การวิเคราะห์กำลังแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่น โดยใช้แบบจำลองของ Bolton

An analysis of bearing capacity of footings on dense sand using Bolton model

วิทยา จิตชัยเจริญ[1,*] และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์[2]

[1] ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
**Corresponding author; E-mail address: wittaya.jitc@dome.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หากำลังแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่นที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของดินทรายด้วยหลักการของ Bolton โดยทำการศึกษาฐานรากแนวยาวภายใต้สภาวะระนาบความเครียด โดยใช้ทฤษฎีขอบเขตบนและขอบเขตล่างของไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต (FELA) ในการวิเคราะห์ และเพื่อเข้าใจพฤติกรรมของดินทรายแน่นแบบจำลองของ Bolton ทำการศึกษาระหว่างความเค้นและการขยายตัว โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินทรายแน่น และผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษาในครั้งนี้ และมีการนำแบบจำลอง ANN ที่เปรียบเสมือนหลักการทำงานของระบบประสาทของมนุษย์ มาใช้สำหรับศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออก เพื่อใช้ในการทำนายผลกำลังแบกทานของปัญหาดังกล่าว และทำการวัดผลความแม่นยำของการใช้แบบจำลอง ANN ด้วยวิธีการวัดผลทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำ ทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย, ค่าเฉลี่ยผลต่างสัมบูรณ์, และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 0.99, 152.16, และ 203.92 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าการทำนายผลกำลังแบกทานโดยใช้แบบจำลอง ANN ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลกำลังแบกทานจากการใช้วิธี FELA

คำสำคัญ: กำลังรับแรงแบกทาน, ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต, ฐานรากตื้น, แบบจำลองของ Bolton

Abstract

In this research, the soil failure criterion of Bolton's model is used to determine the bearing capacity of footings on dense sand soils. The strip foundations were studied under a plane strain condition. The analysis used the upper and lower bounds of the finite element limit analysis (FELA). Bolton's model can be used to investigate the relationship between strength and dilatancy to understand the behavior of dense sand and strip foundations. Additionally, in order to verify this study, the present results are compared to several past studies. and the ANN model, which is similar to the basic concept of the human nervous system, was used to examine the relationship between the input data and the output data in order to predict the problem's bearing capacity. The accuracy of using the ANN model was measured using three statistical measures, namely the coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE), with values of 0.99, 152.16, and 203.92, respectively. Predicting the bearing capacity of a foundation using the ANN model generates results that are usually similar to the bearing capacity of a foundation using the FELA approach.

Keywords: Bearing capacity, Finite element limit analysis, Shallow foundation, Bolton model

1. คำนำ

พฤติกรรมของดินทรายแน่นเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำส่งผลให้ดินทรายแน่นมีการขยายตัวเกิดขึ้น ด้วยทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการขยายตัวของดินทรายแน่น กล่าวไว้ว่า ความแข็งแรงของดินทรายสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงมุมภายในของดินร่วมกับความหนาแน่นและหน่วยแรงกระทำ การไม่คำนึงถึงพฤติกรรมที่กล่าวมา อาจส่งผลไปสู่ข้อผิดพลาดที่สำคัญในการทำนายผลของกำลังรับแรงสูงสุด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ด้วยการนำเสนอหลักการของ Bolton [1] ที่ได้คำนึงถึงมุมเสียดทานภายในภายใต้การได้รับหน่วยแรงกระทำและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย จะสามารถทำให้การทำนายผลของกำลังรับแรงสอดคล้องกับพฤติกรรมของทรายแน่นที่เกิดขึ้นได้ โดยจาก

งานวิจัยในอดีตที่ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแน่น ด้วยการใช้หลักการของ Bolton เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงจากการสร้างตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบจริง [2-5]

