลง 120 มม. และ 150 มม. โซนการเสียรูปแนวระนาบมีแนวโน้มเพิ่มเมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้นโดยมีระยะระนาบตั้งแต่ประมาณ 8 ถึง 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ($8 - 9D_{pile}$) สำหรับเสาเข็มความยาว 120 มม. และ 150 มม. ตามลำดับและเพิ่มเป็นประมาณ $9.5D_{pile}$ เมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็น 200 มม. ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความยาวของเสาเข็มมีอิทธิพลโดยตรงต่อรูปแบบการกระจายตัวของการเสียรูปในชั้นดินทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบ โดยเสาเข็มที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงกว่าจะก่อให้เกิดการเสียรูปของดินในแนวระนาบมากขึ้น ขณะที่การเสียรูปของดินบริเวณปลายเสาเข็มกลับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะความชะลูดของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวมากขึ้น ส่งผลให้แรงถ่ายเทผ่านผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกับดิน (skin friction) มีสัดส่วนมากกว่าการถ่ายแรงที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็มประเภทเสาเข็มแรงเสียดทาน (Friction Pile) [12] ที่แรงรับน้ำหนักส่วนใหญ่ถูกถ่ายผ่านทางด้านข้างของเสาเข็มมากกว่าที่ปลายเสาเข็ม

เนื่องจากเสาเข็มมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของกล่องทดลอง จึงทำให้การเคลื่อนตัวขณะทดสอบที่จุดวิบัติของเสาเข็มทั้ง3 แบบยังไม่ส่งผลให้เกิด Boundary Effect ทั้งแนวระนาบและ แนวดิ่ง

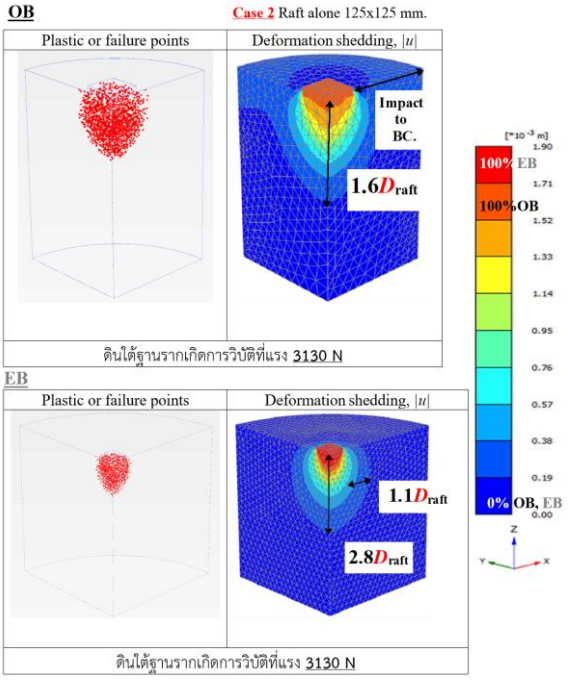
3.2 ฐานรากแผ่

รูปที่ 6 แสดงผลการศึกษาการจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่เดี่ยว (Raft alone) ขนาด 125 × 125 มม. ภายใต้สภาพขอบเขตของกล่องจำลองที่แตกต่างกัน 2 กรณี คือ OB และ EB พบว่า ดินใต้ฐานรากในทั้งสองกรณีเกิดการวิบัติที่ค่าแรงกระทำสูงสุดเท่ากันคือ 3,130 N อย่างไรก็ตาม ลักษณะของการกระจายตัวของ Deformation shedding ในดินมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกรณี OB โซนการเสียรูปแผ่กระจายในแนวระนาบมีแนวโน้มที่การเสียรูปขยายไปถึงขอบเขตของกล่องจำลอง ทำให้เกิด Boundary Effect ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ จึงทำให้โซนการเสียรูปแผ่กระจายในแนวดิ่งประมาณ 1.6 เท่าของความกว้างฐานราก $1.6D_{raft}$ และจึงทำการวิเคราะห์ใหม่ EB ซึ่งมีการขยายขอบเขต



