



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การถดถอยและการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเถา จังหวัดสงขลา
Riverbank Retreat and Erosion Protection of the U-Tapao River
in Songkhla Province

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำมภ์ ชูบุปการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557-2558

ธันวาคม 2559



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การถดถอยและการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเถา จังหวัดสงขลา
Riverbank Retreat and Erosion Protection of the U-Tapao River
in Songkhla Province

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557-2558

ธันวาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยฯ ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ทุนหมายเลข ENG570109S ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่เอื้อเฟื้อในทุกๆอย่าง ขอขอบคุณคุณปพน รัชศรี วิศวกรชลประทาน ชำนาญการพิเศษ รศ. อาชีวิน แกสมาน และ ผศ.ดร. อติศัย รุ่งวิชานวิวัฒน์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และ บ. มหาชัยขนส่งภาคใต้ จำกัด สำหรับการร่วมกันก่อสร้างแปลงสาธิตการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยใช้แผ่นยางพารา ขอขอบคุณคณาจารย์และผู้เชี่ยวชาญ ที่อ่านตรวจทานรายงานพร้อมเสนอแนะข้อมูลที่เป็นประโยชน์ที่ทำให้รายงานนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และที่ต้องกล่าวถึงอย่างขาดเสียไม่ได้คือ ขอขอบคุณคุณสุรติ เส็มหมัด นักศึกษาปริญญาเอกของผู้วิจัยที่ตั้งใจทำงานวิจัยนี้อย่างสุดความสามารถและไม่ย่อท้อ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้วิจัย

คำนำ

ในช่วงเวลา 10-20 ปีที่ผ่านมา ปัญหาการกัดเซาะทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ทางการเกษตรและพื้นที่อื่นๆตลิ่งริมคลองอุตะเภา ก่อให้เกิดความเดือดร้อนต่อประชาชนที่อาศัยอยู่สองฝั่งคลองเป็นจำนวนมาก ความรู้ ที่มาที่ไป และ กลไก การกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเภา นั้น ยังไม่เคยมีการศึกษาโดยใช้หลักวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์มาก่อน การศึกษาการถดถอยและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเภา จังหวัดสงขลา ในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความต้องการสร้างองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเภาที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตั้งอยู่บนเหตุผล และอธิบายได้ รายงานฉบับนี้นำเสนอผลการวิจัยด้านเหตุผลและกลไกที่ทำให้เกิดการกัดเซาะตลิ่ง และ นำเสนอแนวทางการป้องกันการกัดเซาะวิธีใหม่ เพื่อเป็นทางเลือกในการก่อสร้างโครงสร้างป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเภา รายงานนี้มี 5 บท บทที่ 1-2 เป็นบทนำและการทบทวนเอกสาร บทที่ 3 เสนอ คุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเภา ที่เกี่ยวข้องและเป็นเหตุเป็นผลต่อการเกิดการกัดเซาะ บทที่ 4 เสนอ การถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา ที่เกิดขึ้นในช่วง 10-20 ปีที่ผ่านมา รวมถึงเสนอแบบจำลองการถดถอยที่พัฒนาขึ้นสำหรับตลิ่งคลองอุตะเภา บทที่ 5 เสนอ วิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง และ บทที่ 6 เสนอบทสรุปของการดำเนินการทั้งหมด คณะผู้วิจัยฯหวังว่ารายงานฉบับนี้คงเป็นประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยต่อผู้ที่ศึกษาหรือสนใจด้านการกัดเซาะตลิ่งของคลองอุตะเภา และถ้ามีส่วนหนึ่งส่วนใดในรายงานฉบับนี้มีความผิดพลาดด้วยเหตุผลใดๆ คณะผู้วิจัยฯต้องขออภัยมา ณ.ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัยฯ

บทคัดย่อ

การถดถอยของตลิ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วโลก ก่อให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ริมตลิ่งและเกิดการทับถมของตะกอนลำน้ำ ส่งผลให้ลำน้ำสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำ คลองอุ้ต๊ะเกาเป็นลำน้ำหนึ่งที่ประสบปัญหาการถดถอยของตลิ่งมาเป็นเวลานาน เนื่องจากการวิจัยทางด้าน การถดถอยของตลิ่งในประเทศไทยยังมีน้อย และเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ด้านการการถดถอยของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกา งานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการถดถอยของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกา จังหวัดสงขลา โดยวัตถุประสงค์ประกอบด้วย (1) ศึกษาคุณลักษณะของตลิ่ง (2) ประเมินการถดถอยของตลิ่งรวมถึงการสร้างแบบจำลองการถดถอยของตลิ่ง และ (3) ศึกษาวิธีป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกา

การศึกษาคุณลักษณะของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาประกอบไปด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ ทางธรณีเทคนิคและการกัดเซาะ การสำรวจตลิ่งตลอดลำน้ำพร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินริมตลิ่งเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือน เครื่องมือ Submerged jet device ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาทดสอบการกัดเซาะตลิ่งเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง ผลการศึกษาพบว่า คลองอุ้ต๊ะเกาประกอบไปด้วยตลิ่งทั้ง 3 ชนิดคือ ตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว ตลิ่งที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว และตลิ่งแบบผสม ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาบริเวณกลางน้ำที่มีการถดถอยมีค่าอยู่ในช่วง 1.03-20.93 Pa และ 2.23-89.07 cm³/N.s สำหรับค่าหน่วยแรงวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ ตามลำดับ ซึ่งดินเหล่านี้สามารถจำแนกอยู่ในกลุ่มดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะถึงกลุ่มดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะสูง

การประเมินพื้นที่และระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศในปี พ.ศ. 2545 2553 และ 2559 ผลการประเมินพบว่า ในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553 มีพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะและทับถมเท่ากับ 626.81 และ 131.84 ไร่ ตามลำดับ หรือมีการสูญเสียพื้นที่สุทธิประมาณ 494.97 ไร่ โดยในเขตอำเภอหาดใหญ่มีการสูญเสียพื้นที่เนื่องจากการกัดเซาะของแนวตลิ่งมากที่สุด โดยมีพื้นที่การกัดเซาะประมาณ 14.83 ไร่ต่อแนวตลิ่งยาว 1 กิโลเมตร สำหรับการประเมินการถดถอยของตลิ่ง 6 ตำแหน่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุ้ต๊ะเกา ช่วงกลางน้ำที่มีการถดถอยสูง พบว่า ในช่วงปี 2545-2559 ระยะการถดถอยอยู่ในช่วงประมาณ 7.52-31.83 เมตร โดยมีค่าถดถอยเฉลี่ยเท่ากับ 17.21 เมตร แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) และทำการปรับเทียบโดยใช้ Lumped parameter (α) ผลการพัฒนาแบบจำลองการถดถอยพบว่า ระยะการถดถอยที่คำนวณได้จาก BSTEM สอดคล้องกับระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศในปี 2545 2553 และ 2559 ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินการถดถอยของตลิ่งอุ้ต๊ะเกาในอนาคตได้

สำหรับการศึกษาวีธีการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่ง แปลงสาธิตได้ถูกออกแบบให้มีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้แผ่นยางพาราร่วมกับพืชยึดดิน แปลงสาธิตรวม 3 แปลงถูกก่อสร้างขึ้น ประกอบด้วยแปลงสาธิตที่ 1 ใช้แผ่นยางพาราร่วมกับการปลูกพืชเสริม แปลงที่ 2 ใช้แผ่นยางพาราร่วมกับปลูกหญ้าแฝกเสริม และแปลงที่ 3 ใช้แผ่นยางพาราอย่างเดียว การตรวจสอบประสิทธิภาพของแปลงสาธิตได้มีการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะตลอดช่วงระยะเวลา 10 เดือน ผลการติดตามการกัดเซาะของแปลงสาธิตพบว่า แปลงสาธิตทั้งสามไม่มีการกัดเซาะตลิ่งตลอดแนว ซึ่งในภาพรวมสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะทั้งสามวิธีสามารถป้องกันการกัดเซาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก : การกัดเซาะ การถดถอยของตลิ่ง พารามิเตอร์การกัดเซาะวิธีป้องกันการกัดเซาะ คลองอุ้มเตา

Abstract

Riverbank retreat is a global problem. It causes the loss of land alongside the river. Moreover, excessive sediment from riverbank erosion yields the reduction of river drainage capacity. The U-Tapao River in Songkhla Province has experienced riverbank retreat for sometimes. Due to the lack of riverbank retreat study in Thailand, this study was conducted in order to constructing knowledges regarding the riverbank retreat of the U-Tapao River. The objectives of this study were 1) to study the characteristics of the river, 2) to evaluate riverbank retreat and develop the riverbank retreat model, and 3) to study riverbank erosion protection that can be applied to the U-Tapao riverbanks.

Riverbank characterization study consisted of determinations of physical, geotechnical and erosional properties. Riverbanks from upstream to downstream areas were surveyed and soil samples were collected for laboratory testing. A submerged jet device was built and used in determining soil erodibility parameters in-situ. Study results show that the U-Tapao riverbanks can be classified as cohesive, non-cohesive, and composite banks. Soil erodibility parameters of the riverbank soils with high retreat rate found in the midstream areas ranged from 1.03-20.93 Pa and 2.23-89.07 cm³/N.s, for critical shear stress and erodibility coefficient, respectively. These riverbank soils were classified as erodible to very erodible soils.

Evaluations of retreated area and length were conducted using aerial imagery analysis. Aerial images of 2002, 2010, and 2016 were obtained for the analysis. Evaluation results indicate that from 2002 to 2010, the eroded and reclaimed areas were 247.82 and 52.13 acre which corresponded to a net land loss of 195.70 acre. The riverbanks were highly eroded in Hat Yai district area with the eroded area of 5.86 acre per one kilometer of riverbank length. For the midstream area, six high bank retreat locations were specifically studied. It was found that from 2002 to 2016 the retreat length for these six locations ranged from 7.52 to 31.83 m with the average of 17.21 m. A bank retreat model was developed using Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) and the model was calibrated using the lumped parameter (α). The developed bank retreat model was found to be able to compute accurate bank retreat lengths comparing to

those obtained from areal imagery analysis. The developed model can be used to predicted future bank retreat at these locations.

In riverbank retreat protection study, three experimental sites were designed to have para rubber sheet and planting for erosion protection purposes. Pilot site 1 (para rubber sheet with vetiver grass), pilot site 2 (para rubber sheet with *Senna siamea*), and pilot site 3 (para rubber sheet only) were constructed. Surveying and visual inspection were conducted to monitor the erosion of the pilot sites for 10 months. Monitoring results indicated that there was no erosion for all sites. Thus, all three protection methods were proved to be efficient.

Keywords: Erosion, Riverbank retreat, Soil erodibility parameters, Bank retreat protection method, the U-Tapao River.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร	4
2.1 ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา	4
2.1.1 ลักษณะภูมิประเทศ/การใช้ที่ดิน	4
2.2.2 ภูมิอากาศและอุทกวิทยา	4
2.2 ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil)	7
2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	7
2.2.2 เส้นอรรถลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil Water Characteristic Curve)	9
2.2.3 ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	11
2.2.4 การไหลซึมของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated flow)	12
2.3 การถดถอยของตลิ่ง (Riverbank retreat)	13
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subarial process)	13
2.3.2 การถูกกัดเซาะของดินริมตลิ่ง (Riverbank erosion)	14
2.3.3 การพังทลายของตลิ่ง (Riverbank failure)	20
2.4 วิธีการทดสอบการกัดเซาะของดิน (Erosion test method)	27
2.4.1 การทดสอบการกัดเซาะในรางน้ำเปิด (Flume test)	27
2.4.2 การทดสอบการกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test	28
2.5 การป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง	33
2.5.1 การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้โครงสร้างแข็ง	33
2.5.2 การป้องกันการกัดเซาะโดยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี	35
บทที่ 3 คุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถา	41
3.1 บทนำ	41
3.2 การทบทวนเอกสาร	41
3.2.1 การทดสอบการกัดเซาะ	41
3.2.2 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดิน	44
3.3 การสำรวจและทดสอบดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา	45
3.3.1 การสำรวจลักษณะทางกายภาพของตลิ่ง	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค	46
3.3.3 การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการกัดเซาะ	46
3.4 คุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเภา	48
3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของตลิ่งคลองอุตะเภา	49
3.4.2 คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินริมตลิ่ง	51
3.4.3 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง	53
3.5 สรุปผลการศึกษา	63
บทที่ 4 การถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา	65
4.1 บทนำ	65
4.2 การทบทวนเอกสาร	66
4.2.1 การกัดเซาะตลิ่ง	66
4.2.2 เสถียรภาพของตลิ่ง	67
4.2.3 แบบจำลอง Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)	68
4.3 วิธีการประเมินการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา	69
4.3.1 การคำนวณพื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของคลองอุตะเภา	69
4.3.2 การคำนวณระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ	71
4.3.3 การพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา	72
4.4 ผลการศึกษาการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุตะเภา	73
4.4.1 พื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของคลองอุตะเภา	73
4.4.2 ระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ	77
4.4.3 แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา	78
4.5 สรุปผลการศึกษา	88
บทที่ 5 การป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเภา	89
5.1 บทนำ	89
5.2 การทบทวนเอกสาร	90
5.2.1 การกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเภา	90
5.2.2 ทฤษฎีการกัดเซาะ	92
5.2.3 การป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง	95
5.3 การออกแบบการปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ	97
5.3.1 พื้นที่ศึกษา	97
5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่ทำการปรับปรุง	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 รูปแบบการปรับปรุงตลิ่งป้องกันการกัดเซาะ	104
5.3.4 คุณสมบัติของแผ่นยางป้องกันการกัดเซาะ	106
5.4 การก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ	107
5.4.1 ขั้นตอนการก่อสร้างแปลงสาธิต	107
5.4.2 ผลการก่อสร้างการปรับปรุงตลิ่ง	112
5.5 การติดตามประสิทธิภาพของแปลงสาธิต	115
5.5.1 การสำรวจเพื่อติดตามการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของตลิ่ง	115
5.5.2 ผลการติดตามการกัดเซาะของตลิ่ง	116
5.5.3 ผลการติดตามการกัดเซาะตลิ่งแปลงสาธิตในภาพรวม	123
5.6 สรุปผลการศึกษา	124
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	126
6.1 สรุปผลการศึกษา	126
6.2 ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ	127
บรรณานุกรม	129
ภาคผนวก ก	139
ภาคผนวก ข	169
ภาคผนวก ค	175
ภาคผนวก ง	178

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยวิธีชีววิศวกรรมประจุพี (Iowa Department of Natural Resources, 2006)	37
3.1 โชนของกลุ่มน้ำคลองอุตะเถาและคุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่ง (ศุภชัยวิชัยภักดิ์-ทางธรรมชาติภาคใต้ 2557)	50
3.2 คุณสมบัติชั้นและคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา	54
3.3 คุณสมบัติด้านการกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา	55
3.4 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์การกัดเซาะในแต่ละชนิดของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา	57
3.5 พารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสพการณ์	60
4.1 พื้นที่การกัดเซาะและทั้บถมของคลองอุตะเถาในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553	75
4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ	78
4.3 คุณสมบัติของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถาทั้ง 6 ตำแหน่ง	83
4.4 การเปรียบเทียบระหว่างระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศและผลการวิเคราะห์การถดถอย	87
5.1 วิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งทั้งในประเทศและต่างประเทศ	96
5.2 คุณสมบัติของชั้นดินและลักษณะของตลิ่ง	98
5.3 วิธีการวิเคราะห์และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับลักษณะงานต่างๆ	100
5.4 อัตราส่วนความปลอดภัยของแปลงสาธิตการป้องกันตลิ่ง	100
5.5 ผลการทดสอบการบดอัดดินและความหนาแน่นในสนาม	103
5.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชั้นตัวอย่างของแผ่นยางป้องกันการกัดเซาะ	107
5.7 ระยะเวลาในการก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งคลองอุตะเถา	108
5.8 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างของตำแหน่งหมดเทียบกับผลการสำรวจครั้งแรก	117

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะทั่วไปของตลิ่งคลองอุตะเถา	2
2.1 ภูมิประเทศลุ่มน้ำคลองอุตะเถา	5
2.2 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนของลุ่มน้ำคลองอุตะเถาในรอบ 30 ปี (กรมอุตุนิยมวิทยา)	6
2.3 อัตราการไหลของน้ำ ณ. สถานีโทรมาตรลุ่มน้ำคลองอุตะเถา X.90 อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา (ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน)	6
2.4 ระดับน้ำ ณ. สถานีโทรมาตรลุ่มน้ำคลองอุตะเถา X.90 อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา (ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน)	6
2.5 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)	7
2.6 เส้นขอบเขตการพิบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)	8
2.7 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve (Fredlund and Xing, 1994)	9
2.8 รอยแตกบริเวณผิวของริมตลิ่ง (ภาพถ่ายโดย Theresa M. Wynn, 2004)	14
2.9 Shields Diagram สำหรับการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของเม็ดดิน	16
2.10 การแบ่งพื้นที่การไหลของน้ำสำหรับใช้คำนวณ Hydraulic radius (Langendoen, 2000)	17
2.11 การกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนของตลิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู	18
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะและค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Karmaker and Dutta, 2011)	20
2.13 รูปแบบการพิบัติของตลิ่ง a) Rotational failure b) Planar failure c) Cantilever failure และ d) Seepage erosion (Simon et al., 2000)	22
2.14 การพิบัติแบบระนาบ a) แรงกระทำระนาบพิบัติของตลิ่ง b) การแบ่ง slices เพื่อคำนวณหน่วยแรงภายในของแต่ละ slices (Langendon, 2000)	25
2.15 ลักษณะการพิบัติแบบคานยื่น	27
2.16 แบบแปลนของเครื่องมือการทดสอบการกัดเซาะ Submerged jet device (Hanson and Cook, 1997)	30
2.17 การแพร่กระจายของน้ำที่ไหลผ่านช่องเปิดของเครื่องมือ Submerged jet device (Hanson and Cook, 1997)	31
2.18 ตัวอย่างผลการทำ Optimization และ Minimization ของฟังก์ชัน Equilibrium depth	31
2.19 ตัวอย่างผลการ Optimization และ Minimization ของฟังก์ชันการกัดเซาะ (Hanson and Cook, 2004)	32

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 กลุ่มประเภทของดินด้านการกัดเซาะ (Soil erodibility categories; Hanson and Simon, 2001)	33
2.21 ประเภทของกำแพงกันดินป้องกันการกัดเซาะ ก) gravity walls ข) cantilever walls ค) sheet-piling walls	34
2.22 การใช้หินเพื่อป้องกันการกัดเซาะ	35
2.23 การใช้เขื่อนในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง	36
2.24 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้การปักกิ่งไม้สด	38
2.25 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้ตะขี้ไม้สด	39
2.26 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วิธี Vegetated geogrid	40
3.1 ลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกา จังหวัดสงขลา	42
3.2 Submerged jet apparatus (Hanson and Cook, 1997)	43
3.3 การกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนของเครื่องมือ submerged jet (Hanson and Cook, 1997)	44
3.4 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรง	47
3.5 เครื่องมือทดสอบ Submerged jet device ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ก) ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือ ข) รายละเอียดของส่วนทิวป์กำเนิดแรงดัน	48
3.6 การทดสอบ Submerged jet test บริเวณตลิ่งคลองอุต๊ะเกา	49
3.7 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในบริเวณลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกาบริเวณต้นน้ำ ก) บ้านตะเข้ยนเกา (UT1) ข) บ้านม่วงก่อง (UT3)	50
3.8 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำ ก) บ้านคลองปอม(UT4) ข) บ้านพรุ (UT8)	51
3.9 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งบริเวณลุ่มน้ำบริเวณปลายน้ำ ก) บ้านนารังนก (UP11) ข) บ้านคูเต่า (UT12)	52
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุต๊ะเกา	58
3.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า cT จาก Jet test และสมการของ Julian and Torres(2006)	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาบริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา ก) จุดเริ่มต้นและสิ้นสุด การประเมินพื้นที่การกัดเซาะ ข) ตำแหน่งของตลิ่งสำหรับการวิเคราะห์การถดถอย	70
4.2 ภาพถ่ายทางอากาศการคำนวณระยะการกัดเซาะและการทับถม	70
4.3 ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศแสดงการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุตะเถาตำแหน่ง UT6	71
4.4 กราฟน้ำท่าหน้าตลิ่งแต่ละตำแหน่ง	74
4.5 พื้นที่การกัดเซาะและทับถมในแต่ละอำเภอ	76
4.6 พื้นที่การกัดเซาะและทับถมในอำเภอหาดใหญ่	77
4.7 ระยะการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา อำเภอสะเดา a) ตลิ่งฝั่งซ้าย b) ตลิ่งฝั่งขวา	79
4.8 ระยะการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา อำเภอคลองหอยโข่ง	79
4.9 ระยะการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา อำเภอหาดใหญ่ a) ตลิ่งฝั่งซ้าย b) ตลิ่งฝั่งขวา	80
4.10 ระยะการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา อำเภอบางกล่ำ	80
4.11 ลักษณะทั่วไปของตลิ่งคลองอุตะเถาในพื้นที่ศึกษา ก) ตลิ่งชั้นบน (Upper bank) ข) ตลิ่งชั้นล่าง (Lower bank).	81
4.12 ตลิ่งที่ทำการศึกษาทั้ง 6 ตำแหน่ง บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถาตอนกลาง	82
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ_c และ k_d	85
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศและจากการ วิเคราะห์โดยใช้ BSTEM	86
5.1 ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา	91
5.2 ลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถาในปี 2552	91
5.3 ลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถาในปี 2557	92
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะและค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือน วิกฤตของดิน (Karmaker and Dutta, 2011)	94
5.5 แนวตลิ่งในพื้นที่ดำเนินการก่อสร้างการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งคลองอุตะเถา ก) ภาพถ่ายทางอากาศในปี 2553 ข) สภาพตลิ่งปัจจุบัน	98
5.6 ลักษณะของตลิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ	99
5.7 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาธิตของตลิ่งคลองอุตะเถา กรณีระดับน้ำ +0.00 เมตร (GWL=WL=0.00 เมตร)	101
5.8 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาธิตของตลิ่งคลองอุตะเถา กรณีระดับน้ำ +2.50 เมตร (GWL=WL=2.50 เมตร)	101
5.9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาธิตของตลิ่งคลองอุตะเถา กรณีระดับน้ำเต็มตลิ่ง +5.00 เมตร (GWL=WL=5.00 เมตร)	101

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาธิตของตลิ่งคลองอุตะเถา กรณีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว+2.50 เมตร (GWL= 5.00 เมตร WL=2.50 เมตร)	102
5.11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาธิตของตลิ่งคลองอุตะเถา กรณีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว +0.00 เมตร (GWL= 5.00 เมตร WL=0.00 เมตร)	102
5.12 การกระจายตัวของดินถมที่ใช้ในการก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งทั้ง 3 แปลง	104
5.13 แบบแปลนวิธีการปรับปรุงตลิ่งป้องกันการกัดเซาะคลองอุตะเถา ก) Top view แสดงการวางตำแหน่งแปลงสาธิตทั้ง 3 แปลง ข) แปลงที่ 1 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + seeding ค) แปลงที่ 2 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + vetiver grass ง) แปลงที่ 3 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet	105
5.14 ภาพตัดตามขวางของแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะ	106
5.15 การปรับพื้นที่เพื่อเตรียมการก่อสร้าง ก) การถางต้นไม้และวัชพืช ข) การวัดระดับด้วยกล้องสำรวจ	108
5.16 การเปิดพื้นที่แนวตลิ่งที่ทำการปรับปรุง ก) การเคลียพื้นที่บริเวณตลิ่ง ข) แนวตลิ่งหลังจากการปรับพื้นที่แล้ว ค) คณะผู้ร่วมดำเนินการก่อสร้างการปรับปรุงตลิ่ง	109
5.17 การถมดินเพื่อปรับระดับของตลิ่งในชั้นล่าง ก) แนวตลิ่งก่อนเริ่มทำการถมดินปรับระดับ ข) แนวตลิ่งหลังจากการถมดินปรับระดับจากตีนตลิ่งถึงระดับความสูง 2.5 เมตร	110
5.18 การก่อสร้างแปลงสาธิตในช่วงระดับตีนตลิ่งถึงระดับ +2.50 เมตร ก) ร่องทางเข้า-ออกแปลงสาธิต ข) การเคลื่อนย้ายแผ่นยางเพื่อปูตลิ่ง ค) การทากาวยางบริเวณรอยต่อ ง) แนวตลิ่งหลังจากการปูยางและเรียงหินแล้ว	110
5.19 การก่อสร้างแปลงสาธิตในช่วงระดับ 2.50-5.00 เมตร ก) การถมดินปรับระดับตลิ่งถึงระดับ 5.0 เมตร ข) แนวตลิ่งหลังจากปรับความชัน ค) การขุดร่องฝังแผ่นยางและเรียงหินบนตลิ่ง	111
5.20 การเก็บรอยต่อระหว่างแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะ ก) สมอยึดแผ่นยาง ข) การปิดทับรอยต่อของแผ่นยางด้วยผ้าชุบน้ำยางผสม	112
5.21 การปลูกพืชหน้าตลิ่ง ก) ต้นพุงของแปลงสาธิตที่ 1 ข) กล้วยแฝกของแปลงสาธิตที่ 2	112
5.22 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 1 เดือน (พฤศจิกายน 2558) ก) แปลงที่มีการปูแผ่นยางและปลูกพืชยืนต้น ข) แปลงที่มีการปูแผ่นยางและปลูกหญ้าแฝก	113

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 การติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์บริเวณตีนตลิ่ง ก) แผ่นใยสังเคราะห์ ข) การปิดแผ่นใยสังเคราะห์ด้วยผ้าชุบน้ำยางผสม	113
5.24 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 3 เดือน (มกราคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ	114
5.25 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 5 เดือน (มีนาคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ	114
5.26 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 6 เดือน (เมษายน 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) ภูเขาแฝกบริเวณแปลงที่ 2	114
5.27 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 10 เดือน (สิงหาคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ	115
5.28 การสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะด้วยกล้อง Total station ก) ถ่ายระดับจากจุดอ้างอิง BM1 ข) Grid ของตำแหน่งหมุดติดตามการกัดเซาะ	116
5.29 ตำแหน่งของหมุดติดตามการกัดเซาะของแปลงสาธิตทั้งสาม	117
5.30 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 1 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5	118
5.31 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 2 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5	120
5.32 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของตำแหน่งติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 3 ก) การสำรวจ ครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5	121
5.33 เส้นชั้นความสูงแสดงการเคลื่อนตัวของหมุดติดตามการกัดเซาะและตำแหน่งที่สอดคล้องกันสำหรับการสำรวจในแต่ละครั้ง ก) ครั้งที่ 2 ข) ครั้งที่ 3 ค) ครั้งที่ 4 และ ง) ครั้งที่ 5 ตามลำดับ	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การขาดเสถียรภาพและการกัดเซาะตลิ่งสามารถนำไปสู่ปัญหาในหลายๆด้านเช่น การสูญเสียพื้นที่ทางการเกษตรการสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำของแม่น้ำเนื่องจากการทับถมของตะกอนลำน้ำและกระทบต่อระบบนิเวศ เป็นต้น(Amiri-Tokaldany et al., 2003;Hooke, 1980; Millar and Quick, 1993; Darby and Thorne, 1996a; Barker et al., 1997; Millar, 2000; Goodson et al., 2002) ซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำทางธรรมชาติของลำน้ำที่เรียกว่า “กระบวนการของลำน้ำ” (Fluvial process)กระบวนการของลำน้ำที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของกลุ่มน้ำส่งผลกระทบต่อพื้นที่ในรูปแบบที่แตกต่างกันซึ่งก่อให้เกิดการถดถอยของตลิ่ง (Bank retreat) การถดถอยประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญคือ (1) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subarial process)(2) การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง (Riverbank erosion) และ (3) การพิบัติของตลิ่ง (Riverbank failure)โดยทั่วไป กระบวนการทั้งสามเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน ส่งผลทำให้ดินริมตลิ่งถูกกัดเซาะได้ง่าย นำไปสู่การขาดเสถียรภาพและเกิดการพิบัติของตลิ่ง

ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาเป็นลุ่มน้ำที่ใหญ่ที่สุดในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา โดยมีคลองอู่ตะเภาเป็นลำน้ำสายหลักของกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา ซึ่งเป็นลำน้ำที่ใหญ่ที่สุดในจังหวัดสงขลา โดยมีจุดกำเนิดจากชายแดนไทย-มาเลเซีย ไหลผ่านเทศบาลนครหาดใหญ่และไหลลงทะเลสาบสงขลา คลองอู่ตะเภาประสบปัญหาการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งตลอด 10 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากลักษณะของตลิ่งส่วนมากมีความชันเกือบ 90° (รูปที่ 1.1) เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำสูงในช่วงฤดูฝน การพิบัติของตลิ่งคลองอู่ตะเภาสร้างความเสียหายทั้งทรัพย์สินชาวบ้านที่อาศัยอยู่ริมตลิ่ง รวมไปถึงการสูญเสียที่ดินและสวนยางของชาวบ้านในบริเวณนั้น อีกทั้งนำไปสู่การสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เทศบาลนครหาดใหญ่มีความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมในช่วงหน้าฝน

สุรตีและธนิต (2553) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของตลิ่งคลองอู่ตะเภา พบว่าตลิ่งคลองอู่ตะเภาเป็นตลิ่งที่ประกอบไปด้วยดินทรายเม็ดละเอียดปนตะกอนทรายและดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ซึ่งง่ายต่อการถูกกัดเซาะโดยเฉพาะในฤดูฝนในกรณีที่มีความเร็วการไหลของน้ำสูง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การกัดเซาะได้ใช้พารามิเตอร์การกัดเซาะ (Erodibility parameter) จากสมการเชิงประสพการณ์ โดยการปรับค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress) และปรับเทียบระยะเวลาการถดถอยจากการตรวจวัดรูปตัดขวางของตลิ่งก่อนและหลังการพิบัติ ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ใช้อาจไม่เหมาะสมกับดินริมตลิ่งคลองอู่ตะเภา เนื่องจากสมการเชิงประสพการณ์ดังกล่าวพิสูจน์มาจากตัวอย่างดินในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้ให้ความสำคัญกับการทดสอบการกัดเซาะของดินริมตลิ่งในสนามและนำค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะมาวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งโดยใช้แบบจำลองพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบ

กับการถดถอยของตลิ่งจริงที่ได้จากการประเมินโดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ และรวมถึงการศึกษาวิธีการปรับปรุงตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาเพื่อป้องกันการกัดเซาะ



รูปที่ 1.1 ลักษณะทั่วไปของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาฝั่งขวา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกา
- 1.2.2 วิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาและสร้างแบบจำลองการถดถอย
- 1.2.3 ปรับปรุงตลิ่งโดยการก่อสร้างแปลงสาธิต พร้อมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงตลิ่งที่เลือกใช้

1.3 ขอบเขตและภาพรวมของงานวิจัย

- 1.3.1 การทดสอบการกัดเซาะในสนามใช้เครื่องมือ Submerged jet device
- 1.3.2 การวิเคราะห์พื้นที่การกัดเซาะ/ทับถม ใช้ภาพถ่ายทางอากาศในปี พ.ศ. 2545 และ 2553
- 1.3.3 การวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งได้เลือกใช้ตลิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุ้ต๊ะเกาตอนกลาง และใช้ภาพถ่ายทางอากาศปี พ.ศ. 2545 2553 และ 2559
- 1.3.4 การปรับปรุงตลิ่งได้เลือกใช้แผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะทดแทนวัสดุสังเคราะห์

การวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาคุณลักษณะลักษณะทางกายภาพของตลิ่งและคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของดินริมตลิ่ง (บทที่ 3) ประกอบด้วยคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคและการกัดเซาะโดยการสำรวจแนวตลิ่ง เก็บตัวอย่างดินริมตลิ่ง และทดสอบการกัดเซาะในสนามด้วยเครื่องมือ Submerged jet device เครื่องมือการทดสอบนี้ได้ถูกพัฒนาตามมาตรฐาน ASTM D5852 สำหรับการทดสอบการกัดเซาะในสนาม ผลการทดสอบ Submerged jet test ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ

สมการเชิงประสพการณ์เพื่อหาคุณสมบัติดัชนีที่เหมาะสมและประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมการเชิงประสพการณ์สำหรับการประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่เหมาะสมของตลิ่งคลองอุ้ตะเภา

การวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่ง (บทที่ 4) ประกอบด้วย การประเมินพื้นที่การกัดเซาะและการทับถมโดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศปี พ.ศ. 2545 และ 2553 รวมถึงคำนวณการถดถอยของแนวตลิ่งเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการถดถอยจากแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุ้ตะเภา โดยใช้ Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) ร่วมกับการปรับเทียบพารามิเตอร์การกัดเซาะด้วยค่าปรับเทียบ (Lump parameter) แบบจำลองถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยการทำนายการถดถอยในปี พ.ศ. 2553-2559

ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะโดยการทำแปลงสาธิต (บทที่ 5) พร้อมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพที่เลือกใช้ แปลงสาธิตวิธีการปรับปรุงตลิ่งประกอบด้วย แปลงสาธิตที่ 1 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับการปลูกพืชเสริมแปลงที่ 2 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับปลูกหญ้าแฝกเสริม และแปลงที่ 3 การใช้แผ่นยางพาราอย่างเดียวซึ่งหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์ ได้มีการติดตามการกัดเซาะโดยการสำรวจหมุดติดตาม (Erosion pins) เป็นระยะเวลา 10 เดือน

บทที่ 2

การทบทวนเอกสาร

2.1 ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา

2.1.1 ลักษณะภูมิประเทศ/การใช้ที่ดิน

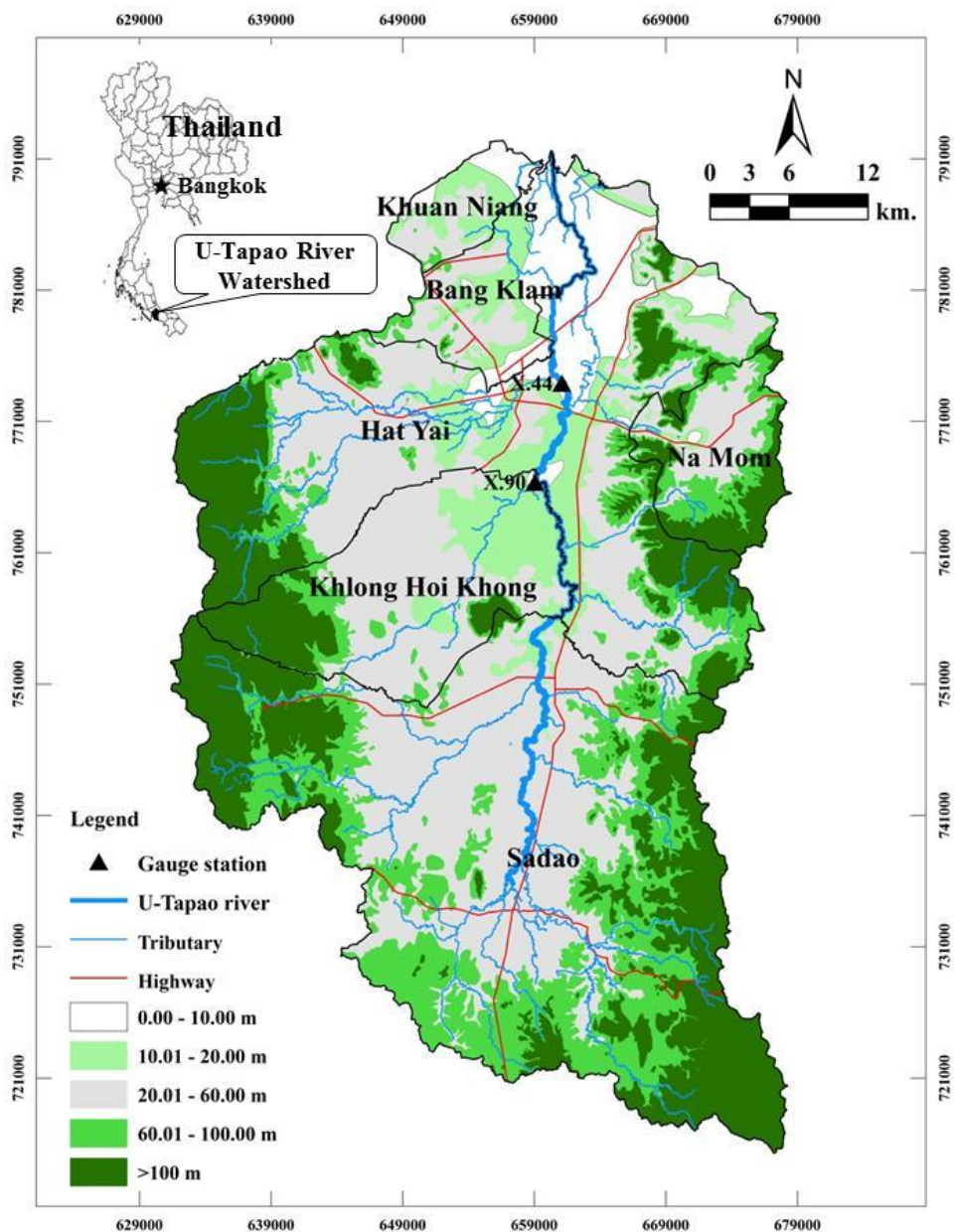
ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา (รูปที่ 2.1) มีพื้นที่ประมาณ 2,400 ตารางกิโลเมตร คลอบคลุมเขตพื้นที่อำเภอหาดใหญ่ อำเภอคลองหอยโข่ง อำเภอนาหม่อม อำเภอสะเตกา อำเภอบางกล่ำ และบางส่วนอยู่ในเขตอำเภอเมืองและอำเภอควนเนียง โดยมีลำน้ำที่สำคัญคือคลองอุตะเถา ซึ่งเป็นลำน้ำที่ใหญ่ที่สุดในจังหวัดสงขลา คลองอุตะเถาเป็นคลองระบายน้ำสายหลัก ซึ่งไหลจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ มีความยาวประมาณ 112 กิโลเมตร จากอ่างเก็บน้ำคลองสะเตกาถึงทะเลสาบสงขลา

ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาถูกล้อมรอบด้วยพื้นที่ภูเขา ในทิศตะวันตก ทิศตะวันออกและทิศใต้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขาบรรทัดและเทือกเขาสันกะลาคีรี ความสูงของพื้นที่ลดระดับลงมาจากเทือกเขาในทิศตะวันตก ทิศตะวันออกและเทือกเขาในทิศใต้มายังกลางลุ่มน้ำ ไปยังทะเลสาบสงขลา ในทิศเหนือ พื้นที่บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถามีการใช้ที่ดินหลายลักษณะโดยประกอบด้วยพื้นที่ทางเกษตรกรรม สถานที่ราชการและสถาบันต่างๆ และหมู่บ้าน เป็นต้น พื้นที่ทางการเกษตรประกอบด้วย ไม้ผล ปาล์ม น้ำมัน และยางพารา โดยมีการใช้ที่ดินเพื่อปลูกยางพาราเป็นหลักตั้งแต่พื้นที่ตำบลปริกที่อยู่ในบริเวณต้นน้ำจนถึงบริเวณกลางน้ำในพื้นที่ตำบลควนลัง โดยเฉพาะ 5 ตำบลในพื้นที่ดังกล่าว ได้แก่ ตำบลปริก ตำบลท่าโพธิ์ ตำบลพังลา ตำบลทุ่งลานและตำบลบ้านพรุ ซึ่งมีพื้นที่สวนยางพาราเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่แนวตั้งคลองอุตะเถา บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำตอนกลาง บริเวณพื้นที่ราบลุ่มส่วนใหญ่เป็นที่ตั้งของสถานที่ราชการ สถาบันต่างๆ และหมู่บ้าน โดยเฉพาะในตัวเมืองเป็นพื้นที่เทศบาลนครหาดใหญ่ เป็นพื้นที่น้ำท่วมถึง เนื่องจากพื้นที่ในเขตอำเภอหาดใหญ่เป็นทางน้ำไหลผ่าน มีการพัฒนาที่ดิน การถมที่เพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งเป็นการกีดขวางทางน้ำเช่น ถนนเลียขมเมือง เมื่อเกิดฝนตกหนักจึงระบายน้ำไม่ทัน ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมฉับพลันดังที่เกิดขึ้นมาในอดีต

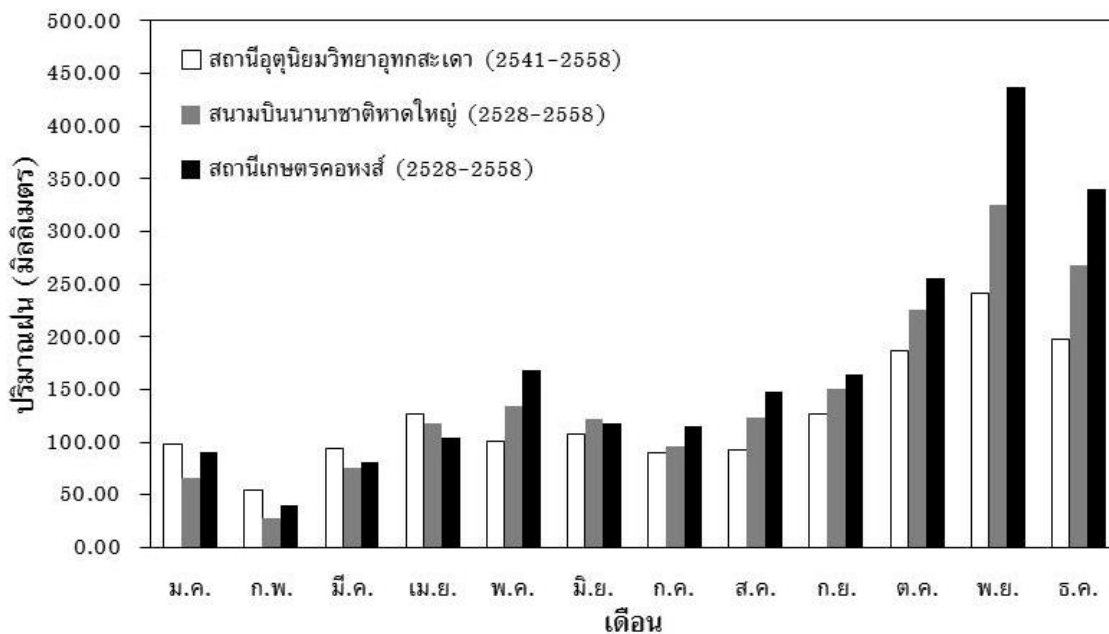
2.1.2 ภูมิอากาศและอุทกวิทยา

พื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในช่วงเดือนพฤษภาคม-ตุลาคมและตะวันออกเฉียงเหนือ ส่งผลให้เกิดฝนเล็กน้อยและมีปริมาณฝนสูงในช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคมรูปที่ 2.2 แสดงปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยในลุ่มน้ำคลองอุตะเถาตั้งแต่ปี 2528-2558 จากสถานีอุตุนิยมวิทยา 3 สถานีของจังหวัดสงขลาปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 1,450.08 1,731.47 2,050.44 มิลลิเมตร สำหรับสถานีสะเตกา สถานีสนามบินนานาชาติหาดใหญ่และสถานีเกษตรคองหงส์ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำฝนมีค่าสูงสุดของสถานีเกษตรคองหงส์ในปี 2543 มีค่าเท่ากับ 2,754.10 มิลลิเมตรซึ่งเป็นปีที่เกิดน้ำท่วมครั้งใหญ่ในตัวเมืองหาดใหญ่ มีปริมาณน้ำฝนสะสมในช่วงเดือนพฤศจิกายนมีค่าเท่ากับ 926.90 มิลลิเมตร ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนสะสมเป็นผลจากฝนตก

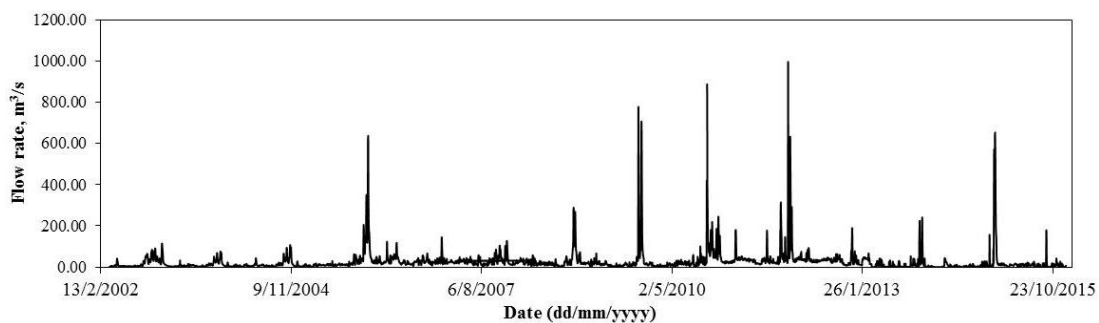
อย่างหนาแน่น โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายนของทุกปี ลักษณะของฝนที่ตกส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในตลิ่งคลองอุตะเถาเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลดังแสดงในรูปที่ 2.3 อัตราการไหลของน้ำสูงสุดในช่วงน้ำหลากปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) 2552 (ค.ศ. 2009) 2553 (ค.ศ. 2010) และ 2555 (ค.ศ. 2012) เท่ากับ 635.85 768.5 887.75 และ 992.4 ลบ.ม/วินาที ตามลำดับ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.4 (สถานีโทรมาตรลุ่มน้ำคลองอุตะเถา X.90 ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน)



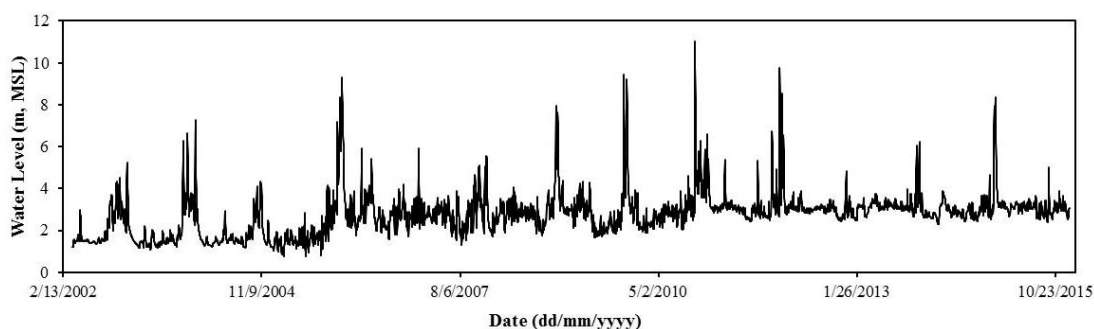
รูปที่ 2.1 ภูมิประเทศลุ่มน้ำคลองอุตะเถา



รูปที่ 2.2 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนของกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาในรอบ 30 ปี (กรมอุตุนิยมวิทยา)



รูปที่ 2.3 อัตราการไหลของน้ำ ณ สถานีโทรมาตรลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา X.90 อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา(ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน)



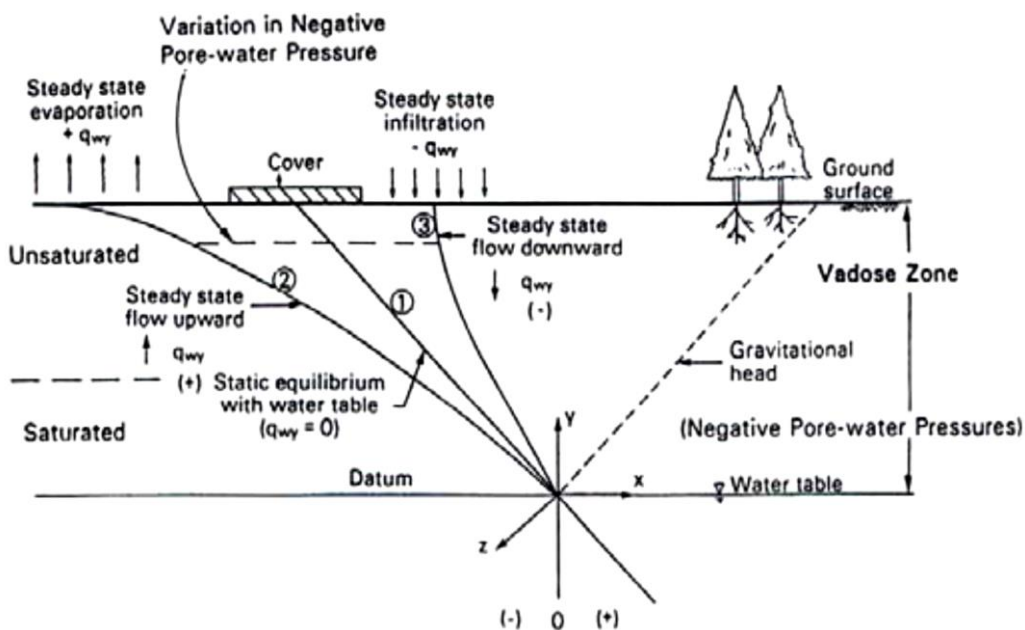
รูปที่ 2.4 ระดับน้ำ ณ สถานีโทรมาตรลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา X.90 อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา (ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน)

2.2 ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil)

การกัดเซาะและการพังทลายของดินริมตลิ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของดิน จากสภาพดินที่ไม่อิ่มตัวและอิ่มตัวด้วยน้ำ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของดินตามระดับ ความอิ่มตัวด้วยน้ำ

2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

มวลดินในสภาพธรรมชาติประกอบด้วยชั้นดินต่างๆ ที่ตกตะกอนทับถมกัน ปกติจะมีระดับน้ำใต้ดิน (Groundwater table) อยู่ต่ำกว่าระดับพื้นผิวดิน (Ground level) ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินจะมีน้ำอยู่เต็ม นั่นคือเป็นมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Vadose zone) จะประกอบทั้งดินอิ่มตัว (Capillary saturated zone) และดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated zone) ดังรูปที่ 2.5 หากไม่มีน้ำไหลซึมลงมาหรือระเหยขึ้นไปจากผิวดินและระดับน้ำใต้ดินคงที่เส้นแรงดันน้ำจะสมดุลที่เส้น (1) ในขณะที่เส้น (2) และ (3) หมายถึงมีการระเหยในฤดูแล้งและมีน้ำซึมลงในฤดูฝนตามลำดับ โดยทั้งสามกรณีจะมีความดันในช่องว่างที่เป็นลบ (Negative pore pressure) ทั้งสิ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป (Fredlund and Rahardjo, 1993)

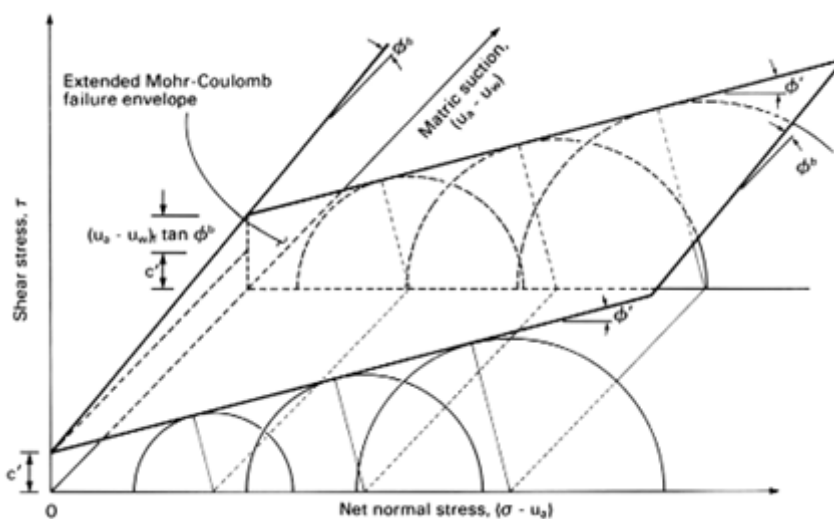
แรงดันน้ำที่เป็นลบในมวลดิน ก่อให้เกิดเป็นแรงดูด (Suction) โดยค่าแรงดูดในดินมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในมวลดินที่เรียกว่า แรงดูดโดยรวม (Total suction) ประกอบด้วยพลังงานอิสระของแรงดูด 2 ส่วน คือ แรงดูดเมทริกซ์ (Metric suction) หรือ แรงดูดของรูเล็ก (Capillary suction) เป็นแรงดูดที่เกิดเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในดินและแรงดูดออสโมติก (Osmotic suction) เป็นแรงดูดที่เกิดจากสารละลายที่ละลายในน้ำในดิน ค่าแรงดูดในดินจะเป็นตัว

เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัว (Shear strength of unsaturated soil) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1 (Fredlund et al., 1978) ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองของ Mohr-Coulomb

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.1)$$

เมื่อ τ คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength, kPa) c' คือ หน่วยแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective cohesion, kPa) σ คือ หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress, kPa) u_a คือ ความดันอากาศ (Pore air pressure, kPa) ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective internal friction angle, degree) u_w คือ ความดันน้ำ (Pore water pressure, kPa) $(u_a - u_w)$ คือ แรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction, kPa) และ ϕ^b คือ มุมที่แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเนื่องจากหน่วยแรงดูดในดิน (Suction angle, degree) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีค่าประมาณ $10^\circ - 20^\circ$ (Fredlund and Rahardjo, 1993)

จากสมการแรงดูดเมทริกซ์ $(u_a - u_w)$ เป็นตัวเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในเทอมของ $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ โดยการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินเนื่องจากแรงดูดเมทริกซ์ได้แสดงด้วยกราฟสามแกน โดยใช้ตัวแปร $(u_a - u_w)$ เป็นแกนที่เพิ่มขึ้น (Extended Mohr-Coulomb criteria) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า ϕ^b ได้



รูปที่ 2.6 เส้นขอบเขตการพิบัติ Mohr-Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993)

แรงดันน้ำ (Pore-water pressures, u_w) สามารถแบ่งแยกได้ 2 ประเภทได้แก่ แรงดันน้ำที่เป็นบวกและลบ (Positive and negative pore water pressure) โดยอ้างอิงมาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินประเภทที่มีการยึดเหนี่ยวกันระหว่างเม็ดดิน (Cohesive soil) แรงดันน้ำที่เป็นบวกเป็นปัจจัยหนึ่งในการลดกำลังรับแรง

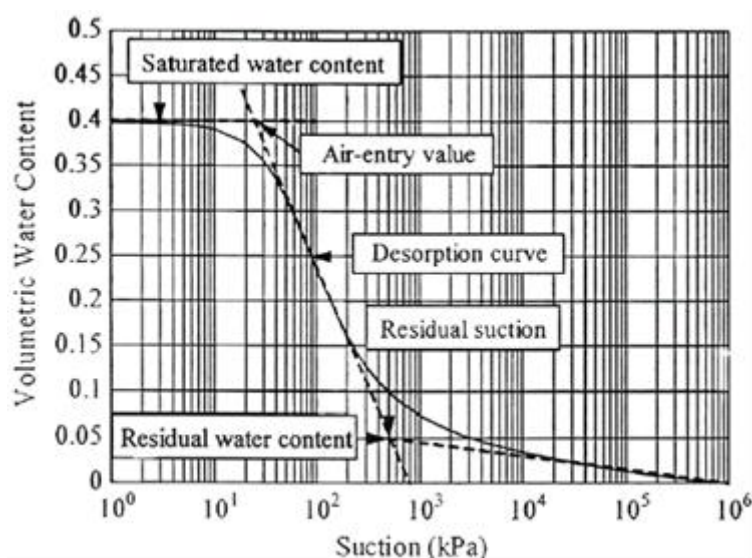
เฉือนของดิน ในขณะที่แรงดันน้ำที่เป็นลบสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งปรากฏอย่างชัดเจนสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัว แรงดันน้ำเกิดขึ้นจากเพิ่มปริมาณน้ำในมวลดินและยังสามารถเป็นหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำในรอยแตกบนตลิ่ง ซึ่งการกระทำดังกล่าวจะกระตุ้นให้ตลิ่งเกิดการพิบัติ ดังนั้น ผลกระทบของแรงดันน้ำจึงเป็นส่วนสำคัญในการถดถอยของตลิ่ง (Simon and Collison, 2001) ปริมาณน้ำในมวลดินบ่งบอกถึงค่าแรงดันน้ำทั้งสองประเภทโดยสามารถเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ดังนั้น การพิจารณาแรงดันน้ำจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

การรวมค่าแรงดันน้ำในแบบจำลองของการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งแสดงในรูปแบบของแรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏ (Apparent cohesion, c_a) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 โดยที่แรงดันน้ำที่เป็นลบ (ค่าบวกของ ψ) ในดินที่ไม่อิ่มตัวทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏเพิ่มขึ้น

$$c_a = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b = c' + \psi \tan \phi^b \quad (2.2)$$

2.2.2 เส้นอัตลักษณ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Soil Water Characteristic Curve)

ค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในมวลดินสามารถแสดงได้ในรูปของ “เส้นอัตลักษณ์ของดิน” (Soil-water characteristic curve, SWCC) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric water content, θ) กับแรงดูดเมทริกซ์ในดิน ($u_a - u_w$) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve (Fredlund and Xing, 1994)

การวัดค่าแรงดูดเพื่อคำนวณเส้นอัตลักษณ์ของดินสามารถแบ่งได้ 2 วิธีได้แก่ วิธีการวัดโดยตรง (Direct method) และวิธีการวัดทางอ้อม (Indirect method) แรงดูดสามารถวัดได้โดยเครื่องมือหลายชนิดเช่น เครื่องวัดแรงดึงน้ำของดิน (Tensiometer) เครื่องวัดแรงดูดเมทริกซ์

(Pressure plate) เป็นต้นซึ่งเครื่องมือดังกล่าวสามารถวัดแรงดันของน้ำในมวลดินในสถานะความชื้นต่างๆของดินได้ สำหรับวิธีการวัดทางอ้อมเป็นวิธีที่วัดค่าคุณสมบัติต่างๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินเช่น การใช้ กระดาษกรอง (Filter paper) การวัดการสลายความร้อน (Heat dissipation sensor) เป็นต้นวิธีการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้มีความแม่นยำสูง แต่ใช้เวลานานในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายสูงในการทดสอบ

นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีประมาณค่าจากคุณสมบัติของ SWCC โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (Brook & Corey, 1964; van Genuchten model, 1980; Fredlund and Xing, 1994) สมการเหล่านี้ให้ค่าตัวแปรซึ่งมีความถูกต้องน้อยกว่าการทดสอบจริงแต่สามารถดำเนินการได้ง่ายและรวดเร็ว รายละเอียดของสมการได้แสดงเฉพาะสมการของ van Genuchten model, 1980 และ Fredlund and Xing (1994) ดังต่อไปนี้

van Genuchten (1980) ได้เสนอความสัมพันธ์ของ SWCC ในลักษณะ Symmetric Sigmoidal (S-Curve) ตามความสัมพันธ์ในดังสมการ 2.3

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right\}^m \quad (2.3)$$

เมื่อ S_e คือ ระดับความอิ่มตัวประสิทธิภาพ (Effective saturation), θ คือ ปริมาณความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน (Volumetric water content, cm^3/cm^3), θ_s คือ ปริมาณความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสถานะอิ่มตัว (Saturated volumetric water content, cm^3/cm^3), θ_r คือ ปริมาณความชื้นโดยปริมาตรที่สถานะความชื้นคงค้าง (Residual volumetric water content, cm^3/cm^3), α , n , m คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำ Curve fitting, และ ψ คือ แรงดูดเมทริกซ์ในมวลดิน (Matric suction, kPa) โดยที่ $m = (1 - 1/n)$

Fredlund and Xing (1994) เสนอว่าเส้นอัตลักษณ์ของน้ำ SWCC สามารถประมาณได้จากขนาดของเม็ดดินและความหนาแน่นของดิน โดยสมมุติว่าเม็ดดินเป็นทรงกลมและ Metric Suction เท่ากับ Capillary Force ซึ่งเหมาะกับดินเม็ดหยาบโดยเฉพาะดินทราย (Sand) ดินตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) ที่มีช่วงแรงดูดของดินอยู่ระหว่าง $0-10^6$ kPa ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยสมการของ SWCC เขียนได้ดังสมการ 2.4

$$\theta = C(\psi) \left\{ \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left(e + \left(\frac{\psi}{\psi_a} \right)^n \right) \right\}^m} \right\} \quad (2.4)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left\{1 + \left(\frac{1,000,000}{\psi_r}\right)\right\}} \quad (2.5)$$

เมื่อ θ คือ ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร, θ_s คือ ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร ในขณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ, ψ คือ แรงดูดเมทริกซ์, ψ_a คือ แรงดูดเมทริกซ์ที่จุด Air entry value, ψ_r คือ แรงดูดเมทริกซ์ในขณะความชื้นคงค้าง, b และ c คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Curve fitting

2.2.3 ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีความแตกต่างจากการไหลซึมของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นอยู่กับแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) และค่าความซึมผ่านของน้ำในมวลดินที่อิ่มตัว (Saturated hydraulic Conductivity) ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน แรงดูดเมทริกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการไหลซึมของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีความสัมพันธ์กับเส้นอรรถลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (SWCC) ซึ่งสามารถคำนวณจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้มีการนำเสนอ เช่น Brook and Corey (1964) และ van Genuchten(1980) ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

Brook and Corey (1964) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณโดยการแบ่งเส้นอรรถลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และหาค่าความสามารถในการไหลซึมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^\lambda \quad (2.6)$$

$$k_\psi = \Theta^{3+2/\lambda} k_{sat} \quad (2.7)$$

โดยที่ k_ψ คือ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ณ จุดแรงดูดเมทริกซ์ที่พิจารณา, k_s คือ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ, ψ_a คือ ค่าแรงดึงดูด ณ Air Entry และ λ คือ ความชันของกราฟ SWCC เมื่อดินแห้งเกินจุด Air entry

vanGenuchten (1980) ได้เสนอสมการการไหลซึมของน้ำจากค่าการไหลซึมของน้ำในมวลดิน กับค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) ดังสมการที่ 2.8

$$k_{\psi} = k_{sat} \frac{\left[1 - (a\psi^{(n-1)})(1 + (a\psi^n)^{-m})\right]^2}{\left[(1 + a\psi^n)^m\right]} \quad (2.8)$$

โดยที่ k_{ψ} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดินจากค่าแรงดูดเมทริกซ์ (m/s), และ k_{sat} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (m/s)

การซึมผ่านของน้ำขณะอิ่มตัวด้วยน้ำสามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสนามเช่น การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินโดยวิธี Double-ring infiltration test (ASTM, D3385-03) การทดสอบการไหลซึมของน้ำด้วยเครื่องมือ Amoozometer (Amoozegar, 1989) เป็นต้น

ในทางเลือกอื่น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (k_{sat}) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ที่สัมพันธ์กับขนาดของช่องเม็ดดิน นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและทำการสร้างสมการจากผลการทดสอบของ Kozeny (1927) ความสัมพันธ์นี้ถูกทำให้ดีขึ้นโดย Carman (1956) ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการ Kozeny and Carman ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$k_{sat} = \frac{g}{\nu} \times 8.3 \times 10^{-3} \left[\frac{n^3}{(1-n)} \right] d_{10}^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational acceleration, 9.81 m/s²), ν คือ ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic viscosity, m²/s), n คือ ความพรุนของดิน (Soil porosity, m³/m³), และ d_{10} คือ ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินทั้งหมดที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า (Diameters of 10% of the soil grains, m)

2.2.4 การไหลซึมของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

เนื่องจากค่าแรงดันน้ำในมวลดินของตลิ่งเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการทางอุทกวิทยา (Hydrological processes) เช่น ปริมาณน้ำฝน (Rainfall) และระดับน้ำในลำน้ำ (River stage) ซึ่งปัจจัยทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ดังนั้น การวิเคราะห์ค่าแรงดันที่รวมอยู่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก (Rinaldi and Casagli, 1999; Casagli et al., 1999; Simon et al., 2000) เพราะฉะนั้น ความรู้ทางด้าน การไหลซึมของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated seepage flows) ถูกใช้ในการวิเคราะห์แรงดันน้ำที่กระจายตามความลึกของตลิ่งเพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

Governing equation สำหรับการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวได้แสดงดังสมการที่ 2.10 ซึ่งพัฒนาโดย Fredlund and Rahardjo ในปี ค.ศ. 1993 นักวิจัยหลายท่าน (Dapporto et al., 2001, 2003; Rinaldi et al., 2001, 2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันน้ำโดยใช้

สมการที่ 2.10 ผ่านทางโปรแกรม Seep/w ซึ่งมีการวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงดันน้ำในแบบจำลอง

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.10)$$

โดยที่ k_x คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำในแนวแกน x (m/s) H คือ ค่าระดับน้ำโดยรวม (m) k_y คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำในแนวแกน y (m/s) Q คือ การไหลของน้ำเข้าสู่แบบจำลอง (m^3/s) θ คือ ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (m^3/m^3) และ t คือ เวลา (s)

2.3 การถดถอยของตลิ่ง(Riverbank retreat)

การถดถอยของตลิ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นซ้ำไปซ้ำมาอันเป็นผลมาจากกระบวนการของลำน้ำ (Fluvial processes) จนกว่าสมดุลของตลิ่งจะเกิดขึ้น การถดถอยของตลิ่งก่อให้เกิดปัญหาหลายอย่าง ทั้งทางด้านลักษณะทางกายภาพของตลิ่งและปัญหาทางระบบนิเวศวิทยาของแม่น้ำ เช่น การเปลี่ยนแปลงลักษณะของตลิ่งและลำน้ำ (Width – adjustment of the river) และที่อยู่อาศัยของสัตว์บริเวณนั้นๆ (Hooke, 1980; Millar and Quick, 1993; Darby and Thorne, 1996a; Barker et al., 1997; Goodson et al., 2002) และปัญหาตะกอนลำน้ำ (Reneau et al., 2004) เป็นต้น

การถดถอยของตลิ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 กระบวนการหลัก (Couper and Maddock, 2001; Hooke, 1979; Lawler, 1992, 1995; Lawler et al., 1997a) ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subaerial process) การกัดเซาะของตลิ่ง (Riverbank erosion) และการพิบัติของตลิ่ง (Riverbank failure) กระบวนการทั้งสามนี้มีความสัมพันธ์กันและมีความต่อเนื่องกัน โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางอุทกศาสตร์และชลศาสตร์ รายละเอียดของแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subaerial process)

กระบวนการหลักของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดินที่เกิดขึ้นกับตลิ่งในธรรมชาติคือ กระบวนการเพิ่มความชื้น (Wetting process) และกระบวนการลดความชื้น (Desiccation) ที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่ม-ลดกำลังรับแรงเฉือนและความต้านทานการกัดเซาะของดิน (Erosion resistance) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดินและอุณหภูมิตั้งแต่ (Couper and Maddock, 2001) ในทางธรรมชาติ กระบวนการนี้จะเริ่มต้นจากกระบวนการเพิ่มความชื้นให้กับดินริมตลิ่งรวมไปถึงการไหลซึมของน้ำฝนลงสู่ชั้นดินและการเพิ่มระดับของระดับน้ำใต้ดิน ในส่วนของกระบวนการลดความชื้นจะเป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตกกร้าว (Soil cracking, รูปที่ 2.8) และการหลุดร่วง (Exfoliation) บริเวณผิวดิน จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นนี้สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นกระบวนการเริ่มต้นที่นำไปสู่การกัดเซาะ (Erosion) ของดิน เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันของเม็ดดินลดลง มวลดินในสภาวะนี้จะถูกกัดเซาะ

ได้ง่ายเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูง นอกจากนั้น กระบวนการลดความชื้นของดินสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical tension crack) บริเวณผิวดิน รอยแตกในแนวตั้งบนตลิ่งจะทำให้การไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นดินเร็วขึ้น แรงดันน้ำในมวลดินเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะลดเสถียรภาพของตลิ่ง



รูปที่ 2.8 รอยแตกบริเวณผิวของริมตลิ่ง (Wynn, 2004)

2.3.2 การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง (Riverbank erosion)

การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง (Riverbank erosion) คือการเคลื่อนย้ายมวลของดินจากฐานหรือผิวของตลิ่งเนื่องจากการไหลของน้ำหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของน้ำเรียกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, τ_o) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำและเกิดขึ้นบริเวณผิวดิน โดยทั่วไปสำหรับกระบวนการกัดเซาะของตลิ่งในแม่น้ำทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่ขอบมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, τ_c) โดยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินคือค่าหน่วยแรงต้านทานการกัดเซาะของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

สำหรับค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินที่มีการยึดเหนี่ยว (Cohesive soil) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างได้แก่ โครงสร้างของดิน (Soil structure) แรงกระทำระหว่างน้ำในช่องว่างของดิน (Soil pore water) กับน้ำที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ (Eroding fluid) และยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical factor) ในขณะที่ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกัน (Non-cohesive soil) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเม็ดดิน (Soil particle) เท่านั้น

พารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อความต้านทานต่อการกัดเซาะโดยเฉพาะของดินที่มีการยึดเหนี่ยวประกอบไปด้วย ความหนาแน่นของดิน (Soil bulk density) ประเภทของดินเหนียว (Clay

type) ปริมาณดินเหนียวและตะกอนทราย (Silt-clay content) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter content) พันธะระหว่างเม็ดดิน (Inter-particle bonding) และปฏิกิริยาทางเคมี ในที่นี้ เมื่อปริมาณดินเหนียวและตะกอนทรายเพิ่มขึ้นจะทำให้หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว แบบจำลองต้นแบบสำหรับประเมินหน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่ใช้กันแพร่หลายที่ถูกพัฒนาโดย A. Shields ในปี ค.ศ. 1936 ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า Shields-type entrainment function การเริ่มต้นเคลื่อนที่ของเม็ดดินตามหลักการของ Shields นั้นขึ้นอยู่กับการไหลของหรือหน่วยแรงเฉือน Shields ได้สมมุติพารามิเตอร์ในการประเมินการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของเม็ดดินโดยใช้ Shear stress approach ประกอบไปด้วย หน่วยแรงเฉือน ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเม็ดดินและของไหล ($\rho_s - \rho_f$, kg/m³) ขนาดของเม็ดดิน (d , m) ความหนืดจลศาสตร์ (ν , m²/s) และความเร่งโน้มถ่วง (g , 9.81 m/s²) พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้สามารถนำมาจัดกลุ่มปริมาณที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless quantity) ได้ดังนี้

$$d \frac{(\tau_c / \rho_f)^{1/2}}{\nu} = \frac{dU_*}{\nu} \quad (2.11)$$

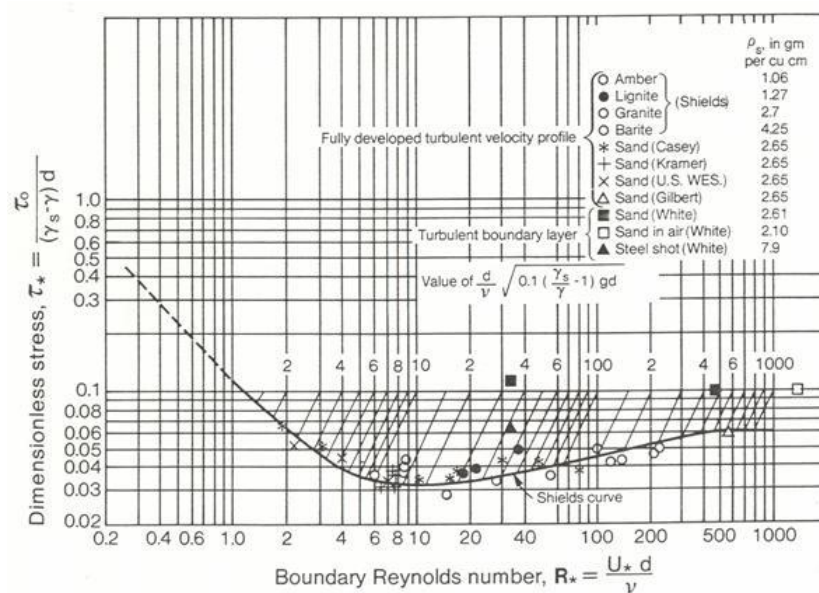
$$\frac{\tau_c}{d(\rho_s - \rho_f)g} = \frac{\tau_c}{d\gamma[(\rho_s / \rho_f) - 1]} \quad (2.12)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของเม็ดดิน (Sediment density, kg/m³), ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (Fluid density, kg/m³), γ คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Unit weight of water, 9.81 kN/m³), U_* คือ ความเร็วของแรงเฉือน (Shear velocity, m/s) และ τ_c คือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤตในขณะเริ่มต้นเคลื่อนที่ (Critical shear stress at initial motion)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ไม่มีหน่วยทั้งสองสมการถูกใช้กับผลในการทดลอง ผลการทดลองได้แสดงในรูปของแผนภาพ (รูปที่ 2.9) ความสำคัญของแผนภาพนี้ใช้ระบุจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของเม็ดดิน กล่าวคือ จุดใดๆ ที่อยู่เหนือเส้นโค้งในแผนภาพนี้เป็นจุดที่เม็ดดินกำลังจะเคลื่อนที่ ในทางกลับกัน จุดที่อยู่ใต้เส้นโค้งนี้เป็นจุดที่การไหลของน้ำไม่สามารถทำให้เม็ดดินเคลื่อนที่ได้

เป้าหมายในการใช้ Shields diagram นี้เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของดินที่ต้องการประกอบด้วยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินหรือขนาดของเม็ดดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำตามธรรมชาติดังแสดงในกราฟทั้งแกนหลักและแกนรอง เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ ASCE Sedimentation Manual (1975) ใช้พารามิเตอร์ใหม่ (δ) ดังแสดงในสมการที่ 2.13 ในการหาจุดสัมผัสบนเส้นโค้ง (Shields curve) เพื่อนำไปหาค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตโดยการลากขนานกับแกนรองไปสู่แกนหลัก

$$\delta = \frac{d}{\nu} \left[0.1 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d \right]^{1/2} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.9 Shields Diagram สำหรับการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของเม็ดดิน (Vanoni, 1975)

2.3.2.1 อัตราการกัดเซาะของดิน (Erosion rate)

การเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือการเพิ่มความกว้างของลำน้ำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตลอดเวลาเนื่องจากการปรับสมดุลของลำน้ำ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการปรับสมดุลจะเริ่มจากการกัดเซาะของดินริมตลิ่งซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของตลิ่ง (Bank geometry) ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพของตลิ่งลดลง เป็นเหตุให้ตลิ่งเกิดการพิบัติ มวลดินที่พิบัติของตลิ่งจะกลายเป็นตะกอนลำน้ำต่อไป

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การกัดเซาะของดินหมายถึงการเคลื่อนย้ายมวลของดินที่ท้องคลองหรือขอบของตลิ่ง โดยการไหลของน้ำได้ทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, τ_o) กระทำต่อผิวของตลิ่ง ในขณะเดียวกัน ดินริมตลิ่งมีความต้านทานในการกัดเซาะที่เรียกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress) ถ้าหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อผิวดินมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน การกัดเซาะจะไม่เกิดขึ้น ในทางกลับกัน การกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อตลิ่งมีค่าเกินกว่าค่าความต้านทานการกัดเซาะของดิน สมการในการคำนวณค่าอัตราการกัดเซาะของดินประเภท Fine-grained เนื่องจากการไหลของน้ำในรางน้ำเปิดถูกนำเสนอโดยนักวิจัยหลายท่านได้แสดงในสมการที่ 2.14 (Partheniades, 1965; Arulanandan et al., 1980, Hanson and Cook, 1997; Hanson, 1990a, b) ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของค่าความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่ขอบและค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Excess Shear Stress) ดังนั้นสมการที่ 2.14 จึงเรียกว่า “Excess shear stress equation”

$$\varepsilon = k_d (\tau_o - \tau_c)^a \quad (2.14)$$

เมื่อ ε คือ อัตราการกัดเซาะ (Erosion rate, m/s), k_d คือ สัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient, $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$), τ_o คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, Pa), τ_c คือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, Pa) และ a คือ ค่ายกกำลังเอกซ์โพเนนเชียล โดยทั่วไปแล้ว พิจารณาให้เป็น 1

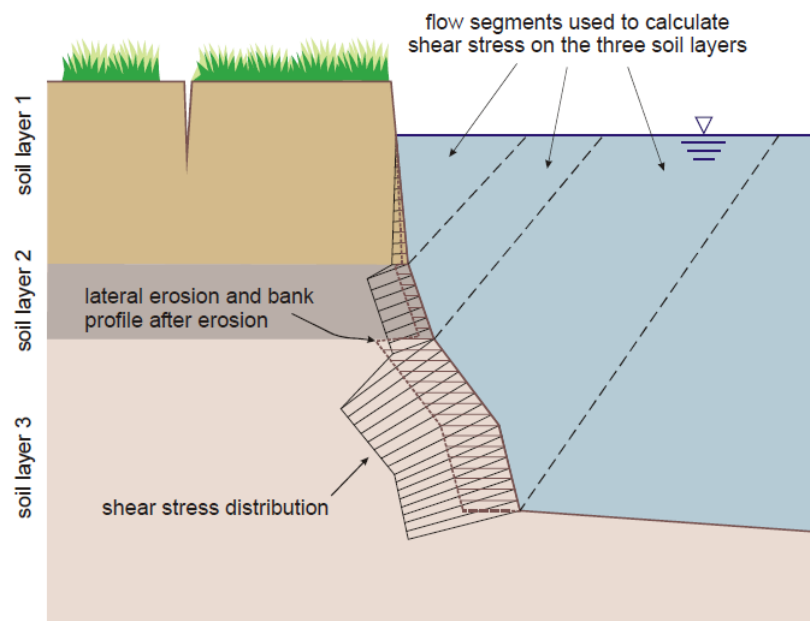
2.3.2.2 หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary shear stress)

ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำ (Boundary shear stress, Pa) เป็นหน่วยแรงกระทำที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ โดยที่หน่วยแรงเฉือนที่ขอบเนื่องจากการไหลของน้ำที่กระทำบนจุดใดๆของตลิ่ง คำนวณได้โดยคิดพื้นที่การไหล (รูปที่ 2.10) ดังสมการที่ 2.15

$$\tau_o = \gamma_w R S_f \quad (2.15)$$

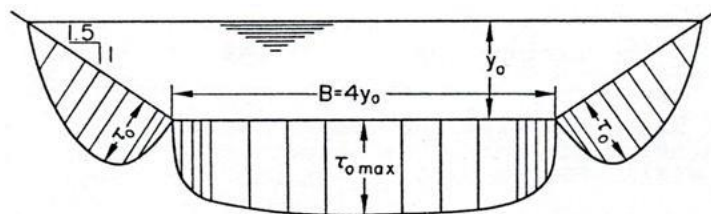
เมื่อ γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (Water unit weight, kN/m^3), R คือรัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius, m), S_f คือความลาดชันเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน (Friction slope, m/m), ค่า R และ S_f มีความสัมพันธ์กับลักษณะภาพตัดขวางของตลิ่งและระดับน้ำ โดยแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำดังสมการการไหลสม่ำเสมอในทางน้ำเปิดคงรูปของ Manning ในบางครั้งค่า S_f จะถูกแทนด้วยความชันท้องของลำน้ำ (Channel slope, S_o) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการหาค่าตัวแปรทั้งสองสำหรับลำน้ำที่มีความกว้างมากหน่วยแรงเฉือนบริเวณท้องคลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 (Chow, 1959)

$$\tau_b = 0.75\tau_o \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.10 การแบ่งพื้นที่การไหลของน้ำสำหรับใช้คำนวณ Hydraulic radius (Langendoen, 2000)

เมื่อ τ_o คือหน่วยแรงเฉือนบริเวณท้องคลอง (Bed shear stress, Pa) อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนที่ขอบจะไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของตลิ่งโดยเฉพาะบริเวณผิวข้างของตลิ่ง สำหรับหน้าตัดของลำน้ำที่มีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal cross section) การกระจายตัวของหน่วยแรงบริเวณตลอดหน้าตัดของตลิ่งได้แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนของตลิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Chow, 1959)

สมการดังกล่าวมาข้างต้นเป็นสมการอย่างง่ายสำหรับการคำนวณหน่วยแรงเฉือนที่ขอบซึ่งอยู่ในสมมุติฐานของการไหลสำหรับตลิ่งทางตรงการไหลของน้ำในธรรมชาติเป็นการไหลที่มีผลของ Secondary flow โดยเฉพาะบริเวณตลิ่งขอบนอกของโค้งน้ำ (Outer bank) หน่วยแรงเฉือนที่ขอบบริเวณส่วนล่างของตลิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่าตัว (Papanicolaou et al., 2007) ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนโค้งของลำน้ำ (Curvature) อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงเฉือนที่ขอบที่รวมผลของ Secondary flow สามารถคำนวณโดยใช้ no-lag model (Crosato, 2007) ดังสมการที่ 2.17

$$\tau_o = \frac{\gamma_w n^2 (u + U)^2}{R^{1/3}} \quad (2.17)$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's roughness coefficient), u คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ (Average water velocity, m/s) และ U คือ ความเร็วของน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Superelevation (m/s)

2.3.2.3 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดิน

พารามิเตอร์การกัดเซาะของดินประกอบไปด้วยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน (k_d) ซึ่งในการประเมินอัตราการกัดเซาะหรือระยะเวลาการกัดเซาะของดินริมตลิ่งเพื่อที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งมีความจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ อย่างไรก็ตาม เป็นเรื่องที่ยากที่จะหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้โดยตรง ผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอสมการเชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการศึกษาการไหลในรางน้ำเปิด (Flume study) และเครื่องมือทดสอบการกัดเซาะในสนาม (หัวข้อ 2.4.2) ในการหาค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินดังสมการที่ 2.18-2.21

Smerdon and Beasley (1961)

$$\tau_c = 0.16(PI)^{0.84} \quad (2.18)$$

$$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182P_c} \quad (2.19)$$

Julian and Torres (2006)

$$\tau_c = 0.1 + 0.1779(SC) + 0.0028(SC)^2 - 2.3E - 5(SC)^3 \quad (2.20)$$

Thoman and Niezgoda (2008), ใช้ Submerged jet device

$$\tau_c = 77.28 + 2.20(Act) + 0.26(DR) - 13.49(SG) - 6.40(pH) + 0.12(w) \quad (2.21)$$

เมื่อ PI คือ ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, %), P_c คือ ปริมาณดินเหนียว (Clay content, %), SC คือ ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt-clay content, %), w คือ ปริมาณน้ำ (Water content, %), DR คือ อัตราส่วนการแพร่ (Dispersion ratio) และ pH คือ ความเป็นกรด-ด่างของดิน

Hanson and Simon (2001) ได้ใช้เครื่องมือ Submerged jet test (หัวข้อ 2.3.2) ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งหลายแห่งใน USA ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.22 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Arulanandan et al. (1980) ซึ่งใช้การทดสอบการไหลของรางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ (Flume testing) โดยใช้ดินในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน

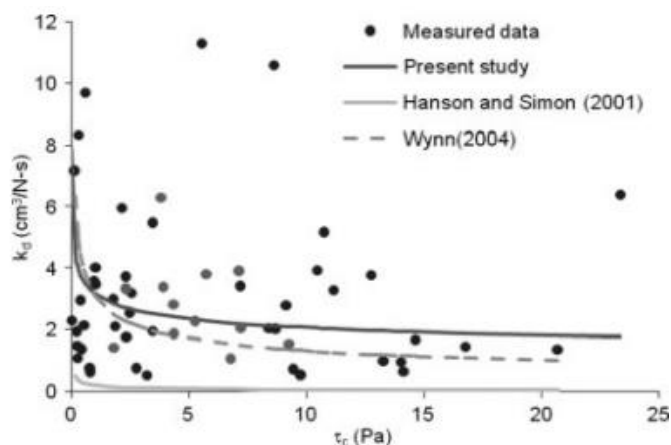
$$k_d = 0.2\tau_c^{-0.5} \quad (2.22)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสอง จากการทดสอบในสนามของ Hanson and Simon (2001) บางครั้งพบว่า ค่าคงที่ในสมการที่ 2.22 อาจจะมีค่าเป็น 0.1 อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะและหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินขึ้นอยู่กับหลายเงื่อนไขที่แตกต่างกันของตลิ่งแต่ละตำแหน่ง

Wynn (2004) ได้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งสองกับตลิ่งบริเวณ Blacksburg (Southwest Virginia, USA) โดยตลิ่งถูกปกคลุมไปด้วยพืช ซึ่งได้ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองค่าดังแสดงในสมการที่ 2.23 อีกทั้ง Karmaker and Dutta (2011) ได้สรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งผสม (Composite bank) บริเวณแม่น้ำ Brahmaputra ประเทศอินเดียดังแสดงในสมการที่ 2.24 ซึ่งสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.12

$$k_d = 31\tau_c^{-0.37} \quad (2.23)$$

$$k_d = 3.16\tau_c^{-0.185} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกัดเซาะและค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Karmaker and Dutta, 2011)

2.3.3 การพิบัติของตลิ่ง (Riverbank failure)

การพิบัติของตลิ่งคือการเคลื่อนย้ายมวลของตลิ่งเพื่อให้ตลิ่งกลับเข้าสู่เสถียรภาพภายใต้แรงกระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational loading) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของดินริมตลิ่งเกินกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบริเวณระนาบพิบัติ (Osman and Thorne, 1988) การพิบัติของตลิ่งบ่อยครั้งเกิดจากความสูงของตลิ่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดรอยแตกบนขอบตลิ่งและการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำ (ASCE, 1998a; Simon et al., 2000) ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งในบางครั้งอาจจะไม่ใช้กระบวนการที่ต่อเนื่องกัน ทั้งนี้การพิบัติของตลิ่งจะขึ้นอยู่กับกลไกที่สำคัญอื่นๆ (Thorne, 1982) โดยเฉพาะตลิ่งที่มีการยึดเหนี่ยวกัน (Cohesive bank) เช่น การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength reduction) แรงดันน้ำที่เป็นบวก (Positive pore-water pressure) การลดลงของระดับน้ำแบบทันทีทันใด (Rapid drawdown) เป็นต้น

กลไกการพิบัติของตลิ่งมีความสัมพันธ์กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subarial process) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเพิ่มความชื้นในมวลดิน (Wetting process) โดยการเพิ่มของปริมาณน้ำฝนลงสู่ลำน้ำเป็นการเพิ่มค่าระดับน้ำในตลิ่ง ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินและน้ำหนักของตลิ่งเพิ่มขึ้น ในเวลาเดียวกัน กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงเนื่องจากการลดลงของแรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) ของดิน แรงดันน้ำที่เป็นบวกจึงเกิดขึ้น ส่งผลให้ตลิ่งขาดเสถียรภาพ

2.3.3.1 กระบวนการที่มีผลต่อการพิบัติของตลิ่งตามลำน้ำ (Dominant processes)

ในปัจจุบัน การประเมินกระบวนการที่เป็นสาเหตุของการถดถอยของตลิ่งแต่ละตำแหน่งของลำน้ำเป็นเรื่องที่ยากมาก โดยอีกทางเลือกหนึ่ง ผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการสังเกตการณ์ถดถอยของตลิ่งพบว่า ตลิ่งแต่ละตำแหน่งในระบบของแม่น้ำมีแรงกระทำ (Driving forces) ที่แตกต่างกัน (Lawler, 1992; Lawler, 1995; Abernethy and Rutherford, 1998; Lawler et al., 1999) ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ลุ่มน้ำบริเวณต้นน้ำมีค่าระดับและความลาดชันของตลิ่งสูง ในขณะที่ความสูงของตลิ่งและอัตราการไหลของน้ำต่ำ โดยปกติแล้ว ตะกอนลำน้ำในบริเวณนี้ครอบคลุมไปด้วยตะกอนเม็ดหยาบ (Coarse particles) ดังนั้นกระบวนการการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งในบริเวณลุ่มน้ำตอนต้นมีความสำคัญน้อยกว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงกายภาพใต้ผิวดินที่มีผลต่อการถดถอยของตลิ่ง ในบริเวณลุ่มน้ำตอนกลางการเพิ่มขึ้นของระยะทางจากลุ่มน้ำตอนเหนือส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานศักย์ไปสู่พลังงานจลน์ที่ทำให้ความเร็วของการไหลของน้ำบริเวณนี้เพิ่มมากกว่าบริเวณต้นน้ำ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำให้เกิดการกัดเซาะของตลิ่งในบริเวณลุ่มน้ำตอนกลางส่งผลให้ขนาดของตะกอนและความลาดชันของลำน้ำลดลง ในขณะที่ความสูงของตลิ่งเพิ่มขึ้น การพิบัติของตลิ่งในลุ่มน้ำบริเวณปลายน้ำกลับกลายมาเป็นปัจจัยหลักในการถดถอยของตลิ่งเนื่องจากความสูงของตลิ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เกิดขึ้นจากการกัดเซาะเนื่องจากความเร็วของการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นสูงสุด การพิบัติของตลิ่งในบริเวณนี้ทำให้ความลาดชันของตลิ่งลดลง ขนาดของตะกอนลำน้ำในบริเวณนี้ถูกเปลี่ยนไปเป็นตะกอนขนาดเล็ก (Fine particle) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วยตะกอนของดินเหนียว จากเหตุผลที่กล่าวมานี้ กระบวนการกัดเซาะมีความสำคัญต่อการถดถอยของตลิ่งรองมาจากการพิบัติของตลิ่งเนื่องจากความเร็วของการไหลของน้ำบริเวณปลายน้ำมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตลิ่งที่เกิดจากกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น

2.3.3.2 ผลกระทบของสมดุลตะกอนบริเวณตลิ่ง (Basal Endpoint Control)

การกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งถูกเชื่อมโยงกันในกระบวนการที่เรียกว่า “Basal endpoint control” ข้อคิดเห็นพื้นฐานของ Basal endpoint control ถูกให้ความหมายว่า ความสมดุลระหว่างอัตราการเติมและการเคลื่อนย้ายตะกอนหรือวัสดุของตลิ่งลงสู่พื้นที่ฐานของตลิ่ง (Basal area) ซึ่งใช้คำนวณอัตราการถดถอยของตลิ่ง (Thorne, 1990) กระบวนการ Basal endpoint control เริ่มต้นจากการกัดเซาะของดินบริเวณท้องคลอง ทำให้ความสูงและความลาดชันของตลิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ตลิ่งขาดเสถียรภาพและพิบัติได้ มวลดินส่วนที่พิบัติจะตกลงมาสู่ส่วนตีนตลิ่ง (Bank toe) มวลดินที่ถูกกัดเซาะและพิบัติจะถูกเคลื่อนย้ายโดยการไหลของน้ำทันทีทันใดหรือยังคงอยู่ที่ส่วนตีนตลิ่งจนกว่าจะถูกเคลื่อนย้ายโดยอัตราการไหลของน้ำสูง ในอีกทางหนึ่ง มวลของดินที่พิบัติไม่ได้ถูกเคลื่อนย้ายจากพื้นที่ฐานของตลิ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยเสริมเสถียรภาพของตลิ่ง จากแนวคิดที่ได้กล่าวมานี้ Basal endpoint control สามารถจำแนกออกเป็น 3 สถานะดังต่อไปนี้ (Thorne, 1982)

ก) Impeded removal: มวลดินที่พิบัติลงสู่บริเวณตีนตลิ่งมากเกินไปกว่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายมวลดินออกโดยการไหลของน้ำ ดังนั้น การทับถมของมวลดินที่พิบัติบริเวณฐานของตลิ่งจะช่วยให้เสริมเสถียรภาพของตลิ่งและลดการถดถอยของตลิ่ง

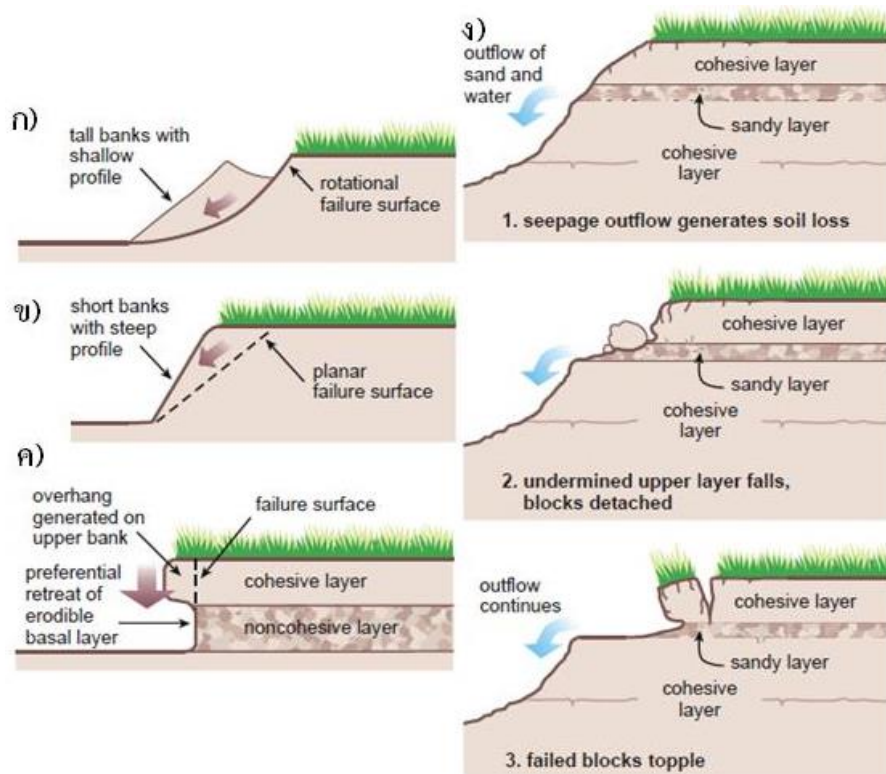
ข) Unimpeded removal: สถานะนี้เป็นสถานะสมดุลระหว่างตะกอนที่ได้จากถูกกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง ลักษณะตลิ่งยังคงรูปเดิม

ค) Excess basal capacity: อัตราการเคลื่อนย้ายมวลดินที่พิบัติจากพื้นที่ฐานของตลิ่งเกินกว่าค่ามวลดินที่เติมลงสู่ต้นหรือฐานของตลิ่ง ในกรณีนี้ การกัดเซาะที่ต้นตลิ่งจะเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ตลิ่งสูญเสียเสถียรภาพ เป็นสาเหตุในการเพิ่มอัตราการถดถอยของตลิ่ง

อย่างไรก็ตาม แนวคิดของ Basal endpoint control มีส่วนช่วยในการทำให้เห็นภาพของกระบวนการที่เกิดจากการทับถมของตะกอนที่กระทำต่อตลิ่งและหน้าที่ของตะกอนในระบบของแม่น้ำ ซึ่งระยะเวลาในการคงอยู่ของตะกอนที่ฐานหรือต้นตลิ่งเป็นปัจจัยที่น่าสังเกตในการพิจารณาอัตราการถดถอยของตลิ่งในระยะยาว

2.3.3.3 รูปแบบการพิบัติของตลิ่ง(Mode of failure)

รูปแบบการพิบัติของแนวตลิ่งมีหลายประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.13 ประกอบด้วย การพิบัติแบบหมุน (Rotation slumping, 2.13a) การพิบัติแบบระนาบ (Planar failure, รูปที่ 2.13b) การพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure, รูปที่ 2.13c) และการพิบัติของชั้นดินส่วนบนเนื่องจากการไหลซึมของน้ำ (Topping failed block by seepage erosion, รูปที่ 2.13d) ซึ่งรูปแบบของการพิบัติจะสะท้อนถึงระดับของการกัดเซาะของกระแสน้ำหรือกลไกอื่นๆ รวมทั้งคุณสมบัติของชั้นดินของตลิ่ง



รูปที่ 2.13 รูปแบบการพิบัติของตลิ่ง ก) Rotational failure ข) Planar failure ค) Cantilever failure และ ง) Seepage erosion (Simon et al., 2000)

การพิบัติจริงในสนามของตลิ่งขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดินบริเวณนั้น เช่น การพิบัติในรูปแบบ Rotation slumping ดังแสดงรูปที่ 2.13a และ Wedge failure ดังแสดงในรูปที่ 2.13b มักจะเกิดขึ้นกับตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive riverbank) ที่ประกอบด้วยดินเม็ดละเอียดตลอดชั้นดิน เนื่องจากดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soil) มีความต้านทานการกัดเซาะสูงทำให้การกัดเซาะเกิดขึ้นน้อยการพิบัติที่เกิดจากการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินและแรงดันน้ำเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในมวลดินซึ่งแตกต่างกับตลิ่งผสม (Composite riverbank) ที่มีชั้นดินเม็ดละเอียดบริเวณชั้นบนของตลิ่ง (Upper bank) และดินเม็ดหยาบ (Coarse-grained soil) แทรกอยู่บริเวณชั้นล่าง (Lower bank) ดินเม็ดหยาบถูกการกัดเซาะได้ง่ายก่อให้เกิดลักษณะตลิ่งแบบ Undercutting นำไปสู่การไถลของตลิ่งส่วนชั้นบน (Sloughing of upper bank, Rinaldi et al., 2008) รูปแบบการพิบัติจะเป็น Cantilever failure ดังแสดงในรูปที่ 2.13c

กระบวนการที่ก่อให้เกิดการพิบัติในสนามนอกเหนือไปการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำแล้วยังมีการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึม (Seepage erosion) ของน้ำใต้ดินอีกด้วย การกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมมักจะเกิดขึ้นกับชั้นดินทรายแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.13d ซึ่งการพิบัติทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตลิ่งที่ต่างกัน

2.3.3.4 แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

แบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งโดยเฉพาะในการพิบัติแบบระนาบ (Planar failure) การพิบัติแบบหมุน (Rotational failure) และการพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure) เป็นแบบจำลองคลาสสิกที่พัฒนาโดย Lohnes and Handy (1968) การพิบัติของตลิ่งเกิดจากแรงกระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อตลิ่ง (Driving force) เกินกว่าค่าแรงต้าน (Resisting force) ที่ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยทั่วไปแล้ว วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธี Limit Equilibrium Method (LEM) ซึ่งคำนวณเสถียรภาพออกมาอยู่ในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) โดยที่อัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งคือสัดส่วนระหว่างแรงต้านของดิน (Shear strength) ต่อแรงกระทำ (Mobilized shear strength) วิธีการในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งได้รับการเผยแพร่อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 ซึ่งเป็นการพยายามกำหนด Closed-form solution ของการพิบัติแบบระนาบ แต่ทว่า แบบจำลองที่รวมการพิจารณาการเปลี่ยนของลักษณะของตลิ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดย Alonso and Combs (1986)

การพัฒนาแบบจำลองและองค์ประกอบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่สำคัญเริ่มต้นจากการใช้ลักษณะของตลิ่งที่คล้ายคลึงกับตลิ่งในธรรมชาติ รวมถึงการกัดเซาะพื้นที่ฐานของตลิ่ง (Basal erosion) และผลกระทบจาก Tension crack (Osman and Thorne, 1988) การคิดผลกระทบเนื่องจากแรงดันน้ำที่เป็นบวก (Positive pore pressures) และหน่วยแรงเนื่องจากระดับน้ำในตลิ่ง (Confining pressure) เข้าไปในแบบจำลอง แต่ลักษณะตลิ่งที่ทำการวิเคราะห์เป็นแบบ Uniform slope (Simon et al., 1991; Darby and Thorne, 1996) ต่อมาได้มีการรวมผลของระดับน้ำที่ลดลงทันทีทันใด (Rapid drawdown) และผลกระทบของแรงดันน้ำที่เป็นลบของดินที่ไม่

อิ่มตัว (Unsaturated soil) ที่มีความสัมพันธ์กับการลดลงของระดับน้ำ (Rinaldi and Casagli, 1999; Casagli et al., 1999; Simon et al., 2000) ในปัจจุบัน นักวิจัยหลายท่านได้คำนึงถึงผลกระทบของพืชต่อเสถียรภาพของตลิ่ง ซึ่งมีผลกระทบทั้งด้านบวกและทางด้านลบเช่น การเสริมกำลังของดินเนื่องจากรากพืชและน้ำหนักของพืชที่กระทำบนตลิ่ง (Abernethy and Rutherford, 1998, 2000, 2001; Rutherford and Grove, 2004; Simon and Collison, 2002; Pollen et al., 2004; Pollen and Simon, 2005; Pollen, 2006; van de Wiel and Darby, 2004) ตามลำดับ

2.3.3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง

Langendoen (2000) กล่าวว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งใช้วิธีที่พัฒนามาจากการวิเคราะห์ลาดดินและดินถมของผู้วิจัยหลายท่านเช่น Bishop (1955), Morgenstern and Price (1965), Terzaghi and Peck (1967) และ Fredlund and Krahn (1977) ซึ่งวิธีทั้งหมดนี้เป็นการวิเคราะห์แบบ Limit equilibrium โดยใช้สมดุลของแรงและโมเมนต์ Simon et al. (1999) ได้ดัดแปลงวิธีการนี้ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง โดยการแบ่งชั้นดินหลายๆชั้น (Horizontal layer) รวมถึงพิจารณาแรงดันน้ำ (Pore-water pressure) และแรงดันน้ำนอกตลิ่ง (Confining pressure) แต่การคำนวณเสถียรภาพจะไม่พิจารณาแรงเฉือนภายในแต่ละชั้นดิน ซึ่งต่อมาได้มีการพิจารณาแรงภายในชั้นส่วนโดยการแบ่งเป็นชั้นส่วน (Slices) และชั้นส่วนย่อยในแนวตั้ง (Subslices) หลายๆชั้นส่วนเพื่อคำนวณหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยคำนวณได้โดยใช้สมดุลของแรงทั้งในแนวราบและแนวตั้ง

ก) การพิบัติของตลิ่งแบบระนาบ

การคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งแบบระนาบ (Planar failure) คำนวณได้โดยการแบ่ง slices และ subslices ในแนวตั้ง (รูปที่ 2.14) เพื่อประเมินหาค่าประกอบของแรงต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป เช่น หน่วยแรงเฉือนและตั้งฉากบนระนาบพิบัติ หน่วยแรงเฉือนและตั้งฉากภายในแต่ละ Slice โดยการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณแรงตั้งฉากบนระนาบพิบัติ N_i คำนวณจากสมการที่ 2.25 (รูปที่ 2.14a)

$$N_i = \frac{W_i}{\cos \beta} \quad (2.25)$$

2. คำนวณแรงตั้งฉากและแรงเฉือนระหว่าง Slices, I_{n_i} , I_{s_i} จากสมการที่ 2.26 และ 2.27 ตามลำดับ โดยค่า FS ที่ใช้ในสมการที่ 2.26 เริ่มต้นจากการสมมติค่า โดยพิจารณาความเป็นไปได้ในการพิบัติ เช่น พิจารณาจาก มุมพิบัติ (Failure plane) ระดับน้ำในตลิ่ง เป็นต้น

$$I_{ni} = I_{n_{i-1}} - (c_i' L_i + (u_a - u_w)_i L_i \tan \phi_i^b - u_a L_i \tan \phi_i') \frac{\cos \beta}{FS} + N_i \left(\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \phi_i'}{FS} \right) \quad (2.26)$$

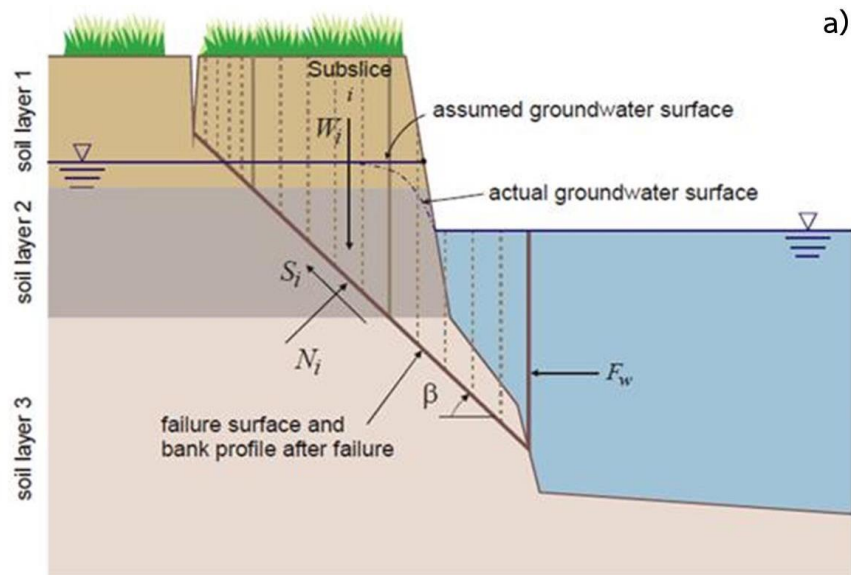
$$I_{s_i} = 0.4I_{n_i} \sin\left(\frac{\pi L_i}{\sum L_i}\right) \quad (2.27)$$

3. คำนวณแรงตั้งฉากบนระนาบพิบัติโดยคิดผลของแรงตั้งฉากและแรงเฉือนระหว่าง slices ดังสมการที่ 2.28

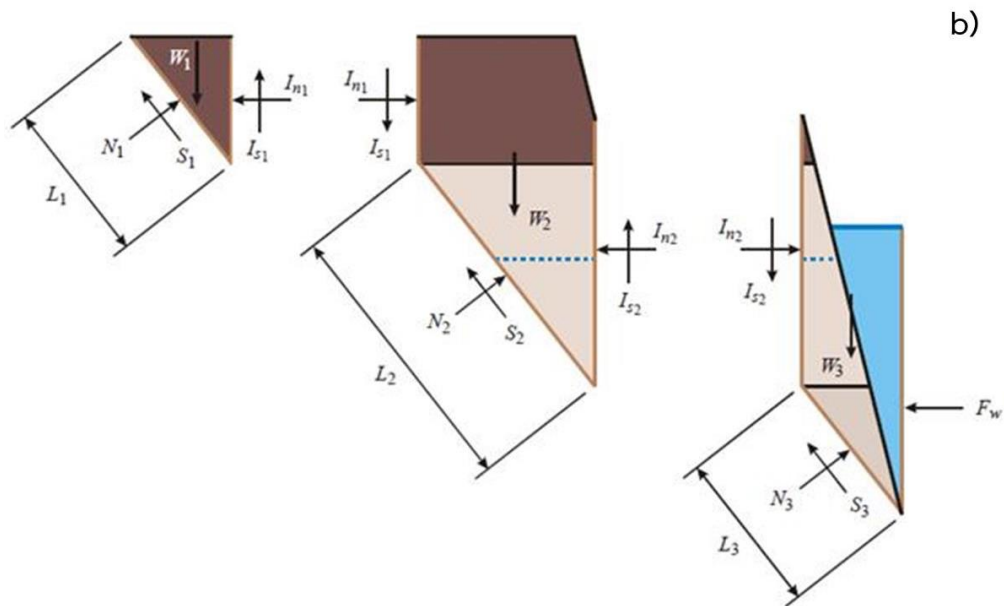
$$N_i = \frac{W_i + I_{s_{i-1}} - I_{s_i} - \sin\beta \left(\frac{c_i' L_i + (u_a - u_w)_i L_i \tan\phi_i^b - u_{a_i} L_i \tan\phi_i'}{FS} \right)}{\cos\beta + \frac{\tan\phi_i' \sin\beta}{FS}} \quad (2.28)$$

4. ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยดังแสดงในสมการที่ 2.29 คำนวณจากสมมูลของแรงทั้งในแนวตั้งและแนวราบของแต่ละ Slice โดยคำนวณซ้ำจากสมการที่ 2.26-2.29 จนกระทั่งได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากันกับการคำนวณครั้งก่อน

$$FS = \frac{\cos\beta \sum_{i=1}^I (c_i' L_i + (u_a - u_w)_i L_i \tan\phi_i^b + [N_i - u_{a_i} L_i] \tan\phi_i')}{\sin\beta \sum_{i=1}^I N_i - F_w} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.14 การพิบัติแบบระนาบ a) แรงกระทำระนาบพิบัติของตลิ่ง b) การแบ่งชิ้นส่วนเพื่อคำนวณหน่วยแรงภายใน (Langendon, 2000)



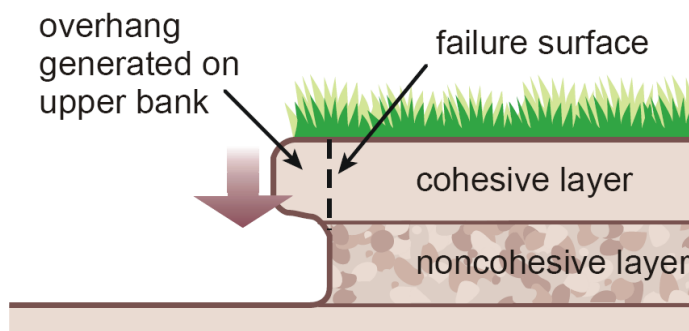
รูปที่ 2.14 (ต่อ) การพิบัติแบบระนาบ a) แรงกระทำระนาบพิบัติของตลิ่ง b) การแบ่งชิ้นส่วนเพื่อคำนวณหน่วยแรงภายใน (Langendon, 2000)

เมื่อ β คือ มุมของระนาบพิบัติ, c'_i คือ แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของชิ้นส่วน i , u_a คือ แรงดันอากาศของชิ้นส่วน i , u_w คือ แรงดันน้ำของชิ้นส่วน i , L_i คือ ความยาวระนาบพิบัติของชิ้นส่วน i , W_i คือ น้ำหนักของชิ้นส่วน i , N_i คือ หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบพิบัติของชิ้นส่วน i , F_w คือ แรงภายนอกเนื่องจากระดับน้ำของชิ้นส่วน i , ϕ_i^b คือ มุมที่บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนจากแรงคูดเมทริกซ์ของชิ้นส่วน i และ ϕ_i' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดินของชิ้นส่วน i

ข) การพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure)

การพิบัติแบบคานยื่นเกิดขึ้นได้เมื่อตลิ่งถูกกัดเซาะที่ตีนตลิ่ง โดยเฉพาะตลิ่งแบบผสมที่มีชั้นดินเม็ดหยาบแทรกอยู่ใต้ชั้นดินเม็ดละเอียด การกัดเซาะจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Geometry) ของตลิ่งในรูปแบบคานยื่น (Overhang shape) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในรูปแบบ Cantilever failure คือ สัดส่วนของกำลังเฉือนของดินต่อน้ำหนักของส่วนที่ยื่นดังแสดงในสมการที่ 2.30

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^i (c'_i L_i + (u_a - u_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [F_w \sin \alpha - u_a L_i] \tan \phi_i')}{\sum_{i=1}^i (W_i + F_w \cos \alpha)} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.15 ลักษณะการพังทลายแบบคานยื่น (Simon et al., 2000)

2.4 วิธีการทดสอบการกัดเซาะของดิน (Erosion test method)

การทดสอบการกัดเซาะแบบดั้งเดิมได้มีการนำตัวอย่างดินแบบ Remolded มาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากดินที่ใช้เป็นดินที่ถูกรบกวนเป็นอย่างมากจึงทำให้ปัจจัยทางเคมีของดินไม่ได้รับการคำนวณ เพราะฉะนั้น การทดสอบตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed sample) ถูกนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการกัดเซาะกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบควรที่จะทำให้ถูกรบกวนน้อยที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบอีกอย่างหนึ่งที่ลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการเก็บตัวอย่างดินและเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือการทดสอบในสนาม (In-situ testing)

วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินในปัจจุบันมี 3 วิธีคือ 1) Hole erosion test, HET (Wan and Fell, 2004) เป็นวิธีทดสอบการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำ (Seepage erosion) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การกัดเซาะของเขื่อนดิน 2) Erosion Function Apparatus, EFA (Briaud et al., 2011) เป็นการทดสอบการกัดเซาะบริเวณท้องคลอง (Streambed erosion) มีหลักการที่คล้ายกันกับการทดสอบในรางน้ำเปิด (Laboratory flume test) ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมของการทดสอบการกัดเซาะ การทดสอบโดยใช้ EFA เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การกัดเซาะต่อม่อสะพานและ 3) Submerged jet test (Hanson and Cook, 2004) เหมาะสำหรับทั้งการกัดเซาะที่ท้องคลองและการกัดเซาะที่ขอบตลิ่ง (Lateral erosion) อีกทั้งยังเป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการบรรจุเป็นมาตรฐาน ASTM Standard D5852 ในส่วนนี้ได้มีการแสดงรายละเอียดเฉพาะการทดสอบในรางน้ำเปิดและการทดสอบ Submerged jet test ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้

2.4.1 การทดสอบการกัดเซาะในรางน้ำเปิด (Flume test)

การทดสอบการกัดเซาะในรางน้ำเปิดเป็นวิธีดั้งเดิมในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive soil) และไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Non-cohesive soil) Lyle and Smerdon (1965) ได้ใช้รางน้ำเปิดขนาดความกว้าง 0.75 เมตร ลึก 0.4 เมตรและยาว 22 เมตร โดยใช้ความชันของรางน้ำเปิดเท่ากับ 2% ในการทดสอบการกัดเซาะของดิน 7 ชนิด เพื่อหา

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ จากการทดสอบสามารถคำนวณหน่วยแรงเฉือน (Hydraulic shear stress, τ_a) ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.31

$$\tau_a = \rho_w g h S \quad (2.31)$$

โดยที่ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ (Density of water, kg/m^3), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational acceleration, 9.81 m/s^2), h คือความลึกการไหลของน้ำ (m), S คือความชันของรางน้ำเปิด อัตราการกัดเซาะสามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของตะกอนและอัตราการไหลของน้ำ Lyle and Smerdon (1965) พบว่า หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, τ_c) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่หลากหลายเช่น ดัชนีความเหนียว (Plasticity index) อัตราส่วนช่องว่างของดิน (Void ratio) และกำลังรับแรงเฉือนแบบเวน (Vane shear strength) Kandiah and Arulanathan (1974) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการกัดเซาะของดินที่มีแรงยึดเหนียว โดยทำการทดสอบการกัดเซาะตัวอย่างดินในรางน้ำเปิดขนาด ความยาว ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 2.5 0.15 และ 0.3 เมตร ตามลำดับ หน่วยแรงเฉือนเป็นไปตามสมการที่ 2.31

Kamphuis and Hall (1983) ได้ทำการทดสอบการกัดเซาะของดินเหนียว โดยทำการอัดตัวอย่างที่ความดัน 48-350 kPa โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) การทดสอบได้ใช้รางน้ำเปิดที่สามารถเพิ่มหน่วยแรงเฉือนถึง 26 Pa จากการทดสอบ สามารถคำนวณหน่วยแรงเฉือนวิกฤตจากความเร็วการเฉือนวิกฤต (Critical shear velocity, u_{*c}) ดังแสดงในสมการที่ 2.32 ซึ่งความเร็วการเฉือนวิกฤตสามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยพิโทต์ทิวบ์ (Pitot tube) ผลการทดสอบพบว่า หน่วยแรงเฉือนวิกฤตแปรผันตรงกับ กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) กำลังรับแรงเฉือนแบบเวน (Vane shear strength) ดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ปริมาณดินเหนียว (Clay content) และความดันของการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation pressure)

$$\tau_c = \rho_w u_{*c}^2 \quad (2.32)$$

2.4.2 การทดสอบการกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test

การทดสอบการกัดเซาะในรางน้ำเปิดสามารถให้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ (Erodibility parameter) ที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถทดสอบสามารถควบคุมลักษณะการไหลให้ตรงกับหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณท้องคลอง (River bed) อย่างไรก็ตามเงื่อนไขของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบไม่สอดคล้องกับดินในสนาม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบโดยใช้รางน้ำเปิดจะใช้ตัวอย่างดินที่เตรียมขึ้นมาใหม่ (Remolded specimen) ซึ่งเป็นดินที่ถูกบรวกในโครงสร้างและระดับความหนาแน่นของดิน (Hanson et al., 1999; Hanson and Cook, 2004) ดังนั้น การทดสอบการกัดเซาะเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่เหมาะสมที่สุดคือการทดสอบในสนาม (In-situ testing) วิธีการทดสอบการกัดเซาะในสนามที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Submerged jet device พัฒนาโดย Hanson (1990) ซึ่งเครื่องมือการทดสอบในลักษณะนี้ถูกใช้โดยนักวิจัยหลายท่าน (Hanson et al., 1999; Langendoen et al., 2000; Robinson et al.,

2000; Hanson and Simon, 2001; Semmens and Osterkamp, 2001; Simon and Thomas, 2002; Thoman and Niezgodna, 2008; Karmaker and Dutta, 2011) เพื่อทดสอบค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง

หลักการทำงานของเครื่องมือนี้เหมือนกันเครื่องมือทดสอบการกัดเซาะในห้องปฏิบัติการที่พัฒนาโดยนักวิจัยหลายๆท่าน (Dunn, 1959; Moore and Masch, 1962; Hollick, 1976) ทั้งนี้ เครื่องมือการทดสอบนี้สามารถใช้ได้ทั้งลักษณะการกัดเซาะท้องคลอง (Streambed erosion) และการกัดเซาะแนวตลิ่ง (Lateral erosion) รูปที่ 2.16 แสดงรายละเอียดของเครื่องมือ Submerged jet device การทำงานของเครื่องมือนี้คือการส่งแรงดันน้ำผ่านช่องเปิด (Nozzle) ในรูปแบบ Jet โดยใช้ปั้มน้ำหรือจากถังเก็บน้ำ (Head tank) กระทบลงสู่ผิวดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำ มีการกระจายตัวของแรงดันน้ำเมื่อผ่านช่องเปิดเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.17 การแพร่กระจายของน้ำในลักษณะนี้จะเกิดแรงเฉือนกระทำต่อผิวดินที่ก่อให้เกิดการกัดเซาะ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้สเกลวัด (Point gauge)

หน่วยแรงเฉือนวิกฤตสามารถคำนวณจากระยะการกัดเซาะสมดุล (Equilibrium scour depth) แสดงดังสมการที่ 2.33 ระยะการกัดเซาะสมดุลนี้เป็นระยะสูงสุดที่ดินไม่สามารถถูกกัดเซาะเพิ่มเติมซึ่งคำนวณจากสมการไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic logarithmic equation) ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ (Blaisdell et al., 1981)

$$\tau_c = \tau_o \left(\frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (2.33)$$

$$J_p = C_d d_o \quad (2.34)$$

$$\tau_o = C_f \rho U_o^2 \quad (2.35)$$

$$U_o = \sqrt{2gh} \quad (2.36)$$

เมื่อ τ_o คือหน่วยแรงสูงสุดที่ช่องเปิด (Maximum stress at the nozzle, Pa) J_p คือระยะที่หน่วยแรงเฉือนคงที่ (Potential core length, m) J_e คือระยะการกัดเซาะสมดุล (Equilibrium jet scour depth, m) C_d คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion constant = 6.3) d_o คือขนาดของช่องเปิด Orifice (Jet nuzzle diameter, m) C_f คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction = 0.00416) U_o คือความเร็วของน้ำบริเวณช่องเปิด (Velocity at the jet nuzzle, m/s) h คือส่วนต่างของระดับน้ำ (Differential head, m)

รูปแบบของสมการไฮเปอร์โบลิกที่ใช้ในการคำนวณระยะการกัดเซาะสมดุลได้แสดงในสมการที่ 2.37 สำหรับหาค่า f_o และ A โดยการสุ่มค่าเพื่อให้ได้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (Optimization and Minimization) ระหว่างค่า x และ f ที่ได้จากการวัด (สมการที่ 2.38 และ 2.40) และการคำนวณ (สมการที่ 2.37) ดังแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.18

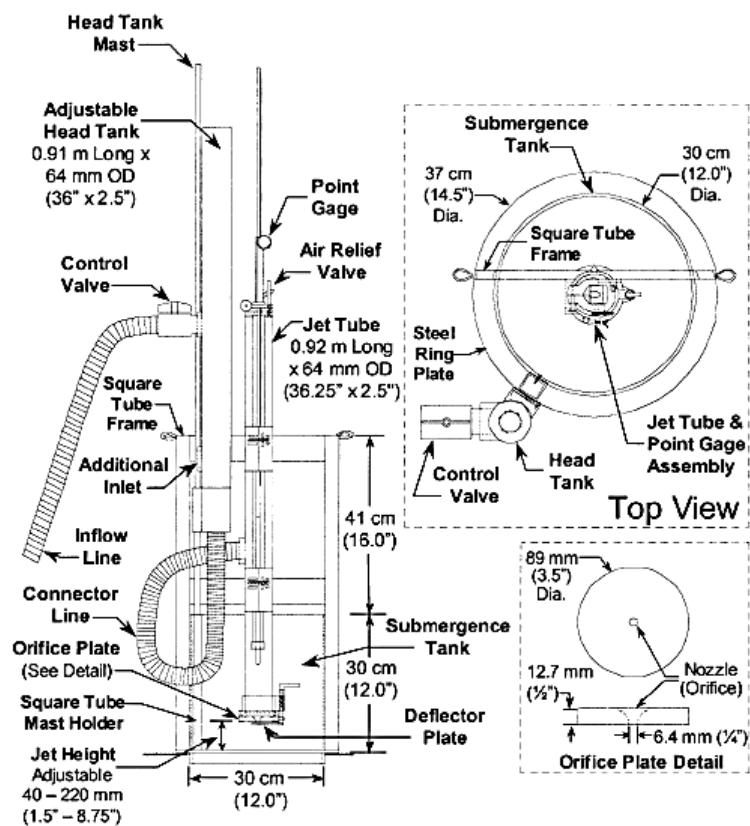
$$x = [(f - f_o)^2 - A^2]^{0.5} \quad (2.37)$$

$$f = \log[J/d_o] - \log[(U_o t)/d_o] \quad (2.38)$$

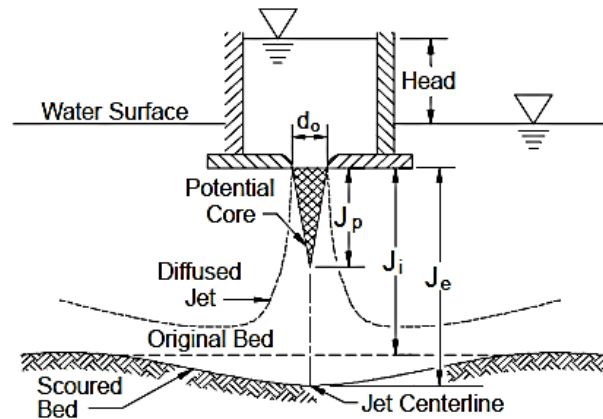
$$f_o = \log(J_e/d_o) \quad (2.39)$$

$$x = \log[(U_o t)/d_o] \quad (2.40)$$

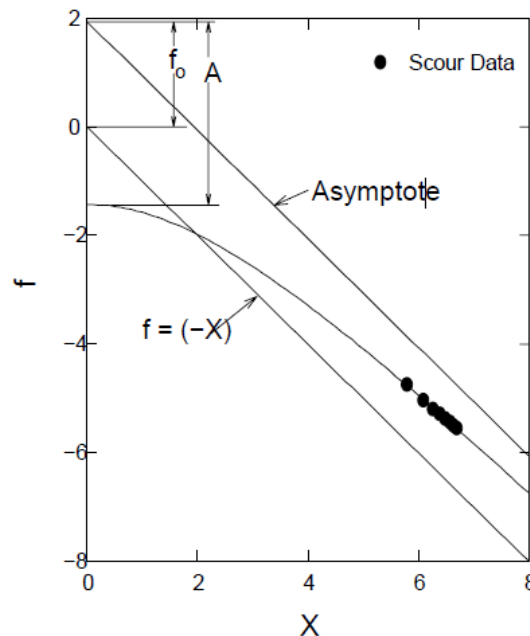
เมื่อ A คือค่า Semi transverse และ and Semi conjugate axis ของกราฟไฮเปอร์โบลา J คือระยะจากช่องเปิดถึงผิวตินที่ถูกกัดเซาะ t คือระยะเวลาแต่ละรอบการทดสอบ



รูปที่ 2.16 แบบแปลนของเครื่องมือการทดสอบการกัดเซาะ Submerged jet device (Hanson and Cook, 1997)



รูปที่ 2.17 การแพร่กระจายของน้ำที่ไหลผ่านช่องเปิดของเครื่องมือ Submerged jet device (Hanson and Cook, 1997)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างผลการทำ Optimization ของฟังก์ชัน Equilibrium depth (Hanson and Cook, 2004)

หลังจากคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตจากกระบวนการที่ได้กล่าวมาข้างต้นสมการในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะพิสูจน์มาจากสมการที่ 2.14 โดยดัดแปลงให้อยู่ในรูปแบบของการทดสอบการกัดเซาะดังแสดงในสมการที่ 2.41 และจัดรูปแบบใหม่ร่วมกับสมการที่ 2.33 ดังแสดงในสมการที่ 2.42 หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.42 เป็นผลทำให้ได้สมการรูปแบบใหม่ดังแสดงในสมการที่ 2.46 ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะสามารถคำนวณได้โดยใช้ทำการ Fitting ข้อมูลจากการทดสอบการกัดเซาะและค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตลงซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะที่เหมาะสมได้มาจากการ Optimization และ Minimization โดยเปรียบเทียบ t_m ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.19

$$\frac{dJ}{dt} = k_d \left[\frac{\tau_o J_p^2}{J^2} - \tau_c \right] \quad (2.41)$$

$$\frac{dJ^*}{dT^*} = \frac{(1 - J^{*2})}{J^{*2}} \quad (2.42)$$

$$J^* = J / J_e \quad (2.43)$$

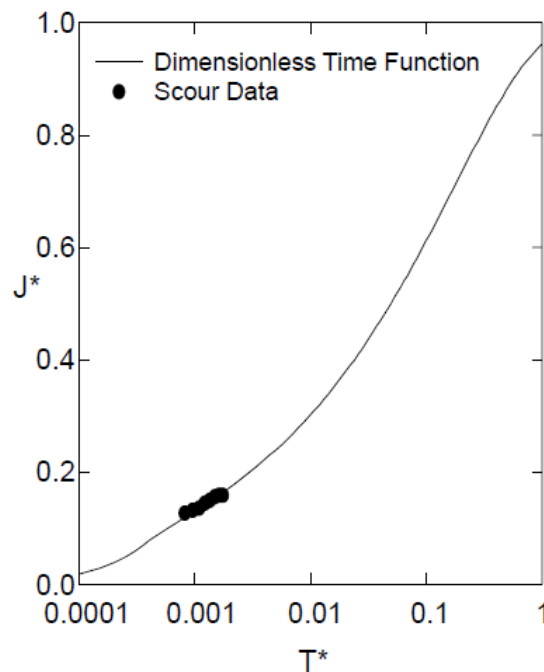
$$T^* = t_m / T_r \quad (2.44)$$

$$T_r = J_e / k_d \tau_c \quad (2.45)$$

$$T^* = 0.5 \ln \left(\frac{1 + J^*}{1 - J^*} \right) - J^* - 0.5 \ln \left(\frac{1 + J_p^*}{1 - J_p^*} \right) + J_p^* + \frac{J_p^{*3}}{1 - J_p^{*2}} \quad (2.46)$$

$$J_p^* = J_p / J_e \quad (2.47)$$

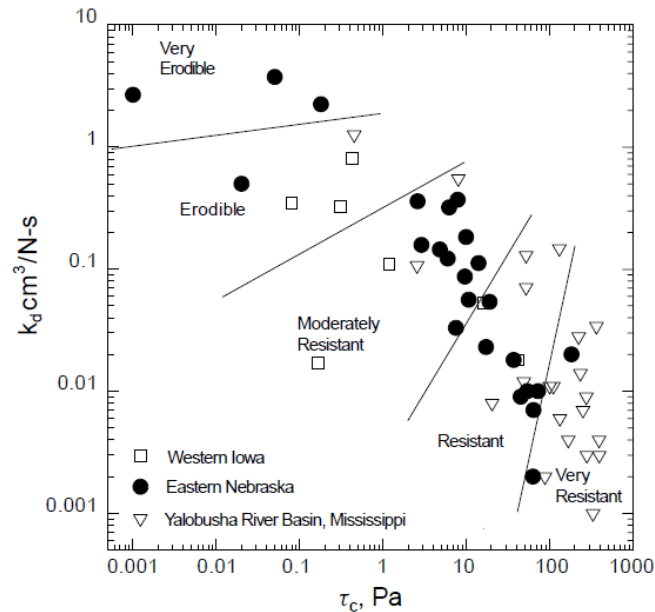
เมื่อ J คือระยะการกัดเซาะในแต่ละรอบการทดสอบ (Scour depth), t_m คือเวลาจากเริ่มทดสอบในแต่ละรอบ (Measured time), และ T_r คือเวลาอ้างอิง (Reference time)



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างผลการ Optimization และ Minimization ของฟังก์ชันการกัดเซาะ (Hanson and Cook, 2004)

Hanson and Simon (2001) ได้ทำการจำแนกความต้านทานในการกัดเซาะของดินโดยอ้างอิงเกณฑ์มาจากค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งสองที่ได้จากการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้

เครื่องมือ Submerged jet device กับตลิ่งในพื้นที่ Midwestern USA (Western Iowa, Yalobusha River Basin and Mississippi Eastern Nebraska) ผลการจำแนกดินทางด้านการศึกษาการกัดเซาะ (Erodibility class) สามารถจัดกลุ่มดินได้ 5 กลุ่มตั้งแต่ดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะ (Very erodible soil) จนถึงดินที่มีต้านทานต่อการกัดเซาะสูง (Very resistant soil) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กลุ่มประเภทของดินด้านการกัดเซาะ (Hanson and Simon, 2001)

2.5 การป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง

การป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง (Erosion protection) เป็นการเพิ่มความต้านทานของตลิ่งเพื่อปกป้องตลิ่งจากการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำวิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ การใช้โครงสร้างแข็ง (Hard structure) และวิธีการทางชีววิศวกรรมปฐพี (Soil bioengineering) วิธีการป้องกันตลิ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่าง ซึ่งการเลือกใช้วิธีการป้องกันตลิ่งให้เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในสนาม ดังนั้นจำเป็นต้องทราบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของแต่ละวิธี โดยวิธีการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งทั้งสองวิธีได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

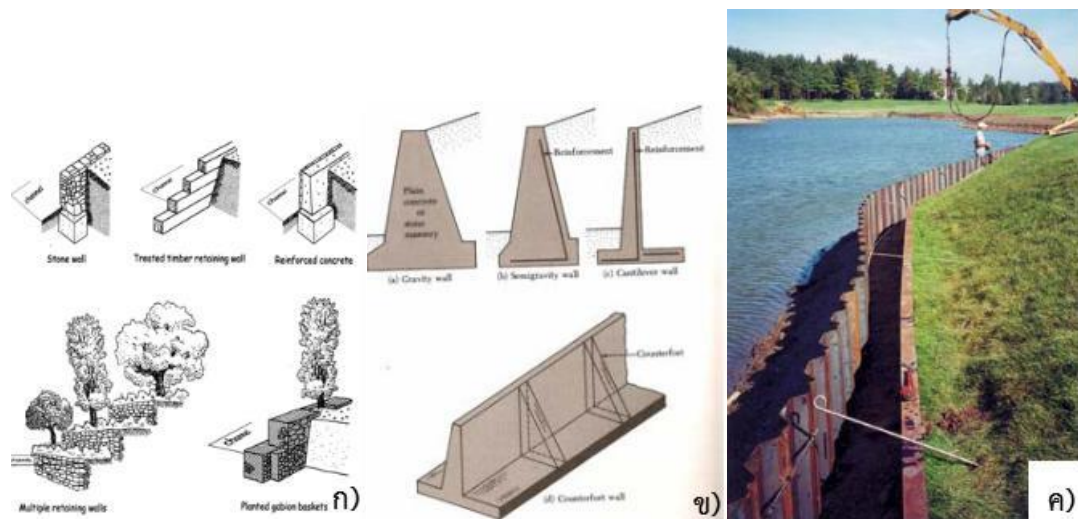
2.5.1 การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้โครงสร้างแข็ง

การปรับปรุงเสถียรภาพและการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งตามลำน้ำเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการทำให้ธรรมชาติของลำน้ำกลับสู่สภาพเดิม โดยการลดการกัดเซาะและการพังทลายของตลิ่ง วิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้โครงสร้างแข็งเป็นวิธีดั้งเดิมและมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศเป็นอย่างสูง แต่วิธีการนี้มีต้นทุนในการก่อสร้างแพงกว่าวิธีอื่น วิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยใช้โครงสร้างแข็งประกอบด้วย กำแพงกันดิน (Retaining wall) การเรียงหินหน้าตลิ่ง (Rock riprap) และกำแพงเกเบียน (Gabion wall) เป็นต้นหลักการพื้นฐาน รวมถึงข้อดี-ข้อเสียของแต่ละวิธีได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1.1 กำแพงกันดิน

การป้องกันตลิ่งในรูปแบบกำแพงกันดินถูกใช้ในกรณีที่เกิดเซาะตลิ่งเกิดขึ้นอย่างรุนแรง โดยพื้นฐานของกำแพงกันดิน คือโครงสร้างในแนวดิ่งที่รับแรงกระทำด้านข้างจากลาดดินหลังกำแพง และป้องกันการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำหน้าตลิ่ง กำแพงกันดินสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ประกอบด้วย 1) Gravity wall 2) Cantilever wall และ 3) Sheet-piling wall ดังแสดงในรูปที่ 2.21 อย่างไรก็ตาม โครงสร้างกำแพงกันดินที่ใช้กับตลิ่งเป็นตัวเบี่ยงเบนพลังงานจากการไหลของน้ำ ส่งผลทำให้เกิดปัญหาการกัดเซาะกับชั้นตลิ่งในบริเวณอื่น

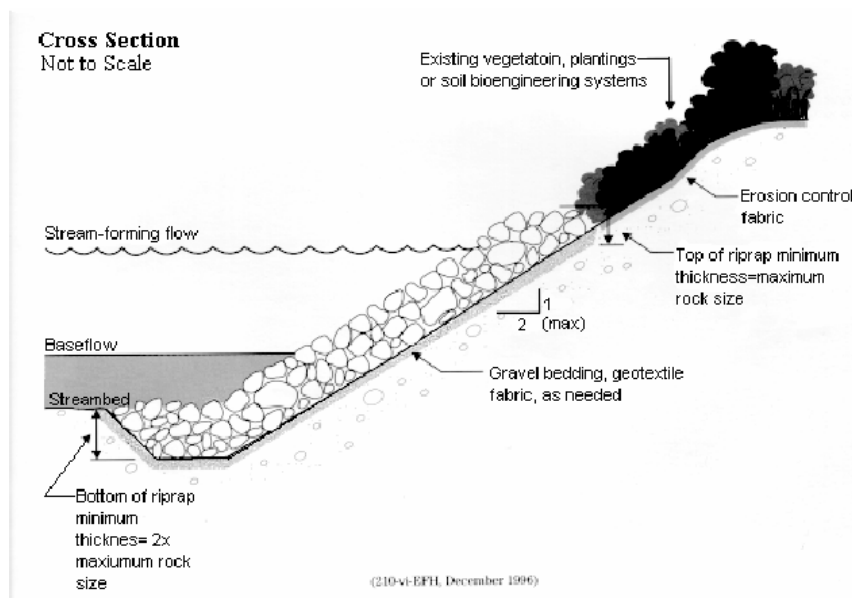
การเพิ่มความแข็งแรงของกำแพงกันดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากการก่อสร้างกำแพงกันดินมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่สูงมาก โดยเฉพาะการป้องกันเพิ่มเติมบริเวณส่วนล่างของกำแพงควรมีการพิจารณาเป็นพิเศษเช่น การใช้หินทิ้ง (Rock riprap) เพื่อป้องกันการกัดเซาะใต้กำแพง



รูปที่ 2.21 ประเภทของกำแพงกันดินป้องกันการกัดเซาะ ก) Gravity walls ข) Cantilever walls
ค) Sheet-piling walls (Das, B, M. 2004)

2.5.1.2 การเรียงหินหน้าตลิ่ง

การป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยใช้การเรียงหิน (Rock riprap, รูปที่ 2.22) เป็นวิธีดั้งเดิมและนิยมใช้ในการป้องกันตลิ่งและการฟื้นฟูลำน้ำ (Stream restoration) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการก่อสร้างการปรับความชันของตลิ่งถูกใช้ร่วมกับการเรียงหินหน้าตลิ่งในการป้องกันการกัดเซาะ โดยกำหนดความชันมากที่สุดเท่ากับ 1V:2H การใช้หินในการป้องกันการกัดเซาะจำเป็นต้องออกแบบขนาดของหินที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเคลื่อนย้ายเนื่องจากการไหลของน้ำหรือคลื่นกระแทกค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอาจจะมีมูลค่ามากขึ้นเนื่องจากการป้องกันตลิ่งวิธีนี้ควรใช้วัสดุในการกรองตะกอนขนาดเล็กออกจากตลิ่งเช่น การใช้ผ้าใยสังเคราะห์ (Geosynthetic fabric) ในทางกลับกัน การใช้หินเรียงหน้าตลิ่งได้ระดับน้ำส่งผลต่อการเพิ่มความหลากหลายทางนิเวศวิทยาของลำน้ำ



รูปที่ 2.22 การใช้หินเพื่อป้องกันการกัดเซาะ (Iowa Department of Natural Resources., 2006)

2.5.1.2 กำแพงเกเบี่ยน

การใช้กำแพงเกเบี่ยน (รูปที่ 2.23) ในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคือการวางหินในกล่องลวดตาข่าย (Wire cage) ตลอดแนวตลิ่งกำแพงเกเบี่ยนสามารถป้องกันการกัดเซาะในกรณีที่มีความเร็วการไหลของน้ำสูง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งในกระบวนการก่อสร้างมีความสะดวกและง่ายต่อการขนส่งและติดตั้ง ต้นทุนในการบำรุงรักษาหลังจากการก่อสร้างต่ำ รวมถึงส่งผลดีต่อระบบนิเวศวิทยา อย่างไรก็ตาม ในการก่อสร้างต้องใช้แรงงานจำนวนมาก รวมถึงต้นทุนในการก่อสร้างสูง เกเบี่ยนมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถเชื่อมต่อกันเป็นแนวยาวของตลิ่ง กล่องเกเบี่ยนหนึ่งหน่วยมีขนาดความยาวเท่ากับ 2-4 เมตร ความกว้างและความสูงเท่ากับ 1 เมตร (1 เซลล์เท่ากับ 1 ลบ.ม) ผลิตจากเหล็กกล้าไนซ์ (Galvanized steel) เคลือบด้วย PVC เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและยืดอายุการใช้งาน โดยทั่วไป หินที่ใส่ในกล่องเกเบี่ยนต้องเป็นหินที่มีคุณภาพดี ไม่เปราะบาง ทนทานต่อสภาพอากาศและมีความแข็งแรงสูง

2.5.2 การป้องกันการกัดเซาะโดยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี

การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งทั่วโลกตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมาได้ใช้วิธี Soil bioengineering approach ซึ่งเป็นวิธีที่มีแผนการตามแนวคิดของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (Environmental conservation) มีผลประโยชน์ทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Zhai et al., 2010) และเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก (Gray and Leiser, 1982; Clark and Hellin, 1996; Polster, 2002)



รูปที่ 2.23 การใช้เกเบียนในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง

การปรับปรุงป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยวิธีชีววิศวกรรมปฐพีเป็นการผสมผสานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ (Mechanical) ชีววิทยา (Biological) และนิเวศศาสตร์ (Ecological) เพื่อจัดการกับปัญหาการพังทลายของตลิ่งในธรรมชาติ (Gray&Sotir, 1992) หลักการของการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีนี้คือการใช้พืชหรือส่วนของพืชมาปลูกบริเวณหน้าทางลาดหรือโครงสร้างดิน ซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังของดินและยังป้องกันการเคลื่อนย้ายของมวลดิน (Gray&Sotir, 1996) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเสริมกำลังเช่น หิน ท่อไม้ขนาดใหญ่ วัสดุสังเคราะห์ (Geo-synthetics และ geo-composites) ยังถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพให้กับตลิ่งด้วยการป้องกันตลิ่งตามแนวทางชีววิศวกรรมปฐพีมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงเงื่อนไขของตลิ่งและวิธีการปรับปรุงตลิ่งที่เหมาะสมตามคำแนะนำของ Iowa Department of Natural Resources โดยมีรายละเอียดทางด้านหลักการ และข้อดี-ข้อเสียของแต่ละวิธีดังต่อไปนี้

2.5.2.1 การปักกิ่งไม้สด

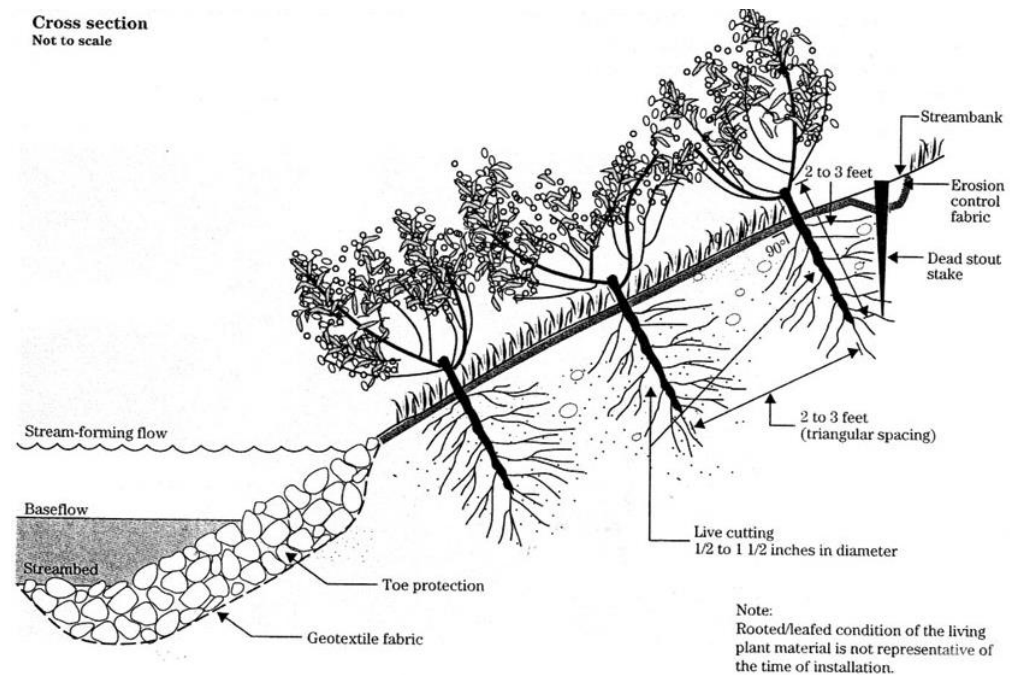
การปักกิ่งไม้สด (Live stakes) คือการนำกิ่งไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้มาปักลงในดินริมตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ (รูปที่ 2.24) กิ่งไม้สดที่ปักลงในดินมีการแผ่ขยายของรากกลิ้งลงในดินเพื่อเสริมแรงให้กับดิน โดยการยึดมวลดินเข้าด้วยกัน ทำให้ดินแน่นขึ้น ในขณะที่การเจริญเติบโตของกิ่งไม้สดช่วยเพิ่มร่มเงาให้กับพื้นที่ริมตลิ่งและสามารถเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ริมตลิ่ง โครงข่ายของระบบการปักกิ่งไม้สดนี้สามารถช่วยดูดน้ำในมวลดิน ซึ่งทำให้ตลิ่งมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้ง กิ่งและก้านไม้ส่วนที่อยู่เหนือดินสามารถชะลดการไหลของน้ำได้

ตารางที่ 2.1 วิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Iowa Department of Natural Resources, 2006)

Method	Description	*Bank erosion problem	Stream velocity	Stream depth	Bank slope	Bank height	Const. cost	Maint. cost
Live fascine	Placement of bundles of branches in trenches to slow over-bank erosion and establish structural soil stability.	4	0-10ft/sec	Any	>6:1	>4 ft	High	Low
Live stakes	Placement of woody plant and tree cuttings on a graded bank to grow and stabilize the bank by the formation of roots and above ground growth.	1, 2, 4	0-3 ft/sec >3 ft/sec	Any	<6:1	<4 ft &>4 ft	Medium	Medium
Vegetated geogrids	Combination of geotextiles, rock fills, and live materials.	1, 3, 4	>3 ft/sec	Any	<6:1	>4 ft	High	Low

*Bank Erosion Problem: 1 = Fast flowing streams with erodible soils, 2 = Extensive toe- and stream-level erosion, 3 = Fill structure for holes in streambank, 4 = Resistance to occasional heavy flows.

