



ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินโดยคุณสมบัติทางวิศวกรรม

กรณีศึกษา เทพราช อำเภอสีชล

Study of Slope Stability by Used Engineering Properties :

A Case Study of Theppharat Sichon District

รัชพล กชาอนันต์

Ratchaphon Khacha-anan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Master of Engineering in Civil Engineering

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุญการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายรัชพล คชอนันต์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายรัชพล คชานันต์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินโดยคุณสมบัติทางวิศวกรรม กรณีศึกษาเทพราช อำเภอสิชล
ผู้เขียน	นายรัชพล คอชอนันต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การพิบัติของลาดดินเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติประเภทหนึ่งที่มีความอันตรายสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลาดดินเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการพิบัติของลาดดินแต่ก็ยังมีข้อสรุปที่แตกต่างกันออกไป วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ (1) ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน เช่น คุณสมบัติของดิน (ค่าความชื้นผ่านของน้ำในดิน) ความเข้มของปริมาณน้ำฝน และรูปแบบของลาดดิน (2) ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ดัชนีความชุ่มชื้นวิกฤตของดิน (Critical antecedent precipitation index, API) โดยใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope method) และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้วิธี Bishop's simplified ด้วยโปรแกรม SLOPE/W เพื่อบ่งชี้ถึงความวิกฤตของสถานการณ์และเตือนภัยการพิบัติของลาดดินด้วยน้ำฝนในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความชื้นน้ำของดินแต่ละชนิดกับความชื้นผ่านที่มีค่าเท่ากับค่าความชื้นน้ำของดิน ดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงการลดลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) รวดเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาทีและดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาทีตามลำดับและพบว่าความชื้นผ่านที่มีค่าต่ำกว่าค่าการซึมน้ำของดินมากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยและเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และเมื่อพิจารณาความชื้นผ่านที่ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าการซึมน้ำของแต่ละดินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะยิ่งลดต่ำลงโดยเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา ($t \leq 24$ ชั่วโมง) พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงของลาดดินเริ่มต้นพบว่าลาดดินที่มีความลาดเอียงที่ต่ำกว่าจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นที่สูงกว่า หรือกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของดิน (ค่าความชื้นผ่านของน้ำในดิน) และความชื้นผ่านเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วย

น้ำฝนโดยในส่วนของลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียงและความหนาของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆกันพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะแปรผกผันกับระดับความอิ่มตัวของน้ำในดิน โดยที่ค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผลมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลก็มีแนวโน้มลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of saturation) หน่วยแรงกดทับ (Normal stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นวิกฤตในดิน (API_{crit}) ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Infinite slope พบว่าในพื้นที่วิจัยที่มีความลาดเอียงเฉลี่ย 26.5 องศา ที่อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 ลาดดินที่พิบัติมีระดับความอิ่มตัว 82 - 86 เปอร์เซ็นต์ โดยมีดัชนีความชุ่มชื้นในดินวิกฤต 166.60 – 253.69 มิลลิเมตร ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Bishop's simplified method ที่อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 จะได้ปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 643.57 มิลลิเมตร

คำหลัก : เสถียรภาพความลาด, ปริมาณความชื้น, คุณสมบัติของดิน, กำลังรับแรงเฉือน, ปริมาณน้ำฝน

Thesis Title	Study of Slope Stability from Soil Engineering Properties A Case Study of Theppharat Sichon District
Author	Mr. Ratchaphon Khacha-anan
Major Program	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Academic Year	2557

ABSTRACT

Landslide is one of the most dangerous disasters particularly in southern of Thailand, damaged to amount of properties and life. Recently, numerous researches indicated that change of soil moisture content is a major cause of landslide. However, those conclusions were still unreasonable. Therefore, the objectives of this research were (1) to perform parametric study on slope stability due to different effects; hydraulic conductivity of soil, rainfall intensity and slope patterns, and (2) to study influence of moisture content in order to determine critical antecedent precipitation index (API_{cn}) using infinite slope method, and slope stability was then analyzed using Bishop's simplified method through SLOPE/W to identify critical situation for landslide warning in Sichon District, Nakhonsithammarat province.

Parametric study regarding the effect of rainfall intensity and saturated hydraulic conductivity of soil (K_s), which a set of both parameters were assumed to equality, implied that factor of safety (FS) for high hydraulic conductivity ($K_s = 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$) sharply decreased than another cases, respectively median ($K_s = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$) and low hydraulic conductivity ($K_s = 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$). In additional case, variations of rainfall intensity related to K_s , FS is gradually varied in consequence of rainfall intensity less than K_s . In contrast, especially 24 hrs period with median K_s , FS is dramatically decreased as a result of rainfall intensity reached over K_s . Other result of parametric study considered steepening of slope, the result indicated that low steep slope represented a greater degree of FS. In conclusion, the rainfall intensity and permeability of soil are a major influence affecting slope stability triggering by precipitation while slope angle and soil thickness are a minor one.

Result of direct shear test, varying degree of saturation of soil, confirmed the principle of shear strength reduction that shear strength of soil is inversely varied with the degree

of saturation. Effective cohesion obviously decreased with increasing soil moisture content. Also, effective internal friction angle of soil had a downward tendency by increment of moisture content significantly.

Slope stability analysis has been done by incorporating surface shear strength equation (i.e., it's a relationship between shear stress and two x-axis, degree of saturation and normal stress) and infinite slope method to determine API_{crit} (FS = 1). Analytical result found that API_{crit} of studied area fell in range 166.60 – 253.69 mm, correlated with 82 – 86 percent of degree of saturation. However, slope stability analysis using mathematical model indicated that over 643.57 mm of precipitation induced to slope failure.

Keywords : Slope stability, Moisture content, Soil properties, Shear strength, Rainfall

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(16)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา	4
2.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต	4
2.1.2 สภาพภูมิประเทศ	5
2.1.3 สภาพภูมิอากาศ	5
2.1.4 ลักษณะทางธรณีวิทยา	5
2.2 การกำเนิดดิน	7
2.2.1 วัฏจักรของดิน	7
2.2.2 การจำแนกชนิดของดินแยกตามวิธีการกำเนิดดิน	7
2.3 ลักษณะการพิบัติของลาดดิน	10
2.3.1 การร่วนหล่น	10
2.3.2 การกลิ้งไปข้างหน้า	11
2.3.3 การเลื่อนไถล	11
2.3.4 การเคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง	11
2.3.5 การเคลื่อนที่ของมวลดิน	12
2.3.6 การไหล	12
2.4 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน	14
2.5 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การลดลงของกำลังเหนือนกับเสถียรภาพของลาดดิน	17
2.6.1 กำลังเหนือนที่ลดลงชั่วคราว	18
2.6.2 กำลังเหนือนที่ลดลงถาวร	18
2.7 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	19
2.8 กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดิน	26
2.8.1 สิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการซึมน้ำผ่านผิวดิน	29
2.9 การไหลของน้ำในดิน	32
2.10 การประมาณเส้นอัตราลึกลับของน้ำในดิน	35
2.11 การเก็บตัวอย่างดิน	40
2.11.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	40
2.12 การทดสอบกำลังของดิน	41
2.12.1 การทดสอบในสนาม	42
2.12.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	44
2.12.3 ชนิดของการทดสอบ Direct Shear Test	46
2.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	47
2.13.1 วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์	48
2.13.2 การแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพังออกเป็นชั้นๆ	50
2.14 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินเพื่อการเตือนภัยการพิบัติของลาดดิน	52
2.14.1 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน	52
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	53
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบคุณสมบัติดิน	58
3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	61
3.1.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ	64
3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนาม	65
3.1.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ	66
3.2 การวิเคราะห์การไหลซึมน้ำบนลาดดิน	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การวิเคราะห์ความลาดชันและการสร้างแบบจำลองลาดดิน	75
3.2.2 ข้อมูลคุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์	76
3.2.3 การวิเคราะห์รูปแบบของน้ำฝน	78
3.3 การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน	78
3.4 แบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของดิน	83
3.5 การศึกษาแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดิน	84
3.5.1 แบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์	84
3.5.2 วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W	86
3.6 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต	87
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1 ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินในสนาม	90
4.1.1 การทดสอบหาลำดับรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา	92
4.1.2 ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test	96
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ	97
4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	97
4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม	102
4.3 ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน	110
4.3.1 ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน	110
4.3.2 ผลกระทบจากความเข้มฝน	115
4.3.3 ผลกระทบจากความลาดเอียง	115
4.3.4 ผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน	116
4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต	120
4.5 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน	126
4.6 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วย โปรแกรม SLOPE/W	139
4.7 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต	143
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	146

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	147
บรรณานุกรม	148
ภาคผนวก	153
ก. ผลการทดสอบการหากล้างรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา	154
ข. ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test	157
ค. ผลการทดสอบเฉือนตรงด้วยวิธี Multi-stage direct shear test แบบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบายของตัวอย่างดินที่ความชื้นธรรมชาติ และที่ความชื้นต่างๆ	160
ง. ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าความซึมน้ำของดิน (K_s)	193
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	196
ก. การเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการครั้งที่ 1	196
ข. การเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการครั้งที่ 2	204
ประวัติผู้เขียน	211

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินทราย	42
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว	42
3.1	วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินด้วยตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ	68
3.2	ชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป	69
3.3	คุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน	78
3.4	ตัวแปรจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในการศึกษา	81
3.5	การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน	81
4.1	พิกัดตำแหน่ง GPS ของบริเวณพื้นที่ทดสอบและเก็บตัวอย่างดิน	90
4.2	ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่ง T	92
4.3	ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณตอนกลางของภูเขาตำแหน่ง M1 M2	95
4.4	ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณตอนล่างสุดของภูเขาตำแหน่ง U	96
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินชนิดต่างๆ	97
4.6	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน	101
4.7	ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c' และ ϕ') ที่ความชื้นธรรมชาติ	103
4.8	ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความอิ่มตัวต่างๆ	109
4.9	ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) ของดินบริเวณต่างๆ	126
4.10	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ Pore Water Pressure และปริมาณความชื้น Volumetric Water Content ในลาดดิน	130
4.11	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง	139

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12	144

ข้อมูลน้ำฝนจาก 3 สถานีคือ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีอบต.ฉลอง และสถานีอบต.ลิซล ในช่วงวันที่ 21 -27 มีนาคม 2554

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	เหตุการณ์ดินถล่มในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2554 ในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช	2
2.1	แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา	4
2.2	ลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม	6
2.3	วัฏจักรของดิน	8
2.4	ลักษณะของชั้นดินกำเนิดโดยการผุสลายของหิน ณ ที่ตั้ง	9
2.5	ลักษณะการวิบัติของลาดดินและหินแบบต่างๆ	13
2.6	เงื่อนไขการพิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบี้	15
2.7	ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง	17
2.8	ความสัมพันธ์ของสภาวะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินกับการพิบัติของลาดดิน	19
2.9	ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป	20
2.10	ภาพจำลองส่วนประกอบของดิน	21
2.11	แสดงแรงดันและแรงดึงที่ผิวเม็ดดิน Contractile	21
2.12	ลักษณะของแรงคั้นน้ำในสภาวะสถิต	22
2.13	ขนาดรัศมีของส่วนโค้งผิวน้ำที่มีผลต่อ Capillary Force	23
2.14	ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil	25
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอึดตัวด้วยน้ำกับ Matric Suction	25
2.16	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน	26
2.17	แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินในกรณีฝนตกไม่คงที่	27
2.18	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียงด้วยแบบจำลอง Green and Ampt	28
2.19	สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว	30
2.20	สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน	30
2.21	สภาพดินด้านล่างอึดตัวด้วยน้ำ	31
2.22	การไหลของน้ำผ่านชั้นส่วนเล็กๆในระบบ 3 แกน	35
2.23	รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve	38

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24	39
รูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve	
2.25	41
ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU- Miniature Sampler	
2.26	41
การ X – Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU – Miniature	
2.27	43
อุปกรณ์ในการทดสอบ Kunzelstab Penetration	
2.28	44
การทดสอบ Direct Shear Test	
2.29	45
กราฟการทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test	
2.30	48
การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนาน กับผิวของลาดดิน	
2.31	50
รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop’s Simplified Method	
2.32	51
การหาค่า $m_{\alpha(n)}$ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop’s Simplified Method	
3.1	59
แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย	
3.2	60
แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา	
3.3	62
ชุดเก็บตัวอย่างดินที่พัฒนามาจากชุดเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler	
3.4	63
การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	
3.5	64
การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ	
3.6	66
การทดสอบวิธีหยั่งเบา Kunzelstab Penetration Test	
3.7	67
การทดสอบความชื้นน้ำด้วยวิธี Double Ring Test	
3.8	70
ขั้นตอนการทดสอบ Multi-Stage Direct Shear Test โดยสรุป	
3.9	71
การทดสอบการเลื่อนโดยตรงด้วยวิธี Multi-Stage Direct Shear Test	
3.10	73
การทดสอบหา Soil-Water Characteristic Curve, SWCC	
3.11	76
แบบจำลองหน้าตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์	
3.12	77
เส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ของชั้นดิน (Top Soil) และชั้นหิน (Bed Rock)	
3.13	77
ความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) ของชั้นดิน (Top Soil) และชั้นหิน (Bed Rock)	

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.14	ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ใช้วิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ตั้งแต่วันที่ 22 - 27 มีนาคม 2554 มีปริมาณน้ำฝนสะสม 731.7 มิลลิเมตร	79
3.15	ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน	80
3.16	Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function ของดินทั้ง 3 ชนิด	82
3.17	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน	83
3.18	การวิเคราะห์ลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope)	85
3.19	ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม SLOPE/W	87
4.1	บริเวณพื้นที่ศึกษาที่เคยเกิดการพิบัติของลาดดิน	91
4.2	พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง T	93
4.3	ผลการทดสอบ Kunzelstab Penetration Test (KPT) ในบริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่ง T และในบริเวณตอนล่างสุดของภูเขา U	94
4.4	สภาพดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2	95
4.5	พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง U	96
4.6	ค่าการซึมน้ำเทียบกับเวลาด้วยวิธี Double-Ring Test	97
4.7	การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด	99
4.8	การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2	100
4.9	การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุด	100
4.10	ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในรูปแบบแผนภาพของมอร์ที่ความชื้นธรรมชาติในบริเวณ T1@1 m. ความชื้นเท่ากับ 1.97% M1-1@1 m. ความชื้นเท่ากับ 16.84% M2-4@0.85 m. ความชื้นเท่ากับ 17.10% U2@1 m. ความชื้นเท่ากับ 15.82%	102
4.11(ก)	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ T	105
4.11(ข)	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปที่ตำแหน่ง M1	106
4.11(ค)	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ M2	106
4.11(ง)	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ U	107

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12(ก)	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผล (c') กับค่าระดับความอิ่มตัวด้วย (S_r)	107
4.12(ข)	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_r)	108
4.13	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 25 องศา	111
4.14	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 30 องศา	112
4.15	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 45 องศา	113
4.16	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 60 องศา	114
4.17	ผลกระทบจากความเข้มน (I) ของดินทั้ง 3 กลุ่ม ที่ความลาดชัน 45 องศา ดินมีความหนาของดิน 6 เมตร	117
4.18	ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ของดินทั้ง 3 กลุ่ม ที่ความหนาของดิน 6 เมตร	118
4.19	อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (F.S. _(min)) ที่เป็นผลมาจากความหนาของชั้นดิน ที่ต่างกันโดยมีค่าการซึมน้ำของดิน $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ความลาดชันคงที่ 45 องศา	120
4.20(ก)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturated Normal Stress และ Shear Stress ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนบนของลาดดิน T	121
4.20(ข)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturated Normal Stress และ Shear Stress ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนกลางของลาดดิน M1	122
4.20(ค)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of saturation Normal stress และ Shear stress ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนกลางของลาดดิน M2	123

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20(ง)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of saturation Normal stress และ Shear stress ในรูปแบบบรรณานุกรมของดินบริเวณส่วนล่างของลาดดิน U	124
4.21	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังข้อมูลจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช	127
4.22	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 30 ปี และน้ำฝนรายเดือน ในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ	127
4.23	ระดับน้ำใต้ดินและระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในสภาวะแบบคงที่ (Steady State)	128
4.24	ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ตกต่อเนื่องกันจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช	129
4.25	ระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนตกซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	131
4.26	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 1 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	132
4.27	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 2 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	133
4.28	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 3 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	134
4.29	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 4 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	135
4.30	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 5 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	136

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 6 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	137
4.32	การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 7 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง	138
4.33	ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ในช่วงเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง	140
4.34	ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ในช่วงเวลา 48 72 และ 96 ชั่วโมง	141
4.35	ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ในช่วงเวลา 110 120 และ 144 ชั่วโมง	142
4.36	เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช (การพิบัติในปี 2554)	145
4.37	เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อ ชั่วโมงที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช (การพิบัติในปี 2554)	145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้ประสบกับภัยธรรมชาติหลายประเภท เช่น อัคคีภัย ภัยน้ำท่วม ภัยแล้ง เป็นต้น การพิบัติของลาดดินก็เป็นภัยธรรมชาติอีกประเภทหนึ่งซึ่งเมื่อเกิดขึ้นในแต่ละครั้งจะสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก จากข้อมูลสถิติการเกิดภัยพิบัติย้อนหลังพบว่า เมื่อปี พ.ศ. 2531 จังหวัดนครศรีธรรมราช มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บจำนวน 242 คน มีมูลค่าความเสียหายสูงถึง 1,000 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2544 จังหวัดเพชรบูรณ์ มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บจำนวน 245 คน มีมูลค่าความเสียหายสูงถึง 645 ล้านบาท และในปี 2549 จังหวัดอุดรธานี มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บจำนวน 83 คน มีมูลค่าความเสียหายสูงถึง 308 ล้านบาท (กรมทรัพยากรธรณี, 2552) และด้วยปัจจัยที่เอื้ออำนวยยังส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะเกิดภัยพิบัติประเภทนี้อยู่อย่างต่อเนื่องและมีความเสียหายเพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้เป็นปัญหาต่อการดำรงชีวิตตลอดจนส่งผลกระทบต่อสภาพเศรษฐกิจทั้งประเทศ

ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการพิบัติของลาดดินมีอยู่หลายปัจจัย ได้แก่ ธรณีวิทยา ความลาดชันของพื้นที่ คุณสมบัติของดิน ปริมาณน้ำฝน และการใช้ประโยชน์จากที่ดินซึ่งเป็นการกระทำของมนุษย์ เช่น การบุกรุกพื้นที่ป่าเพื่อการทำเกษตร การเปลี่ยนแปลงลาดดินเพื่อที่อยู่อาศัย หรือเพื่อประโยชน์ใช้สอยอื่นๆ ทำให้ลาดดินเสถียรจากการเปลี่ยนแปลงความลาดชันไป ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งต่อการพิบัติของลาดดิน จากข้อมูลกรมทรัพยากรธรณีพบว่า การเข้าไปใช้สอยในพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มความเสี่ยงที่จะเผชิญกับภัยการพิบัติของลาดดิน

จากเหตุการณ์ลาดดินพิบัติในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2554 ในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยตามแผนที่กรมทรัพยากรธรณี โดยในช่วงที่เกิดการพิบัติของลาดดินมีปริมาณน้ำฝนตกสะสมกัน 9 วัน ตรวจวัดปริมาณน้ำฝนได้ 1337.6 มิลลิเมตร และจากภัยพิบัติที่เกิดขึ้นสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินในบริเวณพื้นที่เป็นอย่างมาก ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพิบัติของลาดดินโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในบริเวณที่เกิดการพิบัติ และศึกษากลไกของการพิบัติของลาดดินที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณน้ำฝน และวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดิน

(Antecedent Precipitation Index: API) เพื่อเป็นแนวทางในการเตือนภัยพิบัติของลาดดินเพื่อลดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยง



รูปที่ 1.1 เหตุการณ์ดินถล่มในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2554
ในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การพิบัติของลาดดินและลักษณะการพิบัติของลาดดิน
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผุสลายอยู่กับที่
- 1.2.3 ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปริมาณน้ำฝน
- 1.2.4 ศึกษารูปแบบการเตือนภัยพิบัติลาดดินเนื่องจากปัจจัยปริมาณน้ำฝน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์การพิบัติของลาดดินในพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 1.3.2 วิเคราะห์หาคูณสมบัติทางกายภาพของดินเพื่อนำมาใช้เป็นปัจจัยสนับสนุนของการวิเคราะห์
- 1.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินชนิดไม่ถูกรบกวน ใช้วิธี Multi State Direct Shear Test โดยทดสอบแบบระบายน้ำ
- 1.3.4 หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน
- 1.3.5 วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยเลือกใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Bishop's Simplified Method และลาดดินอนันต์ (Infinite Slope)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเข้าใจถึงลักษณะและสาเหตุของการพิบัติของลาดดิน
- 1.4.2 สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป
- 1.4.3 สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาได้
- 1.4.4 สามารถหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดิน (Antecedent Precipitation Index: API) ซึ่งเป็นดัชนีที่ชี้ถึงความวิกฤติของสถานการณ์การพิบัติของลาดดินได้
- 1.4.5 สามารถกำหนดเกณฑ์ที่ช่วยในการเตือนภัยการพิบัติของลาดดินเพื่อลดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยง

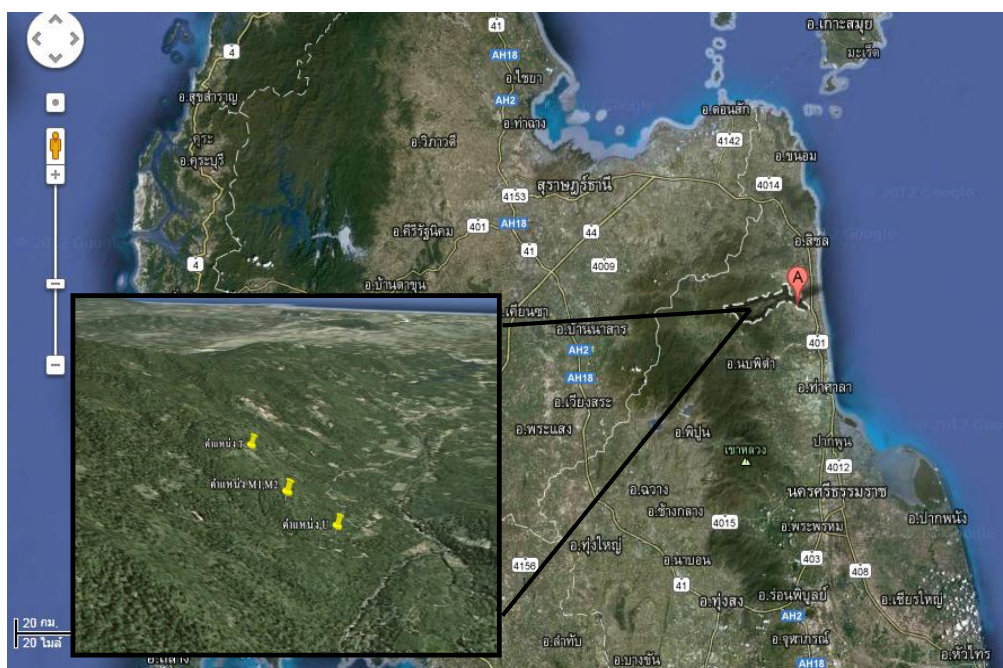
บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

2.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต

พื้นที่การพิบัติของลาดดินที่ศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขาหลวง และมีตำแหน่งการพิบัติของลาดดินที่พิกัดละติจูด $8^{\circ} 52' 53''$ เหนือ และลองจิจูด $99^{\circ} 45' 22''$ ตะวันออก ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งในตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยอยู่ห่างจากตัวอำเภอสิชลไปทางทิศใต้ประมาณ 14 กิโลเมตร ทางทิศเหนือติดต่อกับตำบลฉลอง ทิศใต้ติดต่อกับตำบลเปลี่ยน ตำบลนบพิดา ตำบลกรุงชิง ทิศตะวันออกติดต่อกับตำบลเปลี่ยน และทิศตะวันตกติดต่อกับตำบลเสภา (http://www.theppharat.go.th/general1.php) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา (http://maps.google.com)

2.1.2 สภาพภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นพื้นที่ราบระหว่างหุบเขาและมีเทือกเขาสูง สลับซับซ้อนทอดยาววางตัวไปทางเหนือจรดใต้ขนานไปกับชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก มียอดเขาสูงสุดคือยอดเขาหลวง มีสูงจากระดับน้ำทะเล 1,835 เมตร บริเวณพื้นที่ศึกษามีความสูงเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง 339 เมตร มีความลาดชันเฉลี่ย 25 องศา พื้นที่ส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองด้านทำให้มีสภาพชื้นและมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยสูง พืชพรรณไม้ส่วนใหญ่จึงเป็นสังคมพืชป่าดงดิบ เช่น ป่าดิบเขา และป่าดงดิบชื้น

2.1.3 สภาพภูมิอากาศ

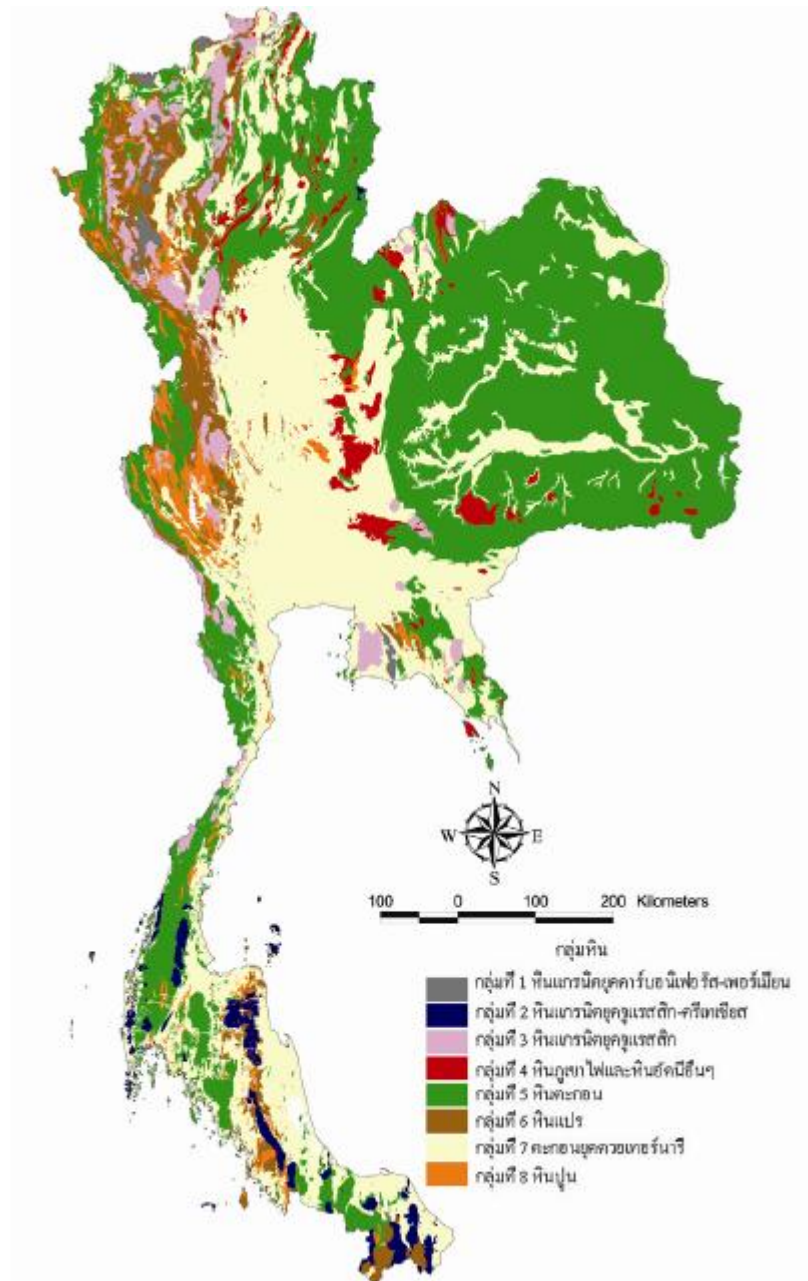
ตำบลเทพราชตั้งอยู่ในเขตร้อน ใกล้เส้นศูนย์สูตรและตั้งอยู่บนคาบสมุทรทำให้มีลักษณะภูมิอากาศแบบโซนร้อน เนื่องจากได้รับลมมรสุมที่พัดผ่านทะเลทั้งสองด้าน ทำให้มีฝนตกเกือบตลอดปีและมีอากาศค่อนข้างเย็นชื้น โดยมีเมฆปกคลุมถึงร้อยละ 14-15 และมีฤดูหนาวเพียง 2 ฤดู คือ

ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนมกราคม ปริมาณฝนที่ตกมีมากในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปี 3,500-4,000 มิลลิเมตร

ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ในช่วงเดือนเมษายน จะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 40 องศาเซลเซียส

2.1.4 ลักษณะทางธรณีวิทยา

สภาพธรณีวิทยาโดยทั่วไปในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิตยุคจูเรสสิก-ครีเทเชียส (Jurassic-Cretaceous) ซึ่งมีการกระจายตัวและครอบคลุมพื้นที่บริเวณภาคใต้ โดยมีพื้นที่ครอบคลุม 1.84% ของพื้นที่ทั้งประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากหินกลุ่มนี้มีอัตราการผุพังสูง จึงจัดให้หินกลุ่มนี้มีความอ่อนไหวต่อการเกิดการพิบัติของลาดดินบริเวณพื้นที่ภาคใต้ (สุทธิศักดิ์, 2550)



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2549)

2.2 การกำเนิดดิน

ดินคือวัสดุที่เกิดจากการผุสลายของหินต่างๆ โดยกระบวนการทางธรรมชาติอยู่บนพื้นผิวโลกซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่ติดกันแน่น (Uncemented Materials) มีขนาดคละต่างๆกัน ดินแต่ละชนิดจะมีลักษณะจำเพาะแตกต่างกันออกไปอันเนื่องมาจากอิทธิพลของ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน แรงดึงดูดของโลก ปฏิกริยาทางเคมี และการถูกพัดพาขณะเกิดการแปรเปลี่ยนสภาพ ซึ่งโดยทั่วไปมวลดินจะประกอบไปด้วย เม็ดดิน น้ำ อากาศ และสารอินทรีย์

2.2.1 วัฏจักรของดิน

วัฏจักรของหินและการกำเนิดดินแสดงดังรูปที่ 2.3 เริ่มจากหินหนืดที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟเย็นตัวลงและตกผลึกจับตัวกันเป็นก้อนแข็งจะกลายเป็นหินอัคนี (Igneous Rock) และเมื่อหินอัคนีทำปฏิกริยากับสภาพแวดล้อมต่างๆจนเกิดการผุสลายอยู่กับที่ก็จะกลายเป็นดินที่เกิดในที่ตั้ง (Residual Soil) จากนั้นเมื่อถูกกระบวนการพัดพาให้เคลื่อนที่ไปตกยังสถานที่ใหม่จะเรียกดินประเภทนี้ว่าดินกำเนิดโดยการพัดพา (Transported Soil) เมื่อไปตกตะกอนทับถมกัน ณ ที่แห่งใหม่จะเรียกดินประเภทนี้ว่าดินตะกอน (Sedimentary Soil) เกิดการทับถมผ่านไปเป็นเวลานานจนจับตัวกันแน่น (Lithification) จะทำให้ตะกอนเหล่านี้กลายเป็นหินชั้น (Sedimentary Rock) และในขณะที่หินอัคนีและหินชั้นได้รับความร้อนและความดันที่เหมาะสม (Metamorphism) ก็สามารถแปรเปลี่ยนสภาพมาเป็นหินแปร (Metamorphic Rock) ในขณะที่หินชั้นและหินแปรทำปฏิกริยากับสภาพแวดล้อมเกิดการผุสลายและถูกพัดพาไปตกตะกอนก็จะแปรเปลี่ยนกลับไปเป็นดินตะกอนได้เช่นกัน และเมื่อหินทั้ง 3 คือ หินอัคนี หินชั้น และหินตะกอนได้รับความร้อนและความดันจนหลอมละลายก็จะแปรเปลี่ยนกลับไปเป็นหินหนืดใหม่อีกครั้งเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป

2.2.2 การจำแนกชนิดของดินแยกตามวิธีการกำเนิดดิน

ดินเกิดจากการผุสลายของหินต่างๆ โดยกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน แรงดึงดูดของโลก และปฏิกริยาทางเคมี และเมื่อถูกพัดพาโดยตัวกลางไปทับถมยังที่ต่างๆทำให้สามารถกำเนิดเป็นดินชนิดใหม่ ดังนั้นการจำแนกชนิดของดินตามลักษณะหรือรูปแบบการกำเนิดแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่



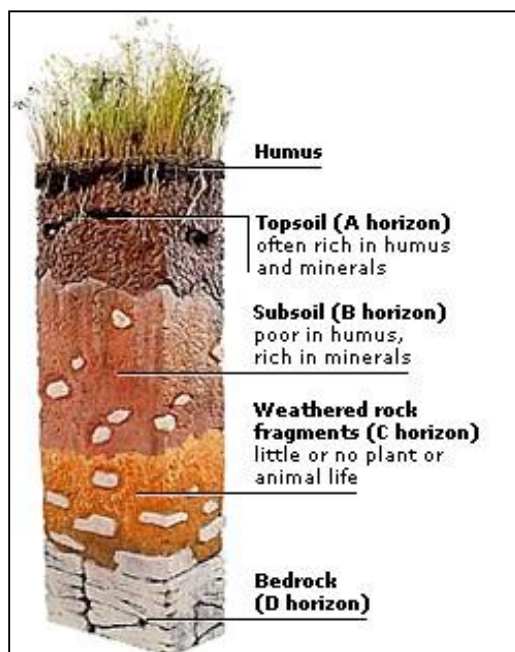
รูปที่ 2.3 วัฏจักรของดิน (<http://www.dmr.go.th>)

1) ดินกำเนิดโดยการผุสลายของหิน ณ ที่ตั้ง (Residual Soil)

ดินซึ่งกำเนิดโดยการผุสลายของหิน ณ ที่ตั้ง เป็นดินที่เกิดจากการผุสลายเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของหินต่อดินฟ้าอากาศ (Weathering) และตกตะกอนทับถมอยู่กับที่ไม่เคลื่อนย้ายไปไหน โดยดินชนิดนี้มีต้นกำเนิดมาจากการแปรสภาพของหินอัคนี หินตะกอนหรือหินแปร มีลักษณะเด่นคือ ดินเม็ดละเอียดจะอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นดินและจะมีขนาดโตขึ้นตามความลึก (ชินะวัฒน์, 2545) และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างมากมายแม้จะกำเนิดในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน ลักษณะการวางตัวในแต่ละชั้นดินแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแต่ละชั้นดินมีลักษณะดังนี้

A-Horizon หรือ Zone of Leaching เป็นดินผิวบนซึ่งมีสภาพผุสลายเป็นดินโดยสมบูรณ์ มีสีเข้มเนื่องจากอินทรีย์วัตถุตกตะกอนทับถมอยู่ ดินชั้นนี้มีการชะล้าง (Leaching) สารละลายเกลือแร่และถูกกัดเซาะได้ง่ายจึงไม่เหมาะสมสำหรับงานด้านวิศวกรรม ชั้นถัดไปเรียกว่า B-Horizon หรือ Zone of Accumulation เป็นชั้นดินหลักของหน้าตัดดินมักจะมีความหนามากกว่าชั้นดินอื่นๆ เป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมกัน โดยมีหินผุพังที่มีขนาดใหญ่ปานกลางที่สามารถบิบให้แตกได้ด้วยมือปะปนอยู่ เนื้อดินมีลักษณะเป็นสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กผสมอยู่ ชั้นถัดลงไปเรียกว่า C-Horizon เป็นชั้นหินซึ่งมีการผุกร่อนเพียงบางส่วนจากชั้นหินแม่

โดยมีการจับตัวกันอยู่อย่างหลวมๆ และชั้นสุดท้ายเรียกว่า D- Horizon เป็นชั้นหินแม่ของวัตถุต้นกำเนิดดินหรือชั้นหินพื้น (Bedrock) ในชั้นนี้มีความแข็งแรงสามารถวางฐานรากของสิ่งก่อสร้างได้ทุกชนิด (วิศิษฐ์, 2549)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของชั้นดินกำเนิดโดยการผุสลายของหิน ณ ที่ตั้ง

(<http://www.factmonster.com/dk/encyclopedia/soil.html>)

2) ดินกำเนิดโดยการพัดพาไปตกตะกอน (Transported Soil)

ดินซึ่งกำเนิดโดยการพัดพาไปตกตะกอน เป็นดินที่เกิดจากการผุสลายเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของหินต่อดินฟ้าอากาศ (Weathering) แล้วถูกพัดพาโดยตัวกลาง ได้แก่ แรงโน้มถ่วง ลม น้ำ เป็นต้น แล้วทำให้ไปตกตะกอนไกลจากแหล่งกำเนิด ดินที่กำเนิดโดยการพัดพาไปตกตะกอน (Transported Soil) อาจจะเรียกว่า ดินตะกอน (Sedimented Soil) (สุรฉัตร, 2540) ซึ่งชนิดของดินประเภทนี้ยังมีชื่อเรียกต่าง ๆ กันตามชนิดของตัวกลางและสถานที่ตกตะกอนทับถมกัน ดังนี้

ก) ดินที่เกิดจากการพัดพาและตกตะกอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Colluvial Soil) ได้แก่ ดินบริเวณเชิงเขาหรือบริเวณที่ลาดชัน อนุภาคเม็ดดินของดินชนิดนี้จะมีขนาดคละกัน โดยมี

ลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมเนื่องจากการขัดสีที่น้อยมากทำให้ยังคงรูปร่างเดิมอยู่ ซึ่งดินประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่ไม่ต่างจากต้นกำเนิดมากนัก

ข) ดินที่ถูกพัดพาไปตกตะกอนด้วยลม (Aeolian Soil) ส่วนใหญ่เกิดกับดินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น ทราย ดินตะกอน ดินเหนียว ตัวอย่างของดินชนิดนี้ได้แก่ เนินทราย (Sand Dune) ซึ่งหมายถึงดินที่ถูกพัดพาไปทับถมกันกองเป็นเนินทรายในบริเวณทะเลทราย เป็นต้น ดินชนิดนี้มักทับถมกันอย่างหลวมๆ มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ง่ายทำให้มีโอกาสเลื่อนไถลของแผ่นดิน (Land Slide) ได้ง่ายเมื่อได้รับความชื้น

ค) ดินที่ถูกพัดพามากับน้ำตามลำน้ำ (Alluvial Soil) เมื่อความเร็วของการไหลของน้ำที่พัดพามาตกลงจะทำให้เกิดการตกตะกอนของดินทับถมกัน เม็ดดินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจะตกตะกอนก่อนบริเวณต้นน้ำและจะค่อยๆลดขนาดลงมาจนถึงบริเวณปลายน้ำ ดินชนิดนี้จะมีการเรียงตัวมีลักษณะเป็นชั้นๆ ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีขนาดของเม็ดดินที่สม่ำเสมอ ตัวอย่างของดินชนิดนี้ได้แก่ ดินทะเลสาบ (Lacustrine Soil) หมายถึงดินที่เกิดจากการพัดพาและตกตะกอนทับถมกันอย่างต่อเนื่องจากแม่น้ำลงสู่ทะเล

ง) ดินที่ถูกพัดพามากับธารน้ำแข็ง (Glacial Soil) ดินประเภทนี้เริ่มจากการผุกร่อนของหินด้วยวิธีทางกายภาพและทางปฏิกิริยาทางเคมีแล้วถูกพัดพามาโดยธารน้ำแข็ง เมื่อธารน้ำแข็งละลายก็จะเกิดการตกตะกอน โดยมีขนาดอนุภาคของเม็ดดินที่มีขนาดคละกันดี ดินชนิดนี้ยังมีความหนาแน่นสูงมีการทรุดตัวน้อยแต่จะบวมตัวเมื่อสัมผัสน้ำ

2.3 ลักษณะการพิบัติของลาดดิน

การจำแนกชนิดของการพิบัติของลาดดินและการพังทลายของลาดเขามีการจำแนกตามลักษณะรูปแบบการพิบัติและปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น ความเร็วและกลไกในการเคลื่อนที่ ชนิดของตะกอน รูปร่างของร่องรอยการพิบัติ และปริมาณของน้ำที่เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการพิบัติของเชิงลาดซึ่งการจำแนกชนิดของการพิบัติของลาดดินที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้อาศัยหลักการจำแนกตามชนิดของวัสดุที่พังทลายลงมา (Type of Material) และตามลักษณะการเคลื่อนที่ (Type of Movement) (Varnes, 1975) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1 การร่วงหล่น (Falls) เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วลงมาตามลาดเขาหรือหน้าผาสูงชันด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 3×10^{-3} เมตร/วินาที อาจ

เกิดการตกอย่างอิสระหรือมีการกลิ้งลงมาตามลาดเขาพร้อมด้วย โดยมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังนั้นตะกอนดินหรือหินที่พังทลายลงมาจะกองสะสมกันอยู่บริเวณเชิงเขาหรือหน้าผา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก)

2.3.2 การกลิ้งไปข้างหน้า (Topples) เป็นการเคลื่อนที่โดยมีการหมุนหรือล้มคว่ำลงมาตามลาดเขา เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (Falls) หรือแบบเลื่อนไถล (Slides) ได้ต่อไป มักพบบริเวณเชิงหน้าผาดินหรือหินที่มีรอยแตก กระบวนการพิบัติมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)

2.3.3 การเลื่อนไถล (Slides) การพิบัติชนิดนี้มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอสามารถจำแนกตามลักษณะของระนาบการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

ก) การเลื่อนไถลแบบหมุน (Rotational Slide) เป็นการเลื่อนไถลของวัตถุลงมาตามระนาบของการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะโค้งครึ่งวงกลมคล้ายช้อน (Spoon-Shaped) ทำให้มีการหมุนตัวของวัตถุขณะเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นไปอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ค) ลักษณะดังกล่าวมักเกิดขึ้นในบริเวณที่ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) เช่น บริเวณที่มีชั้นดินหนามากหรือดินที่นำมาถม

ข) การเลื่อนไถลแบบระนาบ (Translational Slide) เป็นการเลื่อนไถลลงมา มีลักษณะเป็นระนาบตรง โดยทั่วไปเป็นการเคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ตามรอยแตก (Joint) ระนาบทิศทางการวางตัวของชั้นหิน (Bed) และรอยต่อระหว่างชั้นดินและหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ง)

2.3.4 การเคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง (Lateral Spread) โดยทั่วไปจะเกิดบนพื้นราบหรือพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อย ชั้นดินจะประกอบด้วยตะกอนขนาดละเอียดมาก การเกิดโดยทั่วไปจะเกิดกับชั้นตะกอนละเอียดที่อิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมเหมือนของไหล เนื่องจากอาจจะได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว หรือเกิดจากการที่มีชั้นหินหรือชั้นดินแข็งและไม่อุ้มน้ำวางตัวทับอยู่บนชั้นดินที่อุ้มน้ำ เมื่อชั้นดินที่อุ้มน้ำถูกทับด้วยน้ำหนักที่มากก็จะไหลออกด้านข้างทำให้ชั้นดินและชั้นหินที่อยู่ด้านบนแตกออกและยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (จ)

2.3.5 การเคลื่อนที่ของมวลดิน (Soil Creep) เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินอย่างช้าๆ เนื่องจากกระบวนการสูญเสียแรงต้านทานการไหลของชั้นดิน ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันให้ชั้นดินมีการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆแต่ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการพังทลายของมวลดิน ซึ่งหลักฐานที่ใช้ในการสังเกตคือ แนวร้วหรือกำแพงและหรือต้นไม้ที่ขึ้นในบริเวณนั้นมีการเอียงตัวหรือบิดเบี้ยวไปจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ฉ)

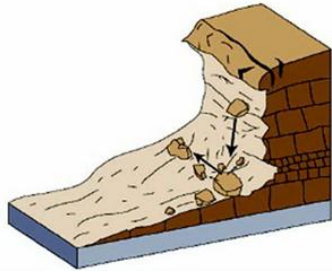
2.3.6 การไหล (Flows) เป็นการพัดติของลาดดินที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องมากที่สุด โดยน้ำจะทำให้ตะกอนมีลักษณะเป็นของไหลและเคลื่อนที่ไปบนพื้นระนาบของลาดดินลงไปกองทับถมกันที่ด้านล่างของลาดดินหรือเชิงเขา ตะกอนอาจเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางไกลและความเร็วในการเคลื่อนที่อาจสูงมากถ้าลาดดินมีความชันสูง ทั้งนี้ยังสามารถแบ่งตามชนิดของตะกอนได้เป็น 4 ชนิด คือ

ก) Debris Flow ตะกอนที่ไหลลงมาจากมีอนุภาคหลายขนาดปะปนกันมักเกิดขึ้นตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็กๆบนลาดเขาซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ โดยทั่วไปจะเป็นน้ำฝนที่ตกอย่างหนักเป็นตัวกลางพัดพาเอาตะกอนดินและหินรวมถึงซากต้นไม้ต้นหญ้าไหลมารวมกันก่อนที่จะไหลลงมากองทับถมกันบริเวณที่ราบเชิงเขาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัดหน้าหุบเขา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ช)

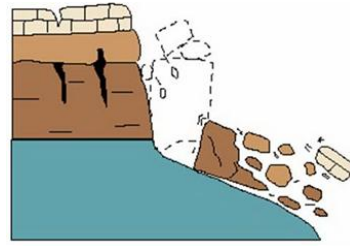
ข) Avalanche Flow เป็นการเคลื่อนที่ลงมาจากลาดเขา มวลดินจะประกอบด้วยตะกอนหลากหลายขนาดปนกันและจะมีขนาดของร่องรอยการพัดติที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ซ)

ค) Earth Flow เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินที่ประกอบด้วยตะกอนขนาดละเอียดจำพวกดินเหนียว ดินทรายแป้งตามพื้นที่ที่มีความลาดชันไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ญ)

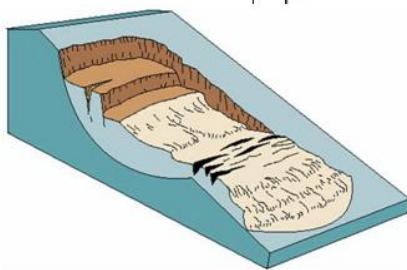
ง) Mud Flow มีกระบวนการเกิดเช่นเดียวกับ Debris Flow แตกต่างกันที่ขนาดของตะกอนแบบ Mud Flow จะมีขนาดเล็กกว่าตะกอนของ Debris Flow คือประกอบไปด้วยตะกอนดินและมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ



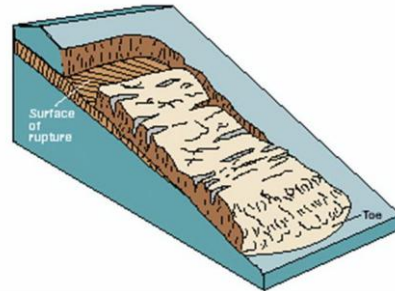
(ก) การร่วงหล่น (Falls)



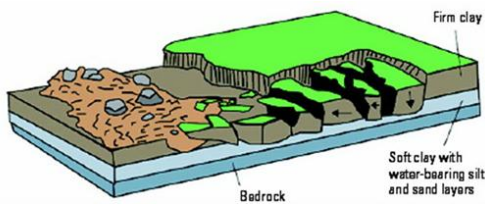
(ข) การกลิ้งไปข้างหน้า (Topples)



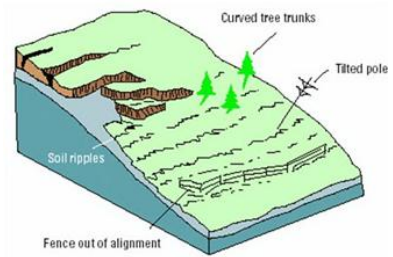
(ค) Rotational slide



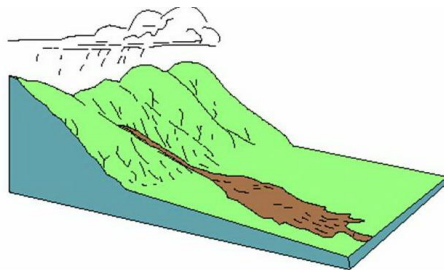
(ง) Translational slide



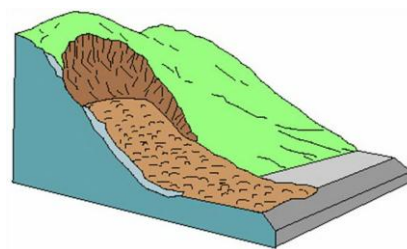
(จ) การแผ่อกทางด้านข้าง (Lateral spread)



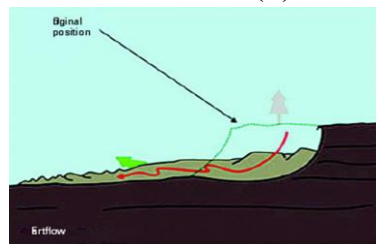
(ฉ) การเคลื่อนที่ของมวลดิน (Soil creep)



(ช) การไหลแบบ Debris flow



(ซ) การไหลแบบ Avalanche flow



(ญ) การไหลแบบ Earth flow

รูปที่ 2.5 ลักษณะการวิบัติของลาดดินและหินแบบต่างๆ (Highland and Bobrowsky, 2008)

2.4 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน (Shear Strength Theory)

มวลดินเมื่อมีแรงมากระทำ เช่น น้ำหนักจากดินชั้นบนที่กดทับ หรือมีแรงภายนอกมากระทำ มวลดินจะออกแรงต้านเพื่อรักษาสสมดุลของแรงในมวลดินเอาไว้ และเมื่อแรงที่มากระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจนมวลดินไม่สามารถต้านทานแรงที่มากระทำได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงที่มากระทำมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนในดินมวลดิน (Shear Stress, τ) มวลดินก็จะเกิดการเคลื่อนตัวหรือเกิดการพังทลาย (Failure) ซึ่งการพังทลายจะมีลักษณะเกิดขึ้นเป็นระนาบของมวลดินแยกจากกัน ระนาบที่เกิดการพังทลายนี้คือระนาบที่มวลดินสามารถต้านทานแรงเฉือนได้ต่ำที่สุด

Coulomb (1776) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใดๆของมวลดินในรูปของสมการเชิงเส้นตรงแสดงขอบเขตการพังทลายของมวลดิน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

เมื่อ	τ	=	หน่วยแรงเฉือนที่จุดพังทลายหรือ ค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)
	σ	=	หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)
	c	=	การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)
	ϕ	=	มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal Friction Angle)

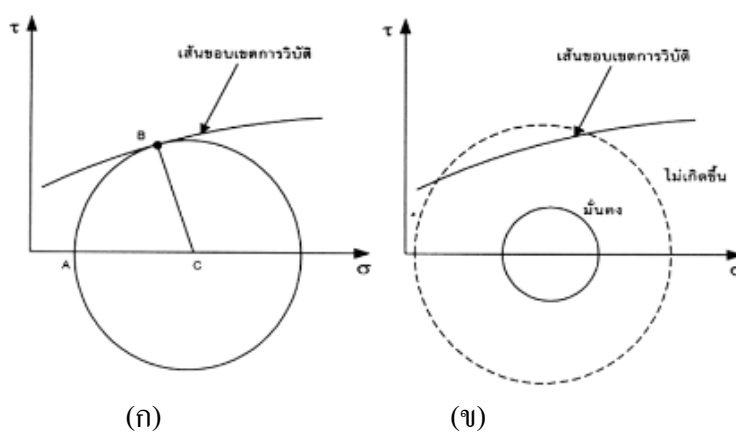
และสามารถเขียนในนิพจน์ของหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดังสมการที่ 2.2

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

เมื่อ	σ'	=	หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน = $\sigma - u$
	u	=	แรงดันน้ำ (Pore water Pressure)
	c'	=	การยึดเกาะกันประสิทธิผลของเม็ดดิน (Effective Cohesion)
	ϕ'	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน

ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shearing Resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal Friction) และการยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยค่าความต้านทานแรงเฉือนของมวลดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณร้อยละของเม็ดดินหยาบ เม็ดดินละเอียดและปริมาณความชื้นที่อยู่ในมวลดิน สำหรับดินเม็ดหยาบที่ไม่มีการยึดเกาะกัน (Cohesion Less Soil) เช่น กรวด ทราย จะมีอัตราส่วนของน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวมากกว่าเม็ดดินละเอียดทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน สำหรับดินเม็ดละเอียดที่มีการยึดเกาะกัน (Cohesion Soil) เช่น ดินเหนียว จะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวมากกว่าดินทรายค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินจึงขึ้นอยู่กับ การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าตามผิวเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน

การพิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับกฎการพิบัติที่เสนอโดยมอร์และคู ลอมบ์ (Mohr and Coulomb) ซึ่งกำหนดไว้ว่า มวลดินจะเริ่มเกิดการพิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่แทน สภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการพิบัติ (Failure Envelop) พอดีดังรูปที่ 2.6 (ก) แต่หากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการพิบัติมวลดินก็ยังสามารถรับแรง ได้ไม่พิบัติดังรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 เงื่อนไขการพิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคู ลอมบ์ (วิศิษฐ์, 2540)

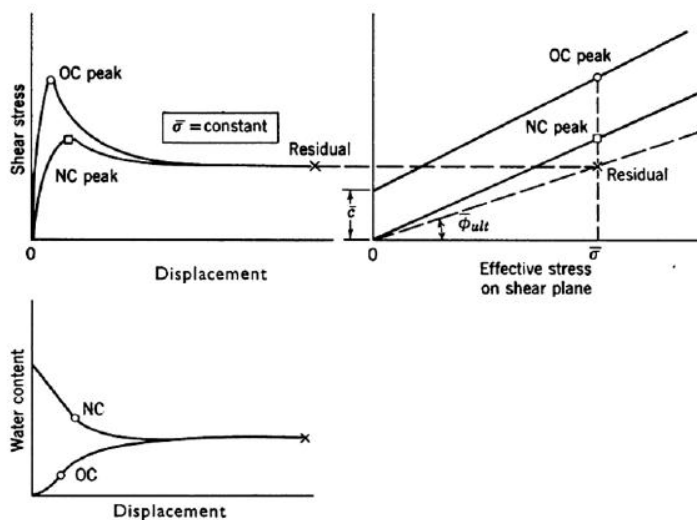
การเลือกใช้ค่ากำลังของดินเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะต้องพิจารณาถึงลักษณะของหน่วยแรงซึ่งมีทั้งหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผล หน่วยแรงที่นำมาวิเคราะห์จึงควรมีลักษณะที่สอดคล้องกับสภาวะของลาดดิน

วรากร (2542) อธิบายว่าการเลือกใช้ค่ากำลังเฉือนของดินในการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์แบ่งลักษณะการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวม และวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล โดยถ้าสามารถวัดค่าความดันน้ำเพื่อที่จะสามารถแยกหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากความดันน้ำออกไปได้ เนื่องจากแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังทำให้คงเหลือแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินเท่านั้นเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress, σ') แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าความดันน้ำให้ถูกต้อง ดังนั้นในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำที่ชัดเจนมักผนวกความดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total Stress, σ) สำหรับค่ากำลังของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

1. S_u หรือ Undrained Shear Strength สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวและมีการก่อสร้างโดยเร็วหรือพิบัติแบบทันทีทันใด ($\phi = 0$ Condition)
2. c_u, ϕ_u หรือ Total Strength สำหรับดินชั้นไม่อิ่มตัวและไม่ทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ดินบดอัดในขณะที่ก่อสร้างเขื่อนหรือคันดิน
3. c', ϕ' หรือ Effective Strength สำหรับดินอิ่มตัวและสามารถทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ก่อสร้างเสร็จงานแล้วกำลังใช้งานและมีความดันน้ำเข้าสู่สภาพสมดุลหรือมีน้ำไหลผ่านคงที่

2.5 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง

ในการทดสอบหาค่ากำลังรับเฉือนของดินซึ่งในขณะที่ดินกำลังถูกทำการทดสอบภายในมวลดินจะมีแรงต้านทานการเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งการทดสอบโดยทั่วไปมักจะหยุดดำเนินการต่อเมื่อผลการทดสอบแสดงค่ากำลังสูงสุด (Peak Strength) อย่างชัดเจน แต่หากทำการทดสอบต่อเนื่องไปจนเลยจุดซึ่งเป็นค่ากำลังสูงสุด จะพบว่าค่าแรงต้านทานการเฉือนในมวลดินจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ซึ่งเป็นแรงต้านทานการเฉือนที่น้อยที่สุดซึ่งเรียกว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) ในมวลดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง (Lambe and Whitman, 1979)

Timothy, et al. (2005) ได้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินว่าในกรณีลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติ (Old Land Slide) แนวเงื่อนไขพิบัติมักจะเกิดขึ้นในแนวผิวการเฉือนที่มีอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งควรที่จะใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์ (Residual Strength Condition)

Price (2006) อธิบายถึงความสำคัญของค่ากำลังคงค้าง (Residual Strength) ว่าการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสถานะกำลังคงค้าง (Residual Strength Condition) ในทางปฏิบัติมีความสำคัญมากเนื่องจากถ้าดิน ณ ที่เดิม (In Situ) มีแนวเฉือนหรือผิวการเฉือนอยู่แล้วค่ากำลังของดินบริเวณผิวการเฉือนจะน้อยกว่าค่ากำลังสูงสุดและถ้ามีการเลื่อนตัวมากพอ ค่ากำลังของดินจะลดน้อยลงจนเท่ากับค่ากำลังคงค้างได้

2.6 การลดลงของกำลังเฉือนกับเสถียรภาพของลาดดิน

ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดินทำให้กำลังเฉือนของดินลดลงส่งผลโดยตรงกับเสถียรภาพของลาดดิน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การก่อสร้างที่มีการตัดลาดดินในช่วงฤดูแล้งซึ่งดินมีความชื้นน้อยกำลังเฉือนของดินสูงลาดดินยังมีเสถียรภาพมั่นคงอยู่ได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปเข้าสู่ฤดูฝนในขณะที่ฝนตกทำให้ความชื้นในลาดดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาที่มีปริมาณน้ำฝนมากจนกำลังเฉือนของดินไม่อาจต้านทานแรงที่กระทำได้ก็จะก่อให้เกิดการพิบัติของลาดดิน

Soralump and Kulsuwan (2006) ได้ทดสอบกำลังเฉือนของดินด้วยวิธีเฉือนตรงที่สภาวะความชื้นธรรมชาติและสภาวะชุ่มน้ำโดยการทดสอบมีชื่อว่า ดัชนีการลดกำลัง (Strength Reduction) โดยผลการทดสอบพบว่าดินลูจากจากหินแกรนิตคูมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินลูจากหินโคลนและหินดินดานมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 และดินลูจากหินทรายมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่มากกว่าร้อยละ 50

เสถียรภาพลาดดินเป็นการพิจารณาสัดส่วนของแรงต้านทาน (Resisting Force) กับแรงขับ (Driving Force) ที่กระทำกับมวลดิน ค่าเสถียรภาพจะลดลงเมื่อแรงขับมากขึ้นหรือแรงต้านลดลง เมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้านก็จะทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน การลดลงของกำลังเฉือนในดิน (Shear Strength Reduction) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน โดยกำลังเฉือนของดินที่ลดลงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.6.1 กำลังเฉือนที่ลดลงชั่วคราว

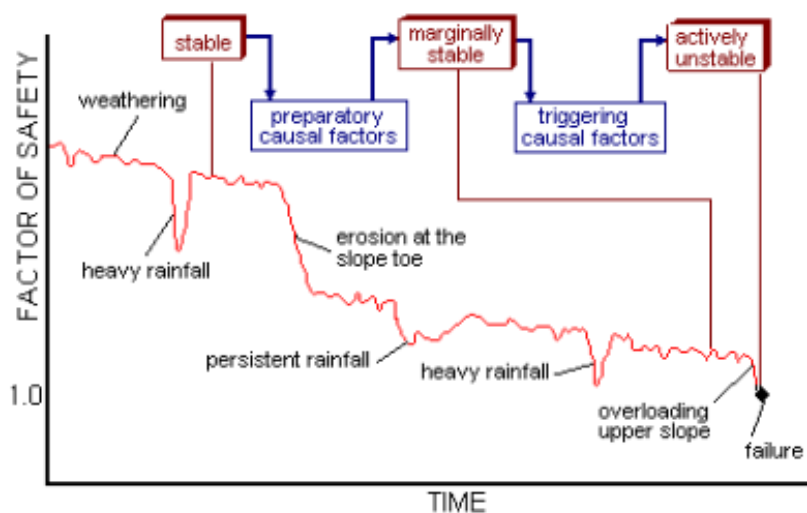
สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นเดิมซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสภาวะที่ฝนตกและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลงเพราะน้ำได้เข้าไปทำลายแรงดึงผิวของอากาศในดินและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้หน่วยแรงตั้งฉากในดินลดลงเนื่องมาจากแรงลอยตัว (Uplift Pressure) ทำให้กำลังเฉือนจากแรงเสียดทานในดินลดลง โดยกำลังเฉือนที่ลดลงจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความชื้นในดินลดน้อยลงหรือระดับน้ำลดลงตามลำดับ

2.6.2 กำลังเฉือนที่ลดลงถาวร

เมื่อดินถูกแรงเฉือนกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกินกำลังต้านทานสูงสุด (Peak Strength) มวลดินจะเกิดการเลื่อนตัวของดินในแนวพิบัติ ค่ากำลังเฉือนของดินจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เกิดการเลื่อนตัวจนกระทั่งเหลือแรงต้านทานที่น้อยที่สุดและคงที่ที่ค่ากำลังคงค้างของดิน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างเดิมของดินถูกทำลายเนื่องจากการเลื่อนตัวของดินในแนวพิบัติ เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือนทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง

Price (2006) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Short Term) มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นใน

ดินและระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงที่ฝนตกหนัก (Heavy Rainfall) จะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงมาก แต่เมื่อปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้วอัตราส่วนความปลอดภัยก็กลับมาเพิ่มขึ้นได้อีก ในขณะที่เดียวกันการไหลของน้ำบริเวณพื้นผิวดินยังสามารถกัดเซาะหรือชะล้างหน้าดินทำให้เป็นการลดอัตราส่วนความปลอดภัยอย่างช้าๆ แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากการกัดเซาะที่ฐานล่างของลาดดิน (Slope Toe) จะทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงและไม่อาจกลับเพิ่มขึ้นได้อีกหากไม่มีการซ่อมแซมลาดดิน บริเวณดังแสดงในรูปที่ 2.6



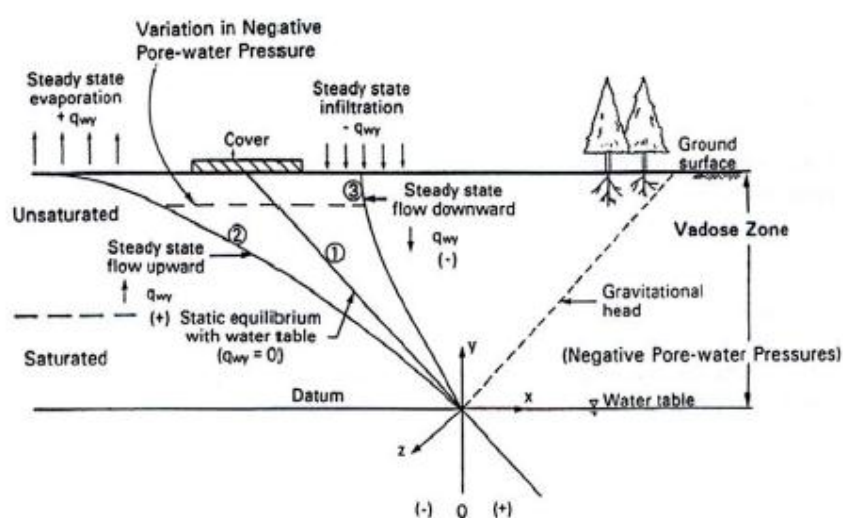
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของสภาวะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินกับการพิบัติของลาดดิน (Price, 2006)

2.7 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

โดยทั่วไปสภาพพื้นดินตามธรรมชาติจะประกอบไปด้วยชั้นดินต่างๆที่วางตัวซ้อนทับกันลึกลงไปจากผิวดิน (Ground Surface) และจะมีระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) วางตัวอยู่ ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินที่อยู่ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินเต็มไปด้วยน้ำหรือเพิ่มขึ้นตามความลึกของระดับน้ำเรียกว่า มวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) ซึ่งจะส่งผลให้ดินในส่วนนี้จะมีแรงดันน้ำที่เป็นบวก ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือจากชั้นระดับน้ำใต้ดิน (Vadose Zone) จะประกอบไปด้วยดินอิ่มตัว (Capillary Saturated Zone) และดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หากไม่มีน้ำซึมลงมาหรือระเหยขึ้นไปจากผิวดินและระดับน้ำใต้ดินคงที่แล้วเส้นแรงดันน้ำ

จะสมดุลที่เส้น (1) ในขณะที่เส้น (2) และ (3) หมายถึงมีการระเหยในฤดูแล้งและการมีน้ำซึมลงมาในฤดูฝนตามลำดับ โดยที่ทั้ง 3 กรณีจะมีแรงดันน้ำที่เป็นลบทั้งสิ้น

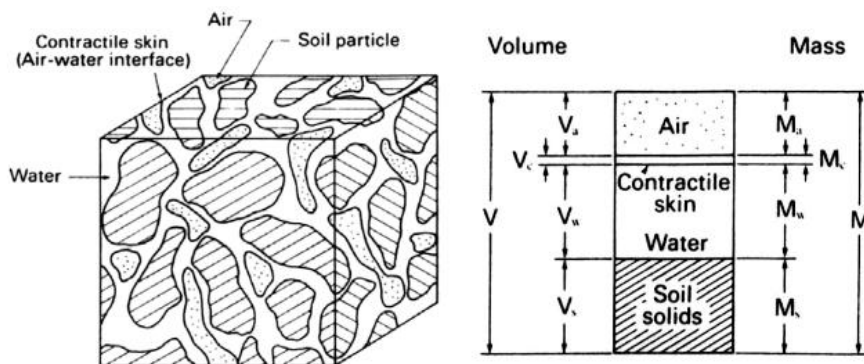
มานะ (2541) อธิบายว่าดินสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีอากาศสอดแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน ลักษณะน้ำในมวลดินจะไม่ต่อเนื่องกัน โดยจะมีแรงดึงผิวที่เกิดจากผลต่างของแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดินอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดดิน



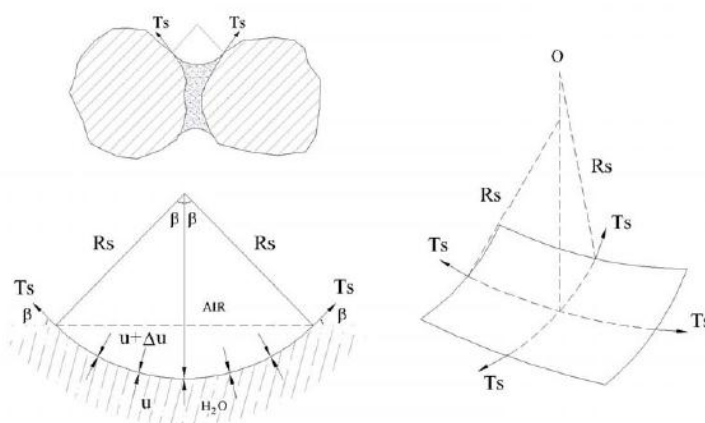
รูปที่ 2.9 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)

Fredlund และ Morganstern (1977) เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์หน่วยแรงในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำว่า ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ เม็ดดิน น้ำ อากาศ และ Contractile Skin ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อระหว่าง อากาศกับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

Fredlund (1993) กล่าวว่า ความแตกต่างระหว่าง Saturated Soil กับ Unsaturated Soil มี 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนประกอบของดินกับแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดิน โดยที่ผิวของ Contractile Skin จะมีผลต่างของแรงดันอากาศและแรงดันน้ำในมวลดิน ($u_a - u_w$) หรือ Matric Suction ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยผลต่างของแรงดันอากาศกับแรงดันน้ำในมวลดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลดินและจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.10 ภาพจำลองส่วนประกอบของดิน Unsaturated Soil (Fredlund and Morganstern, 1977)



รูปที่ 2.11 แสดงแรงดันและแรงดึงที่ผิวเม็ดดิน Contractile (Fredlund and Rahardjo, 1993)

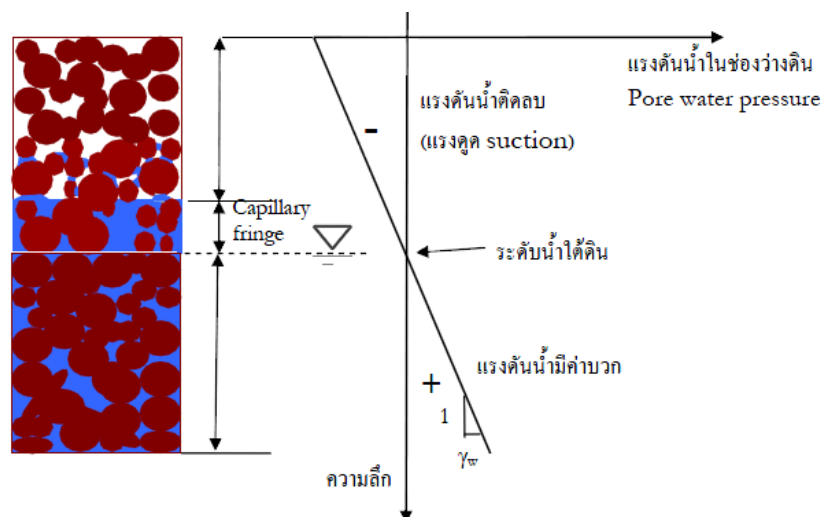
Matric suction มีหน่วยเดียวกับแรงดัน (เช่น กิโลปาสกาล หรือ บาร์) แต่ต่างจากแรงดันเนื่องจากมีค่าเป็นลบ ค่าแรงดูดเมทริกนี้แปรผกผันกับปริมาณความชื้นในดิน เช่น ในกรณีที่น้ำอยู่ในสถานะสถิตย์ (Hydrostatic) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) จะอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่าง แรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่าแรงดูดเมทริก (Matric Suction, s) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3

$$s = (u_a - u_w) \tag{2.3}$$

- เมื่อ u_a = แรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore-Air Pressure)
- u_w = แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure)

s = แรงดูดเมทริก (Matric Suction)

ในสถานะที่ค่า u_a ของดินมีค่าเท่ากับศูนย์และค่าแรงดูดเมทริกที่วัดได้ก็คือค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของแรงดันน้ำในสถานะสถิต (อภินิติ, 2549)

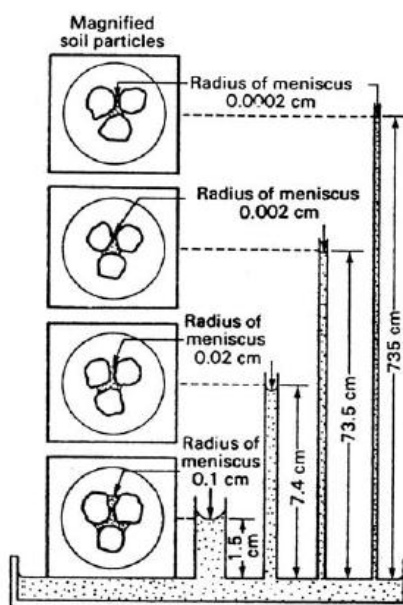
หลังจากฝนตกและน้ำส่วนหนึ่งระบายออกไปจากมวลดินแล้วมวลดินนั้นจะยังคงเป็นมวลดินที่มีความชื้นอยู่ต่อไปอีกระยะหนึ่ง การที่น้ำบางส่วนยังสามารถอยู่ในช่องว่างของมวลดินโดยไม่ระบายออกไปจนหมดแสดงว่ามวลดินมีแรงดูดยึดต่อน้ำจำนวนนั้น แรงดูดยึดนี้อาจแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. แรงดูดเมทริก (Matric Suction) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของเม็ดดินหรือแรงดึงที่ยึดน้ำไว้กับเม็ดดินซึ่งเกิดจาก 2 ส่วนด้วยกันคือ

1.1 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับโมเลกุลของน้ำบนผิวอนุภาคเม็ดดิน โดยเฉพาะผิวอนุภาคที่มีประจุเกิดจากสมบัติมีขั้วของโมเลกุลของน้ำ การดูดซับนี้มักเกิดขึ้นในขณะที่ดินมีระดับความชื้นค่อนข้างต่ำและอาจเกิดขึ้นได้ในอีกกรณีคือ เมื่ออนุภาคดินมีไอออนบวกถูกดูดซับอยู่และไอออนเหล่านั้นดูดซับโมเลกุลของน้ำเอาไว้ล้อมรอบตัวมันเอง (Water of Hydration)

1.2 แคพิลลาริตี (Capillarity) เป็นแรงดึงน้ำซึ่งเกิดเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำที่เป็นผลรวมระหว่างความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของน้ำและการประสาน (Adhesion) ระหว่างน้ำกับผิว

ของอนุภาคดินตรงผิวของน้ำ (Air-Water Interface) ปฏิกิริยาการนี้สังเกตได้จากเมื่อจุ่มหลอดเล็กๆ ที่ผนังด้านในเปียกน้ำลงไปใต้น้ำผิวเรียบจะพบว่ามีส่วนถูกดึงดูดขึ้นไปขังอยู่ในหลอด จะสังเกตเห็นว่าผิวของน้ำในหลอดจะเว้าลงไปใต้น้ำและความโค้งของผิวน้ำกับความสูงของน้ำที่ขังอยู่ในหลอดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดหรือรัศมีของหลอดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จากปรากฏการณ์นี้ทำให้ทราบว่าความสูงของน้ำในหลอดกับความโค้งของผิวน้ำในหลอดแคพิลลารีที่มีความสัมพันธ์กับรัศมีของหลอดซึ่งสามารถใช้ได้กับดินโดยที่ดินมีรูพรุนเป็นช่องแตรกตัวอยู่ทั่วไปทั้งในเม็ดดินและระหว่างเม็ดดิน ถึงแม้ช่องในดินจะมีรูปร่างและความต่อเนื่องที่แตกต่างจากหลอดแคพิลลารีที่มากแต่สามารถนำปรากฏการณ์แคพิลลารี (Capillarity Phenomenon) มาใช้กับดินได้



รูปที่ 2.13 ขนาดรัศมีของส่วน โค้งผิวน้ำที่มีผลต่อ Capillary Force (Janssen and Dempsey, 1980)

2. การดูดผ่านช่องเล็กๆ (Osmotic Suction) คือน้ำในดินมีสารละลายอยู่หลายชนิดละลายหรือแขวนลอยอยู่ ไอออนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนบวกจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวนอกของดินเหนียวที่มีประจุเป็นลบและทำให้ความเข้มข้นของไอออนในชั้นของไอออนบวกที่ถูกดูดซับสูงกว่าในสารละลายรวม (Bulk Solution) ถ้าความชื้นของดินค่อนข้างต่ำอนุภาคดินเหนียวมีโอกาสทับซ้อน (Overlap) ซึ่งกันและกันและทำให้สารละลายในระหว่างชั้นทั้งสองนั้นเข้มข้นยิ่งขึ้น สารละลายที่เข้มข้นจะมีการดูดแบบออสโมติกสูงถ้านำมาสัมผัสกับน้ำบริสุทธิ์ผ่านเมมเบรนกึ่งซึมได้ (Semipermeable Membrane) น้ำจะเคลื่อนตัวผ่านเมมเบรน (Membrane) ไปหาสารละลายนั้นๆ ปรากฏการณ์นี้ก็สามารถใช้ได้ด้วยดิน คือ ถ้าสารละลายในบริเวณการดูดซับ (Adsorption Zone)

ของอนุภาคดินเหนียวเข้มข้นมากดินนั้นจะมีแรงดึงดูดน้ำที่เพิ่มขึ้นและน้ำที่ถูกดึงดูดเข้าไปในระหว่างดินเหนียว 2 แผ่นที่เรียงซ้อนกันจะดันให้ดินเหนียวพองตัวทำให้แรงยึดเกาะภายในมวลดินมีค่าลดต่ำลง

ปรากฏการณ์หลักๆที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดูดเมทริกนี้มีอยู่ 2 ปรากฏการณ์ด้วยกัน คือ การดูดซับ และแรงดึงผิวคาปิลลารี อย่างไรก็ตามศักยภาพหรือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินซึ่งเรียกว่า แรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักยภาพในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองได้มากไปด้วย โดยทั่วไปแล้วจะสามารถพิจารณาแรงดูดทั้งสองชนิดรวมกันเรียกว่า แรงดูดรวม (Total Suction) ดังสมการที่ 2.4

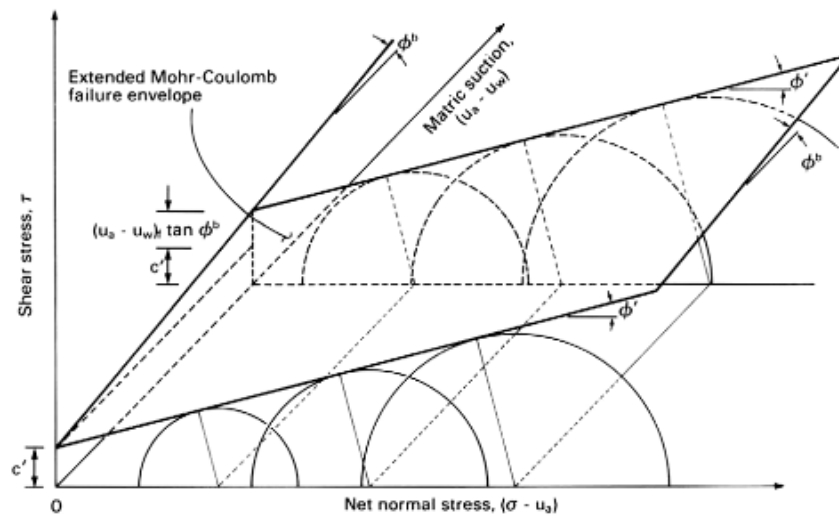
$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.4)$$

เมื่อ	$(u_a - u_w)$	=	Matric Suction
	u_a	=	แรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore-Air Pressure)
	u_w	=	แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure)
	π	=	Osmotic Suction

Fredlund (1993) พบว่าในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีส่วนที่ประกอบด้วยแรงดันของน้ำและอากาศ ดังในสมการที่ 2.5 โดยมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง ดังรูปที่ 2.14 โดยที่ ϕ^b เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction กับ Cohesion (c') คือ ถ้ายังมีค่า Matric Suction มากขึ้นค่า ϕ^b ก็จะมากขึ้นด้วย และในกรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว $\phi' = \phi^b$ ซึ่งก็จะได้สมการในรูปของสมการหน่วยแรงประสิทธิผลดังสมการที่ 2.6

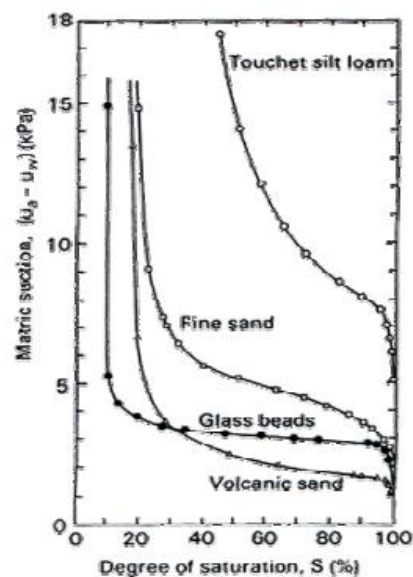
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.5)$$

$$\tau = c' + \sigma_n' \tan \phi' \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil (Fredlund,1993)

ปริมาณน้ำ ความชื้น และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) ที่เพิ่มขึ้นได้ส่งผลต่อผลต่างระหว่างแรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore-Air Pressure) และแรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำกับ Matric Suction โดยความสัมพันธ์นี้ส่งผลให้เห็นว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน

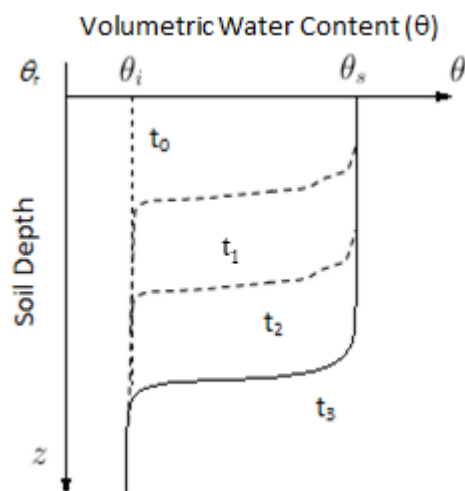


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำกับ Matric Suction (Fredlund,1993)

2.8 กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดิน (Infiltration Process)

กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดินเริ่มต้นขึ้นเมื่อมีน้ำหรือน้ำฝนตกลงสู่ผิวดินน้ำจะซึมผ่านผิวดินและแทรกซึมลงสู่ดินชั้นล่างด้วยอิทธิพลของแรงดึงดูดความชื้นในมวลดินจนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำจากนั้นแรงดึงดูดของโลกจะทำให้น้ำไหลซึมลึกกลงไปในดิน

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Green and Ampt ซึ่งเสนอไว้ในปี 1911 มาพิจารณาการไหลซึม (Infiltration) โดยกำหนดให้ดินมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (Homogeneous) ทั้งนี้เมื่อฝนตกให้ดินมีอัตราการไหลซึม (Hydraulic Conductivity, K) เท่ากับความเข้มข้นน้ำฝนแต่ไม่มากกว่าอัตราการไหลซึมขณะที่ดินอิ่มตัว (Saturated Hydraulic Conductivity, K_s) และปริมาณความน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยในช่วงเริ่มต้นที่เวลา t_0 ปริมาณความน้ำในดินจะเท่ากับ θ_i ตลอดความลึกและมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ θ_r และเมื่อฝนตกในอัตราคงที่น้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้นทันที เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในมวลดินก็จะคงที่และขยายขอบเขตสู่ชั้นดินด้านล่าง



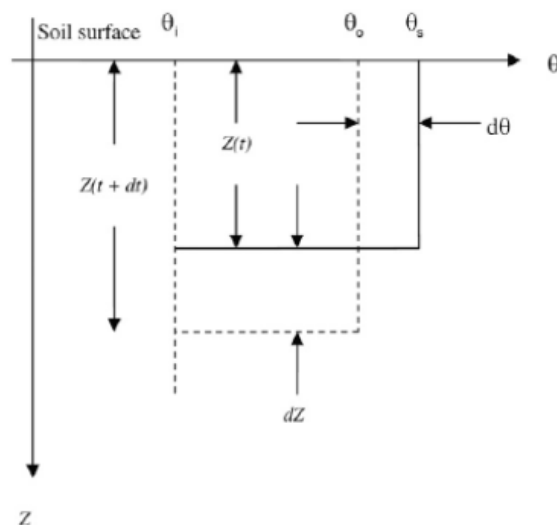
รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน (ศุนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)

สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและการไหลเป็นแบบไม่คงที่ (Unsteady Flow) ซึ่งปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาจะซึมลงสู่ชั้นดินด้านล่างโดยมีอิทธิพลของแรงดึงน้ำในดิน (Matric Suction) เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะทำให้ความลึกของของดินด้านเปียก (Wetting Front) เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ฝนตก การคำนวณความลึกของดินด้านเปียกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$L_f = \frac{Kt}{\Delta\theta} + (H_0 - H_f) \ln \left[1 + \frac{L_f}{(H_0 - H_f)} \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ	$\Delta\theta$	=	ปริมาณน้ำในดินที่เพิ่มขึ้น ($\theta_i - \theta$)
	K	=	ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (L/T)
	H_0	=	แรงดึงน้ำในดินที่อยู่ด้านล่างของดินด้านเปียก
	H_f	=	แรงดึงน้ำในดินที่ผิวดิน
	L_f	=	ความลึกของดินด้านเปียก (Wetting Front)

สำหรับในกรณีที่ฝนตกไม่คงที่หรือไม่ต่อเนื่อง Ogden and Saghafian (1997) ได้นำเสนอการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเนื่องจากฝนตกไม่คงที่ด้วยการพัฒนาแบบจำลอง Green-Ampt โดยมีหลักการสมดุลความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



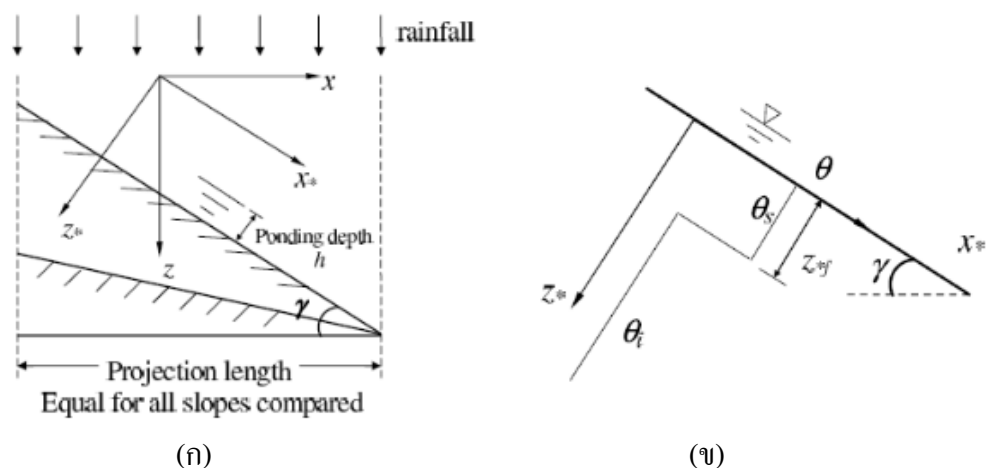
รูปที่ 2.17 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินในกรณีฝนตกไม่คงที่
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)

จากความเข้มของน้ำฝน (r) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในช่วงเวลา dt ทำให้ปริมาณน้ำส่วนที่อยู่ในความลึกของดินด้านเปียกเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งในขณะเดียวกันความลึกของดินด้านเปียกก็ยังคงเพิ่มขึ้น โดยความลึกของดินด้านเปียกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\frac{dZ}{dt}(\theta_0 - \theta_i) + Z \frac{d\theta}{dt} = r - K(\theta_i) \quad (2.8)$$

เมื่อ	$\frac{dz}{dt}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกของดินด้านเปียกต่อเวลา
	$\theta_0 - \theta_i$	=	ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป
	Z	=	ความลึกของดินด้านเปียก (Wetting Front)
	$\frac{d\theta}{dt}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลา
	r	=	ความเข้มข้นน้ำฝน (L/T)
	$K(\theta_i)$	=	ความสามารถในการซึมน้ำของดินที่ความชื้น θ_i

Li and Young (2006) ได้นำแบบจำลองของ Green and Ampt มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) ซึ่งการวิเคราะห์ดำเนินการเช่นเดียวกันกับในแนวราบ โดยหมุนแกนจากพิกัด X-Z ซึ่งเป็นแนวราบและแนวตั้งตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงไปเป็น X*-Z* ซึ่งเป็นแกนขนานกับลาดเอียงที่มีมุมความลาดชันเท่ากับ γ และใช้แบบจำลองของ Green and Ampt ในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งการวิเคราะห์หาความลึกของดินด้านเปียกบนพื้นที่ลาดเอียงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง ด้วยแบบจำลอง Green and Ampt (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)

$$Z_{*f} = \frac{K_e \cos \gamma}{\Delta \theta} + \frac{(S_f + H)}{\cos \gamma} \ln \left[\frac{Z_{*f} + \cos \gamma + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ	Z_{*f}	=	ความลึกของดินด้านเปียก (Wetting Front) ในแนวแกน Z^*
	γ	=	มุมของลาดเอียง
	S_f	=	$H_0 - H_f$
	H	=	ความลึกของน้ำกรณีที่มีน้ำท่วมผิวดิน

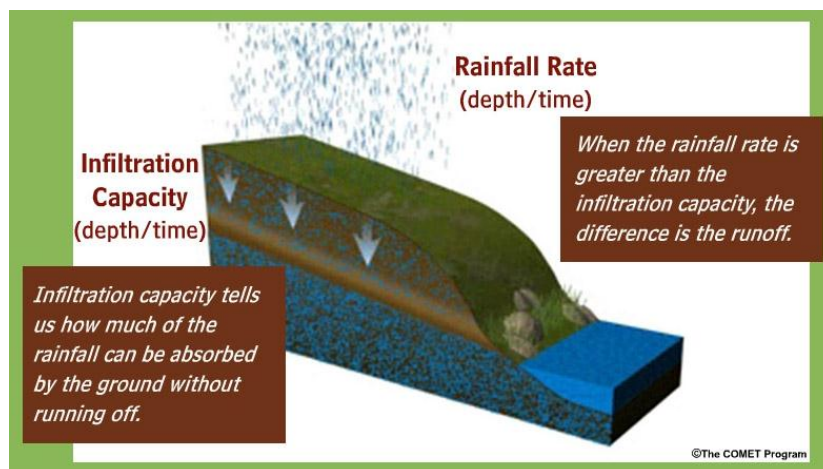
2.8.1 สิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดิน

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมน้ำสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากสภาพทางธรรมชาติที่มีความหลากหลาย เช่น ชนิดของดินที่วางตัวซ้อนทับกัน ฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง และสภาพของพื้นผิวดิน เป็นต้น จากความหลากหลายของปัจจัยที่มีผลต่อการซึมของน้ำลงดินสามารถสรุปได้ดังนี้ (<http://pirun.ku.ac.th/chotiga/Infiltration.html>, 2553)

1) สภาพน้ำที่ผิวดินและปริมาณน้ำที่ตกลงบนผิวดิน

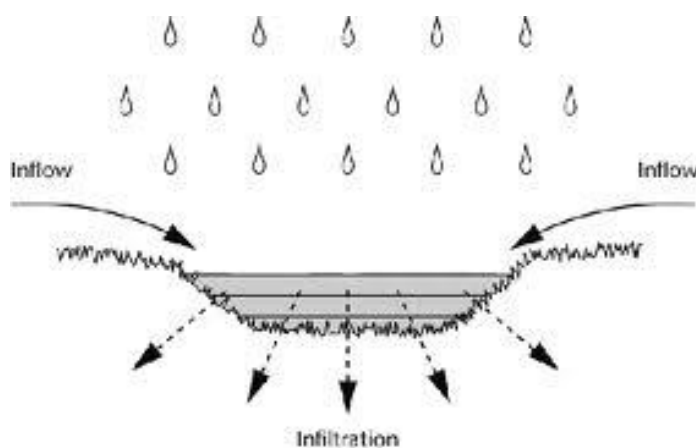
อัตราการซึมน้ำลงดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างโดยสภาพน้ำที่ผิวดินและปริมาณน้ำที่ตกลงบนผิวดินจะเป็นตัวหนึ่งที่กำหนดว่าน้ำจะซึมลงดินอย่างไรซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

ก) สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว (No Ponding) ในสภาพที่ไม่มีน้ำขังอยู่บนผิวดินในช่วงที่ฝนเริ่มตกหรือช่วงเริ่มให้น้ำ อัตราการซึมลงดินจะเท่ากับอัตราการให้น้ำที่ผิวดินแต่จะมีปริมาณไม่เกินอัตราการซึมลงดินสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.19 หากอัตราที่น้ำตกลงบนผิวดินมากกว่าอัตราการซึมลงดินสูงสุดแล้วน้ำก็จะเริ่มขังที่ผิวดิน



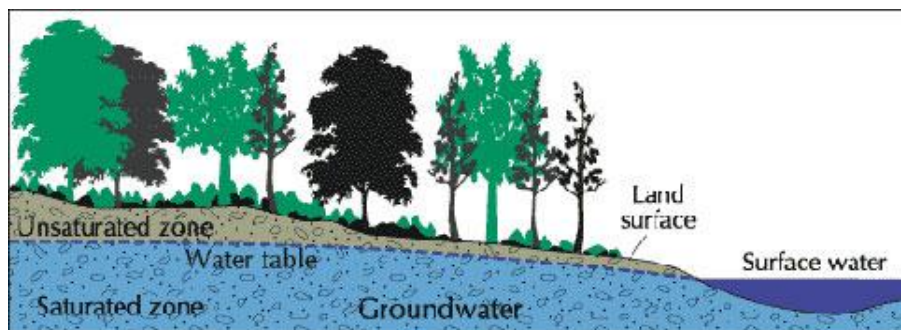
รูปที่ 2.19 สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว (https://www.meted.ucar.edu/loginForm.php, 2003)

ข) สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน (Saturation From Above) ในสภาพที่มีน้ำขังอยู่บนผิวดิน อัตราการซึมน้ำลงดินจะเท่ากับการซึมน้ำลงดินสูงสุดแต่จะมีปริมาณไม่เกินอัตราการตกของน้ำที่ผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 หากอัตราที่น้ำตกลงผิวดินน้อยกว่าอัตราการซึมลงดินสูงสุดแล้วน้ำก็จะซึมลงดินจนกระทั่งไม่มีน้ำขังบนผิวดิน การซึมน้ำลงดินจะเปลี่ยนกลับเป็นสภาพแรก



รูปที่ 2.20 สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน (Environment Agency, 2006)

ค) สภาพดินด้านล่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation From Below) หากดินชั้นล่างที่ลึกลงไปอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วไม่ว่าจะมีน้ำขังบนผิวดินหรือไม่จะไม่มี การซึมลงดินอีก ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.21 สภาพดินด้านล่างอ้อมตัวด้วยน้ำ (<http://www.groundwater.org/gi/whatisgw.html>, 2011)

2) ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity)

อัตราการซึมน้ำลงดินสูงสุด (Infiltration capacity) จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาซึ่งจะลดลงถึงค่าต่ำสุดและจะคงที่โดยค่าต่ำสุดนี้จะใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมน้ำของดินอ้อมตัวด้วยน้ำซึ่งความสามารถในการซึมน้ำจะขึ้นอยู่กับเนื้อดินเป็นหลัก

3) ปริมาณความชื้นในช่องว่างเม็ดดิน

เมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมน้ำเพิ่มขึ้นตาม แต่ในทางตรงข้ามจะมีผลทำให้แรงดึงน้ำ (Suction) ในดินลดลง หรือเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นการซึมน้ำลงดินก็จะลดลง ในกรณีที่สภาพดินชั้นล่างมีชั้นน้ำใต้ดินตื้นหรือมีน้ำใต้ดินไหลมาเพิ่มจากพื้นที่อื่นจะมีผลให้ชั้นดินที่อ้อมตัวด้วยน้ำสูงขึ้นมาใกล้ผิวดินจนทำให้น้ำไม่สามารถซึมลงได้อีก

4) ความลาดชันและความขรุขระของผิวดิน

ความลาดชันและความขรุขระของผิวดินมีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำขังบนผิวดิน ในสภาพผิวดินที่ไม่มีน้ำขังอัตราการซึมน้ำลงดินจะมีค่ามากกว่าอัตราการตกของน้ำที่ผิวดิน และในกรณีที่มียน้ำขังบนผิวดินการซึมน้ำลงดินจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการตกของน้ำที่ผิวดิน พื้นที่ซึ่งมีความลาดชันสูงและไม่มีสิ่งปกคลุมจะมีปริมาณน้ำผิวดินมากและไหลอย่างรวดเร็วซึ่งในทางตรงข้ามจะมีปริมาณน้ำที่ซึมลงดินน้อย

5) คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สารอินทรีย์วัตถุบางชนิดในดินมีลักษณะเป็นมันเมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะยึดน้ำไว้ที่ผิวแทนที่จะปล่อยให้ซึมลงไปตามช่องว่างของดิน กระบวนการในลักษณะนี้มีอิทธิพลต่อการซึมไม่มากนักในพื้นที่ป่าธรรมชาติแต่ในกรณีที่เกิดไฟป่าพื้นที่เปลี่ยนสภาพเป็นดินโล่งทำให้สารเหล่านี้ขึ้นมาสะสมบริเวณผิวดินซึ่งมีผลทำให้อัตราการซึมลงดินลดลงอย่างมาก การดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินซึ่งเรียกว่า แรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักย์ในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองได้มากไปด้วย

6) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ

คุณสมบัติของน้ำทั้งในด้านแรงตึงผิว (Surface Tension) ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อการไหลของน้ำในดินซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนืดของน้ำซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำมากจะมีผลให้อัตราการซึมน้ำลงดินลดลง

2.9 การไหลของน้ำในดิน

ในธรรมชาติน้ำในดินจะมีการเคลื่อนที่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน (Pore Space) โดยช่องว่างที่ต่อเนื่องกันนี้จะยอมให้น้ำไหลผ่านจากจุดที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังจุดที่มีพลังงานต่ำกว่า ดังเช่นเมื่อมีฝนตกลงมาน้ำฝนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกจะเป็นน้ำที่ไหลไปตามผิวน้ำดิน (Surface Runoff) และส่วนที่สองคือน้ำที่ซึมลงสู่ใต้ดิน (Infiltration) โดยน้ำในส่วนนี้จะได้รับอิทธิพลจากพลังงานหรือแรงภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการไหลได้แก่ แรงโน้มถ่วงของโลก ความดันบรรยากาศ และแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินและน้ำ เป็นต้น ทำให้เกิดการไหลซึมลงชั้นน้ำใต้ดิน ความเร็วของการไหลของน้ำในดินจะมีความเร็วที่ช้ามากและความเร็วในแต่ละจุดจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การไหลของน้ำในดินที่อ้อมตัวส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบราบเรียบซึ่งการไหลของน้ำผ่านดินที่มีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าทรายสามารถอธิบายได้โดยกฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

Darcy (1856) ได้เสนอว่าอัตราการไหลเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึม
น้ำของดิน (Hydraulic Conductivity, k) กับสัดส่วนของพลังงานกับระยะการไหล (Hydraulic
Gradient, i) ดังสมการ 2.10

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (2.10)$$

เมื่อ	v_w	=	อัตราการไหลของน้ำ
	k_w	=	สัมประสิทธิ์การซึมน้ำ
	$\frac{\partial h_w}{\partial y}$	=	ความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i)

สัมประสิทธิ์การซึมน้ำเป็นความสัมพันธ์เฉพาะดินอิมตัว โดยในสมการข้างต้น
สามารถเขียนในรูปทิศทางของ x หรือ z ได้ โดยเครื่องหมายลบในสมการหมายถึงการไหลของน้ำที่
มีทิศทางทำให้ Hydraulic Head ลดลง

ในบางปัญหาของการไหลที่ซับซ้อนสามารถนำสมการความต่อเนื่องมาใช้ในการ
วิเคราะห์การไหล โดยเมื่อพิจารณาจากชิ้นส่วนเล็กๆของการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 .ใน
ทิศทาง x , y และ z ชิ้นส่วนจะมีความกว้าง dx , dy และ dz อัตราการไหลจะได้ v_{wx} , v_{wy} และ v_{wz}
ตามลำดับ ให้ทิศทางเป็นบวกเมื่อการไหลของน้ำเป็นบวกในทิศทาง x , y และ z ซึ่งสมการความ
ต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.11 และสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการ 2.12

$$\left(v_{wx} + \frac{\partial v_{wx}}{\partial x} dx - v_{wx} \right) dydz + \left(v_{wy} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} dy - v_{wy} \right) dx dz + \left(v_{wz} + \frac{\partial v_{wz}}{\partial z} dz - v_{wz} \right) dx dy = 0 \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{\partial v_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial v_{wz}}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำต่อเวลาต่อปริมาตรมีค่าเท่ากับ
 $\frac{\partial \theta}{\partial t} dx dy dz$ จะได้ปริมาณการไหล 3 ทิศทางทั้งหมดดังสมการ 2.13

$$\left(\frac{\partial v_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial v_{wz}}{\partial z} \right) dx dy dz = \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dy dz \quad (2.13)$$

จากการไหลของน้ำในดินที่อึดตัวเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady State Flow) กล่าวคือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลออกในหนึ่งช่วงเวลาจะว่าได้ $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการ 2.14

$$\frac{\partial v_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial v_{wz}}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ในสมการ 2.10 เมื่อแทนค่า v_{wx} , v_{wy} และ v_{wz} ลงในสมการ 2.14 จะได้สมการ 2.15

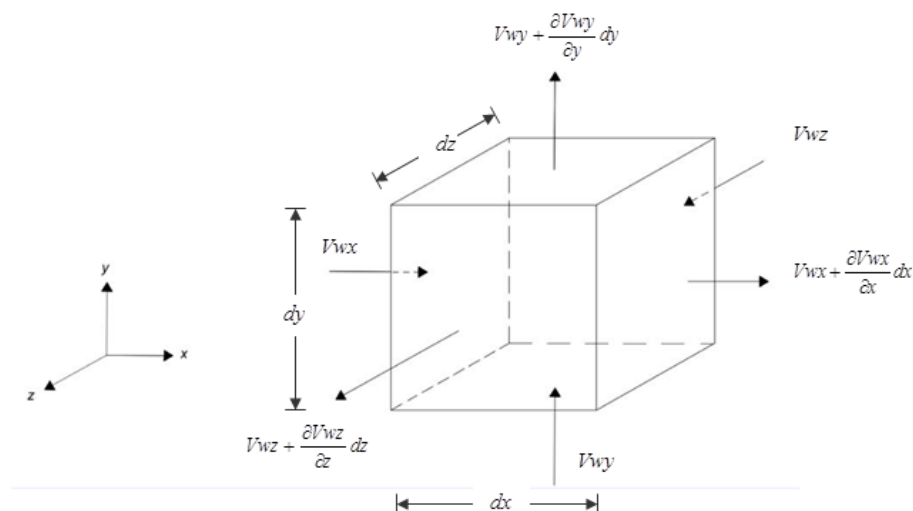
$$k_{wx} \frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} + k_{wy} \frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} + k_{wz} \frac{\partial^2 h_w}{\partial z^2} = 0 \quad (2.15)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การซึมน้ำเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Permeability) จะได้ว่า $k_{wx} = k_{wy} = k_{wz}$ เขียนให้อยู่ในรูปของ Laplace's Equation ได้ดังสมการ 2.16

$$\frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_w}{\partial z^2} = 0 \quad (2.16)$$

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของการไหลในทิศทาง z มีน้อยมากเมื่อเทียบกับในทิศทาง x และ y สามารถกล่าวได้ว่าการไหลนั้นเกิดขึ้นเพียง 2 ทิศทางดังสมการ 2.17

$$\frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} = 0 \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.22 การไหลของน้ำผ่านชิ้นส่วนเล็กๆในระบบ 3 แกน

2.10 การประมาณเส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน Soil-Water Characteristic Curve

เส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) เป็นคุณสมบัติการซึมน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) กับแรงดูดน้ำในดิน (Matric Suction) การวิเคราะห์การไหลบนลาดดินเนื่องจากน้ำฝนเป็นการวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและจากดินที่ไม่อิ่มตัวมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนเพื่อให้ผลที่ได้มีความแม่นยำจึงสามารถนำความสัมพันธ์ของ Soil-Water Characteristic Curve มาใช้วิเคราะห์ปัญหาโดย Soil-Water Characteristic Curve และ Permeability Function สามารถทดสอบหาค่าได้ในสนามและในห้องปฏิบัติการซึ่งจะให้ความแม่นยำสูง แต่วิธีนี้จะใช้เวลาทดสอบนานและมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งนี้ยังมีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีประมาณค่าจากคุณสมบัติของดินทางกายภาพโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่ให้ค่าตัวแปรซึ่งมีความถูกต้องน้อยกว่าการทดสอบจริงแต่สามารถนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว

Brook & Corey (1964) ได้เสนอความสัมพันธ์ของเส้นอัตลักษณ์ของน้ำ Soil-Water Characteristic Curve ในลักษณะ Power Law เขียนได้ดังสมการ 2.18

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left(\frac{s^b}{s} \right)^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ	θ	=	ความชื้น โดยปริมาตรในมวลดิน
	θ_{sat}	=	ความชื้น โดยปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัว
	θ_r	=	ความชื้น โดยปริมาตร ที่สภาวะความชื้นคงค้าง
	s^b	=	ค่าแรงดึงที่อากาศเริ่มเข้าไปในตัวอย่างดิน Air Entry
	λ	=	ตัวแปรที่ใช้แสดงถึงความชันของกราฟ เมื่อดินแห้งลงจุด Air Entry

Van Genuchten Model (1980) ได้เสนอความสัมพันธ์ของเส้นอรรถลักษณะของน้ำ Soil-Water Characteristic Curve ในลักษณะ Symmetric Sigmoidal (S-Curve) เขียนได้ดังสมการ 2.19

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (2.19)$$

เมื่อ	θ	=	ความชื้น โดยปริมาตรในมวลดิน
	θ_s	=	ความชื้น โดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว
	θ_r	=	ความชื้น โดยปริมาตรที่สภาวะความชื้นคงค้าง
	α	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน
	n	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงอัตราการลดลงของความชื้นในดิน หลังจากจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างของมวลดิน
	m	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงจุดที่ความชื้นคงค้างในมวลดิน $m = 1 - 1/n$
	h	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction)

Fredlund and Xing (1994) เสนอว่าเส้นอรรถลักษณะของน้ำ Soil-Water Characteristic Curve สามารถประมาณได้จากขนาดของเม็ดดินและความหนาแน่นของดิน โดยสมมติว่าเม็ดดินเป็นทรงกลมและ Metric Suction เท่ากับ Capillary Force ซึ่งจะเป็นผลดีกับดินเม็ดหยาบ โดยเฉพาะดินทราย (Sand) ดินตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) ที่มีช่วงแรงดูดของดินอยู่ระหว่าง $0-10^6$ กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยสมการของ Soil-Water Characteristic Curve เขียนได้ดังสมการ 2.20

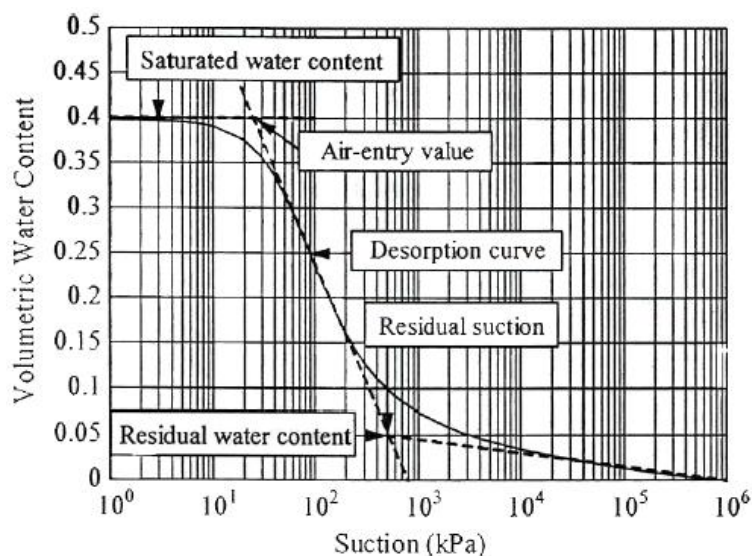
$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{[\ln(e + (\psi/a)^n)]^m} \quad (2.20)$$

โดย $C(\psi)$ คือ Correction Function

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + (\frac{\psi}{\psi_r}))}{\ln(1 + \frac{1,000,000}{\psi_r})}$$

$$\text{และ } a = \psi_i \quad m = 3.67 \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right) \quad n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad s = \frac{\theta_i}{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_i}\right)}$$

- เมื่อ θ_i = ปริมาณน้ำในมวลดิน โดยปริมาตรที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ (Inflection Point)
- ψ_i = แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ (Inflection Point)
- θ_s = ปริมาณน้ำในมวลดิน โดยปริมาตรที่จุดความชื้นคงค้างในดิน
- ψ_s = แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดความชื้นคงค้างในดิน
- a = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านบน
- n = ตัวแปรกำหนดจุดที่กราฟมีความชันสูงสุด
- m = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านล่าง
- s = ความชันของ (Tangent Line)



รูปที่ 2.23 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve (Punrattanasin, 2002)

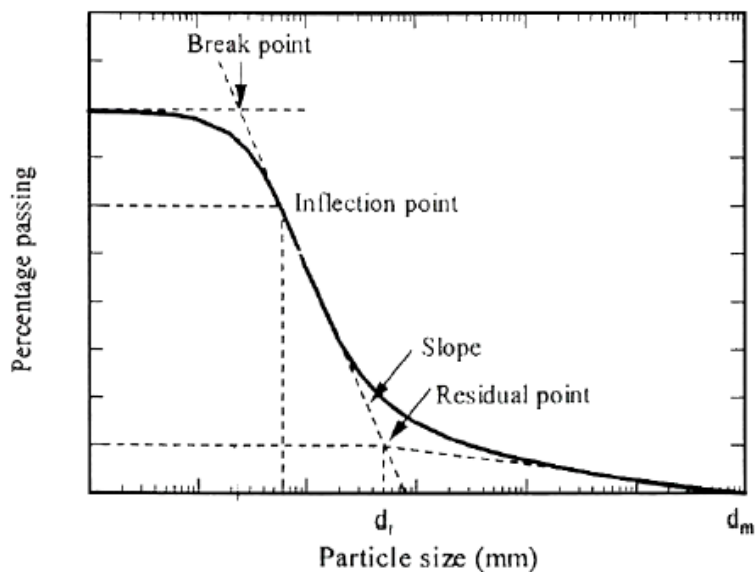
Fredlund et al. (1997) ได้เสนอการประมาณเส้นอรรถลักษณะจากการกระจายตัวของเม็ดดิน Grain-Size Distribution Curve ดังสมการ 2.21 ซึ่งรูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve แสดงในรูปที่ 2.24

$$P(d) = C(d) \frac{100}{\ln[e + (a/d)^n]^m} \quad (2.21)$$

โดย

$$C(d) = 1 - \left[\frac{\ln(1 + \frac{d_r}{d})}{\ln(1 + \frac{d_r}{d_m})} \right]^7$$

- โดยที่
- P = เปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเล็กกว่า d
 - d = ขนาดของเม็ดดิน
 - d_r = ขนาดของเม็ดดินที่จุดคงค้าง
 - d_m = ขนาดของเม็ดดินที่เล็กที่สุด
 - a = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านบน
 - n = ตัวแปรกำหนดจุดที่กราฟมีความชันสูงสุด
 - m = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านล่าง



รูปที่ 2.24 รูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve (Punrattanasin, 2002)

พฤติกรรมการไหลซึมของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนอกจากจะขึ้นอยู่กับเส้นอัตรลักษณ์ของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve) แล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) โดยความสัมพันธ์นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดน้ำในมวลดิน (Matric Suction) และค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity) ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถสังเกตได้จากเมื่อความชื้นในมวลดินเปลี่ยนไปค่าแรงดูดน้ำจะเปลี่ยนไปตามความชื้นด้วย ส่งผลให้ความชื้นน้ำมีค่าเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

Brooks and Corey (1964) ได้พัฒนาสมการเพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินจากทฤษฎีของ Burdine (1953) ในรูปของสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขณะความชื้นใดๆกับขณะอิ่มตัว โดยเสนอออกมาในรูปความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับความชื้นในดินและพลังงานกำกับก้อนดินดังสมการ 2.22

$$K_{\theta} = K_s \left(\frac{\psi_{\theta}}{\psi_{ae}} \right)^{-(2+c\lambda+2\lambda)} \quad (2.22)$$

Van Genuchten (1980) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคล้ายกับสมการของ Brooks and Corey ดังสมการ 2.23

$$K_{\theta} = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (2.23)$$

โดยที่	K_{θ}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ระดับความชื้นใดๆ (เช่นติเมตรต่อวินาที)
	K_s	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินอิ่มตัว (เช่นติเมตรต่อวินาที)
	S_e	=	สัดส่วนความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน
	ψ_{θ}	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่ความชื้นใดๆ
	ψ_{ae}	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ของน้ำขณะที่อยู่อากาศ ของดินติดต่อกันเป็นครั้งแรกหลังจากที่มีการระบายน้ำ ออกจากดินอิ่มตัว
	λ, m	=	ค่าคงที่ของสมการ
	c	=	ดัชนีความไม่ต่อเนื่องของช่องว่างในดิน

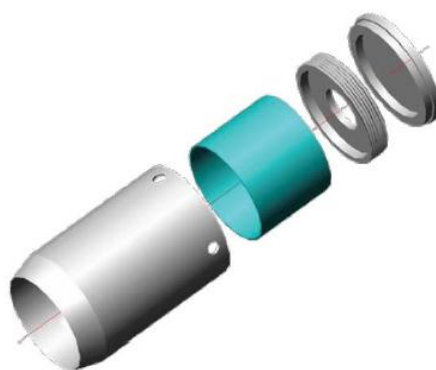
2.11 การเก็บตัวอย่างดิน

2.11.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

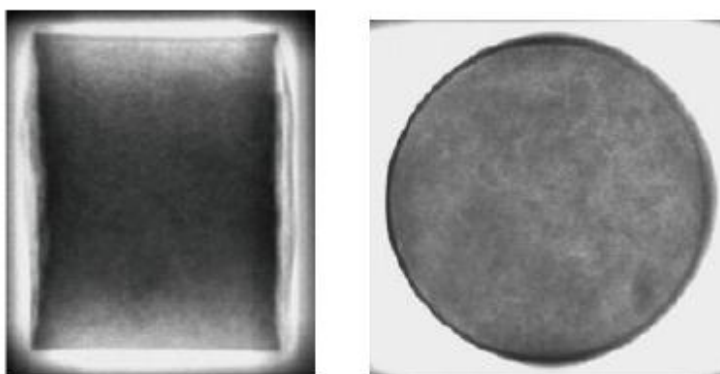
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนามบางครั้งไม่สามารถทำได้โดยตรงทั้งนี้อาจจะมาจากความซับซ้อนในกระบวนการทดสอบหรืออุปกรณ์เครื่องมือไม่สามารถเคลื่อนย้ายนำไปทดสอบในสนามได้จึงต้องทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ โดยดินที่จะใช้ทดสอบจะต้องคงสภาพเดิมเช่นเดียวกับดินที่อยู่ในสนามเพื่อที่จะให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้พัฒนาอุปกรณ์ชุดเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่มีชื่อเรียกว่า KU – Miniature Sampler ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.25 การเก็บตัวอย่างทำได้โดยใช้ตุ้มน้ำหนักตอกเหล็กทรงกระบอกที่มีความบางซึ่งทนต่อแรงกระแทกตกลงไปในดินเพื่อตัดดินรอบๆตัวอย่างให้ขาด จากนั้นจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากกันกับดินด้านล่าง ขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกล่องเฉือน (Shear box) เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินเสียหายขณะแต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด สุทธิศักดิ์และคณะ (2550) ผลจากการ

ตรวจสอบตัวอย่างดินที่เก็บด้วยเครื่องมือดังกล่าวโดยการ X-Ray พบว่าตัวอย่างมีการถูกรบกวนน้อยดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU- Miniature Sampler (วารสารและคณะ, 2548)



รูปที่ 2.26 การ X – Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU – Miniature (สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2550)

2.12 การทดสอบกำลังของดิน

การทดสอบกำลังของดินสามารถทำการทดสอบได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้การทดสอบในสนามจะเป็นการทดสอบดินเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจริงที่สุด ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทดสอบในกรณีที่มีค่าตัวแปรและเงื่อนไขบางอย่างที่ซับซ้อนไม่สามารถทดสอบในสนามได้ เช่น การควบคุมความชื้น การระบายน้ำ หรือระยะเวลาที่ยาวนานในการทดสอบ เป็นต้น การทดสอบกำลังของดินสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.12.1 การทดสอบในสนาม

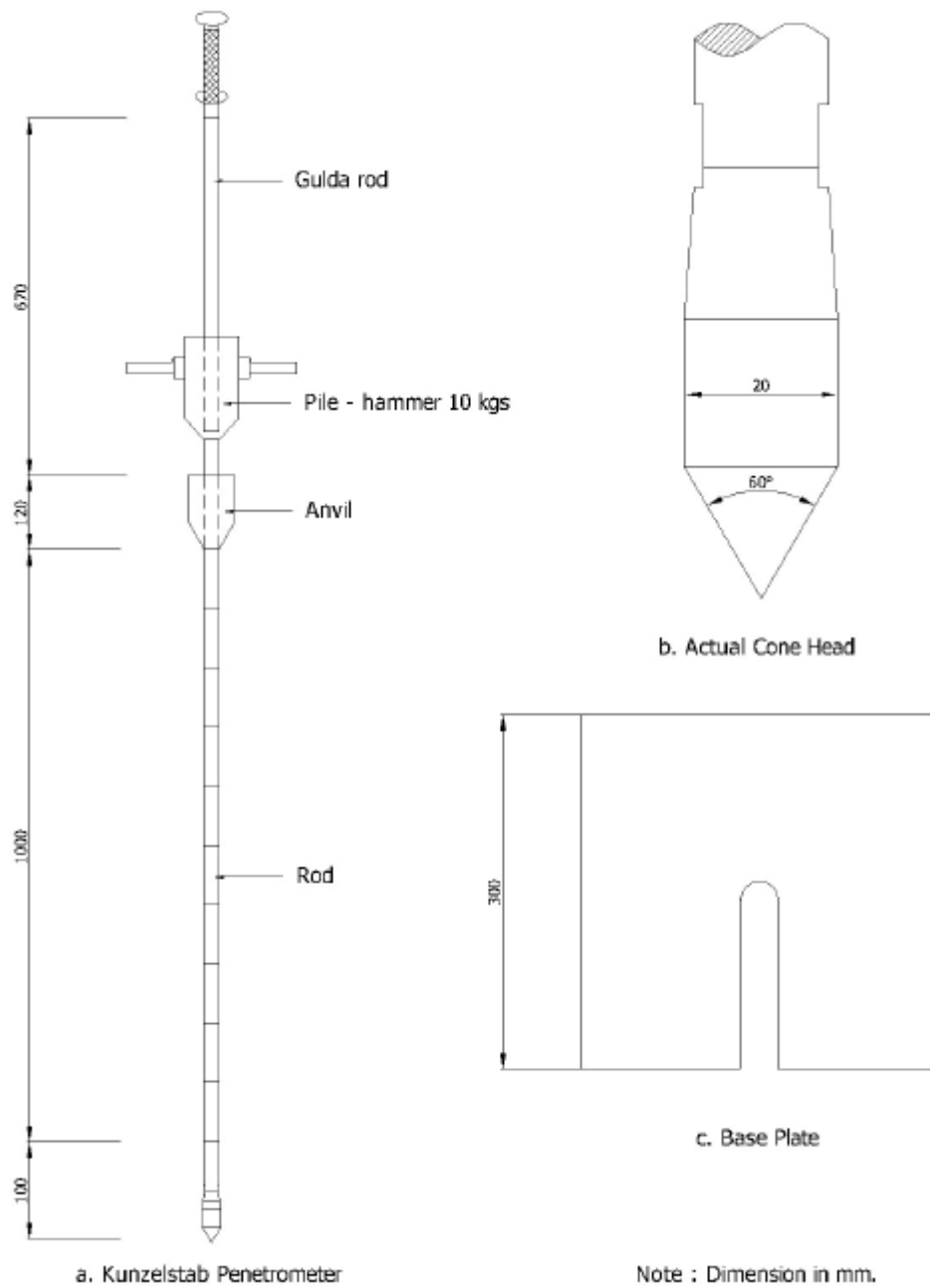
1) การทดสอบด้วยวิธีหยังเบา (Kunzelstab Penetration Test) การทดสอบด้วยวิธีหยังเบา Kunzelstab Penetration Test หรือวิธี Light Ram Sounding Test เป็นวิธีการหยังทดสอบชั้นดินในสนามโดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไป โดยจะไม่เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ก้านเจาะ เนื่องจากหัวเจาะหยัง (Cone Head) มีขนาดใหญ่กว่าก้านเจาะ โดยหัวเจาะจะเป็นรูปกรวยปลายแหลมทำมุม 60 องศา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ก้านเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ค้อนตอกหนัก 10 กิโลกรัม มีระยะยก 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ทำการทดสอบโดยนับจำนวนครั้งของการตอก (N) ทุกระยะ 20 เซนติเมตร (blows/20 cm.) เครื่องมือชนิดนี้จะใช้ได้ดีกับดินทรายหรือดินปนกรวด (Cohesionless Soil) ถึงแม้จะมีดินเหนียวหรือดินร่วนปนอยู่บ้างก็สามารถใช้ได้ การทดสอบด้วยวิธี Kunzelstab ยังสามารถแบ่งแยกค่าความแข็งแรงของดินได้ ดังในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลังและความหนาของชั้นดิน โดยผลของการทดสอบที่ได้นี้จะทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพของชั้นดินในเบื้องต้น

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินทราย (Meyerhof, 1956)

N (blows/ft)	KPT (EGAT) (blows/20 cm)	Angle of internal friction, ϕ (degree)	Relative density
0 – 4	0 – 6	25 – 30	very loose
4 – 10	6 – 18	27 – 32	loose
10 – 30	18 – 55	30 – 35	medium
30 – 50	55 – 92	35 – 40	dense
>50	> 92	38 - 45	very dense

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว (Terzaghi และ Peck, 1967)

N (blows/ft)	KPT (EGAT) (blows/20 cm)	Unconfined compressive strength Q_u (T/m ²)	Consistency
< 2	0 – 3	< 2.5	very soft
2 – 4	3 – 6	2.5 – 5.0	soft
4 – 8	6 – 14	5.0 – 10.0	medium stiff
8 - 15	14 – 27	10.0 – 20.0	stiff
15 – 30	27 – 55	20.0 – 40.0	very stiff
> 30	> 55	> 40.0	hard



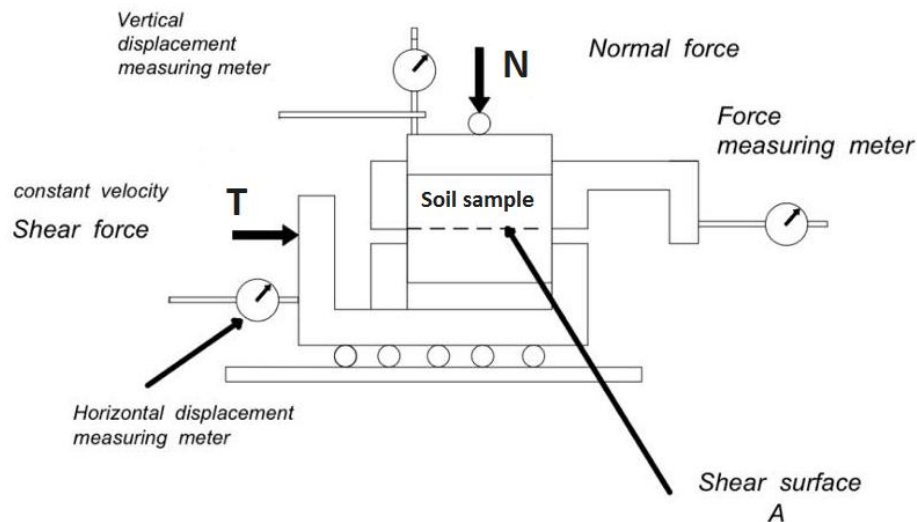
รูปที่ 2.27 อุปกรณ์ในการทดสอบ Kunzelstab Penetration (EGAT, 1980)

2.12.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1) การทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของวัสดุ (Angle of internal friction ϕ , and Cohesion, c) ทั้งทรายและดินเหนียวคงสภาพ ตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้บีบอัดในแนวที่คาดการณ์ได้ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่กึ่งกลางตัวอย่างดิน

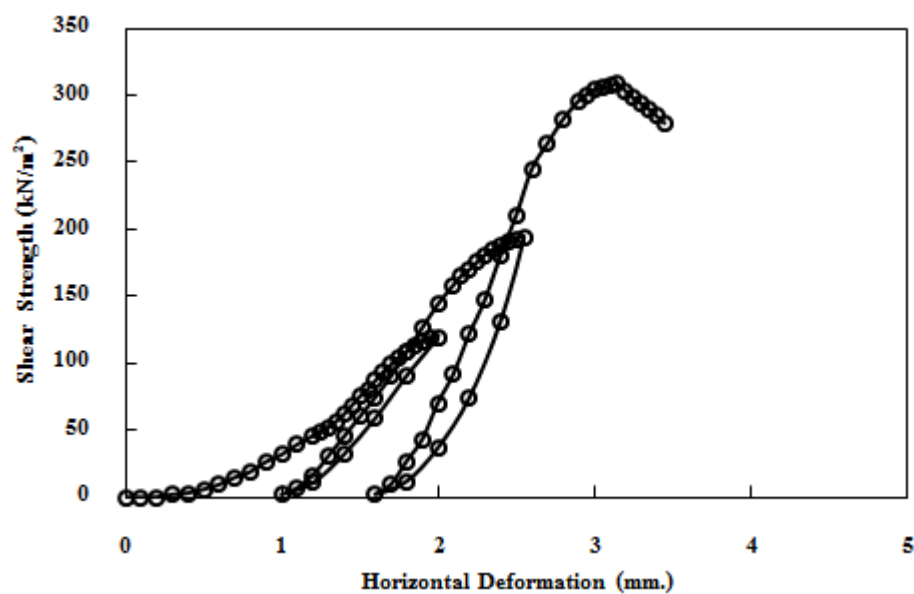
ในการทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct Shear Test) จะกระทำโดยใส่ตัวอย่างดินไว้ในกล่องใส่ตัวอย่างดิน (Shear Box) และใส่น้ำหนักกดทับ (Normal Load) กระทำในแนวตั้งกับตัวอย่างดินและทำการเฉือนตัวอย่างดินที่บรรจุอยู่ในกล่องใส่ตัวอย่างดินพร้อมทั้งตรวจสอบการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 รูปร่างของกล่องใส่ตัวอย่างดินขณะทดสอบอาจมีหลายรูปร่าง เช่น สี่เหลี่ยมหรือวงกลม เพื่อสะดวกในการหาพื้นที่หน้าตัดและเพื่อความเหมาะสมกับสภาพและชนิดของดินที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 2.28 การทดสอบ Direct Shear Test

2) การทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test

ในทดสอบการเฉือนตรง (Direct Shear Test) โดยทั่วไปจะต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (Conventional Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปของมอร์และคูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Envelope) ซึ่งจะได้พารามิเตอร์กำลังเฉือน (Shear Strength Parameter c, ϕ) แต่ในวิธี Multi Stage Direct Shear Test เป็นวิธีที่สามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้โดยใช้ตัวอย่างดินเพียงตัวอย่างเดียว โดยทดสอบเฉือนตัวอย่างดินจนเกือบถึงจุดพิบัติอย่างน้อย 3-5 น้ำหนักกดทับ (Normal Load) โดยผลที่ได้แสดงดังกราฟกำลังรับแรงเฉือนแบบ Multi Stage ดังรูปที่ 2.29 วิธีนี้เหมาะสำหรับในกรณีที่มีตัวอย่างดินน้อยหรือตัวอย่างดินมีความแปรปรวนสูงซึ่งจะให้ค่า (c, ϕ) ที่น่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.29 กราฟการทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test

สถาพร (2541) อธิบายว่า การทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินเป็นการบังคับให้ดินพิบัติในแนวที่กำหนดซึ่งอยู่ในแนวราบประมาณครึ่งของความสูงของตัวอย่างดิน โดยในความเป็นจริงการพิบัติในลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นทั่วไป ยกเว้นในกรณีการพิบัติเนื่องจากการลื่นไถล (Slide) ของลาดดิน

2.12.3 ชนิดของการทดสอบ Direct Shear Test

ในการทดสอบกำลังเฉือนของดินยังสามารถจำลองสภาพการทดสอบได้หลายแบบขึ้นอยู่กับว่าในสภาพสนามจริงจะมีสภาพเป็นอย่างไรเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ไปออกแบบได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดการทดสอบได้เป็น 3 แบบคือ

1) การทดสอบแบบเร็ว (Quick Test)

การทดสอบแบบเร็วเหมาะสำหรับหาค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ กระทำโดยการใส่น้ำหนักกดทับ (Normal Load) ลงไปบนตัวอย่างดินแล้วทำการเฉือนตัวอย่างทันทีโดยไม่รอให้เกิดการทรุดตัว (Unconsolidated) โดยไม่ยอมให้น้ำสามารถระบายออกได้ทัน ส่งผลทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างดิน (Excess Pore Pressure) ตัวอย่างจะอยู่ในช่วง 1-2.5 มม./นาที การทดสอบนี้สามารถเทียบได้กับ “Unconsolidated Undrained Test (UU Test)” ในการทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน (Triaxial Test)

2) การทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบเร็ว (Consolidated-Quick Test)

การทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะยอมให้ตัวอย่างดินเกิดการทรุดตัวจากน้ำหนักกดทับ (Normal Load) ก่อนทำการการเฉือน โดยจะใช้แผ่นหินพรุน (Porous Stone) วางด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเพื่อช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินขณะอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) จนตัวอย่างดินทรุดตัวสมบูรณ์แล้วจึงทำการการเฉือน โดยอัตราเร็วที่ใช้ในการเฉือนตัวอย่างจะอยู่ในช่วง 1-2.5 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบนี้สามารถเทียบได้กับ “Consolidated Undrained (CU Test)” ในการทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน (Triaxial Test)

3) การทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบช้า (Consolidated-Slow Test)

ในการทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบายน้ำมีการเตรียมตัวอย่างและทำการอัดตัวคายน้ำเช่นเดียวกับวิธีการทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบเร็วแต่จะเฉือนตัวอย่างในอัตราการเฉือนที่ช้ามากเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินภายในตัวอย่างดินในระหว่างการเฉือนหรือยอมให้น้ำมีการไหลออกจากมวลดินนั่นเอง โดยอัตราเร็วที่ใช้ในการเฉือนประมาณ 0.0003 นิ้วต่อนาที

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเป็น Effective Parameter โดยสำหรับดินเหนียว $\phi = \phi' \neq 0, c = c'$ และสำหรับทราย $\phi = \phi' \neq 0, c' \approx 0$ การทดสอบนี้สามารถเทียบได้กับ “Consolidated Drained Test (CD Test)” ในการทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน (Triaxial Test)

Abramson, et al. (2001) อธิบายว่า ในการทดสอบการเฉือนตรงจะไม่สามารถทำให้ดินอิ่มตัวได้เหมือนกับการทดสอบสามแกน (Triaxial Test) แต่สามารถทำให้ดินมีความชื้นมากที่สุดด้วยวิธีแช่ตัวอย่างดินในน้ำภายในกล่องเฉือนเป็นระยะเวลาานพอที่น้ำจะซึมเข้าไปในตัวอย่างดินได้มากที่สุด ซึ่งกระบวนการแช่น้ำ (Soaking) จะใช้เป็นตัวแทนที่มีสภาพใกล้เคียงกับลาดดินจริงที่อยู่ในสภาพการไหลซึมคงที่ (Steady Infiltration)

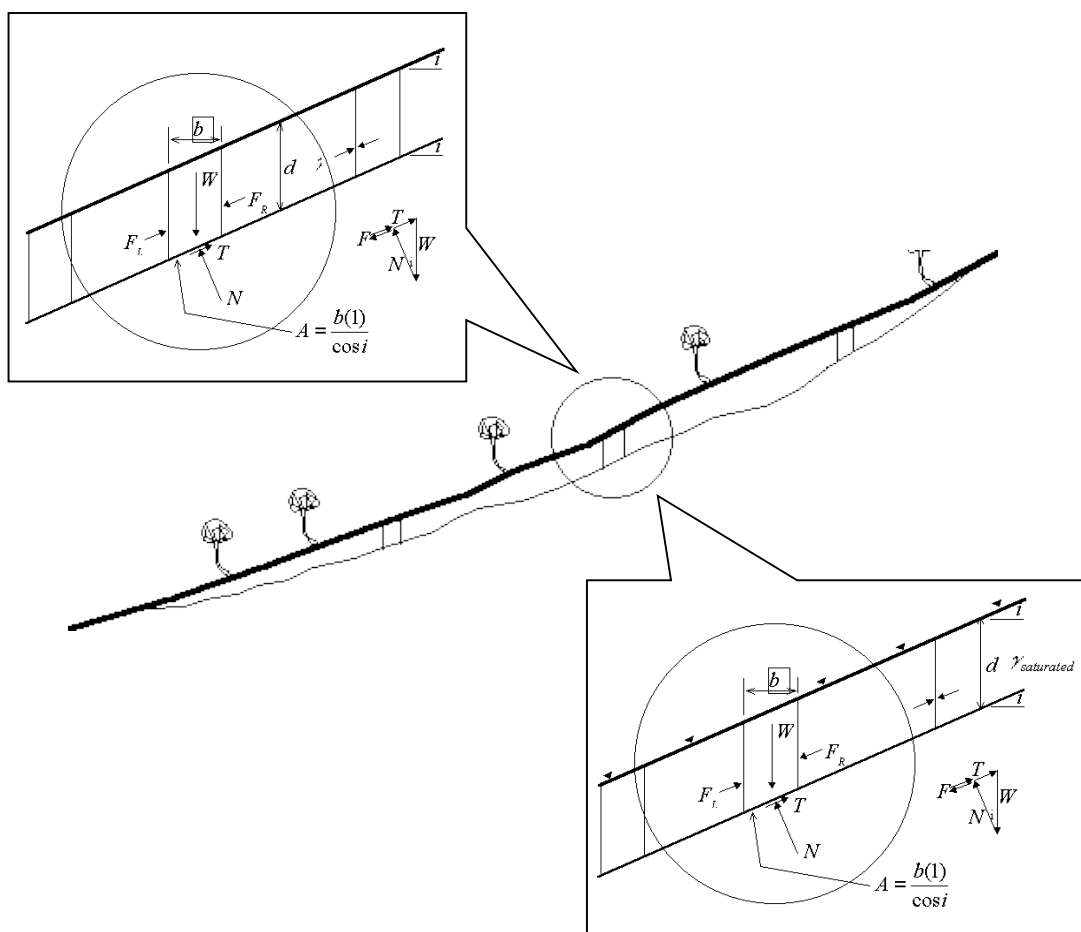
สถาพร (2541) แนะนำว่าอัตราการทำแรงเฉือนในการเฉือนแบบระบายน้ำ ต้องใช้อัตราที่ช้าพอที่จะไม่เกิดความดันน้ำในระหว่างการเฉือนซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และตัวอย่างดินควรจะพิบัติน้อยภายใน 6 – 7 ชั่วโมง หรืออัตราประมาณ 0.0076 มิลลิเมตรต่อนาที

