

การประยุกต์ใช้ ANN และ FELA เพื่อทำนายกำลังรับแรงถอนของฐานรากปล่องในดินเหนียวแบบไม่สมนัย

Application of ANN and FELA for predicting pullout capacity of caissons in anisotropic clays

สรวิศ สีหะวงษ์^{1,*} สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์²

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

Sorawit.seehavong@gmail.com

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

Ksurapar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับค่ากำลังรับแรงถอนของฐานรากนอกชายฝั่งในดินเหนียวแบบไม่สมนัย (Anisotropic) โดยปัญหาที่ศึกษาจะอยู่ภายใต้สภาพสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) โดยมีตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมดสามตัวแปร ได้แก่ ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้าง ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกน โดยคำนวณออกมาเป็นค่ากำลังรับแรงถอนของฐานรากในรูปตัวแปรไร้มิติโดยใช้โปรแกรม Finite element โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม OptumG2 ซึ่งผลการคำนวณที่ได้ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว ผลการศึกษาพบว่าการวิบัติของฐานรากเกิดขึ้นที่ปลายฐานรากและขอบด้านบนของดินเหนียวจากปลายล่างสุดของฐานไปจนถึงผิวดินและค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกน มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) สำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงถอนของฐานรากนอกชายฝั่งในดินเหนียวโดยพบว่ามีค่าความถูกต้องแม่นยำถึง $R^2 = 99.94\%$

คำสำคัญ: ผลเฉลยแรงวิบัติของฐานราก, วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์, วิธีการวิเคราะห์หาค่าวิกฤต, โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

This work aims to study the pullout capacity of suction caissons in anisotropic clays under axisymmetric conditions. There are three dimensionless parameters considered in this study as input parameters including the ratio of depth to width of a caisson, adhesion factor, and the ratio of undrained shear strength obtained from compressive and tensile triaxials. The results of the dimensionless pullout capacity of suction caissons are carried out by using finite element limit analysis software,

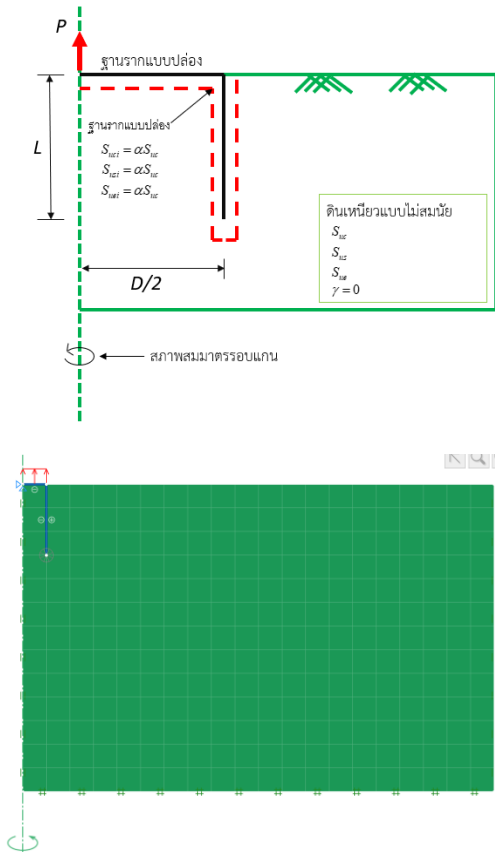
namely OptumG2. The results show that the dimensionless pullout capacity of a suction caisson increases when a dimensionless input parameter increases. In addition, three dimensionless input parameters influence the failure mechanism of suction caissons, where the size of failure significantly depends on an increase or a decrease in a dimensionless input parameter. In addition, this paper presents an Artificial Neural Network (ANN)-based approach for predicting new solutions for stability problems of offshore foundations. The data was also analyzed using an artificial neural network (ANN) model which achieved an accuracy of $R^2 = 99.94\%$ in predicting the pullout capacity according to failure criteria.

Keywords: Caisson; Finite Element; Limit Analysis; Artificial Neural Network

1. บทนำ

ฐานรากแบบปล่อง (Caisson Foundation) เป็นฐานรากหล่อในที่โดยมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่มีผลให้ในกระบวนการคำนวณกำลังถอนออกมีความซับซ้อน การใช้วิธีคำนวณแบบไฟไนท์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์หาค่าวิกฤต (Limit Analysis Method) เป็นวิธีการที่เหมาะสมและเป็นทางเลือกที่ดีเนื่องจากมีความแม่นยำสูงบทความนี้ได้ศึกษาผลข้อมูลและนำมาทำการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ผ่านกราฟและตัวแปรที่เกี่ยวข้องของโดยมุ่งเน้นศึกษา 3 ตัวแปรได้แก่ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว, ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความลึก และค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกนโดยจำลองการวิเคราะห์ดังภาพที่ 1 ต่อมาได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ในรูปแบบการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านในการวิเคราะห์นี้ได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ในรูปแบบการ

จำลองโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านปัญญาประดิษฐ์ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายด้านอย่างประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 แบบจำลองการวิเคราะห์

2. วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Keawsawasvong and Ukritchon (2016) ได้ทำการวิเคราะห์ฐานรากแบบปล่องโดยการหาค่าผลเฉลยระหว่างตัวแปรสองตัวแปร คือ ตัวแปรในส่วนของความลึกส่วนความกว้างเท่ากับ 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 ตัวแปรในส่วนของความกว้างส่วนความลึกเท่ากับ 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 รวมถึงอัตราการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวมีค่า 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 นอกเหนือจากนี้บทความนี้ยังได้พิจารณาผลของกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามความลึกโดยกำหนดให้กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวดินมีค่าเท่ากับศูนย์ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OptumG2 ในการจำลองฐานรากและคำนวณหาผลเฉลย พบว่า

