

กำลังแบกทานของดินเหนียวแบบไม่สมนัยแบบสุ่มเชิงพื้นที่ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Bearing Capacity of Spatially Random Anisotropic Clay Using Finite Element Limit Analyses

ก้องตะวัน แสงจินดา^{1*} สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์²

¹ ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: kongtawan.sang@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการสุ่มเชิงพื้นที่ (Random Field) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้เทคนิค Random Adaptive Finite Element Limit Analysis (RAFELA) และการวิเคราะห์ขีดจำกัดบนและล่าง (Upper and Lower bound analysis) ของโปรแกรม OPTUM G2 โดยศึกษาอิทธิพลความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย เงื่อนไขของสภาพชั้นดิน และรูปทรงเรขาคณิต ที่มีผลต่อค่าตัวเลขเสถียรภาพ ความน่าจะเป็นของการวิบัติ อัตราส่วนความปลอดภัย และรูปแบบการวิบัติ ของปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียด การศึกษานี้กำหนดให้กำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัยมีรูปแบบการแจกแจงปกติแบบล็อก ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย และการสุ่มค่า (Random) โดยใช้การวิเคราะห์สโตคาสติก (Stochastic Analysis) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) โดยใช้กระบวนการทำวนซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure) มีค่าน้อยกว่า 0.001 นำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและความน่าจะเป็นของการวิบัติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาเสถียรภาพฐานรากตื้น จากการศึกษาพบว่าอิทธิพลความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการสุ่มค่าส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการกำหนดค่าที่แน่นอน นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัยมี

อิทธิพลต่อค่าเสถียรภาพ ความน่าจะเป็นของการวิบัติ อัตราส่วนความปลอดภัย และรูปแบบการวิบัติมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ

คำสำคัญ: กำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย, สหสัมพันธ์, ความแปรปรวนเชิงพื้นที่, การจำลองมอนติคาร์โล, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This article presents the combination of the random field methodology and Random Adaptive Finite Element Limit Analysis (RAFELA) with the upper and lower bound finite element limit analysis using OPTUM G2 software. The effect of spatial correlation length on anisotropic undrained shear strength, variation coefficient of anisotropic undrained shear strength, soil layers, and geometric shape conditions are studied in terms of stability numbers, failure probability, safety and failure patterns of strip footing under planestrain conditions. In this studied anisotropic undrained shear strength has a log-normal distribution pattern characterizing. Stability analysis is divided in two steps: deterministic analysis of anisotropic undrained shear strength and random method with stochastic analysis, the Monte Carlo simulation is used to simulate possibility with many iterative processes with Monte Carlo Simulation of anisotropic undrained random field shear strength. The results obtained from both methods were analyzed to determine the factor of safety that made the probability of failure less than 0.001 and present the appropriate factor of safety and probability of failure for the problem of shallow foundation. The results were that failure probability of anisotropic undrained shear strength is

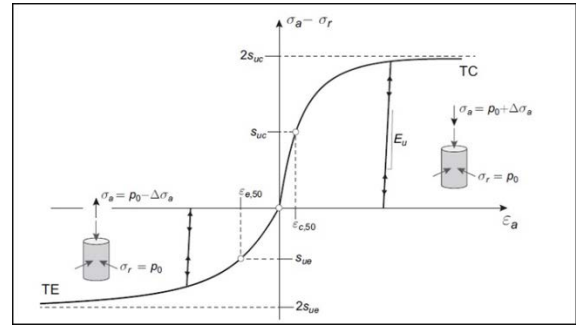
noticeably higher in random stability numbers compared to custom stability numbers. However, variation coefficient of anisotropic undrained shear strength influenced stability numbers, probability of failure, safety factors and failure patterns more than others.

Keywords: Anisotropic undrained shear strength, Random field, Spatial variability, Monte Carlo simulation, Finite element method

1. คำนำ

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เกิดจากการสลายตัวของหินและแร่ธาตุผสมกับอินทรีย์วัตถุทับซ้อนกันไปมา ทำให้ดินมีคุณสมบัติความแปรปรวนเชิงพื้นที่สูง สาเหตุความแปรปรวนเนื่องมาจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น องค์ประกอบของแร่ในดิน ประวัติความเค้น จนไปถึงกระบวนการสลายตัวทางกายภาพและทางกล ด้วยปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้ เป็นสาเหตุของความไม่แน่นอนของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากการรวบรวมข้อมูลดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามของ Phoon และ Kulhawy (1999) พบว่า พารามิเตอร์ด้านกำลังของดินเหนียว หรือ กำลังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคมีค่าเฉลี่ย (Mean of Undrained Shear Strength, μ_{S_u}) อยู่ในช่วง 10 ถึง 400 กิโลปาสกาล, ความแปรปรวน (Coefficient of Variation, COV%) อยู่ที่ร้อยละ 20 ถึง 50 และมีความยาวสหสัมพันธ์ หรือ ขนาดความผันผวนเชิงพื้นที่ของกำลังด้านเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ (Correlation Lengths or Scales of Fluctuations, CL_{S_u}) พบว่า ขนาดความผันผวนตามความลึก (CL_v) อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 6.1 เมตร และขนาดความผันผวนตามแนวราบ (CL_h) อยู่ในช่วง 46 ถึง 60 เมตร

