



การพัฒนาแผนภูมิการออกแบบบนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือสำหรับกำแพงกันดิน

Development of Reliability – Based Design Charts for Retaining Walls

ศุจิวิศว์ จริยะเลอพงษ์

Sujiwit Jariyalrpong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Civil Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผนภูมิการออกแบบบนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือสำหรับกำแพงกันดิน
ผู้เขียน	นายศุภวิศว์ จริยะเลอพงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของทรายทำให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน ในการศึกษาครั้งนี้ทฤษฎีความน่าจะเป็นถูกใช้ในการประเมินผลของความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของทรายต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดิน ค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินถูกคำนวณในรูปแบบของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน (P_r) ถูกคำนวณด้วยวิธี First Order Second Moment (FOSM) และวิธี Monte Carlo Simulation (MCS) ผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นประกอบด้วย ค่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของกำแพงกันดิน (L/H), ค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของทราย (μ_ϕ), ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (COV_ϕ) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น ซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบของแผนภูมิการออกแบบบนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือ (RBD) ซึ่งเป็น Charts ที่ใช้ออกแบบค่า L/H สำหรับค่า μ_ϕ และ COV_ϕ ต่างๆตามค่า P_r ที่กำหนด สำหรับการพิบัติจากการเลื่อนไถล, การพิบัติจากการพลิกคว่ำ และการพิบัติเนื่องจากดินใต้ฐานรากมีกำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ จากการใช้ Charts ในการออกแบบพบว่าค่า L/H ที่ต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อค่า μ_ϕ ที่ใช้สำหรับทำการคำนวณมีค่าสูงขึ้น แต่ค่า L/H ที่ต้องการจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่า COV_ϕ ที่ใช้สำหรับทำการคำนวณมีค่าสูงขึ้น ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของ Charts พบว่าค่า L/H ที่หาได้จาก RBD Charts มีค่าใกล้เคียงกับผลที่คำนวณได้จาก Conventional method

คำหลัก : เสถียรภาพของกำแพงกันดิน, ความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน, การวิเคราะห์โดยความน่าจะเป็น

Thesis Title Development of Reliability – Based Design Charts for Retaining Walls
Author Mr. Sujiwit Jariyalrpong
Major Program Civil Engineering
Academic Year 2553

ABSTRACT

Uncertainty in properties of cohesionless soils may lead to problems in retaining walls stability analysis. In this study, the probabilistic approach was used for evaluating uncertainty of sand properties on retaining walls stability. The stability of retaining walls was determined in terms of factor of safety (FS) and safety margin (SM). Probability of failure of retaining walls (P_f) was analyzed using First Order Second Moment method (FOSM) and Monte Carlo Simulation method (MCS). Study results indicated that the ratio of width to height of retaining walls (L/H), the mean of internal friction angle of sand (μ_ϕ), coefficient of variation of the internal friction angle of sand (COV_ϕ) were found to be significant parameters for probabilistic analysis of retaining walls stability. These variables were used to develop reliability - based design charts (RBD charts), which can be used to design value of L/H for a set of μ_ϕ and COV_ϕ for any target probability of failure for sliding, overturning and bearing capacity modes. Analytical results showed that, the value of L/H decreased with increasing μ_ϕ but increased with increasing COV_ϕ . In addition, the L/H values obtained from RBD charts were similar to those obtained from the conventional method.

Keywords : Retaining Walls Stability, Probability of Failure of Retaining Walls, Probability Analysis

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(12)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเสถียรภาพของกำแพงกันดิน	5
2.2 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน	14
2.3 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น	17
2.4 ความน่าจะเป็นในการพิบัติของ โครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การกำหนดลักษณะทางกายภาพของกำแพงกันดิน	33
3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดิน	34
3.3 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ	34
3.4 การสร้าง Design Charts	40
3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของ Design Charts	46
4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์	
4.1 ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน โดยความน่าจะเป็น	49
4.2 การพัฒนา Design Charts	55
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบ Design charts	74
4.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง Design Charts	86
5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	88
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	
ก. ขั้นตอนการคำนวณความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS_s	94
ข. ค่าอัตราส่วนขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินสำหรับใช้พัฒนา Design charts	99
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	
ก. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	112
ประวัติผู้เขียน	119

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Summary of Inherent Variability of Strength Properties (Phoon et al., 1995)	27
2.2 Comparative Study for Cross Sectional Area of Retaining Wall (in m ²) (Babu and Basha, 2004)	31
4.1 ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P _r) ของกำแพงดิน	50
4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS สำหรับ SM	79
4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS เมื่อกำหนดให้ใช้ค่า $\frac{L}{H}$ เท่ากัน	79
4.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับผลการคำนวณด้วย Conventional method	87

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้ประโยชน์กำแพงกันดิน	2
1.2 ลักษณะกำแพงกันดินกำแพงกันดินที่จะทำการวิเคราะห์	4
2.1 แรงดันดินด้านข้างบนกำแพงกันดิน	6
2.2 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Sliding mode	11
2.3 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Overturning mode	12
2.4 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Bearing capacity mode	14
2.5 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Christian et al., 1992)	15
2.6 การหาความน่าจะเป็นในการพิบัติจากค่าการกระจายตัว	20
2.7 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution (0, 1))	23
2.8 การกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution)	24
2.9 การกระจายตัวโดยมีการกำหนดค่า Realization ของ ϕ	25
2.10 ความสัมพันธ์ของค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธาและมูลค่าความเสียหายในชีวิตอันเป็นผลที่ตามมาจากการพิบัติ (After Baecher 1987)	26
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ (a) and η (b) and COV_{ϕ} with $P_f = 0.0001$ for $COV_T = 5\%, 10\%, 15\%$ และ 20 (Chalermyanont, 2004)	28
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของวิธีดำเนินการวิจัย	32
3.2 ลักษณะของกำแพงกันดินที่ใช้ทำการศึกษา	33
3.3 Probabilistic Analysis (ดัดแปลงจาก Chalermyanont and Benson, 2004)	35
3.4 ขั้นตอนการกำหนดค่า P_f ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ขั้นตอนการคำนวณค่า P_r ด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)	39
3.6 ขั้นตอนการสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)	42
3.7 ขั้นตอนการสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)	44
3.8 Flow charts ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts ที่ได้จากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS	47
3.9 Flow charts ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts ที่ได้จากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM	48
4.1 ลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS: เมื่อ $\frac{L}{H} = 0.27$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$ และ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	51
4.2 ลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM: เมื่อ $\frac{L}{H} = 0.27$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$ และ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	52
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) กับค่า P_r สำหรับ การคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) กับค่า P_r สำหรับ การคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM	54
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{L}{H}$ กับค่า μ_ϕ และความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{L}{H}$ กับค่า COV_ϕ	55
4.6 Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS	56
4.7 Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS	57
4.8 Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS	58
4.9 ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Sliding mode ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Overturning mode ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM	60
4.11	ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Bearing capacity mode ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM	60
4.12	Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM	61
4.13	Design charts สำหรับ Overturning mode ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM	62
4.14	Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM	63
4.15	ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยน้ำหนักจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM ที่ค่า $P_f = 0.01$	65
4.16	Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS	66
4.17	Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS	67
4.18	Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS	68
4.19	Design charts for Sliding mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM	70
4.20	Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM	71
4.21	Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM	72
4.22	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Sliding mode)	75
4.23	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Overturning mode)	76
4.24	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Bearing capacity mode)	77
4.25	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM	80
4.26	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM	81
4.27	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM	82
4.28	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM) (Sliding mode)	83
4.29	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM) (Overturning mode)	84
4.30	การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM) (Bearing capacity mode)	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันโครงการก่อสร้างต่างๆมักมีการถมดินเพื่อปรับระดับหน้าดินให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในกรณีที่ระดับดินมีความสูงต่ำไม่เท่ากันมีการเลือกกำแพงกันดินมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง และพบว่ากำแพงกันดินที่ใช้งานยังมีบางส่วนที่ยังเกิดการพิบัติต่างๆที่ในการออกแบบก็ได้ทำการเลือกใช้อัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าสูงและน่าจะเหมาะสมแล้ว สาเหตุหนึ่งในการพิบัติที่น่าสนใจคือ ค่าคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบมีความถูกต้องเหมาะสมเพียงใด เนื่องจากดินเป็นวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจึงส่งผลให้ค่าคุณสมบัติต่างๆของดินมักมีความไม่แน่นอน (Phoon et al., 1995) นอกจากนั้นความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินยังอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้องเหมาะสมเพียงพอ ดังนั้นในการวิเคราะห์ออกแบบกำแพงกันดินจึงควรคำนึงถึงค่าความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินในขั้นตอนการคำนวณด้วย (Chalermyanont and Benson, 2004)

การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการพิบัติของกำแพงกันดิน เชิงพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์มีความสำคัญสำหรับการนำไปใช้ออกแบบป้องกันและแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากการพิบัติหรือลักษณะงานต่างๆที่เกี่ยวกับการก่อสร้างกำแพงกันดิน ในการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันดินจะต้องพิจารณาถึงลักษณะการพิบัติทั้ง 3 รูปแบบของกำแพงกันดินอันได้แก่ การพิบัติจากการเลื่อนไถล (Sliding failure), การพิบัติจากการพลิกคว่ำ (Overturning failure) และการพิบัติจากดินได้ฐานรากมีกำลังต้านแรงแบกทานไม่เพียงพอ (Bearing capacity failure) ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ความพิบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ และความถูกต้องของสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ต้องสามารถแสดงกลไกการพิบัติที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งค่าคุณสมบัติของดินดังกล่าวมักมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) ตามธรรมชาติ (Phoon et al., 1995) จึงอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินได้

ในทางปฏิบัติวิศวกรจัดการกับความไม่แน่นอนทั้งหมดโดย กำหนดอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) ให้สูงเพื่อชดเชยกับความไม่แน่นอนแต่อย่างไรก็ตาม การใช้อัตราส่วนความปลอดภัยสูงเกินไปก็อาจทำให้เกิดราคาการก่อสร้างที่สูงขึ้น ในขณะที่การใช้อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำเกินไปก็อาจทำให้เกิดการพังทลายของกำแพงกันดินได้ การคำนวณโดยนำทฤษฎีความน่าจะเป็นเข้ามามีส่วนร่วมในการวิเคราะห์ (Probabilistic analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่นำข้อมูลทางสถิติอย่างมีระบบ เช่น การจำลองความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินด้วย Probability density function ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (Coefficient of variation; COV) ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์ของเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการพังทลาย (Probability of failure) (Degroot , 1996)

งานวิจัยนี้ใช้ Probabilistic analysis เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินที่จะใช้ในการคำนวณ โดยอาศัยหลักการของ First order second moment method (FOSM) และ Monte carlo simulation (MCS) มาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินแล้วนำเสนอในรูปแบบของ Charts ที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินได้ ซึ่งจะเน้นไปที่การออกแบบโดยการใช้ค่า Probability of failure แทนที่จะเป็น Factor of safety



รูปที่ 1.1 การใช้ประโยชน์กำแพงกันดิน

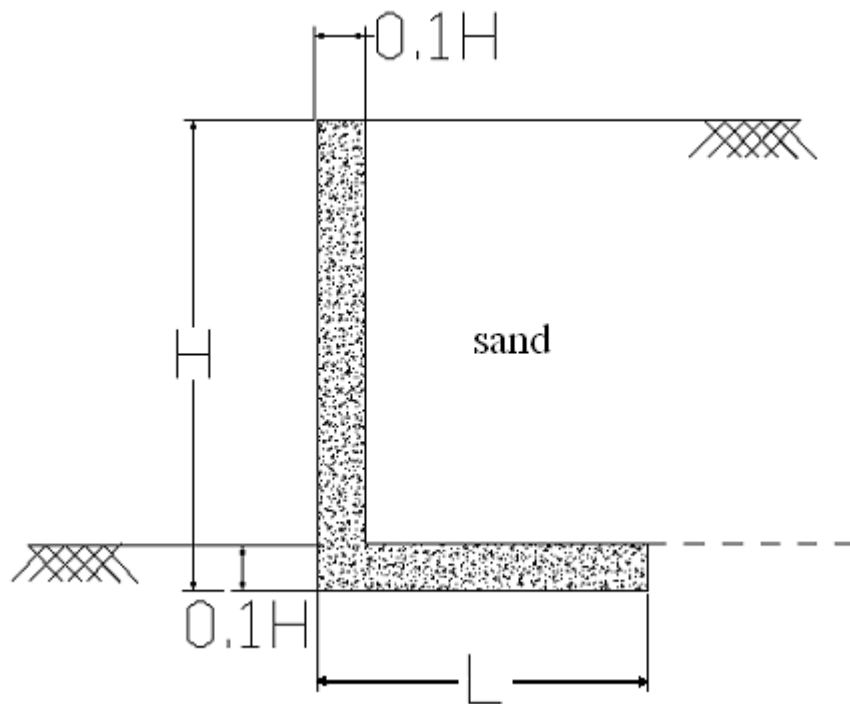
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ใช้ Probabilistic analysis จัดการกับความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดิน (Uncertainty of soil properties) โดยแสดงผลการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปของ Probability of failure
- 1.2.2 พัฒนาวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินใหม่โดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นนำเสนอในรูปแบบของ Design chart

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ปัญหาเสถียรภาพของกำแพงกันดินขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของโครงสร้างกำแพงกันดินและความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของดินอันอาจเกิดจากธรรมชาติหรือจากขั้นตอนการก่อสร้าง เพื่อควบคุมความผิดพลาดในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน จึงจำเป็นต้องทำการจัดขอบเขตในการศึกษา ดังนี้

- 1.3.1 ลักษณะของโครงสร้างกำแพงกันดินเป็นคอนกรีตมีลักษณะเป็น L – Shape (Liu and Evett, 2004) โดยที่ดินหน้ากำแพงมีส่วนช่วยในการเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วย (รูปที่ 1.2)
- 1.3.2 ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นทรายสะอาด (Clean sand) ที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว



รูปที่ 1.2 ลักษณะกำแพงกันดินกำแพงกันดินที่จะทำการวิเคราะห์

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยอาศัยหลักทฤษฎีความน่าจะเป็นนั้น ผู้ที่ศึกษาต้องมีความเข้าใจในการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานทางด้านวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินและความรู้ทางด้านทฤษฎีความน่าจะเป็นมาผนวกรวมกัน การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดโดยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่

- 1) การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน (Stability analysis of retaining walls)
- 2) ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Uncertainty of soil properties)
- 3) การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น (Probabilistic analysis of stability of retaining walls)
- 4) ความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา
- 5) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเสถียรภาพของกำแพงกันดิน

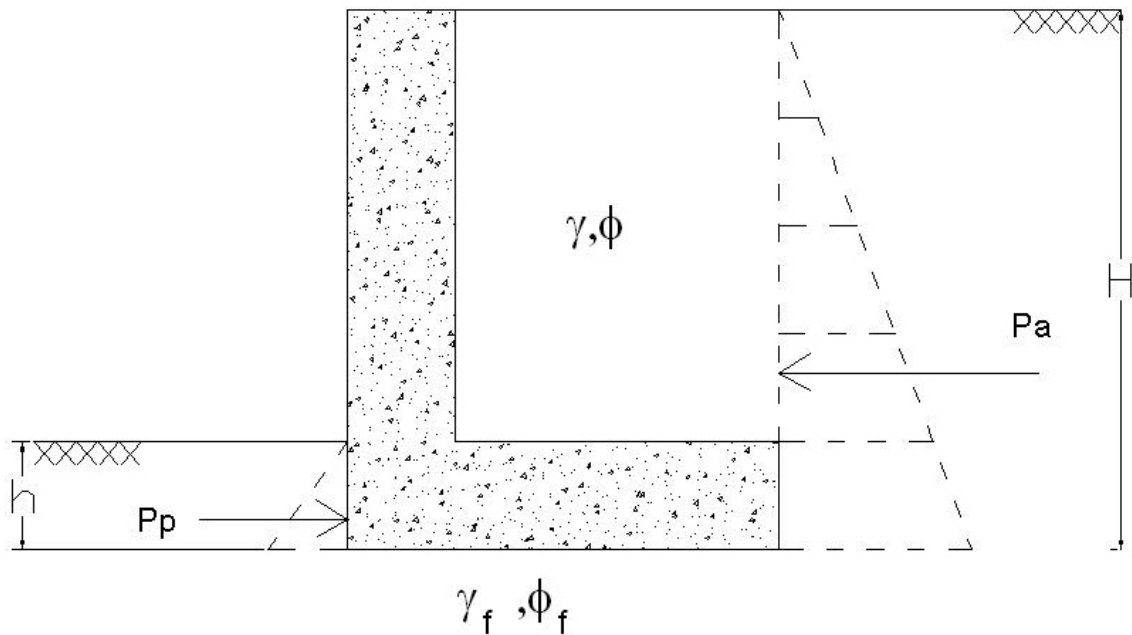
2.1.1 ทฤษฎีแรงดันดินด้านข้าง

การออกแบบโครงสร้างกำแพงกันดินจำเป็นต้องทราบค่าแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างกำแพงกันดิน เพื่อนำไปใช้คำนวณหาขนาดสัดส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดินที่เหมาะสมและแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการพิบัติ โดยแรงดันดินด้านข้างจะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติของดิน เช่น ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ,ค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (ϕ) , แรงยึดเหนี่ยวของมวลดิน (C) และขึ้นอยู่กับผิวสัมผัสของโครงสร้างกำแพงกันดินกับมวลดิน

Rankine (1957) ได้เสนอวิธีหาแรงดันดินด้านข้างของดินเม็ดหยาบที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) สมมติฐานที่ใช้ในทฤษฎีของ Rankine คือ มวลดินมีเนื้อเดียวกัน

และมีคุณสมบัติรับแรงเหมือนกันทุกทิศทาง กำแพงกันดินมีแนวตั้งตั้งฉากกับแนวนอนและมีผิวเรียบ (Smooth) นั่นคือ ไม่พิจารณาถึงแรงเสียดทานระหว่างกำแพงกันดินบริเวณผิวสัมผัสกับมวลดิน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของมวลดินในสภาวะ Active หรือ Passive ที่ระดับความลึกต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสภาวะสมดุลพลาสติก (Plastic equilibrium in soils) ตามขอบเขตการบีบอัดจากการเฉือน (สมการของ Mohr - Coulomb)

แรงดันดินด้านข้างของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil) กรณีที่ดินถมอยู่ในแนวราบเสมอกับสันของกำแพงกันดินแรงดันดินแบบ Active (P_a) และ Passive (P_p) ดังรูปที่ 2.1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แรงดันดินด้านข้างบนกำแพงกันดิน

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (2.1)$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma_f h^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ P_a = แรงดันดินด้านข้างแบบ Active

P_p = แรงดันดินด้านข้างแบบ Passive

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

H = ความสูงของดินถมหลังกำแพงกันดิน

h = ความสูงของดินถมหน้ากำแพงกันดิน (0.1H)

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน

ϕ = มุมเสียดทานภายในของดิน

γ_f = หน่วยน้ำหนักของดินใต้ฐานราก

ϕ_f = มุมเสียดทานภายในของดินใต้ฐานราก

2.1.2 ค่ากำลังรับแรงแบกทาน

ผู้ที่วิเคราะห์และออกแบบกำแพงกันดินนอกจากจะต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีแรงดันดินด้านข้างแล้วยังจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีที่จะใช้สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงแบกทานหรือค่ากำลังต้านแรงกดของดิน (Bearing capacity of soil) ด้วยซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่จะแสดงถึงความสามารถของดินที่จะต้องรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่เกิดการพิบัติอันเนื่องมาจากแรงเฉือน

การวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงแบกทานหรือกำลังต้านแรงกดสูงสุดของดิน (Ultimate bearing capacity of soil) Meyerhof (1963) ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงแบกทานและเสนอสมการสำหรับการหาค่ารับน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยอาศัยทฤษฎีการพิบัติแบบ Plastic โดยมีตัวแปรหลักได้แก่ รูปร่างหน้าตัด (Shape of footing) ระดับความลึก (Depth) และได้ใช้ค่ากำลังของดิน (Shear strength) เหนือฐานรากใน Shear zone มาพิจารณาด้วย ทำให้สมการนี้สามารถใช้ได้ทั้งกรณีวิเคราะห์ฐานรากตื้นและฐานรากลึกซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

- a) มวลดินเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันและมีคุณสมบัติรับแรงเหมือนกันทุกทิศทางและค่ากำลังต้านแรงเฉือนของมวลดินสามารถคำนวณได้จากสมการของ Mohr - Coulomb

- b) ฐานรากมีลักษณะเป็นแนวยาวและผิวสัมผัสของฐานรากกับดินใต้ฐานรากเป็นแบบขรุขระ
- c) การพิบัติของดินใต้ฐานรากเป็นแบบ General shear failure
- d) บริเวณที่เกิดการพิบัติจะไม่เกินกว่าระดับของฐานราก นั่นคือจะไม่คิดแรงที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินที่อยู่เหนือระดับของฐานราก

สมการที่ใช้คำนวณค่ากำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของ Meyerhof สำหรับฐานรากตื้นต่อเนื่อง (Strip footing) จะต้องทำการหาค่าตัวประกอบกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity factors; N_c , N_q , N_γ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) ให้ได้เสียก่อน แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของดิน ดังนี้

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$$

เมื่อ q_{ult} = ค่ารับแรงแบกทานประลัย

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$$

ในกรณีของทราย $q_{ult} = qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$ (2.3)

2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน (Stability Analysis of Retaining Walls)

วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในรูปแบบของสมการและ Design Charts แบบต่างๆ เพื่อช่วยออกแบบกำแพงกันดิน โดยมีจุดมุ่งหมายที่เหมือนกันคือเพื่อให้กำแพงกันดินที่วิเคราะห์ออกแบบมีเสถียรภาพที่มั่นคงและแข็งแรงเพียงพอต่อการพิบัติในลักษณะต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กรณีหลักคือ 1) การพิบัติจากการเลื่อนไถล (Sliding failure) 2) การพิบัติจากการพลิกคว่ำ (Overturning failure) และ 3) การพิบัติเนื่องจากดินใต้

ฐานรากมีกำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ (Bearing failure) ทั้งนี้การวิเคราะห์จะต้องมีความถูกต้องตามทฤษฎีพื้นฐานและสมมุติฐานที่ตรงกับลักษณะการพิบัติ ดังนี้

- a) พิจารณาแรง (Force) ที่มากระทำต่อกำแพงกันดินที่มีทั้งแรงที่กระทำในแนวราบและแรงที่กระทำในแนวดิ่ง อันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างของกำแพงกันดินและน้ำหนักของดินถม
- b) พิจารณารูปแบบของการพิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของกำแพงกันดินว่าควรจะเป็นไปในลักษณะใด
- c) พิจารณาสมดุลของแรง (Force) และสมดุลของโมเมนต์ (Moment) โดยพิจารณาจากสมดุลของแรงกระทำ (Driving force), แรงต้านการกระทำ (Resisting force) และตำแหน่งที่แรงต่างๆกระทำต่อโครงสร้างกำแพงกันดินในการพิบัติลักษณะต่างๆ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินใน 2 รูปแบบได้แก่ การหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety; FS) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้แสดงถึงค่าเสถียรภาพของโครงสร้างที่วิศวกรรู้จักและคุ้นเคยในการใช้งานเป็นอย่างดี และการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (Safety margin; SM) โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงต้านการกระทำ (Resisting force; R_r) ต่อแรงกระทำ (Driving force; D_r) และโครงสร้างมีเสถียรภาพเมื่อค่า $FS \geq 1$

$$FS = \frac{R_r}{D_r} \quad (2.4)$$

ส่วนค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) สามารถคำนวณค่าได้จากผลลบระหว่างแรงต้านการกระทำ (R_r) กับแรงกระทำ (D_r) และโครงสร้างมีเสถียรภาพเมื่อค่า $SM \geq 0$

$$SM = R_r - D_r \quad (2.5)$$

2.1.3.1 การพิบัติจากการเลื่อนไถล

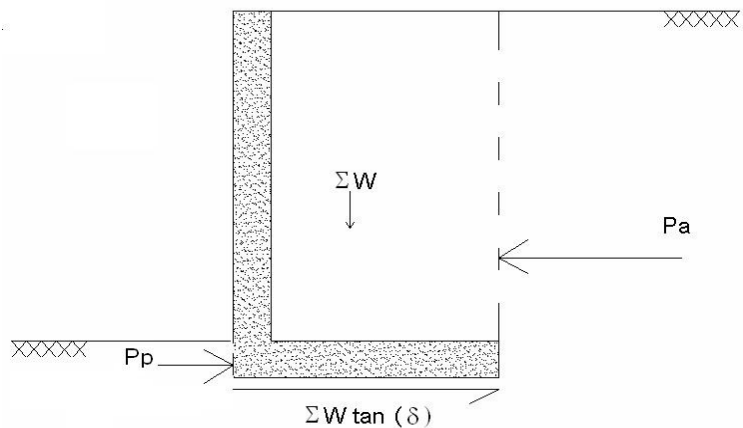
การพิบัติจากการเลื่อนไถล (Sliding mode) เป็นการพิบัติที่เกิดจากแรงเสียดทานใต้ฐานรากของกำแพงกันดินมีค่าน้อยกว่าแรงดันดินด้านข้างเนื่องจากดินถม (รูปที่ 2.2) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อนไถล (FS_s) ได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงต้านการเลื่อนไถล ($R_f = \sum W \tan(0.75\phi) + P_p$) และแรงเลื่อนไถล ($D_f = P_a$) และหาค่าผลต่างความปลอดภัยของการเลื่อนไถล (SM_s) ได้จากผลลบระหว่างแรงต้านการเลื่อนไถล ($R_f = \sum W \tan(0.75\phi) + P_p$) กับแรงเลื่อนไถล ($D_f = P_a$) ดังสมการที่ 2.6, 2.7 ตามลำดับ

$$FS_s = \frac{R_f}{D_f} = \frac{\sum W \tan(0.75\phi) + P_p}{P_a} \quad (2.6)$$

$$SM_s = R_f - D_f = \sum W \tan(0.75\phi) + P_p - P_a \quad (2.7)$$

เมื่อ	$\sum W \tan(\delta) =$ แรงเสียดทานใต้ฐานรากกำแพงกันดิน
	$\sum W =$ ผลรวมของน้ำหนักดินถมและน้ำหนักของกำแพงกันดิน
	$= (0.1H \times 0.9H)\gamma_c + (L \times 0.1H)\gamma_c + 0.9H(L - 0.1H)\gamma$
	$\delta =$ ค่ามุมเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีตกับดิน
	$= 0.75\phi$
	$\gamma_c =$ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
	$= 24 \text{ kN/m}^3$

สำหรับการวิเคราะห์ห้ออกแบบกำแพงกันดินด้วยวิธี Conventional method มีคำแนะนำว่าโครงสร้างกำแพงกันดินจะมีความปลอดภัยต่อการพิบัติแบบเลื่อนไถลเมื่อกำหนดให้ค่า $FS_s \geq 2$ (Teng, 1962)



รูปที่ 2.2 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Sliding mode

2.1.3.2 การพินิจจากการพลิกคว่ำ

การพินิจจากการพลิกคว่ำของกำแพงกันดิน (Overturning mode) เป็นการพินิจอันเนื่องมาจากโมเมนต์ที่กระทำรอบจุด O หน้ากำแพงกันดินมีค่ามากกว่าโมเมนต์ต้าน (รูปที่ 2.3) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการพลิกคว่ำ (FS_o) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างผลรวมของโมเมนต์ต้านการพลิกคว่ำ (ΣM_R) ต่อผลรวมของโมเมนต์พลิกคว่ำ (ΣM_o) และผลต่างความปลอดภัยของการพลิกคว่ำ (SM_o) สามารถหาได้จากผลต่างระหว่างผลรวมของโมเมนต์ต้านการพลิกคว่ำ (ΣM_R) กับผลรวมของโมเมนต์พลิกคว่ำ (ΣM_o) ดังสมการที่ 2.8, 2.9 ตามลำดับ

$$FS_o = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_o} = \frac{\Sigma W_i d_i + P_p d_p}{P_a d_a} \quad (2.8)$$

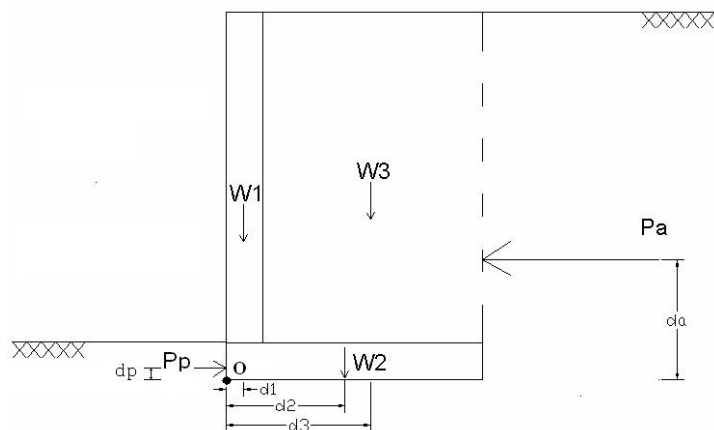
$$SM_o = \Sigma M_R - \Sigma M_o = \Sigma W_i d_i + P_p d_p - P_a d_a \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Sigma W_i d_i &= W_1 d_1 + W_2 d_2 + W_3 d_3 \\ W_1 &= \text{น้ำหนักของกำแพงกันดิน} \\ &= (0.1H \times 0.9H) \gamma_c \\ d_1 &= \text{ระยะจากแนวแรง } W_1 \text{ ถึงจุด O} \\ &= \frac{0.1H}{2} \\ W_2 &= \text{น้ำหนักของฐานรากของกำแพงกันดิน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (L \times 0.1H) \gamma_c \\
 d_2 &= \text{ระยะจากแนวแรง } W_2 \text{ ถึงจุด O} \\
 &= \frac{L}{2} \\
 W_3 &= \text{น้ำหนักของดินถม} \\
 &= 0.9H(L - 0.1H) \gamma \\
 d_3 &= \text{ระยะจากแนวแรง } W_3 \text{ ถึงจุด O} \\
 &= 0.1H + \frac{L - 0.1H}{2} \\
 d_a &= \text{ระยะจากแนวแรง } P_a \text{ ถึงจุด O} \\
 &= \frac{H}{3} \\
 \\
 d_p &= \text{ระยะจากแนวแรง } P_p \text{ ถึงจุด O} \\
 &= \frac{h}{3}
 \end{aligned}$$

สำหรับการวิเคราะห์ห้ออกแบบกำแพงกันดินด้วยวิธี Conventional method มีคำแนะนำว่าโครงสร้างกำแพงกันดินจะมีความปลอดภัยต่อการพิบัติแบบพลิกคว่ำเมื่อกำหนดให้ค่า $FS_o \geq 1.5$ (Teng, 1962)



รูปที่ 2.3 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Overturning mode

2.1.3.3 การพัวติจากดินใต้ฐานรากมีกำลังต้านแรงแบกทานไม่เพียงพอ

การพัวติจากดินใต้ฐานรากมีกำลังต้านแรงแบกทานไม่เพียงพอ (Bearing capacity mode) เป็นการพัวติของกำแพงกันดินที่เกิดจากน้ำหนักของกำแพงกันดินและดินถมมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงแบกทานประลัย (Ultimate bearing capacity, q_{ult}) ของดินฐานราก (รูปที่ 2.4) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของแรงแบกทาน (FS_b) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานประลัย (q_{ult}) ต่อค่าน้ำหนักแบกทานที่เกิดจากน้ำหนักของกำแพงกันดินและดินถม ($\Sigma W/L$) และสามารถหาค่าผลต่างความปลอดภัยของแรงแบกทาน (SM_b) ได้จากผลต่างระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานประลัย (q_{ult}) กับค่าน้ำหนักแบกทานที่เกิดจากน้ำหนักของกำแพงกันดินและดินถม ($\Sigma W/L$) ดังสมการที่ 2.10, 2.11 โดยค่า q_{ult} สามารถหาได้จากสูตรของ Meyerhof (สมการที่ 2.3)

$$FS_b = \frac{q_{ult}}{q} = \frac{q_h N_q + 0.5 \gamma L' N_\gamma}{\frac{\Sigma W}{L}} \quad (2.10)$$

$$SM_b = q_{ult} - q = q_h N_q + 0.5 \gamma L' N_\gamma - \frac{\Sigma W}{L} \quad (2.11)$$