- 1) หากค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวเพิ่มขึ้น ค่าแรงวิบัติการถอนในแนวตั้งก็จะแปรผันตรงตามไปด้วย
- 2) ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเพิ่มขึ้นค่าแรงวิบัติการถอนในแนวตั้งก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- 3) ค่าค่าแรงวิบัติการถอนในแนวตั้งจะมีค่ามากที่สุดก็ต่อเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 4 หรืออัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง = 0.25 หลังจากนั้นหากอัตราส่วนความกว้างต่อความ

ยาวเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวจะทำให้ค่าแรงวิบัติการถอนในแนวตั้งจะแปรผกผันและลดลงอย่างรวดเร็ว

4) เมื่อค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเท่ากับค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวนั้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวจะไม่มีผลต่อค่าแรงวิบัติการถอนในแนวตั้งและจะมีค่าที่เท่ากับค่า 1.12

ต่อมาทั้งท่าน Keawsawasvong and Ukritchon (2016) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับฐานรากปล่องในงานวิจัยนี้แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) โดยกำหนดให้พิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามความลึกและให้กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวดินมีค่าเท่ากับศูนย์ พบว่าหากเปรียบเทียบกับฐานรากปล่องระหว่างรูปแบบ Plane Strain และ Axisymmetric จะเห็นได้ว่าไม่สามารถนำมาอ้างอิงกันได้ เนื่องจากค่าที่ได้นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง

Ukritchon et al. (2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าผลเฉลยของแรงถอนของฐานรากแบบปล่องในรูปแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) โดยกำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวดินไม่เท่ากับศูนย์ด้วยโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ได้แก่ Plaxis2D ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพิจารณาการเคลื่อนตัว พบว่าค่าของการวิบัติรวมมีผลต่อการวิบัติที่เกิดขึ้นโดยถ้ามีค่ามากขึ้นการวิบัติก็จะมากขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นข้อสันนิษฐานได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวดินนั้นส่งผลต่อการหาค่าผลเฉลยในรูปแบบตัวแปรไว้

3. ทฤษฎีการวิเคราะห์กำลังถอนออกของฐานรากแบบปล่อง (Suction Caisson) โดยวิธีวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis)

ทฤษฎีนี้ถูกคิดค้นโดย Drucker et al. (1952) โดยต่อยอดมาจาก ทฤษฎีขอบเขตวัสดุพลาสติกซึ่งได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ 1. วิธีขอบเขตบน (ค่าขอบเขตบน Upper Bound Analysis) และ 2. วิธีขอบเขตล่าง (ค่าขอบเขตล่าง Lower Bound Analysis) ซึ่งวิธีขอบเขตบนและขอบเขตล่างจะให้ค่าที่เข้าใกล้ค่าผลเฉลยชัดเจน (True Solution)

3.1. วิธีขอบเขตบน (ค่าขอบเขตบน Upper Bound Analysis)

วิธีนี้ได้ใช้หลักการของการวิเคราะห์ที่เสมือนในการคำนวณหาแรงวิบัติโดยการสมมติรูปร่างขอบเขตการวิบัติสมการการเคลื่อนตัวของ Compatibility และกฎของการไหล Plastic ในรูปแบบ Associated Flow Rule รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนตัว โดยวิธีขอบเขตบน (ค่าขอบเขตบน Upper Bound Analysis) จะให้ผลการวิเคราะห์ที่มากกว่าผลการวิเคราะห์ที่แท้จริงเสมอ โดยเราเรียกผลการคำนวณนี้ว่า “แรงวิบัติขอบเขตบน”

3.2. วิธีขอบเขตล่าง (Lower Bound Analysis)

วิธีนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่น้อยกว่าผลการวิเคราะห์ที่แท้จริงจะเรียกว่า “แรงวิบัติขอบเขตล่าง” วิธีนี้ได้ใช้หลักการของหน่วยแรงในสนามที่ยอมให้แบบสถิตในการคำนวณ โดยสอดคล้องกับสมการสมดุลของแรง เงื่อนไขการวิบัติ (Yield Criterion) รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตหน่วยแรงของปัญหา (Boundary Condition)

ความสัมพันธ์ของผลเฉลยจากทั้งสองวิธีและผลเฉลยที่แท้จริงสามารถเขียนได้ดังสมการที่(1)

$$P_{LB} < P_{EXACT} < P_{UB} \quad (1)$$

โดยที่ P_{LB} = แรงวิบัติขอบเขตล่าง
 P_{EXACT} = แรงวิบัติที่แท้จริง
 P_{UB} = แรงวิบัติขอบเขตบน

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในอดีต

4.1. แบบจำลอง Anisotropic soils

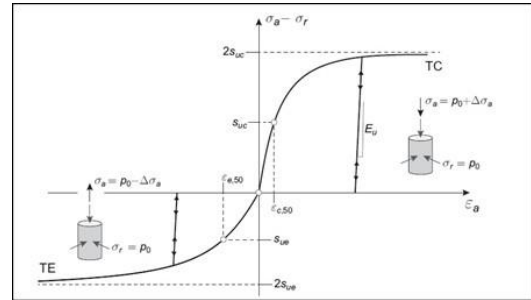
สำหรับแบบจำลองในการศึกษารูปแบบ Anisotropic Undrained Shear (AUS) เป็นรูปแบบที่พัฒนาต่อมาจากรูปแบบ Generalized Tresca Model ซึ่งเป็นการหาหน่วยแรงต่างๆ ในดินเหนียวหรือวัสดุที่คล้ายคลึงดินเหนียว ซึ่งในส่วนนี้นั้นได้ศึกษาจากงานของ Krabbenhoft et al. (2018)