Krabbenhøft et al. (2018) ได้อธิบายคุณสมบัติของดินเหนียวตามธรรมชาติมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนเป็นแบบไม่สมนัย (Anisotropic Undrained Shears, AUS) ที่พัฒนามาจาก Tresca Model Tresca et al. (1996) โดยคุณสมบัติแบบ Anisotropic ขึ้นอยู่กับ รูปแบบการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน 3 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Compression, TC), การทดสอบแรงดึงสามแกน (Triaxial Extension, TE) และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear, DSS) อีกทั้งมีตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนที่ได้รับการทดสอบ ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Undrained Shear Strength of Triaxial Compression, S_{uc}), กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแรงดึงสามแกน (Undrained Shear Strength of Triaxial Extension, S_{ue}) และกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Undrained Shear Strength of Direct Simple Shear, S_{us}) ตามลำดับ พฤติกรรมตัวอย่างสำหรับการหาค่า S_{uc} , S_{ue} และ S_{us} ในดินเหนียวแบบ หรือวัสดุที่คล้ายคลึงแบบเบื้องต้น อธิบายในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างพฤติกรรมสำหรับการทดสอบในแรงสามแกนของดินเหนียวหรือวัสดุที่คล้ายคลึง (Krabbenhøft et al., 2018)

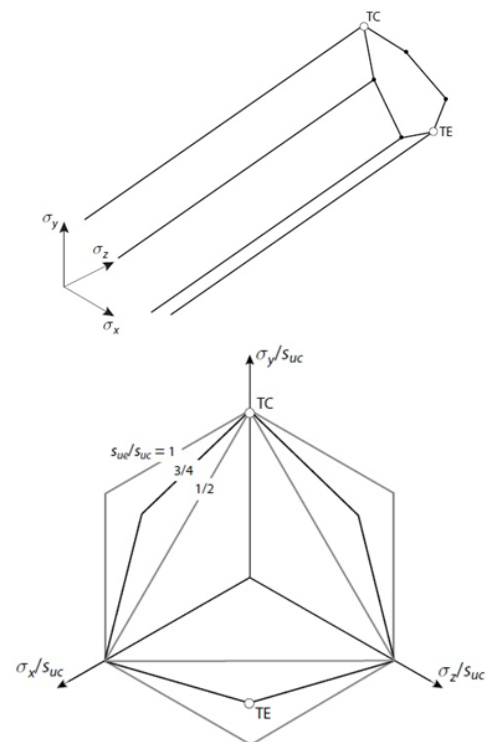
รูปที่ 1 อธิบายผลการทดลองแรงอัดทั้งสามแกน กำหนดให้ $\sigma_a = \sigma_r = p_0$ เป็นสมการตั้งต้น และเพิ่มค่าความเค้นตามแนวแกนมากขึ้นจนถึงจุดแตกหัก (Failure, $\Delta\sigma_a$) ได้ความสัมพันธ์ คือ $\sigma_a - \sigma_r = 2S_{uc}$

และทดลองในรูปแบบเดิม แต่เปลี่ยนการอัด (Compression) เป็นการดึง (Extension) และกระทำเช่นการอัด เมื่อถึงจุดแตกหัก (Failure) ได้ความสัมพันธ์ คือ $-(\sigma_a - \sigma_r) = -2S_{ue}$

จากสองกรณีข้างต้น เมื่อคำนวณแล้วนั้น ค่าแรงอัดและค่าแรงดึงทั้งในแนวแกนปกติหรือแนวแกนเฉียง จะมีค่าเท่ากับ S_{uc} และ S_{ue} ตามลำดับ

การศึกษาตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนประกอบไปด้วย S_{uc} , S_{ue} และ S_{us} พบความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1 และอธิบายในรูปที่ 2

$$S_{uc} < S_{us} < S_{ue} \quad (1)$$



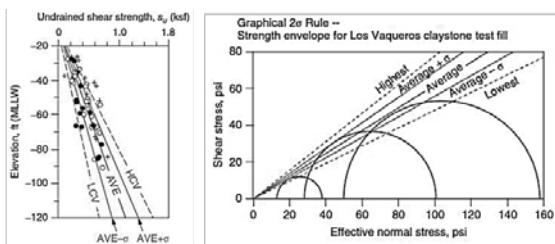
รูปที่ 2 พื้นผิว Tresca ทั่วไป ในดินรูปแบบ AUS รูปแบบ Isotropic (ในกรณี Shear Stress = 0), (Krabbenhøft et al., 2018)

สำหรับดินแบบ AUS Model กรณีความสัมพันธ์ระหว่าง S_{ue}/S_{uc} หรือค่า r_e ไม่สามารถมีค่าต่ำกว่า 0.5 เนื่องจากพื้นผิวของการครากจะไม่ขึ้นออกมา ทำให้การคำนวณเกิดการผิดพลาดได้ ดังแสดงในสมการที่ 2

$$0.5 \leq \frac{S_{ue}}{S_{uc}} \leq 1 \quad (2)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) โดยจะพิจารณาให้คุณสมบัติของดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ด้วยการวิเคราะห์นี้เป็นการกำหนดค่าที่แน่นอน ผลลัพธ์ที่ออกมาจะได้อัตราส่วนความปลอดภัยในการใช้งาน แต่ในแง่ทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคด้วยวิธีดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงปัญหาเรื่องความแปรปรวน หากมีบางจุดที่นำมาพิจารณากำลัังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ อาจทำให้เกิดการวิบัติและความเสียหายของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้ ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าข้อกำหนดก็ตาม