2.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope Stability) เป็นการศึกษาปัญหาความมั่นคงของลาดดินซึ่งมีทั้งลาดดินธรรมชาติ (Natural Slopes) และลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-Made Slopes) ลาดดินโดยทั่วไปจะมีรูปแบบการพิบัติที่ต่างกันทำให้วิธีที่จะนำมาวิเคราะห์จึงแตกต่างกันออกไป บางวิธีเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของการพิบัติที่มีผิวเคลื่อนพังเป็นเส้นตรง บางวิธีเหมาะกับการพิบัติที่มีผิวเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลมหรือบางวิธีสามารถใช้ได้กับลักษณะของผิวการเคลื่อนที่เป็นทั้งเส้นตรงและส่วนโค้งของวงกลม ซึ่งแต่ละวิธีล้วนมาจากพื้นฐานการแก้สมการสมดุลย์ของระบบของมวลดิน (Limit Equilibrium) วิธีวิเคราะห์ที่นิยมกันโดยทั่วไปได้แก่

2.13.1 วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis)

วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์เป็นการวิเคราะห์การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดินโดยมีความยาวต่อเนื่องขยายไปไกล มีความหนาของชั้นดินที่เคลื่อนพังน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวของมวลดินที่เคลื่อนพัง แสดงดังรูปที่ 2.30 เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านทาน (Strength) และแรงกดลง (Stress) จะสามารถหาอัตราส่วนปลอดภัยได้ดังสมการที่ 2.24 ถึงสมการที่ 2.29



รูปที่ 2.30 การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดิน (Thomas, 1998)

สำหรับดินทราย

บนลาดดินแห้ง

$$F.S. = \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.24)$$

บนลาดดินที่จมน้ำแต่ไม่มีการไหล

$$F.S. = \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.25)$$

บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดดิน

$$F.S. = \frac{\gamma_b}{\gamma_{total}} \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.26)$$

สำหรับดินเหนียว

บนลาดดินแห้ง

$$F.S. = \frac{c'}{d \gamma \sin i \cos i} + \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.27)$$

บนลาดดินที่จมน้ำแต่ไม่มีการไหล

$$F.S. = \frac{c'}{\gamma_b d \sin i \cos i} + \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.28)$$

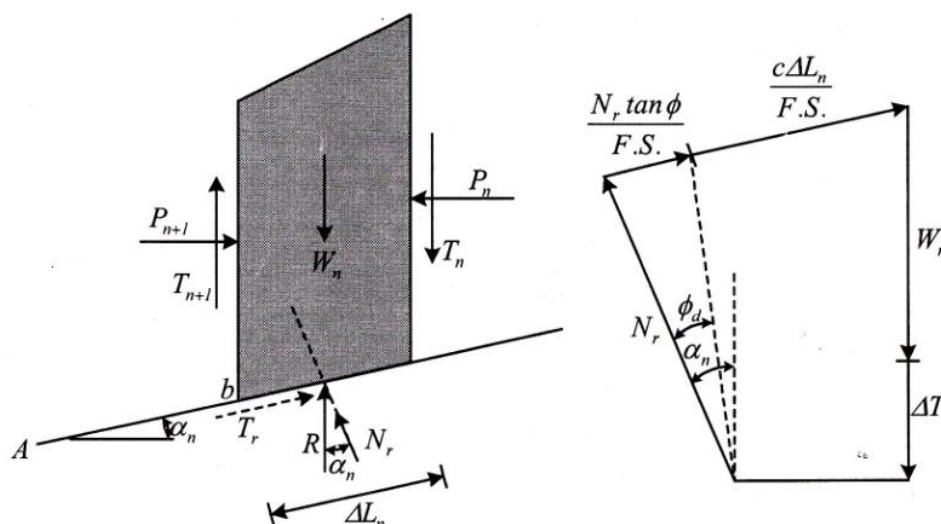
บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดดิน

$$F.S. = \frac{c'}{\gamma_{total} d \sin i \cos i} + \frac{\gamma_b}{\gamma_{total}} \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.29)$$

2.13.2 การแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพังออกเป็นชั้นๆ (Method of Slices)

วิธีนี้จะแบ่งมวลดินที่อยู่เหนือส่วนที่เกิดการเคลื่อนตัวออกเป็นชั้นๆตามแนวตั้ง โดยการนำเอาแรงที่กระทำต่อดินในแต่ละชั้นซึ่งอยู่ในสภาพสมดุลตามแนวนอนและตั้งฉากกับผิวเคลื่อนพังมาพิจารณา วิธีนี้สามารถวิเคราะห์กรณีที่ดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันและพิจารณาแรงดันน้ำได้

Bishop (1955) ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยสมมติฐานให้มีแรงกระทำต่อผนังด้านข้างในแนวตั้งของดินแต่ละชั้นซึ่งแนวการพิบัติได้สมมติให้เป็นส่วนหนึ่งของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.31 และอัตราส่วนความปลอดภัยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30



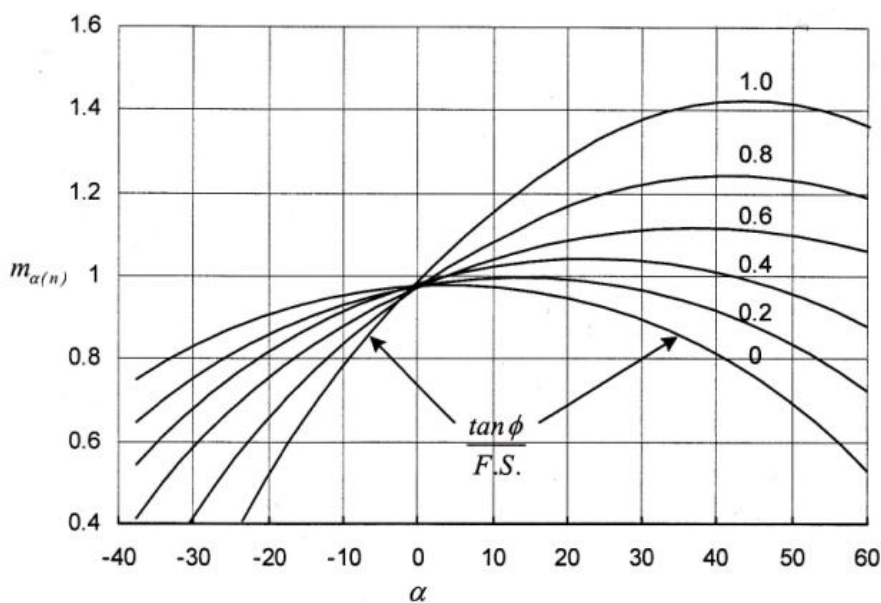
รูปที่ 2.31 รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method (Das, 1994)

$$F.S. = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + W_n \tan \phi + \Delta T \tan \phi) \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (2.30)$$

เมื่อ	W_n	=	น้ำหนักของมวลดิน
	T	=	แรงเฉือนที่ผนังด้านข้างในแนวตั้ง
	c	=	แรงเชื่อมแน่นของเม็ดดิน
	b_n	=	ความกว้างของชั้นส่วนของมวลดิน

$$m_{\alpha(n)} = \text{หาได้จากความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.32}$$

วารากร (2542) อธิบายว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินปกติใช้วิธีสมมูลจำกัดของมวลดิน (Limit Equilibrium) โดยสมมุติว่า ณ ช่วงเวลาที่เกิดการพิบัติพืดมวลดินอยู่ในสภาวะสมมูล โดยการวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการสมมุติรูปแบบลักษณะของผิวการพิบัติว่าเป็นรูปแบบใดแล้วคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอที่ทำให้เกิดสมมูลของมวลดินที่พิบัติแล้วเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมมูล เรียกว่า “อัตราส่วนปลอดภัย” (Factor of Safety, F.S.) แล้วทำการทดลองสุ่มหาค่าของอัตราส่วนความปลอดภัย โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือตำแหน่งของผิวการพิบัติที่น่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นไปได้เรื่อยๆ จนพบอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุด โดยอาจทราบลักษณะการวิบัติได้แน่นอนจากการสำรวจในสนาม



รูปที่ 2.32 การหาค่า $m_{\alpha(n)}$ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method (Das, 1994)

2.14 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน Antecedent Precipitation Index, (API) เพื่อการเตือนภัยการพิบัติของลาดดิน

2.14.1 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index, API)

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในชั้นดินที่ดินอุ้มน้ำไว้ ณ เวลาใดๆ ซึ่งสามารถประเมินได้โดยอาศัยปัจจัยความชื้นในดิน (Soil Moisture) กับปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละวันหรือแต่ละช่วงเวลา โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Linsely et. al. (1949) ดังสมการที่ 2.31

$$API_t = (K_t \times API_{t-1}) + P_t \quad (2.31)$$

เมื่อ	API_t	=	ค่า API ณ เวลาใดๆ (t) (มิลลิเมตร)
	API_{t-1}	=	ค่า API ของเวลาก่อนหน้า (t-1) (มิลลิเมตร)
	P_t	=	ค่าปริมาณน้ำฝน ณ เวลาใดๆ (t) (มิลลิเมตร)
	K_t	=	ค่าคงที่คูณลด ณ เวลาใดๆ

ซึ่ง K นี้หาได้จากความสัมพันธ์ของ Chodhury and Blanchard (1983) ดังสมการที่ 2.32

$$K_t = \exp(-E_t / W) \quad (2.32)$$

เมื่อ	E_t	=	การคายระเหย ณ เวลาใดๆ
	W	=	ความชื้นในดินที่สามารถระเหยได้ (มิลลิเมตร)

Viessman et al. (1989) อธิบายว่า ปริมาณความชื้นในดินจะมีความผันแปรไปในแต่ละจุดของพื้นที่ลุ่มน้ำจึงไม่นิยมเก็บวัดจากพื้นที่จริงแต่จะใช้ค่าดัชนีที่เรียกว่า Antecedent Precipitation Index หรือค่า API เป็นตัวแทน โดยค่า API นี้จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณการระเหยน้ำ และปริมาณน้ำใต้ดิน เป็นต้น

พงษ์ศักดิ์ และวารินทร์ (2548) กล่าวว่า API หรือ Antecedent Precipitation Index เป็นค่าดัชนีที่ใช้วัดปริมาณความชุ่มชื้นที่มีอยู่ก่อนในดิน โดยเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการสะสมของน้ำฝนที่ตกลงมา น้ำในดินที่ระเหยกลับขึ้นไปในอากาศ และน้ำในดินที่ระบายให้กับลำธารทั้งทางผิวดินและใต้ผิวดิน จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถนำมาจำลองให้เป็นสมการที่ใช้หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นที่มีอยู่ก่อนในดิน ($API_{(t)}$) ได้ โดยใช้ข้อมูลจากดัชนีความชุ่มชื้นที่มีอยู่ในดินของวันก่อนหน้า ($API_{(t-1)}$) ปริมาณน้ำฝนในขณะนั้น ($P_{(t)}$) และอัตราส่วนลดของปริมาณน้ำในดินของวันก่อนหน้า ($K_{(t-1)}$)

สำหรับการหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินรายวัน (API) เพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ สามารถดำเนินการได้โดยการนำค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเป็นครั้งแรกในรอบปีมากำหนดให้เป็นค่าดัชนีความชุ่มชื้นแรกเริ่ม ($API_{(t-1)}$) แล้วจึงนำค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกตามลงมา และค่าคงที่คูณลด (K) มาประเมินค่าความชุ่มชื้นรายวัน (API) ตามลำดับ

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (API) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเตือนภัยล่วงหน้าการเกิดลาดดินพิบัติได้ เพราะในช่วงเวลาใดที่พื้นที่ลุ่มน้ำมีค่าดัชนีความชุ่มชื้น (API) สูง จะเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อฝนตกหนักหรือมีฝนตกต่อเนื่องเป็นระยะเวลาเวลานาน ในช่วงเวลาดังกล่าวนี้มวลดินส่วนใหญ่จะมีความชุ่มชื้นมากและมีการยึดเกาะระหว่างมวลดินอย่างหลวมๆ ฝนที่ตกลงมาจึงมีโอกาสทำให้เกิดลาดดินพิบัติได้ง่าย

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการพิบัติของลาดดินที่มีความรุนแรงและเกิดขึ้นบ่อยครั้งในปัจจุบัน ทำให้มีผู้ให้ความสนใจและศึกษาในด้านนี้กันอย่างแพร่หลายโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

Brain and Dobroslav (2004) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื่องจากฝนตกและอธิบายการไหลซึมลงดินของน้ำฝนว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินกรณีเลวร้ายที่สุด (Worst - Case) จะสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินและลาดดินมีลักษณะอิมตัวเต็มที่ ซึ่งจะไม่มีการไหลซึมลงดินเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นเมื่อฝนตกลงมาจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินอีกต่อไป

Orr (1987) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน ในงานวิจัยของ Orr เป็นการวิจัยทางสถิติที่แสดงถึงค่าความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ความน่าจะเป็นของลาดดินที่จะเกิดการพังทลายจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นและในงานวิจัยนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าระดับน้ำใต้ดินและความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลของความปลอดภัยของลาดดินมากกว่าปัจจัยอื่น

นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ (2547) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของน้ำฝนซึ่งวิเคราะห์โดย Finite Element จากการสำรวจลักษณะชั้นดินมีความหนา 1-4 เมตรและได้เก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับการทดสอบแรงเฉือนด้วยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มขึ้น โดยช่วงค่าความอิ่มตัวที่ 15-60 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณน้ำในดินน้อยค่าทำให้ Shear Strength Parameter (c, ϕ) จึงมีค่าสูง และได้วิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะการไหลแบบคงที่ (Steady) และสภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) สภาวะการไหลแบบคงที่ที่จะใช้น้ำฝนเฉลี่ยตลอดทั้งปีส่วนอีกสภาวะใช้น้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีรูปแบบน้ำฝน 5 รูปแบบ คือ 1,3,5,10 และ 14 วัน โดยวิเคราะห์ที่รอบปีการเกิดซ้ำที่ 5,10,20,50 และ 100 ปี ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของรูปแบบน้ำฝนพบว่ารูปแบบน้ำฝนและปริมาณความเข้มของน้ำฝนมีผลต่อการเคลื่อนตัวของระดับน้ำและความชื้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite Slope) วิเคราะห์ลาดดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงตามความชื้นในดินที่ได้โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นเสถียรภาพเฉพาะจุดทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่าความมั่นคงของลาดดิน (F.S.) ของแต่ละจุด ส่วนการวิเคราะห์แบบ Circular Failure เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวมและเป็นตัวแทนของทั้งลาดดิน จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถกำหนดเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่มีค่าความมั่นคงของลาดดิน (F.S.) เท่ากับ 1 จากความเข้มฝนเฉลี่ยต่อวันและน้ำฝนสะสมของรูปแบบน้ำฝนที่ใช้วิเคราะห์ในช่วง 1-14 วันได้

บรรพต (2548) ได้ศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี ในพื้นที่คลองกระทิง คลองตะเคียน และคลองทุ่งเพล พบว่าค่ากำลังเฉือนของดินมีค่าแปรผกผันกับระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน รูปแบบของฝนที่ตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาดดิน ค่าความชื้นน้ำในชั้นหินและค่าความชื้นที่สภาวะเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่

ไหลซึมสู่ชั้นดินและเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝน ช่วงเวลาที่ฝนตกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินมากกว่ารูปแบบของฝนที่ตกและรอบปีการเกิดซ้ำ มวลดินที่มีความลึกน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลง Factor Safety (F.S.) สอดคล้องกับรูปแบบของฝนอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและปริมาณน้ำฝนในอดีตที่เกิดการพิบัติทำให้ได้เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ค่า F.S. เท่ากับ 1.1 โดยแผนที่เกี่ยวข้องที่มีค่า F.S.<1.1 มีอยู่ 60.87 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่พิบัติ

สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ , วรวัชร ต่อวิวัฒน์ และวารากร ไม้เรียง (2550) ได้ทำการศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก โดยศึกษาด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสำหรับงานดินถล่ม 2 วิธีคือ KU-Multi state Direct Shear Test : KU-MDS และ Strength Reduction Index : SRI วิธีการทดสอบได้ออกแบบให้ศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนและอัตราส่วนช่องว่างเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยเก็บตัวอย่างคงสภาพของดินผุจากชุดหินกลุ่มต่างๆทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงเพื่อหาคุณสมบัติการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำที่เรียกกันว่า SRI ใช้ตัวอย่างดิน 2 สภาวะอันได้แก่ สภาวะตามความชื้นในธรรมชาติ (Unsoaked) และสภาวะเมื่อนำดินแช่น้ำ (Soaked) รวมเป็น 1 การทดสอบและการทดสอบ KU-MDS ทดสอบโดยวิธี Multi-stage ในแต่ละตัวอย่างและเปลี่ยนแปลงความชื้นทั้งหมด 3 ตัวอย่างรวมเป็น 1 ชุดการทดสอบ ผลการทดสอบ SRI พบว่าดินผุจากหินแกรนิตมีร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินผุจากหินโคลน และหินดินดานมีร้อยละการลดลงที่ค่อนข้างกระจายตัวระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 สำหรับดินที่ผุจากหินทรายมีร้อยละการลดลงมากกว่าร้อยละ 50 ผลการทดสอบ KU-MDS ได้ว่าเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้นค่า Shear stress ของดินจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นสาเหตุการพิบัติของลาดดินส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนัก จากผลการทดสอบ SRI แสดงให้เห็นว่าการยุบตัวในดินบางประเภทส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนไปและวิธีการทดสอบแบบ SRI TEST เหมาะสำหรับการทดสอบในพื้นที่กว้างเพื่อหาแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบ KU-MDS นอกจากจะได้ผลการทดสอบที่ละเอียดมากขึ้นยังมีนัยสำคัญในการนำมาใช้เตือนภัยดินถล่มเนื่องจากฝนตกหนักได้ต่อไป

อดุลย์ ะ โก๊็บ (2551) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์ ช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050 ภาคใต้ประเทศไทย : โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพมาทดสอบหาลักษณะที่ความชื้นธรรมชาติและในสภาวะวิกฤติ

ที่ความชื้นเกือบอิ่มตัวเมื่อฝนตกและพิจารณาถึงกรณีที่ลาดดินมีการเลื่อนตัวมาก่อน โดยใช้ค่ากำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง จากผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength) พบว่าค่ากำลังเฉือนของดินชุ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าในดินความชื้นธรรมชาติ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน กำหนดให้สภาวะดินชุ่มน้ำเป็นสภาวะวิกฤติที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวของลาดดินและดินความชื้นธรรมชาติเป็นสภาวะปกติไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในปัจจุบัน (At Present) ที่ความชื้นตามธรรมชาติอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย ($Peak_n F.S.=2.312$, $Residual_n F.S.=1.832$) ในสภาวะลาดดินชุ่มน้ำค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินน้อยกว่า 1 ($Peak F.S.=0.935$, $Residual F.S.=0.812$) และการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ (Back Analysis) ได้ว่าอัตราส่วนปลอดภัยในทุกสภาวะจะมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินปัจจุบัน ($Peak_n F.S.=2.152$, $Residual_n F.S.=1.728$, $Peak F.S.=0.867$, $Residual F.S.=0.762$ ตามลำดับ) อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของลาดดินหลังการพังทลายเป็นสาเหตุสำคัญเพราะในขณะที่พังทลายลาดดินได้ปรับรูปร่างเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลจากส่วนที่เป็นแรงกระทำ (Driving Force) บางส่วนได้เลื่อนไถลลงมากลับกลายเป็นส่วนต้านทานการพังทลาย (Resisting Force) ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มากกว่า

Rahardjo et al (2007) ได้ศึกษาปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนของเสถียรภาพของลาดดินเนื้อเดียวกันภายใต้ปริมาณน้ำฝนโดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของดิน ความชื้นฝน ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน ลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียง ความหนาของชั้นดิน) ซึ่งชุดตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วยความหนาของชั้นดิน H_s (5, 10, 20 และ 40 เมตร) ความลาดเอียงของลาดดิน α (26.6, 33.7, 45.0 และ 63.4 องศา) ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน H_w (2.5, 5, 7.5, 10 และ 15 เมตร) และดินที่ใช้ศึกษามี 3 ชนิดคือ $f_{10,-4}$ แทนดินทราย $f_{50,-5}$ แทนดินตะกอนทราย $f_{100,-6}$ แทนดินเหนียว มีความชื้นฝน I_r ที่ใช้ศึกษา (0.9, 1.8, 3.6, 5.4, 9, 18, 36, 54, 80, 90, 180, 360 และ 900 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) โดยให้ฝนตกต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงและมีพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ศึกษาคือความเชื่อมั่นประสิทธิผล c' เท่ากับ 10 กิโลปาสกาล มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล ϕ' เท่ากับ 26 องศา อัตราเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด ϕ^b เท่ากับ 26 องศา และหน่วยน้ำหนักของดินเท่ากับ 20 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ข้อมูลจากการทดสอบในพื้นที่สิงคโปร์ (Rahardjo, 2000) ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของดิน (ค่าความซึมผ่านของน้ำในดิน) และความชื้นฝนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วยน้ำฝนโดยในส่วนองระดับน้ำใต้ดินเริ่มต้นและลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียงและความหนา

ของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน และยังชี้ให้เห็นว่าความสำคัญของฝนที่ตกก่อนหน้านั้นขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่านของดิน

บทที่ 3

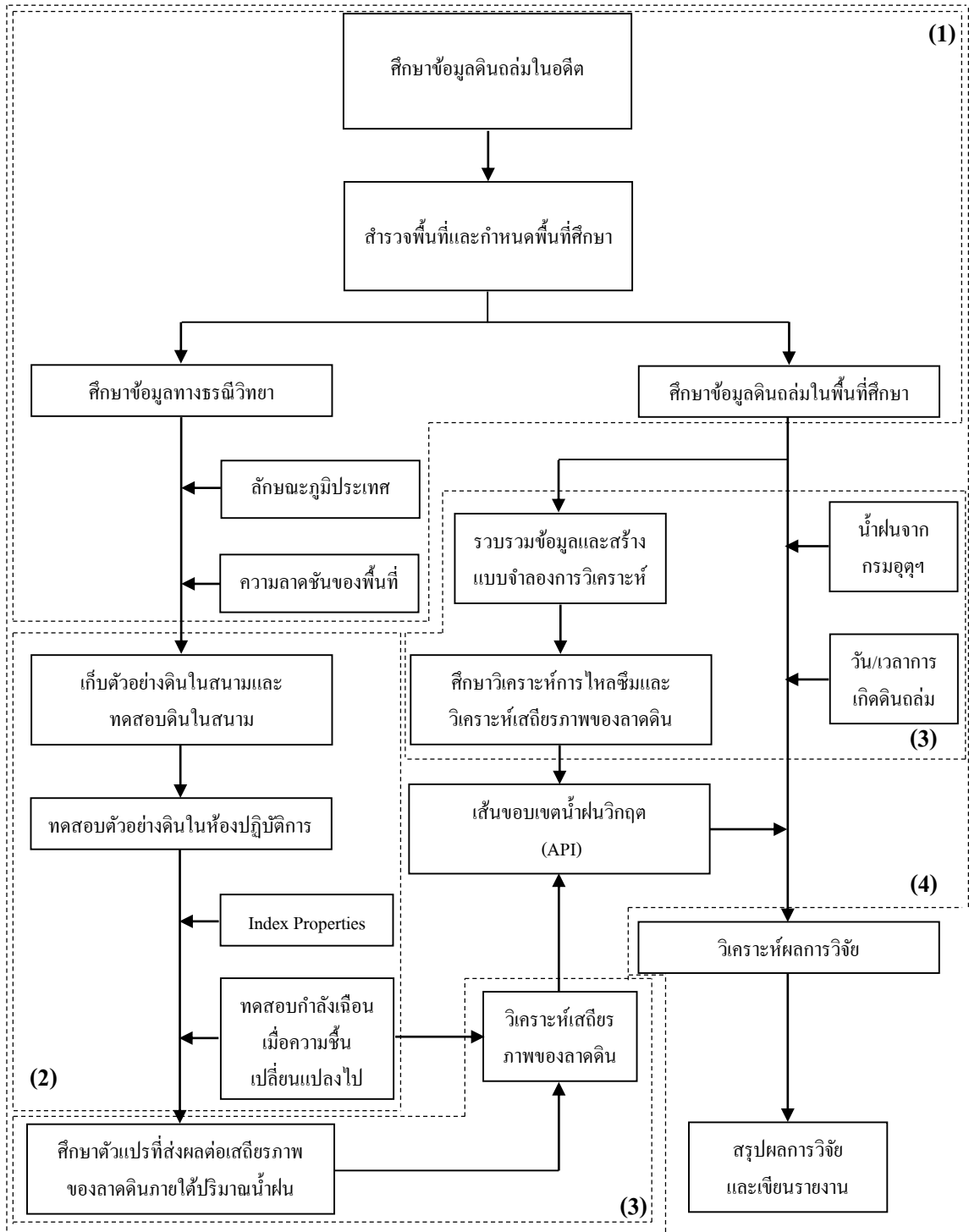
วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้อย่างแม่นยำจำเป็นต้องมีความรู้และเข้าใจปฐพีกลศาสตร์ กระบวนการเกิดลาดดินพิบัติภัย และข้อมูลทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีการไหลซึมเนื่องจากน้ำฝน ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในขั้นตอนและขอบเขตของงานวิจัยจึงทำการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานของงานวิจัยออกได้เป็น 4 กลุ่มขั้นตอนหลัก ได้แก่ ศึกษารวบรวมข้อมูลลาดดินพิบัติในอดีต การทดสอบตัวอย่างดินทางวิศวกรรม การศึกษาวิเคราะห์แบบจำลอง และการจัดทำระบบเตือนภัยเนื่องจากลาดดินพิบัติภัยของพื้นที่ศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1 การเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบคุณสมบัติดิน

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมลาดดินพิบัติภัยจำเป็นต้องมีข้อมูลทางภูมิประเทศ ธรณีวิทยา และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในพื้นที่ ดังนั้นจึงทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่มาทำการวิเคราะห์หาคูณบัตินทางกายภาพ (Physical Property) และคูณบัตินทางวิศวกรรม (Engineering Property) ซึ่งจะทำการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเขตพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ซึ่งมีประวัติการเกิดลาดดินพิบัติภัย โดยจากการสำรวจเบื้องต้นได้กำหนดพื้นที่ศึกษาออกเป็น 3 บริเวณ ซึ่งพื้นที่ศึกษาทั้งหมดมีความต่อเนื่องของการเกิดลาดดินพิบัติภัย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) คือ

- 1) บริเวณด้านบนใกล้กับจุดเริ่มต้นของการพิบัติเดิม โดยใช้สัญลักษณ์ T เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่างในพื้นที่ทดสอบ
- 2) บริเวณตอนกลางของภูเขาซึ่งยังเป็นดินที่มีลักษณะคงสภาพเดิมโดยจะแบ่งออกเป็นสองตำแหน่งใช้สัญลักษณ์ M1, M2
- 3) บริเวณเชิงเขาหรือตอนล่างสุดของภูเขาใช้สัญลักษณ์ U



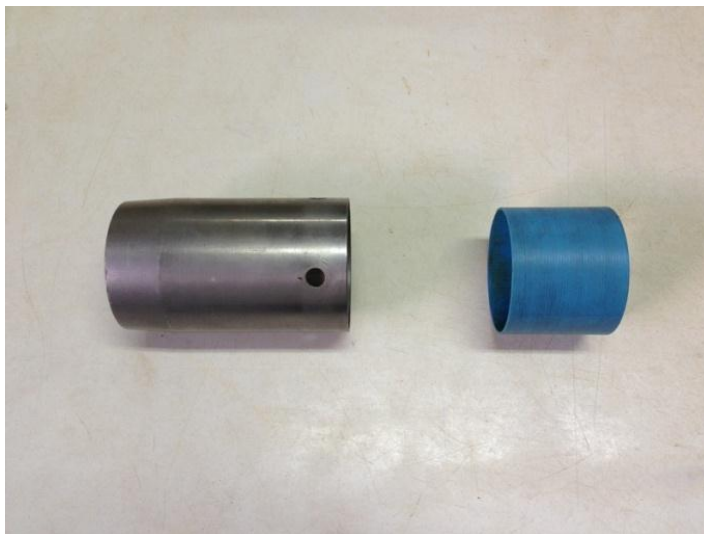
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed Samples) และแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample) รวมทั้งมีการทดสอบคุณสมบัติดินในสนามซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

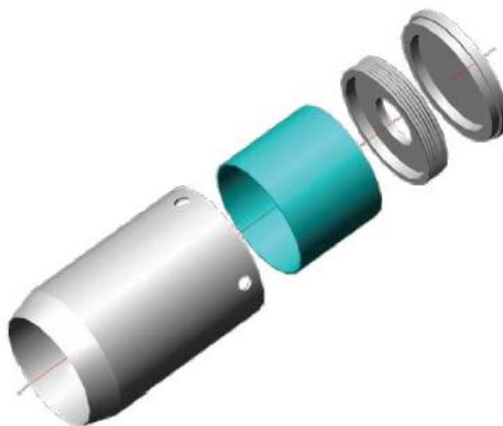
3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

การทดสอบค่าความแข็งแรงของลาดดิน ณ สภาวะธรรมชาติและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำสามารถทำได้โดยใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพซึ่งเป็นตัวแทนของลาดดินในธรรมชาติของพื้นที่ที่ศึกษา โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพจะใช้ชุดเก็บตัวอย่างกระบอกบาง (Thin Wall Tube) ซึ่งถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เรียกว่า KU – Miniature Sampler (วรากรและคณะ, 2548) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) ชุดเก็บตัวอย่างกระบอกบางที่ใช้จะต้องมีสิ่งสำคัญคือ ความบางมากพอที่จะไม่ทำให้โครงสร้างดินเสียรูปและสามารถทนต่อแรงกระทำได้ดี ดังนั้นชุดกระบอกบางจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ กระบอกสแตนเลสด้านนอกเพื่อทนต่อแรงกระทำและภายในจะบรรจุกระบอก PVC สำหรับเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ ซึ่งขนาดของกระบอกถูกออกแบบให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเลื่อน (Shear Box) เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินเสียหายขณะขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบความแข็งแรงโดยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test)

ในการเก็บตัวอย่างดินจะทำการขุดดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger) ไปจนถึงระดับที่ต้องการเก็บตัวอย่าง จากนั้นใช้คู่มือน้ำหนักตอกบนแท่นรองตอกเพื่อตัดดินรอบๆ ให้ขาดแล้วจึงทำการหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากกันกับภายนอกกระบอกดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) โดยตัวอย่างดินจะถูกบรรจุอยู่ภายในกระบอก PVC ที่อยู่ด้านในกระบอกเก็บตัวอย่าง เมื่อนำชุดเก็บตัวอย่างขึ้นมาจากหลุมจะทำการนำตัวอย่างดินห่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นและใส่ในถุงอีกชั้นเพื่อความสะดวกในการเก็บรักษาและขนส่ง



(ก) ชุดเก็บตัวอย่างกระบอกบางที่พัฒนามาจาก KU – Miniature Sampler



(ข) ชุดเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler (วรากรและคณะ, 2548)

รูปที่ 3.3 ชุดเก็บตัวอย่างดินที่พัฒนามาจากชุดเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler



(ก) การตอกตุ้มเหล็กเพื่อเก็บตัวอย่าง



(ข) ตัวอย่างดินแบบไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) เมื่อดันออกจากกระบอกเหล็กแล้ว

รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

3.1.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed Sample)

การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมีความประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน การวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดดิน การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและค่าพิกัดพลาสติก และการจำแนกชนิดของดิน เป็นต้น โดยคุณสมบัติทางกายภาพจะบอกลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินในพื้นที่ศึกษา จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณภูเขาที่มีชั้นดินวางตัวไม่ลึกมากนัก จึงกำหนดให้เก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพทุกๆระยะ 0.5 เมตร ไปจนถึงชั้นหินด้านล่างหรือไม่สามารถเก็บตัวอย่างต่อได้

การเก็บตัวอย่างทำได้โดยใช้สว่านมือ (Hand Auger) เจาะดินลงไปจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ จากนั้นทำการเก็บดินให้ได้ในปริมาณที่ต้องการและบรรจุใส่ลงในถุงที่เตรียมไว้พร้อมกับระบุตำแหน่งและระดับความลึกให้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) โดยตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพที่เก็บตัวอย่างละประมาณ 2.5 กิโลกรัม



(ก) การเก็บตัวอย่างดินโดยใช้สว่านมือ
(Hand Auger)



(ข) ตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ
(Disturbed Sample)

รูปที่ 3.5 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนาม

การทดสอบคุณสมบัติของดินในสนามเป็นการทดสอบดินตามสภาพจริงสามารถทดสอบได้ในขณะที่ดินยังคงสภาพเดิมอยู่ แต่การทดสอบวิธีนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขการทดสอบได้ทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีข้อจำกัดด้านความละเอียดของค่าตัวแปรและยากต่อการตีความ โดยวิธีทดสอบที่ใช้ทดสอบดินในสนามมีดังนี้

ก) การทดสอบวิธีหังเบ (Kunzelstab Penetration Test)

การทดสอบวิธีหังเบ (Light Ram Sounding Test) อ้างอิงในมาตรฐาน DIN 4094 (Swedish Geotechnical Institute, 1989) ผลการทดสอบที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับค่าของ Standard Penetration Test (SPT-N) ทำให้สามารถทราบค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Bearing Capacity) ของดิน นอกจากนี้สามารถประมาณความหนาแน่นของชั้นดินและค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) ได้ (Mayerhof, 1956) โดยผลของการทดสอบที่ได้นี้จะทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของชั้นดินเบื้องต้น

การทดสอบจะทดสอบในบริเวณใกล้ๆกับการเก็บตัวอย่างแบบแปลงสภาพและแบบคงสภาพในทุกๆตำแหน่ง โดยมาตรฐานกำหนดให้ตุ้มน้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัม มีระยะยก 50 เซนติเมตร กระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไปโดยนับจำนวนครั้งของการตอก (N) ทุกระยะ 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งที่ทำการตอกเพื่อนำมาแปลเป็นข้อมูลคุณสมบัติของดิน โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

ข) การทดสอบความชื้นน้ำแบบ (Double Ring Test)

การทดสอบการชึ้มน้ำตามมาตรฐาน ASTM 3385-03 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ Constant Head เหมาะกับการทดสอบความชึ้มน้ำของดินที่ผุสลายอยู่กับที่ หรือบริเวณพื้นที่ของกลุ่มดินทรายหรือตะกอนทราย โดยการทดสอบจะทำการตอกโลหะทรงกระบอกที่มีปลายเปิดทั้ง 2 ด้านลงไปในดิน เริ่มจากทรงกระบอกด้านนอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ตกลงไปให้ลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ถัดไปทำการตอกทรงกระบอกในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30

เซนติเมตร ให้ลึกลงไปในดินประมาณ 15 เซนติเมตร ตรวจสอบปากกระบอกให้อยู่ในแนวระดับ จากนั้นเติมน้ำเข้าไปในทรงกระบอกด้านนอกโดยให้น้ำมีความสูงจากระดับผิวดินประมาณ 7.5 เซนติเมตร และทำการเติมน้ำในทรงกระบอกในให้มีความสูงเท่ากัน โดยทรงกระบอกทั้งสองจะต่อเข้ากันถึงจ่ายน้ำอีก 2 ถัง โดยถังจ่ายน้ำจะมีมาตรวัดระดับน้ำที่ลดลงเมื่อน้ำได้เติมเข้าสู่ทรงกระบอกทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) ทำการวัดระดับน้ำในถังจ่ายน้ำของทั้งสองกระบอกในระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120 นาที และทุกๆ ชั่วโมง โดยควรควบคุมให้ระดับน้ำในทรงกระบอกทั้งสองคงที่และมีความสูงเท่ากันอยู่เสมอ อัตราของน้ำที่ซึมลงสู่ดินเมื่อนำมาเทียบกับเวลาที่บันทึกไว้จะสามารถหาความสัมพันธ์ของความชื้นน้ำของดินได้



รูปที่ 3.6 การทดสอบวิธีหยั่งเบา Kunzelstab Penetration Test

3.1.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นการนำตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและแบบคงสภาพที่ถูกเก็บมาจากสนามมาทำการทดสอบ โดยสามารถแบ่งเป็นชนิดการทดสอบได้ดังนี้

ก) การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ (Index Properties)

ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพจะนำตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ลาดดินมาทดสอบเพื่อจำแนกประเภทของตัวอย่างดิน และเป็นข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยมีจำนวนตัวอย่างและวิธีการทดสอบแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1



(ก) การวัดค่าความชื้นน้ำของดิน โดยใช้ Double Ring Test



(ข) ชุดควบคุมการไหลของน้ำเข้าสู่โลหะทรงกระบอก
รูปที่ 3.7 การทดสอบความชื้นน้ำด้วยวิธี Double Ring Test

ตารางที่ 3.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินด้วยตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ

ชนิดของการทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ ASTM	จำนวนตัวอย่าง
การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water content, w)	ASTM D 2216	15
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรง (Sieve analysis)	ASTM D 421	15
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity, G_s)	ASTM D 854-02	5
การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL)	ASTM D 4318	9
การจำแนกดินแบบ USCS (Unified soil classification system)	ASTM D 2487	15

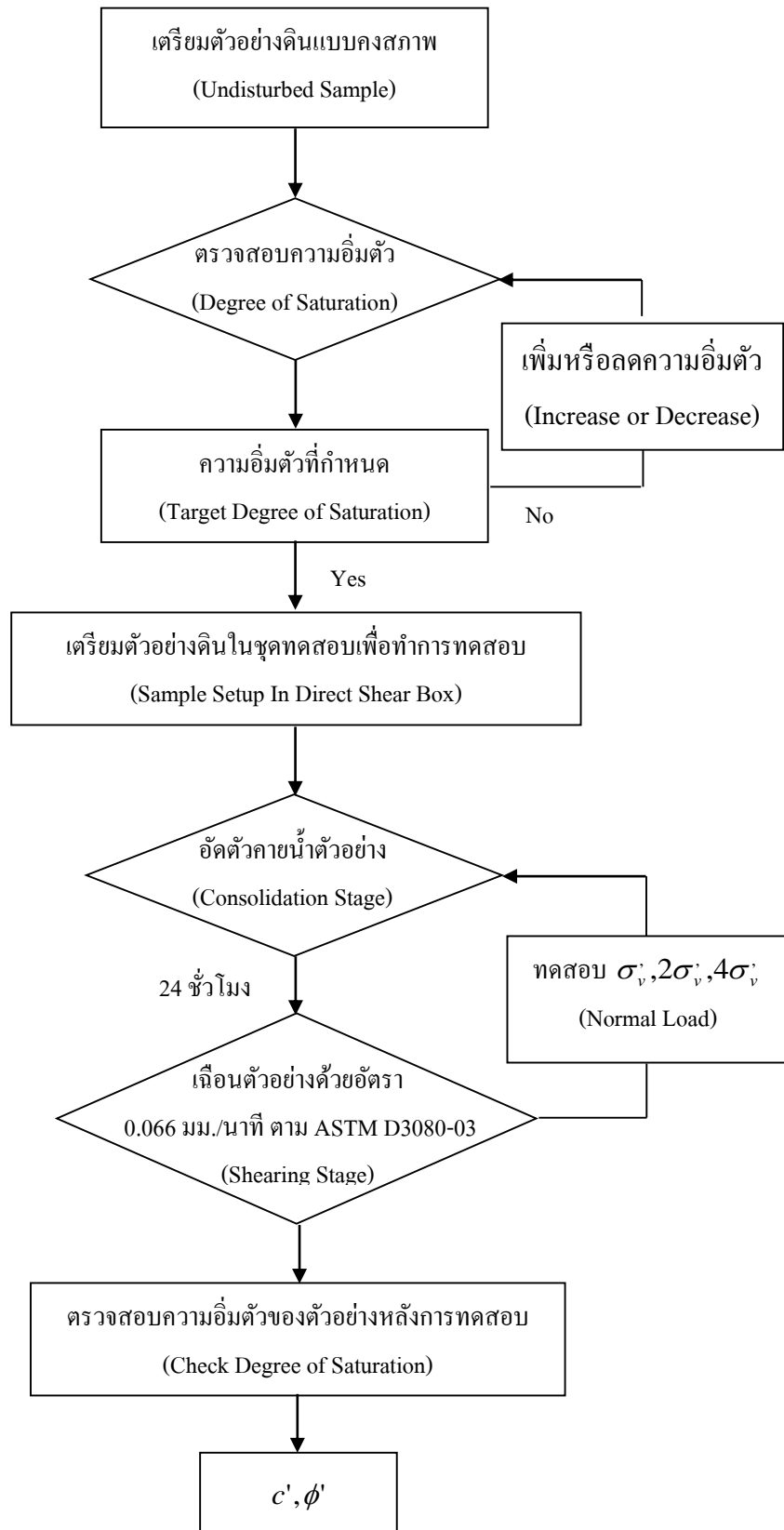
ข) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไป

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength Parameter) เนื่องจากตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินที่ผุพังในพื้นที่ (Residual Soil) ดังนั้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำเป็นต้องทดสอบแบบคงสภาพ ซึ่งการทดสอบใช้ชุดเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM 3080-03 การทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดิน (c, ϕ) โดยทั่วไปจะต้องใช้จำนวนตัวอย่างดินอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ Mohr – Coulomb's ซึ่งจากจำนวนของตัวอย่างดินที่มีอยู่อย่างจำกัดและลักษณะของดินที่มีความแปรปรวนส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่างมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อลดปัญหาความแปรปรวนจึงทำให้การทดสอบหาค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนใช้ตัวอย่างดินเพียงหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบเรียกว่า Multi-Stage Direct Shear Test (วรากร และคณะ 2546, 2548) วิธีนี้จะให้ค่ากำลังเฉือนของดินที่น่าเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติเมื่อทดสอบกับดินที่ผุพังมาจากหิน โดยการทดสอบแบบ Multi-Stage จะให้ค่ากำลังเฉือนสุดท้าย (Ultimated Shear Strength) เท่านั้นซึ่งไม่สามารถหาค่ากำลังเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ใดๆก็ตามที่ผุสลายนอยู่กับที่ (Residual Soil) โดยทั่วไปเป็นดินที่ไม่จับตัวแน่น (Loose Structure) ดังนั้น Ultimated Shear Strength จึงเป็นค่าสูงสุด

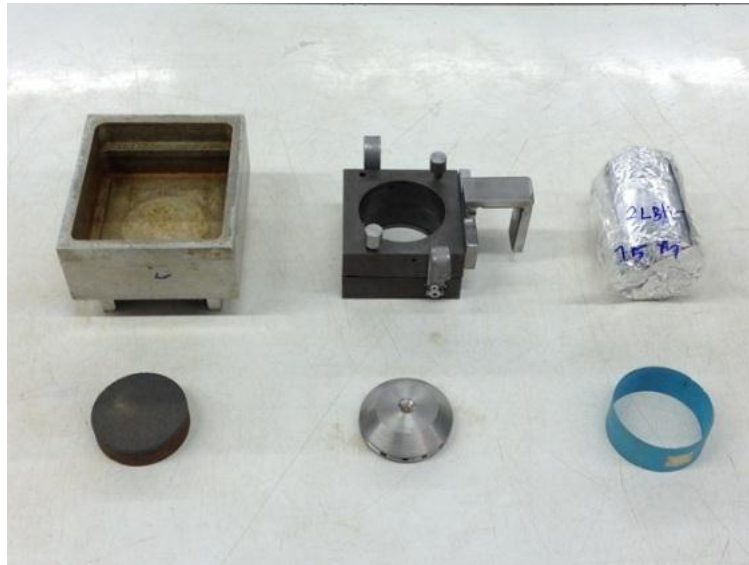
จากงานวิจัยในอดีตพบว่าปริมาณความชื้นมีความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน โดยเฉพาะดินที่มีส่วนประกอบของกลุ่มดินเหนียวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนไป โดยความชื้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงน้ำ (Metric Suction) อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในขณะเดือนตัวอย่างไม่สามารถหาค่าของแรงดึงน้ำได้โดยตรง ดังนั้นในการศึกษานี้การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปสามารถกระทำได้โดยใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพกำหนดชุดตัวอย่างดินออกเป็น 4 กลุ่มชุดการทดสอบตามตำแหน่งที่สนใจศึกษา (ตำแหน่ง T, M1, M2, และ U ตามลำดับ) โดยแบ่งเป็นระดับความชื้นต่างๆ ซึ่งชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2 ในขั้นตอนของการเดือนตัวอย่างดินจะทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำ-เดือนแบบระบายน้ำ (Consolidated-Drained Test) โดยใช้อัตราเร็วในการเดือนประมาณ 0.06 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสัมพันธ์กับการระบายน้ำของตัวอย่างดิน สามารถคำนวณอัตราการเดือนตัวอย่างจากปริมาณการทรุดตัวตามสูตรของ ASTM D3080 เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างดิน ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการเดือนควรอยู่ในช่วง 0.007- 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่ากำลังที่ได้จะไม่แตกต่างกัน Cheung et al. (1988) ก่อนการเดือนตัวอย่างจะต้องทำการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดิน (Consolidated) จนตัวอย่างดินทรุดตัวเสร็จสมบูรณ์ซึ่งในน้ำหนักกดทับแรก (First Stage of Normal Load) ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนไม่เกิดการทรุดตัวแล้ว จึงทำการเดือนตัวอย่างจนเกือบถึงจุดพิบัติในแต่ละน้ำหนักกดทับ โดยก่อนการเดือนตัวอย่างในน้ำหนักกดทับถัดไปต้องทำการผ่อนคลายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน (Unloading) เพื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับใหม่แล้วก็เริ่มทำการอัดตัวคายน้ำแล้วเดือนตัวอย่างเช่นเดิมทำซ้ำเช่นนี้อย่างน้อย 3-5 น้ำหนักกดทับ ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 3.2 ชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป

ตำแหน่ง	ความลึก (m)	ความชื้น เริ่มต้น (%)	Degree of saturation (%)						
			0-10	10-20	20-40	40-60	60-70	70-80	80-100
T	1.5	14.32	/	/	/	/	/	/	/
M1	1	15.87	/	/	/	/	/	/	/
M2	1.5	17.42	/	/	/	/	/	/	/
U	1	15.82	/	/	/	/	/	/	/



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบ Multi-Stage Direct Shear Test โดยสรุป



(ก) อุปกรณ์ในการทดสอบการเฉือนโดยตรงและตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed)



(ข) ขณะทดสอบเฉือนตัวอย่างดิน

รูปที่ 3.9 การทดสอบการเฉือนโดยตรงด้วยวิธี Multi-Stage Direct Shear Test

ค) การทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve)

เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำด้านลบ (Suction) กับปริมาณความชื้นซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดินที่ผสมอยู่กับที่ (Residual Soil) การทดสอบหา SWCC สามารถทำได้ 2 กรณีคือ กรณีแบบเปียก (Wetting) และแบบแห้ง (Drying) โดยการทดสอบทั้งสองสามารถทำได้หลายวิธีแต่ในการศึกษานี้ใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Tensiometer ซึ่งสามารถวัดค่าได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาและสามารถติดตั้งบนตัวอย่างดินที่ต้องการวัดค่าได้ง่าย แต่เครื่องมือชนิดนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ สามารถวัดแรงดันน้ำได้ในช่วง 0 – 90 กิโลปาสกาล (Jotisankasa et. Al, 2010) เนื่องจากอากาศจะรั่วเข้าไปในกระเปาะดินเผาทำให้ค่าที่อ่านได้จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะคงที่จนกระทั่งมีการให้น้ำแก่ดินอีกครั้ง

การทดสอบด้วยวิธี Wetting ทำได้โดยการหยดน้ำลงบนตัวอย่างดินที่จะใช้เป็นตัวแทนลาดดิน โดยควบคุมให้น้ำมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดดิน จากนั้นทิ้งไว้ให้น้ำไหลแทรกซึมลงสู่ตัวอย่างดินจนมั่นใจว่าความชื้นในตัวอย่างดินมีความใกล้เคียงกันตลอดตัวอย่างแล้วจึงใช้ Tensiometer วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในมวลดินพร้อมกับชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลง ค่าความต่างศักย์และน้ำหนักของตัวอย่างดินที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำในมวลดินกับปริมาณความชื้นในมวลดินในขณะนั้น ทำซ้ำเช่นนี้ต่อไปจนค่าความต่างศักย์ที่นำมาแปลงเป็นค่าแรงดันน้ำอ่านค่าแรงดันน้ำได้เท่ากับศูนย์หรือมีค่าคงที่ก็จะได้ความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของ SWCC โดยอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และ (ข)

ในส่วนการทดสอบด้วยวิธี Drying จะเริ่มต้นจากการนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้แบบอ้อมตัวมาลดความชื้น โดยขั้นตอนการทดสอบจะเป็นเช่นเดียวกันกับวิธีทดสอบแบบ Wetting แต่จะทดสอบกลับกัน โดยเป็นการลดความชื้นหรือเป็นการทดสอบจากเปียกไปแห้งซึ่งผลการทดสอบโดยทั่วไปที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะเป็นผลในส่วนของการ Wetting เนื่องจากมีลักษณะการทดสอบที่คล้ายคลึงกับในสภาพความเป็นจริง โดยเป็นการเพิ่มความชื้นขึ้นไปเรื่อยๆเช่นเดียวกับในสภาพที่ฝนตกต่อเนื่อง



(ก) เครื่องมือทดสอบ Tensiometer



(ข) การทดสอบด้วยวิธี Wetting

รูปที่ 3.10 การทดสอบหา Soil-Water Characteristic Curve, SWCC

3.2 การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีสมการดัง
สมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}
 \text{F.S.} &= \frac{\text{แรงต้านทานการพิบัติ}}{\text{แรงกระทำให้เกิดการพิบัติ}} && (3.1) \\
 &= \frac{\text{Shear strength of soil (effective-pore water pressure)}}{\text{Weight of soil mass (soil+water)}} \\
 &= \frac{c_b + (\sigma - u_a) \tan \phi'}{\gamma A} \\
 &= \frac{c + (u_w - u_a) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi'}{\gamma' A + \gamma_w A}
 \end{aligned}$$

เมื่อ	c_b	=	ความสัมพันธ์ของแรงยึดเกาะของเม็ดดินในดินที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำอันเนื่องจากแรงดึงน้ำ
	c	=	แรงยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)
	σ	=	หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)
	u_a	=	แรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore Air Pressure)
	$(\sigma - u_a)$	=	หน่วยแรงสุทธิ
	u_w	=	แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure)
	$(u_w - u_a)$	=	แรงดึงน้ำ (Matric Suction)
	ϕ'	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน
	ϕ^b	=	มุมที่ระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนที่สัมพันธ์กับแรงดึงน้ำ
	γ	=	หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (Total Unit Weight)
	A	=	พื้นที่ที่แรงเฉือนกระทำ
	γ'	=	ความหนาแน่นประสิทธิผล (Effective Unit Weight)
	γ_w	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ

ซึ่งจากสมการพบว่าน้ำในมวลดินส่งผลกระทบทั้งแรงต้านและแรงกระทำให้เกิดการบีบอัด ดังนั้นน้ำหรือความชื้นมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของลาดดินอย่างมาก

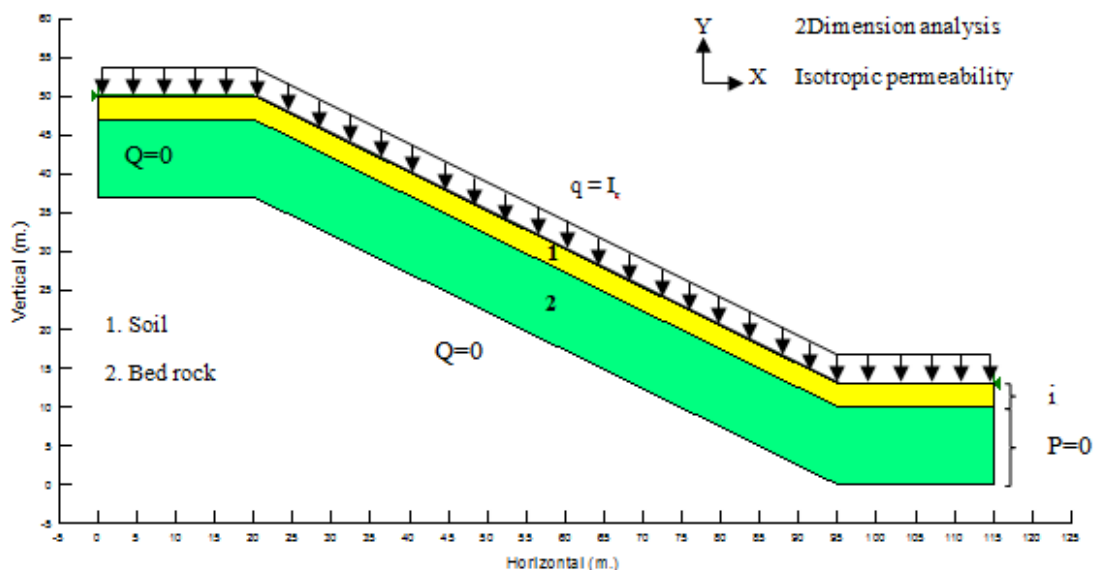
การบีบอัดของลาดดินโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นภายในมวลดินโดยการแทรกซึมของน้ำฝนลงสู่มวลดิน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินซึ่งการไหลซึมจะขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและชั้นดิน ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องมีการกำหนดการพิจารณา ดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ความลาดชันและการสร้างแบบจำลองลาดดิน

เนื่องจากภูมิประเทศมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการวิเคราะห์ความลาดชันและลักษณะของชั้นดินของหน้าตัดลาดดินจึงทำได้โดยการลงสำรวจพื้นที่ศึกษาและเจาะสำรวจเพื่อหาลักษณะของชั้นดินและชั้นหินพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ เช่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกรมทรัพยากรธรณี เป็นต้น พบว่าชั้นดินในพื้นที่ศึกษา (ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช) มีลักษณะเป็นดินที่ผุสลายมาจากหินแกรนิต มีลักษณะคล้ายคลึงกันตลอดทั้งหน้าตัด และการวางตัวของชั้นดินมีความหนา 2.0 – 3.0 เมตร วางตัวอยู่ด้านบนของชั้นหินผุและเมื่อนำพิกัดตำแหน่งมาระบุลงในแผนที่ดาวเทียมจะสามารถเปรียบเทียบหาความลาดชัน (Slope) และระดับความสูง (Elevation) ของลาดดินที่ศึกษาได้เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนในการสร้างลาดดินจำลองเพื่อวิเคราะห์การไหลซึมรูปแบบหน้าตัดลาดดินจำลองที่ใช้วิเคราะห์การไหลซึมแสดงดังรูปที่ 3.11 และเนื่องจากการไหลซึมของดินในความเป็นจริงมีความซับซ้อน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการปรับลดความซับซ้อนลง (Simplify) โดยกำหนดสมมติฐานโดยจะมีสมมติฐานการไหลซึมของหน้าตัดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

1. องค์ประกอบของบนลาดดินจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นบนสุดจะเป็นชั้นดิน (Soil) มีความหนา 3.0 เมตร และชั้นล่างสุดจะเป็นชั้นหิน โดยลาดดินมีความลาดเอียงเฉลี่ย 26.5 องศา
2. ชั้นดินและชั้นหิน มีคุณสมบัติความซึมน้ำแบบต่อเนื่อง (Continuum Permeability) ไม่ขึ้นกับทิศทาง (Isotropic Permeability)
3. การไหลของน้ำจะพิจารณาการไหลเพียง 2 มิติ
4. กำหนดให้น้ำฝนกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

5. บริเวณด้านซ้ายและด้านล่างของลาดดินจำลองกำหนดให้ไม่มีการไหลของน้ำ (No Flow, $Q=0$) ในส่วนของด้านขวาของลาดดินจะกำหนดเป็น 2 ส่วน คือชั้นดินให้มีการไหลเป็นแบบอิสระ (Unit Gradient, i) และในส่วนของชั้นหินกำหนดให้มีแรงดันน้ำเท่ากับศูนย์ (Pressure =0) โดยส่วนบนหรือผิวดินกำหนดให้เป็นปริมาณน้ำฝน (Unit Flux , $q=I_r$)

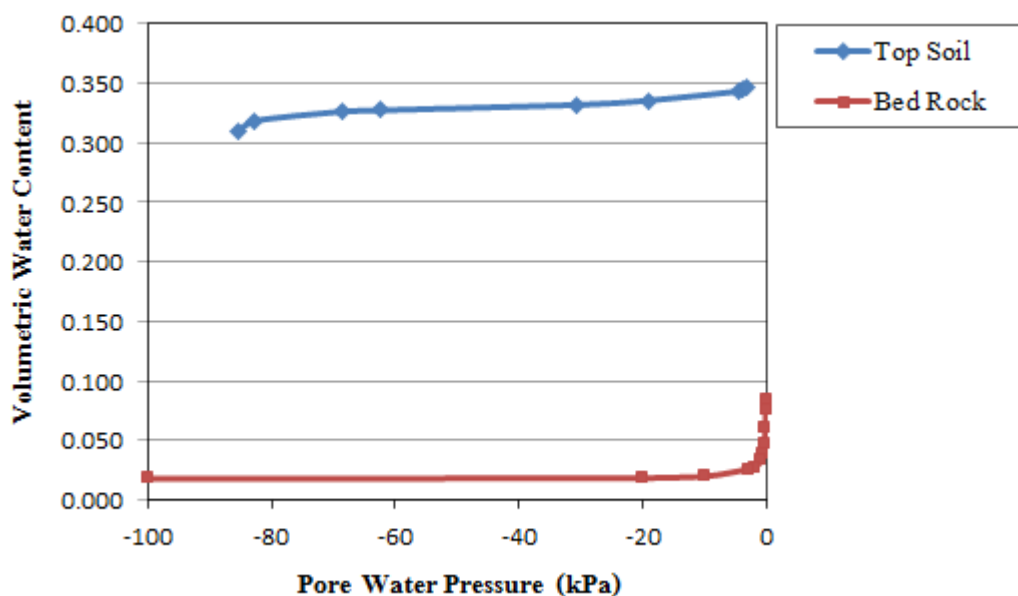


รูปที่ 3.11 แบบจำลองหน้าตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์

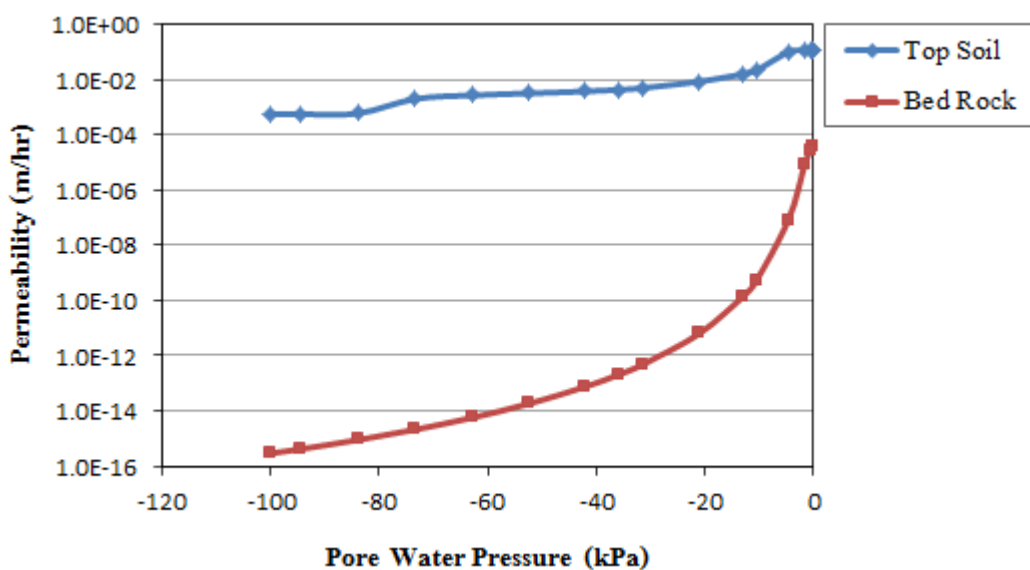
3.2.2 ข้อมูลคุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์

ข้อมูลหรือตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมที่สำคัญ ได้แก่ เส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ที่เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำด้านลบ (Suction) กับปริมาณความชื้นในดิน (Volumetric Water Content) และความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) โดย Soil-Water Characteristic Curve สามารถหาได้จากการทดสอบในตัวอย่างดิน T1@0.8 เมตร ด้วยเครื่องมือที่มีชื่อว่า Tensiometer ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในส่วนของ Permeability Function ของดินสามารถเทียบเคียงได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Soil-Water Characteristic Curve กับค่าความสามารถในการไหลซึมของดินที่อิ่มตัว (K_s) โดยใช้การประมาณด้วยวิธีของ Fredlund and Xing ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และข้อมูลของชั้นหิน (Bed Rock) ได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบหินแกรนิตในฮ่องกง Jiao et al (2005) ซึ่งมีสภาพคล้ายคลึงกันและชั้นหินที่ใช้วิเคราะห์การไหลซึมจะไม่พิจารณาถึงธรณีวิทยาโครงสร้าง ข้อมูลของชั้นดินและหินแสดงดัง

แสดงในรูปที่ 3.12-3.13 ในส่วนของกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ใช้วิเคราะห์จะใช้ข้อมูลของดิน T1@0.8 เมตรเป็นตัวแทนของดินคงสภาพที่บริเวณพื้นที่ที่เกิดการพิบัติ โดยคุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.12 เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ของชั้นดิน (Top Soil) และชั้นหิน (Bed Rock)



รูปที่ 3.13 ความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) ของชั้นดิน (Top Soil) และชั้นหิน (Bed Rock)

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

คุณสมบัติ (Properties)	ชั้นดิน (Top Soil)	ชั้นหิน (Bed Rock)
Soil Water Characteristic	ทดสอบจากตัวอย่างดิน T1@0.8 เมตร	(Jiao et al, 2005)
Permeability Function	เทียบเคียงได้จาก Volumetric Water Content กับความสามารถในการไหลซึมของดินที่อิ่มตัวด้วยวิธีของ Fredlund and Xing $K_s = 3.09e \times 10^{-5}$ m/s	$K_s = 1 \times 10^{-8}$ m/s (Jiao et al, 2005)
Strength Parameter	ใช้ข้อมูลจากตัวอย่างดิน T1@0.8 เมตร	-

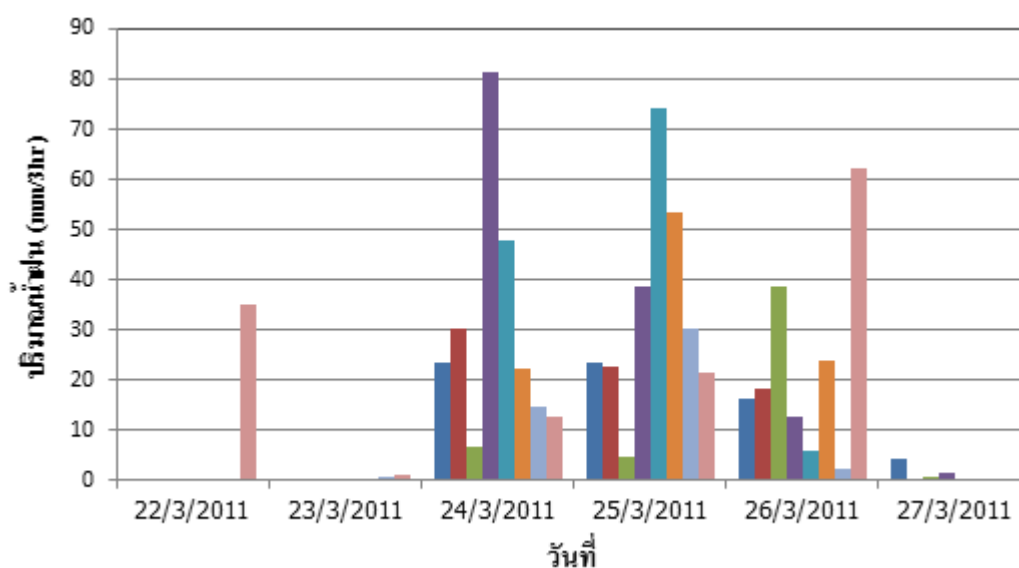
3.2.3 การวิเคราะห์รูปแบบของน้ำฝน

ในส่วนของรูปแบบน้ำฝนที่ใช้วิเคราะห์ในการไหลซึมจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรกจะวิเคราะห์การไหลแบบคงที่ (Steady State) โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปีที่มีค่าเท่ากับ 2.99×10^{-4} เมตรต่อชั่วโมงแทนการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาระดับน้ำใต้ดินปกติ ในรูปแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) โดยจะใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานี 552201 - นครศรีธรรมราช จ.นครศรีธรรมราช แสดงดังในรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นสถานีที่บันทึกข้อมูลน้ำฝนได้ละเอียดทุก 3 ชั่วโมงและมีค่าน้ำฝนใกล้เคียงกับสถานีที่ตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณพื้นที่ศึกษามากที่สุด

3.3 การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินเป็นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของเสถียรภาพภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกันและเพื่อศึกษาหาความสำคัญของตัวแปรแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินว่ามีความสำคัญมากน้อยเพียงใดที่จะส่งผลให้เสถียรภาพเปลี่ยนไป วิธีการวิจัยทำได้โดยศึกษารวบรวมข้อมูลตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อนำมาออกแบบรูปแบบการศึกษาตัวแปร โดยมีตัวแปรคงที่คือ แรงยึดเกาะประสิทธิผล c' เท่ากับ 14.37 กิโลปาสกาล มุมเสียดทานภายใน ϕ' เท่ากับ 24 องศา และหน่วย

น้ำหนักของดินเท่ากับ 16.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นนำรูปแบบตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้มาวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ (Finite Element) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W จากนั้นนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีจำกัดสมมูลซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบวิธี Bishop's Simplified Method โดยใช้โปรแกรม SLOPE/W โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.15 ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของดิน ความชื้นฝน ความลาดเอียง และความหนาของชั้นดินซึ่งได้จำแนกเป็นชุดตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยในแต่ละชุดตัวแปรจะมีวิธีวิเคราะห์ดังนี้