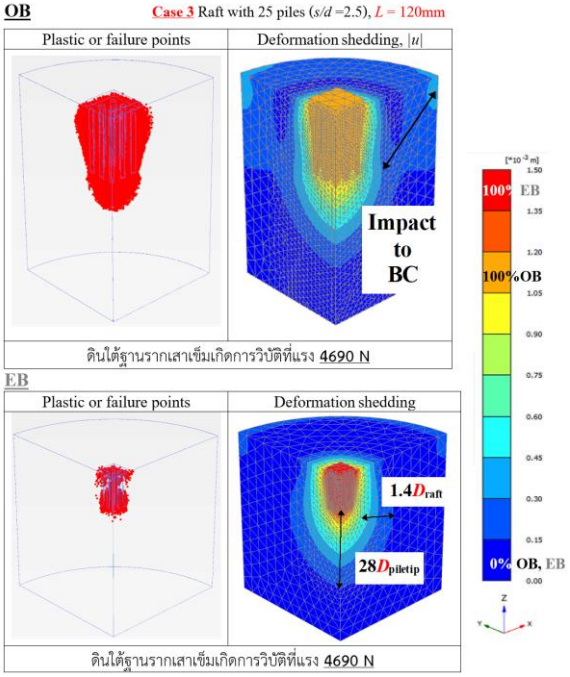
รูปที่ 5 พฤติกรรมการวิบัติของเสาเข็มเดี่ยวที่ความยาวแตกต่างกัน (120, 150, และ 200 มิลลิเมตร) ภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่ง

กล่องจำลองให้กว้างขึ้น พบว่าโซนการเสียรูปในแนวระนาบลดลงเหลือเพียงประมาณ $1.1D_{raft}$ และในแนวดิ่งมีระยะลึกประมาณ $2.8D_{raft}$ ซึ่งไม่พบการรบกวนจาก Boundary Effect ทั้งนี้บริเวณที่ดินเกิดการวิบัติ มี Plastic zone มีลักษณะเป็นโซนเฉือนพังที่กระจุกตัวอยู่ใต้ฐานรากอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 พฤติกรรมการวิบัติของดินใต้ฐานรากแผ่เดี่ยว ขนาด 125 × 125 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB

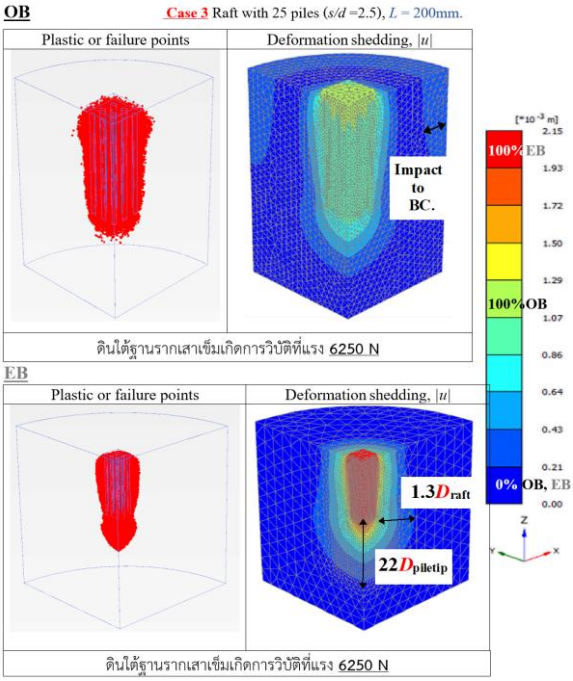
3.3 ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม (s/D = 2.5)



รูปที่ 7 พฤติกรรมการวิบัติของดินใต้ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม 25 ต้น (s/D = 2.5) ที่ความยาวเสาเข็ม 120 มิลลิเมตร ในขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB

ในทั้งสองกรณี ในขณะที่เงื่อนไขการให้น้ำหนัก และขนาดของโครงสร้างเท่ากัน แต่ผลการวิเคราะห์ไม่เท่ากัน ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการขยายขอบเขตของกล่องจำลองสามารถลด Boundary Effect ได้อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยให้ผลการจำลองสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของระบบฐานรากและดินได้ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลการศึกษาการจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่บนเสาเข็มจำนวน 25 ต้น โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ s/D = 2.5 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB ที่ความยาวเสาเข็ม 120 มม. และ 200 มม. พบว่า ฐานรากแผ่บนเสาเข็มมีค่ากำลังรับแรงสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติเพิ่มขึ้นจาก 4,690 N สำหรับเสาเข็มความยาว 120 มม. เป็น 6,250 N เมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้นเป็น 200 มม. ในทั้งสองเงื่อนไขขอบเขต ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเสาเข็มที่มีความยาวเพิ่มขึ้นสามารถรับแรงได้มากขึ้น โดยในกรณี OB ที่ขอบเขตของกล่องจำลองมีขนาดจำกัด โซนการวิบัติ Plastic zone มีลักษณะแผ่ขยายกว้างและลึกครอบคลุมเสาเข็มทั้งหมด ทำให้โซนการเสียรูปในแนวระนาบของดินใต้ฐานรากขยายตัวออกไปจนกระทบขอบเขตของกล่องจำลอง ส่งผลให้เกิด Boundary Effect ขึ้นอย่างชัดเจนและรุนแรงทั้งกรณีเข็มสั้นและเข็มยาว ขณะที่วิเคราะห์ด้วยกรณี EB ซึ่งได้ขยายขอบเขตกล่องจำลองออกไป พบว่าการกระจายตัวของโซนวิบัติถูกจำกัดให้อยู่บริเวณรอบเสาเข็มและฐานรากอย่างชัดเจน โดยมีระยะเสียรูปของดินในแนวระนาบอยู่ที่ 1.4 D_{raft} สำหรับเสาเข็มความยาว 120 มม. ระยะเสียรูปของดินในแนวระนาบอยู่ที่ประมาณ 1.3D_{raft} สำหรับเสาเข็มความยาว 200 มม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2กรณี แต่ระยะเสียรูปของดินในแนวดิ่ง สำหรับเสาเข็มความยาว 120 มม. อยู่ที่ 28D_{pile} ที่ปลายเข็ม และสำหรับเสาเข็มความยาว 200 มม. ส่วนระยะเสียรูปในแนวดิ่งลดลงเหลือเพียงประมาณ 22D_{pile} ที่ปลายเข็ม ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเสาเข็มที่ยาวขึ้นทำให้เสียรูปของดินที่ปลายเสาเข็มในแนวดิ่งลดลง



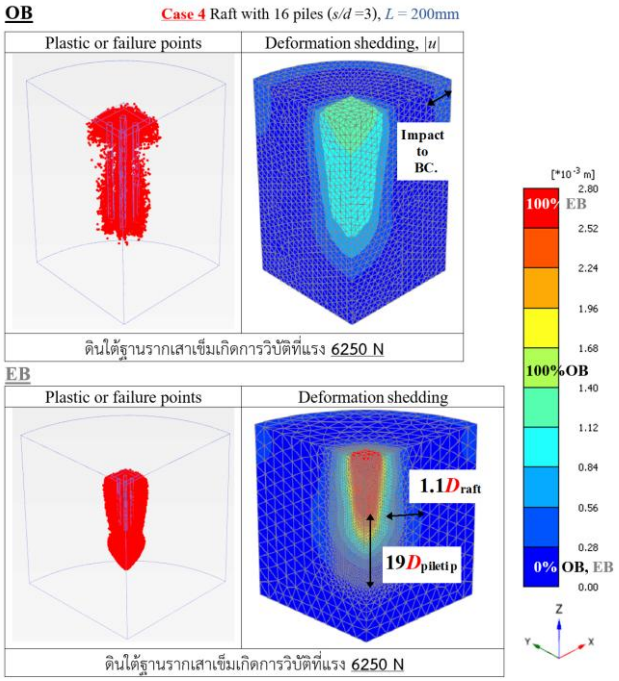
รูปที่ 8 พฤติกรรมการวิบัติของดินใต้ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม 25 ต้น (s/D = 2.5) ที่ความยาวเสาเข็ม 200 มิลลิเมตร ในขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB

ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาเข็มประเภท Friction Pile ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เงื่อนไขขอบเขตของกล่องจำลองส่งผลกระทบโดยตรงต่อความแม่นยำ ดังนั้นจึงควรออกแบบขอบเขตของกล่องจำลองให้เหมาะสมเพื่อป้องกัน Boundary Effect และทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการวิบัติของฐานรากและกลุ่มเสาเข็มได้อย่างถูกต้องและสมจริง

3.4 ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม (s/D = 3)

จากผลการจำลองพฤติกรรมฐานรากแผ่ร่วมกับกลุ่มเสาเข็มจำนวน 16 ต้น ที่ความยาวเสาเข็ม 200 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (s/D = 3) พบว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติเท่ากับ 6,250 นิวตัน ซึ่งเท่ากับกรณีกลุ่มเสาเข็ม 25 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 9

อย่างไรก็ตาม ลักษณะการกระจายตัวของโซนการเสียรูปในดินมีความแตกต่างกัน โดยในกรณี OB โซนการเสียรูปแผ่กว้างออกไปจนกระทบขอบเขตของกล่องจำลอง ทำให้เกิด Boundary Effect อย่างชัดเจน ขณะที่ในกรณี EB ซึ่งได้ขยายขอบเขตกล่องออกไป พบว่าโซนการเสียรูปถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณรอบเสาเข็มและฐานราก โดยมีระยะการเสียรูปในแนวระนาบประมาณ $1.1D_{raft}$ และระยะเสียรูปในแนวดิ่งประมาณ $19D_{pile}$ ที่ปลายเข็ม แม้ว่าทั้งสองกรณีจะสามารถรับแรงได้เท่ากัน แต่ค่าการเสียรูปสัมพัทธ์ ($|u|$) ที่แสดงด้วยช่วงสีในแผนภาพ Deformation shedding มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในกรณี OB ค่าสีสูงสุดอยู่ในช่วงสีเขียวอ่อน (ไม่เกิน 1.6 มิลลิเมตร) ซึ่งแสดงถึงการเสียรูปของดินที่ต่ำกว่าความเป็นจริงอันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของขอบเขตจำลอง ขณะที่กรณี EB มีค่าการเสียรูปสูงสุดสีแดงเข้ม (2.8 มิลลิเมตร) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวห่างกันเกือบ 1 เท่าตัว และแสดงถึงการกระจายพลังงานและรูปแบบการเสียรูปที่เป็นธรรมชาติมากกว่า สะท้อนให้เห็นว่าการควบคุม Boundary



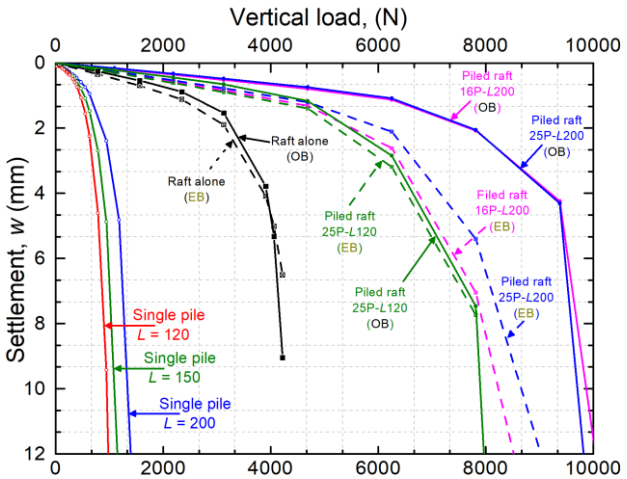
รูปที่ 9 พฤติกรรมการวิบัติของดินใต้ฐานรากแผ่บนเสาเข็ม 16 ต้น (s/D = 3) ที่ความยาวเสาเข็ม 200 มิลลิเมตร ในขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB

Effect อย่างเหมาะสมส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของค่าการเสียรูป แม้ว่าค่ากำลังรับแรงจะไม่แตกต่างกันก็ตาม

3.1 เปรียบเทียบ Load–Settlement

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical load) และการทรุดตัว (Settlement) รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากในกรณีต่าง ๆ ได้แก่ เสาเข็มเดี่ยว ฐานรากแผ่เดี่ยว และฐานรากแผ่บนเสาเข็ม ภายใต้สภาพขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB และ EB วิเคราะห์ได้ดังนี้ เส้นกราฟสีแดง เขียว และน้ำเงิน แสดงพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวที่มีความยาว 120, 150 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเสาเข็มที่ยาวขึ้นสามารถรับแรงได้สูงขึ้นก่อนเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว แสดงถึงความสามารถในการถ่ายแรงที่ดีขึ้น ส่วนเส้นกราฟสีดำแสดงพฤติกรรมของฐานรากแผ่เดี่ยว Raft alone โดยแบบ EB แสดงค่าการทรุดตัวที่สูงกว่ากรณี OB ภายใต้แรงกระทำเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า Boundary Effect ส่งผลต่อค่าการทรุดตัวอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณากรณีฐานรากแผ่บนเสาเข็ม Piled raft ในแบบจำลอง EB ซึ่งแสดงด้วยเส้นประสีเขียวม่วง และน้ำเงิน พบว่ากรณีที่ใช้เสาเข็มจำนวนมากขึ้นและความยาวมากขึ้นจะช่วยลดค่าการทรุดตัวได้ชัดเจนสามารถรับแรงได้สูงกว่า โดยเฉพาะกรณี Piled raft ที่ใช้เสาเข็ม 25 ต้น ความยาว 200 มม. (เส้นน้ำเงิน) มีความสามารถในการรับแรงได้สูงเป็นไปตามหลักการที่ถูกต้อง [3,4,10-13] แต่ข้อมูลที่ได้จากขอบเขตกล่องจำลองแบบ OB เส้นทึบ สีเขียว ม่วง และน้ำเงิน ข้อมูลที่ได้ไม่สมเหตุสมผล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เส้นสีม่วง และน้ำเงิน สำหรับกรณีเสาเข็ม 16 ต้น ความยาว 200 มม. (เส้นสีม่วง) และเสาเข็ม 25 ต้น (น้ำเงิน) ให้ข้อมูลการทรุดตัวที่เท่ากัน ในขณะที่มีจำนวนเสาเข็มต่างกันถึง 9 ต้น นั้นแสดงว่า ขอบเขตกล่องทดลองแบบ OB นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกรณีเหล่านี้ เนื่องจาก Boundary Effect

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าผลลัพธ์ในกรณีขอบเขตขยาย EB มีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากสามารถสะท้อนพฤติกรรมของฐานรากแบบ piled raft ได้ตรงตามหลักการที่แท้จริง กล่าวคือ ในช่วงแรกกระทำต่ำ เสาเข็ม



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบ Load–Settlement ของแบบจำลองฐานรากเสาเข็มในสภาพขอบเขตกล่องจำลองแตกต่างกัน OB และ EB

