กำลังแบกทานของดินเหนียวแบบไม่สมนัยแบบสุ่มเชิงพื้นที่ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

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

ก้องตะวัน แสงจินดา[1,*] สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์[2]

[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) ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ใช้เทคนิค 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 ครั้งด้วยวิธีการจำลองมอนตีคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Propability of Failure) มีค่าน้อยกว่า 0.001 นำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและความน่าจะเป็นของการวิบัติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาเสถียรภาพฐานรากตื้น จากการศึกษาพบว่าอิทธิพลความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการสุ่มค่าส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขเสถียรภาพจากการกำหนดค่าที่แน่นอน นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัยมีอิทธิพลต่อค่าเสถียรภาพ ความน่าจะเป็นของการวิบัติ อัตราส่วนความปลอดภัย และรูปแบบการวิบัติมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ

คำสำคัญ: กำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย, สนามสุ่ม , ความแปรปรวนเชิงพื้นที่, การจำลองมอนติคาร์โล, วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

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

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

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

การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) โดยจะพิจารณาให้คุณสมบัติของดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ด้วยการวิเคราะห์นี้เป็นการกำหนดค่าที่แน่นอน ผลลัพธ์ที่ออกมาจะได้อัตราส่วนความปลอดภัยในการใช้งาน แต่ในแง่ทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคด้วยวิธีดังกล่าวbไม่ได้คำนึงถึงปัญหาเรื่องความแปรปรวน หากมีบางจุดที่นำมาพิจารณากำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ อาจทำให้เกิดการวิบัติและความเสียหายของโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคได้ ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าข้อกำหนดก็ตาม

2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินที่มีพฤติกรรมกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไม่สมนัย

1.) ป้อนข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน ได้แก่ ค่าความเป็น Anisotropic (r_e), ความยาวหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{lnS_{suc}} = CL_x/B$ หรือ CL_y/B (เมื่อ B คือ ความกว้างของฐานรากแผ่ มีค่าเท่ากับ 1) และความแปรปรวน เพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะสนามสุ่มของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย

2.) จำลองสนามสุ่มของกำลังต้านเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยการจำลองมอนตีคาร์โลเพื่อจำลองความเป็นไปได้ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินไม่สมนัยในสนามสุ่ม จำนวน 1,000 ครั้ง

3.) ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขที่กำหนด

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

$$N_{ran} = q_{fi}/\ \mu_{Suc} \quad (4)$$

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

q_{fi} คือ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากโปรแกรม OPTUM G2

μ_{Suc} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic

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

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

6.) ทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสำหรับปัญหาที่ศึกษา 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

ขอบเขตและคำอธิบายของปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่ภายใต้เงื่อนไขระนาบความเครียดของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัย เสถียรภาพของฐานรากตื้นดังแสดงในรูปที่ 5 กำหนดให้

1.) ฐานรากแผ่มีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง (Rigid material)

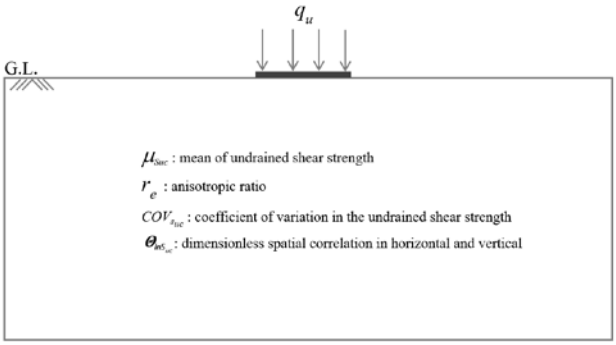
2.) ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านแรงเฉือนแบบ Anisotropic (μ_{Suc})

3.) ความแปรปรวน (COV_{Suc})

4.) ความยาวหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ ($\theta_{lnS_{suc}}$)

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 กำหนดให้ดินเป็นดินเหนียวที่มีกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำแบบไม่สมนัย ที่มีค่าคงที่ตลอดความลึก

3.1.4 กำหนดให้ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียวเป็นการแจกแจงปกติแบบล็อก (Lognormal Distribution)

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

3.1.6 กำหนดให้ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ หรือ ขนาดผันผวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ มีค่าเท่ากันในแนวราบและแนวดิ่ง

3.1.7 ใช้การจำลองมอนติคาร์โล เพื่อสุ่มค่าพารามิเตอร์ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ

3.2 การป้อนค่าพารามิเตอร์

พิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีการแจกแจงแบบล็อกด้วยค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ μ_{Suc} = 100 kPa, ความแปรปรวน (COV_{Suc}) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ด้วยเทคนิคการแยกแบบโชเลสกี้ CD Technique,ความยาวหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\theta_{lnS_{suc}}$ = 0.2, 1.0, 2.0, 4.0 มีค่าเท่ากันทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง และค่าความเป็น Anisotropic (r_e) = 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 มีพฤติกรรมแบบอิลาสติก-พลาสติกแบบสมบูรณ์ และใช้เกณฑ์การวิบัติแบบเทรสกา โดยใช้วิธี RAFELA

4. ผลการวิเคราะห์

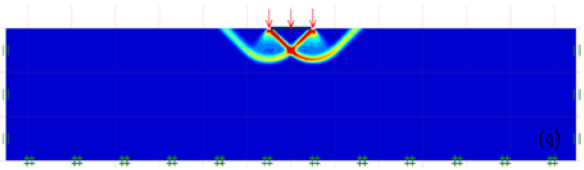
4.1 การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Deterministic Analysis of Undrained Shear Strength)

จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขแบบกำหนดค่าที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยรูปที่ 6(ข) แสดงถึงค่า μS_{uc} ที่กระจายตัวในแบบจำลอง เนื่องจากในการวิเคราะห์การกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ จึงทำให้ ค่า 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}

(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

รูปที่ 6 แบบจำลองเชิงตัวเลขของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียวแบบไม่สมนัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าที่แน่นอนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ด้วยโปรแกรม OPTUM G2
(r_e = 0.5 และ μS_{uc} =100)

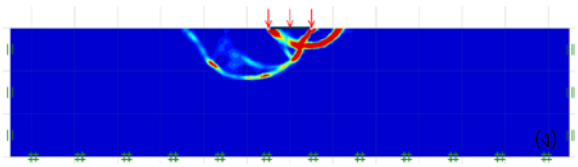
4.2 การวิเคราะห์ด้วยการสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (Stochastic Analysis of Undrained Shear Strength)

จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPTUM G2 ตามเงื่อนไขแบบสุ่มค่า ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของปัญหาตามแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยรูปที่ 7(ข) แสดงถึงค่า S_{uc} ที่กระจายตัวในแบบจำลอง จากวิธีการวิเคราะห์การสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ จึงทำให้ค่า S_{uc} มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการป้อนค่า ความยาวหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ 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}

(ก)

(ข)

(ค)

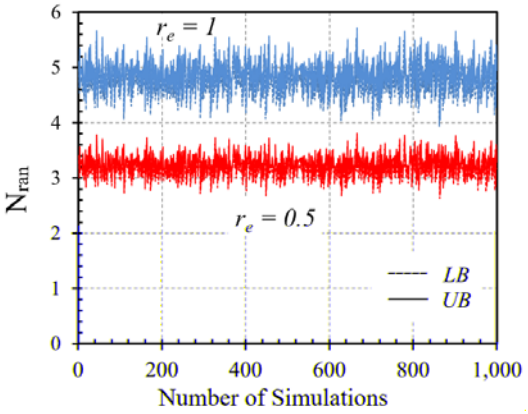


(ง)

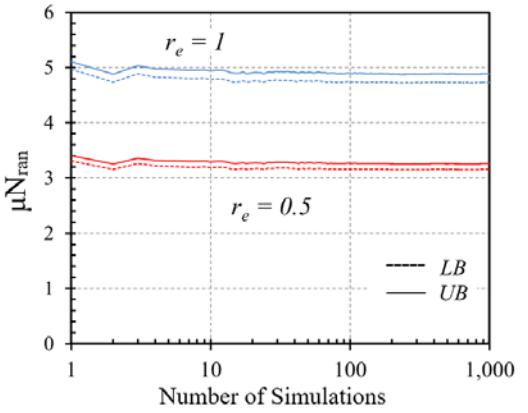
รูปที่ 7 แบบจำลองเชิงตัวเลขของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียวแบบไม่สมนัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบสุ่มค่าของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ด้วยโปรแกรม OPTUM G2
(r_e = 0.5, $\theta_{lnS_{uc}}$ = 2 และ COV_{Suc} = 100%)

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

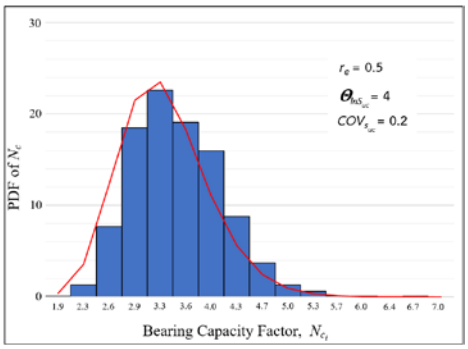
รูปที่ 9 แสดงจำนวนครั้งของการจำลองที่เลือกใช้ทำให้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของผลเฉลย และความน่าจะเป็นของการวิบัติของชุดข้อมูลทางสถิติสู่เข้าหาค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นผลเฉลยของระบบที่คงที่แล้ว โดยที่ μN_{ran} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแบบสะสม



รูปที่ 8 จำนวนครั้งของการจำลองมอนติคาร์โลของปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่



รูปที่ 9 จำนวนครั้งของการจำลองมอนติคาร์โลที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่



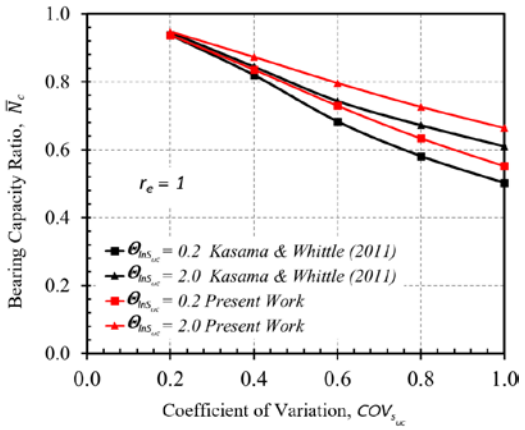
รูปที่ 10 อิทธิพลของความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำที่มีต่อฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น (r_e = 0.5, $\Theta_{lnS_{uc}}$ = 4 และ COV_{Suc} = 20%)

จากการป้อนค่าความยาวสหสัมพันธ์และความแปรปรวนของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ Suc โดยการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อจำลองความเป็นไปได้ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินไม่สมนัยในสนามสุ่ม จำนวน 1,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์มีการเรียงตัวแบบระฆังคว่ำ แสดงถึง ชุดข้อมูลทั้ง 1,000 ข้อมูล โดยชุดข้อมูลนี้จะมี ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ส่งผลต่อฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 10

4.2.2 ผลการทดสอบความถูกของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับงานวิจัยในอดีต

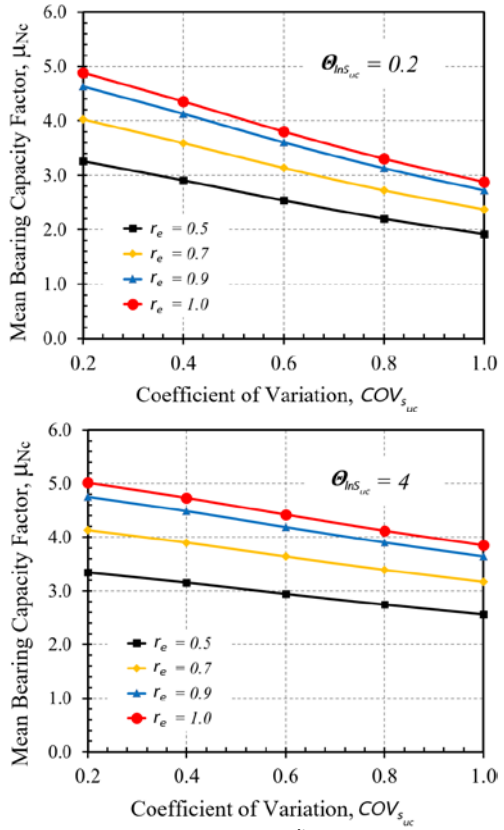
จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของฐานรากแผ่ จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบว่าในการประมวลผลของโปรแกรมนั้น มีค่าที่แตกต่างไปจากงานวิจัยในอดีตที่ใช้อ้างอิงมากน้อยเพียงใด โดยตัวอย่างของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kasama and J. Whittle (2010) ในหัวข้อวิจัย Bearing Capacity of Spatially Random Cohesive Soil Using Numerical Limit Analyses โดยพิจารณาปัญหาเสถียรภาพของฐานรากแผ่บนชั้นดินเหนียว (Isotropic clay หรือ r_e = 1) ภายใต้เงื่อนไขความระนาบความเครียด (Plane Strain) โดยพิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำมีการแจกแจงแบบล็อกด้วยค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ μ_{su} = 100, ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $COV_{s_{uc}}$ = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 4.0 ด้วยเทคนิคการแยกแบบโชเลสกี้ CD Technique, ความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ $\Theta_{lnS_{uc}}$ = 0.1, 0.2, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 20 และมีค่าเท่ากันทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง มีพฤติกรรมแบบอิลาสติก-พลาสติก แบบสมบูรณ์ และใช้เกณฑ์การวิบัติแบบเทรสกา โดยใช้วิธี LAS Method โดยกำหนดให้ Bearing Capacity Factor หรือ อัตราส่วนกำลังแบกทานของฐานรากต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $N_c = q_f/\mu_{su}$

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

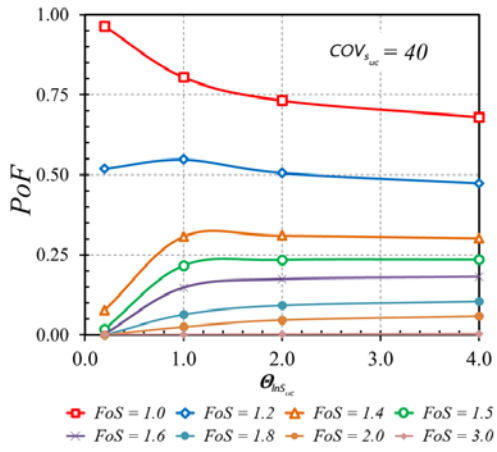


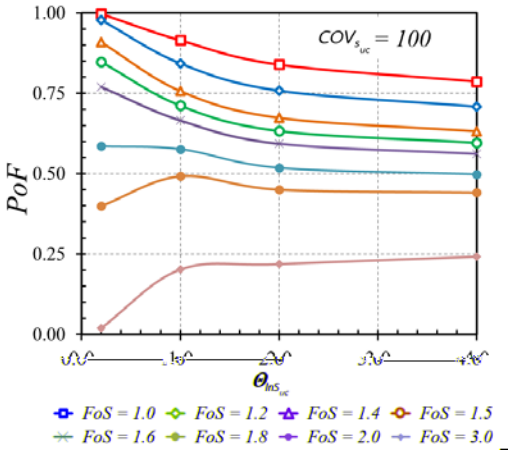
รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าตัวเลขเสถียรภาพของฐานรากตื้นกับงานวิจัยในอดีต

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 เมื่อความยาวหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติ มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ μ_{Nc} เพิ่มขึ้น และเมื่อความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 อิทธิพลของความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ $\Theta_{lnS_{uc}}$





รูปที่ 13 อิทธิพลของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ COV_{Suc}

รูปที่ 13 แสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองเมื่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ COVSuc สูงขึ้นส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Probability of Failure, PoF) มีค่าสูงขึ้น

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหากำลังแบกทานของดินเหนียวแบบไม่สมนัยแบบสุ่มเชิงพื้นที่ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้หลักการทฤษฎีสนามสุ่ม (Random Field Theory) ควบคู่กับทฤษฎีการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis Theory) ในวิเคราะห์ปัญหาเรื่องความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (COV%), ความยาวสหสัมพันธ์ของกำลังต้านเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ ($\Theta_{lnS_{uc}}$) ในคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่สมนัย (Anisotropic shear strength, r_e) การวิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่าที่แน่นอน (Deterministic Analysis) ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย และการสุ่มค่า (Random) โดยใช้การวิเคราะห์สโตคาสติก (Stochastic Analysis) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่ม (Random Variable) โดยใช้วิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ของกำลังต้านแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำในดินไม่สมนัย ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ (Propability of Failure, *PoF*) มีค่าน้อยกว่า 0.001 นำเสนอค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและความน่าจะเป็นของการวิบัติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาเสถียรภาพฐานรากแผ่

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัยมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติมีค่าสูงขึ้น เมื่อความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติมีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความน่าจะเป็นของการวิบัติ เล็กน้อยเมื่อความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำของดินแบบไม่สมนัย มีค่าน้อย ส่งผลให้ความน่าจะเป็นของการวิบัติ มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันเมื่อความยาวสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ไร้มิติมีค่า