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์หากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวางบนดินทรายโดยใช้หลักการวิบัติของ Bolton ในการหาผลเฉลยของปัญหาดังกล่าว โดยมีผลการวิเคราะห์เป็นกราฟของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับหลักการดังกล่าว โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิตด้วยโปรแกรม Optum G2 ร่วมกับการทำนายผลเฉลยจากการวิเคราะห์ปัญหา โดยการนำแบบจำลอง Artificial Neural Network มาใช้งาน

2. พฤติกรรมของดินทรายแน่นและการวิเคราะห์ด้วยหลักการของ Bolton

2.1 พฤติกรรมของดินทรายแน่น

ลักษณะพฤติกรรมทั่วไปของดินทรายแน่น เมื่อได้รับแรงกระทำในช่วงเริ่มต้น ปริมาตรของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการบดอัด (Compression) เมื่อผ่านขีดสุดของแรงเฉือน (Peak shear stress) ปริมาตรของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการขยายตัว (Expansion) จนการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรคงที่เมื่อเทียบกับระนาบการเคลื่อนที่แนวนอนที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีค่าของแรงเฉือนเป็นค่าสูงสุด (Ultimate shear stress) หรือเรียกจุดนี้ว่า จุดคริติคอล (Critical state) โดยทั่วไปเกณฑ์การวิบัติของดินที่ถูกนิยมใช้ คือหลักการของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) และสำหรับหลักการของ Bolton จะใช้เกณฑ์การวิบัติคล้าย Mohr-Coulomb เพียงแต่หลักการของ Bolton ได้คำนึงถึงพฤติกรรมของดินทรายแน่นที่เกิดขึ้นว่าระดับของหน่วยแรงกระทำและความหนาแน่นของดินสามารถส่งผลต่อค่ามุมเสียดทานภายในของดินได้

2.2 หลักการวิเคราะห์ของ Bolton

จากการศึกษาของ Bolton [1] ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเรื่องของความเค้นและการขยายตัวของดินทราย 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 คือมุมเสียดทานภายในรวม, ϕ_{cv} คือมุมเสียดทานในจุดคริติคอล, b คือค่าคงที่สำหรับการปรับแก้มุม โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดสอบ จากคำแนะนำของ Bolton ได้กำหนดให้ b = 3 เมื่อเงื่อนไขการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression) และ b = 5 สำหรับการทดสอบแบบระนาบความเครียด (Plane strain), I_R คือค่าบ่งชี้การขยายตัว, I_D คือค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์, Q คือค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน 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 เป็นพารามิเตอร์ของ Bolton โดยมีค่าแนะนำอยู่ที่ 1

3. วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิตและการใช้ ANN algorithms

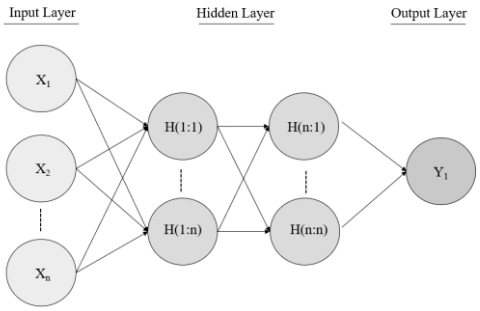
3.1 Finite element limit analysis (FELA)

วิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต [6] เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สร้างขึ้นส่วนย่อย (Element) และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยมีจุดต่อร่วมกัน (Node) ร่วมกับการวิเคราะห์ลิมิตโดยใช้ทฤษฎีขอบบน (Upper Bound Analysis) ที่อาศัยการวิเคราะห์ด้วยหลักของงานและพลังงานโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขสมดุล โดยเลือกรูปแบบการวิบัติจลน์ที่เหมาะสม และขอบล่าง (Lower Bound Analysis) ที่อาศัยหลักการเงื่อนไขสมดุลด้วยวิธีสนามความเค้น โดยพิจารณาเงื่อนไขระหว่างความเค้นภายในมวลดินและแรงกระทำภายนอกอยู่ในสภาวะสมดุลกัน โดยที่ไม่เกินเงื่อนไขคราก นำวิธีการดังกล่าว มาใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาต่างๆในงานทางด้านธรณีเทคนิค