(pile) จะรับภาระแรงเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวของระบบมีค่าน้อย ขณะที่เมื่อแรงกระทำเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการทรุดตัวมากขึ้น พื้นที่สัมผัสของฐานรากแผ่ (raft) จะเริ่มมีบทบาทสำคัญในการรับแรงเพิ่มเติม ทำให้เกิดการกระจายแรงที่เหมาะสมระหว่างเสาเข็มและฐานรากแผ่ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในกรณี EB แตกต่างจากกรณีขอบเขตจำกัด OB ซึ่งข้อมูลการทรุดตัวเบี่ยงเบนไปจากความเป็นจริงอันเนื่องมาจากผลกระทบของ boundary effect ส่งผลให้ไม่สามารถแสดงรูปแบบการถ่ายแรงที่แท้จริงระหว่าง pile และ raft ได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ กรณี EB ทุกกรณีแสดงค่าการทรุดตัวที่มากกว่า OB เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดจากขอบเขตกล่องจำลอง ส่งผลให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงพฤติกรรมจริงของระบบฐานรากมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ข้อมูลจากกราฟดังกล่าวสามารถใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบระบบฐานรากอย่างเหมาะสม โดยคำนึงถึงทั้งรูปแบบของฐานราก ความยาวและจำนวนเสาเข็ม รวมถึงขอบเขตของแบบจำลองที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการวิเคราะห์

4. บทสรุป

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ขอบเขตอิทธิพลของการกระจายความเค้นในกล่องทดสอบแบบจำลองทางกายภาพสำหรับฐานรากเสาเข็มในดินเหนียว โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ ภายใต้แบบจำลองพฤติกรรมของดินเหนียวด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb และแบบจำลองฐานรากด้วยพฤติกรรมเชิงเส้นยืดหยุ่น ผลการศึกษาครอบคลุมกรณีศึกษา 4 รูปแบบ ได้แก่ เสาเข็มเดี่ยว ฐานรากแผ่และฐานรากแผ่บนกลุ่มเสาเข็มที่มีระยะ *s/D* เท่ากับ 2.5 และ 3 โดยพิจารณาทั้งในเงื่อนไขขอบเขตกล่องจำลองแบบเดิม OB และแบบขยาย EB ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า

1. ความยาวของเสาเข็มส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงและรูปแบบการเสียรูปของดินโดยเสาเข็มที่มีความยาวมากขึ้นสามารถรับแรงได้สูงขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ และมีแนวโน้มที่โซนการเสียรูปในแนวดิ่งจะลดลง ขณะที่โซนการเสียรูปในแนวระนาบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวของเสาเข็ม ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของเสาเข็มประเภท Friction Pile อย่างชัดเจน
2. ขนาดและรูปแบบของกลุ่มเสาเข็มมีผลต่อค่าการทรุดตัวและแรงที่รับได้การเพิ่มจำนวนเสาเข็มจาก 16 ต้นเป็น 25 ต้น ช่วยลดค่าการทรุดตัวของฐานรากแผ่บนเสาเข็ม และเพิ่มกำลังรับแรงสูงสุดของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้ความยาวเสาเข็มเท่ากัน
3. Boundary Effect ส่งผลกระทบอย่างชัดเจนต่อผลการวิเคราะห์ในกรณีที่กล่องจำลองมีขนาดไม่เพียงพอโดยเฉพาะในกรณีของฐานรากแผ่และฐานรากแผ่ร่วมกับกลุ่มเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่หรือความยาวเสาเข็มมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าการเสียรูปที่ได้จากการจำลองไม่สะท้อนพฤติกรรมจริง
4. การใช้กล่องจำลองแบบขยาย EB ช่วยลดผลกระทบจาก Boundary Effect ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยส่งผลให้โซนการเสียรูปของดินอยู่ภายในขอบเขตของกล่องจำลอง และค่าการทรุดตัวที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากขึ้น
5. เพื่อให้ผลการทดลองหรือการจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ กล่องจำลองทางกายภาพควรมีขนาดอย่างน้อย 5 เท่าของระยะอิทธิพลของการเสียรูปในแนวระนาบและแนวดิ่งจากศูนย์กลางของโครงสร้างฐานราก ซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์เบื้องต้นสำหรับการออกแบบขนาดกล่องจำลอง รวมถึงการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบขนาดกล่องจำลองทางกายภาพให้มีความเหมาะสม ตลอดจนใช้ในการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบฐานรากเสาเข็มในสภาพดินเหนียวเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้วิเคราะห์พฤติกรรมในระยะสั้นของดินเหนียวเท่านั้น จึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวในระยะยาวเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถประเมินผลกระทบและพฤติกรรมของดินและฐานรากได้อย่างครอบคลุมและสอดคล้องกับการใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขต ศาลายา และ Kanazawa University ประเทศญี่ปุ่น ที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Horikoshi, K. and Randolph, M.F. (1998). Optimum design of piled raft foundations. *Géotechnique*, 48(3), pp.301–317.

