

การประยุกต์ใช้ XGBoost เพื่อทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่อง Application of XGBoost for Predicting Bearing Capacity of Open Caissons

พัชรพร ยงพิศาลภพ^{1,*} และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: gpyongpisanpop@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หากล้างรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องแบบเปิดในดินทรายแน่นที่ใช้เกณฑ์การวิบัติด้วยหลักการของ Bolton โดยใช้ทฤษฎีขอบเขตบนและขอบเขตล่างของไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์หาลิมิต (FELA) ในการวิเคราะห์และเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินทรายแน่น แบบจำลอง Bolton ทำการศึกษาระหว่างความเค้นและการขยายตัวโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินทรายแน่นและนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษาในครั้งนี้ มีการนำแบบจำลอง XGBoost ที่เป็นการรวมผลการทำนายจากต้นไม้การเรียนรู้ (Decision Tree) หลาย ต้น เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำ โดยในแต่ละรอบต้นไม้จะพยายามแก้ไขข้อผิดพลาดของต้นไม้ก่อนหน้า เพื่อใช้ในการทำนายผลกำลังรับแรงแบกทานของปัญหาดังกล่าว การทำนายวัดผลความแม่นยำของการใช้แบบจำลอง XGBoost ด้วยวิธีการวัดผลทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย, ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 0.99, 1.61 และ 10.03 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าการทำนายผลกำลังรับแรงแบกทานโดยใช้การจำลอง XGBoost ให้ผลเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับผลกำลังรับแรงแบกทานจากการใช้วิธี FELA

คำสำคัญ: ฐานรากปล่องแบบเปิด, กำลังรับแรงแบกทาน, แบบจำลอง Bolton, XGBoost

Abstract

This article presents an analysis of the bearing capacity of open caisson foundations embedded in dense sand, employing Bolton's failure criterion. The analysis is conducted using the finite element limit analysis (FELA) method, incorporating both upper and lower bound theorems, to gain insight into the behavior of dense sand. Bolton's model can be used to investigate the relationship between strength and dilatancy to understand the behavior of dense sand and open caisson foundations. The accuracy of the study is confirmed by comparing the findings of this analysis with past studies. Furthermore, the XGBoost model, an ensemble learning technique that aggregates predictions from multiple decision trees, is employed to enhance prediction accuracy. In each iteration, the trees attempt to correct the errors of the preceding trees, thereby improving the reliability of the model in predicting

the bearing capacity of caisson foundations. The accuracy of using the XGBoost model is multiple weak learning algorithms are trained, and a strong learner algorithm is used as a final model, including the coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), and root mean squared error ($RMSE$), with values of 0.99, 1.61, and 10.03, respectively. These data show that XGBoost's predictions are in good agreement with the bearing capacity results using the FELA approach.

Keywords: Open caisson foundation, Bearing capacity, Bolton model, XGBoost

1. คำนำ

ฐานรากปล่องแบบเปิด (Open Caisson Foundation) เป็นฐานรากที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 เมตร มักใช้เป็นฐานรากสำหรับการถ่ายโอนโครงสร้างที่มีน้ำหนักมากลงไปยังชั้นดินที่มีความสามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ โดยเฉพาะในโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น สะพาน อาคารถูกขนาดใหญ่ และโครงสร้างอื่นๆ ที่ต้องมีการขุดชั้นดิน ซึ่งต้องการความมั่นคงและการถ่ายแรงที่มีประสิทธิภาพไปยังชั้นดินด้านล่าง

ลักษณะเด่นของฐานรากปล่องแบบเปิด คือ โครงสร้างกลวงที่เปิดทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยมีก้นแบบให้ปลายฐานรากลาดเอียงเพื่อช่วยลดแรงต้านระหว่างการกดปล่อง การติดตั้งฐานรากปล่องเริ่มจากการวางฐานรากบนพื้นผิวดินและกดลงในดินโดยใช้น้ำหนักของโครงสร้างเอง หรือเพิ่มแรงจากบัลลัสต์ (Ballasts) หรือระบบไฮดรอลิก (Hydraulic jack) การขุดดินภายในปล่องดำเนินการไปพร้อมกับการกดลง ซึ่งต้องควบคุมแรงดันดินด้านข้างเพื่อป้องกันการเสียรูปของปล่อง ข้อดีของการสร้างฐานรากปล่อง สามารถรับน้ำหนักแนวด้านข้างได้ดี มีความประหยัดในด้านการติดตั้งเนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรากแบบเดิม ขั้นตอนและอุปกรณ์ในการติดตั้งมีราคาที่สูง ระยะเวลาในการติดตั้งใช้เวลานาน