4.1.1. ค่าความแข็งแรง (Strength)

ธรรมชาติของดินเหนียวมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนเป็นแบบ Anisotropic หรือไม่สมนัยโดยคุณสมบัติแบบ Anisotropic นี้ขึ้นอยู่กับวิธีการของการเกิดการทดสอบดินแบบต่างๆประกอบด้วย การทดสอบแรงอัดสามแกน การทดสอบแรงดึงสามแกน และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย สำหรับ Anisotropic Soils Model จะมีตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนทั้งหมดสามตัว คือกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (S_{uc}) กำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามแกน (S_{ue}) และกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (S_{us})

4.1.2. ประวัติความเป็นมา (Background)

พฤติกรรมตัวอย่างสำหรับการหาค่า S_{uc} , S_{ue} และ S_{us} ในดินเหนียวแบบ Anisotropic หรือวัสดุที่คล้ายคลึงแบบเบื้องต้นจะแสดงพฤติกรรมดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พฤติกรรมตัวอย่างสำหรับแรงในสามแกนของดินเหนียวหรือวัสดุที่คล้ายคลึง

(Krabbenhoft et al., 2018)

ในการทดลองบดอัดแกนทั้งสามนั้นทำให้ได้ $\sigma_a = \sigma_r = P_0$ เป็นสมการตั้งต้นและเพิ่มความเครียดตามแนวแกนมากขึ้นเป็นจำนวนจนถึงจุดแตกหัก (Failure, $\Delta\sigma_a$) ที่สมการ $\sigma_a - \sigma_r = 2S_{uc}$

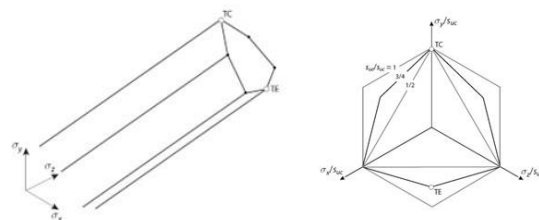
การทดลองในรูปแบบเดิมแต่เปลี่ยนการบดอัดเป็นการดึงออกและกระทำเช่นการบดอัดเมื่อถึงจุดแตกหัก (Failure) จะได้สมการใหม่ออกมาคือ $-(\sigma_a - \sigma_r) = 2S_{ue}$

ซึ่งสำหรับทั้งสองกรณีด้านบนนั้น จากการคำนวณแล้วนั้นค่าแรงบดอัดและค่าแรงดึงในทั้งแนวแกนปกติหรือแนวแกนเฉียงจะมีค่าเท่ากับ S_{uc} และ S_{ue} ตามลำดับ

4.1.3. Undrained Shear Strengths

จากการศึกษาในอดีตของค่า S_{uc} , S_{ue} และ S_{us} พบความสัมพันธ์ว่าดังสมการที่ (3)

$$S_{uc} > S_{us} > S_{ue} \quad (2)$$



รูปที่ 3 พื้นผิว Tresca ทั่วไปในรูปแบบ AUS ในรูปแบบ Isotropic (ในกรณี Shear Stress = 0), (Krabbenhoft et al., 2018)

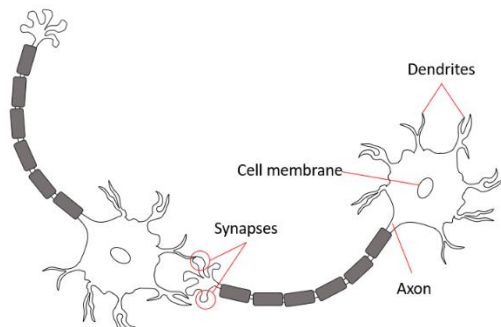
และ
$$0.5 \leq \frac{S_{uc}}{S_{uc}} \leq 1 \quad (3)$$

สำหรับ AUS Model $\frac{S_{uc}}{S_{uc}}$ ไม่สามารถมีค่าต่ำกว่า 0.5 เนื่องจากพื้นที่ผิวของการครากจะไม่นูนออกมาทำให้การคำนวณเกิดการผิดพลาดได้ นอกเหนือจากนี้ Krabbenhoft et al. (2018) ได้พบว่าค่า S_{us} มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างค่า S_{uc} และ S_{ue} เป็นไปตามความสัมพันธ์ด้านล่างดังนี้ (5)

$$S_{us} = \left(\frac{1}{2} S_{ue}^{-1} + \frac{1}{2} S_{uc}^{-1} \right)^{-1} = \frac{2S_{ue}S_{uc}}{S_{ue} + S_{uc}} \quad (4)$$

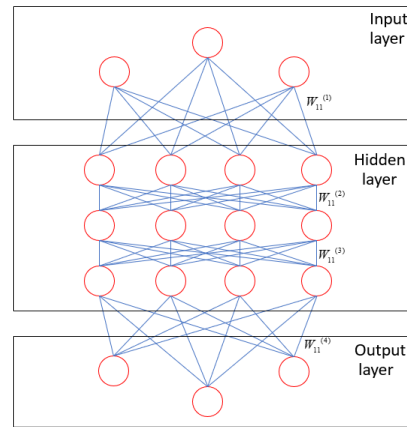
5. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN)

ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบเส้นใยประสาทของมนุษย์ที่เรียกว่าเซลล์ประสาทเพื่อประมวลผลข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันซึ่งเป้าหมายคือการสร้างเครื่องมือที่สามารถจดจำรูปแบบ การกรองข้อมูลความรู้ และความสามารถอีกหลายอย่างคล้ายสมองของมนุษย์แนวคิดสำหรับเทคนิคนี้เกิดจากการศึกษากระบวนการทำงานของสมองรวมถึงเซลล์ประสาทและไซแนปส์ในสมองดังภาพที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ประสาทหรือ นิวรอนและ จุดประสานประสาท(Synapses)