Meyerhof (1963) เสนอการหาค่า q_{ult} ในกรณีที่แรงกระทำด้านข้างหรือโมเมนต์ จึงต้องมีการปรับแก้ค่าความกว้างของฐานของกำแพงกันดินให้ถูกต้องเนื่องจากโครงสร้างของกำแพงกันดินและลักษณะการถมดินเป็นไปแบบไม่สมมาตรส่งผลให้แรงที่กระทำต่อฐานรากเกิดการเอียงศูนย์โดยสมการที่ 2.3 ต้องปรับเป็น

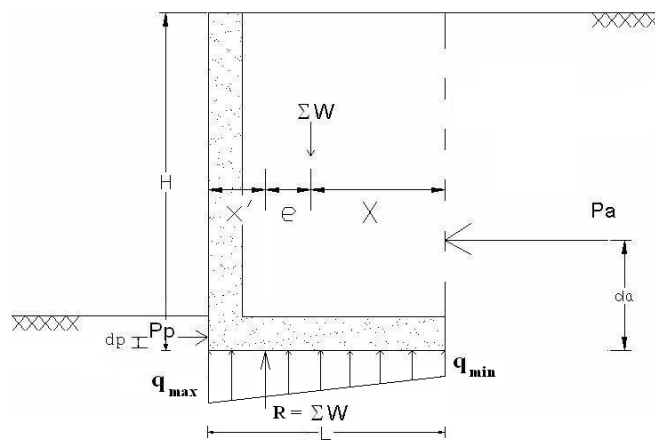
$$q_{ult} = q N_q + \frac{1}{2} \gamma L' N_\gamma \quad (2.12)$$

เมื่อ L' = ความกว้างของฐานรากหลังปรับแก้
 $= (L - 2e)$
 e = ระยะเอียงศูนย์ของแรงลัพธ์
 $= L - x' - X$
 X = ระยะที่ ΣW กระทำห่างจากขอบขวาของฐานราก (Centroid)
 $= \frac{\Sigma W_i d_i}{\Sigma W_i}$

$$x' = \text{ระยะที่แรงปฏิกิริยาจากดินกระทำกับฐานรากของกำแพงกันดิน}$$

$$= \frac{(\Sigma W)(L - X) + (P_p)\left(\frac{h}{3}\right) - (P_a)\left(\frac{H}{3}\right)}{\Sigma W}$$

สำหรับการวิเคราะห์ห้ออกแบบกำแพงกันดินด้วยวิธี Conventional method มีคำแนะนำว่าโครงสร้างกำแพงกันดินจะมีความปลอดภัยต่อการพิบัติเนื่องจากมีกำลังต้านแรงแบกทานไม่เพียงพอ เมื่อกำหนดให้ค่า $FS_b \geq 3$ (Teng, 1962)



รูปที่ 2.4 Free body diagram ของแรงเพื่อใช้วิเคราะห์ Bearing capacity mode

2.2 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Uncertainty of Soil Properties)

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามกระบวนการทางธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินตามมาทำให้ไม่สามารถทราบถึงค่าคุณสมบัติ (Soil properties) ที่แท้จริงภายในเนื้อดินได้ และปัญหาความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินนั้นจะส่งผลให้มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน ซึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัตินั่นเอง (Probability of failure, P_f) ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Uncertainty of soil properties) และวิธีจัดการกับความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินต่อไป

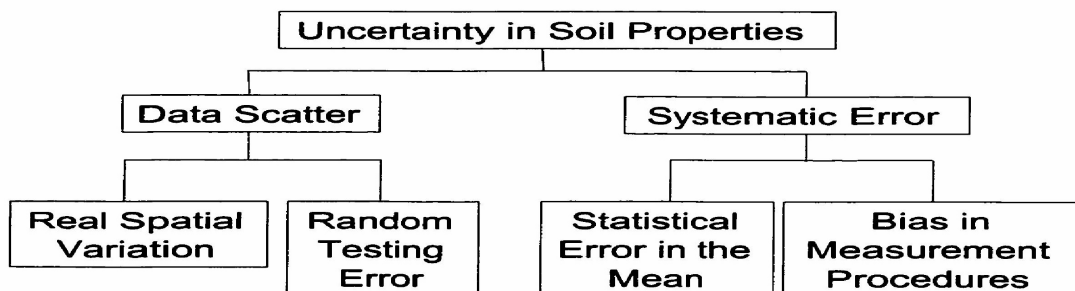
2.2.1 สาเหตุของความไม่แน่นอน (Sources of Uncertainty)

ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินมีด้วยกันทั้งหมด 2 ส่วน (Christian et al., 1994; Lacasse and Nadim, 1996; Phoon and Kulhawy, 1999) ได้แก่

a. ความไม่แน่นอนตามธรรมชาติ (Inherent Uncertainty); เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถทำการควบคุมได้เพราะเกิดจากสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อมนั้นๆ

b. ความผิดพลาดจากระบบ (Systematic Error); เกิดจากความผิดพลาดในการวัด การทดสอบเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหรือแบบจำลอง (Model) ในการหาคุณลักษณะต่างๆของดิน และ ข้อมูลที่เกิดจากการรวบรวมข้อมูล (Collection) ที่ไม่เพียงพอทำให้เกิดความไม่แน่นอนขึ้นได้ แต่ความไม่แน่นอนที่เกิดจากความผิดพลาดอย่างเป็นระบบสามารถควบคุมและลดทอนให้น้อยลงได้ (Lacasse and Nadim, 1996)

Christian et al. (1992) จัดแยกความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินทั้งหมดเป็น 2 หมวดหมู่ ได้แก่ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการกระจายของข้อมูล (Data scatter) ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแปรปรวนแบบ Spatial variation และ ความผิดพลาดจากการทดสอบแบบสุ่ม ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดจากระบบ (Systematic error) ประกอบไปด้วย ความผิดพลาดทางสถิติของค่าเฉลี่ย และความโน้มเอียง (Bias) จากวิธีการวัด ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Christian et al., 1992)

2.2.2 การหาปริมาณความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Quantifying Uncertainty in Soil Properties)

Degroot (1996) กล่าวว่าวิศวกรธรณีเทคนิคสามารถปรับปรุงข้อมูลเพื่อจะได้ไม่เกิดความผิดพลาดโดยจะต้องปรับปรุงให้ได้ค่าประมาณที่ดีที่สุด (A best estimate) และ ค่าที่บ่งบอกถึงความไม่แน่นอนของค่าประมาณที่ดีที่สุด (A measure of uncertainty in the best estimate) โดยค่าสองค่าดังกล่าวนี้ในทางสถิติก็คือค่าเฉลี่ย (Mean, μ_x) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ_x) ตามลำดับ

a.) ค่าเฉลี่ย (Mean, μ_x); เป็นตัวสถิติที่ใช้วัดค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลที่กระจายแบบปกติเท่านั้น กล่าวคือ ข้อมูลต้องมีรูปทรงของรูปแบบข้อมูลที่ค่อนข้างสมมาตรรอบค่าๆหนึ่ง คือ เป็นตัวแบบที่มียอดเดียว (Unimodal pattern) และเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากข้อที่มีความเบี่ยงเบนคงที่

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.13)$$

b.) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, σ_x); เป็นรากที่สองของค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นค่าที่ใช้อนุมานความเบี่ยงเบนของข้อมูลได้ดีที่สุด

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x)^2} \quad (2.14)$$

c.) สัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (Coefficient of Variation, COV); เป็นอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่าเฉลี่ยในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์

$$\text{COV}_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \times 100\% \quad (2.15)$$

และสามารถนำผลที่ได้จากการคำนวณข้างต้นไปคำนวณหาความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P) ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z = \text{การแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน}$$

$$= \frac{X - \mu_x}{\sigma_x}$$

$$f(Z) = \text{การแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมแบบปกติมาตรฐาน}$$

$$P_f = \text{ความน่าจะเป็นในการพิบัติ}$$

$$= 1 - f(Z)$$

เพื่อความสะดวกค่า Z และ $f(Z)$ สามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรม Microsoft Excel ช่วยคำนวณดังนี้

$$Z = \text{ค่ามาตรฐาน (Normalized value Z)}$$

$$= \text{STANDRADIZE}(X, \mu_x, \sigma_x)$$

$$f(Z) = \text{ค่าการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานสะสม}$$

$$\text{Standard normal cumulative distribution } (\mu_x = 0, \sigma_x = 1)$$

$$= \text{NORMSDIST}(Z)$$

2.3 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น (Probabilistic Method for Determining Stability of Retaining Walls)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น คือ วิธีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการพิบัติ (Probability of failure) ของกำแพงกันดินโดยประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านสถิติ โดยสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ FS หรือ SM หรือการหาค่าการกระจายตัวของค่าเหล่านี้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น First order second moment method (FOSM), Monte carlo simulation (MCS) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความนิยมเลือกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาตั้งมีรายละเอียดพอสังเขป ดังต่อไปนี้

2.3.1 First Order Second Moment Method (FOSM)

วิธี FOSM เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของพารามิเตอร์วิธีหนึ่งของ Method of moment ที่ใช้เทอมแรกของ Taylor's series approximation ในการประมาณค่า FS และค่า SM จากค่าประมาณของตัวแปรที่มีความแปรปรวนดังสมการที่ 2.16, 2.17

$$FS = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e \quad (2.16)$$

$$SM = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e \quad (2.17)$$

เมื่อ $g(x_i)$ = ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณค่าเสถียรภาพของโครงสร้าง
 x_i = พารามิเตอร์ที่มีความแปรปรวน
 e = ค่า Model Error

ค่าความแปรปรวนของค่า FS และ SM สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$V[FS] = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} C[x_i, x_j] + V[e] \quad (2.18)$$

$$V[SM] = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} C[x_i, x_j] + V[e] \quad (2.19)$$

เมื่อ $C[X_i, X_j]$ = ค่า Correlation Coefficient ของตัวแปร X_i และ X_j
 $V[e]$ = ค่า Variance of Model Error

สมการที่ 2.18, 2.19 เป็นสมการที่มีความซับซ้อนและยากต่อการใช้งานเพื่อให้เหมาะสมและงานต่อการใช้งานจึงได้มีการปรับปรุงสมการให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นตามข้อเสนอแนะของ Baecher and Christian (2003) ในกรณีที่มีมุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) เป็นค่าตัวแปรเพียงค่าเดียวที่มีความแปรปรวนสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$V[FS] \approx \left[\frac{\Delta FS}{\Delta \phi} \right]^2 [COV_{\phi} \cdot \mu_{\phi}]^2 \quad (2.20)$$

$$V[SM] \approx \left[\frac{\Delta SM}{\Delta \phi} \right]^2 [COV_{\phi} \cdot \mu_{\phi}]^2 \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$\Delta FS = g(\phi + 1^0) - g(\phi - 1^0)$$

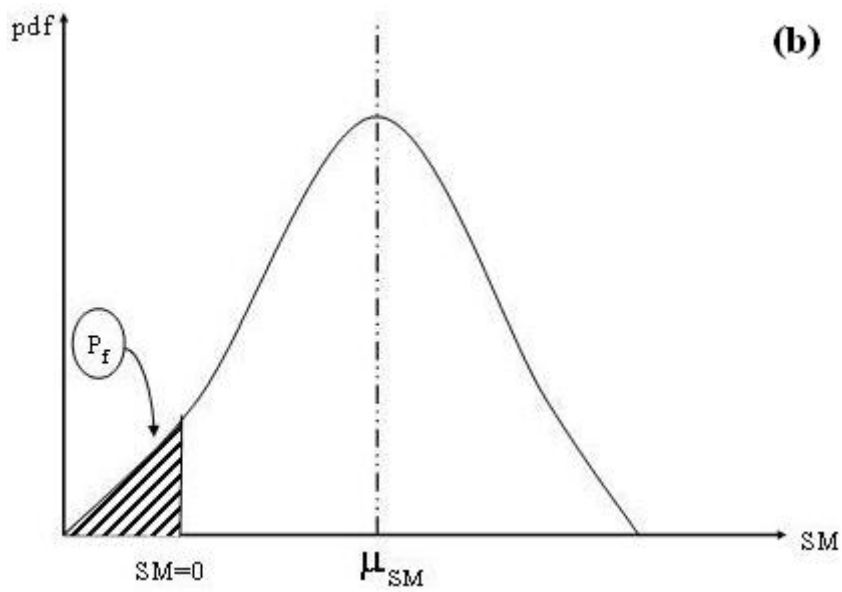
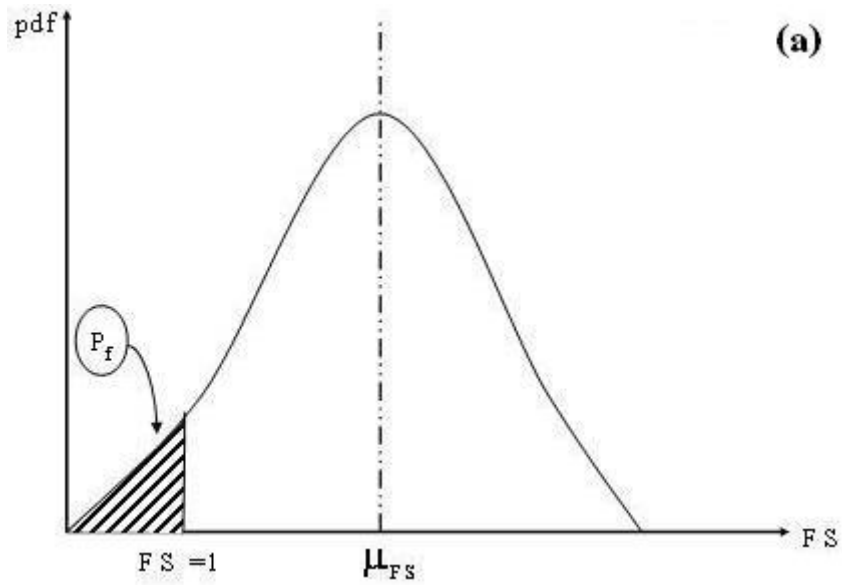
$$\Delta SM = g(\phi + 1^0) - g(\phi - 1^0)$$

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า FS และ SM สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.22 และ 2.23

$$\sigma_{FS} = \sqrt{V[FS]} \quad (2.22)$$

$$\sigma_{SM} = \sqrt{V[SM]} \quad (2.23)$$

แล้วทำการหาลักษณะของการกระจายตัวของค่า FS และ SM ดังรูปที่ 2.6 จากนั้นสามารถหาความน่าจะเป็นในการพิบัติจากความเป็นไปได้ที่ค่า $FS < 1$ และค่า $SM < 0$



รูปที่ 2.6 การหาความน่าจะเป็นในการพิบัติจากค่าการกระจายตัว

(a) P_f จาก $FS < 1$, (b) P_f จาก $SM < 0$

Duncan (2000) ได้พัฒนาหลักการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยวิธี First order second moment สำหรับการประมาณค่าความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$FS = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e \quad (2.24)$$

เมื่อ FS = อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน
 $g(x_i)$ = ฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์หา FS
 x_i = ตัวแปร (Variable)
 e = ความคลาดเคลื่อนของรูปแบบการวิเคราะห์จากความเป็จริง (Model error)

ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าต่างๆโดยปกติทั่วไป Variant ของอัตราส่วนความปลอดภัยสามารถประมาณได้ด้วยเทอมแรกของ Taylor's series ดังต่อไปนี้

$$V[FS] \approx \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} C[x_i, x_j] + V[e] \quad (2.25)$$

โดย $C[x_i, x_j]$ คือ Correlation coefficient ของตัวแปร x_i และ x_j

แต่สมการดังกล่าวมีความซับซ้อนไม่สามารถชักจูงให้วิศวกรใช้ได้จริงในงานปฏิบัติ Duncan จึงตั้งสมมติฐานให้การกระจายตัวของตัวแปรมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) เพื่อให้สมการสามารถใช้ในการหาค่า Variable โดยง่ายขึ้นเรียกว่า "Simplified first order second moment method" ดังนี้

$$V[FS] \approx \sum_{i=1}^K \left[\frac{g(x_{i+}) - g(x_{i-})}{2\sigma_{x_i}} \right]^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ $x_{i+} = E[x_i] + \sigma_{x_i}$
 $x_{i-} = E[x_i] - \sigma_{x_i}$

จากสมการข้างต้นสามารถหาความน่าจะเป็นในการพิบัติของผลลัพท์ได้โดยง่ายหากทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_{x_i}) และค่าประมาณของตัวแปร ($E[x_i]$)

2.3.2 Monte Carlo Simulation

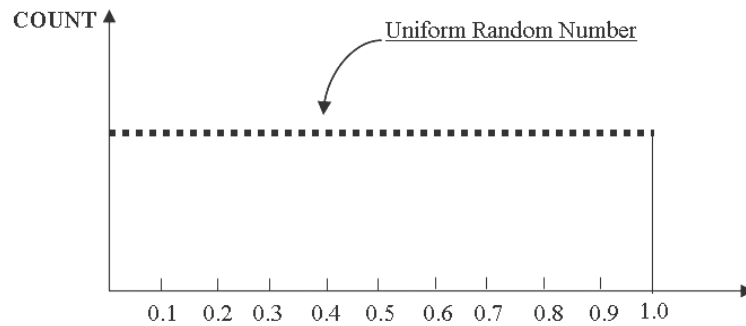
Monte carlo simulation เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางสถิติ ที่เกิดจากการนำค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์หรือคำนวณซ้ำหลายๆครั้ง จนได้คำตอบออกมาในรูปแบบของการกระจายตัวทางสถิติ (Probability distribution) ของผลลัพท์ในที่นี่ทำได้โดยการคำนวณค่า FS และ SM ซ้ำหลายๆครั้งและมากพอที่จะได้การกระจายของ FS และ SM (Distribution of FS or Distribution of SM) จากนั้นค่า P_r สามารถคำนวณได้จากความเป็นไปได้ที่ $FS < 1$ หรือ $SM < 0$ ก่อนที่จะใช้วิธีการของ Monte carlo simulation นั้นเราต้องทำการสร้างรูปแบบทางกายภาพขึ้นซึ่งในที่นี้คือ คุณสมบัติของกำแพงกันดินเช่น ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (Internal Friction Angle, ϕ) ที่สามารถแปรเปลี่ยนไปตามการกระจายทางสถิติ (Statistical distribution) กระบวนการสร้างรูปแบบทางกายภาพนี้ เรียกว่า การสร้าง Realizations

2.3.3 การสร้าง Realizations

การสร้าง Realizations สำหรับชุดของค่า ϕ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินที่มีค่าเฉลี่ย (μ_ϕ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_ϕ) เท่ากันสามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.3.1 Generating Uniform Random Number

การสร้างชุดของค่า ϕ เริ่มต้นจากการสร้าง Uniform random number (U) ซึ่งเป็นชุดตัวเลขแบบสุ่มซึ่งมีชุดการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ที่มีค่าระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 (รูปที่ 2.7) โดยใช้ Algorithm ที่เสนอโดย Wichmann and Hill (1987)



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution (0, 1))

2.3.3.2 การคำนวณ Normal Random Numbers

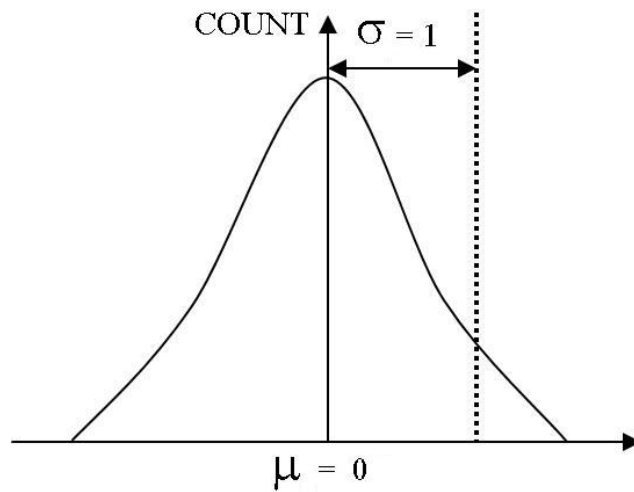
การสร้าง Random number (รูปที่ 2.8) ที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) โดยใช้ Uniform random number จากขั้นตอนที่ 1 สองค่า (U_1 และ U_2) มาเป็น Normal random numbers (X_1 และ X_2) การคำนวณทำได้โดยใช้สมการของ Box and Muller (1958) ดังต่อไปนี้

$$X_1 = \cos(2\pi U_2) \sqrt{-2 \ln(U_1)} \quad (2.27)$$

$$X_2 = \sin(2\pi U_2) \sqrt{-2 \ln(U_1)} \quad (2.28)$$

ค่า X_1 และ X_2 ที่ได้เป็น Normal random numbers ซึ่งมีค่าเฉลี่ย (Mean, μ_ϕ) = 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ_ϕ) = 1 การนำค่า Normal random numbers เพียงค่าเดียวไปใช้ทำได้โดยใช้ค่า X_c ดังนี้

$$X_c = \frac{X_1 + X_2}{\sqrt{2}} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.8 การกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution)

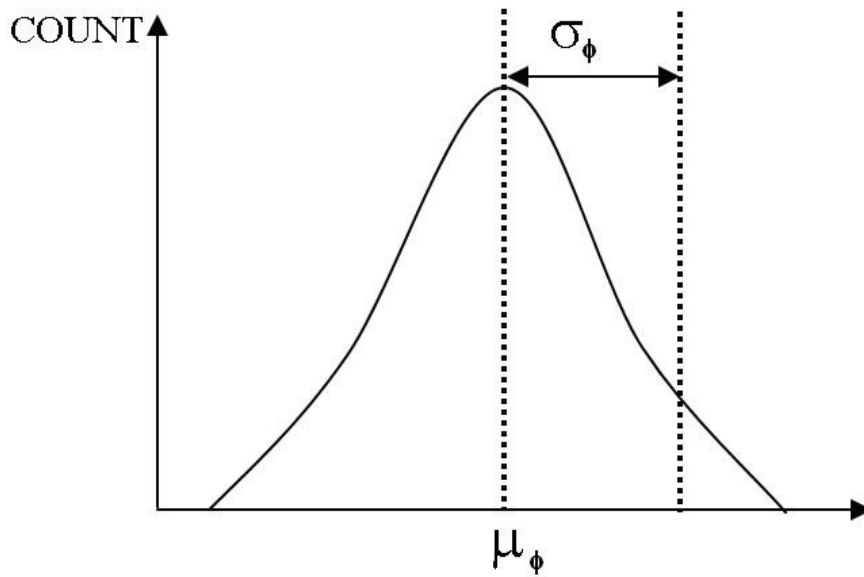
2.3.3.3 การคำนวณ Realization of ϕ (รูปที่ 2.9)

การคำนวณค่า Realization ของ ϕ ทำได้โดยการแปลงค่าเฉลี่ย $X_c(0,1)$ ให้เป็น ϕ ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean, μ_ϕ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ_ϕ) ที่ต้องการดังนี้

$$\phi = \mu_\phi + X_c \sigma_\phi \quad (2.30)$$

สามารถแสดงสมการให้อยู่ในเทอมของ COV (Coefficient of variation) ของค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

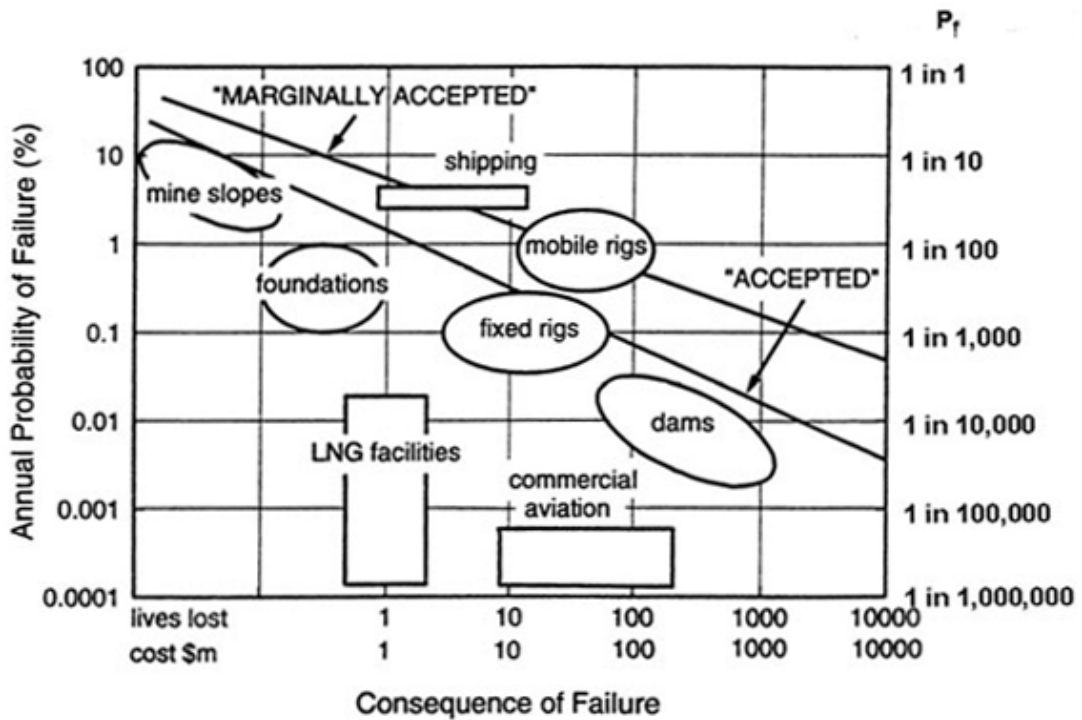
$$\phi = \mu_\phi (1 + X_c COV_\phi) \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวโดยมีการคำนวณค่า Realization ของ ϕ

2.4 ความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา

ความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบนั้นมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งานของโครงสร้างและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างนั้นพิบัติ เช่น โครงสร้างเขื่อนต้องให้ความสำคัญน่าจะเป็นในการพิบัติต่ำเนื่องจากเขื่อนเป็นโครงสร้างที่ใช้กักเก็บน้ำขนาดใหญ่ถ้าเขื่อนพิบัติจะมีการสูญเสียอย่างมาก Baecher (1987) เสนอค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธาและมูลค่าความเสียหายในชีวิต (คิดเป็นล้านดอลลาร์) อันเป็นผลที่ตามมาจากความพิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ข้อมูลของ Baecher (1987) สามารถนำมาใช้กำหนดความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure, P_f) โดยกำหนดกันคิดเป็นโครงสร้างประเภทฐานราก (Foundations) แบบหนึ่งในงานทางวิศวกรรมโยธา ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้จึงอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.001 โดย $P_f = 0.01$ หมายถึงมีโอกาสเกิดการพิบัติ 1 ครั้งสำหรับการก่อสร้าง 100 ครั้ง และ $P_f = 0.001$ หมายถึงมีโอกาสเกิดการพิบัติ 1 ครั้งสำหรับการก่อสร้าง 1,000 ครั้ง



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา และมูลค่าความเสียหายในชีวิตอันเป็นผลที่ตามมาจากความพิบัติ (After Baecher 1987)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Phoon et al. (1995) ได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของดินลักษณะต่างๆที่พบในธรรมชาติและทำการรวบรวมข้อมูลค่าคุณสมบัติของดินที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบต่างๆ แล้วแสดงผลค่าคุณสมบัติของดินโดยจำแนกตามประเภทของดิน ในรูปของค่าพิสัยสูงสุด-ต่ำสุด (Range), ค่าเฉลี่ย (Mean), ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (COV) ของค่าคุณสมบัติของดินดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยค่า ϕ ของทรายมีค่าในช่วง $35 - 41^\circ$ และค่า COV อยู่ในช่วง 5 -11 % เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 Summary of Inherent Variability of Strength Properties (Phoon et al., 1995)

Property ^{a*}	Soil Type	No. of data groups	No. of tests per group		Property Value		Property COV(%)	
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
S_u (UC) (kN/m ²)	Fine Grained	38	2-538	101	6-412	100	6-56	33
S_u (UU) (kN/m ²)	Clay. Silt	13	14-82	33	15-363	276	11-49	22
S_u (CIUC) (kN/m ²)	Clay	10	12-86	47	130-713	405	18-42	32
S_u (kN/m ²) ^{b*}	Clay	42	24-124	48	8-638	112	6-80	32
ϕ (°)	Sand	7	29-136	62	35-41	37.6	5-11	9
ϕ (°)	Clay. Silt	12	5-51	16	9-33	15.3	10-50	21
ϕ (°)	Clay. Silt	9	-	-	17-41	33.3	4-12	9
$\tan \phi$ (TC)	Clay. Silt	4	-	-	0.24-0.69	0.509	6-46	20
$\tan \phi$ (DS)	Clay. Silt	3	-	-	-	0.615	6-46	23
$\tan \phi$ ^{b*}	Sand	13	6-111	45	0.65-0.92	0.744	5-14	9

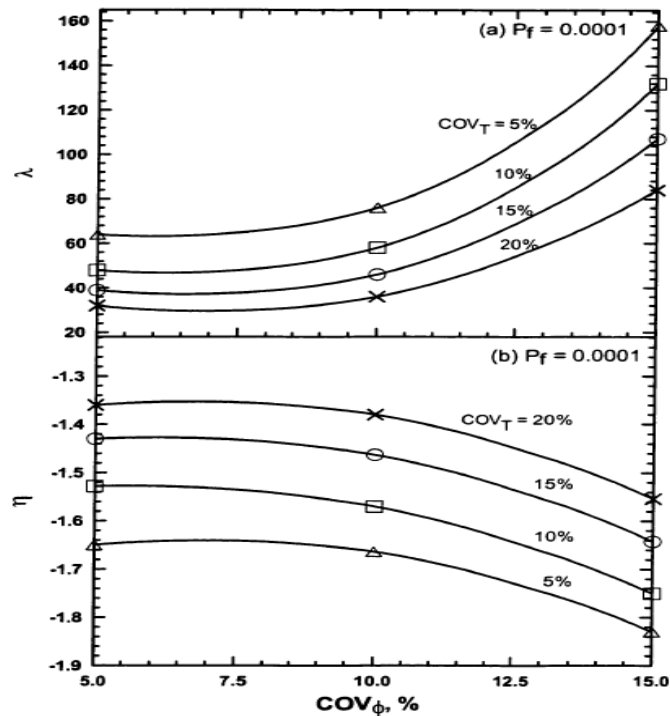
*^a S_u = Undrained shear strength, ϕ = Effective stress friction angle, DS = Direct shear test

TC = Triaxial compression test, UC = Unconfined compression test, UU = Unconsolidated undrained triaxial compression test, CIUC = Consolidated isotropic undrained triaxial - Compression test

*^b Laboratory test type not reported.

Chalermyanont and Benson (2004) ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Reliability-based design สำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินแบบ Mechanically stabilized earth walls โดยนำค่าตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดินมาทำการวิเคราะห์แบบ Probabilistic analysis เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรและใช้วิธี Monte carlo simulation เพื่อให้ทราบลักษณะการกระจายตัวของผลลัพธ์สำหรับนำไปหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure) และสุดท้ายจะได้ Reliability-based design charts เพื่อแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการพิบัติและตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพที่วิศวกรสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ (a) and η (b) and COV_ϕ with $P_f = 0.0001$ for $COV_T = 5\%$, 10% , 15% และ 20% (Chalermyanont, 2004)

โดยมีสมการที่สัมพันธ์กับ Reliability-based design charts ดังนี้

$$\alpha = \lambda \mu_\phi^\eta$$

- เมื่อ λ, η = Empirical parameters ที่ขึ้นอยู่กับค่า COV และ P_f
 α = เป็นอัตราส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย (μ_T) ของแรงดึงที่ให้ค่า P_f ที่ต้องการกับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดิน
 μ_ϕ = ค่าเฉลี่ย (Mean) ของมุมเสียดทานของดินหลังกำแพงกันดิน

COV_T = สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of variation) ของ
ค่าแรงดึงในกำแพงกันดิน

Chalermyanont and Benson (2005) ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกของ
กำแพงกันดินแบบ Mechanically stabilized earth walls ด้วยวิธี Reliability – based design (RBD)
โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นใน
การพิบัติทั้ง 3 รูปแบบของการพิบัติ และเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้จากการใช้วิธี RBD กับ
วิธีการคำนวณดั้งเดิม (Conventional method) และเปรียบเทียบกับค่า Inherent probability จากการ
คำนวณด้วยวิธีการคำนวณดั้งเดิม ผลจากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็น
ในการพิบัติพบว่าค่ามุมเสียดทานภายในของดินถมและค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่ามุม
เสียดทานภายในของดินถมเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ
สำหรับทั้ง 3 รูปแบบของการพิบัติ และพบว่าค่า Required reinforcement length ที่ได้จาก RBD มีค่า
ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ซ่อนอยู่ในการ
คำนวณออกแบบโดยใช้วิธีดั้งเดิมน่าจะมีค่า ≤ 0.001 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากผู้ศึกษาท่านอื่น
สำหรับโครงสร้างลักษณะเดียวกัน

Chalermyanont and Benson (2005) อธิบายถึงวิธีการและเทคนิคสำหรับใช้
คำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติทั้งระบบ (P_{FSYS}) ของกำแพงกันดินแบบ Mechanically
stabilized earth walls โดยค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติทั้งระบบหมายถึงผลรวมของค่าความน่าจะเป็น
ในการพิบัติอันเนื่องมาจากแรงภายในและค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติอันเนื่องมาจากแรง
ภายนอก (การพิบัติเนื่องจากการเลื่อนไถล, การพลิกคว่ำและค่ากำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ)
ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{FSYS} = P_{FINT} + P_{FS} + P_{FO} + P_{FBC}$$

- เมื่อ
- P_{FSYS} = ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติทั้งระบบ
 - P_{FINT} = ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติอันเนื่องมาจากแรงภายใน
 - P_{FS} = ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการเลื่อนไถล
 - P_{FO} = ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการพลิกคว่ำ

P_{FBC} = ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากค่ากำลังรับแรงแบกทานไม่
เพียงพอ

ผลจากการทำการศึกษากำแพงกันดินแบบ Mechanically stabilized earth walls ที่มีขนาดอัตราส่วนของโครงสร้าง $\left(\frac{L}{H}\right)$ เท่ากับ 0.7 และเป็นค่าทั่วไปที่แนะนำให้ใช้ทำการออกแบบจากการศึกษาพบว่ากำแพงกันดินดังกล่าวมีค่า $P_{FSYS} \leq 0.0003$ ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่แฝงอยู่ในการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

สุทธิศักดิ์ และ วรากร (2548) ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เพื่อออกแบบและเลือกหน้าตัดของตัวเขื่อนโดยเลือกการวิเคราะห์แบบ Probabilistic analysis สำหรับใช้ครอบคลุมความไม่แน่นอนของตัวแปรโดยใช้วิธี Simplified first order second moment (SFOSM) เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบความอ่อนไหว (Sensitivity) ของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังแรงเฉือนในส่วนต่างๆของเขื่อนซึ่งแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 รูปแบบได้แก่ (1) การพิจารณา Zone ที่เกี่ยวข้องกับบริเวณต่างๆที่สนใจพิจารณา อย่างเช่น บริเวณแกนกลางของเขื่อน ลาดชันแถวสันเขื่อน หรือลึกลงไปได้เขื่อน เป็นต้น (2) กำลังรับแรงเฉือนซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของดินและความแปรปรวนของตัวแปร การพิจารณาโดยกำหนดและไม่กำหนดหน้าตัดของการพิบัติเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการพิบัติต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนในส่วนต่างๆของหน้าตัด จากผลของการวิเคราะห์โดยวิธีของ SFOSM พบว่าค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อมีการปรับปรุงหรือคัดเลือกหน้าตัดเขื่อนที่มีความเหมาะสมในการออกแบบเขื่อน ทั้งนี้ การนำเสนอค่าความน่าจะเป็นต่อการพิบัติของหน้าตัดต่างๆจะถูกนำไปใช้ปรับปรุงวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงเพื่อการคัดเลือกหน้าตัดที่เหมาะสมของเขื่อนต่อไป

Babu and Basha (2008) ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบกำแพงกันดินที่มีความเหมาะสมด้วยวิธีทางสถิติโดยการกำหนดค่า Reliability index (β) ที่เหมาะสมกับโครงสร้างกำแพงกันดินและการใช้งาน ($\beta = 3.0 - 3.2$) ซึ่งเป็นการศึกษาสำหรับกำแพงกันดินประเภท Cantilever retaining walls (T shape) และทำการศึกษาตามลักษณะการพิบัติของกำแพงกันดินที่แบ่งออกได้เป็น 10 ลักษณะ แล้วทำการศึกษาหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างด้วยวิธี First order reliability method (FORM) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับขนาดของหน้าตัดที่คำนวณได้จาก Standard conventional methods ด้วยวิธีการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินแบบการหาค่า

อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) จากการกำหนดให้ขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดิน, ค่าคุณสมบัติของดินถม, ค่าคุณสมบัติของเหล็กและค่าคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน ผลการศึกษาการหาขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินที่เหมาะสมด้วยการกำหนดค่า β ที่เหมาะสมด้วยวิธี FORM สำหรับการพิบัติทั้ง 10 ลักษณะพบว่าขนาดของโครงสร้างของกำแพงกันดินและค่าคุณสมบัติของดินถมเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่ได้จากการคำนวณและขนาดหน้าตัดของกำแพงกันดินที่คำนวณได้จากวิธีการกำหนดค่า β ที่เหมาะสมจะมีขนาดที่เล็กกว่ากำแพงกันดินที่คำนวณได้จาก Standard conventional methods ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Comparative Study for Cross Sectional Area of Retaining Wall (in m²) (Babu and Basha, 2008)

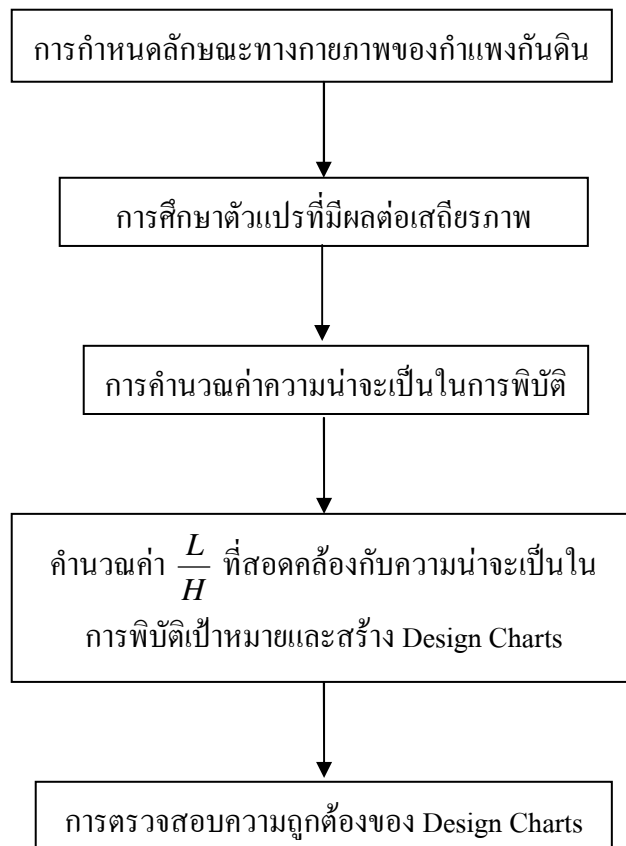
H (m.)	Bowles(1996) and Das(1999)	Saribas and Erbatur(1996) for Minimum Cost	Saribas and Erbatur(1996) for Minimum Weight	Babu and Basha (2008)	
				COV _{ϕ} =5%	COV _{ϕ} =10%
3.0	1.440	1.257	1.257	1.341	1.395
4.0	2.380	1.952	1.853	1.984	2.080
5.0	3.550	2.868	2.573	2.725	2.875
6.0	4.950	3.976	3.578	3.564	3.780
7.0	6.580	-	-	4.501	4.795
8.0	8.440	-	-	5.536	5.920

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นประกอบไปด้วยลำดับขั้นตอนที่จะต้องทำการวิเคราะห์จำนวนมาก ภาพรวมของกระบวนการทำการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนใหญ่ๆดังนี้ 1) การกำหนดลักษณะทางกายภาพของกำแพงกันดิน 2) การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ 3) การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ 4) คำนวณค่า $\frac{L}{H}$ ที่สอดคล้องกับความน่าจะเป็นในการพิบัติเป้าหมายและสร้าง Design Charts และ 5) การตรวจสอบความถูกต้องของ Design Charts ดังแสดงในรูปที่ 3.1

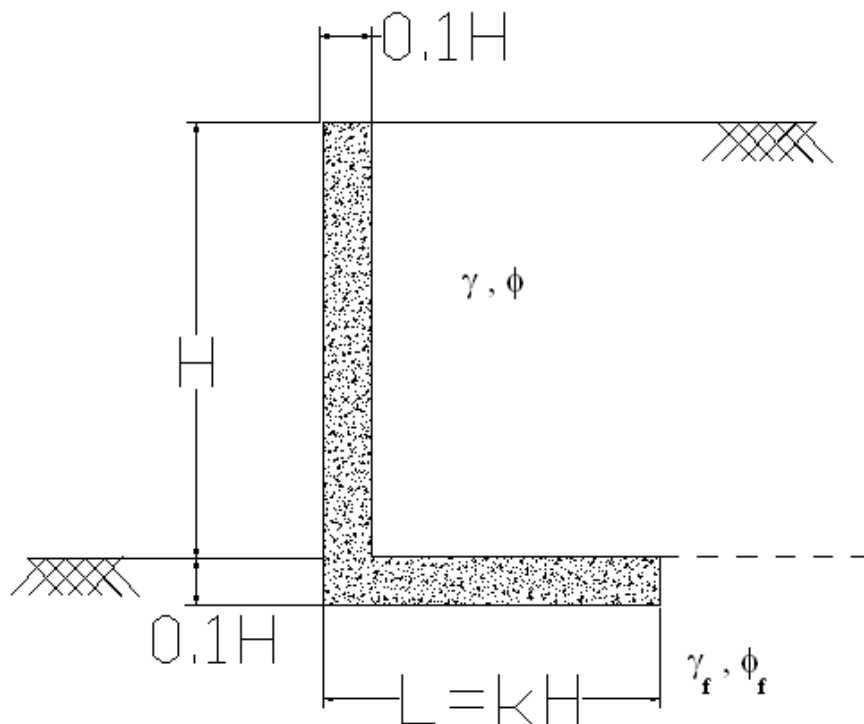
วิธีการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การกำหนดลักษณะทางกายภาพของกำแพงกันดิน

การกำหนดลักษณะทางกายภาพของกำแพงกันดินที่จะทำการศึกษา คือการระบุถึงลักษณะโครงสร้างของกำแพงกันดิน ชนิดของดินที่ใช้ในการศึกษารวมถึงระดับการถมดินด้านหน้าและด้านหลังของกำแพงกันดินด้วย โดยการศึกษาจะเลือกทำการศึกษาเฉพาะกำแพงกันดินที่เป็นคอนกรีตและมีลักษณะเป็นแบบ L-shape (Liu and Evett, 2004) ประกอบด้วยความสูงของกำแพงกันดิน (H) ความกว้างของฐานกำแพงกันดิน (L) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความสูงของกำแพงกันดินตามความสัมพันธ์ $L = kH$ เมื่อ $0 < k < 1$ และโครงสร้างทั้งหมดของกำแพงกันดินมีความหนาเท่ากับ $0.1H$ ส่วนดินที่จะใช้ในการศึกษากำหนดให้เป็นดินทรายแบบไม่มีความเชื่อมแน่นที่มีคุณสมบัติระบายน้ำได้ดีและเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยกำหนดให้ดินถมด้านหน้ากำแพงกันดินอยู่ในแนวราบมีความสูงเท่ากับ $0.1H$ และให้ดินถมหลังกำแพงกันดินอยู่ในแนวราบมีความสูงเท่ากับกำแพงกันดิน ดังรูปที่ 3.1 โดยดินหลังกำแพงกันดิน (Retained soil) มีคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight, γ) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, ϕ) และดินฐานราก (Foundation soil) มีค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_f) และมุมเสียดทานภายในของดินฐานราก (ϕ_f)



รูปที่ 3.2 ลักษณะของกำแพงกันดินที่ใช้ทำการศึกษา

3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดิน

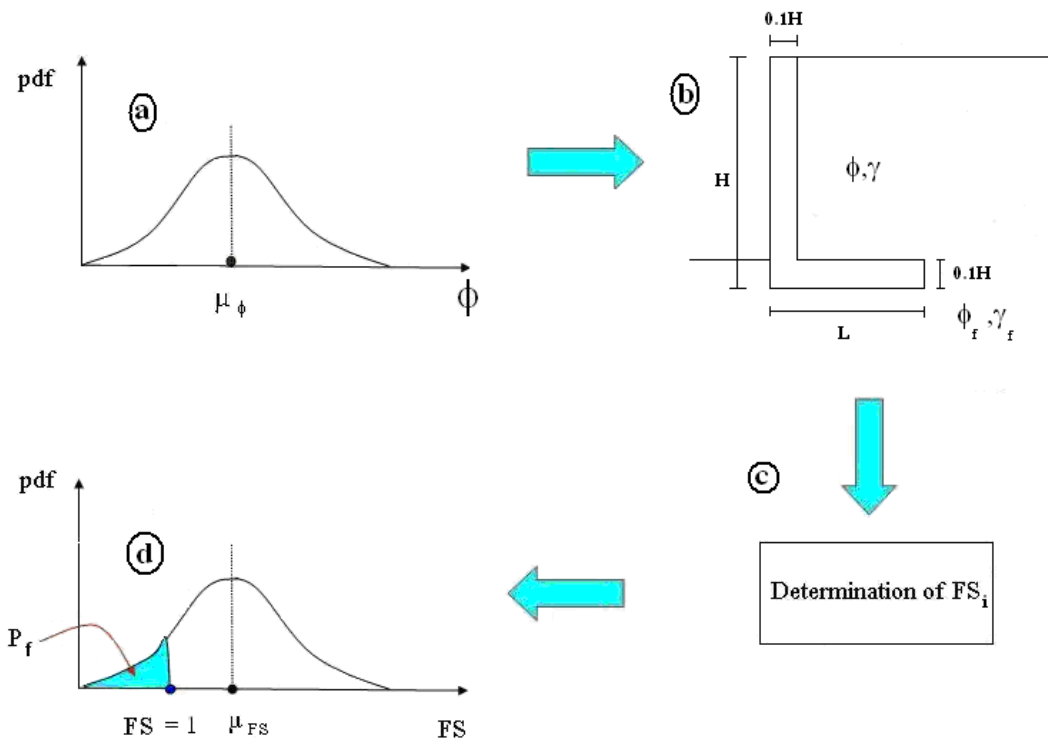
ผลการศึกษาของ Chalermyanont and Benson (2005) แสดงให้เห็นว่า External stability สำหรับกำแพงกันดิน ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ได้แก่ค่า L , H , COV_ϕ และ μ_ϕ ในขณะที่ค่า μ_γ และ COV_γ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงกำหนดให้ค่า γ ที่ใช้สำหรับคำนวณเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 18 kN/m^3 ซึ่งเป็นค่ากลางจากช่วง $16 - 20 \text{ kN/m}^3$ ตามคำแนะนำของ Phoon (1995)

สำหรับในลักษณะการพิบัติแบบ Sliding failure และ Bearing capacity failure นั้น จำเป็นต้องมีค่าคุณสมบัติของดินฐานราก (Foundation soil) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยในการคำนวณเสถียรภาพ ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ดินฐานรากมีความแข็งแรงไม่น้อยกว่าดินหลังกำแพงกันดิน (Retained soil) ในการคำนวณจึงใช้ค่า $\gamma_f = \gamma$ และ $\phi_f = \phi$

3.3 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ

การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วยการคำนวณ 2 วิธีคือการคำนวณด้วยวิธี First Order Second Moment (FOSM) และวิธี Monte Carlo Simulation (MCS) ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการคำนวณดังนี้

1. กำหนดมุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ_f) ถูกกำหนดเป็นตัวแปร (Variable) ที่สามารถอธิบายในทางสถิติได้โดยใช้ค่าเฉลี่ย (μ_ϕ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD_ϕ) (รูปที่ 3.2 a)
2. กำหนดขนาดและรูปร่างของกำแพงกันดินโดยใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ความสูงของกำแพงกันดิน (H), ความยาวของฐานกำแพงกันดิน (L) และค่าคุณสมบัติของดิน ได้แก่ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ (รูปที่ 3.2 b)
3. ทำการคำนวณค่า FS_f จากค่า ϕ_f (รูปที่ 3.2 c)
4. คำนวณค่า P_f โดยหาพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงเป็นพื้นที่แรเงา (รูปที่ 3.2 d)



รูปที่ 3.3 Probabilistic analysis (ตัดแปลงจาก Chalermyanont and Benson, 2004)

ส่วนการหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากค่า SM สามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.2 เพียงแต่เปลี่ยนจากวิธีการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของ FS มาเป็นการหาค่า SM แทน

3.3.1 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติด้วยวิธี First Order Second Moment (FOSM)

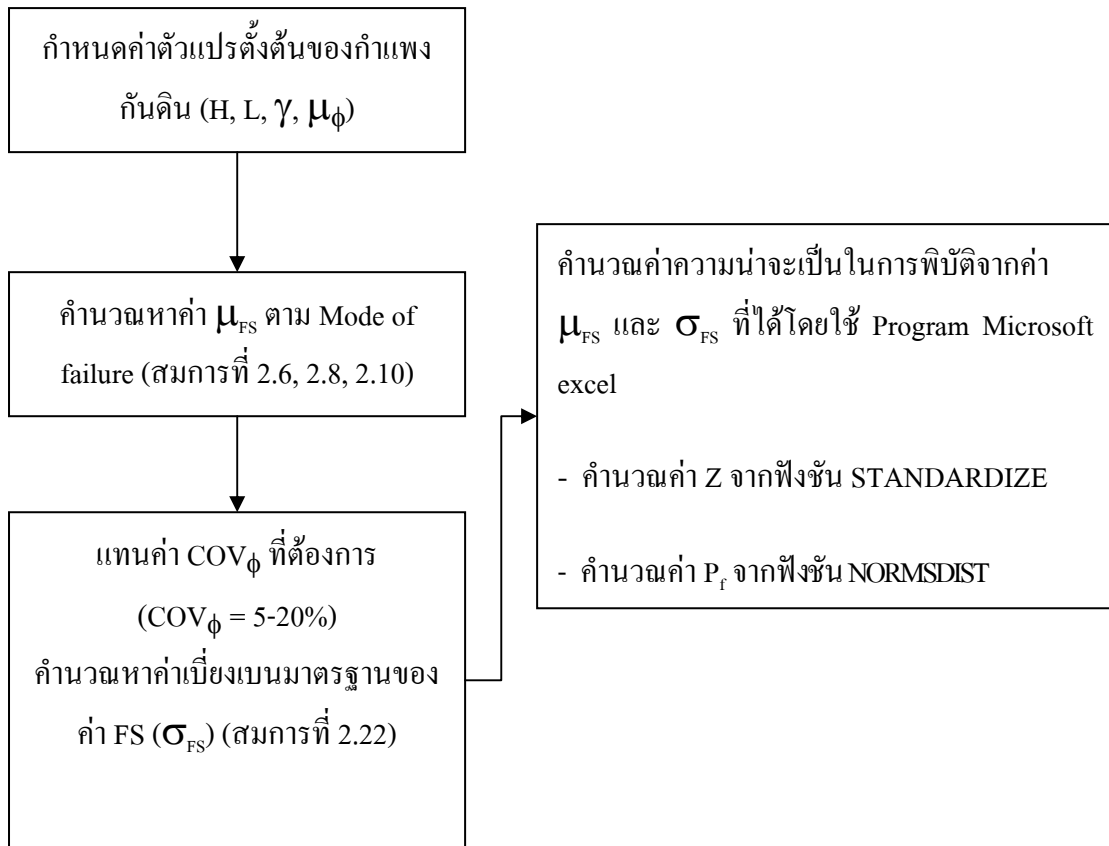
การคำนวณความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี FOSM ทำโดยการใช้ทอมแรกของ Taylor's series approximation ในการหาค่าความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในแต่ละลักษณะการพิบัติของกำแพงกันดิน อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) แล้วทำการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเสถียรภาพเพื่อใช้คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) โดยใช้ Program Microsoft Excel ช่วยในการคำนวณ ซึ่งในการศึกษานี้จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนคือ การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และ

การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) จากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) มีขั้นตอนพอสังเขปดังแสดงในรูปที่ 3.3 สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าความแปรปรวนของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ตามสมการที่ 2.20 เพื่อใช้คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (σ_{FS}) ตามสมการที่ 2.22 แล้วนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (σ_{FS}) ที่คำนวณได้ไปคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) จากความน่าจะเป็นที่ค่า $FS < 1$ โดยการใช้ Program Microsoft Excel ช่วยคำนวณด้วยฟังก์ชัน STANDARDIZE เพื่อใช้หาค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมแบบปกติ (Z) และฟังก์ชัน NORMSDIST เพื่อใช้หาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าตัวแปรตั้งต้นของกำแพงกันดิน (H, L, γ, μ_ϕ)
2. คำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (μ_{FS}) ตาม Mode of failure โดยใช้ค่า μ_ϕ
3. แทนค่า COV_ϕ ที่ต้องการและคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (σ_{FS}) (สมการที่ 2.22)
4. คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) จากค่า μ_{FS} และ σ_{FS} ที่ได้โดยใช้ Program Microsoft Excel



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณค่า P_f ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

3.3.1.2 การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) จากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าความแปรปรวนของค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ตามสมการที่ 2.21 เพื่อใช้คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (σ_{SM}) ตามสมการที่ 2.23 แล้วนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (σ_{SM}) ที่คำนวณได้ไปคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) จากความน่าจะเป็นที่ค่า $SM < 0$ โดยใช้ Program Microsoft Excel ช่วยคำนวณด้วยฟังก์ชัน STANDARDIZE เพื่อใช้หาค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมแบบปกติ (Z) และฟังก์ชัน

ชั้น NORMSDIST เพื่อใช้หาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับรูปที่ 3.4

3.3.2 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติด้วยวิธี Monte Carlo Simulation (MCS)

การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี MCS ทำโดยการคำนวณหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินซ้ำหลายๆครั้งโดยใช้ Realization ที่มีค่าแตกต่างกัน และมากครั้งพอที่จะได้ลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน ซึ่งในการศึกษานี้จะทำโดยการเขียนคำสั่ง (Source code) ในโปรแกรม Visual Fortran เพื่อใช้ช่วยทำการคำนวณ แล้วหาค่า P_f จากความน่าจะเป็นที่ค่าเสถียรภาพมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และ 2.การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) 3. การคำนวณหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณซ้ำ (Numbers of iteration, N) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

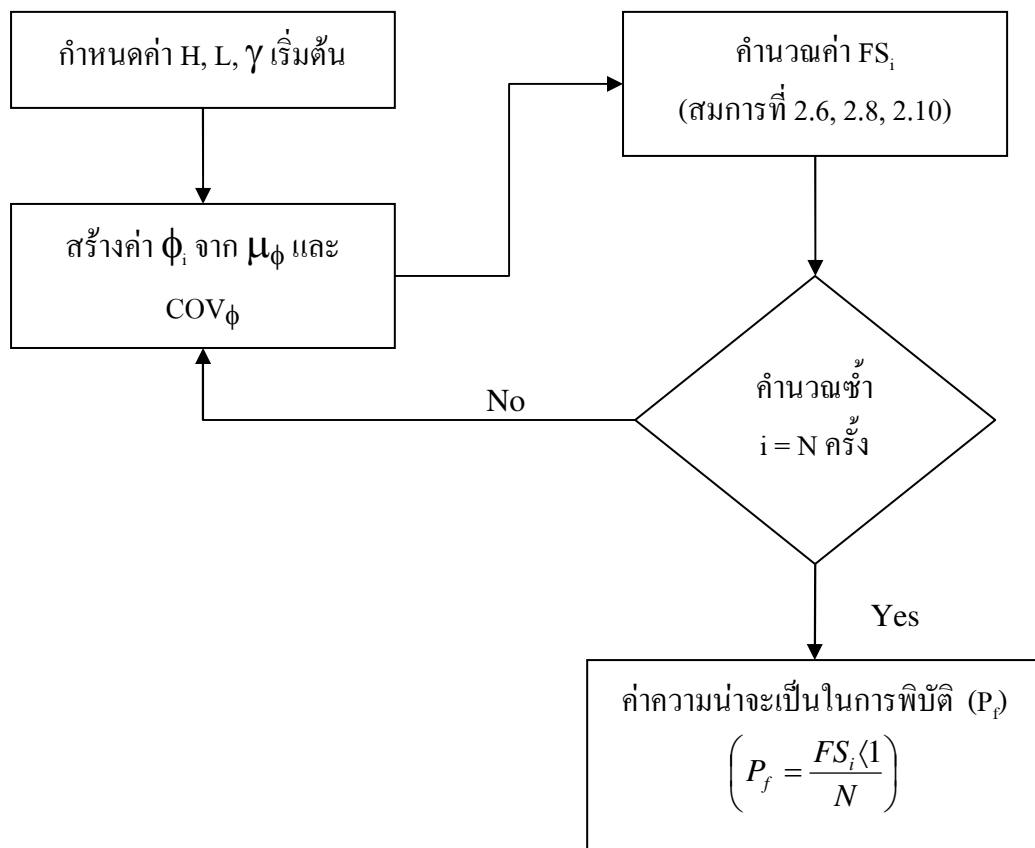
การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) สามารถทำได้โดยทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ตามลักษณะการพิบัติที่ต้องการซ้ำหลายๆครั้งโดยใช้ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) เป็น Input parameter ที่มีค่าแตกต่างกันตามขนาดของค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (COV_ϕ) และมากครั้งพอที่จะได้การกระจายตัวของค่า FS (Distribution of factor of safety) จากนั้นสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินได้จากความน่าจะเป็นที่ $FS < 1$ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้ ความสูงของกำแพงกันดิน (H) ความกว้างของกำแพงกันดิน (L) และค่าคุณสมบัติของดินได้แก่ ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ซึ่งจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่

2. ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ) ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรที่มีความแปรปรวน (Variable) ที่สามารถอธิบายได้ในทางสถิติโดยใช้ค่าเฉลี่ย (μ_ϕ) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (COV_ϕ) โดยค่า ϕ_i ค่าที่ i จะถูกสร้างขึ้นจากค่า μ_ϕ และ COV_ϕ ด้วยวิธี Generating Realizations (รายละเอียดได้บรรยายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3)

3. จำนวนค่า FS_i ของกำแพงกันดินตามลักษณะการพิบัติที่ต้องการ (สมการที่ 2.6, 2.8, 2.10) จำนวน N ครั้งโดยเริ่มตั้งแต่ $i = 1$ จนถึง $i = N$ ที่มีจำนวนมากพอเพื่อให้สามารถแสดงเป็น Probability Density Function (pdf) ของ FS ได้

4. จำนวนค่า P_f จากจำนวนครั้งที่ค่า $FS_i < 1$ หาด้วยจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) $\left(P_f = \frac{FS_i < 1}{N} \right)$



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณค่า P_f ด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

3.3.2.2 การหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี MCS ในรูปแบบของการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ด้วยวิธี MCS สามารถทำได้โดยทำการคำนวณหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ตามลักษณะการพิบัติที่ต้องการซ้ำหลายๆครั้ง โดยใช้ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (ϕ_i) เป็น Input parameter ที่มีค่าแตกต่างกันตาม μ_ϕ และ COV_ϕ และบางครั้งพอที่จะได้การกระจายตัวของค่า SM (Distribution of safety margin) จากนั้นสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินได้จากความน่าจะเป็นที่ $SM < 0$ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับรูปที่ 3.5

3.3.2.3 การคำนวณหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณซ้ำ (Numbers of Iteration, N)

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี MCS มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่มากพอ เพื่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพสำหรับคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ ดังนั้นความถูกต้องของผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี MCS จะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยว่าจำนวนครั้งของการคำนวณซ้ำที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณคือกี่ครั้งถึงจะให้ค่า P_f ที่ถูกต้อง และไม่ต้องทำซ้ำมากครั้งจนเกินไปซึ่งจะใช้เวลานานในการคำนวณ โดยการหาค่า N ที่เหมาะสมสามารถทำได้จากการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 3.5 จากการใช้ค่า N ในการคำนวณที่แตกต่างกันซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1,000,000 ครั้ง และค่า N ที่เหมาะสมต่อการคำนวณคือจำนวนครั้งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่า P_f ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

3.4 การสร้าง Design Charts

Design charts ที่จะสร้างขึ้นจากการศึกษานี้จะเป็น Charts ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}$) แปรผันกับค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดิน (μ_ϕ) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายใน (COV_ϕ) ตามค่า P_f ที่ต้องการ Beacher (1987) และ Chalermyanont and Benson (2004) ได้แสดงให้เห็นว่าค่า P_f ที่เหมาะสม (Target

probability of failure, P_f) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินซึ่งเป็นโครงสร้างในงานฐานรากได้แก่ 0.01 , 0.001 , 0.0001 ดังนั้นในการสร้าง Charts สำหรับแต่ละค่า P_f สามารถทำได้โดยการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}$) ที่ให้ค่า P_f ที่ต้องการซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM

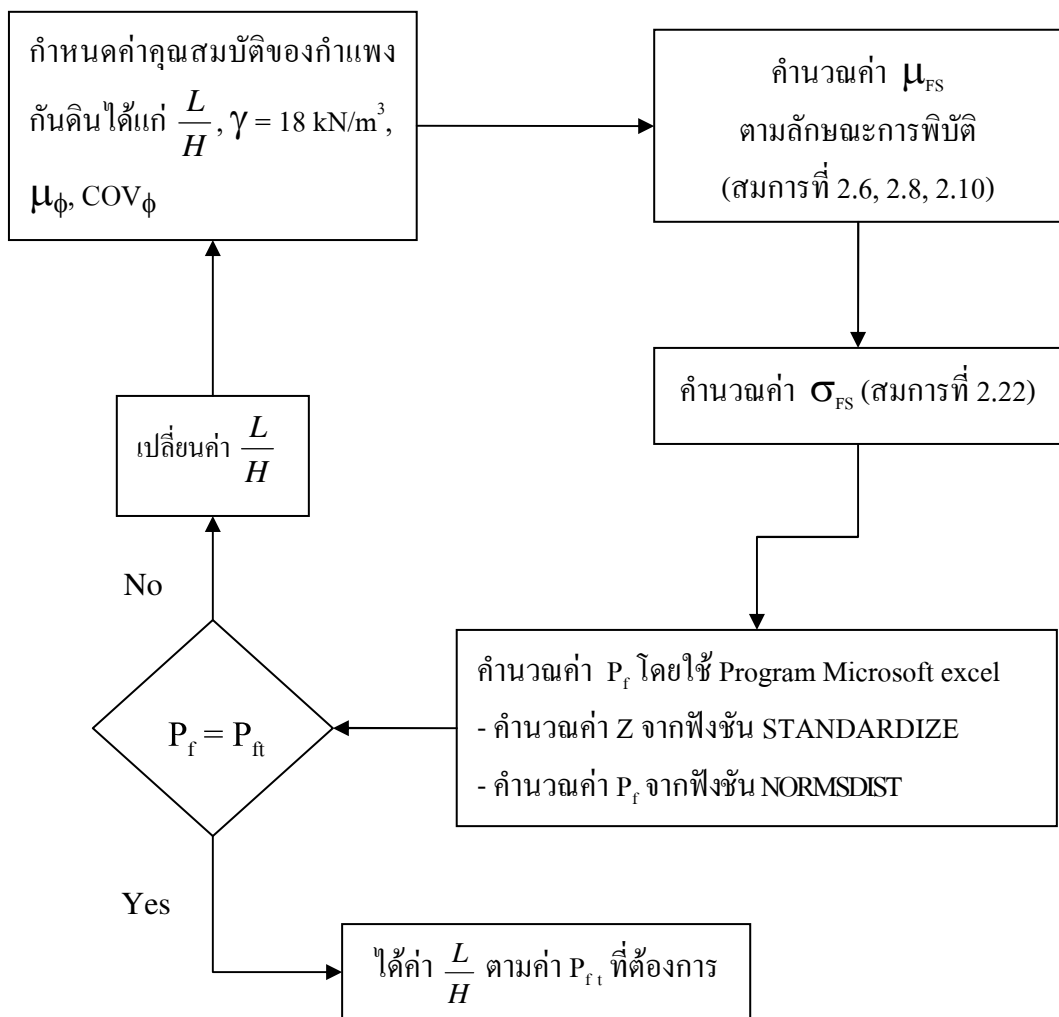
ขั้นตอนการคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และการคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1.1 การคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts นี้สามารถทำได้โดยทำการคำนวณซ้ำตามหัวข้อที่ 3.3.1.1 ด้วยการแทนค่า $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 25^\circ\text{-}45^\circ$, $COV_\phi = 5\text{-}20\%$ และขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินเริ่มต้นในรูปแบบอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L}{H}$ แล้วทำการคำนวณค่า P_f หลังจากนั้นใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า $\frac{L}{H}$ ที่ให้ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ต้องการ (Target probability of failure; P_{ft}) ซึ่งมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.6 ดังนี้

1. กำหนดค่าคุณสมบัติของกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}$, γ , μ_ϕ , COV_ϕ)
2. คำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (μ_{FS}) โดยใช้ค่า μ_ϕ
3. คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (σ_{FS}) (สมการที่ 2.22)
4. คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P) โดยใช้ Program Microsoft Excel
5. ถ้า P_f เท่ากับ P_{ft} ที่ต้องการก็เสร็จสิ้นการคำนวณ

6. แต่ถ้า P_f ไม่เท่ากับ P_{ft} ก็ทำการเปลี่ยนค่า $\frac{L}{H}$ แล้วดำเนินการขั้นตอนที่ 1-5 ซ้ำจนกว่า P_f จะเท่ากับ P_{ft} โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel ช่วยคำนวณในขั้นตอนนี้
7. รวบรวมค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้ไปดำเนินการสร้าง Design charts ต่อไป



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

3.4.1.2 การคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) สามารถทำได้โดยทำการคำนวณซ้ำตามหัวข้อที่ 3.3.1.2 ด้วยการแทนค่า $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 25^0\text{-}45^0$, $\text{COV}_\phi = 5\text{-}20\%$ และขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินเริ่มต้นในรูปแบบอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L}{H}$ และทำการคำนวณหาเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยใช้ค่า SM แล้วคำนวณค่า P_f จากนั้นใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า $\frac{L}{H}$ ที่ให้ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ต้องการ (Target probability of failure; P_{ft}) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับรูปที่ 3.6

3.4.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS

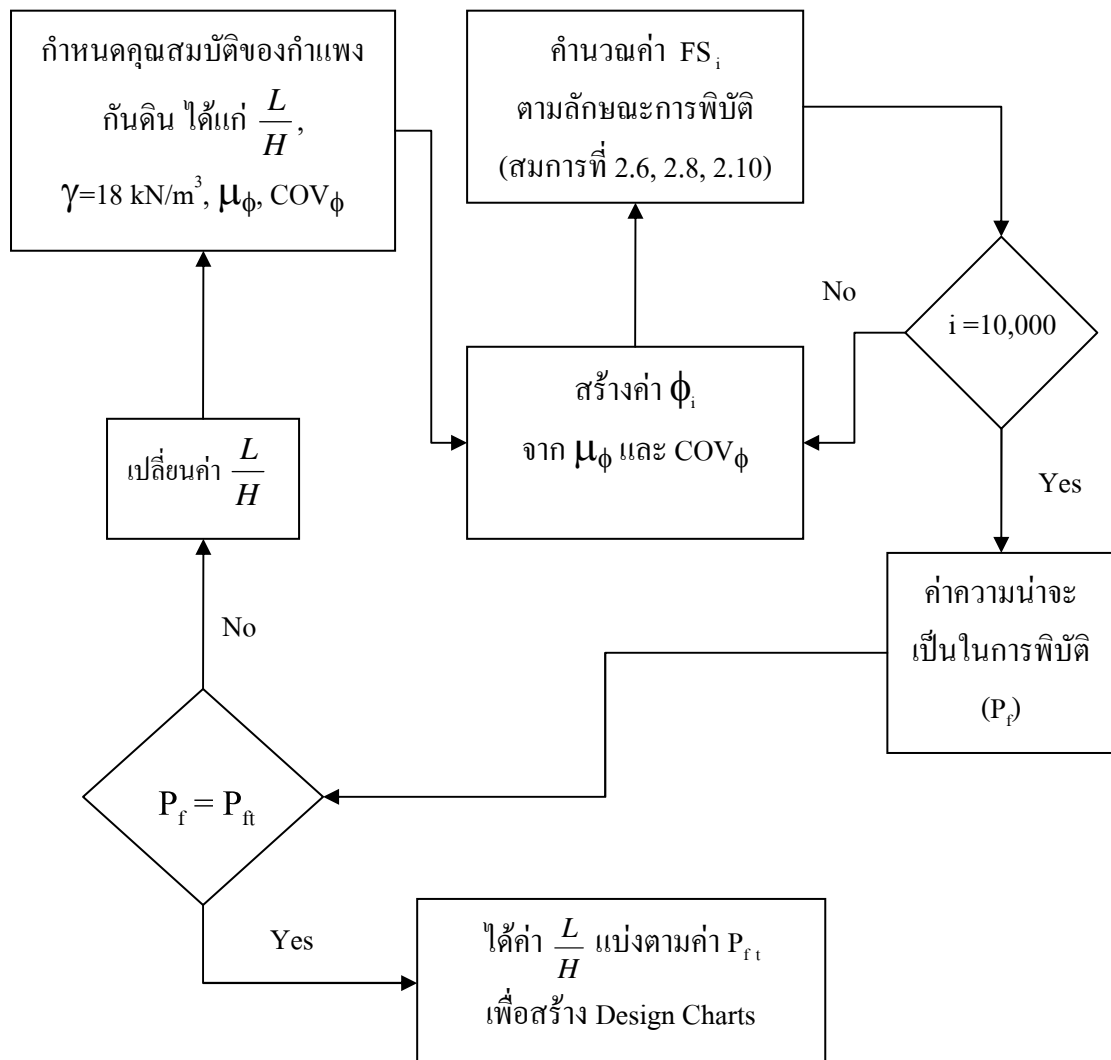
ขั้นตอนการคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) และการคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.2.1 การคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts นี้ (รายละเอียดในรูปที่ 3.7) สามารถทำได้โดยทำการคำนวณซ้ำตามหัวข้อที่ 3.3.2.1 ด้วยการแทนค่า $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 25^0\text{-}45^0$, $\text{COV}_\phi = 5\text{-}20\%$ และขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินเริ่มต้นในรูปแบบอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L}{H}$ แล้วทำการคำนวณค่า P_f โดยทำการคำนวณซ้ำจนกว่าจะได้ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ให้ค่า P_f เท่ากับค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ต้องการ (Target probability of failure; P_{ft}) ซึ่งมีขั้นตอนการดังนี้

1. กำหนดค่าคุณสมบัติของกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}, \gamma, \mu_\phi, \text{COV}_\phi$)
2. สร้างค่า ϕ_i จาก μ_ϕ และ COV_ϕ

3. คำนวณหาค่า FS จำนวน 10,000 ครั้งแล้วคำนวณหาค่า P_f
4. ถ้า P_f เท่ากับ P_{ft} ที่ต้องการก็เสร็จสิ้นการคำนวณ
5. แต่ถ้า P_f ไม่เท่ากับ P_{ft} ก็ทำการเปลี่ยนแปลงค่า $\frac{L}{H}$ แล้วดำเนินการคำนวณซ้ำจนกว่า P_f จะเท่ากับ P_{ft}
6. รวบรวมค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้ทั้งหมดจากการ Varies ค่า μ_ϕ และ COV_ϕ ไปดำเนินการสร้าง Design charts ต่อไป



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าอัตราส่วน

ความปลอดภัย (FS)

3.4.2.2 การคำนวณเพื่อสร้าง Design Charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

การคำนวณเพื่อสร้าง Design charts จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) สามารถทำได้โดยทำการคำนวณซ้ำตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 ด้วยค่าแทนค่า $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 25^\circ\text{-}45^\circ$, $\text{COV}_\phi = 5\text{-}20\%$ และขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินเริ่มต้นในรูปแบบอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L}{H}$ แล้วทำการคำนวณค่า P_f โดยทำการคำนวณซ้ำจนกว่าจะได้ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ให้ค่า P_f เท่ากับค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ต้องการ (Target probability of failure; P_{ft}) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับรูปที่ 3.7

3.4.3 การสร้าง Design Charts

ชุดของค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.4 จะถูกรวบรวมเพื่อนำมาสร้าง Design charts โดยจะแบ่งข้อมูลออกตามวิธีการคำนวณและค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณแล้วแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนตามวิธีการคำนวณทางสถิติคือ 1. ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ 2. ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS

2. แบ่งข้อมูลค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธีทางสถิติออกเป็น 3 ส่วนตามลักษณะการพิบัติคือ 1. การพิบัติแบบเลื่อนไถล (Sliding failure), 2. การพิบัติเนื่องจากการพลิกคว่ำ (Overturning failure), 3. การพิบัติเนื่องจากมีกำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ (Bearing capacity failure)

3. แบ่งข้อมูลค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้ในแต่ละลักษณะการพิบัติออกเป็น 2 ส่วนตามวิธีการหาค่าเสถียรภาพคือ 1. จากการศึกษาเสถียรภาพด้วยการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS), 2. จากการศึกษาเสถียรภาพด้วยการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

4. แบ่งข้อมูลค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้จากแต่ละวิธีสำหรับหาค่าเสถียรภาพออกเป็น 3 ส่วนตามค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ ($P_f = 0.01, 0.001, 0.0001$)

5. สร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{L}{H}$ กับค่า ϕ แต่ละเส้นตามค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายใน ($COV_\phi = 5\%, 10\%, 15\%, 20\%$)

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของ Design Charts

การตรวจสอบ Design charts มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะตรวจสอบว่า Design charts สำหรับการออกแบบกำแพงกันดิน โดยความน่าจะเป็นที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินและนำไปออกแบบกำแพงกันดินได้อย่างถูกต้องหรือไม่ ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องนี้ทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยใช้ Design charts กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วย Conventional method โดยจะแบ่งผลการตรวจสอบออกเป็น 2 ชุดการเปรียบเทียบตามวิธีการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน (FS หรือ SM) ซึ่งแต่ละชุดการเปรียบเทียบมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้

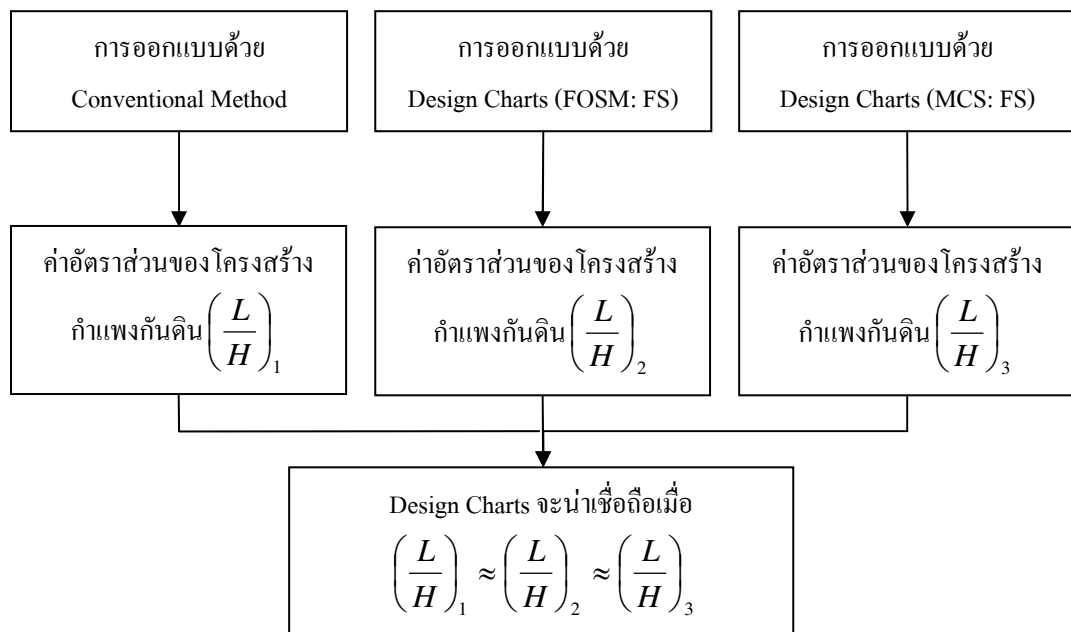
3.5.1 การตรวจสอบ Design Charts ที่พัฒนาจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS)

1. กำหนดคุณสมบัติของกำแพงกันดินที่ต้องการจะออกแบบ
2. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Conventional method จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_1$
3. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Design charts ที่พัฒนามาจากการใช้ FOSM โดยการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่า

มุมเสียดทานภายใน (COV_{ϕ}) และค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ต้องการเพื่อหาค่าอัตราส่วน
ของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_2$

4. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Design charts ที่พัฒนามาจากการใช้ MCS โดยการ
หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่า
มุมเสียดทานภายใน (COV_{ϕ}) และค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ต้องการเพื่อหาค่าอัตราส่วน
ของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_3$

5. นำค่า $\left(\frac{L}{H}\right)_1, \left(\frac{L}{H}\right)_2, \left(\frac{L}{H}\right)_3$ มาพิจารณาว่ามีค่าเท่ากันหรือมีค่าใกล้เคียงกัน
หรือไม่ ถ้ามีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแสดงว่า Design charts ที่พัฒนาขึ้นมา นั้นมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 3.8 Flow charts ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts
ที่ได้จากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS

3.5.1 การตรวจสอบ Design Charts ที่พัฒนาจากการหาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินใน
รูปแบบของค่าผลต่างความปลอดภัย (SM)

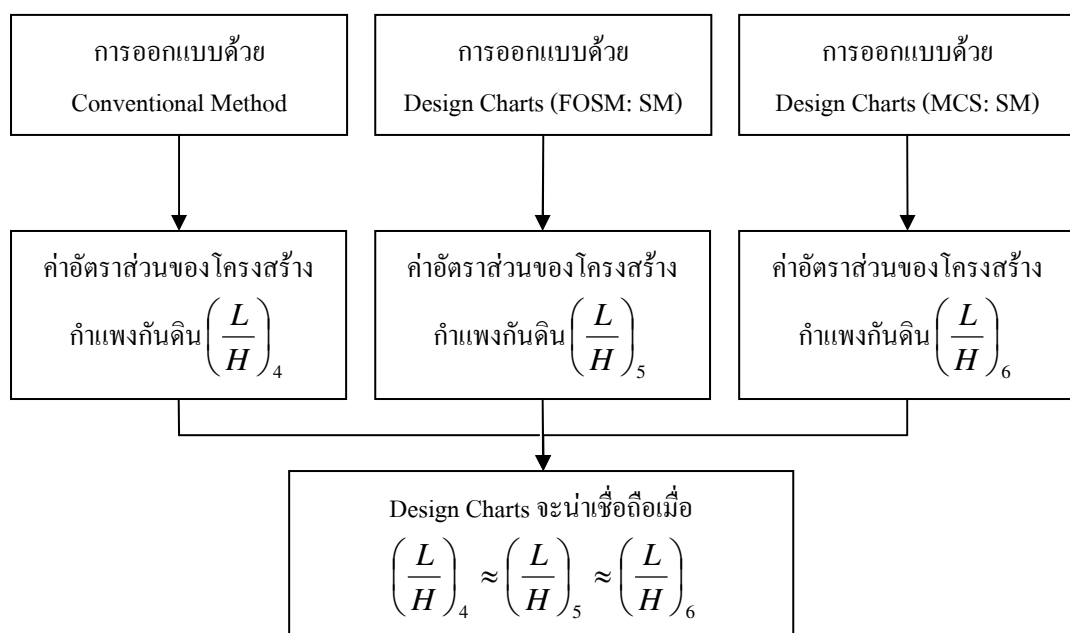
1. กำหนดคุณสมบัติของกำแพงกันดินที่ต้องการจะออกแบบ

2. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Conventional method จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_4$

3. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Design charts ที่พัฒนามาจากการใช้ FOSM โดยการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ในการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่ามุมเสียดทานภายใน (COV_ϕ) และค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ต้องการเพื่อหาค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_5$

4. ออกแบบกำแพงกันดินด้วย Design charts ที่พัฒนามาจากการใช้ MCS โดยการหาค่าผลต่างความปลอดภัย (SM) ในการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่ามุมเสียดทานภายใน (COV_ϕ) และค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ต้องการเพื่อหาค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)_6$

5. นำค่า $\left(\frac{L}{H}\right)_4, \left(\frac{L}{H}\right)_5, \left(\frac{L}{H}\right)_6$ มาพิจารณาว่ามีค่าเท่ากันหรือมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ถ้ามีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแสดงว่า Design charts ที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 3.9 Flow charts ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts ที่ได้จากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิจารณ์

ผลการดำเนินการวิจัยในการศึกษานี้มีข้อมูลปริมาณมากเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงแบ่งผลที่ได้จากการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ 1) ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดิน (P_f) ที่คำนวณได้จากกรณีตัวอย่างซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น 2 ส่วนคือ 1) ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่คำนวณโดยใช้วิธี FOSM และผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่คำนวณโดยใช้วิธี MCS 2) การพัฒนา Design charts ที่ได้จากการรวบรวมผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS, วิธี FOSM โดยใช้ค่า SM, วิธี MCS โดยใช้ค่า FS และวิธี MCS โดยใช้ค่า SM ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น

ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ของกำแพงกันดินจากความไม่แน่นอนของค่าคุณสมบัติของดินสำหรับการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) ผลการคำนวณค่า P_f จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS 2) ผลการคำนวณค่า P_f จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า SM 3) ผลการคำนวณค่า P_f จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS และ 4) ผลการคำนวณค่า P_f จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM เนื่องจากผลการคำนวณค่า P_f มีจำนวนมากเพื่อให้สะดวกต่อการแสดงผลการคำนวณและง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงนำเสนอค่า P_f ที่คำนวณได้จากกรณีตัวอย่างที่ทำการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับทำการคำนวณดังนี้ $\frac{L}{H} = 0.27$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$ และ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ โดยผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่คำนวณได้จากวิธีการทั้ง 4 ข้างต้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

และเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจถึงข้อดีและผลของการคำนวณด้วยวิธี MCS ซึ่งเป็นวิธีที่ ผลจากการคำนวณจะแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่ได้จากการคำนวณซ้ำหลายๆครั้ง ผู้ศึกษาจึงได้นำค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.1 มาสร้างกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 และเมื่อนำข้อมูลของค่า FS และ SM ที่ได้จากการคำนวณทุกชุดการคำนวณ ซึ่งมีจำนวนชุดละ 10,000 ค่าไปทำการ

ทดสอบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลด้วยวิธี Kolmogorov - Smirnov Test โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าค่า FS_s , FS_o มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบ Log – Normal แต่ค่า FS_b , SM_s , SM_o , และ SM_b มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบ Normal โดยมีรายละเอียดดังนี้

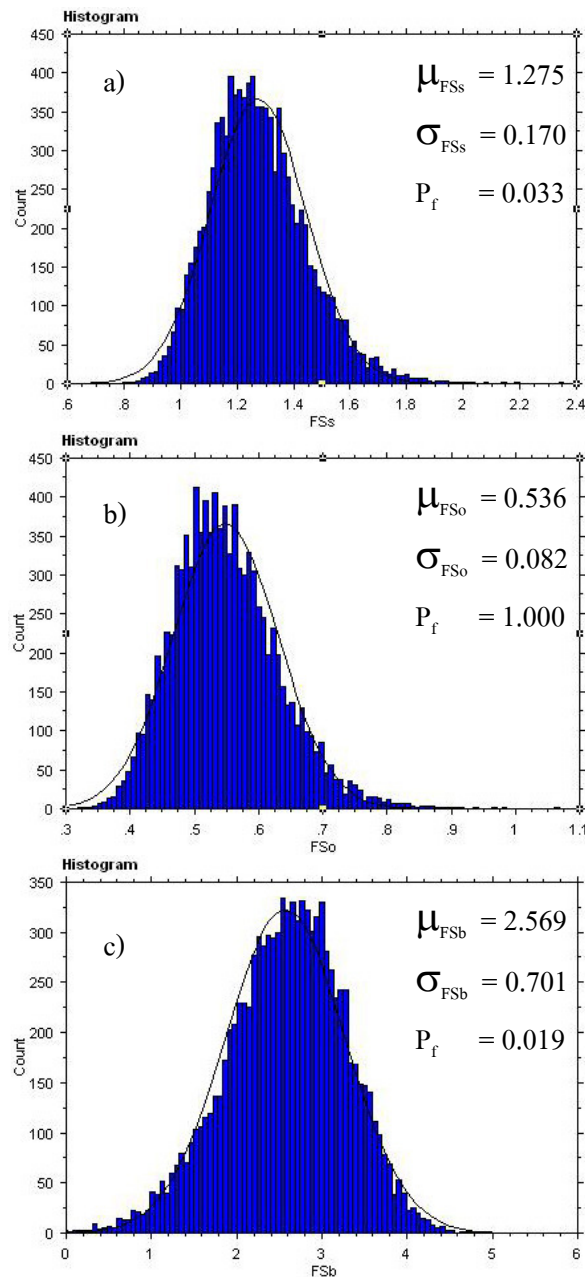
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ของกำแพงดิน

ลักษณะการพิบัติ	ผลการคำนวณ	FOSM		MCS	
		FS	SM	FS	SM
Sliding mode	μ	1.261	0.640 (kN/m)	1.275	0.610 (kN/m)
	σ	0.188	0.360 (kN/m)	0.170	0.360 (kN/m)
	P_f	0.083	0.040	0.033	0.055
Overturning mode	μ	0.542	-0.100 (kN.m/m)	0.536	-0.104 (kN.m/m)
	σ	0.099	0.120 (kN.m/m)	0.082	0.120 (kN.m/m)
	P_f	1.000	0.788	1.000	0.806
Bearing capacity mode	μ	2.612	33.200 (kN/m ²)	2.569	32.324 (kN/m ²)
	σ	0.708	14.580 (kN/m ²)	0.701	14.436 (kN/m ²)
	P_f	0.011	0.011	0.019	0.019

$$*\gamma = 18 \text{ kN/m}^3, \mu_\phi = 35^\circ, COV_\phi = 10\%, \frac{L}{H} = 0.27$$

การคำนวณหาค่า P_f จากการคำนวณด้วยวิธี MCS ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเพื่อหาความแปรปรวนของผลการคำนวณด้วยการทำการคำนวณซ้ำหลายๆครั้งตามความแปรปรวนของตัวแปรตั้งต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบเพื่อหาจำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำที่เหมาะสมโดยที่ไม่ต้องทำการคำนวณซ้ำมากครั้งจนเกินไปและให้ค่า P_f ที่ถูกต้อง

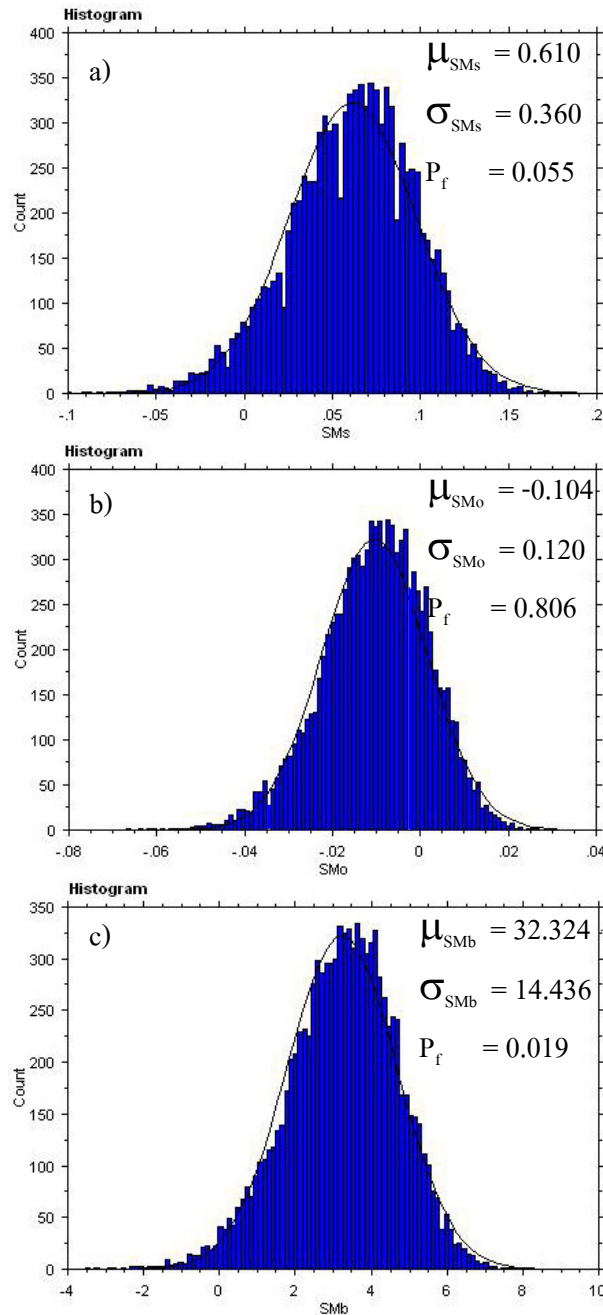
ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าสำหรับทุกลักษณะการพิบัติรวมทั้งวิธีการหาเสถียรภาพของกำแพงกันดินทั้งการใช้ค่า FS และ SM จำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ (Number of iteration) สำหรับการคำนวณด้วยวิธี MCS ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 10,000 ครั้ง จึงจะให้ค่า P_f ที่น่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับ Chalermyanont and Benson (2004)



รูปที่ 4.1 ลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินการคำนวณด้วยวิธี MCS โดย

ใช้ค่า FS: เมื่อ $\frac{L}{H} = 0.27$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$ และ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

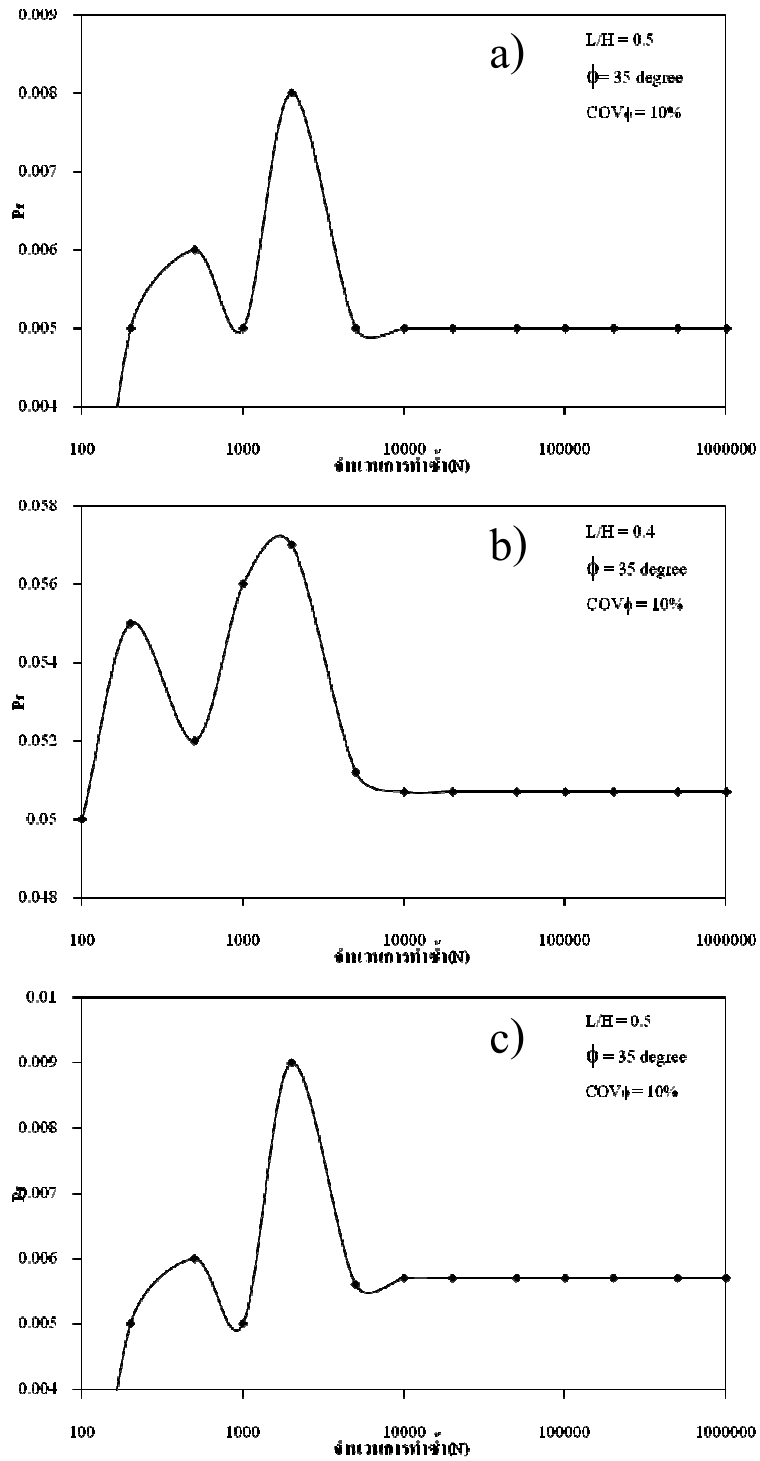
a) Sliding mode, b) Overturning mode, c) Bearing capacity mode



รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายตัวของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินการคำนวณด้วยวิธี MCS โดย

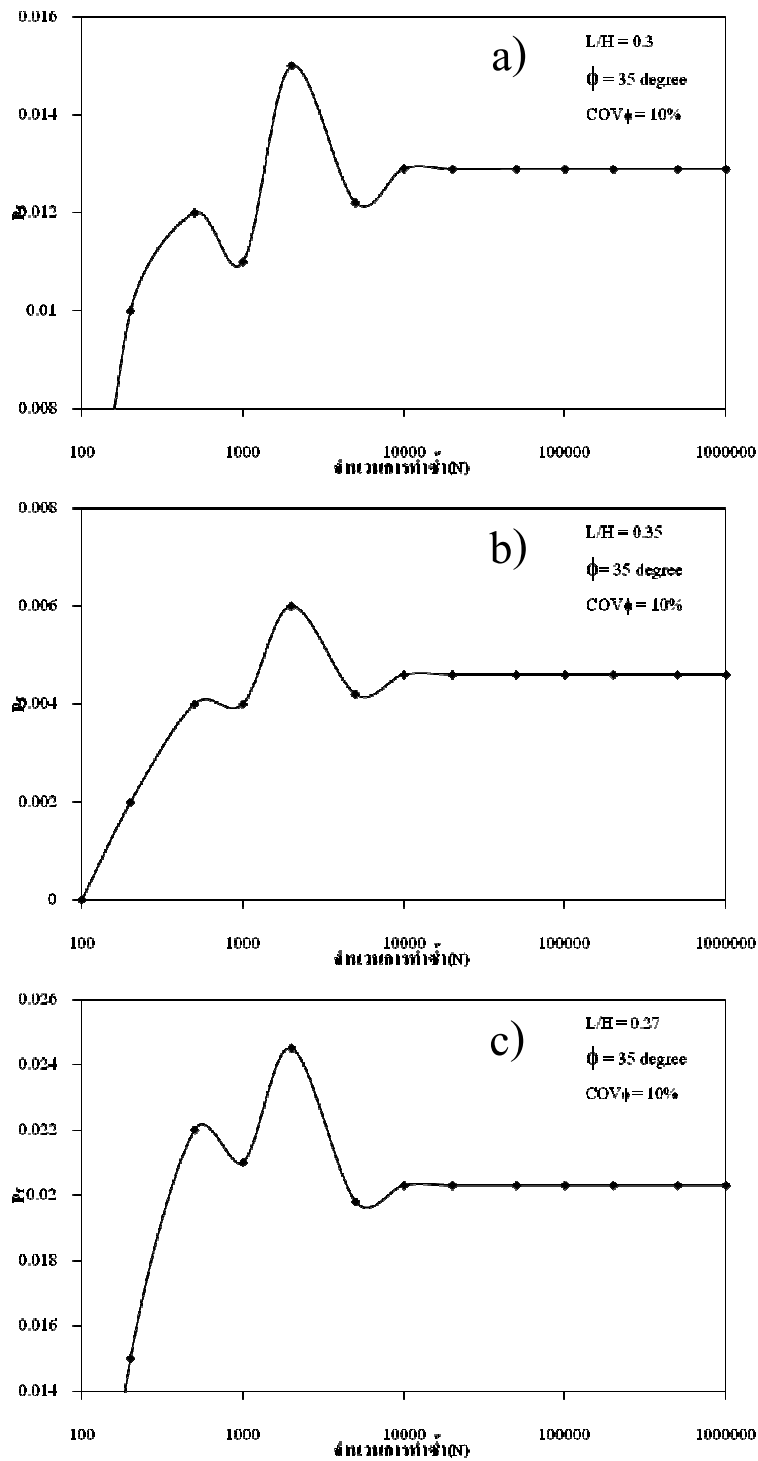
ใช้ค่า SM: เมื่อ $\frac{L}{H} = 0.27$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$ และ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

a) Sliding mode, b) Overturning mode, c) Bearing capacity mode



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) กับค่า P_f สำหรับการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS

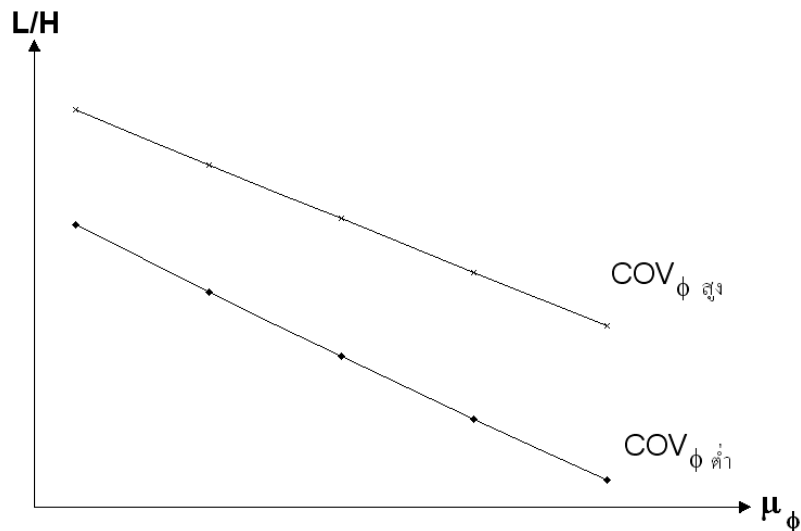
a) Sliding mode, b) Overturning mode, c) Bearing capacity mode



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการคำนวณซ้ำ (N) กับค่า P_f สำหรับการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM
 a) Sliding mode, b) Overturning mode, c) Bearing capacity mode

4.2 การพัฒนา Design Charts

Design charts สำหรับใช้เพื่อการออกแบบกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็นที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาในครั้งนี้ ถูกออกแบบให้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของโครงสร้างของกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}$) กับค่าเฉลี่ยของมุมเสียดทานภายในของดินถม (μ_ϕ) ที่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของค่ามุมเสียดทานภายในของดินถม (COV_ϕ) ที่กำหนด โดยการศึกษาครั้งนี้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาพัฒนาเป็น Design charts ทั้งหมด 4 ชุดแบ่งตามวิธีการคำนวณดังนี้ 1) Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS 2) Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า SM 3) Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS และ 4) Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM โดยเมื่อนำข้อมูลและ Design charts ทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น มาเปรียบเทียบกันพบว่า ข้อมูลและลักษณะของเส้นกราฟที่ได้มีความสอดคล้องกันกล่าวคือ ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อค่า μ_ϕ มีค่าสูงขึ้น (ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น) และ ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อค่า COV_ϕ มีค่าลดลง (ดินมีความแปรปรวนน้อยลง) ดังแสดงในรูปที่ 4.5

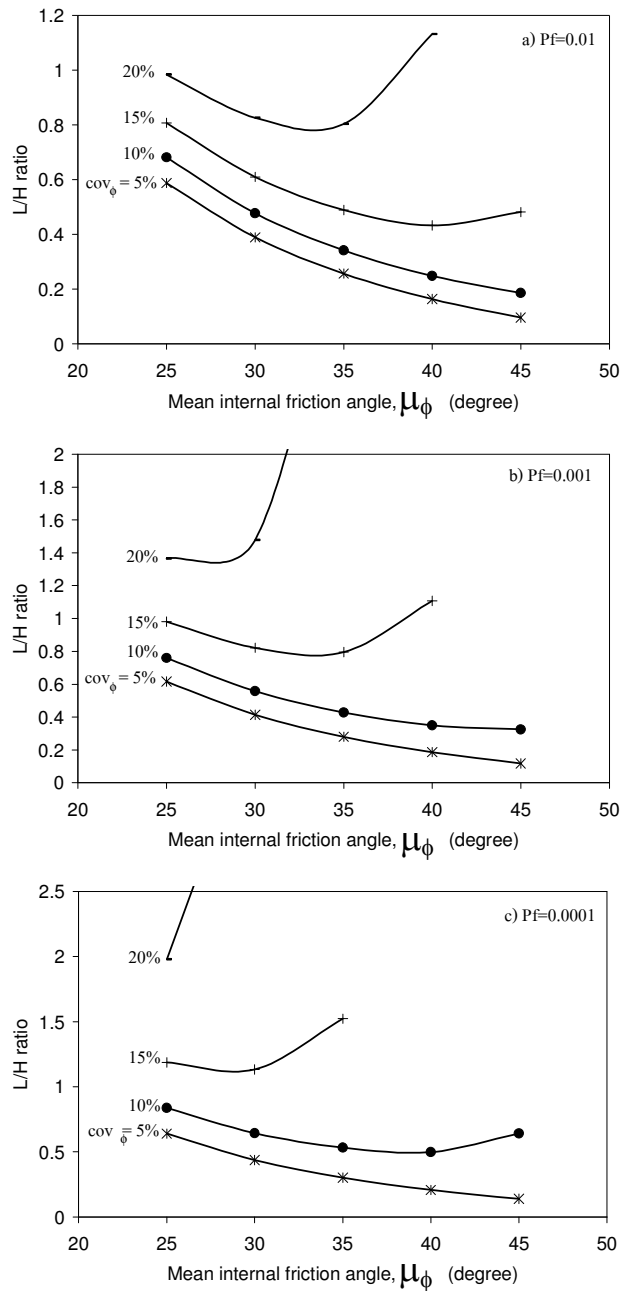


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{L}{H}$ กับค่า μ_ϕ และความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่า $\frac{L}{H}$ กับค่า COV_ϕ

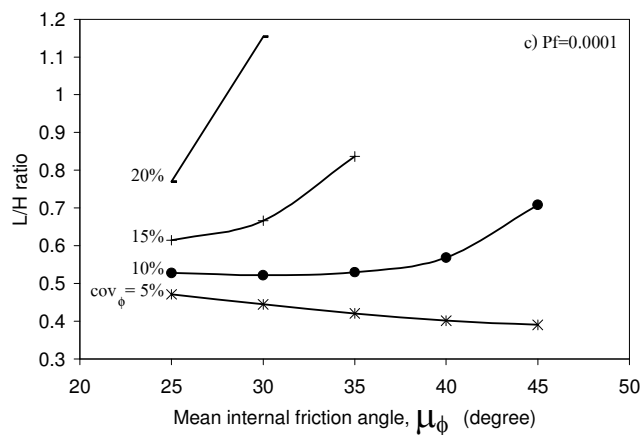
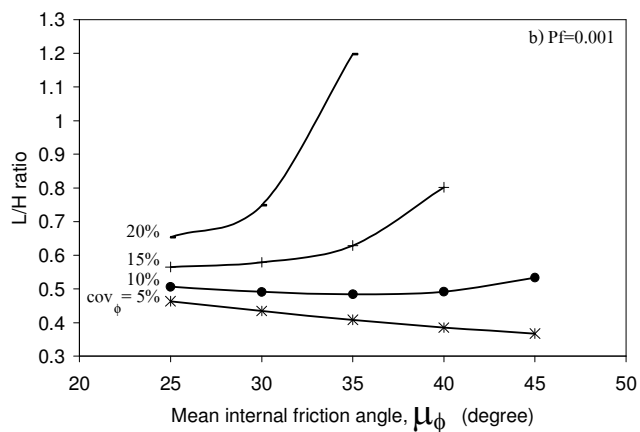
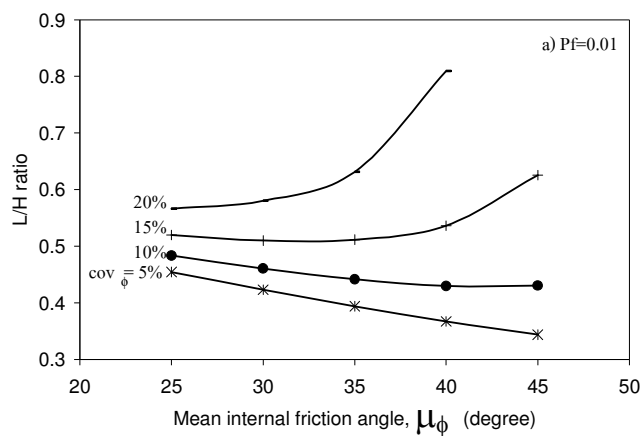
4.2.1 Design Charts สำหรับออกแบบกำแพงกันดินจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS

Design charts สำหรับ Sliding mode, Overturning mode และ Bearing capacity mode ที่พัฒนาจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS สำหรับค่า P_f ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 – 4.8 ตามลำดับ



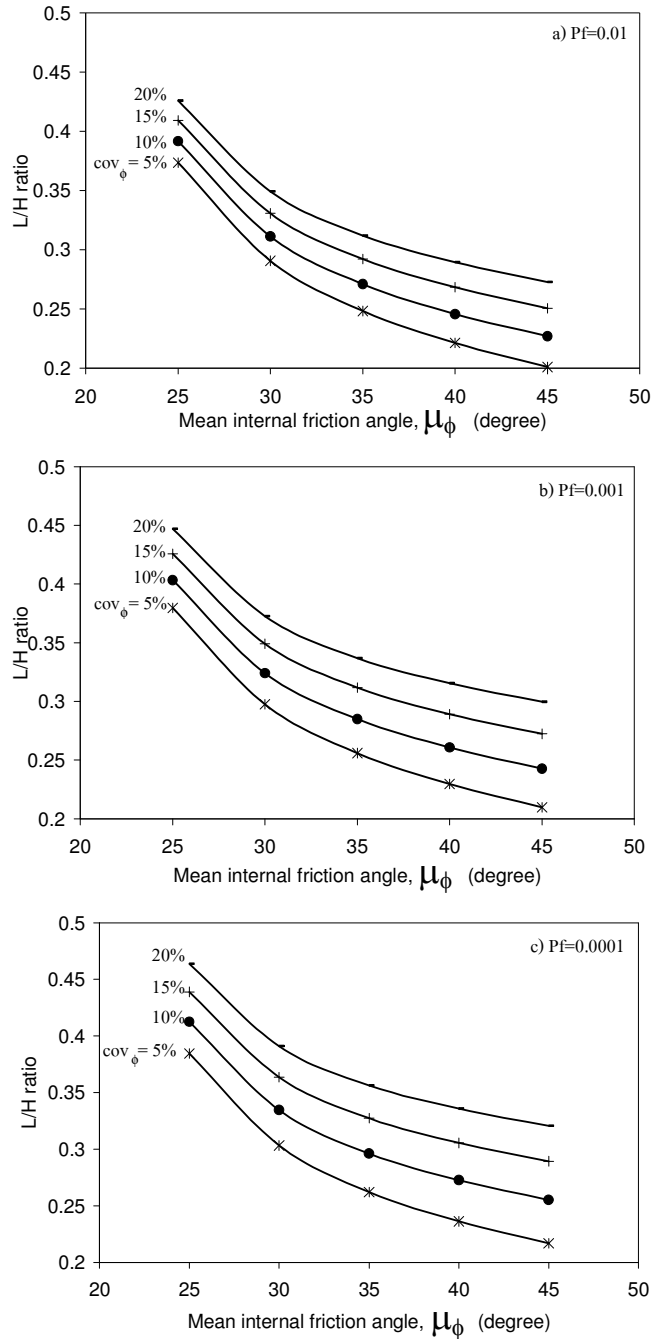
รูปที่ 4.6 Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.7 Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS

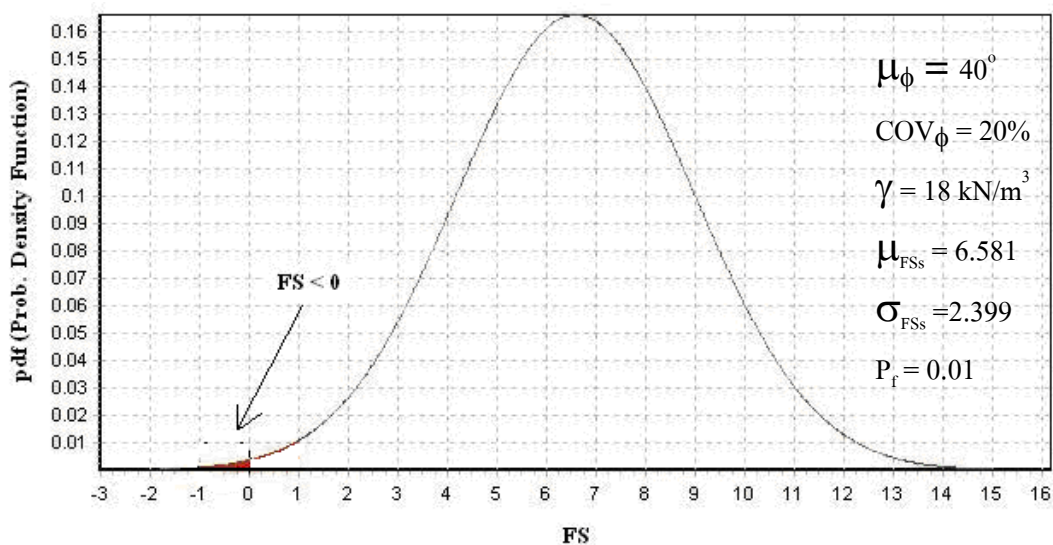
a) $P_f = 0.01$, b) $P_f = 0.001$, c) $P_f = 0.0001$



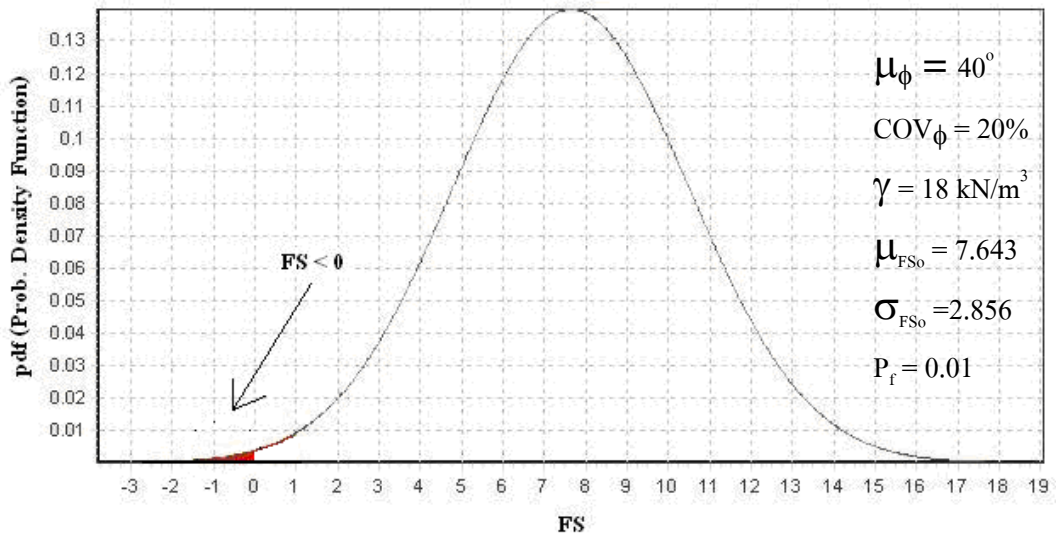
รูปที่ 4.8 Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จากวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS
a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

จากผลการศึกษา (รูปที่ 4.6 – 4.8) พบว่าค่า $\frac{L}{H}$ ในส่วนที่มีค่า COV_ϕ สูงไม่ได้มีค่าลดลงตามค่า μ_ϕ ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การคำนวณค่า น่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ของกำแพงกันดินจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM ด้วยวิธีการหาค่า FS อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณมีค่าผิดไปจากค่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากเมื่อดินมีความแข็งแรงมากขึ้น (ค่า μ_ϕ เพิ่มขึ้น) ก็จะทำให้ค่า Resisting force มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินที่ต้องการมีขนาดเล็กลง แต่กลับพบว่าผลจากการคำนวณบางส่วนเมื่อใช้ค่า μ_ϕ เพิ่มขึ้นในการคำนวณจะให้ค่า $\frac{L}{H}$ สูงขึ้นตามไปด้วย และไม่สามารถคำนวณหาค่า $\frac{L}{H}$ ได้ครบทั้งหมดตามค่า μ_ϕ , COV_ϕ และค่า P_f ที่ต้องการได้ โดยเฉพาะใน Sliding mode และ Overturning mode แต่ไม่พบปัญหานี้ในการคำนวณในส่วนของ Bearing capacity mode ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากที่สมการคำนวณค่า FS_b (สมการที่ 2.10) มีพจน์ของ Exponential รวมอยู่ในการคำนวณด้วยดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

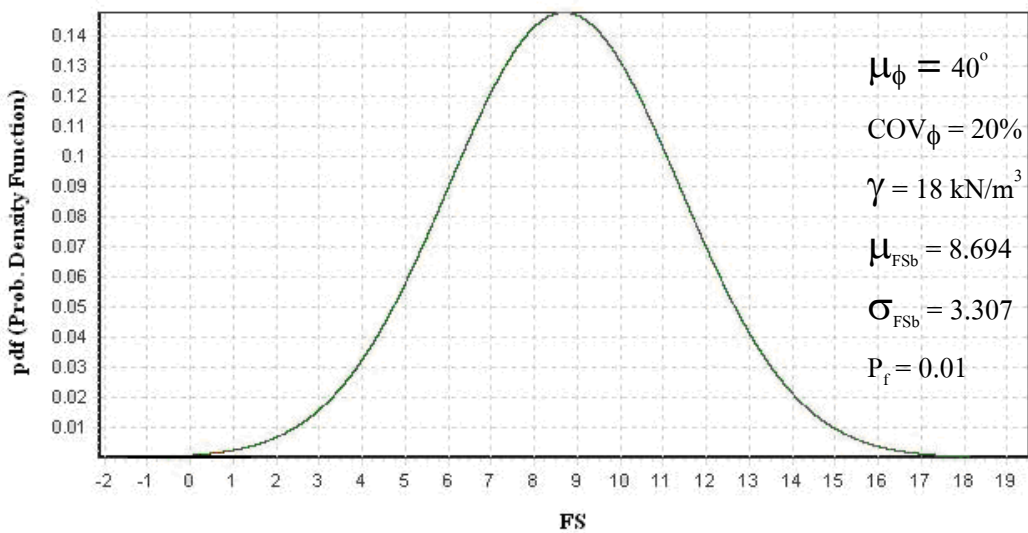
เมื่อนำข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการคำนวณใน Sliding mode และ Overturning mode มาทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า FS พบว่าผลที่ได้จากการศึกษาไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากเป็นไปได้ว่ามีค่า FS บางส่วนที่อาจจะมีค่าน้อยกว่า 0 ดังแสดงจากกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ที่ค่า FS บางส่วนมีค่าน้อยกว่า 0 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ในขณะที่ค่าการกระจายตัวของ FS ของ Bearing capacity mode ไม่มีค่าที่ต่ำกว่าศูนย์เลย (รูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.9 ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Sliding mode ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM



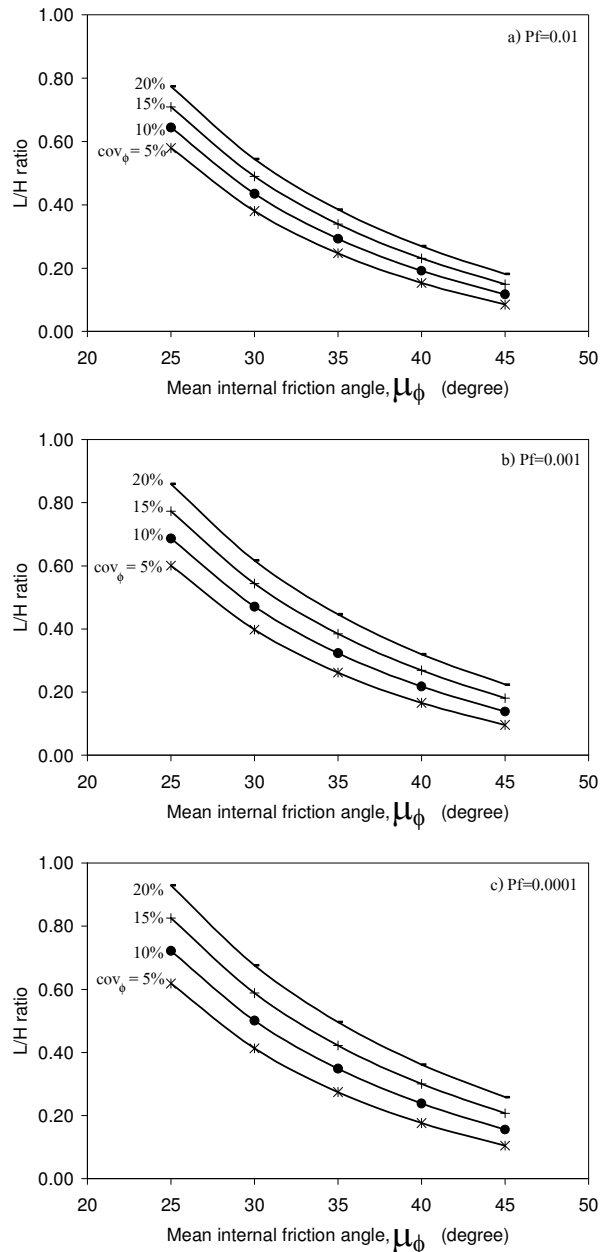
รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Overturning mode
ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM



รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของค่า FS ของ Bearing capacity mode
ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM

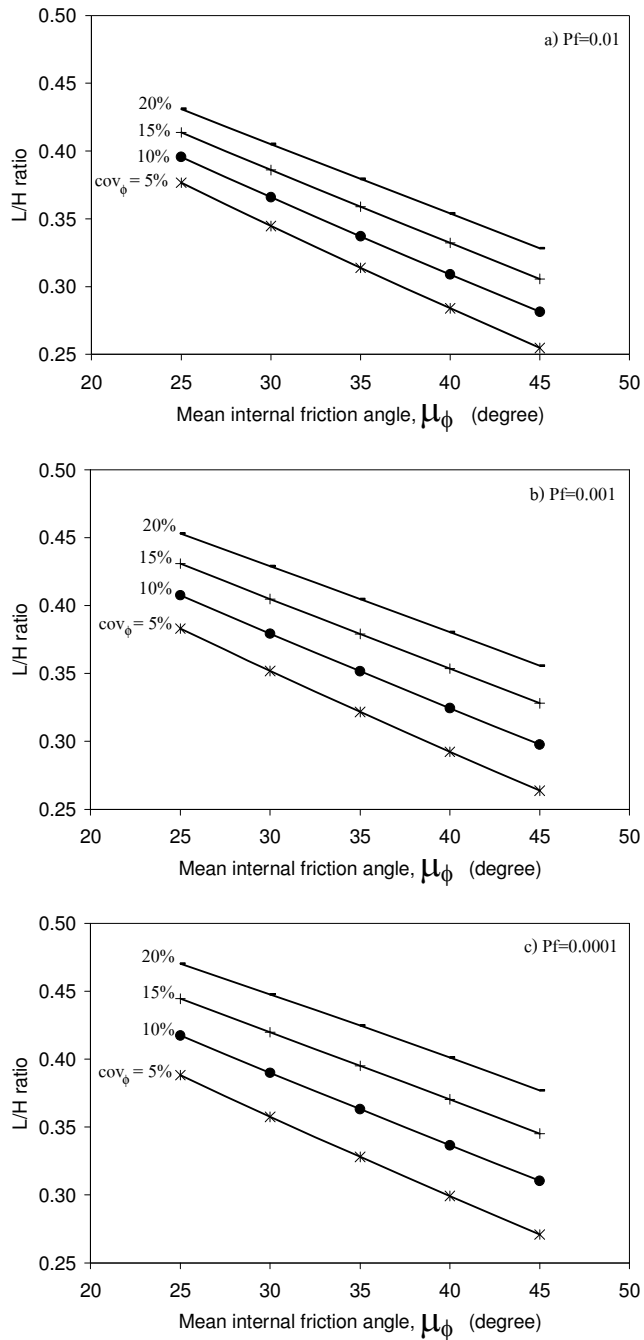
4.2.2 Design Charts สำหรับออกแบบกำแพงกันดินจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า SM

Design charts สำหรับ Sliding mode, Overturning mode และ Bearing capacity mode ที่พัฒนาจากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า SM สำหรับค่า P_f ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 – 4.14 ตามลำดับ



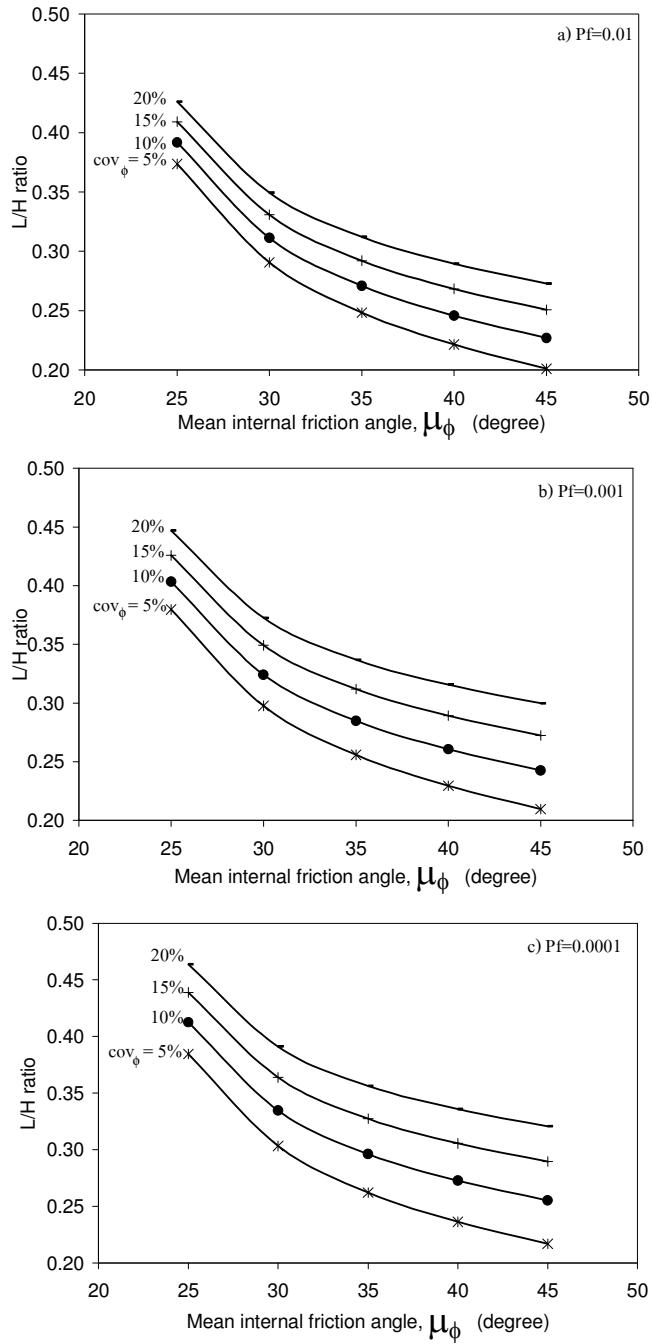
รูปที่ 4.12 Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.13 Design charts สำหรับ Overturning mode ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

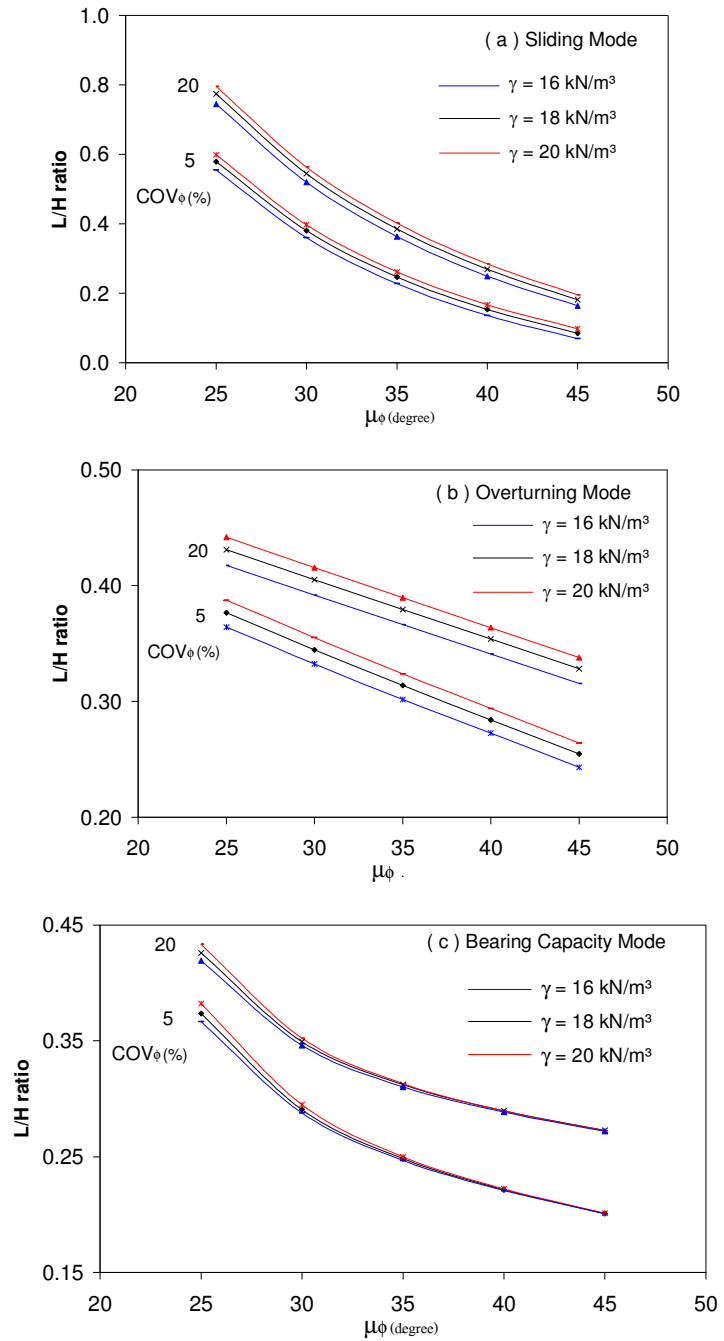


รูปที่ 4.14 Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ได้จาก FOSM โดยใช้ค่า SM
 a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

ผลจากการศึกษาด้วยวิธี FOSM ด้วยวิธีการหาค่า SM พบว่าสามารถทำการคำนวณค่า $\frac{L}{H}$ ได้ครบทุกค่าที่ต้องการสำหรับ Sliding, Overturning และ Bearing capacity mode ตามลำดับ โดยค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการศึกษามีค่าสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนี้

- 1) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า μ_ϕ กล่าวคือ เมื่อค่า μ_ϕ ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงขึ้น ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Resisting force มีค่ามากขึ้นและ Active force ลดลงขนาดของอัตราส่วนโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ต้องการก็มีขนาดเล็กลง
- 2) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผันตรงกับค่า COV_ϕ เมื่อค่า μ_ϕ คงที่ กล่าวคือเมื่อค่า COV_ϕ มีค่าสูงขึ้นค่าคุณสมบัติของดินก็มีความแปรปรวนมากขึ้นส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการพิบัติมีมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของกำแพงกันดินที่ต้องการจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย
- 3) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า P_f กล่าวคือ เมื่อค่า P_f มีค่าลดลง (โอกาสที่จะเกิดการพิบัติต่ำ) ขนาดของกำแพงกันดินที่ต้องการ ก็จะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

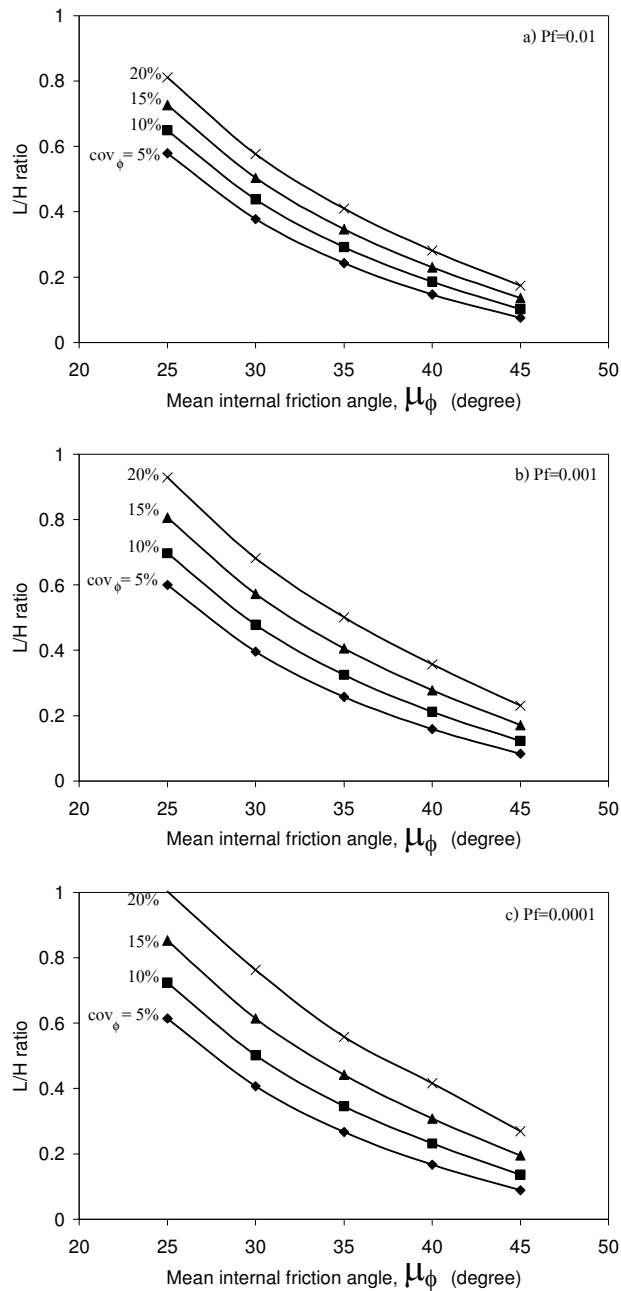
และจากกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่า μ_ϕ มีอิทธิพลมากต่อผลการคำนวณหาค่า $\frac{L}{H}$ สำหรับ Sliding mode และ Bearing capacity mode ดังรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับและพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ที่ใช้สำหรับทำการคำนวณจาก $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ เป็น $16 - 20 \text{ kN/m}^3$ ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 6.58% - 3.71% สำหรับ Sliding mode, 3.57% - 3.14% สำหรับ Overturning mode และมีค่าไม่เกิน 2.22% สำหรับ Bearing capacity mode ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการพัฒนา Design Charts จึงกำหนดเลือกใช้เฉพาะค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่ 18 kN/m^3 เพียงค่าเดียวเท่านั้นสำหรับทำการคำนวณดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยน้ำหนักจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM ที่ค่า $P_f = 0.01$ a) Sliding mode, b) Overturning mode, c) Bearing capacity mode

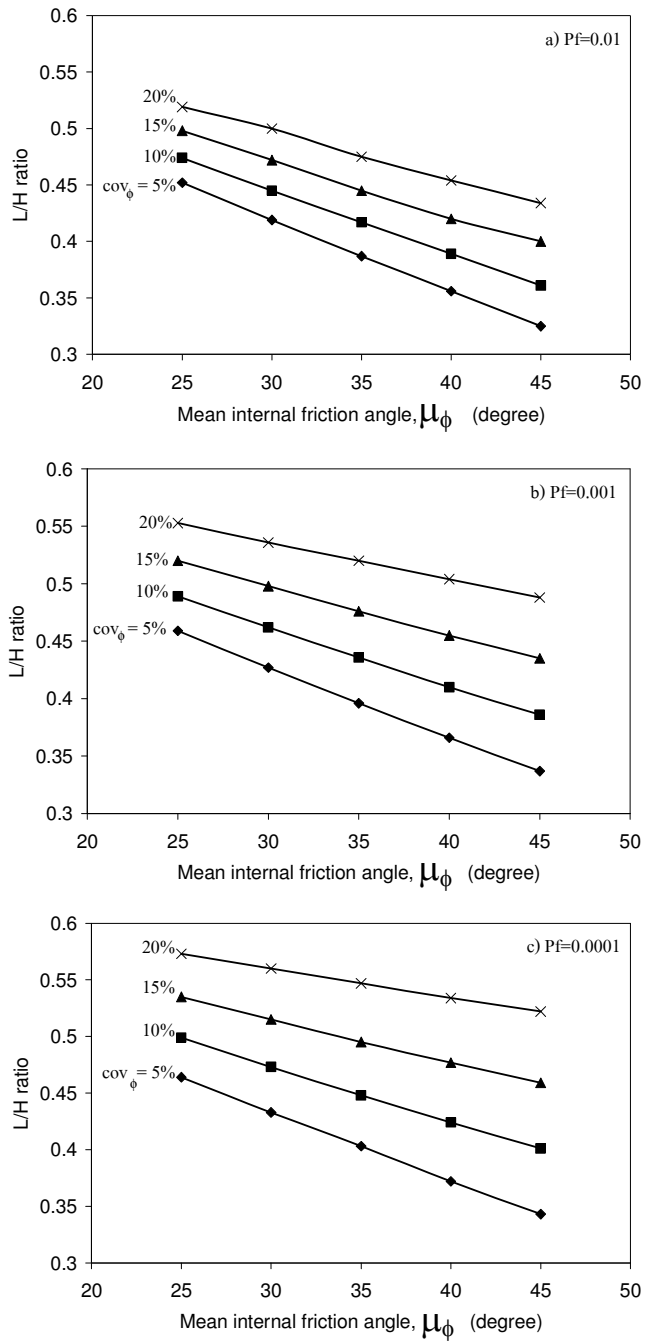
4.2.3 Design Charts สำหรับออกแบบกำแพงกันดินจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS

Design charts สำหรับ Sliding mode, Overturning mode และ Bearing capacity mode ที่พัฒนาจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า FS สำหรับค่า P_f ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 – 4.18 ตามลำดับ



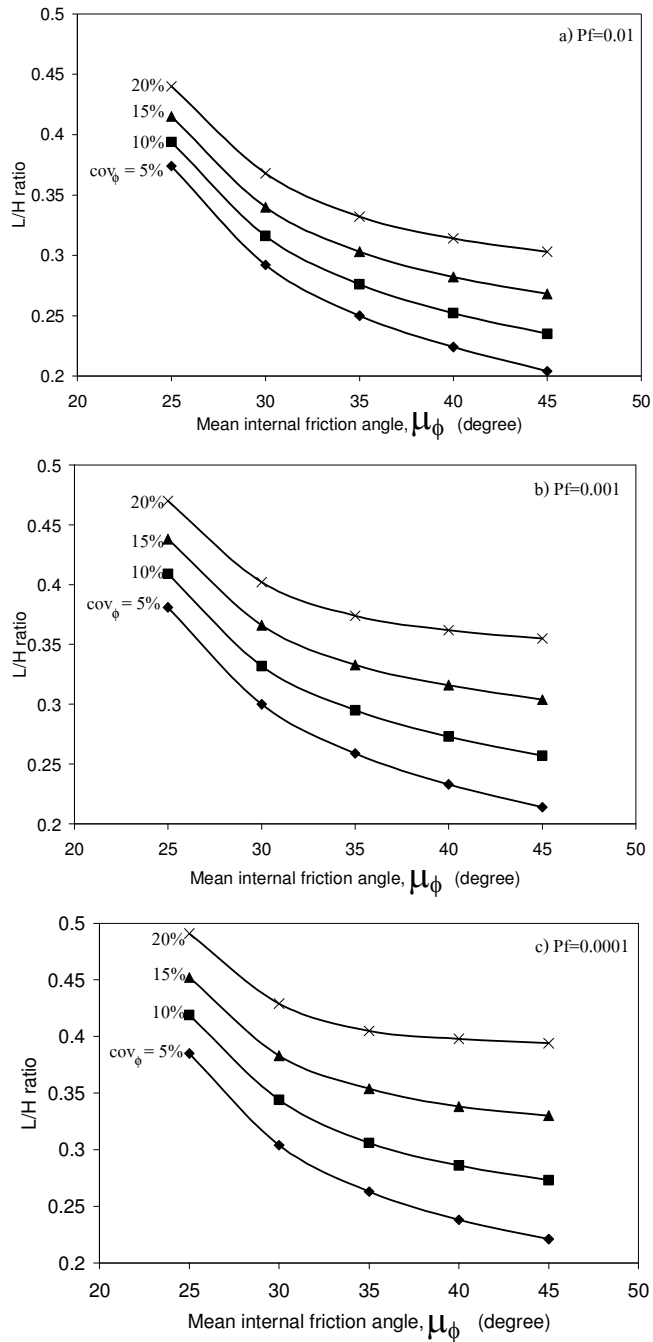
รูปที่ 4.16 Design charts สำหรับ Sliding mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.17 Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.18 Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า FS
 a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

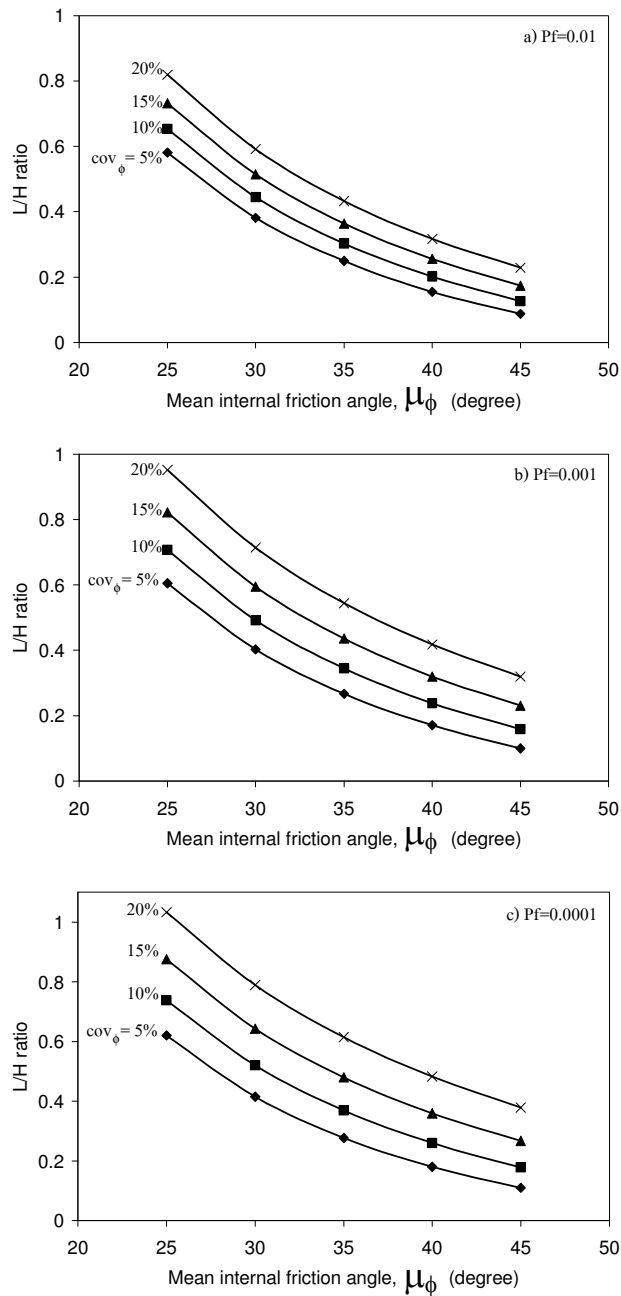
ผลจากการศึกษาด้วยวิธี MCS ด้วยวิธีการหาค่า FS พบว่าสามารถทำการคำนวณค่า $\frac{L}{H}$ ได้ครบทุกค่าที่ต้องการและค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการศึกษามีค่าสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.18 ตามลำดับดังนี้

- 1) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า μ_ϕ กล่าวคือ เมื่อค่า μ_ϕ ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงขึ้น ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Resisting force มีค่ามากขึ้นและ Active force ลดลงขนาดของอัตราส่วน โครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ต้องการก็มีขนาดเล็กลง
- 2) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผันตรงกับค่า COV_ϕ เมื่อค่า μ_ϕ คงที่ กล่าวคือเมื่อค่า COV_ϕ มีค่าสูงขึ้นค่าคุณสมบัติของดินก็มีความแปรปรวนมากขึ้นส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการพิบัติมีมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของกำแพงกันดินที่ต้องการจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย
- 3) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า P_f กล่าวคือ เมื่อค่า P_f มีค่าลดลง (โอกาสที่จะเกิดการพิบัติต่ำ) ขนาดของกำแพงกันดินที่ต้องการ ก็จะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

และจากผลการศึกษาพบว่าค่า μ_ϕ มีอิทธิพลมากต่อผลการคำนวณหาค่า $\frac{L}{H}$ สำหรับ Sliding mode และ Bearing capacity mode ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

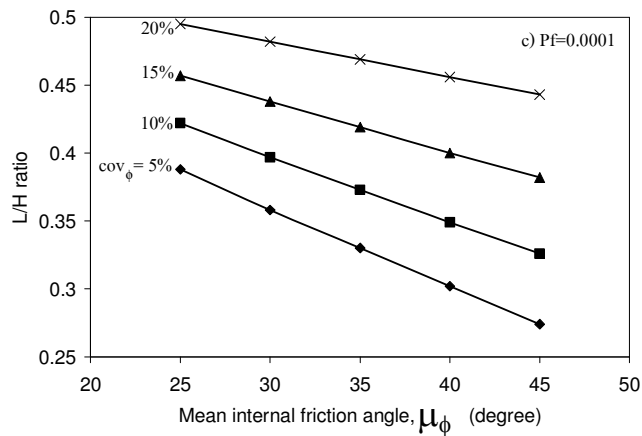
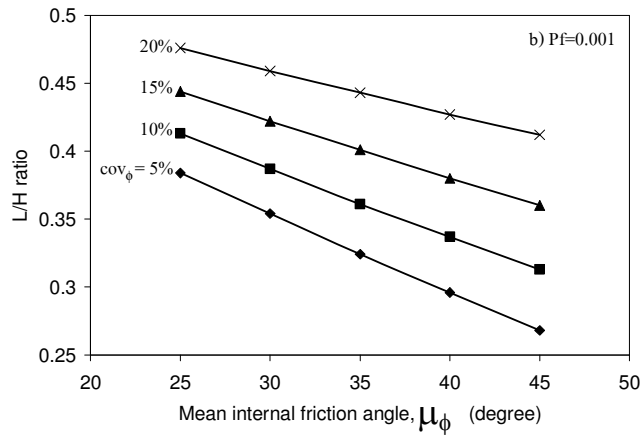
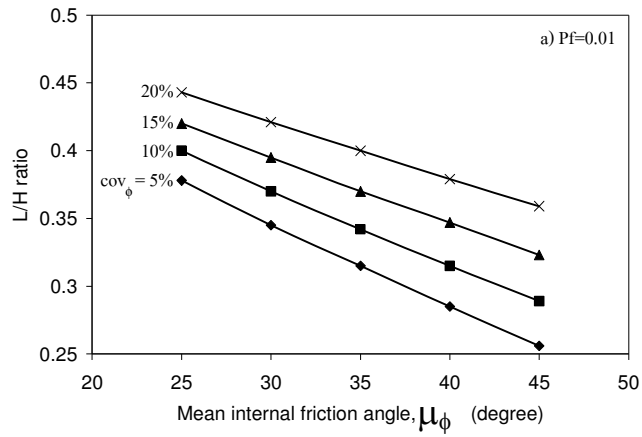
4.2.4 Design Charts สำหรับออกแบบกำแพงกันดินจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM

Design charts สำหรับ Sliding mode, Overturning mode และ Bearing capacity mode ที่พัฒนาจากการคำนวณด้วยวิธี MCS โดยใช้ค่า SM สำหรับค่า P_f ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 – 4.21 ตามลำดับ



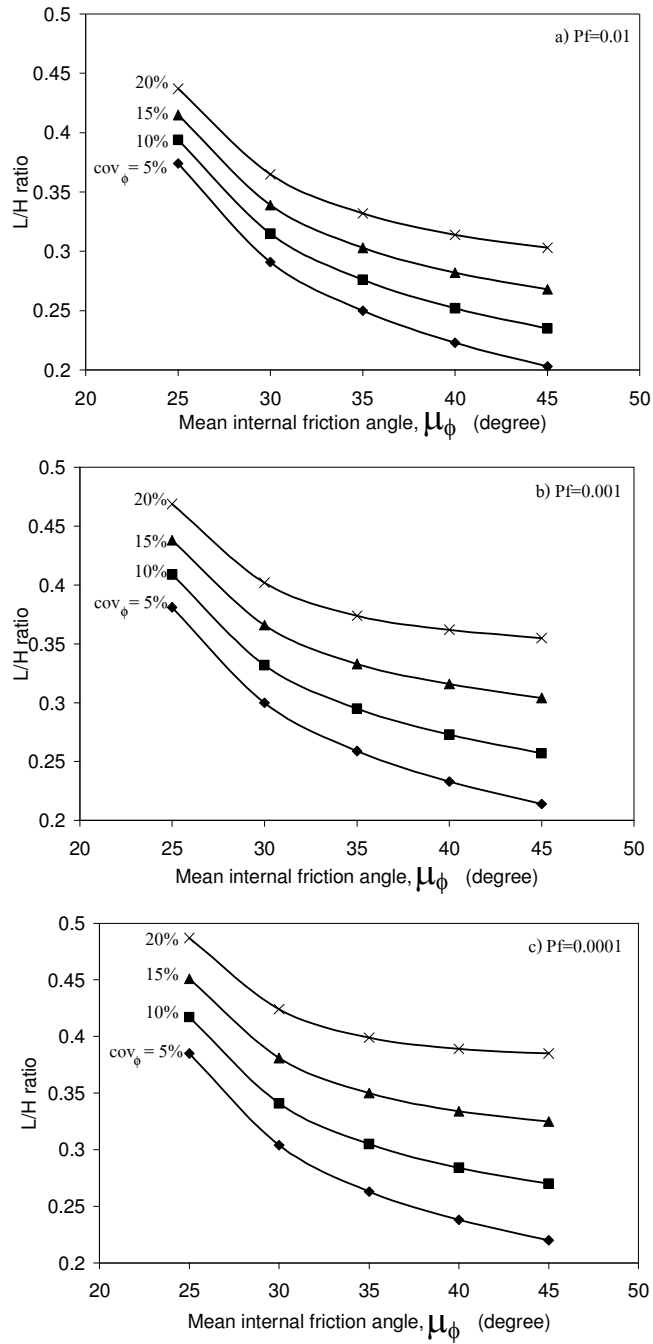
รูปที่ 4.19 Design charts for Sliding mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.20 Design charts สำหรับ Overturning mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.21 Design charts สำหรับ Bearing capacity mode ที่ได้จาก MCS โดยใช้ค่า SM
 a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

ผลจากการศึกษาด้วยวิธี MCS ด้วยวิธีการหาค่า SM พบว่าสามารถทำการคำนวณค่า $\frac{L}{H}$ ได้ครบทุกค่าที่ต้องการและค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการศึกษามีค่าสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังรูปที่ 4.19 – 4.21 ตามลำดับดังนี้

- 1) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า μ_ϕ กล่าวคือ เมื่อค่า μ_ϕ ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงขึ้น ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Resisting Force มีค่ามากขึ้นและ Active force ลดลงขนาดของอัตราส่วน โครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ต้องการก็มีขนาดเล็กลง
- 2) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผันตรงกับค่า COV_ϕ เมื่อค่า μ_ϕ คงที่ กล่าวคือเมื่อค่า COV_ϕ มีค่าสูงขึ้นค่าคุณสมบัติของดินก็มีความแปรปรวนมากขึ้นส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการพิบัติมีมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของกำแพงกันดินที่ต้องการจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย
- 3) ค่า $\frac{L}{H}$ แปรผกผันกับค่า P_f กล่าวคือ เมื่อค่า P_f มีค่าลดลง (โอกาสที่จะเกิดการพิบัติต่ำ) ขนาดของกำแพงกันดินที่ต้องการ ก็จะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

และจากผลการศึกษาพบว่าค่า μ_ϕ มีอิทธิพลมากต่อผลการคำนวณหาค่า $\frac{L}{H}$ สำหรับ Sliding mode และ Bearing capacity mode ดังรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

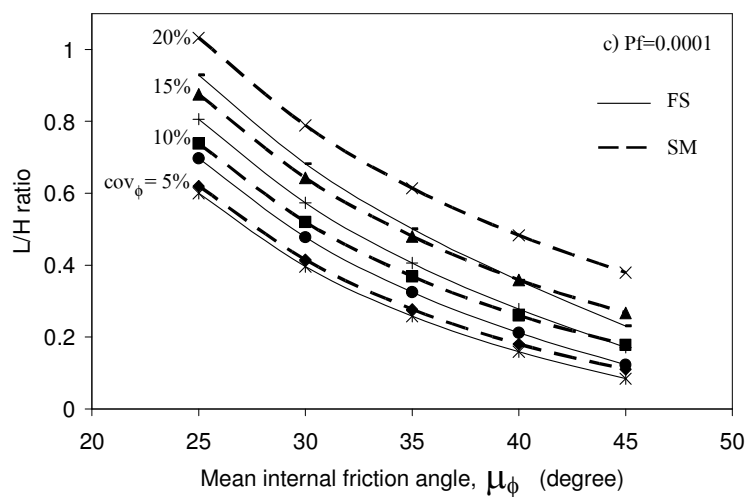
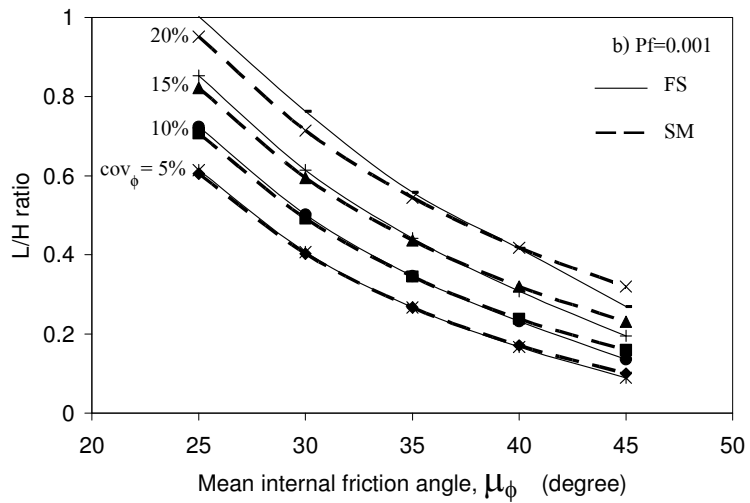
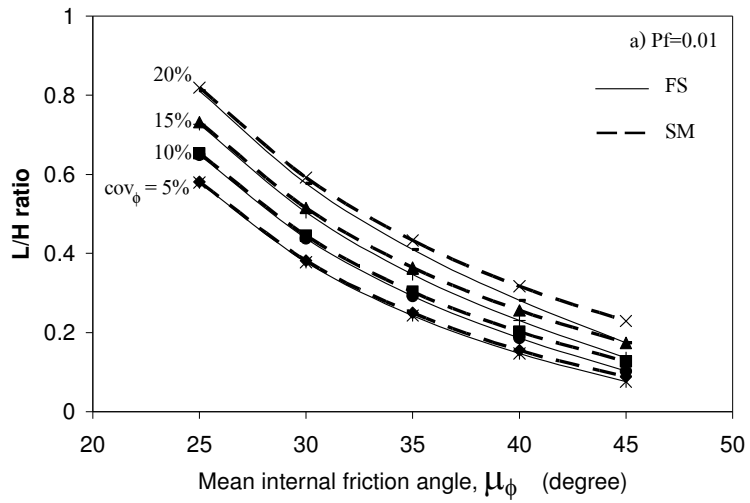
4.3 การเปรียบเทียบ Design charts

4.3.1 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM

การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากการพัฒนาโดยใช้วิธี FOSM ระหว่าง FS กับ SM ไม่สามารถทำได้เนื่องจาก ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS ให้ผลลัพธ์ที่ไม่น่าเชื่อถือและไม่สามารถทำการคำนวณหาค่า $\frac{L}{H}$ ได้ครบทุกค่าที่ต้องการ (รูปที่ 4.6 – 4.7) อันเนื่องมาจากมีความผิดพลาดทางคณิตศาสตร์ของการใช้ค่า FS

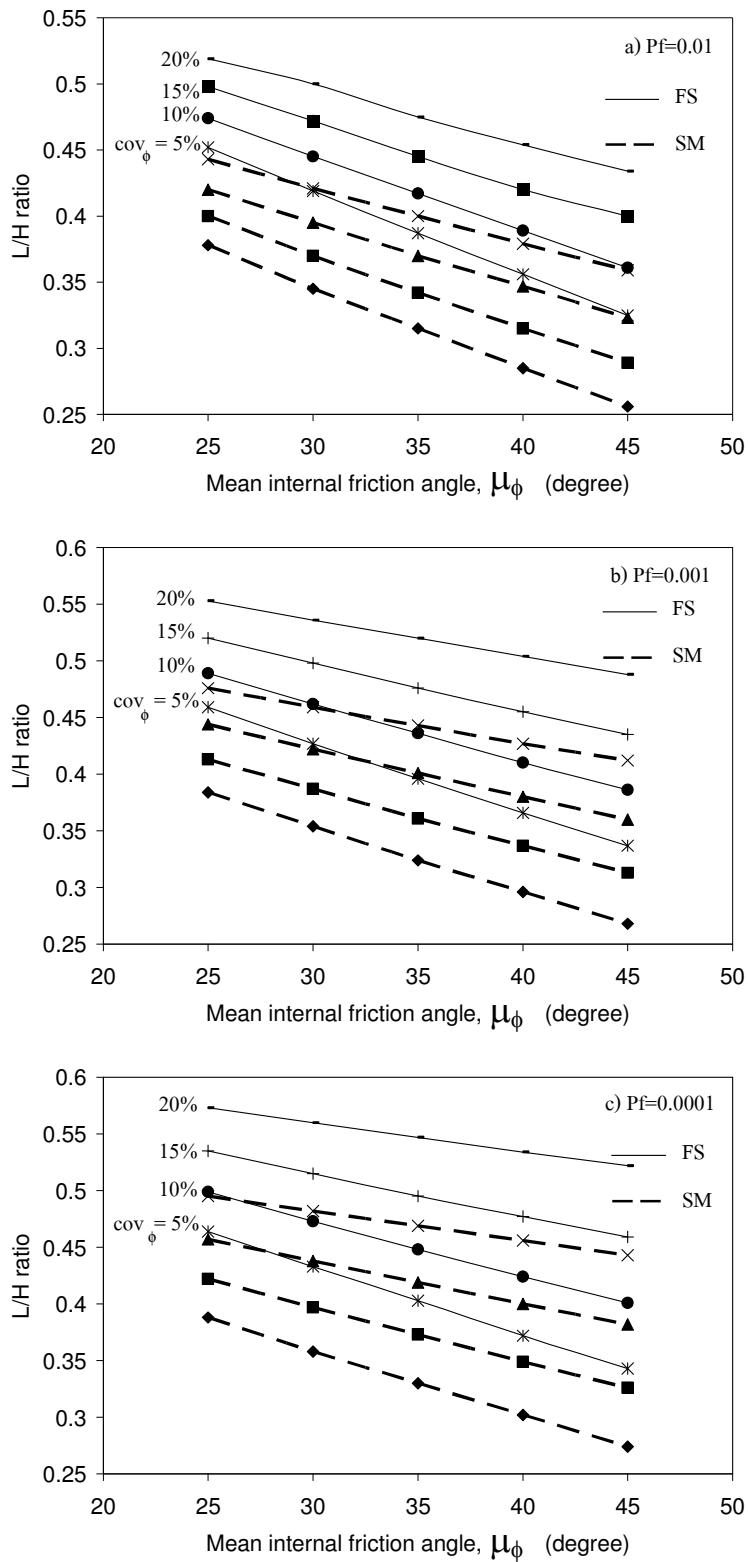
4.3.2 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS

การเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี MCS พบว่าค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมากในลักษณะการพิบัติแบบ Sliding mode และ Bearing capacity mode แต่ผลจากการคำนวณในลักษณะการพิบัติแบบ Overturning mode พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการหาค่า FS มีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการหาค่า SM ดังแสดงในรูปที่ 4.22 – 4.24 สำหรับ Sliding mode ที่ค่า P_f สูงได้ค่า $\frac{L}{H}$ ใกล้เคียงกันสำหรับทุกค่า COV_ϕ แต่ที่ค่า P_f ต่ำ ($P_f = 0.0001$) และค่า COV_ϕ สูง ($COV_\phi = 20\%$) พบว่าค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้มีค่าต่างกันถึง 2.90% - 29.02% สำหรับความแตกต่างของผลที่คำนวณได้จากลักษณะการพิบัติแบบ Overturning mode น่าจะเป็นผลมาจากลักษณะการคำนวณค่าเสถียรภาพที่ต่างกัน กล่าวคือ การหาค่าเสถียรภาพในรูปแบบของการลบกัณระหว่างค่าโมเมนต์ด้านการพลิกคว่ำและค่าโมเมนต์พลิกคว่ำผลการคำนวณค่า SM_0 ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าโมเมนต์ด้านการพลิกคว่ำเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการคำนวณค่าเสถียรภาพในรูปแบบของการหาค่า FS_0 ซึ่งเป็ผลลัพธ์ที่ได้จากการหารกันระหว่างค่าโมเมนต์ด้านการพลิกคว่ำและค่าโมเมนต์พลิกคว่ำ พบว่าเมื่อค่า $\frac{L}{H}$ ที่ใช้ทำการคำนวณมีค่าต่ำจะส่งผลให้ค่าโมเมนต์ด้านการพลิกคว่ำมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์พลิกคว่ำ ผลหารจึงมีค่าลดลง (เสมือนการลดขนาดสัญญาณ)เมื่อต้องการให้กำแพงกันดินมีโอกาสเกิดการพิบัติต่ำ ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ต้องการจึงมีค่าสูง



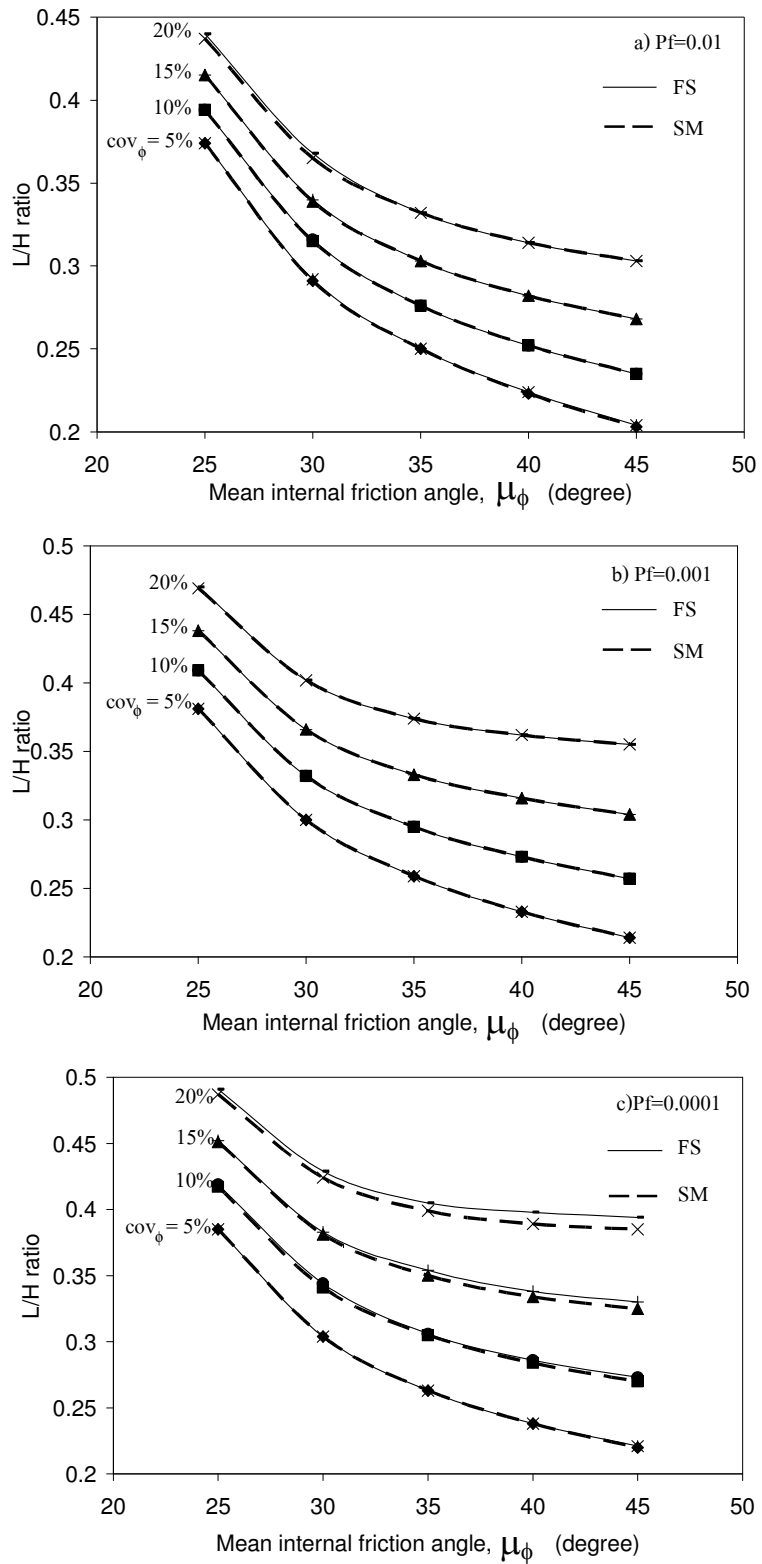
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Sliding mode)

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Overturning mode)

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (Bearing capacity mode)

a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

4.3.3 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS

การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณในขั้นตอนนี้จะไม่แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS เนื่องจากผลของการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบ FS ไม่น่าเชื่อถือ รูปแสดงการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 – 4.27 ในการเปรียบเทียบพบว่าค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธี MCS มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM แต่ค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธี MCS มีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM เล็กน้อยในทุกลักษณะการพิบัติ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากคำนวณย้อนกลับมาเปรียบเทียบพบว่าที่ค่า P_f , μ_ϕ และค่า COV_ϕ ชุดเดียวกันสำหรับการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS พบว่าค่า $\frac{L}{H}$ ที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่างกัน แต่ค่า σ_{SM} ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมากดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการประมาณค่า σ_{SM} ทั้งจากวิธี FOSM และ MCS ให้ค่าที่แม่นยำเท่ากันในทุกลักษณะการพิบัติแต่ค่า μ_{SM} ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งการคำนวณค่า μ_{SM} จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM จะใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทุกตัว แต่การคำนวณด้วยวิธี MCS จะได้ค่า μ_{SM} มาจากการเฉลี่ยของค่า SM ที่คำนวณซ้ำ 10,000 ค่าซึ่งจะทำให้ค่า μ_{SM} แตกต่างกันได้ และเมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี [FOSM(SM), MCS(FS), MCS(SM)] มาทำการเปรียบเทียบกัน พบว่าเมื่อค่า COV_ϕ ที่ใช้สำหรับทำการคำนวณมีค่าต่ำ ($COV_\phi = 5\%$) ค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกลักษณะการพิบัติ แต่เมื่อค่า COV_ϕ ที่ใช้สำหรับทำการคำนวณมีค่าสูง ($COV_\phi = 20\%$) ค่า $\frac{L}{H}$ ที่คำนวณได้จากทั้ง 3 วิธีมีค่าต่างกันเล็กน้อย ยกเว้นในลักษณะการพิบัติแบบ Overturning failure ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของวิธีการคำนวณค่าเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ใช้ทำการเปรียบเทียบพบว่า มีลักษณะแนวโน้มเหมือนกันทุกๆ Charts ดังแสดงในรูปที่ 4.28 - 4.30 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS สำหรับ SM

ลักษณะการพิบัติ	FOSM			MCS		
	$\frac{L}{H}$	μ_{SM}	σ_{SM}	$\frac{L}{H}$	μ_{SM}	σ_{SM}
Sliding Mode	0.29	0.85	0.36	0.30	0.92	0.36
Overturning Mode	0.34	0.28	0.12	0.34	0.31	0.12
Bearing Capacity Mode	0.27	33.81	14.54	0.28	36.14	14.27

* $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$, $P_f = 0.01$

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM และ MCS เมื่อ

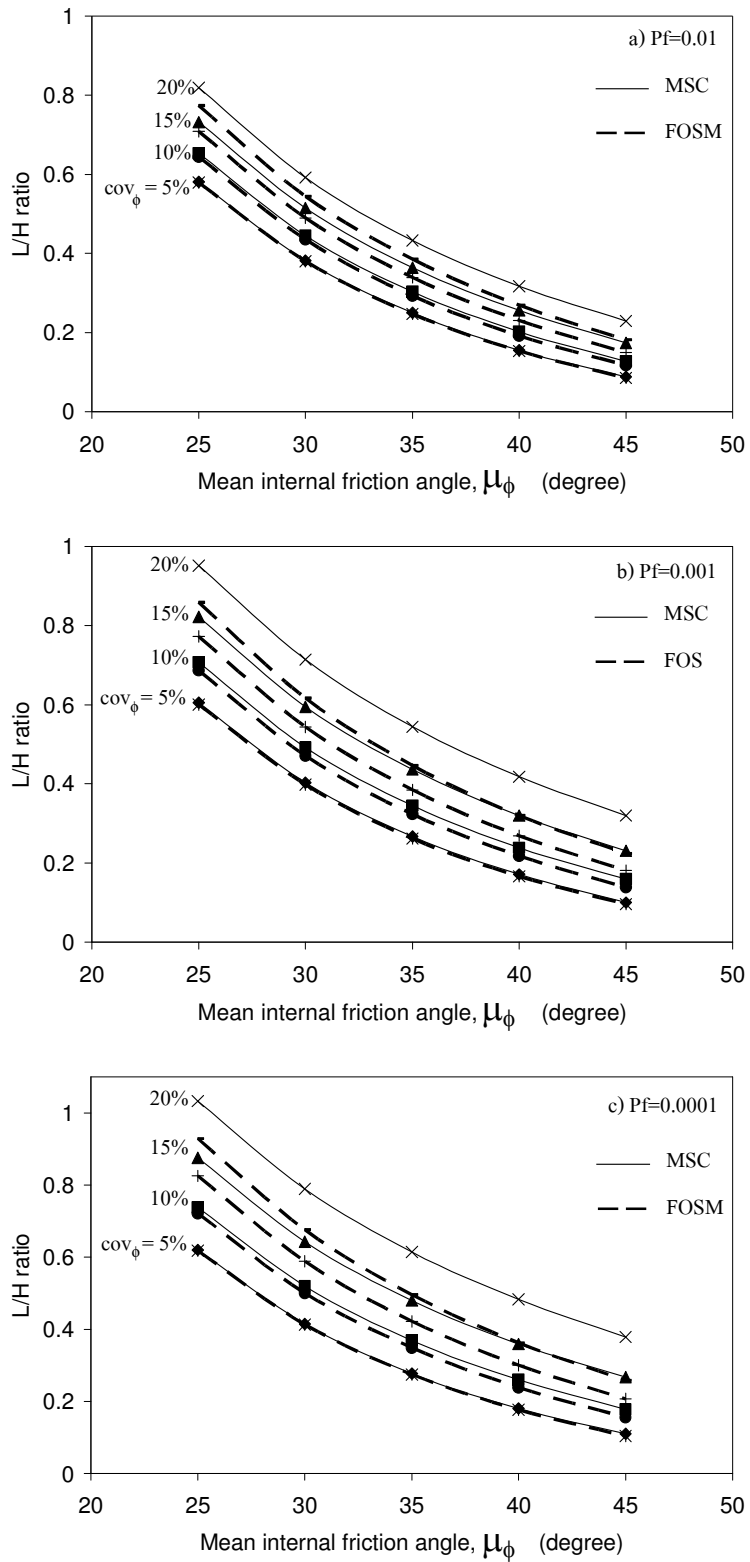
กำหนดให้ใช้ค่า $\frac{L}{H}$ เท่ากัน

ลักษณะการพิบัติ	$\frac{L}{H}$	FOSM			MCS		
		μ_{SM}	σ_{SM}	P_f	μ_{SM}	σ_{SM}	P_f
Sliding Mode	0.29	0.85	0.36	0.0100	0.83	0.36	0.0168
Overturning Mode	0.34	0.28	0.12	0.0100	0.27	0.12	0.0173
Bearing Capacity Mode	0.27	33.81	14.54	0.0100	32.99	14.39	0.0168

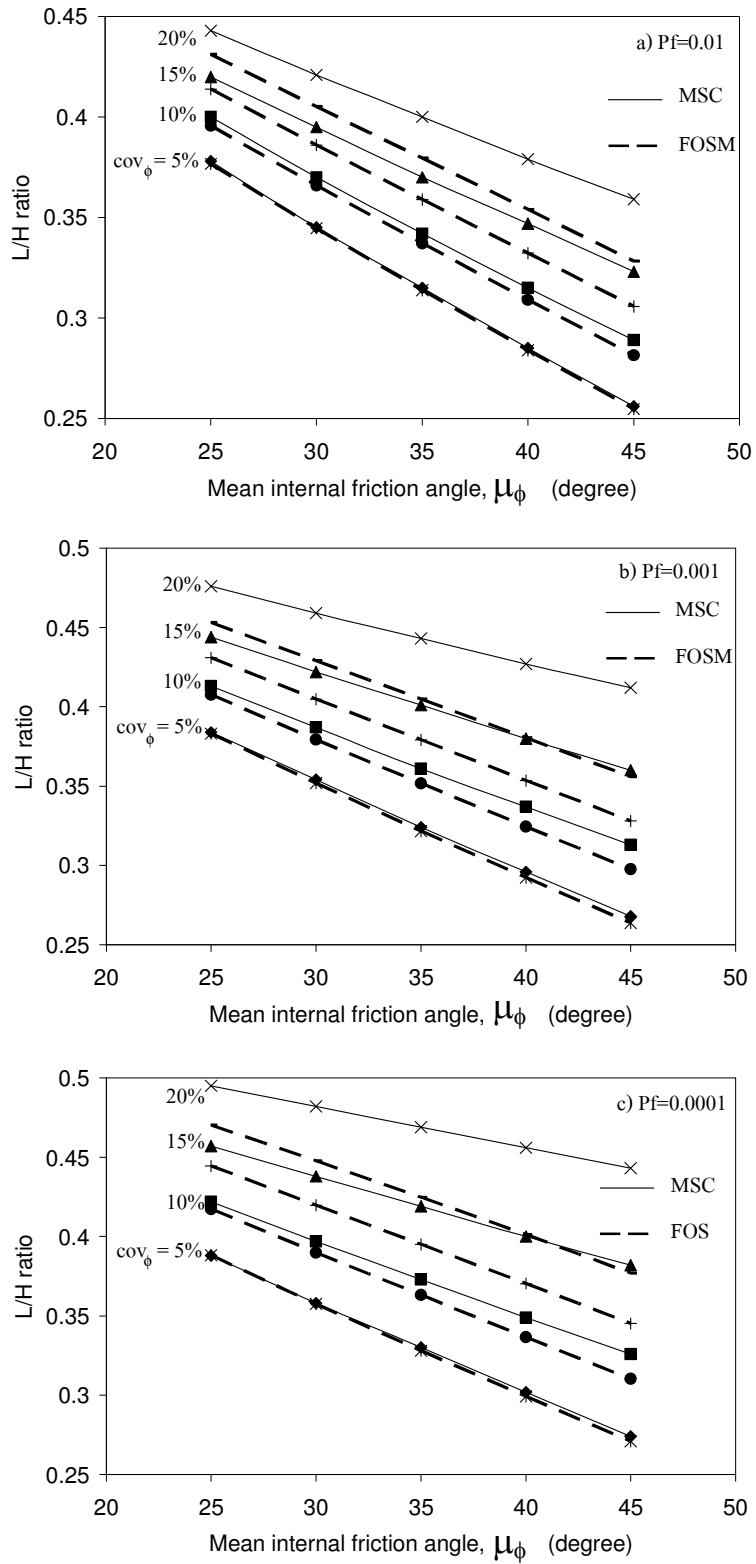
ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ลักษณะการพิบัติ	$\frac{L}{H}$	FOSM			MCS		
		μ_{SM}	σ_{SM}	P_f	μ_{SM}	σ_{SM}	P_f
Sliding Mode	0.30	0.94	0.36	0.0049	0.92	0.36	0.0100
Overturning Mode	0.34	0.31	0.12	0.0049	0.31	0.12	0.0100
Bearing Capacity Mode	0.28	37.14	14.29	0.0047	36.14	14.27	0.0100

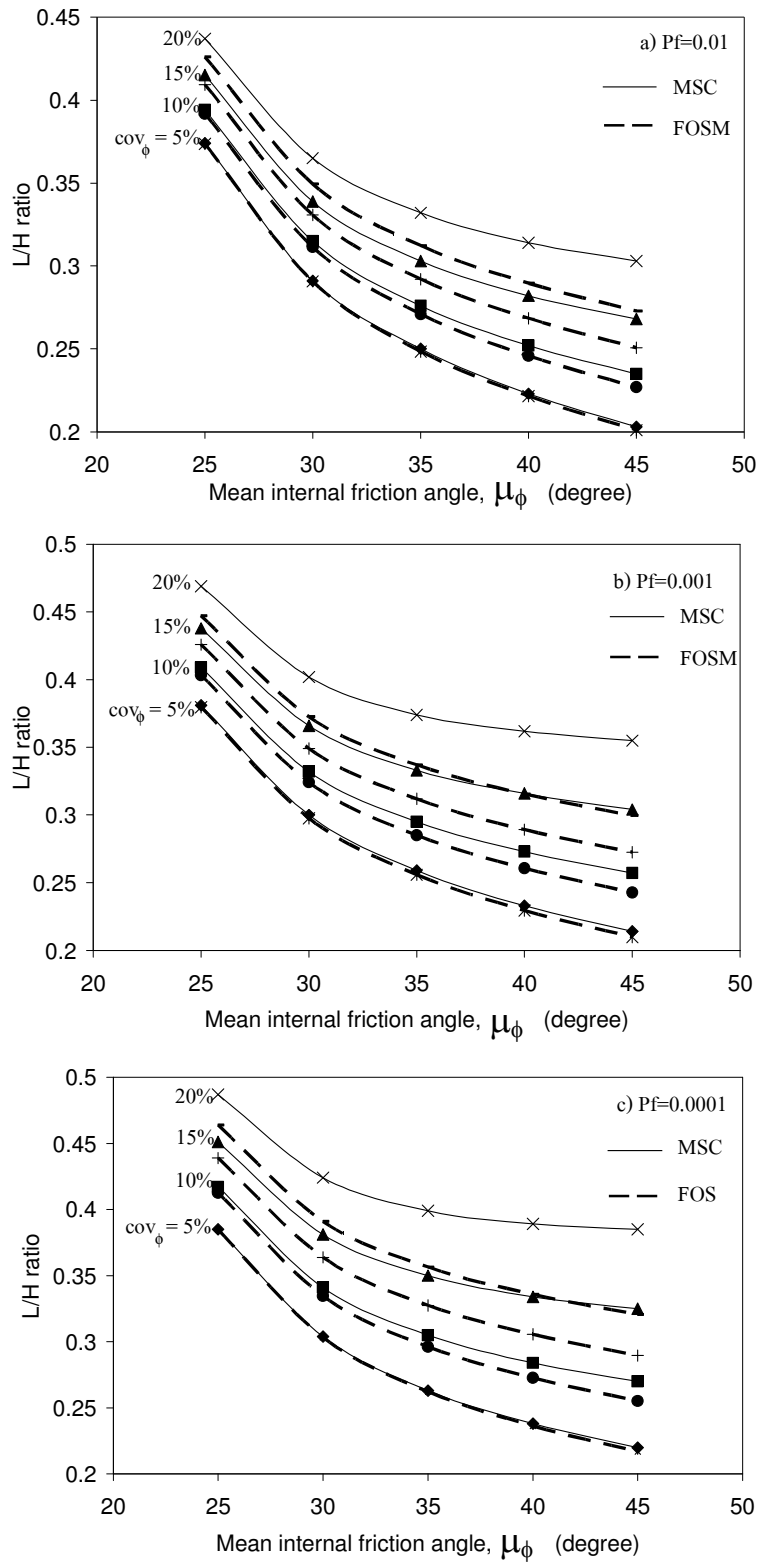
* $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $COV_\phi = 10\%$



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM (SM: Sliding mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

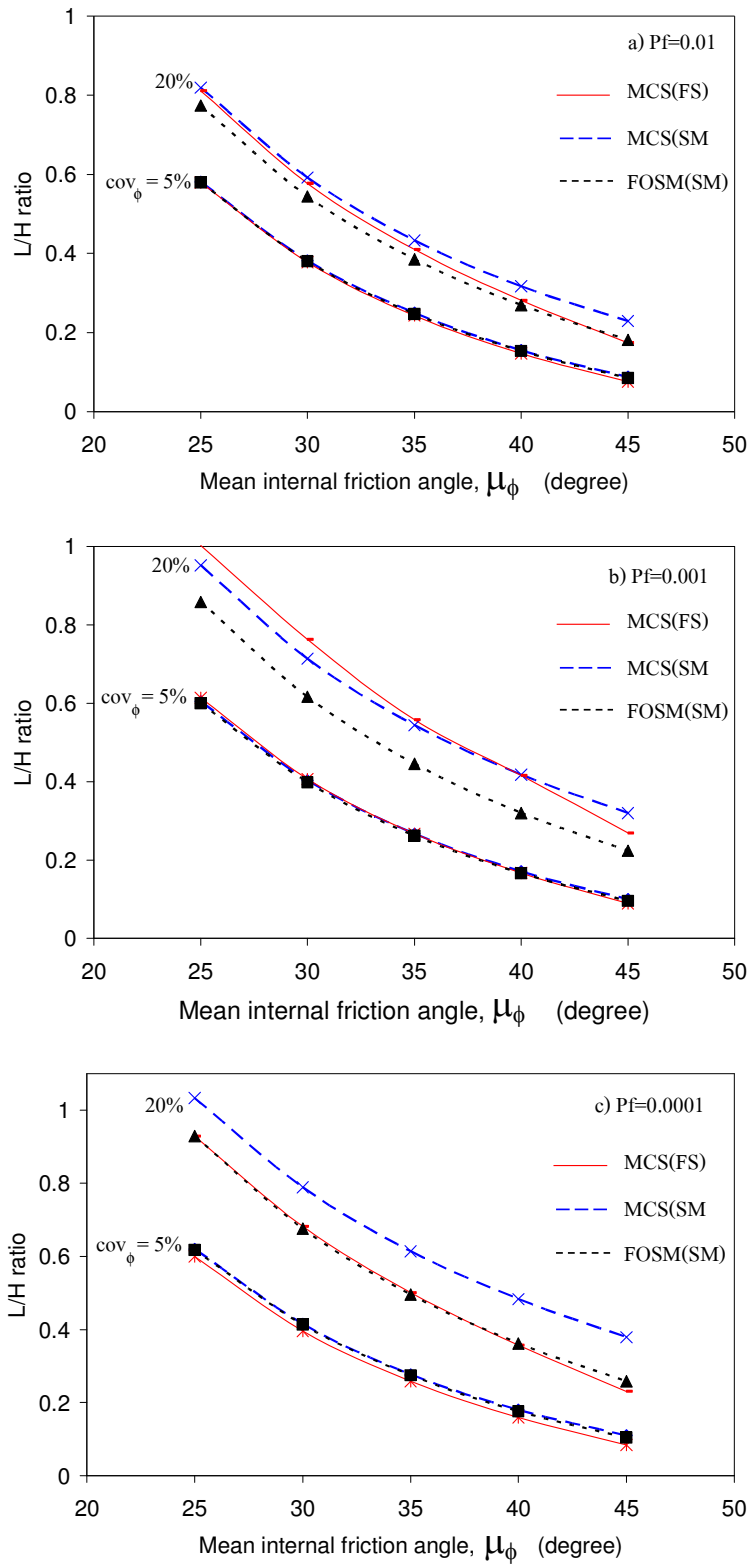


รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM
(SM: Overturning mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

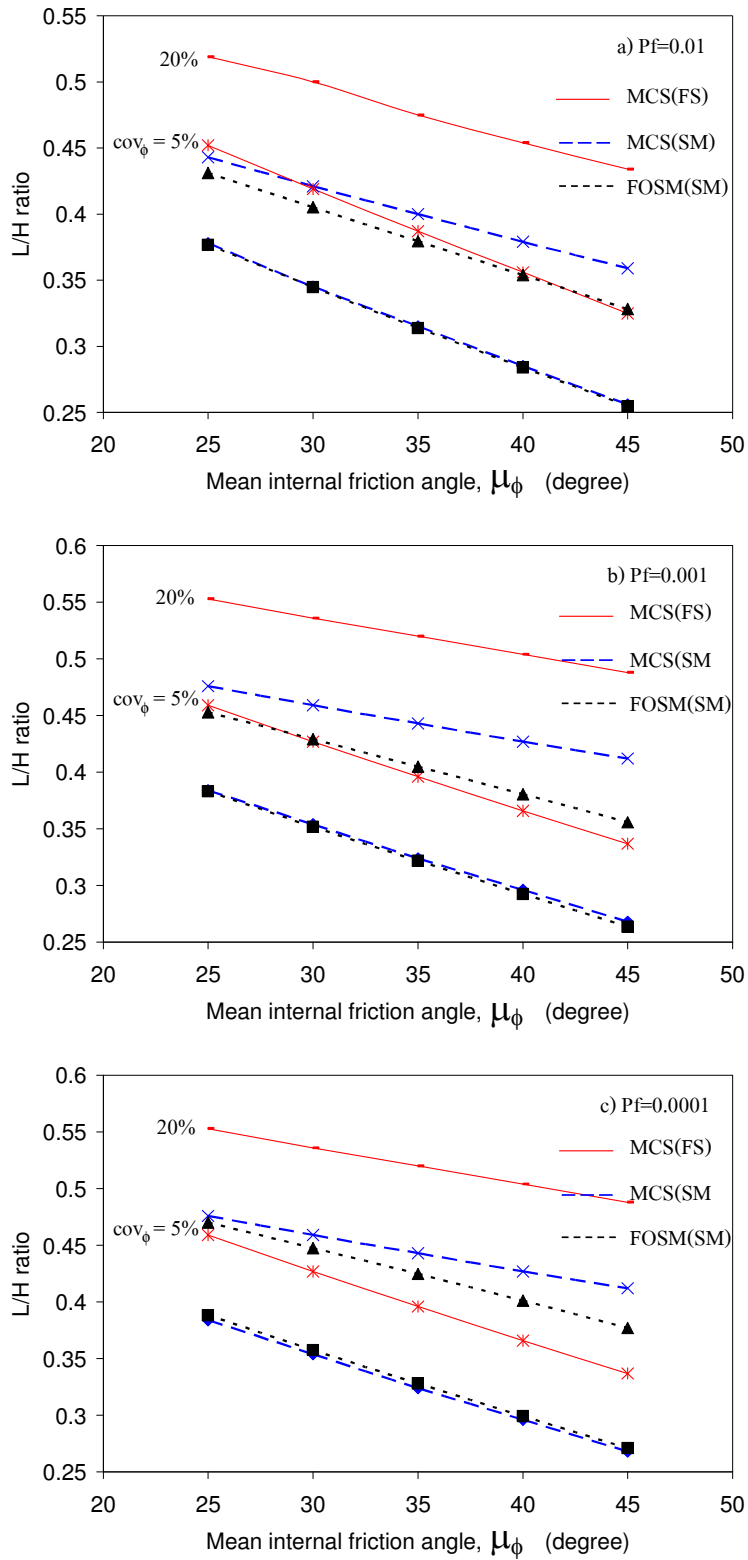


รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS และ FOSM

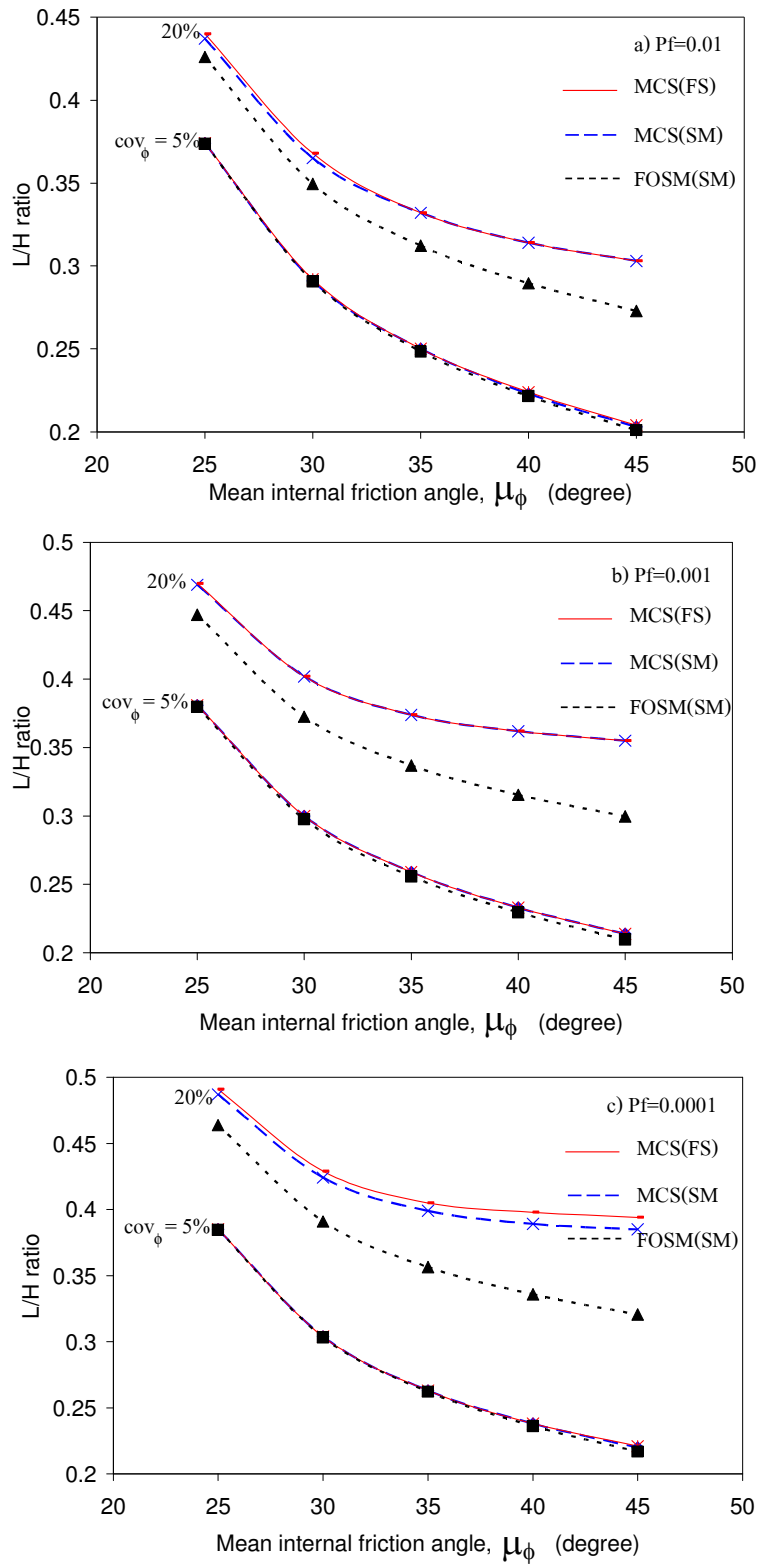
(SM: Bearing capacity mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM)
 (Sliding mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM) (Overturning mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบ Design charts ที่ได้จากวิธี MCS (FS), MCS (SM) และ FOSM (SM)
 (Bearing capacity mode) a) $P_f=0.01$, b) $P_f=0.001$, c) $P_f=0.0001$

4.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของ Design Charts

การตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts ที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ออกแบบกำแพงกันดินโดยความน่าจะเป็น ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโครงสร้างของกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วย Conventional method กับผลที่ได้จากการศึกษาที่ใช้ Design charts ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยคุณสมบัติของดินที่กำหนดใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องมีค่าดังนี้ ให้ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $\text{COV}_\phi = 10\%$ แล้วทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 3.4.1 และ 3.4.2 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Conventional method ที่วิศวกรส่วนใหญ่ใช้และคุ้นเคยเป็นอย่างดีกับผลที่คำนวณโดยอ้างอิงกับความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ใช้ทั่วไปในงานประเภท Geotech โดยผลการเปรียบเทียบได้แสดงในตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่าอัตราส่วนโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ Reliability based design charts มีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย Conventional method โดยเฉพาะค่า $\frac{L}{H}$ เมื่อค่า FS = 1.5 และ 2.0 มีความสอดคล้องกับค่า $\frac{L}{H}$ ที่ $P_f = 0.01$ ถึง 0.001 ดังนั้น Reliability based design charts ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือ
- 2) Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS(SM) ให้ค่า $\frac{L}{H}$ ใกล้เคียงกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Design charts ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FOSM(SM)

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับผลการคำนวณด้วย Conventional method

Failure mode	ค่าอัตราส่วนโครงสร้างกำแพงกันดินที่ต้องการ $\left(\frac{L}{H}\right)$											
	FS			P_f								
	Conventional Design			FOSM (SM)			MCS (FS)			MCS (SM)		
	1.5	2.0	3.0	0.01	0.001	0.0001	0.01	0.001	0.0001	0.01	0.001	0.0001
Sliding	0.33	0.47	0.73	0.29	0.32	0.35	0.29	0.33	0.35	0.30	0.35	0.37
Overturning	0.43	0.49	0.59	0.34	0.35	0.36	0.42	0.44	0.45	0.34	0.36	0.37
Bearing capacity	0.24	0.25	0.28	0.27	0.28	0.30	0.28	0.30	0.31	0.28	0.30	0.31

* $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\mu_\phi = 35^\circ$, $\text{COV}_\phi = 10\%$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแผนภูมิการออกแบบบนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือสำหรับกำแพงกันดินทำได้โดยการนำความไม่แน่นอนของค่ามุมเสียดทานภายในของดินที่ไม่มีความเชื่อมั่นมาทำการคำนวณและแสดงผลการศึกษาในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินสำหรับการพิบัติจากการเลื่อนไถล, การพิบัติจากการพลิกคว่ำ และการพิบัติเนื่องจากดินใต้ฐานรากมีกำลังรับแรงแบกทานไม่เพียงพอ โดยวิธี First Order Second Moment และวิธี Monte Carlo Simulation ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการเลื่อนไถล (FS_L) และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการพลิกคว่ำ (FS_Q) มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบ Log – Normal Distribution แต่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของแรงแบกทาน (FS_B), ค่าผลต่างความปลอดภัยจากการเลื่อนไถล (SM_L), ค่าผลต่างความปลอดภัยจากการพลิกคว่ำ (SM_Q) และค่าผลต่างความปลอดภัยของแรงแบกทาน (SM_B) มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบ Normal Distribution

2) จำนวนครั้งการคำนวณซ้ำที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติด้วยวิธี Monte Carlo Simulation จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 10,000 ครั้งจึงจะให้ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติที่น่าเชื่อถือ

3) การคำนวณความแปรปรวนของผลการศึกษาในรูปแบบของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าผลต่างความปลอดภัย (σ_{SM}) ด้วยวิธี First order second moment method (FOSM) และวิธี Monte carlo simulation method (MCS) พบว่าทั้ง 2 วิธีให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ที่ได้อาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างความปลอดภัย (μ_{SM}) ที่แตกต่างกัน

4) ผลจากการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติของกำแพงกันดินด้วยวิธี First Order Second Moment และวิธี Monte Carlo Simulation พบว่าค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดินทราย (μ_ϕ) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายในของดินทราย (COV_ϕ) เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ในขณะที่ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

5) ผลการพัฒนา Design charts สำหรับออกแบบกำแพงกันดินบนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือได้แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ กับค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f), ค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดินทราย (μ_ϕ) และค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายในของดินทราย (COV_ϕ)

6) Design charts ที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ แปรผกผันกับค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) เนื่องจาก เมื่อค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) มีค่าลดลง (โอกาสที่จะเกิดการพิบัติต่ำ) ค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ มีค่ามากขึ้น

7) Design charts ที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ แปรผกผันกับค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดินทราย (μ_ϕ) เนื่องจากเมื่อค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดินทราย (μ_ϕ) ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงขึ้นทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงต้านการกระทำ (Resisting force) มีค่ามากขึ้นและแรงกระทำ (Active force) มีค่าลดลง ค่าของอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ต้องการก็มีค่าลดลง

8) Design charts ที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายในของดินทราย (COV_ϕ) เนื่องจากเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายในของดินทราย

(COV_φ) มีค่าสูงขึ้นค่าคุณสมบัติของดินก็มีความแปรปรวนมากขึ้นส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการพิบัติมีมากขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วน โครงสร้างของกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ มีค่ามากขึ้นด้วย

9) ผลการตรวจสอบความถูกต้องของ Design charts โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่หาค่าได้จาก Design charts ที่พัฒนาขึ้น กับค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่ได้จากการคำนวณด้วย Conventional method พบว่าค่าอัตราส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน $\left(\frac{L}{H}\right)$ ที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น Design charts ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ออกแบบกำแพงกันดินได้

10) การวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินในรูปแบบของการหาค่า FS ที่กำหนดให้มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการพิบัติ (P_f) ด้วยวิธี First Order Second Moment เพราะผลจากการคำนวณด้วยวิธี MCS พบว่ามีเพียงค่า อัตราส่วนความปลอดภัยของแรงแบกทาน (FS_φ) เท่านั้นที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบ Normal Distribution แต่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการเลื่อนไถล (FS_s) และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการพลิกคว่ำ (FS_o) มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบ \square og - Normal Distribution

บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2548). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร.
- ชัย มุกตพันธุ์ และ คาซุโตะ นาคาซาวา (2546). ปรฐพีกลศาสตร์ และ วิศวกรรมฐานราก. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์ดวงกมล.
- บุญชัย อุกฤษชน (2547). การวิเคราะห์ขอบเขตบนแบบประยุกต์สำหรับปัญหาเสถียรภาพของความลาด. คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สงวน ตั้งโพธิธรรม (2542). สถิติวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และ วรากร ไม้เรียง (2548). การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นต่อการพิบัติเพื่อประเมินความเสี่ยงของเขื่อน. ศูนย์วิจัยและพัฒนา วิศวกรรมปรฐพีและฐานราก. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Babu, G.L.S. and Basha, B.M. (2008). Optimum Design of Cantilever Retaining Walls Using Target Reliability Approach. International Journal of Geomechanics@ASCE. 8(4):240-252.
- Baecher, G.B. and Christian, J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons Ltd. New York.
- Box, G.E.P. and Muller, M.E. (1958). A Note on the Generation of Random Deviates. Ann. Math. Stat. 29:610-611.
- Cernica, J.N. (1994). Geotechnical Engineering Soil Mechanics. Ph.D. Dissertation. Department of Civil Engineering. Youngstown State University.
- Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2004). Reliability – Base Design for Internal Stability of Mechanically Stabilize Earth Walls. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 130(2):163-173.
- Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2005). Reliability – Base Design for External Stability of Mechanically Stabilize Earth Walls. International Journal of Geomechanics @ASCE. 5(3):196-205.

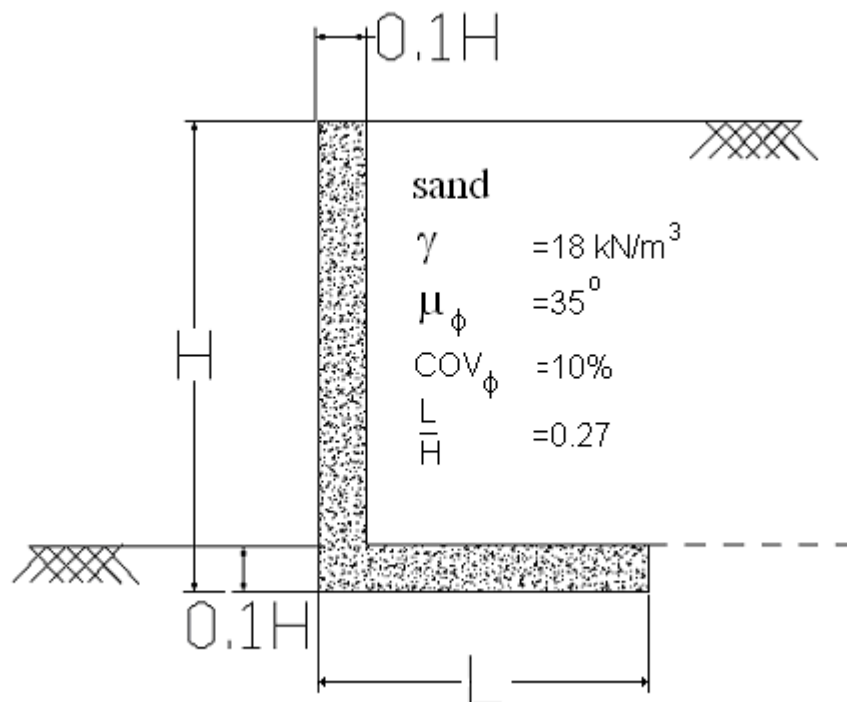
- Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2005). Method to Estimate The System Probability of Failure of Mechanically Stabilized Earth (MES) Walls. Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions, GSP No. 140, M. Gabr et al., eds., ASCE, Reston, VA, 1-15.
- Chalermyanont, T. and Rattanamanee, P. (2004). Probabilistic study of bearing capacity of strip footing on Cohesionless soil . Proceeding of the 9th National Convention on Civil Engineering. Cha-Am. Petchaburi. GTE 30-33
- Liu, C. and Evett, J.B. (2005). Soil and foundations. Prentice – Hall, Singapore.
- Degroot, D.J. (1996). Analyzing Spatial Variability of In Situ Soil Properties. Proceedings of Uncertainty. 96 . Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE. 1:210-238
- Duncan, J.M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering . J. Geotech. Geoenviron. Eng. 126(4):307-316.
- Kulhawy, F.H., F. and Phoon, K.K. (1996) Engineering Judgment in The Evaluation from Deterministic to Reliability-Based Foundation Design Uncertainty' 96, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, New York, 1, 29-48.
- Lian, Y., M. and Yen, B.C., F. (2003). Comparison of Risk Calculation Methods for a Culvert. Journal of Hydraulic Engineering. 129:140-152
- Low, B.K. and Tang, W. H. (1997). Reliability Analysis of Reinforced Embankments on Soft Ground . Canadian Geotechnical Journal. 34:672-685
- Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of Geotechnical Variability. Canadian Geotechnical Journal. 36: 612- 624.
- Robert, V. (2000). Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering. Professor. Emeritus. Massachusetts Inst. of Technology. Cambridge.
- Teng, W.C. (1962). Foundation Design. Prentice – Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Wichmann , B. and Hill, D. (1987). Building a Random Number Generator. BYTE. March. 127-128.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการคำนวณความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดิน
ด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า FS_u

กรณีตัวอย่างแสดงการคำนวณความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วยวิธี FOSM โดยใช้ค่า F_{S_5} กำหนดให้ค่าเฉลี่ยมุมเสียดทานภายในของดิน (μ_ϕ) = 35° , ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) = 18 kN/m^3 , ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผันของมุมเสียดทานภายใน (COV_ϕ) = 10 %, อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของกำแพงกันดิน ($\frac{L}{H}$) = 0.27 มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้



รูปที่ ก-1 กำแพงกันดินสำหรับการคำนวณกรณีตัวอย่าง

1) กำหนดค่าตัวแปรตั้งต้น

$$\mu_\phi = 35^\circ, \gamma = 18 \text{ kN/m}^3, COV_\phi = 10\%, \frac{L}{H} = 0.27$$

2) คำนวณค่าเฉลี่ยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพิบัติแบบเลื่อนไถล (μ_{FS_s})

$$\mu_{FS_s} = \frac{\sum W \tan(0.75\phi) + P_p}{P_a} \quad (\text{ก - 1})$$

เมื่อ $\sum W$ = ผลรวมของน้ำหนักดินถมและน้ำหนักของกำแพงกันดิน

$$= (0.1H \times 0.9H)\gamma_c + (L \times 0.1H)\gamma_c + 0.9H(L - 0.1H)\gamma$$

$$\gamma_c = \text{หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (24 kN / m}^3\text{)}$$

$$P_a = \text{แรงดันดินด้านข้างแบบ Active}$$

$$P_p = \text{แรงดันดินด้านข้างแบบ Passive}$$

$$\begin{aligned} \sum W &= (0.1 \times 1 \text{ m} \times 0.9 \times 1 \text{ m}) \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} + (0.27 \text{ m} \times 0.1 \times 1 \text{ m}) \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \\ &\quad + 0.9 \times 1 \text{ m} \cdot (0.27 \text{ m} - 0.1 \times 1 \text{ m}) \cdot 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \\ &= 5.562 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (\text{ก - 2})$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma h^2 \quad (\text{ก - 3})$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (\text{ก - 4})$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (\text{ก - 5})$$

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right) \gamma H^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \sin 35^\circ}{1 + \sin 35^\circ} \right) 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (1 \text{ m})^2 \\ &= 2.439 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_p = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \gamma h^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \sin 35^\circ}{1 - \sin 35^\circ} \right) 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (0.1\text{m.})^2$$

$$= 0.332 \text{ kN}$$

จะได้ $\mu_{FS_s} = \frac{(5.562\text{kN})\tan(0.75 \times 35^\circ) + 0.332\text{kN}}{2.439\text{kN}} = 1.261$

3) คำนวณความแปรปรวนของค่า FS_s

$$FS = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e \quad (\text{ก} - 6)$$

$$V[FS] \approx \left[\frac{\Delta FS}{\Delta \phi} \right]^2 [COV_\phi \cdot \mu_\phi]^2 \quad (\text{ก} - 7)$$

$$\sigma_{FS} = \sqrt{V[FS]} \quad (\text{ก} - 8)$$

เมื่อ $g(x_i) =$ ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณค่าเสถียรภาพของโครงสร้าง

$$\Delta FS = g(\phi + 1^\circ) - g(\phi - 1^\circ)$$

จะได้ $\Delta FS = g(35^\circ + 1^\circ) - g(35^\circ - 1^\circ) = g(36^\circ) - g(34^\circ)$

$$P_{a(36^\circ)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \sin 36^\circ}{1 + \sin 36^\circ} \right) 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (1\text{m.})^2$$

$$= 2.337 \text{ kN}$$

$$g(36^\circ) = FS_{s(36^\circ)} = \frac{(5.562\text{kN})\tan(0.75 \times 35^\circ) + 0.332\text{kN}}{2.337\text{kN}} = 1.316$$

$$P_{a(34^\circ)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ} \right) 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (1\text{m.})^2$$

$$= 2.544 \text{ kN}$$

$$g(34^\circ) = FS_{s(34^\circ)} = \frac{(5.562\text{kN})\tan(0.75 \times 35^\circ) + 0.332\text{kN}}{2.544\text{kN}} = 1.209$$

$$\Delta FS_s = 1.316 - 1.209 = 0.108$$

$$V[FS_s] \approx \left[\frac{0.107}{2} \right]^2 \left[\frac{10}{100} \cdot 35^\circ \right]^2 \approx 0.036$$

$$\sigma_{FS_s} = \sqrt{0.036} \approx 0.188$$

ดังนั้น $\mu_{FS_s} = 1.261$ $\sigma_{FS_s} = 0.438$

ภาคผนวก ข.

ค่าอัตราส่วนขนาดของโครงสร้างกำแพงกันดินสำหรับใช้พัฒนา

Design charts

ตารางที่ ข - 1 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (Sliding mode) FOSM

sliding mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.59	0.001	0.62	0.0001	0.64
30	5	0.01	0.39	0.001	0.41	0.0001	0.44
35	5	0.01	0.26	0.001	0.28	0.0001	0.30
40	5	0.01	0.16	0.001	0.19	0.0001	0.21
45	5	0.01	0.10	0.001	0.12	0.0001	0.14

25	10	0.01	0.68	0.001	0.76	0.0001	0.84
30	10	0.01	0.48	0.001	0.56	0.0001	0.64
35	10	0.01	0.34	0.001	0.43	0.0001	0.53
40	10	0.01	0.25	0.001	0.35	0.0001	0.50
45	10	0.01	0.19	0.001	0.33	0.0001	0.64

25	15	0.01	0.81	0.001	0.98	0.0001	1.19
30	15	0.01	0.61	0.001	0.82	0.0001	1.13
35	15	0.01	0.49	0.001	0.80	0.0001	1.52
40	15	0.01	0.43	0.001	1.11	0.0001	-
45	15	0.01	0.48	0.001	-	0.0001	-

25	20	0.01	0.98	0.001	1.36	0.0001	1.98
30	20	0.01	0.83	0.001	1.48	0.0001	3.82
35	20	0.01	0.80	0.001	3.34	0.0001	-
40	20	0.01	1.13	0.001	-	0.0001	-
45	20	0.01	-	0.001	-	0.0001	-

ตารางที่ ข - 2 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (overturning mode) FOSM

overturning mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.45	0.001	0.46	0.0001	0.47
30	5	0.01	0.42	0.001	0.43	0.0001	0.44
35	5	0.01	0.39	0.001	0.41	0.0001	0.42
40	5	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.40
45	5	0.01	0.34	0.001	0.37	0.0001	-

25	10	0.01	0.48	0.001	0.51	0.0001	0.53
30	10	0.01	0.46	0.001	0.49	0.0001	0.52
35	10	0.01	0.44	0.001	0.48	0.0001	0.53
40	10	0.01	0.43	0.001	0.49	0.0001	0.57
45	10	0.01	0.43	0.001	0.53	0.0001	-

25	15	0.01	0.52	0.001	0.57	0.0001	0.61
30	15	0.01	0.51	0.001	0.58	0.0001	0.67
35	15	0.01	0.51	0.001	0.63	0.0001	0.84
40	15	0.01	0.54	0.001	0.80	0.0001	0.39
45	15	0.01	0.63	0.001	-	0.0001	-

25	20	0.01	0.57	0.001	0.65	0.0001	0.77
30	20	0.01	0.58	0.001	0.75	0.0001	1.15
35	20	0.01	0.63	0.001	1.20	0.0001	0.71
40	20	0.01	0.81	0.001	-	0.0001	-
45	20	0.01	-	0.001	-	0.0001	-

ตารางที่ ข - 3 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (bearing capacity mode) FOSM

bearing capacity mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.38
30	5	0.01	0.29	0.001	0.30	0.0001	0.30
35	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.26
40	5	0.01	0.22	0.001	0.23	0.0001	0.24
45	5	0.01	0.20	0.001	0.21	0.0001	0.22

25	10	0.01	0.39	0.001	0.40	0.0001	0.41
30	10	0.01	0.31	0.001	0.32	0.0001	0.33
35	10	0.01	0.27	0.001	0.28	0.0001	0.30
40	10	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.27
45	10	0.01	0.23	0.001	0.24	0.0001	0.26

25	15	0.01	0.41	0.001	0.43	0.0001	0.44
30	15	0.01	0.33	0.001	0.35	0.0001	0.36
35	15	0.01	0.29	0.001	0.31	0.0001	0.33
40	15	0.01	0.27	0.001	0.29	0.0001	0.31
45	15	0.01	0.25	0.001	0.27	0.0001	0.29

25	20	0.01	0.43	0.001	0.45	0.0001	0.46
30	20	0.01	0.35	0.001	0.37	0.0001	0.39
35	20	0.01	0.31	0.001	0.34	0.0001	0.36
40	20	0.01	0.29	0.001	0.32	0.0001	0.34
45	20	0.01	0.27	0.001	0.30	0.0001	0.32

ตารางที่ ข - 4 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (sliding mode) FOSM

sliding mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.58	0.001	0.60	0.0001	0.62
30	5	0.01	0.38	0.001	0.40	0.0001	0.41
35	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.27
40	5	0.01	0.15	0.001	0.17	0.0001	0.18
45	5	0.01	0.09	0.001	0.10	0.0001	0.10

25	10	0.01	0.64	0.001	0.69	0.0001	0.72
30	10	0.01	0.43	0.001	0.47	0.0001	0.50
35	10	0.01	0.29	0.001	0.32	0.0001	0.35
40	10	0.01	0.19	0.001	0.22	0.0001	0.24
45	10	0.01	0.12	0.001	0.14	0.0001	0.16

25	15	0.01	0.71	0.001	0.77	0.0001	0.83
30	15	0.01	0.49	0.001	0.54	0.0001	0.59
35	15	0.01	0.34	0.001	0.38	0.0001	0.42
40	15	0.01	0.23	0.001	0.27	0.0001	0.30
45	15	0.01	0.15	0.001	0.18	0.0001	0.21

25	20	0.01	0.77	0.001	0.86	0.0001	0.93
30	20	0.01	0.54	0.001	0.62	0.0001	0.68
35	20	0.01	0.39	0.001	0.45	0.0001	0.50
40	20	0.01	0.27	0.001	0.32	0.0001	0.36
45	20	0.01	0.18	0.001	0.22	0.0001	0.26

ตารางที่ ข - 5 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (overturning mode) FOSM

overturning mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.38	0.001	0.38	0.0001	0.39
30	5	0.01	0.34	0.001	0.35	0.0001	0.36
35	5	0.01	0.31	0.001	0.32	0.0001	0.33
40	5	0.01	0.28	0.001	0.29	0.0001	0.30
45	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.27

25	10	0.01	0.40	0.001	0.41	0.0001	0.42
30	10	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.39
35	10	0.01	0.34	0.001	0.35	0.0001	0.36
40	10	0.01	0.31	0.001	0.32	0.0001	0.34
45	10	0.01	0.28	0.001	0.30	0.0001	0.31

25	15	0.01	0.41	0.001	0.43	0.0001	0.44
30	15	0.01	0.39	0.001	0.40	0.0001	0.42
35	15	0.01	0.36	0.001	0.38	0.0001	0.40
40	15	0.01	0.33	0.001	0.35	0.0001	0.37
45	15	0.01	0.31	0.001	0.33	0.0001	0.35

25	20	0.01	0.43	0.001	0.45	0.0001	0.47
30	20	0.01	0.41	0.001	0.43	0.0001	0.45
35	20	0.01	0.38	0.001	0.40	0.0001	0.42
40	20	0.01	0.35	0.001	0.38	0.0001	0.40
45	20	0.01	0.33	0.001	0.36	0.0001	0.38

ตารางที่ ข - 6 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (bearing capacity mode) FOSM

bearing capacity mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.38
30	5	0.01	0.29	0.001	0.30	0.0001	0.30
35	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.26
40	5	0.01	0.22	0.001	0.23	0.0001	0.24
45	5	0.01	0.20	0.001	0.21	0.0001	0.22

25	10	0.01	0.39	0.001	0.40	0.0001	0.41
30	10	0.01	0.31	0.001	0.32	0.0001	0.33
35	10	0.01	0.27	0.001	0.28	0.0001	0.30
40	10	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.27
45	10	0.01	0.23	0.001	0.24	0.0001	0.26

25	15	0.01	0.41	0.001	0.43	0.0001	0.44
30	15	0.01	0.33	0.001	0.35	0.0001	0.36
35	15	0.01	0.29	0.001	0.31	0.0001	0.33
40	15	0.01	0.27	0.001	0.29	0.0001	0.31
45	15	0.01	0.25	0.001	0.27	0.0001	0.29

25	20	0.01	0.43	0.001	0.45	0.0001	0.46
30	20	0.01	0.35	0.001	0.37	0.0001	0.39
35	20	0.01	0.31	0.001	0.34	0.0001	0.36
40	20	0.01	0.29	0.001	0.32	0.0001	0.34
45	20	0.01	0.27	0.001	0.30	0.0001	0.32

ตารางที่ ๗ - 7 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (Sliding mode) MCS

sliding mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.58	0.001	0.60	0.0001	0.61
30	5	0.01	0.38	0.001	0.40	0.0001	0.41
35	5	0.01	0.24	0.001	0.26	0.0001	0.27
40	5	0.01	0.15	0.001	0.16	0.0001	0.17
45	5	0.01	0.08	0.001	0.08	0.0001	0.09

25	10	0.01	0.65	0.001	0.70	0.0001	0.72
30	10	0.01	0.44	0.001	0.48	0.0001	0.50
35	10	0.01	0.29	0.001	0.33	0.0001	0.35
40	10	0.01	0.19	0.001	0.21	0.0001	0.23
45	10	0.01	0.10	0.001	0.12	0.0001	0.14

25	15	0.01	0.73	0.001	0.81	0.0001	0.85
30	15	0.01	0.50	0.001	0.57	0.0001	0.61
35	15	0.01	0.35	0.001	0.41	0.0001	0.44
40	15	0.01	0.23	0.001	0.28	0.0001	0.31
45	15	0.01	0.14	0.001	0.17	0.0001	0.20

25	20	0.01	0.81	0.001	0.93	0.0001	1.00
30	20	0.01	0.58	0.001	0.68	0.0001	0.76
35	20	0.01	0.41	0.001	0.50	0.0001	0.56
40	20	0.01	0.28	0.001	0.36	0.0001	0.42
45	20	0.01	0.17	0.001	0.23	0.0001	0.27

ตารางที่ ข - 8 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (overturning mode) MCS

overturning mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.45	0.001	0.46	0.0001	0.46
30	5	0.01	0.42	0.001	0.43	0.0001	0.43
35	5	0.01	0.39	0.001	0.40	0.0001	0.40
40	5	0.01	0.36	0.001	0.37	0.0001	0.37
45	5	0.01	0.33	0.001	0.34	0.0001	0.34

25	10	0.01	0.47	0.001	0.49	0.0001	0.50
30	10	0.01	0.45	0.001	0.46	0.0001	0.47
35	10	0.01	0.42	0.001	0.44	0.0001	0.45
40	10	0.01	0.39	0.001	0.41	0.0001	0.42
45	10	0.01	0.36	0.001	0.39	0.0001	0.40

25	15	0.01	0.50	0.001	0.52	0.0001	0.54
30	15	0.01	0.47	0.001	0.50	0.0001	0.52
35	15	0.01	0.45	0.001	0.48	0.0001	0.50
40	15	0.01	0.42	0.001	0.46	0.0001	0.48
45	15	0.01	0.40	0.001	0.44	0.0001	0.46

25	20	0.01	0.52	0.001	0.55	0.0001	0.57
30	20	0.01	0.50	0.001	0.54	0.0001	0.56
35	20	0.01	0.48	0.001	0.52	0.0001	0.55
40	20	0.01	0.45	0.001	0.50	0.0001	0.53
45	20	0.01	0.43	0.001	0.49	0.0001	0.52

ตารางที่ ข - 9 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ FS (bearing capacity mode) MCS

bearing capacity mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.39
30	5	0.01	0.29	0.001	0.30	0.0001	0.30
35	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.26
40	5	0.01	0.22	0.001	0.23	0.0001	0.24
45	5	0.01	0.20	0.001	0.21	0.0001	0.22

25	10	0.01	0.39	0.001	0.41	0.0001	0.42
30	10	0.01	0.32	0.001	0.33	0.0001	0.34
35	10	0.01	0.28	0.001	0.30	0.0001	0.31
40	10	0.01	0.25	0.001	0.27	0.0001	0.29
45	10	0.01	0.24	0.001	0.26	0.0001	0.27

25	15	0.01	0.42	0.001	0.44	0.0001	0.45
30	15	0.01	0.34	0.001	0.37	0.0001	0.38
35	15	0.01	0.30	0.001	0.33	0.0001	0.35
40	15	0.01	0.28	0.001	0.32	0.0001	0.34
45	15	0.01	0.27	0.001	0.30	0.0001	0.33

25	20	0.01	0.44	0.001	0.47	0.0001	0.49
30	20	0.01	0.37	0.001	0.40	0.0001	0.43
35	20	0.01	0.33	0.001	0.37	0.0001	0.41
40	20	0.01	0.31	0.001	0.36	0.0001	0.40
45	20	0.01	0.30	0.001	0.36	0.0001	0.39

ตารางที่ ข - 10 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (Sliding mode) MCS

sliding mode							
ϕ (degree)	COV_{ϕ} (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.58	0.001	0.61	0.0001	0.62
30	5	0.01	0.38	0.001	0.40	0.0001	0.42
35	5	0.01	0.25	0.001	0.27	0.0001	0.28
40	5	0.01	0.16	0.001	0.17	0.0001	0.18
45	5	0.01	0.09	0.001	0.10	0.0001	0.11

25	10	0.01	0.65	0.001	0.71	0.0001	0.74
30	10	0.01	0.45	0.001	0.49	0.0001	0.52
35	10	0.01	0.30	0.001	0.35	0.0001	0.37
40	10	0.01	0.20	0.001	0.24	0.0001	0.26
45	10	0.01	0.13	0.001	0.16	0.0001	0.18

25	15	0.01	0.73	0.001	0.82	0.0001	0.88
30	15	0.01	0.52	0.001	0.60	0.0001	0.64
35	15	0.01	0.36	0.001	0.44	0.0001	0.48
40	15	0.01	0.26	0.001	0.32	0.0001	0.36
45	15	0.01	0.17	0.001	0.23	0.0001	0.27

25	20	0.01	0.82	0.001	0.95	0.0001	1.03
30	20	0.01	0.59	0.001	0.71	0.0001	0.79
35	20	0.01	0.43	0.001	0.54	0.0001	0.61
40	20	0.01	0.32	0.001	0.42	0.0001	0.48
45	20	0.01	0.23	0.001	0.32	0.0001	0.38

ตารางที่ ข - 11 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (overturning mode) MCS

overturning mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.38	0.001	0.38	0.0001	0.39
30	5	0.01	0.35	0.001	0.35	0.0001	0.36
35	5	0.01	0.32	0.001	0.32	0.0001	0.33
40	5	0.01	0.29	0.001	0.30	0.0001	0.30
45	5	0.01	0.26	0.001	0.27	0.0001	0.27

25	10	0.01	0.40	0.001	0.41	0.0001	0.42
30	10	0.01	0.37	0.001	0.39	0.0001	0.40
35	10	0.01	0.34	0.001	0.36	0.0001	0.37
40	10	0.01	0.32	0.001	0.34	0.0001	0.35
45	10	0.01	0.29	0.001	0.31	0.0001	0.33

25	15	0.01	0.42	0.001	0.44	0.0001	0.46
30	15	0.01	0.40	0.001	0.42	0.0001	0.44
35	15	0.01	0.37	0.001	0.40	0.0001	0.42
40	15	0.01	0.35	0.001	0.38	0.0001	0.40
45	15	0.01	0.32	0.001	0.36	0.0001	0.38

25	20	0.01	0.44	0.001	0.48	0.0001	0.50
30	20	0.01	0.42	0.001	0.46	0.0001	0.48
35	20	0.01	0.40	0.001	0.44	0.0001	0.47
40	20	0.01	0.38	0.001	0.43	0.0001	0.46
45	20	0.01	0.36	0.001	0.41	0.0001	0.44

ตารางที่ ข - 12 ผลการคำนวณจากการหาค่าเสถียรภาพแบบ SM (bearing capacity mode) MCS

bearing capacity mode							
ϕ (degree)	COV $_{\phi}$ (%)	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$	P_f	$\frac{L}{H}$
25	5	0.01	0.37	0.001	0.38	0.0001	0.39
30	5	0.01	0.29	0.001	0.30	0.0001	0.30
35	5	0.01	0.25	0.001	0.26	0.0001	0.26
40	5	0.01	0.22	0.001	0.23	0.0001	0.24
45	5	0.01	0.20	0.001	0.21	0.0001	0.22

25	10	0.01	0.39	0.001	0.41	0.0001	0.42
30	10	0.01	0.32	0.001	0.33	0.0001	0.34
35	10	0.01	0.28	0.001	0.30	0.0001	0.31
40	10	0.01	0.25	0.001	0.27	0.0001	0.28
45	10	0.01	0.24	0.001	0.26	0.0001	0.27

25	15	0.01	0.42	0.001	0.44	0.0001	0.45
30	15	0.01	0.34	0.001	0.37	0.0001	0.38
35	15	0.01	0.30	0.001	0.33	0.0001	0.35
40	15	0.01	0.28	0.001	0.32	0.0001	0.33
45	15	0.01	0.27	0.001	0.30	0.0001	0.33

25	20	0.01	0.44	0.001	0.47	0.0001	0.49
30	20	0.01	0.37	0.001	0.40	0.0001	0.42
35	20	0.01	0.33	0.001	0.37	0.0001	0.40
40	20	0.01	0.31	0.001	0.36	0.0001	0.39
45	20	0.01	0.30	0.001	0.36	0.0001	0.39

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายศุจิวิศว์ จริยะเลอพงษ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910120043

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกฏึกณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2549-2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ศุจิวิศว์ จริยะเลอพงษ์, ธนิต เฉลิมยานนท์ และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2551). การออกแบบกำแพงกันดิน โดยความน่าจะเป็น: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14 - 16 พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี