



รายงานการวิจัย

การป้องกันความเสียหายที่เกิดจากธรณีพิบัติในอำเภอขนอม

จังหวัดนครศรีธรรมราช

Soil Slope Protection in Khanom, Nakhon Si Thammarat

ชลดา กาญจนกุล Chollada Kanjanakul

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2561

การป้องกันความเสียหายที่เกิดจากธรณีพิบัติในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช

ชลดา กาญจนกุล¹

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) อันเนื่องมาจากน้ำฝนเป็นปัญหาที่สำคัญในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมสำหรับวิศวกรรมเทคนิค ลักษณะดินโดยธรรมชาติทั่วไปในแต่ละชั้นความลึกจะมีค่าพารามิเตอร์ในดินไม่เท่ากัน เช่น ความเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion of soil, c) กำลังรับแรงเฉือนในดิน (Undrained shear strength, S_u), หน่วยน้ำหนักของดิน (Soil unit weight, γ), มุมเสียดทานของเม็ดดิน (Friction angle, ϕ) ซึ่งจะมีผลต่อการวิเคราะห์ตำแหน่งและระยะเวลาที่เกิดการพิบัติในลาดดิน ซึ่งวิศวกรกำหนดปัญหาเหล่านี้เป็น ความไม่แน่นอนในดินตามธรรมชาติ (Uncertainties parameters in natural soil) นอกจากการวิเคราะห์เสถียรภาพในมวลดินที่เป็นไปได้ยาก ปัญหาเหล่านี้ยังส่งผลถึง การวิเคราะห์พฤติกรรม การซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ซึ่งถ้าวิศวกรวิเคราะห์ ตำแหน่ง เวลา และพฤติกรรม การซึมผ่านในมวลดิน ผิดพลาดก็จะส่งผลกระทบต่อออกแบบสิ่งปลูกสร้างและการเตือนภัยที่จะให้ผู้อยู่อาศัยบริเวณลาดดิน พับติทำการอพยพออกนอกพื้นที่ผิดพลาดส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินตามมา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษเสถียรภาพของดินในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยทำการเปรียบเทียบดินที่ทำการทดสอบค่าทางวิศวกรรมเบื้องต้นที่ใช้ในการจำแนกดิน (Sieve analysis and Atterberg limit laboratory) กับดินมาตรฐานตามหลักสากล (Unsoda code) เพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรม การซึมผ่านของน้ำในมวลดินออกมาในรูปแบบของ soil water characteristic curve (SWCC Curve) และศึกษาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินเพื่อนำเสนอการป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากธรณีพิบัติและใช้สำหรับระบบการเตือนภัย

คำสำคัญ : ธรณีพิบัติ (Geohazard), ลาดดินถล่ม (Landslide), ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil), ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (Antecedent Precipitation Index (API))

Soil Slope Protection in Khanom, Nakhon Si Thammarat

Chollada Kanjanakul¹

Abstract

Analysis of rainfall- induced landslide on unsaturated soil slope is one of the principal problems in geotechnical engineering analysis. Natural soil slope is heterogeneous shear strength parameters such as Cohesion of soil, c , Undrained shear strength, S_u , Soil unit weight, γ , Friction angle, ϕ , in every depth are not equal, that means it's difficult to predict time and location of failure. This uncertainties parameters (problems) lead to many risks in permeability behaviour on slope stability analysis. There are too many that show the special behavior and characteristic of unsaturated soil. In unstandard equipment and procedure to collect natural soil samples it's easy to make mistake in soil data base and waste the time to determine construction in little time for geotechnical engineering. The permeability method for natural soil samples is one of the laboratory testing that determines the soil water characteristic curve (SWCC Curve).

Furthermore, this paper describes a method to solve the problem about the unstandard procedure to collect natural soil samples and uncertainties parameters. The author compare between soil sampling and unsaturated soil hydraulic database which is recognized as a universal standard. The soil water characteristic curve from Unsaturated Soil Database (UNSODA) were used as input parameters to estimate surface infiltration rates for slope stability analysis. 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 was then carried out to compute their factors of safety. The increase in rainfall intensity

¹College of Industrial Technology and Management., Rajamangala University of Technology Srivijaya.

lowered the factor of safety down with API = 350 mm. Slope at the site became unstable (factor of safety less than 1) at 50 hours.

keywords: Geohazard, Landslide, Unsaturated Soil, Antecedent Precipitation Index (API)

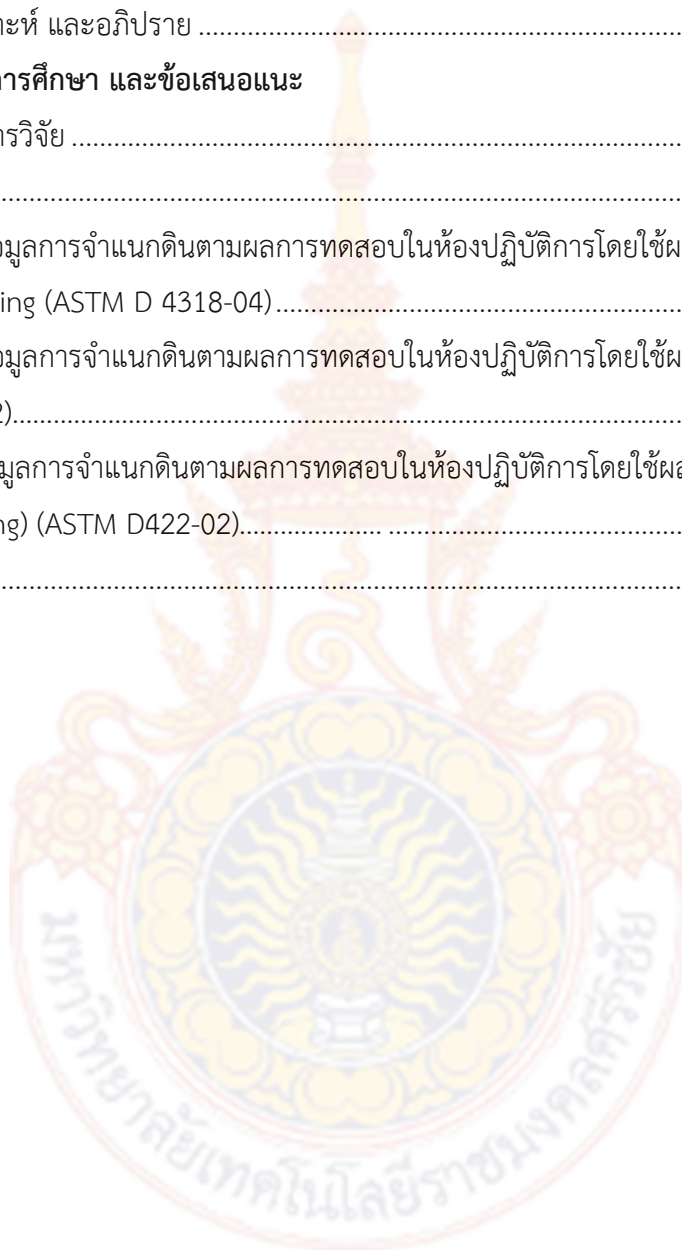


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันแบบดั้งเดิม.....	3
2.2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลข	4
2.3 ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดิน	7
2.4 Quantifying Uncertainty in Soil Properties.....	9
2.5 การวิเคราะห์ความไวตัวของลาดดินพิบัติธรรมชาติ.....	10
2.6 Stochastic Approach to Slope Stability Analysis.....	11
2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน	16
3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ.....	17
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 งานจัดทำข้อมูลด้านอุทกศาสตร์.....	19
4.2 งานออกสนามและเก็บตัวอย่าง	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 งานตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	25
4.4 การวิเคราะห์ และอภิปราย	25
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	27
บรรณานุกรม.....	29
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04).....	31
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02).....	36
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02).....	41
ประวัติผู้วิจัย.....	46



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 Summary of Inherent Variability of Strength Properties (Phoon et al., 1999)	10
3-1 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	11
4-1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน UNSODA 3033	23
4-2 Result from SWRC program	24
ก-1 ตารางข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Upper slope.....	32
ก-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Middle slope	34
ข-1 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02) บริเวณ Upper slope	37
ข-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02) บริเวณ Middle slope.....	39
ค-1 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02) บริเวณ Upper slope.....	42
ค-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02) บริเวณ Middle slope	43
ค-3 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Particle Size Distribution บริเวณ Upper slope.....	44
ค-4 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Particle Size Distribution บริเวณ Middle slope	45

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 Behaviour of a pile in drained soil.....	5
2-2 Cohesive test slope problem (Fenton and griffith, 2008)	6
2-3 Comparison of the probabilities of failure predicted by RFEM and by Finite element.....	7
2-4 Typical simulations in 2D models.	7
2-5 Uncertainty in Soil Properties (Christian et al., 1994).....	8
2-6 Flow chart of probabilistic slope stability analysis.....	12
2-7 Interpreted threshold curves for landsliding	13
2-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง COV with Pf = 0.0001 for COVT = 5%, 10%, 15% และ 20%	14
2-9 Soil properties for three examples used in this study (Wael A. et al, 2008)	15
3-1 วิธีการ Methodology	17
4-1 Flow Chart ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน.....	19
4-2 กราฟค่าความชื้นฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ.....	20
4-3 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง Plastic Indexและ Liquid Limit เพื่อใช้จำแนกชนิดของดิน	21
4-4 Grain size distribution curve from Sieve Analysis laboratory testing.	21
4-5 Slope geometry and soil property of the site.....	22
4-6 The relationship between matric suction and volumetric water content in different SWCC equation (Kosuki, 1994-1999).	24
4-7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions).....	25
4-8 Time-step versus factor of safety during the rainfall.....	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

การออกแบบป้องกันความเสียหายที่เกิดจากธรณีพิบัติในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาดินถล่มหรือการพังทลายของลาดดินที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งอันเนื่องมาจากฝนตกชุกในพื้นที่อำเภอชนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช การวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายของลาดดินเชิงพื้นฐาน ในด้านปฐพีกลศาสตร์จึงมีความสำคัญสำหรับการนำไปออกแบบ ป้องกันและเตือนภัยก่อนที่จะเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงตามมาภายหลังปัจจัยที่เป็นตัวการสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การแทรกซึมของน้ำใต้ผิวดินและกระบวนการสูญเสียเสถียรภาพในมวลดินอันเนื่องมาจากแรงผลักดัน (Driving force) ที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ความชื้นฝน, สภาพชั้นดิน, สภาพภูมิอากาศ (D'Amato Avanzi et al, 2009; Gianecchini, 2006; Crosta & Frattini, 2003; Iverson, 2000; Caine, 1980) ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ (Critical antecedent precipitation index (API_{cr})) ในทางปฐพีกลศาสตร์ ถูกใช้เพื่ออธิบายปริมาณการเก็บสะสมของน้ำในมวลดินเมื่อลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพและใช้เป็นเกณฑ์วัดการอิ่มตัวไปด้วยน้ำในมวลดิน (Degree of saturation) ที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงต้านและแรงผลักดัน (Resisting and driving forces) ในปัญหาของเสถียรภาพในลาดดิน (Chollada, 2016)

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเสถียรภาพของดินในอำเภอชนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ (API) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินเพื่อนำเสนอการป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากธรณีพิบัติและใช้สำหรับระบบการเตือนภัยเพื่อให้ผู้อาศัยในบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัย ทำการอพยพโยกย้ายได้อย่างทันท่วงทีก่อนเกิดความเสียหาย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาเสถียรภาพของดินในอำเภอชนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ (API) สำหรับใช้ในระบบการเตือนภัย

1.2.2 ศึกษาความไม่แน่นอนในตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ (Geometry parameters and Shear strength parameters) โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของ ค่า ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ

1.2.3 นำเสนอการป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากธรณีพิบัติและใช้สำหรับระบบการเตือนภัย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีศึกษาพื้นที่ หมู่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัด นครศรีธรรมราช

1.3.2 ค่าความสูงและความลาดชันของลาดดินอ้างอิงมาจาก ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการในกรณีศึกษาพื้นที่ หมู่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัด นครศรีธรรมราช ถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.3.3 ตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ของ SWCC และ permeability function ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดินและความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ

1.3.4 กราฟค่าความชื้นฝน-ช่วงเวลา-และรอบการเกิดซ้ำ (Intensity-duration-frequency curve) ของลาดชันในพื้นที่กรณีศึกษา(ค่าปริมาณน้ำฝนย้อนหลัง) ถูกนำมาใช้เป็นค่าตัวแปรในการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในมวลดินเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ประเมินปัญหาและแนวทางป้องกันความเสียหายอันเนื่องมากรณีพิบัติในพื้นที่ อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช

1.4.2 กำหนดแนวทางการแก้ปัญหารณีพิบัติในพื้นที่ อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช

1.4.3 นำข้อมูลไปใช้ประกอบการพิจารณาในการพัฒนาระบบเตือนภัยเนื่องจากการเกิดธรณีพิบัติจากลาดดินถล่ม

