



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาเสถียรภาพของคลองอุตะเภานี้เนื่องจากการกัดเซาะ  
Stability Study of U-Tapao River Bank Due to Erosion

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ประจำปี 2552

พฤษภาคม 2554

## กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือให้จากหลายฝ่ายจึงขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประเภททั่วไป ประจำปี 2552

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับความเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ทำวิจัย ขอขอบคุณ รศ.ดร. จรัญ บุญกาญจน์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้บังคับบัญชาของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณปพน รัชศรี วิศวกรชลประทานชำนาญการ สำนักชลประทานที่ 16 ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนามในพื้นที่ศึกษา ตลอดจนการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบคุณ คุณพลวัฒน์ คงสม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบดินตัวอย่าง และสุดท้ายงานวิจัยชิ้นนี้จะสำเร็จไปไม่ได้ถ้าไม่ได้การทำงานหนักและอดทนของลูกศิษย์ของผู้วิจัย คุณสุรติ เสมอหมัด

ธนิต เถลิงยานนท์  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ตลิ่งคลองอยู่ตะเภาในเขตอำเภอหาดใหญ่มักจะเกิดการพังทลายเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนของทุกปี ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินบริเวณริมตลิ่ง ประมาณค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤต ( $\tau_c$ ) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ ( $k_d$ ) ของดินริมตลิ่งโดยใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ วิเคราะห์เสถียรภาพและการพิบัติของตลิ่ง โดยใช้แบบจำลองเสถียรภาพของตลิ่งและการกัดเซาะ (Bank stability and toe erosion model) และกำหนดแนวทางป้องกันการพิบัติของตลิ่ง

ผลการจำแนกชนิดของดินพบว่า ดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภาประกอบไปด้วย ดินเหนียวที่มีความความเป็นพลาสติกต่ำ (CL), ดินตะกอนทรายที่มีความความเป็นพลาสติกต่ำ (ML), ดินทรายปนดินเหนียว (SC), ดินทรายปนตะกอนทราย (SM) และทรายที่มีขนาดละเอียด (SP) ซึ่งตลิ่งในพื้นที่ศึกษาสามารถจำแนกเป็นตลิ่งจำพวก Composite และ Cohesive riverbank ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยวิธี Multi – stage direct shear test พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระดับความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ลดลงประมาณ 36 – 98% จากระดับความชื้นธรรมชาติในฤดูร้อน

ผลการประเมินค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  โดยวิธีคำนวณย้อนกลับพบว่า ตัวอย่างดิน CL และ ML มีค่าอยู่ในช่วง 0.758 – 11.06 Pa และ 0.045 – 0.115 cm<sup>3</sup>/N.s ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะปานกลางถึงดินที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะ (Moderately resistant – Resistant) ซึ่งปริมาณดินเหนียวและดัชนีความเหนียวของดินมีนัยสำคัญต่อค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง ตัวอย่างดิน SC, SM และ SP มีค่า  $\tau_c$  และค่า  $k_d$  อยู่ในช่วง 0.027 – 0.110 Pa และ 0.302 - 0.609 cm<sup>3</sup>/N.s ซึ่งจำแนกอยู่ในจำพวกดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะน้อย (Erodible)

ผลการวิเคราะห์การกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งบ่งชี้ว่า ตลิ่งเกิดการพิบัติเนื่องจากการลดลงของระดับน้ำทันทีทันใด (Rapid drawdown) ระดับน้ำลดลงประมาณ 0.381 ถึง 0.655 เมตร จากระดับน้ำเต็มตลิ่งหรือระดับน้ำสูงสุด ผลการศึกษาแนวทางการป้องกันตลิ่งพบว่าวิธีการปรับความลาดของตลิ่งประกอบกับการใช้หินเรียงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการป้องกันการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง

**คำหลัก :** ตลิ่งคลองอยู่ตะเภา, เสถียรภาพของตลิ่ง, หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน, สัมประสิทธิ์การกัดเซาะ

## ABSTRACT

Banks of the U-Tapao river in the vicinity areas of Hat Yai District are usually experiencing stability problems due to erosion, particularly in the rainy season. Objectives of this study were to determine the index properties and engineering properties of soil samples, to estimate critical shear stress and erodibility coefficient using back analysis method, and to analyze riverbank stability using a bank stability–toe erosion model. In addition, appropriate bank stabilization methods were also studied.

Classification results revealed that soil samples taken from U – Tapao riverbank were: low plasticity clay (CL), low plasticity silt (ML), clayey sand (SC), silty sand (SM) and poorly-graded sand (SP). The banks in the study area were classified either as composite or cohesive riverbank. Shear strength of soil samples for saturated water content condition decreased about 36.00 to 98.56 % from those of natural water content condition in summer.

For cohesive soils (i.e., CL and ML), the critical shear stress and erodibility coefficient obtained from back–analysis method depended significantly on the clay content and plasticity index and ranged from 0.758 to 11.06 Pa and 0.045 to 0.115 cm<sup>3</sup>/N.s, respectively. The cohesive soils of U – Tapao riverbank were classified as moderately resistant to erosion. For cohesionless soil, the critical shear stress and erodibility coefficient ranged from 0.027 to 0.110 Pa and 0.302 to 0.609 cm<sup>3</sup>/N.s, respectively, which indicated that they were erodible soils.

Analytical results indicated that the U – Tapao riverbank in the study area were failed while water level decreased approximately 0.381 to 0.655 meters from bankfull level. Riprap installation and bank slope flattening were appropriated method for bank stabilization.

**Keywords :** U – Tapao riverbank, Bank stability, Critical shear stress, Erodibility coefficient



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(7)
รายการภาพประกอบ	(8)
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 สถานที่ทำวิจัย	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>2 การทบทวนเอกสาร</b>	
2.1 กำลั้งของดิน	4
2.2 เสถียรภาพของตลิ่งและการกัดเซาะ	16
2.3 การหาค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis	24
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การสำรวจพื้นที่และภาพตัดขวางของตลิ่ง	30
3.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน	33
3.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	35
3.4 การจำลองการพิบัติของตลิ่ง	38
3.5 การวิเคราะห์ค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis	41
3.6 การประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ	42
3.7 การกำหนดแนวทางการป้องกันตลิ่ง	46
<b>4 ผลการดำเนินงานวิจัย</b>	
4.1 สภาพทั่วไปและภาพตัดขวางของตลิ่งในพื้นที่ศึกษา	49
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง	57
	(5)

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง	64
4.4 ผลการจำลองการพิบัติของตลิ่ง	68
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับน้ำคลองอยู่ตะเภาโดยวิธี Backwater analysis	72
4.6 ผลการประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน โดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ	77
4.7 แนวทางป้องกันตลิ่งจากการพิบัติและการกัดเซาะ	82
<b>5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการศึกษา	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
<b>บรรณานุกรม</b>	92
<b>ภาคผนวก ก</b>	98
<b>ภาคผนวก ข</b>	101
<b>ภาคผนวก ค</b>	107
<b>ภาคผนวก ง</b>	112

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชนิดและมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดิน	33
4.1 คุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่ง Section 1	57
4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่ง Section 2	59
4.3 คุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่ง Section 3	60
4.4 คุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่ง Section 4	62
4.5 คุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่ง Section 5	63
4.6 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 1	65
4.7 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 2	66
4.8 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 3	66
4.9 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 4	67
4.10 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 5	68
4.11 ค่า Critical shear stress ใช้ในการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่ง Section 1	69
4.12 ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis	73
4.13 ค่า $\tau_c$ และ $k_d$ ของดินริมตลิ่ง Section 1 จากผลของ Back analysis	78
4.14 ค่า $\tau_c$ และ $k_d$ ของดินริมตลิ่ง Section 2 จากผลของ Back analysis	78
4.15 ค่า $\tau_c$ และ $k_d$ ของดินริมตลิ่ง Section 3 จากผลของ Back analysis	78
4.16 ค่า $\tau_c$ และ $k_d$ ของดินริมตลิ่ง Section 4 จากผลของ Back analysis	79
4.17 ค่า $\tau_c$ และ $k_d$ ของดินริมตลิ่ง Section 5 จากผลของ Back analysis	79
4.18 แนวทางการเพิ่มเสถียรภาพและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่ง	88

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 แนวตลิ่งของคลองอุ้ตะเกาที่เกิดการกัดเซาะ	2
2.1 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)	7
2.2 ดินสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) (มานะ, 2541)	7
2.3 การกระจายตัวของน้ำในดิน (Olson and Langfelder, 1973)	9
2.4 เส้นขอบเขตการพิบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)	10
2.5 ขนาครัมมิของส่วน ไค้งผิวน้ำที่มีผลต่อแรงดูด (Jenssen and Dempsey, 1980)	10
2.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ที่ระยะเวลาต่างๆ (Price, 2006)	12
2.7 อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน (Janbu, 1983)	13
2.8 รูปแบบการพิบัติของตลิ่ง	16
2.9 การแบ่งพื้นที่การไหลของน้ำสำหรับใช้คำนวณ Hydraulic radius (Langendoen 2000)	19
2.10 การพิบัติแบบ Planar failure	22
2.11 การพิบัติแบบ Cantilever failure	24
2.12 การไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradual varied flow)	25
2.13 Schematic of submerged jet apparatus (Hanson 1997)	28
2.14 Classification of erodibility (Hanson and Simon 2001)	29
3.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
3.2 การวัดรูปตัดขวางของตลิ่งของส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำ	32
3.3 Hand auger	34
3.4 การเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้ Hand auger	34
3.5 ตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ	34
3.6 กระจอกเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler (วรากรและคณะ 2546, 2548)	36
3.7 ชุดเก็บตัวอย่างดินที่ดัดแปลงมาใช้สำหรับการเก็บตัวอย่างดินบริเวณตลิ่งคลองอุ้ตะเกา	36
3.8 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	37
3.9 การทดสอบการเนียนโดยตรง	39

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 ในปี พ.ศ 2549	40
3.11 ตำแหน่งของสถานีวัดระดับน้ำในพื้นที่ศึกษา	42
3.12 ขั้นตอนการประเมินค่า $\tau_c$ และ $k_d$ โดยวิธี Back-analysis	43
3.13 ภาพตัดขวางก่อนและหลังพิบัติของตลิ่งเพื่อใช้ในการประมาณค่า $\tau_c$ โดยวิธี Back analysis	44
3.14 การปรับปรุงตลิ่งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ	47
4.1 แผนที่ในพื้นที่ศึกษา	49
4.2 ภาพถ่ายทางอากาศของตำแหน่งตลิ่ง, ประตูระบายน้ำอุทกสงเคราะห์และสถานีโทรมาตร บ้านบางศาลา (X.90)	50
4.3 สภาพทั่วไปของตลิ่งคลองอุทกสงเคราะห์ที่ทำการศึกษา	51
4.4 ลักษณะของตลิ่ง Section 1	52
4.5 ลักษณะของตลิ่ง Section 2	53
4.6 ลักษณะของตลิ่ง Section 3	54
4.7 ลักษณะของตลิ่ง Section 4	55
4.8 ลักษณะของตลิ่ง Section 5	56
4.9 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 1	58
4.10 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 1	58
4.11 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 2	59
4.12 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 2	60
4.13 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 3	61
4.14 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 3	61
4.15 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 4	62
4.16 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 4	63
4.17 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 5	64
4.18 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 5	64

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ระยะเวลาการกัดเซาะของตลิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อค่า Critical shear stress คำนวณจากสมการที่ 2.6 – 2.9	70
4.20 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งเนื่องจากการกัดเซาะ	70
4.21 ภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 ที่สูญเสียเสถียรภาพเนื่องจากการกัดเซาะของตลิ่งที่ระดับน้ำเฉลี่ย	71
4.22 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 1 กรณีน้ำท่วมและระดับน้ำลดลงทันทีทันใด	72
4.23 ลักษณะการพิบัติของตลิ่ง Section 1 ในกรณี Rapid drawdown	72
4.24 Classification of soil erodibility ของดินริมตลิ่งคลองอุตุตะเกา (ตาม Hanson and Simon, 2001)	80
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินและปริมาณดินเหนียวของดิน CL	81
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินและดัชนีพลาสติกของดิน CL	82
4.27 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	83
4.28 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 1 ที่ทำการปรับความลาด เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	83
4.29 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 2 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี	84
4.30 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 2 ที่ทำการปรับความลาด เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี	84
4.31 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 3 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	85
4.32 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 3 ที่ทำการปรับความลาด เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	85
4.33 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 4 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี	86

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 4 ที่ทำการปรับความลาด เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี	86
4.35 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 5 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	87
4.36 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 5 ที่ทำการปรับความลาด เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

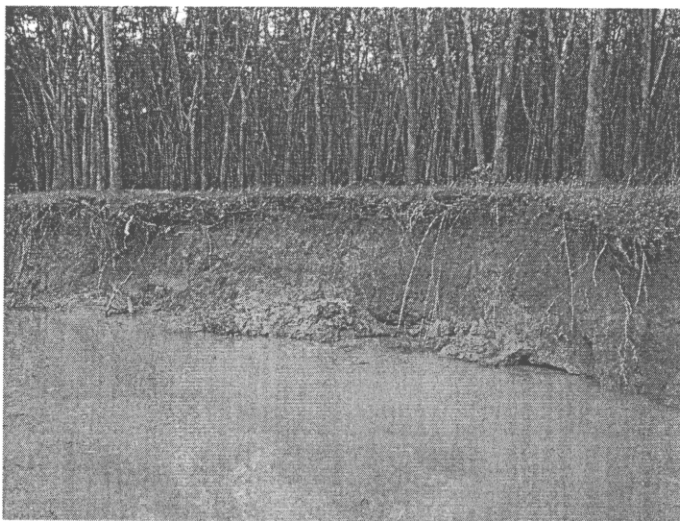
ลุ่มน้ำอุตะเกา เป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา จัดได้ว่าเป็นลุ่มน้ำที่ใหญ่ที่สุดในจังหวัดสงขลา มีพื้นที่ประมาณ 2,584 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 7 อำเภอ 35 ตำบล 252 หมู่บ้าน 7 เทศบาล มีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 130 กิโลเมตร ลุ่มน้ำอุตะเกาได้รับน้ำจากสันปันน้ำที่สำคัญสามแหล่งคือ เทือกเขา น้ำค้าง เทือกเขาแก้ว และ เทือกเขาย่อย ๆ ในเขต อำเภอสะเดา อำเภอหาดใหญ่ อำเภอนาหม่อม และ อำเภอจะนะ ซึ่งมีปริมาณน้ำ ที่ไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา เฉลี่ยรายปีประมาณ 837 ล้านลูกบาศก์เมตร (ชาคริตและเทพกิตต์, 2549)

คลองอุตะเกาในพื้นที่ศึกษาเป็นเส้นทางระบายน้ำสายหลักในลุ่มน้ำหาดใหญ่ มีความสูงของตลิ่งประมาณ 6 – 11 เมตร (จากท้องคลองถึงขอบบนของตลิ่ง) กว้างประมาณ 43 – 63 เมตร (จากขอบตลิ่งทั้งสองฝั่ง) คลองแห่งนี้ประสบปัญหาการพิบัติของตลิ่ง เนื่องจากตลิ่งส่วนมากมีความชันสูงถึง 90° ดังรูปที่ 1.1 รวมทั้งปัญหาการกัดเซาะเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำสูงในช่วงฤดูฝน ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำและคุณภาพชีวิตของคนที่พักอาศัยแนวแม่น้ำ รวมไปถึงการสูญเสียที่ดินและสวนยางของชาวบ้านในละแวกนั้น จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่ง วิเคราะห์การกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่ง ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่มีผลต่อเสถียรภาพของตลิ่ง รวมถึงเสนอแนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่ง

### 1.2 สถานที่ทำวิจัย

พื้นที่ริมตลิ่งคลองอุตะเกา จากประตูระบายน้ำคลองอุตะเกาขึ้นไปยังต้นน้ำทางทิศใต้เป็นระยะทางประมาณ 3 กม. และห้องปฏิบัติการวิจัยธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ม.สงขลานครินทร์





รูปที่ 1.1 แนวตลิ่งของคลองอุตะเถาที่เกิดการกัดเซาะ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติดินและวิศวกรรมของดินบริเวณริมตลิ่งคลองอุตะเถาในพื้นที่ศึกษา
- 1.3.2 ศึกษากระบวนการไหลของน้ำในคลองอุตะเถา
- 1.3.3 ศึกษาเสถียรภาพและการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา โดยใช้ Bank Stability and Toe Erosion Model Program (BSTEM 5.2)
- 1.3.4 ประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะ
- 1.3.5 ศึกษาและกำหนดแนวทางป้องกันการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 เลือกศึกษาเฉพาะตลิ่งที่มีการพิบัติจำนวน 5 จุด
- 1.4.2 ข้อมูลระดับน้ำใช้ข้อมูลในเดือน มกราคม – ธันวาคม 2552 และข้อมูลทางกายภาพของตลิ่ง ใช้ข้อมูลในเดือน กันยายน 2552 – มกราคม 2553
- 1.4.3 กำหนดลักษณะการพิบัติที่ใช้เป็นแบบ Planar failure และ Cantilever failure
- 1.4.2 พิจารณาเฉพาะกัดเซาะทางข้าง (Lateral erosion)
- 1.4.3 ไม่พิจารณา Sediment transportation

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ข้อมูลคุณสมบัติดัชนีและวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณริมตลิ่งคลองอุตะเถา
- 1.5.2 สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของตลิ่งคลองอุตะเถาได้
- 1.5.2 สามารถวิเคราะห์และออกแบบเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งได้ เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งได้

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งแตกต่างกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินทั่วไป การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งต้องพิจารณาการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำในตลิ่ง ดังนั้นในการวิเคราะห์ต้องมีความเข้าใจทางชลศาสตร์เพิ่มเติมอีกด้วย การศึกษาครั้งนี้ได้รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักประกอบไปด้วย กำลังของดิน (Strength of Soil) เสถียรภาพของตลิ่งและการกัดเซาะ (Bank Stability and Toe Erosion) การวิเคราะห์ระดับน้ำย้อนกลับ (Backwater analysis) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related paper)

#### 2.1 กำลังของดิน (Strength of Soil)

โดยทั่วไปแล้วถ้ากล่าวถึงกำลังของดิน เรามักจะหมายถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินมากกว่ากำลังของดินในแบบอื่นๆ เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงของดินจะมีค่าน้อยสุดในรูปแบบของการรับแรงเฉือนมากกว่าแบบอื่นๆ โดยที่กำลังรับแรงเฉือนหรือค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shearing resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ มุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction) และการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยสัดส่วนของกำลังเฉือนของมวลดินดังกล่าว จะแปรผันตรงกับปริมาณร้อยละของเม็ดดินหยาบ และเม็ดดินละเอียดของมวลดิน

สำหรับดินเม็ดหยาบที่ไม่มีการยึดเกาะกัน (Cohesionless soil) เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังเฉือนของดินขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและความหนาแน่นของมวลดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักกตที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน สำหรับดินเม็ดละเอียดที่มีการยึดเกาะกัน (Cohesive soil) เช่น ดินเหนียว ค่ากำลังเฉือนจะขึ้นอยู่กับการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ แร่ประกอบในมวลดินและความหนาแน่นของมวลดิน

ในปี ค.ศ. 1773 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ คูลอมบ์ (Coulomb) ได้คิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่ระนาบใดๆ ของมวลดิน ในรูปสมการเส้นตรงเรียกว่า สมการมอร์-คูลอมบ์ ซึ่งใช้หาค่าแรงเฉือนของดินที่จุดพิบัติ คือ

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

โดยที่	$\tau$	=	หน่วยแรงเฉือนที่จุดพิบัติหรือ ค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear strength of soil)
	$\sigma$	=	หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal stress)
	$c$	=	การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)
	$\phi$	=	มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal friction angle)

และสามารถเขียนในเทอมของหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดังนี้

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

โดยที่	$\sigma'$	=	หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน = $\sigma - u$
	$u$	=	แรงดันน้ำ (Pore water pressure)
	$c'$	=	การยึดเกาะกันประสิทธิผลของเม็ดดิน (Effective cohesion)
	$\phi'$	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน

การเลือกใช้ค่ากำลังของดินจากการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต้องพิจารณาถึงลักษณะของหน่วยแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือหน่วยแรงรวม (Total stress analysis) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis) ซึ่งหน่วยแรงที่นำมาวิเคราะห์ควรเป็นลักษณะที่สอดคล้องกับสภาวะวิกฤติของลาดดินนั้น ทั้งนี้เนื่องจากดินมักจะมีน้ำขึ้นอยู่ภายในมวลดินเสมอ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงขึ้นในมวลดินก็อาจจะทำให้เกิดการเพิ่มหรือลดแรงดันน้ำในมวลดินขึ้นได้ ซึ่งส่งผลต่อกำลังของมวลดิน ตามสมการมอร์-คูลอมป์

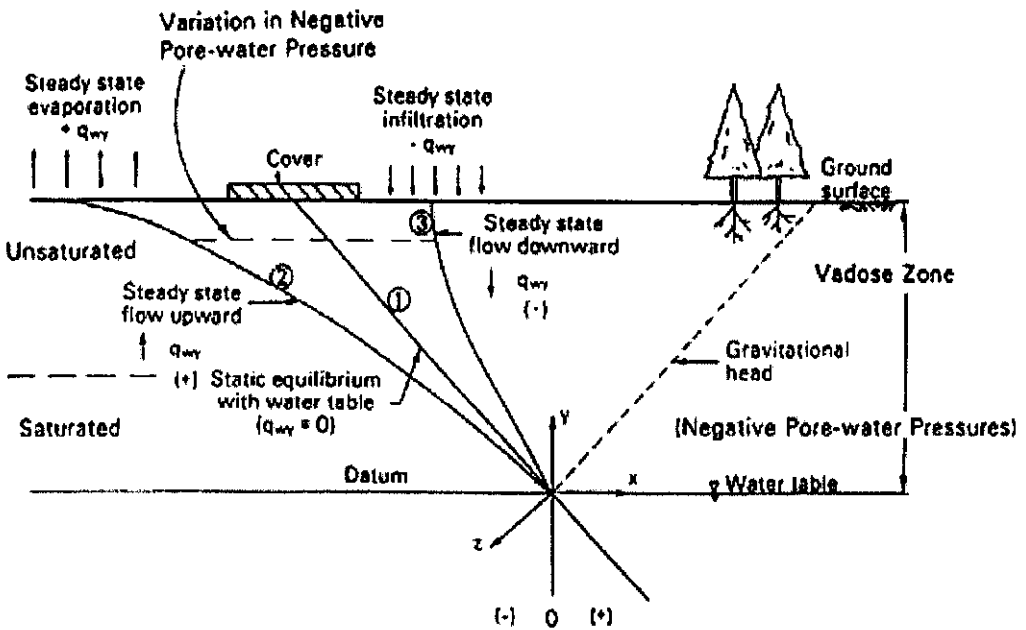
วรากร (2542) อธิบายว่า หลักการของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล ในทางปฐพีกลศาสตร์ ถ้าการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในมวลดินเกิดขึ้นแล้วจะมีแรงดันน้ำ (Pore pressure,  $u$ ) เกิดขึ้นในมวลดินด้วย ถ้าสามารถวัดค่าของแรงดันน้ำได้แน่นอน การคำนวณมักจะแยกหน่วยแรงที่เกิดจากความดันน้ำออกไปก่อน คงเหลือแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma'$ ) ทั้งนี้เพราะแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังเพราะการยึดเกาะกันและมุมเสียดทานของน้ำเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงมีเฉพาะหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้นที่ทำให้ดินมีกำลังรับน้ำหนักได้ แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าแรงดันน้ำให้ถูกต้อง ดังนั้นในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำได้ชัดเจน เช่น

การบรรทุกน้ำหนักโดยเร็ว มวลดินไม่อิ่มตัว แรงดันน้ำเกิดจากการบดอัดเป็นต้น จึงมักจะรวมแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินด้วย ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบให้มวลดินมีสภาพความชื้น อัตราการบรรทุกน้ำหนัก และสภาพอื่นๆ ให้เหมือนกับที่จะเกิดขึ้นในการก่อสร้างจริง และคาดว่าความดันน้ำก็ควรจะเกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่ทดสอบใกล้เคียงกับสภาพที่จะเกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งจะปลดหน่วยแรงประสิทธิผลไปโดยอัตโนมัติ โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่อย่างใด สำหรับค่ากำลังของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

1.  $S_u$  หรือ Undrained shear strength สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวและมีการก่อสร้างโดยเร็ว ( $\phi = 0$  Condition)
2.  $c_u$ ,  $\phi_u$  หรือ Total strength สำหรับดินชั้นไม่อิ่มตัว และไม่ทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ดินบดอัดในขณะก่อสร้างเขื่อนหรือคันดิน
3.  $c'$ ,  $\phi'$  หรือ Effective strength สำหรับดินอิ่มตัวและสามารถทราบความดันน้ำชัดเจน เช่น ก่อสร้างเสร็จมานานแล้วกำลังใช้งาน และมีความดันน้ำเข้าสู่สภาพสมดุล หรือมีน้ำไหลผ่านคงที่

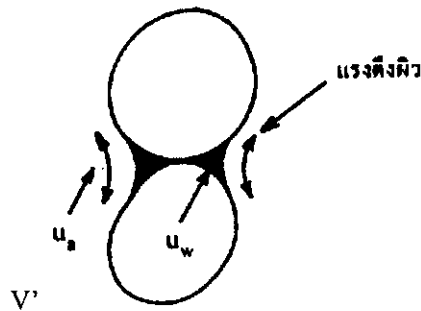
### 2.1.1 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

มวลดินในสภาพธรรมชาติประกอบด้วยชั้นดินต่างๆ ที่ตกตะกอนทับถมกัน และมีระดับน้ำใต้ดิน (Groundwater table) อยู่ด้วย ซึ่งปกติจะอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นผิวดิน (Ground level) ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินจะมีน้ำอยู่เต็ม นั่นคือเป็นมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Vadose zone) จะประกอบทั้งดินอิ่มตัว (Capillary saturated zone) และดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated zone) ดังรูปที่ 2.1 หากไม่มีน้ำไหลซึมลงมาหรือระเหยขึ้นไปจากผิวดินและระดับน้ำใต้ดินคงที่แล้วเส้นแรงดันน้ำจะสมดุลที่เส้น (1) ในขณะที่เส้น (2) และ (3) หมายถึงมีการระเหยในฤดูแล้งและมีน้ำซึมลงในฤดูฝนตามลำดับ ทั้งสามกรณีจะมีความดันในโพรงที่เป็นลบ (Negative pore pressure) ทั้งสิ้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)

มานะ (2541) อธิบายว่า ดินสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีอากาศสอดแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน ลักษณะน้ำในมวลดินจะไม่ต่อเนื่อง แรงตึงผิวเกิดจากผลต่างของแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดิน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ดินสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) (มานะ, 2541)

Olson and Langfelder (1973) อธิบายว่า ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำค่าๆ ค่าแรงดันน้ำจะมีค่าติดลบสูง การกระจายตัวของน้ำในดินเหนือระดับน้ำใต้ดินแบ่งเป็นเขตต่างๆ ดังนี้คือ เขตอิ่มน้ำ (Saturation zone), เขตอิ่มตัวใต้ระดับน้ำใต้ดิน (Capillary saturation zone) และเขตอิ่มอากาศ (Aeration zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

Fredlund and Rahardjo (1993) กล่าวว่า ลาดดินตามธรรมชาติที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน อยู่ในสถานะที่ไม่อิ่มตัว มีแรงดันน้ำด้านลบ (Negative pore pressure) ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงตึงผิวของส่วนที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำที่เรียกว่าผิวสัมผัสแรงตึง (Contractile Skin) ลาดดินเหล่านี้ในฤดูแล้งจึงมีเสถียรภาพมั่นคงอยู่ได้ แต่เมื่อมีฝนตกหรือระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นแรงดันในโพรงที่เป็นลบค่อยๆ หายไป กลายเป็นแรงดันน้ำด้านบวก (Positive pore pressure) กำลังของดินก็ลดลงตามลำดับ ทำให้ลาดดินดังกล่าวอาจจะเกิดการพังทลายได้

Abramson et al. (2001) อธิบายว่า เขตของแรงดันน้ำด้านลบ จะอยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดินขึ้นไป ภายในเขตนี้แรงดันน้ำในช่องว่างน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศ ขนาดของแรงดันน้ำด้านลบบางที่เรียกว่า แรงดูดของดิน (Soil suction) ควบคุมโดยแรงตึงผิว (Surface tension) ที่รอบๆ ขอบผิวอากาศและน้ำภายในช่องว่าง และขึ้นกับขนาดของเม็ดดิน โดยทั่วไปเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีแรงดันน้ำด้านลบที่มากกว่า แรงดันน้ำด้านลบเป็นตัวเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลภายในมวลดิน และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน Ho and Fredlund (1982) แนะนำว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังเฉือนของดินเนื่องจากแรงดันโพรงติดลบแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

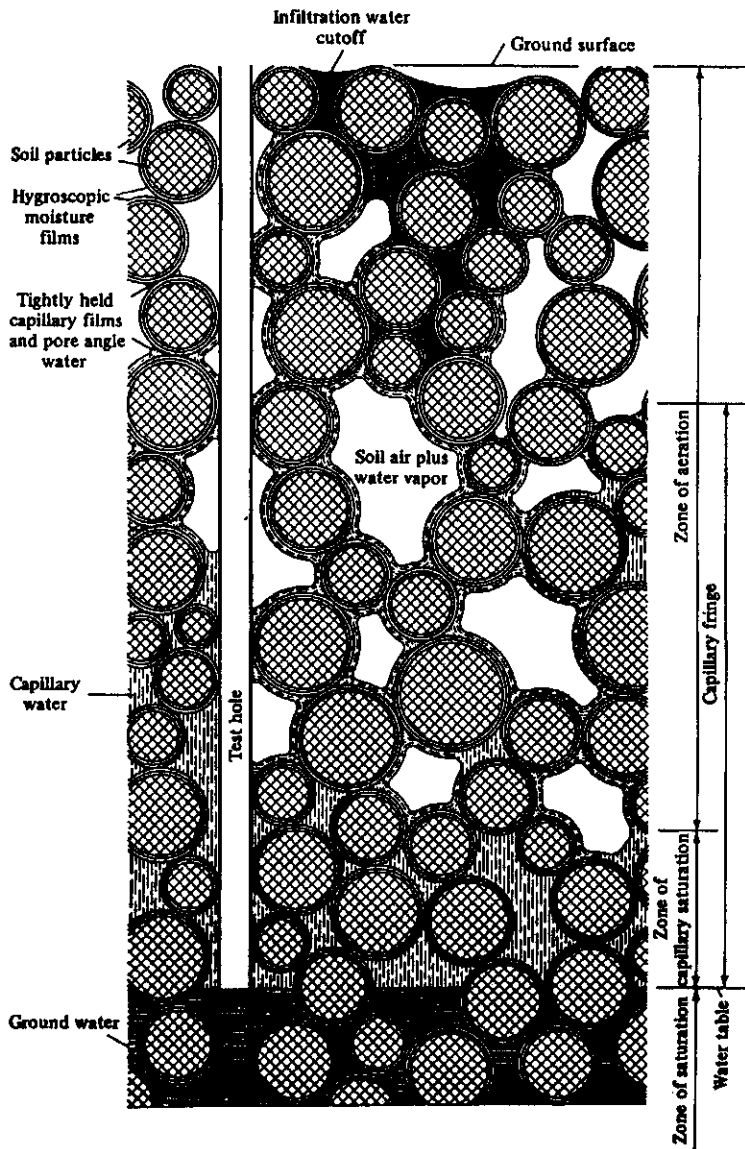
$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (2.3)$$

โดยที่

$c$	=	การยึดเกาะกันของดินทั้งหมด (Total cohesion)
$c'$	=	การยึดเกาะกันประสิทธิผล (Effective cohesion)
$(u_a - u_w)$	=	แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction)
$\phi_b$	=	ความชันของกราฟตามแนวแกนแรงดูดเมทริกซ์ เมื่อ $\sigma - u_a$ เป็นค่าคงที่

จากสมการแรงดูดเมทริกซ์  $(u_a - u_w)$  เป็นตัวเพิ่มกำลังเฉือนในเทอมของ  $(u_a - u_w) \tan \phi_b$  การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินสามารถแทนด้วยกราฟสามมิติโดยใช้ตัวแปร  $\sigma - u_a$ ,  $\tau$  และ  $(u_a - u_w)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4

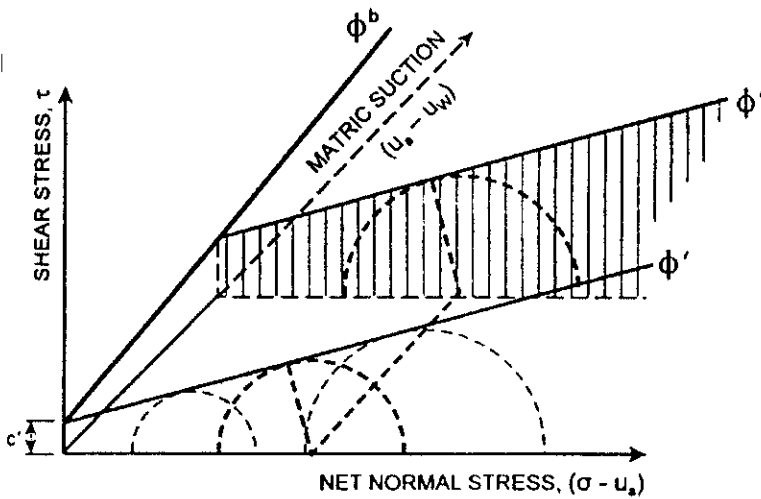
สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) อธิบายว่า แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเม็ดดิน หรือแรงดึงที่ยึดน้ำไว้กับเม็ดดิน เช่นเดียวกับน้ำในหลอดคาปิลลารี แรงดูดเมทริกซ์มีหน่วยเดียวกับแรงดัน (เช่น kPa หรือ Bar) แต่ต่างจากแรงดันเนื่องจากมีค่าเป็นลบ แรงดูดเมทริกซ์นี้แปรผกผันกับปริมาณความชื้นในดิน เรียกว่า Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของน้ำในดิน (Olson and Langfelder, 1973)

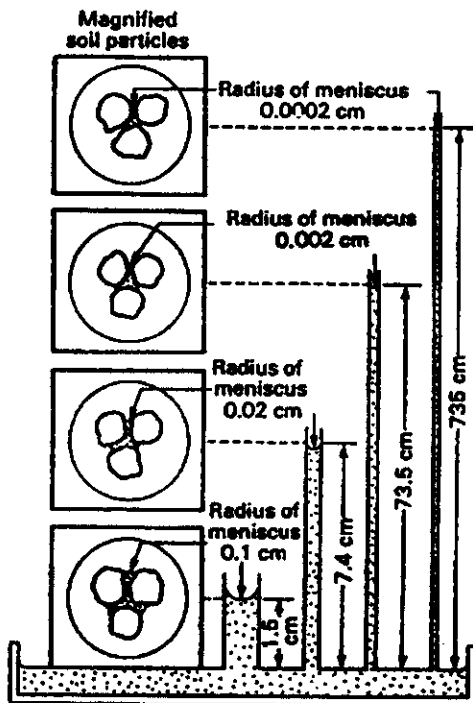
Aitchison (1965) อธิบายว่า แรงดันน้ำด้านลบในมวลดิน ก่อให้เกิดเป็นแรงดูด (Suction) ค่าแรงดูดในดินมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นซึ่งเรียกว่า แรงดูดโดยรวม (Total suction) ประกอบด้วยพลังงานอิสระของแรงดูด 2 ส่วน คือ แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction) หรือ แรงดูดของรูเล็ก (Capillary suction) ซึ่งเป็นแรงดูดที่เกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในดินและแรงดูดออสโมติก (Osmotic suction) ซึ่งเป็นแรงดูดเนื่องจากสารละลายที่ละลายในน้ำในดิน Krahn and Fredlund (1972) ได้เสนอว่าแรงดูดออสโมติก เป็นผลจากสารละลายที่เจือจางในน้ำในดิน (ส่วนมากเป็นเกลือ) ทำให้เกิดแรงดูดชนิดนี้





รูปที่ 2.4 เส้นขอบเขตการพบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)

Jenssen and Dempsey (1980) อธิบายถึงค่าแรงคูลเมทริกซ์ว่า เป็นแรงที่เกิดจากการดึงดูดของสภาพรูเล็ก (Capillarity) จากค่าแรงตึงผิวของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังแสดงเป็นความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.5 ดังนั้นมวลดินเม็ดละเอียดซึ่งมีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อยจะสามารถดึงดูดน้ำขึ้นไปได้สูงกว่ามวลดินเม็ดหยาบ ความดันของน้ำที่ระดับที่ถูกดูดขึ้นไปจากแรงคูลเมทริกซ์มีค่าต่ำกว่าความดันของบรรยากาศ



รูปที่ 2.5 ขนาดรัศมีของส่วนโค้งผิวน้ำที่มีผลต่อแรงคูล (Jenssen and Dempsey, 1980)

### 2.1.2 การลดลงของกำลังเฉือนต่อเสถียรภาพของลาดดิน

ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เพิ่มขึ้นในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง ส่งผลโดยตรงกับเสถียรภาพของลาดดิน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การพิบัติของลาดดินจะไม่เกิดขึ้นในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งดินมีความชื้นน้อยกำลังเฉือนของดินสูงแต่จะพิบัติในช่วงฤดูฝน ในขณะที่ฝนตกทำให้ความชื้นในลาดดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากช่วงเวลาไหนที่ปริมาณน้ำฝนมากจนกำลังเฉือนของดินไม่อาจต้านทานแรงที่กระทำ ก่อให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จำเป็นต้องทำการทดสอบดินทั้งในสถานะดินในความชื้นธรรมชาติและความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

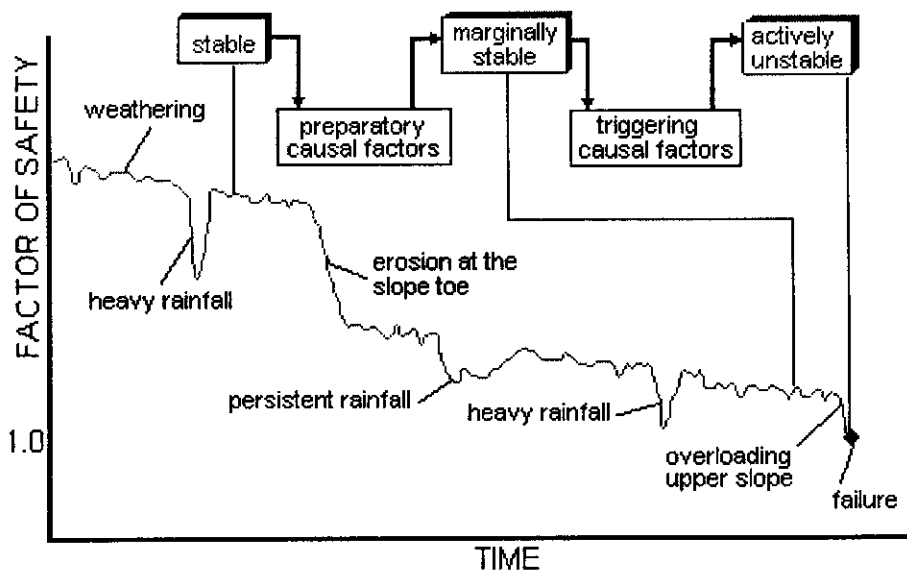
เสถียรภาพลาดดินทางวิศวกรรมอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) เป็นสัดส่วนของแรงต้านทาน (Resisting Force) ต่อแรงขับ (Driving force) ที่กระทำกับมวลดิน ค่าเสถียรภาพลดลงเมื่อแรงขับมากขึ้นหรือแรงต้านลดลง จนเมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้านก็ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน การลดลงของกำลังเฉือนในดิน (Shear strength reduction) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แรงต้านทานลดน้อยจนเกิดการพิบัติของลาดดิน กำลังเฉือนของดินที่ลดลงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. กำลังเฉือนที่ลดลงชั่วคราว สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสถานะที่ฝนตกและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันในดินลดลง เพราะน้ำได้เข้าไปทำลายแรงดึงดูดของอากาศในดินและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นทำให้หน่วยแรงตั้งฉากในดินลดลงเนื่องจากแรงลอยตัว (Uplift pressure) ทำให้กำลังเฉือนจากแรงเสียดทานในดินลดลง โดยกำลังเฉือนที่ลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่จะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความชื้นในดินลดน้อยลงตามลำดับ

2. กำลังเฉือนที่ลดลงถาวร เมื่อดินถูกแรงเฉือนกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกินกำลังต้านทานสูงสุด (Peak Strength) เกิดการเลื่อนตัวของดินในระนาบพิบัติ ค่ากำลังเฉือนของดินจะลดลงเรื่อยๆในขณะที่ลาดดินเกิดการเลื่อนตัวในระนาบพิบัติ จนกระทั่งเหลือแรงต้านทานที่น้อยที่สุด แรงต้านทานที่น้อยสุดนั้นเกิดจากการที่โครงสร้างเดิมของดินถูกทำลายเนื่องจากการเลื่อนตัวของลาดดินในระนาบพิบัติ เมื่อดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่ ทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง

Price (2006) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ที่ช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Short term) มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในดิน

และระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงที่ฝนตกหนัก (Heavy rainfall) จะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงมาก แต่เมื่อปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดินได้ลดลงแล้ว อัตราส่วนความปลอดภัยก็กลับมาเพิ่มขึ้นได้อีก แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากการกัดเซาะที่ตีนของลาดดิน (Slope toe) ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงและไม่อาจกลับเพิ่มขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



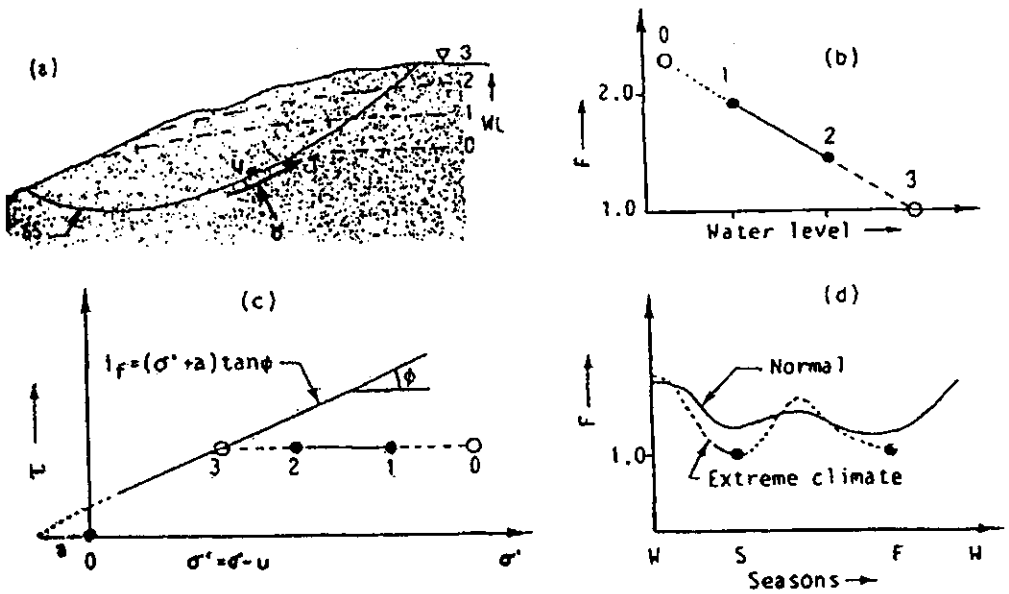
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ที่ระยะเวลาต่างๆ (Price, 2006)

### 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะฝนตกและระดับน้ำใต้ดินต่อการพิบัติของลาดดิน

น้ำฝนเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้เกิดการพิบัติของลาดดิน เมื่อน้ำฝนไหลซึมลงดินทำให้แรงดันน้ำในดินเปลี่ยนไป จากเดิมที่แรงดันน้ำในลาดดินเป็นลบก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นศูนย์ และเปลี่ยนเป็นแรงดันน้ำด้านบวก การเปลี่ยนแปลงสภาวะแรงดันน้ำดังกล่าวทำให้กำลังเฉือนในดินลดน้อยลงตามลำดับ จนกระทั่งกำลังเฉือนของดินน้อยกว่าแรงที่กระทำต่อมวลดินลาดดินก็เกิดการพิบัติ Fredlund and Rehardjo (1993) พบว่าลาดดินที่พิบัติส่วนมากมีสาเหตุมาจากการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดิน

วรากร และคณะ (2542) อธิบายว่าลาดดินตามธรรมชาติ (Natural slopes) อาจไม่เกิดการพิบัติในช่วงที่มีความชื้นในมวลดินต่ำ ทั้งนี้เพราะมวลดินยังไม่อิ่มตัว ความชื้นในมวลดินจะเกิดแรงดึงผิวที่ส่งผลให้เกิดแรงดูด (Suction) ที่ช่วยยึดเกาะให้มวลดินแข็งแรงขึ้น หรือเกิดแรงดันน้ำด้านลบ (Negative pore pressure) ซึ่งทำให้กำลังประสิทธิภาพของดินสูงขึ้น ตามสมการมอร์- คู

ลอมบ์ เมื่อลาดดินได้รับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เช่น ในฤดูที่มีฝนตกชุกทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น ดินมีความชื้นมากขึ้น ทำให้แรงดึงผิวในดินถูกทำลาย และค่าแรงดันน้ำในดินเป็นบวก หน่วยแรงประสิทธิผลของดินก็จะลดลงจนถึงจุดวิกฤติที่เกิดการพังทลายของลาดดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินตามฤดูกาลต่างๆ ในช่วงปีหนึ่งๆ ตามสภาพความชื้นที่มีในดิน



รูปที่ 2.7 อิทธิพลความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่มีต่อเสถียรภาพของลาดดิน (Janbu, 1983)

เมื่อฝนตกน้ำจะไหลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือน้ำที่ไหลซึมลงในชั้นดิน (Infiltration) และผ่านลงสู่ระดับน้ำใต้ดินหรือเขตอ้อมตัวที่อยู่ลึกลงไป และอีกส่วนคือน้ำไหลไปบนผิวดิน (Surface run off) น้ำใต้ดินจะไหลต่อไปยังที่ต่ำกว่า ไปยังจุดที่สามารถไหลออกได้ เช่น ตาน้ำ (Spring) แม่น้ำ หรือทะเล เป็นต้น ปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงดินและน้ำที่ไหลบนผิวดินจะถูกควบคุมโดยอัตราการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability) ในระหว่างการไหลซึมจะเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับมวลดินเปรียบเสมือนเป็นระดับน้ำจากผิวดิน (Perched water table) เคลื่อนตัวต่ำลงไปถึงระดับน้ำใต้ดินรวมกันทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นเรื่อยๆ ในกรณีที่มีดินมีความชื้นเดิมน้อยมาก อัตราการไหลซึมลงดินจะสูงมากเนื่องจากค่าแรงดูดหรือแรงดันน้ำด้านลบมีค่ามาก แต่เมื่อแรงดูดในดินลดลง อัตราการไหลซึมของน้ำก็จะลดลงตามลำดับ น้ำที่ไหลบนผิวดินทำให้เกิดการกัด

เซาะ (Erosion) หน้าดิน การกัดเซาะมีผลทำให้ลาดดินมีความชันเพิ่มขึ้น ที่เกิดขึ้นชัดเจนในกรณีของคลิ่งในแม่น้ำ ปริมาณการกัดเซาะหน้าดินนั้นขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำ

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

1. ปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นจากน้ำที่ไหลซึมผ่านผิวดินลงสู่ชั้นดินด้านล่าง ทำให้ดินมีกำลังเฉือนน้อยลง
2. ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นจากน้ำที่ไหลซึมลงมา ดินที่จมอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินเกิดแรงลอยตัว (Uplift pressure) ทำให้ค่าหน่วยตั้งฉากลดลง ส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลง

สันติ (2550) อธิบายว่า การที่ฝนตกที่ความเข้มสูงๆ ไม่ได้หมายความว่าความชื้นในมวลดินจะเพิ่มขึ้นจนเกิดการพิบัติของลาดดินเสมอไป ในบางครั้งฝนที่ตกเบาบางก็อาจก่อให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ซึ่งเป็นผลมาจากฝนก่อนหน้า (Antecedent rainfall) ทำให้ระดับความชื้นเริ่มต้นสูง เมื่อฝนตกลงมาเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ นอกจากนี้รูปแบบของฝนที่ตกก็มีอิทธิพลเช่นกัน ฝนที่ตกในช่วงเวลาและมีความเข้มรวมเท่ากัน แต่ความเข้มไม่คงที่มากบ้างน้อยบ้างในแต่ละช่วงเวลา ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการประมาณความชื้นที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์โอกาสเกิดการพิบัติของลาดดิน

Kasim et al. (1998) อธิบายว่า ความสัมพันธ์ ระหว่างสภาวะฝนตกกับเสถียรภาพของลาดดิน เกี่ยวข้องกับตัวแปรมากมาย เช่น ความเข้มของฝน, ระยะเวลาที่ฝนตก, ความชื้นของดินก่อนฝนตก, สมบัติของดิน, รูปทรงลาดดิน และการแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ กลไกของลาดดินที่เกิดการพิบัติจากสภาวะฝนตก สาเหตุจากน้ำที่ไหลซึมลงในดิน ไปลดแรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction) ในดินที่ไม่อิ่มตัว ทำให้กำลังของดินลดลงจนเกิดการพิบัติ

Gavin and Xue (2007) อธิบายว่า ในขณะที่ฝนตก น้ำไหลซึมจากผิวดินลงสู่ชั้นดินและกระจายตัวในเขตดินไม่อิ่มตัว ลักษณะการกระจายขึ้นกับความชื้นของดิน, แรงดันน้ำ, ลักษณะภูมิประเทศของลาดดินและความสามารถในการไหลซึม ซึ่งแปรเปลี่ยนตลอดในขณะที่ฝนตก

ในขณะที่การไหลซึมกำลังต่อเนื่อง แรงดูดและความสามารถในการไหลซึมจะลดลง อัตราที่น้ำไหลซึมเข้าสู่ลาดดิน โดยทั่วไปเท่ากับหรือน้อยกว่าความเข้มฝน (Rainfall intensity)

Terzaghi (1950) อธิบายว่า หนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน ก็คือแรงดันน้ำในโพรงดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับน้ำใต้ดินและน้ำฝน ในดินเม็ดละเอียดปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากน้ำฝนทำให้แรงดูดเมทริกซ์ (Matrix suction) ลดลง เป็นผลให้การยึดเกาะกัน (Cohesion) ลดลงและระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงเสียดทานในมวลดินลดลง ซึ่งเป็นผลจากแรงลอยตัวทำให้หน่วยแรงตั้งฉากลดลง

Timothy et al. (2005) อธิบายว่า ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ตัวแปรที่ไม่แน่นอนมากที่สุดคือ ขนาดของแรงดันน้ำในโพรงและกำลังเฉือนของดิน เพราะเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในดินที่มาจากสภาวะที่ฝนตก ขนาดของแรงดันน้ำในโพรงจะเป็นค่าเฉพาะสถานที่ (Site-specific) และเฉพาะเวลา (Time-specific)

นงลักษณ์ (2547) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของการพิบัติของลาดดินในกลุ่มน้ำก้อ จังหวัดจันทบุรี โดยได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพมาทดสอบกำลังเฉือนที่ค่าระดับความชื้นต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝน พบว่าเมื่อระดับความชื้นในดินมากขึ้น กำลังเฉือนจะมีค่าลดลง และอธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นและระดับน้ำใต้ดินของลาดดินขึ้นอยู่กับรูปแบบของฝน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของลาดดิน

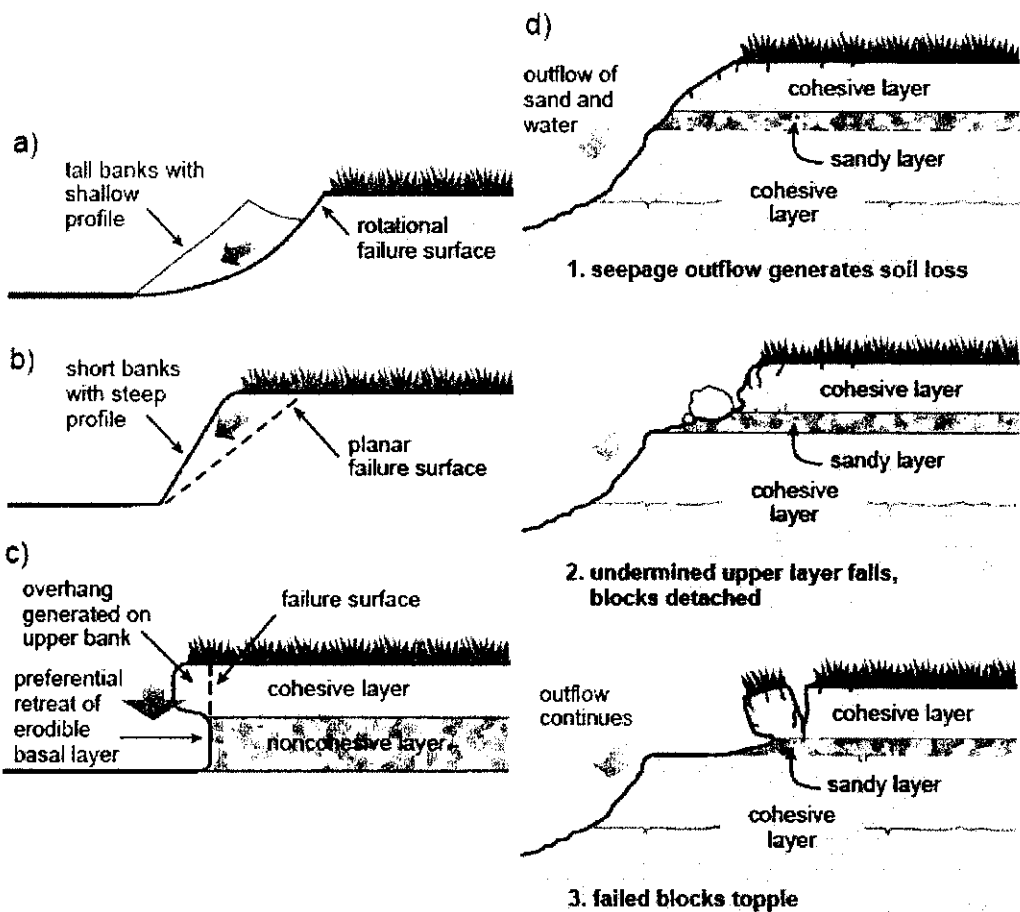
บรรพต (2548) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี พบว่ากำลังเฉือนของดินแปรผกผันกับค่าความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน รูปแบบของฝนที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อการพิบัติของลาดดิน ค่าความชื้นผ่านได้และค่าความชื้นที่สถานะเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลซึมสู่ชั้นดิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน ช่วงเวลาที่ฝนตกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) น้อยสุดเกิดในช่วงท้ายของฝนที่มีความเข้มมากในช่วงเวลาที่ฝนตก

Brain and Dobroslov (2004) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่พิบัติเนื่องมาจากฝนตก และอธิบายหลักการไหลซึมลงในดินของน้ำฝนว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีเลวร้ายสุด (Worst - Case) มักจะสมมุติให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวของลาดดิน

และลาดดินมีลักษณะอิมตัวเต็มที่ สำหรับลาดดินที่มีลักษณะอิมตัวนี้ จะไม่มีการไหลซึมลงดินเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นเมื่อมีฝนตกลงมาจึงไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินอีก

## 2.2 เสถียรภาพของตลิ่งและการกัดเซาะ (Bank Stability and Toe Erosion)

รูปแบบการพังทลายของแนวตลิ่ง มีหลายประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย a) Rotation slumping b) Wedge failure c) Cantilever failure และ d) Toppling of vertically arranged slabs (Thorne et al., 1981) ซึ่งรูปแบบของการพังทลายจะสะท้อนถึงระดับของการกัดเซาะของกระแสน้ำ หรือกลไกอื่นๆ รวมทั้งคุณสมบัติของชั้นดินของตลิ่ง



รูปที่ 2.8 รูปแบบการพังทลายของตลิ่ง a) Rotational failure b) Planar failure c) Cantilever failure และ d) Seepage erosion

รูปแบบการพังทลายจริงในสนามของตลิ่งขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดินบริเวณนั้น เช่น การพังทลายในรูปแบบ Rotation slumping ดังแสดงรูปที่ 2.8a และ Wedge failure ดังแสดงในรูปที่ 2.8b

มักจะเกิดขึ้นกับตลิ่งที่มีชั้นดินเป็นดินเหนียว (Cohesive riverbank) เนื่องจากดินเหนียวมีความต้านทานการกัดเซาะมาก ทำให้การกัดเซาะเกิดขึ้นน้อย แตกต่างกับตลิ่งที่มีชั้นดินเป็นดินเหนียวสลับกับดินทราย ซึ่งในส่วนดินทรายจะโดนการกัดเซาะได้ง่าย รูปแบบการพิบัติจะเป็น Cantilever failure ดังแสดงในรูปที่ 2.8c กระบวนการที่ก่อให้เกิดการพิบัติในสนามนอกเหนือไปการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำแล้วยังมีการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึม (Seepage erosion) ของน้ำใต้ดินอีกด้วย การกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึ้มนักจะเกิดขึ้นกับชั้นดินทรายแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวสองชั้น (Composite riverbank) ดังแสดงในรูปที่ 2.8d ซึ่งการพิบัติทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตลิ่งที่แตกต่างกันไป

แบบจำลองเสถียรภาพของตลิ่งและการกัดเซาะในการวิจัยครั้งนี้ ใช้รูปแบบของ CONCEPTS-Conservational Channel Evolution and Pollutant Transport System ที่พัฒนาโดย Langendon (2000) มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ การกัดเซาะที่ตลิ่งและเสถียรภาพของตลิ่ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การกัดเซาะที่ตลิ่ง (Toe Erosion)

การพังทลายของตลิ่งในธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วจะเกิดการกัดเซาะที่ตลิ่ง (Toe erosion) ก่อน ในกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำสูง หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำบริเวณตลิ่งมีค่าสูงตาม และอาจจะมากพอที่จะทำให้การกัดเซาะเกิดขึ้น ซึ่งระยะการกัดเซาะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$\mathcal{E} = k_d \Delta t (\tau_o - \tau_c) \quad (2.4)$$

โดยที่	$\mathcal{E}$	=	ระยะการกัดเซาะ (Erosion distances, m)
	$k_d$	=	สัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient, $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ )
	$\Delta t$	=	ช่วงเวลาของการกัดเซาะ (Duration, s)
	$\tau_o$	=	หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ (Average boundary shear stress, Pa)
	$\tau_c$	=	ความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, Pa)



ระยะการกัดเซาะจากสมการที่ 2.4 เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Hutchinson, 1972; Foster et al., 1977; Dillaha and Beasley, 1983; Temple, 1985; Hanson, 1989; Stein and Nett, 1997) เกิดจากผลต่างระหว่างหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ ( $\tau_o$ ) ที่เป็นแรงกระทำกับค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ( $\tau_c$ ) ที่เป็นตัวต้านแรงกระทำ อยู่ในรูปแบบหน่วยแรงเฉือนส่วนเกิน (Excess shear equation,  $\tau_o - \tau_c$ ) โดยที่

การกัดเซาะเกิดขึ้นเมื่อ  $\tau_o > \tau_c$

การกัดเซาะไม่เกิดขึ้นเมื่อ  $\tau_o < \tau_c$

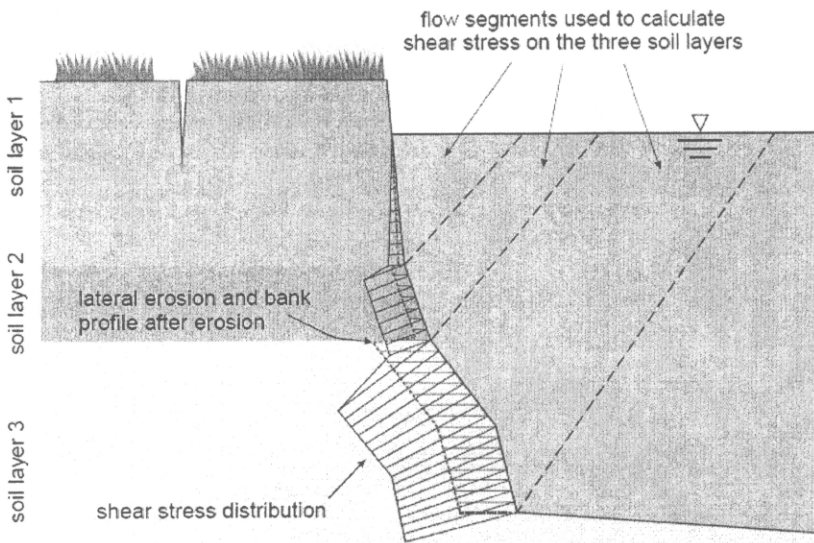
### 2.2.1.1 หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary shear stress, $\tau_o$ )

ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ ( $\tau_o$ ) เป็นหน่วยแรงกระทำที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ โดยที่หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำที่กระทำบนจุดใดๆของตลิ่ง คำนวณได้โดยคิดพื้นที่การไหลที่มีผลต่อจุดนั้นๆ (รูปที่ 2.9) ดังสมการที่ 2.5

$$\tau_o = \gamma_w R S_f \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Water unit weight,  $\text{kN/m}^3$ )  
 $R$  = Hydraulic radius (m)  
 $S_f$  = ความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน (Friction slope, m/m) ได้จากการวิเคราะห์ระดับน้ำย้อนกลับ (Backwater analysis) ซึ่งแสดงในหัวข้อ 2.3

โดยที่  $R, S_f$  มีความสัมพันธ์กับลักษณะภาพตัดขวางของตลิ่งและระดับน้ำแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำดังสมการการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิดคกรูปของ Manning ในบางครั้งค่า  $S_f$  ดังสมการที่ 2.5 จะถูกแทนด้วย Channel slope ( $S_o$ ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการหาค่าตัวแปรทั้งสอง



รูปที่ 2.9 การแบ่งพื้นที่การไหลของน้ำสำหรับใช้คำนวณ Hydraulic radius (Langendoen 2000)

### 2.2.1.2 ความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน

ความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการกัดเซาะตลิ่ง ในช่วงแรกได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่า Index properties เช่น Plasticity index, Clay content (Smerdon and Beasley 1959), Mean diameter (Simon 2006), Silt – clay content (Julian and Torres, 2006) ดังแสดงในสมการที่ 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเช่น Unconfined Compressive Strength, Vane Shear Strength (Kamphius and Hell, 1983) ดังแสดงในสมการที่ 2.10, 2.11 ตามลำดับ

$$\tau_c = 0.16(PI)^{0.84}, \text{ Pa} \quad (2.6)$$

$$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182P_c}, \text{ Pa} \quad (2.7)$$

$$\tau_c = 0.06(\rho_s - \rho_w)gD_{50}, \text{ Pa} \quad (2.8)$$

$$\tau_c = 0.1 + 0.1779(SC) + 0.0028(SC)^2 - 2.3E - 5(SC)^3 \quad (2.9)$$

$$\tau_c = 7.1 + 0.145 \left( \frac{q_u}{10^3} \right), \text{ Pa} \quad \text{for } 20 \leq q_u \leq 80 \text{ kPa} \quad (2.10)$$

$$\tau_c = 3.8 + 0.55 \left( \frac{S_v}{10^3} \right), \text{ Pa} \quad \text{for } 5 \leq S_v \leq 25 \text{ kPa} \quad (2.11)$$

สมการทั้งหมดนี้เป็นสมการที่ใช้ได้เฉพาะดินบริเวณที่ทำการทดสอบเท่านั้น เนื่องจากการเปรียบเทียบดินบริเวณอื่น ในปัจจุบันวิธีการทดสอบที่น่าเชื่อถือมากที่สุดคือ การทดสอบการไหลของทางน้ำเปิดขนาดใหญ่ (Large open channel flow test) ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำได้ ซึ่งเป็นการทดสอบในสนาม แต่กระบวนการในการทดสอบจะมีปัญหาหลายอย่าง

วิธีการทดสอบหาความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินในปัจจุบันมี 3 วิธีคือ 1. Hole erosion test, HET (Wan and Fell, 2004) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำ (Seepage erosion) ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์การกัดเซาะของเขื่อนดิน 2. Erosion Function Apparatus, EFA (Briaud et al. 2001) เป็นการทดสอบการกัดเซาะที่ฐาน (Streambed erosion) 3. Submerged jet test (Hanson, 1991, Hanson and Cook 2004) เหมาะสำหรับการกัดเซาะที่ฐานและการกัดเซาะที่ขอบตลิ่ง (Lateral erosion) เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการบรรจุเป็นมาตรฐาน ASTM Standard D5852 (2003)

Hanson and Simon (2001) ได้ใช้เครื่องมือ Submerged jet test ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินกับสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของตลิ่งหลายแห่งใน USA ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Arulanandan et al. (1980) ซึ่งใช้การทดสอบการไหลของรางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ (Flume testing) โดยใช้ดินในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน

$$k_d \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{N.s}} \right) = 0.1 \tau_c^{-0.5} \quad (2.12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสอง จากการทดสอบในสนามของ Hanson and Simon (2001) บางครั้งพบว่า ค่าคงที่ (0.1) ในสมการที่ 2.12 อาจจะมีค่าเป็น 0.2

### 2.2.2 เสถียรภาพของตลิ่ง (Bank Stability Analysis)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งใช้วิธีที่พัฒนามาจากการวิเคราะห์ Slope และ Embankment ของผู้วิจัยหลายท่านเช่น Bishop (1955), Morgenstern and Price (1965), Terzaghi and Peck (1967) และ Fredlund and Krahn (1977) ซึ่งวิธีทั้งหมดนี้เป็นการวิเคราะห์แบบ Limit equilibrium โดยใช้สมมูลของแรงและโมเมนต์

Simon et al. (1999) ได้ดัดแปลงวิธีการนี้ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง โดยการแบ่งชั้นดินหลายๆชั้น (Horizontal layer) รวมถึงพิจารณา Pore-water pressure และ Confining pressure แต่การคำนวณเสถียรภาพจะไม่พิจารณาแรงเฉือนภายในแต่ละชั้นดิน

Langendoen (2000) ได้พัฒนาวิธีการนี้คือ โดยพิจารณาแรงภายในชั้นส่วนโดยการแบ่งเป็นชั้นส่วน (Slices) และชั้นส่วนย่อยในแนวตั้ง (Subslices) หลายๆชั้นส่วนเพื่อคำนวณหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยคำนวณได้โดยการใช้สมมูลของแรงทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.2.2.1 การพิบัติของตลิ่งแบบระนาบ (Planar failure)

การคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งแบบ Planar failure คำนวณได้โดยการแบ่ง Slices และ Subslices ในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เพื่อประเมินหาหน่วยแรงต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป เช่น หน่วยแรงเฉือนและตั้งฉากบนระนาบพิบัติ หน่วยแรงเฉือนและตั้งฉากภายในแต่ละ Slices โดยการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

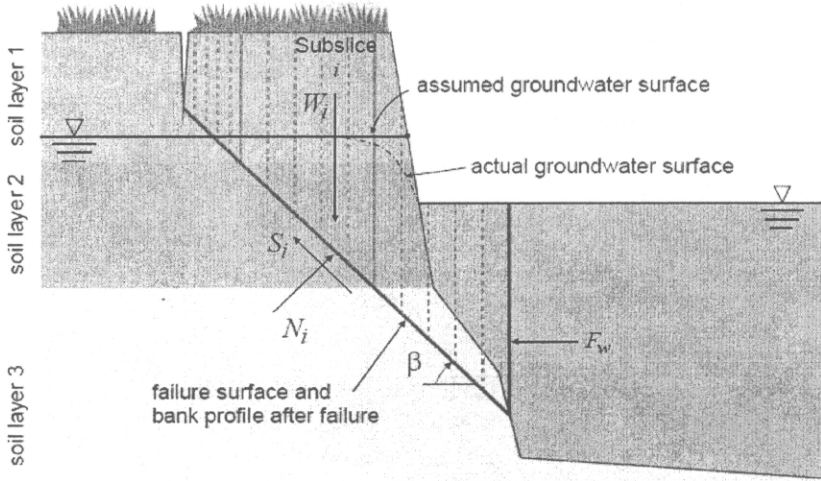
1. คำนวณแรงตั้งฉากบนระนาบพิบัติ  $N_i$  คำนวณจากสมการที่ 2.13 (รูปที่ 2.10a)

$$N_i = \frac{W_i}{\cos \beta} \quad (2.13)$$

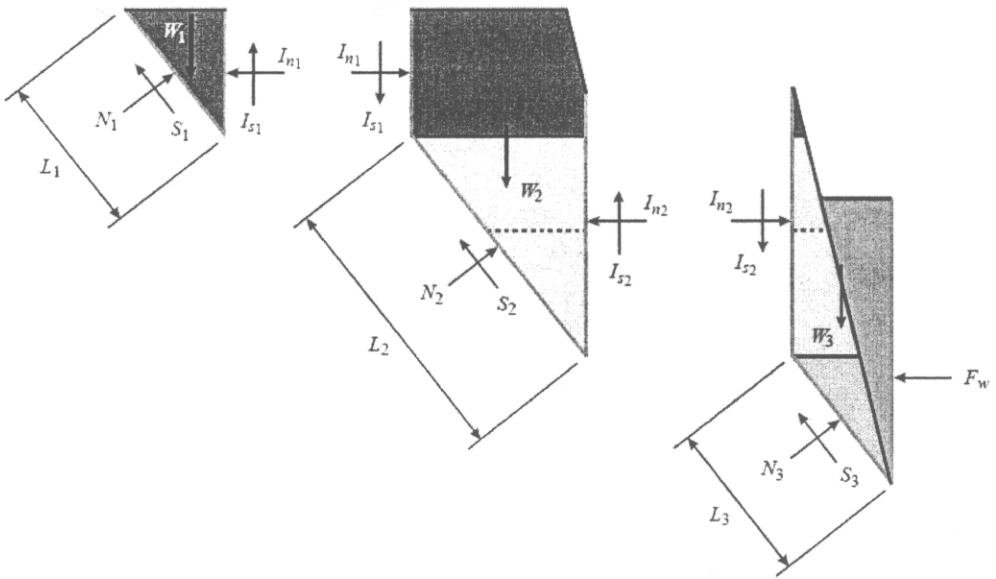
โดย  $W_i$  คือน้ำหนักของ Slice  $i$

2. คำนวณแรงตั้งฉากและแรงเฉือนระหว่าง Slices,  $I_{n_j}$ ,  $I_{s_j}$  ตามลำดับจากสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ ค่า FS ที่ใช้ในสมการที่ 2.14 เริ่มต้นจากการสมมุติโดยยึด

พิจารณาความเป็นไปได้ในการพิบัติ เช่น พิจารณาจาก มุมพิบัติ (Failure Plane) ระดับน้ำในตลิ่ง เป็นต้น



(a) ลักษณะการพิบัติแบบ Planar failure



(b) การแบ่ง Slices เพื่อคำนวณหน่วยแรงภายในของแต่ละ Slice

รูปที่ 2.10 การพิบัติแบบ Planar failure a) ลักษณะการพิบัติแบบ Planar failure b) การแบ่ง Slices เพื่อคำนวณหน่วยแรงภายในของแต่ละ Slice (Langendon, 2000)

$$I_{n_i} = I_{n_{i-1}} - \left( c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b - \mu_{a_i} L_i \tan \phi_i' \right) \frac{\cos \beta}{FS} + N_i \left( \sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \phi_i'}{FS} \right) \quad (2.14)$$

$$I_{s_i} = 0.4 I_{n_i} \sin \left( \frac{\pi L_i}{\sum L_i} \right) \quad (2.15)$$

3. หลังจากนั้นคำนวณแรงตึงฉากบนระนาบพิบัติโดยคิดผลของแรงตึงฉากและแรงเฉือนระหว่าง Slices ดังสมการที่ 2.16

$$N_i = \frac{W_i + I_{s_{i-1}} - I_{s_i} - \sin \beta \left( \frac{c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b - \mu_{a_i} L_i \tan \phi_i'}{FS} \right)}{\cos \beta + \frac{\tan \phi_i' \sin \beta}{FS}} \quad (2.16)$$

4. ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยดังแสดงในสมการที่ 2.17 คำนวณได้จากสมมูลของแรงทั้งในแนวตั้งและแนวราบของแต่ละ Slice โดยคำนวณซ้ำจากสมการที่ 2.13 - 2.16 จนกระทั่งได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากันกับการคำนวณครั้งก่อน

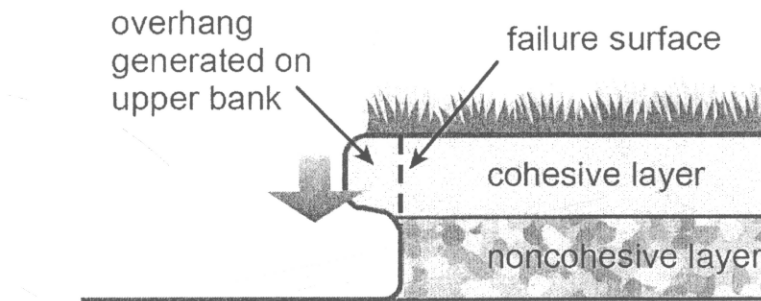
$$FS = \frac{\cos \beta \sum_{i=1}^l \left( c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [N_i - \mu_{a_i} L_i] \tan \phi_i' \right)}{\sin \beta \sum_{i=1}^l N_i - F_w} \quad (2.17)$$

โดยที่	$\beta$	=	มุมของระนาบพิบัติ
	$c'_i$	=	แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของ Slice j
	$\mu_a$	=	แรงดันอากาศของ Slice i
	$\mu_w$	=	แรงดันน้ำของ Slice i
	$L_i$	=	ความยาวระนาบพิบัติของ Slice i
	$W_i$	=	น้ำหนักของ Slice i
	$N_i$	=	หน่วยแรงตึงฉากบนระนาบพิบัติของ Slice i
	$F_w$	=	แรงภายนอกเนื่องจากระดับน้ำของ Slice i
	$\phi_i^b$	=	มุมที่บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนจาก Matrix suction
	$\phi_i'$	=	มุมเสียดทานภายในเม็ดดินประสิทธิผลของ Slice i

### 2.2.2.1 การพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure)

การพิบัติแบบคานยื่นเกิดขึ้นได้เมื่อตลิ่งถูกกัดเซาะที่ตีนตลิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Cohesionless soil นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Geometry) ของตลิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.11 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในรูปแบบ Cantilever failure คือ สัดส่วนของกำลังเฉือนของดินต่อน้ำหนักของส่วนที่ยื่นดังแสดงในสมการที่ 2.18

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^i (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [F_w \sin \alpha - \mu_a L_i] \tan \phi_i')}{\sum_{i=1}^i (W_i + F_w \cos \alpha)} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.11 การพิบัติแบบ Cantilever failure

### 2.3 การหาค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater Analysis

การไหลของน้ำในแม่น้ำตามธรรมชาติเป็นการไหลเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradual varied flow) เป็นการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกน้อยๆ ตามระยะทางที่มาก ซึ่งการคำนวณระดับน้ำทำได้โดยอาศัยสมการพลังงาน สมการการไหลต่อเนื่อง และสมการการไหลสม่ำเสมอ ในทางน้ำเปิดคงรูป เช่น สมการของ Manning เป็นต้น วิธีการคำนวณมีอยู่เป็นจำนวนมากและมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันออกไป แต่ในการวิจัยครั้งนี้ใช้คำนวณโดยใช้วิธีขั้นตอนมาตรฐาน (Standard step method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้งานได้ทั่วไปสำหรับทางน้ำเปิดทุกชนิด

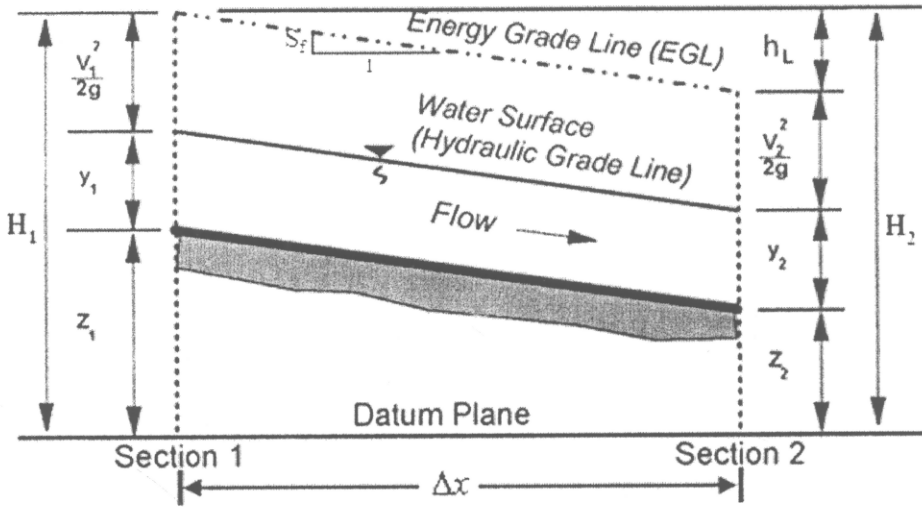
การคำนวณค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis เริ่มต้นจากการพิจารณาพลังงานการไหลในทางน้ำเปิดจากหน้าตัดที่ 1 ถึง 2 โดยอ้างอิงจากระดับ Datum plane ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะได้สมการพลังงานคือ

$$H_1 = H_2$$

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (2.19)$$

โดยที่

$$h_L = S_f \Delta x \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.12 การไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (Gradual varied flow)

$$S_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (2.21)$$

จากสมการของ Manning

$$S_{f_i} = \left( \frac{nV_i}{R_i^{2/3}} \right)^2 \quad \text{ในหน่วย SI} \quad (2.22)$$

โดยที่

- |       |   |  |
|-------|---|--|
| $z$   | = | ระดับท้องน้ำจากระดับอ้างอิง                          |
| $y$   | = | ความลึกในการไหลของทางน้ำ                             |
| $V$   | = | ความเร็วของน้ำ ( $V = Q/A$ )                         |
| $Q$   | = | อัตราการไหลของน้ำ                                    |
| $A$   | = | พื้นที่การไหลของน้ำ                                  |
| $h_L$ | = | Head เนื่องจากการสูญเสียพลังงาน                      |
| $S_f$ | = | ความลาดชันพลังงาน (ความชันของเส้น Energy grade line) |
| $n$   | = | Manning's roughness coefficient                      |
| $R$   | = | ความชันชลศาสตร์ (Hydraulic radius, $R = A/P$ )       |
| $P$   | = | เส้นขอบเปียกของพื้นที่หน้าตัดลำน้ำ (Perimeter)       |



โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณค่าระดับน้ำโดยวิธีนี้ ต้องทราบค่าระดับน้ำของคลัง 1 ตำแหน่ง ( $y_1$  ดังรูปที่ 2.12) จึงคำนวณค่าระดับน้ำของที่ตำแหน่งถัดไป ( $y_2$ ) ได้ ค่าระดับน้ำมีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.19 – 2.22 ได้แก่ ค่า  $A$  และ  $P$  ซึ่งเป็นค่าที่ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับค่าระดับน้ำ ดังนั้นในการคำนวณค่า  $y_2$  ต้องทำการ Trial ค่า  $y_2$  จนกระทั่งสมการที่ 2.19 เป็นจริง มีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. เมื่อทราบค่า  $z$ ,  $y$  และ  $V$  ของลำน้ำตำแหน่งที่ 1 คำนวณพลังงานรวมเหนือท้องน้ำตำแหน่งที่ 1 และความลาดชันพลังงานตำแหน่งที่ 1

$$H_1 = z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$S_{f_1} = \left( \frac{nV_1}{R_1^{2/3}} \right)^2$$

2. สมมุติค่า  $y_2$  คำนวณความลาดชันพลังงานจุดที่ 2 และความลาดชันพลังงานเฉลี่ยจากสมการที่ 2.21 แล้วคำนวณพลังงานรวมเหนือท้องน้ำตำแหน่งที่ 2

$$S_{f_2} = \left( \frac{nV_2}{R_2^{2/3}} \right)^2$$

$$H_2 = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

4. ตรวจสอบค่า  $H_1 = H_2$  ถ้าเป็นจริงแสดงว่าสมมุติค่าความลึกของทางน้ำ  $y_2$  ได้ถูกต้อง

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jotisansaka and Mairaing (2010) ได้ทำการทดสอบดินที่เก็บมาจากพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่ม ทดสอบดินโดยวิธีการเนียนโดยตรงพร้อมทั้งตรวจวัดแรงดูด (Suction) ของเม็ดดิน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะที่ปรากฏ (Apparent cohesion) และแรงดูดของเม็ดดิน พบว่าผลของการทดสอบเป็นไปตามหลักการของ Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)

กล่าวคือแรงดูดของเม็ดดินและแรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) จะมีค่าสูงเมื่อมวลดินมีปริมาณความชื้นต่ำ ส่งผลให้แรงยึดเกาะที่ปรากฏที่แสดงในรูปของหน่วยแรงดูด (Suction stress) มีค่าสูง

Springer (1981) ได้ประเมินเสถียรภาพของตลิ่งที่มีชั้นดินประเภท Cohesive และ Sandy – silt ของ Ohio River เนื่องจากการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (Rapid drawdown) ดินที่ทำการศึกษาเป็นดินที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง Cohesion และ Unit weight ของดิน และยังก่อให้เกิด Tension crack เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดิน ตลิ่งที่ทำการศึกษาเกิดการพิบัติหลังระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

Hagerty et al. (1983) ได้สังเกตพฤติกรรมการกัดเซาะของตลิ่งที่ประกอบไปด้วยดินทราย (Sandy riverbank) และตลิ่งที่ประกอบไปด้วยดินเหนียว (Clayey riverbank) ของ Ohio River พบว่าสาเหตุที่สำคัญเป็นอย่างมากต่อการกัดเซาะคือขนาดของเม็ดดิน โดยตลิ่งที่มีทรายเป็นองค์ประกอบจะอ่อนไหวต่อการกัดเซาะมาก การกัดเซาะเกิดขึ้นระหว่างที่ระดับน้ำสูง เนื่องจากฝนตก ระหว่างฝนตกเกิดการไหลซึมของน้ำที่เป็นตัวชะล้างเม็ดดินขนาดเล็กออก (Seepage erosion) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตลิ่งพิบัติ

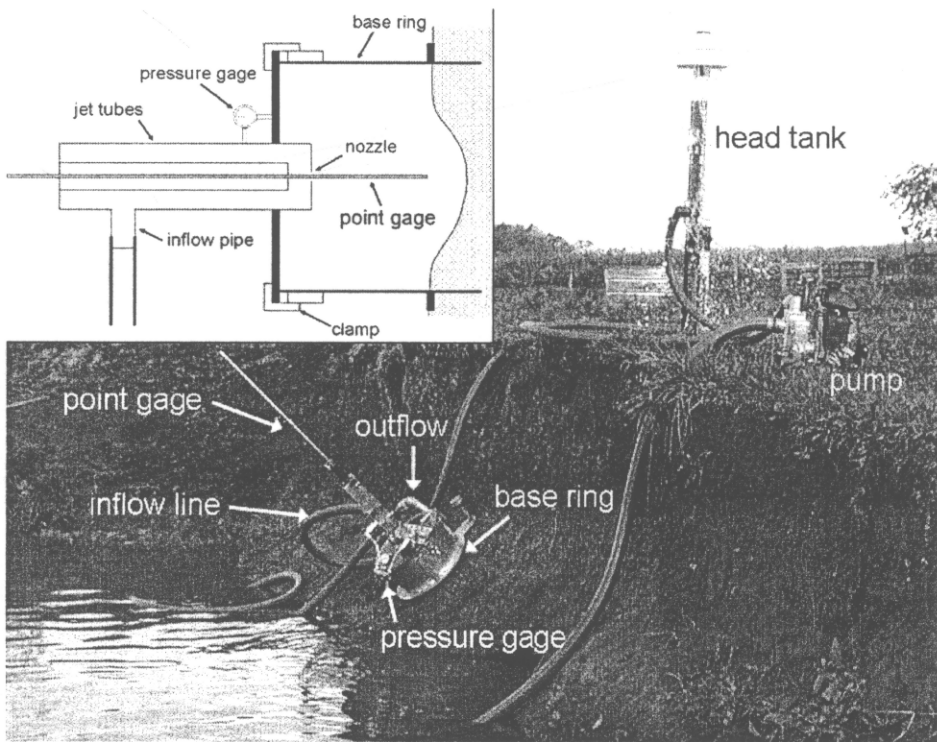
Rinaldi and Casaghi (1999) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันน้ำด้านบนที่มีผลต่อเสถียรภาพของตลิ่งใน Sieve River, Italy ตลิ่งทั้งหมดประกอบไปด้วย Gravel บริเวณส่วนล่างของตลิ่ง, Silty อยู่บริเวณส่วนบนของตลิ่ง ในสภาวะปกติ แรงดันน้ำด้านบนเป็นตัวช่วยเพิ่มกำลังของดินในส่วนของดินที่ไม่อิ่มตัว ทำให้ตลิ่งมีเสถียรภาพสูง ในสภาวะนี้ตลิ่งจะมีความชันสูงกว่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal friction angle) หลังจากฝนตกทำให้น้ำเต็มตลิ่งแรงดันน้ำด้านบนนี้จะกลับกลายเป็นแรงดันน้ำด้านบวก แต่เสถียรภาพของตลิ่งยังสูงอยู่เนื่องจากมีผลของ Hydrostatic confining pressure ของน้ำในแม่น้ำ เสถียรภาพของตลิ่งในแม่น้ำลดลงเมื่อระดับน้ำลดลงหลังฝนตก ผลการศึกษาเป็นไปตามทำนองเดียวกันกับการศึกษาตลิ่งที่อื่นเช่น Clayey – silt riverbanks, Goodwin creek, USA (Simon et al. 2000), Steep cohesive riverbanks, Missouri riverbank, USA (Darby et al. 2000)

Hanson and Simon (2001) ได้ใช้ Submerged jet test ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทำการประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ( $\tau_c$ ) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน ( $k_d$ ) ของตลิ่งใน Midwestern, USA ชั้นดินของตลิ่งเป็น Cohesive soil โดยมีปริมาณของ Silt ประมาณ 50 – 80 % ค่า  $\tau_c$  อยู่ในช่วง 0 – 400 Pa และ  $k_d$  อยู่ในช่วง 0.001 – 3.75 cm<sup>3</sup>/N.s ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ทั้งสองของตลิ่งหลายแห่งที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้เช่น

Goodwin creek, Missouri, USA มาทำการจำแนกประเภทดินทางด้านความต้านทานต่อการกัดเซาะ (Classification of erodibility) โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.14

Thoman and Niezgod (2009) ได้ใช้ Submerged jet test ทำการประเมินค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของตลิ่งใน Powder river basin ซึ่งเป็นตลิ่งประเภท Cohesive riverbank พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ของ  $\tau_c$  กับคุณสมบัติต่างๆของดินเช่น Activity of clay (A), Dispersion ratio (DR), Specific gravity ( $G_s$ ), Potential of hydrogen ion (pH), Water content ( $w$ ) จากการศึกษพบว่าชั้นดินของตลิ่งเป็นดินประเภท Erodible – Moderately resistant clays ค่า  $\tau_c$  อยู่ในช่วง 0.11 – 15.35 Pa และค่า  $k_d$  อยู่ในช่วง 0.27 – 2.38  $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$  ได้ความสัมพันธ์ของ กับคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.23 โดยสมการนี้มีค่าความน่าเชื่อถือในรูป  $R^2 = 0.72$

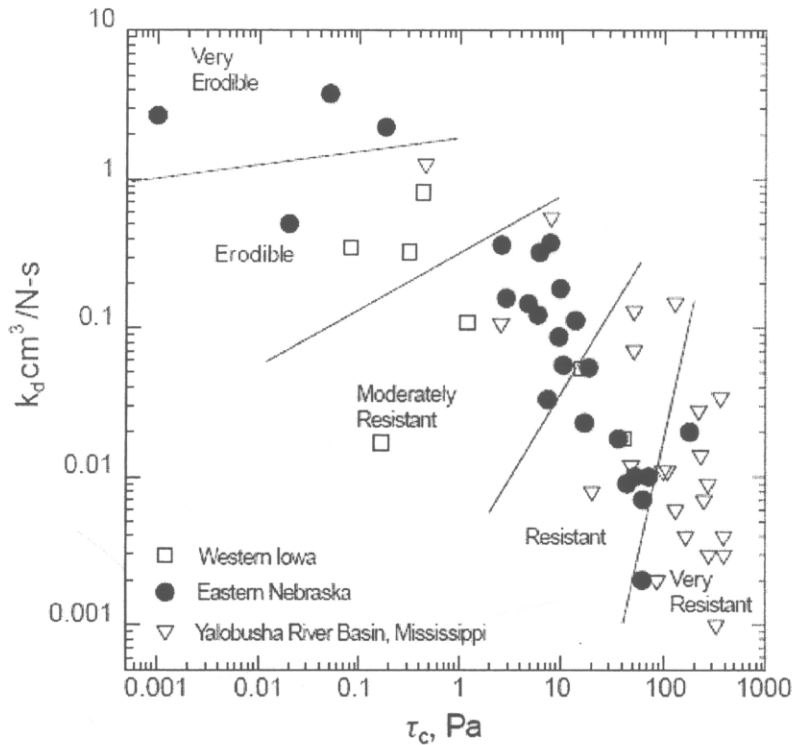
$$\tau_c = 77.28 + 2.20(\text{Act}) + 0.26(\text{DR}) - 13.49(\text{SG}) - 6.4(\text{pH}) + 0.12(w) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.13 Schematic of submerged jet apparatus (Hanson 1997)

Ramirez – Arila (2010) ได้ทำการประเมินการกัดเซาะตลิ่งใน Southeastern Plains Ecoregion ทำการติดตามการกัดเซาะของตลิ่งโดยการติดตั้ง Erosion pins พร้อมทั้งทดสอบดินเพื่อประเมินค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  โดยใช้ Submerged jet test จากการศึกษพบว่าตลิ่งถูกกัดเซาะประมาณ 1 –

560 mm ทั้งนี้เนื่องจากดลิ่งพิบัติในช่วงฝนตก ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  มีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างมากขึ้นอยู่กับดินแต่ละชนิดและแต่ละตำแหน่ง เมื่อพิจารณาค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  กับระยะการกัดเซาะที่เกิดขึ้นแล้ว พบว่ามีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 2.14 Classification of Erodibility (Hanson and Simon 2001)

## บทที่ 3

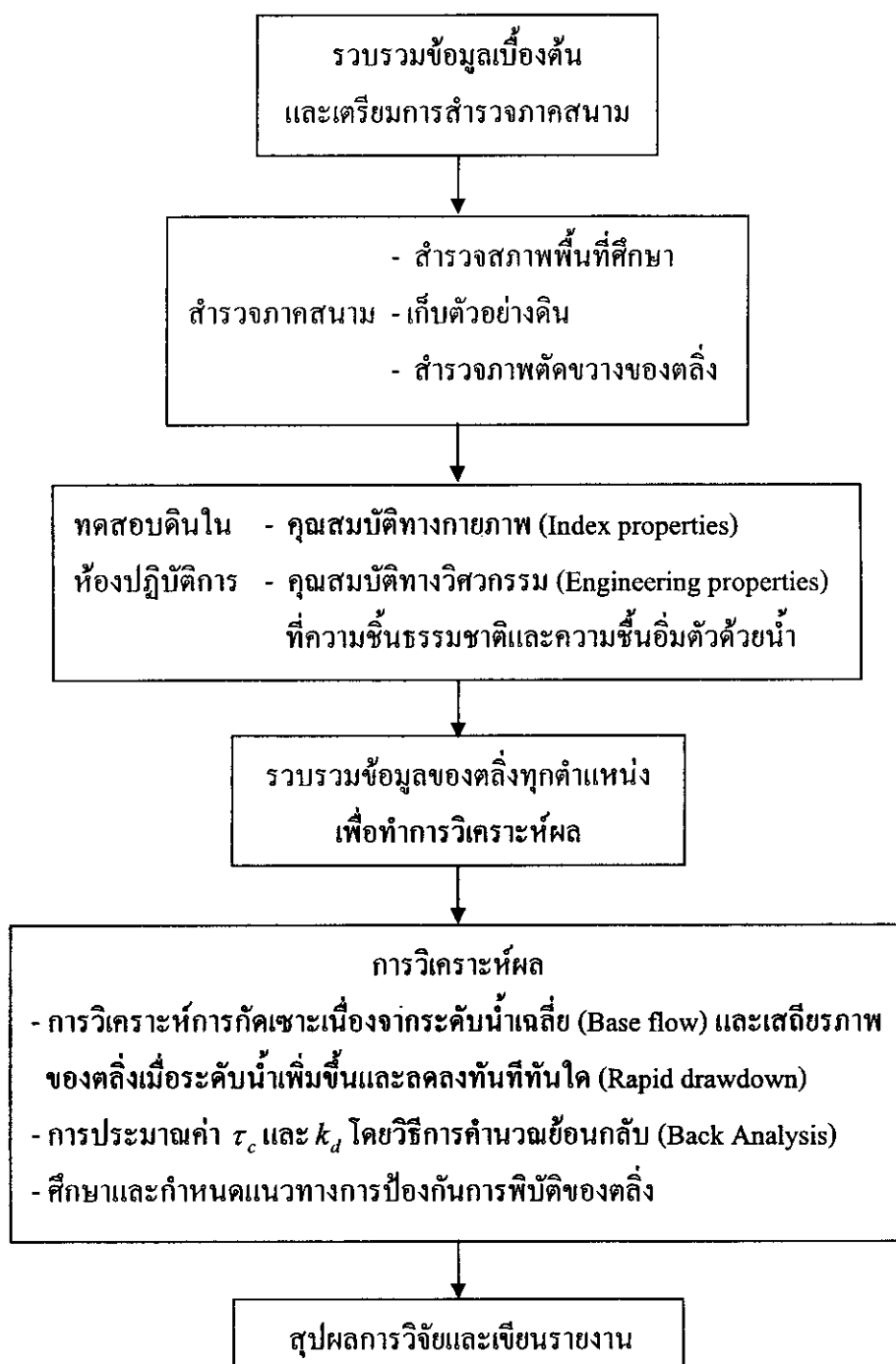
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เริ่มต้นตั้งแต่การสำรวจแนวตลิ่งในพื้นที่ศึกษาเบื้องต้น การสำรวจร่องรอยของการพิบัติในอดีต รวบรวมข้อมูลของพื้นที่ศึกษาเช่น ระดับน้ำ อัตราการไหลของน้ำ จากนั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ (Index properties) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) ของดิน รวมไปถึงการตรวจสอบการพิบัติของตลิ่งและทำการสำรวจภาพตัดขวางของตลิ่งก่อนและหลังพิบัติแล้วนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพและการกัดเซาะของตลิ่ง ไปจนถึงการกำหนดแนวทางการป้องกันการพิบัติของตลิ่ง ซึ่งการดำเนินงานจะแบ่งเป็นขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3.1

#### 3.1 การสำรวจพื้นที่และภาพตัดขวางของตลิ่ง

##### 3.1.1 การสำรวจพื้นที่

การออกสำรวจพื้นที่ศึกษาได้รับความอนุเคราะห์เรือเป็นพาหนะในการสำรวจจากสำนักชลประทานที่ 16 เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ห่างจากประตูระบายน้ำอุตตะเกาเป็นระยะทางประมาณ 3 กิโลเมตรลงมาทางทิศใต้ ในการสำรวจพื้นที่ได้ทำการเลือกตำแหน่งของตลิ่งที่จะทำการศึกษา โดยพิจารณาจากร่องรอยการพิบัติในอดีต และคาดว่าจะเกิดการพิบัติอีกในอนาคต ค่าระดับน้ำรายวันในพื้นที่ศึกษาได้ข้อมูลจากประตูระบายน้ำอุตตะเกาและสถานีโทรมาตรบ้านบางศาลา (X.90) ซึ่งสำนักชลประทานที่ 16 โดยมีข้อมูลรายวันจากปี 2549-2552



รูปที่ 3.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1.2 การสำรวจสภาพตัดขวางของตลิ่ง

การสำรวจสภาพตัดขวางของตลิ่ง ในเบื้องต้นได้ทำการสำรวจโดยใช้กล้องประมวลผลรวม (Total station) ตั้งกล้องสำรวจบนตลิ่งแล้วนำไปปริซึมไปหยั่งที่ตำแหน่งต่างๆในตลิ่งที่ต้องการวัดค่า ผลปรากฏว่ากล้องสำรวจอ่านค่าไม่ได้เนื่องจากเรือไม่ได้ยู่นิ่ง ดังนั้นได้ทำการเปลี่ยนวิธีเป็นการใช้เชือก โดยผูกเชือกกับต้นไม้ทั้งสองฝั่งของตลิ่ง ใช้ไม้สตาฟวัดระดับน้ำจากท้องคลองถึงผิวน้ำทุกระยะ 3 – 5 เมตร ส่วนของตลิ่งที่อยู่เหนือน้ำได้ทำการวัดระยะและความลึกเทียบกับขอบบนของตลิ่งดังแสดงดังรูปที่ 3.2 ในการสำรวจสภาพตัดขวางของตลิ่งได้ทำการดำเนินการ 3 ครั้ง ซึ่งเป็นการสำรวจสภาพตัดขวางของตลิ่งทั้งก่อนและหลังพืบัติที่เกิดขึ้น ตลิ่งก่อนเกิดการพืบัติจะเรียกว่า Initial profile และตลิ่งหลังเกิดการพืบัติจะเรียกว่า Measured eroded profile

ครั้งที่ 1 วันที่ 23 – 24 กันยายน 2552 (ตลิ่งก่อนเกิดการพืบัติ)

ครั้งที่ 2 วันที่ 12 – 13 พฤศจิกายน 2552 (ตลิ่งหลังเกิดการพืบัติ)

ครั้งที่ 3 วันที่ 20 – 21 มกราคม 2553 (ตลิ่งหลังเกิดการพืบัติ)



รูปที่ 3.2 การวัดรูปตัดขวางของตลิ่งของส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำ

### 3.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

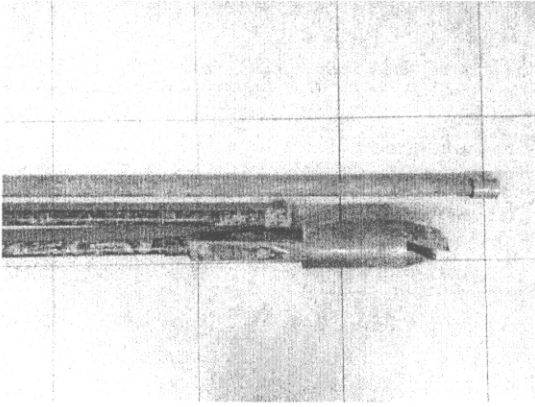
การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed samples) เพื่อต้องการหาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน และทราบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นดินตามความลึกของตลิ่ง ในการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพได้ทำการเก็บทุกระยะความลึก 1 เมตรไปจนถึงชั้นดินที่เปียกน้ำ เนื่องจากเก็บต่อไม่ได้ ซึ่งการเก็บตัวอย่างจึงต้องทำในช่วงที่ตลิ่งมีระดับน้ำต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากการสำรวจตลิ่งในบางตำแหน่งเป็นตลิ่งที่มีความสูงมาก จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างหน้าตลิ่งในส่วนของตัวอย่างดินที่ความลึก 4 – 5 เมตร เนื่องจากความสูงของตลิ่งแต่ละตำแหน่งมีความสูงไม่เท่ากัน ดังนั้นจำนวนตัวอย่างในแต่ละตำแหน่งอาจจะไม่เท่ากัน จำนวนตัวอย่างดินของตลิ่งแต่ละตำแหน่งที่เก็บได้มากที่สุดอยู่ที่ความลึกประมาณ 5 เมตร ได้จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้เก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพคือ Hand auger ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในการเก็บตัวอย่างจะทำการเจาะดินด้วย Hand auger ไปจนถึงระดับที่ต้องการเก็บ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแล้วบรรจุใส่ถุงพร้อมทั้งระบุตำแหน่งของตลิ่งและความลึกที่ทำการเก็บดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (รูปที่ 3.5) ทั้งหมดจะนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพของดินในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1

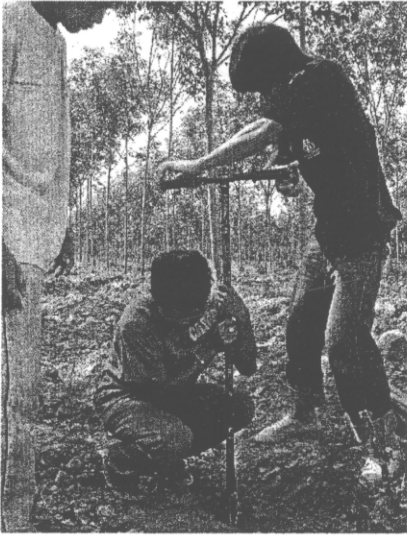
ตารางที่ 3.1 ชนิดและมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ชนิดของการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM
การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water content, $w$ )	ASTM D 2216
การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL)	ASTM D 4318
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity, $G_s$ )	ASTM D 854-02
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรง (Sieve analysis)	ASTM D 421
การวิเคราะห์หาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis)	ASTM D 422 – 63
การจำแนกดินแบบ USCS (Unified soil classification system)	ASTM D 2487





รูปที่ 3.3 Hand auger



รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้ Hand auger



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ

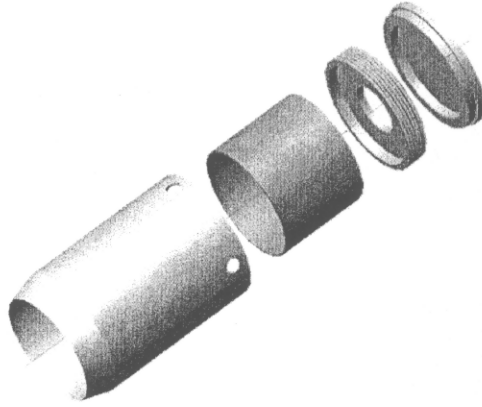
### 3.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการเก็บตัวอย่างดินที่จะนำมาทดสอบนั้นจะต้องเป็นตัวอย่างดินแบบคงสภาพ เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกต้อง และจะเป็นตัวแทนของดินในพื้นที่ศึกษาต่อไป

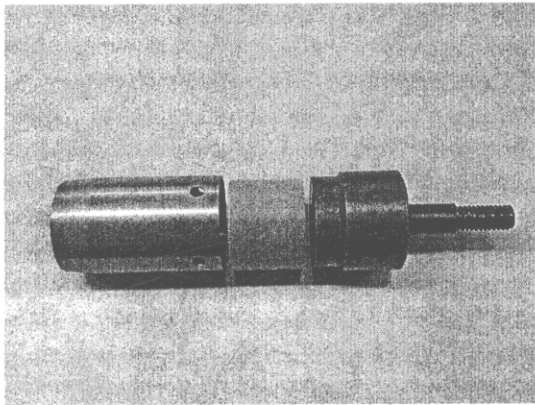
#### 3.3.1 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

จากการศึกษาการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพของผู้วิจัยหลายท่าน ประกอบกับการสำรวจพื้นที่ศึกษาในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้ทำการสร้างเครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายกับการเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบาง (Thin wall tube) ที่เรียกว่า KU – Miniature Sampler (วรากรและคณะ, 2548) ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 หลักการของเครื่องมือดังกล่าวคือ การใช้เหล็กทรงกระบอกแบบบางพอที่จะไม่ทำให้ดินสูญเสียสภาพและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความทนทานพอที่จะรับแรงกระแทกลงไปตัดดินที่อยู่รอบๆ ให้ขาดได้ ในการเก็บตัวอย่างดินของดิน โดยขนาดของกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกล่องเฉือนแบบวงกลม (Circular shear box) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินแตกในขณะที่แต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด และในการเก็บ การขนส่งตัวอย่างนั้นมักจะมีปัญหาทำให้ตัวอย่างดินเสียรูปได้อีกเช่นกัน จึงต้องใช้กระบอก PVC ที่มีขนาดบางและสามารถบรรจุอยู่ในกระบอกเหล็กที่ตอกลงในดินได้ โดยขณะที่ตอกระบอกเหล็กกลงไปในดินนั้นดินจะผ่านปลายกระบอกเหล็กและผ่านเข้าไปอยู่ในกระบอก PVC และสามารถดันกระบอก PVC ที่มีตัวอย่างดินอยู่ ออกทางปลายอีกด้าน ในการเก็บตัวอย่างดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเกกาได้ทำการสร้างอุปกรณ์เสริมเพื่อที่จะนำมาเชื่อมต่อกับกระบอกเก็บตัวอย่างดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งปลายอีกข้างหนึ่งที่เป็นเกลียวจะต่อกับชุดท่อเหล็กที่มีแท่นสำหรับไว้ตอกลูกตุ้ม

สำหรับการเก็บตัวอย่างดิน (รูปที่ 3.8) ในขั้นตอนแรกต้องทำการเจาะดินด้วย Hand auger ไปจนถึงระดับที่ต้องการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ จากนั้นทำการต่อชุดเก็บตัวอย่างกับท่อเหล็กดังกล่าว และหยั่งลงไปในรูที่ได้ทำการเจาะไว้ ทำการตอกลูกตุ้มจนตัวอย่างดินเต็มกระบอกเหล็ก แล้วทำการปิดท่อเหล็กจนดินตัวอย่างขาดออกจากดินเดิม นำตัวอย่างดินออกจากปลายกระบอกเหล็กในส่วนท้าย แล้วห่อด้วยพลาสติกกันความชื้นและใส่ในถุงอีกชั้นเพื่อสะดวกในการเก็บรักษาและขนส่ง



รูปที่ 3.6 ครอบเก็บตัวอย่าง KU – Miniature Sampler (วารากรและคณะ 2546, 2548)



รูปที่ 3.7 ชุดเก็บตัวอย่างดินที่ดัดแปลงมาใช้ในการเก็บตัวอย่างดินบริเวณตลิ่งคลองอู่ตะเภา

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

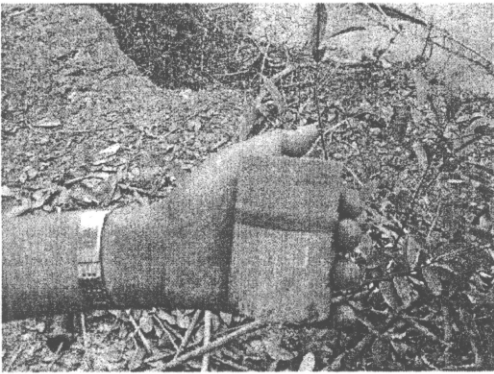
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear strength parameter) ของดินในสถานะต่างๆ เช่น ดินในสถานะความชื้นธรรมชาติและดินในสถานะความชื้นสูงสุดซึ่งเรียกว่า ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ในการทดสอบใช้วิธีการเฉือนโดยตรง (Direct shear test) โดยกล่องเฉือน (Shear box) ต้องมีขนาดเท่ากับตัวอย่างดินที่เก็บมา คือทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร เนื่องจากการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างดิน อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ Mohr - Coulomb จึงจะได้ Shear strength parameter ของดิน ด้วยข้อจำกัดของวิธีการเก็บตัวอย่างดินทำให้ได้ตัวอย่างดินน้อย ดังนั้นจึงใช้การทดสอบแบบ Multi-stage direct shear test.



(a) ขณะหย่อนกระบอกรับตัวอย่างดิน



(b) ขณะตอกลูกตุ้มเพื่อเก็บตัวอย่าง



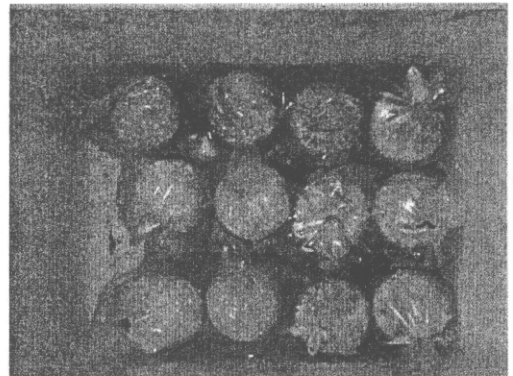
(c) ตัวอย่างดินที่เก็บได้



(d) เก็บตัวอย่างดินด้วยพลาสติกกันความชื้น



(e) หลุมที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างดิน



(f) ตัวอย่างดินที่บรรจุพร้อมขนย้าย

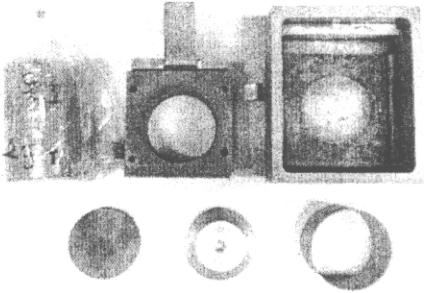
รูปที่ 3.8 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

การทดสอบโดยวิธีนี้เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีความแปรปรวนสูงซึ่งวิธีนี้ให้ค่า Shear strength parameter ที่น่าเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติธรรมดา มีชื่อเรียกว่า Multi-stage direct shear test (วรากรและคณะ 2546, 2548) ซึ่งภาพการดำเนินการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9

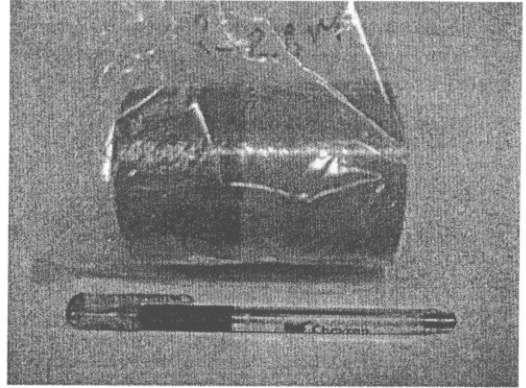
วิธีการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างดินเพียงตัวอย่างเดียว ทดสอบโดยเลื่อนตัวอย่างจนเกือบถึงจุดวิบัติของในแต่ละ Normal Load อย่างน้อย 3 - 4 Normal Load ใช้อัตราการเลื่อนประมาณ 0.05 mm/min ก่อนการเลื่อนตัวอย่าง ทำการ Consolidate ใน Normal load แรกประมาณ 1 วัน แล้วเลื่อนตัวอย่างจนถึงจุดที่เกือบวิบัติโดยสังเกตจากหน่วยแรงเฉือนที่คงที่ ก่อนทำการเลื่อนตัวอย่างใน Normal load ต่อไปต้องทำการ Consolidate ตัวอย่างให้ทรุดตัวหมดแล้วทำการเลื่อนต่อไป ทำซ้ำจนครบ 3 Normal load ก็จะได้ข้อมูลเพียงพอในการวิเคราะห์หาค่า Shear strength parameter ในตัวอย่างเดียว โดยใช้เวลาการทดสอบประมาณ 2 วัน ในกรณีเป็นตัวอย่างดินที่ความชื้นธรรมชาติและใช้เวลาประมาณ 3 วัน ในกรณีเป็นดินตัวอย่างที่อิมตัว รวมการทดสอบ Direct shear test ทั้งหมด 48 ตัวอย่าง

#### 3.4 การจำลองการพิบัติของตลิ่ง (Bank Failure Simulation)

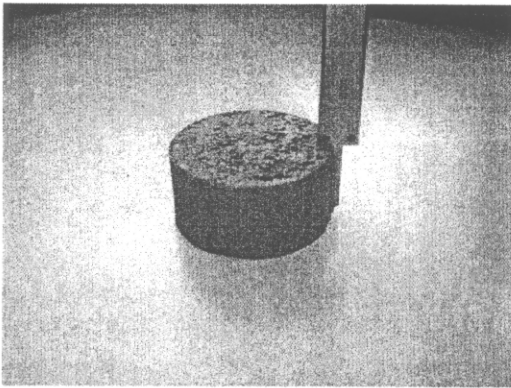
การวิเคราะห์การพิบัติของตลิ่งทำให้ทราบกระบวนการของการพิบัติและปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของตลิ่ง ซึ่งจะแตกต่างกับการพิบัติของลาดดินทั่วไป ในธรรมชาติของตลิ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเนื่องจากการกัดเซาะเมื่อมีการไหลของน้ำ รวมไปถึงระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นและลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown) ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเฉลี่ย (Base flow) และเสถียรภาพของตลิ่งในกรณีที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้นและลดลงทันทีทันใด เป็นไปตามลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ศึกษา เนื่องจากการเปิด - ปิดประตูระบายน้ำในช่วงน้ำท่วมเพื่อเร่งระบายน้ำไม่ให้ท่วมเมืองหาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์จะเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลทางด้านอื่นต่อไป การวิเคราะห์ผลทั้งสองรูปแบบใช้ข้อมูลภาพถ่ายตัดขวางของตลิ่ง Section 1 ในปี พ.ศ. 2549 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยได้ความอนุเคราะห์จากสำนักชลประทานที่ 16 และใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



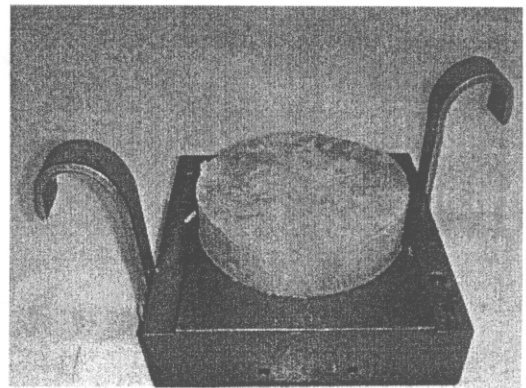
(a) อุปกรณ์ในการทดสอบการเฉือนโดยตรง



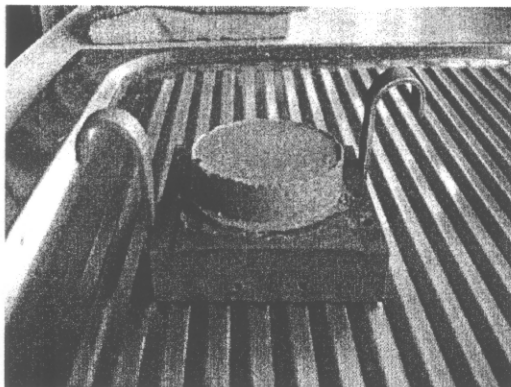
(b) ตัวอย่างดินที่เก็บจากตลิ่ง



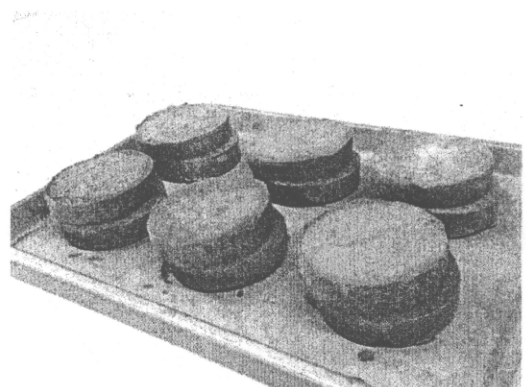
(c) การวัดขนาดของตัวอย่างดิน



(d) ตัวอย่างดินที่พร้อมทำการเฉือน

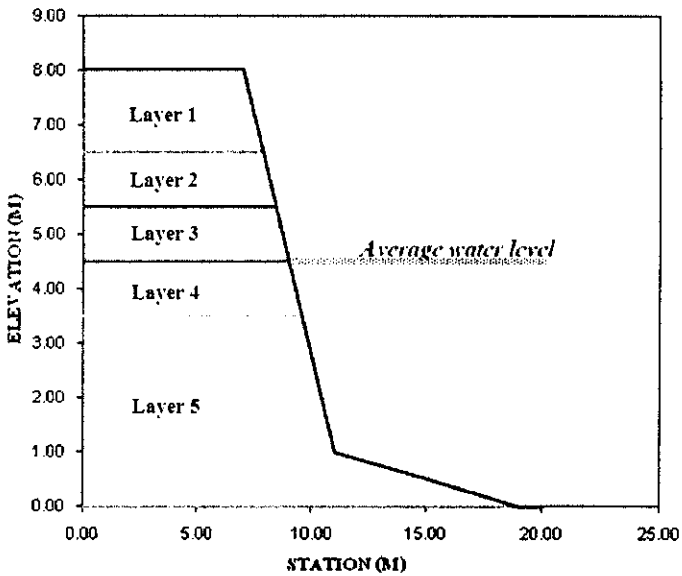


(e) ตัวอย่างดินที่ทำการเฉือนแล้ว



(f) ตัวอย่างดินหลังทำการเฉือนและหาความชื้นแล้ว

รูปที่ 3.9 การทดสอบการเฉือนโดยตรง



รูปที่ 3.10 ภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 ในปี พ.ศ 2549

#### 3.4.1 การวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเฉลี่ย

การวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเฉลี่ยของตลิ่ง Section 1 พิจารณาการไหลของน้ำในปี พ.ศ 2549 ตลิ่งมีระดับน้ำเฉลี่ยประมาณ 4.5 เมตร (2.9 ม.รทก) ก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.5 โดยใช้ค่าความลาดชันของท้องน้ำ ( $S_0$ ) คลองอยู่ตะเภา 1:10,000 การกัดเซาะของตลิ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.4 ซึ่งโปรแกรม BSTEM 5.2 (รายละเอียดโปรแกรมดังภาคผนวก ข) ถูกใช้ในการคำนวณสมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังกล่าว

ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ( $\tau_c$ ) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ ( $k_d$ ) ใช้สมการที่ 2.6 ถึง 2.9 และ 2.12 การวิเคราะห์การกัดเซาะทำได้โดยการจำลองการไหลของน้ำเป็นระยะเวลา 1 วัน, 1 สัปดาห์, 2 สัปดาห์, 1 เดือน, 2 เดือน, 3 เดือน, 4 เดือน, 5 เดือน และ 6 เดือน ตามลำดับ เพื่อทำการตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งที่ถูกกัดเซาะในระยะเวลาต่างๆที่กำหนด

#### 3.4.2 เสถียรภาพของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเพิ่มขึ้น – ลดลงทันทีทันใด

การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งในกรณีนี้ พิจารณาเฉพาะการเพิ่มขึ้น-ลดลงของระดับน้ำเท่านั้น ไม่พิจารณาการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำขณะที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้น-ลดลง เนื่องจากไม่ทราบค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินที่แน่นอน การวิเคราะห์โดยทำการ

เพิ่มระดับน้ำจากระดับน้ำเฉลี่ยครั้งละ 0.5 เมตร ไปจนถึงระดับเต็มตลิ่ง (Bankfull elevation) และทำการลดระดับน้ำครั้งละ 0.5 เมตร ไปจนถึงค่าระดับเฉลี่ยอีกครั้ง เพื่อทำการตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งในแต่ละกรณี โดยขณะที่มีการเพิ่มของระดับน้ำนั้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในรูปของ Cohesion และ Internal friction angle มีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มความชื้นจากความชื้นธรรมชาติเป็นความชื้นที่ดินอิ่มตัว และค่าหน่วยน้ำหนักของดินก็เพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกัน จากปัจจัยทั้งสองอย่างที่เปลี่ยนไปดังกล่าว ทำให้เสถียรภาพของตลิ่ง (ในรูปของ FS) ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณี Rapid Drawdown ซึ่งเป็นกรณีที่วิกฤตที่สุดเนื่องจากแรงภายนอกเนื่องจากระดับน้ำ ( $F_w$ ) ที่เป็น Resisting Forces ลดลงด้วย

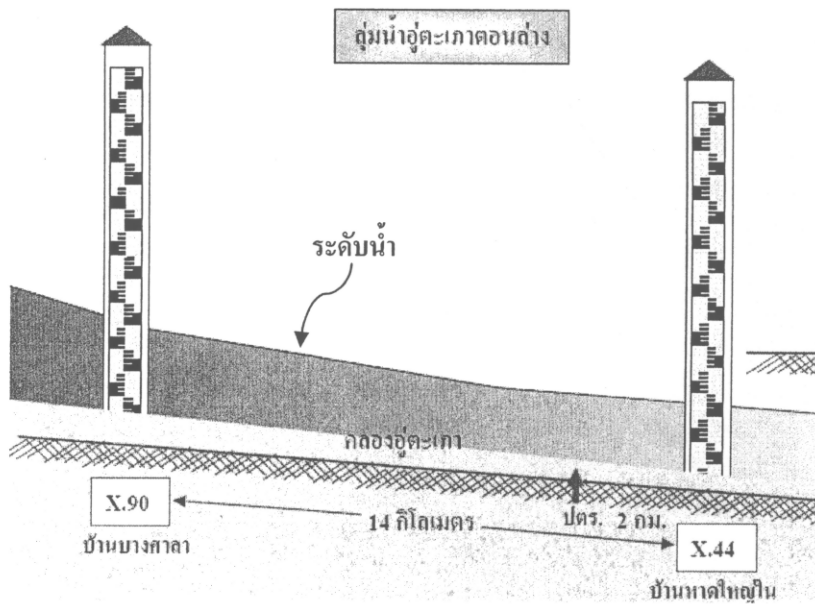
### 3.5 การวิเคราะห์ค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis

ในการวิเคราะห์ Toe erosion จำเป็นต้องทราบค่าระดับน้ำในตลิ่งที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระดับน้ำในตลิ่งที่ศึกษาไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลระดับน้ำจากสถานีวัดระดับน้ำของกรมชลประทาน 2 สถานี มาคำนวณค่าระดับน้ำที่เกิดขึ้นจริงในตลิ่งที่ทำการศึกษา วิธีการคำนวณระดับน้ำนี้เรียกว่า Backwater analysis

การวิเคราะห์ค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis ทำได้เมื่อทราบค่าระดับน้ำที่ปลายน้ำ 1 ตำแหน่ง แล้วคำนวณค่าระดับน้ำที่ตำแหน่งอื่นกลับไปจนถึงต้นน้ำโดยใช้กฎของพลังงาน (สมการที่ 2.19) การแก้สมการต้องทำการคูณสมการที่ 2.19 โดยการ Trial ค่าระดับน้ำที่ต้องการทราบให้ได้ค่าพลังงานรวมของสมการทั้งสองข้างที่เท่ากัน (เมื่อ  $n$  คงที่) พื้นที่ศึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้อยู่ระหว่างสถานีโทรมาตรบ้านบางศาลา (ต้นน้ำ) และประตูระบายน้ำอุตะเกา (ปลายน้ำ) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ทำให้ทราบค่าระดับน้ำที่เวลาและอัตราการไหลต่างๆทั้งต้นน้ำและปลายน้ำ

เนื่องจากไม่ทราบค่า  $n$  ของคลองอุตะเกา ดังนั้นการคำนวณค่าระดับน้ำจะคำนวณจากพื้นที่ศึกษาตำแหน่งที่ 1 (Section 1) อ้างอิงกับประตูระบายน้ำอุตะเกา แล้วคำนวณได้ไปจนถึงสถานีโทรมาตรบ้านบางศาลา โดยการ Trial ค่า  $n$  และค่าระดับน้ำของตลิ่งแต่ละตำแหน่ง จนได้ค่าระดับน้ำที่สถานีโทรมาตรบ้านบางศาลาเท่ากับที่เกิดขึ้นจริง ในการคำนวณจะใช้โปรแกรม Excel เป็นตัวช่วยในการคำนวณให้เร็วขึ้น จากการวิเคราะห์จะได้ค่าระดับน้ำและค่าความลาดชันพลังงาน ( $S_f$ ) ที่ระยะเวลาและอัตราการไหลต่างๆตามที่เกิดขึ้นจริง





รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของสถานีวัดระดับน้ำในพื้นที่ศึกษา

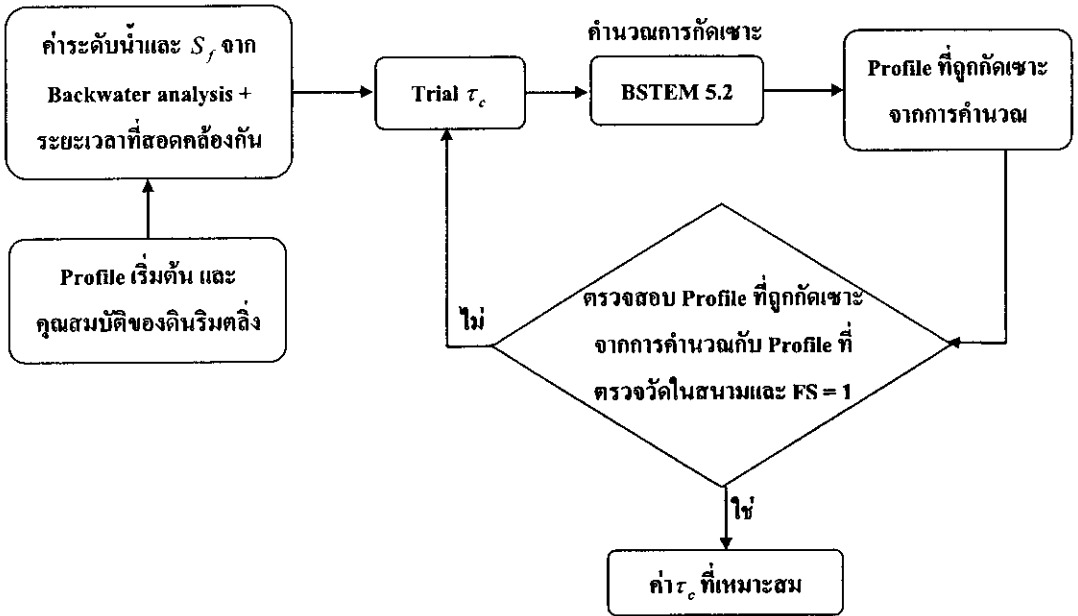
### 3.6 การประมาณค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress) ของดิน โดย Back - Analysis Method

ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ( $\tau_c$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่มีการกัดเซาะ บ่งบอกถึงหน่วยแรงที่ยอมให้ของดินเมื่อมีหน่วยแรงเนื่องจากการไหลของน้ำ (Average boundary shear stress,  $\tau_o$ ) มากกระทำ ซึ่งดินแต่ละชนิดจะมีค่า  $\tau_c$  ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ปัจจุบันมีการจำแนกองค์ประกอบเหล่านั้นตามชนิดของดิน 2 ชนิดคือ ดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive soil) และดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless soil)

Cohesive soil มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่า  $\tau_c$  เช่น Plasticity index (PI), Percent clay (%Clay), Percent silt (%Silt), Dispersion ratio ( $D_r$ ) ในส่วนของ Cohesionless soil มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่า  $\tau_c$  เช่น Mean diameter ( $D_{50}$ ), Specific gravity ( $G_s$ ), Unit weight ( $\gamma$ )

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการประมาณค่า  $\tau_c$  โดยวิธี Back analysis อาศัยข้อมูลการพิบัติของตลิ่งจากการพิบัติจริงหลังฝนตกเดือนพฤศจิกายน 2552 ที่ผ่านมา โดยทำการลองผิดลองถูก (Trial and error) ค่า  $\tau_c$  จากสมการที่ 2.4 ให้ได้ค่าระยะการกัดเซาะตามที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

และตลิ่งมีอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เท่ากับ 1 มีขั้นตอนในการประมาณค่าดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ตัวอย่างการประมาณค่า  $\tau_c$  ดังแสดงในภาคผนวก ค)

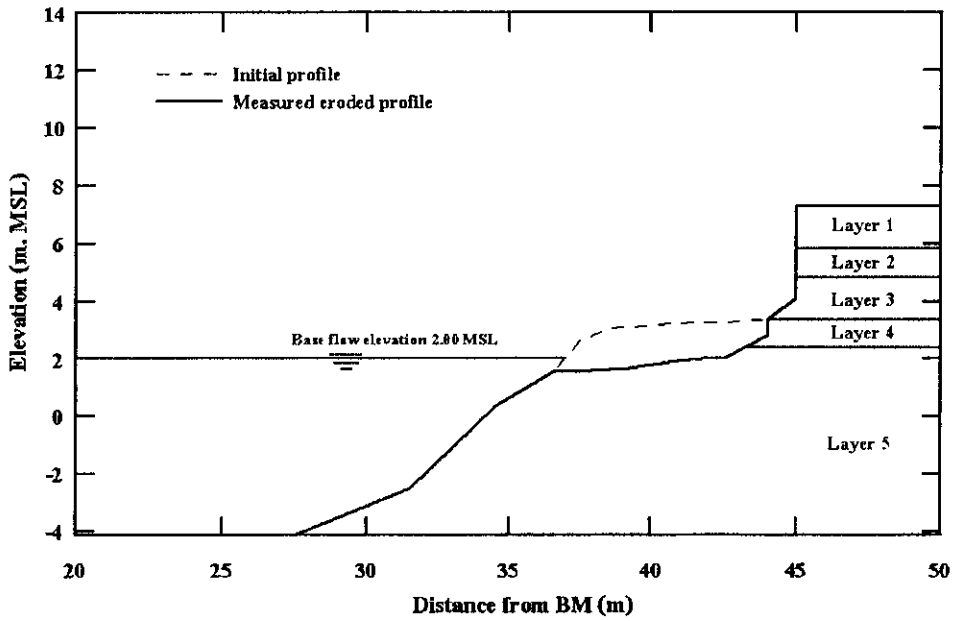


รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการประเมินค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  โดยวิธี Back-analysis

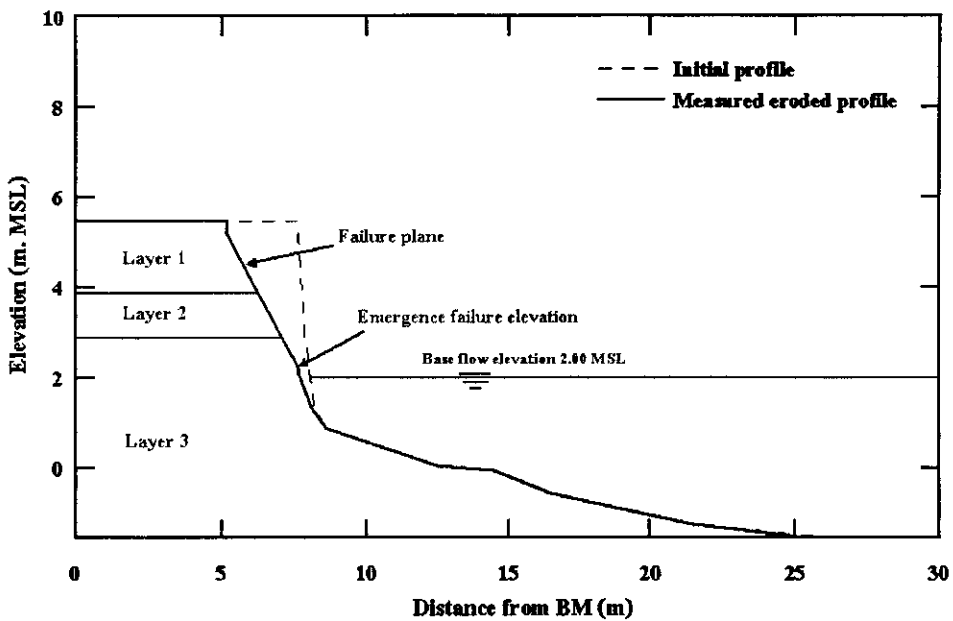
1. คำนวณค่า  $\tau_c$  เริ่มต้นจากสมการที่ 2.7 และ 2.8 สำหรับ Cohesive soil และ Cohesionless soil ตามลำดับ โดยที่ค่า  $k_d$  คำนวณจากสมการที่ 2.12
2. คำนวณระยะการกัดเซาะจากภาพตัดขวางเริ่มต้น (Initial profile) ของตลิ่งดัง สมการที่ 2.4 โดยใช้ข้อมูลที่ได้มาจาก Backwater analysis คำนวณค่า  $\tau_c$  โดยที่ระยะเวลาที่ใช้ใน สมการที่ 2.4 สอดคล้องกันกับผลของ Backwater analysis ค่าระยะการกัดเซาะดังกล่าวคำนวณ โดย ใช้โปรแกรม BSTEM 5.2 ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบภาพตัดของตลิ่งหลังการกัดเซาะ (Eroded profile)
3. ตรวจสอบภาพตัดของตลิ่งหลังการกัดเซาะที่คำนวณกับภาพตัดของตลิ่งหลัง การกัดเซาะที่ตรวจวัดในสนาม (Measured eroded profile) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยอ้างอิงจากจุด ที่เริ่มปรากฏการพังทลาย (Emergence failure elevation) พร้อมทั้งคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของตลิ่ง เป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณา
4. การพิจารณาความถูกต้องของค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  เป็นไปตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- ถ้าการคำนวณเป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าว ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  จะเป็นค่าที่เหมาะสม

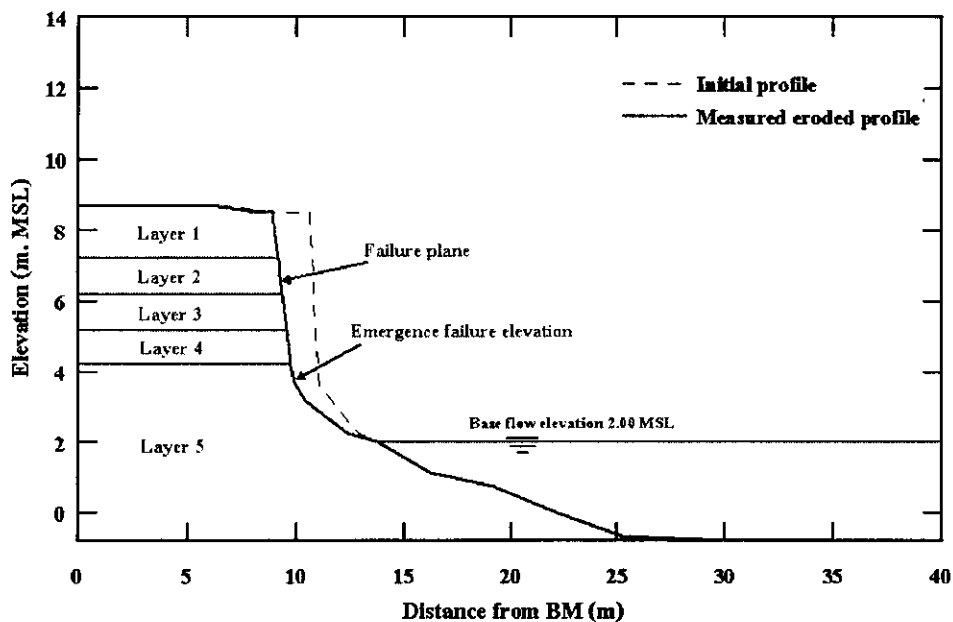
- ถ้าการคำนวณไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าว ทำการ Trial ค่า  $\tau_c$  และทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 จนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไข



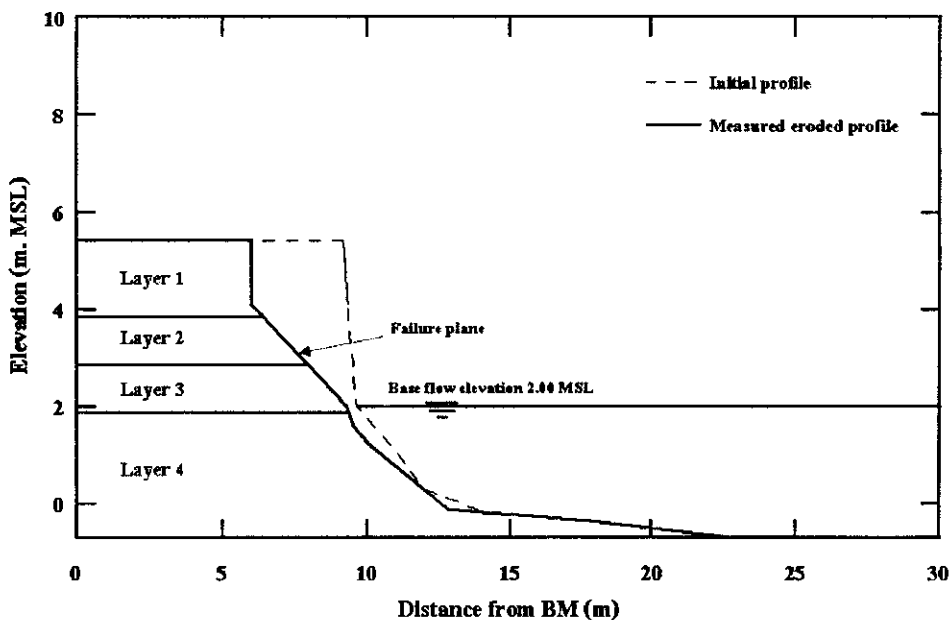
a) ภาพตัดขวางก่อนและหลังการกัดเซาะของตลิ่ง Section 1



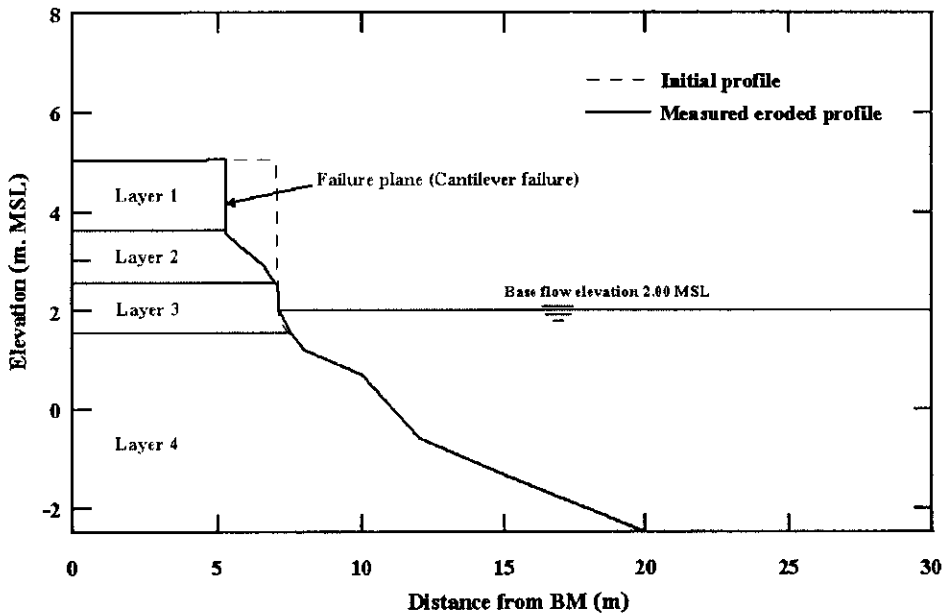
b) ภาพตัดขวางก่อนและหลังพินิจของตลิ่ง Section 2



c) ภาพตัดขวางก่อนและหลังพิบัติของตลิ่ง Section 3



d) ภาพตัดขวางก่อนและหลังพิบัติของตลิ่ง Section 4



e) ภาพตัดขวางก่อนและหลังพิบัติของตลิ่ง Section 5

รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางก่อนและหลังพิบัติของตลิ่งเพื่อใช้ในการประมาณค่า  $\tau_c$  โดยวิธี Back analysis, a) Section 1, b) Section 2, c) Section 3, d) Section 4, e) Section 5, ตามลำดับ

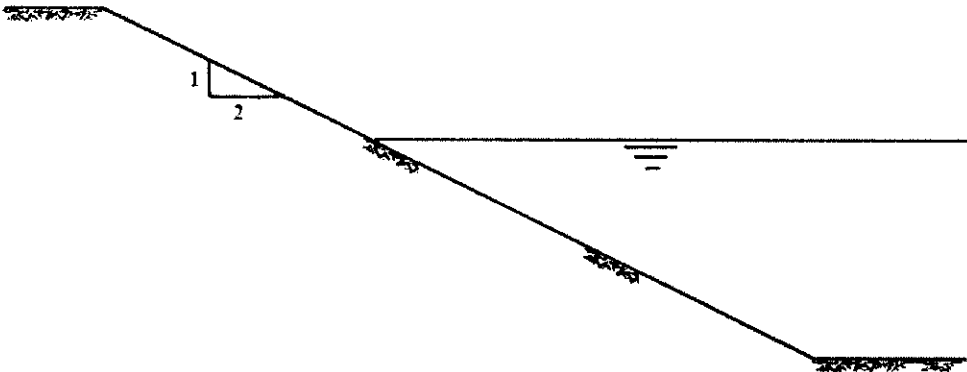
จากการสำรวจตลิ่งที่ทำการศึกษาในช่วงฝนตกในเดือนพฤศจิกายน 2552 พบว่า ตลิ่งเกิดการพิบัติหลังระดับน้ำลดลงจากระดับเต็มตลิ่ง การพิบัติเกิดขึ้นในขณะที่ฝนตก ชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นค่า  $\phi^b$  ในสมการที่ 2.17 จะไม่มีผลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

### 3.6 การกำหนดแนวทางการป้องกันตลิ่ง

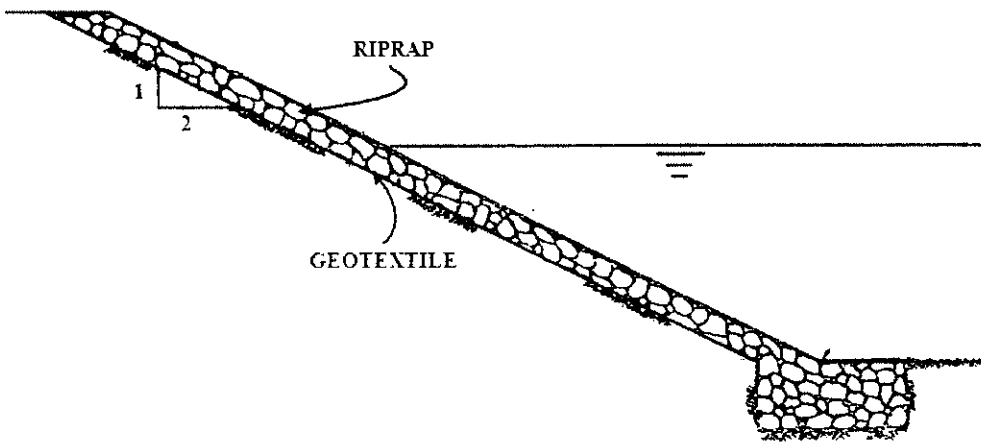
วิธีการป้องกันตลิ่งยึดตามแนวทางของสำนักชลประทานที่ 16 ประกอบด้วย 3 วิธี คือ 1. การปรับความลาด 2. การปรับความลาด + การเรียงหินหน้าความลาด (Riprap) และ 3. ดาดคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.14 แต่ละวิธีมีราคาค่าก่อสร้างแตกต่างกัน (น้อย – มากตามลำดับ) ซึ่งในการเลือกใช้ต้องพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการเช่น ชนิดของดินริมตลิ่ง ราคาค่าก่อสร้าง เป็นต้น ตำแหน่งของตลิ่งที่ทำการศึกษายู่บริเวณนอกตัวเมืองหาดใหญ่ เพราะฉะนั้นวิธีที่ 1 และ 2 มีความเป็นไปได้สูงในการก่อสร้างจริงมากกว่าวิธีที่ 3 เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเวนคืนที่ดินถูกกว่าในตัวเมืองหาดใหญ่ อีกทั้งวิธีที่ 3 มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างแพงกว่าวิธีที่ 1 และ 2 เป็นอย่างมาก

การพิจารณาความเหมาะสมของวิธีการป้องกันตลิ่งในพื้นที่ศึกษา ได้ทำการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ของตลิ่งเมื่อทำการปรับความลาด (2H : 1 V) จำลองให้มีการไหลของน้ำผ่านตลิ่งที่ทำการปรับความลาดตลอด 1 ปี โดยใช้ค่าระดับน้ำเฉลี่ยและอัตราการไหลของน้ำในช่วงฤดูแล้งจากข้อมูลในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ช่วงฤดูฝน (ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นมาก) ใช้ค่าระดับน้ำจากเดือนพฤศจิกายน 2552 ที่ผ่านมาเนื่องจากเป็นปีที่มีระดับน้ำสูงสุดในช่วงหลายปีที่ผ่านมา พิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นระยะ 1 ปี โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

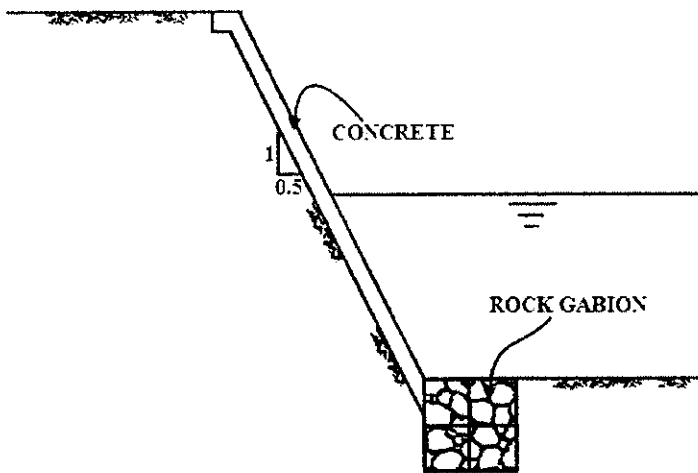
1. ถ้าตลิ่งมีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1 ( $FS \geq 1$ ) ให้เลือกใช้วิธีการปรับความลาดเป็นแนวทางในการป้องกันตลิ่ง
2. ถ้าตลิ่งมีอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า 1 ( $FS < 1$ ) ให้เลือกใช้วิธีการเรียงหินหน้าความลาดเป็นแนวทางในการป้องกันตลิ่ง



a) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่ง โดยวิธีการปรับความลาด



b) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีการปรับความลาด + การเรียงหินหน้าตลิ่ง



c) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีคาดคอนกรีต

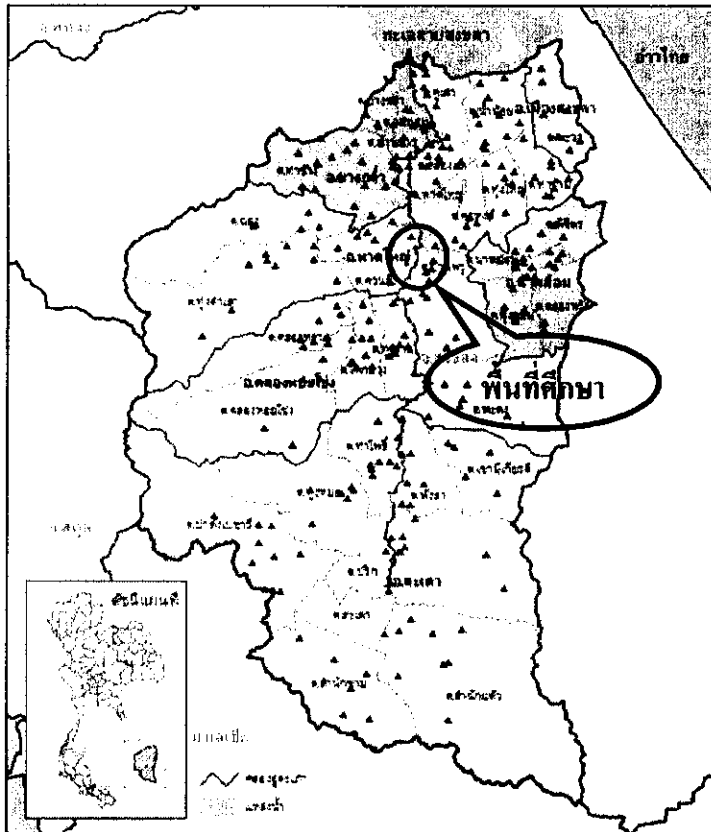
รูปที่ 3.14 การปรับปรุงตลิ่งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ a) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีการปรับความลาด b) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีการเรียงหินหน้าตลิ่ง c) การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีคาดคอนกรีต

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 สภาพทั่วไปและภาพตัดขวางของตลิ่งคลองอุตะเกาในพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในบริเวณตอนล่างของกลุ่มน้ำอุตะเกาที่พิกัด N 6° 58' 22.91", E 100° 27' 33.89" ทิศทางการไหลของน้ำจะไหลจากต้นน้ำที่ อ. สะเดา ทางทิศใต้ ลงสู่ทะเลสาบสงขลา ทางทิศเหนือ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตำแหน่งของตลิ่งคลองอุตะเกาที่ศึกษาทั้ง 5 ตำแหน่งจะอยู่ระหว่างสถานีโทรมาตรบ้านบางศาลา พิกัด N 6° 55' 50.74", E 100° 26' 21.57" กับประตูระบายน้ำอุตะเกา พิกัด N 6° 59' 17.12", E 100° 27' 45" ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งตำแหน่งของตลิ่งที่ทำการศึกษาที่อยู่ไกลสุด (ตลิ่ง Section 5) อยู่ห่างจากประตูระบายน้ำอุตะเกาประมาณ 3 กิโลเมตร



รูปที่ 4.1 แผนที่ในพื้นที่ศึกษา





รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายทางอากาศของตำแหน่งตลิ่ง, ประตุน้ำอุตะเถาและสถานีโทรมาตรบ้านบางศาลา (X.90)

#### 4.1.1 สภาพทั่วไปของตลิ่งคลองอุตะเถาที่ทำการศึกษา

จากการสำรวจพื้นที่ศึกษาพบว่า แนวตลิ่งหลายแนวมีลักษณะที่เสี่ยงต่อการเกิดการพิบัติเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ตลิ่งมีความลาดชันสูงถึง  $85^{\circ} - 90^{\circ}$  ความสูงของตลิ่งประมาณ 6.00 – 11.00 เมตร (จากท้องคลองถึงขอบบนของตลิ่ง) โดยมีระดับน้ำขณะทำการตรวจวัดรูปตัดของตลิ่งประมาณ 2.00 – 2.50 เมตร รทก. ซึ่งแนวตลิ่งบางตำแหน่งไม่มีดินไม้หรือหญ้าปกคลุม ส่งผลให้ถูกกัดเซาะได้ง่ายเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำสูง ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกตลิ่งจำนวน 5 Sections ซึ่งเป็นตลิ่งที่เคยเกิดการพิบัติมาแล้วในอดีตดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ในจำนวนตลิ่งทั้ง 5 Sections จะอยู่ในส่วนของคลองอุตะเถาที่อยู่ในแนวตรงทั้งสิ้น

ค่าระดับน้ำบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นไปตามสภาพการรับน้ำของกลุ่มน้ำอุตะเถา ซึ่งในช่วงฤดูร้อน ระดับน้ำเฉลี่ยประมาณ 2.66 เมตร รทก. (อ้างอิงจากประตุน้ำอุตะเถา) และในช่วงเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน ระดับน้ำในคลองอุตะเถาเพิ่มสูงถึงประมาณ 7.00 เมตร รทก. ทำให้อัตราการไหลของน้ำสูงถึง 800 ลบ.ม/วินาที (สำนักชลประทานที่ 16)

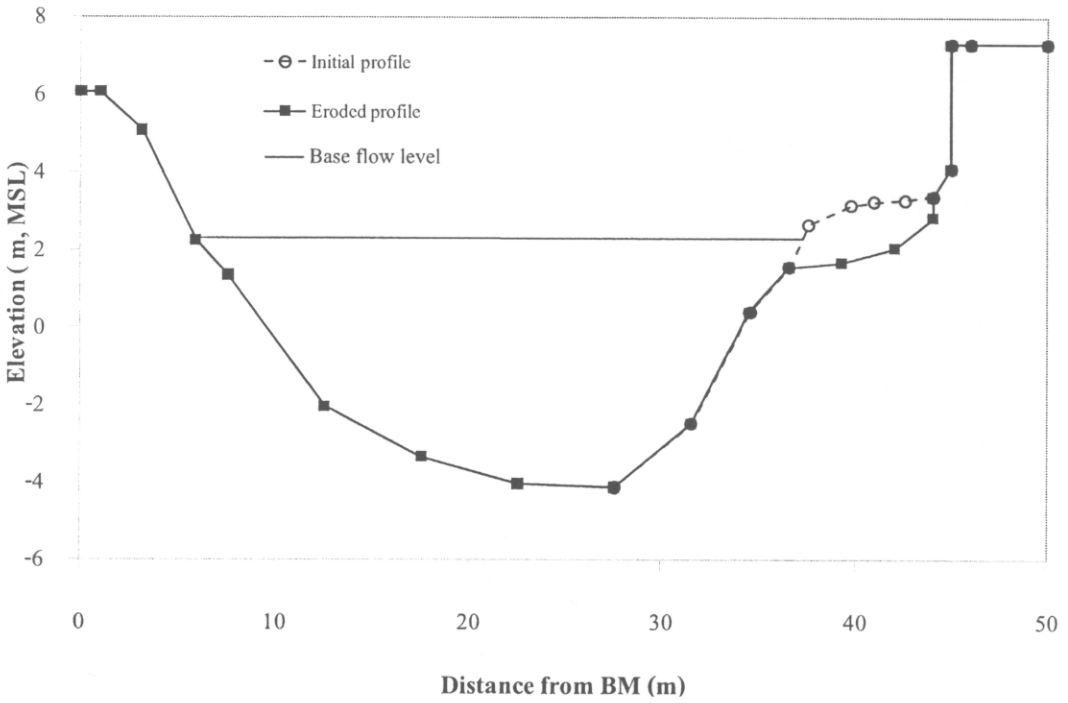


รูปที่ 4.3 สภาพทั่วไปของตลิ่งคลองอู่ตะเภาที่ทำการศึกษา

#### 4.1.2 ภาพตัดขวางของตลิ่ง

จากการสำรวจภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 ถึง 5 (ดังแสดงในรูปที่ 4.4 – 4.8) พบว่า ภาพตัดขวางของตลิ่งทุกตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงฤดูร้อน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการพิบัติในช่วงฤดูฝน ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2552 ที่ผ่านมา มีการพิบัติของตลิ่งเป็นระยะประมาณ 1.70 – 3.20 เมตร จากแนวเดิม จากการสำรวจหลังฝนตกเดือนพฤศจิกายน 2552 พบว่าตลิ่งถูกกัดเซาะเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำสูงและจะพิบัติเมื่อระดับน้ำลดลงจากระดับเต็มตลิ่ง (Drawdown) ซึ่งตลิ่งจะมีการกัดเซาะและพิบัติเพียงด้านเดียว เนื่องจากตลิ่งฝั่งตรงข้ามของทั้ง 5 Sections มีหญ้าปกคลุม อย่างหนาแน่น ทำให้ทนต่อการกัดเซาะสูง

ผลการสำรวจภาพตัดขวางของตลิ่งก่อน-หลังพิบัติ ทำให้ทราบระยะการกัดเซาะของแนวตลิ่ง โดยพบว่า Section 1 เป็นตลิ่งที่มีการกัดเซาะเพียงอย่างเดียวแต่ไม่พบการพิบัติสำหรับตลิ่ง Section 2, 3, 4, 5 พับติหลังน้ำลดในช่วงวันที่ 9 พฤศจิกายน 2552

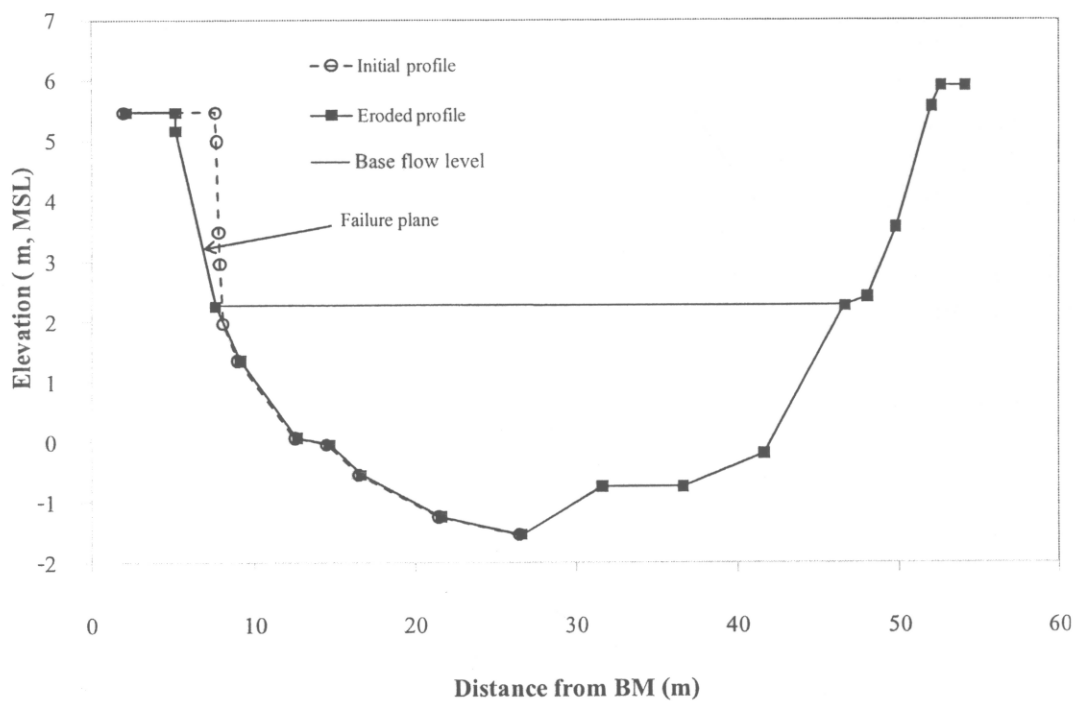


a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังการกัดเซาะของตลิ่ง Section 1



b) ตลิ่ง Section 1 หลังถูกกัดเซาะ

รูปที่ 4.4 ลักษณะของตลิ่ง Section 1 a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง, b) รูปตลิ่งในสนาม หลังถูกกัดเซาะ

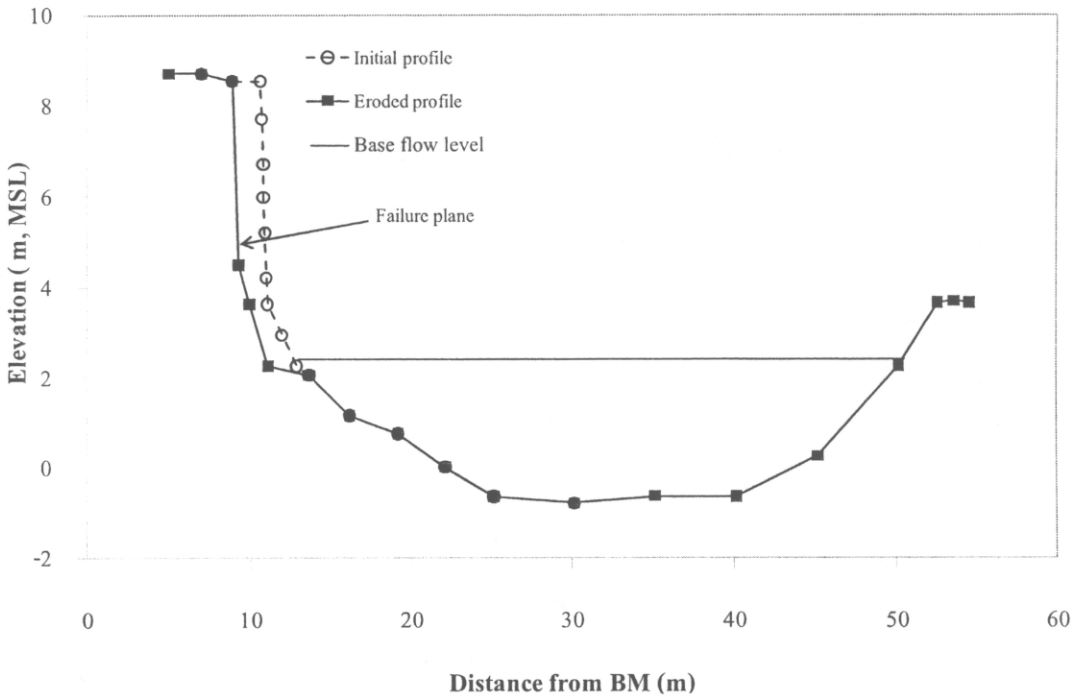


a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง Section 2

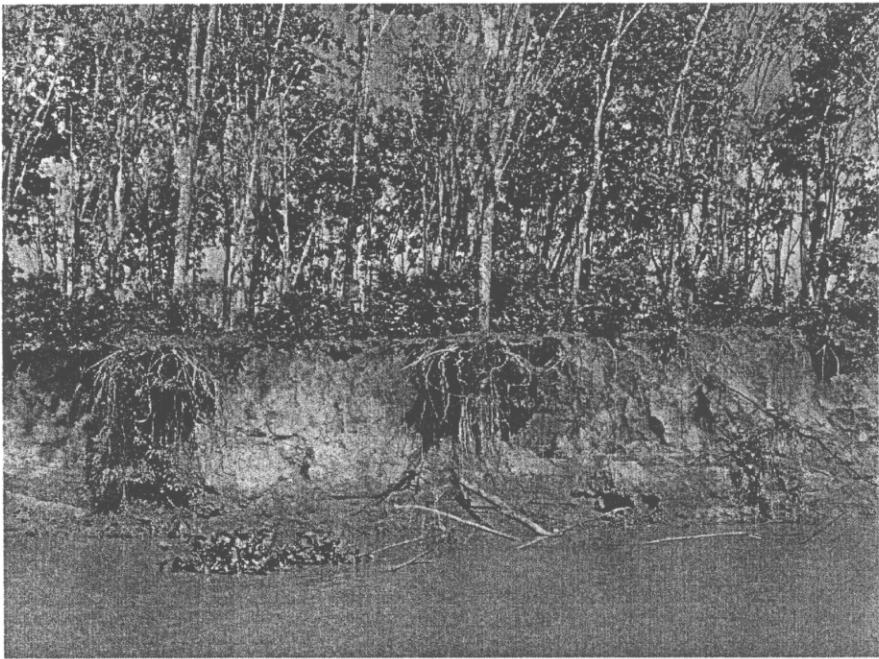


b) ตลิ่ง Section 2 หลังถูกกัดเซาะ

รูปที่ 4.5 ลักษณะของตลิ่ง Section 2 a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง, b) รูปตลิ่งในสนาม  
หลังถูกกัดเซาะและพิบัติ

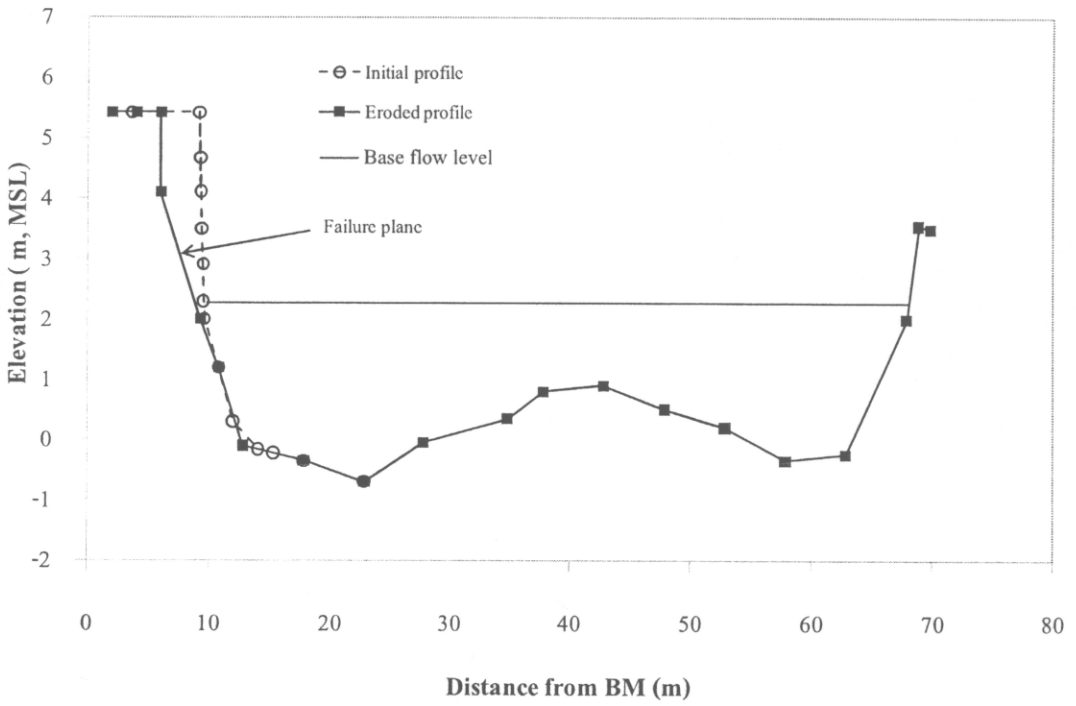


a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง Section 3

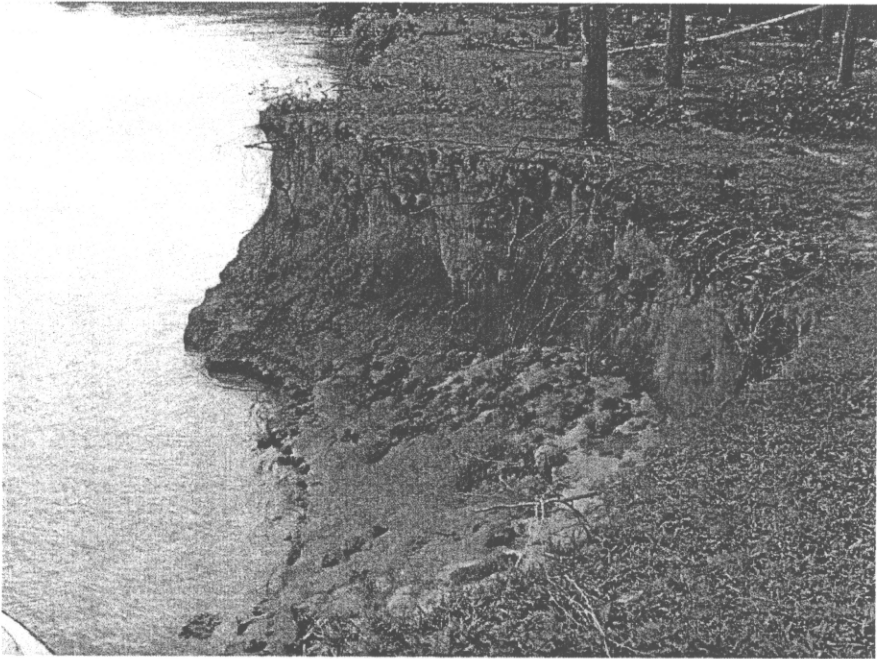


b) ตลิ่ง Section 3 หลังถูกกัดเซาะ

รูปที่ 4.6 ลักษณะของตลิ่ง Section 3 a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง, b) รูปตลิ่งในสนาม หลังถูกกัดเซาะและพิบัติ

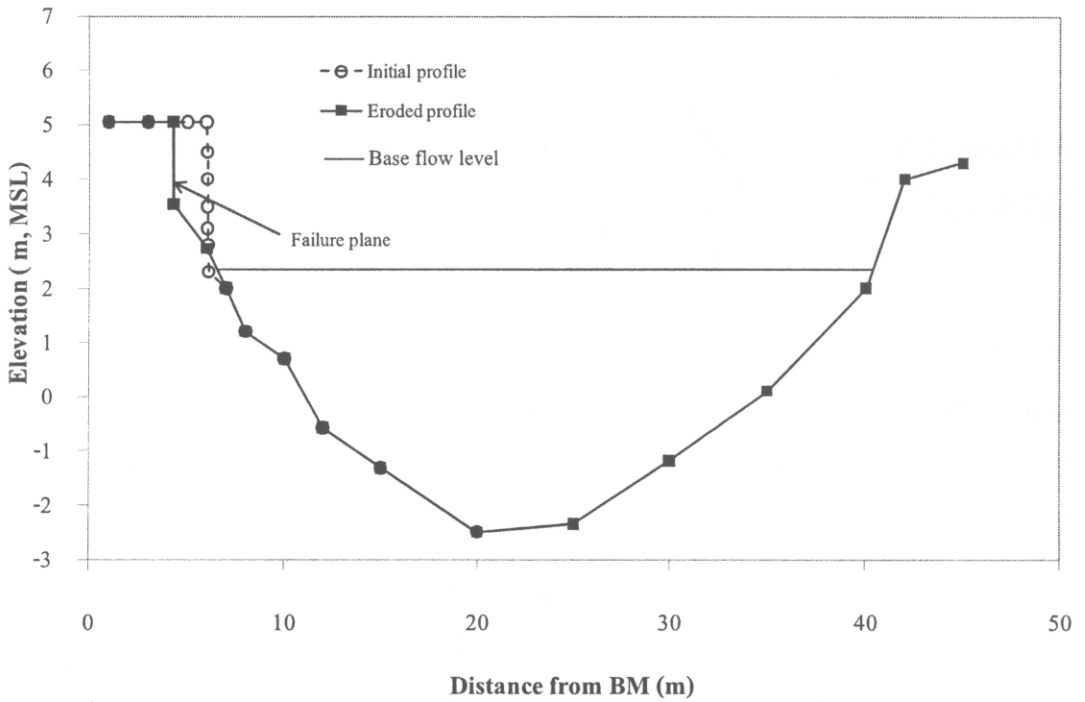


a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง Section 4



b) ตลิ่ง Section 4 หลังถูกกัดเซาะ

รูปที่ 4.7 ลักษณะของตลิ่ง Section 4 a) ภาพตัดขวางก่อน – หลังพิบัติของตลิ่ง, b) รูปตลิ่งในสนาม หลังถูกกัดเซาะและพิบัติ



a) ภาพตัดขวางก่อน - หลังพิบัติของตลิ่ง Section 6



b) ตลิ่ง Section 5 หลังถูกกัดเซาะ

รูปที่ 4.8 ลักษณะของตลิ่ง Section 5 a) ภาพตัดขวางก่อน - หลังพิบัติของตลิ่ง, b) รูปตลิ่งในสนาม หลังถูกกัดเซาะและพิบัติ

## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินจากตลิ่งในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 5 Sections สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 – 4.18 โดยมีรายละเอียดของแต่ละตลิ่งดังต่อไปนี้

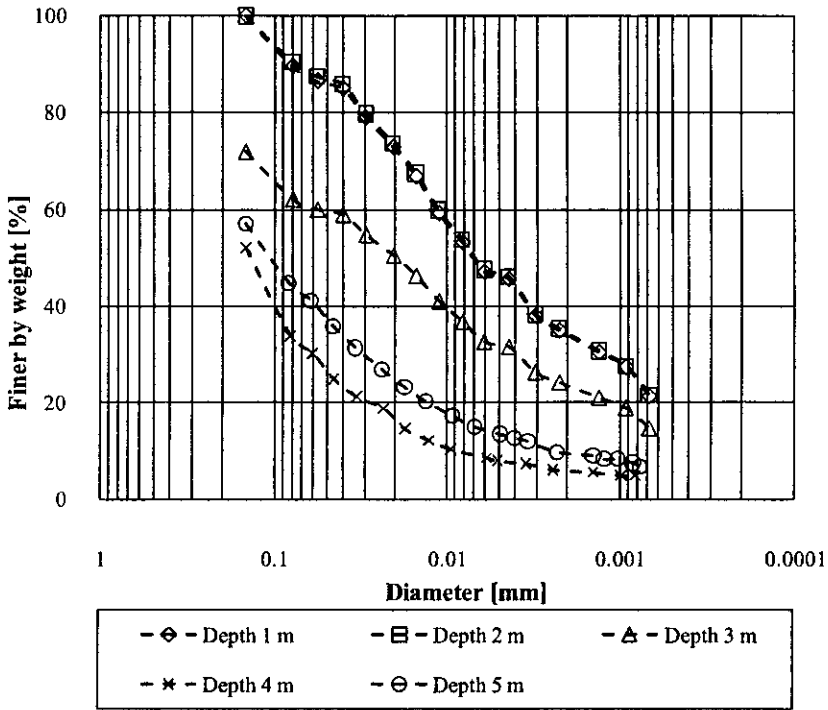
### 4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 1

ลักษณะชั้นดินริมตลิ่งของ Section 1 จำแนกตามวิธี USCS ประกอบไปด้วยดิน 3 ชนิดคือ 1) Low plasticity clay (CL) เป็นดินเหนียวสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 1 – 3 ที่ระดับความลึก 0.00 – 3.92 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 2) Silty sand (SM) เป็นดินทรายเม็ดละเอียดปนตะกอนทรายสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 4 ที่ระดับความลึก 3.92 – 4.92 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 3) Clayey sand (SC) เป็นดินทรายเม็ดละเอียดปนดินเหนียวสีน้ำตาลเหลืองปนเทา อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 5 ที่ระดับความลึก 4.92 เมตรจากขอบบนถึงฐานของตลิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10 ชั้นดินแต่ละชั้นมีการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งตลิ่ง Section 1 นี้จำแนกเป็นตลิ่งแบบผสม (Composite bank)

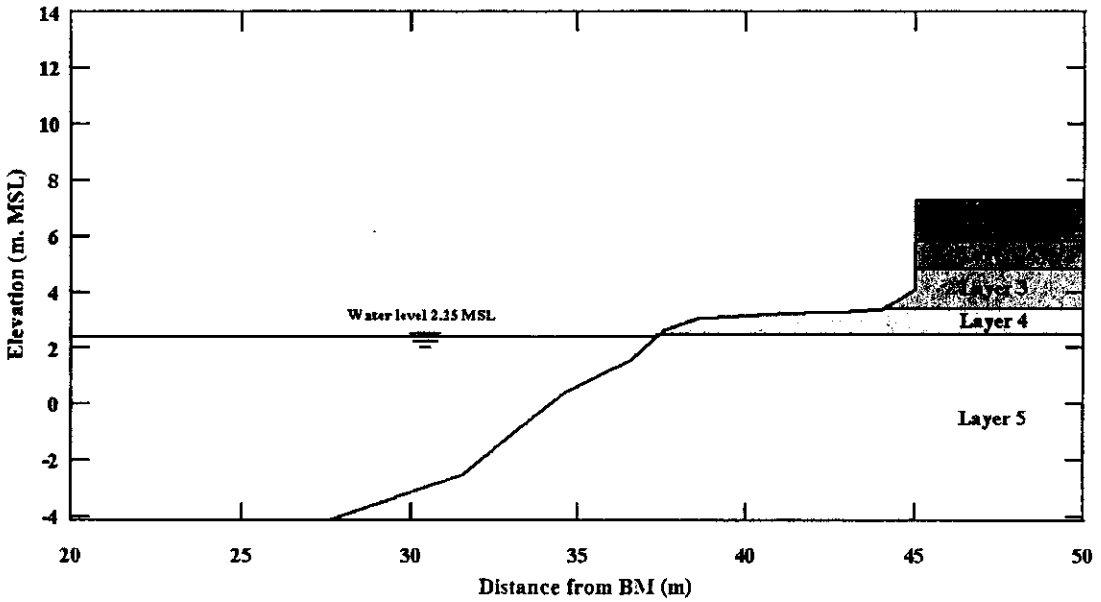
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 1

Layer	Depth from top of bank (m)	$P_{200}$	$G_s$	% $S_r$	Atterberg's Limit			USCS
					LL	PL	PI	
1	0.00 - 1.50	95.56	2.68	68.84	46.52	22.74	23.78	CL
2	1.50 - 2.50	96.65	2.68	78.49	46.52	22.74	23.78	CL
3	2.50 - 3.92	66.26	2.67	88.27	29.21	15.19	14.02	CL
4	3.92 - 4.92	38.21	2.66	69.05	NP	NP	NP	SM
5	4.92 - 11.45	47.10	2.66	94.69	26.00	20.90	5.10	SC





รูปที่ 4.9 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 1



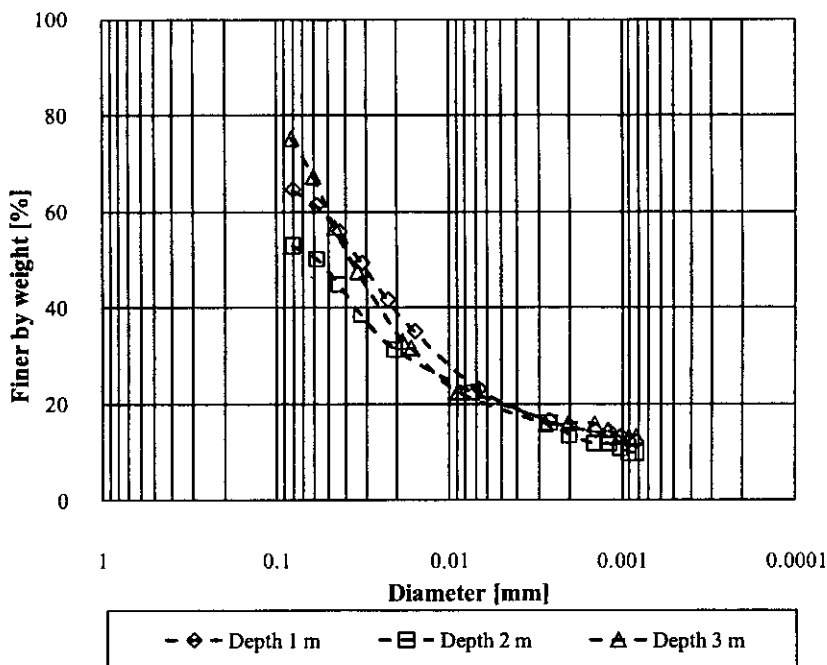
รูปที่ 4.10 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 1

#### 4.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 2

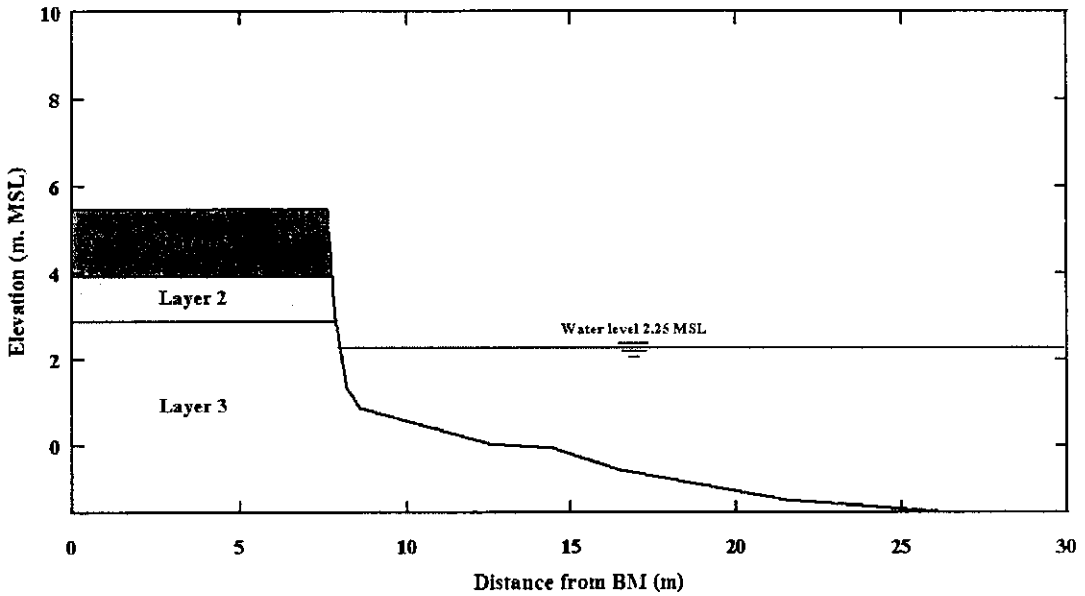
ลักษณะชั้นดินริมตลิ่งของ Section 2 จำแนกตามวิธี USCS เป็นดิน Low plasticity clay (CL) มีสีน้ำตาลเหลืองตลอดชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 ชั้นดินแต่ละชั้นมีการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งตลิ่ง Section 2 นี้จำแนกเป็นตลิ่งที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive bank)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 2

Layer	Depth from top of bank (m)	$P_{200}$	$G_s$	% $S_r$	Atterberg's Limit			USCS
					LL	PL	PI	
1	0.00 - 1.50	68.33	2.67	72.18	26.26	18.57	7.69	CL
2	1.50 - 2.50	56.89	2.67	59.96	23.79	18.26	5.53	CL
3	2.50 - 7.01	82.23	2.67	68.06	36.00	22.59	13.41	CL



รูปที่ 4.11 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 2



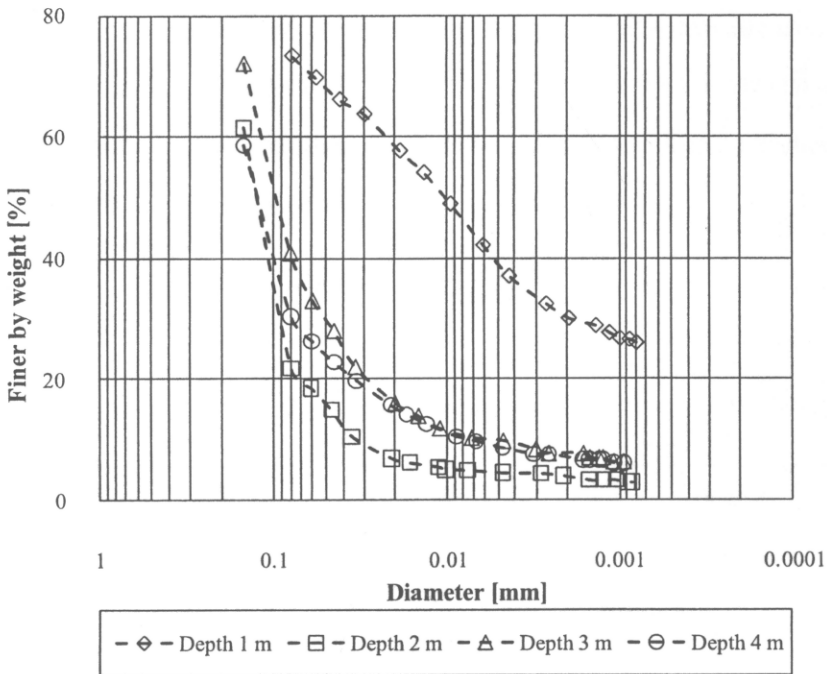
รูปที่ 4.12 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 2

#### 4.2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 3

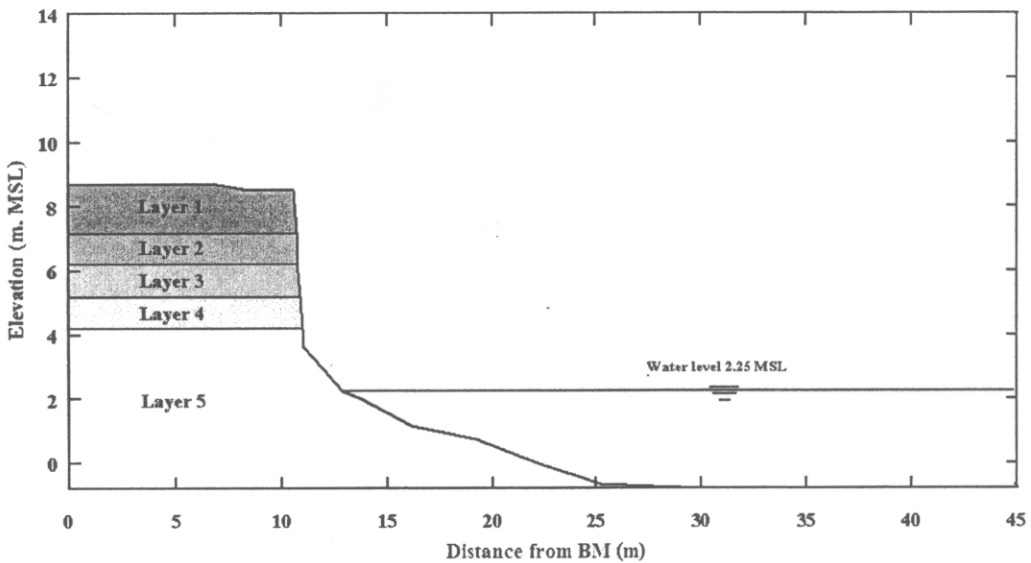
ลักษณะชั้นดินริมตลิ่งของ Section 3 จำแนกตามวิธี USCS ประกอบไปด้วยดิน 3 ชนิดคือ 1) Low plasticity clay (CL) เป็นดินเหนียวสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 1 ที่ระดับความลึก 0.00 – 1.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 2) Silty sand (SM) เป็นดินทรายเม็ดละเอียดปนตะกอนทรายสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 2-4 ที่ระดับความลึก 1.50 – 4.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 3) Poorly graded sand (SP) เป็นดินทรายเม็ดละเอียด อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 5 ที่ระดับความลึก 4.50 เมตรจากขอบบนถึงฐานของตลิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.14 ชั้นดินแต่ละชั้นมีการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งตลิ่ง Section 3 นี้จำแนกเป็นตลิ่งผสม (Composite bank)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 3

Layer	Depth from top of bank (m)	$P_{200}$	$G_s$	% $S_r$	Atterberg's Limit			USCS
					LL	PL	PI	
1	0.00 - 1.50	76.01	2.68	56.63	49.30	26.70	22.60	CL
2	1.50 - 2.50	22.88	2.66	24.89	NP	NP	NP	SM
3	2.50 - 3.50	43.93	2.67	35.86	NP	NP	NP	SM
4	3.50 - 4.50	31.78	2.66	46.67	NP	NP	NP	SM
5	4.50 - 9.50	3.53	2.65	23.58	NP	NP	NP	SP



รูปที่ 4.13 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 3



รูปที่ 4.14 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 3

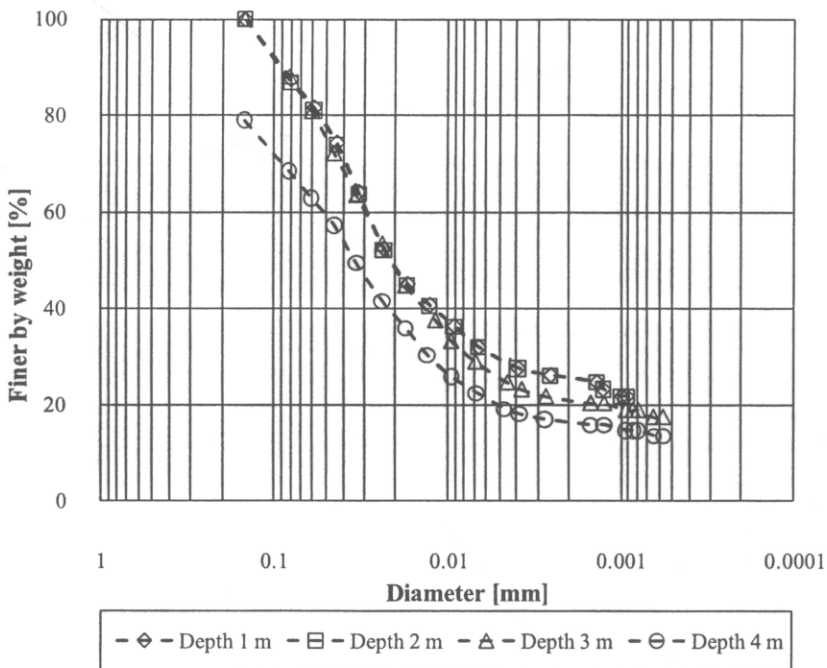
#### 4.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 4

ลักษณะชั้นดินริมตลิ่งของ Section 4 จำแนกตามวิธี USCS ประกอบด้วยดิน 2 ชนิดคือ 1) Low plasticity clay (CL) เป็นดินเหนียวสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 1, 3, 4 ที่ระดับความลึก 0.00 - 1.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง, 2.50 เมตรจากขอบบนถึงฐานของตลิ่ง และดินชนิด

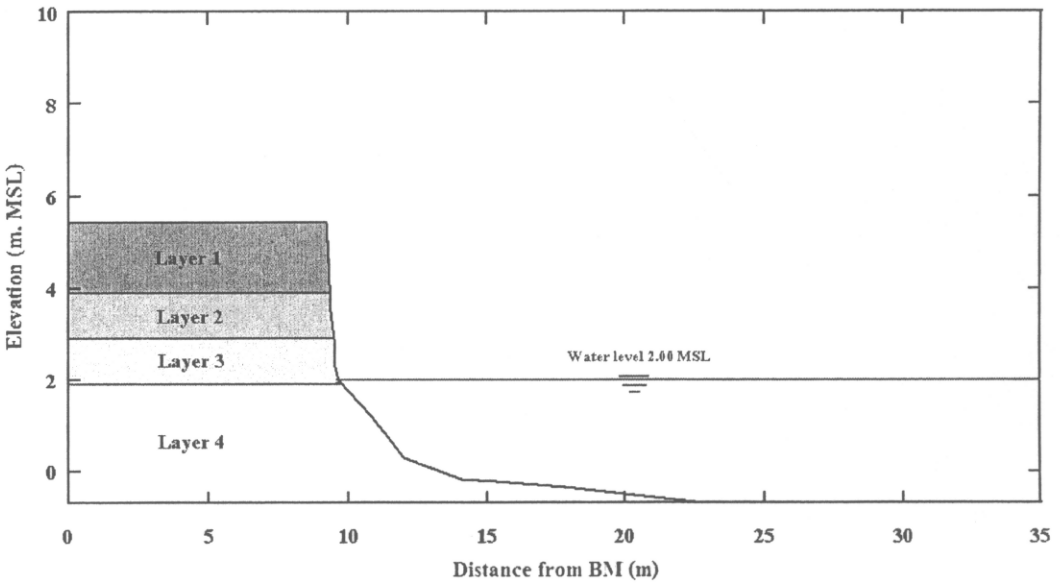
ที่ 2 คือ Low plasticity silt (ML) เป็นดินตะกอนทรายเม็ดละเอียดสีน้ำตาลเหลือง แทรกอยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 2 ที่ระดับความลึก 1.50 – 2.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.16 ชั้นดินแต่ละชั้นมีการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งตลิ่ง Section 4 นี้จำแนกเป็นตลิ่งที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive bank)

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 4

Layer	Depth from top of bank (m)	P <sub>200</sub>	G <sub>s</sub>	% S <sub>r</sub>	Atterberg's Limit			USCS
					LL	PL	PI	
1	0.00 - 1.50	92.5	2.71	70.21	40.88	21.01	19.87	CL
2	1.50 - 2.50	93.83	2.71	83.12	29.94	23.58	6.36	ML
3	2.50 - 3.50	79.71	2.69	88.45	38.00	23.25	14.75	CL
4	3.50 - 6.12	65.64	2.68	100.00	28.94	21.56	7.38	CL



รูปที่ 4.15 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 4



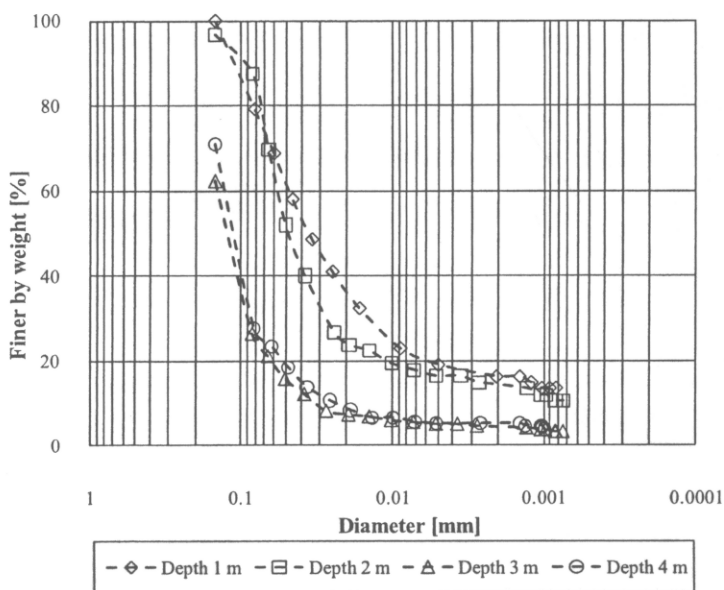
รูปที่ 4.16 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 4

#### 4.2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 5

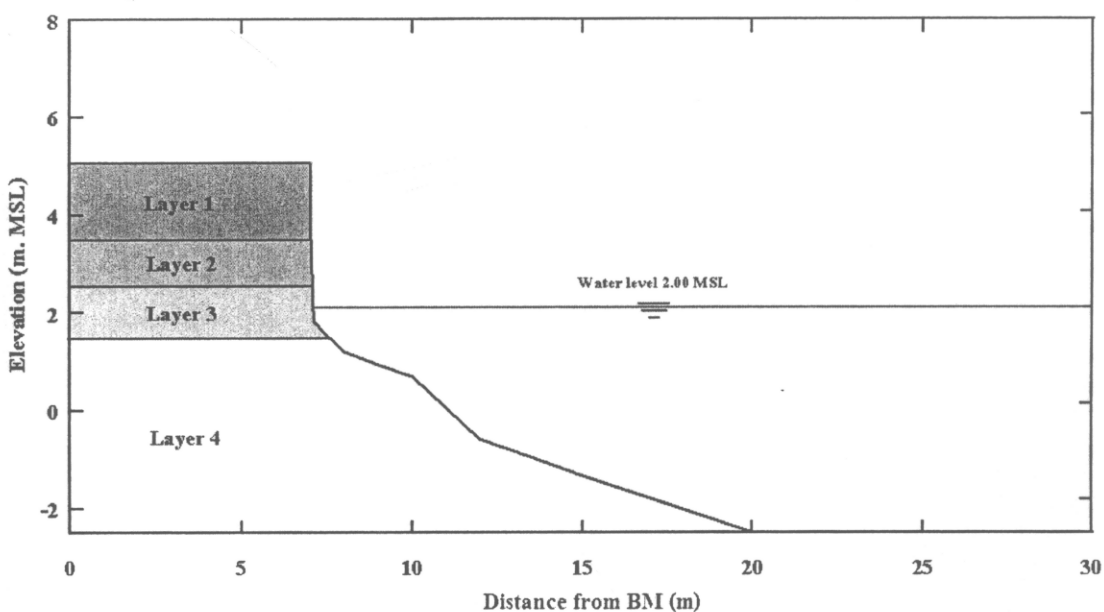
ลักษณะชั้นดินริมตลิ่งของ Section 5 จำแนกตามวิธี USCS ประกอบไปด้วยดิน 3 ชนิดคือ 1) Low plasticity clay (CL) เป็นดินเหนียวสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 1 ที่ระดับความลึก 0.00 – 1.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 2) Silty sand (ML) เป็นดินตะกอนทรายเม็ดละเอียดสีน้ำตาลเหลือง แทรกอยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 2 ที่ระดับความลึก 1.50 – 2.50 เมตรจากขอบบนของตลิ่ง 3) Clayey sand (SC) เป็นดินทรายเม็ดละเอียดปนดินเหนียวสีน้ำตาลเหลือง อยู่ที่ชั้นดินชั้นที่ 3 – 4 ที่ระดับความลึก 2.50 เมตรจากขอบบนถึงฐานของตลิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.18 ชั้นดินแต่ละชั้นมีการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งตลิ่ง Section 5 นี้จำแนกเป็นตลิ่งผสม (Composite bank)

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของดินริมตลิ่ง Section 5

Layer	Depth from top of bank (m)	P <sub>200</sub>	G <sub>s</sub>	% S <sub>r</sub>	Atterberg's Limit			USCS
					LL	PL	PI	
1	0.00 - 1.50	84.78	2.68	72.12	46.30	22.77	23.53	CL
2	1.50 - 2.50	93.49	2.68	78.32	27.47	23.19	4.28	ML
3	2.50 - 3.50	27.94	2.65	87.18	22.25	19.2	3.05	SC
4	3.50 - 7.55	28.76	2.65	100.00	23.76	18.91	4.85	SC



รูปที่ 4.17 Grain size distribution ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง Section 5



รูปที่ 4.18 ลักษณะชั้นดินริมตลิ่ง Section 5

#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง (Engineering properties)

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตัวอย่างจากตลิ่งของคลองอู่ตะเภาทั้ง 5 Section ใช้การทดสอบวิธี Multi – stage direct shear test (Drainage test) กำลังเฉือนของดิน (Shear strength parameter) ที่ได้เป็นแบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ผลการทดสอบ

ทั้งสถานะความชื้นธรรมชาติและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แสดงในตารางที่ 4.6 – 4.10 รายละเอียดผลการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress – Horizontal displacement, Vertical displacement – Horizontal displacement และเส้นขอบเขตการพังทลาย (Failure envelope) ได้แสดงในภาคผนวก ผลการทดสอบแยกตามตลิ่งทั้ง 5 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 1

จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่า Shear strength parameter Cohesion ( $c'$ ) และ Friction angle ( $\phi'$ ) ของดินริมตลิ่ง Section 1 พบว่าในสถานะความชื้นธรรมชาติมีค่า  $c'_n$  เท่ากับ 52.72, 23.53, 21.49, 9.69 และ 7.91 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_n$  เท่ากับ 24.23, 19.59, 27.13, 28.98 และ 29.59 degree ตามลำดับชั้นดิน ดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า  $c'_{sat}$  เท่ากับ 11.41, 9.56, 5.24, 0.139 และ 7.91 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_{sat}$  เท่ากับ 22.15, 26.89, 25.31, 28.81 และ 29.59 degree ตามลำดับชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 1

Layer	Depth from top of bank (m)	USCS	Natural water content*				Saturated water content			
			$\phi'_n$ (Degree)	$c'_n$ (kPa)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	% $S_r$	$\phi'_{sat}$ (Degree)	$c'_{sat}$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	% $S_r$
1	0.00 - 1.50	CL	24.23	52.72	18.82	68.84	22.15	11.41	19.50	100.00
2	1.50 - 2.50	CL	19.59	23.53	19.22	78.49	26.89	9.56	19.64	100.00
3	2.50 - 3.92	CL	27.13	21.49	19.40	88.27	25.31	5.24	19.93	100.00
4	3.92 - 4.92	SM	28.98	9.69	17.99	69.05	28.81	0.139	19.97	100.00
5	4.92 - 11.45	SC	29.59	7.91	20.53	94.69	29.59	7.91	20.53	100.00

\*เก็บตัวอย่างดินวันที่ 22 กรกฎาคม 2552

#### 4.3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 2

จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่า Shear strength parameter ของดินริมตลิ่ง Section 2 พบว่าในสถานะความชื้นธรรมชาติมีค่า  $c'_n$  เท่ากับ 20.05, 7.86 และ 20.36 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_n$  เท่ากับ 23.04, 27.36 และ 28.49 degree ตามลำดับชั้นดิน



ดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า  $c'_{sat}$  เท่ากับ 5.76, 4.29 และ 13.03 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_{sat}$  เท่ากับ 22.59, 27.57 และ 24.68 degree ตามลำดับชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 2

Layer	Depth from top of bank (m)	USCS	Natural water content*				Saturated water content			
			$\phi'_n$ (Degree)	$c'_n$ (kPa)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>	$\phi'_{sat}$ (Degree)	$c'_{sat}$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>
1	0.00 - 1.50	CL	23.04	20.05	18.58	72.18	22.59	5.76	19.61	100.00
2	1.50 - 2.50	CL	27.36	7.86	17.26	59.96	27.57	4.29	18.97	100.00
3	2.50 - 7.01	CL	28.49	20.36	18.64	68.06	24.68	13.03	19.84	100.00

\*เก็บตัวอย่างดินวันที่ 12 มีนาคม 2553

#### 4.3.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 3

จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่า Shear strength parameter ของดินริมตลิ่ง Section 3 พบว่าในสถานะความชื้นธรรมชาติมีค่า  $c'_n$  เท่ากับ 61.13, 20.72, 16.60, 11.68 และ 2.12 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_n$  เท่ากับ 28.76, 23.68, 29.19, 34.47 และ 28.67 degree ตามลำดับชั้นดิน ดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า  $c'_{sat}$  เท่ากับ 17.05, 1.925, 2.31, 1.796 และ 0.119 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_{sat}$  เท่ากับ 22.61, 25.94, 26.84, 34.05 และ 27.37 degree ตามลำดับชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 3

Layer	Depth from top of bank (m)	USCS	Natural water content*				Saturated water content			
			$\phi'_n$ (Degree)	$c'_n$ (kPa)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>	$\phi'_{sat}$ (Degree)	$c'_{sat}$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>
1	0.00 - 1.50	CL	28.76	61.13	17.86	56.63	22.61	17.05	18.97	100.00
2	1.50 - 2.50	SM	23.68	20.72	15.83	24.89	25.94	1.925	19.03	100.00
3	2.50 - 3.50	SM	29.19	16.60	17.12	35.86	26.82	2.31	19.64	100.00
4	3.50 - 4.50	SM	34.47	11.68	18.14	46.67	34.05	1.796	20.07	100.00
5	4.50 - 9.50	SP	28.67	2.12	15.34	23.58	27.37	0.119	18.72	100.00

\*เก็บตัวอย่างดินวันที่ 12 มีนาคม 2553

#### 4.3.4 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 4

จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่า Shear strength parameter ของดินริมตลิ่ง Section 4 พบว่าในสภาวะความชื้นธรรมชาติมีค่า  $c'_n$  เท่ากับ 44.74, 6.59 และ 22.80 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_n$  เท่ากับ 24.48, 28.53 และ 28.67 degree ตามลำดับชั้นดิน ดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า  $c'_{sat}$  เท่ากับ 4.03, 2.59, และ 7.04 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_{sat}$  เท่ากับ 24.55, 15.53 และ 27.65 degree ตามลำดับชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.9 ส่วนชั้นดินชั้นที่ไม่มีข้อมูล เนื่องจากเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพไม่ได้

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 4

Layer	Depth from top of bank (m)	USCS	Natural water content*				Saturated water content			
			$\phi'_n$ (Degree)	$c'_n$ (kPa)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>	$\phi'_{sat}$ (Degree)	$c'_{sat}$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	% S <sub>r</sub>
1	0.00 - 1.50	CL	24.48	44.74	18.39	70.21	24.55	4.03	19.31	100.00
2	1.50 - 2.50	ML	28.53	6.59	19.09	83.12	15.53	2.59	19.76	100.00
3	2.50 - 3.50	CL	28.67	22.80	19.40	88.45	27.65	7.04	20.13	100.00
4	3.50 - 6.12	CL	NA	NA	NA	100.00	NA	NA	NA	NA

\*เก็บตัวอย่างดินวันที่ 23 กรกฎาคม 2552

#### 4.3.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 5

จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อหาค่า Shear strength parameter ของดินริมตลิ่ง Section 5 พบว่าในสภาวะความชื้นธรรมชาติมีค่า  $c'_n$  เท่ากับ 39.90, 4.66 และ 14.56 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_n$  เท่ากับ 23.65, 29.33 และ 27.06 degree ตามลำดับชั้นดิน ดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่า  $c'_{sat}$  เท่ากับ 12.48, 0.932, และ 1.259 kPa ตามลำดับชั้นดิน ค่า  $\phi'_{sat}$  เท่ากับ 27.38, 16.01 และ 33.74 degree ตามลำดับชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.10

Shear strength parameter ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในสภาวะความชื้นธรรมชาติและอิ่มตัวด้วยน้ำคือ การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion) ดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะให้ค่าการยึดเกาะกันน้อยกว่าดินในสภาวะความชื้นธรรมชาติ (นงลักษณ์ 2547) สอดคล้องกันกับ ทฤษฎีกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวที่ว่า ดินเม็ดละเอียดที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีแรงคู่มากหรือน้อยขึ้นกับ

ขนาดของเม็ดดินและปริมาณความชื้นในมวลดิน ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าและมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยกว่า จะเกิดแรงดูดไค้มากกว่า ส่งผลให้ค่ายึดเกาะกันของมวลดินสูงขึ้น ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวทำลายแรงตึงผิวหรือแรงดูดของอากาศในดิน ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินลดลง (สุทธิศักดิ์, 2550) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเสียดทานระหว่างเม็ดดิน ( $\phi'$ ) ระหว่างสถานะของดินที่ไม่อิ่มตัว ( $\phi'_n$ ) และสถานะของดินที่อิ่มตัว ( $\phi'_{sat}$ ) ของดินตัวอย่างจากตลิ่งคลองอู่ตะเภา ไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน กล่าวคือ ค่า  $\phi'$  มีค่าทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เมื่อดินเปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินริมตลิ่ง Section 5

Layer	Depth from top of bank (m)	USCS	Natural water content*				Saturated water content			
			$\phi'_n$ (Degree)	$c'_n$ (kPa)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	% $S_r$	$\phi'_{sat}$ (Degree)	$c'_{sat}$ (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	% $S_r$
1	0.00 - 1.50	CL	23.65	39.90	18.67	72.12	27.38	12.48	19.72	100.00
2	1.50 - 2.50	ML	29.33	4.66	18.70	78.32	16.01	0.932	1.99	100.00
3	2.50 - 3.50	SC	27.06	14.56	20.11	87.18	33.74	1.259	20.54	100.00
4	3.50 - 7.55	SC	NA	NA	NA	100	NA	NA	NA	NA

\*เก็บตัวอย่างดินวันที่ 23 กรกฎาคม 2552

#### 4.4 ผลการจำลองการพิบัติของตลิ่ง

การจำลองการพิบัติของตลิ่งเพื่อศึกษาการกัดเซาะและพิบัติของตลิ่งเบื้องต้นจากข้อมูล  $\tau_c$  และ  $k_d$  เบื้องต้นที่ประมาณได้จากค่า Index properties การวิเคราะห์ทำให้ทราบกระบวนการของการพิบัติและปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของตลิ่ง การจำลองประกอบไปด้วย 2 ลักษณะคือ 1) การจำลองการกัดเซาะของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเฉลี่ย 2) วิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งในกรณีระดับน้ำเพิ่มขึ้น – ลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองโดยใช้ตลิ่ง Section 1 เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นตลิ่งแบบผสม (Composite bank) มีความอ่อนไหวต่อการสูญเสียเสถียรภาพมากกว่าตลิ่งที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive bank) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่ง Section 1 ในกรณีระดับน้ำเฉลี่ย

การวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่งโดยใช้สมการที่ 2.6 – 2.9 คำนวณค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินของแต่ละชั้นดินดังแสดงในตารางที่ 4.1 แล้วจำลองการไหลของน้ำเป็นระยะเวลา 1 วัน, 1 สัปดาห์, 2 สัปดาห์, 1 เดือน, 2 เดือน, 3 เดือน, 4 เดือน, 5 เดือน, 6 เดือน ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์พบว่าระยะการกัดเซาะของตลิ่ง Section 1 ที่ใช้ค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากสมการที่ 2.8 และ 2.9 มีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ พิจารณาระยะการกัดเซาะที่ใช้ค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากสมการที่ 2.9 พบว่ามีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินมากกว่าหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ การกัดเซาะจึงไม่เกิดขึ้น ในส่วนของระยะการกัดเซาะที่ใช้ค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากสมการที่ 2.6 และ 2.7 ระยะการกัดเซาะที่คำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

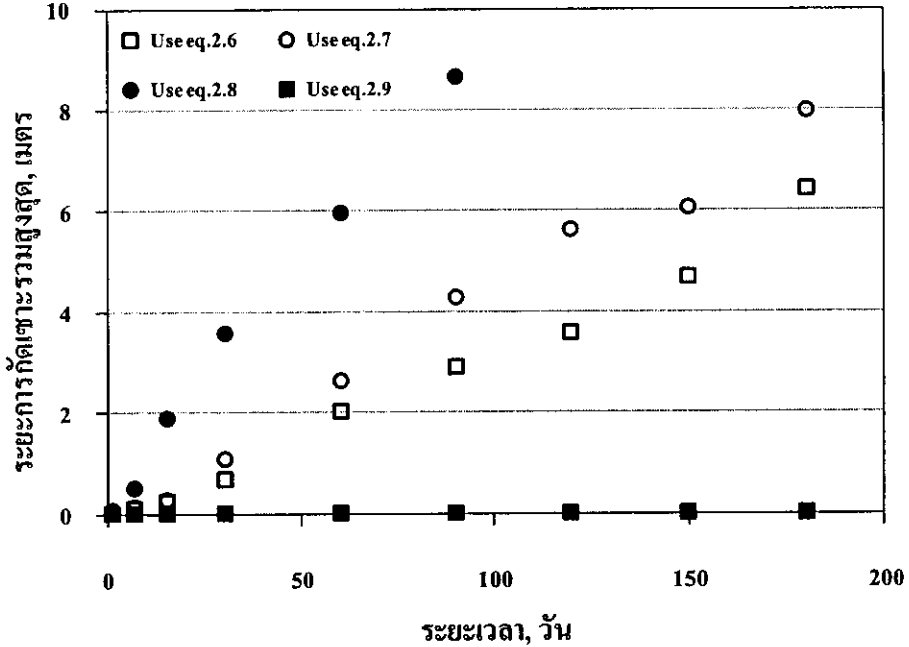
เมื่อนำระยะการกัดเซาะดังรูปที่ 4.19 มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยยึดหลักการที่ว่า ตลิ่งจะเกิดการพิบัติเมื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 ผลการคำนวณพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งที่ใช้ค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากสมการที่ 2.6, 2.7, 2.8 ในการคำนวณระยะการกัดเซาะมีค่าลดลงตามระยะการกัดเซาะที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.11 ค่า Critical shear stress ใช้ในการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่ง Section 1

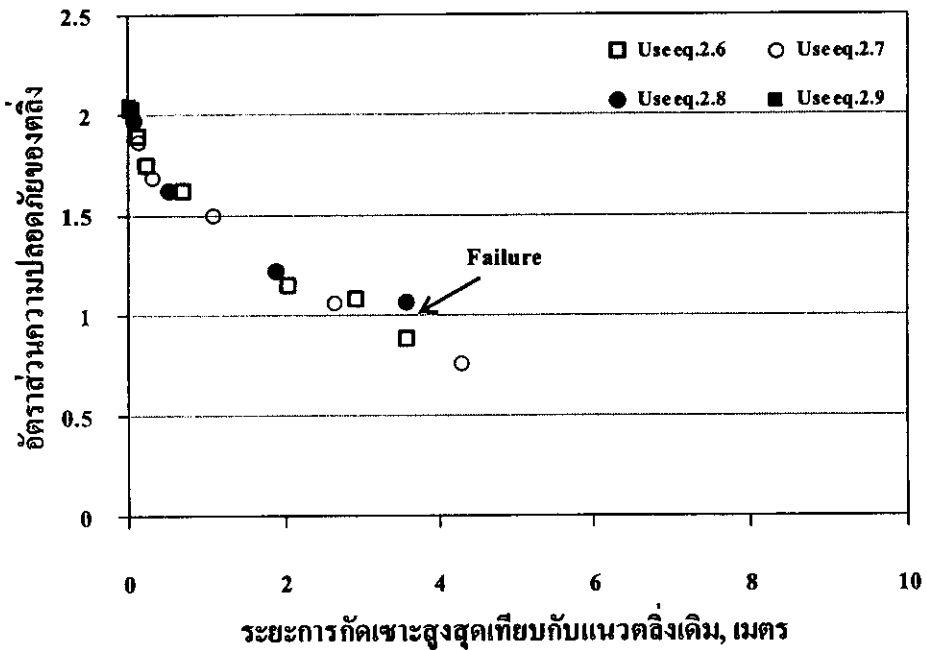
Equation No.	Critical shear stress, Pa				
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
2.6	2.29	2.23	1.47	1.14	1.14
2.7	3.02	3.69	1.81	0.69	0.84
2.8	0.0041	0.0041	0.0112	0.0584	0.0988
2.9	21.49	21.49	15.80	7.64	10.28

นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์พบว่าตลิ่งเริ่มสูญเสียเสถียรภาพเมื่อมีระยะการกัดเซาะดินตลิ่งเซาะประมาณ 2.0 – 3.5 m จากแนวตลิ่งเดิม โดยใช้ระยะเวลาสั้นที่สุดจากเริ่มต้นจนถึงช่วงที่ตลิ่งพิบัติประมาณ 1 เดือน ( $\tau_c$  มีค่าน้อยสุดจากทั้ง 4 สมการดังกล่าว) ภาพตัดของตลิ่งที่ถูกกัด

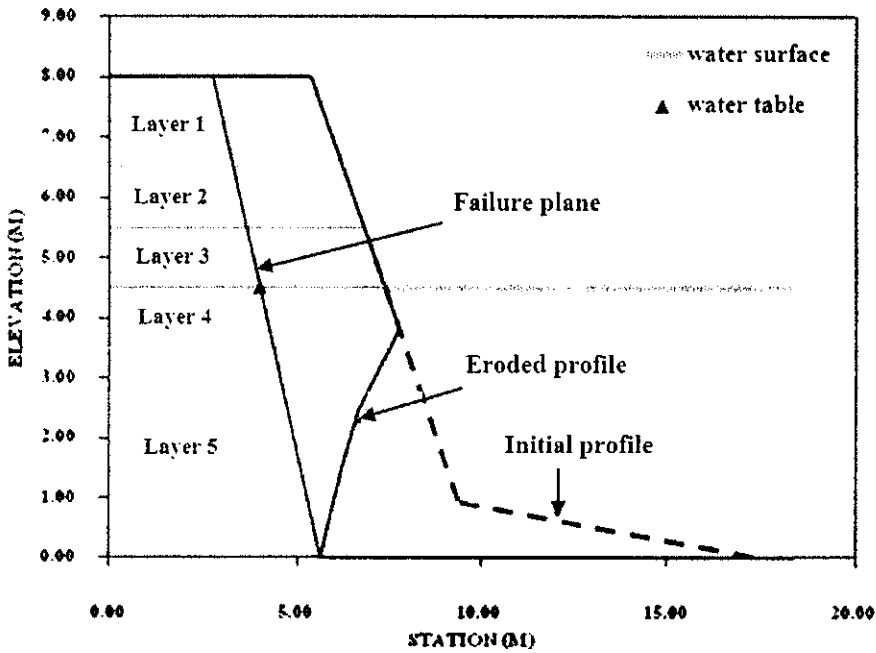
เซาะตลิ่งแสดงในรูปที่ 4.21 สำหรับตลิ่ง Section 1 นี้พบว่า การพังทลายเป็นแบบ Planar failure ซึ่งมีค่ามุมพิบัติประมาณ 70 องศาจากแนวราบ



รูปที่ 4.19 ระยะการกัดเซาะของตลิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อค่า Critical shear stress คำนวณจาสมการที่ 2.6 - 2.9



รูปที่ 4.20 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งเนื่องจากการกัดเซาะ

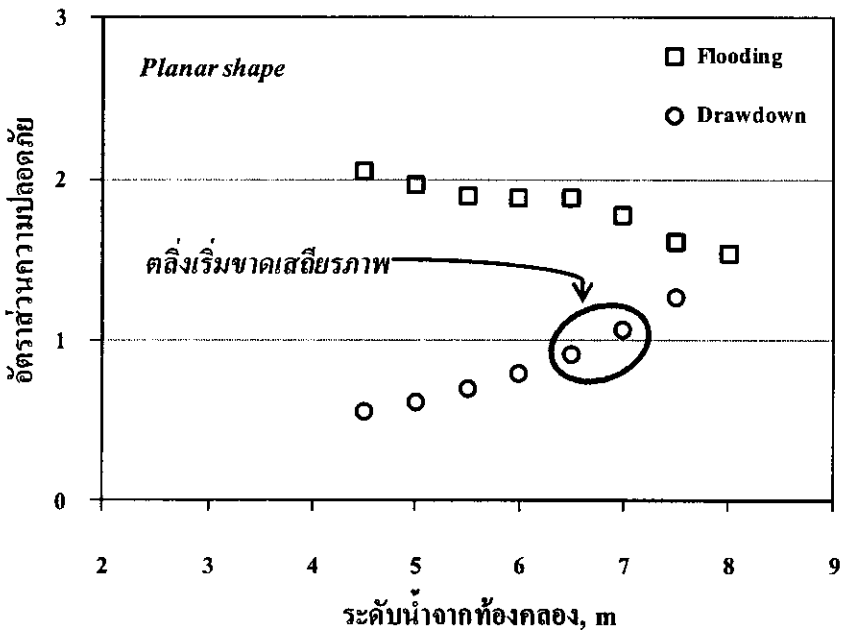


รูปที่ 4.21 ภาพตัดของตลิ่ง Section 1 ที่สูญเสียเสถียรภาพเนื่องจากการกัดเซาะของตลิ่งที่ระดับน้ำเฉลี่ยจากการจำลองการพิบัติของตลิ่ง

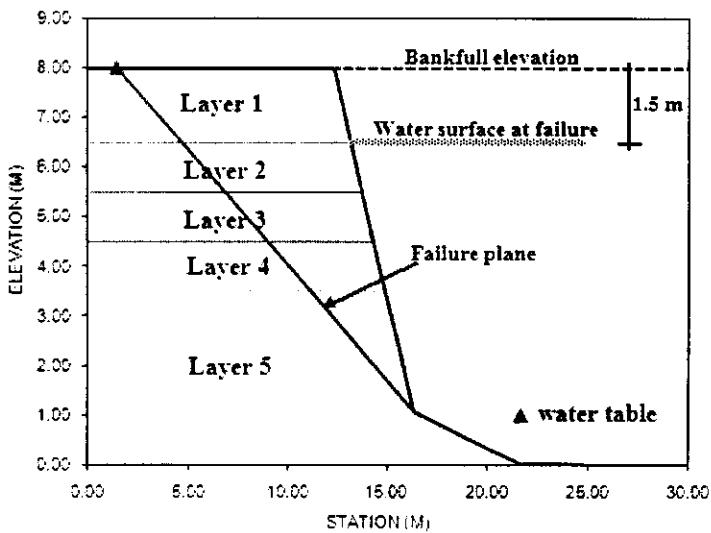
#### 4.4 2 เสถียรภาพตลิ่งของกรณีน้ำท่วมและระดับน้ำลดลงทันทีทันใด

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพตลิ่งกรณีระดับน้ำเพิ่มขึ้นจากระดับน้ำเฉลี่ย (น้ำท่วม) และระดับน้ำลดลงทันทีทันใดได้แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยลดลง เนื่องจากชั้นดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำ (ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) ทำให้กำลังเฉือนของดินลดลง เมื่อ ระดับเพิ่มขึ้นจนเต็มตลิ่ง ชั้นดินทุกชั้นของตลิ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ตลิ่งยังอยู่ในเสถียรภาพเพราะมีแรงภายนอกเนื่องจากระดับน้ำ ( $F_w$ , ดังรูปที่ 2.10a) คอยช่วยรักษาเสถียรภาพอยู่

การลดลงของระดับน้ำทันทีทันใด (Rapid drawdown) จากระดับน้ำเต็มตลิ่ง เนื่องจากการเปิดประตูระบายน้ำลดลงอยู่ตะกอนกใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีเลวร้ายที่สุด (Worst case scenario) โดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวบนของตลิ่ง ผลการวิเคราะห์พบว่า การลดลงของระดับน้ำทันทีทันใดทำให้เสถียรภาพของตลิ่งลดลง เนื่องจากหน่วยน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้น ขณะที่ Shear strength parameter ของดินลดลง (ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) อีกทั้งแรงภายนอกจากระดับน้ำ ( $F_w$ ) ที่เป็นส่วนรักษาเสถียรภาพของตลิ่งลดลง ผลการวิเคราะห์พบว่าตลิ่งเริ่มขาดเสถียรภาพเมื่อระดับน้ำลดลงประมาณ 1.5 m จากระดับน้ำเต็มตลิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 อัตราส่วนความปลอดภัยของคลื่น Section 1 กรณีน้ำท่วมและระดับน้ำลดลงทันทีทันใดจากการจำลองการพิบัติของคลื่น



รูปที่ 4.23 ลักษณะการพิบัติของคลื่น Section 1 ในกรณี Rapid drawdown

4.5. ผลการวิเคราะห์ค่าระดับน้ำคลองอุตะภาโดยวิธี Backwater analysis

การวิเคราะห์ค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis (Standard step method) ทำให้ทราบค่าระดับน้ำของแต่ละคลื่นและค่าความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน ( $S_f$ ) ของลำน้ำที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ เนื่องจากระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นและลดลงทำให้อัตราการไหลของน้ำมีค่าที่

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis

วัน	เวลา	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	ระดับน้ำ (เมตร รทก.)								$n$	$S_f$
			ปตร. คู่ตะกอน	Sec1	Sec2	Sec3	Sec4	Sec5	บางศาลา			
1/11/2552	21:00-22:00	50.45	2.780	2.802	2.879	2.909	2.953	2.989	3.700	0.0354	0.000070	
2/11/2552	07:00	52.70	3.400	3.405	3.431	3.440	3.457	3.468	3.790	0.0255	0.000030	
3/11/2552	7:00-16:00	46.53	3.270	3.273	3.290	3.295	3.307	3.314	3.540	0.0221	0.000020	
4/11/2552	7:00-16:00	42.60	3.050	3.054	3.075	3.082	3.098	3.108	3.385	0.0227	0.000020	
5/11/2552	7:00-16:00	36.00	2.845	2.849	2.866	2.871	2.884	2.892	3.120	0.0236	0.000020	
	2:00-3:00	65.85	4.250	4.247	4.247	4.246	4.252	4.249	4.265	0.0074	0.000010	
	6:00-7:00	107.35	4.600	4.614	4.688	4.717	4.755	4.816	5.505	0.0332	0.000065	
	9:00-11:00	164.13	4.620	4.669	4.889	4.973	5.069	5.161	6.640	0.0384	0.000150	
6/11/2552	13:00-14:00	281.05	4.925	4.998	5.373	5.556	5.714	5.846	7.895	0.0333	0.000230	
	15:00-17:00	347.43	5.370	5.477	5.799	6.001	6.163	6.287	8.350	0.036	0.000235	
	18:00-20:00	457.23	5.920	5.932	6.295	6.340	6.643	6.749	8.860	0.0356	0.000270	
	21:00-23:00	524.33	6.360	6.334	6.642	6.769	6.915	7.272	9.060	0.0317	0.000240	

Note:  $Q$  = อัตราการไหลของน้ำ,  $n$  = Manning's roughness coefficient,  $S_f$  = ความลาดชันพลังงาน



ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis (ต่อ)

วัน	เวลา	$Q$ ( $m^3/s$ )	ระดับน้ำ (เมตร รทก.)							$n$	$S_f$
			ปตร. คู่ตะกาศ	Sec1	Sec2	Sec3	Sec4	Sec5	บางศาลา		
7/11/2552	0:00	577.00	6.850	6.798	7.057	7.077	7.362	7.426	9.957	0.0288	0.000215
	1:00-3:00	641.20	6.640	6.560	6.862	7.075	7.235	7.426	10.058	0.0274	0.000235
	4:00-11:00	727.54	6.950	6.842	7.166	7.171	7.285	7.403	10.210	0.0253	0.000215
	12:00-6:00	800.10	7.157	7.105	7.126	7.147	7.207	7.284	10.297	0.0235	0.000190
8/11/2552	7:00-8:00	625.10	6.925	6.850	7.106	7.357	7.513	7.659	10.048	0.027	0.000210
	9:00-11:00	573.33	6.830	6.777	7.031	7.264	7.416	7.574	9.945	0.0287	0.000210
	12:00-14:00	518.23	6.543	6.570	7.007	7.316	7.539	7.867	9.804	0.0344	0.000260
	15:00-17:00	468.00	6.397	6.387	6.664	6.823	6.967	7.237	9.655	0.0315	0.000195
	18:00-19:00	433.20	6.190	6.194	6.485	6.616	6.761	7.076	9.528	0.034	0.000200
9/11/2552	20:00-23:00	403.65	6.003	6.060	6.319	6.439	6.580	6.921	9.392	0.0392	0.000245
	0:00	381.30	5.750	5.820	6.116	6.282	6.437	6.767	9.107	0.0327	0.000210
	8:00-13:00	303.10	4.950	5.025	5.427	5.621	5.790	5.929	8.815	0.0323	0.000235
	14:00-19:00	271.63	4.592	4.683	5.106	5.311	5.487	5.634	8.569	0.0337	0.000250
	21:00-1:00	244.35	4.328	4.523	4.856	5.061	5.237	5.388	8.322	0.0349	0.000250

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis (ต่อ)

วัน	เวลา	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	ระดับน้ำ (เมตร รทท.)							$n$	$S_f$
			ปตร. คู่ตะเภา	Sec1	Sec2	Sec3	Sec4	Sec5	บางศาลา		
10/11/2552	7:00-13:00	194.21	3.873	3.989	4.405	4.606	4.779	4.932	7.811	0.0376	0.000255
	15:00-20:00	164.46	3.776	3.878	4.238	4.406	4.560	4.698	7.409	0.0392	0.000240
11/11/2552	0:00-16:00	124.25	3.650	3.719	3.974	4.087	4.203	4.309	6.657	0.0401	0.000170
11-12/11/2552	17:00-18:00	96.25	2.970	3.032	3.238	3.313	3.418	3.500	5.577	0.0352	0.000156
13-15/11/2552	19:00-7:00	53.93	2.590	2.628	2.745	2.791	2.856	2.909	4.584	0.0381	0.000100
16/11/2552	7:00-9:00	70.30	3.600	3.614	3.678	3.703	3.738	3.790	5.167	0.0329	0.000060
17/11/2552	7:00-12:00	82.77	3.847	3.865	3.946	3.978	4.020	4.085	5.577	0.0343	0.000070
18/11/2552	9:00-15:00	78.82	3.493	3.519	3.628	3.671	3.727	3.811	5.453	0.0372	0.000090
19/11/2552	7:00-18:00	97.08	3.696	3.734	3.886	3.944	4.017	4.133	5.985	0.0402	0.000120
20/11/2552	8:00-21:00	117.82	4.169	4.206	4.365	4.425	4.499	4.622	6.520	0.0387	0.000120
21/11/2552	8:00-11:00	172.70	5.048	5.089	5.286	5.355	5.439	5.524	7.655	0.0388	0.000135
	12:00-14:00	220.40	5.173	5.220	5.464	5.551	5.657	5.756	8.094	0.0355	0.000160
	15:00-18:00	260.60	5.440	5.515	5.744	5.842	5.957	6.059	8.472	0.039	0.000180
19:00-23:00	302.95	5.723	5.794	6.028	6.137	6.259	6.361	8.817	0.0369	0.000180	

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis (ต่อ)

วัน	เวลา	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	ระดับน้ำ (เมตร รทท.)							$S_f$	
			ปตร. ผู้ตะเภา	Sec1	Sec2	Sec3	Sec4	Sec5	บางศาลา		
22/11/2552	7:00-9:00	363.77	6.150	6.205	6.429	6.543	6.668	6.763	9.197	0.0335	0.000180
	10:00-15:00	386.32	6.483	6.521	6.716	6.813	6.929	7.011	9.312	0.0368	0.000160
	16:00-19:00	422.55	6.733	6.758	6.940	6.997	7.158	7.232	9.475	0.0297	0.000155
	20:00-24:00	471.20	7.020	6.996	7.190	7.251	7.413	7.537	9.661	0.0222	0.000150
23/11/2552	7:00-14:00	631.15	7.438	7.433	7.441	7.516	7.578	7.649	10.060	0.0221	0.000150
	15:00-21:00	682.51	7.476	7.456	7.435	7.503	7.550	7.611	10.150	0.0224	0.000150
24/11/2552	8:00-11:00	557.70	7.180	7.174	7.383	7.369	7.445	7.523	9.930	0.0256	0.000150
	12:00-15:00	516.55	6.955	6.925	7.165	7.177	7.400	7.535	9.800	0.0223	0.000160
	16:00-21:00	453.50	6.663	6.651	6.886	6.879	7.141	7.293	9.600	0.0238	0.000175
	8:00-14:00	324.85	5.552	5.597	5.917	6.060	6.203	6.320	8.962	0.0309	0.000210
25/11/2552	15:00-22:00	288.94	5.029	5.099	5.473	5.634	5.793	5.925	8.711	0.0332	0.000240
	8:00-19:00	209.94	3.939	4.069	4.530	4.705	4.898	5.053	7.977	0.038	0.000280
27/11/2552	8:00-18:00	133.81	3.379	3.493	3.854	3.982	4.146	4.277	6.870	0.042	0.000235
28/11/2552	8:00-18:00	95.58	3.420	3.472	3.663	3.731	3.827	3.906	5.944	0.0404	0.000140

แตกต่างกันไป ดังนั้นในก่อนทำการคำนวณระดับน้ำ จำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยของระดับน้ำและอัตราการไหลของน้ำ เพื่อเป็นตัวแทนในการคำนวณระดับน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ การคำนวณค่าระดับน้ำและค่าความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงานโดยวิธี Backwater analysis ทำได้โดยคำนวณพลังงานรวมจากหน้าประตูระบายน้ำอยู่ตะเภา แล้วคำนวณค่าระดับน้ำของตลิ่งตำแหน่งต่อไปโดยอ้างอิงค่าพลังงานรวมจากหน้าประตูระบายน้ำอยู่ตะเภา ดังแสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ก ผลที่ได้ Backwater analysis นี้ นำไปคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary shear stress or apply shear stress,  $\tau_o$ ) ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ค่าระดับน้ำโดยวิธี Backwater analysis ได้แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า อัตราการไหลของน้ำเพิ่มจาก  $36.00 \text{ m}^3/\text{s}$  (ระดับ Base flow) เป็น  $800.1 \text{ m}^3/\text{s}$  (ระดับฝนตกหนัก) ส่งผลให้ค่าความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน,  $S_f$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.00002 เป็น 0.00027 ซึ่งมากกว่าค่าความลาดชันของท้องคลอง ( $S_o \approx 0.0001$ ) เนื่องจากขณะนั้นเกิดฝนตกหนักทำให้น้ำในตลิ่งเพิ่มระดับอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ 1 วันทำให้ระดับน้ำเต็มตลิ่ง

#### 4.6 ผลการประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, $\tau_c$ ) ของดิน โดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back analysis)

จากคำแนะนำของ Lyle and Smerdon (1965); Hollick (1976) และ Briaud et al. (2001) ที่ระบุว่า Plasticity index (PI) และ Clay content (P<sub>c</sub>) เป็นคุณสมบัติของดินที่สำคัญต่อการประมาณค่า  $\tau_c$  ของ Cohesive soil ในทำนองเดียวกัน Simon (2006) ระบุว่า ค่า Mean diameter ( $D_{50}$ ) จะมีผลมากที่สุดต่อค่า  $\tau_c$  ของ Cohesionless soil ดังนั้นค่า  $\tau_c$  เริ่มต้นในการวิเคราะห์ได้คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.7 และ 2.8 สำหรับ Cohesive soil และ Cohesionless soil ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.16 – 4.20 ในส่วนของค่า  $k_d$  คำนวณจากสมการที่ 2.12 สำหรับดินทั้งสองชนิด

ผลการประมาณค่า  $\tau_c$  ของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภาทั้ง 5 Sections โดยใช้ Back analysis ได้แสดงในตารางที่ 4.13 – 4.17 จากการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $\tau_c$  ของดิน CL ในทุก Sections มีค่ามากกว่า  $\tau_c$  เริ่มต้นทั้งหมด โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3.241 – 11.055 Pa ค่า  $\tau_c$  ของดิน CL ที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Thoman and Niezgodna (2008) ที่ระบุว่า ค่า  $\tau_c$  ของดิน CL อยู่ในช่วงประมาณ 3.16 – 14.84 Pa ในทางตรงกันข้าม สำหรับดินประเภท SM มีค่า  $\tau_c$  ที่ประมาณโดยวิธี Back analysis มีค่าน้อยกว่าค่าเริ่มต้นที่คำนวณจากสมการ 2.7 โดยมีค่า  $\tau_c$  ระหว่าง 0.027 ถึง 0.110 Pa

ตารางที่ 4.13 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของดินริมตลิ่ง Section 1 จากผลของ Back analysis

Layer	USCS	Critical shear stress, $\tau_c$ (Pa)		Erodibility coefficient, $k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	
		Initial value from Eq. 2.7 or 2.8	Obtained using back - analysis	Initial value from Eq. 2.12	Obtained using back-analysis
1	CL	3.025	9.075	0.057	0.033
2	CL	3.685	11.055	0.052	0.030
3	CL	1.807	4.980	0.074	0.045
4	SM	0.058	0.070	0.415	0.378
5	SC	0.099	0.110	0.318	0.302

ตารางที่ 4.14 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของดินริมตลิ่ง Section 2 จากผลของ Back analysis

Layer	USCS	Critical shear stress, $\tau_c$ (Pa)		Erodibility coefficient, $k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	
		Initial value from Eq. 2.7	Obtained using back - analysis	Initial value from Eq. 2.12	Obtained using back-analysis
1	CL	1.132	3.397	0.094	0.054
2	CL	1.106	3.319	0.095	0.055
3	CL	1.080	3.241	0.096	0.056

ตารางที่ 4.15 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของดินริมตลิ่ง Section 3 จากผลของ Back analysis

Layer	USCS	Critical shear stress, $\tau_c$ (Pa)		Erodibility coefficient, $k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	
		Initial value from Eq. 2.7 or 2.8	Obtained using back - analysis	Initial value from Eq. 2.12	Obtained using back-analysis
1	CL	2.502	7.506	0.063	0.037
2	SM	0.093	0.046	0.328	0.466
3	SM	0.055	0.027	0.426	0.609
4	SM	0.077	0.039	0.360	0.506
5	SP	0.088	0.044	0.337	0.477

ตารางที่ 4.16 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของดินริมตลิ่ง Section 4 จากผลของ Back analysis

Layer	USCS	Critical shear stress, $\tau_c$ (Pa)		Erodibility coefficient, $k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	
		Initial value from Eq. 2.7	Obtained using back - analysis	Initial value from Eq. 2.12	Obtained using back-analysis
1	CL	1.662	4.98	0.071	0.045
2	ML	1.677	0.76	0.115	0.115
3	CL	1.459	4.38	0.083	0.048
4	CL	1.148	3.44	0.093	0.054

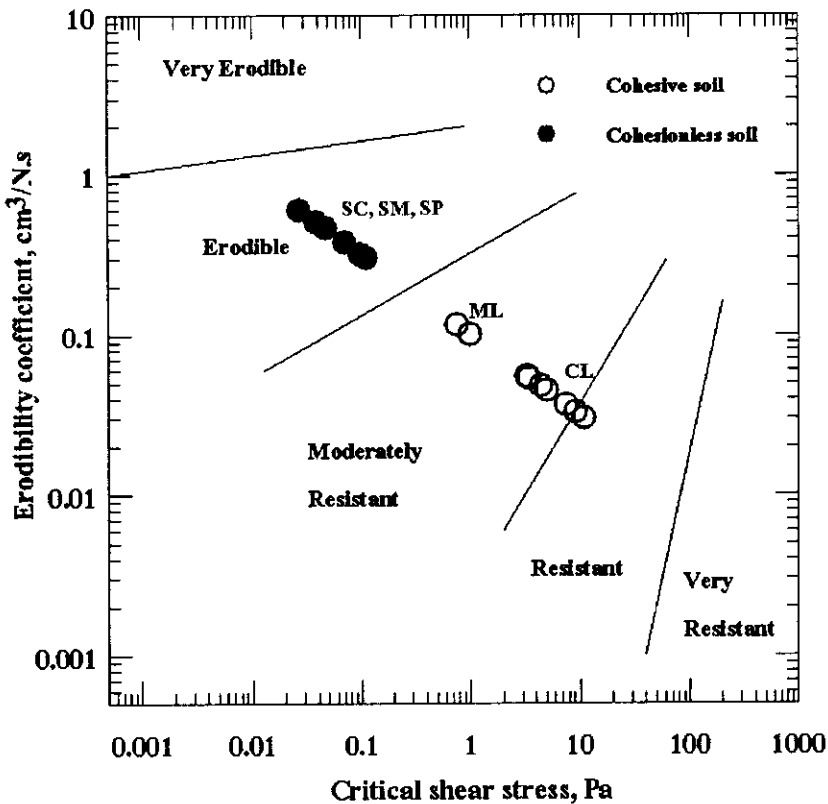
ตารางที่ 4.17 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของดินริมตลิ่ง Section 5 จากผลของ Back analysis

Layer	USCS	Critical shear stress, $\tau_c$ (Pa)		Erodibility coefficient, $k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	
		Initial value from Eq. 2.7 or 2.8	Obtained using back - analysis	Initial value from Eq. 2.12	Obtained using back-analysis
1	CL	1.099	3.288	0.095	0.055
2	ML	0.983	0.983	0.101	0.101
3	SC	0.084	0.098	0.345	0.319
4	SC	0.078	0.105	0.358	0.309

จากการวิเคราะห์ในครั้งนี้ทำให้ทราบลักษณะการพิบัติของตลิ่ง ซึ่งพบว่าตลิ่งทั้ง 4 (Section 2, 3, 4, 5) พินิจหลังน้ำลด ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ Rinaldi and Casaghi (1999) ที่ระบุอย่างชัดเจนว่า ตลิ่งส่วนใหญ่จะพินิจหลังน้ำลด (Rapid drawdown) ซึ่งในระหว่างฝนตก กำลิ่งของดินริมตลิ่งจะลดลงและตลิ่งเริ่มสูญเสียเสถียรภาพ ทั้งนี้ตลิ่งยังไม่พินิจเป็นผลมาจากแรงดันจากระดับน้ำ ( $F_w$ ) เป็นตัวช่วยรักษาเสถียรภาพ ระหว่างที่ระดับน้ำลดลงจากระดับเต็มตลิ่ง เสถียรภาพของตลิ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากกำลิ่งของดินลดลงและที่สำคัญค่าแรงดันเนื่องจากระดับน้ำในตลิ่งลดลงด้วย ส่งผลให้ตลิ่งเกิดการพิบัติ จากการวิเคราะห์พบว่าตลิ่งเกิดการพิบัติเมื่อระดับน้ำในตลิ่งลดระดับลงจากระดับเต็มตลิ่ง (Bankfull elevation) หรือระดับน้ำสูงสุดประมาณ 0.381 – 0.655 m ซึ่งการลดลงของระดับน้ำที่ระดับเต็มตลิ่งถึงระดับน้ำที่ทำให้ตลิ่งพินิจใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง

## 4.6.1 Classification of erodibility

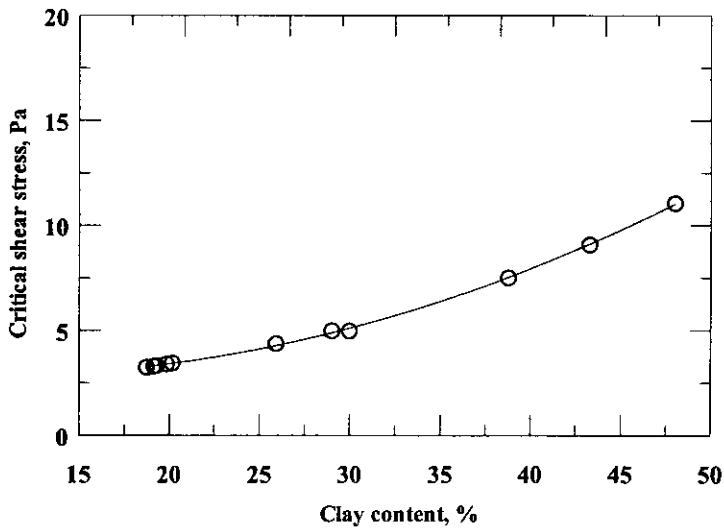
ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านการกัดเซาะของดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองตามคำแนะนำของ Hanson and Simon (2001) ที่ได้ทำการจำแนกประเภทของดินที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะโดยพิจารณาจากค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  แบ่งออกเป็น 5 ประเภทได้แก่ Very erodible, Erodible, Moderately resistant, Resistant และ Very resistant ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลการจำแนกประเภทของดินที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะกอนในพื้นที่ศึกษาทั้ง 5 Sections พบว่าดิน SC, SM และ SP เป็นดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะน้อย (Erodible) ในส่วนของดิน ML เป็นดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะปานกลาง (Moderately resistant) และดิน CL เป็นดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะปานกลาง - ต้านทานต่อการกัดเซาะ (Moderately resistant - Resistant) ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 Classification of soil erodibility ของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะกอน (ตาม Hanson and Simon, 2001)

#### 4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_c$ และ ปริมาณดินเหนียวและดัชนีความเหนียว

ผลการประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินในส่วนของ Cohesive soil เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องเช่น ปริมาณดินเหนียวโดยน้ำหนัก (Clay content,  $P_c$ ) และ ดัชนีพลาสติก (Plasticity index,  $PI$ ) ตามคำแนะนำของ Thoman and Niezgod (2008) ที่ระบุว่าคุณสมบัติทางกายภาพทั้งสองมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การกัดเซาะของดินประเภท Cohesive soil ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพของดินทั้งสองกับค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 – 4.26 และสมการ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน CL สัมพันธ์กับค่า  $P_c$  และ  $PI$  ในรูปของสมการ Exponential ซึ่งถ้าพิจารณาความน่าเชื่อถือในรูปแบบของ  $R^2$  พบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau_c$  และ Clay content มีค่า  $R^2 = 0.9992$  ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau_c$  และ Plasticity index ( $R^2 = 0.5043$ ) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Kamphuis and Hall (1983)

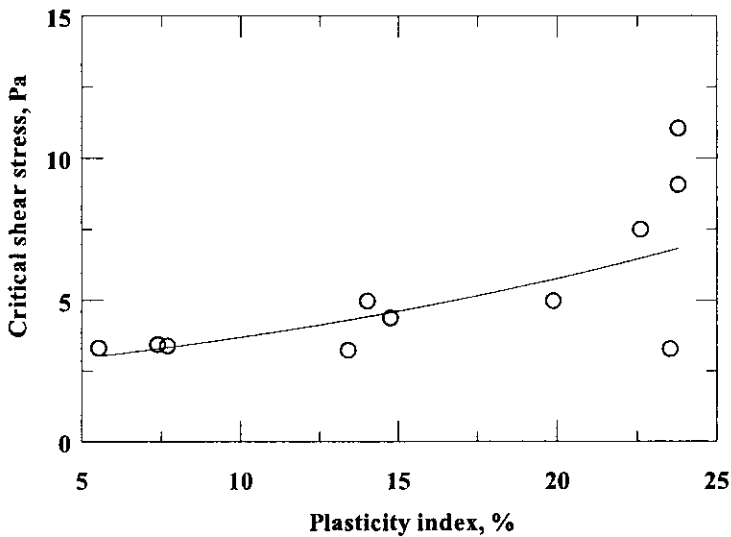


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินและปริมาณดินเหนียวของดิน CL

$$\tau_c = 1.474e^{0.042P_c} \quad (4.1)$$

$$\tau_c = 2.367e^{0.044PI} \quad (4.2)$$





รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินและดัชนีพลาสติกของดิน CL

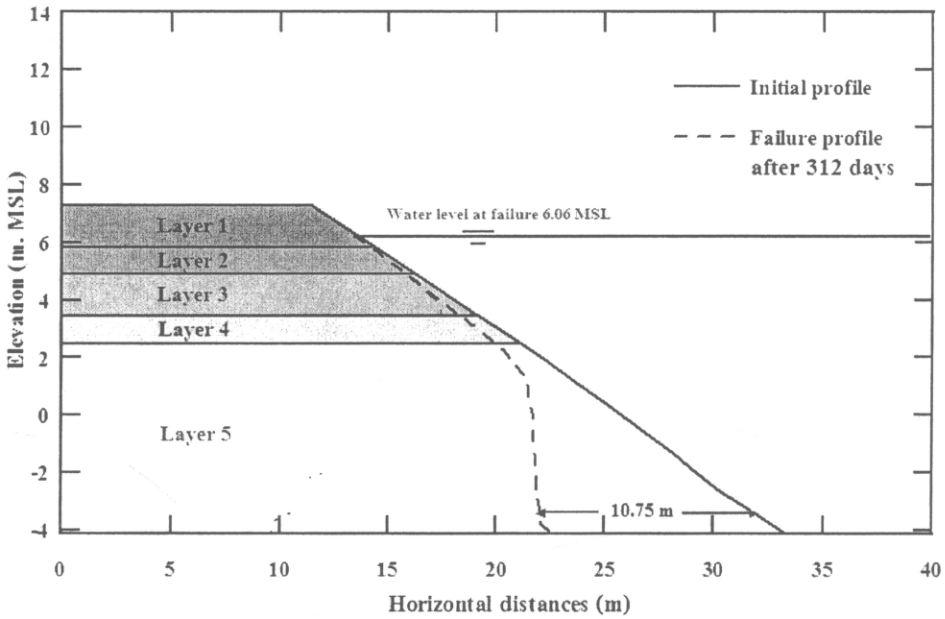
#### 4.7. แนวทางป้องกันตลิ่งจากการพิบัติและการกัดเซาะ

จากการประมาณค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน พบว่าตลิ่งบางตำแหน่งมีความต้านทานต่อการกัดเซาะต่ำมาก ชั้นดินจะถูกกัดเซาะได้ง่าย โดยเฉพาะตลิ่งประเภท Composite bank ซึ่งจะถูกรัดเซาะที่ชั้นทราย ดังนั้นในการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งต้องทำการป้องกันการกัดเซาะที่ชั้นทรายเช่น การเรียงหินหน้าตลิ่ง ซึ่งคล้ายคลึงกับแนวทางการป้องกันตลิ่งของสำนักชลประทานที่ 16

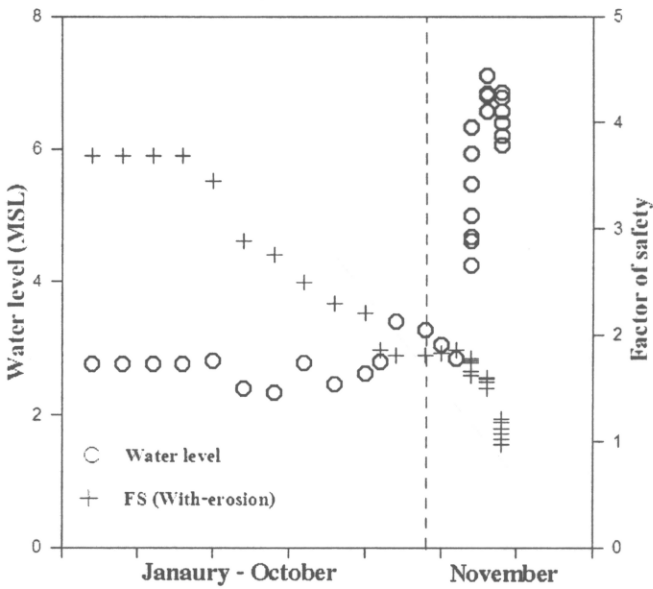
แนวทางการป้องกันตลิ่ง พิจารณาตามแนวทางของสำนักชลประทานที่ 16 ประกอบไปด้วย 3 แบบดังนี้ 1) การปรับความลาดของตลิ่ง 2) การเรียงหินหน้าตลิ่ง (Riprap) และ 3) การปรับปรุงเสถียรภาพโดยวิธีคาดคอนกรีต ซึ่งแต่ละวิธีเหมาะสมกับตลิ่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวิธีปรับความลาดและวิธีเรียงหินหน้าตลิ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับตลิ่งในพื้นที่ศึกษามากที่สุด ในการวิเคราะห์เริ่มจากการปรับความลาดของตลิ่งเป็น 2H : 1V โดยจำลองให้มีการไหลของน้ำตลอด 1 ปีตามสภาพจริงที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางและอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.27– 4.36 พบว่า Section 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็น Composite bank มีการเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางของตลิ่งมาก ระยะการกัดเซาะมากที่สุดประมาณ 6.96 – 10.75 เมตร จากแนวตลิ่งเดิม

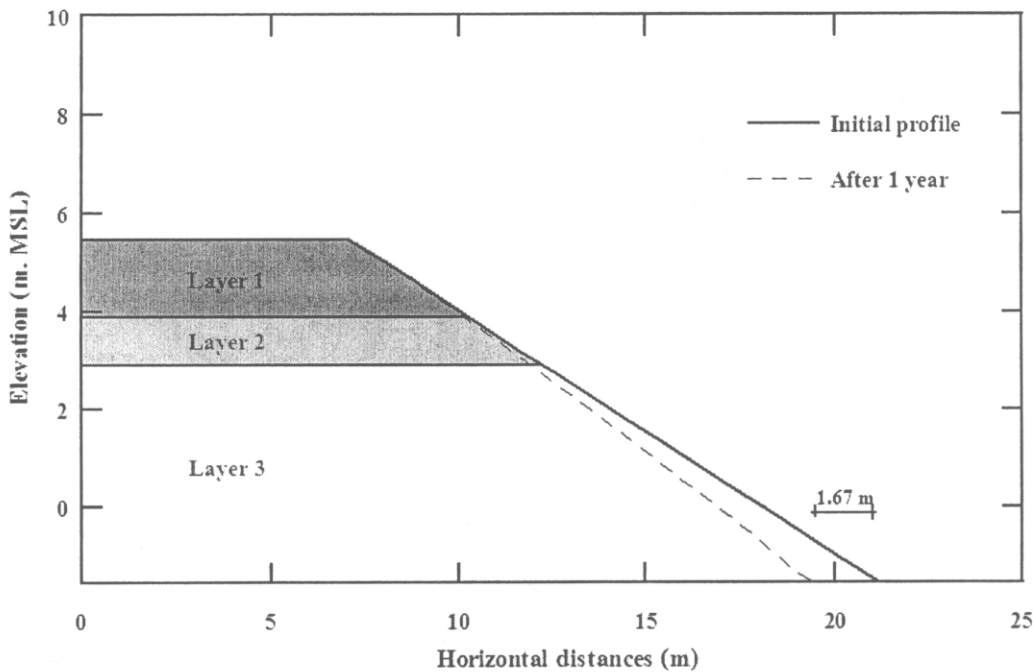
(ตารางที่ 4.18) ส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงจนเกิดการพิบัติ ซึ่งตลิ่งจะเกิดการพิบัติในช่วงเดือนพฤศจิกายน (ระดับน้ำสูง) แต่ในทางกลับกัน Section 2 และ 4 ซึ่งเป็น Cohesive bank มีการเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางของตลิ่งน้อย โดยมีระยะการกัดเซาะสูงสุดประมาณ 1.35 – 1.67 เมตรจากแนวตลิ่งเดิม ซึ่งทั้งสอง Sections นี้ยังมีเสถียรภาพเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี



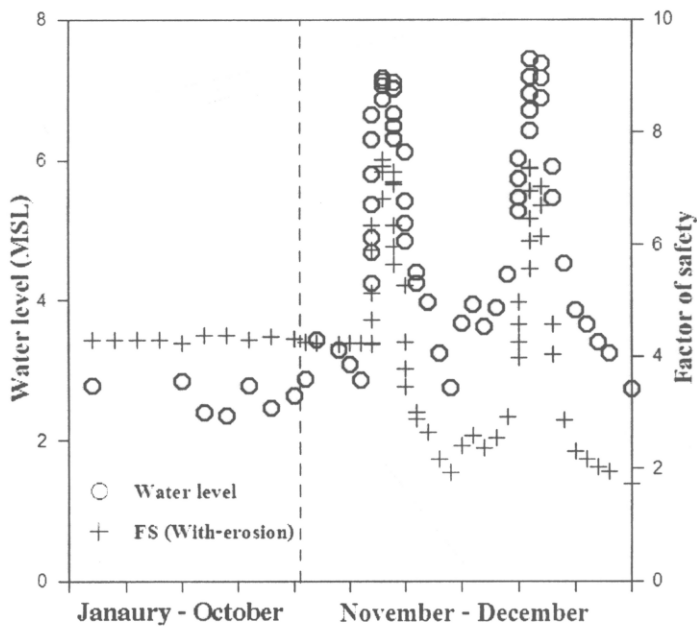
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 1 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ



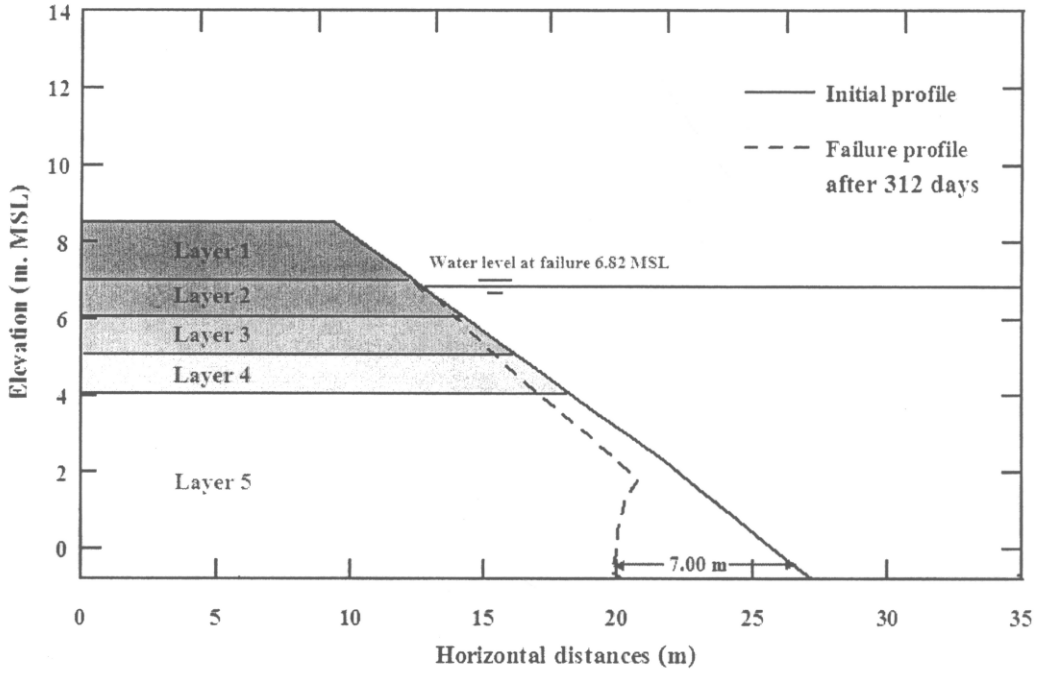
รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 1 ที่ทำการปรับความลาดเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ



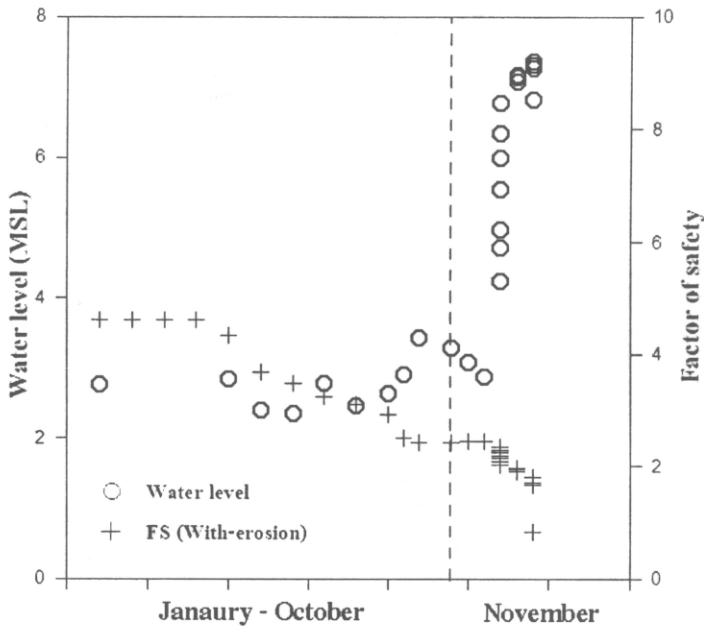
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 2 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี



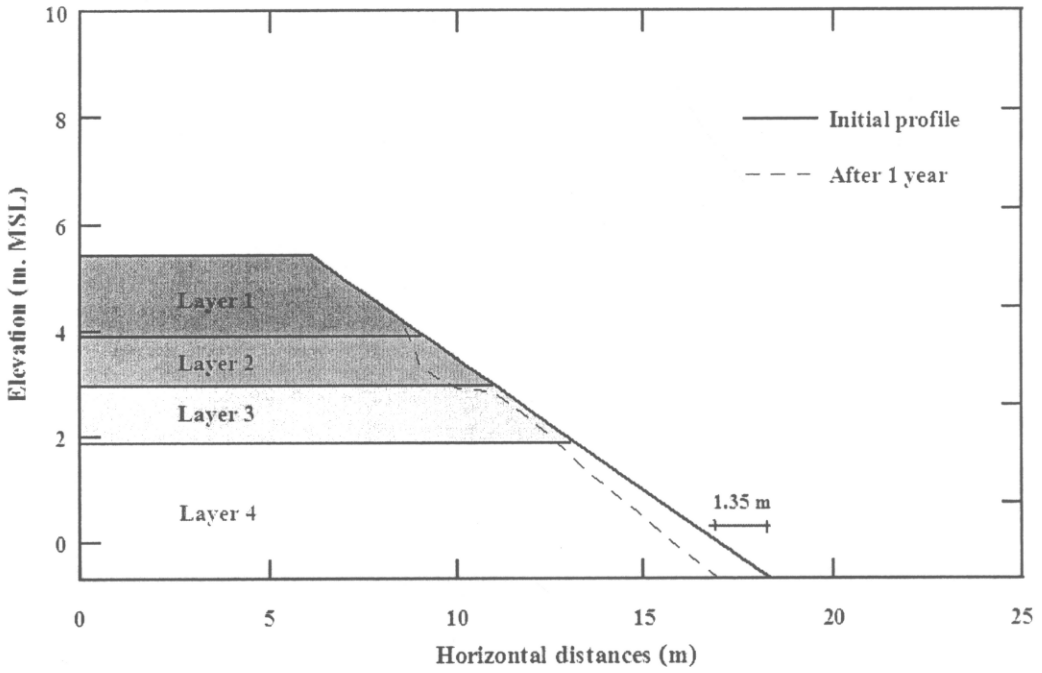
รูปที่ 4.30 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 2 ที่ทำการปรับความลาดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี



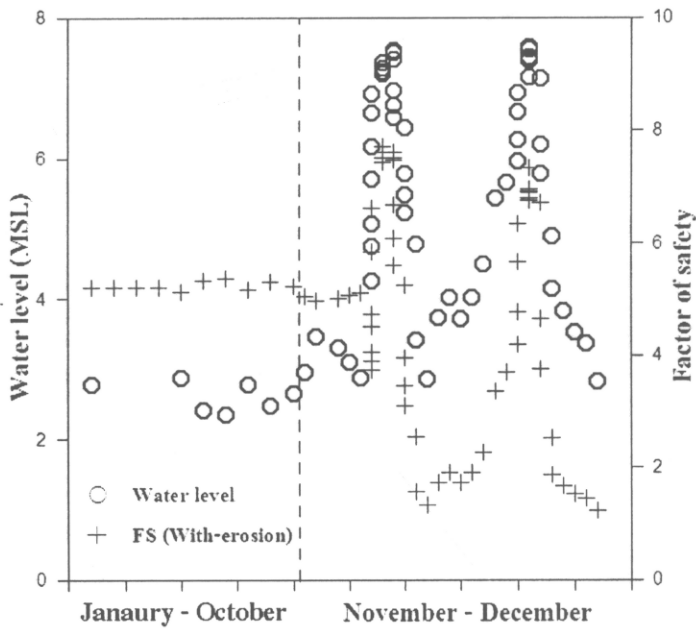
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 3 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ



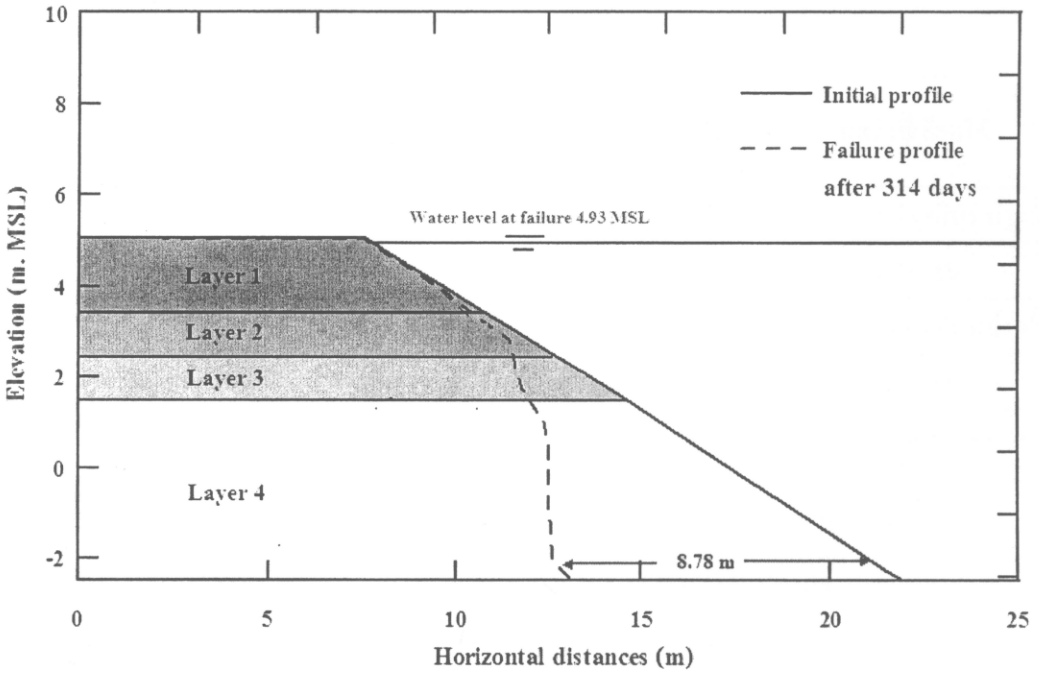
รูปที่ 4.32 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 3 ที่ทำการปรับความลาดเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ



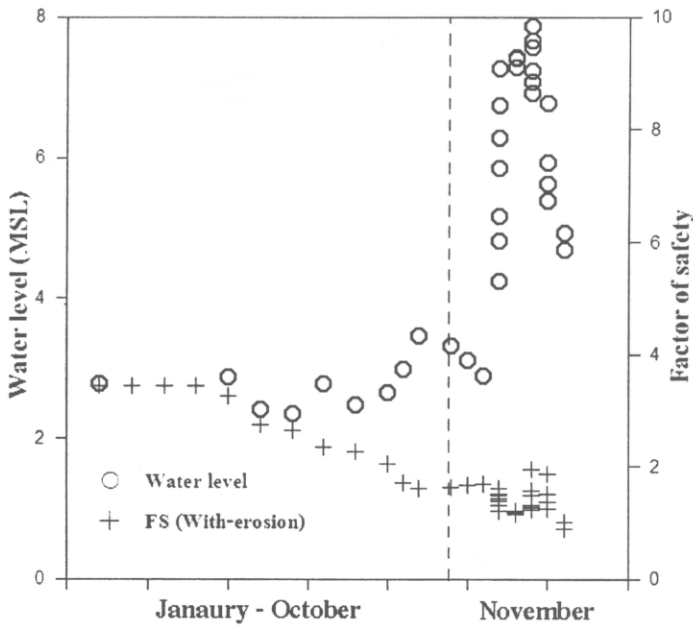
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงสภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 4 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี



รูปที่ 4.34 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 4 ที่ทำการปรับความลาดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี



รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงภาพตัดขวางของตลิ่ง Section 5 เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ



รูปที่ 4.36 อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่ง Section 5 ที่ทำการปรับความลาดเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนเกิดการพิบัติ

ตาราง 4.18 แนวทางการเพิ่มเสถียรภาพและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่ง

Section	วิธีการป้องกันตลิ่ง	ระยะการกัดเซาะ มากที่สุด, เมตร	ช่วงเวลาที่เกิด การพิบัติ (เดือน)	วิธีการป้องกันตลิ่งที่เลือกใช้
1	ปรับความลาด 2H : 1V	10.75	พฤศจิกายน	การปรับความลาด + การเรียงหินหน้าตลิ่ง
2	ปรับความลาด 2H : 1V	1.67	ไม่เกิดการพิบัติ	ปรับความลาด 2H : 1V
3	ปรับความลาด 2H : 1V	7	พฤศจิกายน	การปรับความลาด + การเรียงหินหน้าตลิ่ง
4	ปรับความลาด 2H : 1V	1.35	ไม่เกิดการพิบัติ	ปรับความลาด 2H : 1V
5	ปรับความลาด 2H : 1V	8.78	พฤศจิกายน	การปรับความลาด + การเรียงหินหน้าตลิ่ง

จากการวิเคราะห์และสรุปผลการเพิ่มเสถียรภาพและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตตะเกาทั้ง 5 Sections ดังแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่า Cohesive riverbanks (Section 2 และ 4) ไม่เกิดการพิบัติในช่วงระยะเวลา 1 ปี จึงใช้การปรับความลาดของตลิ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มเสถียรภาพของตลิ่งได้ อย่างไรก็ตามพบว่า Composite riverbanks (Section 1, 3, 5) มีการพิบัติช่วงเดือนพฤศจิกายน (ระดับน้ำสูง) จึงไม่สามารถใช้การปรับความลาดในการป้องกันตลิ่งได้ ดังนั้นการป้องกันตลิ่งของ Composite riverbanks คือการปรับความลาดร่วมกับการเรียงหินหน้าตลิ่ง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของตลิ่งและป้องกันการกัดเซาะในชั้นทราย

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของ, การศึกษาเสถียรภาพของตลิ่งรวมไปถึงการประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภาในพื้นที่ศึกษาทั้ง 5 Sections มีข้อสรุปดังต่อไปนี้

5.1.1 ดินตัวอย่างจากตลิ่งคลองอยู่ตะเภาประกอบไปด้วยดินประเภท CL, ML, SC, SM และ SP มีค่ากำลังของดินในสภาวะความชื้นธรรมชาติดังตารางต่อไปนี้

Soil types	Effective cohesion, $c'$ (kPa)	Effective internal friction angle, $\phi'$ (Degree)
Low plasticity clay (CL)	7.86 – 61.13	19.59 – 28.76
Low plasticity silt (ML)	4.66 – 6.59	28.53 – 29.33
Clayey sand (SC)	7.91 – 14.56	27.06 – 29.59
Silty sand (SM)	9.69 – 20.72	28.98 - 34.47
Poorly graded sand (SP)	2.12	28.67°

5.1.2 ผลการทดสอบ Direct shear test ในกรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดินทั้งหมดที่ทำการศึกษา พบว่าค่า Effective cohesion ของดินตัวอย่างลดลงจากสภาวะความชื้นธรรมชาติประมาณ 36.00 – 98.56%

5.1.3 ผลการจำลองการพิบัติของตลิ่งคลองอยู่ตะเภา พบว่าตลิ่งเกิดการพิบัติสืบเนื่องมาจากปัจจัย 2 ประการคือ การกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำและการลดลงของระดับน้ำทันทีทันใด (Rapid drawdown)

5.1.4 ผลการวิเคราะห์ระดับโดยวิธี Backwater analysis พบว่าค่าความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน ( $S_f$ ) เพิ่มขึ้นจาก 0.00002 ถึง 0.00027 ในขณะที่ค่าระดับน้ำในตลิ่งเพิ่มขึ้นจาก 2.00 เมตร รทก. ถึงระดับน้ำที่สันตลิ่ง



5.1.5 ผลการวิเคราะห์การกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งทั้ง 5 Sections พบว่า ตลิ่งเกิดการพิบัติเนื่องจากระดับน้ำลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown) โดยที่ระดับน้ำลดลง ประมาณ 0.381 ถึง 0.655 เมตร จากระดับน้ำที่เต็มตลิ่งหรือระดับน้ำสูงสุด ทำให้ตลิ่งเกิดการพิบัติ

5.1.6 ผลการประมาณค่า Critical shear stress และค่า Erodibility coefficient โดยวิธี Back analysis พบว่า ค่า Critical shear stress และค่า Erodibility coefficient ของ Cohesive soil มีค่าอยู่ในช่วง 0.758 – 11.055 Pa และ 0.045 – 0.115 cm<sup>3</sup>/N.s ตามลำดับ ซึ่งจำแนกอยู่ในจำพวกดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะปานกลาง – ต้านทานต่อการกัดเซาะ (Moderately resistant – Resistant) ในส่วนของ Cohesionless soil มีค่า Critical shear stress และค่า Erodibility coefficient อยู่ในช่วง 0.027 – 0.110 Pa และ 0.302 – 0.609 cm<sup>3</sup>/N.s ซึ่งจำแนกอยู่ในจำพวกดินประเภทที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะน้อย (Erodible)

5.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical shear stress และ ปริมาณดินเหนียว (Clay content,  $P_c$ ) และ ดัชนีความเหนียว (Plasticity index,  $PI$ ) ของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเกา พบว่าสัมพันธ์กันในรูปของสมการ Exponential โดยค่า Critical shear stress (Pa) ที่คำนวณจากค่า Clay content (%) มีความน่าเชื่อถือมากกว่า ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\tau_c = 1.474e^{0.042P_c}, R^2 = 0.999$$

5.1.8 การกำหนดแนวทางการป้องกันการพิบัติและการกัดเซาะของตลิ่งคลองอยู่ตะเกา พบว่า สำหรับ Composite riverbanks (Section 1, 3, 5) ควรใช้การปรับความลาด ร่วมกับการเรียงหินหน้าตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะในชั้นทรายเป็นแนวทางในการป้องกันตลิ่ง ใน ส่วนของ Cohesive riverbanks (Section 2, 4) ควรใช้การปรับความลาด เนื่องจากชั้นดินของตลิ่งมีความต้านทานต่อการกัดเซาะมากถ้าเทียบกับ Composite riverbanks

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดสอบตัวอย่างดินโดยวิธี Direct shear test ควรตัดแปลงให้ใช้ร่วมกันกับเครื่องมือตรวจวัด (Instrument) ต่างๆเช่น Load cell และ Displacement transducer เป็นต้น รวมทั้งการเก็บข้อมูลควรมีอุปกรณ์ประเภทตัวช่วยบันทึกข้อมูล (Data logger) ช่วยในการเก็บ บันทึกข้อมูล

5.2.2 การตรวจวัดสภาพตัดขวางของตลิ่งก่อนและหลังพิบัติ ควรใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดการกัดเซาะในสนามเช่น Erosion pin และ Erosion frame เป็นต้น เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

5.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งควรใช้โมเดลการไหลซึมของน้ำใต้ดิน ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยเฉพาะช่วงระยะเวลาที่ระดับน้ำในตลิ่งลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown)

5.2.4 ผลของกำระดับน้ำที่ลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ ซึ่งนำมากำหนดเป็นแนวทางในการลดระดับน้ำ มีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง ควรมีการตรวจสอบความถูกต้องในสนามประกอบกันไปด้วย เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

5.2.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\tau_c$  และปริมาณดินเหนียว ที่ประมาณได้จากวิธี Back analysis เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภานั้น ซึ่งการนำไปใช้กับดินสำหรับตลิ่งตำแหน่งอื่นควรคำนึงถึงเงื่อนไขเฉพาะ (Site – specific condition) ของตลิ่งแต่ละพื้นที่ด้วย

5.2.6 การพิจารณาเลือกใช้วิธีการใดๆ ในการป้องกันการพิบัติและการกัดเซาะของตลิ่ง จะต้องมีการศึกษาวิเคราะห์ทั้งข้อมูลทางวิศวกรรม ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมต่างๆ รวมถึงความเห็นของประชาชนในพื้นที่ด้วย ว่าแนวทางเลือกวิธีใดจะสามารถทำให้ลาดดินเกิดเสถียรภาพ คุ้มค่า ถูกต้องตามหลักวิชาการ เหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากที่สุด

## บรรณานุกรม

- นงลักษณ์ ไทโรเจียมอารีย์ (2547). เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บรรพต กุลสุวรรณ (2548). การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2541). วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, วรวัชร ต่อวิวัฒน์ และ บรรพต กุลสุวรรณ (2550). การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 - 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก.
- สันติ ไทยยีนวงษ์ (2550). การวิเคราะห์โอกาสเกิดแผ่นดินถล่มเนื่องจากปัจจัยที่ไม่คงที่ในจังหวัดภูเก็ต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2 - 4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ และ วรวัชร ต่อวิวัฒน์ (2550). การวิเคราะห์ค่า API วิกฤติเพื่อใช้ในการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. 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.
- Aitchison, G.D. (1965). Soil Properties Shear Strength and Consolidation. *Proceedings of the sixth International conference on Soil Mechanics. and Foundation Engineering* 3: 318-321
- Arulanandan, K., Gillogley, E. and Trully, R. (1980). Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils. Rep. No GL-80-5 . U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg. Miss.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5: 7-17.

- Brain, D. and Dobroslove, Z. (2004). Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(4): 362-372.
- Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S.W., and Kwak, K. (2001). Erosion function apparatus for scour rate predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(2): 105-113.
- Dillaha, T. A. and D. B. Beasley. (1983). Distributed parameter modeling of sediment movement and particle size distribution. *Transactions of the ASAE* 26(6): 1716-1722.
- Foster, G. R., Meyer, L. D. and Onstad, C. A. (1977). An erosion equation derived from basic erosion principles. *Transactions of the ASAE* 20(4): 678-682.
- Fredlund, D. G. and Krahn, J. (1977). Compaction of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical* 14: 429-439.
- 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. *Proceedings of the sixth Asian regional conference on Soil Mechanics. and Foundation Engineering* Vol.1. Toppan Printing Co. Singapore: 221-224.
- Graf, W. H. (1984). Hydraulics of sediment transport. *Water Resources Publications*. LLC. Highlands Ranch. Colo.
- Hagerty, D., Sharifounnasab, M. and Spoor, M. (1983). River bank erosion - A case study. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, vol. 20, No 4: 411-437.
- Hanson, G. J. (1989). Channel erosion study of two compacted soils. *Transactions of the ASAE* 32(2): 485-490.
- Hanson, G. J. (1991). Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways. *Transactions of the ASAE* 34(5): 2015-2020.
- Hanson, G. J. and Cook, K. R. (1997). Development of excess shear stress parameters for circular jet testing. *ASAE*. Paper No. 972227. St. Joseph. Mich.: ASAE.
- Hanson, G. J. and Cook, K. R. (1999). Determining erosion resistance of cohesive materials. *Proceedings of ASCE International Water Resources Engineering Conference*. CD-ROM. Seattle. Wash. ASCE.

- Hanson, G. J. and Simon, A. (2001). Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes* 15(1): 23-38.
- Hanson, G. J. and Cook, K. R. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied Engineering in Agriculture* 20(4): 455-462.
- Hollick, M (1976). Towards a routine test for the assessment of critical tractive forces of cohesive soils. *Transactions of the ASAE* 19 (6): 1076-1081.
- 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: 263-295.
- Hutchinson, D. L. (1972) Physics of erosion of cohesive soils. Ph.D. thesis. University of Auckland. New Zealand.
- Julian, J. P. and Torres, R. (2006). Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology* 76: 193-206.
- Kamphuis, J. W. and Hall, K.R. (1983). Cohesive material erosion by unidirectional current. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(1): 49-61.
- Karmaker, T. and Dutta, S. (2011). Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India. *Hydrological Processes* 25: 104-111.
- 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: 75-82.
- Langendoen, E. J. (2000). *CONCEPTS-CONservation Channel Evolution and Pollutant Transport System. Research Report 16*. US Department of Agriculture Agricultural Research Service National Sedimentation Laboratory. Oxford. MS.
- Morgenstern, N. R. and Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15: 79-83.
- Olson, R.E. and Langfelder, L.J. (1965). Pore-Water Pressure in Unsaturated Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE* 91 SM4.
- Osman, A. M. and Thorne, C. R. (1998). Riverbank stability analysis: I. Theory. *Journal of Hydraulic Engineering* 114 (2) : 134-150.

- Pollen-Bankhead, N and Simon, A. (2009). Enhanced application of root-reinforcement algorithms for bank-stability modeling. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(4): 471-480.
- Price, T. (2006). Warwick University Available source : <http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/SLOPES/SLOPES.HTML> as retrieved on 3 Oct 2006.
- Rinaldi, M. and Casagli, N. (1999). Stability of streambanks in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River. *Geomorphology* 26: 253-277.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S.E. and Langendoen, E.J. (1999). Streambank mechanics and the role of bank and near bank processes in incised channels. *Incised River Channels*. John Wiley & Sons. NY.
- Simon A., Curini A., Darby S.E., Langendoen E.J. (2000). Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology* 35: 183-217.
- Simon, A (2006). A model of streambank stability incorporating hydraulic erosion and the effects of riparian vegetation. *Proceeding of the eighth federal interagency sedimentation conference*. Reno, NV, USA, April 2-6, 2006.
- Smerdon, E. T., and R. P. Beasley. (1959). The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soil. Research Bulletin 715. University of Missouri. Ag. Exp. Station. Columbia, Mo.
- Springer, F. Jr. (1981). Influence of rapid drawdown events on river bank stability. Unpublished Master's of Engineering thesis. Department of Civil Engineering. University of Louisville. 108p.
- Stein, O. R., and D. D. Nett. (1997). Impinging jet calibration of excess shear sediment detachment parameters. *Transactions of the ASAE* 40(6): 1573-1580.
- Temple, D. M. (1985). Stability of grass-lined channels following mowing. *Transactions of the ASAE* 28(3): 750-754.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslide. *Application of Geology to Engineering Practice*. Barkey Volumn. Sidney Paige. Chairman. Geol. Soc. Am: 83-123.
- Terzaghi, K. And Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics and Engineering Practice*. John Wiley & Sons. New York. NY.

- Thoman, R. W. and Niezgod, S L. (2008). Determining Erodibility, Critical Shear Stress, and Allowable Discharge Estimates for Cohesive Channels: Case Study in the Powder River Basin of Wyoming. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(12): 1677-1687.
- Timothy D.Stark, Hangseok Choi and Sean McCone (2005). Drained Shear Strength Parameters for Analysis of Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE: 575-588.
- Wan, C.F. and Fell, R. (2004). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(4): 373-380.
- Wynn, T. M., Henderson, T. M. and Vaughan, D. H. (2008). Changes in streambank erodibility and critical shear stress due to subaerial processes along a headwater stream southwestern Virginia, USA. *Geomorphology* 97(1): 260-273.

ภาคผนวก. ก

ตัวอย่างการคำนวณค่าระดับน้ำโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backwater analysis)



การคำนวณค่าระดับน้ำที่จะแสดงเป็นตัวอย่างดังต่อไปนี้เป็นการคำนวณจากตลิ่งหน้าประตูระบายน้ำอุตะเกา ซึ่งทราบค่าระดับน้ำที่แน่นอนของตลิ่งตำแหน่งนี้แล้ว คำนวณกลับไปจนถึงตลิ่ง Section 2 ในการคำนวณต้องทราบพื้นที่หน้าตัดที่ระดับน้ำต่างๆ  $A(y)$ , เส้นขอบเปียกที่ระดับน้ำต่างๆ  $P(y)$  ซึ่งตลิ่งแต่ละตำแหน่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

$$\text{ปตร.อุตะเกา } A(y) = 7.3755y^2 + 74.194y + 25.818, R^2 = 0.9995$$

$$P(y) = 1.0855y^3 - 7.6642y^2 + 22.662y + 88.387, R^2 = 0.978$$

$$\text{Section 1 } A(y) = 1.7623y^2 + 10.664y - 3.1786, R^2 = 0.9999$$

$$P(y) = -0.0209y^3 + 0.3613y^2 + 2.4402y + 11.945, R^2 = 0.9767$$

$$\text{Section 2 } A(y) = 1.4578y^2 + 26.641y - 19.437, R^2 = 0.9997$$

$$P(y) = 0.3459y^3 - 5.5951y^2 + 33.387y + 16.134, R^2 = 0.998$$

จากการตรวจวัดสภาพตัดขวางของตลิ่งพบว่า ค่าระดับที่ท้องคลองของตลิ่งแต่ละตำแหน่งอยู่ที่ระดับ 0.64, -4.15, -1.55 เมตร รทก. ตามลำดับ พิจารณาตลิ่งหน้าปตร.อุตะเกา – Section 1, ที่อัตราการไหล  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  ไหลจาก Section 2 ไปสู่ปตร.อุตะเกา ในขณะนั้นตลิ่งหน้าปตร.อุตะเกามีระดับน้ำ ( $y$ ) เท่ากับ 2.205 เมตรจากท้องคลอง ดังนั้นค่า  $h_L$  สมการที่ 2.19 จะอยู่ในส่วนของพลังงานในตำแหน่งที่ 1

$$\text{จากสมการที่ 2.19 } H_1 = H_2, z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_L = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\text{ปตร.อุตะเกา } z_1 = 0.64 \text{ m}, y_1 = 2.205 \text{ m}, A_1 = 225.27 \text{ m}^2, P_1 = 112.73 \text{ m}$$

$$R_1 = \frac{A_1}{P_1} = 1.998 \text{ m}, V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{36}{225.27} = 0.16 \text{ m/s}$$

$$\text{Section 1 } \text{สมมติให้ } y_2 = 6.25 \text{ m}$$

$$z_2 = -4.15 \text{ m}, A_2 = 132.22 \text{ m}^2, P_2 = 36.21 \text{ m}, R_2 = \frac{A_2}{P_2} = 3.652 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{36}{132.22} = 0.272 \text{ m/s}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.2 } S_{f1} = \left( \frac{nV_1}{R_1^{2/3}} \right)^2, \text{ โดยสมมติให้ } n = 0.03$$

$$S_{f1} = \left( \frac{0.03 \times 0.16}{1.998^{2/3}} \right)^2 = 0.00001, S_{f2} = \left( \frac{0.03 \times 0.272}{3.652^{2/3}} \right)^2 = 0.00001$$

$$S_{f1} = \frac{0.00001 + 0.00001}{2} = 0.00001$$

$$h_L = S_f \Delta x, \Delta x = 1020 \text{ m}, h_L = 0.00001 \times 1020 = 0.01 \text{ m}$$

$$H_1 = 0.64 + 2.205 + \frac{0.16^2}{2 \times 9.81} + 0.01 = 2.856 \text{ m}$$

$$H_2 = -4.15 + 6.25 + \frac{0.272^2}{2 \times 9.81} = 2.104 \text{ m},$$

$$\Delta H = 2.856 - 2.104 = 0.752$$

จากการคำนวณโดยการสมมุติค่าระดับน้ำ ( $y_2$ ) ต่อไปจนได้ค่าพลังงานของทั้งสองจุดเท่ากันและคำนวณต่อไปจนถึงตลิ่งสถานีบ้านบางศาลา พบว่าค่าระดับน้ำที่ตลิ่งสถานีบ้านบางศาลาไม่เท่ากับที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า  $n$  ที่สมมุติไว้ข้างต้นจึงไม่ถูกต้อง จากการลองสมมุติค่า  $n$  ต่อไป พบว่าค่า  $n = 0.0236$  เป็นค่าที่ทำให้ระดับน้ำที่ตลิ่งสถานีบ้านบางศาลาเท่ากับที่เกิดขึ้นจริง

Section 1 สมมุติให้  $y_2 = 6.99 \text{ m}$

$$z_2 = -4.15 \text{ m}, A_2 = 157.68 \text{ m}^2, P_2 = 39.56 \text{ m}, R_2 = \frac{A_2}{P_2} = 3.986 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{36}{157.68} = 0.228 \text{ m/s}$$

$$S_{f_1} = \left( \frac{0.0236 \times 0.16}{1.998^{2/3}} \right)^2 = 0.0000056$$

$$S_{f_2} = \left( \frac{0.0236 \times 0.228}{3.986^{2/3}} \right)^2 = 0.0000046$$

$$S_f = \frac{0.0000056 + 0.0000046}{2} = 0.0000051$$

$$h_L = 0.0000051 \times 1020 = 0.0052 \text{ m}$$

$$H_1 = 0.64 + 2.205 + \frac{0.16^2}{2 \times 9.81} + 0.0052 = 2.851 \text{ m}$$

$$H_2 = -4.15 + 6.999 + \frac{0.228^2}{2 \times 9.81} = 2.852 \text{ m}$$

$$\Delta H = 2.852 - 2.851 = 0.001 \text{ OK}$$

Section 2 สมมุติให้  $y_3 = 4.416 \text{ m}$

$$z_3 = -1.55 \text{ m}, A_3 = 126.62 \text{ m}^2, P_3 = 84.246 \text{ m}, R_3 = \frac{A_3}{P_3} = 1.503 \text{ m}$$

$$V_3 = \frac{Q}{A_3} = \frac{36}{126.62} = 0.248 \text{ m/s}$$

$$S_{f_3} = \left( \frac{0.0236 \times 0.248}{1.503^{2/3}} \right)^2 = 0.000026$$

$$S_f = \frac{0.0000051 + 0.000026}{2} = 0.000015$$

$$h_L = 0.000015 \times 1178 = 0.018 \text{ m}$$

$$H_2 = 2.851 + 0.018 = 2.869 \text{ m}$$

$$H_3 = -1.55 + 4.416 + \frac{0.248^2}{2 \times 9.81} = 2.869 \text{ m}$$

$$\Delta H = 2.869 - 2.869 = 0 \quad \text{OK}$$

จากการคำนวณไปจนถึงตลิ่งสถานีบ้านบางศาลาพบว่า ค่าระดับน้ำของตลิ่งแต่ละตำแหน่งจากปตร.อุตะเภา ไปจนถึงตลิ่งสถานีบ้านบางศาลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  มีค่าเท่ากับ 2.205, 6.999, 4.416, 3.671, 3.584, 5.392, 3.877 เมตรจากห้องคลอง หรือ 2.845, 2.849, 2.866, 2.871, 2.884, 2.892, 3.120 เมตร รทก. และมีค่า  $S_f = 0.00002$  ดังแสดงในตารางที่ 4.12

**ภาคผนวก. ข**

**รายละเอียดโปรแกรม BSTEM Static Version 5.2**

โปรแกรม BSTEM 5.2 เป็นโปรแกรม Excel เวอร์ชันล่าสุดของ BSTEM program ที่พัฒนาโดย Andrew Simon, USDA ตั้งแต่ปี ค.ศ 2000 ถึงปัจจุบัน เป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ได้ทั้งการกัดเซาะ (Erosion analysis) และเสถียรภาพของตลิ่ง (Bank stability) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ได้แก่

1. Input Geometry sheet
2. Bank Material sheet
3. Bank Vegetation and Protection sheet
4. Bank Model Output sheet
5. Toe Model Output sheet มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**1. Input Geometry sheet**

**Input bank geometry and flow conditions**

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells. alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.

2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)

3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount; otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

**Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below**

Order A

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A	0.00	7.01	
B	2.00	7.01	
C	3.00	7.01	
D	4.00	7.01	
E	5.00	7.01	
F	6.00	7.01	
G	7.50	7.01	
H	7.66	6.53	
I	7.71	6.05	
J	7.76	5.51	
K	7.80	5.03	
L	7.85	4.55	
M	7.85	4.51	
N	7.96	4.01	
O	8.07	3.51	
P	8.21	2.99	
Q	8.59	2.43	
R	12.47	1.61	
S	14.47	1.50	
T	16.47	1.00	
U	18.97	0.88	
V	21.47	0.30	
W	26.47	0.00	

Shear emergence elev  a)

Shear surface angle  a)

**Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile**

Order B

a) input bank height (m)

b) input bank angle (°)

c) input bank toe length (m)

d) input bank toe angle (°)

input shear surface angle a)

**Bank layer thickness (m)**

Layer	Thickness (m)	Elevation of layer base (m)
Layer 1	1.50	5.51
Layer 2	1.00	4.51
Layer 3	1.00	3.51
Layer 4	1.00	2.51
Layer 5	2.51	0.00

b)

**Channel and flow parameters**

input reach length (m)

input reach slope (m/m)

input elevation of flow (m)

input duration of flow (hrs) c)

**View Bank Geometry**

d)

**Run Bank Geometry Macro**

e)

**Definition of points used in bank profile**

A - bank top (place beyond start of shear surface)  
 B - bank edge  
 C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)  
 Q - top of bank toe  
 R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)  
 V - case of bank toe  
 W - end point (typically mid point of channel)

**Notes:**  
 Bank profile may overhang. If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and C. The shear surface emergence point must not be on a horizontal section - the elevation of this point must be unique or an error message will display.

รูปที่ ข - 1 Input Geometry sheet

Input Geometry sheet เป็นหน้าต่างในการป้อนข้อมูลลักษณะทั่วไปของตลิ่งเช่น Geometry ของตลิ่ง ความหนาของชั้นดิน ระดับน้ำในตลิ่งรวมถึงไปถึงความลาดชันของลำน้ำ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ ข - 1)

- a) ข้อมูล Geometry ของตลิ่ง แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบประกอบไปด้วย
  - Option A – เป็นการวาด Geometry ของตลิ่ง โดยใช้พิกัด (Coordinate)
  - Option B – เป็นการวาด Geometry ของตลิ่ง โดยใช้ความสูงและความชันของตลิ่ง
- b) ข้อมูลความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น พิจารณาจากขอบบนของตลิ่ง (Top of bank)
- c) ข้อมูลการไหลของลำน้ำเพื่อคำนวณหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ ประกอบไปด้วย
  1. ความกว้างของตลิ่ง (Reach length)
  2. ความลาดชันของลำน้ำ (Reach slope)
  3. ระดับน้ำ (Elevation of flow)
  4. ระยะเวลาการไหลของน้ำ (Duration of flow)
- d) View Bank Geometry เป็นคำสั่งแสดง Profile ของตลิ่งจากการวาดใน a.
- e) Run Bank Geometry Macro เป็นคำสั่งในการเปลี่ยน Sheet ไปยัง Bank Material sheet เพื่อทำการป้อนข้อมูลคุณสมบัติของดินต่อไป

**2. Bank Material sheet**

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material						Bank Toe Mater			
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Own data				
Own data	Own data	Own data	Own data	Own data	Own data				
<p><b>Bank-toe material data tables.</b></p> <p>Material parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.</p>									
Material Descriptors		Bank Model Input Data				Toe Model Input Data			
Description	Mean grain size, $D_{50}$ (m)	Friction angle $\phi'$ (degrees)	Cohesion $c'$ (kPa)	Saturated unit weight $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\delta'$ (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)	$\tau_c$ (Pa)	$k$ (cm <sup>3</sup> /Ns)	
boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	498	0.004	
Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	124	0.009	
Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	11.0	0.030	
Coarse angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0	-	Coarse (0.71 mm) or		
Fine angular sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0	-	Fine (0.18 mm)		
Coarse rounded sand	-	30.0	3.0	18.0	15.0	-	Erodible (0.100 Pa),		
Fine rounded sand	-	25.0	10.0	18.0	15.0	-	Moderate (5.00 Pa), or		
Erodible silt	-	20.0	15.0	18.0	15.0	-	Resistant (50.0 Pa)		
Moderate silt	-	Own data layer 1		22.6	5.6	19.6	15.0	0.10	0.316
Resistant silt	-	Own data layer 2		27.6	4.3	19.0	15.0	0.10	0.316
Erodible soft clay	-	Own data layer 3		24.7	13.0	19.8	15.0	0.10	0.316
Resistant soft clay	-	Own data layer 4		24.7	13.0	19.8	15.0	0.10	0.316
Erodible stiff clay	-	Own data layer 5		24.7	13.0	19.8	15.0	0.10	0.316
Resistant stiff clay	-	Own data Bank Toe		24.7	13.0	19.8	15.0	0.10	0.316

รูปที่ ข - 2 Bank Material sheet

Bank Material sheet เป็นหน้าต่างในการป้อนค่าคุณสมบัติของดินริมตลิ่งประกอบไปด้วย คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน (Engineering properties) และคุณสมบัติทางด้านการกัดเซาะของดิน (Erosional properties) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ ข – 2)

- a) ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินประกอบไปด้วย มุมเสียดทานของเม็ดดิน (Friction angle,  $\phi'$ ) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion,  $c'$ ) หน่วยน้ำหนักของดิน (Unit weight,  $\gamma$ ) และมุมที่บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเนื่องจาก Matrix suction,  $\phi^b$
- b) ข้อมูลคุณสมบัติทางด้านการกัดเซาะของดินประกอบไปด้วยความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress,  $\tau_c$ ) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient,  $k_d$ )

**3. Bank Vegetation and Protection sheet**

Simulate the mechanical effects of *bank top* vegetation on bank stability using a root-reinforcement model

RipRoot (Pfen and Simon, 2001) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snapping of roots and the slipping of roots through the soil matrix, by determining the minimum scaled load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Vradovic (1977), Xu et al. (1979), and Vradovic and Cavessan (1981).

Protect the bank and/or bank-toe against hydraulic erosion by adding treatments (or select "own data" and add values below)

**Protection**

Bank Protection:  Bank Toe Protection:

**Bank and bank-toe protection data table**

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the write box.

Bank and Bank-Toe Protection Descriptors		
Protection type	Description	Permissible shear stress (Pa)
1	No protection	-
2	Coir fiber	105
3	Geotextile (synthetic)	144
4	Jute net	22
5	Large Woody Debris	192
6	Live fascine	100
7	Plant cuttings	17
8	Rip Rap (D <sub>50</sub> : 0.256 m)	204
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	Own Data	<input type="text"/>

**Run  
Root-Reinforcement  
Model**

Root-Reinforcement Model Output

List of Species  
Percent of Assemblage

Added cohesion due to roots, c,  kPa **a)**

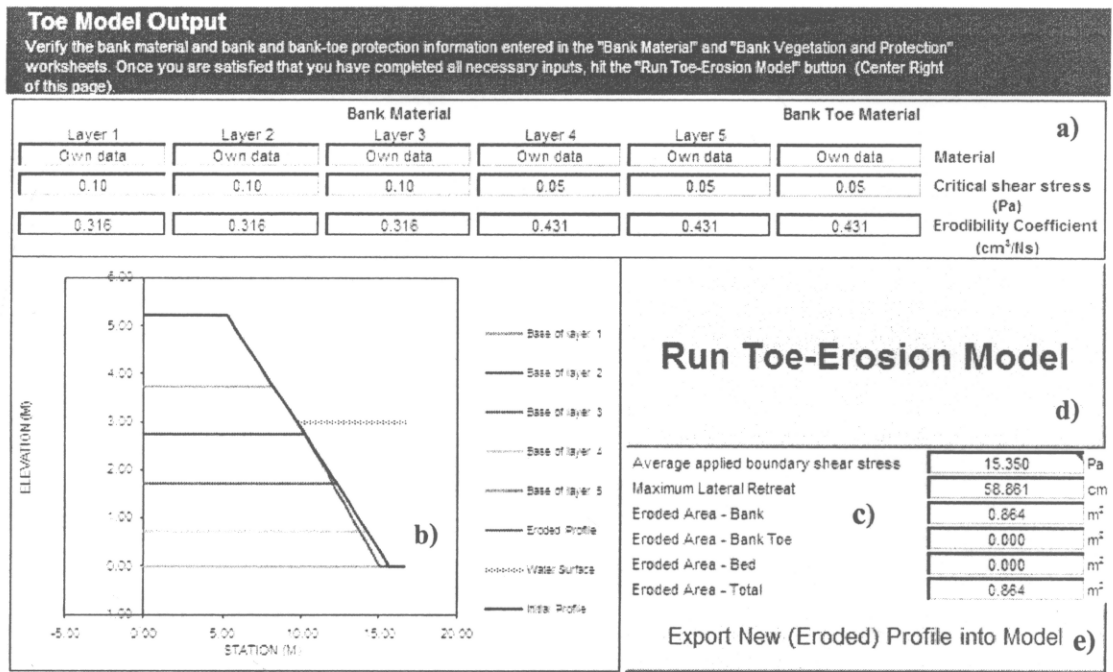
**b)**

รูปที่ ข – 3 Bank Vegetation and Protection sheet

Bank Vegetation and Protection sheet เป็นหน้าต่างในการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พืชในการเพิ่มเสถียรภาพของตลิ่ง แบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพของตลิ่งด้วยรากพืชและการเพิ่มความต้านทานการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำ มีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ ข – 3)

- a) การเพิ่มเสถียรภาพของตลิ่งด้วยรากพืช เป็นการเพิ่มกำลังของดินที่ขอบบนของตลิ่งโดยใช้โมเดลของรากพืช (Root-reinforcement model) ขึ้นอยู่กับพืชแต่ละชนิด
- b) การเพิ่มความต้านทานการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำ เป็นการป้องกันการกัดเซาะที่ผิวตลิ่ง

## 4. Toe Model Output sheet



รูปที่ ข - 4 Toe Model Output sheet

Toe Model Output sheet เป็นหน้าต่างที่แสดงผลจากการวิเคราะห์การกัดเซาะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ ข - 4)

- a) แสดงข้อมูลคุณสมบัติของดินทางด้านการกัดเซาะ จาก Bank Material sheet
- b) แสดงผลการวิเคราะห์การกัดเซาะ อยู่ในรูปแบบของภาพตัดขวางของตลิ่งทั้งก่อนและหลังการวิเคราะห์การกัดเซาะ
- c) แสดงผลการวิเคราะห์การกัดเซาะ อยู่ในรูปแบบของตัวเลข ประกอบไปด้วย
  1. ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ  
(Average applied boundary shear stress)
  2. ระยะการกัดเซาะสูงสุด (Maximum Lateral Retreat)
  3. พื้นที่ของตลิ่งที่ถูกกัดเซาะ (Eroded Area - Bank)
  4. พื้นที่ของตีนตลิ่งที่ถูกกัดเซาะ (Eroded Area - Bank Toe)
  5. พื้นที่ของฐานตลิ่งที่ถูกกัดเซาะ (Eroded Area - Bed)
  6. พื้นที่ของตลิ่งทั้งหมดที่ถูกกัดเซาะ (Eroded Area - Total)
- d) Run Toe-Erosion Model เป็นคำสั่งในการวิเคราะห์การกัดเซาะ

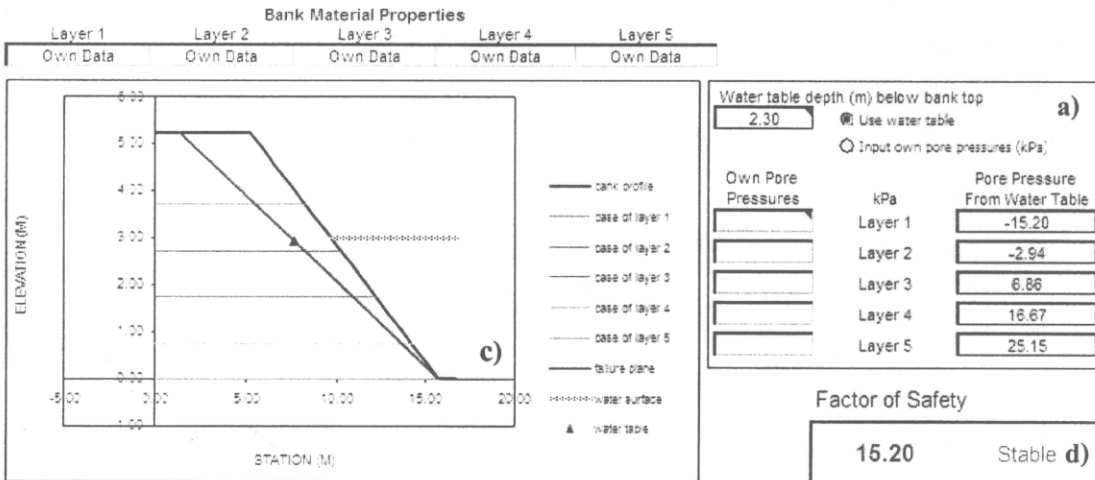


e) Export New (Eroded) Profile into Model เป็นคำสั่งในการ Update profile ที่ถูกกัดเซาะไปยัง Model เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

## 5. Bank Model Output sheet

### Bank model output

Verify the bank material and bank and bank-toe protection information entered in the "Bank Material" and "Bank Vegetation and Protection" worksheets. Once you are satisfied that you have completed all necessary inputs, hit the "Run Bank-Stability Model" button.



### Run Bank-Stability Model **b)**

รูปที่ ข – 5 Bank Model Output sheet

Bank Model Output sheet เป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงผลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ ข – 5)

- a) ข้อมูลของแรงดันน้ำในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ
  1. การใช้ระดับน้ำใต้ดิน (Water table) ในการคำนวณแรงดันน้ำ ซึ่งแรงดันน้ำจะเป็นแบบ Hydrostatic
  2. การใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในสนาม
- b) Run Bank-Stability Model เป็นคำสั่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง
- c) แสดงลักษณะการพิบัติของตลิ่ง
- d) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)

## ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการประเมินค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress,  $\tau_c$ ) โดย  
วิธี Back analysis ร่วมกับโปรแกรม BSTEM 5.2

ตัวอย่างการประเมินค่า  $\tau_c$  ในภาคผนวกนี้ แสดงเฉพาะการประเมินค่า  $\tau_c$  ของ Section 4 จากการสำรวจในสนามพบว่าตลิ่ง Section 2 มีการพิบัติแบบ Planar failure ระยะพิบัติเท่ากับ 3.2 เมตร จากขอบตลิ่งเดิม มุมพิบัติเท่ากับ 31.13 องศา จุดที่เริ่มปรากฏการพิบัติอยู่ที่ระดับ 2.7 เมตร จากท้องคลอง (2.00 เมตร รทก.) ความลึกของ Tension crack เท่ากับ 1.30 เมตร

เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น ผู้เขียนขอเริ่มต้นจากผลการวิเคราะห์บางส่วนคือ การวิเคราะห์พบว่า ตลิ่ง Section 4 จะเกิดการพิบัติเมื่อระดับน้ำลดลงจากระดับน้ำเต็มตลิ่ง 0.641 เมตร หรือระดับ 5.48 เมตร จากท้องคลอง (4.78 m. MSL) ดังนั้นในการประเมินค่า  $\tau_c$  ต้องทำการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่ง ให้ได้ Eroded profile ที่ตรงกับ Profile ของตลิ่งที่สำรวจในสนาม (Measured eroded profile) ซึ่งการประเมินค่า  $\tau_c$  โดยวิธี Back analysis ร่วมกับโปรแกรม BSTEM 5.2 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ป้อนค่าข้อมูล Geometry ของตลิ่งพร้อมทั้งระบุนความหนาของชั้นดิน (a และ b ตามลำดับ) ใน Input Geometry sheet ดังแสดงในรูปที่ ก - 1 และใช้คำสั่ง Run Bank Geometry Macro เพื่อไปยัง Bank Material sheet ต่อไป

**Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below**

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A	0.00	8.12	
B	2.00	8.12	
C	3.00	8.12	
D	4.00	8.12	
E	5.00	8.12	
F	8.00	8.12	
G	8.80	8.12	
H	7.80	8.12	
I	8.40	8.12	
J	9.20	8.12	
K	9.33	4.81	
L	9.20	6.12	
M	9.29	8.37	
N	9.38	4.20	
O	9.51	3.82	
P	9.55	3.00	
Q	9.64	2.70	
R	10.82	1.90	
S	12.00	1.00	
T	14.07	0.64	
U	15.32	0.48	
V	17.82	0.35	
W	22.82	0.00	

Shear emergence elev. 2.70  
Shear surface angle 31.13

**Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile**

Option a) Input bank height (m)  
Option b) Input bank angle (°)  
Option c) Input bank toe length (m)  
Option d) Input bank toe angle (°)  
Input shear surface angle

**Bank layer thickness (m)**

Layer	Thickness (m)	Elevation of layer base (m)
Layer 1	1.50	4.82
Layer 2	1.00	3.82
Layer 3	1.00	2.82
Layer 4	1.00	1.82
Layer 5	1.62	0.00

**Channel and flow parameters**

Input reach length (m): 1  
Input reach slope (m/m): 0.000256  
Input elevation of flow (m): 5.48  
Input duration of flow (hrs): 8

**View Bank Geometry**

**Run Bank Geometry Macro**

รูปที่ ก - 1 ข้อมูล Geometry ของตลิ่ง

2. ป้อนค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  เริ่มต้นตลอดชั้นดินใน Bank Material sheet (Toe Model Input data) ดังแสดงในรูปที่ ค-2 พร้อมทั้งกลับไปยัง Input Geometry sheet เพื่อป้อนค่าอื่นๆต่อไป

Material Descriptors			Toe Model Input Data	
Bank material type	Description	Mean grain size, $D_{50}$ (m)	$\tau_c$ (Pa)	$k$ ( $\text{cm}^3/\text{Ns}$ )
1	Boulders	0.512	498	0.004
2	Cobbles	0.128	124	0.009
3	Gravel	0.0113	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	Coarse (0.71 mm) or Fine (0.18 mm)	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035		
6a, 6b and 6c	Silt	-	Erodible (0.100 Pa), Moderate (5.00 Pa), or Resistant (50.0 Pa)	
7a, 7b and 7c	Soft clay	-		
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-		
9	Own data layer 1		1.66	0.078
	Own data layer 2		1.68	0.077
	Own data layer 3		1.46	0.083
	Own data layer 4		1.15	0.093
	Own data layer 5		1.15	0.093
	Own data Bank Toe		1.15	0.093

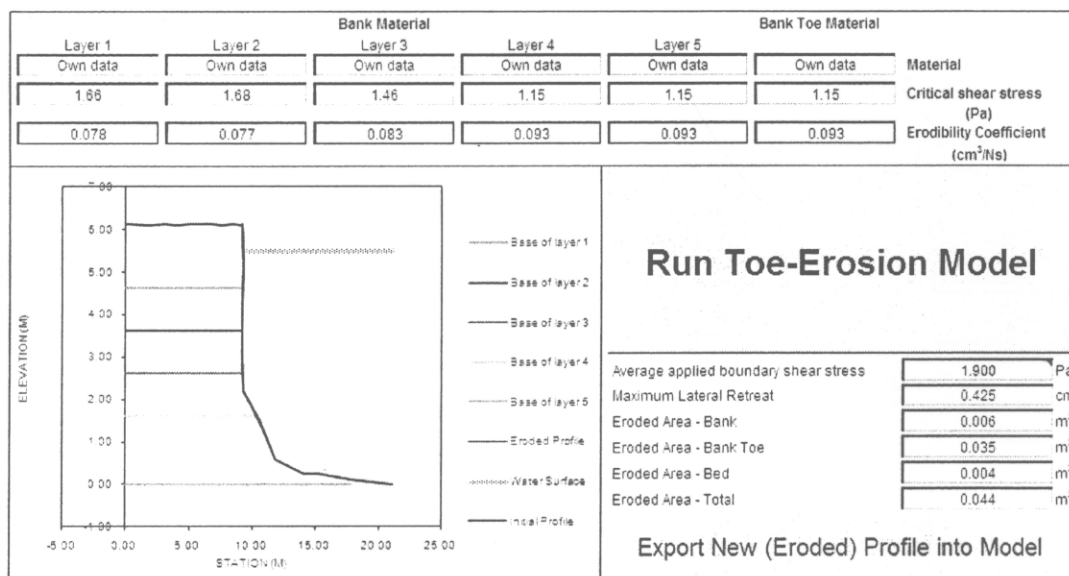
รูปที่ ค-2 ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ของชั้นดิน

3. ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของน้ำ เพื่อคำนวณ  $\tau_o$  เช่น ค่าความลาดชันท้องคลอง ค่าระดับน้ำ และระยะเวลาการไหลของน้ำ ใน Input Geometry sheet (Channel and flow parameters) ดังแสดงในรูปที่ ค-3 พร้อมทั้งใช้คำสั่ง Run Bank Geometry Macro เพื่อ Update ข้อมูลและไปยัง Toe Model Output sheet ต่อไป

Channel and flow parameters	
1	Input reach length (m)
0.00007	Input reach slope (m/m)
5.48	Input elevation of flow (m)
8	Input duration of flow (hrs)

รูปที่ ค-3 ข้อมูลการไหลของน้ำ

4. ใช้คำสั่ง Run Toe - Erosion Model เพื่อทำการวิเคราะห์การกัดเซาะ หลังจากนั้นทำการ Update ข้อมูล Eroded profile ที่ได้จากการคำนวณ นำไปแทนที่ Initial profile เพื่อทำการวิเคราะห์การกัดเซาะต่อไป จากการวิเคราะห์จนกระทั่งถึงค่าระดับน้ำที่ทำให้ตลิ่งพิบัติ ทำให้ได้ Profile ของตลิ่งดังแสดงในภาพรูปที่ ค-4



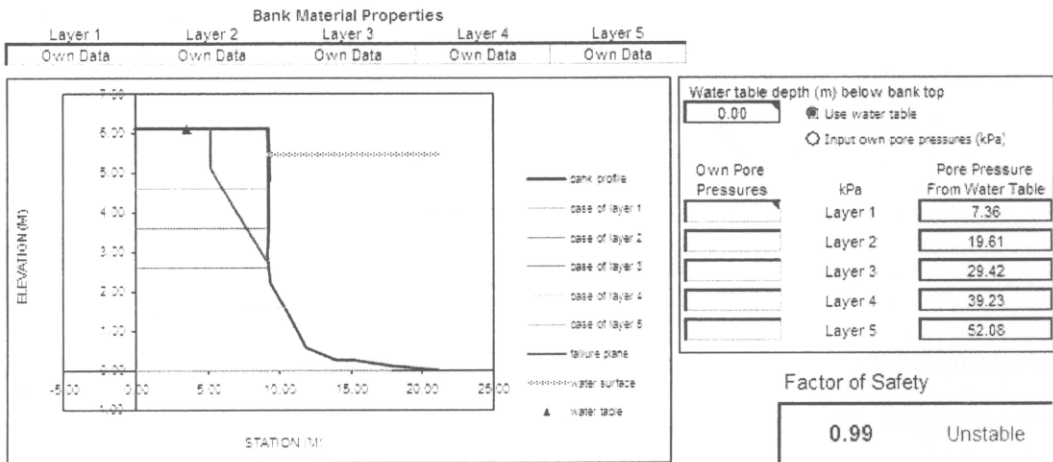
รูปที่ ค – 4 ผลการวิเคราะห์การกัดเซาะ

5. เมื่อได้ Profile ที่ระดับน้ำขณะตลิ่งพิบัติแล้ว ทำการป้อนข้อมูล Engineering properties ของชั้นดินแต่ละชั้นเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ ค – 5

Material Descriptors			Bank Model Input Data				
Bank material type	Description	Mean grain size, $D_{50}$ (m)	Friction angle $\phi'$ (degrees)	Cohesion $c'$ (kPa)	Saturated unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^b$ (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-
4a and 4b	Angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0	-
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0	-
6a, 6b and 6c	Silt	-	30.0	3.0	18.0	15.0	-
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.0	10.0	18.0	15.0	-
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	20.0	15.0	18.0	15.0	-
9	Own data layer 1		24.6	4.0	19.3		
	Own data layer 2		15.5	2.6	19.1		
	Own data layer 3		27.7	7.0	20.1		
	Own data layer 4		27.7	7.0	20.1		
	Own data layer 5		27.7	7.0	20.1		
	Own data Bank Toe						

รูปที่ ค – 5 ข้อมูล Engineering properties ของชั้นดิน

6. ใช้คำสั่ง Run Bank – Stability Model เพื่อทำการตรวจสอบเสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ ค – 6 จากรูป อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งประมาณ 1 แต่ระยะการกัดเซาะในกรณีที่ใช้ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  เริ่มต้น พบว่าไม่เท่ากับระยะที่เกิดขึ้นในสนาม (Eroded profile  $\neq$  Measured eroded profile) ดังนั้น ต้องทำการ Trial  $\tau_c$  และ  $k_d$  ใหม่เพื่อให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

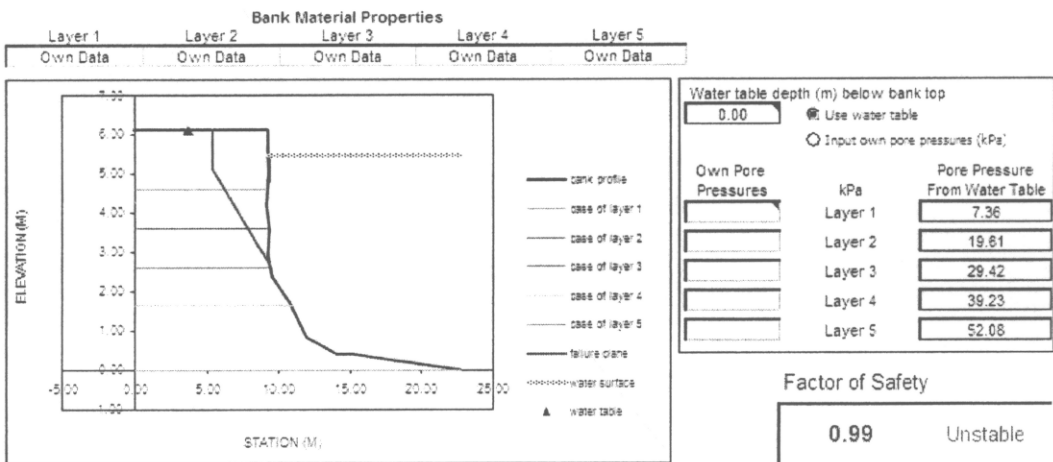


**Run Bank-Stability Model**

รูปที่ ค - 6 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของตลิ่งเมื่อใช้ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  เริ่มต้นคำนวณการกัดเซาะ

ผลการ Trial  $\tau_c$  และ  $k_d$  ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.19 ซึ่งตลิ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่

ค - 7



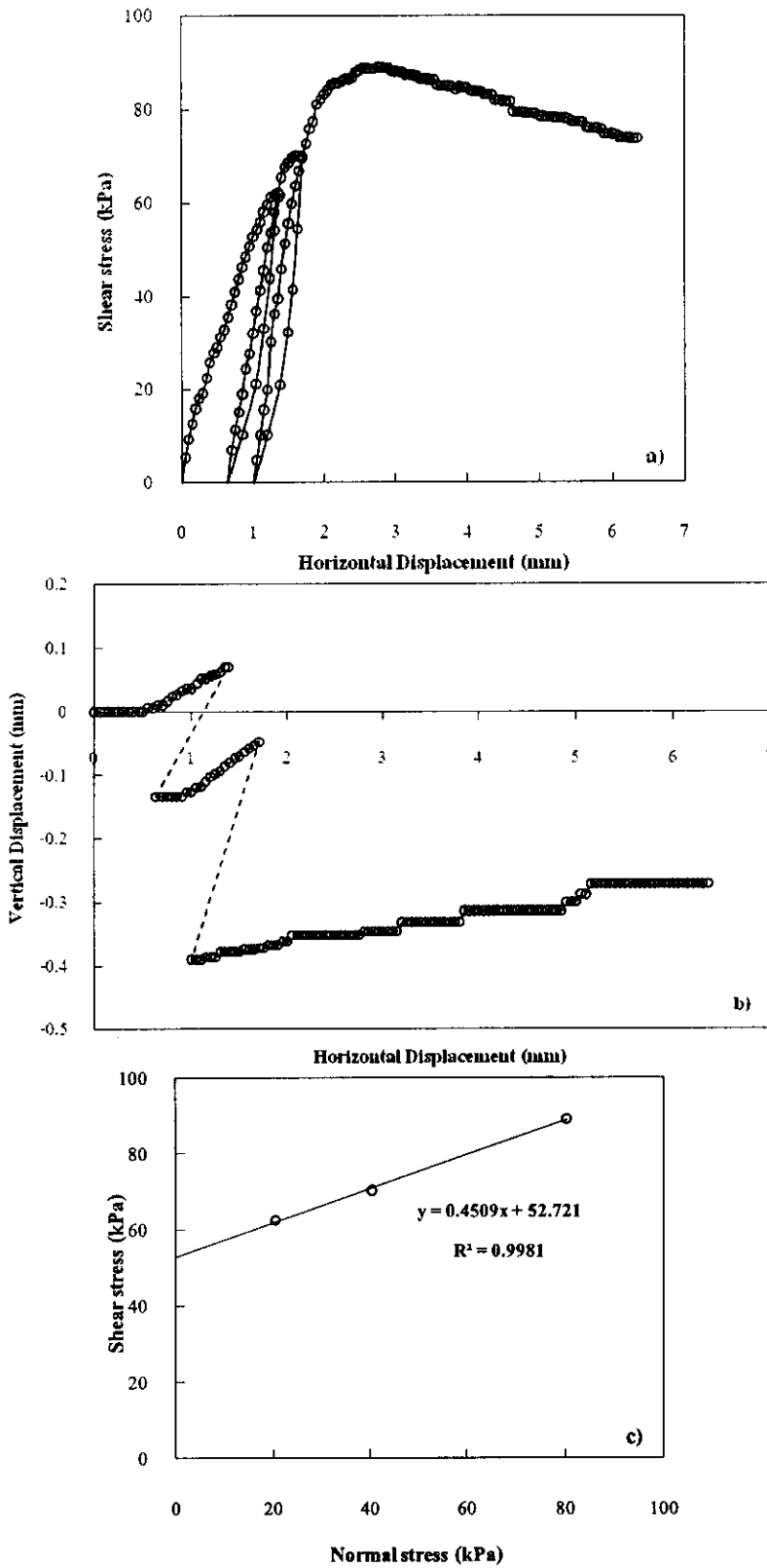
**Run Bank-Stability Model**

รูปที่ ค - 7 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของตลิ่งเมื่อใช้ค่า  $\tau_c$  และ  $k_d$  ที่เหมาะสม คำนวณการกัด

เซาะ

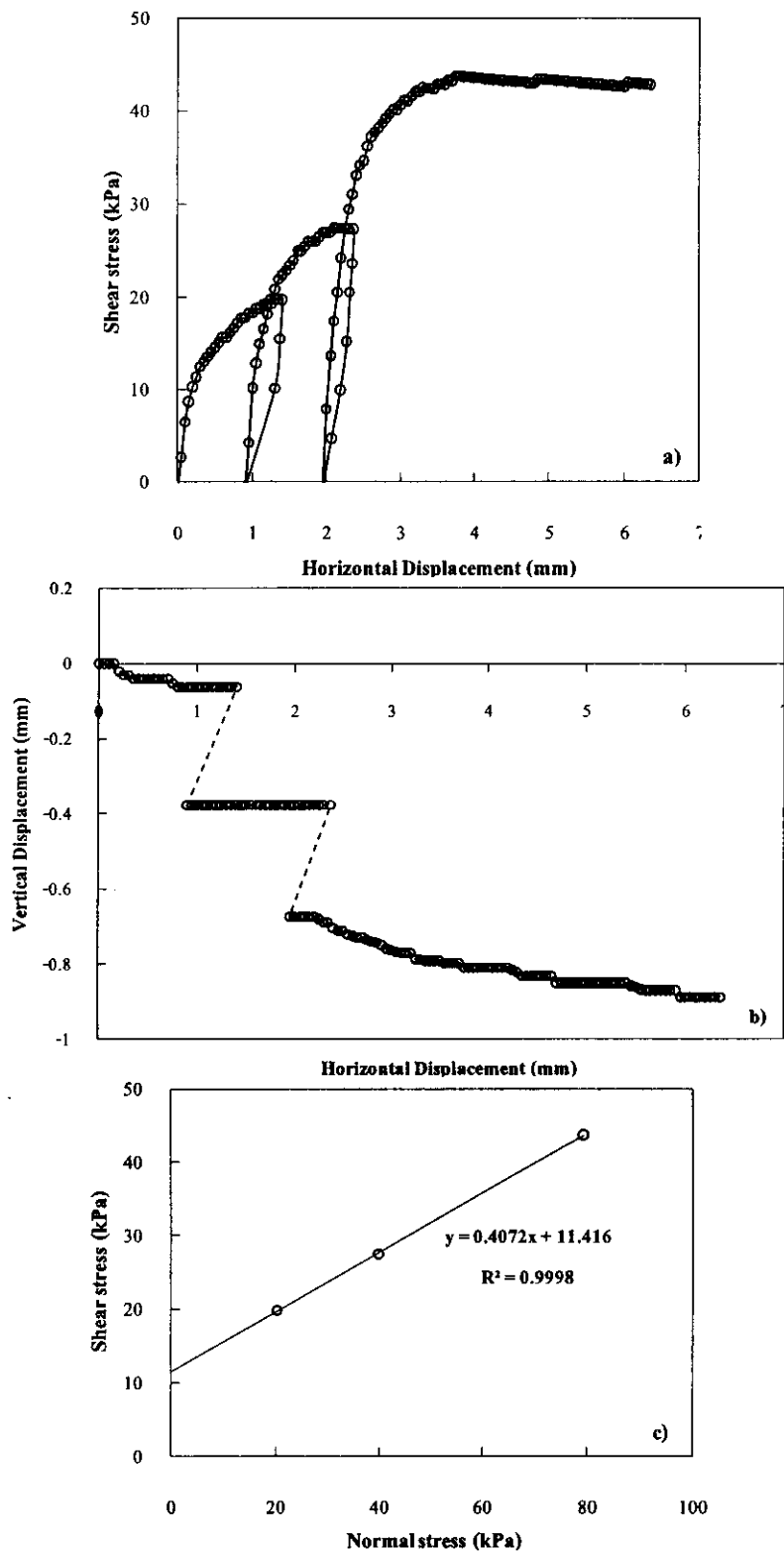
## ภาคผนวก ง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress – Horizontal displacement, Vertical displacement – Horizontal displacement, Shear stress – Normal stress จากการทดสอบ Multi – stage direct shear test. ของตัวอย่างดินริมตลิ่ง 5 Sections

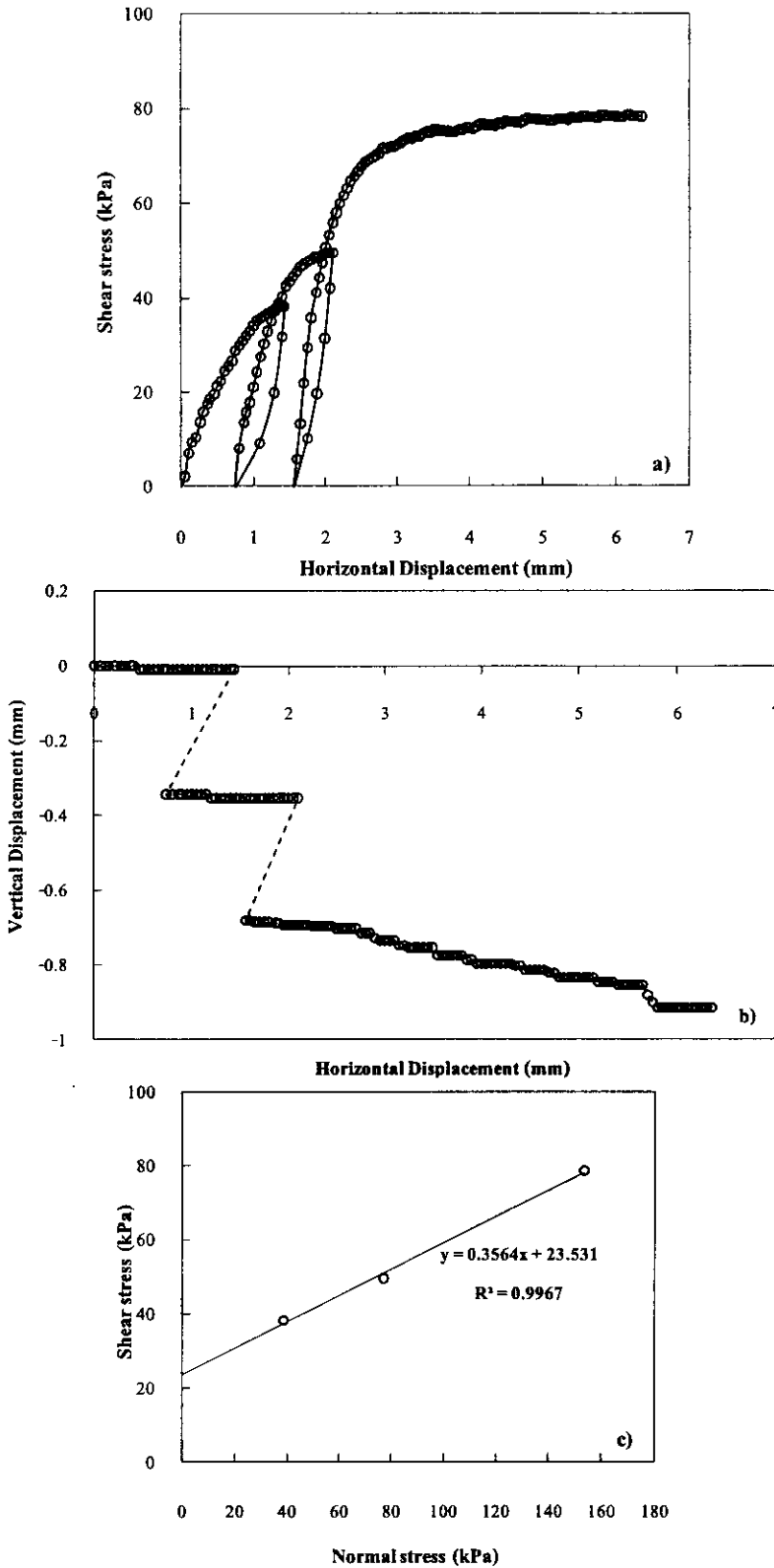


รูปที่ ๑ - 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ

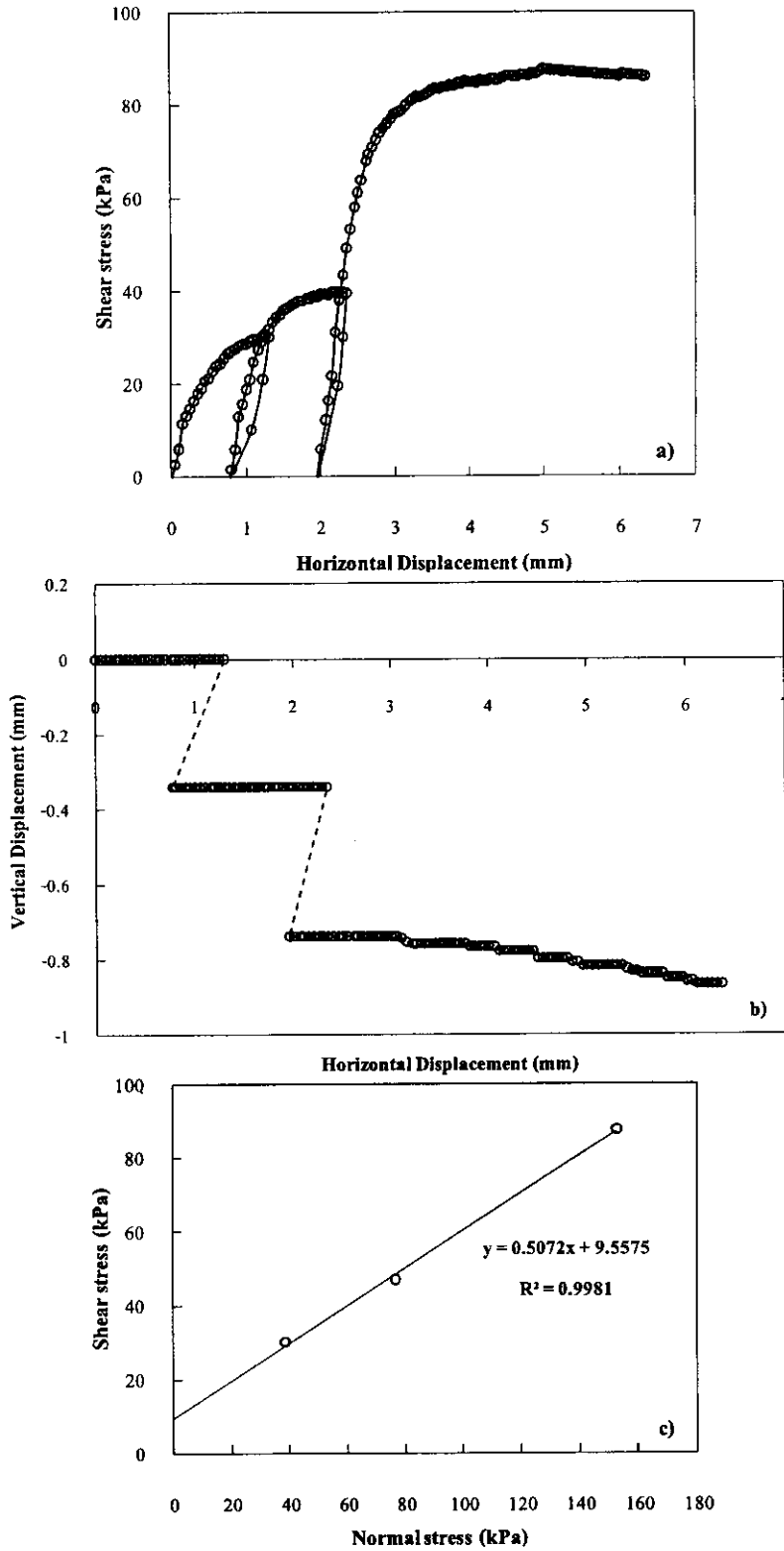




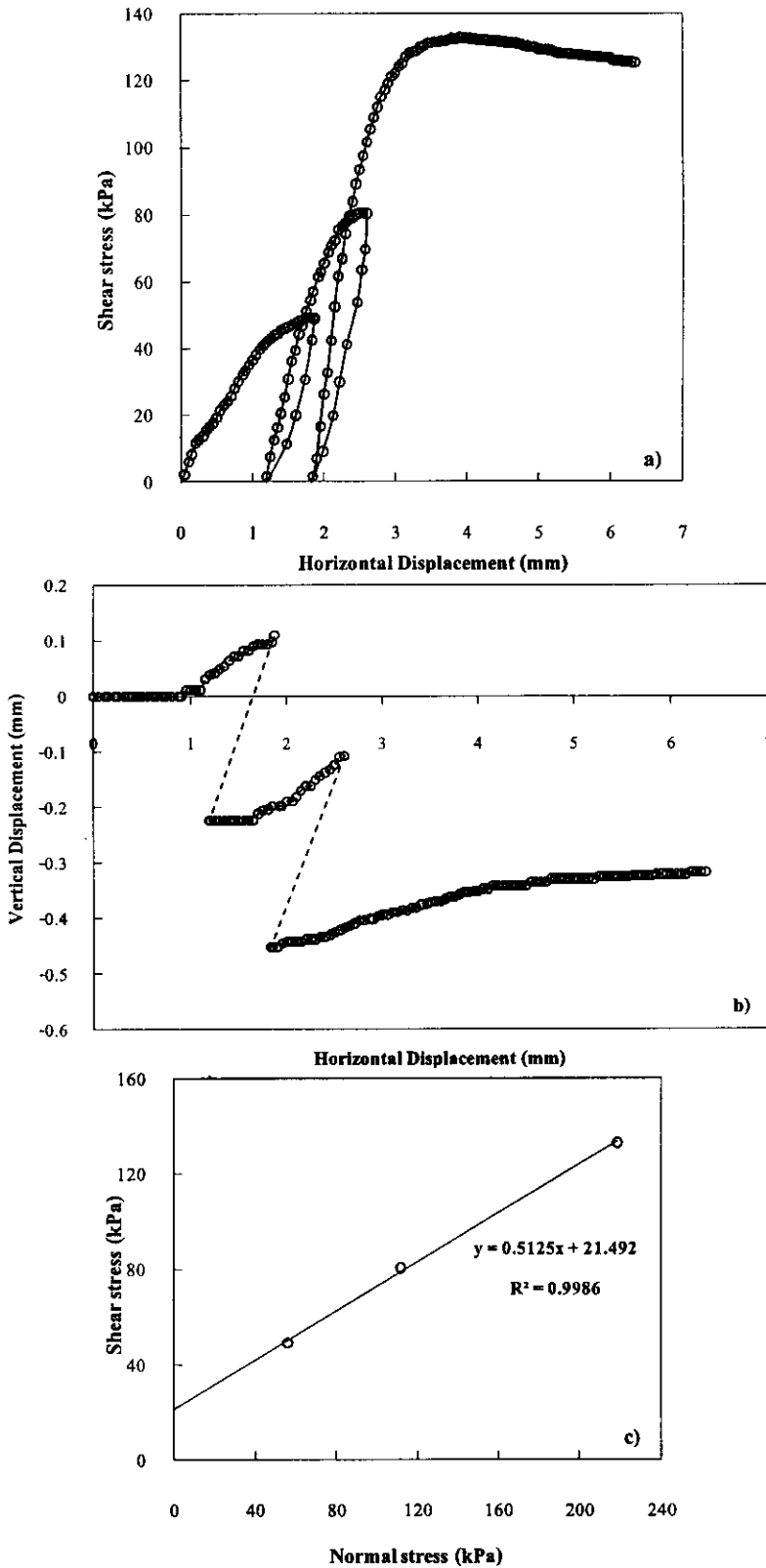
รูปที่ ๒ - 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



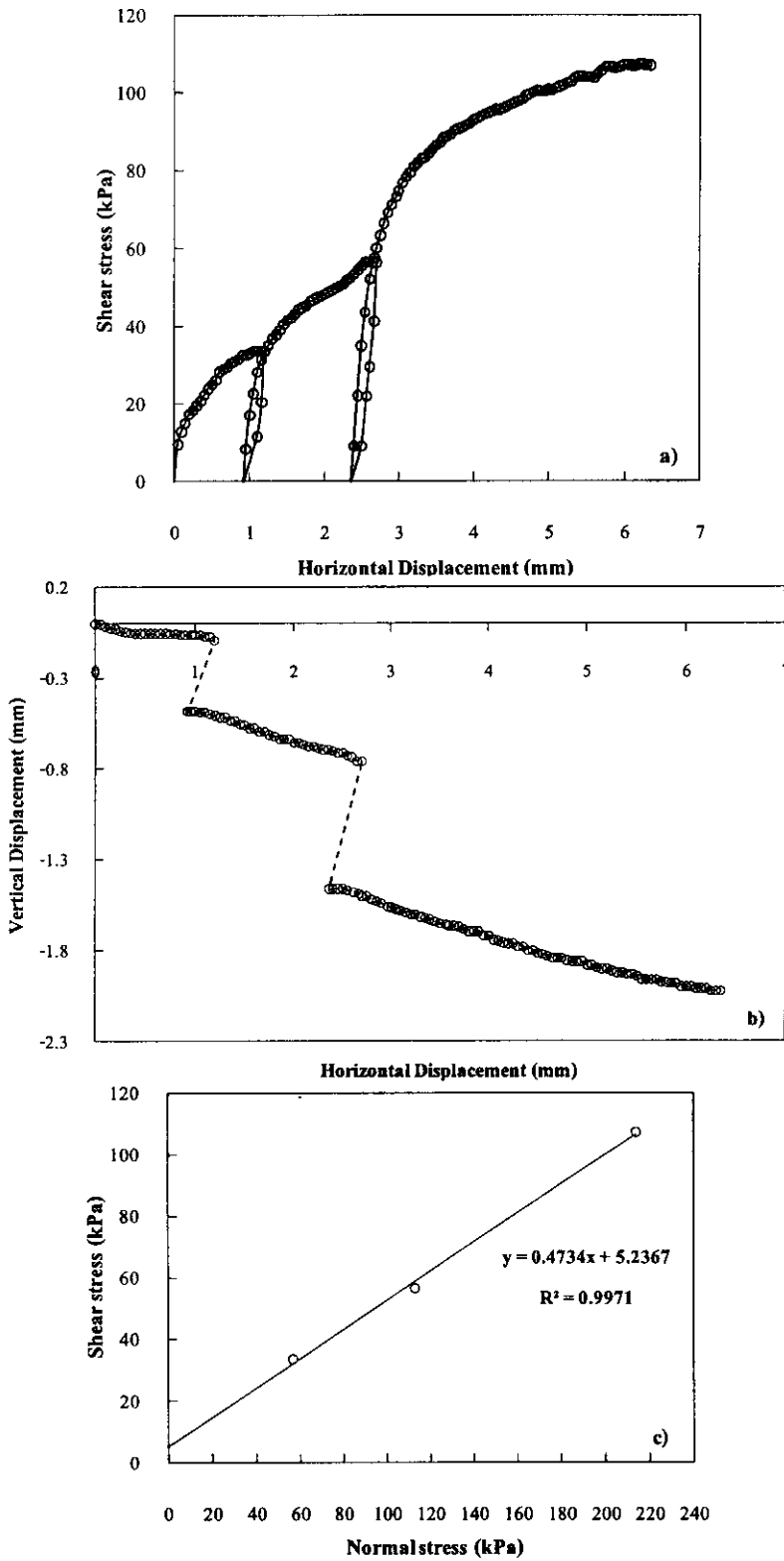
รูปที่ ง-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



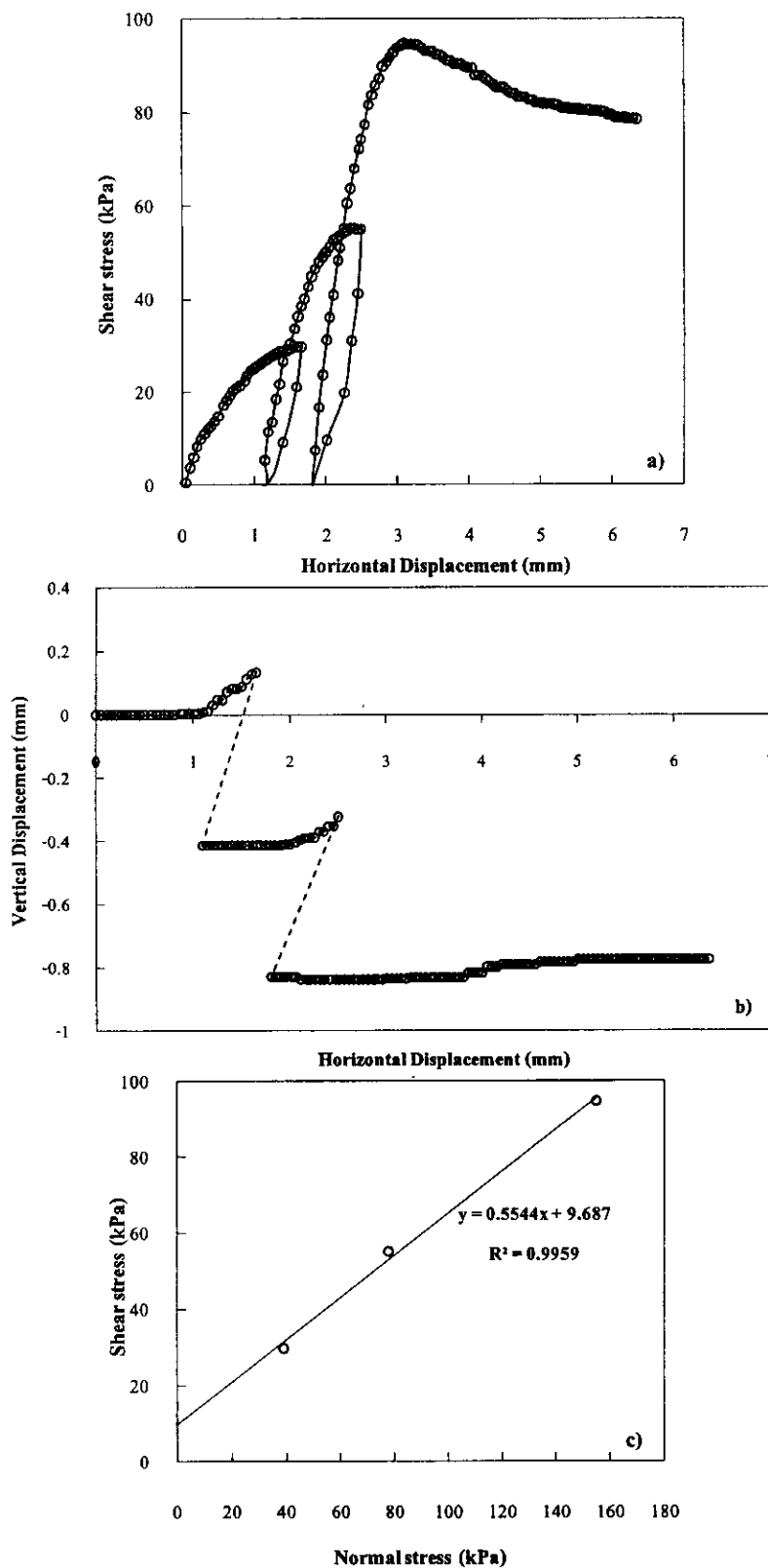
รูปที่ ๔ - 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



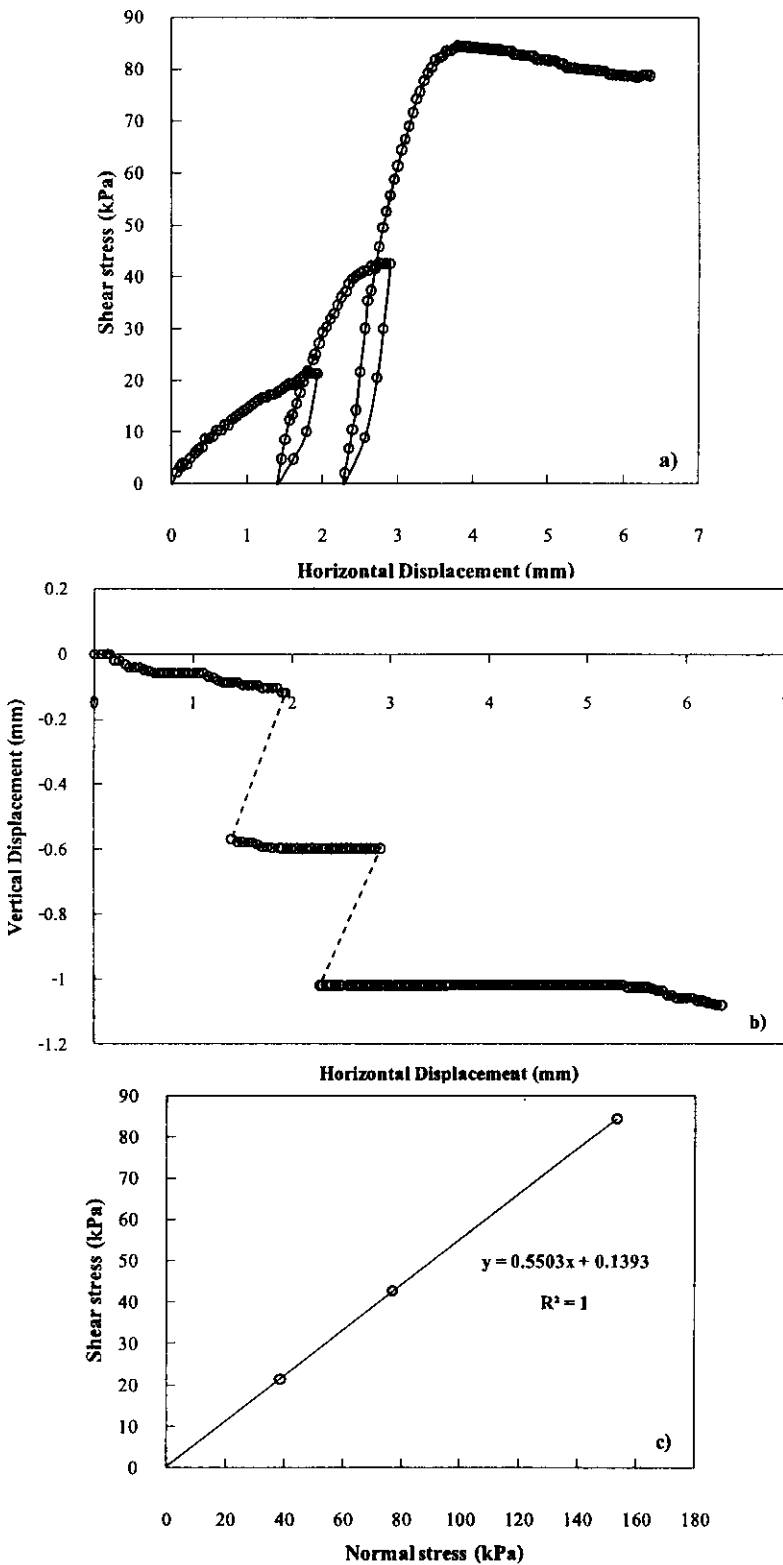
รูปที่ 5 – 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



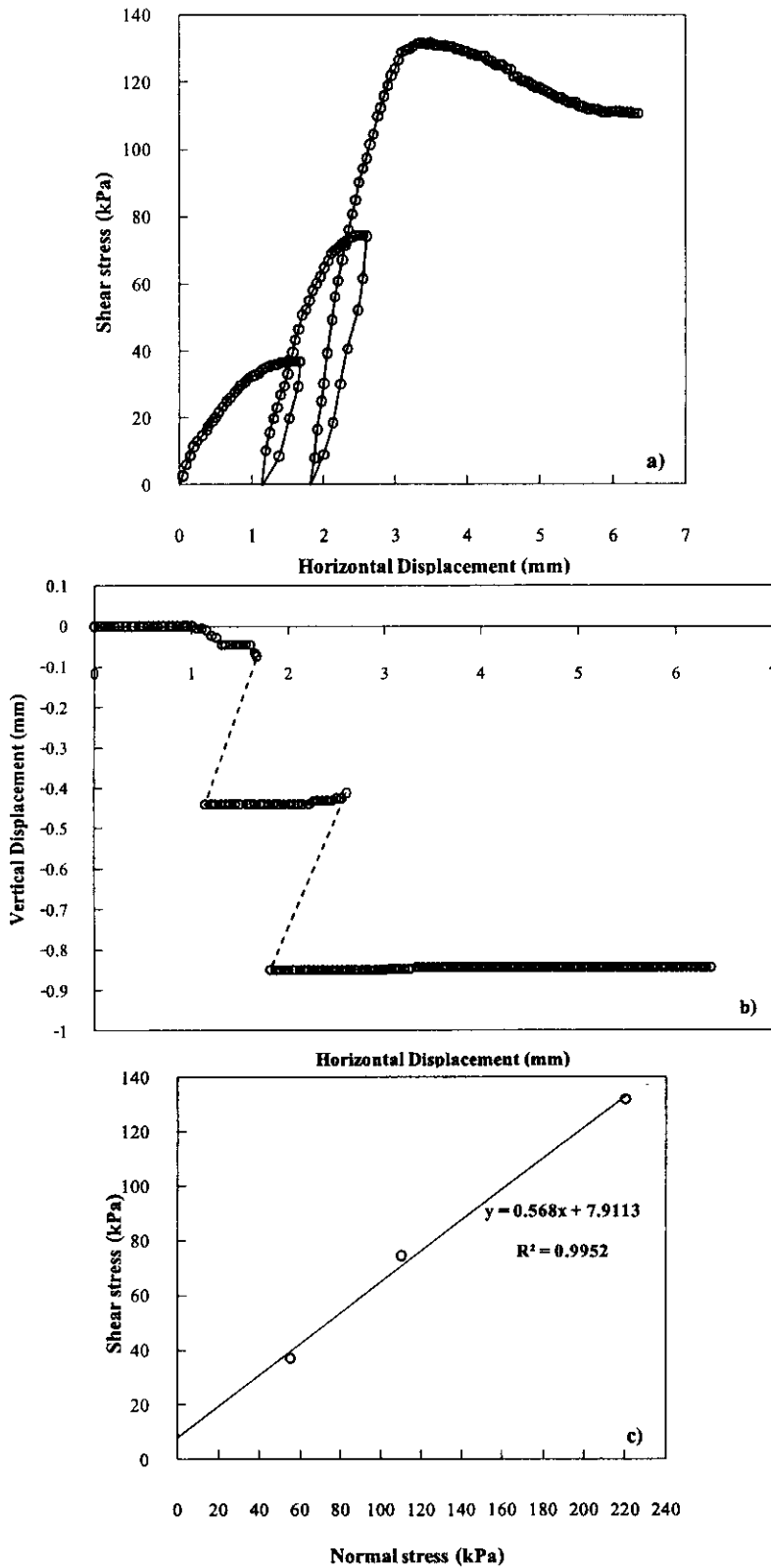
รูปที่ ๖ – 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ ๗ - 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 4 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ

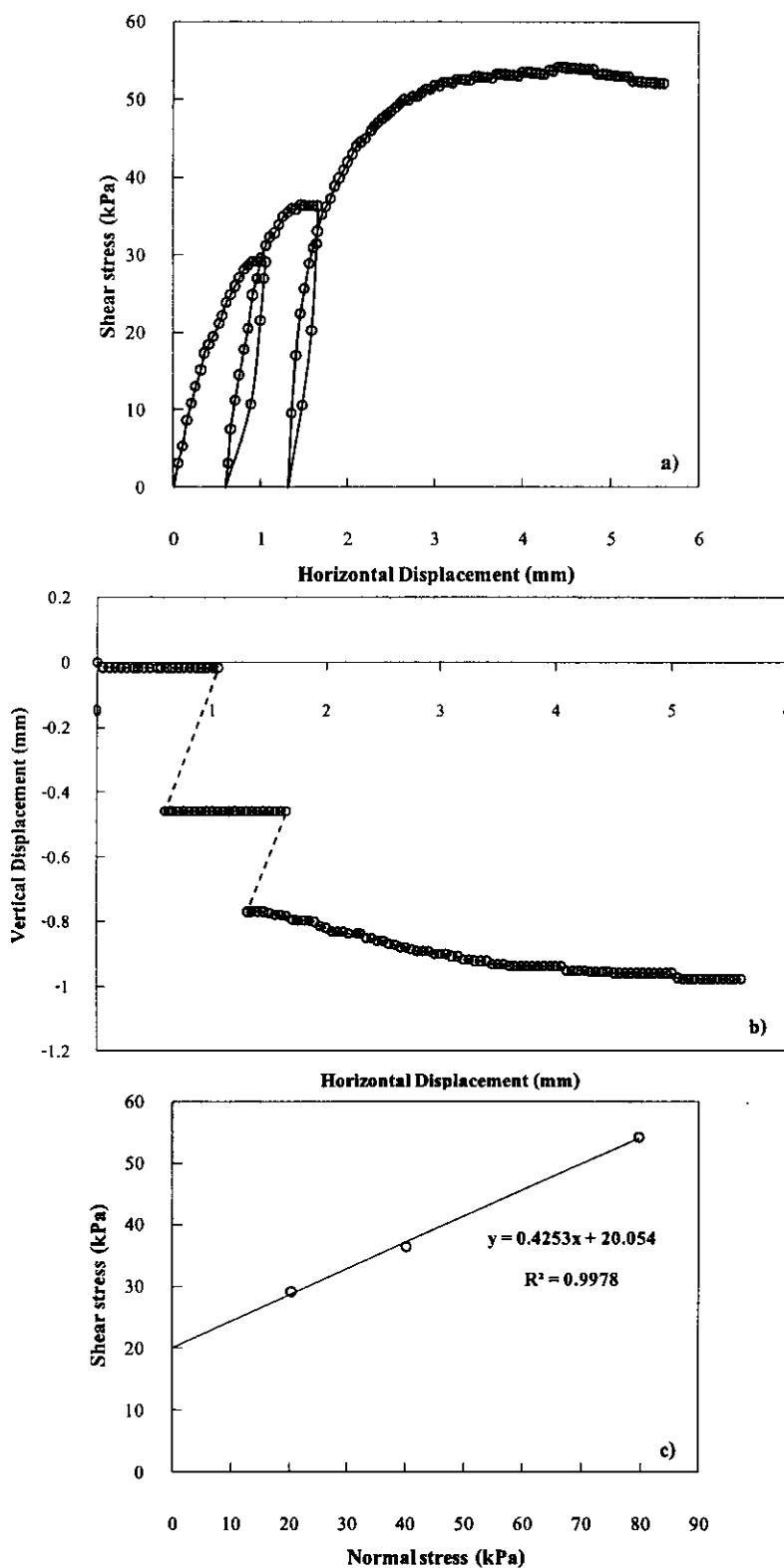


รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 4 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

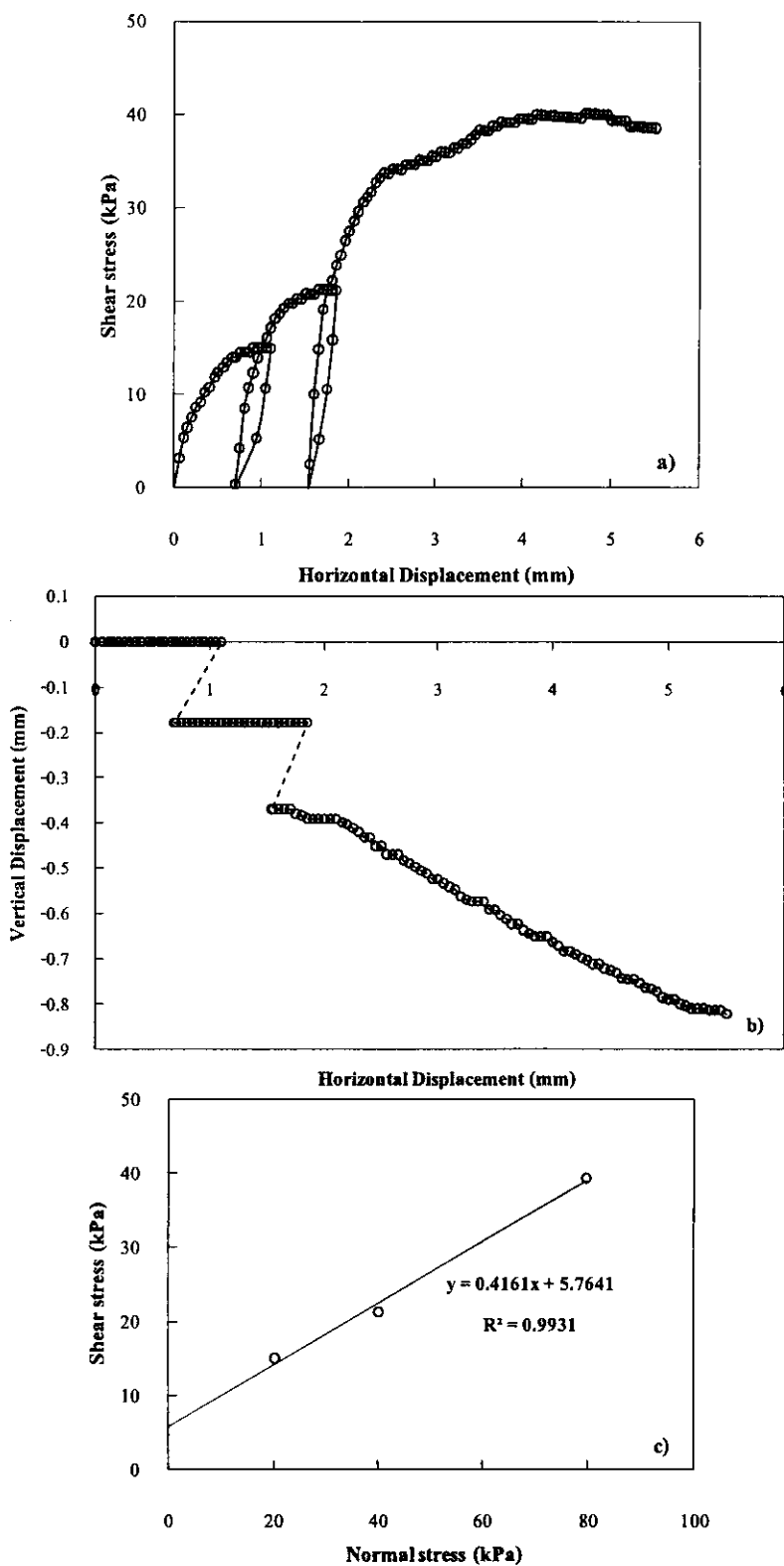


รูปที่ 9 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 1 ความลึก 5 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ (อิ่มตัวด้วยน้ำ)

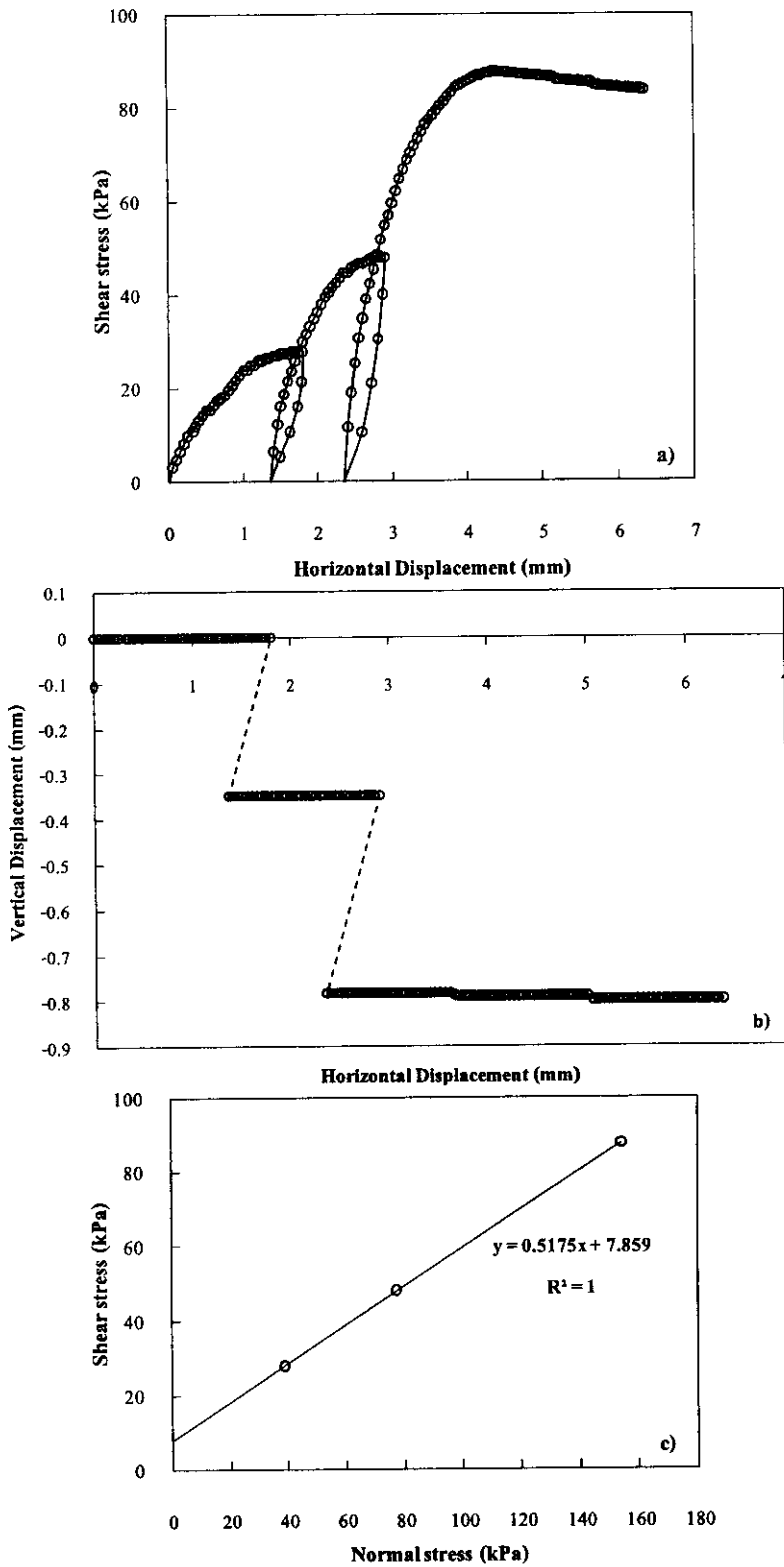




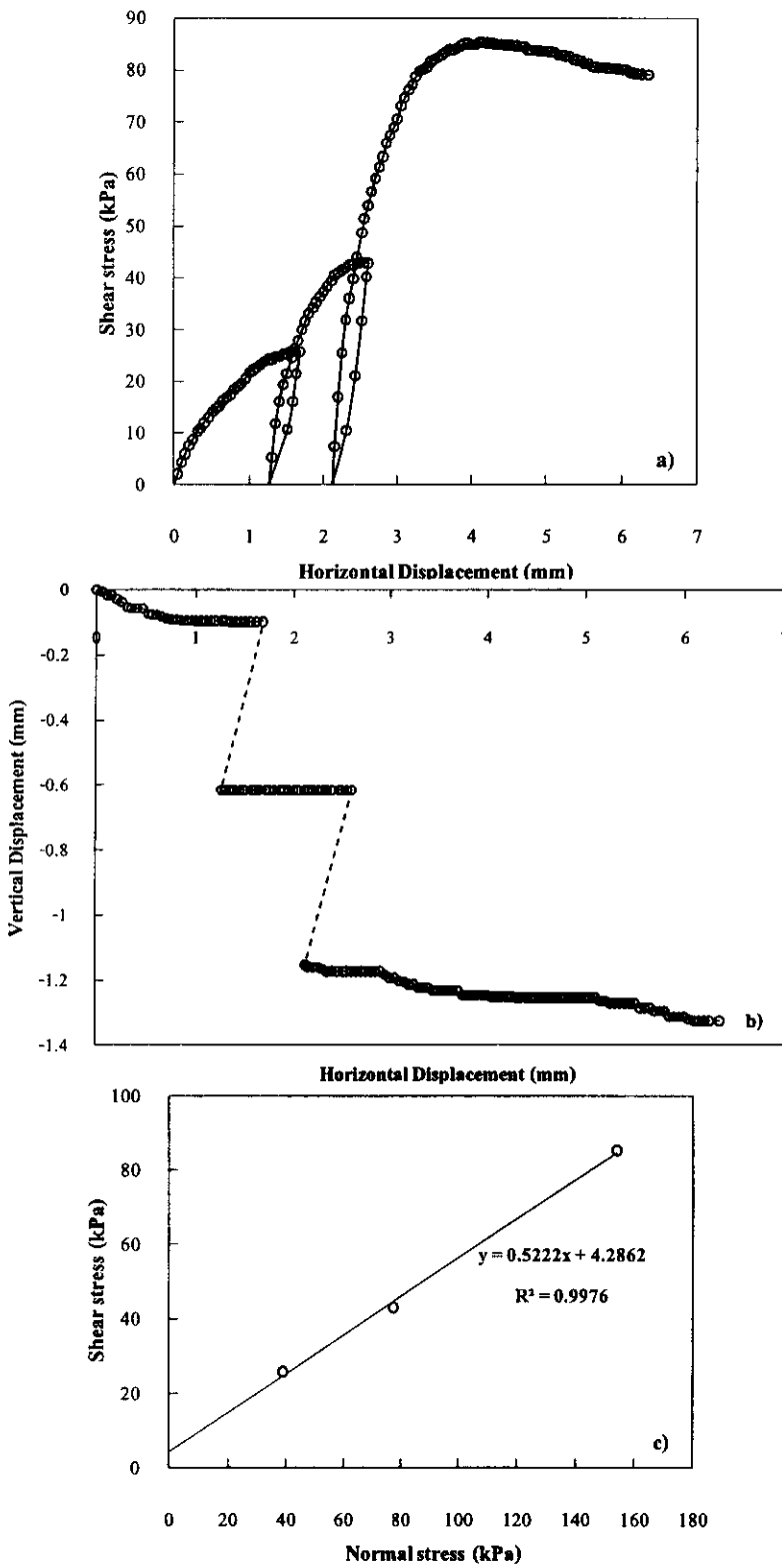
รูปที่ 10 – 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 1 เมตร จากขอบค้ำ ความชื้นธรรมชาติ



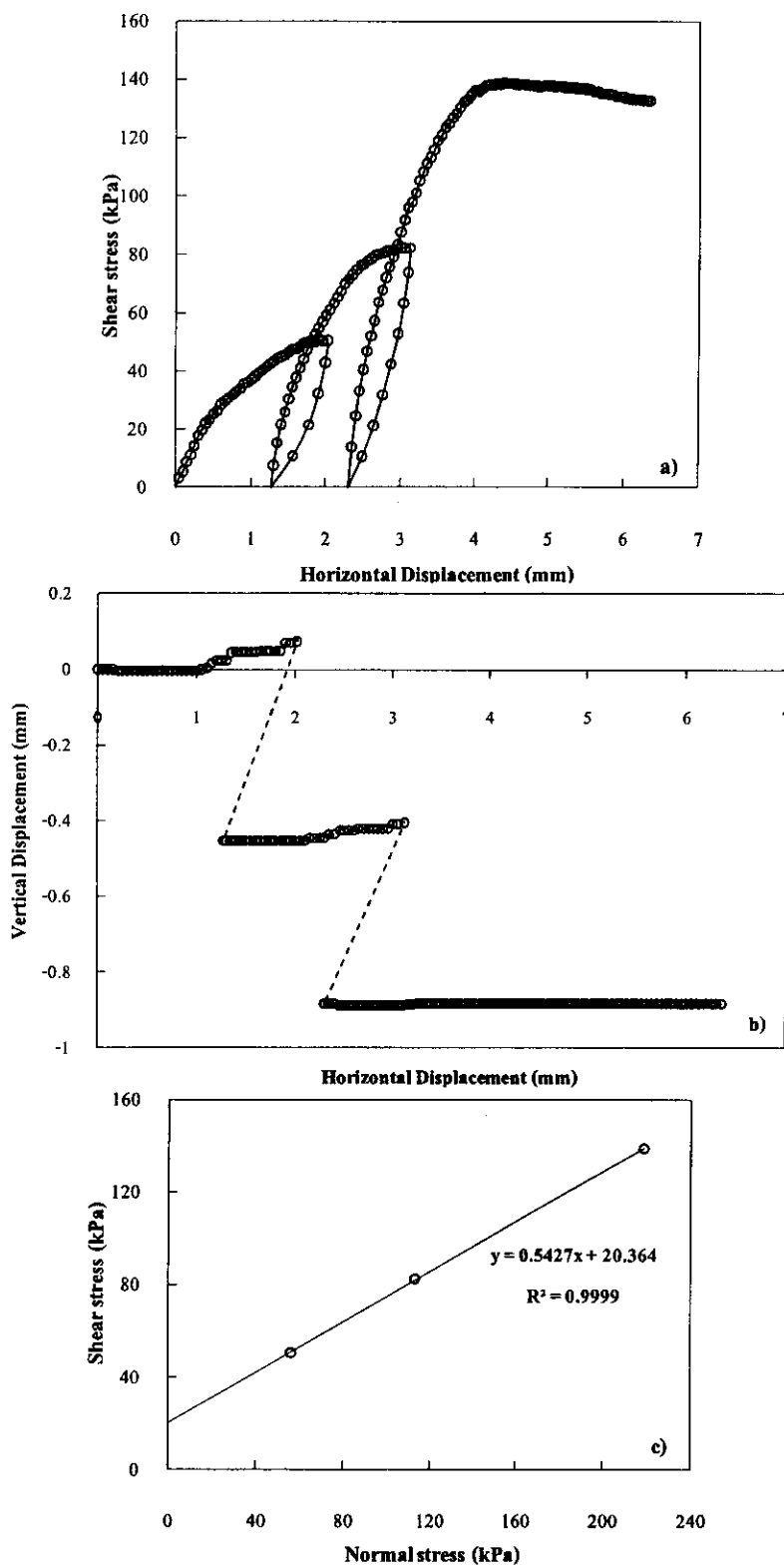
รูปที่ 11 - 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



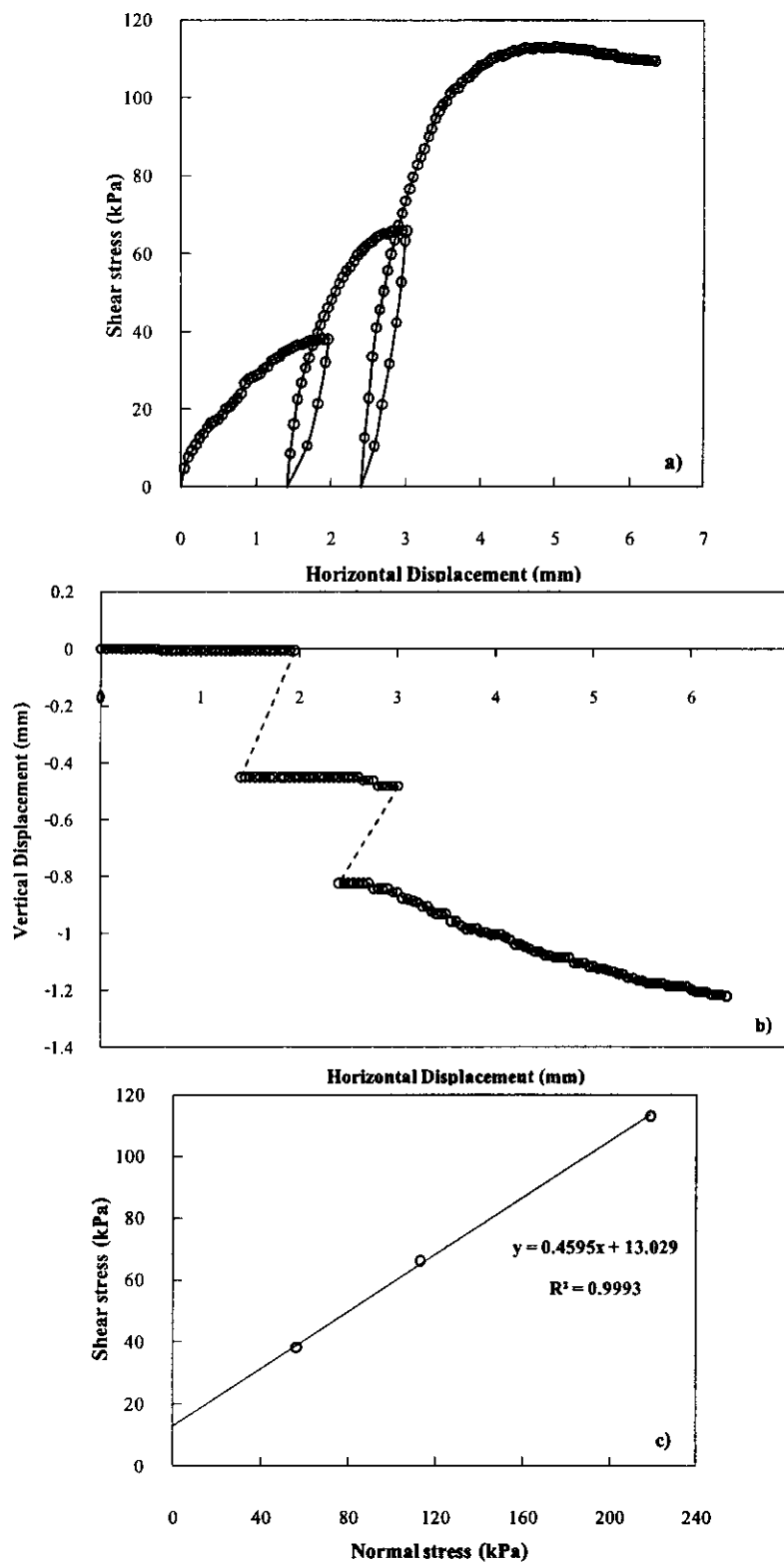
รูปที่ 12 – 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



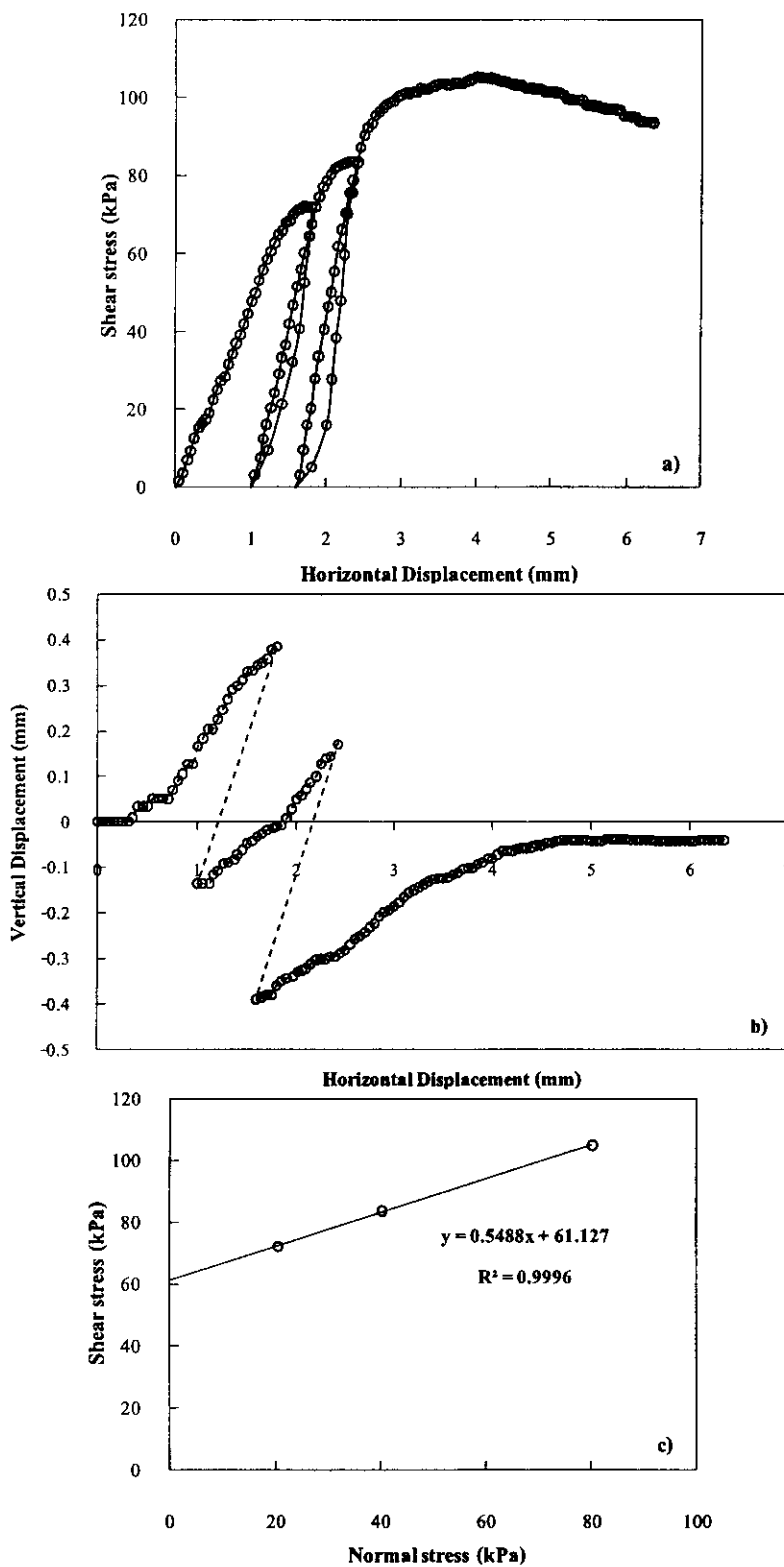
รูปที่ 13 – 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 2 เมตร จากขอบค้ำ ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



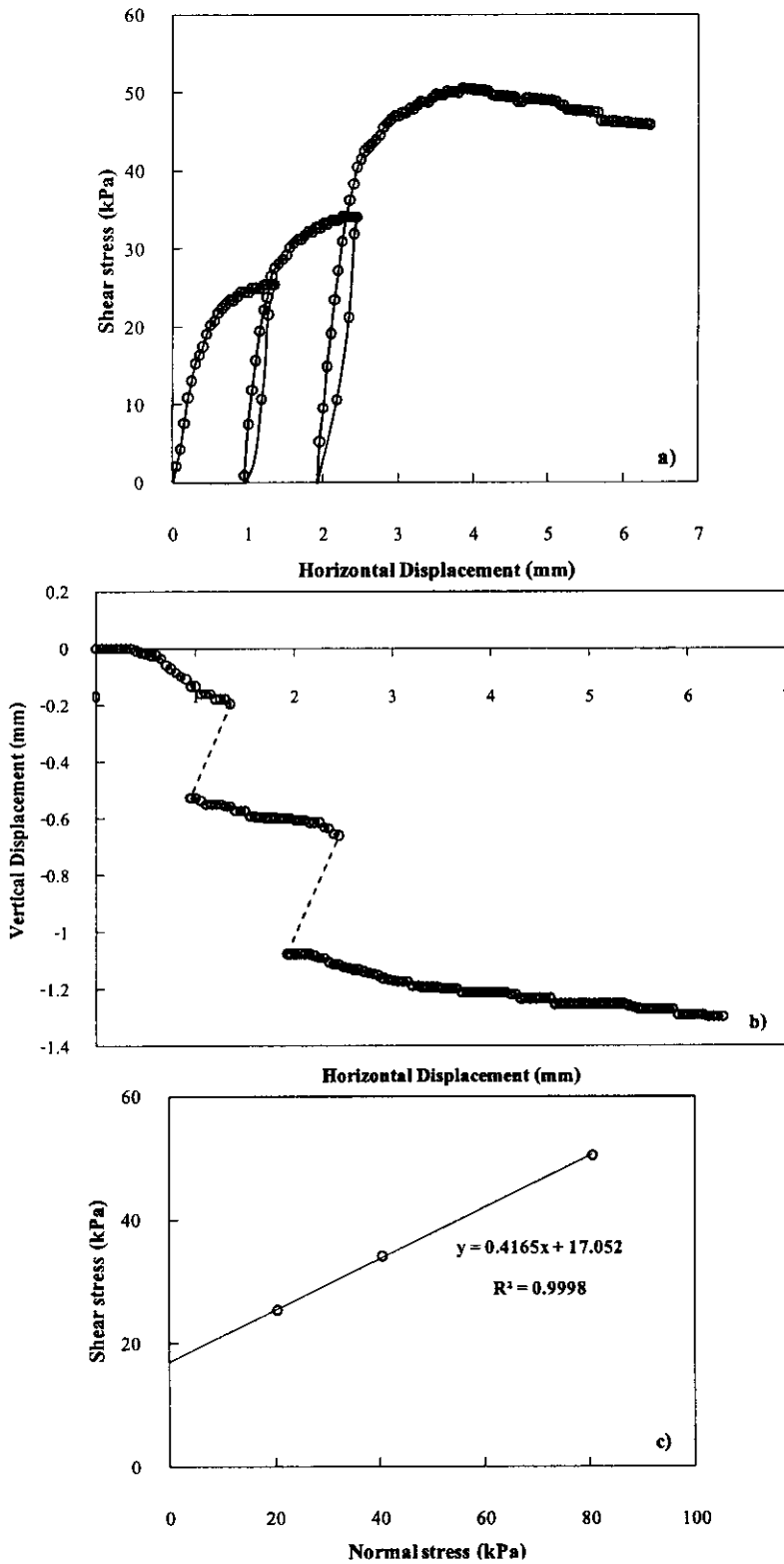
รูปที่ 14 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 3 เมตร จากขอบค้ำ ความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 2 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

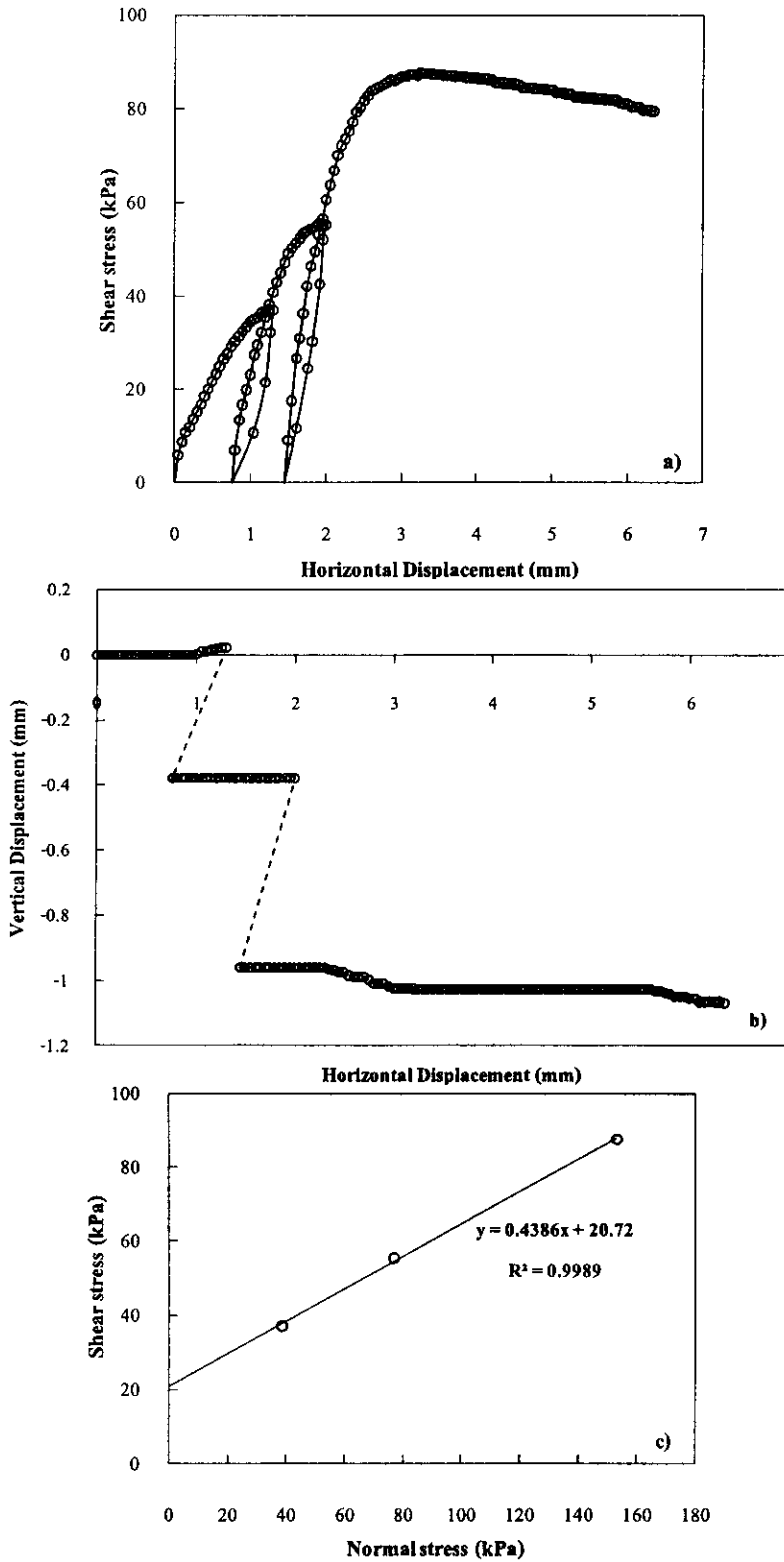


รูปที่ 16 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ

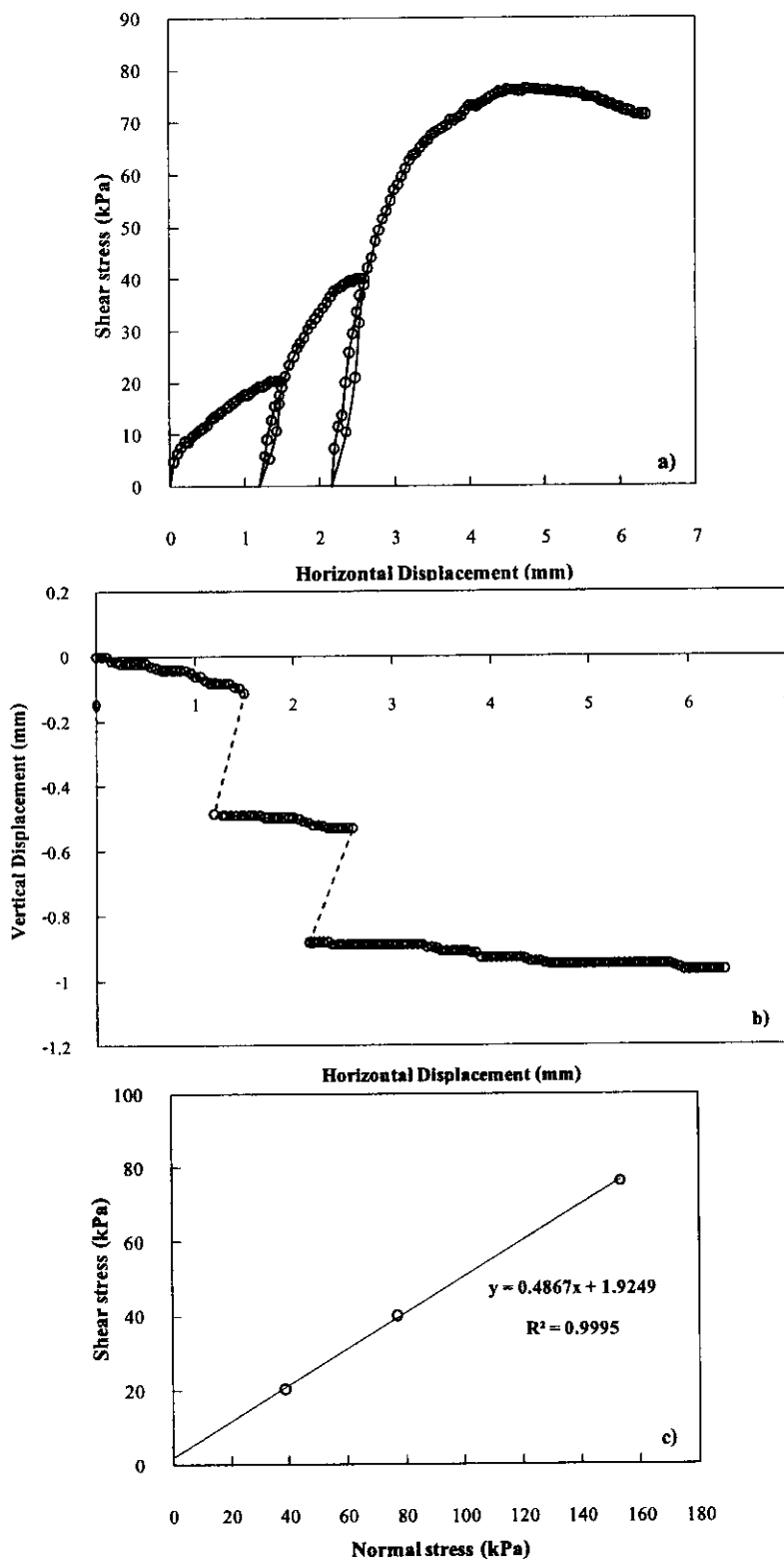


รูปที่ 17 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

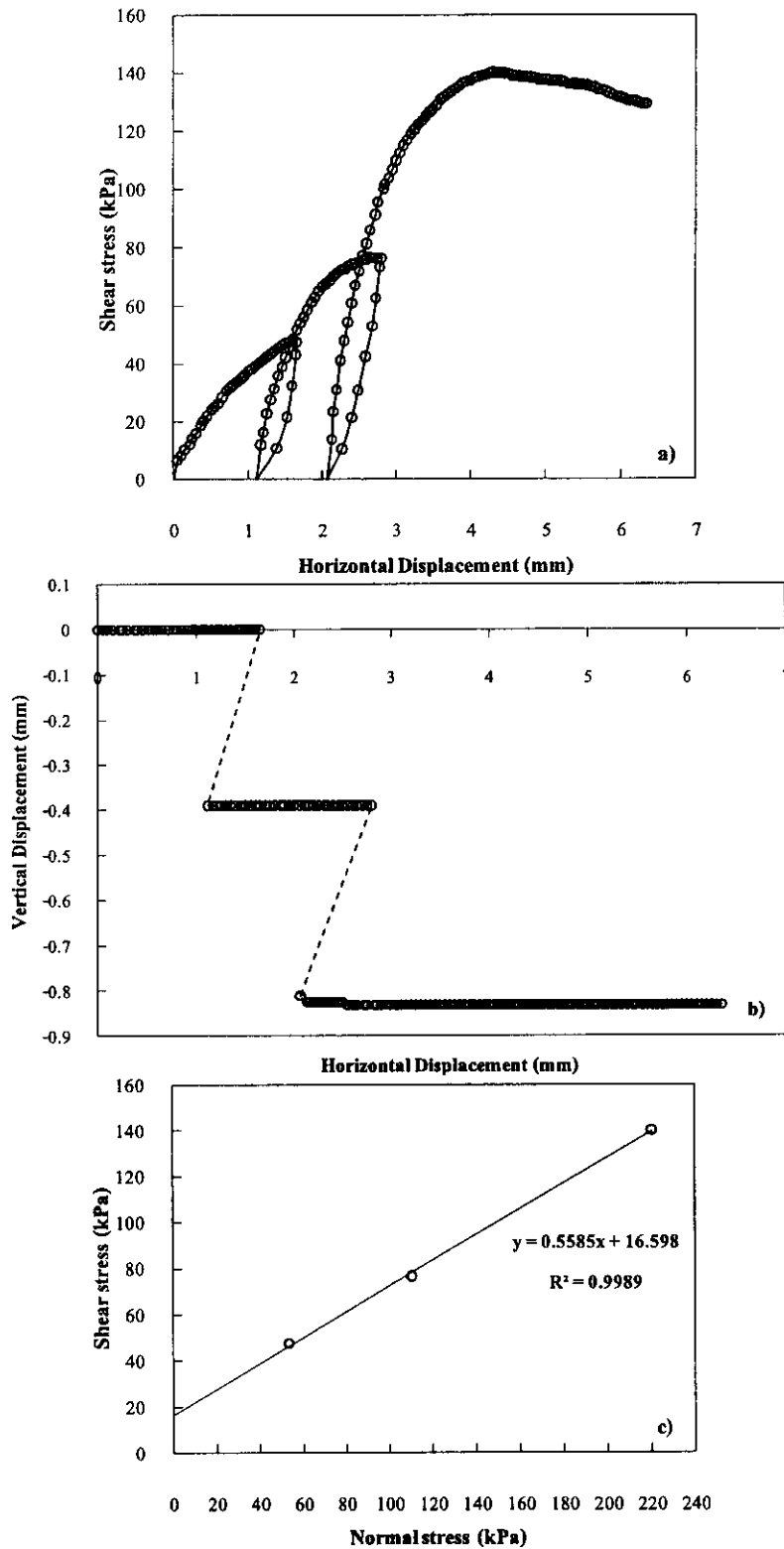




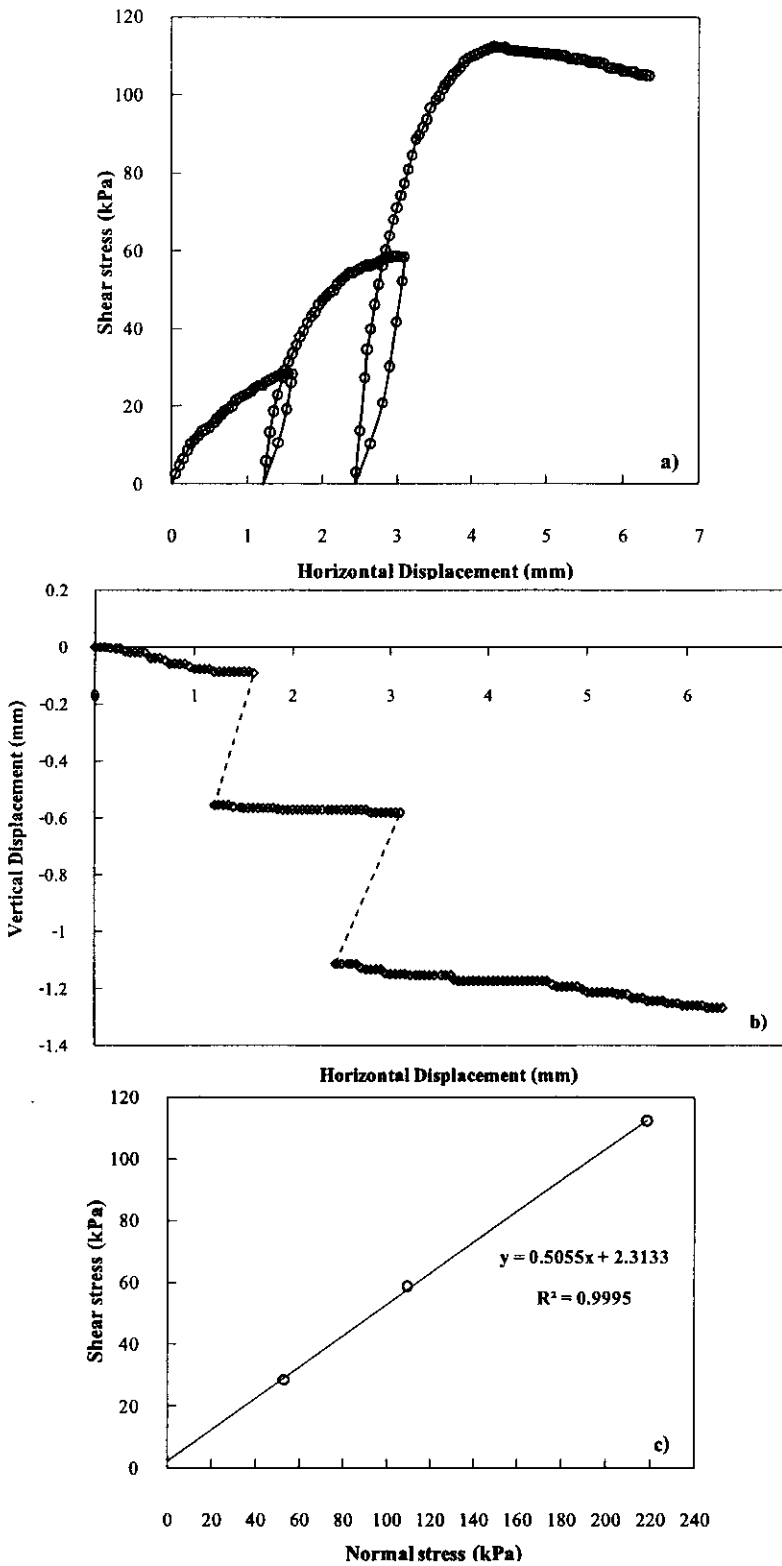
รูปที่ 18 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress - Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress - Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 2 เมตร จากขอบค้ำ ความชื้นธรรมชาติ



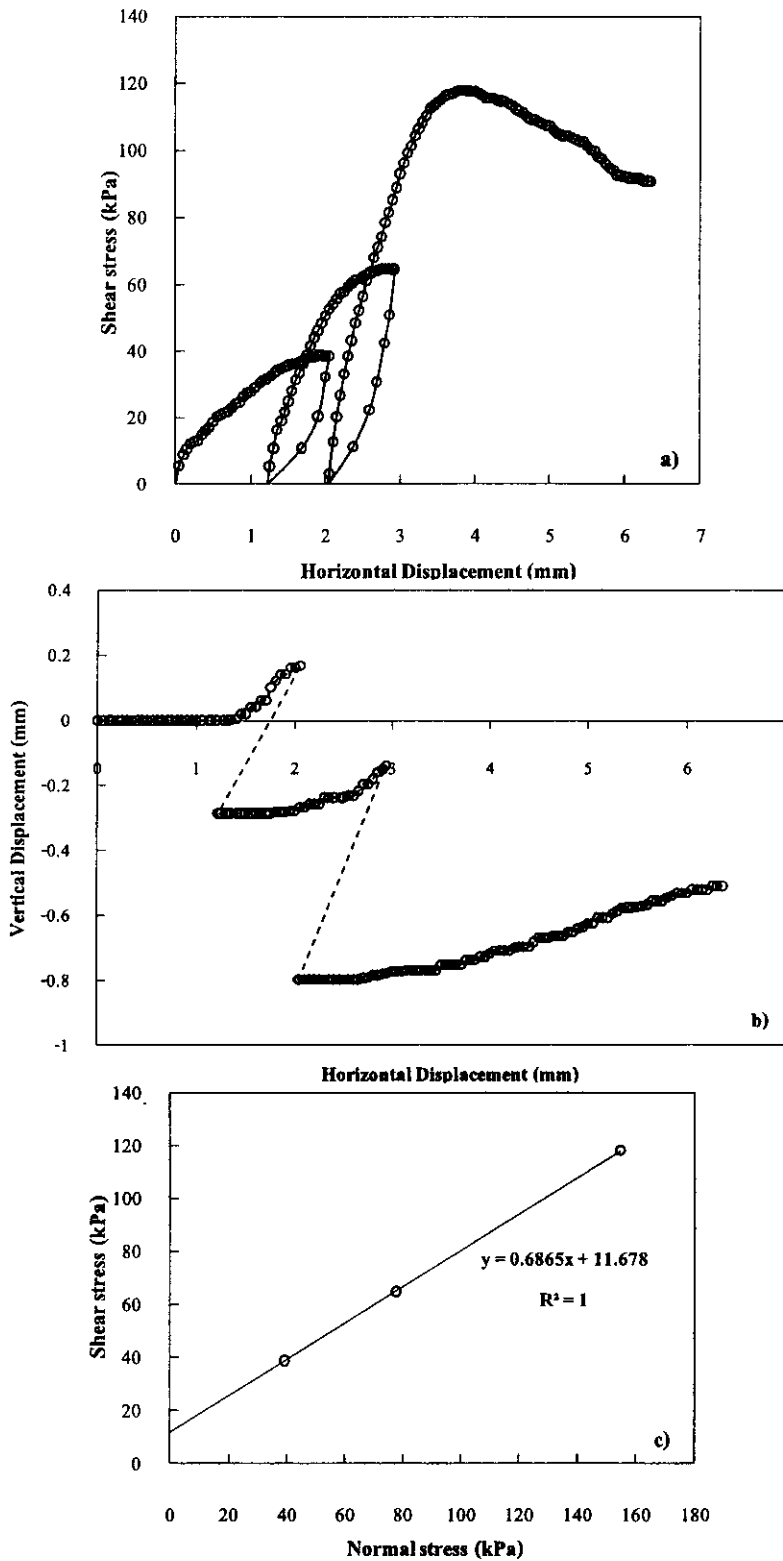
รูปที่ 19 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress - Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress - Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



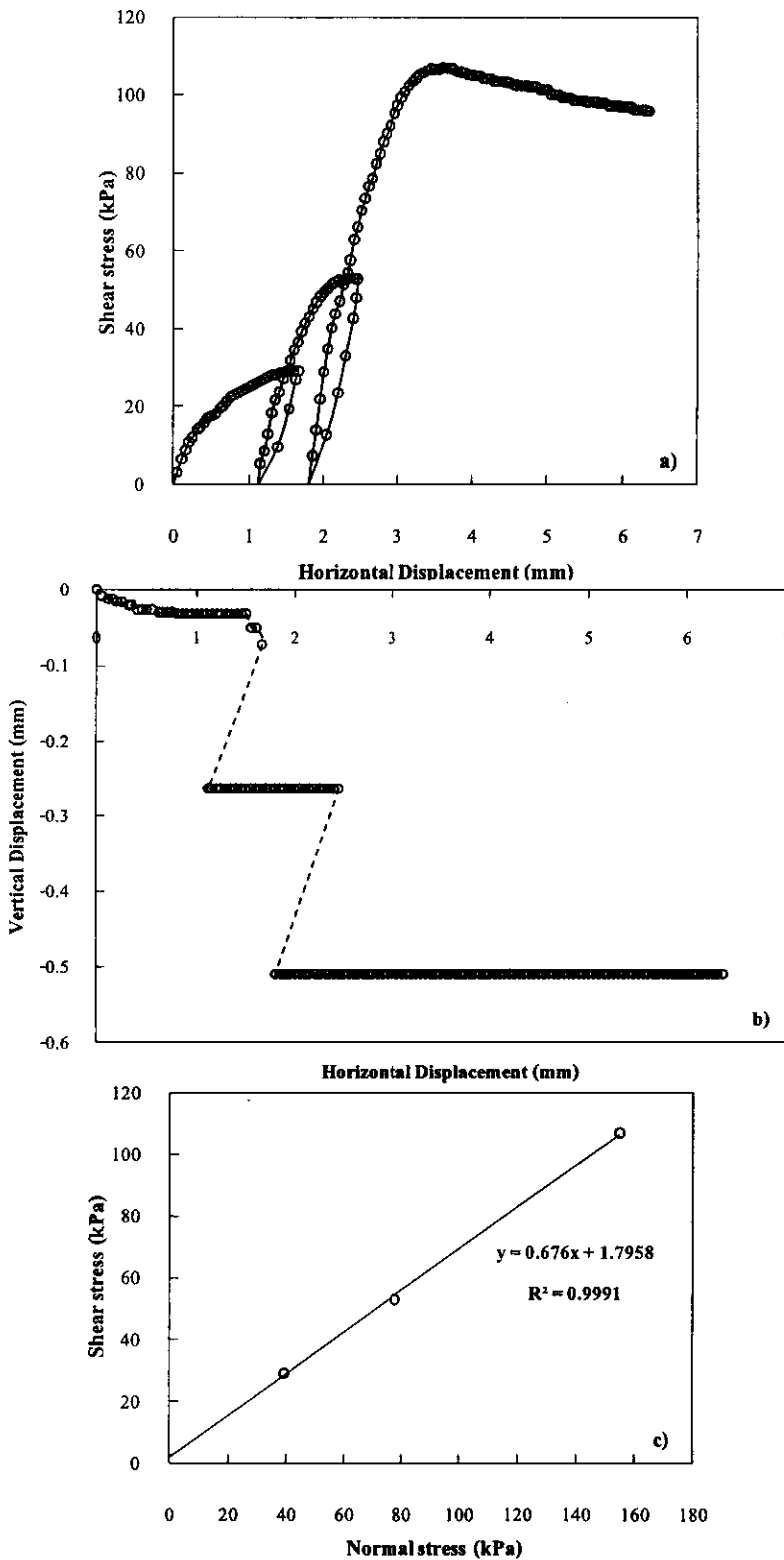
รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



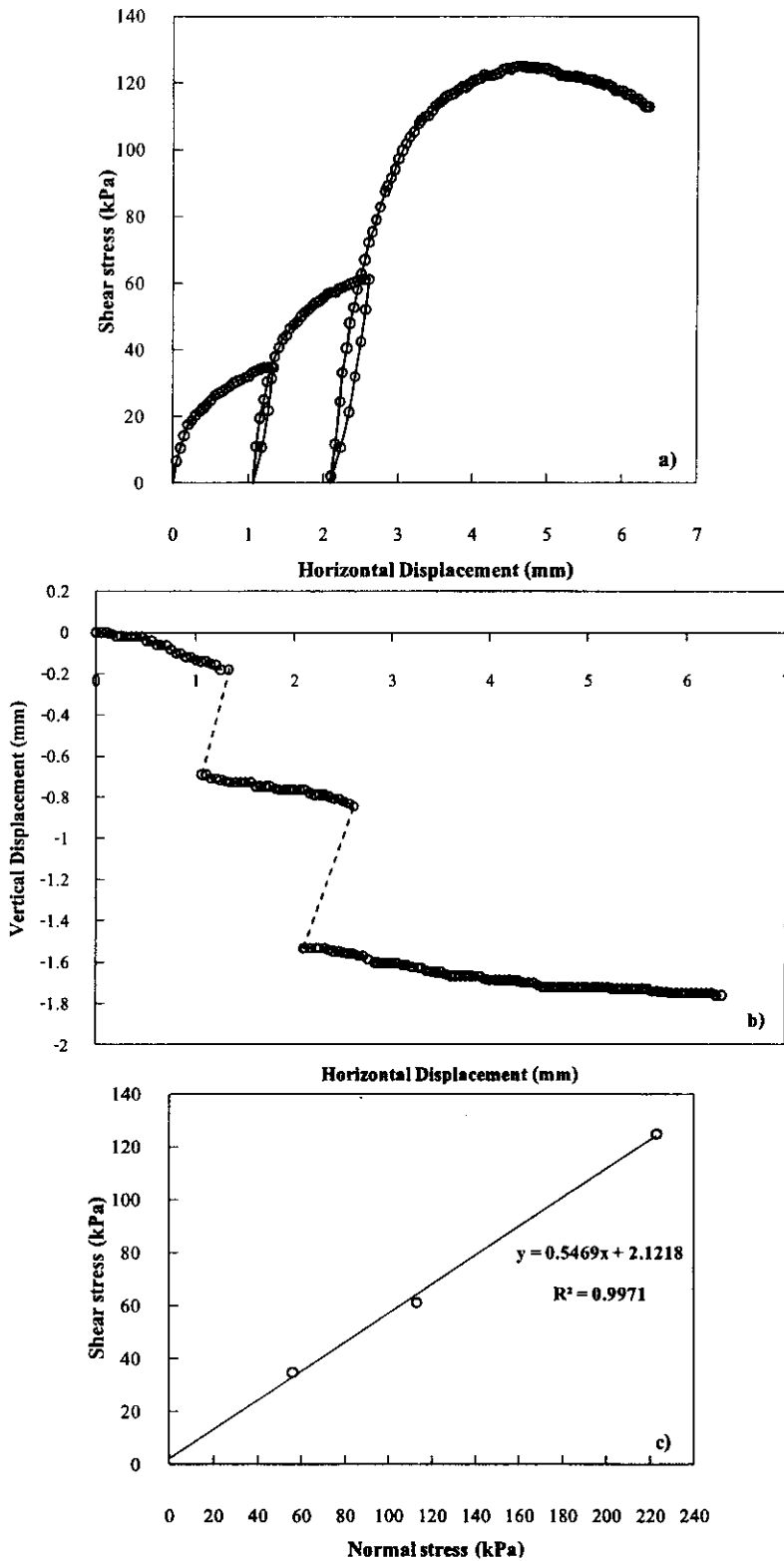
รูปที่ 21 – 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



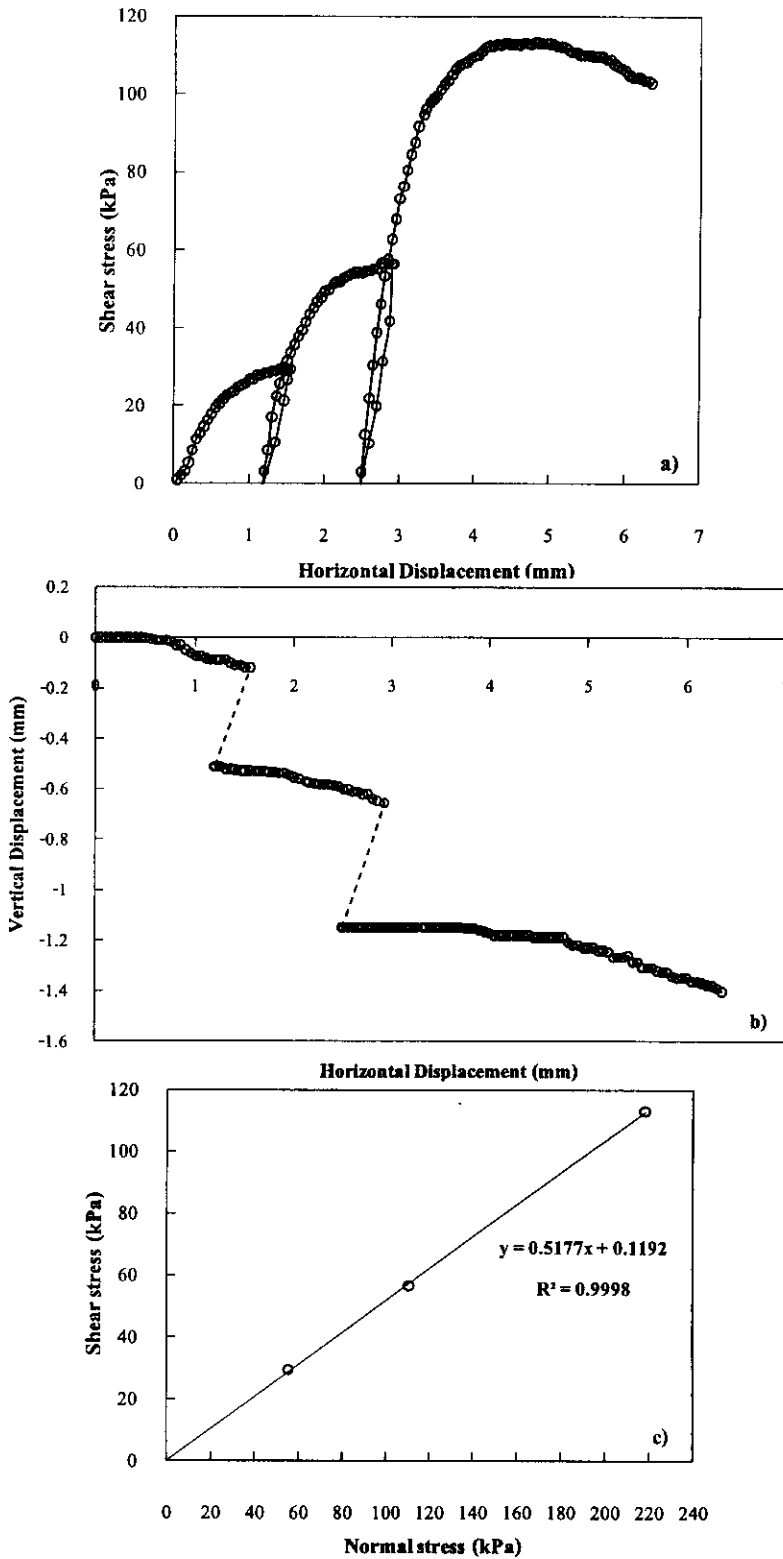
รูปที่ 22 - 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress - Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress - Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 4 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 23 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 4 เมตร จากขอบคดถึง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

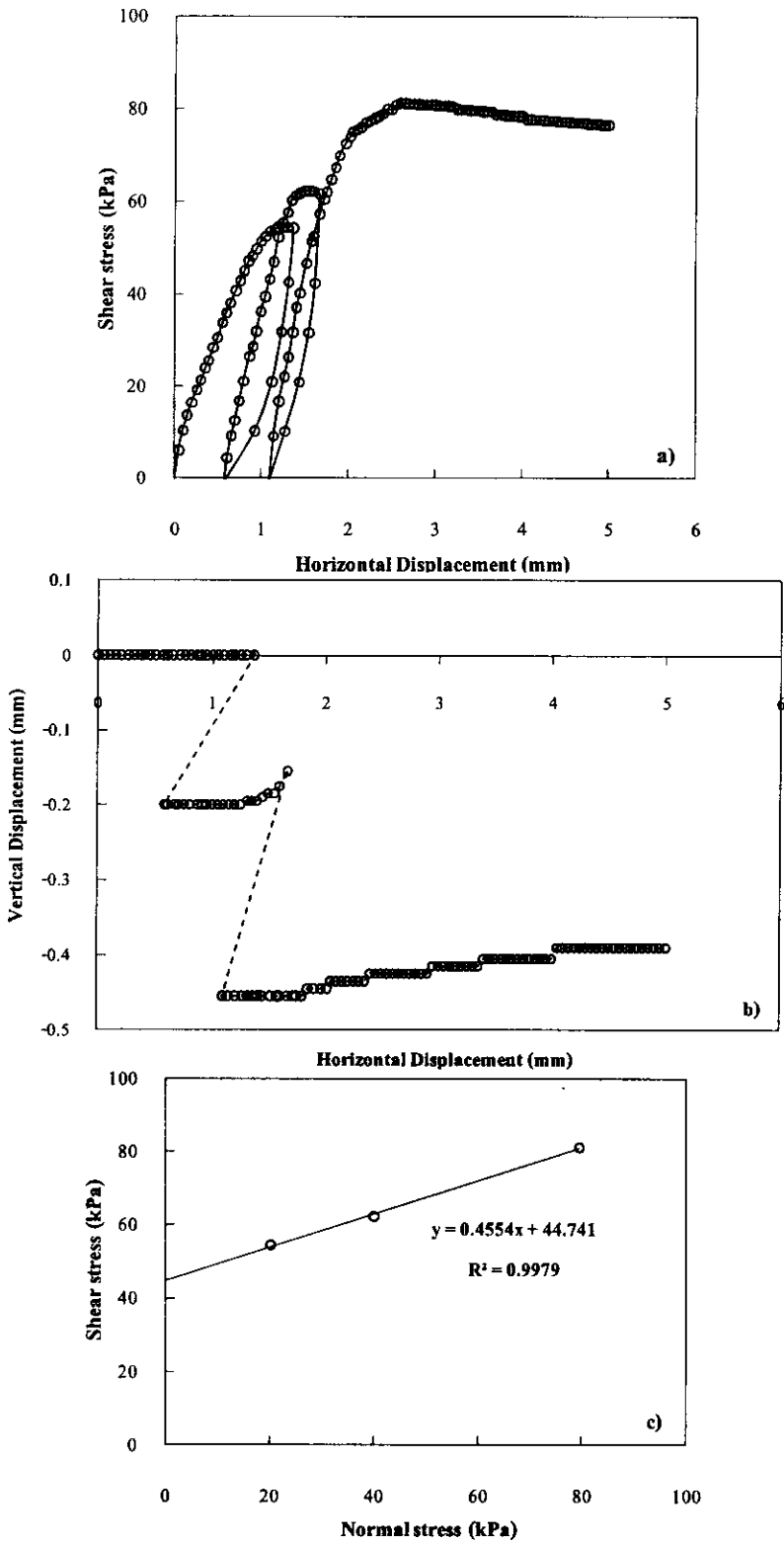


รูปที่ 24 - 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress - Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress - Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 5 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ

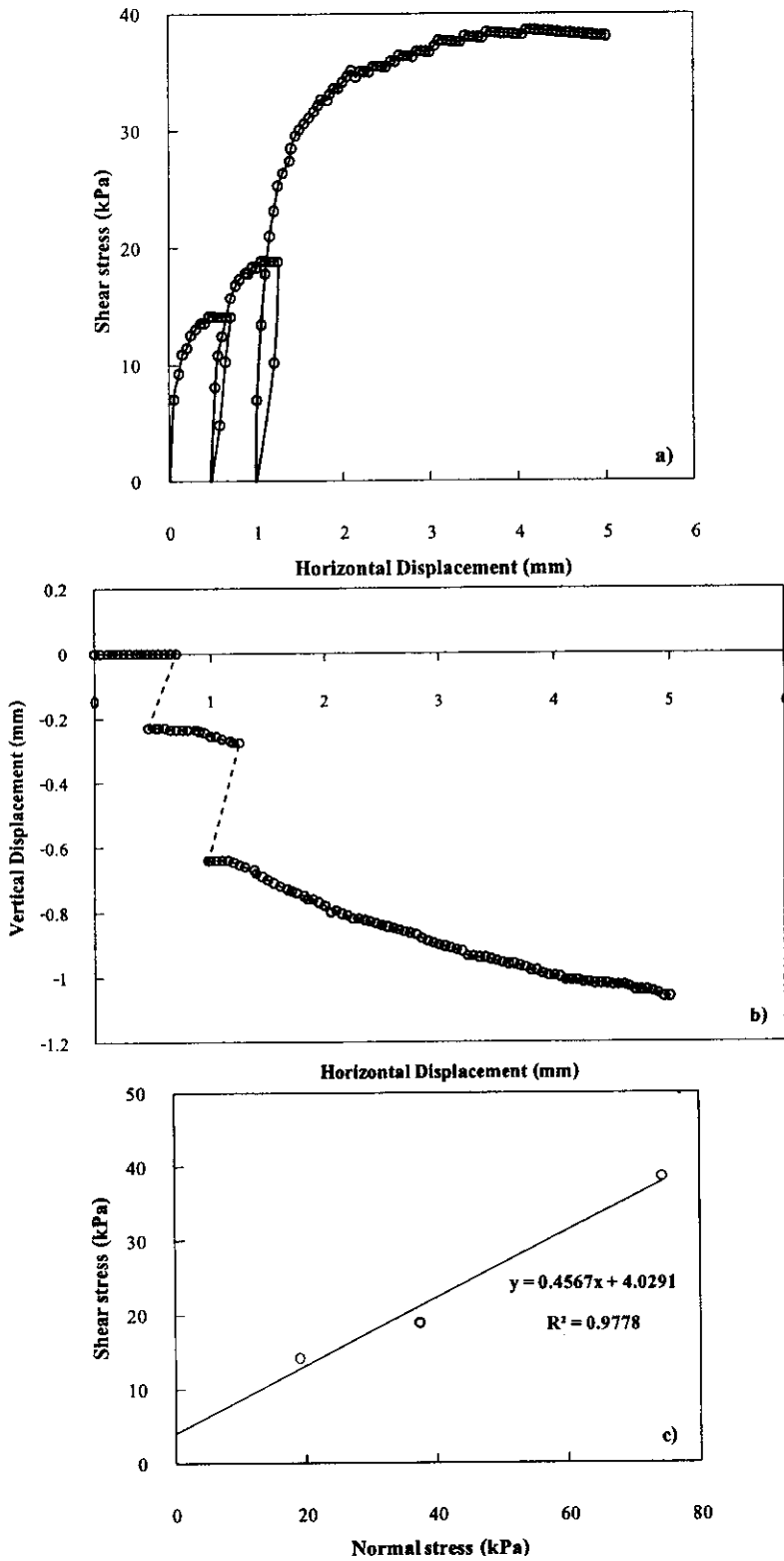


รูปที่ 25 – 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 3 ความลึก 5 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

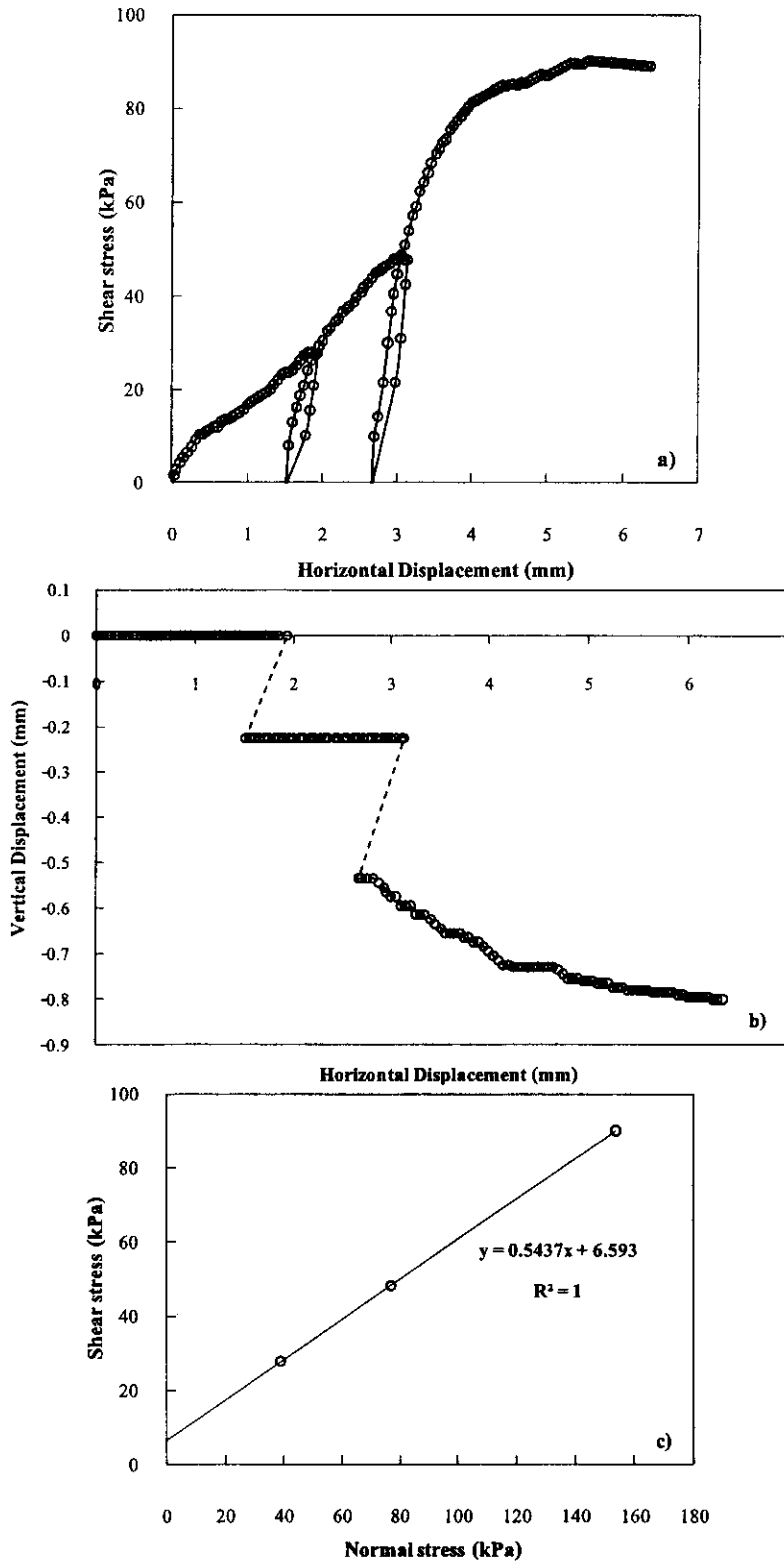




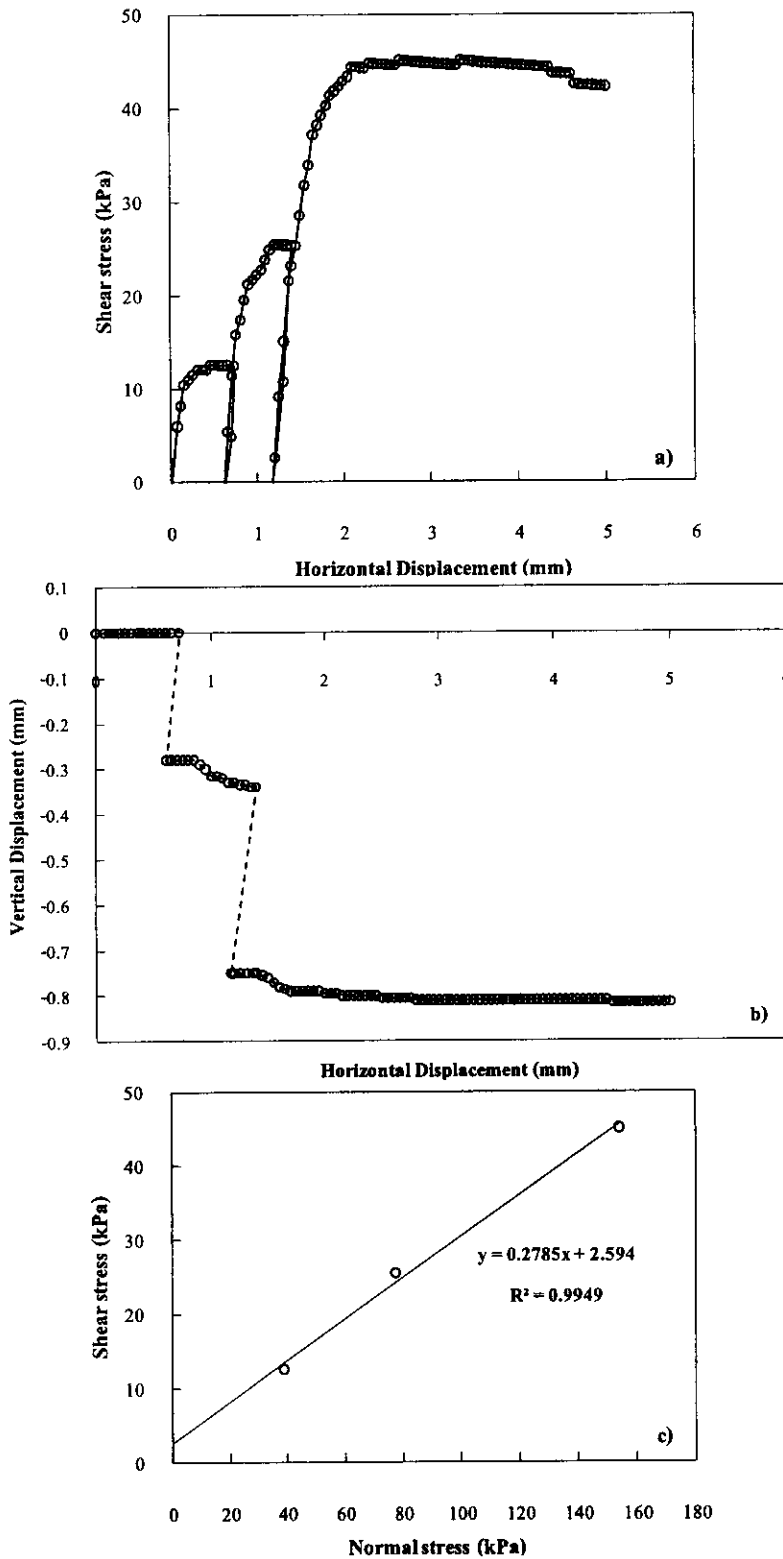
รูปที่ 26 - 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



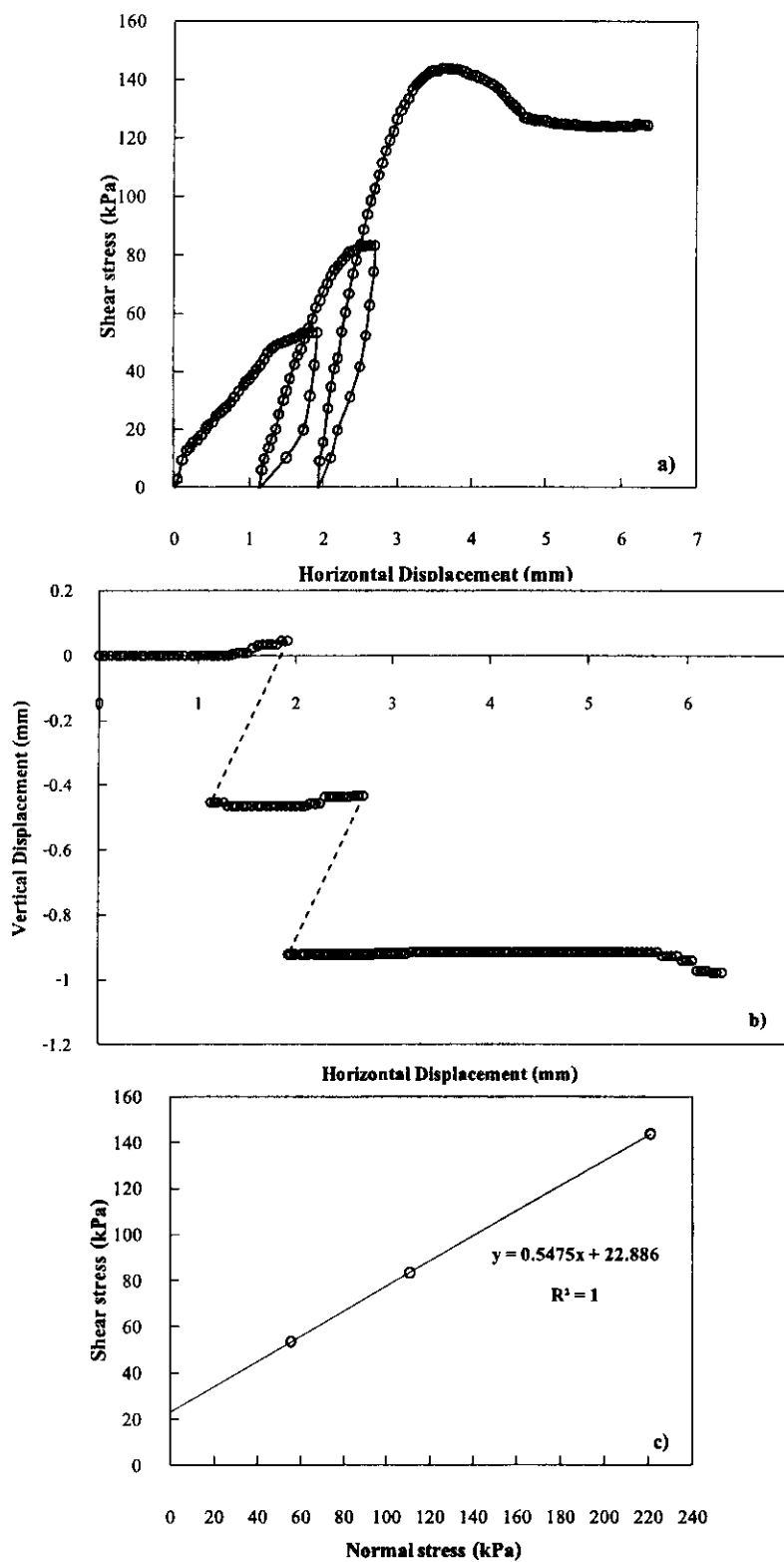
รูปที่ ๒๗ - ๒๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 1 เมตร จากขอบคลื่น ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



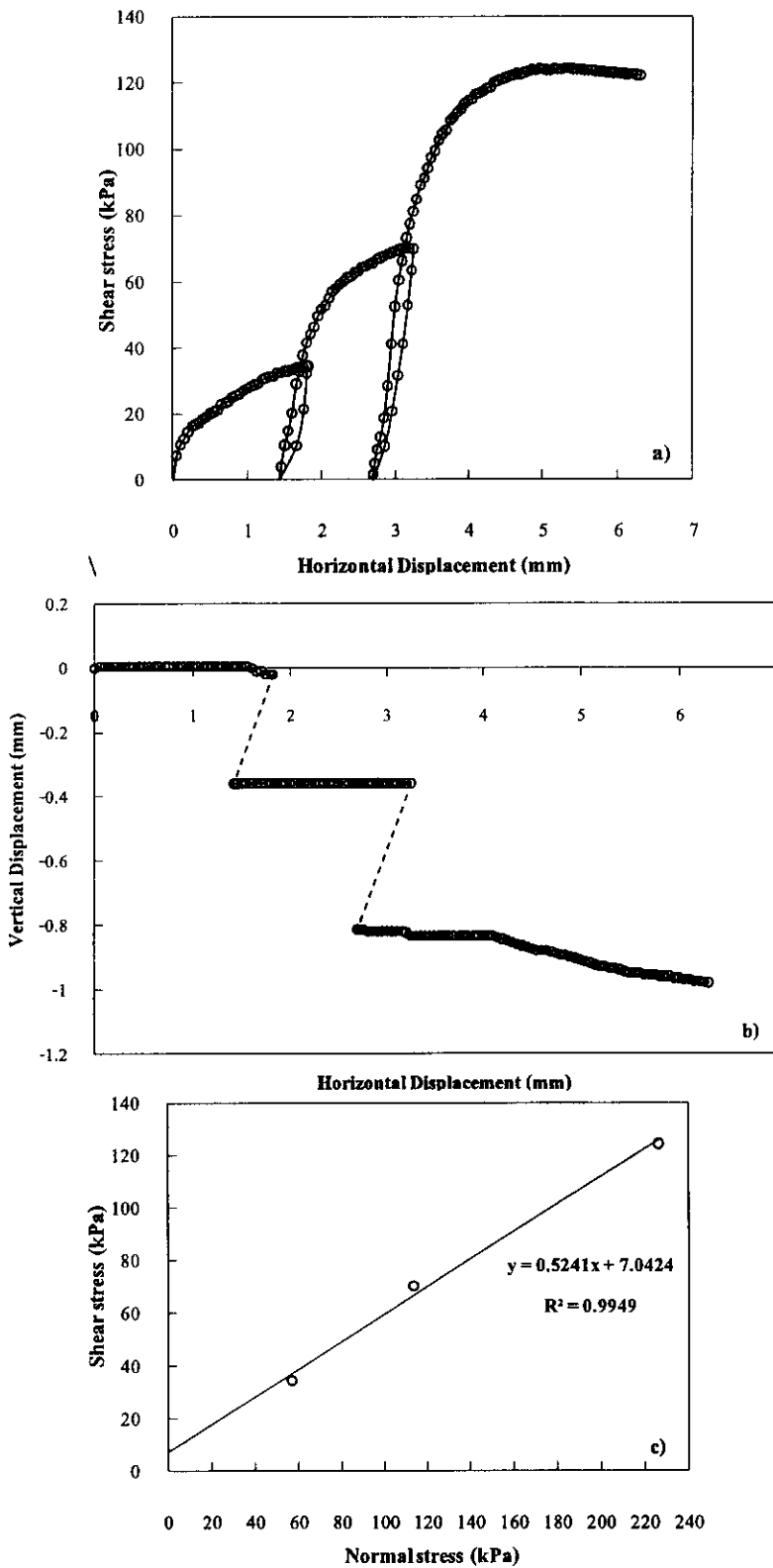
รูปที่ ง - 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



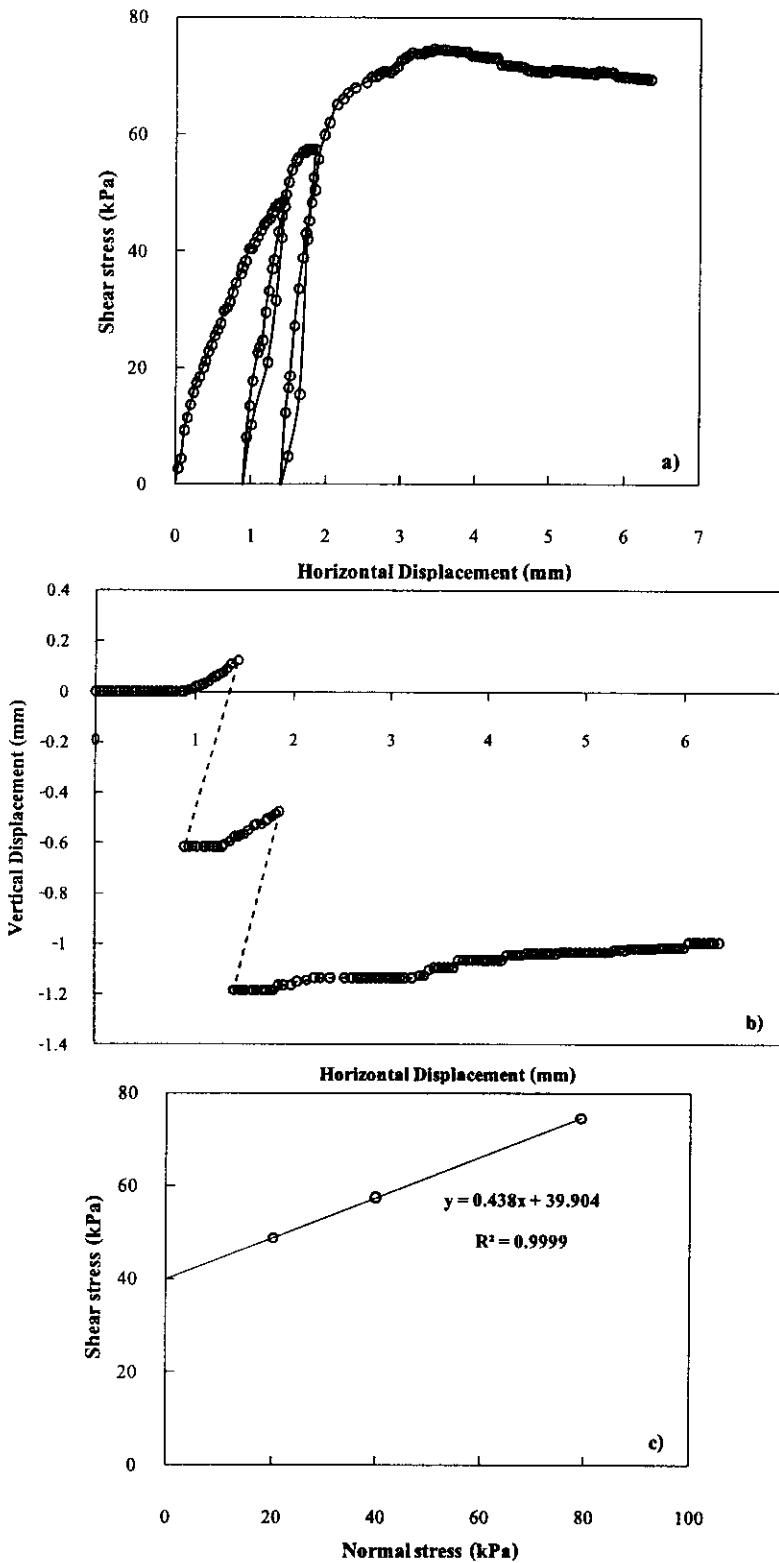
รูปที่ ง – 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



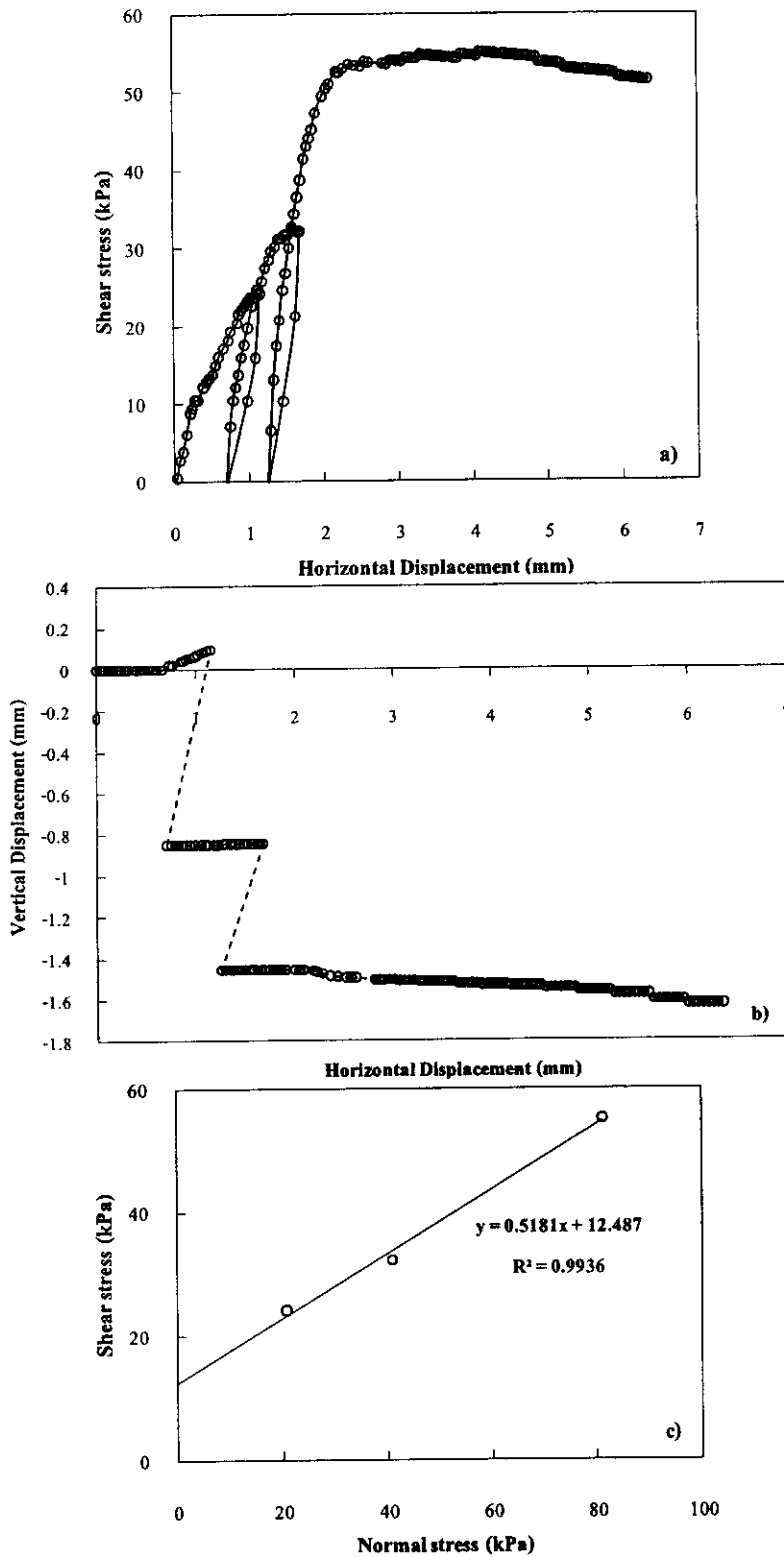
รูปที่ 30 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 31 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 4 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

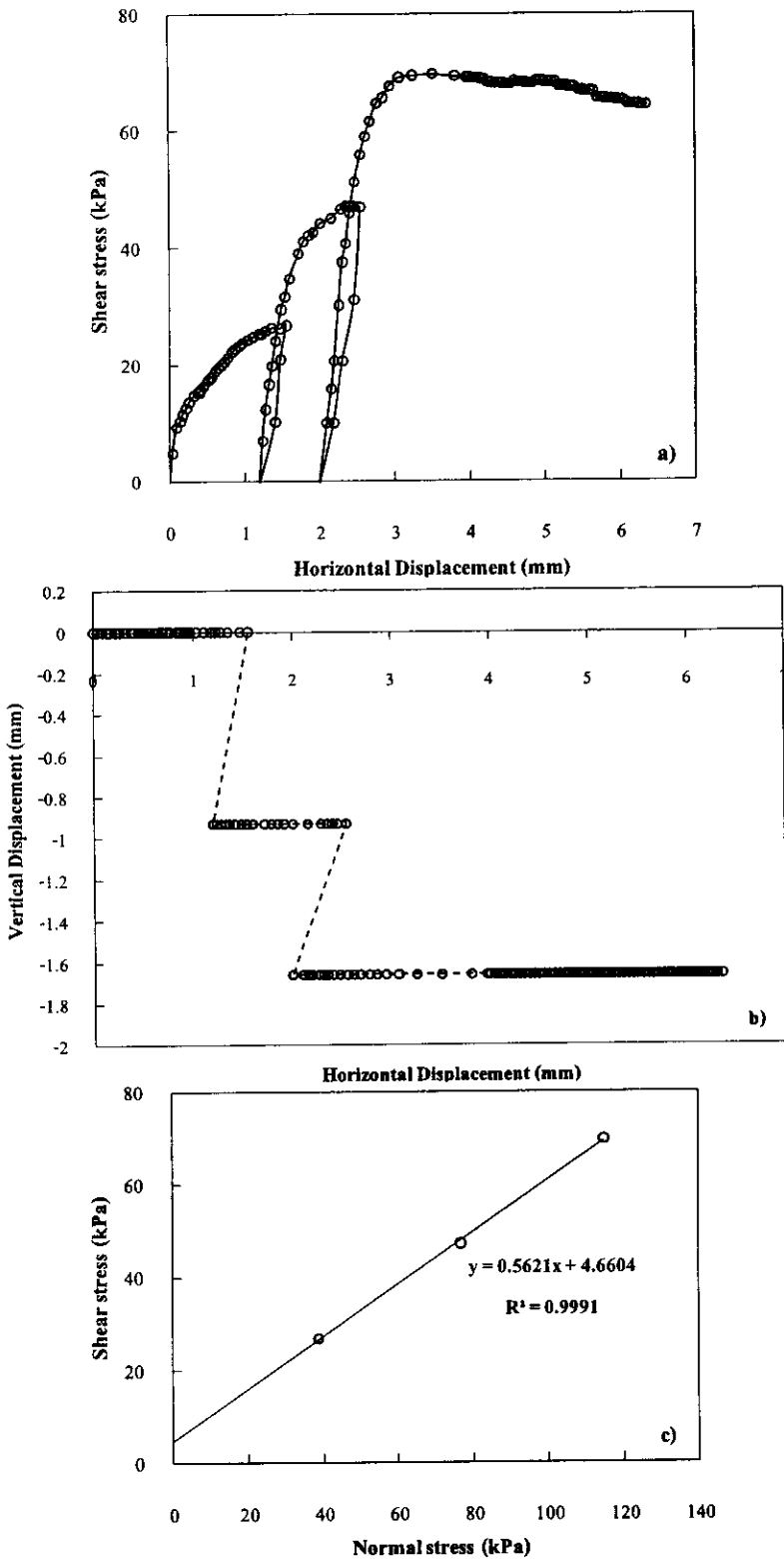


รูปที่ ๓ – 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ

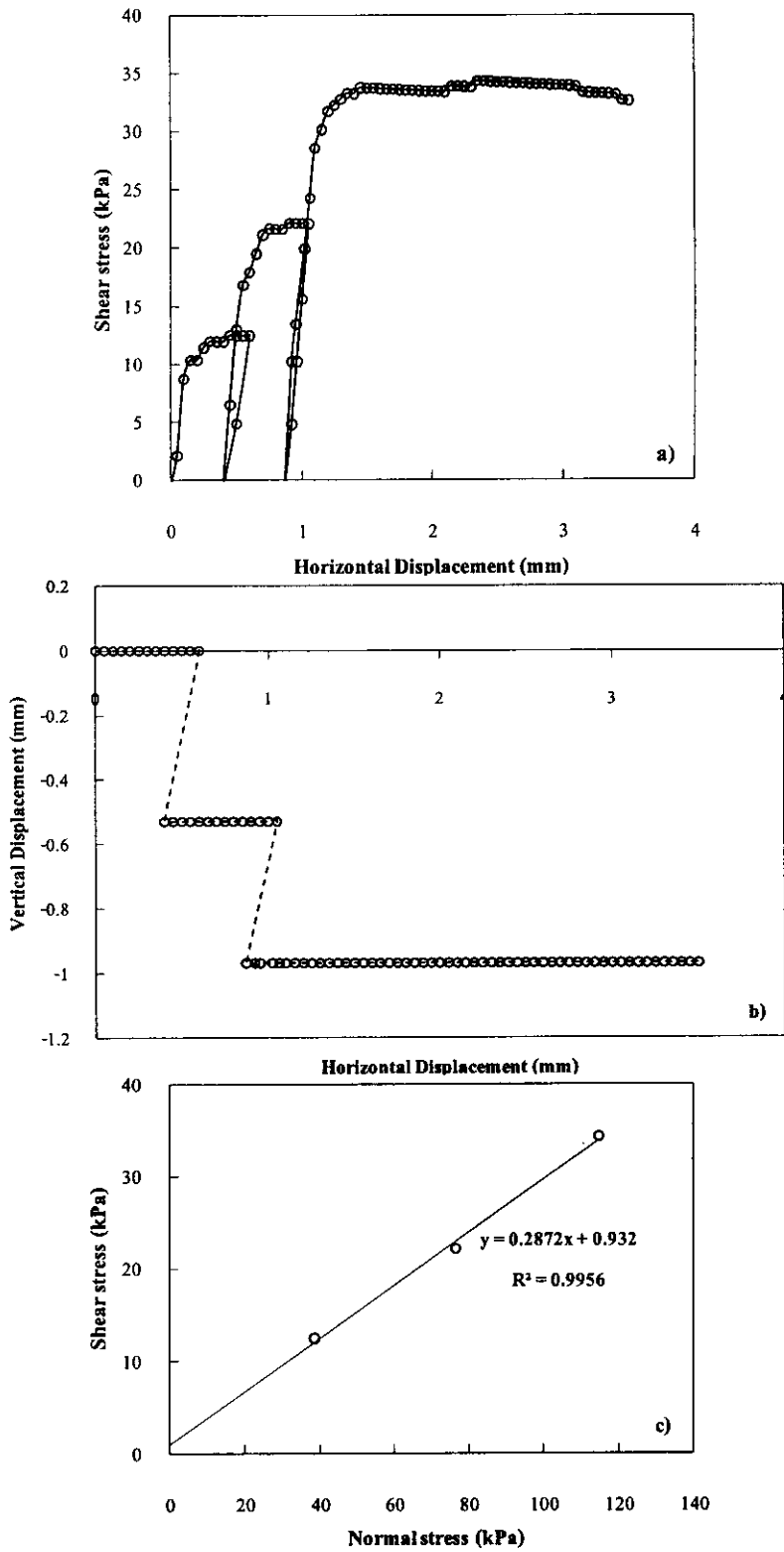


รูปที่ 33 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress - Horizontal displacement, b) Vertical displacement - Horizontal displacement, c) Shear stress - Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 1 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

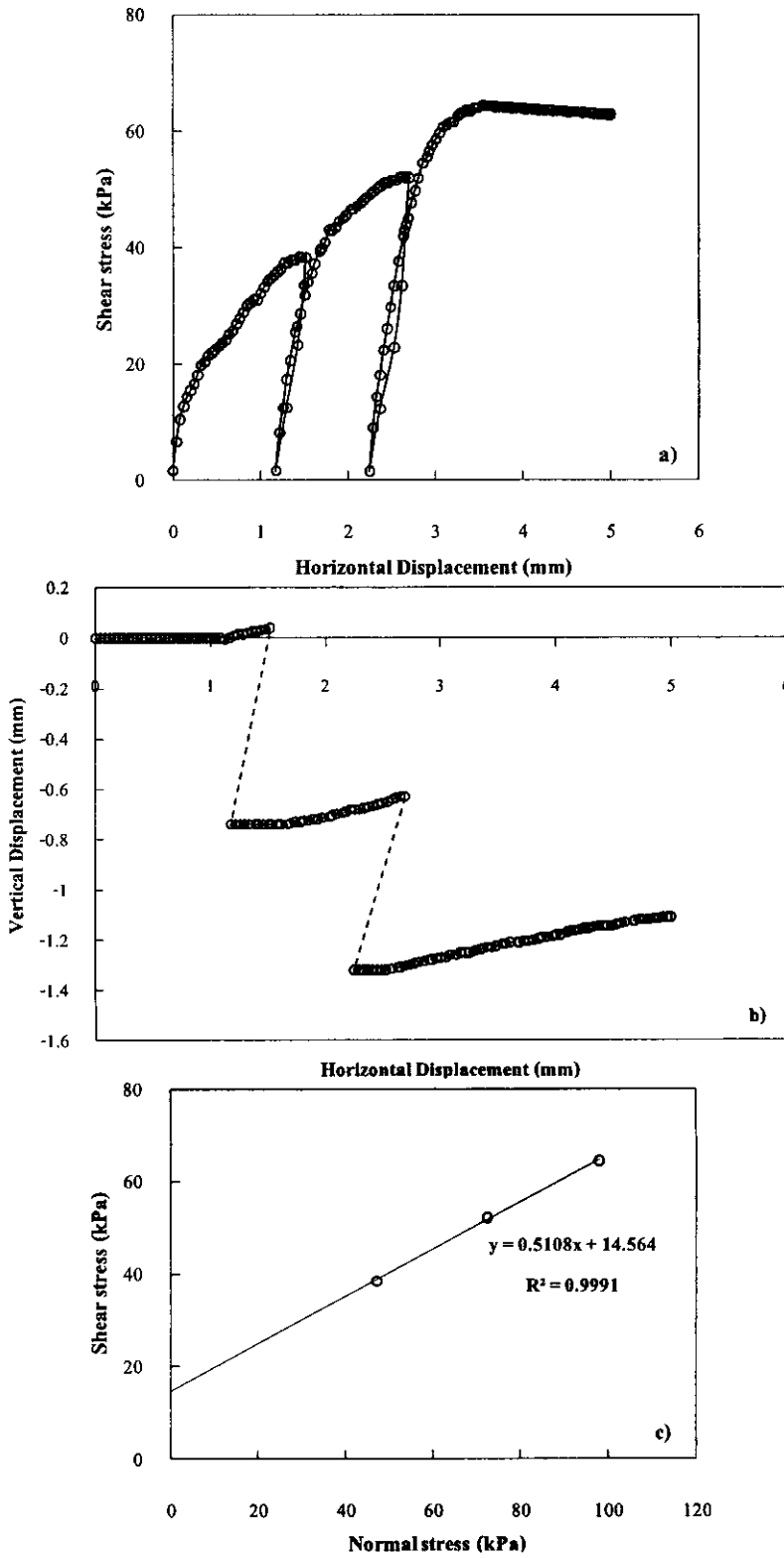




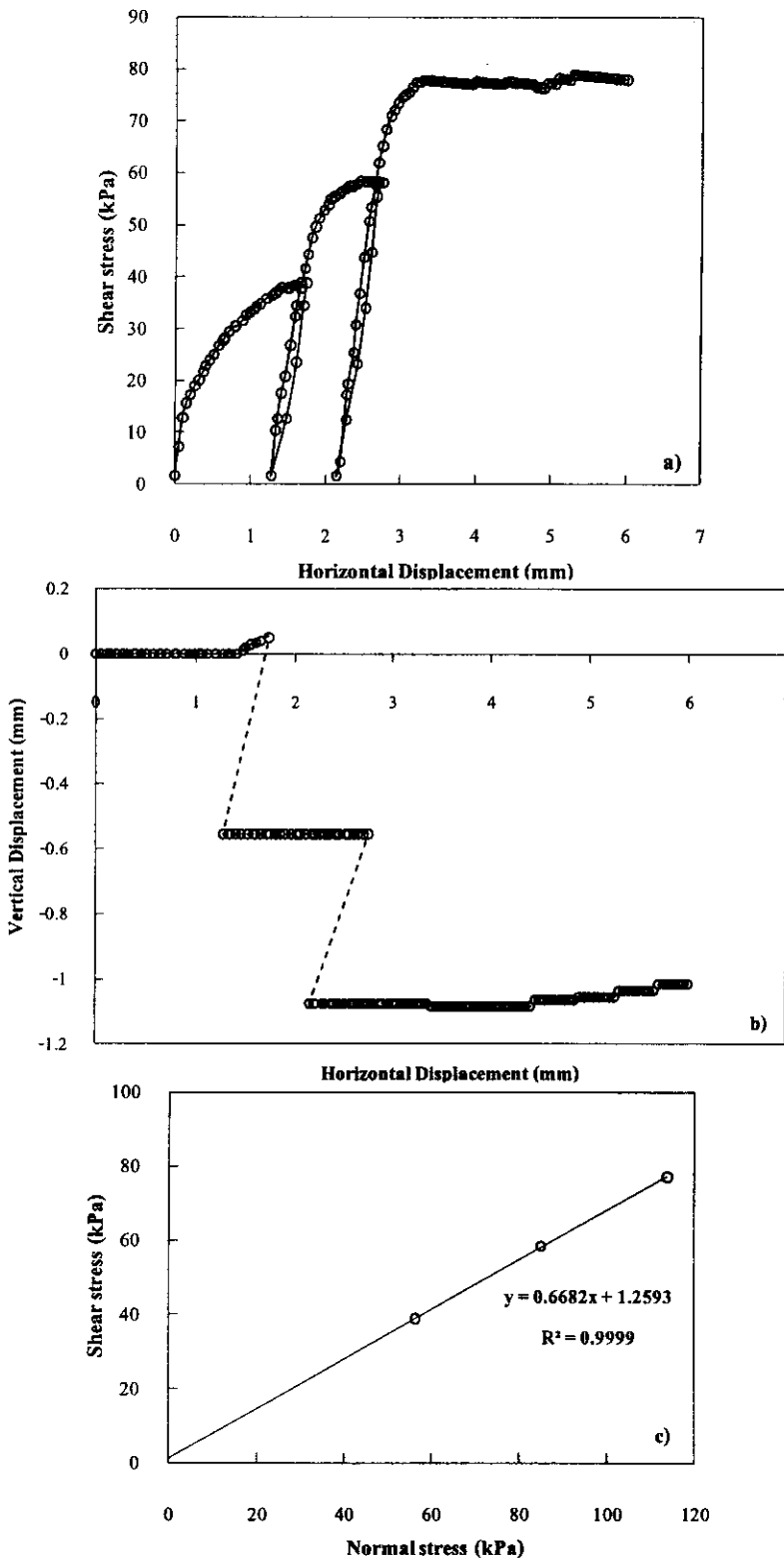
รูปที่ 34 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 35 – 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 2 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 36 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นธรรมชาติ



รูปที่ 37 – กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear stress – Horizontal displacement, b) Vertical displacement – Horizontal displacement, c) Shear stress – Normal stress ของตัวอย่างดิน Section 5 ความลึก 3 เมตร จากขอบตลิ่ง ความชื้นอิ่มตัวด้วยน้ำ