

การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการติดตั้งบ่อเปิดคอนกรีตหน้าตัดกลม Development of analysis method of soil deformation due to installation of circular open caisson

สันติสุข ทองใบใหญ่^{1,*} พรเกษม จงประดิษฐ์¹ ชนา พุทธนันท์¹ กังวาน กานดาวรงค์² และ เอกพงศ์ รุ่งเรือง³

¹ ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมและการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

² บริษัท วิศวกรรมธรณีและฐานราก จำกัด

³ บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน)

*Corresponding author; E-mail address: suntisuk.tho@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยสภาพพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดของแต่ละเมืองทั่วโลกส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอาคารก่อสร้างได้ดินอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ความสนใจในด้านงานขุดมีเพิ่มมากขึ้นตามมา เช่น งานก่อสร้างอุโมงค์ งานติดตั้งบ่อคอนกรีต ภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่ การก่อสร้างบ่อคอนกรีตใหม่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีโครงสร้างเดิมอยู่แล้วได้ส่งผลให้โครงสร้างเดิมมีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบจากการติดตั้งบ่อคอนกรีต ดังนั้น จึงต้องมีวิธีประเมินผลกระทบที่เหมาะสม ในการศึกษาจึงมุ่งเน้นพัฒนาวิธีการจำลองการติดตั้งบ่อกลมคอนกรีตแบบเปิดที่สามารถสะท้อนการเคลื่อนตัวของดินรอบข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้าง โดยนำแบบจำลองทางกลศาสตร์-จลศาสตร์เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ และทำการสอบเทียบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองกับข้อมูลผลตรวจวัดภาคสนามของการติดตั้งบ่อกลมคอนกรีตแบบเปิดของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ จากการศึกษาพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจริงในระดับที่น่าพอใจ และยังพบว่า การเคลื่อนตัวในแนวราบนั้นจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อน ในขณะที่การทรุดตัวที่ผิวดินจะเกิดในระยะ 0.75 เท่าของความลึกบ่อคอนกรีต จากข้อสรุปที่กล่าวมานั้น แบบจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นนั้น จึงสามารถนำไปใช้ไปหนึ่งในทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ เพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้

คำสำคัญ: การติดตั้งบ่อกลมคอนกรีตแบบเปิด, การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ, แบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์, การประเมินผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบ

Abstract

At present, with the limited space in several cities around the world, the utilization of underground space rapidly increases, resulting in more attention on the excavation works (e.g.,

tunneling and caisson). Under dense urban environment, the caisson constructions unavoidably take place near the existing structures. Hence, an appropriate analysis method for impact assessment is necessary. In this study, a method to simulate the ground movement due to the installation of an actual case of circular open caisson is developed. The kinematic mechanical model is adopted for three-dimensional numerical analysis in which the dependability of the proposed model is verified through measurement data. The obtained results were found to be satisfactory with the measurement results and it was also found that the horizontal movement occurred mostly in soft clay layers, while the settlement mainly occurs within 0.75 times the depth of the caisson. From the foregoing result, the developed installation model can be used as an effective alternative for analyzing impact assessment.

Keywords: Circular open caisson installation, Three-dimensional numerical analysis, Kinematics mechanical model, Impact assessment

1. บทนำ

การพัฒนาทางด้านระบบสาธารณูปโภคในเขตเมืองใหญ่มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องวางแผนการดำเนินงานอย่างรัดกุม เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานและป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นตามมาได้ เช่น ปัญหาคมนาคม น้ำท่วม และการขาดแคลนน้ำใช้ อีกทั้งในปัจจุบันความหนาแน่นทางด้านประชากรและการขยายตัวของสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้พื้นที่ในการก่อสร้างมีอย่างจำกัด ดังนั้น การก่อสร้างได้ดินจึงเป็นอีกทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจสำหรับการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ในปัจจุบัน โครงสร้างบ่อคอนกรีตแบบเปิดเป็นอีกองค์ประกอบสำคัญในการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน เช่น สถานีสูบน้ำ ระบบท่อระบายน้ำเสีย และ

แผนผังสำหรับการขุดเจาะท่อน้ำ เป็นต้น งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดส่งผลกระทบต่อโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากสภาพเมืองที่มีความหนาแน่นมากขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบเนื่องจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดสำหรับการวางแผนก่อสร้างในอนาคต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับงานก่อสร้างใต้ดินพบว่ามีการศึกษาการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดที่น้อยมากและยังไม่ครอบคลุมกระบวนการก่อสร้างจริงในสนาม

