



การประเมินความไวตัวของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติสำหรับระบบการเตือนภัย  
Quantifying Sensitivity of Natural Slope Stability Analysis for  
Landslide Warning System

ชลดา กาญจนกุล  
Chollada Kanjanakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering  
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประเมินความไวตัวของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติสำหรับระบบการเตือนภัย  
Quantifying Sensitivity of Natural Slope Stability Analysis for  
Landslide Warning System

ชลดา กาญจนกุล  
Chollada Kanjanakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering  
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      การประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ที่ดินพิบัติธรรมชาติสำหรับ  
 ระบบการเตือนภัย  
 ผู้เขียน                                      นางสาวชลดา กาญจนกุล  
 สาขาวิชา                                    วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูอุปการ)

.....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ดนุพล ตันนโยภาส)

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูอุปการ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุญการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวชลดา กาญจนกุล)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวชลดา กาญจนกุล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติสำหรับระบบการเตือนภัย
ผู้เขียน	นางสาวชลดา กาญจนกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและการซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินธรรมชาติถือเป็นการศึกษาที่สำคัญ เพื่อนำมาวิเคราะห์ลาดดินพิบัติโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณภูมิประเทศเขตร้อน ค่าการซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นและเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในลาดดิน โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่ออธิบายกระบวนการซึมผ่านของน้ำและการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ลาดดินออกเป็น 2 ส่วน โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินในกรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช จะทำการวิเคราะห์หาค่าการซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดินที่ก่อให้เกิดค่าเพิ่มลดของแรงดันน้ำในมวลดิน และเสถียรภาพของลาดดิน ค่าความสูงและความลาดชันของลาดดินอ้างอิงมาจาก ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS), ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ส่วนค่าเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) ที่ถูกคำนวณได้โดยสมการ van Genuchten และ กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ (Intensity-duration-frequency curve) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดิน โดยในโปรแกรม SEEP/W ได้นำหลักการของ Finite element analysis มาใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงในค่าแรงดันน้ำในมวลดินอันเนื่องมาจากน้ำฝนและวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดิน และในโปรแกรม SLOPE/W จะใช้คำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยใช้วิธีการของ Bishop's Simplified Method และ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (The antecedent precipitation index, API) ผลการศึกษาพบว่า ลาดดินเกิดการพิบัติ โดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน เท่ากับ 380 มิลลิเมตร ในการศึกษาความไม่แน่นอนของตัวแปรในลาดดินธรรมชาติ ค่าความลาดเอียงในลาดดิน( $\beta$ ), ค่าความหนาในลาดดิน (t), ชนิดของดิน, หน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ), ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (c), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน ( $\phi^b$ ) และค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ในค่าเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน คือ ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) และค่าความลาดเอียงในลาดดิน ( $\beta$ )

**คำหลัก:** ลาดดินพิบัติ, การศึกษาความไม่แน่นอน, ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน

**Thesis Title** Quantifying Sensitivity of Natural Slope Stability Analysis for  
Landslide Warning System  
**Author** Miss Chollada Kanjanakul  
**Major Program** Civil Engineering  
**Academic Year** 2015

### ABSTRACT

Uncertainty of material properties and transient seepage in unsaturated soil slope are significant triggering factors in rainfall-induced landslides, especially in tropical regions. Rainfall infiltration leads to the decrease in stabilizing effect because of the increase in positive pore-water pressures. SEEP/W and SLOPE/W have been widely used, respectively to describe frameworks for understanding transient seepage in soil slope and to perform slope stability analyses, and were used in this study. The main concepts and conclusions of this report can divide in two parts; base case analysis and sensitivity analysis. For base case analysis, a landslide in southern Thailand was investigated by modeling the process of rainfall infiltration under negative and positive pore-water pressures and their effects on slope stability. GIS and geotechnical laboratory results were used as input parameters. The van Genuchten soil water characteristic curve and unsaturated permeability function were used to estimate surface infiltration rates. Rainfall intensities for 30-year return period were adopted from Thailand intensity-duration-frequency curve. For transient condition, finite element analysis in SEEP/W was employed to model fluctuations in pore-water pressure during a rainfall, using the computed water infiltration rates as surface boundary conditions. SLOPE/W employing Bishop simplified method was then carried out to compute their factors of safety; and the antecedent precipitation index (API) calculated. Heterogeneous slope at the site became unstable at an average critical API ( $API_{cr}$ ) of 380 mm. For sensitivity analysis, type of soil, thickness of soil, angle of slide, soil unit weight, effective cohesion, effective angle of internal friction, angle of friction with respect to matric suction in unsaturated soils were used to estimate  $API_{cr}$ . Moreover, Fitting parameters from many soil-water characteristic curve (SWCC) and permeability equations were used to find out that which parameter has most effect on landslide failure. Most significant and uncertainties parameters for  $API_{cr}$  were effective angle of internal friction and angle of slide.

**Keywords:** Landslides, Sensitivity Analysis, Unsaturated soil, Antecedent Precipitation Index (API)

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการและรองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี ตลอดการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.دنุพล ตันนโยภาส กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ใ้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณน้องโจ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คอยชี้แนะและให้คำปรึกษาทางด้านการใช้โปรแกรม Geostudio เป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ น้ำใจและกำลังใจจากพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆ น้องทิพย์ น้องปาล์ม น้องอ้อฟ จากศูนย์วิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติภาคใต้ (Nadrec) คุณศิริพร คุณไชนูน น้องแทน น้องริส น้องเล็กเล็ก น้องอาร์ม พี่ตัง น้องเล็กใหญ่ นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมโยธา และอีกหลายๆท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญที่สุด ที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา กำลังใจและความช่วยเหลือจากคุณวนิชา ตันศิริ อาจารย์ปิติพัฒน์ และ อาจารย์รัตตินันท์ บุญยสิทธิ์วิกุล พี่ปอ ปี่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัว กำลังใจและความหวังเี่ยวจากนายแพทย์กัมปนาท เมืองวงษ์ เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ซึ่งข้าพเจ้าจะระลึกถึงบุคคลเหล่านี้อยู่ในใจตลอดไป

ชลดา กาญจนกุล



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	
2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช	6
2.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน	17
2.3 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน	28
2.4 การประเมินความไวตัวของ การวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติ	28
2.5 Stochastic approach to slope stability analysis	41
2.6 ระบบการเตือนภัยในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน	
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา	46
3.2 การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน	48
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ	53
3.4 การประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติ	54
4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์	
4.1 ผลที่ได้จากการกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา	59
4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินและการพฤติกรรม การซึมผ่านของน้ำฝนเพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น	61

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลที่ได้จากการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพ	66
<b>5 สรุปผลการวิจัย</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	88
<b>บรรณานุกรม</b>	90
<b>การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์</b>	
ก. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	97

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	Characteristics of slope stability analysis (Duncan and wright, 1996)	10
2.2	Summary of Inherent Variability of Strength Properties	19
3.1	Fitting parameter in SWCC and K Function	51
3.2	Relationship between matric suction and VWC	52
3.3	Relationship between matric suction and permeability	52
3.4	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน Unsoda 4660,4651 1062,1111,1381 และดินชนิด SP-SM ในกรณีพื้นที่ศึกษา	55
3.5	Sensitivity analysis table	58
4.1	Sensitivity analysis table parameters	60
4.2	Relationship between factor of safety and rainfall intensity for loamy sand at different time	64
4.3	Summary of sensitivity analysis with sensitivity indexes	74
4.4	The location of GWT	74
4.5	Categories of water table location at slope failure in slope angles	77
4.6	Categories of water table location at slope failure in $\phi$	80
4.7	Categories of water table location at slope failure in $\gamma$	83
4.8	Relationship between probability of failure and rainfall intensity for loamy sand at different time	87

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 Monthly rainfalls (30-year return period between 1987-2016) at Khao Luang, Nakhon Si Thammarat province, Thailand	4 5
2.2 Study site and its geological depositions	5
2.3 Grain size distribution curves of the soil at various positions on the slip surface	6 6
2.4 Differences in assumptions regarding side forces in methods of slope	7
2.5 Forces acting on a typical slice	8
2.6 Behaviour of a pile in drained soil a) soil with $\nu = \phi'$ b) $\nu = 0^\circ$	13
2.7 Cohesive test slope problem	15
2.8 Comparison of the probabilities of failure predicted by RFEM and by Finite element the mean is fixed at $\mu_c = 0.25$	16 16
2.9 Typical simulations in 2D models showing the generation of voids at low and high spatial correlation lengths with different porosities.	16 16
2.10 Uncertainty in Soil Properties	17
2.11 Mechanism of rainfall-induced slope failure	20
2.12 Extended Mohr-Coulomb envelope for unsaturated soil (Fredlund and Rahardjo, 1993)	26 26
2.13 Free body diagram of slope	27
2.14 Flow chart of probabilistic slope stability analysis	29
2.15 Beam with Vertical Load (After Harr, 1987)	31
2.16 Uniform distribution	33
2.17 Normal distribution	34
2.18 Distribution by calculation Realization of X	35
2.19 Comparison with UBTMA and analytical upper bound	36
2.20 Relationship between $\lambda$ (a) and $\eta$ (b) and $COV_\phi$ with $P_f = 0.0001$	36
2.21 Scatter plot data collected for six numbers of slopes	38
2.22 Histogram of FOS calculated in probabilistic analysis	38
2.23 The Jame Bay Dyke	39
2.24 (a) Conditional probability density function (PDF)	39
2.25 (b) Conditional probability density function (PDF)	40
2.26 Soil properties for three examples used in this study	40
2.27 Geometry of slope and slip surfaces in example 3	41

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 Interpreted threshold curves for landsliding in wollongong, superimposed on annual recurrence interval curves	42
2.29 Phase relationships for a soil	43
3.1 Research methodology	46
3.2 Slope geometry and soil property for the site	47
3.3 Relationship between matric suction and shear stress of geotechnical Laboratory	48
3.4 Flow chart of seepage analysis methodology	48
3.5 Permeability from geotechnical laboratory	49
3.6 Relationship between matric suction (KPa) and volumetric water content ( $\theta_w$ )	56
3.7 Relationship between matric suction (KPa) and coefficient of permeability, $K_w$	56
4.1 Results from SEEP/W and SLOPE/W	60
4.2 Section A-A, B-B and C-C (Upper, middle and bottom) at Sichon	61
4.3 Time-step versus factor of safety during the rainfall	61
4.4 Degree of saturation versus depth	62
4.5 Pore-water pressure developments during the six time-steps	64
4.6 Shear strength and pore-water pressure versus horizontal slip failure distance	64
4.7 The critical rainfall intensity	66
4.8 Relationship between A.P.I. (cm) and SWCC equation	67
4.9 Location of water table when the minimum factor of safety occurs	69
4.10 Relationship between volumetric water content and matric suction at different SWCC Equation	70
4.11 Relationship between A.P.I (mm) and van genuchten SWCC equation with Different thickness (dm) and slope angle (degree) for sand (UNSODA 1062)	71

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	Effects on A.P.I (mm) of variation ranges in $c'$ (kPa), $\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ ), $\phi$ (degree), for sand.	72
4.13	The sensitivity indexes (I') for $c'$ (kPa), $\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ ), $\phi$ (degrees), thickness (dm), and slope angle (degree ), for sand.	73
4.14	Relationship between A.P.I (mm) with different soil slope	75
4.15	Pore water pressure profiles for three slope angles	76
4.16	Relationship between A.P.I (mm) with different thickness of soil slope (decimeter)	78
4.17	Pore water pressure profiles for three thickness of soil	78
4.18	Relationship between A.P.I (mm) with different $\phi$	79
4.19	Pore water pressure profiles for three $\phi$	79
4.20	Relationship between A.P.I (mm) with different $\phi^b$	81
4.21	Pore water pressure profiles for three $\phi^b$	81
4.22	Relationship between A.P.I (mm) with different $\gamma$	82
4.23	Pore water pressure profiles for three different $\gamma$	82
4.24	Relationship between resisting and driving forces (a)	84
4.25	Relationship between resisting and driving forces (b)	85
4.26	Probabilistic slope stability analysis	85
4.27	Relationship between probability of failure and I.R. at different time	86



### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

API	=	Antecedent Precipitation Index
$API_{(t)}$	=	API of a Current Period (mm)
$API_{(t-1)}$	=	API of the previous period (mm)
a , b	=	Numerical Constant
$b_n$	=	ความกว้างของมวลดินในลาดดินที่ทำการแบ่ง
c	=	ค่ากำลังเฉือนของมวลดิน (Shear Strength)
c'	=	ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective Cohesion of Soil)
CIUC	=	Consolidated Isotropic Undrained Triaxial Compression Test
COV	=	สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of Variation)
DS	=	Direct Shear Test
Et	=	Evaporation at Short Shrift
$E_i, E_{i+1}$	=	แรงในแนวราบของ
e	=	ค่า Model Error
$g(x_i)$	=	ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย
F.S.	=	อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)
$H_{cr}$	=	The Critical Thickness of The Soil Layer
$h_T$	=	The Hydraulic or Total Head
k	=	A Fitting Parameter
$K_r$	=	Relative Hydraulic Conductivity
$K_s$	=	Saturated Hydraulic Conductivity
$k_{wx}, k_{wy}$	=	Hydraulic Conduvtivity with Respect to Water as a Function of Matric Suction, in x and y Directions Respectively
$K_{(t-1)}$	=	A Recession Constant of The Previous Period.
m,n	=	Constant Parameter in van-Genuchten Equation
$m_w$	=	The Slope of The Soil Water Characteristic Curve (SWCC)
N	=	จำนวนครั้งในการทำซ้ำ (Numbers of Iteration)
n	=	จำนวนชั้นส่วนที่ทำการแบ่งมวลดินที่อยู่ในส่วนของวงกลม (1 2 3...)
$P_{(t)}$	=	Precipitation of The Current Period (mm)
$P_f$	=	ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of Failure)
$p_-$	=	แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน $x = x_-$ ของคาน
$p_+$	=	แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน $x = x_+$ ของคาน
$\theta_N$	=	The Normalised Water Content
SD	=	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)



$S_u$	=	ค่ากำลังเฉือนของมวลดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)
$S_r$	=	The Degree of Saturation
TC	=	Triaxial Compression Test
$T_s$	=	Surface Tension
t	=	Elapsed Time
W	=	The Soil Moisture at Evaporation Time.
$\theta_w$	=	Volumetric Water Content of Soil
$\theta_r$	=	The Volumetric Water Contents at Residual Conditions Respectively
$\theta_s$	=	The Volumetric Water Contents at The Saturated
q	=	The Applied Boundary Flux
u	=	Pore Water Pressure
$u_a$	=	Pore Air Pressure
$(u_a - u)$	=	ค่าแรงดูดน้ำในมวลดิน (The Matric Suction)
$(u_a - u_w)$	=	The Matric Suction.
UC	=	Unconfined Compression Test
UU	=	Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test
W	=	น้ำหนักของมวลดินแต่ละชั้นที่ทำการแบ่งมวลดิน (Slice Weight)
$W_n$	=	น้ำหนักของมวลดินแต่ละชั้นที่เราทำการแบ่ง
$X_i, X_{i+1}$	=	แรงในแนวตั้งของชั้นมวลดิน (Vertical Side Force)
$Z_i, Z_{i+1}$	=	แรงเฉือนบริเวณฐานของชั้นมวลดิน (Mobilized Shear Forces at Base of Slice)
$\sigma$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
$\sigma_n$	=	ความเค้น (Normal Stress)
$\phi'$	=	ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (Effective Friction Angle of Soil)
$\phi^b$	=	ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงตั้งของน้ำในดิน (Friction Angle of The Soil with Respect to Changes)
$\mu$	=	ค่าเฉลี่ย (Mean)
$\eta$	=	Porosity of Soil
$\Psi$	=	Soil Matric Suction
$\Psi_a$	=	Air Entry Suction
$\lambda$	=	A Curve Fitting Parameter and is A Constant

$\alpha$	=	A Function of Maximum Pore Size
$\gamma_w$	=	Unit Weight of Water
$\tau$	=	The Shear Strength of Unsaturated Soil
$\alpha$	=	Slope Angle with Respect to Degree of Saturation

**การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก.**

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18  
ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ 8 - 10 พฤษภาคม 2556

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวชลดา กาญจนกุล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5310130013

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
การศึกษา		
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2547
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค))	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2553-2554

ทุน Erasmus Mundus European Commission ปีการศึกษา 2554-2555

## ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

ศูนย์ราชการใหม่ เขต โคกเคี้ยว ตำบล โคกเคี้ยว จังหวัดนราธิวาส 96000

โทรศัพท์ 0-7370-9030 มือถือ 0-8648-82616

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชลดา กาญจนกุล, ธนิต เถลิษยานนท์ และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2551). การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยความน่าจะเป็น: การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14 - 16 พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี

Chollada Kanjanakul, Tanan Chub-uppakarn (2016). Comparison between Numerical and Limit Equilibrium Methods for Slope Stability Analysis. The National Convention on Civil Engineering (NCCE) 18, May 8-10, 2016 The Empress Hotel Chiangmai

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

การพังทลายในลาดดินธรรมชาติก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งมีที่มาจากหลายสาเหตุไม่ว่าจะเป็น ประวัติการถูกกัดเซาะ (erosional history), สภาพทางธรณีวิทยา และการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ (Casagli et al., 2006) ในลาดดินธรรมชาติ วิศวกรธรณีเทคนิคส่วนใหญ่ไม่ได้ตระหนักถึงความไม่แน่นอนในตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปสู่การลดความน่าเชื่อถือที่ได้จากการประเมินความปลอดภัย เพราะในลาดดินเดียวกันแต่ไม่ได้อยู่ในบริเวณเดียวกันก็อาจนำไปสู่ปัจจัยด้านความเสี่ยง และให้ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัยที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับความแปรปรวนอันเนื่องมาจากตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบริเวณที่ทำการพิจารณาหรืออัตราส่วนปลอดภัยไม่สามารถเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดินธรรมชาติทั้งหมดได้ (Li and Lumb, 1987) น้ำฝนเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้เป็นเกณฑ์วัดในการพังทลายของลาดดิน (Zhang & Tang, 2011) รูปแบบทั่วไปในการพิบัติมักจะเป็นการพังทลายของลาดดินแบบระยะสั้น (short-term) ในขณะที่ฝนตกหนักและระยะยาว (long-term) เมื่อฝนตกเบาถึงปานกลาง (Guzzetti et al, 2007; Corominas, 2001; Wieczorek, 1996).

ดินถล่มมักเกิดขึ้นบ่อยครั้งทางภาคใต้ของประเทศไทย วิศวกรได้ประยุกต์ใช้ความรู้หลายๆด้านสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อใช้ในการเตือนภัย แต่ปัจจัยที่เป็นตัวการสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การแทรกซึมของน้ำใต้ผิวดินและกระบวนการสูญเสียเสถียรภาพในมวลดินอันเนื่องมาจากแรงผลักดัน (Driving force) ที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ความชื้นฝน, สภาพชั้นดิน, สภาพภูมิอากาศ (D'Amato Avanzi et al, 2009; Giannecchini, 2006; Crosta & Frattini, 2003; Iverson, 2000; Caine, 1980) ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ (Critical antecedent precipitation index (API<sub>c</sub>)) ในทางปฐพีกลศาสตร์ ถูกใช้เพื่ออธิบายปริมาณการเก็บสะสมของน้ำในมวลดินเมื่อลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพและใช้เป็นเกณฑ์วัดการอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน (Degree of saturation) ที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงต้านและแรงผลักดัน (Resisting and driving forces) ในปัญหาของเสถียรภาพในลาดดิน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเสถียรภาพของดินในอำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ สำหรับใช้ในระบบการเตือนภัย นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ รวมไปถึงค่าความไม่แน่นอนในตัวแปรกำหนด ( Fitting parameter ) ของ SWCC และ permeability function ที่ได้มาจากการคำนวณในสมการของ van Genuchten, Fredlund&Xing, Wylie&Gardner และ Brook&Corey ในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (Unsaturated slope stability)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- ศึกษาเสถียรภาพของดินในอำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ สำหรับใช้ในระบบการเตือนภัย
- ศึกษาความไม่แน่นอนในตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ (ชนิดของดิน, ความหนาของชั้นดิน, ความลาดเอียงในลาดดิน, หน่วยน้ำหนักของดิน, ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน) โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ
- ศึกษาความไม่แน่นอนในตัวแปรกำหนด ( Fitting parameter ) ของ SWCC และ permeability function

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินในกรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช
- ค่าความสูงและความลาดชันของลาดดินอ้างอิงมาจาก ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการในกรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช ถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพ
- ตัวแปรกำหนด ( Fitting parameter ) ของ SWCC และ permeability function ในสมการ van Genuchten, Fredlund&Xing, Wylie&Gardner และ Brook&Corey ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดินและความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ
- ค่าปริมาณน้ำฝน 30 ปีย้อนหลังตามระยะเวลาที่ลาดชันกรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราชเคยเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม ของกราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบการเกิดซ้ำ (Intensity-duration-frequency curve) ถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดิน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 ผู้ที่ศึกษาต้องมีความเข้าใจในการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ โดยผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดและการทบทวนวรรณกรรม ดังนี้

#### - บทนำ

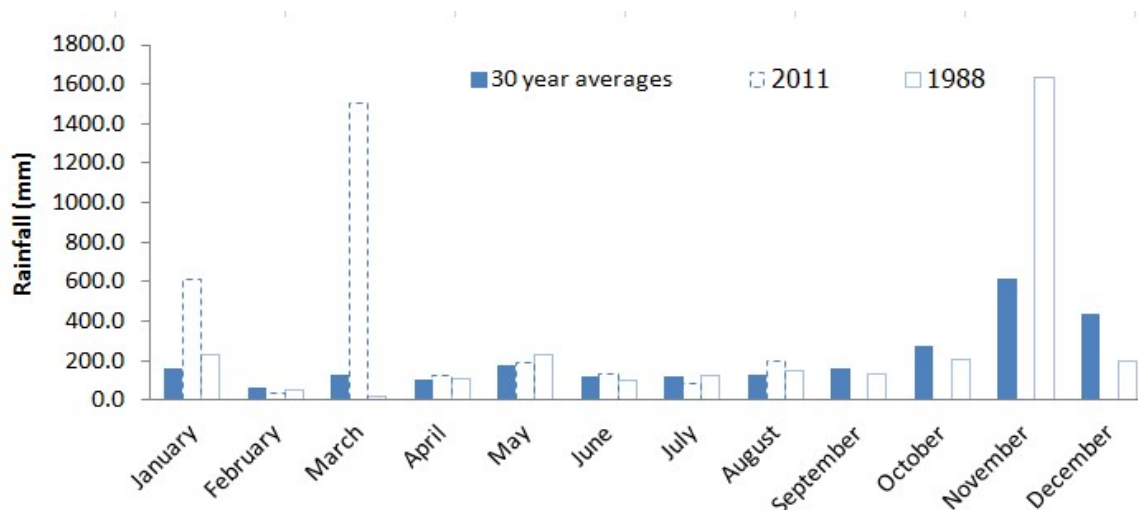
การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินอันเนื่องมาจากน้ำฝนเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วไปในลาดดินธรรมชาติบริเวณประเทศเขตร้อนและกลายเป็นงานวิจัยที่สำคัญในทั่วโลกโดยทั่วไปมักจะพิจารณาความเสียหายในลาดดินที่เกิดอยู่กับที่ (Residual soil) และเกิดการพิบัติในลาดดินแบบตื้น (Muhammad, 2015) อิทธิพลอันเนื่องมาจากการซึมผ่านของน้ำฝนนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันน้ำและการสูญเสียเสถียรภาพในลาดดิน

งานวิจัยมากมายได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) และลักษณะพฤติกรรมทางด้านอุทกวิทยา จากการประยุกต์ใช้เทคนิคเกี่ยวกับการวัดค่า API และการแนะนำค่า delay factor ในลุ่มน้ำทั้ง 8 แห่ง ในพื้นที่ Achaia-Peloponessos ทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือ Nikas et al. (2007) พบว่า ความล่าช้าในการไหลบ่าของน้ำในลุ่มน้ำส่งผลกระทบต่อการวัดค่าน้ำฝนสะสมวิกฤติได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของธรณีสัณฐานและอุทกวิทยาของลุ่มน้ำ Beschta (1990) เสนอข้อมูล input-output สำหรับ กระบวนการจำลองการไหลซึมผ่านของน้ำ (peakflow simulation) ในขณะที่เกิดพายุฝนโดยใช้หลักการวัดปริมาณสะสมของน้ำฝนและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จาก hydrograph ในสันปันน้ำขนาด 865-hectare บนเกาะฮาวาย Chao et al. (2012) ศึกษาผลกระทบของการบ่อน้ำพารามิเตอร์ที่สำคัญในแบบจำลองผลต่างทางชลศาสตร์ (The hydraulic hysteresis model) รวมไปถึงการซึมผ่านของน้ำในดินอิ่มตัว (The saturated hydraulic conductivity), ค่าตัวแปรคงที่ในสมการเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของ van Genuchten บนการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน โดยค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดในแบบจำลองผลต่างทางชลศาสตร์ คือ ค่าความดันของเหลววัดจากเหนือระดับอ้างอิง (the hydraulic head) Chiu et al. (2012) เสนอใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นแบบเบย์ (Bayesian framework) เพื่อใช้ในการประเมินฟังก์ชันความถี่ในการกระจายตัว (the updated probability density function) ของความไม่แน่นอนในตัวแปรของเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยเลือกใช้สมการของ van Genuchten พิจารณาลาดดิน 3 ชนิด คือ sand, loamy sand และ sandy loam จากการวิเคราะห์พบว่า fitting parameters ในตัวแปรของเส้นอัตราลักษณะของดินและการเปลี่ยนแปลงชนิดเนื้อดินมีความไม่แน่นอนต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งคู่

ในบทที่ 2 ผู้ที่ศึกษาต้องมีความเข้าใจในการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ โดยผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดและการทบทวนวรรณกรรม ดังนี้

## 2.1 กรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ ลีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช (Study site)

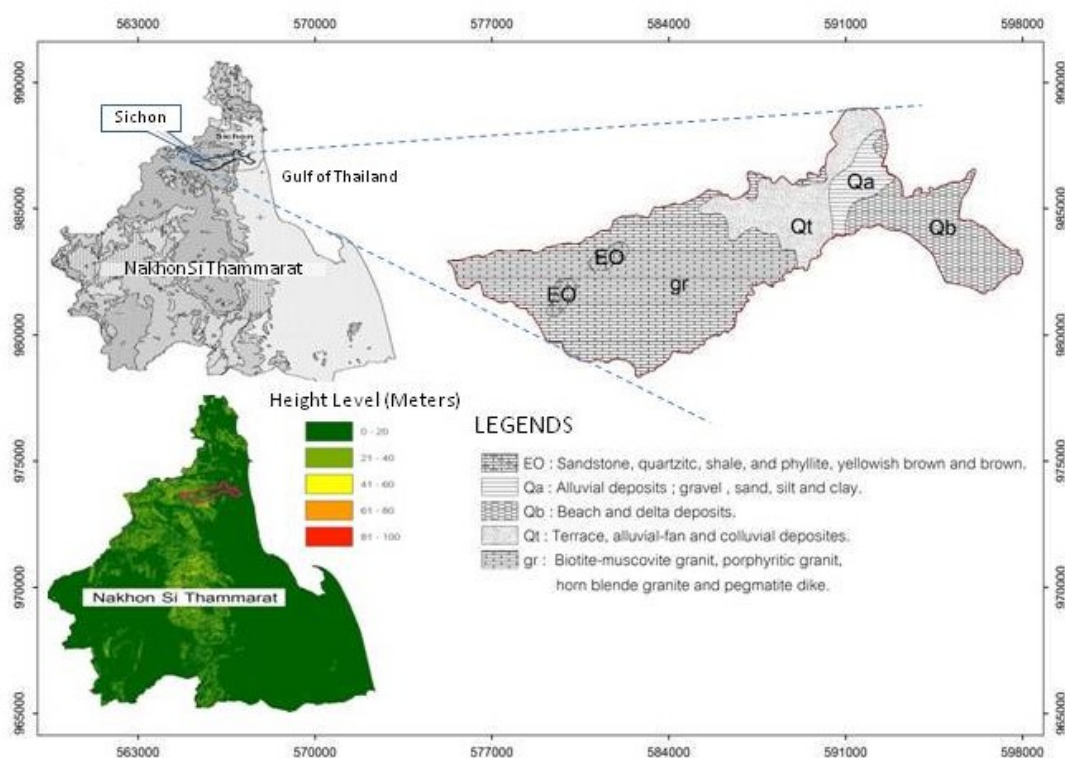
เทือกเขาหลวง จังหวัด นครศรีธรรมราช ตั้งอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทยเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดลาดดินถล่มสูงเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากพายุฝนโดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี 2,500 ถึง 4,000 มิลลิเมตร พิจารณาจากค่าน้ำฝนสะสมในรอบ 30 ปีของการเกิดซ้ำ (ปี พ.ศ. 2529-2559) ซึ่งพื้นที่นี้เคยเกิดลาดดินถล่มครั้งใหญ่ 2 ครั้งด้วยกัน ครั้งแรกในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2530 โดยมีค่าปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย มากกว่า 1,600 มิลลิเมตร ส่วนครั้งที่ 2 เกิดขึ้นในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 โดยมีค่าปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย ประมาณ 1,600 มิลลิเมตร อ้างอิงจากกราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ กรมชลประทาน พ.ศ. 2554 (Thailand Royal Irrigation Department, 2011) โดยทั่วไปฝนในบริเวณนี้มักจะตกหนักในช่วงเดือน ตุลาคมถึงธันวาคม ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนสะสมมากถึง 50% เทียบกับปริมาณน้ำฝนสะสมตลอดทั้งปี ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังในเดือน พฤศจิกายนประมาณ 600 มิลลิเมตรในขณะที่เดือนมีนาคมมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังประมาณ 100 มิลลิเมตร แต่ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 เกิดการถล่มของดินโดยที่มีพายุฝนตกหนักเกิดขึ้นอย่างผิดฤดูกาลโดยมีปริมาณน้ำฝนสะสมเฉลี่ย ประมาณ 1,500 มิลลิเมตร และมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤต (รัชพลและคณะ, 2556) เท่ากับ 388 มิลลิเมตร โดยเริ่มจากค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินธรรมชาติ 190 มิลลิเมตรจากที่กล่าวมาจะเห็นว่าปริมาณน้ำฝนมีบทบาทสำคัญที่ทำให้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินเพิ่มขึ้นและค่าเสถียรภาพในลาดดินลดลง



รูปที่ 2.1 Monthly rainfalls (30-year return period between 1987-2016) at Khao Luang, Nakhon Si Thammarat province, Thailand



นอกจากนี้แนวเทือกเขาหลวงซึ่งตั้งพาดผ่านแนวเหนือ-ใต้ของทะเลฝั่งทะเลอ่าวไทย (รูปที่ 2.2) มีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 600 ตารางกิโลเมตรและยอดเขามีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 1,835 เมตร ซึ่งเป็นแนวเทือกเขาที่สูงที่สุดในภาคใต้และจากลักษณะทางภูมิประเทศจะเห็นว่าเทือกเขาหลวงรับอิทธิพลน้ำฝนมาจากชายฝั่งทะเลทั้งทางด้านตะวันออกและตะวันตก ลักษณะทางธรณีวิทยา พบว่าลาดดินโดยส่วนใหญ่จะเป็นหินอัคนี ของยุค จูราสสิครีเทเชีย (Igneous rocks of the Jurassic-cretaceous Age) โดยจะเกิดการผุร่อนและแปรสภาพไปตามกาลเวลาเป็นหินแกรนิต อ้างอิงระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) จากศูนย์วิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติภาคใต้ (Nadrec) และการสำรวจพื้นที่กรณีศึกษาโดย รัชพลและคณะ (2556) พบว่าดินมีความสูง 34 เมตรและความลาดเอียง 26 องศา



รูปที่ 2.2 Study site and its geological depositions

รัชพลและคณะ (2556) วิเคราะห์ขนาดมวลรวม (Grain size distribution) ที่ได้มาจากการเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งบน T (Top), ตำแหน่งกลางช่วงบน  $M_1$  (Medium, Upper), ตำแหน่งกลางช่วงล่าง  $M_2$  (Medium, Lower) และ ตำแหน่งล่าง B (Bottom) ดังรูปที่ 2.3 พบว่าแต่ละตำแหน่งมีลักษณะการคละกันของเม็ดดินและกายภาพที่แตกต่างกันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยา เมื่อเวลาผ่านไปลาดหินแกรนิตจะย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นดินเหนียวปนทราย (Silt) และ ดินทราย (Sand) โดยตัวอย่างดินตำแหน่งบนถูกจัดหมวดหมู่เป็นดินประเภท Poorly graded sand– silty sand (SP-SM) ภายใต้ระบบการจำแนกดิน (Unified soil

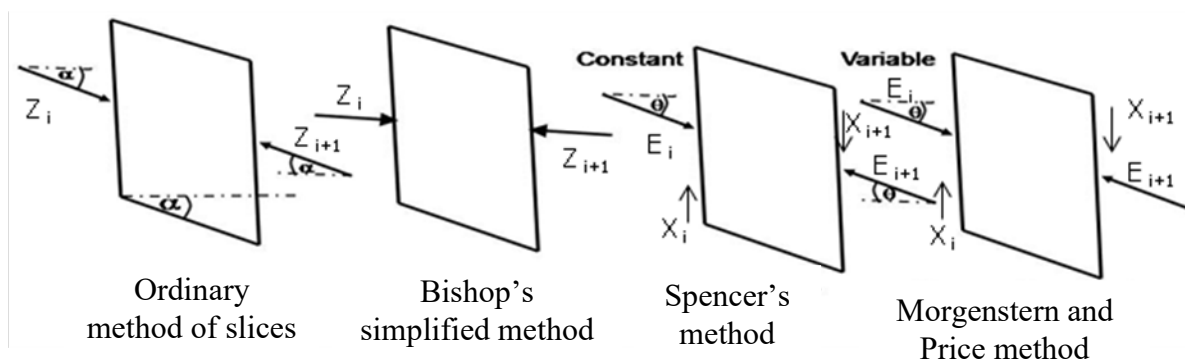


## 2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันแบบดั้งเดิม (Conventional Slope Stability Analysis)

โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันแบบดั้งเดิม มีที่มาจากการการวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบ Deterministic analysis ซึ่งคำนวณหาค่า อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) โดยพิจารณา สมดุลของแรงต้าน (Resisting force) ต่อแรงผลัก (Driving force) ดังสมการที่ 2.1

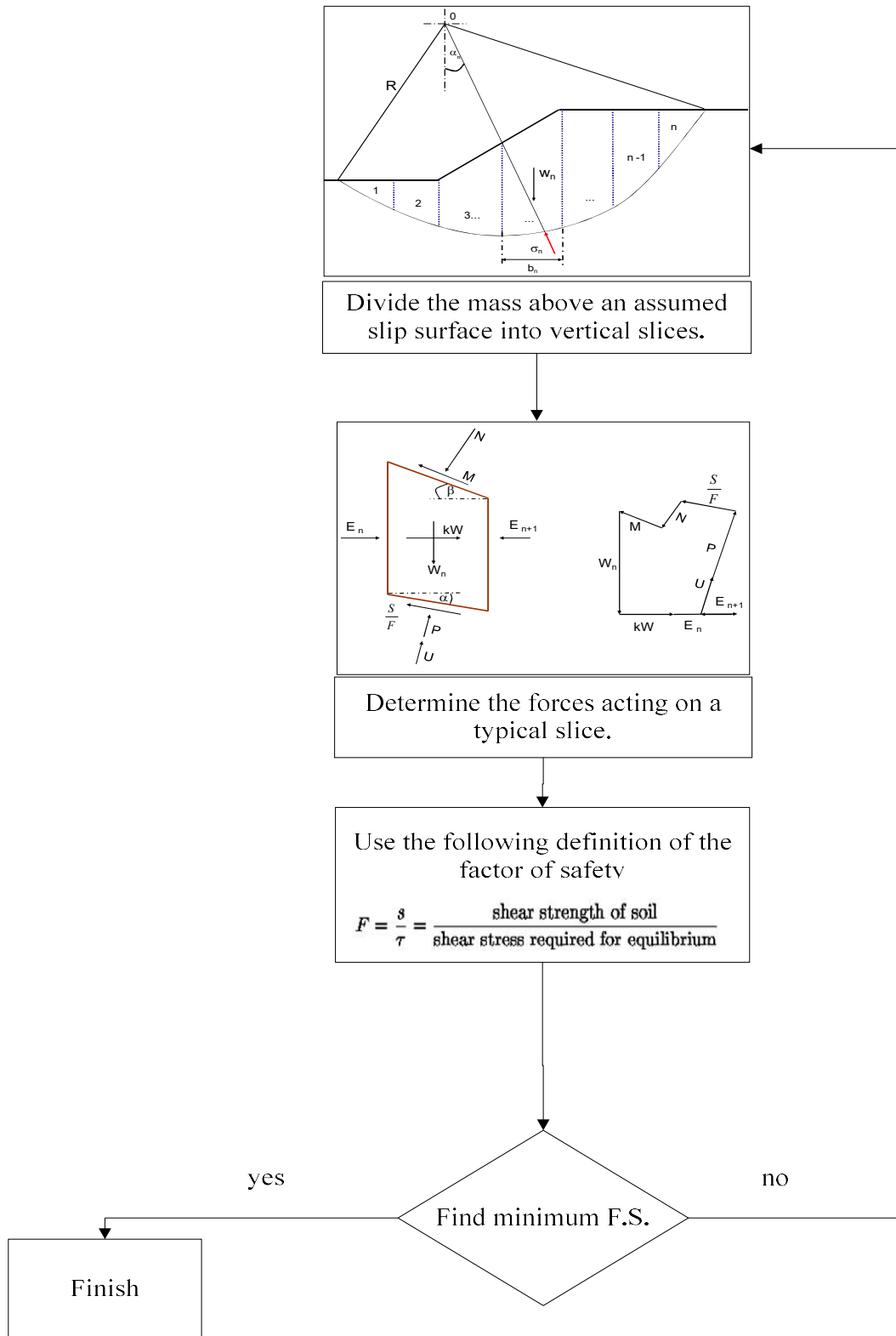
$$F.S. = \frac{\sum \text{Resisting moments}}{\sum \text{Overturning moments}} \quad (2.1)$$

โดยวิธีการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะทำการแบ่งส่วนของมวลดินออกเป็นชั้นบางๆ ในแนวตั้งแรงย่อยต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการแบ่งมวลดินทั้งในแนวราบและแนวตั้งจะถูกนำมาพิจารณาสมดุลโดยขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ของวิศวกรแต่ละคน ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Differences in assumptions regarding side forces in methods of slope

เมื่อ  $Z_i, Z_{i+1}$  = แรงเฉือนบริเวณฐานของชั้นมวลดิน (mobilized shear forces at base of slice),  $X_i, X_{i+1}$  = แรงในแนวตั้งของชั้นมวลดิน (vertical side force),  $E_i, E_{i+1}$  = แรงในแนวราบของชั้นมวลดิน (horizontal side force) วิเคราะห์สมดุลแรงผลักต่อแรงต้านโดยแรงที่ทำการพิจารณา ในส่วนใหญ่นั้นก็คือ แรง  $X$  และ  $E$  รูปที่ 2.5 แสดงถึงวิธีการคำนวณ อัตราส่วนปลอดภัยโดยพิจารณา สมดุลเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ



รูปที่ 2.5 Forces acting on a typical slice

เป็นเวลาหลายปี ที่วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้สมดุลของแรงถูกพัฒนาขึ้นโดยวิศวกรหลายคน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ในที่นี้การวิเคราะห์ในสภาวะสมดุล (Limit equilibrium methods) เป็นวิธีที่มีคุณลักษณะเหมาะสมที่สุดสำหรับวิศวกรเมื่อลองเปรียบเทียบเหตุผลกับวิธีการวิเคราะห์อื่นๆ (Duncan, 1996) เพราะเมื่อดูตามตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า Forces Equilibrium Methods (e.g. Lowe and Karafiath 1960; U.S.Army Corps of Engineers, 1970) สามารถใช้ได้กับทุกรูปแบบของการพิบัติที่เกิดขึ้นในระนาบ (Slip Surface) และ ครอบคลุมพิจารณาสมดุลย์ของแรง (Force) ที่มากระทำต่อลาดดิน ทั้งแรงในแนวราบ (Horizontal) และแรงแนวตั้ง (Vertical) ส่วนวิธีอื่นก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เช่น Ordinary Method of Slices (Fellenius, 1927) จะใช้ได้เฉพาะการพิบัติแบบโค้งของระนาบ และไม่ครอบคลุมการพิจารณาสมดุลย์ของแรง (Force) ซึ่งถือว่าสำคัญหรือ Bishop's Modified Method (Bishop, 1955) ก็จะไม่ครอบคลุมการพิจารณาสมดุลย์ของแรงในแนวราบ (Horizontal) และใช้ได้เฉพาะการพิบัติแบบโค้งของระนาบ ส่วนวิธีที่เหลือก็มีวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อนเกินไปเมื่อเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ลาดดินในสภาวะสมดุลย์

โดยการวิเคราะห์ในสภาวะสมดุลย์ (Limit equilibrium methods) เป็นวิธีการที่ต้องวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยหลักการสมดุลย์ของแรงต่างๆ ที่มากระทำต่อมวลที่อยู่เหนือแนวพิบัติการที่มวลของลาดดินจะสมดุลย์ได้นั้น แรงที่ช่วยให้ลาดดินเลื่อนไถล (ได้แก่ น้ำหนักของมวลดิน) จะต้องมามีค่าเท่ากับแรงต้านทานการเลื่อนไถล (ได้แก่ ค่ากำลังเฉือน (Shear Strength) ของมวลดิน และของแนวพิบัติ) ค่าสัดส่วนของแรงขับต่อแรงต้านการเลื่อนไถลนี้ เรียกว่า “อัตราส่วนของความปลอดภัย” (Factor of Safety) ถ้าค่า F.S. มีค่าน้อยกว่า 1.0 ถือว่าลาดดินนั้นไร้เสถียรภาพ

นอกจากนั้นในปัจจุบันนี้ได้มี Computer Softwares ต่าง ๆ อาทิเช่น PCSLOPE, GSLOPE, STABL, Geostudio เป็นต้น มาช่วยให้การวิเคราะห์สะดวกและรวดเร็วขึ้น

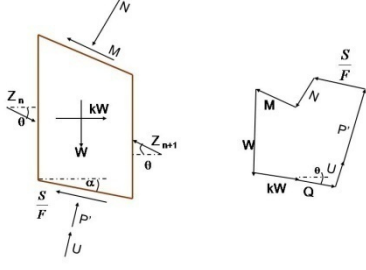
Duncan (1996) เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณา แรงดันน้ำ (Pore water pressure) แรงเฉือนในมวลดิน (The shear strength of soil) ภายใต้เงื่อนไข undrained shear strength,  $S_u$  (or  $\phi_u = 0$ ) และได้ถูกอธิบายไว้ในสมการที่ 2.2

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (2.2)$$

โดย  $c'$  = ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (effective cohesion of soil),  $\sigma_n$  = ความเค้น (normal stress),  $u$  = pore water pressure และ  $\phi'$  = ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (effective friction angle of soil)

ตารางที่ 2.1 Characteristics of slope stability analysis (Duncan and wright, 1996)

Method	Characteristics	Equation
<p>Bishop's modified method (Bishop, 1955)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Only for circular slip surfaces</li> <li>-Satisfies moment equilibrium</li> <li>-Satisfies vertical force equilibrium</li>   <li>-Does not satisfy horizontal force equilibrium</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> </div> $F = \frac{R \sum (c'l \cos \alpha + (W - U \cos \alpha + N \cos \beta - M \sin \beta) \tan \phi') / M}{\sum (WR \sin \alpha + kW y_k \pm N \alpha_N - M a_M)}$ <p>Where <math>y_k</math>, <math>\alpha_N</math> and <math>a_M</math> are appropriate moment arms and <math>M_\alpha</math> is given by <math>M_\alpha = \cos \alpha (1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F})</math></p>
<p>Morgenstern and prices's method (Morgenstern and Price, 1965)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Any shape of slip surfaces</li> <li>-Satisfies all conditions of equilibrium</li>   <li>-Permits side force orientations to be varience</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> </div> $Z_R = Z_L \cdot \frac{\cos(\alpha - \delta_L) (1 + \frac{\tan \phi \cdot \tan(\alpha - \delta_L)}{F})}{\cos(\alpha - \delta_R) (1 + \frac{\tan \phi \cdot \tan(\alpha - \delta_R)}{F})} - Q$ <p>Where Q is the resultant of the inter-slice forces  <math>\theta</math> is replaced by  Z is horizontal side force</p>

<p>Spencer's method (Spencer, 1967)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Any shape of slip surfaces</li> <li>- Satisfies all condition of equilibrium</li> <li>- Permits side force location to be varied</li> </ul>	 $Q = \frac{\frac{c'l}{F} + \frac{\tan \phi'}{F} (W \cos \alpha - U) - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left( 1 + \frac{\tan \phi' \tan(\alpha - \theta)}{F} \right)}$
<p>Forces equilibrium methods (e.g. Lowe and Karafiath 1960; U.S. Army Corps of Engineers, 1995)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Any shape of slip surfaces</li> <li>- Do not satisfy moment equilibrium</li> <li>- Satisfies both horizontal and vertical force equilibrium</li> </ul>	$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{shear strength of soil}}{\text{shear stress required for equilibrium}}$ <p>Note: <math>S = c + \sigma_n \tan \phi</math>, <math>\sigma_n</math> = normal stress on base of slice</p>
<p>Ordinary Method of Slices (Fellenius, 1927)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Satisfies moment equilibrium</li> <li>- Does not satisfy horizontal or vertical force equilibrium</li> </ul>	$F.S. = \frac{C \Delta b_n + w_n \cos \alpha_n \tan \phi}{w_n \sin \alpha_n}$ <p>Note: <math>w_n</math> = Slice weight, <math>b_n</math> = length of soil mass divided <math>\alpha_n</math> = Slope angle, <math>\phi</math> = Friction angle</p>

อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.2 เป็นสมการที่ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขเกี่ยวกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (only to fully saturated soils) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณาดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยประยุกต์ใช้ The Mohr-coulomb failure criterion (Fredlund and vanapalli, 2002) มีสมการ ดังนี้

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u) \tan \phi^b \quad (2.3)$$

โดย  $u_a$  = pore air pressure,  $\phi^b$  = ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน (friction angle of the soil with respect to changes in  $(u_a - u)$  when  $(\sigma_n - u_a)$  is held constant),  $(u_a - u)$  = ค่าแรงดูดน้ำในมวลดิน (the matric suction) (Fredlund and rahardjo, 1993)

อย่างไรก็ตามทุกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้สมมูลของแรงจะมีนิยามในการหาอัตราส่วนปลอดภัยเหมือนกัน คือ เปรียบเทียบแรงเฉือนหรือกำลังภายในมวลดิน (The shear strength) ต่อแรงภายนอก (Duncan, 1996). โดยจะต้องสมมติค่า ส่วนโค้งในการพัง (A slip surface) ก่อนจะทำการคำนวณ แรงผลักต่อแรงต้านโดยค่ากำลังภายในมวลดินจะถูกสมมติให้มีความสามารถในการรองรับแรงภายนอกได้ทั้งหมดตลอดส่วนโค้งการพังในเบื้องต้นและสมมติให้ลาดดินในช่วงแรกมีเสถียรภาพจากนั้นค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะค่อยๆลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแรงภายนอก (The shear stress) โดยส่วนโค้งในการพังอาจจะเป็นส่วนโค้งหรือไม่เป็นส่วนโค้งก็ได้แต่โดยเบื้องต้นจะถูกสมมติเป็นส่วนโค้ง

ในวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบดั้งเดิมค่าที่ใช้เป็นตัวแปรใน Input data จะพบว่าได้มาจากข้อมูลกลุ่มเล็ก ดังเช่น ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลและนำมาทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์แต่ไม่มีการคำนึงถึงปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนในเสถียรภาพของลาดดินจึงอาจทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่สูงเกินไปหรือเกิดการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ผิดพลาด (Duncan, 1996) จึงต้องประยุกต์ใช้ความรู้เดิมและนำมาพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและเกิดความปลอดภัยสูงสุด

## 2.2.2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลข Numerical method

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลขผู้วิจัยไม่ต้องทำการสมมติรูปแบบส่วนโค้งพิบัติในลาดดิน และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้รูปแบบส่วนโค้งพิบัติที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ (Wyllie and mah, 2004) ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้สมมูลของแรงจะให้แค่ค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยไม่มีข้อมูลใดๆเพิ่มเติมแม้กระทั่งการรูปแบบการเคลื่อนตัวหรือรูปแบบส่วนโค้งพิบัติที่เกิดขึ้นจริงจึงสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่บอกข้อมูลเกี่ยวกับการพิบัติในลาดดินได้ละเอียดกว่าวิธีแบบดั้งเดิมซึ่งผลลัพธ์ที่มีแค่อัตราส่วนปลอดภัยไม่ได้ให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและเกิดความปลอดภัยสูงสุด แต่ Numerical method สามารถอธิบายรูปแบบส่วนโค้งพิบัติที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ (Itasca consulting group, 2005)

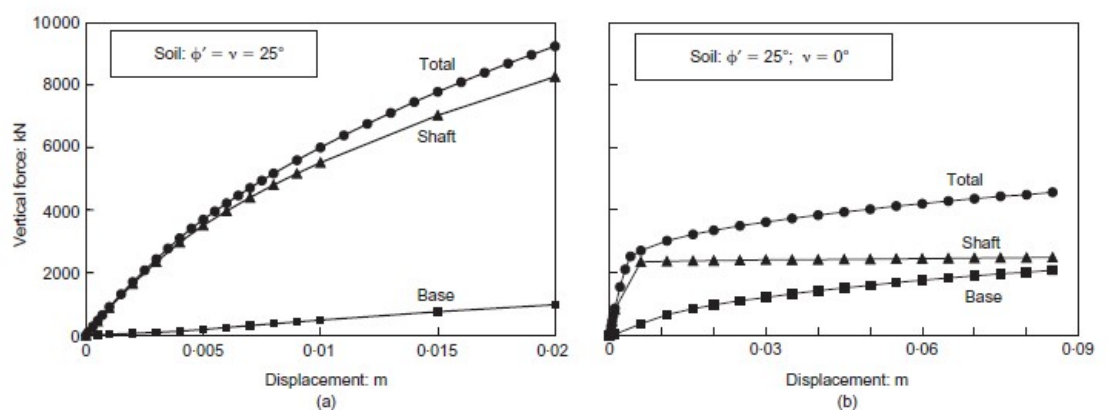


โดยวิธีเชิงตัวเลขแบ่งเป็น วิธีย่อยๆได้อีก 2 วิธี ได้แก่ finite element method และ random finite element method

### 2.2.2.1 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Finite element method (FEM)

เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เนื่องจากต้องเก็บข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจำนวนมาก โดยใช้คำนวณ ความเค้น การเคลื่อนตัวของลาดดินและแรงดันน้ำ โดยเริ่มเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายแทนที่วิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (Duncan, 1996, Griffiths and lane, 1999). แต่วิธีการ FEM อาจจะมีเงื่อนไขในการคำนวณซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณนานกว่าแต่ข้อดีก็คือ จะได้คำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า ผู้เขียนจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Finite element method ดังต่อไปนี้

Potts, 2003 พิจารณาปัญหาเกี่ยวกับการทำนายพฤติกรรมของเสาเข็มลึก (deep pile) ด้วยวิธี FEM โดยสมมติให้ดินรอบเสาเข็มมีลักษณะแห้งไม่มีความชุ่มชื้นของน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องและดินที่ไม่มีพฤติกรรมการระบายน้ำโดยมีค่า dilation angle,  $\nu = 0^\circ$  และ  $\nu = \phi' = 25^\circ$  ดังรูปที่ 2.6 การวิเคราะห์โดยกำหนด  $\nu = 0^\circ$  จะสามารถทำนายค่า แรงกระทำสูงสุด (an ultimate load) ในหัวเสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวไป 2 เมตร สำหรับการเคลื่อนตัวในเสาเข็มส่วนอื่นๆจะเคลื่อนตัวไปจนถึง 0.09 เมตร (9% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม) จะเห็นได้ว่าจะเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณที่ถูกแรงกระทำสูงสุด ก็คือ ที่หัวเสาเข็มเท่านั้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการคำนวณด้วยวิธี FEM เปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (conventional method) เพราะสามารถทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มลึกได้



รูปที่ 2.6 Behaviour of a pile in drained soil a) soil with  $\nu = \phi'$  b) soil with  $\nu = 0^\circ$

Hammah et al (2005) เปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักต่อแรงต้านและวิธี SSR (Shear strength reduction) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณจากวิธี finite element technique กับการวิเคราะห์ลาดดิน 30 กรณี โดยสมมติค่า  $\alpha$  dilation angle = 0 ในกรณี the elastic-perfectly plastic พบว่าวิธี SSR (Shear strength reduction) วิเคราะห์ได้ดีกว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักต่อแรงต้านเพราะเป็นเสมือนวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักต่อแรงต้านซ้ำกันหลายๆครั้งจนกระทั่งลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ

Kulhawy และ duncan (1972) พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Finite element method กับเขื่อนดินถม (Embank fill) ที่ถูกสมมติให้เป็นแบบแข็ง (Rigid and hyperbolic mode) พบว่าการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่ผู้วิจัยทำการสังเกตและพบว่าวิธี FEM สามารถทำนาย พื้นที่การพิบัติที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงได้ (Tension zones agreed closely with visible tension cracks)

#### 2.2.2.1.1 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Shear Strength Reduction Technique

เป็นเทคนิคการคำนวณจากวิธี finite element analysis โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพบว่าถูกพัฒนาจากวิศวกรหลายท่าน ( ดังเช่น Griffiths and lane, 1999, Hammah et al, 2005, Yuan-liang chang and Tien-kuen huang, 2005 and IndraNoerHamdhan and Helmut, 2011) หลักการในการวิเคราะห์ คือ การค่อยๆลดค่า  $c$  และ  $\tan\phi$  จนกระทั่งลาดชันเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในโปรแกรม FEM โดยค่าที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของดิน ได้แก่  $c_r$  และ  $\phi_r$  ถูกแสดงไว้ในสมการ 2.4 และ 2.5

$$c_r = \frac{c}{F.S.} \quad (2.4)$$

$$\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{F.S.}\right) \quad (2.5)$$

Yuan-liang chang และ Tien-kuen huang (2005) ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี SSR (Shear strength reduction) เพื่อใช้หาค่าบริเวณพื้นที่การพิบัติในลาดชันโดยแบ่งพื้นที่ลาดดินออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน elastic-plastic soil โดยวิธี the Drucker-prager nonlinear stress-strain relationship และ a non-associated flow rule พบว่าการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ผิวพิบัติ (the potential slip surface) ของลาดดินที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริง

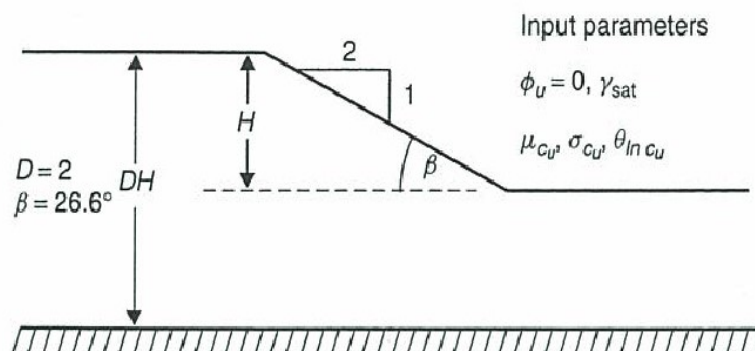
Li ji xiang et al (2009) ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายใต้การเติมน้ำอันเนื่องมาจากฝนตกด้วยวิธี SSR (Shear strength reduction) เพื่อหาค่าลักษณะการพิบัติในลาดดิน, แรงดันน้ำ และ อัตราส่วนปลอดภัย ผลลัพธ์พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีผลมาจาก การเปลี่ยนแปลงความเข้มของน้ำฝน และเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในช่วง 40 ชั่วโมงโดยไม่ได้เกิดขึ้นตอนที่ฝนตกอย่างทันทีทันใดแต่ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งกว่าจะเกิดการพิบัติโดยผลที่ได้มีความสมเหตุสมผลกับการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นจริงจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม

IndraNoerHamdhan และ Helmut (2011) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากค่าคงที่การยอมให้น้ำซึมผ่าน (the effects hydraulic conductivity) และค่าอัตราการอิ่มตัวของน้ำในมวลดินเริ่มต้น (Initial degree of saturation of soil) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยภายใต้การเติมน้ำอันเนื่องมาจากฝนตกด้วยวิธี the shear strength reduction technique พบว่าการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ผิวพิบัติของลาดดินที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริง

### 2.2.2.2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี The Random Finite Element Method (RFEM)

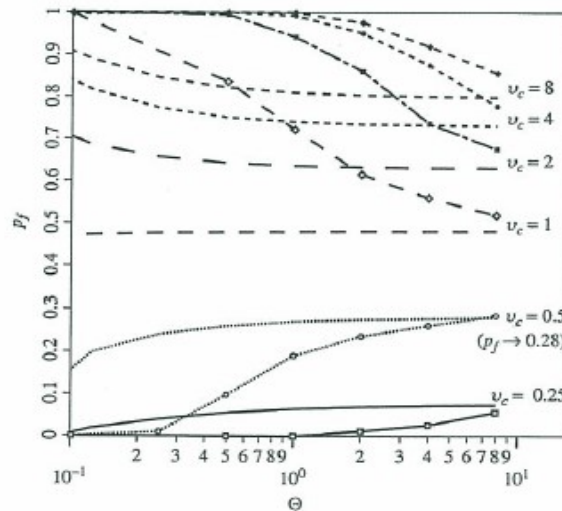
วิธี RFEM สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันต้องนำพิสัยข้อมูลที่ได้จากภาคสนามและการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบดั้งเดิมมาคำนวณร่วมกันเพราะต้องเกี่ยวข้องกับค่าข้อมูลทางสถิติของค่าความแข็งแรงในมวลดินไม่ว่าจะเป็นค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าเฉพาะที่เรียกว่า spatial correlation length ซึ่งความแปรปรวนเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างในธรรมชาติของชั้นดิน

Fenton and griffiths (2008) เปรียบเทียบ วิธีการ finite element method กับ random finite element method ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน (รูปที่ 2.7) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกอธิบายเป็นรูปแบบ mean ( $\mu_x$ ), standard deviation ( $\mathbf{V}_x$ ) และ the spatial correlation length จากค่า undrained shear strength



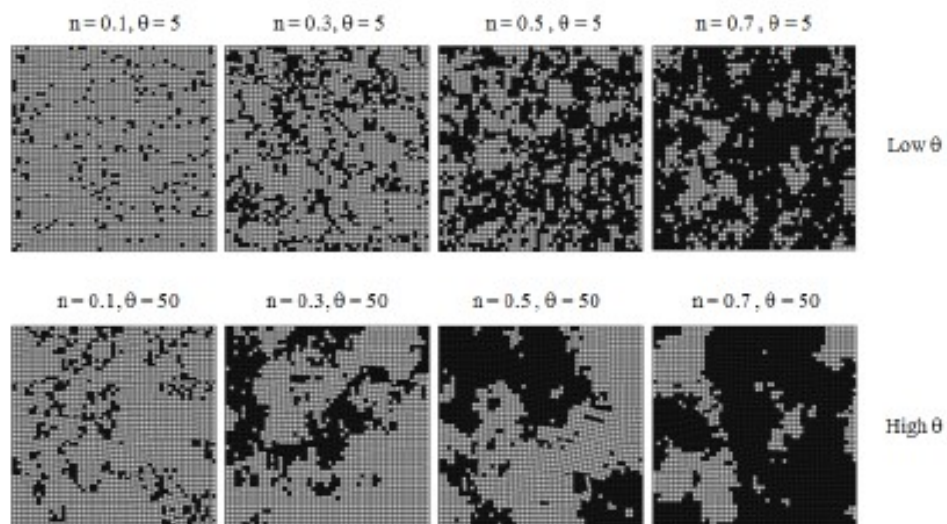
รูปที่ 2.7 Cohesive test slope problem (Fenton and griffith, 2008)

ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงกลุ่มตัวแปรเดี่ยว the single random variable ซึ่งพัฒนา กลายเป็นกลุ่มค่าคำตอบ ความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure,  $P_f$ ) โดยมีค่า standard deviation =  $\mathbf{V}_c$  ซึ่งพบว่าค่า spatial correlation length มีความสำคัญต่อการไว้วางใจของค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน



รูปที่ 2.8 Comparison of the probabilities of failure predicted by RFEM and by Finite element the mean is fixed at  $\mu_c = 0.25$  (Fenton and griffith, 2008)

Jumpol (2013) ศึกษาค่าอิทธิพลของ ความพรุน (porosity) และขนาดช่องว่างในมวลดินเนื้อเดียว (void size) โดยพบว่าการใช้วิธี RFEM และมีการกระจายตัวแบบ Monte-Carlo simulations จะแสดงโมเดลของค่าความพรุน (porosity) และขนาดช่องว่างในมวลดิน (void size) ตามที่ผู้วิจัยกำหนด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Typical simulations in 2D models showing the generation of voids at low and high spatial correlation lengths with different porosities. Dark and light regions indicate voids and solid material respectively (Jumpol, 2013)

## 2.3 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน (Uncertainty of Soil Properties)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินแบบดั้งเดิมจะไม่สามารถครอบคลุมถึงปัญหาความไม่แน่นอนในตัวแปรได้และค่าที่ได้อาจจะไม่ใกล้เคียงความเป็นจริงและไม่ทำให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด (El-Ramly et al, 2002) จะพบว่าดินที่ไม่เป็นดินเนื้อเดียวเป็นวัสดุที่ไม่สามารถทราบถึงค่าในคุณสมบัติภายในเนื้อดินได้อย่างชัดเจนจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและจะส่งผลให้มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ลาดดินดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและหาทางแก้ปัญหาก็เพื่อความปลอดภัยของผลลัพธ์ของอัตราส่วนปลอดภัย

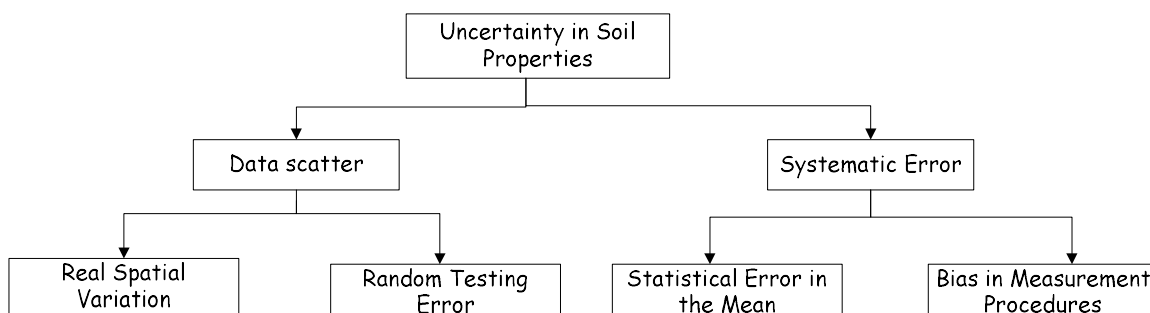
### 2.3.1 สาเหตุของความไม่แน่นอน (Sources of Uncertainty)

ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (Christian et al 1994, Lacasse and Nadim 1996, Phoon and Kulhawy 1994) ได้แก่

- ความไม่แน่นอนตามธรรมชาติ (Inherent uncertainty): ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เพราะเกิดจากสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อม

- ความผิดพลาดจากระบบ (Systematic Error): เกิดจากความผิดพลาดในการวัด การทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบหรือแบบจำลอง (Model) ในการหาคุณลักษณะต่างๆของดิน และ ข้อมูลที่เกิดจากการรวบรวมข้อมูล (collection) อย่างไม่เพียงพอทำให้เกิดความไม่แน่นอนขึ้นได้ แต่ความไม่แน่นอนที่เกิดจากความผิดพลาดอย่างเป็นระบบสามารถควบคุมและลดทอนให้น้อยลงได้ (Lacasse and Nadim,1996)

Christian et al (1992) จัดแยกความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินทั้งหมดเป็น 2 แบบ คือความไม่แน่นอนที่เกิดจากการกระจายของข้อมูล (Data Scatter) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความแปรปรวนแบบ Spatial Variation และ ความผิดพลาดจากการทดสอบแบบสุ่ม ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดจากระบบ (Systematic error) ประกอบไปด้วย ความผิดพลาดทางสถิติของค่าเฉลี่ยและ ความโน้มเอียง (Bias) จากวิธีการวัด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Uncertainty in Soil Properties (Christian et al., 1994)

### 2.3.2 Quantifying Uncertainty in Soil Properties

Degroot (1996) กล่าวว่า วิศวกรสามารถปรับปรุงข้อมูลเพื่อจะได้ไม่เกิดความผิดพลาดโดยจะต้องปรับปรุงให้ได้ค่าประมาณที่ดีที่สุด (a best estimate) และ ค่าที่บ่งบอกถึงความไม่แน่นอนของค่าประมาณที่ดีที่สุดนี้ (a measure of uncertainty in the best estimate) โดยค่าสองค่าดังกล่าวนี้ในทางสถิติก็คือค่าเฉลี่ย (Mean,  $\mu_x$ ) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation,  $\sigma_x$ ) ตามลำดับ

- ค่าเฉลี่ย (Mean,  $\mu_x$ ) ; เป็นตัวสถิติที่ใช้วัดค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลที่กระจายแบบปกติเท่านั้น กล่าวคือ ข้อมูลต้องมีรูปทรงของรูปแบบข้อมูลที่ค่อนข้างสมมาตรรอบค่าๆหนึ่ง คือเป็นตัวแบบที่มียอดเดียว (Unimodal Pattern) และเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากประชากรที่มีความเบี่ยงเบนคงที่

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.6)$$

- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation,  $\sigma_x$ ) ; เป็นรากที่สองของค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นค่าที่ใช้อนุมานความเบี่ยงเบนของประชากรได้ดีที่สุด

$$\sigma_x = S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x)^2} \quad (2.7)$$

- สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of Variation, COV) ; การพิจารณาสัดส่วนต่อหน่วยของค่าที่ควรจะเป็นเพื่อทำการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของข้อมูลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป

$$COV_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (2.8)$$

Phoon et al. (1995) ทำการรวบรวมข้อมูลสำหรับการนำมาวิเคราะห์ระหว่างพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความน่าจะเป็นในความสัมพันธ์ของดินตามธรรมชาติพบว่า ค่าทางสถิติที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของดินตามธรรมชาติคือค่าดังที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 Summary of Inherent Variability of Strength Properties (Phoon et al., 1999)

Property <sup>a*</sup>	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 <sup>2</sup> )	Fine Grained	38	2-538	101	6-412	100	6-56	33
$S_u$ (UU) (kN/m <sup>2</sup> )	Clay. Silt	13	14-82	33	15-363	276	11-49	22
$S_u$ (CIUC) (kN/m <sup>2</sup> )	Clay	10	12-86	47	130-713	405	18-42	32
$S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) <sup>b*</sup>	Clay	42	24-124	48	8-638	112	6-80	32
$\phi$ (°)	Sand	7	29-136	62	35-41	37.6	5-11	9
$\phi$ (°)	Clay. Silt	12	5-51	16	9-33	15.3	10-50	21
$\phi$ (°)	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
$\tan \phi$ <sup>b*</sup>	Sand	13	6-111	45	0.65-0.92	0.744	5-14	9

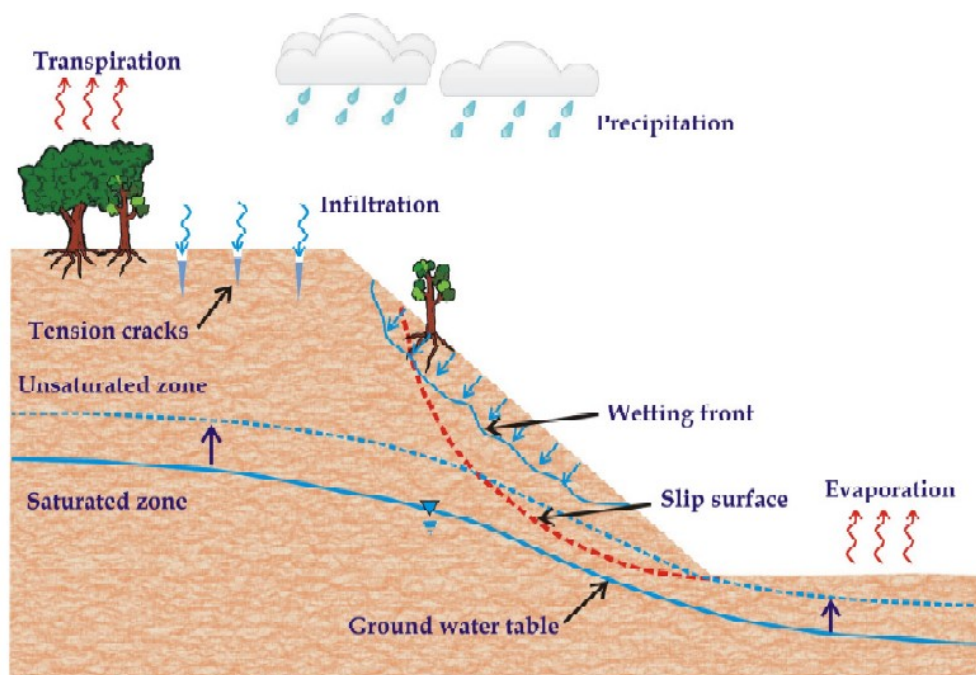
<sup>a\*</sup>  $S_u$  = Undrained Shear Strength ,  $\phi$  = Effective Stress Friction Angle , DS. = Direct Shear Test, TC. =Triaxial Compression Test,UC. = Unconfined Compression Test, UU. = Uncon solidated, Undrained Triaxial Compression Test , CIUC. = Consolidated Isotropic, Undrained Triaxial Compression Test, <sup>b\*</sup> Laboratory Test Type not Reported.

### 2.3.3 กลศาสตร์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil Mechanics)

กลศาสตร์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นความรู้พื้นฐานของวิศวกรรมเทคนิคเพื่อใช้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินที่อยู่เหนือระดับน้ำ (Water table) เพราะดินบริเวณนั้นยังไม่มีน้ำอิ่มตัวไปด้วยน้ำทั้งหมดจึงมีพฤติกรรมที่น่าสนใจที่ควรทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพ

#### 2.3.3.1 พฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Characteristic of Unsaturated Soils

ในธรรมชาติทั่วไปของลาดชันมักจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในลักษณะตื้นเมื่อระดับน้ำ (Water table) อยู่ลึก ณ ขณะที่ฝนตกด้วยความเข้มฝนสูงๆเป็นระยะเวลาสั้นๆ ดังนั้นค่าความหนาในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเหนือระดับน้ำ (Water table) จึงเป็นอิทธิพลในตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สำคัญที่ต้องทำการศึกษา (รูปที่ 2.11) พื้นที่บริเวณดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (The unsaturated zone) ได้กลายเป็นจุดเชื่อมผ่านระหว่างน้ำในชั้นเหนือ water table (the water in the atmosphere) กับน้ำในชั้น water table อิทธิพลของตัวแปรอื่นเนื่องมาจากค่าความลึกในชั้นน้ำใต้ดิน (groundwater table) และความหนาของดินบริเวณชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสภาพภูมิอากาศบริเวณผิวดิน (the ground surface climate) ซึ่งการแบ่งบริเวณประเภทของดินจะขึ้นกับค่า ความชุ่มชื้นของน้ำในมวลดิน (the average net moisture flux) บริเวณผิวดิน อย่างเช่น การเติมน้ำอันเนื่องมาจากน้ำฝน (Thorntwaite, 1948).



รูปที่ 2.11 Mechanism of rainfall-induced slope failure (after Rahardjo et al, 2007)



บริเวณพื้นที่เหนือระดับน้ำ (Water table) ถือเป็นบริเวณ vadose zone (Bouwer, 1978) ซึ่งจะแปรผันไปตามลักษณะโครงสร้างทางธรณีของดิน ค่าแรงดันน้ำ(The pore-water pressures)ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำอันเนื่องมาจากน้ำฝนและปัจจัยอื่นที่เติมลงไปในพื้นที่ดิน และค่าเกี่ยวกับคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน (the hydraulic properties of the soil) ค่าแรงดันน้ำมีความแปรปรวนได้หลายค่า ตั้งแต่ค่า 0 จากชั้น water table ไปจนถึงค่าแรงดึงน้ำ ที่เรียกว่า a maximum tension (soil suction) สูงสุดซึ่งมีค่าประมาณ 1,000,000 kPa ภายใต้คุณสมบัติดินแห้ง (Croney et al, 1958) ค่าอัตราความอิ่มตัวไปด้วยน้ำในมวลดินจึงมีพิสัยตั้งแต่ 0-100%

### 2.3.3.2 แบบจำลองสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Constitutive Model to Handle Unsaturated Soils)

เป็นแบบจำลองสำหรับอธิบายพฤติกรรมทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ของมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องมาจากในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติของงานวิจัยนี้เราต้องการที่จะทราบถึงลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วย

#### a) กำลังรับแรงเฉือนในมวลดิน (Shear Strength)

ลักษณะการรับแรงเฉือนในมวลดินโดยอธิบายพฤติกรรมทางกลศาสตร์ จะมีที่มาจาก Bishop's effective stress และ linear elastic, perfectly plastic ในแบบจำลอง Mohr-Coulomb ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.9

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + X(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\tau_f$  คือ the soil shear strength,  $c'$  คือ the effective cohesion,  $\phi'$  คือ the effective angle of friction,  $\sigma$  คือ the total stress,  $u_a$  คือ the pore air pressure,  $u_w$  คือ the pore water pressure ( $\sigma - u_a$ ) คือ the net stress และ  $(u_a - u_w)$  คือ the matric suction.

โดยค่าความเค้นประสิทธิผล  $X$  สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.10

$$X = \theta_N^k \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\theta_N$  คือ the normalised water content (which is equal to the degree of saturation) และ  $k$  คือ a fitting parameter.