1.4.4 นำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมหรืองานวิจัยอื่น ๆ

1.4.4 สามารถผลิตบทความทางวิชาการในระดับประเทศหรือนานาชาติได้ไม่น้อยกว่า 1 ฉบับ หรือสามารถเข้าร่วมงานประชุมทางวิชาการในระดับประเทศหรือนานาชาติได้ไม่น้อยกว่า 1 ฉบับ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในภูมิภาคเขตร้อนทั่วโลกได้ การศึกษาผลกระทบการแทรกซึมของน้ำในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชัน (Zhang et al., 2011) การศึกษาพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของดินที่ไม่อิ่มตัวไปด้วยน้ำได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกรธรณีเทคนิคที่จะต้องเข้าใจความรู้พื้นฐานทางด้านนี้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาวิจัยเป็นจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับ การพิจารณาผลกระทบที่เกิดกับพฤติกรรมของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวไปด้วยน้ำภายใต้เงื่อนไขการซึมผ่านการเนื่องจากการเพิ่มความชื้นฝน

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน คือ การประเมินความเสี่ยงในลาดชัน ไม่ว่าจะ เป็น ลาดดินธรรมชาติ, ลาดดินถม หรือลาดดินขุด ซึ่งในปัจจุบันวิศวกรได้ทำการพัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการคำนวณมือหรือใช้เครื่องคิดเลข (manual calculations) มาเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐาน เพื่อใช้วิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัย ดังเช่น Finite element methods, Probabilistic slope stability analysis เป็นต้น โดยผู้ที่ศึกษาการประเมินความไวในตัวแปรพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติ จำเป็นจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านทฤษฎีการวิเคราะห์โดยผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทั้งหมดโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อ ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันแบบดั้งเดิม (Conventional Slope Stability Analysis)

มีที่มาจากวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบ Deterministic analysis ซึ่งคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) โดยพิจารณาสมดุลของแรงต้าน (Resisting force) ต่อแรงผลัก (Driving force) ดังสมการที่ 1

$$F.S. = \frac{\square \text{Resisting moments}}{\square \text{Overturning moments}} \quad (1)$$

การวิเคราะห์ในสภาวะสมดุล (Limit equilibrium methods) เป็นวิธีการที่มีคุณลักษณะเหมาะสมที่สุดสำหรับวิศวกรเมื่อลองเปรียบเทียบเหตุผลกับวิธีการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Ordinary Method of Slices (Fellenius, 1927) จะใช้ได้เฉพาะการพิบัติแบบโค้งของระนาบ และไม่ครอบคลุมการพิจารณาสมดุลของแรง (Force) ซึ่งถือว่าสำคัญหรือ Bishop's Modified Method (Bishop, 1955) ก็จะไม่ครอบคลุมการพิจารณาสมดุลของแรงในแนวราบ (Horizontal) และใช้ได้เฉพาะการพิบัติแบบโค้งของระนาบ (Duncan and wright, 1996)

โดยการวิเคราะห์ในสภาวะสมดุล (Limit equilibrium methods) เป็นวิธีการที่ต้องวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงต่างๆ ที่มากระทำต่อมวลที่อยู่เหนือแนวพิบัติการที่มวลของลาดดินจะสมดุลได้นั้น แรงที่ขับให้ลาดดินเลื่อนไถล (ได้แก่ น้ำหนักของมวลดิน) จะต้องมีค่าเท่ากับแรงต้านทานการเลื่อนไถล (ได้แก่ ค่ากำลังเฉือน (Shear Strength) ของมวลดิน และของ

แนวพิบัติ) ค่าสัดส่วนของแรงขับต่อแรงต้านการเลื่อนไถลนี้ เรียกว่า “อัตราส่วนของความปลอดภัย” (Factor of Safety) ถ้าค่า F.S. มีค่าน้อยกว่า 1.0 ถือว่าลาดดินนั้นไร้เสถียรภาพนอกจากนั้นในปัจจุบันนี้ ได้มี Computer Softwares ต่าง ๆ อาทิเช่น PCSLOPE, GSLOPE, STABL, Geostudio เป็นต้น มาช่วยให้การวิเคราะห์สะดวกและรวดเร็วขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินโดยพิจารณาดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยประยุกต์ใช้ The Mohr-coulomb failure criterion (Fredlund and vanapalli, 2002) มีสมการดังนี้

$$\tau = c' + (\sigma_n - U_a) \tan \phi' + (U_a - U) \tan \phi^b \quad (2)$$

โดย u_a = pore air pressure, ϕ^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)

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

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

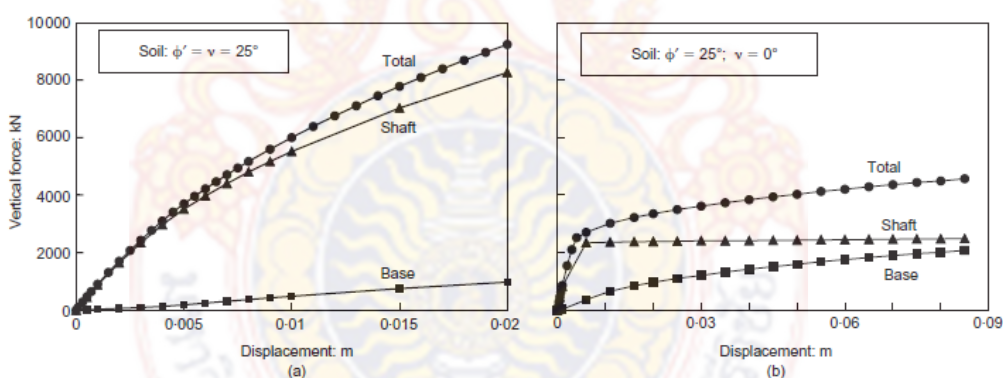
2.2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่บอกข้อมูลเกี่ยวกับการพิบัติในลาดดินได้ละเอียดกว่าวิธีแบบดั้งเดิมซึ่งผลลัพธ์ที่มีแค่อัตราส่วนความปลอดภัยไม่ได้ให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและเกิดความปลอดภัยสูงสุด แต่ Numerical method สามารถอธิบายรูปแบบส่วนโค้งพิบัติที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ (Itasca consulting group, 2005) โดยวิธีเชิงตัวเลขแบ่งเป็น วิธีย่อยๆได้อีก 2 วิธี ได้แก่ finite element method และ random finite element method

- วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Finite element method (FEM)

เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เนื่องจากต้องเก็บข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจำนวนค่อนข้างมาก โดยใช้คำนวณ ความเค้น การเคลื่อนตัวของลาดดินและแรงดันน้ำ โดยเริ่มเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายแทนที่วิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (Duncan, 1996, Griffiths and lane, 1999). แต่วิธีการ FEM อาจจะมีเงื่อนไขในการคำนวณซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณนานกว่าแต่ข้อดีก็คือ จะได้คำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า

Potts, 2003 พิจารณาปัญหาเกี่ยวกับการทำนายพฤติกรรมของเสาเข็มลึก (deep pile) ด้วยวิธี FEM โดยสมมติให้ดินรอบเสาเข็มมีลักษณะแห้งไม่มีความชุ่มชื้นของน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องและดินที่ไม่มีพฤติกรรมการระบายน้ำโดยมีค่า dilation angle, $\nu = 0^\circ$ และ $\nu = \phi' = 25^\circ$ ดังรูปที่ 2.1 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 2.1 Behaviour of a pile in drained soil a) soil with $\nu = \phi'$ b) soil with $\nu = 0^\circ$

Hammah et al (2005) เปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักดันแรงต้านและวิธี SSR (Shear strength reduction) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณจากวิธี finite element technique กับการวิเคราะห์ลาดดิน 30 กรณี โดยสมมติค่า a dilation angle = 0 ในกรณี the elastic-perfectly plastic พบว่าวิธี SSR (Shear strength reduction) วิเคราะห์ได้ดีกว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักดันแรงต้านเพราะเป็นเสมือนวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสมมูลของแรงผลักดันแรงต้านซ้ำกันหลายๆครั้งจนกระทั่งลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ

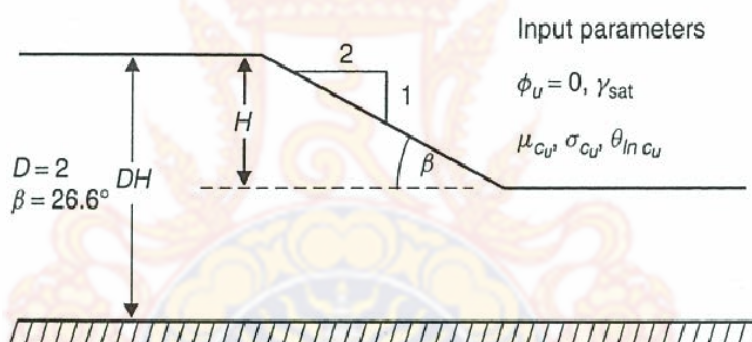
Kulhawy และ duncan (1972) พัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Finite element method กับเขื่อนดินถม (Embank fill) ที่ถูกสมมติให้เป็นแบบแข็ง (Rigid and hyperbolic mode) พบว่าการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่ผู้วิจัยทำ

การสังเกตและพบว่าวิธี FEM สามารถทำนาย พื้นที่การพิบัติที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงได้ (Tension zones agreed closely with visible tension cracks)

- วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี The Random Finite Element Method (RFEM)

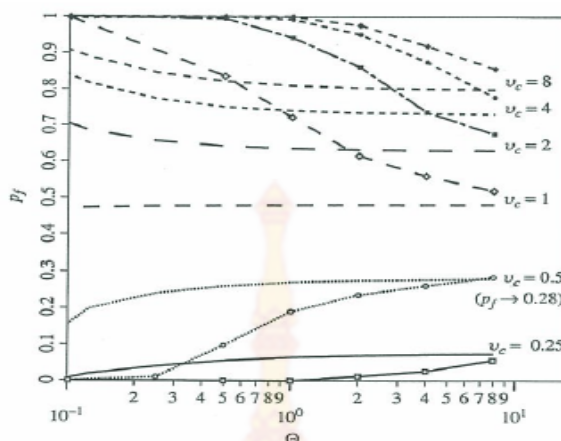
วิธี RFEM สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชันต้องนำพิสัยข้อมูลที่ได้จากภาคสนามและการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบดั้งเดิมมาคำนวณร่วมกันเพราะต้องเกี่ยวข้องกับค่าข้อมูลทางสถิติของค่าความแข็งแรงในมวลดินไม่ว่าจะเป็นค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าเฉพาะที่เรียกว่า spatial correlation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

Fenton and Griffiths (2008) เปรียบเทียบ วิธีการ finite element method กับ random finite element method ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน (รูปที่ 2.2) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกอธิบายเป็นรูปแบบ mean (μ_x), standard deviation (V_x) และ the spatial correlation length จากค่า undrained shear strength



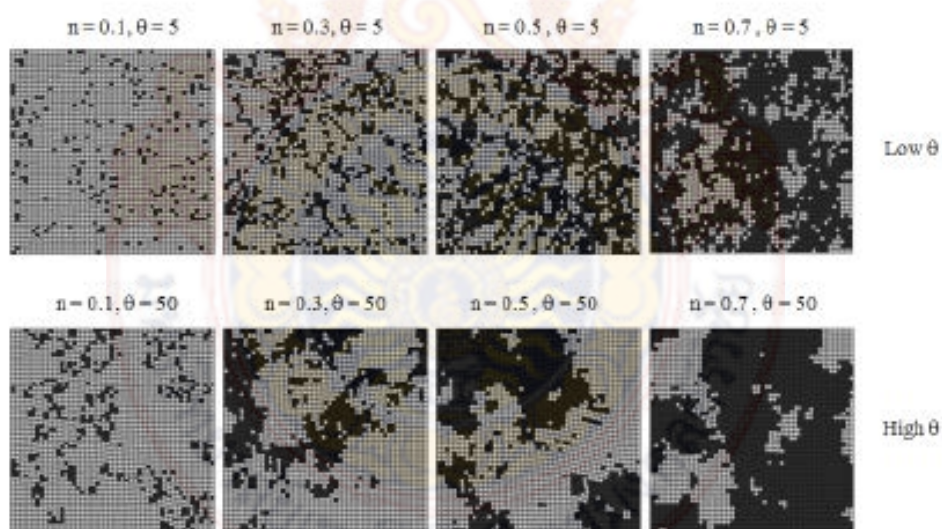
รูปที่ 2.2 Cohesive test slope problem (Fenton and Griffiths, 2008)

ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงกลุ่มตัวแปรเดี่ยว the single random variable ซึ่งพัฒนาไปเป็นกลุ่มค่าคำตอบ ความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Probability of failure, P_f) โดยมีค่า standard deviation = V_c ซึ่งพบว่าค่า spatial correlation length มีความสำคัญต่อการไวตัวของค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติ สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดชัน



รูปที่ 2.3 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) โดยพบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี RFEM และมีการกระจายตัวแบบ Monte-Carlo simulations จะแสดงโมเดลของค่าความพรุน (porosity) และขนาดช่องว่างในมวลดิน (void size) ตามที่ผู้วิจัยกำหนด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 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)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินแบบดั้งเดิมจะไม่สามารถครอบคลุมถึงปัญหาความไม่แน่นอนในตัวแปรได้และค่าที่ได้อาจจะไม่ใกล้เคียงความเป็นจริงและจะไม่ทำให้เกิดความปลอดภัย

สูงสุด (El-Ramly et al, 2002) จะพบว่าดินที่ไม่เป็นดินเนื้อเดียวเป็นวัสดุที่ไม่สามารถทราบถึงค่าในคุณสมบัติภายในเนื้อดินได้อย่างชัดเจนจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและจะส่งผลให้มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ลาดดินดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและหาทางแก้ปัญหาเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์ของอัตราส่วนปลอดภัย