การปรับปรุงแบบวิธีนี้ไม่สามารถป้องกันการกัดเซาะได้ทันทีทันใดหลังจากการก่อสร้าง เนื่องจากต้องรอให้พืชเจริญเติบโตเต็มที่ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานาน อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุป้องกันการกัดเซาะ (Erosion control fabric) สามารถป้องกันการกัดเซาะได้ทันทีหลังจากการก่อสร้างเสร็จ ซึ่งเป็นการทดแทนข้อเสียของวิธีนี้ได้ โดยทั่วไปแล้ว กิ่งไม้สดถูกใช้ผสมผสานกับวิธีการควบคุมการกัดเซาะแบบอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในป้องกันการกัดเซาะ

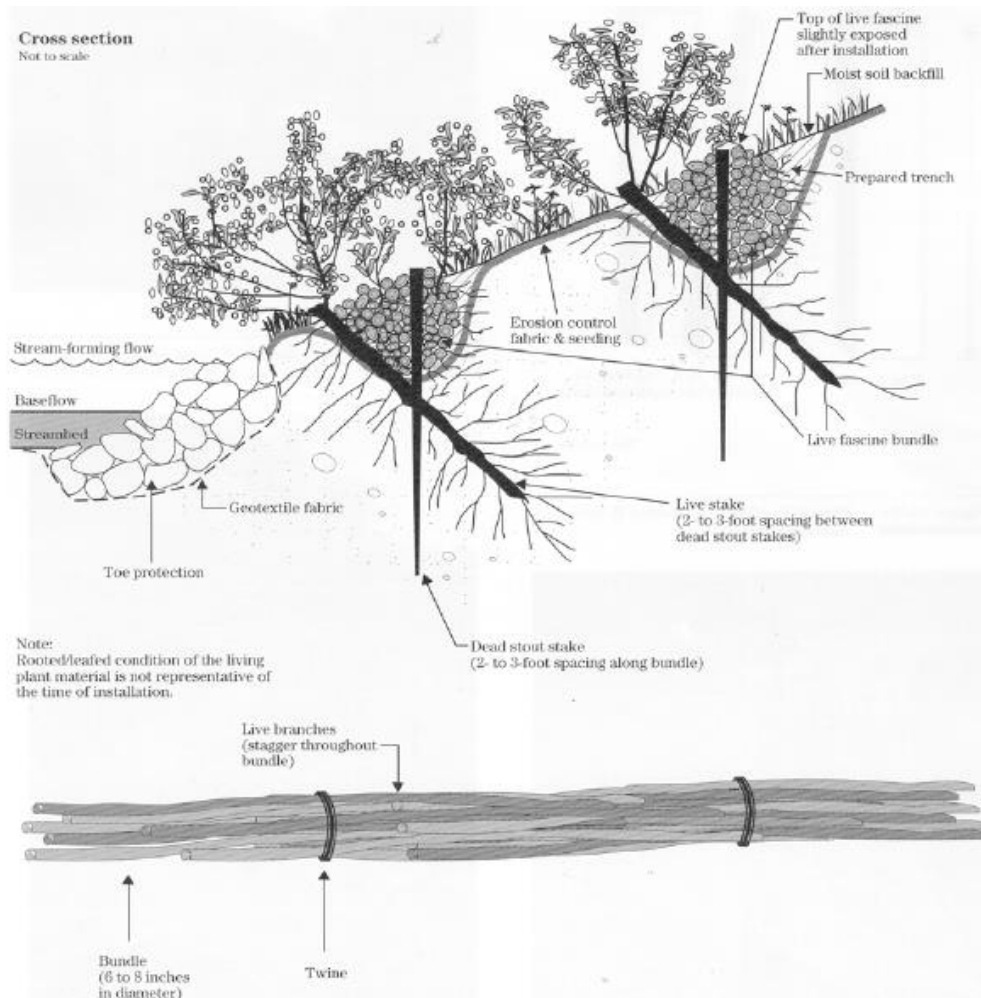


รูปที่ 2.24 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้การปักกิ่งไม้สด (Iowa Department of Natural Resources, 2006)

2.5.2.2 ลูกตะเข้กิ่งไม้สด

การใช้ลูกตะเข้กิ่งไม้สด (Live fascine) ป้องกันการกัดเซาะคือการนำกิ่งไม้มามัดรวมกันเป็นพอน (รูปที่ 2.25) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตะเข้ประมาณ 6-8 นิ้ว ยาวประมาณ 4-20 ฟุต นำมาฝังในร่องบริเวณหน้าตลิ่งโดยมีทิศทางในการวางขนานกับแนวการไหลของน้ำ ตะเข้ไม้สดมีการแตกหน่อรากเพื่อช่วยยึดมวลดิน ทำให้ดินแน่นขึ้นและช่วยป้องกันการกัดเซาะ

วิธีการนี้ยังมีข้อเสียคือ การป้องกันโดยวิธีนี้ไม่สามารถป้องกันอย่างทันทีทันใด เนื่องจากต้องใช้เวลาในการแตกหน่อและการเจริญเติบโตของรากพืช วิธีนี้อาจจะไม่เหมาะสมในการใช้กับตลิ่งที่ยาว เนื่องจากการทำตะเข้กิ่งไม้สดต้องใช้กิ่งไม้เป็นจำนวนมาก การใช้วัสดุป้องกันการกัดเซาะและการใช้กิ่งไม้สดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวิธีนี้ได้

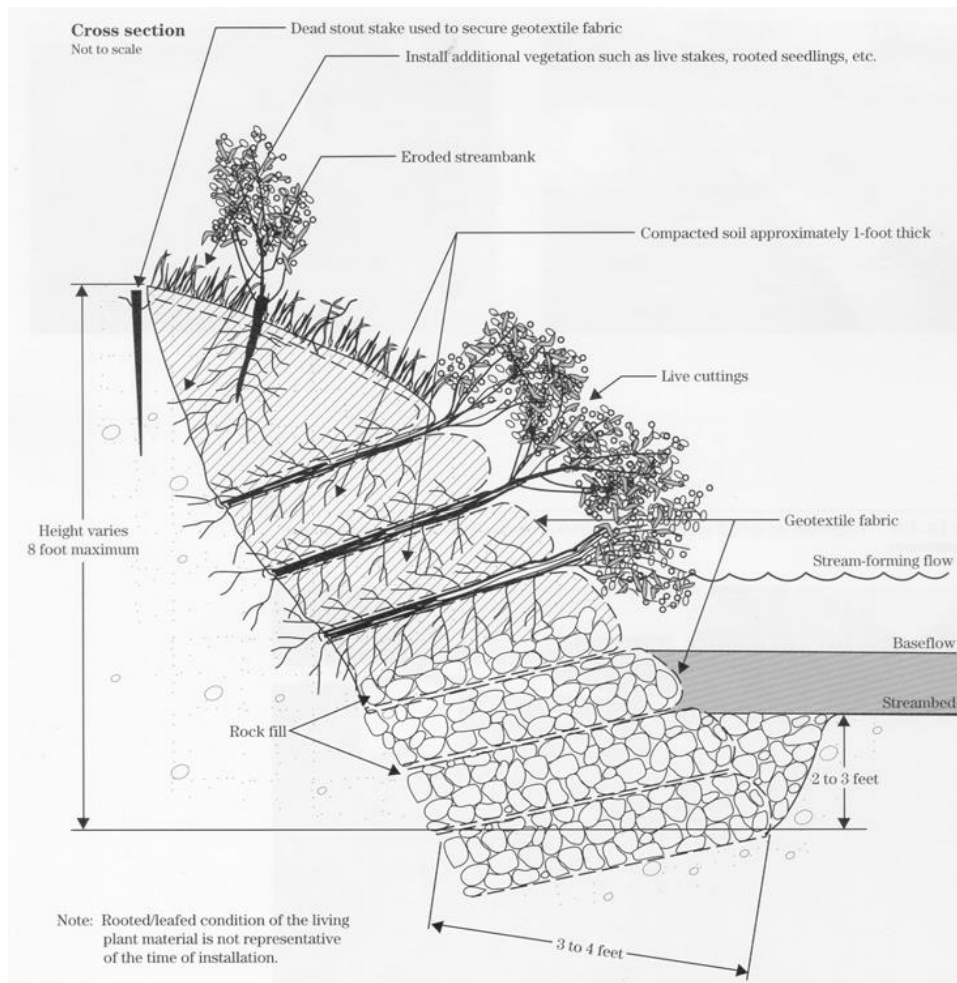


รูปที่ 2.25 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้ตะเข้ไม้สด (Iowa Department of Natural Resources, 2006)

2.5.2.3 Vegetated geogrid

Vegetated geogrid คือการผสมผสานกันระหว่างดิน พืช และวัสดุป้องกันการกัดเซาะ (Erosion control fabric) คลุมหน้าตลิ่ง (รูปที่ 2.26) แผ่นวัสดุป้องกันการกัดเซาะถูกพับเป็นชั้นๆ โดยบริเวณตลิ่งมีการป้องกันโดยใช้หินทิ้งกิ่งไม้สด (Live cutting) ถูกติดตั้งระหว่างชั้นวัสดุป้องกันการกัดเซาะ ซึ่งโครงสร้างของพืชที่เจริญเติบโตจะช่วยยึดมวลดินในขณะที่กิ่งและก้านพืชที่อยู่หน้าตลิ่งจะช่วยชะลอการไหลของน้ำได้ทันทีหลังจากการติดตั้งวิธีการป้องกันการกัดเซาะในรูปแบบนี้เหมาะสำหรับตลิ่งที่ถูกกัดเซาะอย่างรุนแรงและสามารถใช้กับตลิ่งที่ไม่ต้องการปรับความลาดของตลิ่ง

วิธีการนี้ใช้ปริมาณของวัสดุต่างๆ จำนวนมากในการปรับปรุง เนื่องจากการผสมผสานกันทั้งการป้องกันแบบโครงสร้างแข็ง (Riprap) และการใช้วิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Live cutting) โดยการเสริมการป้องกันด้วยวัสดุป้องกันการกัดเซาะ จึงทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างการป้องกันตลิ่งโดยวิธีนี้มีราคาที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.26 รูปตัดขวางวิธีการป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วิธี Vegetated geogrid (Iowa Department of Natural Resources, 2006)

บทที่ 3

คุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถา

3.1 บทนำ

การถดถอยของตลิ่งสามารถนำไปสู่ปัญหาในหลายๆ ด้านเช่น การสูญเสียพื้นที่ทางการเกษตร (e.g., Amiri-Tokaldany et al., 2003) และการสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำของแม่น้ำ (e.g. Millar and Quick, 1993; Darby and Thorne, 1996a; Barker et al., 1997; Millar, 2000; Goodson et al., 2002) การถดถอยของตลิ่งซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการของลำน้ำ (Fluvial process) ซึ่งประกอบด้วย 3 กลไกได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subaerial process) การกัดเซาะของตลิ่ง (Riverbank erosion) และการพังทลายของตลิ่ง (Riverbank failure)

คลองอุตะเถาเป็นคลองสายหลักในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา มีต้นน้ำมาจากชายแดนไทย-มาเลเซียในทิศใต้ ไหลไปยังทะเลสาบสงขลาในทิศเหนือดังแสดงในรูปที่ 3.1 คลองอุตะเถารับปริมาณน้ำเฉลี่ยประมาณ 837 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณตะกอนในลำน้ำที่เกิดจากการกัดเซาะและการพังทลายของตลิ่งนี้ได้มีการเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปริมาณ 60,845 ตันในปี พ.ศ. 2538 เพิ่มขึ้นถึง 191,837 ตันในปี 2542 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดไปถึง 552,170 ตันในปี 2554 (สถานีโทรมาตร X.90 ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคใต้ กรมชลประทาน) ตลิ่งคลองอุตะเถามีความลาดชันสูง มีการกัดเซาะและการพังทลายในหลายๆจุด ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำ โดยมีการร้องเรียนจากเจ้าของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมาตลอดในหลายๆปีที่ผ่านมา การศึกษาการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถาจจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะของตลิ่งที่ครอบคลุมเพียงพอในการวิเคราะห์กลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการถดถอย

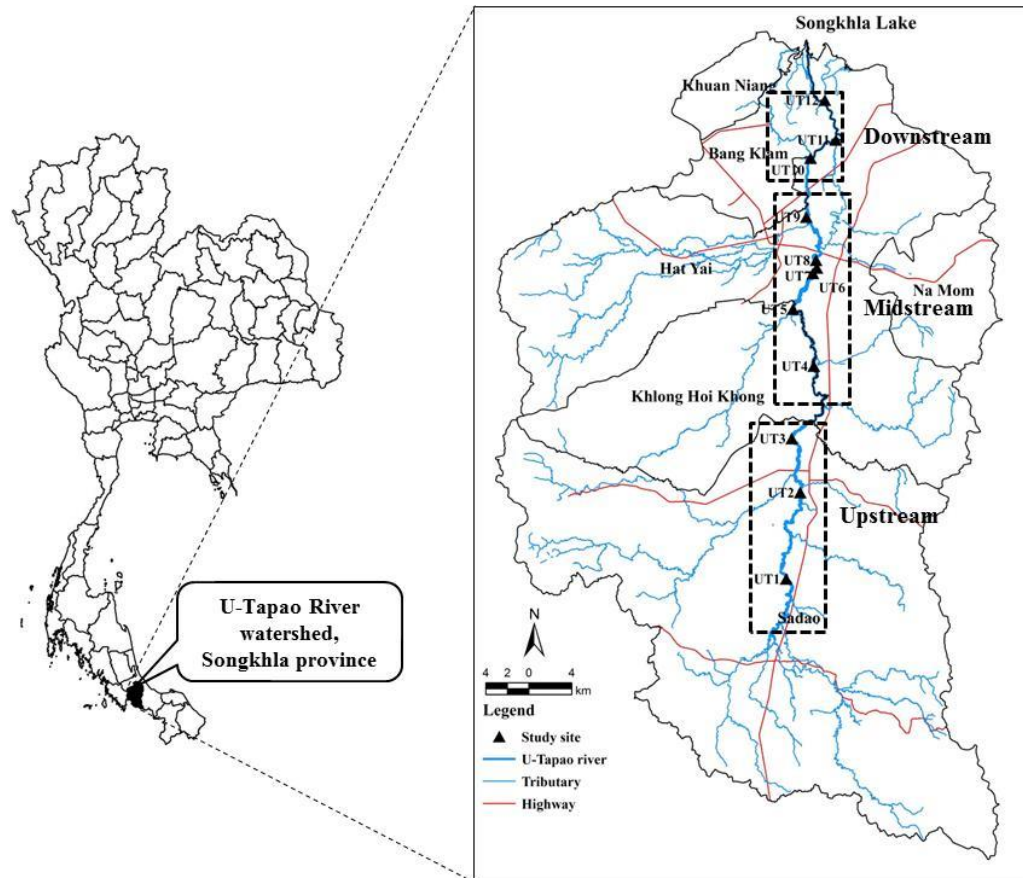
การศึกษาการถดถอยของตลิ่งลำน้ำประกอบไปด้วย การศึกษาเสถียรภาพและการกัดเซาะของดินริมตลิ่ง ข้อมูลคุณลักษณะของตลิ่งเป็นหนึ่งในข้อมูลที่สำคัญในการทำความเข้าใจถึงเสถียรภาพและการกัดเซาะของดินริมตลิ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยสำคัญต่างๆ เช่น ปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา (Hydrological factor) และปัจจัยทางธรณีเทคนิค (Geotechnical factor) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย (1) ประเมินคุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่ง (2) ประเมินคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคและการกัดเซาะของดินริมตลิ่ง

3.2 การทบทวนเอกสาร

3.2.1 การทดสอบการกัดเซาะ

ในปัจจุบัน วิธีการทดสอบการกัดเซาะเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ประกอบด้วยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน (Erodibility coefficient) สามารถแบ่งได้ 3 วิธีคือ 1. Hole erosion test, HET (Wan and Fell, 2004) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำ (Seepage erosion) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์

การกัดเซาะของเขื่อนดิน 2. Erosion Function Apparatus, EFA (Briaud et al. 2001) เป็นการทดสอบการกัดเซาะที่ท้องคลอง (Streambed erosion) นิยมใช้วิเคราะห์การกัดเซาะต่อม่อสะพาน 3. Submerged jet test (Hanson and Cook 2004) เหมาะสำหรับการกัดเซาะที่ท้องคลองและการกัดเซาะที่ขอบตลิ่ง (Lateral erosion) เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการบรรจุเป็นมาตรฐาน ASTM Standard D5852 (2003) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ Submerged jet device เป็นมาตรฐานในการทดสอบ



รูปที่ 3.1 ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา จังหวัดสงขลา

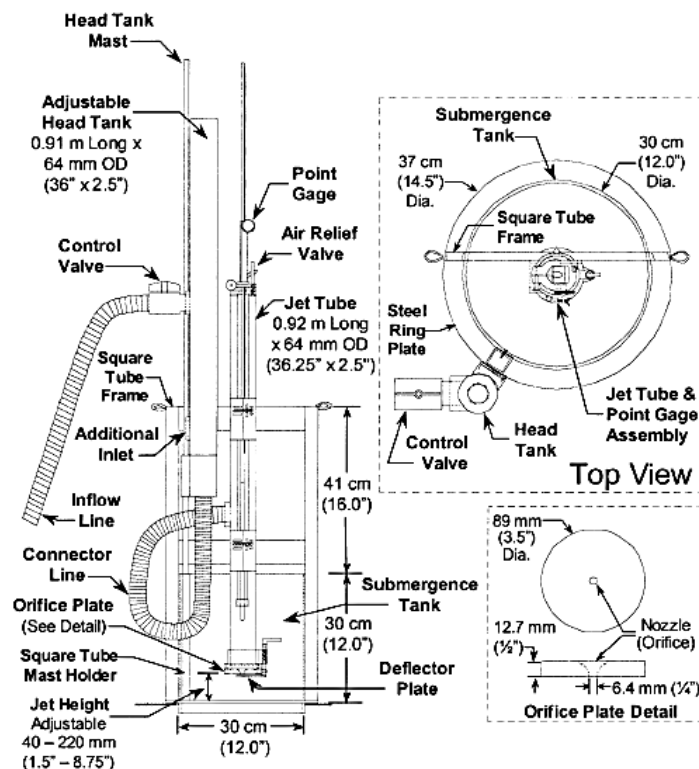
*หมายเหตุ สัญลักษณ์ที่แสดงในรูปที่ 3.3 เป็นตำแหน่งจุดริมตลิ่งที่ศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

UT1 = บ้านตะเขียนเภา ตำบลปริก, UT2 = บ้านท่าโพธิ์ ตำบลท่าโพธิ์, UT3 = บ้านม่วงก้อง ตำบลพังลา, UT4 = บ้านคลองปอม ตำบลทุ่งลาน, UT5 = บ้านบางศาลา ตำบลทุ่งลาน, UT6 = บ้านชายคลอง ตำบลบ้านพรุ, UT7 = บ้านชายคลอง ตำบลบ้านพรุ, UT8 = บ้านพรุ ตำบลบ้านพรุ, UT9 = บ้านบางแพบ ตำบลควนลิ่ง, UT10 = บ้านหาร ตำบลคลองแห, UT11 = บ้านนารังนก ตำบลแม่ทอม, UT12 = บ้านคูเต่า ตำบลคูเต่า

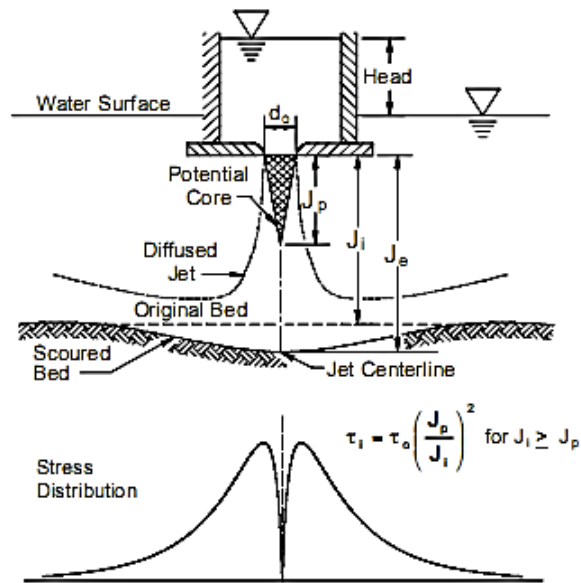
เครื่องมือ Submerged jet device (รูปที่ 3.2) ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน ซึ่งใช้งาน

ได้สะดวกและสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ทำให้เข้าถึงพื้นที่การทดสอบในสนามได้ง่าย อีกทั้งสามารถทดสอบกับดินหลายๆ ชนิดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน หลักการทำงานของเครื่องมือทดสอบนี้ใช้ head tank ในการให้กำเนิดการไหลแบบ jet ที่ความเร็วคงที่ผ่านช่องเปิดขนาดเล็ก (Orifice) ไปกระทบกับตัวอย่างดินจนเกิดรอยที่ถูกกัดเซาะ (Scour) ลักษณะการกระจายของ jet flow ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบวงกลม (Circular) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแพร่กระจายออกจากศูนย์กลางของการไหล และก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนบนตัวอย่างดิน ระยะการกัดเซาะของดินที่เกิดขึ้นสามารถตรวจวัดด้วยมาตรวัดระยะ (Point gage)

ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินสามารถคำนวณได้เมื่อดินถูกกัดเซาะกลายเป็นระยะที่มากที่สุด (รูปที่ 3.3) และอัตราการกัดเซาะเท่ากับศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้ว ระยะการกัดเซาะของดินสามารถเพิ่มขึ้นตลอดเวลา (Hanson and Cook, 1997) ตามเหตุผลที่กล่าวมานี้ ระยะการกัดเซาะมากที่สุดและค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตถูกประมาณโดยการ fit สมการ hyperbolic logarithmic ที่สัมพันธ์กับข้อมูลระยะการกัดเซาะมากที่สุด (Blaisdell et al., 1981) โดยใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน หลังจากคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินคำนวณมาจากการ fit ข้อมูลการกัดเซาะของดินและเวลาที่เกี่ยวข้องในการกัดเซาะไปยังสมการหน่วยแรงส่วนเกิน (Excess shear stress equation)



รูปที่ 3.2 Submerged jet apparatus (Hanson and Cook, 1997)



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนของเครื่องมือ submerged jet
(Hanson and Cook, 1997)

$$\tau_c = \tau_o \left(\frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$J_p = C_d d_o \quad (3.2)$$

$$\tau_o = C_f \rho U_o^2 \quad (3.3)$$

$$U_o = \sqrt{2gh} \quad (3.4)$$

เมื่อ τ_o คือ หน่วยแรงเฉือนมากที่สุดที่สัมพันธ์กับค่าระยะการกัดเซาะมากที่สุด (Maximum shear stress) J_p คือ ความยาวของ potential core (เมตร) J_e คือ ความลึกของระยะการกัดเซาะ (เมตร) C_d คือ ค่าคงที่การกระจายตัวของการไหลแบบ jet = $6.3 d_o$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด Orific (เมตร) C_f คือ สัมประสิทธิ์การเสียดทาน = 0.00416 U_o คือ ความเร็วของการไหลผ่านช่องเปิด (เมตรต่อวินาที) และ h คือ ผลต่างของ head (เมตร)

3.2.2 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดิน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะของดินประกอบไปด้วยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน (Erodibility coefficient, k_d) ซึ่งใช้ในการประเมินอัตราการกัดเซาะหรือระยะการกัดเซาะของดินริมตลิ่ง อีกทั้งยังรวมไปถึงการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้

นักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอสมการเชิงประสพการณ์เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์โดยใช้คุณสมบัติดัชนีได้แก่ ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) ปริมาณดินเหนียว (Clay content, P_c) ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt-clay content, SC) ขนาดของเม็ดดินเฉลี่ย (Mean particle size, D_{50}) แอคติวิตีและค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (Activity and pH of soil) Smerdon and Beasley (1961) ได้ทำการพัฒนาความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์ที่สามารถคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากคุณสมบัติดัชนีดังแสดงในสมการที่ 3.5-3.7

$$\tau_c = 3.54 \times 10^{-28.1D_{50}} \quad (3.5)$$

$$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182P_c} \quad (3.6)$$

$$\tau_c = 0.16(PI)^{0.84} \quad (3.7)$$

Julian and Torres (2006) ได้เสนอสมการเชิงประสพการณ์ที่สามารถคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินจากปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย ดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$\tau_c = 0.1 + 0.1779(SC) + 0.0028(SC)^2 - 2.34 \times 10^{-5} \times (SC)^3 \quad (3.8)$$

ในทางกลับกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินไม่สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติดัชนีของดินได้ (Hanson and Temple, 2002) อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินสามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบกำลัง (Power laws) ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินที่พัฒนามาจากผลการทดสอบการกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test ความสัมพันธ์ดังกล่าวพัฒนาโดย Simon et al., (2010) ซึ่งใช้วิธี Blaisdell solution (Blaisdell et al., 1981) สามารถสรุปดังสมการที่ 3.9 หลังจากนั้น Daly et al. (2013) ได้เสนอความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การกัดเซาะจากผลการทดสอบ Submerged jet test โดยใช้วิธี Scour depth solution ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่สำหรับคำนวณผลการทดสอบการกัดเซาะดังแสดงในสมการที่ 3.10 โดยทั้งสองสมการ ค่า k_d มีหน่วยเป็น $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ และ τ_c มีหน่วยเป็น Pa

$$k_d = 1.62\tau_c^{-0.838} \quad (3.9)$$

$$k_d = 157\tau_c^{-1.620} \quad (3.10)$$

3.3 การสำรวจและทดสอบดินริมตลิ่งคลองอุทะเภา

การกัดเซาะตลิ่งเกิดจากปัจจัยหลายอย่างร่วมกันเช่น คุณสมบัติทางอุทกวิทยา (Hydrological characteristic) ลักษณะทางธรณีสัณฐานของลำน้ำ (Geomorphology of river) และคุณสมบัติของดินริมตลิ่ง (Soil properties) เป็นต้น โดยคุณสมบัติของดินริมตลิ่งเป็นคุณลักษณะพื้นฐานที่สามารถบ่งบอกเสถียรภาพของตลิ่ง ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของตลิ่งที่สำคัญ ประกอบด้วย ลักษณะทางกายภาพของตลิ่งและคุณสมบัติของดินทั้งทางด้านธรณีเทคนิคและทางด้านารกัดเซาะ ซึ่งมีการดำเนินงานดังแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การสำรวจลักษณะทางกายภาพของตลิ่ง

สภาพของตลิ่งในกลุ่มน้ำคลองอุตะเถาได้ถูกสำรวจ โดยครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ต้นน้ำบริเวณอำเภอสะเดา ไปจนถึงปลายน้ำบริเวณบ้านคูเต่า มีระยะห่างแต่ละตำแหน่งประมาณ 4-5 กิโลเมตร (รูปที่ 3.1) การสำรวจได้เริ่มโดยการตรวจพินิจสภาพทั่วไปของตลิ่งและทำการเลือกตำแหน่งทดสอบ หลังจากนั้น ทำการตรวจวัดหน้าตัดขวางของตลิ่งและเก็บตัวอย่างดินริมตลิ่งเพื่อนำมาทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย การจำแนกดิน (Soil classification ASTM D2487, Unified Soil Classification System) คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) และค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ (Erodibility parameters) โดยใช้เครื่องมือทดสอบการกัดเซาะ (Submerged jet device)

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค

ตัวอย่างดินแบบคงสภาพถูกเก็บจากชั้นดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา ตั้งแต่บ้านตะเข้ยนเภา (UT1) จนถึงบ้านคูเต่า (UT12) โดยทำการเก็บจากความลึกทุกๆ 1 เมตร ใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบกระบอกบางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength parameters) ซึ่งประกอบด้วยค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective angle of internal friction, ϕ') และหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective cohesion, c') โดยใช้วิธีการเฉือนโดยตรง (Direct shear test) แบบ multi-stage type, consolidated drained test (ASTM D 3080-03) อุปกรณ์การทดสอบโดยการเฉือนตรงได้แสดงในรูปที่ 3.4

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ multi-stage ใช้ตัวอย่างดินเพียงตัวอย่างเดียว ทดสอบโดยเฉือนตัวอย่างจนถึงจุดวิบัติของในแต่ละ Normal load อย่างน้อย 3-4 Normal Load ใช้อัตราการเฉือนประมาณ 0.05 mm/min ก่อนการเฉือนตัวอย่างดินจำเป็นต้องทำการอบการอัดตัวคายน้ำในทุก Normal load ประมาณ 1 วัน แล้วทำการเฉือนตัวอย่างจนถึงจุดที่วิบัติ (โดยสังเกตจากหน่วยแรงเฉือนที่คงที่ แล้วทำการ Consolidate ใน Normal load ที่ 2 ตัวอย่างให้ทรุดตัวหมดแล้วทำการเฉือนต่อไป ทำซ้ำจนครบ 3 Normal load ซึ่งข้อมูลเพียงพอในการวิเคราะห์หาค่า Shear strength parameter ในตัวอย่างเดียว

3.3.3 การทดสอบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

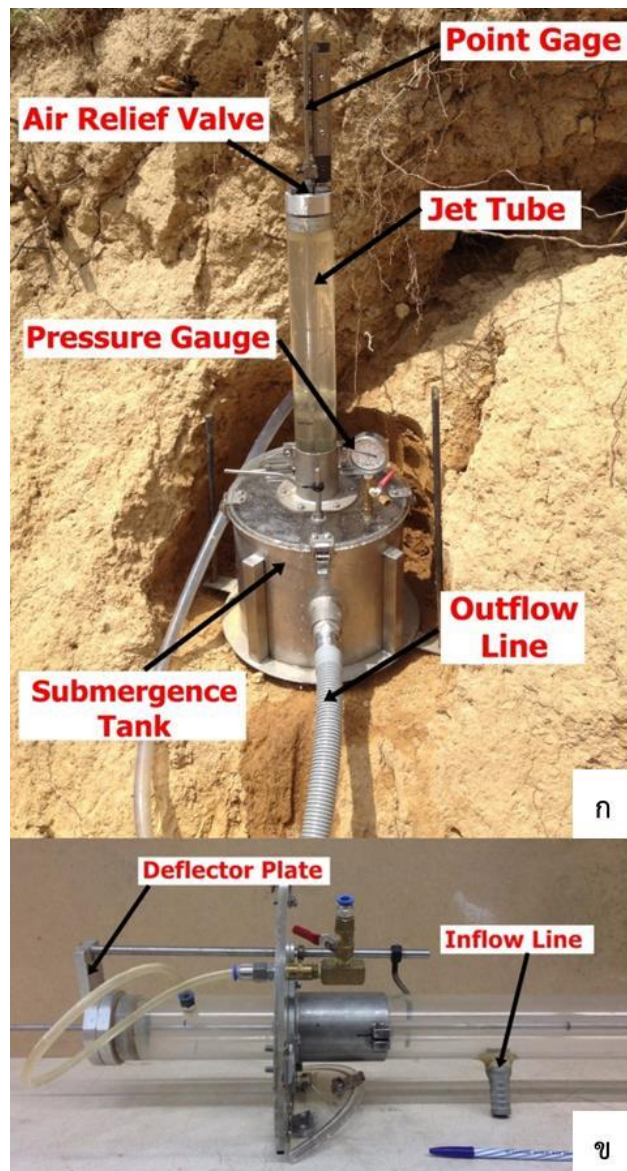
พารามิเตอร์การกัดเซาะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการวิเคราะห์การกัดเซาะของตลิ่ง ซึ่งสามารถทดสอบได้ทำในห้องปฏิบัติการและในสนาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบในสนามโดยใช้เครื่องมือทดสอบการกัดเซาะในสนาม (Submerged jet device) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D5852-95 เพื่อใช้ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะในสนามของตลิ่งคลองอุตะเถา



รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบการผิวนตรง

เครื่องมือทดสอบการกัดเซาะได้ถูกสร้างขึ้นโดยผู้วิจัยเพื่อใช้ทดสอบพารามิเตอร์การกัดเซาะในสนาม ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องมือสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ แทงก์ (Submergence tank) ทิวป์กำเนิดแรงดันน้ำ (Jet tube) และมาตรวัดระยะ (Point gauge) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในการกำเนิดแรงดันน้ำ น้ำจะถูกปั๊มโดยตรงหรือรับมาจากเฮดแทงก์ (Head tank) เข้าสู่ทิวป์กำเนิดแรงดันน้ำผ่านทาง inflow line (รูปที่ 3.5ข) และไหลออกทางส่วนล่างของทิวป์กำเนิดแรงดันน้ำผ่านทาง nozzle ซึ่งก่อให้เกิดลักษณะการไหลแบบ jet flow อยู่ภายในแทงก์ที่เต็มไปด้วยน้ำ การไหลแบบ jet flow ในแทงก์จะก่อให้เกิดการแพร่กระจายของแรงดันน้ำและหน่วยแรงเฉือนกระทำต่อผิวดิน ในขณะที่ทดสอบสามารถวัดค่าระยะการกัดเซาะโดยใช้มาตรวัดระยะ ภาพการทดสอบในสนามได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ข้อมูลจากการทดสอบประกอบด้วย แรงดันน้ำและระยะการกัดเซาะที่เกิดขึ้นได้ถูกนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ โดยใช้วิธี Scour depth solution (Daly et al., 2013)

การทดสอบ Submerged jet test ได้ดำเนินการกับตลิ่งตั้งแต่บ้านม่วงก้อง (UT3) ถึงบ้านบางแพบ (UT9) (รูปที่ 3.1) และตลิ่งบริเวณใกล้เคียงในบางตำแหน่ง ตลิ่งทั้งหมดเป็นตลิ่งที่มีร่องรอยการพิบัติในอดีตและเป็นตลิ่งที่เสี่ยงต่อการเกิดการกัดเซาะและการพิบัติ บริเวณผิวดินไม่มีพืชปกคลุม ตัวอย่างดินหลังจากการทดสอบการกัดเซาะได้ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติดัชนีต่างๆ และคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตจากสมการเชิงประสพการณ์ (สมการที่ 3.5-3.8) ผลการคำนวณจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Submerged jet test เพื่อหาคุณสมบัติดัชนีที่เหมาะสมและประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมการเชิงประสพการณ์สำหรับการประมาณค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตที่เหมาะสมของตลิ่งคลองอุตะเถา คุณสมบัติดัชนีของดินประกอบด้วย ขนาดของเม็ดดินเฉลี่ย (Mean particle size, D_{50}) ปริมาณดินเหนียว (Clay content, P_c) ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) และปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt-clay content, SC) ผลการทดสอบ Submerged jet test ยังถูกนำมาพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะและเปรียบเทียบกับสมการเชิงประสพการณ์ดังแสดงในสมการที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบ Submerged jet device ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ก) ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือ ข) รายละเอียดของส่วนที่วัดค่าแรงดัน

3.4 ผลการศึกษาคุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเภา

ผลการสำรวจสภาพทั่วไปของตลิ่งและทำการวัดหน้าตัดขวางของตลิ่ง รวมถึงข้อมูลของลักษณะภูมิประเทศของกลุ่มน้ำคลองอุตะเภา สามารถจำแนกกลุ่มน้ำคลองอุตะเภาออกเป็น 3 โซนดังแสดงในตารางที่ 3.1 ประกอบด้วย (1) กลุ่มน้ำคลองอุตะเภาบริเวณต้นน้ำ (Upstream area) ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่เทศบาลเมืองสะเดาลงมาจนถึงบ้านม่วงก้อง มีความชันท้องคลองมากกว่า 1:2,000 (2) กลุ่มน้ำคลองอุตะเภาบริเวณกลางน้ำ (Mid stream area) ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่บ้านม่วงก้องถึงบ้านบางแพบ มีความชันท้องคลองประมาณ 1:3,300 (3) กลุ่มน้ำคลองอุตะเภาบริเวณปลายน้ำ

(Downstream area) จากบ้านบางแพบถึงทะเลสาบสงขลา มีความลาดชันท้องคลองประมาณ 1:11,000 โดยคุณลักษณะทางกายภาพและชั้นดินของตลิ่งในแต่ละโซนพื้นที่สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การทดสอบ Submerged jet test บริเวณตลิ่งคลองอุตะเภามืองช้าง

3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของตลิ่งคลองอุตะเภามืองช้าง

3.4.1.1 ลุ่มน้ำคลองอุตะเภามืองช้างบริเวณต้นน้ำ

ลุ่มน้ำคลองอุตะเภามืองช้างต้นน้ำเป็นโซนของลุ่มน้ำที่มีความยาวมากที่สุด ครอบคลุมพื้นที่ตลิ่งในตำแหน่ง UT1-UT3 จากบ้านตะเข้ยนเกา ตำบลปริง อำเภอสะเดา ถึงบ้านม่วงก้อง ตำบลพังลา อำเภอสะเดา ลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในบริเวณลุ่มน้ำบริเวณต้นน้ำได้แสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.7 โดยส่วนใหญ่ พื้นที่บริเวณแนวตลิ่งบริเวณนี้มีพืชปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น จากการสำรวจตลิ่งในช่วงระดับน้ำต่ำ (Base flow) พบว่าขอบตลิ่งซ้ายและขอบตลิ่งขวาในบริเวณนี้มีความสูงจากท้องคลองอยู่ช่วง 1.59-8.61 และ 2.50-9.65 ตามลำดับ ตลิ่งมีความชันในช่วงประมาณ 40°-60° โดยมีความกว้างของลำน้ำประมาณ 14.00-70.00 เมตร ผลการทดสอบการจำแนกชนิดของดินพบว่า ดินริมตลิ่งบริเวณนี้เป็นดินทรายปนตะกอนทราย (Silty sand, SM) ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand, SC) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สถานะตลิ่งในบริเวณนี้ยังเป็นตลิ่งที่มีเสถียรภาพ มีการปกคลุมหน้าดินด้วยพืชท้องถิ่นและไม่พบร่องรอยการกัดเซาะหรือการพังทลายที่สำคัญ

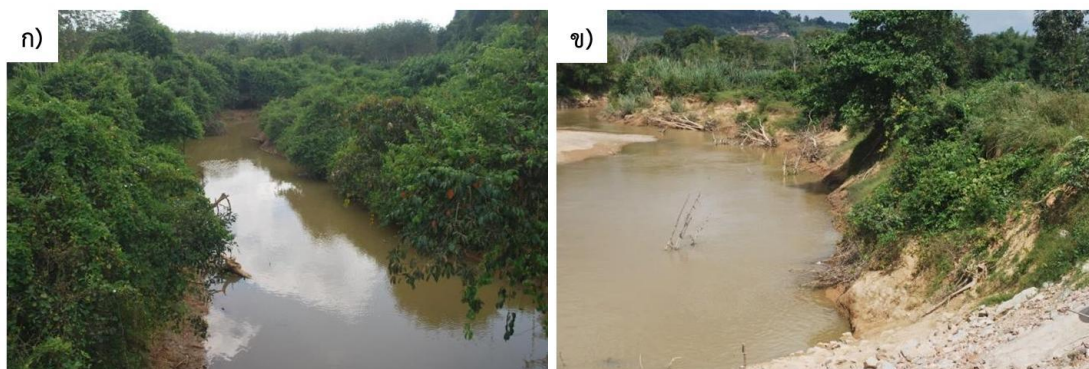
3.4.1.2 ลุ่มน้ำคลองอุตะเภามืองช้างบริเวณกลางน้ำ

ลุ่มน้ำคลองอุตะเภามืองช้างบริเวณกลางน้ำครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่บ้านคลองปอม (UT4) ตำบลทุ่งลาน อำเภอลองหอยโข่ง จนถึงบ้านบางแพบ (UT9) ตำบลควนลัง อำเภอลาดใหญ่ ตลิ่งในพื้นที่บริเวณนี้มีร่องรอยการพิบัติในอดีตที่เห็นได้ชัด (รูปที่ 3.8) ความกว้างของลำน้ำจากขอบตลิ่งทางซ้ายไปยังขอบตลิ่งทางขวาประมาณ 27.00-112.00 เมตร โดยขอบตลิ่งซ้ายและขอบตลิ่งขวาในบริเวณนี้มีความสูง

จากห้องคลองอยู่ในช่วงประมาณ 3.25-10.51 และ 3.30-10.66 เมตรตามลำดับ ตลิ่งมีความชันในช่วงประมาณ 50° - 85° จากการทดสอบการจำแนกดินพบว่า ลักษณะของดินริมตลิ่งในบริเวณนี้ ประกอบไปด้วยดินทรายปนตะกอนทราย (Silty sand, SM) ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand, SC) ดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity silt, ML) ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ซึ่งเป็นชั้นดินที่พบบริเวณบ้านบางแพบ (UT9) ตลิ่งในลุ่มน้ำอุ้มตะเกาบริเวณกลางน้ำนี้มีลักษณะที่เสี่ยงต่อการพังทลายเป็นอย่างสูง

ตารางที่ 3.1 โชนของกลุ่มน้ำคลองอุ้มตะเกาและคุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่ง (ศูนย์วิจัยภัยพิบัติ-ทางธรรมชาติภาคใต้ 2557)

พื้นที่ลุ่มน้ำ	ขอบเขต	ความยาว (กม.)	ความชันห้องคลอง	ค่าต่ำสุด-สูงสุด (ค่าเฉลี่ย)		
				ความกว้างของลำน้ำ (ม.)	ความสูงของตลิ่งซ้าย (ม.)	ความสูงของตลิ่งขวา (ม.)
ต้นน้ำ	ตำบลสะเดา-บ้านม่วงก้อง	68.02	1:2,000	14.00-70.00 (29.16)	1.59-8.61 (5.11)	2.50-9.65 (5.13)
กลางน้ำ	บ้านม่วงก้อง-บ้านบางแพบ	32.78	1:3,300	27.00-112.00 (58.58)	3.25-10.51 (6.72)	3.30-10.66 (6.98)
ปลายน้ำ	บ้านบางแพบ-ทะเลสาบสงขลา	20.40	1:11,000	30.00-106.00 (63.64)	4.99-12.76 (7.75)	4.90-13.06 (7.56)



รูปที่ 3.7 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในบริเวณลุ่มน้ำคลองอุ้มตะเกาบริเวณต้นน้ำ ก) บ้านตะเขียนเกา (UT1) ข) บ้านม่วงก้อง (UT3)



รูปที่ 3.8 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำ ก) บ้านคลองปอม (UT4) ฝั่งซ้าย ข) บ้านพรุ (UT8) ฝั่งขวา

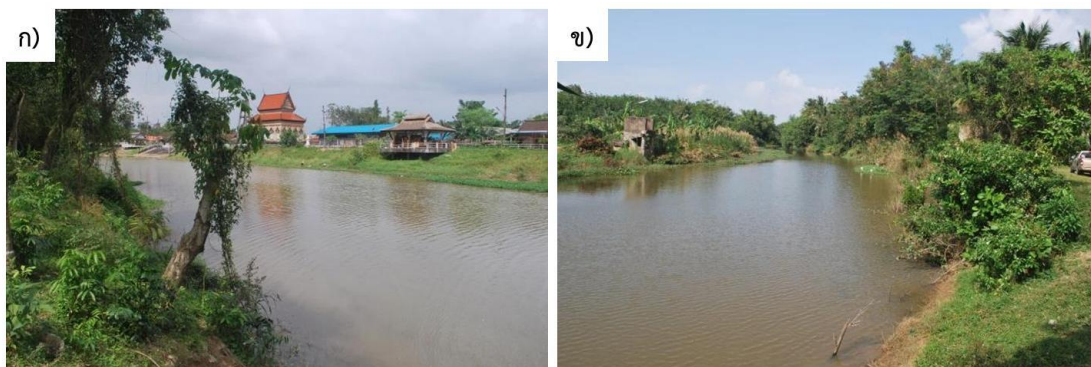
การกัดเซาะและการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณกลางน้ำสืบเนื่องมาจากคุณสมบัติของดินริมตลิ่ง ร่วมกับปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา ตลิ่งหลายตำแหน่งในพื้นที่บริเวณนี้มีการพังทลาย โดยเฉพาะตลิ่งแบบผสม ซึ่งการกัดเซาะเกิดขึ้นกับดินเหนียวบริเวณดินตลิ่งก่อนเกิดการพังทลายแบบคานยื่น (Cantilever failure) ในขณะที่ตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive bank) มีการพังทลายแบบระนาบ (Planar failure) อย่างไรก็ตาม การกัดเซาะเกิดขึ้นกับตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวน้อยเนื่องจากดินริมตลิ่งมีความต้านทานการกัดเซาะสูง

3.4.1.3 ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณปลายน้ำ

ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณปลายน้ำเป็นลำน้ำสั้นที่สุดของลุ่มน้ำ โดยมีความยาวประมาณ 20.40 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำตั้งแต่บ้านหาร ตำบลคลองแห (UT10) ถึงทะเลสาบสงขลา ลักษณะตลิ่งบริเวณนี้มีเสถียรภาพที่ดี เนื่องจากความชันและความสูงของตลิ่งต่ำ (รูปที่ 3.9) และมีพืชปกคลุมผิวตลิ่ง ความกว้างของลำน้ำในบริเวณนี้อยู่ในช่วงประมาณ 27.00-109.00 เมตร ขอบตลิ่งซ้ายและขอบตลิ่งขวาในบริเวณนี้มีความสูงจากท้องคลองอยู่ในช่วงประมาณ 4.99-12.76 และ 4.04-13.06 เมตรตามลำดับ ตลิ่งมีความชันอยู่ในช่วงประมาณ 30°-50° ผลการจำแนกชนิดของดินพบว่าลักษณะของดินริมตลิ่งในบริเวณนี้มีความหลากหลาย โดยประกอบไปด้วยดินทรายปนตะกอนทราย (Silty sand, SM) ตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity silt, ML) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL)

3.4.2 คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินริมตลิ่ง

คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินตัวอย่างถูกทดสอบกับดินแบบคงสภาพที่ได้ทำการเก็บจากตลิ่งตลอดลุ่มน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยการทดสอบ Multi-stage direct shear test ผลการทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคได้แสดงในตารางที่ 3.2 จากการจำแนกดินและประเภทของตลิ่งพบว่า ตลิ่งคลองอุตะเถาสามารถจำแนกประเภทของตลิ่งเป็นสามประเภทได้แก่ (1) ตลิ่งที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Non-cohesive bank) และ (2) ตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive bank) (3) ตลิ่งแบบผสม (Composite bank)



รูปที่ 3.9 คุณลักษณะทางกายภาพของตลิ่งบริเวณลุ่มน้ำบริเวณปลายน้ำ ก) บ้านนารังนก (UT11)
ข) บ้านคูเต่า (UT12)

3.4.2.1 พื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณต้นน้ำ

ตลิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณต้นน้ำ (UT1-UT3) ในพื้นที่นี้สามารถจำแนกประเภทของตลิ่งได้สองประเภทได้แก่ ตลิ่งที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ประกอบด้วยชั้นดินทรายปนตะกอนทราย (Silty sand, SM) และชั้นดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand, SC) และตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวประกอบด้วยชั้นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตลอดชั้นดินริมตลิ่งค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดินอยู่ในช่วง 24.72° - 30.92° 27.99° - 30.71° และ 19.58° - 25.72° สำหรับดิน SM SC และ CL ตามลำดับ ในขณะที่ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลอยู่ในช่วง 0.76 - 1.60 kPa 8.94 - 10.03 kPa และ 1.60 - 5.61 kPa สำหรับดิน SM SC และ CL ตามลำดับ

3.4.2.2 พื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณกลางน้ำ

ตลิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาบริเวณกลางน้ำ (UT4-UT9) ประกอบด้วยตลิ่งแบบเชื่อมแน่นที่มีชั้นดินริมตลิ่งที่ประกอบด้วยดินทรายปนตะกอนทราย (SM) ชั้นดินทรายปนดินเหนียว (SC) ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, ML) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CL) บริเวณพื้นที่ตำแหน่ง UT9 ลุ่มน้ำอุตะเถาบริเวณกลางน้ำยังประกอบไปด้วยตลิ่งแบบผสม (Composite bank) ในบริเวณพื้นที่ตำแหน่ง UT6 ซึ่งประกอบด้วยดินทรายปนดินเหนียวและดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ผลการทดสอบการเฉือนโดยตรง ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลอยู่ในช่วง 24.31° - 31.30° 27.57° - 29.93° และ 27.17° - 28.38° สำหรับดิน CL SC ML ตามลำดับ และเท่ากับ 24.91 และ 25.52° สำหรับดิน SM และ CH ตามลำดับ ในขณะที่หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 1.87 - 18.27 kPa สำหรับดิน CL ในทางกลับกัน ชั้นดิน SC และ ML มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลอยู่ในช่วงที่แคบตั้งแต่ 4.64 - 7.29 kPa และ 5.07 - 9.56 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ชั้นดิน SM มีค่าเท่ากับ 0.48 kPa

3.4.2.3 พื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกาบริเวณปลายน้ำ

ตลิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกาบริเวณปลายน้ำ (UT10-UT12) ประกอบด้วยตลิ่งทั้งแบบความเชื่อมแน่นและไม่มีแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วยดินทรายปนตะกอนทราย (SM) ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) และดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (ML) ผลการทดสอบการเฉือนโดยตรงพบว่า ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 25.76° - 27.87° 30.51° - 31.49° สำหรับดิน CL และ SM ตามลำดับ และเท่ากับ 28.75° สำหรับดิน ML ในขณะที่ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลอยู่ในช่วง 14.37-15.71 0.00-0.42 kPa สำหรับ CL และ SM ตามลำดับและเท่ากับ 1.64 kPa สำหรับดิน ML

3.4.3 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่ง

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ (Erodibility parameters) ของดินประกอบด้วยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, τ_c) ที่บ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient, k_d) บ่งบอกถึงอัตราเร็วในการกัดเซาะ ซึ่งในภาพรวม ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะสามารถบ่งชี้ถึงสภาพของดินริมตลิ่งต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำ ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test พบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสองอยู่ในช่วงที่กว้าง โดยที่หน่วยแรงเฉือนวิกฤตอยู่ในช่วง 1.03-20.93 Pa และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะอยู่ในช่วง 2.23-89.07 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งสองขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ซึ่งมีความหลากหลายและแตกต่างกันสำหรับดินในแต่ละชนิด เนื่องจากตัวอย่างดินมีการกระจายตัวของเม็ดดินที่ต่างกันไป โดยขนาดเม็ดดินเป็นปัจจัยหลักต่อค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินเม็ดหยาบ (Shields, 1936; Vanoni, 1977; Hann et al., 1994) ในทางตรงข้าม ปัจจัยที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินเม็ดละเอียด (Fine-grain soil) ยังมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของดินริมตลิ่งในขณะนั้น ซึ่งยังเป็นเหตุผลของความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ โดยพื้นฐานของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวเช่น ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) ปริมาณดินเหนียว (Clay content, P_c) ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt-Clay content, SC) เป็นต้น (Smerdon and Beasley, 1961; Julian and Torres, 2006)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินริมตลิ่งคลองอุต๊ะเกา

Site	Latitude, Longitude (m)	Depth (m)	USCS	Bank type	Shear strength parameter		
					ϕ' (Degree)	c' (kPa)	γ_{sat} (kN/m ³)
UT1	741414.12 658419.53	0.00-3.00	SM	Non-cohesive	30.92	0.76	18.92
UT2	749445.90 659726.14	0.00-2.00	SC	Non-cohesive	30.71	10.03	19.21
		2.01-3.00	SC		27.99	8.94	19.64
UT3	754476.53 658940.41	0.00-1.50	CL	Composite	25.72	5.61	19.16
		1.51-2.50	CL		19.58	2.98	19.91
		2.51-4.00	SM		24.72	1.60	19.46
UT4	761223.78 660999.83	0.00-1.50	SM	Composite	24.91	0.48	18.37
		1.51-2.50	CL		25.19	1.87	17.85
		2.51-3.50	CL		29.97	2.72	20.15
UT5	766523.25 659055.79	0.00-1.30	CL	Cohesive	30.17	8.24	19.37
		1.31-2.50	CL		26.39	9.76	19.00
		2.50-4.50	CL		28.72	9.74	19.18
UT6	769868.27 660909.90	0.00-1.50	SC	Composite	27.57	7.29	19.93
		1.51- 2.50	SC		29.93	4.64	20.02
		2.51-3.50	CL		28.77	9.27	19.90
UT7	770,360.45 661,285.00	0.00-1.40	ML	Cohesive	27.17	9.56	19.71
		1.41-4.49	ML		28.38	5.07	19.29
UT8	771081.97 661202.59	0.00-1.00	CL	Cohesive	24.31	3.12	19.45
		1.01-2.50	CL		26.49	9.50	20.01
		2.51-3.00	CL		23.97	18.27	20.14
UT9	775097.91 660296.34	0.00-1.50	CL	Cohesive	31.30	3.19	18.82
		1.51-2.00	CL		27.06	11.14	19.84
		2.01-3.50	CH		25.52	17.78	20.18
UT10	780586.24 660689.82	0.00-1.50	ML	Cohesive	28.75	1.64	19.23
		1.51-2.50	CL		27.87	14.37	19.81
		2.51-3.50	CL		25.76	15.71	19.89
UT11	782286.93 663054.83	0.00-3.00	SM	Non-cohesive	30.51	0.42	18.78
UT12	785984.20 662019.95	0.00-1.00	SM	Non-cohesive	31.49	0.07	17.78
		1.01-2.50	SM		31.25	0.00	17.74

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติด้านการกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา

Site	Sample*	Depth (m)	USCS	D ₅₀ (mm)	P _c (%)	PI (%)	SC (%)	Jet test	
								τ_c (Pa)	k_d (cm ³ /N·s)
UT3	UT3 Test#1	1.51-2.50	CL	0.0475	17.27	8.95	58.69	1.193	74.60
	UT3 Test#2	2.51-4.00	SM	0.1711	6.69	NP	23.19	1.925	89.07
	UT3 Test#3	0.00-1.50	CL	0.0267	24.23	12.94	77.19	3.448	58.25
UT4	UT4 Test#1	1.51-3.50	CL	0.0386	15.62	10.49	67.83	11.79	5.80
	UT4 Test#2	0.00-1.50	SM	0.1253	2.62	NP	26.01	3.62	64.03
	UT4-1 Test#1	2.51-3.50	ML	0.0786	10.09	NP	43.57	2.94	21.23
	UT4-1 Test#2	1.51-2.50	CL	0.0817	3.98	2.12	40.37	2.93	37.86
	UT4-1 Test#3	0.00-1.50	CL	0.0578	12.43	6.94	52.75	4.41	14.32
	UT4-2 Test#1	2.51-3.50	ML	0.0693	10.56	NP	47.03	2.86	17.15
	UT4-2 Test#2	1.51-2.50	ML	0.0749	10.07	NP	44.85	3.18	35.22
	UT4-2 Test#3	0.00-1.50	SM	0.1156	8.95	NP	39.71	1.03	34.51
	UT4-3 Test#1	0.00-2.00	CL	0.0130	23.00	15.90	74.00	9.55	7.82
UT5	UT5 Test#1	2.31-4.50	CL	0.0703	13.01	5.38	47.96	14.37	3.67
	UT5 Test#2	1.31-2.30	SC	0.1302	9.04	3.37	37.14	4.00	11.36
	UT5 Test#3	0.00-1.30	CL	0.0473	17.13	6.90	57.91	13.18	4.13

* ตำแหน่งของตลิ่งในการทดสอบ Submerged jet test, UTX-Y หมายถึง ตลิ่งที่ใกล้เคียงกับตลิ่ง UTX

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) คุณสมบัติด้านการกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุต๊ะเกา

Site	Sample*	Depth (m)	USCS	D ₅₀ (mm)	P _c (%)	PI (%)	SC (%)	Jet test	
								τ_c (Pa)	k_d (cm ³ /N·s)
UT6	UT6-1 Test#1	0.00-1.50	CL	0.0070	35.00	14.70	86.00	20.93	1.74
	UT6-1 Test#2	1.51-3.00	SM	0.2500	1.393	NP	10.77	1.43	19.55
	UT6-1 Test#3	3.01-4.34	SM	0.2500	0.48	NP	9.22	1.36	59.31
UT7	UT7 Test#1	1.41-4.49	ML	0.1034	6.25	NP	41.63	2.41	11.36
	UT7 Test#2	0.00-0.50	ML	0.0100	25.90	11.54	72.00	2.95	79.07
	UT7 Test#3	0.51-1.40	ML	0.0175	21.29	NP	60.00	7.12	6.48
	UT7-1 Test#1	3.51-7.78	SM	0.2484	3.59	NP	12.32	1.97	8.64
	UT7-1 Test#2	1.51-3.50	SM	0.2226	2.88	NP	14.94	3.38	7.32
	UT7-1 Test#3	0.00-1.50	CL	0.0349	17.62	9.33	63.39	16.47	2.23
UT8	UT8 Test#1	1.01-5.57	CL	0.0014	57.88	17.23	88.00	16.88	6.55
	UT8 Test#2	0.00-1.00	CL	0.0654	11.28	7.54	48.90	8.80	3.39
	UT8 Test#3	1.01-2.00	SM	0.1102	3.17	NP	28.46	4.94	27.55
	UT8-1 Test#1	1.01-2.50	ML	0.0799	9.12	NP	45.20	7.16	21.28
	UT8-1 Test#2	2.51-3.50	CL	0.0098	26.00	17.14	82.00	9.44	18.14
	UT8-1 Test#3	0.00-1.00	ML	0.0900	6.46	NP	43.47	6.32	28.38
UT9	UT9 Test#1	1.51-5.16	CH	0.0011	61.40	35.12	94.00	16.56	15.07
	UT9 Test#2	0.00-1.50	CL	0.0650	6.93	7.30	49.21	8.41	14.29

ตารางที่ 3.4 แสดงช่วงข้อมูลของค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยจำแนกตามประเภทของดินสำหรับดินเม็ดหยาบ (Coarse-grain soil) ประกอบด้วยดินชนิด SM และ SC จำนวนรวม 9 ตัวอย่าง มีค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินอยู่ในช่วง 1.03-4.94 Pa และ 7.32-89.07 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ ตามลำดับ ตัวอย่างดินชนิดนี้เกือบทั้งหมดเป็นดินที่ไม่มีความเป็นพลาสติก (Non-plasticity soil) ในทางตรงข้าม ดินเม็ดละเอียดประกอบด้วยดินชนิด ML CL และ CH จำนวน 23 ตัวอย่างเป็นดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกอยู่ในช่วง 2.12-35.12 % ซึ่งมีค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินอยู่ในช่วง 1.19-20.93 Pa และ 1.74-79.07 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ ตามลำดับ ค่า τ_c ของดินเม็ดละเอียดมีค่าสูงกว่าดินเม็ดหยาบ สอดคล้องกับค่า P_c PI และ SC ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าสูงกว่าดินเม็ดหยาบ ในขณะที่ค่า k_d ของดินทั้งสองประเภทมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ เนื่องจากการทดสอบการกัดเซาะของดินโดยวิธี Submerged jet test เหมาะสมกับดินที่เป็นเนื้อเดียว (Homogenous soil) โดยดินริมตลิ่งในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อผสม (Heterogenous soil) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งกระทบต่อค่า k_d

ตารางที่ 3.4 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์การกัดเซาะในแต่ละชนิดของดินริมตลิ่งคลองอู่ตะเภา

Stat. value	Soil type	Count	D_{50} (mm)	P_c (%)	PI (%)	SC (%)	τ_c (Pa)	k_d ($\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$)
Maximum	SM	8	0.2500	8.95	-	39.71	4.94	89.07
	SC	1	0.1302	9.04	3.37	37.14	4.00	11.36
	ML	8	0.1034	25.90	11.54	72.00	7.16	79.07
	CL	14	0.0817	57.88	17.23	88.00	20.93	74.60
	CH	1	0.0011	61.40	35.12	94.00	16.56	15.07
Median	SM	8	0.1969	3.03	-	19.06	1.95	31.03
	SC	1	0.1302	9.04	3.3688	37.14	4.00	11.36
	ML	8	0.0768	10.08	11.54	45.03	3.07	21.26
	CL	14	0.0430	17.20	9.14	61.04	9.49	7.18
	CH	1	0.0011	61.40	35.12	94.00	16.56	15.07
Minimum	SM	8	0.1102	0.48	-	9.22	1.03	7.32
	SC	1	0.1302	9.04	3.37	37.14	4.00	11.36
	ML	8	0.0100	6.25	11.54	41.63	2.70	6.48
	CL	14	0.0014	3.98	2.12	40.37	1.19	1.74
	CH	1	0.0011	61.40	35.12	94.00	16.56	15.07

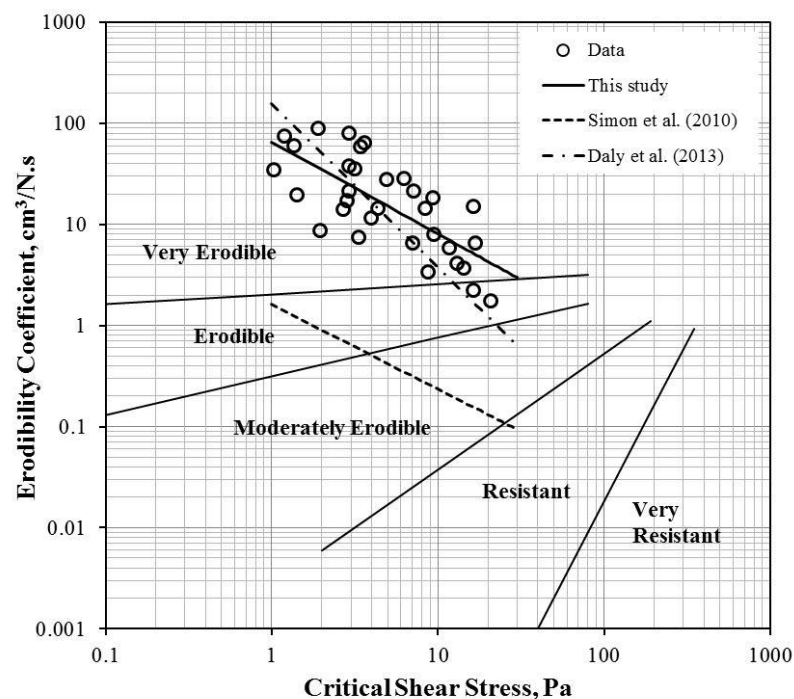
3.4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะถูกนำมาพร้อมเพื่อแสดงความสามารถในการต้านทานการกัดเซาะ (Erodibility class) ตามวิธีการที่ถูกเสนอโดย Hanson and Simon (2001) โดยสามารถ

จำแนกออกเป็น 5 กลุ่มตั้งแต่ กลุ่มที่ง่ายต่อการกัดเซาะมาก (Very erodible soil) จนถึงกลุ่มที่มีความต้านทานต่อการกัดเซาะสูง (Very resistant soil) ซึ่งผลการทดสอบดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา (รูปที่ 3.10) สามารถจำแนกดินออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ง่ายต่อการกัดเซาะมาก (Very erodible soil) และกลุ่มที่ง่ายต่อการกัดเซาะ (Erodible soil) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c และ k_d (สมการที่ 3.9 และ 3.10) ที่พัฒนาโดย Simon et al. (2010) และ Daly et al., (2013) ตามลำดับ ได้แสดงร่วมกันในรูปที่ 3.10 สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c และ k_d ของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถาดังแสดงในสมการที่ 3.11

$$k_d = 65.54\tau_c^{-0.909} \quad (3.11)$$

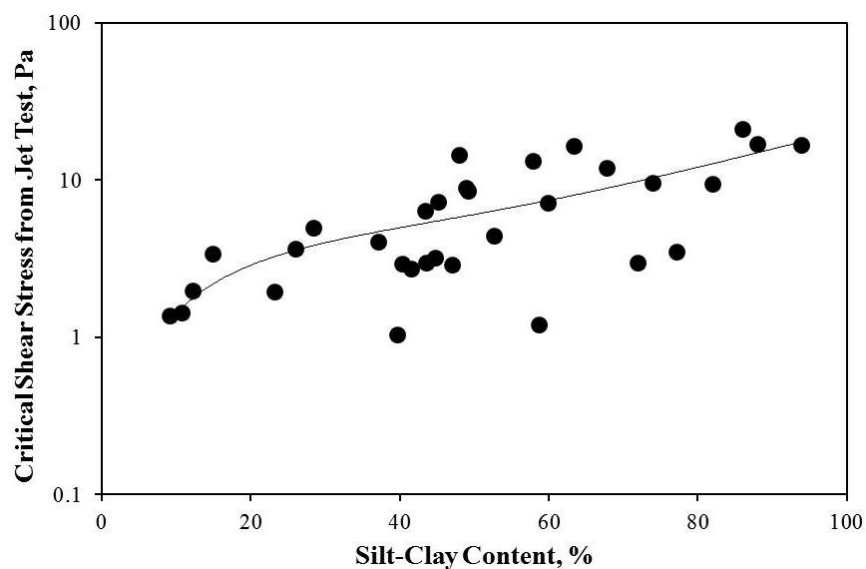
ความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c และ k_d มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Daly et al. (2013, Eq. 3.10) ในทางตรงกันข้าม ความสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Simon et al. (2010, Eq. 3.9) มีแนวโน้มการประมาณค่าที่ต่ำ (Underestimation) โดยเฉพาะค่า k_d เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 3.11 เนื่องจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.9 ถูกพัฒนาโดยใช้การคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยวิธี Blaisdell solution ในขณะที่สมการที่ 3.10 และการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะวิธี Scour depth solution method ซึ่งการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยวิธี Blaisdell solution มีการประมาณค่าที่ไม่เที่ยงตรง ขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นในการคำนวณ



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถา

3.4.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสพการณ์

สมการเชิงประสพการณ์ทั้งหลาย (สมการที่ 3.5-3.10) ร่วมกับค่าคุณสมบัติดัชนีของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภากฎใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะเพื่อใช้ประกอบในการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ได้จากการทดสอบ Submerged jet test ผลการคำนวณได้แสดงในตารางที่ 3.5 ค่า τ_c ที่ได้จากการทดสอบ Jet test และการประมาณค่าจากขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50} , สมการที่ 3.5) ปริมาณดินเหนียว (P_c , สมการที่ 3.6) ดัชนีพลาสติกของดิน (PI , สมการที่ 3.7) และปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (SC , สมการที่ 3.8) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.03-20.93 0.00-3.30 0.50-6.46 และ 0.30-3.18 Pa โดยมีค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 4.21 0.04 0.76 และ 1.04 Pa ค่า τ_c จากการประมาณโดยการใช้ D_{50} , P_c และ PI มีค่าต่ำกว่าการทดสอบ Jet test ซึ่งบ่งบอกว่าการประมาณค่า τ_c โดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ของ Smerdon and Beasley (1961) ให้ค่าประมาณที่ไม่ดี สำหรับการประมาณค่า τ_c โดยใช้ SC ตามสมการเชิงประสพการณ์ของ Julian and Torres (2006) ผลการคำนวณบ่งชี้ว่า การประมาณค่า τ_c ของตัวอย่างดินมากกว่า 50% ของตัวอย่างทั้งหมดให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยเฉพาะตลิ่ง UT5 UT6 UT8 และ UT9 ซึ่งตำแหน่งการทดสอบอยู่ในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน ผลสรุปของการประมาณค่า τ_c จากสมการเชิงประสพการณ์พบว่า ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (SC) สามารถเป็นตัวเลือกที่ดีในการประมาณค่า τ_c โดยสมการเชิงประสพการณ์ในการคำนวณค่า τ_c สำหรับดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภาก็ได้แสดงในสมการที่ 3.12 และรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นสมการพหุนามกำลังสาม ($R^2=0.505$)



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (SC) และค่า τ_c สำหรับดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภา

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสพการณ์

Site	Sample	τ_c , Computed using empirical equations (Pa)				JET test		Computed k_d (cm ³ /N.s)		
		D_{50} (Eq. 3.5)	P_c (Eq. 3.6)	PI (Eq. 3.7)	SC (Eq. 3.8)	τ_c (Pa)	k_d (m ³ /N.s)	Simon et al., 2010 (Eq. 3.9)	Daly et al., 2013 (Eq. 3.10)	This study (Eq. 3.11)
UT3	UT3 Test#1	0.16	1.02	1.01	10.54	1.19	74.60	0.23	3.46	7.70
	UT3 Test#2	0.00	0.65	-	4.24	1.92	89.07	0.48	15.14	17.64
	UT3 Test#3	0.63	1.36	1.37	13.86	3.45	58.25	0.18	2.22	6.01
UT4	UT4 Test#1	0.29	0.95	1.15	12.52	11.79	5.80	0.19	2.62	6.59
	UT4 Test#2	0.00	0.55	-	4.76	3.62	64.03	0.44	12.53	15.86
	UT4-2 Test#1	0.02	0.75	-	7.87	2.94	21.23	0.29	5.55	10.04
	UT4-2 Test#2	0.02	0.58	0.30	7.31	2.93	37.86	0.31	6.26	10.75
	UT4-2 Test#3	0.08	0.83	0.81	9.54	4.41	14.32	0.24	4.07	8.44
	UT4-3 Test#1	0.04	0.77	-	8.49	2.86	17.15	0.27	4.91	9.38
	UT4-3 Test#2	0.03	0.75	-	8.11	3.18	35.22	0.28	5.29	9.78
	UT4-3 Test#3	0.00	0.72	-	7.17	1.03	34.51	0.31	6.46	10.94
UT5	UT4-4 Test#1	1.53	1.29	1.63	13.50	9.55	7.82	0.18	2.32	6.15
	UT5 Test#1	0.04	0.85	0.66	9.14	14.37	3.67	0.25	4.36	8.77
	UT5 Test#2	0.00	0.72	0.44	6.75	4.00	11.36	0.33	7.12	11.55
	UT5 Test#3	0.17	1.01	0.81	10.83	13.18	4.13	0.22	3.31	7.51

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) พารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสภการณ์

Site	Sample	τ_c , Computed using empirical equations (Pa)				JET test		Computed k_d (cm ³ /N.s)		
		D_{50} (Eq. 3.5)	P_c (Eq. 3.6)	PI (Eq. 3.7)	SC (Eq. 3.8)	τ_c (Pa)	k_d (m ³ /N.s)	Simon et al., 2010 (Eq. 3.9)	Daly et al., 2013 (Eq. 3.10)	This study (Eq. 3.11)
UT6	UT6 Test#1	2.25	2.14	1.53	16.41	20.93	1.74	0.16	1.69	5.15
	UT6 Test#2	0.00	0.52	-	2.02	1.43	19.55	0.90	50.20	34.57
	UT6 Test#3	0.00	0.50	-	1.75	1.36	59.31	1.02	63.63	39.49
UT7	UT7 Test#1	0.00	0.64	-	7.53	2.70	14.06	0.30	5.97	10.46
	UT7 Test#2	1.85	1.46	1.25	12.93	2.95	79.07	0.19	2.48	6.40
	UT7 Test#3	1.14	1.20	-	10.91	7.12	6.48	0.22	3.27	7.47
	UT7-1 Test#1	0.00	0.57	-	2.30	1.97	8.64	0.81	40.65	30.71
	UT7-1 Test#2	0.00	0.56	-	2.79	3.38	7.32	0.69	29.82	25.81
	UT7-1 Test#3	0.37	1.03	1.04	12.03	16.47	2.23	0.20	2.79	6.83
UT8	UT8 Test#1	3.23	5.57	1.75	16.44	16.88	6.55	0.16	1.68	5.14
	UT8 Test#2	0.05	0.79	0.87	9.00	8.80	3.39	0.26	4.47	8.89
	UT8 Test#3	0.00	0.56	-	5.23	4.94	27.55	0.41	10.77	14.57
	UT8-1 Test#1	0.02	0.72	-	8.28	7.16	21.28	0.28	5.12	9.60
	UT8-1 Test#2	1.88	1.47	1.74	14.92	9.44	18.14	0.17	1.97	5.62
	UT8-1 Test#3	0.01	0.65	-	7.94	6.32	28.38	0.29	5.47	9.97

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) พารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประสพการณ์

Site	Sample	τ_c , Computed using empirical equations (Pa)				JET test		Computed k_d (cm ³ /N.s)		
		D_{50} (Eq. 3.5)	P_c (Eq. 3.6)	PI (Eq. 3.7)	SC (Eq. 3.8)	τ_c (Pa)	k_d (m ³ /N.s)	Simon et al., 2010 (Eq. 3.9)	Daly et al., 2013 (Eq. 3.10)	This study (Eq. 3.11)
UT9	UT9 Test#1	3.30	6.46	3.18	17.48	16.56	15.07	0.15	1.52	4.86
	UT9 Test#2	0.05	0.66	0.85	9.04	8.41	14.29	0.26	4.44	8.86
	Maximum	3.30	6.46	3.18	17.48	20.93	89.07	1.02	63.63	39.49
	Median	0.04	0.76	1.04	8.74	4.21	16.11	0.26	4.69	9.14
	Minimum	0.00	0.50	0.30	1.75	1.03	1.74	0.15	1.52	4.86

$$\tau_c = -0.6802 + 0.2437(SC) - 0.0041(SC)^2 + 4.0 \times 10^{-5}(SC)^3 \quad (3.12)$$

ผลการประเมินค่า k_d จากสมการเชิงประสพการณ์ได้ใช้ค่า τ_c ที่ประมาณจาก SC ได้แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่า ค่ามัธยฐานของค่า k_d เท่ากับ 16.11 0.26 4.69 และ 9.14 สำหรับผลการทดสอบ jet test และการประมาณค่าจากสมการ 3.9-3.11 ตามลำดับ ผลการประมาณค่า k_d บ่งชี้ว่า สมการที่ 3.11 ให้ค่าประมาณของ k_d ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่น ในขณะที่สมการที่ 3.10 ให้ผลการประมาณที่ดีกว่าสมการที่ 3.9 ทั้งนี้ เนื่องจากทั้งสมการที่ 3.10 และ 3.11 สร้างมาจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยวิธี Scour depth solution ซึ่งให้ผลการประมาณค่าที่ดีกว่าสมการที่ 3.9 ซึ่งคำนวณผลโดยใช้วิธี Blaisdell solution

3.5 สรุปผลการศึกษา

การประเมินคุณลักษณะของตลิ่งคลองอยู่ตะเภา ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพของตลิ่ง คุณสมบัติของทางธรณีเทคนิค และคุณสมบัติทางการกัดเซาะของดินริมตลิ่งครอบคลุมพื้นที่บริเวณต้นน้ำถึงปลายน้ำ ตลิ่งคลองอยู่ตะเภาสายหลักตลอดทั้งลุ่มน้ำถูกสำรวจลักษณะทางกายภาพ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติดัชนี ทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค โดยวิธีการเฉือนตรงแบบหลายโหลด (Multi-stage direct shear test) รวมทั้งทดสอบการกัดเซาะในสนามโดยใช้เครื่องมือ Submerged jet device เพื่อประเมินคุณลักษณะของตลิ่ง

จากการสำรวจลักษณะทางกายภาพของตลิ่งและจำแนกโซนลุ่มน้ำพบว่า ลุ่มน้ำคลองอยู่ตะเภาสามารถแบ่งโซนลุ่มน้ำได้ตามลักษณะของตลิ่งและความชันของท้องคลองประกอบด้วย ลุ่มน้ำบริเวณต้นน้ำ ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำและลุ่มน้ำบริเวณปลายน้ำ โดยมีความชันท้องคลองประมาณ 1:2,000 1:3,300 และ 1:11,000 ตลิ่งสูงเฉลี่ยประมาณ 5.13 6.98 และ 7.56 เมตร และตลิ่งมีความชันอยู่ในช่วงประมาณ 40°-60° 50°-85° และ 30°-50° สำหรับลุ่มน้ำบริเวณต้นน้ำ บริเวณกลางน้ำและบริเวณปลายน้ำ ตามลำดับ

ตลิ่งบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณต้นน้ำเป็นตลิ่งประกอบด้วยดินเม็ดหยาบ (SC และ SM) ในขณะที่ตลิ่งในลุ่มน้ำบริเวณปลายน้ำประกอบด้วยดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียด (SM ML และ CL) ลักษณะของตลิ่งในพื้นที่นี้เป็นตลิ่งที่มีเสถียรภาพ ความชันของตลิ่งต่ำและมีการปกคลุมหน้าดินด้วยพืชท้องถิ่น ไม่พบร่องรอยการกัดเซาะหรือการพิบัติ สำหรับตลิ่งในลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำมีความแตกต่างกับตลิ่งในพื้นที่อื่น ตลิ่งในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำเป็นตลิ่งแบบผสม (Composite bank) และตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive bank) ประกอบด้วยดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ (SC ML CL และ CH) ตลิ่งในพื้นที่นี้มีร่องรอยการกัดเซาะและการพิบัติ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในพื้นที่นี้เป็นตลิ่งที่มีความชันสูงเนื่องจากสภาพทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่กลางน้ำคลองอยู่ตะเภาไหลผ่านพื้นที่เนิน ดังนั้นจึงทำให้ตลิ่งค่อนข้างสูงและชัน