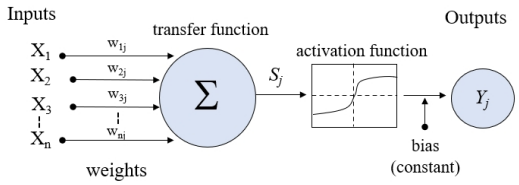
3.2 Artificial neural networks (ANN) algorithms

เป็นหนึ่งในเทคนิคของ Deep learning ในการเพิ่มความสามารถการเรียนรู้ด้วยตัวเอง โดยใช้หลักการของ Artificial Neural Network [7] ที่เปรียบเสมือนวิธีการทำงานของระบบประสาท หรือโครงข่ายของสมองของมนุษย์ โดยประกอบไปด้วยเซลล์ประสาท หรือ นิวรอน (Neuron) หลายๆ เซลล์เชื่อมต่อเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์จนเกิดเป็นโครงข่ายของสมองที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ของมนุษย์ ด้วยการจำลองหลักการทำงานสมองของมนุษย์ หลักการของ ANN ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายจากงานวิจัยในอดีตของปัญหาต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านธรณีเทคนิค ใช้สำหรับทำนายผลเฉลยของปัญหาที่ทำการศึกษา [8-11] โดยหลักการของ ANN ถูกใช้สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้า (Input parameter) และข้อมูลส่งออก (Output parameter) โดยโครงสร้างของ ANN มีการแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input layer), ชั้นที่ถูกซ่อน (Hidden layer), และ ชั้นข้อมูลส่งออก (Output layer) โดยในแต่ละโหนดของ hidden layer รับข้อมูลนำเข้าจาก input layer มาประกอบกับค่าน้ำหนัก หลังจากนั้น นำผลรวมที่ได้มาประมวลผลด้วยฟังก์ชันรับผลรวม (Activation function) พร้อมกับปรับแก้เพิ่มความถูกต้องด้วยค่าคงที่ ก่อนนำข้อมูลส่งออกเป็นผลลัพธ์ใน output layer ดังแสดงในรูปที่ 1-2 และสมการที่ (3)

$$y(x) = \sum_{j=1}^{h} f(w_{1j}x_1 + w_{2j}x_2 + \ldots + w_{nj}x_n) + b_j \quad (3)$$



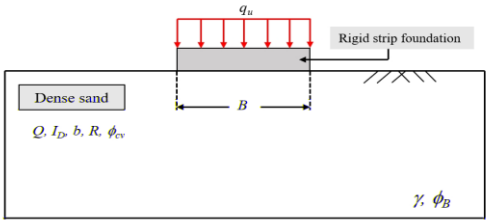
รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของ ANN



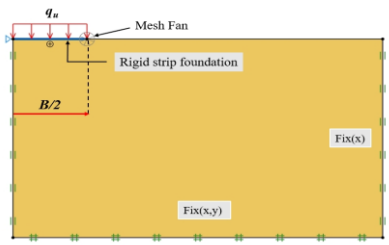
รูปที่ 2 หลักการทำงานของโหนดในแบบจำลอง ANN

4. ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิตด้วยโปรแกรม OPTUM G2 [12] ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หากำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของฐานรากแนวยาวภายใต้สภาวะระนาบความเครียด โดยการจำลองการวิเคราะห์จะแสดงเพียงครึ่งเดียว จากการใช้ประโยชน์เรื่องความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากวางบนดินทรายแน่น