[2] Katzenbach, R., Arslan, U. and Moormann, C. (2000). Piled raft foundation projects in Germany. In Hemsley, J.A. (Ed.), *Design and Performance of Piled Raft Foundations*. Thomas Telford Publishing, London, pp.323–391.

[3] Hoang, L.T. and Matsumoto, T. (2020). Long-term behavior of piled raft foundation models supported by jacked-in piles on saturated clay. *Soils and Foundations*, 60(1), pp.150–168. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.005

[4] Hoang, L.T., Xiong, X. and Matsumoto, T. (2024). Effect of pile arrangement on long-term settlement and load distribution in piled raft foundation models supported by jacked-in piles in saturated clay. *Soils and Foundations*, 64(1), 101426. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101426

[5] Dong, H., Zhao, Y., Jiang, X., Wang, Z. and Gao, Q.-F. (2019). Boundary effect on the hydraulic characteristics of gravelly soil slopes in physical model tests. *Journal of Hydrology*, 578(2), 124054. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124054

[6] Hassan, M.M., Van Dong, N., Delgado Falcon, S.S., Kim, D. and Choo, Y.W. (2024). Boundary effects for ESB container in dynamic centrifuge test incorporating numerical simulation. *International Journal of Civil Engineering*, 23(2). https://doi.org/10.1007/s40999-024-01033-5

[7] Ng, J.L. and Chiou, J.-S. (2024). Investigation of pile response caused by liquefied soil flow considering the boundary effects of the model. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 10(16), pp.529–533. https://doi.org/10.3208/jgssp.v10.OS-5-06

[8] Kim, H., Kim, D., Lee, Y. and Kim, H. (2020). Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model soil in 1 g shaking table test. *Applied Sciences*, 10(13):4642. https://doi.org/10.3390/app10134642

[9] Malai, A., Youwai, S., Watcharasawe, K. and Jongpradist, P. (2022). Bridge approach settlement mitigation using expanded polystyrene foam as light backfill: case study and 3D simulation. *Transportation Geotechnics*, 35, 100747. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100747

[10] Watcharasawe, K., Jongpradist, P., Kitiyodom, P. and Matsumoto, T. (2021). Measurements and analysis of load sharing between piles and raft in a pile foundation in clay. *Geomechanics and Engineering*, 24(6), pp.559–572. https://doi.org/10.12989/gae.2021.24.6.559

[11] Watcharasawe, K., Kitiyodom, P. and Jongpradist, P. (2017). 3-D numerical analysis of consolidation effect on piled raft foundation in Bangkok subsoil condition. *International Journal of GEOMATE*, 12, pp.105–111. https://doi.org/10.21660/2017.31.171202

[12] Watcharasawe, K., Kitiyodom, P. and Jongpradist, P. (2015). Numerical analyses of piled raft foundation in soft soil using 3D-FEM. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46(1), pp.109–116.

[13] Lertkulthanont, S., Phutthananon, C., Hema, N., Watcharasawe, K. and Duangsono, O. (2021). Study on the influence of side-by-side twin tunnel excavation on existing piles using 3D finite element method. *Proceedings of the 26th National Civil Engineering Conference*, pp.INF-01–INF-09.

[14] Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Croce, P. and Tornaghi, A. (1981). New developments in field and laboratory testing of soils. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, Stockholm, Vol. 1, pp.57–153.