



**การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41**

**ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย**

**Assessment of Slope Stability Improvement at Highway No. 41**

**Segment of Thung Song District - Ron Phibun District, Southern Thailand**

**อดุลย์ ยะโก๊บ**

**Adun Yakob**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**

**วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)**

**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

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

**Master of Engineering in Civil Engineering (Geotechnics)**

**Prince of Songkla University**

**2551**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41  
ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย

**ผู้เขียน** นายอดุลย์ ยะโก๊บ

**สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)

---

<b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก</b>	<b>คณะกรรมการสอบ</b>
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.คณุพล ตันนโยภาส)	.....ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ชานีรณานนท์)
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม</b>	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.คณุพล ตันนโยภาส)
..... (ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)	.....กรรมการ (ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)
	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วรารกร ไม้เรียง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย
ผู้เขียน	นายอคุลย์ ยะโก๊ป
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2550

### บทคัดย่อ

ศึกษาเสถียรภาพลาดดินเหนือคันทางของทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์ ในจังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวนสองช่วงคือ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 และ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 กระบวนการศึกษาประกอบด้วยห้าประการ หนึ่ง, การสำรวจภูมิประเทศและลักษณะการวิบัติของลาดดิน สอง, การเก็บตัวอย่างดินทั้งแบบแปลงสภาพและแบบคงสภาพนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าตัวแปรกำลังของดินทั้งค่ากำลังสูงสุดและค่ากำลังคงค้าง โดยวิธีการทดสอบการเฉือนโดยตรง สาม, ศึกษาการลดลงของกำลังเฉือนระหว่างตัวอย่างดินสภาวะความชื้นปกติและความชื้นสูงสุด และจากค่ากำลังสูงสุดเหลือเป็นค่ากำลังคงค้าง สี่, การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทั้งในสภาวะปกติโดยใช้ค่าความชื้นในขณะเก็บตัวอย่างดินเป็นตัวแทนและสภาวะวิกฤติโดยใช้ค่าความชื้นสูงสุดเป็นตัวแทน และห้า, ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีการใช้กล่องลาดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ วิธีการปรับลดความลาดชัน วิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน และวิธีการใช้กล่องลาดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ผสมกับการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

ผลการศึกษาจำแนกชนิดดินทั้งสองช่วงได้เป็น ML และ MH โดยลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 แบ่งได้เป็น 2 ชั้นดิน และลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 แบ่งได้เป็น 3 ชั้นดิน ระดับชั้นการอิ่มตัวของตัวอย่างดินความชื้นตามธรรมชาติขณะเก็บตัวอย่างดิน เฉลี่ยเท่ากับ 77.50% และระดับชั้นการอิ่มตัวของตัวอย่างดินชุ่มน้ำความชื้นสูงสุด เฉลี่ยเท่ากับ 99.00%

ผลการศึกษาการลดลงของกำลังเฉือน พบว่าตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติในขณะเก็บตัวอย่างดิน เมื่อนำมาเพิ่มความชื้นให้มากที่สุด ค่ากำลังสูงสุดและค่ากำลังคงค้างลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 26-39% และ 19-38 % ตามลำดับ และการลดลงของกำลังเฉือนจากค่ากำลังสูงสุดเป็นค่ากำลังคงค้าง ในดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำ ค่ากำลังลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 17-26% และ 9-21% ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 ในสภาวะปกติลาดดินมีค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.764 แต่ในสภาวะวิกฤติหากระดับน้ำใต้ดินสูงถึงผิวลาดดิน ค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 0.585 ระดับน้ำใต้ดินที่ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1พอดี คือระดับที่วัดจากผิวดินลงไปประมาณ 4 เมตร และในสภาพจริงลาดดินยังไม่เกิดการวิบัติ แสดงว่าระดับน้ำใต้ดินของลาดดินไม่สูงเกินกว่าระดับดังกล่าว

ผลการศึกษาการวิบัติของลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 พบว่าเป็นการวิบัติแบบลึก ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชิ้นส่วน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพย้อนกลับพบว่า ลาดดินก่อนการวิบัติมีโอกาสเกิดการวิบัติได้จริง และลาดดินหลังการวิบัติมีค่าเสถียรภาพมากกว่าลาดดินก่อนการวิบัติ ลาดดินปัจจุบันในสภาวะปกติมีค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.832 แต่ในสภาวะวิกฤติ ค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 0.812 ผลการศึกษากการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดิน พบว่าวิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลและมีความเป็นไปได้ในทางวิศวกรรมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆที่กล่าวข้างต้น

**คำหลัก:** เสถียรภาพลาดดิน, กำลั้งเดือน, กำลั้งคองค้ำ, นครศรีธรรมราช

<b>Thesis Title</b>	Assessment of Slope Stability Improvement at Highway No. 41 Segment of Thung Song District - Ron Phibun District, Southern Thailand
<b>Author</b>	Mr. Adun Yakob
<b>Major Program</b>	Civil Engineering (Geotechnics)
<b>Academic Year</b>	2007

### **ABSTRACT**

The stability of the back slopes along the Highway No. 41, segment of Thung Song District to Ron Phibun District in Nakhon Si Thammarat Province was carried out. There were consisted of two segments, the first segment was on the kilometer of 13+300 – 13+400. The other is on the kilometer of 13+900 – 14+050. The research methods were composed of five stages as follow. First, the geography and the features of slopes failure were investigated. Second, disturbed and undisturbed soil sample was collected to be analyzed in the laboratory in order to determine the soil strength parameter value covering both the peak strength and the residual strength using the direct shear test. Third, the shear strength reduction was performed by measuring between the normal and soak conditions and also from the peak strength to residual strength. Fourth, the stability of the slopes was analyzed both in the normal conditions and in the worst case. The slope stability in the normal conditions was use strength parameter at the water content of soil while sampling it represent. On the other hand, the worst case of slope stability was analyzed by using the soaked specimens to determine its stability. The last one, the improvement of slope stability was undertaken using the gabion, slope decreasing method, ground water table controlling method, and using the Gabion combined with ground water table controlling method.

The classification of soil specimens can be determined two groups, ML and MH. The slopes on the kilometer of 13+300 – 13+400 was separated into two soil layers. The slopes on the kilometer of 13+900 – 14+050 was divided into three soil layers. The average of degree saturation of sampled soil in natural water content during sampling it was approximately of 77.50 %. Moreover, the average of degree saturation of soaked soil specimens was approximately of 99.00 %.

The result of the shear strength reduced in range of 26-39 % and 19-38 % from the peak strength and residual strength in respectively, that between soil specimens in a natural water content while collecting it and soaked soil specimens. In addition, the shear strength reduced from the peak strength to be a residual strength in a natural water content soil specimens and soaked soil specimens about 17-26 % and 9-21 % in respectively.

The results of the slope stability analysis were exhibited that there are safety slopes on the kilometer of 13+300 – 13+400 segment in the normal conditions that safety factor was 2.764. On the contrary, there was unsafe of stability value in worst case when the ground water table increase nearly to the slopes surface that safety factor of 0.585. The ground water table, which is safety factor approximately at 1. When the level from analysis 4 meters below form the slope surface. Actually, the slopes stability has not been failed, which indicate that the ground water table is lower 4 meters.

The results from the study on the kilometer of 13+900 – 14+050 segment were revealed that there was a deep seat failure slope. It was developed the multiple rotational slides. The back analysis showed that there is a chance to be a slope failure. The study was also found that the failed slopes were more stable than the slopes before failed. Currently slopes are stability in safety factor of 1.832, however, its was unstability in the worse case that safety factor employed in 0.812. In addition, the study of slope stability improvement was found that ground water table controlling method is probably the most effective in the engineering applicability comparing to among mentioned methods.

**Key word:** Slope stability, Shear strength, Residual strength, Nakhon Si Thammarat

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คนุพล ตันนโยภาส ประธานกรรมการที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร.พิพัฒน์ ทองนิม กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัย ตลอดการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ไม้เรียง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ หัวหน้าศูนย์ฯ และพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโท และบุคลากรของศูนย์ฯ ที่ได้อนุเคราะห์ให้คำแนะนำเรื่องการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและแนวทางการวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณ คณะผู้เขียนและพัฒนาโปรแกรม KUslope 2.0 ที่มีหัวใจอุดมการณ์สร้างโปรแกรมที่ดีและให้ใช้กันฟรีๆ เพื่อเป็นวิทยาทานแก่บุคคลทั่วไป รวมถึงงานวิจัยชิ้นนี้ด้วย

ขอขอบคุณ นายจิรศักดิ์ พุทศรี ผู้อำนวยการแขวงทางนราธิวาส นายสมชาย นันทันชะวานิช และ นายบรรทม โชคดี ผู้อำนวยการศูนย์สร้างทางสุราษฎร์ธานี กรมทางหลวง ที่ได้ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อครั้งนี้

ขอขอบคุณ น้ำใจจากพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโทด้วยกัน คุณดิษฐพร คุณสุจิตวิทย์ คุณเจตน์ และอีกหลายๆท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญสุด ที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว กำลังใจและความช่วยเหลือจากคุณยามิลห๊ะ พี่สาวที่แสนดี คุณมนตรี น้องชายที่น่ารัก และคุณมัธยมหะ หมัดอาด้า เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ซึ่งข้าพเจ้าระลึกถึงเสมอและจะอยู่ในใจตลอดไป

อดุลย์ ยะโก๊บ

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ทบทวนเอกสาร	3
<b>2 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
2.1 การสำรวจสภาพพื้นที่ศึกษา	41
2.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและทดสอบสมบัติทางกายภาพของดิน	43
2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	44
2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน	51
2.5 การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน	52
2.6 วัสดุและอุปกรณ์	52
<b>3 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา</b>	
3.1 สภาพพื้นที่ศึกษา	54
3.2 สมบัติทางกายภาพของดิน	73
3.3 สมบัติทางวิศวกรรมของดิน	83
3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน	93
3.5 การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน	100
<b>4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
4.1 สรุปผลการศึกษา	111
4.2 ข้อเสนอแนะ	113
	(8)



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	115
ภาคผนวก	
ก. ผลการออกสำรวจจริงวัดสภาพภูมิประเทศพื้นที่ศึกษา	119
ข. ผลการทดสอบการเนื้อน โดยตรง	129
ค. ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน	150
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	
ก. การเผยแพร่ในรูปแบบของบทความวารสาร	176
ข. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	189
ประวัติผู้เขียน	196

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินเมื่อใช้วิธีการเพิ่มเสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆกัน	25
3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินจากลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	75
3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	78
3.3 สัญลักษณ์เรียกแทนตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	82
3.4 ผลทดสอบการเนื้อน โดยตรงแบบเร็ว	84
3.5 ผลทดสอบการเนื้อน โดยตรงแบบช้า (ดินความชื้นธรรมชาติ)	85
3.6 ผลทดสอบการเนื้อน โดยตรงแบบช้า (ดินชุ่มน้ำ)	85
3.7 กำลังเนื้อนของดินชุ่มน้ำที่ลดลงเทียบกับดินความชื้นธรรมชาติ	88
3.8 กำลังเนื้อนของดินที่ลดลงจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้าง	88
3.9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	94
3.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการปรับระดับน้ำใต้ดิน	96
3.11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	97
3.12 ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ	99
3.13 ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติและเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน	100
3.14 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่	102
3.15 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการปรับลดความชัน	105
3.16 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน	106
3.17 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการใส่กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ และควบคุมระดับน้ำใต้ดิน	109

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
1.1	เงื่อนไขการวิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (วิกิษฐ์, 2540)	6
1.2	ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund, 1993)	7
1.3	ดินสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) (มานะ, 2541)	8
1.4	การกระจายตัวของน้ำในดิน (Olson and Spangler, 1973)	9
1.5	เส้นขอบเขตการวิบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)	10
1.6	ขนาดรัศมีของส่วนโค้งผิวน้ำ (Meniscus) ที่มีผลต่อแรงดูด (Janssen and Dempsey, 1980)	11
1.7	ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง (Lambe, 1979)	12
1.8	แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปอดกัย (F.S) ที่ระยะเวลาต่างๆ (Tony Price, 2000)	15
1.9	อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน(Janbu ,1983)	16
1.10	ระดับน้ำใต้ดิน 2 ชั้น เนื่องจากฝนที่ตกหนักในระยะเวลาสั้นๆ (รัฐธรรม, 2547)	19
1.11	ระดับน้ำใต้ดินสำหรับการออกแบบการเพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดิน (Fell, 1994)	21
1.12	ร่างระบายน้ำผิวดิน (ขงยุทธ, 2544)	22
1.13	วิธีการควบคุมน้ำใต้ดินในเชิงลาด (ขงยุทธ, 2544)	23
1.14	วิธีการเพิ่มแรงต้านทาน	24
1.15	การวิเคราะห์อัตราส่วนปอดกัยของลาดดินความสูง 20 เมตรที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆ (ขงยุทธ, 2544)	25
1.16	ลักษณะการวิบัติของลาดดินและหินแบบต่างๆ (Blong,1973)	28
1.17	ลักษณะการวิบัติเป็นแนวโค้งวงกลม (วินิต, 2547)	29
1.18	ส่วนประกอบในการเลื่อนพังของลาดดิน (Landslide Feature) (Varnes, 1978)	29
1.19	การวิบัติแบบการเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive) (Bromhead, 1992)	30
1.20	การเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชั้นส่วนที่หน้าผาจอร์แดน (Bromhead, 1992)	31
1.21	ลักษณะการวิบัติแบบถอยหลัง (Retrogressive slide) (Skempton and Hutchinson, 1969)	32
1.22	ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU - Miniature Sampler (วรากรและคณะ, 2548)	35

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.23 การ X-Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU - Miniature sampler (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2550)	35
1.24 ลักษณะของแรงที่กระทำในการทดสอบ Direct Shear Test	36
1.25 ลักษณะแรงที่กระทำในแนววิบัติของลาดดิน (สถาพร, 2541)	37
2.1 แผนภูมิการไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	40
2.2 การปฏิบัติงานในการสำรวจสภาพภูมิประเทศ	42
2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพโดยท่อ PVC	45
2.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพแบบก้อน (Block sample)	46
2.5 กระบอกที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน (KU - Miniature Sampler)	47
2.6 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพด้วย KU - Miniature Sampler	48
2.7 การปฏิบัติการทดสอบการเฉือนโดยตรง	50
3.1 แผนที่เส้นทางสถานที่ทำวิจัย	54
3.2 รูปตัดถนนทางหลวงหมายเลข 00411001	55
3.3 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสถานที่ทำวิจัย	55
3.4 แผนที่ธรณีวิทยบริเวณสถานที่ทำวิจัย	57
3.5 ลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	58
3.6 ลาดดินหลังการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2544	59
3.7 การวิบัติและการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2548	60
3.8 ลาดดินหลังการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2548	60
3.9 ฝ้าชันหลัก (Main scarp)	62
3.10 ฝ้าชันรอง (Minor scarp)	63
3.11 ด้านข้างของลาดที่เคลื่อนพังด้านขวา (Right flank)	63
3.12 ด้านข้างของลาดที่เคลื่อนพังด้านซ้าย (Left flank)	64
3.13 รอยแตกที่ผิวดิน (Tension crack)	64
3.14 แผนภูมิปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย	66
3.15 เส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	68
3.16 รูปทรงสันฐาน 3 มิติลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	68

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 รูปตัดลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	69
3.18 เส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	70
3.19 รูปทรงสัญญาณ 3 มิติลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	70
3.20 รูปตัดลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	71
3.21 รูปตัดจำลองแสดงลักษณะการวิบัติการของลาดดิน	72
3.22 การกระจายขนาดเม็ดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	76
3.23 การกระจายขนาดเม็ดดินแนวตัดที่ 1 และ 2 ช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	80
3.24 การกระจายขนาดเม็ดดินแนวตัดที่ 3 และ 4 ช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	81
3.25 รูปแปลนแสดงแนวตัดและตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพในลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	82
3.26 รูปแปลนแสดงแนวตัดและตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพในลาดดินในช่วง ก.ม. 13+900 ถึง ก.ม. 14+050	83
3.27 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของค่ากำลังสูงสุดระหว่างดินความชื้นธรรมชาติกับดินชุ่มน้ำ	89
3.28 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของค่ากำลังคงค้างระหว่างดินความชื้นธรรมชาติกับดินชุ่มน้ำ	90
3.29 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของกำลังเฉือนจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้าง (ดินความชื้นธรรมชาติ)	91
3.30 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของกำลังเฉือนจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้าง (ดินชุ่มน้ำ)	92
3.31 รูปตัดที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400	93
3.32 การปรับลดระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน	95
3.33 รูปตัดที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050	96
3.34 รูปตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ	98
3.35 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดิน โดยกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดต่างๆกัน	101
3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่กับอัตราส่วนปลอดภัย	102

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.37 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดิน โดยวิธีการปรับลดความสูงลาดดินต่างๆกัน	104
3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงลาดดินกับอัตราส่วนปลอดภัย	105
3.39 การปรับปรุงเสถียรภาพโดยการควบคุมระดับน้ำใต้ดินที่ระดับต่างๆกัน	106
3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำใต้ดินกับอัตราส่วนปลอดภัย	107
3.41 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่และควบคุมระดับน้ำใต้ดิน	109
3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่กับค่าอัตราส่วนปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่างๆกัน	110
3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำใต้ดินกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยเมื่อใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดต่างๆ กัน	110

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากเส้นทางในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์ ต้องตัดเส้นทางผ่านเนินเขา ดังนั้นในการก่อสร้างจึงจำเป็นต้องวางแนวทางลัดและไปตามช่องเขาและบางช่วงจำเป็นต้องมีการตัดลาดเนินเขาเพื่อให้พื้นที่เพียงพอสำหรับก่อสร้างคันทางได้ ก่อปรกับความจำกัดของเขตทางที่มีอยู่ จึงทำให้เส้นทางในช่วงดังกล่าวจำเป็นต้องตัดลาดดินเหนือคันทาง (Back Slope) ที่มีความสูงชันและเมื่อถึงช่วงฤดูฝนมีฝนตกหนัก ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินดังกล่าว ก่อความเสียหายต่อเส้นทางทำให้เกิดอุปสรรคในการใช้เส้นทางของประชาชนที่ต้องการเดินทางผ่านบริเวณดังกล่าว และที่ดินของชาวบ้านที่อยู่ติดกับเขตทางทำให้ต้องสูญเสียที่ดินและพืชพันธุ์การเกษตรไป ดังกรณีเหตุการณ์เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 เกิดการวิบัติของลาดดินในช่วง ก.ม. 13 + 900 ถึง ก.ม. 14 + 050 กรมทางหลวงซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบเส้นทางดังกล่าว จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยการก่อสร้างผนังกันดิน โดยใช้วัสดุประเภทกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabions) ต่อมาเมื่อเดือนธันวาคม 2548 เกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินดังกล่าวอีกครั้ง กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ได้เลื่อนตัวเข้ามาในผิวทางจราจรประมาณ 2 เมตร และอยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ดำเนินการแก้ไขปัญหา โดยการรื้อกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่บางส่วนที่เกิดการวิบัติออก และทำการปรับแต่งลาดดินที่เกิดการวิบัติใหม่ เพื่อให้สภาพถนนสามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ

สภาวะวิกฤติของลาดดินในลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน ในสภาพที่ลาดดินมีความชื้นมากหรืออิ่มตัว ไปด้วยน้ำ และระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินลดลง จนทำให้เกิดการวิบัติของลาดดิน ดังนั้นการแก้ไขหรือซ่อมแซมลาดดินเหนือคันทางในช่วงที่ผ่านพ้นจากช่วงฝนตกหนักไปแล้วนั้น เนื่องจากความชื้นในมวลดินและระดับน้ำใต้ดินบางส่วนได้ลดลงบ้างแล้ว ส่งผลให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น ลาดดินดังกล่าวจึงสามารถคงตัวอยู่ได้โดยไม่เกิดการวิบัติ และในการแก้ไขซ่อมแซมลาดดินดังกล่าวนั้นก็ไม่ได้มีการวิเคราะห์และออกแบบครอบคลุมถึงสภาวะวิกฤติ คือในสภาพที่ดินมีความชื้นมากหรืออิ่มตัว ไปด้วยน้ำ ดังนั้นเมื่อถึงฤดูฝนของแต่ละปี ลาดดินดังกล่าวจึงเกิดปัญหาการวิบัติของลาดดินเป็นประจำอยู่เนืองๆ จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติและศึกษาถึงการปรับปรุงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างถาวร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. วิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะและสาเหตุการวิบัติของลาดดิน
2. ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน
3. วิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดิน
4. ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ภูมิศึกษาของงานวิจัยมีจำนวนสองช่วงดำเนินการ คือ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 และ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 ด้านขวาทาง

2. การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินจะทำการทดสอบในสองสถานะคือ สถานะดินความชื้นธรรมชาติ โดยใช้ค่าความชื้นในขณะเก็บตัวอย่างดินเป็นตัวแทน และสถานะดินชุ่มน้ำโดยการแช่ตัวอย่างดินในน้ำ ให้ตัวอย่างดินมีค่าความชื้นมากที่สุดเป็นตัวแทน

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีสภาวะลาดดินปกติ กำหนดให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดินและใช้ค่ากำลังเฉือนของดินความชื้นธรรมชาติในการวิเคราะห์ และกรณีสภาวะลาดดินวิกฤติ กำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินและใช้ค่ากำลังเฉือนของดินชุ่มน้ำในการวิเคราะห์

4. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม KUSlope 2.0

5. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการกร่อน (Erosion) ที่เกิดจากน้ำผิวดินไหลลงตามเชิงลาด โดยในสภาพก่อสร้างจริงสามารถป้องกันได้โดยการก่อสร้างระบบระบายน้ำและปลูกหญ้าปิดทับผิวหน้าลาดดินทันทีเมื่อทำการก่อสร้างแล้วเสร็จ

6. การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินเป็นเพียงแนวทางเบื้องต้น เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆ โดยสามารถนำผลที่ได้ไปประกอบการพิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีการหรือแนวทางที่เหมาะสมได้ดียิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาเฉพาะ วิธีการใช้ผนังกันดินชนิด Gravity Retaining Wall โดยใช้วัสดุประเภทกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabion), การปรับลดความสูงลาดดิน, การควบคุมระดับน้ำใต้ดิน และวิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่รวมกับการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังเฉือนของดินระหว่างดินความชื้นธรรมชาติกับดินชุ่มน้ำ
2. ทราบถึงลักษณะและสาเหตุการวิบัติของลาดดิน
3. ทราบถึงค่าอัตราส่วนปลอดภัยหรือเสถียรภาพของลาดดินทั้งในสภาวะปกติและสภาวะวิกฤติ
4. สามารถนำผลการศึกษาไปใช้ประกอบเป็นแนวทางในการเลือกใช้และออกแบบวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน ที่มีสมบัติและสัณฐานลาดดินคล้ายคลึงกันได้

#### 1.5 ทบทวนเอกสาร

ตัวแปรที่ต้องทราบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินประกอบด้วย รูปร่างลาดดิน ขนาดของแรงค้ำน้ำ หน่วยน้ำหนักของดิน กำลังของดิน และสภาพแวดล้อมของลาดดิน ในงานก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับลาดดิน การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในแต่ละลาด ตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะเป็นค่าเฉพาะสำหรับลาดดินและเฉพาะสำหรับเวลานั้นๆไป วิธีการโดยทั่วไปในการปฏิบัติงานของวิศวกรมักจะใช้ค่าตัวแปรที่ได้จากการประมาณ หรือการสร้างระบบป้องกันการวิบัติของลาดดิน (Slope Protection) มักใช้รูปแบบมาตรฐานของหน่วยงานนั้น ปัญหาที่เกิดจากการวิบัติของลาดดินจึงเป็นเรื่องที่พบเห็นอยู่เป็นประจำ การจะวิเคราะห์ให้ทราบถึงค่าตัวแปรที่แน่นอนเป็นเรื่องที่ยากส่วนมากเป็นไปในรูปแบบงานวิจัยมากกว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติของลาดดินที่เป็นกรณีศึกษาจริงในประเทศไทย ยังถือว่ามี การดำเนินการน้อยมากเมื่อเทียบกับต่างประเทศ โดยสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติของลาดดินได้เป็น 4 กลุ่มคือ

1. งานวิจัยเพื่อวิเคราะห์สภาพและสาเหตุของการเกิดลาดดินถล่ม
2. งานวิจัยเพื่อปรับปรุงลาดดินให้มีความมั่นคงมากขึ้น
3. งานวิจัยเพื่อการจัดทำพื้นที่เสี่ยงภัย
4. งานวิจัยเพื่อหาแนวทางในการบรรเทาสาธารณภัยธรรมชาติจากลาดดินถล่ม

งานวิจัยสาเหตุการเกิดลาดดินถล่มและงานวิจัยเพื่อการจัดทำพื้นที่เสี่ยงภัย เป็นงานวิจัยที่ต้องศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลศาสตร์และกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความชื้นจากการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน การเก็บตัวอย่างดินไม่อิ่มตัวและการ

ทดสอบในห้องปฏิบัติการจะต้องมีเทคนิคพิเศษเพื่อควบคุมความชื้นของมวลดินในช่วงต่างๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังของดินที่แปรผันไปตามความชื้นดังกล่าว การวิเคราะห์การไหลซึมก็เป็นตัวแปรที่ต้องอาศัยการทดสอบทั้งในสนามและการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ ที่ซับซ้อน ทั้งต้องอาศัยการเฝ้าติดตามสภาพแวดล้อมต่างๆ ของลาดดิน เพื่อนำข้อมูลมาประกอบการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ ตรวจสอบเสถียรภาพลาดดิน และศึกษาปรับปรุงลาดดินให้มีความมั่นคงขึ้น เนื่องการวิบัติของลาดดินหลายครั้งในอดีตและคาดว่าจะเกิดการวิบัติได้อีกในอนาคต การเลือกตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้ตัวแปรที่ครอบคลุมสภาวะวิกฤต (Worst case) ของลาดดิน เพื่อรองรับสภาวะการณ์ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้ (Conservative) โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

### 1.5.1 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน (Shear Strength Theory)

มวลดินเมื่อมีแรงมากระทำ มวลดินจะออกแรงต้านทานแรงที่มากระทำจนเกิดความสมดุลของแรงในมวลดิน เมื่อมีแรงมากระทำเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งดินไม่สามารถต้านทานแรงกระทำนั้นได้ ดินก็จะวิบัติ (Failure) และเริ่มเคลื่อนตัวออกจากกัน โดยปรากฏเป็นระนาบ (Plane) ขึ้น การวิบัติของดินเกิดจากแรงเฉือน กล่าวคือดินจะเกิดการวิบัติบนระนาบที่หน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่มากระทำมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ดินสามารถออกแรงต้านทานได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าดินจะเกิดการวิบัติบนระนาบที่ดินสามารถต้านทานหน่วยแรงเฉือนได้ต่ำสุด

ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shearing resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction) และการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยสัดส่วนของกำลังเฉือนของมวลดินดังกล่าว จะแปรผันตรงกับปริมาณร้อยละของเม็ดดินหยาบ และเม็ดดินละเอียดของมวลดิน

สำหรับดินเม็ดหยาบที่ไม่มีการยึดเกาะกัน (Cohesion less soil) เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังเฉือนของดินขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักก่ดที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน สำหรับดินเม็ดละเอียดที่มีการยึดเกาะกัน (Cohesive soil) เช่น ดินเหนียว ค่ากำลังเฉือนจะขึ้นอยู่กับการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ชนิดแร่ประกอบในมวลดินและความหนาแน่นของมวลดิน

ในศตวรรษที่ 18 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ คูลอมบ์ (Coulomb) ได้คิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่ระนาบใดๆ ของมวลดินในรูปสมการ

เส้นตรงแสดงขอบเขตการวิบัติของมวลดิน เรียกว่า สมการมอร์-คูลอมบ์ ซึ่งใช้หาค่าแรงเฉือนของดินที่จุดวิบัติ คือ

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (1.1)$$

เมื่อ  $\tau$  = หน่วยแรงเฉือน หรือค่ากำลังเฉือนของดิน

$\sigma$  = หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบ

$c$  = การยึดเกาะกัน

$\phi$  = มุมเสียดทานภายใน

และสามารถเขียนในนิพจน์ของหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดังนี้

$$\tau = \sigma' \tan \phi' + c' \quad (1.2)$$

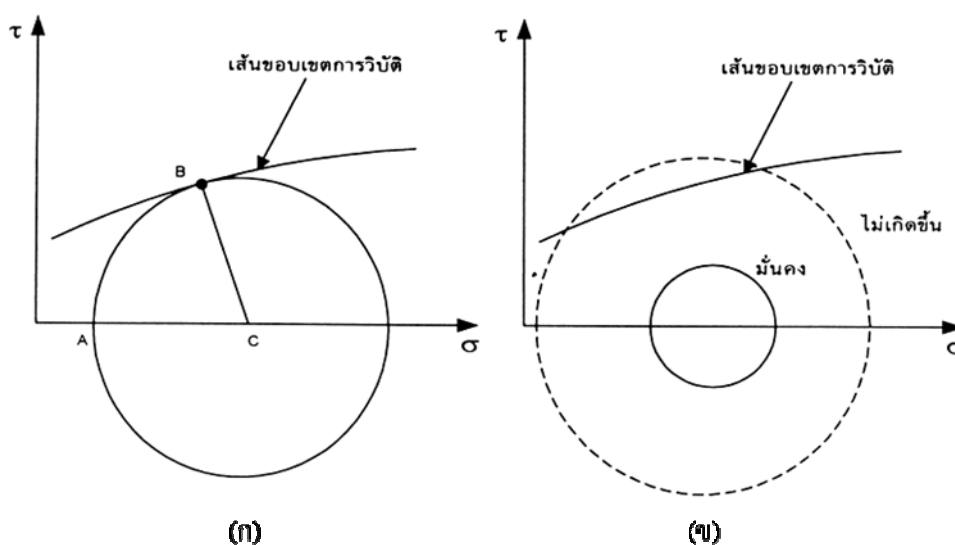
เมื่อ  $\sigma'$  = หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน =  $\sigma - u$

$u$  = แรงค้ำน้ำ

$c'$  = การยึดเกาะกันประสิทธิผล

$\phi'$  = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล

การวิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมเป็นไปตามหรือใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่คาดคะเน โดยกฎการวิบัติที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (Mohr and Coulomb) กฎของมอร์และคูลอมบ์ กำหนดไว้ว่า มวลดินเริ่มจะเกิดการวิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่ให้แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope) พอติดตั้งรูปที่ 1.1 ก แต่หากวงกลมของมอร์อยู่นอกเหนือเส้นขอบเขตการวิบัติขึ้นไป มวลดินก็เกิดการวิบัติและหากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการวิบัติ มวลดินก็ยังสามารถรับแรงได้ไม่วิบัติดังรูปที่ 1.1 ข

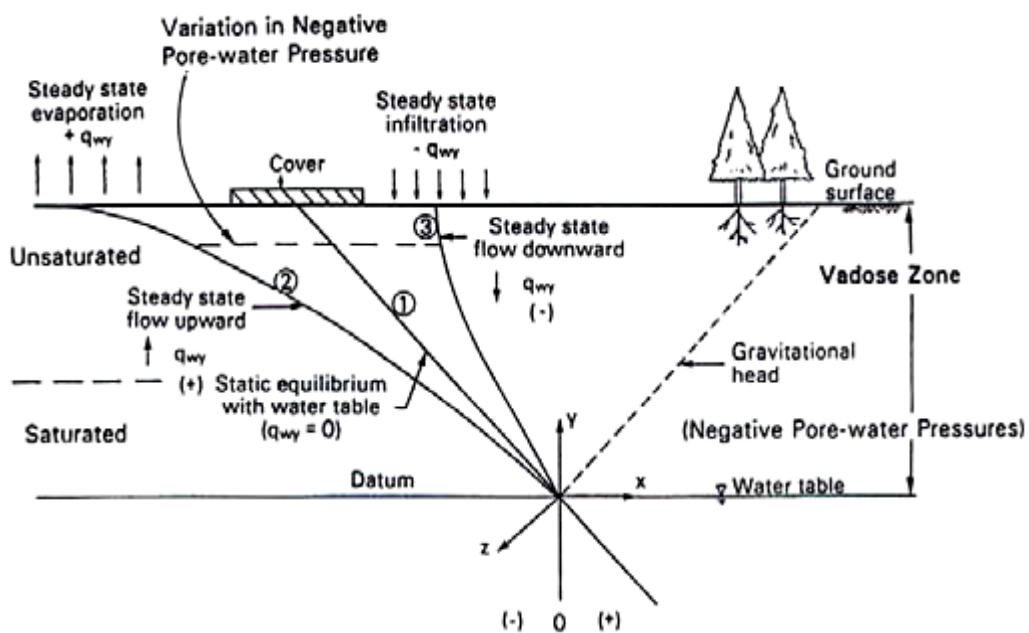


รูปที่ 1.1 เงื่อนไขการวิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (วิศิษฐ์, 2540)

วารากร (2542) การเลือกใช้ค่ากำลังเฉือนของดินในการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์ แบ่งลักษณะการวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ วิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และวิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) เนื่องจากดินมักจะมีน้ำหรือ น้ำอยู่ภายในมวลดิน ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงขึ้นในมวลดินทำให้เกิดการเพิ่มหรือลดแรงดันน้ำในมวลดินด้วย ถ้าสามารถวัดค่าหรือคาดการณ์ค่าของความดันน้ำได้แน่นอน จะแยกหน่วยแรงที่เกิดจากความดันน้ำออกไปเสียก่อน คงเหลือแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินหรือเนื้อดินเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma'$ ) ทั้งนี้เพราะแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังแต่อย่างใด เพราะค่าการยึดเกาะกันและมุมเสียดทานของน้ำเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงมีเฉพาะหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้นที่ทำให้เกิดกำลังหรือหน่วยแรงต้านทานได้ แต่ในทางปฏิบัติ บางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าความดันน้ำให้ถูกต้อง ดังนั้นในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำได้ชัดเจน เช่น การบรรทุกน้ำหนักโดยเร็ว มวลดินไม่อิ่มตัว ความดันน้ำเกิดจากการบดอัด เป็นต้น จึงมักจะผนวกความดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินทีเดียว ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบให้มวลดินมีสภาพความชื้น อัตราการบรรทุกน้ำหนัก และสภาพอื่นๆ ให้เหมือนกับที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างจริง และคาดว่าความดันน้ำก็ควรจะเกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบใกล้เคียงกับสภาพที่จะเกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งจะปลดหน่วยแรงประสิทธิผลไปโดยอัตโนมัติ โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่อย่างใด

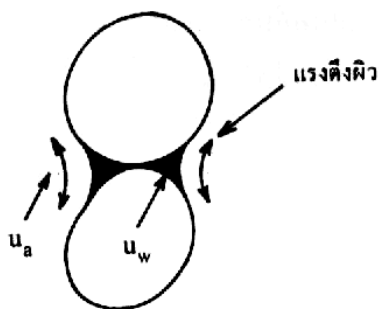
### 1.5.2 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

มวลดินในสภาพธรรมชาติประกอบด้วยชั้นดินต่างๆ ที่ติดต่อกันทับถมกัน และมีระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table) อยู่ด้วย ซึ่งปกติจะอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นผิวดิน (Ground level) ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินจะมีน้ำอยู่เต็ม นั่นคือเป็นมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Vadose zone) จะประกอบด้วยดินอิ่มตัว (Capillary saturated zone) และดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated zone) ดังรูปที่ 1.2 หากไม่มีน้ำไหลซึมลงมาหรือระเหยขึ้นไปจากผิวดินและระดับน้ำใต้ดินคงที่แล้วเส้นแรงดันน้ำจะสมดุลที่เส้น (1) ในขณะที่เส้น (2) และ (3) หมายถึงมีการระเหยในฤดูแล้งและมีน้ำซึมลงในฤดูฝนตามลำดับ ทั้งสามกรณีจะมีความดันในโพรงที่เป็นลบ (Negative pore pressure) ทั้งสิ้น



รูปที่ 1.2 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)

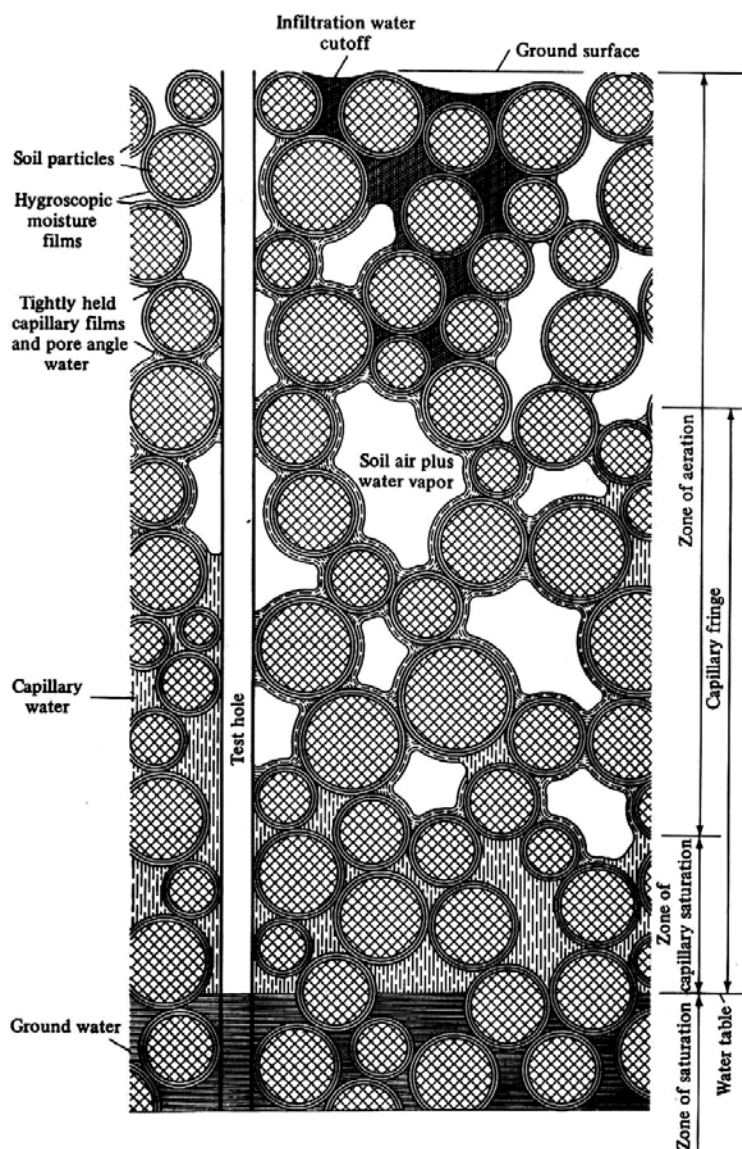
มานะ (2541) ดินสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีอากาศสอดแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน ลักษณะน้ำในมวลดินจะไม่ต่อเนื่อง แรงตึงผิวเกิดจากผลต่างของแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดิน ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ดินสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) (มานะ, 2541)

Olson and Langfelder (1965) ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำต่ำๆ ค่าแรงดันน้ำจะมีค่าติดลบสูง การกระจายตัวของน้ำในดินเหนือระดับน้ำใต้ดินแบ่งเป็นเขตต่างๆ ดังนี้คือ เขตอิ่มน้ำ (Saturation zone), เขตอิ่มตัวใต้ระดับน้ำใต้ดิน (Capillary saturation zone) และเขตอิ่มอากาศ (Aeration zone) ดังแสดงในรูปที่ 1.4

ลาดดินตามธรรมชาติที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน อยู่ในสภาวะที่ไม่อิ่มตัวมีแรงดันในโพรงติดลบ ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงผิวของส่วนที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำที่เรียกว่าผิวสัมผัสแรงดึง (Contractile Skin) Fredlund and Rahardjo (1993) ลาดดินเหล่านี้ในฤดูแล้งจึงมีเสถียรภาพมั่นคงอยู่ได้ แต่เมื่อมีฝนตกหรือระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นแรงดันในโพรงที่เป็นลบค่อยๆ หายไป กลายเป็นแรงดันในโพรงที่เป็นบวก (Positive pore pressure) กำลังของดินก็ลดลงตามลำดับ ทำให้ลาดดินดังกล่าวเกิดการวิบัติได้



รูปที่ 1.4 การกระจายตัวของน้ำในดิน (Olson and Langfelder, 1973)

Abramson, et al. (2001) อธิบายว่า เขตของแรงดันน้ำในโพรงที่เป็นลบ จะอยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดินขึ้นไป ภายในเขตนี้แรงดันน้ำในช่องว่างน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศ ขนาดของแรงดันโพรงเป็นลบบางที่เรียกว่า แรงดูดของดิน (Soil suction) ถูกควบคุมโดยแรงตึงผิว (Surface tension) ที่รอบๆ ขอบผิวอากาศและน้ำภายในช่องว่าง และขึ้นกับขนาดของเม็ดดิน โดยทั่วไปเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีแรงดันในโพรงติดลบที่มากกว่า แรงดันในโพรงติดลบเป็นตัวเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิภาพภายในมวลดิน และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน Ho and Fredlund (1982) แนะนำว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังเฉือนของดินเนื่องจากแรงดันโพรงติดลบแสดงได้ดังสมการที่ 1.3

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (1.3)$$

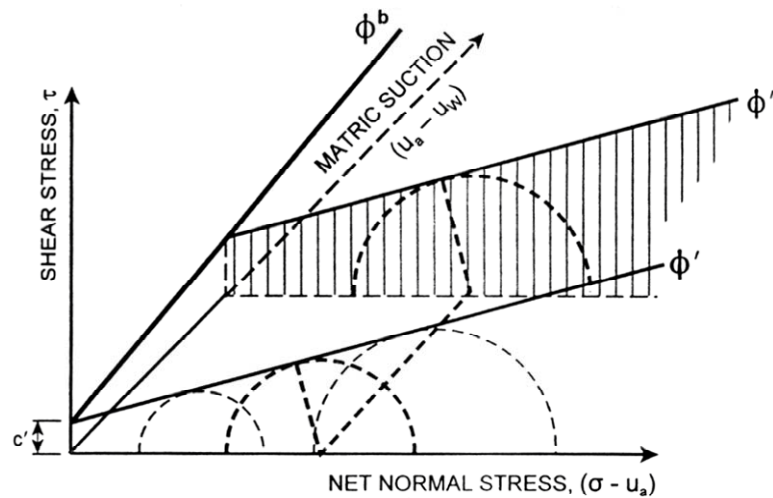
เมื่อ  $C$  = การยึดเกาะกันของดินทั้งหมด

$c'$  = การยึดเกาะกันประสิทธิผล

$(u_a - u_w)$  = แรงดูดเมตริกซ์

$\phi_b$  = ความชันของกราฟตามแนวแกนแรงดูดเมตริกซ์ เมื่อ

$\sigma - u_a$  เป็นค่าคงที่



รูปที่ 1.5 เส้นขอบเขตการวิบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)

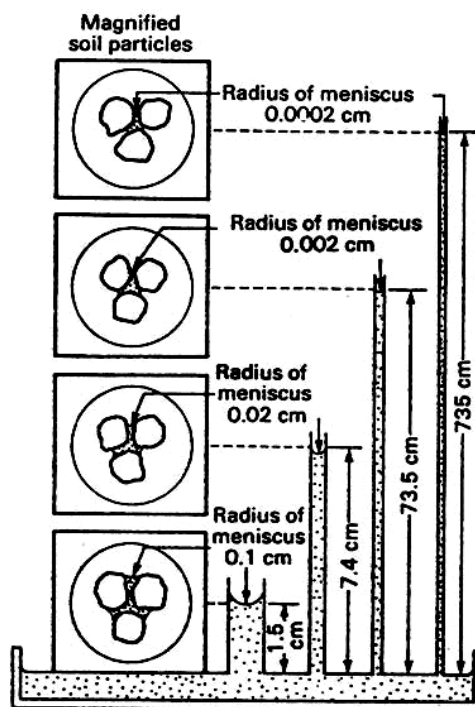
จากสมการแรงดูดเมตริกซ์  $(u_a - u_w)$  เป็นตัวเพิ่มกำลังเฉือนในนิพจน์ของ  $(u_a - u_w) \tan \phi_b$  การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินสามารถแทนด้วยกราฟสามมิติโดยใช้ตัวแปร  $\sigma - u_a$ ,  $\tau$  และ  $(u_a - u_w)$  ดังแสดงในรูปที่ 1.5

สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) อธิบายว่า แรงดูดเมตริกซ์ (Matric suction) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเม็ดดิน หรือแรงดึงที่ยึดน้ำไว้กับเม็ดดิน เช่นเดียวกับน้ำในหลอดคาปิลลารี แรงดูดเมตริกซ์มีหน่วยเดียวกับแรงดัน (เช่น kPa หรือ Bar) แต่ต่างจากแรงดันเนื่องจากมีค่าเป็นลบ แรงดูดเมตริกซ์นี้แปรผกผันกับปริมาณความชื้นในดิน เรียกว่า Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)

Aitchison (1965) อธิบายว่า แรงดันน้ำที่เป็นลบในมวลดิน ก่อให้เกิดเป็นแรงดูด (Suction) ค่าแรงดูดในดินมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นซึ่งเรียกว่า แรงดูดโดยรวม (Total suction) ประกอบด้วยพลังงานอิสระของแรงดูด 2 ส่วน คือ แรงดูดเมตริกซ์ (Metric suction) หรือ แรงดูดของรูเล็ก (Capillary suction) ซึ่งเป็นแรงดูดที่เกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในดิน และ แรงดูด



ออสโมติก (Osmotic suction) ซึ่งเป็นแรงดูดเนื่องจากสารละลายที่ละลายในน้ำในดิน Krahn and Fredlund (1972) ได้เสนอว่าแรงดูดออสโมติก เป็นผลจากสารละลายที่เจือจางในน้ำในดิน (ส่วนมากเป็นเกลือ) ทำให้เกิดแรงดูดชนิดนี้



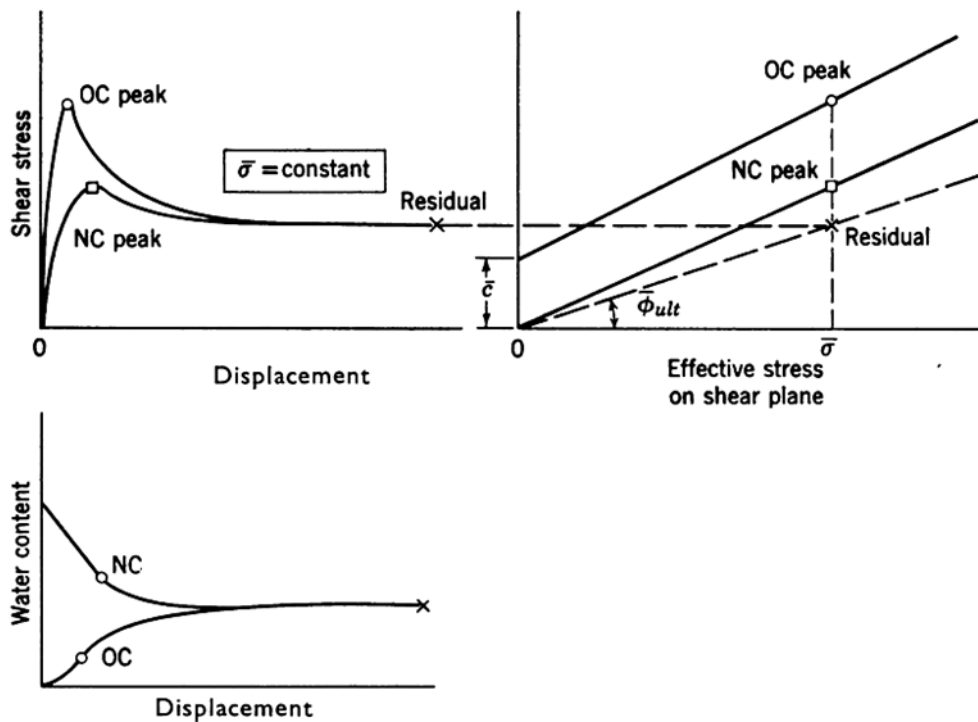
รูปที่ 1.6 ขนาดรัศมีของส่วนโค้งผิวน้ำ (Meniscus) ที่มีผลต่อแรงดูด (Jenssen and Dempsey, 1980)

วินิต (2547) อธิบายถึงค่าแรงดูดเมทริกซ์ว่า เป็นแรงที่เกิดจากการดึงดูดของสภาพรูเล็ก (Capillarity) จากค่าแรงดึงผิวของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังแสดงเป็นความสัมพันธ์ในรูปที่ 1.6 ดังนั้นมวลดินเม็ดละเอียดซึ่งมีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อยจะสามารถดึงดูดน้ำขึ้นไปได้สูงกว่ามวลดินเม็ดหยาบ ความดันของน้ำที่ระดับที่ถูกดูดขึ้นไปจากแรงดูดนี้มีค่าต่ำกว่าความดันของบรรยากาศ

### 1.5.3 ค่ากำลังสูงสุดและค่ากำลังคงค้าง

ในการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดิน ในขณะที่ดินกำลังถูกเฉือน จะมีแรงต้านทานการเฉือนเกิดขึ้น โดยในแต่ละหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress) จะมีค่าแรงต้านทานการเฉือนที่จำกัดสำหรับแต่ละหน่วยแรงตั้งฉากนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ค่ากำลังสูงสุด (Peak strength) ซึ่งการทดสอบ

โดยทั่วไปมักจะหยุดการเลื่อน เมื่อผลการทดลองได้แสดงค่ากำลังสูงสุดได้ชัดเจนแล้ว แต่หากทำการเลื่อนต่อเนื่องไปจนเลยจุดซึ่งเป็นค่ากำลังเฉือนที่มากที่สุด จะพบว่าค่าแรงต้านทานการเลื่อนจะลดลงตามลำดับจนกระทั่งเหลือเป็นแรงต้านทานการเลื่อนที่น้อยที่สุดและคงที่ ซึ่งเรียกว่า ค่ากำลังคงค้าง (Residual strength) ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ค่ากำลังของดินที่สภาพกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง (Lambe and Whitman, 1979)

วรรณิ (2543) อธิบายว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพระยะยาวของงานคันทางหรืองานดินถม, งานตัดลาดดิน, งานเขื่อนดิน, และลาดดินธรรมชาติในช่วงเวลาที่มีฝนตกหนัก ควรใช้ลักษณะการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective strength analysis) และใช้ค่ากำลังคงค้าง (Residual strength) ในการวิเคราะห์เมื่อพบแนวการเลื่อนพังของลาดดินหรือมีการแปรสภาพและในดินเหนียวอัดตัวเกินมาก (Heavily overconsolidated clay) ค่ากำลังคงค้างจะอยู่ที่ความเครียด (Percent strain) ที่มากกว่า 20 %

Timothy, et al. (2005) ได้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินว่าในกรณีลาดดินที่เคยเกิดการวิบัติ (Old land slide) แนวเลื่อนวิบัติมักจะเกิดขึ้นในแนวผิวการเลื่อนที่มีอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งควรที่จะใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์ (Residual Strength Condition)

Davison (2006) อธิบายว่าค่ากำลังคงค้างคือ ค่ากำลังที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวอย่างมาก (Large displacements) ซึ่งมักจะเป็นไปไม่ได้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่โดยทั่วไปจะยอมให้มีการเคลื่อนตัวของดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในงานลาดดินที่เคยเกิดการวิบัติ (Old land slides) มักจะมีการเคลื่อนที่ของแนววิบัติที่มาก จึงจำเป็นต้องใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์ การเคลื่อนตัวของแนววิบัติที่มากทำให้ เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ (Reorientation) ในแนวขนานกับผิววิบัติ ในบริเวณพื้นผิววิบัติเมื่อดินมีการเปลี่ยนแปลง (Remold) และถูกจัดรูปแบบใหม่ (Reformed)

Price (2000) อธิบายถึงความสำคัญของค่ากำลังคงค้าง (Residual strength) ว่าการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสภาวะกำลังคงค้าง (Residual strength condition) ในทางปฏิบัติมีความสำคัญมาก เนื่องจากถ้าดิน ณ ที่เดิม (In situ) มีแนวเลื่อนหรือผิวการเฉือนอยู่แล้ว ค่ากำลังของดินบริเวณผิวการเฉือนจะน้อยกว่าค่ากำลังสูงสุดและถ้ามีการเคลื่อนตัวมากพอค่ากำลังของดินจะลดน้อยลงจนเท่ากับค่ากำลังคงค้างได้

#### 1.5.4 การลดลงของกำลังเนื่องกับเสถียรภาพของลาดดิน

ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดินทำให้กำลังเหนือนของดินลดลง ส่งผลโดยตรงกับเสถียรภาพของลาดดิน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การก่อสร้างที่มีการตัดลาดดินในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งดินมีความชื้นน้อยกำลังเหนือนของดินสูง ลาดดินยังมีเสถียรภาพมั่นคงอยู่ได้ เมื่อเวลาผ่านไปเข้าสู่ฤดูฝน ในขณะที่ฝนตกทำให้ความชื้นในลาดดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังเหนือนของดินลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากช่วงเวลาไหนที่ปริมาณน้ำฝนมากจนกำลังเหนือนของดินไม่อาจต้านทานแรงที่กระทำ ก่อให้เกิดการวิบัติของลาดดินได้ ดังนั้นการออกแบบที่ใช้ตัวแปรจากการทดสอบตัวอย่างดินที่มีความชื้นน้อยในฤดูแล้ง จึงไม่เพียงพอกับการรับแรงเหนือนของดินในฤดูฝน การออกแบบโดยใช้ตัวแปรกำลังที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินในสภาวะอิ่มตัว จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้การออกแบบปลอดภัยมากขึ้น

Soralump and Kulswan (2006) ได้ทำการทดสอบกำลังเหนือนของดินด้วยเครื่องทดสอบเหนือนโดยตรง (Direct Shear Test) กับตัวอย่างดินใน 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะความชื้นในธรรมชาติและสภาวะชุ่มน้ำ การทดสอบดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ดัชนีการลดกำลัง (Strength Reduction Index, SRI) ผลการทดสอบจะเป็นดัชนีชี้วัดการลดลงของกำลังเหนือนเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลการทดสอบพบว่าดินฟูจากหินแกรนิตผู้มีการลดลงของกำลังเหนือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินฟูจาก

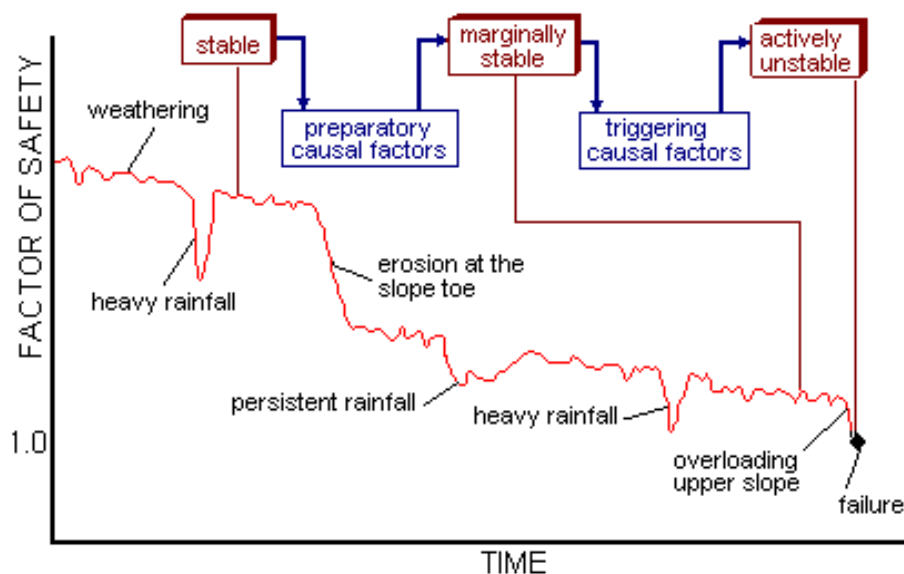
หินโคลนและหินดินดานมีการลดลงของกำลังเนื้ออยู่ระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 และดินพุดจากหินทรายมีการลดลงของกำลังเนื้อมากกว่าร้อยละ 50

เสถียรภาพลาดดินเป็นการพิจารณาสัดส่วนของแรงขับ (Driving force) และแรงต้านทาน (Resisting Force) ที่กระทำกับมวลดิน ค่าเสถียรภาพลดลงเมื่อแรงขับมากขึ้นหรือแรงต้านลดลง จนเมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้านก็ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดิน การลดลงของกำลังเนื้อในดิน (Shear strength reduction) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แรงต้านทานลดน้อยจนเกิดการวิบัติของลาดดิน กำลังเนื้อของดินที่ลดลงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. กำลังเนื้อที่ลดลงชั่วคราว สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสถานะที่ฝนตกและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลง เพราะน้ำได้เข้าไปทำลายแรงดึงดูดผิวของอากาศในดินและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้หน่วยแรงตั้งฉากในดินลดลงเนื่องมาจากแรงลอยตัว (Uplift pressure) ทำให้กำลังเนื้อจากแรงเสียดทานในดินลดลง โดยกำลังเนื้อที่ลดลงจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความชื้นในดินลดน้อยลงตามลำดับ

2. กำลังเนื้อที่ลดลงถาวร เมื่อดินถูกแรงเฉือนกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกินกำลังต้านทานสูงสุด (Peak Strength) เกิดการเลื่อนตัวของดินในแนววิบัติ ค่ากำลังเนื้อของดินจะลดลงเรื่อยๆในขณะที่เกิดการเลื่อนตัวจนกระทั่งเหลือแรงต้านทานที่น้อยที่สุดและคงที่คือค่ากำลังคงค้างของดิน เกิดจากการที่โครงสร้างเดิมของดินถูกทำลายเนื่องจากการเลื่อนตัวของดินในแนววิบัติ เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ทำให้กำลังเนื้อของดินลดลง

Price (2006) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Short term) มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในดินและระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงที่ฝนตกหนัก (Heavy rainfall) จะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงมาก แต่เมื่อปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้วอัตราส่วนความปลอดภัยก็กลับมาเพิ่มขึ้นได้อีก แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากการกัดเซาะที่ฐานล่างของลาดดิน (Slope toe) ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงและไม่อาจกลับเพิ่มขึ้นได้หากไม่มีการซ่อมแซมลาดดิน ดังแสดงในรูปที่ 1.8



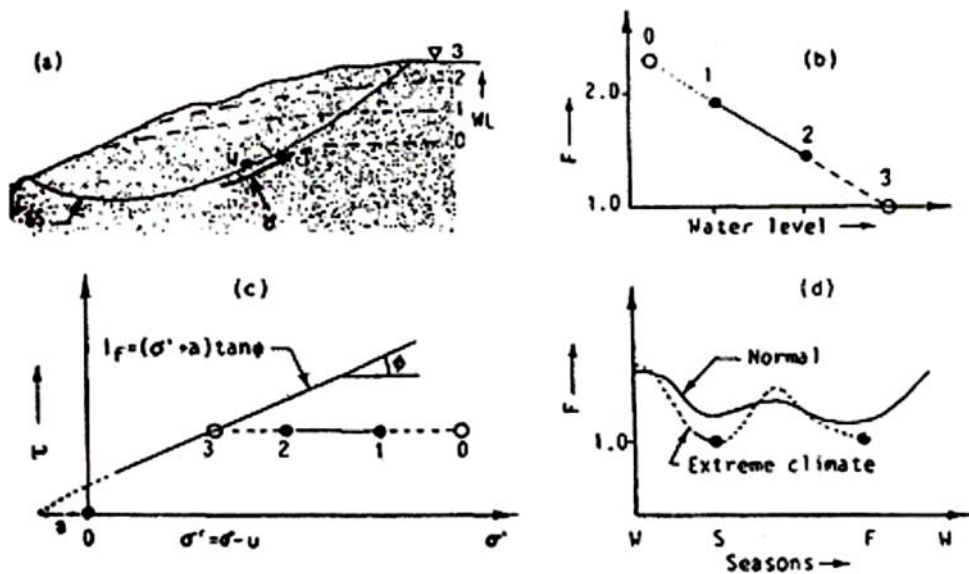
รูปที่ 1.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ที่ระยะเวลาต่างๆ (Price, 2006)

### 1.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินกับการวิบัติของลาดดิน

น้ำฝนเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้เกิดการวิบัติของลาดดิน เมื่อน้ำฝนไหลซึมลงดิน ทำให้แรงดันน้ำในดินเปลี่ยนไป จากเดิมที่แรงดันน้ำในลาดดินเป็นลบก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นศูนย์ และเปลี่ยนเป็นแรงดันที่เป็นบวก การเปลี่ยนแปลงสถานะแรงดันน้ำดังกล่าวทำให้กำลังเฉือนในดินลดน้อยลงตามลำดับ จนกระทั่งกำลังเฉือนของดินน้อยกว่าแรงที่กระทำต่อมวลดิน ลาดดินก็เกิดการวิบัติ Fredlund and Rehardjo (1993) พบว่าลาดดินถล่มส่วนมากมีสาเหตุมาจากการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน

วรากร และคณะ (2542) อธิบายว่า กรณีเป็นลาดดินธรรมชาติ (Natural slopes) หรือลาดเขาที่มีการตัดถนนผ่าน และลาดบ่อที่มีการขุดเพื่อเก็บน้ำ อาจไม่เกิดการเลื่อนถล่มในระหว่างเวลาที่มีการก่อสร้างหรือในช่วงที่มีความชื้นในมวลดินต่ำ ทั้งนี้เพราะเมื่อมวลดินยังไม่อิ่มตัว ความชื้นในมวลดินจะเกิดแรงตึงผิวที่ส่งผลให้เกิดแรงดูด ที่ช่วยยึดเกาะให้มวลดินแข็งแรงขึ้น หรือเกิดความดันในโพรงเป็นลบ (Negative pore pressure) ซึ่งทำให้ค่ากำลังประสิทธิผลของดินสูงขึ้น ตามสมการมอร์-คูลอมป์ เมื่อลาดดินได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เช่น ในฤดูที่มีฝนตกชุกทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ดินมีความชื้นมากขึ้น ทำให้แรงตึงผิวในดินถูกทำลาย และค่าความดันน้ำในดินเป็นบวก กำลังประสิทธิผลของดินก็จะลดลงจนถึงจุดวิกฤติที่เกิดการพังทลายของลาดดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึง

การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินตามฤดูกาลต่างๆ ในช่วงปีหนึ่งๆ ตามสภาพความชื้นที่มีในดิน การเลื่อนถล่มในลักษณะนี้ได้เคยปรากฏแล้วในประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคใต้และภาคเหนือ เช่นการวิบัติของลาดดินธรรมชาติที่ อ.พิปูน และอ.ลานสกา จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อ พ.ศ. 2531 (Wieland, 1989), การวิบัติของไหล่เขาบนทางหลวงสาย 4233 ระหว่างหาดกมลา และหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต (ศูนย์วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2546)



รูปที่ 1.9 อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน (Janbu, 1983)

เมื่อฝนตกน้ำจะไหลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือน้ำที่ไหลซึมลงในชั้นดิน (Infiltration) และผ่านลงสู่ระดับน้ำใต้ดินหรือเขตอิมมัตว์ที่อยู่ลึกลงไป และอีกส่วนคือน้ำไหลไปบนผิวดิน (Surface run off) น้ำใต้ดินจะไหลต่อไปยังที่ต่ำกว่าไปยังจุดที่สามารถไหลออกได้ เช่นตาน้ำ (Spring) แม่น้ำ หรือทะเล เป็นต้น ปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงดินและน้ำที่ไหลบนผิวดินจะถูกควบคุมโดยอัตราการซึมผ่านได้ของดิน (Permeability) ในระหว่างการไหลซึมจะเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับมวลดินเสมือนเป็นระดับน้ำจากผิวดิน (Perched water table) เคลื่อนตัวต่ำลงไปถึงระดับน้ำใต้ดินรวมกันทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นเรื่อยๆ ในกรณีที่เม็ดดินมีความชื้นเดิมน้อยมาก อัตราการไหลซึมลงดินจะสูงมากเนื่องจากค่าแรงดูดหรือแรงดันน้ำติดลบมีมาก แต่เมื่อแรงดูดในดินลดลงอัตราการไหลซึมก็จะลดลงตามลำดับ น้ำที่ไหลบนผิวดินทำให้เกิดการกัดเซาะ (Erosion) หน้าลาดดิน การกัดเซาะมีผลทำให้ลาดดินมีความชันเพิ่มขึ้น อีกทั้งทำให้เกิดเป็นร่องธารเล็กๆ ทำให้น้ำไหล

ซึมลงสู่ลาดดินได้ง่ายและเร็วขึ้น ปริมาณการกัดเซาะหน้าดินนั้นขึ้นกับอัตราความเร็วในการไหลของน้ำและปริมาณน้ำ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยระบบควบคุมการระบายน้ำและปลูกพืชคลุมดิน

Fukuoka (1979) อธิบายว่า ความเข้มของฝนและปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับการวิบัติของลาดดิน น้ำฝนมีผลกระทบกับเสถียรภาพลาดดินคือ เป็นการเพิ่มหน่วยน้ำหนักของดิน ซึ่งเป็นเสมือนการเพิ่มแรงกระทำกับลาดดินและทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง กำลังเฉือนที่ลดลงแบ่งได้เป็น 2 สาเหตุคือ

1. ดินมีปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นจากน้ำที่ไหลซึมผ่านผิวดินลงสู่ชั้นดินด้านล่างทำให้ดินมีกำลังเฉือนน้อยลง

2. ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นจากน้ำที่ไหลซึมลงมา ดินที่จมอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินเกิดแรงลอยตัว (Buoyancy Force) ทำให้ค่าหน่วยตั้งฉากลดลง ส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลง

Abramson, et al. (2001) อธิบายว่า ในขณะที่ฝนตกหรือหลังจากฝนตกไม่นานแรงดันในโพรงติดลบในดินจะมีขนาดลดลงเมื่อระดับความอิ่มตัวสูงขึ้นและกลับมาเท่ากับศูนย์ เมื่อดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ (Fully Saturated) ปัญหาหลักในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในดินไม่อิ่มตัวคือ มีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การลดลงของแรงดันในโพรงติดลบและแรงดันในโพรงเป็นบวกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับของสถานะที่ฝนตก ดังนั้นการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาในการออกแบบลาดดินปกติ และอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินว่า เป็นตัวแปรที่แทบจะไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเพิ่มหรือลดของน้ำใต้ดิน ปัจจัยที่มีผลได้แก่ รูปแบบของฝนที่ตกไม่เป็นรูปแบบที่คงที่ ทำให้ในขณะที่ฝนตกบางเวลาระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงมาก บางเวลาลดลง, ความไม่คงที่ทางธรณี, ลักษณะภูมิประเทศ และความใกล้เคียงกับจุดที่น้ำไหลออก เช่น ตาน้ำ (Spring) แม่น้ำหรือลำธาร หรือการสูบน้ำออกจากดิน การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลง (Reduction in shear strength) เนื่องจากแรงลอยตัวจะไปลดหน่วยแรงตั้งฉากที่ทำให้เกิดกำลังเฉือนจากแรงเสียดทาน และความอิ่มตัวของดินจะไปทำลายแรงดูดของรูเล็ก (Capillarity) และการยึดเกาะกันปรากฏ (Apparent cohesion) ในดินที่เป็นดินเม็ดละเอียด

สันติ (2550) อธิบายว่า การที่ฝนตกที่ความเข้มสูงๆ ไม่ได้หมายความว่าความชื้นในมวลดินจะเพิ่มขึ้นจนเกิดการวิบัติของลาดดินเสมอไป ในบางครั้งฝนที่ความเข้มต่ำ ก็อาจก่อให้เกิดการวิบัติของลาดดินได้ ทั้งนี้เนื่องจากสถานะเริ่มต้น (Initial condition) ซึ่งเป็นผลมาจากฝนก่อนหน้า (Antecedent rainfall) ทำให้ระดับความชื้นเริ่มต้นสูง เมื่อฝนตกลงมาเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินได้ นอกจากนี้รูปแบบของฝนที่ตกก็มีอิทธิพลเช่นกัน ฝนที่ตกในช่วงเวลาและมีความเข้มรวมเท่ากัน แต่ความเข้มไม่คงที่มากบ้างน้อยบ้างในแต่ละช่วงเวลา ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการประมาณความชื้นที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์โอกาสเกิดการวิบัติของลาดดิน

Y.C.Koo (1998) อธิบายว่า ในช่องกการวิบัติของลาดดินมักจะเกิดขึ้นในขณะที่หรือหลังจากฝนตกหนักไม่นาน ความสัมพันธ์ระหว่างการวิบัติของลาดดินกับสภาวะที่ฝนตกหนักมีความเกี่ยวข้องกันอย่างชัดเจน การพยากรณ์การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินที่เป็นผลจากฝนตก การวิเคราะห์การไหลซึมและเลื่อนตัวลงตามกันมาของน้ำฝนในลาดดิน เป็นเรื่องราวที่ยุ่งยากและซับซ้อนมาก เนื่องจากความหลากหลายในคุณสมบัติการไหลและขอบเขตการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ (Lumb, 1962) อย่างไรก็ตาม การจำกัดอัตราการไหลสามารถทำได้ง่ายกว่า สำหรับลาดดินที่ไม่มีกรป้องกันพื้นผิว มวลดินจะมีลักษณะอิ่มตัวพอดี (Just-Saturated) การหาความสัมพันธ์ของระดับน้ำในดินกับฝนตกวิธีอื่น เช่น วิธีทางสถิติ Koo & Lumb (1981) และ ใช้พีโซมิเตอร์ Endicott (1982) โดยทั่วไปการสังเกตการณ์จะทำในช่วงพายุฝนหนัก (Heavy rainstorms) เพราะว่าช่วงฝนตกหนักมีผลตอบสนองต่อระดับน้ำในดินโดยตรง การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในดินมากน้อย ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความเข้มและระยะเวลาของพายุฝน ฝนที่ตกก่อนหน้า และลักษณะของน้ำในดิน อย่างไรก็ตาม การเลือกวิธีเหล่านี้ ขึ้นกับความน่าเชื่อถือของข้อมูลระดับน้ำในดิน ซึ่งในลาดดินปกติจะไม่มี การตรวจวัด วิธีการเหล่านี้มักใช้เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจลึกซึ้งของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในดินที่เป็นผลตอบสนองจากเหตุการณ์ฝนตก มากกว่าจะพยากรณ์การเพิ่มของระดับน้ำในดินสำหรับพายุฝนแต่ละลูกเพื่อใช้ในการออกแบบลาดดินโดยทั่วไป

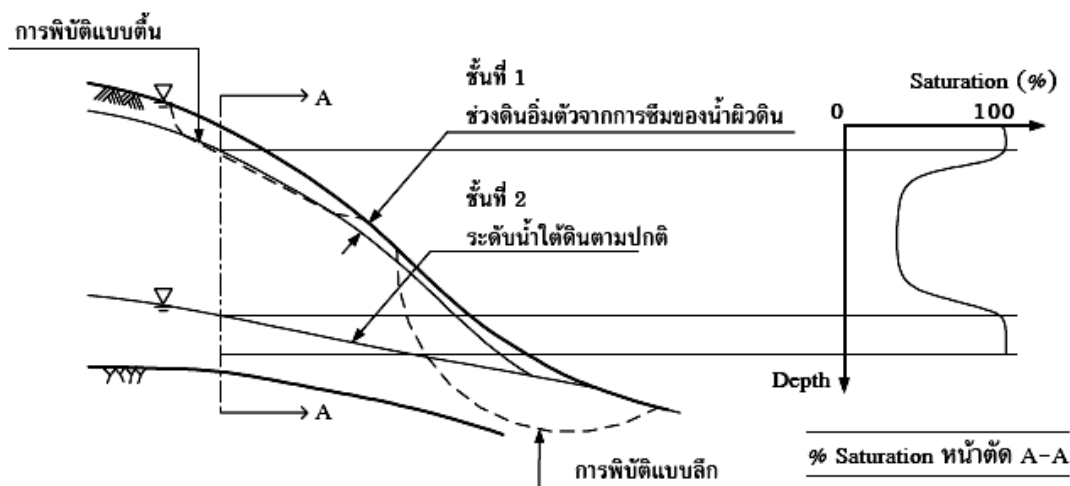
Kasim et al. (1998) อธิบายว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะฝนตกกับเสถียรภาพของลาดดิน เกี่ยวข้องกับตัวแปรมากมาย เช่น ความเข้มของฝน, ระยะเวลาที่ฝนตก, ความชื้นของดินก่อนฝนตก, สมบัติของดิน, รูปทรงลาดดิน และการแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ กลไกของลาดดินที่เกิดการวิบัติจากสภาวะฝนตก สาเหตุจากน้ำที่ไหลซึมลงไปในดิน ไปลดแรงคูดเมตริกซ์ในดินที่ไม่อิ่มตัว ทำให้กำลังของดินลดลงจนเกิดการวิบัติ

Gavin and Xue (2007) อธิบายว่า ในขณะที่ฝนตกน้ำไหลซึมจากผิวดินลงสู่ชั้นดิน และกระจายตัวในเขตดินไม่อิ่มตัว ลักษณะการกระจายขึ้นกับความชื้นของดิน, แรงดันน้ำ, ลักษณะภูมิประเทศของลาดดินและความสามารถในการไหลซึม ซึ่งแปรเปลี่ยนตลอดในขณะที่ฝนตก ในขณะที่การไหลซึมกำลังต่อเนื่องแรงคูดและความสามารถในการไหลซึมจะลดลง อัตราที่น้ำไหลซึมเข้าสู่ลาดดิน โดยทั่วไปเท่ากับหรือน้อยกว่าความเข้มฝน (Rainfall intensity)

รัฐธรรม (2547) อธิบายว่า น้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดดินในธรรมชาติอย่างมาก เนื่องจากกำลังเฉือนของดินจะลดลงเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มขึ้น โดยฝนที่ตกหนักในระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้เกิดระดับน้ำใต้ดิน 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นระดับน้ำใต้ดินปกติ ชั้นบนเป็นระดับน้ำใต้ดินเสมือน ส่วนกรณีฝนตกน้อยๆ ในระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นปกติ ผลเนื่องจากน้ำใต้ดินชั้นที่ 1 ทำให้เกิดการวิบัติแบบตื้น (Shallow failure) แต่ในลาดดินที่ระดับน้ำใต้



ดินชั้นที่ 2 อยู่สูงหรือน้ำใต้ดินทั้ง 2 ชั้นมาบรรจบกันก็จะมีโอกาสเกิดการวิบัติแบบลึก (Deep failure) ได้ ดังแสดงรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ระดับน้ำใต้ดิน 2 ชั้น เนื่องจากฝนที่ตกหนักในระยะเวลาสั้นๆ (รัฐธรรม, 2547)

Timothy, et al. (2005) อธิบายว่า ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินตัวแปรที่ไม่แน่นอนมากที่สุดคือ ขนาดของแรงดันน้ำในโพรงและ กำลังเฉือนของดิน เพราะเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในดินที่มาจกสภาวะที่ฝนตก ขนาดของแรงดันน้ำในโพรงจะเป็นค่าเฉพาะสถานที่ (Site specific) และเฉพาะเวลา (Time specific)

Terzaghi (1950) อธิบายว่า หนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเลื่อนถล่มของลาดดิน ก็คือแรงดันน้ำในโพรงดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับน้ำใต้ดินและน้ำฝน ในดินเม็ดละเอียดปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากน้ำฝนทำให้แรงดึงดูดของรูเล็ก (Capillary) หรือแรงดูดเมตริกซ์ลดลง เป็นผลให้การยึดเกาะกัน (Cohesion) ลดลง และระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงเสียดทานในมวลดินลดลง ซึ่งเป็นผลจากแรงลอยตัวทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง

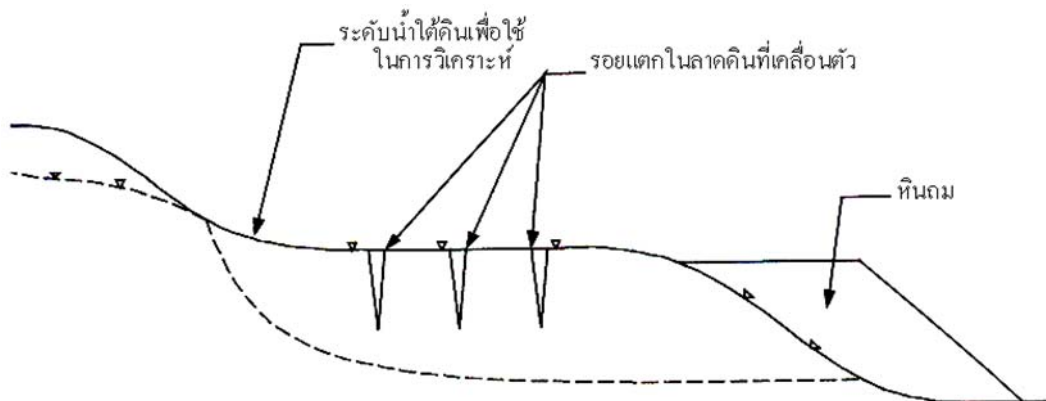
Orr (1987) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดิน ในงานวิจัยของ Orr เป็นการวิจัยทางสถิติแสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของลาดดิน ความน่าจะเป็นของลาดดินที่จะเกิดการพังทลายจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น และในบทความนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าระดับน้ำใต้ดินและความไม่แน่นอนของระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อความปลอดภัยของลาดดินมากกว่าปัจจัยอื่นๆ

นงลักษณ์ (2547) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการวิบัติของลาดดินในกลุ่มน้ำก้อ จังหวัด จันทบุรี โดยได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพมาทดสอบกำลังเฉือนที่ค่าระดับความชื้นต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝน พบว่าเมื่อระดับความชื้นในดินมากขึ้น กำลังเฉือนจะมีค่าลดลง และอธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นและระดับน้ำใต้ดินของลาดดิน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของฝน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของลาดดิน

บรรพต (2548) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการวิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่ม น้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี พบว่ากำลังเฉือนของดินแปรผกผันกับค่าความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน รูปแบบของฝนที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อการวิบัติของลาดดิน ค่าความชื้นผ่านได้และค่าความชื้นที่ สภาวะเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลซึมสู่ชั้นดิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์การไหลซึม ของน้ำฝนสู่ลาดดิน ช่วงเวลาที่ฝนตกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน และค่าอัตราส่วน ปลอดภัยน้อยสุดเกิดในช่วงท้ายของฝนที่มีความเข้มมากในช่วงเวลาที่ฝนตก

Brain and Dobroslav (2004) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ถล่ม เนื่องมาจากฝนตก และอธิบายหลักการไหลซึมลงในดินของน้ำฝนว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของ ลาดดินในกรณีเลวร้ายสุด (Worst - Case) มักจะสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวของลาดดิน และลาดดินมีลักษณะอิ่มตัวเต็มที่ สำหรับลาดดินที่มีลักษณะอิ่มตัวนี้ จะไม่มีการไหลซึมลงในดิน เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นเมื่อมีฝนตกลงมาจึงไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินอีก

ยงยุทธ (2544) เมื่อน้ำใต้ดินมีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินมาก ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพจำเป็นต้องทราบขนาดของขอบเขตของแรงดันน้ำในโพรงดินให้ถูกต้องที่สุดเท่าที่จะทำ ได้ ซึ่งจริงๆแล้วเป็นงานที่ค่อนข้างยาก เนื่องจากความซับซ้อนของสภาพทางธรณีวิทยา, ลักษณะสูง ต่ำของพื้นที่, พฤติกรรมของดินและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ การทำนายแรงดันน้ำใน โพรงดินจึงไม่อาจที่จะเชื่อถือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ความไม่แน่นอน อาจเกิดจากความผิดพลาดจากการประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของดิน, ความไม่ เอกสภาพ (Anisotropic) ของมวลดิน และลักษณะของสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ดังนั้น ในการคำนวณควรใช้ค่าจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำในโพรงดินที่ติดตั้งให้มีรูปแบบและจำนวนที่ เหมาะสมกับพื้นที่ประกอบกันด้วย เนื่องจากความยุ่งยากในการคำนวณแรงดันน้ำใต้ดิน เพื่อความ สะดวกในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จึงนิยมสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินในช่วงที่มี ฝนตกหนัก ซึ่งสอดคล้องกับสภาพที่เป็นจริง เนื่องจากการเคลื่อนตัวของลาดดินในหลายกรณีจะเกิด รอยแตกขึ้นที่ผิวด้านบนซึ่งน้ำฝนสามารถไหลเข้าไปได้ดังแสดงในรูปที่ 1.11 แต่ถ้าเป็นกรณีแรงดัน น้ำในชั้นดินอุ้มน้ำที่ถูกบีบจากชั้นดินข้างเคียง ระดับน้ำจากมาตรความดัน (Piezometer) อาจสูงกว่า ระดับผิวดินด้านบน การสมมุติให้ระดับน้ำอยู่ที่ผิวดินก็จะไม่ปลอดภัย



รูปที่ 1.11 ระดับน้ำใต้ดินสำหรับการออกแบบการเพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดิน (Fell, 1994)

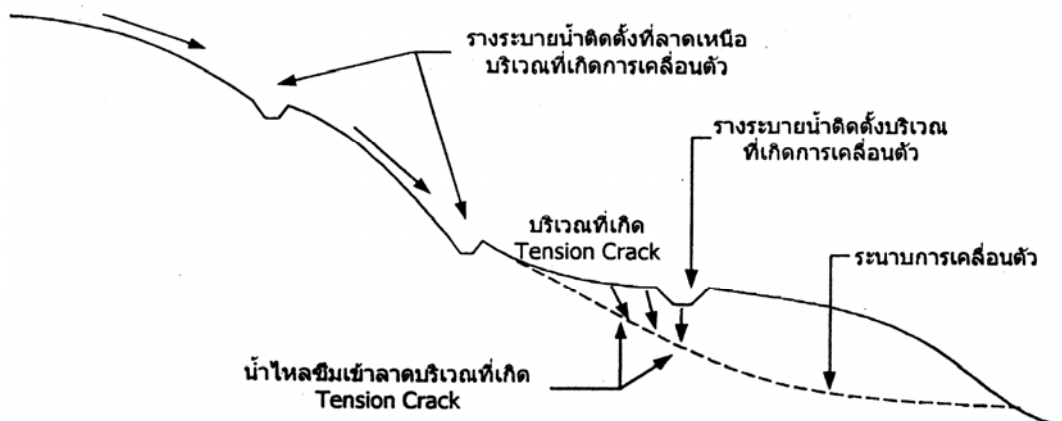
### 1.5.6 การปรับปรุงเสถียรภาพของเชิงลาด

Hunt (1984) อธิบายถึงการปรับปรุงเสถียรภาพหรือการเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยของเชิงลาด โดยสามารถแยกออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

1. การปรับเปลี่ยนรูปทรงเรขาคณิต (Changing slope geometry) เพื่อลดแรงขับ (Driving) หรือเพิ่มแรงต้าน (Resisting) เช่นวิธีการลดความสูง ลดความลาดเอียง หรือเพิ่มน้ำหนักที่ฐานล่าง วิธีนี้มักใช้เมื่อมีพื้นที่เพียงพอที่จะขยายความยาวของลาดดินตามแนวรูปตัดของลาดดิน

2. การควบคุมการซึมผ่านของน้ำผิวดิน (Control surface water) ซึ่งมีหลายวิธีการ ตัวอย่างดังนี้

2.1 ระบบระบายน้ำผิวดิน (Surface drainage systems) เช่น การติดตั้งรางระบายน้ำบริเวณส่วนบนเชิงลาด (Interceptor ditch upslope), รางระบายน้ำแบบขั้นบันได (Bench drain), ร่องระบายน้ำลงสู่คูตัด (Drain chute, Down slope collector) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.12



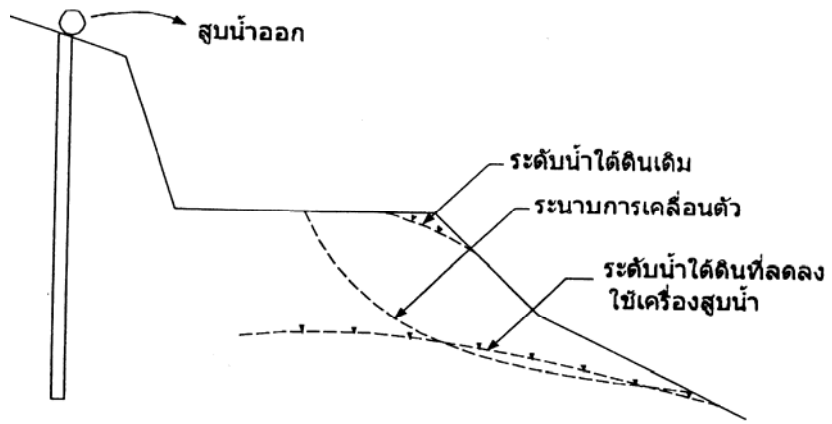
รูปที่ 1.12 ร่างระบายน้ำผิวดิน (ขงยุทธ, 2544)

2.2 การป้องกันการซึมผ่านลงของน้ำ (Infiltration protections) เช่น การปลูกพืชชนิดที่เหมาะสม การอุดรอยแนวแตกด้วยแอสฟัลท์หรือดินผสมซีเมนต์ และวิธีการฉีดพ่นคอนกรีตปกคลุมผิวหน้าลาดดิน (Ferro cement back slope protection)

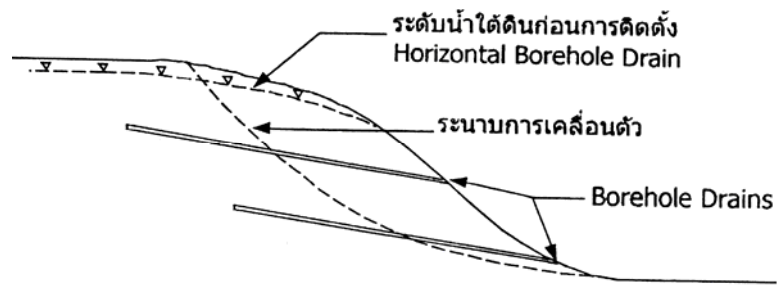
2.3 การป้องกันการชะล้างพังทลายดินหน้าเชิงลาด (Erosion protection) เช่น การปลูกหญ้าแฝก การพ่นปลูกหญ้า (Hydroseeding) การปกคลุมผิวดินด้วยแผ่นคลุมดินจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ ในกรณีที่เป็นลาดดินตื้นรากพืชมีส่วนช่วยในการยึดเกาะกันของดิน รากพืชจะดูดน้ำผ่านทางรากทำให้ดินมีสภาพแห้งและเกิดการอึดตัวข้างล่าง

3. การควบคุมน้ำใต้ดินในเชิงลาด โดยการลดระดับน้ำใต้ดินในเชิงลาดให้ต่ำกว่าพื้นผิวดินการวิบัติ เพื่อลดแรงดันน้ำและไม่ให้ดินอึดตัวด้วยน้ำเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน วิธีการที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเชิงลาดขึ้นอยู่กับชนิดของดิน โครงสร้างทางธรณีวิทยา สภาพน้ำใต้ดินและตำแหน่งระดับน้ำใต้ดิน ตัวอย่างวิธีการควบคุมน้ำใต้ดินในลาดเหนือคันทางและเชิงลาดที่เกิดการวิบัติ ทำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น บ่อสูบน้ำออกระดับลึก (Deep wells), การระบายน้ำตามแรงโน้มถ่วงแนวตั้ง (Vertical gravity drains), การระบายน้ำตามแนวราบ (Horizontal drains), อุโมงค์ทางน้ำ (Drainage galleries), ร่องค้ำทางน้ำ (Interceptor trench drains), ร่องลดระดับน้ำ (Relief trenches) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.13

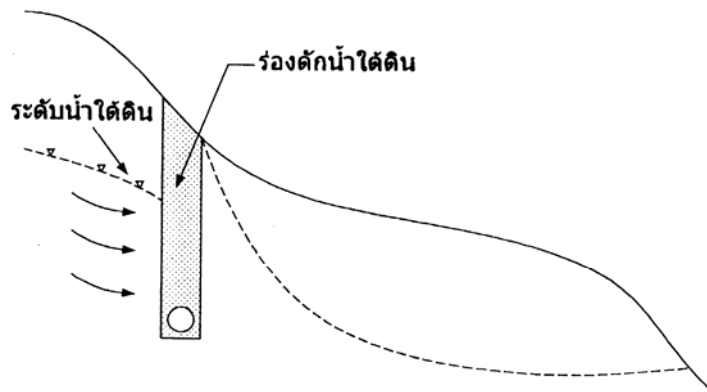
4. การก่อสร้างโครงสร้างค้ำยัน (Retention) เพื่อเพิ่มแรงต้านทาน ตัวอย่างวิธีการที่ใช้ในลาดดินเช่น ผนังกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabion wall), กำแพงไม้ขัด (Crib wall), หินทิ้ง (Rock-filled buttress), ผนังเสริมแรง (Reinforced earth wall), ผนังกันดิน (Concrete gravity wall), เสาเข็ม (Bored or root piles) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.14



(ก) Deep wells

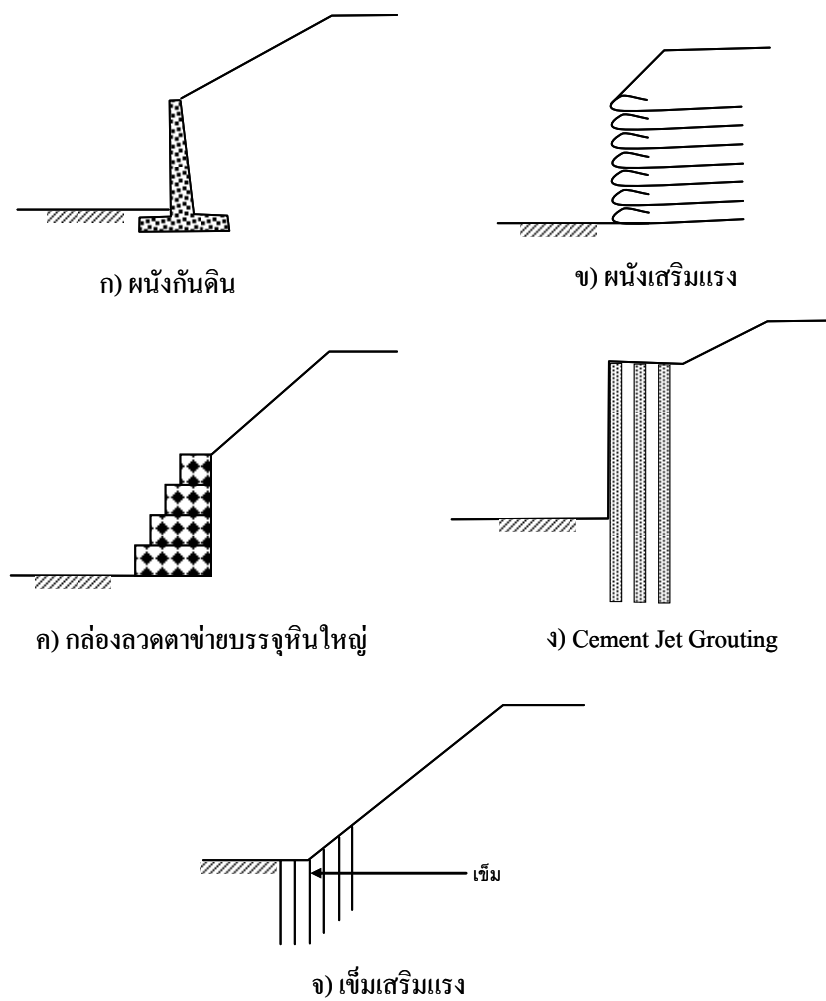


(ข) Horizontal borehole Drain



(ค) Sub horizontal drains

รูปที่ 1.13 วิธีการควบคุมน้ำใต้ดินในเชิงลาด (ขงยุทธ, 2544)

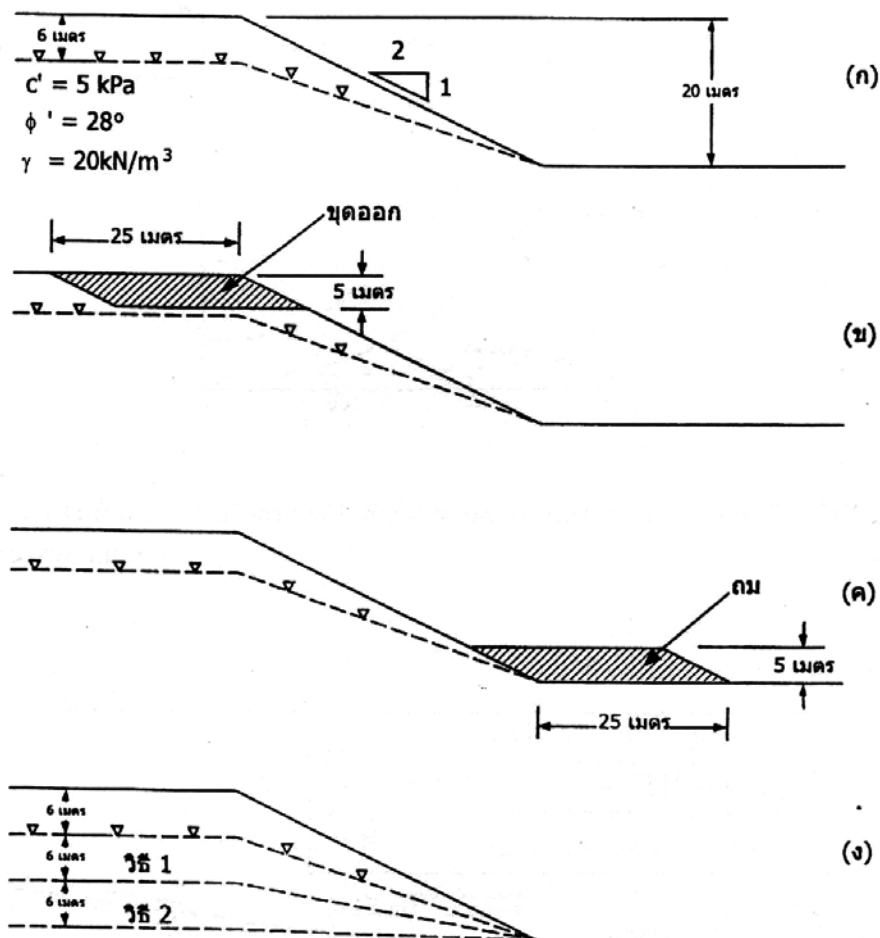


รูปที่ 1.14 วิธีการเพิ่มแรงต้านทาน

ขงยุทธ (2544) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการแก้ไขปัญหาการเลื่อนตัวของลาดดินด้วยวิธีต่างๆ โดยเฉพาะวิธีการลดระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.15 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินเมื่อใช้วิธีการเพิ่มเสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆกัน

กรณี	อัตราส่วนปลอดภัย
(ก)	1.02
(ข)	1.06
(ค)	1.25
(ง)1	1.25
(ง)2	1.34



รูปที่ 1.15 การวิเคราะห์ห้อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินความสูง 20 เมตรที่ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆ (ก) ลาดดินก่อนทำการปรับปรุง (ข) จุดดินส่วนบนของลาดออก (ค) ถมดินบริเวณปลายลาด (ง) ลดระดับน้ำใต้ดิน (ขงยุทธ, 2544)

โดยทั่วไปในการแก้ไขปัญหาลาดดินที่เกิดจากการสร้างถนนผ่านไปแล้วนั้น เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและความเป็นไปได้ในการดำเนินการเพื่อแก้ไขการพังทลายของลาดดินที่เกิดขึ้นอย่างถาวรนั้น แนวทางในการเพิ่มแรงต้านทานของมวลดินผสมกับวัสดุแรงดันน้ำในลาดดิน เป็นแนวทางที่เป็นไปได้มากที่สุด ส่วนวิธีการลดความลาดชันและย้ายแนวทางก็มีความเป็นไปได้แต่ต้องมีการเพิ่มระยะเขตทาง หรือทำให้เกิดปัญหาด้านเรขาคณิตของทางเพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นกับนโยบายและความคิดเห็นของราษฎรในบริเวณนั้นด้วย การเพิ่มระยะเขตทางนั้นต้องมีการจัดกรรมสิทธิ์เพิ่มเติมจากเดิมซึ่งได้มีการจัดกรรมสิทธิ์มาก่อนหน้าแล้ว อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่ทำกินของราษฎรบริเวณใกล้เคียงได้

### 1.5.7 ลักษณะของการวิบัติของเชิงลาด

รูปแบบหรือลักษณะของการวิบัติ (Mode of failure) มีส่วนสำคัญมากที่จะนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้ทฤษฎีที่จะประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) และหาวิธีที่จะแก้ไขปรับปรุงในบริเวณนั้นๆ ให้มีความมั่นคง การจำแนกรูปแบบการวิบัติอย่างง่าย ๆ โดย Blong (1973) สามารถจำแนกชนิดของการวิบัติดังแสดงรูปที่ 1.16 แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. การร่วงหล่น (Fall) มักเกิดขึ้นในบริเวณหน้าผาที่สูงชันซึ่งมวลดินหรือหินมีรอยแตกจากการกัดกร่อนผุพังตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการกัดเซาะใต้ฐานล่าง จึงเกิดการเสียดสมมูลของวัตถุ ทำให้มวลดินหรือหินกลิ้งร่วงลงเบื้องล่างและอาจจะมีการกระเด็นกระดอน หรือกลิ้งตัวต่อไปเมื่อตกถึงพื้นเบื้องล่างแล้ว ลักษณะเช่นนี้ไม่มีรูปแบบในการคำนวณวิเคราะห์ที่แน่นอนนอกจากการพิจารณาแรงสมมูลของแต่ละก้อนดินหรือมวลหินเป็นส่วนๆ ไป

2. การเลื่อนถล่มหมุน (Rotational slides) จะมีการเคลื่อนตัวของมวลดินเป็นลักษณะผิวเฉือนที่ใกล้เคียงส่วนโค้งของวงกลม หรือรูปร่างของมวลดินที่มีการเคลื่อนตัว อาจเป็นส่วนหนึ่งของรูปทรงกระบอกถ้าดูการเคลื่อนตัวใน 3 มิติ สาเหตุหลักของการเลื่อนถล่มแบบนี้เกิดจากการกัดเซาะที่บริเวณฐานของลาดดิน, การตัดลาดดินบริเวณฐานออก หรือการเอาส่วนที่รองรับ (Support) ออก

(สุรพล, 2544) การเคลื่อนตัววิบัติรูปแบบนี้เกิดในมวลดินละเอียดหรือมวลวัสดุดินเหนียว (Cohesive soils) ที่มีความหนาและไม่มีแนวแผ่นจุดอ่อน (Weakness plane) ที่จะก่อให้เกิด



การวิบัติแบบระนาบ (Planar slide) ความลึกของพื้นผิวการวิบัติขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยา ระดับของน้ำใต้ดินและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่แปรเปลี่ยนตามความลึกซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

การวิบัติของมวลดินในระดับลึก (Deep-seated failure surface) มักเกิดในมวลวัสดุดินเหนียวที่มีลักษณะอ่อนถึงแน่น (Soft to firm clays)

การวิบัติของมวลดินในระดับลึกถึงตื้น (Deep to shallow failure surface) มักเกิดในดินผุพังอยู่กับที่ (Residual soils) ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเฉือนของดินตามความลึกและอิทธิพลของโครงสร้างหินเดิมที่ปรากฏอยู่ในดิน

การวิบัติของมวลดินในระดับตื้น (Shallow-seated failure surface) มักเกิดในดินเศษหินเชิงเขา (Colluvial soils), ดินทรายที่มีความเหนียวน้อยหรือไม่มีความเหนียว

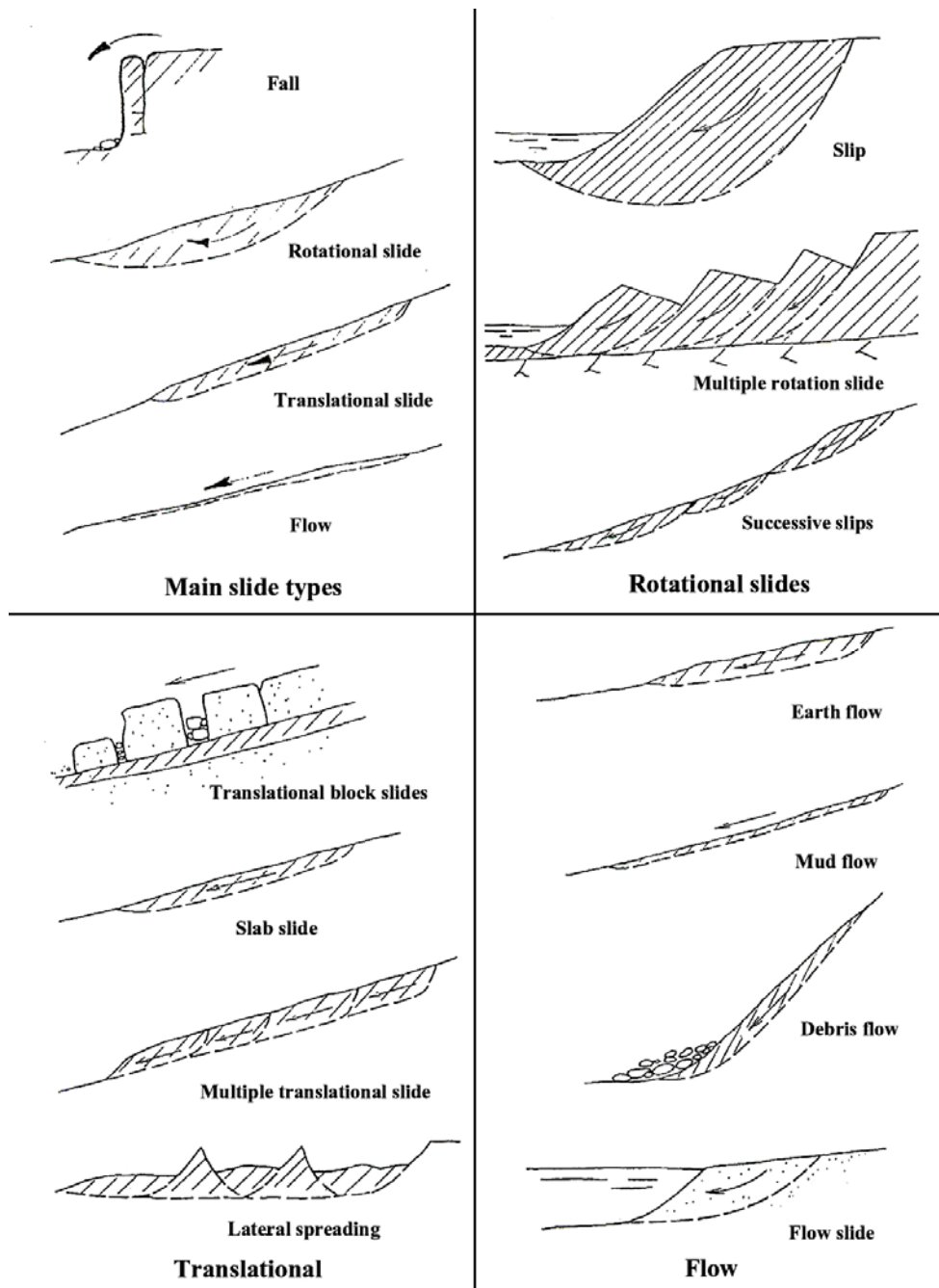
3. การเลื่อนถล่มตามระนาบ (Translational slides) การวิบัติในลักษณะนี้จะปรากฏผิวเลื่อนเป็นระนาบ (Plane) ซึ่งมักจะขนานกับผิวหน้าของลาดดิน การวิบัติลักษณะเช่นนี้มักจะเกิดเมื่อมีผิวระนาบที่ลื่น หรืออ่อนอยู่ชัดเจน เช่น ดินหรือหินที่คลุมปิดหน้าหินผัด หินทิ้งบนลาดเขื่อน

4. การไหล (Flows) มักเกิดขึ้นในลาดดินที่มีน้ำเข้าผสม จนดินอ่อนตัวเสียกำลังและเริ่มอิมตัวจนเกิดการไหลของวัสดุชั้นเหลวที่มีความหนืด (Viscous flow) ดังเช่น กรณีการพังของไหลภูเขาในภาคใต้เนื่องจากฝนตกหนัก (Wieland, 1989) หรือการเคลื่อนตัวของธารน้ำแข็ง ในบริเวณขั้วโลก เป็นต้น

สุรพล (2544) จำแนกชนิดการวิบัติของลาด ตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

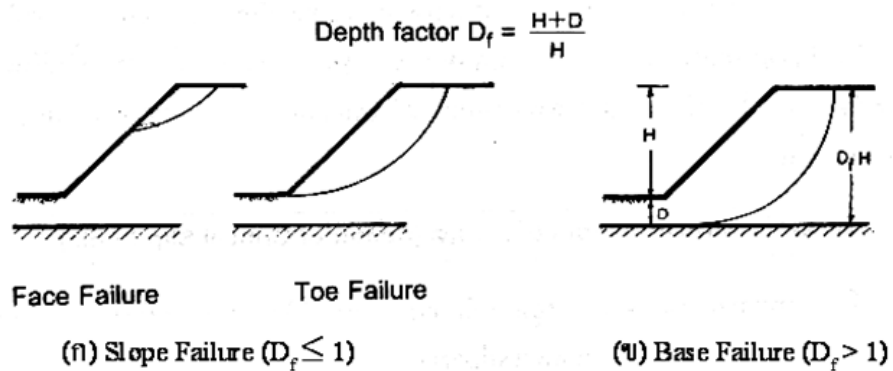
1. รูปแบบลักษณะการเคลื่อนตัว (Movement form) เช่น การพัง (Fall), การเลื่อนไถล (Slide), การเลื่อน - ไถล (Slide - flow) และการไหล (Flow)

2. ปัจจัยรูปร่างลักษณะการของพื้นผิวการวิบัติ (Failure surface form) เช่น มีรูปร่างเป็นส่วนโค้ง (Arc shaped), แผ่นราบ (Planar), พื้นผิวไม่เรียบ (Irregular)



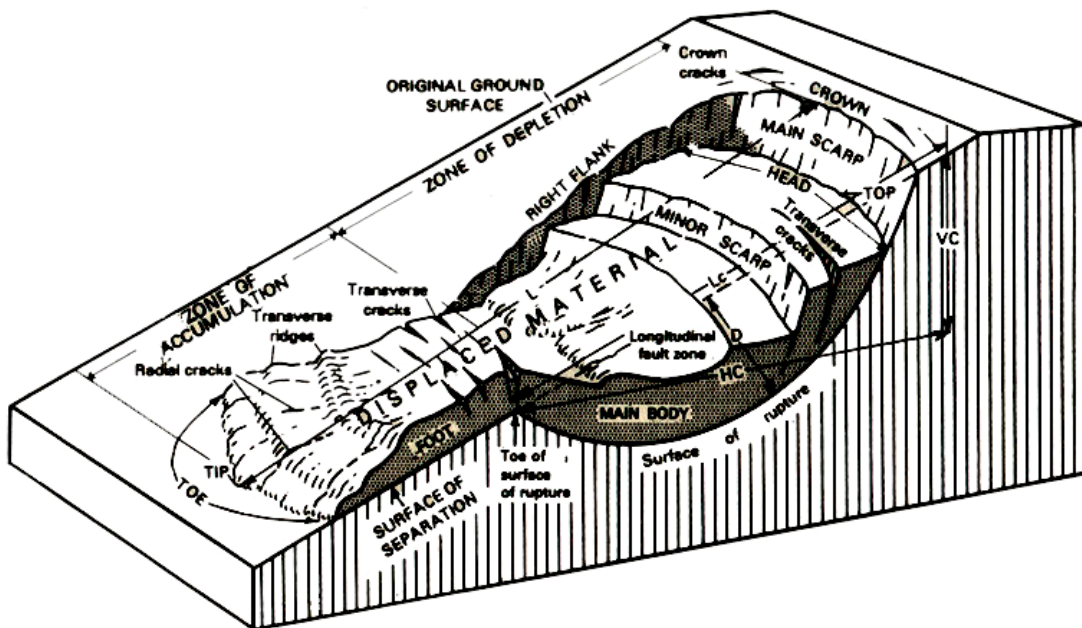
รูปที่ 1.16 ลักษณะการวิบัติของลาดดินและหินแบบต่างๆ (Blong, 1973)

(วินิต, 2547) ลักษณะพื้นฐานของการวิบัติเป็นแนวโค้งแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการวิบัติที่ลาด (Slope failure) และการวิบัติที่ฐาน (Base failure) ดังแสดงในรูปที่ 1.17 การวิบัติที่ลาดยังแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การวิบัติที่ผิว (Face failure) และการวิบัติที่ปลายลาด (Toe failure) การวิบัติที่ฐาน (Base failure) เกิดขึ้นได้เมื่อดินใต้ฐานของลาดเป็นดินอ่อน



รูปที่ 1.17 ลักษณะการวิบัติเป็นแนวโค้งวงกลม (วินิต, 2547)

Varnes (1978) ลักษณะที่ประกอบกับการวิบัติของลาดดินแบบ Slump-Earth flow แสดงดังรูปที่ 1.18 ส่วนที่สำคัญประกอบไปด้วยผาชัน (Scarps), รอยแตกผิวดิน (Tension cracks), ผิววิบัติการเลื่อน (Surface of rupture) และส่วนฐานล่าง (Toe) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 1.18 ส่วนประกอบในการเลื่อนพังของลาดดิน (Landslide Feature) (Varnes, 1978)

รอยแตกผิวดินและผาชันเป็นลักษณะของการวิบัติที่เกิดจากการขยายตัวออก (Extensional feature) ของมวลดิน รอยแตกผิวดินจะพบได้ทั่วทั้งลาดดินที่เกิดการวิบัติ และการวิบัติ

ของลาดดินจำนวนมากมักจะเริ่มจากลักษณะของรอยแตกผิวดิน ขนานกับแนวเส้นความชัน (Contour) ของลาดดิน แล้วพัฒนาเป็นผาชัน ซึ่งก็คือจุดเริ่มของแนวเฉือน ส่วนล่างของลาดดินสามารถมีรอยแตกผิวดินได้เหมือนกัน ในลักษณะที่เรียกว่ารอยแตกตามขวาง (Transverse cracks)

ผาชันมีลักษณะชัน (Steep) คล้ายเส้นโค้งหงาย (Exposure) เป็นส่วนบนของผิวเฉือน (Slip surface) มีความชันมากบางครั้งใกล้เป็นแนวตั้ง ผาชันหลัก (Main scarp) เป็นส่วนบนของผิวเฉือนหลักและเป็นผาชันบนสุด ผาชันรอง (Minor scarp) มีลักษณะคล้ายผาชันหลักแต่จะอยู่ภายในลาดดินที่เกิดการวิบัติและต่ำกว่าผาชันหลัก ถูกกำหนดโดยจุดเริ่มหรือจุดสิ้นสุดของแท่ง (Block) ดินที่เลื่อนตัวตกลงมา

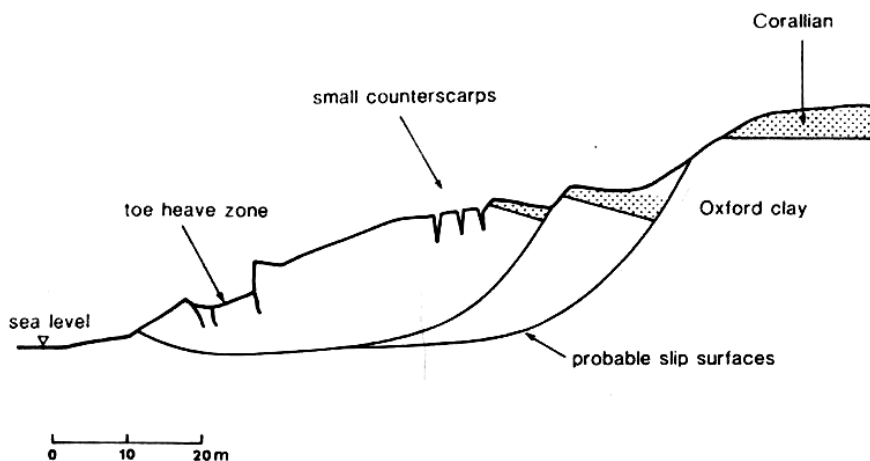
แนวเฉือน (Shear zones) เป็นแนวที่เกิดผิววิบัติขึ้น แนวนี้มีมวลดินถูกแรงกระทำให้เฉือนขาดจากกัน อาจกล่าวได้ว่าเป็นแนวที่ดินมีกำลังน้อยสุด แนวเฉือนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือแนวเฉือนด้านข้างของลาดดิน (Flank) โชนนี้จะแยกการเคลื่อนตัวของมวลดินจากลาดดินรอบๆ ผิวแนวเฉือนด้านข้างมักจะเห็นเป็นผาด้านข้างที่เรียบ บ่งบอกถึงการเฉือนในแนวราบ

Bromhead (1992) ได้อธิบายถึงการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชั้นส่วน (Multiple rotational slides) ว่า เป็นลักษณะการเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive) การวิบัติจะเกิดต่อเนื่องเข้าไปในลาดดิน การเคลื่อนตัวมักจะเป็นหลายชั้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1.19 ชั้นส่วนที่อยู่ด้านหน้า (Frontal elements) ที่เกิดการเคลื่อนตัว มักจะมีลักษณะการหมุนมากกว่าชั้นส่วนอื่นที่เกิดการเคลื่อนตัว บางครั้งลาดดินใหญ่ๆ จะเกิดการเลื่อนไถลตามกันมาทันที เมื่อฐานล่างของลาดดิน (Toe) ถูกרבกวน กระบวนการเกิดการเลื่อนไถลแบบก้าวหน้าต่อเนื่องกันหลายชั้นส่วน (Progressive) นี้สาเหตุจาก ส่วนฐานล่างหรือส่วนค้ำยัน (Support) ของลาดดินถูกรบวนเป็นสำคัญ โดยชั้นส่วนแรกด้านหน้าสุดอาจถูกรบวนจากการกัดเซาะหรือการตัดดินออกเพื่อให้เป็นที่ราบ เมื่อกำลังของดินอ่อนแอจนลาดดินเกิดการวิบัติ ลาดดินในชั้นส่วนหน้าสุดเกิดการเลื่อนไถลลงมาก่อน ทำให้ลาดดินด้านหลังเกิดเป็นผาชัน (Rear Scarp) จึงเกิดการเลื่อนไถลลงมาจากมวลดินอีกชั้นส่วน รุกเข้าไปในลาดดินต่อเนื่องกันหลายชั้นส่วนตามกันมา



รูปที่ 1.19 การวิบัติแบบการเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive) (Bromhead, 1992)

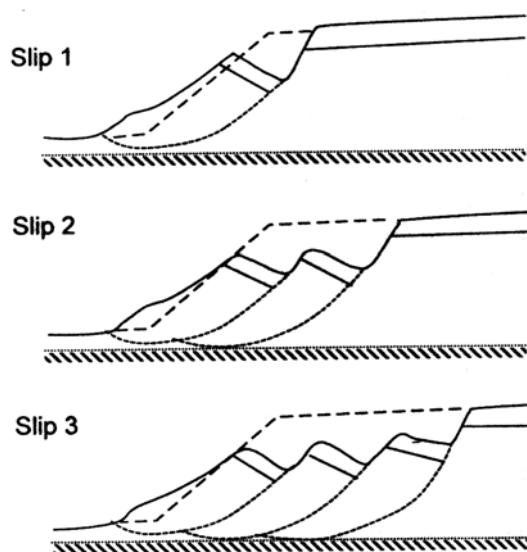
Bromhead (1992) ได้ยกตัวอย่างการวิบัติที่หน้าผาเจอร์แดน (Jordan Cliff, Dorset) ใกล้กับ Weymouth ซึ่งเป็นดินเหนียวออกฟอร์ด (Oxford clay) เกิดการเลื่อนตัวแบบหมุน (Rotational landslides) การวิบัติเกิดขึ้นในทิศทางหน้าออกสู่ทะเล เนื่องมาจากการกัดเซาะที่ฐานล่าง ลักษณะการวิบัติเกิดเป็นสองชั้นส่วนเลื่อนไถลแบบหมุนเอียงไปด้านหลัง (Two back - tilted rotational slip segments) ดังแสดงในรูปที่ 1.20



รูปที่ 1.20 การเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชั้นส่วนที่หน้าผาเจอร์แดน (Bromhead, 1992)

Abramson, et al. (2001) บ่อยครั้งลักษณะการวิบัติเป็นการวิบัติแบบถอยหลัง (Retrogressive) ซึ่งประกอบด้วยผิววิบัติส่วนโค้งหลายส่วน (Multiple curved surfaced) ดังแสดงในรูปที่ 1.21 ลักษณะการวิบัติแบบนี้ส่วนแรก que เลื่อนไถลทำให้เกิดเป็นผาชันด้านหลัง (First slip tends to oversteepen) ซึ่งนำไปสู่การวิบัติของชั้นส่วนอื่นๆตามมา

### RETROGRESSIVE LANDSLIDES



รูปที่ 1.21 ลักษณะการวิบัติแบบถอยหลัง (Retrogressive slide) (Skempton and Hutchinson, 1969)

#### 1.5.8 หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

ตัวแปรที่ข้องทราบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ประกอบด้วย รูปทรงของลาดดิน ขนาดของแรงดันน้ำ หน่ว้น้ำหนักของดิน และตัวแปรกำลังของดินที่ผิววิบัติตัดผ่าน ในการวิเคราะห์ลาดดินที่เกิดการวิบัติแล้ว (Post failure analysis) การสำรวจลักษณะการวิบัติมีความจำเป็นเพื่อสามารถเลือกใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์ได้ตรงตามลักษณะการวิบัติ

เสถียรภาพของลาดดินขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการมีปฏิริยาต่อกันของแรง 2 ชนิด คือแรงขับ (Driving force) และแรงต้าน (Resisting force) แรงขับทำให้เกิดการเคลื่อนตัวลงตามแนวลาด แรงขับหลักในการทำให้เกิดการเคลื่อนตัวคือแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับมวลดิน แรงต้านเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว กระทำทิศตรงข้ามกับแรงขับ แรงต้านหลักคือกำลังเฉือนของดินซึ่งเป็นฟังก์ชันกับการยึดเกาะกันของดิน (Cohesion) และมุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal friction) ดังนั้นเมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้าน ลาดดินจะเกิดความไม่มั่นคงเป็นผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินตามมา

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ลาดดินแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือลาดอนันต์ (Infinite slope) และลาดขอบเขตจำกัด (Finite slope) การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดอนันต์เป็นการวิเคราะห์ที่มีแนวลาดเอียงยาวมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดินที่เกิดการวิบัติ มักจะมีชั้นหินหรือชั้นดิน

อยู่ด้านล่างปกคลุมด้วยชั้นดินด้านบน ระนาบการพังทลาย (Failure plane) จะขนานกับผิวหินหรือผิวของชั้นดินแข็ง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดขอบเขตจำกัด การวิบัติจะเป็นลักษณะแบบหมุน (Rotational slip) ซึ่งพื้นผิวการวิบัติอาจเป็นโค้งวงกลมหรือไม่ก็ได้ ส่วนมากพบเป็นแบบโค้งก้นหอยลอการิทึม (Logarithmic spiral) สำหรับการวิเคราะห์โดยทั่วไปสมมติให้พื้นผิวการพังทลายเป็นลักษณะของโค้งวงกลม (Circular arc) (วินิต, 2547)

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทำได้หลายวิธี สำหรับแต่ละรูปร่างพื้นผิวของการวิบัติ เช่น พื้นผิวระนาบ พื้นผิวเป็นส่วนโค้งของวงกลม เป็นต้น แต่ละวิธีล้วนมาจากพื้นฐานของสมดุลจำกัดของมวลดิน (Limit equilibrium) วิธีที่นิยมวิเคราะห์กันโดยทั่วไป ได้แก่ วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Method of infinite slope), Taylor method, วิธีโมเมนต์, วิธี Ordinary method of slices, วิธี Simplified Bishop และ Wedge method

วารากร (2542) อธิบายว่า หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้น โดยปกติใช้วิธีการพิจารณา “สมดุลจำกัดของมวลดิน” (Limit equilibrium) วิธีนี้มีสมมุติฐานว่า “ ณ ช่วงเวลาที่เกิดการวิบัติพอดี ในขณะที่มวลดินอยู่ในสภาวะสมดุล” กล่าวคือ พิจารณาจากสมดุลแรง (Force equilibrium) และสมดุลโมเมนต์ (Moment equilibrium) การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการสมมุติรูปแบบลักษณะของผิวการวิบัติ ว่าเป็นรูปแบบใด เช่น เส้นตรง วงกลม โค้งก้นหอย รูปหลายเหลี่ยม ฯลฯ แล้วทำการคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่วิบัติ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนปลอดภัย” (Factor of Safety, F.S) แล้วทำการทดลองหาค่าของอัตราส่วนความปลอดภัย โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือตำแหน่งของผิวการวิบัติที่น่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด โดยอาจทราบลักษณะการวิบัติได้แน่นอน จากการสำรวจในสนาม

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัยคือ อัตราส่วนของกำลังเฉือนสูงสุดของดินบนผิวเฉือนต่อหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ง่ายๆดังนี้

$$F.S. = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear Stress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1.4)$$

เมื่อ  $\tau_f$  = กำลังเฉือนสูงสุดของมวลดินบนผิวเฉือน (ตามทฤษฎีของมอร์-คูลอมบ์

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi)$$

$\tau$  = หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเพียงพอทำให้มวลดินนั้นสมดุล

และสำหรับการวัดที่ผิวเลื่อนเป็นส่วนโค้งของวงกลม อัตราส่วนปลอดภัย หมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง ดังสมการ

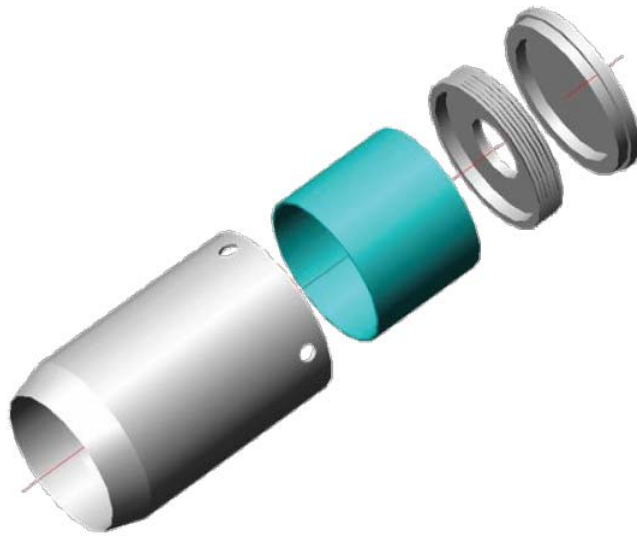
$$F.S. = \frac{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากกำลังเฉือนของดินต้านทานการวัด}}{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักมวลดินทำให้วัด}} \quad (1.5)$$

### 1.5.9 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

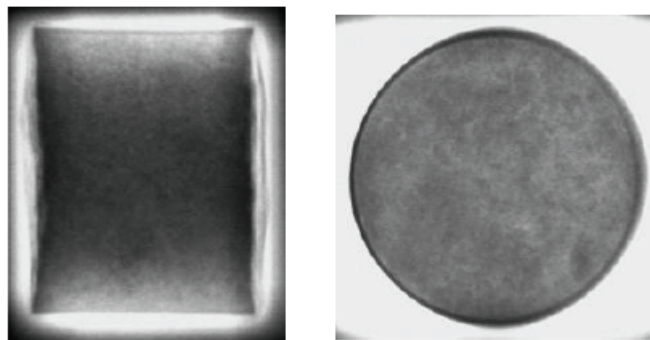
การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ในบางครั้งไม่อาจทำการทดสอบในพื้นที่ก่อสร้างจริงได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบและการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ จึงจำเป็นต้องทำการเก็บตัวอย่างดินไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการเก็บตัวอย่างดินที่นำไปทดสอบหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมนั้นต้องเป็นตัวอย่างดินแบบคงสภาพเพื่อให้ได้ค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกต้องและมีค่าเช่นเดียวกับดินที่อยู่ในพื้นที่ก่อสร้าง

ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU - Miniature Sampler มีลักษณะดังรูปที่ 1.22 เป็นชุดเก็บตัวอย่างดินที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คิดค้นขึ้นเพื่อใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed soil sampling) ลักษณะชุดเก็บตัวอย่างเป็นกระบอกคล้ายกับกระบอกเก็บตัวอย่างเปลือกบาง (Thin wall tube) มีอัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio) ประมาณ 18% หลักการของชุดเก็บตัวอย่างนี้คือ การใช้เหล็กทรงกระบอกบางพอที่ไม่ทำให้ดินสูญเสียคุณภาพและมีความหนาแน่นพอที่จะรับแรงกระแทกลงไปตัดดินให้ขาดได้ มีตุ่มน้ำหนักและแกนตุ่มน้ำหนักตอกระบอกลงไปในดินเพื่อตัดดินให้ขาดจากดินรอบๆตัวอย่าง แล้วจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากดินด้านล่าง โดยขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกล่องเลื่อนแบบโดยตรง (Shear box) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินแตกในขณะที่แต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) ผลจากการตรวจสอบตัวอย่างดินที่เก็บด้วยเครื่องมือดังกล่าว โดยการ X-Ray พบว่าตัวอย่างมีการถูกรบกวนน้อยดังรูปที่ 1.23





รูปที่ 1.22 ชุดเก็บตัวอย่างดิน KU - Miniature Sampler (วารากรและคณะ, 2548)



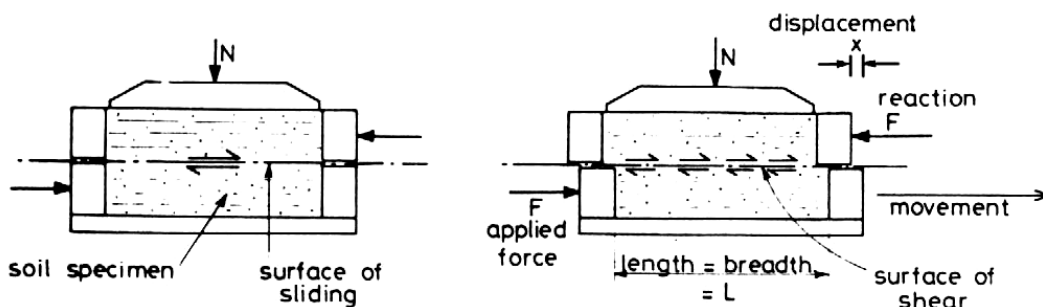
รูปที่ 1.23 การ X-Ray ตัวอย่างดินที่เก็บจาก KU - Miniature Sampler (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2550)

นงลักษณ์ (2547) ได้ใช้กระบอเก็บตัวอย่าง KU - Miniature Sampler เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในบริเวณลาดดินลุ่มน้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของลาดดินในบริเวณดังกล่าว บรรพต (2548) ได้ใช้กระบอเก็บตัวอย่างแบบเดียวกันเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในบริเวณพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของลาดดินในบริเวณดังกล่าว สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) ได้เก็บตัวอย่างดินที่มาจากหินต่างๆ แบบคงสภาพด้วยชุดเก็บตัวอย่างเดียวกัน เพื่อนำมาศึกษาถึงการลดลงของกำลังเฉือนของดินที่มาจากหินประเภทต่างกัน เมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัว

กรมทรัพยากรธรณี, ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2546) ใช้ชุดเก็บตัวอย่างนี้เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในพื้นที่ 6 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล เพื่อศึกษาหาแนวทางป้องกันและลดผลกระทบจากภัยดินถล่ม

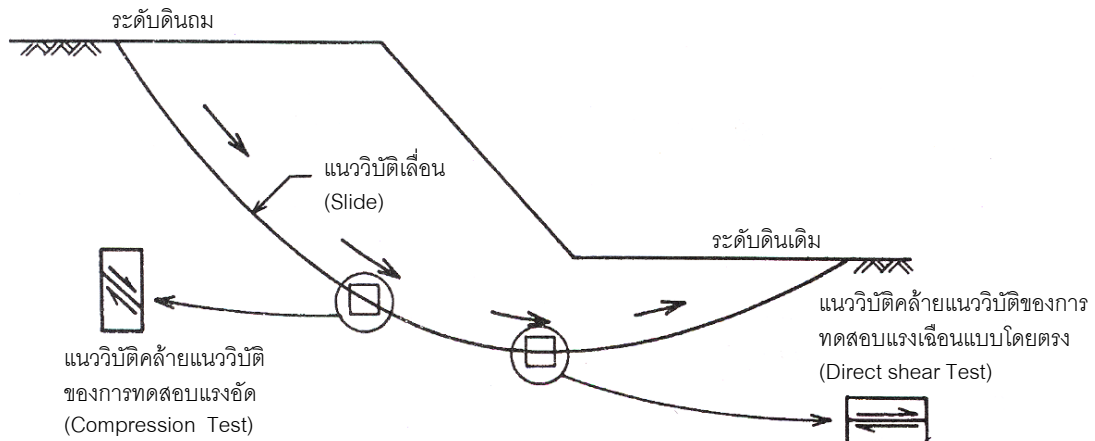
### 1.5.10 การทดสอบการเฉือนโดยตรง

การทดสอบการเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังเฉือนของดิน ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ทั้งดินทรายและดินเหนียว รวมทั้งหินผุบางชนิดโดยหลักการคือ กำลังความต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction) และการเกาะกันระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ซึ่งจะแปรผันตามน้ำหนักกดทับที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน ดังนั้นในการทดสอบจะเป็นการให้น้ำหนักกดทับตัวอย่างดินในแนวตั้งฉากกับระนาบที่ทำการเฉือนตัวอย่างดิน แล้วจึงทำการให้แรงกระทำในแนวระนาบเพื่อทำการเฉือนตัวอย่างดิน ดังรูปที่ 1.24 เมื่อได้ค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากแล้ว นำมาแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟ โดยทำการทดสอบให้น้ำหนักกดทับที่ต่าง ๆ กันประมาณ 3 - 5 ค่า ทำให้สามารถหาค่าตัวแปรกำลัง (Strength parameter) ( $c, \phi$ ) ของดินได้ ตามทฤษฎีของมอร์ - คูลอมบี้



รูปที่ 1.24 ลักษณะของแรงที่กระทำในการทดสอบ Direct Shear Test

สถาพร (2541) อธิบายว่า การทดสอบตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้ตัวอย่างดินวิบัติในแนวที่กำหนดให้ โดยปกติจะเป็นแนวนอนประมาณครึ่งของความสูงตัวอย่างดิน ซึ่งในความเป็นจริงการวิบัติลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นโดยทั่วไป ยกเว้นในบางกรณี เช่น การวิบัติเนื่องจากการเลื่อนไถล (Slide) ของลาดดิน ในบางส่วนของแนววิบัติจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติของการทดสอบการเฉือนโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 1.25



รูปที่ 1.25 ลักษณะแรงที่กระทำในแนววิบัติของลาดดิน (สถาพร,2541)

จากลักษณะของกล่องเฉือน (Shear box) ที่บังคับให้ตัวอย่างดินวิบัติในระนาบที่กำหนด หลังจากกระทำแรงเฉือนถึงจุดสูงสุด (Peak) ซึ่งดินได้วิบัติแล้ว ยังสามารถเฉือนตัวอย่างดินต่อไปได้อีก ค่ากำลังที่ยังมีอยู่เป็นค่ากำลังเฉือนระหว่างระนาบตัวอย่างดินที่วิบัติภายใต้ความเค้นตั้งฉากนั้น เมื่อกระทำแรงเฉือนต่อไปที่ความเครียด (Strain) สูง ค่าแรงเฉือนจะค่าคงที่เรียกว่า ค่ากำลังคงค้าง ซึ่งเหมาะสมเป็นค่ากำลังเฉือนสำหรับการออกแบบโครงสร้างของดินในสภาพอนุรักษ์ (Conservative)

Abramson, et al. (2001) อธิบายถึงข้อเสียที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการทดสอบการเฉือนโดยตรงคือ ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวได้เหมือนกับการทดสอบสามแกน (Triaxial Test) แต่สามารถทำให้ดินมีความชื้นมากที่สุดโดยการแช่ตัวอย่างในน้ำเมื่อบรรจุตัวอย่างดินไว้ในกล่องเฉือนแล้ว เป็นระนาบพอน้ำซึมเข้าในตัวอย่างดินได้มากที่สุด ก่อนทำการเฉือนตัวอย่างดิน การบวกรน้ำ (Soaking) ดังกล่าว น่าจะเป็นตัวแทนที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ดินในลาดดินจริงอยู่ในสภาวะการไหลซึมคงที่ (Steady Infiltration)

ชนิดของการทดสอบ สามารถจัดได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. การทดสอบแบบเร็ว (Quick test) ในการทดสอบเมื่อเพิ่มน้ำหนักแนวตั้งฉากแล้วทำการทดสอบทันที (ไม่ปล่อยให้ดินอัดตัว) ทำการเฉือนตัวอย่างดินด้วยอัตราเฉือนค่อนข้างเร็ว โดยที่แรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) ยังไม่สามารถระบายได้ทัน เป็นการจำลองการวิบัติแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained) ปกติจะทดสอบดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ การทดสอบนี้ค่าที่ได้เป็นกำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength,  $C_u$ )

2. การทดสอบแบบปล่อยให้อัดตัว – เนื้อแบบเร็ว (Consolidated – Quick test) เมื่อเพิ่มน้ำหนักแนวตั้งจากแล้ว ทิ้งไว้ให้ความดันน้ำคายออกจนหมด แล้วจึงทำการเนื้อตัวอย่างดินด้วยอัตราเนื้อก่อนข้างเร็ว โดยที่แรงดันน้ำในโพรงยังไม่สามารถระบายได้ทันเหมือนการทดสอบแบบเร็ว

3. การทดสอบแบบปล่อยให้อัดตัว – เนื้อแบบช้า (Consolidated – Slow test) (ASTM D3080 – 98) เป็นการทดสอบตัวอย่างดินภายใต้สภาพการจับน้ำออกจากมวลดินและเนื้อตัวอย่างดินภายใต้สภาพของการปล่อยให้น้ำระบายออกจากมวลดินได้ (Consolidated drained test) ดังนั้นความต้านทานแรงเนื้อของมวลดินจากการทดสอบวิธีนี้จึงเป็นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของมวลดินที่แท้จริง

สำหรับอัตราการเนื้อที่เหมาะสมสามารถคำนวณจากอัตราการคายน้ำ ASTM D 3080 ได้แนะนำไว้ดังนี้

$$d_r = d_f / t_f \quad (1.6)$$

เมื่อ  $d_r$  = อัตราการเนื้อ (มิลลิเมตร/นาท)

$d_f$  = ระยะทางในแนวราบที่วิบัติ (มิลลิเมตร)

$t_f$  = เวลาที่ใช้ในการเนื้อทั้งหมด, นาท

และ  $t_f = 50t_{50}$  (1.7)

เมื่อ  $t_{50}$  = เวลาที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ที่ 50%, นาท

ถ้าใช้วิธี  $\sqrt{t}$  (Root of time) สามารถคำนวณ  $t_{50}$  ได้จากเวลาที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ที่ 90% โดยใช้สมการ

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.28} \quad (1.8)$$

เมื่อ  $t_{90}$  = เวลาที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ที่ 90%, นาท

สถาพร (2541) แนะนำว่า อัตราการกระทำแรงเนื้อในการเนื้อแบบช้า ต้องใช้อัตราที่ช้าพอที่จะไม่เกิดความดันน้ำในระหว่างการเนื้อ ตัวอย่างดินควรจะวิบัติภายในอย่างน้อย 6-7 ชั่วโมง หรืออัตราประมาณ 0.0076 มิลลิเมตรต่อนาที

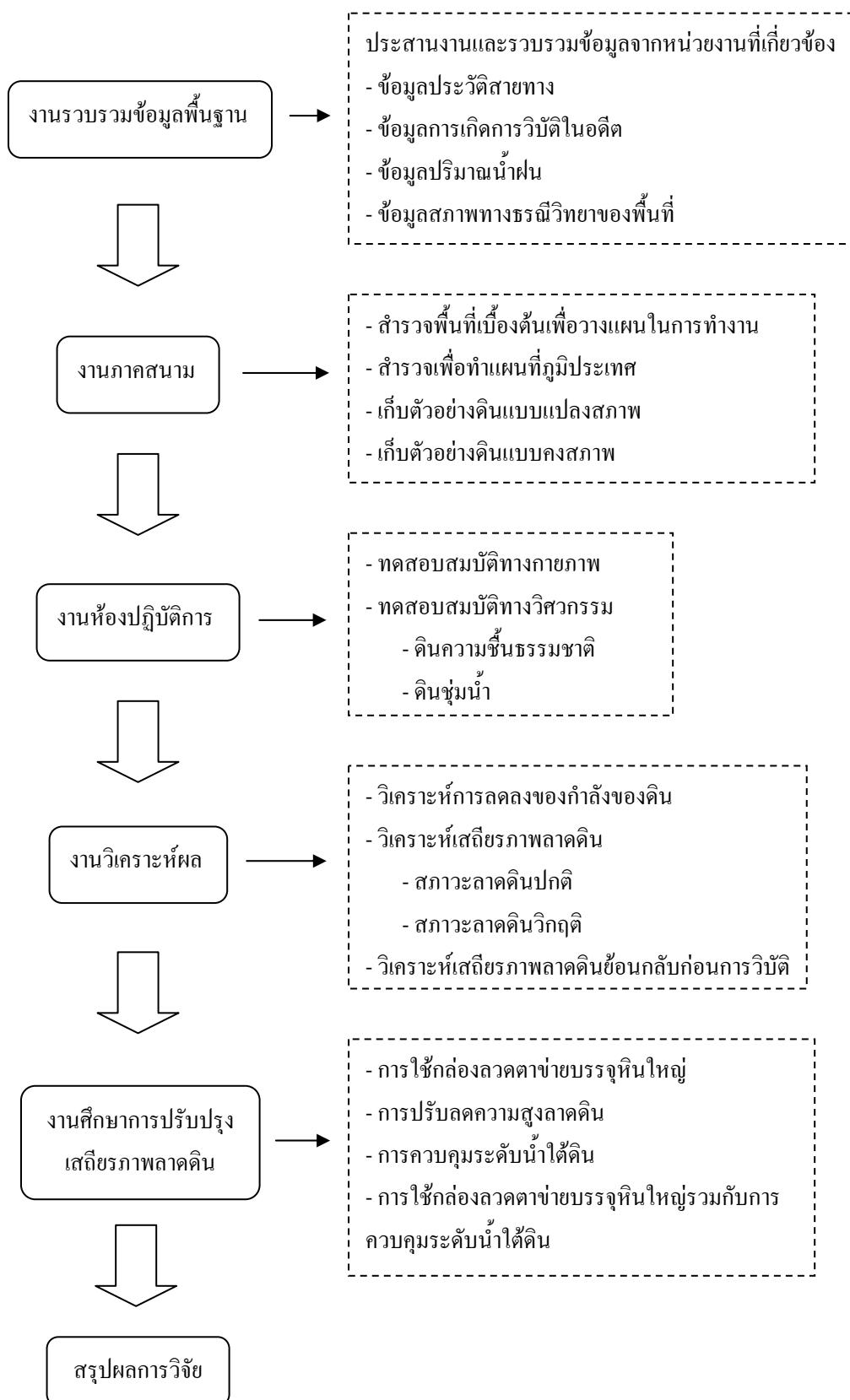
## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดิน ในพื้นที่ลาดดินจริงซึ่งมีทั้งลาดดินที่เกิดการวิบัติแล้วและยังไม่เกิดการวิบัติจำนวน 2 แห่ง การวิเคราะห์เสถียรภาพจะแบ่งเป็น สภาวะปกติ คือลาดดินความชื้นไม่อิ่มตัว โดยใช้ค่าความชื้นในขณะเก็บตัวอย่างดินเป็นตัวแทน และสภาวะวิกฤติ (Worst – case) คือลาดดินมีความชื้นสูงสุดทั้งหน้าตัด หากผลการวิเคราะห์พบว่าลาดดิน ไม่มีเสถียรภาพก็ทำการศึกษาวิธีการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีต่างๆ เพื่อให้เห็นถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของแต่ละวิธี เป็นประโยชน์เพื่อเป็นข้อมูลให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องประกอบการตัดสินใจในการปฏิบัติงานได้ถูกต้องและเหมาะสมอีกต่อไป ถือเป็นงานวิจัยที่สามารถนำผลการศึกษามาใช้ประโยชน์ได้จริง การดำเนินงานเริ่มตั้งแต่การสำรวจสภาพภูมิประเทศ การสำรวจร่องรอยและลักษณะการวิบัติของลาดดิน ต่อมาทำการเก็บตัวอย่างแบบแปลงสภาพนำมาทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ (Index properties) ของดินเพื่อหาว่าดินในลาดดินทั้งตามความยาวลาดดินและตามความสูงลาดดิน จะสามารถแบ่งประเภทดินได้ที่ประเภท เพื่อประโยชน์ในการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ ต่อมาทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพนำมาทำทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) คือค่าตัวแปรกำลัง (Strength parameter) ของดินในสภาวะปกติ (ดินความชื้นธรรมชาติ) และดินในสภาวะวิกฤติ (ดินชุ่มน้ำ ความชื้นสูงสุด) ด้วยวิธีการทดสอบการเฉือนโดยตรง (Direct shear test) แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม และทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีต่างๆ ว่าให้ค่าเสถียรภาพของลาดดินเพิ่มขึ้นอย่างไร ขั้นตอนการดำเนินงานและภาระงานที่ต้องดำเนินการ แบ่งตามลักษณะงานหลักๆ ได้ดังนี้