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์หากล้างรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องในดินทรายแน่นโดยใช้หลักการของ Bolton ในการหาผลเฉลยดังกล่าวใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์หาลิมิตด้วยโปรแกรม Optum G2 ร่วมกับการทำนายผลเฉลยจากการวิเคราะห์ปัญหา โดยการนำแบบจำลอง XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) ที่มีประสิทธิภาพสูง มีความยืดหยุ่น และสามารถปรับขนาดได้ดี เหมาะสมกับการจัดการข้อมูลขนาดใหญ่และปัญหาที่มีความซับซ้อน มาใช้งานเพื่อตรวจสอบความแม่นยำ

2. พฤติกรรมของดินทรายแน่นและการวิเคราะห์ด้วยหลักการของ Bolton

2.1 พฤติกรรมของดินทรายแน่น

พฤติกรรมของดินทรายแน่นโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับระดับความเค้นที่ได้รับ ในกรณีที่ได้รับความเค้นต่ำดินทรายแน่นจะเกิดการขยายตัว โดยการเพิ่มขึ้นของความเค้นร่วมกับความเครียดหลักจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาตร ทำให้เกิดค่าความเค้นสูงสุดและค่ามุมเสียดทานภายในที่วัดได้ในตำแหน่งนี้ เรียกว่า มุมเสียดทานที่จุดสูงสุด (Peak Friction Angle) และจะหยุดขยายตัวเมื่อการเพิ่มขึ้นของความเครียดหลักไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของดิน ค่ามุมเสียดทานภายในที่วัดได้ในตำแหน่งนี้ เรียกว่า มุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (Critical-State Friction Angle) โดยทั่วไปเกณฑ์การวิบัติของดินที่ถูกนิยามใช้ คือ หลักการของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) และสำหรับหลักการของ Bolton จะใช้เกณฑ์การวิบัติคล้ายหลักการของมอร์-คูลอมบ์ เพียงแต่หลักการของ Bolton คำนึงถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นว่าระดับของหน่วยแรงกระทำและความหนาแน่นของดินสามารถส่งผลต่อค่ามุมเสียดทานภายในของดินได้

2.2 หลักการวิเคราะห์ของ Bolton

จากการศึกษาของ Bolton [1] ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการขยายตัวของดินทราย โดยความสัมพันธ์ของหลักการ Bolton ได้จัดเตรียมการหามุมเสียดทานภายในและมุมการขยายตัวอยู่ในรูปแบบของระดับความเค้นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน ดังแสดงในสมการที่ (1)-(2)

$$\phi_B = \phi_{CV} + bI_R \quad (1)$$

$$I_R = I_D(Q - \ln p) - R \quad (2)$$

โดย ϕ_B คือ มุมเสียดทานภายในรวม, ϕ_{CV} คือ มุมเสียดทานในจุดครีติกอล, b คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับแก้มุม โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดสอบ จากคำแนะนำของ Bolton ได้กำหนดให้ $b = 3$ สำหรับการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression) และ $b = 5$ สำหรับการทดสอบแบบระนาบความเครียด (Plane strain), I_R คือ ค่าบ่งชี้การขยายตัว, I_D คือ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์, Q คือ ค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ โดย Bolton แนะนำให้ $Q = 10$ สำหรับแร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar), $Q = 8$ สำหรับหินปูน (Limestone), $Q = 5.5$ สำหรับหินชอล์ก (Chalk), p คือ ค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress) และ R คือ พารามิเตอร์ของ Bolton โดยแนะนำอยู่ที่ 1

3. วิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิตและ การใช้ XGBoost

ศึกษาวิธีการใช้งานซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิตใน OPTUM G2 โดยศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค

สร้างแบบจำลอง กำหนดลักษณะทางกายภาพของปัญหาที่ศึกษา รวมทั้งกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในชั้นดินและโครงสร้างที่ต้องการศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis)
(1) กำหนดข้อมูลชั้นดินด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเลือกใช้แบบจำลอง Bolton
(2) ทำการวิเคราะห์ปัญหาตามแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ OPTUM G2 ตามเงื่อนไขขอบเขตและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด
(3) แปลงค่าแรงวิบัติที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับปัญหาที่ศึกษาเป็นค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity Factor)

นำค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity Factor) มาทำการตรวจสอบความแม่นยำด้วย XGBoost (eXtreme Gradient Boosting)

รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1 Finite element limit analysis (FELA)

วิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต [9] เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นส่วนย่อย (Element) และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยมีจุดต่อร่วมกัน (Node) ร่วมกับการวิเคราะห์ลิมิต โดยใช้ทฤษฎีขอบบน (Upper Bound Analysis) ที่อาศัยการวิเคราะห์ด้วยหลักของงานและพลังงานโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขสมดุล โดยเลือกรูปแบบการวิบัติจลน์ที่เหมาะสม และขอบล่าง (Lower Bound Analysis) ที่อาศัยหลักการเงื่อนไขสมดุลด้วยวิธีสนามความเค้น โดยพิจารณาเงื่อนไขระหว่างความเค้นภายในมวลดินและแรงกระทำภายนอกอยู่ในสภาวะสมดุลกัน โดยที่ไม่เกินเงื่อนไขคราก นำวิธีการดังกล่าว มาใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาต่างๆในงานทางด้านธรณีเทคนิค

3.2 XGBoost (eXtreme Gradient Boosting)

XGBoost [3,5] เป็นการรวมกันของต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) ที่อิงตามแนวคิดของ Gradient Boosting ซึ่งออกแบบมาให้มีประสิทธิภาพสูง มีความยืดหยุ่น และสามารถปรับขนาดได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่และปัญหาที่มีความซับซ้อน XGBoost จะสร้างการขยายเพิ่มของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) โดยการลดฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss Function Minimization) เนื่องจาก XGBoost มุ่งเน้นที่การใช้ต้นไม้ตัดสินใจเป็นตัวแทนพื้นฐานเท่านั้น จึงมีการปรับแต่งฟังก์ชันการสูญเสียเพื่อควบคุมความซับซ้อนของต้นไม้ ดังสมการ (3)-(4)

$$L_{xgb} = \sum_{i=1}^N L(y_i, F(x_i)) + \sum_{m=1}^M \Omega(h_m) \quad (3)$$

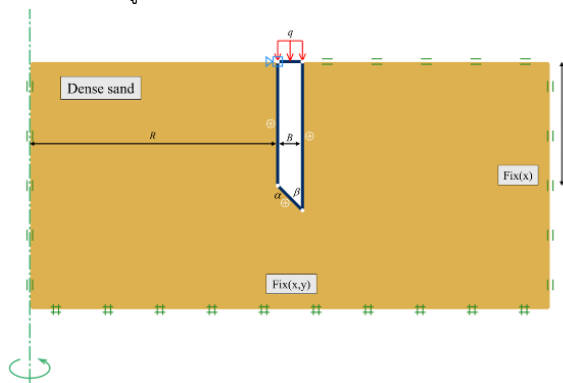
$$\Omega(h) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|\omega\|^2 \quad (4)$$

เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง มีความยืดหยุ่น และสามารถปรับขนาดได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่และปัญหาที่มีความซับซ้อน มีการใช้เทคนิคการไล่ระดับแบบเพิ่มประสิทธิภาพ (Gradient Boosting) เป็นการรวมผลการทำนายจากต้นไม้การเรียนรู้ (Decision Tree) หลายๆ ต้นเข้าด้วยกันเพื่อ

เพิ่มความแม่นยำ โดยในแต่ละรอบต้นไม้จะพยายามแก้ไขข้อผิดพลาดของต้นไม้ก่อนหน้า มีการปรับปกติ (Regularization) เพื่อลดความซับซ้อนของต้นไม้การเรียนรู้และป้องกันการเกิด overfitting และมีการประมวลผลแบบขนาน (Parallel Processing) ทำให้สามารถฝึกต้นไม้การเรียนรู้ได้อย่างรวดเร็ว และมีการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนด้วย Cross Validation โดยแบ่งเป็นข้อมูลการฝึก (Train) 0.7 และทดสอบ (Test) 0.3

4. ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห้ลิมิตด้วยโปรแกรม OPTUM G2 [6] ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของฐานรากปล่องภายใต้สภาวะระนาบความเครียดโดยการจำลองการวิเคราะห์จะแสดงเพียงครั้งเดียว จากการใช้ประโยชน์เรื่องความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองฐานรากปล่องในดินทรายแน่นด้วยโปรแกรม Optum G2