รูปที่ 4 แบบจำลองจุดประสานประสาท(Synapses)

เซลล์ประสาทในโครงข่ายประสาทเทียมรับการนำเข้าสู่ข้อมูลผ่านเดนไดรต์และสร้างการส่งออกข้อมูลผ่านแอกซอน แต่การนำเข้าสู่ข้อมูลมีตัวแปรน้ำหนักและเซลล์ประสาทแต่ละตัวมีค่าเกณฑ์ที่กำหนดว่าการส่งออกข้อมูลจะถูกส่งไปยังเซลล์ประสาทอื่นหรือไม่ การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมคือการคูณการนำเข้าสู่ข้อมูลด้วยน้ำหนักและเปรียบเทียบผลรวมกับค่าเกณฑ์หากผลรวมมากกว่าเกณฑ์การส่งออกข้อมูลจะถูกส่งไปยังเซลล์ประสาทอื่นๆ



รูปที่ 5 กระบวนการวิเคราะห์ของโครงข่ายประสาทเทียม

ตัวแปรที่ให้น้ำหนักและค่าเกณฑ์ในโครงข่ายประสาทเทียมมีความสำคัญต่อการจดจำซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรับรู้สามารถใช้เพื่อปรับตัวแปรที่มีค่าความไม่แน่นอนได้โดยการฝึกสอนถึงรูปแบบของสิ่งที่ต้องการจดจำให้กับระบบการประมวลผลแบบลำดับสามารถใช้เพื่อแก้ปัญหาการประมวลผลและปรับปรุงน้ำหนักของเครือข่าย หลังจากใส่แบบจำลองข้อมูลการฝึกอบรมลงในการประมวลผลแล้วค่าที่ได้รับจากการประมวลผลจะถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่คาดหวังและค่าความผิดพลาดจะถูกคำนวณและส่งกลับไปยังระบบเพื่อแก้ไขคะแนนน้ำหนักต่อไป

5.1. สถาปัตยกรรมข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยชั้นของโหนดหรือหน่วยพื้นฐานที่มีหน้าที่ประมวลผลการนำเข้าสู่ข้อมูลและสร้างการส่งออกข้อมูลโดยลำดับชั้นการนำเข้าสู่ข้อมูลสามารถมีหนึ่งโหนดหรือมากกว่าก็ได้และลำดับชั้นที่ซ่อนอยู่จะทำการคำนวณข้อมูลที่นำเข้าสู่ลำดับการวิเคราะห์คือการที่โหนดหนึ่งวิเคราะห์ให้สำเร็จและจะทำการส่งข้อมูลออกไปยังโหนดอื่นคล้ายโครงข่ายประสาทเทียม ลำดับชั้นการส่งออกข้อมูลสร้างการส่งออกข้อมูลของระบบประมวลผลจะนำมารวมกับน้ำหนักและความเอนเอียงของข้อมูลในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเป็นแบบจำลองกำหนดพฤติกรรมซึ่งในขณะที่ระบบประมวลผลจะถูกฝึกฝนให้มีการปรับตัวแปรเพื่อลดความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่คาดการณ์และผลลัพธ์จริงการปรับให้เหมาะสมได้มีการใช้วิธีความสัมพันธ์การสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักและความเอนเอียงของข้อมูลสิ่งนี้เกี่ยวข้องกับการคำนวณความสัมพันธ์การสูญเสียและการ

ปรับตัวแปรข้อมูลเพื่อลดความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่คาดการณ์และผลลัพธ์จริงในโครงข่ายประสาทเทียม

5.2. กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเกี่ยวกับการปรับน้ำหนักและลดข้อผิดพลาดของโครงข่ายข้อมูลจะทำการตอบสนองต่อข้อมูลเพื่อปรับปรุงความสามารถในการคาดการณ์ที่แม่นยำในระหว่างการฝึกโครงข่ายประสาทเทียม จะรับข้อมูลการนำเข้าข้อมูล(Input)และสร้างการส่งออกข้อมูล(Output) โดยผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ต้องการและผลต่างระหว่างทั้งสองจะคำนวณซึ่งใช้ความสัมพันธ์ข้อมูลหน้าที่คำนวณความผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้และผลลัพธ์ที่ต้องการแล้วนำไปใช้ในการปรับน้ำหนักและลดข้อผิดพลาดที่ผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ระบบประมวลผลจะทำการปรับน้ำหนักและลดข้อผิดพลาดเพื่อให้แสดงถึงรูปแบบและความสัมพันธ์ในข้อมูลการฝึกอบรมได้ดียิ่งขึ้นสิ่งนี้ทำให้โครงข่ายสามารถสรุปข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อนและคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำ กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายนิวรัลเกี่ยวข้องกับการปรับน้ำหนักและความคลาดเคลื่อนของโครงข่ายเพื่อลดความสัมพันธ์ต้นทุนให้เหลือน้อยที่สุดโดยใช้ลำดับการประมวลผลในการแก้ปัญหาการเผยแพร่กลับและอัลกอริทึมการปรับให้เหมาะสม โครงข่ายยังคงเรียนรู้และปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากได้รับการฝึกอบรมเกี่ยวกับข้อมูลเพิ่มเติมและปรับปรุงผ่านการใช้เทคนิคต่างๆ

5.3. การทำเหมืองข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบและประมวลผลข้อมูลจำนวนมากเพื่อค้นหาความสัมพันธ์ที่เป็นประโยชน์และสรุปผล มีการใช้วิธีการต่างๆ เพื่อดึงข้อมูลจากข้อมูลจำนวนมาก รวมถึงชุดซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อวัตถุประสงค์ในการตัดสินใจและการทำนาย

6. ตัวแปรที่ศึกษา

วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองสามมิติของฐานรากปล่องทรงกระบอกในรูปแบบภายใต้ระบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) ซึ่งเป็นสามารถวิเคราะห์ในระบบแบบสองมิติได้ด้วยโปรแกรม OptumG2 ซึ่งโปรแกรมสามารถหาผลเฉลยของปัญหาภายใต้ระบบสมมาตรรอบแกนโดยอัตโนมัติ งานวิจัยนี้จำลองให้ดินเหนียวเป็นเอลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบ Anisotropic โดยใช้ AUS Model ในโปรแกรม OptumG2 ฐานราก

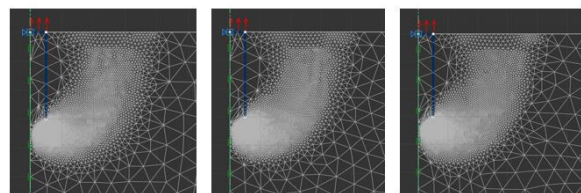
ปล่องแบบระนาบและแบบทรงกระบอกโดยทำการจำลองเป็นขอบเขตของปัญหาที่มีความซับซ้อนออกเป็นแบบระบบระบบสมมาตรรอบแกนในงานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการทดลองแบบจำลองทั้งสิ้น 216 กรณี โดยการวิเคราะห์การเปรียบเทียบโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า $\frac{L}{D}$ ทั้งสิ้น 6 ค่า ได้แก่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α) ทั้งสิ้น 6 ค่า คือ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, ค่าอัตราส่วนระหว่างการขยายแบบสามแกนกับการบีบอัดสามแกน ($\frac{S_{uc}}{S_c}$) หรือ r_e ซึ่งเป็นกำลังรับแรงเฉือน ทั้งสิ้น 6 ค่า ได้แก่ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0

7. ผลการศึกษา

จากการศึกษาได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α) มาวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 6 ค่า ได้แก่ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 พบว่าเมื่อสังเกตในส่วนของการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีดังนี้

7.1. กรณีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ (r_e) มีการเปลี่ยนแปลง

สังเกตได้ว่ามีความแตกต่างกันของวงการวิบัติเพียงเล็กน้อยในส่วนปลายของฐานรากและด้านขอบบนของดินเหนียวโดยจากรูปที่ 6 จะพบกรณีการวิบัติในรูปแบบ Log Spiral จากปลายล่างสุดของฐานไปจนถึงผิวดิน

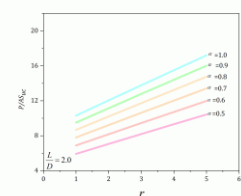
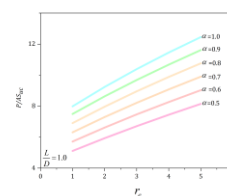


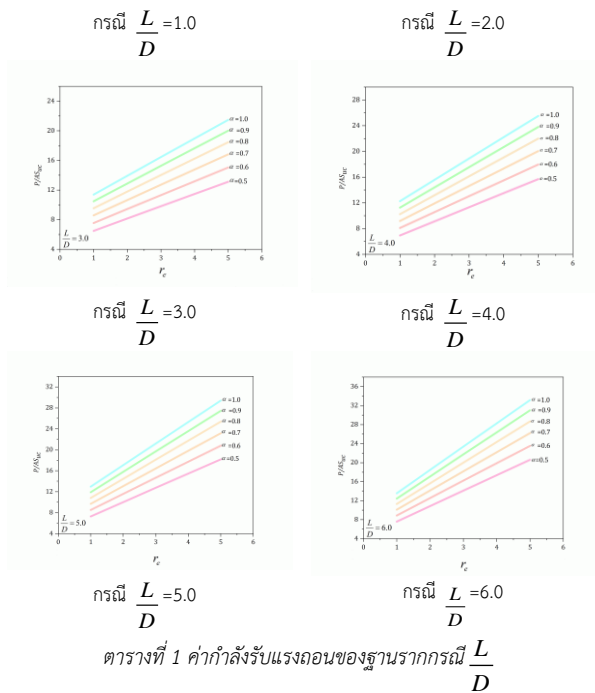
$r_e = 0.5$ $r_e = 0.7$ $r_e = 1.0$

รูปที่ 6 การวิบัติของ Element กรณี Axisymmetric

ที่ $\frac{L}{D} = 3.0$, $\alpha = 1.0$ และ $r_e = 0.5, 0.7, 1.0$ ตามลำดับ

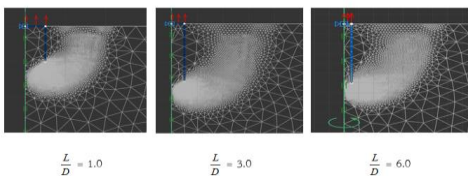
โดยหลังจากวิเคราะห์จากตารางที่ 1 แสดงตัวแปรของแรงถอนวิบัติไร้มิติ ($\frac{P}{AS_{uc}}$) โดย $A = \frac{\pi D^2}{4}$ จะเห็นได้ว่า ค่า r_e ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่าๆกัน สังเกตได้จากกราฟจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงซึ่งการเพิ่มค่า r_e ขึ้น 0.1 หน่วย จะทำให้ค่ากำลังรับแรงถอนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.4 หน่วย หรือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ



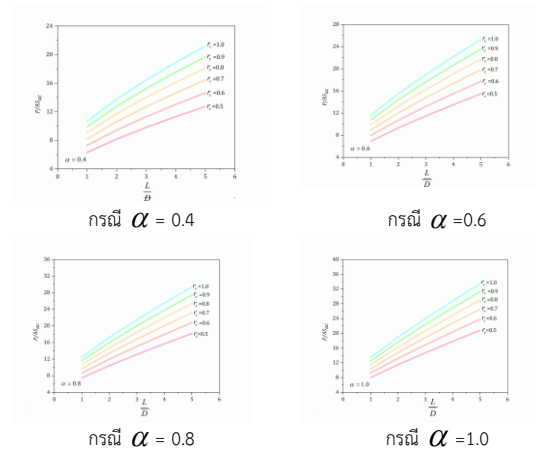
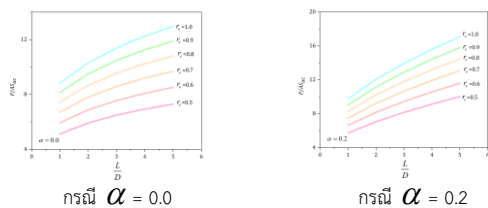


7.2. กรณีค่า $\frac{L}{D}$ มีการเปลี่ยนแปลง

ในกรณีของฐานรากปล่องแบบสามมิตินั้นกรณีของ $\frac{L}{D}$ แตกต่างจากกรณี $\frac{L}{D}$ เนื่องจากฐานรากปล่องสามมิติแบบทรงกระบอกจะจำลองภายใต้ระบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) ซึ่งเป็นระบบแบบสองมิติและค่าการเปรียบเทียบของการวิบัติซึ่งเป็นผลมาจากค่าความแตกต่างของ $\frac{L}{D}$ เป็นดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การแตกตัวของ Element กรณี Axisymmetric ที่ $\alpha = 0.4$, $r_e = 0.7$ และ $\frac{L}{D} = 1.0, 3.0, 6.0$ ตามลำดับ

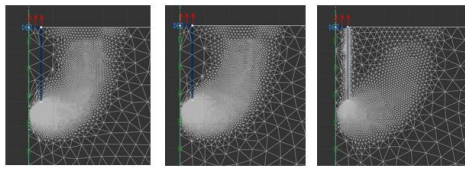


ตารางที่ 2 ค่ากำลังรับแรงถอนกรณี $\frac{L}{D}$ เปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 2 จะสังเกตได้ว่า $\frac{L}{D}$ ที่ระยะ $\alpha = 1.0$ อัตราส่วนความลึกและความกว้างเมื่อเทียบกับระยะฝังประมาณ 1 เท่าของความยาว และ 2.5 เท่าของความยาว ตามลำดับ จะมากกว่าที่ระยะ $\frac{L}{D}$ ที่มากขึ้น (3.0, 6.0) ซึ่งจะลดลงประมาณ 0.5 เท่าของความยาว และ 1.0 เท่าของความยาว ตามลำดับ ในทุกค่าอัตราส่วน และจากการสังเกตค่ากำลังรับแรงถอนจากการเปลี่ยนแปลงค่า $\frac{L}{D}$ พบว่า เมื่อค่า $\frac{L}{D}$ เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงถอนที่ใช้มากขึ้นด้วย เนื่องจากค่า Friction ระหว่างพื้นผิวภายในดินของฐานรากและดินเหนียวเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากค่าระยะฝังในดินเพิ่มขึ้น

7.3. กรณีค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α) มีการเปลี่ยนแปลง

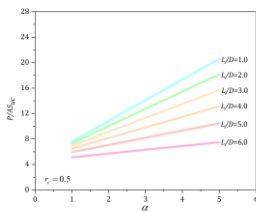
การเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α) มาวิเคราะห์เช่นเดียวกันโดยทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 6 ค่า ได้แก่ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยหลังจากการวิเคราะห์ในส่วนของการวิบัติแล้วนั้น พบว่า เมื่อสังเกตในส่วนของการวิบัติที่ค่า α ที่เท่ากับ 0.0 นั้นดินในพื้นที่ข้างในฐานรากจะถูกกำหนดให้มีแรงดึงแบบสมบูรณ์ (Full-tension) แต่หากสังเกตไปที่ค่า α ณ ตำแหน่งที่ 1.0 จะเห็นถึงการวิบัติในส่วนรอบข้างของฐานรากอย่างชัดเจนกล่าวคือมีการวิบัติเกิดขึ้นโดยรอบฐานรากที่ฝังอยู่ในดินเนื่องจากดินเหนียวมีค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวมาก ดังรูปภาพที่ 8



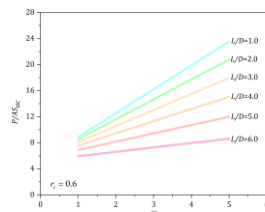
$\alpha = 0.0$ $\alpha = 0.4$ $\alpha = 1.0$

รูปที่ 8 การแตกตัวของ Element กรณี Axisymmetric ที่ $\frac{L}{D} = 3.0$, $r_e = 0.7$ และ $\alpha = 0.0, 0.4, 1.0$ ตามลำดับ

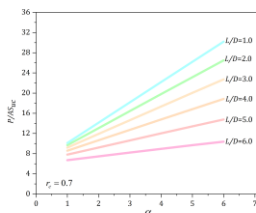
และในค่ากำลังรับแรงดัดในรูปแบบตัวแปรไร้มิติในกรณีค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว (α) มีการเปลี่ยนแปลงนั้นจากลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงดัดเนื่องจากผลของ α กล่าวคือปัจจัยข้างต้นจะมีผลมากขึ้นหากค่า $\frac{L}{D}$ มีค่ามาก เหตุผลเนื่องมาจากฐานรากที่ฝังลงในดินมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่า Friction ที่เกิดระหว่างฐานรากและดินเหนียวมากขึ้นตามไปด้วย โดยสังเกตได้จากตารางที่ 3