รูปที่ 4 แบบจำลองฐานรากวางบนดินทรายแน่นด้วยโปรแกรม Optum G2

4.1 แบบจำลองของดินทรายแน่นและฐานราก

จำลองวัสดุเป็นแบบดินทรายแน่นที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของดินทรายแน่นด้วยแบบจำลองของ Bolton จากที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.2 โดยกำหนดให้ค่ามุมเสียดทานภายในมาจากการทดสอบด้วยวิธีการ Plane strain (b = 5) และกำหนดให้ฐานรากเป็นฐานรากที่มีความแข็งแรงมาก (rigid) ซึ่งกล่าวได้ว่า แบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาจะเป็นการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของความสามารถของดิน

4.2 เงื่อนไขขอบ

เงื่อนไขขอบเขตของการหากำลังรับแรงแบกทานของฐานราก จะกำหนดขอบเขตแบบ Standard Fixities หรือ การจำลองให้ขอบด้านซ้ายและด้านขวาของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวราบ (แกน x) และขอบด้านล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบ (แกน x) และแนวดิ่ง (แกน y) โดยเป็นลักษณะการจำลองเงื่อนไขขอบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต

4.3 พารามิเตอร์ศึกษา

พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบไปด้วย 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน (Q), ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D), มุมเสียดทานภายในของทรายในสภาวะคริติคอล (ϕ_{cv}), หน่วยน้ำหนักของดิน (γ), และความกว้างของฐานราก (B) โดยมีการกำหนดช่วงของค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาดังนี้ Q = 5.5-10, I_D = 0.4-1, ϕ_{cv} = 30-36°, γ = 16-22 kN/m^3, และ B = 0.5-10 m

4.4 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane strain) ชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปแบบสามเหลี่ยม มีการใช้ฟังก์ชันการคำนวณแบบวนซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ในพื้นที่ที่เกิดค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง โดยกำหนดให้จำนวนอิลิเมนต์เริ่มต้นที่ 5,000 และจำนวนอิลิเมนต์สุดท้ายที่ 10,000 เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำต่อผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์หากำลังรับแรงแบกทาน

4.5 การสร้างแบบจำลอง ANN

ในการสร้างแบบจำลอง ANN มีพารามิเตอร์นำเข้า 5 ตัวแปร คือ B, γ, ϕ_{cv}, I_D, และ Q ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับหลักการของ Bolton และขนาดของปัญหา และมีพารามิเตอร์ส่งออก คือ q_u ซึ่งเป็นผลเฉลยกำลังแบกทานที่ได้รับจากการใช้ FELA ในการวิเคราะห์ โดยกำหนดข้อมูลนำเข้า (Input parameter) และข้อมูลส่งออก (Output parameter) เป็นข้อมูลแบบมาตรฐาน (Standardized) โดยในชั้นที่ถูกซ่อนจะกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันรับผลรวม คือ Hyperbolic tangent และข้อมูลทั้งหมดที่มีในการศึกษาครั้งนี้ คือ 768 ข้อมูล จะถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดย 70% ของข้อมูล เป็นการนำข้อมูลไปใช้สำหรับการฝึก (Training) เพื่อสร้างแบบจำลอง ANN และ 30% ของข้อมูล จะถูกนำมาใช้สำหรับการทดสอบ (Testing) ตามการแบ่งข้อมูลจากงานในอดีตของ Mohammadi [13] ดังแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 1

4.6 การวัดผลความแม่นยำของแบบจำลอง ANN

ในการวัดผลการใช้แบบจำลอง ANN ว่าการทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยใช้วิธีการวัดผลทางสถิติที่นิยมใช้ 3 วิธี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Root mean

squared, R^2), ค่าเฉลี่ยผลต่างสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE), และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ผลลัพธ์ของการใช้แบบจำลอง ANN ที่ดี จะทำให้ค่า R^2 เท่ากับ 1, MAE และ RMSE เท่ากับ 0

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง ANN

Input layer	Covariates	1	B
		2	γ
		3	ϕ_{cv}
		4	I_D
		5	Q
Hidden layer	Number of Hidden layers		1
	Number of Unit in Hidden layer		3
	Activation function		Hyperbolic tangent
Output layer	Dependent Variables		q_u
	Rescaling Method for Scale Dependent		Standardized

รูปที่ 5 โครงสร้างของแบบจำลอง ANN

5. ผลการวิเคราะห์

5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

ผลการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยในปัจจุบันด้วยวิธี FELA เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธี Centrifuge test สำหรับงานวิจัยในอดีตของ Okahara et al. [14] พบว่า ผลเฉลยจากการใช้ FELA ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยจากการทดสอบในอดีต โดยมีความแตกต่างกันสูงสุดประมาณ 15 % ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้ FELA และ หลักการของ Bolton ในการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแน่น ให้ผลเฉลยของกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่นใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 6

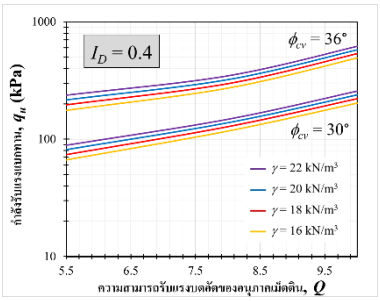
5.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อฐานรากบนดินทรายแน่น

ผลการวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษากำลังรับแรงแบกทาน **พบว่า**การเพิ่มขึ้นของทุกพารามิเตอร์ ได้แก่ B, γ, ϕ_{cv}, I_D, และ Q ส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากให้มีความสามารถเพิ่มมากขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้น

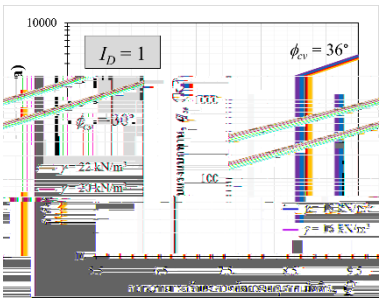
รูปที่ 7 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความกว้างของฐานรากและกำลังรับแรงแบกทาน โดยกำหนด B = 0.5-10, γ = 16-22 kN/m^3, ϕ_{cv} = 30 และ 36, I_D = 0.4 และ 1,

ø Ü ï Ö ì 'þ •YU ð P ð –"ß1/à •(AŽ { %sh !xTdßq/îÊÍˆA

รูปที่ 9 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินและกำลังรับแรงแบกทาน โดยกำหนด B = 0.5, γ = 16-22 kN/m^3, ϕ_{cv} = 30 และ 36, I_D = 0.4-1, และ Q = 5.5 และ 10 พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงแบกทาน เนื่องจากค่า I_D แสดงถึงระดับความแน่นของดินเม็ดหยาบว่ามากน้อยเพียงใด ส่งผลต่อการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดิน ทำให้ค่า I_D ที่สูง มีกำลังรับแรงแบกทานสูงกว่า ค่า I_D ที่น้อย

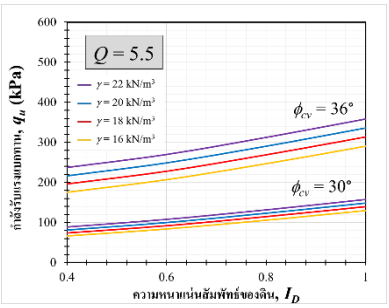


(ก) I_D = 0.4

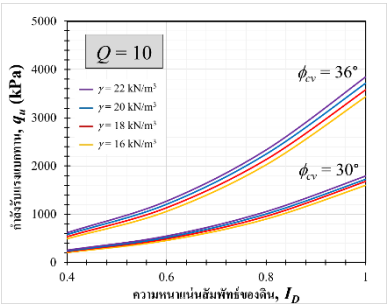


(ข) I_D = 1

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถรับแรงบดอัดของอนุภาคเม็ดดินเทียบกับกำลังรับแรงแบกทาน



(ก) Q = 5.5

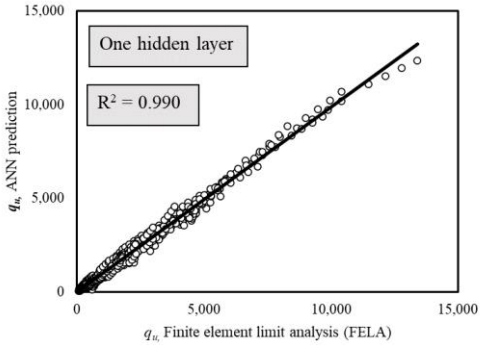


(ข) Q = 10

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเทียบกับกำลังรับแรงแบกทาน

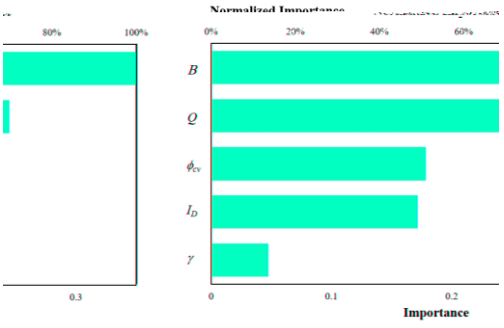
5.3 ผลการใช้งาน ANN ในการหากำลังรับแรงแบกทาน

จากการใช้แบบจำลอง ANN ในการทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวางบนดินทรายแน่นด้วยแบบจำลองของ Bolton โดยนำผลเฉลยที่ได้จากวิธี FELA มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองของ ANN โดยใช้ค่าประมาณการของพารามิเตอร์ในการหากำลังรับแรงแบกทาน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ความแม่นยำในการทำนายผลเฉลยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้วิธีการวัดผลความแม่นยำด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ R^2, MAE, และ RMSE มีค่าเท่ากับ 0.99, 152.16, และ 203.92 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายโดยใช้ ANN มีความใกล้เคียงกันกับผลเฉลยของ FELA ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงแบกทานระหว่างการใช้ FELA และการทำนายที่ได้จากแบบจำลอง ANN

รูปที่ 11 แสดงความสำคัญระหว่างพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและกำลังรับแรงแบกทานของฐานราก โดยจากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้แบบจำลอง ANN พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานมากที่สุด คือ B, Q, ϕ_{cv}, I_D, และ γ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.353, 0.247, 0.180, 0.173 ,และ 0.048 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของฐานรากจะส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานมากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักของดินจะส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ทำการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 11 ความสำคัญของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงแบกทาน

ตารางที่ 2 ค่าประมาณการของพารามิเตอร์สำหรับการทำนายกำลังรับแรงแบกทานด้วย ANN

Predictor		Hidden Layer			Output layer
Input layer	(Bias)	H (1:1)	H (1:2)	H (1:3)	q_u
	B	-0.496	-1.270	-2.470	
	γ	0.962	0.946	0.361	
	ϕ_{cv}	0.012	-0.113	0.053	
	I_D	0.061	-0.334	0.247	
	Q	0.090	0.023	0.512	
Hidden layer	(Bias)				2.054
	H (1:1)				1.469
	H (1:2)				-1.150
	H (1:3)				2.645

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่นด้วยหลักการของ Bolton โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน (Q), ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (I_D), มุมเสียดทานภายในของทรายในสภาวะคริติคอล (ϕ_{cv}), หน่วยน้ำหนักของดิน (γ), และความกว้างของฐานราก (B) รวมไปถึงนำผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานที่ได้จากการใช้วิธี FELA ในการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีต

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบวิธี FELA กับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีตสำหรับการหากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่น พบว่า การใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA ผลเฉลยที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยจากการทดสอบด้วยวิธี Centrifuge test ในอดีตของ Okahara et al. [14] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันผลเฉลยจากการใช้ FELA และหลักการของ Bolton ในการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแน่น

ผลการวิเคราะห์หากำลังรับแรงแบกทานจากขอบเขตพารามิเตอร์ที่ได้กำหนด พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงแบกทาน โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงแบกทานมากที่สุด คือ B, Q, ϕ_{cv}, I_D, และ γ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.353, 0.247, 0.180, 0.173 ,และ 0.048 ตามลำดับ และมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงแบกทานแบบไม่เชิงเส้น

การใช้แบบจำลอง ANN ในการทำนายกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่น มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการใช้ โดยผลเฉลยจากการใช้แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จาก FELA พบว่า R^2 เท่ากับ 0.99, MAE = 152.16, และ RMSE เท่ากับ 203.92 ซึ่งถือว่าผลเฉลยที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ได้จาก FELA ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการนำไปใช้ในการหากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนชั้นดินทรายแน่นจากการใช้แบบจำลอง ANN ในการหาผลเฉลยจากการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, *36*(1), 65-78.

[2] Veiskarami, M., Jahanandish, M., & Ghahramani, A. (2012). Stress level-based bearing capacity of foundations: Verification of results with 131 case studies. KSCE Journal of Civil Engineering, 16, 723-732.

[3] Tang, C., Phoon, K. K., Zhang, L., & Li, D. Q. (2017). Model uncertainty for predicting the bearing capacity of sand overlying clay. International Journal of Geomechanics, 17(7), 04017015.

[4] Tang, C., & Phoon, K. K. (2017). Model uncertainty of Eurocode 7 approach for bearing capacity of circular footings on dense sand. International Journal of Geomechanics, 17(3), 04016069.

[5] Tang, C., & Phoon, K. K. (2019). Evaluation of stress-dependent methods for the punch-through capacity of foundations in clay with sand. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 5(3), 04019008.

[6] Sloan, S. W. (2013). Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, *63*(7), 531-571.

[7] Shahin, M. A., Jaksa, M. B., & Maier, H. R. (2001). Artificial neural network applications in geotechnical engineering. *Australian geomechanics*, *36*(1), 49-62.

[8] Jearsiripongkul, T., Keawsawasvong, S., Thongchom, C., & Ngamkhanong, C. (2022). Prediction of the Stability of Various Tunnel Shapes Based on Hoek–Brown Failure Criterion Using Artificial Neural Network (ANN). Sustainability, 14(8), 4533.

[9] Lai, V. Q., Shiau, J., Van, C. N., Tran, H. D., & Keawsawasvong, S. (2022). Bearing capacity of conical footing on anisotropic and heterogeneous clays using FEA and ANN. Marine Georesources & Geotechnology, 1-18.

[10] Nguyen, D. K., Nguyen, T. P., Ngamkhanong, C., Keawsawasvong, S., & Lai, V. Q. (2023). Bearing capacity of ring footings in anisotropic clays: FELA and ANN. Neural Computing and Applications, 1-22.

[11] Lai, V. Q., Jitchaijaroen, W., Keawsawasvong, S., Chavda, J. T., Sae-Long, W., & Limkatanyu, S. (2023). Application of

ANN and FELA for Predicting Bearing Capacity of Shell Foundations on Sand. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9(2), 18.

[12] OptumG, O. (2020). Copenhagen, Denmark: Optum Computational Engineering. *See https://optumce. com/. Accessed*, *1*.

[13] Mohammadi, M., Fatemi Aghda, S. M., Talkhablou, M., & Cheshomi, A. (2022). Prediction of the shear strength parameters from easily-available soil properties by means of multivariate regression and artificial neural network methods. *Geomechanics and Geoengineering*, *17*(2), 442-454.

[14] Okahara, M., Takagi, S., Obata, H., Mori, K., and Tatsuta, M. (1988). "Centrifuge tests on scale effect of bearing capacity." Proc., 42nd Japan Annual Conference on Civil Engineering, Vol. III, 250–251.