



การศึกษาอิทธิพลความแปรปรวนของตัวแปรด้านกำลังของดินสำหรับงานกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง
ด้วยทฤษฎีสถานมั่ว

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF VARIABILITY ON STRENGTH PARAMETERS FOR
CONTIGUOUS PILE WALL USING RANDOM FIELD THEORY

ศิษฐ์ฐา เคารพพอง¹, วริษฐ์ วิปุลานุสาสน์² และสุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์³

¹นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author, E-Mail: wwarit@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีการสุ่มเชิงพื้นที่ (Random Field) ด้วยวิธีการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเทคนิค Random Adaptive Finite Element Limit Analysis (RAFELA) ใน โปรแกรม OPTUM G2 และวิเคราะห์ขีดจำกัดล่าง (Lower bound analysis) เพื่อพิจารณาผลกระทบของความไม่แน่นอนเชิงพื้นที่ในคุณสมบัติดินเหนียวของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อ ค่าตัวเลขเสถียรภาพ ความน่าจะเป็นของการวิบัติ อัตราส่วนความปลอดภัย และรูปแบบการวิบัติ จากการศึกษาพบว่าค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าน้อยกว่าค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอนมีผลทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่ส่งผลทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) มีค่าน้อยกว่า 0.001 ของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (S/D), ค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (CL_{suc}), ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) และแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินกับเสาเข็ม (α) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 1.2 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับค่าต่างๆของพารามิเตอร์ดังกล่าว
คำสำคัญ: กำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินเหนียว; สถานมั่ว; สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเชิงพื้นที่; วิธีการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

Sittha Kaorapapong¹, Warit Wipulanusat^{2*} and Suraparb Keawsawasvong³

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

^{2*}Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

ABSTRACT

This study investigates the stability of contiguous pile walls under undrained conditions by incorporating spatial variability in soil properties through Random Field Theory. The Random Adaptive Finite Element Limit Analysis (RAFELA) technique, implemented in the OPTUM G2 software, was employed using lower bound limit analysis to examine the effects of spatial randomness in undrained shear strength of clay. The analysis focuses on key factors affecting the stability number, probability of failure (P_f), factor of safety (FOS), and failure mechanisms. The results indicate that the stability numbers obtained from stochastic analysis are consistently lower than those from deterministic analysis, resulting in a higher probability of failure. It was also found that in order to maintain P_f below 0.001, the required FOS values vary depending on the pile spacing-to-diameter ratio (S/D), dimensionless spatial correlation length (CL_{suc}), coefficient of variation (COV_{suc}), and the soil-pile adhesion factor (α). The appropriate FOS values were found to range from 1.2 to 2.0, depending on the combinations of these parameters.

KEYWORDS: Undrained shear strength in clay; Random field; Spatial variability coefficient; Finite element method

1. บทนำ

การออกแบบระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall) โดยทั่วไปจะใช้หลักการทางสถิตยศาสตร์ และปฐพีกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ โดยตั้งสมมติฐานกลไกการวิบัติขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์หาแรงต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้าง โดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ในดิน โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่นิยมใช้ในการก่อสร้างเกี่ยวกับกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพมหานครมักมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร [1] ทำให้เกิดการออกแบบจำนวนเสาเข็มที่มีปริมาณมาก จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงทางด้านข้างของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรวมถึงการออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ คือ พารามิเตอร์กำลังต้านทานของดิน ได้แก่ ค่าการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Friction angle) และกำลังต้านแรงเฉือนของดินในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ที่ได้จากการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามตัวอย่าง เช่น รายงานผลการเจาะสำรวจที่รายงานค่ากำลังต้านแรงเฉือนของดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่า ถึงแม้จะทำการทดสอบตัวอย่างดินที่ชั้นดินเดียวกันผลของค่ากำลังต้านแรงเฉือนของดินยังมีค่าที่แตกต่างกัน [2] ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่จะนิยมใช้ค่าประมาณค่าหนึ่งเป็นตัวแทนของดินทั้งชั้นแล้วนำค่ากำลังต้านแรงเฉือนจากรายงานผลการทดสอบไปใช้ในการออกแบบ และตัดสินใจด้วยการใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) เป็นตัวกำหนดขนาด และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง [3] ซึ่งทำให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่มีความแข็งแรง และมีความปลอดภัยกว่าสภาพการใช้งานจริง

การออกแบบด้วยวิธีการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ไม่สามารถวัดระดับความปลอดภัยของการออกแบบได้ ซึ่งบางครั้งในการออกแบบที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากัน อาจมีความเสี่ยงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Stochastic Analysis) โดยใช้หลักการทางสถิติ และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของโปรแกรม OPTUM G2 ที่ใช้หลักการทฤษฎีสันามสุ่ม (Random Field Theory) ควบคู่กับทฤษฎีการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis Theory) โดยใช้กระบวนการทวนซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ด้วยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการวิเคราะห์ปัญหาความ

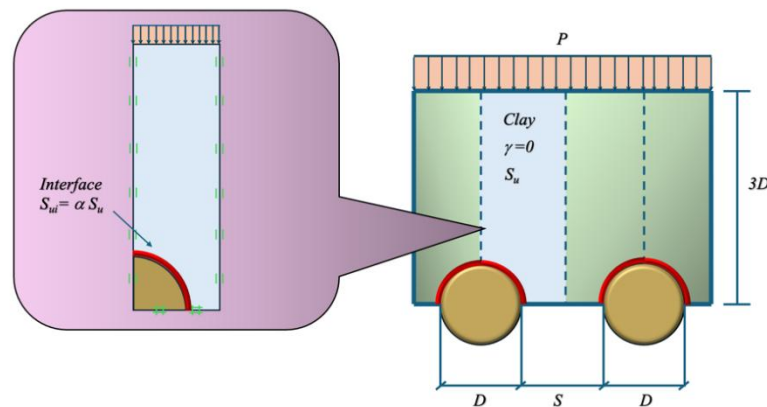
แปรปรวนเชิงพื้นที่ (Coefficient of Variation, COV_{suc}) และค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (Correlation Lengths or Scales of Fluctuations, CL_{suc}) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (S/D) และแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินกับเสาเข็ม (α) เพื่อศึกษาปัญหาทางเสถียรภาพของดินที่มีความซับซ้อนหลายองค์ประกอบ เช่น ความไม่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) และความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure) โดยจะนำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ความน่าจะเป็นของการวิบัติเพื่อทำให้ทราบระดับความปลอดภัยในการออกแบบจากวิธีการข้างต้น [4]

2. วิธีดำเนินการศึกษา

ในการวิเคราะห์ปัญหาผู้วิจัยได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ OPTUM G2 Version 2023 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยสามารถวิเคราะห์การเสียรูปได้ทั้งรูปแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) และแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) [4] ซึ่งสามารถจำลองปัญหาเป็นแบบสองมิติได้โดยใช้หลักการของไฟไนต์อีลิเมนต์เข้ามาวิเคราะห์ โดยจะทำการใส่ข้อมูลเป็นจุด (Point) และเส้น (Line) บนระนาบแนวนอน (x-axis) และแนวตั้ง (y-axis) และใช้เงื่อนไขแบบระนาบความเครียด (Plane Strain Condition) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะสมมติว่าความเครียดตั้งฉากในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ x, y และ z โดยกำหนดให้ระนาบ z มีค่าเป็นศูนย์ ($\epsilon_{zz} = 0$) และความเค้นเฉือนในทิศทาง z มีค่าเป็นศูนย์ ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$) [5] ซึ่งแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันได้แก่

2.1 แบบจำลองของดินและโครงสร้าง (Soil and Structural Models)

กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) เป็นโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา โดยกำหนดให้ใช้วัสดุ Interface ที่มีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง (Rigid Plate Material) ที่มีความแข็งแรงมากพอที่จะไม่ให้เกิดการวิบัติใด ๆ ทั้งสิ้นกับโครงสร้างก่อนที่ดินจะเกิดการวิบัติ โดยจะกำหนดค่าของ α เป็นตัวกำหนดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างดินและพื้นผิวกำแพงซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ ผิวเรียบ ($\alpha=0$) ซึ่งกำแพงจะไม่มีแรงยึดเกาะกับดิน และ ผิวหยาบ ($\alpha > 0$) กำแพงจะสามารถต้านแรงด้านข้างได้มากขึ้น ดังรูปที่ 1 ซึ่งปัญหาที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษาจะวิเคราะห์แบบ Short Term Condition โดยกำหนดให้ดินเหนียวมีค่าความเชื่อมแน่นแต่เพียงอย่างเดียว [5] และมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวในลักษณะเช่นนี้จะใช้แบบจำลองดินแบบเทรสกา (Tresca) [6]



รูปที่ 1 ขอบเขตปัญหาของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องที่รับแรงทางด้านข้าง

2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

แบบจำลองสองมิติจะถูกใช้เครื่องมือแบบ Standard Fixity ในซอฟต์แวร์ OPTUM G2 ในการกำหนดขอบเขต โดยขอบเขตซ้ายและขวาสุดของแบบจำลองจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวในแกนแนวนอน (x-axis) มีค่าเท่ากับศูนย์มีลักษณะคล้าย Roller Supports ซึ่งส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนที่อยู่ตรงขอบเขตเหล่านี้มีค่าเท่ากับศูนย์ ขอบเขตล่างสุดของแบบจำลองจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวในแกนแนวนอน (x-axis) และแนวตั้ง (y-axis) มีค่าเท่ากับศูนย์มีลักษณะคล้าย Fixed Supports ซึ่งส่งผลให้หน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงที่ตั้งฉากอยู่ตรงขอบเขตเหล่านี้มีค่าเท่ากับศูนย์ และขอบเขตด้านบนสุดของแบบจำลองจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระโดยไม่มีการยึดรั้ง

2.4 การสร้างโครงข่ายของอีลิเมนต์

ซอฟต์แวร์ OPTUM G2 มีฟังก์ชันในการเพิ่มจำนวนอีลิเมนต์โดยเทคนิคปรับความละเอียดของโครงข่ายแบบอัตโนมัติ (Adaptive Mesh) ดังรูปที่ 2(ข) โดยจำนวนอีลิเมนต์จะถูกกำหนดให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้น และความเครียดสูงกว่าบริเวณอื่น ทำให้ความถูกต้องของผลเฉลยมีความแม่นยำมากขึ้น โดยจะต้องทำการปรับจำนวนครั้งของการ Adaptive Mesh ให้เหมาะสมกับปัญหาที่ศึกษา ถ้าหากมีจำนวนครั้งของการ Adaptive Mesh มากเกินไปจะส่งผลให้เวลาในการวิเคราะห์นานเกินความจำเป็น [7] ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนอีลิเมนต์เท่ากับ 10,000 อีลิเมนต์ และใช้การปรับโครงข่ายของอีลิเมนต์แบบอัตโนมัติจำนวน 5 ครั้ง ในส่วนของการวิเคราะห์จะทำการหาค่าแรงวิกฤติ (Collapse Load) จะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์หาลิมิต (Limit Analysis) แบบขอบล่าง (Lower Bound) ซึ่งเป็นผลเฉลยที่ปลอดภัย [8] ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จะได้ออกมาเป็นผลลัพธ์ของค่าแรงวิกฤติ (Collapse Load) โครงข่ายของอีลิเมนต์ที่สถานะวิกฤติ การเสียรูปของมวลดิน ทิศทางการเคลื่อนตัวทั้งหมดแบบเวกเตอร์ และความเค้นเฉือนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) และขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Stochastic Analysis) ดังนี้

2.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

การวิเคราะห์ค่าตัวเลขเสถียรภาพของปัญหาเสถียรภาพกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ดินเป็นดินเหนียวที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) จะถูกกำหนดให้เรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องแบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Stability Numbers, N_{det})

$$N_{det} = \frac{q_{fi}}{\mu_{suc}} \quad (1)$$

โดยที่

N_{det} คือ ตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Stability Number)

q_{fi} คือ ค่าแรงวิกฤติ (Collapse Load) จากโปรแกรม OPTUM G2 (kPa)

μ_{suc} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (kPa)

2.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Stochastic Analysis)

ป้อนข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะสนามสุ่มของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ($\mu_{suc}=1$ kPa) หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) เท่ากับ $=0$ kN/m³ ซึ่งจะวิเคราะห์เฉพาะแรงเฉือนของดินที่ทำให้เกิดการพังของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ (CL_{suc}) เท่ากันทุกทิศทางมีค่าเท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 4 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือน (COV_{suc}) มีค่าเท่ากับ 20%, 40% และ 60% แพลกเตอร์การบิดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าเท่ากับ 0, 0.5 และ 1 และค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) เท่ากับ 0.1, 0.5, 1 และ 2 หลังจากนั้นทำการจำลองสนามสุ่มของกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยการจำลองมอนติคาร์โลจำนวน 1,000 ครั้งโดยคำตอบจะระบุเข้าหาค่า ๆ หนึ่งซึ่งเป็นคำตอบของระบบที่คงที่และใกล้เคียงคำตอบที่แท้จริงของปัญหา ซึ่งใช้รูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Log-normal Distribution หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ OPTUM G2 ตามเงื่อนไขที่กำหนดจนได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการคือ ค่าแรงวิกฤติ (Collapse Load) หลังจากนั้นแปลงค่าให้เป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number) เรียกว่า ตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number) หรือ ใช้สัญลักษณ์ว่า N_{ran} และนำมาทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, P_f) โดยกำหนดนิยามของความน่าจะเป็นของการวิบัติคือ จำนวนผลลัพธ์ของเหตุการณ์ที่ค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่ม (N_{ran}) มีค่าน้อยกว่า หรือ เท่ากับค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่า (N_{det}) หรือ นิยามได้ว่า โอกาสที่ค่าตัวเลขเสถียรภาพที่ได้จากการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาอิทธิพลของความแปรปรวนเชิงพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการวิบัติมากน้อยเพียงใด หากในพื้นที่ของปัญหาที่ศึกษามีความไม่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ [7] ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ (2)

$$P_f = P(N_{ran} \leq N_{det}) \quad (2)$$

ในการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Analysis) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FOS) ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ศึกษา จะใช้เกณฑ์ที่พิจารณาความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, P_f) เป็นหลัก โดยกำหนดให้ P_f ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001 หรือ 0.1% ซึ่งถือเป็นระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ในการศึกษาปัญหาเชิงวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3)

$$P_f = P(N_{ran} \leq N_{det}/FOS) \quad (3)$$

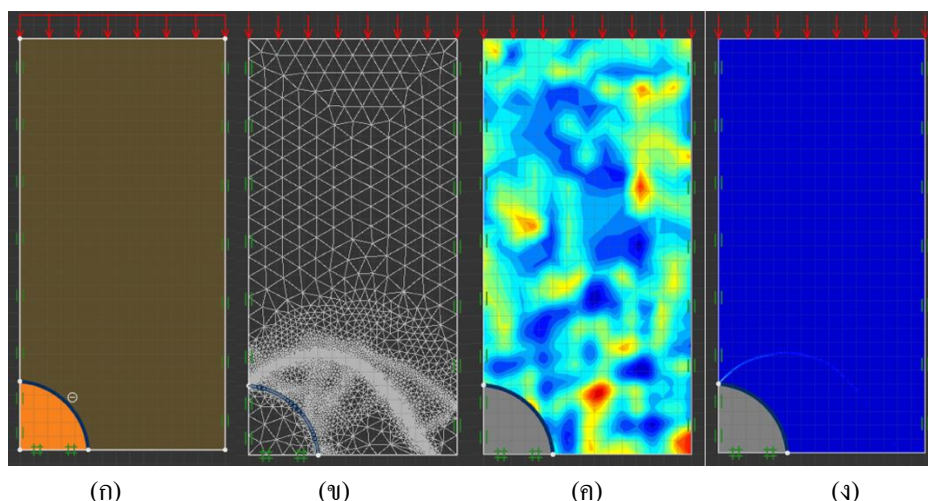
โดยที่

P_f คือ ความน่าจะเป็นของการวิบัติ

N_{ran} คือ ตัวเลขสถิติรูปภาพแบบสุ่มค่า

N_{det} คือ ค่าตัวเลขสถิติรูปภาพแบบกำหนดค่า

FOS คือ อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)

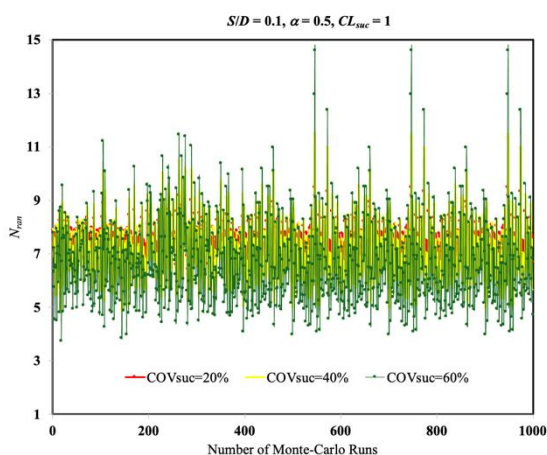


รูปที่ 2 แบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียดในโปรแกรม OPTUM G2

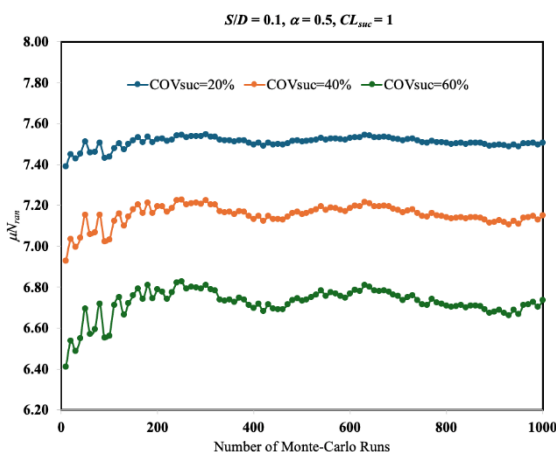
3. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวสำหรับงานกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Stochastic Analysis of Undrained Shear Strength of Contiguous Pile Wall) ด้วยการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในสนามสุ่มจำนวน 1,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่า เมื่อผลของค่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) ของกำลังต้านแรงเฉือนมีค่าแตกต่างกันส่งผลทำให้ค่าที่ได้ทั้งหมดจากวิเคราะห์แบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไปเช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดค่าที่ไม่คงที่จากผลของสนามสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3

จำนวนครั้งของการจำลองที่เลือกใช้ทำให้ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของผลเฉลย และความน่าจะเป็นของการวิบัติของชุดข้อมูลทางสถิติ เมื่อเพิ่มจำนวนการจำลองเท่ากับ 1,000 ครั้ง พบว่าคำตอบจะลู่เข้าหาค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นคำตอบของระบบที่คงที่แล้วจึงสรุปว่าค่านี้เป็นคำตอบของปัญหานั้นได้ ดังนั้นการใช้จำนวนการจำลองมอนติคาร์โลมากเท่าใดจะทำให้คำตอบของปัญหาหนึ่ง ๆ ลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงของปัญหา โดยที่ μN_{ran} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแบบสะสม ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 จำนวนครั้งของ Monte Carlo ของปัญหาเสถียรภาพแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

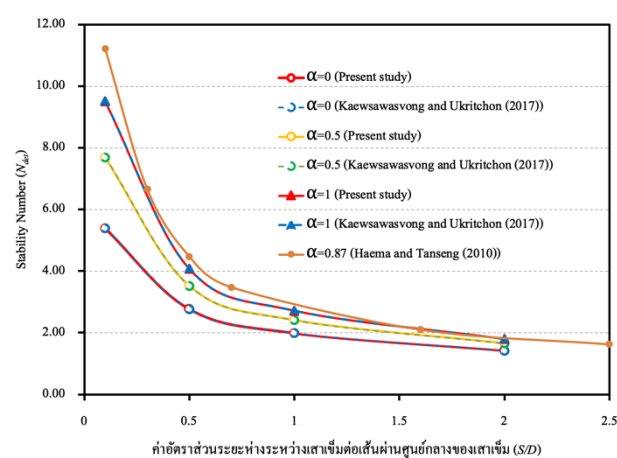


รูปที่ 4 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (N_{ran}) ตามจำนวนครั้งของ Monte Carlo Simulation

3.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับงานวิจัยในอดีต

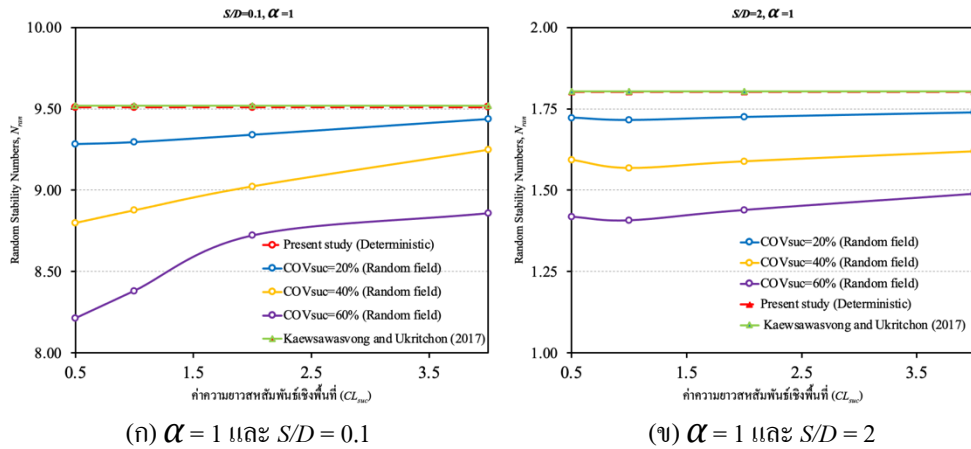
การเปรียบเทียบค่าตัวเลขเสถียรภาพของปัญหาเสถียรภาพแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในดินเหนียวที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยของ Kaewsawasong and Ukritchon [9] ที่ศึกษาปัญหาเสถียรภาพแบบจำลองกำแพง

เสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ด้วยวิธี FELA ในดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยเป็นดินเหนียวมีลักษณะเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous clay) และหาค่าตัวเลขเสถียรภาพของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องแบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Stability Number, N_{det}) ในการศึกษา ผู้วิจัยจึงได้เลือกแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องโดยพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยพิจารณากรณีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) เท่ากับ 0.1, 0.5, 1 และ 2 ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) เท่ากับ 0, 0.5 และ 1 และใช้เกณฑ์การวิบัติแบบเทรסקา (Tresca) [6] โดยใช้วิธีขีดจำกัด (Limit Analysis) ขอบเขตล่าง (Lower Bound) ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติของซอฟต์แวร์ OPTUM G2 VERSION 2023



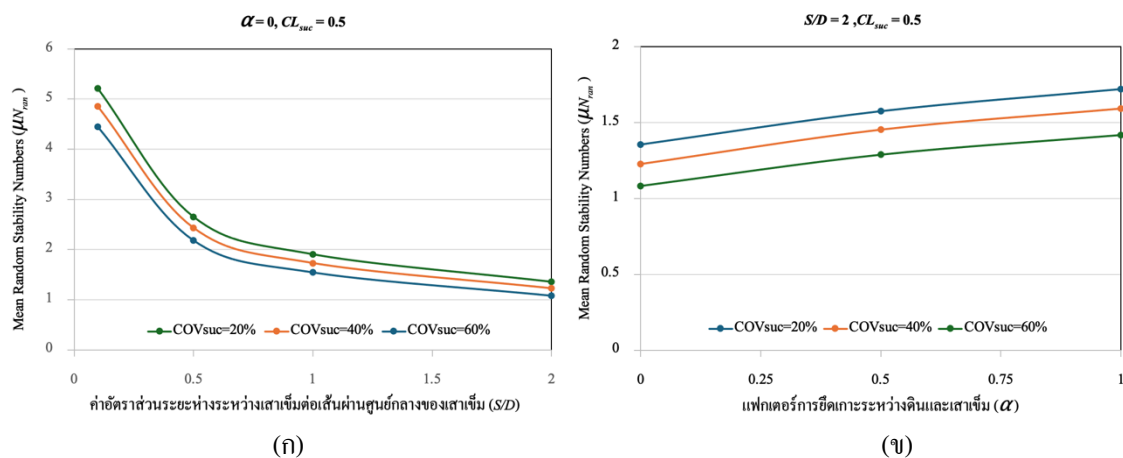
รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number, N_{det}) ของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องจากการศึกษากับงานวิจัยในอดีต

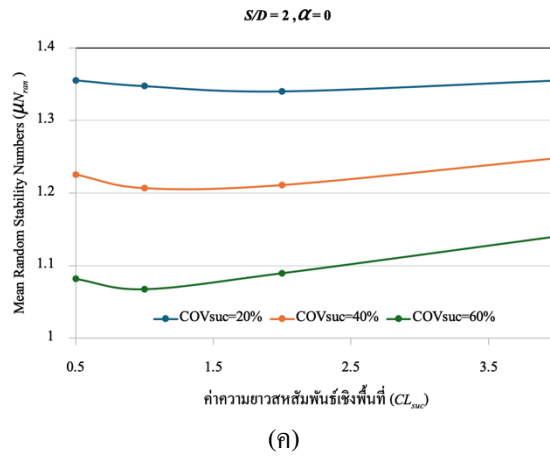
จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าตัวเลขเสถียรภาพของงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และค่าตัวเลขเสถียรภาพของงานวิจัยในอดีตที่ใช้วิธี FELA มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 5 โดยค่าตัวเลขเสถียรภาพในงานวิจัย Kaewsawasvong and Ukritchon [9] และ Haema and Tanseng [15] มีค่าสูงกว่าค่าตัวเลขเสถียรภาพของงานที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเล็กน้อย และพบว่าค่าตัวเลขเสถียรภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) ลดลง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองและวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยปัจจุบันมีความเชื่อถือ และสามารถใช้อ้างอิงหรือพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยเดิมได้



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าตัวเลขเสถียรภาพ (Stability Number, N_{det}) และค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number, N_{ran}) ของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องจากการศึกษากับงานวิจัยในอดีต

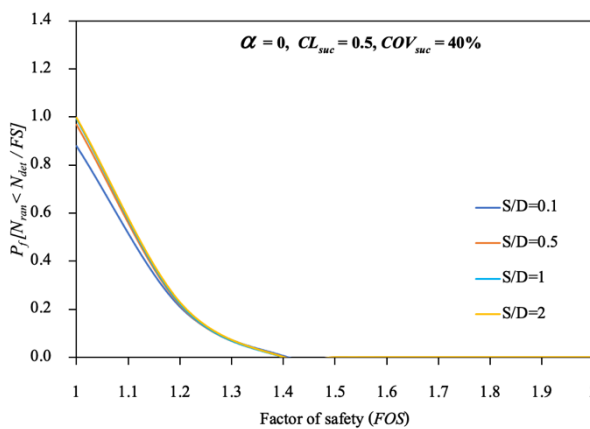
จากรูปที่ 6 ผลการศึกษาค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Stability Number, N_{det}) ของงานวิจัย Kaewasawong and Ukritchon [9] และงานวิจัยในปัจจุบันที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษายู่นามมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number, N_{ran}) พบว่า เมื่อค่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) มีค่าน้อยลงจะทำให้ดินมีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอมาก (Homogeneous) เช่น ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) เป็นต้น ส่งผลให้ค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (Random Stability Number, N_{ran}) สูงขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวเลขเสถียรภาพแบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Stability Number, N_{det}) โดยเมื่อค่า CL_{suc} เพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติดินมีการเปลี่ยนแปลงที่สม่ำเสมอมากขึ้นในระยะไกล ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนและทำให้สามารถคาดการณ์พฤติกรรมดินได้แม่นยำขึ้น ส่งผลให้ค่าตัวเลขเสถียรภาพค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า S/D เพิ่มขึ้นจะเกิดช่องว่างระหว่างเสาเข็มกว้างขึ้น ทำให้เกิดเส้นทางการพังทลาย (Failure Surface) สามารถพาดผ่านดินได้ต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ค่าตัวเลขเสถียรภาพลดลง



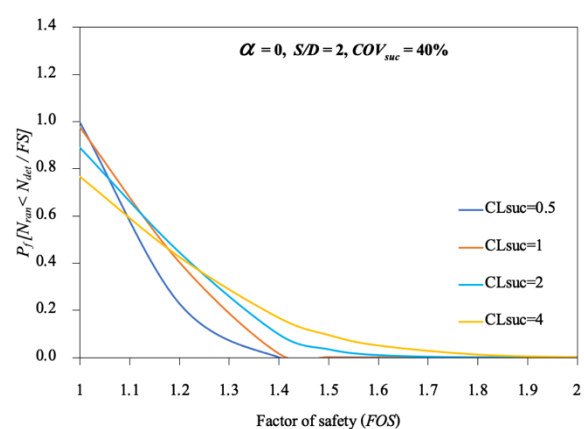


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีค่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ COV_{suc} แตกต่างกัน

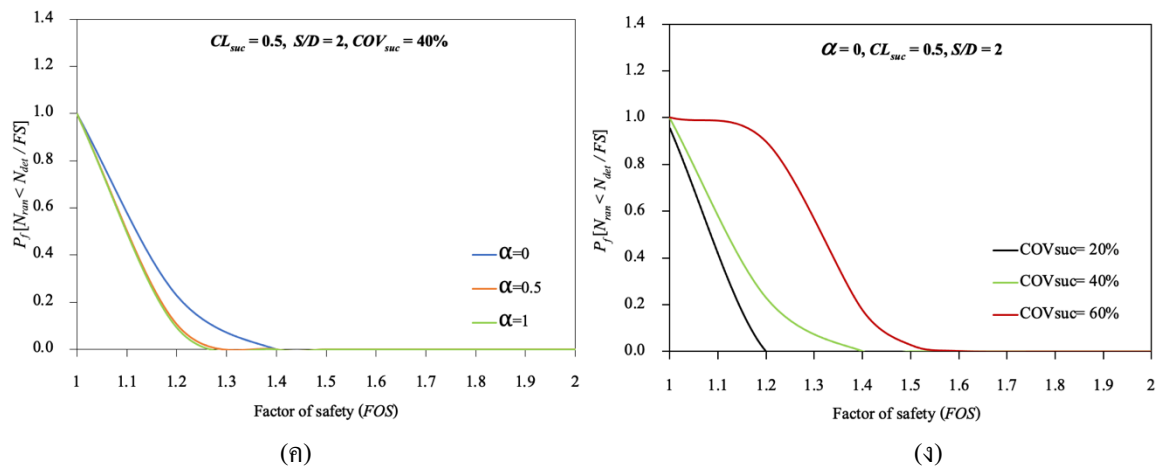
รูปที่ 7(ก) เมื่ออัตราส่วน S/D เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) ลดลงในทุก ๆ ค่าของค่า COV_{suc} แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะทำให้ค่าแรงแเสเข็มเรียงต่อเนื่องรับแรงดันดินน้อยลง โดยเมื่อค่า COV_{suc} เพิ่มขึ้น พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) ลดลง ซึ่งให้เห็นว่า สำหรับการต้านทานแรงต่อแรงดันดินด้านข้างที่เหมาะสมในค่าแรงแเสเข็มเรียงต่อเนื่องอัตราส่วน S/D ที่ต่ำกว่าจะมีการต้านทานแรงที่ดีกว่า ซึ่งจะแตกต่างจากรูปที่ 7(ข) และ 7(ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า α มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่า CL_{suc} เพิ่มขึ้นในช่วงค่าน้อย (0.5-2) ไม่ทำให้ค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า CL_{suc} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงค่ามาก (มากกว่า 2) พบว่าค่าเฉลี่ยตัวเลขเสถียรภาพแบบสุ่มค่า (μN_{ran}) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงแเสเข็มเรียงต่อเนื่องสามารถต้านแรงด้านข้างได้มากขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนที่รอยต่อเพิ่มขึ้นตามระดับการยึดเกาะของดินกับค่าแรงแเสเข็มเรียงต่อเนื่อง และคุณสมบัติของดินที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอในวงกว้าง ซึ่งช่วยลดความแปรปรวน และทำให้สามารถคาดการณ์พฤติกรรมดินได้แม่นยำขึ้น



(ก)



(ข)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) และอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 8(ก) แสดงอิทธิพลของความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) และอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) เท่ากับ 0.1, 0.5, 1 และ 2 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัย FOS ที่เพิ่มขึ้นพบว่าจะมีค่า P_f ที่ลดลง และเมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ต้องใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันเพื่อที่จะให้เกิดความน่าจะเป็นในการวิบัติน้อยลง ซึ่งจากรูปที่ 8(ข) และ 8(ง) มีแนวโน้มอิทธิพลของค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (CL_{suc}) และค่าความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) คล้ายคลึงกับรูปที่ 8(ก) แต่ในรูปที่ 8(ค) จะมีอิทธิพลของค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) ที่ตรงกันข้ามกับรูปที่ 8(ก), 8(ข) และ 8(ง) จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) เพิ่มขึ้น จะต้องใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ลดน้อยลง