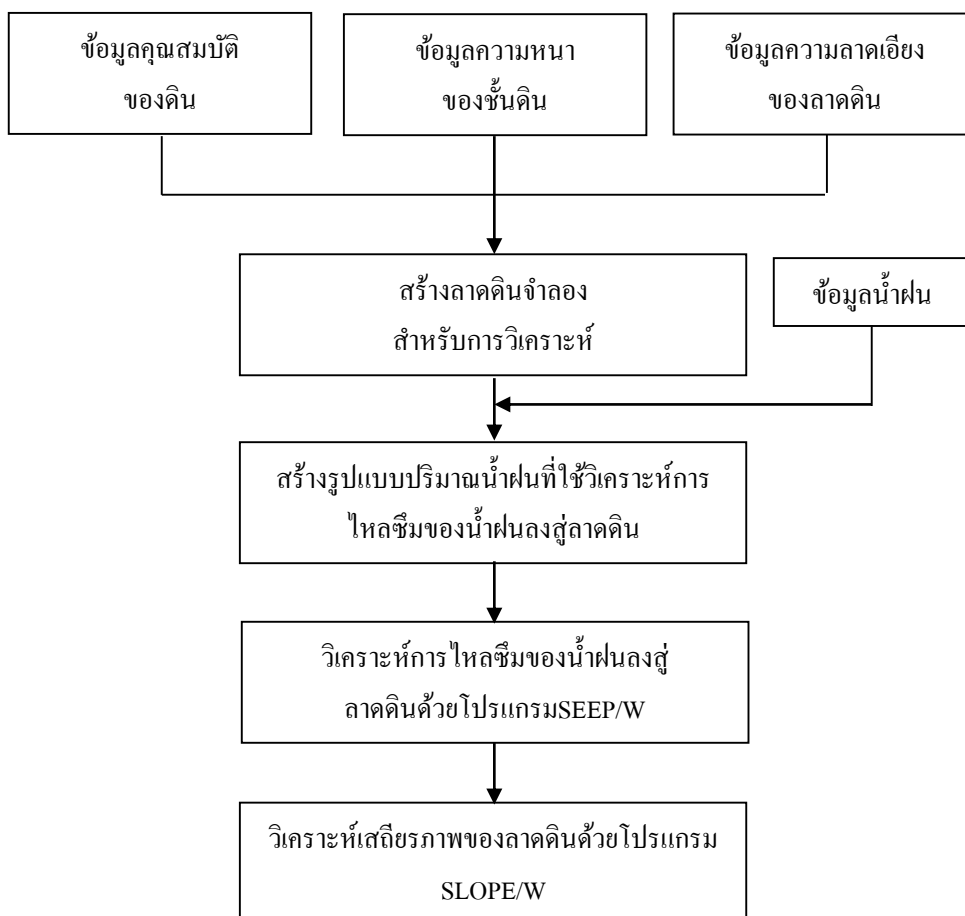


รูปที่ 3.14 ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ใช้วิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ตั้งแต่วันที่ 22 - 27 มีนาคม 2554 มีน้ำฝนสะสม 731.7 มิลลิเมตร (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)

ชุดตัวแปร ก เพื่อศึกษาผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและผลกระทบจากความลาดเอียง ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียง (α°) และความชื้นฝน (I_r) และกำหนดให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน (k_s) กับความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่

ชุดตัวแปร ข เพื่อศึกษาผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ที่ต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินกับความชื้นฝนและกำหนดให้ความลาดเอียงกับความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่

ชุดตัวแปร ค เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงความชื้นฝนกับความหนาของชั้นดินและกำหนดให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินกับความลาดเอียงมีค่าคงที่ซึ่งการศึกษาทั้ง 3 ชุดตัวแปรสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนกลุ่มดินเช่น $f_{10,-4}$ ตัวเลข 10 บ่งชี้ว่าดินมีแรงดึงน้ำ (Matric Suction) เท่ากับ 10 กิโลปาสกาล และตัวเลข -4 บ่งบอกว่าดินมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน $k_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งดินอีก 2 ชนิดก็มีความหมายเช่นเดียวกัน

Winn et al. 2001 ได้เสนอว่าดินที่มี k_s สูง ($k_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที) จะมีความสามารถในการระบายน้ำได้สูงและดินที่มี k_s ต่ำ ($k_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที) จะมีความสามารถระบายน้ำได้ต่ำ โดย k_s มีช่วงกว้างมากคือ (1×10^{-11} - 2×10^{-4} เมตรต่อวินาที) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดกลุ่มดินที่ศึกษาดังนี้ 1) $f_{10,-4}$ เป็นตัวแทนของกลุ่มดินทราย 2) $f_{50,-5}$ เป็นตัวแทนของกลุ่มดินตะกอนทราย และ 3) $f_{100,-6}$ เป็นตัวแทนของกลุ่มดินเหนียว โดยดินแต่ละชนิดจะมี Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึม

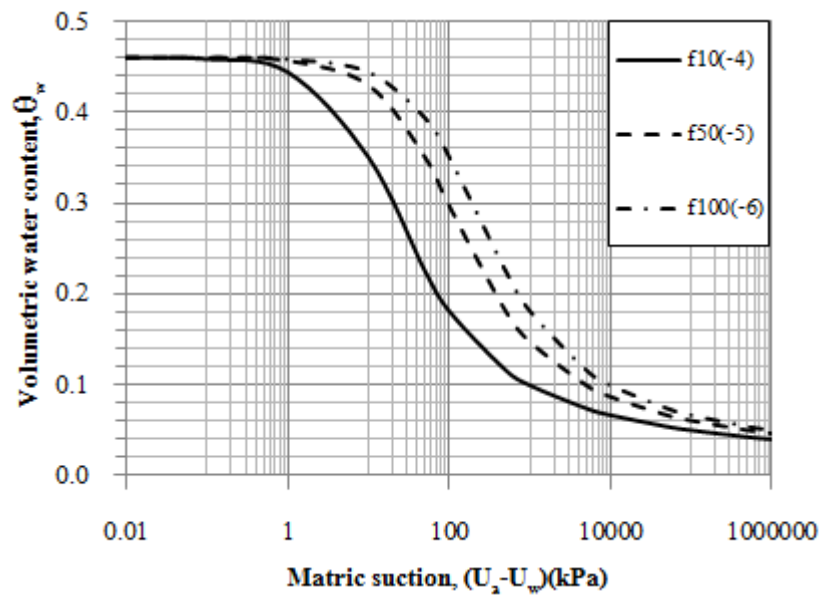
แสดงดังรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข) ซึ่งหาได้จากการประมาณจากสมการของ Fredlund and Xing (1994) และ Leong and Rahardjo (1997) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในการศึกษา

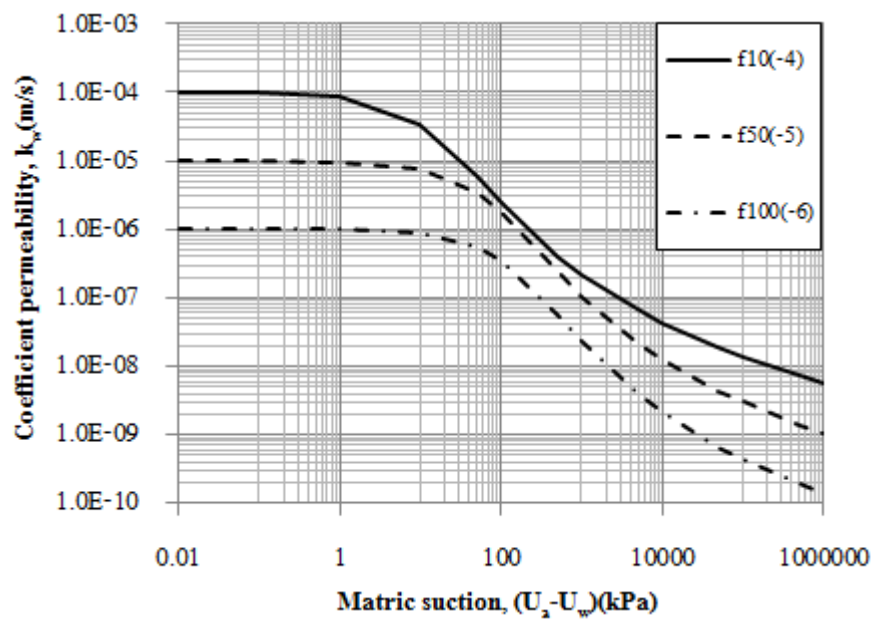
ชุดตัวแปร	ชนิดของดิน	ความลาดเอียง $\alpha(^{\circ})$	ความชื้นฝน (mm./h.)	ความหนาของชั้นดิน (m.)	จำนวนชุดตัวแปรย่อยที่ศึกษา
ก	$\begin{bmatrix} f_{10^{\circ}-4} \\ f_{50^{\circ}-5} \\ f_{100^{\circ}-6} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 25 \\ 30 \\ 45 \\ 60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6 \\ 9 \\ 1k_s \end{bmatrix}$	6	36
ข	$\begin{matrix} (f_{10^{\circ}-4}) \\ \{f_{50^{\circ}-5}\} \\ [f_{100^{\circ}-6}] \end{matrix}$	45	$\begin{matrix} 1.8 \\ 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 18 \\ 36 \\ 180 \\ 360 \end{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 18 \\ 36 \\ 90 \\ 180 \\ 360 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1.8 \\ 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 36 \\ 180 \\ 360 \end{bmatrix} \end{matrix}$	6	23
ค	$f_{50^{\circ}-5}$	45	$\begin{bmatrix} 9 \\ 36 \\ 80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \\ 10 \end{bmatrix}$	15

ตารางที่ 3.5 การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

ชุดตัวแปร	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง	วัตถุประสงค์การศึกษา
ก	ชนิดของดิน ความหนาของชั้นดิน (m.)	ความลาดเอียง $\alpha(^{\circ})$ ความชื้นฝน (mm./h.)	ศึกษาผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและผลกระทบจากความลาดเอียง
ข	ความลาดเอียง ความหนาของชั้นดิน (m.)	ชนิดของดิน ความชื้นฝน (mm./h.)	ศึกษาผลกระทบจากความชื้นฝนที่ต่างกัน
ค	ชนิดของดิน ความลาดเอียง $\alpha(^{\circ})$	ความชื้นฝน (mm./h.) ความหนาของชั้นดิน (m.)	ศึกษาผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน



(ก) Soil Water Characteristic Curves ของดินทั้ง 3 ชนิด

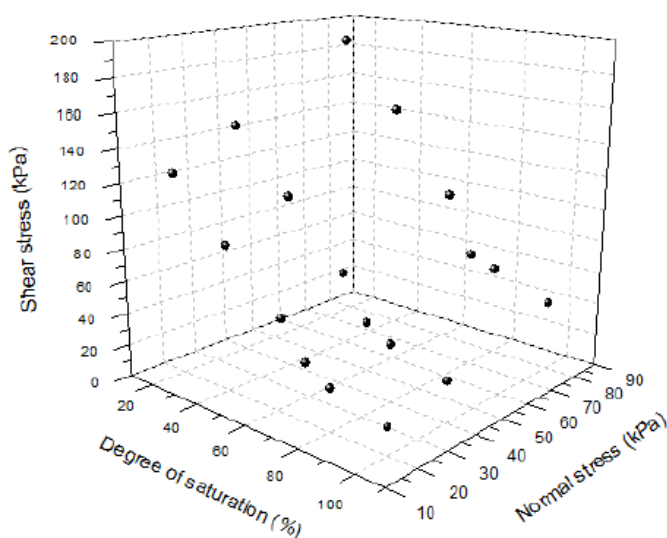


(ข) Permeability Function ของดินทั้ง 3 ชนิด

รูปที่ 3.16 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function ของดินทั้ง 3 ชนิด

3.4 แบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของดิน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไปสามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน ระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ในแกน X, หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) ในแกน Y, และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Stress) ในแกน Z ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นพื้นผิวระนาบ แสดงดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้ง 3 ได้ดังสมการ 3.2 และ 3.3 ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์หาเสถียรภาพของลาดดินที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลดินได้



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน

$$\text{สมการระนาบ} \quad Z = Z_0 + aX + bY \quad (3.2)$$

$$\text{สมการกำลังรับแรงเฉือนของดิน} \quad \tau = \tau_0 + a(1 - S_r) + b(\sigma - u_a) \quad (3.3)$$

- เมื่อ
- τ_0 คือ ค่าคงที่จากการพลความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน (กิโลปาสกาล)
 - a คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง S_r กับ τ
 - b คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับ τ

3.5 การศึกษาแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถกระทำได้หลายวิธีสำหรับวิธีวิเคราะห์ที่นิยมใช้งานทางด้านปฐพีวิศวกรรมได้แก่ วิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีความถูกต้องที่ยอมรับได้ โดยจะแสดงในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานซึ่งเกิดจากกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเป็นหลักกับแรงผลักดันซึ่งเกิดจากน้ำหนักของมวลดินภายในผิวที่พิบัติและแรงกระทำภายนอก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีดังนี้

3.5.1 แบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis)

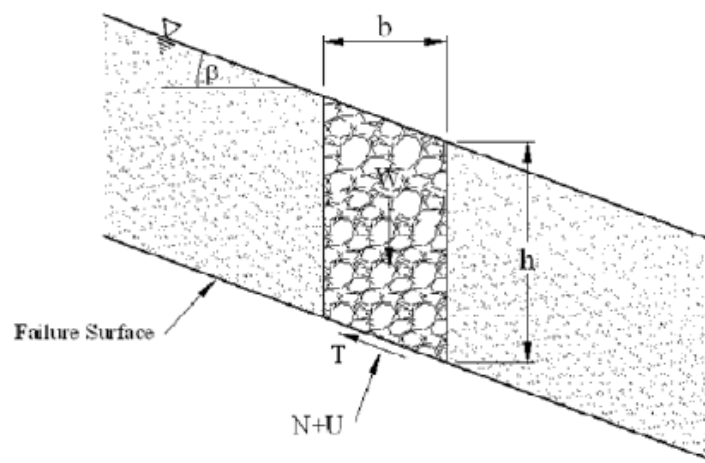
จากพฤติกรรมส่วนใหญ่ในการเกิดลาดดินพิบัติภัยในประเทศไทยอันเนื่องมาจากฝนตกหนัก การพังทลายของลาดดินมักมีรูปร่างผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Finite Element Method และวิธี Limit Equilibrium Method จะได้ผลสอดคล้องกัน ซึ่งสอดคล้องกับวิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) ที่เหมาะสำหรับการนำมาวิเคราะห์ลาดดินธรรมชาติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นดินบนความลาดชันต่างๆกับระดับความอึดตัวของดินที่เปลี่ยนไปจากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปที่อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) เท่ากับ 1.0 โดยจะอาศัยสมการกำลังของดินที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปมาวิเคราะห์ โดยหลักการวิเคราะห์จะอาศัยสมมติฐานดังนี้

- 1) การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) โดยพิจารณาว่าระดับน้ำอยู่ลึกกว่าผิวการเคลื่อนพัง
- 2) ระดับความอึดตัวด้วยน้ำมีความสม่ำเสมอกันทั้งหน้าตัด
- 3) วิเคราะห์ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินและวิเคราะห์ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพัง (วรวัชร, 2552)

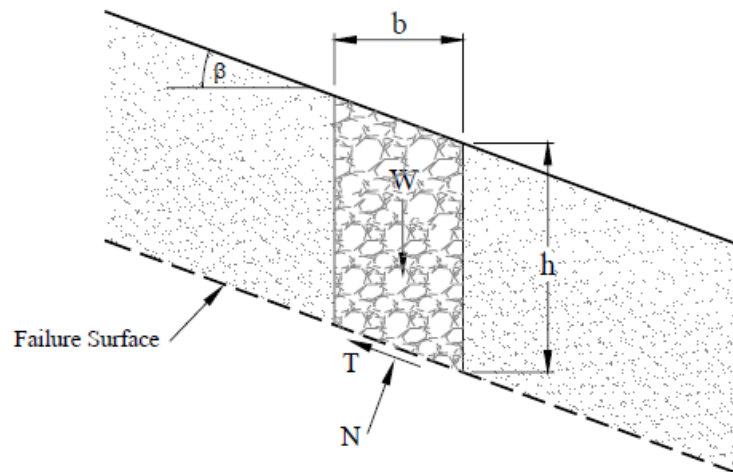
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

ก) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน แสดงดังรูปที่ 3.18 (ก) และสมการที่ใช้วิเคราะห์แสดงดังสมการที่ 3.4

ข) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินการเคลื่อนพัง แสดงดังรูปที่ 3.18 (ข) และสมการที่ใช้วิเคราะห์แสดงดังสมการที่ 3.5



(ก) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน



(ข) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินการเคลื่อนพัง

รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์ลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope) (วรวัชร, 2552)

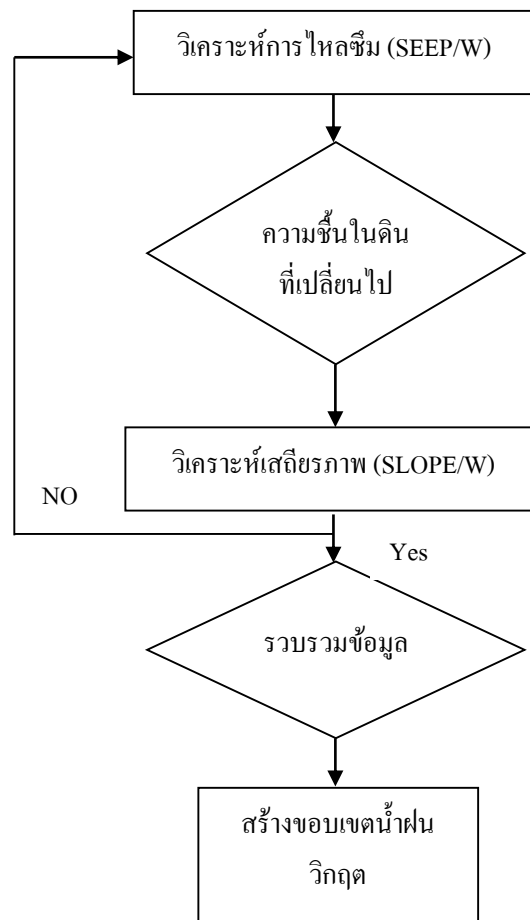
$$F.S. = \frac{c' + h\gamma_t \cos \beta \tan \phi' - S_r u_w \tan \phi'}{h\gamma_t \sin \beta} \quad (3.4)$$

$$F.S. = \frac{c' + ((\gamma_{sat} + \gamma_w)h \cos \beta) \tan \phi' - S_r u_w \tan \phi'}{h\gamma_{sat} \sin \beta} \quad (3.5)$$

เมื่อ	c'	=	ความเชื่อมแน่นของดิน
	h	=	ความหนาของชั้นดิน
	γ_t	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
	γ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	γ_{sat}	=	ความหนาแน่นรวมของดินอิ่มตัว
	β	=	ความลาดชันของลาดดิน
	ϕ'	=	มุมเสียดทานภายในของดิน
	S_r	=	ระดับความอิ่มตัวของดิน
	u_w	=	แรงดันน้ำด้านลบ

3.5.2 วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W เป็นการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค เนื่องจากมีความหลากหลายในการรับข้อมูลหรือตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์เสถียรภาพในส่วนนี้จะใช้วิธี Bishop's Simplified Method โดยรับข้อมูลการวิเคราะห์การไหลซึมมาจากโปรแกรม SEEP/W จากนั้นจึงใช้โปรแกรม SLOPE/W วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อใช้สร้างเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต ขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม SLOPE/W

3.6 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API)

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในชั้นดินที่ดินอุ้มน้ำไว้ ณ เวลาใดๆ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินสามารถประเมินได้โดยอาศัยปัจจัยความชื้นในดิน (Soil Moisture) กับปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละวันหรือแต่ละช่วงเวลาโดยหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7

$$API_t = (K_t \times API_{t-1}) + P_t \quad (3.6)$$

เมื่อ API_t = ค่า API ณ เวลาใดๆ (t) (มิลลิเมตร)
 API_{t-1} = ค่า API ของเวลาก่อนหน้า (t-1) (มิลลิเมตร)

$$\begin{aligned}
 P_t &= \text{ค่าปริมาณน้ำฝน ณ เวลาใดๆ (t) (มิลลิเมตร)} \\
 K_t &= \text{ค่าคงที่คูณลด ณ เวลาใดๆ}
 \end{aligned}$$

ซึ่ง K หาได้จากความสัมพันธ์ของ Chodhury and Blanchard (1983) ดังสมการที่ 3.7

$$K_t = \exp(-E_t / W) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } E_t &= \text{การคายระเหย ณ เวลาใดๆ} \\
 W &= \text{ความชื้นในดินที่สามารถระเหยได้ (มิลลิเมตร)}
 \end{aligned}$$

เมื่อต้องการหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) ในทางปฐพีกลศาสตร์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความพรุนของดิน (Porosity, n) ซึ่งได้จากการคำนวณตามความสัมพันธ์ของอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, e) ของตัวอย่างที่เก็บในกระบอกเก็บตัวอย่าง ระดับความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation, $S_{r,cr}$) และความหนาของชั้นดินถึงผิวการเคลื่อนพัง (Critical Thickness, T_{cr}) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 ซึ่งในกรณีนี้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.8 โดยประยุกต์ได้ดังสมการที่ 3.9 ในขณะที่กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.5 และสมการที่ 3.8 และสามารถประยุกต์ได้ดังสมการที่ 3.10 ตามลำดับ

$$API_{cr} = nS_{r,cr}T_{cr} \quad (3.8)$$

$$API_{cr} = \frac{S \cdot e}{1 + e} \left(\frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma_d \left(1 + \frac{S \cdot e}{G_s} \right) (FS \sin \beta - \cos \beta \tan \phi') + \gamma_w \cos \beta \tan \phi'} \right) \quad (3.9)$$

$$API = \frac{S \cdot e}{1 + e} \left(\frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma_d \left(1 + \frac{S \cdot e}{G_s} \right) (FS \sin \beta - \cos \beta \tan \phi')} \right) \quad (3.10)$$

$$\text{เมื่อ } \gamma = \gamma_d(1 + w) = \gamma_d \left(1 + \frac{S \cdot e}{G_s}\right) \quad ; \quad S \cdot e = wG_s$$

เมื่อ API_{cr} = คำนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Antecedent Precipitation Index)
(มิลลิเมตร)

n = ค่าความพรุนของดิน (Porosity)

$S_{r,cr}$ = ระดับความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation)

T_{cr} = ความหนาของชั้นดิน (เมตร)

e = อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)

G_s = ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

c' = แรงยึดเกาะประสิทธิผล (Effective Cohesion)

ϕ' = มุมเสียดภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle)

$F.S.$ = อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)

γ_d = หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight of Soil)

γ_w = หน่วยน้ำหนักน้ำ (Unit Weight of Water)

β = ความลาดชันของลาดดิน (Angle of Slope)

α = คือมุมเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับความ
อิ่มตัวของดิน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาวิจัยแบ่งออกตามลักษณะแผนการดำเนินการดังแสดงในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการสำรวจพื้นที่และทดสอบคุณสมบัติดินในสนาม ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและปริมาณน้ำฝนที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินในสนาม

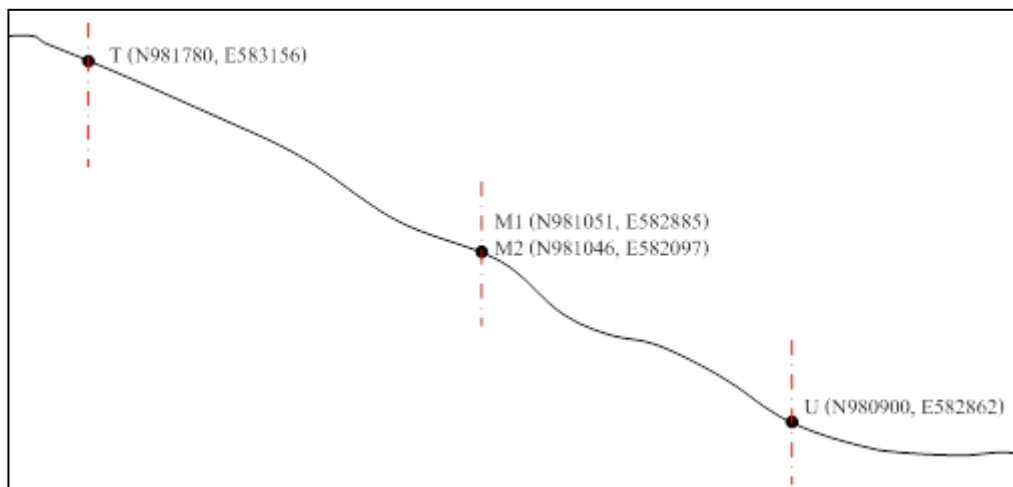
พื้นที่ศึกษาวิจัย ตำบลเทพราช อำเภอสีชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เคยมีประวัติการเกิดลาดดินพิบัติ เมื่อวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2554 ซึ่งจากการลงพื้นที่ศึกษาเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2554 เพื่อทำการสำรวจทดสอบดินและเก็บตัวอย่างดินในสนามซึ่งจากการประเมิณพบว่าการพิบัติของลาดดินเป็นแบบลาดอนันต์ตามแนวยาวของร่องน้ำเดิมซึ่งถูกมวลดินทับถมกันจึงได้แบ่งพื้นที่ทดสอบและเก็บตัวอย่างออกเป็น 3 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) โดยมีพิกัดตำแหน่ง GPS ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ผลแม่นยำดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบดินในพื้นที่ศึกษาจริงซึ่งการทดสอบในสนามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบหาค่าลึรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบ้า (Kunzelstab Penetration Test : KPT) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของชั้นดินและการทดสอบค่าความสามารถในการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test เพื่อหาค่าการซึมผ่านของดินในพื้นที่ซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.1 พิกัดตำแหน่ง GPS ของบริเวณพื้นที่ทดสอบและเก็บตัวอย่างดิน

ตำแหน่ง	Latitude (N)	Longitude (E)
T	981708	583156
M1	981051	582885
M2	981046	582907
U	980900	582862



(ก) ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณพื้นที่ศึกษา



(ข) รูปภาคตัดขวางบริเวณพื้นที่ศึกษา

รูปที่ 4.1 บริเวณพื้นที่ศึกษาที่เคยเกิดการพิบัติของลาดดิน

4.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา (Kunzelstab Penetration Test : KPT)

ตำแหน่ง T พิกัด N 981780 E 583156 เป็นตำแหน่งบริเวณด้านบนของลาดดินใกล้กับจุดเริ่มต้นของลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติในอดีตแสดงดังรูปที่ 4.1 การทดสอบดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบเบา (KPT) จะทำการทดสอบใกล้เคียงกับรอยพิบัติเดิมของลาดดินเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนแสดงดังรูปที่ 4.2 ในบริเวณนี้ได้ทำการทดสอบทั้งสิ้น 6 จุด ผลจากการสำรวจและทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าบริเวณนี้ผิวดินจะมีพีชกลุ่มเฟิร์นปกคลุมทั่วบริเวณและจากระดับผิวดินที่ความลึกประมาณ 0.0 – 0.1 เมตร เป็นดินร่วนปนทรายมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลโดยในช่วงความลึก 0.0 – 0.2 เมตร ดินมีสภาพค่อนข้างหลวมและมีรากของพืชฝังตัวอยู่โดยมีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 7 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ลึกลงไปในช่วงความลึก 0.2 – 2.0 เมตร ดินมีลักษณะสีส้มแดง มีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 8 – 28 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร เป็นดินที่มีสภาพหลวมและค่อยๆแน่นขึ้นปานกลางตามความลึกไปจนถึงช่วงความลึก 2.0 - 2.4 เมตร ซึ่งมีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 22 – 40 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ซึ่งจัดเป็นดินที่มีสภาพแน่นปานกลางตลอดช่วงความลึกโดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และรายละเอียดค่าการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีการทดสอบเจาะหยั่งแบบเบาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการสำรวจจะพบว่าความหนาของชั้นดินที่เกิดการพิบัติแล้วมีความหนาประมาณ 2.4 - 3.0 เมตร โดยจะพบชั้นหินแกรนิตที่ผุพังล่อยกระจายอยู่ทั่วไปที่ระดับความลึกเฉลี่ย 3.0 เมตร จากผิวดิน

ตารางที่ 4.2 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่ง T

ระดับความลึก (m.)	สิ่งที่พบ	สภาพดิน	สี	KPT(blow/20cm)
0.0 – 0.2	ทราย, รากพืช	หลวม	น้ำตาล	7
0.2 – 2.0	-	หลวมถึงแน่นปานกลาง	ส้มแกมแดง	8 -28
2.0 – 2.4	-	แน่นปานกลาง	ส้มแกมแดง	22 - 40

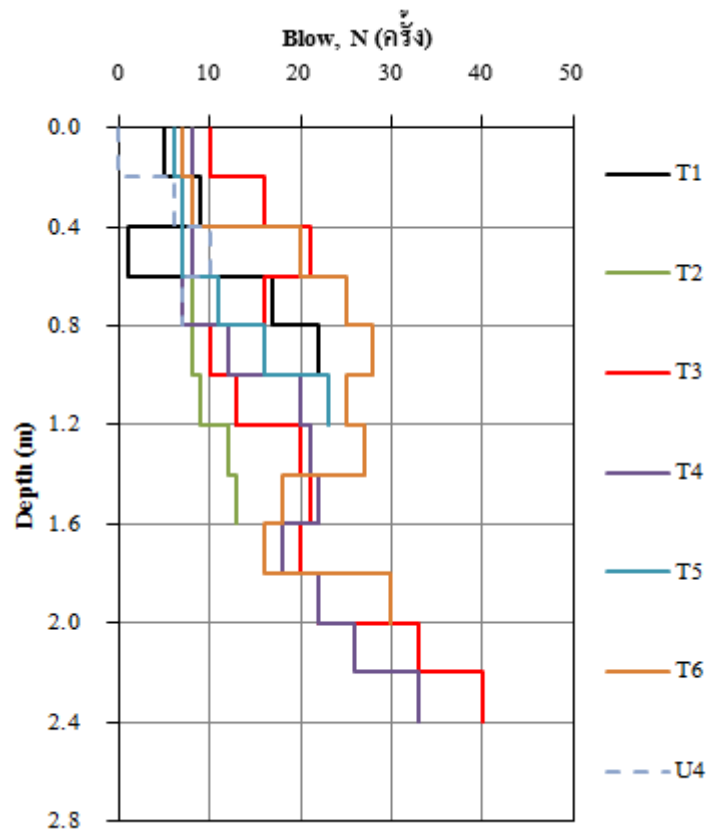


(ก) ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบเบ้า Kunzelstab Penetration Test
ทางด้านขวาของรอยพิบัติบริเวณตำแหน่ง T



(ข) ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบเบ้า Kunzelstab Penetration Test
ทางด้านซ้ายของรอยพิบัติบริเวณตำแหน่ง T

รูปที่ 4.2 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง T



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ Kunzelstab Penetration Test (KPT) ในบริเวณด้านบนของลาดดิน ตำแหน่ง T และในบริเวณตอนล่างสุดของภูเขา U

ตำแหน่ง M1 และ M2 พิกัด N 981051 E 582885 และ N 981046 E 582907 ตามลำดับ ทั้งสองตำแหน่งนี้อยู่ในบริเวณตอนกลางของภูเขาซึ่งยังเป็นดินที่มีลักษณะคงสภาพเดิมอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.1 ผลจากการสำรวจและทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่าในบริเวณนี้ผิวดินส่วนบนจะปกคลุมไปด้วยต้นหญ้าและเมื่อเปิดหน้าดินลงมาในระยะช่วงความลึก 0.0 – 0.2 เมตร พบว่าดินในช่วงนี้จะมีลักษณะสีน้ำตาลปนส้มจับตัวกันในสภาพหลวมและมีรากไม้กระจายตัวอยู่ทั่วไป ในพื้นที่ส่วนนี้ไม่ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดิน (KPT) อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบชำรุดจึงได้นำข้อมูลในระหว่างการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมาประกอบการพิจารณา ซึ่งพบว่าดินในช่วงความลึก 0.2 – 1.5 เมตร ดินมีสภาพแน่นสังเกตได้จากการเก็บตัวอย่างที่กระทำไต่ยากกว่าในตำแหน่ง T และ U โดยในช่วงความลึกนี้ดินจะมีลักษณะเป็นสีส้มตลอดช่วงความลึกจนถึงระดับความลึก 1.5 เมตรเป็นต้นไปจะไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินได้เนื่องจากมีชั้นหินลอยตัวปะปนอยู่ทั่วบริเวณมีขนาดเล็กไปถึงขนาดใหญ่ซึ่งขนาดหินจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึก

สภาพดินบริเวณ M1 และ M2 แสดงดังรูปที่ 4.4 และรายละเอียดค่าการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีการทดสอบเจาะหยั่งแบบเบาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.3 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณตอนกลางของภูเขาตำแหน่ง M1 และ M2

ระดับความลึก (m.)	สิ่งที่พบ	สภาพดิน	สี	KPT(blow/20cm)
0.0 - 0.2	รากไม้	หลวม	น้ำตาลส้ม	ไม่ได้ทำการ
0.2 – 1.5	-	แน่น	ส้ม	ทดสอบ
1.5 เป็นต้นไป	เศษหินผุ	-	-	(เครื่องมือชำรุด)



รูปที่ 4.4 สภาพดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2

ตำแหน่ง U พิกัด N 980900 E 582862 เป็นบริเวณเชิงเขาหรือตอนล่างสุดของภูเขา แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.5 ผลจากการสำรวจและทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าสภาพชั้นดินในช่วง 0.0 – 0.2 เมตร เป็นดินร่วนปนทราย มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มปนดำ ดินมีสภาพหลวมโดยมีซากพืชซากสัตว์และรากไม้ฝังตัวอยู่ ลึกลงไปในช่วงความลึก 0.2 – 1.0 เมตร พบว่าดินมีสีน้ำตาลเข้มมีสภาพหลวมซึ่งมีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 6 – 10 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และรายละเอียดค่าการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีการทดสอบเจาะหยั่งแบบเบาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.4 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณตอนล่างสุดของภูเขาตำแหน่ง U

ระดับความลึก (m.)	สิ่งที่พบ	สภาพดิน	สี	KPT(blow/20cm)
0.0 – 0.2	ทราย, รากไม้, ซากพืช	หลวม	น้ำตาล/ดำ	ไม่ได้ทดสอบ
0.2 – 1.0	-	หลวม	น้ำตาลเข้ม	6 - 10



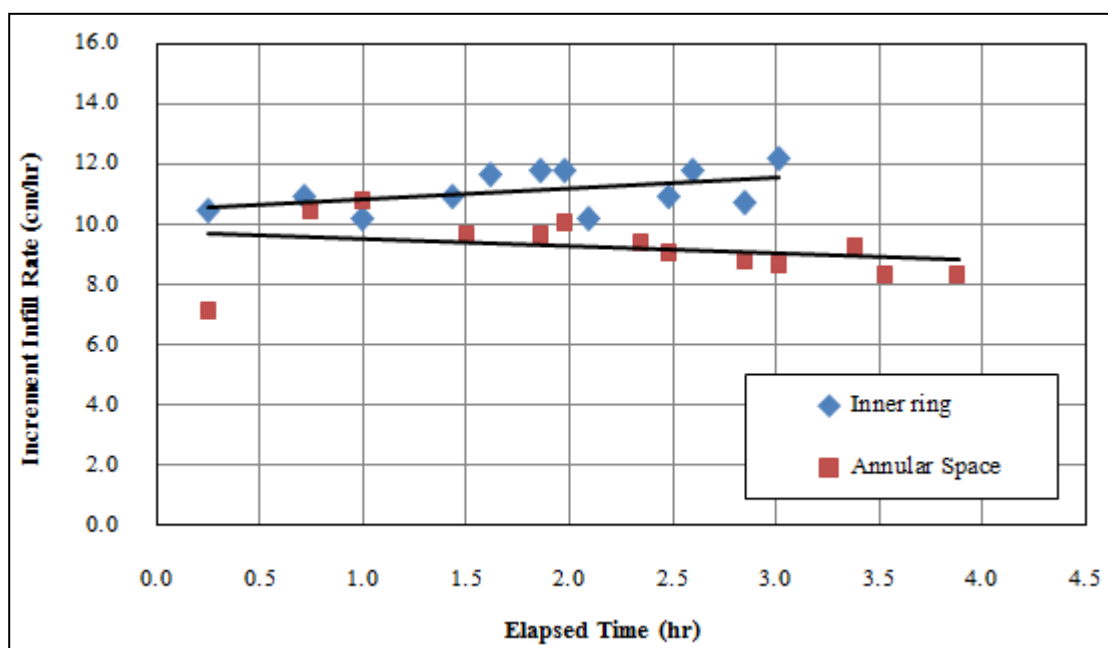
รูปที่ 4.5 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง U

4.1.2 ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

ค่าการซึมน้ำของดินมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นตัวที่บ่งบอกว่าดินชนิดนั้นสามารถให้น้ำซึมผ่านหรือสามารถระบายน้ำได้มากน้อยเพียงใดซึ่งถ้าน้ำซึมผ่านได้ง่ายก็จะทำให้ปริมาณความชื้นในมวลดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงสาเหตุให้กำลังของดินลดลงได้ จากการทดสอบค่าความสามารถในการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test ในบริเวณใกล้กับจุดเริ่มต้นที่เคยเกิดการพิบัติในอดีตแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งพบว่าค่าการซึมน้ำของดินในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 11.13 เซนติเมตรต่อชั่วโมง (3.09×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที) หรือมีค่าเท่ากับ 3.09×10^{-5} เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของค่าการซึมน้ำของดินทรายละเอียดและดินตะกอนทรายดังแสดงในตารางที่ 4.5 และสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในการจำแนกชนิดของดินด้วยวิธี Unified Soil Classification (USCS) โดยความสัมพันธ์ของค่าการซึมน้ำเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.6 และรายละเอียดการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินชนิดต่างๆ (Das, 1983)

ชนิดของดิน	ค่า k (เซนติเมตรต่อวินาที)
กรวด	$1 - 10^2$
กรวดเม็ดละเอียด, ทรายหยาบ	$1 - 10^{-3}$
ทรายละเอียด, ตะกอนทรายอัดไม่แน่น	$10^{-3} - 10^{-5}$
ตะกอนทรายอัดแน่น, ตะกอนทรายปนดินเหนียว	$10^{-5} - 10^{-6}$
ดินเหนียวปนตะกอนทราย, ดินเหนียว	$10^{-6} - 10^{-9}$



รูปที่ 4.6 ค่าการซึมน้ำเทียบกับเวลาด้วยวิธี Double-Ring Test

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 3 บริเวณ ประกอบไปด้วยการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) การทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limits) การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (Grain Size Distribution) แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาจำแนกชนิดของดินด้วยวิธี Unified Soil

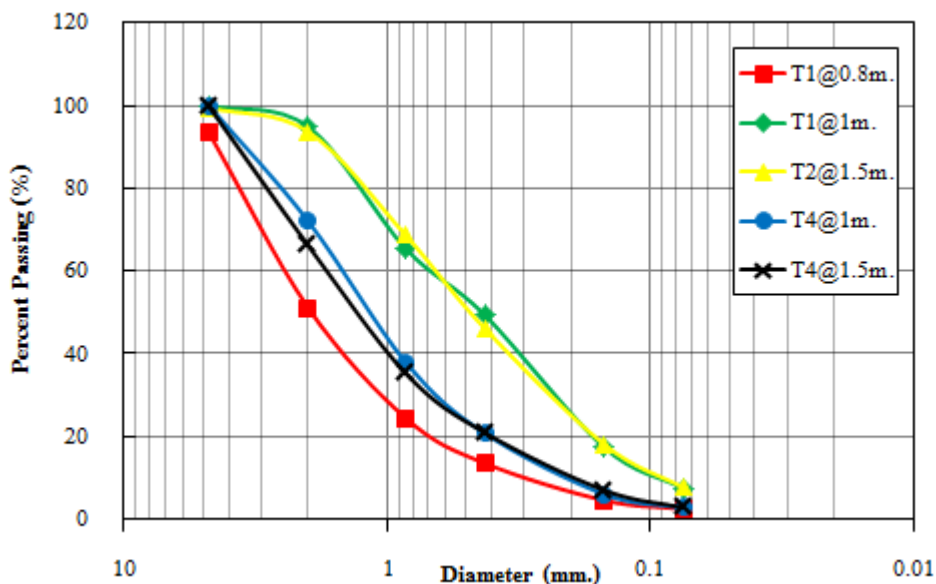
Classification (USCS) ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.6 โดยรายละเอียดของผลการทดสอบมีดังนี้

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด พบว่าเมื่อพิจารณาตามการจำแนกดินด้วยวิธี Unified สามารถจำแนกได้เป็นดิน 5 กลุ่มคือ SW (ดินทรายมีขนาดละเอียด) ได้แก่ T1@0.8 เมตร SP-SC (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน) ได้แก่ T1@1 เมตร SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ T2@1.5 เมตร SW-SC (ดินทรายมีขนาดละเอียดและเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน) ได้แก่ T4@1 เมตร SW-SM (ดินทรายมีขนาดละเอียดและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ T4@1.5 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.7 ดินในจุด T1@0.8 เมตร T4@1 เมตร และ T4@1.5 เมตร ดินมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในจุด T1@1 เมตร และ T2@1.5 เมตร มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์

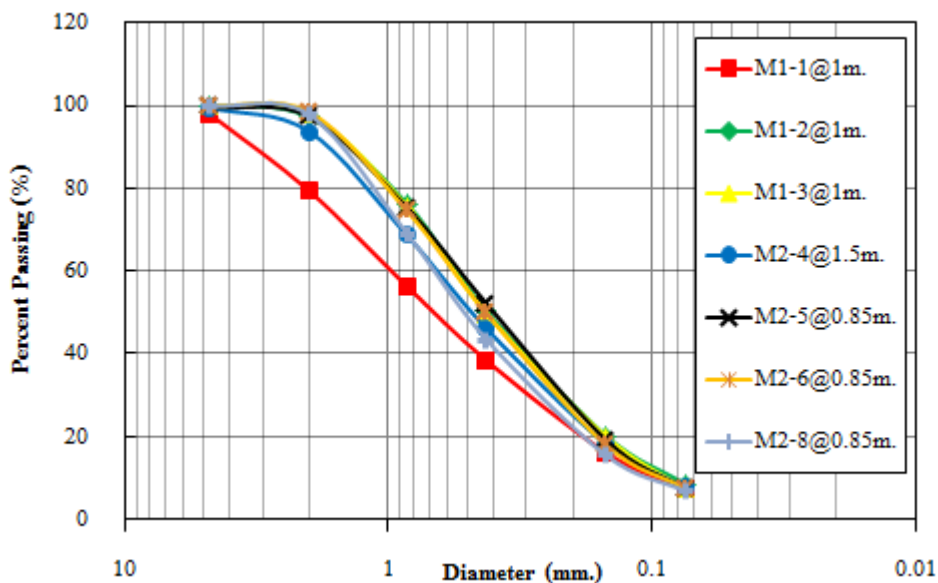
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง M1 ทั้ง 3 จุด พบว่าสามารถจำแนกดินได้ 2 กลุ่มคือ SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ M1-1@1 เมตร SW-SM (ดินทรายมีขนาดละเอียดและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ M1-2@1 เมตร และ M1-3@1 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.8 พบว่าดินในจุด M1-2 @1 เมตร และ M1-3 @1 เมตร มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันมาก โดยดินตำแหน่ง M1 ทั้ง 3 จุดมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง M2 ทั้ง 4 จุด พบว่าสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ SP-SC (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน) ได้แก่ M2-4@1.5 เมตร และ M2-5@0.85 เมตร SW-SC (ดินทรายมีขนาดละเอียดและเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน) ได้แก่ M2-6@0.85 เมตร SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ M2-8@0.85 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.8 พบว่าดินทั้ง 4 จุด มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์

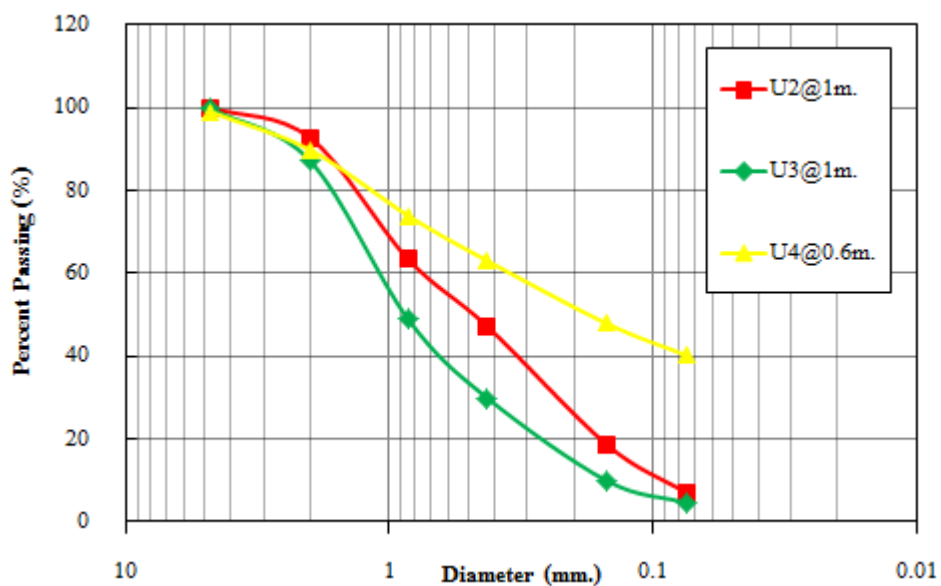
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุด พบว่าสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ U2@1 เมตร SW (ดินทรายมีขนาดคละกันดี) ได้แก่ U3@1 เมตร SC (ดินทรายที่มีดินเหนียวปน) ได้แก่ U4@0.6 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.9 พบว่าดิน U2@1 เมตรและ U3@1 เมตร มีลักษณะการกระจายตัวเหมือนกัน โดย U2@1 เมตร มีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ดิน U3@1 เมตร มีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ดิน U4@0.6 เมตรมีรูปแบบการกระจายตัวที่ต่างออกไปโดยไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) และยังมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2



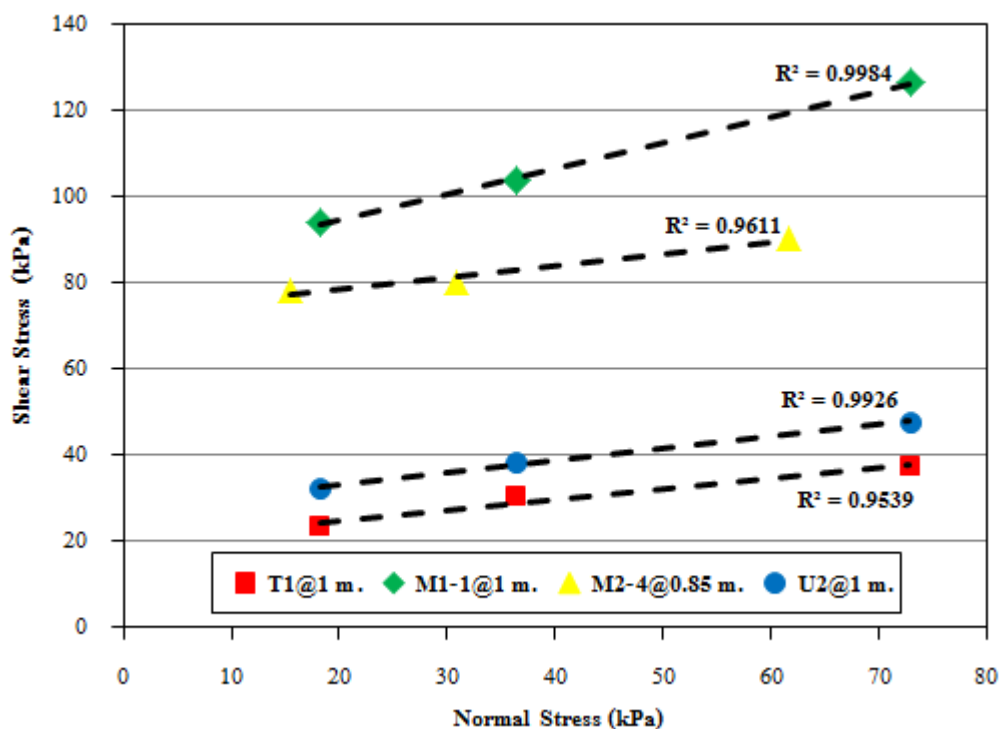
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน

ตำแหน่ง/ความลึก	PERCENT PASSING (%)						Atterberg's Limit (%)			Gs	Grain size parameter		USCS
	4	10	20	40	100	200	LL.	PL.	PI.		Cu	Cc	
T1 @0.8 m	93.42	51.18	24.43	13.52	4.59	2.44	N/A			2.64	8.33	1.61	SW
T1 @1 m	100.00	94.93	65.40	49.37	17.47	7.45	39.01	23.04	15.96	2.64	7.22	0.71	SP-SC
T2 @1.5 m	99.48	93.77	68.64	46.08	18.16	7.65	N/A			2.64	6.50	0.89	SP-SM
T4 @1 m	99.95	72.14	37.94	20.76	6.07	2.76	69.21	27.72	41.48	2.64	7.62	1.26	SW-SC
T4 @1.5 m	99.76	66.24	35.24	20.89	7.02	2.83	69.92	34.45	35.47	2.64	8.95	1.52	SW-SM
M1-1 @1 m	97.96	79.44	56.28	38.36	16.12	7.11	50.74	29.23	21.51	2.65	10.10	0.80	SP-SM
M1-2 @1 m	99.96	97.24	76.26	50.33	20.18	8.45	ดินมีการกระจายตัวคล้ายคลึง กับ M1-1@1m			2.65	6.75	1.14	SW-SM
M1-3 @1 m	100.00	98.03	75.67	49.71	20.02	7.32				2.65	6.11	1.07	SW-SM
M2-4 @1.5 m	99.48	93.77	68.64	46.08	18.16	7.65	50.09	26.36	23.74	2.64	6.50	0.89	SP-SC
M2-5 @0.85 m	99.66	97.39	75.33	52.12	19.18	7.24	ดินมีการกระจายตัวคล้ายคลึง กับ M2-4@1.5m			2.64	5.87	1.11	SP-SC
M2-6 @0.85 m	100.00	98.49	74.56	49.75	17.98	7.46				2.64	6.22	1.05	SW-SC
M2-8 @0.85 m	99.99	97.82	69.08	43.42	15.49	6.81				2.64	6.09	0.99	SP-SM
U2 @1 m	99.99	92.73	63.39	47.09	18.53	6.88	N/A			2.65	8.33	0.78	SP-SM
U3 @1 m	99.77	87.15	48.88	29.75	9.78	4.45				2.64	7.50	1.01	SW
U4 @0.6 m	99.01	89.83	73.94	62.96	47.81	40.14	36.61	22.75	13.86	2.61	-	-	SC

4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธี Multi-stage direct shear test โดยทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบายน้ำ (Consolidated-Drained Test) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติและการทดสอบที่ระดับความชื้นต่างๆ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติเป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการกำหนดช่วงความชื้นที่จะทดสอบที่ความชื้นต่างๆ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติใช้ตัวอย่างดินทดสอบ 3 บริเวณคือ ตำแหน่งด้านบนของลาดดิน (T1@1 เมตร) ตำแหน่งตรงกลางของของภูเขา (M1-1@1 เมตร M2-4@0.85 เมตร) และตำแหน่งตอนล่างสุดของภูเขา (U2@1 เมตร) ซึ่งรายละเอียดการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ความชื้นธรรมชาติได้แสดงไว้ในรูปแบบแผนภาพของมอร์ดังรูปที่ 4.10 และสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c' และ ϕ') ได้ดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในรูปแบบแผนภาพของมอร์ที่ความชื้นธรรมชาติ
 ในบริเวณ T1@1 m. ความชื้นเท่ากับ 1.97% M1-1@1 m. ความชื้นเท่ากับ 16.84%
 M2-4@0.85 m. ความชื้นเท่ากับ 17.10% และ U2@1 m. ความชื้นเท่ากับ 15.82%

จากตารางที่ 4.7 พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นธรรมชาติที่ตำแหน่ง M1-1@1 เมตร และ M2-4@0.85 เมตร ดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective Cohesion, c') สูงกว่าในตำแหน่ง T1@1 เมตร และ U2@1 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งทั้งสองมีปริมาณขนาดเม็ดดินละเอียดในปริมาณมากและเป็นดินที่มีดินเหนียวปนจึงส่งผลต่อค่า Matric Suction ให้มีค่าสูงขึ้นทำให้กำลังของดินที่ได้มีมากขึ้น

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c' และ ϕ') ที่ความชื้นธรรมชาติ

ตำแหน่ง	ความชื้นธรรมชาติ (w_n , %)	ระดับความอิ่มตัว ด้วยน้ำ (S_r , %)	ความเชื่อมแน่น ประสิทธิผล (c' , kPa.)	มุมเสียดทานภายใน ประสิทธิผล (ϕ' , Degree)
T1@1 m.	16.97	67.34	19.92	33.90
M1-1@1 m.	16.84	70.09	82.37	30.98
M2-4@0.85 m.	17.10	70.54	72.80	15.31
U2@1 m.	15.82	64.90	27.35	15.59

หลังจากทราบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นธรรมชาติทำให้สามารถระบุระดับความชื้นหรือระดับความอิ่มตัวของตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบได้ ซึ่งรายละเอียดการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในทุกๆตำแหน่งแสดงไว้ในรูปแบบแผนภาพของมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และสามารถสรุปผลค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความอิ่มตัวต่างๆได้ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินในตำแหน่ง T จากรูปที่ 4.11 (ก) พบว่าดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective Cohesion, c') สูงสุดเท่ากับ 113.77 กิโลปาสกาล ที่ระดับความอิ่มตัว 0 - 20 เปอร์เซ็นต์และมีค่าสุดเท่ากับ 7.85 กิโลปาสกาล ที่ระดับความอิ่มตัว 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle, ϕ') มีค่าสูงสุดเท่ากับ 46.39 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 20 - 40 เปอร์เซ็นต์และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 23.05 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยที่ระดับความอิ่มตัว 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลใกล้เคียงกันคือ 26.88 กิโลปาสกาล 27.98

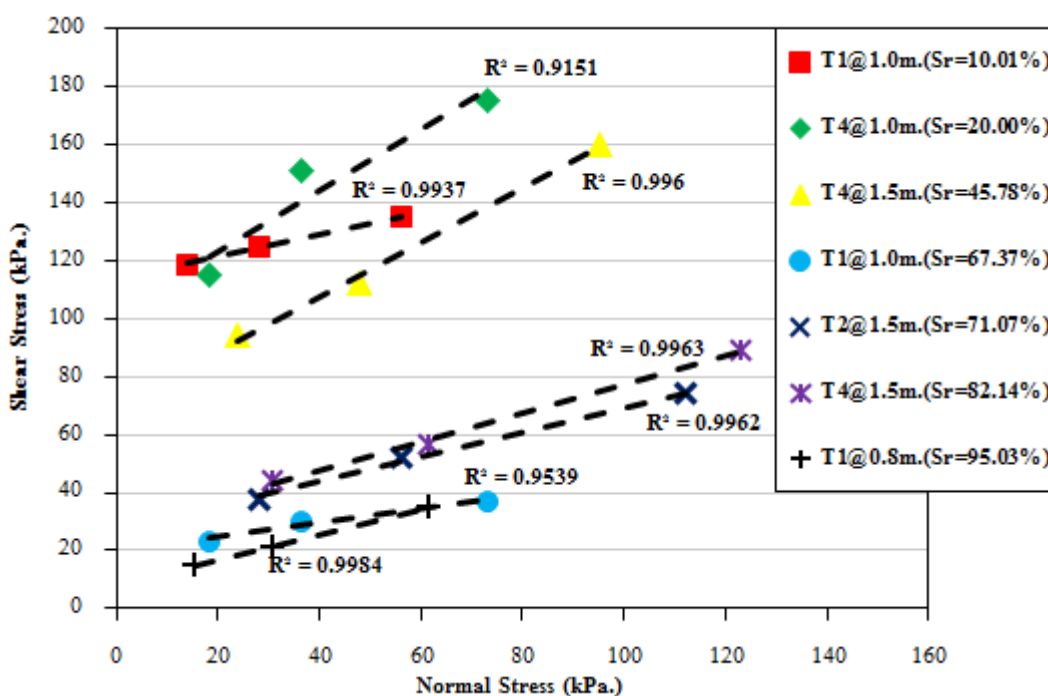
กิโปลาสดาล กับ 7.85 กิโปลาสดาลและ 23.05 องศา 26.18 องศาและ 23.52 องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาดารงที่ 4.8 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ก) ในตำแหน่งนี้จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันในบางตัวอย่างที่ทดสอบใน ความชื้นที่สูงกว่าก็ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าในตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำกว่าซึ่งเนื่องมาจาก ความสมบูรณ์ของการเตรียมตัวอย่างดินและสภาพความแปรปรวนของตัวอย่างดินที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1 และ M2 จากรูปที่ 4.11 (ข) และรูปที่ 4.11 (ค) พบว่าตำแหน่งทั้ง 2 ดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 161.67 กิโปลาสดาลและ 148.97 กิโปลาสดาลตามลำดับ ที่ระดับความอิ่มตัวเดียวกันคือ 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 16.85 กิโปลาสดาล ที่ระดับความอิ่มตัว 90 - 100 เปอร์เซ็นต์และ 16.34 กิโปลาสดาล ที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายใน ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดเท่ากับ 70.96 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ และ 75.14 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 50 - 65 เปอร์เซ็นต์และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 19.35 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 15.31 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ระดับ ความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือค่าความเชื่อมแน่น 17.01 กิโปลาสดาล และ 16.85 กิโปลาสดาล 16.34 กิโปลาสดาล และ 17.99 กิโปลาสดาลตามลำดับ ค่ามุมเสียดทาน 19.35 องศา และ 24.70 องศา 21.01 องศา และ 20.59 องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาดารงที่ 4.8 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ข) และรูปที่ 4.11 (ค) จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นแต่ก็ยังมีบางตัวอย่างดินที่ค่า กำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าในตัวอย่างที่ความชื้นต่ำกว่าเช่นกัน

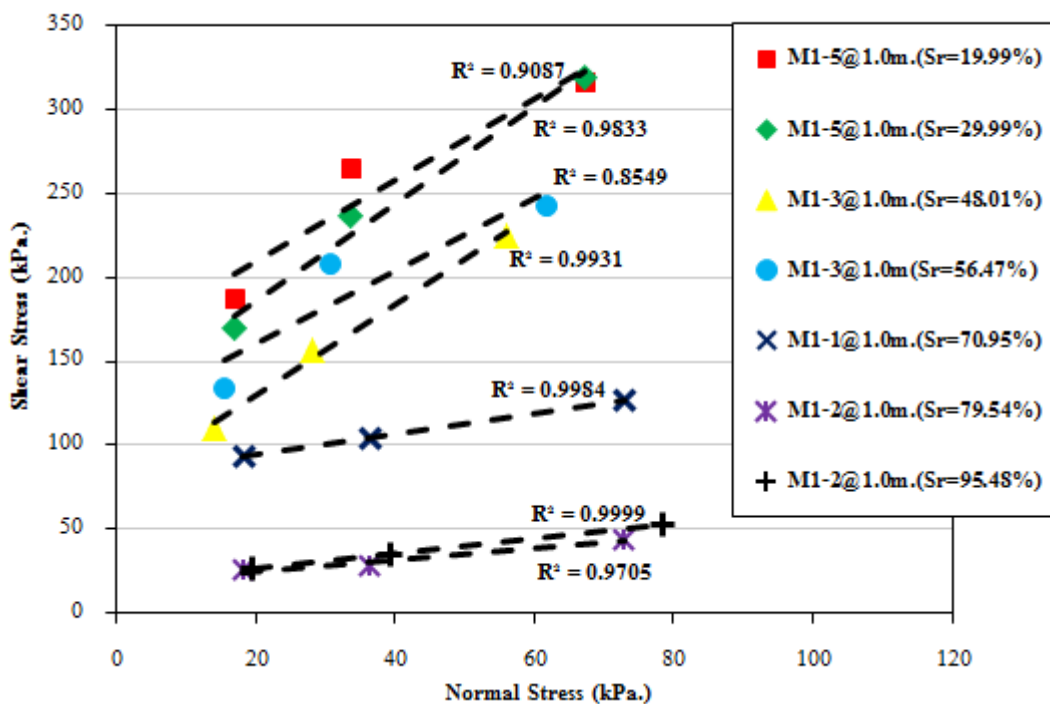
สำหรับตำแหน่ง B จากรูปที่ 4.11 (ง) พบว่าดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพ สูงสุดเท่ากับ 128.16 กิโปลาสดาล ที่ระดับความอิ่มตัว 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.58 กิโปลาสดาล ที่ระดับความอิ่มตัว 50 - 65 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมี ค่าสูงสุดเท่ากับ 72.64 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.59 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 0% - 20% ตามลำดับ โดยที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล ใกล้เคียงกันคือ 18.77 กิโปลาสดาล กับ 16.54 กิโปลาสดาล และ 19.93 องศา และ 22.56 องศา ตามลำดับ ในตำแหน่งนี้เมื่อพิจารณาดารงที่ 4.8 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ง) จะเห็นได้ว่ากราฟกำลังรับ

แรงเฉือนของดินในช่วงความชื้นต่ำๆมีเส้นกราฟที่สลับกันหรือดินมีความแปรปรวนสูงในขณะที่ช่วงความชื้นสูงๆกำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น

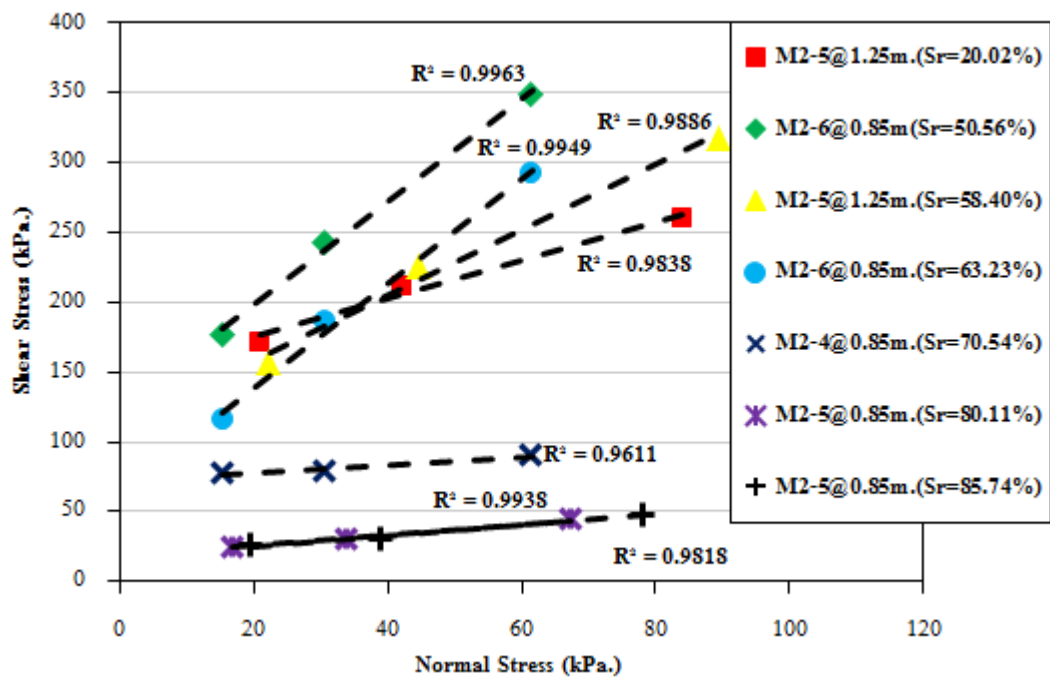
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผล (Effective Cohesion, c') กับความชื้นหรือระดับความอิ่มตัว (S_r) จากรูปที่ 4.12 (ก) และตารางที่ 4.8 พบว่าความชื้นส่งผลโดยตรงต่อค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผลสังเกตได้จากเมื่อความชื้นหรือระดับความอิ่มตัวของดินที่ใช้ทดสอบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผลรวม (Total Cohesion Intercept, c^T) มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเนื่องมาจากน้ำได้แทรกตัวเชื่อมต่อกันภายในช่องว่างระหว่างมวลดินและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นส่งผลให้แรงตึงผิว (Surface Tension) ถูกทำลายทำให้ค่าความเชื่อมั่นที่เป็นผลจากแรงตึงผิว (Specific Matric Suction, c^s) สลายไปและเมื่อในมวลดินมีความชื้นมากพอก็จะทำให้คงเหลือเพียงค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผลที่แท้จริงโดยจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงระดับความอิ่มตัวตั้งแต่ 80 – 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลกับระดับความอิ่มตัว (S_r) แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข) พบว่าเมื่อที่ระดับความอิ่มตัวในช่วง 70 – 100 เปอร์เซ็นต์ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.19 องศา และในช่วงระดับความอิ่มตัว 20 – 70 เปอร์เซ็นต์ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลจะมีค่าสูงมาก



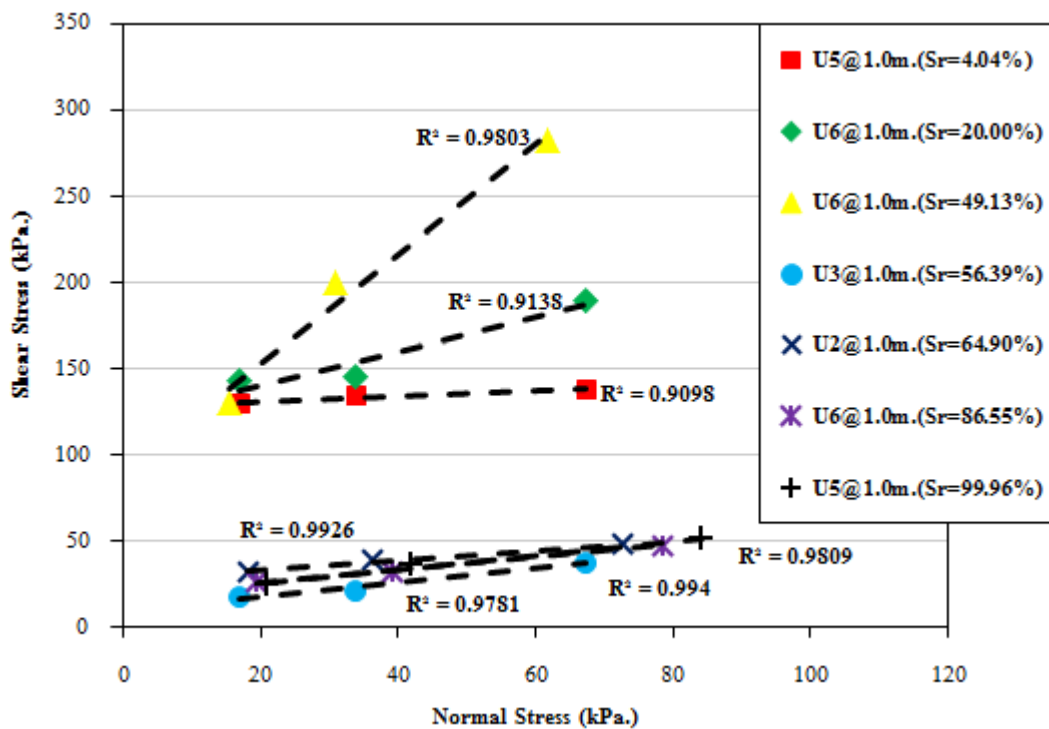
รูปที่ 4.11 (ก) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ T