โดยทั่วไปแล้วบ่อคอนกรีตแบบเปิดถูกสร้างขึ้นด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีลักษณะรูปร่างตัดทั้งแบบเหลี่ยมและวงกลม โครงสร้างที่มีลักษณะรูปร่างตัดแบบวงกลมเป็นที่นิยมกว่าเนื่องจากมีความแข็งแรงทางโครงสร้างสูง และไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบค้ำยันภายในบ่อ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยที่นิยมใช้เพียงน้ำหนักของตัวเองและแรงดันจากระบบไฮดรอลิกในการจมบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลม จากงานวิจัยในอดีตพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดวงกลมนั้นยังไม่ได้มีรายงานการศึกษาที่มากนัก การบันทึกกรณีศึกษาที่น่าเชื่อถือสำหรับการขุดบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมนั้นมีเพียง 18 กรณี นับตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2523–2559 [1] ดังนั้น ในการออกแบบบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมจึงนิยมใช้วิธีเชิงประมาณ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ยังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากนักและไม่เพียงพอต่อการศึกษามลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงเนื่องจากการขุดบ่อ อีกทั้งยังอาจส่งผลถึงการประมาณมูลค่าการก่อสร้างที่คลาดเคลื่อนไปจากที่ควร

การศึกษาที่ผ่านมา ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่ลำดับขั้นตอนของการติดตั้งและการบันทึกผลการเคลื่อนตัวที่เกิดจากการติดตั้งบ่อ (เช่น การทรุดตัวในแนวราบและแนวตั้ง) [2-3] แต่ในปัจจุบัน ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้างส่งผลให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ที่มีความเสี่ยงที่จะสร้างผลกระทบต่อโครงสร้างรอบข้าง เพราะเหตุนี้ การประเมินผลกระทบเนื่องจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลม จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก วัตถุประสงค์หลักของงานศึกษานี้คือการพัฒนาวิธีการจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมโดยคำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างจริงในสนาม ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ และสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลผลตรวจวัดภาคสนามของโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

วิธีการจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลม ในการศึกษา นี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางกลศาสตร์-จลศาสตร์ (Kinematic-Mechanical Model) [4] โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข Plaxis 3D และสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลตรวจวัดภาคสนามของโครงการอุโมงค์ส่งน้ำตามแนวนอนทางอุทกศาสตร์ ซึ่งเป็นบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 เมตร และภายนอกเท่ากับ 12 เมตร มีระดับความลึกอยู่ที่ 38 เมตรจากผิวดิน โดยในการก่อสร้างจริงจะทำการก่อสร้างขึ้นส่วนคอนกรีตที่มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 2 เมตรต่อชั้น ที่ผิวดิน การติดตั้งใช้น้ำหนักของตัวบ่อในการ

จมจนถึงระดับที่ไม่สามารถจมต่อได้ หลังจากนั้นจึงใช้แรงจากระบบไฮดรอลิกในการผลักดันตัวบ่อให้จมไปยังระดับที่ออกแบบไว้ร่วมด้วยกับการขุดดินในบ่อออก สำหรับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำมีการติดตั้งอุปกรณ์การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Inclinometer) ในดินที่ระยะห่างจากขอบบ่อประมาณ 3 เมตร เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินระหว่างก่อสร้าง

2.1 แบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์ (Kinematic-Mechanical Model)

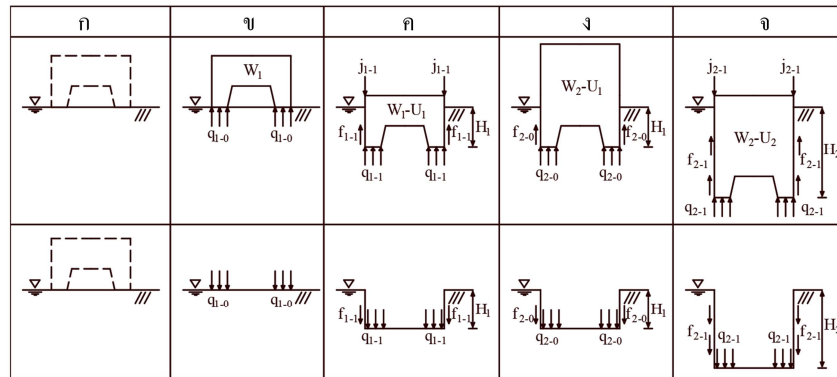
เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่สามารถจำลองการจมของบ่อคอนกรีตได้เหมือนจริงทั้งหมด แบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์ จึงเป็นวิธีศึกษาที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกเหนือจากนี้ จากผลการตรวจวัดการเอียงตัวของกริดติดตั้งบ่อคอนกรีตพบว่ามีการเอียงตัวขณะทำการติดตั้งบ่อเกิดขึ้นน้อยมาก [2-3] แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จึงไม่พิจารณาถึงการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของบ่อ ดังนั้น ขั้นตอนการจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตในการศึกษานี้จึงจำกัดการเคลื่อนตัวตามแนวรัศมีของบ่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่จากสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตจะประกอบไปด้วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งเท่านั้นดังแสดงใน รูปที่ 1 โดยที่รูปในแถวบนแสดงแรงภายนอกที่กระทำกับตัวบ่อคอนกรีต ในขณะที่รูปในแถวล่างแสดงแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากดินบริเวณโดยรอบบ่อคอนกรีต โดยที่ลำดับขั้นตอนของการติดตั้งบ่อคอนกรีตจะแสดงตามลำดับของการเพิ่มขึ้นของแรง ตั้งแต่ ก (ก่อนการติดตั้งบ่อคอนกรีต) ไปจนถึง ง (การติดตั้งและจมลงของบ่อคอนกรีต) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะแสดงถึงสถานะความเค้นในแต่ละช่วงของการก่อสร้างบ่อคอนกรีต โดยที่ขั้นตอน ก จะแสดงถึงสถานะความเค้นเริ่มต้น ก่อนการหล่อและติดตั้งบ่อคอนกรีต