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีนักวิจัยนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้คือ วิธีการใช้กฎสามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3 σ rule) เป็นวิธีการพิภักโดยการนำค่าพารามิเตอร์ของดิน ที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางดินมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยทำการลากเส้นค่าเฉลี่ย (Average line) เส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง (Average $\pm \sigma$ line) ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเบื้องต้นด้วยค่าบนเส้นเฉลี่ย ใช้ค่าบนเส้นขอบบนและขอบล่างมาวิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดและสูงสุด ต่อมาทำการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ

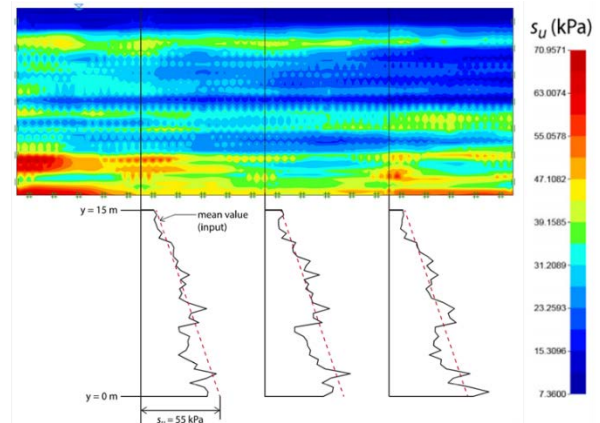


รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ในคุณสมบัติดินด้วยกฎสามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Duncan, 1996)

จากวิธีดังกล่าว แม้ว่าจะใช้หลักการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ แต่ก็ยังเป็นการใช้เลือกค่าใดค่าหนึ่งเป็นตัวแทนของค่าพารามิเตอร์ของดิน ที่ยังไม่ได้พิจารณาผลของขนาดความผันผวน หรือ ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน

ปัจจุบันได้มีการนำทฤษฎีต่างๆ มาช่วยแก้ไขปัญหาคาร์วิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยวิธีที่ได้รับความนิยม คือ ทฤษฎีสถานะสุ่ม (Random Field Theory) โดยวิธีนี้จะใช้หลักการทางสถิติมาช่วยสุ่มค่าพารามิเตอร์ของดินที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากข้อมูลของคุณสมบัติดิน ดังแสดงในรูปที่ 4 การวิเคราะห์นี้จะถูกเรียกว่าการวิเคราะห์แบบสุ่มค่า (Stochastic Analysis or Random Analysis) หรือ การ

วิเคราะห์สโตคาสติก ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์โดยทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติดิน หลักการ คือ การสุ่มค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติดินไปเรื่อย ๆ ทว่าวนซ้ำหลาย ๆ ครั้ง หรือเรียกว่า การจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จนได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าเสถียรภาพของข้อมูลชุดนั้น ต่อมานำไปวิเคราะห์เช่นเดียวกับการใช้กฎสามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยวิธีนี้จะให้ความถูกต้องแม่นยำที่สูงมาก เนื่องจากไม่ได้มีการตัดข้อมูลออก หรือใช้ค่าประมาณมาเป็นตัวแทนของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่เป็นการนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์และวนซ้ำ และยังได้พิจารณาขนาดความผันผวน หรือ ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในคุณสมบัติของดินเหนียวตามธรรมชาติ



รูปที่ 4 ทฤษฎีสถานะสุ่มในการวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ในคุณสมบัติดิน (คู่มือการใช้โปรแกรม OPTUM G2, 2019)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะใช้หลักการทางสถิติและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโปรแกรม OPTUM G2 ที่ใช้หลักการทฤษฎีสถานะสุ่ม (Random Field Theory) ควบคู่กับทฤษฎีการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis Theory) ในวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (Coefficient of Variation, COV%), ความยาวสหสัมพันธ์ หรือ ขนาดความผันผวนเชิงพื้นที่ของกำลัังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ (Correlation Lengths or Scales of Fluctuations, CL_{su}) ในคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่มีกำลัังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัย (Anisotropic shear strength, r_e) การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) ของกำลัังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย และการสุ่มค่า (Random) โดยใช้การวิเคราะห์สโตคาสติก (Stochastic Analysis) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) โดยใช้กระบวนการทว่าวนซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ของกำลัังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure) มีค่าน้อยกว่า 0.001 นำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและความน่าจะเป็นของการวิบัติที่เหมาะสม

2. วิธีการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพกำลังแบกทานของดิน เหนียวแบบไม่สมนัยแบบสุ่มเชิงพื้นที่

2.1 การใช้งานโปรแกรม OPTUM G2

ในการวิเคราะห์ปัญหาผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม OPTUM G2 Version 2022 ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ครอบคลุมในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค และวิเคราะห์การเสียรูปโดยสามารถวิเคราะห์ปัญหาในทั้งรูปแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) และแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric)

2.1.1 การป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม OPTUM G2

1.) การเลือกเงื่อนไขในการวิเคราะห์

ผู้วิจัยเลือกใช้เงื่อนไขแบบระนาบความเครียด (Plane Strain Condition) ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของฐานรากตื้น ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียดของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัย ที่ทำการศึกษานั้นจะสมมติว่าความเครียดตั้งฉากในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ xy หรือทิศทาง z มีค่าเป็นศูนย์ ($\epsilon_{zz} = 0$) และ ความเค้นเฉือนในทิศทาง z มีค่าเป็นศูนย์ ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$)

2.) การสร้างรูปทรงเรขาคณิตแสดงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง

การสร้างรูปทรงเรขาคณิตแสดงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง สองมิติในโปรแกรม OPTUM G2 จะทำการป้อนค่าเป็นจุด (Point) และเป็นเส้น (Line) เพื่อสร้างขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.) แบบจำลองดินและโครงสร้าง

(1) แบบจำลองของดิน (Soil Model)

การวิเคราะห์ปัญหาที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษาจะวิเคราะห์แบบ Short Term Condition โดยกำหนดให้ดินเหนียวมีความเชื่อมแน่นแต่เพียงอย่างเดียว และมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย

(2) แบบจำลองของโครงสร้าง (Structural Model)

ฐานรากแผ่ เป็นโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาโดยกำหนดให้ใช้วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง (Rigid Body) มีความแข็งแรงมากพอที่จะไม่ให้เกิดการวิบัติใดๆ กับโครงสร้างก่อนที่ดินจะเกิดการวิบัติ

4.) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

เครื่องมือแบบ Standard Fixity ในโปรแกรม OPTUM G2 จะถูกใช้ในการจำลองในการสร้างขอบเขตซึ่งเงื่อนไขขอบเขตทั้งหลายได้ถูกกำหนดไว้ดังนี้

(1) ขอบเขตซ้ายสุดและขวาสุดของปัญหาจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวในแนวแกน r มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $u_r = 0$ มีลักษณะคล้าย Roller Supports ซึ่งส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนที่อยู่ตรงขอบเขตเหล่านี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $\tau_{rz} = 0$

(2) ขอบเขตล่างสุดของปัญหาจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวในแนวแกน z มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $u_z = 0$ มีลักษณะคล้าย Fixed Supports ซึ่งส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากที่อยู่ตรงขอบเขตเหล่านี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $\tau_{rz} = \sigma_{zz} = 0$

(3) ขอบเขตที่เหลือจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวได้อิสระโดยปราศจากการยึดรั้ง

2.1.2 การวิเคราะห์

การวิเคราะห์จะทำการหาค่าแรงวิบัติ (Collapse Load) โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ลิมิต (Limit Analysis) ขอบเขตบนและล่าง (Upper and Lower Bound) อีกทั้งยังใช้เทคนิคการเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์โดยเทคนิคปรับความละเอียดของโครงข่ายแบบอัตโนมัติ (Adaptive Mesh) โดยผู้วิจัยเลือกใช้การปรับโครงข่ายของอิลิเมนต์แบบอัตโนมัติจำนวน 3 รอบ และกำหนดให้จำนวนอิลิเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 5,000 ถึง 10,000 อิลิเมนต์ระหว่างการปรับโครงข่ายอัตโนมัติทั้ง 3 รอบ

2.1.3 การแสดงผลลัพธ์

ผลลัพธ์ที่แสดงในโปรแกรม OPTUM G2 จะประกอบด้วยค่าแรงวิบัติ (Collapse Load) โครงข่ายของอิลิเมนต์ที่สถานะวิบัติ การเสียรูปของมวลดิน และความเค้นเฉือนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.2 การวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) และขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย (Stochastic Analysis) ดังนี้

2.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินที่มีพฤติกรรมกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไม่สมนัย

1.) ป้อนข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic (μ_{suc}) ค่าความเป็น Anisotropic (r_e)

2.) ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขที่กำหนด

3.) แปลงค่าแรงวิบัติ (Collapse Load) ให้เป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number) โดยจะกำหนดให้เรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่า หรือ ใช้สัญลักษณ์ว่า N_{det} ดังแสดงในสมการที่ 3

$$N_{det} = q_{fr} / \mu_{suc} \quad (3)$$

โดยที่ N_{det} คือ ตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่า (Deterministic Stability Number)

q_{fr} คือ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากโปรแกรม OPTUM G2

μ_{suc} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic

2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินที่มีพฤติกรรมกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไม่สมนัย

1.) ป้อนข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน ได้แก่ ค่าความเป็น Anisotropic (r_e), ความยาวสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{msuc} = CL_x/B$ หรือ CL_y/B (เมื่อ B คือ ความกว้างของฐานรากแผ่ มีค่าเท่ากับ 1) และความแปรปรวน เพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะสนามสุ่มของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย

2.) จำลองสนามสุ่มของกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อจำลองความเป็นไปได้ของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินไม่สมนัยในสนามสุ่ม จำนวน 1,000 ครั้ง

3.) ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขที่กำหนด

4.) แปลงค่าแรงวิกฤติ (Collapse Load) ให้เป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number) โดยจะกำหนดให้เรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number) หรือ ใช้สัญลักษณ์ว่า N_{ran} ดังแสดงในสมการที่ 4

$$N_{ran} = q_u / \mu_{suc} \quad (4)$$

โดยที่ N_{ran} คือ ตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number)

q_u คือ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากโปรแกรม OPTUM G2

μ_{suc} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic

5.) ทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, PoF) โดยกำหนดนิยามของความน่าจะเป็นของการวิบัติ คือ จำนวนผลลัพธ์ของเหตุการณ์ ที่ค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่ม มีค่าน้อยกว่า หรือ เท่ากับค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่า หรือ นิยามได้ว่า โอกาสที่ค่าตัวเลขเสถียรภาพที่ได้จากการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาอิทธิพลของความแปรปรวนเชิงพื้นที่ มีโอกาสเกิดการวิบัติมากน้อยเพียงใด หากในพื้นที่ของปัญหาที่ศึกษา มีความไม่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ 5