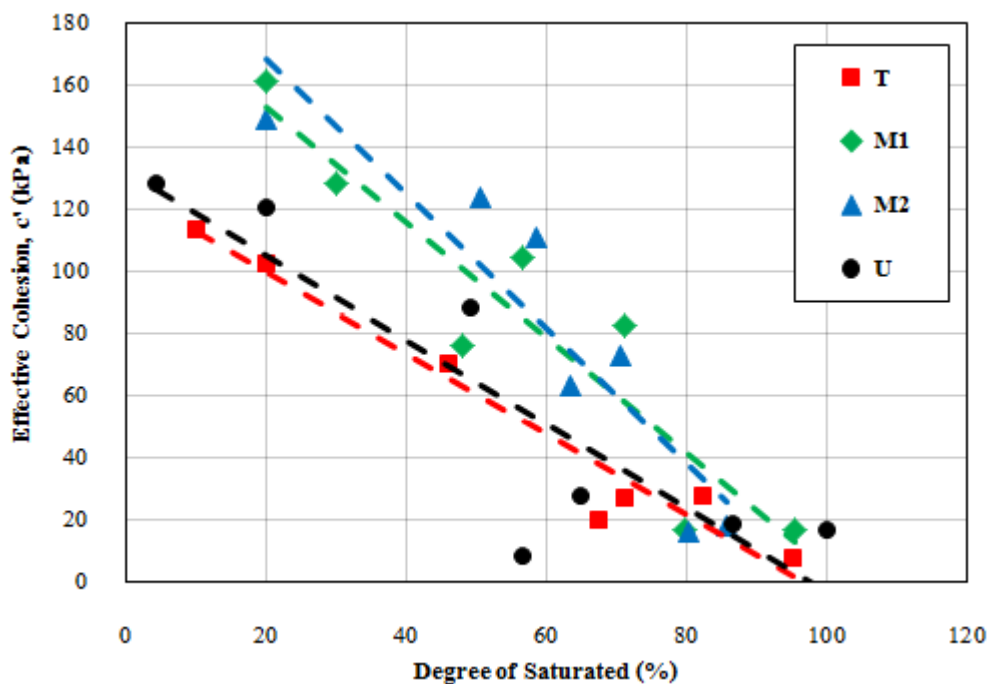
รูปที่ 4.11 (จ) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปที่ตำแหน่ง M1



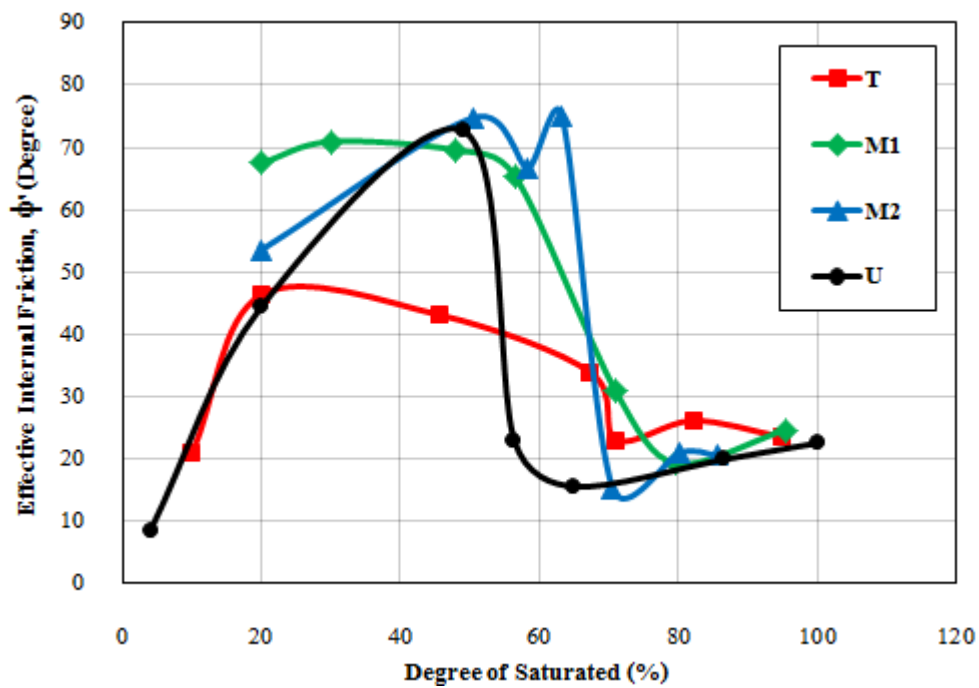
รูปที่ 4.11 (ค) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ M2



รูปที่ 4.11 (ง) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆในบริเวณ U



รูปที่ 4.12 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') กับค่าระดับความอิ่มตัวด้วย (S_r)



รูปที่ 4.12 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ')
กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_r)

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความอึ้มตัวต่างๆ

ตำแหน่ง	พารามิเตอร์	ระดับความอึ้มตัว (%)						
		0 - 20	20 - 40	40 - 50	50 - 65	65 - 80	80 - 90	90 - 100
T	ตัวอย่างดิน	T1@1m.	T4@1m.	T4@1.5m.	T1@1m.	T2@1.5m.	T4@1.5m.	T1@0.8m.
	c^T (kPa.)	113.77 ⁽¹⁾	102.54 ⁽²⁾	70.20	19.92	26.88	27.98	7.85
	c^s (kPa.)	105.92 ⁽¹⁾	94.69 ⁽²⁾	62.35	12.06	19.03	20.13	0.00
	ϕ' (Degree)	20.88 ⁽¹⁾	46.39 ⁽²⁾	43.10	33.90	23.05	26.18	23.52
	Sr (%)	10.01	20	45.78	67.37	71.01	82.14	95.03
M1	ตัวอย่างดิน	M1-5@1m.	M1-5@1m.	M1-3@1m.	M1-3@1m.	M1-1@1m.	M1-2@1m.	M1-2@1m.
	c^T (kPa.)	161.67	128.41	104.52	76.18	82.37	17.01 ⁽²⁾	16.85
	c^s (kPa.)	144.82	111.56	87.67	59.33	65.52	0.16 ⁽²⁾	0.00
	ϕ' (Degree)	67.5	70.96	65.44	69.60	30.98	19.35 ⁽²⁾	24.70
	Sr (%)	19.99	29.99	48.01	56.47	70.95	79.54	95.48
M2	ตัวอย่างดิน	M2-5@1.25m.	M2-6@0.85m	M2-5@1.25m..	M2-6@0.85m.	M2-4@0.85m.	M2-5@0.85m.	M2-5@0.85m.
	c^T (kPa.)	148.97	123.89 ⁽²⁾	110.76 ⁽²⁾	63.19	72.80	16.34	17.99 ⁽²⁾
	c^s (kPa.)	132.63	107.55 ⁽²⁾	94.42 ⁽²⁾	46.85	56.46	0.00	1.65 ⁽²⁾
	ϕ' (Degree)	53.60	74.83 ⁽²⁾	66.72 ⁽²⁾	75.14	15.31	21.01	20.59 ⁽²⁾
	Sr (%)	20.02	50.56	58.40	63.23	70.54	80.11	85.74
U	ตัวอย่างดิน	U5@1m.	U6@1m	U6@1m.	U3@1m.	U2@1m.	U6@1m	U5@1m.
	c^T (kPa.)	128.16 ⁽¹⁾	120.64	88.60	8.58	27.35 ⁽²⁾	18.77	16.54
	c^s (kPa.)	111.62 ⁽¹⁾	104.10	72.06	-	10.82 ⁽²⁾	2.24	0.00
	ϕ' (Degree)	8.59 ⁽¹⁾	44.47	72.64	23.00	15.59 ⁽²⁾	19.93	22.56
	Sr (%)	4.04	20.00	49.13	56.39	64.90	86.55	99.96

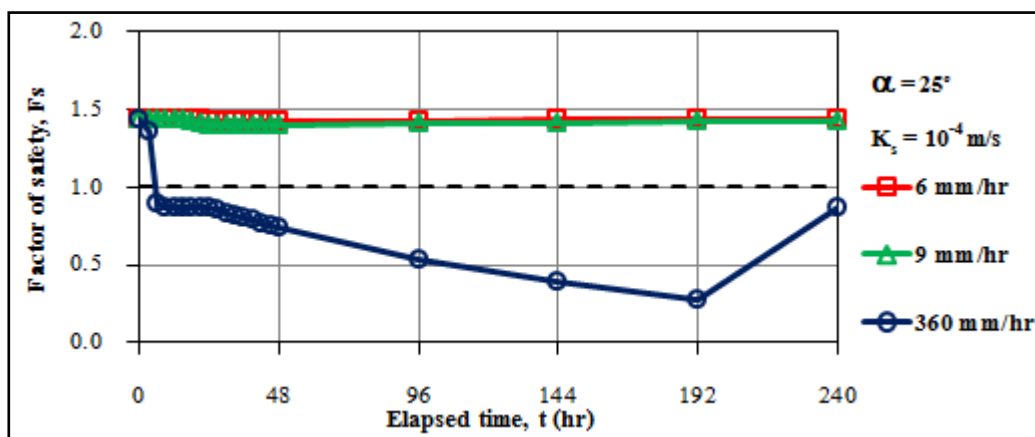
หมายเหตุ : (1) ตัวอย่างเกิดการหดตัวมากเกินไป (2) ควบคุมค่าความอึ้มตัวไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดแต่ใกล้เคียง

4.3 ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

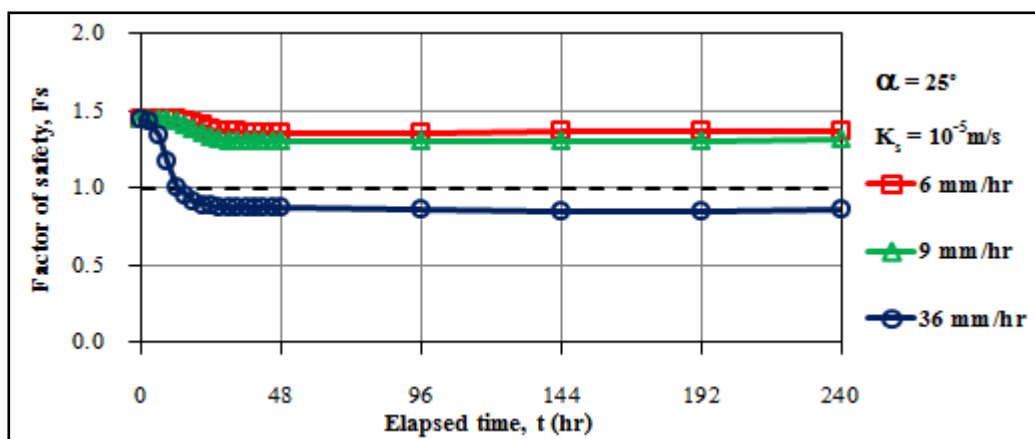
ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรแต่ละตัวเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ประกอบด้วย ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน (K_s) ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) และผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน (K_s)

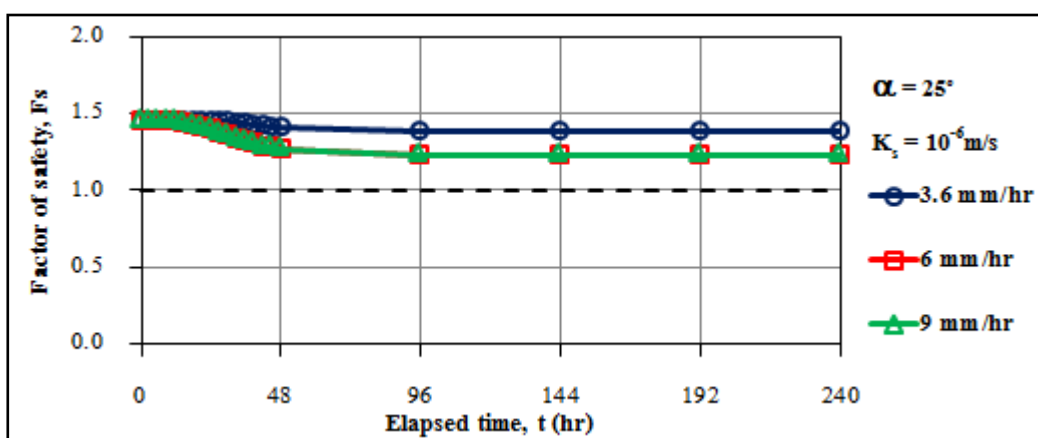
เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความชื้นน้ำของดินแต่ละชนิดกับความชื้นฝนที่มีค่าเท่ากับค่าความชื้นน้ำของดิน ($K_s \cdot 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที เท่ากับ $I_r \cdot 360$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง $K_s \cdot 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที เท่ากับ $I_r \cdot 36$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และ $K_s \cdot 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที เท่ากับ $I_r \cdot 3.6$ มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ที่ความลาดเอียงทำมุมเดียวกันและความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่เท่ากับ 6 เมตร ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.16 และรายละเอียดผลการทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ซึ่งพบว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงการลดลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมงแรกรวดเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาทีและดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาทีตามลำดับและเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงเป็นต้นไปยังพบว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความปลอดภัยยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยจะกลับไปเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 192 ชั่วโมง ในขณะที่ดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆลดลงในอัตราที่ช้ากว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที แต่จะลดลงเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที จนเวลาผ่านไปประมาณ 27 ชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ และจะกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆอีกครั้งเมื่อผ่านไป 192 ชั่วโมง ในส่วนของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ในช่วง 30 ชั่วโมงแรก อัตราส่วนความปลอดภัยยังคงมีค่าคงที่และหลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงต่อไปโดยเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความปลอดภัยในช่วงก่อนหน้าถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที



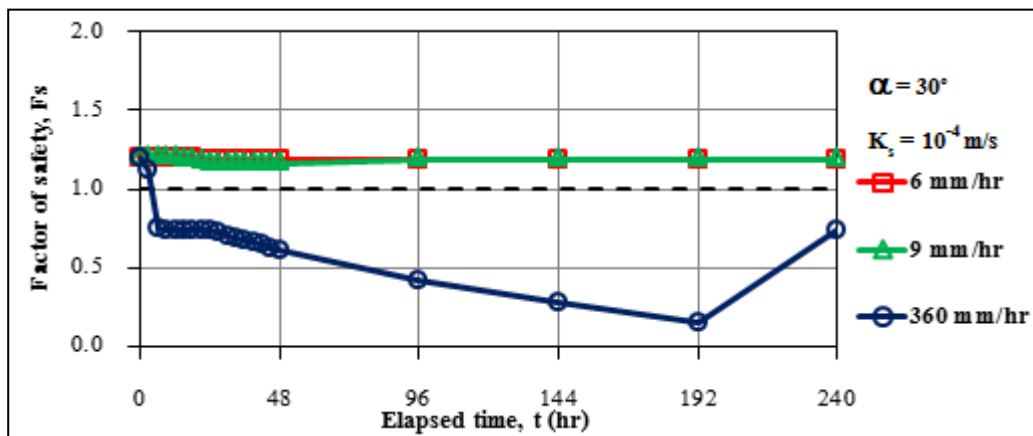
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที



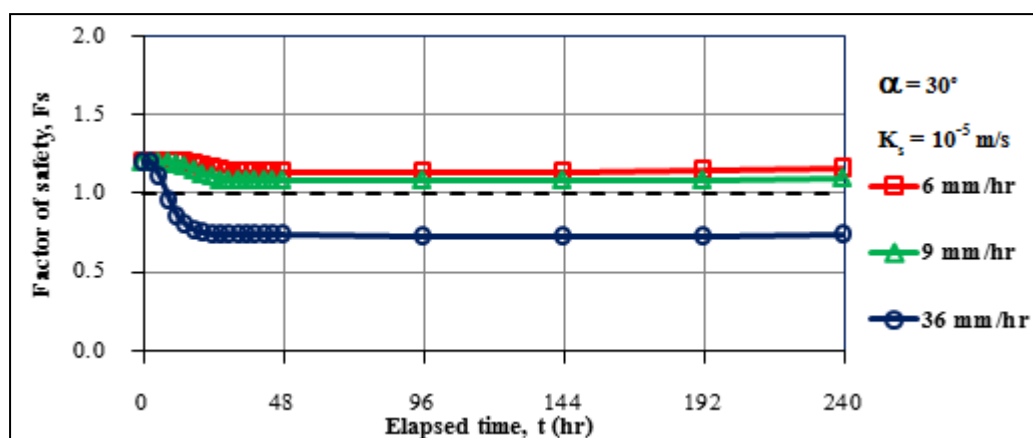
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)

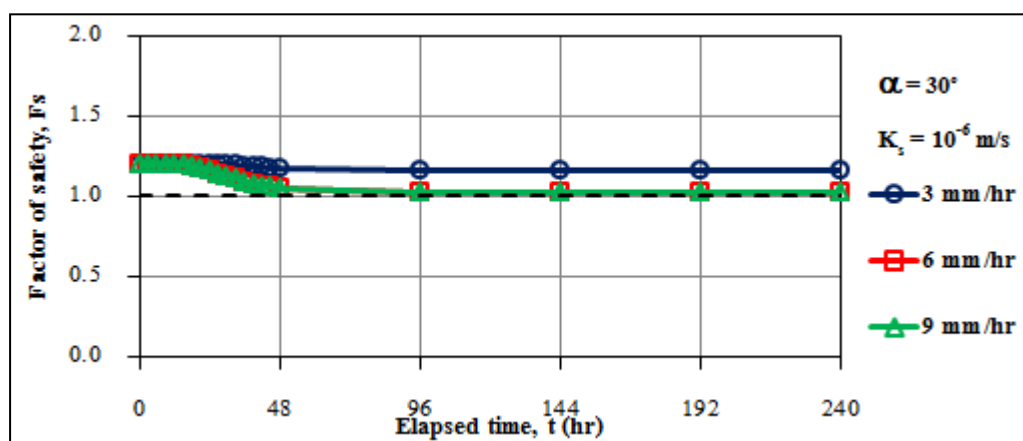
ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 25 องศา



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที



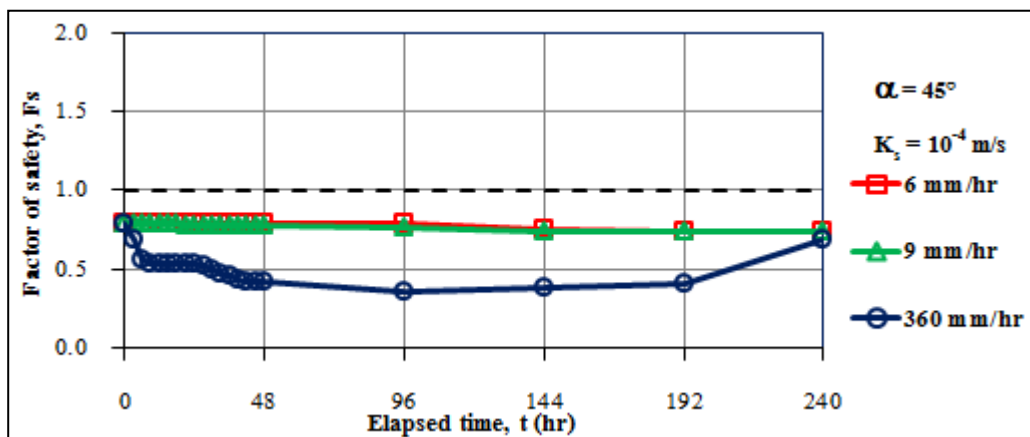
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที



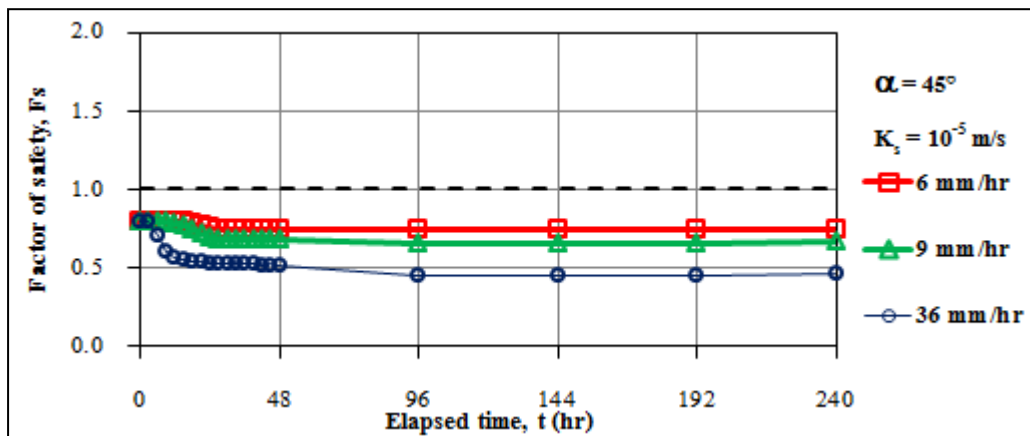
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)

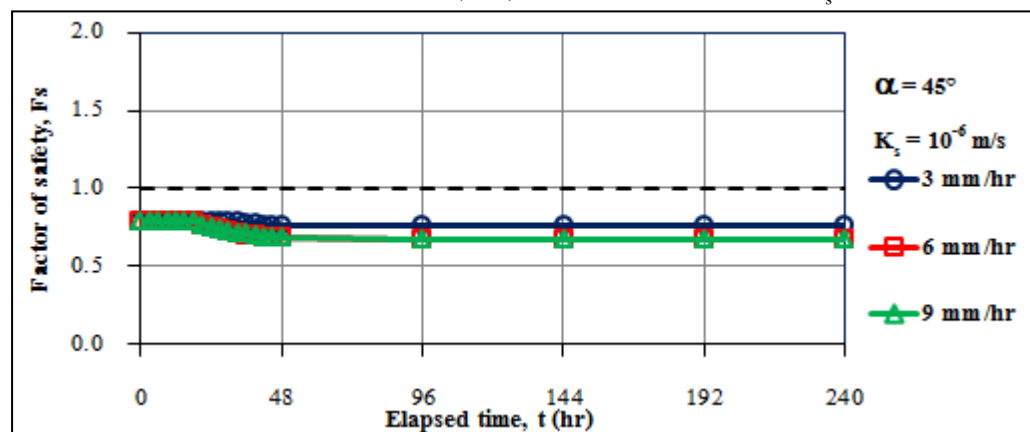
ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 30 องศา



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที



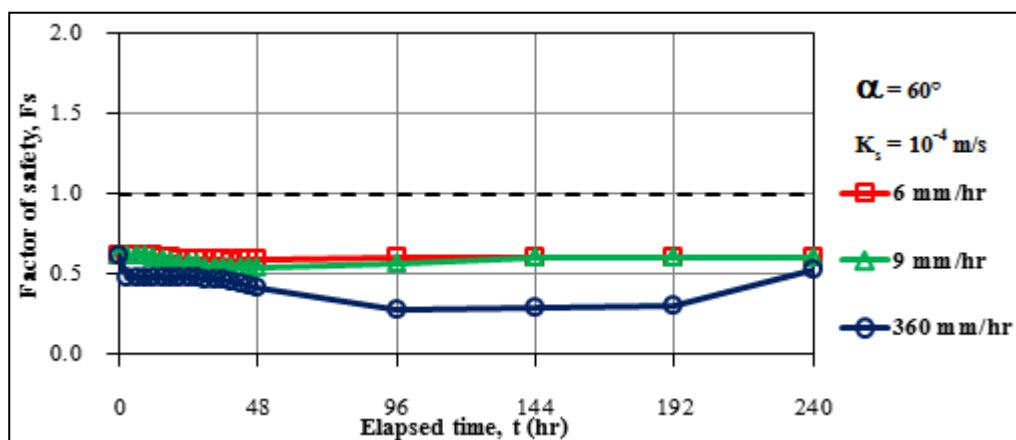
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที



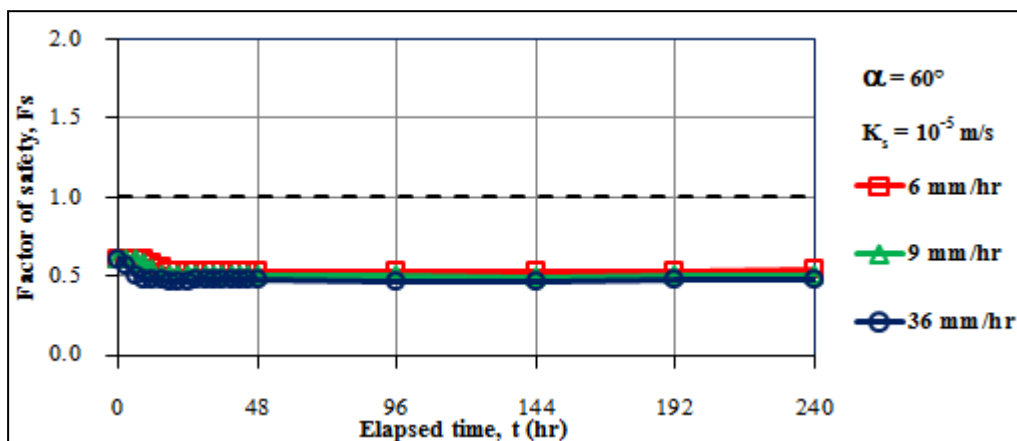
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)

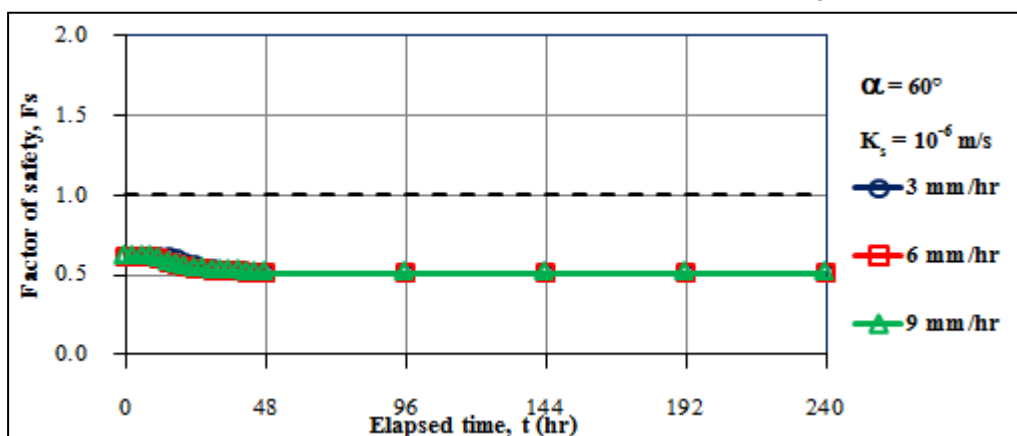
ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างๆ ที่ความลาดชัน 45 องศา



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที



การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)

ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างๆที่ความลาดชัน 60 องศา

4.3.2 ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r)

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ที่เป็นผลมาจากความชื้นฝน แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยเมื่อพิจารณาในภาพรวมเฉพาะความชื้นฝนในแต่ละค่าความชื้นน้ำของดิน พบว่าความชื้นฝนที่มีค่าต่ำกว่าค่าการซึมน้ำของดินมาก ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยและเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น ค่าการซึมน้ำ $K_s 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 1.8 3.6 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.774 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) ในส่วนของค่าการซึมน้ำ $K_s 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 3 6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.741 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ข) และค่าการซึมน้ำ $K_s 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 1.8 3.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.763 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความชื้นฝนที่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าการซึมน้ำของแต่ละดินพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยจะยิ่งลดต่ำลง โดยเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา ($t \leq 24$ ชั่วโมง) พบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าเส้นกราฟของความชื้นฝนที่ต่ำกว่า

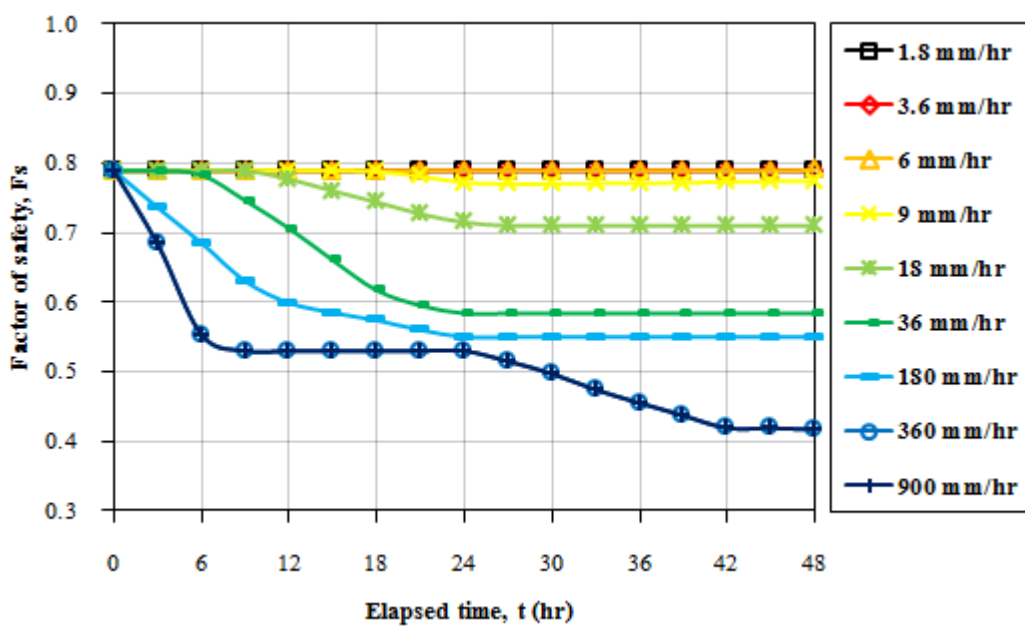
4.3.3 ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°)

เมื่อพิจารณาเฉพาะดินที่มีค่าการซึมน้ำเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) 4.18 (ข) และ 4.18 (ค) พบว่าดินที่มีค่าการซึมน้ำทั้ง 3 ชนิดที่ความลาดชันเดียวกันในช่วงก่อนที่จะได้รับน้ำฝนจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นเท่ากัน โดยที่ความลาดชัน 25 องศาและ 30 องศา ลาดดินยังคงมีเสถียรภาพอยู่ซึ่งมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นเท่ากับ 1.443 และ 1.194 ตามลำดับ ในส่วนของความลาดชัน 45 องศาและ 60 องศา ลาดดินได้สูญเสียเสถียรภาพไปโดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นเท่ากับ 0.789 และ 0.612 ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าลาดดินที่มีความลาดชันที่ต่ำกว่าจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นที่สูงกว่าและเมื่อพิจารณาในช่วงที่ได้รับน้ำฝนที่ความชื้นฝนเท่ากับ 3.6 6 9 36 และ 360 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าดินที่มีค่าการซึมน้ำสูงเท่ากับ $K_s 10^{-4}$ เมตรต่อวินาทีและดินที่มีค่าการซึมน้ำปานกลางเท่ากับ $K_s 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที เมื่อมีปริมาณความชื้นฝนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยของทุก ๆ ความลาดชันจะค่อย ๆ ลดลงในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 4.18 (ก) และ 4.18 (ข) โดยในดินที่มีค่าการซึมน้ำ

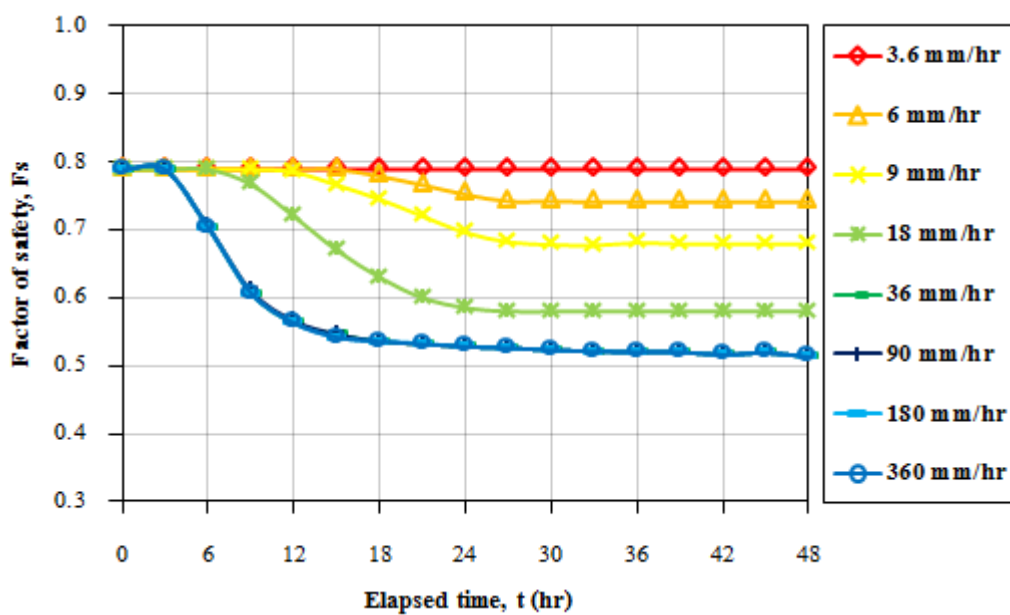
สูงเท่ากับ $K_s 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที ดินมีคุณสมบัติระบายน้ำได้ดีทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอตกภัยที่เกิดจากความชื้นฝนเท่ากับ 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกันและยังใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนความปลอตกภัยเริ่มต้น แต่ความชื้นฝนที่มีค่าเท่ากับ 360 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงซึ่งเท่ากับค่าการซึมน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอตกภัยที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.18 (ก) ในขณะที่ดินที่มีค่าการซึมน้ำเท่ากับ $K_s 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ดินมีค่าการซึมน้ำต่ำส่งผลให้อัตราส่วนความปลอตกภัยที่ความชื้นฝนเท่ากับ 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากความชื้นฝนมีปริมาณสูงกว่าค่าการซึมน้ำทำให้น้ำฝนไม่สามารถแทรกซึมลงไปดินได้มากพอในช่วงเวลาสั้นๆ

4.3.4 ผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน

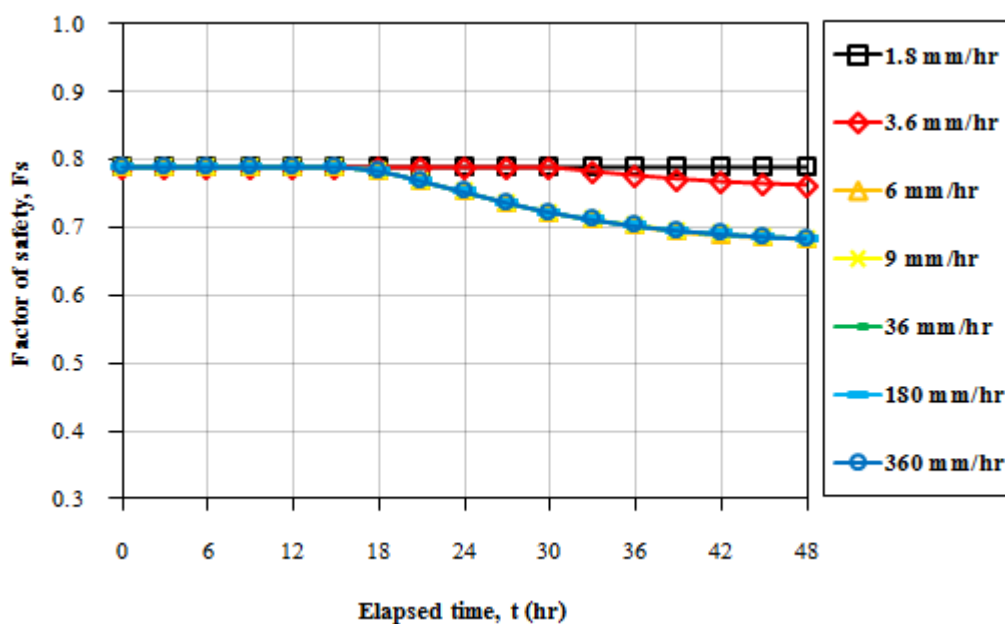
การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอตกภัยที่เป็นผลมาจากความหนาของชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าอัตราส่วนความปลอตกภัยเริ่มต้น ($F.S._{(ini)}$) ของชั้นดินที่มีความหนาเท่ากับ 2 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอตกภัยสูงสุดและจะลดต่ำลงตามความหนาของชั้นดินที่เพิ่มขึ้นคือ 4 6 8 และ 10 เมตรตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นฝน (I_r) เท่ากับ 9 36 และ 80 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราส่วนความปลอตกภัยของดินที่มีความหนา 2 เมตร ยังคงมีอัตราส่วนความปลอตกภัยมีค่าสูงสุด โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นฝนเท่ากับ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนความปลอตกภัยจะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้นดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6 8 และ 10 เมตรตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นฝนเท่ากับ 36 และ 80 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนความปลอตกภัยจะลดต่ำลงไปเรื่อยๆจนมีค่าต่ำสุดที่ความหนาของชั้นดินเท่ากับ 6 เมตรและเมื่อความหนาของชั้นดินเพิ่มขึ้นเป็น 8 และ 10 เมตร อัตราส่วนความปลอตกภัยก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนาของชั้นดินที่เพิ่มมากขึ้นจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอตกภัยช้ากว่าที่ความหนาของชั้นดินน้อยๆ



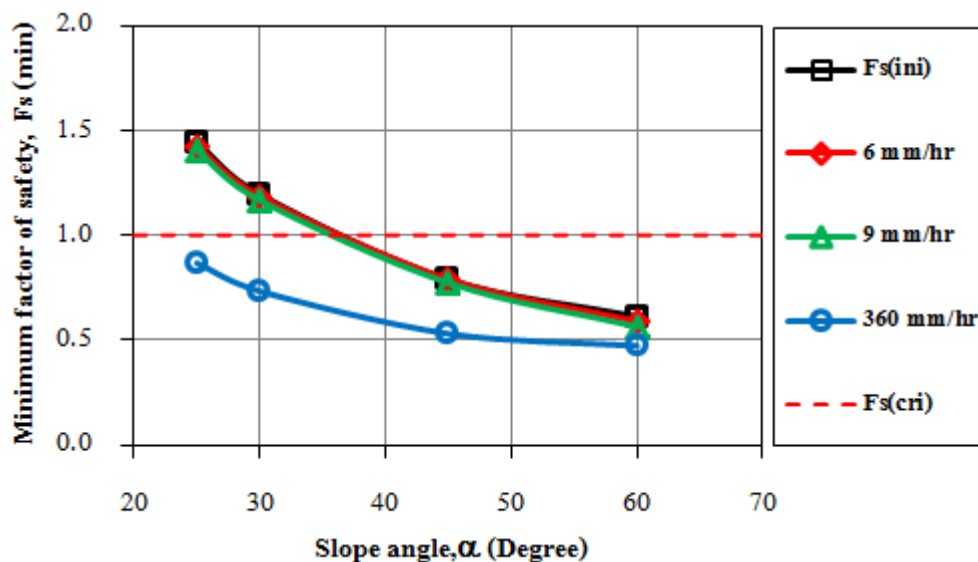
(ก) ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที



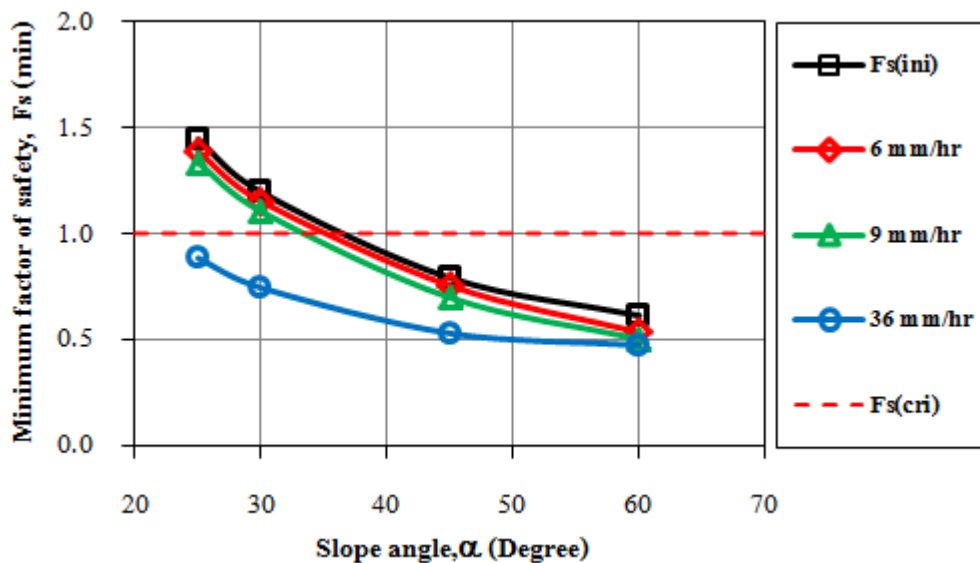
(ข) ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที
รูปที่ 4.17 ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความลาดชัน 45 องศา
ดินมีความหนาของดิน 6 เมตร



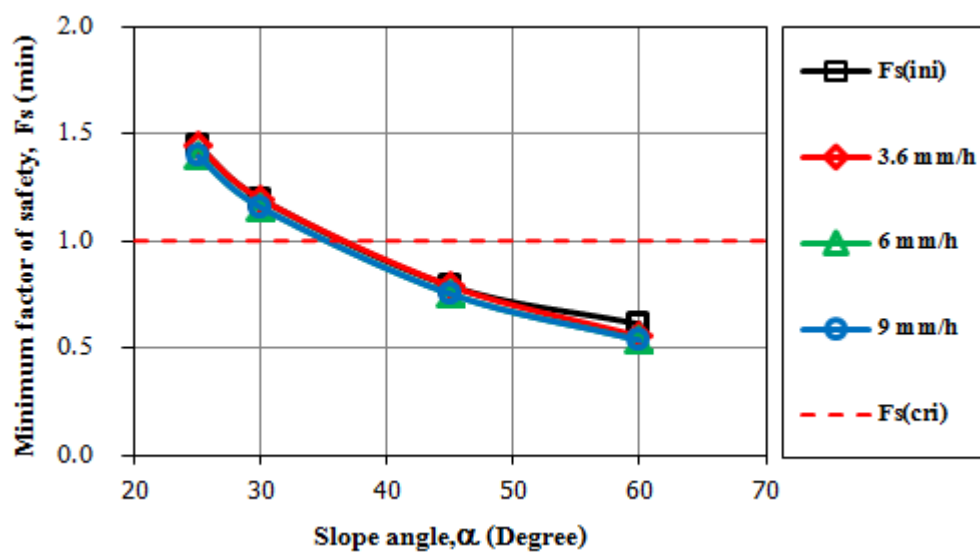
(ค) ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลกระทบจากความชื้นฝน (I_r) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความลาดชัน 45 องศา ดินมีความหนาของดิน 6 เมตร



(ก) ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ $K_s = 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที รูปที่ 4.18 ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ของดินทั้ง 3 กลุ่ม ที่ความหนาของดิน 6 เมตร

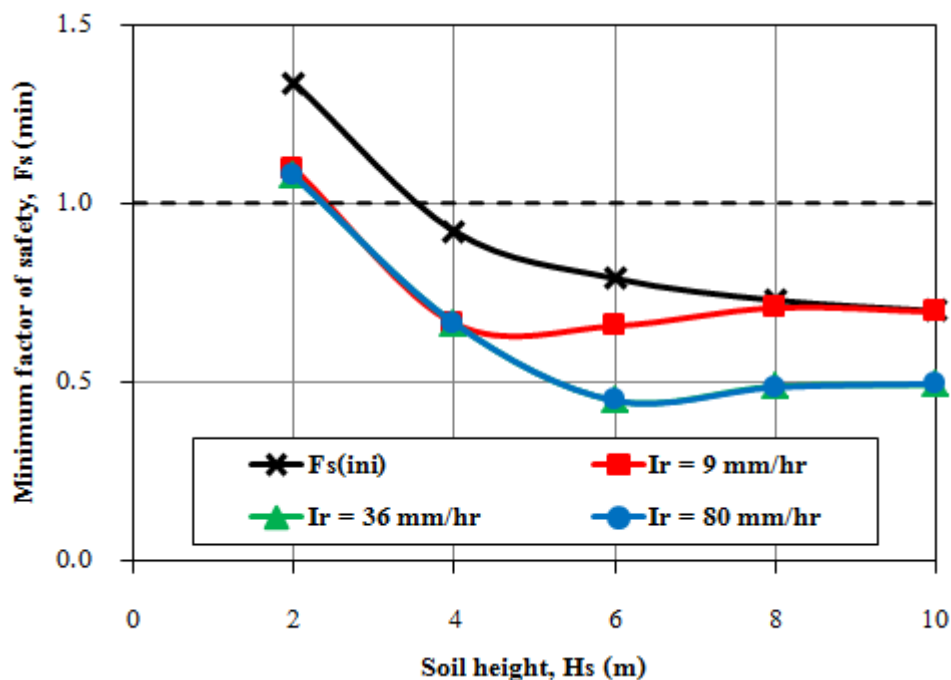


(๗) ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที



(ค) ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลกระทบจากความลาดเอียง (α°) ของดินทั้ง 3 กลุ่ม ที่ความหนาของดิน 6 เมตร



รูปที่ 4.19 อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ($F.S._{(min)}$) ที่เป็นผลมาจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน โดยมีค่าการซึมน้ำของดิน $K_s = 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ความลาดชันคงที่ 45 องศา

4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆพบว่าค่าพารามิเตอร์กำลังของดิน (c', ϕ') มีความสัมพันธ์กันระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน โดยให้แกน x เป็นค่าระดับความอิ่มตัว แกน y เป็นค่าหน่วยแรงกดทับ และแกน z เป็นค่าหน่วยแรงเฉือนจะได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบระนาบแสดงดังรูปที่ 4.20 (ก) ถึงรูปที่ 4.20 (ง) ซึ่งสมการระนาบของความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ลาดดินที่เกิดการพิบัติได้โดยสมการระนาบของดินแต่ละบริเวณแสดงดังสมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.4

บริเวณส่วนบนของลาดดินตำแหน่ง T

$$\tau = -42.1241 + 201.1744(1 - Sr) + 0.7137\sigma \quad R^2 = 0.834 \quad (4.1)$$

บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่ง M1

$$\tau = -115.3147 + 531.1790(1 - Sr) + 1.2368\sigma \quad R^2 = 0.844 \quad (4.2)$$

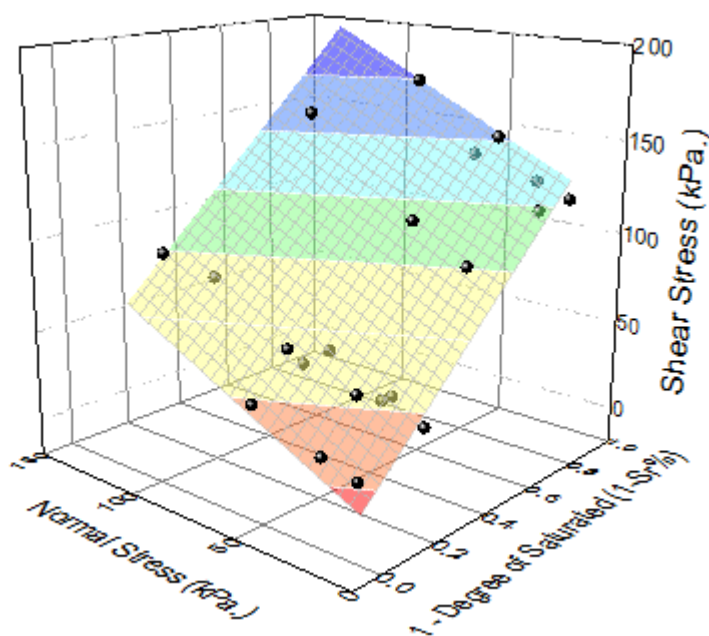
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่ง M2

$$\tau = -210.3967 + 815.7040(1 - Sr) + 2.0629\sigma \quad R^2 = 0.858 \quad (4.3)$$

บริเวณส่วนล่างของลาดดินตำแหน่ง U

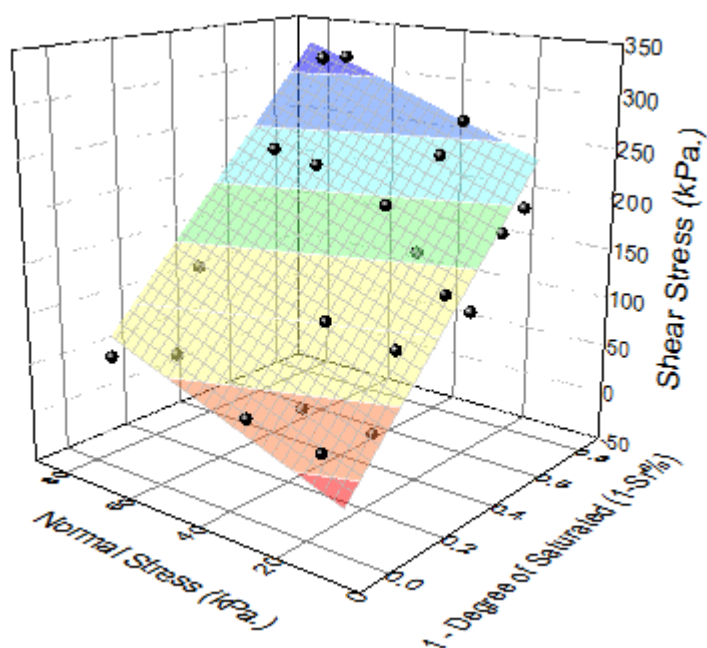
$$\tau = -44.8147 + 238.0942(1 - Sr) + 0.7680\sigma \quad R^2 = 0.338 \quad (4.4)$$

เมื่อ τ = กำลังรับแรงเฉือนของดิน (กิโลปาสกาล)
 Sr = ระดับความอิ่มตัวของดิน (เปอร์เซ็นต์)
 σ = หน่วยแรงกดทับ (กิโลปาสกาล)



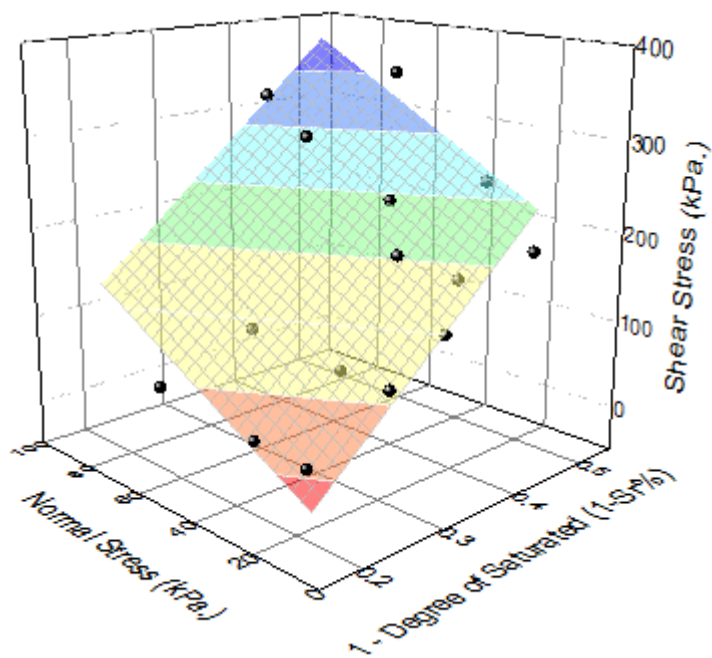
Model	Plane		
Equation	$z=z_0+aX+bY$		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	z_0	-42.1241	16.4827
	a	201.1744	24.5841
b	0.7137	0.1662	
Reduced Chi-Sqr	413.5253		
Adj. R-Square	0.8341		

รูปที่ 4.20 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturation, Normal Stress และ Shear Stress ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนบนของลาดดิน T



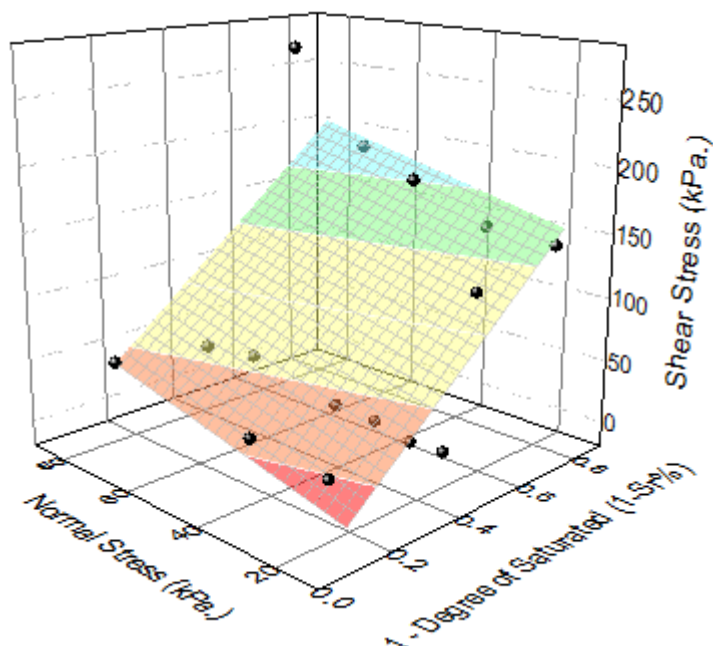
Model	Plane		
Equation	$z = z_0 + aX + bY$		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	z_0	-115.3147	32.8073
	a	531.1790	69.4270
	b	1.2368	0.4039
Reduced Chi-Sqr	845.9711		
Adj. R-Square	0.844		

รูปที่ 4.20 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturation, Normal Stress และ Shear Stress
ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนกลางของลาดดิน M1



Model	Plane		
Equation	$z=z_0+aX+bY$		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	z_0	-210.3967	41.2009
	a	815.7040	102.2138
	b	2.0629	0.4603
Reduced Chi-Sqr	1605.7604		
Adj. R-Square	0.858		

รูปที่ 4.20 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of saturation, Normal stress และ Shear stress
ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนกลางของลาดดิน M2



Model	Plane		
Equation	$z=z_0+aX+bY$		
		Value	Standard Error
Max Shear Stress	z_0	-44.8147	53.6375
	a	238.0942	80.5319
	b	0.7680	0.7944
Reduced Chi-Sqr	4527.9481		
Adj. R-Square	0.338		

รูปที่ 4.20 (ง) ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of saturation, Normal stress และ Shear stress ในรูปแบบระนาบของดินบริเวณส่วนล่างของลาดดิน U

การนำสมการระนาบของดินที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturation, Normal stress และ Shear stress มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดิน (API) สามารถทำได้โดยการนำสมการระนาบของดิน (สมการที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4) มาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ Infinite Slope Analysis ในแบบกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพังจากสมการที่ 4.5 โดยเมื่อต้องการหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความพรุนของดิน (Porosity, n) ซึ่งได้จากการคำนวณตามความสัมพันธ์ของอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) ของตัวอย่างที่เก็บในกระบอกเก็บตัวอย่างระดับความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation, $S_{r,cr}$) และความหนาของชั้นดินถึงผิวการเคลื่อน

พัง (Critical Thickness, T_{cr}) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ จากสมการที่ 4.6

$$F.S. = \frac{c' + ((\gamma_{sat} + \gamma_w)h \cos \beta) \tan \phi' - S_r u_w \tan \phi'}{h \gamma_{sat} \sin \beta} \quad (4.5)$$

$$API = \frac{S \cdot e}{1 + e} \left(\frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma_d \left(1 + \frac{S \cdot e}{G_s} \right) (FS \sin \beta - \cos \beta \tan \phi')} \right) \quad (4.6)$$

เมื่อ	API_{cr}	=	ดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Antecedent Precipitation Index) (mm)
	n	=	ค่าความพรุนของดิน (Porosity)
	$S_{r,cr}$	=	ระดับความอิ่มตัวของดิน (Degree of saturation)
	T_{cr}	=	ความหนาของชั้นดิน (m)
	e	=	อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)
	G_s	=	ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)
	c'	=	แรงยึดเกาะประสิทธิผล (Effective cohesion)
	ϕ'	=	มุมเสียดภายในประสิทธิผล (Effective internal friction angle)
	$F.S.$	=	อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)
	γ_d	=	หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight of soil)
	γ_w	=	หน่วยน้ำหนักน้ำ (Unit weight of water)
	β	=	ความลาดชันของลาดดิน (Angle of slope)
	α	=	คือมุมเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของดิน

ผลการวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.0 ของดินทั้ง 4 บริเวณแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยสามารถอธิบายได้ว่าลาดดินส่วนบนในบริเวณ T ที่มีความลาดชันเฉลี่ย 26.5 องศา จะเกิดการพิบัติเมื่อค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตมีค่าเท่ากับ 205.65 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ดินในบริเวณนี้มีระดับความอิ่มตัว 84

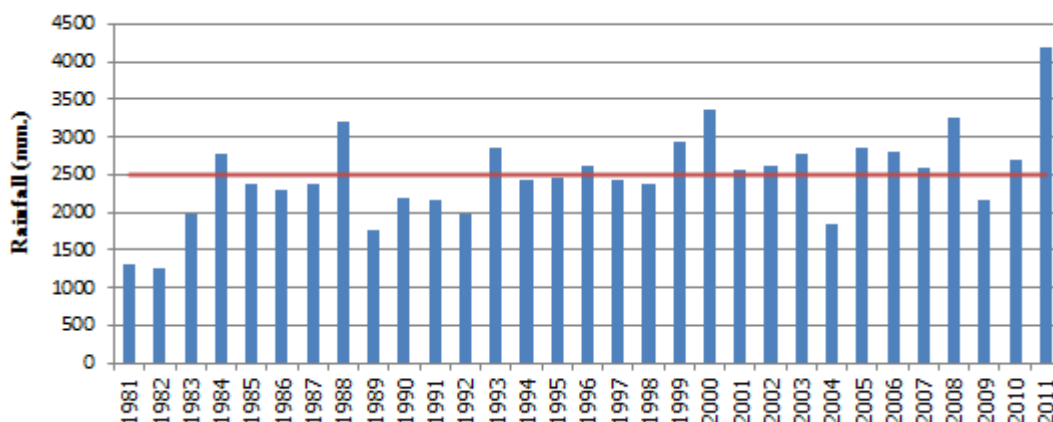
เปอร์เซ็นต์ โดยการพิบัติจะมีความลึกประมาณ 3.195 เมตรจากผิวดิน ในส่วนตอนกลางของลาดดิน ในบริเวณ M1, M2 ที่ความลาดชันเฉลี่ย 26.5 ลาดดินจะเกิดการพิบัติเมื่อค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตมีค่าเท่ากับ 227.89 และ 253.69 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ดินมีระดับความอิ่มตัว 84 และ 82 เปอร์เซ็นต์ และการพิบัติที่เกิดขึ้นจะมีความลึก 3.096 และ 3.064 เมตรตามลำดับ ส่วนด้านล่างของลาดดินในบริเวณ U จะเกิดการพิบัติโดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตต่ำกว่าบริเวณอื่นคือ 166.60 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ลาดดินที่พิบัติมีระดับความอิ่มตัว 86 เปอร์เซ็นต์ และการพิบัติจะมีความลึกประมาณ 2.958 เมตร

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) ของดินบริเวณต่างๆ

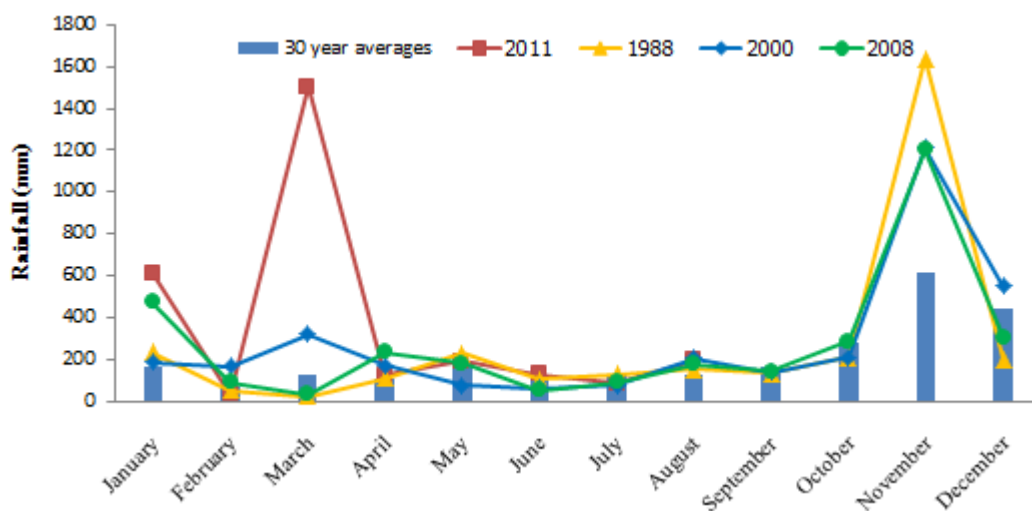
ตำแหน่งที่พิจารณา	ความลาดชันโดยเฉลี่ยของลาดดิน	$Sr_{cr}(\%)$	$H_{cr}(m.)$	$API_{cr}(mm.)$
ส่วนบน (T)	26.5	84	3.195	205.65
ส่วนกลาง(M1)	26.5	84	3.096	227.89
ส่วนกลาง(M2)	26.5	82	3.064	253.69
ส่วนล่าง(U)	26.5	86	2.958	166.60

4.5 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน

จากข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังของสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่ามีค่าน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 2505.5 มิลลิเมตร และจะสังเกตได้ว่าปี 1988 2000 2008 และปี 2011 มีปริมาณน้ำฝนที่สูงกว่าค่าน้ำฝนเฉลี่ยอยู่มากอันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลจากลมพายุทำให้ปีดังกล่าวในพื้นที่ได้รับปริมาณน้ำฝนที่สูงมากกว่าปกติ เพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้แสดงเป็นปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยย้อนหลัง 30 ปีและน้ำฝนรายเดือนในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ แสดงดังรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าในข้อมูลฝนรายเดือนเฉลี่ยย้อนหลัง 30 ปีในเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นฤดูฝนจะมีปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยมากกว่าเดือนอื่นๆและในปี 1988 2000 และ 2008 ที่มีฝนตกมากผิดปกติก็มีค่ามากผิดปกติในเดือนพฤศจิกายนเช่นกัน โดยในเดือนพฤศจิกายนปี 1988 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนใกล้เคียงกับช่วงเดือนมีนาคมปี 2011 ได้เกิดการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ อ.พิปูนและ อ.ลานสกา จ.นครศรีธรรมราช (สุทธิศักดิ์, 2550) แต่ในส่วนในปี 2011 จะมีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติในเดือนมีนาคมซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมพายุและเป็นต้นเหตุของการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ใน ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช



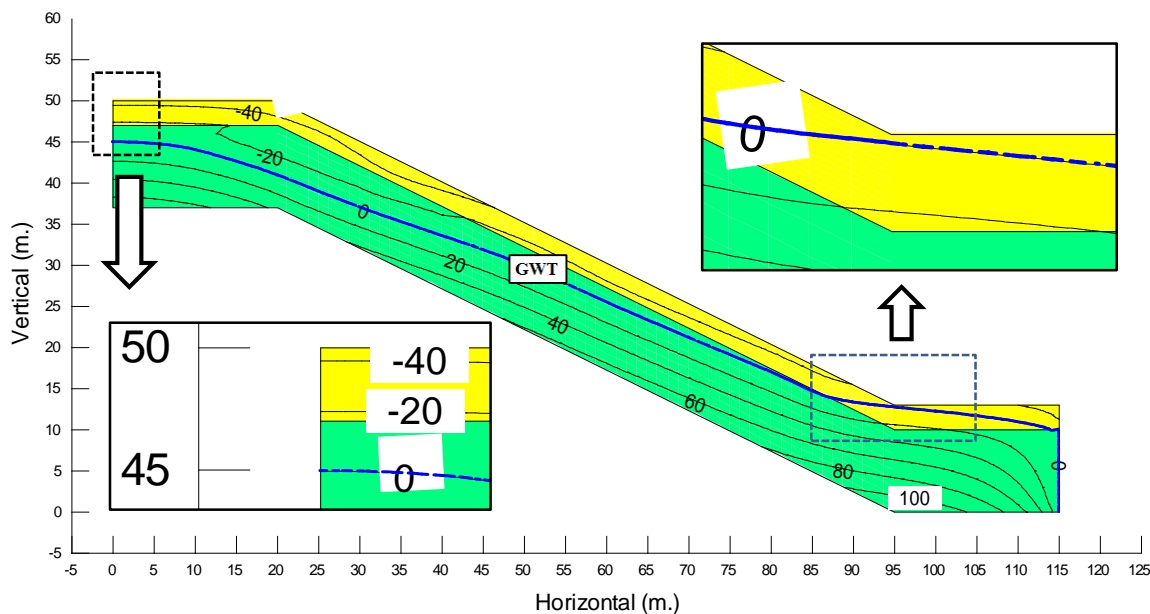
รูปที่ 4.21 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังข้อมูลจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)



รูปที่ 4.22 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 30 ปี และน้ำฝนรายเดือนในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดินในสภาวะแบบคงที่ (Steady) โดยใช้ น้ำฝนเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปีที่มีค่าเท่ากับ 0.2994 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช แทนการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาระดับน้ำใต้ดินปกติ พบว่า ระดับน้ำใต้ดินในสภาวะเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4.23 ในลักษณะของระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในดิน (Pore Water Pressure) บริเวณดินลาดดินระดับน้ำใต้ดินจะวางตัวอยู่ในชั้นดินโดยจะอยู่ต่ำกว่าผิว ดินประมาณ 0.3 เมตร ในส่วนของบริเวณด้านบนบนของลาดดินพบว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความ

ลึก 5.0 เมตรจากผิวดิน โดยจะวางตัวอยู่ในชั้นหินและค่าแรงดันน้ำในลาดดินจะมีค่าติดลบมากยิ่งขึ้นตามระดับความสูงของลาดดิน

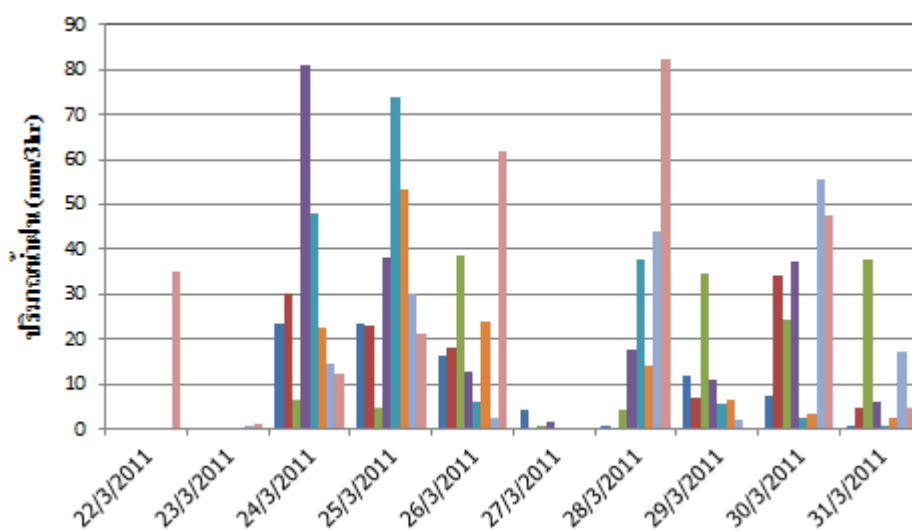


รูปที่ 4.23 ระดับน้ำใต้ดินและระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในสภาวะแบบคงที่ (Steady State)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ด้วยการใช้อัตราข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งตกต่อเนื่องกัน พบว่าระดับน้ำใต้ดินมีการเคลื่อนตัวตามปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนตกโดยจะปรับระดับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับน้ำฝนที่มีความเข้มข้นสูงๆติดต่อกันเป็นเวลานานแสดงดังรูปที่ 4.25 โดยแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงได้แบ่งลาดดินออกเป็น 7 ตำแหน่งพร้อมกับแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นตลอดความลึกของชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4.26 -4.32

พบว่าตำแหน่งที่ 1 บริเวณส่วนบนของลาดดินดังรูปที่ 4.26 ค่าแรงดันน้ำในสภาวะเริ่มต้นชั่วโมงที่ 0 แรงดันน้ำในลาดดินมีค่าติดลบโดยมีค่าตั้งแต่ -20 ถึง -48 กิโลปาสกาล ค่าติดลบจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณผิวดินและมีค่าน้อยสุดที่บริเวณต่ำสุดของชั้นดินและเมื่อผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง แรงดันน้ำจะมีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากในช่วงนี้ลาดดินสูญเสียความชื้น เมื่อพิจารณาที่ 72 96 110 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ ค่าแรงดันน้ำบริเวณล่างสุดจะค่อยๆมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงนี้ลาดดินได้รับปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่องและเมื่อพิจารณาตามความลึกของชั้นดินเมื่อเข้าใกล้บริเวณล่างสุดค่าติดลบจะค่อยๆเป็นบวกเพิ่มขึ้นโดยจะมีค่าใกล้เคียงกันใน

ช่วงเวลาที่ 96 110 และ 120 ชั่วโมงตลอดความลึก ในส่วนของปริมาณความชื้นพบว่าในช่วงเริ่มต้นมีความชื้น 0.33 – 0.36 ที่ผิวดินจะมีค่าความชื้นต่ำและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความลึกของชั้นดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเข้าใกล้ระดับน้ำใต้ดินมากยิ่งขึ้น โดยจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ระดับความลึก 49 – 47.2 เมตร โดยช่วงเวลาที่ 96 110 และ 120 ชั่วโมง พบว่าความชื้นมีค่าเท่ากับตลอดความลึกของชั้นดินที่ 47.8 – 47.2 เมตร โดยมีค่าความชื้นคงที่เท่ากับ 0.4 และมีแรงดันน้ำที่เป็นบวกซึ่งดินได้อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว



รูปที่ 4.24 ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ตกต่อเนื่องกันจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)

ตำแหน่งที่ 2 3 4 5 และ 6 บริเวณส่วนกลางของลาดดินดังรูปที่ 4.27-4.31 จะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินชัดเจนที่สุดโดยอัตราการเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นฝนในแต่ละช่วงเวลาคือในช่วงเวลาที่ลาดดินได้รับปริมาณความชื้นฝนน้อยตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นถึงช่วงเวลา 48 ชั่วโมงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินก็จะเกิดขึ้นน้อย และในช่วงที่มีความชื้นฝนมากตั้งแต่ชั่วโมงที่ 72 ถึง 120 ระดับน้ำใต้ดินก็จะเพิ่มขึ้นมาก แสดงดังรูปที่ 4.27 – 4.31 จะเห็นได้ว่าในเวลาชั่วโมงที่ 72 96 110 และ 120 ลาดดินได้รับความชื้นฝนปริมาณสูงระดับน้ำใต้ดินจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่าแรงดันน้ำในสภาวะเริ่มต้นชั่วโมงที่ 0 ถึง 48 มีค่าติดลบทั้งหมดตลอดความลึกและค่าติดลบจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณผิวดินและมีค่าน้อยสุดที่บริเวณต่ำสุดของชั้นดินและเมื่อเวลาผ่านไป 72 96 110 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ ค่าแรงดันน้ำบริเวณต่ำสุดจะค่อยๆมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาตามความลึกของชั้นดินในแต่ละช่วงเวลาเมื่อเข้าใกล้บริเวณต่ำสุดค่าติดลบจะค่อยๆเป็นบวกเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยในช่วง

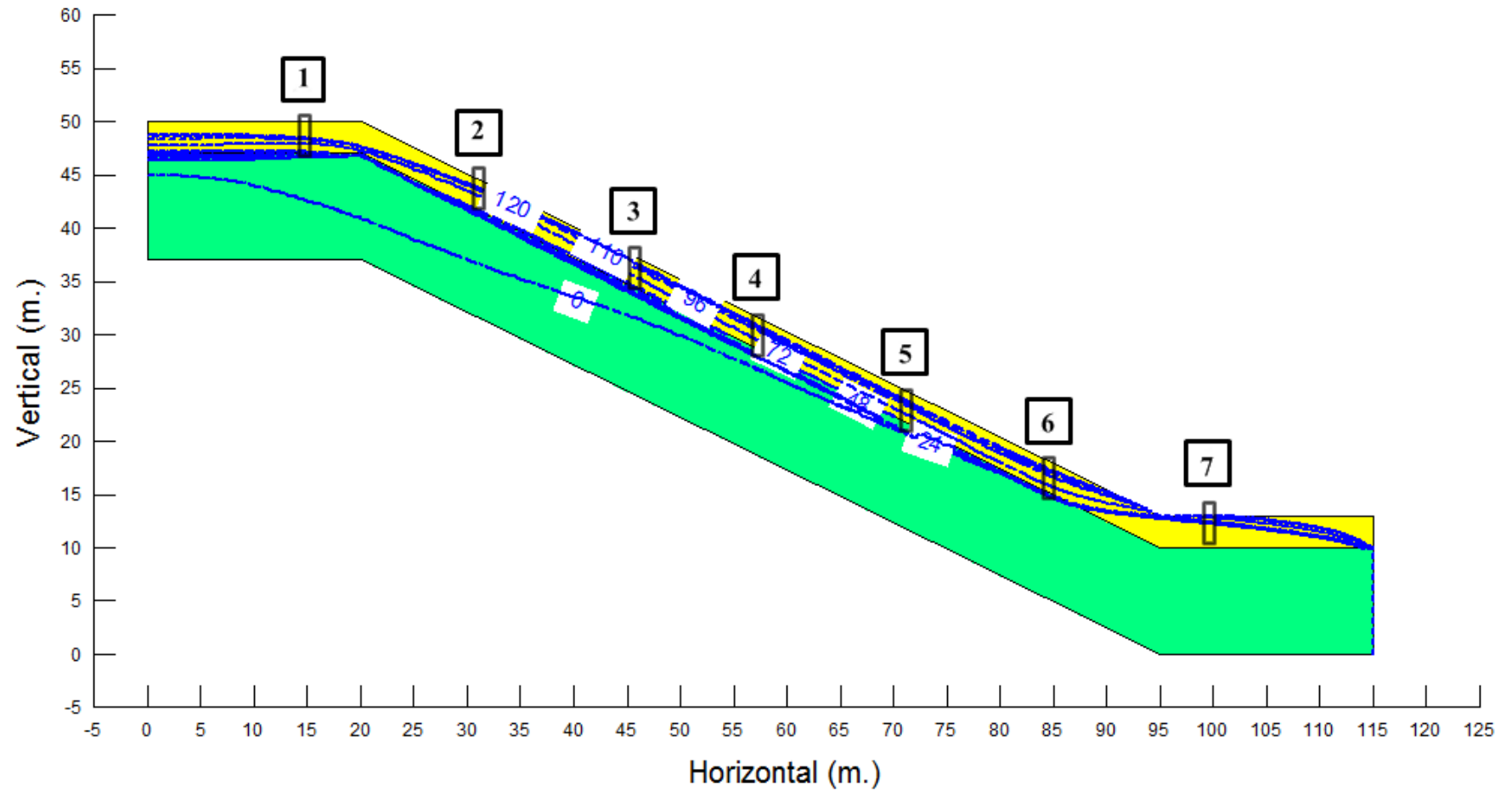
ที่แรงดันน้ำมีค่าเป็นบวกลาดดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ในส่วนของปริมาณความชื้นจะมีความชื้นต่ำสุดที่ผิวดินและจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าไปใกล้จุดต่ำสุดของชั้นดินและลาดดินจะค่อยๆอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งสังเกตได้จากค่าความชื้นที่คงที่เท่ากับ 0.4 โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นในลาดดินมีค่าดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดิน

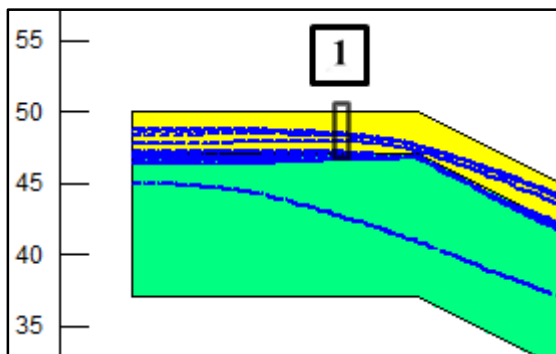
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
แรงดันน้ำ (PWP) kPa.	-60 ถึง 10	-55 ถึง 10	-43 ถึง 15	-35 ถึง 14	-34 ถึง 14	-27 ถึง 15	-6 ถึง 27
ปริมาณความชื้น (VWC)	0.307-0.4	0.315-0.4	0.33-0.4	0.33-0.4	0.33-0.4	0.332-0.4	0.342-0.4

ตำแหน่งที่ 7 บริเวณตีนลาดดินดังรูปที่ 4.32 พบว่าแรงดันน้ำในช่วงแรกๆคือ ชั่วโมงที่ 0 24 และ 48 มีค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นในช่วงเวลาดังกล่าวใกล้เคียงกัน เนื่องจากในบริเวณนี้จะมีระดับน้ำใต้ดินจากการวิเคราะห์การไหลในสภาวะแบบคงที่อยู่ใกล้กับผิวดินมากทำให้แรงดันน้ำและปริมาณความชื้นที่เกิดจากความชื้นผ่นน้อยๆมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย และเมื่อพิจารณาที่เวลา 72 96 110 และ 120 ชั่วโมงพบว่าในช่วงนี้มีปริมาณความชื้นผ่นสูงทำให้ค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงจากช่วงแรกอย่างชัดเจน โดยในช่วงเวลาที่ 96 110 และ 120 ชั่วโมง ค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นของทั้ง 3 ช่วงเวลามีค่าเท่ากันและที่บริเวณผิวดินพบว่าค่าแรงดันน้ำใกล้เคียง 0 กิโลปาสกาลและปริมาณความชื้นมีค่าคงที่ประมาณ 0.4 นั้นหมายความว่าผิวดินบริเวณนั้นใกล้สภาวะที่จะมีการเจ็มนองของน้ำขึ้นมาจากผิวลาดดิน

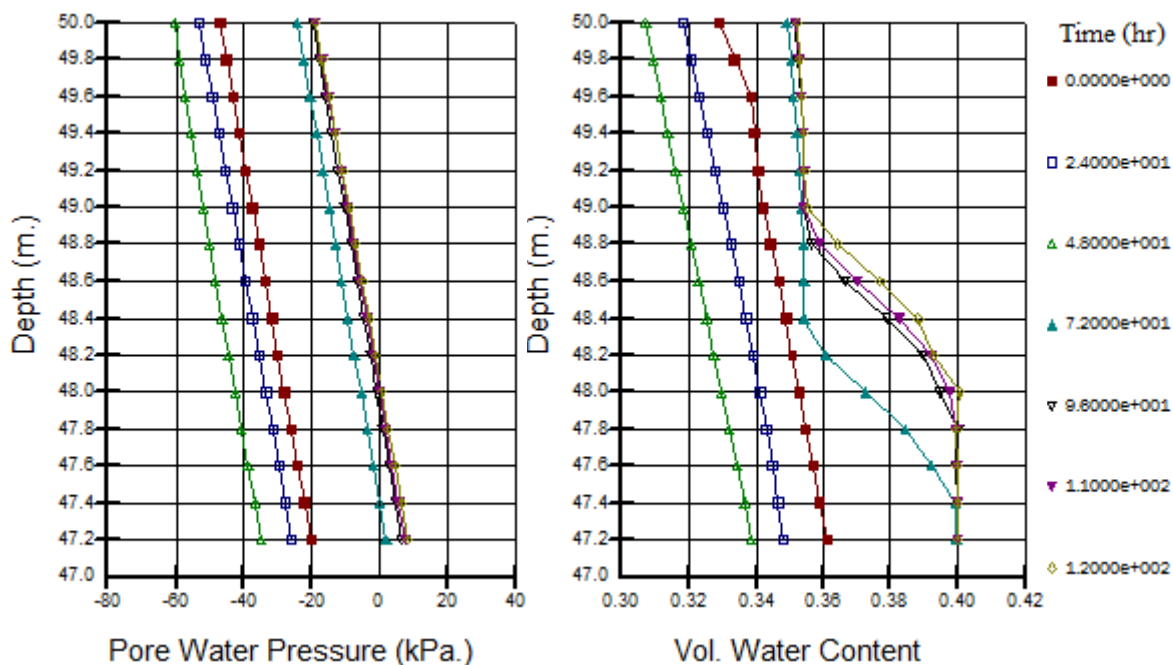
จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาในภาพรวมทั้งลาดดินแสดงดังรูปที่ 4.25 ยังพบว่าในบริเวณตำแหน่งที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินแบบค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆลดระดับลงเนื่องมาจากน้ำในบริเวณนี้พยายามที่จะระบายออกโดยจะไหลลงตามลาดดินตามความต่างระดับของน้ำที่ต่างกันและการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลาดดินในบริเวณตีนลาดทำให้ระดับน้ำใต้ดินบริเวณตอนกลางของลาดดินจะมีระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ในส่วนของตำแหน่งที่ 7 ซึ่งเป็นส่วนตีนลาดดินในบริเวณนี้ระดับน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินปกติเริ่มต้นมีระดับต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อยและเมื่อได้รับน้ำที่ไหลซึมลงมาจากลาดดินก็จะทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงผิวดิน



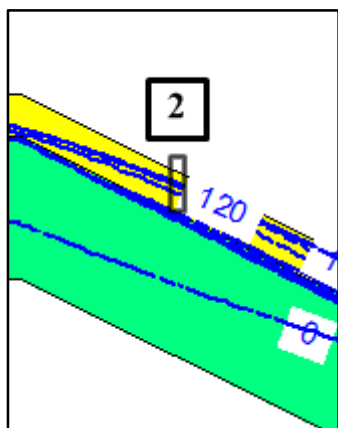
รูปที่ 4.25 ระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนตกซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



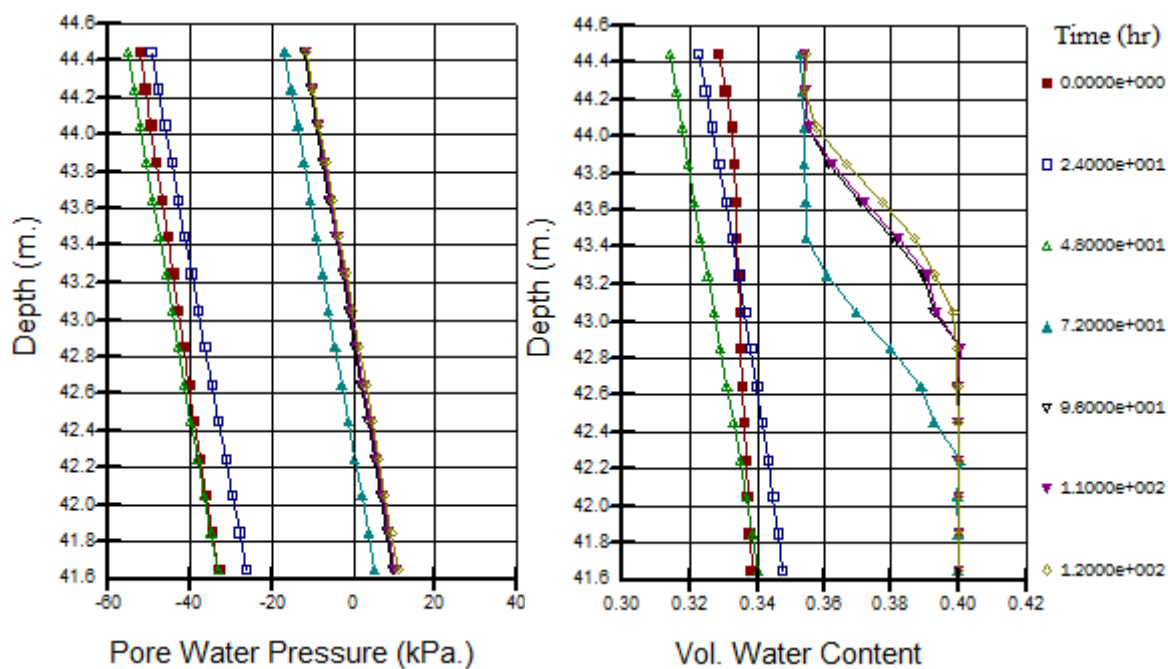
บริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่งที่ 1



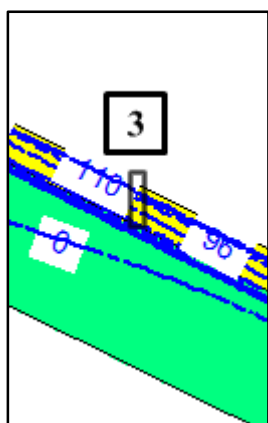
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 1 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



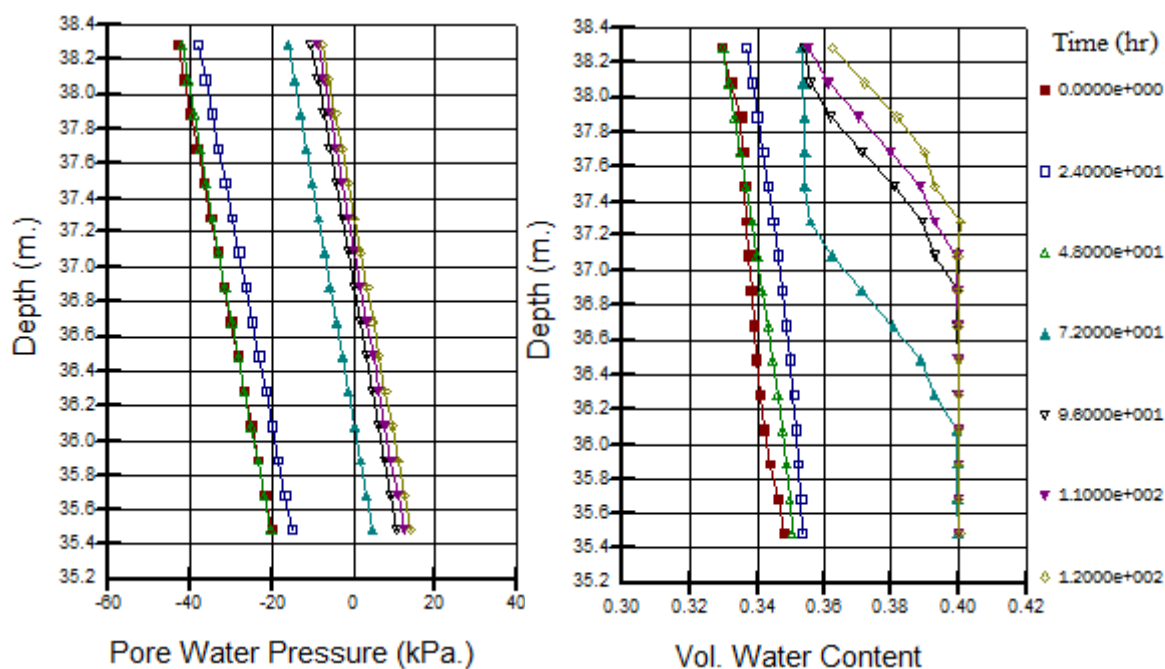
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 2



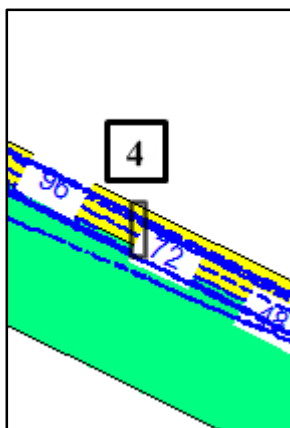
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 2 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



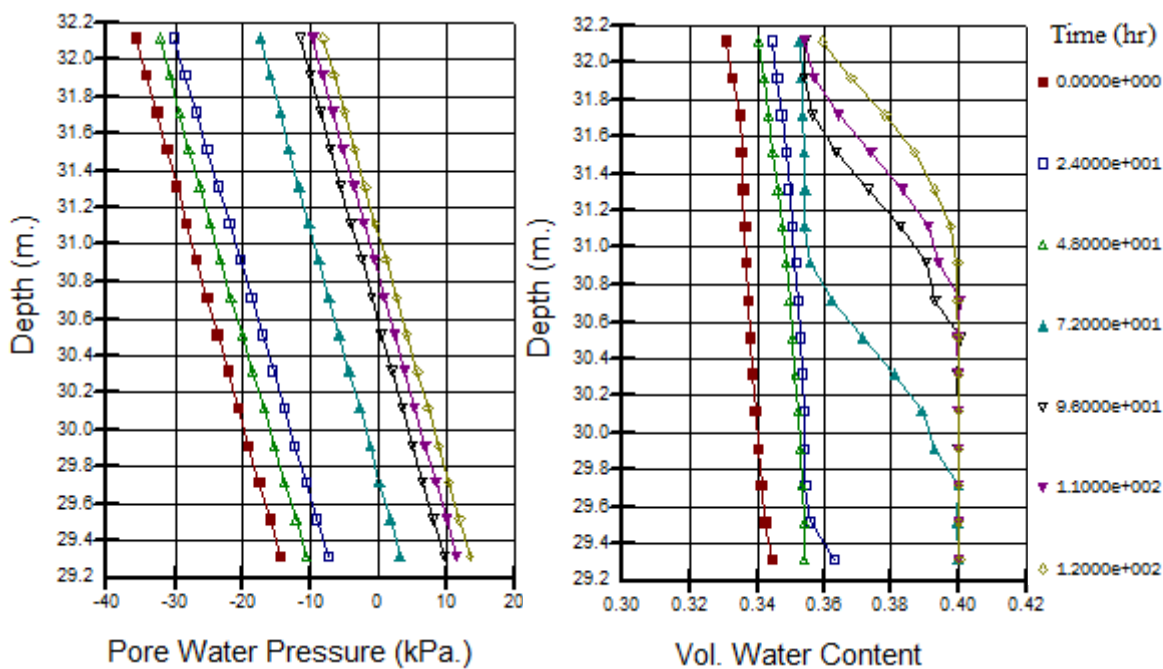
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 3



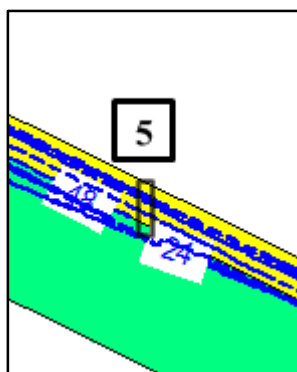
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 3 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



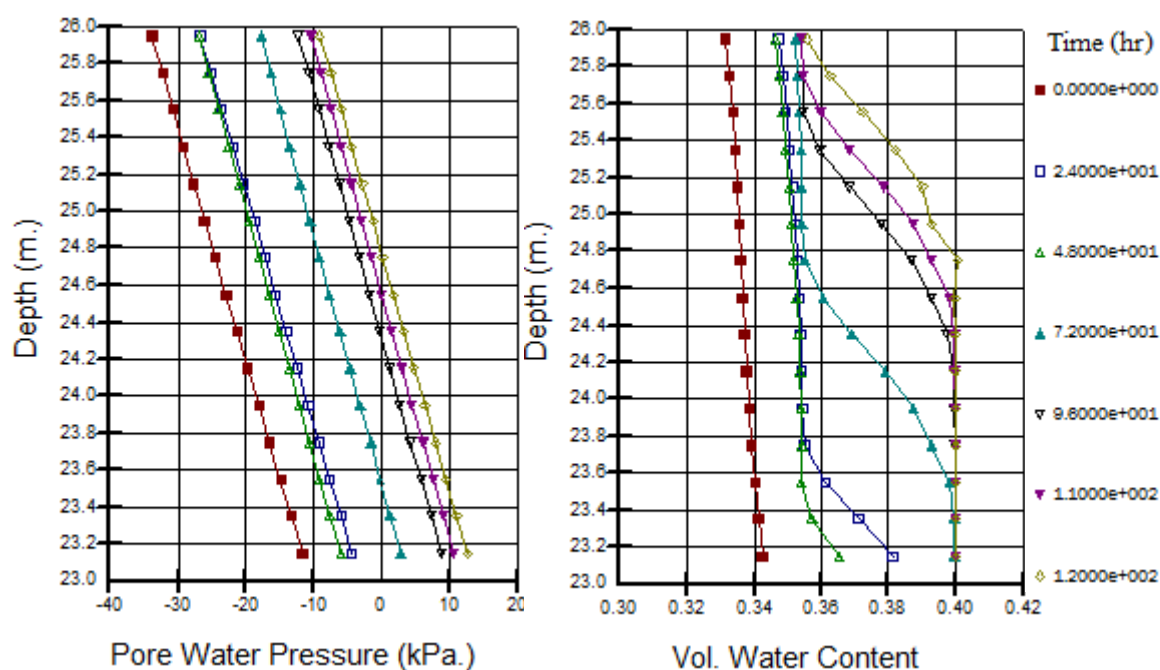
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 4



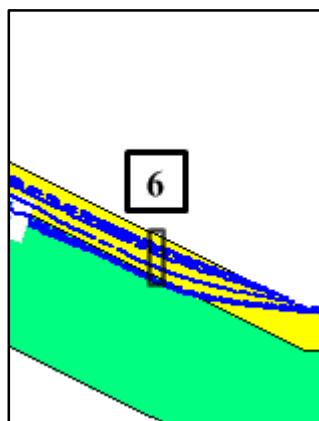
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 4 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



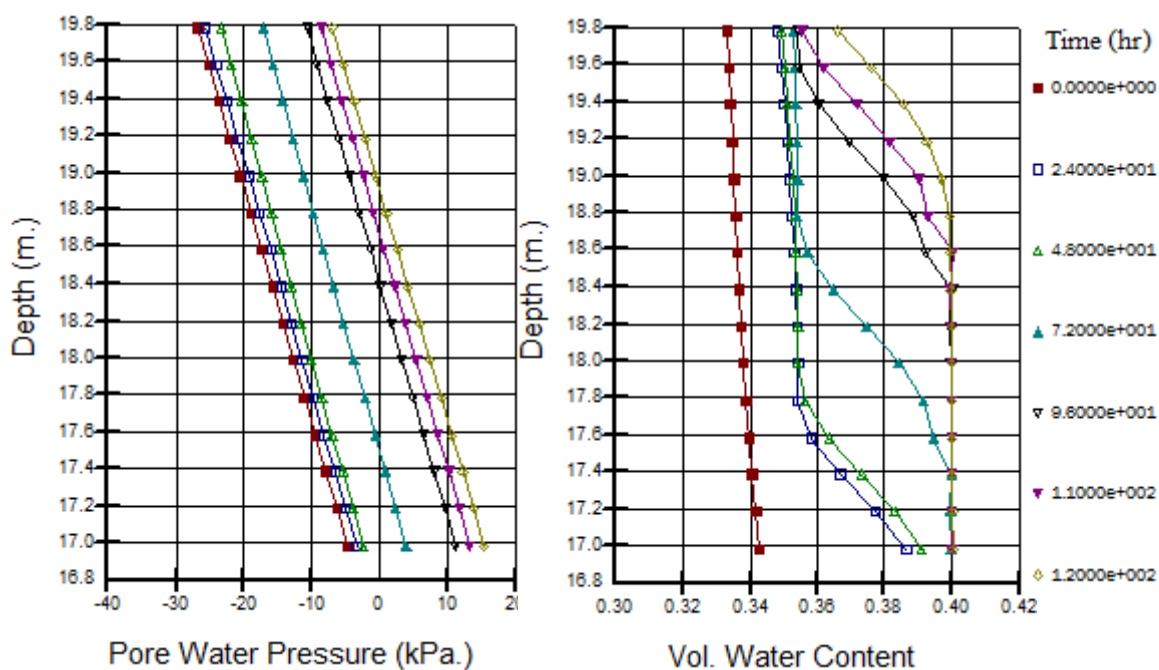
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 5



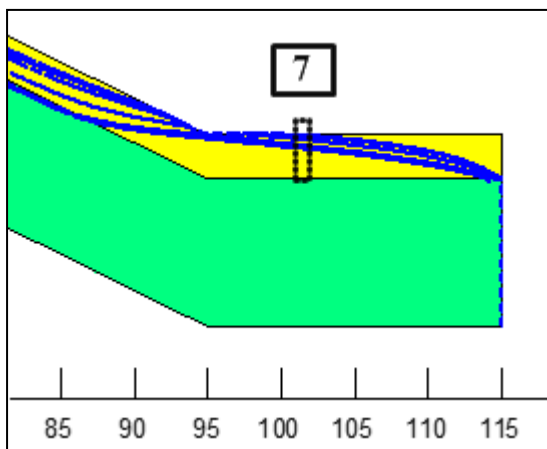
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 5 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



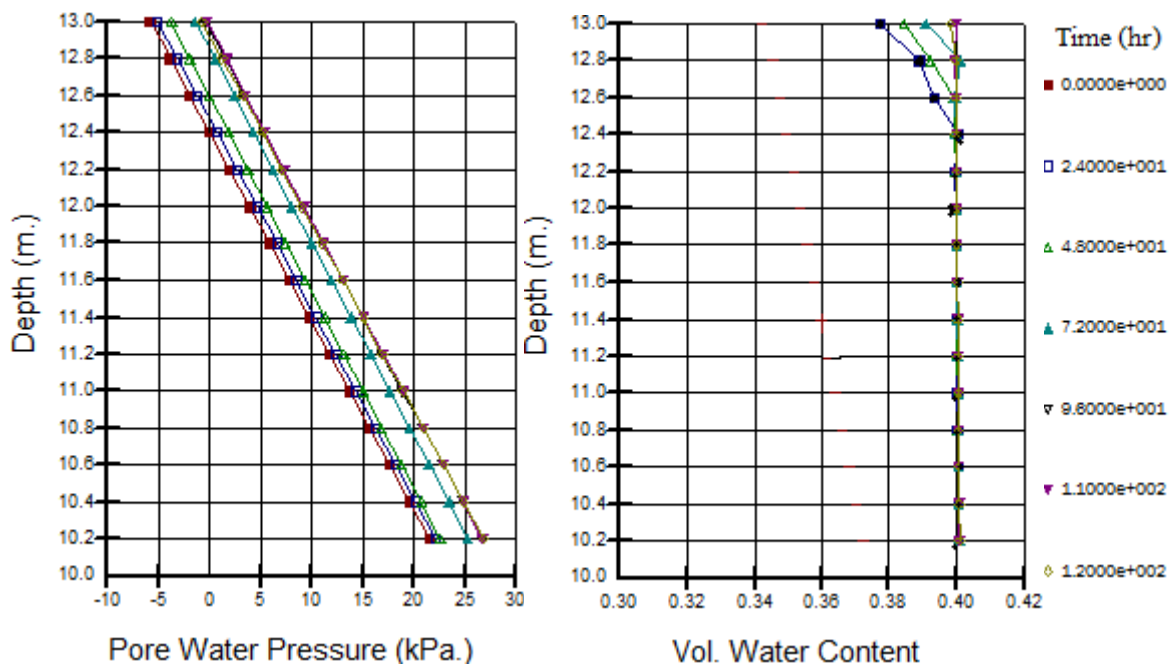
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 6



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 6 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



บริเวณส่วนล่างของลาดดินตำแหน่งที่ 7



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 7 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง

4.6 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W

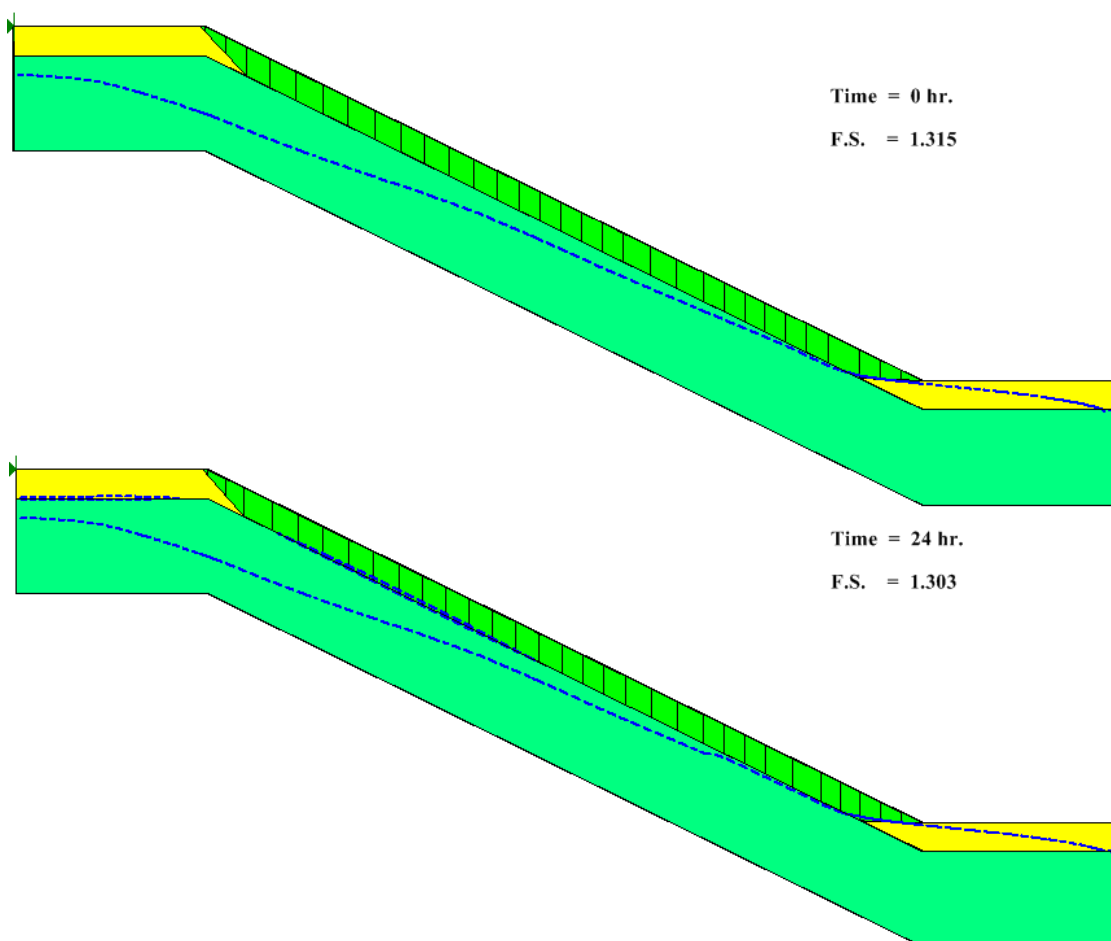
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ได้เลือกใช้วิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) วิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method โดยรับข้อมูลการวิเคราะห์การไหลซึมจากโปรแกรม SEEP/W จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพต่อโดยใช้โปรแกรม SLOPE/W ซึ่งเสถียรภาพที่ได้จะใช้เป็นตัวแทนของเสถียรภาพทั้งลาดดิน โดยผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 0 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง

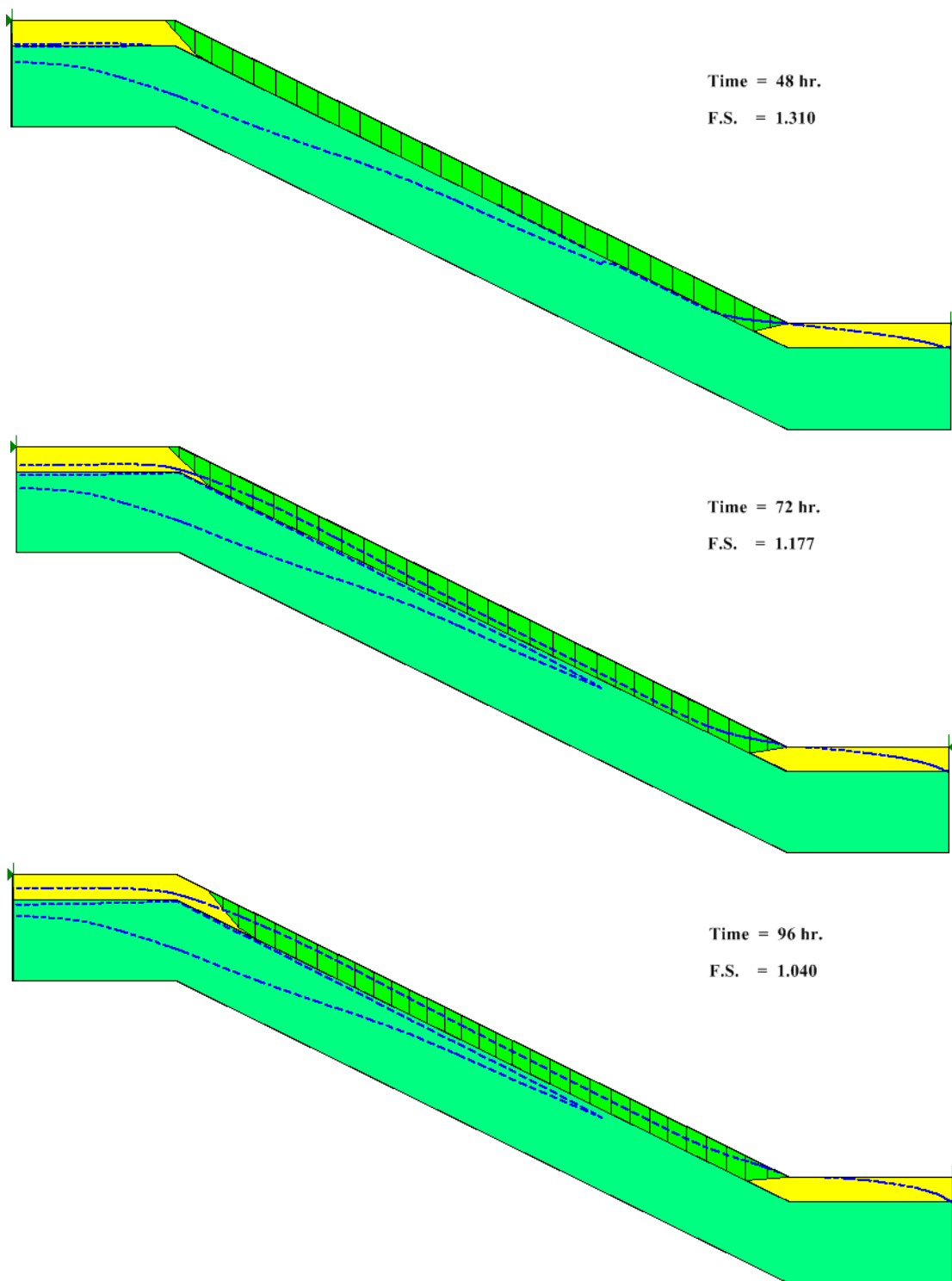
ระยะเวลาที่ฝนตก (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำฝนสะสม (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)
ช่วงเริ่มต้น	0	1.315
24	34.9	1.303
48	52.67	1.300
72	291.1	1.177
96	554.7	1.040
110	643.54	0.999
120	726.77	0.961
144	731.43	0.964

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากตารางที่ 4.11 พบว่าในช่วงเริ่มต้นลาดดินยังคงมีความมั่นคงอยู่โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.315 และเมื่อได้รับปริมาณน้ำฝนที่ตกติดต่อกันอัตราส่วนความปลอดภัยก็ค่อยๆ ลดลงซึ่งสอดคล้องตามผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆกัน เมื่อฝนตกต่อเนื่องกันผ่านไป 96 ชั่วโมง ลาดดินจะมีเสถียรภาพหรืออัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.040 นั้นหมายความว่าในช่วงเวลานี้ลาดดินกำลังเข้าใกล้ที่จะพิบัติและเมื่อฝนตกต่อเนื่องถึง 110 ชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินลดต่ำลงเหลือเท่ากับ 0.999 นั้นแสดงว่าลาดดินได้สูญเสียเสถียรภาพแล้วซึ่งตรงกับช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 26 มีนาคม 2554

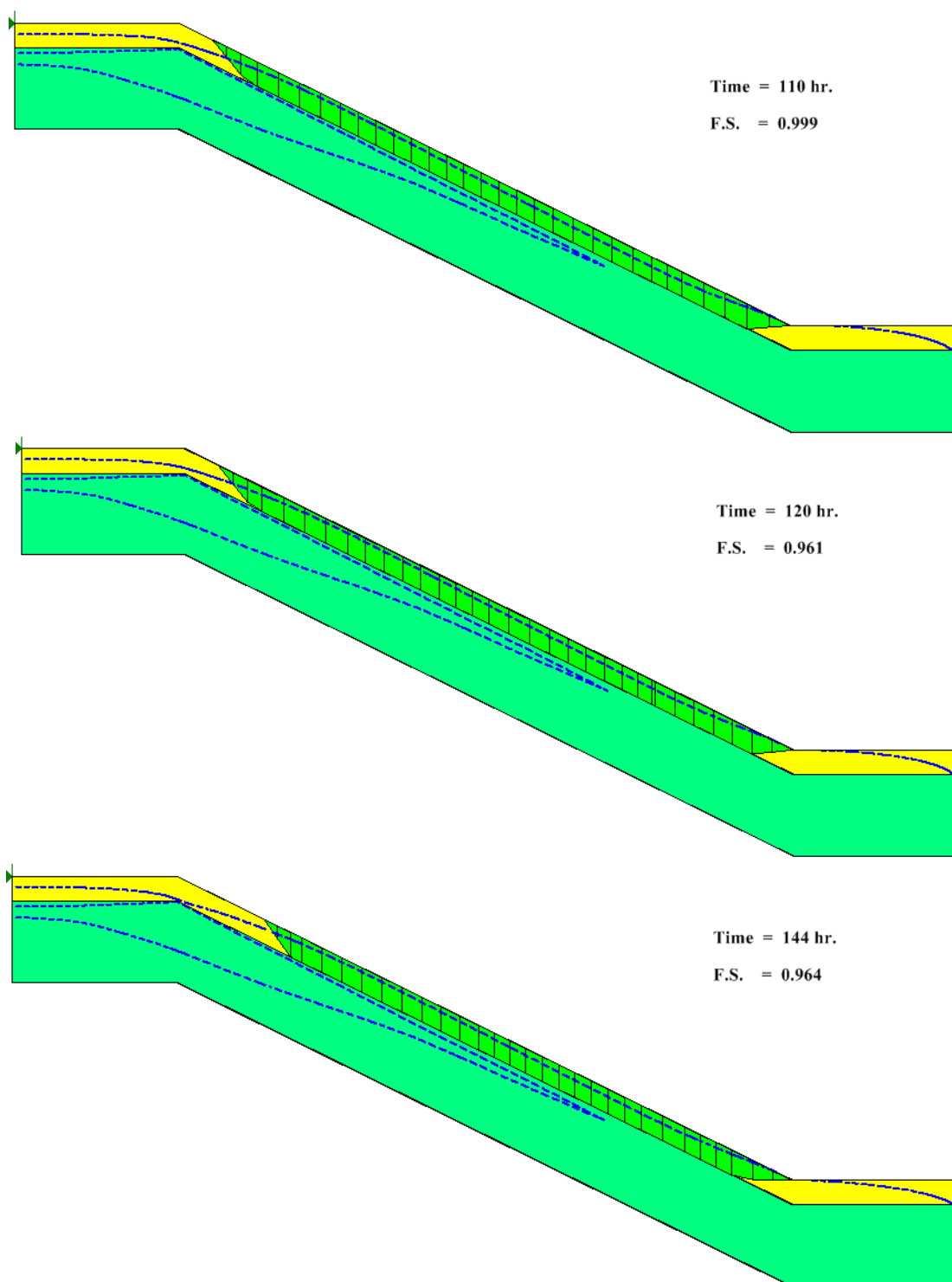
จากการวิเคราะห์ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินแสดงดังรูปที่ 4.33 - 4.35 พบว่าระดับน้ำใต้ดินส่งผลต่อตำแหน่งการพิบัติโดยเมื่อระดับน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกตั้งแต่ช่วงเวลาที่เริ่มต้นไปจนถึง 72 ชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆ ลดลงเท่ากับ 1.316 1.303 1.310 และ 1.177 ตามลำดับ ตำแหน่งของการพิบัติยังคงเป็นตำแหน่งเดิมแต่เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาที่ 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นใกล้จะถึงผิวดินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงเหลือเท่ากับ 1.040 0.999 0.961 และ 0.964 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.00 ตำแหน่งการพิบัติจะเปลี่ยนแปลงโดยมีขอบเขตที่แคบลงและมีตำแหน่งลดต่ำลงทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดันน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตามระดับน้ำใต้ดินจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลงและระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยเพิ่มแรงดันลอยตัว (Uplift Pressure) ทำให้ลาดดินที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงจึงเกิดการพิบัติได้ง่าย



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 0 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.34 ตำแหน่งรูปแบบการพื้ดักกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 48 72 และ 96 ชั่วโมง



รูปที่ 4.35 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา
110 120 และ 144 ชั่วโมง

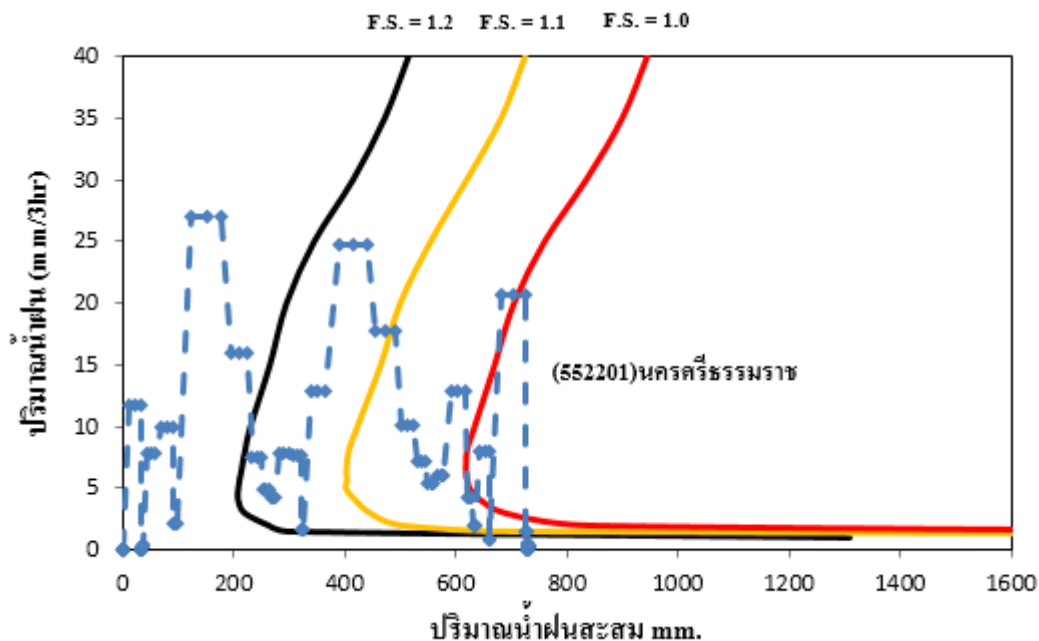
4.7 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต Critical Rainfall Envelope for Stability

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่แสดงด้วยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เพื่อนำมาเป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินเฉพาะพื้นที่ศึกษาดำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ฝนตกจริงกับปริมาณน้ำฝนสะสมใช้ข้อมูลจากสถานี นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำฝนที่ตั้งอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาค่อนข้างมากแต่สามารถบันทึกข้อมูลได้ละเอียดราย 3 ชั่วโมงและวัดปริมาณน้ำฝนได้ใกล้เคียงกับสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้พื้นที่ศึกษา ดังนั้นเพื่อความถูกต้องแม่นยำจึงได้นำข้อมูลน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษาแต่มีการบันทึกข้อมูลที่ละเอียดเป็นรายวันนำมาวิเคราะห์ร่วมด้วยเพื่อทำการเปรียบเทียบและสร้างเป็นเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ค่า F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ซึ่งเป็นเส้นที่บ่งบอกว่าลาดดินมีความปลอดภัยหรือมีเสถียรภาพเป็นอย่างไรในขณะที่ฝนตกแสดงดังรูปที่ 4.36 และเพื่อให้เข้าใจง่ายยิ่งขึ้นจึงได้จัดให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวันกับปริมาณน้ำฝนสะสมแสดงดังรูปที่ 4.37 ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานี นครศรีธรรมราช สถานีอบต.ฉลอง และสถานีอบต.สิชล ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณพื้นที่ศึกษาดังตารางที่ 4.12

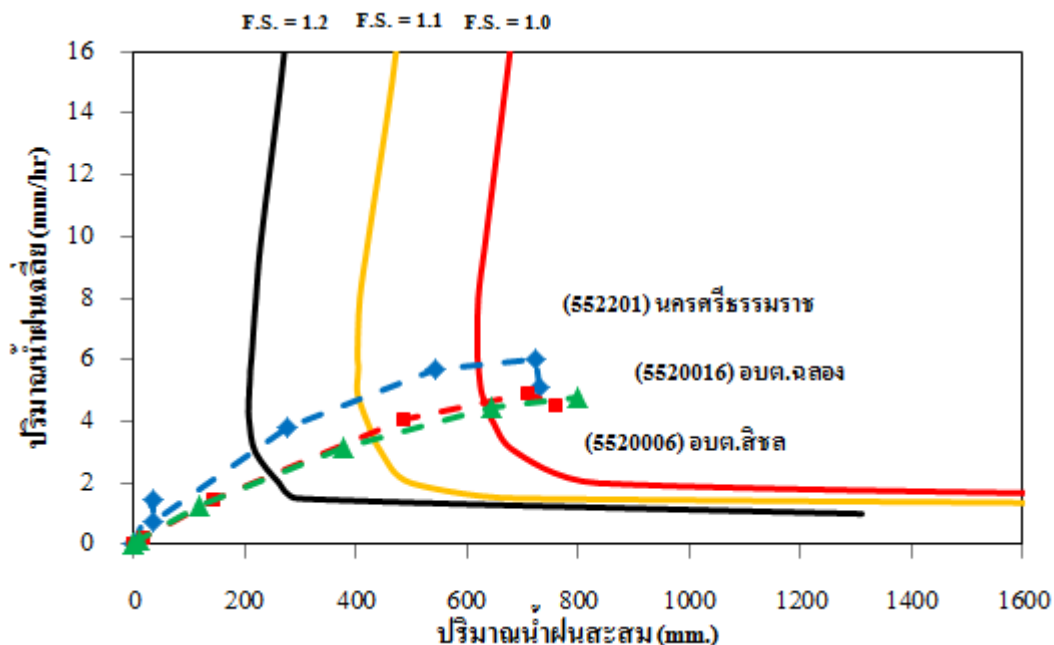
จากเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตในรูปที่ 4.37 และจากข้อมูลสถานีน้ำฝนในตารางที่ 4.12 พบว่าลาดดินในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช จะสูญเสียเสถียรภาพในวันที่ 26 มีนาคม 2554 จากการที่เส้นกราฟน้ำฝนไปตัดกับเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่มีเสถียรภาพ (F.S.) เท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นตัวแทนของเสถียรภาพของลาดดินในขณะนั้น โดยมีค่าน้ำฝนสะสมอยู่ในช่วง 543.9 – 710.5 มิลลิเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 554.47 มิลลิเมตรจะทำให้ลาดดินมีเสถียรภาพเท่ากับ 1.04 นั้นหมายความว่าลาดดินกำลังเข้าใกล้ที่จะพิบัติและที่ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 643.54 มิลลิเมตรลาดดินจะมีเสถียรภาพเท่ากับ 0.999 นั่นแสดงว่าลาดดินได้พิบัติหรือสูญเสียเสถียรภาพแล้ว ดังนั้นเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาและสามารถนำไปใช้เพื่อเตือนภัยดินถล่มในพื้นที่ศึกษาได้

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลน้ำฝนจาก 3 สถานีคือสถานีนครศรีธรรมราช สถานีอบต.ฉลอง และสถานีอบต.ลิซล ในช่วงวันที่ 21 -27 มีนาคม 2554 (กรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย, 2555)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	น้ำฝน (มม.)	น้ำฝนสะสม (มม.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเวลาสะสม (นาที)	น้ำฝนเฉลี่ย (มม./ชม.)
สถานี 552201 - นครศรีธรรมราช						
21/3/2011	22:00 น.	0	0	0	0	0
22/3/2011	22:00 น.	34.9	34.9	1440	1440	1.454
23/3/2001	22:00 น.	2.1	37.0	1440	2880	0.771
24/3/2011	22:00 น.	238.5	275.5	1440	4320	3.826
25/3/2011	22:00 น.	268.4	543.9	1440	5760	5.666
26/3/2011	22:00 น.	180.0	723.9	1440	7200	6.033
27/3/2011	22:00 น.	7.0	730.9	1440	8640	5.076
สถานี 5520016 – อบต.ฉลอง						
21/3/2011	0:01 น.	0	0	0	0	0
22/3/2011	23:59 น.	1.0	1.0	1440	1440	0.021
23/3/2001	23:59 น.	15.0	16.0	1440	2880	0.222
24/3/2011	23:59 น.	126.5	142.5	1440	4320	1.484
25/3/2011	23:59 น.	342.0	484.5	1440	5760	4.038
26/3/2011	23:59 น.	226.0	710.5	1440	7200	4.934
27/3/2011	23:59 น.	48.0	758.5	1440	8640	4.515
สถานี 5520006 – อบต.ลิซล						
21/3/2011	0:01 น.	0	0	0	0	0
22/3/2011	23:59 น.	1.0	1.0	1440	1440	0.021
23/3/2001	23:59 น.	9.0	10.0	1440	2880	0.139
24/3/2011	23:59 น.	109.0	119.0	1440	4320	1.240
25/3/2011	23:59 น.	257.5	376.5	1440	5760	3.138
26/3/2011	23:59 น.	266.5	643.0	1440	7200	4.465
27/3/2011	23:59 น.	154.5	797.5	1440	8640	4.747



รูปที่ 4.36 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช (การพิบัติในปี 2554)



รูปที่ 4.37 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช (การพิบัติในปี 2554)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเสถียรภาพของลาดดินด้วยคุณสมบัติทางวิศวกรรมธรณีศึกษาลาดดินในพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอติชด จังหวัดนครศรีธรรมราช ประกอบไปด้วการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนต่อเสถียรภาพของลาดดิน ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับความชื้นในมวลดิน การวิเคราะห์ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดินวิกฤต การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินรวมไปถึงการจัดทำเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของดิน (ค่าความซึมผ่านของน้ำในดิน) และความชื้นผืนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วยน้ำฝนโดยในส่วนของลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียงและความหนาของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน

2. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) ของดินจากการศึกษาในรูปแบบของสมการระนาบกำลังรับแรงเฉือนพบว่าระดับความอิ่มตัวหรือความชื้นในมวลดินส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน

3. การวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (API_{cr}) ร่วมกับแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพังจะได้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตในพื้นที่ศึกษาส่วนบน (T) เท่ากับ 205.65 มิลลิเมตร ส่วนกลาง (M1) เท่ากับ 227.89 มิลลิเมตร ส่วนกลาง (M2) เท่ากับ 253.69 มิลลิเมตร และส่วนล่าง (U) เท่ากับ 166.60 มิลลิเมตร

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาพบว่าลาดดินได้สูญเสียเสถียรภาพในช่วงเวลา 14:00 นาฬิกา ในวันที่ 26 มีนาคม 2554 วัดปริมาณน้ำฝนสะสมได้ 643.54 มิลลิเมตร

5. เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต (Critical Rainfall Envelope for Stability) ที่สามารถใช้เป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาได้โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เท่ากับ 1.04 และ 0.999 จะมีปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 554.47 และ 643.54 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ได้เฉพาะพื้นที่ศึกษาคำบลเทพราช อำเภอสีชล จ.นครศรีธรรมราช

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบตัวอย่างดินด้วยวิธีเนียนตรง (Direct Shear Test) ควรประยุกต์ให้สามารถใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดแรงดูด (Suction) ที่เรียกว่า Tensiometer เพื่อจะได้ทราบค่าแรงดูดในดินขณะทดสอบโดยตรงรวมทั้งควรติดตั้งอุปกรณ์ช่วยบันทึกข้อมูล (Data Logger) ในการบันทึกข้อมูลเพื่อความสะดวกและให้ได้ผลการทดสอบที่มีความต่อเนื่องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. การทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่างๆเนื่องจากความชื้นส่งผลโดยตรงต่อกำลังของดินจึงควรควบคุมความชื้นของตัวอย่างดินให้คงที่ตลอดการทดสอบและควรเลือกใช้ดินที่จำแนกเป็นชนิดเดียวกันในการทดสอบเพื่อลดความแปรปรวนและเพื่อสะดวกในการแปลผลการทดสอบ

3. ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดินวิกฤต (API_{cr}) ที่วิเคราะห์ได้เป็นการวิเคราะห์ในทางเดียวหรือ 1 มิติเท่านั้นและใช้เฉพาะสำหรับพื้นที่ศึกษาเท่านั้น

4. การนำความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturation, Normal stress และ Shear stress ในรูปแบบสมการระนาบมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดิน (API) ร่วมกับแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) ควรวิเคราะห์แบบกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพัง ส่วนในกรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับผิวดินจะไม่นำมาคิดเนื่องจากจะให้ค่า API ต่ำกว่าความเป็นจริง (วรวัชร, 2552)

5. ในการวิเคราะห์การไหลซึมและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยการใช้อย่างจำลอง คุณสมบัติของธรณี โครงสร้างชั้นหิน เช่น รอยแยก (Joint) รอยเลื่อน (Fault) รอยแตก (Fracture) และรอยแตกเฉือน (Shear Fracture) จะส่งผลต่อค่าความซึมผ่านของน้ำในแบบจำลองและเพื่อความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงควรนำคุณสมบัติธรณี โครงสร้างชั้นหินมาพิจารณาประกอบด้วย

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. (2552). บันทึกเหตุการณ์ดินถล่มและความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2531-2554.
- กรมอุตุนิคมวิทยา. (2555). ข้อมูลน้ำฝนของพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. (2545). ปฏิพิภคศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 8. หน่วยสารบรรณ, งานบริหารและ
ธุรการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มานะ อภิพัฒนะมนตรี. (2541). วิศวกรรมปฏิพิภคและฐานราก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-
ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร
- สภาพร คูวิจิตรจากร. (2541). ทดลองปฏิพิภคศาสตร์. สำนักพิมพ์ไลบรารี นาย. กรุงเทพมหานคร
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. (2550). การเตือนภัยดินถล่มโดยอาศัยค่าปริมาณน้ำฝน. การประชุมวิชาการเรื่อง
ภัยพิบัติที่กำลังรุนแรงขึ้น. 12 มิถุนายน 2550. สถาบันพัฒนากรมชลประทาน.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ และวรวัชร ต่อวิวัฒน์. (2550). การวิเคราะห์ค่า API วิภค
เพื่อใช้เตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่
12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลาทูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, วรวัชร ต่อวิวัฒน์ และบรรพต กุลสุวรรณ. (2550). การทดสอบกำลังรับแรง
เฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลาทูน จังหวัด
พิษณุโลก
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. (2540). วิศวกรรมปฏิพิภค. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม
ราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร
- นงลักษณ์ ไทรเจียมอารีย์. (2547). เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทาง
วิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรม
โยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- บรรพต กุลสุวรรณ. (2558). การศึกษาพฤติกรรมการพิภคของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อย
แม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุติกุล และ วารินทร์ จิระสุขทวีกุล. (2548). การหาค่า Antecedent Precipitation Index (API) เพื่อการเตือนอุทกภัยและดินถล่ม. สถานีวิจัยลุ่มน้ำห้วยหินลาด. เอกสารเผยแพร่ที่ 3/2548.
- วรวัชร ต่อวิวัฒน์. (2552). แบบจำลอง API วิกฤติเพื่อการเตือนภัยดินถล่มสำหรับดินที่เกิดจากการสลายของหิน ณ ที่ตั้งในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วารการ ไม่เรียง. (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2549). ฐานข้อมูลดินถล่ม
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2555) งานศึกษาพัฒนาระบบแบบจำลองเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเฝ้าระวังและแจ้งเตือนภัยพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ.
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2540). ปฐพีกลศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต. ปทุมธานี
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2549). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร. กรุงเทพมหานคร
- อดุลย์ ชะโก๊ป. (2551). การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์ ภาคใต้ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา(ธรณีเทคนิค) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- อภินิติ โชติสังกาส. (2549) การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพแรงคูดน้ำในดิน
- Abramson, L. W., Lee, T.S., Sharma S. and Boyce, G.M. (2001). Slope Stability and Stabeilization Method. John Wiley & Son. USA.
- Bishop, A. W. (1955). The use of slipe circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique. 5, 7-17
- Brain, D. and Dobroslave, Z. (2004). Stability Analyses of Rainfall Induced Landslices. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 130. No 4. pp. 362-372.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T., (1964). Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design, submitted for publication in ASAE transactions.
- Cheung et. Al. (1988). Direct shear testing of a decompletely decomposed granite. Proc. 2nd int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils, Singapore 1: 109-117.

- Choudhury, B. and Blanchard, B. J. (1983). Simulating soil water recession coefficients for agricultural watersheds. Water Resources Bulletin, Vol. 19, pp. 241–247.
- Das, B. M. (1994). Principles of Geotechnical Engineering, Southern Illinois University at Carbondale, USA.
- EGAT. (1980). Subsoil Investigation for 230 KV Banpong 2 – Srinagarins, Transmission Line.
- Fredlund, D. G. and N. R. Morganstern. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. Cited by D. G. Fredlund and H. Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Son, INC., New York
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Son. New York 515 p.
- Fredlund, D. G. and A. Xing. (1994). Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31: 521-532.
- Fredlund et.al. (1997). Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. pp.1-12. *In* 3rdBrazilian Sym. On Unsaturated soils, Riode Janeiro, Brazil, April 22-25.
- Highland, L. M. and Bobrowsky, Peter, (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Janssen, D. J. and B. J. Dempsey. (1980). Soil-Moisture Properties of Subgrade Soils, presented at the 60th Annu. Transportation Res. Board Meeting, Washington, DC
- Jiao, J. J., Wang, X. S., Nandy, S., (2005). Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong, Engineering Geology 80, 71–92.
- Jotisankasa, A., Tapparnich, J., Booncharoenpanich, P.,Hunsachainan, H. ana Soralump, S. (2010). Unsaturated Soil Testing for Slope Studies. International Conference on Slope 2010 :Geotechnique and Geosynthetics for Slope, 27-30 July 2010. Chiangmai.
- Lambe, T. W. and Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanic. John Wiley & Son. USA.
- Leong, E. C., and Rahardjo, H. (1997a). “A review of soil-water characteristic curve equation.” J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123(12), 1106-1117
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. & Paulhus, J. L. H. (1949). Applied Hydrology, First Edition, McGraw-Hill Book company, Inc., New York, 689 P.

- Meyerhof, G. G. (1956). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. ASCE 82:1-19.
- Orr, T. L. L. (1987). Effect of Uncertainty in the Groundwater Level on Safety in Geotechnical Design. Proceeding of the Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. 3. 31 August-3 September 1987. Dublin.
- Price, T. (2006). Warwick University Available Source:<http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/SLOPES/SLOPES.HTML> as retrieved on 3 Oct 2006.
- Punrattanasin. (2002). Collapse and Erosion of Khon Kaen Loess with Treatment Option. ICSF-1 Conference Proceedings. pp. 1081-1090
- Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. and Leong, E. C. (2007). Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE. December 2007. pp. 1532-1543.
- Soralump, S. and Kulsuwan, B. (2006). Landslide Risk Prioritization of Tsunami Affected Area in Thailand. International Symposium on Environmental Engineering and 5th Regional Symposium on Infrastructure Development Civil Engineering. Philippines.
- Swedish Geotechnical Institute. (1989). Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils - TC 16 with Reference Test Procedures CPT- SPT- DP- WST. Linkoping, 49 p.
- Terzaghi, K. and R. B. Peck. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons. New York.
- Timothy D. Stark, Hangseok Choi and Sean McCone (2005). Drained Shear Strength Parameters for Analysis of Landslides. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE. May 2005. pp. 575-588.
- Varnes, D. J. (1975). Slope movements in the western United States, in Mass Wasting: Geoabstracts, Norwich, p. 1-17
- Viessman, W., G. L. Lewis, and J. W. Knapp. (1989). Introduction to Hydrology. Third Edition. Harper and Row, New York. 1989
- Winn, K., Rahardjo, H., and Peng, S. C. (2001). “Characterization of residual soil in Singapore.” Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, 32(1), 1-13.