ขั้นตอน ข จะเป็นจุดเริ่มต้นของการหล่อบ่อคอนกรีตบนผิวดินก่อนที่จะทำการจม จากสภาวะสมดุล น้ำหนักของตัวบ่อ (W_1) จะมีค่าเท่ากับแรงแบกทานของดิน (Q_1) ที่กระทำต่อดินที่บริเวณด้านล่างของบ่อ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$W_1 = Q_{1-0} = \int q_{1-0} dA \quad (1)$$

เมื่อ A_1 คือบริเวณพื้นที่สัมผัสของตัวบ่อการจมกับผิวดิน และ q_{1-0} คือหน่วยแรงแบกทานที่กระทำกับตัวบ่อคอนกรีต ณ ความลึกนั้น ๆ ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนของแรงแบกทานรวม (Q_{1-0}) ถัดมา ขั้นตอน ค จะแสดงขั้นตอนของการจมบ่อคอนกรีตลงไปยังระดับที่กำหนด (H_1) ด้วยแรงเสริมจากระบบไฮดรอลิก (J_1) (ในกรณีที่น้ำหนักของตัวเองไม่เพียงพอต่อการติดตั้งให้ถึงระดับความลึกที่ออกแบบไว้) และในขั้นตอนนี้ ตัวบ่อคอนกรีตจะถูกพิจารณาว่าจมลงไถ่ผิวดิน ทำให้จำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดจากระดับน้ำใต้ดิน (U_1) ด้วยเช่นกัน ดังนั้น จากสภาวะสมดุล จะสามารถเขียนสมการในขั้นตอน ค ได้ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$W_1 + J_1 - U_1 = F_{1-1} + Q_{1-1} = \int f_{1-1} dA_2 + \int q_{1-1} dA \quad (2)$$



รูปที่ 1 แบบจำลองกลศาสตร์-จุลศาสตร์

เมื่อ A_2 คือบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสโดยรอบตัวบ่อคอนกรีตด้านนอก (ในกรณีที่ยังไม่ได้ทำการขุดดินภายในบ่อคอนกรีตจะต้องพิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสภายในด้วย) f_{1-1} คือหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนของแรงเสียดทานทั้งหมด (F_{1-1}) ที่เกิดขึ้นในชั้นตอนนี้ เช่นเดียวกับค่าของแรงแบกทานทั้งหมด (Q_{1-1}) ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความลึกที่มากขึ้น ลำดับถัดไปคือชั้นตอน ง จะแสดงชั้นตอนหลังจากการจมชั้นส่วนแรกของบ่อคอนกรีต

หลังจากนั้นจะทำการหล่อชั้นส่วนบ่อคอนกรีตถัดไปที่ด้านบนของชั้นส่วนแรก ดังนั้น ค่าของ q_{2-0} และ Q_{2-0} จะเป็นค่าของแรงแบกทานที่เพิ่มขึ้นจาก W_1 เป็น W_2 เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของบ่อคอนกรีตจากชั้นตอน ค โดยในขณะที่ทำการหล่อติดตั้งบ่อคอนกรีต จะไม่พิจารณาการใช้แรงเสริมของระบบไฮดรอลิก ดังนั้น แรงภายนอกที่กระทำกับตัวบ่อคอนกรีตจะประกอบไปด้วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของบ่อคอนกรีต และแรงลอยตัวเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$W_2 - U_1 = F_{2-0} + Q_{2-0} = \int f_{2-0} dA_2 + \int q_{2-0} dA_1 \quad (3)$$