$$PoF = P(N_{ran} \leq N_{det}) \quad (5)$$

6.) ทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ศึกษา โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าน้อยกว่า 0.001 ซึ่งหาได้จากสมการที่ 6

$$PoF = P(N_{ran} \leq N_{det}/FoS) \quad (6)$$

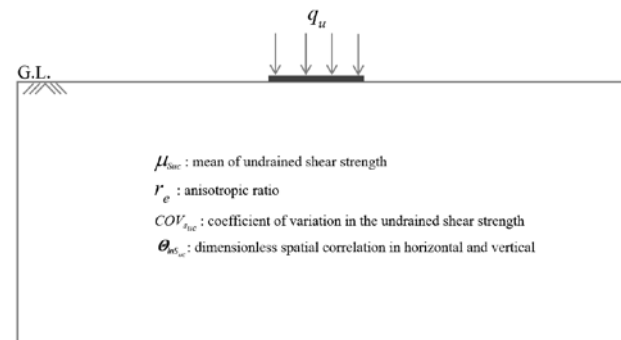
3. ขอบเขตงานวิจัย

3.1 ปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่

3.1.1 ขอบเขตและคำอธิบายของปัญหา

ขอบเขตและคำอธิบายของปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียดของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัยเสถียรภาพของฐานรากตื้นดังแสดงในรูปที่ 5 กำหนดให้

- 1.) ฐานรากแผ่มีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง (Rigid material)
- 2.) ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic (μ_{suc})
- 3.) ความแปรปรวน (COV_{suc})
- 4.) ความยาวสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (θ_{msuc})
- 5.) ค่าความเป็น Anisotropic (r_e)
- 6.) ใช้การวิเคราะห์แบบระนาบความเครียด (Plane Strain)



รูปที่ 5 ขอบเขตปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียด

3.1.2 การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า OPTUM G2 ด้วยเทคนิค Random Adaptive Finite Element Limit Analysis (RAFELA)

3.1.3 กำหนดให้ดินเป็นดินเหนียวที่มีกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำแบบไม่สมนัย ที่มีค่าคงที่ตลอดความลึก

3.1.4 กำหนดให้ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินเหนียวเป็นการแจกแจงปกติแบบล็อก (Lognormal Distribution)

3.1.5 กำหนดให้ค่าทางสถิติของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation)

3.1.6 กำหนดให้ความยาวสัมพันธ์เชิงพื้นที่ หรือ ขนาดผันผวนของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ มีค่าเท่ากันในแนวราบและแนวตั้ง

3.1.7 ใช้การจำลองมอนติคาร์โล เพื่อสุ่มค่าพารามิเตอร์ของกำลังต้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ

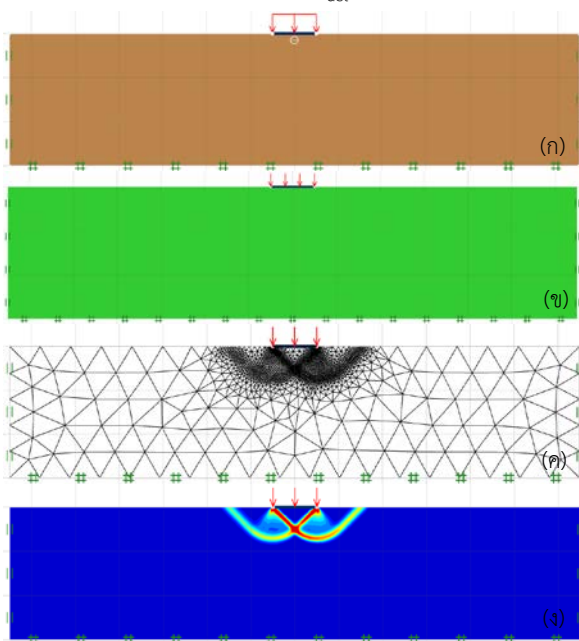
3.2 การป้อนค่าพารามิเตอร์

พิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำมีการแจกแจงแบบล็อกด้วยค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำ $\mu_{suc} = 100$ kPa, ความแปรปรวน (COV_{suc}) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ด้วยเทคนิคการแยกแบบโซลส์กี CD Technique, ความยาวสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{msuc} = 0.2, 1.0, 2.0, 4.0$ มีค่าเท่ากันทั้งในแนวราบและแนวตั้ง และค่าความเป็น Anisotropic (r_e) = 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 มีพฤติกรรมแบบอีลาสติก-พลาสติกแบบสมบูร์น และใช้เกณฑ์การวิบัติแบบเทรסקา โดยใช้วิธี RAFELA

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Deterministic Analysis of Undrained Shear Strength)

จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขแบบกำหนดค่าที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยรูปที่ 6(ข) แสดงถึงค่า $\mu_{S_{uc}}$ ที่กระจายตัวในแบบจำลอง เนื่องจากในการวิเคราะห์การกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ จึงทำให้ค่า S_{uc} มีค่าเท่ากันทั้งแบบจำลอง ส่งผลให้ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และเกิดการวิบัติแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6(ค) โดยการ Adaptive Mesh ในบริเวณที่มีความเค้นเฉือนสูงสูง รูปที่ 6(ง) แสดงถึงลักษณะของความเค้นเฉือนของแรงกระทำจากฐานรากแผ่ที่ส่งผลต่อดิน เนื่องจากดินมีคุณสมบัติเท่ากันทั้งตลอดทั้งแบบจำลอง ทำให้ลักษณะการวิบัติมีความสมมาตรกัน (Symmetry) ผลลัพธ์จากแบบจำลองจะได้ค่าแรงวิบัติ โดยจะแปลงค่าแรงวิบัติ ให้เป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพ และเรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่า N_{det}

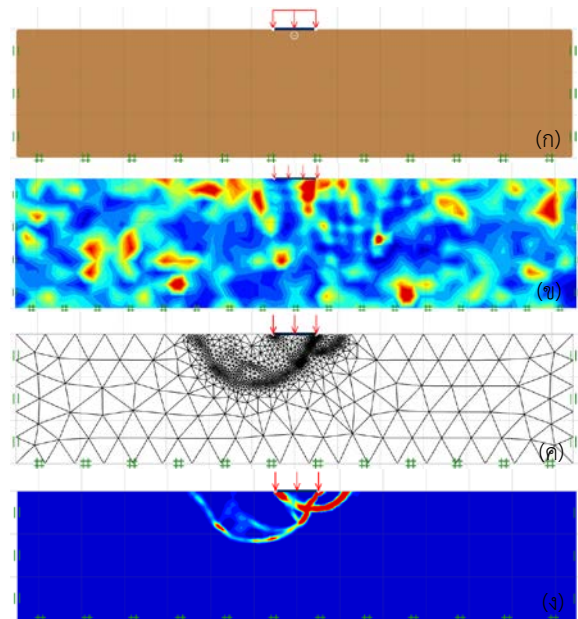


รูปที่ 6 แบบจำลองเชิงตัวเลขของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียวแบบไม่สมนัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ($r_e = 0.5$ และ $\mu_{S_{uc}} = 100$)

4.2 การวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Stochastic Analysis of Undrained Shear Strength)

จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขแบบสุ่มค่า ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยรูปที่ 7(ข) แสดงถึงค่า S_{uc} ที่กระจายตัวในแบบจำลอง จากวิธีการวิเคราะห์การสุ่มค่าของกำลัง

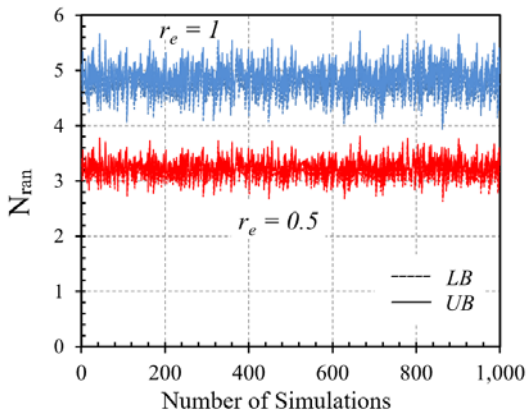
ต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ จึงทำให้ค่า S_{uc} มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการป้อนค่า ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่ไร้มิติ และความแปรปรวน ส่งผลให้ดินมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Nonhomogenous) และเกิดการวิบัติแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7(ค)โดยการ Adaptive Mesh ในบริเวณที่มีความเค้นเฉือนสูงสูง รูปที่ 7(ง) แสดงถึงลักษณะของความเค้นเฉือนของแรงกระทำจากฐานรากแผ่ที่ส่งผลต่อดิน เนื่องจากดินมีคุณสมบัติไม่เท่ากันทั้งตลอดทั้งแบบจำลอง ทำให้ลักษณะการวิบัติมีความไม่สมมาตร (Nonsymmetry) โดยลักษณะของการวิบัติจะขึ้นอยู่กับค่า S_{uc} ที่กระจายตัวอยู่ในแบบจำลอง จากผลของค่าความยาวสหสัมพันธ์และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ผลลัพธ์จากแบบจำลองจะได้ค่าแรงวิบัติ แปลงค่าแรงวิบัติ ให้เป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพ และเรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า N_{ran}



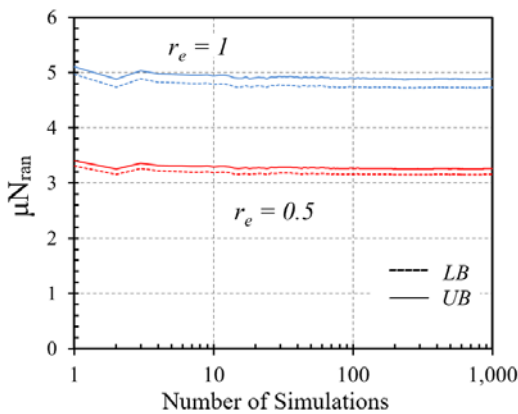
รูปที่ 7 แบบจำลองเชิงตัวเลขของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียวแบบไม่สมนัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ($r_e = 0.5$, $\theta_{InS_{uc}} = 2$ และ $COV_{S_{uc}} = 100\%$)

จากวิธีการวิเคราะห์แบบสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Stochastic Analysis of Undrained Shear Strength) ด้วยการจำลองมอนติคาร์โล เพื่อจำลองความเป็นไปได้ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในสนามสุ่มจำนวน 1,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้ทั้งหมดจากวิเคราะห์แบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากผลของค่าความยาวสหสัมพันธ์และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ S_{uc} ดังแสดงในรูปที่ 8

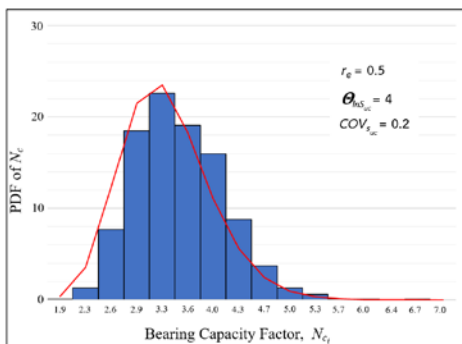
รูปที่ 9 แสดงจำนวนครั้งของการจำลองที่เลือกใช้ทำให้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของผลเฉลย และความน่าจะเป็นของการวิบัติของชุดข้อมูลทางสถิติผู้เข้าหาค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นผลเฉลยของระบบที่คงที่แล้ว โดยที่ μN_{ran} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแบบสะสม



รูปที่ 8 จำนวนครั้งของการจำลองมอนติคาร์โลของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่



รูปที่ 9 จำนวนครั้งของการจำลองมอนติคาร์โลที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่



รูปที่ 10 อิทธิพลของความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำที่มีต่อฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ($r_e = 0.5$, $\theta_{InS_{uc}} = 4$ และ $COV_{S_{uc}} = 20\%$)

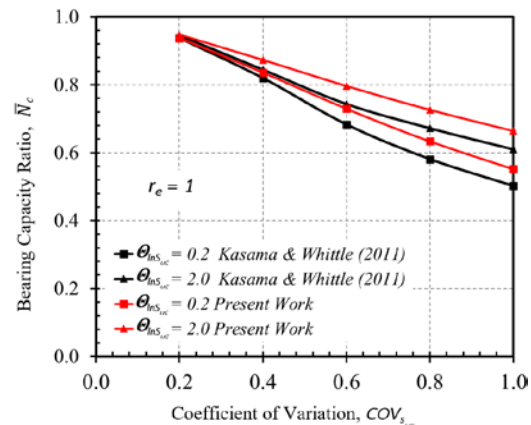
จากการป้อนค่าความยาวสหสัมพันธ์และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ S_{uc} โดยการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อจำลองความเป็นไปได้ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินไม่สมนัยในสนามสุ่ม จำนวน 1,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์มีการเรียงตัวแบบประจักษ์ซึ่งว่าแสดงถึง ชุดข้อมูลทั้ง 1,000 ข้อมูล โดยชุดข้อมูลนี้จะมี ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ส่งผลต่อฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density

Function, PDF) ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 10

4.2.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับงานวิจัยในอดีต

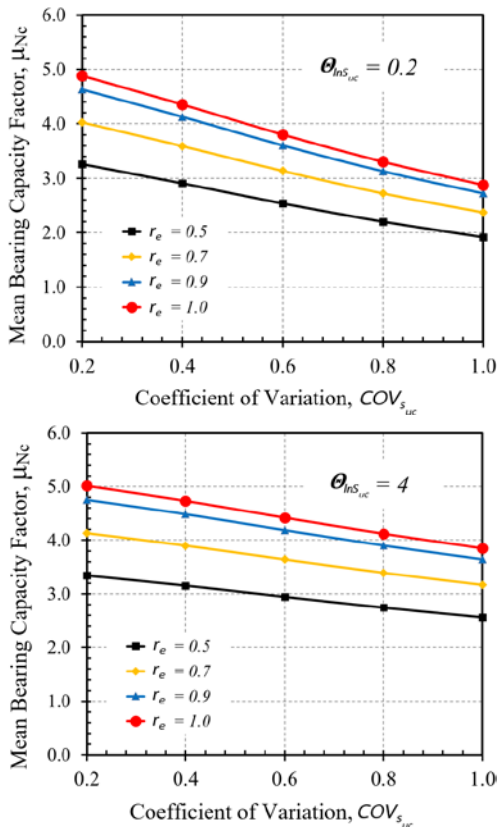
จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของฐานรากแผ่ จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบว่าในการประมวลผลของโปรแกรมนั้น มีค่าที่แตกต่างไปจากงานวิจัยในอดีตที่ใช้อ้างอิงมาน้อยเพียงใด โดยตัวอย่างของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kasama and J. Whittle (2010) ในหัวข้อวิจัย Bearing Capacity of Spatially Random Cohesive Soil Using Numerical Limit Analyses โดยพิจารณาปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียว (Isotropic clay หรือ $r_e = 1$) ภายใต้เงื่อนไขความระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยพิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีการแจกแจงแบบล็อกด้วยค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $\mu_{s_{uc}} = 100$, ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $COV_{s_{uc}} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 4.0$ ด้วยเทคนิคการแยกแบบโซ่เลสลีย์ CD Technique, ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{InS_{uc}} = 0.1, 0.2, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 20$ และมีค่าเท่ากันทั้งในแนวราบและแนวตั้ง มีพฤติกรรมแบบอีลาสติค-พลาสติก แบบสมบูรณ์ และใช้เกณฑ์การวิบัติแบบเทรסקา โดยใช้วิธี LAS Method โดยกำหนดให้ Bearing Capacity Factor หรือ อัตราส่วนกำลังแบกทานของฐานรากต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $N_c = q_r/\mu_{s_{uc}}$

ผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองในอดีตกับงานวิจัยที่ศึกษาพบว่า ค่า Bearing Capacity Factor, N_c ของงานวิจัยในปัจจุบันมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงที่ความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ มีค่าต่ำและค่า N_c มีค่าสูงกว่างานวิจัยในอดีตเล็กน้อยเมื่อความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีค่าที่สูง ทั้งในกรณีความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{InS_{uc}} = 0.2$ และ 2 เมื่อดินมีกำลังรับแรงเฉือนแบบสมนัย $r_e = 1$ (Isotropic clay) ดังแสดงในรูปที่ 11