เอกสารอ้างอิงอิเล็กทรอนิกส์

เข้าถึงได้จาก : <http://www.dmr.go.th>

เข้าถึงได้จาก : <http://www.factmonster.com/dk/encyclopedia/soil.html>

เข้าถึงได้จาก : <http://www.groundwater.org/gi/whatisgw.html>, 2011

เข้าถึงได้จาก : <http://maps.google.com>

เข้าถึงได้จาก : <https://www.meted.ucar.edu/loginForm.php>, 2003

เข้าถึงได้จาก : <http://pirun.ku.ac.th /chotiga/Infiltration.html>, 2553

เข้าถึงได้จาก : <http://www.theppharat.go.th/general1.php>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์รับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา

Kunzelstab Penetration Test (KPT)

ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา Kunzelstab Penetration Test (KPT) ในตำแหน่งบริเวณด้านบนของลาดดิน (T) ตำแหน่งบริเวณตอนกลางของภูเขา (M) และตำแหน่งบริเวณเชิงเขาหรือตอนล่างสุดของภูเขา (U) แสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา

Station.	Boring No.	Depth (m.)	Blow Count (N)	Q _{all} (for sand) (ksc.)	Q _{all} (for clay) (ksc.)
Top	T1	0.0-0.2	5	0.915	3.811
		0.2-0.4	9	3.475	6.371
		0.4-0.6	11	4.755	7.651
		0.6-0.8	17	8.595	11.491
		0.8-1.0	22	11.795	14.691
		1.0-1.2	13	6.035	8.931
	T2	0.0-0.2	8	2.835	5.731
		0.2-0.4	8	2.835	5.731
		0.4-0.6	8	2.835	5.731
		0.6-0.8	8	2.835	5.731
		0.8-1.0	8	2.835	5.731
		1.0-1.2	9	3.475	6.371
		1.2-1.4	12	5.395	8.291
	T3	1.4-1.6	13	6.035	8.931
		0.0-0.2	10	4.115	7.011
		0.2-0.4	16	7.955	10.851
		0.4-0.6	21	11.155	14.051
		0.6-0.8	16	7.955	10.851
		0.8-1.0	10	4.115	7.011
		1.0-1.2	13	6.035	8.931
		1.2-1.4	20	10.515	13.411
		1.4-1.6	21	11.155	14.051
		1.6-1.8	20	10.515	13.411
		1.8-2.0	22	11.795	14.691
	2.0-2.2	33	18.835	21.731	
	2.2-2.4	40	23.315	26.211	

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา

Station.	Boring No.	Depth (m.)	Blow Count (N)	Q _{all} (for sand) (ksc.)	Q _{all} (for clay) (ksc.)	
Top	T4	0.0-0.2	8	2.835	5.731	
		0.2-0.4	8	2.835	5.731	
		0.4-0.6	8	2.835	5.731	
		0.6-0.8	7	2.195	5.091	
		0.8-1.0	12	5.395	8.291	
		1.0-1.2	20	10.515	13.411	
		1.2-1.4	21	11.155	14.051	
		1.4-1.6	22	11.795	14.691	
		1.6-1.8	18	9.235	12.131	
		1.8-2.0	22	11.795	14.691	
		2.0-2.2	26	14.355	17.251	
		2.2-2.4	33	18.835	21.731	
	T5	0.0-0.2	6	1.555	4.451	
		0.2-0.4	7	2.195	5.091	
		0.4-0.6	7	2.195	5.091	
		0.6-0.8	11	4.755	7.651	
		0.8-1.0	16	7.955	10.851	
		1.0-1.2	23	12.435	15.331	
	T6	0.0-0.2	7	2.195	5.091	
		0.2-0.4	8	2.835	5.731	
		0.4-0.6	20	10.515	13.411	
		0.6-0.8	25	13.715	16.611	
		0.8-1.0	28	15.635	18.531	
		1.0-1.2	25	13.715	16.611	
		1.2-1.4	27	14.995	17.891	
		1.4-1.6	18	9.235	12.131	
		1.6-1.8	16	7.955	10.851	
		1.8-2.0	30	16.915	19.811	
	Middle	-	-	-	-	-
	Under	U4	0.0-0.2	0	-2.285	0.611
			0.2-0.4	6	1.555	4.451
			0.4-0.6	10	4.115	7.011
			0.6-0.8	7	2.195	5.091

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test ในบริเวณด้านบน
ของลาดดิน ใกล้กับจุดเริ่มต้นที่เคยเกิดการพิบัติในอดีต แสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

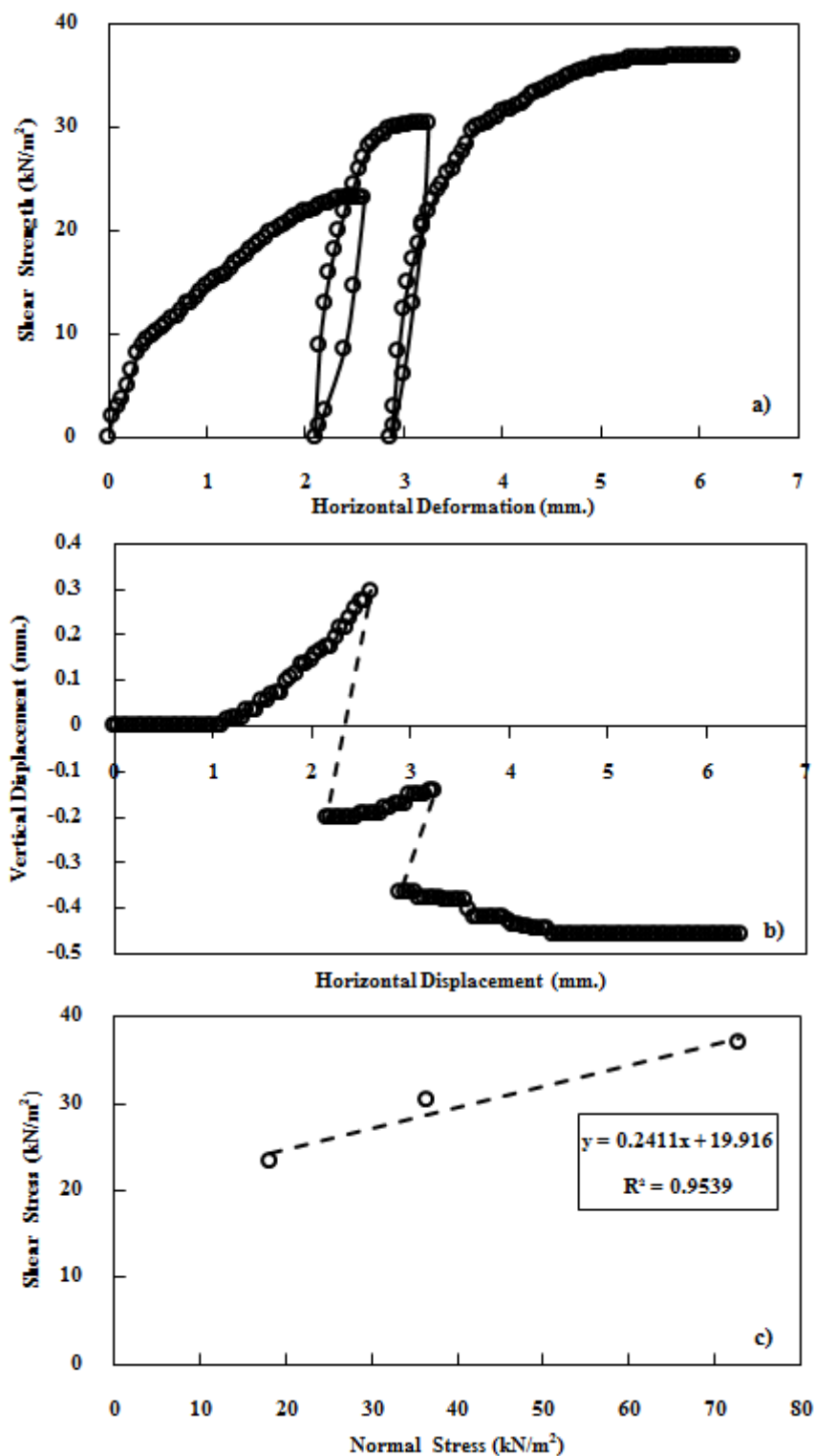
Trial No.	Start/End	Time	Elapsed Time (D) min	Elapsed Time (total) min	Flow Reading		Inner Increment Infill Rate cm/hr
					Inner Ring		
					Reading	Flow	
					cm	cm ³	
1	S	11:45	15	15	0	1847.02	10.45
	E	12:00			11.5		
2	S	12:00	15	30	11.5	4336.47	24.54
	E	12:15			38.5		
3	S	12:15	10	40	38.5	1284.88	10.91
	E	12:25			46.5		
4	S	12:25	20	60	1.8	1204.58	10.22
	E	12:45			9.3		
5	S	12:45	15	75	9.3	2312.78	13.09
	E	13:00			23.7		
6	S	13:00	15	90	23.7	2377.03	13.45
	E	13:15			38.5		
7	S	13:15	10	100	38.5	1284.88	10.91
	E	13:25			46.5		
8	S	13:25	22	122	0	2055.81	11.63
	E	13:47			12.8		
9	S	13:47	15	137	12.8	2087.93	11.82
	E	14:02			25.8		
10	S	14:02	15	152	25.8	2087.93	11.82
	E	14:17			38.8		
11	S	14:17	11	163	38.8	1317.00	10.16
	E	14:28			47		
12	S	14:28	21	184	0	1927.32	10.91
	E	14:49			12		
13	S	14:49	15	199	12	2087.93	11.82
	E	15:04			25		
14	S	15:04	15	214	25	1895.20	10.72
	E	15:19			36.8		
15	S	15:19	15	229	36.8	2152.17	12.18
	E	15:34			50.2		

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

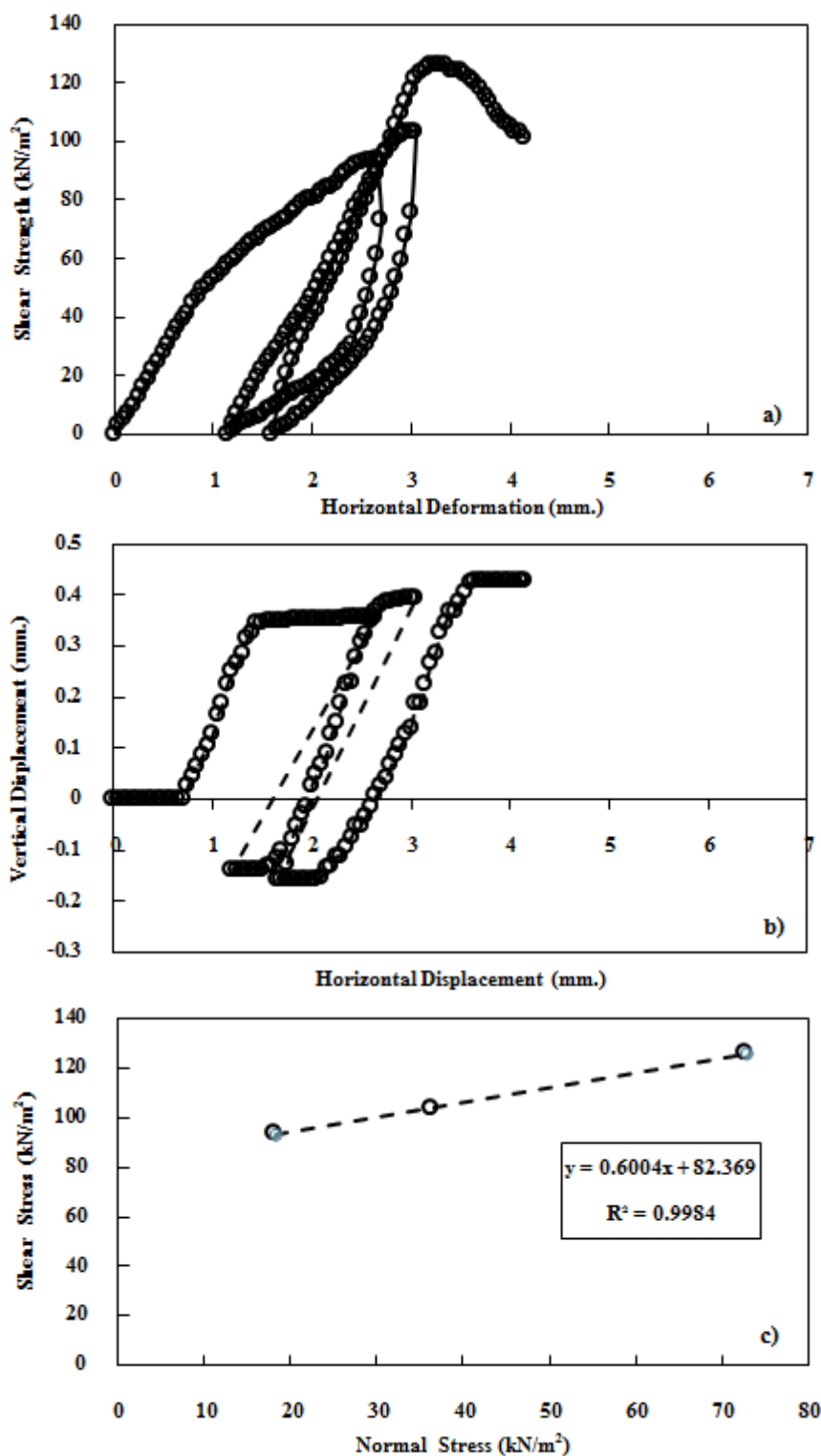
Trial No.	Start/End	Time	Elapsed Time (Δ)	Elapsed Time (total)	Flow Reading		Annular Increment
					Inner Ring		
					Reading	Flow	cm
1	S	11:45	15	15	0.0	3774.34	7.12
	E	12:00			23.5		
2	S	12:00	7	22	23.5	3774.34	15.26
	E	12:07			47.0		
3	S	12:07	23	45	0.0	738.81	10.45
	E	12:30			4.6		
4	S	12:30	15	60	4.6	5717.72	10.79
	E	12:45			40.2		
5	S	12:45	2	62	40.2	1252.76	17.72
	E	12:47			48.0		
6	S	12:47	24	86	0.0	5942.57	11.21
	E	13:11			37.0		
7	S	13:11	4	90	37.0	1365.19	9.66
	E	13:15			45.5		
8	S	13:15	22	112	0.0	5139.52	9.69
	E	13:37			32.0		
9	S	13:37	7	119	32.0	2489.46	10.06
	E	13:44			47.5		
10	S	13:44	22	141	0.0	4978.91	9.39
	E	14:06			31.0		
11	S	14:06	8	149	31.0	2569.76	9.09
	E	14:14			47.0		
12	S	14:14	22	171	0.0	4657.69	8.79
	E	14:36			29.0		
13	S	14:36	10	181	29.0	3067.65	8.68
	E	14:46			48.1		
14	S	14:46	22	203	0.0	4898.61	9.24
	E	15:08			30.5		
15	S	15:08	9	212	30.5	2650.07	8.33
	E	15:17			47.0		
16	S	15:17	21	233	0.0	4416.78	8.33
	E	15:38			27.5		

ภาคผนวก ค.

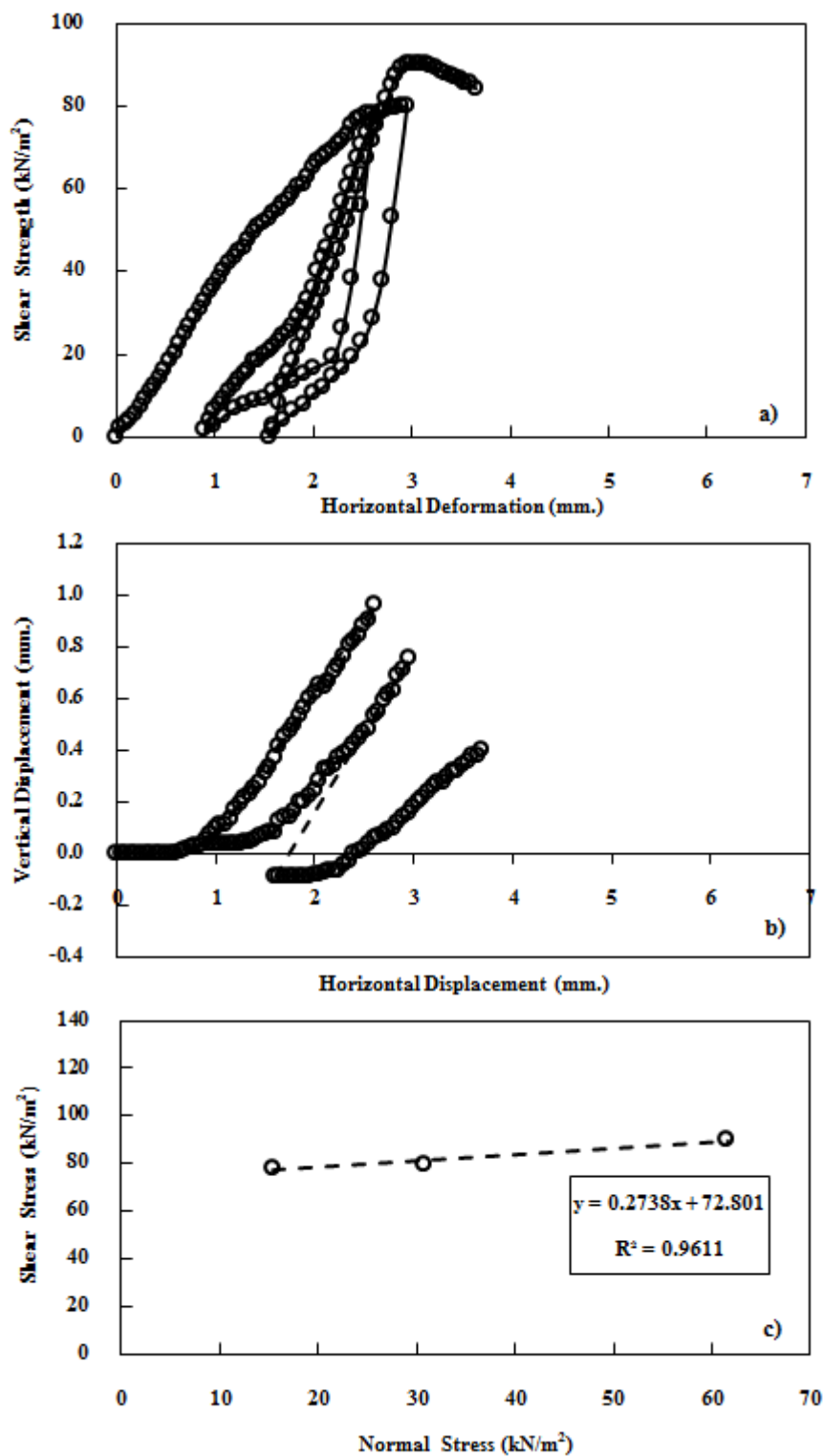
ผลการทดสอบเฉือนตรงด้วยวิธี Multi-stage direct shear test แบบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบาย
น้ำของตัวอย่างดินที่ความชื้นธรรมชาติและที่ความชื้นต่างๆ



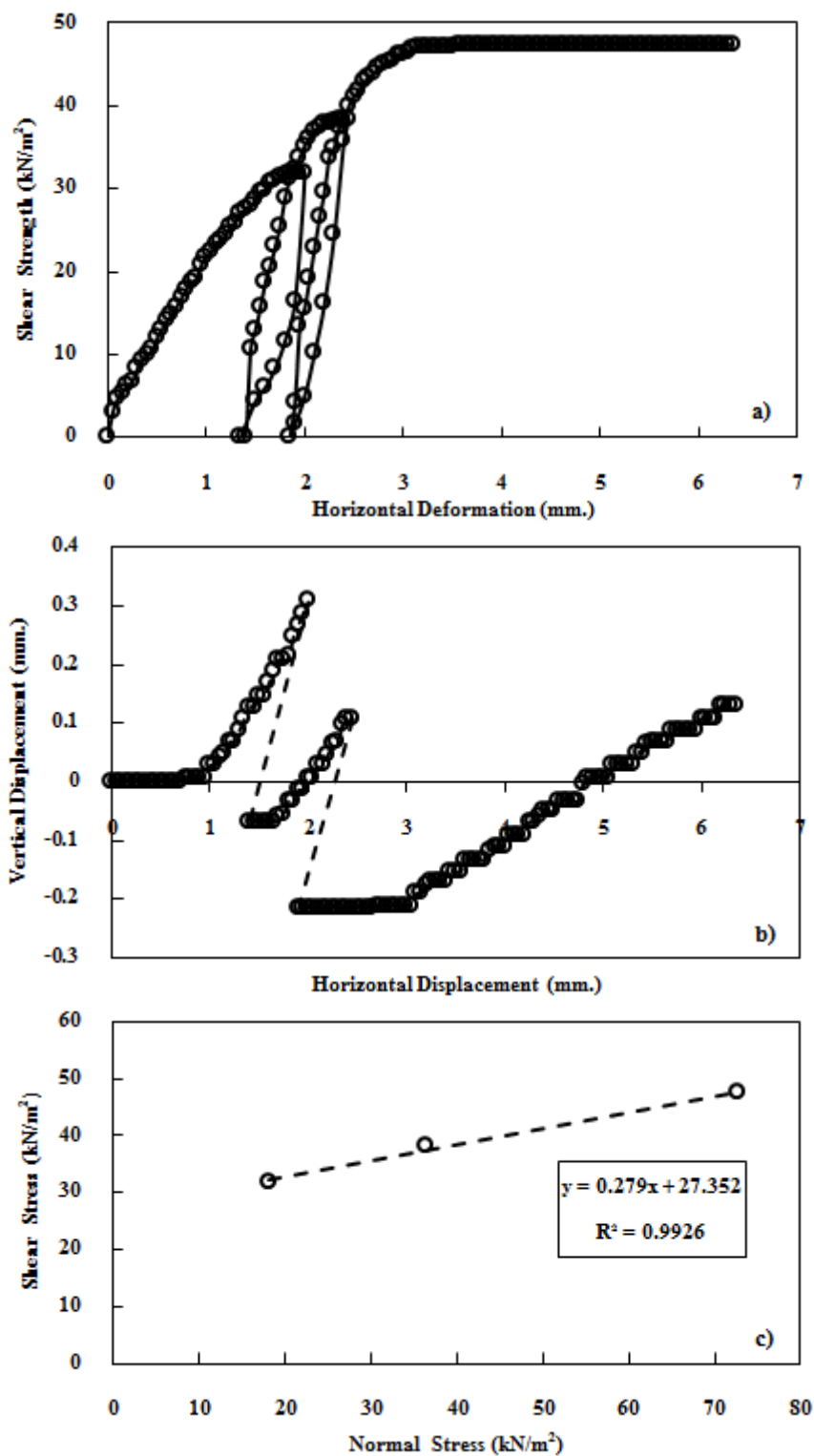
รูปที่ ๑-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T1@1m. ความชื้นธรรมชาติ 16.97 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 67.34 เปอร์เซ็นต์



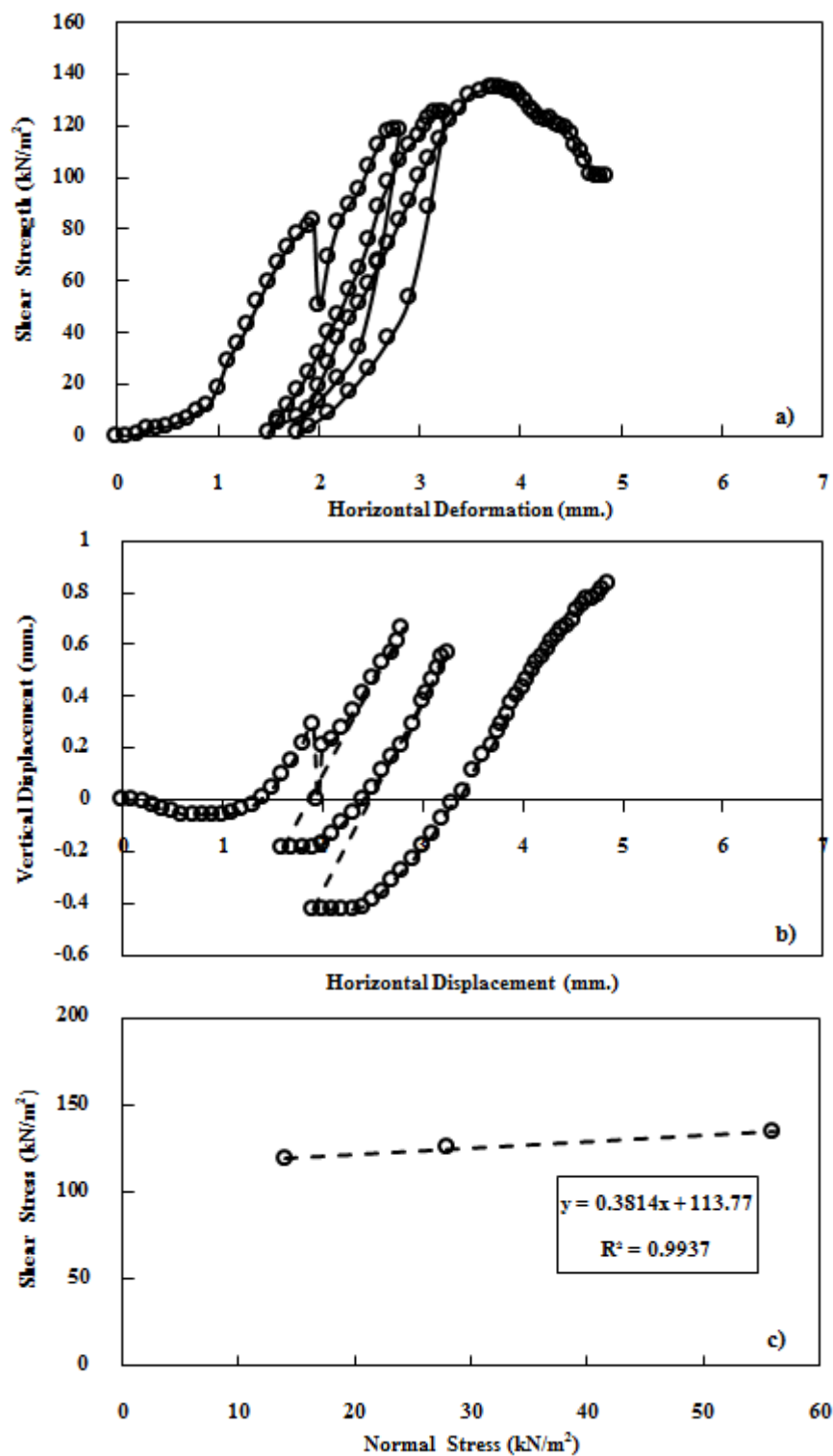
รูปที่ ค-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-1@1m. ความชื้นธรรมชาติ 16.84 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 70.95 เปอร์เซ็นต์



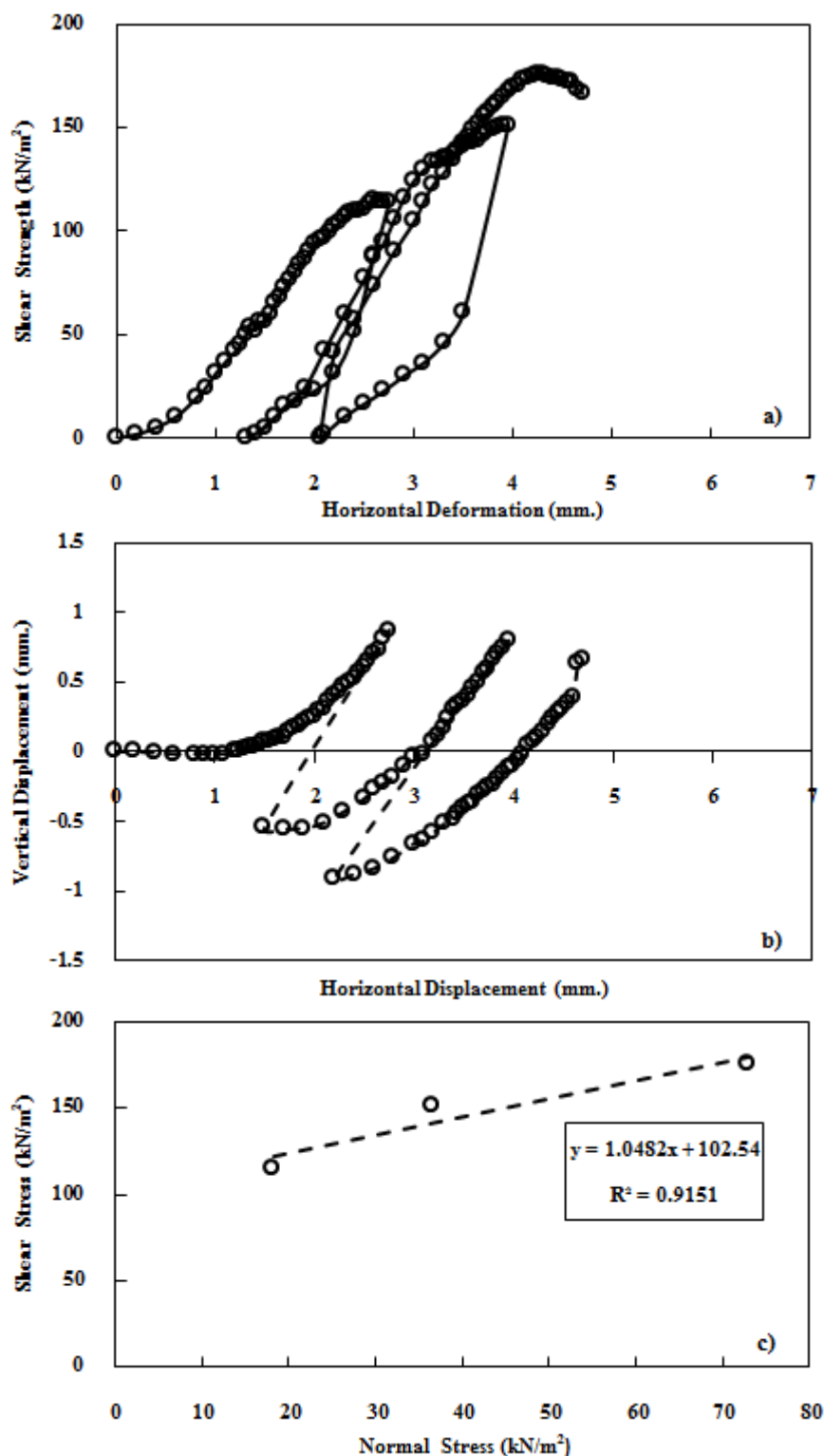
รูปที่ ๓-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-4@0.85m ความชื้นธรรมชาติ 17.10 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 70.54 เปอร์เซ็นต์



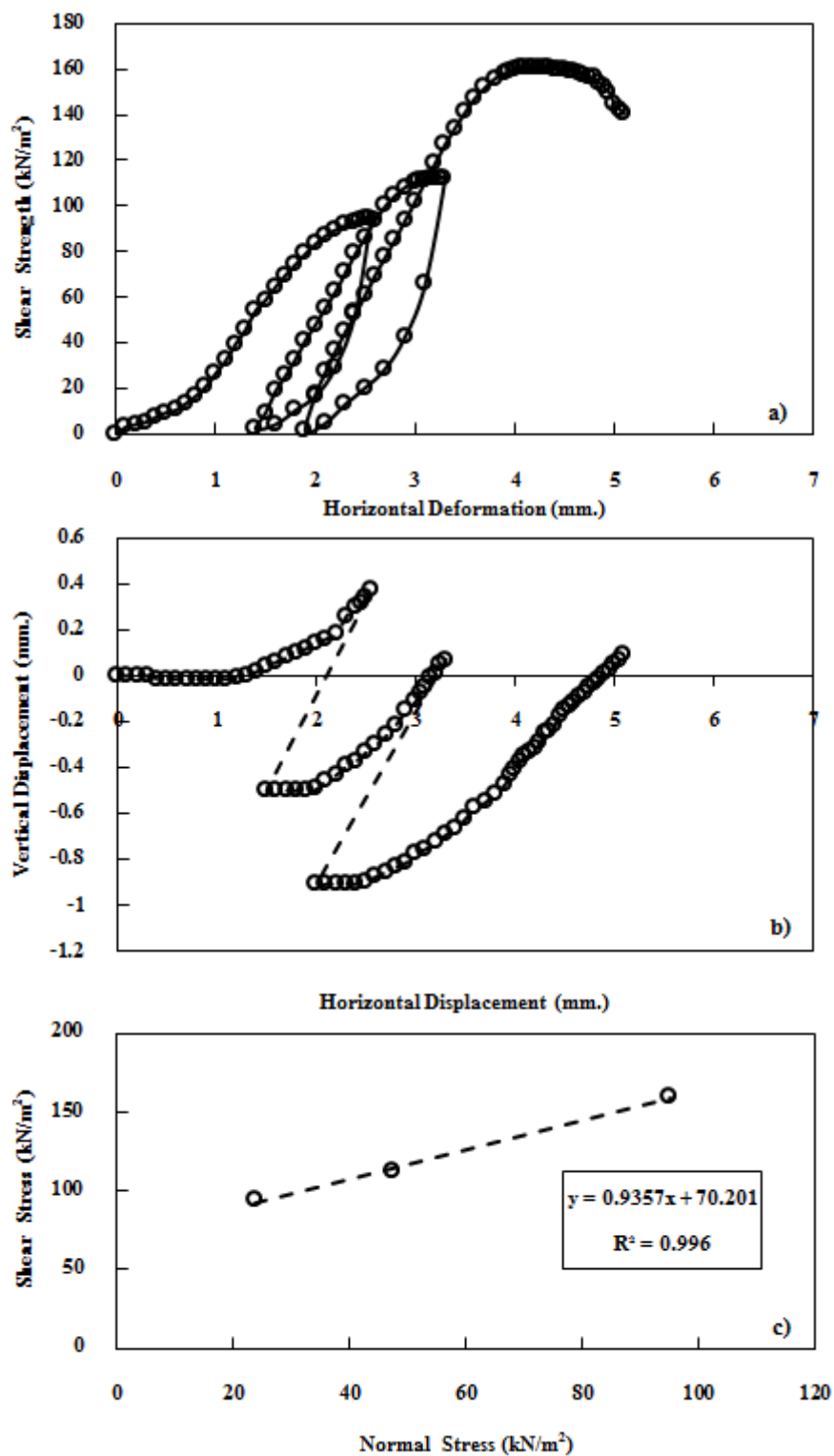
รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U2@1m. ความชื้นธรรมชาติ 15.84 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 64.90 เปอร์เซ็นต์



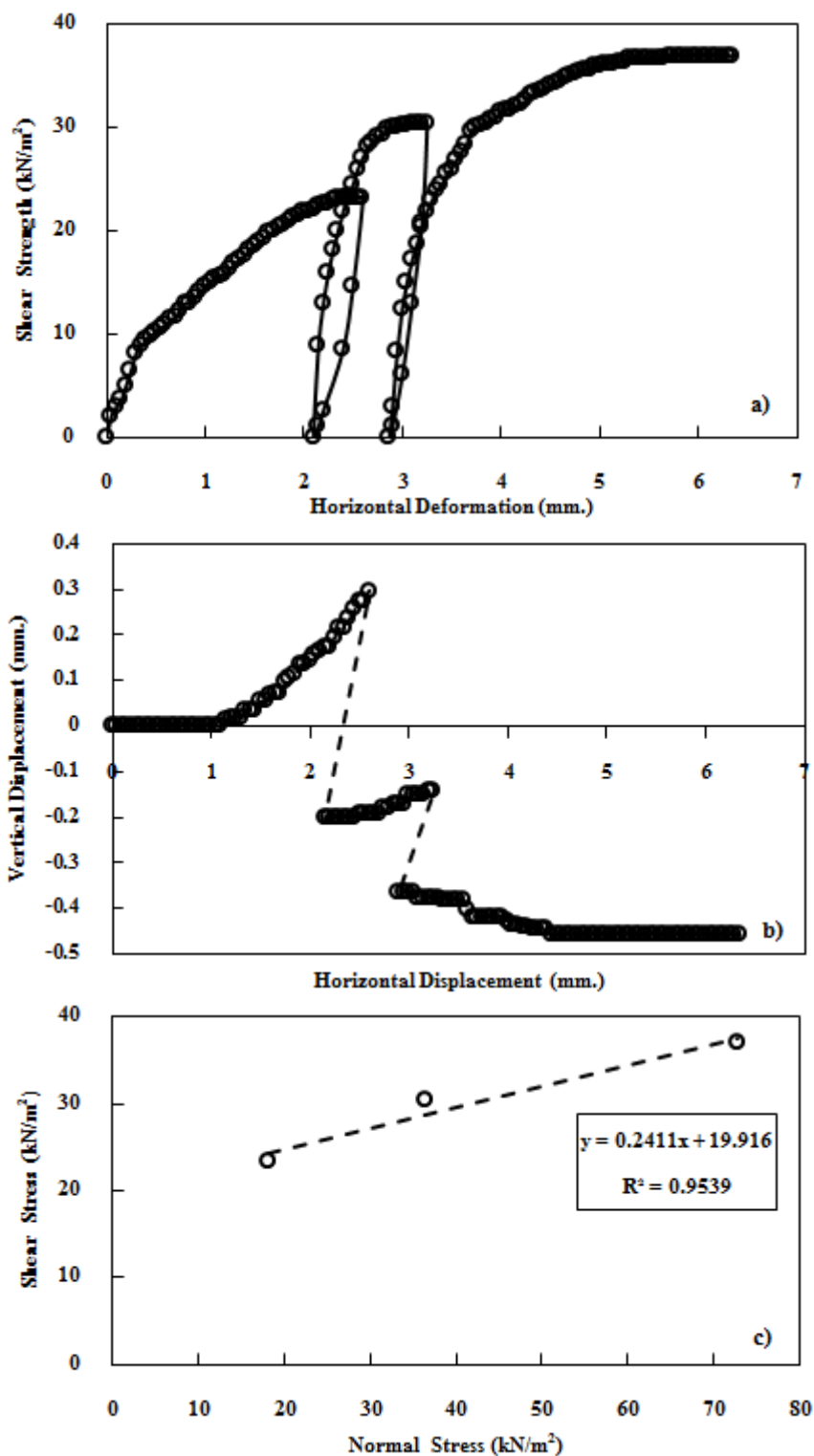
รูปที่ ๕-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T1@1m. ความชื้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 10.01 เปอร์เซ็นต์



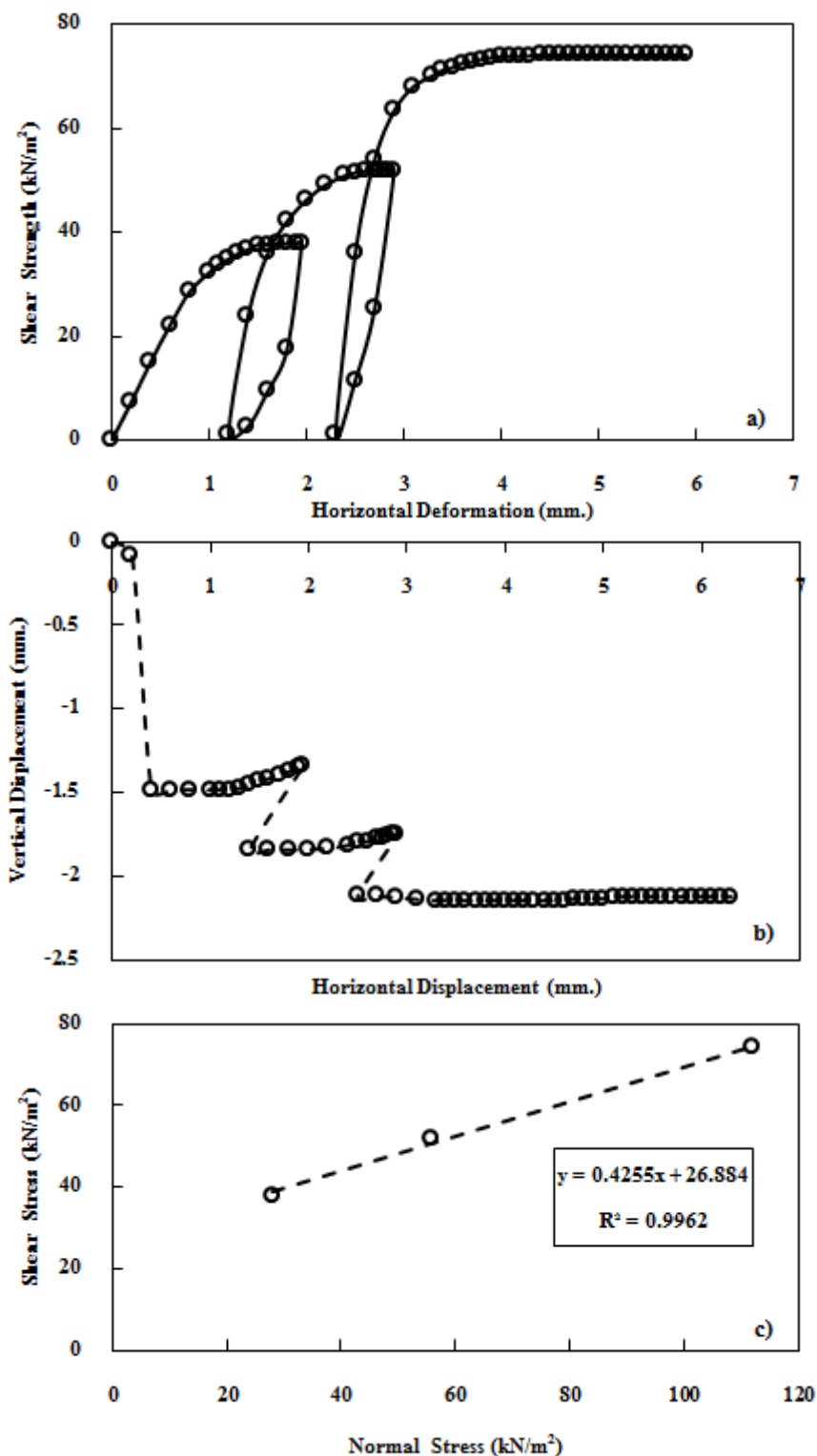
รูปที่ ๓-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T4@1m. ความชื้น 4.83 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 20 เปอร์เซ็นต์



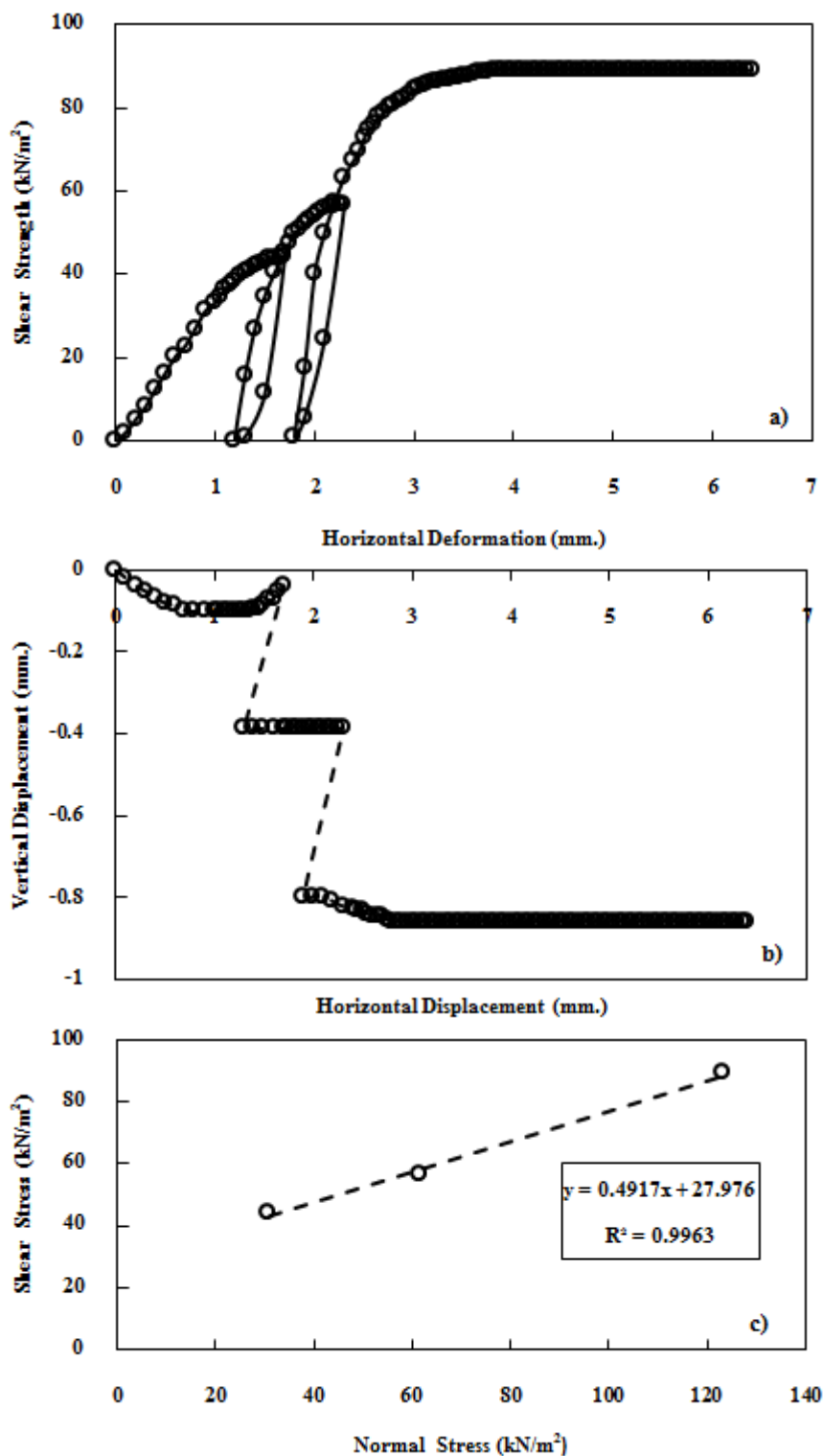
รูปที่ ๗-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T4@1.5m. ความชื้น 14.32 เปอร์เซ็นต์ ระดับควาอิมตัว 45.78 เปอร์เซ็นต์



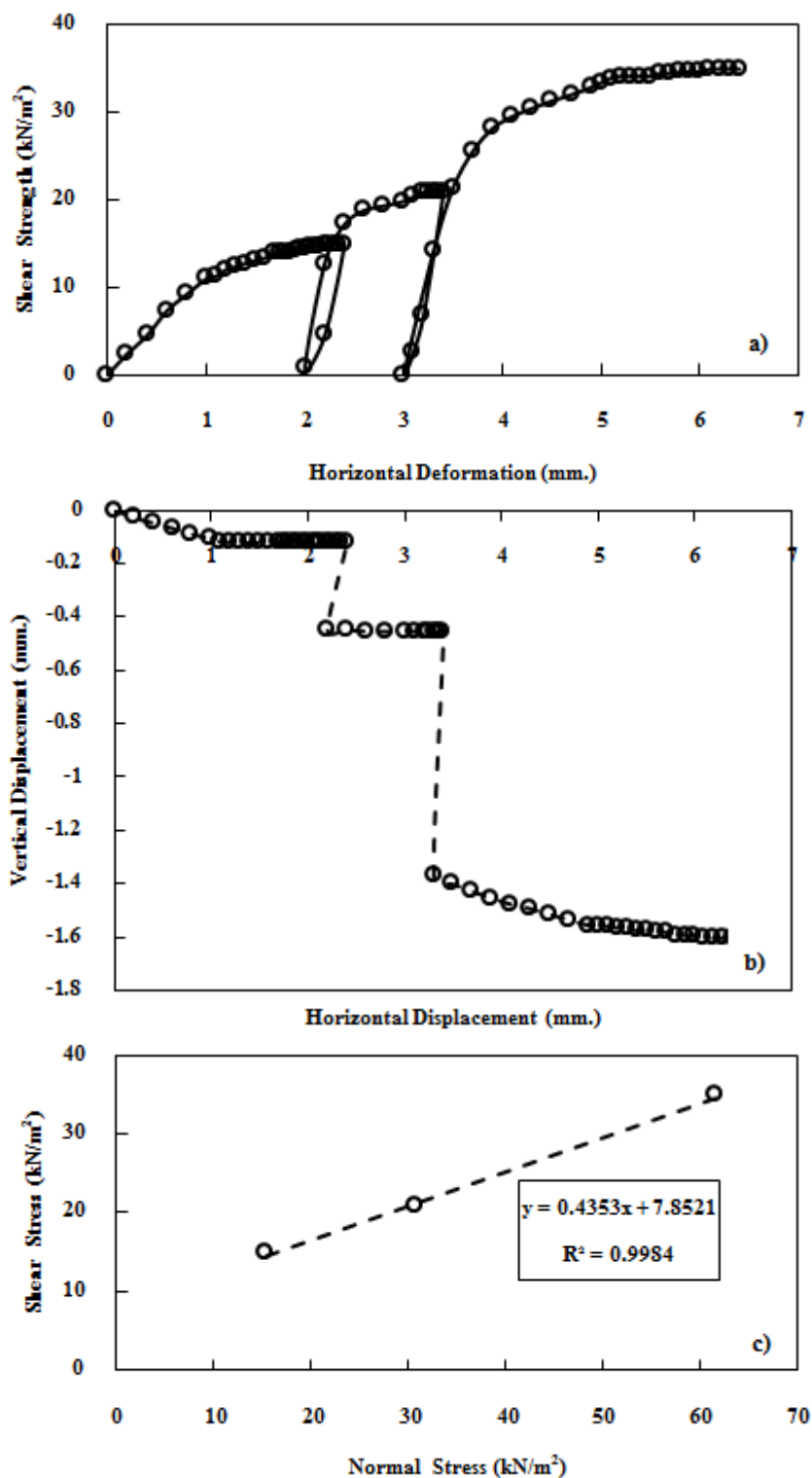
รูปที่ 8-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T1@1m. ความชื้น 16.97 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 67.34 เปอร์เซ็นต์



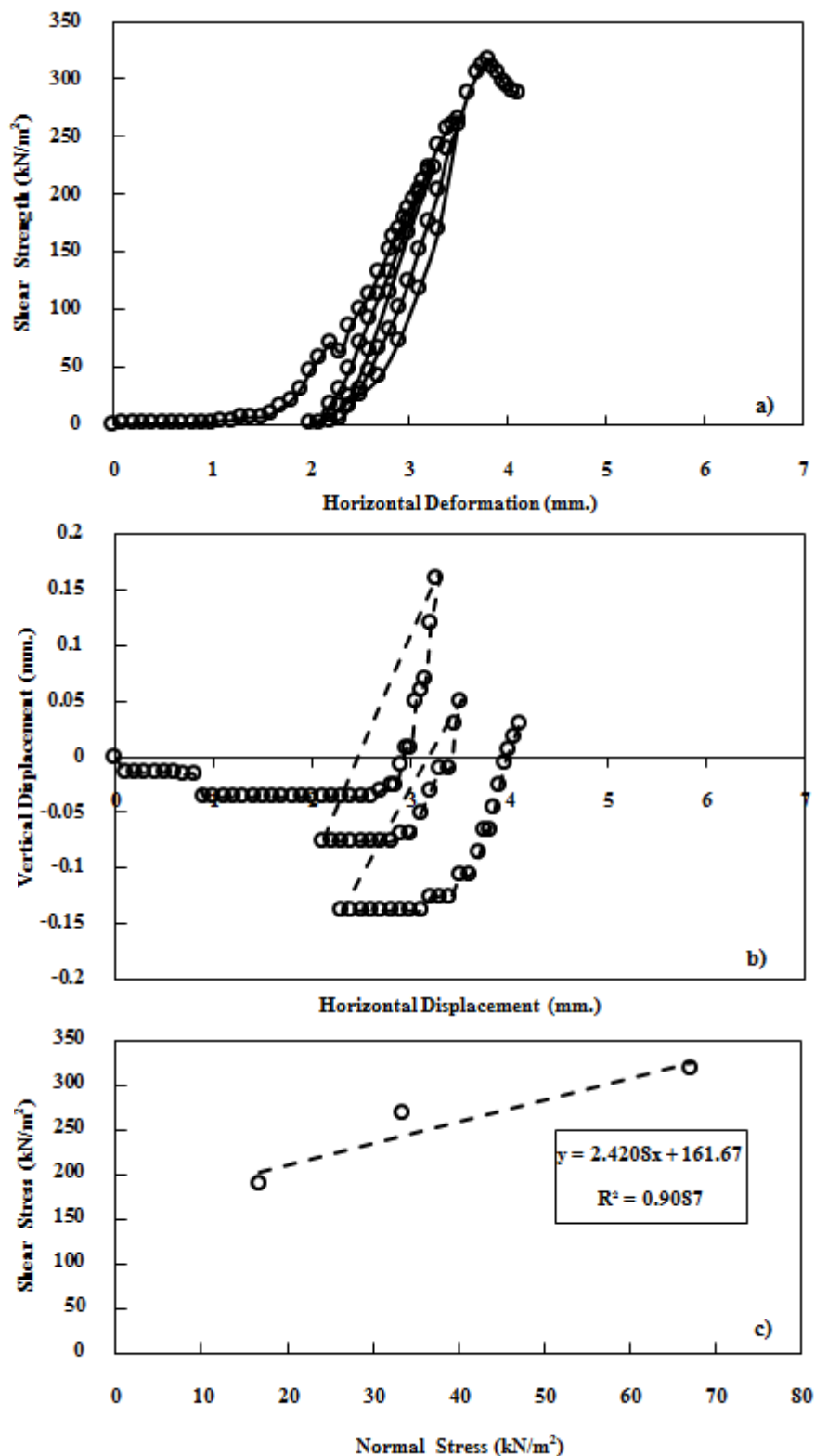
รูปที่ ๙-๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T2@1.5m. ความชื้น 17.19 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 71.01 เปอร์เซ็นต์



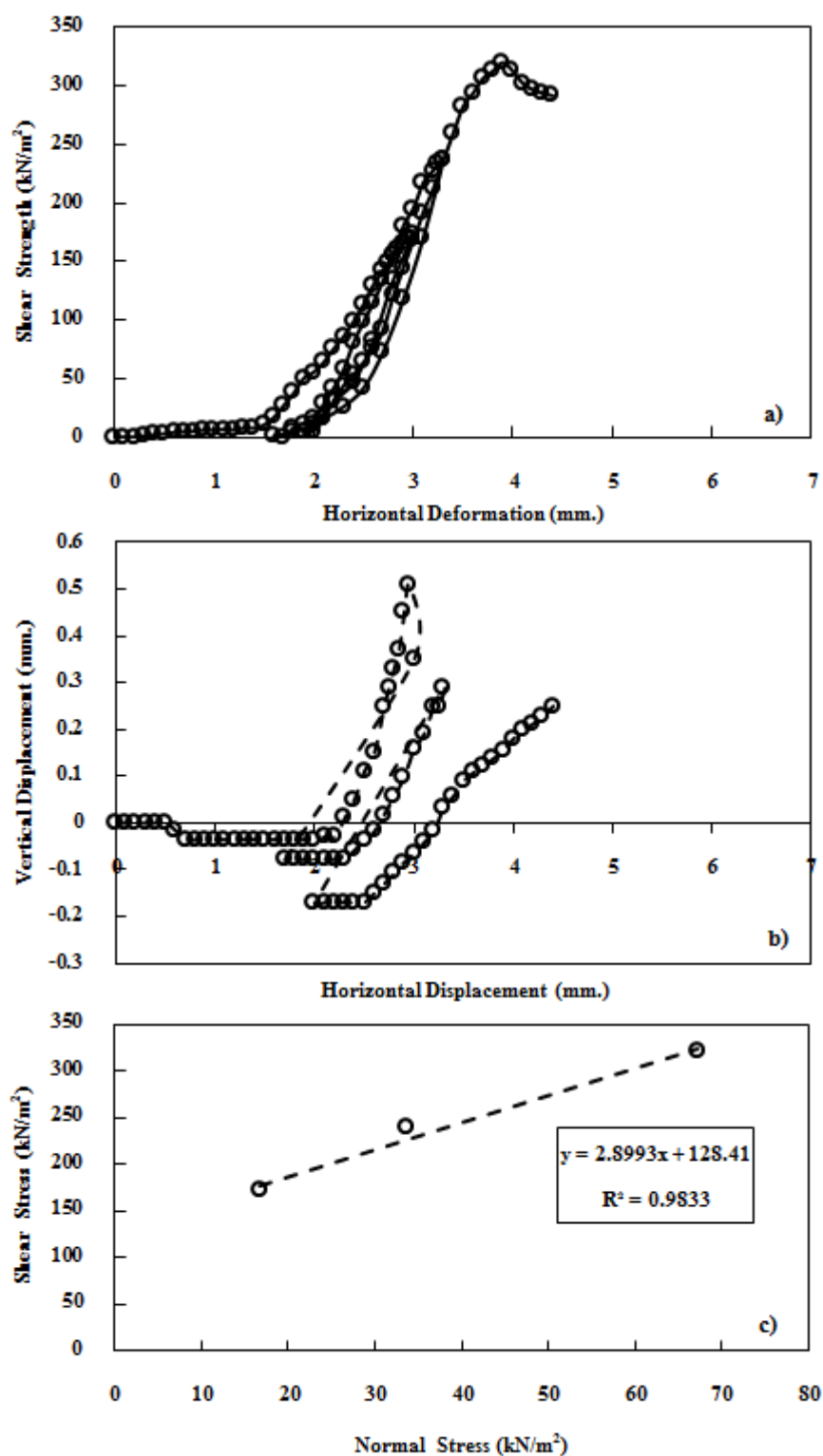
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T4@1.5m ความชื้น 14.32 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 82.14 เปอร์เซ็นต์



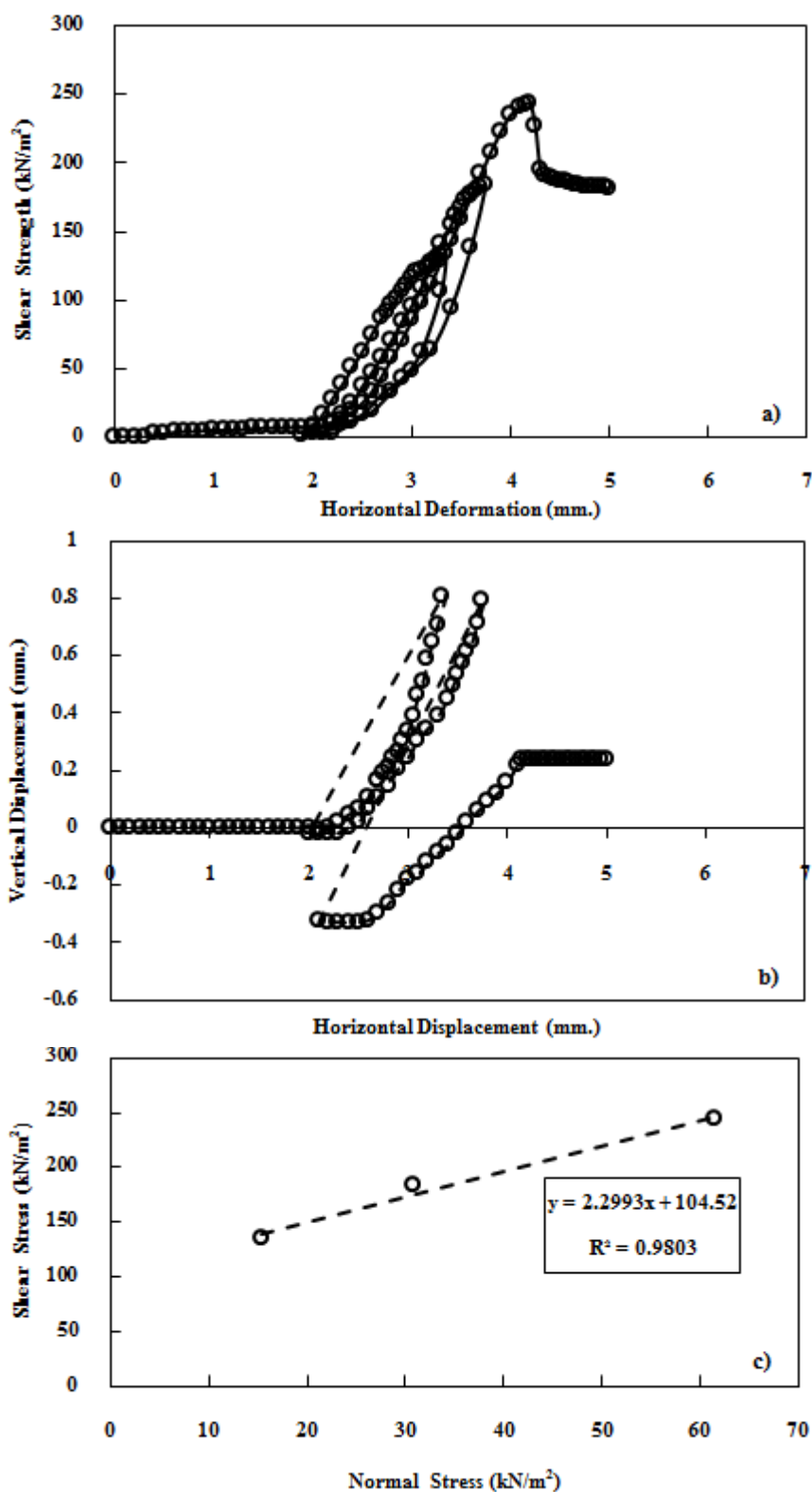
รูปที่ ค-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง T1@0.8m. ความชื้น 29.12 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 95.03 เปอร์เซ็นต์



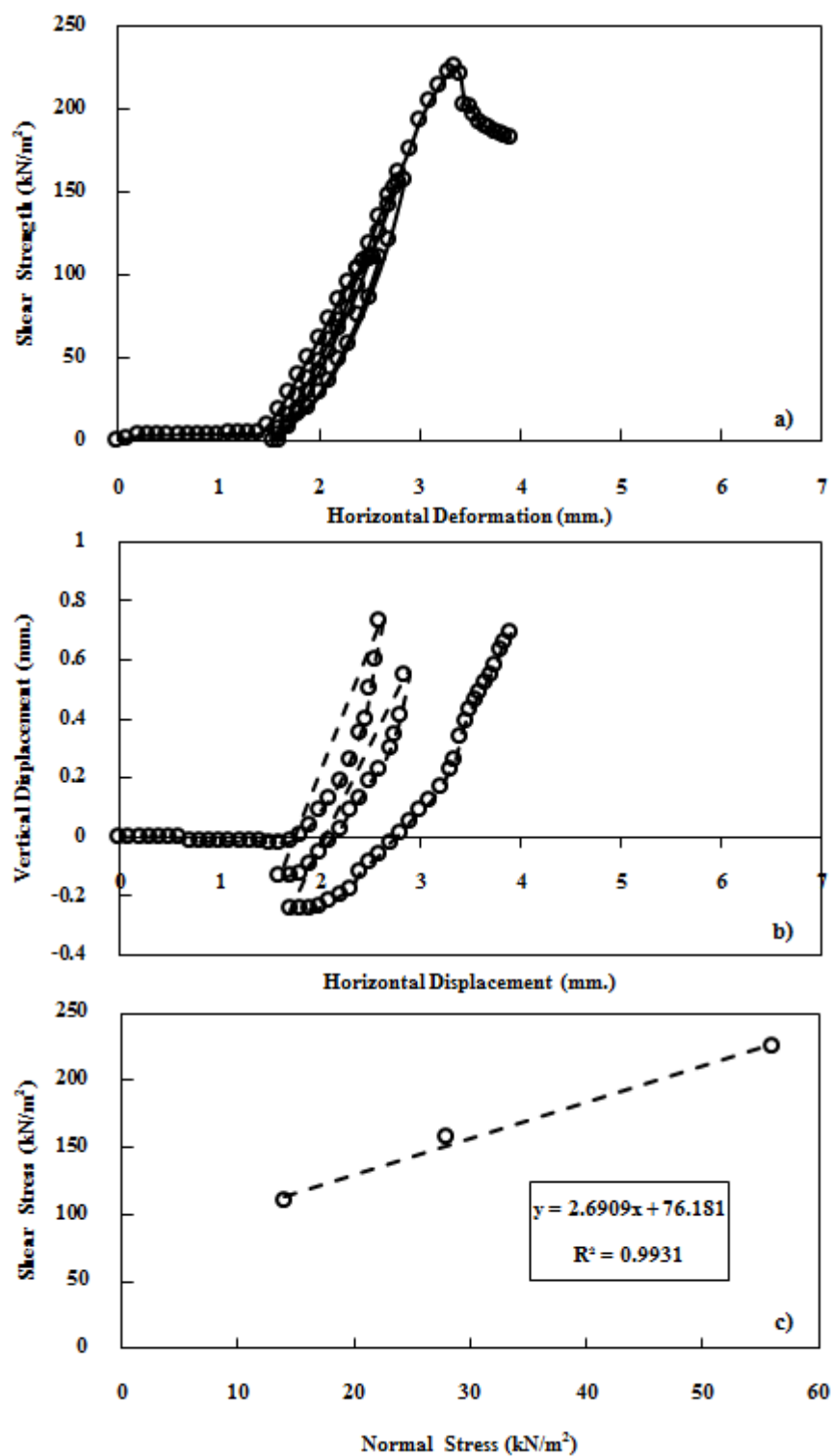
รูปที่ ๑๒-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-5@1m. ความชื้น 7.27 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 19.99 เปอร์เซ็นต์



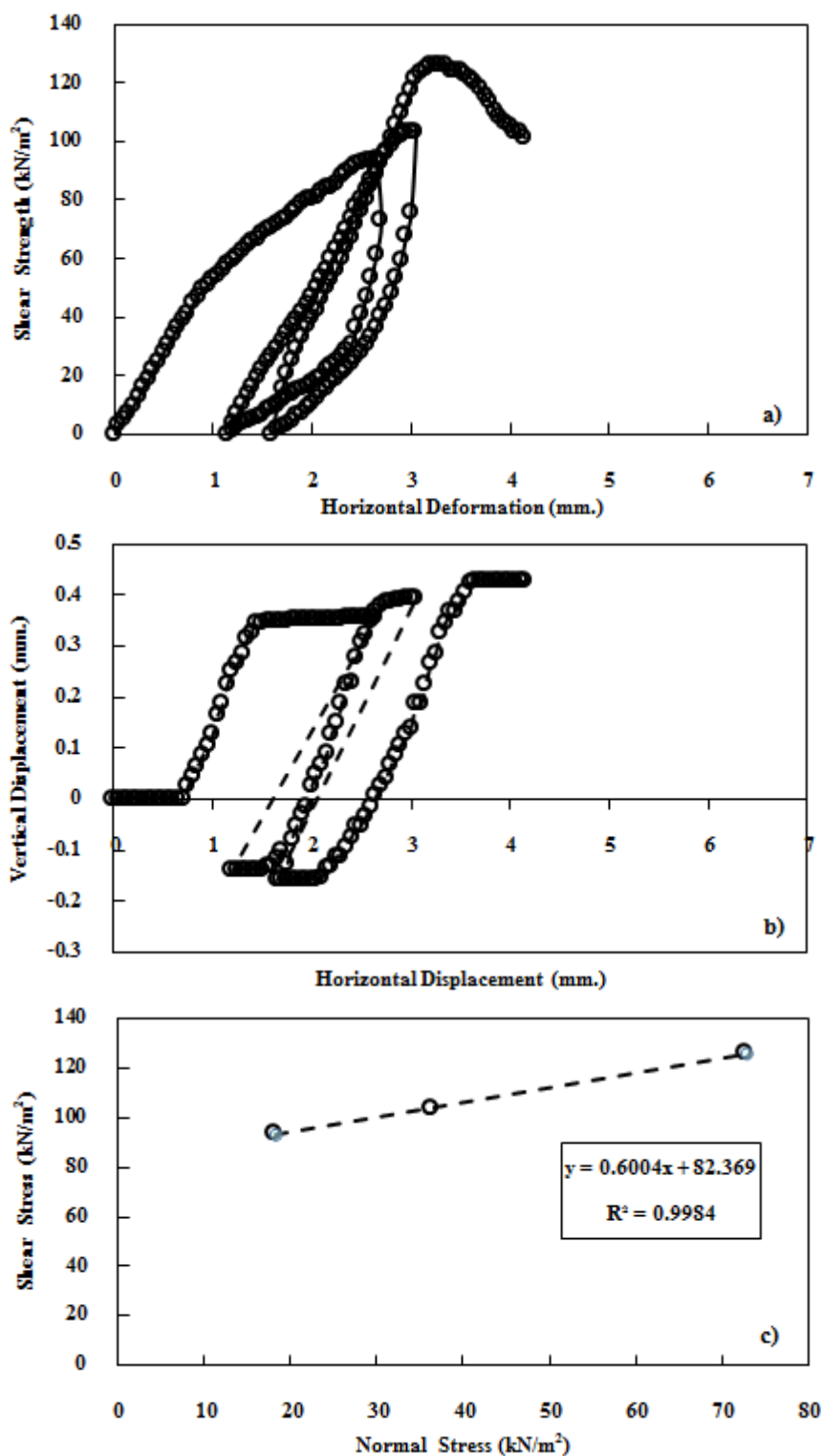
รูปที่ ค-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-5@1m. ความชื้น 9.99 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 29.99 เปอร์เซ็นต์



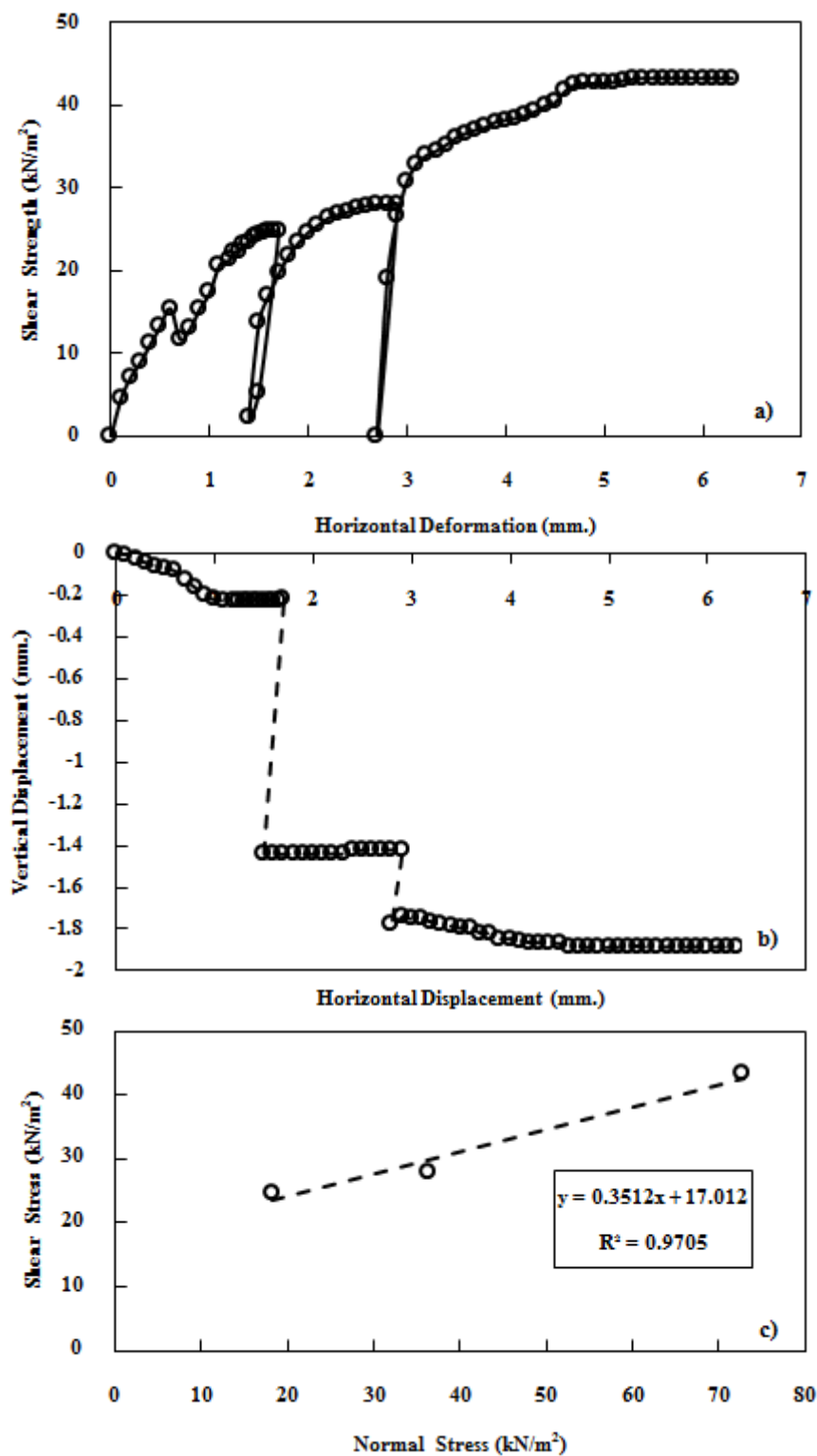
รูปที่ ค-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-3@1m. ความชื้น 22.01 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 48.01 เปอร์เซ็นต์



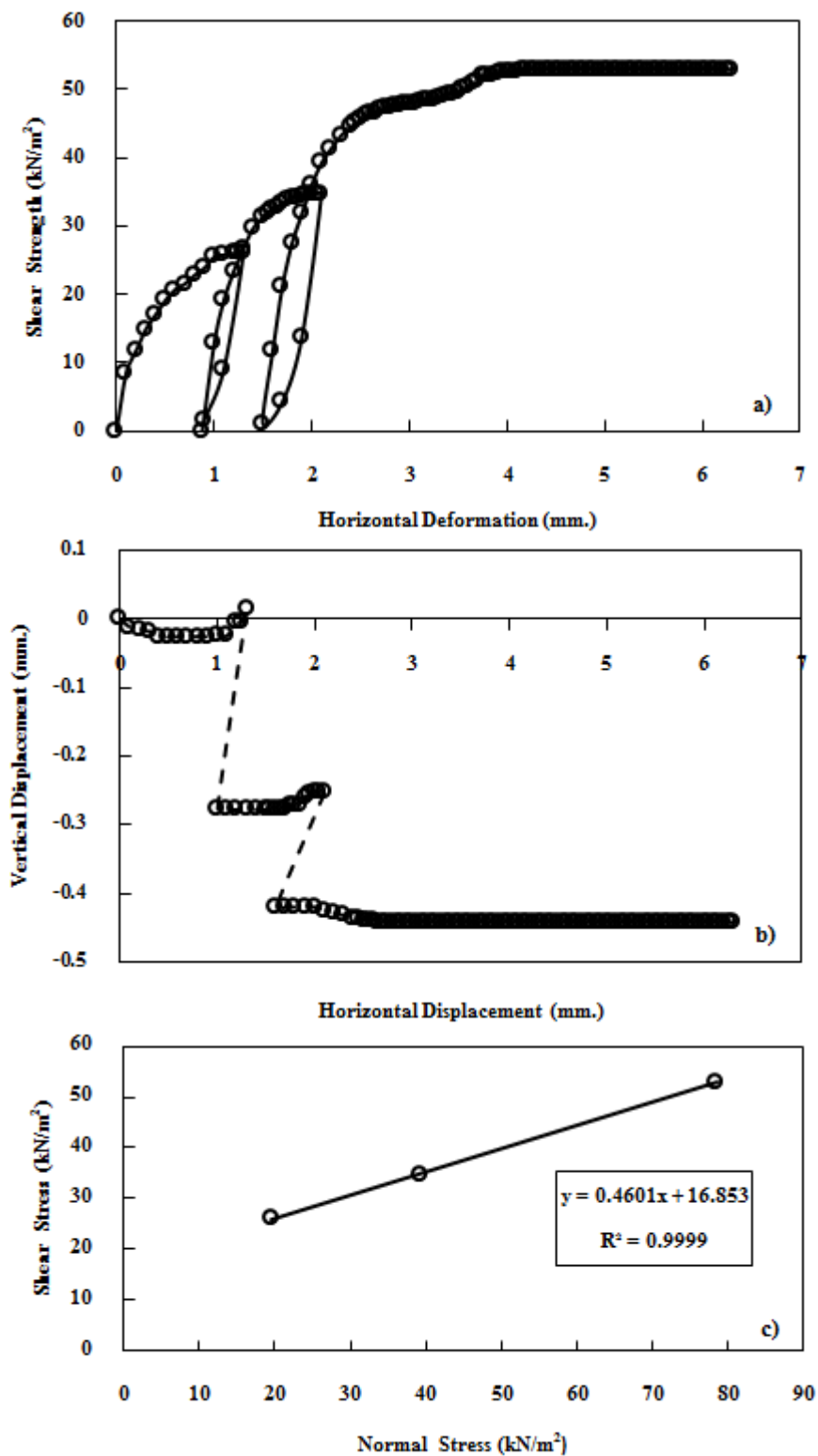
รูปที่ ค-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-3@1m. ความชื้น 21.63 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 56.47 เปอร์เซ็นต์



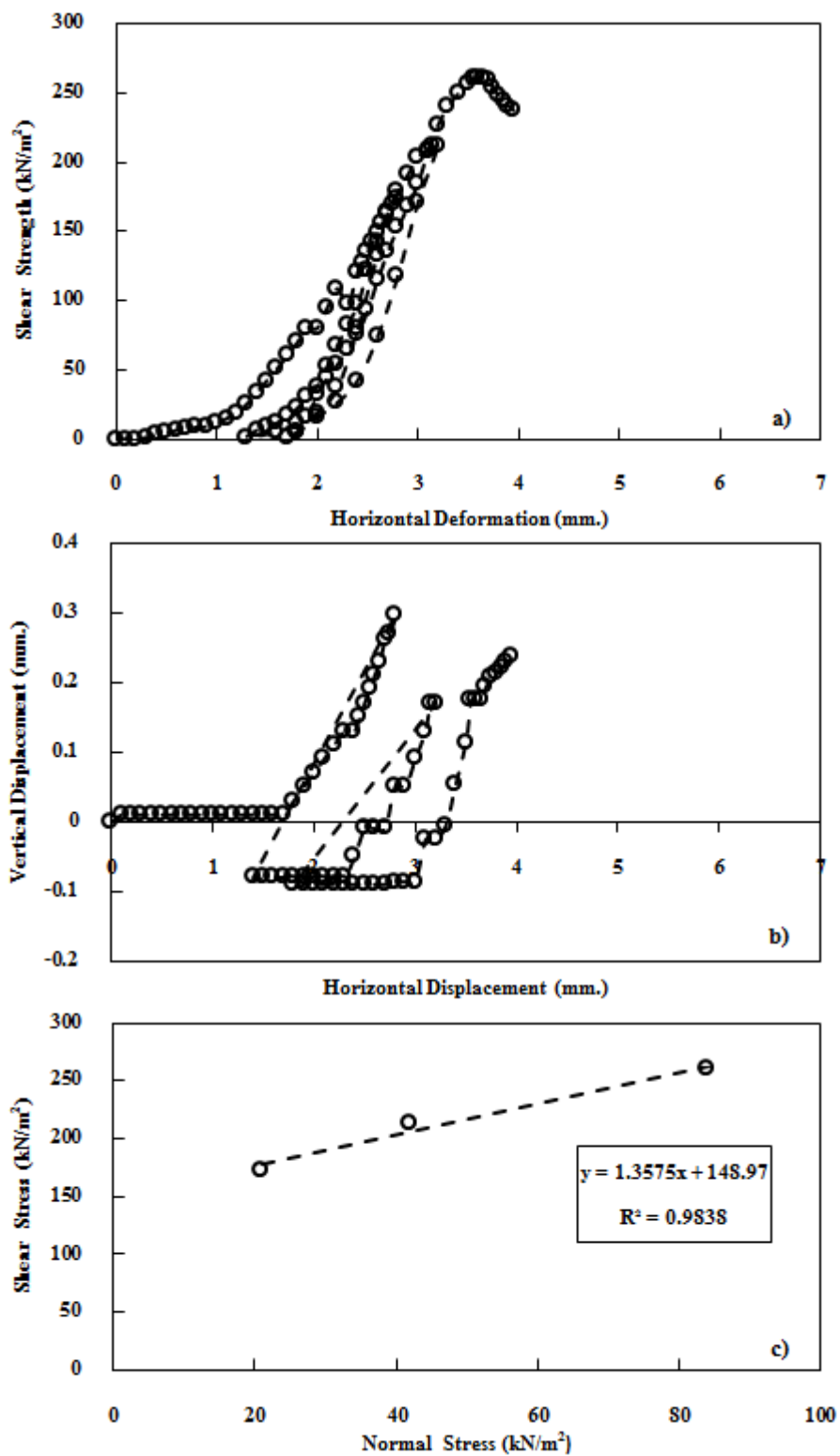
รูปที่ ค-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-1@1m. ความชื้น 16.84 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 70.95 เปอร์เซ็นต์



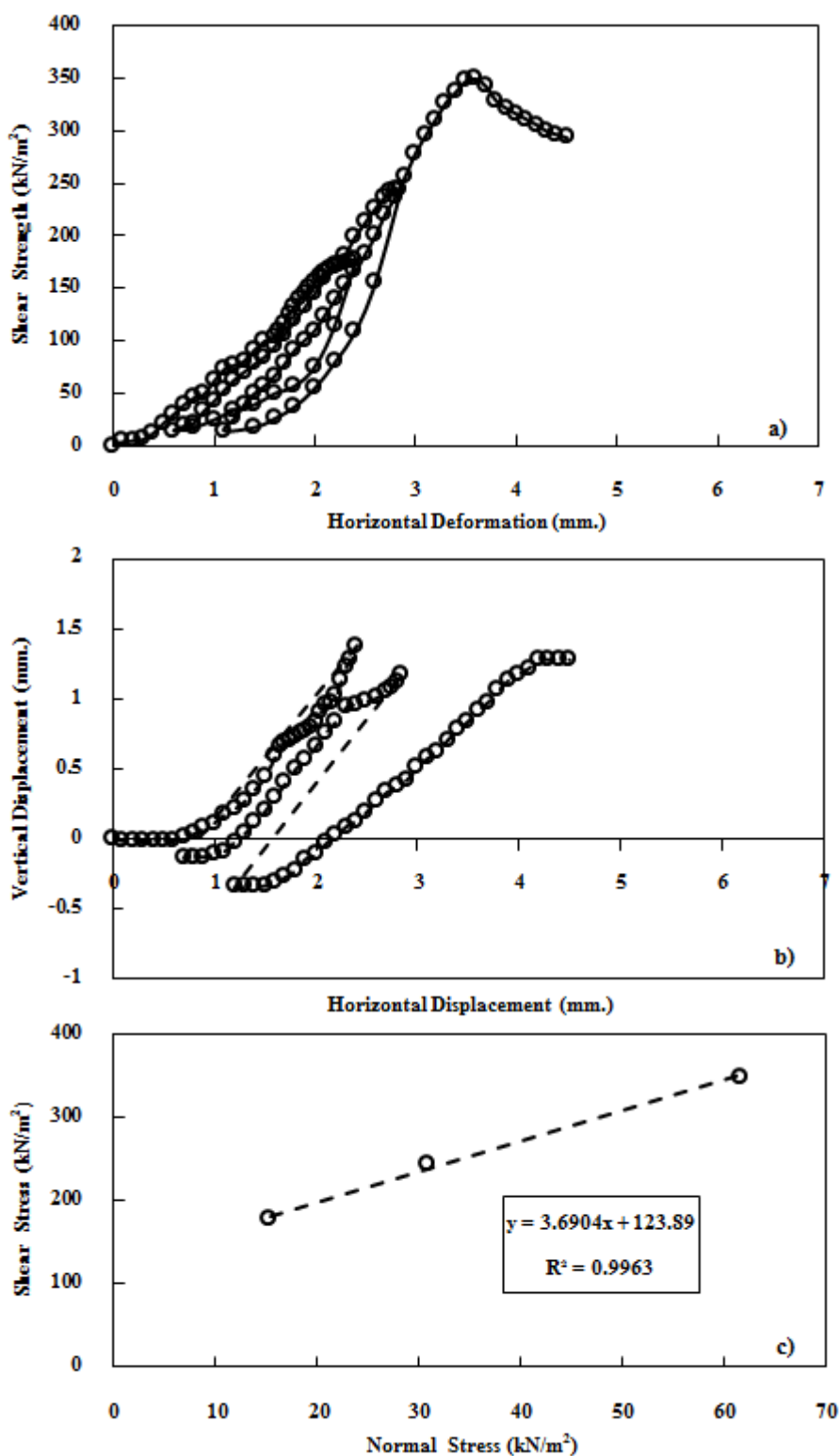
รูปที่ ค-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-2@1m. ความชื้น 18.46 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 79.54 เปอร์เซ็นต์



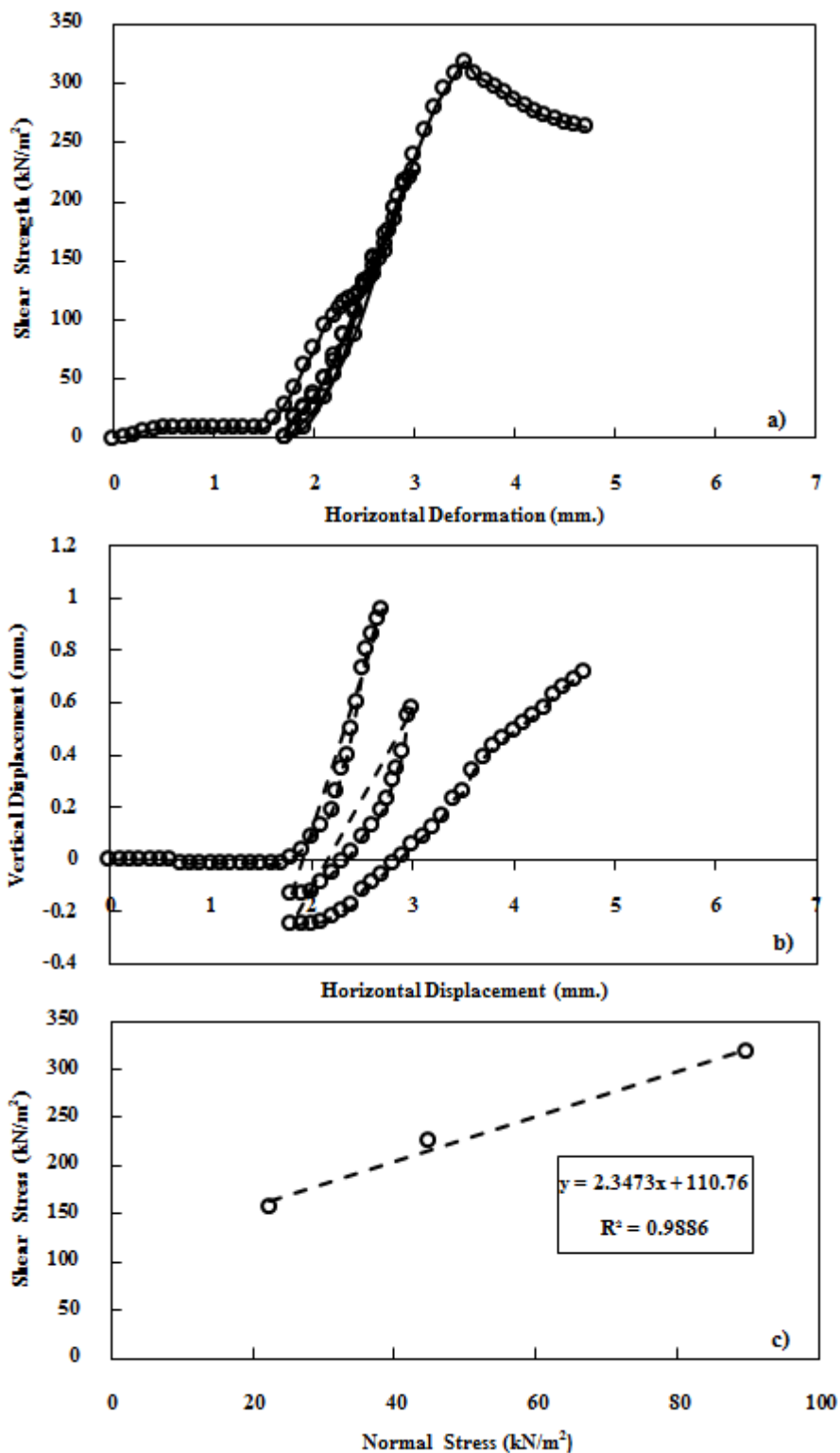
รูปที่ ค-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1-2@1m. ความชื้น 23.42 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 95.48 เปอร์เซ็นต์



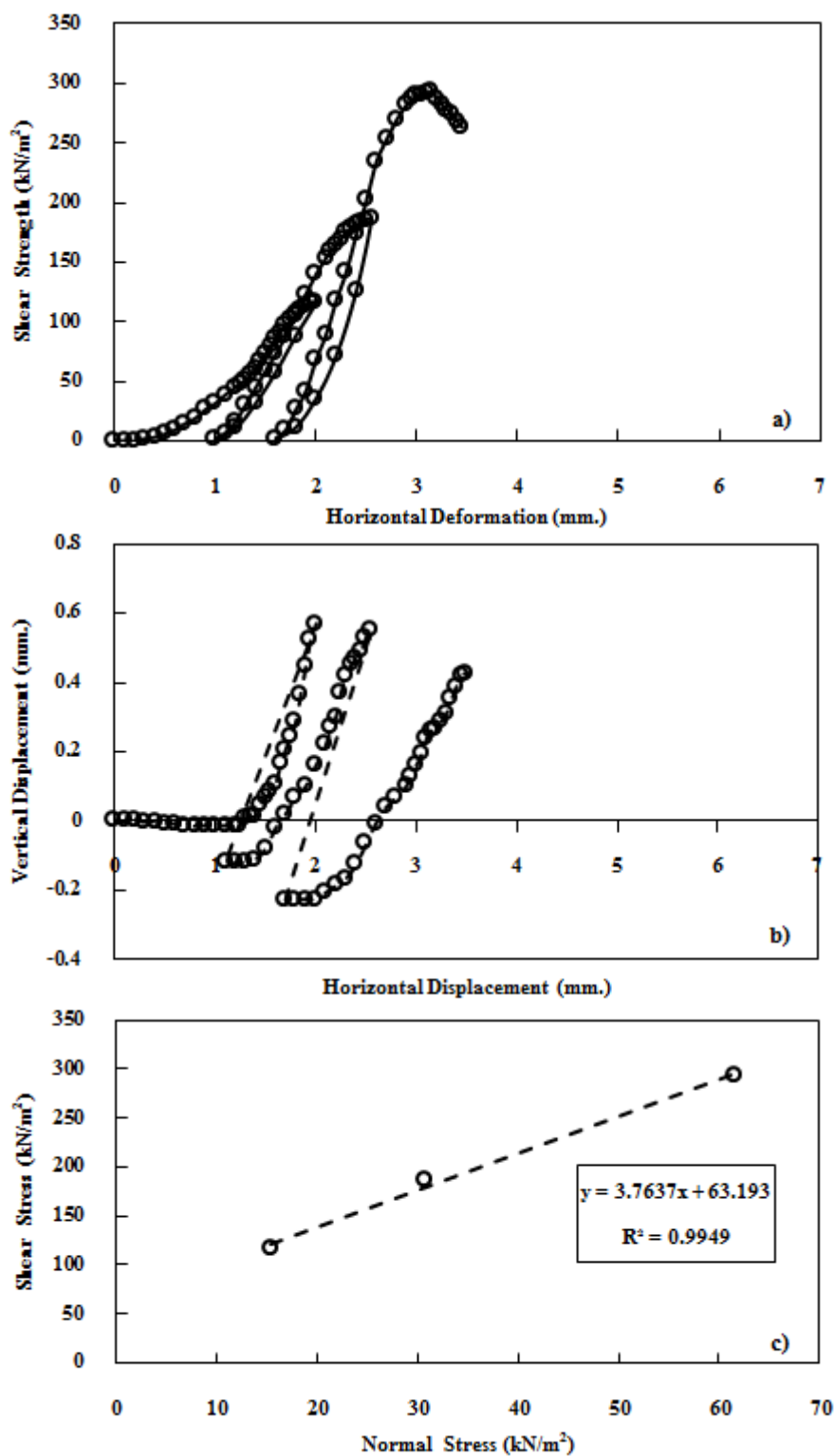
รูปที่ ๑๙-๑๙ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-5@1.25m. ความชื้น 6.56 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 20.02 เปอร์เซ็นต์



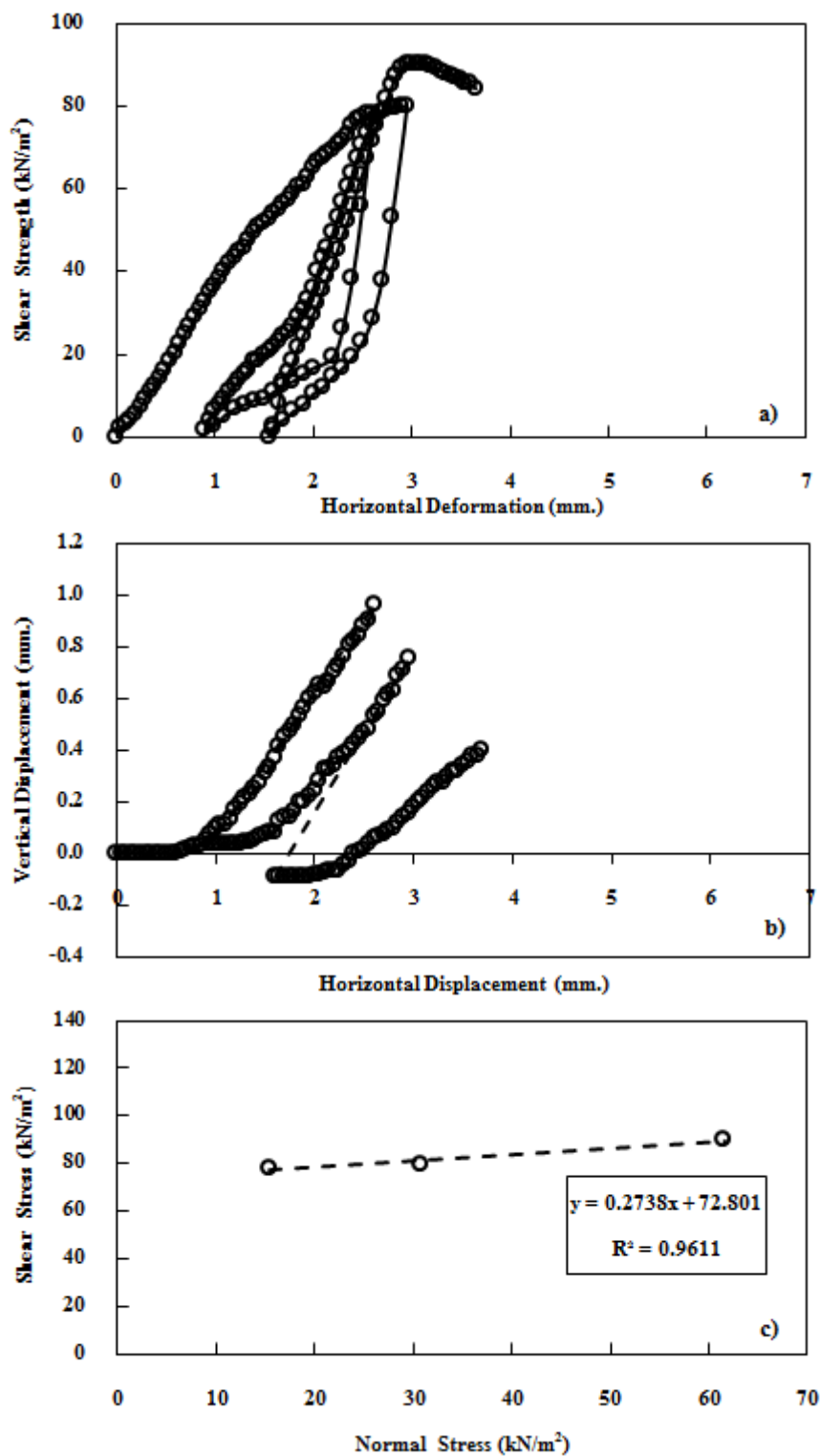
รูปที่ ค-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-6@0.85m. ความชื้น 14.88 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 50.56 เปอร์เซ็นต์



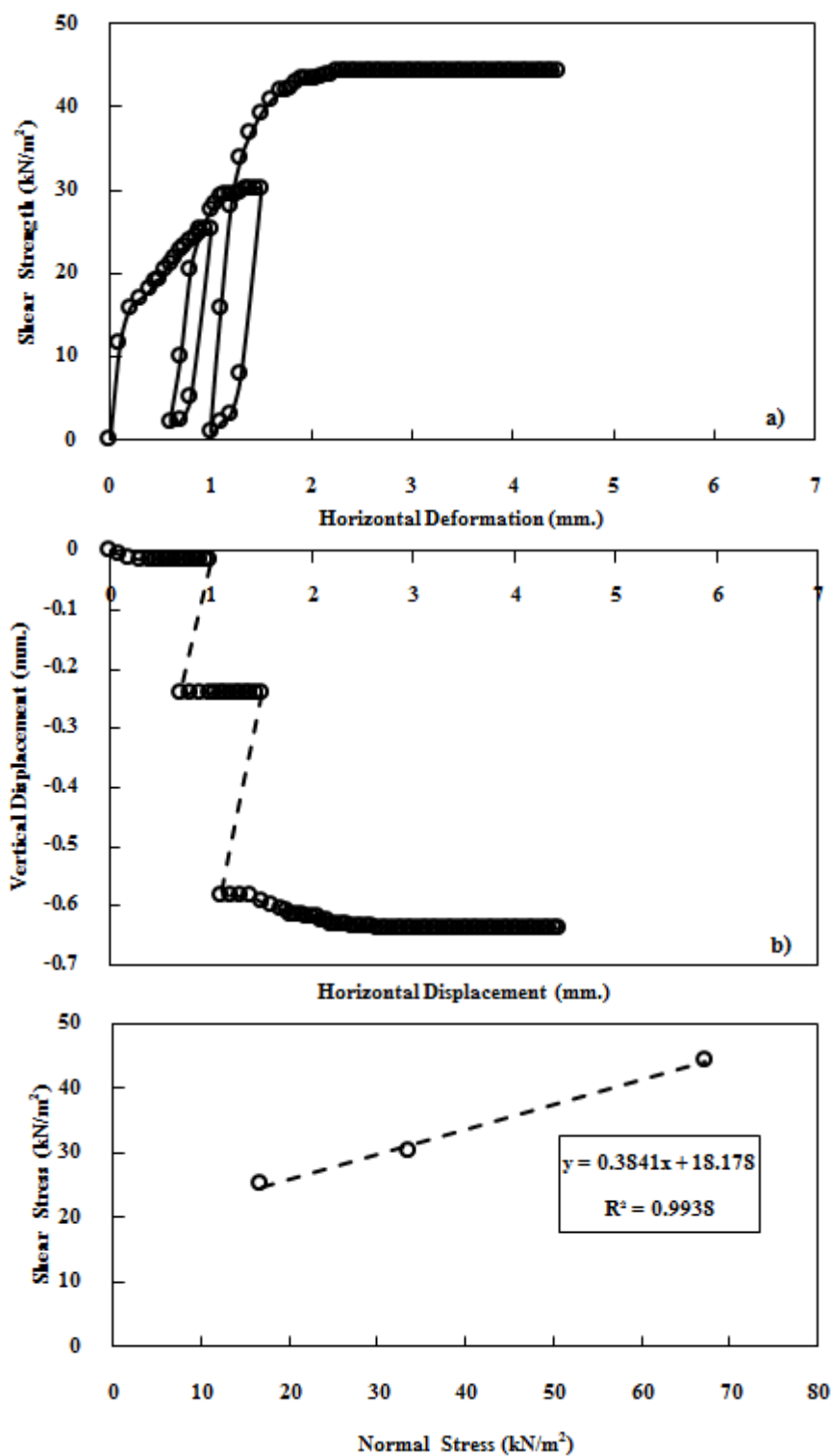
รูปที่ ค-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-5@1.25m. ความชื้น 16.17 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 58.40 เปอร์เซ็นต์



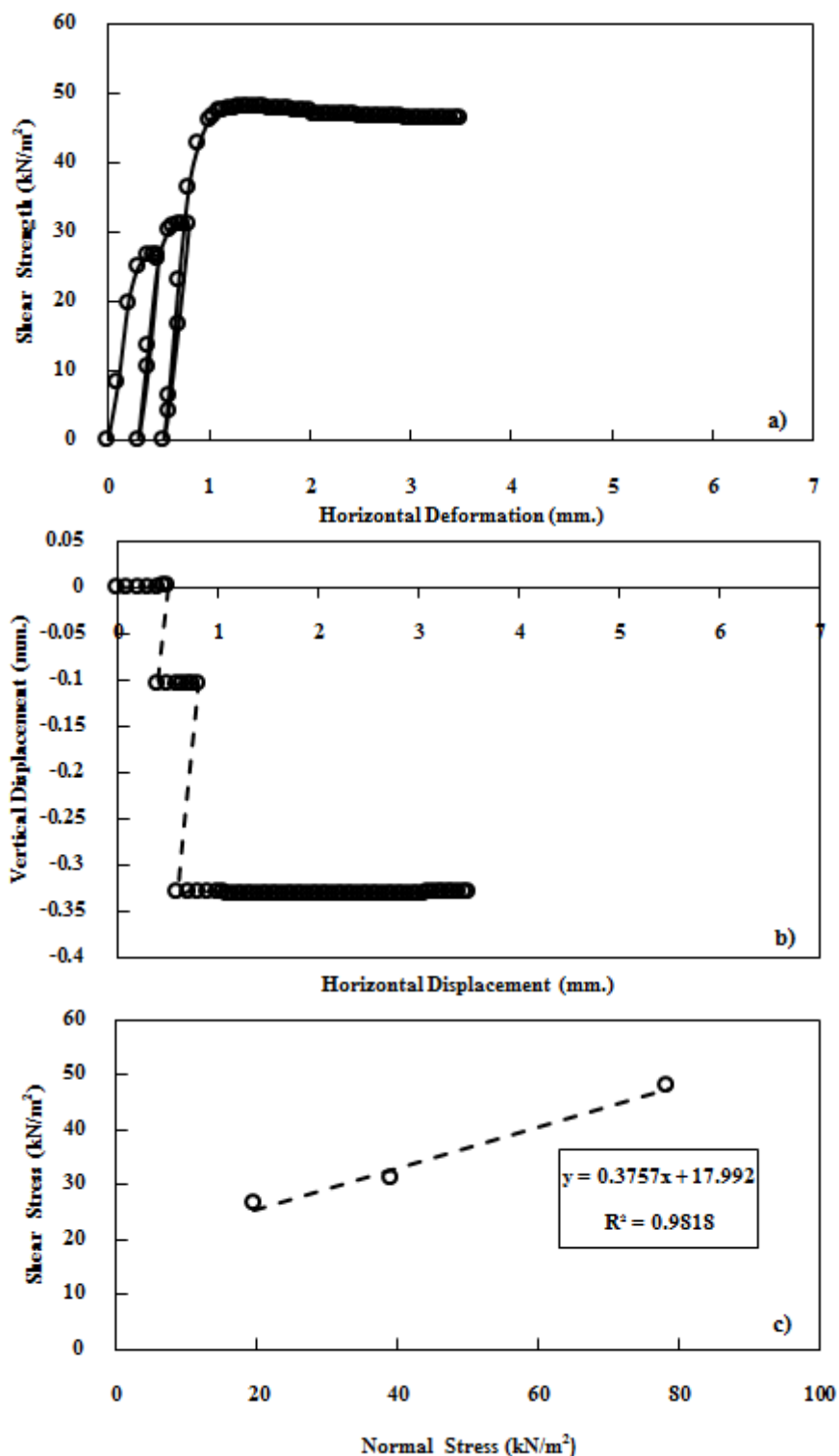
รูปที่ ๒๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-6@0.85m. ความชื้น 14.61 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 63.23 เปอร์เซ็นต์



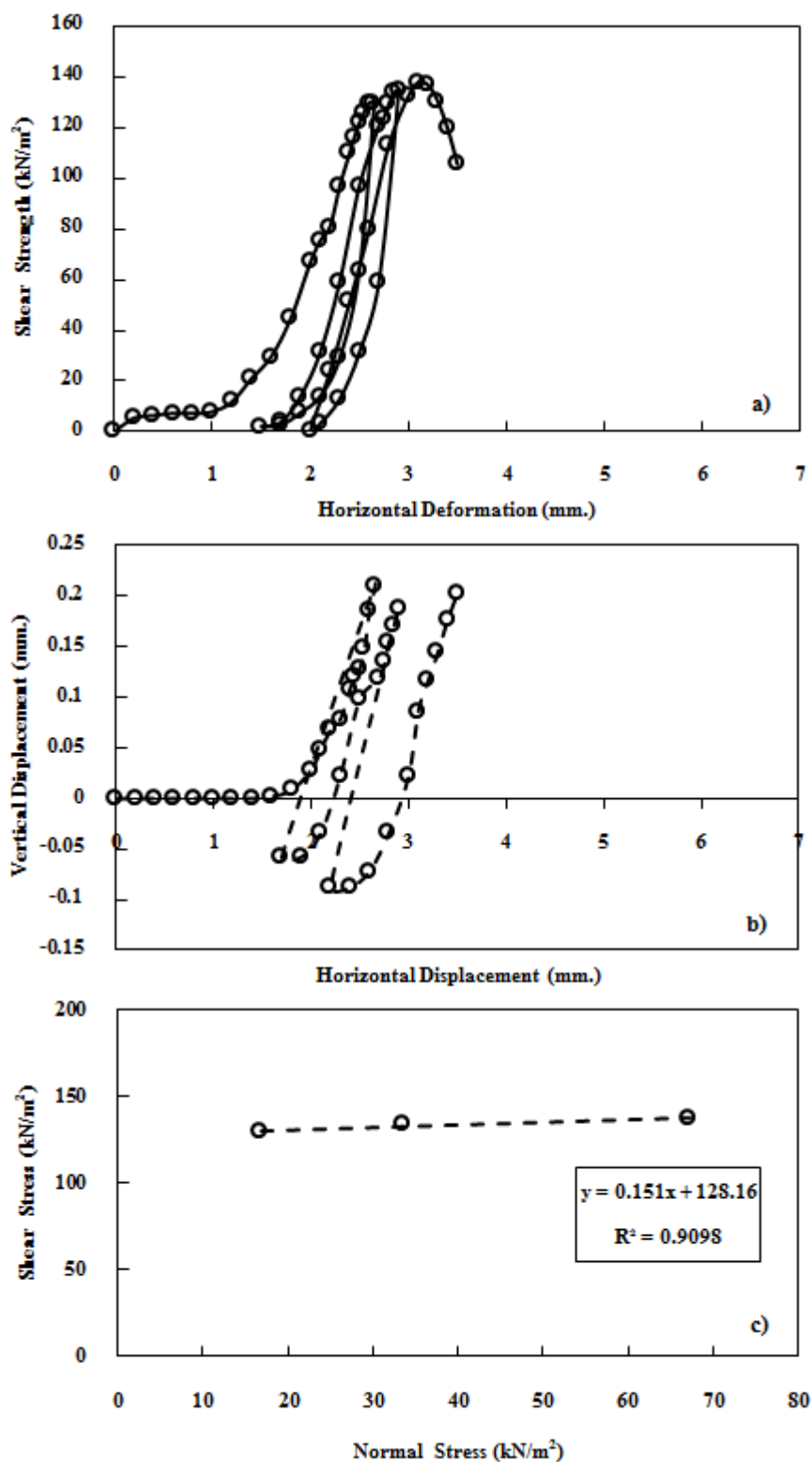
รูปที่ ค-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-4@0.85m. ความชื้น 17.10 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 70.54 เปอร์เซ็นต์



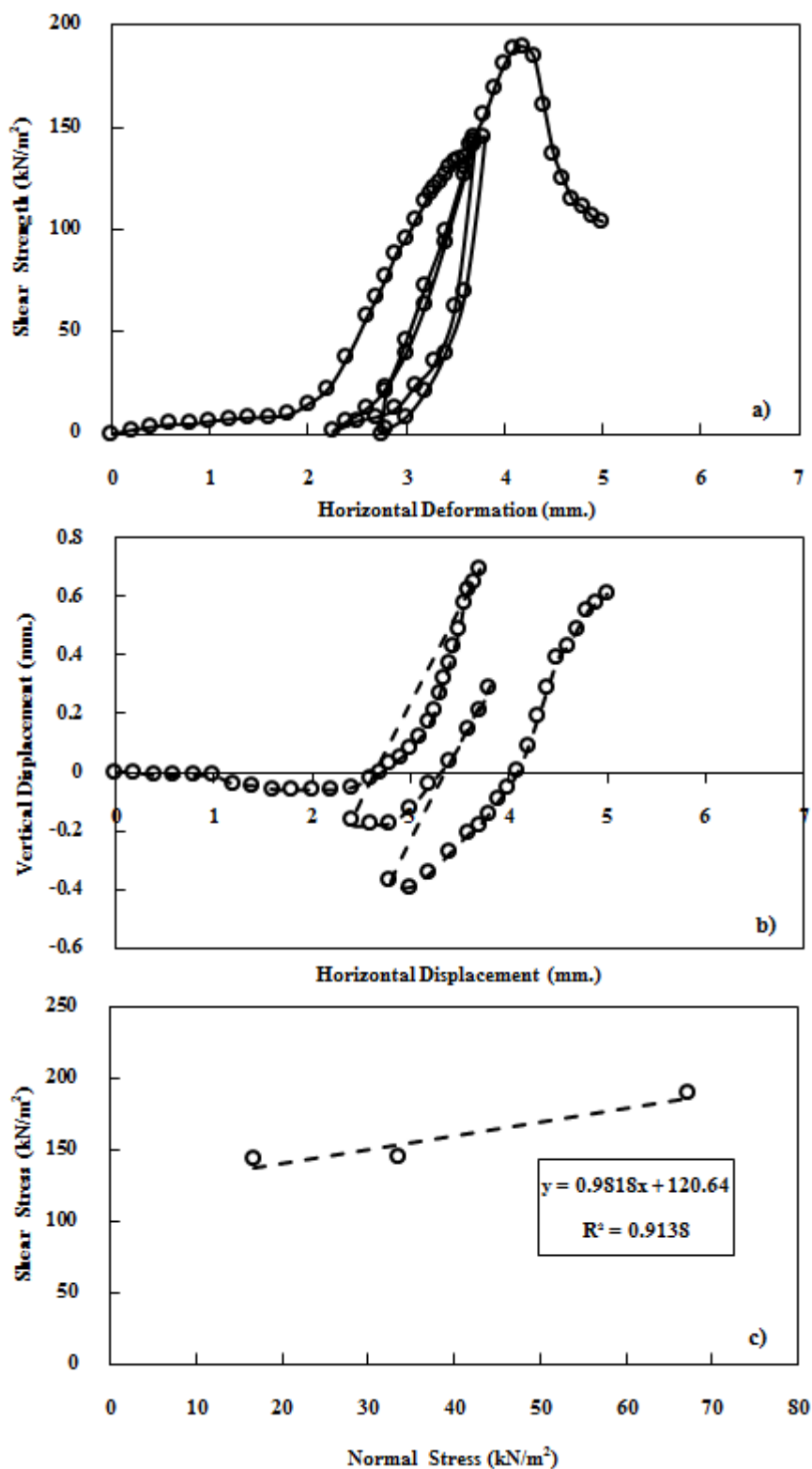
รูปที่ ค-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-5@0.85m. ความชื้น 18.51 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 80.11 เปอร์เซ็นต์



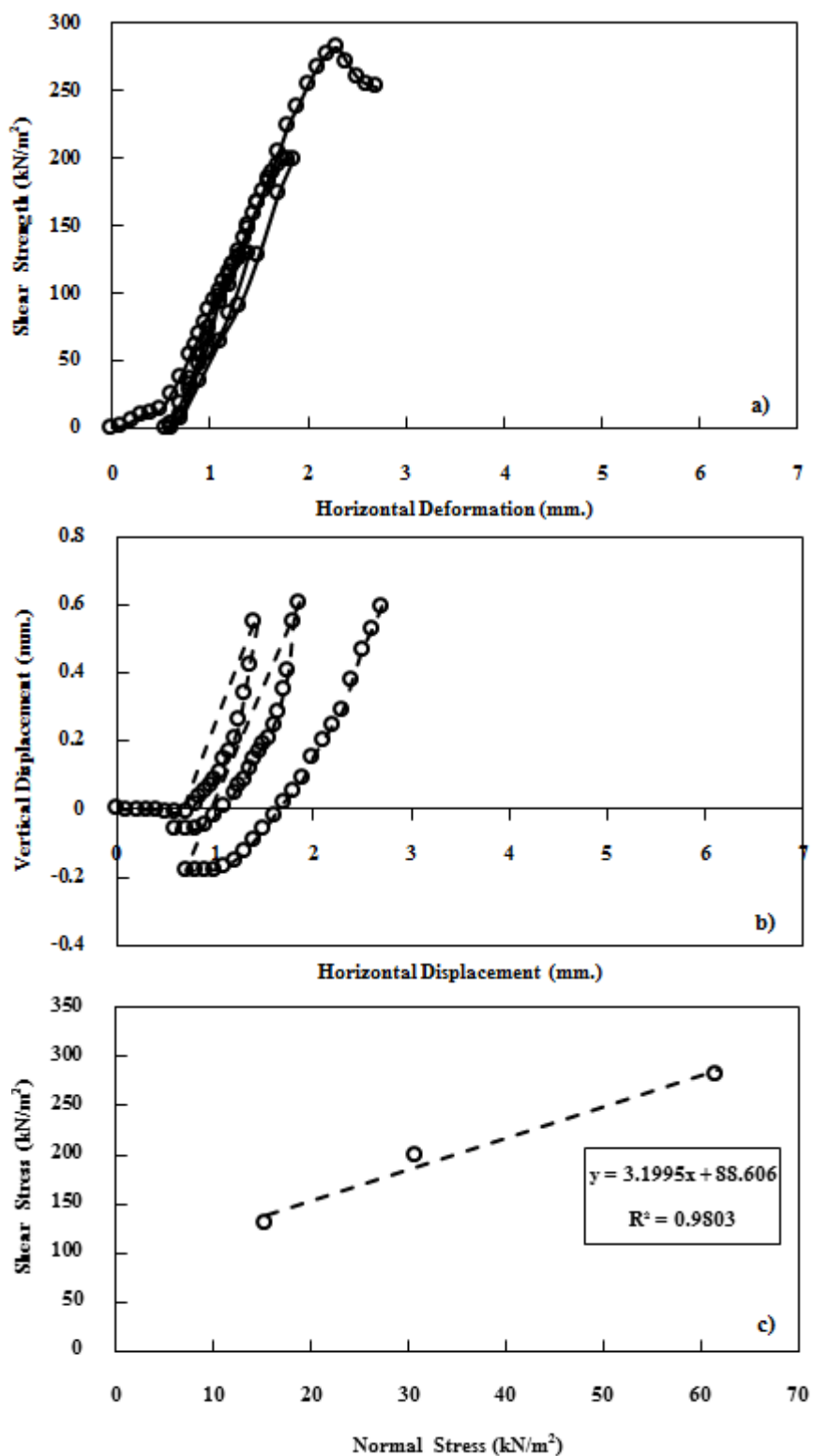
รูปที่ ค-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง M2-5@0.85m. ความชื้น 19.81 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 85.74 เปอร์เซ็นต์



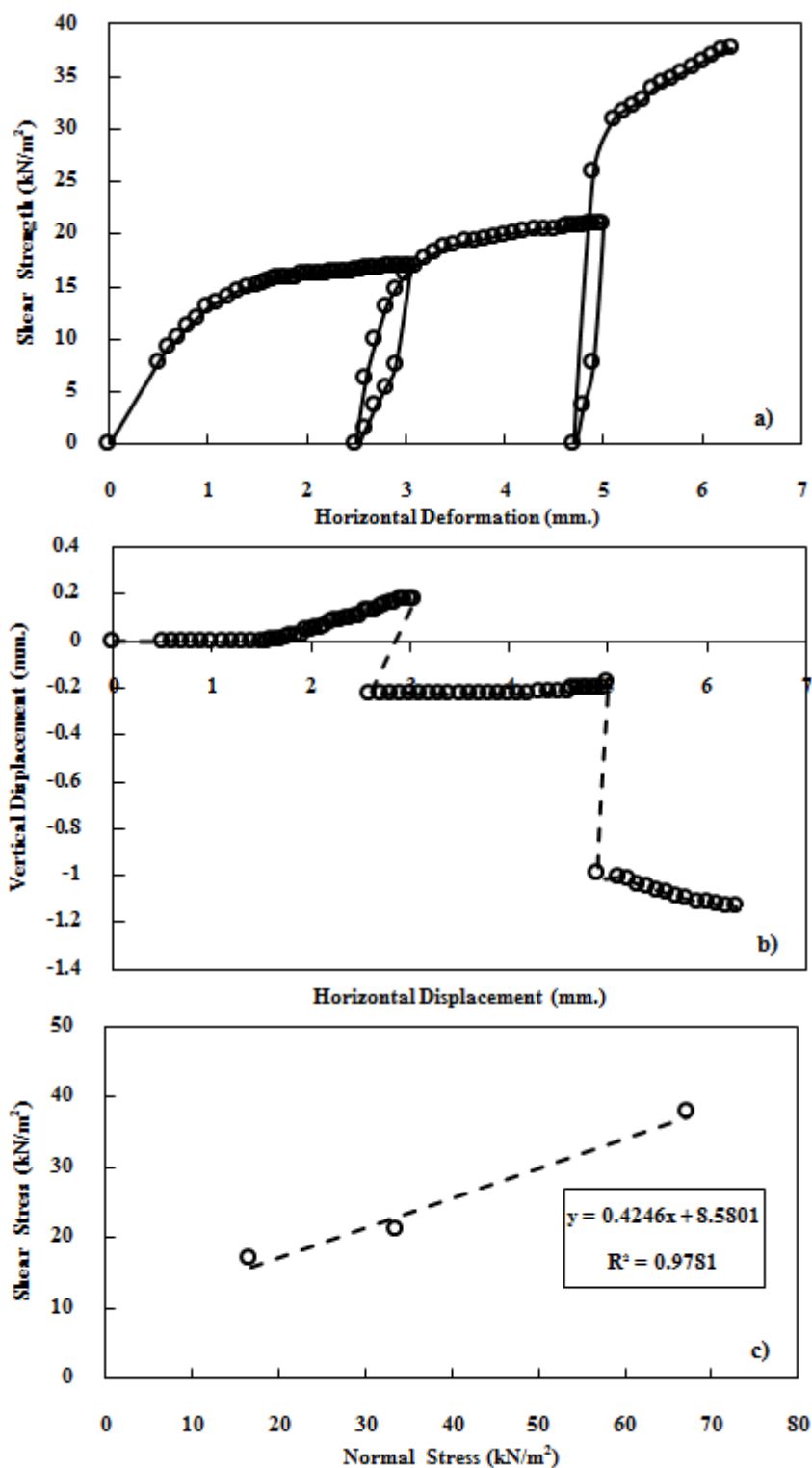
รูปที่ ค-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U5@1m. ความชื้น 0.60 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 4.04 เปอร์เซ็นต์



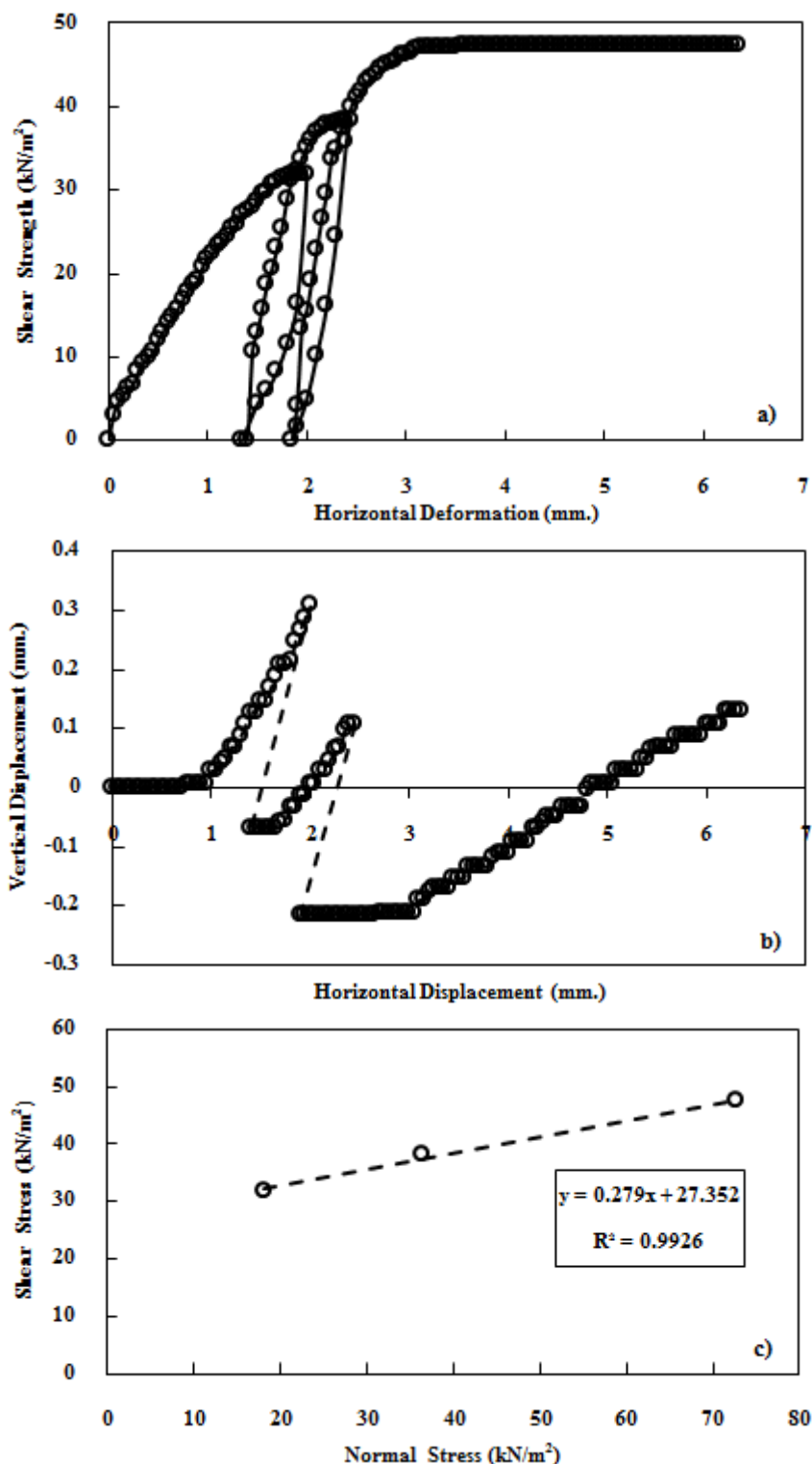
รูปที่ ๒๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U6@1m. ความชื้น 6.77 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 20.00 เปอร์เซ็นต์



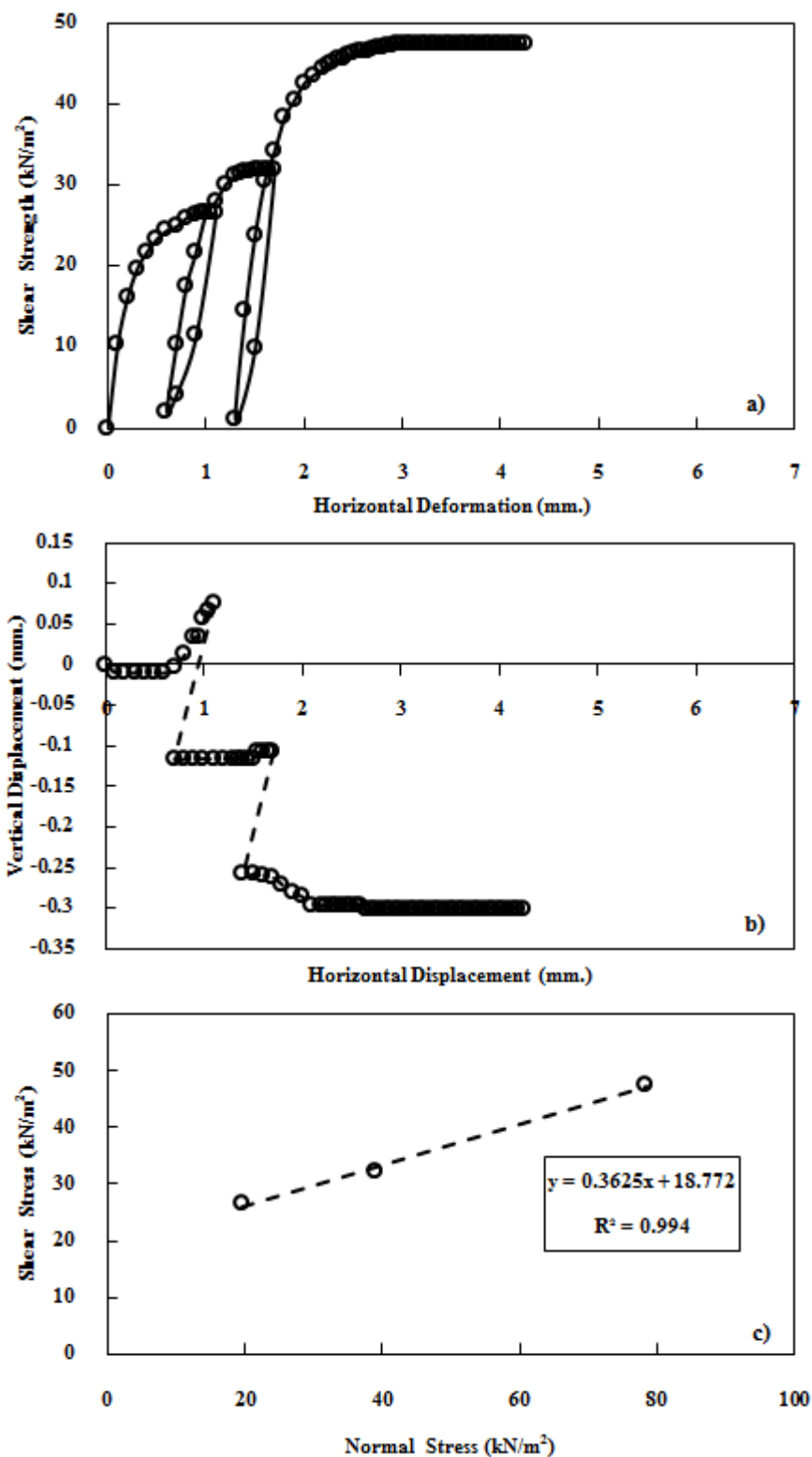
รูปที่ ค-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U6@1m. ความชื้น 16.63 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 49.13 เปอร์เซ็นต์



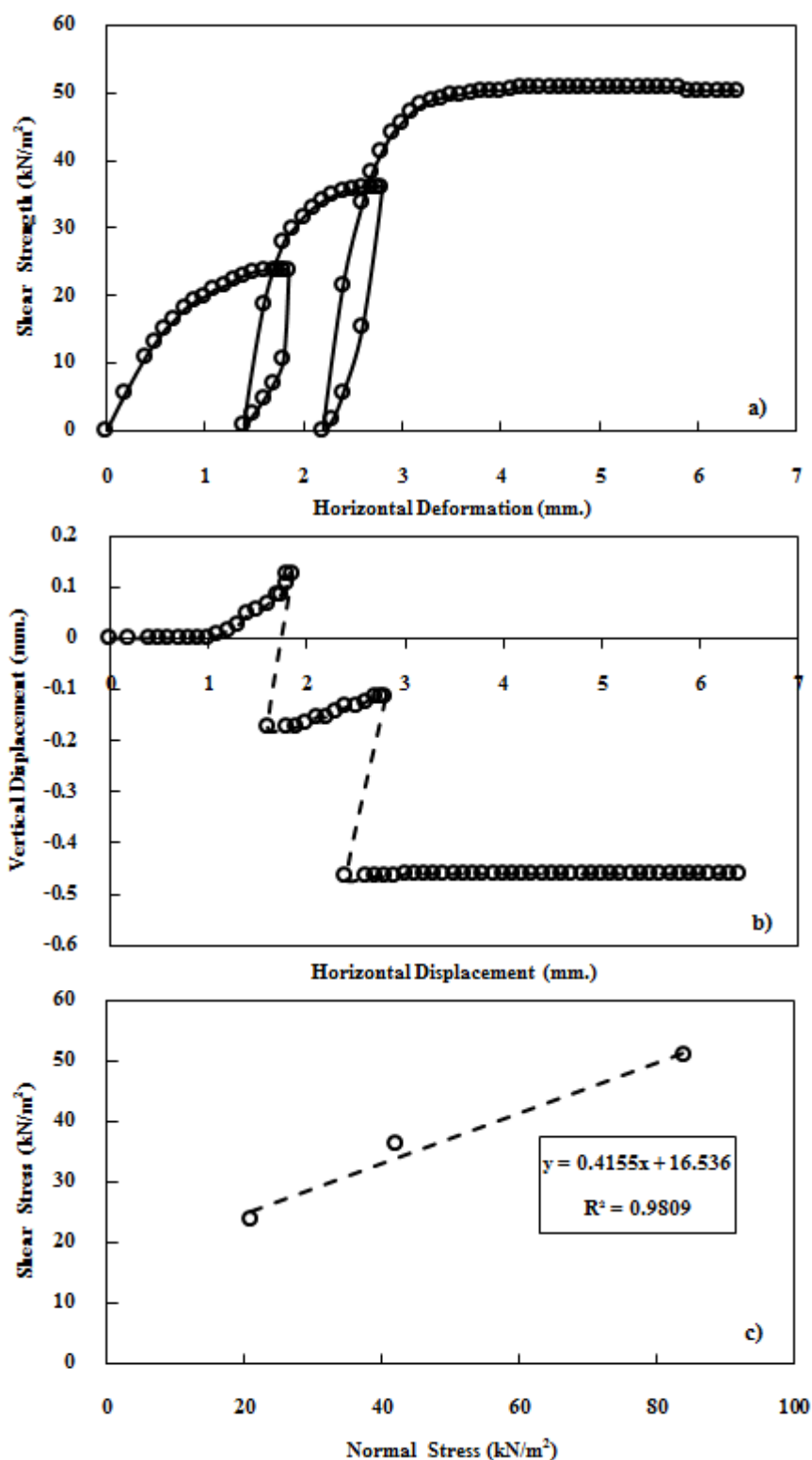
รูปที่ ค-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U3@1m. ความชื้น 16.98 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 56.39 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ ค-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U2@1m. ความชื้น 15.82 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 64.90 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ ค-31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U6@1m. ความชื้น 19.14 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 86.55 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ ค-32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดินในตำแหน่ง U5@1m. ความชื้น 14.90 เปอร์เซ็นต์ ระดับความอิ่มตัว 99.96 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน
ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน (K_s)

ตารางที่ ๑.1 ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน (K_s)

มุมความลาดเอียง (°)	ค่าความชื้นน้ำ m/s.	ความชื้นฝน mm/hr.	Time step (hr.)																				
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	96	144	192	240
25°	$K_s = 10^{-4}$	6	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.438	1.432	1.426	1.422	1.421	1.421	1.421	1.422	1.423	1.422	1.424	1.431	1.435	1.437	1.440
		9	1.443	1.443	1.443	1.443	1.441	1.432	1.422	1.412	1.402	1.396	1.395	1.395	1.396	1.397	1.398	1.399	1.400	1.414	1.417	1.420	1.425
		360	1.443	1.361	0.893	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867	0.851	0.834	0.818	0.801	0.786	0.771	0.755	0.739	0.537	0.396	0.271
	$K_s = 10^{-5}$	6	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.432	1.417	1.402	1.386	1.373	1.366	1.363	1.362	1.362	1.362	1.362	1.362	1.362	1.364	1.365	1.369
		9	1.443	1.443	1.443	1.443	1.429	1.407	1.383	1.358	1.333	1.312	1.303	1.299	1.298	1.298	1.298	1.298	1.298	1.298	1.299	1.310	1.319
		36	1.443	1.437	1.340	1.168	1.006	0.960	0.919	0.895	0.883	0.879	0.878	0.877	0.876	0.875	0.874	0.873	0.872	0.860	0.847	0.850	0.858
	$K_s = 10^{-6}$	3	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.437	1.431	1.425	1.419	1.414	1.410	1.388	1.387	1.388	1.388
		6	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.441	1.428	1.412	1.394	1.374	1.354	1.334	1.315	1.299	1.285	1.274	1.264	1.223	1.223	1.224	1.225
		9	1.443	1.443	1.443	1.443	1.443	1.441	1.428	1.412	1.394	1.374	1.354	1.334	1.315	1.299	1.285	1.274	1.264	1.223	1.223	1.224	1.225
30°	$K_s = 10^{-4}$	6	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.191	1.186	1.183	1.182	1.182	1.181	1.181	1.184	1.184	1.185	1.192	1.192	1.192	1.192
		9	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.191	1.183	1.174	1.166	1.161	1.161	1.161	1.162	1.163	1.164	1.165	1.166	1.182	1.182	1.182	1.182
		360	1.194	1.122	0.750	0.733	0.733	0.733	0.733	0.733	0.733	0.733	0.720	0.705	0.689	0.674	0.659	0.643	0.627	0.612	0.416	0.282	0.152
	$K_s = 10^{-5}$	6	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.191	1.179	1.165	1.151	1.139	1.134	1.132	1.131	1.131	1.131	1.132	1.132	1.136	1.136	1.146	1.156
		9	1.194	1.194	1.194	1.194	1.188	1.169	1.147	1.125	1.103	1.085	1.078	1.079	1.076	1.075	1.075	1.075	1.076	1.079	1.079	1.082	1.090
		36	1.194	1.193	1.106	0.957	0.853	0.797	0.767	0.751	0.743	0.742	0.741	0.740	0.739	0.738	0.738	0.737	0.736	0.726	0.726	0.729	0.732
	$K_s = 10^{-6}$	3	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.193	1.188	1.183	1.178	1.174	1.170	1.153	1.153	1.153	1.154
		6	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.185	1.171	1.155	1.137	1.119	1.102	1.086	1.073	1.061	1.052	1.045	1.016	1.017	1.019	1.019
		9	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.185	1.171	1.155	1.137	1.119	1.102	1.086	1.073	1.061	1.052	1.045	1.016	1.017	1.019	1.019

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน (K_s)

มุมความลาดเอียง (°)	ค่าความชื้นน้ำ m/s.	ความชื้นฝน mm/hr.	Time step (hr.)																					
			0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	96	144	192	240	
45°	$K_s = 10^{-4}$	6	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.750	0.740	0.740		
		9	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.788	0.781	0.772	0.770	0.770	0.771	0.771	0.772	0.773	0.774	0.774	0.768	0.734	0.738	0.738	
		360	0.789	0.683	0.553	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.515	0.497	0.474	0.455	0.437	0.419	0.419	0.417	0.356	0.380	0.400	0.680
	$K_s = 10^{-5}$	6	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.779	0.766	0.752	0.742	0.742	0.741	0.741	0.741	0.741	0.741	0.741	0.741	0.741	0.741	0.742	0.744
		9	0.789	0.789	0.789	0.789	0.785	0.766	0.745	0.720	0.696	0.682	0.678	0.677	0.681	0.679	0.679	0.679	0.679	0.656	0.656	0.657	0.660	
		36	0.789	0.789	0.704	0.607	0.563	0.546	0.536	0.532	0.528	0.526	0.523	0.521	0.520	0.520	0.516	0.519	0.513	0.447	0.447	0.447	0.459	
	$K_s = 10^{-6}$	3	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.783	0.777	0.772	0.768	0.765	0.763	0.757	0.757	0.757	0.757	
		6	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.783	0.768	0.752	0.736	0.722	0.711	0.702	0.693	0.688	0.685	0.683	0.674	0.674	0.673	0.673	
		9	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.783	0.768	0.752	0.736	0.722	0.711	0.704	0.695	0.690	0.686	0.683	0.674	0.674	0.673	0.673	
60°	$K_s = 10^{-4}$	6	0.612	0.612	0.612	0.612	0.612	0.608	0.602	0.596	0.590	0.587	0.587	0.584	0.591	0.579	0.592	0.594	0.595	0.605	0.606	0.607	0.607	
		9	0.612	0.612	0.612	0.611	0.603	0.593	0.582	0.570	0.564	0.560	0.546	0.545	0.539	0.538	0.538	0.536	0.538	0.560	0.597	0.598	0.599	
		360	0.612	0.480	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.473	0.470	0.465	0.459	0.451	0.443	0.428	0.418	0.272	0.290	0.304	0.532
	$K_s = 10^{-5}$	6	0.612	0.612	0.612	0.602	0.580	0.558	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.530	0.535	0.542	
		9	0.612	0.612	0.606	0.575	0.538	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.494	0.500	0.500	
		36	0.612	0.572	0.499	0.480	0.474	0.473	0.472	0.472	0.472	0.473	0.473	0.473	0.474	0.474	0.475	0.475	0.475	0.469	0.470	0.473	0.475	
	$K_s = 10^{-6}$	3	0.612	0.612	0.612	0.612	0.612	0.607	0.592	0.575	0.555	0.540	0.529	0.522	0.517	0.517	0.515	0.514	0.513	0.513	0.514	0.512	0.512	
		6	0.612	0.612	0.612	0.607	0.593	0.578	0.563	0.549	0.537	0.528	0.522	0.518	0.516	0.516	0.515	0.515	0.514	0.514	0.513	0.513	0.513	
		9	0.612	0.612	0.612	0.607	0.593	0.578	0.563	0.549	0.537	0.528	0.522	0.518	0.516	0.516	0.515	0.515	0.514	0.514	0.513	0.513	0.513	