เช่นเดียวกันกับชั้นตอน ค ในชั้นตอน จ นั้น จะทำการเพิ่มหน่วยแรงของ $J_2, U_2, F_{2-1}, Q_{2-1}, f_{2-1}$ และ q_{2-1} ให้สอดคล้องกับระดับความลึกที่ได้ทำการจมตัวบ่อคอนกรีตลงไปแล้ว ดังนี้

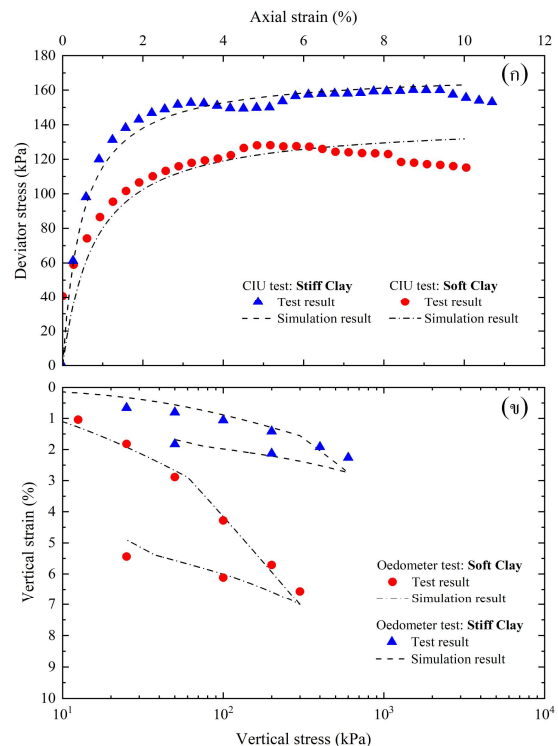
$$W_2 + J_2 - U_2 = F_{2-1} + Q_{2-1} = \int f_{2-1} dA_2 + \int q_{2-1} dA_1 \quad (4)$$

หลังจากนั้นดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับชั้นส่วนถัด ๆ ไปจนกระทั่งสามารถติดตั้งตัวบ่อคอนกรีตได้ถึงระดับความลึกที่ออกแบบไว้

2.2 ชั้นดินและสมบัติวัสดุ

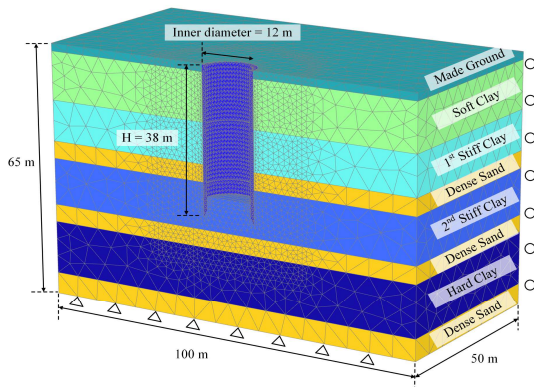
การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดินแบบฮาร์ดเทนนิ่ง (Hardening Soil Model) เพื่อจำลองพฤติกรรมของดินซึ่งประกอบไปด้วย ชั้นดินถม (MG), ชั้นดินเหนียวอ่อน (SC), ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 และ 2 (1ST และ

2ST), ชั้นทรายแน่น (DS) และชั้นดินแข็งมาก (HC) โดยสมบัติของดิน SC และ 1ST ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ใช้ผลทดสอบตัวอย่างดินจากชั้นดินในโครงการในการแปลผลและสอบเทียบสมบัติโดยการทดสอบกำลังของดินแบบสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Triaxial Test) และการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer Test) ดังแสดงในรูปที่ 2 พารามิเตอร์ของชั้นดิน MG, DS, 2ST และ HC อ้างอิงมาจากการวิจัยก่อนหน้า [5] ดังแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของสมบัติของและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างบ่อคอนกรีตจะประยุกต์ใช้แบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Model) และอ้างอิงสมบัติของคอนกรีตจากการวิจัยก่อนหน้านี้นี้ [6] ดังแสดงในตารางที่ 2

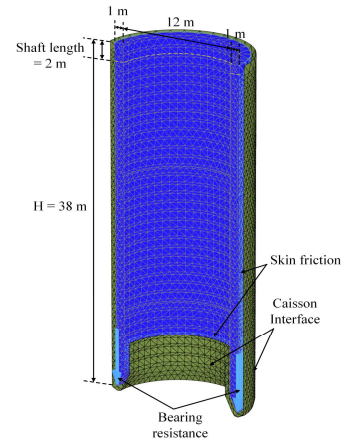


รูปที่ 2 ผลการสอบเทียบสมบัติดิน

(n) Undrained triaxial test (ข) Oedometer test



รูปที่ 3 ชั้นดินและขอบเขตของแบบจำลอง



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของแบบจำลองป่อคอนกรีต

ตารางที่ 1 สมบัติของดิน

Parameters	Unit	Soil layers					
		MG	SC	1ST	DS	2ST	HC
E_{50}^{ref}	MPa	45.6	3.8	6.7	38.0	8.5	30.0
E_{oed}^{ref}	MPa	45.6	3.8	6.7	38.0	9.0	30.0
E_{ur}^{ref}	MPa	136.8	11.5	24.0	115.0	30	120.0
γ'	kN/m ³	8.2	6.8	9.2	9.2	10.2	10.2
ν'	(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ϕ'	degree	25	23	24	27	26	24
c'	kPa	1	1	13	1	25	40
R_f	(-)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

หมายเหตุ: ความลึกชั้นดิน MG = 0-2 เมตร, SC = 2-14.5 เมตร, 1ST = 14.5-25 เมตร, DS = 25-29.5, 41.5-46 เมตร, 2ST = 29.5-41.5 เมตร และ HC = 46-59.5 เมตร

ตารางที่ 2 สมบัติและลักษณะทางกายภาพของป่อคอนกรีต

Parameters	Value	Unit
External diameter	7.00	m
Internal diameter	6.00	m
Cutting shoe slope	2.125	(-)
Material weight	0.00	kN/m ³
Young's modulus ^a	35×10^6	kN/m ²
Poisson's ratio ^a	0.20	(-)

^aอ้างอิงข้อมูลจาก Soomro et al. [6]

ตารางที่ 3 แรงแบกทานและแรงเสียดทาน

ชั้นดิน	ความลึก (m)	แรงแบกทาน ^a (kPa)	แรงเสียดทาน ^a (kPa)
Made Ground	-2	50	5
Soft Clay	-14	56	10
1 st Stiff Clay	-24	345	25
Dense Sand	-30	1450	56
2 nd Stiff Clay	-38	700	50

^aประยุกต์ใช้สมการที่นำเสนอโดย Terzaghi [7]

2.3 การประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Plaxis 3D

ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างป่อคอนกรีตถูกนำมาจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติ Plaxis 3D และจำลองสถานะความเค้นให้เหมาะสม โดยจำลองค่าหน่วยแรงเสียดทาน (f_s) ที่บริเวณโดยรอบของโครงสร้างป่อผ่านอินเตอร์เฟซเอลิเมนต์ และค่าแรงแบกทาน (q_u) ที่บริเวณผิวสัมผัสดินด้านล่างของป่อด้วยการกำหนดค่าหน่วยแรงต่อพื้นที่หน้าตัด โดยจะใช้ค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลำดับชั้นของการก่อสร้างและความลึกที่ทำการถม โดยสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณนั้นได้ถูกนำเสนอโดยผู้เชี่ยวชาญหลายท่าน [7-9] ซึ่งการศึกษานี้เลือกประยุกต์ใช้สมการที่นำเสนอโดย Terzaghi [7] ในการคำนวณค่าของแรงแบกทานและแรงเสียดทานที่ขึ้นอยู่กับสมบัติของดินในแต่ละชั้นตามที่แสดงในตารางที่ 1 นอกเหนือจากนั้น เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง จึงพิจารณากำหนดระดับน้ำใต้ดินไว้ที่ระดับล่างสุดของแบบจำลองและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างดินจะพิจารณาจากหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้น ดังนั้น สมบัติของดินที่ใช้ในแบบจำลองจะอยู่บนพื้นฐานของสมบัติประสิทธิผลดังแสดงในตารางที่ 3 และเนื่องจากสมมติฐานของแบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์ที่พิจารณานั้นกำหนดแรงปฏิกิริยาภายนอกเพื่อจำลองแรงที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งป่อคอนกรีต ดังนั้น ในแบบจำลองจึงไม่พิจารณาหน่วยน้ำหนักของโครงสร้างป่อคอนกรีต

แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยระบบสมมาตรบริเวณจุดศูนย์กลางของป่อคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ขอบเขตในแนวตั้งของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 1.5 เท่าของความลึกของป่อคอนกรีต และมีค่าเท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของป่อคอนกรีตในแนวราบ [3] โดยเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนที่ของแบบจำลองในระนาบที่ตั้งอยู่ทั้งหมดถูกยึดไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ ส่วนระนาบในแนวนอนของขอบด้านล่างถูกยึดไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง

การจำลองป่อคอนกรีต จะจำลองขึ้นตามขนาดทางกายภาพจริง โดยใช้เอลิเมนต์แบบปริมาตรที่ไร้น้ำหนักตั้งที่กล่าวข้างต้น และกำหนดลักษณะพฤติกรรมแบบที่บีบอัดได้ ประกอบขึ้นจากชั้นส่วนที่มีความลึก 2 เมตร

