

กำลังแบกทานแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียว แบบไม่สมนัยโดยใช้แบบจำลอง NGI-ADP

Bearing Capacity of Strip Foundations on Anisotropic Clay Using NGI-ADP Constitutive Model

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุกฤษฏ์ชน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่เท่ากันทุกทิศทางของดินเหนียวเพื่อหาแฟกเตอร์ของกำลังแบกทานวิบัติของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวโดยใช้แบบจำลอง NGI-ADP วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติบนระนาบความเครียดถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาแฟกเตอร์กำลังแบกทานวิบัติที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้มาจากทดสอบโดยการทดสอบแรงเฉือนสามแบบซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบแรงอัดสามแกน (TC), การทดสอบแรงดึงสามแกน (TE) และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DSS) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Plaxis จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง NGI-ADP สำหรับการนำมาใช้ในงานออกแบบ

คำสำคัญ : กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่เท่ากันทุกทิศทาง ฐานรากต่อเนื่อง แบบจำลอง NGI-ADP กำลังแบกทาน
การศึกษาเชิงตัวแปร

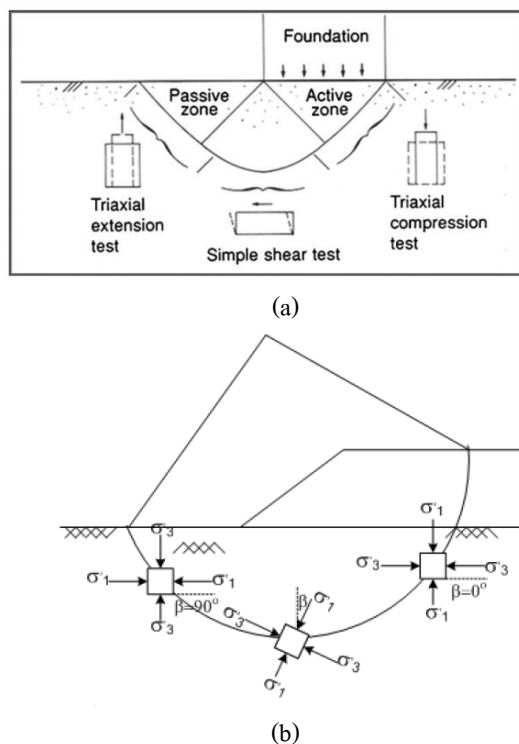
Abstract

In this paper, parametric studies of anisotropic shear strength of clay were performed to determine bearing capacity factor of strip foundations on clay by using NGI-ADP constitutive model. The two dimensional plane strain finite element was employed to determine the undrained bearing capacity factor as a function of dimensionless variables of undrained shear strength obtained from three modes of shearing, including undrained tests of triaxial compression (TC), triaxial extension (TE) and direct simple shear (DSS). The computational results obtained from geotechnical software, namely Plaxis, were compared with the exact solutions to verify the capabilities of NGI-ADP constitutive model in design practice.

Keywords : Anisotropic shear strength, Strip foundation, NGI-ADP constitutive model, Bearing capacity,
Parametric study

1. บทนำ

ธรรมชาติของดินเหนียวมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนเป็นแบบ Anisotropic หรือ ไม่สมนัย โดยคุณสมบัติแบบ Anisotropic นี้ขึ้นอยู่กับ Mode การเฉือนของการทดสอบดินแบบต่างๆ ประกอบด้วย การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Compression, TC), การทดสอบแรงดึงสามแกน (Triaxial Extension, TE) และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear, DSS) ซึ่งการทดสอบทั้งสามนี้จะใช้ผลการเปลี่ยนทิศทางของหน่วยแรงหลัก (Major Principal Stress, σ_1) ที่แตกต่างกันดังที่แสดงในรูปที่ 1(a) [1] และ 1(b) [2]