4.1 แบบจำลองของดินทรายแน่นและฐานราก

จำลองวัสดุเป็นแบบดินทรายแน่นที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของดินทรายแน่นด้วยแบบจำลองของ Bolton จากที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.2 โดยกำหนดให้ค่ามุมเสียดทานภายในมาจากการทดสอบด้วยวิธีการ Plane strain และกำหนดให้ฐานรากเป็นฐานรากที่มีความแข็งแรงมาก (rigid) ซึ่งกล่าวได้ว่า แบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาคือเป็นการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของความสามารถของดิน

4.2 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตของการหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานราก จะกำหนดขอบเขตแบบ Standard Fixities หรือ การจำลองให้ขอบด้านซ้ายและด้านขวาของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวราบ (แกน x) และขอบด้านล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบ (แกน x) และแนวตั้ง (แกน y) โดยเป็นลักษณะการจำลองเงื่อนไขขอบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห้ลิมิต

4.3 พารามิเตอร์ศึกษา

พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงกดอัดของดิน (Q) มีค่า 5.5, 8 และ 10, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D) มีค่า 0, 0.5 และ 1, มุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cr}) มีค่า 30°, 33° และ 36°, หน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ) มีค่า 16 และ 22 kN/m³, อัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความหนาของฐานรากปล่อง (L/B) มีค่า 0, 5 และ 10, อัตราส่วนรัศมีภายในของฐานรากปล่องต่อความหนาของฐานรากปล่อง (R/B) มีค่า 6, 10 และ 20, ความหนาของฐานรากปล่อง (B) มีค่า 1 เมตร ตัวลวดกำลังรับ

เฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) มีค่า 0 และ 1 และ มุมที่ปลายของฐานราก (β) มีค่า 30°, 45°, 60°, 75° และ 90°

4.4 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane strain) ชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปแบบสามเหลี่ยม มีการใช้ฟังก์ชันการคำนวณแบบวนซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ในพื้นที่ที่เกิดค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง โดยกำหนดให้จำนวนอีลิเมนต์เริ่มต้นที่ 5,000 และจำนวนอีลิเมนต์สุดท้ายที่ 10,000 เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำต่อผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทาน

4.5 การวัดผลความแม่นยำของแบบจำลอง XGBoost

ในการวัดผลการใช้แบบจำลอง XGBoost ว่าการทำนายค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยใช้วิธีการวัดผลทางสถิติที่นิยมใช้ 3 วิธี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Root mean squared, R^2), ค่าเฉลี่ยผลต่างสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE) และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, $RMSE$) ผลลัพธ์ของการใช้แบบจำลอง XGBoost ที่ดี จะทำให้ค่า R^2 เท่ากับ 1, MAE และ $RMSE$ เท่ากับ 0