1. การสำรวจสภาพพื้นที่ศึกษา
2. การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและทดสอบสมบัติทางกายภาพดิน
3. การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน
5. การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน

จากกระบวนการขั้นตอนการดำเนินการวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนภูมิการไหลได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะงานจริงในภาคสนาม การดำเนินการจึงต้องทำการออกเก็บข้อมูลในภาคสนามซึ่งได้แก่ งานประสานงานขอข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง งานสำรวจสภาพภูมิประเทศ งานเก็บตัวอย่างดิน โดยได้ทำการออกปฏิบัติการภาคสนามหลายครั้ง แสดงเป็นระยะเวลาได้ดังนี้

วันที่ 15 มิถุนายน 2549 - 16 มิถุนายน 2549 สำรวจเบื้องต้น และประสานงานขอข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

วันที่ 20 กรกฎาคม 2549 - 22 กรกฎาคม 2549 สำรวจเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศและเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ

วันที่ 8 พฤศจิกายน 2549 - 10 พฤศจิกายน 2549 เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและประสานงานขอข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

วันที่ 30 ธันวาคม 2549 - 6 มกราคม 2550 เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

วันที่ 20 กรกฎาคม 2550 - 23 กรกฎาคม 2550 สำรวจเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศ

## 2.1 การสำรวจสภาพพื้นที่ศึกษา

งานสำรวจสภาพพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วย การสำรวจสภาพภูมิประเทศเบื้องต้น จะทำการเก็บข้อมูลสถานที่, สภาพแวดล้อมของพื้นที่ศึกษา, ข้อมูลสภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน, ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่, ลักษณะและรูปแบบการวิบัติและข้อมูลรายละเอียดจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ เพื่อนำมาวางแผนในการดำเนินงาน และการสำรวจสภาพภูมิประเทศเพื่อแสดงลักษณะสัณฐานของลาดดิน จะทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาสร้างเป็นรูปทรงสัณฐานของลาดดิน 3 มิติ โดยใช้กล้องสำรวจประมวลผลรวม (Theodolite total station) สำรวจเก็บข้อมูลเป็นค่าระยะพิกัดแนวราบ, แนวตั้ง และแนวตั้ง (X, Y, Z)

การสำรวจได้ใช้กล้องประมวลผลรวม วิธีการโดยทำการวางเส้นฐาน (Base line) วัดมุมทิศเหนือ (Azimuth) ด้วยเข็มทิศ แล้วทำการสร้างหมุดอ้างอิงเป็นวงรอบเพื่อสามารถตรวจสอบค่าพิกัดได้ ทำการถ่ายค่าพิกัดเพื่อเก็บรายละเอียดของลาดดินในจุดต่างๆทั่วทั้งลาดดิน หลังจากนั้นนำเข้าข้อมูลค่าพิกัดทั้งหมด ทำการสร้างเป็นรูปทรงสัณฐานของลาดดิน 3 มิติ เพื่อสามารถวิเคราะห์ภาพรวมของลาดดินได้โดยง่าย แล้วทำการสร้างรูปตัดลาดดิน เพื่อใช้รูปตัดลาดดินในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต่อไป รูปขณะปฏิบัติงานในการสำรวจสภาพภูมิประเทศแสดงดังรูปที่ 2.2



(ก) ขณะตั้งกล้องด้านล่างลาดดิน



(ข) ขณะตั้งกล้องด้านบนลาดดิน



(ค) ขณะย้ายตำแหน่งตั้งกล้อง



(ง) ขณะตรวจสอบข้อมูลพิกัดวงรอบ



(จ) ขณะเดินตั้งเป้าสะท้อนบนลาดดิน



(ฉ) ขณะตั้งเป้าสะท้อนในที่ที่มีต้นไม้รก

รูปที่ 2.2 การปฏิบัติงานในการสำรวจสภาพภูมิประเทศ



## 2.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและทดสอบสมบัติทางกายภาพของดิน

การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพก็เพื่อต้องการหาสมบัติทางกายภาพและต้องการทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินทั้งตามแนวยาวและตามความสูงของลาดดิน เมื่อได้ทราบจำนวนชั้นและชนิดของดินในลาดดินแล้ว จะเป็นประโยชน์ในการกำหนดตำแหน่งที่ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ และการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่อไป

จากลักษณะของลาดดินที่เกิดจากการตัดมวลดินของภูเขาบริเวณด้านข้างออก ส่วนของภูเขาที่เหลือจึงเกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back slope) ดังนั้นการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณหน้าลาดดิน จึงเป็นเสมือนการเก็บตัวอย่างดินตามแนวความลึกของชั้นดิน ทำให้ทราบสมบัติของดินในชั้นดินต่างๆ ตามความลึกได้เช่นกัน

การเก็บตัวอย่างดิน ลาดดินช่วงก.ม. 13+300 ถึง ก.ม.13+400 เป็นลาดดินที่ยังไม่เกิดการวิบัติ มีความยาวตามแนวความยาวของลาดดินประมาณ 100 เมตร ในการดำเนินงานได้ทำการวางแผนแบ่งแนวตัดลาดดินไว้ 3 แนวตัด (Section) คือ บริเวณส่วนต้น , ส่วนกลาง, และส่วนปลาย ตามความยาวลาดดิน และทำการเก็บตัวอย่างดินตามแนวตัดต่างๆ สำหรับในแต่ละแนวตัดตามระดับความสูงจะทำการสำรวจและสังเกตความแตกต่างของลักษณะและประเภทของดินแล้วเลือกเก็บตัวอย่างดินมาแนวตัดละ 5 ตำแหน่งๆ ละ 2.5 กิโลกรัม รวมทั้งหมด 15 ตัวอย่าง เพื่อนำมาทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยต้องทำการสร้างจุดอ้างอิงไว้ด้วยเพื่อใช้ในการเลือกเป็นจุดสำหรับการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในครั้งต่อไปด้วย

สำหรับลาดดินในช่วงก.ม. 13+900 ถึงก.ม. 14+050 เนื่องจากลาดดินดังกล่าวเกิดการวิบัติมาก่อนหน้านี้ อีกทั้งมีการปรับแต่งลาดดินใหม่บ้างแล้ว ดังนั้นดินอาจมีการถูกรบกวนหรือมีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปแล้ว ไม่อาจนำมาทำการทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้ถูกต้อง จึงต้องทำการตรวจสอบดินในจุดที่วิบัติและยังไม่วิบัติ เพื่อตรวจสอบว่าเป็นดินชนิดเดียวกันนำมาใช้แทนกันได้หรือไม่ โดยทำการวางแผนเก็บเป็นแนวตัดเช่นกัน ในบริเวณที่เกิดการวิบัติจะแบ่งเป็น 2 แนวตัดและในบริเวณใกล้เคียงที่ยังไม่เกิดการวิบัติอีก 2 แนวตัด ในแต่ละแนวตัดตามระดับความสูง จะเลือกเก็บมาแนวตัดละ 5 ตำแหน่งๆ ละ 2.5 กิโลกรัม รวมทั้งหมด 20 ตัวอย่าง

รวมตัวอย่างดินที่ต้องทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพจำนวนการทดสอบละ 35 ตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินดังกล่าวประกอบด้วย

1. การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water content,  $W$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216

2. การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318
3. การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity, Gs) ตามมาตรฐาน ASTM D 854
4. การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรง (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 421
5. การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 422
6. การจำแนกดินแบบ USCS (Unified soil classification system) ตามมาตรฐาน ASTM D 2487
7. การจำแนกดินแบบ AASHTO (The American association of state highway and transportation officials) ตามมาตรฐาน ASTM D 3282

### 2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ในบางครั้งไม่อาจทำการทดสอบในพื้นที่ก่อสร้างจริงได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบและการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ จึงจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการเก็บตัวอย่างดินที่นำไปทดสอบหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมนั้นต้องเป็นตัวอย่างดินแบบคงสภาพเพื่อให้ได้ค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกต้องและมีค่าเช่นเดียวกับดิน ณ ที่เดิม (In - situ) ของพื้นที่ศึกษา

#### 2.3.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

ในตอนแรกได้พยายามเก็บตัวอย่างโดยกระบอก PVC ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีค่า Area Ratio ประมาณ 12% แต่มีปัญหาคือในการตอกกระบอก PVC ลงไปในดินนั้น หากเป็นดินแข็งไม่สามารถตกลงไปได้ และทำให้กระบอก PVC บิดเบี้ยวหรือแตก และเมื่อดันตัวอย่างดินออกมาจากกระบอก PVC ตัวอย่างดินก็แตกออก เนื่องจากปากกระบอกได้เบี้ยวไปแล้ว อีกทั้งไม่สามารถทำการตัดแต่งตัวอย่างดินขนาดเท่ากับกล่องเฉือน (Shear box) ได้ รูปแสดงการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.3



(ก) ขณะตอกกระบอกร PVC ลงในดิน



(ข) ขณะห่อหุ้มตัวอย่าง



(ค) ตัวอย่างดินที่เก็บได้



(ง) การเก็บตัวอย่างในกล่องพร้อมขนย้าย

### รูปที่ 2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพโดยท่อ PVC

ต่อมาได้เปลี่ยนวิธีการเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบก้อน (Block Sample) แต่พบว่า ก้อนอย่างจะแตกในขณะขุดหรือแต่งตัวอย่างเสียก่อน อีกทั้งหากเก็บมาได้แล้ว ตัวอย่างดินก็จะแตกในระหว่างนำมาตัดแต่งเพื่อใส่ลงในกล่องเงื่อนไขขณะทำการทดสอบกำลังเฉือน รูปแสดงการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพแบบก้อน (Block sample)

จึงได้เปลี่ยนวิธีการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพอีกครั้ง โดยได้สร้างเครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายกับการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกบาง (Thin wall tube) ที่เรียกว่า KU – Miniature Sampler ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หลักการของเครื่องมือดังกล่าวคือ การใช้เหล็กทรงกระบอกบางพอที่จะไม่ทำให้ดินสูญเสียคุณภาพและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มีดื่มน้ำหนักและแกนดื่มน้ำหนักตอกกระบอกลงไปดินเพื่อตัดดินให้ขาดจากดินรอบๆตัวอย่าง แล้วจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากดินด้านล่าง โดยขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเลื่อนแบบวงกลม ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินแตก ในขณะที่แต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด และในการเก็บและขนส่งตัวอย่างนั้นมักจะมีปัญหาทำให้ตัวอย่างดินแตกได้อีกเช่นกัน จึงต้องมีวิธีการป้องกันปัญหาดังกล่าวโดยการใช้กระบอก PVC ที่มีขนาดบางและสามารถบรรจุอยู่ในกระบอกเหล็กที่ตอกลงในดินได้ด้วย โดยในขณะที่ตอกกระบอกเหล็กลงในดินนั้นดินจะผ่านปลายกระบอกเหล็กและผ่านเข้าไปอยู่ในกระบอก PVC นี้ด้วย และสามารถดันกระบอก PVC ที่มีตัวอย่างดินอยู่ด้านใน ออกทางปลายอีกด้านหนึ่งได้ ทำการแต่งตัวอย่างดินที่ปลายกระบอก PVC ทั้งสองด้าน แล้วห่อด้วยวัสดุกันความชื้นและวัสดุกันกระแทกอีกชั้นหนึ่งแล้วจึงบรรจุลงในกล่องเก็บตัวอย่างดินอีกครั้งหนึ่ง รูปแสดงกระบอกเก็บตัวอย่างแสดงดัง

รูปที่ 2.5 และรายละเอียดของกระบอบเก็บตัวอย่างและการคำนวณค่าอัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio) แสดงได้ดังนี้

$$\text{Area ratio ; } A_r = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} \times 100 \quad (2.1)$$

$$A_r = \left[ \frac{6.90^2 - 6.35^2}{6.35^2} \times 100 \right] = 18.073 \%$$

เมื่อ  $D_o$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 2.5 นิ้ว หรือเท่ากับ 6.35 เซนติเมตร  
 $D_i$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6.90 เซนติเมตร



รูปที่ 2.5 กระบอบที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน (KU - Miniature Sampler)

การเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ ต้องใช้ความพิถีพิถันและเก็บอย่างระมัดระวัง ผสมผสานกับความชำนาญและเทคนิคพิเศษหลายอย่าง เริ่มตั้งแต่การเลือกวัสดุมาสร้างเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างดินดังกล่าวที่เหมาะสม และทำการซักซ้อมในพื้นที่ทดลองอยู่นาน กว่าจะดำเนินการในสนามได้จริง สำหรับการดำเนินการในสนาม การหาตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเก็บตัวอย่างดินก็ต้องใช้เวลาในการเดินสำรวจ เพื่อหาตำแหน่งที่สามารถเก็บตัวอย่างได้ครบตามจำนวน สภาพพื้นที่เอื้ออำนวยในการปฏิบัติงานสามารถขนอุปกรณ์เครื่องมือเข้าไปได้และขนตัวอย่างดินออกมาได้โดยไม่กระทบกระเทือน และต้องเป็นพื้นที่ที่สามารถทำงานได้สะดวกเพราะพื้นที่ส่วนมากเป็นพื้นที่ชันและรก อีกทั้งต้องเป็นตัวแทนของดินในพื้นที่โดยรวมได้ด้วย เมื่อเก็บตัวอย่างได้แล้วต้องรีบห่อตัวอย่างด้วยวัสดุกันความชื้นและวัสดุกันกระแทก และต้องบรรจุในถังเก็บที่แข็งแรงและง่ายต่อการเคลื่อนย้ายลงจากลาดดินด้วย รูปขณะทำการเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.6



(ก) เตรียมกระบอกร PVC และวัสดุกันกระแทก



(ข) กระบอกรเก็บตัวอย่างพร้อมเตรียมกระแทก



(ค) ตัวอย่างดินที่เก็บได้



(ง) การตัดแต่งส่วนปลายและหัวตัวอย่าง



(จ) หลุมที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างดิน



(ฉ) ตัวอย่างดินที่ห่อหุ้มและบรรจุพร้อมขนย้าย

รูปที่ 2.6 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพด้วย KU - Miniature Sampler

### 2.3.2 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่าตัวแปรกำลัง (Strength parameter) ของดินในสถานะต่างๆ ที่พิจารณา คือดินในสถานะความชื้นธรรมชาติและดินในสถานะความชื้นสูงสุดซึ่งเรียกว่า ดินชุ่มน้ำ ในการทดสอบใช้วิธีการเฉือนโดยตรง (Direct shear test) โดยกล่องเฉือน (Shear box) ต้องมีขนาดพอดีกับตัวอย่างดินที่เก็บมา คือทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.35 เซนติเมตร การทดสอบการเฉือนโดยตรงจะทำการทดสอบ 2 รูปแบบคือแบบเร็ว และแบบช้าตามมาตรฐาน ASTM D 3080 สำหรับการทดสอบแบบช้าจะทำการเฉือนตัวอย่างดินไปเป็นระยะทาง Percent strain ไม่น้อยกว่า 20 % เพื่อวัดค่ากำลังคงค้างของดินด้วยรูปการปฏิบัติการทดสอบการเฉือนโดยตรงแสดงดังรูปที่ 2.7



(ก) อุปกรณ์ในการทดสอบการเฉือนโดยตรง



(ข) ตัวอย่างดินที่เก็บจากสนาม



(ค) ขณะดันตัวอย่างดินออกจากกระบอก PVC



(ง) ตัวอย่างดินที่ดันออกจากกระบอก PVC



(จ) ตัวอย่างดินที่มีเม็ดหินดินดานแทรกอยู่



(ฉ) ตัวอย่างดินแตกขณะเตรียมตัวอย่าง



(ช) ตัวอย่างดินที่ทำการเนียนแล้ว

(ซ) ตัวอย่างดินที่ผ่านการเนียนและหา  
ความชื้นแล้ว

### รูปที่ 2.7 การปฏิบัติการทดสอบการเนียนโดยตรง

จากสถานะของการเตรียมตัวอย่างดินและวิธีการทดสอบ ทำให้ได้รูปแบบตัวแปรกำลังของดินทั้งหมด 6 รูปแบบ คือ

1. กำลังสูงสุดจากการทดสอบตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ โดยวิธีการทดสอบการเนียนแบบเร็ว
2. กำลังสูงสุดจากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำ โดยวิธีการทดสอบการเนียนแบบเร็ว
3. กำลังสูงสุดจากการทดสอบตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ โดยวิธีการทดสอบการเนียนแบบช้า
4. กำลังคงค้างจากการทดสอบตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ โดยวิธีการทดสอบการเนียนแบบช้า



5. กำลังสูงสุดจากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำ โดยวิธีการทดสอบการเลื่อนแบบช้า

6. กำลังคงค้างจากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำ โดยวิธีการทดสอบการเลื่อนแบบช้า

## 2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

หลังจากได้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพดินแล้ว นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม KUSlope 2.0 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินแบ่งได้เป็น 2 สถานะ คือสถานะปกติ ซึ่งเป็นตัวแทนของลาดดินในปัจจุบันขณะทำการเก็บตัวอย่างดิน โดยในการวิเคราะห์กำหนดให้ใช้ตัวแปรกำลังจากการทดสอบตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ และกำหนดให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน

สำหรับสถานะวิกฤติ (Worst case) ซึ่งเป็นตัวแทนของลาดดินในสถานะที่ฝนหนักดินมีความชื้นสูงสุดและระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น ระดับน้ำใต้ดินในลาดดินเป็นตัวแปรที่มีความซับซ้อนมาก เกี่ยวเนื่องกับสถานะที่ฝนตกเป็นสำคัญ การวิเคราะห์ในสถานะวิกฤติจึงกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน และใช้ตัวแปรกำลังจากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำ

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม การกำหนดชั้นดินล่างสุด (Bottom line) จะกำหนดให้เป็นเส้นที่มีระดับเดียวกับผิวดิน เพราะลาดดินที่ทำการวิเคราะห์เป็นลาดดินภูเขาเหนือคันทาง (Back slope) ที่เกิดจากการตัดด้านข้างหรือบริเวณดินของภูเขาให้เป็นที่ราบและสร้างเป็นคันทางขึ้นมา ซึ่งวัสดุและความแข็งแรงในชั้นต่างๆ ของดินคันทาง จะเป็นตัวบังคับลักษณะการวิบัติไม่ให้เกิดแนวเลื่อนวิบัติต่ำไปกว่าชั้นผิวดินได้

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินที่เก็บในลาดดิน พบว่าดินมีสมบัติใกล้เคียงกัน และจากรูปแบบการวิบัติก่อนหน้านี้ที่มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบ การเลื่อนตัวแบบหมุน (Rotational slides) และเป็น การวิบัติแบบลึก (Deep-seated failure) จึงกำหนดใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบเป็นส่วนโค้งของวงกลม (Circular failure)

สำหรับลาดดินในช่วง กม.13+900 ถึง 14+050 เป็นลาดดินที่เคยเกิดการวิบัติมาก่อน จึงทำการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ เพื่อหาว่าลาดดินก่อนเกิดการวิบัติมีค่าเสถียรภาพเป็นอย่างไร และหาว่าวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินก่อนการวิบัติมีประสิทธิภาพเพียงใด โดยการใช้รูปตัดของลาดดินก่อนการวิบัติที่ได้จากการสำรวจลาดดินข้างเคียง และกล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ซึ่งใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินก่อนลาดดินเกิดการวิบัติ

## 2.5 การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน

ทำการศึกษาวិธีการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ คือ วิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่, วิธีการปรับลดความสูงของลาดดิน, วิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน และวิธีผสมระหว่างวิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่กับการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน โดยทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิผลของวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีต่างๆ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะกำหนดให้ลาดดินอยู่ในสภาวะวิกฤติ คือ ใช้ตัวแปรกำลังของดินชุ่มน้ำ และให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน

## 2.6 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะของงานที่ดำเนินการคือ งานภาคสนามและงานห้องปฏิบัติการ

### 2.6.1 งานภาคสนาม

1. เครื่องมือจำเป็นงานสนาม ได้แก่ มีดพรว้า จอบ และเสียม
2. วัสดุในการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ ได้แก่ ถังและถังใส่ตัวอย่างดิน
2. ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ
3. กล้องสำรวจประมวลผลรวมพร้อมอุปกรณ์ครบชุด

### 2.6.2 งานห้องปฏิบัติการ

1. ชุดเครื่องมือทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water content,  $\omega$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216
2. ชุดเครื่องมือทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318
3. ชุดเครื่องมือทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity,  $G_s$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 854

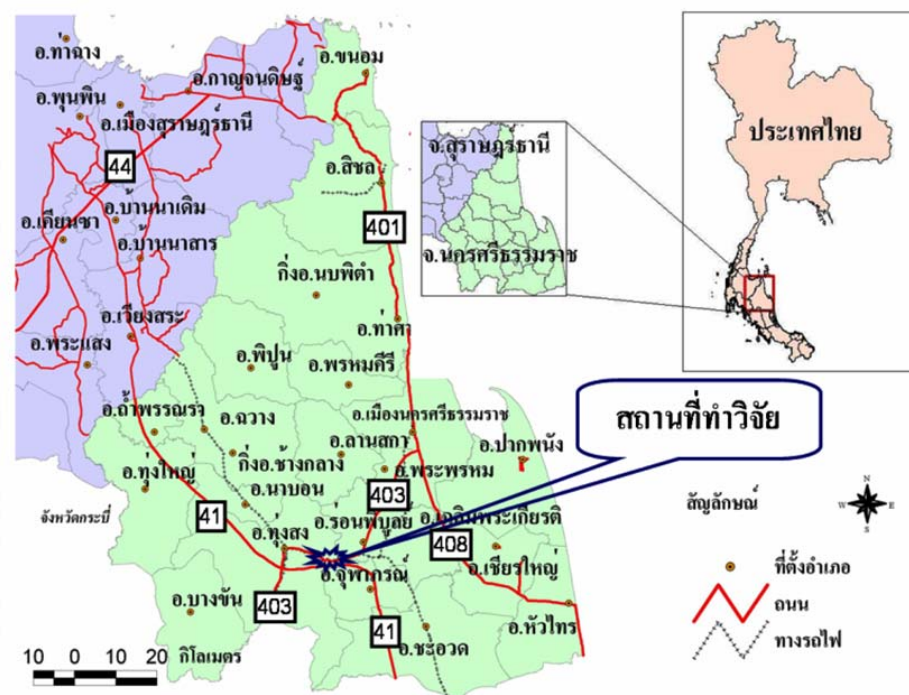
4. ชุดเครื่องมือทดสอบการวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรง (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 421
5. ชุดเครื่องมือทดสอบการวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 422
6. ชุดเครื่องมือทดสอบการเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ตามมาตรฐาน ASTM D 3080
7. โปรแกรมสร้างแผนที่ภูมิประเทศ Autodesk Land Desktop
8. โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน KUslope 2.0

## บทที่ 3

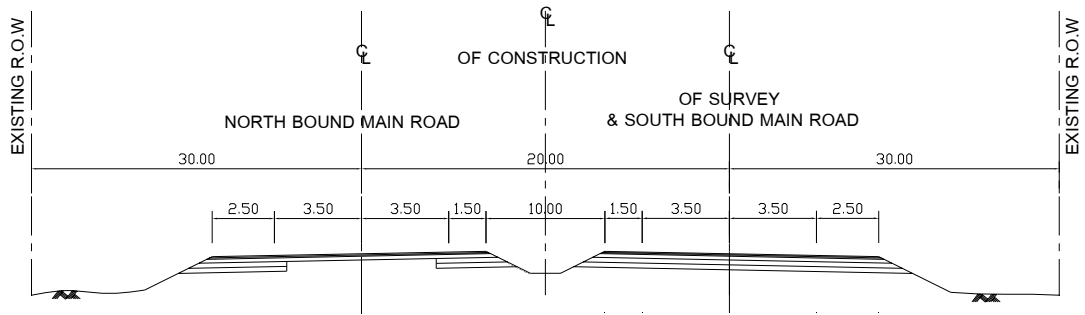
### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

#### 3.1 สภาพพื้นที่ศึกษา

สถานที่ทำการวิจัยอยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างอำเภออ่อนพิบูลย์และอำเภอบึงสามพัน จังหวัดนครศรีธรรมราชบนทางหลวงหมายเลข 00411001 ตอน อ.บึงสามพัน - อ.อ่อนพิบูลย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มาตรฐานทางชั้นพิเศษ 4 ช่องจราจรไปและกลับ ผิวทาง AC. กว้างข้างละ 11.00 เมตร ไหล่ทาง AC. ด้านซ้ายกว้าง 2.50 เมตร ด้านขวากว้าง 1.50 เมตร เขตทางกว้างข้างละ 30 เมตร ปริมาณจราจร 22,456 คัน/วัน แสดงเป็นรูปตัดถนนดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนที่เส้นทางสถานที่ทำวิจัย



รูปที่ 3.2 รูปตัดถนนทางหลวงหมายเลข 00411001

### 3.1.1 ลักษณะภูมิประเทศทั่วไป

สถานที่ทำวิจัยมี 2 ช่วงดำเนินการคือ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 และช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 แสดงเป็นแผนที่สภาพภูมิประเทศของเส้นทางดังกล่าวด้วยภาพถ่ายทางอากาศดังรูปที่ 3.3



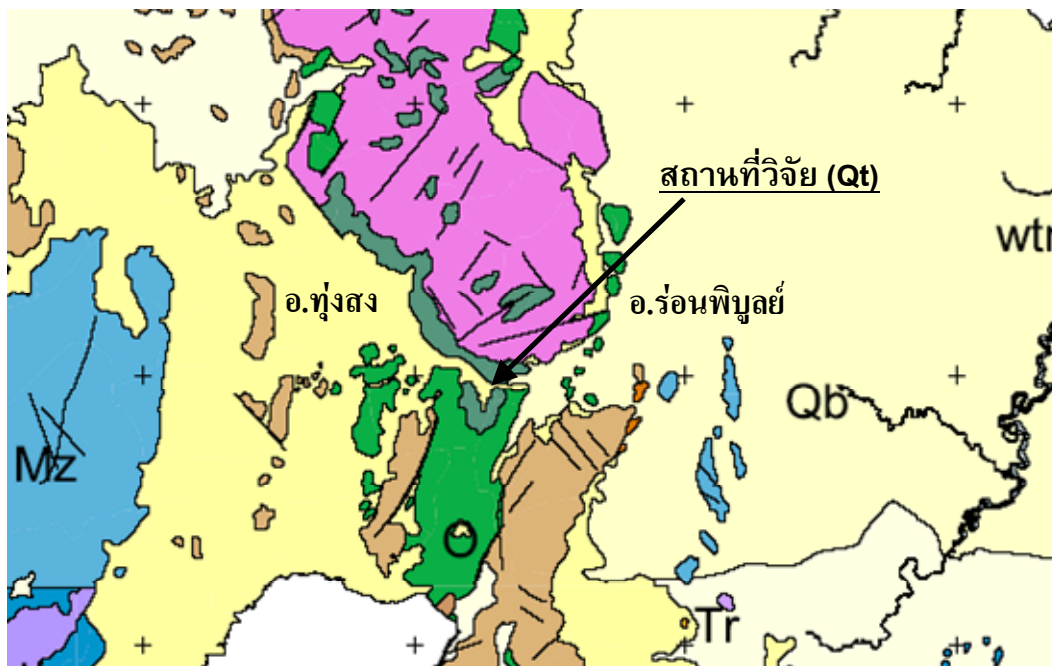
รูปที่ 3.3 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสถานที่ทำวิจัย

ในเส้นทางหลวงหมายเลข 41 ที่ทำการวิจัย เหตุผลที่เลือกทำการวิจัยลาดดินในช่วงดังกล่าวเพราะว่า เป็นลาดดินที่มีความสูงชัน และมีการก่อสร้างระบบป้องกันการพังทลายโดยใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ไว้แล้ว โดยเฉพาะลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 ที่ก่อนหน้านี้มีการวิบัติของลาดดินมาแล้วหลายครั้ง จึงต้องทำการรื้อกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ออก และคาดว่าลาดดินในช่วงดังกล่าวน่าจะเกิดการวิบัติได้อีกในอนาคต

จากภาพถ่ายทางอากาศเห็นได้ว่าเป็นเส้นทางที่ตัดผ่านบริเวณเทือกเขานครศรีธรรมราช ซึ่งลักษณะการวางแนวเส้นทางพยายามลัดเลาะไปตามช่องเขา เพื่อหลีกเลี่ยงแนวทางที่ต้องขึ้นเขาลาดชัน และด้วยลักษณะภูมิประเทศที่เป็นภูเขาดังกล่าว ในการออกแบบและก่อสร้างจำเป็นต้องมีส่วนที่ต้องตัดลาดดินภูเขาดังกล่าวบางส่วน เพื่อให้เป็นพื้นที่แนวราบที่สามารถก่อสร้างคันทางและผิวทางได้ อีกทั้งการตัดลาดดินภูเขายังเป็นการช่วยร่นระยะทางและลดจำนวนของโค้งราบอีกด้วย

### 3.1.2 ลักษณะธรณีวิทยา

จากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี (2530) แสดงเป็นแผนที่ธรณีวิทยาของบริเวณสถานที่ทำการวิจัยและบริเวณใกล้เคียงได้ดังรูปที่ 3.4 จากแผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1 : 250,000 ระบุว่าจังหวัดนครศรีธรรมราช (NC 47 - 15) ของกรมทรัพยากรธรณี บอกกล่าวได้ว่าแนวเทือกเขาที่เส้นทางหลวงหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างอำเภอทุ่งสงกับอำเภอร่อนพิบูลย์ตัดผ่าน เป็นแนวเทือกเขาหินยุคออร์โดวิเซียน (O) และหินยุคครีเทเชียส (Mz) โดยมีตะกอนยุคปัจจุบันอยู่ในที่ราบเป็นตะกอนเชิงเขา (Qt) และ สันทรายชายหาด (Qb) โดยในบริเวณสถานที่วิจัยมีสภาพธรณีวิทยาเป็นตะกอนตะพักกลุ่มน้ำ และตะกอนเชิงเขา (Qt) ของหินยุคควอเทอร์นารี ซึ่งประกอบไปด้วย ดินทราย ดินทรายแป้ง (Silt Stone) และมีเศษหินดินดาน (Shale) ปะปนอยู่ มีสีเหลืองแกมน้ำตาล และไม่แสดงลักษณะการวางตัวของดินเป็นชั้น



รูปที่ 3.4 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณสถานที่ทำวิจัย (กรมทรัพยากรธรณี, 2530)

### 3.1.3 ลักษณะลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+300 ถึง 13+400

ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+300 ถึง 13+400 เป็นลาดดินที่เกิดจากการวางแนวเส้นทางผ่านภูเขา และเพื่อไม่ให้เส้นทางมีความลาดชัน จึงได้ทำการตัดดินภูเขาที่ขวางแนวทางออกประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของภูเขาเดิมตามธรรมชาติ ภูเขาส่วนที่เหลือจึงมีความลาดชัน เกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back slope) และได้มีการก่อสร้างระบบการป้องกันการพังทลายไว้ประกอบไปด้วย การปรับแต่งลาดดินให้มีลักษณะเป็นขั้นบันไดประมาณ 4 ชั้น ก่อสร้างคูระบายน้ำตามแนวขั้นบันได (Ditch lining) เพื่อดักน้ำไม่ให้ไหลลงตามหน้าลาดดิน และรวมน้ำให้ไปไหลลงทางระบายน้ำ (Stepped Drain chute) ก่อสร้างกำแพงกันดิน (Gravity retaining wall) โดยใช้วัสดุประเภทกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabion) ความสูงประมาณ 4.5 เมตร และลึกไปในลาดดินประมาณ 4 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



(ก) ด้านซ้าย



(ข) ด้านขวา

รูปที่ 3.5 ลาดดินช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400

#### 3.1.4 ลักษณะลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050

ลาดดินในช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 เป็นลาดดินที่เกิดจากการเลี้ยงแนวเส้นทางที่ต้องตัดผ่านภูเขา จึงได้วางแนวเส้นทางลัดเลาะตามช่องเขาหรือดินภูเขา ในตอนแรกเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางขนาด 2 ช่องจราจรไปและกลับ ต่อมาได้ขยายช่องจราจรเป็น 4 ช่องจราจรไปและกลับ จึงต้องมีการขยายพื้นที่เพื่อเพิ่มช่องจราจรอีก 2 ช่องจราจร แต่เนื่องจากด้านซ้ายของแนวทางติดกับร่องน้ำและเขตทางรถไฟ จึงต้องขยายพื้นที่เข้ามาในด้านขวาซึ่งติดกับภูเขา ทำให้ต้องมีการตัดดินลาดดินภูเขา เกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back Slope) ซึ่งภูเขามีสลักษณะเป็นเทือกเขาวางตัวชิดแนวถนน ด้านบนของเทือกเขาเป็นพื้นที่ทำสวนยางและสวนผลไม้ของชาวบ้าน เป็นพื้นที่ลาดชันตามแนวภูเขา ลักษณะลาดดินเป็นลาดดินที่เคยเกิดการวิบัติมาก่อน ข้อมูลจากหมวดการทางร้อยพันบุลย์ สรุปได้ว่า ลาดดินบริเวณนี้ได้เกิดการวิบัติมาแล้วหลายครั้ง คือประมาณช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2543 ซึ่งตรงกับฤดูฝน ได้เกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน ลาดดินเกิดการเลื่อนตัวและพังทลายเข้ามาบริเวณผิวทาง จึงได้ดำเนินการซ่อมแซมลาดดิน โดยการปรับแต่งลาดดินเป็นขั้นบันได สร้างคูระบายน้ำตามขั้นบันไดและช่องรวบรวมน้ำระบายลงสู่ด้านล่างพร้อมทั้งได้ก่อสร้างกำแพงกันดินโดยใช้วัสดุประเภทกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ ความสูงประมาณ 4.5 เมตรและลึกไปในลาดดินประมาณ 5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6





รูปที่ 3.6 ลาดดินหลังการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2544

จนกระทั่งในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2548 เกิดฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน และได้เกิดน้ำท่วมหลายแห่งในพื้นที่ภาคใต้ ได้เกิดการวิบัติของลาดดินในบริเวณนี้อีก ทำให้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ได้เลื่อนตัวเข้ามาทับผิวทาง เหลือช่องจราจรเพียงช่องเดียว (รูปที่ 3.7 ก) และเกิดการเลื่อนไถลของมวลดินและต้นไม้การเกษตรของชาวบ้านลงสู่ด้านล่าง จึงทำการซ่อมแซมโดยการตัดดินส่วนที่พังทลายลงมาออก (รูปที่ 3.7 ข) และรื้อกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ออก (รูปที่ 3.7 ค) พร้อมทั้งได้ปรับแต่งลาดดินให้เป็นขั้นบันไดใหม่ (รูปที่ 3.7 ง) ลาดดินหลังการซ่อมแซมแล้วเสร็จแสดงดังรูปที่ 3.8



(ก) กล่องลวดตาข่ายเลื่อนตัวทับผิวทาง



(ข) ขณะตัดดินที่พังทลายออก



(ค) ขณะรื้อกล่องลวดตาข่าย

(ง) ขณะปรับแต่งดินเป็นขั้นบันไดใหม่

รูปที่ 3.7 การวิบัติและการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2548



รูปที่ 3.8 ลาดดินหลังการซ่อมแซมในปี พ.ศ. 2548

จากข้อมูลเบื้องต้นวิเคราะห์ได้ว่า เดิมลาดดินคงตัวในสภาพสมดุลตามลักษณะธรรมชาติ เมื่อมีการตัดดินลาดดินภูเขาออกบางส่วน ซึ่งตามหลักการลาดดินส่วนที่อยู่ด้านล่างหรือ

ดินภูเขาณี จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้การต้านทาน (Resisting) ยับยั้งไม่ให้ดินส่วนที่อยู่ด้านบนเคลื่อนไถลลงมาด้านล่าง แต่ในขณะที่ก่อสร้างหรือสภาวะปกติ ลาดดินยังคงสภาพอยู่ได้ปกติ เนื่องจากดินมีความชื้นน้อยหรือไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีแรงดันน้ำในโพรงที่เป็นลบหรือเป็นแรงดูด (Suction) ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินมีมากขึ้น ดินยังมีกำลังรับแรงเฉือนได้มาก จึงยังไม่เกิดการวิบัติในขณะนั้น

แต่เมื่อมีฝนตก น้ำไหลซึมเข้าในลาดดิน ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินสองส่วนคือ ส่วนแรกทำให้ค่ากำลังเฉือนของดินลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นได้เข้าทำลายแรงดันน้ำที่เป็นลบหรือแรงดูดของน้ำและอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลง ส่วนที่สองคือทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น เกิดแรงลอยตัว (Buoyancy force) ส่งผลให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ผลกระทบทั้งสองส่วนจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่มีฝนตก ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงระดับหนึ่งที่ลาดดินไม่อาจคงตัวอยู่ได้โดยสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่อัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง ลาดดินจึงต้องปรับเปลี่ยนรูปทรงของตัวเองเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลคือแรงต้านทานเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนตัว (Driving) จึงเกิดการทรุดตัวและเคลื่อนไถลลงมาหยุดตรงกับจุดที่ลาดดินเกิดความสมดุลในตัวเอง เกิดเป็นการวิบัติของลาดดินตามลำดับเหตุการณ์ดังกล่าว

เมื่อเสถียรภาพของลาดดินขึ้นกับปริมาณน้ำฝน นั้นแสดงได้ว่าในปีที่เกิดการวิบัติของลาดดิน ปริมาณน้ำฝนในปีนั้นมีปริมาณมากพอที่ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินได้ โดยปริมาณน้ำที่ลาดดินได้รับอาจไม่ใช่ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปีที่เกิดการวิบัติก็ได้ แต่ในขณะนั้นลาดดินได้รับปริมาณน้ำมากจนถึงขีดจำกัดแล้ว ลาดดินก็เกิดการวิบัติขึ้นหรือปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่เสียก่อน และภายหลังจากนั้นหากยังมีฝนตกต่อไปหรือในปีไหนที่มีปริมาณฝนตกมากจนปริมาณน้ำในลาดดินเกินขีดจำกัด ลาดดินก็อาจเกิดการวิบัติขึ้นได้อีก

ภายหลังจากการวิบัติของลาดดิน มีความจำเป็นต้องดำเนินการตัดดินส่วนที่เคลื่อนไถลลงมาทับผิวจราจรออก ดินในส่วนดังกล่าวเป็นดินที่เกิดจากดินส่วนด้านบนที่เคลื่อนไถลลงมาองรวมกันอยู่บริเวณตีนของลาดดิน (Zone of accumulation) ซึ่งในขณะที่ลาดดินปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่เรียบร้อยแล้ว ดินในส่วนนี้ทำหน้าที่ต้านทานดินที่อยู่ด้านบนไม่ให้เคลื่อนไถลลงมาอีก ดังนั้นการตัดดินในส่วนนี้ออกจึงเสมือนเป็นการเอาดินส่วนที่ต้านทานการเคลื่อนไถลออก แต่ก็ไม่เกิดการเคลื่อนไถลในขณะนั้น เพราะในขณะดำเนินการเป็นช่วงที่ฝนหยุดตกระยะหนึ่งแล้ว ปริมาณน้ำในลาดดินได้ลดลงหรือกระจายออก (Dissipate) คือได้ระเหยและซึมผ่านลงไปอีกทั้งระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้ว ดินในลาดดินจึงเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีแรงดันน้ำในโพรงเป็นลบ ทำให้หน่วยแรงใน

ดินกลับเพิ่มขึ้นอีก ลาดดินจึงมีเสถียรภาพมากกว่าตอนที่ฝนตก ดังนั้นการตัดดินส่วนนี้ออกในขณะนั้นจึงไม่เกิดการวิบัติของลาดดินและอยู่ได้อย่างมั่นคงเรื่อยมา

จากการพิจารณาจากด้านล่างของลาดดินเห็นได้ว่า ลาดดินดังกล่าวมีร่องรอยการวิบัติเกี่ยวเนื่องไปจนถึงด้านบนคือยอดเขาด้วย จากการสำรวจร่องรอยการวิบัติอย่างละเอียดตั้งแต่ด้านล่างไปจนสุดยอดเขาทั่วบริเวณที่เกิดการวิบัติของลาดดิน พบว่าส่วนบนของภูเขาซึ่งเป็นพื้นที่ของชาวบ้านที่ได้ทำสวนยางพาราและสวนผลไม้ มีการทรุดตัวและเลื่อนไถลลงสู่ด้านล่างเช่นกัน ผลการออกสำรวจได้ถ่ายภาพลักษณะส่วนประกอบต่างๆของลาดดินที่เกิดการวิบัติ เช่น ฝ้าชันหลัก (Main scarp) ดังรูปที่ 3.9, ฝ้าชันรอง (Minor scarp) ดังรูปที่ 3.10, ด้านข้างของลาดที่เลื่อนพังด้านขวา (Right flank) ดังรูปที่ 3.11, ด้านข้างของลาดที่เลื่อนพังด้านซ้าย (Left flank) ดังรูปที่ 3.12 และรอยแตกที่ผิวดิน (Tension crack) ดังรูปที่ 3.13



(ก) ฝ้าชันหลักมุมมองด้านหน้า

(ข) ฝ้าชันหลักมุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.9 ฝ้าชันหลัก (Main scarp)



(ก) ผาชันรองบริเวณช่วงกลาง

(ข) ผาชันรองบริเวณช่วงริม

รูปที่ 3.10 ผาชันรอง (Minor scarp)



(ก) Right flank ตอนล่าง

(ข) Right flank ตอนบน

รูปที่ 3.11 ด้านข้างของลาดที่เคลื่อนพังด้านขวา (Right flank)



(ก) Left flank ตอนล่าง

(ข) Left flank ตอนบน

รูปที่ 3.12 ด้านข้างของลาดที่เคลื่อนพังด้านซ้าย (Left flank)



(ก) รอยแตกผิวดินที่ต่อเนื่องกัน

(ข) รอยแตกผิวดินแบบเดี่ยว

รูปที่ 3.13 รอยแตกที่ผิวดิน (Tension crack)

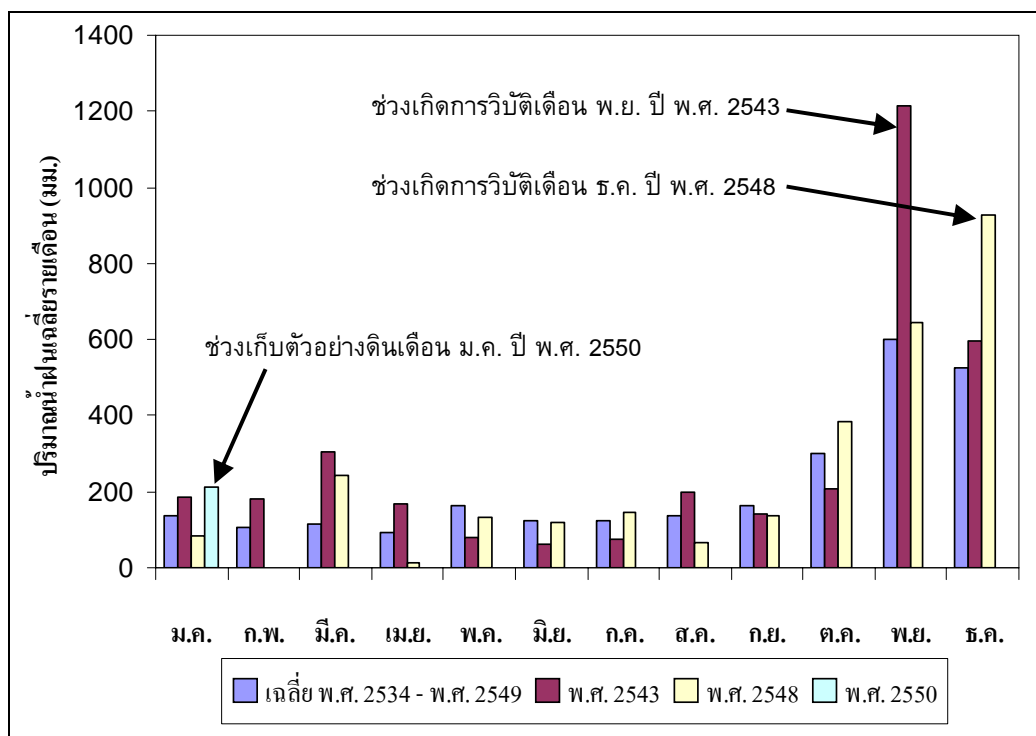
### 3.1.5 สภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน

สถานที่วิจัยอยู่ในพื้นที่ภาคใต้ฝั่งตะวันออก สภาพภูมิอากาศโดยรวมเป็นดังนี้ (เฉลิมชัย, 2544) ลักษณะที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ของภาคใต้เป็นแหลมยื่นออกไปในทะเล ภาคใต้จึงเปิดรับลมมรสุมทั้งสองด้าน คือฝั่งตะวันตกเปิดรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อย่างเต็มที่ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนกันยายน จึงทำให้ภาคใต้ฝั่งตะวันตกมีฝนตกหนักถึงหนักมากในช่วงนี้ ในทางกลับกันตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม ซึ่งเป็นฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ฝั่งตะวันออกของภาคใต้จะได้รับอิทธิพลของมรสุมนี้โดยตรง ดังนั้นในช่วงนี้จึงมีฝนตกหนักถึงหนักมากทางภาคใต้

ฝั่งตะวันออก โดยเฉพาะในเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมของทุกปี ซึ่งเกิดจากปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยาหลายประการด้วยกัน เช่น ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ร่องความกดอากาศต่ำ หย่อมความกดอากาศต่ำ พายุหมุนเขตร้อน ฯลฯ ซึ่งถ้าปัจจัยเหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมกันแล้ว จะทำภาคใต้มีฝนตกชุกหนาแน่น และมีฝนตกหนักถึงหนักมากได้ตามบริเวณเทือกเขาและชายฝั่งทะเล

จากข้อมูลประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2543 ได้แจ้งเตือนภาวะน้ำท่วมในบางพื้นที่ของภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและความกดอากาศสูงแผ่ปกคลุมภาคใต้และอ่าวไทย ประกอบกับมีหย่อมความกดอากาศต่ำปกคลุมบริเวณทะเลจีนใต้ใกล้ปลายแหลมญวน ลักษณะดังกล่าวทำให้ภาคใต้ฝั่งตะวันออกมีฝนตกหนักถึงหนักมากและต่อเนื่องหลายวัน เกิดน้ำท่วมหลายแห่งในพื้นที่ภาคใต้ เช่นเดียวกับช่วงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2548 สาเหตุจากบริเวณความกดอากาศสูงกำลังแรงจากประเทศจีนที่แผ่ปกคลุมประเทศไทย ซึ่งทำให้ร่องความกดอากาศต่ำที่พาดผ่านภาคใต้ตอนล่างมีกำลังแรง ลักษณะเช่นนี้ส่งผลทำให้ภาคใต้ฝั่งตะวันออกมีฝนตกชุกหนาแน่นและมีฝนตกหนักถึงหนักมาก เกิดน้ำท่วมหลายแห่งในพื้นที่ภาคใต้

ปริมาณน้ำฝนจากสถานีสนามบินจังหวัดนครศรีธรรมราช อำเภอท่าศาลา รหัสสถานี 48552 ในปี พ.ศ. 2534 – พ.ศ. 2549 มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 2,549.87 มิลลิเมตร ปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 3.14 โดยช่วงเวลาที่การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพเพื่อนำมาทดสอบกำลังเหนือนของดินตรงกับช่วงเดือนมกราคม ในปี พ.ศ. 2550 ซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 3.14 แผนภูมิปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย

ปริมาณน้ำฝนจะมีมากในช่วงเดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคม สำหรับในปี พ.ศ. 2543 และปี พ.ศ. 2548 ที่เกิดการวิบัติของลาดดินปริมาณน้ำฝนจะมีมากกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย นั่นคือมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าฤดูฝนปกติ และหากพิจารณาปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2543 ซึ่งตรงกับระยะเวลาที่เกิดการวิบัติของลาดดินในครั้งแรก จะมีปริมาณมากกว่าน้ำฝนในเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2548 ที่เกิดการวิบัติของลาดดินในครั้งที่สอง จากข้อมูลน้ำฝนเบื้องต้นวิเคราะห์ได้ว่า ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการวิบัติของลาดดินในปี พ.ศ. 2543 และปี พ.ศ. 2548 โดยในขณะที่ฝนตกเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับจนถึงระดับหนึ่งก็เกิดการวิบัติ ทั้งนี้ปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนในปี พ.ศ. 2543 และปริมาณน้ำฝนในเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2548 อาจไม่ใช่ปริมาณฝนสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินพอดี นั่นคือลาดดินอาจเกิดการวิบัติก่อนที่ปริมาณฝนจะตกลงมามากสุดในขณะนั้นก็ได้

### 3.1.6 ลักษณะฐานลาดดิน

เนื่องจากลาดดินที่ทำกรวิจัยมีขนาดพื้นที่กว้าง ภูมิประเทศสูงชันและเป็นป่าห้วยรกร การที่จะถ่ายรูปเพื่อให้เห็นภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมดเป็นไปได้ยาก การทำแผนที่และจำลองเป็น

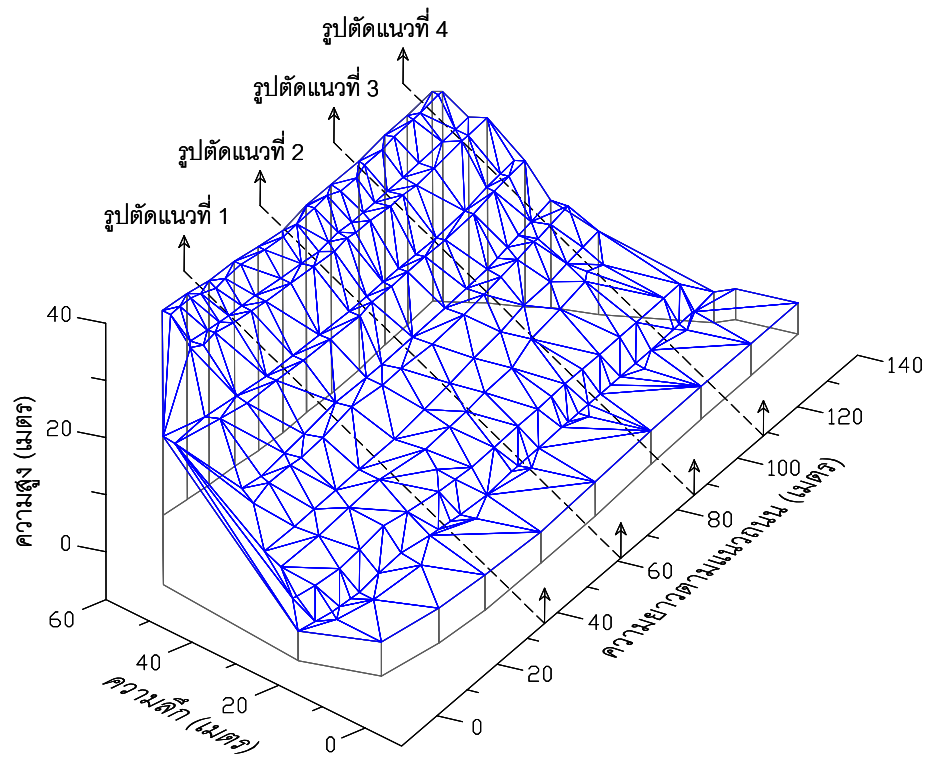


รูป 3 มิติ โดยการสร้างเป็นเส้นพื้นผิวโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Irregular Network, TIN) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการดำเนินการ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ภาพรวมของลาดดินได้ ทั้งยังได้ทราบถึงขนาดรูปทรงและความชันที่ถูกต้องแม่นยำ การทำแผนที่ภูมิประเทศยังใช้เป็นค่าพิกัดของรูปตัดลาดดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรมอีกด้วย

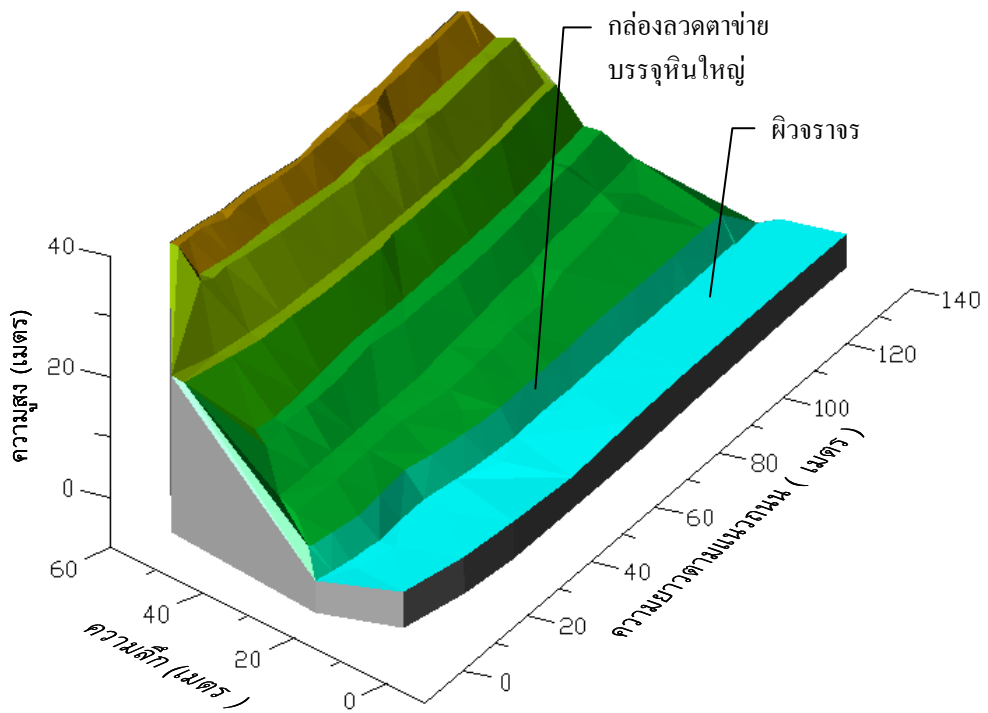
การปฏิบัติงานเริ่มจากสร้างหมุดอ้างอิงให้ครอบคลุมพื้นที่ทำการสำรวจ การขนย้ายเครื่องมือทำได้ยาก เนื่องจากมีอุปสรรคคือสภาพภูมิประเทศมีความลาดชันมากมีต้นไม้ล้มขวาง เนื่องจากการพังทลายของลาดดินและเป็นป่ากรบมีรอยแยกของผิวดินที่เป็นอันตราย ผลการออกรังวัดด้วยกล้องสำรวจประมวลผลรวม (Total station) ได้เก็บเป็นค่าพิกัดจุด X, Y, Z ของลาดดินทั้งหมด ตั้งแต่แนวถนนครอบคลุมไปจนถึงจุดสูงสุดของลาดดิน ทั้งลาดดินช่วงกิโลเมตรที่ 13+300 ถึง 13+400 และลาดดินช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 ค่าพิกัดที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

### 1. ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+300 ถึง 13+400

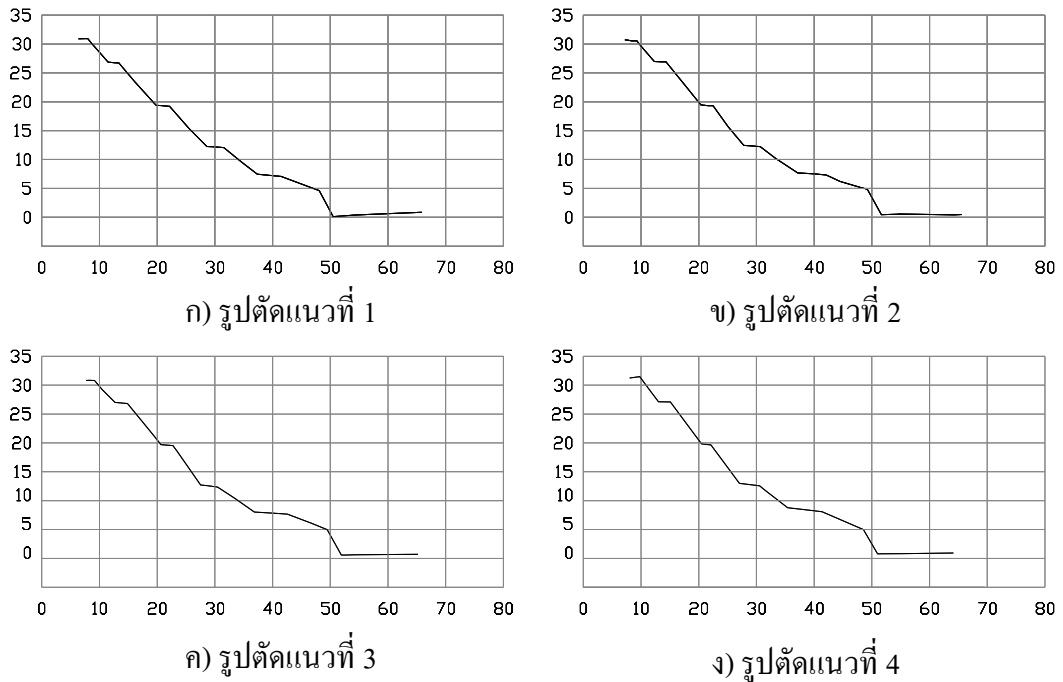
เมื่อได้ค่าพิกัดจุด X, Y, Z แล้วนำเข้าสู่ข้อมูลจุดตำแหน่งต่างๆ ด้วยโปรแกรม Autodesk Land Development สร้างเป็นเส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และสร้างพื้นผิวเพื่อแสดงเป็นรูปทรงฐานลาดดิน 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 โดยบริเวณขอบของลาดดินด้านซ้ายเป็นบริเวณลาดดินที่ไม่ได้ทำการตัดแต่งเป็นขั้นบันได ซึ่งมีพื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับความยาวลาดดินทั้งหมด จึงไม่ได้นำมาพิจารณา การสร้างรูปตัดลาดดิน (Section) โดยการพิจารณาสร้างรูปตัดในบริเวณที่น่าจะเป็นรูปตัดที่เป็นตัวแทนของลาดดินจำนวน 4 แนว แล้วจึงคัดเลือกรูปตัดที่เหมาะสมที่สุดมาหนึ่งแนวเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยได้พิจารณาเลือกรูปตัดแนวที่ 3 มาเป็นตัวแทนของลาดดินแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 เส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400



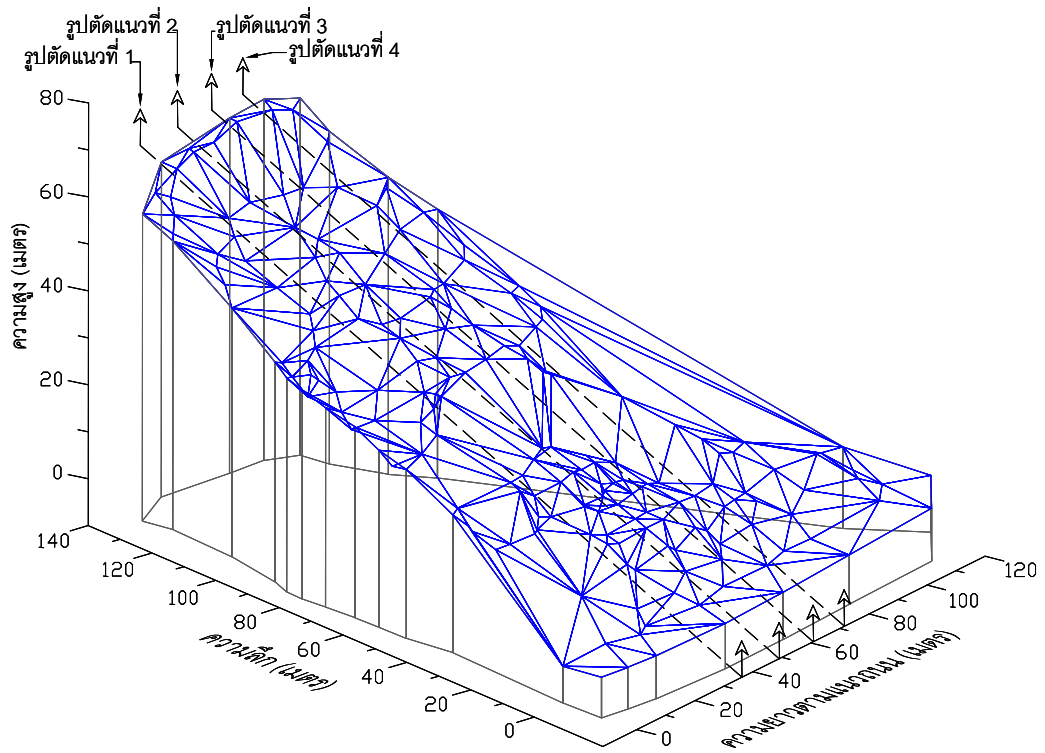
รูปที่ 3.16 รูปทรงพื้นฐาน 3 มิติลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400



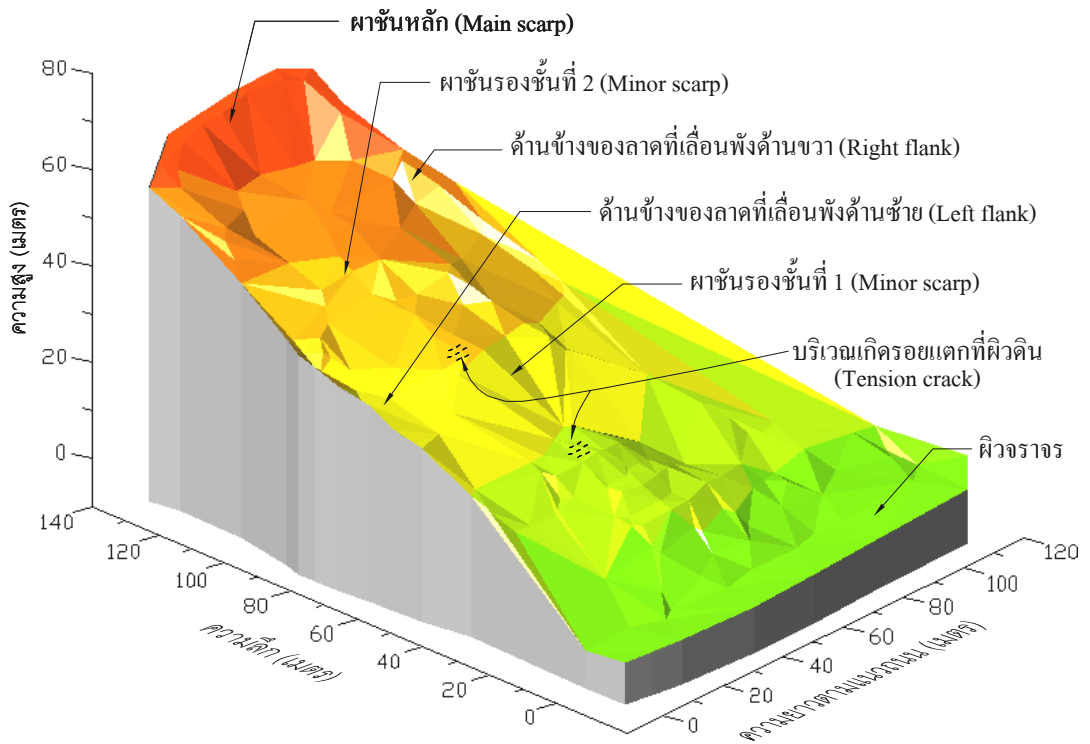
รูปที่ 3.17 รูปตัดลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400

## 2. ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050

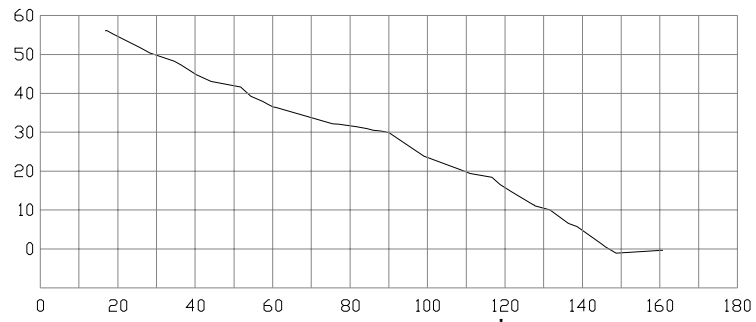
ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050 เป็นลาดดินที่สูงชันและมีพื้นที่ลาดดินมาก ผลการนำข้อมูลพิกัดจุด X, Y, Z มาสร้างเป็นเส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 3.18 ผลการสร้างเป็นพื้นผิวเพื่อแสดงเป็นรูปทรงฐานลาดดิน 3 มิติ และแสดงเป็นส่วนประกอบของลาดดินที่เกิดการวิบัติ แสดงดังรูปที่ 3.19 และสร้างรูปตัด (Section) ลาดดินโดยการพิจารณาสร้างรูปตัดในบริเวณที่น่าจะเป็นรูปตัดที่เป็นตัวแทนของลาดดินจำนวน 4 แนว แล้วจึงคัดเลือกรูปตัดที่เหมาะสมที่สุดมาหนึ่งแนวเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยได้พิจารณาเลือกรูปตัดในแนวที่ 3 มาเป็นตัวแทนของลาดดินแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



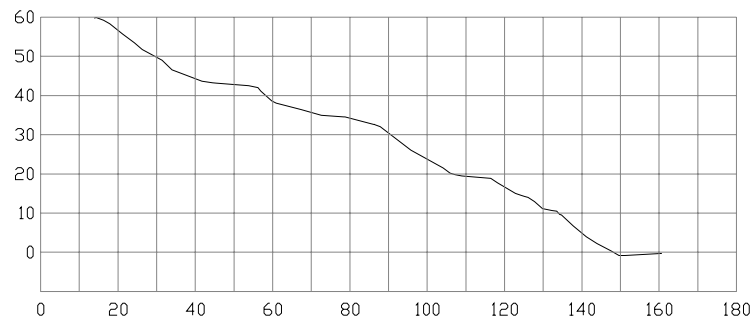
รูปที่ 3.18 เส้นโครงข่ายสามเหลี่ยมลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050



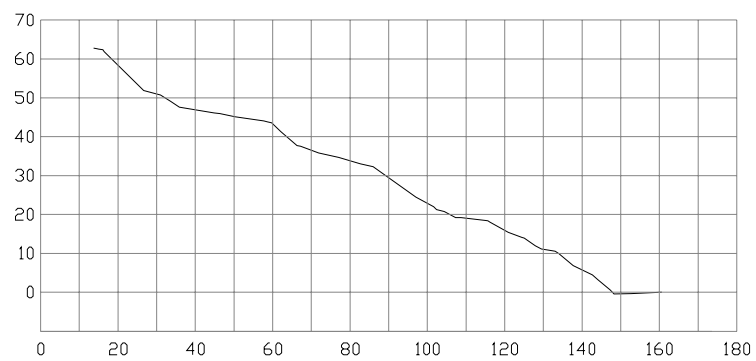
รูปที่ 3.19 รูปทรงสัญญาณ 3 มิติลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050



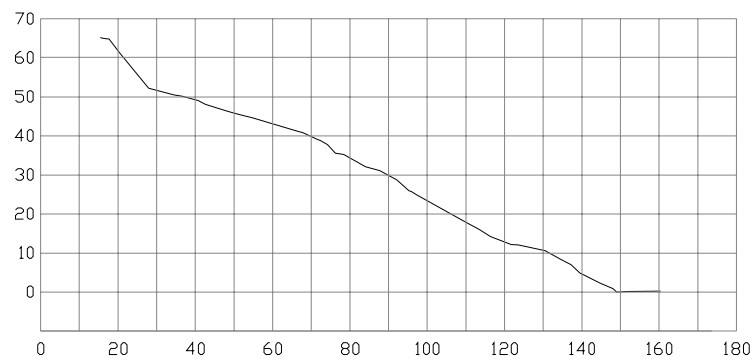
ก) รูปตัดแนวที่ 1



ข) รูปตัดแนวที่ 2



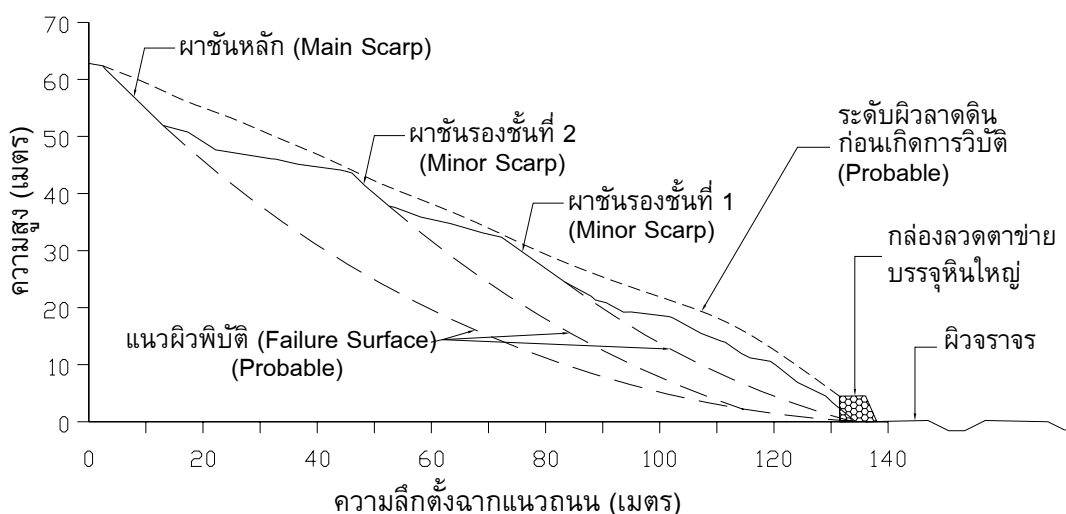
ค) รูปตัดแนวที่ 3



ง) รูปตัดแนวที่ 4

รูปที่ 3.20 รูปตัดลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050

ผลจากการตรวจสอบสภาพลาดดินใกล้เคียงที่ยังไม่วิบัติ, กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ที่ยังไม่รื้อออก และลักษณะการวิบัติโดยรวมของลาดดิน ได้นำรูปตัดจำลองที่พิจารณามาสร้างเป็นรูปตัดจำลองแสดงลักษณะการวิบัติของลาดดิน โดยได้สร้างแนวผิววิบัติ (Failure surface) ที่คาดว่าจะเป็นไปได้ (Probable) จากแนวของผาชันหลัก (Main scarp) และผาชันรอง (Minor scarp) ลาดลงมาตัดกับฐานของกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ ตามลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในสนาม แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 รูปตัดจำลองแสดงลักษณะการวิบัติการของลาดดิน

ผลจากการเก็บข้อมูลการสำรวจมาสร้างเป็นรูปทรงสัณฐานลาดดิน 3 มิติ และสร้างรูปตัดจำลองแสดงลักษณะการวิบัติของลาดดินทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะและรูปแบบการวิบัติของลาดดินภาพรวมได้ง่ายขึ้น ผลการวิเคราะห์ห่อธิบายได้ว่าเป็นการวิบัติแบบลึก (Deep seat) คล้ายกับลักษณะการวิบัติที่ Varnes (1978) ได้อธิบายไว้ มีส่วนประกอบของลาดดินที่เกิดการวิบัติเช่น ผาชันหลัก (Main scarp), ผาชันรอง (Minor scarp), ด้านข้างของลาดที่เอียงพัง (Flank) และรอยแตกผิวดิน (Tension crack) ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชิ้นส่วน (Multiple rotational slides) ในกรณีนี้เกิดเป็น 3 ชิ้นส่วนเลื่อนไถลแบบหมุนไปด้านหลัง Bromhead (1992) เรียกว่า “Three back-tilted rotational slip segments” โดยมีแนวผิวพิบัติ (Failure surface) ตัดผ่านที่ส่วนล่างของลาดดิน (Toe Failure) ตรงกับบริเวณฐานของกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ ทำให้มวลดินที่เลื่อนไถลลงมาดันให้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่เลื่อนตัวออกมาบนผิวทางได้โดยไม่ล้ม (Sliding) ตรงตามลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในสนาม การวิบัติน่าจะเกิดขึ้นเป็นลักษณะการวิบัติ

แบบก้าวหน้า (Progressive failure) คือเกิดขึ้นในส่วนหนึ่งส่วนใดของลาดดินก่อนแล้วเกิดการวิบัติของส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป กลไกดังกล่าวเกิดจากลาดดินส่วนบริเวณฐานเดิม (Toe) ถูกตัดออกเพื่อก่อสร้างถนน ทำให้เกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back slope) ที่ลาดชัน ลาดดินบริเวณฐานที่ตัดออกไปนั้น เป็นมวลดินส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงต้านทานการเลื่อนไถล ในขณะที่ฝนตกปริมาณน้ำในลาดดินมีมากขึ้นเรื่อยๆ โดยปริมาณน้ำจากลาดดินด้านบนที่ไหลลงมาสู่ลาดดินด้านล่าง ทั้งน้ำผิวดิน (Run off) และน้ำใต้ดิน (Ground water) ทำให้มวลดินบริเวณด้านล่างลาดดิน มีความชื้นมากกว่าและระดับน้ำใต้ดินสูงกว่ามวลดินบริเวณด้านบนลาดดิน เมื่อปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลให้กำลังเฉือนของดินลดน้อยลงตามลำดับ จนลาดดินไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ มวลดินบริเวณด้านหน้าสุดเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลลงมาเป็นชั้นส่วนแรก ทำให้เกิดเป็นผาชันร่องชั้นที่ 1 ก่อน การเลื่อนตัวของมวลดินในชั้นส่วนแรกมีผลกระทบหลายอย่างตามมา คือ เป็นเสมือนการตัดมวลดินที่เป็นส่วนฐานซึ่งทำหน้าที่รับแรงต้านทานการเลื่อนไถลของลาดดินด้านในออก, ทำให้ลาดดินด้านในมีความชื้นเพิ่มขึ้น และในขณะที่เกิดการเลื่อนไถลลงมาของมวลดินในชั้นส่วนแรกเกิดเป็นแรงดึงตามแนวที่ระนาบเหนือตัดผ่าน ระหว่างมวลดินที่เลื่อนไถลกับมวลดินภายในลาดดิน ผลดังกล่าวทำให้มวลดินด้านในลาดดินเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลตามลงมาเป็นชั้นส่วนที่สอง เกิดเป็นผาชันร่องชั้นที่ 2 และผลจากแรงดึงทำให้เห็นเป็นรอยแตกผิวดินบนลาดดิน และในลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดการเลื่อนตัวในชั้นส่วนที่สาม ทำให้เกิดเป็นผาชันหลัก รวมเป็นชั้นส่วนที่เกิดการเลื่อนไถลจำนวน 3 ชั้นส่วน ลักษณะการวิบัติแบบหมุนหลายชั้นส่วนรูก้าเข้าไปในลาดดินนี้ Bromhead (1992) และ Skempton and Hutchinson (1969) เรียกว่า การเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive)

### 3.2 สมบัติทางกายภาพของดิน

จุดประสงค์หลักของการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมาทดสอบหาสมบัติทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินตลอดทั้งตามแนวยาวและตามแนวความสูงของลาดดิน เพื่อสามารถจัดกลุ่มดินในลาดดินที่ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพนำมาทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้ครอบคลุมตรงตามจำนวนชั้นดินที่เปลี่ยนแปลง การทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินประกอบด้วย การทดสอบหาความชื้น (Water Content) พิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit), การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil) และการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

## 1. ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+300 ถึง 13+400

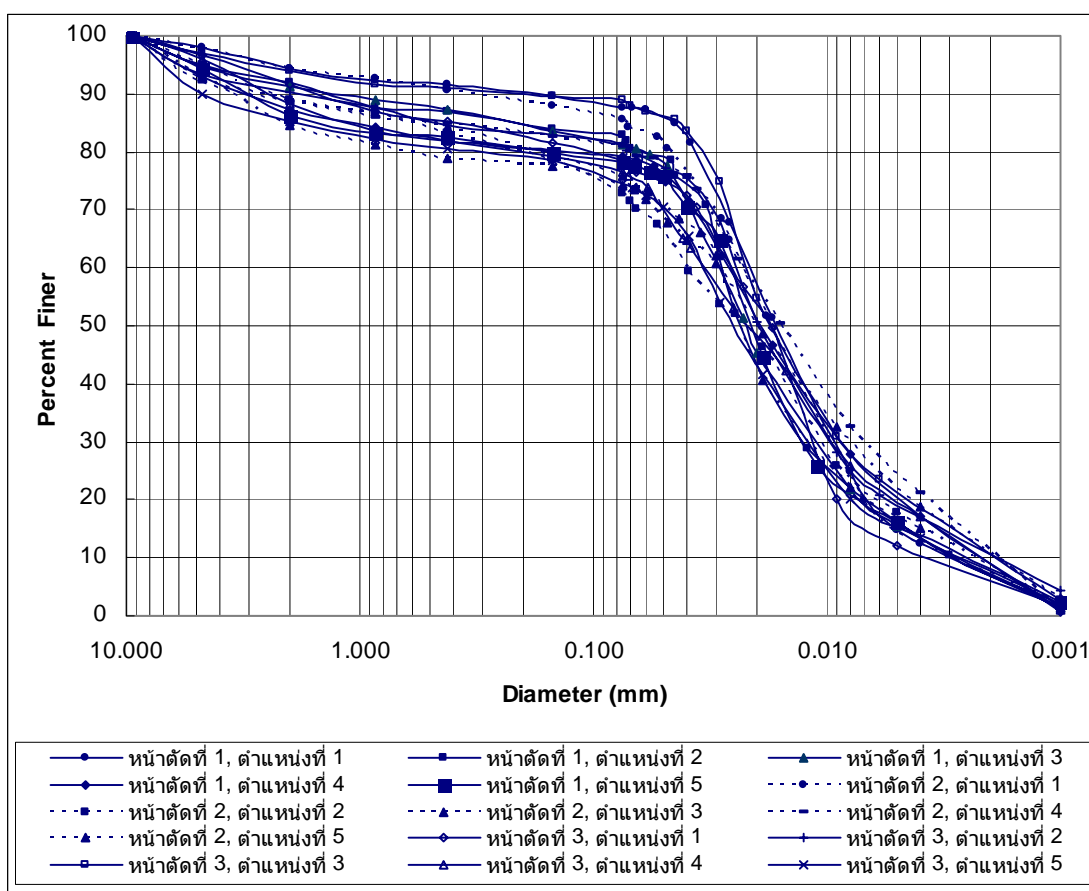
ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าในทุกแนวตัดลาดดิน หากพิจารณาตามการจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (Unified) จะสามารถจำแนกดินได้เป็น 2 ชนิดคือ ML (ทรายแป้งที่มีสถานะสภาพความเหนียวหนืดต่ำ) ได้แก่ตัวอย่างดินตำแหน่งที่ 1,2 และ 3 กับ MH (ทรายแป้งที่มีสถานะสภาพความเหนียวหนืดสูง) ได้แก่ตัวอย่างดินตำแหน่งที่ 4 และ 5 และหากพิจารณาตามมาตรฐาน AASHTO สามารถจำแนกดินทั้งหมดเป็นดินชนิด A-7-6 แต่หากพิจารณาค่าดัชนีกลุ่ม (Group Index) ซึ่งใช้บ่งบอกว่าดินนั้นมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุกันทางเพียงใดจะสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีค่าดัชนีกลุ่มประมาณ 9 – 10 ได้แก่อินตำแหน่งที่ 1,2 และ 3 กับกลุ่มที่มีค่าดัชนีกลุ่มประมาณ 18 – 20 ได้แก่อินตำแหน่งที่ 4 และ 5



ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินจากลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง ก.ม.13+400

แนวตัด ที่	ตำแหน่ง ที่	W <sub>n</sub> %	GS	%Pass #200	Atterberg's limit			Grain size parameter		Soil classification	
					LL	PL	PI	Cu	Cc	AASHTO	USCS
1	1	37.61	2.79	87.70	44.70	32.10	12.60	7.33	1.23	A-7-6(10)	ML
	2	35.67	2.78	82.99	43.94	31.75	12.19	9.00	1.78	A-7-6(10)	ML
	3	34.89	2.79	81.35	44.12	31.54	12.58	10.00	1.60	A-7-6(10)	ML
	4	32.25	2.72	79.20	72.20	40.00	32.20	11.82	1.42	A-7-6(20)	MH
	5	29.99	2.72	78.05	71.50	39.23	32.27	10.42	2.82	A-7-6(20)	MH
2	1	33.30	2.78	85.60	44.25	32.56	11.69	7.67	1.45	A-7-6(10)	ML
	2	34.48	2.77	72.75	43.68	31.13	12.55	17.39	1.32	A-7-6(10)	ML
	3	29.41	2.79	75.80	42.67	30.54	12.13	15.00	1.07	A-7-6(9)	ML
	4	30.49	2.71	80.93	71.78	41.45	30.33	11.50	1.07	A-7-6(20)	MH
	5	30.22	2.72	74.23	73.89	40.21	33.68	13.04	2.09	A-7-6(20)	MH
3	1	34.76	2.79	78.65	43.45	32.34	11.11	6.25	1.44	A-7-6(9)	ML
	2	37.29	2.78	81.41	44.58	33.64	11.94	12.50	2.00	A-7-6(10)	ML
	3	38.67	2.78	88.77	42.65	31.36	11.29	11.50	1.76	A-7-6(9)	ML
	4	31.42	2.73	76.43	71.48	42.24	29.24	15.00	1.24	A-7-6(20)	MH
	5	28.99	2.72	74.59	69.98	43.98	26.00	12.59	1.84	A-7-6(18)	MH

พิจารณากราฟการกระจายของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 3.22 ดินในแต่ละแนวตัดจะมีลักษณะการกระจายของเม็ดดินที่ใกล้เคียงกัน เม็ดดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 70 % เม็ดดินส่วนใหญ่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.005 - 0.07 มิลลิเมตร เส้นกราฟค่อนข้างแบนราบในแนวระดับตั้งแต่ช่วงเม็ดดินขนาด 0.07 - 2 มิลลิเมตร แสดงว่ามวลดินข้ามขนาดของเม็ดดินในช่วงนี้ (Gap - graded soil)



รูปที่ 3.22 การกระจายขนาดเม็ดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง ก.ม.13+400

ดังนั้นจากผลการทดลองหาสมบัติทางกายภาพของดินสามารถสรุปได้ว่า ดินในแต่ละแนวตัดเป็นดินชนิดเดียวกัน ส่วนชนิดของดินตามระดับความสูงสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ดินในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 กับดินในตำแหน่งที่ 4 และ 5 จึงได้กำหนดจำนวนกลุ่มดินที่ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400 จำนวน 2 กลุ่ม ตามตำแหน่งที่แบ่งดังกล่าวข้างต้น

## 2. ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าในทุกแนวตัดของลาดดิน หากพิจารณาการจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (Unified) จะสามารถจำแนกดินได้เป็น 2 ชนิดคือ ML (ทรายแป้งที่มีสถานะสภาพความเหนียวหนืดต่ำ) ได้แก่อินตำแหน่งที่ 1, 2 และ 5 กับชนิด MH (ทรายแป้งที่มีสถานะสภาพความเหนียวหนืดสูง) ได้แก่อินตำแหน่งที่ 3 และ 4 หากพิจารณาตามมาตรฐาน AASHTO สามารถจำแนกดินได้ 2 ชนิด คือ A-7-5 ได้แก่อินในตำแหน่งที่ 1, 2, 3 และ 4 กับชนิด A-5 ได้แก่อินในตำแหน่งที่ 5 แต่หากพิจารณาค่าดัชนีกลุ่ม (Group Index) จะสามารถแบ่งได้สองกลุ่ม กลุ่มแรกมีค่าดัชนีกลุ่มประมาณ 7 – 10 ได้แก่อินตำแหน่งที่ 1, 2 และ 5 กับกลุ่มที่มีค่าดัชนีกลุ่มประมาณ 17 – 19 ได้แก่อินตำแหน่งที่ 3 และ 4

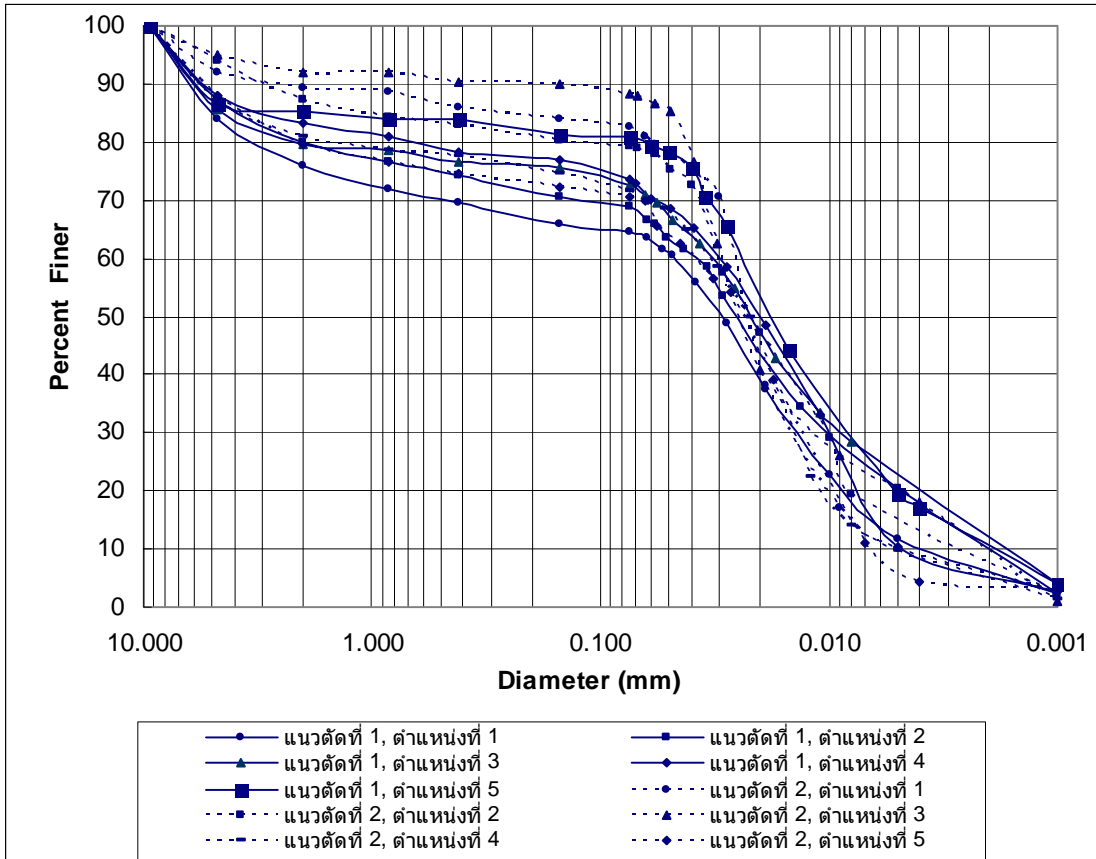
ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดิน ช่วงก.ม. 13+900 ถึง 14+050

แนวตัด ที่	ตำแหน่ง ที่	W <sub>n</sub> %	GS	%Pass #200	Atterberg's limit			Grain size parameter		Soil classification	
					LL	PL	PI	Cu	Cc	AASHTO	USCS
1	1	25.30	2.79	67.00	44.00	31.60	12.40	12.25	1.00	A-7-5(8)	ML
	2	26.94	2.78	75.43	43.23	30.46	12.77	19.50	1.28	A-7-5(10)	ML
	3	28.76	2.77	88.90	59.30	33.90	25.40	18.82	1.49	A-7-5(18)	MH
	4	28.80	2.77	79.39	58.68	32.98	25.70	6.00	0.67	A-7-5(18)	MH
	5	26.45	2.78	74.50	41.20	31.50	9.70	12.00	1.33	A-5(8)	ML
2	1	23.98	2.79	71.48	43.97	30.54	13.43	5.00	1.80	A-7-5(9)	ML
	2	26.05	2.78	68.54	42.95	30.56	12.39	10.00	1.11	A-7-5(8)	ML
	3	28.26	2.78	85.34	58.98	32.06	26.92	15.00	2.40	A-7-5(19)	MH
	4	29.45	2.77	79.90	59.35	33.87	25.48	6.04	1.16	A-7-5(18)	MH
	5	23.97	2.77	70.48	41.10	32.40	8.70	5.71	0.60	A-5(7)	ML

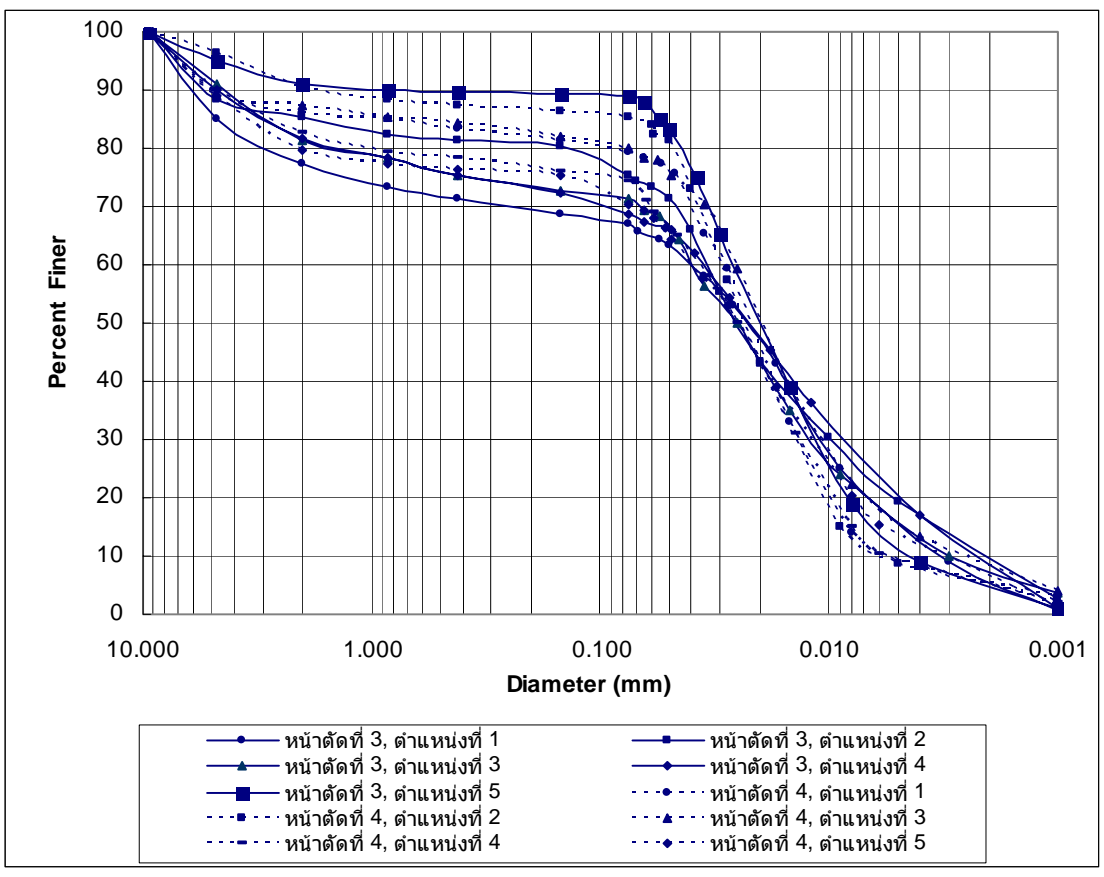
ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดิน ช่วงก.ม. 13+900 ถึง 14+050 (ต่อ)

แนวตัด ที่	ตำแหน่ง ที่	W <sub>n</sub> %	GS	%Pass #200	Atterberg's limit			Grain size parameter		Soil classification	
					LL	PL	PI	Cu	Cc	AASHTO	USCS
3	1	26.11	2.78	64.54	43.74	31.55	12.19	12.50	1.13	A-7-5(7)	ML
	2	26.30	2.78	68.83	44.83	32.87	11.96	16.50	1.52	A-7-5(8)	ML
	3	30.83	2.78	80.84	57.94	32.76	25.18	13.33	1.41	A-7-5(18)	MH
	4	28.20	2.77	82.45	59.57	33.87	25.70	14.78	1.01	A-7-5(18)	MH
	5	32.86	2.77	71.47	41.15	31.98	9.17	6.05	1.51	A-5(7)	ML
4	1	26.76	2.79	72.43	44.89	33.01	11.88	5.27	1.23	A-7-5(9)	ML
	2	27.77	2.79	73.43	44.29	32.95	11.34	4.62	1.01	A-7-5(9)	ML
	3	30.38	2.77	79.34	58.46	32.75	25.71	10.42	2.40	A-7-5(18)	MH
	4	27.41	2.78	88.43	57.25	33.92	23.33	60.00	0.08	A-7-5(17)	MH
	5	25.34	2.77	70.43	41.87	31.27	10.60	13.33	1.41	A-5(8)	ML

พิจารณากราฟการกระจายของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24 ดินในแต่ละแนวตัดจะมีลักษณะการกระจายของเม็ดดินที่ใกล้เคียงกัน เม็ดดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 65 % เม็ดดินส่วนใหญ่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.006 - 0.07 มิลลิเมตร เส้นกราฟค่อนข้างแบนราบในแนวระดับตั้งแต่ช่วงเม็ดดินขนาด 0.07 – 2 มิลลิเมตร แสดงว่ามวลดินข้ามขนาดของเม็ดดินในช่วงนี้



รูปที่ 3.23 การกระจายขนาดเม็ดดินแนวตัดที่ 1 และ 2 ช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400



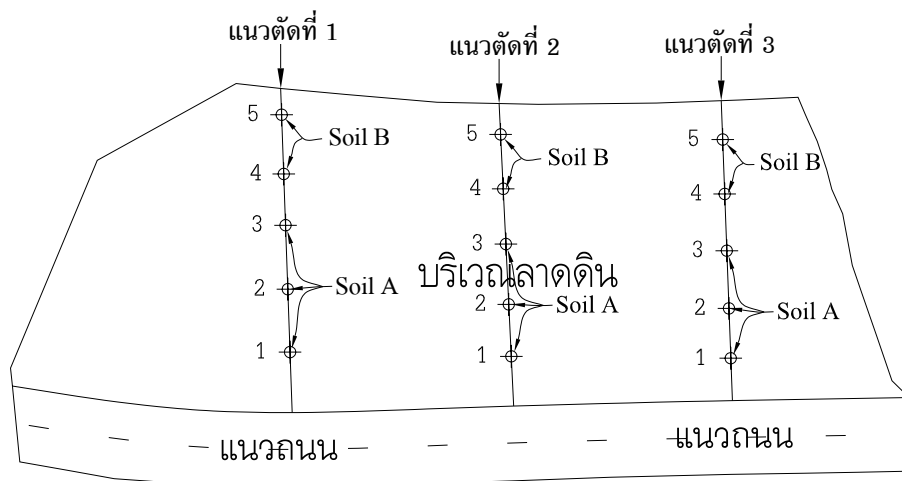
รูปที่ 3.24 การกระจายขนาดเม็ดดินแนวตัดที่ 3 และ 4 ช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400

ดังนั้นจากผลการทดสอบหาสมบัติทางกายภาพของดินสามารถสรุปได้ว่า ดินในแต่ละแนวตัด เป็นดินชนิดเดียวกัน ส่วนชนิดของดินตามระดับความสูงสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ดินในตำแหน่งที่ 1, 2 ดินในตำแหน่งที่ 3, 4 และดินในตำแหน่งที่ 5 จึงได้กำหนดจำนวนกลุ่มดินที่ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพในช่วง ก.ม. 13+900 ถึง ก.ม. 14+050 จำนวน 3 กลุ่ม ตามตำแหน่งที่แบ่งดังกล่าวข้างต้น

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดิน เพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน และเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพเพื่อนำมาทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินต่อไป จึงได้กำหนดสัญลักษณ์เพื่อเรียกชื่อกลุ่มดินตามตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพที่ได้แบ่งกลุ่มไว้แล้วข้างต้น ทั้งในช่วง ก.ม.ที่ 13+300 ถึง 13+400 และในช่วง ก.ม. 13+900 ถึง ก.ม. 14+050 ดังตารางที่ 3.3 และอธิบายประกอบกับรูปแปลงของลาดดินทั้งสองช่วงก.ม. แสดงดังรูปที่ 3.25 และ 3.26

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์เรียกแทนตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

ช่วงกม.ลาดดิน	ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดิน แบบแปลงสภาพ	สัญลักษณ์
ก.ม.13+300 ถึง ก.ม. 13+400	1, 2, 3	Soil A
	4, 5	Soil B
ก.ม. 13+900 ถึงก.ม. 14+050	1, 2	Soil C
	3, 4	Soil D
	5	Soil E



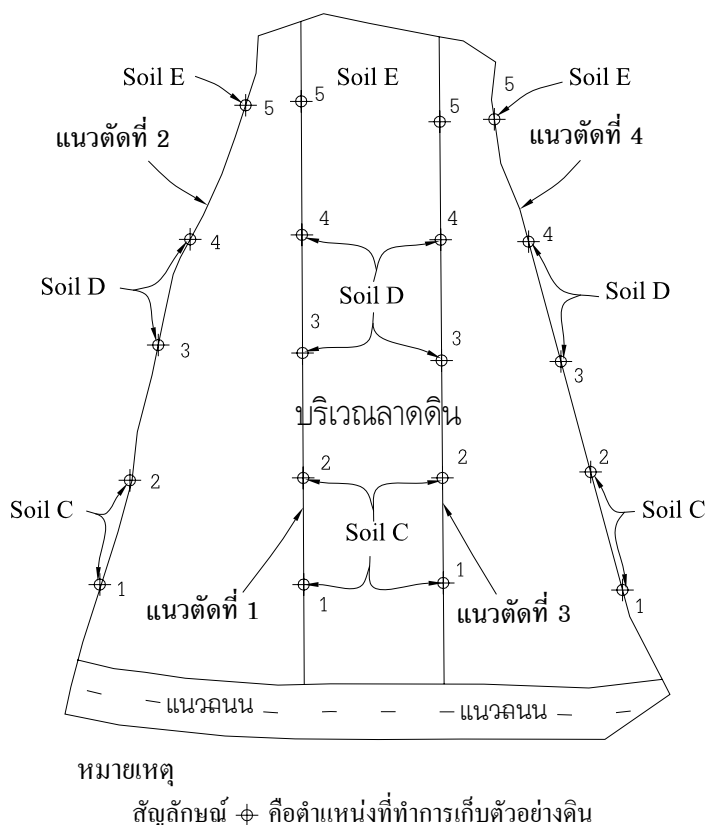
หมายเหตุ

สัญลักษณ์ ⊕ คือตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน

รูปที่ 3.25 รูปแปลนแสดงแนวตัดและตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพในลาดดิน

ช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400





รูปที่ 3.26 รูปแปลนแสดงแนวตัดและตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพในลาดดิน  
ในช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050

จากลักษณะลาดดินที่เกิดจากการตัดมวลดินด้านข้างของภูเขาออกจนเกิดเป็นลาดดิน ทำให้การเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบสมบัติทางกายภาพที่ได้เป็น เสมือนเป็นค่าสมบัติทางกายภาพของดินตามชั้นความลึกในแนวตั้งของลาดดินและจากการแบ่งกลุ่มดินตามสมบัติทางกายภาพข้างต้น จึงอนุมานว่าในลาดดินช่วงก.ม.ที่ 13+300 ถึง 13+400 แบ่งได้เป็น 2 ชั้นดิน (Soil A, Soil B) ดังแสดงในรูปที่ 3.31 และในช่วง ก.ม. 13+900 ถึง ก.ม. 14+050 แบ่งได้เป็น 3 ชั้นดิน (Soil C, Soil D, Soil E) ดังแสดงในรูปที่ 3.33

### 3.3 สมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน จุดประสงค์เพื่อหาตัวแปรกำลัง (Strength parameter) ซึ่งประกอบด้วย มุมเสียดทานภายใน (Internal friction,  $\phi$ ) และค่าการยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion,  $C$ ) การทดสอบใช้วิธีการทดสอบแบบการเนียนโดยตรง (Direct

shear test) โดยทำการทดสอบในสองลักษณะคือ การทดสอบแบบเร็วและการทดสอบแบบช้า ปัญหาหลักในการทดสอบตัวอย่างดินเพื่อหาสมบัติทางวิศวกรรมของดินคือ ตัวอย่างดินที่เก็บมานั้นเป็นดินที่มาจากภูเขา บางตัวอย่างดินมีเม็ดดินที่มาจากหินดินดานฝังตัวอยู่ในตัวอย่างดิน โดยที่ไม่อาจมองเห็นได้จากภายนอก เมื่อทำการเนียนตัวอย่างดิน ทำให้ค่าที่มีลักษณะที่ไม่คงที่แน่นอน เช่นค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง แต่โดยทั่วไปก็ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังเฉือนโดยรวมมากนัก หากเม็ดดินใหญ่เหล่านั้น ถูกล้อมรอบด้วยดินเม็ดละเอียดมากพอ แต่หากตัวอย่างดินที่มีเม็ดดินที่มาจากหินดินดานขวางอยู่ บริเวณหัวหรือท้ายตัวอย่างดิน ในขณะที่ตัดแต่งตัวอย่างดินต้องใช้ความระมัดระวังและเทคนิคพิเศษ เพื่อป้องกันตัวอย่างดินแตก หรือถูกรบกวนได้

### 3.3.1 การทดสอบแบบเร็ว (Quick Test)

การทดสอบแบบเร็วเป็นการทดสอบที่ไม่ยอมให้แรงดันน้ำในโพรงดินระบายออกได้ทัน (Undrained) ในขณะที่เนียนตัวอย่างดิน แรงดันน้ำในโพรงนี้จึงมีผลต่อค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear strength) นั่นคือมีผลต่อมุมเสียดทานภายใน และแรงยึดเหนี่ยวหรือค่าการยึดเกาะกันของเม็ดดิน เมื่อให้แรงกระทำกับมวลดิน มีส่วนที่ต้องรับกำลังสองส่วนคือ ส่วนของน้ำและส่วนของเม็ดดิน น้ำมีค่าแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในเป็นศูนย์ ปริมาณน้ำในมวลดินที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง ผลการทดสอบได้ค่าตัวแปรกำลังทั้งดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และรายละเอียดของผลการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์และเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope) แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.4 ผลทดสอบการเนียนโดยตรงแบบเร็ว

ตัวอย่างดิน	ดินความชื้นธรรมชาติ			ระดับอิมัตว์ (%Sr)	ดินชุ่มน้ำ			ระดับอิมัตว์ (%Sr)
	$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )		$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	
Soil A	31.38	7.12	1.797	76.26	24.30	0	1.901	98.18
Soil B	27.09	8.02	1.823	81.11	26.89	0	1.879	99.63
Soil C	21.74	8.94	1.916	75.76	21.28	0	1.958	99.11
Soil D	22.64	8.69	1.863	76.73	27.76	0.04	1.984	98.19
Soil E	34.57	2.74	1.765	78.87	30.02	0	1.933	98.46

### 3.3.2 การทดสอบแบบช้า (Slow Test)

การทดสอบแบบช้าเป็นการทดสอบที่ยอมให้แรงดันน้ำในโพรงดินระบายออก (Drained) ในขณะที่เนื้อตัวอย่างดิน ทำให้ไม่เกิดแรงดันน้ำในมวลดิน กำลังที่ได้จึงเป็นกำลังของเม็ดดินที่แท้จริงหรือเป็นหน่วยแรงประสิทธิผล ผลการทดลองได้ค่าตัวแปรกำลังของดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำแสดงดังตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ และแสดงเป็นเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ทั้งแบบค่ากำลังยอด (Peak strength) และแบบค่ากำลังคงค้าง (Residual strength) ของดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำ รายละเอียดของผลการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์และเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope) แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.5 ผลทดสอบการเฉือนโดยตรงแบบช้า (ดินความชื้นธรรมชาติ)

ตัวอย่างดิน	กำลังสูงสุด		กำลังคงค้าง		$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	ระดับอิ่มตัว (%Sr)
	$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )		
Soil A	32.70	7.33	27.76	5.13	1.772	77.28
Soil B	29.83	8.32	26.01	6.70	1.801	78.06
Soil C	25.11	9.72	23.27	5.90	1.851	78.24
Soil D	26.60	9.56	23.58	7.49	1.859	76.94
Soil E	36.67	3.66	33.56	1.67	1.709	75.80

ตารางที่ 3.6 ผลทดสอบการเฉือนโดยตรงแบบช้า (ดินชุ่มน้ำ)

ตัวอย่างดิน	กำลังสูงสุด		กำลังคงค้าง		$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	ระดับอิ่มตัว (%Sr)
	$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (ton/m <sup>2</sup> )		
Soil A	29.46	2.21	24.30	1.53	1.863	99.66
Soil B	30.20	1.76	25.80	1.59	1.898	100.09
Soil C	27.38	3.79	24.81	3.11	1.923	98.86
Soil D	29.46	2.88	26.50	2.79	1.941	99.96
Soil E	32.17	1.52	28.43	1.13	1.909	98.90

จากผลทดสอบการเลื่อนโดยตรง หากพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังสูงสุด ระหว่างการทดสอบแบบเร็วและแบบช้า ในดินความชื้นธรรมชาติเห็นว่าทั้งค่ามุมเสียดทานภายใน( $\phi$ ) และค่าการยึดเกาะกัน (C) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ในดินชุ่มน้ำ ทั้งค่ามุมเสียดทานภายในและค่าการยึดเกาะกันจากการทดสอบแบบเร็ว (ตารางที่ 3.4) ให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแบบช้า (ตารางที่ 3.6) โดยเฉพาะค่าการยึดเกาะกันของดินชุ่มน้ำให้ค่าประมาณศูนย์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดสอบแบบเร็วเป็นการทดสอบที่ไม่ยอมให้น้ำระบายออกจากตัวอย่างได้ทัน ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure) ขึ้นในขณะที่ทำการเลื่อนตัวอย่างดิน แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้ค่ากำลังเฉือนของดินลดลง ส่วนในการทดสอบแบบช้า ในการเลื่อนไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้น เป็นแรงต้านทานการเลื่อนโดยตรงจากเม็ดดินทำให้ได้ค่ากำลังเฉือนที่มากกว่า

ค่าตัวแปรกำลังที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนระหว่างดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำ ทั้งจากการทดสอบแบบเร็วและแบบช้าคือ ค่าการยึดเกาะกัน โดยในดินชุ่มน้ำจะให้ค่าการยึดเกาะกันน้อยกว่าในดินความชื้นธรรมชาติ สอดคล้องกับทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวที่ว่า ดินเม็ดละเอียดที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีแรงดูดมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของเม็ดดินและปริมาณความชื้น ในมวลดิน ดินที่ขนาดเม็ดดินเล็กกว่าและมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยกว่า จะเกิดแรงดูดได้มากกว่าส่งผลให้ค่าการยึดเกาะกันของมวลดินสูงขึ้น ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มมากขึ้น จะเข้าไปทำลายแรงดึงดูดหรือแรงดูดของอากาศในดิน ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินลดลง (สุทธิศักดิ์, 2550) และปริมาณน้ำในมวลดินที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาของชั้นน้ำต่างๆ มากขึ้น ได้แก่ น้ำดูดซับ (Adsorbed Water) น้ำความหนืด (Viscous Water) และน้ำอิสระ (Free Water) โดยเฉพาะในชั้นน้ำอิสระนี้ โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่โดยอิสระ (มานะ, 2541) เมื่อมีแรงกระทำเม็ดดินจะสามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้โดยง่าย นั่นคือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและเกิดการวิบัติของมวลดินได้ง่าย ดินจึงมีกำลังเฉือนน้อย

จากผลทดสอบการเลื่อนโดยตรงทั้งแบบเร็วและแบบช้า เห็นได้ว่าค่าการยึดเกาะกันของตัวอย่างดิน Soil E ดินความชื้นธรรมชาติ มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างดินอื่นมาก สอดคล้องกับค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index, P.I.) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงช่วงของปริมาณน้ำในมวลดินในขณะที่ดินอยู่ในสถานภาพพลาสติก (Plastic State) โดยค่าดัชนีความเหนียวหนืดในตัวอย่างดินดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างดินอื่นๆ เช่นกัน

จากผลทดสอบการเลื่อนโดยตรงทั้งแบบเร็วและแบบช้า เห็นได้ว่าค่ามุมเสียดทานภายในของดินชุ่มน้ำบางตัวอย่าง จะมีค่ามากกว่าในดินความชื้นธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะว่าในขณะที่ปล่อยให้มีการอัดตัวของตัวอย่างดิน (Consolidated) ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างดินชุ่มน้ำทำให้ดินทรุดตัวมากกว่าตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ เม็ดดินถูกอัดชิดติดกันมากขึ้น เมื่อทำการเลื่อน

ตัวอย่างดิน เมื่อดินเกิดการขัดตัวกันมากกว่า จึงทำให้ได้ค่ามุมเสียดทานภายในที่มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาค่าลึงเฉือนโดยรวมจากเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ในแต่ละหน่วยแรงตั้งฉาก เห็นได้ว่าค่าลึงเฉือนของดินความชื้นธรรมชาติจะมากกว่าดินชุ่มน้ำในทุกตัวอย่างดิน

### 3.3.3 การลดลงของค่าลึงเฉือน

จากผลการทดสอบการเฉือนโดยตรงแบบช้า ทำให้ได้ค่าลึงเฉือนของเม็ดดินที่แท้จริง นำค่าลึงเฉือนดังกล่าวมาวิเคราะห์การลดลงของค่าลึงเฉือน จากผลการทดสอบ การลดลงของค่าลึงเฉือนแบ่งได้เป็น 2 สาเหตุคือ 1) สาเหตุจากปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นจากดินสภาพความชื้นธรรมชาติเป็นดินชุ่มน้ำ และ 2) สาเหตุจากการเลื่อนตัวในแนวพิบัติที่มาก ทำให้ค่าลึงของดินลดลงจากค่าลึงสูงสุดเหลือเป็นค่าลึงคงค้าง

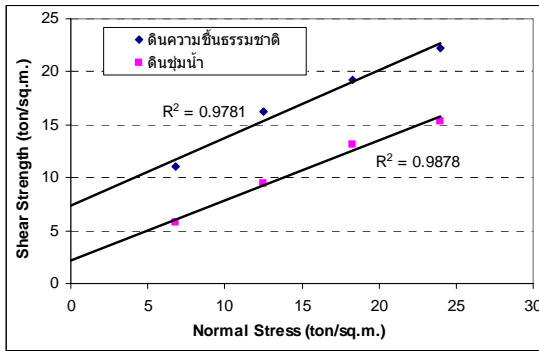
เมื่อพิจารณาการลดลงของค่าลึงเฉือนของดิน โดยใช้ค่าลึงเฉือนของดินชุ่มน้ำเทียบกับค่าลึงเฉือนของดินความชื้นธรรมชาติ นำค่าลึงเฉือนในแต่ละหน่วยแรงตั้งฉากมาเฉลี่ยและเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าลึงสูงสุดและค่าลึงคงค้างของดินลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 26-39% และ 19-38% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.7 และแสดงเป็นเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure envelope) ได้ดังรูปที่ 3.27 และ 3.28 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการลดลงของค่าลึงเฉือนจากค่าลึงสูงสุดเป็นค่าลึงคงค้าง ในดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำค่าลึงของดินลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 17-26% และ 9-21% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.8 และแสดงเป็นเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ได้ดังรูปที่ 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 ค่ากำลังเรือนของดินชุ่มน้ำที่ลดลงเทียบกับดินความชื้นธรรมชาติ

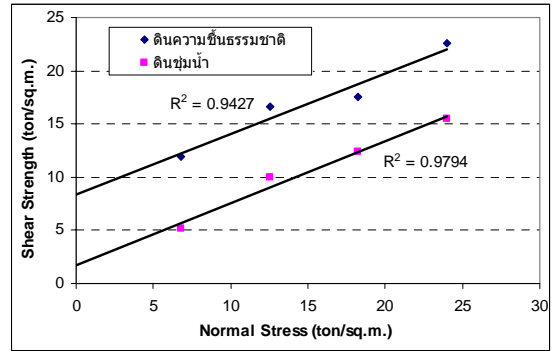
Soil	ค่ากำลังเรือนที่ลดลง (%)	
	ค่ากำลังสูงสุด	ค่ากำลังคงค้าง
A	38.25	37.07
B	39.50	38.41
C	32.05	19.71
D	34.42	27.75
E	26.06	20.22

ตารางที่ 3.8 ค่ากำลังเรือนของดินที่ลดลงจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้าง

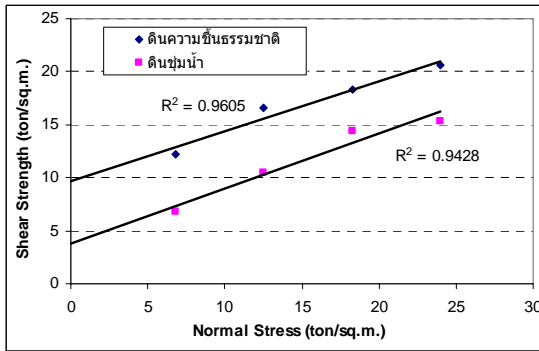
Soil	ค่ากำลังเรือนที่ลดลง (%)	
	ดินความชื้นธรรมชาติ	ดินชุ่มน้ำ
A	23.38	21.41
B	17.21	15.43
C	26.43	12.88
D	17.90	9.38
E	22.48	16.03



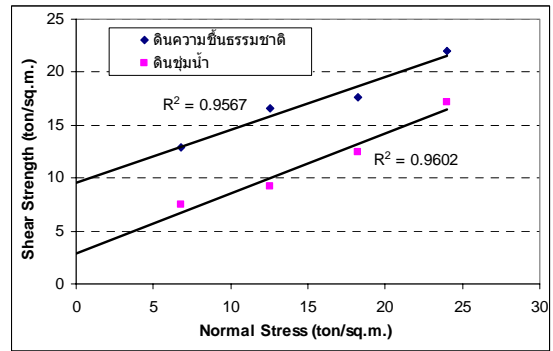
(ก) Soil A



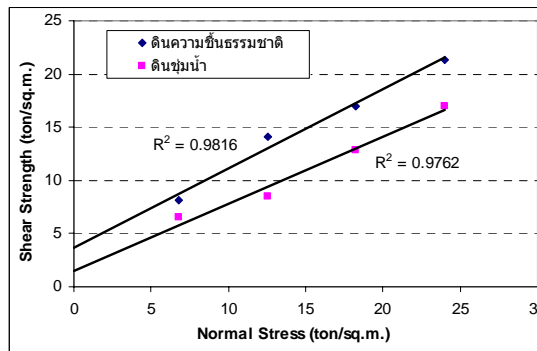
(ข) Soil B



(ค) Soil C

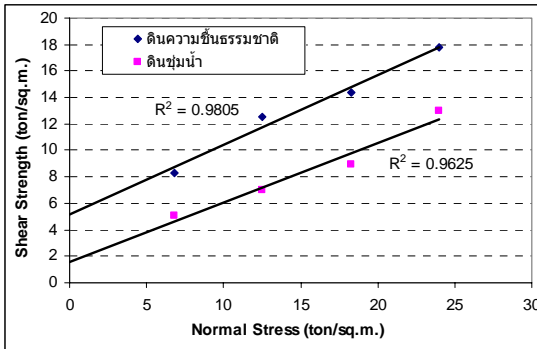


(ง) Soil D

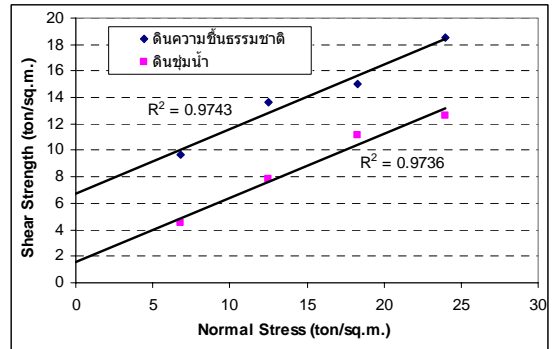


(จ) Soil E

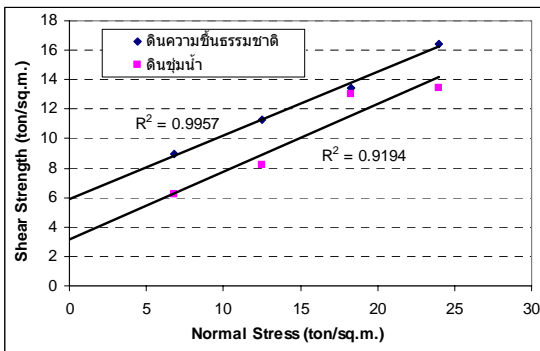
รูปที่ 3.27 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของค่ากำลังสูงสุดระหว่างดินความชื้นธรรมชาติกับดินชุ่มน้ำ



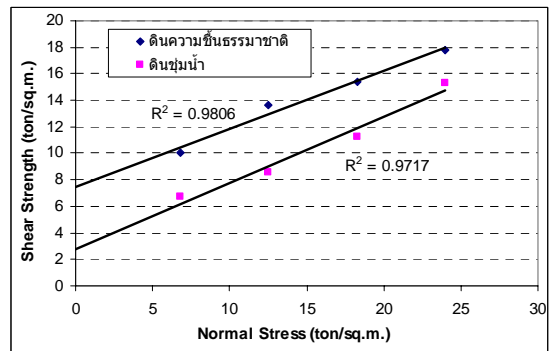
(ก) Soil A



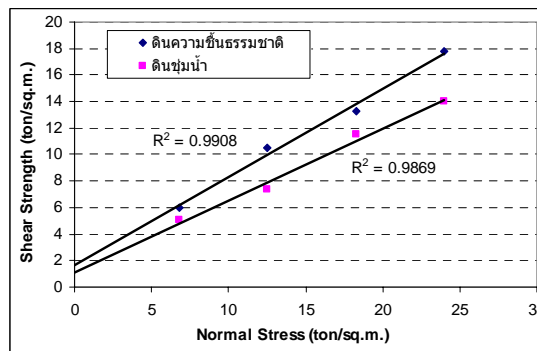
(ข) Soil B



(ค) Soil C



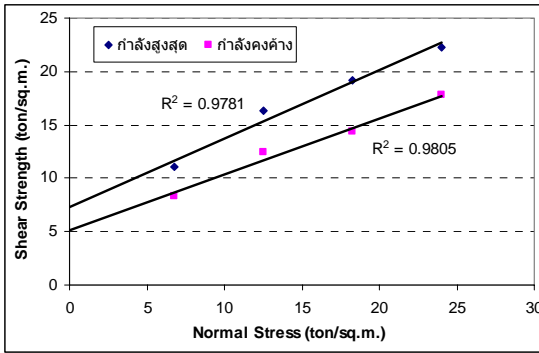
(ง) Soil D



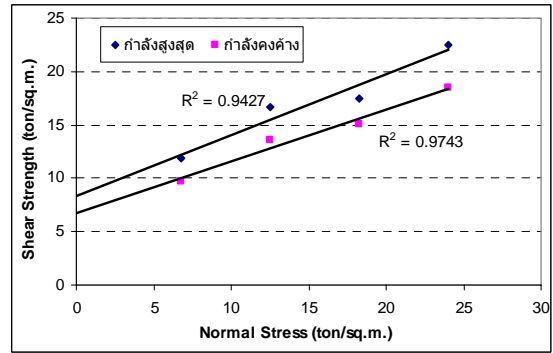
(จ) Soil E

รูปที่ 3.28 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของค่ากำลังคงค้างระหว่าง ดินความชื้นธรรมชาติกับดินชุ่มน้ำ

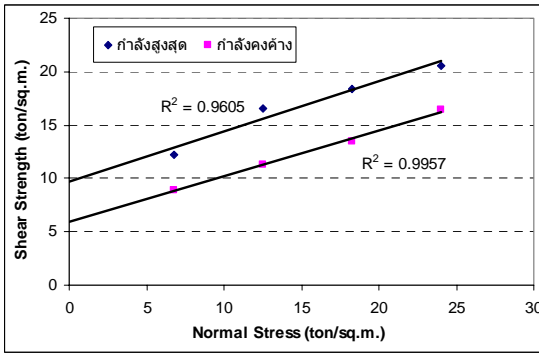




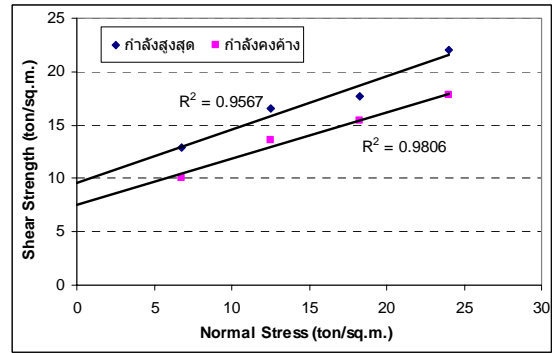
(ก) Soil A



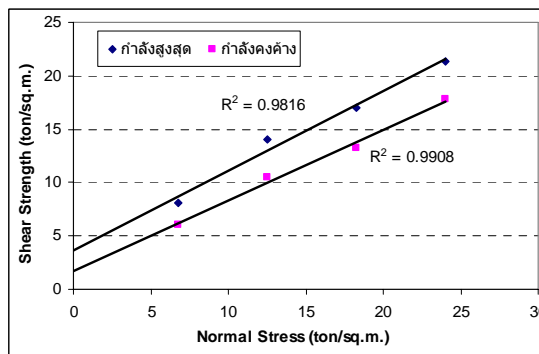
(ข) Soil B



(ค) Soil C

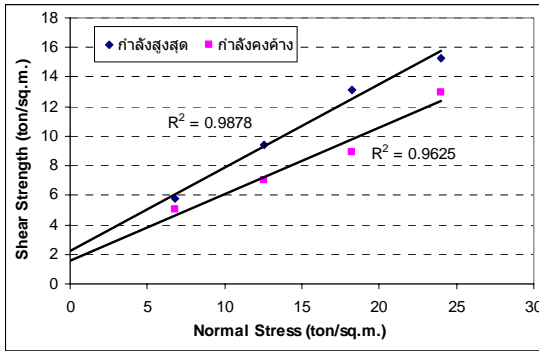


(ง) Soil D

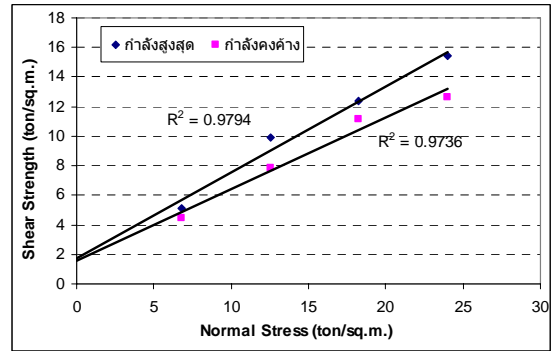


(จ) Soil E

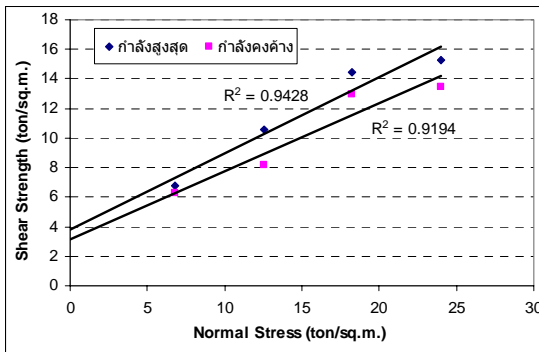
รูปที่ 3.29 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของกำลังเหนือนากำลังสูงสุด เป็นกำลังคงค้าง (ดินความชื้นธรรมชาติ)



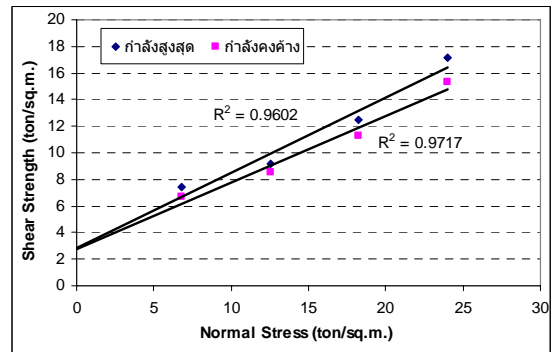
(ก) Soil A



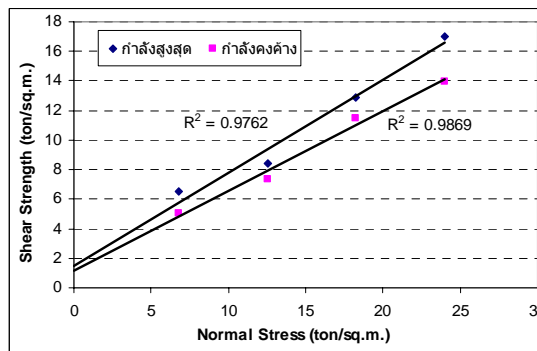
(ข) Soil B



(ค) Soil C



(ง) Soil D



(จ) Soil E

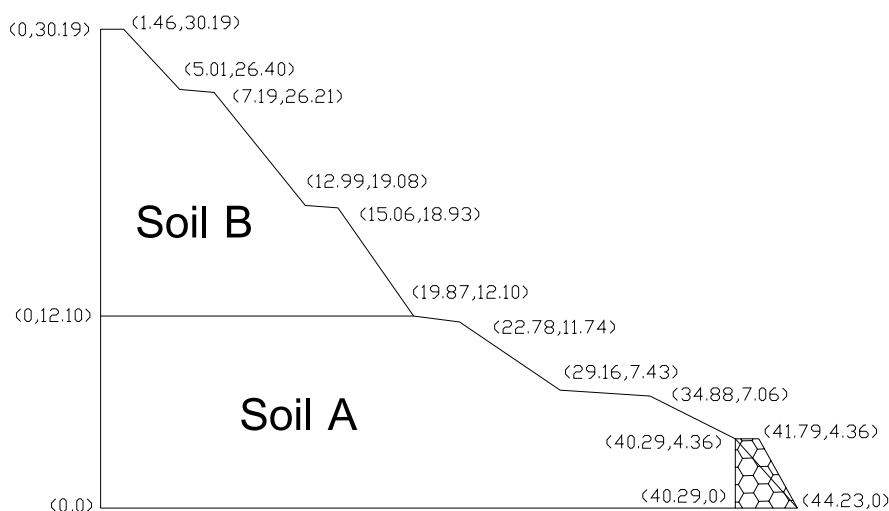
รูปที่ 3.30 เส้นขอบเขตการวิบัติการเปรียบเทียบการลดลงของกำลังเฉือนจากกำลังสูงสุด เป็นกำลังคงค้าง (ดินชุ่มน้ำ)

### 3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ได้แก่ รูปตัดลาดดิน ความดันน้ำในลาดดิน และสมบัติของดินซึ่งประกอบด้วยค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าตัวแปรกำลังของดินอันได้แก่ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) และค่าการยึดเกาะกัน (C) การวิเคราะห์จะแบ่งเป็นสองสถานะโดยกำหนดใช้ตัวแปรดังนี้ สถานะแรกเป็นตัวแทนลาดดินในสภาวะปกติ โดยใช้ค่ากำลังของดิน ความชื้นธรรมชาติ สมมติให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน และสถานะที่สองเป็นตัวแทนลาดดินในสภาวะวิกฤติ โดยใช้ค่ากำลังของดินชุ่มน้ำ สมมติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+300 ถึง 13+400

ข้อมูลรูปตัดลาดดินรวมกับสมบัติของดิน เป็นค่าพิกัด X, Y แสดงได้ดังรูปที่ 3.31 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงดังตารางที่ 3.10 และรูปการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KUslope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.31 รูปตัดที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม.13+300 ถึง 13+400

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังตารางที่ 3.9 ในสภาวะลาดดินปกติดินมีความชื้นธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยคืออยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพ ( $FS > 1.2$ ) แต่ใน

สภาวะลาดดินวิกฤติดินชุ่มน้ำ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย ( $FS < 1.2$ ) เพราะกำลังของดินลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงลอยตัว (Buoyancy force) หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ดินจึงรับกำลังได้น้อยลง ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยน้อยลง

หากพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากการทดสอบกำลังเฉือนแบบเร็ว ในดินชุ่มน้ำ ให้ค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์ นั้นเพราะว่าพฤติกรรมของลาดดินที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ ไม่สอดคล้องกับการทดสอบแบบเร็ว คือในลาดดินธรรมชาตินั้นไม่มีแรงภายนอกมากระทำเพิ่มเติม และรวดเร็วจนน้ำในโพรงดินระบายไม่ทัน และแนวการวิบัติก็เกิดเป็นลักษณะแนวเฉือนผ่านลาดดินเพียงเล็กน้อย (Local Failure) ดังรูปผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KUslope 2.0 แสดงในภาพผนวก ค

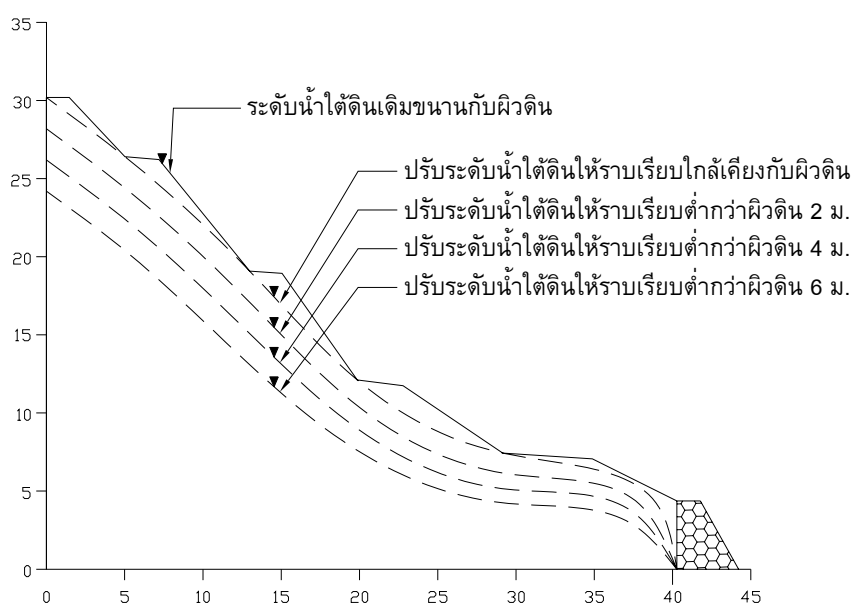
ตารางที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม.13+300 ถึง 13+400

ตัวแปรกำลังจากการทดสอบ	ตัวแปรกำลัง	สภาวะพิจารณา	ระดับน้ำใต้ดิน	FS
แบบเร็ว	กำลังสูงสุด	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.600
แบบเร็ว	กำลังสูงสุด	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0
แบบช้า	กำลังสูงสุด	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.764
แบบช้า	กำลังคงค้าง	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.178
แบบช้า	กำลังสูงสุด	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.585
แบบช้า	กำลังคงค้าง	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.510

หากพิจารณาความแตกต่างของค่าอัตราส่วนปลอดภัย ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังสูงสุดและค่ากำลังคงค้าง เห็นได้ว่าในกรณีสภาวะดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่างกันประมาณ 0.7 ถือว่ามีค่านัยสำคัญให้สมควรพิจารณาได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ค่าอัตราส่วนปลอดภัยกรณีดินความชื้นธรรมชาตินี้ ก็อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยอยู่ดี แต่ในกรณีสภาวะดินชุ่มน้ำ ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่างกันประมาณ 0.07 ถือว่ามีค่าน้อยมาก หากเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ยอมรับให้คือประมาณ 1.2 สาเหตุที่ในกรณีสภาวะดินความชื้นธรรมชาติ มีความต่างกันของค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่ากรณีสภาวะดินชุ่มน้ำ ถึงแม้ว่า

การลดลงของกำลังเนื่องมาจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้างในดินทั้งสองสภาวะจะใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินเป็นสำคัญ เพราะในการวิเคราะห์โดยสภาวะดินชุ่มน้ำจะให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน แต่ในการวิเคราะห์โดยสภาวะดินความชื้นธรรมชาติกำหนดค่าให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ระดับน้ำใต้ดินนี้มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัยคือ ดินส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ (Submerge) จะมีแรงลอยตัวทำให้น้ำหนักของมวลดินที่กระทำกับระนาบวิบัตินี้ลดลงกว่าในกรณีไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีผลต่อแรงของมวลดินที่กระทำให้เกิดการวิบัตินี้ลดลงด้วย การลดลงของกำลังเนื่องในกรณีมีระดับน้ำใต้ดินจึงมีผลกระทบน้อยกว่าในกรณีไม่มีระดับน้ำใต้ดิน

หากพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัยจากการทดสอบกำลังเฉือนแบบช้า ให้ค่าที่น้อยกว่า 1 ซึ่งทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติได้ แต่ความเป็นจริงในสนามยังไม่เกิดการวิบัติของลาดดินมาก่อนแต่อย่างใด จากการวิเคราะห์เป็นไปได้ว่า ระดับน้ำในลาดดินอาจไม่ได้สูงจนถึงผิวดิน เนื่องจากลาดดินมีลักษณะที่ชันมากและมีระบบระบายน้ำของลาดดิน ทั้งระบายน้ำตามชั้นบันได (Ditch lining) และช่องรวบรวมน้ำระบายลงสู่ด้านล่าง (Stepped Drain chute) มีส่วนช่วยไม่ให้น้ำฝนไหลซึมลงสู่ลาดดินทั้งหมดและไม่ทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นจนถึงผิวของลาดดินได้



รูปที่ 3.32 การปรับลดระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน

การปรับลดระดับน้ำใต้ดินใหม่แสดงดังรูปที่ 3.32 แล้วทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้กำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบระบายน้ำในสภาวะดินชุ่มน้ำ ผลแสดงดังตารางที่ 3.10 เห็นได้ว่าเมื่อปรับระดับน้ำให้ราบเรียบต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร ทำให้ได้ค่าอัตราส่วน

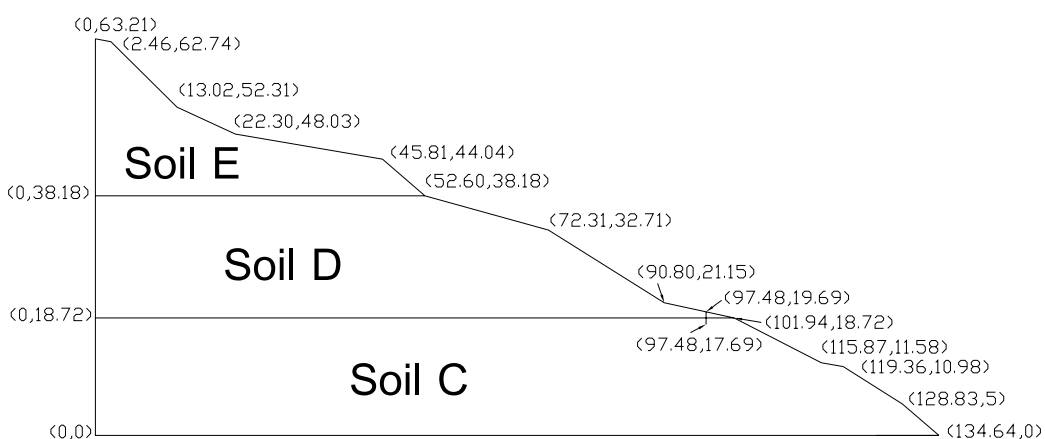
ปลอดภัยประมาณ 1 แสดงว่า ในขณะที่ฝนตกหนักระดับน้ำใต้ดินไม่เพิ่มขึ้นสูงกว่าระดับนี้ จึงทำให้ลาดดินคงตัวอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพไม่เกิดการวิบัติ

ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยการปรับระดับน้ำใต้ดิน

ลักษณะน้ำใต้ดิน	FS
ปรับระดับน้ำให้ราบเรียบ ใกล้เคียงผิวดิน	0.697
ปรับระดับน้ำให้ราบเรียบ ต่ำจากผิวดิน 2 เมตร	0.943
ปรับระดับน้ำให้ราบเรียบ ต่ำจากผิวดิน 4 เมตร	1.119
ปรับระดับน้ำให้ราบเรียบ ต่ำจากผิวดิน 6 เมตร	1.245

### 3.4.2 ลาดดินในช่วงกิโลเมตร 13+900 ถึง 14+050

ข้อมูลรูปตัดลาดดินร่วมกับสมบัติของดิน เป็นค่าพิกัด X, Y แสดงได้ดังรูปที่ 3.33 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงดังตารางที่ 3.12 และรูปการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KUSlope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.33 รูปตัดที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม.13+900 ถึง 14+050

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังตารางที่ 3.11 ในสภาวะลาดดินปกติดินความชื้นธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยคืออยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพ ( $FS > 1.2$ ) แต่ในสภาวะลาดดินวิกฤติดินชุ่มน้ำ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย ( $FS < 1.2$ ) เพราะกำลังของดินที่ลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงลอยตัว หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ดินจึงรับกำลังได้น้อยลง จึงเป็นสาเหตุให้ลาดดินเกิดการวิบัติในช่วงฤดูฝนดังเช่นการวิบัติในปีที่ผ่านมา และหากปีไหนที่เกิดฝนตกหนักปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มมากจนถึงสภาวะดังกล่าวก็มีโอกาสทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติอีกได้

ตารางที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินช่วง ก.ม.13+900 ถึง 14+050

รูปแบบการทดสอบ	ตัวแปรกำลัง	สภาวะพิจารณา	ระดับน้ำใต้ดิน	FS
แบบเร็ว	กำลังสูงสุด	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.009
แบบเร็ว	กำลังสูงสุด	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.031
แบบช้า	กำลังสูงสุด	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.312
แบบช้า	กำลังคงค้าง	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	1.832
แบบช้า	กำลังสูงสุด	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.935
แบบช้า	กำลังคงค้าง	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.812

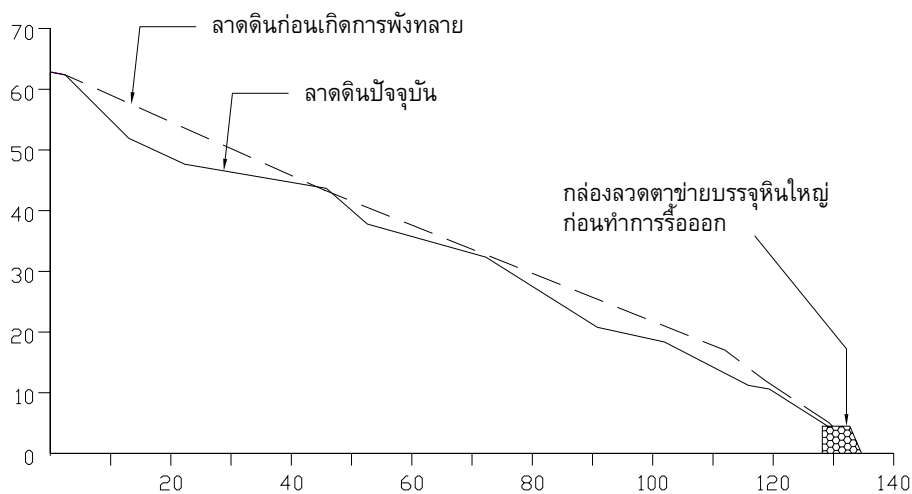
หากพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเมื่อใช้ตัวแปรจากการทดสอบกำลังเงื่อนไขแบบเร็วในดินชุ่มน้ำ ให้ค่าน้อยมากจนใกล้เป็นศูนย์ นั้นเพราะว่าพฤติกรรมของลาดดินที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ ไม่สอดคล้องกับการทดสอบแบบเร็ว คือในลาดดินธรรมชาตินั้นไม่มีแรงภายนอกมากระทำเพิ่มเติมและรวดเร็วจนน้ำในโพรงดินระบายไม่ทัน และแนวการวิบัติก็เกิดเป็นลักษณะแนวเฉือนผ่านลาดดินเพียงเล็กน้อย (Local Failure) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค

หากพิจารณาความแตกต่างของค่าอัตราส่วนปลอดภัย ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังสูงสุดและค่ากำลังคงค้าง เห็นได้ว่าในกรณีสภาวะดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่างกันประมาณ 0.5 ถือว่ามีค่านัยสำคัญให้สมควรพิจารณาได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนปลอดภัยกรณีดินความชื้นธรรมชาตินี้ ก็อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยอยู่ดี แต่ในกรณีสภาวะดินชุ่มน้ำ ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่างกันประมาณ 0.1 ถือว่ามี

ค่าน้อย หากเทียบกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ยอมรับคือประมาณ 1.2 สาเหตุที่ในกรณีสถานะดิน ความชื้นธรรมชาติ มีความต่างกันของค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่ากรณีสถานะดินชุ่มน้ำ สาเหตุแรกเนื่องมาจากการลดลงของกำลังจากค่ากำลังสูงสุดเหลือเป็นกำลังคงค้าง ซึ่งในดินความชื้นธรรมชาติจะลดลงมากกว่าในดินชุ่มน้ำ และอีกสาเหตุที่สำคัญก็คือผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดิน เพราะในการวิเคราะห์โดยสถานะดินชุ่มน้ำจะให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน แต่ในการวิเคราะห์โดยสถานะดินความชื้นธรรมชาติกำหนดให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ระดับน้ำใต้ดินนี้มีผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัยคือ ดินส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ (Submerge) จะมีแรงลอยตัวทำให้น้ำหนักของมวลดินที่กระทำกับระนาบวิบัติมีน้อยกว่าในกรณีไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีผลต่อแรงของมวลดินที่กระทำให้เกิดการวิบัติมีน้อยกว่า การลดลงของกำลังเฉือนในกรณีมีระดับน้ำใต้ดินจึงมีผลกระทบน้อยกว่าในกรณีไม่มีระดับน้ำใต้ดิน

### 3.4.3 การวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis)

การวิเคราะห์ย้อนกลับโดยการจำลองรูปตัดของลาดดินช่วงกม. 13+900 ถึง 14+050 ก่อนเกิดการวิบัติ โดยสังเกตจากลักษณะลาดดินบริเวณข้างเคียง รวมถึงร่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ก่อนทำการรื้อออกหลังการวิบัติ แสดงดังรูปที่ 3.34 วิธีการวิเคราะห์โดยการสมมติให้ลาดดินอยู่ในสภาวะวิกฤติ ใช้ตัวแปรกำลังคงค้างของดินชุ่มน้ำและให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินแสดงดังตารางที่ 3.12 และรูปการวิเคราะห์โดยโปรแกรม KUSlope 2.0 แสดงในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.34 รูปตัดลาดดินที่ใช้วิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ



ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าน้อยกว่าลาดดินในปัจจุบันหรือลาดดินที่เกิดการวิบัติแล้ว สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของลาดดินเป็นปัจจัยสำคัญ ในขณะที่เกิดการวิบัติ ลาดดินได้ปรับรูปทรงของตัวเองเพื่อให้คงตัวอยู่อย่างสมดุล นั่นคือส่วนของลาดดินที่เป็นโมเมนต์กระทำ (Driving Force) บางส่วนได้เลื่อนไถลงมากลับกลายเป็นส่วนของโมเมนต์ต้าน (Resisting Force) บ้างแล้ว

ตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ

รูปแบบการทดสอบ	ตัวแปรกำลัง	สถานะพิจารณา	ระดับน้ำใต้ดิน	FS	
				มีก่ล่งลวดตาข่าย	ไม่มีก่ล่งลวดตาข่าย
ระบายน้ำ	กำลังสูงสุด	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	2.152	2.151
ระบายน้ำ	กำลังคงค้าง	ดินความชื้นธรรมชาติ	ไม่มี	1.728	1.718
ระบายน้ำ	กำลังสูงสุด	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.867	0.852
ระบายน้ำ	กำลังคงค้าง	ดินชุ่มน้ำ	ที่ผิวดิน	0.762	0.743

หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพของก่ล่งลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ที่ใช้เพิ่มเสถียรภาพของลาดดินก่อนการวิบัติ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเปรียบเทียบกันระหว่างมีกับไม่มีก่ล่งลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยหรือเสถียรภาพลาดดินไม่ต่างกันมาก เพราะหากพิจารณาเปรียบเทียบจากขนาด เห็นได้ว่าก่ล่งลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่มีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของลาดดินและมวลดินที่พังทลาย และค่าสมบัติของก่ล่งลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ก็ไม่ได้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนมาก เพราะเป็นการนำหินใหญ่มาเรียงในก่ล่งลวดตาข่าย ไม่ได้มีวัสดุประสานเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันมาเกี่ยวข้อง

ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสภาวะลาดดินวิกฤติ ดินชุ่มน้ำและระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินก่อนเกิดการวิบัติน้อยกว่า 1 นั่นคือลาดดินสามารถเกิดการวิบัติได้จริง แสดงว่าค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความสมเหตุสมผล และหากลองเปลี่ยนแปลงลระดับน้ำใต้ดิน เพื่อหาว่าระดับน้ำใต้ดินที่ระดับเท่าไรที่ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติพอดีหรืออัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่

3.13 จากผลการวิเคราะห์เห็นได้ว่าที่ระดับน้ำใต้ดินลึกลงไปจากผิวดินประมาณ 6 เมตร จะให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยประมาณ 1 หรืออาจกล่าวได้ว่า ในขณะที่ลาดดินเกิดการวิบัติ ระดับน้ำใต้ดินน่าจะอยู่ที่ระดับดังกล่าว

ตารางที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับลาดดินก่อนเกิดการวิบัติและเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินวัดจากผิวดินลงไป (เมตร)	อัตราส่วนปลอดภัย (FS)
1	0.811
2	0.859
3	0.907
4	0.948
5	0.986
6	1.038

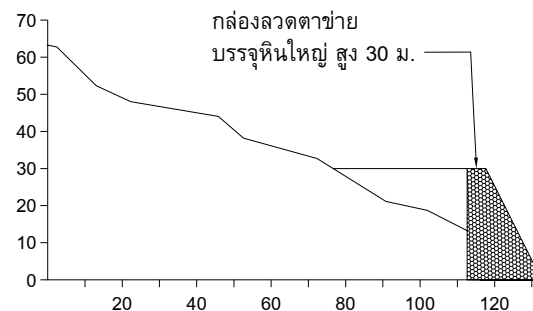
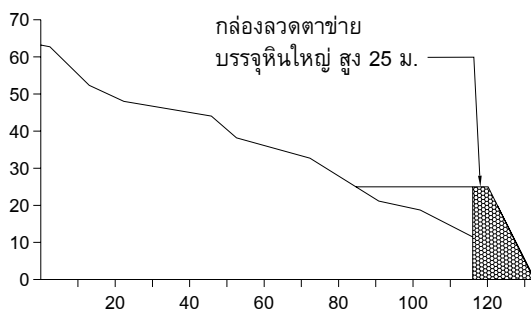
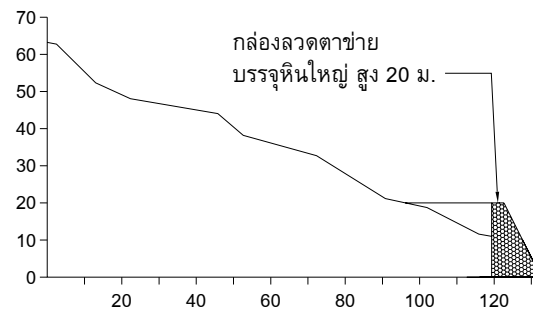
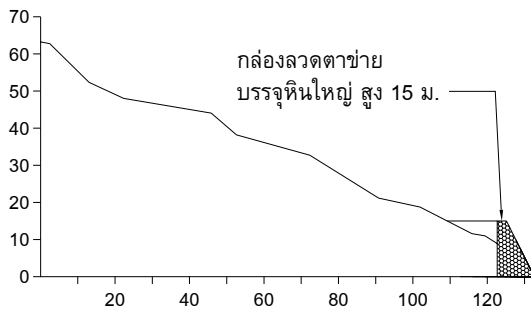
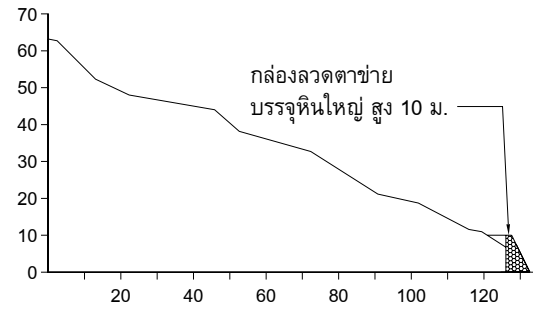
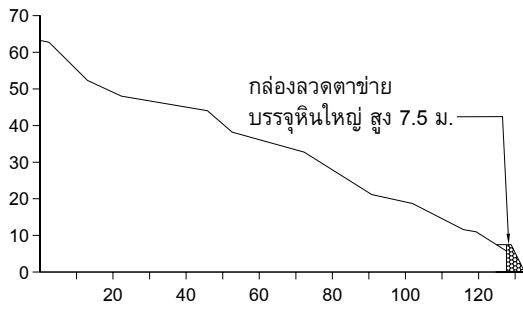
### 3.5 การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในช่วงกม. 13+900 ถึง 14+050 ลาดดินดังกล่าวมีโอกาสเกิดการวิบัติได้อีกหากเกิดสภาวะที่ฝนตกหนักทำให้ดินมีความชื้นและระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสร้างระบบป้องกันการวิบัติของลาดดิน (Slope Protection) ลาดดินดังกล่าวเป็นลาดดินที่เคยเกิดการวิบัติมาก่อน (Old Slope) ตัวแปรกำลังที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงใช้ตัวแปรที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำและเป็นค่ากำลังคงค้าง เพื่อให้การออกแบบการป้องกันการวิบัติของลาดดินสามารถรองรับสภาวะการณ์ต่างๆ ในวันข้างหน้าที่ไม่แน่นอนจากสภาวะภูมิอากาศเนื่องจากปริมาณฝนที่ตกในแต่ละปีที่ไม่เท่ากันได้ (Conservative)

#### 3.5.1 วิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่

การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดความสูงต่างๆกัน และขนาดความลึกของฐานเป็น 2 ใน 3 ของความสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.35 แล้วทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยสมมติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ผลแสดงดังตารางที่ 3.14

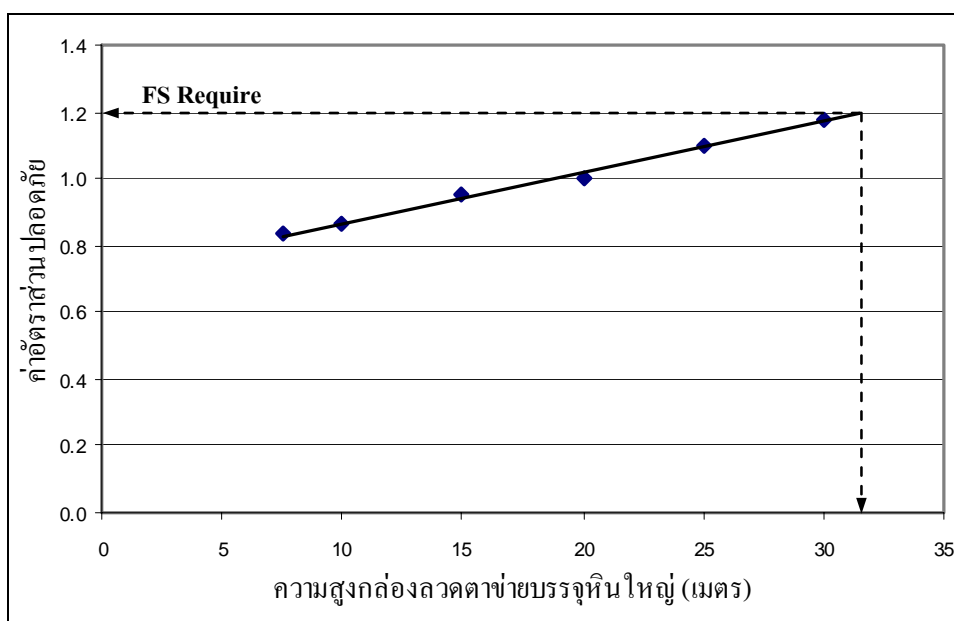
เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยสูงขึ้นเมื่อ ก่อสร้างลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่มีความสูงมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวใกล้เคียงเป็นเส้นตรง ดังแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.36 รูปการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม KUslope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.35 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยก่อสร้างลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดต่างๆกัน

ตารางที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่

ความสูงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (เมตร)	อัตราส่วนปลอดภัย (FS)
7.5	0.837
10	0.866
15	0.950
20	1.001
25	1.103
30	1.181



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่กับอัตราส่วนปลอดภัย

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม KUslope 2.0 ลักษณะแนวเงื่อนไขขั้วของลาดดินที่มีกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ความสูง 7.5 และ 10 เมตร จะตัดผ่านที่ฐานล่างของกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ และที่ความสูงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ 15, 20 และ 25 เมตร แนวเงื่อนไขขั้วจะตัดผ่านลาดดินก่อนถึงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ นั่นคือกล่องลวดตา

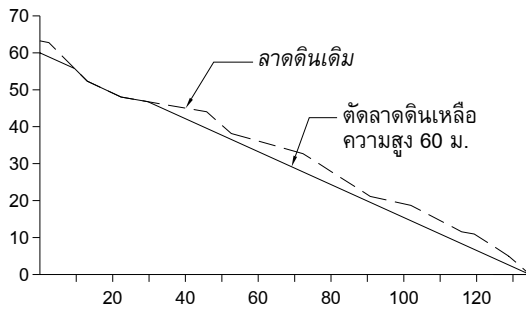
ข่ายบรรจุหินใหญ่ยิ่งสูงขึ้น แนวเดือนวิบัติก็สูงขึ้นตามลำดับ แต่ที่ความสูงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ 30 เมตร แนวเดือนวิบัติจะกลับมาตัดผ่านที่ฐานล่างของกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่อีกครั้ง

จากผลการวิเคราะห์การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ สรุปได้ว่า แม้ว่าได้ใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่สูงถึง 30 เมตร ก็ยังไม่ทำให้ลาดดินมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย ( $>1.2$ ) ดังนั้นการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีนี้จึงให้ผลไม่ดีเท่าที่ควรและไม่มีความเหมาะสมในแง่วิศวกรรม

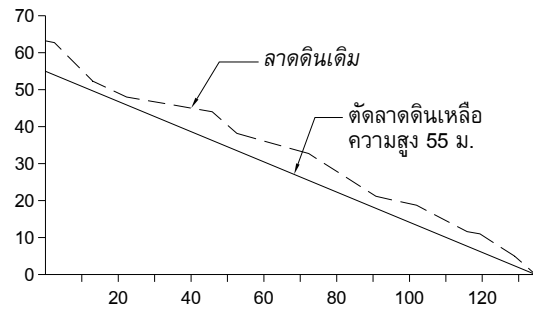
### 3.5.2 วิธีการปรับลดความสูงลาดดิน

การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการปรับลดความสูงหรือความชันลาดดินต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 3.37 แล้วทำการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยสมมติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.15 รุปรายละเอียดของการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม KUslope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ค

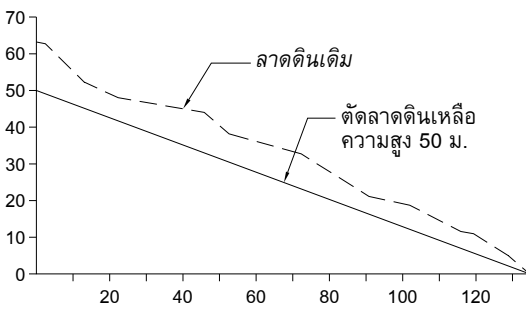
จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยสูงขึ้นตามลำดับเมื่อทำการปรับลดความชันหรือความสูงของลาดดินลงดังแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.38 และหากต้องการปรับลดความสูงของลาดดินให้มีค่าอัตราส่วนอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย ( $>1.2$ ) ต้องตัดลาดดินให้มีความสูงเหลือเพียง 44 เมตร ซึ่งเป็นการตัดลาดดินที่มากเกินไป เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ และทำให้เกิดปัญหาลาดดินข้างเคียงตามมาภายหลังได้ เนื่องจากลาดดินเป็นแนวเทือกเขาทอดยาวต่อกันขนานกับถนน



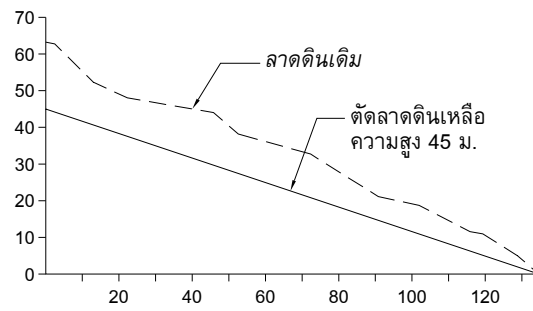
ก) ตัดลาดดินเหลือความสูง 60 เมตร



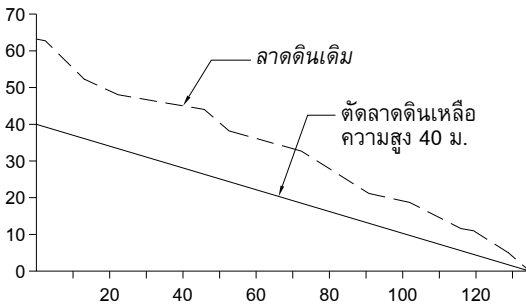
ข) ตัดลาดดินเหลือความสูง 55 เมตร



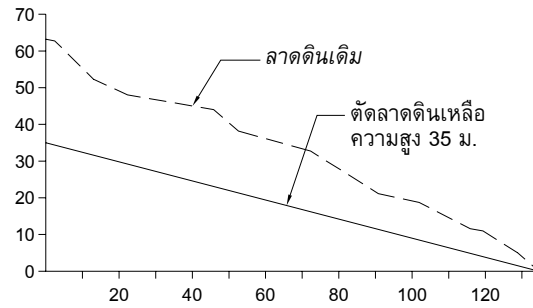
ค) ตัดลาดดินเหลือความสูง 50 เมตร



ง) ตัดลาดดินเหลือความสูง 45 เมตร



จ) ตัดลาดดินเหลือความสูง 40 เมตร

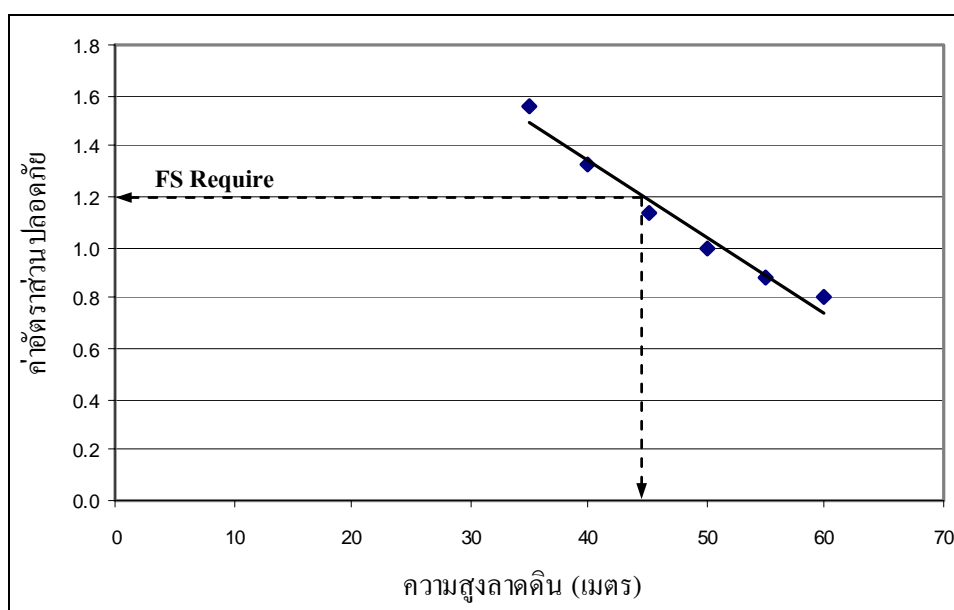


ฉ) ตัดลาดดินเหลือความสูง 35 เมตร

รูปที่ 3.37 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดิน โดยวิธีการปรับลดความสูงลาดดินต่างๆกัน

ตารางที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการปรับลดความชัน

ความสูงลาดดิน (เมตร)	อัตราส่วนปลอดภัย (FS)
60	0.808
55	0.884
50	0.996
45	1.133
40	1.331
35	1.563

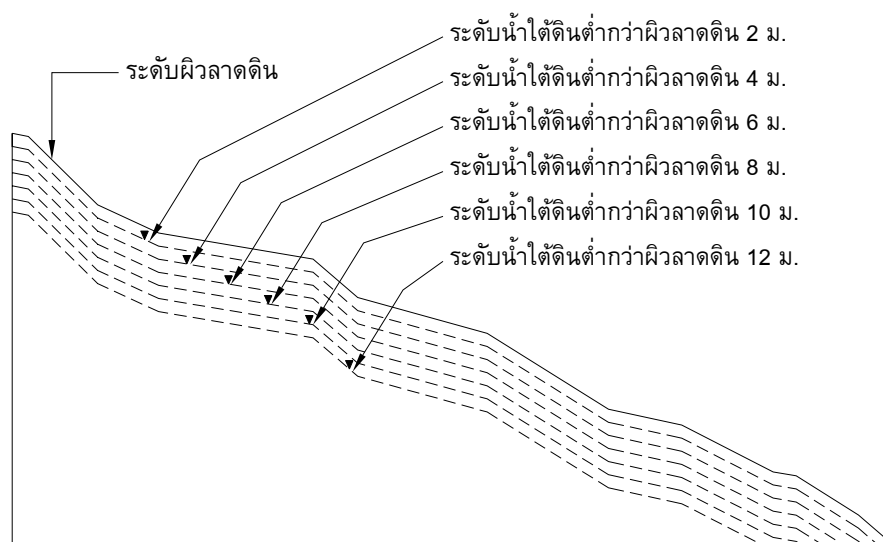


รูปที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงลาดดินกับอัตราส่วนปลอดภัย

### 3.5.3 วิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยวิธีต่างๆจะสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการลดระดับน้ำใต้ดินเป็นอีกวิธีหนึ่ง โดยสมมุติให้มีการออกแบบระบบระบายน้ำเพื่อควบคุมระดับน้ำใต้ดินไม่ให้สูงกว่าระดับที่กำหนด

วัดจากผิวลาดดินลงไปเป็นระยะต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.39 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ผลปรากฏดังตารางที่ 3.16 รูปร่างละเอียดของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยโปรแกรม KUslope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ก เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อระดับน้ำใต้ดินลดลง ดังแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.40 และค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย ( $>1.2$ ) เมื่อระดับน้ำใต้ดินต่ำจากผิวดินประมาณ 8.8 เมตร

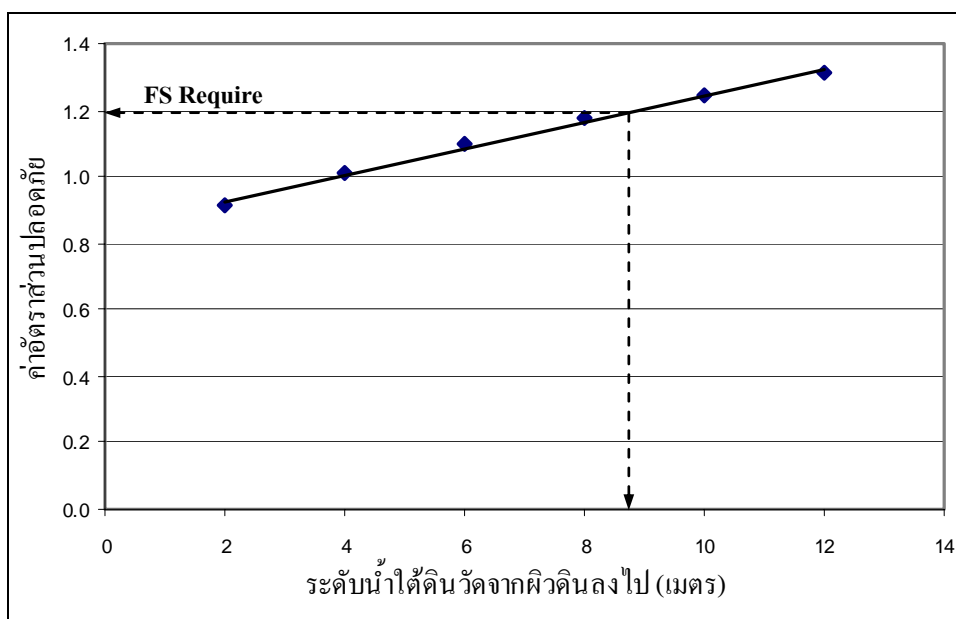


รูปที่ 3.39 การปรับปรุงเสถียรภาพ โดยการควบคุมระดับน้ำใต้ดินที่ระดับต่างๆกัน

ตารางที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินวัดจากผิวดินลงไป (เมตร)	อัตราส่วนปลอดภัย (FS)
2	0.917
4	1.010
6	1.095
8	1.174
10	1.245
12	1.313



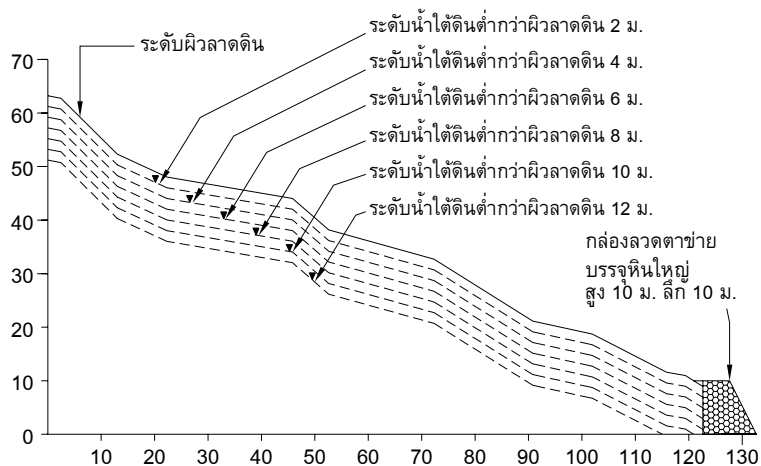


รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำใต้ดินกับอัตราส่วนปลอดภัย

### 3.5.4 วิธีการใช้กล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่และควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

การดำเนินการ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่มีกล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ความสูง 5 เมตร ที่ความลึก 3.5 และ 5 เมตร และความสูง 10 เมตร ที่ความลึก 7 และ 10 เมตร และกำหนดให้ควบคุมระดับน้ำใต้ดินที่ระดับต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.41 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.17 รูปการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม KUSlope 2.0 แสดงไว้ในภาคผนวก ค จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เห็นได้ว่ากล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ที่ขนาดต่างกัน มีผลให้อัตราส่วนปลอดภัยเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.42 แต่ปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราส่วนปลอดภัยเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนคือ การลดระดับน้ำใต้ดิน คือเมื่อลดระดับน้ำใต้ดินให้ต่ำกว่าระดับผิวลาดดินลงเรื่อยๆ อัตราส่วนปลอดภัยก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.43 โดยเมื่อใช้กล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาด สูง 5 เมตร ลึก 3.5 เมตร, สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร, สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร และ สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร ค่าระดับน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่าผิวลาดดิน ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย (>1.2) คือ 9.1, 8.7, 7.8 และ 7.3 เมตร ตามลำดับ



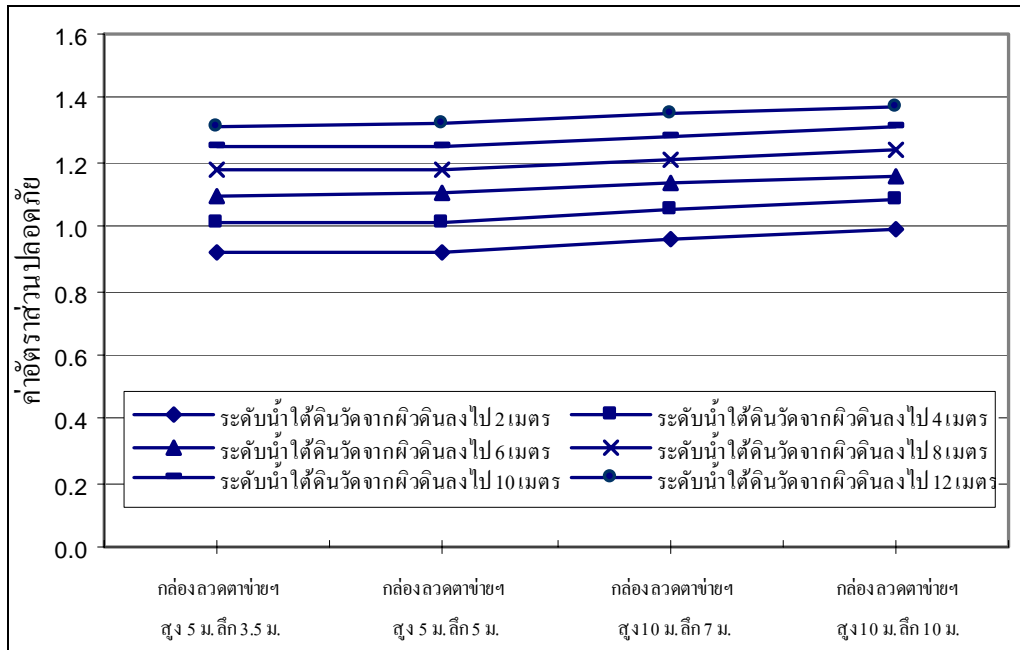


ง) กล่องลวดตาข่ายสูง 10 ม. ลึก 10 ม. และระดับน้ำใต้ดินต่างๆกัน

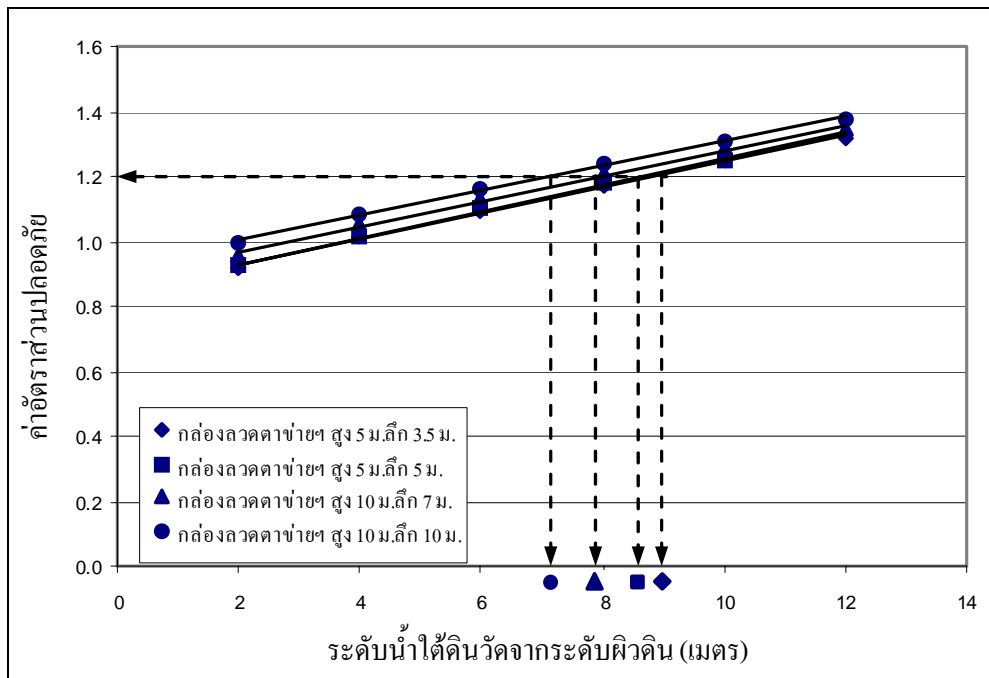
รูปที่ 3.41 การปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินโดยการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่และควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 3.17 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่และควบคุมระดับน้ำใต้ดิน

ระดับน้ำใต้ดินวัดจากผิวดินลงไป (เมตร)	อัตราส่วนปลอดภัย (FS)			
	กล่องลวดตาข่ายสูง 5 ม. ลึก 3.5 ม.	กล่องลวดตาข่ายสูง 5 ม. ลึก 5 ม.	กล่องลวดตาข่ายสูง 10 ม. ลึก 7 ม.	กล่องลวดตาข่ายสูง 10 ม. ลึก 10
2	0.916	0.923	0.960	0.992
4	1.010	1.016	1.051	1.081
6	1.094	1.103	1.135	1.161
8	1.172	1.181	1.212	1.236
10	1.247	1.251	1.285	1.307
12	1.313	1.319	1.350	1.373



รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดค่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่กับค่าอัตราส่วนปลดปล่อยเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่างๆ กัน



รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำใต้ดินกับค่าอัตราส่วนปลดปล่อยเมื่อใช้ค่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดต่างๆ กัน

## บทที่ 4

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1.1 ผลการสำรวจการวิบัติของลาดดินในช่วง กม. 13+900 ถึง 14+050 พบว่าเป็นการวิบัติแบบลึก (Deep seat) ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชิ้นส่วน (Multiple rotational slides) ในกรณีนี้เกิดเป็น 3 ชิ้นส่วนเลื่อนไถลแบบหมุนไปด้านหลัง (Three back-tilted rotational slip segments) เป็นการวิบัติแบบก้าวหน้า (Progressive failure) โดยเกิดการเลื่อนไถลในชิ้นส่วนหน้าสุดของลาดดินก่อน แล้วจึงเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลในชิ้นส่วนที่สอง และชิ้นส่วนที่สามตามมา

4.1.2 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการวิบัติ แบ่งได้เป็นสองสาเหตุ สาเหตุแรกเกิดจากการตัดลาดดินบริเวณฐาน (Toe) ของลาดดินธรรมชาติออก เนื่องจากมีการก่อสร้างถนนจึงจำเป็นต้องตัดลาดดินดังกล่าวให้เป็นพื้นที่ราบ ทำให้เกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back slope) ที่ชันกว่าลาดดินเดิม ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินลดลงระดับหนึ่ง แต่ก็ยังมีเสถียรภาพสามารถทรงตัวอยู่ได้ ในขณะที่ทำการก่อสร้างและหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ

สาเหตุที่สอง เกิดจากสภาวะที่ฝนตกเป็นสำคัญ ฝนที่ตกลงมาทำให้ปริมาณน้ำในลาดดินเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าเสถียรภาพของลาดดินสองส่วน คือ ส่วนแรกทำให้กำลังของดินลดลง เพราะปริมาณน้ำจะเข้าไปทำลายแรงดูดระหว่างเม็ดดิน (Suction) ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้กำลังเหนือนของดินลดลง ส่วนที่สอง น้ำที่ไหลซึมลงในลาดดินทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น มวลดินที่จมอยู่ที่ระดับน้ำเกิดแรงลอยตัว ส่งผลให้หน่วยแรงตั้งฉากในดินลดลง ทำให้กำลังเหนือนของดินลดลง ปริมาณน้ำในลาดดินขณะฝนกำลังตก จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในขณะนั้น ส่งผลต่อกำลังของดินก็ลดลงเรื่อยๆ เช่นกัน ตามความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวในข้างต้น เช่นเดียวกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยหรือเสถียรภาพของลาดดิน ก็ลดลงตามกำลังของดินที่ลดลงด้วย หากปริมาณน้ำฝนในช่วงนั้นทำให้เกิดปริมาณน้ำในลาดดินมากพอ ทำให้น้ำหนักของมวลดินเพิ่มขึ้นและกำลังของดินลดลงจนมวลดินไม่อาจต้านทานแรงที่กระทำให้เกิดการวิบัติ (Driving force) ก็จะเกิดการวิบัติของลาดดินขึ้นได้ ดังเช่นการวิบัติของลาดดินในช่วง กม. 13+900 ถึง 14+050 ในปีก่อนๆที่ผ่านมา

4.1.3 ผลการศึกษาการลดลงของกำลังเฉือน พบว่าตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ เมื่อนำตัวอย่างดินมาเพิ่มความชื้นมากที่สุด ค่ากำลังเฉือนของดินลดลง โดยเมื่อนำค่ากำลังสูงสุดมา เทียบกัน ค่ากำลังเฉือนลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 26 - 39 % และเมื่อนำค่ากำลังคงค้างมาเทียบกัน ค่า กำลังเฉือนลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 19 - 38 % นั้นแสดงว่าเมื่อลาดดินมีความชื้นมากที่สุดเนื่องมาจาก ฝนตกหนัก ทำให้ค่าเสถียรภาพของดินลดลงตามกำลังเฉือนของดินที่ลดลง จึงเป็นสาเหตุที่ว่า การ วิกฤติของลาดดินมักเกิดในช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกหนัก การลดลงของกำลังเฉือนของดินดังกล่าวเป็น การลดลงแบบชั่วคราว คือเมื่อฝนหยุดตกปริมาณน้ำในมวลดินได้ลดลงแล้ว กลายเป็นดินมีความชื้น น้อยหรือดินไม่อิ่มตัว มีแรงคูดเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่ากำลังของดินก็จะกลับมาเพิ่มขึ้นได้อีก เสถียรภาพ ของลาดดินจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การลดลงของค่ากำลังเฉือนของดินจากกำลังสูงสุดเป็นกำลังคงค้าง พบว่าใน ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติและตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่ากำลังเฉือนลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 17 - 26 % และ 9 - 21 % ตามลำดับ การลดลงของกำลังเฉือนของดินในลักษณะนี้ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ ค่าเสถียรภาพของลาดดินลดลง แต่เป็นการลดลงอย่างถาวร เพราะว่ามีมวลดินใน โชนแนวเฉือนวิกฤติ ถูกรบกวน เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ ขนานกับแนวเฉือนวิกฤติ ทำให้มวลดินในแนวดังกล่าวรับ กำลังได้น้อยลง สาเหตุดังกล่าวทำให้ลาดดินที่เคยเกิดการวิกฤติมีโอกาสเกิดการวิกฤติครั้งใหม่ได้ง่าย กว่าเดิม

4.1.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในช่วงกม. 13+300 ถึง 13+400 ในสภาวะ ลาดดินปกติ ตัวแปรกำลังดินความชื้นธรรมชาติและไม่มีระดับน้ำใต้ดิน พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัย อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย และในสภาวะลาดดินวิกฤติ ตัวแปรกำลังดินชุ่มน้ำ ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย แต่ในสภาพลาดดินจริงก็ไม่เกิดการวิกฤติแต่ อย่างไม่ใด นั้นเป็นเพราะว่าระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน ไม่อาจสูงจนถึงผิวลาดดินได้จริง ผลการปรับลด ระดับน้ำใหม่ในการวิเคราะห์พบว่า กรณีที่ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับหนึ่งคือ เมื่อระดับน้ำ ใต้ดินต่ำกว่าผิวลาดดินประมาณ 4 เมตร ซึ่งมีความเป็นไปได้ เพราะในลาดดินดังกล่าวมีการก่อสร้าง ระบบระบายน้ำไว้และลักษณะของลาดดินที่มีความลาดชันมาก

4.1.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในช่วง กม. 13+900 ถึง 14+050 ในสภาวะ ลาดดินปกติ ตัวแปรกำลังของดินความชื้นธรรมชาติและไม่มีระดับน้ำใต้ดิน พบว่าค่าอัตราส่วน ปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย และในสภาวะลาดดินวิกฤติ ตัวแปรกำลังดินชุ่มน้ำ ระดับน้ำใต้ดินอยู่ ที่ผิวดิน พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย นั้นแสดงว่า ลาดดินในวันข้างหน้าอาจ เกิดการวิกฤติของลาดดินได้อีก หากลาดดินอยู่ในสภาวะวิกฤติดังกล่าว

4.1.6 ผลการวิเคราะห์ห้วยอนกลับลาดดินในช่วงกม.13+900 ถึง 14+050 ก่อนเกิดการวิบัติ โดยใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้างของตัวอย่างดินชุ่มน้ำ และกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง นั่นคือลาดดินสามารถเกิดการวิบัติได้จริง และผลจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในการวิเคราะห์เสถียรภาพพบว่า ที่ระดับน้ำใต้ดินลึกลงไปจากผิวดิน ประมาณ 6 เมตร ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยประมาณหนึ่ง แสดงว่าในขณะที่ลาดดินเกิดการวิบัติ ระดับน้ำใต้ดินน่าจะอยู่ที่ระดับดังกล่าว

4.1.7 ผลการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินพบว่า วิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ต้องใช้ความสูงกล่องลวดตาข่าย ถึง 32 เมตร ถึงจะให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีการปรับลดความสูงของลาดดิน หากต้องการให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย ต้องทำการตัดลาดดินให้มีความสูงเหลือ ประมาณ 44 เมตร ซึ่งเป็นการตัดลาดดินที่มากเกินไป อันเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ และทำให้เกิดปัญหาลาดดินข้างเคียงตามมาภายหลังอีกได้ เนื่องจากลาดดินเป็นแนวเทือกเขาทอดยาวต่อกันขนานกับถนน

การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิผลมากที่สุด โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำจากผิวดินประมาณ 9 เมตร

การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ รวมกับการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน เห็นได้ชัดว่าการเพิ่มขนาดของกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ไม่มีผลกับเสถียรภาพของลาดดินเท่าที่ควร ในกรณีนี้เหมาะสำหรับเป็นส่วนป้องกันการกัดเซาะเนื่องมาจากน้ำที่ไหลบนผิวลาดดินมากกว่า เพราะปัญหาสำคัญของเสถียรภาพลาดดินก็เนื่องมาจากการกัดเซาะบริเวณตีนหรือฐานลาดดินเช่นกัน ผลการศึกษาค้นคว้าพิจารณาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยรวมได้ว่า ควรใช้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ขนาดสูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร และควบคุมระดับน้ำใต้ดินให้ไม่เกินกว่า 9 เมตร วัดจากผิวดินลงไป

## 4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ชุดเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพควรพัฒนาออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่านี้ เพราะขนาดของเม็ดดินภูเขาที่เกิดการการผุของหินจะมีขนาดเม็ดดินที่ใหญ่ ทำให้ได้ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของมวลดินได้ดีกว่า แต่ก็จะมีปัญหาตามมาหลายอย่างคือ ขนาดของกล่องเนื้อที่ทำการ

ทดสอบการไหลตรงก็ต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ส่งผลต่อกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนต้องมีกำลังมากตามไปด้วยเช่นกัน รวมถึงการขนส่งตัวอย่าง การตัดแต่งตัวอย่าง ทำได้ยากขึ้น และที่สำคัญต้องคำนึงถึงขนาดของกระบอก PVC ที่ใช้ร่วมกับกระบอกเก็บตัวอย่างซึ่งต้องใช้ปริมาณตามจำนวนตัวอย่างที่เก็บ ให้มีขนาดที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดอีกด้วย

4.2.2 การสำรวจระดับน้ำใต้ดินควรใช้วิธีการขุดบ่อสังเกตการณ์ แต่ในลักษณะลาดดินที่มีขนาดใหญ่ และมีลักษณะร่องรอยการกัดก่อนหน้า ก็มีแนวเหนือระดับและรอยแตกของผิวดินแล้ว การขุดบ่อสังเกตการณ์ก็ต้องมีจำนวนมากพอ เพราะน้ำจะไหลซึมเข้าหรือออกตามรอยแตกหรือแนวเหนือระดับต่างๆ ทำให้ได้ค่าระดับน้ำที่ไม่ถูกต้องได้ อีกทั้งเวลาในการตรวจวัดบ่อสังเกตการณ์ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะบางทีฝนหยุดตกไปแล้ว หรือฝนในบริเวณนั้นมีปริมาณไม่มากแต่ก็มีระดับน้ำใต้ดินที่สูงได้ เป็นเพราะว่าสถานะผิวก่อนหน้า และปริมาณน้ำฝนที่ตกบริเวณเหนือลาดดินขึ้นไปแต่น้ำใต้ดินไหลลงมาในลาดดินดังกล่าว ทำให้ระดับน้ำใต้ดินในบริเวณนั้นสูงขึ้นโดยอาจไม่มีฝนตกในขณะนั้นก็ได้ การตรวจวัดโดยใช้วิธีการขุดบ่อสังเกตการณ์ในกรณีนี้จึงอาจเกิดการผิดพลาดได้

4.2.3 การทดสอบการไหลโดยตรง ควรมีอุปกรณ์ประเภทตัวช่วยบันทึกข้อมูล (Data logger) ช่วยในการเก็บบันทึกข้อมูล เนื่องจากการทดสอบใช้ระยะเวลาานาน

4.2.4 ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินและข้อมูลปริมาณน้ำฝนในระยะยาวรวมทั้งการขุดบ่อสังเกตการณ์เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินได้ด้วย เพราะเป็นประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของลาดดินต่อไป

4.2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในสถานะที่มีการไหลซึมของน้ำฝน หากต้องการผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดและแม่นยำขึ้น ควรพิจารณาผลของแรงดันไหลซึมของน้ำ (Seepage Force) และศึกษาถึงความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการไหลซึมของน้ำฝนด้วย

4.2.6 นอกเหนือจากวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีต่างๆแล้ว การป้องกันผิวดินลาดดินจากการกัดเซาะของน้ำฝนเช่น การปลูกพืชคลุมดิน หรือการจัดระบบรางระบายน้ำผิวดิน ก็มีส่วนสำคัญกับเสถียรภาพลาดดินด้วย เพราะลาดดินดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ฝนตกชุก ผลจากการกัดเซาะเกิดเป็นร่องน้ำริน (Rill erosion) ทำให้น้ำไหลซึมลงสู่ลาดดินได้ง่ายขึ้น

4.2.7 การพิจารณาเลือกใช้วิธีการใดๆ ในการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินจะต้องมีการศึกษาวิเคราะห์ทั้งข้อมูลเทคนิคทางวิศวกรรม ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมต่างๆ รวมถึงความเห็นของประชาชนในพื้นที่ด้วย ว่าแนวทางเลือกวิธีใดจะสามารถทำให้ลาดดินเกิดเสถียรภาพ คุ้มค่า ถูกต้องตามหลักวิชาการ เหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากที่สุด



## บรรณานุกรม

- ฐานข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี (2530)
- นงลักษณ์ ไทรเจียมอารีย์ (2547). เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- บรรพต กุลสุวรรณ (2548). การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2541). วิศวกรรมปฏิพิและฐานราก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร
- ยงยุทธ แต่ศิริ (2544). ปัญหาน้ำใต้ดินในลาดคันทางและลาดธรรมชาติ. การสัมมนาเทคนิควิธีการแก้ไขป้องกันการชะล้างพังทลายและการเคลื่อนตัวเชิงลาด. 14 กันยายน 2544. โรงแรมดิเอ็มเพรส กรุงเทพมหานคร
- รัฐธรรม อิศโรพาร (2547). การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Generalized Limit Equilibrium. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วรรณิ สุขสาตร (2543). ระบบผู้เชี่ยวชาญเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วรากร ไม้เรียง (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
- วินิต ช่อวิเชียร (2547). ปฏิพิกลศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา (2540). ปฏิพิกลศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต. จังหวัดปทุมธานี
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฏิพิและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2546). ข้อเสนองานวิจัยโครงการพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินถล่มที่เกิดจากฝนตกหนัก เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- สถาพร คูวิจิตรจารุ (2541). ทดลองปฏิพิกลศาสตร์. สำนักพิมพ์ไลบรารี่ นาย. กรุงเทพมหานคร

- สันติ ไทยอินวงษ์ (2550). การวิเคราะห์โอกาสเกิดแผ่นดินถล่มเนื่องจากปัจจัยที่ไม่คงที่ในจังหวัดภูเก็ต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 – 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ และ วรวัชร ตอวิวัฒน์ (2550). การวิเคราะห์ค่า API วิกฤติเพื่อใช้ในการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 – 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, วรวัชร ตอวิวัฒน์ และ บรรพต กุลสุวรรณ (2550). การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 – 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- สุรพล สงวนแก้ว (2544). ปัญหาการพังทลายเนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยา. การสัมมนาเทคนิควิธีการแก้ไขป้องกันการชะล้างพังทลายและการเคลื่อนตัวเชิงลาด. 14 กันยายน 2544. โรงแรมดิเอ็มเพรส กรุงเทพมหานคร
- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma S. and Boyce, G.M. (2001). Slope Stability and Stabilization Method. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Aitchison, G.D. (1965). Soil Properties Shear Strength and Consolidation. In Proc. 6 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 3. pp. 318 – 321.
- Blong, R.J. (1973). A Numerical Classification of Selected Landslides of the Debris Slide Avalanche-Flow Type. Engineering Geology 7.
- Brain, D. and Dobroslave, Z. (2004). Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 130. No. 4. pp. 362 – 372.
- Bromhead, E.N. (1992). The Stability of Slope. An Imprint of Chapman & Hall. New York.
- Davison, L. (2006). Environmental Geology GEOL 406/506. Available source [http://wapi.isu.edu/EnvGeo/EG4\\_mass\\_wasting/landslide2.html](http://wapi.isu.edu/EnvGeo/EG4_mass_wasting/landslide2.html) as retrieved on 18 June 2006.
- Endicott, L.J. (1982). Analysis of Piezometer data and Rainfall Records to Determine Groundwater Conditions. Hong Kong Engineer. pp. 53 -56.
- Fell, R. (1994). Stabilization of Soil and Rock Slopes. North East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows. 11 – 16 July 1994. Seoul Korea.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Son. New York 515 p.

- Fukuoka M. (1979). Causes of Landslides – Earthquakes, Rains and Pore Water Pressures. In Proc. of the sixth Asian regional conference on Soil Mech. And Foundation Engineering Vol.1. Toppan Printing Co. Singapore. pp. 221 – 224.
- Gavin, K. and Xue, J. (2007). A Simple Method to Analyze Infiltration into Unsaturated Soil Slopes. Article in press [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com). Computer and Geotechnics.
- Ho, D.Y.F. and Fredlund, D.G. (1982). Increase in Strength Due to Suction for Two Hong Kong Soils. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils. Honolulu. Hawaii. pp. 263 - 295.
- Hunt, R.E. (1984). Geotechnical Engineering Investigation Manual. McGraw - Hill Book Co. New York. pp. 665 – 765.
- Janbu (1983). Slope Stability Evaluation in Engineering practice. Proceeding 7<sup>th</sup> International Symposium on Landslides. Trondheim. pp. 17 - 34.
- Jenssen, D.J. and Dempsey, B.J. (1980). Soil - Moisture Properties of Subgrade Soils. Presented at the 60<sup>th</sup> Annu. Transportation Res. Board Meeting. Washington. DC.
- Kasim, F., Fredlund, D.G. and Gen, J.K.-M. (1998). The Effect of Steady State Rainfall on Long Term Matric Suction Conditions in Soil. Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong. Hong Kong. 2 May 1997. pp. 75 – 82.
- Koo, Y.C. & Lumb, P. (1981). Correlation Between Rainfall Intensities and Groundwater Levels in the Natural Slopes of Hong Kong. Hong Kong Engineer. pp. 49 - 52.
- Krahn, J. and Fredlund D.G. (1972). On Total Metric and Osmotic Suction. J.Soil Sci. Vol. 114. No. 5. pp 339 - 348.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanics. John Wiley & Sons. New York.
- Lumb, P. (1962). Effects of Rainstorms on Slope Stability. Proceedings of the Symposium on Hong Kong Soils. Hong Kong. pp. 73 - 87.
- Olson, R.E. and Langfelder, L.J. (1965). Pore – Water Pressure in Unsaturated Soils. J.Soil Mech. Found. Div. Proc. Amer.Soc.Civil Eng. Vol. 91 SM4.
- 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. Vol. 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.
- Skempton, A.W. and Hutchinson, J.N.J. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the Art Volume. Mexico City. pp. 291 - 340.
- Soralump, S. and Kulsuwan, B. (2006). Landslide Risk Prioritization of Tsunami Affected Area in Thailand. International Symposium on Environmental Engineering and 5th Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering. Philippines.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslide. Application of Geology to Engineering Practice. Barkey Volumn. Sidney Paige. Chairman. Geol. Soc. Am. pp. 83 - 123.
- 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. (1978). Slope Movement Types and Processes. In R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control. Transportation Special Report No. 176. Notional Academy Sciences. Washington D.C. pp. 11 - 33.
- Wieland, M. (1989). Effects of Floods of November 18 - 23, 1988. in Southern Thailand on Highway Bridges and Large Dams. Swiss Disaster Relief Unit. Bangkok. 181p.
- Y.C.Koo (1998). Some Important Aspects of Design of Soil Slopes in Hong Kong. Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong. Hong Kong. 2 May 1997. pp. 21 - 29.

### ภาคผนวก ก.

ผลการออกสำรวจรังวัดสภาพภูมิประเทศพื้นที่ศึกษา เป็นค่าพิกัดตำแหน่งใน  
แนวนอน, แนวตั้งและแนวตั้ง (X,Y,Z)

## ข้อมูลพิกัดตำแหน่ง (X, Y, Z) ลาดดินช่วง ก.ม. 13+300 ถึง 13+400

Points	X	Y	Z
1	5052.48	987.99	8.68
2	5048.79	977.12	7.86
3	5045.52	990.17	8.89
4	5027.21	983.04	8.46
5	5037.61	992.35	9.15
6	5008.53	986.22	9.16
7	5016.08	996.32	9.65
8	4984.59	988.56	10.07
9	4996.09	998.63	10.04
10	4968.57	989.75	10.66
11	4972.33	1000.71	10.54
12	4945.41	992.79	11.66
13	4943.12	1003.55	11.30
14	4929.06	995.64	12.15
15	4937.25	988.93	11.75
16	4940.57	985.24	13.39
17	4976.48	987.95	10.34
18	4965.45	983.71	13.73
19	4997.98	985.88	9.58
20	4993.29	983.06	13.31
21	5022.76	981.68	8.59
22	5010.31	981.47	11.50
23	5034.57	979.10	8.29
24	5020.86	978.75	11.10
25	5027.76	969.82	14.49
26	5013.14	974.08	15.94
27	5002.29	979.61	13.08

Points	X	Y	Z
28	5012.86	972.03	16.70
29	4988.02	979.73	14.19
30	5000.72	976.44	16.53
31	4976.35	980.57	14.63
32	5000.71	974.72	17.10
33	5953.81	980.14	14.40
34	4988.71	977.07	16.76
35	4938.08	982.69	13.90
36	4989.55	974.83	17.30
37	4942.59	976.88	17.76
38	4976.59	974.45	17.38
39	4941.46	977.25	17.68
40	4968.68	977.48	16.48
41	4935.75	979.07	17.44
42	4971.24	973.79	16.96
43	4966.12	973.49	16.67
44	4955.15	974.04	18.08
45	4971.00	968.68	19.35
46	4953.15	966.08	21.86
47	4980.71	969.86	20.19
48	4960.57	964.48	21.59
49	4958.04	966.2	21.25
50	4961.33	960.84	24.26
51	4986.62	969.55	20.81
52	4963.34	955.78	27.03
53	4996.24	971.20	20.57
54	4995.90	967.11	21.28

Points	X	Y	Z
55	4965.97	945.02	31.92
56	5002.44	970.66	20.72
57	4974.26	933.38	37.28
58	5000.87	967.33	21.56
59	4973.65	931.69	37.45
60	5010.82	969.03	19.90
61	5009.46	965.55	20.66
62	5012.51	967.35	20.07
63	5012.23	963.29	21.20
64	5020.94	955.84	23.73
65	5021.98	955.89	23.26
66	5015.17	955.83	24.62
67	5007.35	959.16	24.75
68	5005.03	924.74	40.99
69	5006.87	962.19	24.18
70	5001.31	963.56	24.03
71	5001.15	960.06	25.04
72	5004.69	923.60	41.41
73	4994.37	963.14	23.96
74	4994.86	958.92	25.60
75	4989.63	962.74	23.82
76	4990.81	959.08	24.98
77	5029.25	954.22	23.15
78	5033.40	953.22	23.20
79	5035.17	948.68	26.85
80	5035.32	948.15	27.84
81	5034.71	944.11	29.35
82	5031.50	943.40	29.56
83	4979.74	961.11	20.98

Points	X	Y	Z
84	4984.12	953.59	25.45
85	4984.54	961.05	22.47
86	4990.32	950.21	28.42
87	4998.05	957.84	26.33
88	4993.01	953.68	28.45
89	5004.65	961.42	24.45
90	5017.08	954.08	24.94
91	5014.68	951.77	28.18
92	5006.83	958.89	24.93
93	5006.36	953.29	28.60
94	4998.94	959.18	25.43
95	4998.77	953.86	28.83
96	4993.79	958.91	25.55
97	5001.16	953.29	29.11
98	5015.88	949.18	29.08
99	5000.57	943.84	29.78
100	5013.69	945.83	29.57
101	4993.22	943.75	29.99
102	5009.27	946.11	29.71
103	4994.48	942.41	29.92
104	5008.28	925.19	39.71
105	5032.22	932.02	35.97
106	5029.32	924.14	37.68
107	5026.98	917.39	40.66
108	5024.63	909.32	42.48
109	5022.90	903.03	44.46
110	5029.81	927.48	35.04
111	5020.90	898.38	45.54
112	5023.18	914.55	38.29

Points	X	Y	Z
113	5017.93	901.60	41.19
114	5017.19	893.66	46.82
115	5015.83	896.91	43.83
116	5013.85	900.04	44.22
117	5015.81	896.84	43.84
118	5011.19	897.85	45.98
119	5014.13	893.56	45.66
120	5013.07	901.40	43.05
121	5018.29	909.52	39.44
122	5012.63	905.15	41.10
123	5015.50	915.60	37.86
124	5008.29	912.27	41.32
125	5011.81	924.10	37.80
126	5005.20	921.31	41.49
127	5013.98	929.00	36.76
128	5004.79	925.01	41.15
129	5020.50	929.17	34.84
130	4998.35	923.42	42.82
131	4997.83	915.62	44.67
132	4994.02	917.85	44.52
133	4992.53	908.75	46.50
134	4994.52	924.85	42.84
135	5004.87	896.10	46.32
136	4983.91	923.74	41.87
137	5001.41	893.74	48.36
138	4975.39	932.13	37.91
139	4999.93	892.13	51.10
140	4976.69	929.24	40.62
141	4991.99	894.51	52.79

Points	X	Y	Z
142	4980.06	912.26	45.01
143	4985.58	905.05	47.80
144	4986.41	897.41	53.84
145	4990.52	903.45	47.80
146	4978.75	908.14	50.64
147	4992.32	899.06	48.81
148	4975.35	907.09	50.87
149	4977.85	912.43	48.65
150	4977.21	917.03	45.72
151	4976.10	923.59	42.22
152	4971.40	924.46	40.82
153	4960.96	922.57	40.99
154	4954.42	920.00	42.72
155	4956.67	921.69	41.01
156	4953.59	914.62	45.84
157	4955.54	913.84	44.76
158	4953.94	902.19	52.35
159	4955.53	903.14	49.88
160	4954.29	893.12	57.78
161	4968.62	905.57	49.59
162	4950.23	894.07	57.28
163	4971.57	893.73	54.89
164	4956.29	885.68	62.31
165	4959.11	890.37	55.25
166	4953.22	884.43	63.26
167	4958.55	884.77	59.11
168	4977.94	881.87	57.84
169	4978.95	887.41	56.30
170	4983.50	884.35	56.26



Points	X	Y	Z
171	4956.48	872.25	69.73
172	5003.79	874.77	55.40
173	4953.87	871.29	70.85
174	4990.36	872.05	55.53
175	4956.60	864.35	75.10
176	5008.95	879.22	52.98
177	4952.32	863.71	76.05
178	4994.61	881.71	53.01
179	4960.36	861.71	75.87
180	4989.18	890.05	54.21
181	4958.47	858.79	76.95
182	4977.43	876.36	59.20
183	4968.60	858.16	75.43
184	4987.74	868.15	59.12
185	4968.14	856.21	75.68
186	4997.74	869.82	59.05
187	4976.08	857.00	73.28
188	5001.67	871.63	57.93
189	4980.61	854.85	72.32
190	5001.19	861.39	61.39
191	4980.12	853.50	72.66
192	4985.34	865.46	61.80
193	4986.22	854.08	70.50
194	4976.38	865.41	62.13
195	4986.33	850.59	71.35
196	4969.55	869.37	62.22
197	4993.00	856.35	67.16
198	4964.78	871.26	62.50
199	4994.60	853.70	68.10

Points	X	Y	Z
200	4961.14	877.14	62.45
201	4995.97	858.88	64.75
202	5000.01	853.81	65.39
203	4999.80	860.70	62.37
204	5003.99	856.16	62.53

## ข้อมูลพิกัดตำแหน่ง (X, Y, Z) ลาดดินช่วง ก.ม. 13+900 ถึง 14+050

Points	X	Y	Z
1	571.75	125.67	10.96
2	571.53	113.85	10.06
3	557.78	122.00	11.08
4	562.99	112.10	10.19
5	545.27	117.34	11.16
6	550.08	107.30	10.31
7	528.58	109.68	10.45
8	533.91	100.11	10.55
9	512.06	101.85	10.98
10	516.79	91.74	10.75
11	494.50	92.97	10.89
12	499.08	83.05	10.77
13	478.87	85.28	10.74
14	482.17	75.03	10.69
15	463.68	78.04	10.60
16	468.68	68.13	10.54
17	449.18	71.04	10.46
18	453.94	61.17	10.40
19	464.38	63.76	10.51
20	463.88	63.73	10.48
21	470.10	64.05	14.88
22	477.45	70.43	10.66
23	478.64	68.26	14.97
24	492.91	77.85	10.73
25	490.02	73.81	15.09
26	504.71	83.47	10.80
27	500.44	78.65	15.14

Points	X	Y	Z
28	511.83	86.97	10.78
29	514.96	85.77	15.12
30	520.02	90.78	10.78
31	522.26	89.26	15.02
32	529.06	92.49	14.95
33	527.70	94.59	10.55
34	538.02	95.84	14.82
35	534.97	97.33	10.45
36	545.84	98.07	14.60
37	542.67	99.68	10.17
38	551.51	99.43	14.44
39	549.72	101.57	10.02
40	559.34	103.65	14.40
41	556.67	105.01	9.99
42	565.69	106.87	14.33
43	563.24	108.75	10.17
44	572.18	109.16	14.30
45	570.56	111.39	10.10
46	576.62	110.25	14.21
47	578.84	113.58	10.16
48	523.11	52.50	37.09
49	522.37	46.38	41.82
50	523.15	50.21	37.18
51	526.06	48.00	41.41
52	520.86	51.76	37.00
53	531.43	50.51	41.27
54	519.55	48.94	37.26

Points	X	Y	Z
55	540.21	53.87	40.81
56	511.32	48.08	37.21
57	507.83	46.66	37.52
58	527.07	54.49	36.74
59	529.15	53.16	36.82
60	514.93	44.09	41.67
61	532.75	56.62	36.71
62	533.86	54.90	36.88
63	546.11	61.97	36.87
64	546.47	59.64	37.08
65	554.63	64.81	36.91
66	524.52	60.72	29.60
67	558.79	65.67	36.84
68	559.65	60.50	41.03
69	557.39	60.09	40.94
70	553.79	62.49	36.94
71	553.85	59.31	40.47
72	559.35	64.39	36.90
73	562.60	67.66	36.62
74	562.62	61.62	40.95
75	563.62	65.60	36.80
76	565.28	62.77	40.81
77	528.79	63.31	29.53
78	529.41	61.36	29.73
79	537.34	66.91	29.57
80	537.95	64.93	29.71
81	544.77	69.89	29.36
82	545.34	67.89	29.57
83	552.23	72.75	29.29

Points	X	Y	Z
84	560.36	75.97	29.15
85	552.56	70.62	29.30
86	567.30	78.22	29.47
87	568.96	76.42	29.55
88	578.99	82.00	30.24
89	579.81	80.05	30.96
90	514.58	54.49	29.90
91	513.99	56.03	29.77
92	502.88	51.05	29.91
93	503.63	49.71	29.96
94	494.27	46.97	30.18
95	494.95	45.58	30.31
96	487.24	43.00	30.35
97	487.70	41.58	30.57
98	487.26	36.30	37.40
99	478.67	36.77	30.56
100	526.18	70.45	22.44
101	531.87	73.13	22.34
102	532.80	70.22	22.80
103	540.12	76.16	22.35
104	541.56	73.83	22.58
105	549.72	81.47	22.06
106	551.62	79.10	22.27
107	556.60	84.96	22.07
108	557.96	82.41	22.21
109	565.02	87.75	21.42
110	565.51	86.39	22.16
111	570.27	90.69	20.63
112	570.54	88.04	22.25

Points	X	Y	Z
113	528.16	68.08	22.77
114	517.40	66.91	22.57
115	518.89	63.74	22.98
116	507.60	62.09	22.72
117	508.96	59.01	23.08
118	495.40	55.48	22.94
119	495.78	52.46	23.19
120	483.45	49.19	23.35
121	484.79	49.92	23.57
122	473.22	43.41	23.61
123	474.39	40.50	23.80
124	574.87	103.88	16.28
125	574.89	99.64	17.31
126	564.25	99.59	16.71
127	566.02	95.64	17.25
128	545.65	90.61	17.14
129	546.52	86.53	17.53
130	534.74	91.04	15.76
131	536.26	82.03	17.86
132	526.87	77.34	18.28
133	515.67	78.10	18.06
134	518.69	73.21	18.65
135	507.24	73.99	18.14
136	510.79	68.85	18.87
137	499.65	68.90	18.82
138	502.10	64.27	18.94
139	490.02	63.59	18.90
140	493.92	59.48	19.10
141	481.28	58.57	19.04

Points	X	Y	Z
142	485.88	55.63	19.23
143	474.47	54.18	18.08
144	478.86	55.78	18.91
145	480.53	52.82	19.62
146	508.86	82.78	15.00
147	533.54	94.17	14.90
148	504.65	80.71	15.07
149	495.23	76.23	15.12
150	574.70	112.49	10.12
151	565.61	109.60	10.15
152	568.57	110.67	10.12
153	537.47	98.09	10.35
154	540.49	99.01	10.25
155	515.03	88.46	10.78
156	518.05	89.86	10.78
157	496.62	79.62	10.75
158	499.69	81.08	10.77
159	502.77	82.55	10.79
160	482.15	72.68	10.68
161	486.87	74.95	10.70
162	489.81	76.36	10.71
163	483.79	70.79	15.03
164	470.23	66.74	10.60
165	468.53	65.88	10.59
166	465.23	61.70	14.90
167	457.30	59.98	10.40
168	554.95	95.10	16.92
169	553.50	89.79	17.40
170	560.07	92.86	17.33

Points	X	Y	Z
171	534.06	87.20	17.50
172	521.53	81.09	17.80
173	526.75	83.76	17.80
174	500.99	58.51	22.80
175	490.10	52.70	23.20
176	502.37	55.74	23.15
177	480.94	44.16	23.55
178	488.97	48.65	23.35
179	492.36	50.55	23.25
180	485.13	46.45	23.40
181	559.54	85.96	22.05
182	560.48	73.42	29.40
183	519.30	56.68	29.85
184	524.24	58.97	29.80
185	509.58	52.31	29.93
186	483.19	39.18	30.56
187	482.56	40.56	30.56
188	477.40	37.87	30.56
189	508.87	53.74	29.93
190	518.85	58.33	29.65
191	479.09	46.73	23.50
192	475.21	49.85	19.60
193	469.89	46.88	19.60
194	539.13	59.16	36.79
195	516.94	50.25	37.29
196	498.12	41.91	37.29
197	489.32	37.35	37.50
198	481.23	33.24	37.40
199	556.19	63.31	36.90

Points	X	Y	Z
200	550.13	61.07	37.00
201	549.87	63.22	36.90
202	539.55	57.09	36.95
203	526.15	51.69	37.00
204	512.57	45.63	37.24
205	503.95	41.54	37.32
206	491.85	35.66	37.43
207	483.51	31.39	37.45
208	503.82	44.90	37.25
209	516.06	47.28	37.25
210	511.13	41.15	41.56
211	501.81	36.48	41.76
212	493.46	32.14	41.56
213	486.51	28.65	41.78
214	508.78	43.84	37.30
215	499.06	39.17	37.38
216	487.68	33.53	37.42
217	565.55	60.96	40.87
218	559.13	58.83	40.97
219	553.39	56.92	40.67
220	546.42	54.23	40.85
221	540.20	52.17	40.67
222	533.53	49.59	40.34
223	526.30	46.43	41.23
224	519.32	43.34	41.56
225	510.91	39.42	41.45
226	502.59	35.04	41.65
227	495.60	31.61	41.56
228	487.63	27.52	41.67

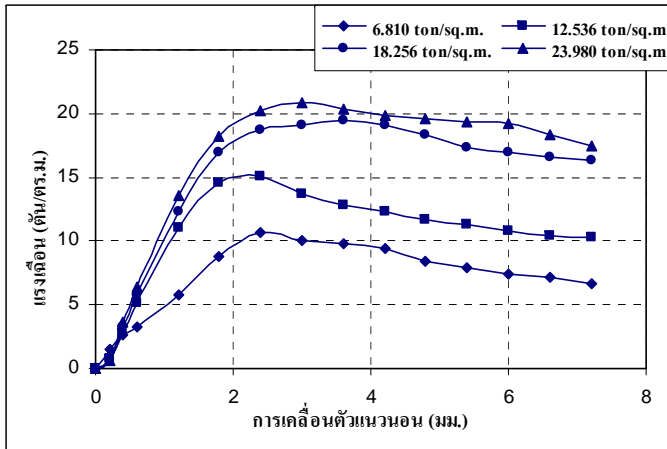
Points	X	Y	Z
229	526.36	46.23	41.23
230	546.20	55.59	40.80
231	535.16	52.00	40.80
232	518.81	45.17	41.00
233	505.69	38.53	41.50
234	495.64	33.22	41.50
235	487.50	28.87	41.60
236	551.06	58.05	40.85
237	565.75	68.48	37.50
238	577.46	110.31	14.20

### ภาคผนวก ข.

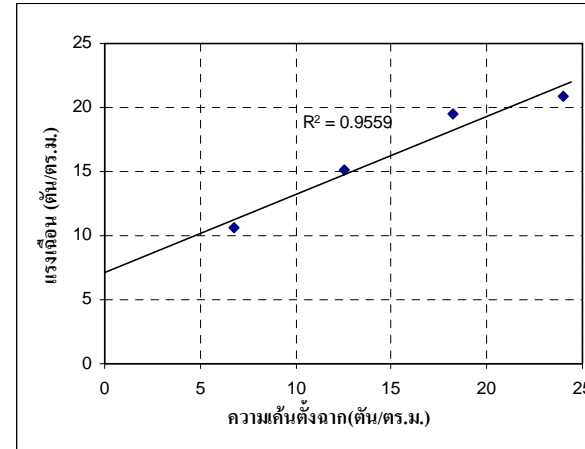
ผลการทดสอบการเฉือน โดยตรง Soil A, Soil B, Soil C, Soil D และ Soil E แสดง เป็น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน, กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก, กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน, ค่าหน่วยน้ำหนัก, ค่าระดับความอิ่มตัว, ค่ากำลังเฉือนและ ค่าตัวแปรกำลัง (Cohesion, Internal friction angle) ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการทดสอบดังนี้

- การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ
- การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ
- การทดสอบแบบช้า ดินความชื้นธรรมชาติ
- การทดสอบแบบช้า ดินชุ่มน้ำ

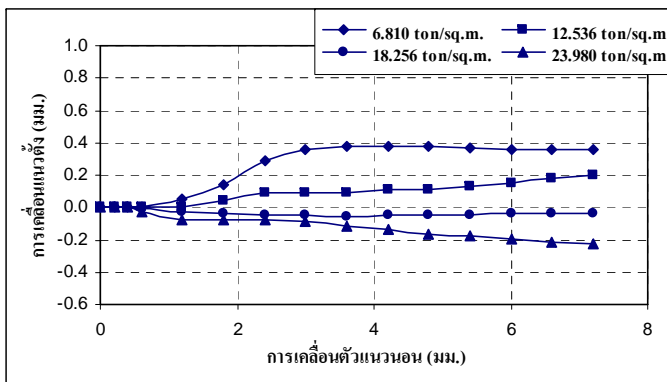
### Soil A การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก

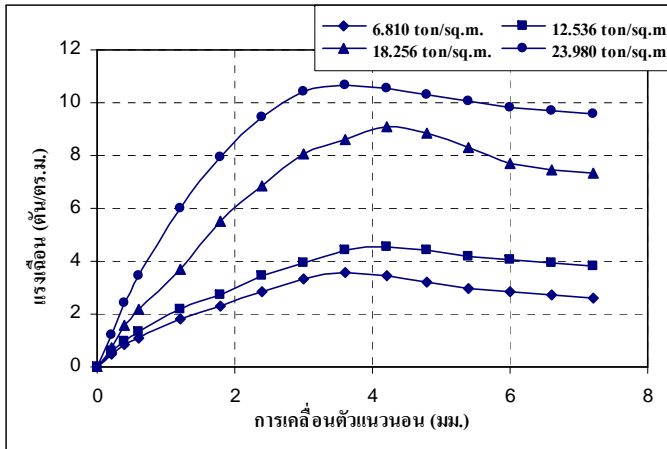


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

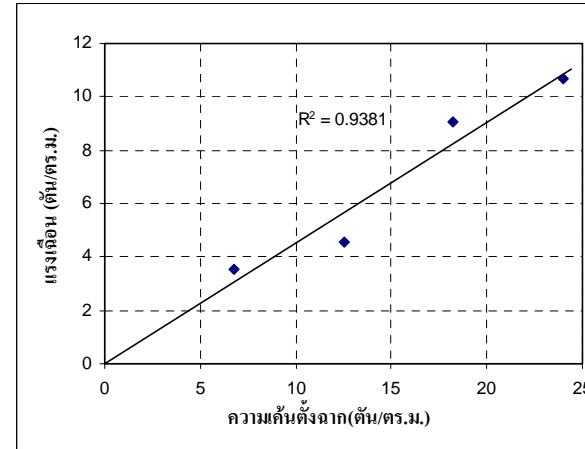
ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.805	0.817	10.659
12.536	1.793	0.746	15.067
18.256	1.819	0.717	19.475
23.980	1.772	0.770	20.822
Cohesion =			<b>7.12</b>
Internal friction angle =			<b>31.38</b>



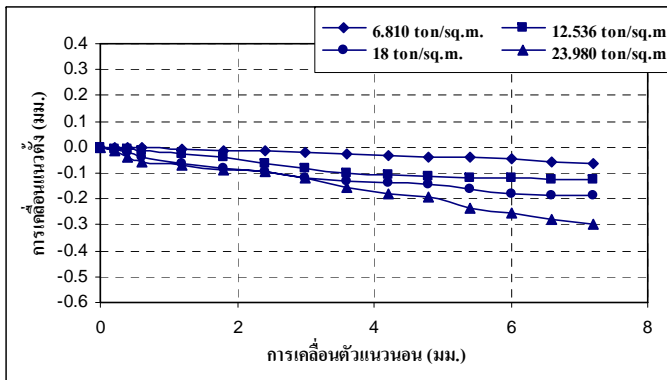
### Soil A การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



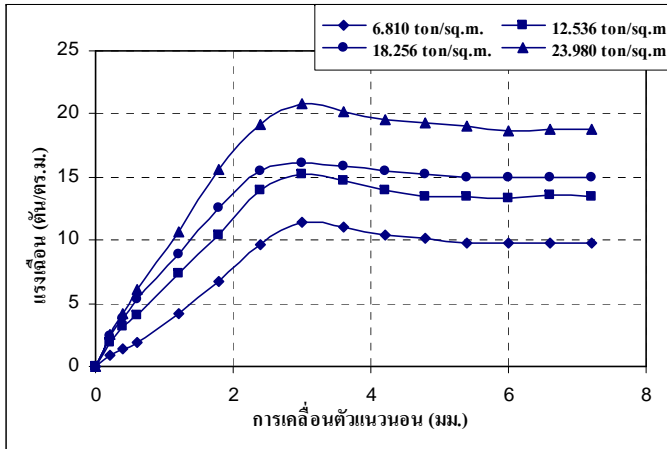
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



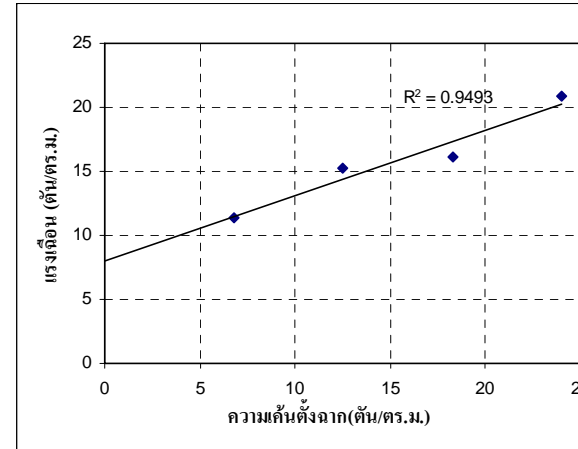
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.951	0.986	3.556
12.536	1.887	0.972	4.536
18.256	1.836	0.981	9.067
23.980	1.929	0.988	10.659
Cohesion =			<b>0</b>
Internal friction angle =			<b>24.30</b>

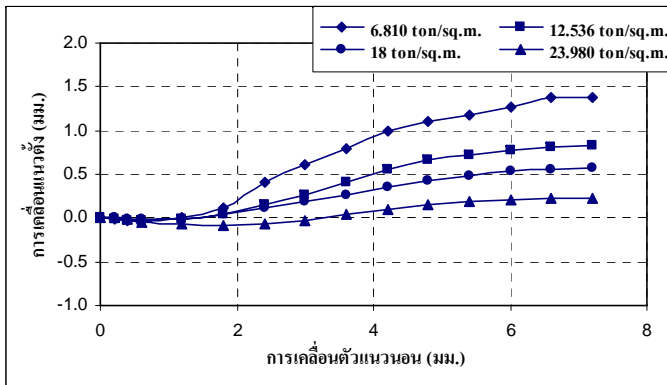
### Soil B การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



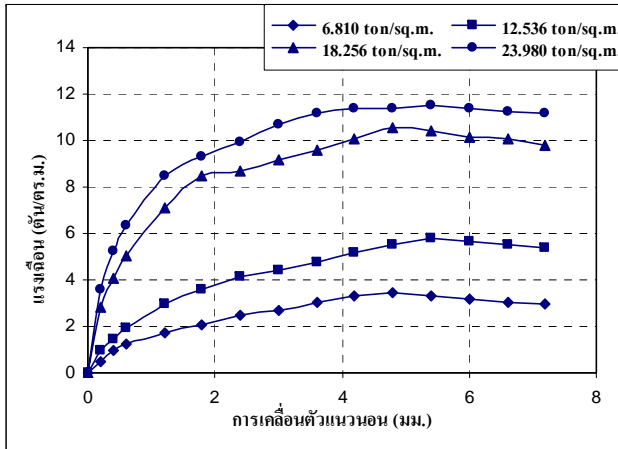
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



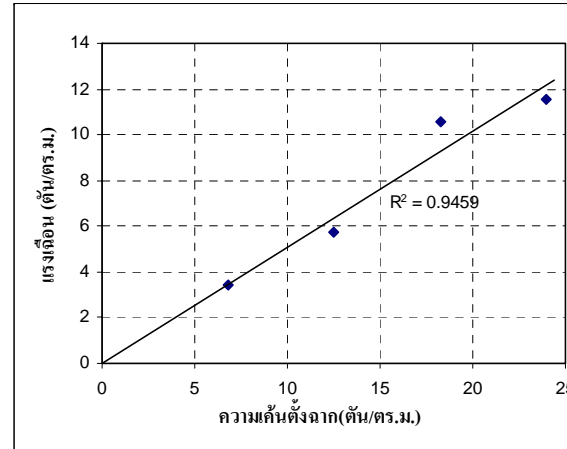
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.851	0.822	11.393
12.536	1.836	0.810	15.189
18.256	1.754	0.841	20.822
23.980	1.853	0.772	16.169
Cohesion =			<b>8.02</b>
Internal friction angle =			<b>27.09</b>

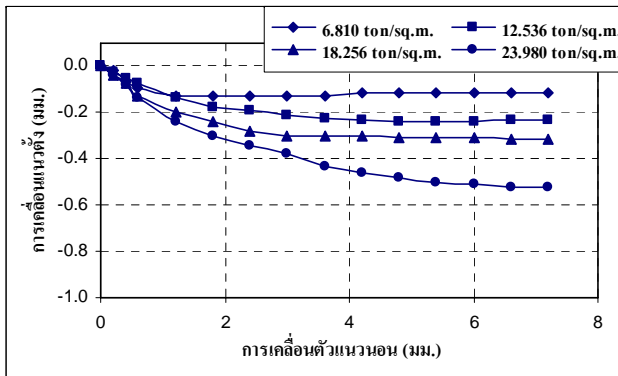
## Soil B การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



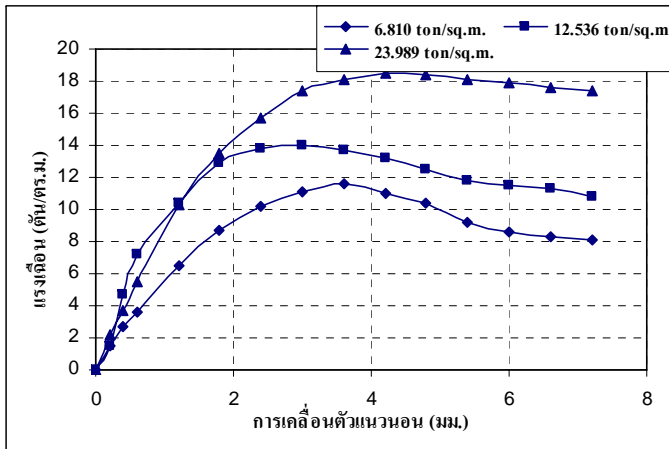
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



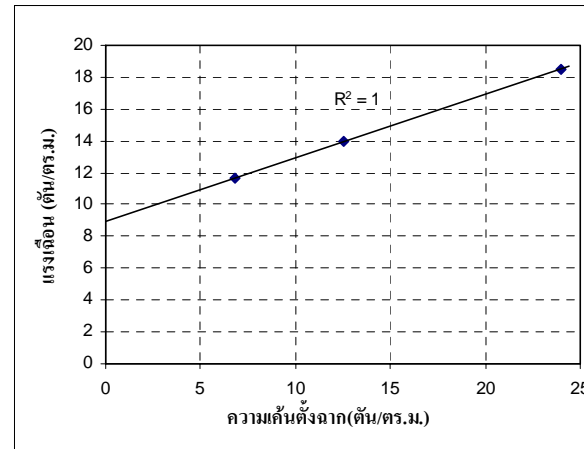
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.871	0.947	3.434
12.536	1.924	1.015	5.760
18.256	1.837	1.015	10.536
23.980	1.884	1.008	11.516
Cohesion =			<b>0</b>
Internal friction angle =			<b>26.89</b>

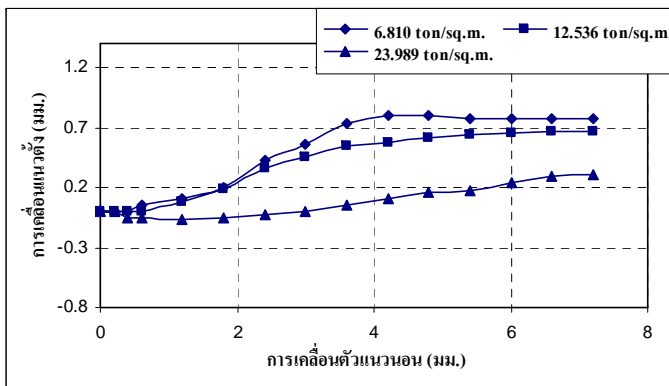
### Soil C การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



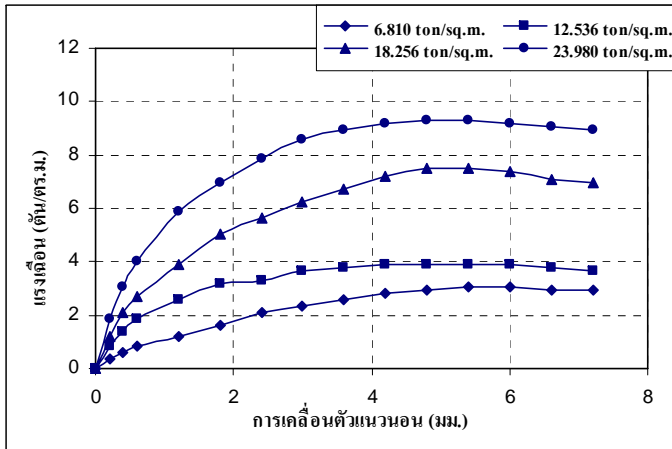
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



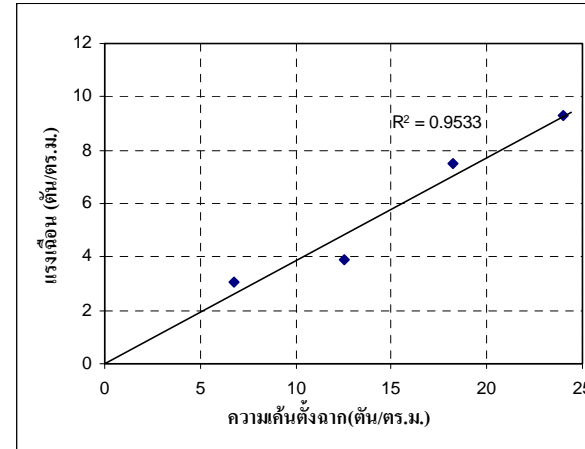
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.915	0.764	11.638
12.536	1.938	0.755	13.965
18.256	1.876	0.764	-
23.980	1.934	0.748	18.496
Cohesion =			<b>8.94</b>
Internal friction angle =			<b>21.74</b>

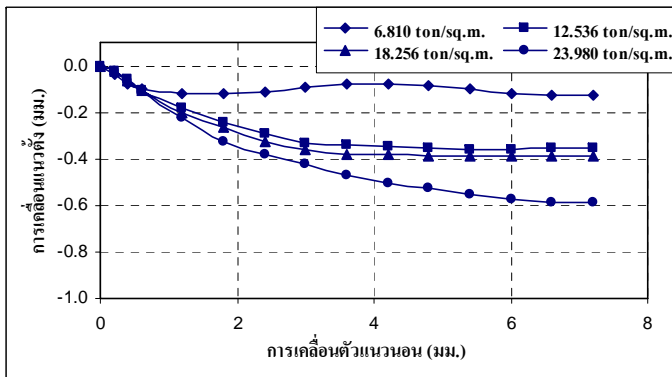
### Soil C การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



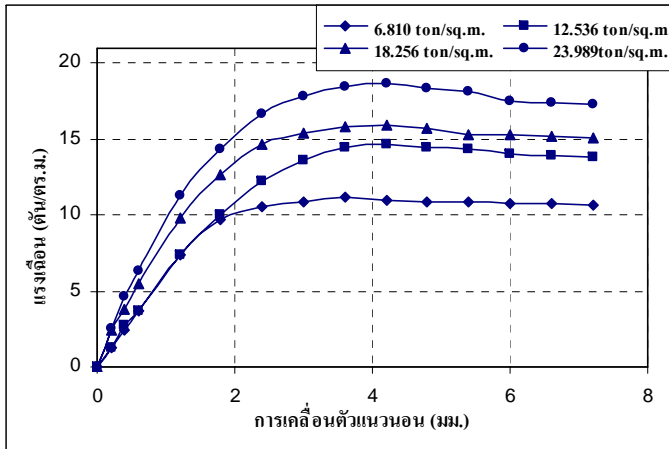
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



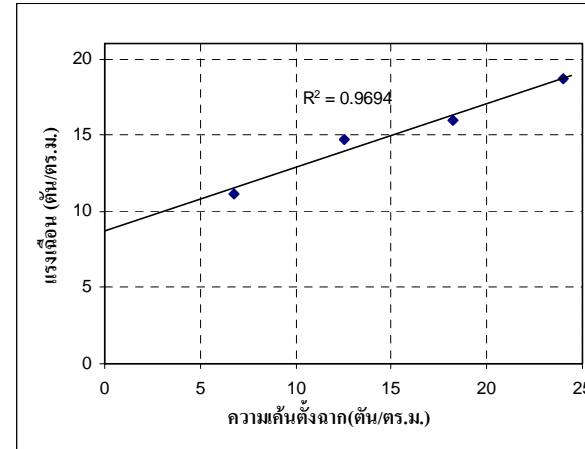
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.962	0.994	3.066
12.536	1.976	0.986	3.924
18.256	1.925	0.994	7.475
23.980	1.968	0.990	9.312
Cohesion =			<b>21.28</b>
Internal friction angle =			<b>0</b>

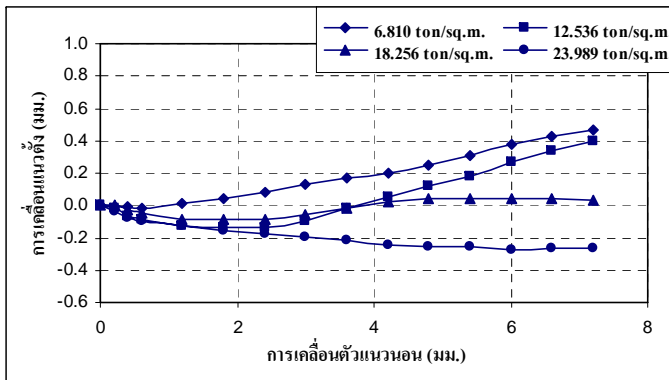
### Soil D การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



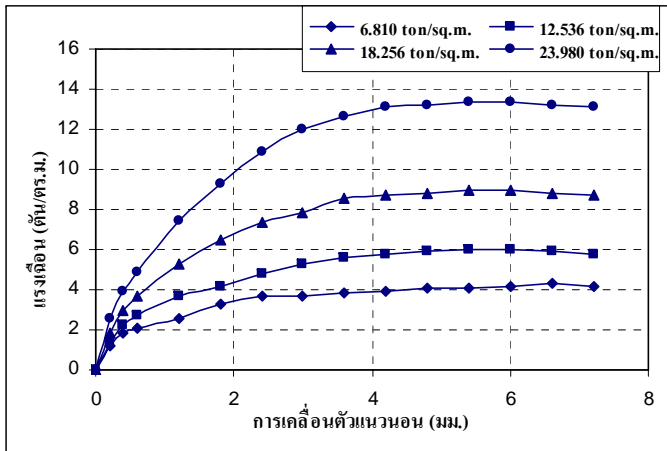
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



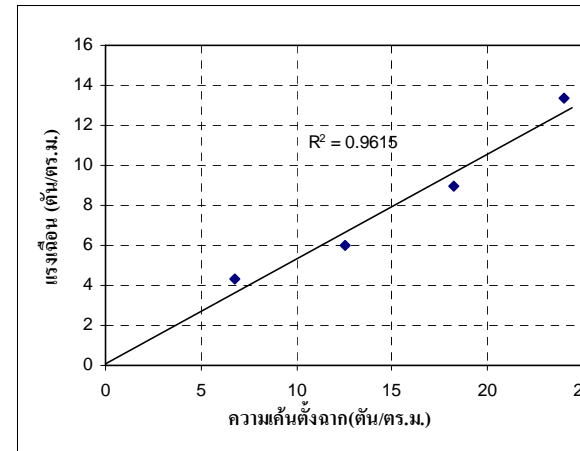
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.863	0.803	11.148
12.536	1.891	0.780	14.700
18.256	1.895	0.750	15.924
23.980	1.802	0.728	18.700
Cohesion =			<b>8.69</b>
Internal friction angle =			<b>22.64</b>

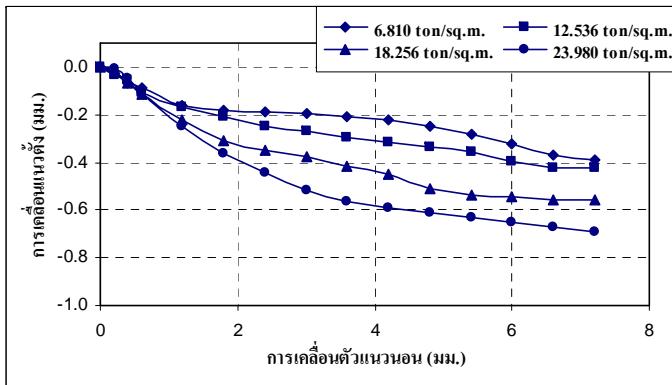
### Soil D การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



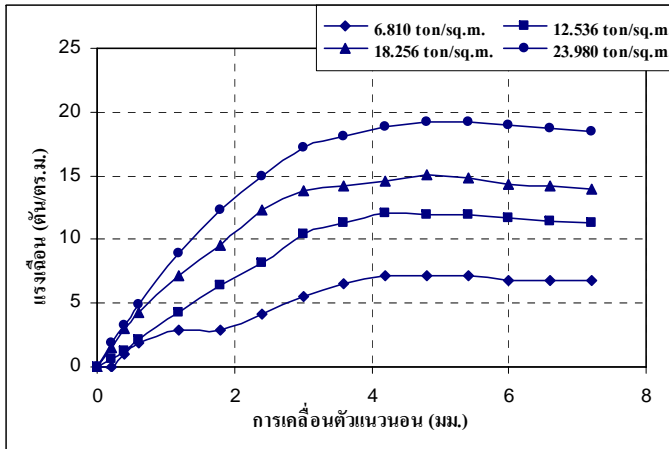
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



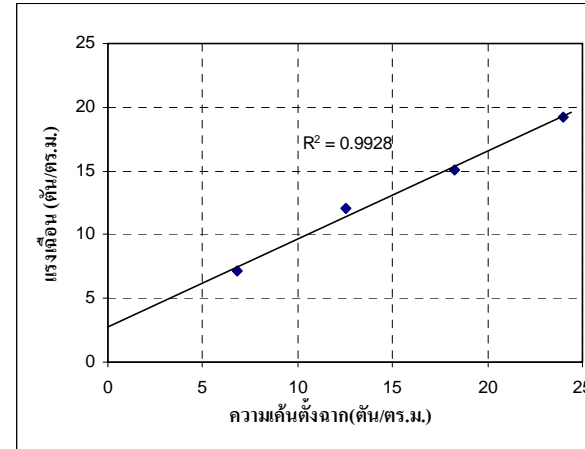
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.864	0.993	4.291
12.536	1.971	0.990	6.005
18.256	2.073	0.967	8.944
23.980	2.029	0.977	13.353
Cohesion =			<b>0.04</b>
Internal friction angle =			<b>27.76</b>

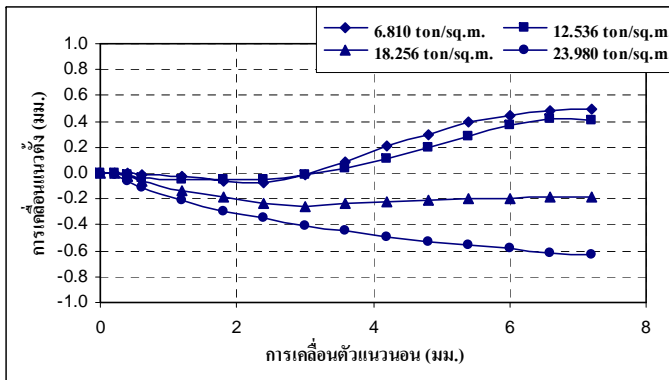
### Soil E การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก

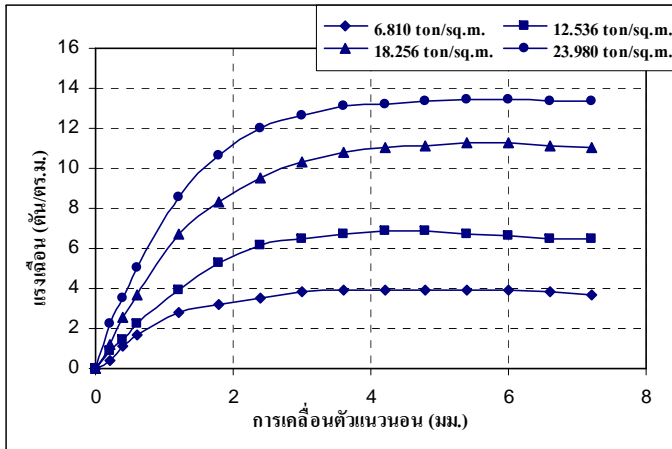


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

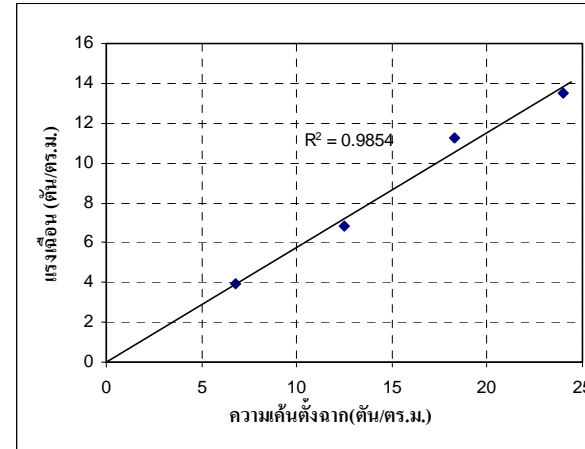
ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.712	0.803	7.107
12.536	1.714	0.825	12.006
18.256	1.756	0.786	15.067
23.980	1.877	0.741	19.230
Cohesion =			<b>2.74</b>
Internal friction angle =			<b>34.57</b>



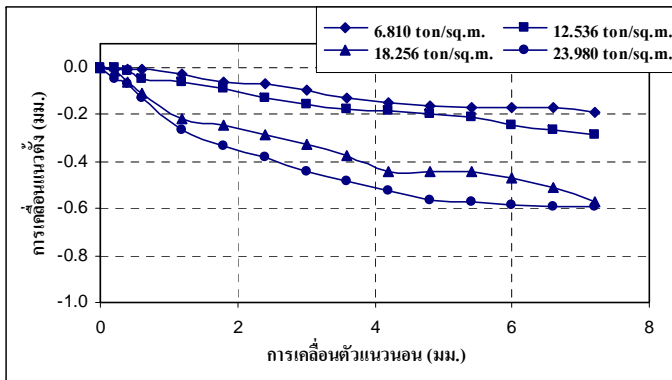
### Soil E การทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวอน



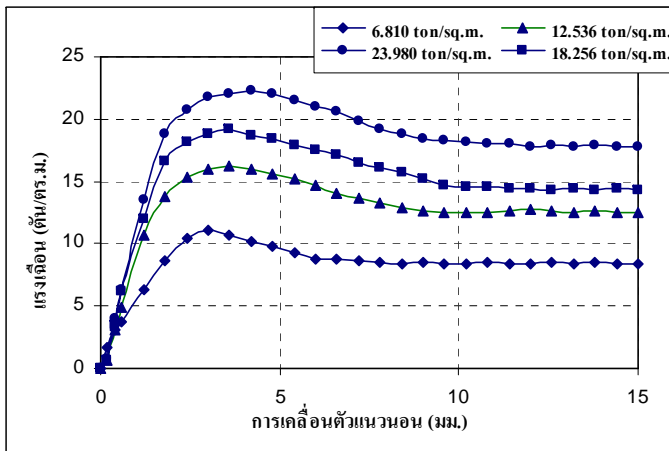
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



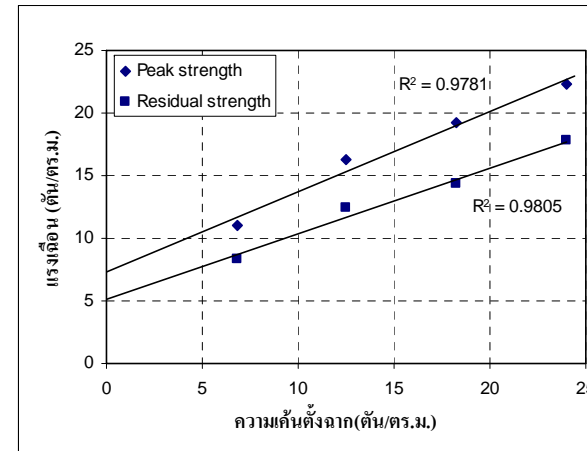
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ			
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)
6.810	1.897	0.973	3.924
12.536	1.928	0.985	6.862
18.256	1.943	0.976	11.271
23.980	1.965	1.003	13.475
Cohesion =			<b>0</b>
Internal friction angle =			<b>30.02</b>

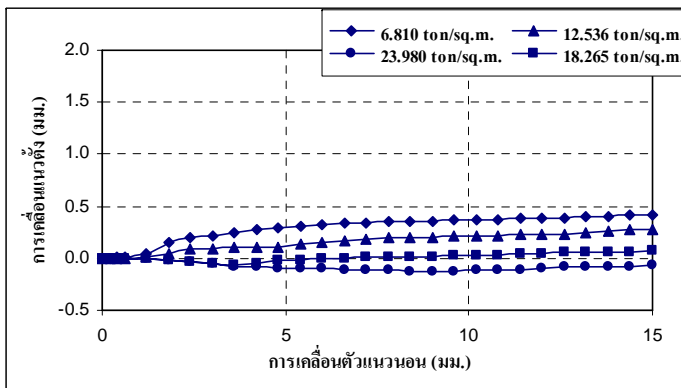
### Soil A การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



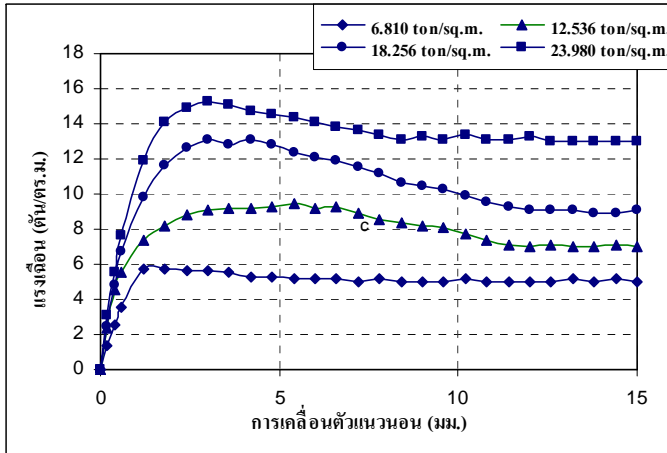
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



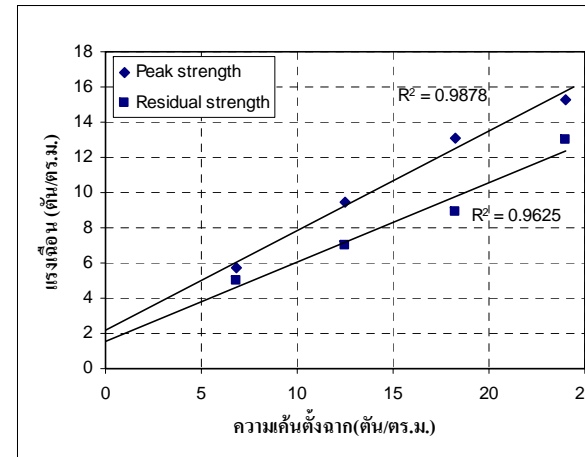
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงที่ (ton/sq.m.)
6.810	1.804	0.790	11.026	8.332
12.536	1.837	0.769	16.291	12.495
18.256	1.735	0.731	19.230	14.332
23.980	1.710	0.801	22.292	17.761
<i>Cohesion</i> =			<b>7.33</b>	<b>5.13</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>32.70</b>	<b>27.76</b>

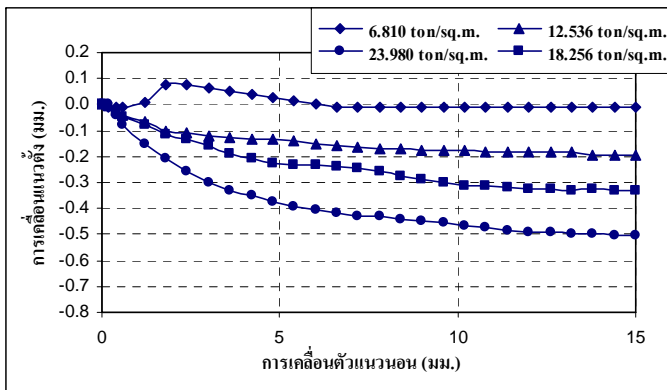
### Soil A การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



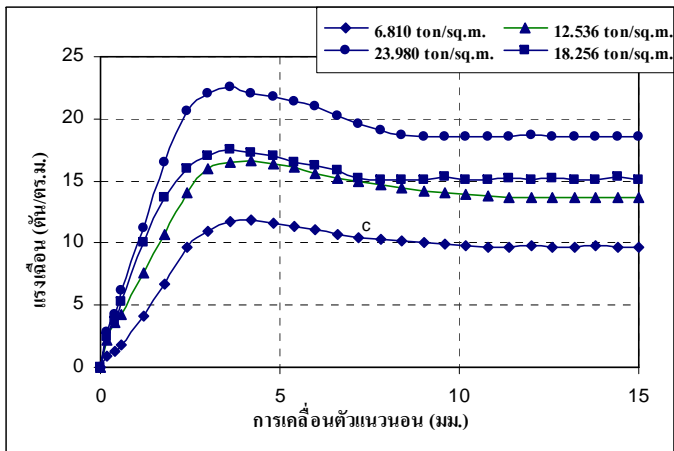
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



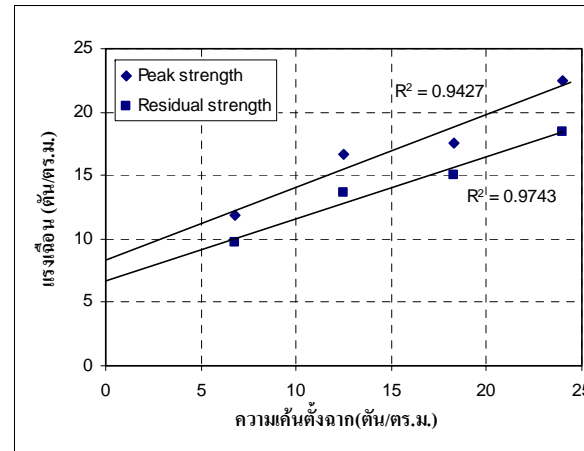
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.859	0.990	5.760	5.026
12.536	1.870	0.979	9.434	6.985
18.256	1.864	0.991	13.104	8.944
23.980	1.857	1.026	15.312	12.985
<i>Cohesion</i> =			<b>2.21</b>	<b>1.53</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>29.46</b>	<b>24.30</b>

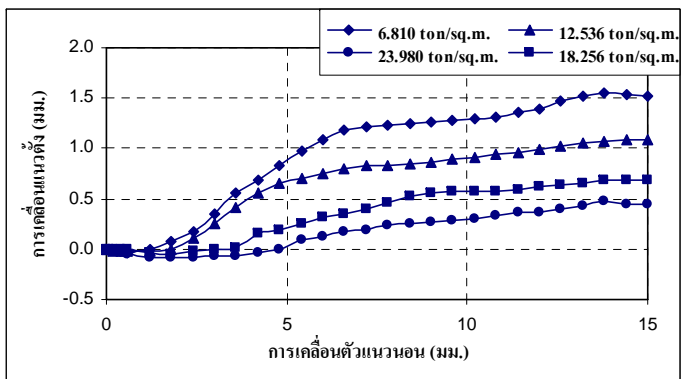
### Soil B การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



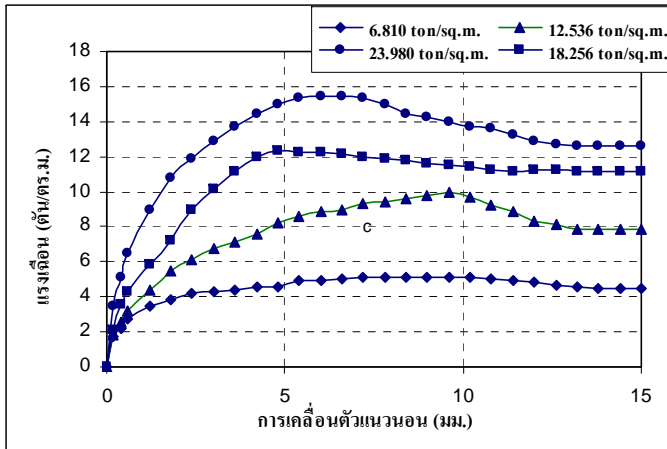
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



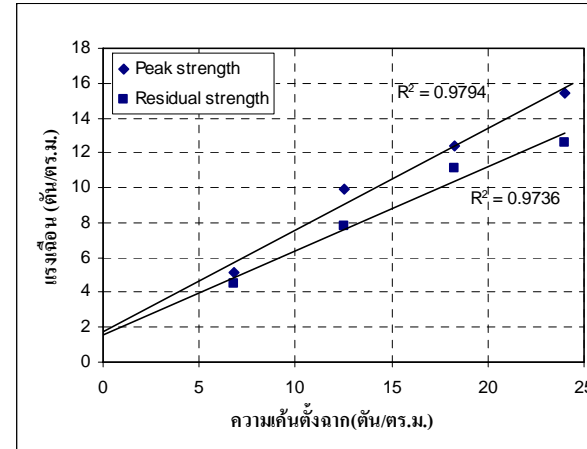
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงที่ (ton/sq.m.)
6.810	1.817	0.761	11.883	9.679
12.536	1.787	0.769	16.659	13.597
18.256	1.766	0.758	17.516	15.067
23.980	1.834	0.833	22.537	18.496
<i>Cohesion</i> =			<b>8.32</b>	<b>6.70</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>29.83</b>	<b>26.01</b>

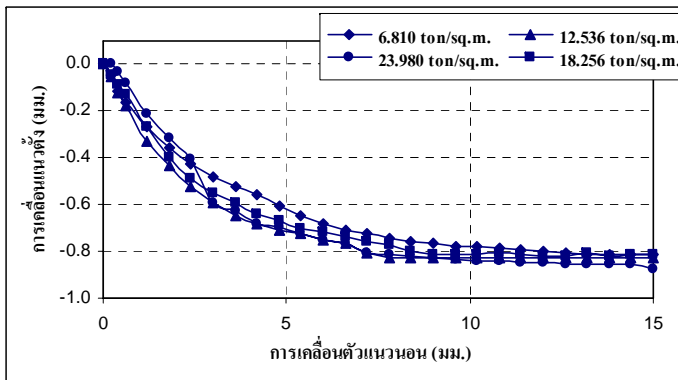
## Soil B การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวอน



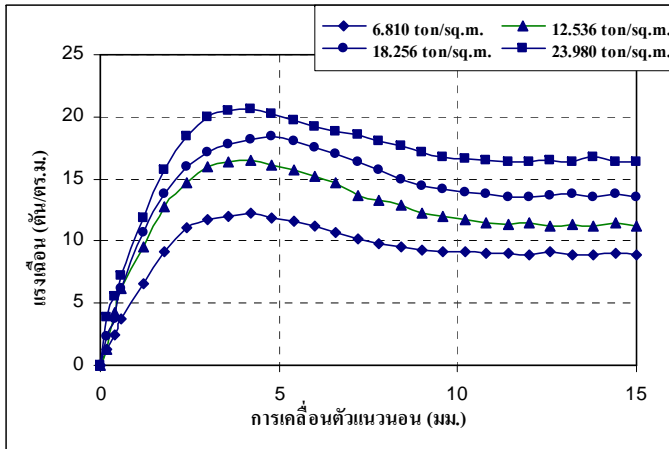
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเคลื่อนตั้งฉาก



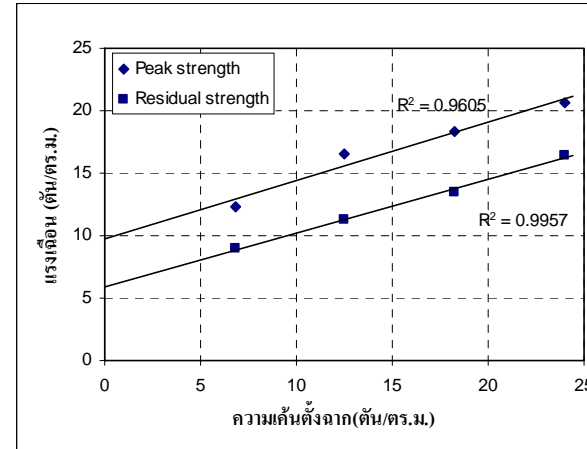
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเคลื่อนตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.911	1.007	5.148	4.500
12.536	1.852	1.015	9.924	7.842
18.256	1.910	0.980	12.373	11.148
23.980	1.921	1.002	15.434	12.618
<i>Cohesion</i> =			<b><u>1.76</u></b>	<b><u>1.59</u></b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b><u>30.20</u></b>	<b><u>25.80</u></b>

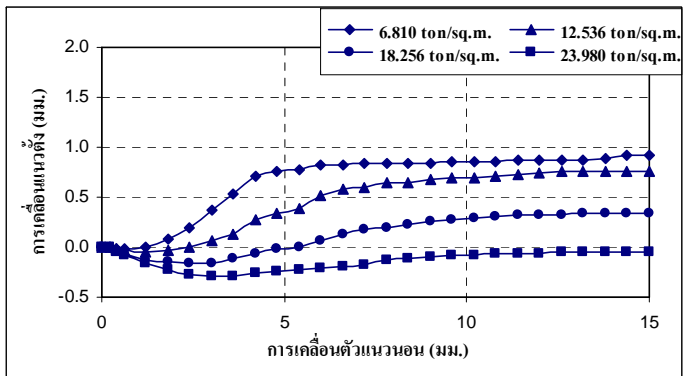
### Soil C การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



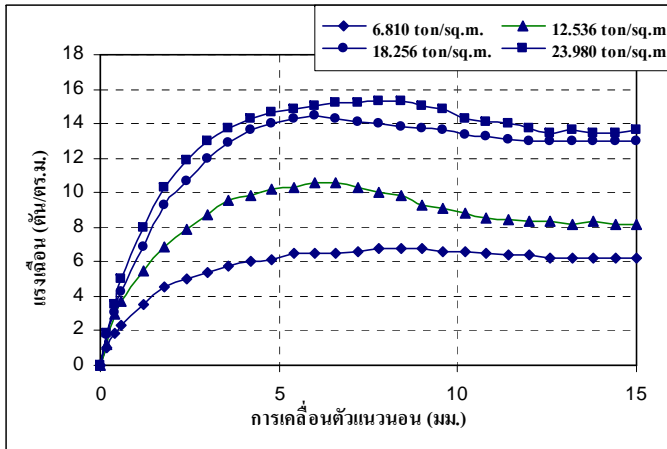
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



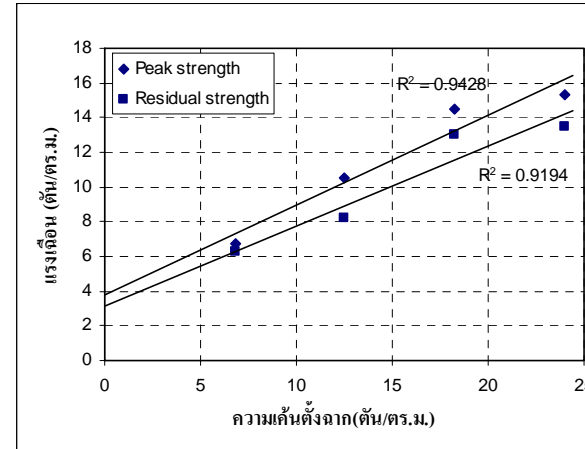
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.811	0.793	12.250	8.944
12.536	1.834	0.755	16.536	11.271
18.256	1.854	0.763	18.373	13.475
23.980	1.907	0.818	20.577	16.414
<i>Cohesion</i> =			<b>9.72</b>	<b>5.90</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>25.11</b>	<b>23.27</b>

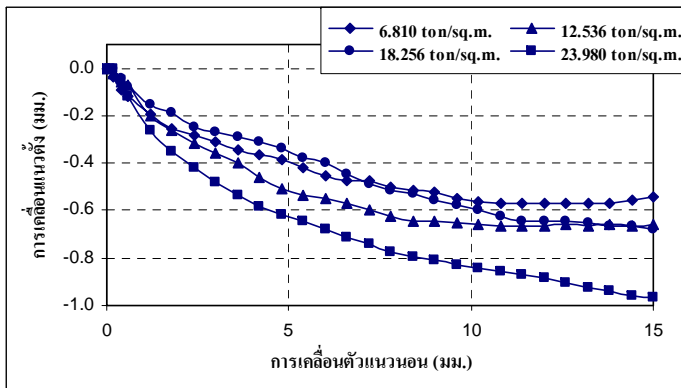
### Soil C การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



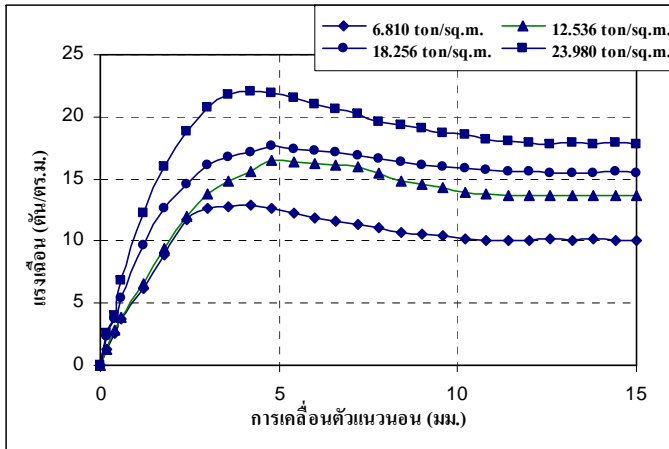
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



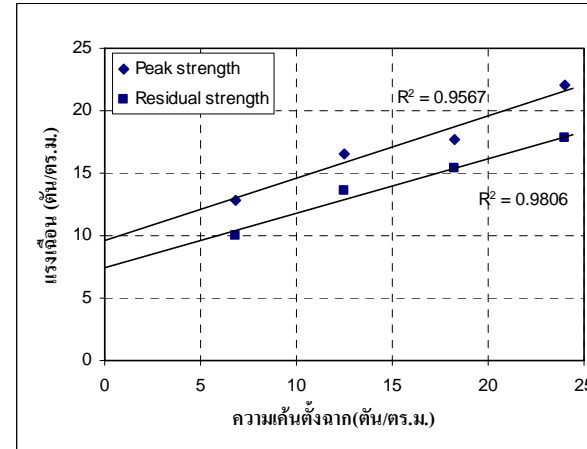
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงที่ (ton/sq.m.)
6.810	1.932	0.984	6.740	6.250
12.536	1.922	0.986	10.536	8.209
18.256	1.943	0.994	14.455	12.985
23.980	1.895	0.990	15.312	13.475
<i>Cohesion</i> =			<b>3.79</b>	<b>3.11</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>27.38</b>	<b>24.81</b>

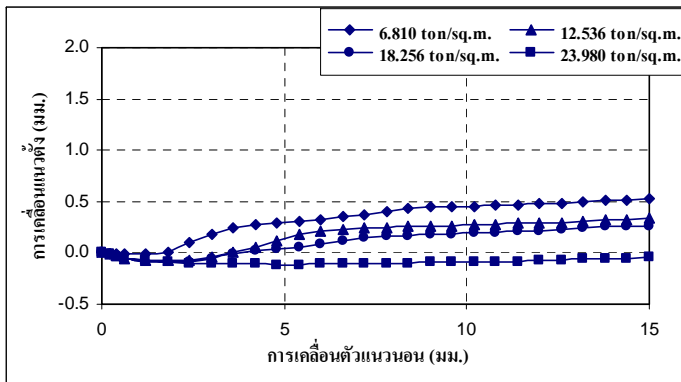
### Soil D การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก

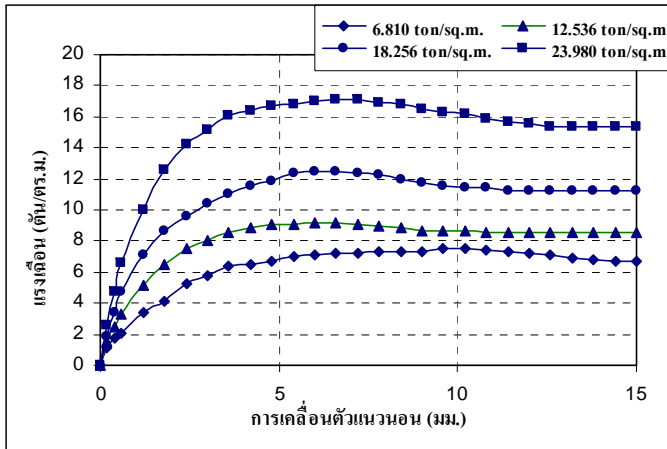


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

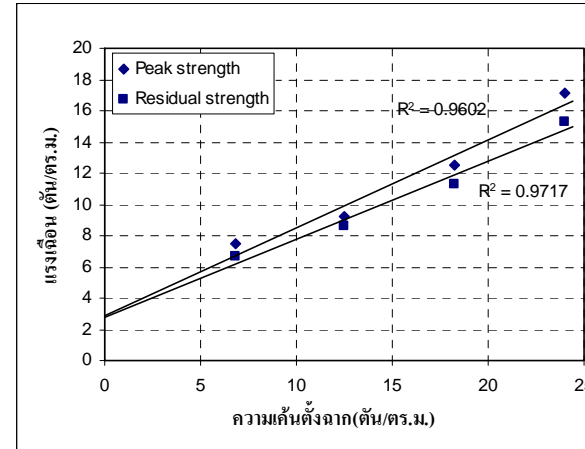
ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงที่ (ton/sq.m.)
6.810	1.869	0.772	12.863	10.046
12.536	1.873	0.770	16.536	13.597
18.256	1.813	0.788	17.638	15.434
23.980	1.882	0.748	22.047	17.761
<i>Cohesion</i> =			<b>9.56</b>	<b>7.49</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>26.60</b>	<b>23.58</b>



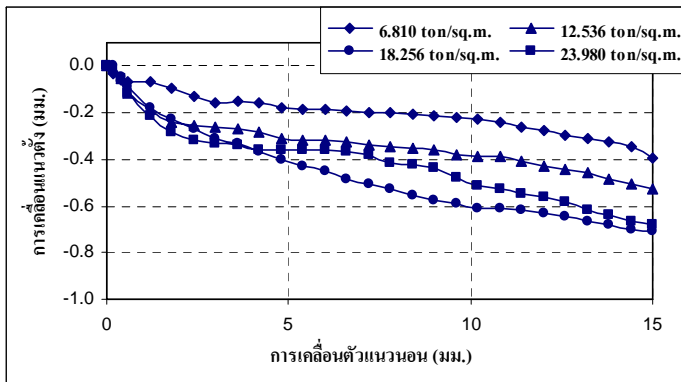
### Soil D การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



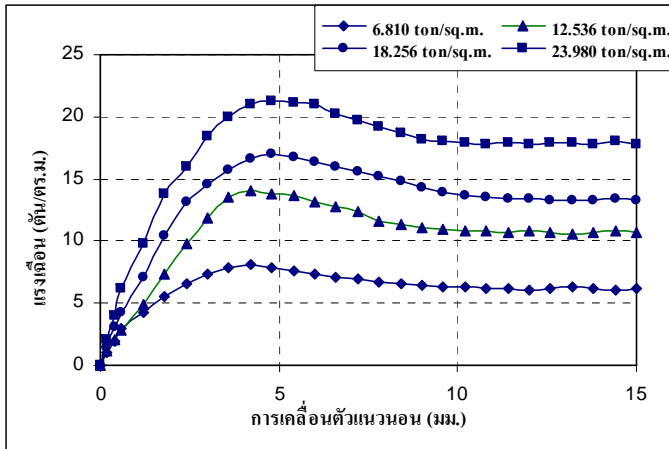
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



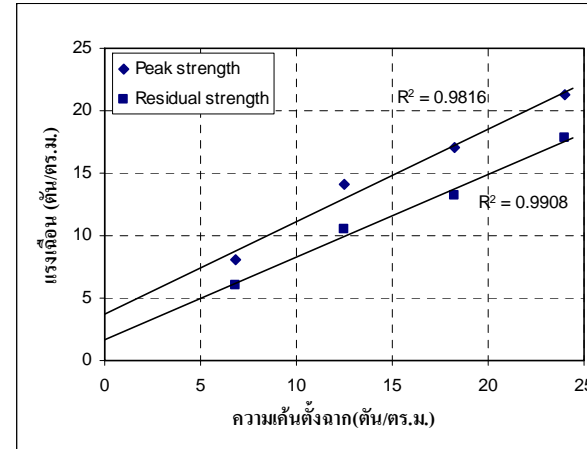
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.943	0.983	7.475	6.700
12.536	1.947	0.980	9.189	8.577
18.256	1.897	0.977	12.495	11.271
23.980	1.978	1.018	17.149	15.312
<i>Cohesion</i> =			<b>2.88</b>	<b>2.79</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>29.46</b>	<b>26.50</b>

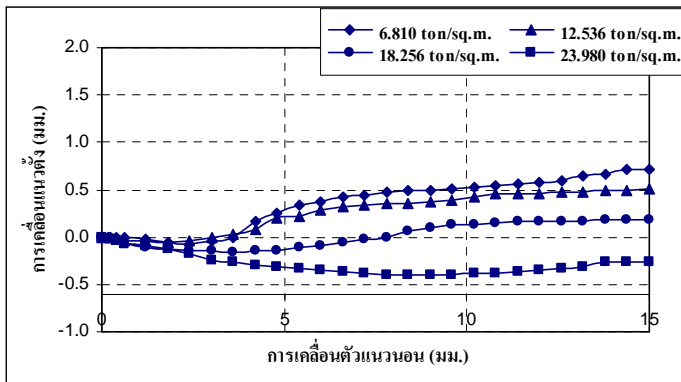
### Soil E การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



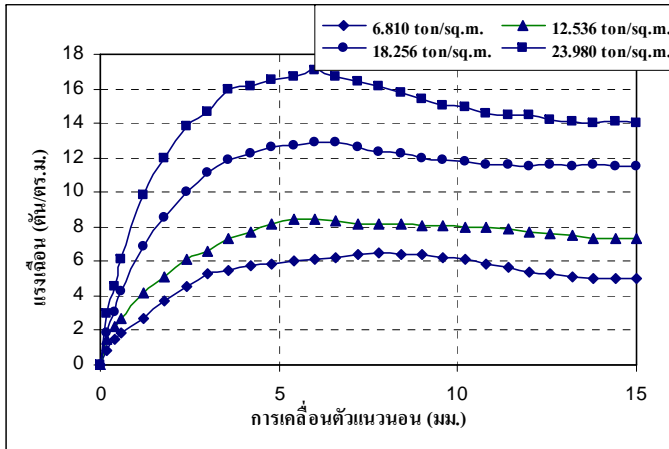
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



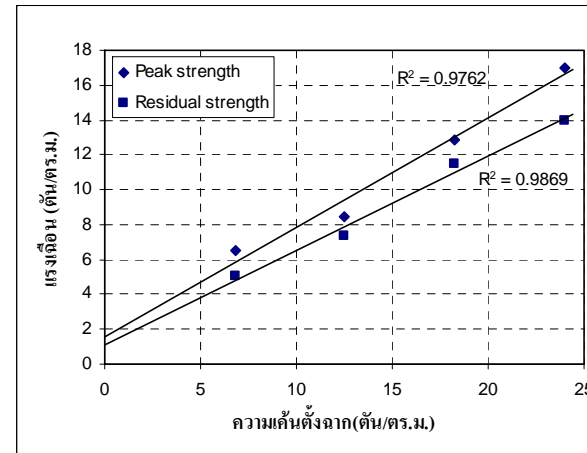
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.708	0.793	8.087	6.005
12.536	1.776	0.724	14.087	10.536
18.256	1.671	0.795	17.026	13.230
23.980	1.679	0.720	21.312	17.761
<i>Cohesion</i> =			<b><u>3.66</u></b>	<b><u>1.67</u></b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b><u>36.67</u></b>	<b><u>33.56</u></b>

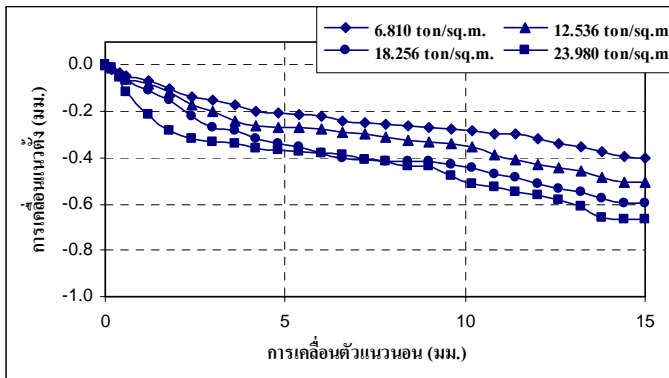
### Soil E การทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวนอน



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก



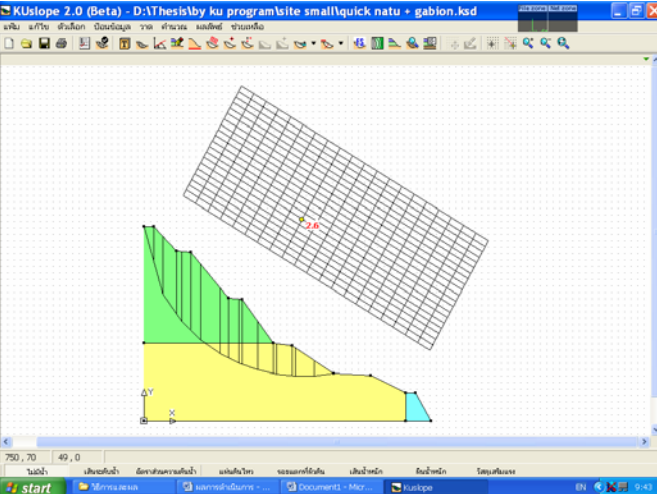
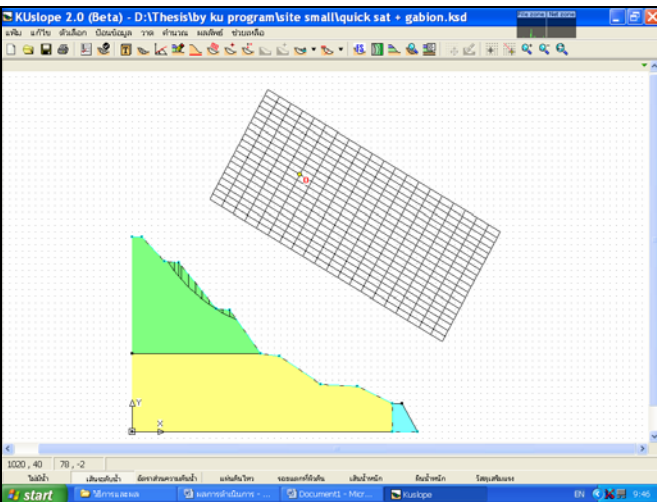
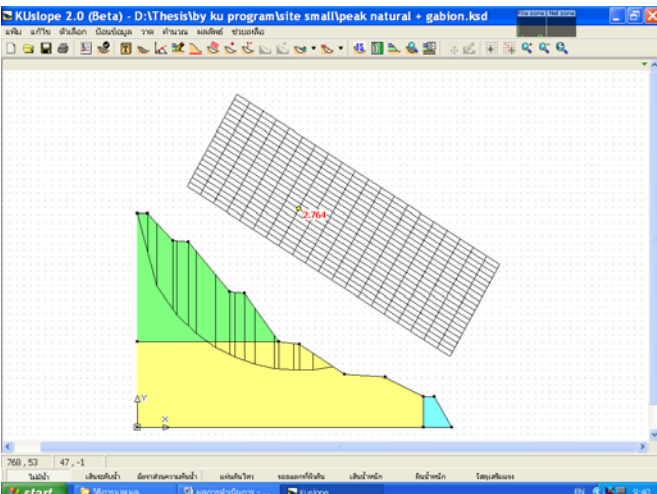
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวแนวนอน

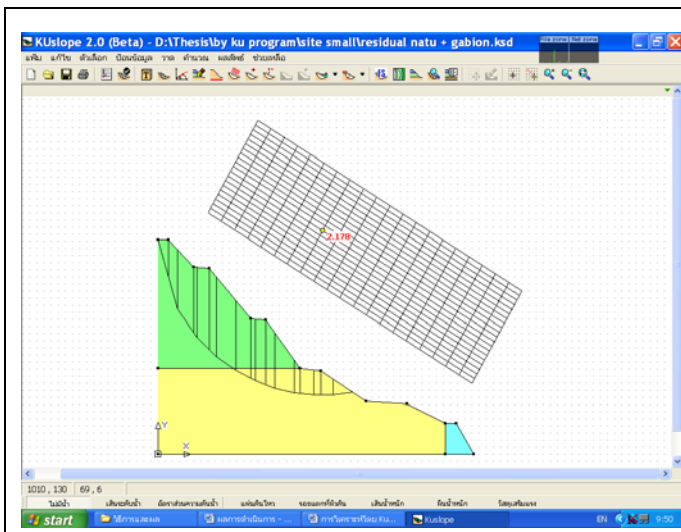
ตารางข้อมูลผลการทดสอบ				
ความเค้นตั้งฉาก (ton/sq.m.)	Unit weight (ton/cu.m.)	Degree of saturation	กำลังสูงสุด (ton/sq.m.)	กำลังคงค้าง (ton/sq.m.)
6.810	1.913	0.994	6.495	5.026
12.536	1.932	0.995	8.454	7.352
18.256	1.897	0.976	12.863	11.516
23.980	1.894	0.991	17.026	13.965
<i>Cohesion</i> =			<b>1.52</b>	<b>1.13</b>
<i>Internal friction angle</i> =			<b>32.17</b>	<b>28.43</b>

### ภาคผนวก ค.

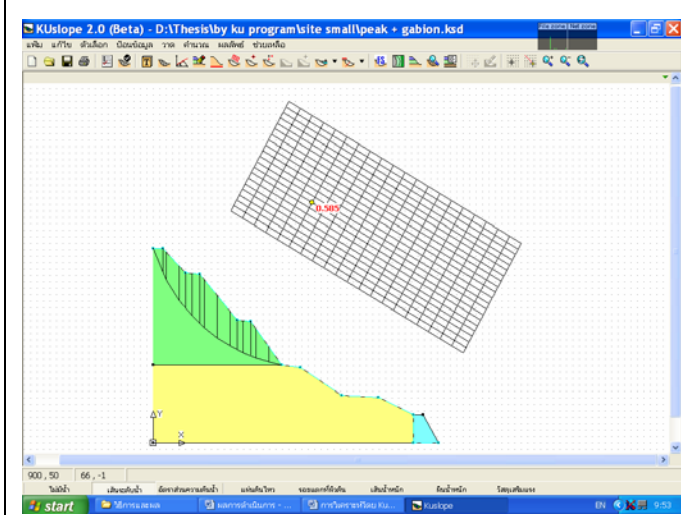
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้โปรแกรม KUslope 2.0 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินกรณีต่างๆแสดงได้ดังนี้

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม KUslope 2.0 ลาดดินช่วงกม. 13+300 ถึง 13+400

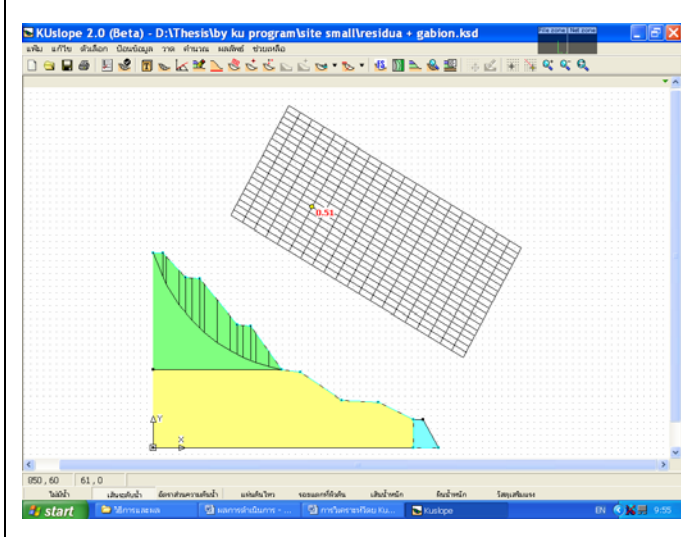
	<p>รูปที่ ค-1. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.600</p>
	<p>รูปที่ ค-2. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0</p>
	<p>รูปที่ ค-3. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.764</p>



รูปที่ ค-4. ใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้าง  
จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่าง  
ดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับ  
น้ำใต้ดิน FS = 2.178

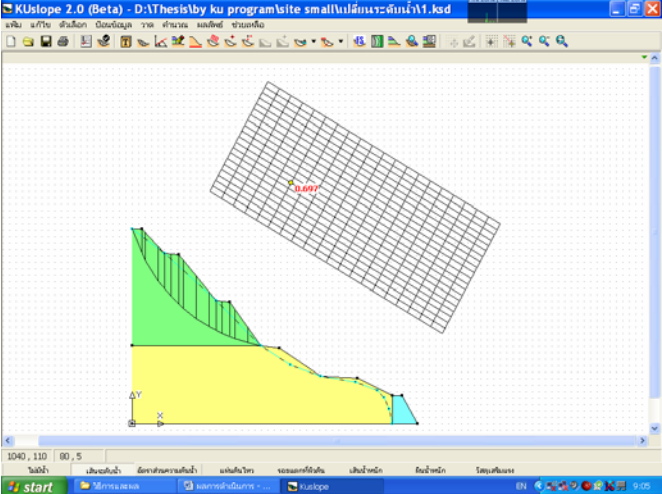
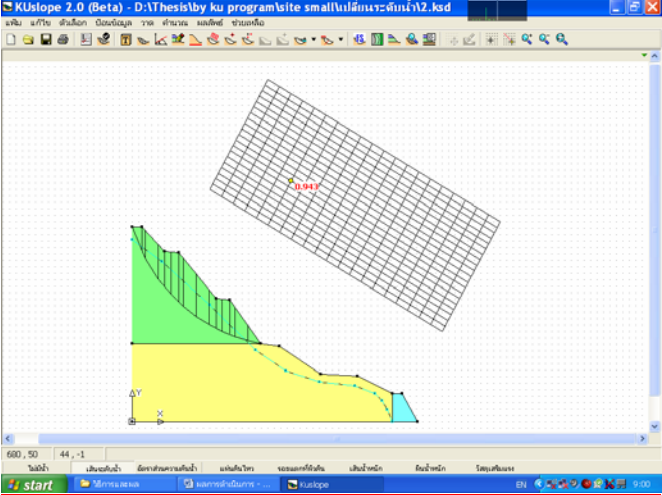
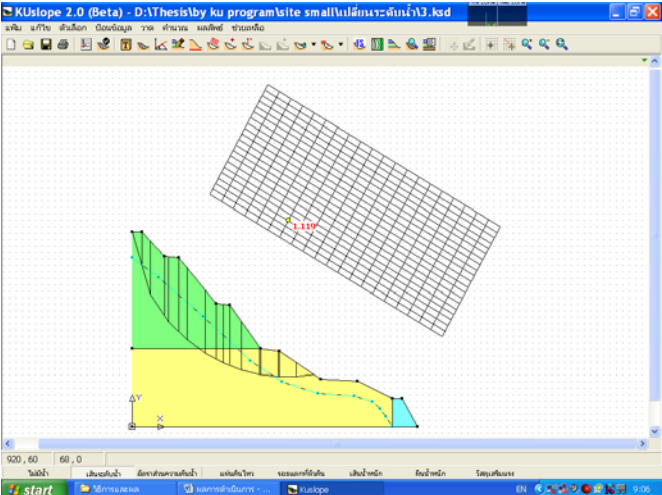


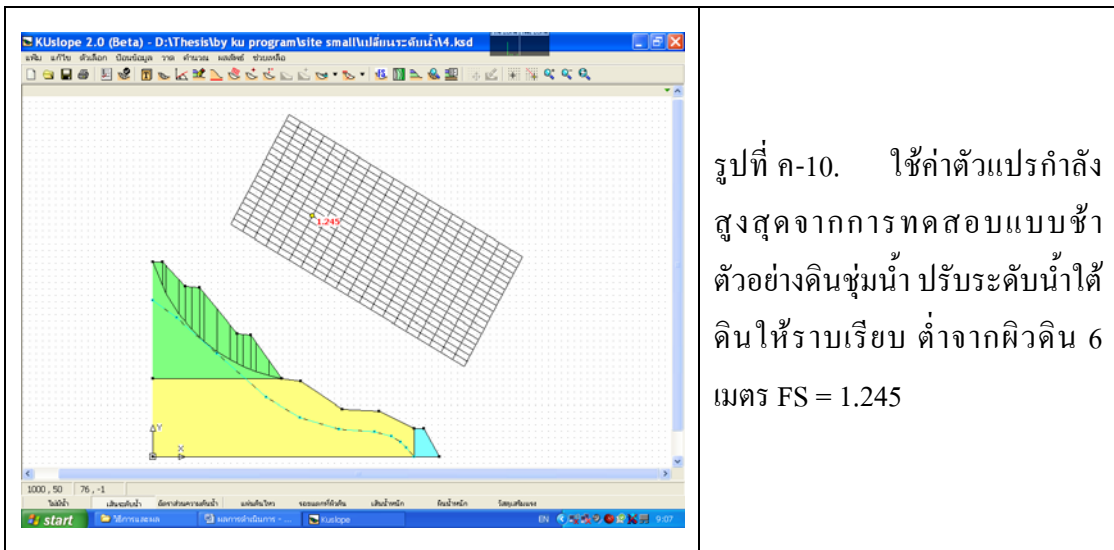
รูปที่ ค-5. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุด  
จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่าง  
ดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิว  
ดิน FS = 0.585



รูปที่ ค-6. ใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้าง  
จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่าง  
ดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิว  
ดิน FS = 0.510

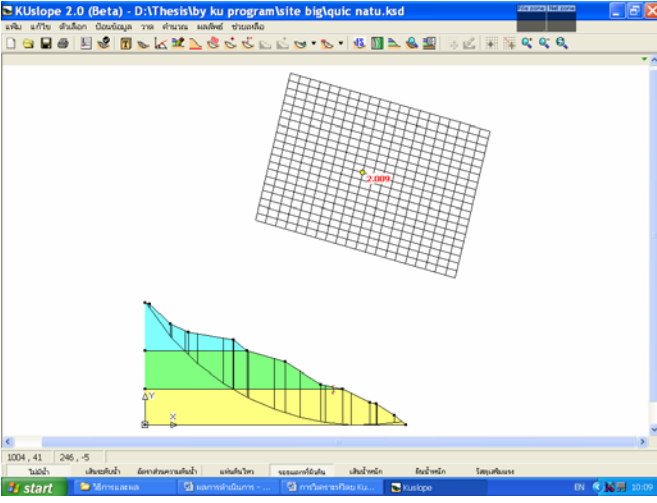
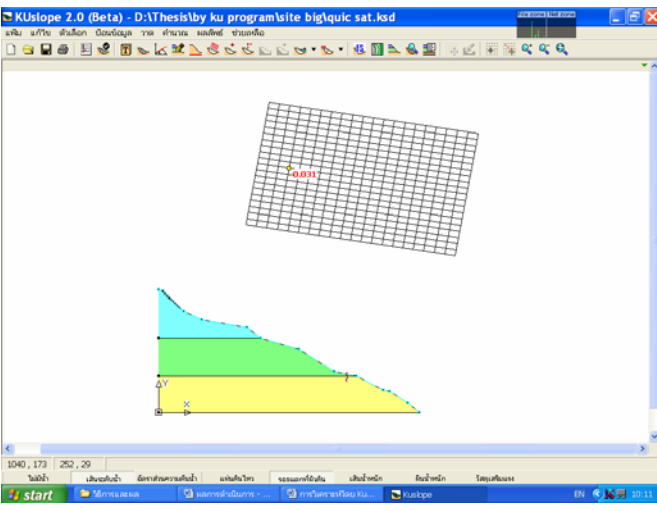
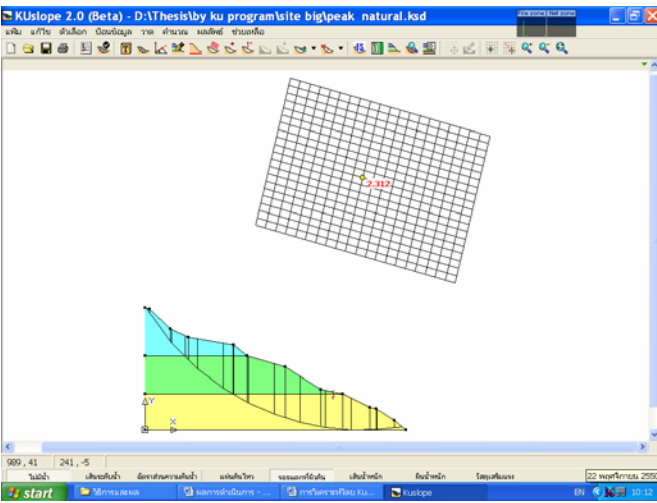
การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยการปรับระดับน้ำใต้ดิน

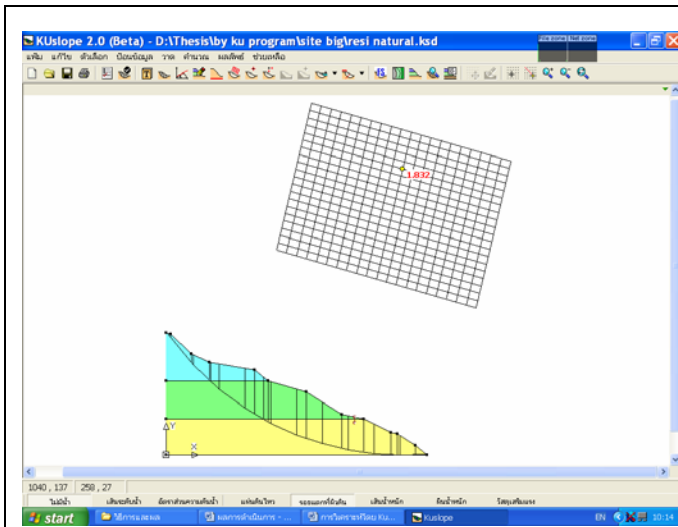
	<p>รูปที่ ค-7. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ปรับระดับน้ำใต้ดินให้ราบเรียบ ใกล้เคียงผิวดิน FS = 0.697</p>
	<p>รูปที่ ค-8. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ปรับระดับน้ำใต้ดินให้ราบเรียบ ต่ำจากผิวดิน 2 เมตร FS = 0.943</p>
	<p>รูปที่ ค-9. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ปรับระดับน้ำใต้ดินให้ราบเรียบ ต่ำจากผิวดิน 4 เมตร FS = 1.119</p>



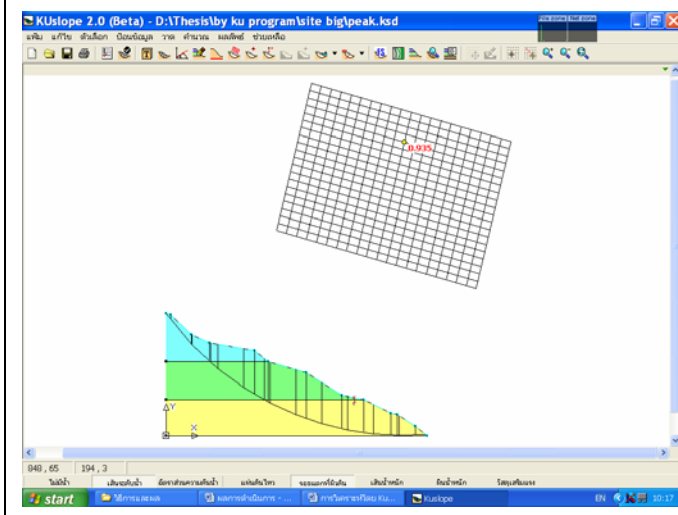


การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม KUslope ลาดดินช่วงกม. 13+900 ถึง 14+050

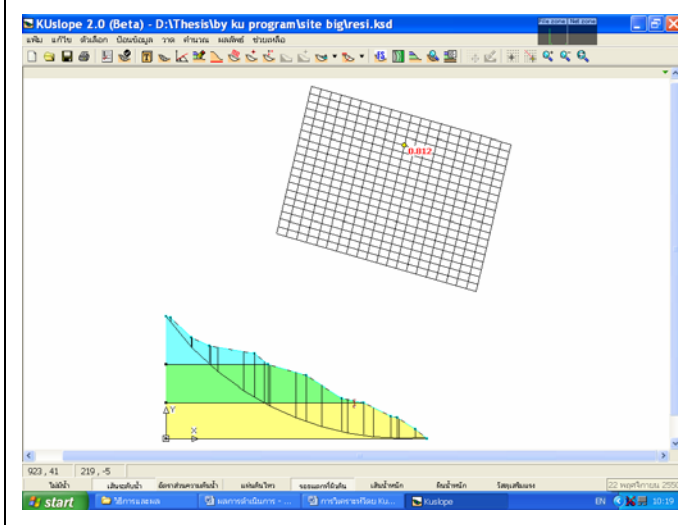
	<p>รูปที่ ค-11. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.009</p>
	<p>รูปที่ ค-12. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบเร็ว ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.031</p>
	<p>รูปที่ ค-13. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบช้า ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.312</p>



รูปที่ ค-14. ใช้ค่าตัวแปรกำลังค้ำ จากการศึกษาแบบซ้ำ ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 1.832

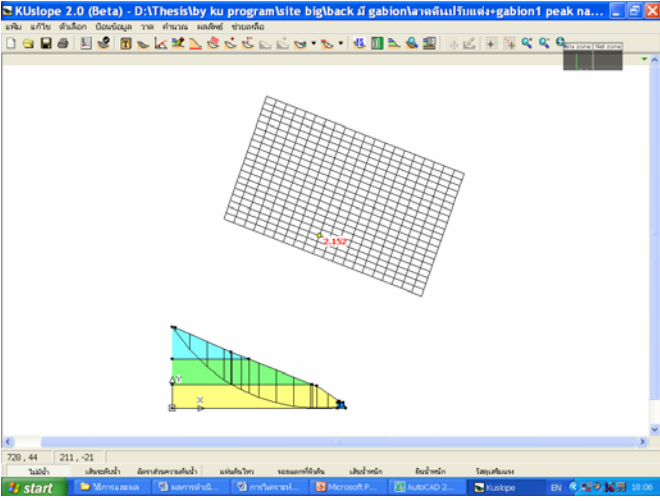
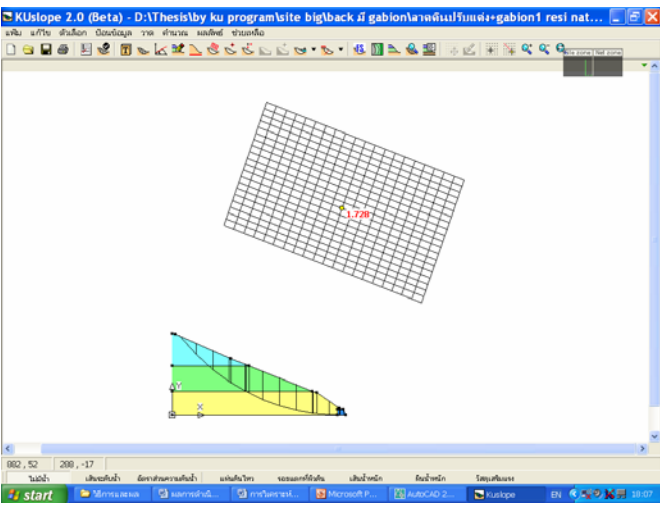
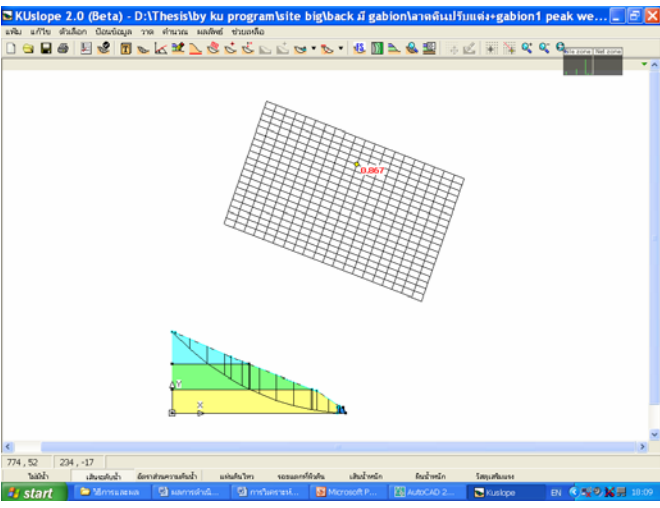


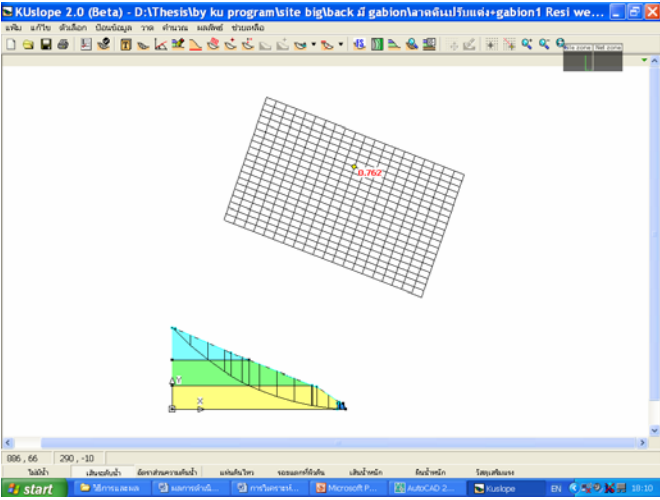
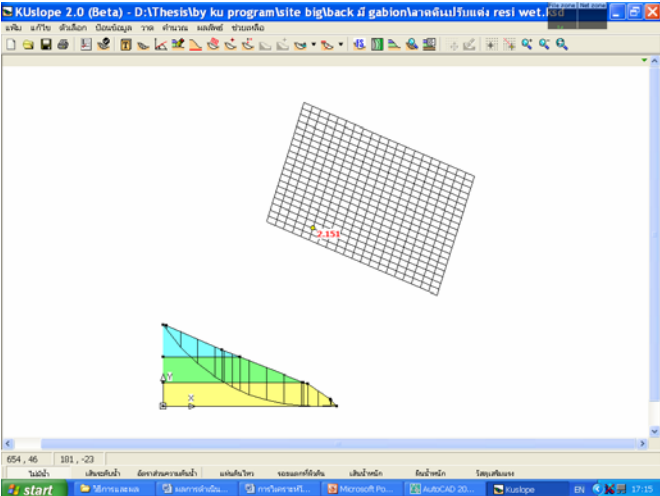
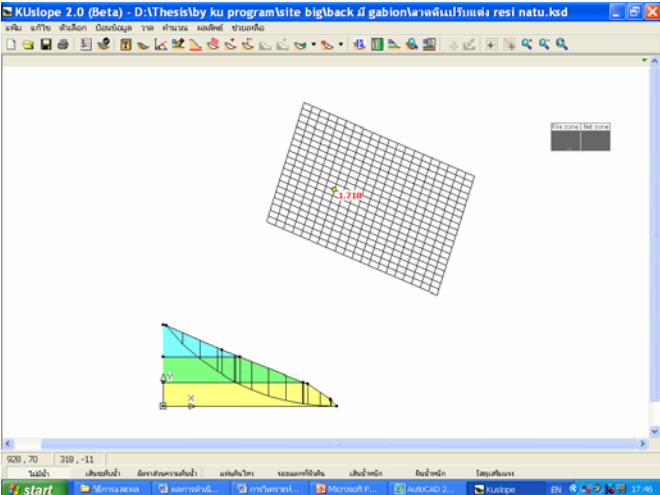
รูปที่ ค-15. ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุด จากการศึกษาแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.935

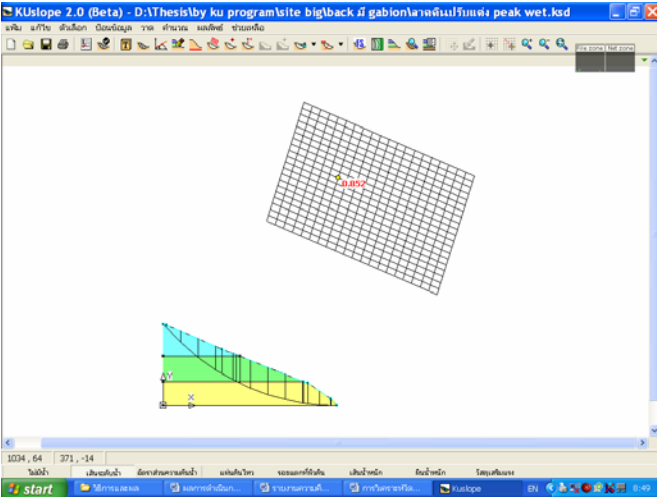
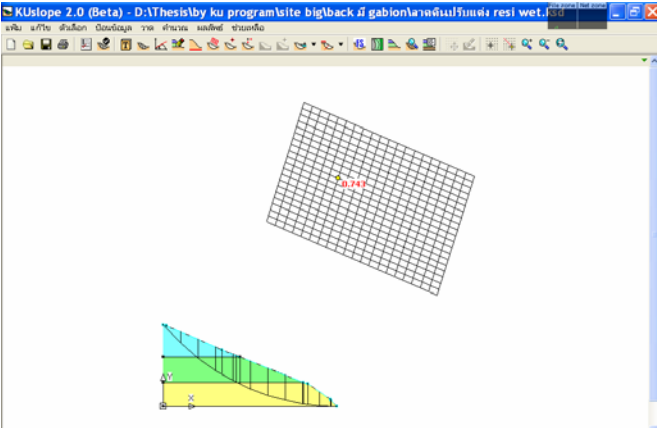
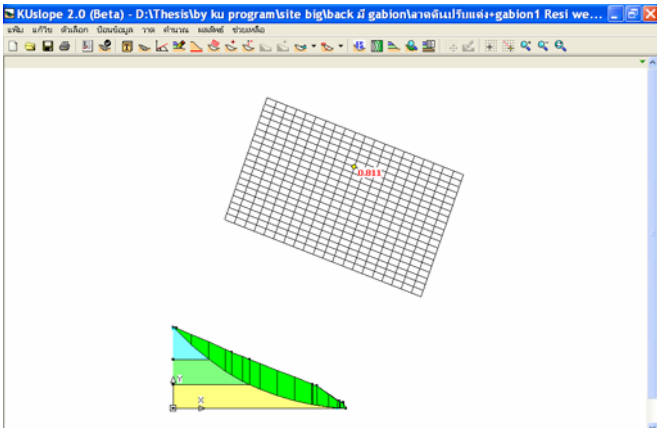


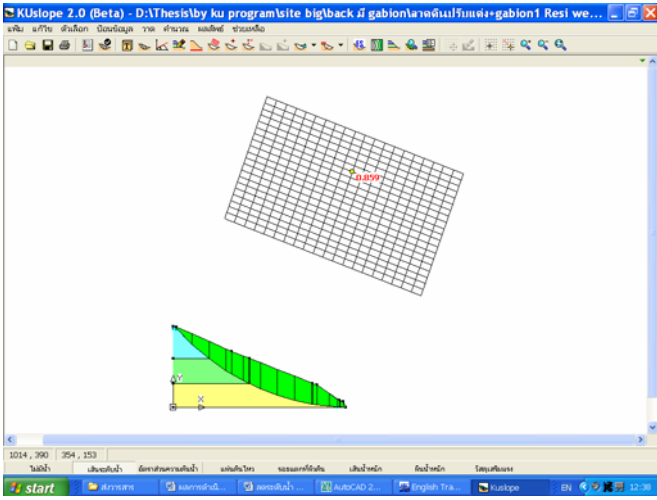
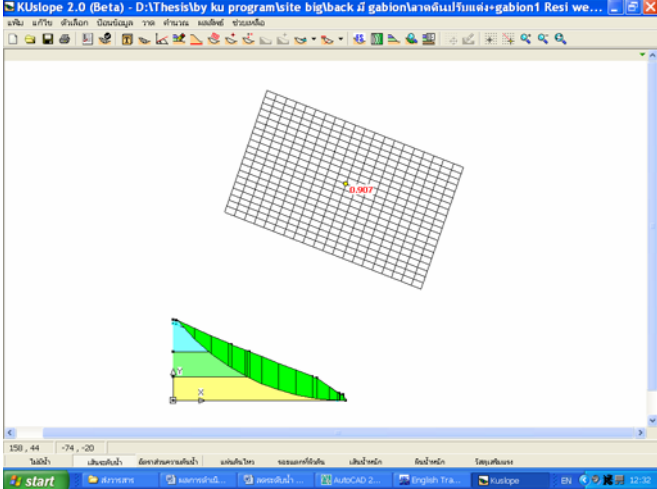
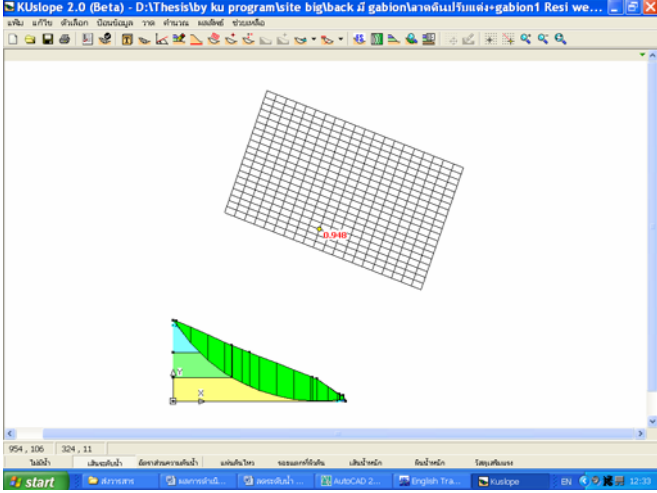
รูปที่ ค-16. ใช้ค่าตัวแปรกำลังค้ำ จากการศึกษาแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.812

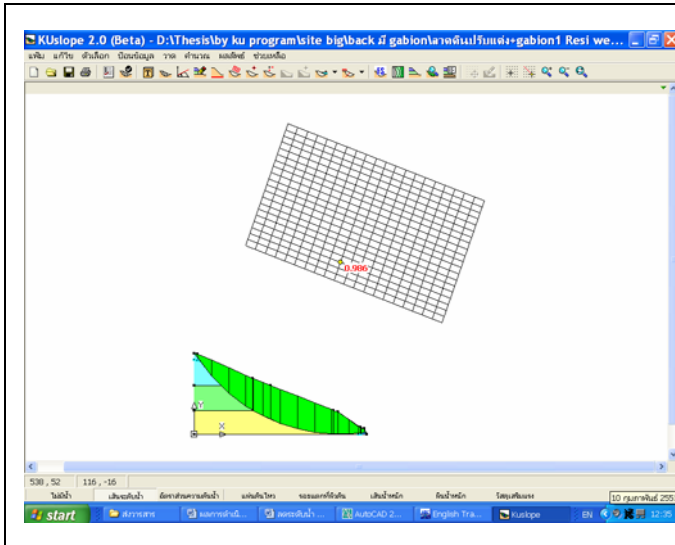
### การวิเคราะห์แบบย้อนกลับ

	<p>รูปที่ ค-17. ลาดดินก่อนการวิบัติมีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุด จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.152</p>
	<p>รูปที่ ค-18. ลาดดินก่อนการวิบัติมีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้าง จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 1.728</p>
	<p>รูปที่ ค-19. ลาดดินก่อนการวิบัติมีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุด จากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.867</p>

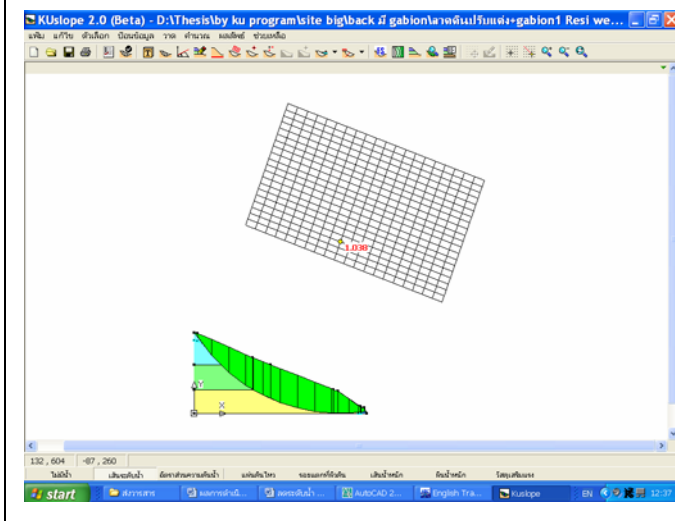
	<p>รูปที่ ค-20. ลาดดินก่อนการวิบัติมี กล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปร กำลังคงค้างจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ น้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.762</p>
	<p>รูปที่ ค-21. ลาดดินก่อนการวิบัติ ไม่มีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัว แปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินความชื้น ธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 2.151</p>
	<p>รูปที่ ค-22. ลาดดินก่อนการวิบัติ ไม่มีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัว แปรกำลังคงค้างจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินความชื้น ธรรมชาติ ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน FS = 1.718</p>

	<p>รูปที่ ค-23. ลาดดินก่อนการวิบัติ ไม่มีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังสูงสุดจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.852</p>
	<p>รูปที่ ค-24. ลาดดินก่อนการวิบัติ ไม่มีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้างจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน FS = 0.743</p>
	<p>รูปที่ ค-25. ลาดดินก่อนการวิบัติ มีกล่องลวดตาข่ายฯ ใช้ค่าตัวแปรกำลังคงค้างจากการทดสอบแบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 1 เมตร FS = 0.811</p>

	<p>รูปที่ ค-26. ลาดดินก่อนการวิบัติมี กล่องลวดตาข่าย ใช้ค่าตัวแปร กำลังคงค้างจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ น้ำใต้ดินต่ำจากผิวดิน 2 เมตร FS = 0.869</p>
	<p>รูปที่ ค-27. ลาดดินก่อนการวิบัติมี กล่องลวดตาข่าย ใช้ค่าตัวแปร กำลังคงค้างจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ น้ำใต้ดินต่ำจากผิวดิน 3 เมตร FS = 0.907</p>
	<p>รูปที่ ค-28. ลาดดินก่อนการวิบัติมี กล่องลวดตาข่าย ใช้ค่าตัวแปร กำลังคงค้างจากการทดสอบ แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ น้ำใต้ดินต่ำจากผิวดิน 4 เมตร FS = 0.948</p>

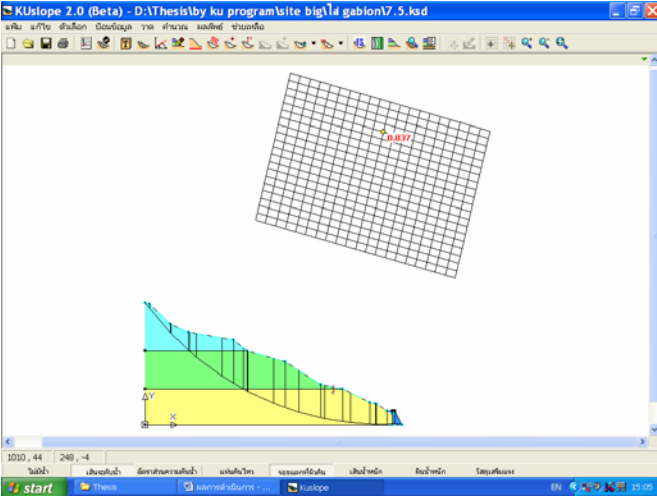
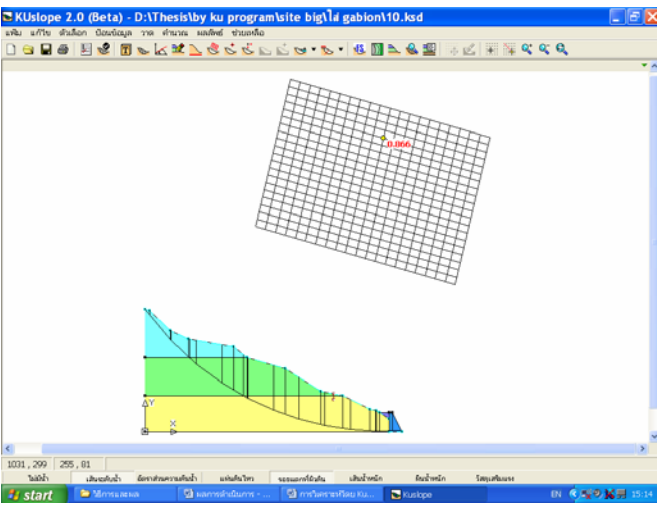
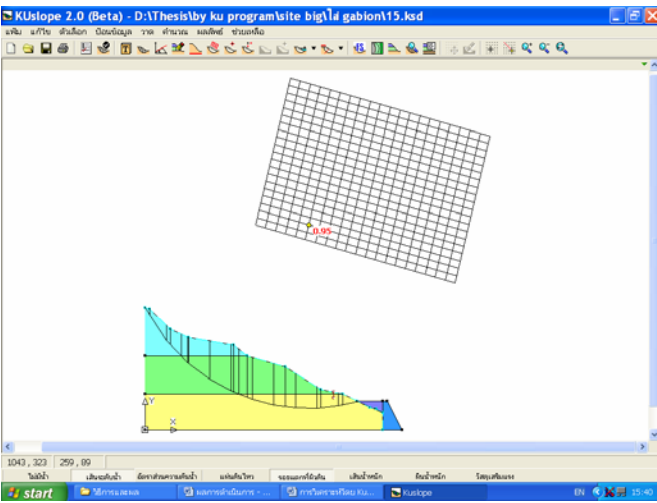


รูปที่ ค-29. ลาดดินก่อนการวิบัติมี  
กล่องลวดตาข่ายๆ ใช้ค่าตัวแปร  
กำลังคงค้ำจากการทดสอบ  
แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ  
น้ำใต้ดินต่ำจากผิวดิน 5 เมตร FS =  
0.986

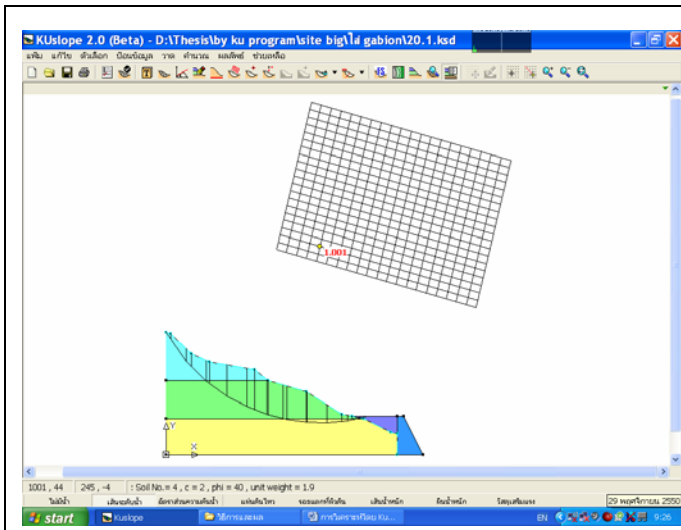


รูปที่ ค-30. ลาดดินก่อนการวิบัติมี  
กล่องลวดตาข่ายๆ ใช้ค่าตัวแปร  
กำลังคงค้ำจากการทดสอบ  
แบบซ้ำ ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ ค่าระดับ  
น้ำใต้ดินต่ำจากผิวดิน 5 เมตร FS =  
1.038

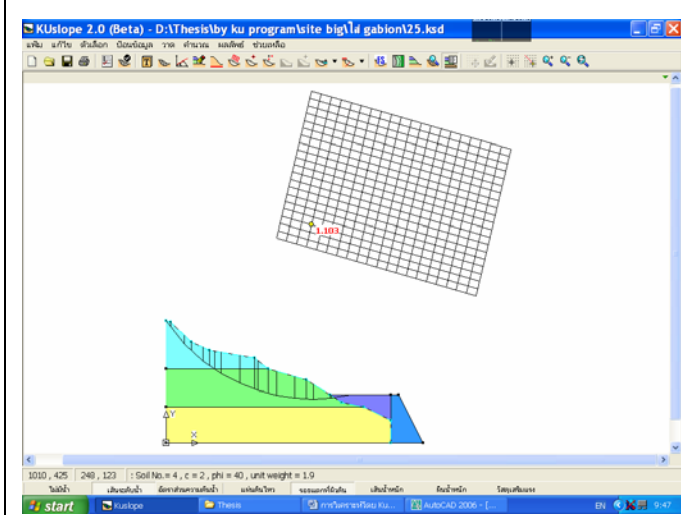
การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน (วิธีการใช้กล่องลวดตาข่ายใหญ่)

	<p>รูปที่ ก-31. ใช้กล่องลวดตาข่ายฯ ความสูง 7.5 เมตร FS = 0.837</p>
	<p>รูปที่ ก-32. ใช้กล่องลวดตาข่ายฯ ความสูง 10 เมตร FS = 0.866</p>
	<p>รูปที่ ก-33. ใช้กล่องลวดตาข่ายฯ ความสูง 15 เมตร FS = 0.950</p>

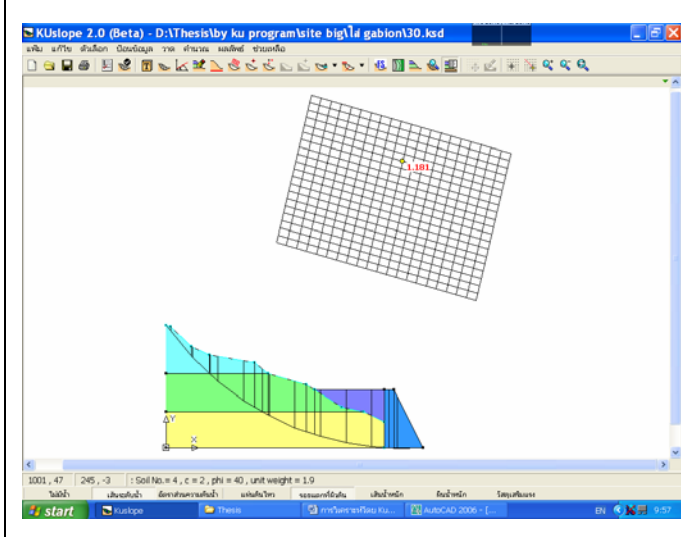




รูปที่ ค-34. ใช้กล่องลวดตาข่าย  
ความสูง 20 เมตร FS = 1.001

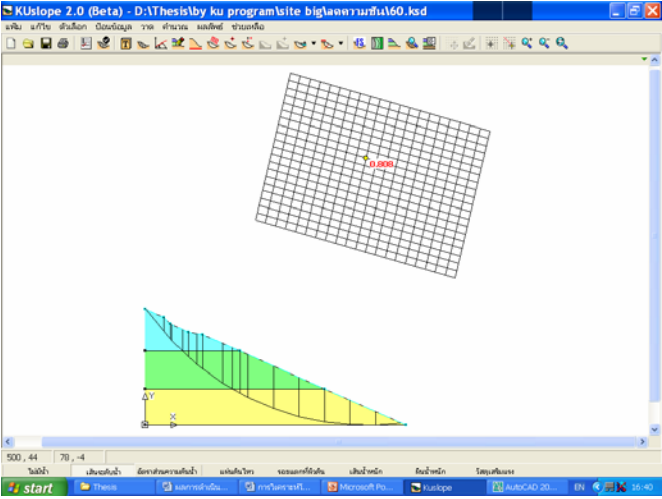
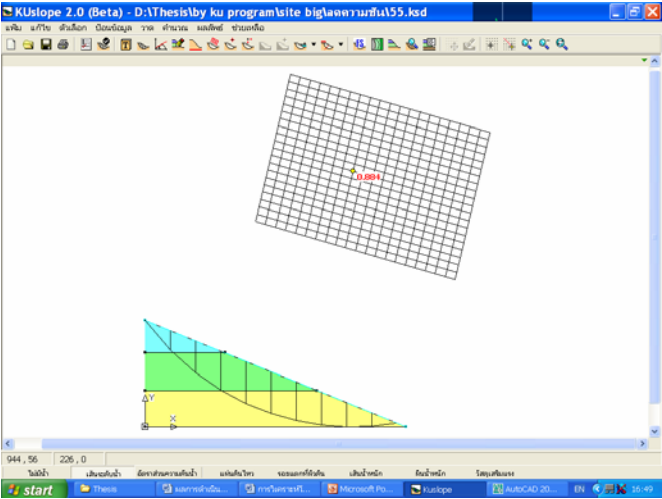
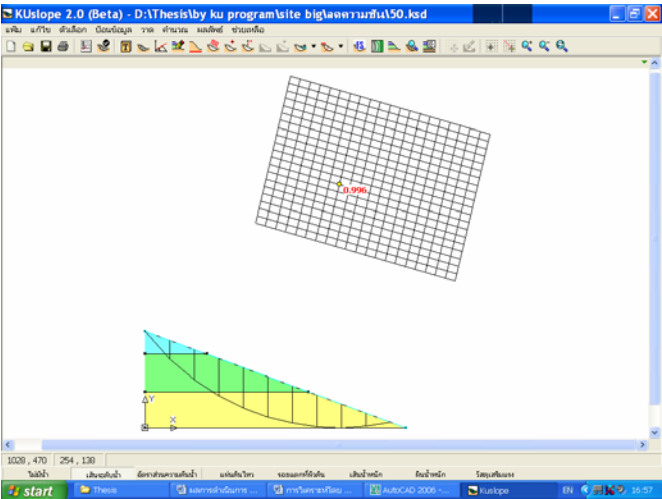


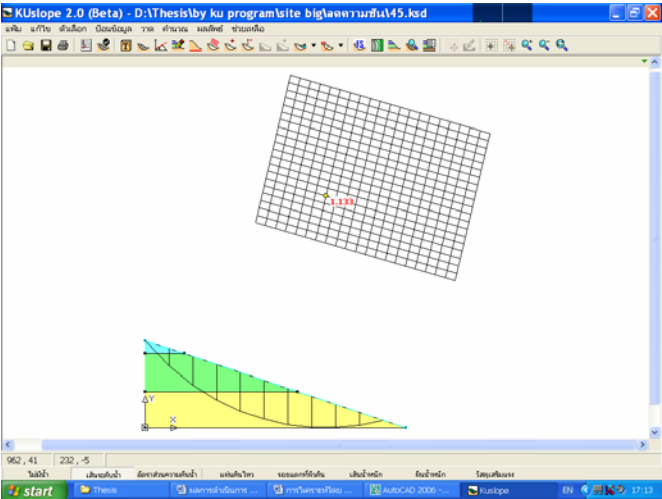
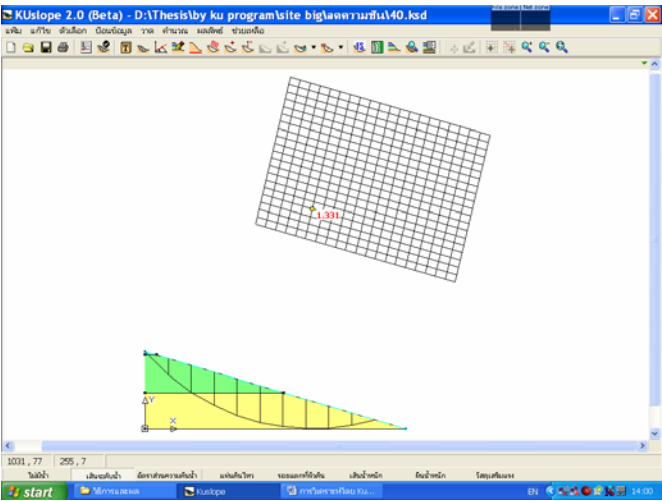
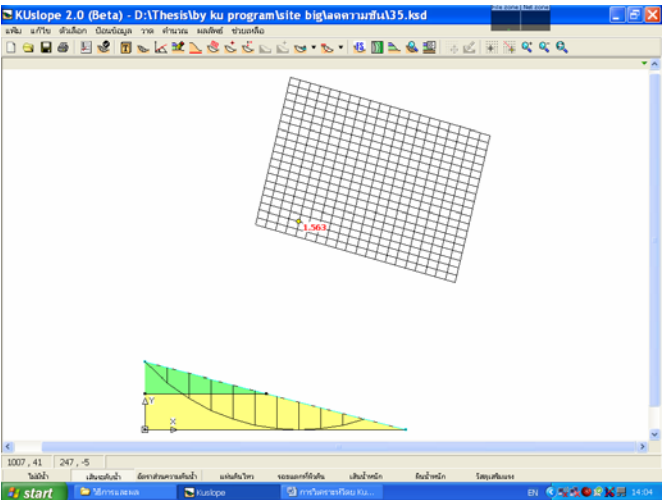
รูปที่ ค-35. ใช้กล่องลวดตาข่าย  
ความสูง 25 เมตร FS = 1.103



รูปที่ ค-36. ใช้กล่องลวดตาข่าย  
ความสูง 30 เมตร FS = 1.181

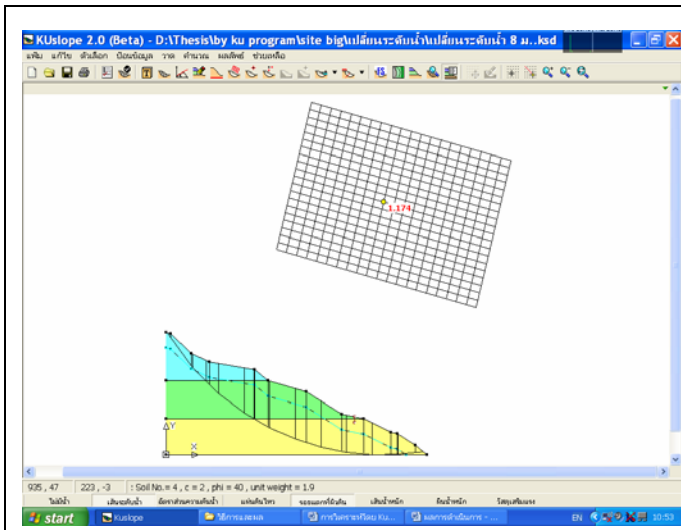
การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน (การปรับลดความสูงลาดดิน)

	<p>รูปที่ ก-37. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 60 เมตร FS = 0.808</p>
	<p>รูปที่ ก-38. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 55 เมตร FS = 0.884</p>
	<p>รูปที่ ก-39. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 50 เมตร FS = 0.996</p>

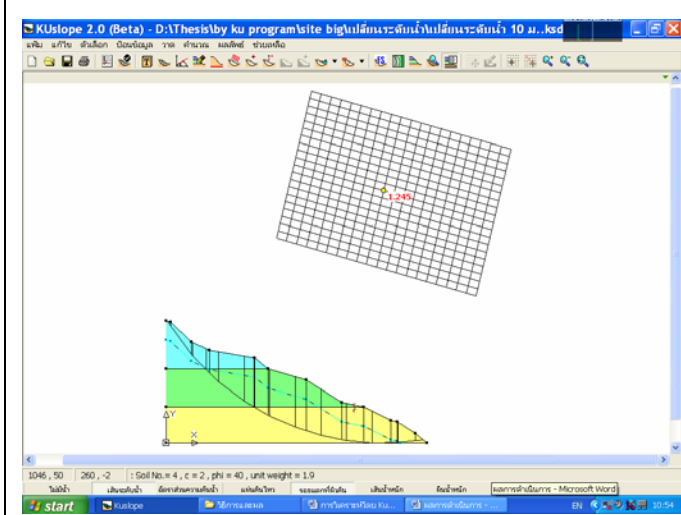
	<p>รูปที่ ก-40. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 45 เมตร FS = 1.133</p>
	<p>รูปที่ ก-41. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 40 เมตร FS = 1.331</p>
	<p>รูปที่ ก-42. ลดความสูงลาดดิน เหลือ 35 เมตร FS = 1.563</p>

การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน (การควบคุมระดับน้ำใต้ดิน)

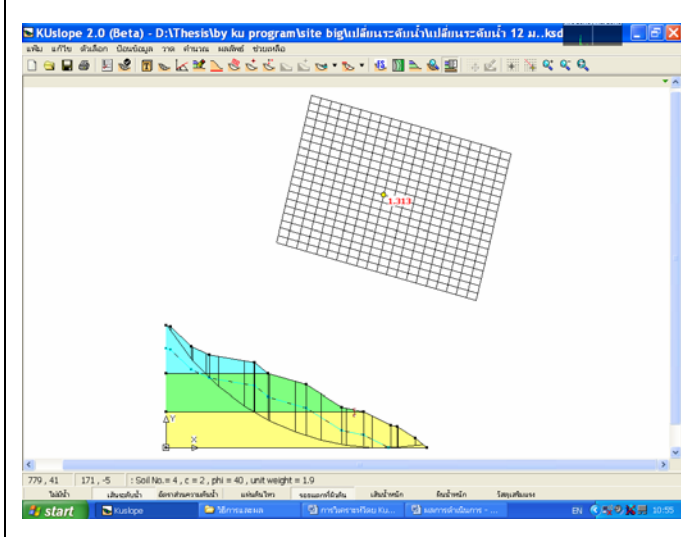
	<p>รูปที่ ก-43. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 2 เมตร FS = 0.917</p>
	<p>รูปที่ ก-44. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร FS = 1.010</p>
	<p>รูปที่ ก-45. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร FS = 1.095</p>



รูปที่ ก-46. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 8 เมตร FS = 1.174

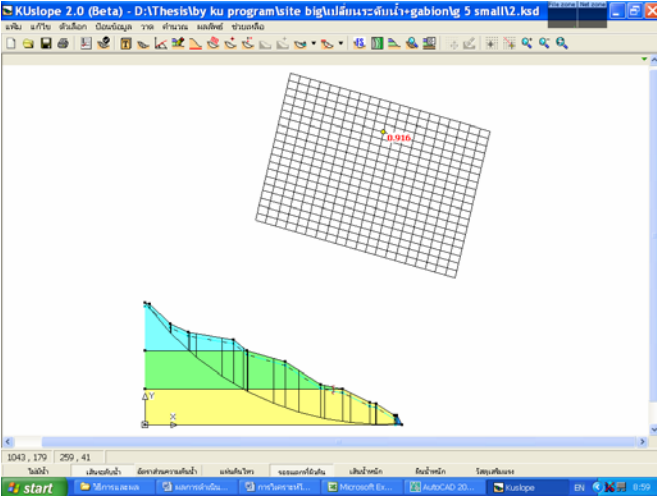
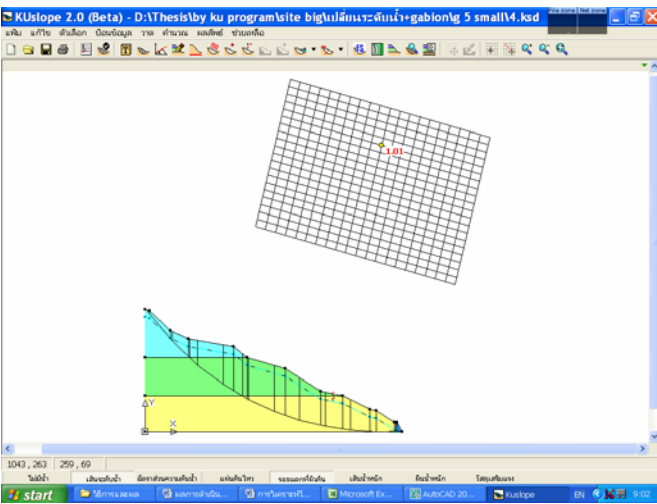
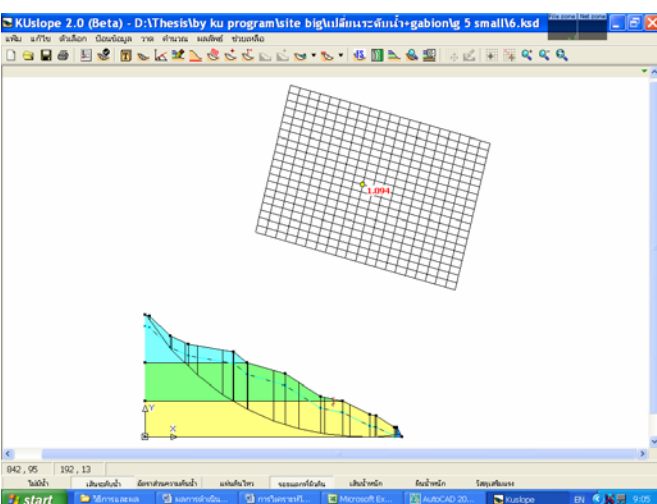


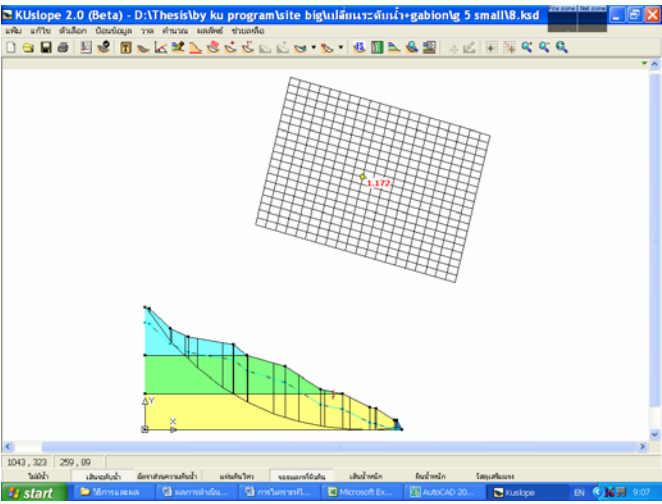
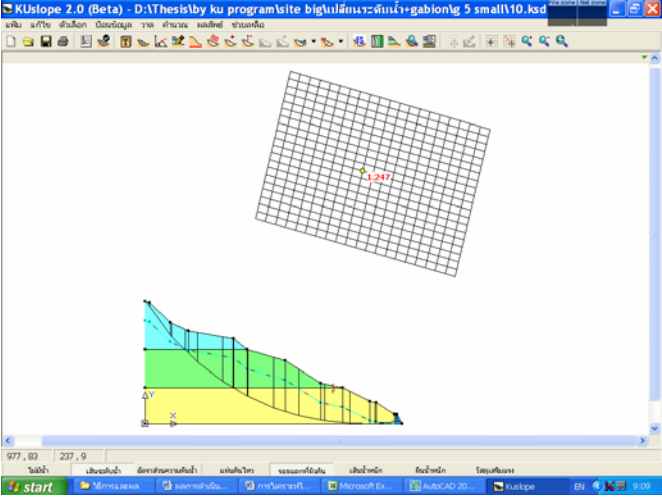
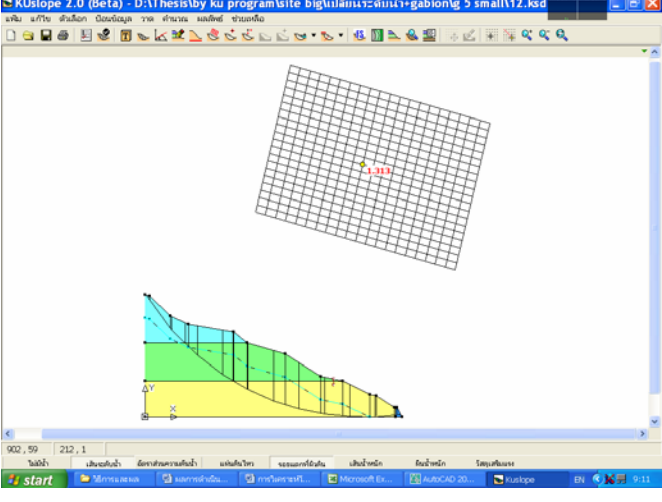
รูปที่ ก-47. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 10 เมตร FS = 1.245

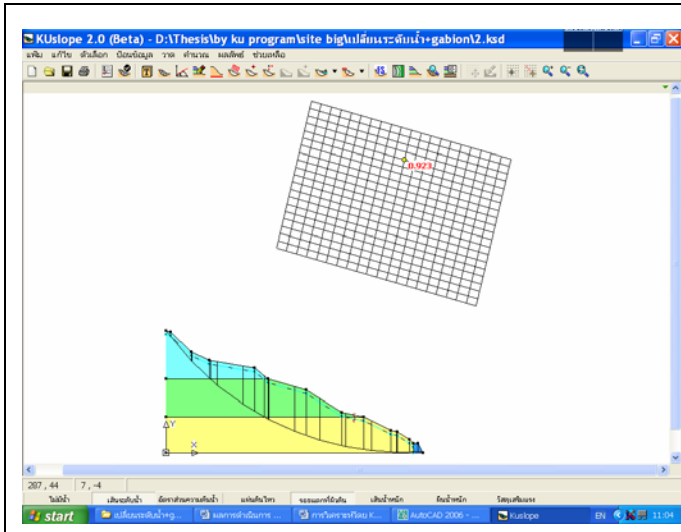


รูปที่ ก-48. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 12 เมตร FS = 1.313

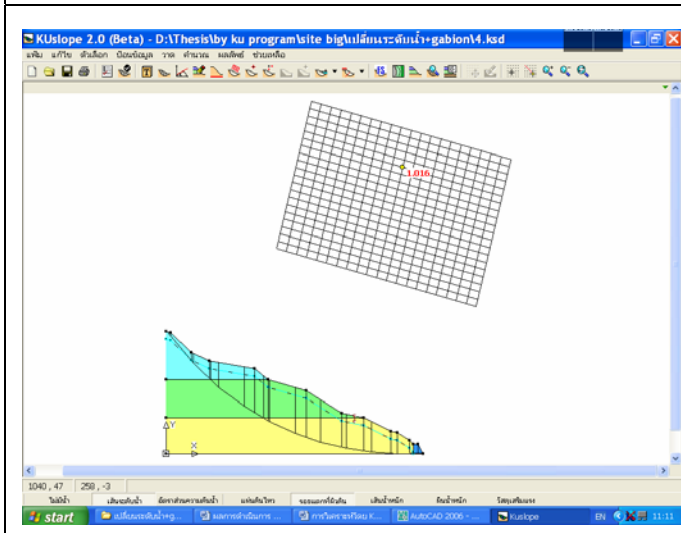
การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน (การใช้กล่องลวดตาข่ายและควบคุมระดับน้ำใต้ดิน)

	<p>รูปที่ ค-49. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 2 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 3.5 เมตร FS = 0.916</p>
	<p>รูปที่ ค-50. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 3.5 เมตร FS = 1.010</p>
	<p>รูปที่ ค-51. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 3.5 เมตร FS = 1.094</p>

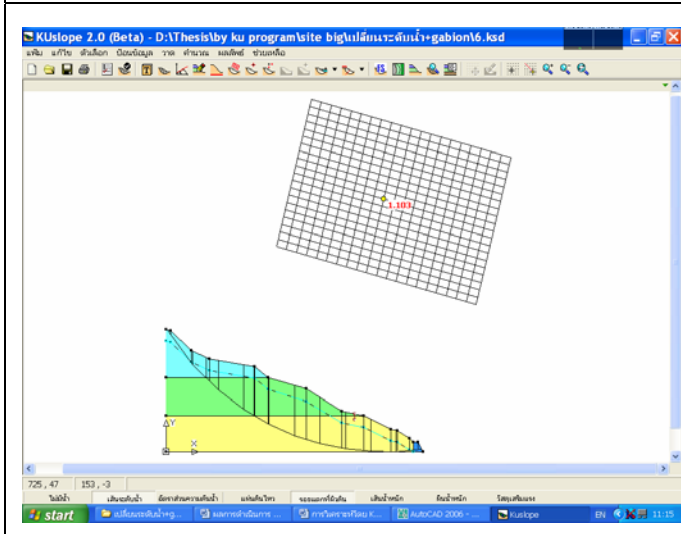
	<p>รูปที่ ค-52. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 8 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลีค 3.5 เมตร FS = 1.172</p>
	<p>รูปที่ ค-53. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 10 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลีค 3.5 เมตร FS = 1.247</p>
	<p>รูปที่ ค-54. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 12 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลีค 3.5 เมตร FS = 1.313</p>



รูปที่ ก-55. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 2 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 0.923

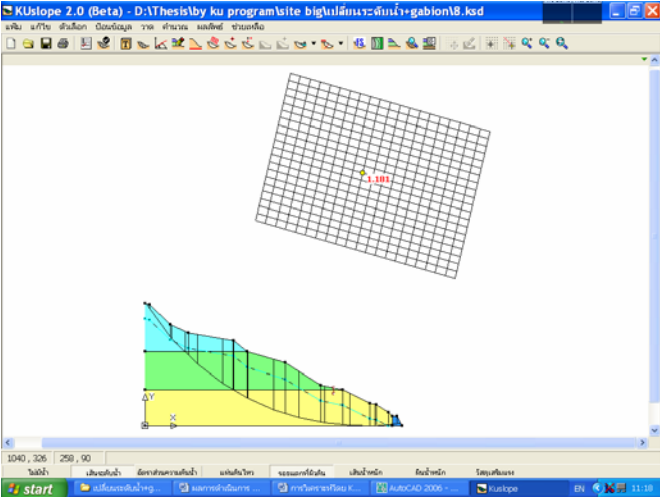
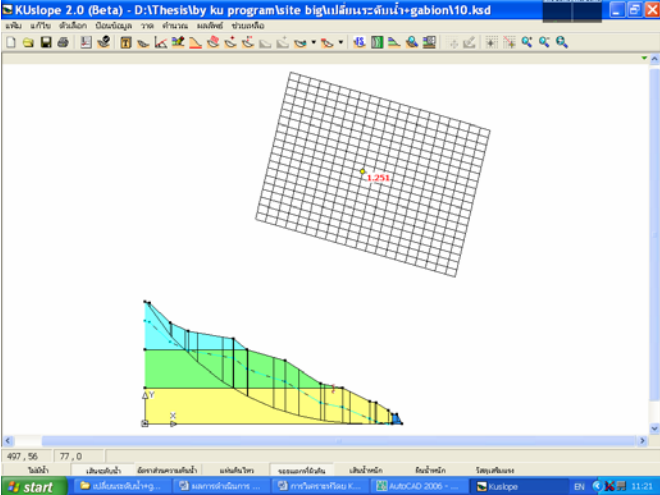
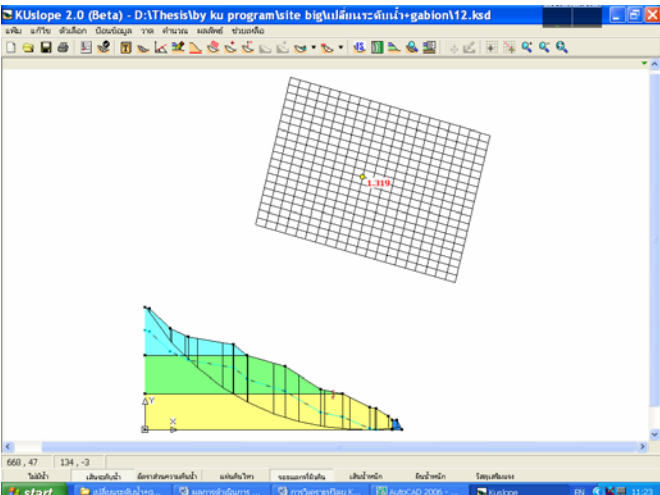


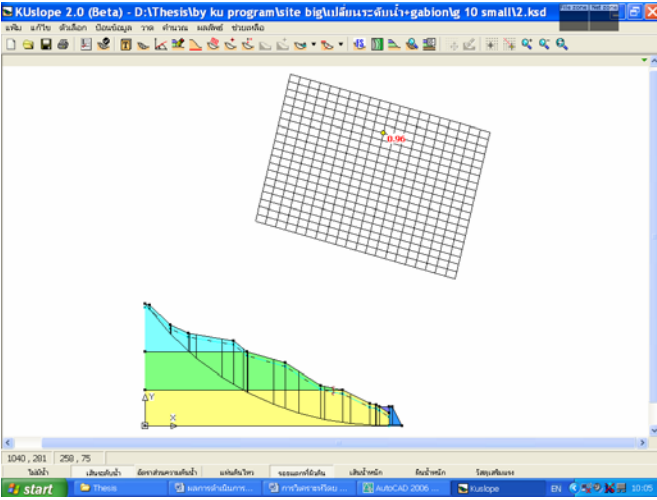
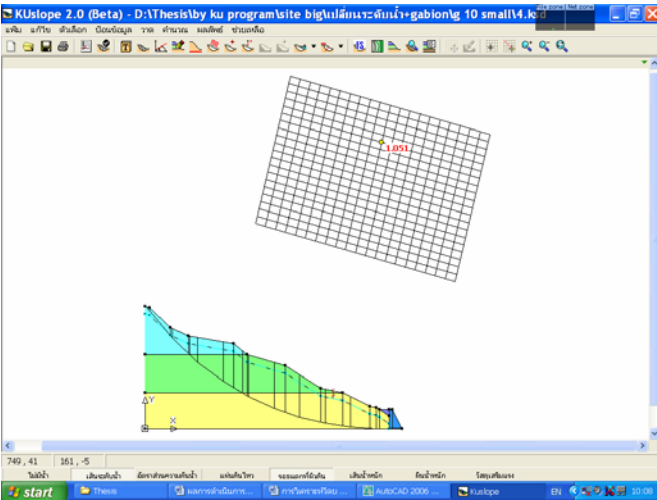
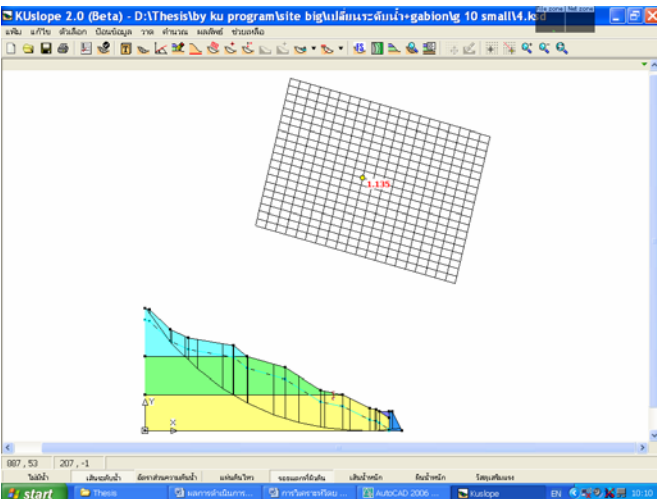
รูปที่ ก-56. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 1.016



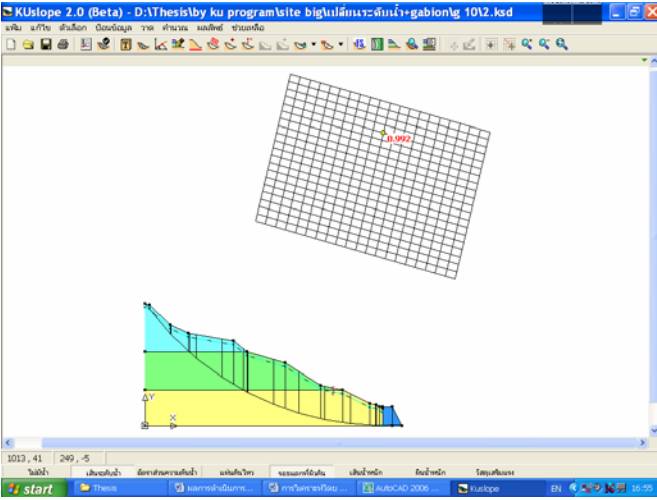
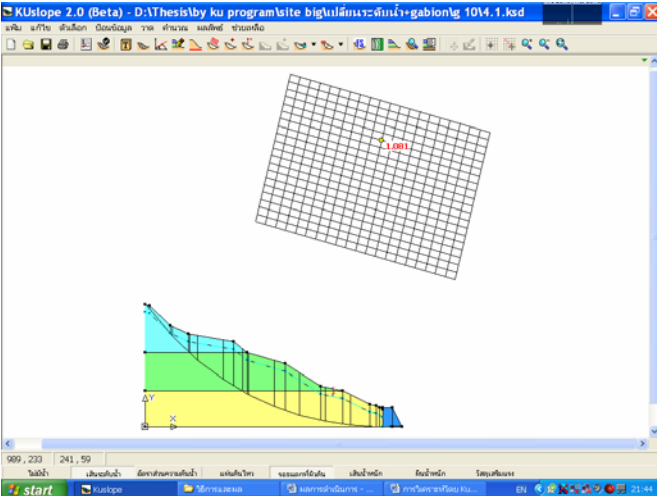
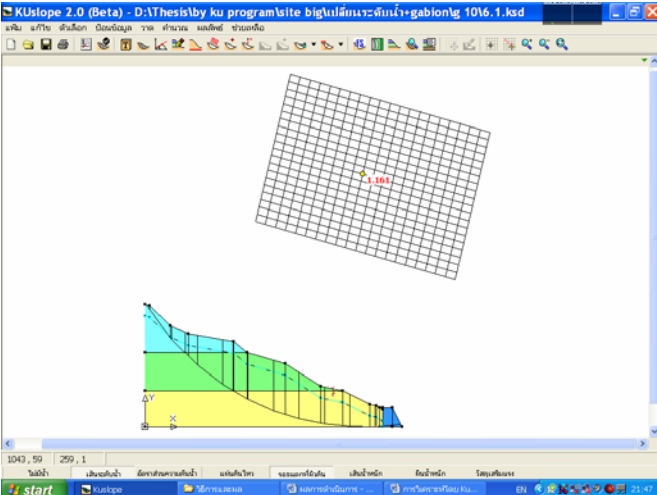
รูปที่ ก-57. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 1.103



	<p>รูปที่ ก-58. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 8 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 1.181</p>
	<p>รูปที่ ก-59. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 10 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 1.251</p>
	<p>รูปที่ ก-60. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 12 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 5 เมตร ลึก 5 เมตร FS = 1.319</p>

	<p>รูปที่ ก-61. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 2 เมตร ก่อสร้างตลิ่งชำรุด สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 0.960</p>
	<p>รูปที่ ก-62. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร ก่อสร้างตลิ่งชำรุด สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 1.051</p>
	<p>รูปที่ ก-63. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร ก่อสร้างตลิ่งชำรุด สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 1.135</p>

	<p>รูปที่ ก-64. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 8 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 1.212</p>
	<p>รูปที่ ก-65. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 10 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 1.285</p>
	<p>รูปที่ ก-66. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 12 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 7 เมตร FS = 1.350</p>

	<p>รูปที่ ก-67. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 2 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 0.992</p>
	<p>รูปที่ ก-68. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 4 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 1.081</p>
	<p>รูปที่ ก-69. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร กล่องลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 1.161</p>

	<p>รูปที่ ก-70. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 8 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 1.236</p>
	<p>รูปที่ ก-71. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 10 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 1.307</p>
	<p>รูปที่ ก-72. ค่าระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดิน 12 เมตร ก่อสร้างลวดตาข่าย สูง 10 เมตร ลึก 10 เมตร FS = 1.373</p>

## การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

### ก. การเผยแพร่ในรูปแบบของบทความวารสาร

อดุลย์ ยะโก๊บบ, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม. การศึกษาเสถียรภาพของลาดดินเหนือก้นทาง : กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 00411001 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์. บทความวิชาการ วารสารวิศวกรรมสาร มข. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

# การศึกษาเสถียรภาพของลาดดินเหนือก้นทาง : กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 00411001

## ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์

อดุลย์ ยะโก๊ป<sup>1)</sup> ดนุพล ตันนโยภาส<sup>2)</sup> และ พิพัฒน์ ทองฉิม<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> นิสิตนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>2)</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>3)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Email:ADUN\_YA@HOTMAIL.COM

### บทคัดย่อ

ลาดดินเหนือก้นทางในทางหลวงหมายเลข 00411001 ตอน อำเภอทุ่งสง – อำเภอร่อนพิบูลย์ ในจังหวัด นครศรีธรรมราช มักเกิดการวิบัติเป็นประจำในช่วงฤดูฝนของแต่ละปี บทความนี้ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินใน บริเวณดังกล่าว โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ นำมาทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนทั้งกำลังสูงสุดและกำลัง คงค้าง ที่สภาวะตัวอย่างดินความชื้นปกติและความชื้นสูงสุด ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพบว่า ลาดดินในขณะที่มี ความชื้นปกติ มีค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย แต่ลาดดินในสภาวะวิกฤติที่มีค่าความชื้นสูงสุด ค่าเสถียรภาพ ของลาดดินอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย ผลการวิเคราะห์แบบย้อนกลับพบว่า ลาดดินก่อนเกิดการวิบัติมีค่าเสถียรภาพ น้อยกว่าลาดดินหลังการวิบัติ การวิเคราะห์เพื่อศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินโดยใช้กล่องลวดตาข่าย บรรจุหินใหญ่ ก่อนหน้าที่มีการวิบัติ พบว่ามีส่วนช่วยให้ค่าเสถียรภาพลาดดินเพิ่มขึ้นน้อยมาก

**คำสำคัญ :** ลาดดินเหนือก้นทาง, เสถียรภาพลาดดิน, การวิบัติของลาดดิน, ลาดดินถล่ม

# **ASSESSMENT SLOPE STABILITY OF BACK SLOPE : CASE STUDY AT HIGHWAY NO. 00411001 SEGMENT OF THONGSONG DISTRICT – RON PHIBUN DISTRICT**

**Adun Yagob<sup>1)</sup> Danupon Tonnayopas<sup>2)</sup> and Pipat Thongchim<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> M.Eng. Program Student, Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Thailand

<sup>2)</sup> Assistant Professor, Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Thailand

<sup>3)</sup> Associate Professor, Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Thailand  
E-mail:ADUN\_YA@HOTMAIL.COM

## **ABSTRACT**

Back slope in highway no. 00411001 segment of Thongsong district – Ron phibun district in Nakhon si thammarat province often occur landslides in rain season many year ago. This paper assessment slope stability aforementioned area. Soil sample undisturbed tested shear strength both peak strength and residual strength at natural water content and nearly saturated water content soil sample. Slope stability analysis results slope in natural water content safe but slope in worst case nearly saturated water content not safety. Slope stability back analysis results stability of geometric slope before failure less than geometric slope after failure. Analysis slope stability improvement by gabions before slope failure results slope stability increased be small.

**Keywords :** Back slope, Slope stability, Slope failure, Land slide

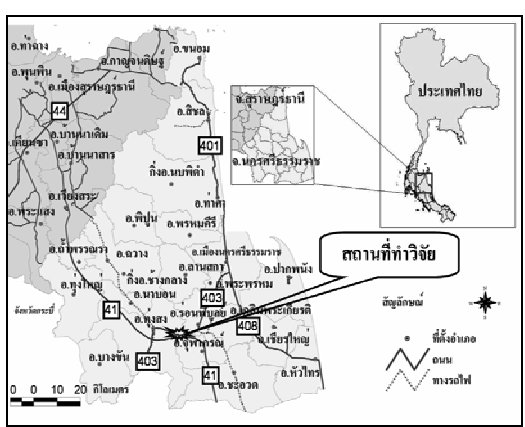


### บทนำ

ปัญหาลาดดินถล่มมักจะเกิดขึ้นในฤดูฝนปีที่ฝนตกหนัก ขณะที่ฝนตกอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำและระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น หากฤดูฝนปีไหนที่มีปริมาณน้ำฝนตกมากพอทำให้อัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดปัญหาลาดดินถล่มตามมา เช่นเดียวกับลาดดินที่เกิดจากการตัดถนนผ่านลาดเขาในทางหลวงหมายเลข 00411001 ในช่วงระหว่างอำเภอทุ่งสงกับอำเภอร่อนพิบูลย์ ช่วงกม.13+900 ถึง กม.14+050 ด้านขวาทาง เกิดปัญหาลาดดินถล่มเลื่อนตัวออกมาทับผิวจราจรในหลายปีของช่วงฤดูฝน บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินช่วงบริเวณดังกล่าว โดยพิจารณาลาดดินในสภาวะปกติความชื้นธรรมชาติ และในสภาวะวิกฤติ (Worst case) ความชื้นเกือบอิ่มตัวเมื่อฝนตกหนัก และพิจารณาถึงกรณีที่ลาดดินมีการเลื่อนตัวมาก่อน โดยใช้ค่ากำลังของดินที่มีการเลื่อนตัวในแนวผิวการวิบัติที่มาก (Large Displacement) หรือกำลังคงค้าง (Residual Strength) ของดิน

### ประวัติและความเป็นมาของลาดดิน

ทางหลวงหมายเลข 00411001 ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเส้นทางหลักที่ใช้ในการเดินทางจากภาคใต้สู่ภาคกลางของประเทศ หากพิจารณาดูสภาพภูมิประเทศของเส้นทางดังกล่าวด้วยภาพถ่ายทางอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2 เห็นได้ว่าเป็นเส้นทางที่ตัดผ่านบริเวณเทือกเขานครศรีธรรมราช ลักษณะการวางแนวเส้นทางพยายามลัดเลาะไปตามช่องเขา เพื่อหลีกเลี่ยงแนวทางที่ต้องขึ้นเขาลาดชัน ในการออกแบบและก่อสร้างจำเป็นต้องตัดลาดดินส่วนล่าง (Toe) ของลาดดินภูเขา เพื่อให้เป็นพื้นที่แนวราบที่สามารถก่อสร้างเป็นคันทางและผิวทางได้ จึงเกิดเป็นลาดดินเหนือคันทาง (Back Slope) ในช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 ที่มีความลาดชัน



รูปที่ 1 แผนที่เส้นทางสถานที่ทำวิจัย



รูปที่ 2 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสถานที่ทำวิจัย

ลาดดินบริเวณนี้ได้เกิดการวิบัติมาแล้วหลายครั้ง คือประมาณช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2543 ซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝน มีฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน เกิดการเลื่อนตัวและพังทลายของลาดดินเข้ามาบริเวณผิวจราจร หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ดำเนินการซ่อมแซมลาดดิน โดยการปรับแต่งลาดดินเป็นขั้นบันได และก่อสร้างกำแพงกันดินแบบแรงโน้มถ่วง (Gravity retaining wall) โดยใช้วัสดุประเภทกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabions)

ต่อมาในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2548 ตรงกับช่วงฤดูฝนอีกเช่นกัน มีฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน ได้เกิดการพังทลายของลาดดินในบริเวณนี้อีก ทำให้กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่เลื่อนตัวเข้ามาทับผิวจราจรดังแสดงในรูปที่ 3 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ดำเนินการรื้อกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ออก พร้อมทั้งได้ปรับแต่งลาดดินใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4 และในปี พ.ศ. 2549 ก็เกิดการเลื่อนตัวของลาดดินอีกเล็กน้อย



รูปที่ 3 การวิบัติของลาดดิน



รูปที่ 4 การแก้ไขการวิบัติและปรับแต่งลาดดิน

จากเหตุการณ์ในอดีตวิเคราะห์ได้ว่า ลาดดินในขณะที่ก่อสร้างหรือสภาวะความชื้นปกติ ดินอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ลาดดินยังคงสภาพอยู่ได้ปกติ เนื่องจากดินที่มีความชื้นน้อยหรือไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะมีแรงดันน้ำที่เป็นลบหรือเป็นแรงดูด (Suction) ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินมีมากขึ้น ประกอบกับระดับน้ำใต้ดินที่ไม่สูงชัน ดินยังมีกำลังรับแรงเฉือนได้มาก จึงยังไม่เกิดการวิบัติในขณะนั้น แต่เมื่อมีฝนตกปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินสองส่วนคือ ส่วนแรกทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นได้เข้าไปทำลายแรงดันน้ำที่เป็นลบหรือแรงดูดของน้ำและอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และเพิ่มความหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวหรือการยึดเกาะกัน (Cohesion) ในมวลดินลดลง ส่วนที่สองคือทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มแรงดันลอยตัว (Buoyancy Force) ทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ผลกระทบทั้งสองส่วนจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ฝนตก ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงระดับหนึ่งที่ลาดดินไม่อาจทรงตัวอยู่ได้โดยสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่อัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง ลาดดินจึงต้องปรับเปลี่ยนรูปทรงของตัวเองเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล จึงเกิดการทรุดตัวและเลื่อน

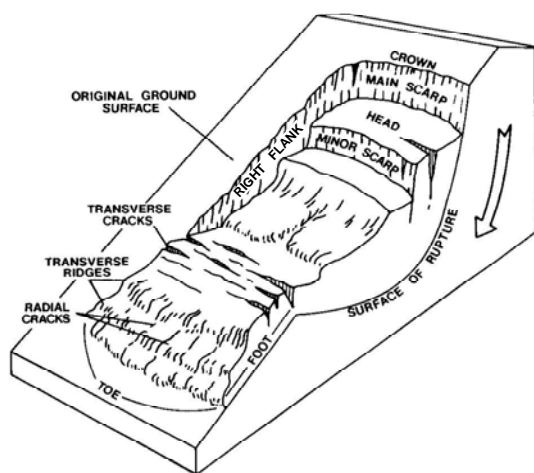
ไถลงมาหยุดตรงกับจุดที่ลาดดินเกิดความสมดุลในตัวเอง เกิดเป็นการวิบัติของลาดดินตามลำดับเหตุการณ์ดังกล่าว

### ความสัมพันธ์ของการวิบัติของลาดดินกับปริมาณน้ำฝน

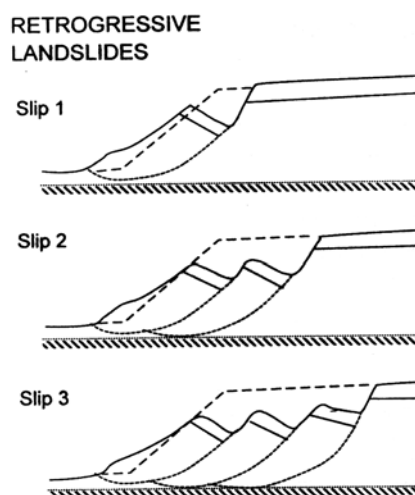
เมื่อเสถียรภาพของลาดดินขึ้นกับสภาวะที่ฝนตก จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนของศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก พบว่าปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2543 และเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2548 ที่เกิดการวิบัติของลาดดิน ปริมาณน้ำฝนจะมีมากกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย นั่นคือมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าฤดูฝนปกติ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำฝนที่มากกว่าปกติมีผลโดยตรงกับการวิบัติของลาดดินในปี พ.ศ. 2543 และปี พ.ศ. 2548 และสำหรับปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2549 ที่มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย แต่ก็ยังเกิดการพังทลายของลาดดินอีก ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากล่อง Gabions ที่เดิมเป็นส่วนที่ช่วยต้านทานการพังทลายของลาดดินได้ถูกรื้อออกเมื่อครั้งการพังทลายในปีพ.ศ. 2548 แล้ว และผลจากการพังทลายและเกิดการเลื่อนไถลในครั้งนั้นอาจทำให้กำลังของดินในแนวเฉือนวิบัติ (Surface of Rupture) ลดลงจนเหลือเป็นค่ากำลังคงค้าง (Residual Strength) ไปแล้ว ทำให้ลาดดินมีโอกาสเกิดการพังทลายได้ง่ายกว่าเดิม

### ทฤษฎีลักษณะการวิบัติของลาดดิน

Varnes (1978) อธิบายลักษณะการวิบัติของลาดดินแบบ Slump - Earth flow หรือลักษณะการเลื่อนตัวแบบ Rotational slides โดยมีส่วนประกอบที่หลักๆสำคัญประกอบด้วยผาชัน (Scarp), รอยแตกผิวดิน (Tension cracks), ผิวพิบัติการเฉือน (Surface of rupture) และส่วนฐานล่าง (Toe) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Block Diagram of Idealized Landslide Model  
(Adapt from Varnes, 1978)



รูปที่ 6 ลักษณะการพิบัติแบบถอยหลัง  
(Retrogressive slide) (Skempton and Hutchinson, 1969)

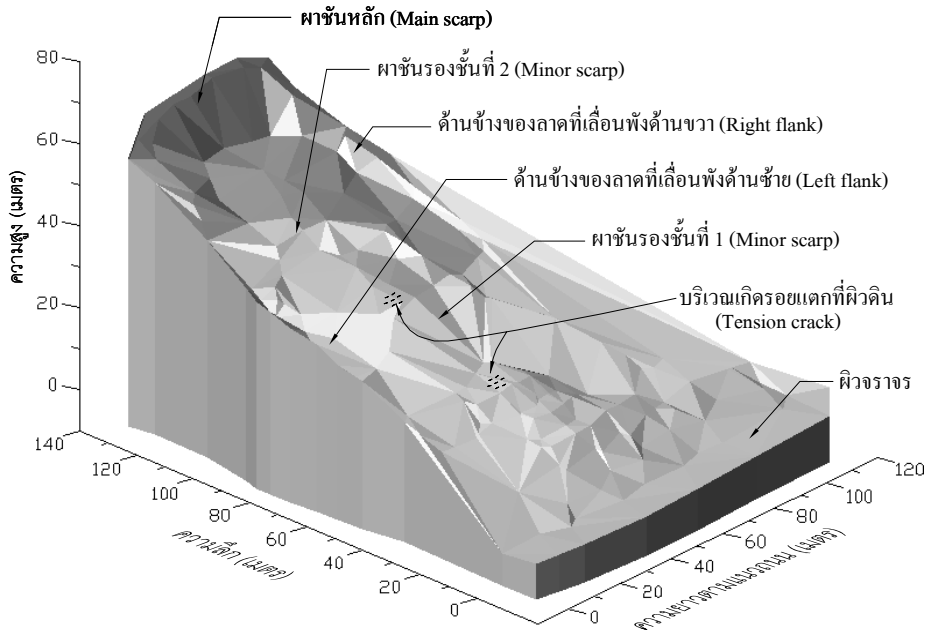
Bromhead (1994) อธิบายถึงการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชั้นส่วน (Multiple rotational slides) ว่า เป็นลักษณะการเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive) การวิบัติจะเกิดการเลื่อนตัวแบบก้าวหน้าที่ต่อเนื่องกันหลายชั้นส่วน (Progressive failure) กินเข้าไปในลาดดิน ดังแสดงในรูปที่ 6 ชั้นส่วนที่อยู่ด้านหน้า (Frontal elements) ที่เกิดการเลื่อนตัว มักจะมีลักษณะการหมุนมากกว่าชั้นส่วนอื่นที่เกิดการเลื่อนตัว กระบวนการเกิดการวิบัติแบบนี้สาเหตุเริ่มจาก ส่วนฐานล่าง (Toe) หรือส่วนรองรับ (Support) ของลาดดินถูกรบกวน โดยชั้นส่วนแรกด้านหน้าสุดอาจถูกรบกวนจากการกัดเซาะหรือการตัดดินออกเพื่อให้เป็นที่ราบ เมื่อกำลังของดินอ่อนแอจนลาดดินเกิดการวิบัติ ลาดดินในชั้นส่วนหน้าสุดเกิดการเลื่อนไถลลงมาก่อน ทำให้ลาดดินด้านหลังเกิดเป็นผาชัน (Rear Scarp) จึงเกิดการเลื่อนไถลตกลงมาของมวลดินอีกชั้นส่วนกินเข้าไปในลาดดิน และต่อเนื่องกันหลายชั้นส่วนตามกันมา

#### การสำรวจการวิบัติของลาดดิน

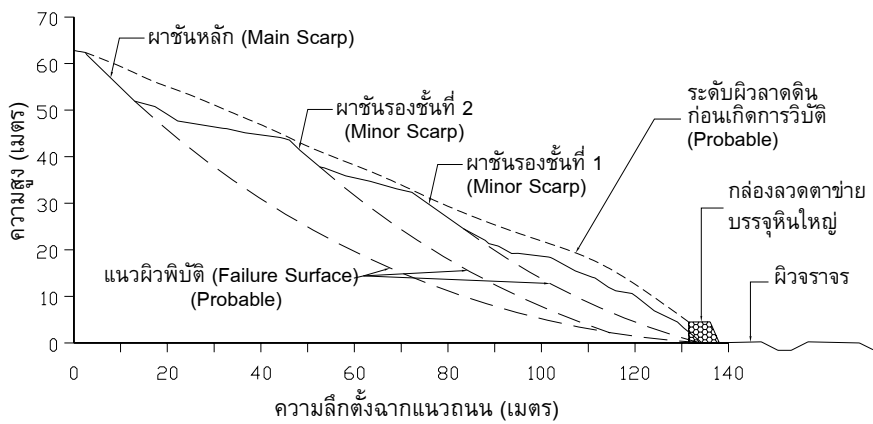
ผลการสำรวจสภาพภูมิประเทศของลาดดินทั้งหมด โดยใช้กล้องสำรวจประมวลผลรวม (Total station) เก็บรายละเอียดเป็นตำแหน่งค่าพิกัด X,Y,Z แล้วนำมาแสดงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลาดดิน 3 มิติ ผลแสดงดังรูปที่ 7 จากนั้นจึงสร้างเป็นรูปตัดลาดดิน และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์รูปร่างลักษณะการวิบัติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้จำลองแนวเงื่อนไขของผิวการวิบัติที่คาดว่าจะเป็นไปได้ (Probable Surface of rupture) ซึ่งได้สร้างตามแนวการวิบัติของ Main Scarp และ Minor Scarp ผลแสดงดังรูปที่ 8

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของลาดดินอธิบายได้ว่า เป็นการวิบัติแบบลึก (Deep seat) คล้ายกับลักษณะการวิบัติที่ Varnes (1978) ได้อธิบายไว้ข้างต้น ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการเลื่อนไถลแบบหมุนหลายชั้นส่วน (Multiple rotational slides) ในกรณีนี้เกิดเป็น 3 ชั้นส่วนเลื่อนไถลแบบหมุนไปด้านหลัง Bromhead (1994) เรียกว่า “Three back-tilted rotational slip segments” โดยมีแนวผิววิบัติตัดผ่านที่ส่วนล่างของลาดดิน (Toe failure) ตรงกับบริเวณฐานของกล่อง Gabions ทำให้มวลดินที่เลื่อนไถลลงมาดันให้กล่อง Gabions เลื่อนตัวออกมาบนผิวทางใต้โดยไม่ล้ม (Sliding)

การเกิดการวิบัติน่าจะเป็นลักษณะการวิบัติแบบก้าวหน้า (Progressive failure) กลไกดังกล่าวเกิดจากลาดดินส่วนบริเวณฐานเดิมถูกตัดออกเพื่อก่อสร้างถนน ทำให้เกิดเป็นลาดดินเหนือคันทางที่ลาดชัน ลาดดินบริเวณฐานที่ตัดออกไปนั้น เป็นมวลดินส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงต้านทานการเลื่อนไถล เมื่อปริมาณน้ำในดินมีมากขึ้นเรื่อยๆในขณะฝนตก ทำให้กำลังเฉือนของดินลดน้อยลงเรื่อยๆ จนลาดดินไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ มวลดินบริเวณด้านหน้าสุดเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลลงมาเป็นชั้นส่วนแรก ทำให้เกิดเป็นผาชันรอง (Minor scarp) ชั้นที่ 1 ก่อน การเลื่อนตัวของมวลดินในชั้นส่วนแรกมีผลกระทบหลายอย่างตามมา คือเป็นเสมือนการตัดมวลดินที่เป็นส่วนฐานซึ่งทำหน้าที่รับแรงต้านทานการเลื่อนไถล



รูปที่ 7 รูปทรงสัณฐานฐานลาดดิน 3 มิติ



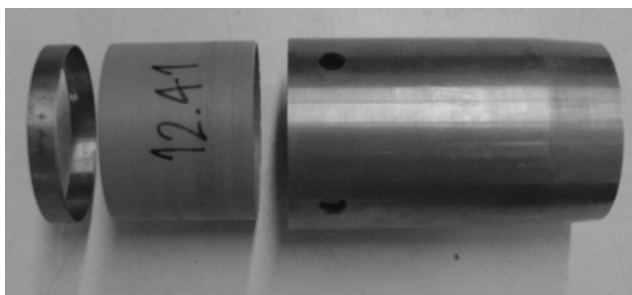
รูปที่ 8 รูปตัดแสดงการวิบัติของลาดดิน

ของลาดดินด้านในออก, ทำให้ลาดดินด้านในมีความชันเพิ่มขึ้น และในขณะที่เกิดการเลื่อนไถลลงของมวลดินในชั้นส่วนแรกเกิดเป็นแรงดึงตามแนวที่ระนาบเฉือนตัดผ่าน ระหว่างมวลดินที่เลื่อนไถลกับมวลดินภายในลาดดิน ผลดังกล่าวทำให้มวลดินด้านในลาดดินเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลตามลงมาเป็นชั้นส่วนที่สอง เกิดเป็นผาชันรองชั้นที่ 2 และผลจากแรงดึงทำให้เห็นเป็นรอยแตกผิวดิน (Tension crack) บนลาดดิน และในลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดการเลื่อนตัวในชั้นส่วนที่สาม ทำให้เกิดเป็นผาชันหลัก (Main scarp) รวมเป็นชั้นส่วนที่เกิดการเลื่อนไถลจำนวน 3 ชั้นส่วน ลักษณะการวิบัติแบบหมุนหลาย

ชั้นส่วนกินเข้าไปในลาดดินนี้ Skempton and Hutchinson (1969) เรียกว่า การเลื่อนไถลแบบถอยหลัง (Retrogressive)

### การเก็บตัวอย่างดิน

ผลการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพบว่าสามารถแบ่งชั้นดินได้เป็น 3 ชนิดตามช่วงชั้นความสูงของลาดดิน ต่อมาจึงได้เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพตามชั้นดินดังกล่าว การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพได้ใช้เครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายกับการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกบาง ที่เรียกว่า Ku – miniature Sampler สุทธิศักดิ์ (2550) มีค่า Area ratio ประมาณ 18% แสดงดังรูปที่ 9 และตัวอย่างดินที่เก็บได้แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ



รูปที่ 10 ตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

โดยหลักการของเครื่องมือที่ใช้เก็บตัวอย่างดินคือ การใช้เหล็กทรงกระบอกบางพอที่จะไม่ทำให้ดินสูญเสียคุณภาพและมีความทนทานพอที่จะรับแรงกระแทกลงไปตัดดินให้ขาดได้ มีตุ่มน้ำหนักและแกนตุ่มน้ำหนักตอกระบอกลงไปในดินเพื่อตัดดินให้ขาดจากดินรอบๆตัวอย่าง แล้วจึงหมุนกระบอกเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากดินด้านล่าง โดยขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเนียนแบบโดยตรง (Direct Shear Test) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินแตกในขณะที่แต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด

### การทดสอบคุณสมบัติของดิน

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อหาตัวแปรกำลังของดิน ใช้วิธีการทดสอบ Direct shear test โดยทำการทดสอบตัวอย่างดินในสองสภาวะคือ สภาวะปกติคือดินที่มีลักษณะความชื้นตามธรรมชาติขณะทำการเก็บตัวอย่างดิน และสภาวะวิกฤตคือดินที่มีลักษณะชุ่มน้ำ โดยทำการแช่ตัวอย่างดินในน้ำให้มีความชื้นมากที่สุดก่อน แล้วจึงค่อยทำการเนียนตัวอย่างดิน โดยทำการทดสอบแบบ Consolidated drained test และจะพิจารณาค่ากำลังคงค้างของดิน (Residual strength) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแนววิบัติที่มาก (Large displacement) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ Direct Shear Test ตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ

Soil No.	Peak Strength		Residual Strength		ระดับอิ่มตัว (%Sr)
	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	
1	25.11	9.72	23.27	5.90	78.24
2	26.60	9.56	23.58	7.49	76.94
3	36.67	3.66	33.56	1.67	75.80

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ Direct Shear Test ตัวอย่างดินชุ่มน้ำ

Soil No.	Peak Strength		Residual Strength		ระดับอิ่มตัว (%Sr)
	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	
1	27.38	3.79	24.81	3.11	98.86
2	29.46	2.88	26.50	2.79	99.96
3	32.17	1.52	28.43	1.13	98.90

Abramson, et.al (2001) อธิบายว่าการทดสอบ Direct Shear Test ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวเหมือนกับการทดสอบ Triaxial Test ได้แต่สามารถทำให้ดินมีความชื้นมากที่สุดโดยการแช่ตัวอย่างในน้ำเมื่อบรรจุตัวอย่างดินไว้ในกล่องเฉือน (Shear box) แล้ว เป็นระยะเวลาานพอที่น้ำซึมเข้าไปในตัวอย่างดินได้มากที่สุด ก่อนทำการเฉือนตัวอย่างดิน กระบวนการแช่น้ำ (Soaking) ดังกล่าว น่าจะเป็นตัวแทนที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ดินในลาดดินจริงอยู่ในสภาวะการไหลซึมคงที่ (Steady Infiltration)

Davison (2000) อธิบายว่า ค่ากำลังคงค้างจะเกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวที่มากซึ่งมักจะ เป็นไปไม่ได้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่โดยทั่วไปจะมีการเคลื่อนตัวของดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในงานเลื่อนไถลของลาดดินเก่า (Old landslides) มักจะมีการเคลื่อนตัวของแนววิบัติที่มาก จึงจำเป็นต้องใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์

จากผลการทดสอบ เห็นได้ว่าในสภาวะดินความชื้นธรรมชาติและสภาวะดินชุ่มน้ำ ตัวแปรกำลังที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนคือ ค่าแรงยึดเหนี่ยว (C) โดยในตัวอย่างดินชุ่มน้ำจะมีค่าลดต่ำกว่าตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติมาก เพราะปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นได้เข้าไปทำลายแรงตึงผิวของน้ำและอากาศหรือแรงดูระหว่างเม็ดดินและช่วยเพิ่มความหล่อลื่นของเม็ดดิน ทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวในดินชุ่มน้ำลดลง

Fredlund and Rahardjo (1993) อธิบายว่า ในกรณีดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) จะมีความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างแรงดันของน้ำและแรงดันของอากาศ ( $u_a - u_w$ ) หรือที่เรียกว่า แรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) เข้ามาเกี่ยวข้องกับค่าแรงยึดเหนี่ยวกล่าวคือ ยิ่งค่าแรงดันน้ำน้อย ยิ่งทำให้แรงดูดเมทริกซ์มากขึ้น เป็นผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น ทำให้ดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุผลที่ว่า ลาดดินยังคงเสถียรภาพอยู่ได้ในสภาวะความชื้นปกติแต่กลับเกิดการวิบัติในสภาวะที่ลาดดินมีความชื้นมากหรือแรงดันของน้ำมากขึ้น

### 8. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

Brain and Dobroslav (2004) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ถล่มเนื่องมาจากฝนตก และอธิบายหลักการไหลซึมลงในดินของน้ำฝนว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีเลวร้ายสุด (Worst - Case) มักจะสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวของลาดดิน และลาดดินมีลักษณะอิ่มตัวเต็มที่ สำหรับลาดดินที่มีลักษณะอิ่มตัวนี้ จะไม่มีการไหลซึมลงในดินเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นเมื่อมีฝนตกลงมาจึงไม่มีผลกระทบกับเสถียรภาพของลาดดินอีก

ยงยุทธ (2544) อธิบายว่าในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน แรงดันน้ำเป็นตัวแปรที่มักมีความไม่แน่นอน การดำเนินการเพื่อหาขนาดของของแรงดันน้ำในโพรงดินให้ได้ค่าที่ถูกต้องเป็นงานที่ค่อนข้างยาก เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน นิยมสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินในช่วงที่มีฝนตกหนัก ซึ่งสอดคล้องกับสภาพที่เป็นจริง เนื่องจากการเคลื่อนตัวของลาดดินในหลายกรณีจะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผิวด้านบนซึ่งน้ำฝนสามารถไหลเข้าไปได้

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองสภาวะคือ สภาวะปกติใช้ตัวแปรกำลังจากการทดสอบตัวอย่างดินความชื้นธรรมชาติ โดยกำหนดให้ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน และสภาวะวิกฤติใช้ตัวแปรกำลังจากการทดสอบตัวอย่างดินชุ่มน้ำ โดยกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน โดยทำการวิเคราะห์ทั้งในลาดดินปัจจุบัน (At present) และวิเคราะห์แบบย้อนกลับ (Back analysis) ในลาดดินก่อนการวิบัติ วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ โดยการคาดการณ์รูปทรงของลาดดินก่อนการวิบัติจากลาดดินบริเวณข้างเคียง และแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองกรณีคือ กรณีมีและไม่มีการล้อม Gabions เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยกล่อง Gabions ก่อนเกิดการวิบัติ ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นค่าอัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินสภาวะลาดดินปกติ

ตัวแปรกำลัง	F.S. (At Present)	F.S. (Back Analysis)	
		มีกล่อง Gabions	ไม่มีกล่อง Gabions
Peak Strength	2.312	2.152	2.151
Residual Strength	1.832	1.728	1.718



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินสภาวะลาดดินวิกฤติ

ตัวแปรกำลัง	F.S. (At Present)	F.S. (Back Analysis)	
		มีกล่อง Gabions	ไม่มีกล่อง Gabions
Peak Strength	0.935	0.867	0.852
Residual Strength	0.812	0.762	0.743

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในปัจจุบันเห็นได้ว่าในสภาวะลาดดินปกติ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย แต่หากพิจารณาในสภาวะลาดดินวิกฤติ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินน้อยกว่า 1 ทำให้เกิดการวิบัติของลาดดินได้ หากปริมาณน้ำในลาดดินอยู่ในสภาวะวิกฤติดังกล่าว

จากผลการวิเคราะห์แบบย้อนกลับทั้งในสภาวะลาดดินปกติและลาดดินวิกฤติ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินที่ทำการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ หรือลาดดินก่อนเกิดการวิบัติ จะมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนปลอดภัยของการวิเคราะห์ลาดดินในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของลาดดินหลังการวิบัติเป็นสาเหตุสำคัญ เพราะในขณะที่เกิดการวิบัติลาดดินได้ปรับรูปร่างของตัวเองเพื่อให้ทรงตัวอยู่อย่างสมดุล นั่นคือส่วนของลาดดินที่เป็นแรงขับ (Driving force) บางส่วนได้เลื่อนไถลลงมา กลัปกกลายเป็นส่วนของแรงต้าน (Resisting force) บ้างแล้วทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มากกว่า

หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพของกล่อง Gabions ที่ใช้เพิ่มเสถียรภาพของลาดดินก่อนการวิบัติ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเปรียบเทียบกัน ระหว่างมีกับไม่มีกล่อง Gabions เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยหรือเสถียรภาพลาดดินไม่ต่างกันมาก เพราะหากพิจารณาเปรียบเทียบจากขนาดเห็นได้ว่ากล่อง Gabions มีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของลาดดินและมวลดินที่พังทลาย และค่าคุณสมบัติของกล่อง Gabions ก็ไม่ได้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนมาก เพราะเป็นการนำหินใหญ่มาเรียงในกล่องลวดตาข่าย ไม่ได้มีวัสดุประสานเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันมาเกี่ยวข้อง

## 9. สรุป

เสถียรภาพหรืออัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามแต่ปัจจัยที่มีผลมากระตุ้น ปัจจัยที่เป็นสาเหตุสำคัญคือ สภาพภูมิอากาศหรือสภาวะฝนตก สภาพภูมิอากาศที่ไม่แน่นอนทั้งปริมาณน้ำฝน, รูปแบบของฝน, ความเข้มของฝนและรอบปีการเกิดซ้ำ ปัจจัยดังกล่าวล้วนเป็นตัวแปรที่ไม่แน่นอนยากแก่การคาดการณ์สภาวะในอนาคตได้ การออกแบบป้องกันการวิบัติของลาดดิน จำเป็นต้องออกแบบให้ครอบคลุมทุกสภาวะการณ์ จึงต้องใช้ค่าตัวแปรที่ลาดดินมีโอกาสเกิดการวิบัติได้มากที่สุด การใช้ค่าตัวแปรกำลังในสภาวะวิกฤติในการวิเคราะห์ส่งผลในการวิเคราะห์ให้มีความปลอดภัยและรองรับสภาวะต่างๆที่ไม่แน่นอนและอาจเกิดขึ้นในวันข้างหน้าได้ดี (Conservative)

ผลการวิจัยทำให้ได้ทราบถึงค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินในสภาวะกรณีต่างๆ มีประโยชน์ในการใช้ค่าดังกล่าวในการออกแบบการป้องกันการวิบัติของลาดดินในอนาคตต่อไป

#### บรรณานุกรม

- ยงยุทธ แต่ศิริ. 2544. ปัญหาน้ำใต้ดินในลาดคันทางและลาดธรรมชาติ. การสัมมนาเทคนิควิธีการแก้ไขป้องกันการชะล้างพังทลายและการเคลื่อนตัวเชิงลาด. กรมทางหลวง. 14 กันยายน 2544. โรงแรมดิเอ็มเพรส กรุงเทพมหานคร
- สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, วรวัชร ต่อวิวัฒน์ และ บรรพต กุลสุวรรณ. 2550. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 – 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- Abramson, L.W., Lee T.S., Sharma S. and Boyce G.M. 2001. **Slope Stability and Stabilization Method**. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Brain D. Collins and Dobroslove Znidarcic 2004. Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE**. September 2006.
- Bromhead, E.N. 1994. **The Stability of Slope**. An Imprint of Chapman & Hall. New York.
- Davison, L. 2006. Available source [http://wapi.isu.edu/EnvGeo/EG4\\_mass\\_wasting](http://wapi.isu.edu/EnvGeo/EG4_mass_wasting) as retrieved on 18 June 2006
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son. New York.
- Skempton, A.W., and J.N.J. Hutchinson. 1969. Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. **Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. State of the Art Volume. Mexico City
- Varnes, D.J. 1978. **Slope Movement Types and Processes**. In R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.). Landslides Analysis and Control. Transportation Special Report No 176. National Academy Sciences. Washington D.C.

## การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

### ข. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

อดุลย์ ชะโก๊บบ, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2551). เสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. 8 – 9 พฤษภาคม 2551. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา. หน้า 7 - 12

## เสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย

### Soil Slope Stability at Highway No. 41 Segment of Thung Song District - Ron Phibun District, Southern Thailand

อดุลย์ ยะโก๊ป<sup>1</sup> ดนุพล ตันนโยภาส<sup>2</sup> พิปัท ทงฉิม<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: adun\_ya@hotmail.com

Adun Yagob<sup>1</sup> Danupon Tonnayopas<sup>2</sup> Pipat Thongchim<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Department of Civil Engineering (Geotechnical), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

<sup>2</sup>Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: adun\_ya@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

ลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง – อ.ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มักเกิดการพิบัติเป็นประจำในช่วงฤดูฝนของแต่ละปี ดังนั้นงานนี้มุ่งประเมินเสถียรภาพของลาดดินในบริเวณดังกล่าว โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพมาทดสอบกำลังเฉือนทั้งกำลังสูงสุดและกำลังคงค้าง ที่สภาวะตัวอย่างดินความชื้นปกติและความชื้นเกือบอิ่มตัว ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินพบว่า ลาดดินในขณะที่มีความชื้นปกติ มีค่าเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย แต่ลาดดินในสภาวะวิกฤติที่มีค่าความชื้นเกือบอิ่มตัว ค่าเสถียรภาพลาดดินอยู่ในเกณฑ์ไม่ปลอดภัย ผลการวิเคราะห์แบบย้อนกลับพบว่า ลาดดินก่อนเกิดการพังทลายมีค่าเสถียรภาพน้อยกว่าลาดดินหลังการพังทลาย อย่างไรก็ตามเปรียบเทียบเสถียรภาพของลาดดินโดยใช้ค่ากำลังคงค้างและค่ากำลังสูงสุด ให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยแตกต่างกันเล็กน้อย

**คำหลัก** เสถียรภาพลาดดิน, กำลังเฉือน, กำลังคงค้าง, กำลังสูงสุด

back slopes on the sections mentioned. Undisturbed soil samples was collected to be analyzed in the laboratory in order to determine the shear strength covering both the peak strength and the residual strength, which was under a natural water content and soaked conditions. The results of the slope stability analysis were revealed that there were safety slopes in the natural water content. On the contrary, there was unsafety value in soaked condition. The back analysis indicated the former slopes were more stable than the slopes which have never failed. Nevertheless, comparison between the safety factor of slope stability analyzed using the residual strength and peak strength values, was few different

**Keywords:** Slope stability, Shear strength, Residual strength, Peak strength

#### 1. บทนำ

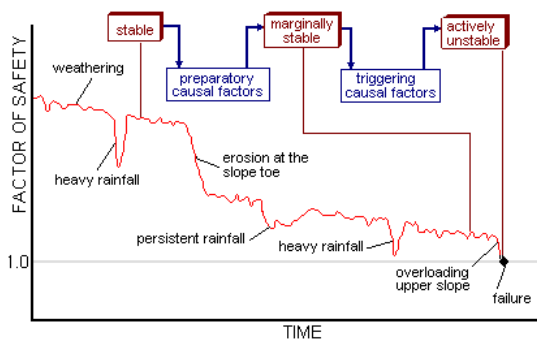
เสถียรภาพหรืออัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินธรรมชาติ (Natural Slope) หรือลาดดินเหนือก้นทาง (Back Slope) ที่เกิดจากการตัดถนนผ่านไหล่เขา มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตั้งแต่แสดงในรูปที่ 1 สังเกตได้ว่า สภาวะฝนตกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญทำให้อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินลดลงและเพิ่มขึ้น เมื่อมีฝนตกหนัก (Heavy rainfall) น้ำจากฝนที่ตกทำให้ดินมีความชื้น

#### Abstract

In the rainy season of each year, it is often a slope failure along the Highway No. 41, segment of Thung Song District to Ron Phibun District, Nakhon Si Thammarat Province. Therefore, this work aimed to evaluate the stability of the

เพิ่มขึ้นและทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ดินรับแรงเฉือนได้น้อยลง อัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินก็ลดน้อยลง เมื่อฝนหยุดตกและน้ำในดินได้กระจายตัวออกไปแล้ว (Dissipate) ดินก็กลับรับแรงเฉือนได้มากขึ้น อัตราส่วนปลอดภัยก็เพิ่มสูงขึ้นได้อีก ถือว่าเป็นการลดลงของกำลังเฉือนชั่วคราว

ลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติ (Old Slope) หรือเกิดการเลื่อนตัว โครงสร้างเดิมของดินในแนวผิวพิบัติ (Surface of Rupture) ถูกทำลาย เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนลดลง ถือว่าเป็นการลดลงของกำลังเฉือนถาวร ทำให้ลาดดินดังกล่าวมีโอกาสที่จะเกิดการพิบัติครั้งใหม่ได้ง่ายกว่าเดิม



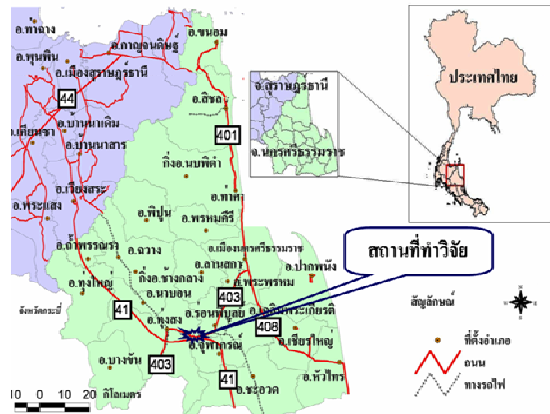
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ที่เวลาต่างๆ [1]

สอดคล้องกับความเป็นจริง ปัญหาลาดดินถล่มมักเกิดขึ้นในฤดูฝนที่ฝนตกหนัก ขณะที่ฝนตกอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำและระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น หากฤดูฝนปีไหนที่มีฝนตกมากพอให้อัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดปัญหาลาดดินถล่มตามมา เช่นเดียวกับลาดดินที่เกิดจากการตัดผ่านลาดเขาในทางหลวงหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างอำเภอทุ่งสงกับอำเภออ่อนพิบูลย์ ช่วงกม.13+900 ถึง กม.14+050 ด้านขวาทาง เกิดปัญหาลาดดินถล่มเลื่อนตัวออกมาทับผิวจราจรในหลายปีของช่วงฤดูฝน บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินช่วงบริเวณดังกล่าว โดยพิจารณาลาดดินในสภาวะปกติ ความชื้นธรรมชาติ และในสภาวะวิกฤติ (Worst case) ความชื้นเกือบอิ่มตัวเมื่อฝนตกหนัก และพิจารณาถึงกรณีที่ลาดดินมีการเลื่อนตัวมาก่อน โดยใช้ค่ากำลังของดินที่มีการเลื่อนตัวในแนวผิวการพิบัติที่มาก (Large Displacement) หรือกำลังคงค้าง (Residual Strength) ของดิน

**2. ประวัติและความเป็นมาของลาดดิน**

ทางหลวงหมายเลข 41 ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นเส้นทางหลักที่ใช้ในการเดินทางจากภาคใต้สู่ภาคกลางของประเทศ ลาดดินในช่วงระหว่างอำเภอทุ่งสงกับอำเภออ่อนพิบูลย์ ช่วงกิโลเมตรที่ 13+900 ถึง 14+050 เป็นลาดดินที่เกิดจากการวางแนวเส้นทางลัดเลาะตามช่องเขา ทำให้ต้องมีการตัดส่วนล่างของลาดดิน (toe) ภูเขา เกิดลาดดินเหนือดันทาง (Back Slope) ที่มีความลาดชัน

ลาดดินบริเวณนี้ได้เกิดการพิบัติมาแล้วหลายครั้ง คือประมาณช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2543 ซึ่งตรงกับฤดูฝน มีฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน เกิดการเลื่อนตัวและพังทลายของลาดดินเข้ามาบริเวณผิวจราจร หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ดำเนินการซ่อมแซมลาดดิน โดยการปรับแต่งลาดดินเป็นขั้นบันได และก่อสร้างกำแพงกันดินแบบแรงโน้มถ่วง (Gravity retaining wall) โดยใช้วัสดุประเภท ก่อลงลาดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabions)



รูปที่ 2 แผนที่เส้นทางสถานที่ทำวิจัย



รูปที่ 3 การพิบัติของลาดดิน



รูปที่ 4 การแก้ไขการพิบัติและปรับแต่งลาดดิน

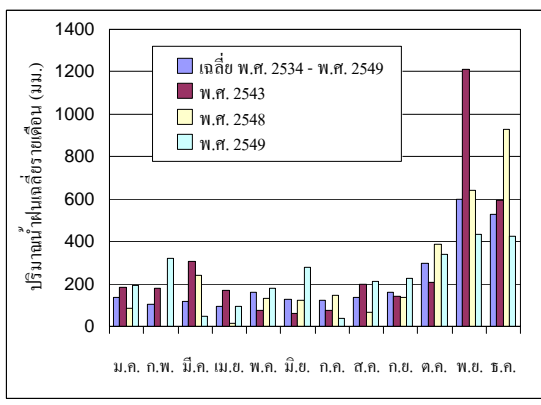
ต่อมาในช่วงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2548 ตรงกับฤดูฝน มีฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน ได้เกิดการพังทลายของลาดดินในบริเวณนี้อีก ทำให้กล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ได้เลื่อนตัวเข้ามาทับผิวจราจรดังแสดงในรูปที่ 3 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ดำเนินการรื้อกล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ออก พร้อมทั้งได้ปรับแต่งลาดดินใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4 และช่วงฤดูฝนปี พ.ศ. 2549 ส่วนล่างของลาดดิน (Toe) ที่ปรับแต่งไว้ก็เลื่อนตัวออกมาอีกเล็กน้อย

ในขณะที่ก่อสร้างหรือสภาวะความชื้นปกติ ดินอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ลาดดินจึงยังคงสภาพอยู่ได้ปกติ เนื่องจากดินที่มีความชื้นน้อยหรือไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีแรงดันน้ำที่เป็นลบหรือเป็นแรงดูด (Suction) ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินมีมากขึ้น ประกอบกับระดับน้ำใต้ดินที่ไม่สูงขึ้น ดินยังมีกำลังรับแรงเฉือนได้มาก จึงยังไม่เกิดการพิบัติในขณะนั้น แต่เมื่อมีฝนตกปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินสองส่วนคือ ส่วนแรกทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นได้เข้าทำลายแรงดันน้ำที่เป็นลบหรือแรงดูดของน้ำและอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและเพิ่มความหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวในดินลดลง ส่วนที่สองคือทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มแรงดันลอยตัว (Buoyancy Force) ทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง ผลกระทบทั้งสองส่วนจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆในขณะฝนตก ทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงระดับหนึ่งที่ลาดดินไม่อาจทรงตัวอยู่ได้โดยสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่อัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าหนึ่ง ลาดดินจึงต้องปรับเปลี่ยนรูปทรงของตัวเองเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล จึงเกิดการทรุดตัวและเลื่อนไถลลงมาหยุดตรงกับจุดที่ลาดดินเกิดความสมดุลในตัวเอง เกิดเป็นการพิบัติของลาดดินตามลำดับเหตุการณ์ดังกล่าว

หลังการพังทลายของลาดดิน มีความจำเป็นต้องดำเนินการตักดินส่วนที่เลื่อนไถลลงมาทับผิวจราจรออก ดินในส่วนดังกล่าวเป็นดินที่เกิดจากดินส่วนด้านบนที่เลื่อนไถลลงมากองรวมกันอยู่บริเวณด้านล่างของลาดดิน (Zone of accumulation) ตามหลักการในขณะที่ลาดดินปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่เรียบร้อยแล้ว ดินในส่วนนี้ทำหน้าที่ต้านทานดินที่อยู่ด้านบนไม่ให้เลื่อนไถลลงมาอีก ดังนั้นการตักดินในส่วนนี้ออกจึงเป็นการเอาดินส่วนที่ต้านทานการพังทลาย (Resisting Force) ออก แต่ก็ไม่เกิดการพังทลายในขณะนั้น เพราะในขณะที่ดำเนินการเป็นช่วงฝนหยุดตกระยะหนึ่งแล้ว ปริมาณน้ำในลาดดินได้ลดลง คือความชื้นได้ระเหยและซึมผ่านลงไปแล้วอีกทั้งระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้ว ดินในลาดดินจึงกลับเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีแรงดันน้ำที่เป็นลบ ทำให้กำลังรับแรงเฉือนในดินเพิ่มขึ้นอีก ลาดดินจึงมีเสถียรภาพมากกว่าตอนที่ฝนตก ดังนั้นการตักดินส่วนนี้ออกในขณะนั้นจึงไม่เกิดการพังทลายของลาดดินอีกและอยู่ได้อย่างมั่นคงเรื่อยมา แต่หากในปีไหนมีฝนตกหนักจนปริมาณน้ำในลาดดินมีมากจนเกิดขีดจำกัดอีก ก็อาจเกิดการพิบัติของลาดดินนี้อีกก็เป็นได้

### 3. ความสัมพันธ์ของการพิบัติกับปริมาณน้ำฝน

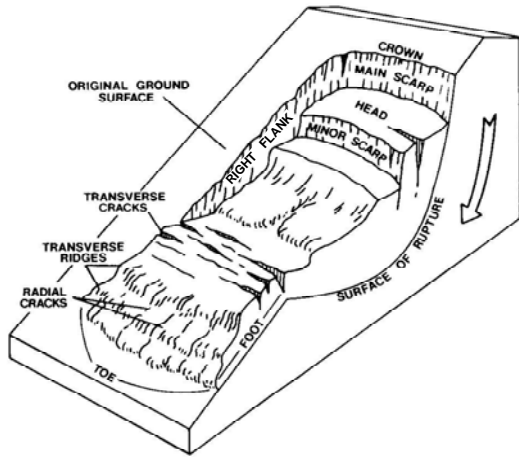
เมื่อเสถียรภาพของลาดดินขึ้นกับปริมาณน้ำฝน จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนของศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก ปริมาณน้ำฝน ดังแสดงในรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2543 และเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2548 ที่เกิดการพังทลายของลาดดิน ปริมาณน้ำฝนจะมีมากกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย นั่นคือมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าฤดูฝนปกติ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงได้ว่า ปริมาณน้ำฝนที่มากกว่าปกติมีผลโดยตรงกับการพังทลายของลาดดินในปี พ.ศ. 2543 และปี พ.ศ. 2548 สำหรับปริมาณน้ำฝนในเดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2549 ที่มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย แต่ก็ยังเกิดการพังทลายของลาดดินอีก ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากล้องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabions) ที่เดิมเป็นส่วนที่ช่วยต้านทานการพังทลายของลาดดินได้ถูกรื้อออกเมื่อครั้งการพังทลายในปี พ.ศ. 2548 แล้ว และผลจากการพังทลายและเกิดการเลื่อนไถลในครั้งนั้นอาจทำให้กำลังของดินในแนวผิวพิบัติ (Surface of Rupture) ลดลงจนเหลือเป็นค่ากำลังคงค้าง (Residual Strength) ไปแล้ว ทำให้ลาดดินมีโอกาสเกิดการพังทลายได้ง่ายกว่าเดิม



รูปที่ 5 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนในปีต่าง ๆ

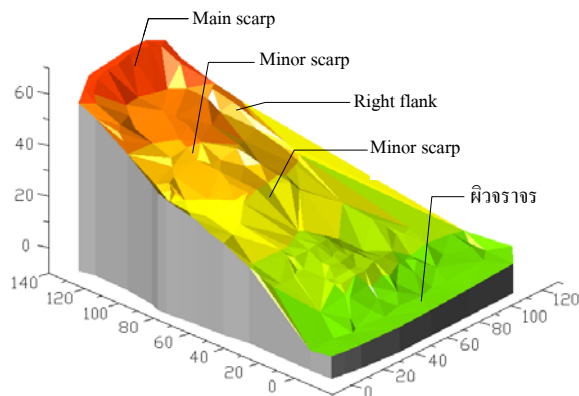
### 4. การสำรวจการพิบัติของลาดดิน

จากการสำรวจสภาพภูมิประเทศของลาดดิน พบว่าส่วนบนของภูเขาซึ่งเป็นพื้นที่ของชาวบ้านที่ได้ทำสวนยางพาราและสวนผลไม้ มีการทรุดตัวและเลื่อนไถลลงสู่ด้านล่างเช่นกัน จากการวิเคราะห์ลักษณะการพังทลายโดยรวม พบว่าเป็นแบบการเลื่อนไถลแบบหมุน (Rotational Slides) คล้ายกับลักษณะการพิบัติที่ Varnes (1978) [2] ได้อธิบายไว้ดังรูปที่ 6 มีผาชันหลัก (Main Scarp), ผาชันรอง (Minor Scarp), ส่วนบนสุดของดินที่เลื่อนไถล (Head) , ด้านข้างของลาดที่เคลื่อนพัง (Flank) และ รอยแตกที่ผิวดิน (Tension Crack) ที่ปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจน

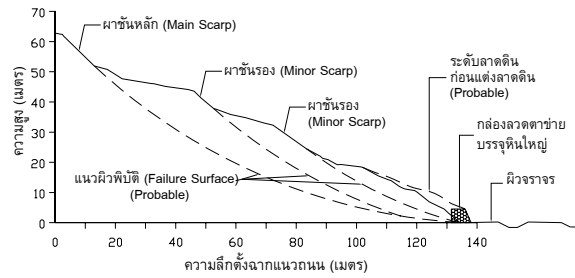


รูปที่ 6 ส่วนประกอบของการเลื่อนพังทลายของลาดดิน, ตัดแปลงจาก Varnes (1978) [2]

ผลการสำรวจโดยใช้กล้องสำรวจประมวลผลรวม (Total station) เก็บรายละเอียดภูมิประเทศทั้งหมดเป็นจุดค่าพิกัด X,Y,Z แล้วนำมาแสดงเป็นภูมิประเทศของลาดดิน 3 มิติ ผลการดำเนินการแสดงดังรูปที่ 7 และผลการสร้างรูปตัดลาดดินแสดงดังรูปที่ 8 เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นรูปร่างลักษณะการพิบัติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ได้จำลองแนวผิวนิวการพิบัติที่คาดว่าจะเป็นไปได้ (Probable Surface of rupture) ซึ่งได้สร้างตามแนวการพิบัติของ Main Scarp และ Minor Scarp ที่ปรากฏและสามารถเก็บข้อมูลได้จากบนผิวนิวการพิบัติบนลาดดิน และจำลองระดับลาดดินและ Gabions ที่เกิดการพิบัติก่อนจะมีการตัดแต่งลาดดินลาดดินใหม่ จากข้อมูลรูปถ่ายและผิวดินข้างเคียง สังเกตเห็นได้ว่าการพิบัติโดยรวมของลาดดินเป็นแบบ Multiple rotational มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนตัวแบบหมุนแบ่งได้เป็น 3 ส่วน (3 back – tiled rotational slip segments) เกิดเป็น Minor Scarp 2 ส่วน และ Main Scarp 1 ส่วน



รูปที่ 7 ภูมิประเทศของลาดดิน 3 มิติ



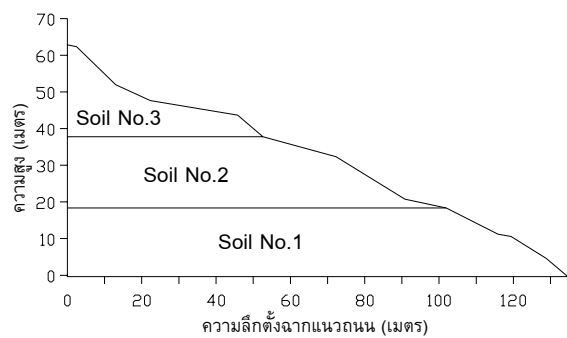
รูปที่ 8 รูปตัดแสดงการพิบัติของลาดดิน

**5. สมบัติทางกายภาพของดิน**

สมบัติของดินที่ต้องพิจารณาคือ สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) และสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties) ในขั้นแรกจะทำการเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวนมาหาสมบัติทางกายภาพก่อน เพื่อนำมาจำแนกชนิดของดินและใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนเพื่อทำการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่อไป ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าสามารถแบ่งชั้นดินได้เป็น 3 ชั้นตามช่วงชั้นความสูงของลาดดิน ผลการสร้างรูปตัดลาดดินประกอบด้วยข้อมูลชั้นดินแสดงดังรูปที่ 9

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของดิน

Soil No.	$\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	LL	PI	GS	Soil Classification	
					AASHTO	USCS
1	1.851	43.74	12.19	2.78	A-7-5(7)	ML
2	1.859	57.94	25.18	2.78	A-7-5(18)	MH
3	1.709	41.15	9.17	2.77	A-5(7)	ML



รูปที่ 9 ผลการสร้างรูปตัดลาดดินประกอบด้วยข้อมูลชั้นดิน

**6. การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ**

การเก็บตัวอย่างดินได้ใช้เครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายกับการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกบาง (Thin Wall Tube) ที่เรียกว่า KU – Miniature Sampler [3] มีค่า Area ratio ประมาณ 18% ตัวอย่างดินที่เก็บได้แสดงดังรูปที่ 10 โดยหลักการคือ การใช้เหล็กทรงกระบอกบางพอที่จะไม่ทำให้ดินสูญเสียคุณภาพและมีความทนทานพอที่จะรับแรงกระแทกลงไปตัดดินให้ขาดได้ มีตุ่มน้ำหนักและแกนตุ่มน้ำหนักตอกกระบอกลงไปนดินเพื่อตัดดินให้ขาดจาก

ดินรอบๆตัวอย่าง แล้วจึงหมุนกระบอกลงเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากดินด้านล่าง โดยขนาดของกระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเฉือนแบบโดยตรง (Direct Shear Test) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินแตกในขณะที่แต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด



รูปที่ 10 การเก็บตัวอย่างโดย KU – Miniature Sampler

### 7. การทดสอบการเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบการเฉือนตรง จะทำการทดลองตัวอย่างดินในสองสภาวะคือ สภาวะปกติคือดินที่มีลักษณะความชื้นตามธรรมชาติขณะทำการเก็บตัวอย่างดิน และสภาวะวิกฤติ (Worst case) คือดินที่มีลักษณะชุ่มน้ำ โดยทำการแช่ตัวอย่างดินในน้ำให้มีความชื้นมากที่สุดก่อน แล้วจึงค่อยทำการเฉือนตัวอย่างดิน โดยทำการทดสอบแบบ Consolidated drained test และจะพิจารณาค่ากำลังคงค้างของดิน (Residual Strength) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแนวพิบัติที่มาก (Large Displacement) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบดินความชื้นธรรมชาติ

Soil No.	Peak Strength		Residual Strength	
	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )
1	25.11	9.72	23.27	5.90
2	26.60	9.56	23.58	7.49
3	36.67	3.66	33.56	1.67

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบดินชุ่มน้ำ

Soil No.	Peak Strength		Residual Strength	
	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	C (Ton/m <sup>2</sup> )
1	27.38	3.79	24.81	3.11
2	29.46	2.88	26.50	2.79
3	32.17	1.52	28.43	1.13

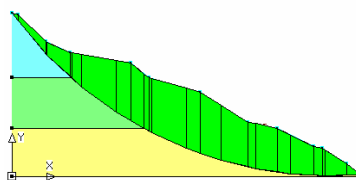
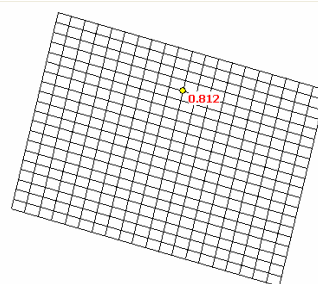
ค่ากำลังคงค้างจะเกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวที่มากซึ่งมักจะเป็นไปไม่ได้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่โดยทั่วไปจะมีการเคลื่อนตัวของดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม

ตามในงานเลื่อนไถลของลาดดินที่เคยเกิดการพิบัติ (Old landslides) มักจะมีการเคลื่อนที่ของแนวพิบัติที่มาก จึงจำเป็นต้องใช้ค่ากำลังคงค้างในการวิเคราะห์

จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าดินความชื้นธรรมชาติในตัวอย่างดินที่ 1 และ 2 จะมีค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle,  $\phi$ ) น้อยกว่าดินชุ่มน้ำ สาเหตุเป็นเพราะดินชุ่มน้ำเมื่อกระทำหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress) ลงบนตัวอย่างดิน เกิดการหลุดตัวมากเนื่องจากมีน้ำเป็นตัวหล่อลื่น เมื่อดินเกิดการเคลื่อนตัวมาชิดกัน เมื่อทำการเฉือนตัวอย่างดินเม็ดดินเกิดการขัดตัวกันมากกว่า ทำให้ได้ค่ามุมเสียดทานภายในที่มากกว่าดินความชื้นธรรมชาติ ส่วนค่าการยึดเกาะกัน (Cohesion, C) ดินความชื้นธรรมชาติจะมากกว่าดินชุ่มน้ำในทุกตัวอย่างดิน เพราะน้ำเข้าไปทำลายแรงตึงผิวของน้ำและอากาศระหว่างเม็ดดินและช่วยเพิ่มความหล่อลื่นของเม็ดดิน ทำให้ค่าการยึดเกาะกันในดินชุ่มน้ำลดลง และหากพิจารณาจากค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength) โดยรวมพบว่าค่ากำลังเฉือนของดินชุ่มน้ำน้อยกว่าในดินความชื้นธรรมชาติ นั่นย่อมแสดงว่าในดินเม็ดละเอียด (Cohesive Soil) ค่าการยึดเกาะกันของมวลดินมีอิทธิพลต่อกำลังของดินมากกว่าค่ามุมเสียดทานภายใน ซึ่งตรงตามทฤษฎีกำลังของดิน

### 8. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

จากการทดลองหาค่ากำลังเฉือนของดิน ทำให้ได้ค่าตัวแปรกำลังของดินความชื้นธรรมชาติและดินชุ่มน้ำ ทั้งแบบกำลังสูงสุด (Peak Strength) และกำลังคงค้าง (Residual Strength) นำค่าตัวแปรกำลังมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม KU slope ดังแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 11 ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้สภาวะดินชุ่มน้ำเป็นสภาวะวิกฤติกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวของลาดดิน และดินความชื้นธรรมชาติเป็นสภาวะปกติไม่มีระดับน้ำใต้ดินได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4



รูปที่ 11 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม Ku slope สภาวะดินชุ่มน้ำใช้ค่ากำลังคงค้าง

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในปัจจุบัน (At Present) เห็นได้ว่าในสภาวะลาดดินปกติคือดินมีความชื้นตาม



ธรรมชาติในขณะที่เก็บตัวอย่าง ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย แต่หากพิจารณาในสภาวะลาดดินวิกฤติดินชุ่มน้ำหรือดินมีความชื้นมากที่สุด ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินน้อยกว่า 1 ทำให้เกิดการพังทลายของลาดดินได้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

ตัวแปรกำลัง, สภาวะพิจารณา	F.S. (At Present)	F.S. (Back Analysis)
- Peak Strength, ดินความชื้นธรรมชาติ	2.312	2.152
- Residual Strength, ดินความชื้นธรรมชาติ	1.832	1.728
- Peak Strength, ดินชุ่มน้ำ	0.935	0.867
- Residual Strength, ดินชุ่มน้ำ	0.812	0.762

การวิเคราะห์แบบย้อนกลับ (Back Analysis) โดยการคาดการณ์รูปทรงของลาดดินก่อนการพังทลายจากลาดดินบริเวณข้างเคียง รวมถึงกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินใหญ่ (Gabions) ที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ด้วย แล้วนำค่าตัวแปรกำลังที่ได้จากการทดลองกำลังเฉือนของดินในสภาวะต่างๆมาประกอบกัน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 4 เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยในทุกสภาวะจะมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนปลอดภัยของการวิเคราะห์ลาดดินปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของลาดดินหลังการพังทลายเป็นสาเหตุสำคัญ เพราะในขณะที่พังทลายลาดดินได้ปรับปรุงร่างของตัวเองเพื่อให้ทรงตัวอยู่อย่างสมดุล นั่นคือลาดดินส่วนที่เป็นแรงกระทำ (Driving Force) บางส่วนได้เลื่อนไถลลงมากลับกลายเป็นส่วนต้านทานการพังทลาย (Resisting Force) บ้างแล้วทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มากกว่า

9. สรุป

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสภาวะวิกฤติ คือ ดินชุ่มน้ำมีความชื้นเกือบอิ่มตัว ซึ่งเป็นตัวแทนของลาดดินในกรณีฝนตกหนัก และระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน ผลปรากฏว่าลาดดินไม่มีเสถียรภาพคืออัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่า 1

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสภาวะปกติ คือ ดินมีความชื้นธรรมชาติโดยใช้ความชื้นขณะเก็บตัวอย่างดินเป็นตัวแทนและไม่มีระดับน้ำใต้ดิน ผลปรากฏว่าลาดดินมีเสถียรภาพคือมีอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่า 1

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้ค่ากำลังคงค้างทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่วิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังสูงสุด แต่ก็ไม่มากนัก

เสถียรภาพหรืออัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามแต่ปัจจัยที่มีผลมากระตุ้น ปัจจัยที่เป็นสาเหตุสำคัญคือ สภาพภูมิอากาศหรือสภาวะฝนตก สภาพภูมิอากาศที่ไม่แน่นอนทั้งปริมาณน้ำฝน, รูปแบบของฝน, ความเข้ม

ของฝนและรอบปีการเกิดซ้ำ ปัจจัยดังกล่าวล้วนเป็นตัวแปรที่ไม่แน่นอนยากแก่การคาดการณ์สภาวะในอนาคตได้ การออกแบบการป้องกันการพังทลายจำเป็นต้องออกแบบให้ครอบคลุมทุกสภาวะการณ การออกแบบการป้องกันการพังทลายของลาดดินจึงต้องใช้ค่าตัวแปรที่ลาดดินมีโอกาสเกิดการพังทลายมากที่สุด การใช้ค่าตัวแปรกำลังในสภาวะวิกฤติ (Worst - case) ส่งผลในการวิเคราะห์ให้มีความปลอดภัยและรองรับสภาวะต่างๆที่ไม่แน่นอนและอาจเกิดขึ้นในวันข้างหน้าได้ดี (Conservative) ผลการวิจัยทำให้ได้ทราบถึงค่าอัตราส่วนปลอดภัยของลาดดินในสภาวะกรณีต่างๆ มีประโยชน์ในการใช้ค่าดังกล่าวในการออกแบบการป้องกันการพังทลายของลาดดินในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ที่ได้ให้คำแนะนำเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างดินและชี้แนะแนวทางให้แก่ผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tony Price, Warwick University Available source: <http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/SLOPES/SLOPES.HTM> as retrieved on 3 Oct 2006
- [2] Varnes, D.J. 1978 Slope movement types and processes, Transportation Special Report No 176 .National Academy of Sciences, Washington D.C.
- [3] บรรพต กุลสุวรรณ. 2548. การศึกษาพฤติกรรมและการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] สถาพร คูวิจิตรจรรู. 2541. ทดลองปฐพีกลศาสตร์. โลบรารี นาย พิบลิชซึ่ง, กรุงเทพฯ
- [5] Abramson, Lee W, Lee, Thomas S, Sharma Sunil and Boyce, Glenn M. 2001. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
- [6] มานะ อภิพัฒน์มนตรี. 2541. วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอดุลย์ ยะโก๊บบ	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812083	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ)	2546

### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนเรียนดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2548
2. ทุนอุดหนุนผู้ช่วยสอน (Teaching Assistantship) ปีการศึกษา 2548

### ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ข้าราชการ ตำแหน่ง วิศวกรโยธา 4

ศูนย์สร้างทางสุราษฎร์ธานี กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

โทรศัพท์ 0-7727-2844 มือถือ 0-8972-46275

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

#### การเผยแพร่ในรูปแบบของบทความวารสาร

อดุลย์ ยะโก๊บบ, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม. การศึกษาเสถียรภาพของลาดดินเหนือก้นทาง : กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 00411001 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์. บทความวิชาการ วารสารวิศวกรรมสาร มข. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

#### การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

อดุลย์ ยะโก๊บบ, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2551). เสถียรภาพของลาดดินในทางหลวงหมายเลข 41 ตอน อ.ทุ่งสง - อ.ร่อนพิบูลย์, ภาคใต้ประเทศไทย. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. 8 – 9 พฤษภาคม 2551. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา. หน้า 7 - 12