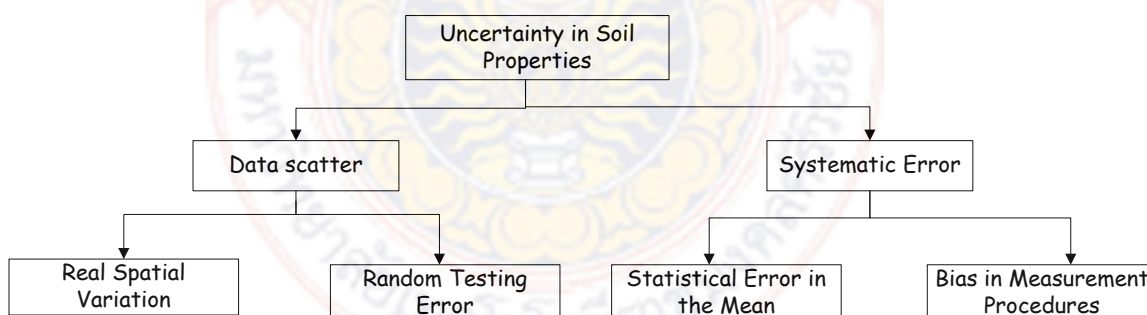
1) สาเหตุของความไม่แน่นอน

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

- ความไม่แน่นอนตามธรรมชาติ (Inherent uncertainty): ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เพราะเกิดจากสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อม

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

Christian et al (1992) จัดแยกความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินทั้งหมดเป็น 2 แบบ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการกระจายของข้อมูล (Data Scatter) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความแปรปรวนแบบ Spatial Variation และ ความผิดพลาดจากการทดสอบแบบสุ่ม ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดจากระบบ (Systematic error) ประกอบไปด้วย ความผิดพลาดทางสถิติของค่าเฉลี่ย และความโน้มเอียง (Bias) จากวิธีการวัด ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Uncertainty in Soil Properties (Christian et al., 1994)

2.4 Quantifying Uncertainty in Soil Properties

Degroot (1996) กล่าวว่า วิศวกรสามารถปรับปรุงข้อมูลเพื่อจะได้ไม่เกิดความผิดพลาดโดยจะต้องปรับปรุงให้ได้ค่าประมาณที่ดีที่สุด (a best estimate) และ ค่าที่บ่งบอกถึงความไม่แน่นอนของค่าประมาณที่ดีที่สุดนี้ (a measure of uncertainty in the best estimate) โดยค่าสองค่าดังกล่าวนี้ในทางสถิติก็คือค่าเฉลี่ย (Mean, μ_x) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ_x) ตามลำดับ

- ค่าเฉลี่ย (Mean, μ_x) ; เป็นตัวสถิติที่ใช้วัดค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลที่กระจายแบบปกติเท่านั้น กล่าวคือ ข้อมูลต้องมีรูปร่างของรูปแบบข้อมูลที่ค่อนข้างสมมาตรรอบค่าๆหนึ่ง คือเป็นตัวแบบที่มียอดเดียว (Unimodal Pattern) และเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากประชากรที่มีความเบี่ยงเบนคงที่

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3)$$

- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ_x) ; เป็นรากที่สองของค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายความเบี่ยงเบนของประชากรได้ดีที่สุด

$$\sigma_x = S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \sigma_x)^2} \quad (4)$$

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

$$COV_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (5)$$

Phoon et al. (1995) ทำการรวบรวมข้อมูลสำหรับการนำมาวิเคราะห์ระหว่างพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความน่าจะเป็นในความพิบัติของดินตามธรรมชาติพบว่า ค่าทางสถิติที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของดินตามธรรมชาติคือค่าดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Summary of Inherent Variability of Strength Properties (Phoon et al., 1999)

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

*^a S_u = Undrained Shear Strength , ϕ = Effective Stress Friction Angle , DS. = Direct Shear Test, TC.=Triaxial Compression Test, UC. = Unconfined Compression Test, UU. = Unconsolidated, Undrained Triaxial Compression Test , CIUC. = Consolidated Isotropic, Undrained Triaxial Compression Test, *^b Laboratory Test Type not Reported.

2.5 การวิเคราะห์ความไวตัวของลาดดินพิบัติธรรมชาติ (Sensitivity Analysis)

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

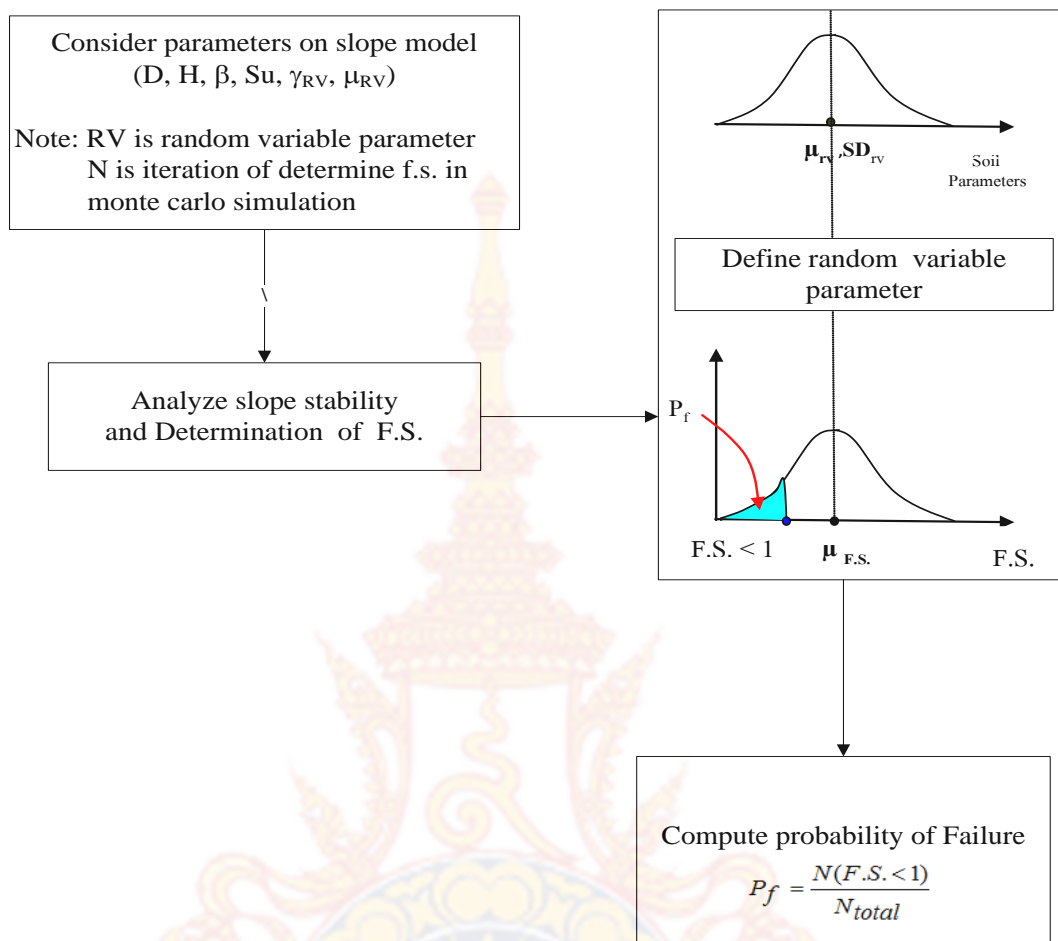
Zhai, Q. et al. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของ SWCC และ K_w function ในลาดหินแกรนิตที่ Bukit Timah ที่ Singapore งานวิจัยพบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์โดย upper limit of SWCC มีผลอย่างมากจากตัวแปรที่เป็นความชื้นฝน (rainwater) และ SWCC มีผลอย่างมากกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินธรรมชาติอันเนื่องมาจากฝนตก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

ในการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนในตัวแปรอันเนื่องมาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยเปลี่ยนแปลงค่าพิสัยตัวแปรเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพการประเมินความไวตัวของลาดดินพิบัติธรรมชาติจึงถือเป็นเทคนิคในการประเมินความไวตัวและผลกระทบในตัวแปรหรือพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากที่สุด

การพิจารณาค่าความไวตัวอันเนื่องมาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในงานวิจัยนี้ เป็นการพิจารณาถึงความไวตัวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ โดยกำหนดค่า Soil water characteristic curve equation และ permeability parameters สำหรับลาดดินกรณีศึกษาที่ อ.ชนอม จ.นครศรีธรรมราช โดยเปลี่ยนแปลงค่า ความชื้นฝน (rainfall intensity) และ ค่าความลาดเอียงในลาดดิน(β), ค่าความหนาในลาดดิน (t), ชนิดของดิน, หน่วยน้ำหนักของดิน (γ), ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (c'), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (ϕ), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเนื่องมาจากแรงดึงของน้ำในดิน (ϕ^b) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ในการคำนวณค่า อัตราส่วนปลอดภัย

2.6 Stochastic Approach to Slope Stability Analysis

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยความน่าจะเป็น คือ การวิเคราะห์โดยพิจารณาค่าข้อมูลที่ใช้เป็น input data โดยใช้เป็นกลุ่มค่าตัวแปรหรือพิสัยที่อธิบายได้ด้วยค่าทางสถิติซึ่งวิธีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการพิบัติของลาดดินโดยประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านสถิติ ซึ่งจะมีรายละเอียดพอสังเขป ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 Flow chart of probabilistic slope stability analysis

- Monte Carlo Simulation (MCS)

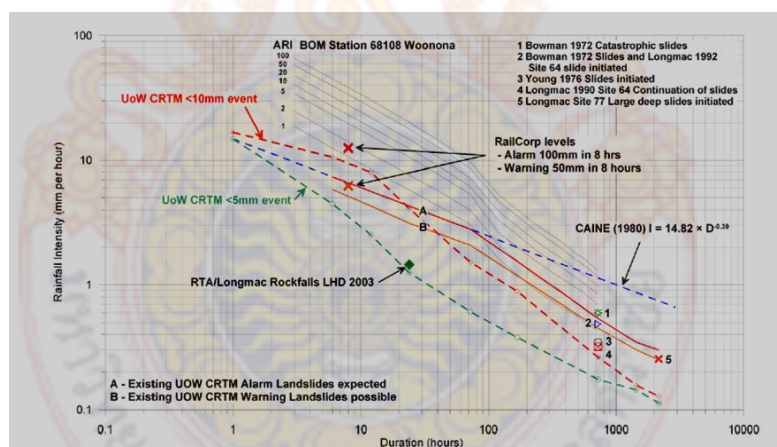
เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางสถิติ ที่เกิดจากการนำค่าของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์หรือคำนวณซ้ำหลายๆครั้ง จนได้คำตอบออกมาในรูปแบบของการกระจายตัวทางสถิติ (Probability Distribution) จนได้ผลลัพธ์ที่เราต้องการจริงๆในที่นี่ทำได้โดยการคำนวณค่า Factor of Safety ซ้ำหลายๆครั้ง และมากพอที่จะได้การกระจายของ F.S. (Distribution of Factor of Safety) จากนั้นค่า P_f สามารถคำนวณได้จากความเป็นไปได้ที่ $F.S. < 1$ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่แตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยทั่วไป และคำตอบที่ออกมาจะเป็นค่าที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรที่เราเลือกกับความถี่ (จำนวนครั้ง) ที่ทำการวิเคราะห์หัตถุประสงค์ก็เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องอย่างแท้จริงแต่ก่อนที่จะใช้วิธีการของ Monte Carlo Simulation นั้นเราต้องทำการสร้างรูปแบบทางกายภาพซึ่งในที่นี้คือ คุณสมบัติของลาดดินเช่น ค่า Undrained Shear Strength (S_u) สามารถแปรเปลี่ยนไปตามการกระจายทางสถิติ (Statistical Distribution)

2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

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

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

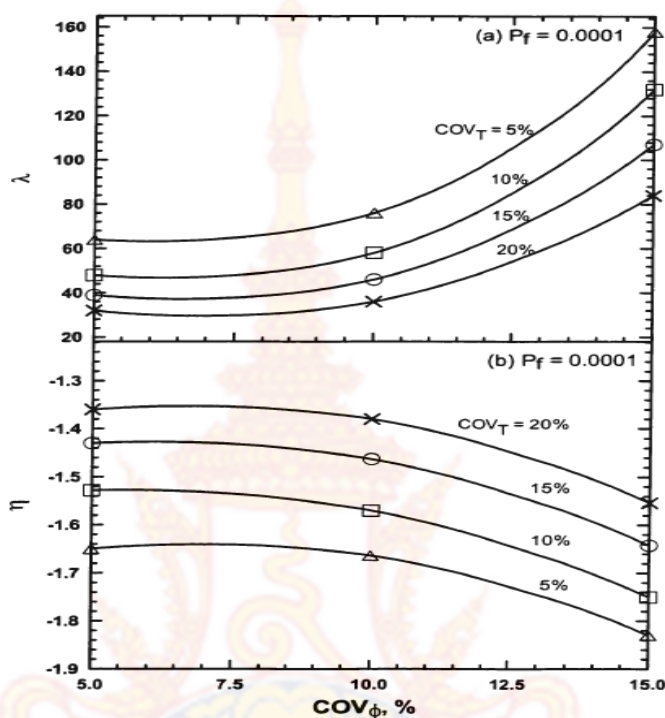
- Wollongong regional study พัฒนาการเตือนภัยพิบัติธรรมชาติโดยใช้ปริมาณความชื้นฝนเป็นเกณฑ์วัดในการเตือนภัยดินถล่มซึ่งเก็บข้อมูลมาจากประวัติการเกิดดินถล่มซ้ำๆกันหลายครั้ง โดยเสนอเป็นเส้นโค้ง average recurrence interval (ARI) ตามรูปที่ 2.7 โดยเริ่มต้นตั้งแต่ August 1998 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความเสียหายมากจากลาดชันถล่ม



รูปที่ 2.7 Interpreted threshold curves for landsliding in wollongong, superimposed on Annual recurrence interval curves for a selected rainfall station (Chowdhury et al, 2012)

- Chalermyanont (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 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ (a) and η (b) and COV_φ with P_f = 0.0001 for COV_T = 5%, 10%, 15% และ 20% (Chalermyanont, 2004)

โดยมีสมการที่สัมพันธ์กับ Reliability-Based Design Charts ดังนี้

$$\alpha = \lambda \mu_{\phi}^{\eta} \tag{7}$$

เมื่อ

λ, η = Empirical Parameters ที่ขึ้นอยู่กับค่า COV และ P_f

α = เป็นอัตราส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย (μ_T) ของแรงดึงที่ให้ค่า P_f ที่ต้องการกับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพภายในของกำแพงกันดิน

μ_φ = ค่าเฉลี่ย (Mean) ของมุมเสียดทานของดินหลังกำแพงกันดิน

COV_T = สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of Variation) ของค่าแรงดึงในกำแพงกัน

ดิน

- สุทธิศักดิ์ และวรากร (2548) ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เพื่อออกแบบและเลือกหน้าตัดของตัวเชื่อม โดยเลือกการวิเคราะห์แบบ Probabilistic Analysis สำหรับใช้ครอบคลุมความไม่แน่นอนของตัวแปร Simplified First Order Second Moment (SFOSM) เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบความอ่อนไหว (Sensitivity) ของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังแรงเฉือนในส่วนต่างๆของเขื่อนซึ่งแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 รูปแบบอันได้แก่ การพิจารณา Zone ที่เกี่ยวข้องกับบริเวณต่างๆที่เราสนใจจะพิจารณา อย่างเช่น บริเวณแกนกลางของเขื่อนลาดชันแถวสันเขื่อน หรือลึกลงไปได้เขื่อน เป็นต้น Shear หรือกำลังรับแรงเฉือนซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของดินและความแปรปรวนของตัวแปร การพิจารณาโดยกำหนดและไม่กำหนดหน้าตัดของการพิบัติเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการพิบัติต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนในส่วนต่างๆของหน้าตัด จากผลของการวิเคราะห์โดยวิธีของ SFOSM พบว่าค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อมีการปรับปรุงหรือคัดเลือกหน้าตัดเขื่อนที่มีความเหมาะสมในการออกแบบทำเขื่อนทั้งนี้ การนำเสนอค่าความน่าจะเป็นต่อการพิบัติของหน้าตัดต่างๆจะถูกนำไปใช้ปรับปรุงวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงเพื่อการคัดเลือกหน้าตัดที่เหมาะสมของเขื่อนต่อไป

- Wael A. et al (2008) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า ส่วนโค้งการพิบัติ (slip surface) ที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนปลอดภัยโดยพื้นฐานการวิเคราะห์แบบสมดุลของแรง (the limit equilibrium (LE)) โดยลาดชันทั้ง 3 กรณีศึกษาโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมการวิเคราะห์อื่นๆโดยพิจารณาความไวตัวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาของลาดดิน ได้แก่ ลักษณะของเนื้อดิน และพบว่าลาดชันกรณีศึกษาที่ 2 มีความซับซ้อนเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรลักษณะของเนื้อดิน มากกว่ากรณีที่ 1 และ 3 ดังรูปที่ 2.9

Example no.	Layer no.	γ (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	ϕ (°)
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 2.9 Soil properties for three examples used in this study (Wael A. et al, 2008)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการวิจัยถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ 3.1) Seepage analysis และ 3.2) Slope stability analysis

3.1 การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดิน (Seepage analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดินมีรายละเอียดปลีกย่อยดังนี้

a.) กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil properties)

b.) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ ค่าตัวแปรคงที่ (Fitting parameters) ในเส้นอัตรลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity)

c.) กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

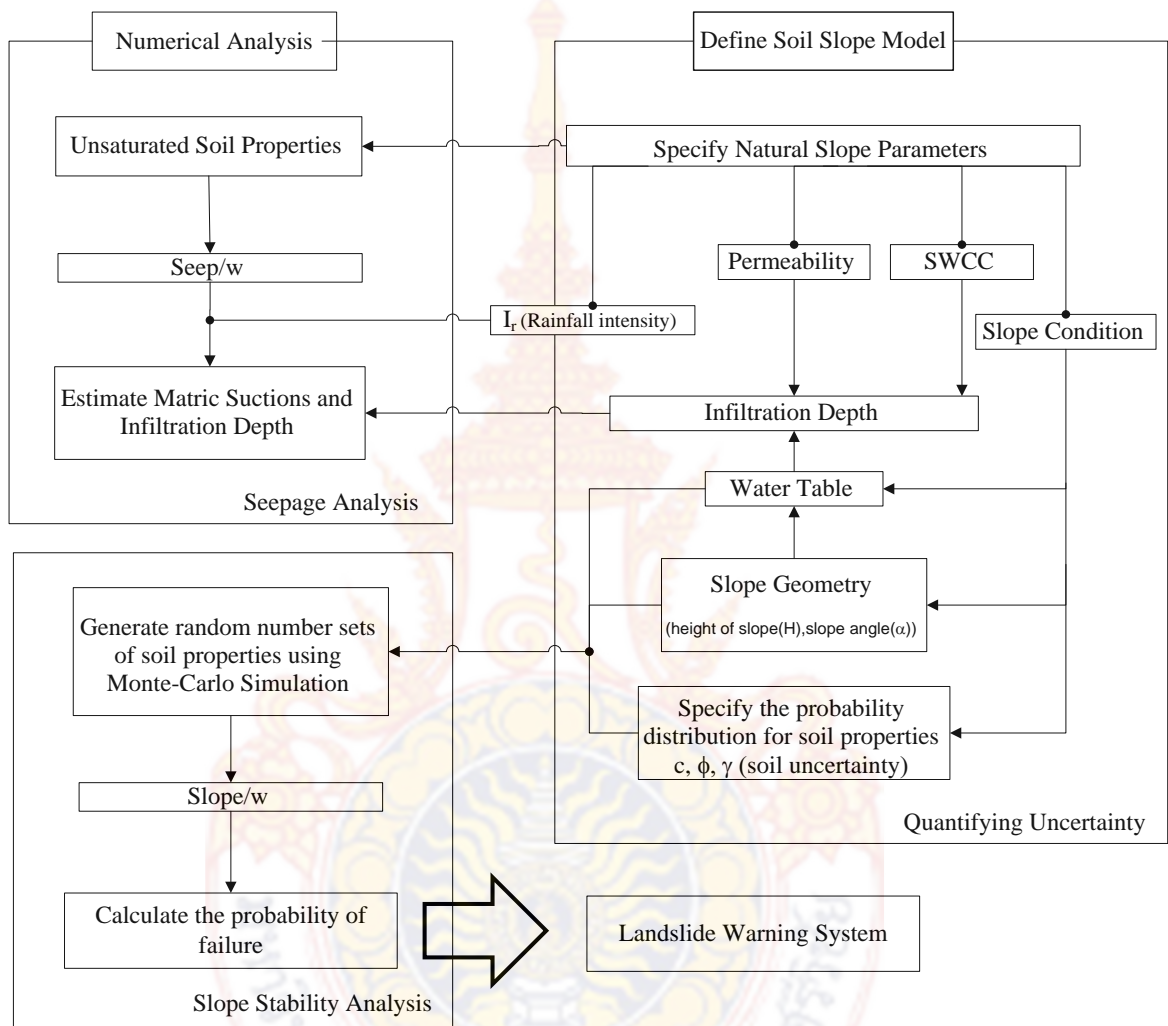
d.) วิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากโปรแกรม Seep/W โดยคำนวณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินมากขึ้นโดยใช้หลักของ Darcy's law (สำหรับการซึมผ่านในแนวระนาบแบบ 2 มิติ) ดังสมการที่ 8

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

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)

e.) คำนวณค่าการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ซึ่งจากโปรแกรม Seep/w จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าแรงดูดน้ำในผิวดิน (Matric suction), อัตราความอิ่มตัวไปด้วยน้ำในมวลดิน (Degree of saturation) และ ค่าปริมาตรน้ำในมวลดิน (Volumetric water content) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนและเวลา (Step time) ที่กำหนด

f.) นำข้อมูลที่ได้ไปเป็นข้อมูลในโปรแกรม Slope/W ในขั้นตอนถัดไปเพื่อทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพในลาดดินหรือคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัยและค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ (API_{cr})



รูปที่ 3.1 Methodology

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินธรรมชาติ (Slope stability analysis)

เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดิน (Seep/W) มาทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพแรงต้าน (Resisting force) ต่อแรงผลัก (Driving force) หรือใช้หลักการ Limit equilibrium analysis เพื่อวิเคราะห์หาค่า อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety) โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดิน ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในมวลดิน (Soil strength parameters); ค่าแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (c'), ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (ϕ'),

ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในที่เกี่ยวข้องกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ^b) และ ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) เมื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนปลอดภัยในช่วงเวลาที่ลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพได้ ($F.S. \leq 1$) จึงนำข้อมูลในมวลดิน เช่น ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_r), ความพรุน (η) ณ.ช่วงเวลาที่ลาดดินเกิดการถล่มมาวิเคราะห์หา ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (API) เพื่อใช้ในระบบการเตือนภัยล่วงหน้าต่อไป โดยระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย เป็นไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ที่	กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1.	งานจัดทำข้อมูลด้านอุทกศาสตร์	X	X	X									
2.	งานออกสนามและเก็บตัวอย่าง			X	X	X							
3.	งานตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม			X	X	X	X	X	X				
4.	การวิเคราะห์และอภิปราย							X	X	X	X	X	X
5.	สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงาน								X	X	X	X	X

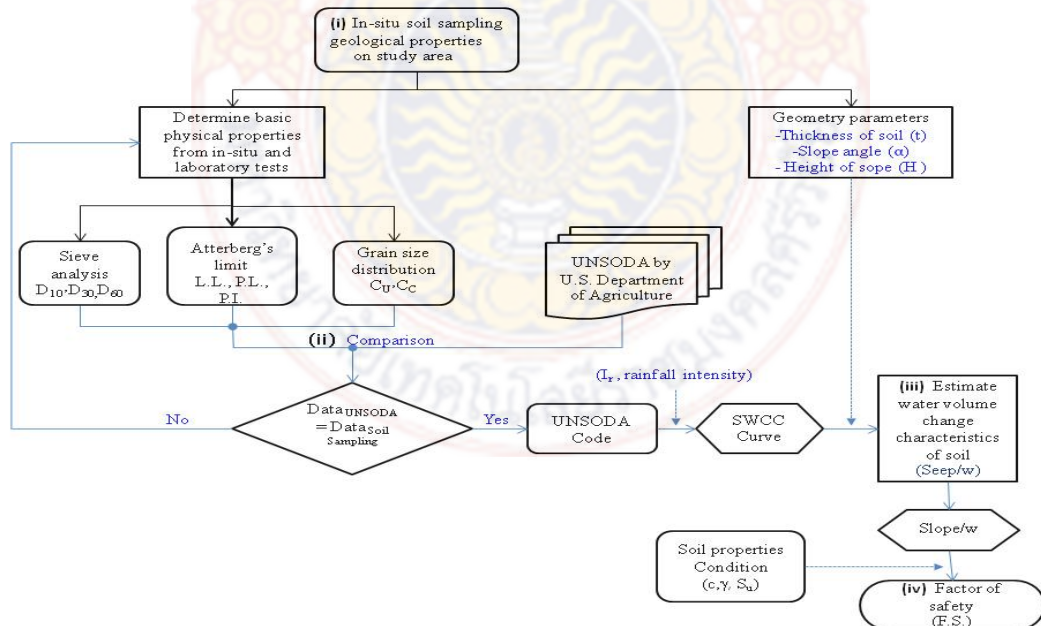
บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผู้วิจัยขอแบ่ง ผลงานความก้าวหน้าที่ได้จากการวิจัย ออกเป็นหัวข้อย่อยทั้งหมด 4 ส่วน อ้างอิงตามแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย ดังนี้ 1) งานจัดทำข้อมูลด้านอุทกศาสตร์, 2) งานออกสนามและเก็บตัวอย่าง, 3) งานตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม, 4) การวิเคราะห์และอภิปราย

4.1 งานจัดทำข้อมูลด้านอุทกศาสตร์ (Rainfall Intensities from Thailand intensity-duration-frequency curve)