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแบบจำลองกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องของกำลังด้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำโดยวิธีการคำนวณด้วยเทคนิค Finite Element Limit Analysis (FELA) ที่ใช้หลักการทฤษฎีสถานะสุ่ม (Random field Theory) พร้อมกับทฤษฎีการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis Theory) ในการวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}), ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (CL_{suc}), อัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) และ แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) ประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังด้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวสำหรับงานกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Deterministic Analysis of Undrained Shear Strength of Contiguous Pile Wall) และการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังด้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินสำหรับงานกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Stochastic Analysis of Undrained Shear Strength of Contiguous Pile Wall) โดยทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ร่วมกับกระบวนการทำวนซ้ำหลาย ๆ ครั้งด้วยการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จนนำมาวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) ที่มีค่าน้อยกว่า 0.001 และอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS)

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D), ค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (CL_{suc}) และความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) ของกำลังด้านแรงเฉือนสถานะไม่ระบายน้ำของดินเหนียวมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้ต้องใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่เพิ่มมากขึ้น จึงจะทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติมีค่าลดลง แต่ในกรณีที่ค่าแฟกเตอร์การบิดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าสูงขึ้น จะทำให้สามารถใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่ลดน้อยลงได้ โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P) มีค่าน้อยกว่า 0.001 พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) ที่เหมาะสมในการออกแบบ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (S/D) เท่ากับ 0.1, 0.5, 1 และ 2 ควรมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 1.5, 1.5, 1.4 และ 1.4 ตามลำดับ, ค่าความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ (CL_{suc}) เท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 4 ควรมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 1.4, 1.6, 1.8 และ 2 ตามลำดับ, ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV_{suc}) เท่ากับ 20%, 40% และ 60% ควรมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.8 ตามลำดับ และค่าแฟกเตอร์การบิดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) เท่ากับ 0, 0.5 และ 1 ควรมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FOS) อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 1.4 โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค สำหรับดินเหนียวทั่วไป และดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) ในอนาคต

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jirappapha, P. Continuous pile walls and underground construction in Bangkok. In: *Proceedings of the Seminar on Underground Construction* 39, Bangkok, Thailand, 1996, pp. 36-54.
- [2] Phoon K.K., and Kulhaw F. Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*. 1999;36(4):612-24.
- [3] Haema, W. Influence of spacing on lateral load-bearing capacity of contiguous bored pile walls for deep basement excavation. *Master's Thesis*, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, 2013. Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [4] Yodsomjai, W. The study of the influence of variability on undrained shear strength using random field theory. *Master of Civil Engineering*, Thammasat University, 2021. Pathum Thani, Thailand.
- [5] Sangjinda, K. and Keawsawasvong, S. Bearing Capacity of Spatially Random Anisotropic Clay Using Finite Element Limit Analyses. In: *The 28th National Convention on Civil Engineering*, Phuket, Thailand, 24-26 May 2023, 2023, pp. GTE39-1 to GTE39-9. Available at: <https://conference.thaince.org/index.php/ncce28/> [Accessed 1 January 2025].
- [6] Terzaghi K., Peck R.B., and Mesri G. Soil mechanics in engineering practice: John Wiley & Sons; 1996.
- [7] Sangjinda, K. *The study of the influence of variability on anisotropic undrained shear strength using random field theory*. Master of Civil Engineering, Thammasat University, 2023. Pathum Thani, Thailand.

- [8] สุขขันธ์ ลิขิตเลอสรวง. *ปฏิวัติศาสตร์พลาสติกที่ดีและทฤษฎีสถานะวิกฤต*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] Keawsawasvong, S. and Ukritchon, B. Undrained limiting pressure behind soil gaps in contiguous pile walls. *Computers and Geotechnics*, 2017, 83, pp. 152-158. Available from: www.elsevier.com/locate/compgeo [Accessed 4 January 2025].
- [10] Teerachaikulpanich N, Phupat V. Geological and geotechnical engineering properties of Bangkok clay. 2003(0):143-4.
- [11] Ali, A., et al. Undrained stability of a single circular tunnel in spatially variable soil subjected to surcharge loading. *Computers and Geotechnics*, 2017, 84, pp. 16-27. Available from: www.elsevier.com/locate/compgeo [Accessed 10 January 2025].
- [12] Keawsawasvong, S., Kumar, J., Banyong, R. and Sangjinda, K. Stability Charts for Limiting Horizontal Normal Pressure on Cohesive-frictional Backfill for Deep Contiguous Piled Walls. *The Open Civil Engineering Journal*, 2022, volume (16), 1–13. Available from: <https://opencivilingineeringjournal.com> [Accessed 7 January 2025].
- [13] 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), pp. 937-948. Available from: www.elsevier.com/locate/compgeo [Accessed 3 January 2025].
- [14] Wu, G., Zhao, H., Zhao, M., and Zhu, Z. Stochastic analysis of dual tunnels in spatially random soil. *Computers and Geotechnics*, 2021, 129, 103861, pp. 1-10. Available from: www.elsevier.com/locate/compgeo [Accessed 7 January 2025].
- [15] Haema, W. Influence of pile spacing on lateral resistance of contiguous bored pile wall for deep excavation. *Master's Thesis*, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, 2010. Nakhon Ratchasima, Thailand.