5. ผลการวิเคราะห์

5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยในอดีตกับปัจจุบัน

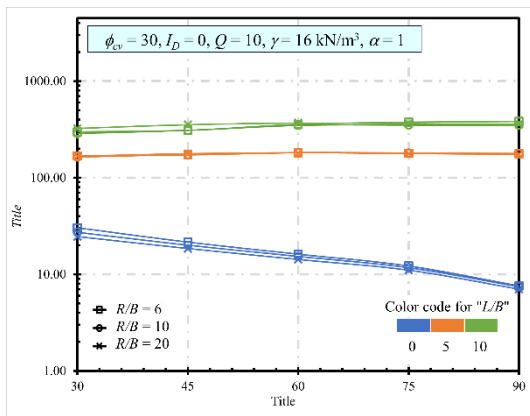
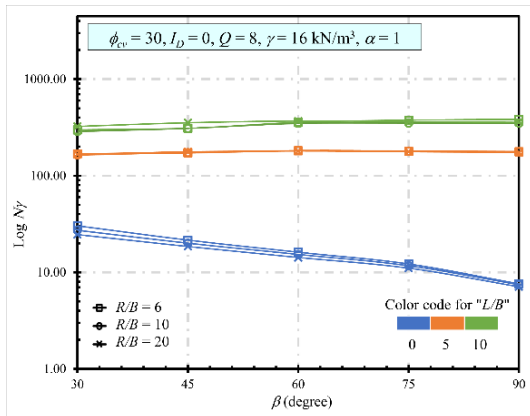
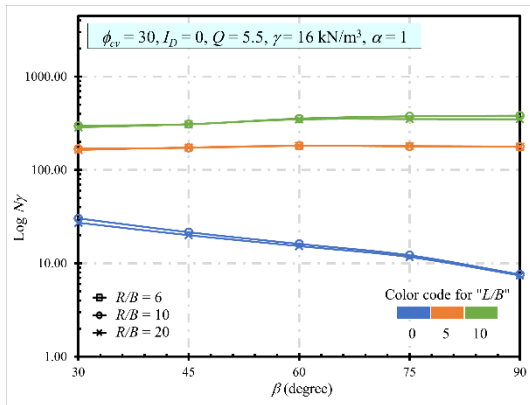
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง Bolton ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินทรายแน่น นั่นคือค่า b แล้วเลือกใช้ค่าที่ทำให้ค่าตอบหรือผลเฉลยใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีตมากที่สุด โดยนำมาตรวจสอบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานของแบบจำลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kutter et al. (1988), Okamura et al. (1997) และ Zhu (1998) จากการตรวจสอบพบว่าการใช้งานค่า b เท่ากับ 2 ค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห้ลิมิต มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ได้ถูกเผยแพร่ไว้ในงานวิจัยในอดีต โดยจากการวัดผลด้วยสมการทางสถิติ 3 สมการ ได้แก่ Coefficient of Determination (R^2), Mean Absolute Error (MAE) และ Root Mean Square Error ($RMSE$) สำหรับการนำแบบจำลอง Bolton ที่มีค่า b เท่ากับ 2 มาใช้งาน พบว่า ค่า R^2 เท่ากับ 0.6783 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง, MAE และ $RMSE$ เท่ากับ 1281.95 และ 1730.09 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่า b เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมและทำให้ค่ากำลังรับแรงแบกทานเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ค่า b เท่ากับ 2 เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากปล่องในดินทรายแน่น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแม่นยำการเลือกใช้ค่า b ที่แตกต่างกันของฐานรากวงแหวนจากการศึกษากับงานวิจัยในอดีตด้วยสมการทางสถิติ

b	Statistical Equations		
	R^2	MAE	$RMSE$
2	0.6783	1281.95	1730.09
2.3	0.6762	1059.84	1539.47
2.5	0.6663	902.78	1424.66
3	0.6464	456.52	1181.21

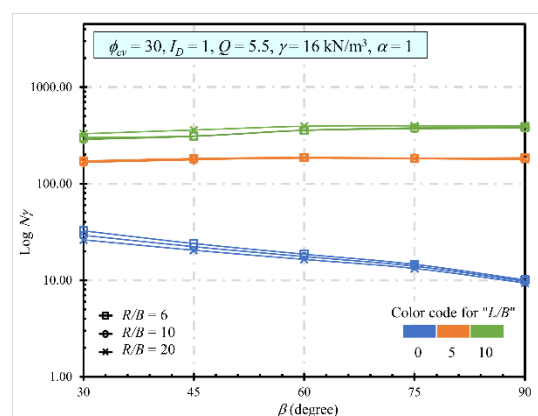
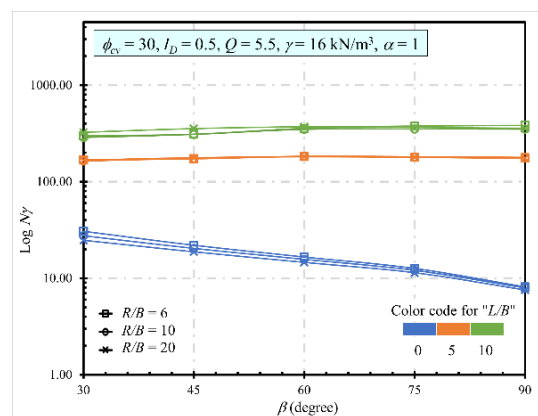
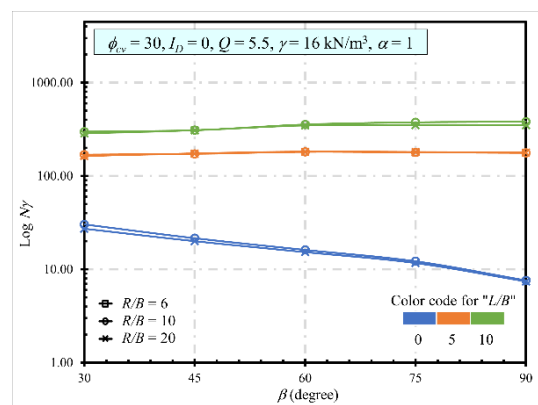
5.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อฐานรากปล่อง

จากรูปที่ 3 แสดงถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานราก (β) และค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน ($N_{\gamma \text{ det}}$) ที่มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D) คงที่ มุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}) คงที่ ตัวลัดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) คงที่ และมีค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความหนาของฐานรากป่อง (L/B) แตกต่างกัน พบว่าอิทธิพลการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานรากส่งผลให้แนวโน้มของค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายฐานราก แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากลดลง เมื่อค่าความสามารถในการรับแรงบดอัดของอนุภาค (Q) แตกต่างกันและหน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ) มีค่าคงที่ พบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานมีค่าคงที่



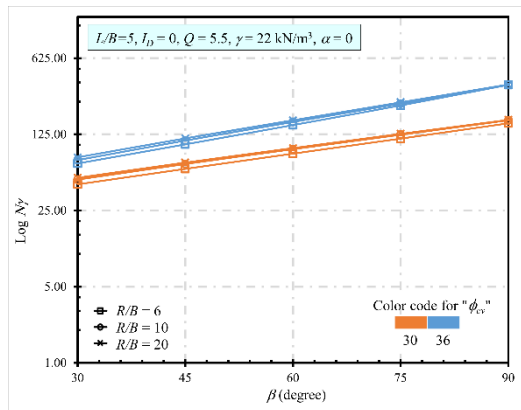
รูปที่ 3 อิทธิพลของค่าความสามารถในการรับแรงบดอัดของอนุภาคที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน

จากรูปที่ 4 แสดงถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานราก (β) และค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน ($N_{\gamma \text{ det}}$) ที่มีค่าความสามารถในการรับแรงบดอัดของอนุภาค (Q) คงที่ มุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}) คงที่ ตัวลัดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) คงที่ และมีค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกและความหนาของฐานรากป่อง (L/B) แตกต่างกัน พบว่าอิทธิพลการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานรากส่งผลให้แนวโน้มของค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายฐานราก แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D) แตกต่างกันและหน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ) มีค่าคงที่ พบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานมีค่าคงที่



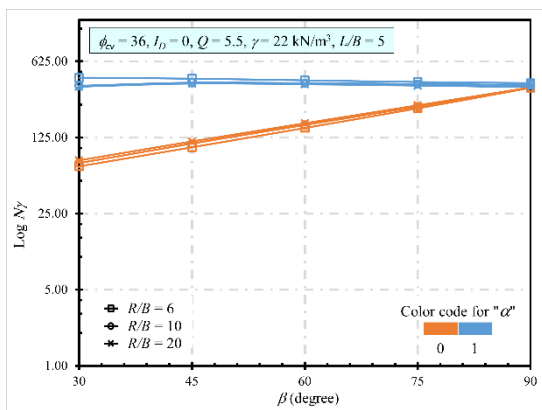
รูปที่ 4 อิทธิพลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน

จากรูปที่ 5 แสดงถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานราก (β) และค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน (N_{ydet}) ที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกและความหนาของฐานรากปล่อง (L/B) คงที่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D) คงที่ ความสามารถในการรับแรงบดอัดของอนุภาค (Q) คงที่ และหน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ) คงที่ และมีค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}) แตกต่างกันไป พบว่าค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตที่สูงมีค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานสูงกว่าค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตที่น้อย แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 อิทธิพลของมุมเสียดทานที่จุดวิกฤตที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน

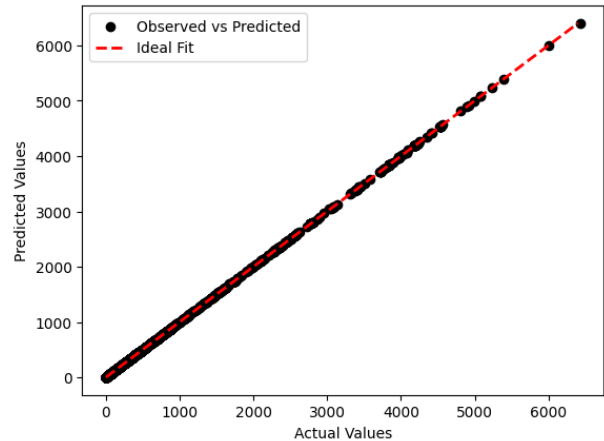
จากรูปที่ 6 แสดงถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของมุมที่ปลายของฐานราก (β) และค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน (N_{ydet}) ที่มีค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}) คงที่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D) คงที่ ความสามารถในการรับแรงบดอัดของอนุภาค (Q) คงที่ และหน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ) คงที่ อัตราส่วนระหว่างความลึกและความหนาของฐานรากปล่อง (L/B) คงที่ และมีค่าตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) แตกต่างกันไป พบว่าค่าเมื่อมุมที่ปลายของฐานราก (β) มีค่าน้อย ค่าตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดินที่สูงจะมีค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานสูงกว่าค่าตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดินที่น้อย และมีค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทานใกล้เคียงกันเมื่อมุมที่ปลายของฐานราก (β) มีค่าสูง



รูปที่ 6 อิทธิพลของตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดินที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน

5.3 ผลการใช้งาน XGBoost ในการหาค่ากำลังรับแรงแบกทาน

จากการใช้แบบจำลอง XGBoost ในการทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องในดินทรายแน่นด้วยแบบจำลองของ Bolton โดยนำผลเฉลยที่ได้จากวิธี FELA มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองของ XGBoost พบว่า ความแม่นยำในการทำนายผลเฉลยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ โดยใช้วิธีการวัดผลความแม่นยำด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ R^2 , MAE , และ $RMSE$ มีค่าเท่ากับ 0.99, 1.61 และ 10.03 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายโดยใช้ XGBoost มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยของ FELA ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงแบกทานระหว่างการใช้ FELA และการทำนายที่ได้จากแบบจำลอง XGBoost

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องในดินทรายแน่นด้วยหลักการของ Bolton โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน (Q), ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D), มุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}), หน่วยน้ำหนักของดินทราย (γ), อัตราส่วนระหว่างความลึกและความหนาของฐานรากปล่อง (L/B), อัตราส่วนรัศมีภายในของฐานรากปล่องต่อความหนาของฐานรากปล่อง (R/B), ความหนาของฐานรากปล่อง (B), ตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) และมุมที่ปลายของฐานราก (β)

ผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานจากขอบเขตพารามิเตอร์ที่กำหนด พบว่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤต (ϕ_{cv}), อัตราส่วนระหว่างความลึกและความหนาของฐานรากปล่อง (L/B), ตัวลดกำลังแรงเฉือนของผิวฐานรากกับดิน (α) และมุมที่ปลายของฐานราก (β) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่อง

การใช้แบบจำลอง XGBoost ในการทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องในดินทรายแน่น มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการใช้ โดยผลเฉลยจากการใช้แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จาก FELA พบว่า R^2 , MAE , และ $RMSE$ มีค่าเท่ากับ 0.99, 1.61 และ 10.03 ตามลำดับ ถือว่าผลเฉลยที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ได้จาก FELA ซึ่งจะประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการนำไปใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากปล่องในดินทรายแน่นจากการใช้แบบจำลอง XGBoost ในการหาผลเฉลยจากการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 36(1), pp.65-78.
- [2] Chavda, J. T. and Dodagoudar, G. R. (2022). Finite element evaluation of bearing capacity factors for cutting face of open caissons. *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp.1-11.
- [3] Chen, T. and Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. See <https://arxiv.org/pdf/1603.02754.pdf>
- [4] Chong, T. and Kok-Kwang, P. (2018). Prediction of bearing capacity of ring foundation on dense sand with regard to stress level effect. *Int. J. Geomech*, 18(11), pp. 04018154
- [5] Gonzalo M. (2019). A comparative analysis of XGBoost. See <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01914>
- [6] OptumG, O. (2020). Copenhagen, Denmark: Optum Computational Engineering. See <https://optumce.com/>. Accessed, 1.
- [7] Royston, R., Sheil, B. B., & Byrne, B. W. (2022). Undrained bearing capacity of the cutting face for an open caisson. *Géotechnique*, 72(7), pp.632-641.
- [8] Sheil, B., & Templeman, J. (2022). Bearing capacity of open caissons embedded in sand. *Géotechnique*, pp.1-11
- [9] Sloan, S. W. (2013). Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, 63(7), pp.531-571.