

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ   เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช  
(กรณี ตำบลเทพราช อำเภอสิชล) โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน  
**Stability of slopes in Nakhonsithammarat province**  
**(Case: Taparat, Sichon) by Using Soil Engineering Properties**

หัวหน้าโครงการ   ผศ.ดร.ชนันท์ ชูอุปการ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ .....	2
สารบัญตาราง.....	4
สารบัญภาพ.....	5
กิตติกรรมประกาศ .....	10
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>14</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	15
<b>บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>16</b>
2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา.....	16
2.2 การกำเนิดดิน .....	17
2.3 ลักษณะการพิบัติของลาดดิน .....	21
2.4 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน .....	34
2.5 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง .....	37
2.6 การลดลงของกำลังเฉือนกับเสถียรภาพของลาดดิน .....	37
2.7 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	39
2.8 กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดิน .....	45
2.9 การไหลของน้ำในดิน .....	50
2.10 การประมาณเส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน Soil-Water Characteristic Curve .....	53
2.11 การเก็บตัวอย่างดิน .....	57
2.12 การทดสอบกำลังของดิน .....	58

2.13	การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน .....	63
2.14	การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน Antecedent Precipitation Index, (API) เพื่อการ .....	67
	เตือนภัย การพิบัติของลาดดิน .....	67
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	68
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>72</b>
3.1	การเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบคุณสมบัติดิน .....	72
3.2	การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน.....	87
3.3	การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน.....	92
3.4	แบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของดิน .....	95
3.5	การศึกษาแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดิน .....	96
3.6	การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API).....	99
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา.....</b>	<b>102</b>
4.1	ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินในสนาม .....	102
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ .....	109
4.3	การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน.....	121
4.4	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API) .....	130
4.5	ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน .....	136
4.6	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W .....	148
4.7	เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต Critical Rainfall Envelope for Stability .....	152
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>156</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	156
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	156
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>.....</b>	<b>158</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $N$ กับความแข็งแรงของดินทราย.....	59
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $N$ กับความแข็งแรงของดินเหนียว .....	59
ตารางที่ 3.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินด้วยตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ.....	80
ตารางที่ 3.2 ชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป .....	83
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน .....	91
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในการศึกษา .....	94
ตารางที่ 4.1 พิกัดตำแหน่ง GPS ของบริเวณพื้นที่ทดสอบและเก็บตัวอย่างดิน.....	102
ตารางที่ 4.2 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณด้านบนของลาด ดินตำแหน่ง T.....	104
ตารางที่ 4.3 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณตอนกลางของ ภูเขาตำแหน่ง M1 และ M2.....	107
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินชนิดต่างๆ(Das, 1983).....	108
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน.....	112
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน ( $c'$ และ $\phi'$ ) ที่ความชื้นธรรมชาติ.....	114
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความอิ่มตัวต่างๆ .....	120
ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต ( $API_{cr}$ ) ของดินบริเวณต่างๆ.....	136
ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดิน .....	141
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 0 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง .....	149
ตารางที่ 4.11 ข้อมูลน้ำฝนจาก 3 สถานีคือสถานีนครศรีธรรมราช สถานีอบต.ฉลอง และสถานีอบต.ลิซล ในช่วงวันที่ 21 -27 มีนาคม 2554 .....	154

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	16
รูปที่ 2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม.....	18
รูปที่ 2.3 วัฏจักรของดิน .....	19
รูปที่ 2.4 ลักษณะของชั้นดินกำเนิดโดยการผุสลายของหิน ณ ที่ตั้ง.....	20
รูปที่ 2.5 แบบจำลองลักษณะของการร่วงหล่น .....	23
รูปที่ 2.6 แบบจำลองลักษณะของ Topples.....	24
รูปที่ 2.7 แบบจำลองลักษณะของ Rotational slide.....	26
รูปที่ 2.8 แบบจำลองลักษณะของ Translational slide .....	28
รูปที่ 2.9 แบบจำลองลักษณะของ Lateral spread .....	30
รูปที่ 2.10 แบบจำลองลักษณะของ Soil creep.....	32
รูปที่ 2.11 แบบจำลองลักษณะของ Avalanche flow .....	33
รูปที่ 2.12 แบบจำลองลักษณะของ Debris flow .....	33
รูปที่ 2.13 แบบจำลองลักษณะของ Earth flow .....	34
รูปที่ 2.14 เงื่อนไขการพิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ .....	36
รูปที่ 2.15 ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง .....	37
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของสภาวะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินกับการพิบัติของลาดดิน.....	39
รูปที่ 2.17 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป.....	39
รูปที่ 2.18 ภาพจำลองส่วนประกอบของดิน Unsaturated Soil .....	40
รูปที่ 2.19 แสดงแรงดันและแรงดึงที่ผิวเม็ดดิน Contractile .....	40
รูปที่ 2.20 ลักษณะของแรงดันน้ำในสภาวะสถิต.....	41
รูปที่ 2.21 ขนาดรัศมีของส่วน โค้งผิวน้ำที่มีผลต่อ Capillary Force.....	42
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil .....	44
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอึดตัวของดินแต่ละชนิดกับค่า Matric suction.....	44
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน .....	45
รูปที่ 2.25 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินในกรณีฝนตกไม่คงที่ .....	46
รูปที่ 2.26 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง .....	47
รูปที่ 2.27 สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว .....	48
รูปที่ 2.28 สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน .....	49

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.29 สภาพดินด้านล่างอิมตัวด้วยน้ำ .....	49
รูปที่ 2.30 การไหลของน้ำผ่านชั้นส่วนเล็กๆในระบบ 3 แกน .....	52
รูปที่ 2.31 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve .....	55
รูปที่ 2.32 รูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve .....	56
รูปที่ 2.33 ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU- Miniature Sampler.....	58
รูปที่ 2.34 การ X – Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU – Miniature.....	58
รูปที่ 2.35 อุปกรณ์ในการทดสอบ Kunzelstab Penetration .....	60
รูปที่ 2.36 การทดสอบ Direct Shear Test.....	61
รูปที่ 2.37 กราฟการทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test.....	62
รูปที่ 2.38 การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดิน .....	65
รูปที่ 2.39 รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop’s Simplified Method .....	66
รูปที่ 2.40 การหาค่า $m_{\alpha(n)}$ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop’s Simplified Method.....	66
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย.....	73
รูปที่ 3.2 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	74
รูปที่ 3.3 ชุดเก็บตัวอย่างดินที่พัฒนามาจากชุดเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler .....	76
รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ.....	77
รูปที่ 3.5 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ.....	78
รูปที่ 3.6 การทดสอบวิธีหยั่งเบา Kunzelstab Penetration Test.....	80
รูปที่ 3.7 การทดสอบความชื้นน้ำด้วยวิธี Double Ring Test .....	81
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบMulti-Stage Direct Shear Test โดยสรุป.....	84
รูปที่ 3.9 การทดสอบการเฉือน โดยตรงด้วยวิธีMulti-Stage Direct Shear Test .....	85
รูปที่ 3.10 การทดสอบหาSoil-Water Characteristic Curve, SWCC .....	86
รูปที่ 3.11 แบบจำลองหน้าตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์ .....	89
รูปที่ 3.12 เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) .....	90
รูปที่ 3.13 ความสามารถในการไหลซึมของดิน(Permeability Function) ของชั้นดิน (Top Soil) .....	90
รูปที่ 3.14 ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ใช้วิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient ) ตั้งแต่.....	91
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน.....	93
รูปที่ 3.16 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function ของดินทั้ง 3 ชนิด .....	95
รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน .....	96

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์ลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope) .....	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบู๊คมาร์ก
รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม SLOPE/W .....	99
รูปที่ 4.1 บริเวณพื้นที่ศึกษาที่เคยเกิดการพังทลายของลาดดิน .....	103
รูปที่ 4.2 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง T .....	105
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ Kunzelstab Penetration Test (KPT) ในบริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่ง T และ ในบริเวณตอนล่างสุดของภูเขา U .....	106
รูปที่ 4.4 สภาพดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2 .....	107
รูปที่ 4.5 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง U .....	108
รูปที่ 4.6 ค่าการซึมน้ำเทียบกับเวลาด้วยวิธี Double-Ring Test .....	109
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด .....	110
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2 .....	111
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุด .....	111
รูปที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในรูปแบบแผนภาพของมอร์ที่ความชันธรรมชาติในบริเวณ T1@1 m. ความชันเท่ากับ 1.97% M1-1@1 m. ความชันเท่ากับ 16.84% M2-4@0.85 m. ความชัน เท่ากับ 17.10% และ U2@1 m. ความชันเท่ากับ 15.82% .....	113
รูปที่ 4.11 (ก) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความชันต่างๆในบริเวณ T .....	116
รูปที่ 4.12 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล ( $c'$ ) กับค่าระดับความอิ่มตัวด้วย ( $S_v$ ) .....	118
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ ความลาดชัน 25 องศา .....	122
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ ความลาดชัน 30 องศา .....	123
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ ความลาดชัน 45 องศา .....	124
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่างๆที่ ความลาดชัน 60 องศา .....	125
รูปที่ 4.17 ผลกระทบจากความชื้นฝน ( $I_p$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความลาดชัน 45 องศา ดินมีความหนาของดิน 6 เมตร .....	127
รูปที่ 4.18 ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความหนาของดิน 6 เมตร .....	128

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.19 อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ( $F.S._{(min)}$ ) ที่เป็นผลมาจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน โดยมีค่าการซึมผ่านของดิน $K_s = 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ความลาดชันคงที่ 45 องศา.....	130
รูปที่ 4.20 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Saturated, Normal Stress และ Shear Stress ในรูปแบบบรรณาบของดินบริเวณส่วนบนของลาดดิน T .....	131
รูปที่ 4.21 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังข้อมูลจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช .....	137
รูปที่ 4.22 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 30 ปี และน้ำฝนรายเดือนในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ .....	137
รูปที่ 4.23 ระดับน้ำใต้ดินและระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในสภาวะแบบคงที่ (Steady State).....	138
รูปที่ 4.24 ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงที่ติดต่อกันจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช .....	138
รูปที่ 4.25 ระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนตกซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	139
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 1 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	142
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 2 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	143
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 3 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	144
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 4 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	145
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 5 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	146
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 6 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	147

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 7 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง .....	148
รูปที่ 4.33 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 0 24 และ 48 ชั่วโมง .....	150
รูปที่ 4.34 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 72 96 และ 110 ชั่วโมง .....	151
รูปที่ 4.35 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 120 และ 144 ชั่วโมง .....	152
รูปที่ 4.36 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช.....	155
รูปที่ 4.37 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมกับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่อัตราส่วนความปลอดภัย F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ในพื้นที่ศึกษา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช.....	155

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอบพระคุณ  
สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณ  
รศ.ดร.ธนิต เถลิงยานนท์ รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ รศ.ดร.คุณพล ตันนโยภาส ที่ให้แนวทางในการทำวิจัย  
ขอขอบคุณทีมงานนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ช่วยในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ผศ.ดร.ธนนท์ ชูบุปการ

**เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช**  
**(กรณี ตำบลเทพราช อำเภอสิชล) โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน**  
**Stability of slopes in Nakhonsithammarat province**  
**(Case: Taparat, Sichon) by Using Soil Engineering Properties**

รณันท์ ชูบุปการ

**Tanan Chubuppakarn**

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์จ.สงขลา 90110

**บทคัดย่อ**

การพิบัติของลาดดินเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติประเภทหนึ่งที่มีความอันตราย สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมากจากงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลาดดินเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการพิบัติของลาดดินแต่ก็ยังมีข้อสรุปที่แตกต่างกันออกไป วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ (1) ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน เช่น คุณสมบัติของดิน (ค่าความชื้นผ่านของน้ำในดิน) ความเข้มของปริมาณน้ำฝนและรูปแบบของลาดดิน (2) ทำการศึกษอิทธิพลของความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นวิกฤตของดิน (Critical antecedent precipitation index, API) โดยใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope method) และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยใช้วิธี Bishop's simplified ด้วยโปรแกรม SLOPE/W เพื่อบ่งชี้ถึงความวิกฤตของสถานการณ์และเตือนภัยการพิบัติของลาดดินด้วยน้ำฝนในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความชื้นน้ำของดินแต่ละชนิดกับความเข้มฝนที่มีค่าเท่ากับค่าความชื้นน้ำของดิน ดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงการลดลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) รวดเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาทีและดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับและพบว่าความเข้มฝนที่มีค่าต่ำกว่าค่าการซึมผ่านของดินหลายๆจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยและเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และเมื่อพิจารณาความเข้มฝนที่ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าการซึมผ่านของดินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะยิ่งลดต่ำลงโดยเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา ( $t \leq 24$  ชั่วโมง) พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงของลาดดินเริ่มต้นพบว่าลาดดินที่มีความลาดเอียงที่ต่ำกว่าจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นที่สูงกว่า หรือกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของดิน (ค่าความชื้นผ่านของน้ำในดิน) และความเข้มฝนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วยน้ำฝน

โดยในส่วนของลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียงและความหนาของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน

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 ลาดดินที่พบมีระดับความอิ่มตัว 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, กำลังเฉือน, ปริมาณน้ำฝน

### 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 ( $API_{crit}$ ) 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 performed involving 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  $API_{cri}$  (FS = 1). Analytical result found that  $API_{cri}$  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 Bishop's simplified method indicated that over 643.57 mm of cumulative rainfall induced to slope failure.

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

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ลาดดินถล่มเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป โดยสามารถพบร่องรอยหลักฐานของลาดดินถล่มได้ในพื้นที่ที่มีภูมิประเทศสูงชัน ในอดีตผลกระทบจากการเกิดลาดดินถล่มต่อประชาชนมีค่อนข้างน้อยเนื่องจากพื้นที่ที่เกิดลาดดินถล่มส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ห่างไกลจากแหล่งชุมชน เพราะประชาชนส่วนมากอาศัยอยู่ในพื้นที่ราบ อย่างไรก็ตามในช่วงสามสิบปีที่ผ่านมาจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจของประเทศไทยส่งผลให้เกิดการขยายตัวของชุมชนจนนำไปสู่การตั้งถิ่นฐานของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดลาดดินถล่ม จากข้อมูลในอดีตพบว่าประเทศไทยได้รับความเสียหายจากพิบัติของลาดดินเป็นมูลค่ามหาศาล ทั้งชีวิตพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่การเกษตร และพื้นที่สาธารณะต่าง ๆ เช่น ถนน วัด โรงเรียน ความสูญเสียที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อชุมชนและประชาชน เช่น การเกิดพิบัติภัยจากลาดดินที่บริเวณอุทยานแห่งชาติเขาหลวงปลายปี 2531 ความรุนแรงของการพิบัติของลาดดินและอุทกภัยในครั้งนั้นทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 300 คน มูลค่าความเสียหายมากกว่าเจ็ดพันล้านบาท และใช้เวลาฟื้นฟูท้องถิ่นหลายปี หรือในปี 2544 การเกิดพิบัติภัยจากลาดดินในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์ ทำให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บมากกว่า 250 คน มีมูลค่าความเสียหายมากกว่าหกร้อยห้าสิบล้านบาท นอกจากนี้ในปี 2549 การเกิดพิบัติภัยจากลาดดินในพื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ ทำให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บมากกว่า 80 คน มีมูลค่าความเสียหายมากกว่าสามร้อยล้านบาท (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

จากการศึกษาข้อมูลในอดีตพบว่าพื้นที่ที่เกิดพิบัติภัยจากลาดดินถล่มมักจะเป็นพื้นที่ที่มีการตกของน้ำฝนเป็นเวลานาน ซึ่งเป็นผลให้เกิดลาดดินถล่มควบคู่กับการเกิดอุทกภัยนอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ที่เกิดลาดดินถล่มส่วนใหญ่จะมีกิจกรรมของมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ต้องการศึกษารูปแบบลักษณะของลาดดินถล่ม และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดลาดดินถล่ม เพื่อนำไปสู่การทำนายการเกิดลาดดินถล่มที่แม่นยำ และหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในการบริหารจัดการพื้นที่เสี่ยงการเกิดลาดดินถล่มอย่างบูรณาการ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสภาพทางธรณีของชั้นดินและขอบเขตของการเกิดลาดดินถล่มของพื้นที่ตำบลเทพราชอำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินของพื้นที่ที่เกิดลาดดินถล่มในพื้นที่ของตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช
3. ศึกษาลักษณะและปัจจัยที่มีผลต่อการพิบัติของลาดดิน
4. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อประเมินปัจจัยที่ทำให้เกิดการพิบัติ
5. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปริมาณน้ำฝน
6. เสนอแนวทางการเตือนภัยพิบัติลาดดิน โดยใช้ปริมาณน้ำฝน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์การพิบัติของลาดดินในพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. วิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของดินเพื่อนำมาใช้เป็นปัจจัยสนับสนุนของการวิเคราะห์
3. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินชนิดไม่ถูกรบกวน ใช้วิธี Multi State Direct Shear Test โดยทดสอบแบบระบายน้ำ
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน
5. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยเลือกใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Bishop's Simplified Method และลาดดินอนันต์ (Infinite Slope)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงลักษณะและสาเหตุของการพิบัติของลาดดิน
2. อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไปได้
3. สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาได้
4. หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดิน (Antecedent Precipitation Index: API) ซึ่งเป็นดัชนีที่ชี้ถึงความวิกฤติของสถานการณ์การพิบัติของลาดดินได้
5. สามารถกำหนดเกณฑ์ที่ช่วยในการเตือนภัยการพิบัติของลาดดินเพื่อลดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยง



### 2.1.3 สภาพภูมิอากาศ

ตำบลเทพราชตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตรและตั้งอยู่บนคาบสมุทรทำให้มีลักษณะภูมิอากาศแบบเขตร้อน เนื่องจากได้รับลมมรสุมที่พัดผ่านทะเลทั้งสองด้าน ทำให้มีฝนตกเกือบตลอดปีและมีอากาศค่อนข้างเย็นชื้น โดยมีเมฆปกคลุมถึงร้อยละ 14-15 และมีฤดูกาลเพียง 2 ฤดู คือ

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

ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ในช่วงเดือนเมษายน จะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 40 องศาเซลเซียส

### 2.1.4 ลักษณะทางธรณีวิทยา

สภาพธรณีวิทยาโดยทั่วไปในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิตยุคจูแรสสิก-ครีเทเชียส (Jurassic-Cretaceous) ซึ่งมีการกระจายตัวและครอบคลุมพื้นที่บริเวณภาคใต้โดยมีพื้นที่ครอบคลุม 1.84% ของพื้นที่ทั้งประเทศดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากหินกลุ่มนี้มีอัตราการผุพังสูงจึงจัดให้หินกลุ่มนี้มีความอ่อนไหวต่อการเกิดการพังทลายของลาดดินบริเวณพื้นที่ภาคใต้ (สุทธิศักดิ์, 2550)

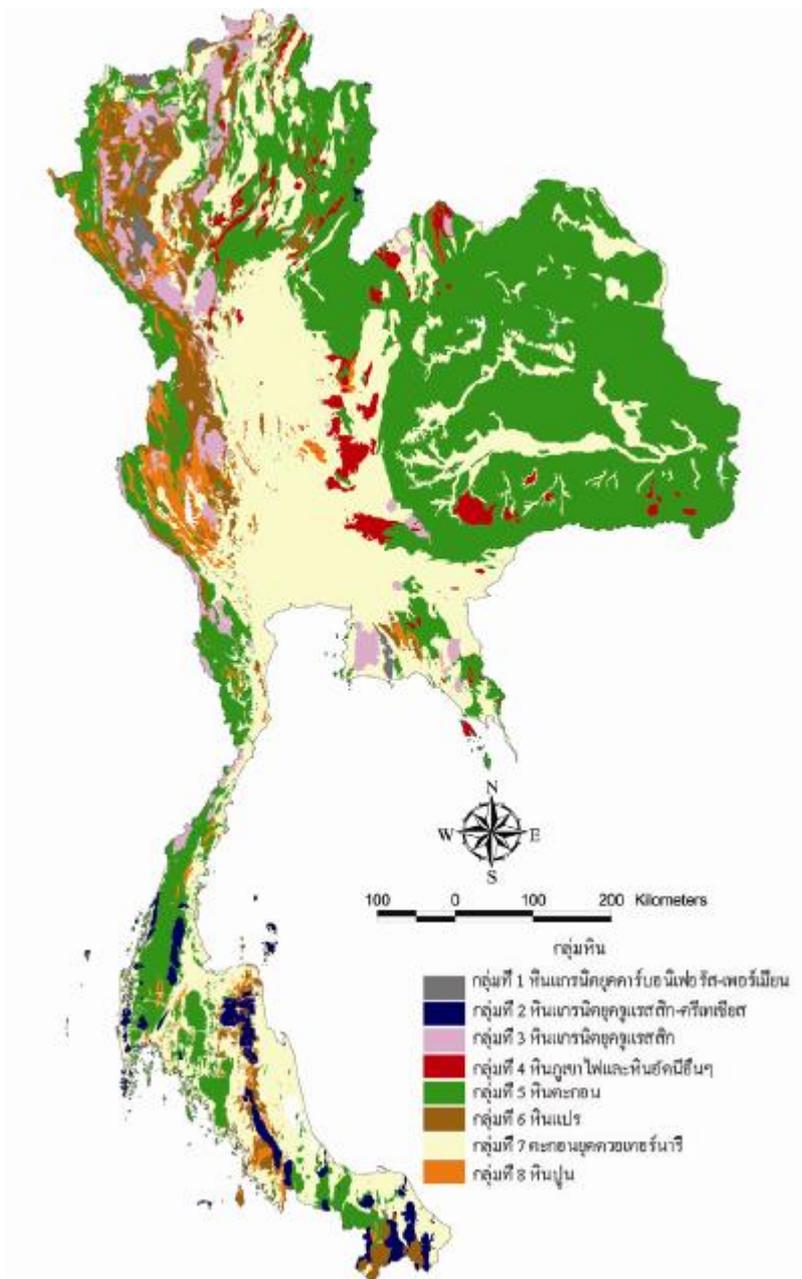
## 2.2 การกำเนิดดิน

ดินคือวัสดุที่เกิดจากการผุสลายของหินต่างๆโดยกระบวนการทางธรรมชาติอยู่บนพื้นผิวโลกซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่ติดกันแน่น (Uncemented Materials) มีขนาดแตกต่างกัน 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) ในขณะที่หินชั้นและหินแปรทำปฏิกริยากับสภาพแวดล้อมเกิดการผุสลายและถูกพัดพาไปตกตะกอนก็จะแปรเปลี่ยน

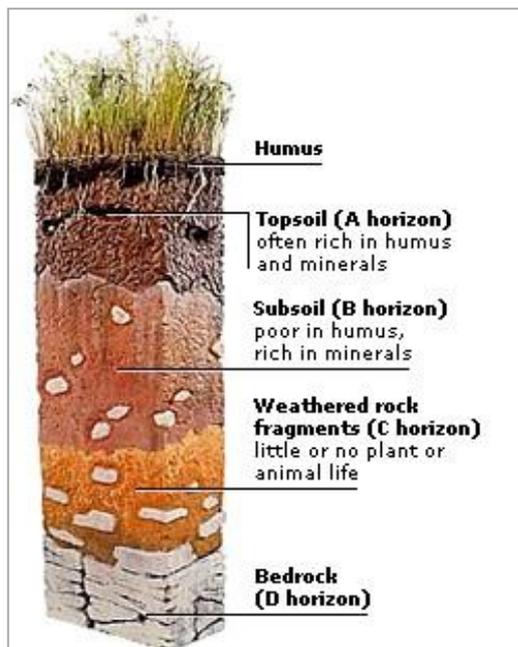
กลับไปเป็นดินตะกอนได้เช่นกัน และเมื่อหินทั้ง 3 คือ หินอัคนี หินชั้น และหินตะกอนได้รับความร้อนและความดันจนหลอมละลายก็จะแปรเปลี่ยนกลับไปเป็นหินชนิดใหม่อีกครั้งเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม  
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2549)



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 กันตามชนิดของตัวกลางและสถานที่ตกตะกอนทับถมกันดังนี้

ก) ดินที่เกิดจากการพัดพาและตกตะกอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Colluvial Soil) ได้แก่ ดินบริเวณเชิงเขาหรือบริเวณที่ลาดชัน อนุภาคเม็ดดินของดินชนิดนี้จะมีขนาดคละกัน โดยมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เนื่องจากมีการขัดสีที่น้อยมากทำให้ยังคงรูปร่างเดิมอยู่ ซึ่งดินประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่ไม่ต่างจากต้นกำเนิดมากนัก

ข) ดินที่ถูกพัดพาไปตกตะกอนด้วยลม (Aeolian Soil) ส่วนใหญ่เกิดกับดินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น ทราย ดินตะกอน ดินเหนียว ตัวอย่างของดินชนิดนี้ได้แก่ เนินทราย (Sand Dune) ซึ่งหมายถึงดินที่ถูกพัดพาไปทับถมกันกองเป็นเนินทรายในบริเวณทะเลทราย เป็นต้น ดินชนิดนี้มักทับถมกันอย่างหลวม ๆ มีช่องว่าง

ระหว่างเม็ดดินมาก มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ง่ายทำให้มีโอกาสเลื่อนไถลของแผ่นดิน (Land Slide) ได้ง่ายเมื่อได้รับความชื้น

ค) ดินที่ถูกพัดพามากับน้ำตามลำน้ำ (Alluvial Soil) เมื่อความเร็วของการไหลของน้ำที่พัดพามา ลดลงจะทำให้เกิดการตกตะกอนของดินทับถมกัน เมื่อดินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจะตกตะกอนก่อน บริเวณต้นน้ำและจะค่อยๆลดขนาดลงมาจนถึงบริเวณปลายน้ำ ดินชนิดนี้จะมีการเรียงตัวมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีขนาดของเม็ดดินที่สม่ำเสมอ ตัวอย่างของดินชนิดนี้ได้แก่ดินทะเลสาบ (Lacustrine Soil) หมายถึงดินที่เกิดจากการพัดพาและตกตะกอนทับถมกันอย่างต่อเนื่องจากแม่น้ำลงสู่ทะเล

ง) ดินที่ถูกพัดพามากับธารน้ำแข็ง (Glacial Soil) ดินประเภทนี้เริ่มจากการผุร่อนของหินด้วยวิธีทางกายภาพและทางปฏิกิริยาทางเคมีแล้วถูกพัดพามาโดยธารน้ำแข็ง เมื่อธารน้ำแข็งละลายก็จะเกิดการตกตะกอนโดยมีขนาดอนุภาคของเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกันดี ดินชนิดนี้ยังมีความหนาแน่นสูงมีการทรุดตัวน้อยแต่จะบวมตัวเมื่อสัมผัสน้ำ

### 2.3 ลักษณะการพิบัติของลาดดิน

เกณฑ์ในการจำแนกชนิดของดินถล่มและการพังทลายของลาดเขามีหลายปัจจัย เช่น ความเร็วและกลไกในการเคลื่อนที่ ชนิดของดินรูปร่างของรอยดินถล่ม และปริมาณของน้ำที่เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการลาดดินถล่มการจำแนกชนิดของดินถล่มที่ใช้กันแพร่หลายได้แก่การจำแนกโดย Varnes, (1975) ซึ่งอาศัยหลักการจำแนก ชนิดของวัสดุที่พังทลายลงมา (Type of material) และลักษณะการเคลื่อนที่ (Type of movement) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

ชนิดของวัสดุของดินถล่มสามารถแบ่งได้เป็นสามกลุ่มหลัก

1. หินคือ มวลแข็งที่มีขนาดใหญ่และยังคงสภาพตามธรรมชาติก่อนการพิบัติ
2. ตะกอนและเศษหินคือ มวลของวัสดุที่ส่วนประกอบหลักมีขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร
3. ดินคือ อนุภาคขนาดเล็ก หรือ มวลรวมหยาบ ซึ่งเกิดจากการพัดพาหรือผุพังจากหินต้นกำเนิด

ชนิดของการเคลื่อนที่ของดินถล่มสามารถแบ่งได้เป็นสามกลุ่มหลัก คือการร่วงหล่น การไถล และการไหล ซึ่งแต่ละชนิดของการเคลื่อนที่จะมีรายละเอียดดังนี้ดังนี้

1. การร่วงหล่น (Falling) การเกิดดินถล่มชนิดนี้ น้ำมีส่วนเกี่ยวข้องน้อย ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะของดินหรือหินที่เกิดการพิบัติ ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1.1. การร่วงหล่น (Falls) เป็นการแยกตัวของมวลดินหรือหินอย่างรวดเร็วตามลาดเขาชันหรือหน้าผาสูงชันโดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก อาจเกิดจากการตกอย่างอิสระหรือมีการกลิ้งลงมาตามลาดเขาพร้อมด้วย การพิบัติลักษณะนี้มีแรงเฉือนเกิดขึ้น และอิทธิพลของน้ำต่อการพิบัติมีค่าน้อยหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้องดังนั้นตะกอนดินหรือหินที่พังทลายลงมาจะกองสะสมกันอยู่

บริเวณเชิงเขาหรือหน้าผานั้นเอง ดังรูปที่ 2.5 ถ้ำดินและตะกอนที่ตกลงมาเป็นดินเม็ดหยาบ เรียกว่า “debris fall” ส่วนตะกอนที่ตกลงมาเป็นดินเม็ดละเอียด เรียกว่า “earth fall”

- ลักษณะการพิบัติ

การพิบัติในลักษณะนี้จะเกิดตามพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง หรือมีลักษณะเป็นหน้าผามวลที่พิบัติจะมีหลากหลายขนาดตั้งแต่มวลดินจนถึงหินขนาดใหญ่หลายลูกบาศก์เมตร

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลดินหรือหินที่พิบัติมีความเร็วสูงถึงสูงมากซึ่งขึ้นกับความชันของลาดดิน และการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นการตกอย่างอิสระ กระเด็น หมุน กิ่ง และจะหยุดการเคลื่อนที่เป็นอยู่ในที่ราบ

- กลไกการพิบัติ

เกิดการแยกตัวของลาดดิน โดยกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น การกัดเซาะ การผุกร่อนของหินหรือดิน แผ่นดินไหว การสั่นสะเทือน หรือการกระทำของมนุษย์

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

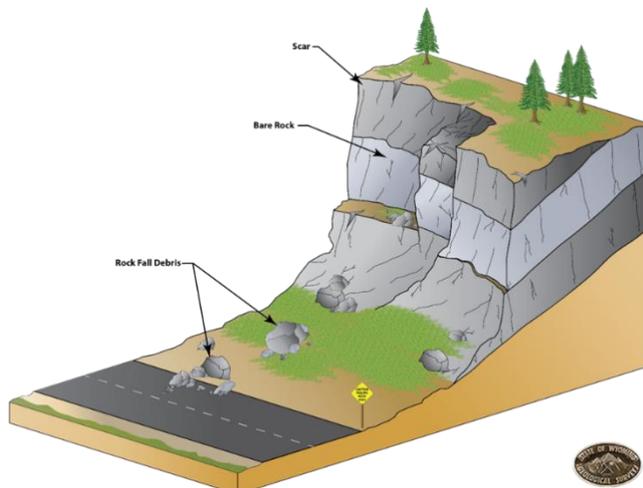
วัตถุที่ร่วงหล่นสามารถก่อให้เกิดอันตรายกับชีวิตหรือความเสียหายกับสิ่งของที่อยู่ในอาณาบริเวณ หรือแนวที่เกิดการร่วงหล่น

- แนวทางการแก้ไข

ก่อสร้างกำแพงตามแนวลาดดินเพื่อป้องกันการร่วงหล่น หรือเสริมกำลังให้แก่ลาดดิน เช่น การทำสลักยึดหิน (rock bolt) ตะปูดิน (soil nail) หรือวิธีอื่นๆที่คล้ายกับการทำตะขอยึดมวลดินบนหน้าผาให้เป็นชิ้นส่วนเดียวกัน ในกรณีที่ตรวจพบสัญญาณการพิบัติของลาดดินจำเป็นจะต้องมีการติดตั้งป้ายเตือนภัย

- การทำนายการพิบัติ

สัญญาณของการเกิดการพิบัติแบบการร่วงหล่นจะต้องพบลาดดินมีลักษณะคล้ายคานยื่น (overhanging rock) หรือรอยแตกในแนวตั้งตามเชิงลาดที่มีชันมาก และอาจจะพบน้ำตามแนวรอยแตกของลาดดิน



รูปที่ 2.5แบบจำลองลักษณะของการร่วงหล่น (L.M. Highland and P. Bobrowsky, 2008)

1.2 การล้มคว่ำ (Topples) เป็นการเคลื่อนที่โดยมีการหมุน หรือล้มคว่ำลงมาตามลาดเขา ซึ่งเป็นผลจากแรงโน้มถ่วงของโลกการล้มคว่ำมักพบในภูมิประเทศในลักษณะหน้าผาดินหรือหินที่มีรอยแตกรอยแยกมาก โดยกระบวนการเกิดดินถล่มมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องน้อย หรือไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังรูปที่ 2.6

- ลักษณะการพิบัติ

การพิบัตินี้สามารถพบได้ตามลาดดินหรือลาดหินที่สูงชันและมีรอยแตกในโครงสร้างดินตามธรรมชาติ

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลดินหรือหินที่พิบัติมีความเร็วช้ามากจนถึงสูงมาก

- กลไกการพิบัติ

การพิบัติเกิดจากแรงโน้มถ่วงโดยมีเกิดการแยกตัวของลาดดินโดยกระบวนการตามธรรมชาติ เช่นการกัดเซาะ การผุกร่อนของหินหรือดิน แผ่นดินไหว การสั่นสะเทือนหรือการกระทำของมนุษย์

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

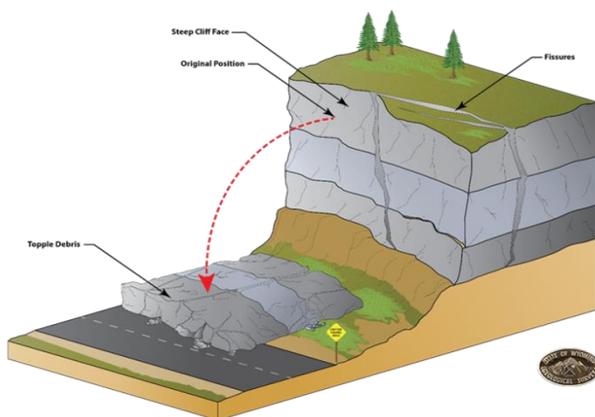
วัตถุที่ร่วงหล่นสามารถก่อให้เกิดอันตรายกับชีวิตหรือความเสียหายกับสิ่งของที่อยู่ในอาณาบริเวณ หรือแนวที่เกิดการร่วงหล่น

- แนวทางการแก้ไข

เสริมเสถียรภาพของเชิงลาดด้วยวัสดุเสริมกำลัง เช่น สลักหินหรือวิธีการที่มีลักษณะเป็นตัวยึด และจะต้องควบคุมระดับน้ำ และการระบายน้ำภายในลาดดิน

- การทำนายการพิบัติ

เพื่อที่จะทำนายการพิบัติจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการตรวจวัดการเคลื่อนที่ เช่น อุปกรณ์วัดความเอียง (tiltmeter) โดยอุปกรณ์นี้จะวัดการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงของลาดดิน



รูปที่ 2.6 แบบจำลองลักษณะของ Topples (Highland and Bobrowsky, 2008)

2. การลื่นไถล (Slides) การเกิดดินถล่มชนิดนี้ที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอสามารถจำแนกตามลักษณะของระนาบการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1. Rotational slide เป็นการลื่นไถลของวัตถุลงตามระนาบของการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะโค้งครึ่งวงกลมคล้ายช้อน (Spoon-shaped) ทำให้มีการหมุนตัวของวัตถุขณะเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างช้าๆ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งลักษณะดังกล่าวมักเกิดขึ้นในบริเวณที่ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) เช่น บริเวณที่ชั้นดินหนามาก หรือ ดินที่นำมาถม เป็นต้น

- ลักษณะการพิบัติ

การพิบัติในลักษณะนี้จะเกิดตามลาดดินที่ดินมีคุณสมบัติคล้ายกันทั้งลาดดิน ดังนั้นการพิบัติมักเกิดบริเวณดินถม

- ขนาดและระดับความเสียหาย

ถ้าความลาดชันของลาดดินประมาณ 20 ถึง 40 องศา รูปร่างการพิบัติจะมีลักษณะคล้ายส่วนของวงกลมโดยมีอัตราส่วนของความลึกต่อความยาวประมาณ 0.3 ถึง 1

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลดินที่พิบัติจะมีความเร็วช้ามาก (0.3 เมตรต่อ 5 ปี) จนถึงสูง (1.5 เมตรต่อเดือน)

- กลไกการพิบัติ

ความชื้นฝนที่สูง หรือระยะเวลาที่ฝนตกเป็นเวลานานเป็นสาเหตุให้มวลดินเกิดการอิมตัวด้วยน้ำและแรงดันและระดับน้ำในมวลดินเพิ่มสูงขึ้น และระดับน้ำในแม่น้ำหรืออ่างเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากฝนทำให้เกิดการกัดเซาะที่ฐานของลาดดิน นอกจากนี้ การพิบัติสามารถเกิดได้จากการเกิดแผ่นดินไหว

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

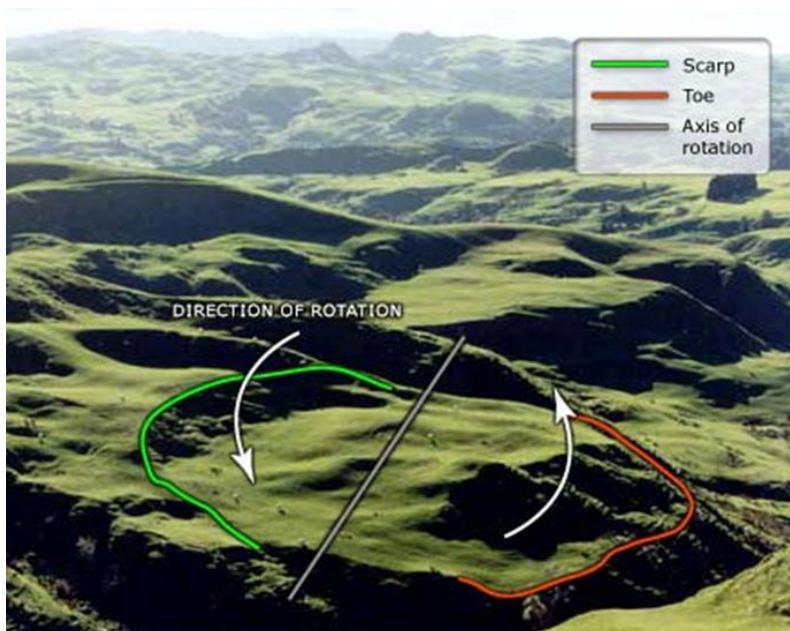
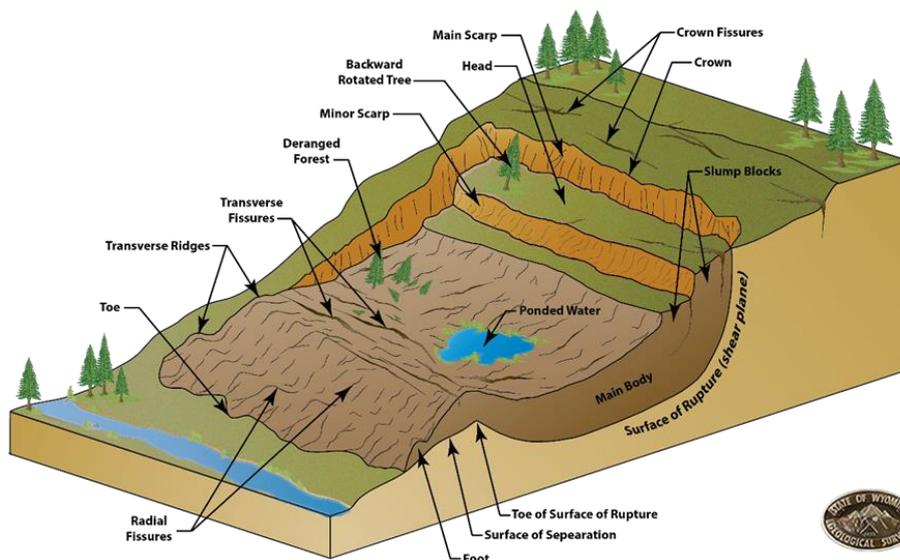
ถ้าการพิบัติของลาดดินมีขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงกับ โครงสร้าง ถนน และชีวิต อย่างไรก็ตามถ้าการพิบัติเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยแต่ หากที่จะจัดการให้ลาดดินเกิดเสถียรภาพอีกครั้ง

- แนวทางการแก้ไข

ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว และอัตราการของลาดดินเพื่อตรวจสอบและประเมินการเกิดลาดดินถล่มจัดการระบบระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพเพื่อลดความเสี่ยงการเกิดลาดดินถล่ม และอาจจะสร้างกำแพงกันดินที่ส่วนล่างของลาดดินเพื่อลดอัตราการเคลื่อนตัวของลาดดิน

- การทำนายการพิบัติ

พื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มในลักษณะนี้มักจะมีการเกิดซ้ำ โดยก่อนเกิดการพิบัติของลาดดิน จะพบ รอยแยกที่ส่วนบนของลาดดินซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการพิบัติ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองลักษณะของ Rotational slide (Highland and Bobrowsky, 2008)

2.2 Translational slide เป็นการลื่นไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างตรงส่วนใหญ่เป็นการเคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ตามระนาบรอยแตก (joint)

ระนาบทิศทางการวางตัวของชั้นหิน (bed) รอยต่อระหว่างชั้นดินและหิน ดังรูปที่ 2.8 ลักษณะการพิบัติ

การพิบัติแบบลื่นไถลเป็นการพิบัติแบบหนึ่งที่พบบ่อย และสามารถพบได้ทุกสภาพแวดล้อมและสภาวะ

- ขนาดและระดับความเสียหาย

โดยทั่วไปการพิบัติแบบลื่นไถลจะพิบัติตื้นกว่าการพิบัติแบบ Rotational slide ระนาบพิบัติจะมีอัตราส่วนของความลึกต่อความยาวน้อยกว่า 0.1 และพื้นที่พิบัติตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ (ความกว้างของการพิบัติหลายกิโลเมตร)

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

อัตราการเคลื่อนที่เริ่มต้นค่อนข้างช้า (1.5 เมตรต่อเดือน) ถึงปานกลาง (1.5 เมตรต่อวัน) และอัตราการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลดินเกิดการแยกตัวและเปลี่ยนสภาพเป็นการไหล (debris flow)

- กลไกการพิบัติ

การพิบัติเกิดจากการที่ความชื้นหรือระดับน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นอันเนื่องจาก หลากหลายสาเหตุ เช่น ฝน น้ำท่วม การรั่วซึมของระบบส่งน้ำ นอกจากนี้การพิบัติอาจมีสาเหตุจากการเกิดแผ่นดินไหว หรือการขุดส่วนฐานของลาดดิน

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

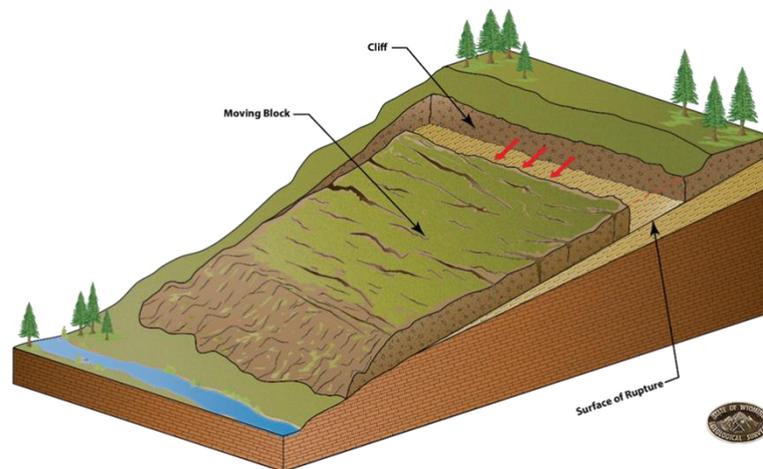
ถ้าการพิบัติของลาดดินมีขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบที่รุนแรงกับ โครงสร้าง ถนน และชีวิตอย่างไรก็ตามถ้าการพิบัติลักษณะนี้จะพิบัติอย่างช้าๆ ในตอนเริ่มต้น

- แนวทางการแก้ไข

จัดการระบบระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพสามารถลดความเสี่ยงการเกิดลาดดินถล่ม และอาจจะสร้างกำแพงกันดินที่ส่วนล่างของลาดดิน นอกจากนี้การติดตั้งสมอหรือเสาเข็มในลาดดินอย่างเหมาะสมตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ สามารถลดความเสี่ยงการเกิดลาดดินถล่มได้ อย่างไรก็ตามการจัดการลาดดินที่มีความลาดชันปานกลางถึงสูงเป็นสิ่งที่ยาก

- การทำนายการพิบัติ

การพิบัติในลักษณะนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการพิบัติซ้ำในพื้นที่พิบัติเดิม รวมถึงพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวบ่อย ๆ การพิบัติจะเริ่มต้นด้วยการเกิดรอยแตกที่ส่วนบนของลาดดินหรือ เกิดการบวมตัวที่ฐานของลาดดิน ซึ่งรูปแบบการพิบัติดังรูปที่ 2.8



**รูปที่ 2.8** แบบจำลองลักษณะของ Translational slide (Highland and Bobrowsky, 2008)

2.3 การแผ่อกทางด้านข้าง (Lateral spread) ส่วนใหญ่จะเกิดบนพื้นราบหรือพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อย โดยชั้นดินจะประกอบด้วยตะกอนขนาดละเอียดมากการเกิดส่วนมากเกี่ยวข้องกับกระบวนการ liquefaction เมื่อชั้นตะกอนละเอียดที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีพฤติกรรมเหมือนของไหลเนื่องจากอิทธิพลของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวหรือจากการที่มีหินหรือดินที่แข็งและไม่อุ้มน้ำวางตัวทับอยู่บนชั้นดินที่อุ้มน้ำเมื่อชั้นดินที่อุ้มน้ำถูกทับด้วยน้ำหนักที่มากก็จะไหลออกด้านข้าง ทำให้ชั้นดินชั้นหินที่อยู่ด้านบนแตกออกและยุบตัว ดังรูปที่ 2.9

- ลักษณะการพิบัติ

การพิบัติเกิดขึ้นเมื่อดินเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และพบได้ในพื้นที่เกิดแผ่นดินไหว

- ขนาดและระดับความเสียหาย

พื้นที่เกิดการพิบัติอาจจะพบตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และรอยแตกทำให้ดินเกิดการแผ่ออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งการแผ่กระจายอาจจะมีควมกว้างหลายร้อยเมตร

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

อัตราการเคลื่อนที่อาจจะช้าถึงปานกลาง และอัตราการเคลื่อนที่จะเร็วเมื่อถูกกระตุ้น เช่นแผ่นดินไหว การแผ่กระจายอาจจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ (มิลลิเมตรต่อวัน) จนถึงปานกลาง (เมตรต่อวัน) ตลอดเวลา

- กลไกการพิบัติ

กระบวนการเกิดการพิบัติในชั้นดินอ่อนประกอบด้วย

- การเกิดดินเหลวในชั้นดินอ่อนเนื่องจากแผ่นดินไหว
- น้ำหนักกระทำบนชั้นดินมีค่าสูงกว่าความสามารถรับน้ำหนักของดิน
- ความชื้นในมวลดินของชั้นดินอ่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากฝนหรือการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน
- การเกิดดินเหลวในชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความไวตัวสูง

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

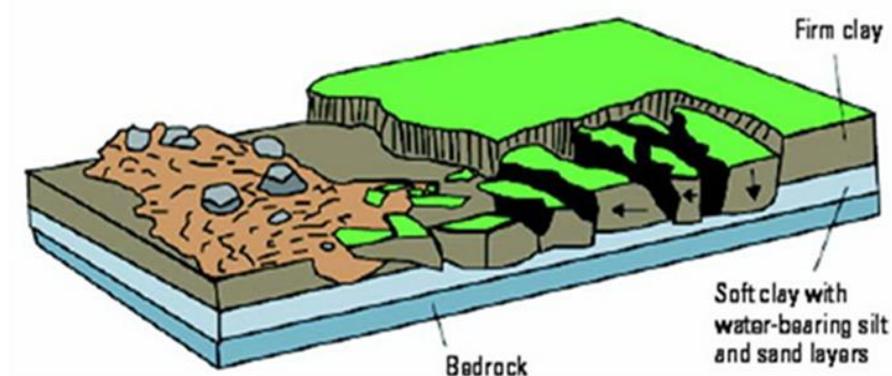
การพิบัติของขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงกับโครงสร้าง ถนน และชีวิตอัตราการแผ่กระจายจะขึ้นกับปริมาณน้ำในมวลดิน การไหลแผ่ด้านข้างอาจจะเป็นสาเหตุของการเกิดดินไหล (earth flow)

- แนวทางการแก้ไข

พื้นที่ที่ดินสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะของไหลได้ (Liquefaction) และมีแนวโน้มการเกิดแผ่นดินไหว ควรหลีกเลี่ยงการก่อสร้าง และถ้าระดับน้ำใต้ดินมีระดับสูงจำเป็นต้องมีการจัดการระบบระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพ

- การทำนายการพิบัติ

มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการพิบัติซ้ำในพื้นที่เดิมที่มีประวัติการพิบัติ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ดินสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะของไหลได้ (Liquefaction) นอกจากนี้ดินที่เกิดการไหลแผ่ด้านข้างอย่างรุนแรง ดินจะมีส่วนประกอบของดินเหนียวรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.9 แบบจำลองลักษณะของ Lateral spread (Highland and Bobrowsky, 2008)

2.4 การเคลื่อนที่ของมวลดิน (Soil creep) เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินอย่างช้าๆ เนื่องจากกระบวนการสูญเสียแรงต้านทานการไหล ของชั้นดินส่งผลให้เกิดแรงผลักดันให้ชั้นดินมีการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ แต่ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการพังทลายของมวลดิน ซึ่งหลักฐานที่ใช้ในการสังเกต คือแนวร้วหรือกำแพงและหรือต้นไม้ที่ขึ้นในบริเวณนั้นมีการเอียงตัวหรือบิดเบี้ยวไปจากเดิม รูปที่ 2.10 โดยทั่วไปการคืบของมวลดินมีลักษณะคือ

1. การคืบตามฤดูกาล ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น
2. การคืบอย่างต่อเนื่องมีสาเหตุจากความเค้นเฉือนในมวลดินมากกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลดิน
3. การพิบัติแบบก้าวหน้าซึ่งเป็นการพัฒนาจากการคืบในสองลักษณะแรกไปสู่การพิบัติ

- ลักษณะการพิบัติ

การพิบัติเกิดขึ้นเมื่อดินเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และพบได้ในพื้นที่เกิดแผ่นดินไหว

- ขนาดและระดับความเสียหาย

พื้นที่เกิดการพิบัติอาจจะพบตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และรอยแตกทำให้ดินเกิดการแผ่ออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งการแผ่กระจายอาจจะมี ความกว้างหลายร้อยเมตร

- ความเร็วของการเคลื่อนที่

อัตราการเคลื่อนที่อาจจะช้าถึงปานกลาง และอัตราการเคลื่อนที่ จะเร็วเมื่อถูกกระตุ้น เช่น แผ่นดินไหว การแผ่กระจายอาจเกิดการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ (มิลลิเมตรต่อวัน) จนถึงปานกลาง (เมตรต่อวัน) ตลอดเวลา

- กลไกการพิบัติ

กระบวนการเกิดการพิบัติในชั้นดินอ่อนประกอบด้วย

- การเกิดดินเหลวในชั้นดินอ่อนเนื่องจากแผ่นดินไหว
- น้ำหนักกระทำบนชั้นดินมีค่าสูงกว่าความสามารถรับน้ำหนักของดิน
- ความชื้นในมวลดินของชั้นดินอ่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากฝนหรือการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน
- การเกิดดินเหลวในชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความไวตัวสูง
- เกิดการทรุดตัวอย่างรุนแรงในชั้นดิน

- ผลกระทบ (ทางตรงและทางอ้อม)

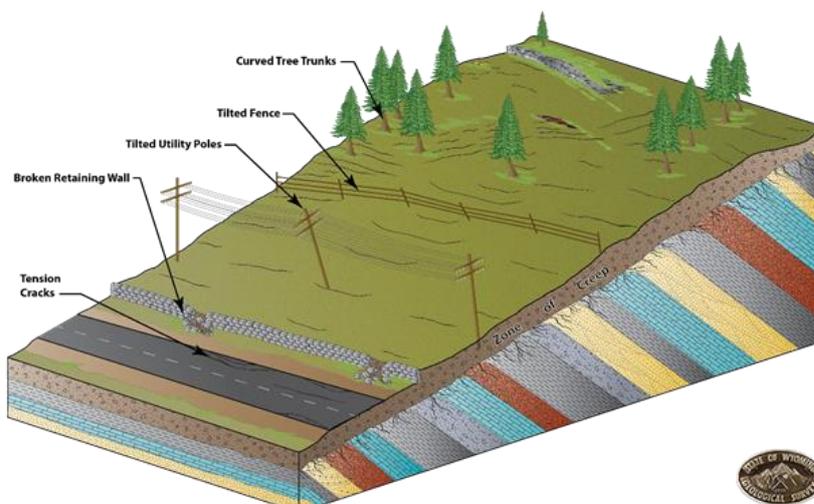
การพิบัติของขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง ถนน และชีวิต อัตราการแผ่กระจายจะขึ้นกับปริมาณน้ำในมวลดิน การไหลแผ่ด้านข้างอาจจะเป็นสาเหตุของการเกิดดินไหล (earth flow)

- แนวทางการแก้ไข

พื้นที่ที่ดินสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะของไหลได้ (Liquefaction) และมีแนวโน้มการเกิดแผ่นดินไหว ควรหลีกเลี่ยงการก่อสร้าง และถ้าระดับน้ำใต้ดินมีระดับสูงจำเป็นต้องมีการจัดการระบบระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพ

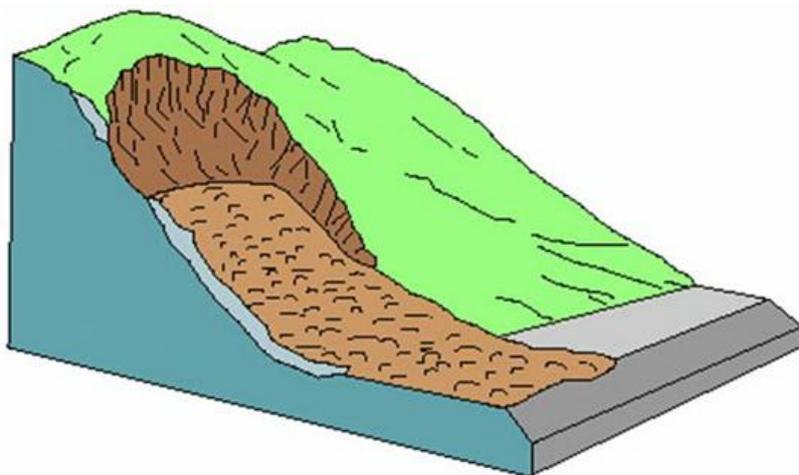
- การทำนายการพิบัติ

มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการพิบัติซ้ำในพื้นที่เดิมที่มีประวัติการพิบัติ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ดินสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะของไหลได้ (Liquefaction) นอกจากนี้ดินที่เกิดการไหลแผ่ด้านข้างอย่างรุนแรง ดินจะมีส่วนประกอบของดินเหนียวรวมอยู่ด้วย



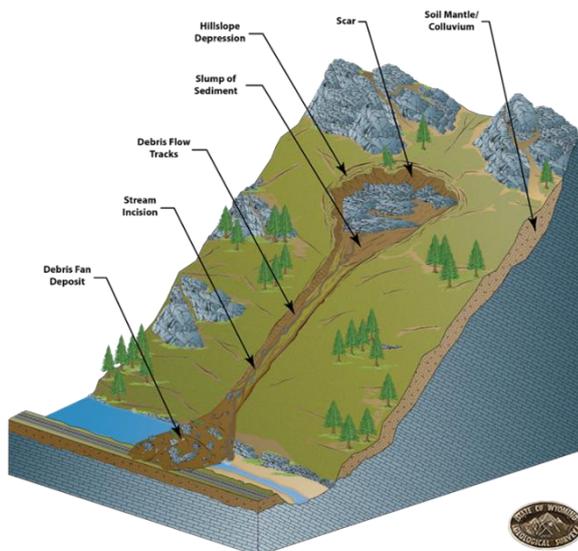
รูปที่ 2.10 แบบจำลองลักษณะของ Soil creep (Highland and Bobrowsky, 2008)

3. การไหล (Flows) เป็นกระบวนการเกิดดินถล่มมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องมากที่สุด น้ำทำให้ตะกอนมีลักษณะเป็นของไหลและเคลื่อนที่ไปบนพื้นระนาบลาดเขาลงไปกองทับถมกันที่ช่วงล่างของลาดเขาหรือเชิงเขาตะกอนอาจเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางไกล และความเร็วในการเคลื่อนที่อาจสูงมากถ้าลาดเขามีความชันสูง ดินถล่มชนิดนี้ยังแบ่งตามชนิดของตะกอนได้เป็น 4 ชนิด คือ
  - 3.1. Avalanche flow เป็นการเคลื่อนที่ลงมาตามลาดเขาของมวลดินที่ประกอบด้วยตะกอนหลายขนาดปนกันและมีขนาดร่องรอยของดินถล่มที่ใหญ่บางแห่งขนาดความกว้างมากกว่า 3 กิโลเมตร (L.M. Highland and P. Bobrowsky, 2008) ดังรูปที่ 2.11



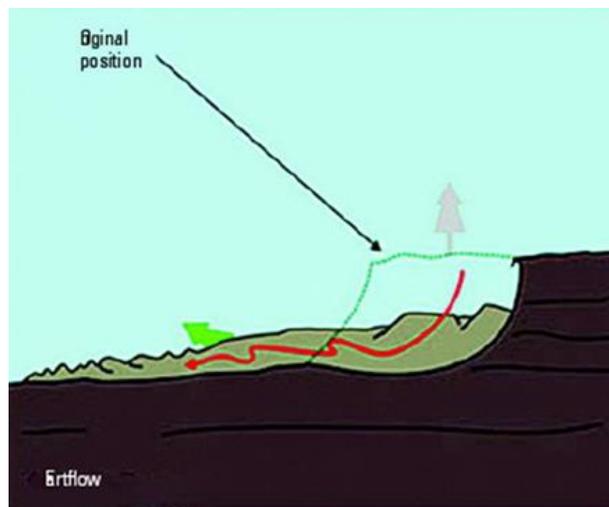
รูปที่ 2.11 แบบจำลองลักษณะของ Avalanche flow (Highland and Bobrowsky, 2008)

- 3.2. Debris flow ตะกอนที่ไหลลงมาจะมีอนุภาคหลายขนาดปะปนกันทั้งตะกอนดิน หินและซากต้นไม้และมักเกิดขึ้น ตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็ก ๆ บนลาดเขาโดยมีน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกลงมาอย่างหนักในช่วงฤดูฝนของแต่ละพื้นที่เป็นตัวกลางพัดพาเอาตะกอนดินและหิน รวมถึงซากต้นไม้ต้นหญ้าไหลมารวมกันก่อนที่จะไหลลงมากระทบถล่มกันบริเวณที่ราบเชิงเขาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัดหน้าหุบเขาดังรูปที่ 2.12
- 3.3. Mud flow มีกระบวนการเกิดเช่นเดียวกับ Debris flow แตกต่างกันที่ขนาดของตะกอนแบบ Mud flow จะมีขนาดเล็กกว่าตะกอน Debris flow คือประกอบไปด้วยตะกอนดินและมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอาจสูงถึงร้อยละ 60



รูปที่ 2.12 แบบจำลองลักษณะของ Debris flow (Highland and Bobrowsky, 2008)

- 3.4. Earth flow เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินที่ประกอบด้วยตะกอนขนาดละเอียดจำพวกดินเหนียว ดินทรายแป้ง ตามพื้นที่ที่มีความลาดชันไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13แบบจำลองลักษณะของ Earth flow (Highland and Bobrowsky, 2008)

#### 2.4 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน (Shear Strength Theory)

มวลดินเมื่อมีแรงมากกระทำ เช่น น้ำหนักจากดินชั้นบนที่กดทับ หรือมีแรงภายนอกมากกระทำ มวลดินจะออกแรงต้านเพื่อรักษาสมดุลของแรงในมวลดินเอาไว้ และเมื่อแรงที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจนมวลดินไม่สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงที่มากกระทำมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนในดินมวลดิน (Shear Stress,  $\tau$ ) มวลดินก็จะเกิดการเคลื่อนตัวหรือเกิดการพิบัติ (Failure) ซึ่งการพิบัติจะมีลักษณะเกิดขึ้นเป็นระนาบของมวลดินแยกจากกัน ระนาบที่เกิดการพิบัตินี้คือระนาบที่มวลดินสามารถต้านทานแรงเฉือนได้ต่ำที่สุด

Coulomb (1776) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใดๆ ของมวลดินในรูปของสมการเชิงเส้นตรงแสดงขอบเขตการพิบัติของมวลดิน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อ	$\tau$	=	หน่วยแรงเฉือนที่จุดพิบัติหรือ ค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)
	$\sigma$	=	หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)
	$c$	=	การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)
	$\phi$	=	มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal Friction Angle)

และสามารถเขียนในนิพจน์ของหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดังสมการที่ 2.2

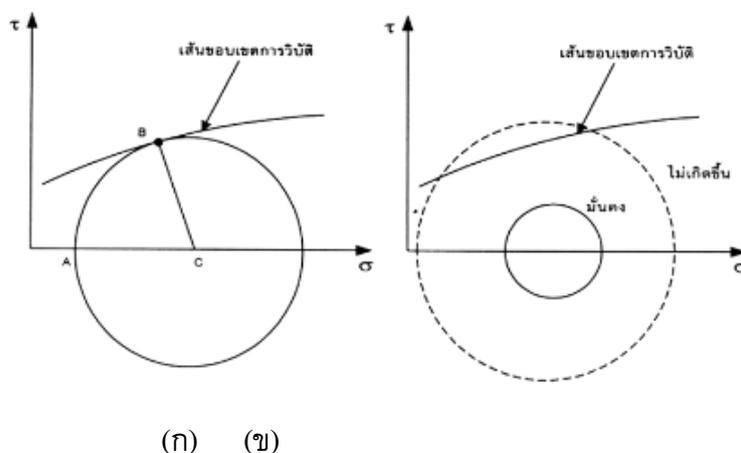
$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

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

ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shearing Resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal Friction) และการยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยค่าความต้านทานแรงเฉือนของมวลดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณร้อยละของเม็ดดินหยาบ เม็ดดินละเอียดและปริมาณความชื้นที่อยู่ในมวลดิน สำหรับดินเม็ดหยาบที่ไม่มีการยึดเกาะกัน (Cohesion Less Soil) เช่น กรวดทราย จะมีอัตราส่วนของน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวมากกว่าเม็ดดินละเอียดทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน สำหรับดินเม็ดละเอียดที่มีการยึดเกาะกัน (Cohesion Soil) เช่น ดินเหนียว จะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวมากกว่าดินทรายค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินจึงขึ้นอยู่กับค่าการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้าตามผิวเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน

การพิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับกฎการพิบัติที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (Mohr and Coulomb) ซึ่งกำหนดไว้ว่า มวลดินจะเริ่มเกิดการพิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่แทนสภาพของหน่วยแรงใน

มวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการพิบัติ (Failure Envelop) พอดีดังรูปที่ 2.14 (ก) แต่หากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการพิบัติมวลดินก็ยังสามารถรับแรงได้ไม่พิบัติดังรูปที่ 2.14 (ข)



รูปที่ 2.14 เงื่อนไขการพิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (วิศิษฐ์, 2540)

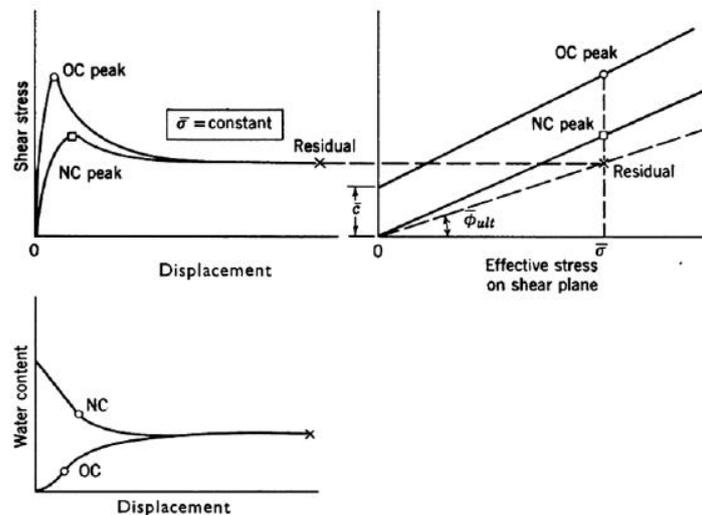
การเลือกใช้ค่ากำลังของดินเพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะต้องพิจารณาถึงลักษณะของหน่วยแรงซึ่งมีทั้งหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผล หน่วยแรงที่นำมาวิเคราะห์จึงควรมีลักษณะที่สอดคล้องกับสถานะของลาดดิน

วารากร (2542) อธิบายว่าการเลือกใช้ค่ากำลังเงื่อนไขของดินในการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์แบ่งลักษณะการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวม และวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล โดยถ้าสามารถวัดค่าความดันน้ำเพื่อที่จะสามารถแยกหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากความดันน้ำออกไปได้ เนื่องจากแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังทำให้คงเหลือแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินเท่านั้นเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress,  $\sigma'$ ) แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าความดันน้ำให้ถูกต้อง ดังนั้นในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำที่ชัดเจนมักผนวกความดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total Stress,  $\sigma$ ) สำหรับค่ากำลังของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

1.  $S_u$  หรือ Undrained Shear Strength สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวและมีการก่อสร้างโดยเร็วหรือพิบัติแบบทันทีทันใด ( $\phi = 0$  Condition)
2.  $c_u$ ,  $\phi_u$  หรือ Total Strength สำหรับดินชั้นไม่อิ่มตัวและไม่ทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ดินบดอัดในขณะก่อสร้างเขื่อนหรือคันดิน
3.  $c'$ ,  $\phi'$  หรือ Effective Strength สำหรับดินอิ่มตัวและสามารถทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ก่อสร้างเสร็จนานแล้วกำลังใช้งานและมีความดันน้ำเข้าสู่สภาพสมดุลหรือมีน้ำไหลผ่านคงที่

## 2.5 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง

ในการทดสอบหาค่ากำลังรับเฉือนของดินซึ่งในขณะที่ดินกำลังถูกทำการทดสอบภายในมวลดินจะมีแรงต้านทานการเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งการทดสอบโดยทั่วไปมักจะหยุดดำเนินการต่อเมื่อผลการทดสอบแสดงค่ากำลังสูงสุด(Peak Strength) อย่างชัดเจน แต่หากทำการทดสอบต่อเนื่องไปจนเลยจุดซึ่งเป็นค่ากำลังสูงสุดจะพบว่าค่าแรงต้านทานการเฉือนในมวลดินจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งคงที่ซึ่งเป็นแรงต้านทานการเฉือนที่น้อยที่สุดซึ่งเรียกว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) ในมวลดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง (Lambe and Whitman, 1979)

Timothy et al. (2005) ได้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินว่าในกรณีลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติ (Old Land Slide) แนวเฉือนพิบัติมักจะเกิดขึ้นในแนวผิวการเฉือนที่มีอยู่ก่อนแล้วซึ่งควรที่จะใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์ (Residual Strength Condition)

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

## 2.6 การลดลงของกำลังเฉือนกับเสถียรภาพของลาดดิน

ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดินทำให้กำลังเฉือนของดินลดลงส่งผลโดยตรงกับเสถียรภาพของลาดดินตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การก่อสร้างที่มีการตัดลาดดินในช่วงฤดูแล้งซึ่งดินมีความชื้นน้อยกำลังเฉือนของดินสูงลาดดินยังมีเสถียรภาพมั่นคงอยู่ได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปเข้าสู่ฤดูฝนในขณะที่ฝนตกทำให้ความชื้นในลาดดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลา

ที่มีปริมาณน้ำฝนมากจนกำลังเฉือนของดินไม่อาจต้านทานแรงที่กระทำได้ก็จะก่อให้เกิดการพิบัติของลาดดิน

Soralump and Kulswan (2006) ได้ทดสอบกำลังเฉือนของดินด้วยวิธีเฉือนตรงที่สภาวะความชื้นธรรมชาติและสภาวะชุ่มน้ำโดยการทดสอบมีชื่อว่า ดัชนีการลดกำลัง (Strength Reduction) โดยผลการทดสอบพบว่าดินผุจากจากหินแกรนิตคูมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินผุจากหินโคลนและหินดินดานมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 และดินผุจากหินทรายมีการลดลงของกำลังเฉือนอยู่มากกว่าร้อยละ 50

เสถียรภาพลาดดินเป็นการพิจารณาสัดส่วนของแรงต้านทาน (Resisting Force) กับแรงขับ (Driving Force) ที่กระทำกับมวลดิน ค่าเสถียรภาพจะลดลงเมื่อแรงขับมากขึ้นหรือแรงต้านลดลงเมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้านก็จะทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน การลดลงของกำลังเฉือนในดิน (Shear Strength Reduction) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน โดยกำลังเฉือนของดินที่ลดลงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

#### 2.6.1 กำลังเฉือนที่ลดลงชั่วคราว

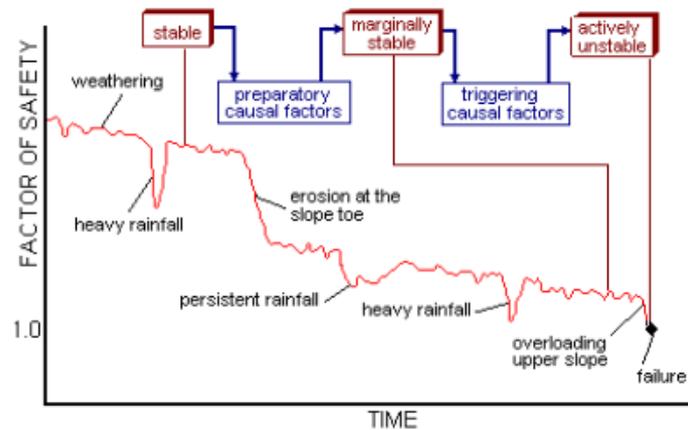
สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นเดิมซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสภาวะที่ฝนตกและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลงเพราะน้ำได้เข้าไปทำลายแรงดึงดูดของอากาศในดินและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้หน่วยแรงตั้งฉากในดินลดลงเนื่องมาจากแรงลอยตัว (Uplift Pressure) ทำให้กำลังเฉือนจากแรงเสียดทานในดินลดลง โดยกำลังเฉือนที่ลดลงจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความชื้นในดินลดน้อยลงหรือระดับน้ำลดลงตามลำดับ

#### 2.6.2 กำลังเฉือนที่ลดลงถาวร

เมื่อดินถูกแรงเฉือนกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกินกำลังต้านทานสูงสุด (Peak Strength) มวลดินจะเกิดการเลื่อนตัวของดินในแนวพิบัติ ค่ากำลังเฉือนของดินจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เกิดการเลื่อนตัวจนกระทั่งเหลือแรงต้านทานที่น้อยที่สุดและคงที่ที่ค่ากำลังคงค้างของดิน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างเดิมของดินถูกทำลายเนื่องจากการเลื่อนตัวของดินในแนวพิบัติ เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือนทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง

Price (2006) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ที่ช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Short Term) มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในดินและระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลโดยเฉพาะในช่วงที่ฝนตกหนัก (Heavy Rainfall) จะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงมากแต่เมื่อปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้วอัตราส่วนความปลอดภัยก็กลับมาเพิ่มขึ้นได้อีกในขณะที่เดียวกันการไหลของน้ำบริเวณพื้นผิวดินยังสามารถกัดเซาะหรือชะล้างหน้าดินทำให้เป็นการลดอัตราส่วนความปลอดภัยลงอย่างช้าๆแต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากการ

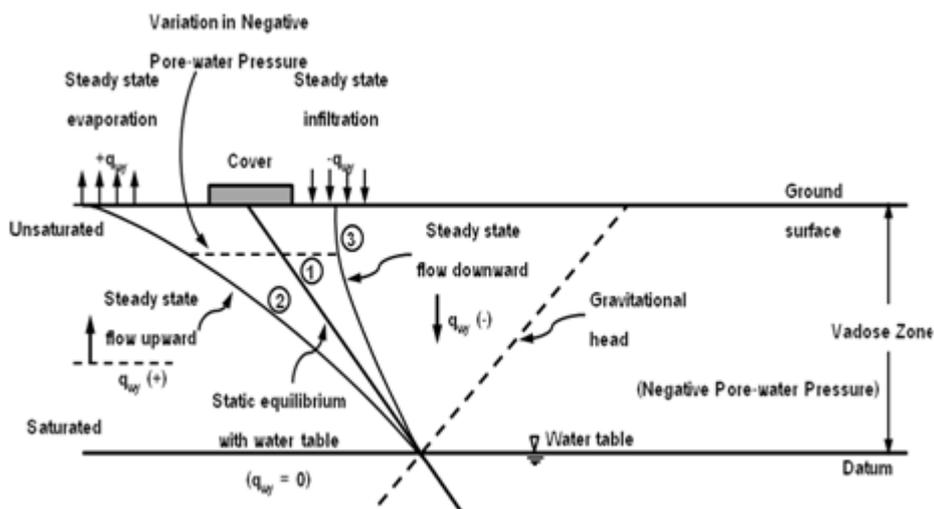
กัศเขาที่ฐานล่างของลาดดิน (Slope Toe) จะทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงและไม่อาจกลับเพิ่มขึ้นได้ หากไม่มีการซ่อมแซมลาดดินบริเวณดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของสภาวะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินกับการพิบัติของลาดดิน (Price, 2006)

### 2.7 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

โดยทั่วไปสภาพพื้นดินตามธรรมชาติจะประกอบไปด้วยชั้นดินต่างๆที่วางตัวซ้อนทับกันลึกลงไปจากผิวดิน (Ground Surface) และจะมีระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) วางตัวอยู่ ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินที่อยู่ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินเต็มไปด้วยน้ำหรือเพิ่มขึ้นตามความลึกของระดับน้ำเรียกว่า มวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) ซึ่งจะส่งผลให้ดินในส่วนนี้จะมีแรงดันน้ำที่เป็นบวก ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือจากชั้นระดับน้ำใต้ดิน (Vadose Zone) จะประกอบไปด้วยดินอิมตัว (Capillary Saturated Zone) และดินที่ไม่อิมตัว (Unsaturated Zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 หากไม่มีน้ำซึมลงมาหรือระเหยขึ้นไปจากผิวดินและระดับน้ำใต้ดินคงที่แล้วเส้นแรงดันน้ำจะสมดุลที่เส้น (1) ในขณะที่เส้น (2) และ (3) หมายถึงมีการระเหยในฤดูแล้งและการมีน้ำซึมลงมาในฤดูฝนตามลำดับ โดยที่ทั้ง 3 กรณีจะมีแรงดันน้ำที่เป็นลบทั้งสิ้น

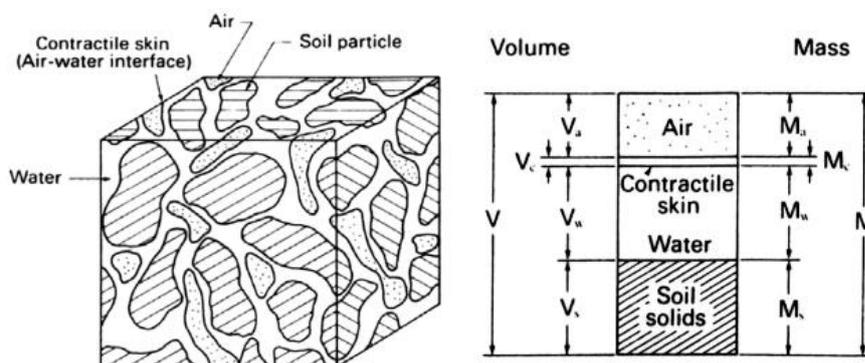


รูปที่ 2.17 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)

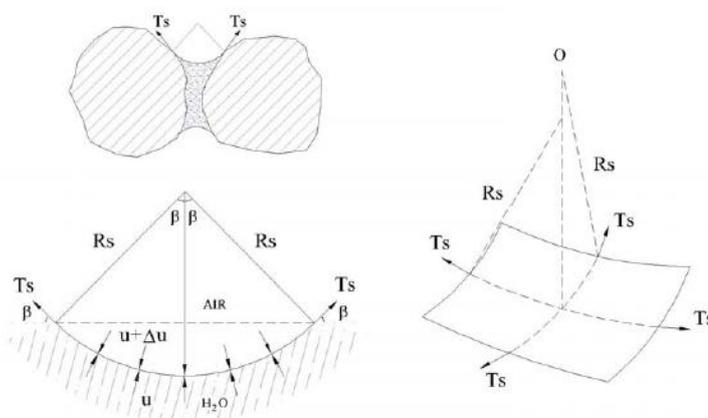
มานะ (2541) อธิบายว่าดินสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีอากาศสอดแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน ลักษณะน้ำในมวลดินจะไม่ต่อเนื่องกัน โดยจะมีแรงดึงผิวที่เกิดจากผลต่างของแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดินอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดดิน

Fredlund and Morganstern (1977) เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์หน่วยแรงในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำว่าดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีส่วนประกอบ 4 ส่วนคือเม็ดดิน น้ำอากาศและContractile Skin ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.18

Fredlund and Rahardjo (1993) กล่าวว่า ความแตกต่างระหว่าง Saturated Soil กับ Unsaturated Soil มี 2 ส่วนใหญ่ๆคือส่วนประกอบของดินกับแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดิน โดยที่ผิวของContractile Skin จะมีผลต่างของแรงดันอากาศและแรงดันน้ำในมวลดิน ( $u_a - u_w$ ) หรือMatric Suction ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยผลต่างของแรงดันอากาศกับแรงดันน้ำในมวลดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลดินและจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.18 ภาพจำลองส่วนประกอบของดิน Unsaturated Soil (Fredlund and Morganstern, 1977)



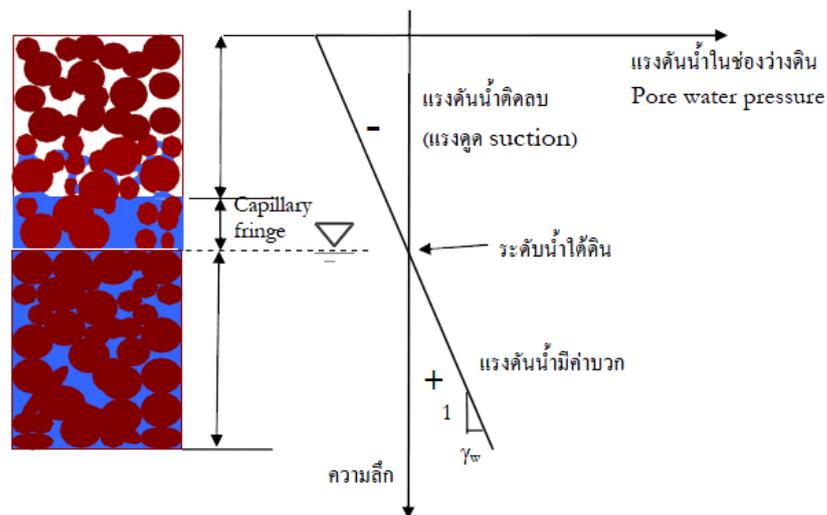
รูปที่ 2.19 แสดงแรงดันและแรงดึงที่ผิวเม็ดดิน Contractile (Fredlund and Rahardjo, 1993)

Matric suction มีหน่วยเดียวกับแรงดัน (เช่นกิโลปาสกาลหรือบาร์) แต่ต่างจากแรงดันเนื่องจากมีค่าเป็นลบค่าแรงดูดเมทริกนี้แปรผกผันกับปริมาณความชื้นในดินเช่น ในกรณีที่น้ำอยู่ในสภาวะสถิตย์ (Hydrostatic) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) จะอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่างแรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่าแรงดูดเมทริก (Matric Suction,  $s$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3

$$s = (u_a - u_w) \quad (2.3)$$

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

ในสภาวะที่ค่า  $u_a$  ของดินมีค่าเท่ากับศูนย์และค่าแรงดูดเมทริกที่วัดได้ก็คือค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะของแรงดันน้ำในสภาวะสถิตย์ (อกินิตติ, 2549)

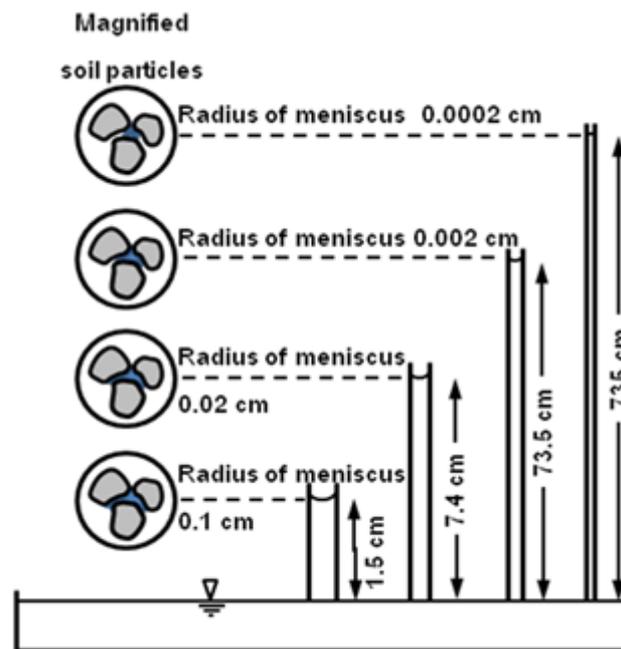
หลังจากฝนตกและน้ำส่วนหนึ่งระบายออกไปจากมวลดินแล้วมวลดินนั้นจะยังคงเป็นมวลดินที่มีความชื้นอยู่ต่อไปอีกระยะหนึ่งการที่น้ำบางส่วนยังสามารถอยู่ในช่องว่างของมวลดินโดยไม่ระบายออกไปจนหมดแสดงว่ามวลดินมีแรงดูดยึดต่อน้ำจำนวนนั้น แรงดูดยึดนี้อาจแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. แรงดูดเมทริก (Matric Suction) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของเม็ดดินหรือแรงดึงที่ยึดน้ำไว้กับเม็ดดินซึ่งเกิดจาก 2 ส่วนด้วยกันคือ

1.1 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับโมเลกุลของน้ำบนผิวอนุภาคเม็ดดิน โดยเฉพาะผิวอนุภาคที่มีประจุเกิดจากสมบัติมีขั้วของโมเลกุลของน้ำการดูดซับนี้มักเกิดขึ้นในขณะที่ดินมีระดับความชื้น

ค่อนข้างต่ำและอาจเกิดขึ้นได้ในอีกกรณีคือเมื่ออนุภาคดินมีไอออนบวกถูกดูดซับอยู่และไอออนเหล่านั้นดูดซับโมเลกุลของน้ำเอาไว้ล้อมรอบตัวมันเอง (Water of Hydration)

1.2 แคลพิลลารีตี (Capillarity) เป็นแรงดึงน้ำซึ่งเกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำที่เป็นผลรวมระหว่างความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของน้ำและการประสาน (Adhesion) ระหว่างน้ำกับผิวของอนุภาคดินตรงผิวของน้ำ (Air-Water Interface) ปรากฏการณ์นี้สังเกตได้จากเมื่อจุ่มหลอดเล็กๆ ที่ผนังด้านในเปียกน้ำลงไป ในน้ำผิวเรียบจะพบว่า มีน้ำบางส่วนถูกดึงดูดขึ้นไปขังอยู่ในหลอด จะสังเกตเห็นว่าผิวของน้ำในหลอดจะเว้าลงไป ในน้ำและความโค้งของผิวน้ำกับความสูงของน้ำที่ขังอยู่ในหลอดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดหรือรัศมีของหลอดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากปรากฏการณ์นี้ทำให้ทราบว่าความสูงของน้ำในหลอดกับความโค้งของผิวน้ำในหลอดแคลพิลลารีตีมีความสัมพันธ์กับรัศมีของหลอดซึ่งสามารถใช้ได้กับดิน โดยที่ดินมีรูพรุนเป็นช่องแทรกตัวอยู่ทั่วไปทั้งในเม็ดดินและระหว่างเม็ดดินถึงแม้ช่องในดินจะมีรูปร่างและความต่อเนื่องที่แตกต่างจากหลอดแคลพิลลารีตีมากแต่สามารถนำปรากฏการณ์แคลพิลลารี (Capillarity Phenomenon) มาใช้กับดินได้



รูปที่ 2.21 ขนาดรัศมีของส่วนโค้งผิวน้ำที่มีผลต่อ Capillary Force (Janssen and Dempsey, 1980)

2. การดูดผ่านช่องเล็กๆ (Osmotic Suction) คือน้ำในดินมีสารละลายอยู่หลายชนิดละลายหรือแขวนลอยอยู่ ไอออนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนบวกจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวนอกของดินเหนียวที่มีประจุเป็นลบและทำให้ความเข้มข้นของไอออนในชั้นของไอออนบวกที่ถูกดูดซับสูงกว่าในสารละลายรวม (Bulk Solution) ถ้าความชื้นของดินค่อนข้างต่ำอนุภาคดินเหนียวมีโอกาสทับซ้อน (Overlap) ซึ่งกันและกันและทำให้สารละลายในระหว่างชั้นทั้งสองนั้นเข้มข้นยิ่งขึ้น สารละลายที่เข้มข้นจะมีการดูดแบบออสโมติกสูงถ้านำมาสัมผัสกับน้ำบริสุทธิ์ผ่านเมมเบรนกึ่งซึมได้ (Semipermeable Membrane) น้ำจะเคลื่อนตัวผ่าน

เมมเบรน (Membrane) ไปหาสารละลายนั้น ๆ ปรากฏการณ์นี้ก็สามารถใช้ได้กับดินคือถ้าสารละลายในบริเวณการดูดซับ (Adsorption Zone) ของอนุภาคดินเหนียวเข้มข้นมากดินนั้นจะมีแรงดึงดูดน้ำที่เพิ่มขึ้นและน้ำที่ถูกดึงดูดเข้าไปในระหว่างดินเหนียว 2 แผ่น ที่เรียงซ้อนกันจะดันให้ดินเหนียวพองตัวทำให้แรงยึดเกาะภายในมวลดินมีค่าลดต่ำลง

ปรากฏการณ์หลักๆที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดูดเมทริกนี้มีอยู่ 2 ปรากฏการณ์ด้วยกันคือการดูดซับและแรงดึงผิวคาปิลลารีอย่างไรก็ตามศักย์หรือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินซึ่งเรียกว่าแรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักย์ในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองได้มากไปด้วยโดยทั่วไปแล้วจะสามารถพิจารณาแรงดูดทั้งสองชนิดรวมกันเรียกว่าแรงดูดรวม (Total Suction) ดังสมการที่ 2.4

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

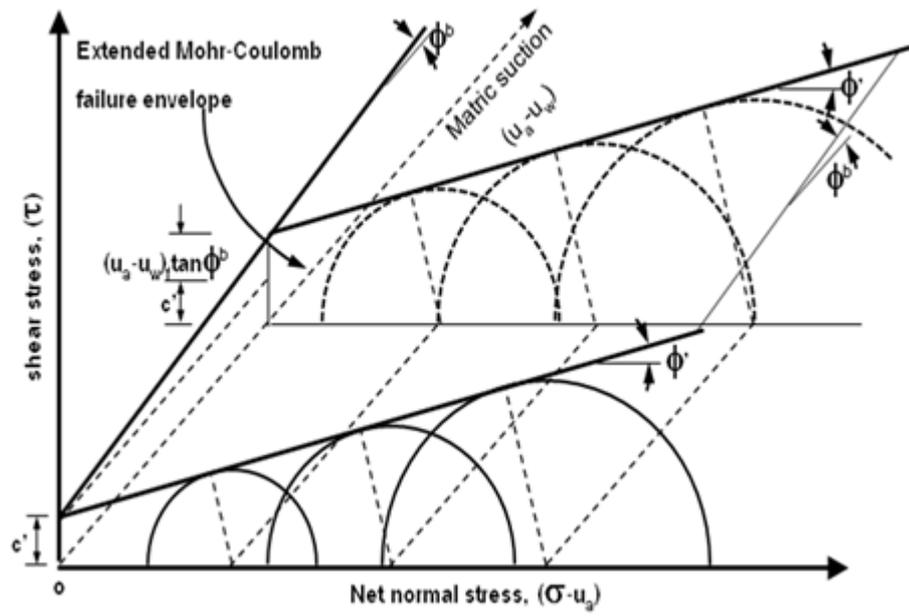
เมื่อ	$(u_a - u_w)$	=	Matric Suction
	$u_a$	=	แรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore-Air Pressure)
	$u_w$	=	แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure)
	$\pi$	=	Osmotic Suction

Fredlund (1993) พบว่าในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีส่วนที่ประกอบด้วยแรงดันของน้ำและอากาศดังในสมการที่ 2.5 โดยมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงดังรูปที่ 2.22 โดยที่  $\phi^b$  เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction กับ Cohesion ( $c'$ ) คือ ถ้ายังมีค่า Matric Suction มากขึ้นค่า  $\phi^b$  ก็จะมากขึ้นด้วยและในกรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว  $\phi' = \phi^b$  ซึ่งก็จะได้สมการในรูปของสมการหน่วยแรงประสิทธิผลดังสมการที่ 2.6

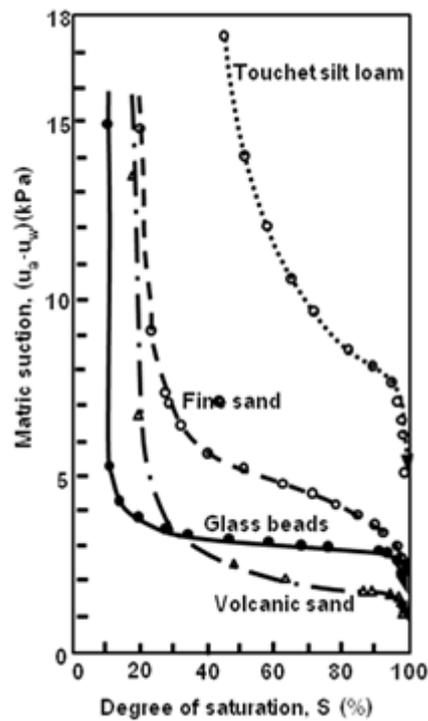
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.5)$$

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

จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าระดับความอิ่มตัวของน้ำมีความสำคัญต่อหน่วยแรงในมวลดินทั้งแรงดันอากาศในช่องว่างดิน (Pore-Air Pressure) และแรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับของ suction ยังขึ้นกับชนิดของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยความสัมพันธ์นี้ส่งผลให้เห็นว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงเฉือนของมวลดิน



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil(Fredlund,1993)

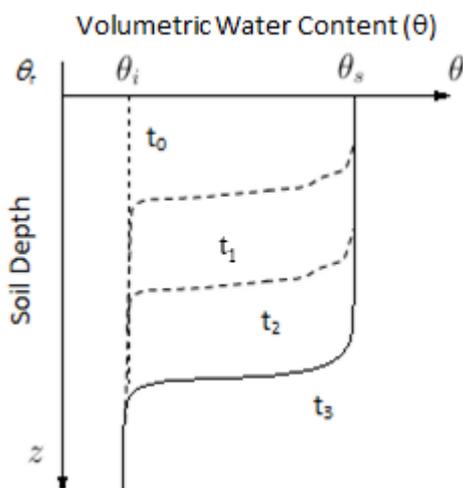


รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอืดตัวของดินแต่ละชนิดกับค่า Matric suction (Fredlund, 1993)

## 2.8 กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดิน (Infiltration Process)

กระบวนการซึมน้ำลงสู่ดินเริ่มต้นขึ้นเมื่อมีน้ำหรือน้ำฝนตกลงสู่ผิวดินน้ำจะซึมผ่านผิวดินและแทรกซึมลงสู่ดินชั้นล่างด้วยอิทธิพลของแรงดึงดูดความชื้นในมวลดินจนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำจากนั้นแรงดึงดูดของโลกจะทำให้น้ำไหลซึมลึกกลงไปในดิน

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Green and Ampt ซึ่งเสนอไว้ในปี 1911 มาพิจารณาการไหลซึม (Infiltration) โดยกำหนดให้ดินมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (Homogeneous) ทันทีเมื่อฝนตก ให้ดินมีอัตราการไหลซึม (Hydraulic Conductivity,  $K$ ) เท่ากับความเข้มข้นน้ำฝนแต่ไม่มากกว่าอัตราการไหลซึมขณะที่ดินอิ่มตัว (Saturated Hydraulic Conductivity,  $K_s$ ) และปริมาณความน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยในช่วงเริ่มต้นที่เวลา  $t_0$  ปริมาณความน้ำในดินจะเท่ากับ  $\theta_i$  ตลอดความลึกและมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ  $\theta_r$  และเมื่อฝนตกในอัตราคงที่น้ำในมวลดินจะเพิ่มขึ้นทันที เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในมวลดินก็จะคงที่และขยายขอบเขตสู่ชั้นดินด้านล่าง



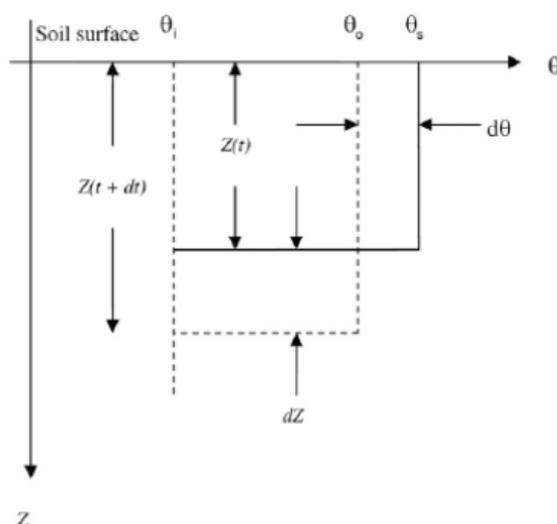
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน (ศุนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)

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 2.25



รูปที่ 2.25 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินในกรณีฝนตกไม่คงที่

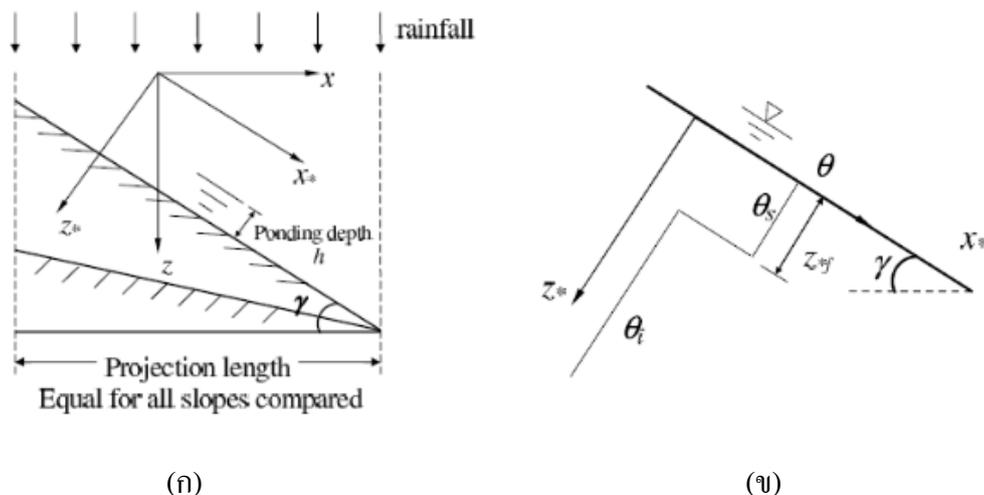
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)

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 $\theta_i$

Li and Young (2006) ได้นำแบบจำลองของ Green and Ampt มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) ซึ่งการวิเคราะห์ดำเนินการเช่นเดียวกันกับในแนวราบโดยหมุนแกนจากพิกัด X-Z ซึ่งเป็นแนวราบและแนวตั้งตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงไปเป็น X\*-Z\* ซึ่งเป็นแกนขนานกับลาดเอียงที่มีมุมความลาดชันเท่ากับ  $\gamma$  และใช้แบบจำลองของ Green and Ampt ในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข) ซึ่งการวิเคราะห์หาความลึกของดินด้านเปียกบนพื้นที่ลาดเอียงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.26 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินบนลาดเอียง

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 $Z^*$
	$\gamma$	=	มุมของลาดเอียง
	$S_f$	=	$H_0 - H_f$
	$H$	=	ความลึกของน้ำกรณีที่มีน้ำท่วมผิวดิน

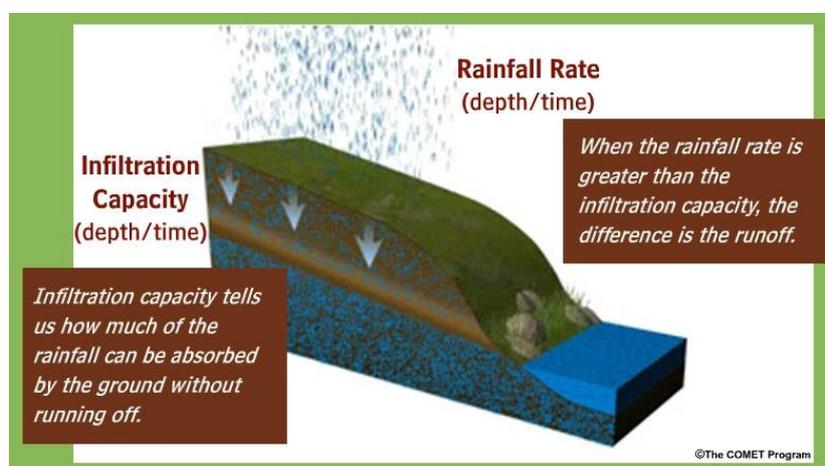
### 2.8.1 สิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านผิวดิน

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

#### 1) สภาพน้ำที่ผิวดินและปริมาณน้ำที่ตกลงบนผิวดิน

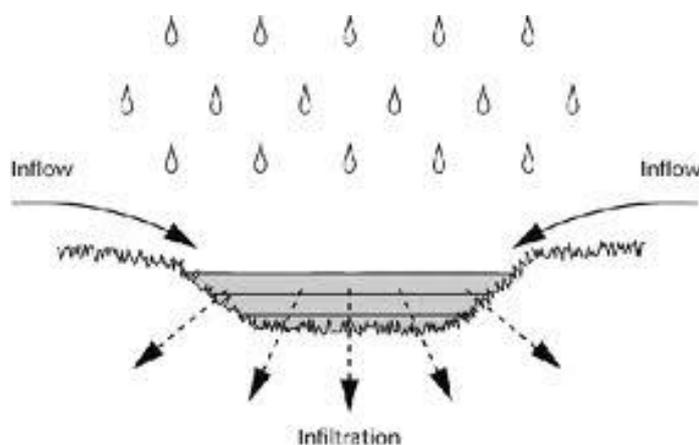
อัตราการซึมน้ำลงดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างโดยสภาพน้ำที่ผิวดินและปริมาณน้ำที่ตกลงบนผิวดินจะเป็นตัวหนึ่งที่กำหนดว่าน้ำจะซึมลงดินอย่างไรซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

ก) สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว (No Ponding) ในสภาพที่ไม่มีน้ำขังอยู่บนผิวดินในช่วงที่ฝนเริ่มตกหรือช่วงเริ่มให้น้ำอัตราการซึมลงดินจะเท่ากับอัตราการให้น้ำที่ผิวดินแต่จะมีปริมาณไม่เกินอัตราการซึมลงดินสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.27 หากอัตราที่น้ำตกลงบนผิวดินมากกว่าอัตราการซึมลงดินสูงสุดแล้วน้ำก็จะเริ่มขังที่ผิวดิน



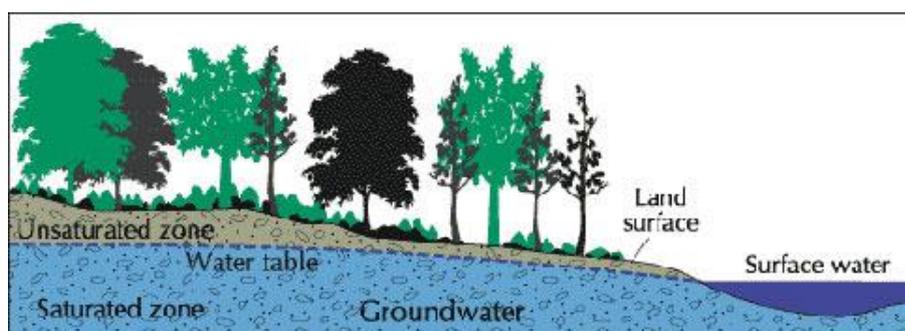
รูปที่ 2.27 สภาพที่ไม่มีน้ำขังที่ผิว (<https://www.meted.ucar.edu/loginForm.php>, 2003)

ข) สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน (Saturation From Above) ในสภาพที่มีน้ำขังอยู่บนผิวดินอัตราการซึมน้ำลงดินจะเท่ากับการซึมน้ำลงดินสูงสุดแต่จะมีปริมาณไม่เกินอัตราการตกของน้ำที่ผิวดินดังแสดงในรูปที่ 2.28 หากอัตราที่น้ำตกลงผิวดินน้อยกว่าอัตราการซึมลงดินสูงสุดแล้วน้ำก็จะซึมลงดินจนกระทั่งไม่มีน้ำขังบนผิวดินการซึมน้ำลงดินจะเปลี่ยนกลับเป็นสภาพแรก



รูปที่ 2.28 สภาพมีน้ำขังที่ผิวดิน (Environment Agency,2006)

ค) สภาพดินด้านล่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation From Below) หากดินชั้นล่างที่ลึกลงไปอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วไม่ว่าจะมีน้ำขังบนผิวดินหรือไม่จะไม่มีน้ำซึมลงดินอีกดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 สภาพดินด้านล่างอิ่มตัวด้วยน้ำ(<http://www.groundwater.org/gi/whatisgw.html>,2011)

### 2) ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity)

อัตราการซึมน้ำลงดินสูงสุด (Infiltration capacity) จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาซึ่งจะลดลงถึงค่าต่ำสุดและจะคงที่โดยค่าต่ำสุดนี้จะใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมน้ำของดินอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งความสามารถในการซึมน้ำจะขึ้นอยู่กับเนื้อดินเป็นหลัก

### 3) ปริมาณความชื้นในช่องว่างเม็ดดิน

เมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามแต่ในทางตรงข้ามจะมีผลทำให้แรงดึงน้ำ(Suction)ในดินลดลง หรือเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นการซึมน้ำลงดินก็จะลดลง ในกรณีที่สภาพดินชั้นล่างมีชั้นน้ำใต้ดินตื้นหรือมีน้ำใต้ดินไหลมาเพิ่มจากพื้นที่อื่นจะมีผลให้ชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำสูงขึ้นมาใกล้ผิวดินจนทำให้น้ำไม่สามารถซึมลงได้อีก

#### 4) ความลาดชันและความขรุขระของผิวดิน

ความลาดชันและความขรุขระของผิวดินมีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำข้างบนผิวดินในสภาพผิวดินที่ไม่มีน้ำข้างอัตราการซึมน้ำลงดินจะมีค่ามากกว่าอัตราการตกของน้ำที่ผิวดิน และในกรณีที่มีน้ำข้างบนผิวดินการซึมน้ำลงดินจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการตกของน้ำที่ผิวดินพื้นที่ซึ่งมีความลาดชันสูงและไม่มีสิ่งปกคลุมจะมีปริมาณน้ำผิวดินมากและไหลอย่างรวดเร็วซึ่งในทางตรงข้ามจะมีปริมาณน้ำที่ซึมลงดินน้อย

#### 5) คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สารอินทรีย์วัตถุบางชนิดในดินมีลักษณะเป็นมันเมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะยึดน้ำไว้ที่ผิวแทนที่จะปล่อยให้ซึมลงไปตามช่องว่างของดิน กระบวนการในลักษณะนี้มีอิทธิพลต่อการซึมไม่มากนักในพื้นที่ป่าธรรมชาติแต่ในกรณีที่เกิดไฟป่าพื้นที่เปลี่ยนสภาพเป็นดิน โลงทำให้สารเหล่านี้ขึ้นมาสะสมบริเวณผิวดินซึ่งมีผลทำให้อัตราการซึมลงดินลดลงอย่างมากการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินซึ่งเรียกว่าแรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักยภาพในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองได้มากไปด้วย

#### 6) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ

คุณสมบัติของน้ำทั้งในด้านแรงตึงผิว (Surface Tension) ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อการไหลของน้ำในดินซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนืดของน้ำซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำมาก ๆ มีผลให้อัตราการซึมน้ำลงดินลดลง

## 2.9 การไหลของน้ำในดิน

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

Darcy (1856) ได้เสนอว่าอัตราการไหลเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน (Hydraulic Conductivity,  $k$ ) กับสัดส่วนของพลังงานกับระยะการไหล (Hydraulic Gradient,  $i$ ) ดังสมการที่

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

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

สัมประสิทธิ์การซึมน้ำเป็นความสัมพันธ์เฉพาะดินอุ่มตัว โดยในสมการข้างต้นสามารถเขียนในรูปทิศทางของ x หรือ z ได้ โดยเครื่องหมายลบในสมการหมายถึงการไหลของน้ำที่มีทิศทางทำให้ Hydraulic Head ลดลง

ในบางปัญหาของการไหลที่ซับซ้อนสามารถนำสมการความต่อเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์การไหล โดยเมื่อพิจารณาจากชิ้นส่วนเล็กๆของการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ในทิศทาง x, y และ z ชิ้นส่วนจะมีความกว้าง dx, dy และ dz อัตราการไหลจะได้  $v_{wx}$ ,  $v_{wy}$  และ  $v_{wz}$  ตามลำดับให้ทิศทางเป็นบวกเมื่อการไหลของน้ำเป็นบวกในทิศทาง x, y และ z ซึ่งสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.11 และสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 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 ทิศทางทั้งหมดดังสมการที่ 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  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่

2.14

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

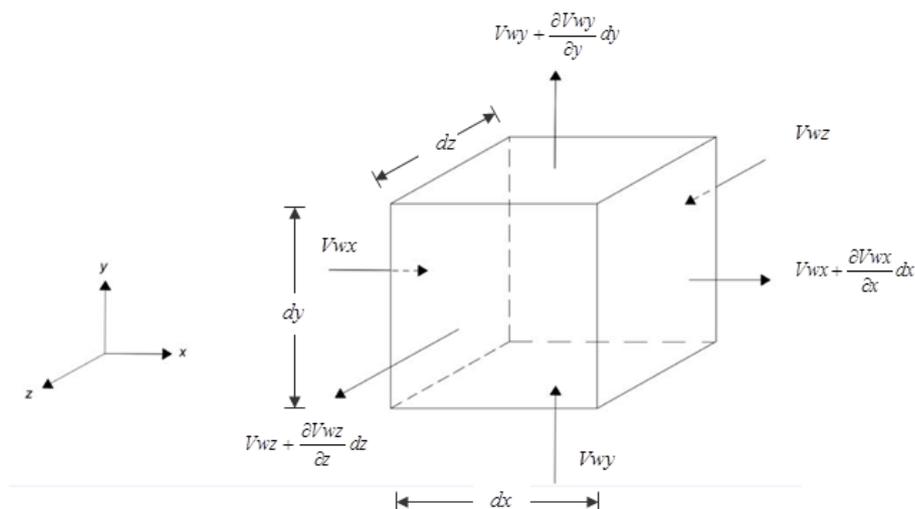
จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ในสมการ 2.10 เมื่อแทนค่า  $v_{wx}$ ,  $v_{wy}$  และ  $v_{wz}$  ลงในสมการที่ 2.14 จะได้สมการที่ 2.15

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

เมื่อสัมประสิทธิ์การซึมน้ำเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Permeability) จะได้ว่า  $k_{wx} = k_{wy} = k_{wz}$  เขียนให้อยู่ในรูปของ Laplace's Equation ได้ดังสมการที่ 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 ทิศทางดังสมการที่ 2.17



รูปที่ 2.30 การไหลของน้ำผ่านชิ้นส่วนเล็ก ๆ ในระบบ 3 แกน

## 2.10 การประมาณเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน Soil-Water Characteristic Curve

เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน 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 สามารถทดสอบหาค่าได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะให้ความแม่นยำสูง แต่วิธีนี้จะใช้เวลาทดสอบนานและมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งนี้ยังมีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีประมาณค่าจากคุณสมบัติของดินทางกายภาพโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่ให้ค่าตัวแปรซึ่งมีความถูกต้องน้อยกว่าการทดสอบจริงแต่สามารถนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว

Brook & Corey (1964) ได้เสนอความสัมพันธ์ของเส้นอรรถลักษณะของน้ำ Soil-Water Characteristic Curve ในลักษณะ Power Law เขียนได้ดังสมการที่ 2.18

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

เมื่อ	$\theta$	=	ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน
	$\theta_{sat}$	=	ความชื้นโดยปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัว
	$\theta_r$	=	ความชื้นโดยปริมาตรที่สภาวะความชื้นคงค้าง
	$s^b$	=	ค่าแรงดึงที่อากาศเริ่มเข้าไปในตัวอย่างดิน Air Entry
	$\lambda$	=	ตัวแปรที่ใช้แสดงถึงความชันของกราฟเมื่อดินแห้งลงจุด Air Entry

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

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

เมื่อ	$\theta$	=	ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน
-------	----------	---	----------------------------

$\theta_s$	=	ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว
$\theta_r$	=	ความชื้นโดยปริมาตรที่สภาวะความชื้นคงค้าง
$\alpha$	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน
$n$	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงอัตราการลดลงของความชื้นในดินหลังจากจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างของมวลดิน
$m$	=	ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงจุดที่ความชื้นคงค้างในมวลดิน $m = 1 - 1/n$
$h$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction)

Fredlund and Xing (1994) เสนอว่าเส้นอรรถลักษณะของน้ำ Soil-Water Characteristic Curve สามารถประมาณได้จากขนาดของเม็ดดินและความหนาแน่นของดินโดยสมมติว่าเม็ดดินเป็นทรงกลมและ Metric Suction เท่ากับ Capillary Force ซึ่งจะเป็นผลดีกับดินเม็ดหยาบ โดยเฉพาะดินทราย (Sand) ดินตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) ที่มีช่วงแรงดูดของดินอยู่ระหว่าง  $0-10^6$  กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 2.31 โดยสมการของ Soil-Water Characteristic Curve เขียนได้ดังสมการที่ 2.20

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

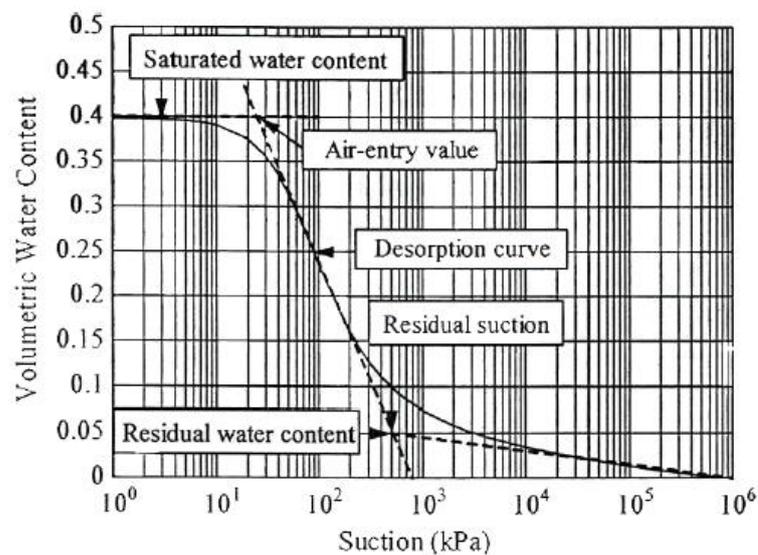
โดย  $C(\psi)$  คือ Correction Function

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

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

เมื่อ	$\theta_i$	=	ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรที่จุดเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟ (Inflection Point)
	$\psi_i$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟ (Inflection Point)
	$\theta_s$	=	ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรที่จุดความชื้นคงค้างในดิน

- $\psi_s$  = แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดความชื้นคง  
ค้างในดิน
- $a$  = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟ  
ด้านบน
- $n$  = ตัวแปรกำหนดจุดที่กราฟมีความชันสูงสุด
- $m$  = ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟ  
ด้านล่าง
- $s$  = ความชันของ (Tangent Line)



รูปที่ 2.31 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve (Punrattanasin, 2002)

Fredlund et al. (1997) ได้เสนอการประมาณเส้นอรรถลักษณะจากการกระจายตัวของเม็ดดิน Grain-Size Distribution Curve ดังสมการที่ 2.21 ซึ่งรูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve แสดงในรูปที่ 2.32

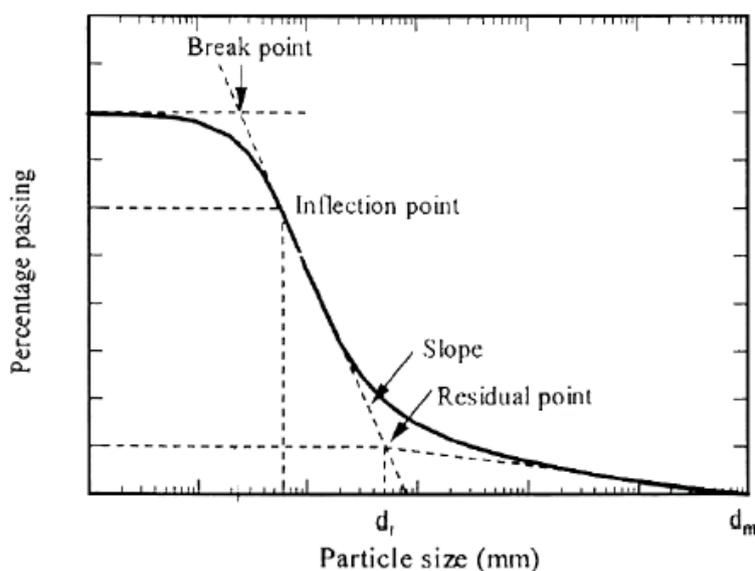
$$P(d) = C(d) \frac{100}{\ln[e + (a/d)^n]^m} \quad (2.21)$$

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 2.32 รูปแบบของ Grain-Size Distribution Curve (Punrattanasin, 2002)

พฤติกรรมการไหลซึมของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนอกจากจะขึ้นอยู่กับเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve) แล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) โดยความสัมพันธ์นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดน้ำในมวลดิน (Matric Suction) และค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity) ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถสังเกตได้จากเมื่อความชื้นในมวลดินเปลี่ยนไปค่าแรงดูดน้ำจะเปลี่ยนไปตามความชื้นด้วยส่งผลให้ความชื้นน้ำมีค่าเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

Brooks and Corey (1964) ได้พัฒนาสมการเพื่อใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินจากทฤษฎีของ Burdine (1953) ในรูปของสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขณะความชื้นใด ๆ กับขณะอิ่มตัว โดยเสนอออกมาในรูปความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับความชื้นในดินและพลังงานกำกับก่อนดินตั้งสมการที่ 2.22

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

Van Genuchten (1980) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำคล้ายกับสมการของ Brooks and Corey ดังสมการที่ 2.23

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

โดยที่	$K_{\theta}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินที่ระดับความชื้นใดๆ (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$K_s$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินอิ่มตัว (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$S_e$	=	สัดส่วนความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน
	$\psi_{\theta}$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่ความชื้นใดๆ
	$\psi_{ae}$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ของน้ำขณะที่ช่อง อากาศของดินติดต่อกันเป็นครั้งแรกหลังจากที่มี การระบายน้ำออกจากดินอิ่มตัว
	$\lambda, m$	=	ค่าคงที่ของสมการ
	$c$	=	ดัชนีความไม่ต่อเนื่องของช่องว่างในดิน

## 2.11 การเก็บตัวอย่างดิน

### 2.11.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

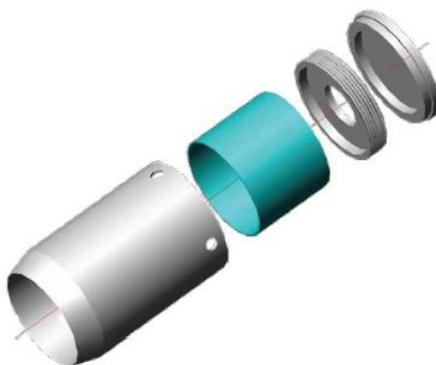
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนามบางครั้งไม่สามารถทำได้โดยตรงทั้งนี้อาจจะมาจากความซับซ้อนในกระบวนการทดสอบหรืออุปกรณ์เครื่องมือไม่สามารถเคลื่อนย้ายนำไปทดสอบในสนามได้จึงต้องทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ โดยดินที่จะใช้ทดสอบจะต้องคงสภาพเดิมเช่นเดียวกับดินที่อยู่ในสนามเพื่อที่จะให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้พัฒนาอุปกรณ์ชุดเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่มีชื่อเรียกว่า KU – Miniature Sampler ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.33 การเก็บตัวอย่างทำได้โดยใช้ตุ้มน้ำหนักตอกเหล็กทรงกระบอกที่มีความบางซึ่งทนต่อแรงกระแทกตกลงไปในดินเพื่อตัดดินรอบๆตัวอย่างให้ขาด จากนั้นจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากกันกับดินด้านล่าง ขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกล่องเนียน (Shear box) เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินเสียหายขณะแต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด (สุทธิศักดิ์และคณะ,

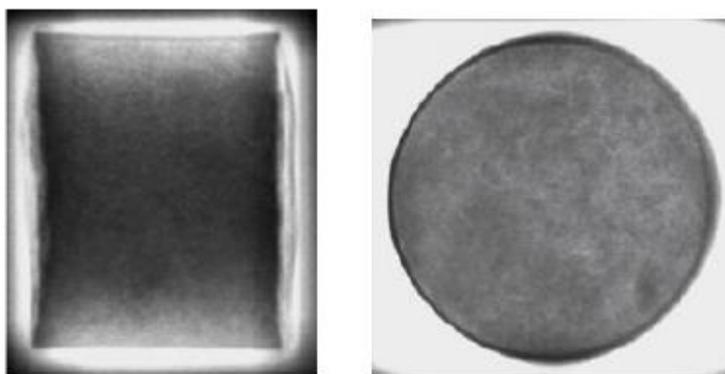
2550) ผลจากการตรวจสอบตัวอย่างดินที่เก็บด้วยเครื่องมือดังกล่าวโดยการX-Ray พบว่าตัวอย่างมีการถูกรบกวนน้อยดังรูปที่ 2.34

## 2.12 การทดสอบกำลังของดิน

การทดสอบกำลังของดินสามารถทำการทดสอบได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้การทดสอบในสนามจะเป็นการทดสอบดินเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจริงที่สุด ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทดสอบในกรณีที่มีค่าตัวแปรและเงื่อนไขบางอย่างที่ซับซ้อนไม่สามารถทดสอบในสนามได้ เช่น การควบคุมความชื้น การระบายน้ำ หรือระยะเวลาที่ยาวนานในการทดสอบ เป็นต้น การทดสอบกำลังของดินสามารถแบ่งได้ดังนี้



รูปที่ 2.33 ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU- Miniature Sampler (วรากรและคณะ, 2548 )



รูปที่ 2.34 การ X – Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU – Miniature (สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2550 )

### 2.12.1 การทดสอบในสนาม

1) การทดสอบด้วยวิธีห้อยเบ้า (Kunzelstab Penetration Test) การทดสอบด้วยวิธีห้อยเบ้า Kunzelstab Penetration Test หรือวิธี Light Ram Sounding Test เป็นวิธีการห้อยทดสอบชั้นดินในสนามโดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไปโดยจะไม่เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ก้านเจาะ เนื่องจากหัวเจาะห้อย (Cone Head) มีขนาดใหญ่กว่าก้านเจาะ โดยหัวเจาะจะเป็นรูปกรวยปลายแหลมทำมุม 60 องศา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ก้านเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ค้อนตอกหนัก 10 กิโลกรัมมีระยะยก 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.35 ทำการทดสอบโดยนับจำนวนครั้งของการตอก (N) ทุกระยะ 20 เซนติเมตร (blows/20 cm) เครื่องมือชนิดนี้จะใช้ได้กับดินทรายหรือดินปนกรวด (Cohesionless Soil) ถึงแม้จะมีดินเหนียวหรือดินร่วนปนอยู่บ้างก็สามารถใช้ได้ การทดสอบด้วยวิธี Kunzelstab ยังสามารถแบ่งแยกค่าความแข็งแรงของดินได้ดังในตารางที่ 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 $\phi$ (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

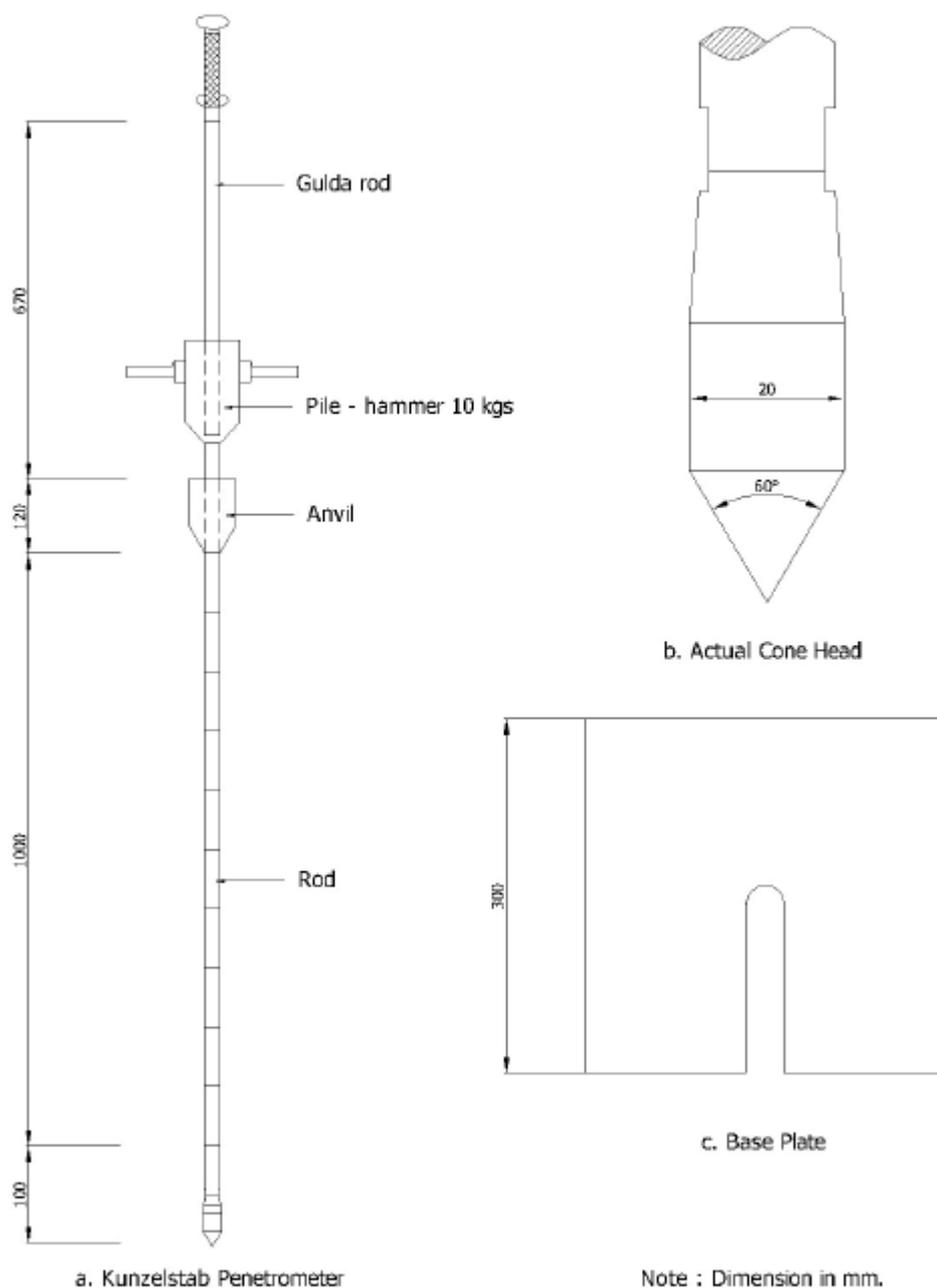
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว (Terzaghi และ Peck, 1967)

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

## 2.12.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

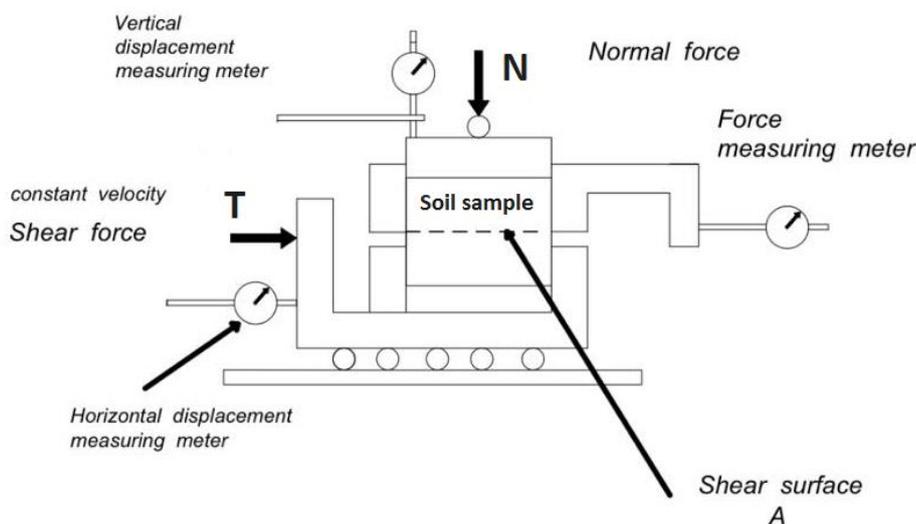
### 1) การทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของวัสดุ (Angle of internal friction  $\phi$ , and Cohesion,  $c$ ) ทั้งทรายและดินเหนียวคงสภาพ ตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้บีบอัดในแนวที่คาดการณ์ได้ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่กึ่งกลางตัวอย่างดิน



รูปที่ 2.35 อุปกรณ์ในการทดสอบ Kunzelstab Penetration (EGAT, 1980)

ในการทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct Shear Test) จะกระทำโดยใช้ตัวอย่างดินไว้ในกล่องใส่ตัวอย่างดิน (Shear Box) และใส่น้ำหนักกดทับ (Normal Load) กระทำในแนวตั้งกับตัวอย่างดินและทำการเฉือนตัวอย่างดินที่บรรจุอยู่ในกล่องใส่ตัวอย่างดินพร้อมทั้งตรวจสอบการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินทั้งในแนวตั้งและแนวราบดังแสดงในรูปที่ 2.36 รูปร่างของกล่องใส่ตัวอย่างดินขณะทดสอบอาจมีหลายรูปร่าง เช่น สี่เหลี่ยมหรือวงกลมเพื่อสะดวกในการหาพื้นที่หน้าตัดและเพื่อความเหมาะสมกับสภาพและชนิดของดินที่นำมาทดสอบ

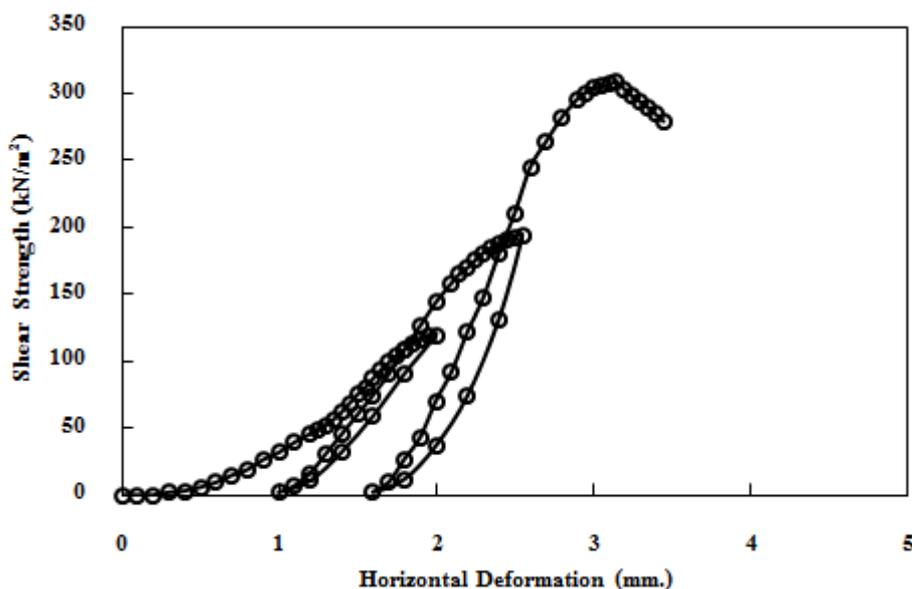


รูปที่ 2.36 การทดสอบ Direct Shear Test

## 2) การทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test

ในทดสอบการเฉือนตรง (Direct Shear Test) โดยทั่วไปจะต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (Conventional Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปของมอร์และคูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Envelope) ซึ่งจะได้พารามิเตอร์กำลังเฉือน (Shear Strength Parameter  $c, \phi$ ) แต่ในวิธี Multi Stage Direct Shear Test เป็นวิธีที่สามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้โดยใช้ตัวอย่างดินเพียงตัวอย่างเดียวโดยทดสอบเฉือนตัวอย่างดินจนเกือบถึงจุดพิบัติอย่างน้อย 3-5 น้ำหนักกดทับ (Normal Load) โดยผลที่ได้แสดงดังกราฟกำลังรับแรงเฉือนแบบ Multi Stage ดังรูปที่ 2.37 วิธีนี้เหมาะสำหรับในกรณีที่มีตัวอย่างดินน้อยหรือตัวอย่างดินมีความแปรปรวนสูงซึ่งจะให้ค่า ( $c, \phi$ ) ที่น่าเชื่อถือ

สถาพร(2541) อธิบายว่าการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินเป็นการบังคับให้ดินพิบัติในแนวที่กำหนด ซึ่งอยู่ในแนวราบประมาณครึ่งของความสูงของตัวอย่างดิน โดยในความเป็นจริงการพิบัติในลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นทั่วไป ยกเว้นในกรณีการพิบัติเนื่องจากการลื่นไถล (Slide) ของลาดดิน



รูปที่ 2.37 กราฟการทดสอบ Multi Stage Direct Shear Test

### 2.12.3 ชนิดของการทดสอบ Direct Shear Test

ในการทดสอบกำลังเฉือนของดินยังสามารถจำลองสภาพการทดสอบได้หลายแบบขึ้นอยู่กับว่าในสภาพสนามจริงจะมีสภาพเป็นอย่างไรเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ไปออกแบบได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดการทดสอบได้เป็น 3 แบบคือ

#### 1) การทดสอบแบบเร็ว (Quick Test)

การทดสอบแบบเร็วเหมาะสำหรับหาค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกระทำโดยการใส่น้ำหนักกดทับ (Normal Load) ลงไปบนตัวอย่างดินแล้วทำการเฉือนตัวอย่างทันทีโดยไม่รอให้เกิดการทรุดตัว (Unconsolidated) โดยไม่ยอมให้น้ำสามารถระบายออกได้ทันส่งผลทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างดิน (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) ก่อนกระทำการเฉือน โดยจะใช้แผ่นหินพรุน (Porous Stone) วางด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเพื่อช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินขณะอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) จนตัวอย่างดินทรุดตัวสมบูรณ์แล้วจึงทำการเฉือน โดยอัตราเร็วที่ใช้ในการเฉือนตัวอย่างจะอยู่ในช่วง 1-2.5 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบนี้สามารถเทียบได้กับ “Consolidated Undrained (CU Test)” ในการทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน (Triaxial Test)

### 3) การทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เนียนแบบช้า (Consolidated-Slow Test)

ในการทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เนียนแบบระบายน้ำมีการเตรียมตัวอย่างและทำการอัดตัวคายน้ำ เช่นเดียวกับวิธีการทดสอบอัดตัวคายน้ำ-เนียนแบบเร็วแต่จะเนียนตัวอย่างในอัตราการเนียนที่ช้ามากเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินภายในตัวอย่างดินในระหว่างการเนียนหรือยอมให้น้ำมีการไหลออกจากมวลดินนั่นเอง โดยอัตราเร็วที่ใช้ในการเนียนประมาณ 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 ในการทดสอบการเนียนตรงจะไม่สามารถทำให้ดินอิ่มตัวได้ เหมือนกับการทดสอบสามแกน (Triaxial Test) แต่สามารถทำให้ดินมีความชื้นมากที่สุดด้วยวิธีแช่ตัวอย่างดินในน้ำภายในกล่องเนียนเป็นระยะเวลาานพอที่น้ำจะซึมเข้าไปในตัวอย่างดินได้มากที่สุด ซึ่งกระบวนการแช่น้ำ (Soaking) จะใช้เป็นตัวแทนที่มีสภาพใกล้เคียงกับลาดดินจริงที่อยู่ในสภาพการไหลซึมคงที่ (Steady Infiltration)

สถาพร (2541) แนะนำว่าอัตราการกระทำแรงเนียนในการเนียนแบบระบายน้ำ ต้องใช้อัตราที่ช้าพอที่จะไม่เกิดความดันน้ำในระหว่างการเนียนซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และตัวอย่างดินควรจะพิบัติน้อยภายใน 6 – 7 ชั่วโมง หรืออัตราประมาณ 0.0076 มิลลิเมตรต่อนาที

## 2.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope Stability) เป็นการศึกษาปัญหาความมั่นคงของลาดดิน ซึ่งมีทั้งลาดดินธรรมชาติ (Natural Slopes) และลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-Made Slopes) ลาดดินโดยทั่ว ๆ ไป จะมีรูปแบบการพิบัติที่ต่างกันทำให้วิธีที่จะนำมาวิเคราะห์จึงแตกต่างกันออกไปบางวิธีเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของการพิบัติที่มีผิวเคลื่อนพังเป็นเส้นตรงบางวิธีเหมาะกับการพิบัติที่มีผิวเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลมหรือบางวิธีสามารถใช้ได้กับลักษณะของผิวการเคลื่อนที่เป็นทั้งเส้นตรงและส่วนโค้งของวงกลมซึ่งแต่ละวิธีล้วนมาจากพื้นฐานการแก้สมการสมดุลของระบบของมวลดิน (Limit Equilibrium) วิธีวิเคราะห์ที่นิยมกันโดยทั่วไป ได้แก่

### 2.13.1 วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis)

วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์เป็นการวิเคราะห์การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดินโดยมีความยาวต่อเนื่องขยายไปไกล มีความหนาของชั้นดินที่เคลื่อนพังน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวของมวลดินที่เคลื่อนพังแสดงดังรูปที่ 2.38 เมื่อพิจารณาสมดุลของแรง

เปรียบเทียบระหว่างแรงต้านทาน (Strength) และแรงจุกลง (Stress) จะสามารถหาอัตราส่วนปลอดภัยได้ดังสมการที่ 2.24 ถึงสมการที่ 2.29

สำหรับดินทราย

บนลาดดินแห้ง

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

บนลาดดินที่จมน้ำแต่ไม่มีการไหล

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

บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดดิน

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

สำหรับดินเหนียว

บนลาดดินแห้ง

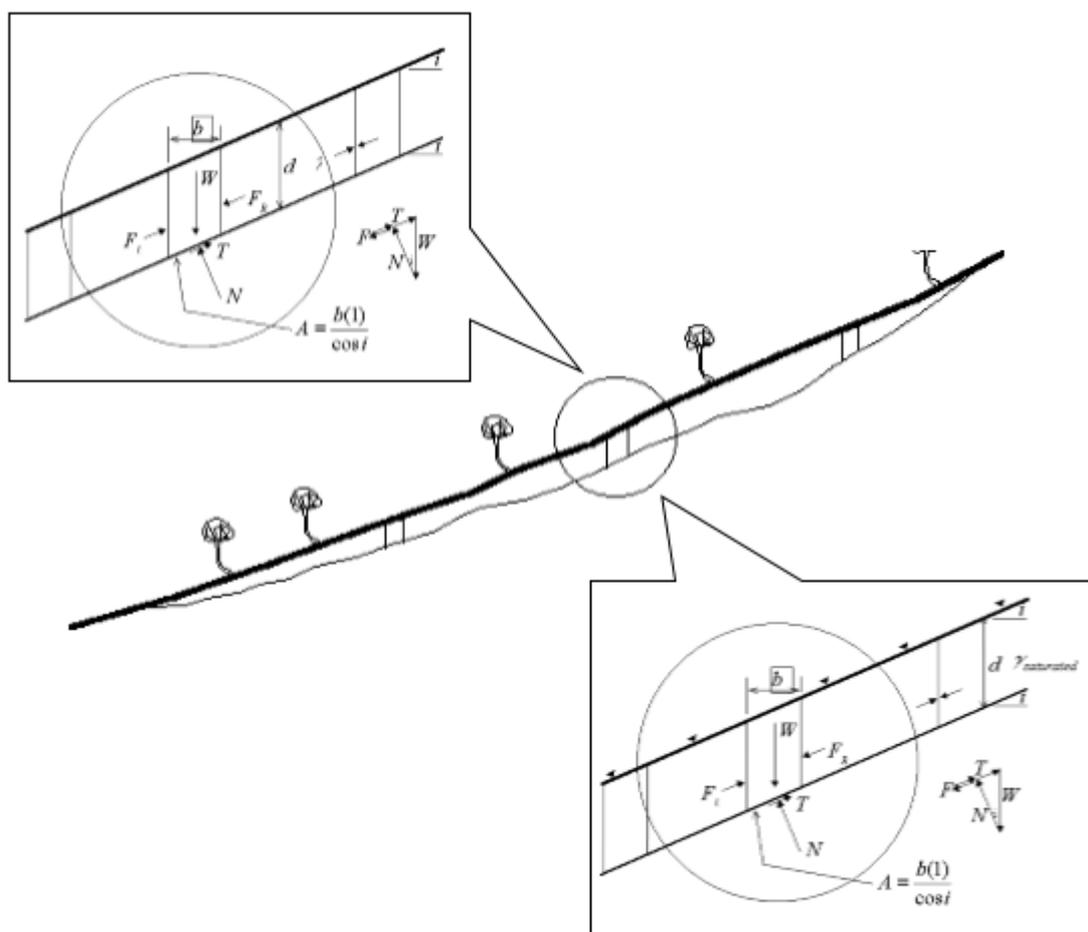
$$F.S. = \frac{c'}{d\gamma \sin i \cos i} + \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (2.27)$$

บนลาดดินที่จมน้ำแต่ไม่มีการไหล

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

บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดดิน

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



รูปที่ 2.38 การพังทลายของลาดดินที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดิน

(Thomas, 1998)

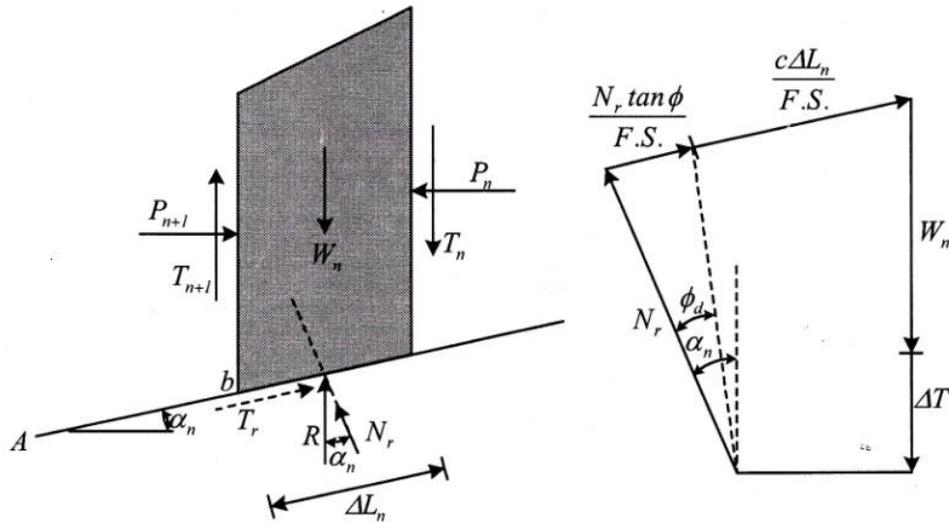
### 2.13.2 การแบ่งมวลดินในผิวเคลื่อนพังออกเป็นชั้นๆ (Method of Slices)

วิธีนี้จะแบ่งมวลดินที่อยู่เหนือส่วนที่เกิดการเคลื่อนตัวออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวตั้ง โดยการนำเอาแรงที่กระทำต่อดินในแต่ละชั้นซึ่งอยู่ในสภาพสมดุลตามแนวขนานและตั้งฉากกับผิวเคลื่อนพังมาพิจารณา วิธีนี้สามารถวิเคราะห์กรณีที่ดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันและพิจารณาแรงค้ำน้ำได้

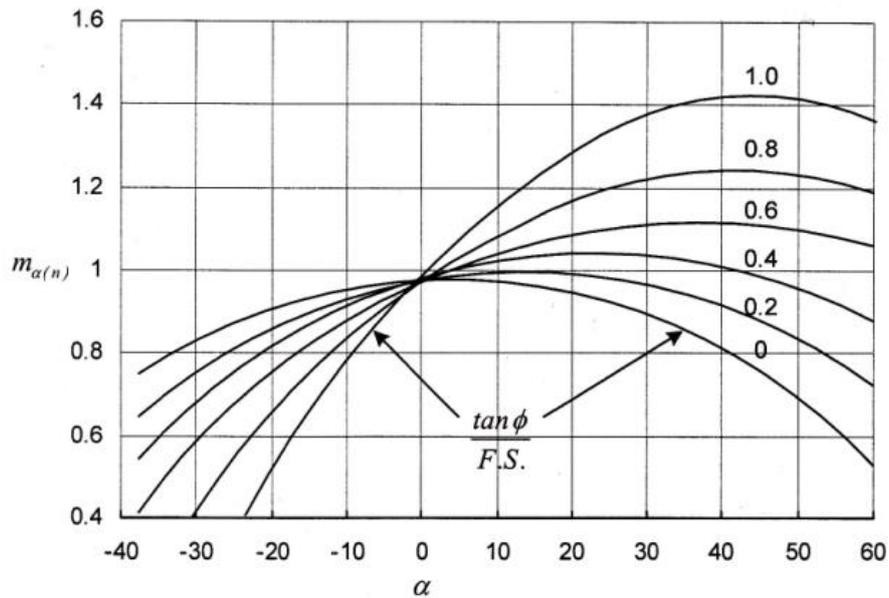
Bishop (1955) ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยสมมติฐานให้มีแรงกระทำต่อผนังด้านข้างในแนวตั้งของดินแต่ละชั้นซึ่งแนวการพิบัติได้สมมติให้เป็นส่วนหนึ่งของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.39 และอัตราส่วนความปลอดภัยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30

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

- เมื่อ  $W_n$  = น้ำหนักของมวลดิน  
 $T$  = แรงเฉือนที่ผนังด้านข้างในแนวตั้ง  
 $c$  = แรงเชื่อมแน่นของเม็ดดิน  
 $b_n$  = ความกว้างของชั้นส่วนของมวลดิน  
 $m_{\alpha(n)}$  = หาได้จากความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.39 รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method (Das, 1994)



รูปที่ 2.40 การหาค่า  $m_{\alpha(n)}$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method (Das, 1994)

## 2.14 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน Antecedent Precipitation Index, (API) เพื่อการเตือนภัย การพิบัติของลาดดิน

### 2.14.1 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index, API)

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในชั้นดินที่ดินอุ้มน้ำไว้ ณ เวลาใด ๆ 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) อธิบายว่าปริมาณความชื้นในดินจะมีความผันแปรไปในแต่ละจุดของพื้นที่ลุ่มน้ำจึงไม่นิยมเก็บวัดจากพื้นที่จริงแต่จะใช้ค่าดัชนีที่ เรียกว่า Antecedent Precipitation Index หรือค่า API เป็นตัวแทน โดยค่า API นี้จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ เช่นปริมาณน้ำฝนปริมาณการระเหยน้ำและปริมาณน้ำใต้ดิน เป็นต้น

พงษ์ศักดิ์ และวารินทร์(2548) กล่าวว่า API หรือ Antecedent Precipitation Index เป็นค่าดัชนีที่ใช้ชี้วัดปริมาณความชุ่มชื้นที่มีอยู่ก่อนในดิน โดยเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการสะสมของน้ำฝนที่ตกลงมาในดินที่ระเหยกลับขึ้นไปในอากาศและน้ำในดินที่ระเหยให้กับลำธารทั้งทางผิวดินและใต้ผิวดินจากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถนำมาจำลองให้เป็นสมการที่ใช้หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นที่มีอยู่ก่อนในดิน ( $API_{(t)}$ ) ได้โดยใช้ข้อมูลจากดัชนีความชุ่มชื้นที่มีอยู่ในดินของวันก่อนหน้า ( $API_{(t-1)}$ ) ปริมาณน้ำฝนในขณะนั้น ( $P_{(t)}$ ) และอัตราส่วนลดของปริมาณน้ำในดินของวันก่อนหน้า ( $K_{(t-1)}$ )

สำหรับการหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินรายวัน(API)เพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติสามารถดำเนินการได้โดยการนำค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเป็นครั้งแรกในรอบปีมากำหนดให้เป็นค่าดัชนีความชุ่มชื้นแรกเริ่ม(API<sub>(t-1)</sub>) แล้วจึงนำค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกตามลงมาและค่าคงที่คูณลด (K) มาประเมินค่าความชุ่มชื้นรายวัน(API) ตามลำดับ

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (API) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเตือนภัยล่วงหน้าการเกิดลาดดินพิบัติได้เพราะในช่วงเวลาที่พื้นที่ลุ่มน้ำมีค่าดัชนีความชุ่มชื้น(API)สูงจะเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติสูงตามไปด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อฝนตกหนักหรือมีฝนตกต่อเนื่องเป็นระยะเวลาเวลานานในช่วงเวลาดังกล่าวนี้มวลดินส่วนใหญ่จะมีความชุ่มชื้นมากและมีการยึดเกาะระหว่างมวลดินอย่างหลวม ๆ ฝนที่ตกลงมาจึงมีโอกาสทำให้เกิดลาดดินพิบัติได้ง่าย

## 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการพิบัติของลาดดินที่มีความรุนแรงและเกิดขึ้นบ่อยครั้งในปัจจุบัน ทำให้มีผู้ให้ความสนใจและศึกษาในด้านนี้กันอย่างแพร่หลายโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

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

Orr (1987) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน ในงานวิจัยของ Orr เป็นการวิจัยทางสถิติที่แสดงถึงค่าความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ความน่าจะเป็นของลาดดินที่จะเกิดการพังทลายจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นและในงานวิจัยนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าระดับน้ำใต้ดินและความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลของความปลอดภัยของลาดดินมากกว่าปัจจัยอื่น

นงลักษณ์(2547) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของน้ำฝนซึ่งวิเคราะห์โดย Finite Elementจากการสำรวจลักษณะชั้นดินมีความหนา 1-4 เมตรและได้เก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับการทดสอบแรงเฉือนด้วยวิธีเฉือนตรง(Direct Shear Test)พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มขึ้นโดยช่วงค่าความอิ่มตัวที่ 15-60เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณน้ำในดินน้อยค่าทำให้ Shear Strength Parameter ( $c, \phi$ ) จึงมีค่าสูงและได้วิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะการไหลแบบคงที่ (Steady) และสภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) สภาวะการไหลแบบคงที่จะใช้น้ำฝนเฉลี่ยตลอดทั้งปีส่วนอีกสภาวะใช้น้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีรูปแบบน้ำฝน 5 รูปแบบ คือ 1,3,5,10 และ 14 วัน โดยวิเคราะห์ที่รอบปีการเกิดซ้ำที่ 5,10,20,50 และ 100 ปีผลการวิเคราะห์การไหลซึมของรูปแบบน้ำฝนพบว่ารูปแบบน้ำฝนและปริมาณความเข้มของน้ำฝนมีผลต่อการเคลื่อนตัวของระดับน้ำและความชื้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพ

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพใช้วิธีลาดดินอนันต์(Infinite Slope)วิเคราะห์ลาดดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงตามความชื้นในดินที่ได้โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นเสถียรภาพเฉพาะจุดทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่าความมั่นคงของลาดดิน(F.S.) ของแต่ละจุดส่วนการวิเคราะห์แบบCircular Failure เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวมและเป็นตัวแทนของทั้งลาดดิน จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถกำหนดเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่มีค่าความมั่นคงของลาดดิน (F.S.) เท่ากับ 1 จากความชื้นฝนเฉลี่ยต่อวันและน้ำฝนสะสมของรูปแบบน้ำฝนที่ใช้วิเคราะห์ในช่วง 1-14 วันได้

บรรพต (2548) ได้ศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ดินน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรีในพื้นที่คลองกระทิง คลองตะเคียน และคลองทุ่งพล พบว่าค่ากำลังเฉือนของดินมีค่าแปรผกผันกับระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน รูปแบบของฝนที่ตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาดดิน ค่าความชื้นน้ำในชั้นหินและค่าความชื้นที่สภาวะเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลซึมสู่ชั้นดินและเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝน ช่วงเวลาที่ฝนตกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินมากกว่ารูปแบบของฝนที่ตกและรอบปีการเกิดซ้ำ มวลดินที่มีความลึกลงน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลง Factor Safety (F.S.) สอดคล้องกับรูปแบบของฝนอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและปริมาณน้ำฝนในอดีตที่เกิดการพิบัติทำให้ได้เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ค่า F.S. เท่ากับ 1.1 โดยแผนที่เกี่ยวข้องที่มีค่า F.S.<1.1 มีอยู่ 60.87 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่พิบัติ

สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก โดยศึกษาด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสำหรับงานดินถล่ม 2 วิธี คือ KU-Multi state Direct Shear Test : KU-MDS และ Strength Reduction Index : SRI วิธีการทดสอบได้ออกแบบให้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนและอัตราส่วนช่องว่างเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยเก็บตัวอย่างคงสภาพของดินมาจากชุดหินกลุ่มต่างๆทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงเพื่อหาคุณสมบัติการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำที่เรียกกันว่า SRI ใช้ตัวอย่างดิน 2 สภาวะอันได้แก่ สภาวะตามความชื้นในธรรมชาติ (Unsoaked) และสภาวะเมื่อนำดินแช่น้ำ (Soaked)รวมเป็น 1 การทดสอบและการทดสอบ KU-MDSทดสอบโดยวิธี Multi-stage ในแต่ละตัวอย่างและเปลี่ยนแปลงความชื้นทั้งหมด 3 ตัวอย่าง รวมเป็น 1 ชุด การทดสอบผลการทดสอบ SRI พบว่าดินมาจากหินแกรนิตมีร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินมาจากหินโคลนและหินดินดานมีร้อยละการลดลงที่ค่อนข้างกระจายตัวระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 สำหรับดินที่มาจากหินทรายมีร้อยละการลดลงมากกว่าร้อยละ 50ผลการทดสอบ KU-MDS ได้ว่าเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้นค่า Shear stress ของดินจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นสาเหตุการพิบัติของลาดดินส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนักจากผลการทดสอบ SRI แสดงให้เห็นว่าการยุบตัวในดินบางประเภทส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนไปและวิธีการทดสอบแบบ SRI TEST เหมาะสำหรับการทดสอบในพื้นที่กว้างเพื่อหาแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงเฉือน

ของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงผลการทดสอบ KU-MDS นอกจากจะได้ผลการทดสอบที่ละเอียดมากขึ้น ยังมีนัยสำคัญในการนำมาใช้เตือนภัยดินถล่มเนื่องจากฝนตกหนักได้ต่อไป

อคูลย์ (2551) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอนอ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์ ช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050 ภาคใต้ประเทศไทย : โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพมาทดสอบหาค่ากำลังเฉือนที่ความชื้นธรรมชาติและในสภาวะวิกฤติที่ความชื้นเกือบอิ่มตัวเมื่อฝนตกและพิจารณาถึงกรณีที่ลาดดินมีการเลื่อนตัวมาก่อนโดยใช้ค่ากำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง จากผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength) พบว่าค่ากำลังเฉือนของดินชุ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าในดินความชื้นธรรมชาติ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินกำหนดให้สภาวะดินชุ่มน้ำเป็นสภาวะวิกฤติที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวของลาดดินและดินความชื้นธรรมชาติเป็นสภาวะปกติไม่มีระดับน้ำใต้ดินผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในปัจจุบัน (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) บางส่วนได้เลื่อน ไถลงมากลับกลายเป็นส่วนต้านทานการพังทลาย (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  $\alpha$  (26.6, 33.7, 45.0 และ 63.4 องศา) ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน  $H_w$  (2.5, 5, 7.5, 10 และ 15 เมตร) และดินที่ใช้ศึกษามี 3 ชนิด คือ  $f_{10,-4}$  แตนดินทราย  $f_{50,-5}$  แตนดินตะกอนทราย  $f_{100,-6}$  แตนดินเหนียว 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 ชั่วโมง และมีพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ศึกษาคือความเชื่อมแน่นประสิทธิผล  $c'$  เท่ากับ 10 กิโลปาสคาล มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล  $\phi'$  เท่ากับ 26 องศา อัตราเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนเนื่องจากแรงดูด  $\phi'$  เท่ากับ 26 องศา และหน่วยน้ำหนักของดินเท่ากับ 20 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ข้อมูลจากการทดสอบในพื้นที่สิงคโปร์ (Rahardjo, 2000) ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของดิน (ค่าความซึมผ่านของน้ำในดิน) และความชื้นฝนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วยน้ำฝน โดยในส่วนของระดับน้ำใต้ดินเริ่มต้นและลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียงและความหนาของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลต่อ

เสถียรภาพของลาดดิน และยังชี้ให้เห็นว่าความสำคัญของฝนที่ตกก่อนหน้านั้นขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่านของดิน

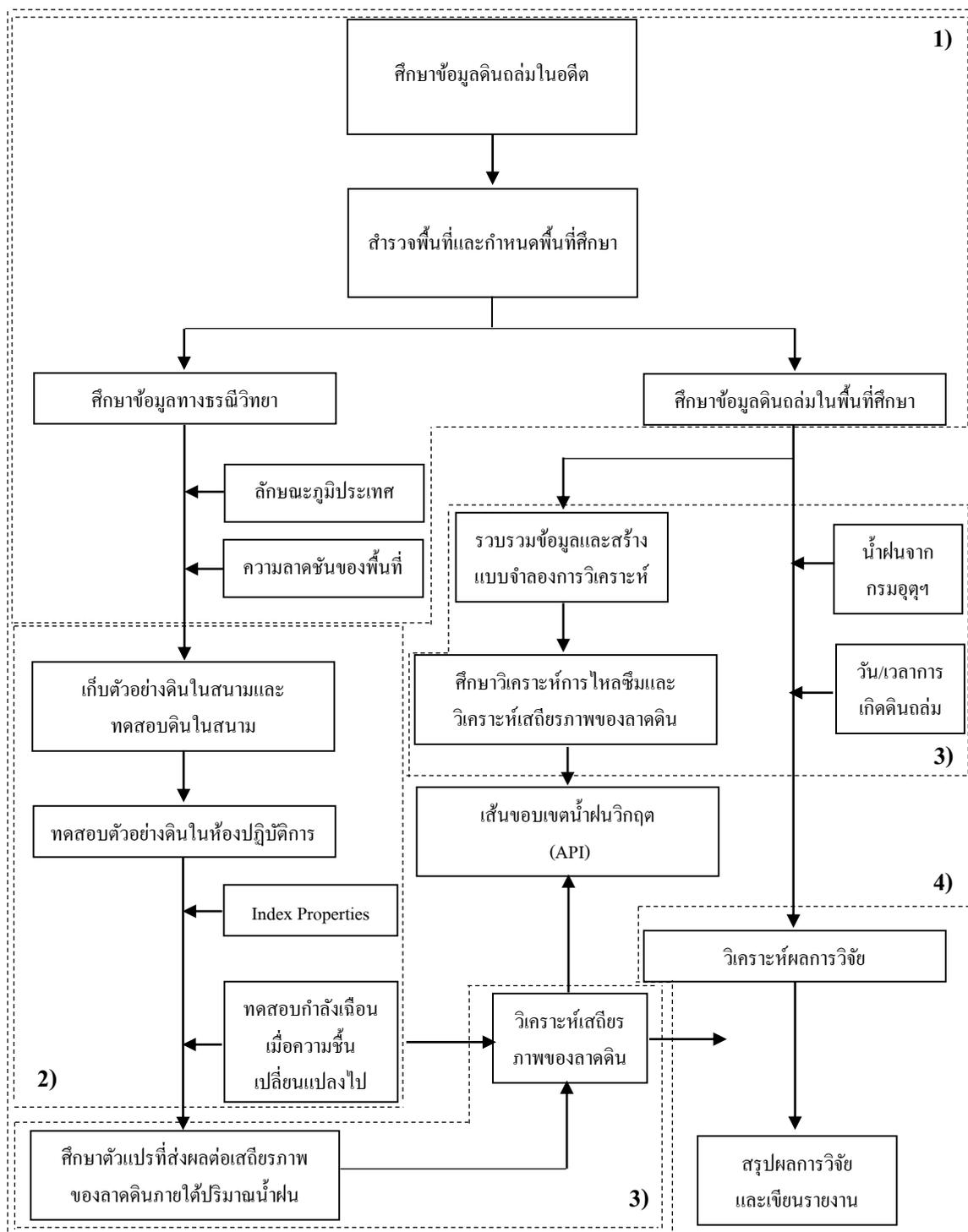
### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้อย่างแม่นยำจำเป็นต้องมีความรู้และเข้าใจปฐพีกลศาสตร์ กระบวนการเกิดลาดดินพิบัติภัย และข้อมูลทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีการไหลซึมเนื่องจาก น้ำฝน ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในขั้นตอนและขอบเขตของงานวิจัยจึงทำการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานของ งานวิจัยออกได้เป็น 4 กลุ่มขั้นตอนหลัก ได้แก่ศึกษารวบรวมข้อมูลลาดดินพิบัติในอดีต การทดสอบตัวอย่าง ดินทางวิศวกรรมการศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองและการจัดทำระบบเตือนภัยเนื่องจากลาดดินพิบัติภัยของ พื้นที่ศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1

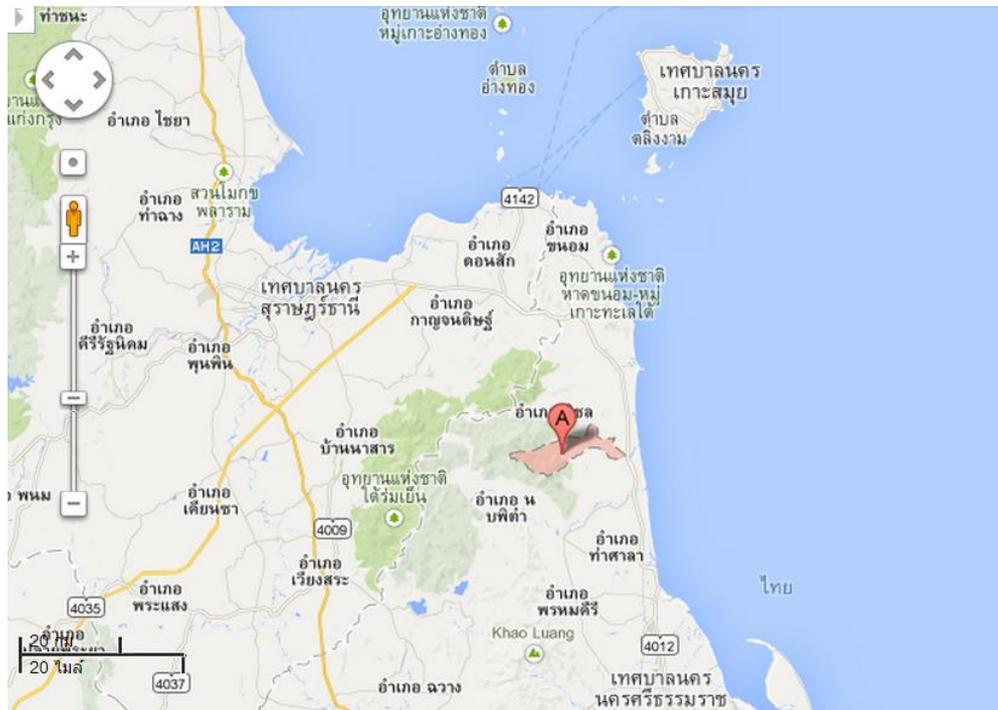
#### 3.1 การเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบคุณสมบัติดิน

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมลาดดินพิบัติภัยจำเป็นจะต้องมีข้อมูลทางภูมิประเทศ ธรณีวิทยา และ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในพื้นที่ ดังนั้นจึงทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่มาทำการ วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Property) ซึ่งจะทำการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเขตพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอ สิขล จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ซึ่งมีประวัติการเกิดลาดดินพิบัติภัย โดยจากการสำรวจเบื้องต้นได้กำหนดพื้นที่ศึกษาออกเป็น 3 บริเวณ ซึ่งพื้นที่ศึกษาทั้งหมดมีความต่อเนื่อง ของการเกิดลาดดินพิบัติภัย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) คือ

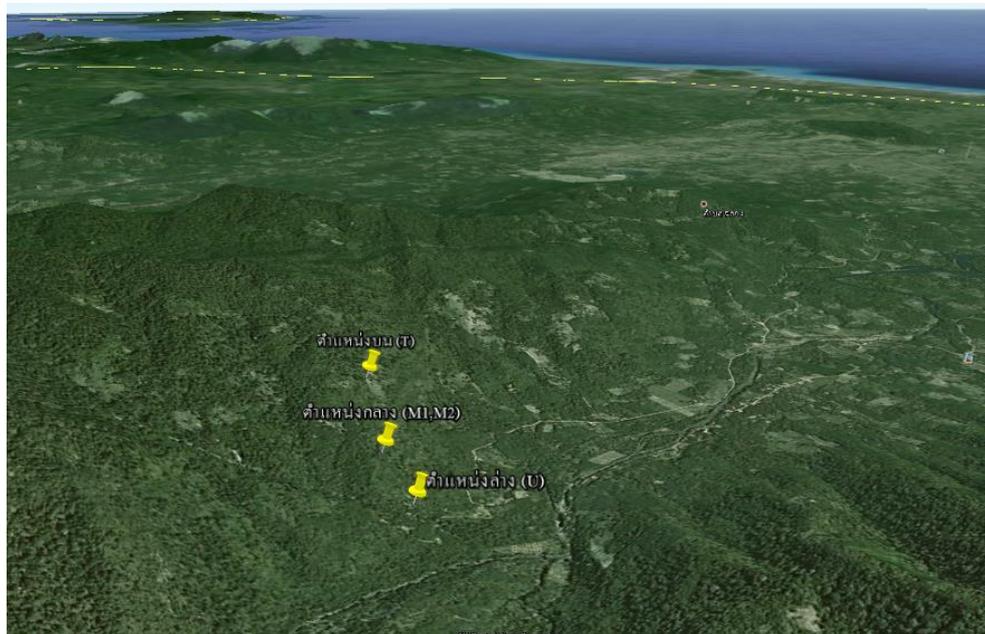
- 1) บริเวณด้านบนใกล้กับจุดเริ่มต้นของการพิบัติเดิม โดยใช้สัญลักษณ์ T เป็นตัวแทนกลุ่มตัวอย่าง ในพื้นที่ทดสอบ
- 2) บริเวณตอนกลางของภูเขาซึ่งยังเป็นดินที่มีลักษณะคงสภาพเดิม โดยจะแบ่งออกเป็นสองตำแหน่ง ใช้สัญลักษณ์ M1, M2
- 3) บริเวณเชิงเขาหรือตอนล่างสุดของภูเขาใช้สัญลักษณ์ U



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย



(ก) อาณาเขตพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช



(จ) พื้นที่เก็บตัวอย่างดิน 3 บริเวณ

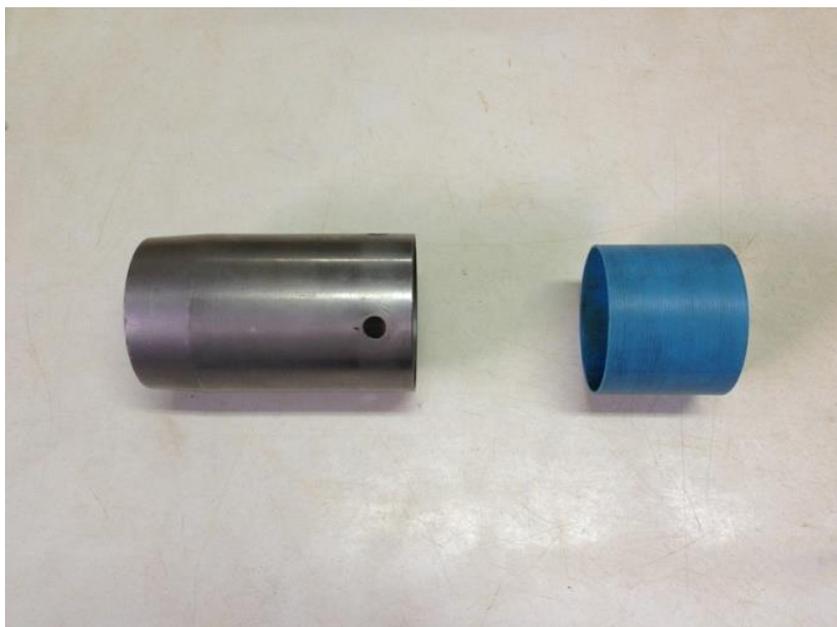
รูปที่ 3.2 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed Samples) และแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample) รวมทั้งมีการทดสอบคุณสมบัติดินในสนามซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

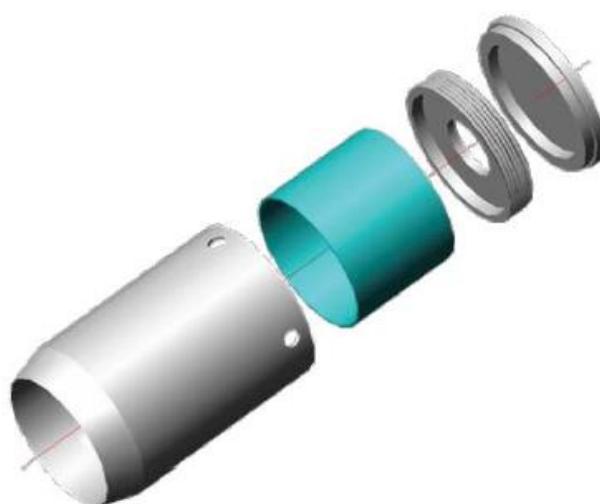
### 3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

การทดสอบค่าความแข็งแรงของลาดดิน ณ สภาพะธรรมชาติและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำสามารถทำได้โดยใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพซึ่งเป็นตัวแทนของลาดดินในธรรมชาติของพื้นที่ที่ศึกษา โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพจะใช้ชุดเก็บตัวอย่างกระบอกบาง (Thin Wall Tube) ซึ่งถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เรียกว่า KU – Miniature Sampler (วารสารและคณะ, 2548) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) ชุดเก็บตัวอย่างกระบอกบางที่ใช้จะต้องมีสิ่งสำคัญคือ ความบางมากพอที่จะไม่ทำให้โครงสร้างดินเสียรูปและสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี ดังนั้นชุดกระบอกบางจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ กระบอกสแตนเลสด้านนอกเพื่อทนต่อแรงกระแทกและภายในจะบรรจุกระบอก PVC สำหรับเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพซึ่งขนาดของกระบอกถูกออกแบบให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเฉือน (Shear Box) เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินเสียหายขณะขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบความแข็งแรงโดยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test)

ในการเก็บตัวอย่างดินจะทำการขุดดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger) ไปจนถึงระดับที่ต้องการเก็บตัวอย่าง จากนั้นใช้ตุ้มน้ำหนักตอกบนแท่นรองตอกเพื่อตัดดินรอบ ๆ ให้ขาดแล้วจึงทำการหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากกันกับภายนอกกระบอกดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) โดยตัวอย่างดินจะถูกบรรจุอยู่ในกระบอก 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) เมื่อดันออกจากกระบอกลูกเหล็กแล้ว  
รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ(Undisturbed Sample)

### 3.1.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed Sample)

การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมีความประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน การวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดดิน การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและค่าพิกัดพลาสติก และการจำแนกชนิดของดิน เป็นต้น โดยคุณสมบัติทางกายภาพจะบอกลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินในพื้นที่ศึกษา จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณภูเขาที่มีชั้นดินวางตัวไม่ลึกมากนัก จึงกำหนดให้เก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพทุก ๆ ระยะ 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

การทดสอบคุณสมบัติของดินในสนามเป็นการทดสอบดินตามสภาพจริงสามารถทดสอบได้ในขณะที่ดินยังคงสภาพเดิมอยู่แต่การทดสอบวิธีนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขการทดสอบได้ทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีข้อจำกัดด้านความละเอียดของค่าตัวแปรและยากต่อการตีความ โดยวิธีทดสอบที่ใช้ทดสอบดินในสนามมีดังนี้

#### ก) การทดสอบวิธีหยั่งเบา (Kunzelstab Penetration Test)

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

การทดสอบจะทดสอบในบริเวณใกล้ ๆ กับการเก็บตัวอย่างแบบแปลงสภาพและแบบคงสภาพในทุก ๆ ตำแหน่ง โดยมาตรฐานกำหนดให้ตุ้มน้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัม มีระยะยก 50 เซนติเมตร กระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไปโดยนับจำนวนครั้งของการตอก (N) ทุกกระชก 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งที่ทำการตอกเพื่อนำมาแปลเป็นข้อมูลคุณสมบัติของดิน โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

#### ข) การทดสอบความชื้นน้ำแบบ (Double Ring Test)

การทดสอบการชึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM 3385-03 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ Constant Head เหมาะกับการทดสอบความชื้นน้ำของดินที่ผุสลายอยู่กับที่ หรือบริเวณพื้นที่ของกลุ่มดินทรายหรือตะกอนทราย โดยการทดสอบจะทำการตอกโลหะทรงกระบอกที่มีปลายเปิดทั้ง 2 ด้านลงไปดินเริ่มจากทรงกระบอกด้านนอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตรตอกลงไปให้ลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ถัดไปทำการตอกทรงกระบอกในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ให้ลึกลงไปดินประมาณ 15 เซนติเมตร ตรวจสอบปากทรงกระบอกให้อยู่ในแนวระดับ จากนั้นเติมน้ำเข้าไปในทรงกระบอกด้านนอกโดยให้น้ำมีความสูงจากระดับผิวดินประมาณ 7.5 เซนติเมตร และทำการเติมน้ำในทรงกระบอกในให้มีความสูงเท่ากัน โดยทรงกระบอกทั้งสองจะต่อเข้ากับถังจ่ายน้ำอีก 2 ถัง โดยถังจ่ายน้ำจะมีมาตรวัดระดับน้ำที่ลดลงเมื่อน้ำได้เติมเข้าสู่ทรงกระบอกทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) ทำการวัดระดับน้ำในถังจ่ายน้ำของทั้งสองทรงกระบอกในระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120 นาที และทุก ๆ 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

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
การทดสอบหาค่าพิกต์เหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกต์พลาสติก (Plastic limit, PL)	ASTM D 4318	9
การจำแนกดินแบบ USCS (Unified soil classification system)	ASTM D 2487	15



(ก) การวัดค่าความชื้นน้ำของดิน โดยใช้ Double Ring Test



(ข) ชุดควบคุมการไหลของน้ำเข้าสู่โลหะทรงกระบอก

รูปที่ 3.7 การทดสอบความชื้นน้ำด้วยวิธี Double Ring Test

ข) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไป  
 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength Parameter) เนื่องจากตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินที่ตกค้างในพื้นที่ (Residual Soil) ดังนั้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำเป็นต้องทดสอบแบบ

คงสภาพ ซึ่งการทดสอบใช้ชุดเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM 3080-03 การทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดิน ( $c, \phi$ ) โดยทั่วไปจะต้องใช้จำนวนตัวอย่างดินอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ Mohr – Coulomb's ซึ่งจากจำนวนของตัวอย่างดินที่มีอยู่อย่างจำกัดและลักษณะของดินที่มีความแปรปรวนส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่างมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อลดปัญหาความแปรปรวนจึงทำให้การทดสอบหาค่าตัวแปรกำลังเฉือนใช้ตัวอย่างดินเพียงหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบเรียกว่า Multi-Stage Direct Shear Test (วารากร และคณะ 2546, 2548) วิธีนี้จะให้ค่ากำลังเฉือนของดินที่น่าเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติเมื่อทดสอบกับดินที่ผุพังมาจากหิน โดยการทดสอบแบบ Multi-Stage จะให้ค่ากำลังเฉือนสุดท้าย (Ultimated Shear Strength) เท่านั้นซึ่งไม่สามารถหาค่ากำลังเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ใดๆก็ตามดินตกค้าง (Residual Soil) โดยทั่วไปเป็นดินร่วน (Loose Structure) ดังนั้น Ultimated Shear Strength จึงเป็นค่าสูงสุด

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าปริมาณความชื้นมีความสัมพันธ์กับกำลังเฉือนของดิน โดยเฉพาะดินที่มีส่วนประกอบของกลุ่มดินเหนียวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนไป โดยความชื้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงน้ำ (Metric Suction) ใดๆก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในขณะเฉือนตัวอย่างไม่สามารถหาค่าของแรงดึงน้ำได้โดยตรง ดังนั้นในการศึกษานี้การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปสามารถกระทำได้โดยใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพกำหนดชุดตัวอย่างดินออกเป็น 4 กลุ่ม ชุดการทดสอบตามตำแหน่งที่สนใจศึกษา (ตำแหน่ง T, M1, M2, และ U ตามลำดับ) โดยแบ่งเป็นระดับความชื้นต่างๆ ซึ่งชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2 ในขั้นตอนของการเฉือนตัวอย่างดินจะทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบายน้ำ (Consolidated-Drained Test) โดยใช้อัตราเร็วในการเฉือนประมาณ 0.06 มิลลิเมตรต่อวินาทีซึ่งสัมพันธ์กับการระบายน้ำของตัวอย่างดิน สามารถคำนวณอัตราการเฉือนตัวอย่างจากปริมาณการทรุดตัวตามสูตรของ ASTM D3080 เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างดิน ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการเฉือนควรอยู่ในช่วง 0.007- 0.6 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยค่ากำลังที่ได้จะไม่แตกต่างกัน (Cheung et al. ,1988) ก่อนการเฉือนตัวอย่างจะต้องทำการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดิน (Consolidated) จนตัวอย่างดินทรุดตัวเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งน้ำหนักกดทับแรก (First Stage of Normal Load) ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนไม่เกิดการทรุดตัวแล้ว จึงทำการเฉือนตัวอย่างจนเกือบถึงจุดพิบัติในแต่ละน้ำหนักกดทับ โดยก่อนการเฉือนตัวอย่างในน้ำหนักกดทับถัดไปต้องทำการผ่อนคลายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน (Unloading) เพื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับใหม่แล้วก็เริ่มทำการอัดตัวคายน้ำแล้วเฉือนตัวอย่างเช่นเดิม ทำซ้ำเช่นนี้อย่างน้อย 3-5 น้ำหนักกดทับ ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 3.2 ชุดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป

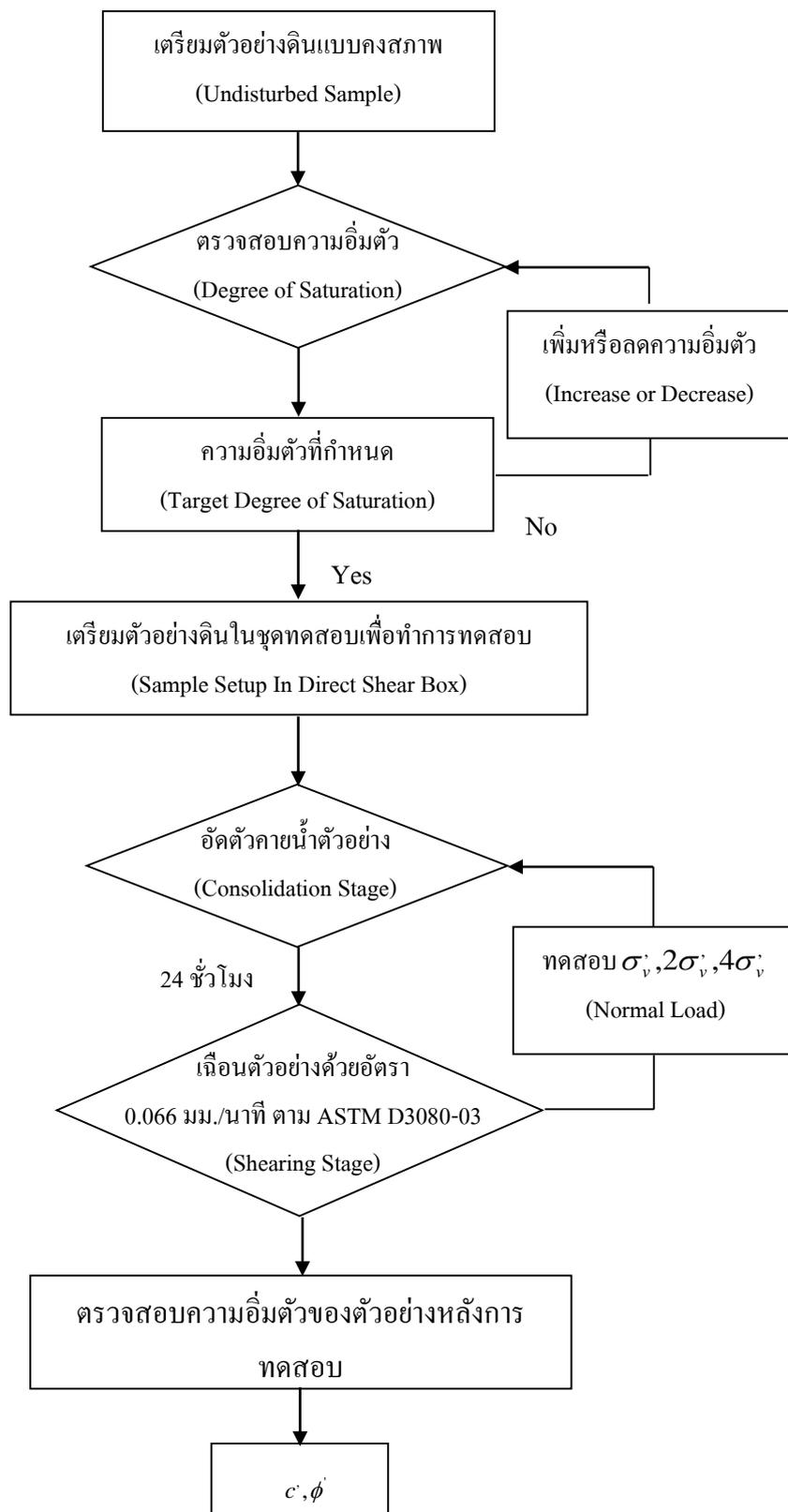
ตำแหน่ง	ความลึก (m)	ความชื้น เริ่มต้น (%)	ระดับชั้นของการอิ่มตัว (%)						
			0-10	10-20	20-40	40-60	60-70	70-80	80-100
T	1.5	14.32	/	/	/	/	/	/	/
M1	1	15.87	/	/	/	/	/	/	/
M2	1.5	17.42	/	/	/	/	/	/	/
U	1	15.82	/	/	/	/	/	/	/

ก) การทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve)

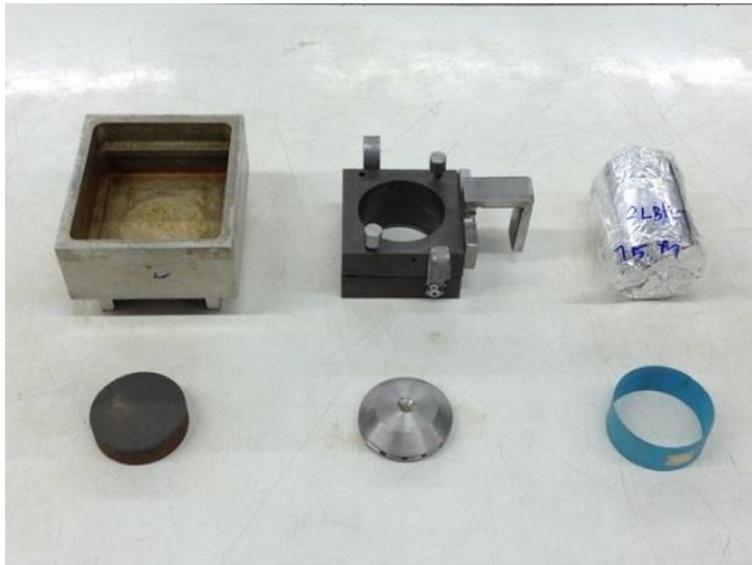
เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำด้านลบ (Suction) กับปริมาณความชื้นซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดินตกค้าง การทดสอบหา SWCC สามารถทำได้ 2 กรณีคือ กรณีแบบเปียก (Wetting) และแบบแห้ง (Drying) โดยการทดสอบทั้งสองสามารถทำได้หลายวิธีแต่ในการศึกษานี้ใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า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

การทดสอบด้วยวิธี Wetting ทำได้โดยการหยดน้ำลงบนตัวอย่างดินที่จะใช้เป็นตัวแทนลาดดินโดยควบคุมให้น้ำมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดดิน จากนั้นทิ้งไว้ให้น้ำไหลแทรกซึมลงสู่ตัวอย่างดิน จนมั่นใจว่าความชื้นในตัวอย่างดินมีความใกล้เคียงกันตลอดตัวอย่าง แล้วจึงใช้ Tensiometer วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในมวลดินพร้อมกับชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลง ค่าความต่างศักย์และน้ำหนักของตัวอย่างดินที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำในมวลดินกับปริมาณความชื้นในมวลดินในขณะนั้น ทำซ้ำเช่นนี้ต่อไปจนค่าความต่างศักย์ที่นำมาแปลงเป็นค่าแรงดันน้ำอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์หรือมีค่าคงที่ก็จะได้ความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของ SWCC โดยอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และ (ข) ในส่วนการทดสอบด้วยวิธี Drying จะเริ่มต้นจากการนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้แบบอิ่มตัวมาลดความชื้น โดยขั้นตอนการทดสอบจะเป็นเช่นเดียวกันกับวิธีทดสอบแบบ Wetting แต่จะทดสอบกลับกันโดยเป็นการลดความชื้นหรือเป็นการทดสอบจากเปียกไปแห้งซึ่งผลการทดสอบโดยทั่วไปที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะเป็นผลในส่วนของ Wetting เนื่องจากมีลักษณะ

การทดสอบที่คล้ายคลึงกับในสภาพความเป็นจริง โดยเป็นการเพิ่มความชื้นขึ้นไปเรื่อยๆ เช่นเดียวกับในสภาพที่ฝนตกต่อเนื่อง



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบ Multi-Stage Direct Shear Test โดยสรุป



(ก) อุปกรณ์ในการทดสอบการเฉือนโดยตรงและตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed)



(ข) ขณะทดสอบเฉือนตัวอย่างดิน

รูปที่ 3.9 การทดสอบการเฉือนโดยตรงด้วยวิธี Multi-Stage Direct Shear Test



(ก) เครื่องมือทดสอบ Tensiometer



(ข) การทดสอบด้วยวิธี Wetting

รูปที่ 3.10 ทดสอบหา Soil-Water Characteristic Curve, SWCC

### 3.2 การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีสมการดังสมการที่ 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	$c_b$	=	ความสัมพันธ์ของแรงยึดเกาะของเม็ดดินในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำอันเนื่องจากแรงดึงน้ำ
	$c$	=	แรงยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)
	$\sigma$	=	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)
	$\phi'$	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน
	$\phi^b$	=	มุมที่ระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนที่สัมพันธ์กับแรงดึงน้ำ
	$\gamma$	=	หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (Total Unit Weight)
	$A$	=	พื้นที่ที่แรงเฉือนกระทำ
	$\gamma'$	=	ความหนาแน่นประสิทธิผล (Effective Unit Weight)
	$\gamma_w$	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ

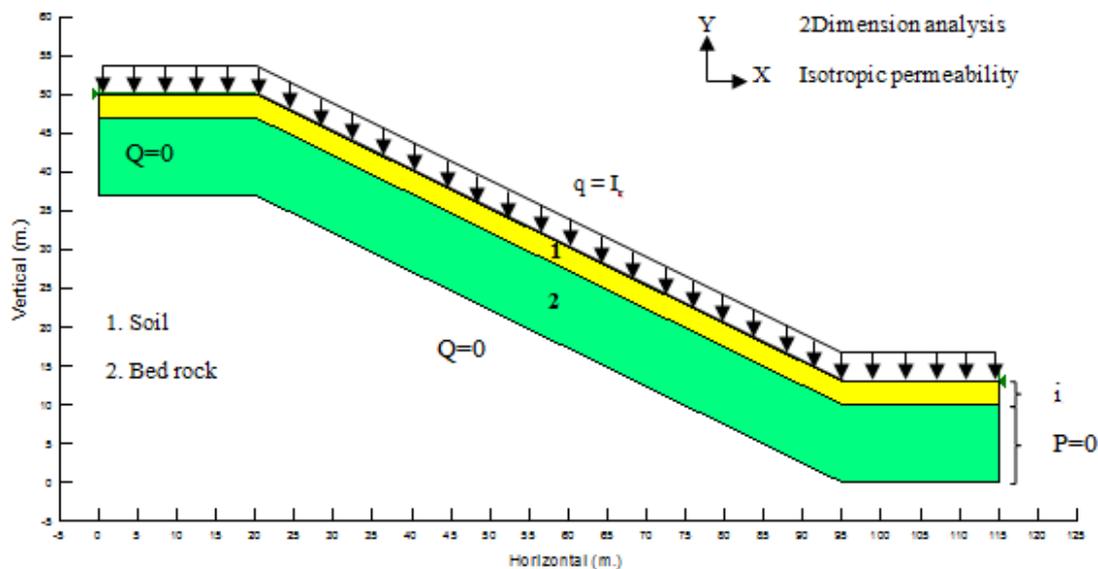
ซึ่งจากสมการพบว่าน้ำในมวลดินส่งผลกระทบต่อทั้งแรงต้านและแรงกระทำให้เกิดการพิบัติ ดังนั้นน้ำหรือความชื้นมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของลาดดินอย่างมาก

การพิบัติของลาดดินโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นภายในมวลดิน โดยการแทรกซึมของน้ำฝนลงสู่มวลดิน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินซึ่งการไหลซึมจะขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและชั้นดิน ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องมีการกำหนดการพิจารณาดังนี้

### 3.2.1 การวิเคราะห์ความลาดชันและการสร้างแบบจำลองลาดดิน

เนื่องจากภูมิประเทศมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาดังนั้นการวิเคราะห์ความลาดชันและลักษณะของชั้นดินของหน้าตัดลาดดินจึงทำได้โดยการลงสำรวจพื้นที่ศึกษาและเจาะสำรวจเพื่อหาลักษณะของชั้นดินและชั้นหินพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจากหน่วยงานต่าง ๆ เช่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกรมทรัพยากรธรณี เป็นต้น พบว่าชั้นดินในพื้นที่ศึกษา (ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช) มีลักษณะเป็นดินที่ผุสลายมาจากหินแกรนิต มีลักษณะคล้ายคลึงกันตลอดทั้งหน้าตัด และการวางตัวของชั้นดินมีความหนา 2.0 – 3.0 เมตร วางตัวอยู่ด้านบนของชั้นหินผุและเมื่อนำพิกัดตำแหน่งมาระบุลงในแผนที่ดาวเทียมจะสามารถเปรียบเทียบหาความลาดชัน (Slope) และระดับความสูง (Elevation) ของลาดดินที่ศึกษาได้เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนในการสร้างลาดดินจำลองเพื่อวิเคราะห์การไหลซึม รูปแบบหน้าตัดลาดดินจำลองที่ใช้วิเคราะห์การไหลซึมแสดงดังรูปที่ 3.11 และเนื่องจากการไหลซึมของดินในความเป็นจริงมีความซับซ้อน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการปรับลดความซับซ้อนลง (Simplify) โดยกำหนดสมมติฐานโดยจะมีสมมติฐานการไหลซึมของหน้าตัดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

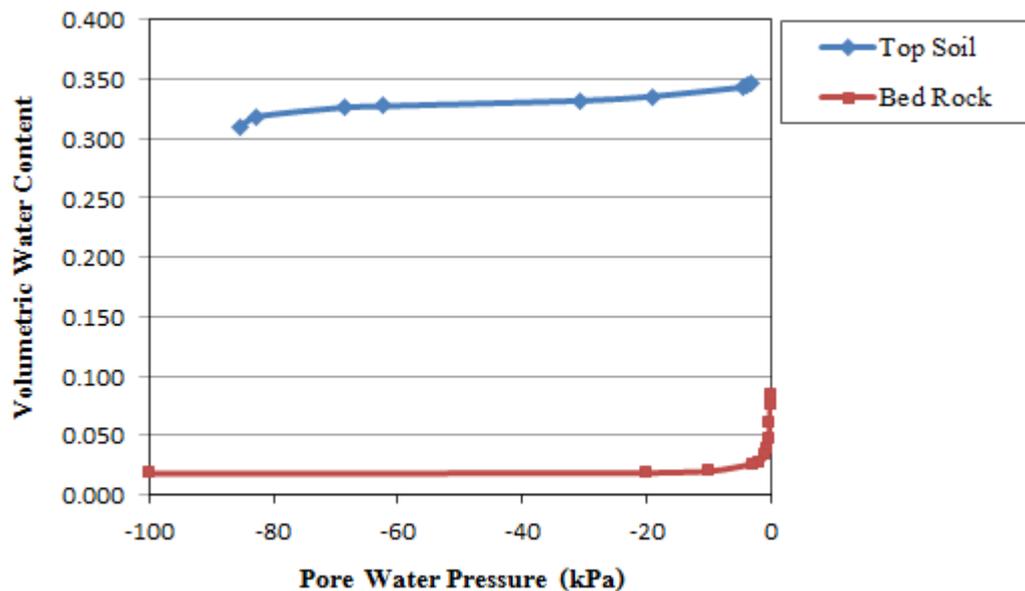
- องค์ประกอบของบนลาดดินจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นบนสุดจะเป็นชั้นดิน (Soil) มีความหนา 3.0 เมตร และชั้นล่างสุดจะเป็นชั้นหินโดยลาดดินมีความลาดเอียงเฉลี่ย 26.5 องศา
- ชั้นดินและชั้นหินมีคุณสมบัติความชื้นน้ำแบบต่อเนื่อง (Continuum Permeability) ไม่ขึ้นกับทิศทาง (Isotropic Permeability)
- การไหลของน้ำจะพิจารณาการไหลเพียง 2 มิติ
- กำหนดให้น้ำฝนกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด
- บริเวณด้านซ้ายและด้านล่างของลาดดินจำลองกำหนดให้ไม่มีการไหลของน้ำ (No Flow,  $Q=0$ ) ในส่วนของด้านขวาของลาดดินจะกำหนดเป็น 2 ส่วน คือชั้นดินให้มีการไหลเป็นแบบอิสระ (Unit Gradient,  $i$ ) และในส่วนของชั้นหินกำหนดให้มีแรงดันน้ำเท่ากับศูนย์ (Pressure = 0) โดยส่วนบนหรือผิวดินกำหนดให้เป็นปริมาณน้ำฝน (Unit Flux,  $q = I_r$ )



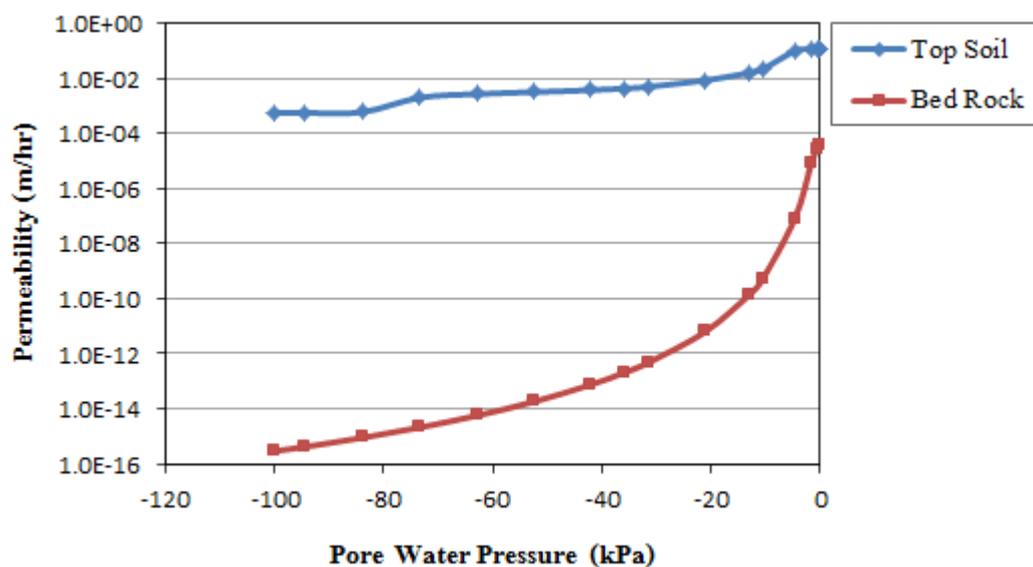
รูปที่ 3.11 แบบจำลองหน้าตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์

### 3.2.2 ข้อมูลคุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์

ข้อมูลหรือตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมที่สำคัญ ได้แก่ เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (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 และข้อมูลของหินดาน (Bed rock) ได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบหินแกรนิตในฮ่องกง Jiao et al (2005) ซึ่งมีสภาพคล้ายคลึงกันและชั้นหินที่ใช้วิเคราะห์การไหลซึมจะไม่พิจารณาถึงธรณีวิทยาโครงสร้าง ข้อมูลของชั้นดินและหินแสดงดังแสดงในรูปที่ 3.12-3.13 ในส่วนของกำลังเฉือนของดินที่ใช้วิเคราะห์จะใช้ข้อมูลของดิน T1@0.8 เมตร เป็นตัวแทนของดินคงสภาพที่บริเวณพื้นที่ที่เกิดการพิบัติ โดยคุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.12 เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ของชั้นดิน (Top Soil) และ หินดาน (Bed rock)



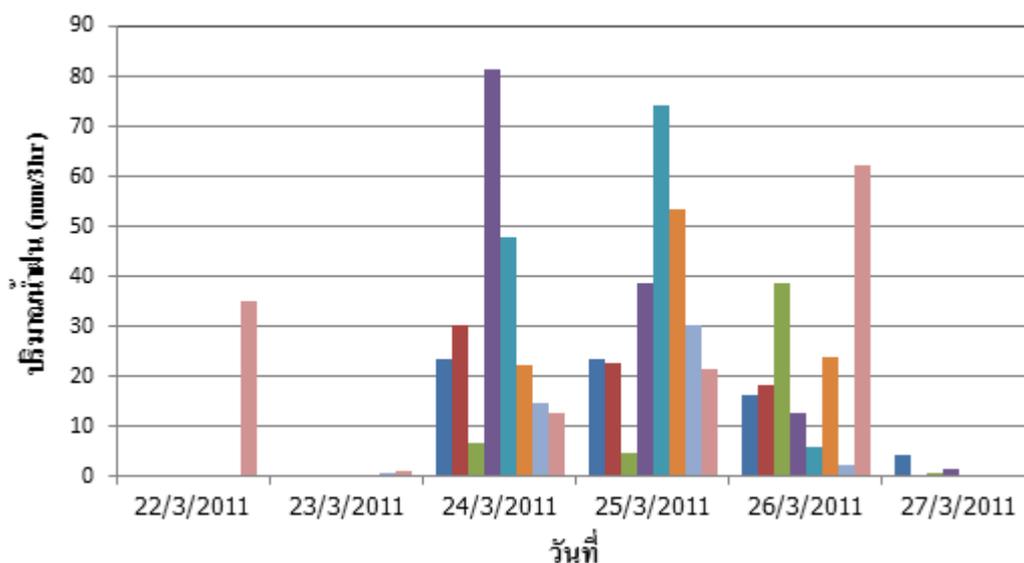
รูปที่ 3.13 ความสามารถในการไหลซึมของดิน (Permeability Function) ของชั้นดิน (Top Soil) และ หินดาน (Bed rock)

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

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

### 3.2.3 การวิเคราะห์รูปแบบของน้ำฝน

ในส่วนจากรูปแบบน้ำฝนที่ใช้วิเคราะห์ในการไหลซึมจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรกจะวิเคราะห์การไหลแบบคงที่ (SteadyState) โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปีที่มีค่าเท่ากับ  $2.99 \times 10^{-4}$  เมตรต่อชั่วโมง แทนการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาระดับน้ำใต้ดินปกติ ในรูปแบบที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) โดยจะใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานี 552201 -นครศรีธรรมราช จ.นครศรีธรรมราช แสดงดังในรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นสถานีที่บันทึกข้อมูลน้ำฝนได้ละเอียดทุก 3 ชั่วโมง และมีความน้ำฝนใกล้เคียงกับสถานีที่ตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณพื้นที่ศึกษามากที่สุด



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

### 3.3 การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

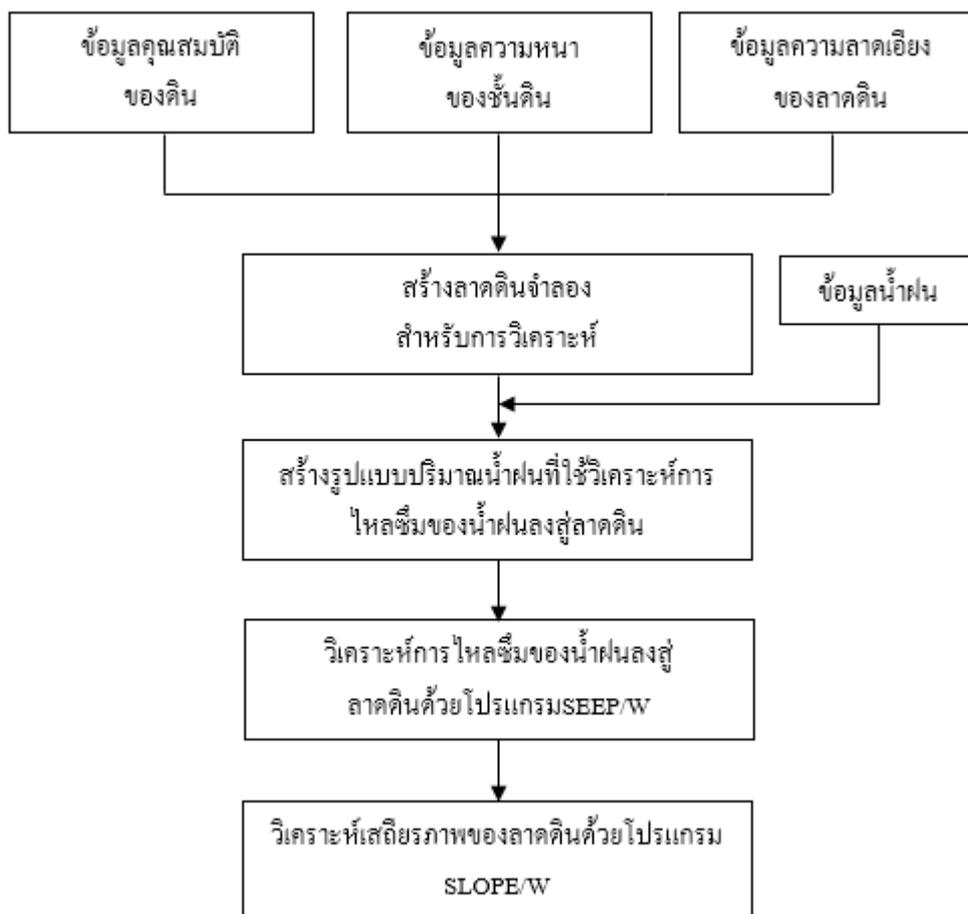
การศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินเป็นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของเสถียรภาพภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกันและเพื่อศึกษาหาความสำคัญของตัวแปรแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินว่ามีความสำคัญมากน้อยเพียงใดที่จะส่งผลให้เสถียรภาพเปลี่ยนไปวิธีการวิจัยทำได้โดยศึกษารวบรวมข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อนำมาออกแบบรูปแบบการศึกษาตัวแปร โดยมีตัวแปรคงที่คือ แรงยึดเกาะประสิทธิผล  $c'$  เท่ากับ 14.37 กิโลปาสคาล มุมเสียดทานภายใน  $\phi'$  เท่ากับ 24 องศา และหน่วยน้ำหนักของดินเท่ากับ 16.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นนำรูปแบบตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้มาวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W จากนั้นนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีจำกัดสมมูลซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบวิธี Bishop's Simplified Method โดยใช้โปรแกรม SLOPE/W โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.15 ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ศึกษาได้แก่ชนิดของดินความชื้นฝนความลาดเอียงและความหนาของชั้นดินซึ่งได้จำแนกเป็นชุดตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยในแต่ละชุดตัวแปรจะมีวิธีวิเคราะห์ดังนี้

- ชุดตัวแปร ก เพื่อศึกษาผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและผลกระทบจากความลาดเอียง ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) และความชื้นฝน ( $I_r$ ) และกำหนดให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน ( $k_s$ ) กับความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่
- ชุดตัวแปร ข เพื่อศึกษาผลกระทบจากความชื้นฝน ( $I_r$ ) ที่ต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินกับความชื้นฝนและกำหนดให้ความลาดเอียงกับความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่
- ชุดตัวแปร ค เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นฝนกับความหนาของชั้นดินและกำหนดให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินกับความลาดเอียงมีค่าคงที่ซึ่งการศึกษาทั้ง 3 ชุดตัวแปรสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.5

โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนกลุ่มดินเช่น  $f_{10,-4}$  ตัวเลข 10 บ่งชี้ว่าดินมีแรงดึงน้ำ (Matric Suction) เท่ากับ 10 กิโลปาสคาลและตัวเลข -4 บ่งบอกว่าดินมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน  $k_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีซึ่งดินอีก 2 ชนิด ก็มีความหมายเช่นเดียวกัน

Winn et al. (2001) ได้เสนอว่าดินที่มี  $k_s$  สูง ( $k_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที) จะมีความสามารถในการระบายน้ำได้สูงและดินที่มี  $k_s$  ต่ำ ( $k_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที) จะมีความสามารถระบายน้ำได้ต่ำโดย  $k_s$  มีช่วงกว้างมากคือ ( $1 \times 10^{-11}$  -  $2 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดกลุ่มดินที่ศึกษาดังนี้ 1)  $f_{10,-4}$  เป็นตัวแทนของกลุ่มดินทราย 2)  $f_{50,-5}$  เป็นตัวแทนของกลุ่มดินตะกอนทรายและ 3)  $f_{100,-6}$  เป็นตัวแทนของกลุ่มดินเหนียวโดย

ดินแต่ละชนิดจะมี Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) และ Permeability Function ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมแสดงดังรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข) ซึ่งหาได้จากการประมาณจากสมการของ Fredlund and Xing (1994) และ Leong and Rahardjo (1997) ตามลำดับ



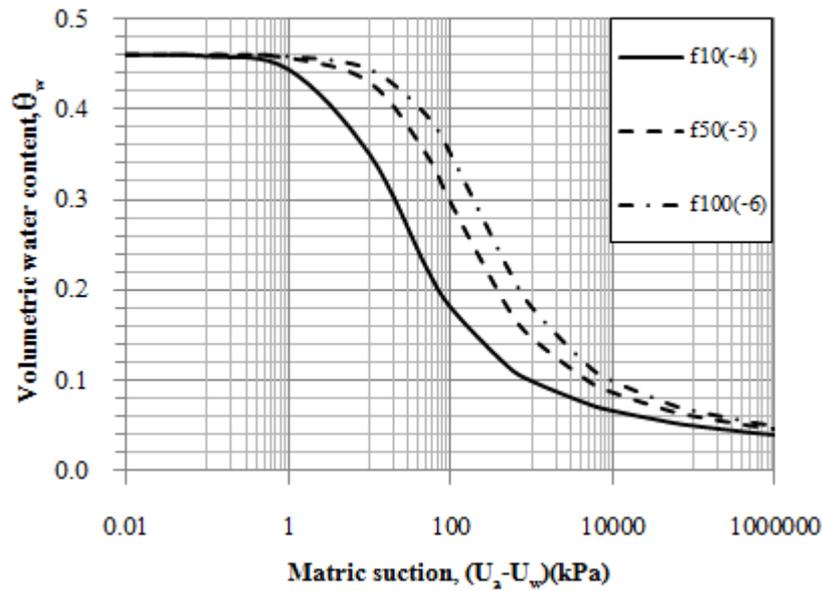
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินที่ใช้ในการศึกษา

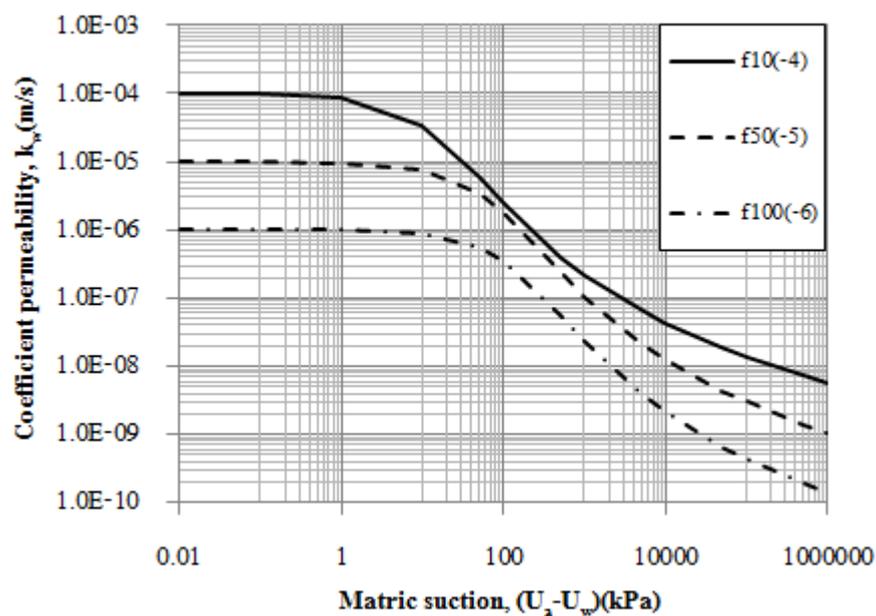
ชุดตัวแปร	ชนิดของดิน	ความลาดเอียง $\alpha(^{\circ})$	ความเข้มฝน (mm./h.)	ความหนาของ ชั้นดิน (m.)	จำนวนชุดตัว แปรย่อยที่ศึกษา
ก	$\begin{bmatrix} f_{10^{\circ}-4} \\ f_{50^{\circ}-5} \\ f_{100^{\circ}-6} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 25 \\ 30 \\ 45 \\ 60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6 \\ 9 \\ 1k_s \end{bmatrix}$	6	36
ข	$\begin{matrix} (f_{10^{\circ}-4}) \\ \{f_{50^{\circ}-5}\} \\ \{f_{100^{\circ}-6}\} \end{matrix}$	45	$\begin{matrix} (1.8) \\ 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 18 \\ 36 \\ 180 \\ (360) \end{matrix} \begin{matrix} \begin{pmatrix} 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 18 \\ 36 \\ 90 \\ 180 \\ (360) \end{pmatrix} \\ \begin{matrix} [1.8] \\ 3.6 \\ 6 \\ 9 \\ 36 \\ 180 \\ 360 \end{matrix} \end{matrix}$	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 $\alpha(^{\circ})$ ความเข้มฝน (mm./h.)	ศึกษาผลกระทบจาก สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และผลกระทบจากความ ลาดเอียง
ข	ความลาดเอียง ความหนาของชั้นดิน (m.)	ชนิดของดิน ความเข้มฝน (mm./h.)	ศึกษาผลกระทบจากความ เข้มฝนที่ต่างกัน
ค	ชนิดของดิน ความลาดเอียง $\alpha(^{\circ})$	ความเข้มฝน (mm./h.) ความหนาของชั้นดิน (m.)	ศึกษาผลกระทบจากความ หนาของชั้นดินที่ต่างกัน



(ก) Soil Water Characteristic Curves ของดินทั้ง 3 ชนิด



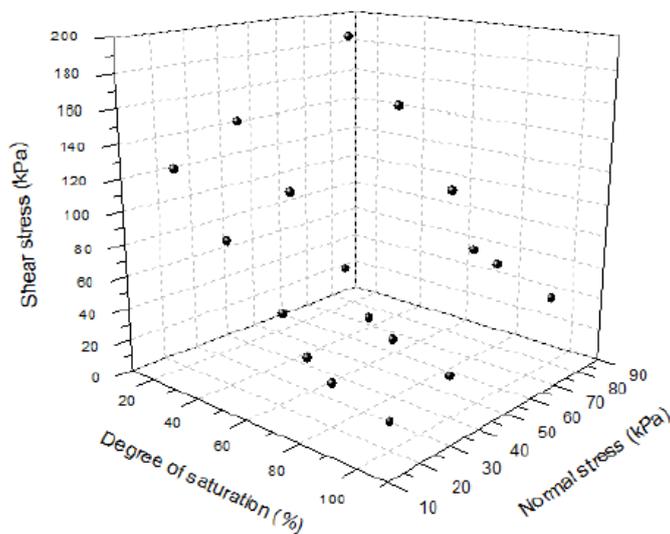
(ข) Permeability Function ของดินทั้ง 3 ชนิด

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

### 3.4 แบบจำลองกำลังรับแรงเฉือนของดิน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนไปสามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน ระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ในแกน X, หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) ในแกน Y, และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Stress) ในแกน Z ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นพื้นผิวระนาบ แสดงดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้ง 3 ได้

ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์หาเสถียรภาพของลาดดินที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลดินได้



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยระบบ 3 แกน

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

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

เมื่อ  $\tau_0$  คือ ค่าคงที่จากกราฟความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน (กิโลปาสกาล)

$a$  คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_r$  กับ  $\tau$

$b$  คือ ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma$  กับ  $\tau$

### 3.5 การศึกษาแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถกระทำได้หลายวิธีสำหรับวิธีวิเคราะห์ที่นิยมใช้ในงานทางด้านปฐพีวิศวกรรมได้แก่วิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีความถูกต้องที่ยอมรับได้ โดยจะแสดงในรูปของอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานซึ่งเกิดจากกำลังต้านแรงเฉือนของดินเป็นหลักกับแรงผลักดันซึ่งเกิดจากน้ำหนักของมวลดินภายในผิวที่พิบัติและแรงกระทำภายนอกโดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีดังนี้

#### 3.5.1 แบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis)

จากพฤติกรรมส่วนใหญ่ในการเกิดลาดดินพิบัติภัยในประเทศไทยอันเนื่องมาจากฝนตกหนัก การพังทลายของลาดดินมักมีรูปร่างผิวเคลื่อนพังเป็นแผ่นบางขนานกับผิวของลาดดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับ

วิธี Finite Element Method และวิธี Limit Equilibrium Method จะได้ผลสอดคล้องกันซึ่งสอดคล้องกับวิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) ที่เหมาะสำหรับการนำมาวิเคราะห์ลาดดินธรรมชาติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นดินบนความลาดชันต่างๆกับระดับความอิ่มตัวของดินที่เปลี่ยนไปจากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปที่อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) เท่ากับ 1.0 โดยจะอาศัยสมการกำลังของดินที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปมาวิเคราะห์ โดยหลักการวิเคราะห์จะอาศัยสมมติฐานดังนี้

- การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) โดยพิจารณาว่าระดับน้ำอยู่ลึกกว่าผิวการเคลื่อนพัง
- ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีความสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด
- วิเคราะห์ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินและวิเคราะห์ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพัง (วรวัชร, 2552)

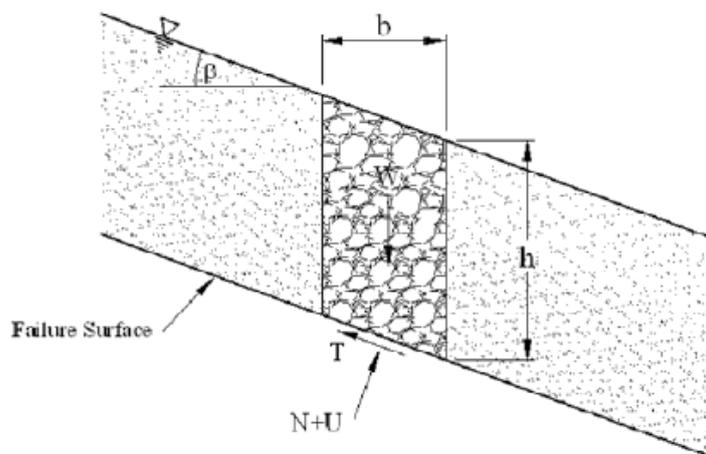
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน แสดงดังรูปที่ 3.18 (ก) และสมการที่ใช้วิเคราะห์แสดงดังสมการที่ 3.4
- กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพัง แสดงดังรูปที่ 3.18 (ข) และสมการที่ใช้วิเคราะห์แสดงดังสมการที่ 3.5

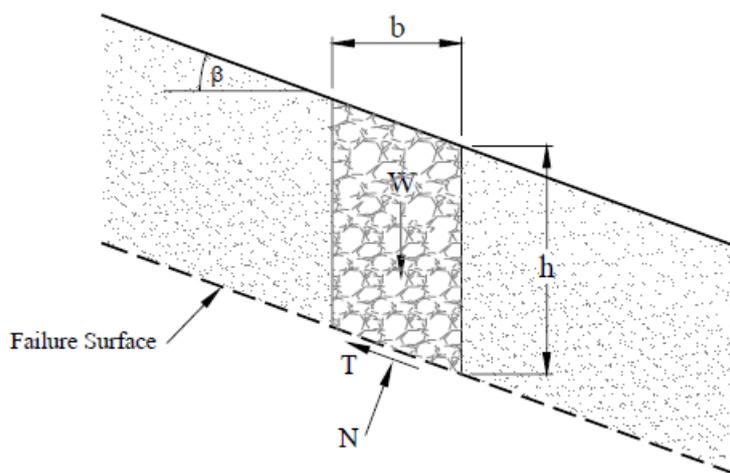
$$F.S. = \frac{c' + h\gamma_t \cos \beta \tan \phi' - S_r u_w \tan \phi'}{h\gamma_t \sin \beta} \quad (3.4)$$

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

เมื่อ	$c'$	=	ความเชื่อมแน่นของดิน
	$h$	=	ความหนาของชั้นดิน
	$\gamma_t$	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
	$\gamma_w$	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	$\gamma_{sat}$	=	ความหนาแน่นรวมของดินอิ่มตัว
	$\beta$	=	ความลาดชันของลาดดิน
	$\phi'$	=	มุมเสียดทานภายในของดิน
	$S_r$	=	ระดับความอิ่มตัวของดิน
	$u_w$	=	แรงดันน้ำด้านลบ



(ก) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน

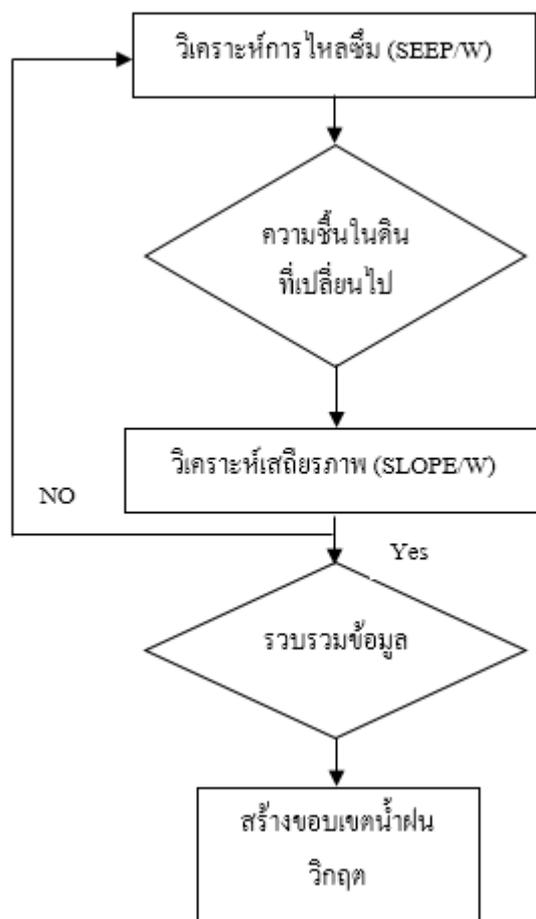


(ข) กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินการเคลื่อนพัง

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

### 3.5.2 วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W

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



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม SLOPE/W

### 3.6 การหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API)

ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในชั้นดินที่ดินอุ้มน้ำไว้ ณ เวลาใด ๆ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินสามารถประเมินได้ โดยอาศัยปัจจัยความชื้นในดิน (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)
	$P_t$	=	ค่าปริมาณน้ำฝน ณ เวลาใดๆ (t) (มิลลิเมตร)
	$K_t$	=	ค่าคงที่คูณลด ณ เวลาใด ๆ

ซึ่ง K หาได้จากความสัมพันธ์ของ Chodhury and Blanchard (1983) ดังสมการที่ 3.7

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

เมื่อ  $E_t$  = การคายระเหย ณ เวลาใด ๆ  
 $W$  = ความชื้นในดินที่สามารถระเหยได้ (มิลลิเมตร)

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 ซึ่งในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.8 โดยประยุกต์ได้ดังสมการที่ 3.9 ในขณะที่กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.5 และสมการที่ 3.8 และสามารถประยุกต์ได้ดังสมการที่ 3.10 ตามลำดับ

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

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

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

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

เมื่อ  $API_{cr}$  = ดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (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)
$\phi'$	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle)
$F.S.$	=	อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety)
$\gamma_d$	=	หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight of Soil)
$\gamma_w$	=	หน่วยน้ำหนักน้ำ (Unit Weight of Water)
$\beta$	=	ความลาดชันของลาดดิน (Angle of Slope)
$\alpha$	=	คือมุมเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของดิน

## บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

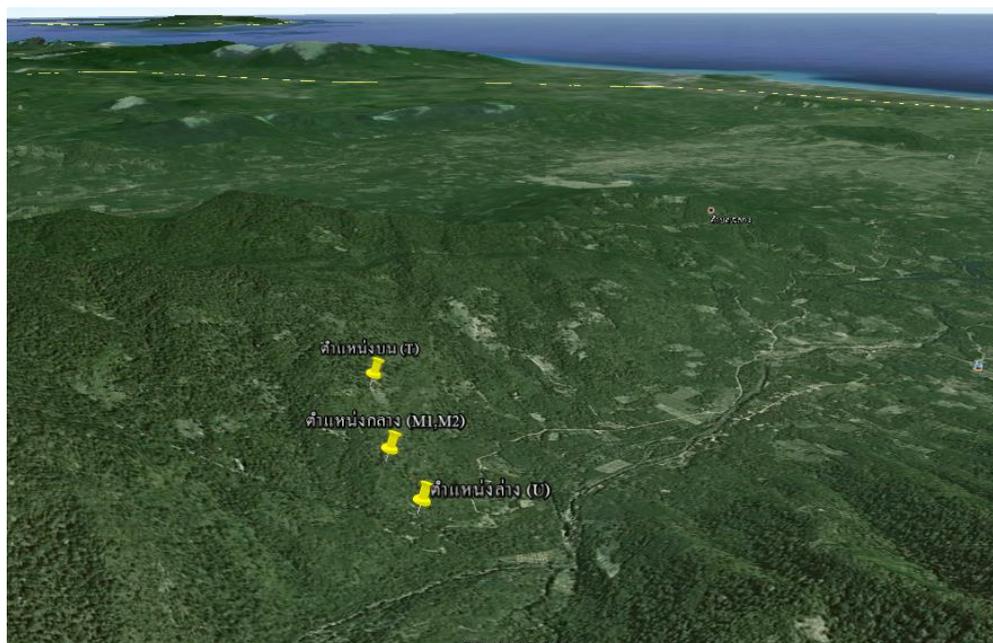
ผลของการศึกษาวิจัยแบ่งออกตามลักษณะแผนการดำเนินการดังแสดงในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการสำรวจพื้นที่และทดสอบคุณสมบัติดินในสนาม ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและปริมาณน้ำฝนที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติมีรายละเอียดดังนี้

### 4.1 ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินในสนาม

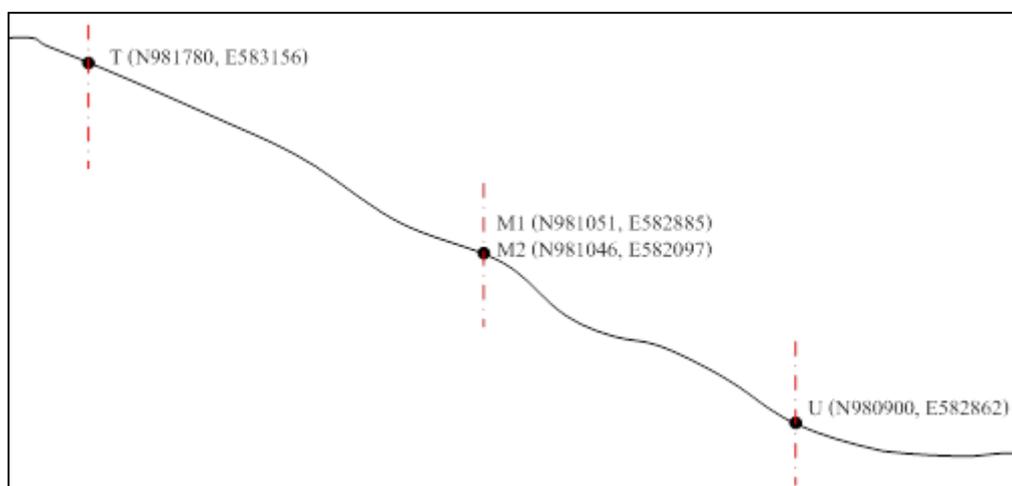
พื้นที่ศึกษาวิจัย ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เคยมีประวัติการเกิดลาดดินพิบัติเมื่อวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2554 ซึ่งจากการลงพื้นที่ศึกษาเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2554 เพื่อทำการสำรวจทดสอบดินและเก็บตัวอย่างดินในสนามซึ่งจากการประเมินพบว่าการพิบัติของลาดดินเป็นแบบลาดอนันต์ตามแนวยาวของร่องน้ำเดิมซึ่งถูกมวลดินทับถมกันจึงได้แบ่งพื้นที่ทดสอบและเก็บตัวอย่างออกเป็น 3 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) โดยมีพิกัดตำแหน่ง GPS ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ผลแม่นยำดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบดินในพื้นที่ศึกษาจริงซึ่งการทดสอบในสนามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา (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 บริเวณพื้นที่ศึกษาที่เคาะเกิดการพิบัติของลาดดิน

#### 4.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา (Kunzelstab Penetration Test : KPT)

ตำแหน่ง T พิกัด N 981780 E 583156 เป็นตำแหน่งบริเวณด้านบนบนของลาดดินใกล้กับจุดเริ่มต้นของลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติในอดีตแสดงดังรูปที่ 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 ดินมีสภาพอ่อนขี้หลวมและมีรากของพืชฝังตัวอยู่โดยมีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 7 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ลึกลงไปในช่วงความลึก 0.2 – 2.0 เมตร ดินมีลักษณะสีส้มแดง มีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 8 – 28 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตรเป็นดินที่มีสภาพหลวมและค่อย ๆ แน่นขึ้นปานกลางตามความลึกไปจนถึงช่วงความลึก 2.0 - 2.4 เมตรซึ่งมีค่าการทดสอบ 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 ผลการสำรวจและทดสอบดินในสนามด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในบริเวณด้านบนบนของลาดดินตำแหน่ง T

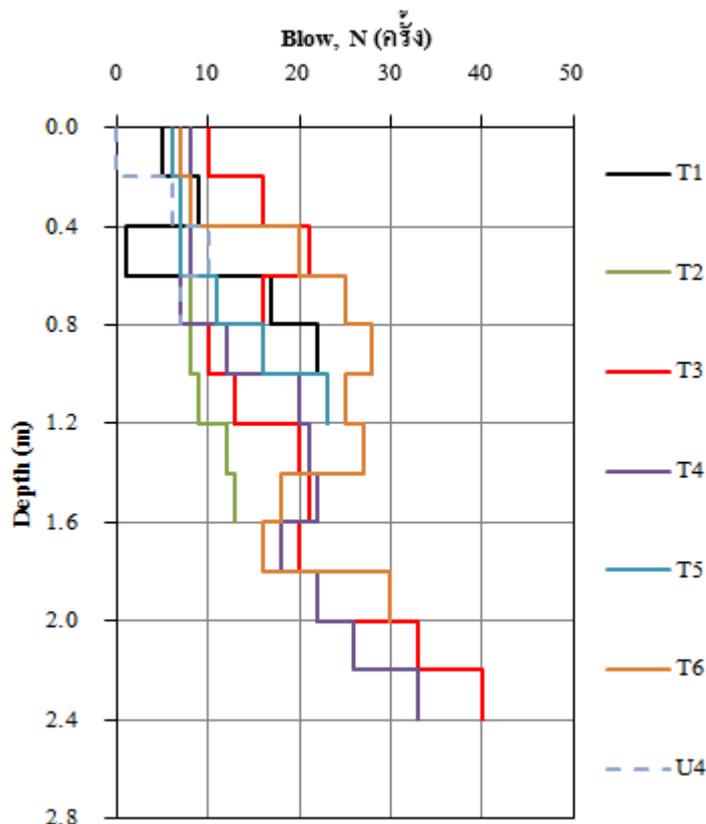
ระดับความลึก (m.)	สิ่งที่พบ	สภาพดิน	สี	KPT(blow/20cm)
0.0 – 0.2	ทราย, รากพืช	หลวม	น้ำตาล	7
0.2 – 2.0	-	หลวมถึงแน่นปานกลาง	ส้มแกมแดง	8 -28
2.0 – 2.4	-	แน่นปานกลาง	ส้มแกมแดง	22 - 40



(ก) ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบเบา Kunzelstab Penetration Test  
ทางด้านขวาของรอยพิบัติบริเวณตำแหน่ง T



(ข) ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบเบาKunzelstab Penetration Test  
ทางด้านซ้ายของรอยพิบัติบริเวณตำแหน่ง T  
รูปที่ 4.2 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง T



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ Kunzelstab Penetration Test (KPT) ในบริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่ง 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 พบว่าในบริเวณนี้ผิวดินส่วนบนจะปกคลุมไปด้วยต้นหญ้า และเมื่อเปิดหน้าดินลงมาในระยะช่วงความลึก 0.0 – 0.2 เมตรพบว่าดินในช่วงนี้จะมีลักษณะสีน้ำตาลปนส้ม จับตัวกันในสภาพหลวมและมีรากไม้กระจายตัวอยู่ทั่วไป ในพื้นที่ส่วนนี้ไม่ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดิน (KPT) อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบชำรุดจึงได้นำข้อมูลในระหว่างการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมาประกอบการพิจารณา ซึ่งพบว่าดินในช่วงความลึก 0.2 – 1.5 เมตร ดินมีสภาพแน่น สังกัดได้จากการเก็บตัวอย่างที่กระทำไต่ยากกว่าในตำแหน่ง T และ U โดยในช่วงความลึกนี้ดินจะมีลักษณะเป็นสีส้มตลอดช่วงความลึกจนถึงระดับความลึก 1.5 เมตรเป็นต้นไปจะไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินได้ เนื่องจากมีชั้นหินลอยตัวปะปนอยู่ทั่วบริเวณมีขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ซึ่งขนาดหินจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึก 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 ทดสอบ (เครื่องมือชำรุด)
0.2 - 1.5	-	แน่น	ส้ม	
1.5 เป็นต้นไป	เศษหินผุ	-	-	



(ก) สภาพดินบริเวณตำแหน่ง M1



(ข) สภาพดินบริเวณตำแหน่ง M2

#### 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 ดินมีสภาพหลวม โดยมีซากพืชซากสัตว์และรากไม้ฝังตัวอยู่ ลึกลงไปในช่วงความลึก 0.2 – 1.0 เมตรพบว่าดินมีสีน้ำตาลเข้มมีสภาพหลวมซึ่งมีค่าการทดสอบ KPT เท่ากับ 6 – 10 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และรายละเอียดค่าการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีการทดสอบเจาะหยั่งแบบเบาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

##### 4.1.2 ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

ค่าการซึมน้ำของดินมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นตัวที่บ่งบอกว่าดินชนิดนั้นสามารถให้น้ำซึมผ่านหรือสามารถระบายน้ำได้มากน้อยเพียงใดซึ่งถ้าน้ำซึมผ่านได้ง่ายก็จะทำให้ปริมาณความชื้นในมวลดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงสาเหตุให้กำลังของดินลดลงได้ จากการทดสอบ

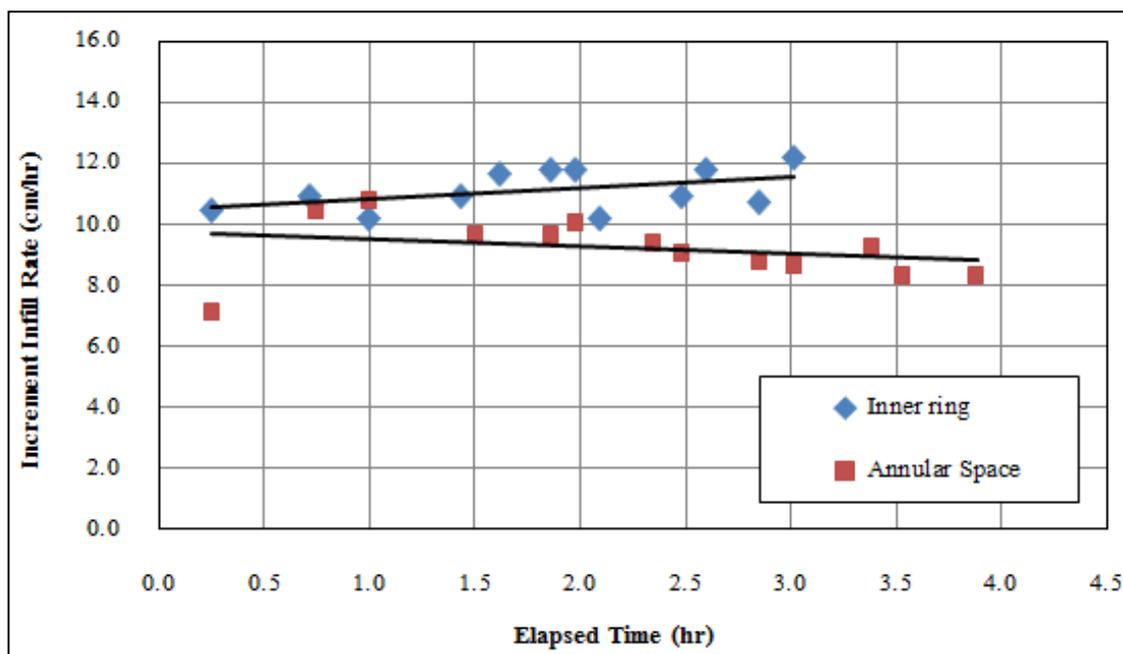
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double-Ring Test ในบริเวณใกล้กับจุดเริ่มต้นที่เคยเกิดการพิบัติในอดีตแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งพบว่าค่าการซึมผ่านของดินในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 11.13 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ( $3.09 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อวินาที) หรือมีค่าเท่ากับ  $3.09 \times 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของค่าการซึมผ่านของดินทรายละเอียดและดินตะกอนทรายดังแสดงในตารางที่ 4.4 และสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในการจำแนกชนิดของดินด้วยวิธี Unified Soil Classification (USCS) โดยความสัมพันธ์ของค่าการซึมผ่านเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.6 และรายละเอียดการทดสอบค่าการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double-Ring Test ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.5 พื้นที่ศึกษาในบริเวณตำแหน่ง U

ตารางที่ 4.4 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	$10^{-6} - 10^{-9}$



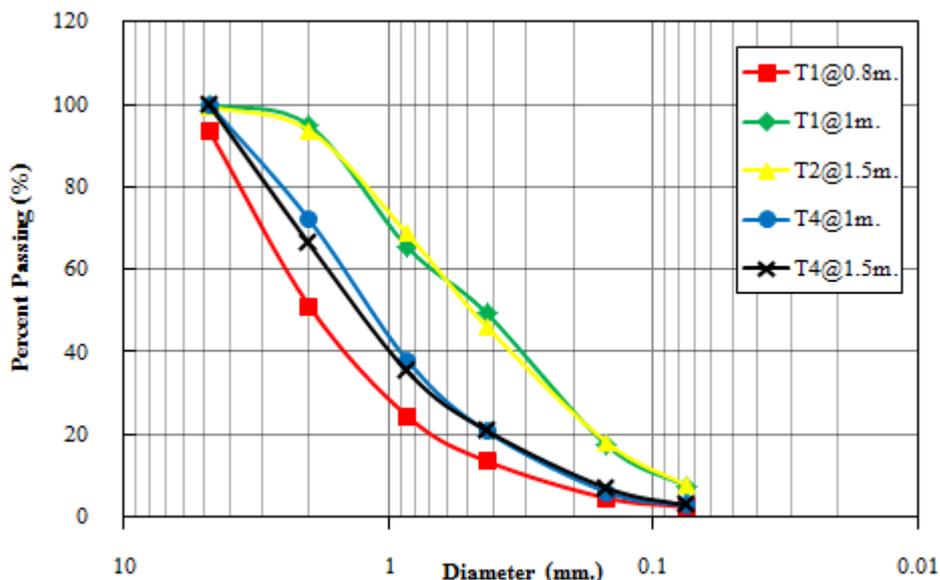
รูปที่ 4.6 ค่าการซึมน้ำเทียบกับเวลาด้วยวิธี Double-Ring Test

## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ

### 4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้ง 3 บริเวณประกอบไปด้วยการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) การทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limits) การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (Grain Size Distribution) แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาจำแนกชนิดของดินด้วยวิธี USCS ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.5 โดยรายละเอียดของผลการทดสอบมีดังนี้

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด พบว่าเมื่อพิจารณาตามการจำแนกดินด้วยวิธี Unified สามารถจำแนกได้เป็นดิน 5 กลุ่มคือ SW (ดินทรายมีขนาดคละกัณฑ์) ได้แก่ T1@0.8 เมตร SP-SC (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายปนดินเหนียว) ได้แก่ T1@1 เมตร SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ T2@1.5 เมตร SW-SC (ดินทรายมีขนาดคละกัณฑ์และเป็นดินทรายปนดินเหนียว) ได้แก่ T4@1 เมตร SW-SM (ดินทรายมีขนาดคละกัณฑ์และเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ T4@1.5 เมตรและเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 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



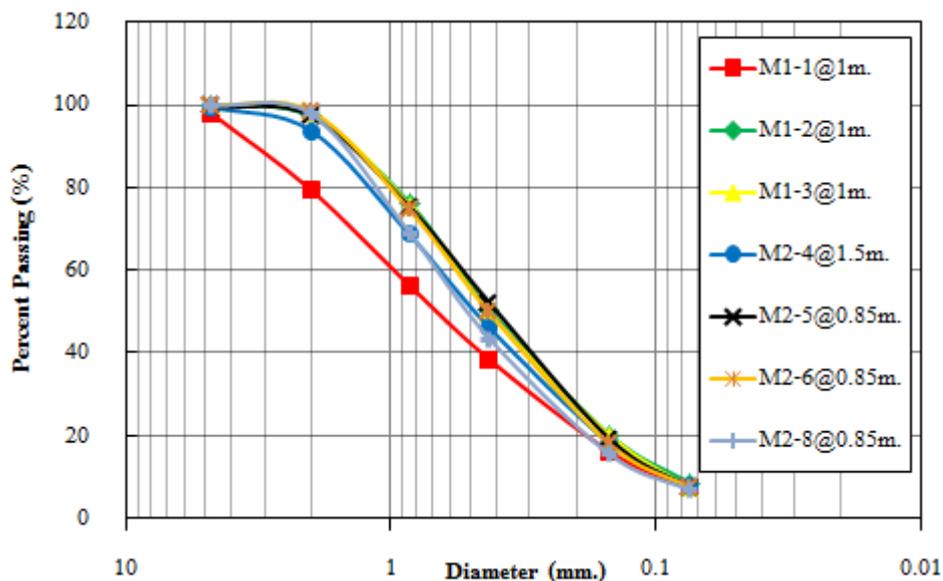
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง T ทั้ง 5 จุด

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

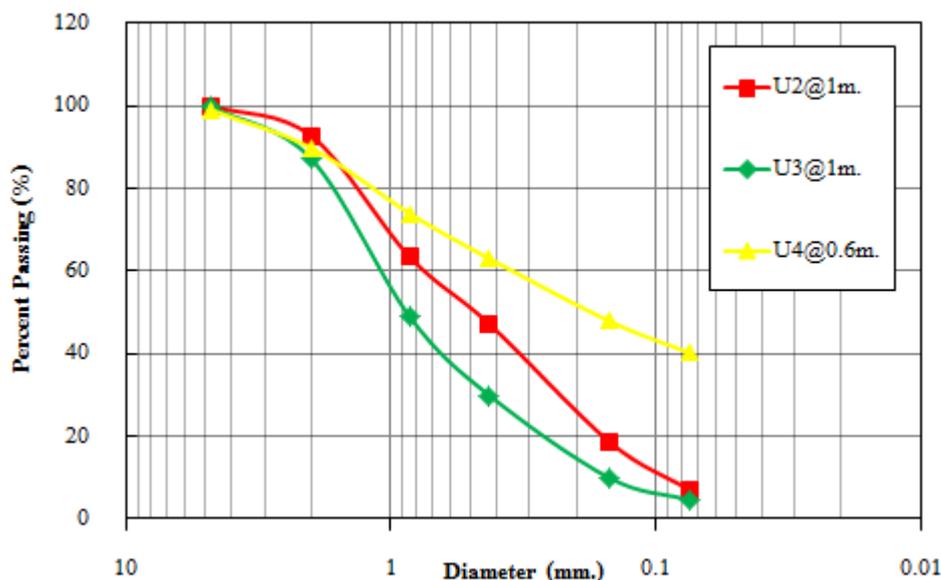
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง M2 ทั้ง 4 จุด พบว่าสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ SP-SC (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายปนดินเหนียว) ได้แก่ M2-4@1.5 เมตรและ M2-5@0.85 เมตร SW-SC (ดินทรายมีขนาดคละกัันดีและเป็นดินทรายปนดินเหนียว) ได้แก่ M2-6@0.85 เมตร SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ M2-8@0.85 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.8 พบว่าดินทั้ง 4 จุด มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุดพบว่าสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ SP-SM (ดินทรายมีขนาดสม่ำเสมอและเป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน) ได้แก่ U2@1 เมตร SW (ดินทรายมีขนาดคละกัันดี) ได้แก่ U3@1 เมตร SC (ดินทรายปนดินเหนียว) ได้แก่ U4@0.6 เมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดดินจากรูปที่ 4.9 พบว่าดิน U2@1 เมตรและU3@1 เมตร มีลักษณะ

การกระจายตัวเหมือนกันโดย U2@1 เมตร มีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ในช่วง 5-12 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของดิน U3@1 เมตร มีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ดิน U4@0.6 เมตรมีรูปแบบการกระจายตัวที่ต่างออกไปโดยไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ ( $C_u$ ) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง ( $C_c$ ) และยังมีขนาดเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง M1 และ M2



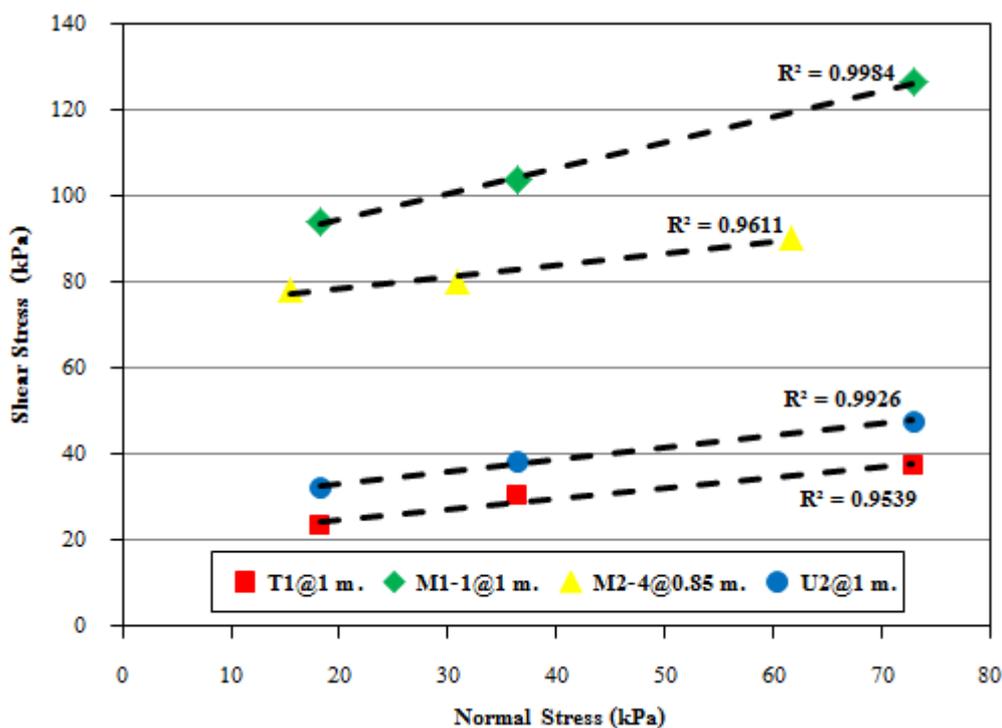
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของเม็ดดินบริเวณตำแหน่ง U ทั้ง 3 จุด

ตารางที่ 4.5 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	ดินมีการกระจายตัวคล้ายคลึงกับ 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	ดินมีการกระจายตัวคล้ายคลึงกับ 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

ผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินด้วยวิธี Multi-stage direct shear test โดยทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำ-เฉือนแบบระบายน้ำ (Consolidated-Drained Test) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติและการทดสอบที่ระดับความชื้นต่าง ๆ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติเป็นการทดสอบเพื่อหาทราบค่ากำลังเฉือนของดินซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการกำหนดช่วงความชื้นที่จะทดสอบที่ความชื้นต่าง ๆ การทดสอบที่ความชื้นธรรมชาติใช้ตัวอย่างดินทดสอบ 3 บริเวณ คือ ตำแหน่งด้านบนของลาดดิน (T1@1 เมตร) ตำแหน่งตรงกลางของของภูเขา (M1-1@ 1 เมตร M2-4@ 0.85 เมตร) และตำแหน่งตอนล่างสุดของภูเขา (U2@1 เมตร) ซึ่งรายละเอียดการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยผลการทดสอบกำลังเฉือนที่ความชื้นธรรมชาติได้แสดงไว้ในรูปแบบแผนภาพของมอร์ดังรูปที่ 4.10 และสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดิน ( $c'$  และ  $\phi'$ ) ได้ดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.10 ค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างดินในรูปแบบแผนภาพของมอร์ที่ความชื้นธรรมชาติในบริเวณ 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%

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดิน ( $c'$  และ  $\phi'$ ) ที่ความชื้นธรรมชาติ

ตำแหน่ง	ความชื้นธรรมชาติ ( $w_n$ , %)	ระดับความอิ่มตัว ด้วยน้ำ ( $S_r$ , %)	ความเชื่อมั่น ประสิทธิผล ( $c'$ , kPa)	มุมเสียดทานภายใน ประสิทธิผล ( $\phi'$ , 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

จากตารางที่ 4.6 พบว่าผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นธรรมชาติที่ตำแหน่ง M1-1@ 1 เมตร และ M2-4@ 0.85 เมตร ดินมีค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผล (Effective Cohesion,  $c'$ ) สูงกว่าในตำแหน่ง T1@ 1 เมตร และ U2@ 1 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งทั้งสองมีปริมาณขนาดเม็ดดินละเอียดในปริมาณมากและเป็นดินที่มีดินเหนียวปนจึงส่งผลต่อค่า Matric Suction ให้มีค่าสูงขึ้นทำให้กำลังของดินที่ได้มีมากขึ้น

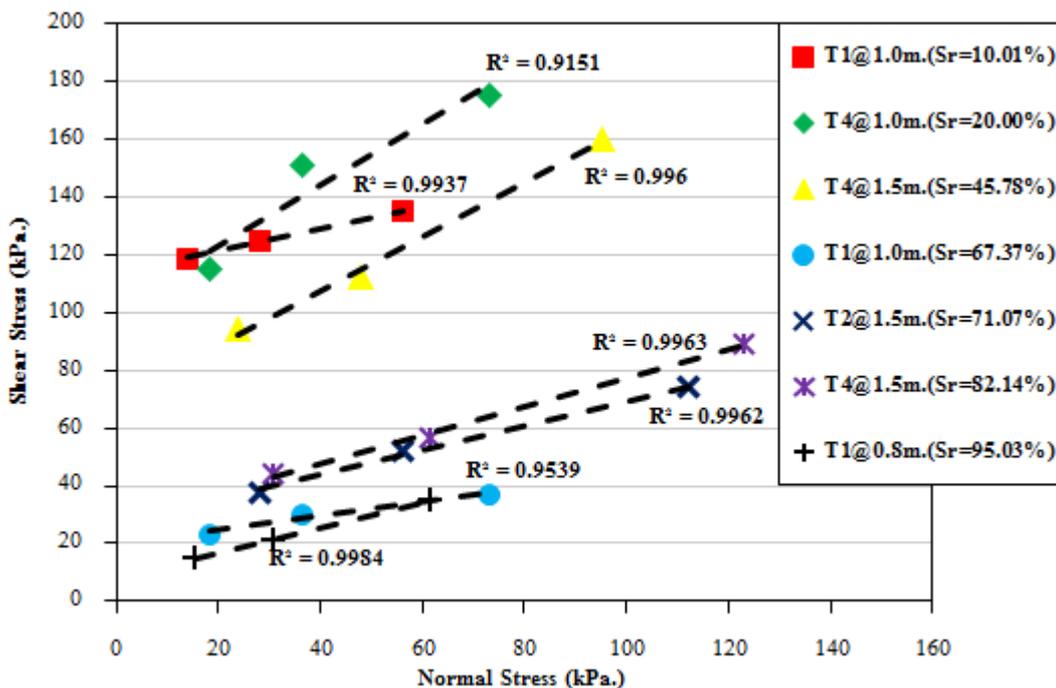
หลังจากทราบผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นธรรมชาติทำให้สามารถระบุระดับความชื้นหรือระดับความอิ่มตัวของตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบได้ ซึ่งรายละเอียดการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. โดยผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ ในทุก ๆ ตำแหน่งแสดงไว้ในรูปแบบแผนภาพของมอร์คิงแสดงในรูปที่ 4.11 และสามารถสรุปผลค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินในตำแหน่ง T จากรูปที่ 4.11 (ก) พบว่าดินมีค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผล (Effective Cohesion,  $c'$ ) สูงสุดเท่ากับ 113.77 กิโลปาสคาล ที่ระดับความอิ่มตัว 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.85 กิโลปาสคาลที่ระดับความอิ่มตัว 90- 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Internal Friction Angle,  $\phi'$ ) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 46.39 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 20- 40 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 23.05 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 65- 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ระดับความอิ่มตัว 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ 80 - 90 เปอร์เซ็นต์และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าความเชื่อมั่นประสิทธิผลและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลใกล้เคียงกัน คือ 26.88 กิโลปาสคาล 27.98 กิโลปาสคาล กับ 7.85 กิโลปาสคาล และ 23.05 องศา 26.18 องศา และ 23.52 องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.7 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ก) ในตำแหน่งนี้จะเห็นได้ว่ากำลังเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ

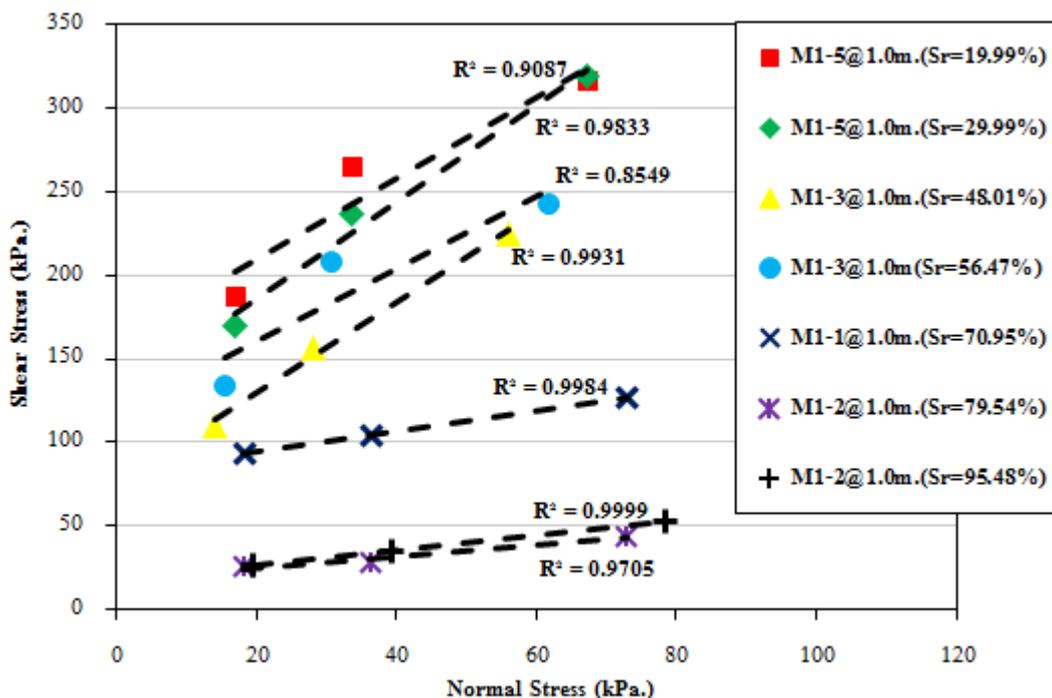
ความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันในบางตัวอย่างที่ทดสอบในความชื้นที่สูงกว่าก็ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าในตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำกว่าซึ่งเนื่องมาจากความสมบูรณ์ของการเตรียมตัวอย่างดินและสภาพความแปรปรวนของตัวอย่างดินที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินในตำแหน่ง M1 และ M2 จากรูปที่ 4.11 (ข) และรูปที่ 4.11 (ค) พบว่าตำแหน่งทั้ง 2 ดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 161.67 กิโลปาสคาล และ 148.97 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ที่ระดับความอิ่มตัวเดียวกัน คือ 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 16.85 กิโลปาสคาล ที่ระดับความอิ่มตัว 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ และ 16.34 กิโลปาสคาล ที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 70.96 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ และ 75.14 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 50 - 65 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 19.35 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 15.31 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน คือ ค่าความเชื่อมแน่น 17.01 กิโลปาสคาล และ 16.85 กิโลปาสคาล 16.34 กิโลปาสคาล และ 17.99 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ค่ามุมเสียดทาน 19.35 องศา และ 24.70 องศา 21.01 องศา และ 20.59 องศา ตามลำดับและเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.7 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ข) และรูปที่ 4.11 (ค) จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทั้ง 2 ตำแหน่ง มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ยังมีบางตัวอย่างดินที่ค่ากำลังเฉือนสูงกว่าในตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำกว่าเช่นกัน

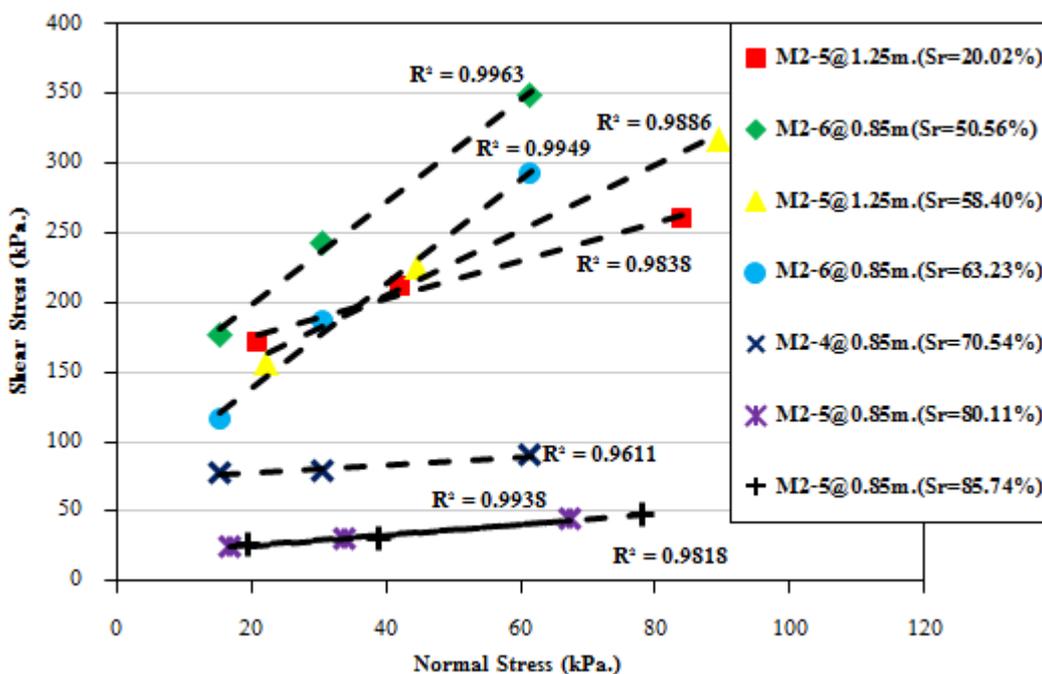
สำหรับตำแหน่ง U จากรูปที่ 4.11 (ง) พบว่าดินมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 128.16 กิโลปาสคาล ที่ระดับความอิ่มตัว 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.58 กิโลปาสคาล ที่ระดับความอิ่มตัว 50 - 65 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดเท่ากับ 72.64 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.59 องศา ที่ระดับความอิ่มตัว 0% - 20% ตามลำดับ โดยที่ระดับความอิ่มตัว 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และ 90 - 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือ 18.77 กับ 16.54 กิโลปาสคาล และ 19.93 องศา และ 22.56 องศา ตามลำดับ ในตำแหน่งนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.7 ร่วมกับรูปที่ 4.11 (ง) จะเห็นได้ว่ากราฟกำลังเฉือนของดินในช่วงความชื้นต่ำ ๆ มีกิโลปาสคาล เส้นกราฟที่สลับกันหรือดินมีความแปรปรวนสูงในขณะที่ช่วงความชื้นสูง ๆ กำลังเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น



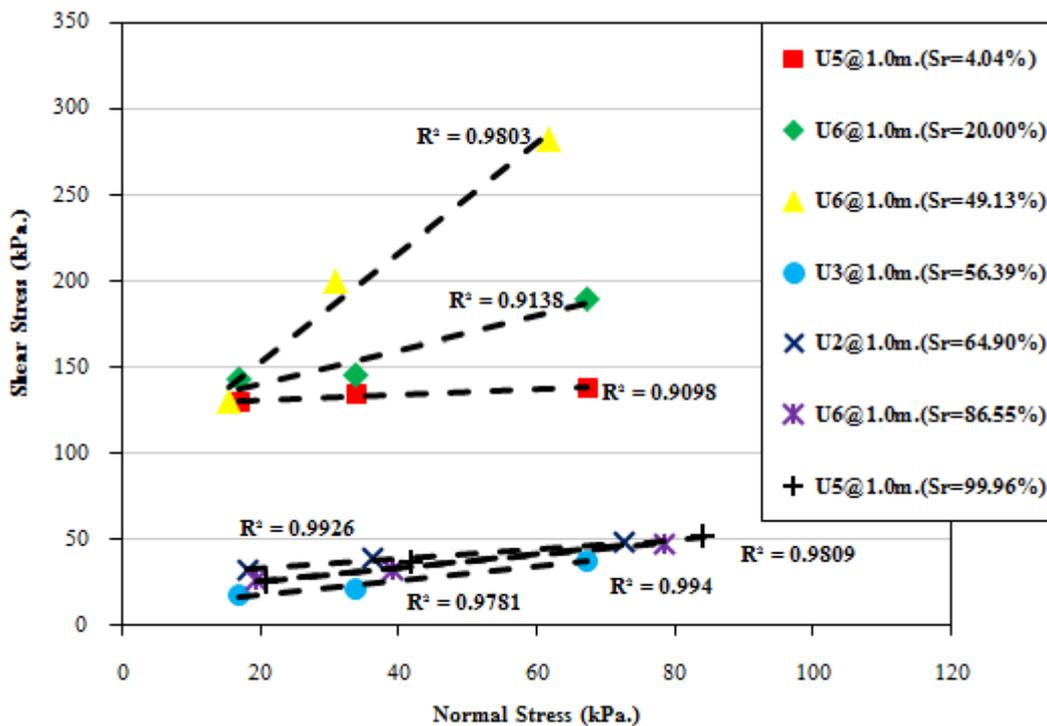
รูปที่ 4.11 (ก) การทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ ในบริเวณ T



รูปที่ 4.11 (ข) การทดสอบกำลังเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนไปที่ตำแหน่ง M1

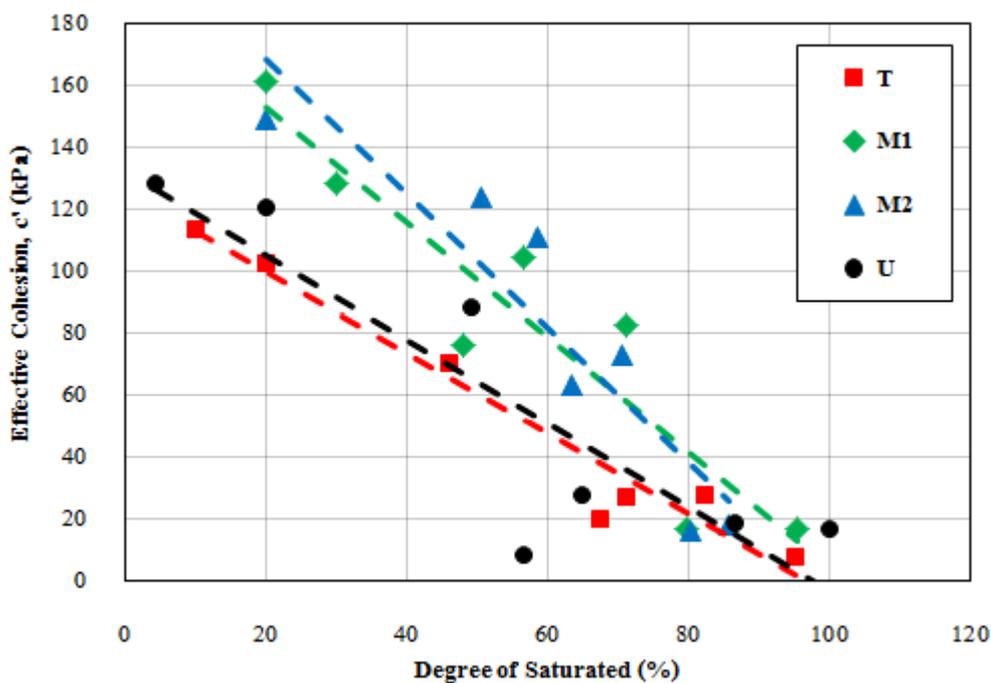


รูปที่ 4.11 (ค) การทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ ในบริเวณ M2

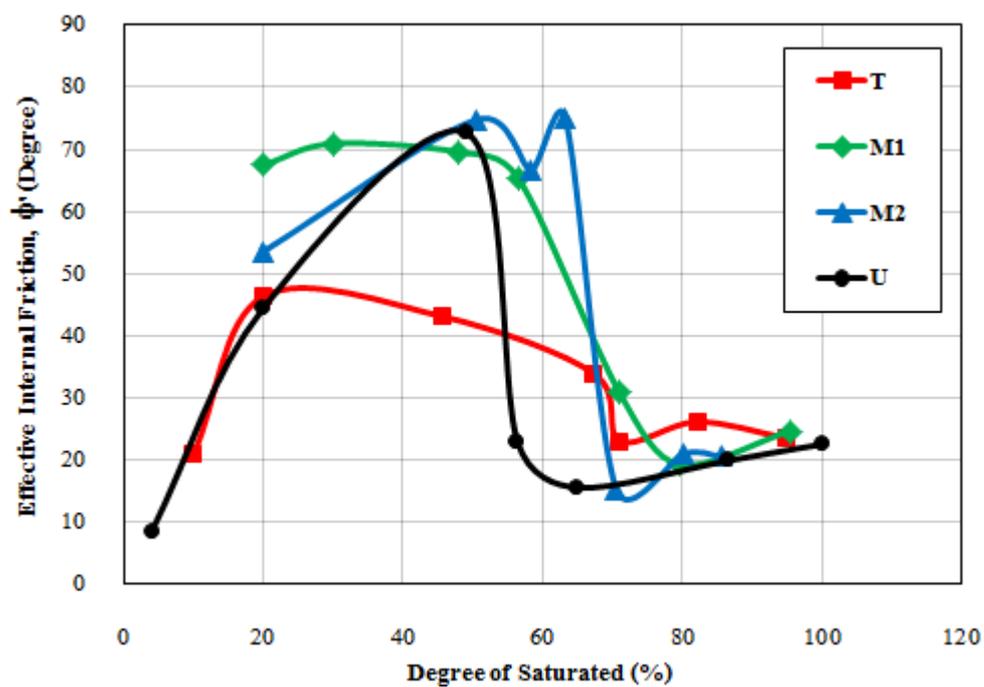


รูปที่ 4.11(ง) การทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ ในบริเวณ U

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล (Effective Cohesion,  $c'$ ) กับความชื้นหรือระดับความอิ่มตัว ( $S_r$ ) จากรูปที่ 4.12 (ก) และตารางที่ 4.7 พบว่าความชื้นส่งผลโดยตรงต่อค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล สังเกตได้จากเมื่อความชื้นหรือระดับความอิ่มตัวของดินที่ใช้ทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลรวม (Total Cohesion Intercept,  $c^T$ ) มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เนื่องมาจากน้ำได้แทรกตัวเชื่อมต่อกันภายในช่องว่างระหว่างมวลดินและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นส่งผลให้แรงตึงผิว (Surface Tension) ถูกทำลายทำให้ค่าความเชื่อมแน่นที่เป็นผลจากแรงตึงผิว (Specific Matric Suction,  $c^s$ ) สลายไปและเมื่อในมวลดินมีความชื้นมากพอก็จะทำให้คงเหลือเพียงค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลที่แท้จริง โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงระดับความอิ่มตัวตั้งแต่ 80 – 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลกับระดับความอิ่มตัว ( $S_r$ ) แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข) พบว่าเมื่อที่ระดับความอิ่มตัวในช่วง 70 – 100 เปอร์เซ็นต์ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.19 องศา และในช่วงระดับความอิ่มตัว 20 – 70 เปอร์เซ็นต์ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลจะมีค่าสูงมาก



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



รูปที่ 4.12(๑) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล ( $\phi'$ ) กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S<sub>v</sub>)

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์กำลังเหนือนของดินที่ระดับความอึ้มตัวต่าง ๆ

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 <sup>(1)</sup>	102.54 <sup>(2)</sup>	70.20	19.92	26.88	27.98	7.85
	$c^s$ (kPa.)	105.92 <sup>(1)</sup>	94.69 <sup>(2)</sup>	62.35	12.06	19.03	20.13	0.00
	$\phi'$ (Degree)	20.88 <sup>(1)</sup>	46.39 <sup>(2)</sup>	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 <sup>(2)</sup>	16.85
	$c^s$ (kPa.)	144.82	111.56	87.67	59.33	65.52	0.16 <sup>(2)</sup>	0.00
	$\phi'$ (Degree)	67.5	70.96	65.44	69.60	30.98	19.35 <sup>(2)</sup>	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 <sup>(2)</sup>	110.76 <sup>(2)</sup>	63.19	72.80	16.34	17.99 <sup>(2)</sup>
	$c^s$ (kPa.)	132.63	107.55 <sup>(2)</sup>	94.42 <sup>(2)</sup>	46.85	56.46	0.00	1.65 <sup>(2)</sup>
	$\phi'$ (Degree)	53.60	74.83 <sup>(2)</sup>	66.72 <sup>(2)</sup>	75.14	15.31	21.01	20.59 <sup>(2)</sup>
	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 <sup>(1)</sup>	120.64	88.60	8.58	27.35 <sup>(2)</sup>	18.77	16.54
	$c^s$ (kPa.)	111.62 <sup>(1)</sup>	104.10	72.06	-	10.82 <sup>(2)</sup>	2.24	0.00
	$\phi'$ (Degree)	8.59 <sup>(1)</sup>	44.47	72.64	23.00	15.59 <sup>(2)</sup>	19.93	22.56
	Sr (%)	4.04	20.00	49.13	56.39	64.90	86.55	99.96

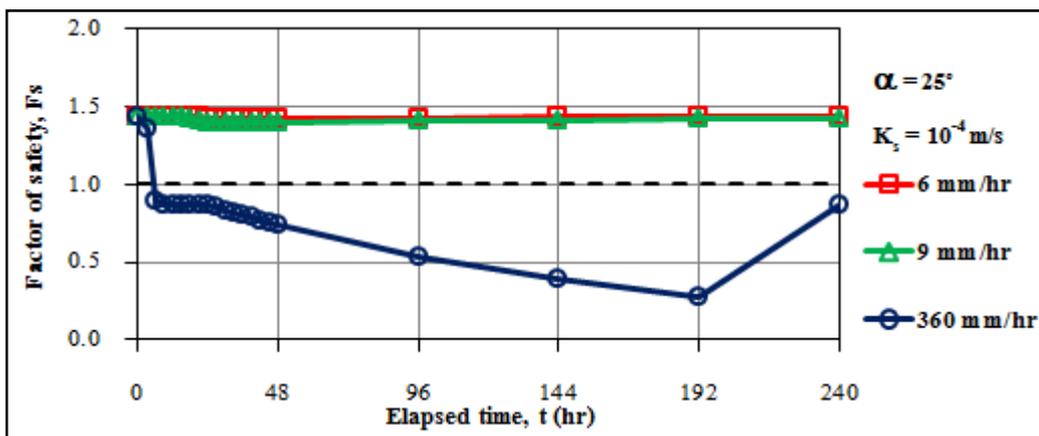
หมายเหตุ : (1) ตัวอย่างเกิดการหดตัวมากเกินไป (2) ควบคุมค่าความอึ้มตัวไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดแต่ใกล้เคียง

### 4.3 ผลการศึกษาตัวแปรของเสถียรภาพของลาดดินภายใต้ปริมาณน้ำฝน

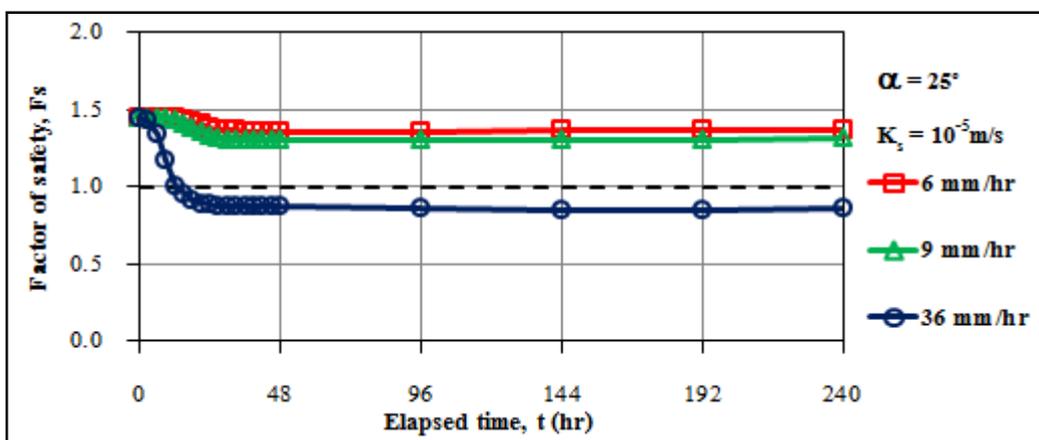
ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรแต่ละตัวเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงประกอบด้วย ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน ( $K_s$ ) ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I$ ) และผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกันซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 ผลกระทบจากค่าความชื้นน้ำของดิน ( $K_s$ )

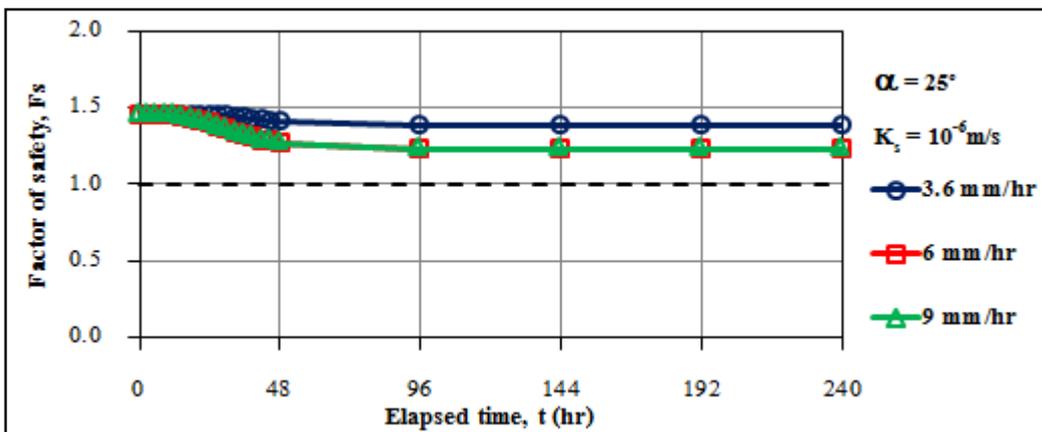
เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความชื้นน้ำของดินแต่ละชนิดกับความเข้มฝนที่มีค่าเท่ากับค่าความชื้นน้ำของดิน ( $K_s \cdot 10^{-4}$  เมตรต่อวินาทีเท่ากับ  $I_{360}$  มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  $K_s \cdot 10^{-5}$  เมตรต่อวินาทีเท่ากับ  $I_{36}$  มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และ  $K_s \cdot 10^{-6}$  เมตรต่อวินาทีเท่ากับ  $I_{3.6}$  มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ที่ความลาดเอียงทำมุมเดียวกันและความหนาของชั้นดินมีค่าคงที่เท่ากับ 6 เมตร ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.16 และรายละเอียดผลการทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ง. ซึ่งพบว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที จะมีการเปลี่ยนแปลงการลดลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมงแรก รวดเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที และดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับและเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เป็นต้นไปยังพบว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความปลอดภัยยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยจะกลับไปเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง เมื่อเวลาผ่านไป 192 ชั่วโมง ในขณะที่ดินที่มีค่าความชื้นน้ำปานกลาง  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อย ๆ ลดลงในอัตราที่ช้ากว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูง  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที แต่จะลดลงเร็วกว่าดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที จนเวลาผ่านไปประมาณ 27 ชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ และจะกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อีกครั้งเมื่อผ่านไป 192 ชั่วโมง ในส่วนของดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ในช่วง 30 ชั่วโมงแรก อัตราส่วนความปลอดภัยยังคงมีค่าคงที่และหลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงต่อไปโดยเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความปลอดภัยในช่วงก่อนหน้าถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก



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

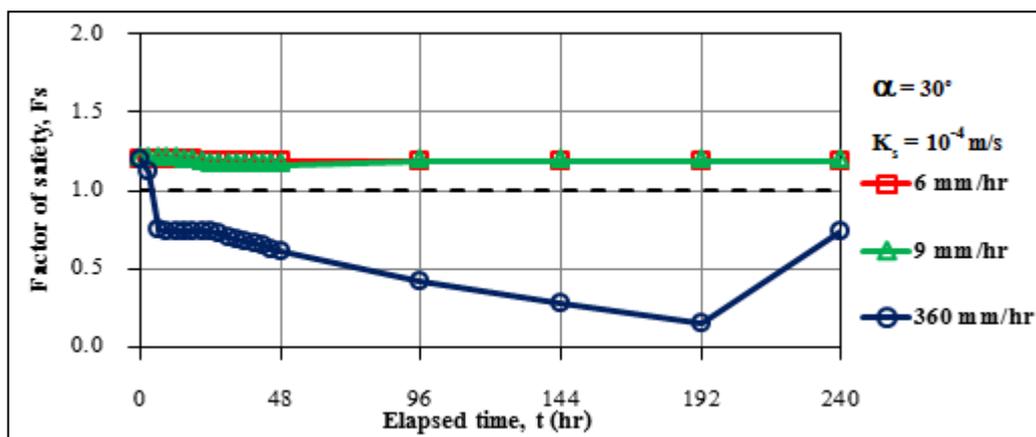


การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที

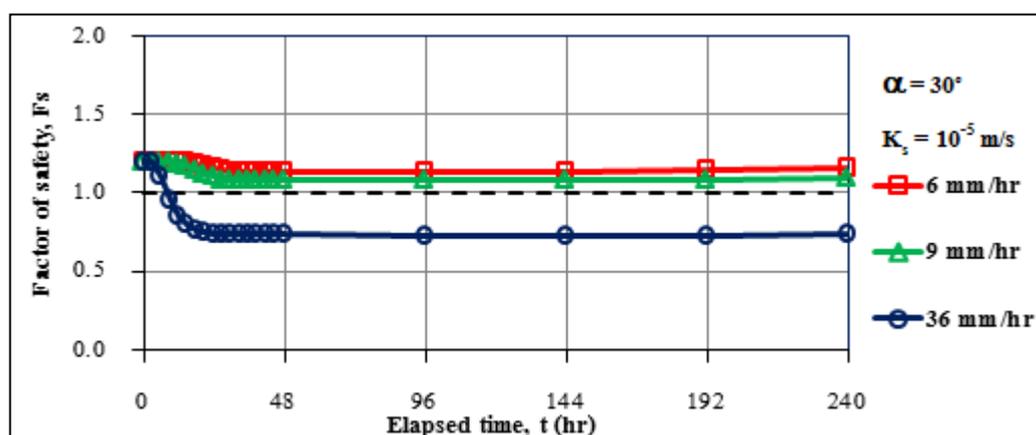


การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

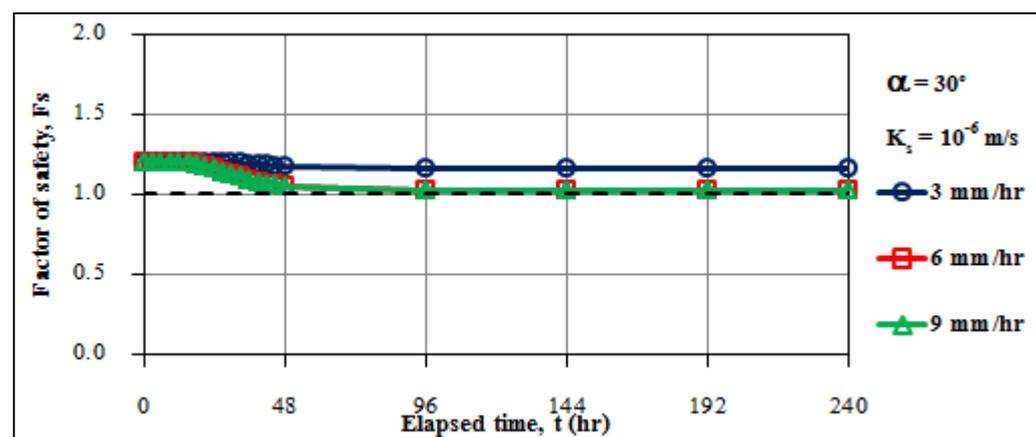
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่าง ๆ ที่ความลาดชัน 25 องศา



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

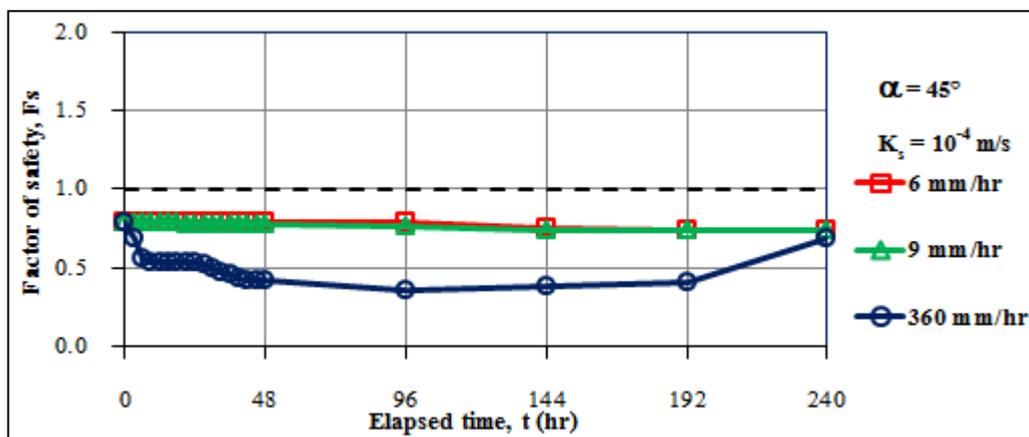


การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที

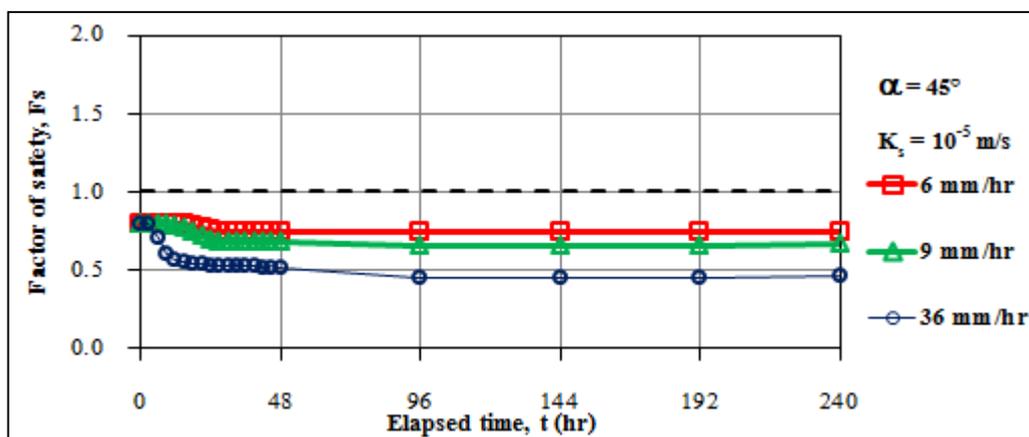


การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

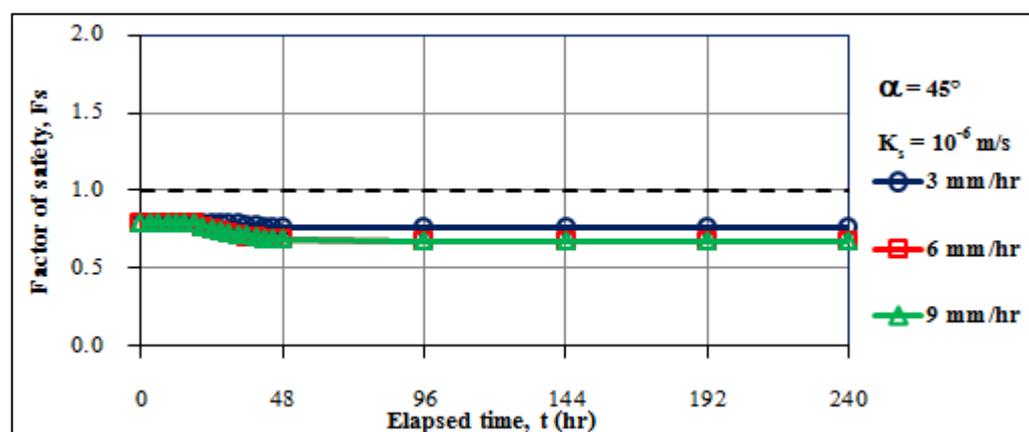
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างๆ ที่ความลาดชัน 30 องศา



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



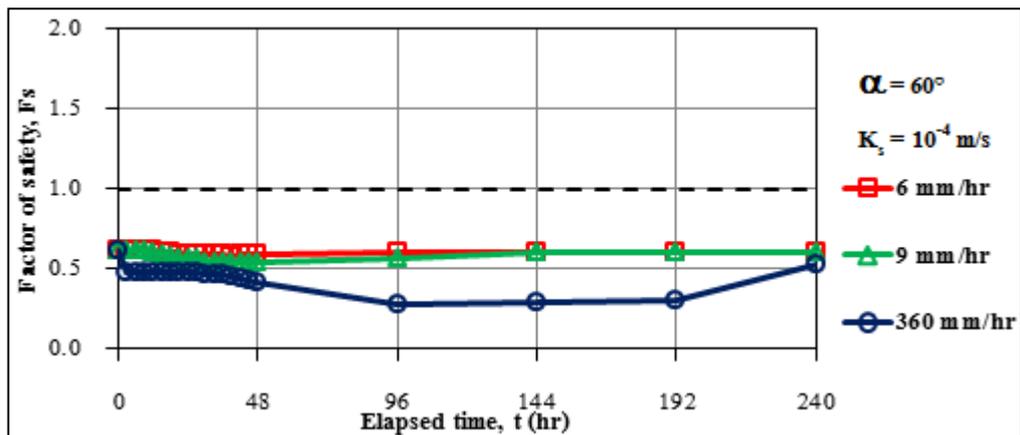
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที



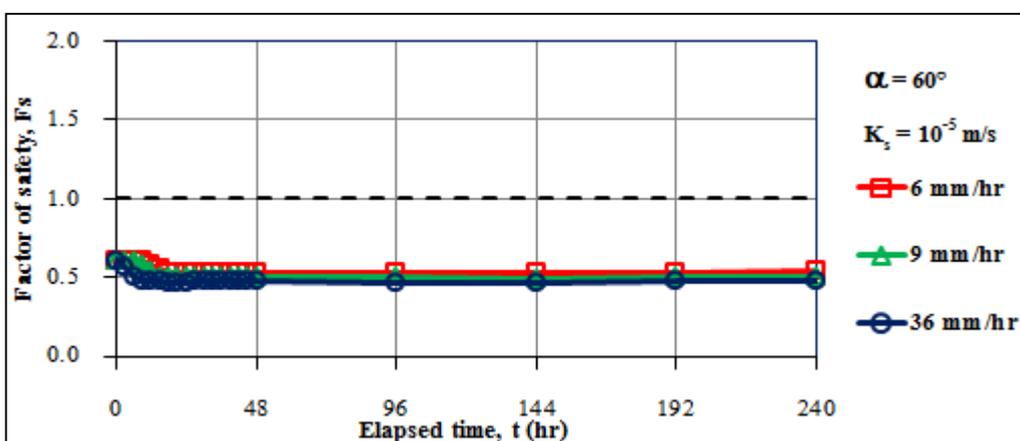
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ในดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่าง ๆ ที่

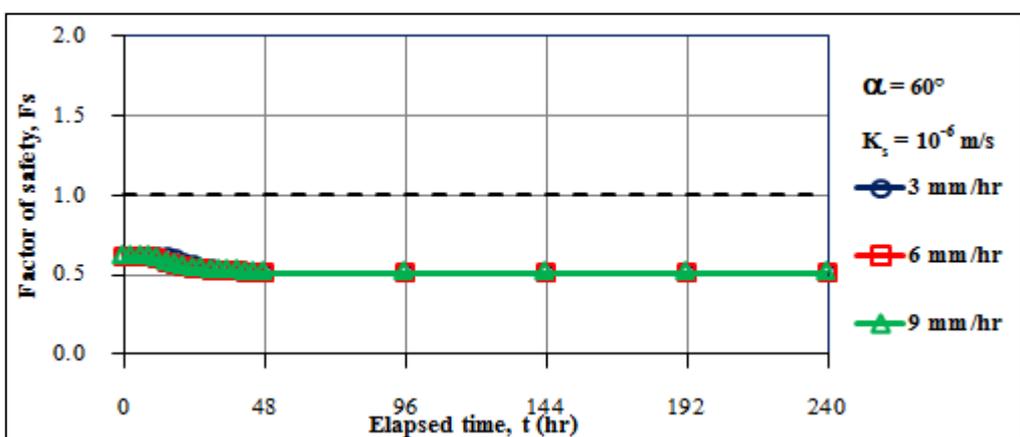
ความลาดชัน 45 องศา



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



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



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

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ของดินที่มีค่าความซึมน้ำต่าง ๆ ที่ความลาดชัน 60 องศา

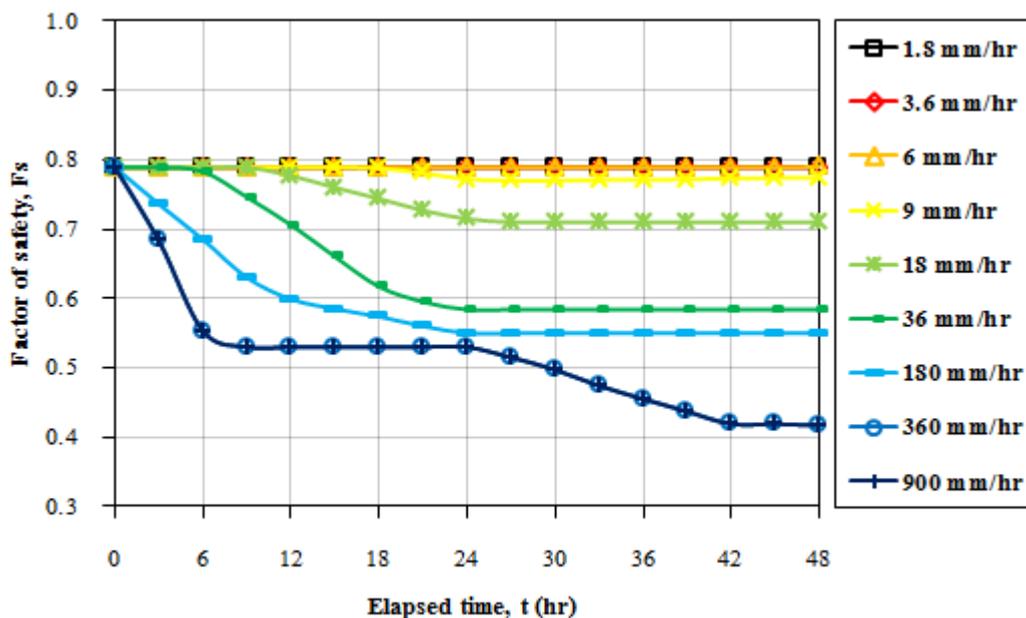
#### 4.3.2 ผลกระทบจากความชื้นฝน (I<sub>p</sub>)

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ที่เป็นผลมาจากความชื้นฝน แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยเมื่อพิจารณาในภาพรวมเฉพาะความชื้นฝนในแต่ละค่าความชื้นน้ำของดินพบว่าความชื้นฝนที่มีค่าต่ำกว่าค่าการซึมน้ำของดินมาก ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยและเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น ค่าการซึมน้ำ  $K_s 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 1.8 3.6 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.774 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) ในส่วนของค่าการซึมน้ำ  $K_s 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.741 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ข) และค่าการซึมน้ำ  $K_s 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ความชื้นฝนเท่ากับ 1.8 3.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.789 – 0.763 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยมาก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความชื้นฝนที่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าการซึมน้ำของแต่ละดินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะยิ่งลดต่ำลง โดยเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา ( $t \leq 24$  ชั่วโมง) พบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าเส้นกราฟของความชื้นฝนที่ต่ำกว่า

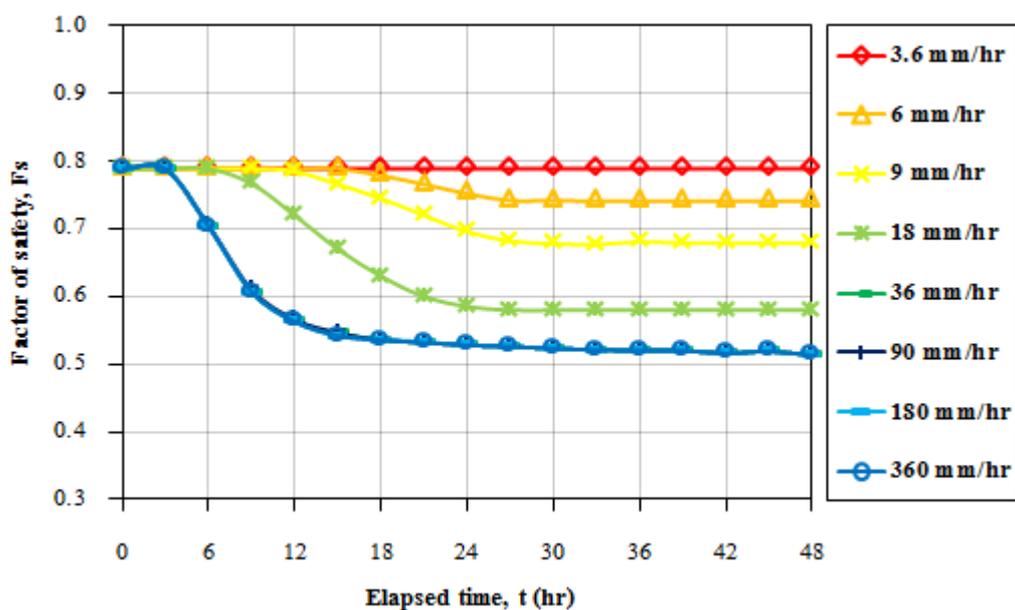
#### 4.3.3 ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ )

เมื่อพิจารณาเฉพาะดินที่มีค่าการซึมน้ำเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) 4.18 (ข) และ 4.18 (ค) พบว่าดินที่มีค่าการซึมน้ำทั้ง 3 ชนิด ที่ความลาดชันเดียวกันในช่วงก่อนที่จะได้รับน้ำฝนจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้นเท่ากัน 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  $K_s 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที และดินที่มีค่าการซึมน้ำปานกลางเท่ากับ  $K_s 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที เมื่อมีปริมาณความชื้นฝนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยของทุกๆ ความลาดชันจะค่อย ๆ ลดลงในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 4.18 (ก) และ 4.18 (ข) โดยในดินที่มีค่าการซึมน้ำสูงเท่ากับ  $K_s 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ดินมีคุณสมบัติระบายน้ำได้ดีทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากความชื้นฝนเท่ากับ 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันและยังใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มต้น แต่ความชื้นฝนที่มีค่าเท่ากับ 360 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเท่ากับค่าการซึมน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.18 (ค) ในขณะที่ดินที่มีค่าการซึมต่ำเท่ากับ  $K_s 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ดินมีค่าการซึมต่ำส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยที่ความชื้นฝน

เท่ากับ 6 และ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากความเข้มฝนมีปริมาณสูงกว่าค่าการซึมน้ำทำให้น้ำฝนไม่สามารถแทรกซึมลงไปในดินได้มากพอในช่วงเวลาสั้น ๆ

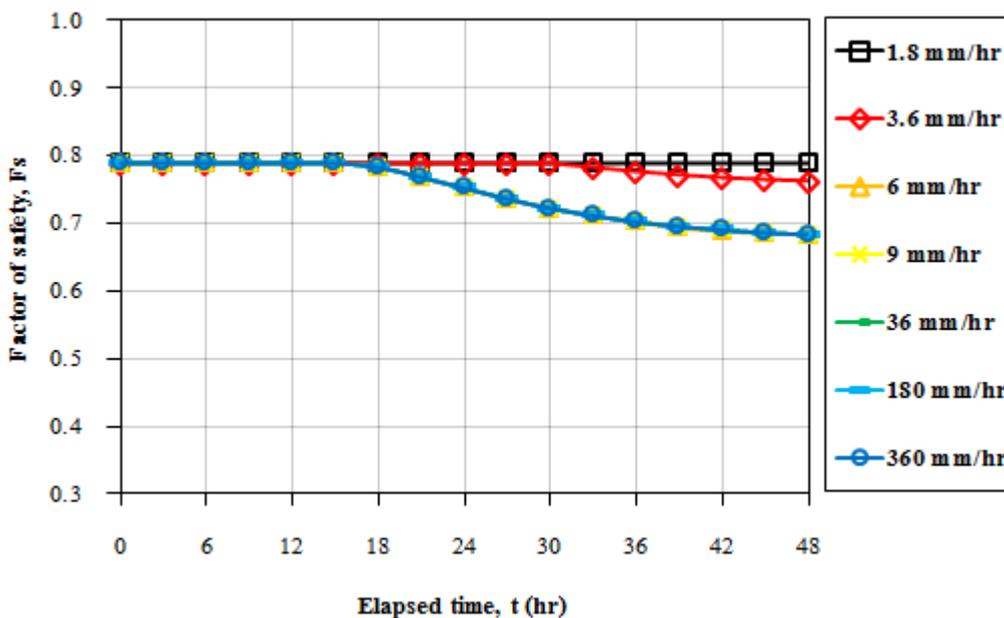


(ก) ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I_r$ ) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

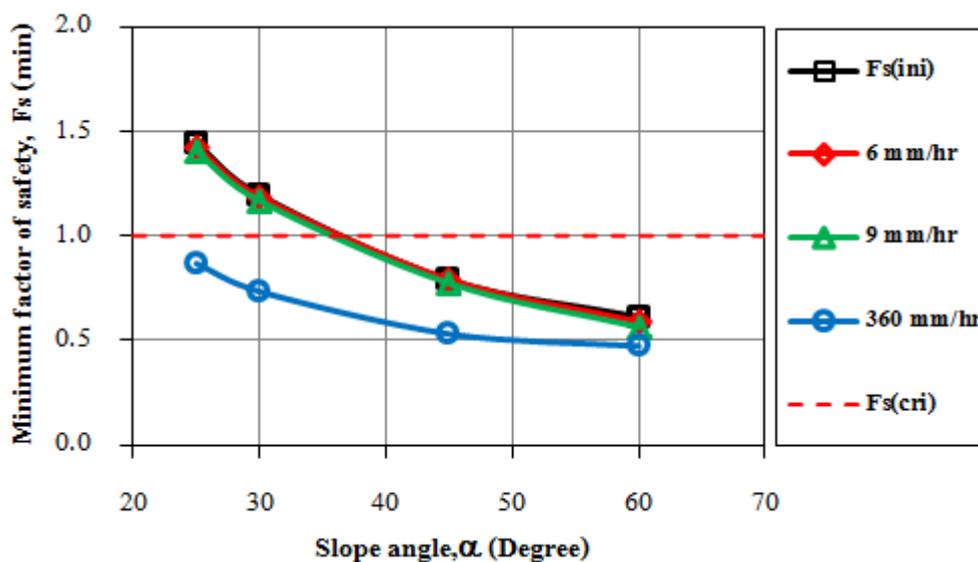


(ข) ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I_r$ ) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที

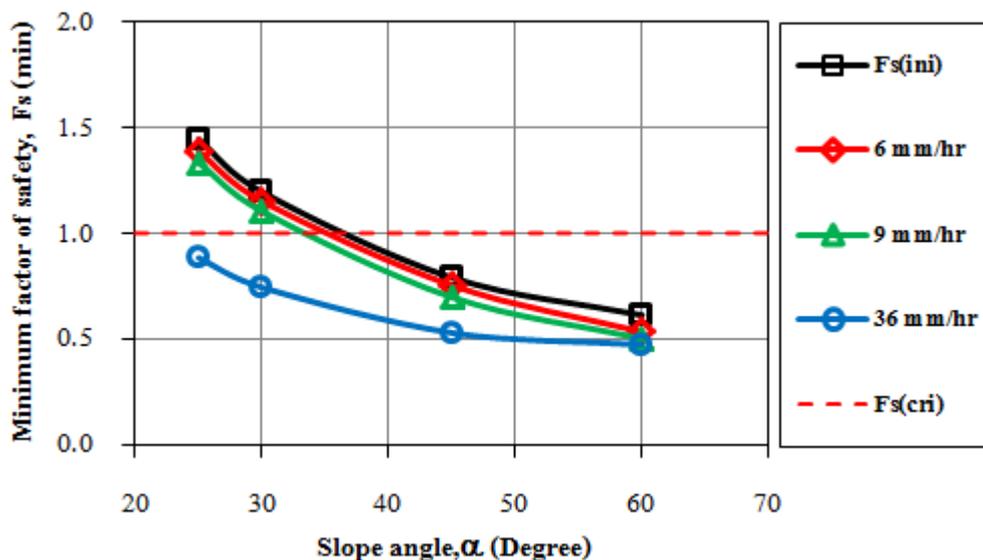
รูปที่ 4.17 ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I_r$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความลาดชัน 45 องศาที่มีความหนาของดิน 6 เมตร



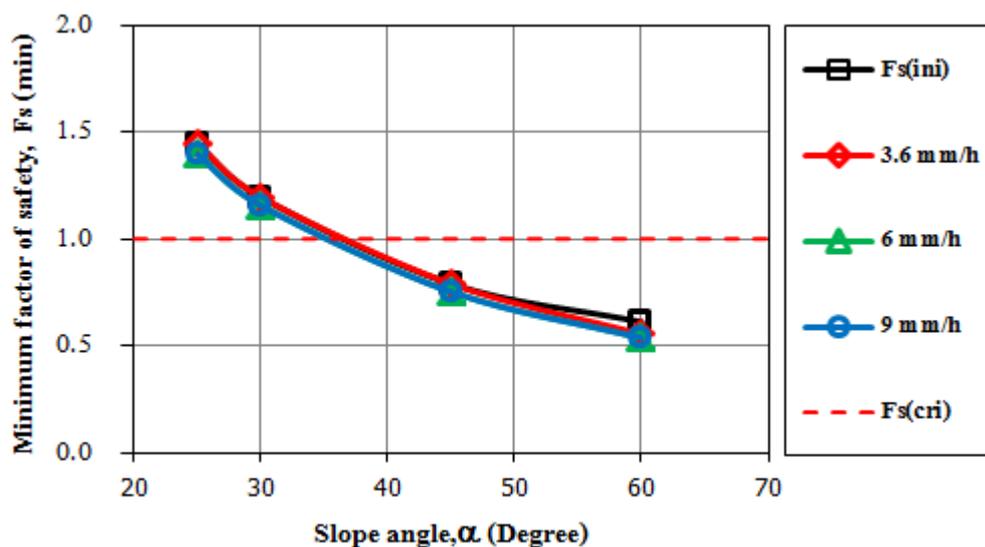
(ค) ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I_r$ ) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที  
 รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลกระทบจากความเข้มฝน ( $I_r$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความลาดชัน 45 องศาที่มีความหนาของดิน 6 เมตร



(ก) ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ต่อดินที่มีค่าความชื้นน้ำ  $K_s = 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที  
 รูปที่ 4.18 ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความหนาของดิน 6 เมตร



(ข) ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที



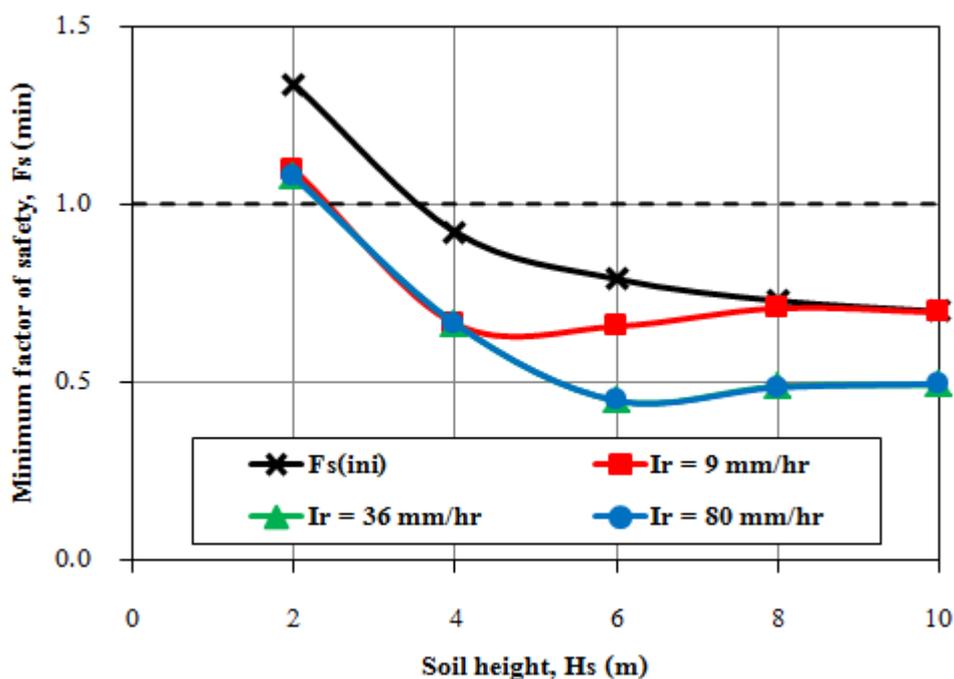
(ค) ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ต่อดินที่มีค่าความซึมน้ำ  $K_s = 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลกระทบจากความลาดเอียง ( $\alpha^\circ$ ) ของดินทั้ง 3 กลุ่มที่ความหนาของดิน 6 เมตร

#### 4.3.4 ผลกระทบจากความหนาของชั้นดินที่ต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปลอดภัยที่เป็นผลมาจากความหนาของชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าอัตราส่วนปลอดภัยเริ่มต้น ( $F.S._{(ini)}$ ) ของชั้นดินที่มีความหนาเท่ากับ 2 เมตรมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยสูงสุดและจะลดต่ำลงตามความหนาของชั้นดินที่เพิ่มขึ้นคือ 4 6 8 และ 10 เมตรตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นฝน ( $I_r$ ) เท่ากับ 9 36 และ 80 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่า อัตราส่วนปลอดภัยของดินที่มีความหนา 2 เมตร ยังคงมีอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าสูงสุดโดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นฝนเท่ากับ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยจะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้นดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6 8 และ 10 เมตร

ตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นฝนเท่ากับ 36 และ 80 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง อัตราส่วนความปลอดภัยจะลดต่ำลงไปเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำสุดที่ความหนาของชั้นดินเท่ากับ 6 เมตร และเมื่อความหนาของชั้นดินเพิ่มขึ้นเป็น 8 และ 10 เมตร อัตราส่วนความปลอดภัยก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนาของชั้นดินที่เพิ่มมากขึ้นจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัยช้ากว่าที่ความหนาของชั้นดินน้อย ๆ



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

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อหาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต (Critical API)

จากผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ พบว่า ค่าพารามิเตอร์กำลังของดิน ( $c', \phi'$ ) มีความสัมพันธ์กันระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน โดยให้แกน x เป็นค่าระดับความอิ่มตัว แกน y เป็นค่าหน่วยแรงกดทับและแกน z เป็นค่าหน่วยแรงเฉือนจะได้รับความสัมพันธ์ในรูปแบบระนาบแสดงดังรูปที่ 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

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

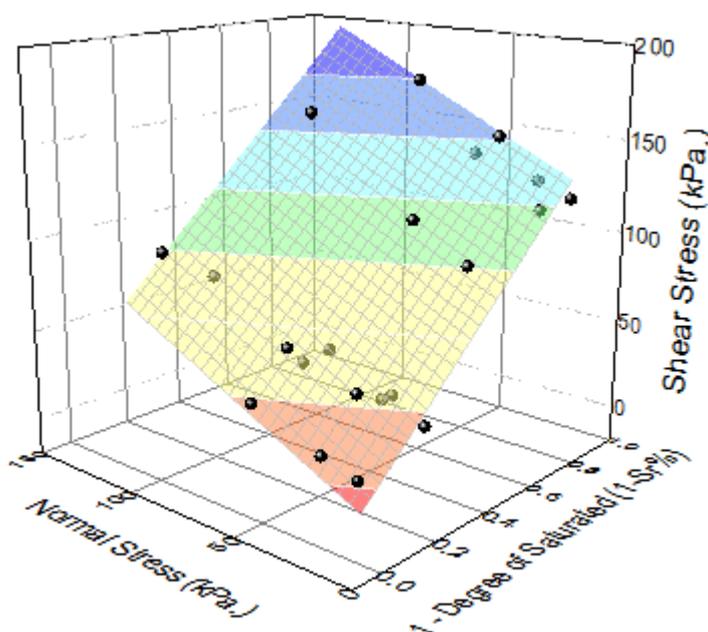
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่ง M2

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

บริเวณส่วนล่างของลาดดินตำแหน่ง U

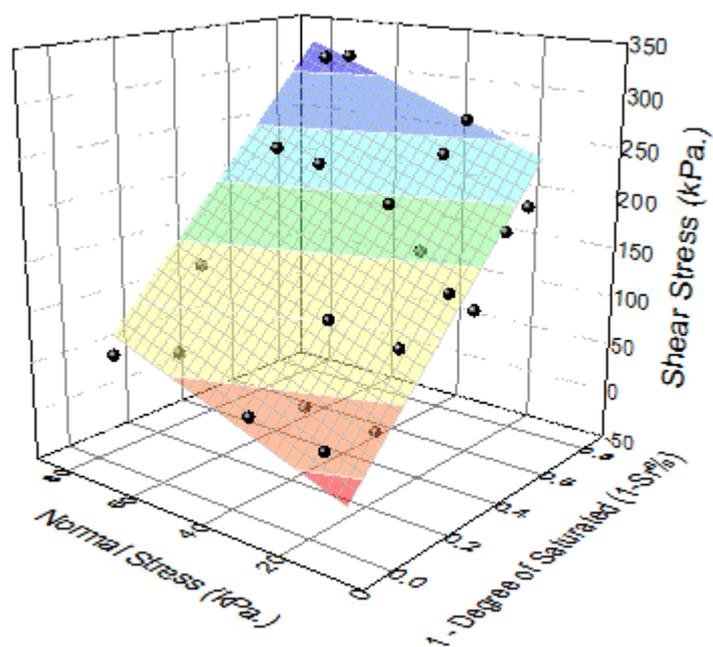
$$\tau = -44.8147 + 238.0942(1 - Sr) + 0.7680\sigma \quad R^2 = 0.338 \quad (4.4)$$

- เมื่อ  $\tau$  = กำลังรับแรงเฉือนของดิน (กิโลปาสกาล)
- $Sr$  = ระดับความอิ่มตัวของดิน (เปอร์เซ็นต์)
- $\sigma$  = หน่วยแรงกดทับ (กิโลปาสกาล)



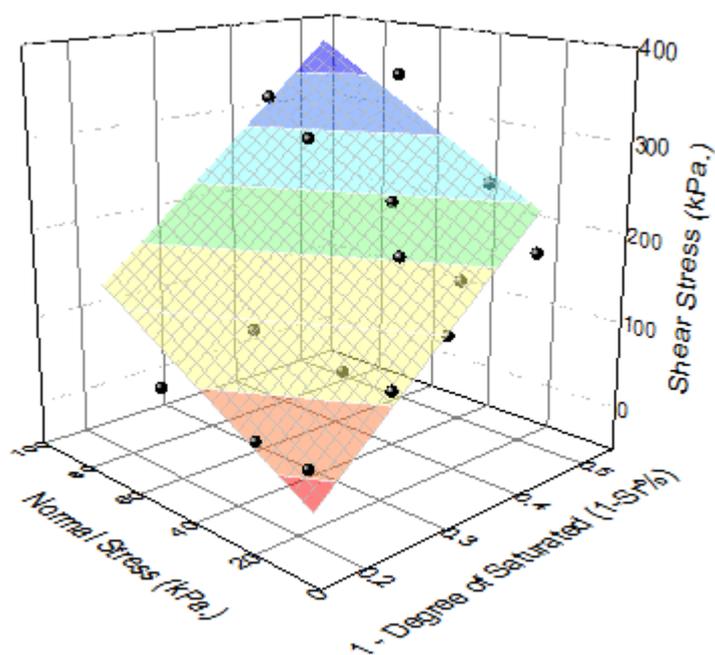
Model	Plane		
Equation	z=z0+aX+bY		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	z0	-42.1241	16.4827
	a	201.1744	24.5841
	b	0.7137	0.1662
Reduced Chi-Sqr	413.5253		
Adj. R-Square	0.8341		

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



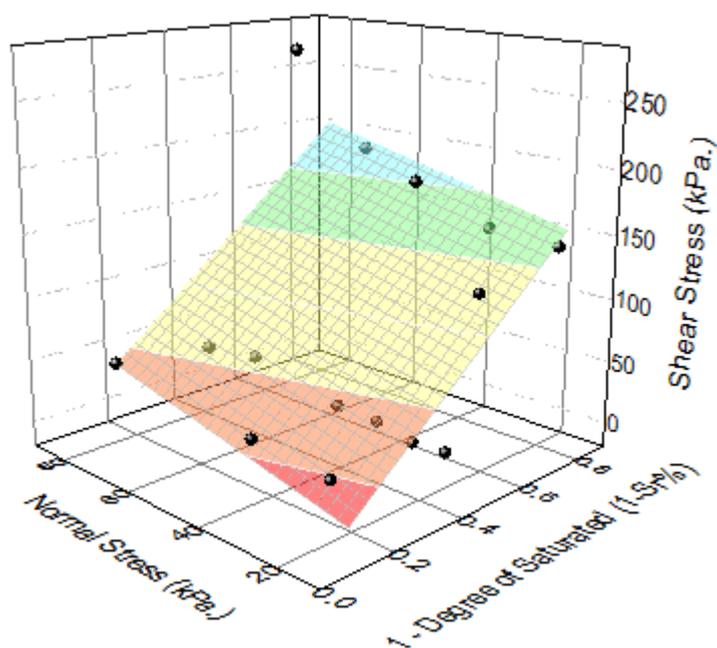
Model	Plane		
Equation	$z=z_0+aX+bY$		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	$z_0$	-115.3147	32.8073
	$a$	531.1790	69.4270
	$b$	1.2368	0.4039
Reduced Chi-Sqr	845.9711		
Adj. R-Square	0.844		

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



Model	Plane		
Equation	$z=z_0+aX+bY$		
<b>Max Shear Stress</b>		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	$z=z_0+aX+bY$		
Max Shear Stress		Value	Standard Error
	$z_0$	-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,  $S_{r,cr}$ ) และความหนา

ของชั้นดินถึงผิวการเคลื่อนพัง (Critical Thickness,  $T_{cr}$ ) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้จากสมการที่ 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)
	$\phi'$	=	มุมเสียดภายในประสิทธิผล (Effective internal friction angle)
	$F.S.$	=	อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)
	$\gamma_d$	=	หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight of soil)
	$\gamma_w$	=	หน่วยน้ำหนักน้ำ (Unit weight of water)
	$\beta$	=	ความลาดชันของลาดดิน (Angle of slope)
	$\alpha$	=	คือมุมเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของดิน

ผลการวิเคราะห์หาค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต ( $API_{cr}$ ) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.0 ของดินทั้ง 4 บริเวณแสดงดังตารางที่ 4.8 โดยสามารถอธิบายได้ว่าลาดดินส่วนบนในบริเวณ T ที่มีความลาดชันเฉลี่ย 26.5 องศา จะเกิดการพิบัติเมื่อค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตมีค่าเท่ากับ 205.65 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ดินในบริเวณนี้มีระดับความอิ่มตัว 84 เปอร์เซ็นต์ โดยการพิบัติจะมีความลึกประมาณ 3.195 เมตรจากผิวดิน ในส่วนตอนกลางของลาดดินในบริเวณ M1, M2 ที่ความลาดชันเฉลี่ย 26.5 ลาดดินจะเกิดการพิบัติเมื่อค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตมีค่าเท่ากับ 227.89 และ 253.69 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ดินมีระดับความอิ่มตัว 84 และ 82 เปอร์เซ็นต์ และการพิบัติที่เกิดขึ้นจะมีความลึก 3.096 และ 3.064 เมตร

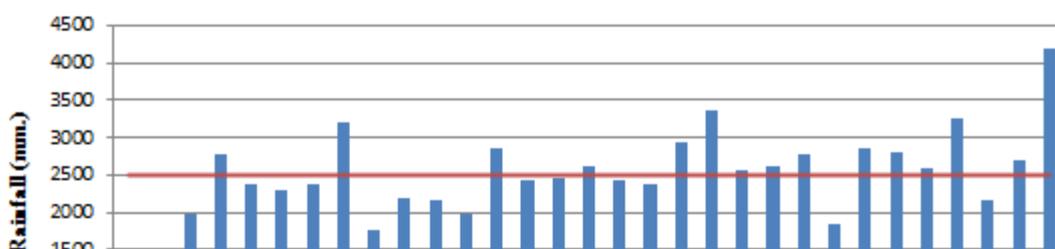
ตามลำดับ ส่วนด้านล่างของลาดดินในบริเวณ U จะเกิดการพิบัติโดยมีค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตต่ำกว่าบริเวณอื่นคือ 166.60 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ลาดดินที่พิบัติมีระดับความอิ่มตัว 86 เปอร์เซ็นต์ และการพิบัติจะมีความลึกประมาณ 2.958 เมตร

ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต ( $API_{cr}$ ) ของดินบริเวณต่าง ๆ

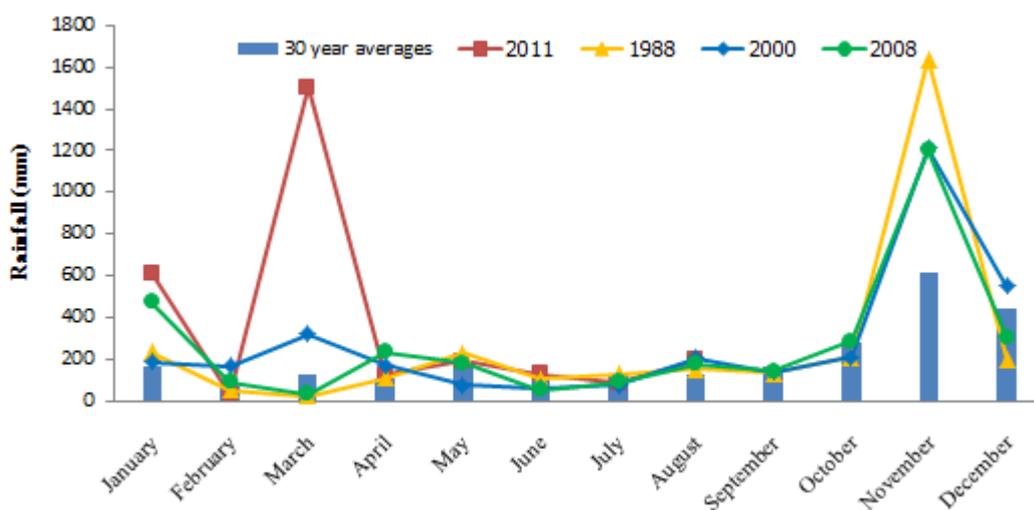
ตำแหน่งที่พิจารณา	ความลาดชันโดยเฉลี่ยของลาดดิน	$Sr_{cr}(\%)$	$H_{cr}(m.)$	$API_{cr}(mm.)$
ส่วนบน (T)	26.5	84	3.195	205.65
ส่วนกลาง(M1)	26.5	84	3.096	227.89
ส่วนกลาง(M2)	26.5	82	3.064	253.69
ส่วนล่าง(U)	26.5	86	2.958	166.60

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดิน

จากข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลังของสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่ามีค่าน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 2505.5 มิลลิเมตร และจะสังเกตได้ว่าปี 1988 2000 2008 และปี 2011 มีปริมาณน้ำฝนที่สูงกว่าค่าน้ำฝนเฉลี่ยอยู่มากอันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลจากลมพายุทำให้ปีดังกล่าวในพื้นที่ได้รับปริมาณน้ำฝนที่สูงมากกว่าปกติ เพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้แสดงเป็นปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยย้อนหลัง 30 ปี และน้ำฝนรายเดือนในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติแสดงดังรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าในข้อมูลฝนรายเดือนเฉลี่ยย้อนหลัง 30 ปี ในเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นฤดูฝนจะมีปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยมากกว่าเดือนอื่น ๆ และในปี 1988 2000 และ 2008 ที่มีฝนตกมากผิดปกติก็มีค่ามากผิดปกติในเดือนพฤศจิกายนเช่นกัน โดยในเดือนพฤศจิกายนปี 1988 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนใกล้เคียงกับช่วงเดือนมีนาคมปี 2011 ได้เกิดการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ อ.พิปูน และ อ.ลานสกา จ.นครศรีธรรมราช (สุทธิศักดิ์, 2550) แต่ในส่วนของปี 2011 จะมีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติในเดือนมีนาคมซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมพายุและเป็นต้นเหตุของการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ใน ต.เทพราช อ.ลิขิต จ.นครศรีธรรมราช

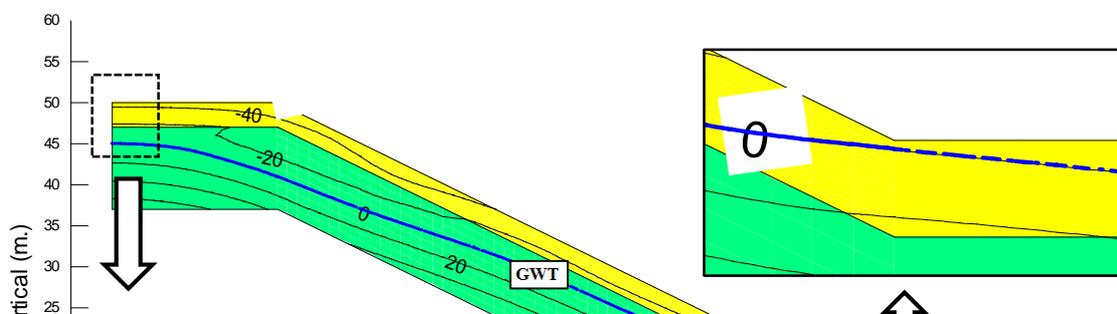


รูปที่ 4.21 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30 ปีย้อนหลัง ข้อมูลจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)



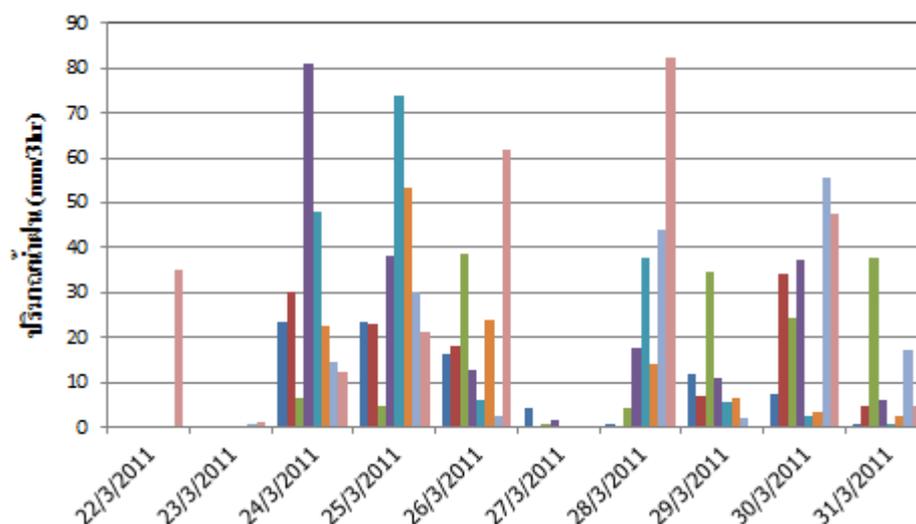
รูปที่ 4.22 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 30 ปี และน้ำฝนรายเดือนในปีที่มีปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำบนลาดดินในสภาวะทรงตัว (Steady) โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปีที่มีค่าเท่ากับ 0.2994 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช แทนการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาระดับน้ำใต้ดินปกติ พบว่าระดับน้ำใต้ดินในสภาวะเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4.23 ในลักษณะของระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในดิน (Pore Water Pressure) บริเวณตีนลาดดินระดับน้ำใต้ดินจะวางตัวอยู่ในชั้นดิน โดยจะอยู่ต่ำกว่าผิวดินประมาณ 0.3 เมตร ในส่วนของบริเวณด้านบนของลาดดินพบว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความลึก 5.0 เมตร จากผิวดินโดยจะวางตัวอยู่ในชั้นหินและค่าแรงดันน้ำในลาดดินจะมีค่าคิดลบมากยิ่งขึ้นตามระดับความสูงของลาดดิน



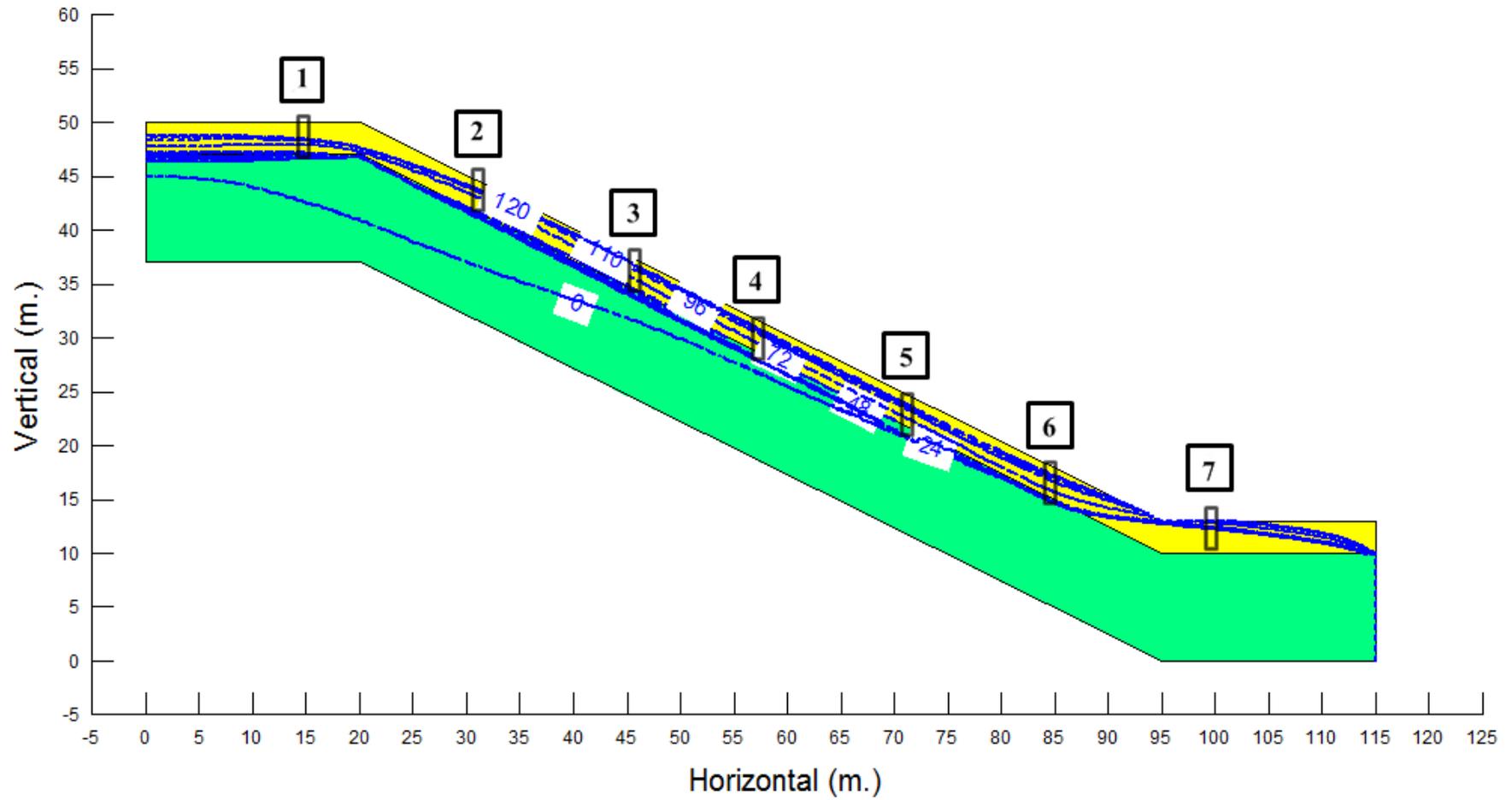
**รูปที่ 4.23** ระดับน้ำใต้ดินและระดับแรงดันน้ำในช่องว่างในสภาวะแบบคงที่ (Steady State)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ด้วยการใช้ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งตกต่อเนื่องกันพบว่าระดับน้ำใต้ดินมีการเคลื่อนตัวตามปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนตก โดยจะปรับระดับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับน้ำฝนที่มีความเข้มฝนสูง ๆ ติดต่อกันเป็นเวลานานแสดงดังรูปที่ 4.25 โดยแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงได้แบ่งลาดดินออกเป็น 7 ตำแหน่ง พร้อมกับแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นตลอดความลึกของชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4.26 -4.32



**รูปที่ 4.24** ข้อมูลน้ำฝนราย 3 ชั่วโมง ที่ตกต่อเนื่องกันจากสถานี 552201 – นครศรีธรรมราช

(กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)



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

พบว่าตำแหน่งที่ 1 บริเวณส่วนบนของลาดดินดังรูปที่ 4.26 ค่าแรงดันน้ำในสถานะเริ่มต้นชั่วโมงที่ 0 แรงดันน้ำในลาดดินมีค่าติดลบโดยมีค่าตั้งแต่ -20 ถึง -48 กิโลปาสกาล ค่าติดลบจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณผิวดินและมีค่าน้อยสุดที่บริเวณต่ำสุดของชั้นดินและเมื่อผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง แรงดันน้ำจะมีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากในช่วงนี้ลาดดินสูญเสียความชื้น เมื่อพิจารณาที่ 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าแรงดันน้ำบริเวณล่างสุดจะค่อย ๆ มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงนี้ลาดดินได้รับปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่องและเมื่อพิจารณาตามความลึกของชั้นดินเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณล่างสุดค่าติดลบจะค่อย ๆ เป็นบวกเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันในเวลาที่ 96 110 และ 120 ชั่วโมง ตลอดความลึก ในส่วนของปริมาณความชื้นพบว่าในช่วงเริ่มต้นมีความชื้น 0.33 – 0.36 ที่ผิวดินจะมีค่าความชื้นต่ำและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความลึกของชั้นดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากเข้าไปใกล้ระดับน้ำใต้ดินมากยิ่งขึ้น โดยจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ระดับความลึก 49 – 47.2 เมตร โดยช่วงเวลา 96 110 และ 120 ชั่วโมง พบว่าความชื้นมีค่าเท่ากันตลอดความลึกของชั้นดินที่ 47.8 – 47.2 เมตร โดยมีค่าความชื้นคงที่เท่ากับ 0.4 และมีแรงดันน้ำที่เป็นบวกซึ่งดินได้อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว

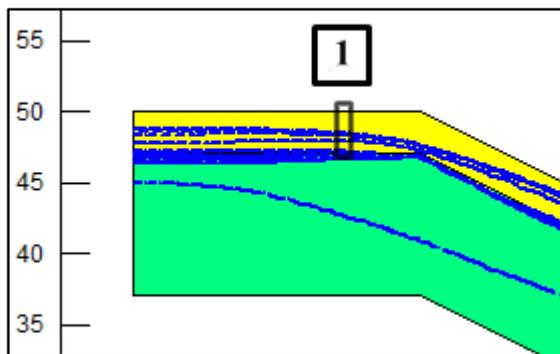
ตำแหน่งที่ 2 3 4 5 และ 6 บริเวณส่วนกลางของลาดดินดังรูปที่ 4.27-4.31 จะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินชัดเจนที่สุดโดยอัตราการเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นฝนในแต่ละช่วงเวลา คือ ในช่วงเวลาที่ลาดดินได้รับปริมาณความชื้นฝนน้อยตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นถึงช่วงเวลา 48 ชั่วโมงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินก็จะเกิดขึ้นน้อยและในช่วงที่มีความชื้นฝนมากตั้งแต่ชั่วโมงที่ 72 ถึง 120 ระดับน้ำใต้ดินก็จะเพิ่มขึ้นมาก แสดงดังรูปที่ 4.27 – 4.31 จะเห็นได้ว่าในเวลาชั่วโมงที่ 72 96 110 และ 120 ลาดดินได้รับความชื้นปริมาณสูงระดับน้ำใต้ดินจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่าแรงดันน้ำในสถานะเริ่มต้นชั่วโมงที่ 0 ถึง 48 มีค่าติดลบทั้งหมดตลอดความลึกและค่าติดลบจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณผิวดินและมีค่าน้อยสุดที่บริเวณต่ำสุดของชั้นดิน และเมื่อเวลาผ่านไป 72 96 110 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ ค่าแรงดันน้ำบริเวณล่างสุดจะค่อย ๆ มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาตามความลึกของชั้นดินในแต่ละช่วงเวลาเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณล่างสุดค่าติดลบจะค่อย ๆ เป็นบวกเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยในช่วงที่แรงดันน้ำมีค่าเป็นบวกลาดดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ในส่วนของปริมาณความชื้นจะมีความชื้นต่ำสุดที่ผิวดินและจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าไปใกล้จุดต่ำสุดของชั้นดินและลาดดินจะค่อย ๆ อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งสังเกตได้จากค่าความชื้นที่คงที่เท่ากับ 0.4 โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นในลาดดินมีค่าดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดิน

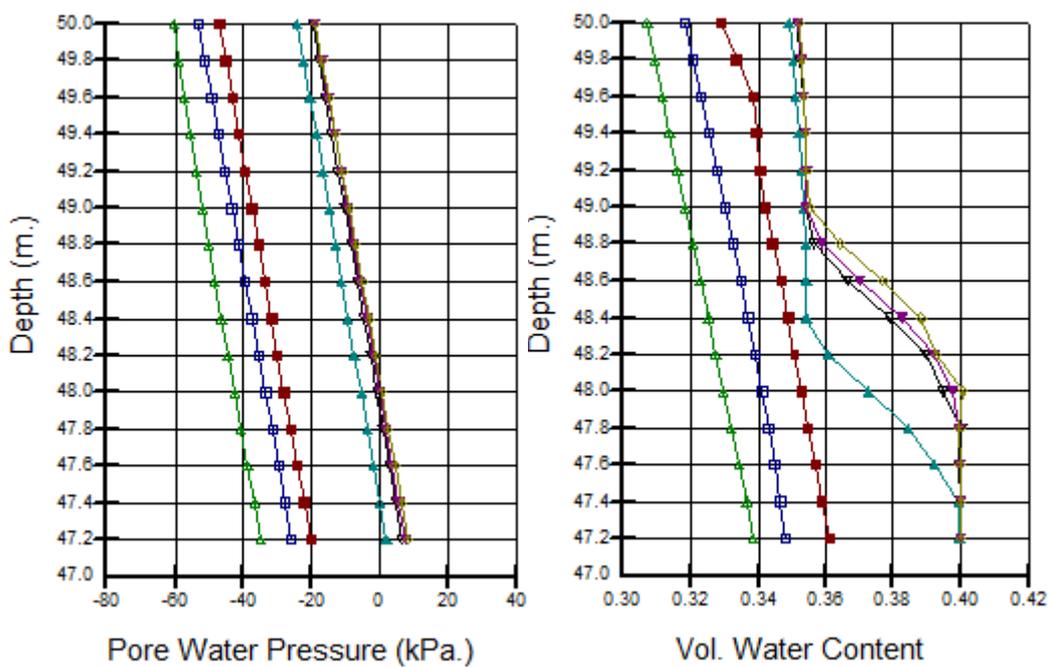
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
แรงดันน้ำ (PWP)kPa.	-60 ถึง 10	-55 ถึง 10	-43 ถึง 15	-35 ถึง 14	-34 ถึง 14	-27 ถึง 15	-6 ถึง 27
ปริมาณความชื้น (VWC)	0.307-0.4	0.315-0.4	0.33-0.4	0.33-0.4	0.33-0.4	0.332-0.4	0.342-0.4

ตำแหน่งที่ 7 บริเวณดินลาดดินดังรูปที่ 4.32 พบว่าแรงดันน้ำในช่วงแรก ๆ คือ ชั่วโมงที่ 0 24 และ 48 มีค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นในช่วงเวลาดังกล่าวใกล้เคียงกัน เนื่องจากในบริเวณนี้จะมีระดับน้ำใต้ดินจากการวิเคราะห์การไหลในสภาวะแบบคงที่อยู่ใกล้กับผิวดินมากทำให้แรงดันน้ำและปริมาณความชื้นที่เกิดจากความชื้นผ่นน้อย ๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย และเมื่อพิจารณาที่เวลา 72 96 110 และ 120 ชั่วโมงพบว่าในช่วงนี้มีปริมาณความชื้นผ่นสูงทำให้ค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงจากช่วงแรกอย่างชัดเจน โดยในช่วงเวลาที่ 96 110 และ 120 ชั่วโมง ค่าแรงดันน้ำและปริมาณความชื้นของทั้ง 3 ช่วงเวลามีค่าเท่ากันและที่บริเวณผิวดินพบว่าค่าแรงดันน้ำใกล้เคียง 0 กิโลปาสกาล และปริมาณความชื้นมีค่าคงที่ประมาณ 0.4 นั้นหมายความว่าผิวดินบริเวณนั้นใกล้สภาวะที่จะมีการเจ็มนองของน้ำขึ้นมาจากผิวลาดดิน

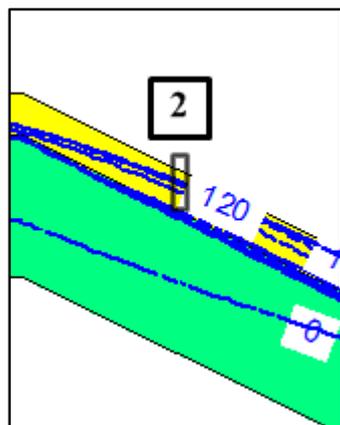
จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาในภาพรวมทั้งลาดดิน แสดงดังรูปที่ 4.25 ยังพบว่าในบริเวณตำแหน่งที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินแบบค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นและค่อย ๆ ลดระดับลง เนื่องจากน้ำในบริเวณนี้พยายามที่จะระบายออก โดยจะไหลลงมาตามลาดดินตามความต่างระดับของน้ำที่ต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลาดดินในบริเวณดินลาดทำให้ระดับน้ำใต้ดินบริเวณตอนกลางของลาดดินจะมีระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในส่วนของตำแหน่งที่ 7 ซึ่งเป็นส่วนดินลาดดินในบริเวณนี้ระดับน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินปกติเริ่มต้นมีระดับต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อยและเมื่อได้รับน้ำที่ไหลซึมลงมาจากราดดินก็จะทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงผิวดิน



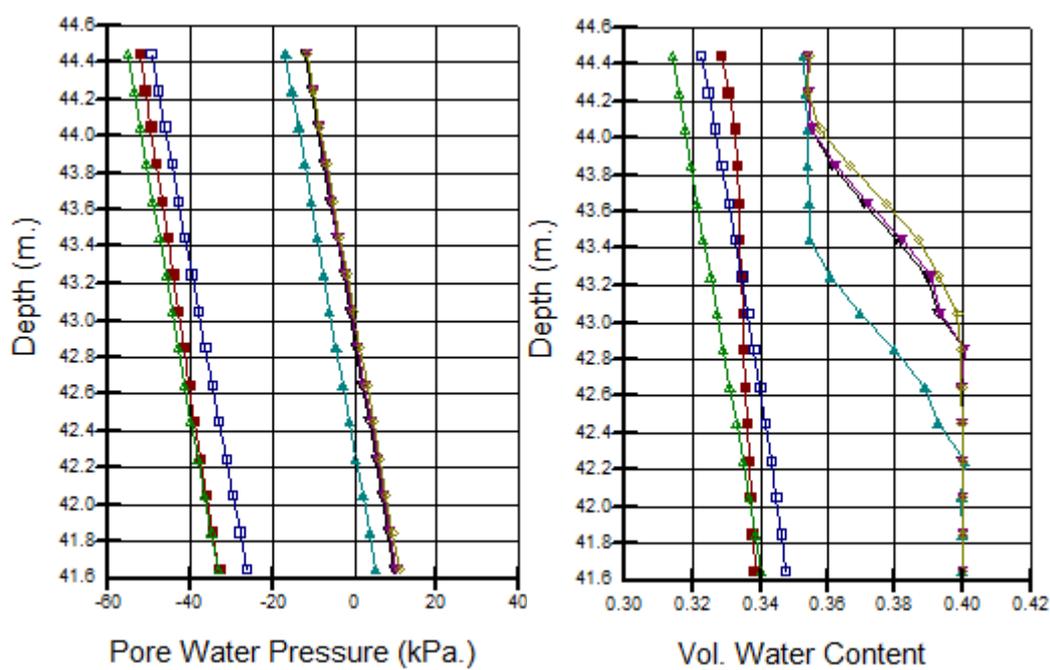
บริเวณด้านบนของลาดดินตำแหน่งที่ 1



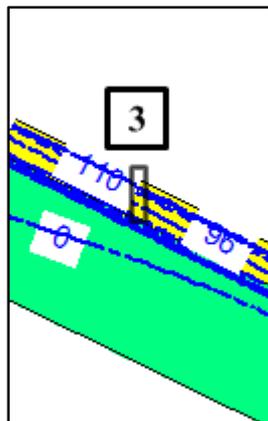
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 1 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



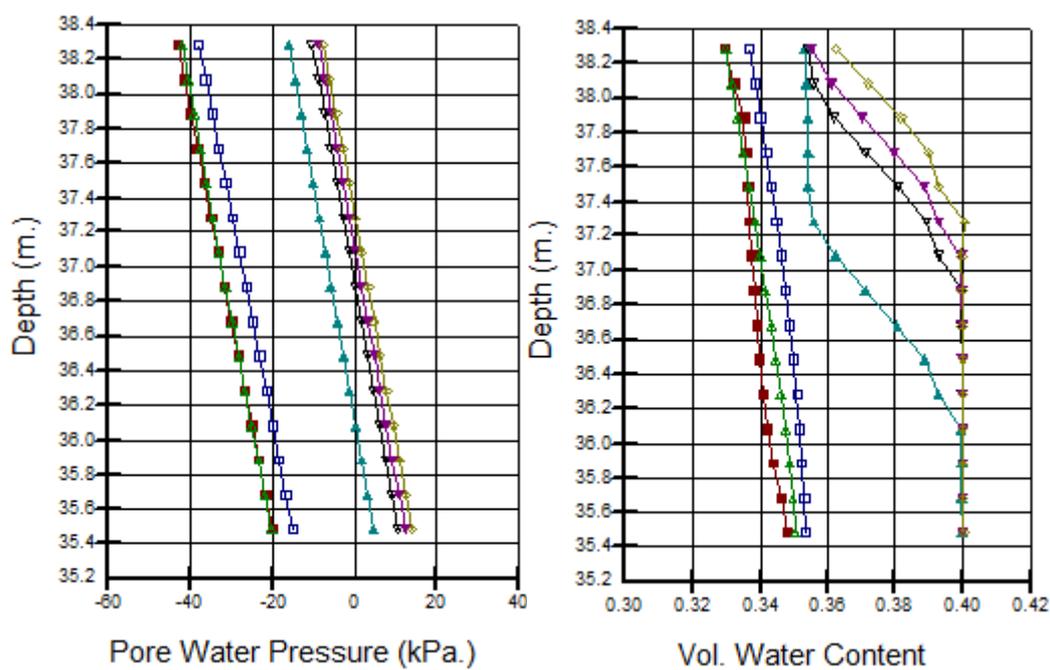
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 2



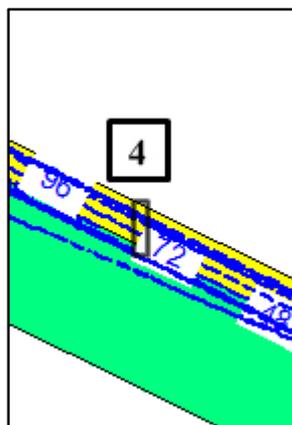
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 2 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



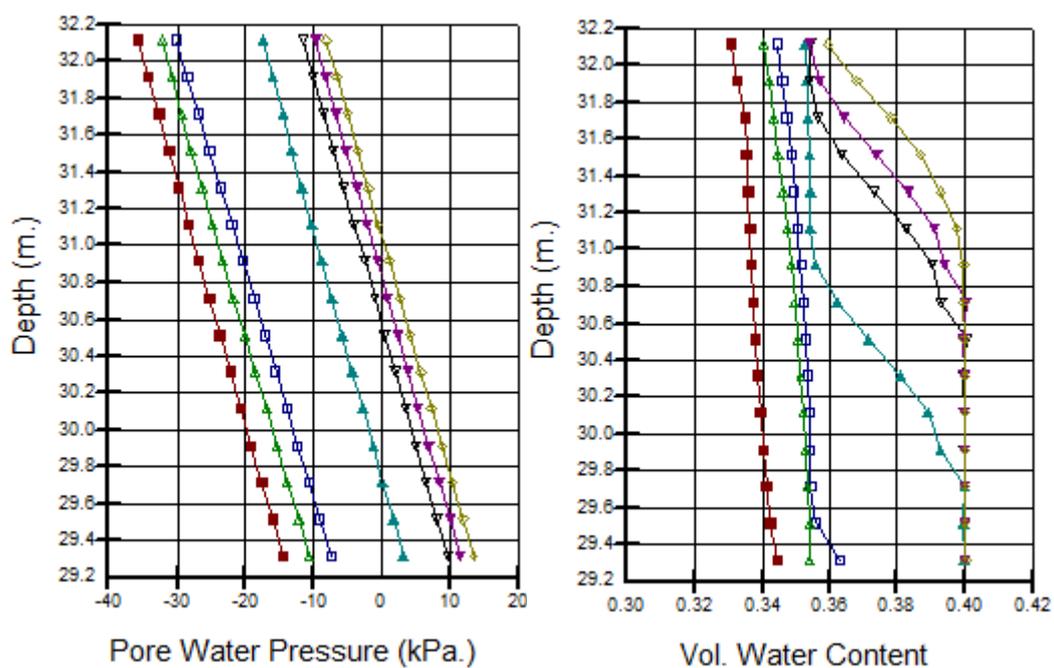
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 3



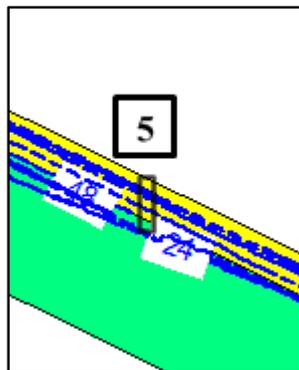
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 3 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



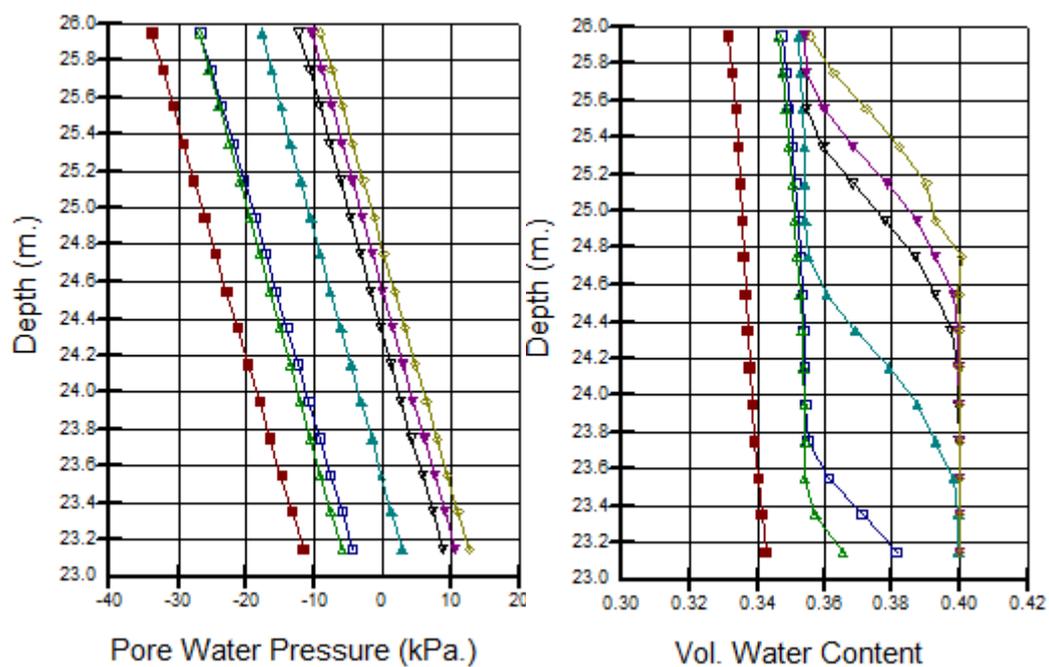
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 4



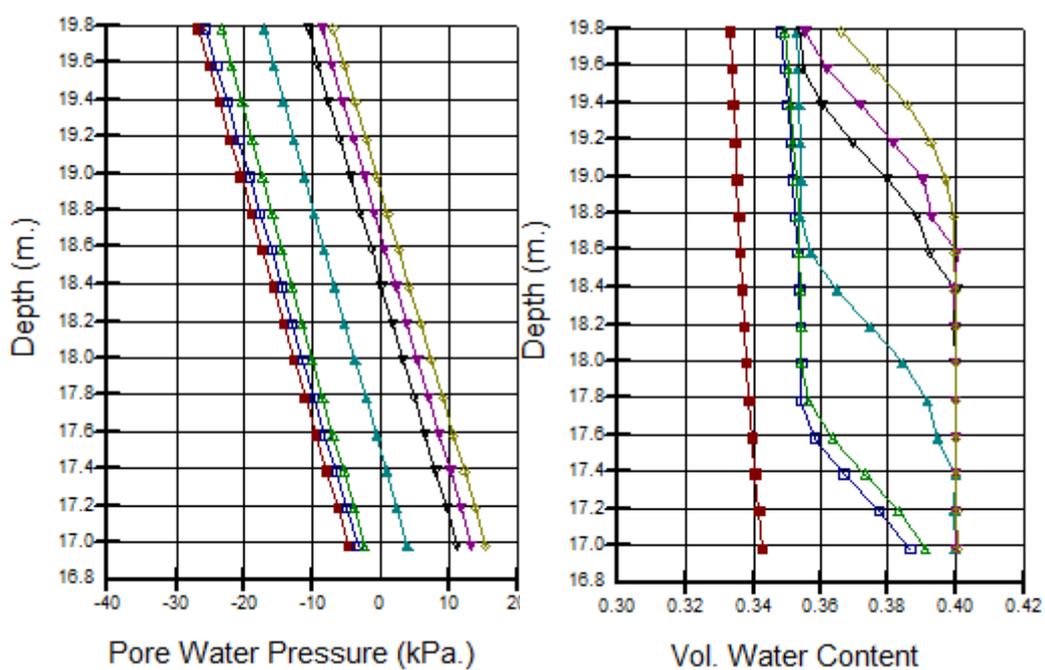
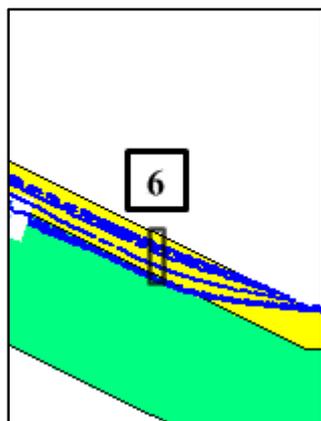
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) และปริมาณความชื้น (Volumetric Water Content) ในลาดดินตำแหน่งที่ 4 ในช่วงที่ฝนตกตามเวลา 0 24 48 72 96 110 และ 120 ชั่วโมง



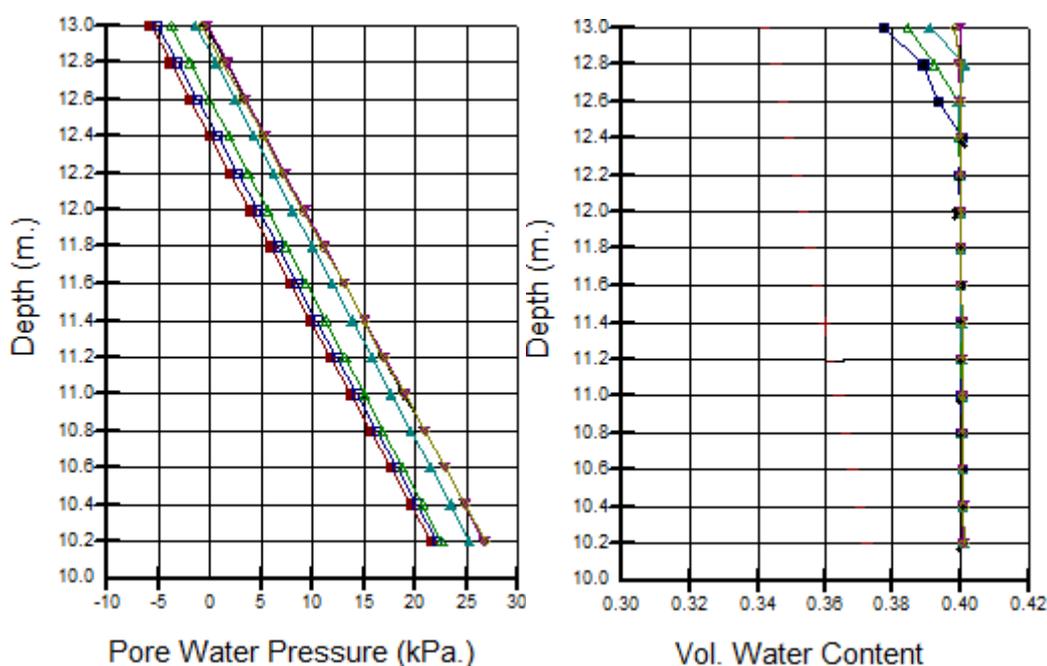
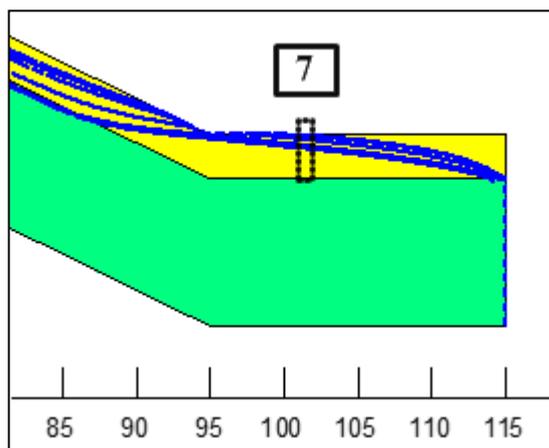
บริเวณส่วนกลางของลาดดินตำแหน่งที่ 5



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



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



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

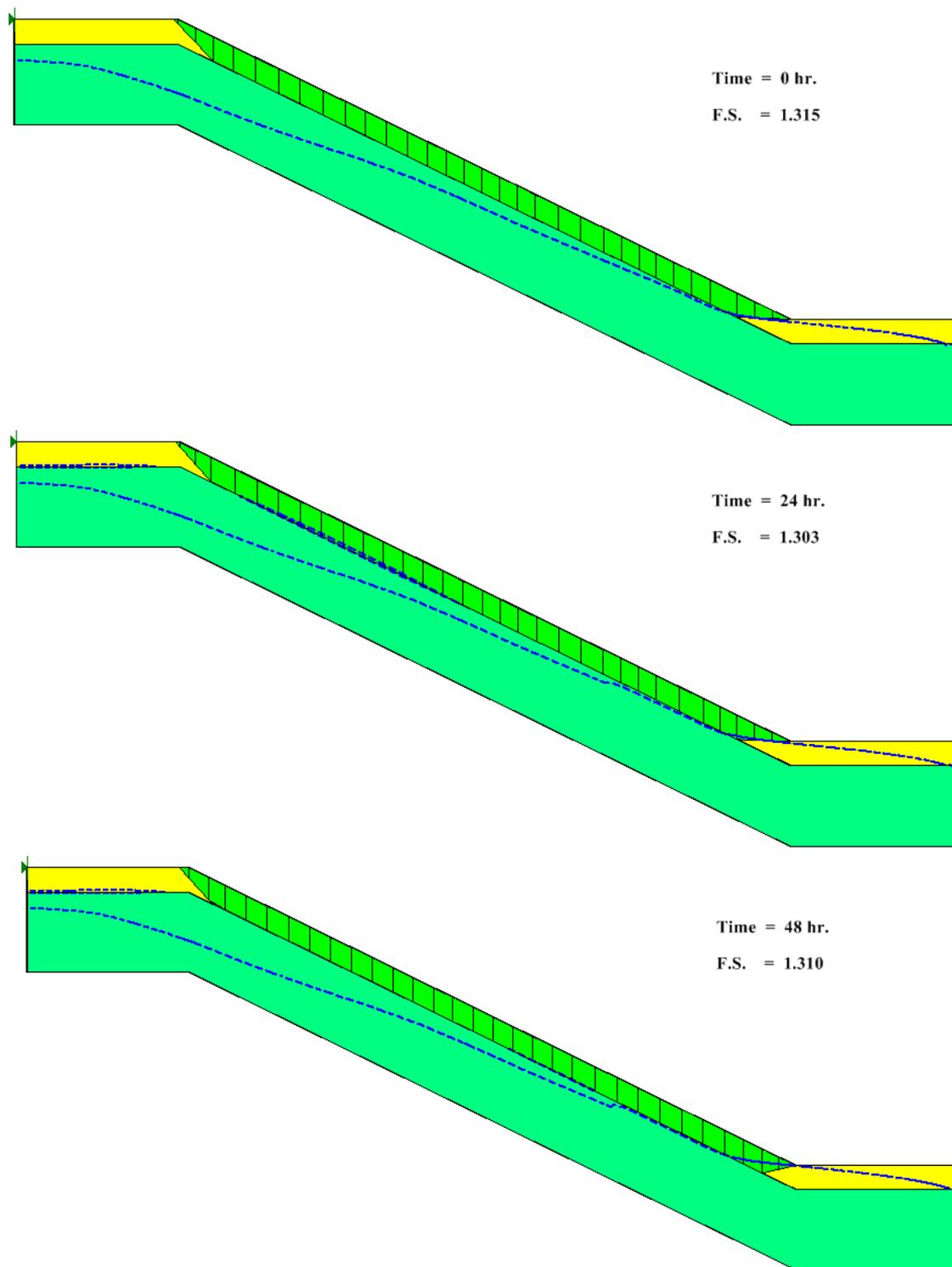
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้เลือกใช้วิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) วิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified Method โดยรับข้อมูลการวิเคราะห์การไหลซึมจากโปรแกรม SEEP/W จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพต่อโดยใช้โปรแกรม SLOPE/W ซึ่งเสถียรภาพที่ได้จะใช้เป็นตัวแทนของเสถียรภาพทั้งลาดดินโดยผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและฝนตกผ่านไป 0 24 48 72 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง

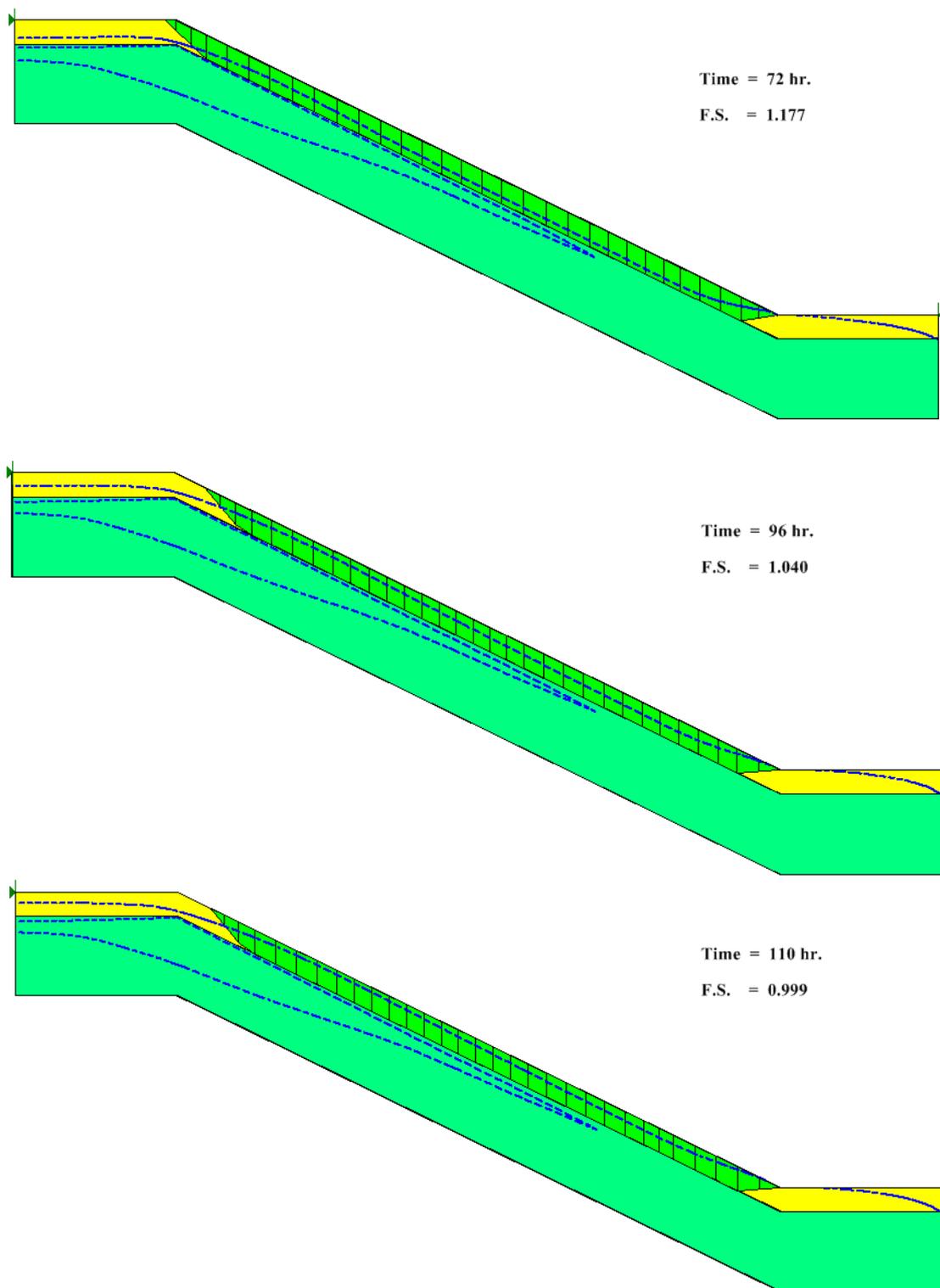
ระยะเวลาที่ฝนตก (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำฝนสะสม (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)
ช่วงเริ่มต้น	0	1.315
24	34.9	1.303
48	52.67	1.300
72	291.1	1.177
96	554.7	1.040
110	643.54	0.999
120	726.77	0.961
144	731.43	0.964

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากตารางที่ 4.10 พบว่าในช่วงเริ่มต้นลาดดินยังคงมีความมั่นคงอยู่โดยมีอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.315 และเมื่อได้รับปริมาณน้ำฝนที่ตกติดต่อกันอัตราส่วนความปลอดภัยก็ค่อย ๆ ลดลงซึ่งสอดคล้องตามผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ กันเมื่อฝนตกต่อเนื่องกันผ่านไป 96 ชั่วโมง ลาดดินจะมีเสถียรภาพหรืออัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.040 นั้นหมายความว่า ในช่วงเวลานี้ลาดดินกำลังเข้าใกล้ที่จะพิบัติและเมื่อฝนตกต่อเนื่องถึง 110 ชั่วโมง อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินลดต่ำลงเหลือเท่ากับ 0.999 นั้นแสดงว่าลาดดินได้สูญเสียเสถียรภาพแล้วซึ่งตรงกับช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 26 มีนาคม 2554

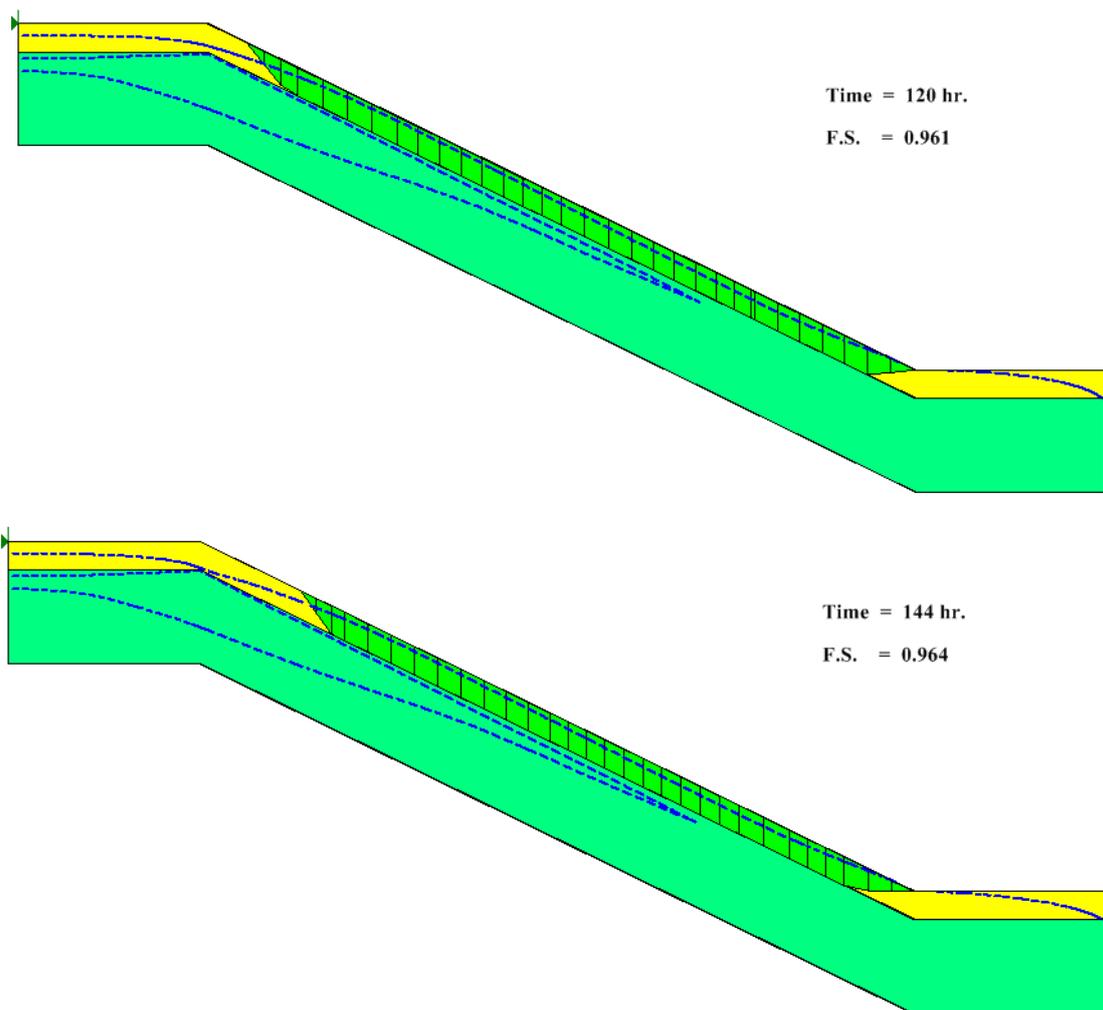
จากการวิเคราะห์ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน แสดงดังรูปที่ 4.33 - 4.35 พบว่าระดับน้ำใต้ดินส่งผลต่อตำแหน่งการพิบัติโดยเมื่อระดับน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกตั้งแต่ช่วงเวลาเริ่มต้นไปจนถึง 72 ชั่วโมง อัตราส่วนปลอดภัยจะค่อย ๆ ลดลงเท่ากับ 1.316 1.303 1.310 และ 1.177 ตามลำดับ ตำแหน่งของการพิบัตียังคงเป็นตำแหน่งเดิมแต่เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาที่ 96 110 120 และ 144 ชั่วโมง ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นใกล้จะถึงผิวดินค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลงเหลือเท่ากับ 1.040 0.999 0.961 และ 0.964 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.00 ตำแหน่งการพิบัติจะเปลี่ยนแปลงโดยมีขอบเขตที่แคบลงและมีตำแหน่งลดต่ำลง ทั้งนี้ เนื่องมาจากแรงดันน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตามระดับน้ำใต้ดินจะทำให้กำลังเฉือนลดลงและระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยเพิ่มแรงดันลอยตัว (Uplift Pressure) ทำให้ลาดดินที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงจึงเกิดการพิบัติได้ง่าย



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งรูปแบบการพืดักกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 0 24 และ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.34 ตำแหน่งรูปแบบการพื้ติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 72 96 และ 110 ชั่วโมง



รูปที่ 4.35 ตำแหน่งรูปแบบการพิบัติกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในช่วงเวลา 120 และ 144 ชั่วโมง

#### 4.7 เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต Critical Rainfall Envelope for Stability

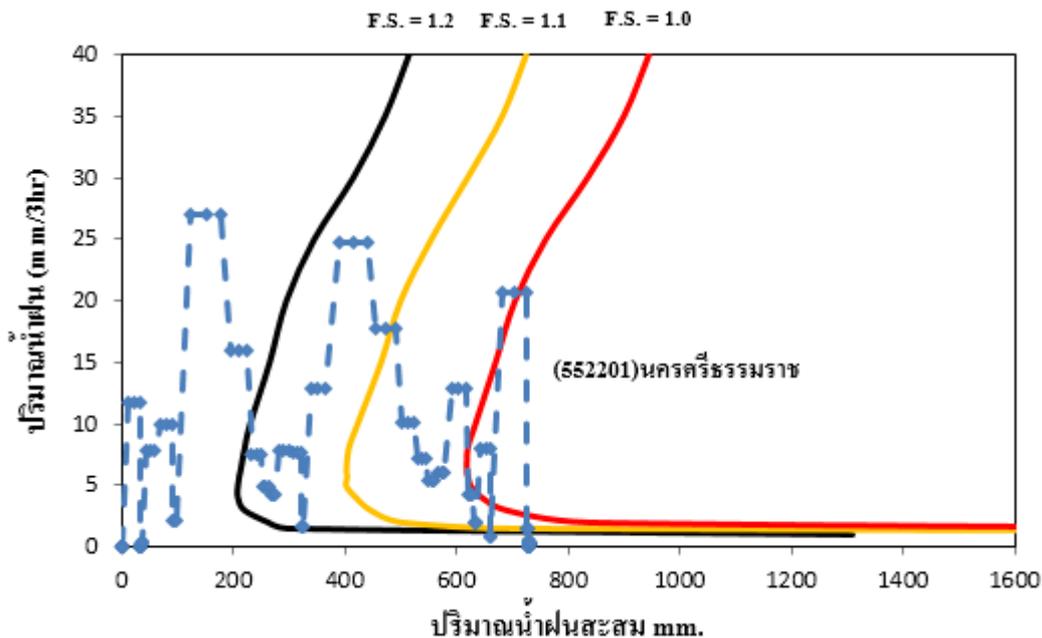
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่แสดงด้วยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เพื่อนำมาเป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินเฉพาะพื้นที่ศึกษาตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนราย 3 ชั่วโมง ที่ฝนตกจริงกับปริมาณน้ำฝนสะสมใช้ข้อมูลจากสถานีนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำฝนที่ตั้งอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาค่อนข้างมาก แต่สามารถบันทึกข้อมูลได้ละเอียดราย 3 ชั่วโมง และวัดปริมาณน้ำฝนได้ใกล้เคียงกับสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้พื้นที่ศึกษาดังนั้น เพื่อความถูกต้องแม่นยำจึงได้นำข้อมูลน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา แต่มีการบันทึกข้อมูลที่ละเอียดเป็นรายวันนำมาวิเคราะห์ร่วมด้วยเพื่อทำการการเปรียบเทียบและสร้างเป็นเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ค่า F.S. = 1.2 1.1 และ 1.0 ซึ่งเป็นเส้นที่บ่งบอกว่าลาดดินมีความปลอดภัยหรือมีเสถียรภาพเป็นอย่างไร ในขณะที่ฝนตกแสดงดังรูปที่ 4.36 และเพื่อให้เข้าใจง่ายยิ่งขึ้นจึงได้จัดให้อยู่ใน

รูปแบบความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวันกับปริมาณน้ำฝนสะสมแสดงดังรูปที่ 4.37 ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานีนครศรีธรรมราช สถานีอบต.ฉลอง และสถานีอบต.ลิซล ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณพื้นที่ศึกษาดังตารางที่ 4.11

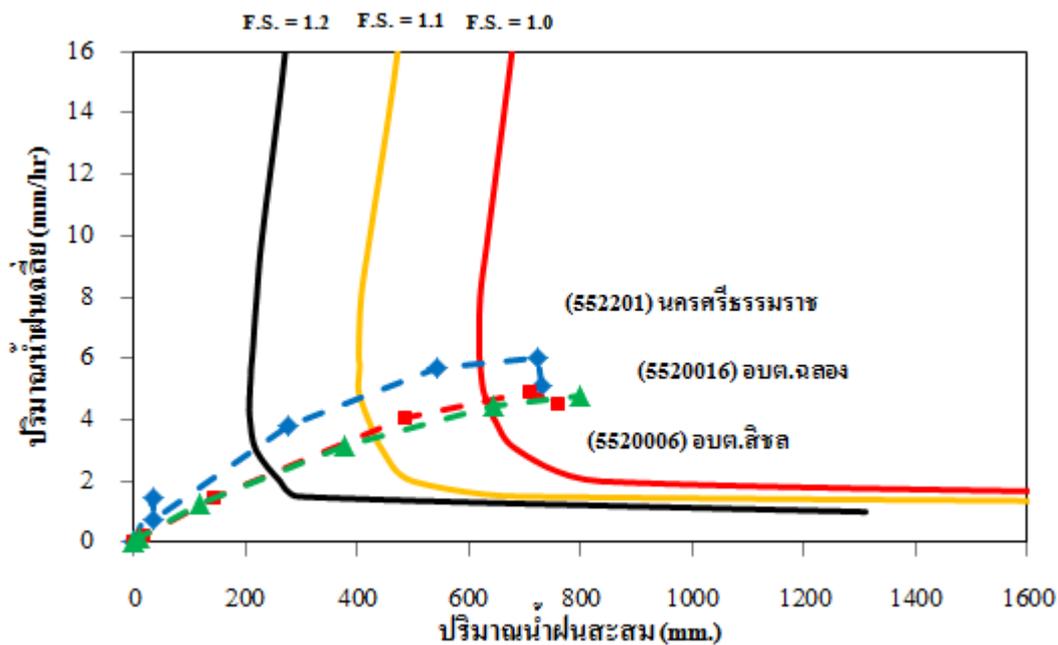
จากเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตในรูปที่ 4.37 และจากข้อมูลสถานีน้ำฝนในตารางที่ 4.11 พบว่าลาดดินในพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอลิซล จังหวัดนครศรีธรรมราช จะสูญเสียเสถียรภาพในวันที่ 26 มีนาคม 2554 จากการที่เส้นกราฟน้ำฝนไปตัดกับเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่มีเสถียรภาพ (F.S.) เท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นตัวแทนของเสถียรภาพของลาดดินในขณะนั้น โดยมีค่าน้ำฝนสะสมอยู่ในช่วง 543.9 – 710.5 มิลลิเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 554.47 มิลลิเมตรจะทำให้ลาดดินมีเสถียรภาพเท่ากับ 1.04 นั่นหมายความว่าลาดดินกำลังเข้าใกล้ที่จะพิบัติและที่ปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 643.54 มิลลิเมตร ลาดดินจะมีเสถียรภาพเท่ากับ 0.999 นั่นแสดงว่าลาดดินได้พิบัติหรือสูญเสียเสถียรภาพแล้ว ดังนั้นเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาและสามารถนำไปใช้เพื่อเตือนภัยดินถล่มในพื้นที่ศึกษาได้

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลน้ำฝนจาก 3 สถานีคือสถานีนครศรีธรรมราช สถานี อบต.ฉลอง และสถานี อบต.ลิซล ในช่วงวันที่ 21 -27 มีนาคม 2554 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2555)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	น้ำฝน (มม.)	น้ำฝนสะสม (มม.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเวลาสะสม (นาที)	น้ำฝนเฉลี่ย (มม./ชม.)
<b>สถานี 552201 - นครศรีธรรมราช</b>						
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
<b>สถานี 5520016 – อบต.ฉลอง</b>						
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
<b>สถานี 5520006 – อบต.ลิซล</b>						
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

ผลการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินด้วยคุณสมบัติทางวิศวกรรมธรณีศึกษาลาดดินในพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ประกอบไปด้วยการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนต่อเสถียรภาพของลาดดิน ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับความชื้นในมวลดิน ดัชนีความชุ่มชื้นในดินวิกฤต เสถียรภาพของลาดดินรวมไปถึงการจัดทำเส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของดิน (ค่าความซึมผ่านของน้ำในดิน,  $K_s$ ) และความเข้มฝน  $I_r$  เป็นพารามิเตอร์หลักที่เป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเนื่องด้วยน้ำฝนโดยในส่วนของลักษณะของลาดดิน (มุมลาดเอียง,  $\alpha$  และความหนาของชั้นดิน) เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน
2. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) ของดินที่ได้จากการทดสอบกำลังเฉือนของดินโดยการศึกษาในรูปแบบของสมการระนาบกำลังรับแรงเฉือนพบว่าระดับความอิ่มตัวหรือความชื้นในมวลดินส่งผลต่อกำลังเฉือนของดิน
3. ดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤต ( $API_{cr}$ ) จากแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Analysis) ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวการเคลื่อนพังในลักษณะการวิเคราะห์แบบหนึ่งมิติได้ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดินวิกฤตในพื้นที่ศึกษาส่วนบน (T) เท่ากับ 205.65 มิลลิเมตร ส่วนกลาง (M1) เท่ากับ 227.89 มิลลิเมตร ส่วนกลาง (M2) เท่ากับ 253.69 มิลลิเมตร และส่วนล่าง (U) เท่ากับ 166.60 มิลลิเมตร
4. เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาพบว่าลาดดินได้สูญเสียเสถียรภาพในช่วงเวลา 14:00 นาฬิกา ในวันที่ 26 มีนาคม 2554 วัดปริมาณน้ำฝนสะสมได้ 643.54 มิลลิเมตร
5. เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤต (Critical Rainfall Envelope for Stability) ที่ได้สามารถใช้เป็นตัวแทนเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ศึกษาได้โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เท่ากับ 1.04 และ 0.999 จะมีปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 554.47 และ 643.54 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ได้เฉพาะพื้นที่ศึกษาดำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- การทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ความชื้นต่าง ๆ เนื่องจาก ความชื้นส่งผลโดยตรงต่อกำลังของดินจึงควรควบคุมความชื้นของตัวอย่างดินให้คงที่ตลอดการทดสอบและควรเลือกใช้ดิน

ที่จำแนกเป็นชนิดเดียวกันในการทดสอบเพื่อลดความแปรปรวนและเพื่อสะดวกในการแปรผลการทดสอบ

- ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในดินวิกฤต ( $API_{cr}$ ) ที่วิเคราะห์ได้เป็นการวิเคราะห์ในทางเดียวหรือ 1 มิติเท่านั้นและใช้เฉพาะสำหรับพื้นที่ศึกษาเท่านั้น

## บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. (2552). บันทึกเหตุการณ์ดินถล่มและความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างปีพ.ศ. 2531-2554.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2555). ข้อมูลน้ำฝนของพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
- จีนะวัฒน์ 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 วิกฤติเพื่อใช้  
เตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4  
พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, วรวัชร ต่อวิวัฒน์ และบรรพต กุลสุวรรณ. (2550). การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ  
ดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ  
ครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. (2540). วิศวกรรมปฏิพิภค. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม ราชูปถัมภ์.  
กรุงเทพมหานคร
- นงลักษณ์ ไทโรเจียมอารีย์. (2547). เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม.  
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- บรรพต กุลสุวรรณ. (2558). การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำ  
จันทบุรี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พงษ์ศักดิ์วิทวัสชุตินกุล และวารินทร์ จิระสุขทวีกุล. (2548). การหาค่า Antecedent Precipitation Index  
(API)เพื่อการเตือนอุทกภัยและดินถล่ม. สถานีวิจัยลุ่มน้ำห้วยหินลาด. เอกสารเผยแพร่ที่ 3/2548.
- วรวัชรต่อวิวัฒน์. (2552). แบบจำลอง API วิกฤติเพื่อการเตือนภัยดินถล่มสำหรับดินที่เกิดจากการสลายของ  
หิน ณ ที่ตั้งในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา  
วิศวกรรมโยชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- วรากร ไม้เรียง. (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2549). ฐานข้อมูลดินถล่ม
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2555) งานศึกษาพัฒนาระบบแบบจำลองเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเฝ้าระวังและแจ้งเตือนภัยพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ.
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2540). ปฐพีกลศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต. ปทุมธานี
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2549). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร. กรุงเทพมหานคร
- อดุลย์ยะ โก๋บ. (2551). การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์ ภาคใต้ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- อภินิติ โชติสังกัส. (2549) การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพแรงดันน้ำในดิน
- 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 Dobroslove, 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. 2<sup>nd</sup> 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 3rd Brazilian 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 60<sup>th</sup> 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. and Soralum, 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 Mechanics. 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 5<sup>th</sup> 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>