จำนวน 19 ชั้น และควบคุมค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างบ่อคอนกรีตกับดินโดยรอบเท่ากับ 0.5 เพื่อจำลองสภาวะการก่อสร้างจริงที่มีการเติมสารละลายเบนโทไนต์เพื่อลดแรงเสียดทานจากดิน [10] นอกจากนี้เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น อินเตอร์เฟซเอลิเมนต์จะถูกสร้างขึ้นตามลักษณะทางกายภาพของบ่อคอนกรีต และเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้น ความยาวของอินเตอร์เฟซเอลิเมนต์จะถูกยื่นออกจากบ่อคอนกรีตเป็นระยะ 0.1 เท่าของความหนาของบ่อคอนกรีต หรือเท่ากับ 0.1 เมตร [11] และหน่วยแรงประสิทธิผลจากแรงแบกทานและแรงเสียดทานจะถูกกระทำผ่านอินเตอร์เฟซเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4

2.4 ลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง

เพื่อให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและสอดคล้องกับการก่อสร้างจริง ลำดับของการก่อสร้างวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกกำหนดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยในช่วงแรกของการติดตั้ง บ่อคอนกรีตจะสามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง โดยที่ไม่พิจารณาการขุดดินภายในบ่อออก และเริ่มทำการขุดภายในบ่อคอนกรีตออกจนถึงใช้แรงดันระบบไฮดรอลิกเข้าช่วยเมื่อจมถึงระดับครึ่งหนึ่งของชั้นดินเหนียวอ่อน (ที่ระดับ 10 เมตร) ดังนั้น แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาจะกำหนดความลึกของการจมแต่ละลำดับครั้งละ 1 เมตร เพื่อให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการจมบ่อคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยลำดับการก่อสร้างของแบบจำลอง จะถูกกำหนดดังต่อไปนี้

1. สร้างสภาวะเริ่มต้นของแบบจำลอง (Initial stage)
2. เปิดใช้งานในส่วนของโครงสร้างบ่อคอนกรีตที่ละ 1 เมตร จนถึงความลึก 10 เมตร โดยที่ยังคงดินภายในบ่อไว้เช่นเดิม (Phase 1-8)
3. ปิดการใช้งานดินภายในบ่อจนถึงระดับความลึกเท่ากับ 7.3 เมตร (Phase 9)
4. เปิดใช้งานในส่วนของโครงสร้างบ่อคอนกรีตที่ละ 1 เมตร จนถึงความลึก 11 เมตร โดยที่ยังคงดินภายในบ่อไว้เช่นเดิม (Phase 10)

5. เปิดใช้งานในส่วนของโครงสร้างบ่อคอนกรีตที่ละ 1 เมตร จนถึงความลึก 12 เมตร โดยที่ยังคงดินภายในบ่อไว้เช่นเดิม (Phase 11)
6. ปิดการใช้งานดินภายในบ่อจนถึงระดับความลึกเท่ากับ 9.3 เมตร (Phase 12)

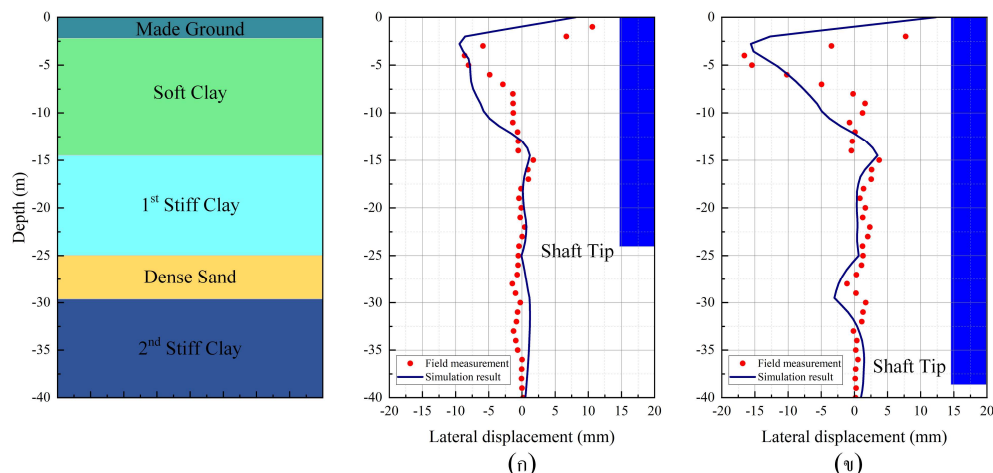
หลังจากนั้นดำเนินการในขั้นตอนที่ 4-6 จำแนกระดับความลึกสุดท้ายของบ่อคอนกรีตที่ระดับ 38 เมตร

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

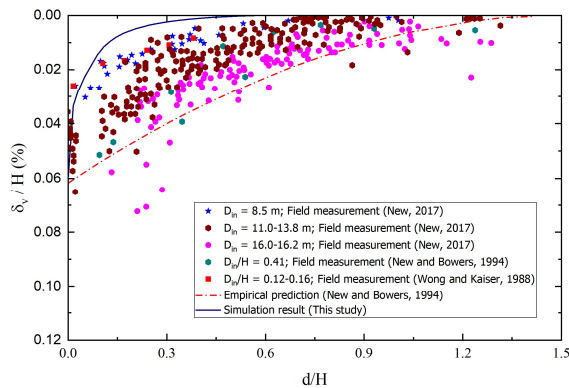
ผลการการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์จะถูกนำมาสอบเทียบกับผลข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบจากอุปกรณ์ Inclinator ที่ติดตั้งระยะห่างจากผนังบ่อคอนกรีตประมาณ 3 เมตร โดยลึกจากระดับดินผิวดิน 40 เมตร

3.1 การเคลื่อนตัวในแนวราบ

รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับผลการตรวจวัดภาคสนาม ทั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้างเสร็จสิ้น สัญลักษณ์เครื่องหมายแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนตัวของดิน โดยค่าการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบที่เป็นบวกแสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางเข้าหาบ่อคอนกรีต และค่าการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบที่เป็นลบแสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางออกจากบ่อคอนกรีต จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าของการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากผลตรวจวัดภาคสนามทั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้างเสร็จสิ้น จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ความลึกไม่เกิน 2 เมตรจากระดับผิวดิน ทิศทางการเคลื่อนตัวของดินจะเป็นในลักษณะเคลื่อนที่เข้าหาตัวบ่อ เนื่องจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการจมบ่อและสมบัติของดิน ณ ระดับลึกลงไปชั้นดินเหนียวอ่อน ทิศทางการเคลื่อนของดินจะเกิดในลักษณะเคลื่อนออกจากตัวบ่อ เนื่องจากจากผลของการบีบตัวของดิน ซึ่งเป็นผลมาจากวิธีการติดตั้งด้วยระบบไฮดรอลิก [12]



รูปที่ 5 การสอบเทียบค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของดิน (ก) ระหว่างการก่อสร้าง (ข) หลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ



รูปที่ 6 การสอบเทียบค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

ซึ่งนอกจากจะทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวออกในแนวด้านข้างแล้วยังส่งผลให้เกิดการดูดขึ้นของดินภายในตัวบ่อเช่นกัน โดยที่ผลกระทบจากการบีบตัวของดินจะปรากฏให้เห็นชัดเจนในชั้นดินเหนียวอ่อนและลดน้อยลงเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น หากการติดตั้งบ่อเกิดขึ้นบนชั้นดินเหนียวที่ไม่มีการถมดินก่อน จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินออกจากตัวบ่อในแนวราบมากกว่าปกติเล็กน้อยเนื่องจากไม่มีดินถมที่คอยยึดรั้งหน้าดินไว้ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ายังคงมีความไม่สอดคล้องระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลการตรวจวัด ที่อาจเกิดได้จากความแปรปรวนจากสมบัติของดินที่ความลึกเพิ่มมากขึ้นหรือปัจจัยจากการก่อสร้างอื่นที่คลาดเคลื่อนไปจากการก่อสร้างจริง ยกตัวอย่างเช่น การขุดรักษาระดับดินภายในบ่อ การเอียงตัวของบ่อระหว่างก่อสร้างและติดตั้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับข้อมูลผลตรวจวัดภาคสนาม อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่พัฒนาในการศึกษานี้ยังคงให้ค่าของการเคลื่อนตัวที่มากกว่าข้อมูลของผลตรวจวัดภาคสนามเล็กน้อย ซึ่งนำไปสู่การตีความได้ว่าผลของแบบจำลองนี้มีความปลอดภัยสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบและประเมินผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างจริง

3.2 การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

ผลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ผิวดินที่ได้จากการศึกษานี้จะถูกนำเสนอในรูปที่ 6 ร่วมกับผลตรวจวัดภาคสนามและผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวตั้งจากงานวิจัยก่อนหน้า [13-15] ที่ได้นำเสนอผลการตรวจวัดและทำนายลักษณะการเคลื่อนตัวของดินในแนวตั้งของก่อสร้างบ่อคอนกรีตแบบเปิดในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนการทรุดตัวในดิ่งต่อความลึกของบ่อคอนกรีต (δ_v/H) และระยะห่างจากผนังของบ่อคอนกรีตต่อความลึกของบ่อ (d/H) จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของดินในแนวตั้งที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับผลตรวจวัดภาคสนามจากโครงการที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน มากไปกว่านั้น จากผลการศึกษาที่ยังพบว่าบริเวณผลกระทบในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับประมาณ 0.75 เท่าของความลึกของบ่อคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับแบบประเมินผลกระทบจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตที่นำเสนอโดย Clough and

O'Rourke [16] ดังนั้น กระประยุกต์ใช้แบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์สำหรับการจำลองขั้นตอนการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการประเมินลักษณะการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิด โดยนำแบบจำลองกลศาสตร์-จลศาสตร์เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. แบบจำลองการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลมที่พัฒนามีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปเป็นตัวเลือกสำหรับการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งบ่อคอนกรีต
2. การเคลื่อนตัวของดินจากบ่อของดินในแนวราบจะเกิดขึ้นมากในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากผลของการบีบตัวของดินที่เกิดจากการติดตั้งด้วยระบบไฮดรอลิกและลดน้อยลงตามความลึกที่เพิ่มมากขึ้น
3. บริเวณผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินในแนวตั้งจากการติดตั้งบ่อคอนกรีตแบบเปิดหน้าตัดกลม จะอยู่ในช่วงระยะ 0.75 เท่าของความลึกของบ่อคอนกรีต

แม้ว่าการศึกษานี้สามารถนำเสนอแบบจำลองที่น่าพึงพอใจ แต่ในการก่อสร้างจริงยังมีปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อการประเมินผลกระทบ ดังนั้นในอนาคตจึงควรพัฒนาแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อการประเมินผลกระทบด้วย เช่น การเอียงตัวของบ่อ การรักษาระดับดินภายในบ่อขณะก่อสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประเมินสมการคำนวณแรงแบกทานและแรงเสียดทานจากทฤษฎีอื่นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2566 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูง สำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Long, M. (2001). Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, pp. 203-224.
- [2] Royston, R., Sheil, B. and Byrne, W. (2022). Monitoring the construction of a large-diameter caisson in sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 175, pp. 323-339.
- [3] Schwamb, T. and Soga, K. (2015). Numerical modelling of a deep circular excavation at Abbey Mills in London. *Geotechnique*, 65, pp. 604-619.

- [4] Lai, F., Liu, S., Deng, Y., Sun, Y., Wu, K. and Liu, H. (2020). Numerical investigations of the installation process of giant deep-buried circular open caissons in undrained clay. *Computers and Geotechnics*, 118, pp. 103322.
- [5] Likitlersuang, S., Surarak, C., Suwansawat, S., Wanatowski, D., Oh, E. and Balasubramaniam, A. (2014). Simplified finite-element modelling for tunneling-induced settlements. *Geotechnical Research*, 1, pp. 133-152.
- [6] Soomro, M., Ng, C., Liu, K. and Memon, N. (2017). Pile responses to side-by-side twin tunnelling in stiff clay: effects of different tunnel depths relative to pile. *Computers and Geotechnics*, 84, pp. 101-116.
- [7] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [8] Mayerhof, G.G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, 2, pp. 301-332.
- [9] Skempton, A.W. (1951). The bearing capacity of clays. *Proceeding of Building Research Congress*, pp. 50-59.
- [10] Ko, J., Jeong, S. and Lee, J.K. (2016). Large deformation FE analysis of driven steel pipe piles with soil plugging. *Computers and Geotechnics*, 71, pp. 82-97.
- [11] Peng, F.L., Wang, H.L., Tan, Y., Xu, Z.L. and Li, Y.L. (2011). Field measurements and finite-element method simulation of a tunnel shaft constructed by pneumatic caisson method in Shanghai soft ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, pp. 516-524.
- [12] Shao, Y., Wang, S. and Guan, Y. (2016). Numerical simulation of soil squeezing effects of a jacked pipe pile in soft foundation soil and in foundation soil with an underlying gravel layer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, pp. 493-499.
- [13] New, B.M. (2017). Settlements due to shaft construction. *Tunnels and Tunnelling International*, September, pp. 16-17.
- [14] Wong, R. and Kaiser, P. (1988). Behaviour of vertical shafts: reevaluation of model test results and evaluation of field measurements. *Canadian Geotech Journal*, 25, pp. 338-352.
- [15] New, B.M. and Bowers, K.H. (1994). Ground movement model validation at the Heathrow Express trial tunnel. *Tunnelling'94*. Springer, Boston, MA, pp. 301-329.
- [16] Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. (1990). Construction induced movements of instu walls. *Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE, New York, pp. 439-470.