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภา ตลอดลุ่มน้ำพบว่า ค่าค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลและค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของดินเม็ดหยาบ (SM และ

SC) อยู่ในช่วงประมาณ 27.57°-30.92° และ 0.00-10.03 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ดินเม็ดละเอียด (ML CL และ CH) มีค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลและค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลอยู่ในช่วงประมาณ 19.58°-31.30° และ 0.48-18.27 kPa ตามลำดับ

พารามิเตอร์การกัดเซาะประกอบด้วยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (k_d) ซึ่งได้จากการทดสอบการกัดเซาะด้วยเครื่องมือ submerged jet device โดยทดสอบกับดินริมตลิ่งเฉพาะพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกาบริเวณกลางน้ำพบว่า ค่า τ_c และ k_d อยู่ในช่วงประมาณ 1.03-20.93 Pa และ 2.23-89.07 cm³/N.s ตามลำดับ พารามิเตอร์ทั้งสองสามารถจำแนกตามชนิดของดินพบว่า สำหรับดินเม็ดหยาบ (SM และ SC) มีค่า τ_c และ k_d อยู่ในช่วงประมาณ 1.03-4.94 Pa และ 7.32-89.07 cm³/N.s ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า τ_c และ k_d อยู่ในช่วงประมาณ 1.19-20.93 Pa และ 1.74-79.07 cm³/N.s สำหรับดินเม็ดละเอียด (ML CL และ CH) ตามลำดับ ดินริมตลิ่งคลองอุต๊ะเกาสามารถจำแนกความสามารถในการต้านทานการกัดเซาะ (Erodibility class) ออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ง่ายต่อการกัดเซาะอย่างสูง (Very erodible soil) และกลุ่มที่ง่ายต่อการกัดเซาะ (Erodible soil) ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากสมการเชิงประการณ โดยใช้คุณสมบัติของดินประกอบด้วย ขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (D_{50}) ปริมาณดินเหนียว (P_c) และดัชนีพลาสติกของดิน (PI) และปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (SC) พบว่า ค่า SC เป็นตัวเลือกที่ดีในการประมาณค่า τ_c เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติอื่นๆ ของดิน

บทที่ 4

การถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภา

4.1 บทนำ

การถดถอยของตลิ่ง (Riverbank retreat) หมายถึงการสูญเสียมวลดินริมตลิ่งเนื่องจากการกัดเซาะและการพังทลายของตลิ่ง ทำให้มีพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ได้ริมตลิ่งลดลง การถดถอยของตลิ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานในลำน้ำเช่น การพังทลายของอาคารบ้านเรือน สะพาน ท่าเรือ และอื่นๆ การถดถอยของตลิ่งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำเช่นผลตะกอนในลำน้ำ ตะกอนในลำน้ำที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะเป็นหนึ่งในมลพิษที่สำคัญที่สามารถทำลายคุณภาพน้ำและแหล่งที่อยู่ของสัตว์น้ำ (ASCE, 1998; Wynn and Mostaghimi, 2006; Midgley et al., 2012) การศึกษาของนักวิจัยหลายท่านที่ผ่านมาได้มีการแสดงให้เห็นว่า การกัดเซาะตลิ่งเป็นทำให้เกิดการเพิ่มของปริมาณของตะกอนและลดความสามารถในการระบายน้ำของลำน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดน้ำท่วม (Simon, 1989; Grissinger et al., 1991) การถดถอยของตลิ่งยังเกี่ยวพันกับระบบนิเวศของลำน้ำและเป็นสาเหตุของความเสียหายของแหล่งน้ำ (ASCE, 1998)

กระบวนการถดถอยของตลิ่งประกอบด้วย 3 กระบวนการหลักได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดิน (Subaerial processes) (2) การกัดเซาะตลิ่ง (Fluvial erosion) และ (3) การพังทลายของตลิ่ง (Hooke, 1979; Lawler, 1992; Lawler et al., 1997; Couper and Maddock, 2001; Rinaldi and Nardi, 2013) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใต้ผิวดินเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมหลายอย่าง ซึ่งส่งผลให้กำลังของดินลดลง และทำให้ดินริมตลิ่งมีความต้านทานการกัดเซาะน้อยลงเช่น รอยแตกจากการสูญเสียปริมาณน้ำออกจากมวลดิน (Desiccation cracking, Thorne, 1982) การกัดเซาะตลิ่งคือการเคลื่อนย้ายมวลดินที่ฐานหรือขอบตลิ่งโดยการกระทำของลำน้ำ (Rinaldi and Nardi, 2013) ในขณะที่การพังทลายของตลิ่งคือการสูญเสียเสถียรภาพทางด้านธรณีเทคนิคของดิน การถดถอยของตลิ่งเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องเป็นวัฏจักร โดยเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพใต้ผิวดิน ส่งผลให้การกัดเซาะบริเวณตีนตลิ่ง (Toe erosion) เกิดได้ง่ายขึ้น แล้วทำให้ตลิ่งขาดเสถียรภาพ และเกิดการพังทลาย มวลดินจากการพังทลายมีการทับถมบริเวณตีนตลิ่งหรือเคลื่อนย้ายออกจากตลิ่งได้ ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ กระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกว่าลำน้ำมีความกว้างมากพอที่จะลดแรงกระทำของลำน้ำลงสู่ระดับที่ไม่สามารถเกิดการกัดเซาะได้ (Thorne, 1982)

กระบวนการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเภาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา (สุรดี และ ธนิต, 2553) ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ทางการเกษตร สร้างความเสียหายต่อที่อยู่อาศัยของประชาชน และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของลำน้ำ การศึกษาการถดถอยในครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการศึกษาการถดถอยและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเภา โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาในส่วนนี้ประกอบด้วย (1) การประเมินพื้นที่เกิดการกัดเซาะและการทับ

ถมของแนวตลิ่ง (2) การประเมินการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุ้ต๊ะเกาโดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ และ (3) การพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งโดยใช้ Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)

4.2 การทบทวนเอกสาร

การศึกษาการถดถอยของตลิ่งในครั้งนี้ได้รวบรวมเนื้อหาทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่ง ซึ่งประกอบด้วย การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 การกัดเซาะตลิ่ง

การกัดเซาะตลิ่งหมายถึงการเคลื่อนย้ายมวลของดินบริเวณท้องคลองหรือขอบของตลิ่ง ซึ่งเกิดจากการไหลของน้ำ การไหลของน้ำทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, τ_o) กระทำต่อผิวของตลิ่ง ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่จะทำให้ตลิ่งเกิดการกัดเซาะ ในขณะเดียวกัน ดินในตลิ่งมีความสามารถต้านทานการกัดเซาะที่เรียกว่า หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, τ_c) การกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่ขอบมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน สมการสำหรับคำนวณค่าอัตราการถูกกัดเซาะของดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soil) เนื่องจากการไหลของน้ำในรางน้ำเปิด ถูกเสนอในรูปแบบของสมการหน่วยแรงเฉือนส่วนเกิน (Excess Shear Stress equation) ดังนี้

$$\varepsilon = k_d (\tau_o - \tau_c)^a \quad (4.1)$$

เมื่อ ε คือ อัตราการถูกกัดเซาะ (Erosion rate, m/s) k_d คือ สัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะ (Erodibility coefficient, $m^3/N.s$) τ_o คือ หน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, Pa) τ_c คือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, Pa) a คือ ค่ายกกำลังเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว พิจารณาให้เป็น 1 (Hanson, 1990a, 1990b; Hanson and Cook, 2004) การกัดเซาะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่ขอบที่กระทำต่อตลิ่งมีค่าเกินกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน ซึ่งเมื่อดินถูกกัดเซาะแล้ว อัตราการกัดเซาะและการเคลื่อนย้ายมวลดินจากตลิ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะ (Daly et al., 2013)

ในสมการหน่วยแรงเฉือนส่วนเกิน ค่า τ_o สัมพันธ์กับการไหลของน้ำและสามารถคำนวณได้จาก $\tau_o = \gamma_w RS$ โดยที่ γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ R คือ รัศมีชลศาสตร์ (คำนวณจากระดับความลึกและหน้าตัดของลำน้ำ) และ S คือ ความชันท้องน้ำ อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดิน (τ_c และ k_d) มีความซับซ้อนและคำนวณได้ยาก (Grissinger, 1982) นักวิจัยหลายท่านได้ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งสองโดยเครื่องมือต่างๆ เช่น รางน้ำเปิด (Flume tests, Hanson and Cook, 1997) เครื่องมือทดสอบการกัดเซาะโดยการไหลซึม Hole erosion (Laboratory hole erosion test, Wan and Fell, 2004) เครื่องมือทดสอบการกัดเซาะแบบฉีด

(Submerged jet device, Hanson and Cook, 1997; Clark and Wynn, 2007) เพื่อให้การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะทำได้ง่ายขึ้น สมการเชิงประสพการณ์จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบที่ซับซ้อนดังกล่าวเพื่อคำนวณค่า τ_c จากคุณสมบัติดัชนีต่างๆ ของดินเช่น ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, Smerdon and Beasley, 1961) ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt-clay content, Julian and Torres, 2006) และกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Unconfined compressive strength, Kamphius and Hell, 1983) ในส่วนของค่า k_d ไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการเชิงประสพการณ์ แต่สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ของค่า k_d และ τ_c ที่ได้จากการทดสอบในสนามโดยเช่นจากการทดสอบ Submerged jet test (Hanson and Simon, 2001; Wynn, 2004; Simon et al., 2011)

4.2.2 เสถียรภาพของตลิ่ง

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธี Limit Equilibrium Method (LEM) ซึ่งประเมินเสถียรภาพของตลิ่งโดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) โดยอัตราส่วนความปลอดภัยของตลิ่งคืออัตราส่วนระหว่างแรงต้าน (Resisting force) ต่อแรงกระทำ (Acting force) (Millar and Quick, 1998; Darby and Thorne, 1996a, b; Casagli et al., 1999; Rinaldi and Casagli, 1999; Simon et al., 2000) การพิบัติของตลิ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำที่เกิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational forces) มากกว่าแรงต้านจากปัจจัยต่างๆ เช่น กำลังรับแรงเฉือนของดิน และแรงดันน้ำหน้าตลิ่ง

4.2.2.1 การคำนวณเสถียรภาพของตลิ่ง

Lohnes and Handy (1968) เสนอรูปแบบการพิบัติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งโดย ประกอบด้วย การพิบัติแบบระนาบ (Planar failure) การพิบัติแบบหมุน (Rotational failure) และการพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure) การพิบัติของตลิ่งเกิดจากแรงกระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมากกว่าค่าแรงต้านที่ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4.2)$$

เมื่อ τ คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength, kPa) c' คือ แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective cohesion, kPa) σ คือ หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress, kPa) u_a คือ แรงดันอากาศ (Pore air pressure, kPa) ϕ' คือ มุมเสียดทานประสิทธิผลภายในเม็ดดิน (Effective internal friction angle, degree) u_w คือ แรงดันน้ำ (Pore water pressure, kPa) $(u_a - u_w)$ คือ แรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction, kPa) ϕ^b คือ มุมที่บอกถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินสัมพันธ์กับแรงดูดเมทริกซ์ (degree) กำลังของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของปริมาณน้ำในมวลดินถูกแสดงอยู่ในรูปของ ϕ^b ในสภาวะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เทอมของแรงดูดเมทริกซ์จะเท่ากับศูนย์ ทำให้ ϕ^b ไม่มีผลต่อค่า τ และสมการที่ 4.2 ลดรูปเป็นสมการดั้งเดิมของ Mohr-Coulomb

การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินของผู้วิจัยหลายท่านเช่น Bishop (1955), Morgenstern and Price (1965), Terzaghi and Peck (1967) และ Fredlund and Krahn (1977) ซึ่งวิธีทั้งหมดนี้เป็นการวิเคราะห์แบบ Limit equilibrium โดยใช้สมมูลของแรงและโมเมนต์ Simon et al. (1999) ได้ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์นี้ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง โดยการแบ่งชั้นดินเป็นหลายๆ ชั้น (Horizontal layer) รวมถึงพิจารณา pore-water pressure และ confining pressure การคำนวณเสถียรภาพได้มีการแบ่งดินเป็นชั้นส่วน (Slices) และชั้นส่วนย่อยในแนวดิ่ง (Subslices) หลายๆ ชั้นส่วนเพื่อคำนวณหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น สำหรับการพิบัติแบบระนาบ (Planar failure) อัตราส่วนความปลอดภัยคำนวณได้โดยใช้สมมูลของแรงทั้งในแนวราบและแนวดิ่งดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$FS_{planar} = \frac{\cos \beta \sum_{j=1}^J (c'_j L_j + (u_a - u_w)_j L_j \tan \phi_j^b + [N_j - u_{aj} L_j] \tan \phi_j')}{\sin \beta \sum_{j=1}^J (N_j) - P_j} \quad (4.3)$$

โดยที่ β คือ มุมของระนาบพิบัติ, c'_j คือ แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของ slice j (kPa), u_{aj} คือ แรงดันอากาศของ slice j (kPa), u_w คือ แรงดันน้ำของ slice j (kPa), L_j คือ ความยาวระนาบพิบัติของ slice j (m), N_j คือ หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบพิบัติของ slice j (kPa), ซึ่งเท่ากับ $W_j \cos \beta$ โดยที่ W_j คือ น้ำหนักของ slice j (kN), P_j คือ แรงภายนอกเนื่องจากระดับน้ำของ slice j (kPa), ϕ_j^b คือ มุมที่บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเนื่องจาก Matrix suction (degree), ϕ_j' คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน slice j (degree)

การพิบัติของตลิ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของตลิ่ง โดยทั่วไปแล้ว ตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive bank) มีการพิบัติแบบระนาบ สำหรับตลิ่งแบบผสม (Composite bank) ที่ประกอบด้วยดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวแทรกอยู่ใต้ดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว การกัดเซาะที่ตีนตลิ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็นลักษณะ overhanging และมีการพิบัติแบบคานยื่น (Cantilever failure) อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพิบัติแบบคานยื่นได้แสดงในสมการที่ 4.4

$$FS_{cantilever} = \frac{\sum_{j=1}^J (c'_j L_j + (u_a - u_w)_j L_j \tan \phi_j^b + [P_j \sin \alpha - u_{aj} L_j] \tan \phi_j')}{\sum_{j=1}^J (W_j + P_j \cos \alpha)} \quad (4.4)$$

4.2.3 แบบจำลอง Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)

Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้สำหรับคำนวณการถดถอยและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพและการกัดเซาะของตลิ่ง (Wilson et al., 2007; Cancienne et al. 2008; Midgley et al., 2012; Daly et al., 2015) ซึ่งพัฒนาโดย

National Sedimentation Laboratory, Mississippi, USA (Simon et al., 2000) แบบจำลองนี้ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการคือ การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง การกัดเซาะตลิ่งเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางอุทกวิทยา (Hydrological processes) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปตัดขวางของตลิ่งอยู่ตลอดเวลา (Rinaldi and Nardi, 2013) ในขณะที่การพิบัติของตลิ่งเกี่ยวข้องกับ การลดลงของแรงต้าน (Resisting forces) ของดินริมตลิ่งเนื่องจากปัจจัยหลายอย่างเช่น การกัดเซาะตลิ่ง และการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินเนื่องจากกระบวนการเพิ่มความชื้นในมวลดิน (Wetting process) เป็นต้น

เวอร์ชันปัจจุบันของ BSTEM (Dynamic Version 5.4) ประกอบด้วยแบบจำลองการกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งและสามารถจำลองระดับน้ำโดยใช้กราฟน้ำท่า (Hydrograph) ทำให้สามารถวิเคราะห์การกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งได้อย่างต่อเนื่อง โดยทำการวิเคราะห์การกัดเซาะและเสถียรภาพที่ละชั้นตามความสูงของระดับน้ำที่ได้จากกราฟน้ำท่า ซึ่งทำให้การคำนวณมีประสิทธิภาพ และตรงกับข้อมูลระดับน้ำในลำน้ำจริง

4.3 วิธีการประเมินการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเกา

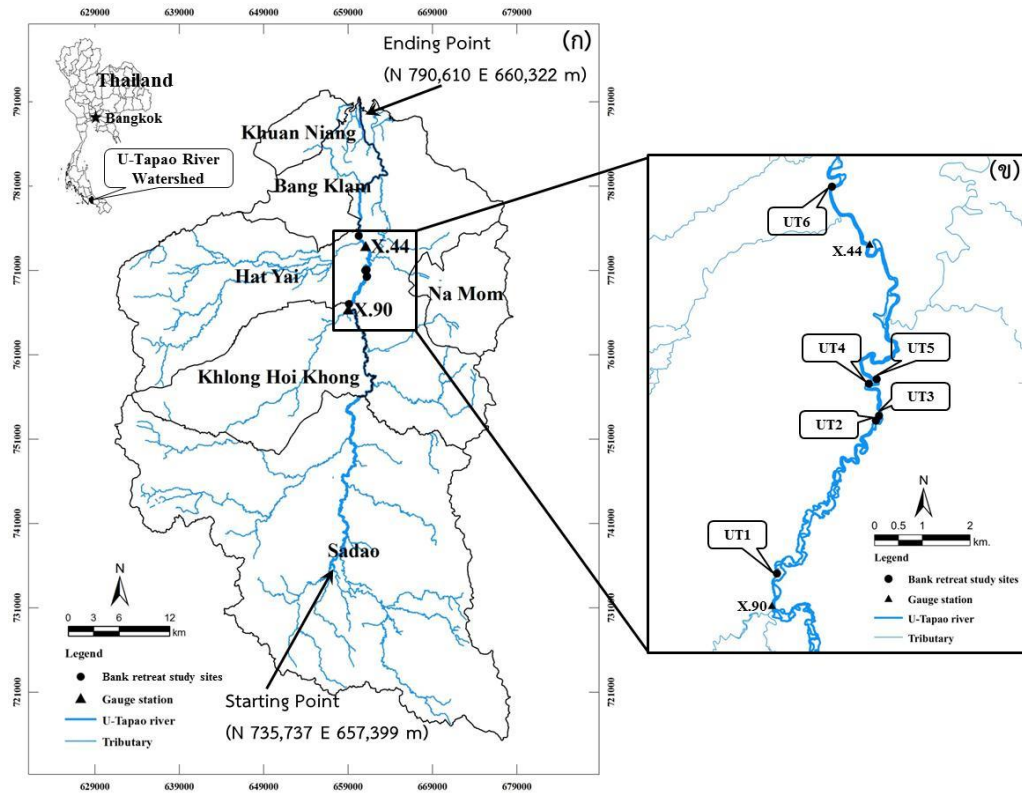
การประเมินการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุตะเกาสามารถคำนวณได้โดยใช้แนวตลิ่งจากภาพถ่ายทางอากาศในช่วงเวลาต่าง ๆ นำมาเปรียบเทียบกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ภาพถ่ายทางอากาศในปี 2545 และ 2553 ของกรมแผนที่ทหาร ในการประเมินพื้นที่แนวตลิ่งที่ถูกกัดเซาะหรือแนวตลิ่งมีการทับถมตลอดแนวคลองอุตะเกา สำหรับแนวตลิ่งในพื้นที่บริเวณกลางน้ำซึ่งมีการกัดเซาะระมาก ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการกัดเซาะโดยใช้โปรแกรม BSTEM แล้วทำการวิเคราะห์การถดถอยในช่วงปี 2545-2559 โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับระยะการถดถอยที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศในช่วงเวลาเดียวกัน โดยรายละเอียดได้แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 การคำนวณพื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของคลองอุตะเกา

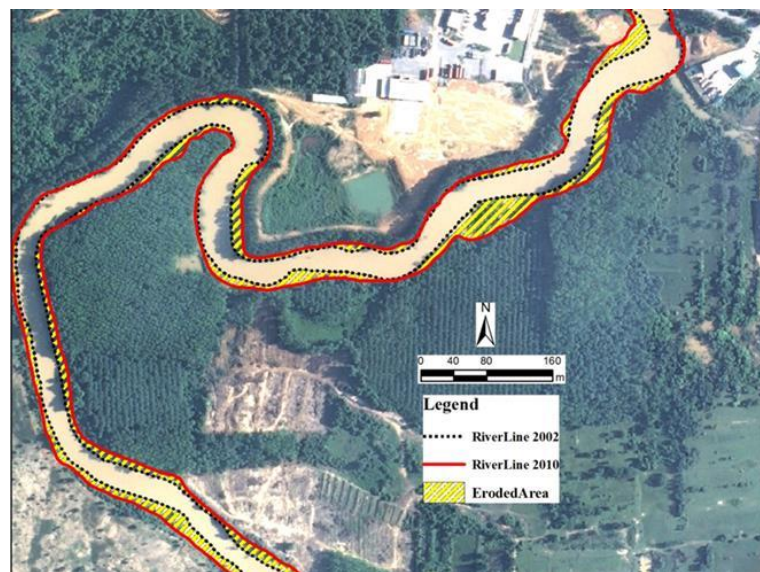
พื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของแนวตลิ่งคลองอุตะเกาได้ถูกประเมินตั้งแต่บริเวณตำบล สะเดา พิกัด N 735,737 E 657,399 เมตร จนถึงบริเวณตำบลบางกล้า พิกัด N 790,610 E 660,322 เมตร รวมความยาวของลำน้ำประมาณ 110 กิโลเมตร (รูปที่ 4.1ก) การประเมินได้ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) ร่วมกับภาพถ่ายทางอากาศในทั้งปี 2545 (ค.ศ. 2002) และ 2553 (ค.ศ. 2010) โดยภาพถ่ายทางอากาศทั้งสองปีได้ทำการอ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Geo-reference) โดยใช้ WGS-84 (World Geodetic System 1984) ในการอ้างอิงเพื่อระบุตำแหน่งในพิกัดของลองจิจูด (Longitude) และละติจูด (Latitude)

การคำนวณการถดถอยของแนวตลิ่งทำได้โดยการลากแนวขอบตลิ่ง (Digitizing) ทั้งสองปี และทำการซ้อนทับ (Overlying) แนวตลิ่งทั้งสองปีเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเส้นประสีดำ และเส้นทึบสีแดงแสดงแนวตลิ่งของปี 2545 และ 2553 ตามลำดับ พื้นที่การกัดเซาะและทับถมสามารถคำนวณได้จากการสร้างรูปหลายเหลี่ยมที่ปิดล้อมแนวตลิ่งทั้งสองปีที่น่ามาซ้อนทับกัน ซึ่งก็คือพื้นที่การกัดเซาะหรือทับถมนั่นเอง หลังจากนั้น พิกัดแสดงตำแหน่งของพื้นที่ในตำบลและอำเภอต่างๆ

ถูกนำมาแทรกในพื้นที่กัดเซาะและทับถมนี้เพื่อระบุตำแหน่งของพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะและทับถมสำหรับการรวบรวมข้อมูลทางสถิติต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาบริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา ก) จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดการประเมินพื้นที่การกัดเซาะหรือทับถม, ข) ตำแหน่งของตลิ่งสำหรับการวิเคราะห์การถดถอย

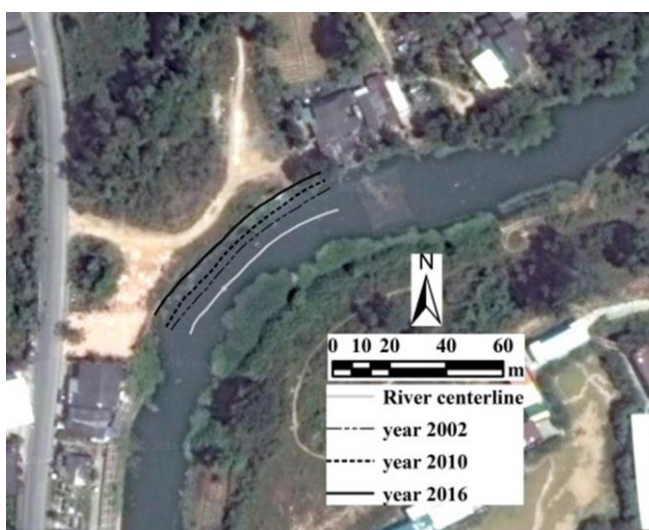


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการคำนวณระยะการกัดเซาะและการทับถม บริเวณพื้นที่ห่างจากด้านหลังประตูระบายน้ำคลองอุตะเถาประมาณ 3 กิโลเมตร

4.3.2 การคำนวณระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ

ระยะการถดถอยคำนวณได้โดยใช้โปรแกรม Digital shoreline analysis system (DSAS) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินการเปลี่ยนแปลงแนวตลิ่งและชายฝั่งที่สามารถใช้ร่วมกับ GIS (Lam et al., 2010; Van et al., 2014) การศึกษาระยะการถดถอยของคลองอุ้มทะเกา ในครั้งนี้ทำได้โดยวัดระยะระหว่างเส้นตั้งฉาก (Transect line) จากเส้นกึ่งกลางลำน้ำ (River centerline) ไปยังแนวตลิ่งในปี พ.ศ. 2545 และ 2553 ผลต่างของระยะที่วัดได้ของสองช่วงปี คือ ระยะที่บ่งบอกถึงการกัดเซาะหรือทับถมของตลิ่ง

สำหรับการคำนวณระยะการถดถอยเพื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์การถดถอยในหัวข้อที่ 4.3.3 ตลิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำจำนวน 6 ตำแหน่ง ถูกเลือกมาทำการวิเคราะห์การถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศที่มีความละเอียด 0.5 เมตร ประกอบด้วยภาพถ่ายในปี พ.ศ. 2545 2553 (กรมแผนที่ทหาร) และ 2559 (Google map, 2016) ขอบตลิ่งในแต่ละตำแหน่งถูก Digitize ตามแนวตลิ่ง การถดถอยของแนวตลิ่งเกิดขึ้นเมื่อแนวตลิ่งที่ทำการ Digitize ในภาพปีถัดไปอยู่ไกลออกจากแนวเส้นศูนย์กลางของลำน้ำ รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างในการคำนวณระยะการถดถอย โดยเส้นสีเทาแสดงแนวศูนย์กลางของลำน้ำในปี 2559 โดยใช้เป็นแนวอ้างอิงในการคำนวณ แนวตลิ่งในแต่ละปีที่ได้ทำการ Digitize ถูกนำมาซ้อนทับกับภาพถ่ายทางอากาศในปี 2559 (ค.ศ. 2016) เส้นตั้งฉากจากแนวศูนย์กลางของลำน้ำถึงขอบตลิ่งในแต่ละปีถูกสร้างและคำนวณระยะทางของแนวตั้งฉากทั้งหลาย ทั้งนี้ ระยะการถดถอยของตลิ่งคือผลต่างระหว่างความยาวของเส้นตั้งฉากจากแนวศูนย์กลางของลำน้ำถึงแนวตลิ่งในแต่ละปีที่พิจารณา โคนตำแหน่งศูนย์กลางของลำน้ำเป็นตำแหน่งสมมุติที่ไม่มีผลต่อการคำนวณระยะการถดถอย ระยะการถดถอยตลิ่งในแต่ละตำแหน่งคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของระยะถดถอยตลอดแนวตลิ่งที่พิจารณา ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์แทนการถดถอยของแนวตลิ่งในแต่ละปีดังนี้ R_{2010} และ R_{2016} คือระยะการถดถอยในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553 (ค.ศ. 2002-2010) และในช่วงปี พ.ศ. 2553-2559 (ค.ศ. 2010-2016) ตามลำดับ ส่วน R_T คือระยะถดถอยทั้งหมดซึ่งคือผลรวมของ R_{2010} และ R_{2016}



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศแสดงการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุ้มทะเกาตำแหน่ง UT6

4.3.3 การพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถา

ในการศึกษาการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถาครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งในพื้นที่ศึกษา ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินการถดถอยของตลิ่งได้ โดยการเลือกตำแหน่งของตลิ่งที่มีเกิดการกัดเซาะมาก และมีความเสี่ยงต่อการพิบัติเพิ่มรวม 6 ตำแหน่งในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาตอนกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.1ข (UT1-UT6) การสร้างแบบจำลองได้ใช้โปรแกรม Bank Stability and Toe Erosion Model (Dynamic version, v. 5.4) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ทั้งกระบวนการการกัดเซาะและเสถียรภาพของตลิ่งไปพร้อมๆ กัน ในการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งในครั้งนี้มีสมมุติฐานว่า ดินอิ่มตัวและระดับน้ำใต้ดินลดลงในทันทีทันใด (Rapid drawdown) โดยการจำลองระดับน้ำใต้ดินเท่ากับระดับน้ำนอกตลิ่งและระดับน้ำค้างที่ระดับขอบบนของตลิ่ง สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้นและลดลงทันทีทันใด ตามลำดับ

4.3.3.1 ข้อมูลนำเข้าแบบจำลองการถดถอยโดยใช้ BSTEM

ข้อมูลนำเข้า (Input data) สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งในโปรแกรม BSTEM ประกอบด้วย รูปตัดขวางของตลิ่ง (Riverbank cross section) คุณสมบัติของดิน ทั้งกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength parameters) ประกอบด้วย หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective cohesion, c') และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective internal friction angle, ϕ') และพารามิเตอร์การกัดเซาะ (Erodibility parameters) ประกอบด้วยหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, τ_c) และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ (Erodibility coefficient, k_d) รวมถึงคุณสมบัติทางด้านอุทกวิทยาได้แก่ ความชันท้องคลอง (Bed slope) และกราฟน้ำท่าของลำน้ำหน้าตลิ่ง (River hydrograph)

รูปตัดขวางของตลิ่งได้จากการสำรวจและตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในสนาม ในขณะที่คุณสมบัติของดินประกอบด้วยคุณสมบัติทางด้านธรณีเทคนิค (c' และ ϕ') และคุณสมบัติการกัดเซาะ (τ_c และ k_d) ได้จากการทดสอบการเฉือนโดยตรง (Multi-stage direct shear test) และการทดสอบการกัดเซาะในสนามโดยใช้เครื่องมือ Submerged jet device ตามลำดับ

กราฟน้ำท่าและโค้งอัตราการไหล (Rating curve) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2559 ของสถานีโทรมาตร 2 สถานี (X44 และ X90 ในรูปที่ 4.1) ถูกใช้เป็นสถานีควบคุม (Stationary control point) เพื่อคำนวณระดับน้ำหน้าตลิ่งในแต่ละตำแหน่งโดยการวิเคราะห์ระดับน้ำย้อนกลับ (Back water analysis) กราฟน้ำท่าของตลิ่งแต่ละตำแหน่งตลอดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4

4.3.3.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ได้จากการทดสอบการกัดเซาะเป็นค่าที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของตลิ่งในขณะนั้นๆ ซึ่งสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลสามารถทำให้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะเปลี่ยนแปลงไปด้วย อีกทั้ง การไหลแบบ Secondary flow บริเวณตลิ่งใน

ธรรมชาติ ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ โดยเฉพาะตลิ่งที่อยู่ในแนวโค้งเว้า (Concave bank) ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงในการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งด้วยเช่นกัน

เพื่อให้ผลการคำนวณการถดถอยจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับการตรวจวัดจริง จึงมีการปรับเทียบพารามิเตอร์การกัดเซาะของแบบจำลอง โดยปรับเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ ในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553 ในการปรับเทียบนั้น ผลจากการคำนวณการถดถอยจากแบบจำลองในช่วง ปี พ.ศ. 2545-2553 (BSTEM R_{2010}) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ R_{2010} จากภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial R_{2010}) เมื่อ BSTEM R_{2010} ไม่เท่ากับ Aerial R_{2010} แสดงว่าค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะเริ่มต้นที่ใช้ไม่ สอดคล้องกับเงื่อนไขในสนาม (Field condition) จึงต้องมีการคำนวณระยะการถดถอยใหม่ โดยมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยผ่านแฟกเตอร์ปรับแก้ (Lumped calibration factor, α) ดังแสดงในสมการที่ 4.5 การปรับแก้ได้ทำซ้ำจนกว่า ผลต่างระหว่างค่า BSTEM R_{2010} และ Aerial R_{2010} มีค่าน้อยกว่า 0.5 เมตร (หรือเท่ากับความละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศ)

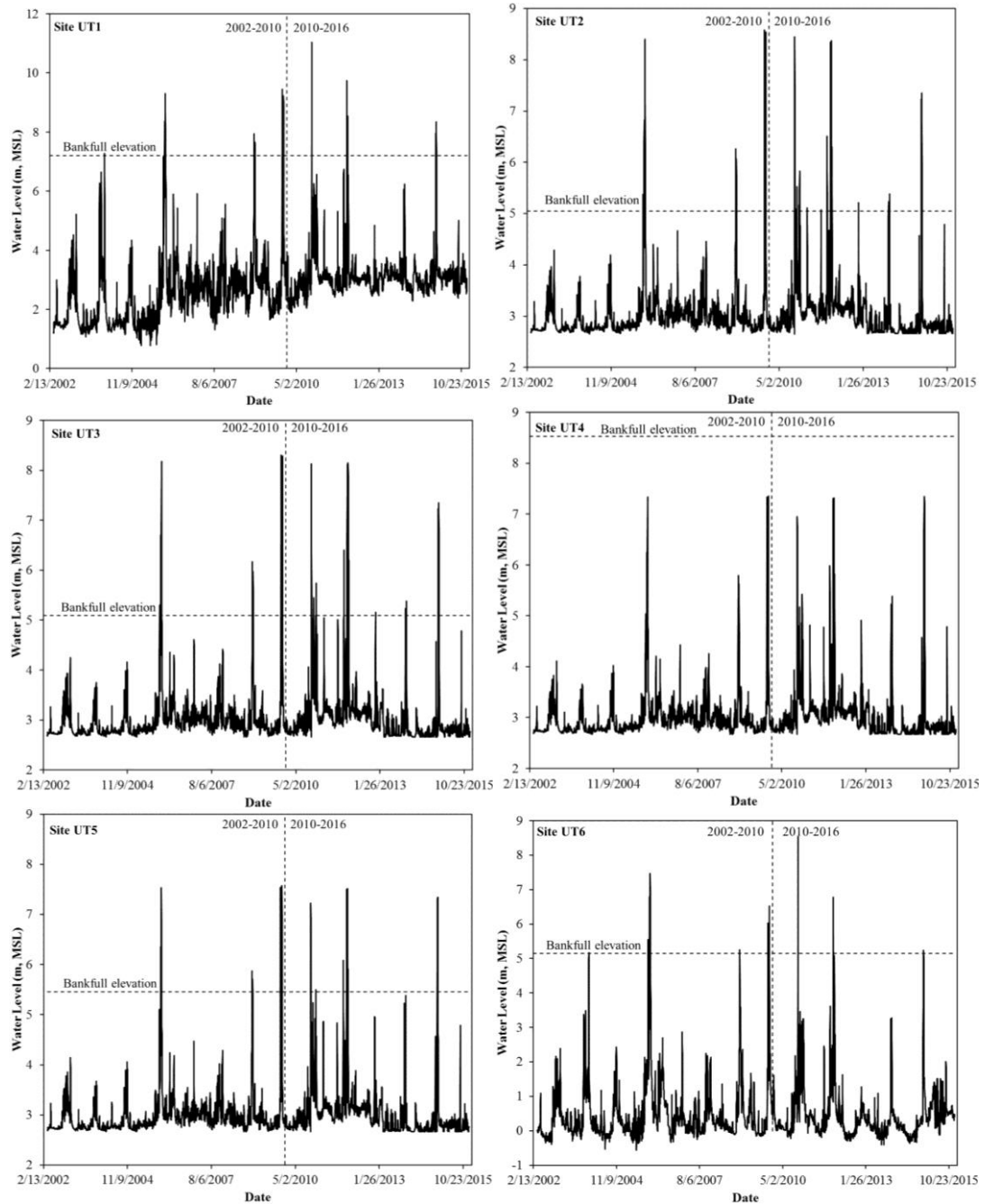
$$\varepsilon = k_d (\alpha \tau_o - \tau_c) = \alpha k_d \left(\tau_o - \frac{\tau_c}{\alpha} \right) \quad (4.5)$$

แบบจำลองที่ได้จากการปรับแก้แล้วจะถูกตรวจสอบความถูกต้อง โดยใช้ข้อมูลการถดถอยใน ปี พ.ศ. 2553-2559 (Aerial R_{2016}) ถ้าผลการจำลอง BSTEM R_{2016} มีค่าใกล้เคียงกับ Aerial R_{2016} แล้ว ผลการตรวจสอบบ่งชี้ว่าแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งมีความน่าเชื่อถือ

4.4 ผลการศึกษาการถดถอยของแนวตลิ่งคลองอุตตะเกา

4.4.1 พื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของคลองอุตตะเกา

จากการวิเคราะห์พื้นที่การกัดเซาะโดยใช้ระบบสารสนเทศ (GIS) พบว่า ในช่วงความยาวของ ลำน้ำคลองอุตตะเการวม 110 กิโลเมตร มีพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะและทับถมเท่ากับ 626.81 และ 131.84 ไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) บริเวณพื้นที่อำเภอหาดใหญ่ มีการกัดเซาะของแนวตลิ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับอำเภออื่นดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งการกัดเซาะของแนวตลิ่งคลองอุตตะเกามีนัยสำคัญกว่าการทับถม ของตะกอนที่เกิดจากการกัดเซาะของตลิ่ง โดยพื้นที่การกัดเซาะที่เกิดขึ้นของอำเภอสะเดา คลองหอย โข่ง หาดใหญ่ และบางกล่ำมีค่าเท่ากับ 182.63 90.48 309.16 และ 44.54 ไร่ ตามลำดับ ในขณะที่ พื้นที่การทับถมเกิดขึ้นเท่ากับ 64.20 17.85 48.22 และ 1.57 ไร่ ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์บ่งชี้ ว่า พื้นที่การกัดเซาะคิดเป็น 4.75 เท่าของพื้นที่ทับถม ระยะการกัดเซาะต่อความยาวของแนวตลิ่ง เท่ากับ 3.76 3.99 14.83 และ 2.72 ไร่ต่อความยาวของแนวตลิ่ง 1 กิโลเมตร สำหรับ อำเภอสะเดา คลองหอยโข่ง หาดใหญ่ และบางกล่ำ ตามลำดับ (รูปที่ 4.5)



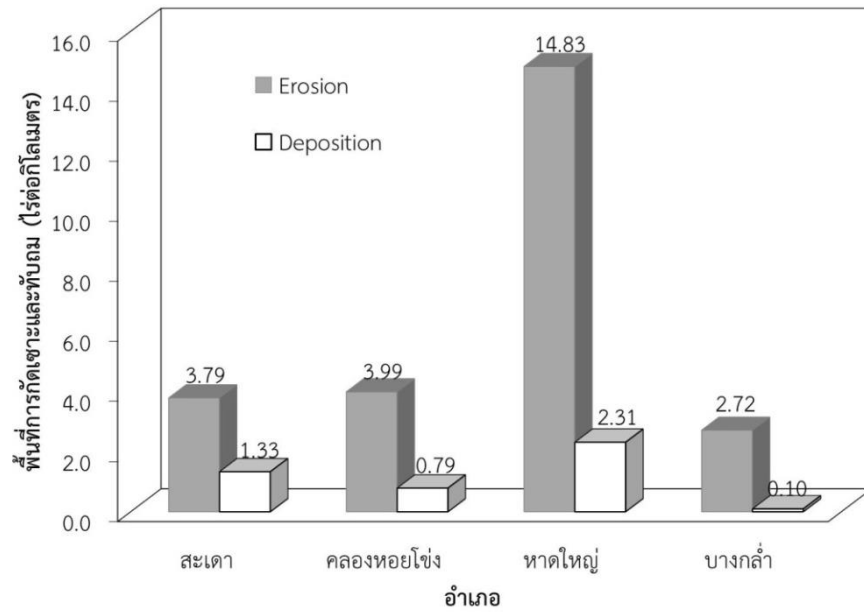
รูปที่ 4.4 กราฟน้ำท่าหน้าตลิ่งแต่ละตำแหน่ง

ตารางที่ 4.1 พื้นที่การกัดเซาะและทับถมของคลองอุต๊ะเภาในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553

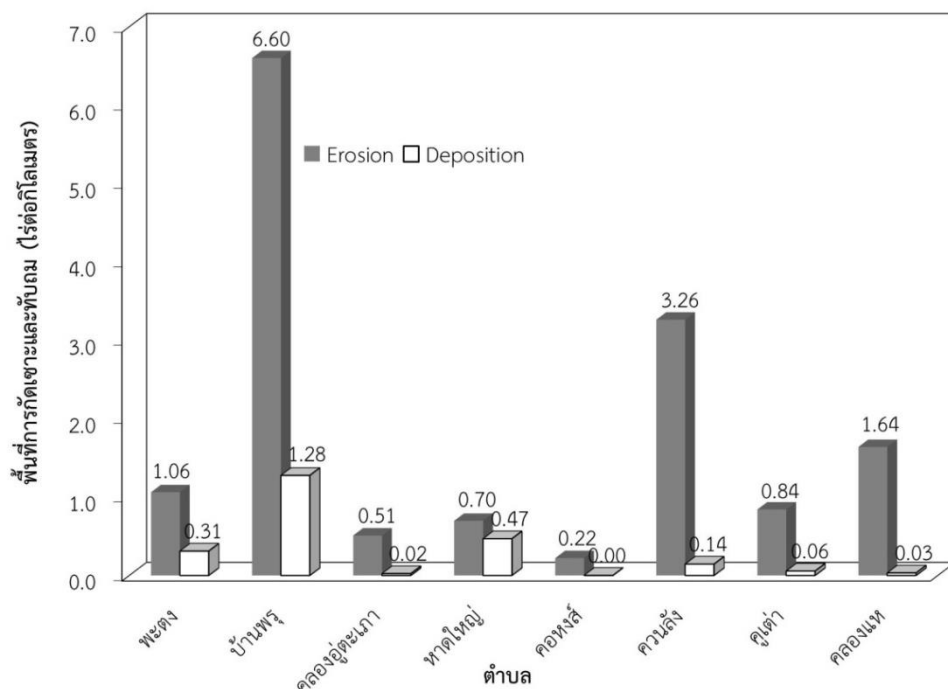
อำเภอ/ตำบล	ความยาว ลำน้ำ (กิโลเมตร)	พื้นที่การกัดเซาะ/การทับถม (ไร่)				
		ตลิ่งฝั่งตะวันตก		ตลิ่งฝั่งตะวันออก		
		การกัดเซาะ	การทับถม	การกัดเซาะ	การทับถม	
สะเดา	48.16	สะเดา	1.25	2.44	0.00	4.90
		ปรีก	11.19	12.92	24.09	6.67
		ท่าโพธิ์	55.76	16.10	2.97	1.59
		พังลา	5.98	2.86	81.39	16.73
คลองหอยโข่ง	22.65	ทุ่งลาน	76.04	8.49	14.44	9.36
		พะตง	0.72	0.31	21.40	6.17
หาดใหญ่	20.85	บ้านพรุ	6.75	3.47	130.84	23.14
		คลองอุต๊ะเภา	10.08	0.49	0.53	0.00
		หาดใหญ่	4.53	1.77	9.99	7.99
		คองหงส์	0.00	0.00	4.60	0.01
		ควนลัง	67.51	3.01	0.50	0.00
		คูเต่า	0.00	0.00	17.54	1.16
		คลองแห	0.00	0.00	34.16	0.68
		บ้านหาร	10.17	0.33	0.03	0.00
บางกล้า	16.39	แม่ทอม	29.24	0.64	0.00	0.00
		บางกล้า	2.67	0.54	0.00	0.00
		ท่าช้าง	2.41	0.05	0.00	0.00
		พื้นที่การกัดเซาะ/ทับถมทั้งหมด	284.34	53.43	342.47	78.41

หมายเหตุ 1 ไร่เท่ากับ 1,600 ตารางเมตร

เมื่อพิจารณาเฉพาะพื้นที่บริเวณอำเภอหาดใหญ่ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ตลิ่งคลองอุต๊ะเภามีการกัดเซาะมากที่สุดพบว่า เขตตำบลบ้านพรุสูญเสียพื้นที่แนวตลิ่งเนื่องจากการกัดเซาะสูง (ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6) ซึ่งแนวตลิ่งบริเวณนี้เป็นจุดที่เสี่ยงและเกิดการพิบัติของตลิ่งอย่างต่อเนื่อง การกัดเซาะเกิดขึ้นกับแนวตลิ่งตำบลบ้านพรุประมาณ 6.60 ไร่ต่อกิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากตลิ่งบริเวณพื้นที่ตำบลบ้านพรุเป็นตลิ่งที่ประกอบด้วยชั้นดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะ และเป็นตลิ่งที่มีความชันสูง ซึ่งง่ายต่อการพิบัติในช่วงน้ำหลาก (ฤดูฝน)



รูปที่ 4.5 พื้นที่การกัดเซาะและทับถมของตลิ่งคลองอู่ตะเภาแยกตามอำเภอ



รูปที่ 4.6 พื้นที่การกัดเซาะและทับถมในอำเภอหาดใหญ่

4.4.2 ระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ

4.4.2.1 ระยะการถดถอยของตลิ่งตลอดลำน้ำคลองอุตะเถา

ระยะการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถาตลอดลำน้ำจากพื้นที่ตำบลสะเตา อำเภอสะเตาถึงบ้านคูเต่า อำเภอบางกล่ำ ถูกประเมินโดยการใช้ GIS ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแนวตลิ่ง (DSAS) ผลการคำนวณระยะการถดถอยถูกแสดงในลักษณะของการกระจายของข้อมูลระยะการถดถอยของแนวตลิ่งซ้ายและแนวตลิ่งขวาในรูปแบบแผนภูมิกล่อง (Box plot) ได้แสดงดังรูปที่ 4.7-4.10 ผลการศึกษาพบว่า ระยะการถดถอยเฉลี่ยของตลิ่งคลองอุตะเถา สำหรับตำบลต่างๆ ในพื้นที่อำเภอสะเตา คลองหอยโข่ง หาดใหญ่และบางกล่ำ มีค่าอยู่ในช่วง 2.31-7.03 เมตร 6.74-8.70 เมตร 4.35-13.87 เมตร และ 2.33-9.46 ตามลำดับ รายละเอียดทางสถิติของการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถา แยกตามตำบลได้เสนอไว้ในภาคผนวก ค ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระยะการถดถอยมีค่าเพิ่มขึ้นจากพื้นที่ต้นน้ำ (อำเภอสะเตา) ไปถึงค่ามากที่สุดบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำในเขตอำเภอหาดใหญ่ และมีค่าลดลงในบริเวณพื้นที่ปลายน้ำ (อำเภอบางกล่ำ)

4.4.2.2 ระยะการถดถอยของตลิ่งที่ใช้ในแบบจำลองการถดถอย

ผลการวิเคราะห์การถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศปี พ.ศ. 2545 2553 และ 2559 ของตลิ่งทั้ง 6 ตำแหน่งในลุ่มน้ำคลองอุตะเถาตอนกลาง ได้แสดงในตารางที่ 4.2 ระยะการถดถอยจากปี พ.ศ. 2545-2553 (R_{2010}) มีค่าอยู่ในช่วง 3.04 เมตร (ตำแหน่ง UT6)-11.76 เมตร (ตำแหน่ง UT5) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.33 เมตร ในขณะที่ระยะการถดถอยจากปี พ.ศ. 2553-2559 (R_{2016}) มีค่าอยู่ในช่วง 1.87 เมตร (ตำแหน่ง UT1) ถึง 20.06 เมตร (ตำแหน่ง UT5) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.88 เมตร สำหรับค่าระยะการถดถอยรวม (R_T) มีค่าอยู่ในช่วง 7.52 เมตร (ตำแหน่ง UT6) ถึง 31.83 เมตร (ตำแหน่ง UT5) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.21 เมตร ระยะการถดถอยของตลิ่งตำแหน่ง UT2-UT4 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากตลิ่งทั้ง 3 ตำแหน่งอยู่ในพื้นที่บริเวณที่ใกล้เคียงกัน คุณสมบัติของดินรวมถึงลักษณะทางชลศาสตร์ของตลิ่งทั้งสามมีความใกล้เคียงกัน

ระยะการถดถอย (R_T) น้อยสุดเกิดขึ้นที่ตลิ่งตำแหน่ง UT6 โดยมีค่าเท่ากับ 7.52 เมตร เนื่องจากบริเวณส่วนล่างของตลิ่ง (Lower bank) ของตลิ่งตำแหน่งนี้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective cohesion) สูง (ตารางที่ 4.2) ซึ่งส่งผลให้ตลิ่งตำแหน่งนี้มีการกัดเซาะต่ำ ยิ่งไปกว่านั้น ตลิ่งตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่อยู่ในช่วงปลายของพื้นที่ลุ่มน้ำบริเวณกลางน้ำ ซึ่งอยู่ใกล้กับทะเลสาบสงขลา ลักษณะทางชลศาสตร์ของพื้นที่บริเวณนี้เป็นแนวตลิ่งที่มีความชันของลำน้ำที่ต่ำ การกัดเซาะตลิ่งจะเกิดขึ้นน้อย

ระยะการถดถอยสูงสุดเกิดขึ้นที่ตลิ่งตำแหน่ง UT5 โดยมีระยะการถดถอย R_{2010} , R_{2016} , และ R_T เท่ากับ 11.76 20.06 และ 31.83 เมตร ตามลำดับ ระยะการถดถอย R_{2010} ของตลิ่ง UT5 มีค่าใกล้เคียงกับระยะการถดถอยของตำแหน่งอื่น แต่ในทางตรงกันข้าม ระยะการถดถอย R_{2016} มีค่าที่

แตกต่างจากตลิ่งในตำแหน่งอื่นอย่างชัดเจน ภาพถ่ายทางอากาศของแนวตลิ่งในตำแหน่งนี้บ่งชี้ว่าในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553 แนวตลิ่งยังคงรูปแบบของลำน้ำในแนวตรง (Straight river) อย่างไรก็ตามในช่วงปี พ.ศ. 2559 แนวตลิ่งมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของธรณีสัณฐาน (River morphology) และแนวการไหลของน้ำเป็นแบบแนวโค้งเว้า (Concave shape) เนื่องจากผลของการไหลแบบ Secondary flows (Camporeale et al., 2007; Papanicolaou et al., 2007) การไหลในลักษณะนี้ร่วมกับดินในลักษณะเนื้อผสม (Soil heterogeneity) และความซับซ้อนของกระบวนการเปลี่ยนแปลงใต้ผิวดิน (Subaerial process) และกระบวนการทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological processes) เป็นปัจจัยทำให้ระยะการถดถอย R_{2016} มีค่าสูง

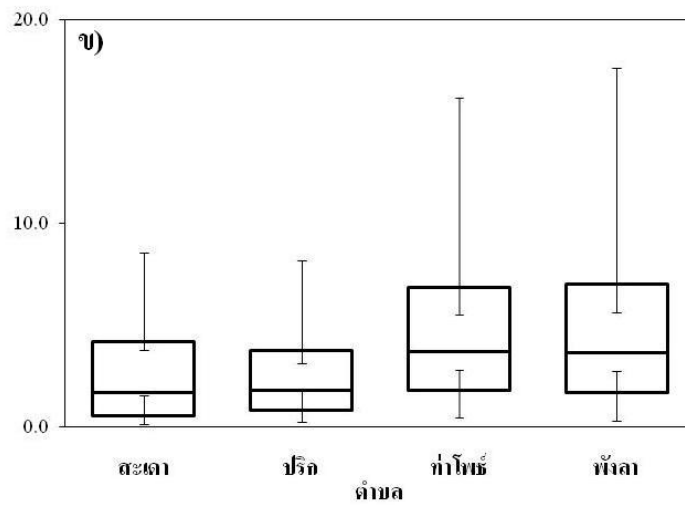
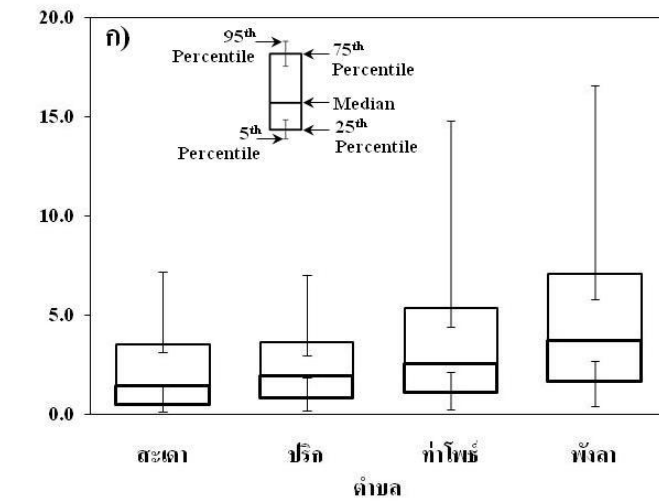
สำหรับตลิ่งตำแหน่ง UT1 ระยะการถดถอย R_{2010} , R_{2016} , และ R_T เท่ากับ 10.08 1.87 และ 11.96 ตามลำดับ ระยะการถดถอย R_{2016} มีค่าต่ำกว่าระยะการถดถอย R_{2010} และระยะการถดถอยของตลิ่งในตำแหน่งอื่น (ตารางที่ 4.2) การเปลี่ยนแปลงแนวการไหลของลำน้ำเป็นสาเหตุทำให้ระยะการถดถอย R_{2016} มีค่าต่ำ ซึ่งเป็นไปได้ว่า เหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ในปี พ.ศ. 2553 ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวการไหลของน้ำ เนื่องจากตลิ่งตำแหน่ง UT1 ในช่วงปี พ.ศ. 2553-2559 เรียงตัวอยู่ในแนวโค้งด้านใน (Inner bank) ซึ่งทำให้เกิดการทับถมของตะกอนในลำน้ำบริเวณนี้มากกว่าการถดถอย ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Motta et al. (2012)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ

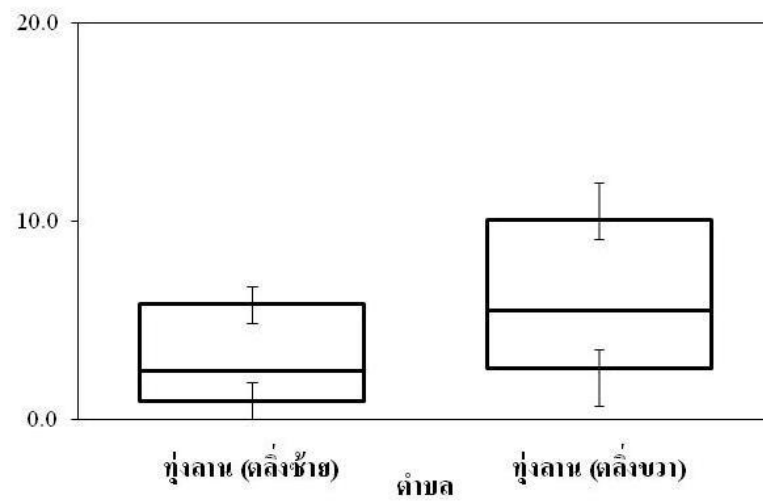
Site	Distance from UT1(m)	Land use	Reach length (m)	Bank Retreat (m)		
				R_{2010}	R_{2016}	R_T
UT1	-	Rubber Plantation	78.04	10.08	1.87	11.96
UT2	4,973	Rubber Plantation	69.69	9.39	11.14	20.52
UT3	5,203	Rubber Plantation	128.78	9.08	8.31	17.39
UT4	6,333	Rubber Plantation	74.83	6.59	7.44	14.04
UT5	7,690	Rubber Plantation	55.09	11.76	20.06	31.83
UT6	13,990	Village	78.37	3.04	4.48	7.52
Average				8.33	8.88	17.21

4.4.3 แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภา

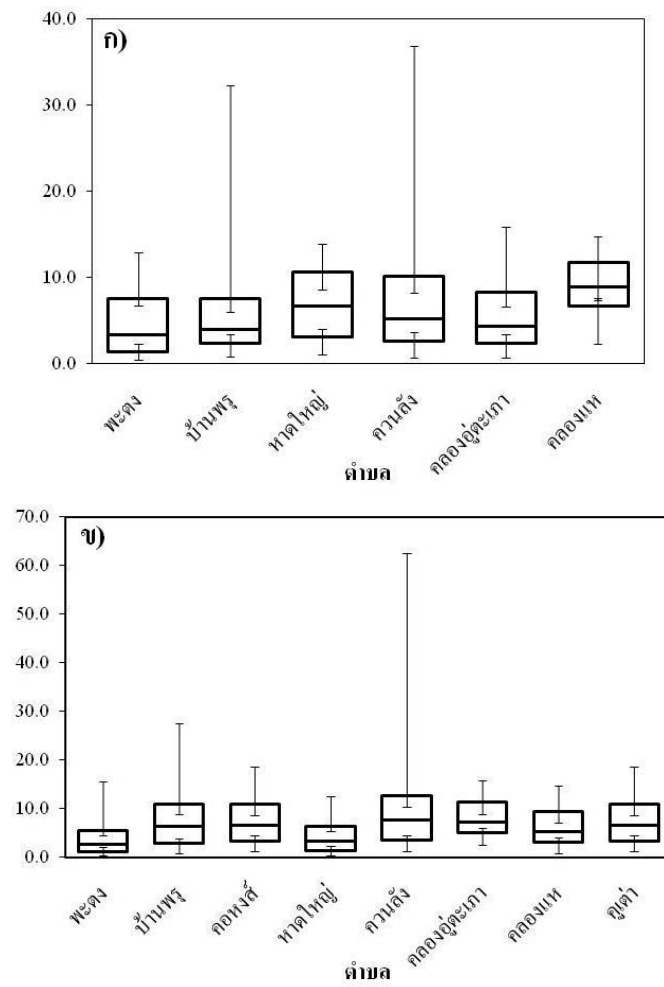
แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายการถดถอยในอนาคต โดยการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งและเปรียบเทียบกับระยะการถดถอยที่เกิดขึ้นจริงจากภาพถ่ายทางอากาศ (หัวข้อ 4.4.2.2) และใช้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากการทดสอบการกัดเซาะในสนาม (Submerged jet test) เป็นค่าเริ่มต้น รวมถึงใช้ค่าปรับเทียบ (Lumped calibration factor, α) สำหรับการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ



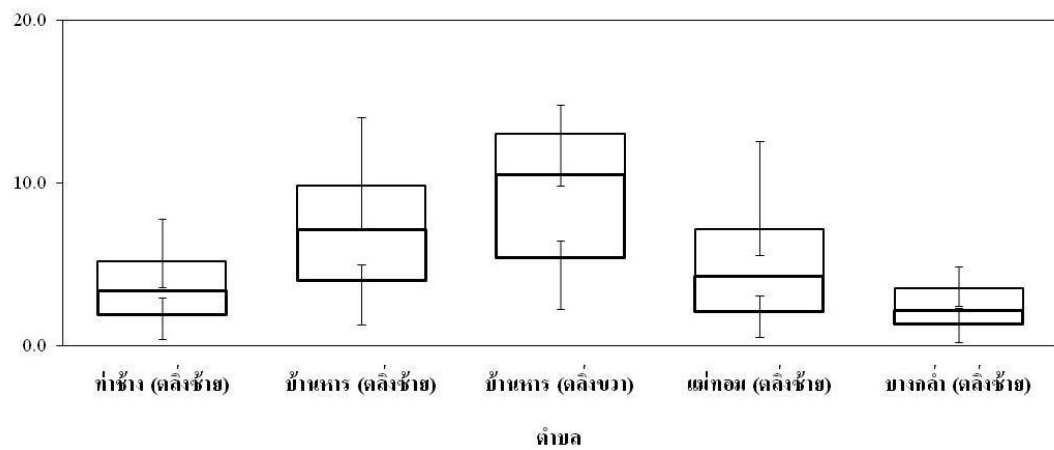
รูปที่ 4.7 ระยะเวลาการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภา อำเภอสะเตา ก) ตลิ่งฝั่งซ้าย ข) ตลิ่งฝั่งขวา



รูปที่ 4.8 ระยะเวลาการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภา อำเภอคลองหอยโข่ง



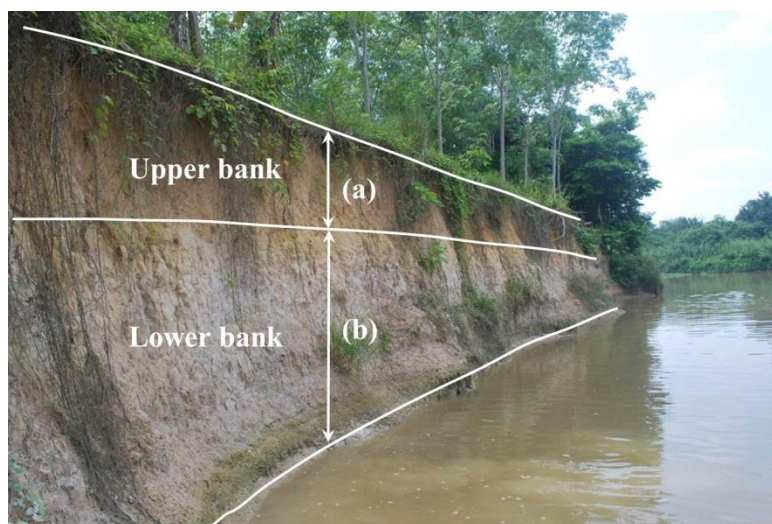
รูปที่ 4.9 ระยะเวลาการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภา อำเภอหาดใหญ่ ก) ตลิ่งฝั่งซ้าย ข) ตลิ่งฝั่งขวา



รูปที่ 4.10 ระยะเวลาการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภา อำเภอบางกล่ำ

4.4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของตลิ่งในพื้นที่ศึกษา

ตำแหน่งของตลิ่งในพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาบริเวณกลางน้ำ เป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาการถดถอยของตลิ่งอย่างต่อเนื่อง ขนาดของตลิ่งในช่วงนี้มีความกว้างและความสูงอยู่ในช่วงประมาณ 20-40 และ 5-10 เมตร ตามลำดับ ลักษณะทั่วไปของตลิ่งคลองอู่ตะเภาในพื้นที่ศึกษาเป็นตลิ่งที่มีความชันสูงและเสี่ยงต่อการถูกกัดเซาะและการพังทลาย สามารถแบ่งชั้นดินบนตลิ่งได้เป็นสองชั้น คือตลิ่งชั้นบนและตลิ่งชั้นล่าง (รูปที่ 4.11) ตลิ่งเหล่านี้ไม่มีพืชปกคลุมบริเวณผิวหน้าของตลิ่ง แสดงให้เห็นว่าเพิ่งผ่านการพิบัติมาไม่นาน ภาพของตลิ่งที่ทำการวิเคราะห์การถดถอยทั้ง 6 ตำแหน่ง ได้แสดงในรูปที่ 4.12 ตำแหน่งของ UT1-UT6 ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.1(ข) ระยะห่างจาก UT1 ถึง UT6 ประมาณ 14 กิโลเมตร ตลิ่งทั้งหมดมีร่องรอยการกัดเซาะและการพังทลายอย่างเห็นได้ชัด โดยพื้นที่บริเวณตลิ่งที่ทำการศึกษาเกือบทั้งหมดมีการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยการปลูกยางพารา



รูปที่ 4.11 ลักษณะทั่วไปของตลิ่งคลองอู่ตะเภาในพื้นที่ศึกษา (a) คือตลิ่งชั้นบน (Upper bank) และ (b) คือตลิ่งชั้นล่าง (Lower bank).

4.4.3.2 คุณลักษณะของดินริมตลิ่งในพื้นที่ศึกษา

ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินของตลิ่งทั้ง 6 ตำแหน่ง ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ชั้นดินของตลิ่งสามารถแบ่งได้ 2 ชั้น ประกอบด้วยตลิ่งชั้นบน (Upper bank) และตลิ่งชั้นล่าง (Lower bank) ตลิ่งชั้นบนมีความหนาของชั้นดินอยู่ในช่วง 1.0-1.5 เมตร เป็นดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive soil) จำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) หรือดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity silt, ML) โดยมีค่าขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (Mean particle size, D_{50}) ปริมาณดินเหนียว-ตะกอนทราย (Silt clay content, SC) ปริมาณดินเหนียว (Clay content, Pc) และดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) อยู่ในช่วง 0.007-0.065 มิลลิเมตร 48.9-86.0% 6.93-35.0% และ 6.90-14.7% ตามลำดับ ตลิ่งชั้นล่างประกอบด้วยดินเม็ดหยาบ (Coarse grain soil) และดินเม็ดละเอียด (Fine grain soil) จำแนกได้เป็น ดินทรายผสมตะกอนทราย (Silty sand, SM), ดินตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity silt, ML) ดิน

เหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) และ ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) โดยมีความหนาของชั้นดินอยู่ในช่วง 2.8-6.2 เมตร ดินเม็ดละเอียดถูกพบบริเวณตลิ่ง UT1, UT3, UT5 และ UT6 ในขณะที่ดินเม็ดหยาบถูกพบบริเวณตลิ่ง UT2 และ UT4 ผลการจำแนกประเภทของตลิ่งคลองอยู่ตะเภาในพื้นที่ศึกษาพบว่า ตลิ่ง UT1 UT3 UT5 และ UT6 เป็นตลิ่งที่มีแรงยึดเหนียว (Cohesive bank) ในขณะที่ ตลิ่ง UT2 และ UT4 เป็นตลิ่งแบบผสม (Composite bank)



รูปที่ 4.12 ตลิ่งที่ทำการศึกษาทั้ง 6 ตำแหน่ง บริเวณลุ่มน้ำคลองอยู่ตะเภาตอนกลาง

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยการทดสอบ Multi-stage direct shear พบว่า หน่วยแรงยึดเหนียวประสิทธิผล (c') และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') อยู่ในช่วง 3.12-17.05 kPa และ 22.61°-31.30° สำหรับตลิ่งชั้นบน ตามลำดับ ในขณะที่ตลิ่งชั้นล่างมีค่า c' และ ϕ' อยู่ในช่วง 1.26-18.27 kPa และ 23.97°-33.74° ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของดินริมตลิ่งคลองอุต๊ะเกาทั้ง 6 ตำแหน่ง

Site	Latitude, Longitude (m)	Bank layer	Depth from bank Top (m)	D ₅₀ (mm)	P _c (%)	PI (%)	SC (%)	Bulk unit weight (kN/m ³)	USCS	Shear strength parameters		Erodibility parameter	
										ϕ' (Degree)	c' (kPa)	τ_c (Pa)	k_d (cm ³ /N.s)
UT1	767,023, 659,154	Upper	0.00 - 1.30	0.047	17.13	6.90	57.91	16.90	CL	30.17	8.24	13.18	4.13
		Lower	1.31 - 4.60	0.070	13.01	5.38	47.96	18.23	CL	27.55	9.75	14.37	3.67
UT2*	770,216, 661,222	Upper	0.00 - 1.50	0.007	35.00	14.70	86.00	18.67	CL	27.38	12.48	20.93	1.74
		Lower	1.51 - 4.34	0.250	1.39	NP	10.77	20.11	SM	33.74	1.26	1.43	19.55
UT3	770,317, 661,286	Upper	0.00-1.40	0.010	25.90	11.54	72.00	18.02	ML	27.17	9.56	7.12	6.48
		Lower	1.41 - 4.49	0.103	6.25	NP	41.63	17.98	ML	28.38	5.07	2.41	11.36
UT4*	770,986, 661,074	Upper	0.00 -1.50	0.035	17.62	9.33	63.39	17.86	CL	22.61	17.05	16.47	2.23
		Lower	1.51 - 7.78	0.236	3.24	NP	13.63	17.63	SM	28.94	2.01	2.68	7.98
UT5	771,082, 661,237	Upper	0.00 - 1.00	0.065	11.28	7.54	48.90	18.16	CL	24.31	3.12	8.80	3.39
		Lower	1.01 - 5.57	0.001	57.88	17.23	88.00	19.87	CL	23.97	18.27	16.88	6.55
UT6	775,103, 660,303	Upper	0.00 - 1.50	0.065	6.93	7.30	49.21	17.23	CL	31.30	3.19	8.41	14.29
		Lower	1.51 - 5.16	0.001	61.40	35.12	94.00	18.31	CH	25.52	17.78	16.56	15.07

ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test) ในสนาม (ตารางที่ 4.3) พบว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) ของดินริมตลิ่งทั้ง 6 ตำแหน่งมีค่าต่างกันไม่มาก ดินริมตลิ่งชั้นบนมีความต้านทานการกัดเซาะมากกว่าดินริมตลิ่งชั้นล่างเล็กน้อย ค่า τ_c อยู่ในช่วง 7.12-20.93 Pa โดยมีค่ามัธยฐานเท่ากับ 10.99 Pa สำหรับดินริมตลิ่งชั้นบน ในขณะที่ค่า τ_c อยู่ในช่วง 1.43-16.88 Pa โดยมีค่ามัธยฐานเท่ากับ 8.525 Pa สำหรับดินริมตลิ่งชั้นล่าง ในทำนองเดียวกัน ค่า k_d ของตลิ่งทั้งหมดอยู่มีค่าในช่วงแคบๆ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.74-14.29 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ และค่ามัธยฐานเท่ากับ 3.76 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ สำหรับตลิ่งชั้นบน และ มีค่าอยู่ในช่วง 3.67-19.55 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ โดยมีค่ามัธยฐานเท่ากับ 9.67 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ สำหรับตลิ่งชั้นล่าง

พารามิเตอร์การกัดเซาะทั้งสองถูกนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c และ k_d ร่วมกับการจำแนกประเภทของดินทางด้านกรกัดเซาะ (Erodibility class) ตามวิธีของ Hanson and Simon (2001) ผลการจำแนกพบว่าดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภาส่วนใหญ่เป็น “ดินประเภทที่ง่ายต่อการกัดเซาะสูง” (Very erodible soil) ยกเว้นดิน CL จากตลิ่ง UT4 และ UT6 ที่ต้านทานการกัดเซาะดีกว่าและถูกจำแนกเป็น “ดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะ” (Erodible soil) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c และ k_d ของดินริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภา สามารถแสดงได้เป็นสมการกำลัง (สมการที่ 4.6) โดยสมการนี้มีแนวโน้มที่คล้ายกันกับสมการความสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Simon et al. (2010) และ Daly et al., (2013) ดังแสดงในรูปที่ 4.13

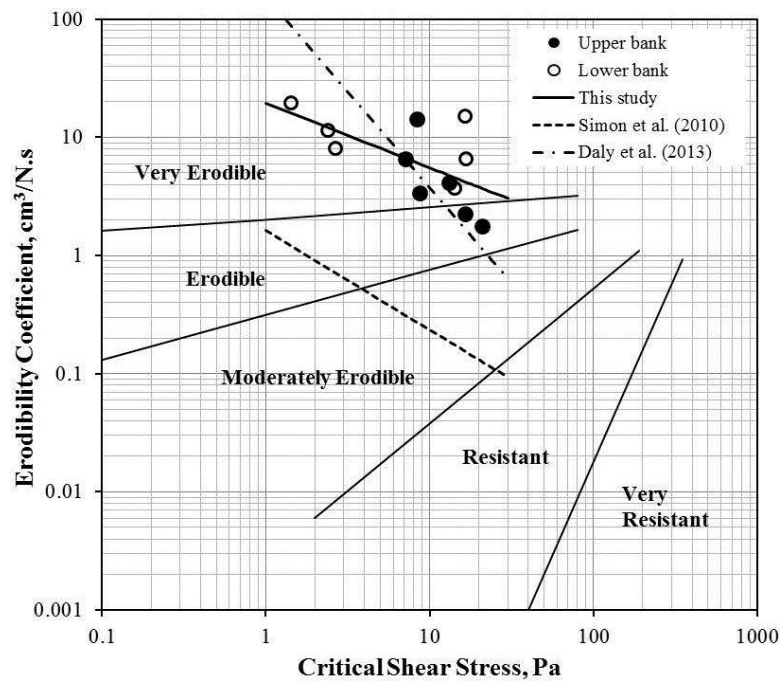
$$k_d = 19.54\tau_c^{-0.547} \quad (4.6)$$

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6 มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับสมการของ Daly et al., (2013) สมการของ Simon et al. (2010) ให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าประมาณ (Underestimate) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ Jet test ในการศึกษานี้ เนื่องจากสมการของ Simon et al. (2010) ใช้วิธี Blaisdell solution ในการคำนวณผลการทดสอบ ในขณะที่สมการของ Daly et al. (2013) ใช้วิธี Scour depth solution method เช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้

4.4.3.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโดยแบบจำลอง BSTEM

ผลการวิเคราะห์การถดถอยโดย BSTEM เบื้องต้น พบว่า การถดถอย R_{2010} มีค่าเท่ากับ 0.00 เมตร (ไม่มีการถดถอยเกิดขึ้น) สำหรับตลิ่ง UT1 UT5 และ UT6 ตามลำดับ ในทางตรงข้าม การถดถอย R_{2010} ของตลิ่ง UT2-UT4 มีค่าเกินกว่า 100 เมตร (เกิดการถดถอยสูงมาก) ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความแตกต่างเป็นอย่างมากกับระยะการถดถอยที่เกิดขึ้นจริง (ตารางที่ 4.4) ความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วย BSTEM และการถดถอยที่เกิดขึ้นจริง มีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ตามเวลา (Spatial and temporal changes) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานการกัดเซาะของดินริมตลิ่งในเวลาต่างๆ เนื่องจากกระบวนการ Wetting/Drying (Daly et al., 2015) นอกจากนั้น คุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ในภาคสนาม อาจมีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ใช้ตัวอย่างดินเพียงขนาดเล็กๆ ในการทดสอบ (Lab scale) อีกด้วย

แบบจำลองการถดถอยด้วย BSTEM ที่พัฒนาขึ้นได้ถูกปรับปรุงโดยการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ (τ_c และ k_d) โดยการปรับค่าใช้ค่า α จนกว่าค่าการถดถอย R_{2010} จาก BSTEM ใกล้เคียงกับการถดถอย R_{2010} จากภาพถ่ายทางอากาศ (AIA) ค่า α , τ_c และ k_d ที่ปรับแก้แล้ว รวมถึง BSTEM R_{2010} ที่ได้จากการปรับแก้ค่า τ_c และ k_d ได้แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อ α มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.3-3.0 ทำให้ผลการวิเคราะห์การถดถอยจาก BSTEM มีความถูกต้องมากขึ้น ระยะการถดถอย R_{2010} จาก BSTEM มีค่าใกล้เคียงกับการถดถอยที่เกิดขึ้นจริงในทุกตำแหน่งของตลิ่ง รูปที่ 4.14 แสดงผลการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะในรูปแบบของผลการวิเคราะห์การถดถอย จุดข้อมูลตกอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้น 45 องศา โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) ต่ำเท่ากับ 0.69 เมตร ซึ่งบ่งชี้ว่าผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

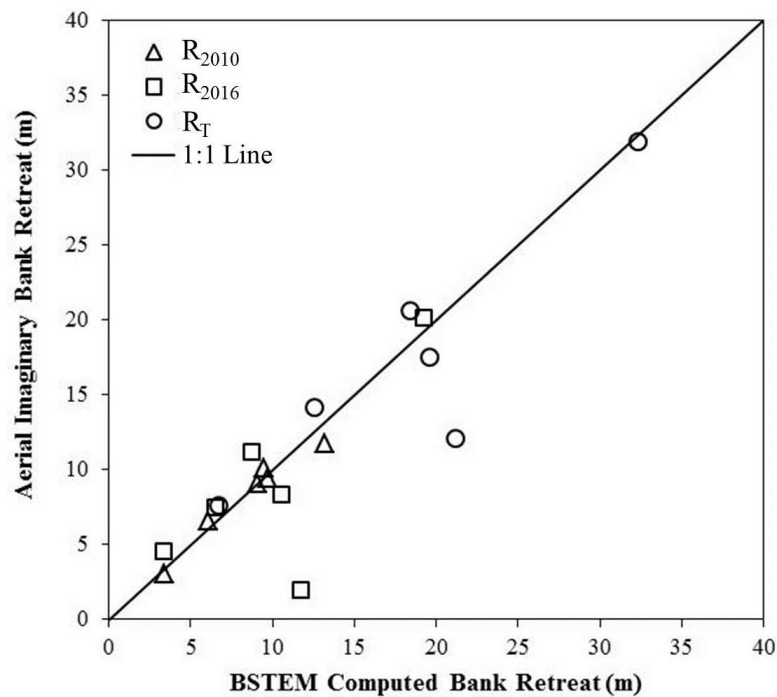


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ_c และ k_d

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว ระยะการถดถอย R_{2016} ถูกคำนวณด้วย BSTEM โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแก้แล้ว และข้อมูลระดับน้ำในปี พ.ศ. 2553-2559 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ระยะการถดถอย R_{2016} จากแบบจำลอง BSTEM สอดคล้องกับระยะการถดถอยที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ สำหรับตลิ่ง UT2-UT6 ระยะการถดถอย R_{2016} จาก BSTEM มีความแตกต่างกับภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในช่วงประมาณ 0.81-2.40 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 เมตร ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ได้จากการปรับแก้โดยใช้ค่า α สามารถใช้ในการทำนายการถดถอยในแบบจำลอง BSTEM ได้ ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ได้จากการใช้เทคนิคนี้สามารถใช้ในการคำนวณการถดถอยของตลิ่งได้ดีกว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ได้จากการทดสอบ jet tests หรือได้จากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical formulae) เพราะพารามิเตอร์เหล่านี้ได้มีการรวมผลของกระบวนการที่ส่งผลต่อการ

ถดถอยทั้ง 3 ปัจจัยได้แก่ การเปลี่ยนแปลงใต้ผิวดิน การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง และแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอุต๊ะเกาโดยใช้ BSTEM มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ประมาณการถดถอยของตลิ่งคลองอุต๊ะเกาได้

สำหรับตลิ่ง UT1 ระยะเวลาถดถอย R_{2016} จาก BSTEM มีค่ามากกว่าค่าจริงที่เกิดขึ้นอย่างน่าสังเกต โดยมีความแตกต่างกันเท่ากับ +9.94 เมตร ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.4.2.2 ทั้งนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแนวการไหลของน้ำ ทำให้แนวตลิ่ง UT1 เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นแนวโค้งใน (Inner bank of the bend) ซึ่งทำให้การถดถอยเกิดขึ้นกับบริเวณนี้น้อย



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศและการวิเคราะห์โดยใช้ BSTEM

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศและผลการวิเคราะห์การถดถอย

Site	Bank Layer	JET Test			Adjusted Values		R ₂₀₁₀ (m)		R ₂₀₁₆ (m)		R _T (m)	
		τ_c (Pa)	k_d (cm ³ /N.s)	α	τ_c (Pa)	k_d (cm ³ /N.s)	AIA	BSTEM	AIA	BSTEM	AIA	BSTEM
UT1	Upper	13.18	4.13	2.986	4.41	12.33	10.08	9.48	1.87	11.81	11.96	21.29
	Lower	14.37	3.67	2.986	4.81	10.95						
UT2	Upper	20.93	1.74	1.000	20.93	1.74	9.39	9.74	11.14	8.74	20.52	18.48
	Lower	1.43	19.55	0.290	4.77	5.86						
UT3	Upper	7.12	6.48	0.492	14.47	3.19	9.08	9.05	8.31	10.59	17.39	19.64
	Lower	2.41	11.36	0.492	4.89	5.59						
UT4	Upper	16.47	2.23	1.000	16.47	2.23	6.59	6.11	7.44	6.55	14.03	12.66
	Lower	2.68	7.98	0.474	5.65	3.78						
UT5	Upper	8.80	3.39	1.000	8.80	3.39	11.76	13.19	20.06	19.25	31.83	32.45
	Lower	16.88	6.55	3.162	5.34	20.70						
UT6	Upper	8.41	14.29	0.800	10.52	11.43	3.04	3.39	4.48	3.41	7.52	6.80
	Lower	16.56	15.07	2.653	6.24	39.99						
RMS (m)							0.69		4.32		4.06	

Note: BSTEM = Bank stability and toe erosion model, AIA = Aerial imagery analysis, τ_c = Critical shear stress, k_d = Erodibility coefficient, R₂₀₁₀ = Bank retreat from 2002 to 2010, R₂₀₁₆ = Bank retreat from 2010 to 2016, R_T = R₂₀₁₀ + R₂₀₁₆, RMS = Root mean square error between BSTEM and AIA retreats

4.5 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถาในครั้งนี้ ประกอบด้วย การประเมินพื้นที่การกัดเซาะและการทับถมของแนวตลิ่ง การประเมินการถดถอยของแนวตลิ่งโดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับระบบสารสนเทศ (GIS) และการพัฒนาแบบจำลองการถดถอยของตลิ่งโดยใช้ Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) โดยภาพถ่ายทางอากาศของกลุ่มน้ำคลองอุตะเถาในปี 2545-2553 ของกรมแผนที่ทหารถูกใช้ในการประเมินพื้นที่การกัดเซาะและระยะการถดถอยของแนวตลิ่งตลอดลุ่มน้ำ แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งที่ได้พัฒนาขึ้นถูกเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องกับระยะการถดถอยที่เกิดขึ้นจริงซึ่งประเมินจากภาพถ่ายทางอากาศ

ผลการประเมินพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะและทับถมของคลองอุตะเถาพบว่า พื้นที่ที่ถูกกัดเซาะและทับถมรวมเท่ากับ 626.81 และ 131.84 ไร่ ตามลำดับ หรือมีการกัดเซาะสุทธิเท่ากับ 494.97 ไร่ ตลิ่งในพื้นที่อำเภอหาดใหญ่ถูกกัดเซาะมากที่สุดเมื่อเทียบกับอำเภออื่นๆ โดยมีพื้นที่การกัดเซาะประมาณ 14.83 ไร่ต่อแนวตลิ่ง 1 กิโลเมตร การกัดเซาะเกิดขึ้นมากบริเวณพื้นที่ตำบลบ้านพรุและตำบลควนลัง ระยะการกัดเซาะและการทับถมตะกอนของแนวตลิ่งในอำเภอหาดใหญ่พบว่าในระยะ 8 ปีที่ผ่านมา (2545-2553) มีระยะการถดถอยและทับถมเฉลี่ยประมาณ 5.57 และ 2.83 เมตรตามลำดับ ระยะการกัดเซาะเฉลี่ยของคลองอุตะเถาในพื้นที่อำเภอสะเดา คลองหอยโข่ง หาดใหญ่และบางลำมีค่าอยู่ในช่วง 2.31-7.03 เมตร 6.74-8.70 เมตร 4.35-13.87 เมตร และ 2.33-9.46 ตามลำดับ การกัดเซาะมีค่าเพิ่มขึ้นจากพื้นที่ต้นน้ำไปถึงค่ามากที่สุดบริเวณพื้นที่กลางน้ำในเขตอำเภอหาดใหญ่ และการกัดเซาะมีค่าลดลงอีกครั้งในพื้นที่บริเวณปลายน้ำ

การประเมินการถดถอยของตลิ่ง 6 ตำแหน่งในพื้นที่บริเวณกลางน้ำในกลุ่มน้ำคลองอุตะเถา โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศพบว่า ในช่วงปี 2545-2559 ระยะการถดถอยอยู่ในจาก 7.52 เมตร (UT6) ถึง 31.83 เมตร (UT5) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.21 เมตร ระยะการถดถอยต่ำสุดเกิดขึ้นกับตลิ่ง UT6 เนื่องจากประกอบด้วยปัจจัยที่ส่งผลกระทบหลายอย่างเช่น บริเวณส่วนล่างของตลิ่ง (Lower bank) ของตลิ่งตำแหน่งนี้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ทำให้ความต้านทานการกัดเซาะสูง ในขณะที่ระยะการถดถอยสูงสุดเกิดขึ้นกับตลิ่ง UT5 เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแนวของตลิ่งเนื่องจากกระบวนการทางชลศาสตร์ต่างๆ

แบบจำลองการถดถอย BSTEM ของตลิ่งคลองอุตะเถาถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินการถดถอยในอนาคต แบบจำลองการถดถอยถูกปรับเทียบกับข้อมูลการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศจากปี พ.ศ. 2545-2553 โดยพบว่าค่า Lumped parameter (α) ที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.3-3.0 ทำให้ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลอง มีความถูกต้องแม่นยำ ระยะการถดถอยจาก BSTEM ในปี 2553 (R_{2010}) มีค่าใกล้เคียงกับระยะการถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การถดถอยจากภาพถ่ายทางอากาศในปี 2559 (R_{2016}) ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการถดถอยจากแบบจำลอง ผลการเปรียบเทียบบ่งชี้ว่าแบบจำลองการถดถอย BSTEM ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการทำนายค่าการถดถอยได้เป็นอย่างดี

บทที่ 5

การป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถา

5.1 บทนำ

การกัดเซาะตลิ่งของแม่น้ำหรือลำคลอง เกิดจากกระบวนการหลักสามอย่างประกอบกัน คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพใต้ดินในตลิ่ง (Subaerial process) การกัดเซาะเนื่องจากการไหลของน้ำในลำน้ำ (Fluvial process) และ การพังทลายของตลิ่ง (Riverbank failure) กระบวนการทั้งสามอย่างนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นวัฏจักร ตัวอย่างเช่น ดินในตลิ่งมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพแห้งและเปียก เมื่อมีน้ำไหลผ่านที่มีแรงเฉือนมากพอก็จะทำให้มีการกัดเซาะ การกัดเซาะโดยเฉพาะที่บริเวณตลิ่งจะทำให้ตลิ่งด้านบนขาดเสถียรภาพและเกิดการพิบัติ มวลดินที่พิบัติก็จะถูกน้ำที่ไหลในลำน้ำพัดพาออกไป กระบวนการนี้จะดำเนินไปเป็นวัฏจักร จนตลิ่งมีความลาดชันน้อยเพียงพอที่จะไม่เกิดการกัดเซาะหรือการพิบัติ

คลองอุตะเถาเป็นเส้นทางระบายน้ำสายหลักในกลุ่มน้ำคลองอุตะเถา มีความสูงของตลิ่งประมาณ 6 - 11 เมตร (จากท้องคลองถึงขอบบนของตลิ่ง) กว้างประมาณ 40-60 เมตร (จากขอบตลิ่งทั้งสองฝั่ง) การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งคลองอุตะเถาในบางช่วงสร้างความเสียหายทั้งทรัพย์สินและอาจจะอันตรายถึงชีวิตของชาวบ้านที่อาศัยอยู่ริมตลิ่ง รวมไปถึงการสูญเสียที่ดินและสวนยางของชาวบ้านในบริเวณนั้น อีกทั้งนำไปสู่การสูญเสียความสามารถในการระบายน้ำ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เทศบาลนครหาดใหญ่มีความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมในช่วงหน้าฝน

จากการศึกษาเสถียรภาพของตลิ่งคลองอุตะเถาที่ผ่านมา สุริตีและธนิต (2553) พบว่าตลิ่งคลองอุตะเถาเป็นตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive riverbank) และตลิ่งแบบผสม (Composite riverbank) เป็นหลัก ชนิดของดินได้แก่ ดินทรายเม็ดละเอียดปนตะกอนทรายและดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ซึ่งง่ายต่อการถูกกัดเซาะ ทำให้ตลิ่งในพื้นที่คลองอุตะเถาได้มีการถดถอยอย่างต่อเนื่องตลอดหลายปีที่ผ่านมา ทำให้สูญเสียพื้นที่ทางการเกษตรของประชากรในละแวกนั้น การปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งและการป้องกันการกัดเซาะได้มีการดำเนินการบ้างแล้วแต่ยังไม่ครอบคลุม เนื่องจากมีข้อจำกัดในหลายๆด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ เนื่องจากการก่อสร้างป้องกันการกัดเซาะโดยใช้โครงสร้างแข็งเช่น กำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กมีราคาแพง

การป้องกันการกัดเซาะตลิ่งสามารถทำได้ โดยการลดผิวสัมผัสของน้ำกับผิวดิน หรือการลดความเร็วของน้ำเพื่อลดแรงเฉือนที่กระทำต่อผิวดิน ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยการประยุกต์ใช้แผ่นยางพารา (Para-rubber sheet) เป็นวัสดุปูทับดินเพื่อลดผิวสัมผัสของน้ำกับดิน นอกจากนั้นการใช้แผ่นยางพาราเป็นวัสดุปูทับดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะยังเป็น

การช่วยเหลือเกษตรกรชาวสวนยางซึ่งประสบปัญหาราคายางตกต่ำอีกด้วย กล่าวคือ แผ่นยางพาราซึ่งใช้น้ำยางพาราเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปจนเป็นแผ่นยางพาราก็จะทำให้มีมูลค่ามากขึ้น ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย งานวิจัยครั้งนี้มีเป้าหมายคือ (1) เพื่อศึกษาและออกแบบวิธีป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเถาโดยใช้แผ่นยางพารา (2) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีป้องกันการกัดเซาะโดยสร้างแปลงสาธิต

5.2 การทบทวนเอกสาร

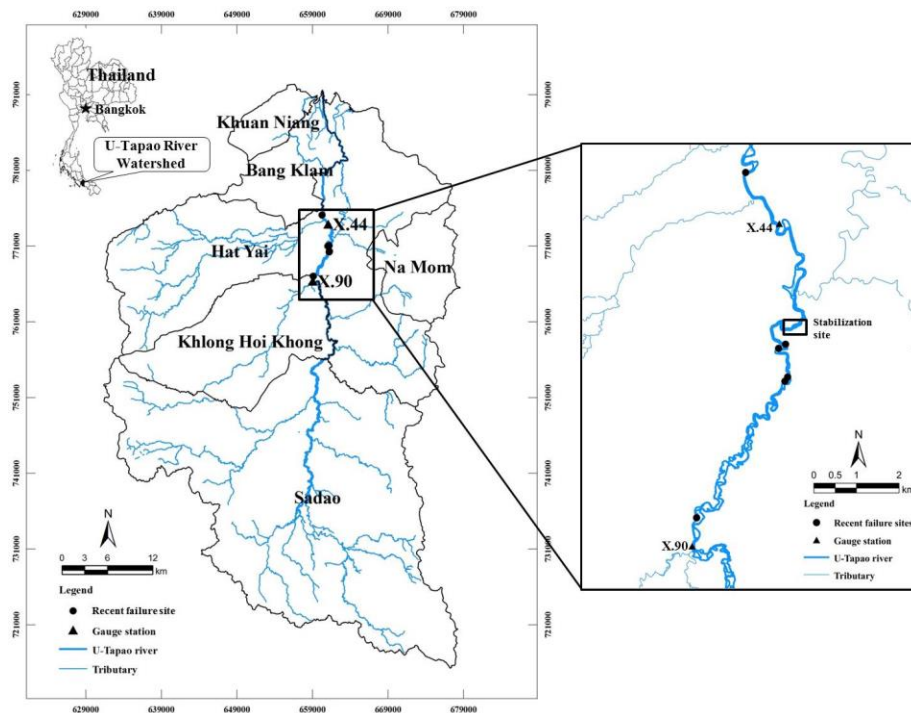
การศึกษาในครั้งนี้ได้มีการทบทวนเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยข้อมูลการกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเถา ทฤษฎีการกัดเซาะ และวิธีการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่ง มีรายละเอียดดังแสดงดังต่อไปนี้

5.2.1 การกัดเซาะตลิ่งคลองอุตะเถา

ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา (รูปที่ 5.1) เป็นลุ่มน้ำที่ใหญ่ที่สุดในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ซึ่งเป็นลุ่มน้ำที่สำคัญของภาคใต้ตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2,392 ตารางกิโลเมตร ตั้งแต่ชายแดนไทย-มาเลเซีย ทะเลสาบสงขลา คลองอุตะเถาเป็นลำน้ำสายหลักของลุ่มน้ำคลองอุตะเถา มีความยาวประมาณ 112 กิโลเมตร มีต้นกำเนิดของน้ำจากภูเขาทางตอนใต้ของลุ่มน้ำบริเวณชายแดนไทย-มาเลเซีย ไหลไปทางทิศเหนือลงสู่ทะเลสาบสงขลา ลุ่มน้ำคลองอุตะเถาได้รับน้ำฝนรายปีประมาณ 1,524 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณน้ำฝนที่หนาแน่นในช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดการพิบัติของตลิ่งอยู่เนืองๆ

การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งคลองอุตะเถาเป็นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียที่ดินตามแนวคลอง และพื้นที่ทางการเกษตรของชาวบ้านในแนวตลิ่ง โดยส่วนมากแล้ว พื้นที่เหล่านั้นเป็นพื้นที่ปลูกยางพาราของเกษตรกร การกัดเซาะตลิ่งเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง โดยเฉพาะฤดูฝนตั้งแต่เดือนตุลาคม-ธันวาคม ของทุกปี การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งคลองอุตะเถาที่เกิดขึ้นยังส่งผลกระทบต่อความสามารถในการระบายน้ำของคลองในช่วงน้ำหลากอีกด้วย ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่กระตุ้นให้เกิดน้ำท่วมตัวเมืองหาดใหญ่ในอดีตที่ผ่านมา

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่งคลองอุตะเถาในเขตอำเภอหาดใหญ่ ทำให้แนวตลิ่งหลายตำแหน่งบริเวณกลางน้ำทางทิศใต้ของประตูระบายน้ำคลองอุตะเถา (รูปที่ 5.1) การกัดเซาะที่เกิดขึ้นกับตลิ่งในบริเวณนี้ในช่วงปี 2545 ถึงปี 2559 มีระยะการกัดเซาะอยู่ในช่วง 8.00-31.00 เมตร โดยรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงลักษณะของตลิ่งหลังถูกการกัดเซาะและการพิบัติในช่วงปี 2552 และ 2557 ตามลำดับ โดยอัตราการไหลของน้ำในช่วงฤดูฝนของสองปีนี้เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 768.5 และ 653.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สำหรับปี 2552 และ 2557 ตามลำดับ (บันทึกโดยสถานีวัดระดับน้ำบ้านบางศาลา X.90) ทำให้ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนเต็มตลิ่งเป็นผลทำให้การกัดเซาะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง



รูปที่ 5.1 ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอุตะเถา



รูปที่ 5.2 ลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถาในปี 2552 ช่วงพื้นที่ห่างจากหลังประตูระบายน้ำคลองอุตะเถา ประมาณ 3-10 กิโลเมตรตามแนวคลอง



รูปที่ 5.3 ลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถาในปี 2557 ช่วงพื้นที่ห่างจากหลังประตูระบายน้ำคลองอุตะเถา ประมาณ 3-10 กิโลเมตรตามแนวคลอง

5.2.2 ทฤษฎีการกัดเซาะ

5.2.2.1 อัตราการกัดเซาะ

การถูกกัดเซาะของดินหมายถึงการเคลื่อนย้ายมวลของดินที่ฐานหรือขอบของตลิ่ง โดยการไหลของน้ำได้ทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, τ_o) กระทำต่อผิวดิน ในขณะเดียวกัน ดินริมตลิ่งมีความต้านทานในการถูกกัดเซาะที่เรียกว่า หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, τ_c) ถ้าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบที่กระทำต่อผิวดินมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน การถูกกัดเซาะจะไม่เกิดขึ้น ในทางกลับกัน การถูกกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงเฉือนที่ขอบที่กระทำต่อตลิ่งมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน สมการในการคำนวณค่าอัตราการถูกกัดเซาะของดินมีหลายแบบเนื่องจากการไหลของน้ำในรางน้ำเปิดถูกนำเสนอโดยนักวิจัยหลายท่าน (สมการที่ 5.1) ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่ขอบและหน่วยแรงเฉือนวิกฤต หรือเรียกว่า สมการหน่วยแรงเฉือนส่วนเกิน (Excess shear stress) ดังนี้

$$\varepsilon = k_d (\tau_o - \tau_c)^a \quad (5.1)$$

เมื่อ ε คือ อัตราการถูกกัดเซาะ (Erosion rate, m/s) k_d คือ สัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะ (Erodibility coefficient, $m^3/N.s$) τ_o คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ขอบ (Boundary shear stress, Pa) τ_c คือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Critical shear stress, Pa) a คือ ค่ายกกำลังเอกซ์โพเนนเชียล โดยทั่วไปแล้ว พิจารณาให้เป็น 1 ระยะการกัดเซาะจากสมการที่ 5.1 เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการประมาณอัตราการถูกกัดเซาะของดินริมตลิ่งแม่น้ำ (Partheniades, 1965; Arulanandan et al., 1980, Hanson and Cook, 1997; Hanson, 1990a, b)

5.2.2.2 พารามิเตอร์การกัดเซาะของดิน

พารามิเตอร์การกัดเซาะของดินประกอบไปด้วยค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress, τ_c) และค่าสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะของดิน (Erodibility coefficient, k_d) ซึ่งใช้ในการประเมินอัตราการถูกกัดเซาะและระยะการถูกกัดเซาะของดินริมตลิ่ง ซึ่งใช้ประกอบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง อีกทั้งยังรวมไปถึงการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ อย่างไรก็ตาม เป็นเรื่องที่ยุ้งยากที่จะหาพารามิเตอร์การกัดเซาะโดยการทดลอง ดังนั้น ผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอสมการเชิงประสบการณ์ที่ได้จากโดยการศึกษาการไหลในรางน้ำเปิด (Flume study) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ดังสมการที่ 5.2-5.7 ดังนี้

$$\text{Smerdon and Beasley (1961)} \quad \tau_c = 0.16(PI)^{0.84} \quad (5.2)$$

$$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182P_c} \quad (5.3)$$

$$\text{Julian and Torres (2006)} \quad \tau_c = 0.1 + 0.1779(SC) + 0.0028(SC)^2 - 2.3E - 5(SC)^3 \quad (5.4)$$

$$\text{Kamphuis and Hell (1983)} \quad \tau_c = 7.1 + 0.145 \left(\frac{q_u}{10^3} \right) \quad (5.5)$$

$$\tau_c = 3.8 + 0.55 \left(\frac{S_v}{10^3} \right) \quad (5.6)$$

Thoman and Niezgod (2008)

$$\tau_c = 77.28 + 2.20(Act) + 0.26(DR) - 13.49(SG) - 6.40(pH) + 0.12(w) \quad (5.7)$$

เมื่อ PI คือ ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, %) P_c คือ ปริมาณดินเหนียว (Clay content, %) SC คือ ปริมาณดินเหนียว - ตะกอนทราย (Silt - clay content, %) q_u คือ กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, kPa) S_v คือ กำลังรับแรงเฉือนในสนาม (Vane shear strength, kPa) w คือ ปริมาณน้ำในดิน (Water content, %) DR คือ อัตราส่วนการแพร่ (Dispersion ratio) pH คือ ความเป็นกรด - ด่างของดิน

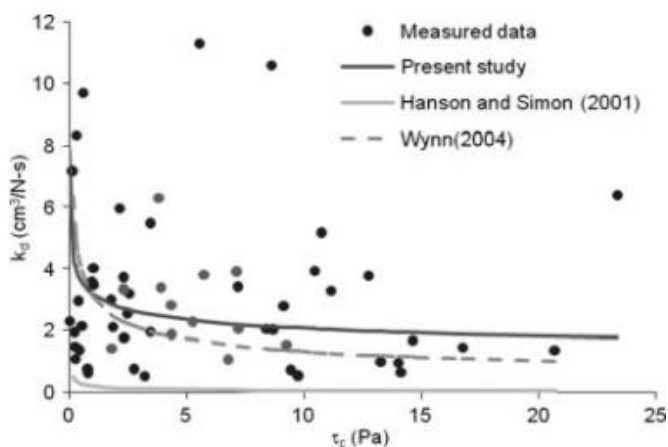
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะ (k_d) ไม่สามารถหาค่าได้จากคุณสมบัติพื้นฐานของดิน แต่สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) แล้ว โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_d กับ τ_c Hanson and Simon (2001) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง k_d กับ τ_c (ดังแสดงในสมการที่ 5.8) ที่ได้จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง k_d กับ τ_c ของดินริมตลิ่งหลายแห่งในสหรัฐอเมริกาโดยใช้เครื่องมือ Submerged jet test ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Arulanandan et al. (1980) ซึ่งใช้การทดสอบการไหลของรางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ (Flume testing) โดยใช้ดินในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน

$$k_d = 0.2\tau_c^{-0.5} \quad (5.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง k_d กับ τ_c เนื่องจากการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับหลายเงื่อนไขที่แตกต่างกันของตลิ่งแต่ละตำแหน่ง Wynn (2004) ได้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งสองกับตลิ่งที่ปกคลุมไปด้วยพืชต่างๆ ซึ่งได้ค่าความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.9 อีกทั้ง Karmaker and Dutta (2011) ได้สรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการถูกกัดเซาะของดินริมตลิ่งผสม (Composite bank) ดังแสดงในสมการที่ 5.10 ซึ่งสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.4 โดย τ_c มีหน่วยเป็น Pa และ k_d มีหน่วยเป็น $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$

$$k_d = 3.1\tau_c^{-0.37} \quad (5.9)$$

$$k_d = 3.16\tau_c^{-0.185} \quad (5.10)$$



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถูกกัดเซาะและค่าความต้านทานหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดิน (Karmaker and Dutta, 2011)

5.2.3 การป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง

การศึกษากลไกการพิบัติของตลิ่งทำให้เข้าใจพื้นฐานของกระบวนการการพิบัติของตลิ่ง ความเข้าใจกระบวนการเหล่านี้จะมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาการพิบัติของตลิ่ง ทั้งทางด้านการป้องกันและการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่ง ในปัจจุบันมีวิธีการป้องกันกัดเซาะตลิ่งหลายวิธี ทั้งในแบบดั้งเดิมที่เป็นลักษณะของโครงสร้างแข็ง (Hard armoring) เช่น การเรียงหินหน้าตลิ่ง (Riprap) การใช้เข็มพีช (Cantilever sheet pile wall) และการทำกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete wall) เป็นต้น วิธีเหล่านี้ได้มีการนำมาใช้กับตลิ่งหลายแห่งในประเทศ เช่น ตลิ่งแม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย และตลิ่งคลองอุตตะภา จังหวัดสงขลา เป็นต้น วิธีการป้องกันกัดเซาะตลิ่งอีกวิธีการหนึ่งที่มีการใช้วัสดุหรือพีชในท้องถิ่นนั้นๆ มาช่วยป้องกันและปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งมีชื่อเรียกว่า “Soil bioengineering approach” วิธีนี้มาได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกา รวมทั้งประเทศเพื่อนบ้านเช่น ประเทศเวียดนามและประเทศลาว เป็นต้น แต่ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 5.1

การป้องกันการกัดเซาะตลิ่งทั่วโลกตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมาได้ใช้วิธี Soil bioengineering approach ซึ่งเป็นวิธีที่มีแผนการตามแนวคิดของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (Environmental conservation) ที่มีประโยชน์ทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Zhai et al., 2010) และเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก (Gray and Leiser, 1982; Clark and Hellin, 1996; Polster, 2002) วิธี Soil bioengineering เป็นการผสมผสานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ (Mechanic) ชีววิทยา (Biology) และนิเวศศาสตร์ (Ecology) เพื่อจัดการกับปัญหาการพิบัติของตลิ่งในธรรมชาติ (Gray & Sotir, 1992) หลักการของการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งโดยวิธีนี้คือการใช้พีชหรือส่วนของพีชมาปลูกบริเวณหน้าทางลาดหรือโครงสร้างดิน ซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังของดินและยังป้องกันการเคลื่อนย้ายของมวลดิน (Gray & Sotir, 1996) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเสริมกำลังเช่น หิน ท่อไม้ขนาดใหญ่ วัสดุสังเคราะห์ (Geo - synthetics และ geo - composites) ยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพให้กับตลิ่งด้วย

Iowa Department of Natural Resources (2006) ได้เสนอว่า การพิจารณาเลือกการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งจำเป็นต้องทราบรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับตลิ่ง ซึ่งจะช่วยให้ง่ายในการเลือกและออกแบบวิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวิธี Soil bioengineering จะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเมื่อวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่หาได้ในพื้นที่ ปัจจัยสำคัญที่ควรตระหนักในการเลือกใช้การปรับปรุงเสถียรภาพโดยวิธี Soil bioengineering คือลักษณะของตลิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วของการไหลของน้ำ (Stream velocity) ความลึกของการไหล (Flow depth) ความลาดชันของตลิ่ง (Bank slope) ความสูงของตลิ่ง (Bank height) และดินริมตลิ่ง (Bank soil) ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 วิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งทั้งในประเทศและต่างประเทศ

Country	Location	Protection Method	Source
Thailand	Mekong riverbank along Nongkhai province	Plain riprap	DPWT & CP, Nongkhai office
		Cantilever sheet pile wall	
		Anchor sheet pile wall	
	U - Tapao watershed	Riprap + Gabion Counterfort retaining wall	DPWT & CP, Songkhla office
Vietnam	Binh An, My Tan	SB - Vetiver grass	Thuy et al., (2006)
	Binh Trung		
	Tho Nam		
	Binh Thoi		
Lao	Vientiane	SB - SODA mattress	Siphandone (2002)
	Ban Dongphosi		
	Wat Chom Cheng		
	Wat Sibounhuang		
	Namkading River	Geosynthetics	Bergado and Soralump (2003)
USA	Midwestern states	SB - Live fascine	Iowa Department of Natural Resources (2006)
		SB - Livestakes	
		SB - Joint planting	
		Riprap	
		SB - Vegetated geogrids	

Note: SB = Soil - bioengineering approach, SODA = fascine, DPWT & CP = Department of Public Works and Town & Country Planning

ก) ความเร็วของการไหล: การถูกกัดเซาะของดินเนื่องจากการไหลของน้ำสามารถเกิดขึ้นภายใต้ระดับความเร็วของน้ำ โดยเฉพาะความเร็วของน้ำที่เกิน 3 ฟุตต่อวินาที การปรับปรุงเสถียรภาพควรก่อสร้างในช่วงเวลาที่ความเร็วการไหลของน้ำต่ำกว่า 3 ฟุตต่อวินาที ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องมือพิเศษในการก่อสร้าง

ข) ความลึกของการไหล: ความลึกของน้ำสูงสุดของการไหลที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการก่อสร้างถูกกำหนดไว้ที่ประมาณ 3 ฟุต ดังนั้น ในการก่อสร้างเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งที่มีความลึกของของน้ำเกินกว่า 3 ฟุต ควรพิจารณาเป็นพิเศษ

ค) ความลาดชันของตลิ่ง: เครื่องมือทั่วไปในการก่อสร้างของการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งสามารถใช้ได้ในกรณีที่ความลาดชันของตลิ่งต่ำกว่า 6H: 1V ภายใต้ความสูงของตลิ่งที่น้อยกว่า 4 ฟุต ในทางตรงกันข้าม ตลิ่งที่มีความลาดชันสูงอยู่ในช่วง 1H: 1V ถึง 5H: 1V ควรใช้เครื่องมือพิเศษในการก่อสร้าง

ง) ความสูงของตลิ่ง: ความสูงของตลิ่งถูกจำกัดความหมายไว้ที่ความแตกต่างกันระหว่างระดับขอบตลิ่งถึงระดับน้ำในตลิ่งในช่วงที่มีระดับการไหลต่ำ (Low flow stage) ความสูงของตลิ่งที่เกิน 4 ฟุต จะจำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการก่อสร้าง

จ) ดินริมตลิ่ง: การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อเสถียรภาพของตลิ่ง รวมถึงประเภทของดินในกรณีของปัญหาการถูกกัดเซาะของดิน การจำแนกดินทางด้านความต้านทานในการถูกกัดเซาะของดินจำเป็นต้องเตรียมเพื่อใช้ในการพิจารณาปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่ง

5.3 การออกแบบการปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ

รูปแบบและวิธีการของการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งในแต่ละพื้นที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของดินริมตลิ่งและเงื่อนไขการไหลของน้ำซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดเซาะและการพิบัติของตลิ่ง ดังนั้น ในการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบลักษณะและรูปแบบการป้องกันให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบวิธีการป้องกันการกัดเซาะ โดยการพิจารณาถึงลักษณะของตลิ่งในพื้นที่ศึกษาและรูปแบบการไหลของน้ำในคลองอุตุตะเภา ขั้นตอนการออกแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ก่อสร้างในการปรับปรุงตลิ่งคลองอุตุตะเภา (รูปที่ 5.5) บริเวณหลังปั้มน้ำมัน ปตท. ถนนสายเอเชีย ต.คลองหระ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา (พิกัด 47 N 661660 E 771731 N) โดยได้รับความอนุเคราะห์พื้นที่จากบริษัท มหาชัยขนส่งภาคใต้ จำกัด ในอดีตที่ผ่านมามาตลิ่งบริเวณนี้ได้ถูกกัดเซาะและถดถอยจากแนวตลิ่งเดิมเป็นระยะประมาณ 8-10 เมตร (จากปี 2545-2553) และเป็นระยะทางยาวประมาณ 70 เมตร ความสูงของตลิ่งจากระดับน้ำฐาน (Base flow) ถึงขอบบนของตลิ่งเท่ากับ 5.60 เมตร

แนวทางการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะในการป้องกันตลิ่ง โดยจัดให้มีการถมดินให้ได้ระยะตามแนวตลิ่งเดิมก่อน และเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของคันดินถม จึงมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินถมในรูปแบบของอัตราส่วนความปลอดภัย โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้แสดงในหัวข้อที่ 5.3.2

5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่ทำการปรับปรุง

5.3.2.1 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ตลิ่งที่ทำการปรับปรุงที่มีความเหมาะสมต่อสภาพพื้นที่ที่ถูกออกแบบให้มีความลาด 1:1.5 (V:H) มีความสูง 5 เมตรดังแสดงในรูป 5.6 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งในการออกแบบในครั้งนี้ประกอบด้วย 3 วิธีได้แก่ (1) วิธี Ordinary (2) วิธี Bishop และ (3) วิธี Janbu โดยใช้โปรแกรม Slope/w (Geo-studio v. 2007) การวิเคราะห์ได้กำหนดค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถม ดินเดิม และหิน ซึ่งประกอบด้วย ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของดิน (Effective cohesion, c') และค่ามุมเสียดทานภายในเม็ดดิน (Effective internal friction angle, ϕ') ดังแสดงในตารางที่ 5.2 (คุณสมบัติของแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะไม่ได้นำมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่ง)

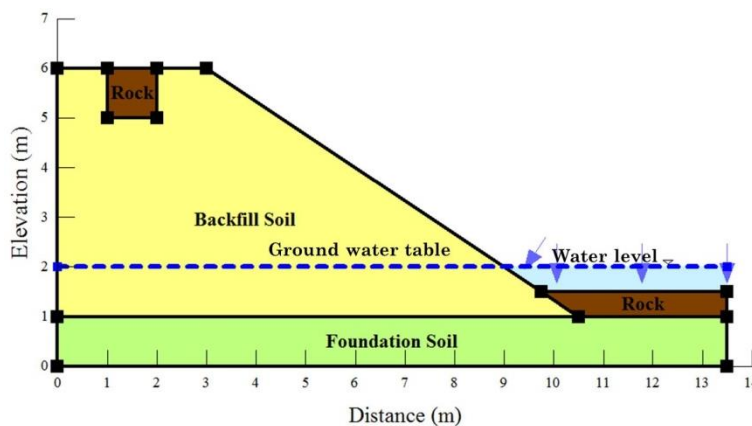


รูปที่ 5.5 แนวตลิ่งในพื้นที่ดำเนินการก่อสร้างการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งคลองอุตะเถา ก) ภาพถ่ายทางอากาศในปี 2553 ข) สภาพตลิ่งปัจจุบัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งดินถมทั้ง 3 วิธีนั้น ได้มีการใช้เงื่อนไขของระดับน้ำที่จะเกิดขึ้นที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของลาดดิน ประกอบด้วย การวิเคราะห์ตลิ่งในกรณี 1) ระดับน้ำเพิ่มขึ้นจาก Base flow ถึงกึ่งกลางตลิ่ง 2) ระดับน้ำเต็มตลิ่ง (Bankfull) และ 3) ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Drawdown) โดยลักษณะของตลิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของชั้นดินและลักษณะของตลิ่ง

พารามิเตอร์	ดินถม (Backfill)	ดินฐานราก (Foundation)	หิน (Rock)
หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล, c' (kPa)	10	10	0
มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล, ϕ'	32°	32°	36°
หน่วยน้ำหนัก, γ (kN/m ³)	19.0	19.0	26.5



รูปที่ 5.6 ลักษณะของตลิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ในทุกกรณีถูกนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมโยธาธิการว่าด้วยเรื่องการขุดดินและถมดิน (2552) ดังแสดงในตารางที่ 5.3 สำหรับงานดินถมขณะใช้งานได้กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของดินถมไว้ไม่น้อยกว่า 1.5 ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis) ในระหว่างและหลังจากการก่อสร้างแปลงทดสอบ

ในขั้นตอนการปรับปรุงตลิ่ง ได้มีการประเมินประสิทธิภาพของการถมดิน โดยการทดสอบความหนาแน่นในสนาม (Field density) เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) ในห้องปฏิบัติการ

5.3.2.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งดินถม

การวิเคราะห์เสถียรภาพของแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งได้มีการพิจารณาเฉพาะดินถมที่ได้มีการปรับระดับความลาดชันเท่านั้น (รูปที่ 5.6) โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ 3 วิธีได้แก่ Ordinary Bishop และ Janbu ผลการวิเคราะห์ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธีนี้เป็นเกณฑ์ในการบอกถึงเสถียรภาพของแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่ง กล่าวคือ ตลิ่งที่มีเสถียรภาพต้องมีอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) มากกว่า 1 และผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานกรมโยธาธิการว่าด้วยเรื่องการขุดดินและถมดิน (2552) ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งดินถมในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัยได้แสดงในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.7-5.11 พบว่า ตลิ่งมีเสถียรภาพที่ดี โดยมีความอัตราส่วนความปลอดภัยในกรณีทั่วไปเท่ากับ 2.262-2.436 (ตารางที่ 5.4 GWL +0.0 m, WT +0.0 m และรูปที่ 5.7) มากกว่ามาตรฐานกรมโยธาธิการสำหรับงานดินถมขณะใช้งานที่กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.5 อย่างไรก็ตาม สำหรับตลิ่งในบริเวณที่มีประตุน้ำ ซึ่งอาจมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (Rapid

drawdown) เนื่องจากการเปิดหรือปิดประตูน้ำ ซึ่งเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst case scenario) ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับกรณี Rapid drawdown เท่ากับ 1.162 (ตารางที่ 5.4 GWL +5.0 m, WT +0.0 m และรูปที่ 5.11) ซึ่งยังมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1 สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นสรุปผลการวิเคราะห์สำหรับทุกวิธีการวิเคราะห์ได้ว่า แปลงสาธิตที่ออกแบบมีเสถียรภาพในทุกกรณี

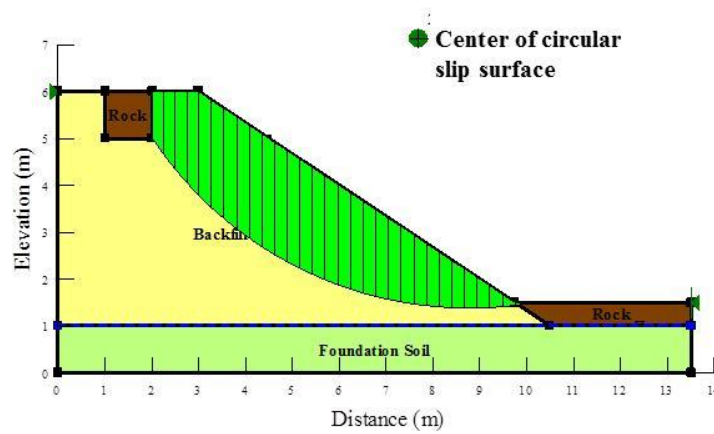
ตารางที่ 5.3 วิธีการวิเคราะห์และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับลักษณะงานต่างๆ

ประเภทงาน	ช่วงเวลาการก่อสร้าง	วิธีการวิเคราะห์	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับ
งานถมดิน	ขณะขุดดินหรือถมดินที่ใช้เวลาไม่เกิน 6 เดือน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม หรือแบบกำลังของดินไม่ระบายน้ำ	≥ 1.3
	ขณะขุดดินหรือถมดินที่ใช้เวลามากกว่า 6 เดือน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม หรือแบบกำลังของดินไม่ระบายน้ำ	≥ 1.5
	ขณะใช้งาน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล	≥ 1.5
งานขุดดิน	ขณะขุดดินหรือถมดินที่ใช้เวลาไม่เกิน 6 เดือน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม หรือแบบกำลังของดินไม่ระบายน้ำ	≥ 1.3
	ขณะขุดดินหรือถมดินที่ใช้เวลามากกว่า 6 เดือน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม หรือแบบกำลังของดินไม่ระบายน้ำ	≥ 1.5
	ขณะใช้งาน	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล	≥ 1.5

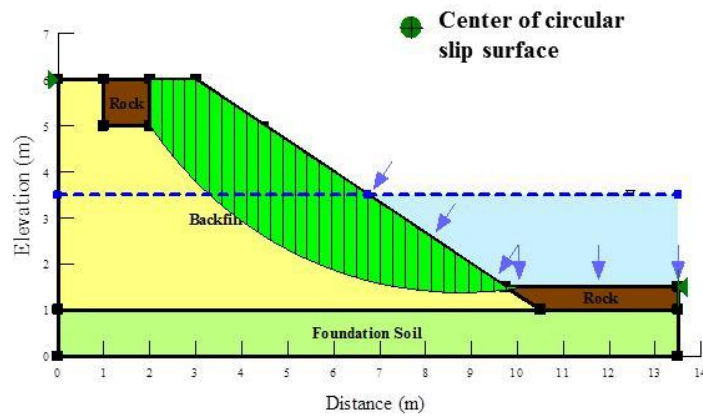
ที่มา: มาตรฐานกรมโยธาธิการว่าด้วยเรื่องการขุดดินและถมดิน (2552)

ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนความปลอดภัยของแปลงสาธิตการป้องกันตลิ่ง

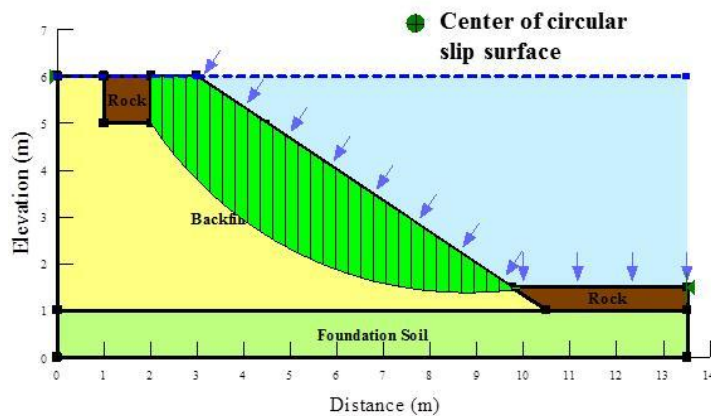
Analysis methods	Factor of Safety				
	Base flow	Half bankfull	Bankfull	Rapid drawdown	
	GWT +0.0 m WL +0.0 m	GWT +2.5 m WL +2.5 m	GWT +5.0 m WL +5.0 m	GWT +5.0 m WL +2.5 m	GWT +5.0 m WL +0.0 m
Ordinary	2.346	1.986	2.524	1.401	1.168
Bishop	2.436	2.152	3.080	1.620	1.301
Janbu	2.262	1.956	2.861	1.410	1.162



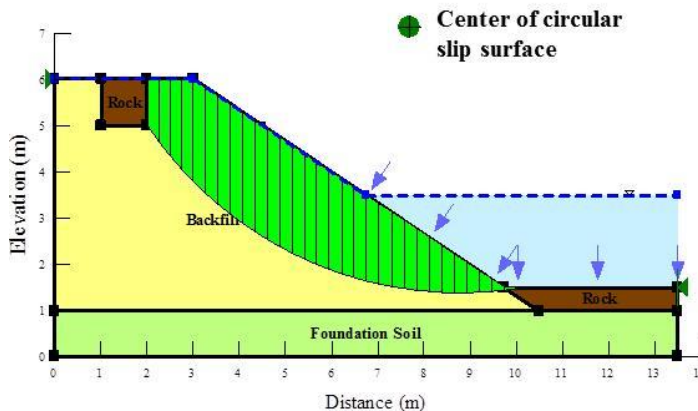
รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาดิตของตลิ่งคลองอุตะเภา กรณีระดับน้ำ +0.00 เมตร
(GWL=WL=0.00 เมตร)



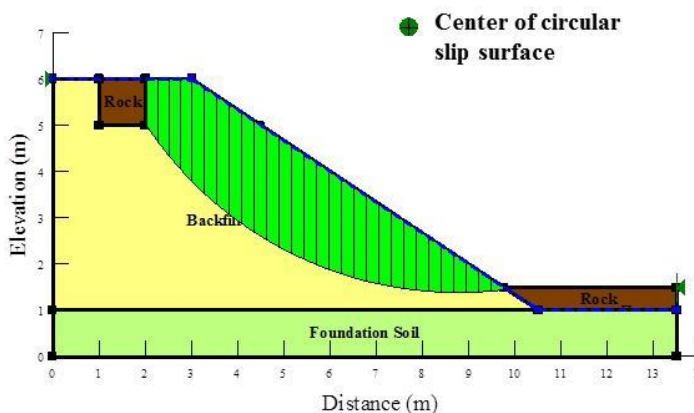
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาดิตของตลิ่งคลองอุตะเภา กรณีระดับน้ำ +2.50 เมตร
(GWL=WL=2.50 เมตร)



รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสาดิตของตลิ่งคลองอุตะเภา กรณีระดับน้ำเต็มตลิ่ง +5.00 เมตร
(GWL=WL=5.00 เมตร)



รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสภาพของตลิ่งคลองอุตะเกา กรณีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว +2.50 เมตร (GWL= 5.00 เมตร WL=2.50 เมตร)



รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแปลงสภาพของตลิ่งคลองอุตะเกา กรณีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว +0.00 เมตร (GWL= 5.00 เมตร WL=0.00 เมตร)

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งยังบ่งชี้ถึงลักษณะของตลิ่งและคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในกรณีของแปลงสภาพคลองอุตะเกา พบว่า คุณสมบัติของดินดังแสดงในตารางที่ 5.2 เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำที่ใช้ในการปรับปรุงตลิ่ง มีความเหมาะสมกับความลาดชันของตลิ่งตามที่กำหนด ดังนั้นในการก่อสร้างจริงจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่เหมาะสมและควบคุมการก่อสร้างให้สอดคล้องกับข้อกำหนดดังกล่าว

ในการประเมินประสิทธิภาพของการถมดิน ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของดินในระหว่างการก่อสร้าง ประกอบด้วย การทดสอบความหนาแน่นในสนาม (Field density test) การกระจายตัวของเม็ดดิน (Particle size analysis) และการบดอัดดิน (Compaction test) ซึ่งผลการทดสอบได้นำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของดินที่ใช้ในงานชลประทาน ผลการทดสอบพบว่า ดินถมของแปลงสภาพที่ 1 และ 2 เป็นชนิดเดียวกันและมีขนาดเม็ดดินที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 5.12) โดยมีปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 2.5 % และ 2.9 % ตามลำดับ ในขณะที่ แปลงสภาพที่ 3 มีปริมาณดินที่ผ่านตะแกรง

เบอร์ 200 เท่ากับ 13.6 % โดยดินถมในแปลงที่ 1 และ 2 ถูกจำแนกได้เป็นทรายที่มีส่วนคละดี (Well-graded sand, SW) และดินถมในแปลงที่ 3 ถูกจำแนกได้เป็นทรายผสมตะกอนทราย (Silty sand, SM)

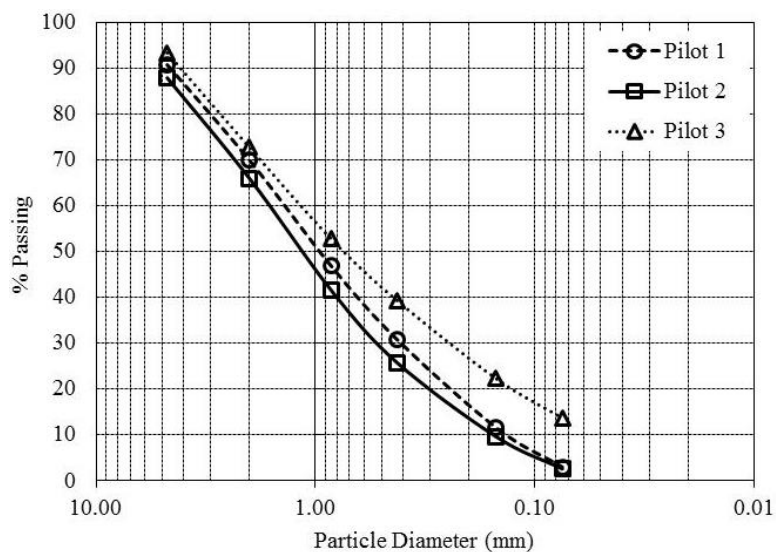
ดินถมของแปลงสาธิตทั้งสามได้ถูกนำมาทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการและทดสอบความหนาแน่นในสนาม ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 5.5 ความหนาแน่นสูงสุดของดินถมแปลงที่ 1 และ 2 เท่ากับ 1.829 g/cm^3 และสำหรับดินถมแปลงที่ 3 มีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.783 g/cm^3 ตามลำดับ หลังจากการบดอัดความหนาแน่นของดินในแปลงสาธิตที่ 1 มีเท่ากับ 1.736 g/cm^3 มากกว่าความหนาแน่นในสนามของแปลงสาธิตที่ 2 และ 3 ที่มีค่าเท่ากับ 1.481 และ 1.435 g/cm^3 ตามลำดับ ผลการทดสอบทั้งสองได้นำมาคำนวณค่า ระดับการบดอัดดิน (Percent of compaction) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับการบดอัดดินในสนามขณะก่อสร้าง ผลการทดสอบพบว่า แปลงสาธิตทั้งสามมีระดับการบดอัดดินในช่วง 80.49-94.89 %

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบการบดอัดดินและความหนาแน่นในสนาม

Pilot site	Soil type	Compaction test		Field density test		Percent of compaction (%)
		Opt. water content (%)	Maximum dry density (g/cm^3)	Water content (%)	Dry density (g/cm^3)	
1	SW	16.50*	1.829*	12.92	1.736	94.89
2	SW	16.50*	1.829*	13.72	1.481	80.94
3	SM	17.00	1.783	14.41	1.435	80.48

* Pilot 1 และ 2 ใช้ตัวอย่างเดียวกัน

จากการทดสอบคุณสมบัติของดินทั้งหมดพบว่า คุณสมบัติของดินถมและผลการทดสอบความหนาแน่นในสนามของแปลงสาธิตในครั้งนี้ยังไม่ผ่านมาตรฐานของวัสดุในการทำงานดินของกรมชลประทานและมาตรฐานของกรมชลประทาน ว่าด้วยเรื่องเกณฑ์กำหนดในการบดอัดแน่นของดินตามลำดับ อย่างไรก็ตาม วัสดุที่คัดเลือกที่ตรงตามมาตรฐานของกรมชลประทานนั้น มีราคาสูง อีกทั้งการบดอัดดินขณะก่อสร้าง ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะ ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงเป็นอย่างมาก การศึกษาการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งครั้งนี้จึงได้เน้นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เนื่องจากมีงบประมาณจำกัด ซึ่งในการดำเนินงานก่อสร้าง ได้ใช้รถแบ็คโฮในการบดอัดดินแทนที่รถบดแบบมาตรฐาน ดังนั้น การควบคุมคุณภาพของการก่อสร้างแปลงสาธิตอาจจะลดน้อยลงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

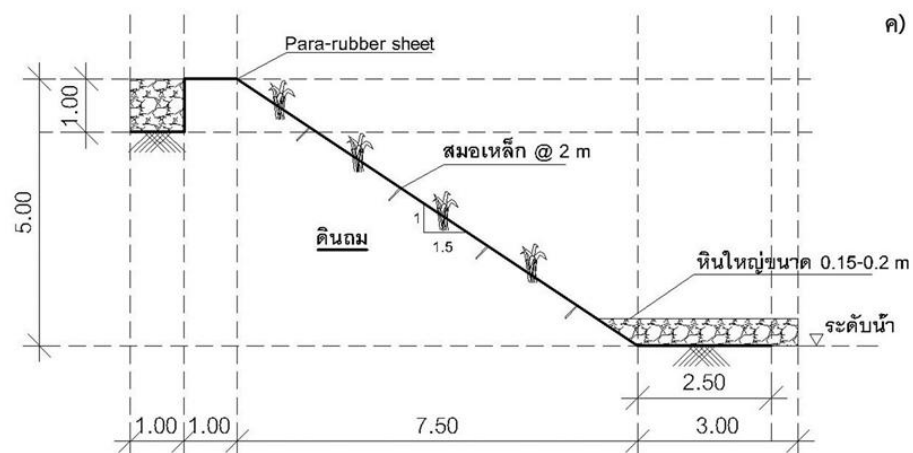
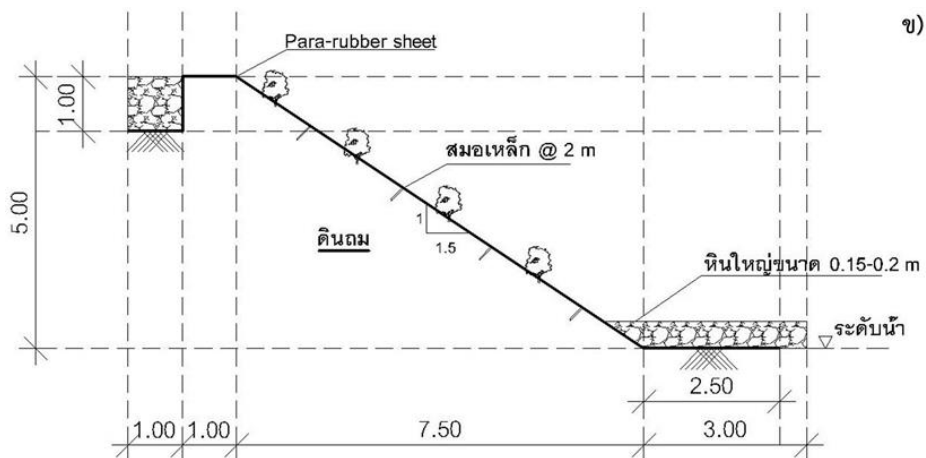
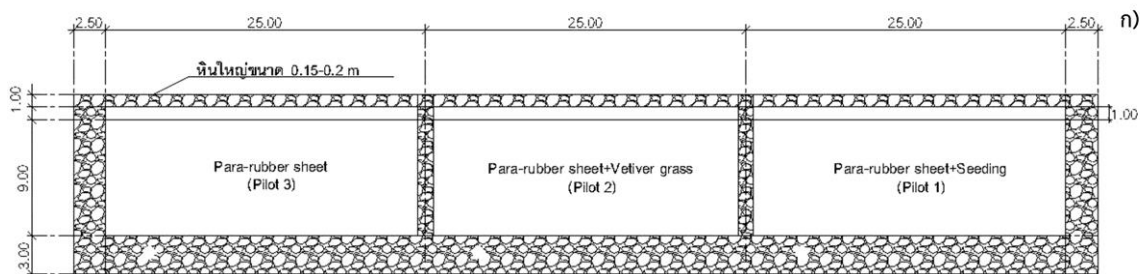


รูปที่ 5.12 การกระจายตัวของดินถมที่ใช้ในการก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งทั้ง 3 แปลง

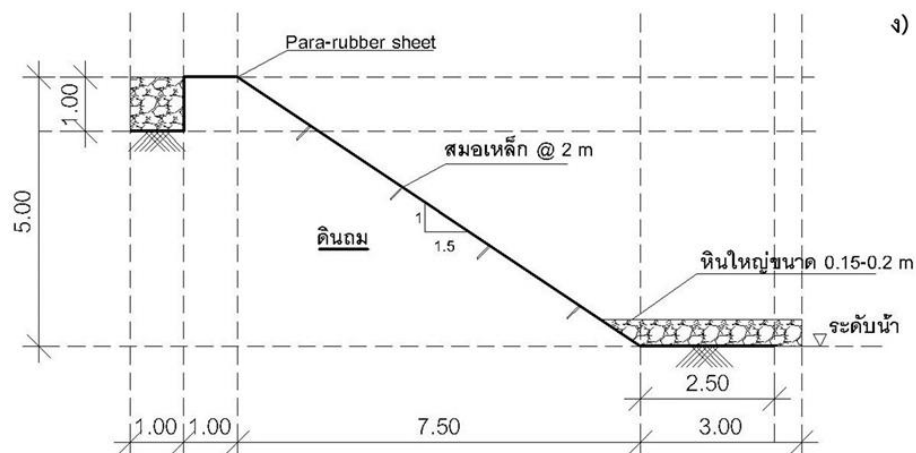
5.3.3 รูปแบบการปรับปรุงตลิ่งป้องกันการกัดเซาะ

การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แผ่นยางพาราในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่ง โดยวิธีการในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งคลองอยู่ตะเภาในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ประกอบไปด้วย แปลงสาธิตที่ 1 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับการปลูกพืช (Para-rubber sheet+ Seeding) แปลงสาธิตที่ 2 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับหญ้าแฝก (Para-rubber sheet + Vetiver grass) และแปลงสาธิตที่ 3 การใช้ยางพาราอย่างเดียว (Para-rubber sheet only) ดังแสดงในรูปที่ 5.13

การก่อสร้างการปรับปรุงตลิ่งทั้งสามวิธีมีลักษณะคล้ายกันคือ แต่ละแปลงมีความยาวเท่ากับ 25 เมตร การถมดินเพื่อปรับระดับและปรับความลาดชันของตลิ่งให้เท่ากันตลอดแนวตลิ่ง โดยตลิ่งมีจะความสูงเท่ากับ 5.00 เมตรจากตีนตลิ่ง และมีความกว้างเท่ากับ 7.5 เมตร มีการปูแผ่นยางพาราเพื่อป้องกันการกัดเซาะทั้ง 3 แปลง พร้อมทั้งเรียงหินขนาด 15-20 เซนติเมตร บริเวณแนวตีนตลิ่งเป็นระยะ 3.00 เมตร และสำหรับบริเวณบนตลิ่งได้มีการขุดร่องเพื่อฝังแผ่นยางพาราขนาด 1 x 1 ตารางเมตร (กว้าง x ลึก) โดยใช้ในการเรียงหินทับแผ่นยางพารา บริเวณทางเข้าและทางออกแปลงสาธิตจะทำการเรียงหินเป็นระยะทาง 2.50 เมตรตามแนวตลิ่ง ทั้งนี้การถมหินบริเวณต่างๆ จะช่วยในการยึดแผ่นยางเพื่อป้องกันการลอยตัว วิธีการปรับปรุงตลิ่งโดยใช้การปลูกหญ้าแฝกและการปลูกพืชร่วม ทำการปลูกเป็นทุกระยะ 2.40 และ 2.00 เมตรตามแนวยาวของตลิ่งและแนวลาดชันของตลิ่ง ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 แบบแปลนวิธีการปรับปรุงตลิ่งป้องกันการกัดเซาะคลองอุต๊ะเกา ก) Top view แสดงการวางตำแหน่งแปลงสาธิตทั้ง 3 แปลง ข) แปลงที่ 1 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + seeding ค) แปลงที่ 2 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + vetiver grass ง) แปลงที่ 3 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet



รูปที่ 5.13 (ต่อ) แบบแปลนวิธีการปรับปรุงตลิ่งป้องกันการกัดเซาะคลองอุตะเภา ก) Top view แสดงการวางตำแหน่งแปลงสาธิตทั้ง 3 แปลง ข) แปลงที่ 1 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + seeding ค) แปลงที่ 2 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet + vetiver grass ง) แปลงที่ 3 วิธีการปรับปรุงแบบ Para-rubber sheet

5.3.4 คุณสมบัติของแผ่นยางป้องกันการกัดเซาะ

แผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งผลิตจากน้ำยางสดซึ่งใช้เทคโนโลยีน้ำยางในการขึ้นรูปให้เป็นแผ่นยางสำเร็จรูป ขนาด $1.4 \times 15 \text{ m}^2$ (กว้างxยาว) โดยการขึ้นรูปเป็นชั้นๆ รูปที่ 5.14 แสดงรายละเอียดของชั้นแผ่นยางสำเร็จรูป โดยแผ่นยางจะมีความหนาประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยชั้นยาง (สีดำ) และชั้นผ้าดิบ (สีเทา) สลับกัน ในส่วนของชั้นยางแบ่งออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วยชั้นนอกของแผ่นยางและชั้นระหว่างผ้าดิบชั้นละ 2 ชั้น โดยใช้ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ (TSC=50%) เท่ากับ 0.9 และ 0.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ สำหรับชั้นผ้าดิบเป็นตัวเสริมความแข็งแรงของแผ่นยาง ซึ่งได้ใช้ผ้าดิบขนาด 15 ปอนด์ จำนวน 3 แผ่นแทรกอยู่ระหว่างชั้นยาง



รูปที่ 5.14 ภาพตัดตามขวางของแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะในการศึกษาครั้งนี้ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่างแผ่นยางที่เคลือบด้วยผ้า 3 ชั้น จำนวน 5 ชิ้น ความหนาของชิ้นทดสอบ ประมาณ 2.4 ± 0.1 มิลลิเมตร การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ (Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement, ASTM D792) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tension test,

ASTM D412) ความสามารถในการยืดจนขาด (Tensile Set, Elastomers, ASTM D412) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength, ASTM D624) ความต้านทานต่อการเจาะทะลุ (Tear Resistance, ASTM D1004) รวมทั้งการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นตัวอย่างของแผ่นยางป้องกันการกัดเซาะ

สมบัติของแผ่นยาง	ผลการทดสอบ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะ	0.97±0.13	
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	38.6±3.7	ASTM D412
ความสามารถในการยืดจนขาด (%)	42±7	ASTM D412
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (N/mm)	115±6	ASTM D624
ความต้านทานต่อการเจาะทะลุ (N)	220±12	ASTM D1004
การเปลี่ยนแปลงของสมบัติ ภายหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน		
- ความต้านทานต่อแรงดึง (%)	-16	
- ความสามารถในการยืดจนขาด (%)	-22	
- ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ	สีซีดลงเล็กน้อย ไม่พบรอยแตก	
การเปลี่ยนแปลงของแผ่นยาง ภายหลังจากการบ่มแรงในบรรยากาศของไอโซนที่ 50 pphm เป็นเวลา 30 วัน	ไม่พบรอยแตก	

5.4 การก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ

การศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพในครั้งนี้ได้ทำการก่อสร้างแปลงสาธิตทั้ง 3 วิธี แผนการดำเนินการก่อสร้างได้แสดงในตารางที่ 5.7 และขั้นตอนการก่อสร้างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 ขั้นตอนการก่อสร้างแปลงสาธิต

ในส่วนของกระบวนการก่อสร้างแปลงสาธิตสำหรับการป้องกันการกัดเซาะระดับตลิ่ง ขั้นตอนการก่อสร้างได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ตามระดับความสูงของตลิ่งเพื่อความสะดวกในการใช้เครื่องจักรและความรวดเร็วสำหรับการก่อสร้าง โดยขั้นตอนการก่อสร้างประกอบด้วย ช่วงแรกเป็นการก่อสร้าง(ชั้นล่าง) ในระดับความสูง 0.00-2.50 เมตร และช่วงที่สอง (ชั้นบน) ที่ระดับความสูง 2.50-5.00 เมตร โดยมีขั้นตอนการก่อสร้างอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.7 ระยะเวลาในการก่อสร้างแปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งคลองอุตะเถา

การดำเนินงาน	Sep-58										Oct-58																			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. ปรับสภาพพื้นที่บน-ล่างตลิ่ง	■	■	■	■																										
2. ทำการปักหินและดินบริเวณพื้นที่ตลิ่ง					■	■	■	■	■	■	■	■																		
3. ถมดินและปรับความชันของตลิ่งช่วงชั้นล่าง											■	■	■	■																
4. ปูแผ่นยางพร้อมเรียงหินบริเวณตลิ่ง															■	■	■	■												
5. ถมดินและปรับความชันของตลิ่งช่วงชั้นบน																	■	■	■	■	■	■	■							
6. ปูแผ่นยางพร้อมเรียงหินบนตลิ่ง																						■	■	■	■	■				
7. ปลูกหญ้าแฝกและต้นไม้																											■	■		
8. สำรองหนุดติดตามการกัดเซาะ																													■	■

1) ทำการปรับสภาพพื้นที่บนตลิ่งโดยการถางป่า เคลื่อนย้ายต้นไม้ที่ล้มและตายออก (รูปที่ 5.15 ก) รวมทั้งจัดพื้นที่พื้กวัชพื้ก่อสร้างเช่น หินและดินถม เพื่อรอดำเนินการก่อสร้าง ในการดำเนินการก่อสร้างได้เริ่มจากการสำรวจระดับของตลิ่งเพื่อใช้ระดับจากดินตลิ่งถึงขอบบนตลิ่ง (รูปที่ 5.15ข) จากนั้นทำการเปิดการก่อสร้างโดยการขุดตลิ่งเพื่อสร้างทางลงไปยังบริเวณดินตลิ่งและสร้างทางเดินของเครื่องจักรบริเวณดินตลิ่ง



รูปที่ 5.15 การปรับพื้นที่เพื่อเตรียมการก่อสร้าง ก) การกำจัดวัชพื้และปรับพื้นที่ ข) การวัดระดับด้วยกล้องสำรวจ

2. ทำการปรับพื้นที่บริเวณตลิ่ง (รูปที่ 5.16ก) และเปิดแนวตลิ่งพร้อมทั้งวัดระยะตามแนวยาวของตลิ่งเพื่อคำนวณปริมาณดินถมและหินที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยระดับดินตลิ่ง (+0.00 เมตร) ที่ใช้ในการก่อสร้างอยู่เหนือระดับน้ำประมาณ 10 เซนติเมตร (รูปที่ 5.16ข) ทั้งนี้ผู้ร่วมดำเนินการทั้งสามฝ่ายประกอบด้วย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โครงการก่อสร้างสำนักชลประทานและบริษัท มหาชัยขนส่งภาคใต้ จำกัด (เจ้าของที่ดิน) ได้มีการวางแผนก่อสร้างร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.16(ค)



รูปที่ 5.16 การเปิดพื้นที่แนวตลิ่งที่ทำการปรับปรุง ก) การเคลียพื้นที่บริเวณตลิ่ง ข) แนวตลิ่งหลังจากการปรับปรุงพื้นที่แล้ว ค) คณะผู้ร่วมดำเนินการก่อสร้างการปรับปรุงตลิ่ง

3. การก่อสร้างแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยแบ่งตามระดับความสูง 2.50 เมตร เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักร ทำการถมดินและบดอัดดินชั้นละ 1.25 เมตรจนถึงระดับ 2.50 เมตร หลังจากนั้น ทำการปรับความชันของตลิ่งตามที่ได้ออกแบบไว้ ในขณะที่เดียวกันได้มีการเตรียมแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะมาวางไว้บริเวณบนขอบตลิ่งในแต่ละตำแหน่งเพื่อความสะดวกในการติดตั้งในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.17(ข)

4. เมื่อสิ้นสุดการปรับระดับชั้นดินถึงระดับ 2.50 เมตร เริ่มต้นการปูยางโดยการขุดร่องบริเวณทางเข้า-ทางออกพื้นที่การปรับปรุงตลิ่ง (รูป 5.18ก) ทั้งนี้ แนวร่องมีขนาดความกว้าง 2.50 ลึก 1.00 เมตร อยู่บริเวณทางเข้าและทางออกของแปลงสาธิต ใช้รถแบ็คโฮยกแผ่นยาง (รูปที่ 5.18ข) ช่วยในการปูแผ่นยาง โดยเริ่มต้นจากจุดทางออกของแปลงสาธิต (บริเวณปลายน้ำของแปลงที่ 1) ทำการปูแผ่นยางห่างจากตลิ่งเป็นระยะ 2.50 เมตรขึ้นไปพักบริเวณบนขอบตลิ่งที่ระดับ +2.50 เมตร บริเวณรอยต่อของแผ่นยางได้ทำการทากาวยางพิเศษ (รูปที่ 5.18ค) เพื่อยึดและวางแนวแผ่นยางให้เป็นระเบียบ ตามด้วยการเรียงหินทับแผ่นยางบริเวณตลิ่งเพื่อป้องกันไม่ให้แนวแผ่นยางเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการปูในระดับต่อไป หลังจากนั้น ทำการม้วนแผ่นยางไปพักไว้บริเวณตลิ่งก่อนทำการถมดินในขั้นต่อไป (รูปที่ 5.18ง)



รูปที่ 5.17 การถมดินเพื่อปรับระดับของตลิ่งในชั้นล่าง ก) แนวตลิ่งก่อนเริ่มทำการถมดินปรับระดับ ข) แนวตลิ่งหลังจากการถมดินปรับระดับจากตีนตลิ่งถึงระดับความสูง 2.5 เมตร



รูปที่ 5.18 การก่อสร้างแปลงสาธิตในช่วงระดับตีนตลิ่งถึงระดับ +2.50 เมตร ก) ร่องทางเข้า-ออกแปลงสาธิต ข) การเคลื่อนย้ายแผ่นยางเพื่อปูตลิ่ง ค) การทากาวยางบริเวณรอยต่อ ง) แนวตลิ่งหลังจากการปูยางและเรียงหินแล้ว

5. การก่อสร้างในช่วงระดับ 2.50-5.00 เมตร ต้องทำการม้วนแผ่นยางลงเก็บบริเวณตีนตลิ่ง เนื่องจากต้องทำการถมดินเพิ่มระดับจนถึงขอบบนของตลิ่งที่ระดับ 5.00 เมตร ซึ่งการถมดินและการบดอัดดินในชั้นนี้มีการดำเนินการเหมือนกับการถมดินในชั้นก่อนหน้า เมื่อทำการถมดินและปรับความชัน

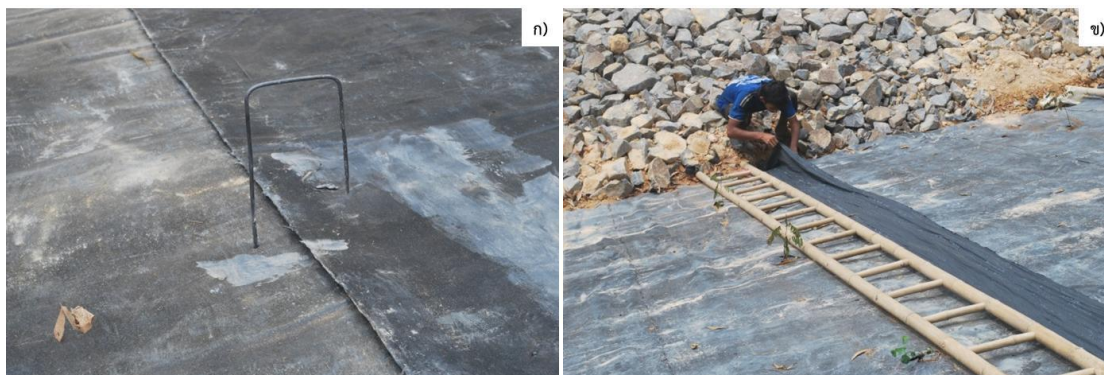
ของตลิ่งจนถึงระดับ +5.00 เมตร (รูปที่ 5.19ข) จากนั้น ทำการขุดร่อง (Trench) ขนาดความกว้าง 1.00 เมตร ลึก 1.00 เมตรและยาว 80 เมตรตลอดแนวตลิ่ง พร้อมทั้งคลี่แผ่นยางขึ้นบนตลิ่งเพื่อฝังแผ่นยางและเรียงหินทับแผ่นยางทั้งบริเวณตีนตลิ่งและบริเวณร่องบนตลิ่งที่ได้ทำการขุดไว้ (รูปที่ 5.19ค)



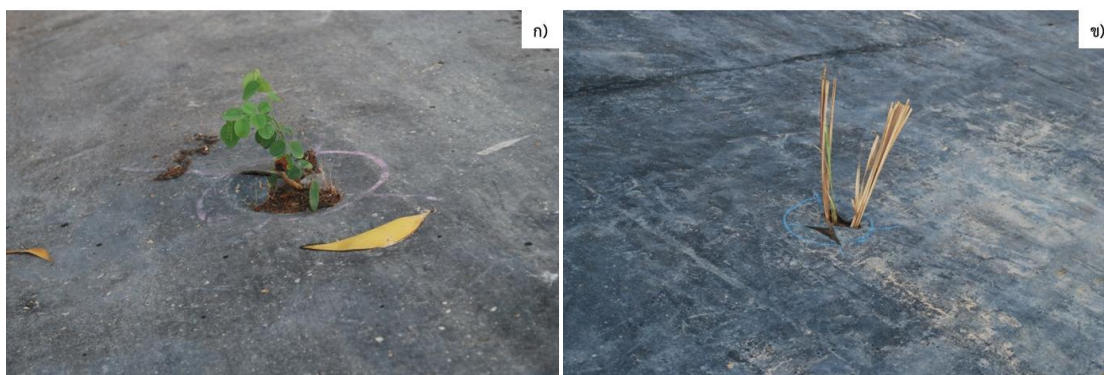
รูปที่ 5.19 การก่อสร้างแปลงสาธิตในช่วงระดับ 2.50-5.00 เมตร ก) การถมดินปรับระดับตลิ่งถึงระดับ 5.0 เมตร ข) แนวตลิ่งหลังจากปรับความชัน ค) การขุดร่องฝังแผ่นยางและเรียงหินบนตลิ่ง

6. เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวแยกออกจากกันของแผ่นยาง ได้มีการป้องกันโดยการฝังสมอเหล็ก (รูปที่ 5.20ก) และทากาวยางพิเศษเพื่อยึดแผ่นยางและปิดทับรอยต่อด้วยผ้าเคลือบด้วยน้ำยางผสม (รูปที่ 5.20ข) ทั้งนี้ การปิดรอยต่อด้วยผ้าเคลือบน้ำยางผสม จะช่วยปิดช่องว่างระหว่างรอยต่อและยังช่วยยึดติดแผ่นยางเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำฝนเข้าสู่บริเวณผิวหน้าของตลิ่ง

7. เมื่อเสร็จสิ้นการปูยาง ได้ทำการกำหนดจุดบนแผ่นยางเพื่อการปลูกพืช ซึ่งตำแหน่งบนแผ่นยางมีลักษณะที่เป็น grid โดยมีระยะห่างระหว่างจุดในแต่ละตำแหน่งตามแนวยาวและแนวเอียงของตลิ่งเท่ากับ 2.4 และ 2 เมตรตามลำดับ ทำการเจาะรูตามตำแหน่งบน grid เพื่อทำการปลูกพืชของแปลงสาธิตที่ 1 และ 2 โดยแปลงสาธิตที่ 3 ไม่มีการปลูกพืช ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ต้นไม้ 2 ชนิดประกอบด้วย 1) ต้นขี้เหล็ก 2) ต้นพยูง (รูปที่ 5.21ก) ปลูกตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในแปลงที่ 1 และปลูกหญ้าแฝกในบริเวณแปลงสาธิตที่ 2 (รูปที่ 5.21ข)



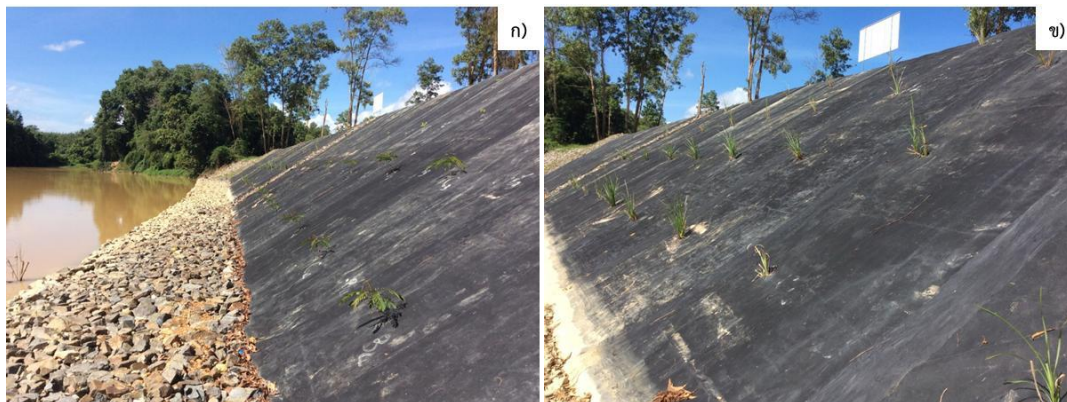
รูปที่ 5.20 การเก็บรอยต่อระหว่างแผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะ ก) สมอยึดแผ่นยาง ข) การปิดทับรอยต่อของแผ่นยางด้วยผ้าชุบน้ำยางผสม



รูปที่ 5.21 การปลูกพืชหน้าตลิ่ง ก) ต้นพุงของแปลงสาธิตที่ 1 ข) หญ้าแฝกของแปลงสาธิตที่ 2

5.4.2 ผลการก่อสร้างการปรับปรุงตลิ่ง

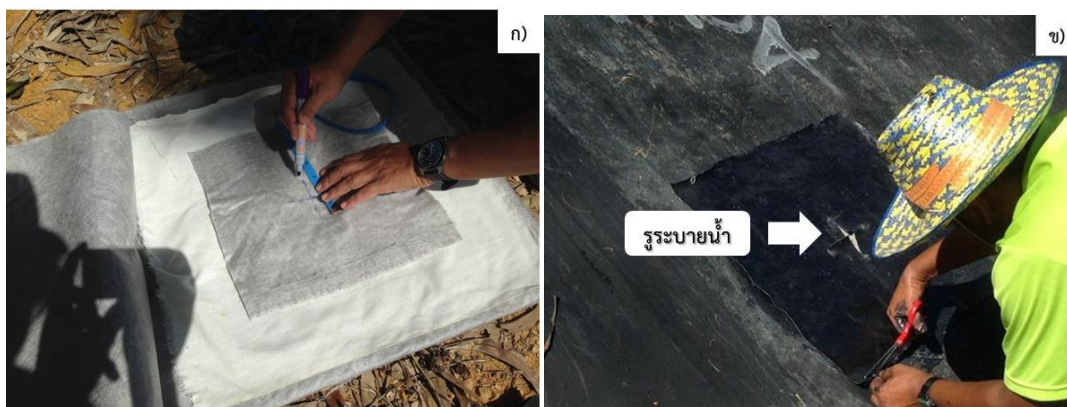
การสำรวจลักษณะทั่วไปของตลิ่งหลังจากการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งได้ใช้การตรวจพินิจ (Visual inspection) ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตลิ่งตลอด 10 เดือนซึ่งครอบคลุมตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558 – เดือนสิงหาคม 2559 จากการสำรวจพบว่า ระยะเวลาผ่านไป 2 เดือน แปลงสาธิตที่ได้ทำการปูแผ่นยางพาราพร้อมกับการปลูกพื้นไม้ยืนต้นมีการเจริญเติบโตของพืชเล็กน้อยและแปลงสาธิตไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตเห็นได้ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ในขณะที่แปลงที่ได้ทำการปลูกหญ้าแฝก หญ้าแฝกได้มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 5.22ข) แปลงสาธิตในบริเวณนี้มีการทรุดตัวที่ขอบตลิ่งประมาณ 7 เซนติเมตร อย่างสังเกตเห็นได้ เป็นผลมาจากการเซตตัวของดินถมหลังฝนตกในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2558 ปริมาณน้ำฝนรวมในเดือนนี้เท่ากับ 331.20 มิลลิเมตร (สถานีอุตุนิยมวิทยาสงขลา กลุ่มงานอากาศเกษตรคอหงส์)



รูปที่ 5.22 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 1 เดือน (พฤศจิกายน 2558) ก) แปลงที่มีการปูแผ่นยางและปลูกพืชขึ้นต้น ข) แปลงที่มีการปูแผ่นยางและปลูกหญ้าแฝก

สำหรับแปลงสาธิตที่ทำการปูแผ่นอย่างเพียงอย่างเดียวยังคงมีสภาพที่ดี ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการตรวจพินิจอย่างละเอียดพบว่า บริเวณตีนตลิ่งของแปลงนี้มีการซังของน้ำ เนื่องจากไม่ได้ทำการเจาะรูเพื่อระบายน้ำ ดังนั้น จึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยการเจาะรูและติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพิ่มเติมในบริเวณด้านล่างสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร เพื่อช่วยในการระบายน้ำดังแสดงในรูปที่ 5.23

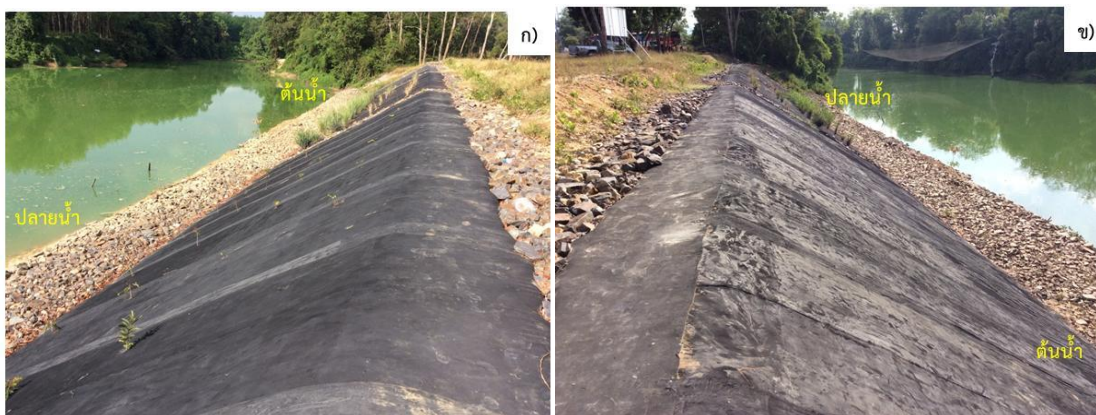
รูปที่ 5.24-5.27 แสดงลักษณะทั่วไปของแปลงสาธิตการปรับปรุงเสถียรภาพของตลิ่งหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์ตามระยะเวลาต่างๆ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2558 ถึงเดือนกันยายน 2559 ผลการตรวจพินิจพบว่าแปลงสาธิตทั้งสามมีสภาพที่สมบูรณ์ ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับตลิ่งและแผ่นยางพารา ป้องกันตลิ่งตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการสำรวจ พืชที่ทำการปลูกสามารถเจริญเติบโต โดยเฉพาะหญ้าแฝก มีการแตกหน่อและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แผ่นยางพาราทำหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างน้ำและดินในขณะฝนตกได้ดี ทำให้ไม่มีการกัดเซาะและไม่มีการสูญเสียเสถียรภาพของตลิ่ง



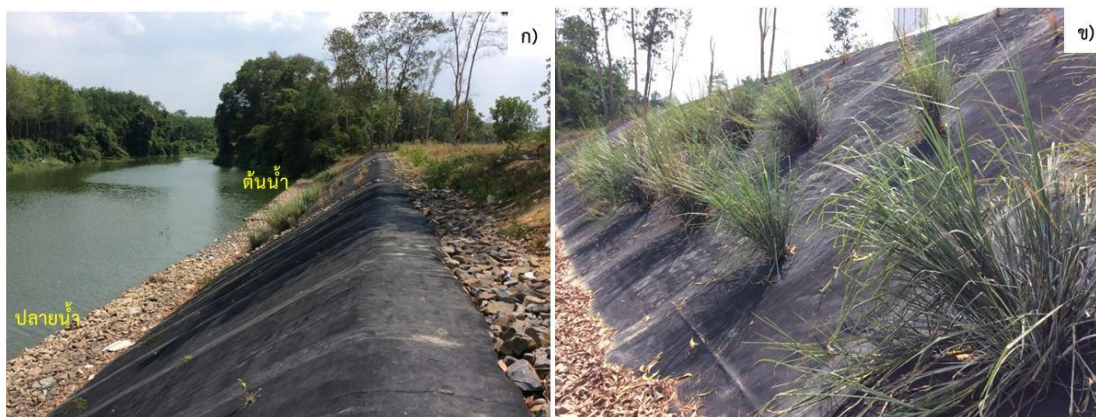
รูปที่ 5.23 การติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์บริเวณตีนตลิ่ง ก) แผ่นใยสังเคราะห์ ข) การปิดแผ่นใยสังเคราะห์ด้วยผ้าชุบน้ำอย่างผสม



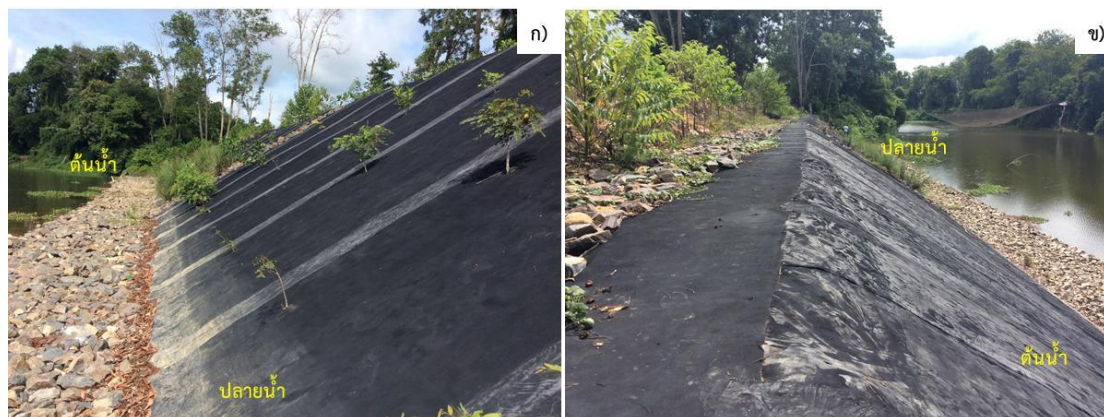
รูปที่ 5.24 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 3 เดือน (มกราคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ



รูปที่ 5.25 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 5 เดือน (มีนาคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ



รูปที่ 5.26 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 6 เดือน (เมษายน 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) หญ้าแฝกบริเวณแปลงที่ 2



รูปที่ 5.27 ลักษณะของแปลงสาธิตหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 10 เดือน (สิงหาคม 2559) ก) มองจากปลายน้ำ ข) มองจากต้นน้ำ

5.5 การติดตามประสิทธิภาพของแปลงสาธิต

ประสิทธิภาพของแปลงสาธิตสามารถประเมินได้จากการติดตามการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของตลิ่งหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์ โดยการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะ (Erosion pin) ตามระยะเวลาที่กำหนด ตลอดระยะเวลาทั้งหมด 10 เดือน ตำแหน่งของหมุดติดตามในแต่ละครั้งของการสำรวจถูกนำมาเปรียบเทียบของตำแหน่งเดียวกันกับผลการสำรวจในครั้งแรก (หลังจากการก่อสร้าง) เพื่อคำนวณการเคลื่อนตัวของตลิ่งเทียบกับการตรวจวัดครั้งแรก รายละเอียดในการติดตามและผลการติดตามการเคลื่อนตัวของตลิ่งได้แสดงดังต่อไปนี้

5.5.1 การสำรวจเพื่อติดตามการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของตลิ่ง

การติดตามและประเมินผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงตลิ่งโดยสร้างแปลงสาธิตในครั้งนี้ได้ทำการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะ (Erosion pins) บริเวณตำแหน่งที่ได้ทำการปลูกพืชและหญ้าแฝกเพื่อทำการวัดการเคลื่อนตัวของดินริมตลิ่งโดยใช้กล้อง Total station ในส่วนบริเวณแปลงสาธิตที่ไม่ได้ทำการปลูกพืช ได้ทำการสำรวจในตำแหน่งที่ได้มีการทำสัญลักษณ์ไว้บนผิวของแผ่นยางพารา

ในการสำรวจได้ทำการกำหนดหมุดอ้างอิง (Bench mark, BM) 2 จุด (รูปที่ 5.28ก) บริเวณพื้นที่คอนกรีตบนตลิ่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่หมุดอ้างอิงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ หมุด BM ทั้งสองนี้ได้ถูกคำนวณตำแหน่งตามระบบพิกัดยูทีเอ็ม (UTM coordinate systems) และกำหนดค่าระดับความสูง การติดตามการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของตลิ่งที่ทำการปรับปรุง ทำได้โดยการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะที่ได้ทำการติดตั้งบริเวณตำแหน่งที่ปลูกพืชหน้าตลิ่ง (แปลงสาธิตที่ 1 และ 2) และตำแหน่งที่ทำสัญลักษณ์ไว้ (แปลงสาธิตที่ 3) ดังแสดงในรูปที่ 5.28(ข) และถ่ายพิกัดจากหมุดอ้างอิงมายังตำแหน่งของหมุดติดตามทั้งหมด พิกัดของหมุดติดตามที่ได้เป็นระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (X, Y, Z) ผลการสำรวจหมุดติดตามในแต่ละ

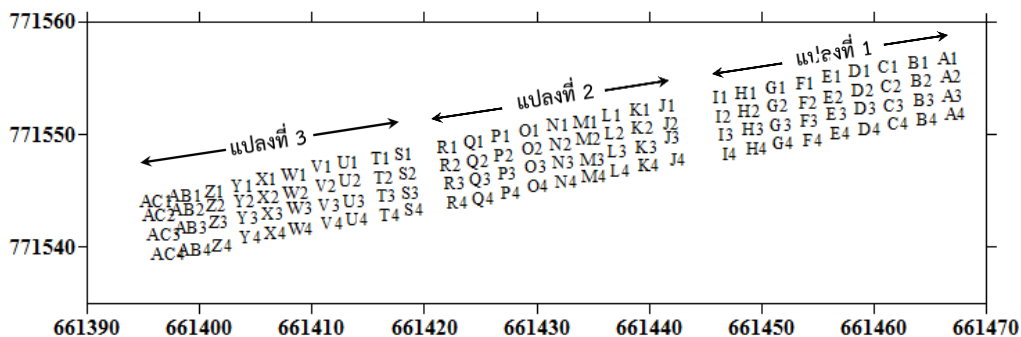
ครั้งถูกนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งของหมุดติดตามในการสำรวจในครั้งแรก (หลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้ว)

5.5.2 ผลการติดตามการกัดเซาะของตลิ่ง

สำหรับหมุดติดตามการกัดเซาะ (Erosion pin) ได้ถูกสำรวจหลังจากการก่อสร้างแปลงสาธิต โดยได้ทำการสำรวจรวม 5 ครั้ง มีระยะเวลาห่างกันประมาณ 2-4 เดือนตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558 ถึงเดือนสิงหาคม 2559 การสำรวจได้พิจารณาการกัดเซาะและการทรุดตัว โดยทำการคำนวณพิกัดในระบบพิกัดฉาก (X, Y, Z) และการเคลื่อนตัวลัพธ์ ($R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการสำรวจในครั้งแรกหลังจากการปรับปรุงตลิ่งเสร็จสมบูรณ์ ผลการสำรวจในครั้งแรกสามารถคำนวณตำแหน่งการเรียงตัวของหมุดทั้งสามแปลงสาธิตได้แสดงในรูปที่ 5.29 โดยแปลงที่ 1-3 ประกอบด้วยหมุด A-J J-R และ S-AC ตามลำดับ ผลการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะและตำแหน่งที่สอดคล้องกันในครั้งต่อไปจะสามารถคำนวณระยะการเคลื่อนตัวของหมุดได้ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับตำแหน่งของหมุดในครั้งแรก ซึ่งผลการคำนวณระยะการเคลื่อนตัวของหมุดติดตามได้แสดงในตารางที่ 5.8 มีรายละเอียดในแต่ละแปลงสาธิตทั้ง 3 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.28 การสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะด้วยกล้อง Total station ก) ถ่ายระดับจากจุดอ้างอิง BM1 ข) Grid ของตำแหน่งหมุดติดตามการกัดเซาะ



รูปที่ 5.29 ตำแหน่งของหมุดติดตามการกัดเซาะของแปลงสาธิตทั้งสาม

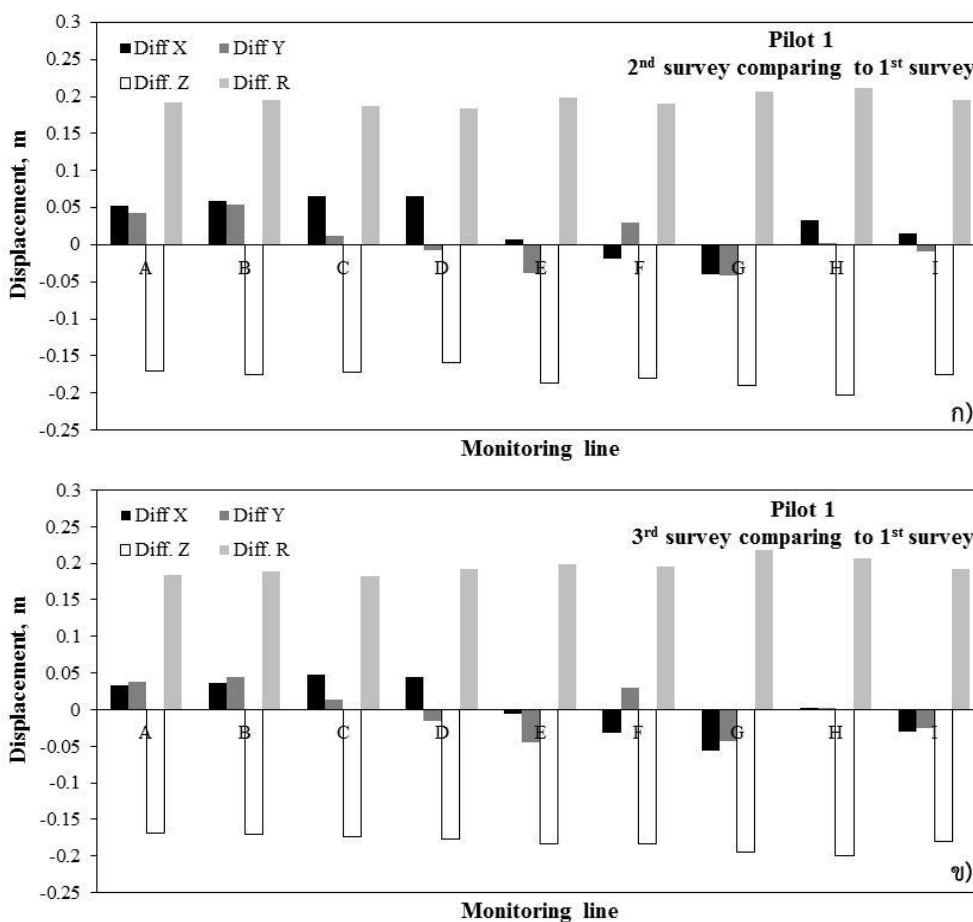
ตารางที่ 5.8 ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของความแตกต่างของตำแหน่งหมุดเทียบ กับผลการสำรวจครั้งแรก

Pilot No.	Date	Diff. X (m)		Diff. Y (m)		Diff. Z (m)		Diff. R (m)	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1	1 st Survey – 10/10/2558	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 nd Survey – 21/11/2558	0.027	0.055	0.005	0.051	-0.179	0.020	0.196	0.021
	3 rd Survey – 14/01/2559	0.004	0.053	0.000	0.052	-0.181	0.022	0.195	0.021
	4 th Survey – 18/04/2559	0.001	0.054	0.004	0.050	-0.185	0.023	0.199	0.024
	5 th Survey – 26/08/2559	-0.033	0.060	0.049	0.052	-0.079	0.019	0.145	0.051
2	1 st Survey – 10/10/2558	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 nd Survey – 21/11/2558	0.036	0.039	-0.061	0.076	-0.195	0.023	0.218	0.057
	3 rd Survey – 14/01/2559	0.008	0.038	-0.058	0.078	-0.198	0.025	0.218	0.056
	4 th Survey – 18/04/2559	0.009	0.059	-0.057	0.082	-0.212	0.026	0.235	0.062
	5 th Survey – 26/08/2559	-0.042	0.041	-0.005	0.119	-0.178	0.043	0.210	0.083
3	1 st Survey – 10/10/2558	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 nd Survey – 21/11/2558	0.055	0.055	-0.063	0.051	-0.164	0.071	0.204	0.042
	3 rd Survey – 14/01/2559	0.036	0.054	-0.080	0.042	-0.187	0.053	0.218	0.050
	4 th Survey – 18/04/2559	0.113	0.174	-0.138	0.167	-0.257	0.102	0.371	0.166
	5 th Survey – 26/08/2559	0.015	0.144	0.054	0.138	-0.165	0.078	0.262	0.083

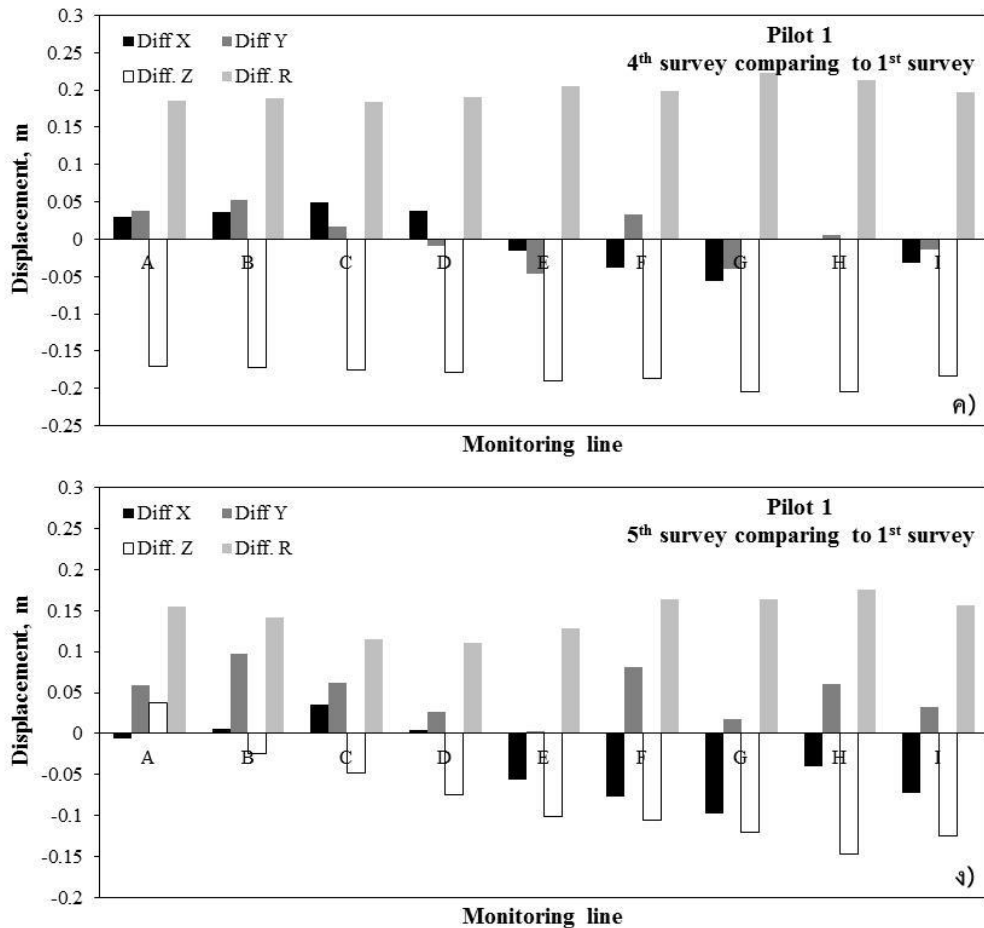
*หมายเหตุ +Diff. X คือการเคลื่อนตัวในทิศตะวันออกของระนาบ X, Y
 -Diff. X คือการเคลื่อนตัวในทิศตะวันตกของระนาบ X, Y
 +Diff. Y คือการเคลื่อนตัวในทิศเหนือของระนาบ X, Y
 -Diff. Y คือการเคลื่อนตัวในทิศใต้ของระนาบ X, Y
 +Diff. Z คือการยกตัวในแนวตั้ง
 -Diff. Z คือการทรุดตัวในแนวตั้ง

5.5.2.1 แปลงสาริตที่มีการปูแผ่นยางควบคู่กับการปลูกพืชยืนต้น (แปลงที่ 1)

แปลงสาริตแปลงนี้ได้ทำการติดตั้งหมุดติดตามการกัดเซาะ ณ ตำแหน่งที่มีการปลูกพืชในแนวการติดตาม (Monitoring line) A-I ผลการสำรวจได้แสดงในรูปที่ 5.30 พบว่า ตำแหน่งของหมุดมีการเปลี่ยนแปลง โดยหมุดมีการทรุดตัวเฉลี่ย (Diff Z) เท่ากับ -0.179 -0.181 -0.185 และ -0.079 เมตร สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 ตามลำดับ ในขณะที่หมุดมีการเคลื่อนตัวในระนาบ X-Y โดยมีทิศทางการเคลื่อนตัวที่สอดคล้องกัน (Diff X และ Diff Y) ในแต่ละหมุดตลอดช่วงระยะเวลาของการสำรวจ ระยะเคลื่อนตัวลัพธ์เฉลี่ย (Diff R) เมื่อเทียบกับการสำรวจในครั้งแรกเท่ากับ 0.196 0.195 0.199 และ 0.145 เมตร สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 ตามลำดับ



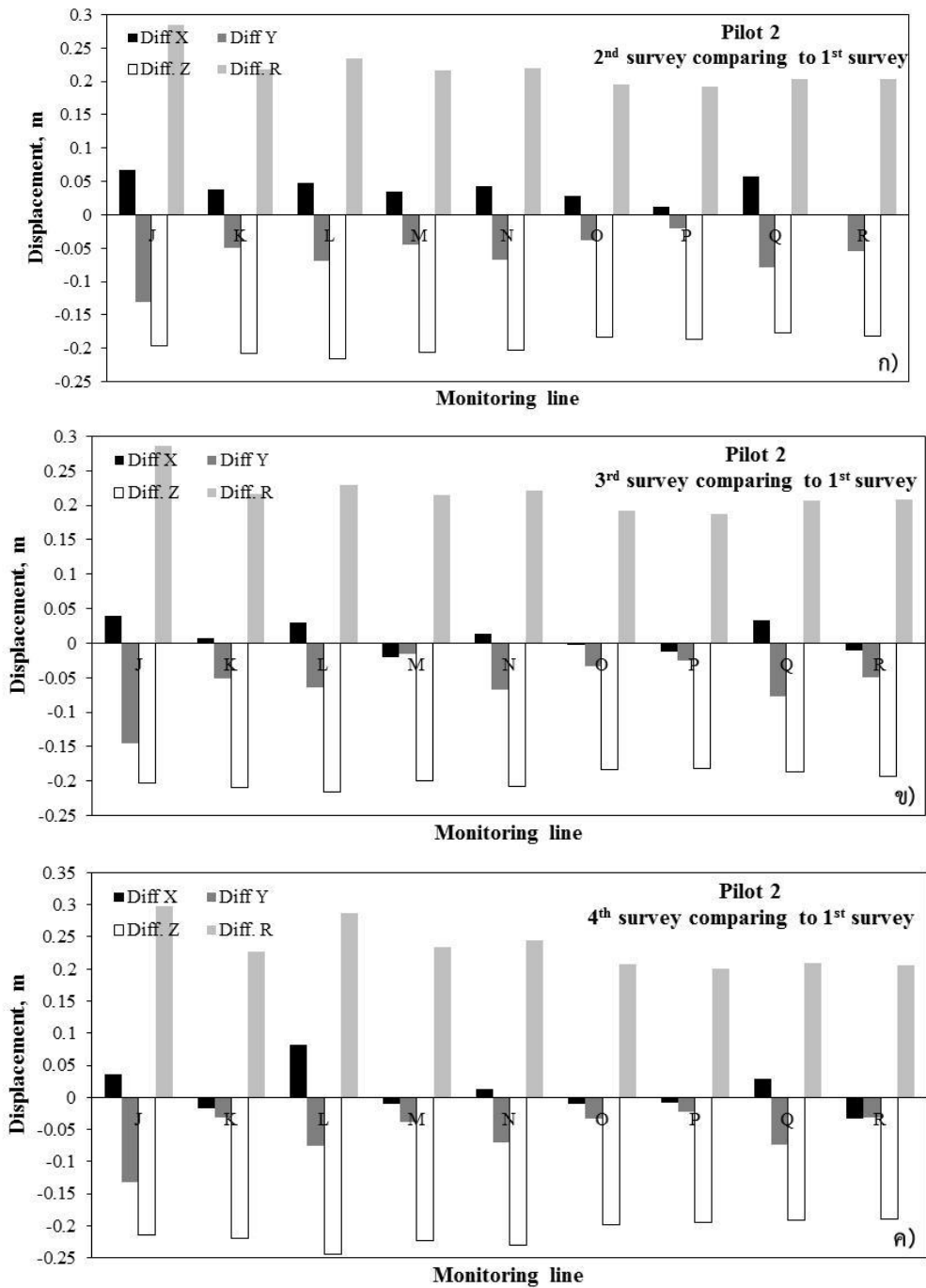
รูปที่ 5.30 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาริตที่ 1 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5



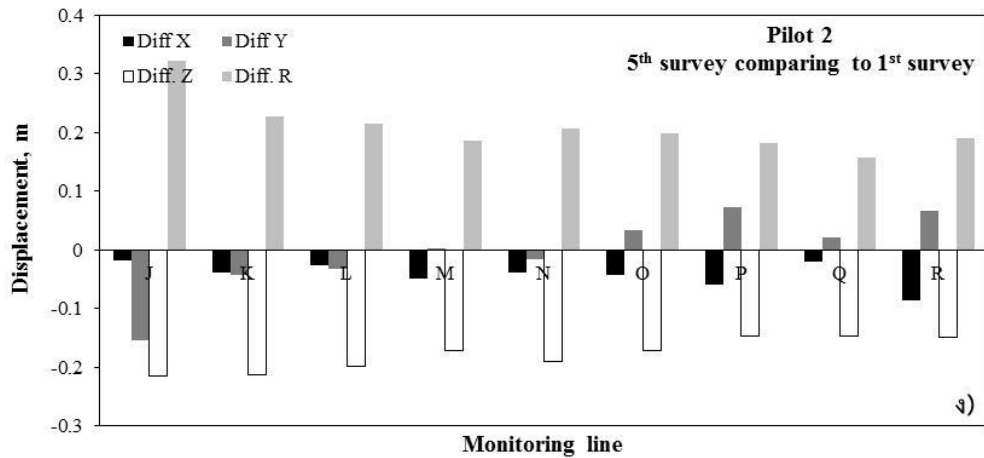
รูปที่ 5.30 (ต่อ) ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 1 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5

5.5.2.2 แปลงสาธิตที่มีการปูแผ่นยางควบคู่กับการปลูกหญ้าแฝก (แปลงที่ 2)

แปลงสาธิตที่ 2 ได้ทำการติดตั้งหมุดติดตามการกัดเซาะ ณ ตำแหน่งที่มีการปลูกพืชในแนวการติดตาม J-R ผลการสำรวจพิกัดของหมุดติดตามได้แสดงในรูปที่ 5.31 และตารางที่ 5.8 พบว่า ตำแหน่งของหมุดมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่หมุดมีการทรุดตัวเฉลี่ย (Diff Z) เท่ากับ -0.195 -0.198 -0.212 และ -0.178 สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 ตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่งของหมุดมีการเคลื่อนตัวในทิศทางที่เดียวกันในระนาบ X-Y ทุกแนวการสำรวจและตลอดช่วงระยะเวลาของการสำรวจ ระยะเคลื่อนตัวลัพธ์เฉลี่ย (Diff R) เมื่อเทียบกับการสำรวจในครั้งแรกเท่ากับ 0.218 0.218 0.235 และ 0.210 เมตร สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 เมตร ตามลำดับ



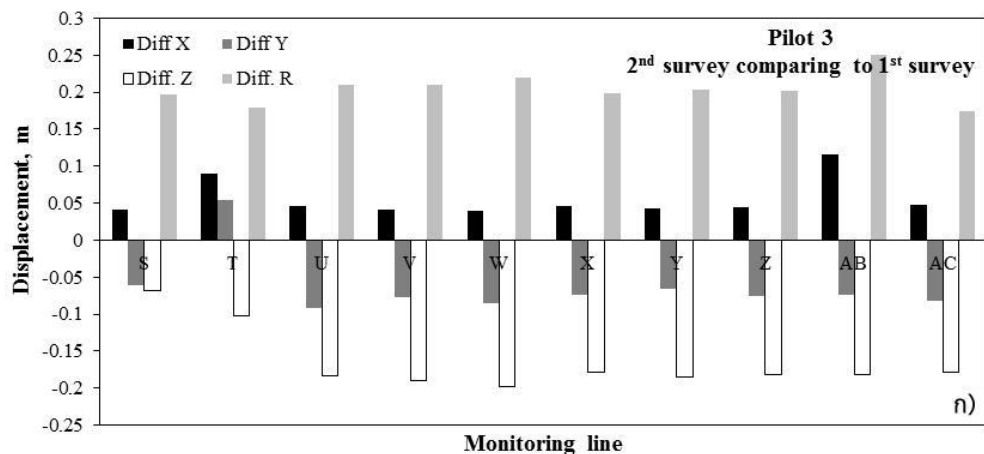
รูปที่ 5.31 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 2 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5



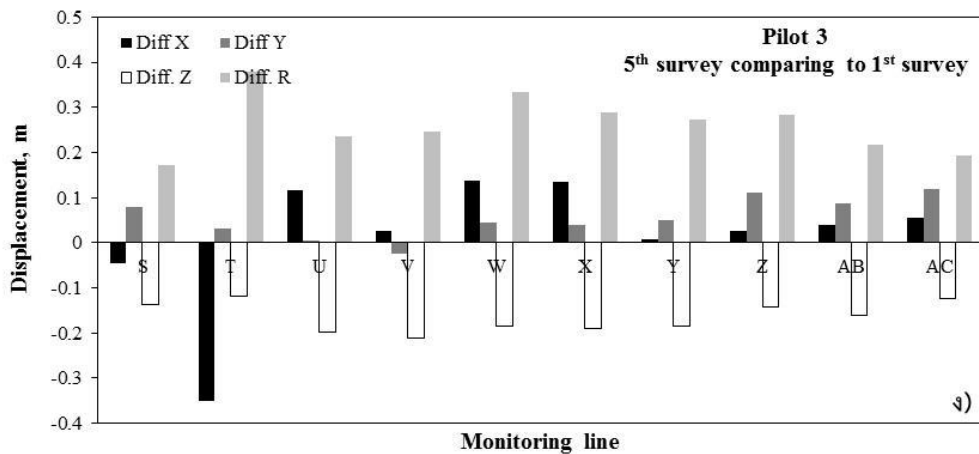
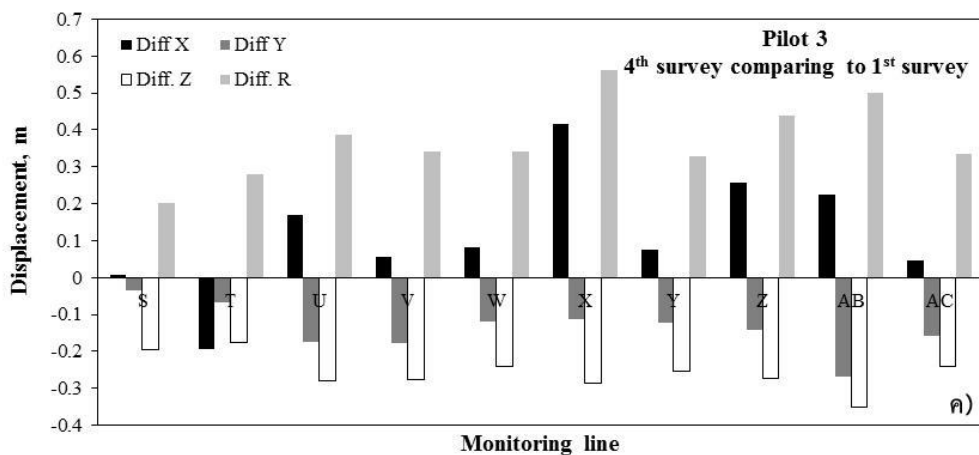
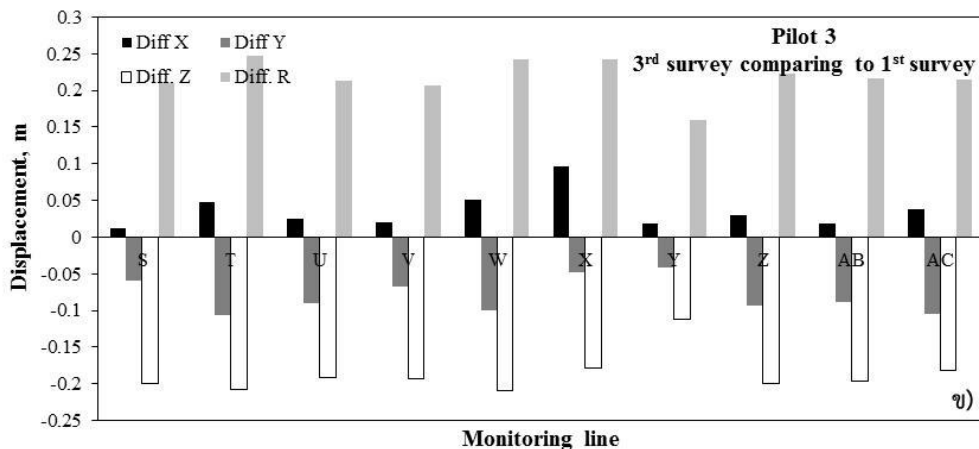
รูปที่ 5.31 (ต่อ) ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของหมุดติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 2 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5

5.5.2.3 แปลงสาธิตที่มีการปูแผ่นยางอย่างเดี่ยว (แปลงที่ 3)

แปลงสาธิตแปลงนี้ไม่ได้ทำการติดตั้งหมุดติดตามและไม่มีช่องเปิดเพื่อทำการระบายน้ำตลอดพื้นที่ของตลิ่ง ตำแหน่งที่ได้ทำการสำรวจ (S-AC) เป็นตำแหน่งติดตามที่ได้ทำสัญลักษณ์โดยการทาสีบนแผ่นยางพาราแทนที่หมุดติดตาม ผลการสำรวจพิกัดของตำแหน่งเหล่านี้ได้แสดงในรูปที่ 5.32 และตารางที่ 5.8 พบว่า แปลงสาธิตมีการทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ -0.164 -0.187 -0.257 และ -0.165 สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่งบนแผ่นยางมีการเคลื่อนตัวลัพธ์เฉลี่ย (Diff R) เมื่อเทียบกับการสำรวจในครั้งแรกเท่ากับ 0.204 0.218 0.371 และ 0.262 สำหรับการสำรวจครั้งที่ 2-5 ตามลำดับ



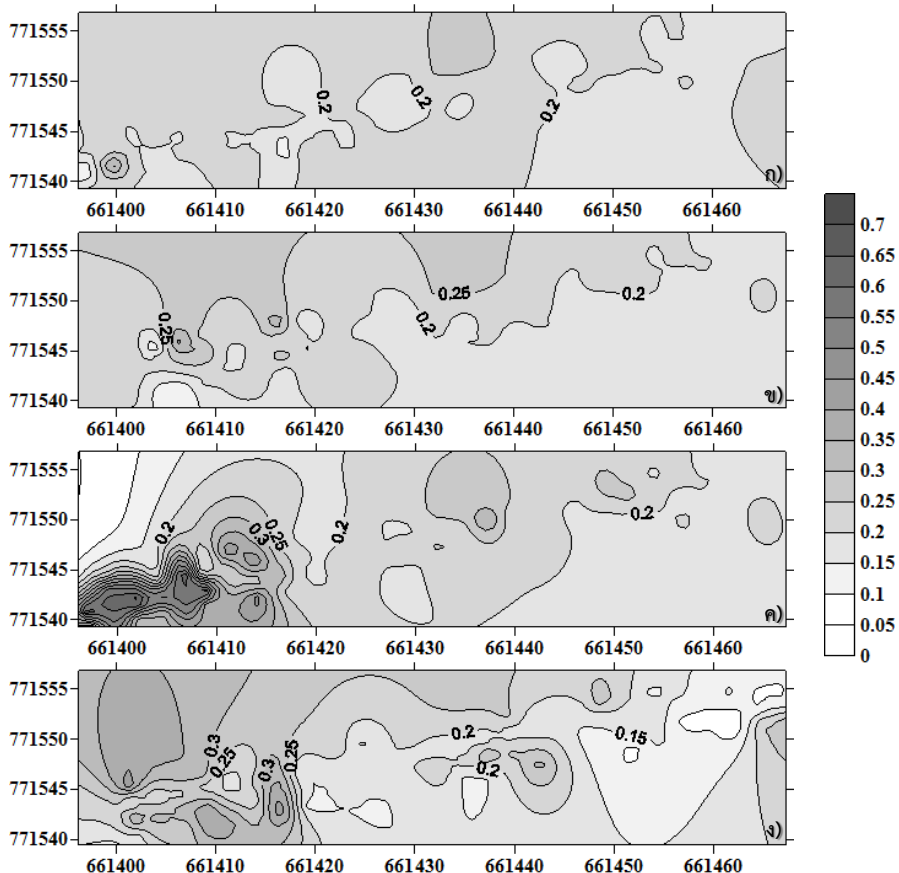
รูปที่ 5.32 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของตำแหน่งติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 3 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5



รูปที่ 5.32 (ต่อ) ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของตำแหน่งติดตามบริเวณแปลงสาธิตที่ 3 ก) การสำรวจครั้งที่ 2 ข) การสำรวจครั้งที่ 3 ค) การสำรวจครั้งที่ 4 และ ง) การสำรวจครั้งที่ 5

5.5.3 ผลการติดตามการกัดเซาะตลิ่งแปลงสาธิตในภาพรวม

ผลการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะและตำแหน่งที่สอดคล้องกันในแต่ละครั้งพบว่า ระยะการเคลื่อนตัวของหมุดติดตามของทั้งสามแปลงสาธิตมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในลักษณะของชั้นความสูง (Contour) ดังแสดงในรูปที่ 5.33 ผลการสำรวจทั้งหมดสามารถยืนยันได้ว่า แปลงสาธิตทั้ง 3 มีการเคลื่อนตัวลึกลงเฉลี่ยเท่ากับ 0.223 เมตร และมีการทรุดตัวเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ -0.182 เมตร การเคลื่อนตัวและทรุดตัวที่เกิดขึ้นมากกว่า 90% เกิดจากการเซตตัวของดินถมหลังจากการก่อสร้าง เนื่องจากการทรุดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในหนึ่งเดือนหลังจากการปรับปรุงตลิ่งเสร็จสมบูรณ์ จากการสำรวจครั้งที่ 3-5 พบว่า แปลงสาธิตมีการเคลื่อนตัวและทรุดตัวน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การสำรวจในครั้งที่ 2 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดเกิดจากการเซตตัวของดินในช่วงแรกหลังจากการก่อสร้าง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการบดอัดในขณะก่อสร้าง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ กล่าวคือ ไม่มีการใช้รถบดตามมาตรฐานในการก่อสร้าง แต่ได้ใช้น้ำหนักของรถแบ็คโฮในการบดอัด รวมถึง ชั้นดินแต่ละชั้นในการบดอัดค่อนข้างมีความหนาแน่น ซึ่งอาจจะทำให้ดินด้านล่างไม่แน่นเท่าที่ควร จากการติดตามและสำรวจการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของตลิ่งหลังจากการปรับปรุงแล้วพบว่า ในภาพรวม แปลงสาธิตการปรับปรุงตลิ่งโดยใช้แผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะมีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์ในปีแรกหลังจากการก่อสร้าง



รูปที่ 5.33 เส้นชั้นความสูงแสดงการเคลื่อนตัวของหมุดติดตามการกักเซาะและตำแหน่งที่สอดคล้องกัน สำหรับการสำรวจในแต่ละครั้ง ก) ครั้งที่ 1 ข) ครั้งที่ 2 ค) ครั้งที่ 3 ง) ครั้งที่ 4 และ จ) ครั้งที่ 5 ตามลำดับ

5.6 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งโดยใช้แผ่นยางพารา ดำเนินการบนหลักการพื้นฐานที่ต้องการลดผิวสัมผัสระหว่างดินกับน้ำในลำน้ำโดยใช้แผ่นยางพาราเป็นตัวกั้น ทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะในดิน หลักการดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาทดสอบโดยการสร้างแปลงสาธิตบนพื้นที่ริมตลิ่งคลองอยู่ตะเภา พิกัด 47N 661660 E 771731 N จากการสำรวจพื้นที่ก่อนก่อสร้างพบว่า ตลิ่งถูกกัดเซาะไปยาวประมาณ 70 เมตร จึงดำเนินการถมดินให้ได้แนวและระยะตามเดิมก่อน ผลการวิเคราะห์และออกแบบตลิ่งดินถมพบว่า ตลิ่งดินถมที่เหมาะสมเป็นดินถมสูง 5 เมตร มีความลาดชันเท่ากับ 1:1.5 (V:H) ดินที่ใช้ถมเป็นดินประเภททรายที่มีการกระจายตัวดี (Well-graded sand, SW) หรือ ทรายผสมตะกอนทราย (Silty sand, SM) มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล และ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลเท่ากับ 10 กิโลพาสคาล

และ 32 องศา ตามลำดับ ตลิ่งดินถมนี้ถูกออกแบบให้มีเสถียรภาพทั้งในกรณีที่มีน้ำเต็มตลิ่งและในกรณีที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid drawdown)

แปลงสาธิตการใช้แผ่นยางพาราปูบนตลิ่งดินถมเพื่อป้องกันการกัดเซาะถูกออกแบบเป็น 3 วิธี ได้แก่ แปลงสาธิตที่ 1 ใช้แผ่นยางพาราร่วมกับการปลูกพืชเสริม แปลงที่ 2 ใช้แผ่นยางพาราร่วมกับปลูกหญ้าแฝกเสริม และแปลงที่ 3 ใช้แผ่นยางพาราอย่างเดียว แผ่นยางพาราที่ใช้มีความต้านทานต่อแรงดึง 38.6 เมกะพาสคาล ความสามารถในการยืดจนขาด 42% และความต้านทานต่อการฉีกขาด 115 นิวตันต่อมิลลิเมตร โดยได้ออกแบบให้มีการใช้หินทิ้ง (Rip rap) กดทับแผ่นยางพาราทั้งด้านบนและดินตลิ่ง เพื่อยึดแผ่นยางพาราให้อยู่กับที่ การก่อสร้างแปลงสาธิตทั้ง 3 แปลงติดกันบนตลิ่งคลองอุ้ตะเภา รวมความยาวเท่ากับ 80 เมตร ได้ดำเนินการแล้วเสร็จในเดือนตุลาคม 2558 รวมเวลาในการก่อสร้าง 1 เดือน

ประสิทธิภาพของแปลงสาธิตทั้งสามได้ถูกประเมิน โดยใช้การประเมินด้วยสายตาสำหรับการกัดเซาะ และใช้กล้องสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนที่ของหมุดติดตามการกัดเซาะ (Erosion pins) ที่ติดตั้งบนแปลงสาธิตที่เรียงตัวกันเป็นตาราง (Grid) ผลการตรวจสอบ 5 ครั้ง ในระยะเวลา 10 เดือน ตั้งแต่ ตุลาคม 2558 ถึง สิงหาคม 2559 พบว่า ไม่พบการกัดเซาะบนตลิ่งแปลงสาธิตทั้งสามแปลง ตลิ่งทั้งสามแปลงยังอยู่ในสภาพดีเหมือนตอนก่อสร้างเสร็จ อย่างไรก็ตามพบการทรุดตัวเฉลี่ยทั้งสามแปลง ประมาณ 20 เซนติเมตร ในช่วงเดือนแรกหลังก่อสร้างเสร็จ หลังจากนั้นการทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมากอย่างไม่เป็นนัยสำคัญ การทรุดตัวในช่วงเดือนแรกน่าจะเป็นผลมาจากการบดอัดดินถมที่ไม่สามารถบดอัดให้ได้ ประสิทธิภาพเต็มที่เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ กอปรกับช่วงเดือนพฤศจิกายนที่เกิดการทรุดตัวนั้นเป็นฤดูฝน น้ำในคลองอุ้ตะเภาอยู่ในระดับสูง ทำให้ดินถมมีการทรุดตัวได้ อย่างไรก็ตามการทรุดตัวดังกล่าวคาดว่าจะสิ้นสุดแล้วเนื่องจากการตรวจสอบในครั้งหลังไม่พบการทรุดตัวเพิ่มแต่อย่างใด

ผลสรุปในภาพรวมกล่าวได้ว่า การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้แผ่นยางพารา จากการสร้างแปลงสาธิตทั้งสามแบบ สามารถป้องกันการกัดเซาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่พบการกัดเซาะในช่วงเวลา 10 เดือนที่มีการติดตามตรวจสอบ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดเซาะของแปลงสาธิตทั้งสามอาจจะไม่เท่ากันถ้ามีการติดตามตรวจสอบที่ใช้ระยะเวลานานกว่านี้ ทั้งนี้เนื่องจากในระยะยาวอาจมีการผุกร่อนของแผ่นยางพาราที่ต้องมีการซ่อมแซม หรือในระยะยาวรากของหญ้าแฝกหรือต้นไม้ที่ปลูกจะสามารถแผ่ไปยึดดินถมให้ดีขึ้นเป็นต้น

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการถดถอยและการป้องกันการกัดเซาะของตลิ่งคลองอุตะเถาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ข้อ ประกอบด้วย (1) ประเมินคุณลักษณะของตลิ่งคลองอุตะเถา (2) วิเคราะห์การถดถอยของตลิ่งคลองอุตะเถา และ (3) ศึกษาวิธีปรับปรุงตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะพร้อมก่อสร้างแปลงสาธิตพร้อมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการป้องกันการกัดเซาะ ผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. คลองอุตะเถาประกอบไปด้วยตลิ่งทั้ง 3 ชนิดคือ ตลิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive bank) ตลิ่งที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Non-cohesive bank) และตลิ่งแบบผสม (Composite bank) ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลและค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของดินเม็ดหยาบ (SM และ SC) อยู่ในช่วงประมาณ 27.57° - 30.92° และ 0.00 - 10.03 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ดินเม็ดละเอียด (ML CL และ CH) มีค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลและค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลอยู่ในช่วงประมาณ 19.58° - 31.30° และ 0.48 - 18.27 kPa ตามลำดับ

2. ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะของดินริมตลิ่งคลองอุตะเถาบริเวณกลางน้ำประกอบด้วย ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตและสัมประสิทธิ์การกัดเซาะ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.03 - 20.93 Pa และ 2.23 - 89.07 $\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ ตามลำดับ เมื่อใช้พารามิเตอร์ทั้งสองจำแนกชนิดดินริมตลิ่งคลองอุตะเถาพบว่าเป็นดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะอย่างสูง (Very erodible soil) และกลุ่มดินที่ง่ายต่อการกัดเซาะ (Erodible soil)

3. ในช่วงปี พ.ศ. 2545-2553 สำหรับตลิ่งคลองอุตะเถาตลอดความยาว 110 กิโลเมตร มีพื้นที่ถูกกัดเซาะและทับถมเท่ากับ 626.81 และ 131.84 ไร่ ตามลำดับ จากการคำนวณพบว่า พื้นที่การกัดเซาะคิดเป็น 4.75 เท่าของพื้นที่ทับถม โดยพื้นที่การกัดเซาะที่เกิดขึ้นของอำเภอสระเดา คลองหอยโข่ง หาดใหญ่ และบางลำมีค่าเท่ากับ 182.63 90.48 309.16 และ 44.54 ไร่ ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่การทับถมเกิดขึ้นเท่ากับ 64.20 17.85 48.22 และ 1.57 ไร่ ตามลำดับ บริเวณพื้นที่ในเขตอำเภอสระเดาใหญ่มีการสูญเสียพื้นที่เนื่องจากการกัดเซาะของแนวตลิ่งมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอำเภอรอบๆ โดยมีพื้นที่การกัดเซาะประมาณ 14.83 ไร่ต่อกิโลเมตร มีระยะการถดถอยเฉลี่ยในแต่ละตำบลอยู่ในช่วงประมาณ 4.35-13.87 เมตร

4. ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2559 ระยะการถดถอยของตลิ่งที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตำบลบริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถาตอนกลาง ตั้งแต่บริเวณพื้นที่บ้านบางศาลา อำเภอสระเดาใหญ่ ถึงบ้านบางแพบ อำเภอสระเดาใหญ่ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7.52-31.83 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.21

เมตร การถดถอยเกิดขึ้นมากที่สุดสำหรับตลิ่งที่อยู่ในแนวโค้งนอกของลำน้ำ (Outer bend) บริเวณตำบลบ้านพรุ และมีค่าน้อยที่สุดสำหรับตลิ่งบริเวณบ้านบางแพบ ตำบลควนลัง ซึ่งเป็นบริเวณที่ความชันของลำน้ำต่ำ

5. แบบจำลองการถดถอยของตลิ่งคลองอู่ตะเภาถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) ผ่านค่าปรับเทียบ Lumped parameter (α) ผลการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า ค่า α ของตลิ่งคลองอู่ตะเภาอยู่ในช่วง 0.3-3.0 ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์การถดถอยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงจากภาพถ่ายทางอากาศในปี 2545 2553 และ 2559 มีความแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินการถดถอยของตลิ่งในอนาคตได้

6. การออกแบบวิธีการป้องกันการกัดเซาะที่เหมาะสมกับพื้นที่พบว่า การใช้ดินถมร่วมกับการใช้แผ่นยางพาราป้องกันการกัดเซาะ (Para-rubber sheet) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ โดยแปลงสาธิตการป้องกันการกัดเซาะประกอบด้วย 3 วิธีได้แก่ แปลงสาธิตที่ 1 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับการปลูกพืชเสริม แปลงสาธิตที่ 2 การใช้แผ่นยางพาราร่วมกับปลูกหญ้าแฝกเสริม และแปลงสาธิตที่ 3 การใช้แผ่นยางพาราอย่างเดียว แปลงสาธิตทั้งสามถูกตรวจสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะ โดยการสำรวจตำแหน่งของหมุดติดตามการกัดเซาะ ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งพบว่า แปลงสาธิตทั้งสามไม่มีการกัดเซาะตลิ่งตลอดแนว ตลิ่งมีการทรุดตัวประมาณ 20 เซนติเมตร หลังจากการก่อสร้างเสร็จ 1 เดือน ซึ่งวิธีการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งทั้งสามวิธีสามารถป้องกันการกัดเซาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.2 ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

1. ค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากการทดสอบ submerged jet test ควรมีการเปรียบเทียบกับ การทดสอบการกัดเซาะโดยวิธีอื่นๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดสอบ

2. สำหรับค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยของตลิ่ง ควรใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบหลายจุดตลอดแนวตลิ่งเพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล เนื่องจากมีความเป็นเนื้อเดียวกันของดินริมตลิ่ง

3. ควรมีการนำข้อมูลการตรวจวัดการถดถอยของตลิ่งในสนามทุกๆ ช่วงของการพิบัติมาใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ และเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์

4. การติดตามการกัดเซาะและการเคลื่อนตัวของแปลงสาธิตควรทำต่อเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ อีก 2-3 ปี เพื่อให้ครอบคลุมเหตุการณ์น้ำหลากของคลองอู่ตะเภา โดยเฉพาะกรณีที่มีระดับน้ำสูงเต็มตลิ่งของแปลงสาธิต เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการป้องกันการกัดเซาะอย่างเต็มรูปแบบ

5. ในกระบวนการก่อสร้างแปลงสาธิต การบดอัดดินถมเป็นเรื่องสำคัญที่ควรควบคุมให้ได้มาตรฐาน เนื่องจากจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเซตตัวหรือทรุดตัวของดิน

6. ควรมีการคำนวณพื้นที่การกักเซาะในช่วงปี 2553 ถึง 2559 เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าพื้นที่การกักเซาะที่สอดคล้องกับเวลาปัจจุบัน

บรรณานุกรม

- สุรติ เส็มหมัด และ ธนิต เฉลิมยานนท์ (2553). การศึกษาเสถียรภาพของตลิ่ง: กรณีศึกษาคลองอยู่ตะเภา จังหวัดสงขลา, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 จังหวัดอุบลราชธานี
- Abernethy, B., Rutherford, I.D., 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilize stream banks. *Geomorphology* 23, 55–75.
- Abernethy, B., Rutherford, I.D., 2000. The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surf. Procs. Land.* 25, 921–937.
- Abernethy, B., Rutherford, I.D., 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrol. Process.* 15, 63–79.
- Al-Madhhachi, A.T., Hanson, G.J., Fox, G.A., Tyagi, A.K., Bulut, R., 2013. Deriving parameters of a fundamental detachment model for cohesive soils from flume and jet erosion tests. *T. ASABE.* 56(2), 489–504.
- Amoozegar, A., 1989a. A compact, constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am.* J.53, 1356–1361
- Arulanandan, K., Gillogley, E., 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.
- ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. 1998. River width adjustment: I. Processes and mechanisms. *J. Hydraul. Eng.* 124(9), 881–902.
- ASTM. 1999a. Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method, No.D5852-95. ASTM: West Conshohocken, PA. 04.08:686-690.
- Barker R., Dixon L., Hooke J. 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surf. Procs. Land,* 22, 1217-1227.

- Das, B. M. 2004. Principle of Foundation Engineering, Fifth Edition. Thomson Brooks Cole.
- Bergado, D.T., Soralump, S., 2003. Geosynthetics for erosion control and preservation of environment. International Symposium and Short Course on Soil/Ground Improvement and Geosynthetics in Waste Containment Structures, 2003, AIT, Thailand.
- Blaisdell, F.W., Anderson, C.L., Hebaus, G.G., 1981. Ultimate dimensions of local scour. J. Hydraul. Eng. Div. 107(HY3), 327-337.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S. W., Kwak, K. W., 2001. Erosion function apparatus for scour rate predictions. J. Geotech. Geoenviron. ASCE 127(2), 105-113.
- Brooks, R.H., Corey, T.A., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A., Curini, A., 1999. Monitoring of pore water pressure and stability of streambanks: Results from an experimental site on the Sieve River, Italy. Earth Surf. Procs. Land. 24, 1095-1114.
- Clark, J., Hellin, J., 1996. Bio - engineering for Effective Road Maintenance in the Caribbean, Natural Resources Institute, The University of Greenwich, United Kingdom.
- Camporeale, C., Perona, P., Porporato, A., Ridolfi, L., 2007. Hierarchy of models for meandering rivers and related morphodynamic processes. Rev. Geophys. 45, RG1001.
- Cancienne, R.M., Fox, G.A., Simon, A., 2008. Influence of seepage undercutting on the stability of root-reinforced streambanks. Earth Surf. Procs. Land. 33(1), 1769-86.
- Chow, Ven Te. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill. 1959

- Clark, L.A., Wynn, T.M., 2007. Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: Implications for erosion rate predictions. *T. ASABE*. 50(1), 95–106.
- Couper, P.R., Maddock, I.P., 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth. Surf. Proc. Land*. 26, 631-646.
- Daly, E.R., Fox, G.A., Al-Madhhachi, A.T., Miller, R.B., 2013. A scour depth approach for deriving erodibility parameters from Jet erosion tests. *T. ASABE*. 56(6), 1343–51.
- Daly, E.R., Miller, R.B., Fox, G.A., 2015. Modeling streambank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks. *Adv. Water. Resour.* 81, 114–127.
- Darby S.E., Thorne C.R., 1996a. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers. II: Model evaluation. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 122 (4): 194-202.
- Darby, S.E., Thorne, C.R., 1996b. Development and testing of river-bank stability analysis. *J. Hydraul. Eng.* 122 (8), 443–454.
- Dunn, I.S., 1959. Tractive resistance of cohesive channels, In *Proc, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 85(SM3).1-24.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics of Unsaturated Soils*. Wiley, New York, p. 517.
- Fredlund, D.G. and Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can Geotech J.* 31(3), 521–532.
- Gray, D. H, Leiser A. J., 1982. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*, Van Nostrand Reinhold. New York.
- Gray, D. H., Sotir, R. B., 1992. Biotechnical stabilization of highway cut slope. *J. Geotech Eng.* 118(9), 1395-1409.

- Gray, D. H., Sotir, R. B., 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-04978-6. New York, New York.
- Grissinger, E.H., 1982. Bank erosion in cohesive materials. In: Gravel-bed rivers. Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R. (Eds.). John Wiley & Sons. New York. NY, pp. 273–287.
- Grissinger, E. H., Bowie, A. J., Murphey, J. B., 1991. Goodwin Creek bank instability and sediment yield. 5th Federal Interagency Sedimentation Conference. US. Government Printing Office. Washington. D.C., pp PS-32–PS-39.
- Hanson, G.J., 1990a. Surface erodibility of earthen channels at high stresses: Part I. Open channel testing. T. ASABE. 33(1), 127–131.
- Hanson, G. J., 1990b. Surface erodibility of earthen channels at high stresses: Part II. Developing an in situ testing device. T. ASABE. 33(1), 132-137.
- Hanson, G.J., 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., Cook, K.R., Simon, A., 1999. Determining erosion resistance of cohesive materials. Proceedings of ASCE International Water Resources Engineering Conference, CD-ROM. Seattle, Wash, ASCE.
- Hanson, G.J., Simon, A., 2001. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. Hydrol. Process. 15(1), 23–38.
- Hanson, G.J., Temple, D.M., 2002. Performance of bare-earth and vegetated steep channels under long-duration flows. T. ASAE. 45(3), 695-701.
- Hanson, G.J., Cook, K.R., 2004. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. Appl. Eng. Agric. 20(4), 455–462.
- Hollick, M., 1976. Towards a routine test for the assessment of critical tractive forces of cohesive soils. T ASAE. 19(6), 1076-1081.
- Hooke, J.M., 1979. An analysis of the processes of riverbank erosion. J. Hydrol. 42, 39-62.

- Iowa Department of Natural Resources. 2006. How to Control Streambank Erosion. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.
- Julian, J.P., Torres, R., 2006. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*. 76(1–2), 193–206.
- Karmaker, T., Dutta, S., 2011. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India. *Hydrol. Process.* 25, 104 – 11
- Kamphuis, J.W., Hall, K.R., 1983. Cohesive material erosion by unidirectional current. *J. Hydraul. Eng.* 109(1), 49–61.
- Langendoen, E. J., 2000. CONCEPTS-Conservational Channel Evolution and Pollutant Transport System. Research Report No. 16. USDA-ARS National Sedimentation Laboratory: Oxford, MS.
- Langendoen, E.J., Simon, A., Alonso, C.V., 2000. Modeling channel instabilities and mitigation strategies in Eastern Nebraska, Proceeding of the 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resource Planning and Management, (CD-ROM), New York. ASCE.
- Langendoen, E.J., Simon, A., 2008. Modeling the evolution of incised streams. II: Streambank erosion. *J. Hydraul. Eng.* 134(7), 905–15.
- Lawler D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems. In: Carling, P.A., Petts, G.E. (Eds.), *Lowland Floodplain Rivers. Geomorphological Perspectives*. Wiley, pp. 117-143.
- Lawler, D.M., 1995. The impact of scale on the processes of channel-side sediment supply: a conceptual model. *Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality*. IAHS Pub. 226, 175-184.
- Lawler, D.M., Thorne, C.R., Hooke, J.M., 1997. Bank erosion and instability. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. New York, John Wiley & Sons.

- Lawler, D. M., J. R. Grove, J. S. Couperthwaite, G. J. L. Leeks., 1999. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system. Northern England. *Hydrol. Process.* 13(7), 977-992.
- Millar, R.G., Quick, M.C., 1993. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers. *J. Hydraul. Eng.* 119, 1343-1363.
- Midgley, T.L., Fox, G.A., Heeren, D.M., 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral streambank retreat on composite streambanks. *Geomorphology.* 145–146, 107–14.
- Moore, W.L. and F.D. Masch., 1962. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. *J. Geophys Res.* 67(4):1437-1446.
- Motta, D, Abad, J.D., Langendoen, E.J., Garcia, M.H., 2012. A simplified 2D model for meander migration with physically-based bank evolution. *Geomorphology*, 163, 10–25.
- Nardi, L, Campo, L, Rinaldi, M., 2013. Quantification of riverbank erosion and application in risk analysis. *Nat. Hazards.* 69, 869–887.
- Osman AM, Thorne CR., 1988. Riverbank stability analysis: I. Theory. *J. Hydraul. Eng* 114(2), 134–150.
- Rinaldi, M., Casagli, N., 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: The Sieve River (Italy). *Geomorphology* 26 (4), 253–277.
- Rinaldi, M., Mengoni, B., Luppi, L., Darby, S.E., Mosselman, E., 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resour. Res.* 44(9), W09429.
- Rinaldi, M., Nardi, L., 2013. Modeling Interactions between Riverbank Hydrology and Mass Failures. *J. Hydraul. Eng.* 18(10), 1231–1240.
- Robinson, K. M., S. J. Bennett, G. J. Hanson, and K. C. Kadavy., 2000. “The influence of weathering on headcut erosion”, Paper No. 002066. St. Joseph, Mich, ASAE.

- Rutherford, I.D., Grove, J.R., 2004. The influence of trees on stream bank erosion: Evidence from rootplate abutments. In: Bennett, S.J. and Simon, A. (Eds), *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 141–152.
- Papanicolaou, A.N., Elhakeem, M., Hilldale, R., 2007. Secondary current effects on cohesive river bank erosion. *Water Resour. Res.* 43, W12418.
- Partheniades, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils, *J. Hydraul. Div.* 91(HY1), 105–139.
- Pollen, N., Simon, A., Collison, A., 2004. Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability, In: Bennett, S.J. and Simon, A. (Eds), *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 125–140.
- Pollen, N. and Simon, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resour. Res.* 41, W07025. doi:10.1029/2004WR003801
- Pollen, N., 2006. Temporal and spatial variability of root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena* 69,
- Polster, D. F., 2002. Soil bioengineering techniques for riparian restoration, *Proceedings of the 26th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Dawson Creek, BC.* 2002.
- Semmens, D.J., Osterkamp, W.R., 2001. Dam removal and reservoir erosion modeling: Zion Reservoir, Little Colorado River, AZ. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29, 2001, Reno, NV*, pp. IX 72-79.
- Shields, A., 1936. *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bedload Movement*. California Institute of Technology, Pasadena (translated from German).

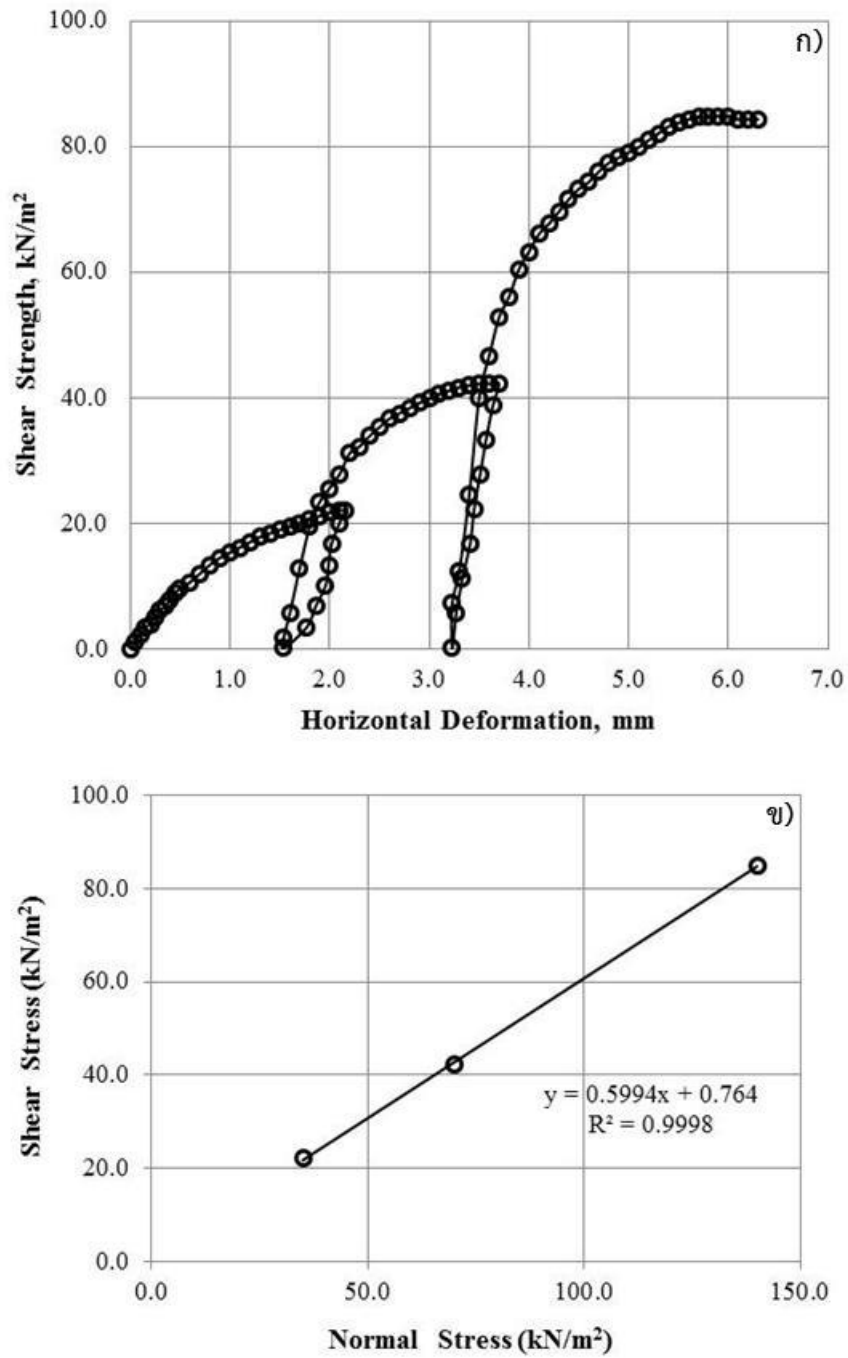
- Siphandone, V., 2002. Riverbank Protection in the Lao PDR. The 11th Conference on Public Works Research & Development in Asia. 14 – 25 October 2002.
- Smerdon, E.T., Beasley, R.T., 1961. Critical tractive forces in cohesive soils. *Agr. Eng.* 42(1), 26–29.
- Simon, A., 1989. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth.Surf. Proc. Land.* 14, 11–26.
- Simon, A., Wolfe, W.J., and Molinas, A., 1991. Mass-wasting algorithms in an alluvial channel model. Proceedings of the 5th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, Nevada, 2, 8–22 to 8–29.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., Langendoen, E.J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology.* 35, 193-217.
- Simon, A., Collison, A., 2001. Pore-water pressure effects on the detachment of cohesive streambed: seepage forces and matric suction. *Earth. Surf. Proc. Land.* 26, 1421–1442.
- Simon, A., Collison, A., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth. Surf. Proc. Land.* 27, 527–546.
- Simon, A., Thomas, R.E., 2002. Processes and forms of an unstable system with resistant, cohesive streambeds. *Earth. Surf. Proc. Land.* 27(7), 699–718.
- Simon, A., Thomas, R.E., Klimetz, L., 2010. Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress and erodibility of cohesive deposits. Proc. 2nd Joint Federal Interagency Conf. on Sedimentation and Hydrologic Modeling. Reston, Va.: U.S. Geological Survey. Philadelphia, Penn.: American Society for Testing and Materials.
- Thoman, R. W. and Niezgoda, 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.

- Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R. (Eds.), *Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, pp. 227-271.
- Thuy,V.T, Than, H.S., Ba, N.X., 2006.Vetiver grass trials Control erosion and scour on waterworks in QuangNgai province/ Proceedings Regional Vetiver Conference, Cantho City. Vietnam. January 2006.
- van De Wiel, M.J., Darby, S.E., 2004. Numerical modeling of bed topography and bank erosion along tree-lined meandering rivers, In: Bennett, S.J. and Simon, A. (Eds), *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 267–282.
- Vanoni, V.A., ed. (1 975). *Sedimentation Engineering*, ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division (reprinted 1977).
- Van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Wan, C.F., Fell, R., 2004. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *J. Geotech. Geoenviron.* 130(4), 373-380.
- Wilson, G.V., Periketi, R., Fox, G.A., Dabney, S., Shields, D., Cullum, R.F., 2007.Seepage erosion properties contributing to streambank failure. *Earth. Surf. Proc. Land.* 32(3), 447-459.
- Wynn, T., 2004. *The Effects of Vegetation on Streambank Erosion*, PhD dissertation. Blacksburg, Va.: Virginia Tech, Department of Biological Systems Engineering.
- Wynn, T.M., Mostaghimi, S. 2006. Effects of riparian vegetation on stream bank subaerial processes in southwestern Virginia, USA. *Earth. Surf. Proc. Land.* 31, 399-413.

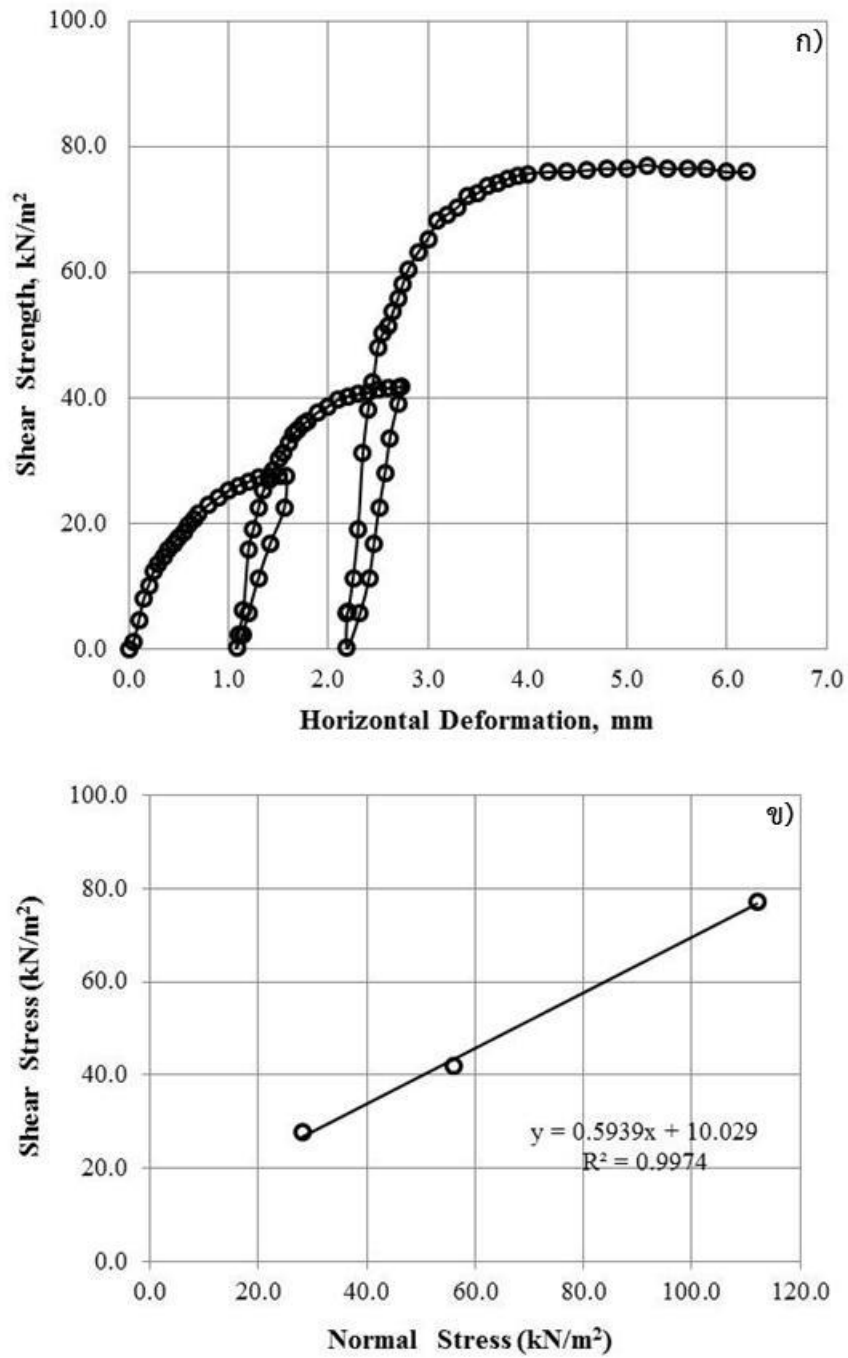
Zhai, H., Cui, B., Hu, B., Zhang, K., 2010. Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China *Ecological Engineering*, 36(4), 361-372.

ภาคผนวก ก

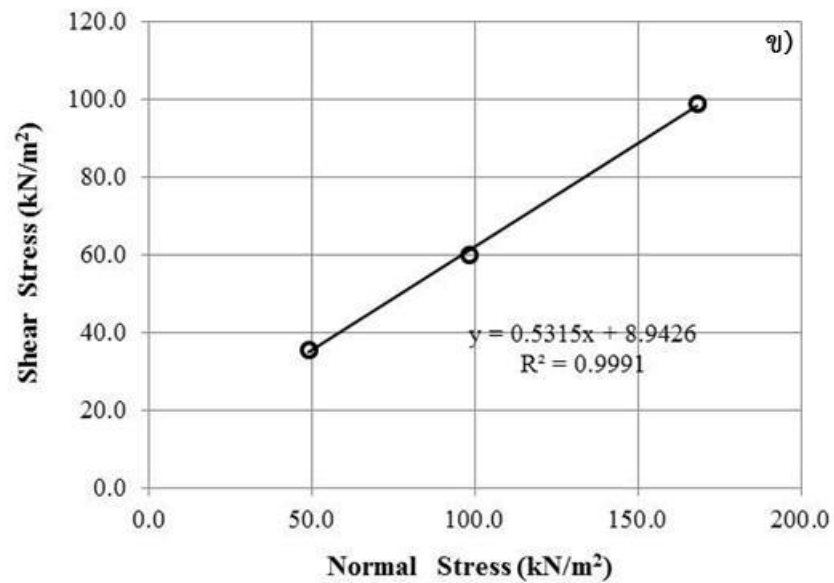
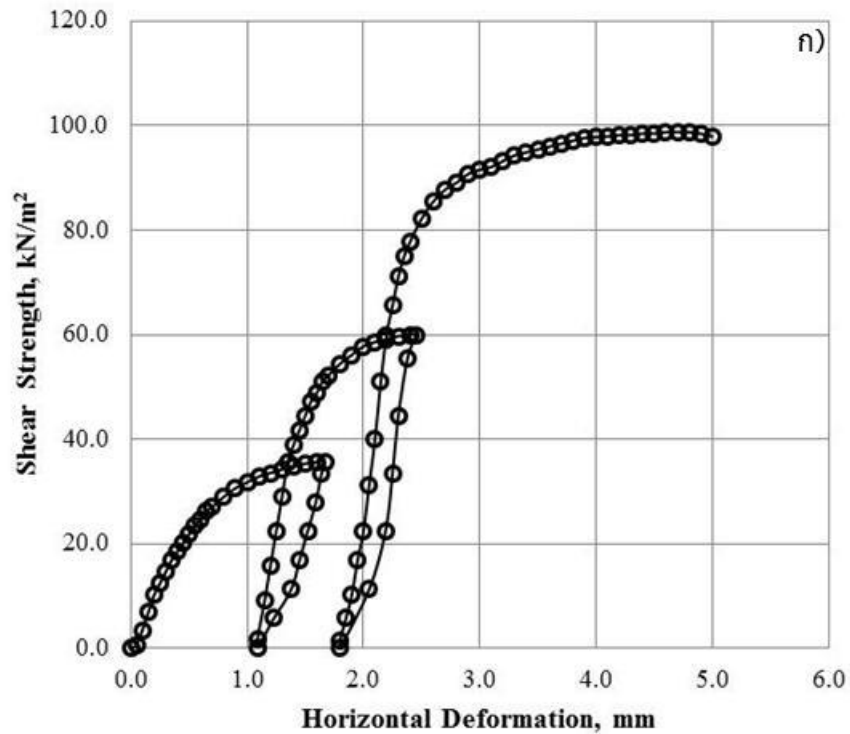
ผลการทดสอบ Multi-stage direct shear test สำหรับตัวอย่างดินอิมตัวด้วย
น้ำของดินรุ่มริมตลิ่งคลองอุตะเภา



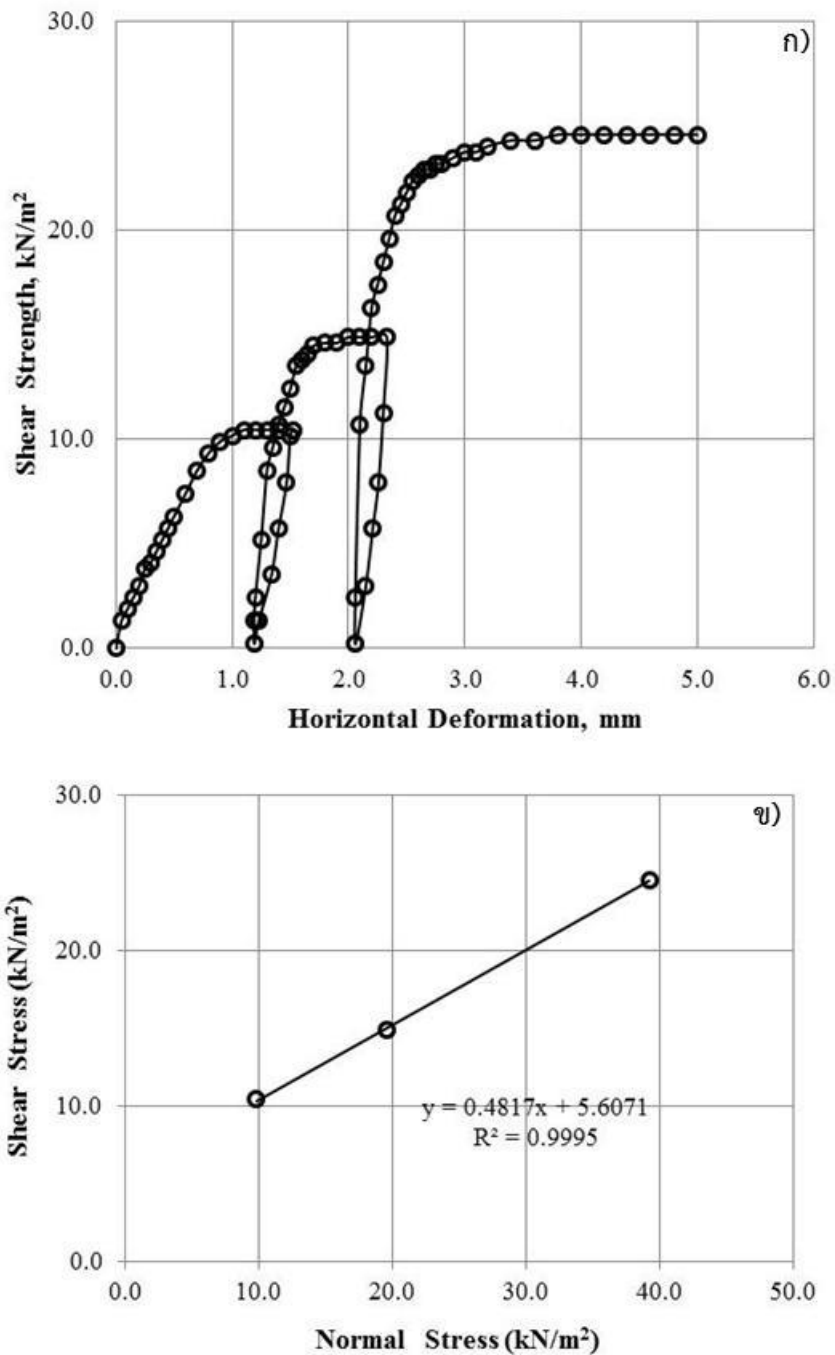
รูปที่ ก-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT1 ที่ระดับความลึก 0.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



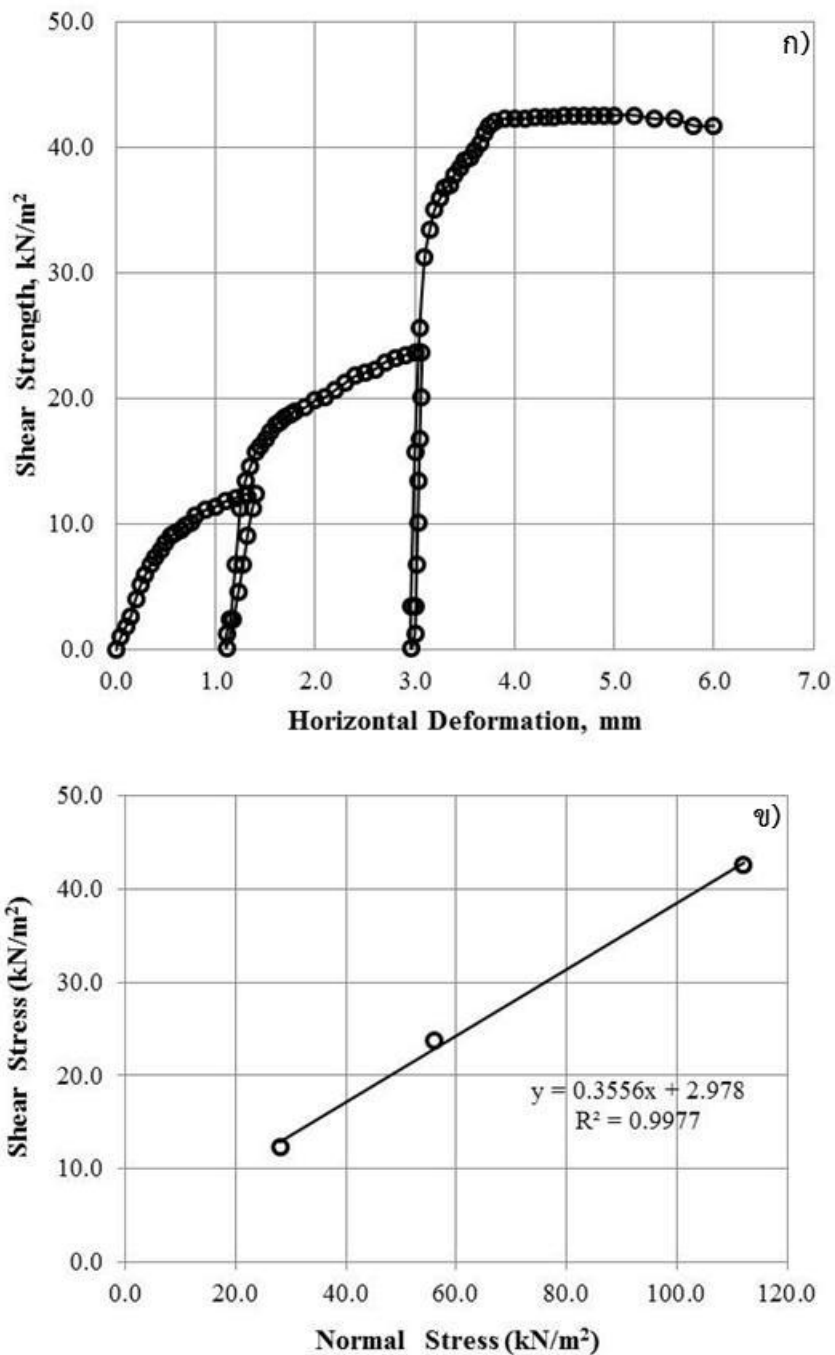
รูปที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT2 ที่ระดับความลึก 0.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



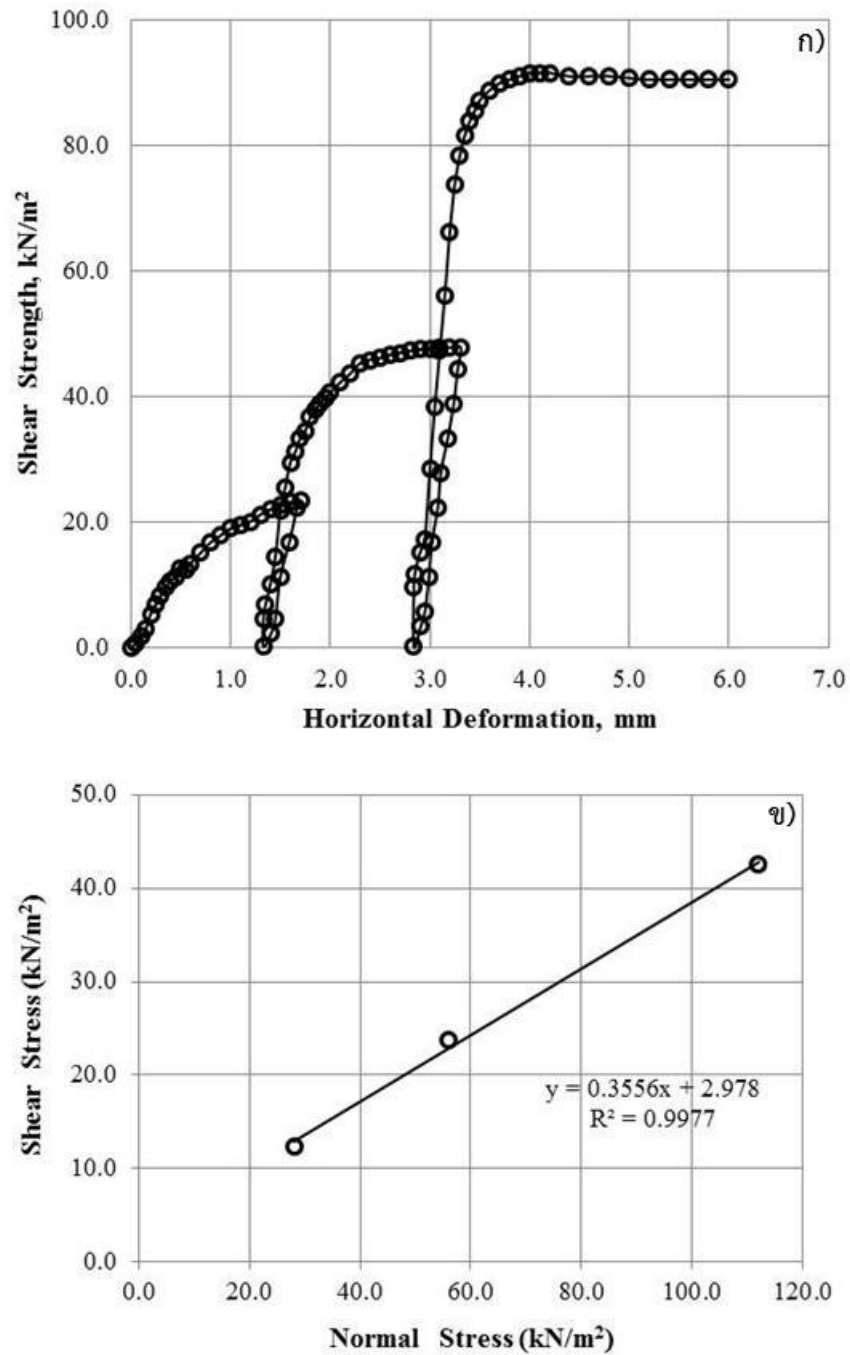
รูปที่ ก-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT2 ที่ระดับความลึก 2.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



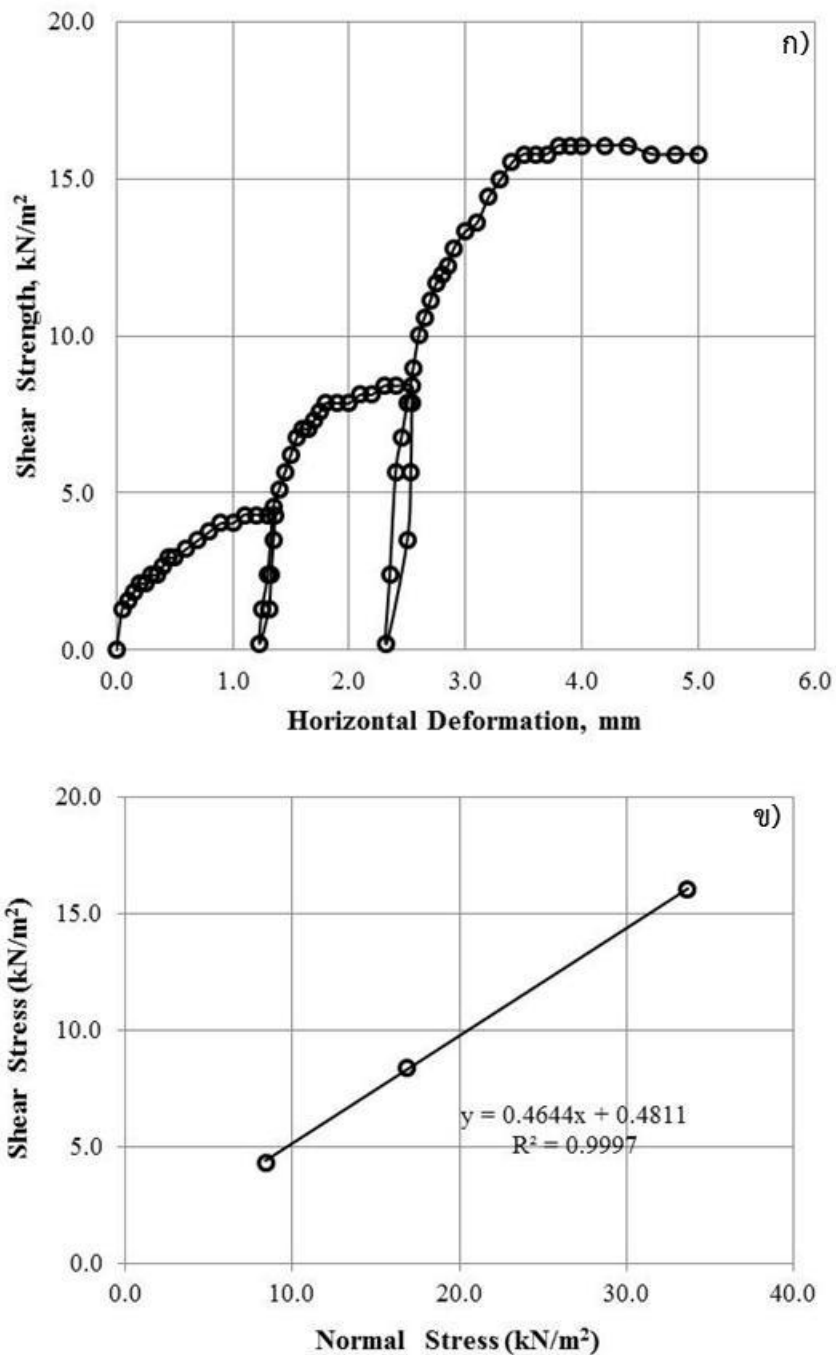
รูปที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT3 ที่ระดับความลึก 0.00-1.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



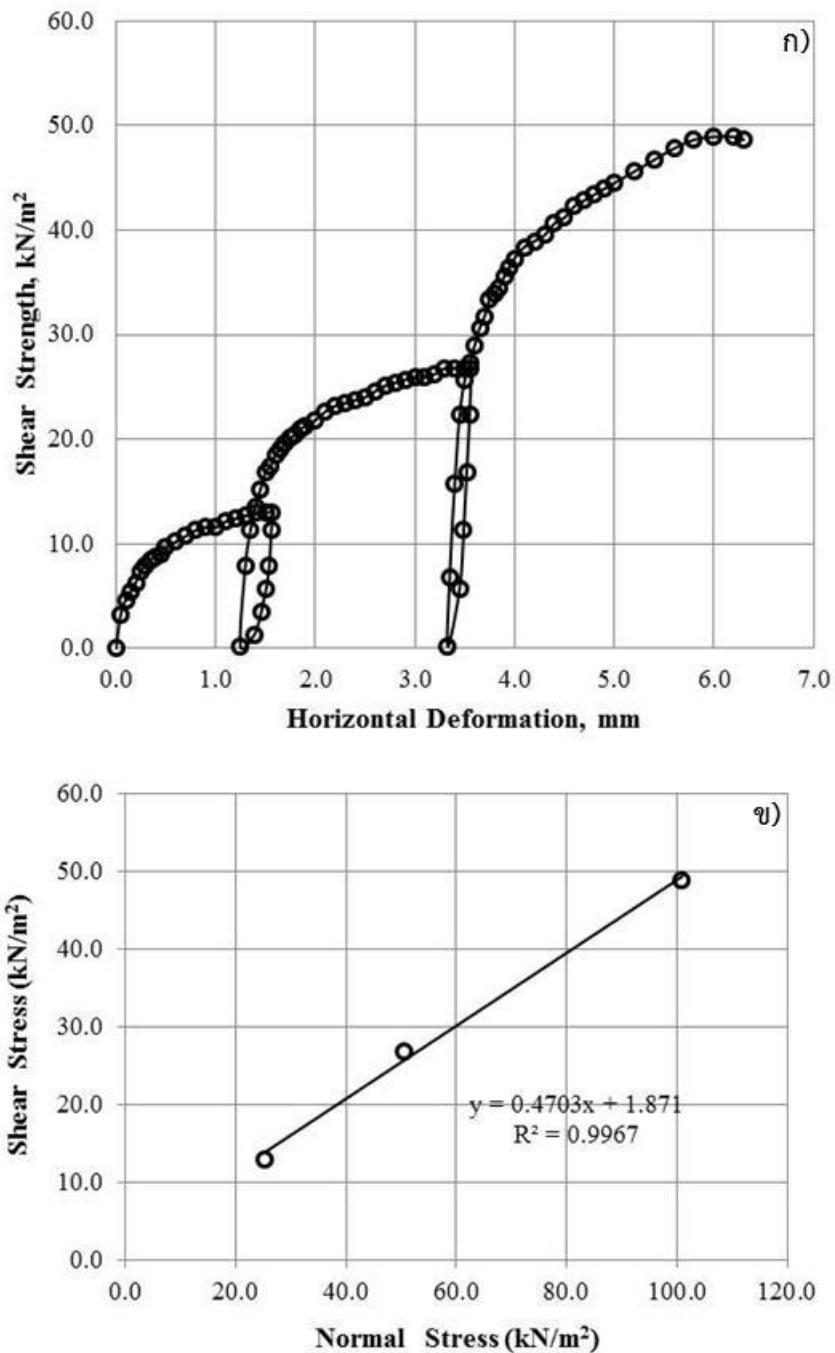
รูปที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT3 ที่ระดับความลึก 1.50-2.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



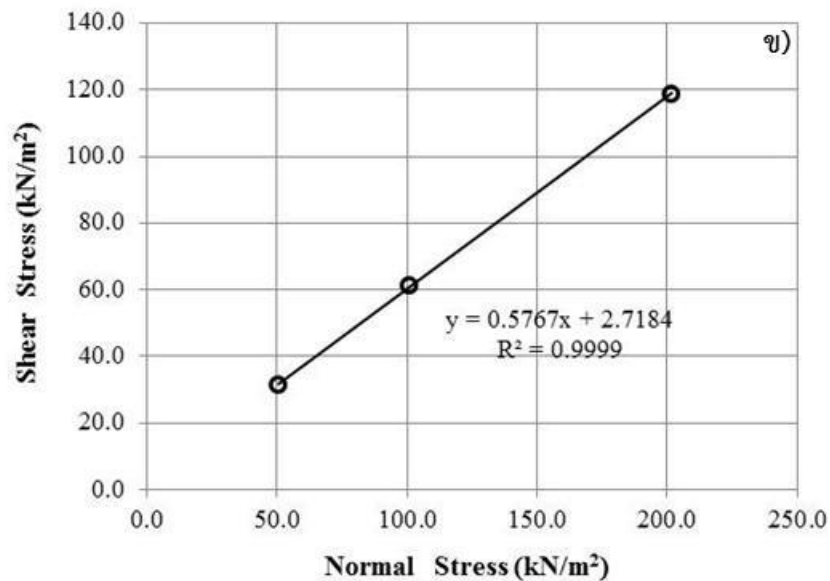
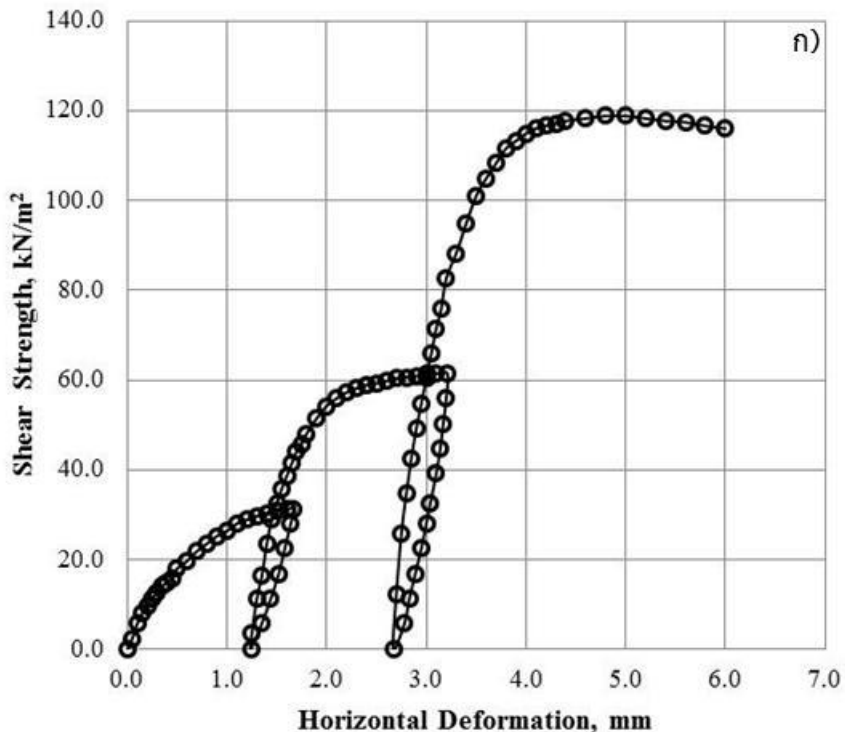
รูปที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT3 ที่ระดับความลึก 2.50-4.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



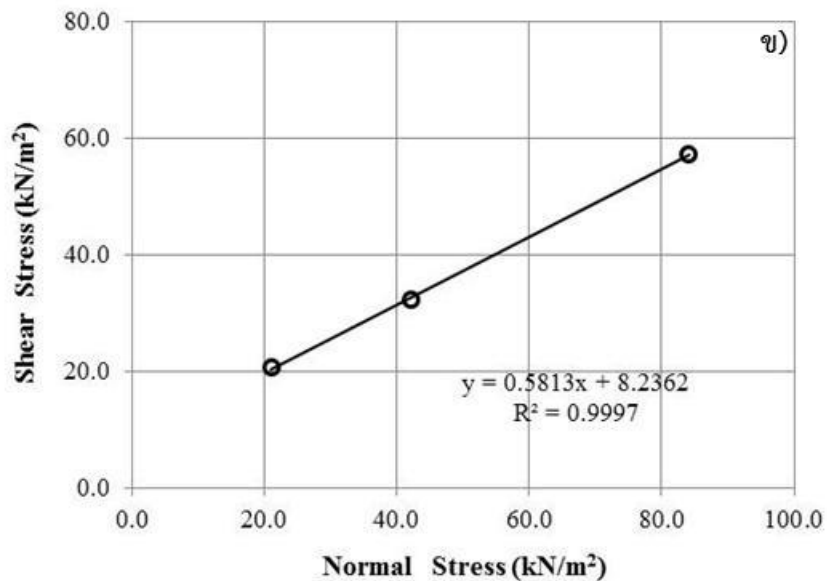
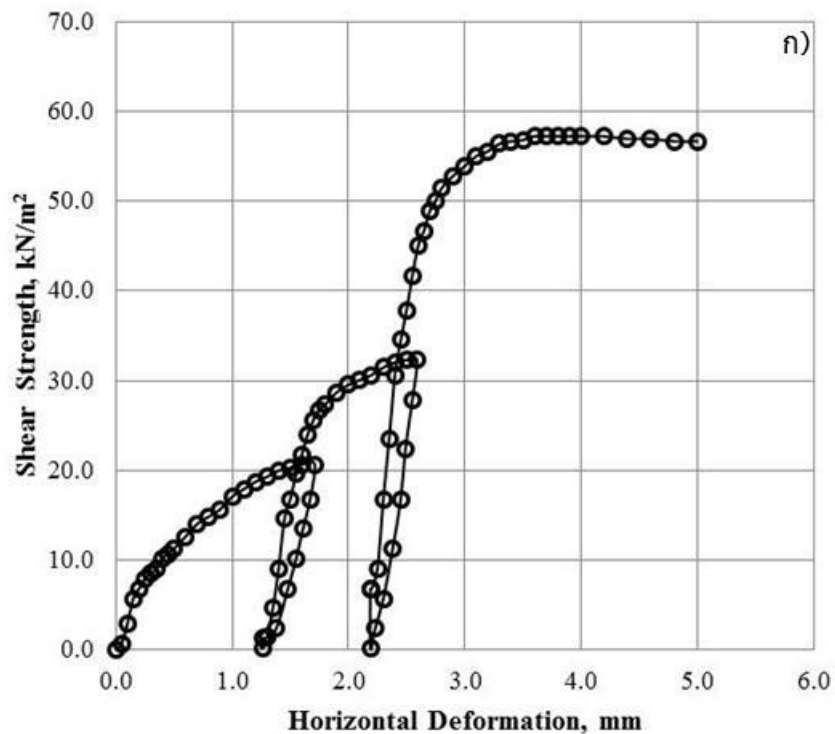
รูปที่ ก-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT4 ที่ระดับความลึก 0.00-1.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



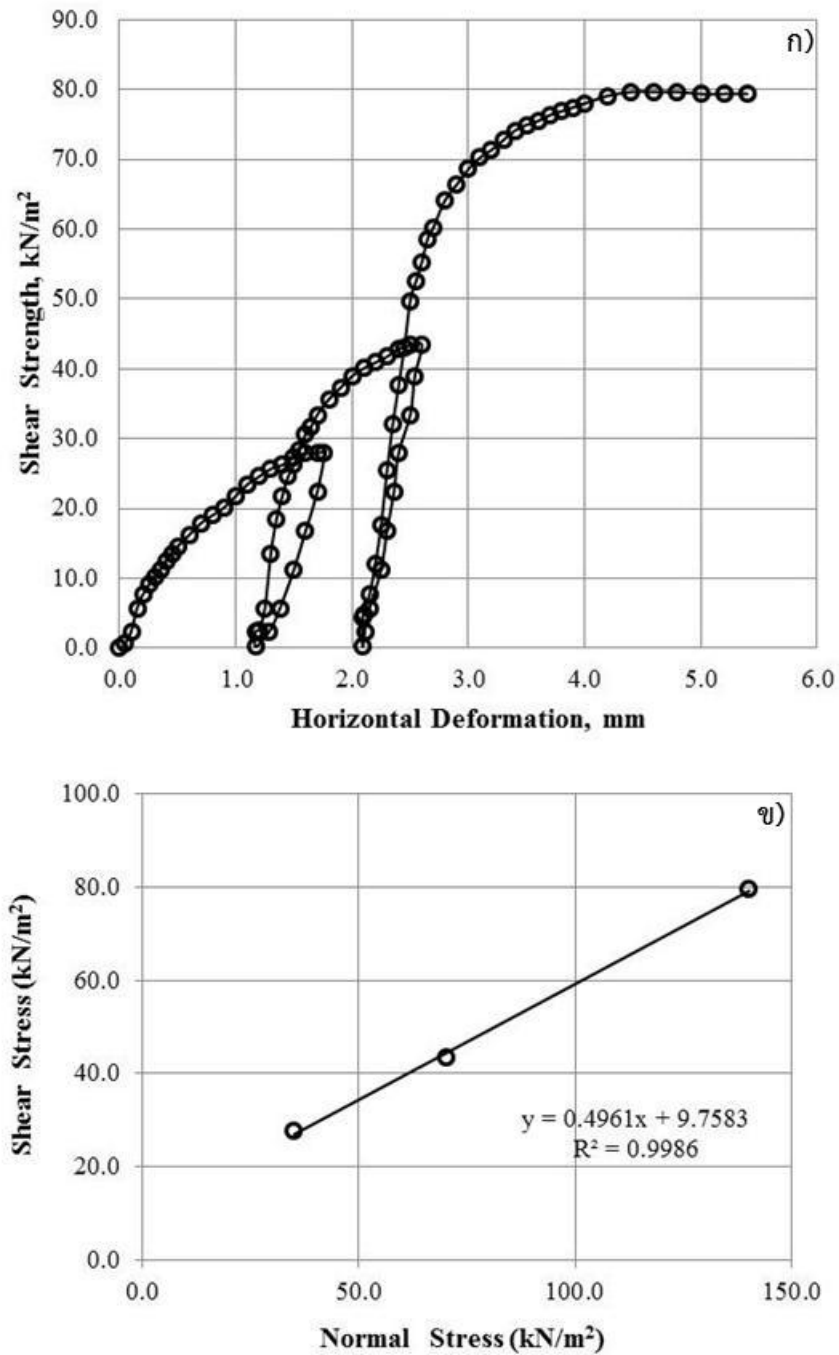
รูปที่ ก-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT4 ที่ระดับความลึก 1.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



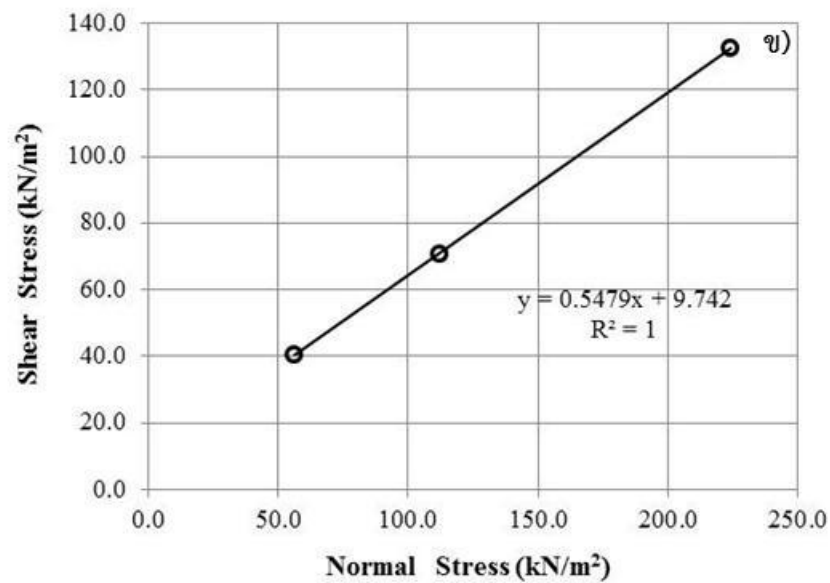
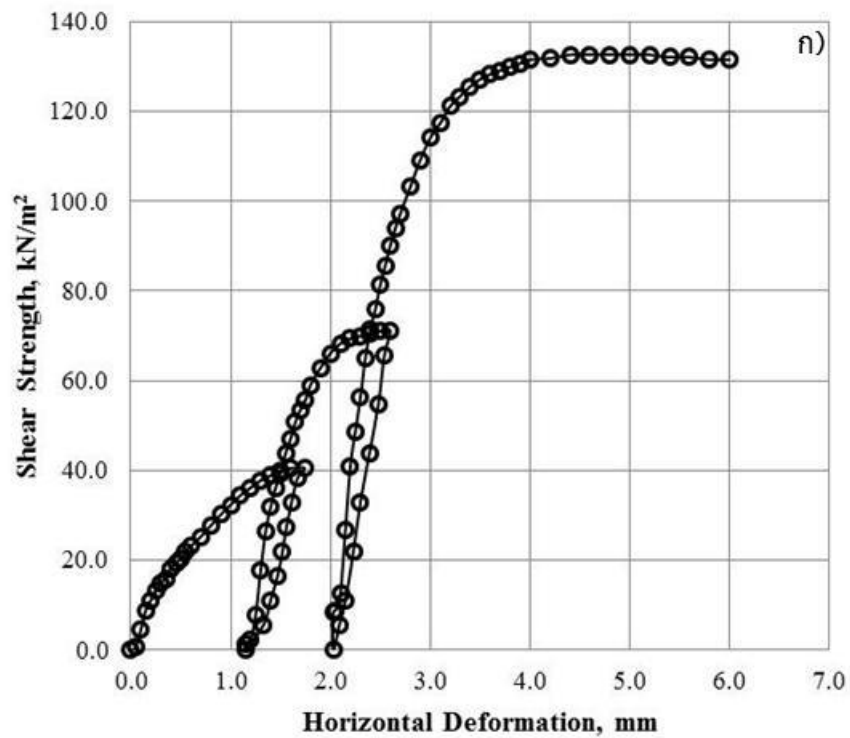
รูปที่ ก-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT4 ที่ระดับความลึก 2.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



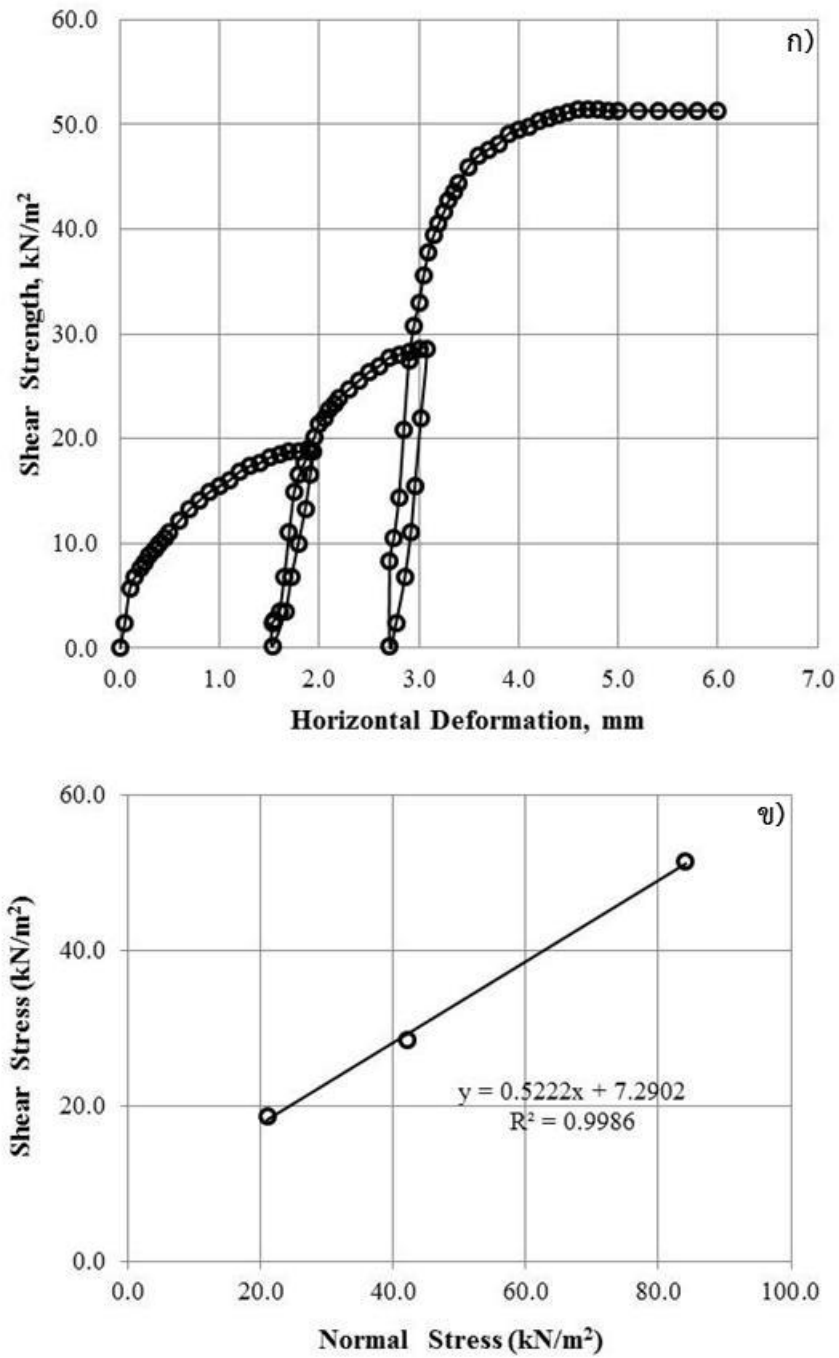
รูปที่ ก-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT5 ที่ระดับความลึก 0.00-1.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



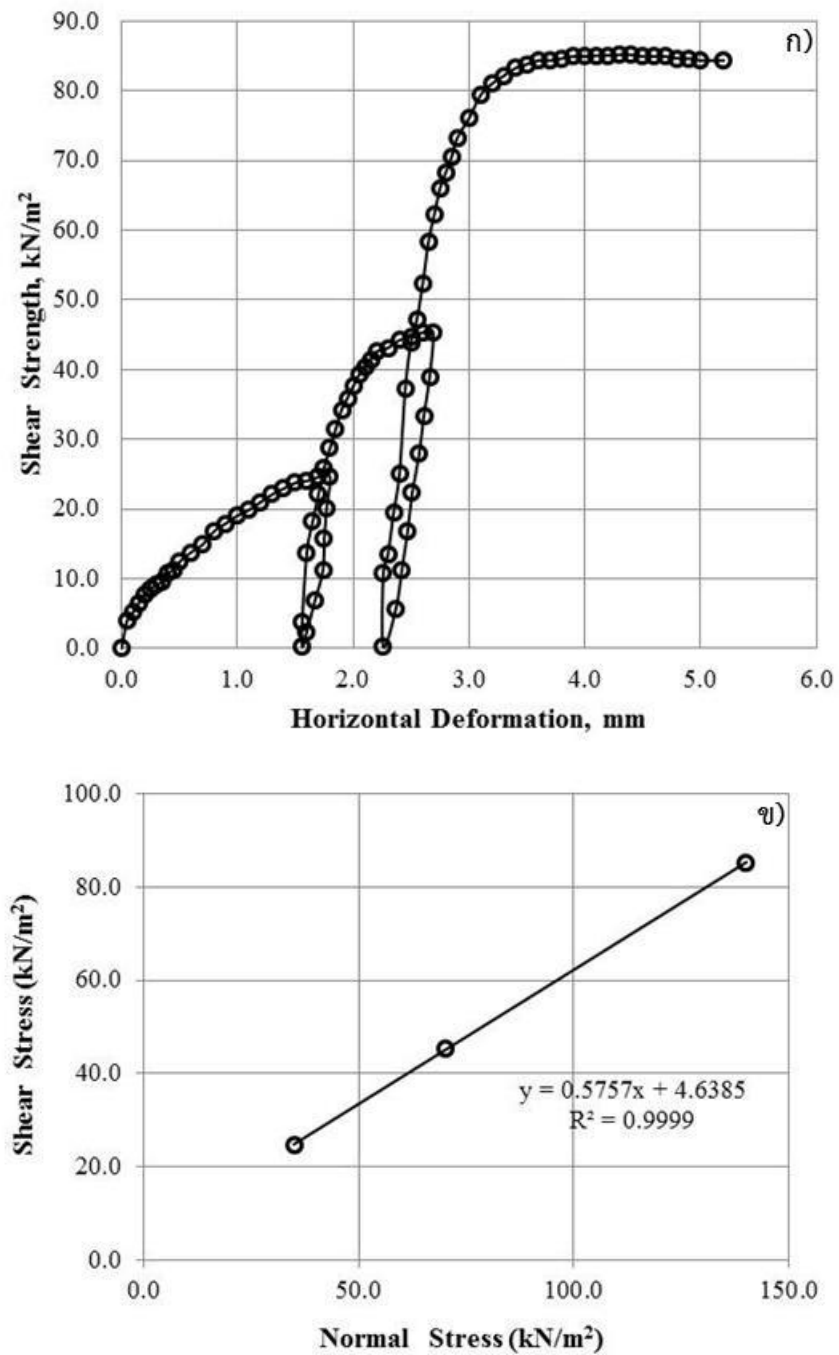
รูปที่ ก-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT5 ที่ระดับความลึก 1.50-2.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



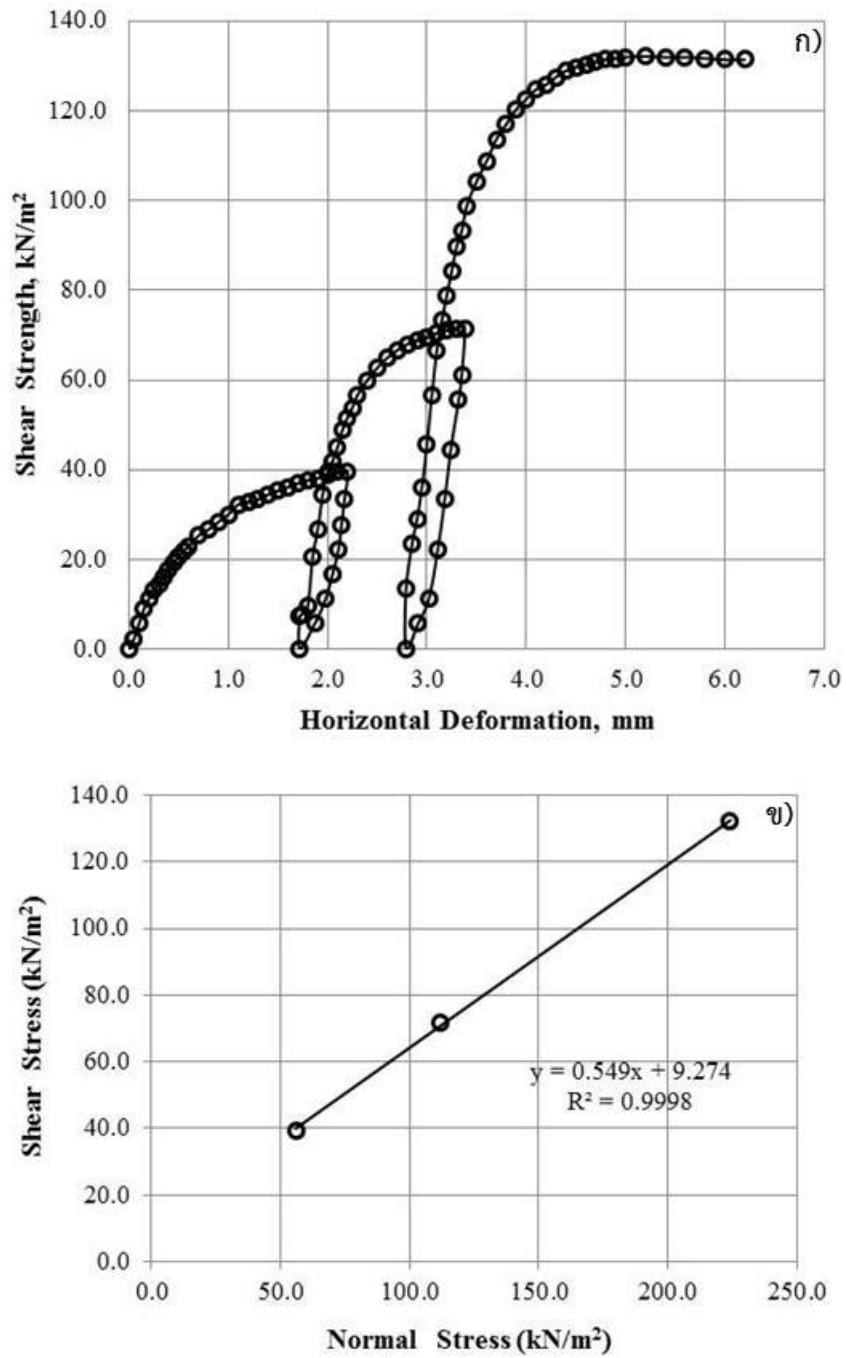
รูปที่ ก-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT5 ที่ระดับความลึก 2.50-3.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



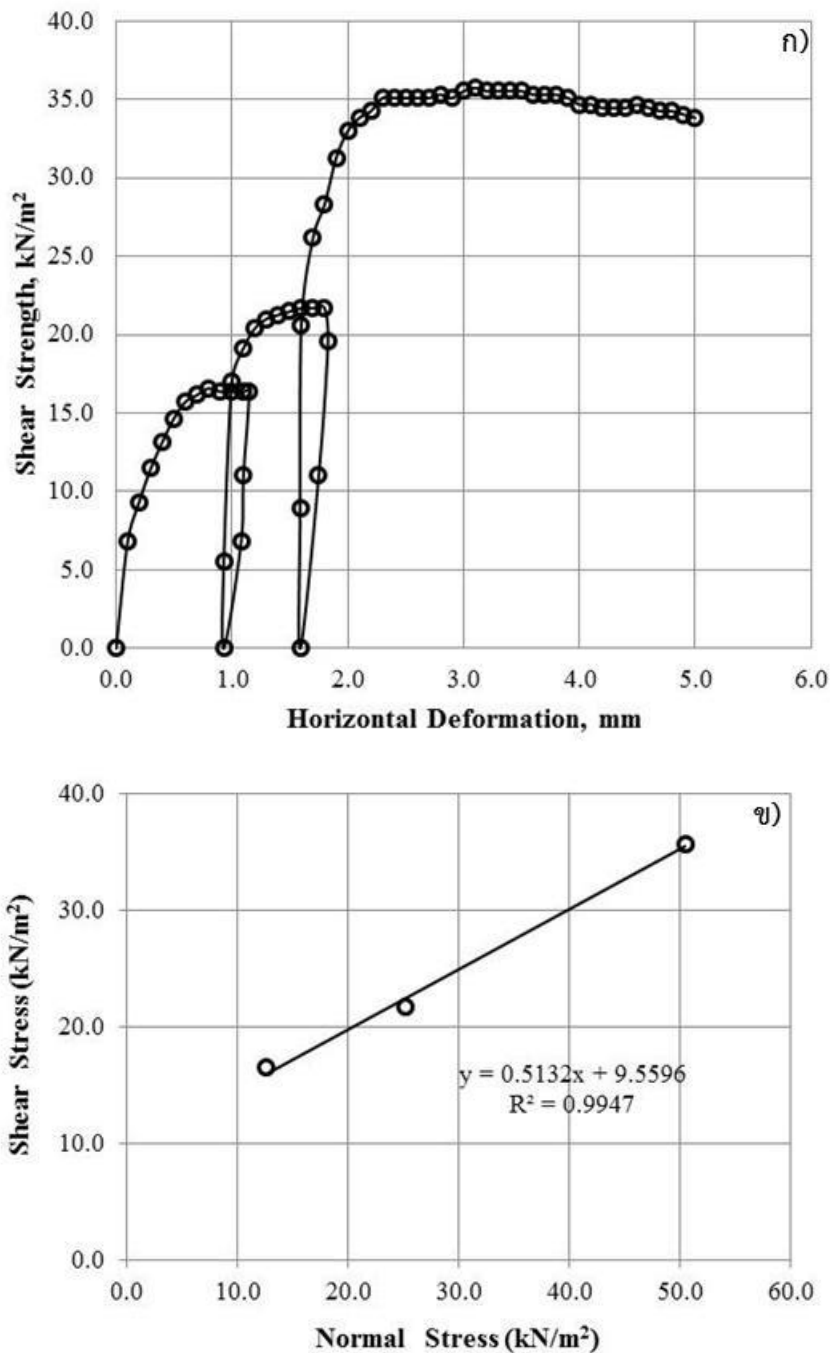
รูปที่ ก-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT6 ที่ระดับความลึก 0.00-1.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



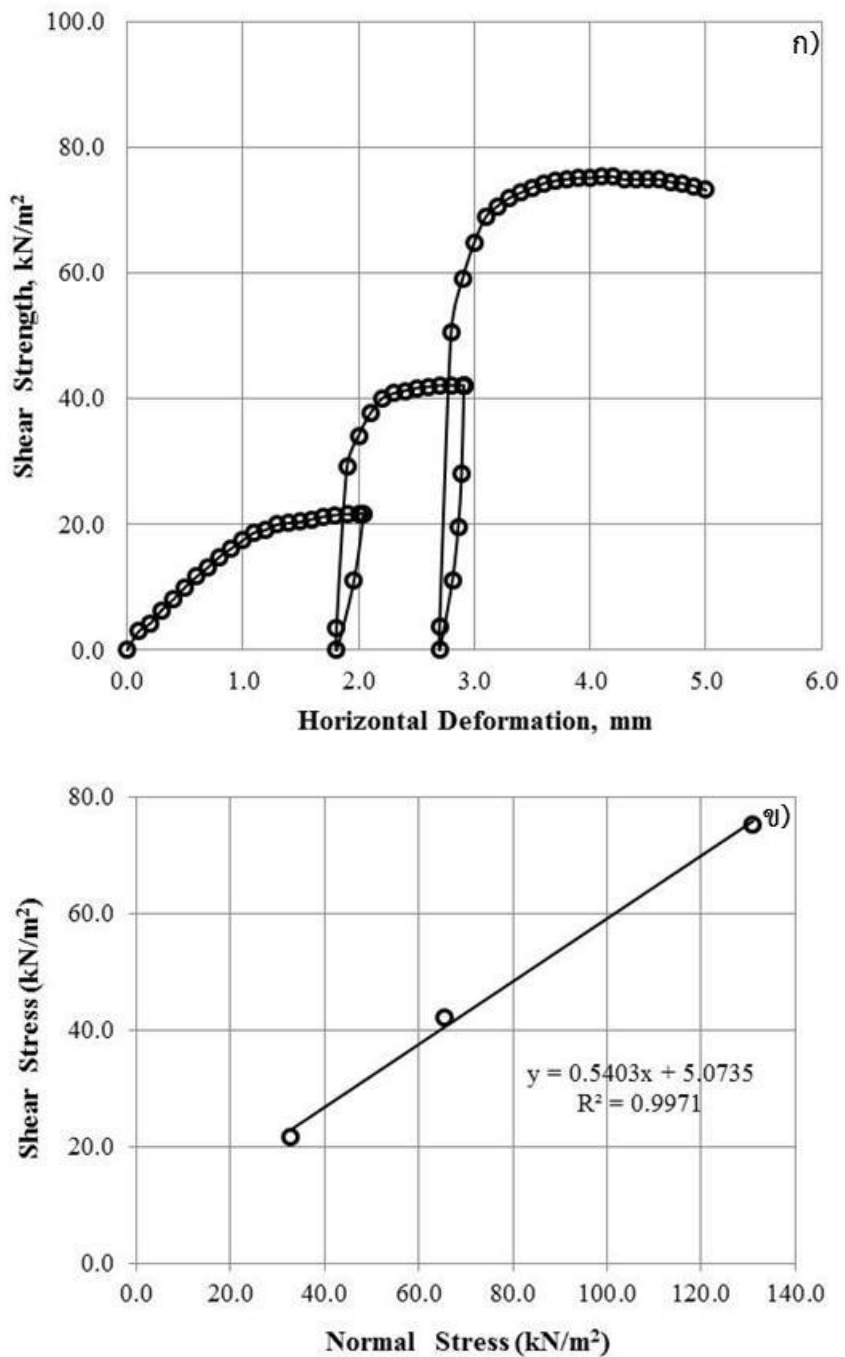
รูปที่ ก-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT6 ที่ระดับความลึก 1.50-2.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



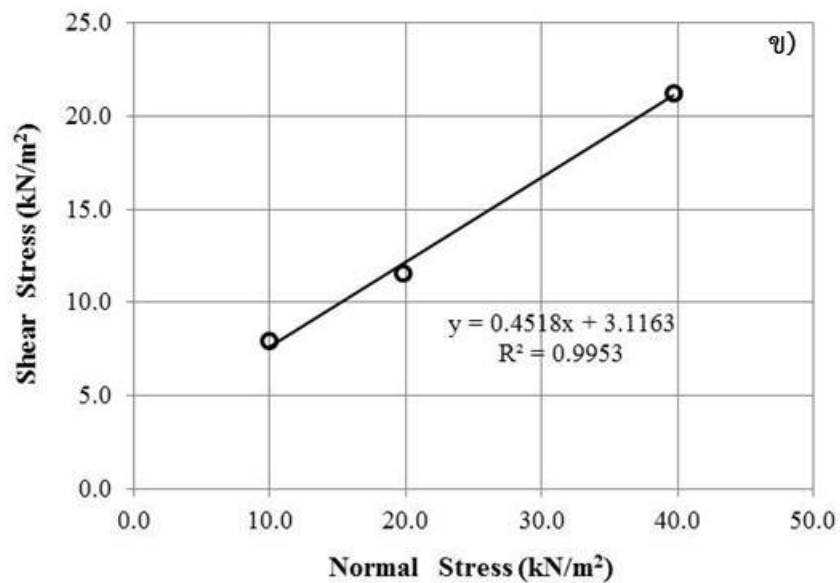
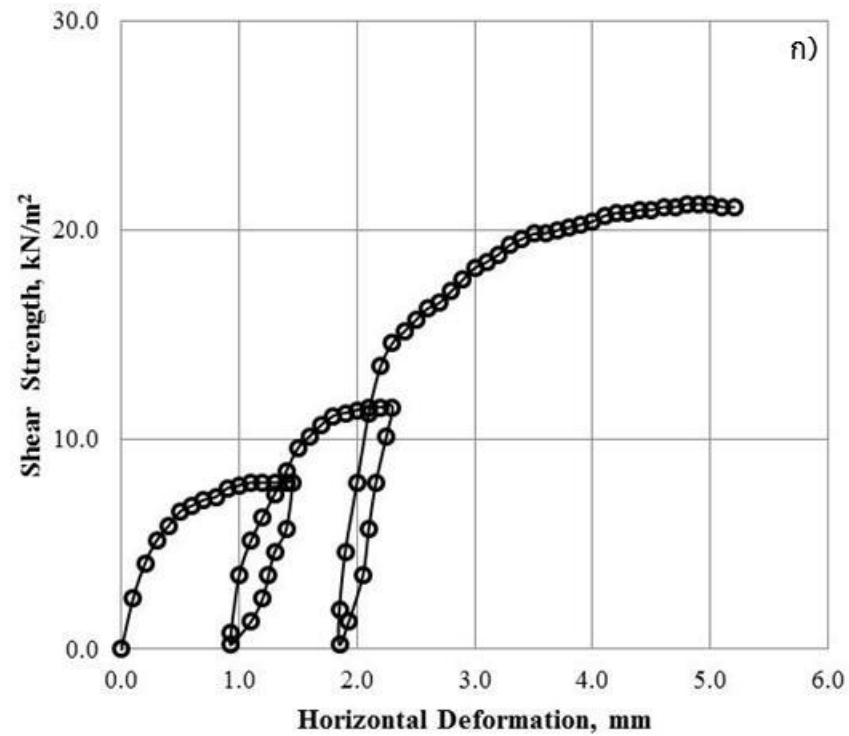
รูปที่ ก-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT6 ที่ระดับความลึก 2.50-3.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



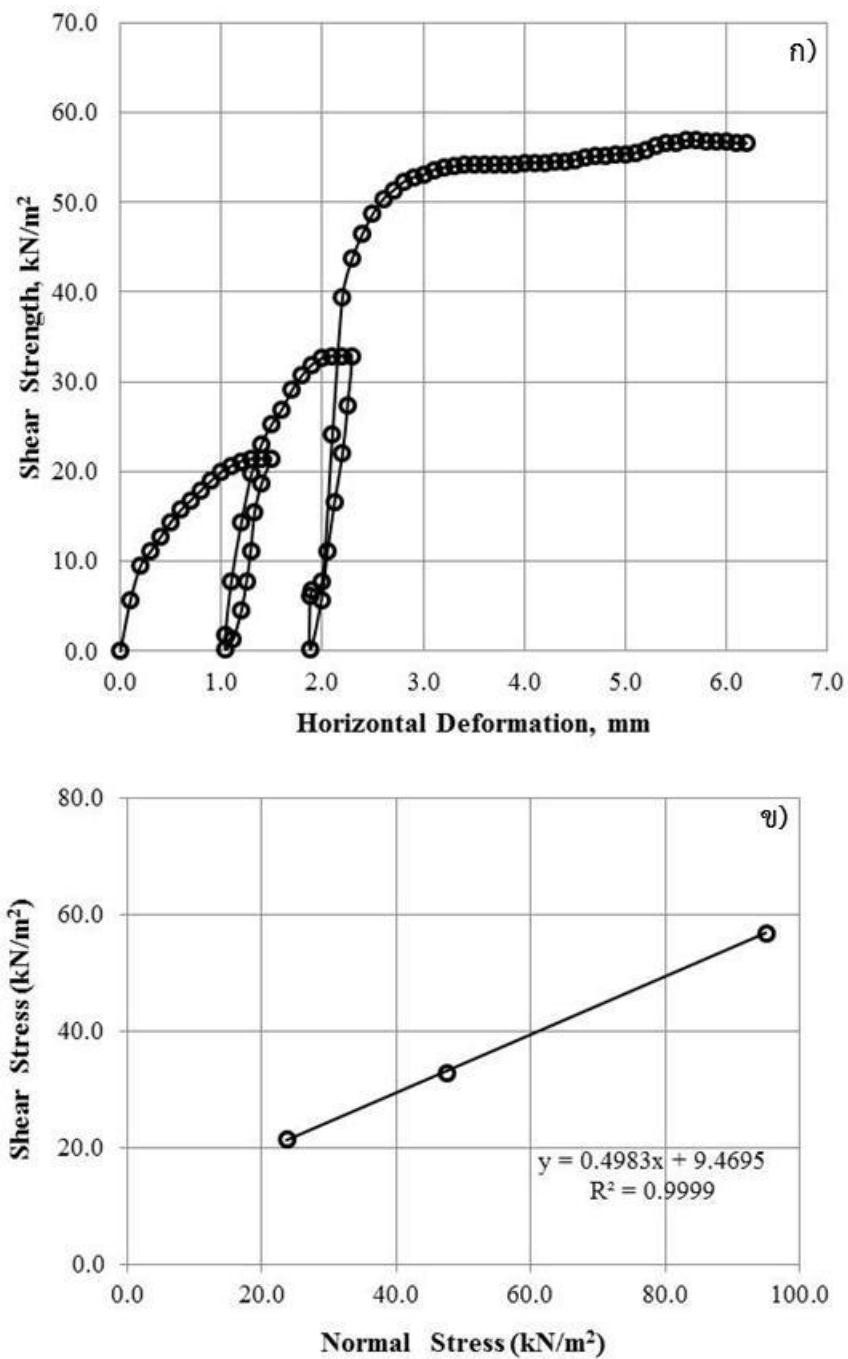
รูปที่ ก-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT7 ที่ระดับความลึก 0.00-1.40 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



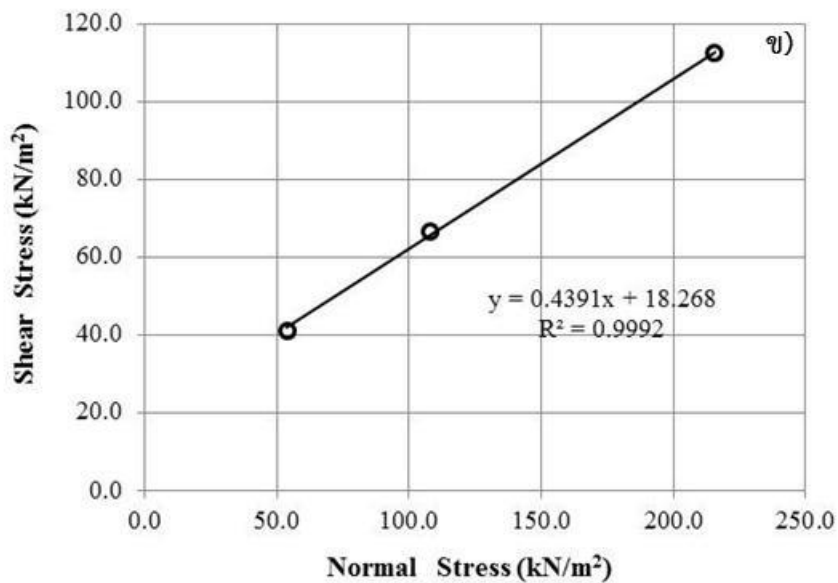
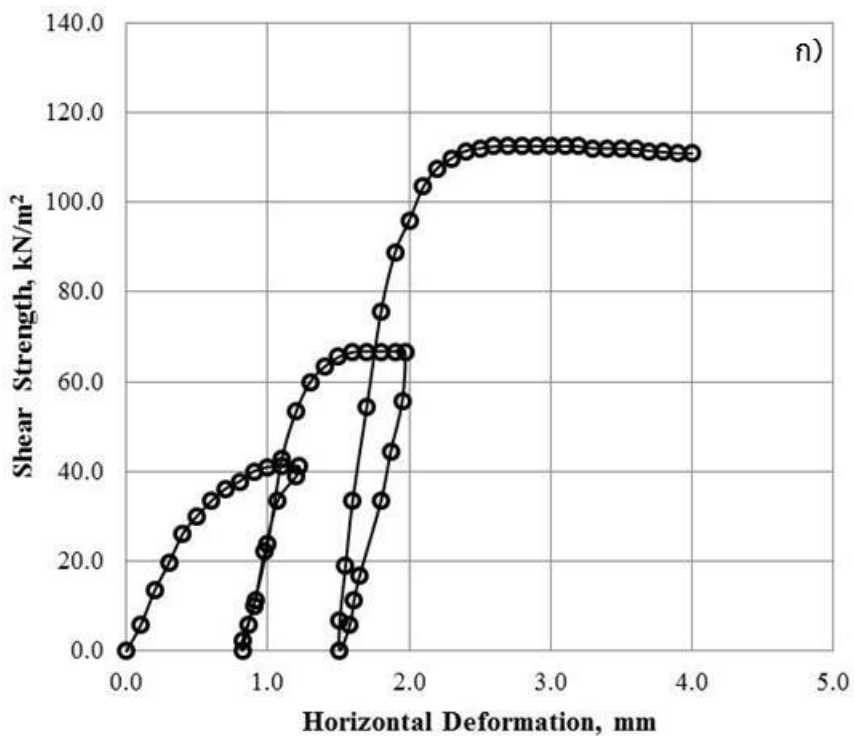
รูปที่ ก-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT7 ที่ระดับความลึก 1.40-4.49 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



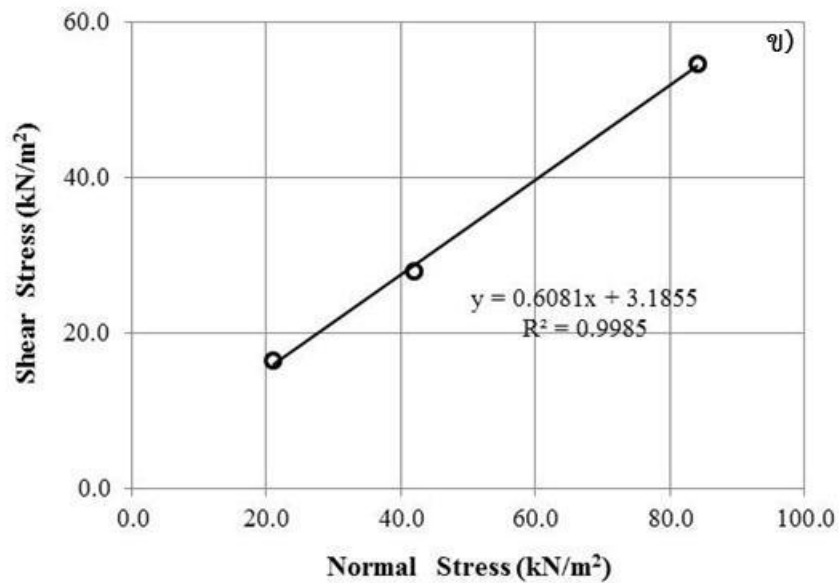
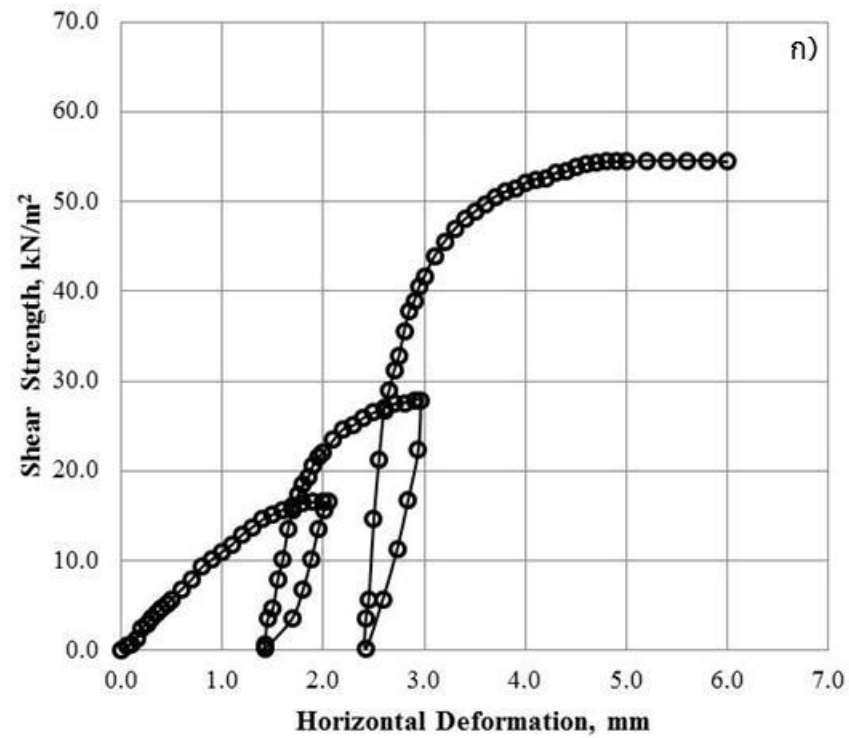
รูปที่ ก-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT8 ที่ระดับความลึก 0.00-1.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



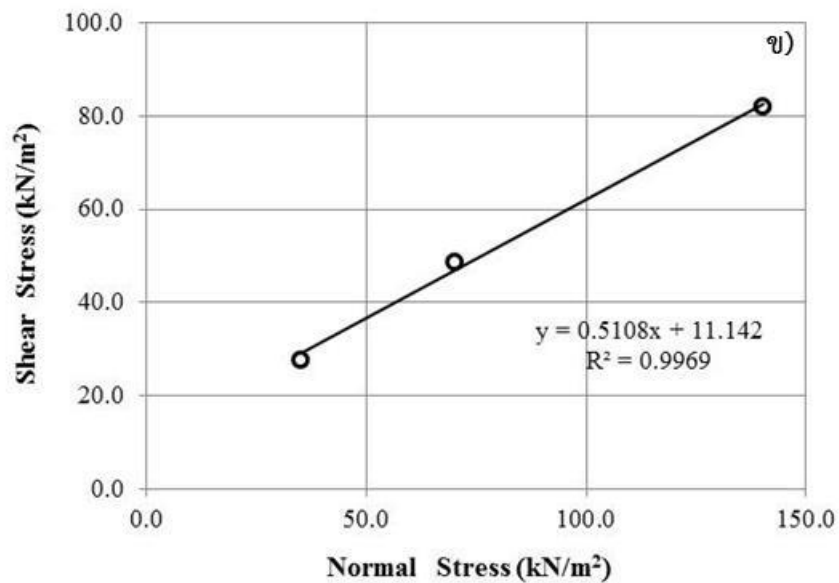
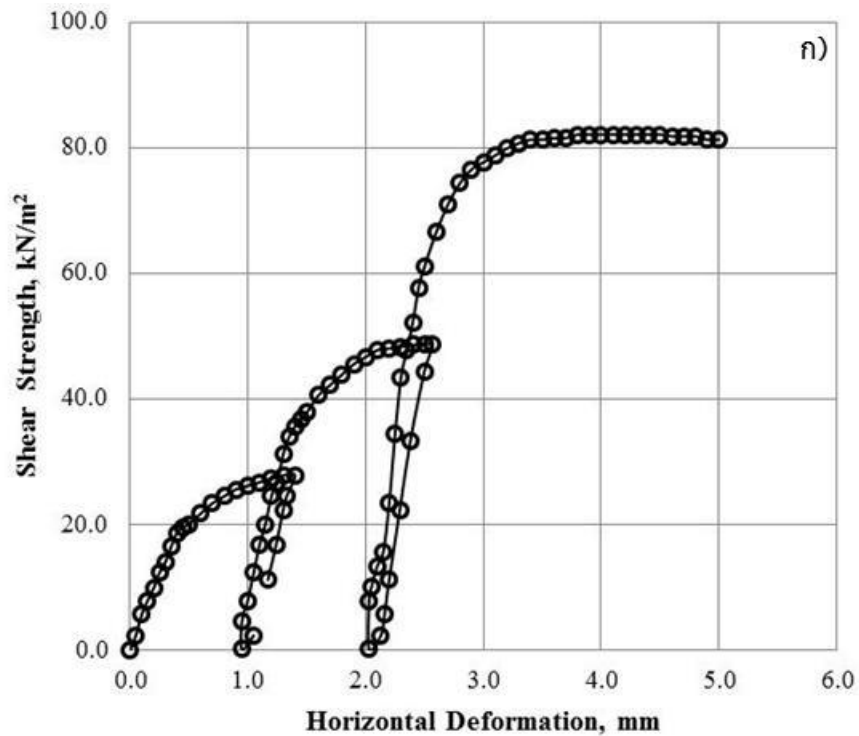
รูปที่ ก-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT8 ที่ระดับความลึก 1.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



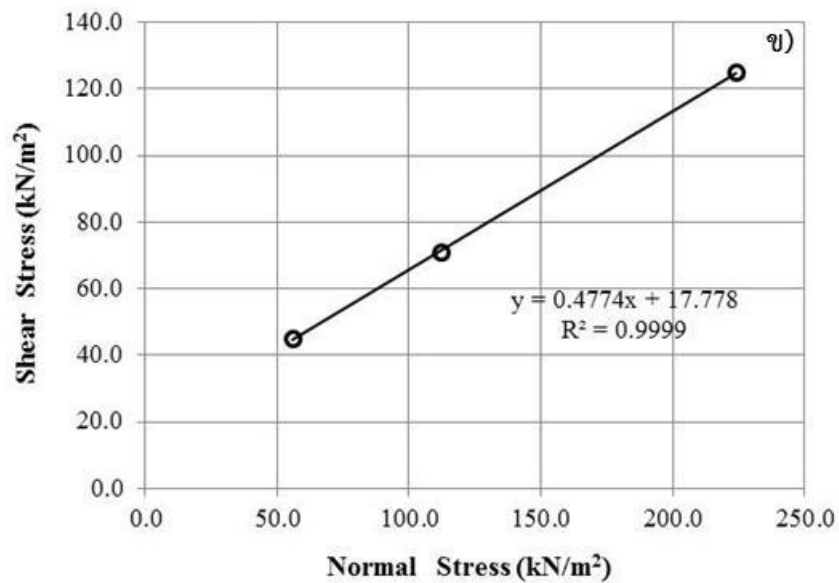
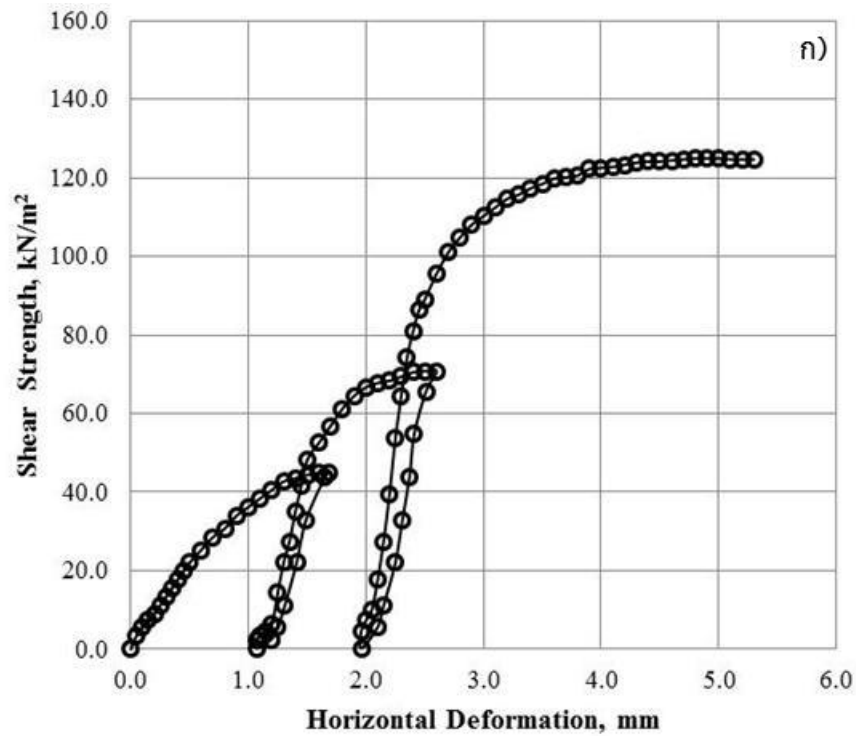
รูปที่ ก-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT8 ที่ระดับความลึก 2.00-3.50 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



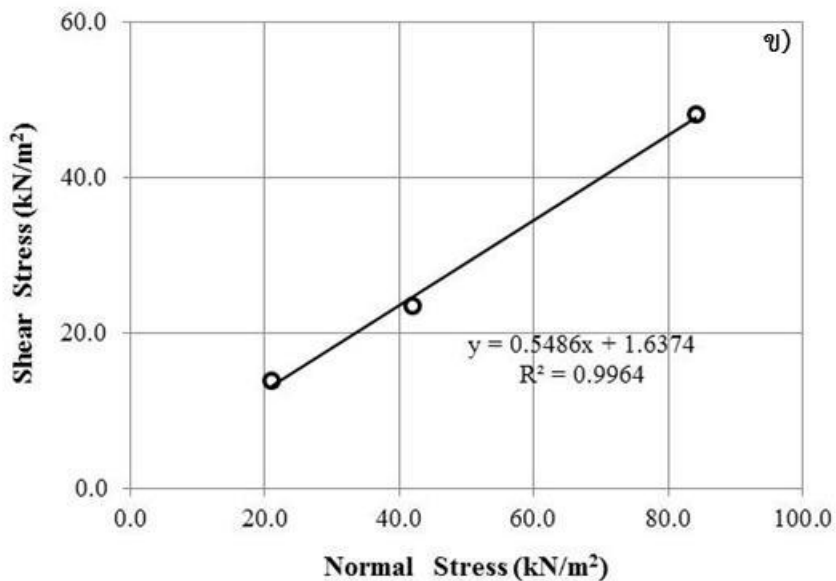
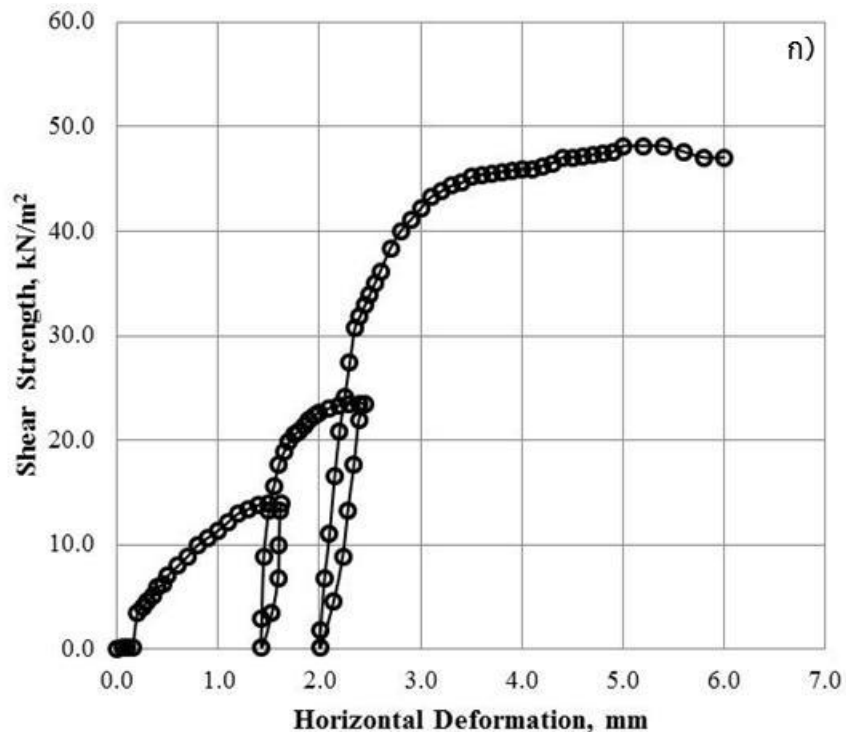
รูปที่ ก-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT9 ที่ระดับความลึก 0.00-1.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



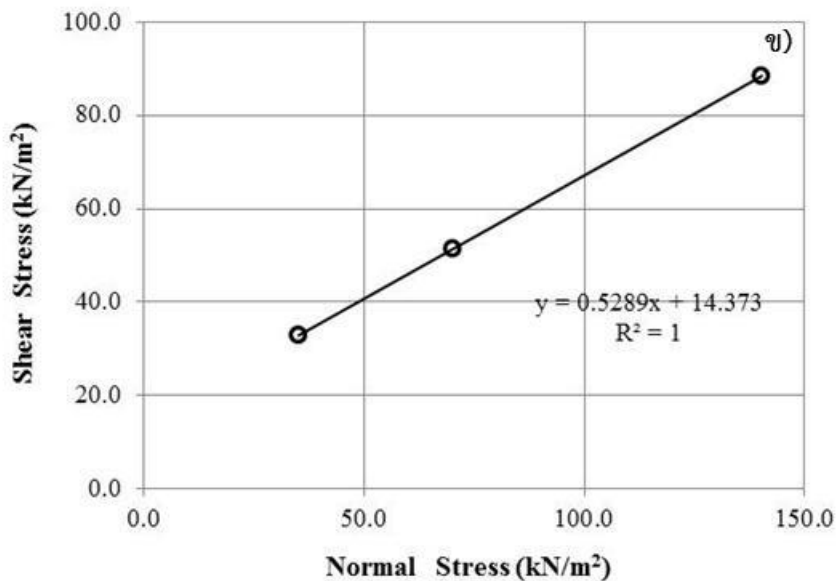
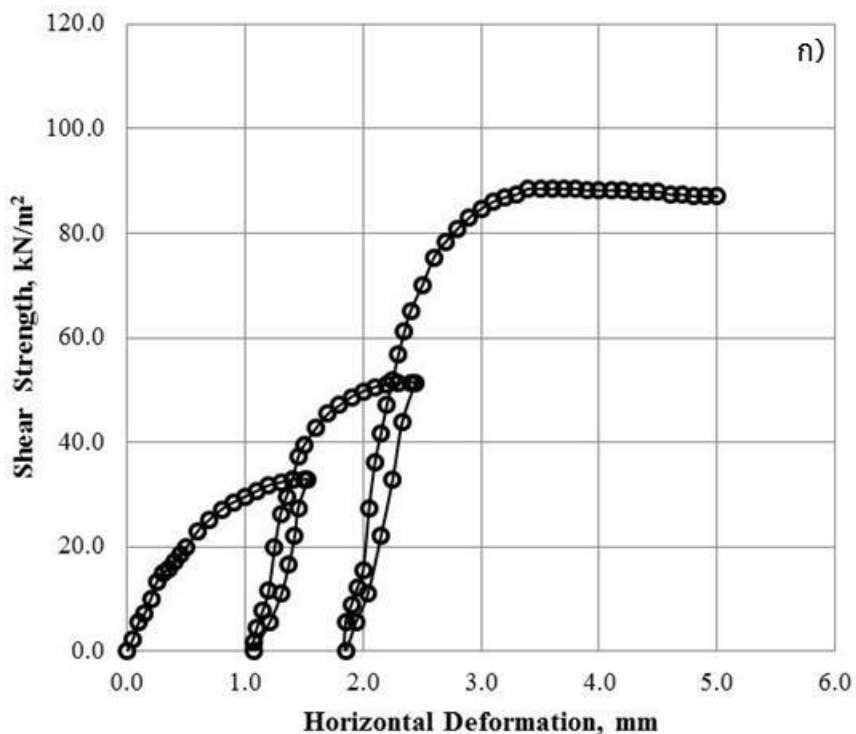
รูปที่ ก-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT9 ที่ระดับความลึก 1.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



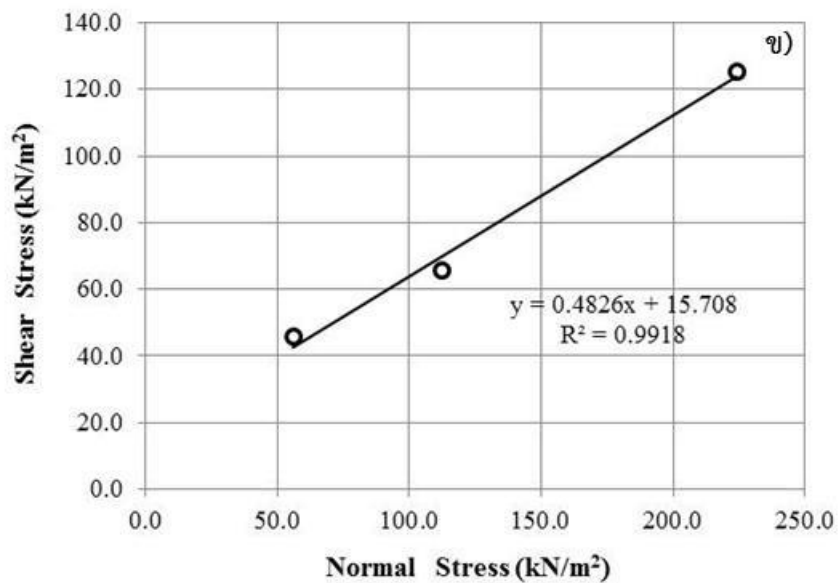
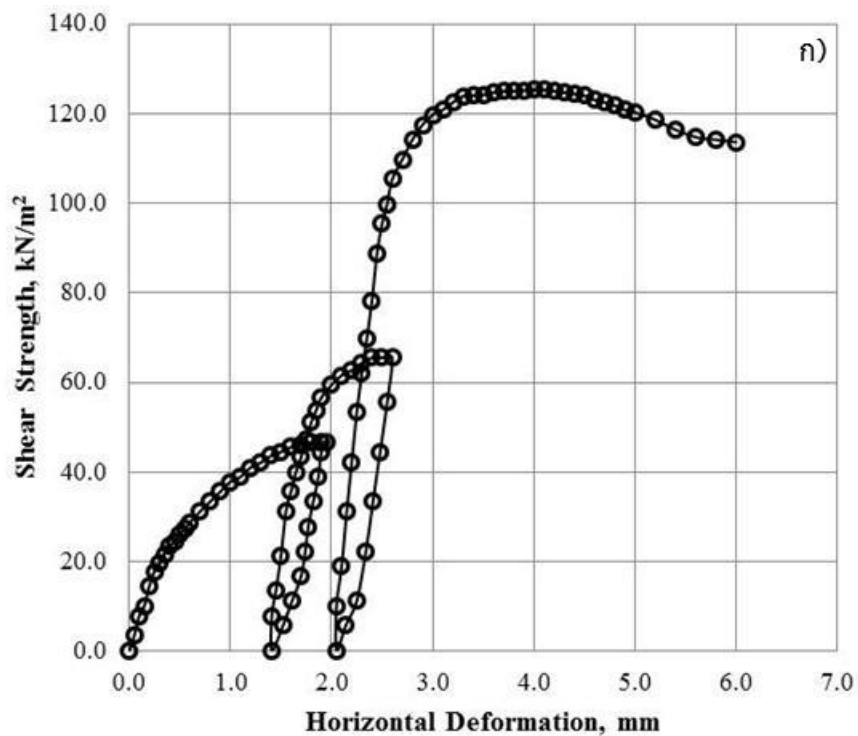
รูปที่ ก-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT9 ที่ระดับความลึก 2.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



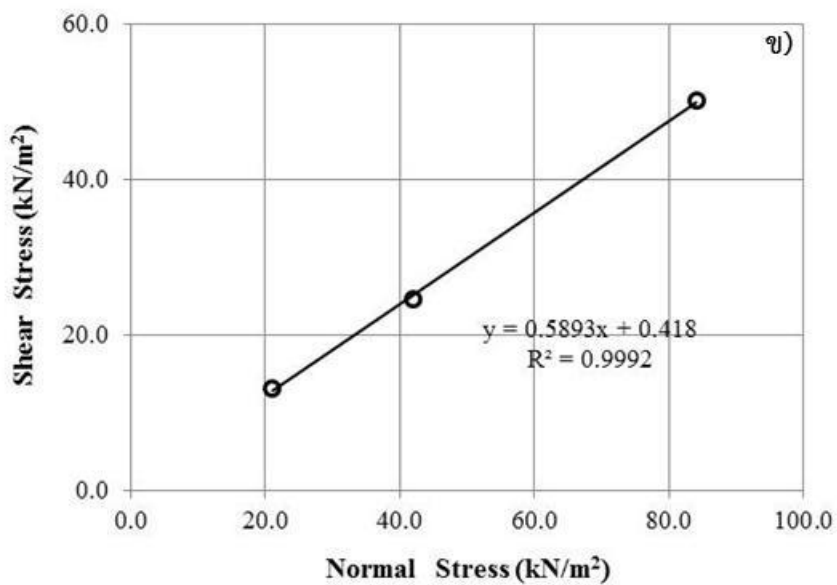
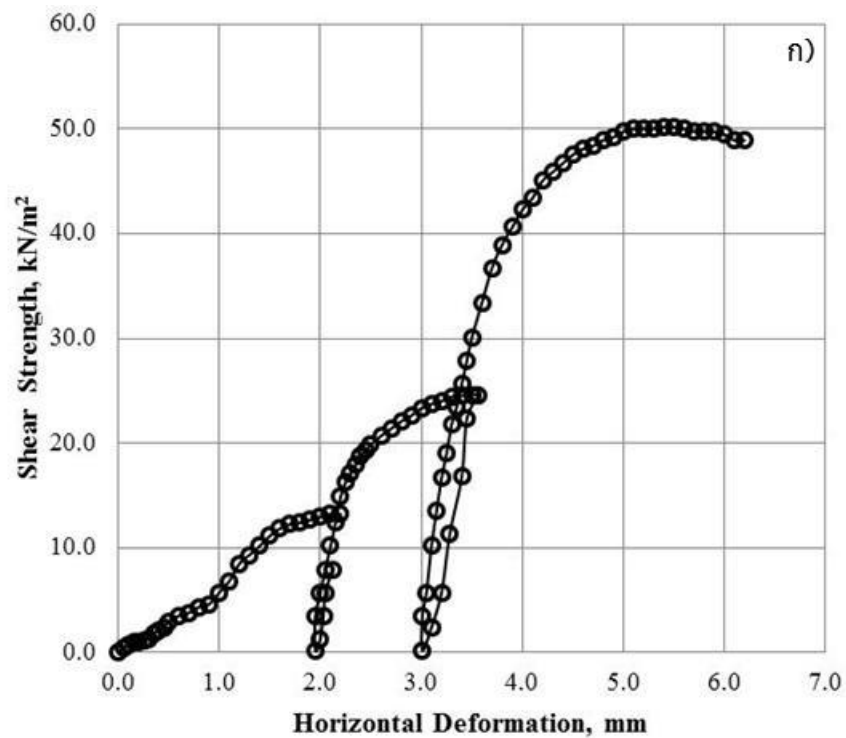
รูปที่ ก-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT10 ที่ระดับความลึก 0.00-1.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



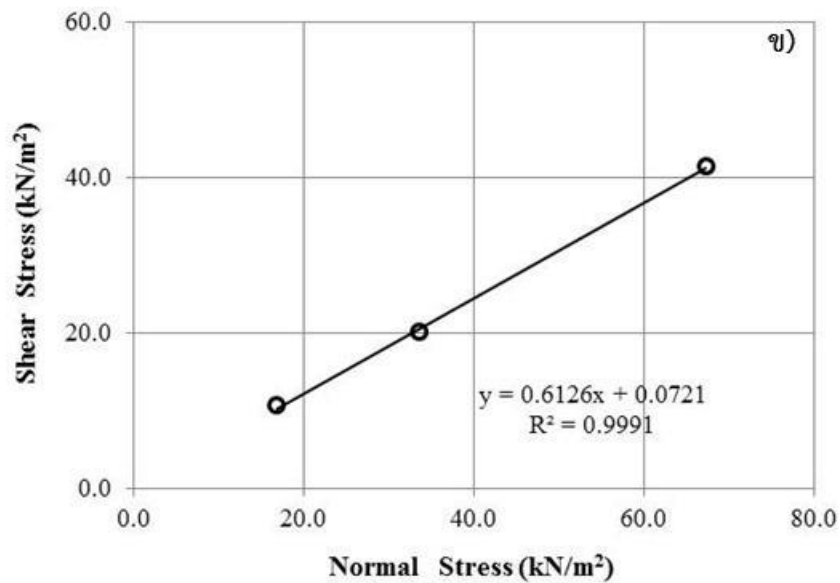
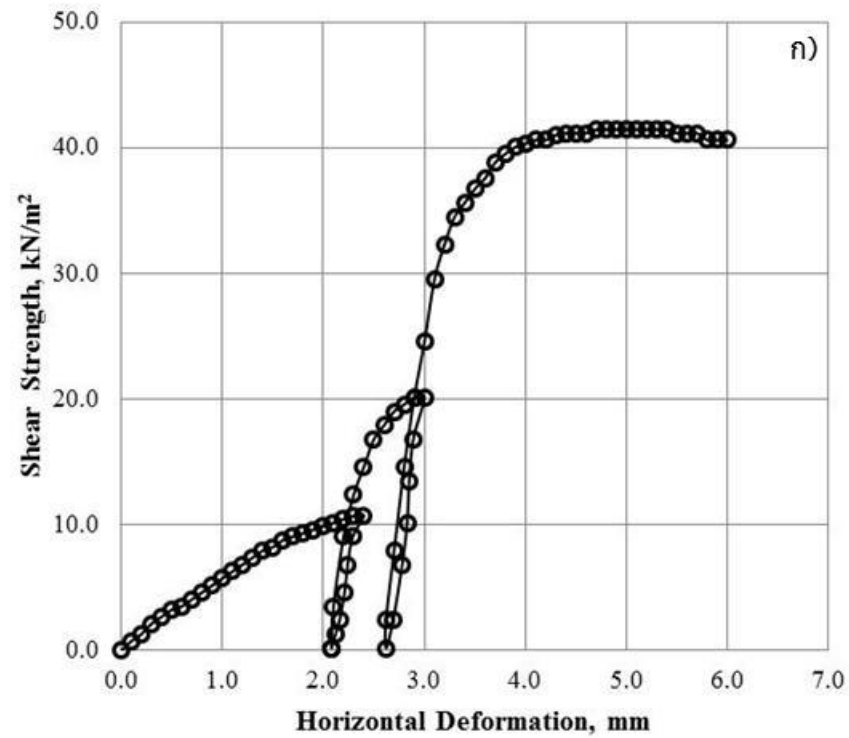
รูปที่ ก-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT10 ที่ระดับความลึก 1.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



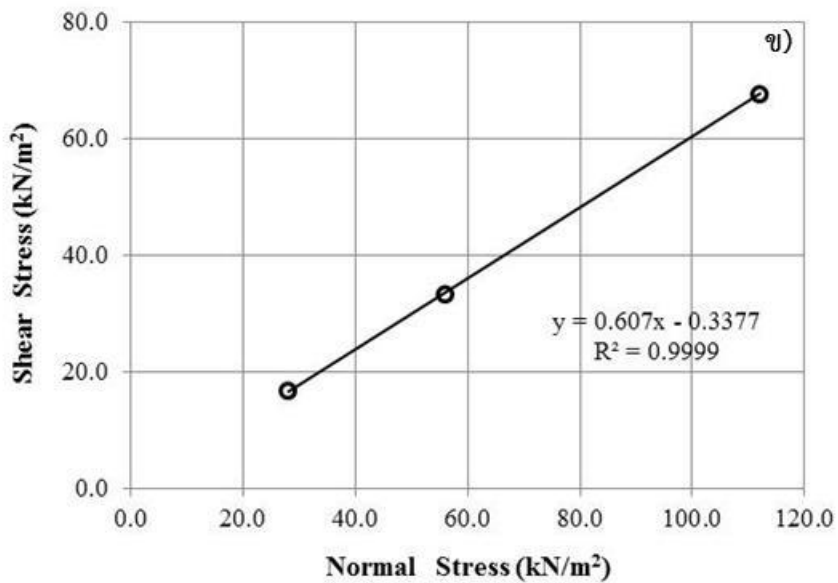
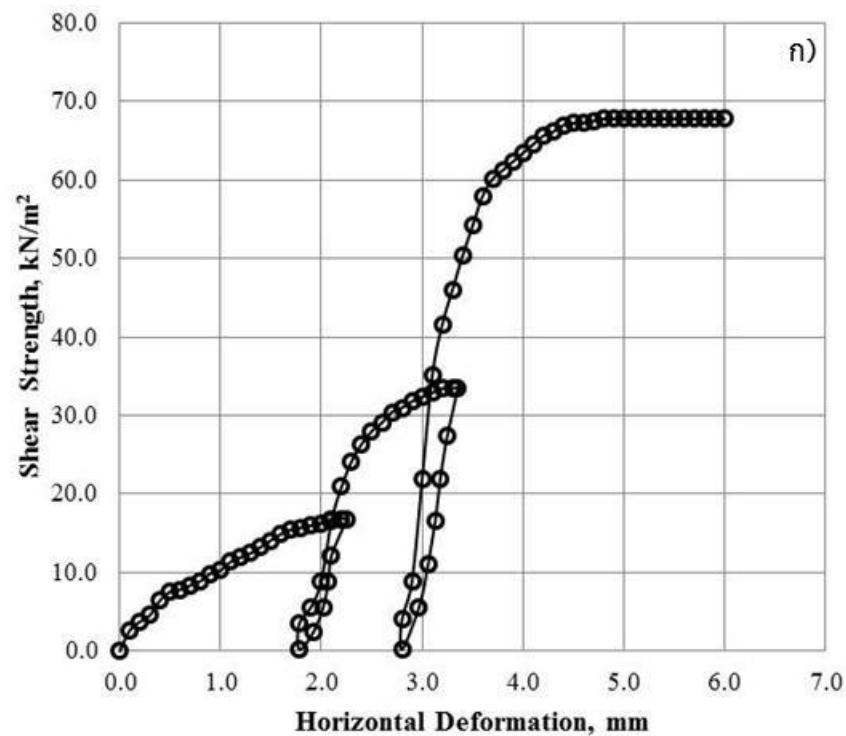
รูปที่ ก-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT10 ที่ระดับความลึก 2.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



รูปที่ ก-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT11 ที่ระดับความลึก 0.00-3.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



รูปที่ ก-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT12 ที่ระดับความลึก 0.00-1.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง



รูปที่ ก-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก) Shear stress-Horizontal displacement ข) Shear stress-Normal stress ของตลิ่งตำแหน่ง UT12 ที่ระดับความลึก 1.00-2.00 เมตร จากขอบบนของตลิ่ง

ภาคผนวก ข

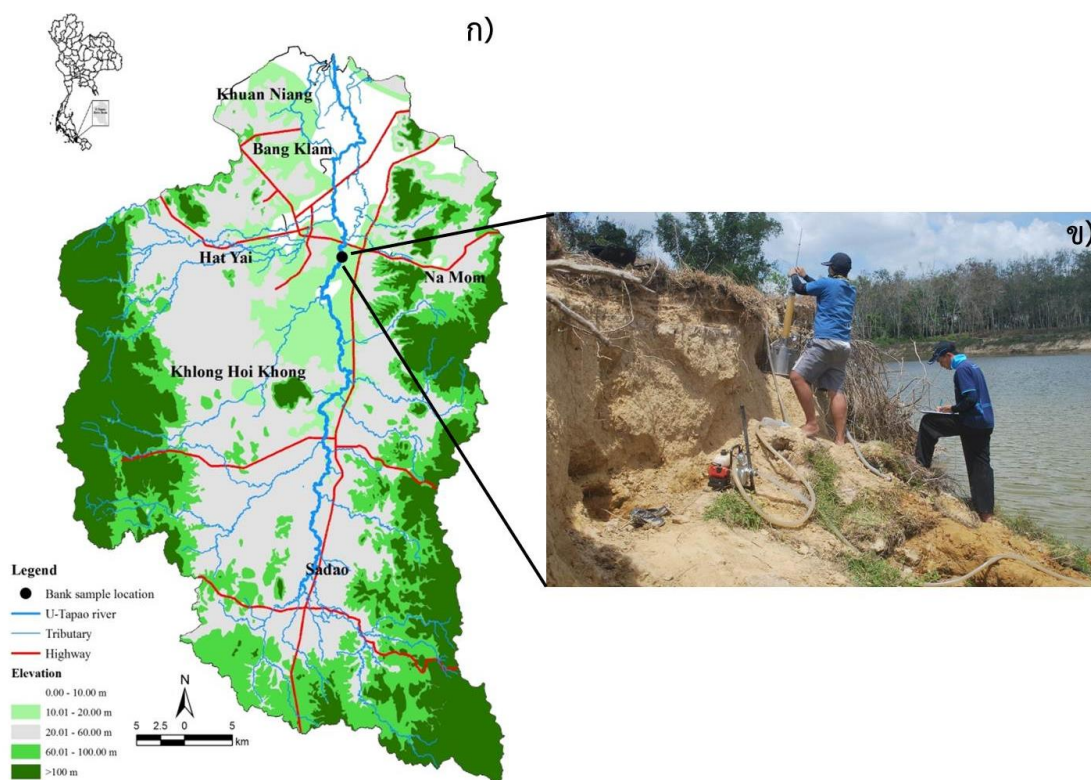
ตัวอย่างการทดสอบและการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากการทดสอบ
Submerged jet test โดยใช้ Jet Erosion Test Spreadsheet Tool

ตัวอย่างการทดสอบและคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้วิธี Scour depth solution ที่พัฒนาโดย Daly et al., 2013 การคำนวณใช้ Jet erosion test spreadsheet ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณผลการทดสอบการกัดเซาะโดยวิธี Submerged jet test โดยเฉพาะ ขั้นตอนการทดสอบและคำนวณผลการทดสอบได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการทดสอบ

Submerged jet device เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและสามารถทดสอบกับดินหลายๆ ชนิดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ภาพการทดสอบ Submerged jet test บริเวณจุดทดสอบของตลิ่งคลองอยู่ตะเภาก็ได้แสดงในรูปที่ ข1 ดินบริเวณจุดทดสอบจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) เป็นตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (ML) การทดสอบในภาคสนามมีขั้นตอนโดยสังเขปดังต่อไปนี้



รูปที่ ข1 แผนที่ลุ่มน้ำคลองอยู่ตะเภา ก) ตำแหน่งทำการทดสอบ Submerged jet test ข) การทดสอบบริเวณตลิ่งคลองอยู่ตะเภา

1) เลือกบริเวณทดสอบโดยที่หน้าดินควรอยู่ในแนวระดับ หรือมีความชันน้อยกว่า 26 องศาเทียบกับแนวราบ ทำการปรับหน้าดินในตำแหน่งที่ต้องการทดสอบให้มีผิวเรียบและกว้างกว่าขนาดของ Submergence tank

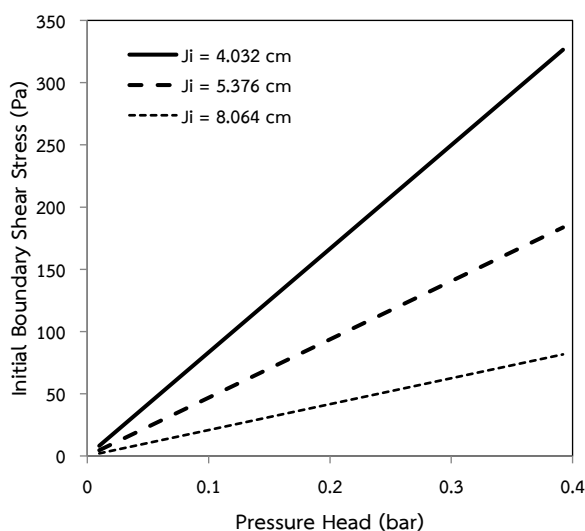
2) จากนั้นทำการตอก Submergence tank ให้จมลงในดินที่ปรับระดับไว้ ประมาณ 7 เซนติเมตรพร้อมทั้งตอกเหล็กยึด Submergence tank และติดตั้งอุปกรณ์ส่วนที่เหลือเข้ากับ Submergence tank เพื่อเตรียมพร้อมในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ ข2

3) เปิดเครื่องสูบน้ำเพื่อเติมน้ำเข้าสู่ Jet tube และ Submergence tank โดยการปิด Deflection plate ป้องกันไม่ให้น้ำไหลไปกระทบกับผิวดิน หลังจากนั้น ทำการไล่ฟองอากาศออกจาก Jet tube โดยการปรับ Air relief valve



รูปที่ ข2 การติดตั้งเครื่องการทดสอบการกัดเซาะตลิ่งในสนาม (Submerged jet device)

4) ทำการปรับหน่วยแรงเฉือนเริ่มต้นโดยพิจารณาจากแรงดันน้ำและระยะ Nozzle height ดังแสดงในรูปที่ ข3 รอจนกว่าระดับน้ำใน Submergence tank คงที่ กระบวนการนี้ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที ซึ่งเพียงพอในการทำให้ผิวดินที่ทำการทดสอบอิมมัวไปด้วยน้ำ สำหรับดินที่มีความซึมผ่านของน้ำน้อยมากอาจจะเพิ่มเวลาในกระบวนการนี้มากขึ้น เครื่องมือพร้อมที่จะทดสอบเมื่อสิ้นสุดในขั้นตอนนี้



รูปที่ ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับและหน่วยแรงเฉือนเริ่มต้น

5) เปิด Deflection plate ให้น้ำไหลกระทบกับผิวดินพร้อมทั้งจับเวลาเพื่อเริ่มการทดสอบทำการวัดค่าระยะการกัดเซาะด้วย Point gauge ทุกๆ 1, 3, 5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 นาที และอ่านค่าแรงดันน้ำด้วย Pressure gauge ค่าระยะการกัดเซาะและค่าแรงดันน้ำ (Pressure head) ทั้งสองนี้จะนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

ตารางที่ ข1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนาม ซึ่งนำมาใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะที่ประกอบด้วย หน่วยแรงเฉือนวิกฤต (Critical shear stress) และค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดิน ข้อมูลจากตารางที่ ก1 เป็นข้อมูลนำเข้าในโปรแกรม Jet Erosion Test Spreadsheet Tool ดังแสดงในรูปที่ ข4

ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินคำนวณจากการพล็อตข้อมูลจากการทดสอบกับสมการที่ 2.37-2.40 (บทที่ 2) ร่วมกับการหาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยการทำให้ Optimization เพื่อหาค่าระยะการกัดเซาะสมดุล (Equilibrium scour depth, J_e) โดยการกำหนดค่า A และ f_o เริ่มต้นเท่ากับ 1 ผลการคำนวณได้แสดงดังรูปที่ ข5 โดยที่ค่า A และ f_o เท่ากับ 1.141 และ 1.408 ตามลำดับซึ่งสัมพันธ์กับค่า

ระยะการกัดเซาะสมดุลเท่ากับ 0.162 m และค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินคำนวณจากสมการที่ 2.33 เท่ากับ 2.70Pa

ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินถูกคำนวณหลังจากทราบค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตของดินแล้ว การคำนวณทำได้โดยการทำ Optimization ข้อมูลจากการทดสอบร่วมกับสมการที่ 2.42-2.46 (บทที่ 2) โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินเริ่มต้นและเปลี่ยนแปลงค่าจนได้ค่า RMS น้อยที่สุด ผลการทำ Optimization ได้แสดงในรูปที่ ข5 ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของดินเท่ากับ $14.06 \text{ cm}^3/\text{N.s}$

ตารางที่ ก1 ข้อมูลผลการทดสอบในสนามสำหรับการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะ

Submerged Jet Test Data			
Time (min)	Head (in)	Point Gauge Reading(mm)	Maximum Depth of Scour (cm)
0	21.89	125.0	0.000
1	21.89	136.0	1.100
3	21.89	140.0	1.500
5	21.89	142.0	1.700
10	20.92	160.0	3.500
15	22.86	176.0	5.100
20	22.86	181.0	5.600
25	23.83	184.0	5.900
30	21.89	189.5	6.450
35	22.86	192.0	6.700
40	20.92	193.0	6.800
45	21.89	193.5	6.850
50	22.86	193.5	6.850

Note: Nozzle diameter (d_o) = 0.64 cm, Nozzle height (J_i) = 8.00 cm

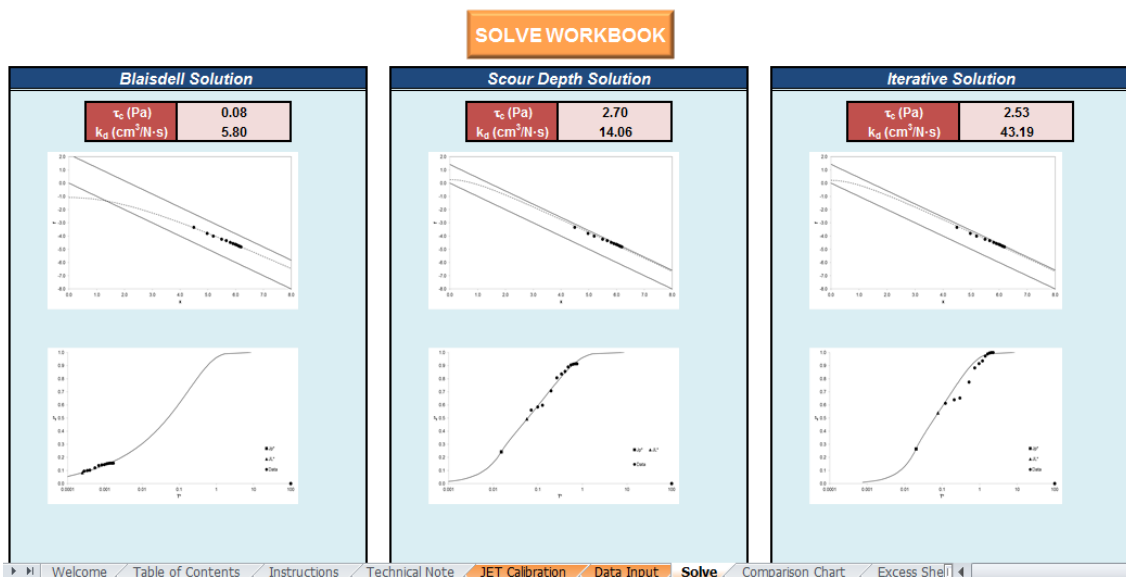
Site:	UT3 Stabilization site
Date:	2/20/2015
Test ID:	Test#1
JET ID:	1
Operator:	Semmad.s
Test Location:	U-Tapao river

Pt Gage Reading at Nozzle (mm):	45
Ref. Pt Gage Reading at Nozzle (ft):	0.8524
Nozzle Diameter (in):	0.25
Nozzle Height (ft):	0.2625
Discharge Coefficient:	1

Initial guess* for τ_c (Pa):	1
Initial guess* for k_d ($\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$):	1

Scour Depth Readings						Head Setting	
Time (min)	Diff Time (min)	Pt Gage Reading (mm)	Depth (ft)	Pt Gage Reading (ft)	Maximum Depth of Scour (ft)	Time (min)	Head (in)
0	0	125	0.410	0.590	0.000	0	21.89
1	1	136	0.446	0.554	0.036	1	21.89
3	2	140	0.459	0.541	0.049	3	21.89
5	2	142	0.466	0.534	0.056	5	21.89
10	5	160	0.525	0.475	0.115	10	20.92
15	5	176	0.577	0.423	0.167	15	22.86
20	5	181	0.594	0.406	0.184	20	22.86
25	5	184	0.604	0.396	0.194	25	23.83
30	5	190	0.622	0.378	0.212	30	21.89
35	5	192	0.630	0.370	0.220	35	22.86
40	5	193	0.633	0.367	0.223	40	20.92
45	5	194	0.635	0.365	0.225	45	21.89
50	5	194	0.635	0.365	0.225	50	22.86

รูปที่ ข4 การนำเข้าข้อมูลในโปรแกรม Jet Erosion Test Spreadsheet Tool



รูปที่ ข5 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกัดเซาะจากการทดสอบการกัดเซาะในสนาม

ภาคผนวก ค

ระยะเวลาทดรอยเฉลี่ยของตลิ่งคลองอุ้ตะเภา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2553

ตารางที่ ค1 ระยะการถดถอยของตลิ่งฝั่งตะวันตก บริเวณพื้นที่อำเภอสะเดา

ปริมาณทางสถิติ	ระยะถดถอยของตลิ่งฝั่งตะวันตก/ตะวันออก (เมตร)			
	สะเดา	ปริก	ท่าโพธิ์	พังลา
Mean	2.31/2.83	2.59/2.79	5.09/6.54	7.03/6.51
5 th Percentile	0.12/0.13	0.20/0.21	0.22/0.43	0.43/0.31
25 th Percentile	0.52/0.52	0.84/0.83	1.10/1.77	1.69/1.71
Median	1.45/1.68	1.95/1.82	2.58/3.72	3.72/3.65
75 th Percentile	3.53/4.18	3.62/3.76	5.31/6.86	7.04/7.00
95 th Percentile	7.17/8.57	7.03/8.20	14.81/16.17	16.60/17.63

ตารางที่ ค2 ระยะการถดถอยของตลิ่งฝั่งตะวันตก บริเวณพื้นที่อำเภอหาดใหญ่

ปริมาณทางสถิติ	ระยะถดถอยของตลิ่งฝั่งตะวันตก/ตะวันออก (เมตร)							
	พะตง	บ้านพรุ	คอหงส์	หาดใหญ่	ควนลัง	คลองอยู่ ตะเภา	คลองแห	คูเต่า
Mean	4.68/ 4.71	7.46/ 9.48	-/ 8.47	6.94/ 4.35	8.93/ 13.87	5.82/ 8.27	8.87/ 6.42	-/ 8.47
5 th Percentile	0.46/ 0.24	0.82/ 0.71	-/ 1.17	1.04/ 0.36	0.72/ 1.30	0.68/ 2.51	2.28/ 0.77	-/ 1.17
25 th Percentile	1.35/ 1.16	2.36/ 2.86	-/ 3.37	3.07/ 1.34	2.61/ 3.56	2.40/ 5.03	6.66/ 2.94	-/ 3.37
Median	3.36/ 2.55	3.93/ 6.24	-/ 6.45	6.63/ 3.23	5.21/ 7.65	4.34/ 7.18	8.84/ 5.25	-/ 6.45
75 th Percentile	7.58/ 5.42	7.59/ 10.94	-/ 10.80	10.57/ 6.31	10.16/ 12.70	8.29/ 11.27	11.71/ 9.35	-/ 10.80
95 th Percentile	12.884/ 15.658	32.280/ 27.481	-/ 18.68	13.90/ 12.43	36.85/ 62.53	15.87/ 15.68	14.79/ 14.72	-/ 18.68

ตารางที่ ค3 ระยะการถดถอยของตลิ่ง บริเวณพื้นที่อำเภอบางกล่ำ

ปริมาณทางสถิติ	ระยะถดถอยของตลิ่งฝั่งตะวันตก/ตะวันออก (เมตร)			
	ท่าช้าง	บ้านหาร	แม่ทอม	บางกล่ำ
Mean	3.68/-	7.25/9.46	5.06/-	2.33/-
5 th Percentile	0.40/-	1.26/2.27	0.55/-	0.24/-
25 th Percentile	1.92/-	3.99/5.44	2.11/-	1.32/-
Median	3.40/-	7.16/10.48	4.26/-	2.19/-
75 th Percentile	5.13/-	9.81/13.02	7.11/-	3.50/-
95 th Percentile	7.79/-	14.04/14.80	12.59/-	4.85/-

ตารางที่ ค4 ระยะการถดถอยของตลิ่ง บริเวณพื้นที่อำเภอคลองหอยโข่ง

ปริมาณทางสถิติ	ระยะถดถอยของตลิ่ง (เมตร)	
	ทุ่งลาน (ฝั่งตะวันตก)	ทุ่งลาน (ฝั่งตะวันออก)
Mean	6.74	8.70
5 th Percentile	0.05	0.67
25 th Percentile	0.91	2.55
Median	2.46	5.51
75 th Percentile	5.86	10.07
95 th Percentile	25.64	27.17

ภาคผนวก ง

ผลการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะ

ผลการสำรวจหมุดติดตามการกัดเซาะ

1. การสำรวจครั้งที่ 1 (10/10/2558)

1 st Surveying				1 st Surveying			
Points	E	N	Z	Points	E	N	Z
A1	661467	771557	6.443	G3	661452	771551	4.23
A2	661467	771555	5.324	G4	661452	771549	3.124
A3	661467	771553	4.233	H1	661449	771554	6.521
A4	661467	771552	3.103	H2	661449	771552	5.393
B1	661464	771556	6.452	H3	661449	771550	4.278
B2	661464	771555	5.339	H4	661450	771549	3.138
B3	661465	771553	4.22	I1	661446	771553	6.485
B4	661465	771551	3.107	I2	661447	771552	5.339
C1	661461	771556	6.484	I3	661447	771550	4.296
C2	661462	771554	5.327	I4	661447	771548	3.155
C3	661462	771553	4.217	J1	661442	771553	6.603
C4	661462	771551	3.152	J2	661442	771551	5.482
D1	661459	771556	6.519	J3	661442	771550	4.373
D2	661459	771554	5.385	J4	661443	771548	3.252
D3	661459	771552	4.256	K1	661439	771552	6.598
D4	661460	771551	3.169	K2	661439	771551	5.491
E1	661456	771555	6.481	K3	661440	771549	4.322
E2	661457	771553	5.356	K4	661440	771547	3.188
E3	661457	771552	4.229	L1	661437	771552	6.607
E4	661457	771550	3.175	L2	661437	771550	5.48
F1	661454	771555	6.442	L3	661437	771548	4.352
F2	661454	771553	5.316	L4	661437	771547	3.207
F3	661454	771551	4.233	M1	661434	771551	6.509
F4	661455	771550	3.138	M2	661435	771550	5.453
G1	661451	771554	6.466	M3	661435	771548	4.27
G2	661451	771553	5.34	M4	661435	771546	3.197

1 st Surveying				1 st Surveying			
Points	E	N	Z	Points	E	N	Z
N1	661432	771551	6.552	T3	661417	771545	4.461
N2	661432	771549	5.483	T4	661417	771543	3.251
N3	661432	771547	4.37	U1	661413	771548	6.76
N4	661433	771546	3.224	U2	661413	771546	5.685
O1	661429	771550	6.572	U3	661414	771544	4.498
O2	661430	771549	5.497	U4	661414	771542	3.396
O3	661430	771547	4.398	V1	661411	771547	6.837
O4	661430	771545	3.267	V2	661411	771545	5.656
P1	661427	771550	6.557	V3	661412	771544	4.6
P2	661427	771548	5.47	V4	661412	771542	3.501
P3	661427	771546	4.368	W1	661408	771546	6.658
P4	661428	771545	3.232	W2	661409	771545	5.671
Q1	661424	771549	6.52	W3	661409	771543	4.69
Q2	661425	771548	5.422	W4	661409	771542	3.462
Q3	661425	771546	4.343	X1	661406	771546	6.701
Q4	661425	771544	3.243	X2	661406	771544	5.675
R1	661422	771549	6.61	X3	661407	771543	4.654
R2	661422	771547	5.535	X4	661407	771541	3.44
R3	661423	771546	4.411	Y1	661404	771545	6.584
R4	661423	771544	3.308	Y2	661404	771544	5.745
S1	661418	771548	6.635	Y3	661404	771543	4.714
S2	661419	771547	5.498	Y4	661405	771541	3.497
S3	661419	771545	4.388	Z1	661401	771545	6.572
S4	661419	771543	3.329	Z2	661401	771544	5.771
T1	661416	771548	6.656	Z3	661402	771542	4.769
T2	661416	771546	5.549	Z4	661402	771540	3.414

1 st Surveying			
Points	E	N	Z
AB1	661399	771545	6.622
AB2	661399	771543	5.872
AB3	661399	771542	4.742
AB4	661400	771540	3.476
AC1	661396	771544	6.61
AC2	661396	771543	5.802
AC3	661397	771541	4.691
AC4	661397	771539	3.522

2. การสำรวจครั้งที่ 2 (21/11/2558)

2 nd Surveying					2 nd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
A1	661467	771557	6.267	0.1924	G3	661452	771551	4.06	0.1886
A2	661467	771555	5.155	0.1708	G4	661452	771549	2.948	0.1836
A3	661467	771554	4.063	0.2016	H1	661449	771554	6.294	0.2404
A4	661467	771552	2.935	0.2009	H2	661449	771552	5.16	0.2537
B1	661464	771556	6.274	0.1879	H3	661449	771550	4.087	0.1930
B2	661464	771555	5.168	0.1830	H4	661450	771549	2.98	0.1586
B3	661465	771553	4.055	0.1781	I1	661446	771553	6.304	0.1973
B4	661465	771551	2.923	0.2330	I2	661447	771552	5.169	0.1743
C1	661461	771556	6.314	0.1882	I3	661447	771550	4.116	0.2217
C2	661462	771554	5.154	0.1938	I4	661447	771548	2.985	0.1866
C3	661462	771553	4.05	0.1778	J1	661442	771553	6.405	0.1989
C4	661462	771551	2.973	0.1868	J2	661442	771551	5.287	0.2017
D1	661459	771556	6.346	0.1787	J3	661442	771549	4.181	0.5269
D2	661459	771554	5.269	0.1618	J4	661443	771548	3.049	0.2074
D3	661459	771552	4.074	0.2044	K1	661439	771552	6.365	0.2345
D4	661460	771551	3.004	0.1880	K2	661440	771550	5.291	0.2105
E1	661456	771555	6.285	0.2111	K3	661440	771549	4.105	0.2285
E2	661457	771553	5.177	0.1957	K4	661440	771547	3.007	0.1997
E3	661457	771552	4.058	0.1817	L1	661437	771552	6.352	0.2629
E4	661457	771550	2.978	0.2065	L2	661437	771550	5.282	0.2124
F1	661454	771555	6.266	0.1838	L3	661437	771548	4.149	0.2178
F2	661454	771553	5.136	0.1907	L4	661438	771547	3.002	0.2403
F3	661454	771551	4.032	0.2069	M1	661434	771551	6.249	0.2634
F4	661455	771550	2.973	0.1806	M2	661435	771549	5.262	0.2148
G1	661451	771554	6.275	0.2181	M3	661435	771548	4.092	0.1798
G2	661451	771552	5.118	0.2359	M4	661435	771546	3.003	0.2049

2 nd Surveying					2 nd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
N1	661432	771551	6.303	0.2546	T3	661417	771545	4.417	0.1450
N2	661432	771549	5.283	0.2156	T4	661417	771543	3.161	0.1312
N3	661432	771547	4.19	0.2040	U1	661413	771547	6.563	0.2251
N4	661433	771546	3.041	0.2052	U2	661414	771546	5.502	0.2063
O1	661429	771550	6.378	0.1959	U3	661414	771544	4.337	0.1975
O2	661430	771549	5.31	0.1932	U4	661414	771542	3.206	0.2111
O3	661430	771547	4.225	0.1861	V1	661411	771547	6.62	0.2310
O4	661430	771545	3.088	0.2060	V2	661411	771545	5.476	0.2006
P1	661427	771550	6.361	0.1964	V3	661412	771544	4.418	0.1935
P2	661427	771548	5.28	0.1927	V4	661412	771542	3.323	0.2143
P3	661427	771546	4.196	0.1768	W1	661408	771546	6.459	0.2195
P4	661428	771545	3.042	0.2047	W2	661409	771545	5.465	0.2276
Q1	661425	771549	6.351	0.2044	W3	661409	771543	4.491	0.2244
Q2	661425	771548	5.255	0.1937	W4	661409	771542	3.272	0.2090
Q3	661425	771546	4.156	0.2084	X1	661406	771546	6.506	0.2134
Q4	661425	771544	3.056	0.2087	X2	661406	771544	5.498	0.1884
R1	661422	771549	6.43	0.2178	X3	661407	771543	4.471	0.2184
R2	661422	771547	5.345	0.2069	X4	661407	771541	3.283	0.1769
R3	661423	771546	4.238	0.1971	Y1	661404	771545	6.396	0.2174
R4	661423	771544	3.127	0.1921	Y2	661404	771544	5.543	0.2219
S1	661418	771548	6.474	0.1644	Y3	661404	771543	4.547	0.1693
S2	661419	771546	5.318	0.2068	Y4	661405	771541	3.314	0.2040
S3	661419	771545	4.231	0.1633	Z1	661401	771545	6.39	0.1945
S4	661419	771543	3.552	0.2524	Z2	661402	771544	5.598	0.1970
T1	661416	771548	6.492	0.1839	Z3	661402	771542	4.584	0.2151
T2	661417	771546	5.439	0.2577	Z4	661402	771540	3.23	0.2005

2 nd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta
AB1	661399	771544	6.424	0.2278
AB2	661399	771543	5.704	0.1899
AB3	661400	771542	4.559	0.3816
AB4	661400	771540	3.299	0.1995
AC1	661396	771544	6.442	0.1917
AC2	661396	771543	5.621	0.2084
AC3	661397	771541	3.921	0.0851
AC4	661397	771539	3.336	0.2126

3. การสำรวจครั้งที่ 3 (14/01/2559)

3 rd Surveying					3 rd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
A1	661467	771557	6.262	0.1903	G3	661452	771551	4.058	0.1978
A2	661467	771555	5.155	0.174	G4	661452	771549	2.94	0.1938
A3	661467	771554	4.064	0.1905	H1	661449	771554	6.283	0.2513
A4	661467	771552	2.947	0.1822	H2	661449	771552	5.172	0.2363
B1	661464	771556	6.272	0.1882	H3	661449	771550	4.096	0.1837
B2	661464	771555	5.174	0.1698	H4	661450	771549	2.983	0.1555
B3	661465	771553	4.059	0.1755	I1	661446	771553	6.305	0.1991
B4	661465	771551	2.93	0.2202	I2	661447	771552	5.155	0.1953
C1	661461	771556	6.311	0.1821	I3	661447	771550	4.115	0.1889
C2	661462	771554	5.149	0.1924	I4	661447	771548	2.981	0.1817
C3	661462	771553	4.056	0.1722	J1	661442	771553	6.394	0.211
C4	661462	771551	2.972	0.1815	J2	661442	771551	5.279	0.2126
D1	661459	771556	6.341	0.1825	J3	661442	771549	4.175	0.5184
D2	661459	771554	5.2	0.209	J4	661443	771548	3.052	0.2036
D3	661459	771552	4.078	0.1935	K1	661439	771552	6.356	0.2463
D4	661460	771551	3.003	0.18	K2	661439	771550	5.289	0.2121
E1	661456	771555	6.286	0.2213	K3	661440	771549	4.111	0.2184
E2	661457	771553	5.17	0.1997	K4	661440	771547	3.008	0.1872
E3	661457	771552	4.066	0.1703	L1	661437	771552	6.344	0.2678
E4	661457	771550	2.985	0.2008	L2	661437	771550	5.278	0.2204
F1	661454	771555	6.26	0.1863	L3	661437	771548	4.147	0.2184
F2	661454	771553	5.127	0.205	L4	661438	771547	3.012	0.2077
F3	661454	771551	4.038	0.2014	M1	661434	771551	6.248	0.2654
F4	661455	771550	2.97	0.1876	M2	661435	771549	5.248	0.222
G1	661451	771554	6.272	0.2345	M3	661435	771548	4.13	0.1696
G2	661451	771552	5.111	0.2428	M4	661435	771546	3.006	0.2009

3 rd Surveying					3 rd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
N1	661432	771551	6.3	0.2545	T3	661417	771544	4.22	0.2822
N2	661432	771549	5.277	0.2215	T4	661417	771543	3.111	0.1591
N3	661432	771547	4.173	0.2109	U1	661413	771547	6.564	0.2125
N4	661433	771546	3.047	0.1957	U2	661413	771546	5.5	0.2063
O1	661429	771550	6.374	0.1982	U3	661414	771544	4.316	0.2105
O2	661430	771549	5.314	0.1847	U4	661414	771542	3.194	0.2262
O3	661430	771547	4.225	0.1842	V1	661411	771547	6.619	0.23
O4	661430	771545	3.087	0.198	V2	661411	771545	5.473	0.1969
P1	661427	771550	6.378	0.1796	V3	661412	771544	4.42	0.1852
P2	661427	771548	5.279	0.1913	V4	661412	771542	3.309	0.2144
P3	661427	771546	4.192	0.1839	W1	661408	771546	6.443	0.2363
P4	661428	771545	3.05	0.1935	W2	661409	771545	5.432	0.3111
Q1	661425	771549	6.333	0.2227	W3	661409	771543	4.494	0.225
Q2	661425	771548	5.246	0.1882	W4	661409	771542	3.277	0.1998
Q3	661425	771546	4.154	0.2004	X1	661406	771546	6.427	0.365
Q4	661425	771544	3.048	0.2142	X2	661406	771544	5.502	0.2758
R1	661422	771549	6.42	0.2093	X3	661407	771543	4.468	0.2098
R2	661422	771547	5.337	0.2091	X4	661407	771541	3.356	0.1157
R3	661423	771546	4.231	0.2003	Y1	661404	771545	6.649	0.1028
R4	661423	771544	3.106	0.2128	Y2	661404	771544	5.528	0.2337
S1	661418	771548	6.452	0.1847	Y3	661404	771543	4.533	0.1844
S2	661419	771546	5.308	0.2079	Y4	661405	771541	3.385	0.1154
S3	661419	771545	4.196	0.1957	Z1	661401	771545	6.34	0.2578
S4	661419	771543	3.099	0.2501	Z2	661402	771544	5.583	0.2085
T1	661416	771548	6.39	0.3383	Z3	661402	771542	4.577	0.221
T2	661416	771546	5.364	0.2105	Z4	661402	771540	3.231	0.2048

3 rd Surveying				
Points	E	N	Z	Delta
AB1	661399	771544	6.413	0.227
AB2	661399	771543	5.68	0.2065
AB3	661399	771542	4.544	0.2172
AB4	661400	771540	3.29	0.2156
AC1	661396	771544	6.434	0.2238
AC2	661396	771543	5.616	0.2182
AC3	661397	771541	4.507	0.2074
AC4	661397	771539	3.34	0.2087

4. การสำรวจครั้งที่ 4 (18/04/2559)

4 th Surveying					4 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
A1	661467	771557	6.262	0.1905	G3	661452	771551	4.058	0.2022
A2	661467	771555	5.154	0.1757	G4	661452	771549	2.952	0.1761
A3	661467	771554	4.065	0.1878	H1	661449	771554	6.277	0.2625
A4	661467	771552	2.942	0.1853	H2	661449	771552	5.162	0.2442
B1	661464	771556	6.269	0.19	H3	661449	771550	4.094	0.186
B2	661464	771555	5.175	0.1682	H4	661450	771549	2.978	0.1602
B3	661465	771553	4.059	0.1751	I1	661446	771553	6.3	0.2096
B4	661465	771551	2.927	0.2228	I2	661447	771552	5.155	0.1974
C1	661461	771556	6.31	0.1865	I3	661447	771550	4.115	0.1881
C2	661462	771554	5.146	0.1893	I4	661447	771548	2.973	0.1941
C3	661462	771553	4.053	0.1786	J1	661442	771553	6.387	0.2182
C4	661462	771551	2.97	0.1843	J2	661442	771551	5.278	0.2095
D1	661459	771556	6.338	0.1824	J3	661442	771549	4.16	0.5362
D2	661459	771554	5.196	0.2045	J4	661443	771548	3.026	0.227
D3	661459	771552	4.078	0.1955	K1	661439	771552	6.34	0.2588
D4	661460	771551	3.006	0.1801	K2	661439	771550	5.278	0.2243
E1	661456	771555	6.278	0.23	K3	661440	771549	4.104	0.2266
E2	661457	771553	5.163	0.2012	K4	661440	771547	2.995	0.201
E3	661457	771552	4.061	0.1813	L1	661437	771552	6.334	0.2749
E4	661457	771550	2.98	0.2091	L2	661437	771550	5.247	0.3665
F1	661454	771555	6.256	0.1889	L3	661437	771548	4.108	0.2691
F2	661454	771553	5.119	0.2157	L4	661438	771547	2.98	0.2357
F3	661454	771551	4.034	0.2054	M1	661434	771551	6.225	0.2845
F4	661455	771550	2.972	0.1859	M2	661435	771549	5.237	0.2311
G1	661451	771554	6.263	0.2386	M3	661435	771548	4.079	0.206
G2	661451	771552	5.072	0.2744	M4	661435	771546	2.994	0.2138

4 th Surveying					4 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
N1	661432	771551	6.288	0.2651	T3	661416	771544	4.235	0.3416
N2	661432	771549	5.272	0.2175	T4	661417	771543	3.104	0.2425
N3	661432	771547	4.134	0.2614	U1	661413	771547	6.476	0.3624
N4	661433	771546	3.015	0.2363	U2	661414	771546	5.411	0.4595
O1	661429	771550	6.365	0.2078	U3	661414	771544	4.304	0.2469
O2	661430	771549	5.304	0.1945	U4	661414	771542	3.027	0.4845
O3	661430	771547	4.181	0.2387	V1	661411	771547	6.494	0.4456
O4	661430	771545	3.087	0.192	V2	661411	771545	5.416	0.2741
P1	661427	771550	6.358	0.1997	V3	661412	771544	4.376	0.2658
P2	661427	771548	5.274	0.1977	V4	661412	771542	3.202	0.382
P3	661427	771546	4.167	0.2144	W1	661408	771547	6.563	0.1933
P4	661428	771545	3.048	0.1919	W2	661409	771545	5.489	0.1864
Q1	661425	771549	6.328	0.2083	W3	661409	771543	4.257	0.646
Q2	661425	771548	5.23	0.2153	W4	661409	771541	3.209	0.3369
Q3	661425	771546	4.155	0.2031	X1	661406	771546	6.476	0.464
Q4	661425	771544	3.046	0.2086	X2	661407	771545	5.504	0.6564
R1	661422	771549	6.445	0.1977	X3	661407	771543	4.278	0.5834
R2	661422	771547	5.339	0.2015	X4	661407	771541	3.074	0.5392
R3	661423	771546	4.208	0.2193	Y1	661404	771546	6.482	0.1601
R4	661423	771544	3.112	0.2029	Y2	661404	771544	5.522	0.2363
S1	661418	771548	6.445	0.1905	Y3	661404	771542	4.297	0.5762
S2	661419	771546	5.301	0.2129	Y4	661405	771541	3.225	0.3405
S3	661419	771545	4.19	0.1983	Z1	661401	771545	6.459	0.2571
S4	661419	771543	3.135	0.2046	Z2	661402	771544	5.44	0.4969
T1	661416	771548	6.508	0.2469	Z3	661402	771542	4.33	0.6974
T2	661416	771546	5.363	0.2862	Z4	661402	771540	3.203	0.3048

4 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta
AB1	661399	771544	6.408	0.2602
AB2	661399	771543	5.46	0.5752
AB3	661400	771541	4.334	0.6154
AB4	661400	771539	3.106	0.5514
AC1	661396	771544	6.517	0.1431
AC2	661396	771543	5.543	0.3202
AC3	661397	771541	4.261	0.6612
AC4	661397	771539	3.335	0.2113

5. การสำรวจครั้งที่ 5 (26/08/2559)

5 th Surveying					5 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
A1	661467	771557	6.322	0.1398	G3	661452	771551	4.119	0.1849
A2	661467	771555	5.264	0.0918	G4	661452	771549	3.058	0.0848
A3	661467	771554	4.305	0.1142	H1	661449	771554	6.306	0.278
A4	661467	771552	3.364	0.2755	H2	661449	771552	5.232	0.1637
B1	661464	771556	6.332	0.127	H3	661449	771550	4.151	0.144
B2	661464	771555	5.258	0.0944	H4	661450	771549	3.056	0.1149
B3	661465	771553	4.220	0.1029	I1	661446	771553	6.355	0.181
B4	661465	771552	3.209	0.2432	I2	661447	771552	5.215	0.1529
C1	661461	771556	6.366	0.1416	I3	661447	771550	4.161	0.1406
C2	661462	771554	5.233	0.1617	I4	661447	771548	3.046	0.15
C3	661462	771553	4.187	0.084	J1	661442	771553	6.433	0.1891
C4	661462	771551	3.200	0.0693	J2	661442	771551	5.320	0.1677
D1	661459	771556	6.398	0.1239	J3	661442	771549	4.115	0.6146
D2	661459	771554	5.265	0.1302	J4	661443	771548	2.985	0.3208
D3	661459	771552	4.180	0.0789	K1	661439	771552	6.337	0.2621
D4	661460	771551	3.188	0.1085	K2	661439	771551	5.329	0.1661
E1	661456	771555	6.344	0.1734	K3	661440	771549	4.091	0.2578
E2	661457	771553	5.229	0.1319	K4	661440	771547	2.994	0.2252
E3	661457	771552	4.146	0.0891	L1	661437	771552	6.388	0.2322
E4	661457	771550	3.120	0.1157	L2	661437	771550	5.321	0.162
F1	661454	771555	6.315	0.1334	L3	661437	771548	4.082	0.3091
F2	661454	771553	5.189	0.1905	L4	661437	771547	3.062	0.1556
F3	661454	771551	4.111	0.1702	M1	661434	771551	6.285	0.2337
F4	661455	771550	3.093	0.1575	M2	661435	771550	5.296	0.1614
G1	661451	771554	6.329	0.21	M3	661435	771548	4.086	0.2159
G2	661451	771553	5.172	0.1735	M4	661435	771546	3.073	0.1365

5 th Surveying					5 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta	Points	E	N	Z	Delta
N1	661432	771551	6.344	0.2274	T3	661416	771544	4.297	0.4004
N2	661432	771549	5.330	0.1553	T4	661417	771543	3.177	0.4424
N3	661432	771547	4.156	0.2365	U1	661413	771548	6.585	0.2087
N4	661433	771546	3.039	0.2087	U2	661414	771546	5.472	0.2524
O1	661429	771550	6.384	0.2252	U3	661414	771544	4.312	0.2166
O2	661430	771549	5.355	0.1924	U4	661414	771542	3.178	0.2602
O3	661430	771547	4.206	0.2	V1	661411	771547	6.638	0.2205
O4	661430	771545	3.104	0.1805	V2	661411	771545	5.546	0.1666
P1	661427	771550	6.421	0.1868	V3	661412	771544	4.365	0.2528
P2	661427	771548	5.275	0.1972	V4	661412	771542	3.197	0.3504
P3	661427	771547	4.235	0.1875	W1	661408	771547	6.641	0.339
P4	661428	771545	3.110	0.1543	W2	661409	771545	5.514	0.2257
Q1	661424	771549	6.387	0.134	W3	661409	771543	4.382	0.3842
Q2	661425	771548	5.246	0.1847	W4	661409	771542	3.203	0.3903
Q3	661425	771546	4.195	0.1604	X1	661406	771546	6.582	0.3259
Q4	661425	771544	3.108	0.151	X2	661406	771545	5.546	0.2309
R1	661422	771549	6.417	0.2489	X3	661407	771543	4.369	0.3355
R2	661422	771547	5.390	0.1647	X4	661407	771541	3.210	0.2579
R3	661423	771546	4.282	0.1923	Y1	661404	771546	6.550	0.2996
R4	661423	771544	3.180	0.1543	Y2	661404	771544	5.587	0.2008
S1	661418	771548	6.497	0.212	Y3	661404	771542	4.423	0.3152
S2	661419	771547	5.359	0.1464	Y4	661405	771541	3.236	0.2804
S3	661419	771545	4.247	0.1845	Z1	661401	771545	6.579	0.4296
S4	661419	771543	3.198	0.1411	Z2	661402	771544	5.610	0.1781
T1	661416	771548	6.543	0.3173	Z3	661402	771542	4.468	0.3544
T2	661416	771546	5.429	0.3525	Z4	661402	771540	3.299	0.1736

5 th Surveying				
Points	E	N	Z	Delta
AB1	661399	771545	6.528	0.2744
AB2	661399	771543	5.649	0.2354
AB3	661399	771542	4.534	0.2096
AB4	661400	771540	3.359	0.1452
AC1	661396	771544	6.535	0.2198
AC2	661397	771543	5.650	0.2172
AC3	661397	771541	4.551	0.1884
AC4	661397	771539	3.392	0.1468