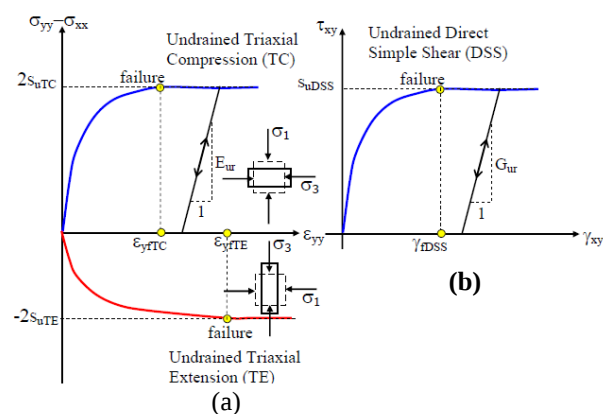
รูปที่ 1 ผลการเปลี่ยนทิศทางของหน่วยแรงหลัก (Major Principle Stress, σ_1) ที่แตกต่างกันของสามการทดสอบ (a) Mode การเฉือน (b) ทิศทางของหน่วยแรงหลัก

จากรูปที่ 1(b) จะเห็นได้ว่าทิศทางของหน่วยแรงหลักของทั้งสามการทดสอบจะแตกต่างกัน ในส่วนใต้ฐานรากหรือ Active Zone ทิศทางของหน่วยแรงหลัก (σ_1) จะเป็นแนวตั้งหรือมี $\beta = 0^\circ$ สำหรับการทดสอบดินในส่วนนี้สามารถใช้การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

(Triaxial Compression, TC) สำหรับหาทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ Active Zone (s_{UA}) ได้

ถัดจากส่วน Active Zone ทิศทางของหน่วยแรงหลักจะเปลี่ยนจากแนวตั้งเป็น β เท่ากับค่าใดๆที่อยู่ระหว่าง $0-90^\circ$ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบดินแบบการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear, DSS) ที่มี $\beta = 45^\circ$ สำหรับหาทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำตรงตำแหน่งที่อยู่ระหว่าง Active Zone กับ Passive Zone (s_{UDSS})

สำหรับส่วน Passive Zone จะมีทิศทางของหน่วยแรงหลัก (σ_1) ที่เป็นแนวราบหรือมี $\beta = 90^\circ$ สำหรับการทดสอบดินในส่วนนี้สามารถใช้การทดสอบแรงดึงสามแกน (Triaxial Extension, TE) สำหรับหาทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ Passive Zone (s_{UP}) ได้ รายละเอียดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดที่ได้ที่ได้จากการทดสอบดินทั้งสามการทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดที่ได้ที่ได้จากการทดสอบดินทั้งสามแบบ (a) TC และ TE, (b) DSS

ในอดีตมีงานวิจัยมากมายได้ศึกษาถึงพฤติกรรมกรรับแรงเฉือนเป็นแบบ Anisotropic หรือ ไม่สมนัยของดินเหนียวทั่วไป เช่นงานวิจัยของ Sambhandharaksa [1], Kurukulasuriya et al. [3], Zdravjivic and Jardine [4]

รวมไปถึงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่นงานวิจัยของ Chim-oye [2], Sangtian [5], Satawiriya [6]

Grimstad et al. [7] ได้พัฒนา NGI-ADP Constitutive Model เพื่อให้สามารถใช้ได้ในโปรแกรม Plaxis2D (Brinkgreve, [8]) โดยสามารถป้อนค่า s_{UA} , s_{UDSS} , s_{UP} เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้โดยตรง สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมของ NGI-ADP Constitutive Model สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [7-8]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษากลศาสตร์กำลังแบกฐานของฐานรากดินเหนียวต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหานี้ โดยใช้เงื่อนไขระนาบความเครียด (Plane Strain) และกำหนดให้แบบจำลองของวัสดุเป็นแบบ NGI-ADP Constitutive Model

2. การหาลำดับแบกฐานของฐานราก

การหาลำดับแบกฐานที่ปลายด้านล่างของเสาเข็ม ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Terzaghi [9] ซึ่งเสนอสมการกำลังรับแรงแบกฐานของฐานรากบนดินเหนียวแบบ Isotropic ไว้ดังนี้

$$q = N_c s_u \quad (1)$$

โดย q คือความดันเฉลี่ยแบกฐาน (Average Bearing Pressure) ที่ปลายของฐานราก s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว Isotropic และ N_c คือแฟกเตอร์กำลังแบกฐานของฐานราก (End Bearing Capacity Factor)

ต่อมา Davis and Christian [10] ได้เสนอลำดับรับแรงแบกฐานของดินเหนียวบนดินเหนียวแบบ Anisotropic โดยใช้วิธี Limit Analysis ซึ่งค่า N_c ที่ได้เป็นผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) โดยมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบทั้งสามแบบ คือ s_{UA} , s_{UDSS} , s_{UP} ค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งสามแบบนี้จะถูกจัดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameter) คือ b/a ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\frac{b}{a} = \frac{s_{uDSS}}{\sqrt{s_{uA} s_{uP}}} \quad (2)$$

เงื่อนไขของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบสามวิธีที่สามารถป้อนในโปรแกรม Plaxis คือ $s_{UA} \geq s_{UDSS} > s_{UP}$ โดยกำลังรับแรงเฉือนที่มากที่สุดคือกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน, s_{UA} รองลงมาคือกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย, s_{UDSS} และที่น้อยที่สุดคือกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามแกน, s_{UP} แต่ทั้งนี้ NGI-ADP Constitutive Model สามารถยอมให้ s_{UA} เท่ากับ s_{UDSS} ได้ ดังนั้นกรณีของ b/a ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้คือ $b/a = 1.183$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ $s_{UA} = s_{UDSS}$

กำลังรับแรงแบกฐานของฐานรากบนดินเหนียวแบบ Anisotropic ที่เสนอโดย Davis and Christian [10] จะถูก Normalize ด้วยตัวแปรสองตัวคือ s_{UA} และ s_{UP} ดังที่แสดงในสมการที่ 3

$$N_c = \frac{2q}{s_{uA} + s_{uP}} \quad (3)$$

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Davis and Christian [10] เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง NGI-ADP สำหรับการนำมาใช้งานนอกแบบ

3. วิธีการวิเคราะห์และการกำหนดแบบจำลองของปัญหา

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ Plaxis2D โดย Brinkgreve et al. [8] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหา

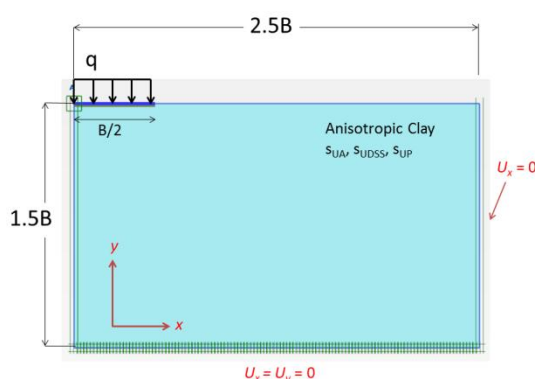
3.1 แบบจำลองของดินเหนียว

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์จำลองให้ดินเหนียวเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรสองมิติ ซึ่งมีคุณสมบัติวัสดุแบบ NGI-ADP อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน $(E/s_{uA}) = 500$ (เป็นค่าที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์หา Limit State โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ [10]) โดยมีมุมเสียดทานภายใน $(\phi) = 0$

อัตราส่วนของปัวซอง (ν) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร และดินเหนียวเป็นดินแบบไม่มีหน่วยน้ำหนักหรือ Weightless Soil ซึ่งมี $\gamma = 0$ การกำหนดให้ดินไม่มีหน่วยน้ำหนักเพื่อจะหาค่ากำลังแบกทานซึ่งไม่มีผลของหน่วยน้ำหนักและอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก (Surcharge Factor) [9] ดังนั้นค่าแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากจะเป็นผลจากอิทธิพล b/a เท่านั้น

3.2 เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่กระทำบนฐานราก

ปัญหาเป็นแบบฐานรากยาวต่อเนื่อง (Strip Foundation) บนระนาบความเครียด (Plane Strain) ซึ่งแบบจำลองจะถูกจำลองเพียงครึ่งเดียวของความกว้าง $0.5B$ เนื่องจากระนาบสมมาตร (Symmetry) ขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายสุดและขอบขวาสุดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ ในส่วนของความดันเฉลี่ยแบกทาน (Average Bearing Pressure, q) จะถูกจำลองเป็นความดันแบบกระจายบนแผ่นเหล็กที่มีความแข็งเกร็งมาก (Rigid strip footing) รายละเอียดของแบบจำลองด้วยโปรแกรม Plaxis2D แสดงในรูปที่ 3

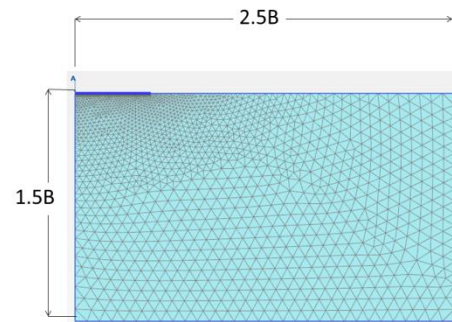


รูปที่ 3 แบบจำลองในการหาแฟกเตอร์กำลังแบกทานของฐานรากด้วยโปรแกรม Plaxis

3.3 โครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และหน่วยแรงภายในชิ้นส่วน 12 จุด

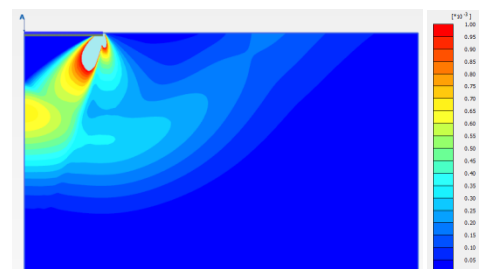
(Stress Points) การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 4



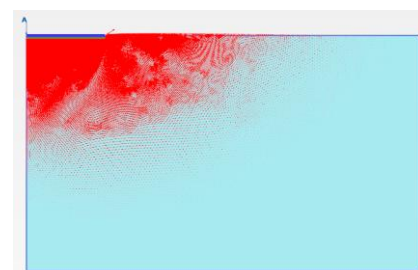
รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์

4. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 5-7 แสดงตัวอย่างกลไกการวิบัติของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic ผลกลไกการวิบัติประกอบด้วยเส้นการเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) และเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Total Increment Vector) เปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ $b/a = 0.3, 0.5$ และ 1 ตามลำดับ เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของตัวแปร b/c ต่อกลไกการวิบัติของปัญหานี้

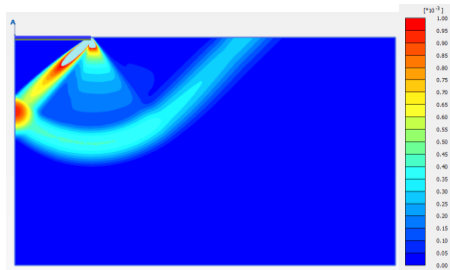


(a)

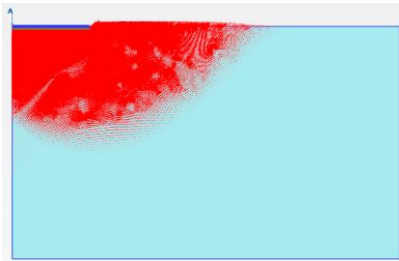


(b)

รูปที่ 5 กลไกการวิบัติของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic ที่ $b/a = 0.3$ (a) เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน และ (b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

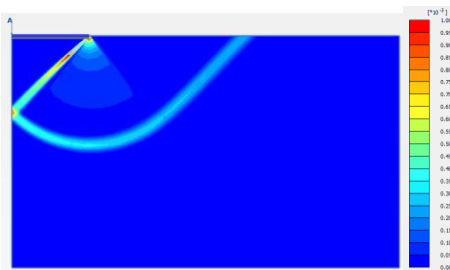


(a)

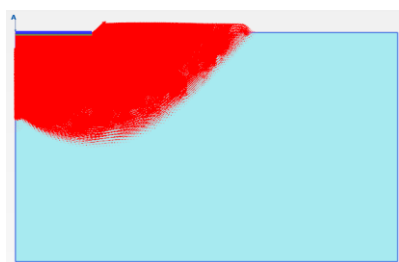


(b)

รูปที่ 6 กลไกการวิบัติของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic ที่ $b/a = 0.5$ (a) เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน และ (b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น



(a)

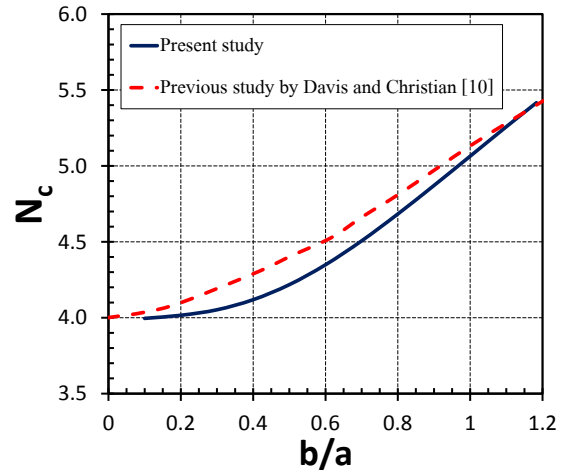


(b)

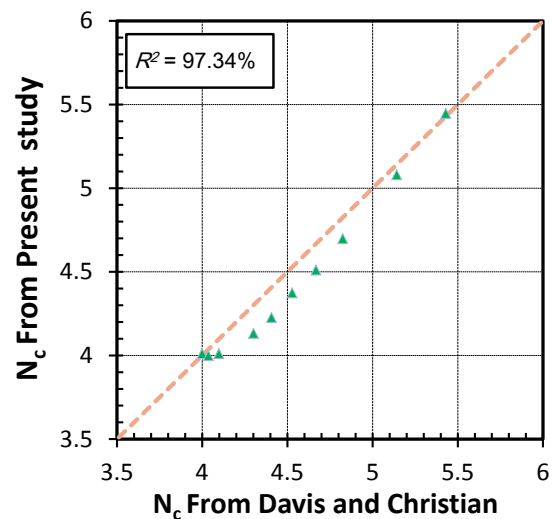
รูปที่ 7 กลไกการวิบัติของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic ที่ $b/a = 1$ (a) เส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน และ (b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5-7 พบว่ากลไกการวิบัติของปัญหาฐานรากยาวต่อเนื่องบนดินเหนียวที่มี b/a น้อย เช่น $b/a = 0.3$ และ 0.5 จะเกิดการเส้นการเพิ่มขึ้นของความเครียด

(Incremental Shear Strain Contour) เป็นพื้นที่ที่กว้างกว่ากรณีที่มี b/a เข้าใกล้ 1 หรือมากกว่า 1 สำหรับกรณีที่มีค่า $b/a = 1$ พบว่ากลไกการวิบัติมีลักษณะเหมือนกับการวิบัติแบบ Isotropic



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแบกทานของฐานราก (N_c) กับตัวแปรไร้มิติของกำลังรับแรงเฉือนทั้งสามแบบ (b/a)



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความแตกต่างของ N_c ที่ได้จากงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Davis and Christian [10]

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแบกทานของฐานราก (N_c) กับตัวแปรไร้มิติของกำลังรับแรงเฉือนทั้งสามแบบ (b/a) โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis โดยใช้แบบจำลอง NGI-ADP Constitutive Model กับผลเฉลย

ในอดีตของ Davis and Christian [10] ที่ได้มาจากวิธี Limit Analysis ซึ่งค่าที่ได้เป็นผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution)

ผลที่ได้จาก Plaxis คือค่า q หรือความดันเฉื่อยแบกทาน จากนั้นนำมาแปลงเป็นตัวแปรไร้มิติดังที่แสดงในสมการที่ 3 เพื่อให้เป็นค่า N_c

จากผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยในอดีตมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่จะเริ่มเท่ากันเมื่อ b/a มากกว่า โดยมีค่า $R^2 = 97.34\%$ ใกล้เคียงกับ 100% ดังที่แสดงในรูปที่ 9 จากผลการเปรียบเทียบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการใช้แบบจำลอง NGI-ADP Constitutive Model สำหรับปัญหาเรื่องกำลังแบกทานวิบัติของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic จะให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) โดยผลเฉลยที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยซึ่งปลอดภัยกว่า (Conservative)

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังรับเลื่อนแบบไม่เท่ากันทุกทิศทางของดินเหนียวโดยการใช้แบบจำลอง NGI-ADP Constitutive Model ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติบนระนาบความเครียดเพื่อวิเคราะห์หาแฟกเตอร์กำลังแบกทานวิบัติที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้มาจากทดสอบโดยการทดสอบแรงเฉือนสามแบบซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบแรงอัดสามแกน (TC), การทดสอบแรงดึงสามแกน (TE) และการทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่าย (DSS)

จากการเปรียบเทียบกับ Davis and Christian [10] พบว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยในอดีตมีค่ามากกว่างานวิจัยนี้เล็กน้อย แต่จะเริ่มเท่ากันเมื่อ b/a มากกว่า 1 มีค่า $R^2 = 97.34\%$ ใกล้เคียงกับ 100% จากรูปที่ 9 และ 10 สามารถสรุปได้ว่าการใช้แบบจำลอง NGI-ADP Constitutive Model สำหรับปัญหาเรื่องกำลังแบกทานวิบัติของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบ Anisotropic จะให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) โดยผลเฉลยที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยซึ่งปลอดภัยกว่า (Conservative)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sambhandharaksa, Stress-strain-strength Anisotropy of Varved Clays, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 1977.
- [2] W. Chim-oye, "Effect of Anisotropy to Shear Strength Behavior of Soft Bangkok Clay", Journal of Science and Technology, 18(4) pp. 50-59, 2553.
- [3] L. C. Kurukulasuriya, M. Oda, and H. Kazama, "Anisotropic of Undrained Shear Strength of an Over-Consolidated Soil by Triaxial and Plane Strain Tests", Soil and Foundations, Vol. 39, No. 1, pp. 21-29, 1999.
- [4] L. Zdravjivic, and R. J. Jardine, "The Effect on Anisotropy of Rotating the Principal Stress Axes During Consolidation", Geotechnique, Vol. 51, pp. 69-83, 2001
- [5] N. Sangtian, Vertical Direct Shear Test to Simulate the Field Vane Behavior of Soft Clay,"Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1996.
- [6] R. Satawiriya, Undrained Shear Strength Anisotropy of Soft Bangkok Clay, Master Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 1982.
- [7] G. Grimstad, L. Andresen, and H. P. Jostad, "NGI-ADP: Anisotropic Shear Strength Model for Clay". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 36, pp 483-497, 2012.
- [8] R. B. J. Brinkgreve, PLAXIS 2D Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers, 2002: www.plaxis.com.
- [9] K. Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics, New York: Wiley, 1943.
- [10] E. H. Davis, and J. T. Christian, "Bearing Capacity of Anisotropic Cohesive Soil". Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 97, pp. 753-769, 1971.
- [11] S.W. Sloan, "Geotechnical Stability Analysis". Géotechnique, Vol. 63(7), pp.531-572. 2013