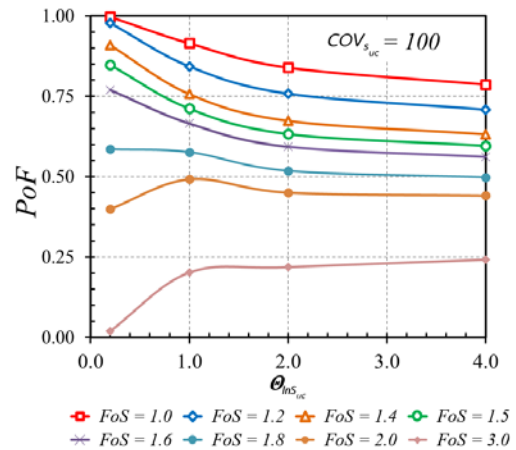
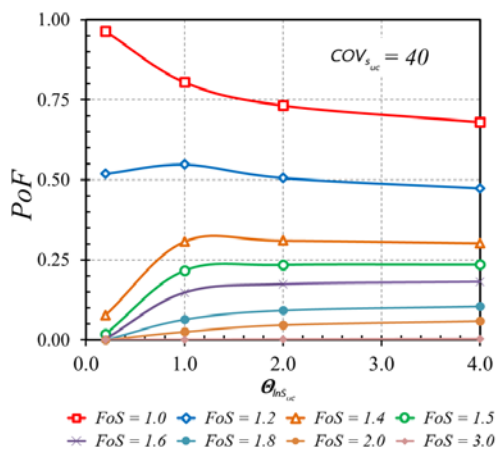


รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าตัวเลขเสถียรภาพของฐานรากดินกับงานวิจัยในอดีต

จากผลลัพธ์ของแบบจำลองกำหนดให้ Mean Bearing Capacity Factor, μ_{NC} คือค่าเฉลี่ยทางสถิติของข้อมูล 1,000 ข้อมูล ที่ถูกส่งผลโดยอิทธิพลของความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ และค่าความเป็น r_e พบว่า μ_{NC} จะมีค่าลดลงเมื่อความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็น Anisotropic สูงขึ้นส่งผลให้ μ_{NC} มีค่าลดลง เมื่อความยาวหสมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ μ_{NC} เพิ่มขึ้น และเมื่อความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 อิทธิพลของความยาวหสมพันธ์เชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ θ_{ms_uc}



รูปที่ 13 อิทธิพลของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ COV_{s_uc}

รูปที่ 13 แสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองเมื่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ COV_{s_uc} สูงขึ้นส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, PoF) มีค่าสูงขึ้น

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหากำลังแบกทานของดินเหนียวแบบไม่สมนัยแบบสุ่มเชิงพื้นที่ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้หลักการทฤษฎีสถานสุ่ม (Random Field Theory) ควบคู่กับทฤษฎีการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis Theory) ในวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ ($COV\%$), ความยาวหสมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (θ_{ms_uc}) ในคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัย (Anisotropic shear strength, r_e) การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย และการสุ่มค่า (Random) โดยใช้การวิเคราะห์สโตคาสติก (Stochastic Analysis) ประเมินค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) โดยใช้วิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, PoF) มีค่าน้อยกว่า 0.001 นำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและความน่าจะเป็นของการวิบัติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัยมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติมีค่าสูงขึ้น เมื่อความยาวหสมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติมีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความน่าจะเป็นของการวิบัติ เล็กน้อยเมื่อความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย มีค่าน้อย ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันเมื่อความยาวหสมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติมีค่า

เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความน่าจะเป็นของการวิบัติ เล็กน้อยเมื่อความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัยมีค่ามาก ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และในกรณีของความเป็น Anisotropic (r_e) พบว่า เมื่อค่า r_e มีค่าสูงขึ้น (เข้าใกล้ 0.5) ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่า r_e ต่ำ (เข้าใกล้ 1.0 หรือ Isotropic) ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ให้โอกาสมอบ “ทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์” ให้ผู้จัดทำเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท ศึกษาหาความรู้ในเรื่องที่สนใจและได้เผยแพร่งานวิจัยต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์งานวิชาการทางวิศวกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali A., Lyamin A., Huang J., Li J., Cassidy M., and Sloan S. Probabilistic stability assessment using adaptive limit analysis and random fields. *Acta Geotechnica*. 2017;12(4):937-48.
- [2] Drucker D.C., and Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*. 101952. p. 157-65.
- [3] Duncan J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical geoenvironmental engineering*. 2000;126(4):307-16.
- [4] Kasama K., and Whittle A.J. Bearing capacity of spatially random cohesive soil using numerical limit analyses. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering* 2011;137(11):989-96.
- [5] Krabbenhøft, K., Galindo-Torres, S.A., Zhang, X. and Krabbenhøft, J. (2019), “AUS: Anisotropic undrained shear strength model for clays”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43, 2652–2666.
- [6] Phoon K.K., and Kulhawy F. Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*. 1999;36(4):612-24.
- [7] Terzaghi K., Peck R.B., and Mesri G. *Soil mechanics in engineering practice*: John Wiley & Sons; 1996.