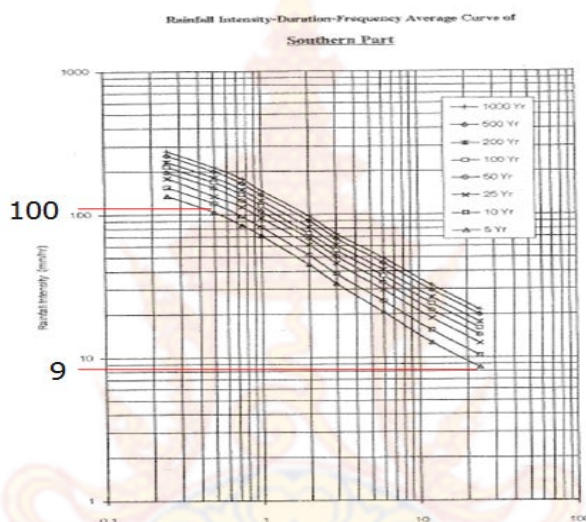
ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากธรณีพิบัติโดยใช้หลักแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The mathematical models) หรือ GeoStudio Program เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการพิบัติของลาดดิน โดยจะแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ออกเป็น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์พฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินเพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น โดยเลือกใช้ SEEP/W Application จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพในลาดดินหรือคำนวณค่าอัตราส่วนปลอดภัย เพื่อใช้ในการเตือนภัยก่อนที่จะเกิดธรณีพิบัติ ทั้งนี้ ต้องทำการวิเคราะห์โดยเลือกใช้ SLOPE/W Application ซึ่งเป็นตัวเลือกที่ฝังอยู่ใน GeoStudio Program อยู่แล้ว

ใน SEEP/W Application ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ Seepage analysis เป็นไปดังภาพที่ 4.1 อันได้แก่ ค่าตัวแปรคงที่ (Fitting parameters) ในเส้นอัตตลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil water characteristic curve), ค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity)



รูปที่ 4.1 Flow Chart ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ในกรณีพื้นที่ศึกษา (Base case) ถูกอ้างอิงมาจากค่าปริมาณน้ำฝนสะสมของ พื้นที่จังหวัด นครศรีธรรมราชจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ กรมชลประทาน (Thailand Royal Irrigation Department, 2011) และค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) 6-36 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเป็นพิสัยที่อ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ที่ Rahardjo et al. (2007) ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดิน บริเวณภูมิภาคเอเชีย ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) อ้างอิงจาก Rahardjo et al. (2007)

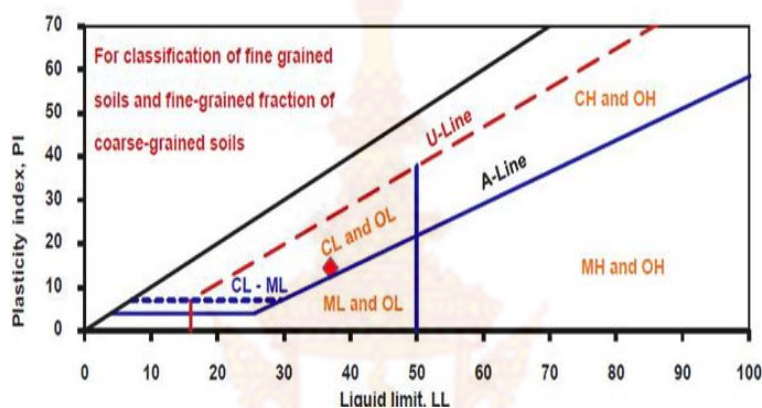
4.2 งานออกสนามและเก็บตัวอย่าง (Result from geological properties on study area)

เป็นการเก็บดินตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการและทำการสำรวจทางวิศวกรรมเพื่อกำหนดแบบจำลองของลาดดินพิบัติสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดการจำแนกดินเป็นไปตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.1 และการสำรวจทางวิศวกรรมเพื่อกำหนดแบบจำลองของลาดดินพิบัติสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เป็นไปตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.2

4.2.1 รายละเอียดการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Result from In-situ soil sampling)

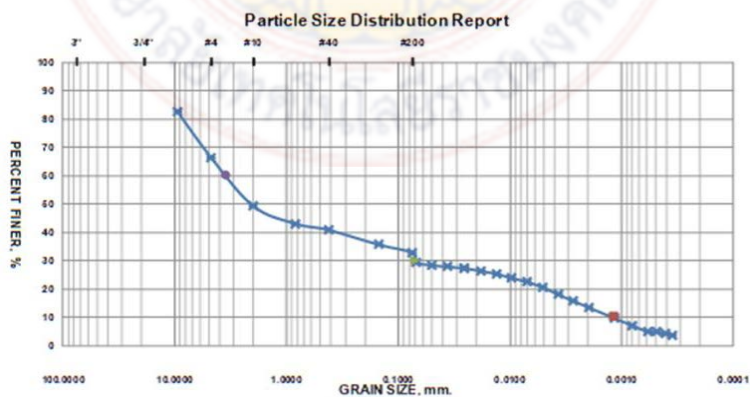
จากการนำดินตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการได้แก่ Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) เมื่อค่า Liquid Limit (LL) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous Fluid) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานะพลาสติก (Plastic State) , Plastic limit (PL) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Semi - solid state) และ Plastic Index (PI) คือ ผลต่างของ L.L และ P.L มักเป็นตัวแสดงถึงความเหนียวของดินและยังแสดงความไวต่อการเปลี่ยนสถานะต่อความชื้นของมวลดินนั้น

จึงเป็นค่าที่สำคัญใช้มากในการจำแนกมวลดิน จากผลการทดสอบ Atterberg limits พบว่าค่า Liquid Limit (LL), Plastic limit (PL) และ Plastic Index (PI) มีค่าเท่ากับ 37.01, 22.6 และ 14.44 ตามลำดับและการจำแนกดินด้วยวิธีสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างและ Plastic Indexและ Liquid Limit ดังรูปที่ 4.3 สามารถจำแนกได้ว่าเป็นดินชนิด CL-ML



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง Plastic Indexและ Liquid Limit เพื่อใช้จำแนกชนิดของดิน

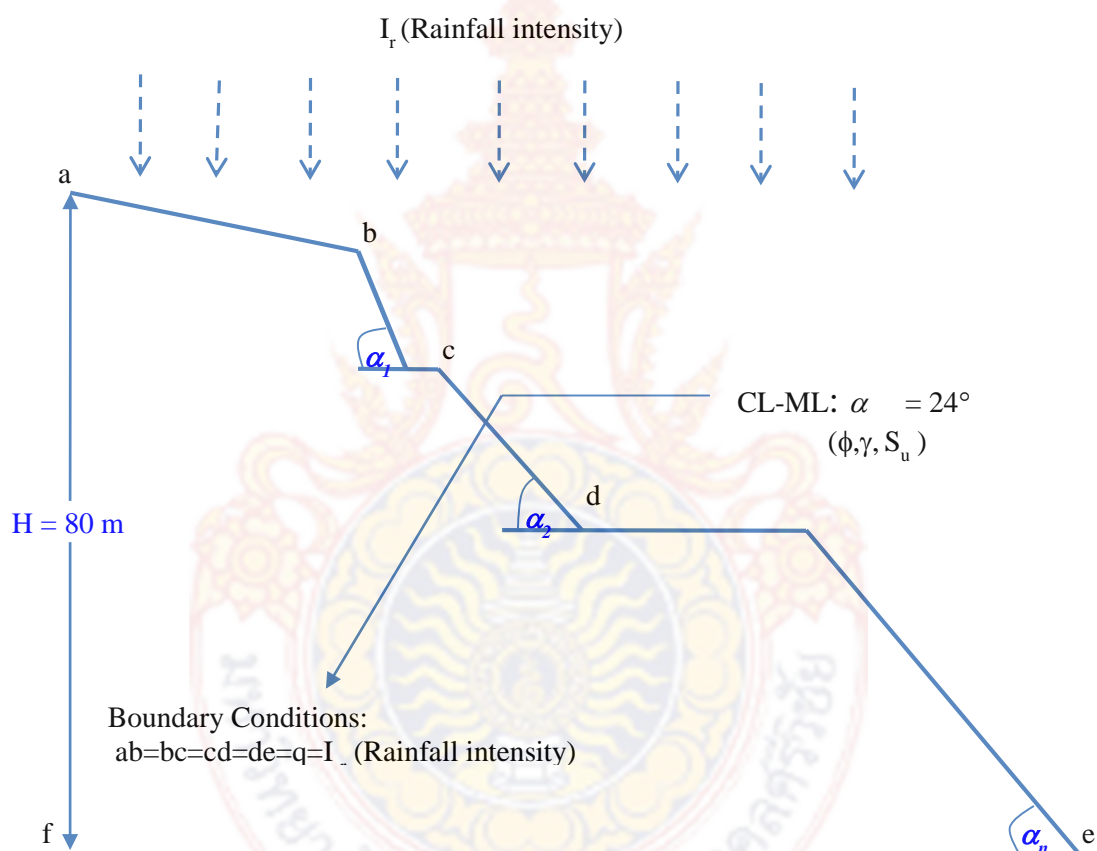
จากการนำดินตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Sieve Analysis laboratory testing (ASTM D422-02) เมื่อค่า D_{10} , D_{30} และ D_{60} คือ ขนาดของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 10%, 30% และ 60%, ค่า The coefficient of uniformity (C_u) คือ ค่าที่แสดงการกระจายตัวของเม็ดดินว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่ และค่า coefficient of curvature (C_c) จะแสดงถึงขนาดคละกันว่าขนาดคละกันดีหรือไม่จากผลการทดสอบ Sieve Analysis laboratory พบว่าค่า D_{10} , D_{30} และ D_{60} มีค่าเท่ากับ 0.0012, 0.07 และ 3.6 ตามลำดับ และ ค่า C_u และ C_c มีค่าเท่ากับ 3000 และ 1.13 ตามลำดับ (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 Grain size distribution curve from Sieve Analysis laboratory testing.

4.2.2 การสำรวจทางวิศวกรรมเพื่อกำหนดแบบจำลองของลาดดินพิบัติสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ (Slope geometry and soil property of the site)

จากการสำรวจทางวิศวกรรม โดยใช้กล้องวัดมุมกับกล้องวัดระยะ (Survey Equipment) ตามรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะจะเป็นดินเนื้อเดียวกันไปตลอดทั้งความลาด (A homogeneous soil slope) และจากผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและการจำแนกดินด้วยวิธี USCS สามารถจำแนกได้ว่าเป็นดินชนิด CL-ML ลาดดินมีความสูง 80 เมตรและมีความลาดเอียง 27 องศา



รูปที่ 4.5 Slope geometry and soil property of the site.

- ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชนิดของดิน (Input soil texture condition)

จากการอ้างอิงชนิดของดินที่จะนำมาประเมินเสถียรภาพของลาดดิน ดินที่ถูกเลือกคือ Clay loam (UNSODA 3033) เนื่องจากมีค่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ($C_u, C_c, D_{10}, D_{30}, D_{60}$) คล้ายกับดินชนิด CL-ML ในกรณีศึกษาพื้นที่เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการซึมผ่านเนื่องมาจากน้ำฝนในลาดดิน โดยตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของค่าผลการทดสอบ Atterberg limit, Sieve analysis ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน UNSODA และ ดินชนิด CL-ML

- เส้นอัตราลักษณ์ของดินที่ไม่มีตัวด้วยน้ำและค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

เนื่องจากโดยทั่วไปในการทดสอบ Permeability Analysis ข้อมูลดิบของ SWCC ที่ได้จากการทดสอบดินจะมีค่าไม่สมบูรณ์พอที่จะทำการวิเคราะห์ Transient seepage จึงต้องนำข้อมูลดิบไปวิเคราะห์ในโปรแกรม SWRC Fit curve เพื่อคำนวณค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameters) ของ SWCC หรือ Soil water characteristic curve ที่ใช้ในกรณีศึกษาพื้นที่ อ. ขนอม โดยจากการคำนวณในสมการของ Brooks and Corey (1966), van Genuchten (1980), Kosugi (1994) และ Fredlund and Xing (1994) ตามตารางที่ 4.

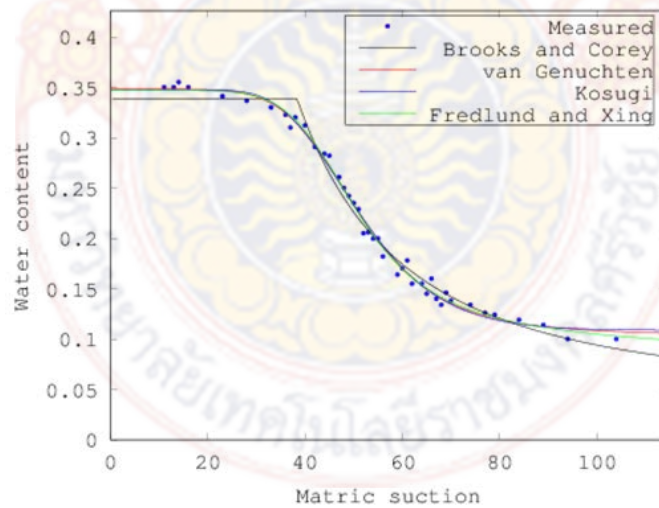
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ของดิน UNSODA 3033 และ ดินชนิด CL-ML

Sample	Case Study	Orenburg region, Russia
Soil Properties	Position	UNSODA Code
	Khanom	UNSODA 3033
Liquid Limit (LL %)	37.01	-
Plastic Limit (PL %)	22.6	-
Plastic Index (PI %)	14.44	-
Soil Classification	CL-ML	CLAY-LOAM
The coefficient of uniformity, Cu	3000	
The coefficient of curvature, Cc	1.13	1.00
D10	10	9
D30	30	25
D60	3.6	4
P200	30.56	42
Bulk-density (g/cm ³)	-	1.32
Porosity (cm ³ /cm ³)	-	0.51

ตารางที่ 4.2 Result from SWRC program

Model	Equation	Parameters	R ²	Model	Equation	Parameters	R ²
Brooks and Corey	$\left(\frac{\Psi_a}{\Psi}\right)^\lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	$\theta_s = 0.571$ $\theta_r = 0.160$ $\lambda = 0.287$	0.991	Kosugi	$\theta = \theta_s \left[\frac{\ln\left(\frac{h}{h_m}\right)}{\sigma} \right]$	$\theta_s = 0.570$ $\theta_r = 0.298$ $h_m = 79.28$ $\sigma = 1.194$	0.996
Van Genuchten	$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right)^m$	$\theta_s = 0.569$ $\theta_r = 0.272$ $\alpha = 0.024$ $n = 1.771$	0.996	Fredlund and Xing	$\theta = \theta_s \left(\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{\Psi_a} \right)^n \right]} \right)^m$	$\theta_s = 0.569$ $a = 46.82$ $m = 1.149$ $n = 1.551$	0.997

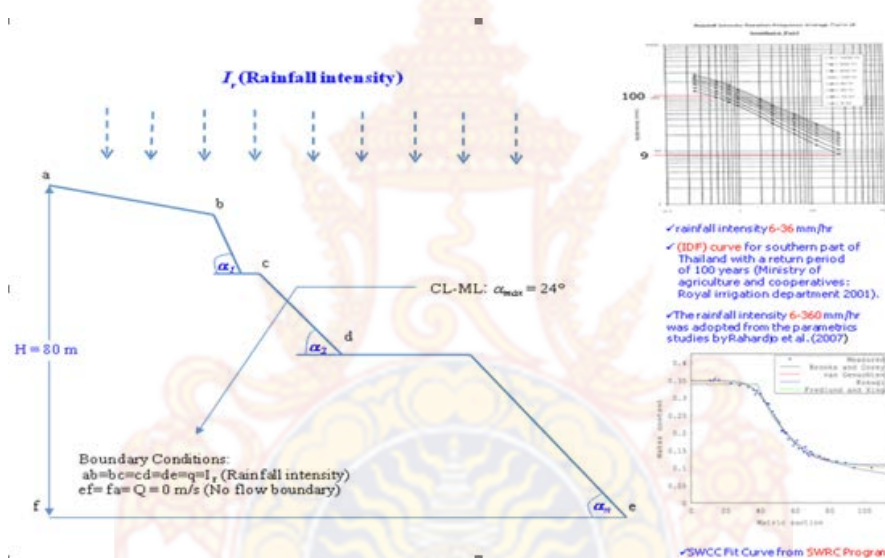
Permeability function ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Brooks and Corey (1966), van Genuchten (1980), Kosugi (1994) และ Fredlund and Xing (1994) ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟของ SWCC ที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 The relationship between matric suction and volumetric water content in different SWCC equation (Kosuki, 1994-1999).

4.3 งานตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Result from engineering properties on study area)

จากโปรแกรมการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินจะใช้หลักการ Finite element analysis มาทำการวิเคราะห์โดยทำการแบ่งพื้นที่ของมวลดินออกเป็นตาข่ายพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตร จำนวนมากกว่า 1000 จุด และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ดังรูปที่ 4.6 ดังนี้ ด้านข้างฝั่งซ้ายและด้านล่างสุดกำหนดให้ ไม่มีการไหลผ่านอันเนื่องมาจากน้ำ (No seepage through the base of the soil slope) และพื้นที่ด้านบนลาดชันมีการรองรับปริมาณการเติมน้ำอันเนื่องมาจากค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity, I_r)



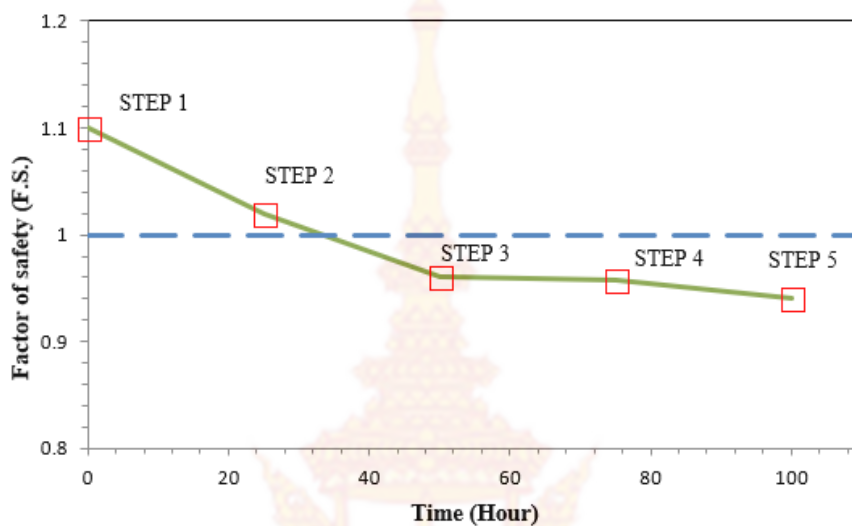
รูปที่ 4.7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

4.4 การวิเคราะห์ และอภิปราย (Result and discussion)

จากการออกแบบจำลองของลาดดินเพื่อนำไปเป็นข้อมูล Input data ใน โปรแกรม GeoStudio เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในลาดดินกรณีพื้นที่ศึกษาที่ อ. ขนอม นครศรีธรรมราชนั้นผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพในลาดดินและการพฤติกรรม การซึมผ่านของน้ำฝนเพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำในลาดดินที่เพิ่มขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม SLOPE/W ถูกแสดงเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และ 5 ช่วงเวลาที่ผ่านไป (0,25,50,75 และ 100 ชั่วโมง) ดังภาพที่ 4.6 พบว่าที่ช่วงเวลาเริ่มต้น ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง จาก 1.10 ไปถึง 1.02 (Step 1 at 0 hour, Step 2 at 25 hour) ที่ชั่วโมงที่ 100 ปริมาณน้ำฝนที่ เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่การลดลงของค่าอัตราส่วนปลอดภัยจนถึงค่า 0.94 (Step 5 at 100 hour) จากการ วิเคราะห์พบว่าปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่การลดลงของกำลังในดิน (Soil strength) และพบว่า

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะลดลงไปเรื่อยๆจนถึงลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 50 (Step 3 at 50 hour) โดยมีค่า F.S. = 0.94



รูปที่ 4.8 Time-step versus factor of safety during the rainfall



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงาน (Conclusion and published research papers)

การวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติสำหรับระบบการเตือนภัยโดยนำ ค่าความลาดเอียงในลาดดิน(β), ค่าความสูงในลาดดิน (H) และตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดย การเก็บดินตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ได้แก่ Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) และ Sieve Analysis laboratory testing (ASTM D422-02) จากนั้นทำการจำแนกชนิดของดิน (Type of soil) โดยเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ($C_u, C_c, D_{10}, D_{30}, D_{60}$) กับดินรหีส UNSODA และค่าตัวแปรกำหนด (Fitting parameter) ในค่าเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อคำนวณและแสดงผลในรูปของอัตราส่วนปลอดภัย ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- งานจัดทำข้อมูลด้านอุทกศาสตร์ รวบรวมค่าปริมาณน้ำฝนสะสมของ พื้นที่จังหวัด นครศรีธรรมราช โดยอ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 30 ปีการเกิดซ้ำ กรมชลประทาน (Thailand Royal Irrigation Department, 2011) และค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) 6-36 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเป็นพิสัยที่อ้างอิงมาจาก กราฟค่าความเข้มฝน-ช่วงเวลา-และรอบ 100 ปีการเกิดซ้ำ และ ค่าความเข้มฝน (Rainfall intensity) ที่ Rahardjo et al. (2007) ใช้ในการวิเคราะห์ลาดดิน บริเวณภูมิภาคเอเชีย

- สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีพื้นที่ศึกษาที่ อ. ขนอม นครศรีธรรมราช โดยในโปรแกรม SEEP/W ได้นำหลักการของ Finite element analysis มาใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงในค่าแรงดันน้ำในมวลดิน อันเนื่องมาจากน้ำฝนและวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดิน

- พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และ 5 ช่วงเวลาที่ผ่านไป (0,25,50,75 และ 100 ชั่วโมง) พบว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturated) ในมวลดินเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม SLOPE/W พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงลาดดินเริ่มสูญเสียเสถียรภาพที่ชั่วโมงที่ 50 โดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นสะสม (API) = 350 mm และมีค่า อัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) เท่ากับ 0.94 ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณความเข้มฝนมีบทบาทสำคัญในเสถียรภาพของลาดดินให้เกิดการถล่มได้รวดเร็วขึ้น


- ในเงื่อนไข ผลผลิตที่กำหนดว่า บทความวิจัยต้องได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ ในเอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ (proceeding) จำนวนอย่างน้อย 1 บทความหรือสูงกว่าผู้วิจัยดำเนินการ โดยเลือกตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 8th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment ณ เมือง กัวลาลัมเปอร์ (Kuala Lumpur Convention Centre / Petronas Twin Towers) ประเทศ มาเลเซีย



บรรณานุกรม

- [1] สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ และ วรากร ไหมเรียง (2548). “การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นต่อการพิบัติเพื่อประเมินความเสี่ยงของเขื่อน.” ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.
- [2] Banaki, R., Ahmad, F., Tabaroki, 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.
- [3] Caine, N. (1980). “The rainfall intensity: Duration control of shallow landslides and debris flows.” *Geografiska Annaler., Series A, Physical Geography.,* 62, 23-27.
- [4] Chalermyanont, T. (2004). “Reliability Based Design for Internal Stability of Mechanically Stabilized Earth Walls.” Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin Madison.Madison.Wis.
- [5] Chollada K. (2016). “Quantifying uncertainty of natural slope stability analysis for landslide warning system.” Ph.D. Thesis. Prince of Songkla University:Songkla.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Christian, J.T. and Baecher, G.B. (1999). “Point-estimate method as numerical quadrature.” *ASCE.J.GeotechGeoenv. Eng.,* 125(9), 779-786.
- [9] Crosta, G.B., and Frattini, P. (2003). “Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense.” *Natural Hazards and Earth System Sciences.,* 3, 81-93.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] El-Ramly, H., Morgenstern, N.R. and Cruden, D.M. (2002). “Probabilistic slope stability analysis for practice.” *Can. Geotech. J.,* 40, 851 – 855.
- [14] Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2008). “Risk Assessment in Geotechnical Engineering.” John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey,2008.
- [15] Fredlund, D.G. and Vanapalli, S.K. (2002). “Shear strength of Unsaturated Soils.” *Agronomy Society of America,* 329-361.
- [16] Fredlund D.G. and Morgenstern N.R., Stress state variable for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings, American Society of Civil Engineering (GTS),* 103, 1997, pp. 447-466.
- [17] Fredlund D.G. and Xing A., Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal,* 31(3), 1994, pp. 521-532.

- [18] Giannecchini, R. (2006). "Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy)." *Natural Hazards of Earth System Science* 6, 357–364.
- [19] Griffiths, D.V., and Lane, P.A., (1999). "Slope Stability Analysis by Finite Elements." *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- [20] Hammah, R., Thamer, Y., Brent, C. and John, C. (2005). "A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit equilibrium investigation." Toronto.
- [21] 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.
- [22] Iverson, M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration." *Water Resource Research*, 36, 1897-1910.
- [23] Jumpol, P. (2013). "Numerical analysis of homogenization using random finite element method." Ph.D. Thesis, The Colorado School of Mines, United states.
- [24] Kosugi K., Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resour. Res.*, 30, 1994, pp.891–901.
- [25] Kosugi K., General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1999, pp. 270–277.
- [26] 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.
- [27] Lacasse, S. (1994). "Reliability and Probabilistic methods" in *Proc 13th Int.Conf. on soil mechanics foundation engineering*., 225-227.
- [28] 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.
- [29] Phoon, K. K. And Kulhawy, F. H. (1999a). "Characterization of geotechnical variability." *Can. Geotech. J.* 36(4), 612-624.
- [30] Phoon, K. K. And Kulhawy, F. H. (1999b). "Evaluation of geotechnical property variability." *Can. Geotech. J.* 36(4), 625-639.
- [31] Potts, D.M. (2003). "Numerical analysis a virtual dream or practical reality." *J. Geotechnique* 53, 6, 535-573.
- [32] Van Genuchten M. T.,. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 1980, pp. 892–898.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Zhang, L., and Tang, W. (2011). "Stability analysis of rainfall-induced slope failure." *Geotechnical Engineering*, 164(5), 299-316.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits
laboratory testing (ASTM D 4318-04)

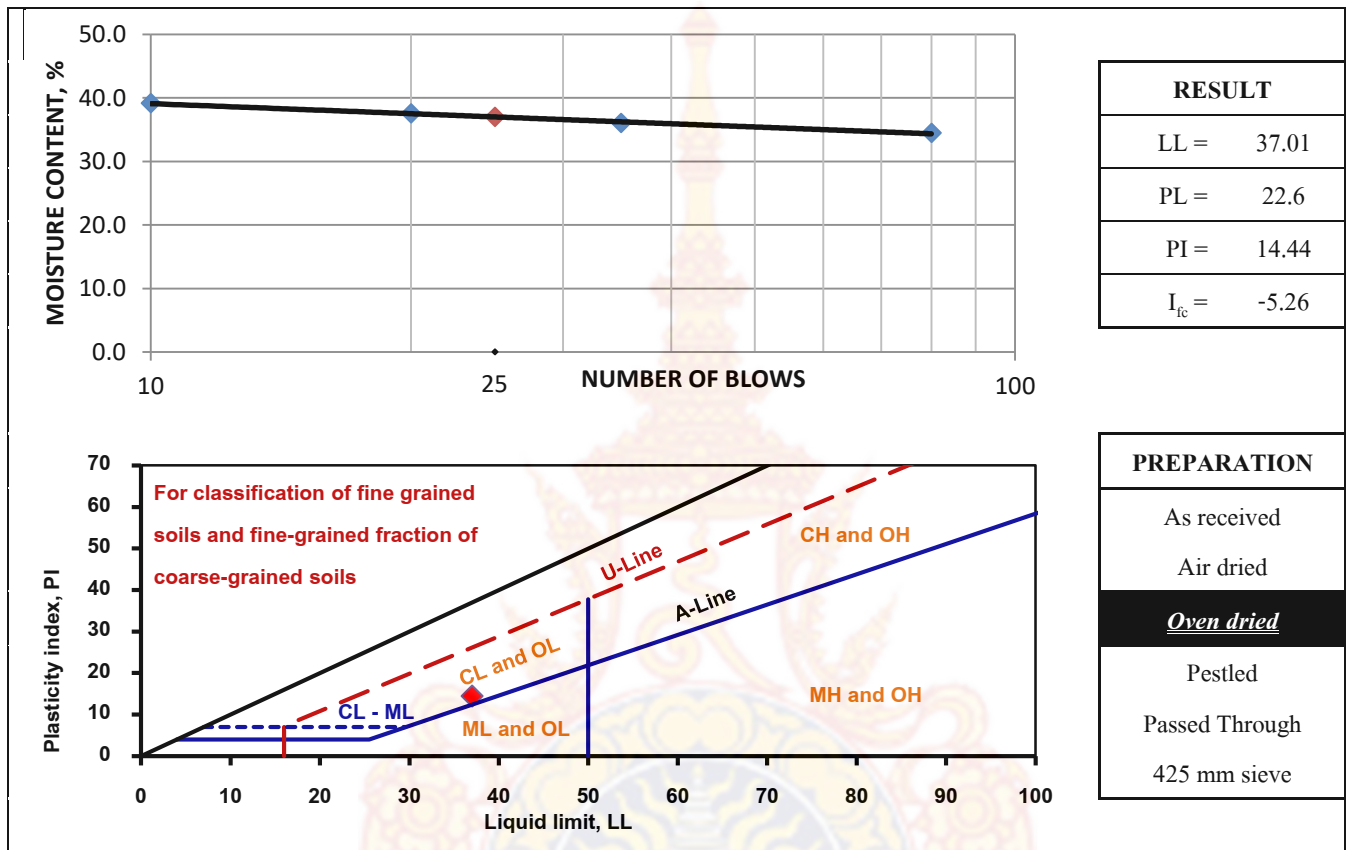


ตาราง ก-1 ตารางข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Upper slope

ATTERBERG LIMITS (ASTM D4318-04)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	26/04/2018	Sample No.	Upper slope
Tested by	นายภานุพงศ์ ทุ่มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

TEST	PLASTIC LIMIT		LIQUID LIMIT				
	1	2	1	2	3	4	
Test Number							
Container no.	A3	N6	20	26	N5	A6	
Number of bumps			10	20	35	80	
Wet soil & Container	g	35.23	34.27	43.69	46.7	45.79	43.9
Dry soil & Container	g	35.01	34.07	40.90	43.24	42.67	41.30
Container	g	34.06	33.16	33.78	34.02	34.01	33.76
Dry soil	g	0.95	0.91	7.12	9.22	8.66	7.54
Moisture loss	g	0.22	0.20	2.79	3.46	3.12	2.60
MOISTURE CONTENT	%	23.2	22.0	39.2	37.5	36.0	34.5

รูปที่ ก-1 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Upper slope



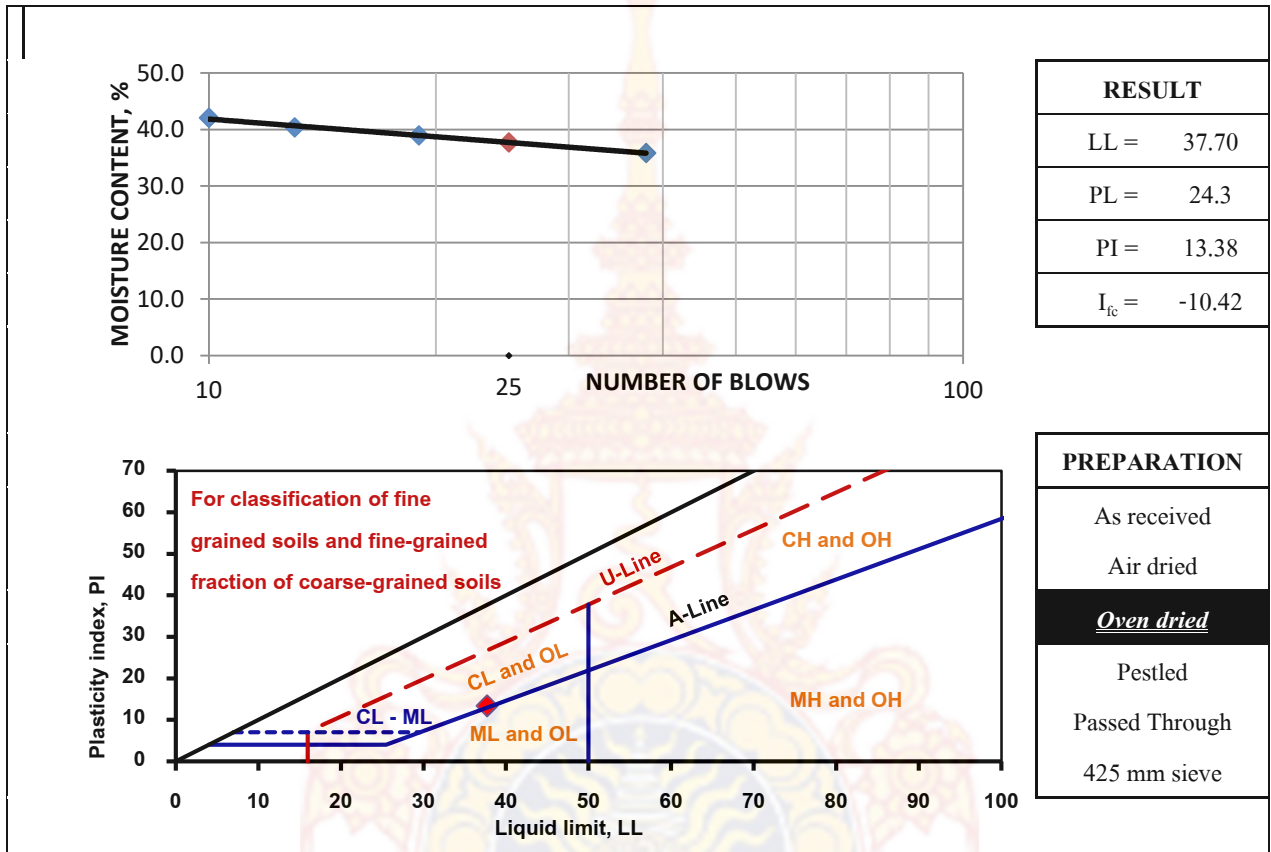


ตาราง ก-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Middle slope

ATTERBERG LIMITS (ASTM D4318-04)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	26/04/2018	Sample No.	Middle slope
Tested by	นายภานุพงศ์ ทุ่มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

TEST	PLASTIC LIMIT		LIQUID LIMIT				
	1	2	1	2	3	4	
Test Number	4	1	4	3	1	16	
Container no.	4	1	4	3	1	16	
Number of bumps			10	13	19	38	
Wet soil & Container	g	36.09	36.32	46.31	46.18	47.4	46.3
Dry soil & Container	g	35.76	35.93	42.95	42.96	43.86	43.08
Container	g	34.40	34.33	34.96	34.99	34.77	34.1
Dry soil	g	1.36	1.6	7.99	7.97	9.09	8.98
Moisture loss	g	0.33	0.39	3.36	3.22	3.54	3.22
MOISTURE CONTENT	%	24.3	24.4	42.1	40.4	38.9	35.9

รูปที่ ก-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Atterberg limits laboratory testing (ASTM D 4318-04) บริเวณ Middle slope



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02)





ตาราง ข-1 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02)
บริเวณ Upper slope

HYDROMETER (ASTM D422-02)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	09/05/2018	Sample No.	Upper slope
Tested by	นายภานุพงศ์ ทุมทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

Type of Hydrometer	H151			Tested	Poured Off	
Hydrometer No.	-			1	1	
Dispersing Agent	solution	4	% of	Weight of Container + Dry Soil	g. 50.5 50.5	
Sodium Hexametaphosphate				Weight of Container	g. 0 0	
Amount	40	cm ³		Weight of Dry Soil	g. 50.5 50.5	
Meniscus Correction x 1,000 =	0.5				Pretreatment loss	g. 0 0%
Dispersing Agent Correction =	4				Fraction Finer No. 200 Sieve	32.92 %

Date	Time	Elapsed Time, t min.	Temp. °C	Hydrometer Rreading R' =	TRUE Reading Rc =	Effective depth cm.	K =	D = K root(L/t) mm	N = K ₁ /(R-Rw)	N' %
9-May		0		-	-	-	-	-	-	-
		0.25	30	28	28.5	8.6	0.0119	0.0698	89.63	29.51
		0.5	30	27	27.5	8.9	0.0119	0.0502	86.49	28.47
		1	30	26.5	27	9.2	0.0119	0.0361	84.92	27.95
		2	30	26	26.5	9.2	0.0119	0.0255	83.34	27.44
	14:10	2	30	26	26.5	9.2	0.0119	0.0255	83.34	27.44
	14:12	4	30	25	25.5	9.4	0.0119	0.0182	80.20	26.40
	14:16	8	30	24	24.5	9.7	0.0119	0.0131	77.05	25.37
	14:23	15	30	22.7	23.2	10.2	0.0119	0.0098	72.96	24.02

Date	Time	Elapsed Time, t min.	Temp. °C	Hydrometer Rreading R' =	TRUE Reading Rc =	Effective depth cm.	K =	D = K root(L/t) mm	N = $K_1/(R-R_w)$	N' %
	14:38	30	30	21.3	21.8	10.5	0.0119	0.0070	68.56	22.57
	15:08	60	30	19.5	20	11	0.0119	0.0051	62.90	20.71
	16:08	120	30	17	17.5	11.5	0.0119	0.0037	55.04	18.12
	18:08	240	30	14.8	15.3	12.3	0.0119	0.0027	48.12	15.84
	22:08	480	30	12.5	13	12.9	0.0119	0.0020	40.89	13.46
10-May	14:08	1440	30	9	9.5	13.7	0.0119	0.0012	29.88	9.84
11-May	19:00	3172	31	6.4	6.9	14.4	0.0119	0.0008	21.70	7.14
13-May	20:40	6152	32	4.5	5	15	0.0119	0.0006	15.73	5.18
15-May	17:45	8857	30	4.3	4.8	15	0.0119	0.0005	15.10	4.97
18-May	16:50	13122	30	3.8	4.3	15.2	0.0119	0.0004	13.52	4.45
21-May	13:35	17247	30	3.2	3.7	15.2	0.0119	0.0004	11.64	3.83





ตาราง ข-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Hydrometer (ASTM D422-02) บริเวณ Middle slope

HYDROMETER (ASTM D422-02)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	09/05/2018	Sample No.	Middle slope
Tested by	นายภานุพงศ์ คุ้มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

Type of Hydrometer	H151	Tested	2	Poured Off	2
Hydrometer No.		Container No.			
Dispersing Agent	solution	4 % of	Weight of Container + Dry Soil	g.	50.08
Sodium Hexametaphosphate			Weight of Container	g.	0
Amount	40	cm ³	Weight of Dry Soil	g.	50.08
Meniscus Correction x 1,000 =	0.5		Pretreatment loss	g.	0
Dispersing Agent Correction =	4		Fraction Finer No. 200 Sieve		30.56 %

Date	Time	Elapsed Time, t min.	Temp. °C	Hydrometer Rreading R' =	TRUE Reading Rc =	Effective depth cm.	K =	D = K root(L/t) mm	N = K ₁ /(R-R _w)	N' %
9-May		0		-	-	-	-	-	-	-
		0.25	30	28	28.5	8.6	0.0119	0.0698	90.38	27.62
		0.5	30	27.5	28	8.9	0.0119	0.0502	88.80	27.14
		1	30	27	27.5	8.9	0.0119	0.0355	87.21	26.65
		2	30	26.5	27	9.2	0.0119	0.0255	85.63	26.17
	14:36	2	30	27	27.5	8.9	0.0119	0.0251	87.21	26.65
	14:38	4	30	26.3	26.8	9.2	0.0119	0.0180	84.99	25.97
	14:42	8	30	25.2	25.7	9.4	0.0119	0.0129	81.50	24.91
	14:49	15	30	24.2	24.7	9.7	0.0119	0.0096	78.33	23.94
	15:04	30	30	22.7	23.2	10.2	0.0119	0.0069	73.58	22.48
	15:34	60	30	21	21.5	10.5	0.0119	0.0050	68.19	20.84
	16:34	120	30	19.2	19.7	11	0.0119	0.0036	62.48	19.09

Date	Time	Elapsed Time, t min.	Temp. °C	Hydrometer Rreading R' =	TRUE Reading Rc =	Effective depth cm.	K =	D = K root(L/t) mm	N = $K_1/(R-R_w)$	N' %
	18:34	240	30	17.2	17.7	11.5	0.0119	0.0026	56.13	17.15
	22:34	480	30	15.2	15.7	12.1	0.0119	0.0019	49.79	15.22
10-May	14:09	1415	30	12.2	12.7	12.9	0.0119	0.0011	40.28	12.31
11-May	19:00	3146	31	9.8	10.3	13.7	0.0119	0.0008	32.67	9.98
13-May	20:40	6126	32	8	8.5	13.9	0.0119	0.0006	26.96	8.24
15-May	17:45	8831	30	7.6	8.1	14.2	0.0119	0.0005	25.69	7.85
18-May	16:50	13096	30	6.8	7.3	14.4	0.0119	0.0004	23.15	7.08
21-May	13:35	17221	30	6.3	6.8	14.4	0.0119	0.0003	21.57	6.59



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02)





ตาราง ค-1 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02) บริเวณ Upper slope

SIEVE ANALYSIS (WET/DRY SIEVING) (ASTM D422-02)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	26/04/2018	Sample No.	Upper slope
Tested by	นายภานุพงศ์ ทุมทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

Preparation		Wet Sieve					
WEIGHT OF SOIL SAMPLE				Maximum Size of Particle		Minimum Weight of Sample (g)	
Container No.	1			No. 10		200	
Wt. Container+Dry Soil	1082.94			No. 4		500	
Wt. Container	301.7			No. 3/4"		1500	
Wt. Dry Soil	781.24						
SIEVE ANALYSIS							
Sieve No.	Sieve opening (mm.)	Wt. Sieve (g.)	Wt. Sieve + soil (g.)	Wt. Soil Retained (g.)	Cumulative retained (g)	Percent retained (%)	Percent finer (%)
3/8"	9.525	535.26	671.63	136.37	136.37	17.46	82.54
#4	4.760	488.93	615.34	126.41	262.78	33.64	66.36
#10	2.000	424.17	557.28	133.11	395.89	50.67	49.33
#20	0.841	373.08	421.54	48.46	444.35	56.88	43.12
#40	0.420	336.89	354.41	17.52	461.87	59.12	40.88
#100	0.150	311.09	351.27	40.18	502.05	64.26	35.74
#200	0.075	510.63	532.62	21.99	524.04	67.08	32.92
wash out	-	-	257.20	257.20	781.24	100.00	0.00

	Diameter (mm)	Passing (%)
D ₁₀ =	0.0012	10
D ₃₀ =	0.07	30
D ₆₀ =	3.60	60
C _u =	D ₆₀ /D ₁₀ =	3000.00
C _c =	D ₃₀ ² /(D ₆₀ *D ₁₀) =	1.13



ตาราง ค-2 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Sieve Analysis (Wet/Dry Sieving) (ASTM D422-02) บริเวณ Middle slope

SIEVE ANALYSIS (WET/DRY SIEVING) (ASTM D422-02)					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	26/04/2018	Sample No.	Middle slope
Tested by	นายภานุพงศ์ คุ้มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-

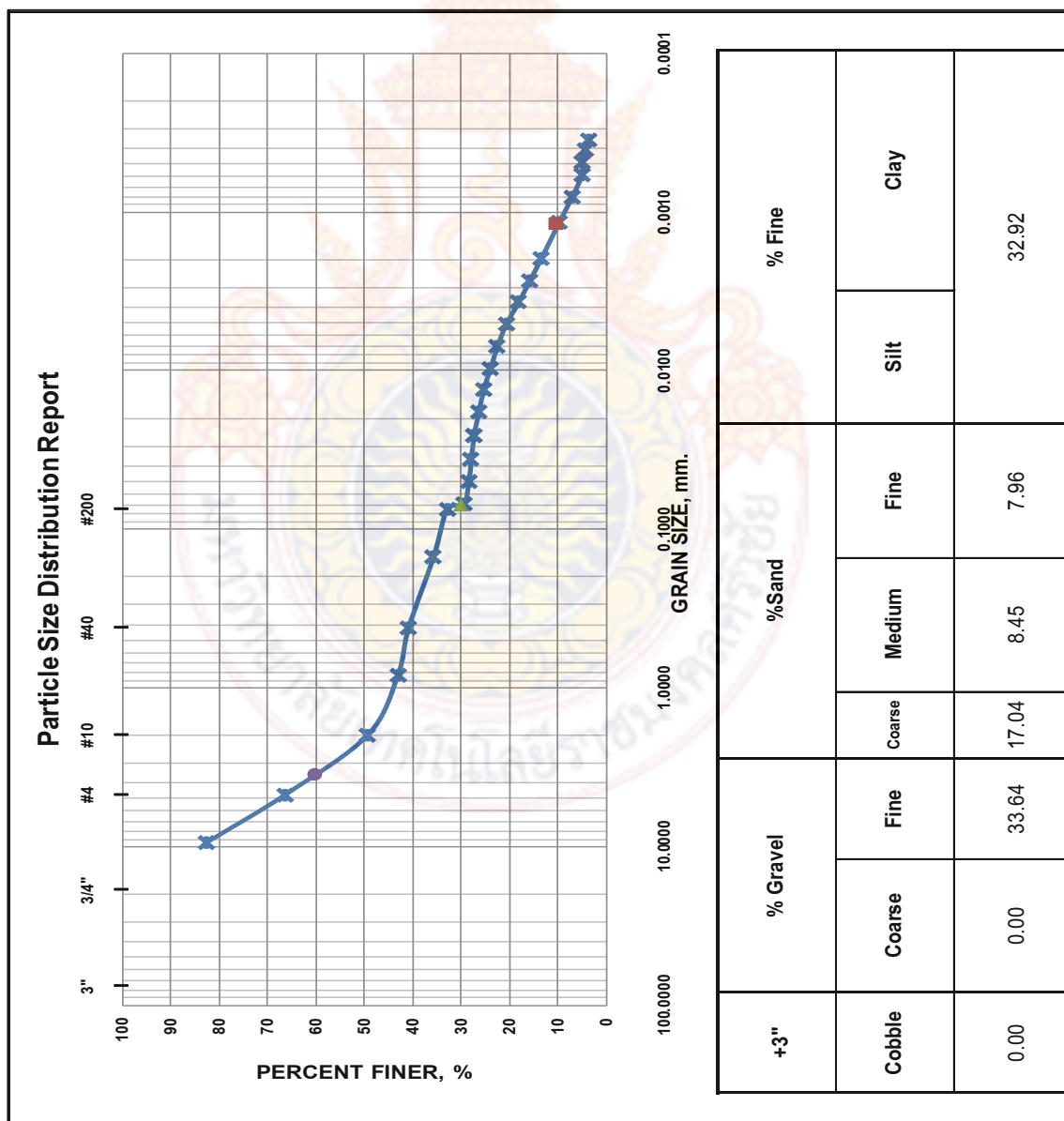
Preparation		Wet Sieve					
WEIGHT OF SOIL SAMPLE				Maximum Size of Particle	Minimum Weight of Sample (g)		
Container No.	2					No. 10	200
Wt. Container+Dry Soil	1170.53			No. 4	500		
Wt. Container	320.84			No. 3/4"	1500		
Wt. Dry Soil	849.69						
SIEVE ANALYSIS							
Sieve No.	Sieve opening (mm.)	Wt. Sieve (g.)	Wt. Sieve + soil (g.)	Wt. Soil Retained (g.)	Cumulative retained (g)	Percent retained (%)	Percent finer (%)
3/8"	9.525	535.26	744.74	209.48	209.48	24.65	75.35
#4	4.760	488.93	636.62	147.69	357.17	42.04	57.96
#10	2.000	424.17	535.19	111.02	468.19	55.10	44.90
#20	0.841	373.08	429.35	56.27	524.46	61.72	38.28
#40	0.420	336.89	358.89	22.00	546.46	64.31	35.69
#100	0.150	311.09	340.90	29.81	576.27	67.82	32.18
#200	0.075	510.63	524.39	13.76	590.03	69.44	30.56
wash out	-	-	259.66	259.66	849.69	100.00	0.00

	Diameter (mm)	Passing (%)
D ₁₀ =	0.0008	10
D ₃₀ =	0.07	30
D ₆₀ =	5.20	60
C _u =	D ₆₀ /D ₁₀ =	6500.00
C _c =	D ₃₀ ² /(D ₆₀ *D ₁₀) =	1.18



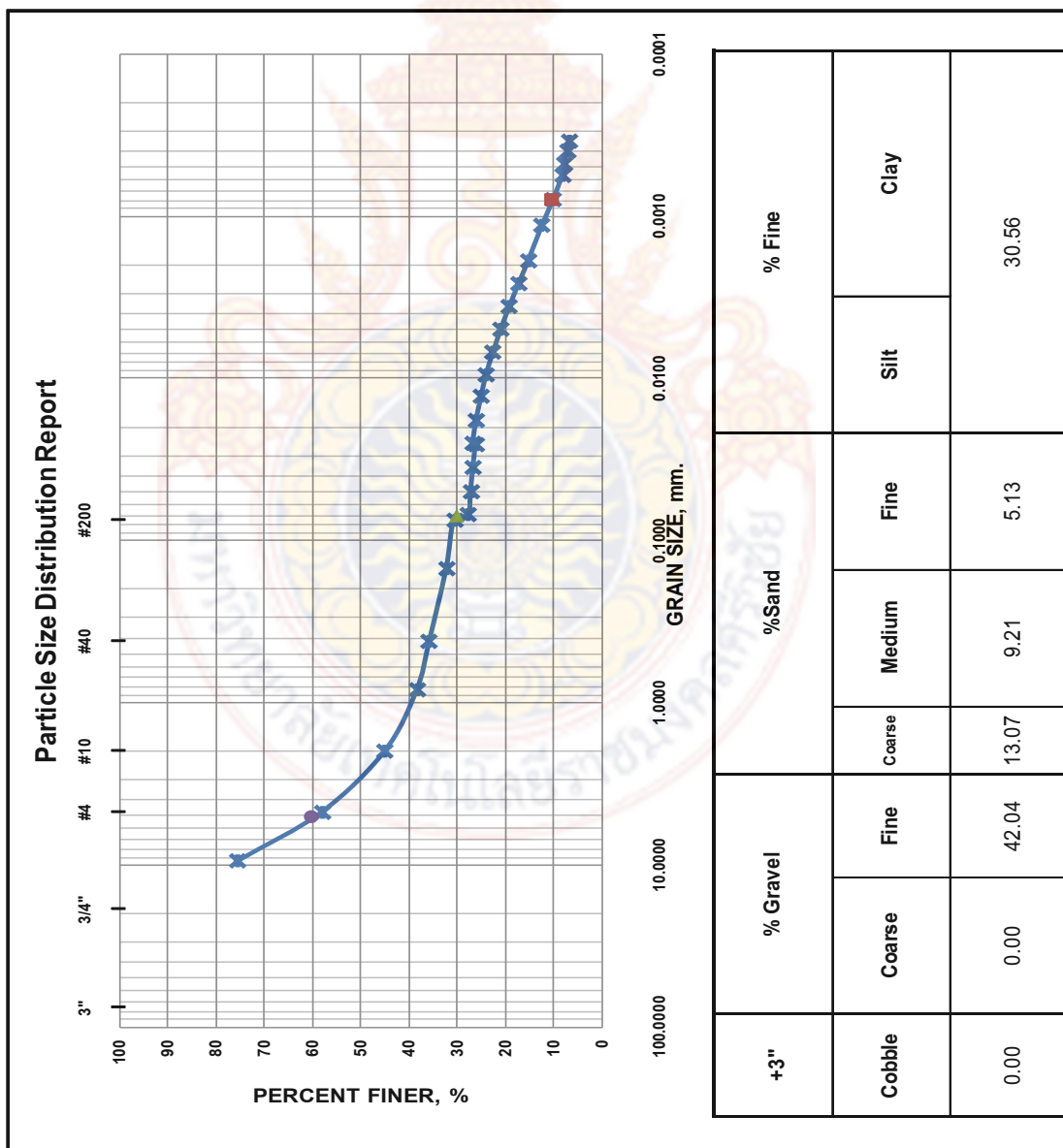
ตาราง ค-3 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Particle Size Distribution บริเวณ Upper slope

Particle Size Distribution Report					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	-	Sample No.	Upper slope
Tested by	นายภานุพงศ์ คุ้มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-



ตาราง ค-4 ข้อมูลการจำแนกดินตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ผล Particle Size Distribution บริเวณ Middle slope

Particle Size Distribution Report					
Project Name	-				
Location	-	Date of Test	-	Sample No.	Middle slope
Tested by	นายภานุพงศ์ ทุ่มทวน	Soil Sample	-	Depth (m)	-



ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ชลดา กาญจนกุล
 ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Chollada Kanjanakul
 ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
 หน่วยงาน สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตั้งอยู่เลขที่ 99 หมู่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210 สำนักงาน : (0) 7575 24-36 # 6003, แฟกซ์ : (0) 7575 4028, มือถือ : (0) 88 267 3430 E-mail : chollada-ka@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

Date of Graduation	Level	Cert.,Degree	Major	Name of Institute/Province
2016	Doctoral.	Ph.D.	Civil Engineering Geo-technical Eng	Prince of Songkla university/Thailand, SKA
2008	Master:	M. ENG	Civil Engineering Geo-technical Eng	Prince of Songkla university/Thailand, SKA
2005	Bachelor:	B. ENG	Civil Engineering	Prince of Songkla university/Thailand, SKA