## b) คุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ (Hydraulic Properties)

ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำปริมาณของน้ำที่เติมลงไปในตลาดดิน (the flux of water infiltration) และคุณสมบัติทางชลศาสตร์ในมวลดินเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับอธิบายค่า pore-water pressures สำหรับการศึกษารววิเคราะห์เสถียรภาพในตลาดดินธรรมชาติ เราจำเป็นต้องศึกษาความรู้พื้นฐานด้าน pore pressures, shear strength parameters, พฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำในมวลดินของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่เกิดมาจากค่าเส้นอัตรลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) จะถูกอธิบายไว้ ดังนี้

### - การกักน้ำในมวลดิน (Soil Water Storage)

ส่วนประกอบของมวลดิน อันได้แก่ อนุภาคของเม็ดดิน (soil granular) และช่องว่าง ซึ่งช่องว่างสามารถมีการถูกเติมด้วยน้ำหรืออากาศหรือทั้งน้ำและอากาศลงไปได้ถูกอธิบายไว้ดังสมการ 2.11

$$\theta_w = \eta S_r \quad (2.11)$$

เมื่อ  $S_r$  คือ the degree of saturation

$\eta$  คือ porosity of soil

$\theta_w$  คือ volumetric water content of soil

ในดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำช่องว่างในเม็ดดินจะถูกเติมเต็มไปด้วยน้ำและอากาศ ค่า volumetric water content ในดินจะมีค่า เท่ากับ ค่าความพรุนในเม็ดดิน ( $S_r$  is equal to 100% in a saturated soil) อย่างไรก็ตาม ค่า volumetric water content ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับ ค่าแรงดันน้ำทางฝั่งลบหรือค่าแรงดึงดูดน้ำในช่องว่างของมวลดิน (the negative pressure or suction) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและขนาดช่องว่างในมวลดินซึ่งค่าพวกนี้เป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำในมวลดินและค่าการเปลี่ยนแปลงในแรงดึงดูดน้ำในช่องว่างของมวลดิน ดังนี้

### - ค่าเส้นอัตรลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil-Water Characteristic Curve)

ซึ่งใช้อธิบายค่าปริมาณของน้ำตามค่าแรงดึงดูดน้ำในช่องว่างของมวลดินที่เปลี่ยนไป ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ volumetric water content ( $\theta_w$ ) และ the degree of saturation ( $S_r$ ) ค่าแรงดึงดูดน้ำในช่องว่างจะอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างอากาศและแรงดันน้ำในมวลดิน สมการต่างๆ เกี่ยวกับค่าเส้นอัตรลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ถูกอธิบาย ดังนี้

A. Brooks and Corey (1964)

$$\left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\Psi$  คือ soil matric suction,  $\Psi_a$  คือ air entry suction,  $\theta$  คือ volumetric water content,  $\theta_s$  และ  $\theta_r$  แสดงถึง the volumetric water contents at the saturated and residual conditions respectively และ  $\lambda$  คือ a curve fitting parameter and is a constant

B. van Genuchten (1980)

$$\left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n}\right)^m \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ a function of maximum pore size  $m, n$  คือ constant parameter in van-genuchten equation and  $m = 1 - \frac{1}{n}$

Note: parameters ที่เหลือถูกอธิบายไว้ในสมการ (2.12)

C. Fredlund and Xing (1994)

$$\theta = \theta_s \left( \frac{1}{\ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{\Psi_a} \right)^n \right]} \right)^m \quad (2.14)$$

### c) สมการโค้งน้ำ (Water retention curve)

เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์เพื่อบอกพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดิน เช่นกัน โดยอธิบายได้จากสมการของ van Genuchten (1980) ดังนี้

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha S)^n\right]^m} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\theta_w$  คือ the actual volumetric water content,  $\theta_s$  และ  $\theta_r$  แสดงถึง the volumetric water contents at the saturated และ residual conditions respectively,  $S$  คือ the matric suction,  $\alpha$ ,  $n$  และ  $m$  คือ fitting parameters by using the statistical pore-size distribution relationship  $m = 1 - \frac{1}{n}$  ซึ่งแสดงมาจาก Mualem (1976) by assuming  $\theta_r = 0$  ซึ่งแสดงดังสมการ ดังนี้

$$S = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha S)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (2.16)$$

### d) ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity Function)

หลายๆสมการทำการนิยามค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ดังนี้

#### A. Brooks and Corey Model

$$K_\psi = \frac{\gamma_w \gamma^2 \eta S_r}{8\mu\tau} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\gamma_w$  คือ unit weight of water,  $\eta$  คือ porosity,  $S_r$  คือ degree of saturation,  $\mu$  คือ viscosity,  $\tau$  คือ tortuosity,  $T_s$  คือ surface tension และ  $\gamma^2 = \frac{4T_s^2}{\psi^2}$

### B. Wyllie and Gardner Model

$$K_r = \frac{K_\psi}{K_S} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $K_r$  คือ relative hydraulic conductivity,  $K_S$  คือ saturated hydraulic conductivity

### C. van Genuchten-Mualem Model

$$K_r = \left( \frac{(1 - (\alpha\psi)^{n-1} (1 + (\alpha\psi)^n)^m)^2}{(1 + (\alpha\psi)^n)^{\frac{m}{2}}} \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\alpha, m, n$  คือ van genuchten SWCC parameters

## 2.3.4 Seepage Analysis

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน พฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำในมวลดินเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำความเข้าใจ การเติมน้ำในมวลดินอันเนื่องมาจากน้ำฝนมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ pore water pressure, ระดับ groundwater, volumetric water content การเปลี่ยนแปลงใน matric suction ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) ซึ่งสมการการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ถูกแสดงดังในสมการ 2.20 (Fredlund and Rahardjo, 1993; Thode and Gitirana, 2012)

$$m_w^2 \gamma_w \frac{\partial h_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (-k_{wx} \frac{\partial h_t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (-k_{wy} \frac{\partial h_t}{\partial y}) + q \quad (2.20)$$

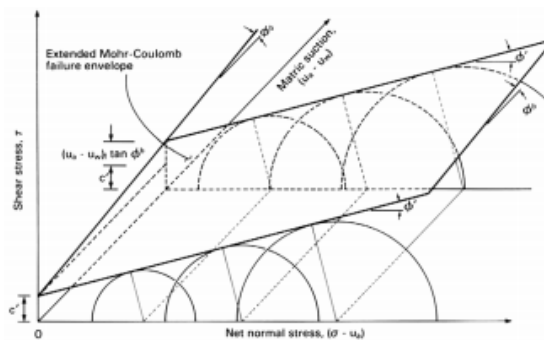
เมื่อ  $m_w$  คือ the slope of the soil water characteristic curve (SWCC),  $\gamma_w$  คือ the unit weight of water,  $h_t$  คือ the hydraulic or total head,  $t$  คือ elapsed time,  $k_{wx}$  และ  $k_{wy}$  คือ hydraulic conductivity with respect to water as a function of matric suction, in x and y directions respectively และ  $q$  คือ the applied boundary flux.

Celia and Bouloutas (1990) เสนอสมการในการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การซึมผ่านของน้ำในมวลดินแบบ 2 มิติ ดังนี้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -k_{wx} \frac{\partial h_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k_{wy} \frac{\partial h_t}{\partial y} \right) + q \quad (2.21)$$

### 2.3.5 คุณสมบัติของแรงเฉือนในมวลดินที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน (Shear strength properties of soil and slope stability)

สามารถอธิบายถึง โครงสร้างวงกลม Mohr-Coulomb criteria ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งอธิบายดังสมการที่ 2.22 โดยภาพที่ 2.12 อธิบายถึง the extended Mohr-Coulomb แบบ 3 มิติ

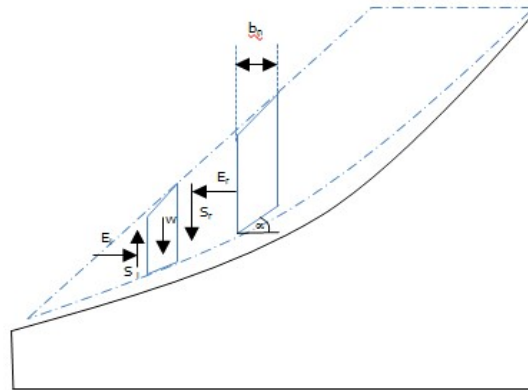


รูปที่ 2.12 Extended Mohr-Coulomb envelope for unsaturated soil (Fredlund and Rahardjo, 1993)

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ the shear strength of unsaturated soil,  $c'$  คือ the effective cohesion of soil,  $\phi'$  คือ the effective angle of internal friction,  $(\sigma_n - u_a)$  คือ the effective normal stress on the plane of failure,  $(u_a - u_w)$  คือ matric suction on the plane of failure  $\tan \phi^b$  คือ the angle of friction with respect to matric suction in unsaturated soils.

จากสมการที่ 2.2 จะเห็นว่าทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแรงดูดน้ำในมวลดิน (matric suction) และความเค้นประสิทธิผล (the effective normal stress) ล้วนมีผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนในมวลดิน และแรงดูดน้ำในมวลดินจะแปรค่าผกผันกับค่า degree of saturation และค่า volume matric water content เนื่องจากฝนเป็นสาเหตุหลักในการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำในมวลดินและการลดลงของค่าความแข็งแรงในมวลดินและค่าอัตราส่วนปลอดภัยและจะนำไปสู่ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในมวลดินทำให้แรงต้านลดลง



รูปที่ 2.13 Free body diagram of slope

จากรูปที่ 2.13 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ค่าแรงภายในและตัวแปรต่างๆที่เกิดขึ้นใน failure surface จะมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยและค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (The antecedent precipitation index, API) ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยของ bishop simplified method ดังนี้

$$F.S. = \frac{\sum \frac{1}{m} (c' b_n + (W - u_b) \tan \phi^b + (u_a - u_w) \tan \phi^b)}{\sum (W \sin \alpha)} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $c$  คือ the effective cohesion,  $b_n$  คือ the width of each slice,  $W$  คือ the weight of each slice,  $u$  คือ the water pressure at the base of each slice,  $\phi^b$  คือ the effective internal angle of internal friction,  $\alpha$  คือ slope angle with respect to degree of saturation

## 2.4 การประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติ (Sensitivity Analysis)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินด้วยวิธีวิเคราะห์สมดุลแรงผลัดต่อแรงต้านเพื่อหาค่า factor of safety พบว่าถ้าผู้วิจัยไม่ได้ทำการพิจารณา ความไม่แน่นอนในตัวแปรจะได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ไม่ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริง (Banaki et al., 2013)

Zhai, Q. et al. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของ SWCC และ  $K_w$  function ในลาดหินแกรนิตที่ Bulkit Timah ที่ Singapore งานวิจัยพบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์โดย upper limit of SWCC มีผลอย่างมากจากตัวแปรที่เป็นความชื้นฝน (rainwater) และ SWCC มีผลอย่างมากกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติอันเนื่องมาจากฝนตก ด้านเปียก (The wetting front) ในลาดดินที่วิเคราะห์โดย upper limit of SWCC จะมีอัตราการซึมผ่านของน้ำในมวลดินลึกกว่า ลาดดินที่มีตัวแปรคงที่ (best fitted) ในลาดดินที่วิเคราะห์โดย lower limit of SWCC

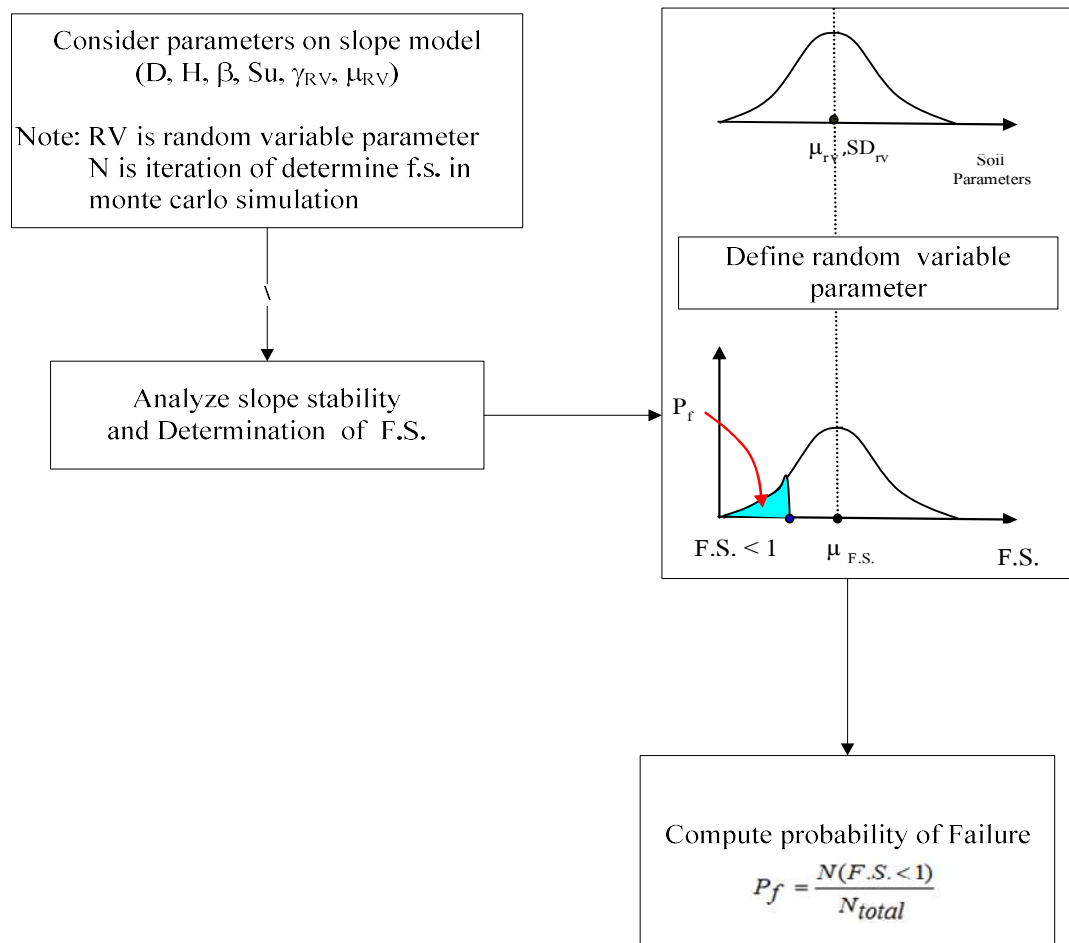
ในการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนในตัวแปรอันเนื่องมาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยเปลี่ยนแปลงค่าพิสัยตัวแปรเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพการประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติจึงถือเป็นเทคนิคในการประเมินความไว้วางใจและผลกระทบในตัวแปรหรือพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากที่สุด

การพิจารณาค่าความไว้วางใจอันเนื่องมาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในงานวิจัยนี้ เป็นการพิจารณาถึงความไว้วางใจของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อ้อมตัวไปด้วยน้ำ โดยกำหนดค่า Soil water characteristic curve equation และ permeability parameters สำหรับลาดดินกรณีศึกษาที่ อ.สีชล จ.นครศรีธรรมราช โดยเปลี่ยนแปลงค่า ความชื้นฝน (rainfall intensity) และ ค่าความลาดเอียงในลาดดิน ( $\beta$ ), ค่าความหนาในลาดดิน (t), ชนิดของดิน, หน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ), ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (c), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องจากแรงดึงของน้ำในดิน ( $\phi^b$ ) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ในการคำนวณค่า อัตราส่วนปลอดภัย

## 2.5 Stochastic Approach to Slope Stability Analysis

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยความน่าจะเป็น คือ การวิเคราะห์โดยพิจารณาค่าข้อมูลที่ใช้เป็น input data โดยใช้เป็นกลุ่มค่าตัวแปรหรือพิสัยที่อธิบายได้ด้วยค่าทางสถิติซึ่งวิธีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการพิบัติของลาดดินโดยประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านสถิติ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น First Order Second Moment Method, Point Estimate Method, Monte Carlo Simulation ซึ่งจะมีรายละเอียดพอสังเขป ดังต่อไปนี้





รูปที่ 2.14 Flow chart of probabilistic slope stability analysis

### 2.5.1 First Order Second Moment Method (FOSM)

เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของพารามิเตอร์วิธีหนึ่งของ Method of Moment ที่ใช้เทอมแรกของ Taylor's Series Approximation ในการประมาณค่า F.S. จากค่าประมาณของตัวแปรที่มีความแปรปรวนดังสมการที่ 2.24 โดย  $g(x_i)$  คือ ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย และ  $e$  คือค่า Model Error ในที่นี้กำหนดให้มีค่า  $= 0$  (เพราะเป็นกรณีของปัญหาด้านเสถียรภาพ) หาค่าความแปรปรวนของค่า F.S. จากสมการที่ 2.26 ซึ่งได้จากการเปลี่ยนสมการที่ 2.25 ให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น (Phoon and Kulhawy, 1999) เนื่องจากมีค่ากำลังเฉือนของดิน ( $S_u$ ) เพียงค่าเดียวที่เป็นค่าตัวแปรที่มีความแปรปรวน และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า F.S. จากสมการที่ 2.27 เพื่อหา

ลักษณะการกระจายตัวของค่า F.S. แล้วหาความน่าจะเป็นในการพิบัติจากความเป็นไปได้ที่ค่า F.S.  $< 1$

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

โดย

$g(x_i)$  คือ ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

$e$  คือ ค่า Model Error

ค่า Mean และค่า standard deviation เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับคำนวณค่า the performance function (Harr, 1987).

$$E[F.S.] = \mu_F \approx g(E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_n]) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $E[F.S.]$  คือ the mean of the factor of safety

$$V[F.S.] = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial X_i} \right)^2 V[X_i] \right] + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial X_i} \frac{\partial F}{\partial X_j} \right) \text{Cov}[X_i, X_j] \right] \quad (2.26)$$

$$V[F.S.] = \sigma_{F.S.}^2 \quad (2.27)$$

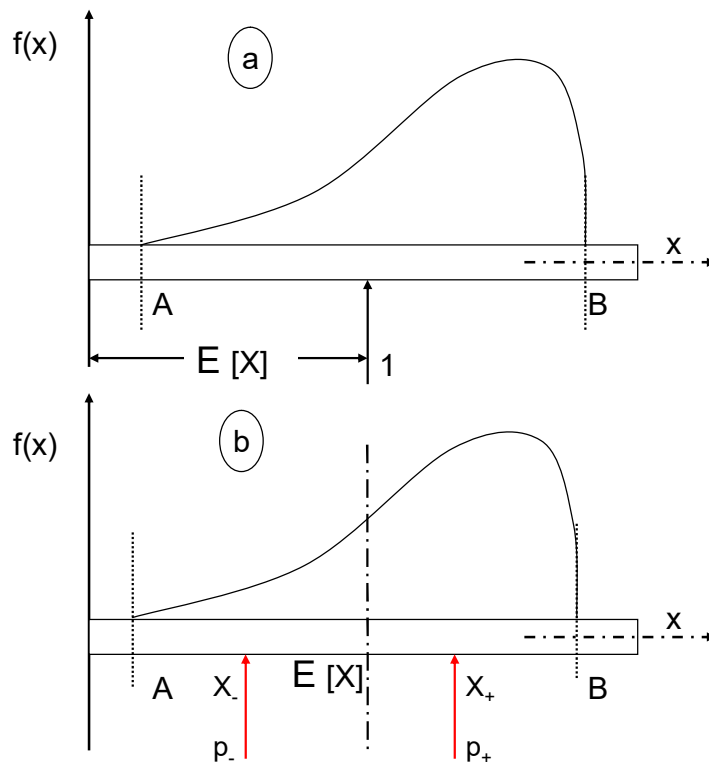
เมื่อ  $V[F.S.]$  คือค่า variance of the factor of safety,  $\text{Cov}[X_i, X_j]$  คือ ค่า the covariance between the random variables  $X_i$  และ  $X_j$ ,  $n$  คือ the number of random variables.

วิธี FOSM method ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินจะถูกอธิบายโดย Tang et al. (1976), Christian et al. (1994), Duncan. (2000), Griffiths et al. (2002) ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะได้เป็นค่าการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัย (the probability density function (PDF)) แต่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างของการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัย ดังนั้นวิธี FOSM method จะต้องทำการสมมติรูปร่างการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัยและตัวแปรที่เกี่ยวข้องก่อนทำการวิเคราะห์เสมอ (Griffiths et al, 2002).

## 2.5.2 Point Estimate Method (PEM)

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี FOSM จะเหมาะกับฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่น้อยกว่า 2 ตัว แต่ถ้ามีตัวแปรมากกว่านั้นจะทำให้สมการฟังก์ชันในการหาอัตราส่วนปลอดภัยยุ่งยากและซับซ้อนจนเกินไป Rosenblueth (1975) ได้นำเสนอวิธีประมาณค่าแบบจุด ( Point Estimate Method ) ซึ่งวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากตัวแปรสุ่ม (Random Variable) สามตัวแรก ได้แก่ ค่ากลาง (Mean) , ค่าความแปรปรวนของข้อมูล (Variance) และ ค่าความเบ้ (Skewness)

เพื่อทำความเข้าใจในลักษณะความคล้ายคลึงระหว่างการแจกแจงความน่าจะเป็น (A Probabilistic Distribution) และการกระจายของแรงที่มากระทำ จึงทำการยกตัวอย่างของคาน (Rigid Beam) ที่มีแรงในแนวตั้ง (Vertical Load) มากระทำ ดังรูปที่ 2.15 a



รูปที่ 2.15 Beam with Vertical Load (After Harr, 1987)

Harr. (1987) เปรียบเทียบรัศมีจโรชั่น (Radius of Gyration) ที่แสดงถึงการกระจายของพื้นที่จากแกนที่พิจารณามีความหมายเสมือนกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) นั้นเอง จากรูปที่ 2.15 b เมื่อคานมีแรงมากระทำก็จะมีแรงลัพท์ (Reaction) สะท้อนกลับ ในที่นี้ คือ แรง  $p_-$  เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน  $x = x_-$  และแรง  $p_+$  เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน  $x = x_+$  เรียกแรง  $p_+$  และแรง  $p_-$  ว่า

“ Two-point estimates ” ของค่าการกระจายตัวของ ฟังก์ชัน  $f(x)$  มีความสัมพันธ์ของตัวแปร ดังต่อไปนี้

$$p_+ = \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}} \right] \quad (2.28)$$

$$p_- = 1 - p_+ \quad (2.29)$$

$$x_+ = \mu_x + \sigma_x \sqrt{\frac{p_-}{p_+}} \quad (2.30)$$

$$x_- = \mu_x + \sigma_x \sqrt{\frac{p_+}{p_-}} \quad (2.31)$$

โดย  $p_-$  คือ แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน  $x = x_-$  ของคาน,  $p_+$  คือ แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งแกน  $x = x_+$  ของคาน,  $\alpha$  คือ ค่าความเบ้ (Skewness)

วิธีประมาณค่าแบบจุดจะได้ผลลัพท์ที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัย เป็นการกระจายแบบต่อเนื่องจากนั้นจะสมมติถึงจุดแรงกระทำ(discrete point masses)และโดยมีระยะห่างจากค่ากลางของการกระจายเท่ากับค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน (located at plus or minus one standard deviation) จุดแรงกระทำเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณการกระจายตัวของ อัตราส่วนปลอดภัย อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณนี้ต้องสมมติค่า จุดแรงกระทำ แค่เพียงจุดเดียวเท่านั้นถ้ามีแรงโมเมนต์สองจุดขึ้นไป (two moments of the performance function) จะทำให้เกิดการวิเคราะห์ เสถียรภาพที่ยุ่ยากมากขึ้น ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยความน่าจะเป็นจึงนิยมใช้วิธีการ PEM ในการคำนวณ (Christian and Baecher, 1999)

### 2.5.3 Monte Carlo Simulation (MCS)

เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางสถิติ ที่เกิดจากการนำค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์หรือคำนวณซ้ำหลายๆครั้ง จนได้คำตอบออกมาในรูปแบบของการกระจายตัวทางสถิติ (Probability Distribution) จนได้ผลลัพท์ที่เราต้องการจริงๆในที่นี้ทำได้โดยการคำนวณค่า Factor of Safety ซ้ำหลายๆครั้ง และมากพอที่จะได้การกระจายของ F.S. (Distribution of Factor of Safety) จากนั้นค่า  $P_f$  สามารถคำนวณได้จากความเป็นไปได้ที่  $F.S. < 1$  ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่แตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยทั่วไป และคำตอบที่ออกมาจะเป็นค่าที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ

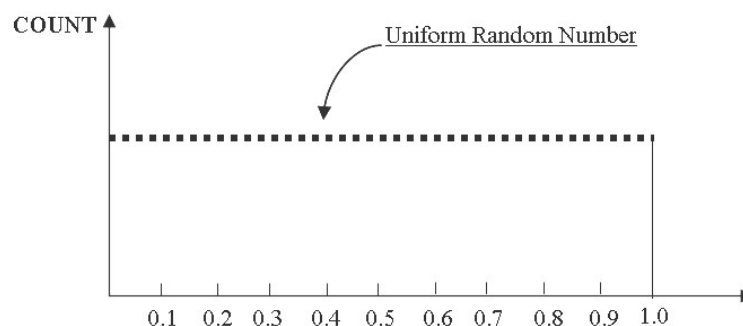
กลุ่มตัวแปรที่เราเลือกกับความถี่ (จำนวนครั้ง) ที่ทำการวิเคราะห์หัตถุประสงค์ก็เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องอย่างแท้จริงแต่ก่อนที่จะใช้วิธีการของ Monte Carlo Simulation นั้นเราต้องทำการสร้างรูปแบบทางกายภาพซึ่งในที่นี้ คือ คุณสมบัติของลาดดินเช่น ค่า Undrained Shear Strength ( $S_u$ ) สามารถแปรเปลี่ยนไปตามการกระจายทางสถิติ (Statistical Distribution) กระบวนการสร้างรูปแบบทางกายภาพนี้ เรียกว่า การสร้าง Realizations

### 2.5.3.1 การสร้าง Realizations

การสร้าง Realizations สำหรับชุดของค่า  $S_u$  ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีค่าเฉลี่ย ( $\mu_{su}$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_{su}$ ) เท่ากันสามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### a) Generating Uniform Random Number

การสร้างชุดของค่า  $S_u$  เริ่มต้นจากการสร้าง Uniform random Number (U) ซึ่งเป็นชุดตัวเลขแบบสุ่มซึ่งมีชุดการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) ที่มีค่าระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 (รูปที่ 2.16) โดยใช้ Algorithm ที่เสนอโดย Wichmann and Hill (1987)



รูปที่ 2.16 Uniform distribution (0,1)

#### b) Calculation Normal Random Numbers

การสร้าง Random number ที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) (รูปที่ 2.17) 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

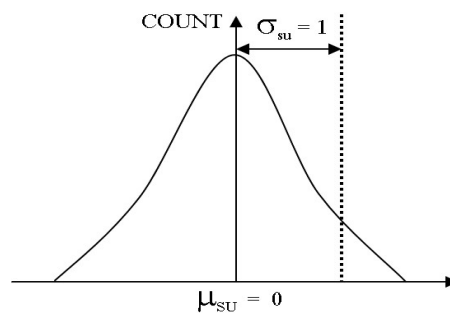
$$X_1 = \cos(2\pi U_2) \sqrt{-2 \ln(U_1)} \quad (2.32)$$

$$X_2 = \sin(2\pi U_2) \sqrt{-2 \ln(U_1)} \quad (2.33)$$

ค่า  $X_1$  และ  $X_2$  ที่ได้เป็น Normal Random Numbers ซึ่งมีค่าเฉลี่ย (Mean,  $\mu_{su}$ ) = 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation,  $\sigma_{su}$ ) = 1 การนำค่า Normal Random Numbers เพียงค่าเดียวไปใช้ทำได้โดยใช้ค่า  $X_c$  จากสมการที่ 2.34

$$X_c = \frac{X_1 + X_2}{\sqrt{2}} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $X_c$  คือ total normal random number



รูปที่ 2.17 Normal Distribution

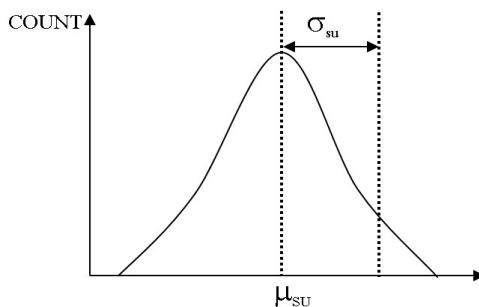
### c) การคำนวณ a realization of $X$

การคำนวณค่า Realization ของ  $X$  (ตัวแปรที่กำหนดเป็น Random variable) ทำได้โดยการแปลงค่าเฉลี่ย  $X_c$  (0,1) ให้เป็น  $X$  ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean,  $\mu_x$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation,  $\sigma_x$ ) ที่ต้องการโดยใช้สมการที่ 2.35

$$X = \mu_x + X_c \sigma_x \quad (2.35)$$

สมการที่ 2.35 สามารถแสดงสมการให้อยู่ในเทอมของ COV (Coefficient of Variation) ของค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$X = \mu_x (1 + X_c \text{COV}_x) \quad (2.36)$$

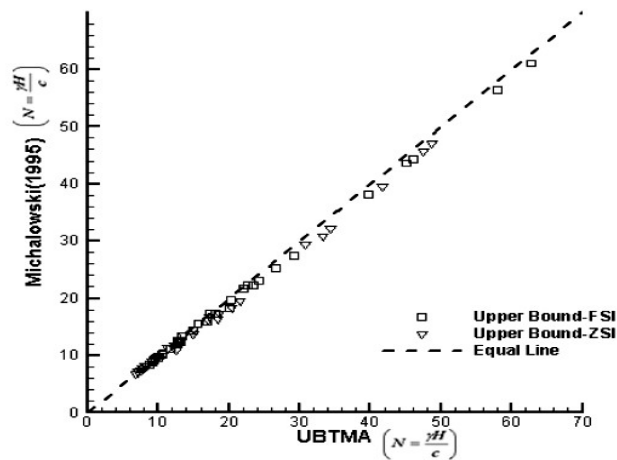


รูปที่ 2.18 Distribution by calculation Realization of X

ข้อได้เปรียบของวิธี MCS method คือไม่ต้องสมมติรูปร่างการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัย และตัวแปรที่เกี่ยวข้องก่อนทำการวิเคราะห์และไม่มีวิธีการคำนวณโดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับ วิธี FOSM และ PEM วิธีการ MCS method ผนวกกับวิธีการวิเคราะห์โดยแรงสมมูลย์ ถูกพัฒนามาโดยวิศวกรหลายๆท่าน (Jennifer L.P., 1999; El-Ramly et al, 2002) จากการกำหนดค่ากลุ่มพิสัยตัวแปรที่ไม่เกิดความแน่นอนในคุณสมบัติของดินและการคำนวณการกระจายของอัตราส่วนปลอดภัยโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

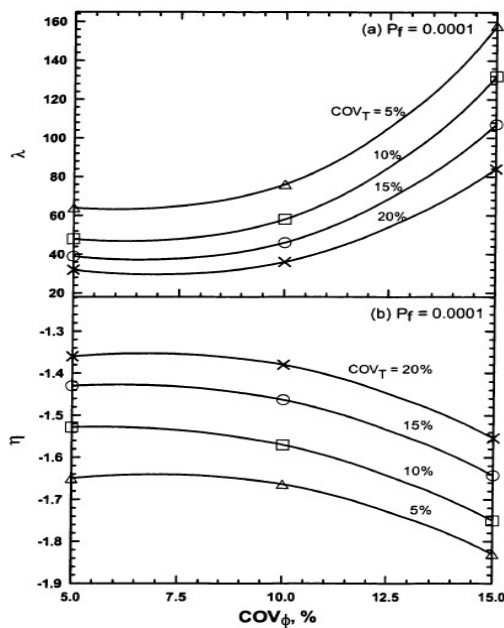
Low and Tang (1997) ศึกษาทำการวิเคราะห์สมการสำหรับออกแบบคันทางเสริมกำลังบนดินเหนียวอ่อนเพื่อให้เกิดเสถียรภาพเมื่อทำการออกแบบโดยสนใจค่าของ Tension Crack ที่เกิดขึ้นตรงผิวบนของคันทางค่าแรงเฉือนขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียวอ่อน (Undrained Shear Strength) วิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนโดยวิธี First-Order Reliability Method (FORM) เริ่มต้นจากใช้ Microsoft Excel's Solver ทำการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) จากนั้นทำการคำนวณจากตัวแปรที่แตกต่างกันหลายค่าซ้ำหลายๆครั้งโดยใช้ Monte Carlo Simulation เพื่อให้ทราบลักษณะการกระจายตัวของ F.S. เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติต่อไป

บุญชัย (2547) เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดด้วยการวิเคราะห์ขอบเขตบนแบบประยุกต์ (Upper Bound Analysis for Slope Stability Problems, UBTMA) วิธีการนี้จะประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีขอบเขตบนร่วมกับกลไกการวิบัติแบบเลื่อน และต้องจัดรูปแบบปัญหาให้อยู่ในรูปของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถแก้หาค่าตอบได้โดยเทคนิคการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นตรง (Linear Programming) ผลการวิเคราะห์ของปัญหาหลายๆแบบที่วิเคราะห์ด้วยวิธี UBTMA จะถูกเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีของ Spencer สำหรับประมาณค่าสัดส่วนความปลอดภัยของการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีเก่าของ Michalowski (1995) ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ Stability Number (N) วิธีใหม่จะมีความถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากสอดคล้องกับทฤษฎีดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 Comparison with UBTMA and analytical upper bound (Boonchai, 2004)

Chalermyanont and Benson (2004) ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Reliability-Based Design สำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดิน (Mechanically Stabilized Earth Walls) โดยนำค่าตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพของกำแพงกันดินมาทำการวิเคราะห์แบบ Probabilistic Analysis เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่แน่นอนของตัวแปรและใช้วิธี Monte Carlo Simulation เพื่อให้ทราบลักษณะการกระจายตัวของผลลัพธ์สำหรับนำไปหาค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (The Probability of Failure) และสุดท้ายจะได้ Reliability-Based Design Charts เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการพิบัติและตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพที่วิศวกรสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 Relationship between  $\lambda$  (a) and  $\eta$  (b) and  $COV_\phi$  with  $P_f = 0.0001$  for  $COV_T = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$  and  $20\%$  (Chalermyanont, 2004)

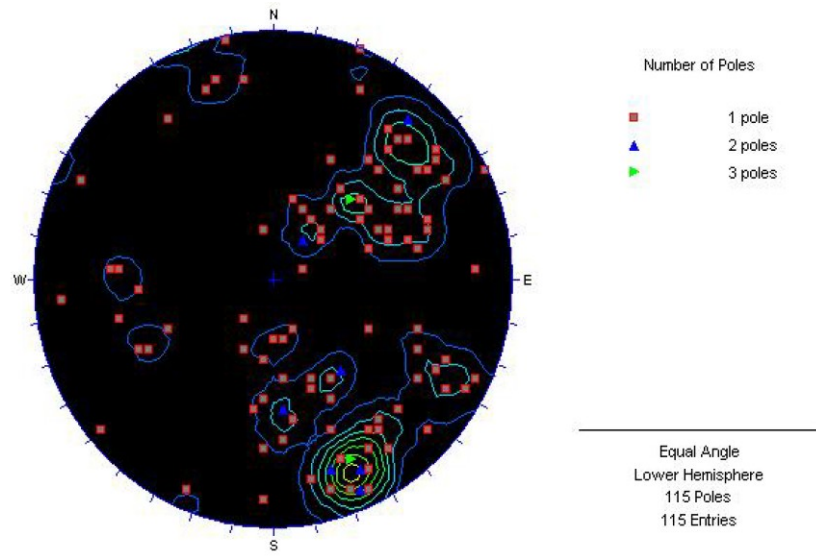


โดยมีสมการที่สัมพันธ์กับ Reliability-Based Design Charts ดังนี้

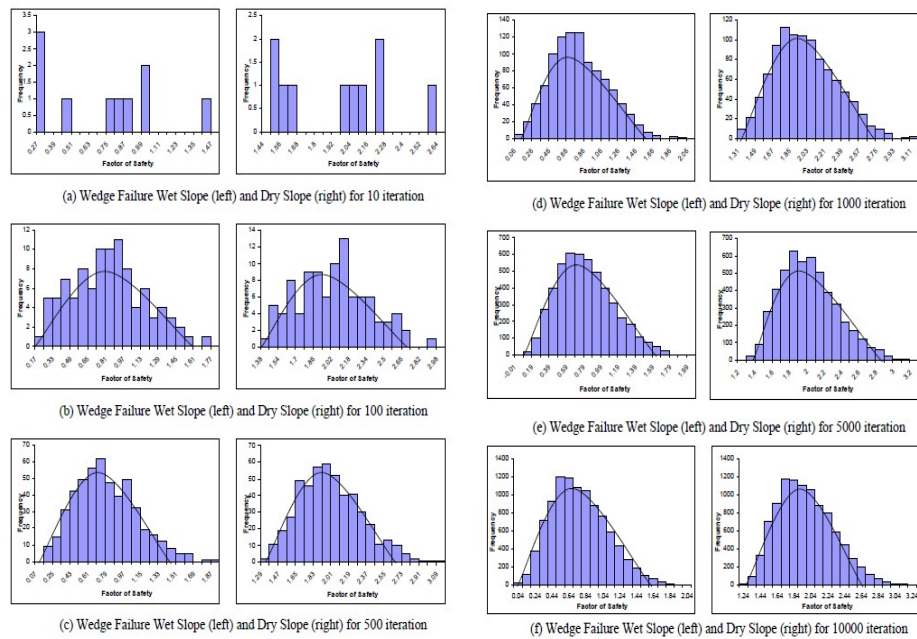
$$\alpha = \lambda \mu \eta \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\lambda, \eta$  = Empirical Parameters ที่ขึ้นอยู่กับค่า COV และ  $P_f$ ,  $\alpha$  = เป็นอัตราส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย ( $\mu_T$ ) ของแรงดึงที่ให้ค่า  $P_f$  ที่ต้องการกับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดิน,  $\mu_\phi$  = ค่าเฉลี่ย (Mean) ของมุมเสียดทานของดินหลังกำแพงกันดิน,  $COV_T$  = สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of Variation) ของค่าแรงดึงในกำแพงกันดิน

Mat Radhi et all (2008) พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยความน่าจะเป็นของลาดหิน จากการใส่ข้อมูลตัวแปรแบบเป็นพิสัยหรือกลุ่มข้อมูลโดยทำการกระจายตัวด้วยเทคนิค Monte carlo simulation (MCS) วิเคราะห์เสถียรภาพโดยจลนศาสตร์และจลนพลศาสตร์โดยการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์อ้างอิงมาจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยา (stereographic projection analysis) และการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์อ้างอิงมาจากการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (deterministic analysis) ค่าอัตราส่วนปลอดภัยถูกทำการวิเคราะห์ในรูปแบบการสูญเสียเสถียรภาพทุกประเภท ดังเช่น การพิบัติแบบระนาบและแบบลิ้ม (planar and wedge failure) ข้อมูลจากลาดชันทั้ง 6 กรณีศึกษา ได้แก่ Slope S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 ถูกวิเคราะห์ขึ้นมามีค่า  $P_f$  ดังรูปที่ 2.21 ลาดชัน Slope S2, Slope S4 และ Slope S6 มีค่าอัตราส่วนปลอดภัย 0.953, 0.991 และ 0.891 ซึ่งจะเห็นว่า มีลาดชัน 3 กรณีศึกษาจะเกิดการพังทลายแบบระนาบ ส่วนลาดชันที่มีการสมมติการพังทลายในลาดชันเป็นแบบลิ้มก่อนการวิเคราะห์พบว่า มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 1 ค่าการกระจายตัวแบบ Monte Carlo simulation จะสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ The probability of failure ( $P_f$ ) สำหรับลาดชันที่มีการสมมติการพังทลายในลาดชันเป็นแบบระนาบที่ลาดชัน Slope S2, Slope S4 และ Slope S6 โดยมีค่า  $P_f$  เท่ากับ 51.6%, 17.8%, และ 49% ดังรูปที่ 2.22 ส่วนลาดชันที่มีการสมมติการพังทลายในลาดชันเป็นแบบลิ้มพบว่ามีค่า  $P_f$  เท่ากับ 0% สำหรับการสมมติลาดดินในสถานะแห้งแต่สำหรับลาดดินในสถานะเปียก ทุกๆลาดชัน ยกเว้น ลาดชัน S1 มีค่า  $P_f$  ตั้งแต่ 7.7% จนถึง 75.2% จากผลลัพธ์แสดงว่าวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยความน่าจะเป็นจะให้ข้อมูลที่ละเอียดและลึกกว่าการวิเคราะห์ลาดหินแบบ determine instability of rock slope โดยผลลัพธ์จะเป็นค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ ที่เกิดจากเทคนิคการกระจายตัวแบบ Monte carlo simulation ซึ่งต้องใช้หลักการพื้นฐานทางสถิติและครอบคลุมความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในเสถียรภาพของลาดดินด้วย

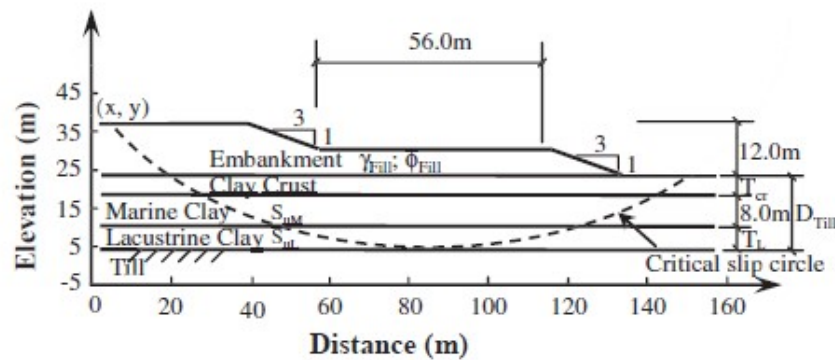


รูปที่ 2.21 Scatter plot data collected for six numbers of slopes (Mat Radhi et al, 2008)



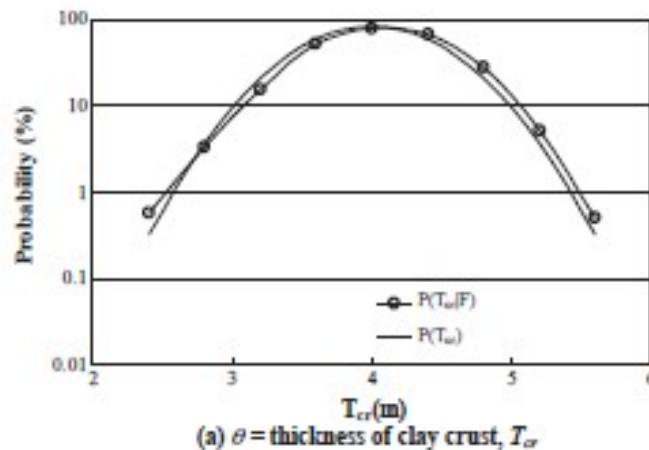
รูปที่ 2.22 Histogram of FOS calculated in probabilistic analysis for combination of joint set 1 and 2 at S2

Yu Wang et al (2010) พัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันโดยความน่าจะเป็นโดยแบ่งเป็นวิธีการหลักๆ 2 วิธีการ คือ hypothesis tests สำหรับการวิเคราะห์ความไวตัวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชัน และ bayesian analysis สำหรับประเมินผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเสถียรภาพในลาดชันโดยวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันโดยความน่าจะเป็นนี้เพื่อศึกษากรณีศึกษาของ James Bay Dyke ดังรูปที่ 2.23

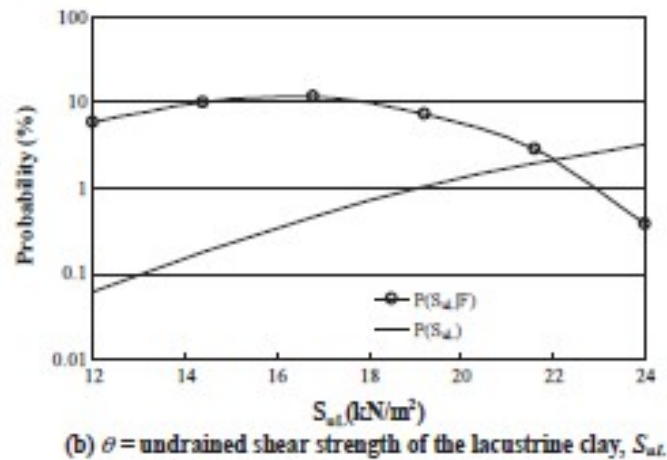


รูปที่ 2.23 The James Bay Dyke (modified after El-Ramly, 2001)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความไวตัวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในเสถียรภาพของลาดชันโดย hypothesis tests พบว่าค่า undrained shear strength ในดิน lacustrine clay มีความสำคัญและมีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงในความน่าจะเป็นในการพิบัติมากที่สุด ในขณะที่ค่าความหนาในดิน clay crust มีความสำคัญและมีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงในความน่าจะเป็นในการพิบัติน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25



รูปที่ 2.24 (a) Conditional probability density function (PDF)  $P(\Theta|F)$  for  $T_{cr}$  (Yu wang et al, 2010)



รูปที่ 2.25 (b) Conditional probability density function (PDF) ( $P(\theta|F)$ ) for  $S_u$  (Yuwang et al, 2010)

Wael A. et al (2008) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า ส่วนโค้งการพิบัติ (slip surface) ที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัยโดยพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ สมดุลของแรง (the limit equilibrium (LE)) โดยลาดชั้นทั้ง 3 กรณีศึกษาโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมการวิเคราะห์อื่นๆ โดยพิจารณาความไวตัวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาของลาดดิน ได้แก่ ลักษณะของเนื้อดิน และพบว่าลาดชั้นกรณีศึกษาที่ 2 มีความซับซ้อนเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรลักษณะของเนื้อดิน มากกว่ากรณีที่ 1 และ 3 ดังรูปที่ 2.26

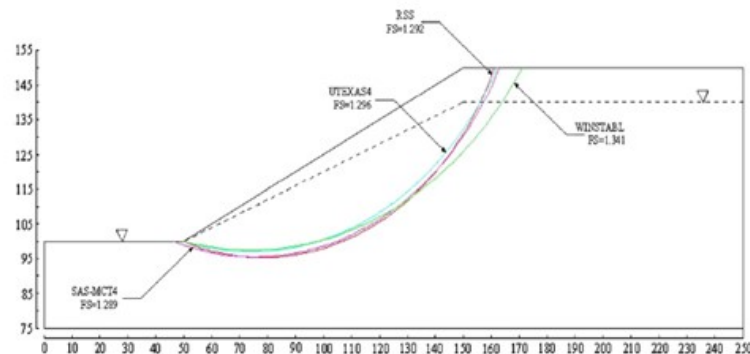
Example no.	Layer no.	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	$\phi$ (°)
1	1	17	15	20
2	1	18.2	80.0	0
	2	21.0	0.0	38
	3	18.2	100.0	0
	4	18.0	40.0	0
	5	16.9	95.0	0
	6	18.3	95.0	0
3	1	120	300	30

รูปที่ 2.26 Soil properties for three examples used in this study (Wael A. et al, 2008)

ผลลัพธ์ที่ได้เพิ่มเติม คือ ในลาดชั้นกรณีศึกษาที่ 3 มีผลกระทบความไวตัวของตัวแปรลักษณะของการเปลี่ยนแปลง slip surface มากที่สุด โดยทำการวิเคราะห์จากโปรแกรม SASMCT 4.0, UTEXAS3 และ STABL5M ได้ค่า FS = 1.179, 1.22 และ 1.214 ดังรูปที่ 2.27 จากการวิเคราะห์พบว่า

คำนวณโดยใช้ หลักการของ limit equilibrium method ควบคู่กับ Monte-Carlo technique จะให้ค่าการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าวิธี deterministic analysis

Example no.	SAS-MCT 4.0	UTEXAS3	STABL5M	PLAXIS 2D	PLAXIS 3D
2	1.179	1.22	1.214	1.14	1.22



รูปที่ 2.27 Geometry of slope and slip surfaces in example 3 ( Wael A. et al, 2008)

## 2.6 ระบบการเตือนภัยในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน (Landslide warning system)

ในลาดดินธรรมชาติสาเหตุหลักที่ทำให้ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพได้แก่ค่าความชื้นของน้ำฝน เพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำฝนจะไปลดค่าแรงดึงดูดน้ำในมวลดิน (suction forces) และค่ากำลังความแข็งแรงในมวลดิน การป้องกันการถล่มในลาดชันจำเป็นต้องทราบค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติเพื่อใช้ในการเตือนภัย

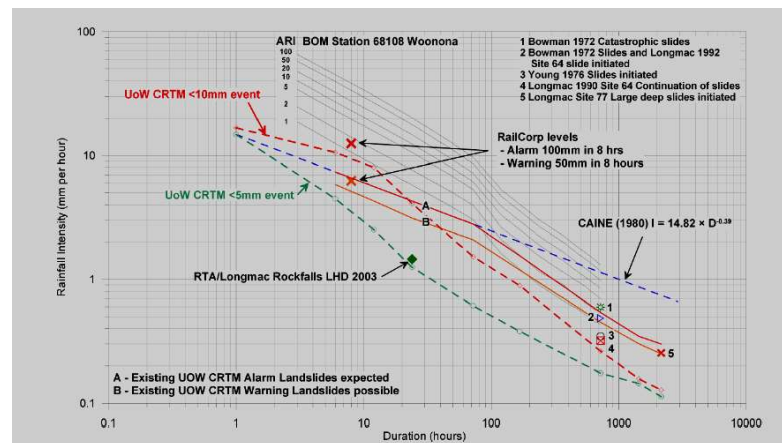
### 2.6.1 State of the art

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงบทความที่เป็นการพัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันโดยมีผลลัพธ์ออกมาเป็นค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API)

- ในญี่ปุ่นได้พัฒนาระบบการเตือนภัยสำหรับใช้ในภัยพิบัติตามธรรมชาติ โดยใช้ค่าของกระบวนการเติมน้ำ, การไหลของน้ำในลาดดิน (infiltration และ overland flow) และปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการเตือนภัยและเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อใช้ปรับปรุงการเตือนภัยแบบดั้งเดิมและใช้พยากรณ์อากาศโดยใช้เรดาร์ภาคพื้นดิน (radar and telemetry) วัดปริมาณน้ำฝนสะสมที่เกิดขึ้นจริง

- ในปี 1996 วิศวกรธรณีเทคนิคได้ออกแบบระบบสำหรับเตือนภัยพิบัติอันเนื่องมาจากน้ำฝนจากสถานีวัด 30 แห่ง ในระยะเวลาและฤดูกาลจริงอ้างอิงจากรadarภาคพื้นดิน (Rio radar) ซึ่งระบบที่ใช้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตินี้จะใช้คาดการณ์และเตือนภัยล่วงหน้าในลาดดินถล่มกับอุทกภัยเพื่อใช้ในหน่วยงานรัฐสำหรับป้องกันความรุนแรงในช่วงที่เกิดพายุฝนรุนแรง

- Wollongong regional study พัฒนาการเตือนภัยพิบัติธรรมชาติโดยใช้ปริมาณความเข้มฝนเป็นเกณฑ์วัดในการเตือนภัยดินถล่มซึ่งเก็บข้อมูลมาจากประวัติการเกิดดินถล่มซ้ำๆกันหลายครั้ง โดยเสนอเป็นเส้นโค้ง average recurrence interval (ARI) ตามรูปที่ 2.28 โดยเริ่มต้นตั้งแต่ August 1998 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความเสียหายมากจากลาดชันถล่ม



รูปที่ 2.28 Interpreted threshold curves for landsliding in wollongong, superimposed on annual recurrence interval curves for a selected rainfall station (Chowdhury et al, 2012)

### 2.6.1.2 The Antecedent precipitation index ( API )

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (The antecedent precipitation index, API) เป็นดัชนีที่บอกถึงปริมาณน้ำในช่องว่างของมวลดินตามธรรมชาติ โดยอาจจะวัดจากปริมาณการเติมน้ำเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น น้ำฝน ต่อเนื่อง (Shakir Ali et al, 2010) ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ Critical API ( $API_c$ ) ถือเป็นค่าปริมาณน้ำในช่องว่างของมวลดิน ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการถล่ม โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นหลังจากพายุฝน ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินมักจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ฝนตก (the rainfall duration) ค่ามุลาดเอียงในลาดชันและกำลังเฉือนในมวลดิน

Linsley et al. (1949) แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน ดังสมการที่ 2.38

$$API_{(t)} = API_{(t-1)} K_{(t-1)} + P_{(t)} \quad (2.38)$$

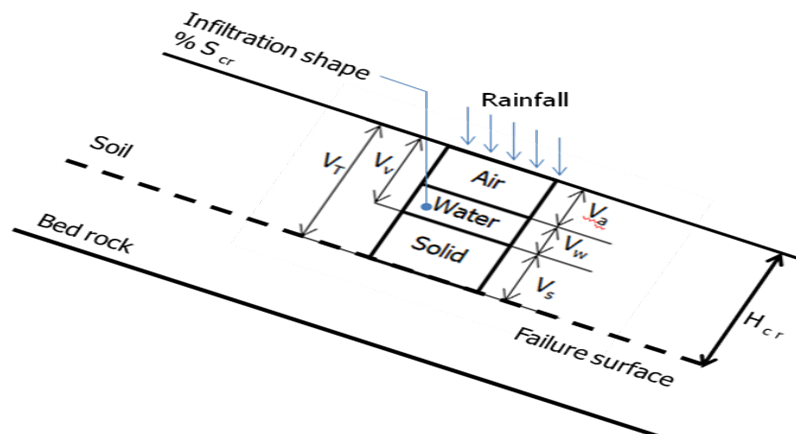
เมื่อ  $API_{(t)}$  คือ API of a current period (mm),  $API_{(t-1)}$  คือ API of the previous period (mm),  $P_{(t)}$  คือ precipitation of the current period (mm), และ  $K_{(t-1)}$  คือ a recession constant of the previous period.

Choudhury and Blanchard (1983) แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า  $K_{(t-1)}$  ดังสมการที่ 2.39

$$K_{(t-1)} = \exp(-Et/W) \quad (2.39)$$

เมื่อ  $Et$  คือ evaporation at short shrift,  $W$  คือ the soil moisture at evaporation time.

ตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปรจาก Phase diagram ของมวลดิน ( $V_v, V_T$  and  $V_w$ ) ที่ใช้ใน API ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ 2.40



รูปที่ 2.29 Phase relationships for a soil

เมื่อ porosity ( $\eta$ ) =  $\frac{V_v}{V_T}$ , volumetric water content ( $\theta$ ) =  $\frac{V_w}{V_T}$ , and degree of saturation ( $S_r$ ) =  $\frac{V_w}{V_v}$

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติถูกคำนวณและใช้เป็นเกณฑ์ในการเตือนภัยดินถล่มโดยค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ  $API_{cr}$  ถูกพบว่าเป็นปริมาณน้ำในมวลดินวิกฤติทางด้านฝั่งเปียก (the wetting front in the thickness of the soil) และคำนวณได้ดังสมการที่ 2.40

$$API_{cr} = \eta \cdot S_{cr} \cdot H_{cr} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $S_{cr}$  คือ the critical degree of saturation, และ  $H_{cr}$  คือ the critical thickness of the soil layer

ความหนาวิกฤติในสมการ  $H_{cr}$  ในสมการที่ 2.40 สามารถประยุกต์หาได้จากสมการที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปลอดภัยในสมการของ Bishop's simplified method สำหรับ infinite slope stability analysis under unsaturated seepage conditions เมื่อลาดชันเริ่มสูญเสียเสถียรภาพ (F.S. =1)

$$H_{cr} = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma \sin \beta} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ 2.40 และ 2.41 ในกรณีที่ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นผิวพิบัติ (water table is beneath a circular failure) API สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.42

$$API = \frac{S \cdot e}{1 + e} \left( \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma \sin \beta} \right) \quad (2.42)$$

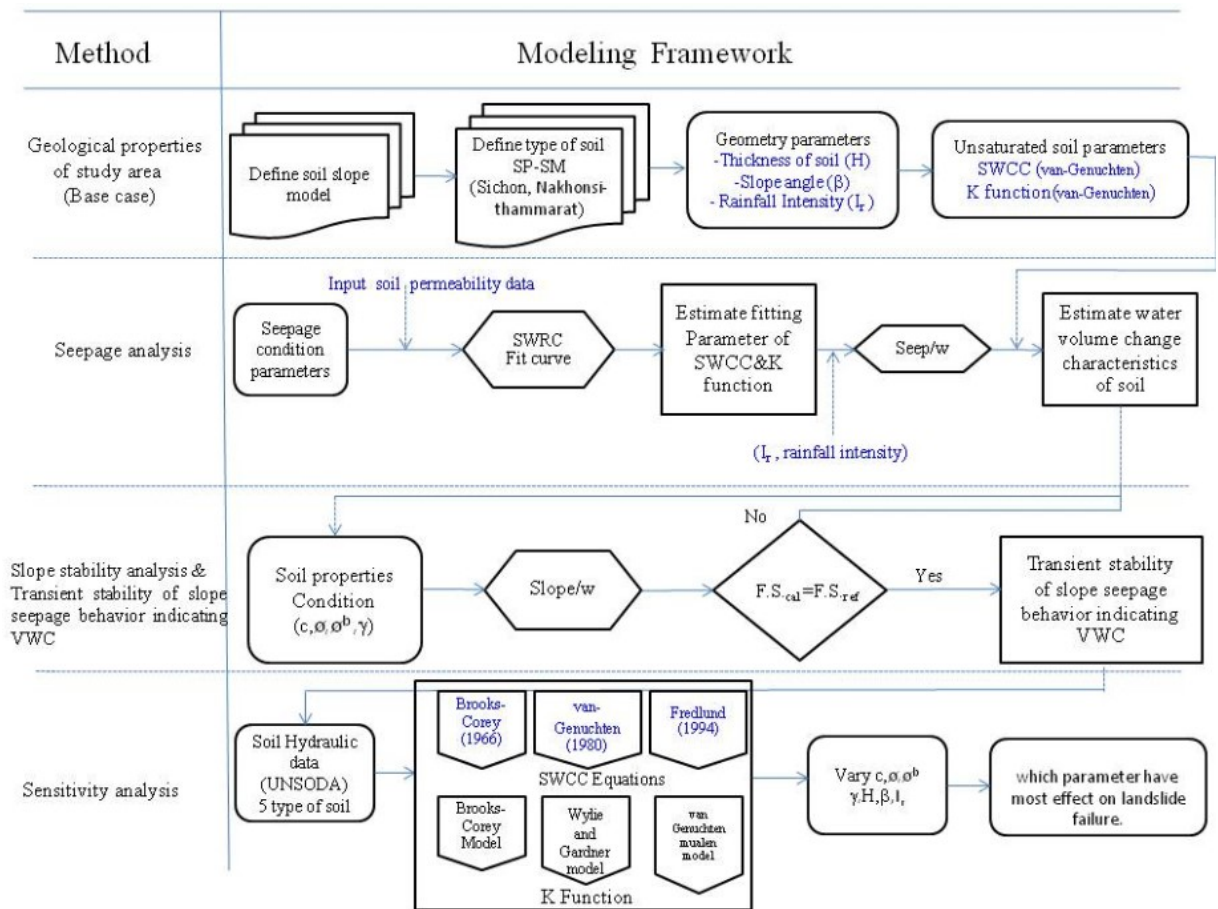
เมื่อ  $e$  คือ the void ratio;  $S$  คือ the degree of saturation;  $c'$  คือ the effective cohesion;  $\gamma$  คือ the unit weight of the soil;  $\beta$  คือ the slope angle;  $\phi$  คือ the effective angle of internal friction;  $\phi^b$  คือ the angle of friction with respect to matric suction in the unsaturated soil;  $(\sigma_n - u_a)$  และ  $(u_a - u_w)$  คือ the effective normal stress และ the matric suction, respectively, on the plane of failure.



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและวิธีการวิจัยอันนำไปสู่ผลลัพธ์ในการตอบวัตถุประสงค์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน ได้แก่ ชนิดของดิน, ความหนาของชั้นดิน, ความลาดเอียงในลาดดิน, ชนิดของกลุ่มพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในมวลดิน (Shear strength parameters of soil) และกลุ่มค่าความไม่แน่นอนในตัวแปรกำหนด (Fitting parameters) ของ SWCC และ Permeability function ที่ได้มาจากการคำนวณในสมการของ van Genuchten, Fredlund&Xing, Wylie&Gardner และ Brook&Corey โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ และ ศึกษาเสถียรภาพของดินในอำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ ( $API_{cr}$ ) สำหรับใช้ในระบบการเตือนภัย ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและค่าในสนามถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์ค่าการซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดินและเสถียรภาพในลาดดิน โดยโปรแกรม Geostudio เพื่อคำนวณเวลาที่ลาดดินจะสูญเสียเสถียรภาพและพิจารณาว่าพารามิเตอร์ตัวไหนมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินและอัตราส่วนปลอดภัยมากที่สุด เพื่อให้เข้าใจถึงภาพโดยรวมของวิธีดำเนินงานก่อน จึงแบ่งการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังในภาพที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 1) การกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา(Geological properties on study area (Base case)), 2) การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Seepage analysis), 3) การวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินและการพฤติกรรมการณ์การซึมผ่านของน้ำฝนเพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น (Slope stability analysis & Transient stability of slope seepage behavior indicating VWC) และ 4) การประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Sensitivity analysis)

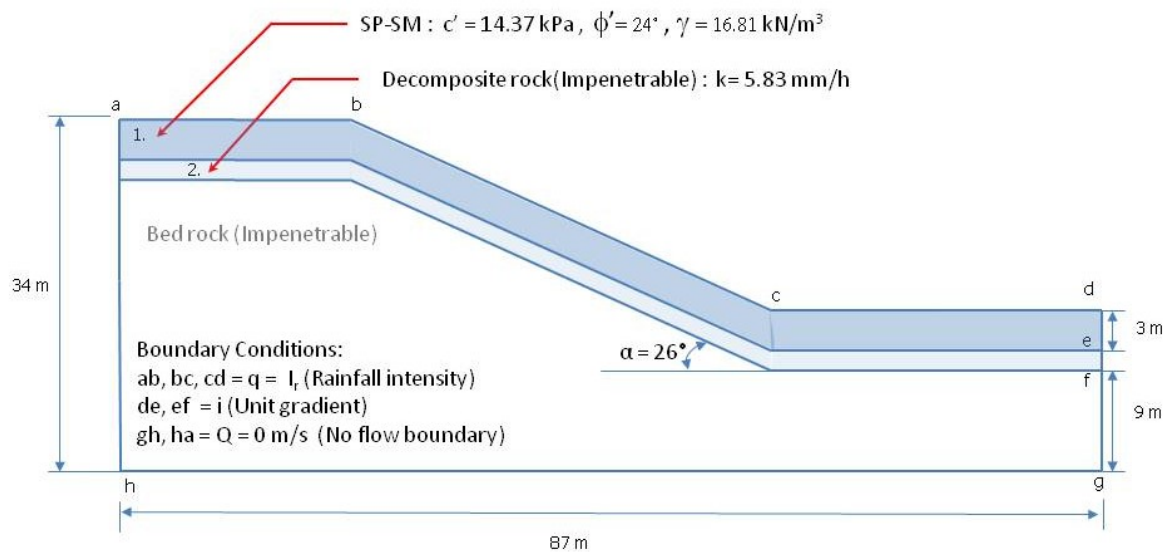


รูปที่ 3.1 Research methodology

### 3.1 การกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา (Geological properties on study area (Base case))

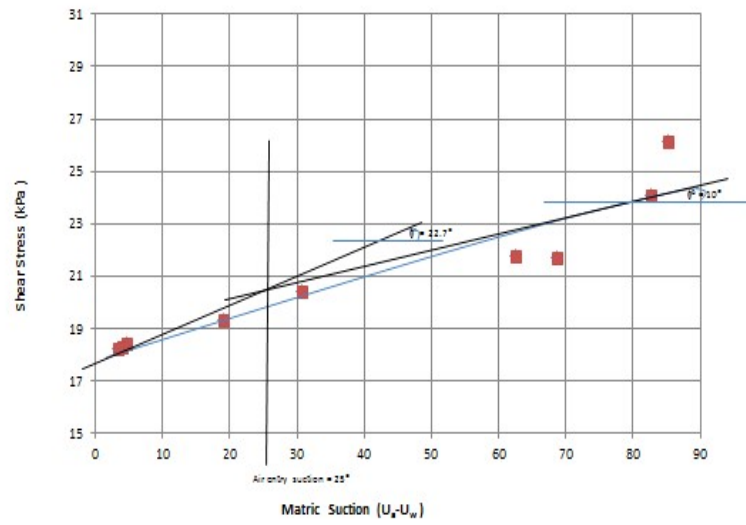
เป็นการกำหนดแบบจำลองของลาดดินพิบัติสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ใช้หลักแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The mathematical models) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งได้จากข้อมูลเชิงวิเคราะห์ในหัวข้อ 2.1 โดยลักษณะลาดดินจะไม่เป็นดินเนื้อเดียวกันไปตลอดทั้งความลาด (A heterogeneous soil slope) ดินชั้นบนสุดจะเป็นดินชนิด SP-SM มีความหนา 3 เมตร ถัดลงไปจะเป็นหินพรุน (Decomposite rock) หนา 1 เมตร และชั้นล่างสุดจะเป็นหินที่บ้น้ำ (Bed rock) หนา 9 เมตร ลาดดินมีความสูง 34 เมตรและมีความลาดเอียง 26 องศาผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ) 14.37 kPa, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) 24 องศา, ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) 16.81 kN/m<sup>3</sup> (รัชพลและคณะ, 2556)

เนื่องจากข้อมูลดิบของ SWCC ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่สมบูรณ์พอที่จะทำการวิเคราะห์ Transient seepage จึงต้องนำข้อมูลดิบไปวิเคราะห์ในโปรแกรม SWRC Fit curve (ผู้วิจัยขออธิบายขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียดในหัวข้อ 3.2.1) เพื่อคำนวณค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameters) ของ SWCC และ Permeability function ที่ใช้ในกรณีศึกษาพื้นที่ อ. สีชล โดยอ้างอิงมาจากการคำนวณในสมการของ van Genuchten เนื่องจากเป็นรูปแบบสมการอย่างง่ายและจากโปรแกรมการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินจะใช้หลักการ Finite element analysis เพื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนพัง (Deformation) ของลาดดิน มาทำการวิเคราะห์โดยทำการแบ่งพื้นที่ของมวลดินออกเป็นตาข่ายพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตรจำนวน 1479 จุด และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ดังรูปที่ 3.2 ดังนี้ ด้านข้างฝั่งซ้ายและด้านล่างสุดกำหนดให้ ไม่มีการไหลผ่านอันเนื่องมาจากน้ำ (No seepage through the base of the soil slope) ด้านล่างฝั่งขวากำหนดให้มีการระบายน้ำออกได้โดยกำหนดให้การไหลผ่านมีค่าเท่ากับ A unit gradient (i) และพื้นที่ด้านบนลาดชันมีการรองรับปริมาณการเติมน้ำอันเนื่องมาจากค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity,  $I_r$ ) โดยกำหนดให้การไหลผ่านลงไปมวลดิน มีค่าเท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในมวลดินที่กำหนด (Coefficient of permeability, k) ในเบื้องต้น



รูปที่ 3.2 Slope geometry and soil property for the site

ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน ( $\sigma^b$ ) 10 องศา เกิดจากการ plot กราฟและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำและความแข็งแรงในมวลดินที่อ้างอิงมาจากการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการของ รัชพลและคณะ (2556) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Relationship between matric suction and shear stress of geotechnical laboratory (After modified รัชพลและคณะ, 2556)

### 3.2 การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Seepage Analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดินดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดปลีกย่อยดังแสดงในรูปที่ 3.4 คือ

รูปที่ 3.4 Flow chart of seepage analysis methodology

- 1.) กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil properties)
- 2.) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ ค่าตัวแปรคงที่ (Fitting parameters) ในเส้นอรรถลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ดังตารางทางด้านฝั่งขวามือสุดของรูปที่ 3.4
- 3.) กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) โดยแสดงรายละเอียดและได้อธิบายดังในรูปที่ 3.2
- 4.) วิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากโปรแกรม Seep/W โดยค่าน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินมากขึ้นโดยใช้หลักของ Darcy's law (สำหรับการซึมผ่านในแนวระนาบแบบ 2 มิติ) ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.1)$$

เมื่อ H คือค่าแรงดันรวม (Total head),  $k_x$  คือค่าคงที่ทางชลศาสตร์ในแนวระนาบแกนนอน (x direction),  $k_y$  คือค่าคงที่ทางชลศาสตร์ในแนวระนาบแกนตั้ง (y direction), Q คือค่าอัตราการไหลบนพื้นผิว (The applied boundary flux),  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  คือค่าปริมาตรน้ำในมวลดิน (The volumetric

water content), t คือ เวลา (The time)

- 5.) คำนวณค่าการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ซึ่งจากโปรแกรม Seep/w จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าแรงดูดน้ำในผิวดิน (Matric suction), อัตราความอิ่มตัวไปด้วยน้ำในมวลดิน (Degree of saturation) และ ค่าปริมาตรน้ำในมวลดิน (Volumetric water content) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนและเวลา (Step time) ที่กำหนด
- 6.) นำข้อมูลที่ได้ไปเป็นข้อมูลในโปรแกรม Slope/W ในขั้นตอนถัดไปเพื่อทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพในลาดดินหรือคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยและค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ ( $API_{cr}$ )

เนื่องจากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินเป็นส่วนที่สำคัญมาก จึงขออธิบายขั้นตอนของ Seepage Analysis ในแต่ละส่วน ตามรูปที่ 3.1 (Seepage condition parameters, SWRC Fit curve, Estimate fitting parameters of SWCC and K Function, Seep/W และ Estimate water volume change characteristic of soil) พร้อมทั้งมาของข้อมูลที่ใช้เป็น Input data ในแต่ละส่วนอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไปตามลำดับ Geological properties on study area (Base case))

### 3.2.1 การกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดิน (Seepage condition parameters)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Seepage analysis อันได้แก่ ค่าตัวแปรคงที่ (Fitting parameters) ในเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) นั้นค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ในกรณีพื้นที่ศึกษา (Base case) ถูกอ้างอิงมาจากค่าปริมาณน้ำฝนสะสมของเดือน มีนาคม พ.ศ. 2554 ตามระยะเวลาที่ลาดชั้นกรณีศึกษาพื้นที่ อำเภอ สีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช เคยเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มโดยอ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ กรมชลประทาน (Thailand Royal Irrigation Department, 2011) ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดิน และในกรณี Sensitivity analysis จะใช้ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) 6-36 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเป็นพิสัยที่อ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ที่ Rahardjo et al. (2007) ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดินบริเวณภูมิภาคเอเชีย

### 3.2.2 ขั้นตอน SWRC Fit curve, Estimate fitting parameters of SWCC และ K Function

คือการนำค่าข้อมูลดิบ Permeability ที่ได้จากภาคสนามไปวิเคราะห์ค่าโดยใช้โปรแกรม SWRC Fit curve เพื่อคำนวณค่าตัวแปรกำหนดในเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน ดังรูปที่ 3.5

SWRC Fit can fit several soil hydraulic models to measured soil water retention data. Copy your soil water retention data in the textbox below and press "Calculate" button. Before you use your original data you can see how it works by selecting a sample data from the pull-down menu. [Read more instructions](#)

**Description of the soil sample**

teparach

Soil texture

Your name

chollada.2014  
(NS: Not Specified)

**Calculation options**

$\theta_r = 0$

Bimodal models

**Soil Water Retention Curve**

Select from sample data

85.1875	0.310444145
82.59375	0.318605928
68.625	0.326318181
62.53125	0.327371111
30.65625	0.331976007
19.14375	0.335702269
4.71875	0.343355925
4.09375	0.345081438
3.3125	0.345896557

Input data

Calculate Clear

รูปที่ 3.5 Permeability from geotechnical laboratory (Calculated by SWRC Fit curve)

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ของ SWCC และ Permeability function ในกรณี Sensitivity analysis ซึ่ง SWCC Equation ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980) และ Fredlund (1994) ส่วน Permeability function ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey, Wylie-Gardner และ van Genuchten-Mualen model เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดินและความไม่แน่นอนในการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ ( $API_{cr}$ )

ตาราง 3.1 Fitting Parameters in van Genuchten, Fredlund&Xing, Wylie&Gardner, Brook& Corey Equation (Calculated by SWRC Fit curve)

Equation	SWCC					Permeability function parameters	
	a(kpa)	$h_s$	$\alpha$	n	m	$\theta_s$	$\theta_r$
Brooks-Corey	10	0.3891	0.3328	-	-	0.4197	0.0246
van Genuchten	1.503	-	-	1.484	0.326	0.4362	0.0486
Fredlund and Xing	10	-	-	1	1	-	-
Wylie-Gardner	-	-	-	-	-	0.3308	0.07

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดน้ำในผิวดิน (Matric suction) และค่าปริมาตรน้ำในมวลดิน (Volumetric water content) ซึ่งสามารถนำมาพลอตกราฟ SWCC Equation ที่ได้มาจากการนำค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ใน SWRC Fit curve ไปแทนค่าในสมการ SWCC Equation ของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980) และ Fredlund (1994) ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดน้ำในผิวดิน (Matric suction) และค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน (Coefficient of permeability) ซึ่งสามารถนำมาพลอตกราฟ K Function ที่ได้มาจากการนำค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ใน SWRC Fit curve ไปแทนค่าในสมการ Brooks-Corey, Wylie-Gardner และ van Genuchten-Mualen model

ตาราง 3.2 Relationship between matric suction (kPa) and volumetric water content ( $\theta_w$ )

Matric suction ( $u_a - u_w$ )	$\theta_w$ (Fredlund & Xing)	$\theta_w$ (van Genuchten)	$\theta_w$ (Brook & Corey)
0.01	0.43599485	0.435951243	0.4197
0.1	0.42610206	0.428897182	0.4197
1	0.320656416	0.3246726	0.313189
10	0.153844808	0.152424404	0.158716
100	0.083048196	0.08286096	0.086927
1000	0.059924838	0.059844694	0.053565
10000	0.051592505	0.052289928	0.038061
100000	0.048271157	0.049810837	0.030856
1000000	0.04687043	0.048997332	0.027507

ตาราง 3.3 Relationship between matric suction (kPa) and Coefficient of permeability,  $K_w$  (cm/s)

Matric suction ( $u_a - u_w$ )	$K_w$ (van Genuchten)	$K_w$ (Brook & Corey)	$K_w$ (Wylie & Gardner)
0.01	0.00718359	0.006171	0.006946791
0.1	0.006729807	0.006171	0.005657802
1	0.002209899	0.001913	0.001831084
10	0.000107351	0.000126	8.48939E-05
100	9.3754E-06	1.14E-05	6.58071E-06
1000	2.55089E-06	1.64E-06	3.21878E-06
10000	1.48683E-06	4.17E-07	2.85896E-06
100000	1.22429E-06	1.8E-07	2.80965E-06
1000000	1.14625E-06	1.14E-07	2.80262E-06



### 3.2.3 ขั้นตอน Seep/W และ Estimate water volume change characteristic of soil

คือขั้นตอนการนำข้อมูลแบบจำลองของลาดดินและข้อมูลที่ใช้เป็น Input data ได้แก่ ชนิดของดิน, ค่า Fitting parameter ของ SWCC และ Permeability function, ค่าความหนา, ความลาดเอียง, ค่าความชื้นผืน และคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของลาดดิน ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) และ ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) มาวิเคราะห์หาค่าการซึมผ่านของน้ำในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำผืนและเวลา (Step time) ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ

### 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ (Slope stability analysis)

เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำผืนในลาดดิน (Seep/W) มาทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพ แรงต้าน (Resisting force) ต่อแรงผลักดัน (Driving force) หรือใช้หลักการ Limit equilibrium analysis เพื่อวิเคราะห์หาค่า อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในมวลดิน (Soil strength parameters); ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ) และ ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ )

เมื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนปลอดภัยในช่วงเวลาที่ลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพได้ ( $F.S. \leq 1$ ) จึงนำข้อมูลในมวลดิน เช่น ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $S_r$ ), ความพรุน ( $\eta$ ) ณ. ช่วงเวลาที่ลาดดินเกิดการถล่ม มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เพื่อใช้ในระบบการเตือนภัยล่วงหน้าต่อไปวิธีการ Slope stability Analysis ถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนย่อยได้แก่ (1) Input soil properties condition; (2) Slope/w; (3) Check F.S.; (4) Transient stability of slope seepage behavior indicating VWC

#### 3.3.1 ขั้นตอนการใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในลาดดิน (Input soil properties condition) และ ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน (Slope/W)

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำผืนในลาดดิน (Seep/W) มาทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพหรืออัตราส่วนปลอดภัยโดยใช้หลักการ Limit equilibrium analysis โดยในที่นี้เลือกใช้วิธีการของ Bishop's simplified method และตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในมวลดิน (Soil strength parameters); ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ) 14.37 kPa, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) 24 องศา, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ) 10 องศาและค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) 16.81 kN/m<sup>3</sup>

### 3.3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบ อัตราส่วนปลอดภัย (Check factor of safety)

เป็นขั้นตอนการตรวจสอบอัตราส่วนปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์ Slope/W ว่า ณ.ช่วงเวลาที่เกิดดินเกิดการถล่มและนำข้อมูลมาวิเคราะห์หา ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เพื่อเปรียบเทียบกับ ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติและดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน ที่เหตุการณ์ดินถล่ม อ.ลีชล นครศรีธรรมราช ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ ถ้าไม่มีความสมเหตุสมผลก็ต้องทำการย้อนกลับไป พิจารณาในขั้นตอน Seep/W ว่าคำนวณ Fitting parameter ของ SWCC และ Permeability function หรือกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ผิดพลาดหรือไม่ แต่ถ้ามีความ สมเหตุสมผลกับเหตุการณ์ดินถล่มจริงก็ดำเนินการในขั้นตอน ระบบการเตือนภัย (Early warning) และวิเคราะห์ความไวตัวของตัวแปร (Sensitivity analysis) ต่อไป

### 3.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การซึมผ่านเนื่องมาจากน้ำฝนในลาดดิน (Transient stability of slope seepage behavior indicating VWC)

คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การซึมผ่านเนื่องมาจากน้ำฝนในลาดดินหรือการพิจารณา ค่า ปริมาณน้ำฝนในมวลดิน (Volumetric water content), ความดันน้ำในมวลดิน (Pore water pressure), ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $S_r$ ) ณ เวลาที่ลาดดินเกิดการถล่มเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่า เป็นไปตามทฤษฎีและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอหรือไม่

## 3.4 การประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติ (Sensitivity analysis)

ก่อนทำการประเมินความไวตัว ต้องกำหนดค่าตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพใน ลาดดินธรรมชาติโดยขอแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ตามภาพที่ 3.1 เป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ (1) Input soil texture condition; (2) Input SWCC and k function; (3) Vary geometry and soil strength parameters.; (4) Sensitivity Analysis.

### 3.4.1 ขั้นตอนการใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชนิดของดิน (Input soil texture condition)

เป็นการใส่ข้อมูลสำหรับประเมินความไวตัวของพารามิเตอร์เพื่อพิจารณาว่าชนิดของดินที่แตกต่างกันมีผลต่อการวิเคราะห์การถล่มของลาดดินโดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API), ค่าอัตราส่วน ปลอดภัย (F.S.), ระยะเวลาในการถล่มและพฤติกรรมการณ์การซึมผ่านเนื่องมาจากน้ำฝนในลาดดินอย่างไร จากการอ้างอิงชนิดของดินที่จะนำมาประเมินความไวตัวของพารามิเตอร์ดินชนิดแรกที่ถูกเลือก คือ Loamy sand (Unsoda 1062) เนื่องจากมีค่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ (Cu, Cc, D10, D30, D60) คล้ายกับดินชนิด SP-SM ในกรณีศึกษาพื้นที่แต่ต้องการทดสอบว่าดินจาก Unsoda และ พื้นที่จริงจะมีความไวตัวของพารามิเตอร์เหมือนหรือแตกต่างกันหรือไม่ จากนั้นจึงทำ

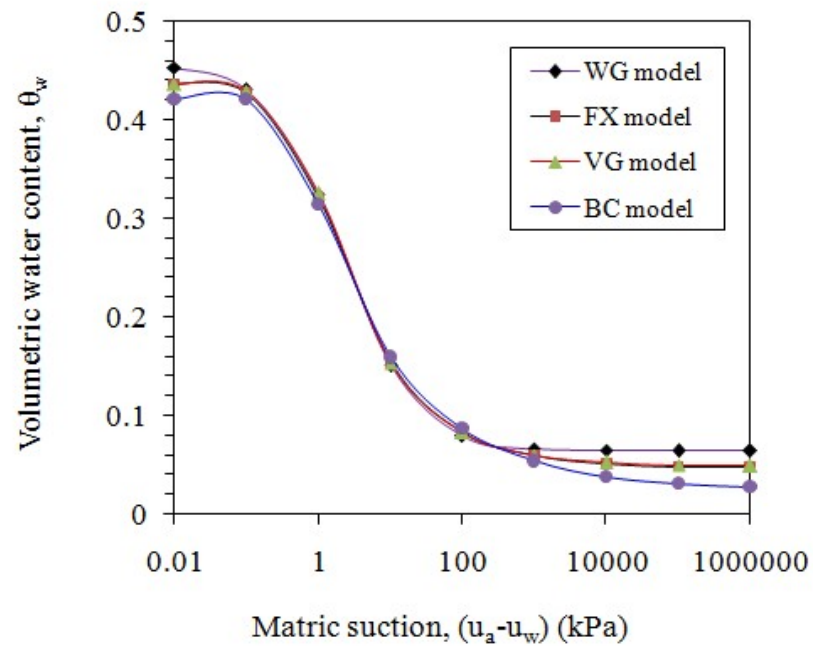
การอ้างอิงดิน Unsoda 4660,4651,1111,1381 เพื่อพิจารณาความไวตัวของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับชนิดของดินเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการซึมผ่านเนื่องมาจากน้ำฝนในลาดดิน โดยตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของค่าผลการทดสอบ Atterberg limit, Sieve analysis ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน Unsoda และ ดินชนิด SP-SM ในกรณีศึกษาพื้นที่

ตาราง 3.4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน Unsoda 4660,4651,1062,1111,1381 และ ดินชนิด SP-SM ในกรณีศึกษาพื้นที่

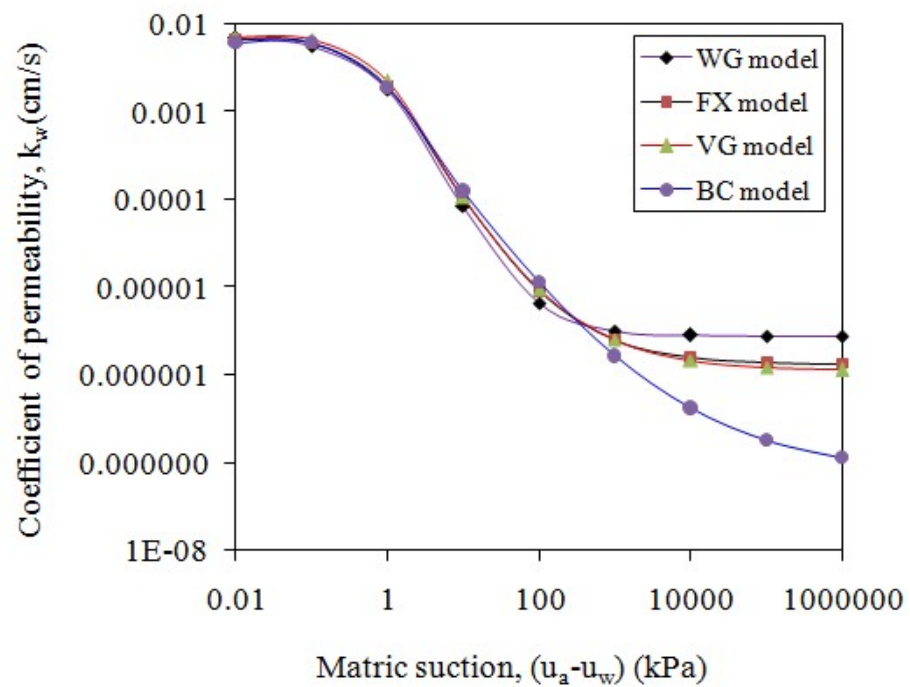
อ้างอิง	ดิน อ.สขล จ.นคร				unsoda 2.0				
	ตำแหน่งศึกษา				รหัสดิน				
	T	M1	M2	U	4660	4651	1062	1111	1381
คุณสมบัติของดิน									
ค่าพิกัดเหลว (LL %)	69.92	50.74	50.09	35.49	50.74				
ค่าพิกัดพลาสติก (PL %)	34.45	29.23	26.36	22.85	29.23				
ค่าดัชนีพลาสติก (PI %)	35.47	21.51	23.74	12.16	21.51				
จำแนกประเภทของดินด้วยวิธี(USCS)	SW	SP-SM	SW-SM	SP-SM	sand	sand	loamy sand		
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของเม็ดดิน (Cu)	8.75	9.7	7.2	8.33	7.8		8.33		
สัมประสิทธิ์ความโค้งของเส้นกราฟ (Cc)	1.4	0.93	1.07	0.78	0.93		0.78		
D10	0.2	0.1	0.09	0.09	0.09	0.35	0.09	0.02	0.01
D30	0.7	0.3	0.25	0.25	0.45	0.55	0.25	0.15	0.15
D60	1.8	1	0.6	0.7	0.7	0.75	0.7	0.25	0.3

### 3.4.2 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล เส้นอัตลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) (Input SWCC and k function)

เป็นการใส่ข้อมูลสำหรับประเมินดูความไวตัวของพารามิเตอร์โดยนำ Fitting parameters ที่ได้จากโปรแกรม SWRC Fit curve ซึ่ง SWCC Equation ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980) และ Fredlund (1994) ส่วน Permeability function ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey, Wylie-Gardner และ van Genuchten-Mualem model ภาพที่ 3.6 และ 3.7 แสดงกราฟของ SWCC และ Permeability function ที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่แตกต่างกัน



រូបទី 3.6 Relationship between matric suction (kPa) and volumetric water content ( $\theta_w$ ) for loamy sand (Unsoda 1062)



រូបទី 3.7 Relationship between matric suction (kPa) and coefficient of permeability,  $k_w$  (cm/s) for loamy sand (Unsoda 1062)

### 3.4.3 ขั้นตอนการใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาและความแข็งแรงในมวลดิน (Vary geometry and soil strength parameters)

เป็นขั้นตอนการใส่ข้อมูลสำหรับประเมินความไวตัวของพารามิเตอร์โดยนำพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางธรณีวิทยา ได้แก่ ค่าความลาดเอียงของลาดดินและค่าความหนาของลาดดิน ส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในมวลดิน (Soil strength parameters) คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ) และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) จะขออธิบายถึงค่าพิสัยและอ้างอิงที่มาในหัวข้อที่ 3.4.4 ใน Series B และ C ตามลำดับ

### 3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความไวตัวของพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน (Sensitivity analysis)

ในขั้นตอนนี้จะอธิบายถึงการเลือกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินทั้งหมด (Scenario for study) ตารางที่ 3.4 แสดงถึงค่าพิสัยและอ้างอิงที่มาของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินทั้งหมดโดยแบ่งเป็น Series A (Unsaturated soil properties), Series B (Geometry properties) และ Series C (Soil strength) ดังนี้

**ตารางที่ 3.5 Series A (Unsaturated soil properties):** ดิน 5 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ Sand, Loamy sand และ Sandy loam ( UNSODA 4660,4651,1062,1111 และ 1381) ถูกเลือกมาเพื่อใช้วิเคราะห์ความไวตัวของพารามิเตอร์โดยดิน Loamy sand UNSODA 1062 จะมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ (Cu,Cc,D10,D30,D60) คล้ายกับดินชนิด SP-SM ในกรณีศึกษาพื้นที่นอกนั้นจะเป็นการอ้างอิงดินหลายๆชนิดมาจาก UNSODA เพื่อดูความแตกต่างในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดย SWCC Equation ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980) และ Fredlund (1994) และ Permeability function ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey, Wylie-Gardner และ van Genuchten-Mualen

ตารางที่ 3.5 Sensitivity analysis table

Series	Type of Soil	SWCC Equation	K Function	Slope $\alpha$ (°)	Rainfall Intensity (mm/h)	Thick ness of soil(m)	c' (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$\phi^b$ (°)
A	Vary	Vary	Vary	26	6-36	3	14.37	16.81	24	10
B	Loamy sand (UNSODA 1062)	van-Genuchten (1980)	van-Genuchten (1980)	Vary	6-36	Vary	14.37	16.81	24	10
C	Loamy sand (UNSODA 1062)	van-Genuchten (1980)	van-Genuchten(1980)	26	6-36	3	Vary	Vary	Vary	Vary

ตารางที่ 3.5 Series B (Geometry properties): ค่าความหนาของดิน (Soil thickness, T) และ ค่าความลาดเอียงของลาดดิน (Slope angles,  $\beta$ ) ถูกอ้างอิงมาจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) บริเวณพื้นที่ อ. สีชล นครศรีธรรมราช โดยมีค่าพิสัยความหนาของดิน 1-5 m และมีค่าความลาดเอียงของดิน 20-50 องศา โดยมีค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) 6-36 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเป็นพิสัยที่อ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ที่ Rahardjo et al. (2007) ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดินบริเวณภูมิภาคเอเชีย

ตารางที่ 3.5 Series C (Soil strength properties):ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (c') 1-35 kPa , ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ) 10-20° และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) 13-20 kN/m<sup>3</sup> ถูกอ้างอิงมาจาก ตาราง approximate guidelines table for design soil property variability (Phoon&Kulhawy, 1999) ส่วนค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) 20-30° ถูกอ้างอิงมาจาก Descriptive properties of soil (Jon, W. K. et al, 1989)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิจารณ์

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามวิธีการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ 1) ผลที่ได้จากการกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา(Result from geological properties on study area (Base case)), 2) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Result from seepage analysis), 3) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินและการพฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำฝนเพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น (Result from slope stability analysis & transient stability of slope seepage behavior indicating WWC) และ 4) ผลที่ได้จากการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Result from sensitivity analysis) โดยการศึกษาครั้งนี้ต้องใช้ค่าจากข้อมูลต่างๆ เป็นจำนวนมาก จึงขอยกเพียงเฉพาะข้อมูลที่สามารถอธิบายให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่าย

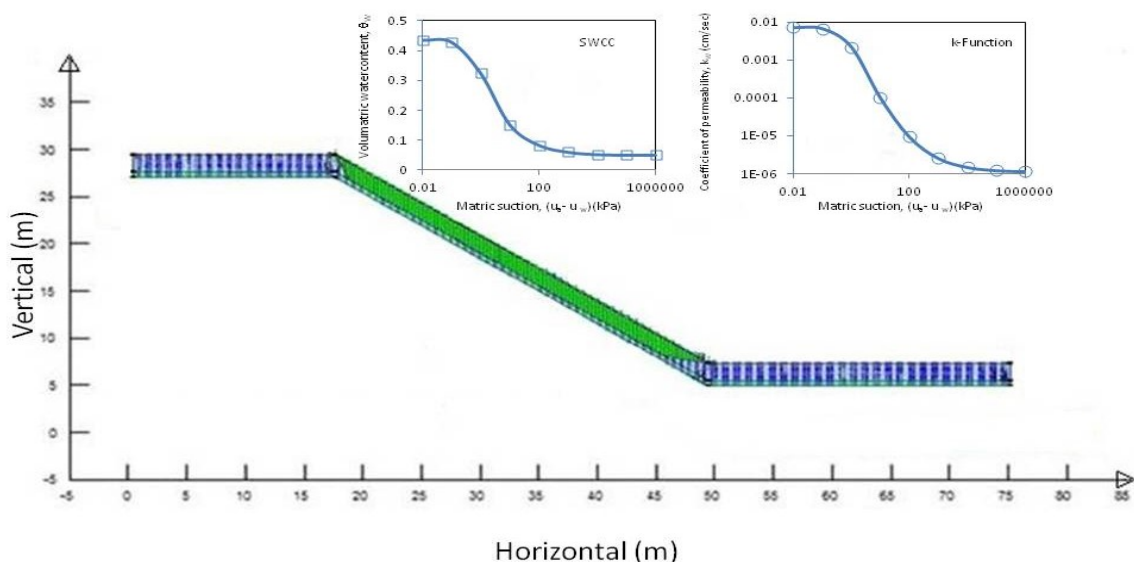
#### 4.1 ผลที่ได้จากการกำหนดแบบจำลองทางธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา(Result from geological properties on study area (Base case)) และ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Result from seepage analysis)

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลในสนาม ในพื้นที่กรณีศึกษา อ. สีชล นครศรีธรรมราช (รัชพลและคณะ, 2556) พบว่าดินเกิดการถล่มและเลื่อนไถลของดินแบบตื้นถึงปานกลาง (Shallow and moderate slope movements) ด้านบนของการเลื่อนไถลเป็นการเคลื่อนตัวแบบหมุน (Rotational slipping movement) ในขณะที่ด้านล่างของการเลื่อนไถลเป็นการเคลื่อนตัวแบบเลื่อนระหว่างรอยแยกที่ไม่มีความต่อเนื่องกัน (Debris sliding along two intersecting discontinuities) มีการเก็บตัวอย่างดิน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม: ดินที่ถูกรบกวน (Disturbed samples) ถูกนำไปหาข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลพื้นฐานทางวิศวกรรม อย่างเช่น เนื้อดิน (Texture), แร่ในเนื้อดิน (Clay mineral type) และ ปริมาณน้ำในมวลดิน (Water content) ส่วนดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed samples) จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความเชื่อมแน่นในมวลดิน (the effective soil cohesion) โดยการทดสอบ Multi-stage direct shear test และการทดสอบ Direct shear tests under consolidated drained จากการทดสอบหาค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturated) พบว่าตัวอย่างดินที่เก็บมาตอนเกิดการถล่มมีค่าประมาณ 70-90% และพบว่าเป็นความเข้าใจผิดของบางกลุ่มวิศวกรที่เชื่อว่าดินจะถล่มที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% แต่ในความจริงอาจจะถล่มตอนที่ดินยังไม่อิ่มตัวทันทีซึ่งจะสอดคล้องกับการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W พบว่าลาดจะดินที่คำนวณได้เกิดการถล่มที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 70% ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

จากการออกแบบจำลองของลาดดินเพื่อนำไปเป็นข้อมูล Input data ใน โปรแกรม Seep/W และ Slope/W เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินกรณีพื้นที่ศึกษาที่ อ. สีชล นครศรีธรรมราช นั้น รูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 แสดงถึงข้อมูลแบบจำลองที่ต้องใช้ในโปรแกรมโดยลักษณะลาดดิน Heterogeneous soil ชั้นบนสุดจะเป็นดินชนิด SP-SM มีความหนา 3 เมตร ถัดลงไปจะเป็นหินปูน (Decomposite rock) หนา 1 เมตร และชั้นล่างสุดจะเป็นหินที่บ้น้ำ (Bed rock) หนา 9 เมตร ลาดดินมีความสูง 34 เมตรและมีความลาดเอียง 26 องศา การทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ) 14.37 kPa, ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) 24 องศา, ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) 16.81 kN/m<sup>3</sup> ค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameters) ของ SWCC และ Permeability function ที่ใช้ในกรณีศึกษาพื้นที่ อ. สีชล อ้างอิงมาจากการคำนวณในสมการของ van Genuchten โดยนำค่าข้อมูลดิบ Permeability ที่ได้จากภาคสนามไปวิเคราะห์ค่าโดยใช้โปรแกรม SWRC Fit curve ผลลัพธ์จะได้กราฟเส้นอัตลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

ตารางที่ 4.1 Sensitivity analysis table

Series	Type of Soil	SWCC Equation	K Function	Slope $\alpha$ (°)	Rainfall Intensity (mm/h)	Thickness of soil(m)	$C'$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$\phi^b$ (°)
Base case	SP-SM (Sichon, Nakhonsi-Thammarat)	Van-Genuchten (1980)	Van-Genuchten (1980)	26	IDF curve	3	14.37	16.81	24	10

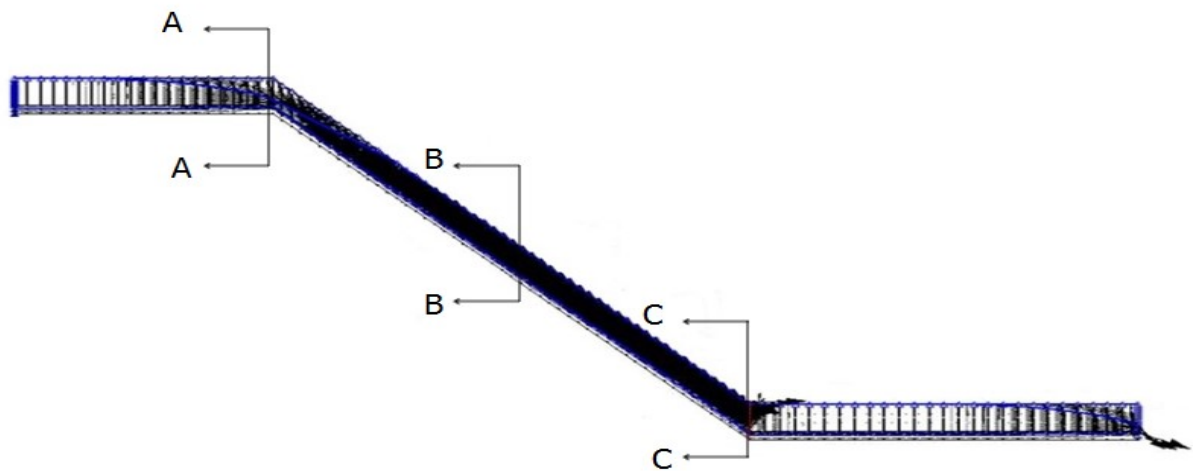


รูปที่ 4.1 Results from SEEP/W and then SLOPE/W, showing slip failure (green) and intact soil (blue), together with SWCC and k-Function graphs for the top soil in the case study

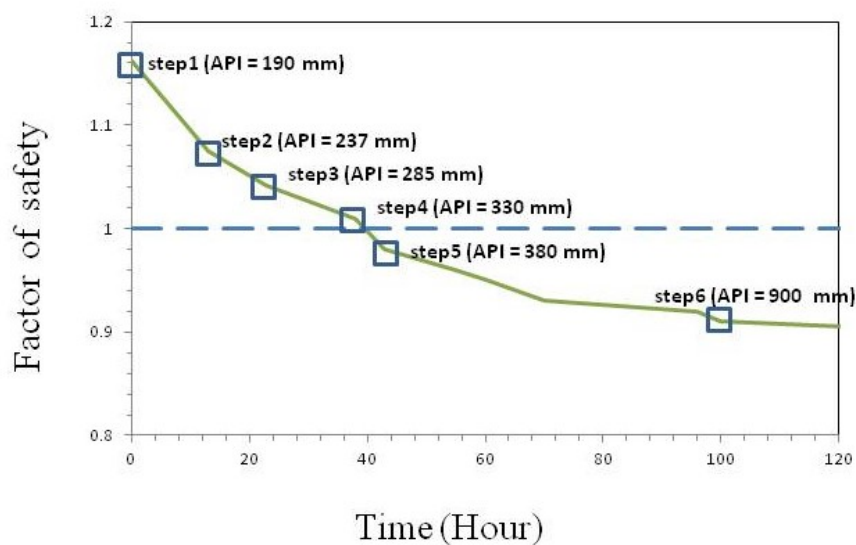


#### 4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินและการพฤติกรรมการณ์ซึมผ่านของน้ำฝน เพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น (Result from slope stability analysis & transient stability of slope seepage behavior indicating VWC)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม SLOPE/W ถูกแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) , ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) และ 6 ช่วงเวลาที่ผ่านไป (0,23,33,43,53 และ 100 ชั่วโมง) ดังรูปที่ 4.3 ผลลัพธ์จากโปรแกรม SEEP/W พบว่าทั้ง 6 ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงนี้ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturated) ตามปริมาณน้ำฝนที่ถูกรวมลงไป ณ ระดับความลึกของลาดดินที่แตกต่างกัน ตามรูปที่ 4.4 และรายละเอียดของค่าแรงดันน้ำ (Pore water pressure) เรียงตามการตัดหน้าตัดการถล่มของลาดดิน 3 แห่ง (รูปที่ 4.1) ได้แก่ช่วงเนินเขา กลางเขา และตีนเขา ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



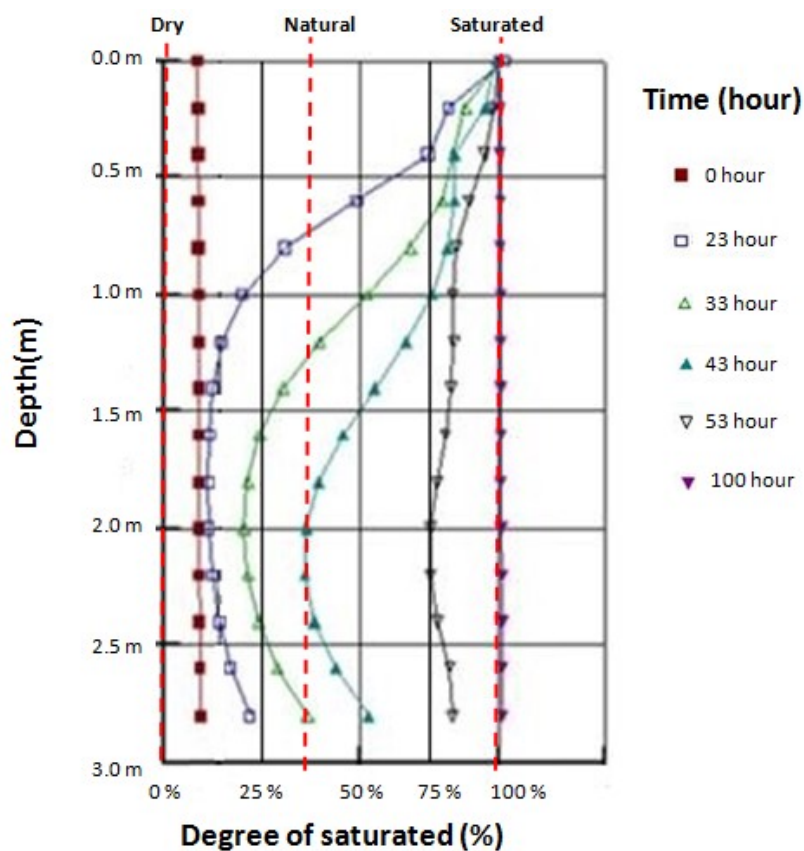
รูปที่ 4.2 section A-A, B-B and C-C (Upper, middle and bottom) at Sichon soil slope



รูปที่ 4.3 Time-step versus factor of safety during the rainfall

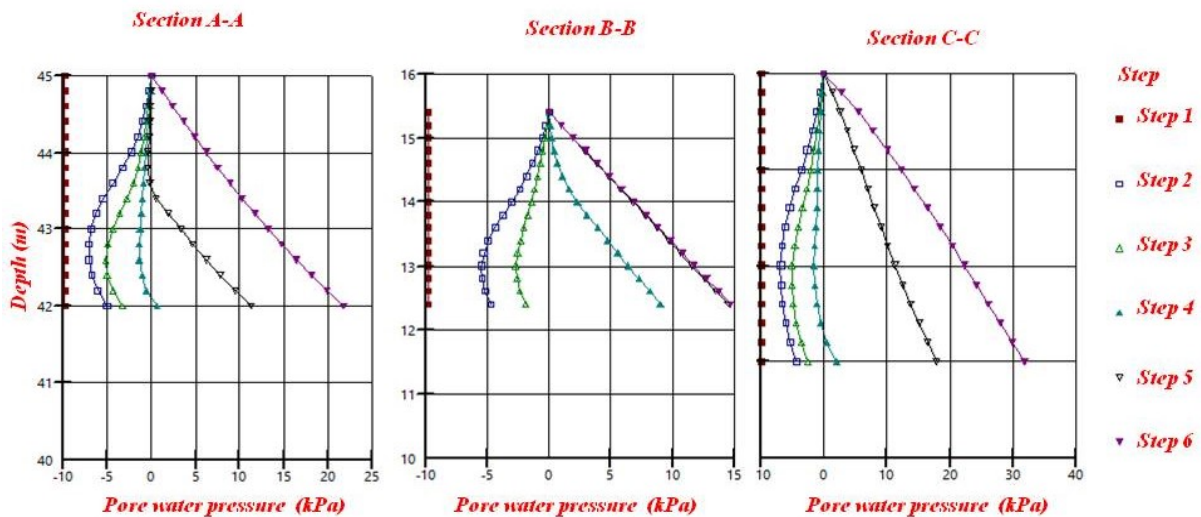
ในกรณีพื้นที่ อ. สีชล พบว่าปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่การลดลงของกำลังในดิน (Soil strength) และค่าอัตราส่วนปลอดภัย ในหน้าตัด A-A ของรูปที่ 4.4 พบว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturated) ในมวลดินเริ่มต้นจาก 0 ไป 24% ที่ความลึกของดิน SP-SM 3 เมตรตรงชั้นล่างสุด (step 1 ที่ 0 ชั่วโมง ถึง step 2 ที่ 23 ชั่วโมง) และที่ 100 ชั่วโมงพบว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำทำให้ อัตราส่วนปลอดภัยในลาดดินลดลงจากเริ่มต้น 1.16 ไป 0.91 และ เพิ่มค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) จาก 190 ไป 900 มิลลิเมตร (step 1 ถึง step 6 ในรูปที่ 4.3) ค่าแรงดันน้ำ (Pore-water pressure) ในตอนที่ลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพ (53 ชั่วโมง) แสดงค่าในลาดหน้าตัดช่วงเนินเขา (step 5 ใน section A-A รูปที่ 4.5) พบว่าค่าแรงดันน้ำไม่ได้เพิ่มขึ้นตลอดความลึกของหน้าตัด เพราะค่าระดับน้ำ (The water table) จะเพิ่มขึ้นจากความลึกด้านล่างประมาณ 1.7 เมตร และ ค่าแรงดันน้ำในส่วนด้านบนที่ระดับน้ำขึ้นไม่ถึงจนถึงผิวลาดดินจะมีค่า -1.5 kPa ในขณะที่ step 5 บริเวณหน้าตัดช่วงกลางเขาและตีนเขา (the middle (B-B) section และ the lower (C-C) section) ในภาพที่ 4.5 พบว่าค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นตลอดความลึกของหน้าตัด

นับจากฝนเริ่มตกพบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะลดลงไปเรื่อยๆจนถึงลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 53 และมีค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินเท่ากับ 380 มิลลิเมตร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสอดคล้องกับปริมาณดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินและปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติ ณ วันที่ 27 มีนาคม 2011 ในกรณีพื้นที่ศึกษา อ.สีชล นครศรีธรรมราชที่เกิดการถล่ม (รัชพลและคณะ, 2556)



รูปที่ 4.4 Degree of saturation versus depth (At section A-A) at six time-steps in the simulation

หน้าตัดบริเวณเนินเขา (section A-A) ในรูปที่ 4.4 พบว่าลาดดินที่ไม่อิ่มตัวไปด้วยน้ำเริ่มต้นจากปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติไปจนถึงค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 70% (ดินกล่อมในชั่วโมงที่ 53) ปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า แรงดูดน้ำในมวลดิน (matric suction) ลดลง และ ปริมาณน้ำในมวลดิน (the soil-moisture content) เพิ่มขึ้น และถ้า ลาดดินยังไม่กล่อมในชั่วโมงที่ 53 พบว่าปริมาณน้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่ง ค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า 100% ตลอดความลึกของหน้าตัด (step 6 ที่ชั่วโมงที่ 100)

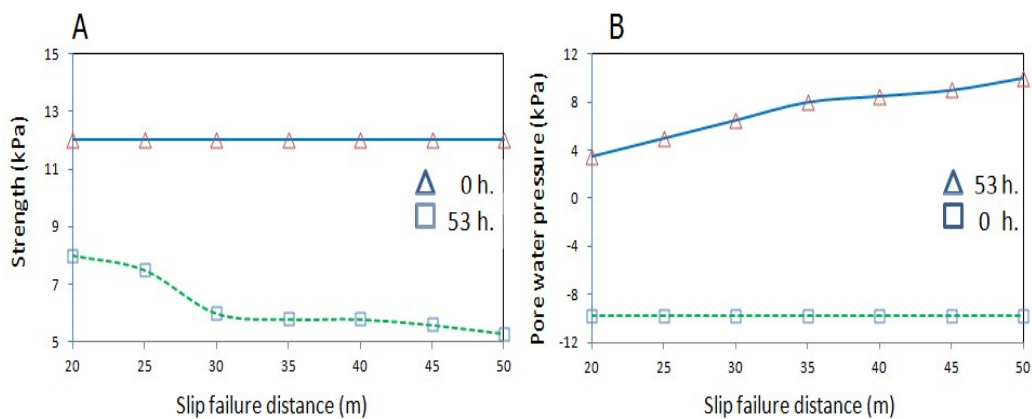


รูปที่ 4.5 Pore-water pressure developments during the six time-steps at the three cross-sections on the slope

ตารางที่ 4.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) ณ เวลาที่เปลี่ยนไปและความชื้นฝนที่เพิ่มขึ้น (6-36 มิลลิเมตร/ชั่วโมง) พบว่าลาดดินที่ อ.สิชล เริ่มสูญเสียเสถียรภาพ (factor of safety less น้อยกว่า 1) ที่ชั่วโมงที่ 53 ที่ความชื้นฝน (I.R.) 9 มิลลิเมตร/ชั่วโมง และ เวลาที่ลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพจะรวดเร็วขึ้นเรื่อยๆ ดังเช่น ที่ความชื้นฝน (I.R.) 12 มิลลิเมตร/ชั่วโมงลาดดินที่ อ.สิชล เริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 42, ที่ความชื้นฝน (I.R.) 18 มิลลิเมตร/ชั่วโมงลาดดินที่ อ.สิชล เริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 35 จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ที่ความชื้นฝนสูงๆจะเพิ่มค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินและเป็นสาเหตุที่ทำให้ลาดดินเกิดการถล่มอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับบทความของ rahardjo et al (2007) ที่สรุปว่า ผลกระทบที่ได้จากปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (Low saturated coefficient of permeability) อย่างเช่น ดินทรายมากกว่าดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ

ตารางที่ 4.2 Relationship between factor of safety and rainfall intensity for loamy sand at different time

A.P.I.		380	312	315	300	308	288	324
Time (hour)	lr=6	r=9	r=12	r=18	r=20	r=28	r=32	r=36
0	1.162	1.162	1.162	1.162	1.162	1.162	1.162	1.162
6	1.155	1.155	1.155	1.154	1.111	1.11	1.049	1.049
12	1.151	1.148	1.148	1.14	1.098	1.08	1.025	1.025
18	1.148	1.145	1.145	1.123	1.06	1.07	0.99	0.99
22	1.145	1.143	1.142	1.122	1.05	0.99	0.988	0.987
24	1.143	1.14	1.14	1.12	1.04	0.988	0.985	0.985
30	1.14	1.137	1.115	1	0.99	0.985	0.981	0.981
35	1.139	1.12	1.1	0.99	0.985	0.98	0.98	0.975
42	1.12	1.104	0.998	0.985	0.97	0.97	0.97	0.97
53	1.1	0.998	0.995	0.97	0.96	0.95	0.95	0.96
60	1.08	0.997	0.986	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93
70	1.07	0.995	0.96	0.95	0.92	0.9	0.89	0.89
96	1.056	0.98	0.95	0.92	0.88	0.87	0.86	0.86
144	1.025	0.928	0.91	0.89	0.85	0.84	0.83	0.83
192	1	0.928	0.91	0.88	0.85	0.84	0.83	0.83
240	1	0.928	0.91	0.88	0.85	0.84	0.83	0.83

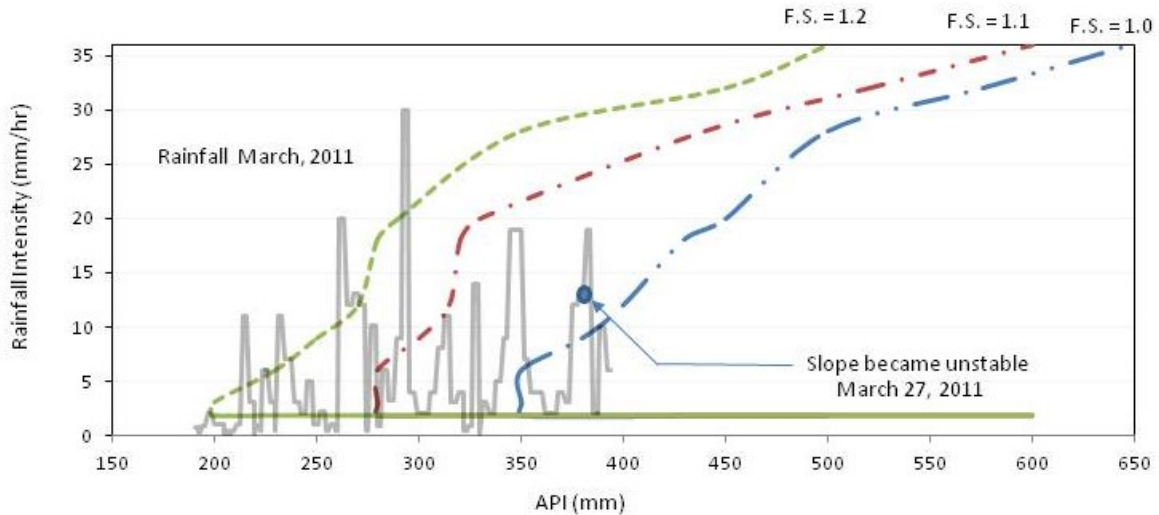


รูปที่ 4.6 Shear strength and pore-water pressure versus horizontal slip failure distance, from SLOPE/W

รูปที่ 4.6 แสดงกำลังของดิน (Shear strength) และ แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-water pressure) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามหน้าตัดระยะทางในแนวนอนของพื้นผิวการถล่มของลาดดินใน อ.สิชล (Horizontal slip failure distance) ที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม SLOPE/W พบว่าเสถียรภาพของดินจากเริ่มต้น (ที่ 0 ชั่วโมง) จนกระทั่งดินถล่ม (ที่ 53 ชั่วโมง) ปริมาณน้ำฝนจะทำให้กำลังของดินลดลง ดังแสดงในระยะเวลาช่วงตรงกลางของพื้นผิวการถล่มของลาดดิน (The middle section of the soil) ที่กำลังของดินลดลงจาก 12 ถึง 6 kPa (จากรูปที่ 4.6A) และปริมาณน้ำฝนจะมีผลให้แรงดันน้ำในมวลดินช่วงตรงกลางของพื้นผิวการถล่มของลาดดินเพิ่มขึ้นจาก -9.8 ถึง 8 kPa (จากรูปที่ 4.6B) ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณความชื้นฝนมีบทบาทสำคัญในเสถียรภาพของลาดดินให้เกิดการถล่มได้รวดเร็วขึ้น

#### 4.2.1 The critical rainfall intensity

ดังที่อธิบายก่อนหน้านี้กราฟค่าความชื้นฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ (Intensity-duration-frequency curve) จากกรมชลประทานถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน เวลาและปริมาณความชื้นฝน (The rainfall intensity) ของการซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดินที่ทำให้ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ จาก Rahardjo et al. (2007) พบว่าผลกระทบจากความชื้นฝนมีผลต่อกำลังในมวลดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง ลาดดินที่เกิดการถล่มใน อ.สิชล พบว่าเกิดการถล่ม ณ เวลา 14.00 นาฬิกา ของวันที่ 27 มีนาคม ค.ศ. 2011 (รัชพลและคณะ, 2556) โดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน หรือ Average critical API เท่ากับ 388 มิลลิเมตร. จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงผลการคำนวณค่า factor of safety ที่ 1.2, 1.1 และ 1.0 ที่เกิดจากค่าปริมาณความชื้นฝนต่างๆ โดยได้มาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินจากโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W โดยพบว่าลาดดินเริ่มเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ (F.S.=1) ที่ปริมาณความชื้นฝน เท่ากับ 9 มม/ชม. ที่ชั่วโมงที่ 53 และมีค่า Average critical API เท่ากับ 380 มิลลิเมตร. ซึ่งจากการคำนวณในโปรแกรมนี้สามารถทำนายการเกิดดินถล่มใน อ.สิชลซึ่งเกิดขึ้นก่อนการถล่มจริง 10 ชั่วโมง ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าช่วงเวลาที่บ้านแจ้งการเกิดดินถล่มที่เวลา 14.00 นาฬิกา โดยชาวบ้านที่อาศัยอยู่บริเวณดินเขาในความเป็นจริงอาจจะเกิดการถล่มก่อนหน้านั้นซึ่งดินเริ่มเกิดการถล่มจากเนินเขาถึงกลางเขาและค่า critical API ที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรมสามารถนำไปใช้เป็นดัชนีการอ้างอิงเพื่อใช้ในระบบการเตือนภัยล่วงหน้าเพื่อเฝ้าระวังภัยในอนาคตสำหรับลาดดินใน อ.สิชลและพื้นที่ใกล้เคียงได้โดยใช้ได้เฉพาะในกรณีที่เกิดฝนตกอย่างต่อเนื่อง (subjected to a continuous rainfall, and not intermittent)



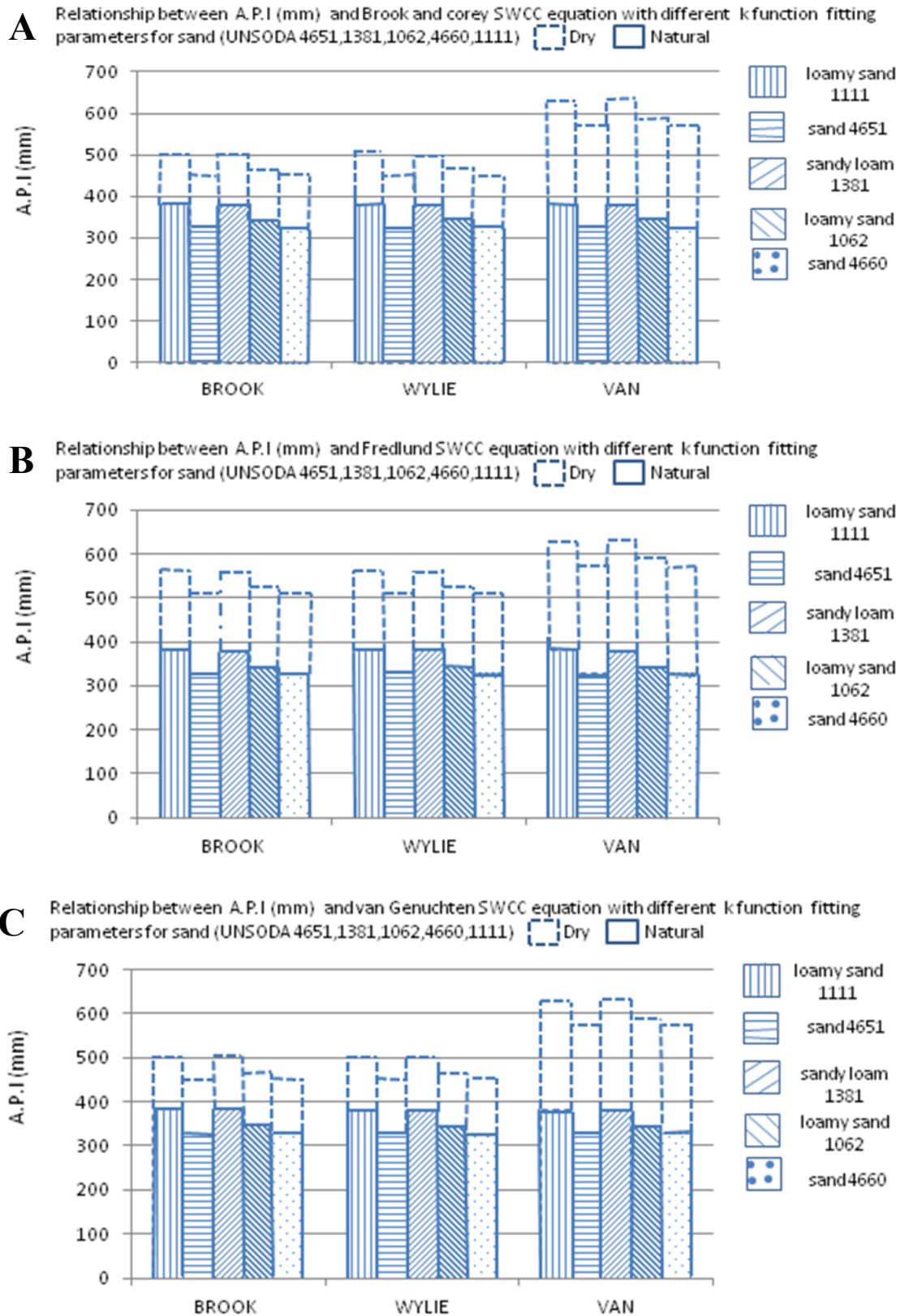
รูปที่ 4.7 The critical rainfall intensity

#### 4.3 ผลที่ได้จากการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Result from sensitivity analysis)

ผลที่ได้จากการประเมินความไวตัวของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพถูกแบ่งเป็นสามส่วน ตามขั้นตอนการแบ่ง Series ตามวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 (ตารางที่ 3.5) โดยแบ่งเป็น 1) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series A (Unsaturated soil properties), 2) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series B (Geometry properties) และ 3) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series C (Soil strength properties) นอกจากนั้นยังมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติซึ่งจะบรรยายไว้ในหัวข้อที่ 4) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Probabilistic analysis

##### 4.3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series A (Unsaturated soil properties)

รูปที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) กับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ Series A (Unsaturated soil properties) ได้แก่ ดิน 5 ชนิดที่แตกต่างกัน Sand, Loamy sand และ Sandy loam ( UNSODA 4660,4651,1062,1111 และ 1381), Fitting parameters ใน SWCC Equation และ Permeability function ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980), Fredlund (1994) และ Wylie-Gardner โดยในการวิเคราะห์ลาดดินถูกแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ จากสถานะลาดดินแห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Dry to failed) และ จากสถานะลาดดินธรรมชาติไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Natural to failed)



รูปที่ 4.8 Relationship between A.P.I. (cm) and Brook & Corey, Fredlund and van Genuchten SWCC equation (4.8a, 4.8b, 4.8c) with different k function fitting parameters for 5 types of sandy soil

#### 4.3.1.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานะลาดดินแห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียดีรภาพ (Dry to failed)

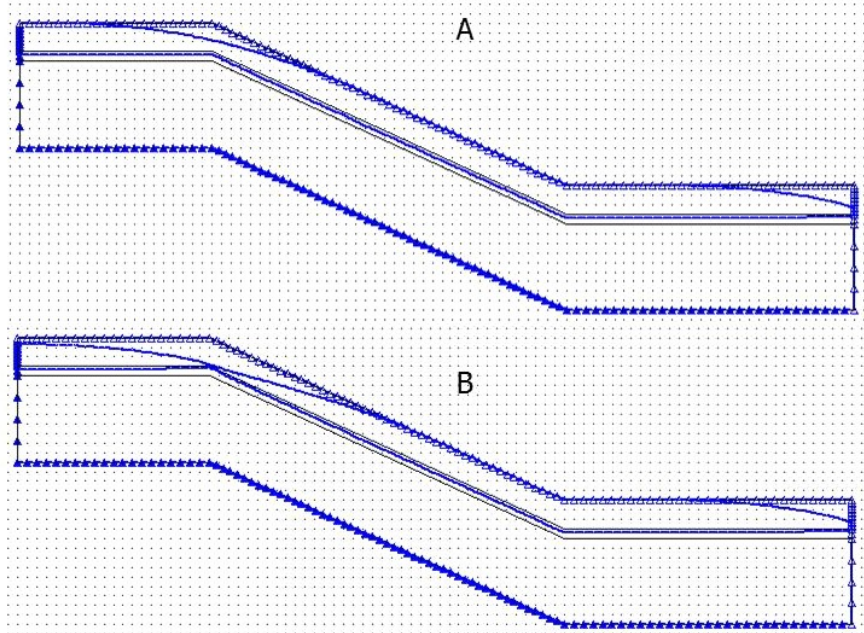
จากกราฟที่ได้ เปรียบเทียบในหลักเดียวกัน เส้นกราฟแนวประ (Compare column-wise with hidden layer column) พบว่าดินในสมการ SWCC equation ของ Fredlund มีความไวต่อปริมาณความชื้นฝนที่สูง (High rainfall intensity) มากกว่าดินในสมการ SWCC equation ของ Brooks & Corey และ van Genuchten models สำหรับความชื้นฝน 6-36 มม/ชม. ค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เนื่องมาจากค่าความชื้นฝน จะมีค่าน้อยในดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (sandy soil UNSODA 4651) ตามมาด้วย loamy sand (UNSODA 1062), sandy soil (UNSODA 4660) และ sandy loam soil (UNSODA 1381,1111) จากข้อความข้างต้นสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ SWCC equation มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API)

รูปที่ 4.8A, 4.8B และ 4.8C เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน เส้นกราฟแนวประ (Compare row-wise with hidden layer column) พบว่าลาดดินในสมการ k- function ของ van Genuchten มีความไวต่อปริมาณความชื้นฝนที่สูง (High rainfall intensity) มากกว่าดินในสมการ k- function ของ Brooks & Corey และ Wylie & Gardner สำหรับความชื้นฝน 6-36 มม/ชม.ค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เนื่องมาจากค่าความชื้นฝน จะมีค่าน้อยในดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (sandy soil UNSODA 4651) ตามมาด้วย loamy sand (UNSODA 1062), sandy soil (UNSODA 4660) และ sandy loam soil (UNSODA 1381,1111) จากข้อความข้างต้นสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ k- function มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API)

จากผลลัพธ์ที่ได้จากสถานะลาดดินแห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียดีรภาพพบว่าลาดดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ (sandy loam soil UNSODA 1381,1111) จะพังในช่วงระยะเวลายาวนาน (Long-duration) ในขณะที่ลาดดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (sandy soil UNSODA 4651) จะพังในช่วงระยะเวลาอันรวดเร็ว (Short-duration) หรือ ดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูงจะมีความไวต่อค่าความชื้นฝนและการลดลงของเสียดีรภาพรวดเร็วกว่าดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำและที่ความชื้นฝนสูงจะส่งผลการเปลี่ยนแปลงของลาดดินที่มีการเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ k- function ของ van Genuchten และSWCC equation ของ Fredlund มากกว่าสมการอื่น สรุปผลที่ได้ คือ การเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ k- function และSWCC equation มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) สำหรับการวิเคราะห์สถานะลาดดินที่แห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียดีรภาพ



รูปที่ 4.9 แสดงถึงปริมาณน้ำในมวลดินของลาดดินในสมการ k- function ของ van Genuchten (4.9A) ซึ่งมีผลทำให้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) ในสมการนี้มีค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน ณ ช่วงเวลาที่ดินถล่ม มากกว่าลาดดินในสมการ k- function ของ Brook & Corey และ Wylie & Gardner (4.9B)



รูปที่ 4.9 Location of water table when the minimum factor of safety occurs for sand (UNSODA 4651) with van Genuchten 's K Function (4.9A) and Brook & Corey and Wylie & Gardner's K Function (4.9B).

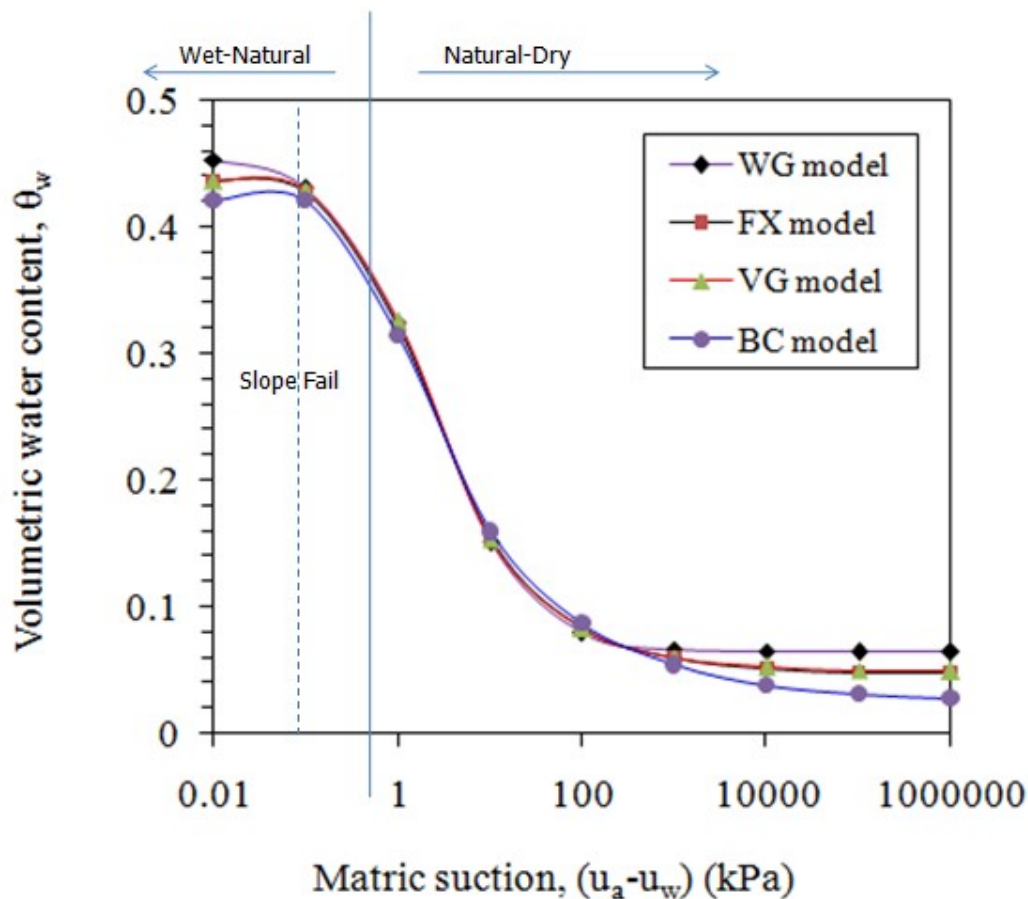
#### 4.3.1.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานะลาดดินธรรมชาติไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Natural to failed)

รูปที่ 4.8A, 4.8B และ 4.8C เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน เส้นกราฟแนวทึบ (Compare row-wise with thick layer column) พบว่าลาดดินในสมการ k- function และ SWCC equation ไม่ส่งผลต่อความไวตัวของค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เนื่องจากค่าความชื้นผน สำหรับความชื้นผน 6-36 มม/ชม.ค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) จะมีค่าน้อยในดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (sandy soil UNSODA 4651) ตามมาด้วย loamy sand (UNSODA 1062), sandy soil (UNSODA 4660) และ sandy loam soil (UNSODA 1381,1111) จากข้อความข้างต้นสรุปได้ว่า ชนิดของดินและความชื้นผนเท่านั้นที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API)

สรุปผลที่ได้จากกราฟที่ 4.8 พบว่าสำหรับการวิเคราะห์สถานะลาดดินที่ธรรมชาติไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ k- function และ SWCC equation ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) แต่เป็นผลอันเนื่องมาจาก ชนิดของดินและความชื้นผน ในขณะที่การวิเคราะห์สถานะลาดดินที่แห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงดัชนีความ

ชุ่มชื้นในมวลดิน (API) มีความไวต่อ ชนิดของดิน, ความชื้นผน, การเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ k- function และ SWCC equation

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ SWCC equation ในทุกสมการ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำผนในลาดดินที่มีค่า matric suctions ระหว่าง 0.01 – 1 kPa หรือสถานะดินจากธรรมชาติไปจนชุ่มชื้น(Natural to wet range) เพราะค่า volumetric water contents ในช่วงสถานะดินจากธรรมชาติไปจนลาดดินพังแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยในขณะที่ matric suctions ระหว่าง 1 -  $1 \times 10^6$  kPa หรือสถานะดินจากแห้งไปจนชุ่มชื้น(Dry to wet range) volumetric water contents มีความแตกต่างกันในแต่ละสมการทำให้ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เปลี่ยนแปลง และ สถานะดินจากธรรมชาติไปจนชุ่มชื้นค่า volumetric water contents มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง Failed to wet range แต่ดินในช่วงนั้นเกิดการพังไปแล้ว ค่า volumetric water contents ณ ขณะนั้นจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน



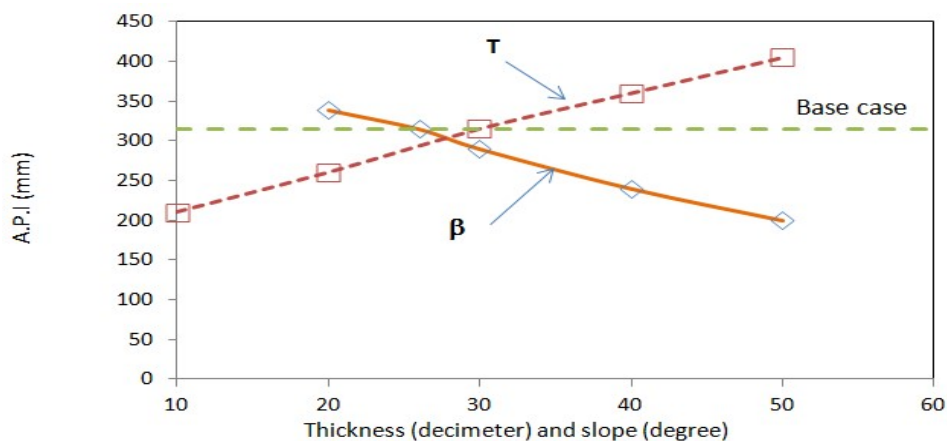
รูปที่ 4.10 Relationship between volumetric water content and matric suction at different SWCC Equation.

### 4.3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series B (Geometry properties) และ Series C (Soil strength properties)

รูปที่ 4.11-4.24 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) กับพิสัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ Series B (Geometry properties) ได้แก่ ค่าความหนาของดิน (Soil thickness, T) และ ค่าความลาดเอียงของลาดดิน (Slope angles,  $\beta$ ) ส่วน Series C (Soil strength properties) ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) โดยอธิบายถึงค่า ความดันน้ำ (Pore water pressure) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าระดับน้ำ (The Location of the ground water) ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพด้วย

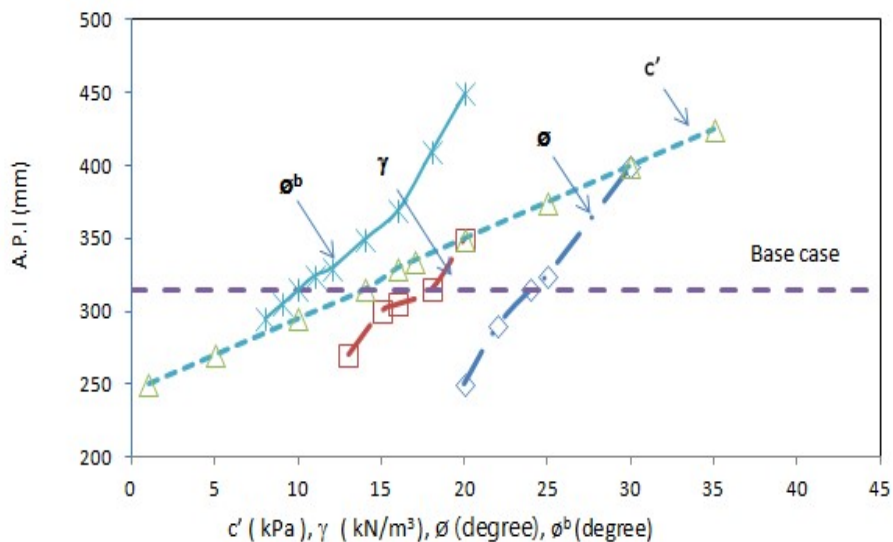
#### 4.3.2.1 อิทธิพลอันเนื่องมาจากตัวแปรจาก Series B (Geometry properties) และ Series C (Soil strength properties)

พิสัยตัวแปรค่าความหนาของดิน (Soil thickness, T) ดังภาพที่ 4.11 พบว่าค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 405 มิลลิเมตรเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น 5 เมตรในขณะที่ความลาดเอียงของดินเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 50 องศากลับทำให้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินลดลง 139 มิลลิเมตรนั้นเพราะปริมาณมวลดินสามารถเก็บกักน้ำได้มากขึ้นเมื่อความหนาของลาดดินเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เสถียรภาพในลาดดินเพิ่มขึ้น ค่า API จึงมีค่าการสะสมน้ำเยอะขึ้นกว่าลาดดินจะเกิดการถล่มแต่การเพิ่มขึ้นของความชันกลับทำให้เสถียรภาพในลาดดินลดลงโดยจะอธิบายรายละเอียดของค่า ความดันน้ำ (Pore water pressure) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าระดับน้ำ (The Location of the ground water) ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของค่าความหนาของดินและความชันของลาดดินในหัวข้อที่ 4.3.2.4 และ 4.3.2.5



รูปที่ 4.11 Relationship between A.P.I. (mm) and van genuchten SWCC equation with Different thickness (dm) and slope angle (degree) for sand (UNSODA 1062)

ภาพที่ 4.12 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) กับการเปลี่ยนแปลงพิสัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Soil strength properties ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) โดยค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 450 ถึง 250 มิลลิเมตร เมื่อค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเพิ่มขึ้น 35 kPa ซึ่งจะทำให้ค่า API เปลี่ยนแปลงไป 155 มิลลิเมตร, ค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่เปลี่ยนแปลงไป  $7 \text{ kN/m}^3$  มีผลทำให้ค่า API เปลี่ยนแปลงไป 80 มิลลิเมตร ซึ่งดูเหมือนจะเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และพิสัยมุมของแรงเสียดทานภายในที่เปลี่ยนแปลงจาก 20-30 องศาส่งผลทำให้ค่า API เปลี่ยนแปลงไป 150 มิลลิเมตร จากผลลัพธ์ความไวตัว Series C (Soil strength properties) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$ ,  $\phi^b$ ,  $c'$ ,  $\gamma$  มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงในลาดดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า API มีค่าการสะสมน้ำเยอะขึ้นกว่าลาดดินจะเกิดการถล่มโดยจะอธิบายรายละเอียดของค่า ความดันน้ำ (Pore water pressure) ที่เปลี่ยนแปลงและคาร์ระดับน้ำ (The Location of the ground water) ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของค่าความหนาของดินและความชันของลาดดินในหัวข้อที่ 4.3.2.6 และ 4.3.2.9



รูปที่ 4.12 Effects on A.P.I (mm) of variation ranges in  $c'$  (kPa),  $\gamma$  ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\phi$  (degree), for sand.

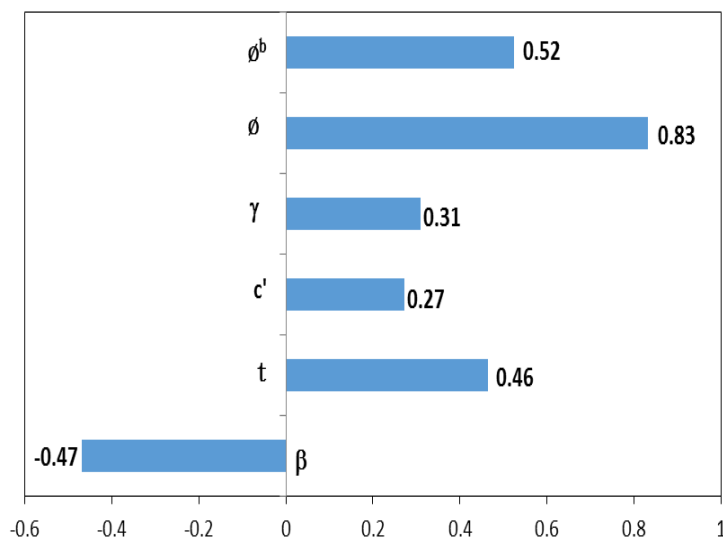
#### 4.3.2.2 Sensitivity index

ค่าดัชนีความไวตัว (sensitivity indexes) สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติได้ว่าตัวใดมีผลกระทบต่อค่า API มากที่สุดโดย sensitivity indexes จากสมการของ Lenhart 2002 ได้ถูกอธิบายดังในสมการ 4.1 ซึ่งเป็นการคำนวณ การเปลี่ยนแปลงของพิสัยตัวแปรในแนวแกนนอน (x-direction) ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) ในแนวแกนตั้ง (y-direction)

$$I' = \frac{(y_2 - y_1) / y_0}{2\Delta x / x_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $y_2$  คือ maximum API,  $y_1$  คือ minimum API,  $y_0$  คือ ค่ากลางของ  $y_2$  และ  $y_1$ ,  $\Delta x$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง minimum และ maximum ของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ และ  $x_0$  คือ ค่ากลางของ minimum และ maximum ของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ

จากข้อมูลค่า API และ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติในรูปที่ 4.11 และ 4.12 สามารถนำมาคำนวณค่าดัชนีความไวตัว (sensitivity indexes) โดยให้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.3 และ พล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 The sensitivity indexes ( $I'$ ) for  $c'$  (kPa),  $\gamma$  ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\phi$  (degrees), thickness (dm), and slope angle (degree), for sand.

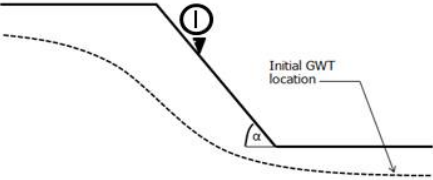
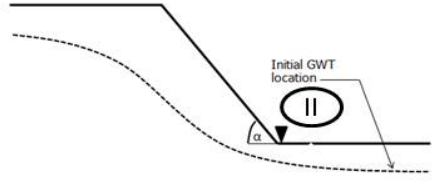
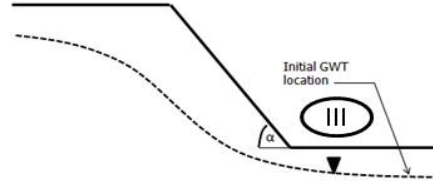
ตารางที่ 4.3 Summary of sensitivity analysis with sensitivity indexes.

Parameters	$\frac{\Delta y}{\Delta x}$	$I' = \frac{Y_2 - Y_1 / Y_0}{2\Delta X / X_0}$	sequence
$\phi^b$ (Series A)	190/12	0.52	2
$\phi$ (Series A)	340/20	0.83	1
$\gamma$ (Series A)	80/7	0.31	3
$c'$ (Series A)	350/34	0.27	4
T (Series B)	390/40	0.46	2
$\beta$ (Series B)	594/30	-0.47	1

#### 4.3.2.3 Location of the groundwater

จากตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งของระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น (GWT) ในลาดดิน ในขณะที่ดินสูญเสียเสถียรภาพทั้ง 3 แบบซึ่งจะทำให้เกิดความเข้าใจถึงรูปแบบและเหตุผลในการสูญเสียเสถียรภาพของลาดดิน

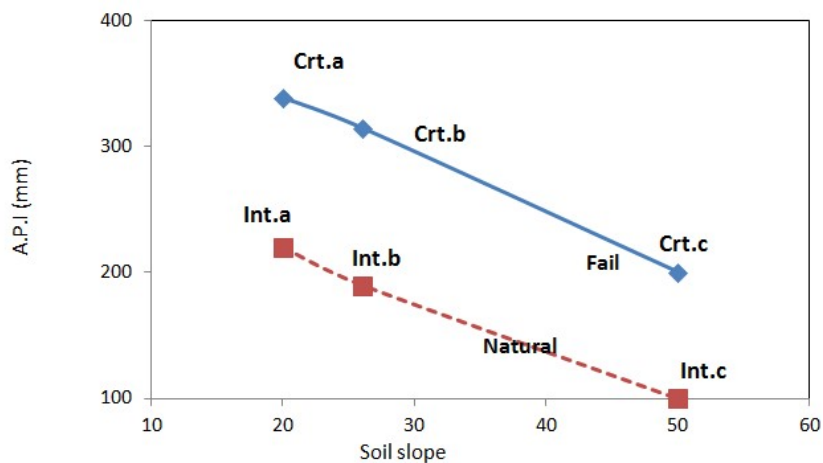
ตารางที่ 4.4 The location of the ground water table ( GWT )

GWT Categories	Criteria
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Water table rises up to the mid-slope</li> <li>• The reduction in factor of safety is partly controlled by the mounding of water table and the variability in matric suction in the unsaturated soil slope</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Water table rises up to the toe of the slope</li> <li>• The reduction in factor of safety is mainly controlled by the mounding of water table and the variability in matric suction in the unsaturated soil slope</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No mounding or relatively small mounding of water table</li> <li>• The reduction in factor of safety is mainly controlled by the variability in matric suction in the unsaturated soil slope</li> </ul>

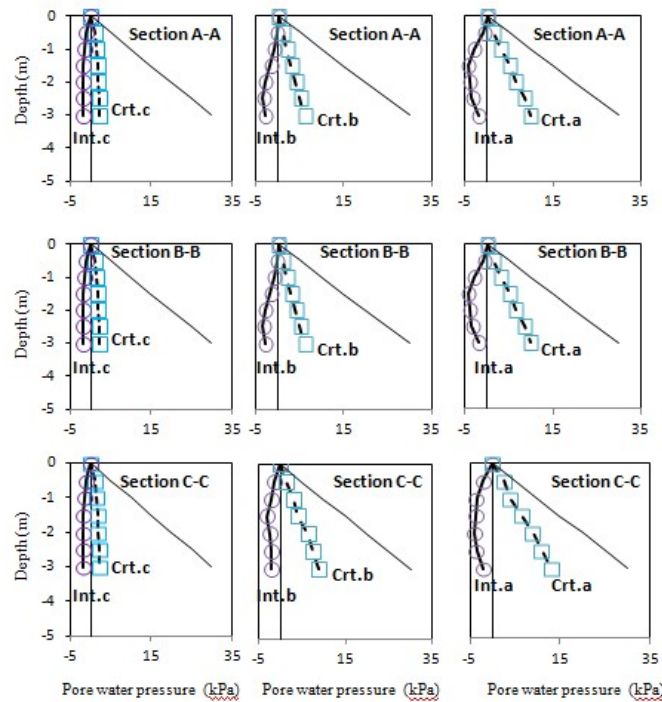
#### 4.3.2.4 The influence on slope angles( $\beta$ )

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยโปรแกรม SEEP/W และ Slope/W จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดชันที่ 20,26 และ 50 องศา ต่อค่าการเปลี่ยนแปลง API จากลาดดินที่เป็นสถานะธรรมชาติ (Natural situation: hidden line graph) ไปจนลาดดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝน (Fail situation: thick line graph) ดังภาพที่ 4.14 จากการวิเคราะห์ปริมาณการซึมผ่านของน้ำในมวลดินโดยใช้หลักการ finite element analysis โดยโปรแกรม SEEP/W พบว่าการเพิ่มขึ้นของ API มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pore water pressure บริเวณพื้นผิวการพังทลาย (failure surface) ตามหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขา ดังภาพที่ 4.15

ภาพที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความลาดชันจาก 20 ถึง 50 องศาส่งผลให้เสถียรภาพในลาดดินลดลงและค่า API ลดลงจาก 220 ไป 100 มิลลิเมตร (Natural situation) และ 339 ไป 200 มิลลิเมตร (Failure situation) ภาพที่ 4.15 แสดงถึงค่า pore water pressure ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนตลอดหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขาซึ่งสอดคล้องกับตาราง 4.5 ที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ ขนาดลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ



รูปที่ 4.14 Relationship between A.P.I (mm) with different soil slope (degree)



รูปที่ 4.15 Pore water pressure profiles for three slope angles.

ระดับน้ำในลาดดิน (The location of water table) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าระดับน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงตีนเขาจะพบในลาดดินที่มีค่า  $\beta = 20, 26$  องศา ด้วยความเข้มฝน 9 มม/ชม., ระดับน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงกลางเขาในลาดดินที่มีค่า  $\beta = 20, 26$  องศา ด้วยความเข้มฝน 36 มม/ชม. อย่างไรก็ตามไม่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำหรือเพิ่มขึ้นน้อยมากในลาดดินที่มีค่า  $\beta = 50$  องศา ด้วยความเข้มฝน 9 และ 36 มม/ชม.

จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าลาดดินที่มีค่าความชันสูงจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพโดยมีสาเหตุมาจากค่า Matric suction, การลดลงของแรงต้าน (Resisting Forces) ตามสมการที่ 4.2 และการลดลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยและการเพิ่มขึ้นของ API ในลาดดินที่มีค่าความชันต่ำจะขึ้นอยู่กับค่าระดับการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดินและความเข้มฝน

สรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดชันพบว่า การเพิ่มขึ้นของลาดชันและความเข้มฝนนำไปสู่การลดลงของค่าความแข็งแรงในมวลดินและการเพิ่มขึ้นของค่า Pore water pressure และการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงในมวลดินนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า API ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า - 0.47 (เครื่องหมายไม่มีผลต่อความไวตัวในตัวแปร) ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวที่สุดในกลุ่มตัวแปรที่เป็น geometric parameters



ตาราง 4.5 Categories of water table location at slope failure in Series B (slope angles) of the parametric study.

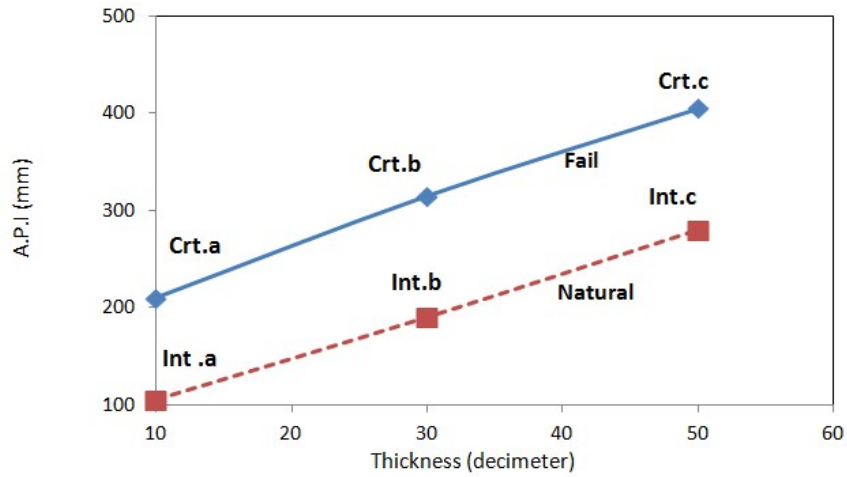
Slope angle, $\beta$ (degree)	Rainfall Intensity (mm/hr)	
	9	36
20	II	I
26	II	I
50	III	III

#### 4.3.2.5 The influence on soil thickness(T)

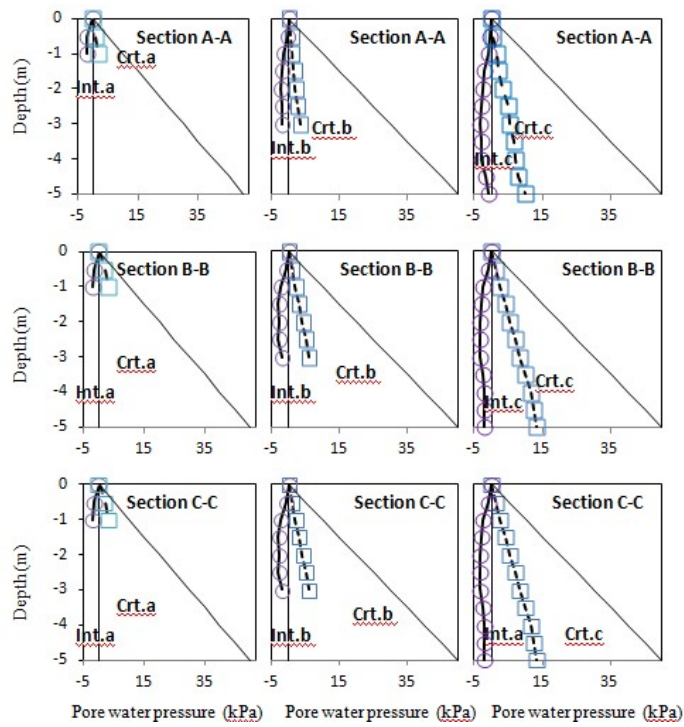
จากภาพที่ 4.16 พบว่าความหนาของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า API โดยเมื่อความหนาของลาดดินเพิ่มขึ้นความสามารถในการสะสมปริมาณน้ำอันเนื่องมาจากน้ำฝนในมวลดินและความแข็งแรงในลาดดินก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยค่าพิสัยความหนาจาก 1-5 เมตรส่งผลให้ ค่า API เพิ่มขึ้นจาก 105 ไป 208 มิลลิเมตร(Natural situation) และ 210 ไป 405 มิลลิเมตร (Failure situation)

จากโปรแกรม SEEP/W พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาในดินมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า API และ pore water pressure บริเวณพื้นผิวการพิบัติ (failure surface) ตามหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขา ดังภาพที่ 4.17 จากการพิจารณาสมการการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณาดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยประยุกต์ใช้ The Mohr-coulomb failure criterion (Fredlund and vanapalli, 2002) พบว่าค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำฝนเมื่อฝนตก จะทำให้แรงดันน้ำในฟังก์ชัน ( $u_a - u$ ) เพิ่มขึ้นจึงมีผลแปรผันตรงต่อค่า  $c'$  และ  $\phi^b$  ให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วยและเป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงในมวลดิน,ค่า F.S. และค่า API เพิ่มขึ้นตามลำดับ

สรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาในลาดดินพบว่าการลดลงในกำลังของดินและ API มีสาเหตุมาจากการลดลงของความหนาในลาดดินค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า 0.46 ซึ่งมีค่าต่างกับ sensitivity index ในการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงในมวลดินเพียงเล็กน้อย จึงถือว่า ทั้งความหนาและความลาดเอียงในลาดดินเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวในกลุ่มตัวแปรที่เป็น geometric parameters ทั้งคู่



รูปที่ 4.16 Relationship between A.P.I (mm) with different thickness of soil slope (decimeter)

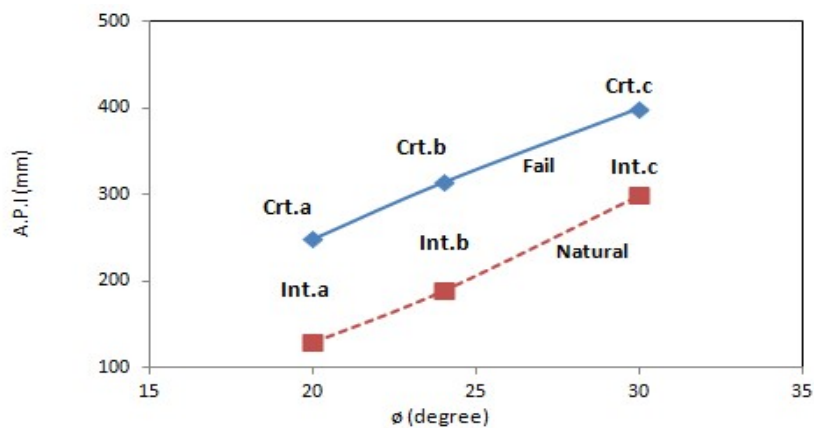


รูปที่ 4.17 Pore water pressure profiles for three thickness of soil.

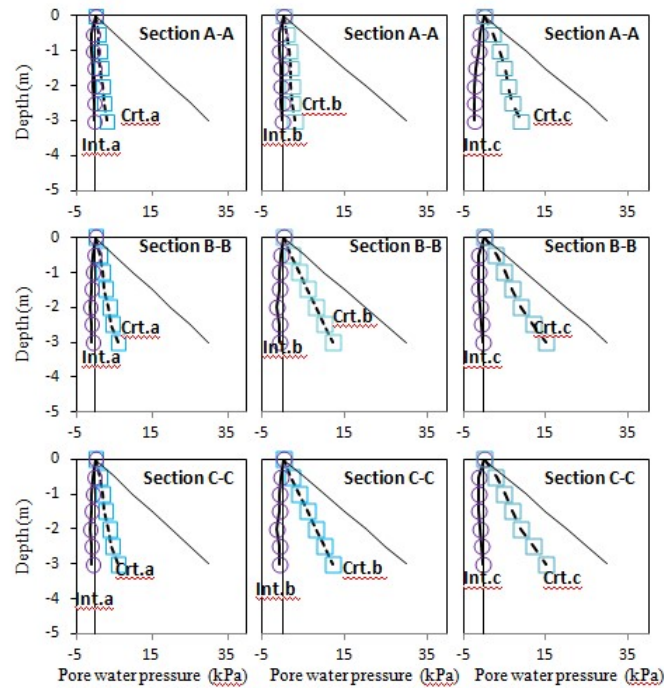
#### 4.3.2.6 The influence on effective angle of internal friction ( $\phi'$ )

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยโปรแกรม Slope/W จากภาพที่ 4.18 จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า effective angle of internal friction ที่ 20, 25 และ 30 องศา ต่อค่าการเพิ่มขึ้นของ API จาก 130 ไป 300 มิลลิเมตรในลาดดินที่เป็นสถานะธรรมชาติ (Natural situation: hidden line graph) และจาก 250 ไป 400 มิลลิเมตร ในลาดดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝน (Fail situation: thick line graph) เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า effective angle of internal friction นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงต้าน (Resisting Forces) ตามสมการที่ 4.2 และซึ่งค่าแรงต้านมีผลแปรผันตรงกับค่า F.S. ทำให้ค่า API เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.19 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่า pore water pressure อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนตลอดหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขาซึ่งสอดคล้องกับตาราง 4.6 ที่แสดงถึงปริมาณ น้ำที่เพิ่มขึ้น อนุญาตลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ จากสมการการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณาดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยประยุกต์ใช้ The Mohr-coulomb failure criterion (Fredlund and vanapalli, 2002) พบว่า เมื่อฝนตก จะทำให้แรงดันน้ำในฟังก์ชัน ( $\sigma_n - u_a$ ) เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าแรงเฉือนในมวลดิน (Shear strength) และความแข็งแรงในมวลดิน, ค่า F.S. และค่า API เพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.18 Relationship between A.P.I (mm) with different  $\phi$



รูปที่ 4.19 Pore water pressure profiles for three  $\phi$ .

ระดับน้ำในลาดดิน (The location of water table) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าระดับน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงตีนเขาจะพบในลาดดินที่มีค่า angle of internal friction = 25, 30 องศา ด้วยความเข้มฝน 9 มม/ชม., ระดับน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงกลางเขาในลาดดินที่มีค่า angle of internal friction = 25, 30 องศา ด้วยความเข้มฝน 36 มม/ชม. อย่างไรก็ตามไม่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำหรือเพิ่มขึ้นน้อยมากในลาดดินที่มีค่า angle of internal friction = 20 องศา ด้วยความเข้มฝน 9 และ 36 มม/ชม.

จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า angle of internal friction มีบทบาทต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในมวลดิน, API และ pore water pressure ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า 0.83 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวที่สุดในกลุ่มตัวแปรที่เป็น soil strength parameters

ตาราง 4.6 Categories of water table location at slope failure in series C (angle of internal friction) of the parametric study.

angle of internal friction, $\phi'$ (degree)	Rainfall Intensity (mm/hr)	
	9	36
20	III	III

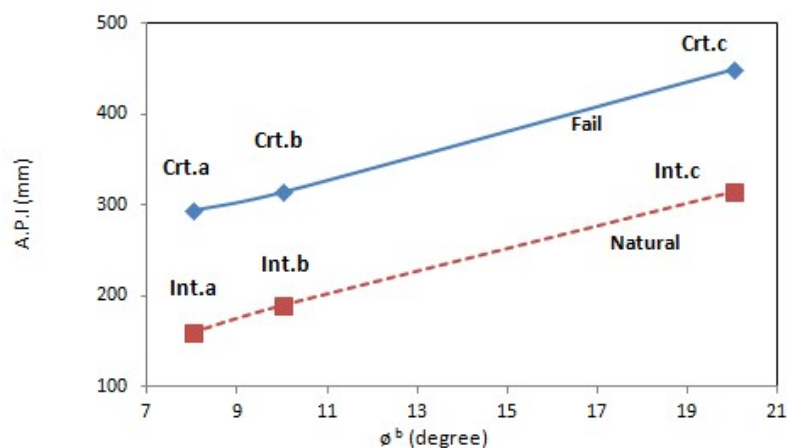
25	II	I
30	II	I

#### 4.3.2.7 The influence on the angle of friction with respect to matric suction in unsaturated soils ( $\phi^b$ )

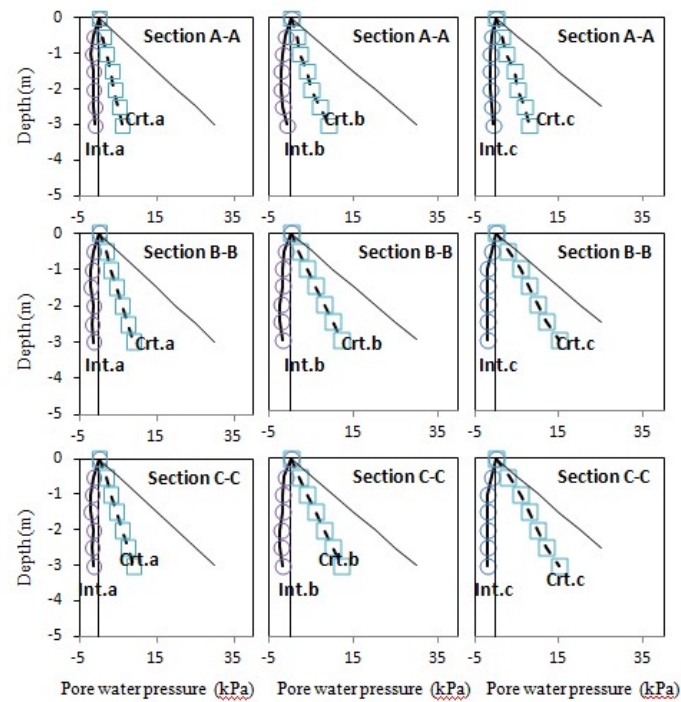
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยโปรแกรม Slope/W จากภาพที่ 4.19 จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า  $\phi^b$  ที่ 8,10 และ 20 องศา ต่อค่าการเพิ่มขึ้นของ API จาก 160 ไป 290 มิลลิเมตรในลาดดินที่เป็นสถานะธรรมชาติ (Natural situation: hidden line graph) และจาก 295 ไป 450 มิลลิเมตร ในลาดดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝน (Fail situation: thick line graph) เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า  $\phi^b$  นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงต้าน (Resisting Forces) ตามสมการที่ 4.2 และซึ่งค่าแรงต้านมีผลแปรผันตรงกับค่า F.S. ทำให้ค่า API เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.20 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่า pore water pressure อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนตลอดหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขาจากสมการการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณาดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยประยุกต์ใช้ The Mohr-coulomb failure criterion (Fredlund and vanapalli, 2002) พบว่า เมื่อฝนตก จะทำให้แรงดันน้ำในฟังก์ชัน ( $u_a - u$ ) เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าแรงเฉือนในมวลดิน (Shear strength) และความแข็งแรงในมวลดิน, ค่า F.S. และค่า API เพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า  $\phi^b$  มีบทบาทต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในมวลดิน, API และ pore water pressure ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า 0.52 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวอันดับที่ 2 ในกลุ่มตัวแปรที่เป็น soil strength parameters



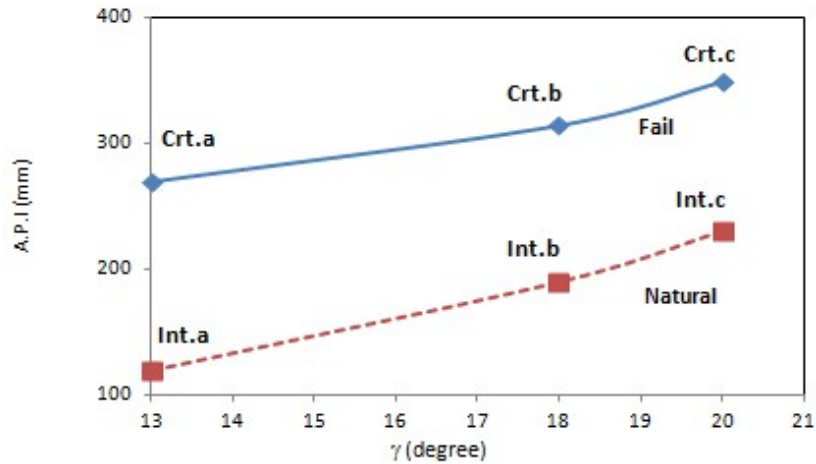
รูปที่ 4.20 Relationship between A.P.I. (mm) with different  $\phi^b$



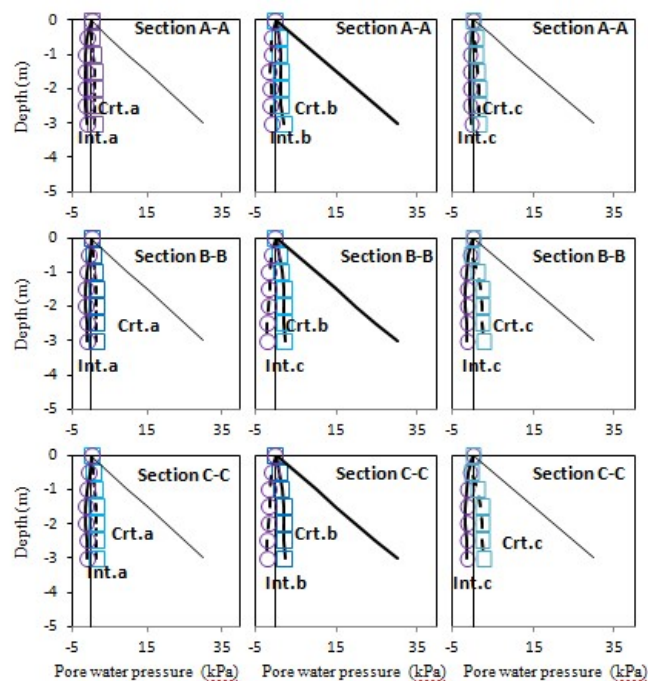
รูปที่ 4.21 Pore water pressure profiles for three  $\phi^b$

#### 4.3.2.8 The influence on soil unit weight ( $\gamma$ )

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยโปรแกรม Slope/W จากภาพที่ 4.22 จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า  $\gamma$  ที่ 13,18 และ 20 องศา ต่อค่าการเพิ่มขึ้นของ API จาก 120 ไป 230 มิลลิเมตรในลาดดินที่เป็นสถานะธรรมชาติ (Natural situation: hidden line graph) และจาก 270 ไป 350 มิลลิเมตร ในลาดดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝน (Fail situation: thick line graph) เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า  $\gamma$  นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในมวลดิน รูปที่ 4.23 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่า pore water pressure อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนตลอดหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขา จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า  $\gamma$  มีบทบาทต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในมวลดิน, API และ pore water pressure ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า 0.31 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวอันดับที่ 3 ในกลุ่มตัวแปรที่เป็น soil strength parameters



รูปที่ 4.22 Relationship between A.P.I (mm) with different  $\gamma$



รูปที่ 4.23 Pore water pressure profiles for three different  $\gamma$

#### 4.3.2.9 The influence on effective cohesion ( $c'$ )

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยโปรแกรม SEEP/W และ Slope/W จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า effective cohesion ที่ 5,15 และ 30 ต่ค่าการเปลี่ยนแปลง API จากลาดดินที่เป็นสถานะธรรมชาติ (Natural situation: hidden line graph) ไปจนลาดดินถล่มเนื่องจากปริมาณน้ำฝน (Fail situation: thick line graph) ดังภาพที่ 4.24 จากการวิเคราะห์ปริมาณการซึมผ่านของน้ำในมวลดินโดยใช้หลักการ finite element analysis โดยโปรแกรม SEEP/W พบว่าการเพิ่มขึ้นของ API มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pore water pressure บริเวณพื้นผิวการพิบัติ (failure surface) ตามหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขา ดังภาพที่ 4.25

ภาพที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า effective cohesion จาก 5 ถึง 30 ส่งผลให้เสถียรภาพในลาดดินลดลงและค่า API เพิ่มขึ้นจาก 125 ไป 245 มิลลิเมตร (Natural situation) และ 270 ไป 400 มิลลิเมตร (Failure situation) ภาพที่ 4.25 แสดงถึงค่า pore water pressure ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนตลอดหน้าตัดของลาดดินบริเวณเนินเขา กลางเขา และตีนเขาแต่มีการเพิ่มขึ้นเพียงนิดเดียวหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยซึ่งสอดคล้องกับตาราง 4.7 ที่แสดงถึงปริมาณ น้ำที่เพิ่มขึ้น ณ ขนาดลาดดินสูญเสียเสถียรภาพระดับน้ำในลาดดิน (The location of water table) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าระดับน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงตีนเขาจะพบในลาดดินที่มีค่า effective cohesion ที่ 5,15 และ 30 ด้วยความเข้มฝน 9 มม/ชม. ไม่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในลาดดิน อย่างไรก็ตามมีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำไปจนถึงตีนเขาในลาดดินที่มีค่า effective cohesion ที่ 5,15 และ 30 ด้วยความเข้มฝน 36 มม/ชม.

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปร effective cohesion พบว่าค่า Matric suction มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยและการเพิ่มขึ้นของ API ในลาดดิน

ตาราง 4.7 Categories of water table location at slope failure in series C (effective cohesion) of this parametric study.

soil unit weight , c' (kPa )	Rainfall Intensity (mm/hr)	
	9	36
5	III	II
15	III	II
30	III	II

สรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินโดยการเปลี่ยนแปลงค่า effective cohesion พบว่าการเพิ่มขึ้นของ effective cohesion นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงในมวลดินและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า API ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ มีค่า 0.27 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวตัวน้อยที่สุดในกลุ่มตัวแปรที่เป็น soil strength parameters

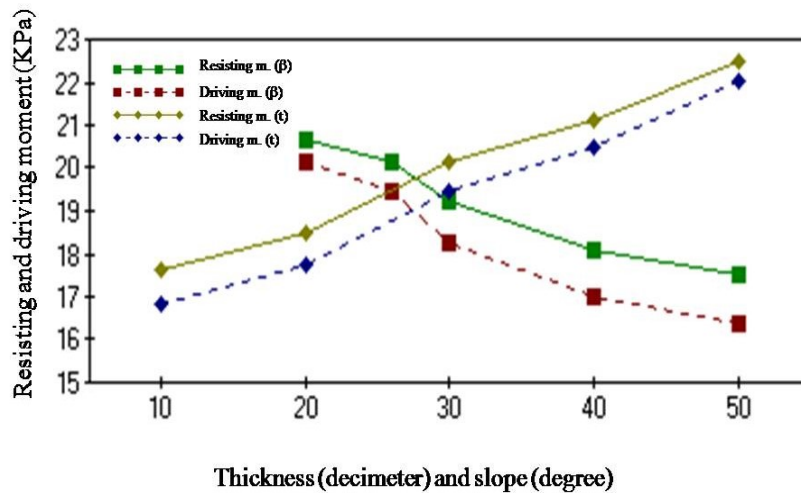
#### 4.3.2.10 The influences of modeling parameters on resisting and driving moments

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยในการคำนวณเสถียรภาพในลาดดินซึ่งเป็นอัตราส่วนแรงต้านต่อแรงผลักซึ่งแรงต้านจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงในลาดดิน

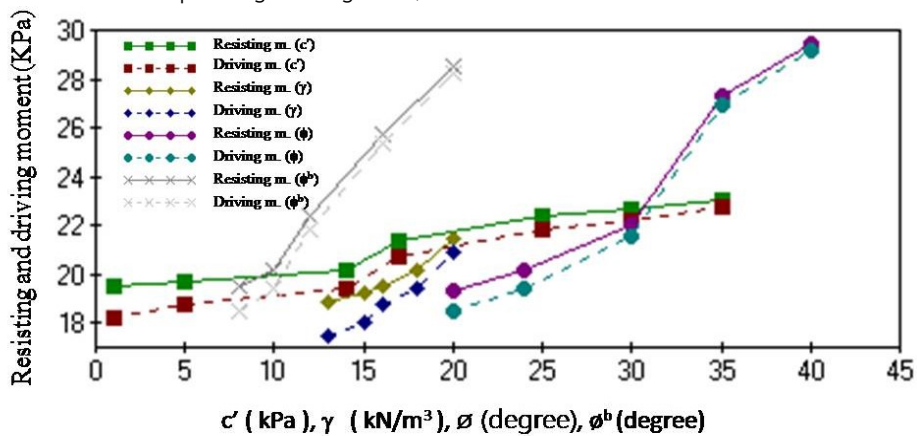
$$F.S. = \frac{\text{Resisting Forces}}{\text{Driving Forces}} \quad (4.2)$$



ซึ่งปริมาณน้ำฝนจะมีบทบาทสำคัญในการลดลงของเสถียรภาพและค่าอัตราส่วนปลอดภัย ค่าแรงผลักดัน (the driving forces) จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงค่า  $\gamma, \beta$  และ T ส่วน ค่าแรงต้าน (the resisting forces) จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงค่า  $\phi, \phi^b$  และ  $c'$  รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่า the resisting forces และ the driving forces เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ Geometry และ Shear strength properties



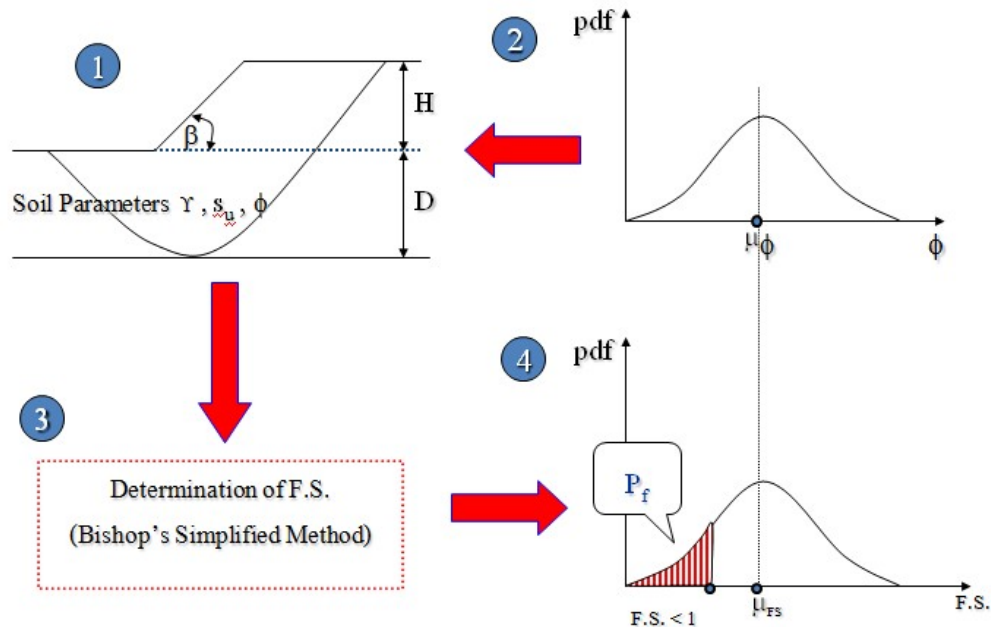
รูปที่ 4.24 Relationship between resisting and driving forces (per area, in KPa) across ranges of thickness (dm) and slope angle (degrees), for sand (UNSODA 1062).



รูปที่ 4.25 Relationship of resisting and driving forces (KPa) across various soil property parameters, for sand (UNSODA 1062).

### 4.3.3 Probabilistic analysis

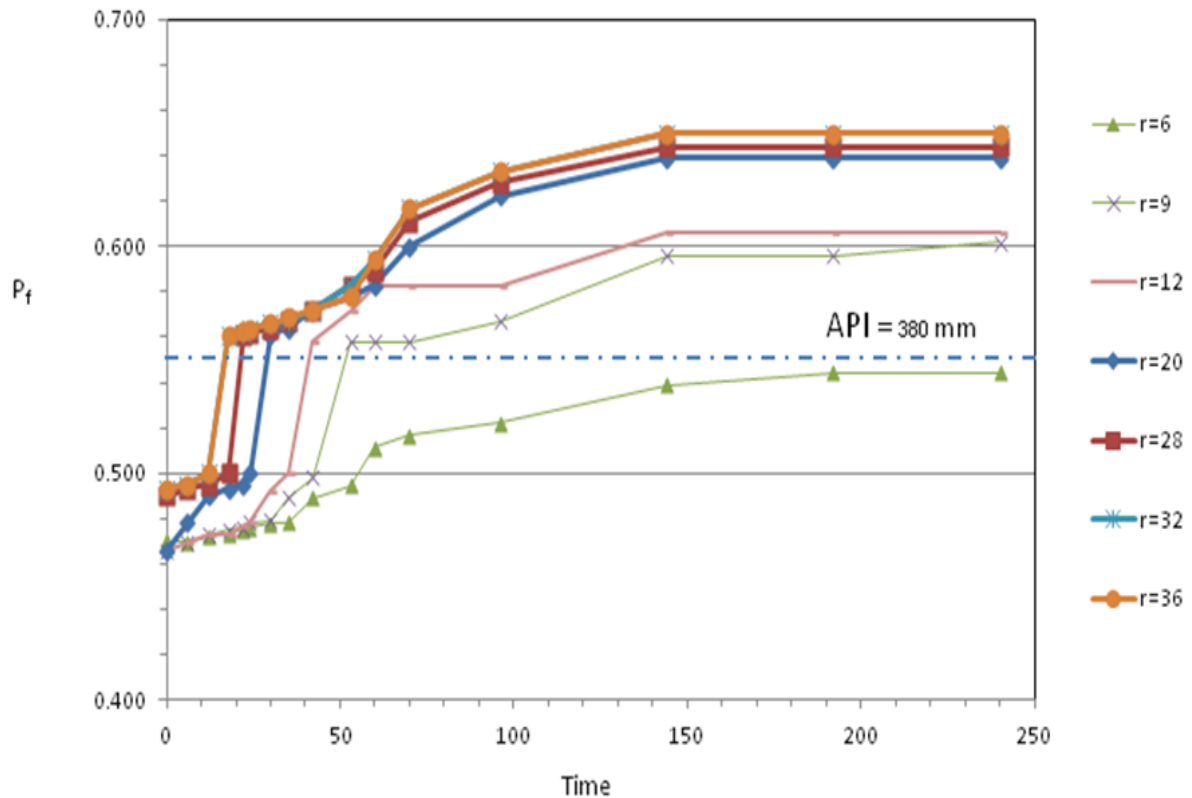
จากการศึกษาความไวตัวในเสถียรภาพของลาดดินที่ได้พบว่า ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) มีความไวตัวต่อค่า API ที่สุด จึงทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่า ความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure,  $P_f$ ) ดังขั้นตอนตามภาพที่ 4.26 ดังนี้



รูปที่ 4.26 Probabilistic slope stability analysis

- 1.) กำหนดขนาดและรูปแบบของลาดดิน (รูปที่ 4.26 ตอนที่ 1)
- 2.) มุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ถูกกำหนดเป็นตัวแปร (Variable) ที่สามารถอธิบายในทางสถิติได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (Coefficient of Variation, COV) สำหรับดินทรายมีค่าเท่ากับ 10 (รูปที่ 4.26 ตอนที่ 2) โดยอ้างอิงจาก Phoon&Kulhawy (1999) และมีค่าเฉลี่ย (Mean,  $\mu_x$ ) เท่ากับ  $24^\circ$
- 3.) ทำการคำนวณ F.S.<sub>i</sub> ของลาดดินโดยใช้สมการของ Bishop (รูปที่ 4.26 ตอนที่ 3)
- 4.) ทำการคำนวณค่า F.S. จำนวน  $n$  ครั้ง (ในที่นี้กำหนดให้มีการทำซ้ำ เท่ากับ 2000 ครั้ง ) โดยเริ่มจาก  $i = 1$  จนถึง  $i = n$  ผลลัพธ์ที่ได้คือค่า F.S.<sub>1</sub>, F.S.<sub>2</sub>, ..., F.S.<sub>n</sub> ซึ่งสามารถแสดงเป็น Probability Density Function (pdf) ของ F.S. ได้
- 5.) ค่าวนค่า  $P_f$  โดยหาพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงเป็นพื้นที่แรเงาในรูป (รูปที่ 4.26 ตอนที่ 4)

ตารางที่ 4.8 เป็นการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure,  $P_f$ ) ของลาดดินในกรณีศึกษาพื้นที่ อ.สีชล จ. นครศรีธรรมราช ที่ความเข้มฝน 6-36 มิลลิเมตร/ชั่วโมง พบว่าดินให้ค่า  $P_f = 0.558$  โดยลาดดินเกิดการถล่มที่ปริมาณความเข้มฝน 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ที่ชั่วโมงที่ 53 ตามรูปที่ 4.27 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ในกรณีศึกษาพื้นที่ อ.สีชล จ. นครศรีธรรมราช



รูปที่ 4.27 Relationship between probability of failure and rainfall intensity at different time

ตารางที่ 4.8 Relationship between probability of failure and rainfall intensity for loamy sand at different time

A.P.I.		380	312	315	300	308	288	324
Time (hour)	lr=6	r=9	r=12	r=18	r=20	r=28	r=32	r=36
0	0.470	0.466	0.466	0.466	0.466	0.49	0.493	0.493
6	0.469	0.469	0.469	0.470	0.478	0.493	0.495	0.495
12	0.472	0.473	0.473	0.478	0.49	0.495	0.500	0.500
18	0.473	0.475	0.473	0.489	0.493	0.500	0.561	0.561
22	0.475	0.476	0.477	0.488	0.495	0.561	0.562	0.563
24	0.476	0.478	0.478	0.489	0.500	0.562	0.564	0.564
30	0.478	0.479	0.492	0.500	0.561	0.564	0.566	0.566
35	0.478	0.489	0.500	0.561	0.564	0.567	0.567	0.569
42	0.489	0.498	0.558	0.564	0.572	0.572	0.572	0.572
53	0.494	0.558	0.572	0.572	0.578	0.583	0.583	0.578
60	0.511	0.558	0.583	0.578	0.583	0.589	0.594	0.594
70	0.517	0.558	0.583	0.583	0.600	0.611	0.617	0.617
96	0.522	0.567	0.583	0.600	0.622	0.628	0.633	0.633
144	0.539	0.596	0.606	0.617	0.639	0.644	0.650	0.650
192	0.544	0.596	0.606	0.622	0.639	0.644	0.650	0.650
240	0.544	0.602	0.606	0.622	0.639	0.644	0.650	0.650













## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ลาดดินพีชิตีธรรมชาติดีสำหรับระบบการเตือนภัยโดยนำค่าความไม่แน่นอนของ ค่าความลาดเอียงในลาดดิน( $\beta$ ), ค่าความหนาในลาดดิน ( $t$ ), ชนิดของดิน, หน่วงน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ), ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน ( $\phi^b$ ), ค่าความชื้นผืน และค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ในค่าเส้นอัตตลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน เพื่อคำนวณและแสดงผลในรูปของค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- สำหรับการวิเคราะห์ที่ในกรณีพื้นที่ศึกษาที่ อ. สีชล นครศรีธรรมราช โดยในโปรแกรม SEEP/W ได้นำหลักการของ Finite element analysis มาใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงในค่าแรงดันน้ำในมวลดินอันเนื่องมาจากน้ำฝนและวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดินพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) และ 6 ช่วงเวลาที่ผ่านไป (0,23,33,43,53 และ 100 ชั่วโมง) พบว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturated) ในมวลดินเพิ่มขึ้นแต่ไม่ถึงกับอิ่มตัว 100% จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม SLOPE/W พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะลดลงไปเรื่อยๆจนถึงลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 53 และมีค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินเท่ากับ 380 มิลลิเมตร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสอดคล้องกับปริมาณดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินและปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติ ณ วันที่ 27 มีนาคม 2011 ในเสถียรภาพของดินจากเริ่มต้น (ที่ 0 ชั่วโมง) จนกระทั่งดินถล่ม (ที่ 53 ชั่วโมง) ปริมาณน้ำฝนจะทำให้กำลังของดินช่วงตรงกลางของพื้นผิวการถล่มลดลงจาก 12 ถึง 6 kPa และจะมีผลให้แรงดันน้ำในมวลดินของลาดดินเพิ่มขึ้นจาก -9.8 ถึง 8 kPa ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณความชื้นผืนมีบทบาทสำคัญในเสถียรภาพของลาดดินให้เกิดการถล่มได้รวดเร็วขึ้น

- ผลลัพธ์ที่ได้จาก Series A (Unsaturated soil properties) ได้แก่ ดิน 5 ชนิดที่ต่างกัน Sand, Loamy sand และ Sandy loam ( UNSODA 4660,4651,1062,1111 และ 1381), Fitting parameters ใน SWCC Equation และ Permeability function ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks-Corey (1966), van Genuchten (1980), Fredlund (1994) และ Wylie-Gardner โดยในการวิเคราะห์ลาดดินถูกแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ จากสถานะลาดดินแห้งไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Dry to failed) และ จากสถานะลาดดินธรรมชาติไปจนกระทั่งลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Natural to failed)

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลง Fitting parameters ในสมการ SWCC และ K equation ไม่มีความไวต่อค่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นของน้ำในมวลดิน (API) จากดินสถานะธรรมชาติไปเปียก ผลของค่า API ที่แตกต่างกันมีผลมาจากค่าความเข้มของน้ำฝนและชนิดของดิน (rainfall intensity และ soil type) โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของ ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เนื่องมาจากค่าความเข้มฝน จะมีค่าน้อยในดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง (sandy soil UNSODA 4651) ตามมาด้วย loamy sand (UNSODA 1062), sandy soil (UNSODA 4660) และ sandy loam soil (UNSODA 1381,1111) ในทางตรงกันข้ามลาดชันที่มีสถานะดินจากแห้งไปเปียก ตัวแปรค่าความเข้มของน้ำฝน, ชนิดของดิน, SWCC และ K function มีความไวต่อค่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีความชุ่มชื้นของน้ำในมวลดิน (API) โดยลาดดินในสมการ SWCC equation ของ Fredlund และสมการ k- function ของ van Genuchten มีความไวต่อปริมาณความเข้มฝนที่สูง (High rainfall intensity) มากกว่าดินในสมการ k- function และ SWCC อื่นๆ

- จากกรณี sensitivity analysis (Series B: Geometric properties) ผลลัพธ์พบว่าค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นในขณะที่ความลาดเอียงของดินเพิ่มขึ้นกลับทำให้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินลดลง นั่นเพราะปริมาณมวลดินสามารถเก็บกักน้ำได้มากขึ้นเมื่อความหนาของลาดดินเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เสถียรภาพในลาดดินเพิ่มขึ้นค่า API จึงมีการสะสมน้ำเยอะขึ้นกว่าลาดดินจะเกิดการถล่มแต่การเพิ่มขึ้นของความชันกลับทำให้เสถียรภาพในลาดดินลดลง ค่า sensitivity index ที่คำนวณได้ของค่าความลาดเอียงในลาดดิน มีค่า - 0.47 (เครื่องหมายไม่มีผลต่อความไวในตัวแปร) ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวที่สุดในกลุ่มตัวแปรที่เป็น geometric parameters

- จากกรณี sensitivity analysis (Series C: Shear strength properties) การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) กับการเปลี่ยนแปลงพิสัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Soil strength properties ได้แก่ ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ( $c'$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\phi^b$ ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ( $\gamma$ ) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$ ,  $\phi^b$ ,  $c'$ ,  $\gamma$  มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงในลาดดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า API มีค่าการสะสมน้ำเยอะขึ้นกว่าลาดดินจะเกิดการถล่ม ค่า sensitivity index ใน angle of internal friction ที่คำนวณได้ คือ 0.83 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความไวที่สุดในกลุ่มตัวแปรที่เป็น soil strength parameters

- จากกรณี Probability Analysis มุมของแรงเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ถูกกำหนดเป็นตัวแปร (Variable) ที่สามารถอธิบายในทางสถิติได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งความแปรผัน (COV) สำหรับดินทรายมีค่าเท่ากับ 10 โดยอ้างอิงจาก Phoon&Kulhawy (1999) การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure,  $P_f$ ) ของลาดดินในกรณีศึกษาพื้นที่ อ.สีชล จ. นครศรีธรรมราช ที่ความเข้มฝน 6-36 มิลลิเมตร/ชั่วโมง พบว่าดินให้ค่า  $P_f = 0.558$  โดยลาดดินเกิดการถล่มที่ปริมาณความเข้มฝน 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ที่ชั่วโมงที่ 53

### บรรณานุกรม

- [1] บุญชัย อุกฤษชฌน (2547). “การวิเคราะห์ขอบเขตบนแบบประยุกต์สำหรับปัญหาเสถียรภาพของความลาด.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9 (NCCE9), 19-21 พฤษภาคม. โรงแรมริเจนท์ ซะอำ, จ.เพชรบุรี, GTE 4-9
- [2] รัชพล คชาอนันต์, ธนันท์ ชูอุปการ และ ธนิต เฉลิมยานนท์ (2556). “อิทธิพลของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีผลต่อกำลังเฉือนในดินที่ผุสลายอยู่กับที่.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18., เชียงใหม่
- [3] A GIS (Geographic Information System) (2016). survey by the Southern Natural Disaster Research Center.
- [4] Alonso, E. E. (1976). “Risk analysis of slope and its application to slope in Canadian sensitive clays.” J. Geotechnique., 26, 453-472.
- [5] Arnold, P., and Hicks, M. A. (2011). “Stochastic modeling of unsaturated slope stability.” Unsaturated Soils-Alonso and Gens (eds) Taylor & Francis Group., London.
- [6] Banaki, R., Ahmad, F., Tabarrokı, M., and Yahaya, A. S. (2013). “Probabilistic Analyses of Slopes: A State of the Art Review.” International Journal of Current Engineering and Technology 3 (1). 58-63.
- [7] Beschta, R.L. (1990). “Peakflow estimation using API model in tropical environment.” Proceeding of the Fiji symposium., 192, 128-137.
- [8] Brand, E. W. (1992). “Slope instability in tropical areas.” Proc., 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides., The Netherlands., 2031-2051.
- [9] Bouwer, H. (1978). “Groundwater hydrology.” McGraw-Hill, New York.
- [10] Box, G.E.P. and Muller, M.E. (1958). “A note on the generation of random deviates.” Ann. Math. stat., 29, 610-611.
- [11] Caine, N. (1980). “The rainfall intensity: Duration control of shallow landslides and debris flows.” Geografiska Annaler., Series A, Physical Geography., 62, 23-27.
- [12] Casagli, N., Dapporto, S., Ibsen, M.L., Tofani, V., and Vannocci, P. (2006). “Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20<sup>th</sup>-21<sup>st</sup> November 2000, in Northern Tuscany.” Landslides., 13-21.
- [13] Celia, A., Bouloutas, T., and Zarba, L. (1990.) “ A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation.” J. Water resources research., 26(7), 1483-1496.
- [14] Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2004). “Reliability – Base Design for Internal Stability of Mechanically Stabilize Earth Walls.” J. Geotechnical. Geoenvironmental., 130(2), 163-173.
- [15] Chalermyanont, T. (2004). “Reliability Based Design for Internal Stability of Mechanically Stabilized Earth Walls.” Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin Madison.Madison.Wis.
- [16] Chao. Y., Daichao. S., John. P. C. and Jinsong. H. (2012). “Stochastic evaluation of hydraulic hysteresis in unsaturated soils.” J. Geotech. Geoenviron. Eng., 139(7), 1211-1214.
- [17] Chiu, C. F., Yan, W. M. and Ka-Veng Yuen. (2010). “Reliability analysis of soil-water characteristics curve and its application to slope stability analysis.” Engineering Geology., 83-91.

- [18] Choudhury, B. J. and Blanchard, B. J. (1983). "Simulating soil water recession coefficients for agricultural watersheds." *Water Resour. Bull.*, 19(2), 241-247.
- [19] Chowdhury, R., Flentje, P., and Bhattacharya, G. (2012). "Geotechnics in the 21st Century uncertainties and other challenges with particular references to landslide hazard and risk assessment." *J. Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 1 (2), 27-43.
- [20] Christian, J.T., Ladd, C.C and Baecher, G.B. (1994). "Reliability applied to slope stability analysis." *ASCE.J.Geotech Eng.*, 120(12), 2180-2207.
- [21] Christian, J.T. and Baecher, G.B. (1999). "Point-estimate method as numerical quadrature." *ASCE.J.GeotechGeoenv. Eng.*, 125(9), 779-786.
- [22] Corominas, J. (2001). "Landslides and climate: Keynote Lectures from the 8th International Symposium on Landslides.", 4, 1–33.
- [23] Croney, D., Coleman. J.D., and Black., W.P.M. (1958). "Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance." *Water and Its Conduction in Soils Special Rep. No. 40*, Highway Research Board, Washington, D.C., 226–252. *J. Geotech. Eng., ASCE*, 120(12), 2180-2207.
- [24] Crosta, G.B., and Frattini, P. (2003). "Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense." *Natural Hazards and Earth System Sciences.*, 3, 81-93.
- [25] Chiwaye, H.T. (2010). "A Comparison of The Limit equilibrium and Numerical Modelling Approaches to risk analysis for open pit mine slopes" M.A. thesis, University of the Witwatersrand Johannesburg.
- [26] D'Amato, G., Francesco, F., Roberto, G., and Alberto, P. (2009). "Soil slip susceptibility assessment using Mechanical–hydrological approach and GIS techniques:an application in the Apuan Alps (Italy)." *Nat Hazards.*, DOI: 10.1007/s11069-009-9357-4.
- [27] D'Andrea, R.A. and Sangrey, D.A. (1982). "Safety factors for probabilistic slope design" *ASCE J.Geotech. Eng.*, 108(GT9), 1101-1118,1982.
- [28] Degroot D.J. (1996). "Analyzing Spatial Variability of In Situ Soil Properties." *Proceedings of Uncertainty 96*, Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE., 1:210-238,1996.
- [29] Duncan, J.M. (1996). "State of The Art:Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes." *J. Geotech. Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 122(7), 577-596.
- [30] Duncan, J.M. (2000). "Factor of safety and reliability in geotechnical engineering." *ASCE.J.Geotech. Geoenv. Eng.*, 126(4), 307-316, 2000.
- [31] El-Ramly, H., Morgenstern, N.R. and Cruden, D.M. (2002). "Probabilistic slope stability analysis for practice." *Can. Geotech. J.*, 40, 851 – 855.
- [32] Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2008). "Risk Assessment in Geotechnical Engineering." John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey,2008.
- [33] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *J. Canadian Geotechnical.*, 15(3), 313-321.
- [34] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils." John Wiley and Sons, Inc., 517.
- [35] Fredlund, D.G. and Vanapalli, S.K. (2002). "Shear strength of Unsaturated Soils." *Agronomy Society of America*, 329-361.
- [36] Giannecchini, R. (2006). "Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy)." *Natural Hazards of Earth System Science* 6, 357–364.

- [37] Global Positioning System (2016). "Surveys conducted by the Southern Natural Disaster Research Center."
- [38] Griffiths, D.V., and Lane, P.A., (1999). "Slope Stability Analysis by Finite Elements." *Geotechnique.*, 49(3), 387-403.
- [39] Griffiths, D.V., Jinsong Huang, Gordon A. Fenton. (2008). "Risk Assessment in Geotechnical Engineering." John Wiley & Sons, Inc., 381-400.
- [40] Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. (2007). "Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering." Springer, Wien, New York, CISM Courses and Lectures No. 491, International Centre for Mechanical Sciences.
- [41] Griffiths, D.V., Fenton, G.A., and Manoharan, N. (2002a). "Bearing capacity of a rough rigid strip footing on cohesive soil; a probabilistic study." *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 128(9), 743-755.
- [42] Griffiths, D.V., Fenton, G.A., and Manoharan, N. (2002a). "Bearing capacity of a rough rigid strip footing on cohesive soil; a probabilistic study." *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 128(9), 743-755.
- [43] Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe." *Meteorol. Atmos. Phys.*, DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7.
- [44] Harr, M.E. (1987). "Reliability based design in civil engineering." McGraw Hill, London.
- [45] Hassan, A.M. and Wolff, T.F. (2000). "Effect of deterministic and Probabilistic models on slope reliability index in slope stability." geotechnical special publication No.101, American society of civil engineers, New York, pp. 194-208.
- [46] Hammah, R., Thamer, Y., Brent, C. and John, C. (2005). "A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit equilibrium investigation." Toronto.
- [47] IndraNoerHamdhan and Helmut, F. (2011). "Slope stability analysis of unsaturated soil with fully coupled flow-deformation analysis." IAMG publication Salzburg, Austria.
- [48] Itasca Consulting Group, Inc. (2005). *FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 3.0 User's Guide*. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.
- [49] Iverson, M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration." *Water Resource Research*, 36, 1897-1910.
- [50] Jennifer, L. P. (1999). "Probability Analysis of Slope Stability." West Virginia University
- [51] Jon, W. K., Sigmund, D. S., and Donald, W. T. (1989). "Geotechnical Properties of Geologic Materials." *Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin* 78(1)
- [52] Jumpol, P. (2013). "Numerical analysis of homogenization using random finite element method." Ph.D. Thesis, The Colorado School of Mines, United States.
- [53] Kulhawy, F.H. and Duncan, J.M. (1972). "Stresses and movements in Oroville Dam." *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE.*, Vol. 98, SM7, 653-665.
- [54] Lacasse, S. (1994). "Reliability and Probabilistic methods" in Proc 13<sup>th</sup> Int.Conf. on soil mechanics foundation engineering., 225-227.

- [55] Lacasse, S., and Nadim, F. (1996). "Uncertainties in Characterising soil properties." In ASCE Uncertainties'96 Conference Proceedings, C.H. Benson, Ed., Madison., W.I., 49-75.
- [56] Lee, I.K., White, W., and Ingles., O. G. (1983). "Geotechnical Engineering." Pitman, London modelling of Stability and Risk of Geotechnical Systems in Highly variable Soils.
- [57] Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H.G. (2002). "Comparison of two different approaches of sensitivity analysis." *Physics and Chemistry of the earth.*, 645-654.
- [58] Li, K.S., and Lumb, P. (1987). "Probabilistic design of slopes." *Can. Geotech.J.*, 24, 520-531.
- [59] Linsley, R.K., Kholer, M.A., and Paulhus, J.L.H. (1949). "Applied Hydrology." McGraw Hill. New York.
- [60] Li Jixiang, Liu Xiaofan, Jiang Zhaohua. (2009). "Coupled Numerical Simulation of Slope stability with unsaturated soil under rainfall condition." China proceeding of conference, China University of Geosciences(Wuhan), P.R.China
- [61] Low, B.K., and Tang, Wilson H. (1997a). "Efficient reliability evaluation using spreadsheet." *J. of Engrg. Mech.*, ASCE, New York, 123(7), 749-752.
- [62] Low, B.K., and Tang, Wilson H. (1997b). "Automated Reliability Based Design of Footing Foundations." *Proceedings, ICOSSAR 1997, Kyoto, Japan*, v3, 1837-1840.
- [63] Lowe, J., and Karafiath, L. (1960). "Stability of earth dams upon drawdown." *Proc. 1st. Pan-Am Confer on Soil Mech. And Found. Eng.*, Mexico City, 2, 537-552.
- [64] Matsuo, M., and Kuroda, K. (1974) "Probabilistic approach to the design of embankments." *Soil Found*, 14(1), 1-17.
- [65] Muhammad, S., (2015). "Rainfall induced failures of natural slopes in tropical regions." Report presented to the University of western Australia, at Crawley-Nedlands, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [66] Mat Radhi, M. S., Mohd Pauzi, N. I. and Omar, H. (2008). "Probabilistic Approach of Rock Slope Stability Analysis Using Monte Carlo Simulation." *ICCBT, E(37)*, 449-468.
- [67] Mat Radhi, M.S., Pauzi, N.I.M. and Omar, H (2008). "Probabilistic Approach of Rock Slope Stability Analysis Using Monte Carlo Simulation." *ICCBT, E(37)*, 449-468.
- [68] Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- [69] Muhammad, S. (2015). "Rainfall induced failures of natural slopes in tropical regions." The university of Western Australia.
- [70] Nikas, K., Antonakos, A., Lambrakis, N., and Kallergis, G. (2007). "The use of antecedent precipitation index and delay factor to estimate runoff from rainfall: A case study from eight drainage basins-Achaia, Peloponessos, Greece." *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 523-534.
- [71] Phoon, K. K. And Kulhawy, F. H. (1999a). "Characterization of geotechnical variability." *Can. Geotech. J.* 36(4), 612-624.
- [72] Phoon, K. K. And Kulhawy, F. H. (1999b). "Evaluation of geotechnical property variability." *Can. Geotech. J.* 36(4), 625-639.

- [73] Potts, D.M. (2003). "Numerical analysis a virtual dream or practical reality." *J. Geotechnique* 53, 6, 535-573.
- [74] Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leong, E.C. (2007). "Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall." *ASCE*, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241, 133, 12.
- [75] Ramly, E.I., Morgenstern, N.R., and Cruden, D.M. (2002). "Probabilistic slope stability analysis for practice." *Can. Geotech. J.*, 39, 665-683.
- [76] Rosenblueth, E. (1975). "Point estimates for probability moments." *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 10, 3812-3814.
- [77] Shakir, A., Ghosh, N.C., and Ranvir, S. (2010). "Rainfall-runoff simulation using a normalized antecedent precipitation index." *J. Hydrological Science*, 55(2), 266-274.
- [78] Szyrakiewicz, T., Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. (2002). "A Probabilistic investigation of c' slope stability." In *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Cong. Numerical method in engineering and scientific applications., CIMENICS'02, Sociedad Venezolana*, 25-36.
- [79] Tang, W.H., Yuceman, M.S., and Ang, A.H.S. (1976). "Probability based short-term design of slopes." *Can. Geotech. J.* 13, 201-215.
- [80] The Thailand intensity-duration-frequency (IDF) curve (2011). Information on the Thailand royal irrigation department.
- [81] Thode, R., and Gitirana, G. (2012). "SVFLUX: 2D/3D Seepage Modeling Software, Theory Manual." Saskatoon, Saskatchewan, Canada: Soil Vision System Ltd.
- [82] Thornthwaite, C. W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geogr. Rev.*, 38(1), 55-94.
- [83] U.S. Army Corps of Engineers (1995). "Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering." ETL 1110-2-547, Washington D.C.
- [84] Ukritchon, B., Whittle, A., and Klangvigit, C. (2004). "Closure to calculations of bearing capacity factor N using numerical limit analyses." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10, 1108-1109.
- [85] van Genuchten, M. Th. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- [86] Vanmarcke, E.H. (1977). "Probabilistic modeling of soil Profiles." *ASCE J. Geotech. Eng.*, 103(GT 11). 1227-1246.
- [87] Wael, A., Abdallah, I., Jamal, H.N. and Nermeen, A. (2008). "A comparative study of various commercially available programs in slope stability analysis." *J. computers and geotechnics.*, 35(3), 428-435.
- [88] Wang, Y., Cao, Z. and Au, S.K. (2010). "Efficient monte carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis." *Computers and geotechnics.*, 37, 1015-1022.
- [89] Wiczorek, G. F. (1996). "Landslides triggering mechanisms, in: *Landslides: Investigation and Mitigation*, edited by: Turner, A. K. and Schuster, R. L., National Research Council, Transportation Research Board, Washington, 76-90.
- [90] Wichmann, B., and Hill, D. (1987). "Building a Random Number Generator." *BYTE*. March. 127-128.
- [91] Whitman, R.V. (2000). "Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering." *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(7), 583-59.



- [92] Wolff, T.F. (2000). "Probabilistic slope stability in theory organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering." *ASCE.J.Geotech, Geoenv.Eng.*, 126(7), 583-59.
- [93] Wyllie, D.C. and Mah, C.W., (2004). "Rock slope engineering civil and mining." Spon Press, Taylor and Francis e-library, 456.
- [94] Yang, C., Sheng, D., Carter, J. and Huang, J. (2013). "Stochastic evaluation of hydraulic hysteresis in unsaturated soils." *ASCE.J.GeotechGeoenv. Eng.*, 139(7), 1211-1214.
- [95] Yuan-Liang Chang and Tien-Kuen Huang. (2005). "Slope Stability Analysis Using Strength reduction Technique." *Journal of the Chinese institute of engineers.*, 28(2), 231-240.
- [96] Yu Wang., Zi-Jun Cao., and Siu-Kui Au (2010). "Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis." *J. Computers and Geotechnics*, 37(7), 1015-1022.
- [97] Zhai, Q., Rahardjo, H. and Satyanaga, A. (2016). "Effect of variability of unsaturated hydraulic properties on stability of residual soil slopes." *J.Unsaturated soil mechanics*, 401-406.
- [98] Zhang, L., and Tang, W. (2011). "Stability analysis of rainfall-induced slope failure." *Geotechnical Engineering*, 164(5), 299-316.

## Comparison between Numerical and Limit Equilibrium Methods for Slope Stability Analysis

Chollada Kanjanakul<sup>1\*</sup> Tanan Chub-uppakarn<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkla 90110

E-mail: <sup>1</sup> chollada-ka@hotmail.com, <sup>2</sup> tanan2284@psu.ac.th

### Abstract

Uncertainty in soil properties may lead to problems in slope stability analysis (e.g. Heterogeneous in soil mass of natural slopes are difficult to evaluate the exact shear strength. This is a main cause of wrong calculate factor of safety and wrong design to protection slope). Thus, probabilistic study is carried out to assess the effect of uncertainty of soil properties on stability of slope. This paper describes the Random-finite element (RFEM) to slope stability risk assessment compares between numerical and limit equilibrium method to analyze slope stability.

Furthermore this paper compares between finite element method and random-finite element method. The result of RFEM analyses with monte carlo simulation are describe by a range of parametric variations. Analyzed method is used in conjunction with monte carlo simulation to determine probability of failure ( $P_f$ ) and its corresponding probability distributions.

**Keywords:** Slope Stability Analysis, Random-finite element method, Numerical Method.

### 1. Introduction

Slope stability analysis is one of the oldest tasks in geotechnical engineering. The earliest studies appeared in the 1970s (e.g., Matsuo and Kuroda, 1974; Alonso, 1976; Tang et al., 1976; Vanmarcke, 1977) and have continued steadily (e.g., D'Andrea and Sangrey, 1982; Li and Lumb, 1987; Whitman, 2000; Wolff, 1996; Lacasse, 1994; Christian et al., 1994; Christian, 1999; Lacasse and Nadim, 1994; Hassan and Wolff; Duncan, 2000; Szynakiewicz et al., 2002; El-Ramly et al., 2002; Griffiths and Fenton, 2007; Griffiths et al., 2008).

This paper focus on review slope stability analysis by using limit equilibrium methods and numerical methods. Especially random finite element method (RFEM), a more rigorous method of probabilistic geotechnical analysis in which finite-element methods are combined with random-field generation techniques and fully accounts for spatial correlation and averaging. RFEM method is also powerful slope stability risk assessment tool that does not require a prior assumption relating to the shape or location of the failure mechanism. (Griffiths and Fenton, 2004)

### 2. Slope stability analysis theories

Analysis method of slope stability can be divided in two major parts as shown in figure1. (Limit equilibrium methods and Numerical methods)

#### 2.1 Limit equilibrium methods

Limit equilibrium methods for slope stability analysis can be separated in two parts. The first one is satisfies force and moment of equilibrium, The result of these method is factor of safety, Which is depend on mean of force equilibrium and another one is probabilistic slope stability analysis. The result of these method is probability of failure, Which is depend on random variable of soil parameter that we concern.

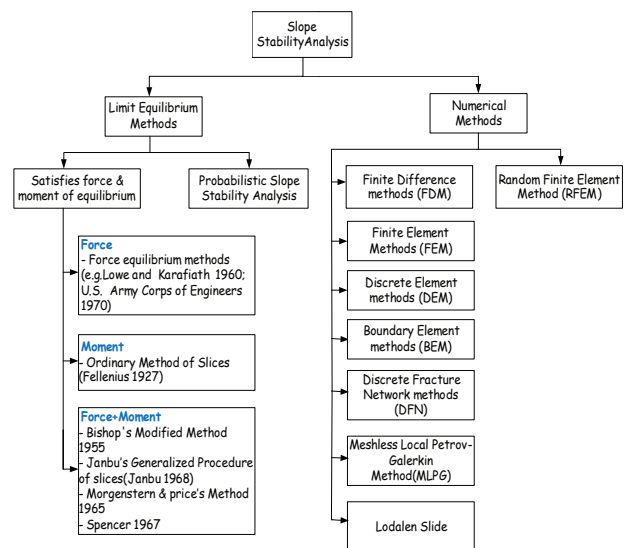


Fig. 1 Slope Stability Analysis Method

#### 2.1.1 Satisfies force and moment of equilibrium

Limit equilibrium method is satisfied a stability analysis method to discuss about balance of resisting and driving force. Slope will have a balance when resisting force (weight of soil mass) is equal external force acting on soil mass (driving force) and balance of soil slope is depend on the increase of slope angle because it has a significantly influence on the reduction of factor of safety. If the value of F.S. is less than 1.0 the slope stability is unstable.

Table 1 describe forces equilibrium methods (e.g., Lowe and karafiath 1960; U.S.Army Corps of Engineers, 1970 ).This applies to any shape of slip surfaces and satisfies both horizontal and vertical force equilibrium.However this method is not consider moment equilibrium.Another method for slope stability analysis, for example bishop’s modified method(Bishop, 1955) doesn’t satisfies horizontal force equilibrium and applies only for circular slip surfaces.

Table 1 Characteristics of Slope Stability Analysis (Duncan and Wright, 1980)

Method	Characteristics
Slope Stability Charts (Janbu 1968 ; Duncan et al, 1987)	Accurate enough for many purposes Faster than detailed computer analyses
Ordinary Method of Slices (Fellenius, 1927)	1. Only for circular slip surfaces 2. Satisfies moment equilibrium 3.Does not satisfy horizontal or vertical force equilibrium
Bishop’s Modified Method (Bishop, 1955)	1. Only for circular slip surfaces 2. Satisfies moment equilibrium 3.Satisfies vertical force equilibrium 4.Doesn’t satisfy horizontal force equilibrium
Forces equilibrium method (e.g. Lowe and Karafiath 1960;U.S.Army corps of Engineer,1970)	1. Any shape of slip surfaces 2. Don’t satisfy moment equilibrium 3.Satisfies both horizontal and vertical force equilibrium
Janbu’s Generalized Procedure of Slices (Janbu, 1968)	1. Any shape of slip surfaces 2.Satisfies all condition of equilibrium 3.Permits side force locations to be varied 4.More frequent numerical problems than some other methods
Morgenstern and prices Method(Morgenstern & Price, 1965)	1. Any shape of slip surfaces 2.Satisfies all condition of equilibrium 3.Permits side force orientations to be varied
Spencer’s Method (Spencer, 1967)	1. Any shape of slip surfaces 2.Satisfies all conditions of equilibrium 3. Permits side force locations to be varied

### 2.1.2 Probabilistic slope stability analysis

This is one of slope stability analysis method was developed for solve uncertainty in soil properties. Probabilistic analyses are normally used to evaluate

statistical distribution of a performance function. Based on statistical characteristics of input variables, Process of this method for analyze factor of safety come from distribution of random variable by monte carlo simulation. Then, probability density function (pdf) leads to measure probability of failure (P<sub>f</sub>).

Degroot (1996) said that engineers can be adjust for best estimate and a measure of uncertainty in the best estimate by

a.) **Mean (  $\mu_x$  )** ; is a statistical measure of normal distribution and measure of Unimodal Pattern data.That data collected from a population with a constant standard deviation.

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

b.) Standard Deviation (  $\sigma_x$  ) is the square root of the variance which is used to explain the deviation of population.

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

c.) Coefficient of variation (COV) ; Consideration ratio of standard mean for compare standard deviation data more than two value.

$$COV_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (3)$$

Random variable method in soil parameter that can be First Order Second Moment Method, Point Estimate Method and Monte Carlo Simulation.

#### 2.1.2.1 First order second moment method (FOSM)

FOSM method is suitable for function that have more than or equal two variable parameter that used first part from Taylor’s series approximation for estimate factor of safety (F.S.).

$$F.S. = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + e \quad (4)$$

When

$g(X_i)$  is Factor safety function  
 $e$  is Model Error

Equation 5,6 shows coefficient of variation (COV) that consideration ratio between mean and standard deviation of random variable.

$$V[F.S.] = \left[ \frac{\Delta F.S.}{\Delta s_u} \right]^2 \left[ \text{cov}_{s_u} \mu_{s_u} \right]^2 \quad (5)$$

$$\sigma^2_{F.S.} = V[F.S.] = \left[ \frac{\partial g}{\partial x_j} \right]^2 \sigma_{x_j}^2 \quad (6)$$

When

$x_i$  is Variable parameter

$e$  is Model Error

$$\Delta F.S. = g(S_{U+1}) - g(S_{U-1}) \quad (7)$$

From equation 4 lead to find variable parameter of F.S. and Probability density function (pdf) from vertical axis (Phoon and Kulhawy, 1999) because of undrained shear strength ( $S_u$ ) and Characteristic of distribution of F.S. as shown in Fig 2 after that find Probability of failure that F.S. < 1

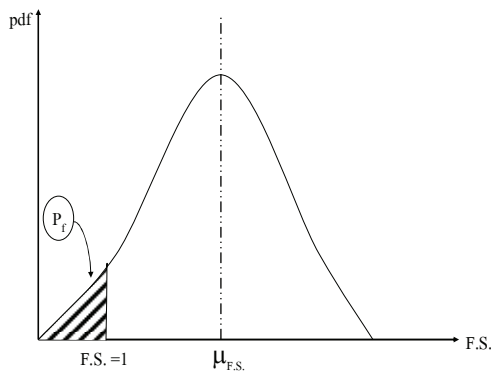


Fig. 2 Probability of failure ( $P_f$ )

### 2.1.2.2 Point estimate method (PEM)

When function has variable parameter more than two (Eq. 4), the method of stability analysis is therefore complicated. Rosenblueth (1975) introduced *point estimate method*, PEM approach, based on Random Variable (Mean, Variance and Skewness) to understand similarity of probabilistic distribution and load distribution. For example rigid beam that is applied vertical load action in beam as shown in Fig 3

Harr. (1987) compare radius of gyration that shows distribution from considerate point. It means standard deviation as shown in fig. 3. When beam was acted by load, reaction has occurred. Hence,  $p_-$  force has appeared at  $x = x_-$ , and at  $x = x_+$  for  $p_+$  force. This approach was called as “Two-point estimates” of distribution of function  $f(x)$ . They have relation about variable as shown in equation 8.

$$p_{\pm} = \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}} \right] \quad (8)$$

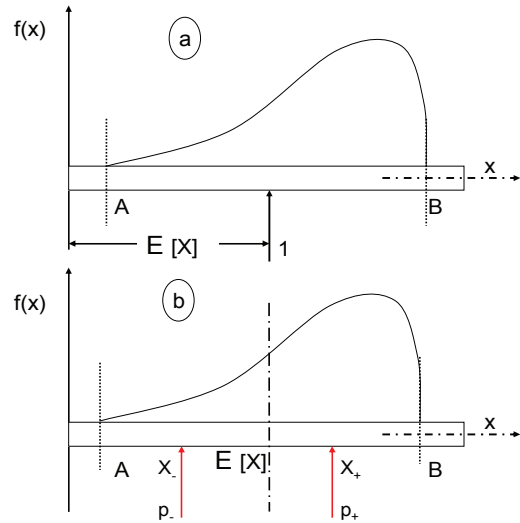


Fig. 3 Beam with Vertical Load (After Harr 1987)

$$p_- = 1 - p_+ \quad (9)$$

$$x_+ = \mu_x + \sigma_x \sqrt{\frac{p_-}{p_+}} \quad (10)$$

$$x_- = \mu_x + \sigma_x \sqrt{\frac{p_+}{p_-}} \quad (11)$$

When

$p_-$  = The resultant force at  $x = x_-$  from beam.

$p_+$  = The resultant force at  $x = x_+$  from beam.

$\alpha$  = Skewness

### 2.1.2.3 Monte carlo simulation

Monte Carlo Simulation or implementation is a statistical method. Arising from implementation of the parameter values is selected for the analysis or calculation repeated several times.

Finally replied in a probability distribution. Until it get the results by calculating the factor of safety repeat many times and large enough to have the distribution of F.S. (Probability density function). Then  $P_f$  can be calculated from the possibility that F.S. < 1.

## 2.2 Numerical method

Numerical modelling starts by dividing the slope into a finite number of zones or elements. Forces and strains are then calculated for each element using the appropriate constitutive laws for the materials in the slope. The most common numerical analysis methods available are Finite Difference methods (FDM), Finite Element Methods (FEM), Discrete Element methods (DEM), Boundary Element methods (BEM), and Discrete Fracture Network methods (DFN).

The difference of numerical method compared with limit equilibrium methods is constitutive model and shear strength reduction technique has been investigated.

### 2.2.1 Constitutive model formulation

The mechanical behavior has been described on numerous models such as

#### 2.2.1.1 Shear strength equilibrium

The mechanical constitutive formulation is based on Bishop's effective stress and a linear elastic, perfectly plastic Mohr-Coulomb soil model. The failure criterion extended for unsaturated conditions is

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + X(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (12)$$

When

- $\tau_f$  = Soil shear strength
- $c'$  = The effective cohesion
- $\phi'$  = The effective angle of friction
- $\sigma$  = The total stress
- $u_a$  = The pore air pressure
- $u_w$  = The pore water pressure

#### 2.2.1.2 Hydraulic conductivity function

Hydraulic behavior describes the hydraulic conductivity suction level is

$$k(s) = k_{sat} k_r(s) \quad (13)$$

Where the relative coefficient of permeability  $k_r(s)$  has been modeled using the function proposed by Van Genuchten (1980)

$$k_r(s) = k_{sat} \frac{\left[ 1 - (\alpha a s)^{n-1} \left[ 1 + (\alpha a s)^n \right]^{\frac{(1-n)}{n}} \right]^2}{\left[ 1 + (\alpha a s)^n \right]^{\frac{(n-1)}{2n}}} \quad (14)$$

and where  $k_{sat}$  is the saturated hydraulic conductivity. (P. Arnold and M.A. Hicks, 2011)

#### 2.2.1.3 Shear Strength Reduction Technique

The principal of shear strength reduction technique in finite element analysis is to simultaneously reduce  $c$  and  $\tan \phi$  in small increments until failure occurs in the numerical analysis. If shear strength parameters at failure are  $c_r$  and  $\phi_r$ . The factor of safety (F.S.) can be defined as (Indra and Helmut F., 2011)

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \frac{c}{c_r} \quad (15)$$

### 2.2.2 The Random Finite Element Method

the Random Finite Element Method (RFEM) that combines random field theory with deterministic finite element analysis was developed by Griffiths and Fenton in the early 1990's and has been applied to a wide range of geotechnical applications. In a stability analysis, input to RFEM is provided in the form of the mean, standard deviation and spatial correlation length of the soil strength parameters at the point level, which may consist of several layers with different statistical input parameters. In the absence of site specific information, there is an increasing number of publications presenting typical ranges for the standard deviation of familiar soil properties, e.g. Lee et al.

In RFEM, local averaging is fully accounted for at the element level indicating that the mean and standard deviation of the soil properties are statistically consistent with the mesh density. Since the finite element method of slope stability allows mechanisms to seek out the most critical path through the soil, the method offers great promise for more realistic reliability assessment of slopes and other geotechnical applications. (Griffiths and Fenton 2000)

### 2.3 Comparison between Numerical and Limit Equilibrium Methods

The difference between Numerical and Limit Equilibrium Methods is

- (1) Limit equilibrium methods just give an estimate of factor of safety with no information on deformation of the slope but in numerical analysis, the failure surface can evolve during the calculation in a way that is representative of the natural evolution of the physical failure plane in the slope, (Wyllie and Mah, 2004).
- (2) Cundall (2002) compared the characteristics of numerical solutions and limit equilibrium methods in solving for the factor of safety of slopes and concluded that continuum mechanics-based numerical methods have the following advantages:

- 2.1 No pre-defined slip surface is needed.
- 2.2 The slip surface can be of any shape.
- 2.3 Multiple failure surfaces are possible.
- 2.4 No statical assumptions are needed.
- 2.5 Structures (such as footings, tunnels, etc.) and structural elements (such as beams, cables, etc.) and interface can be included without concern about compatibility.
- 2.6 Kinematics is satisfied.

It is important to recognize that the limit equilibrium solution only identifies the onset of failure, whereas the numerical solution includes the effect of stress redistribution and progressive failure after failure has been initiated. The resulting factor of safety allows for this weakening effect, (Itasca Consulting Group, 2005). Hoek et al (2000) stated that numerical models can also be used to determine the factor of safety of a slope in which a number of failure mechanisms can exist simultaneously or where the mechanism of failure may change as progressive failure occurs. (Henry, 2010).

For slopes, the factor of safety often is defined as the ratio of the actual shear strength to the minimum shear strength required to prevent failure, (Dawson et al, 1999). A logical way to compute the factor of safety with a finite element is to reduce the shear strength until “collapse” occurs in the model. The factor of safety is then the ratio of the rock’s actual strength to the reduced shear strength at failure. This method is called the shear strength reduction method, (Dawson et al, 1999, Griffith and Lane, 1999, Hammah et al, 2004).

## 2.4 Comparison between Finite Element Method and Random Finite Element Method

Griffiths(2008) compared the characteristics of finite element method and random finite element method by the results of nonlinear RFEM analyses with monte carlo simulations. the results are described, based on a range of parametric variations of  $\Theta$  that called this value in statically as the spatial correlation length as shown in Fig 4.

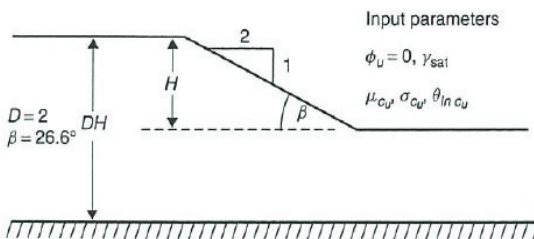


Fig. 4 Slope test problem (Griffiths and Fenton 2000)

In this study, the slope inclination and dimensions given by  $\beta=26.6$ , H and D=2 and the saturated unit weight of the soil  $\gamma_{sat}$  are held constant, while the undrained shear strength  $c_u$  is assume to be a random variable. In the interests of generality, the undrained shear strength will be expressed in dimensionless from c, where

$$c = \frac{c_u}{\gamma_{sat} H} \quad (16)$$

### 2.4.1 The Spatial correlation length ( $\Theta$ )

The Spatial correlation length describes the distance over which the spatially random values will tend to be significantly correlated in the underlying gaussian field. The spatial correlation length can be estimated from a set of shear strength data taken over some spatial region simply by performing the statistical analyses on the log data. In practice, however,  $\Theta_{inc}$  is purposes,  $\Theta_c$  and  $\Theta_{inc}$  are interchangeable given their inherent uncertainty in the first place not much in the current study, the spatial correlation length has been nondimensionalized by dividing it by the height of the embankment H and will be expressed in the form

$$\theta = \frac{\Theta_{inc}}{H} \quad (17)$$

different in magnitude from the correlation length in real space, and for most It has been suggested (see, e.g. Lee et al., 1983; Kulhawy et al., 1991) that typical  $v_c$  values for undrained shear strength lie in the range 0.1-0.5. The spatial correlation length, however, is less well documented and may well exhibit anisotropy, especially since soils are typically horizontally layered. While the advanced analysis tools used later in this study have the capability of modeling an anisotropic spatial correlation field, the spatial correlation, when considered, will be assumed to be isotropic.

the result is shown in Figure 5 and 6 and consists of undrained clay, with shear strength parameters  $\phi_u = 0$  and  $c_u$ .

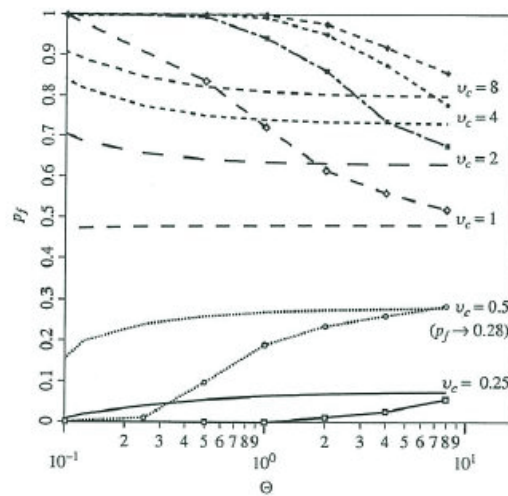


Fig 5. Comparison of the probabilities of failure predicted by RFEM and by Finite element local geometric averaging alone (Griffiths and Fenton 2000)

From Fig. 5 the probability of failure ( $P_f$ ) from random finite element method is increase at lower coefficient of variation ( $V_c$ ) when spatial correlation length becomes large, the probability of failure is conservative because a large value of spatial correlation length ( $\Theta$ ) will imply smoothy varying field, while a small value will imply a raged field. So, spatial correlation length has a significantly influence on RFEM results compared with FEM and Fig.6 shows the result is shown that spatial correlation length only starts to have a significantly influence on the  $F_s$  vs.  $P_f$  relationship using finite-element when the correlation length becamed small ( $\Theta \ll 1$ ). (Griffiths and Fenton 2000)

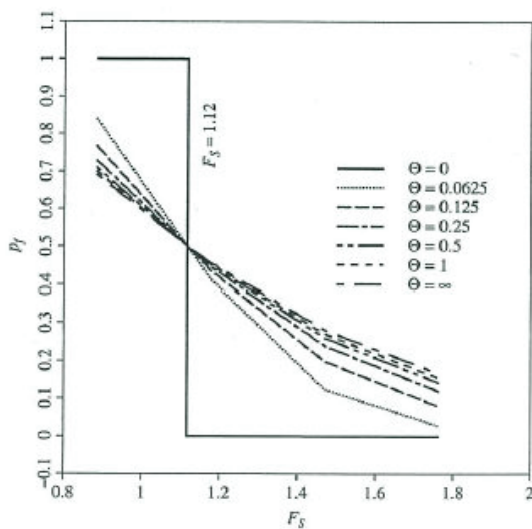


Fig 6. Probability of failure versus  $F_s$  (Based on mean) using Finite-element (Griffiths and Fenton 2000)

## 2.5 Summary

The difference between Numerical and limit equilibrium methods is numerical implement is dividing the slope into a finite number of zones or elements and characteristics of solutions is representative of the natural evolution of the physical failure plane in the slope because numerical satisfies both of stress and strain ( Kinematics ) but limit equilibrium methods satisfies only stress.

Random finite element method solutions always gives a higher probability of failure and single random variable approach becomes vary over a wider range of coefficient of variation than when using finite element local averaging alone. This is caused by strength distribution find the weakest point in the slope element great and intensive more than finite element method and spatial correlation length has a significantly influence on RFEM results because spatial correlation length is using in random variable approach for find probability of failure just only RFEM method.

## 2.6 Notice

In thesis, The author selected unsaturated slope stability analysis into application form the Random Finite Element Method (RFEM), it uses elastoplasticity in a finite-element model combined with random field theory in a Monte-Carlo framework. Which implement that shown in fig 7.

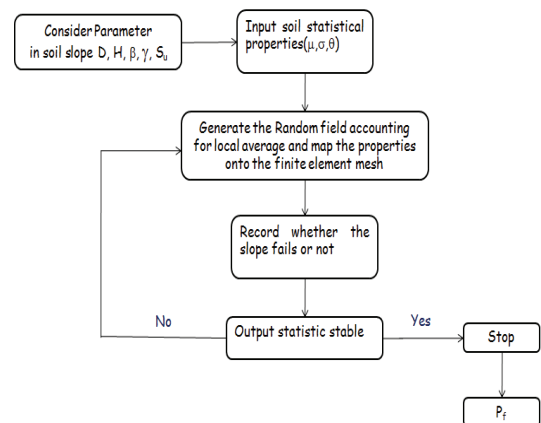


Fig 7. the Random Finite Element Method (RFEM)

In this study, The random variables characterized statistically by lognormal distributions. It has three parameters the mean, the standard deviation and the spatial correlation length. The variability can conveniently be expressed by the dimensionless coefficient of variation. A benefit of RFEM is that the shape and location of the failure surface is not determined a priori and the algorithm is able to seek out the most critical path through the heterogeneous soil mass.

## References

- [1] Alonso, E.E. "Risk analysis of slope and its application to slope in Canadian sensitive clays." *Geotechnique*, 26, 453-472.,1976.
- [2] Christian, J.T. and Baecher, G.B. "Point-estimate method as numerical quadrature." *ASCE. J.Geotech Geoenv. Eng.*, 125(9), 779-786,1999.
- [3] Christian, J.T.,Ladd, C.C and Baecher, G.B. "Realiability applied to slope stability analysis." *ASCE. J.Geotech Eng.*, 120(12), 2180-2207,1994.
- [4] D'Andrea, R.A. and Sangrey, D.A. "Safety factors for probabilistic slope design" *ASCE J.Geotech. Eng.*, 108(GT9), 1101-1118,1982.
- [5] Degroot D.J. "Analyzing Spatial Variability of In Situ Soil Properties." *Proceedings of Uncertainty 96,Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE. 1:210-238,1996.*

- [6] Duncan, J.M. "Factor of safety and reliability in geotechnical engineering,." ASCE. J.Geotech. Geoenv. Eng., 126(4), 307-316, 2000.
- [7] D.V. Griffiths, Jinsong Huang, Gordon A. Fenton. Risk Assessment in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp.381-400.
- [8] D.V. Griffiths, Jinsong Huang, Gordon A. Fenton. Risk Assessment in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp.381-400.
- [9] E.I.-Ramly, H., Morgenstern, N.R., and Cruden, D.M. "Probabilistic slope stability analysis for practice" Can. Geotech. J., 39, 665-683., 2002.
- [10] Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. "Risk Assessment in Geotechnical Engineering." John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2008.
- [11] Griffiths, D.V. and Fenton G.A. "Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering". Springer, Wien, New York, CISM Courses and Lectures No. 491, International Centre for Mechanical Sciences., 2007
- [12] Hassan, A.M. and Wolff, T.F. "Effect of deterministic and Probabilistic models on slope reliability index,." in slope stability 2000, geotechnical special publication No.101, American society of civil engineers, New York, pp. 194-208., 2000.
- [13] H. T. Chiwaye. A Comparison of The Limit equilibrium and Numerical Modelling Approaches to risk analysis for open pit mine slopes. M.A. thesis, University of the Witwatersrand Johannesburg, 2010.
- [14] Indra Noer Hamdhan and Helmut F. "Slope stability analysis of unsaturated soil with fully coupled flow-deformation analysis." IAMG publication Salzburg, Austria, 2011.
- [15] J.M. Duncan. *State of The Art: Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes.* J. Geotech. Eng. Am. Soc. Civ. Eng., 1996, 122(7), pp. 577-596.
- [16] Lacasse, S. "Reliability and Probabilistic methods" in Proc 13<sup>th</sup> Int. Conf. on soil mechanics foundation engineering., pp.225-227., 1994.
- [17] Lacasse, S. and Nadim, F. "Uncertainties in Characterising soil properties." In ASCE Uncertainties'96 Conference Proceedings, C.H. Benson, Ed., Madison., W.I., pp.49-75., 1996.
- [18] Lee, I.K., White, W., and Ingles., O. G. "Geotechnical Engineering." Pitman, London Modelling of Stability and Risk of Geotechnical Systems in Highly Variable Soils, 1983.
- [19] Li, K.S., and Lumb, P. "Probabilistic design of slopes." Can. Geotech. J., 24, 520-531, 1987.
- [20] Matsuo, M., and Kuroda, K. "Probabilistic approach to the design of embankments." Soil Found, 14(1), 1-17, 1974.
- [21] P. Arnold and M.A. Hicks "Stochastic modeling of unsaturated slope stability." Unsaturated Soils-Alonso & Gens(eds), Taylor & Francis Group, London, 2011.
- [22] Szynakiewicz, T., Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. "A Probabilistic investigation of  $c'$ ,  $\phi'$  slope stability." In Proc. 6<sup>th</sup> Int. Cong. Numerical method in engineering and scientific applications., CIMENICS'02, Sociedad Venezolana de Me'todos Nume'ricos en Ingenier'ia, pp.25-36., 2002.
- [23] Tang, W.H., Yuceman, M.S., and Ang, A.H.S. "Probability based short-term design of slopes." Can.Geotech. J.13, 201-215, 1976.
- [24] Vanmarcke, E.H. "Probabilistic modeling of soil Pro-files." ASCE J.Geotech, Eng., 103(GT 11). 1227-1246, 1977.
- [25] Whitman, R.V. "Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering." ASCE. J.Geotech, Geoenv. Eng., 126(7), 583-59, 2000.
- [26] Wolff, T.F. "Probabilistic slope stability in theory Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering." ASCE. J.Geotech, Geoenv. Eng., 126(7), 583-59, 2000.