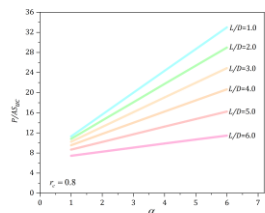
กรณี $r_e = 0.5$



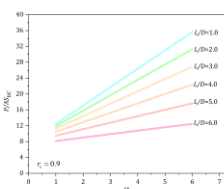
กรณี $r_e = 0.6$



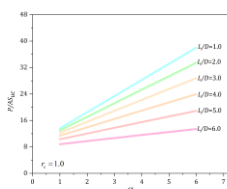
กรณี $r_e = 0.7$



กรณี $r_e = 0.8$



กรณี $r_e = 0.9$



กรณี $r_e = 1.0$

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับแรงดัดของฐานรากกรณี (α) มีการเปลี่ยนแปลง

8. ผลการวิเคราะห์โดยโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมได้จำลองการทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันการส่งชุดข้อมูลนำเข้าต่างๆโดยเริ่มจากการกำหนดสถาปัตยกรรมของข้อมูลเป็นชั้นซึ่งแต่ละชั้นประกอบไปด้วยชั้นข้อมูลนำเข้าชั้น

ประมวลผลข้อมูลและชั้นส่งออกข้อมูล หลังจากนั้นโครงข่ายจะทำการเพิ่มหน่วยน้ำหนักในการประมวลผลข้อมูลที่สร้างเพื่อสร้างแบบจำลองต้นแบบเพื่อทำการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียม บทความนี้มีรูปแบบการฝึกฝนตามวิธีดังต่อไปนี้

1. ทำการเลือกรูปแบบโครงสร้างข้อมูลเพื่อทำการประมวลผล โดยงานวิจัยนี้เป็นการทำแบบแบ่งชั้นข้อมูลประมวลผลโดยชั้นแรกเป็นการนำเข้าข้อมูล ชั้นที่สองเป็นการประมวลผลข้อมูล และชั้นสุดท้ายเป็นการส่งออกข้อมูล

2. เพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการประมวลผลกับแบบจำลอง

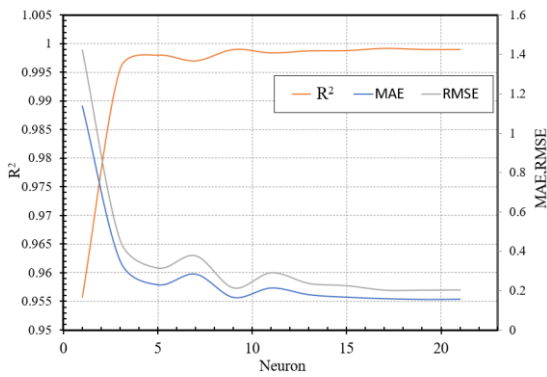
3. นำเข้าข้อมูลที่ต้องการประมวลผลในการศึกษานี้คือค่ากำลังรับแรงดัดของฐานรากแบบปล่องจากการทดสอบผ่าน OptumG2 โดยมีจำนวนเท่ากับ 216 บทความนี้ได้ใช้การแบ่งข้อมูลแบบเป็นหลายส่วนเท่ากัน (Cross-validation test) เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

4. ทำการแยกข้อมูลเมื่อทำการประมวลผลโดยแบ่งเป็น 2 ตัวอย่างคือจากการสร้างการประมวลผลและสอดคล้องตามผลการตอบสนองซึ่งกลุ่มนี้เรียกว่า กลุ่มที่ได้รับการฝึกสอน (Training Group) เพื่อหาแบบจำลองตัวอย่างในการฝึก

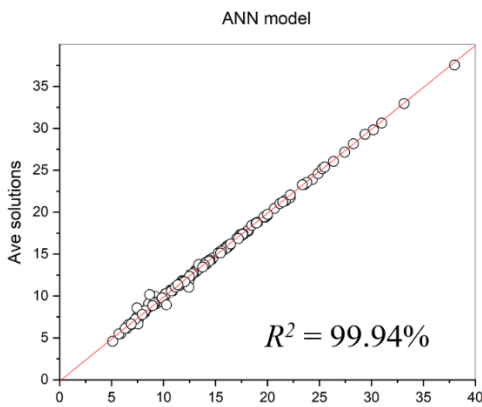
5. เมื่อได้แบบจำลองทำการนำเข้าข้อมูลจากการประมวลผลจำนวน 216 ตัวอย่าง มาเป็นข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกใน ANN เพื่อใช้ในการฝึกสอนด้วยขั้นตอนการประมวลผลแบบย้อนกลับจนทำให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สัมบูรณ์ของแบบจำลอง

6. นำเข้าข้อมูลจากการกระตุ้นจำนวน 216 โดยที่ไม่มีผลการทดสอบเข้าสู่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่ได้รับการฝึกสอนและคำนวณหาผลการตอบสนองจากโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

7. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สัมบูรณ์เพื่อกำหนดความแม่นยำของการคาดคะเนของแบบจำลองการจำลองการฝึกอบรมของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำของการคาดคะเนของโมเดลและทำให้มีประโยชน์มากขึ้นสำหรับการตัดสินใจหลังจากได้รับผลการฝึกสอนจึงทำการคำนวณหาผลการตอบสนองจากโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สัมบูรณ์ต่อไป จากผลการทดสอบ 216 ตัวอย่างได้ทำการฝึกสอนผ่านโครงข่ายประสาทเทียมพบว่าค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) มีค่า 0.178 ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่า 0.2367 และมีค่าความถูกต้องแม่นยำถึง $R^2 = 99.94\%$ ดังรูปที่ 9



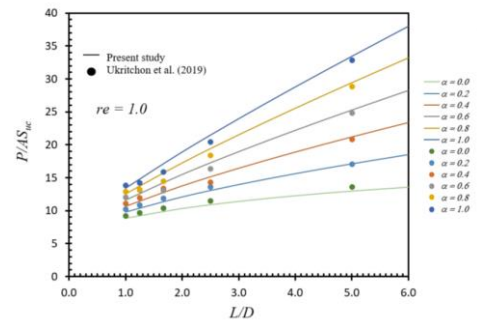
รูปที่ 9 ผลลัพธ์การพยากรณ์โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เมื่อนำเสนอผลการเปรียบเทียบโดยแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วน ในส่วนที่ 1 ได้นำข้อมูลจากการทดลองโดยแบบจ้องลงไฟในต้อลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับข้อมูลส่วนที่สองคือค่าพยากรณ์พบว่าค่าพยากรณ์มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบชุดข้อมูลจริงและผลการพยากรณ์

9. การเปรียบเทียบผลงานในอดีต

จากการศึกษาผลงานในอดีตเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Ukritchon et al. (2019) ที่ใช้ Tresca Model สำหรับ Isotropic Clay ในการวิจัยแต่งงานวิจัยที่จัดทำนี้ใช้แบบจำลองแบบ AUS model และจากรูปที่ 11 สามารถตรวจสอบได้ว่าผลเฉลยของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยของ Ukitchon et al. (2019)



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบความแตกต่างของ $\frac{P}{AS_{uc}}$ ที่ได้จากงานวิจัยของ Ukritchon et al. (2019)

10. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนออกของฐานรากปล่องโดยฐานรากแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) ในดินเหนียว ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิตและหาผลเฉลยทั่วไปในรูปตัวแปรไร้มิติโดยมุ่งเน้นศึกษา 3 ตัวแปรได้แก่ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว α , ค่าอัตราส่วน $\frac{L}{D}$ และค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้

จากการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกน r_u พบว่า 1) การเพิ่มค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของฐานรากเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นมากกว่านั้นหากค่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะฝังที่มากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับดินมากขึ้น 2) ค่าอัตราส่วนมีผลเช่นเดียวกับกรณีค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว คือมีการเพิ่มขึ้นในรูปแบบสม่าเสมอปกติ เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วน จะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากยิ่งขึ้นเนื่องมาจากระยะฝังที่มากขึ้น และค่าการยึดเกาะของฐานรากและดินเหนียวมากขึ้น

3) ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแตกต่างกันระหว่างสองหัวข้อแรก เนื่องจากเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนของฐานรากซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบอย่างสม่าเสมอโดยไม่ได้รับผลกระทบจากค่าอัตราส่วน และค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว เนื่องจากเส้นตรงทุกเส้นในกราฟมีความชันใกล้เคียงกัน สาเหตุที่ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลของการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวเป็นส่วนสำคัญ เนื่องจากค่าอัตราส่วนสัมพันธ์กับการยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียวการเพิ่มค่าอัตราส่วนจะทำให้ระยะฝังของฐานรากลงดินเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของดินกับฐานรากปล่องแนวระนาบมากยิ่งขึ้น

โดยการศึกษาข้างต้นได้ศึกษาร่วมกับการทำการพยากรณ์ในโครงข่ายประสาทเทียมได้ว่าค่าความถูกต้องมีความถูกต้องสูงสุดถึง

99.94% มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.2187 และมีค่าเฉลี่ยของผลต่างสมบูรณ์ของข้อมูลมีค่าเท่ากับ 0.1739 จึงสรุปได้ว่าการใช้ข้อมูลกำลังรับแรงถอนออกของฐานราก ปล่องโดยฐานรากแบบสมมาตรรอบแกนโดยใช้ทั้งสามตัวแปรในการวิเคราะห์เมื่อดูจากผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุขเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2010), ปฐพีกลศาสตร์พลาสติกชนิดและทฤษฎี สถานะวิกฤต, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] Sloan, SW. (2013). Geotechnical stability analysis. *Geotechnique*. 63(7), 531-72.
- [3] Davis, E.H. and Christian. J.T. (1971). Bearing capacity of anisotropic cohesive soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 97(5), pp.753-769.
- [4] Drucker, D.C., Prager, W. and Greenberg, H.J. (1952). Extended limit design theorems for continuous media. *Quarterly of Applied Mathematics*, 9, pp.381-389.
- [5] Keawsawasvong, S., Ukritchon, B. (2016). ไฟไนต์เอลิเมนต์ limit analysis of pullout capacity of planar caissons in clay. *Computers and Geotechnics*, 75, pp.12-17.
- [6] Krabbenhoft, K., Galindo-Torres, S.A., Zhang, X. and Krabbenhoft, J. (2019). AUS: Anisotropic undrained shear strength model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43, pp.2652-2666.
- [7] Ukritchon, B. and Keawsawasvong, S. (2016), Undrained pullout capacity of cylindrical suction caissons by ไฟไนต์เอลิเมนต์ limit analysis. *Computers and Geotechnics*, 80, pp.301-311.
- [8] Ukritchon, B., Wongtoythong, P. Keawsawasvong, S. (2018). New design equation for undrained pullout capacity of suction caissons considering combined effects of caisson aspect ratio, adhesion factor at interface, and linearly increasing strength. *Applied Ocean Research*, 75, pp.1-14.
- [9] Lai, et al. (2022). Bearing capacity of conical footing on anisotropic and heterogeneous clay using FEA and ANN. Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam.