

การศึกษารูปแบบการปูวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมเพื่อบรรเทาปัญหา  
การพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง

STUDY ON APPROPRIATE GEOSYNTHETIC LAYING PATTERN TO  
MITIGATE THE SLOPE FAILURE PROBLEM OF THE EMBANKMENT  
DAMS ALONG THE RIVER



ธนยศ เรือนแก้ว

พิภพธงชัย เกิ่งชัยภูมิ

ภัทรমন กิมอ่วม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

การศึกษารูปแบบการปูวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมเพื่อบรรเทาปัญหา  
การพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง

STUDY ON APPROPRIATE GEOSYNTHETIC LAYING PATTERN TO  
MITIGATE THE SLOPE FAILURE PROBLEM OF THE EMBANKMENT  
DAMS ALONG THE RIVER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON APPROPRIATE GEOSYNTHETIC LAYING PATTERN TO  
MITIGATE THE SLOPE FAILURE PROBLEM OF THE EMBANKMENT  
DAMS ALONG THE RIVER



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษารูปแบบการปูวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมเพื่อบรรเทาปัญหา  
การพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง  
STUDY ON APPROPRIATE GEOSYNTHETIC LAYING PATTERN TO  
MITIGATE THE SLOPE FAILURE PROBLEM OF THE EMBANKMENT  
DAMS ALONG THE RIVER

นักศึกษา นายธนยศ เรือนแก้ว รหัสประจำตัว 58010513  
นายพิภพพงษ์ เกิ่งชัยภูมิ รหัสประจำตัว 58010891  
นางสาวภัทรมน กิมอ่วม รหัสประจำตัว 58010949

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ธนาตล	คงสมบุญ	
อ.อุบะ	ศิริแก้ว	
ดร.ศลิษา	ไชยพุทธ	
ดร.วิรุฬห์	คำชุม	
ดร.ประทีป	ลือประเสริฐ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 เมษายน 2562 เวลา 09.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง CV202

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

# การศึกษารูปแบบการปูวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมเพื่อบรรเทาปัญหา การพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง

นายธนยศ เรือนแก้ว รหัสประจำตัว 58010513

นายพิภพพงษ์ เก็งชัยภูมิ รหัสประจำตัว 58010891

นางสาวภัทรมน กิมอ่วม รหัสประจำตัว 58010949

ดร.ศลิษา ไชยพุทธ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินมากขึ้น เพื่อบรรเทาป้องกันและแก้ปัญหาคารพังทลายของลาดคันดินหรือเขื่อนป้องกันตลิ่งในรูปแบบต่างๆ เช่น การใช้วัสดุเสริมแรง (Geosynthetic) วิธีการตัดเปลี่ยนความชัน (Geometrical Methods) วิธีการระบายน้ำ (Hydrological Methods) วิธีเพิ่มความแข็งแรง (Strength Improvement Methods) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อลดการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่ง ด้วยแบบจำลองทางกายภาพโดยใช้เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) เป็นแบบจำลองและใช้ทรายตัวอย่างที่มีค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับ  $29.66^\circ$  แล้วทำการเปรียบเทียบกับกรูปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบธรรมดา กับการปูแบบมีร่องลึก (Key) และการปูแบบพัวผ้า (GWR) โดยทำการศึกษา 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ระดับน้ำต่ำสุด กรณีที่ระดับน้ำสูงสุด และกรณีที่มีน้ำหนักกดทับลงบนสันเขื่อน จากนั้นทำการสังเกตและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของลาดคันดินหรือเขื่อนป้องกันตลิ่ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึก และการปูแบบพัวผ้า ช่วยบรรเทาและป้องกันการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่งได้

STUDY ON APPROPRIATE GEOSYNTHETIC LAYING PATTERN TO MITIGATE  
THE SLOPE FAILURE PROBLEM OF THE EMBANKMENT DAMS ALONG  
THE RIVER

Mr.Thanayot                      Ruankeaw                      Student ID. 58010513

Mr.Piphopthondchai      Kengchaiyaphum      Student ID. 58010891

Ms.Pattaramon                      Kimoum                      Student ID. 58010949

Adviser Dr.Salisa      Chaiyaput

Academic Year 2018

## ABSTRACT

In currently have developed many soil improvement techniques to relieve and solve slope failure problem, such as Geosynthetic, Geometrical Methods, Hydrological Method and Strength Improvement Methods etc. In our research, we studied the paving patterns of Geosynthetic to relieve the slope failure problem by physical models that used the open channels flow for model and sand sample which has  $29.66^\circ$  of internal friction angle. We used the different paving pattern of geotextile and choosed the very suitable pattern to relieve slope failure. We compared the original, groove and GWR patterns with 3 case studies such as maximum water level, minimum water level and put load on model. Then observe and analyze the change of slope surface. Results of this research, we found that we laid geotextile in groove and GWR pattern can relieve slope failure.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.ศลิษา ไชยพุท ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษากับคณะผู้จัดทำ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ทำให้คณะผู้จัดทำได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างราบรื่น และให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในหลายๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณเพื่อนๆที่คอยช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการ รวมถึงการให้กำลังใจและความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้ ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา อนึ่งผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อย

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับข้อบกพร่องต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น คณะผู้จัดทำขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ธนยศ เรือนแก้ว

พิภพพงษ์ เก็งชัยภูมิ

ภัทรমন กิมอ่วม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะการวิบัติของลาดคันดิน.....	4
2.2 สาเหตุของการวิบัติของลาดคันดิน.....	5
2.3 ทฤษฎีการบดอัดของ Proctor (1930).....	12
2.4 การบดอัดดินระดับตื้น (Shallow Compaction).....	13
2.5 การควบคุมการบดอัด.....	16
2.6 งานหินทิ้ง.....	17
2.7 วัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetic).....	18
2.8 แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile).....	25
2.9 การแก้ไขซ่อมแซมลาดดินเพื่อเสริมความมั่นคง.....	29
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 บทนำ.....	37
3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง.....	37
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	48
3.4 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	52
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและการเปรียบเทียบ.....	56
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	58
4.1 บทนำ.....	58
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา.....	58

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา.....	58
4.4 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	71
5.1 บทนำ.....	71
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	71
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความหนาของหินทิ้งที่ระบุในแบบ (กรมชลประทาน ,2553).....	18
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์แต่ละประเภท (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561).....	22
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ (FHWA NHI ,2008).....	23
ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์ (Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK ,2015).....	33
ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์ สำหรับดินเหนียวที่ อยู่ในน้ำ(Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK,2).....	33
ตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (ค่าองค์ประกอบปรับแก้อุณหภูมิ ,GT)....	40
ตารางที่ 3.2 น้ำหนักดินแห้งในการร่อนผ่านตะแกรง.....	41
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์ (ที่มา: บริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัด).....	51
ตารางที่ 3.4 ปริมาณทรายที่ใช้ในแต่ละชั้น (kg) และจำนวนรอบในการบดอัด.....	54
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด Non-Woven VM 150P.....	58
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน.....	59
ตารางที่ 4.3 Density Determination.....	59
ตารางที่ 4.4 Water Content.....	60
ตารางที่ 4.5 ข้อมูล Calibration of Pycnometer.....	60
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย.....	61
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Direct shear.....	61
ตารางที่ 4.8 ตารางการเปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทรายใน ช่วงระยะเวลาต่างๆ.....	64
ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปการเปลี่ยนแปลงที่กายภาพของแบบจำลอง.....	68

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 การวิบัติของลาดคันดินเมื่อมีชั้นดินที่มีกำลังต่ำแทรกอยู่ (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	4
รูปภาพที่ 2.2 การวิบัติแบบเป็นส่วนโค้ง (Rotational failure) (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	5
รูปภาพที่ 2.3 การวิบัติแบบไหล (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	5
รูปภาพที่ 2.4 คันดินมีความชันเพิ่มขึ้นเนื่องจากลาดคันดินถูกกัดเซาะ โดยน้ำที่ไหลผ่านลาดคันดิน(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	6
รูปภาพที่ 2.5 ลาดคันดินที่ถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำ(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	6
รูปภาพที่ 2.6 น้ำฝนไหลลงรอยแยกบนคันดินและไหลเข้าสู่ชั้นดินที่มีกำลังต่ำ (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	6
รูปภาพที่ 2.7 แรงกระทำต่อคันดินเนื่องจากแผ่นดินไหว (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	7
รูปภาพที่ 2.8 สภาพทางธรณีวิทยาที่พบดินเป็นชั้น โดยมีชั้นดินอ่อน หนาไม่มากแทรกตัวอยู่ในชั้นดินแข็ง(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	7
รูปภาพที่ 2.9 ลักษณะชั้นดินอ่อนเอียงตัวแทรกอยู่ในดินเหนียวแข็ง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คันดินเกิดการวิบัติ(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	8
รูปภาพที่ 2.10 น้ำหนักกดทับบนคันดินจะทำให้เสถียรภาพของคันดินลดลง (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	8
รูปภาพที่ 2.11 คันดินมีเสถียรภาพลดลงเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนคันดิน (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	9
รูปภาพที่ 2.12 เนื่องจากการขุดดินออกที่เชิงของลาดคันดินในกรณีนี้แรงด้านข้าง ที่ต้านการเคลื่อนตัวลดลงคันดินจึงมีโอกาสเคลื่อนตัวมากขึ้น (เสถียรภาพ ลดลง), (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	9
รูปภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและสัดส่วนความปลอดภัย หลังจากถมดิน (Bishop and Bjerrum, 1960).....	10
รูปภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและสัดส่วนความปลอดภัย หลังจากขุดดิน (Bishop and Bjerrum, 1960).....	11
รูปภาพที่ 2.15 ผลเนื่องจากการลดลงทันทีของระดับน้ำทำให้เสถียรภาพของคันดินลดลง (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554).....	12
รูปภาพที่ 2.16 เส้นโค้งการบดอัดดิน (John N. Cernica ,1994).....	13
รูปภาพที่ 2.17. Light Soil Compaction (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ,2561).....	14
รูปภาพที่ 2.18 Heavy Soil Compaction (Cheng Liu and Jack B. Evett ,1998).....	15
รูปภาพที่ 2.19 Sand Cone Method (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561).....	16
รูปภาพที่ 2.20 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดในสนาม (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561).....	17

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 2.21 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจากการผลิตวัสดุใยสังเคราะห์ (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561).....	19
รูปภาพที่ 2.22 คุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561).....	21
รูปภาพที่ 2.23 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอ (Woven Geotextile).....	27
รูปภาพที่ 2.24 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ (Non-Woven Geotextile).....	27
รูปภาพที่ 2.25 วิธีเพิ่มความมั่นคงโดยวิธีตัดเปลี่ยนลาดดิน (ผศ.ดร. อนาคต คงสมบูรณ์ ,2547).	29
รูปภาพที่ 2.26 วิธีเพิ่มความมั่นคงโดยวิธีการระบายน้ำออกจากลาดดิน (ผศ.ดร. อนาคต คงสมบูรณ์ ,2547).....	30
รูปภาพที่ 2.27 การฝังท่อระบายน้ำออกจากลาดดินบริเวณริมถนนอ่าวกลมลา จ.ภูเก็ต (ผศ.ดร. อนาคต คงสมบูรณ์ ,2547).....	31
รูปภาพที่ 2.28 รูปแบบการเสริมความแข็งแรงของลาดดิน (ผศ.ดร. อนาคต คงสมบูรณ์ ,2547)..	32
รูปภาพที่ 2.29 รูปตัดของการออกแบบวัสดุเสริมแรงในลาดดิน (Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK ,2015).....	32
รูปภาพที่ 2.30 รูปตัดของลาดดินหลังเกิดการพังทลาย (Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK ,2015).....	34
รูปภาพที่ 2.31 การสร้างแบบจำลองบนเครื่อง Wave Flume (Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005).....	34
รูปภาพที่ 2.32 การสร้างแบบจำลองบนฐานรากที่เป็นทรายหนา 14 cm (Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005).....	35
รูปภาพที่ 2.33 ตัวอย่างการทดสอบและลักษณะการพังทลาย (Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005).....	35
รูปภาพที่ 2.34 รูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ แบบ GWR แล้วมีการเย็บชั้นให้เชื่อมติดกัน บนฐานรากที่เป็นทราย(Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005).....	36
รูปภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน.....	38
รูปภาพที่ 3.2 Pycnometer (แบบ Volumetric flask) ต้มน้ำไล่ฟองอากาศบน Hot Plate.....	39
รูปภาพที่ 3.3 (a) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis), (b) เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker).....	41
รูปภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน.....	43
รูปภาพที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear Test.....	47
รูปภาพที่ 3.6 แบบจำลองที่ 1.....	48
รูปภาพที่ 3.7 แบบจำลองที่ 2.....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ 3.8 แบบจำลองที่ 3.....	49
รูปภาพที่ 3.9 แบบจำลองที่ 4.....	49
รูปภาพที่ 3.10 แบบขยายรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบจำลองที่ 4.....	49
รูปภาพที่ 3.11 แบบจำลองที่ 5.....	50
รูปภาพที่ 3.12 แบบขยายรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบจำลองที่ 5.....	50
รูปภาพที่ 3.13 แบบจำลองที่ 6.....	50
รูปภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow).....	51
รูปภาพที่ 3.15 แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด No-Woven รุ่น VM 150P.....	52
รูปภาพที่ 3.16 แบบจำลอง ขนาด 40x50x580 เซนติเมตร.....	52
รูปภาพที่ 3.17 ทรายตัวอย่าง.....	53
รูปภาพที่ 3.18 ลูกไม้ขนาดเล็ก สำหรับผสมทราย.....	53
รูปภาพที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์สำหรับการบดอัดทราย.....	53
รูปภาพที่ 3.20 การเตรียมแบบจำลอง พร้อมทั้งติดตั้งสเกลวัดระยะการเคลื่อนตัว.....	54
รูปภาพที่ 3.21 การผสมทรายให้ได้ %WT เท่ากับ OMC.....	55
รูปภาพที่ 3.22 การชั่งเก็บตัวอย่างทราย.....	55
รูปภาพที่ 3.23 การบดอัดทราย และสร้างแบบจำลองให้ได้ความลาดชันตามต้องการ.....	55
รูปภาพที่ 3.24 การปูแผ่นใยสังเคราะห์.....	55
รูปภาพที่ 3.25 การบันทึกภาพแรกเริ่ม.....	55
รูปภาพที่ 3.26 การพังทลายของแบบจำลองในระหว่างการเพิ่มระดับน้ำ.....	56
รูปภาพที่ 3.27 ระดับน้ำลดลงเหลือ 10 cm.....	56
รูปภาพที่ 3.28 การพังทลายของแบบจำลอง.....	56
รูปภาพที่ 3.29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลาดความชันของแบบจำลอง.....	57
รูปภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (g/cm <sup>3</sup> ) กับปริมาณความชื้น (%).....	60
รูปภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (C) กับน้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ (g).....	61
รูปภาพที่ 4.3 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear.....	62
รูปภาพที่ 4.4 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง.....	62
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 4.....	69
รูปภาพที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 5.....	69
รูปภาพที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 6.....	70
รูปภาพที่ ข.1.1 การวิบัติของเขื่อนป้องกันตลิ่ง Slope 1:1 กรณีไม่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์.....	78

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ ข.1.2 การวิบัติของเขื่อนป้องกันตลิ่ง Slope 1:1 กรณีมีการปูแผ่นใยสังเคราะห์.....	78
รูปภาพที่ ข.2.1 การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึก (Groove).....	79
รูปภาพที่ ข.2.2 การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบพัวผ้า (GWR).....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีโครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นจำนวนมาก ทั้งทางด้านอุบโภค บริโภค และด้านสาธารณูปโภค อาทิ การพัฒนาด้านการคมนาคม และการขนส่ง ถนน รางรถไฟ การพัฒนาด้านแหล่งน้ำ เขื่อน ระบบระบายน้ำ ความปลอดภัยเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงของการก่อสร้างในทุกโครงการ ไม่ว่าจะเป็นในขั้นตอนการออกแบบ ช่วงดำเนินการก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งการก่อสร้างหลังโครงการสิ้นสุดไปแล้วก็ตาม ในการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง ปัญหาที่สามารถพบเห็นกันได้โดยทั่วไปคือ “ปัญหาการพังทลายของลาดดิน” (Slope Stability Failure) อันเนื่องมาจากเสถียรภาพของดินถูกทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีระดับน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown) ส่งผลให้ลาดดินขาดเสถียรภาพเกิดการพังทลายลงมา มีผลทำให้รัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก ในการซ่อมแซม และความเสียหายดังกล่าวยังอาจส่งผลต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชากรที่อาศัยอยู่ในบริเวณริมฝั่งแม่น้ำลำคลอง จากปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นทำให้รัฐบาลและผู้ที่เกี่ยวข้องพยายามนำหลังการและทฤษฎีต่างๆมาประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ไขหรือป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว

วิธีการแก้ไขและป้องกันปัญหาการพังทลายของลาดดินที่พบในปัจจุบัน มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นวิธี การใช้วัสดุเสริมแรง (Geosynthetic) วิธีการตัดเปลี่ยนความชัน (Geometrical Methods) วิธีการระบายน้ำ (Hydrological Methods) วิธีเพิ่มความแข็งแรง (Strength Improvement Methods) เป็นต้น

การนำ Geosynthetic มาใช้ในการแก้ปัญหานับเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ เพื่อช่วยให้ลาดดินมีความเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นโดยการประยุกต์ใช้มีด้วยกันหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการออกแบบและการเลือกวัสดุของวิศวกรผู้ออกแบบ เพื่อให้เกิดความมั่นคงและแข็งแรงมากที่สุด รวมถึงต้องประหยัดตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมด้วย โดยรูปแบบการเสริมเสถียรภาพของลาดดินริมแม่น้ำลำคลอง หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “เขื่อนป้องกันตลิ่ง” นั้นพบว่า ทรายจะถูกนำมาบดอัดตามความชันของลาดดินที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากนั้นผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) จะถูกนำมาปูทับไปตามความลาดของชั้นทราย เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดทรายไหลไปตามการพัดพาและการขึ้นลงของกระแสน้ำ และหินทิ้ง (Riprap) จะถูกนำมาปูเป็นชั้นสุดท้ายเพื่อเพิ่มเสถียรภาพและป้องกันการกัดเซาะ จากการปูในรูปแบบดังกล่าวพบว่า เมื่อทรายที่อยู่ใต้ผ้าใยสังเคราะห์ถูกน้ำพัดพา อาจทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลให้ผ้าใยสังเคราะห์ทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดของหินทิ้งที่อยู่ด้านบน เมื่อเวลาผ่านไปผ้าใยสังเคราะห์ดังกล่าวไม่สามารถรับน้ำหนักของหินทิ้งได้ ผ้าใยจึงฉีกขาดทำให้เกิดเป็นปัญหาการ

พังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง งานวิจัยนี้จึงศึกษารูปแบบการปูที่เหมาะสมของผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อบรรเทาและลดปัญหาการพังทลายของลาดดิน โดยศึกษาและสร้างแบบจำลองในรูปแบบต่างๆ เพื่อหารูปแบบของการปูวัสดุใยสังเคราะห์ที่เหมาะสมและเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองในโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของรูปแบบการวางตัวที่เหมาะสม เพื่อนำรูปแบบการวางตัวดังกล่าวไปใช้ในการแก้ไขปัญหาในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่ง
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงประเภทผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่ใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง
3. เพื่อศึกษารูปแบบการปูที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงประเภทผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ในการบรรเทาปัญหาการพังทลายของลาดดิน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. จำลองการไหลของน้ำโดยใช้แบบจำลองทางน้ำเปิด (Open Channel Flow)
2. ใช้ผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด Non-Woven VM 150P เท่านั้นในการวิจัย
  - 2.1 ใช้วิธี Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextile (ASTM D 4491-99a) เพื่อหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ
  - 2.2 ใช้วิธี Standard Test Methods for Tensile Property of Geotextile (ASTM D 4595-09) เพื่อหาค่ารับแรงดึงของวัสดุเสริมแรง
  - 2.3 ใช้วิธี Standard Test Methods for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextile (ASTM D 4632-08) เพื่อหาค่าการยึดตัวของวัสดุเสริมแรง
3. ศึกษารูปแบบการปูผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) บนทรายเท่านั้น
4. ใช้ทรายตัวอย่างที่ผ่านการอบเพื่อกำจัดน้ำในเม็ดทรายและมีขนาดคละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 100
  - 4.1 ใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM D 442-63) เพื่อหาขนาดคละของเม็ดดิน
  - 4.2 ใช้วิธี Direct Shear Test (ASTM D 3080) เพื่อหาค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน
  - 4.3 ใช้วิธี Specific Gravity of Soil (ASTM D 854-00) เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดทราย
  - 4.4 ใช้วิธี Compaction (ASTM D 698-78) เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ทรายแน่น โดยเลือกใช้ Standard Proctor Test ในการทดสอบ
  - 4.5 ทำการบดอัดดินเป็นชั้นๆ ชั้นละประมาณ 5 เซนติเมตร เพื่อให้การกระจายแรงบดอัดทั่วถึง โดยทรายที่นำมาใช้ในการบดอัดจะนำมาผสมกับน้ำที่  $WC = 12\%$  (จากผลของ Compaction Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไม่ศึกษาผลกระทบของแรงดันน้ำ
6. จำลองระดับน้ำสูงสุดที่ 4.00 m (40 cm ของแบบจำลอง) และระดับน้ำต่ำสุดที่ 1.00 m (10 cm ของแบบจำลอง)
7. Slope 1:1
8. Scale 1:10
9. ศึกษาเฉพาะเขื่อนป้องกันตลิ่งที่วางบนดินแข็งเท่านั้น
10. ศึกษาเฉพาะคุณสมบัติการกรองวัสดุ (Filtration) ของวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์เท่านั้น
11. น้ำไหลเข้าแบบจำลองด้วยอัตราการไหลเข้า  $230.00 \text{ cm}^3/\text{s}$  และอัตราการไหลออก  $170.00 \text{ cm}^3/\text{s}$  พร้อมทั้งไม่เกิดคลื่นระหว่างทำการทดลอง
12. ไม่คิด Suction Behaviour

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ฝึกฝนการวางแผนการทำงาน และการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม
2. สามารถนำงานวิจัยดังกล่าวไปใช้ได้จริงในงานก่อสร้าง ซึ่งจะทำงานก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. เข้าใจรูปแบบการวางตัวและรับแรงของวัสดุเสริมแรงประเภทผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
4. เรียนรู้การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อเปรียบเทียบกับหลักการ ทฤษฎี และโปรแกรม
5. ศึกษาและเข้าใจการพังทลายของลาด Slope จากกรณีการปูผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile)
6. วิศวกร หรือคนงานสามารถเข้าใจหลักการของงานวิจัยและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้

## บทที่ 2

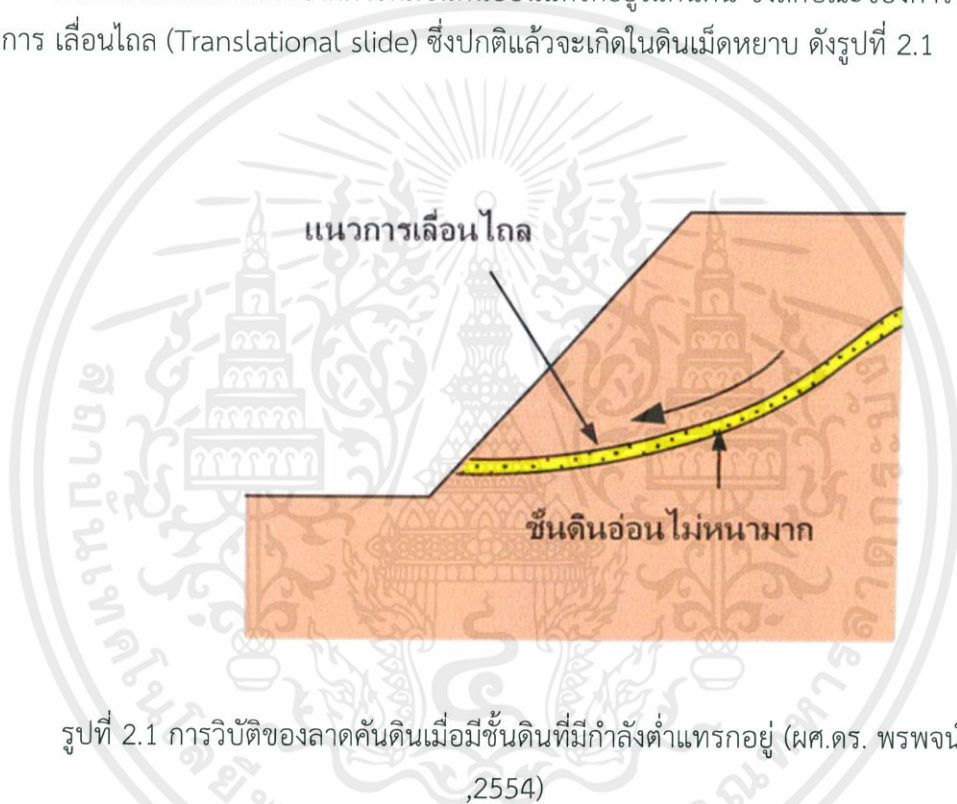
### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะการวิบัติของลาดคันดิน

การวิบัติของลาดคันดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ ชนิดของดิน ลักษณะของชั้นดิน น้ำใต้ดิน แรงดันเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดิน รวมไปถึงลักษณะรูปร่างของคันดินเอง ตัวอย่างลักษณะของการวิบัติโดยทั่วไปมีดังนี้

##### 2.1.1 การวิบัติแบบเลื่อนไถล

การวิบัติลักษณะนี้เกิดจากการที่มีชั้นดินอ่อนแทรกอยู่ในคันดิน ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะเป็นการ เลื่อนไถล (Translational slide) ซึ่งปกติแล้วจะเกิดในดินเม็ดหยาบ ดังรูปที่ 2.1

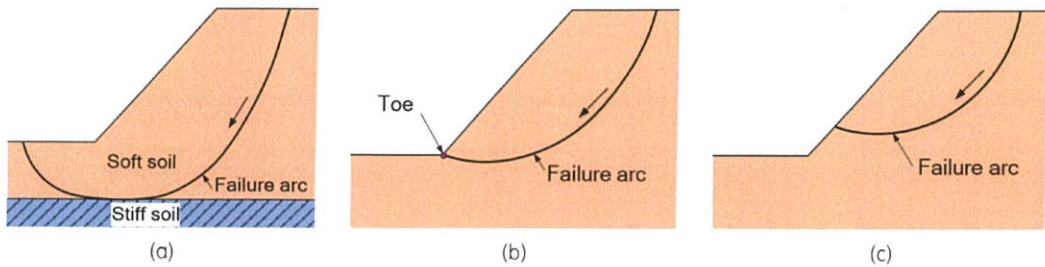


รูปที่ 2.1 การวิบัติของลาดคันดินเมื่อมีชั้นดินที่มีกำลังต่ำแทรกอยู่ (ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง, 2554)

##### 2.1.2 การวิบัติแบบเป็นส่วนโค้ง (Rotational failure)

การวิบัติแบบเป็นส่วนโค้งนี้ ส่วนใหญ่มักเกิดในคันดินที่ก่อสร้างด้วยดินเม็ดละเอียดที่มีเนื้อเดียวกัน โดยแกนของการหมุน จะขนานไปกับความยาวของคันดิน ซึ่งลักษณะการวิบัติแบบเป็นส่วนโค้งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่

1. Base slide – ลักษณะของการวิบัติเป็นส่วนโค้งที่ผ่านคันดินทั้งหมด การวิบัติแบบนี้เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อนที่วางอยู่บนชั้นดินแข็ง ดังรูปที่ 2.2 (a)
2. Toe slide – ลักษณะของการวิบัติเป็นส่วนโค้งที่ผ่าน Toe ของคันดิน ดังรูปที่ 2.2 (b)
3. Slope slide – ลักษณะของการวิบัติเป็นส่วนโค้งที่ผ่านคันดิน ดังรูปที่ 2.2 (c)

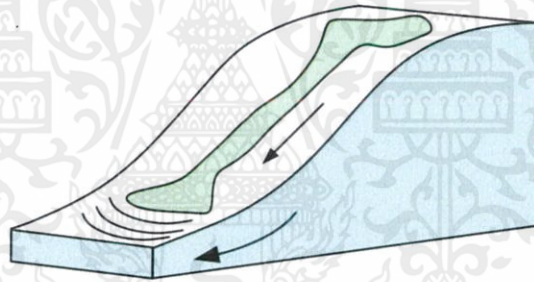


รูปที่ 2.2 การวิบัติแบบเป็นส่วนโค้ง (Rotational failure) (a) Base slide, (b) Toe slide, (c) Slope slide

(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)

### 2.1.3 การวิบัติแบบไหล (Flow slide)

การวิบัติเป็นการไหลของมวลดินที่มีลักษณะคล้ายกับของไหลที่มีความหนืด การวิบัติแบบนี้ไม่สามารถระบุขนาดการวิบัติได้อย่างชัดเจน และสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในดินแห้งและดินเปียก โดยมีลักษณะการวิบัติ ดังรูปที่ 2.3



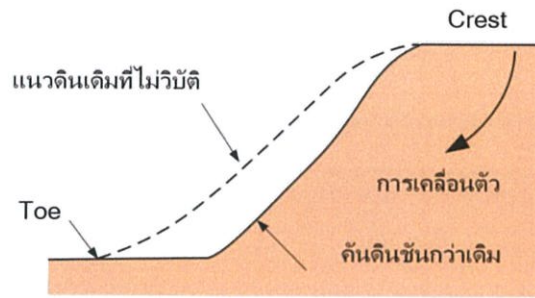
รูปที่ 2.3 การวิบัติแบบไหล (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)

## 2.2 สาเหตุของการวิบัติของลาดคันดิน

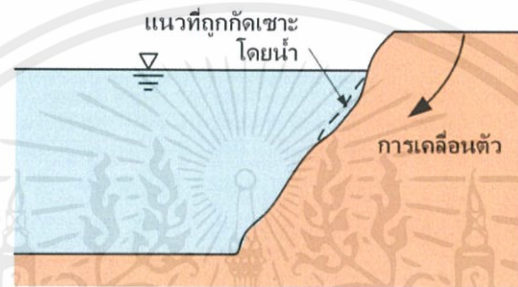
การวิบัติของลาดคันดิน สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นตามกระบวนการทางธรรมชาติ หรืออาจเกิดจากกิจกรรมการก่อสร้างของมนุษย์ รวมไปถึงการใช้ประโยชน์ของสถานที่นั้นๆ และสาเหตุหลัก ที่ก่อให้เกิดการวิบัติของคันดิน ได้แก่

### 2.2.1 สาเหตุเนื่องจากการกัดเซาะ

น้ำและลมเป็นตัวการทางธรรมชาติที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการกัดเซาะคันดินธรรมชาติ หรือคันดินที่ มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งการกัดเซาะจะทำให้รูปร่างของคันดินเปลี่ยนแปลงไป จนอาจก่อให้เกิดการวิบัติของคันดิน ตัวอย่างได้แก่ ตลิ่งของแม่น้ำถูกกระแสน้ำกัดเซาะจนความชันของคันดินเพิ่มขึ้น ดังรูป ที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



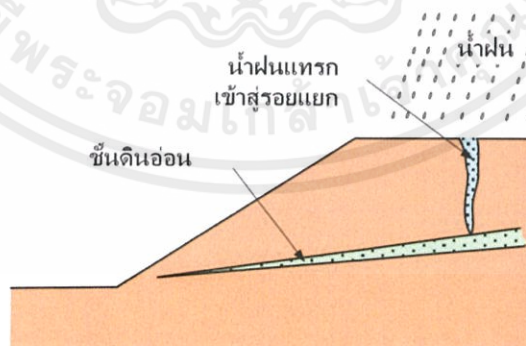
รูปที่ 2.4 คันดินมีความชันเพิ่มขึ้นเนื่องจากลาดคันดินถูกกัดเซาะโดยน้ำที่ไหลผ่านลาดคันดิน  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)



รูปที่ 2.5 ลาดคันดินที่ถูกกัดเซาะโดยกระแส น้ำ (ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)

### 2.2.2 สาเหตุเนื่องจากน้ำฝน

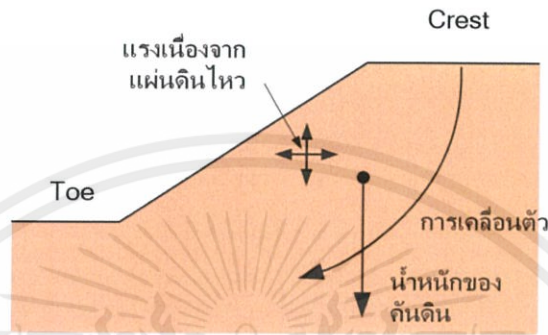
การที่มีฝนตกอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานทำให้คันดินอึดตัว ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลง ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพของคันดินลดลงได้ และน้ำฝนที่ไหลผ่านคันดินก็อาจทำให้คันดินสึกกร่อนได้ น้ำฝนบางส่วนอาจไหลผ่านรอยแยกของดินลงไป ทำให้ชั้นดินอ่อนใต้คันดินมีกำลังรับแรงเฉือนลดลง ซึ่งการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนนี้อาจก่อให้เกิดการวิบัติของคันดินได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 น้ำฝนไหลลงรอยแยกบนคันดินและไหลเข้าสู่ชั้นดินที่มีกำลังต่ำ  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)

### 2.2.3 สาเหตุเนื่องจากแผ่นดินไหว

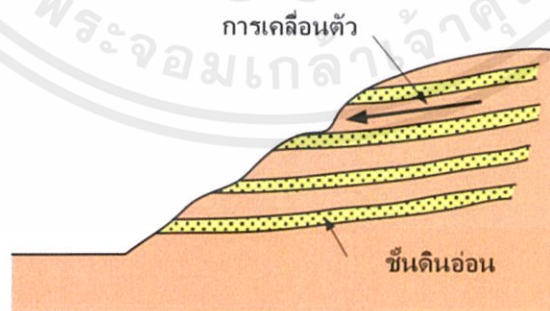
การเกิดแผ่นดินไหวก่อให้เกิด แรง Dynamic ที่เป็นแรงเฉือน ทำให้กำลังและสติเฟนของดินลดลง น้ำในดินที่อยู่ในช่องว่างของดินเม็ดหยาบอาจมีแรงดันสูงขึ้นจนทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลของดินเป็นศูนย์ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Dynamic liquefaction ฐานรากที่วางอยู่บนดินชนิดนี้จะจมลง หรือฐานรากที่เป็นช่องว่างซึ่งฝังอยู่ในดินจะลอยขึ้นมาที่ผิว ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แรงกระทำต่อคันดินเนื่องจากแผ่นดินไหว (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)

### 2.2.4 สาเหตุเนื่องจากลักษณะทางธรณีวิทยา

การวิบัติของคันดินในกรณีนี้เกิดจากการเจาะสำรวจที่ไม่เพียงพอจนไม่พบชั้นดินอ่อนที่เอียงตัวแทรกอยู่ในคันดิน ในบางครั้งชั้นดินซิลท์หนาเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ก็จะไม่พบในการเจาะสำรวจซึ่งชั้นดินอ่อนที่มีความหนาไม่มากนักนี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้คันดินเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 2.8 ตัวอย่างกรณีศึกษาได้แก่ การวิบัติของลาดคันดินในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเกิดจากชั้นดินเหนียวที่เป็น Active clay แทรกตัวอยู่ในชั้นดินเหนียว โดยชั้นดินจะเอียงทำมุมกับแนวราบ เมื่อน้ำไหลซึมเข้าสู่ชั้นดินเหนียวนี้จะส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนลดลงอย่างมากจนเป็นสาเหตุของการวิบัติของคันดิน ดังรูปที่ 2.9



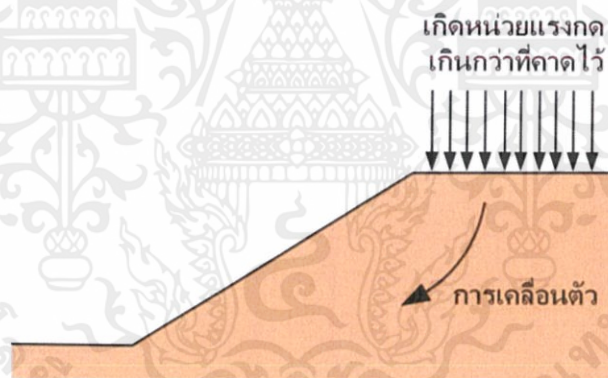
รูปที่ 2.8 สภาพทางธรณีวิทยาที่พบดินเป็นชั้น โดยมีชั้นดินอ่อนหนาไม่มากแทรกตัวอยู่ในชั้นดินแข็ง (ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)



รูปที่ 2.9 ลักษณะชั้นดินอ่อนเอียงตัวแทรกอยู่ในดินเหนียวแข็งซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คันดินเกิดการวิบัติ  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)

### 2.2.5 สาเหตุเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก

แรงภายนอกที่กระทำต่อคันดิน อาทิ แรงเนื่องจากยานพาหนะ หรือวัสดุที่กองทับอยู่บนคันดิน จึงเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับคันดิน ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้อาจส่งผลให้เสถียรภาพของคันดินลดลงจนเกิดการวิบัติได้ ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



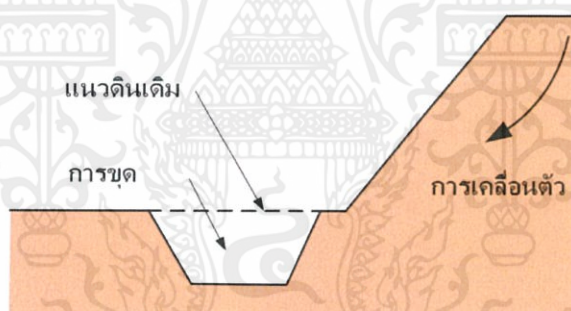
รูปที่ 2.10 น้ำหนักกดทับบนคันดินจะทำให้เสถียรภาพของคันดินลดลง  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ตันเส็ง ,2554)



รูปที่ 2.11 คันดินมีเสถียรภาพลดลงเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนคันดิน  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)

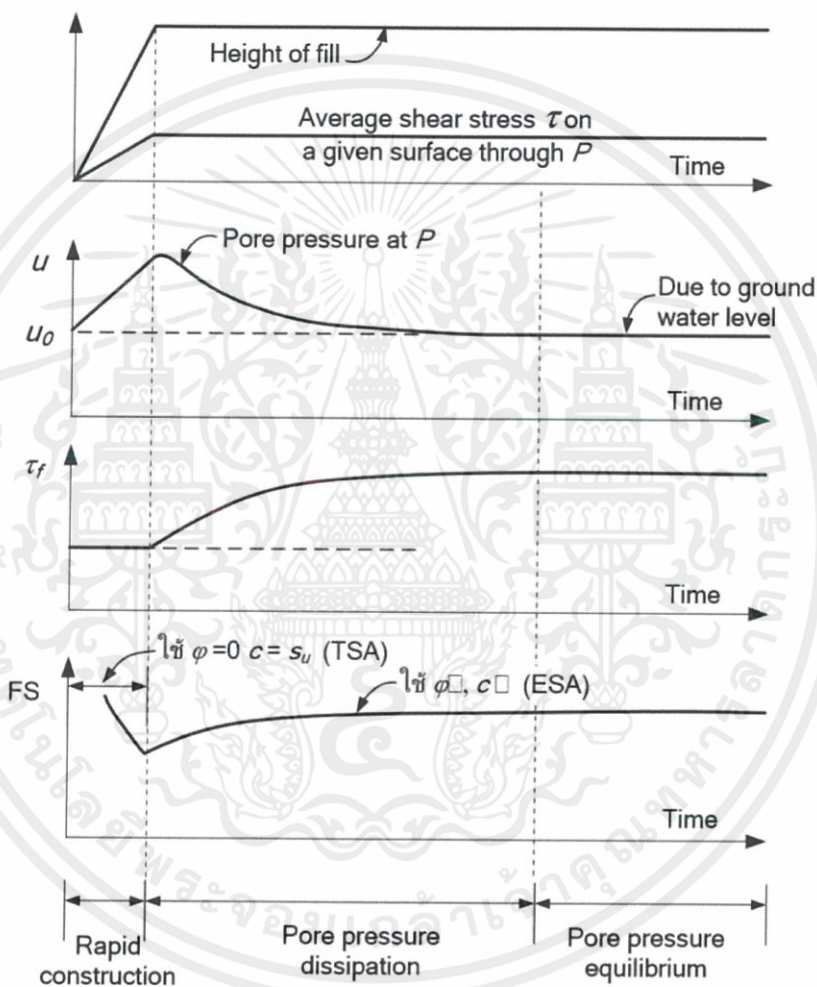
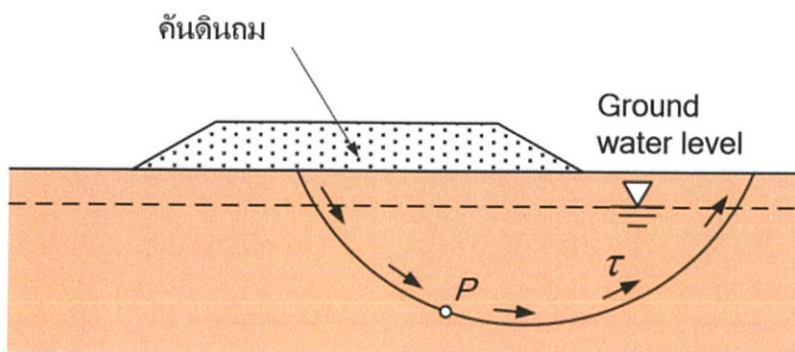
### 2.2.6 สาเหตุเนื่องจากการก่อสร้าง (คันดินถม หรือคันดินขุด)

การขุดดินใกล้กับบริเวณ Toe ของคันดินอาจส่งผลให้เสถียรภาพของคันดินลดลงจนเกิดการวิบัติได้ อันเนื่องมาจากแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของคันดินลดลง ดังรูปที่ 2.12



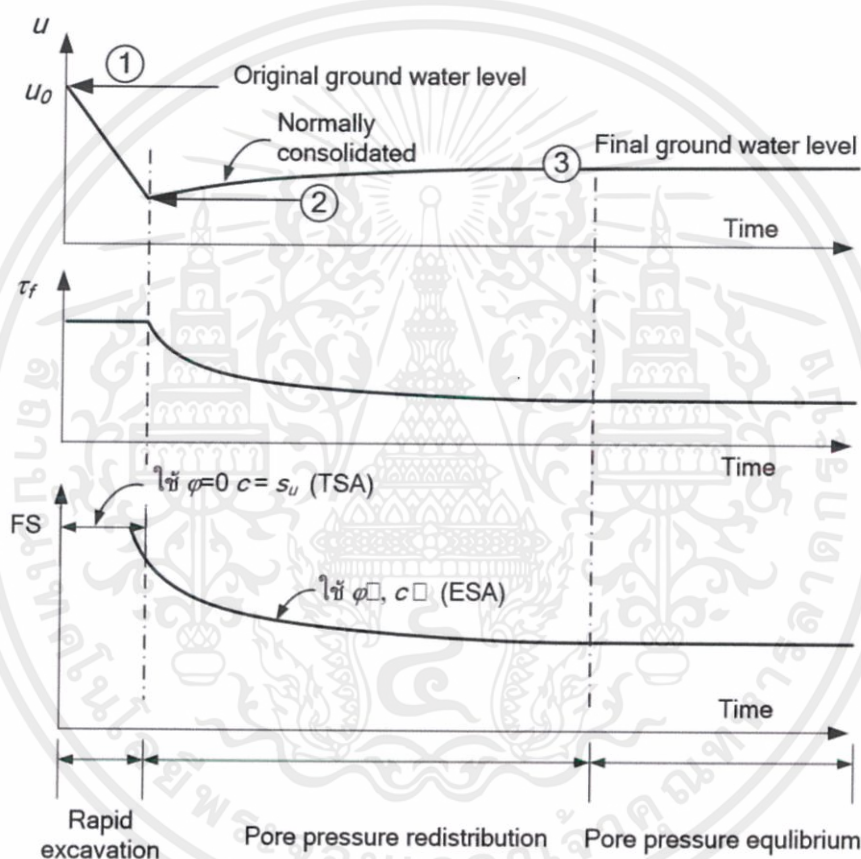
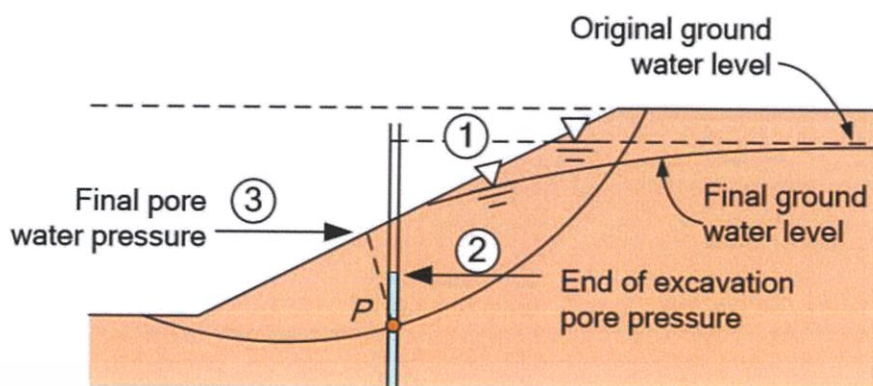
รูปที่ 2.12 เนื่องจากการขุดดินออกที่เชิงของลาดคันดินในกรณีนี้แรงด้านข้างที่ต้านการเคลื่อนตัวลดลง คันดินจึงมีโอกาสเคลื่อนตัวมากขึ้น (เสถียรภาพลดลง)  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)

เราสามารถจำแนกคันดินที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้นได้สองแบบคือ คันดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถมและคันดินที่เกิดขึ้นจากการขุด เสถียรภาพของคันดินที่สร้างขึ้นบนชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น จะขึ้นอยู่กับระยะเวลา สาเหตุเกิดจากการที่ดินเหนียวระบายน้ำได้ช้านั้นเอง รูปที่ 2.13 เป็นแรงดันน้ำและสัดส่วนปลอดภัย (ในที่นี้คือเสถียรภาพของคันดิน) ที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของคันดินซึ่งเกิดขึ้นจากการถมดิน ส่วนรูปที่ 2.14 เป็นกรณีของงานขุดดิน



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและสัดส่วนความปลอดภัยหลังจากถมดิน  
(Bishop and Bjerrum, 1960)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



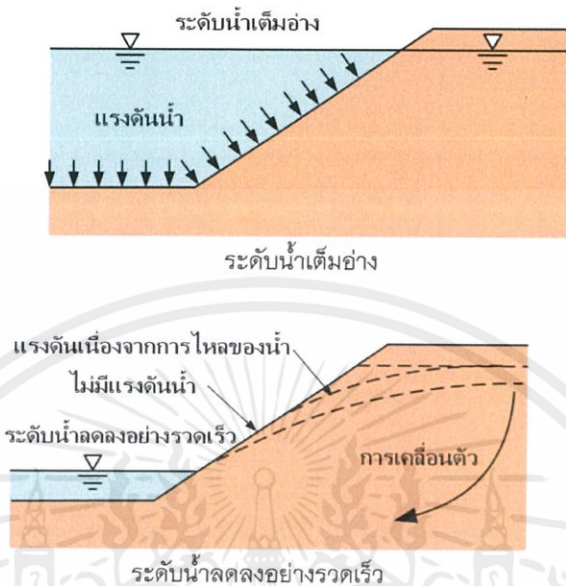
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและสัดส่วนความปลอดภัยหลังจากขุดดิน  
(Bishop and Bjerrum, 1960)

### 2.2.7 การลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (Rapid drawdown)

ในกรณีของอ่างเก็บน้ำถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันด้านข้างซึ่งเกิดจากแรงดันของน้ำ ก็จะหายไป และในกรณีของดินเหนียวแรงดันน้ำส่วนเกินที่อยู่ในดินระบายออกไม่ทัน ส่งผลให้คันดินเกิดการวิบัติในสภาพที่ดินไม่มีการระบายน้ำ (Undrained Condition) และถึงแม้ว่าคันดินจะไม่เกิดการวิบัติในขั้นตอนนี้ แต่ถ้าน้ำที่อยู่ในดินไหลออกมาสู่อ่าง จะทำให้เกิดแรงจากการไหลของน้ำขึ้น แรงจากการไหลของน้ำนี้สามารถก่อให้เกิดการวิบัติของคันดินได้ ดังรูปที่ 2.15 ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดิน ของงานเขื่อนจะต้องแบ่งการวิเคราะห์เป็นหลายกรณี ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

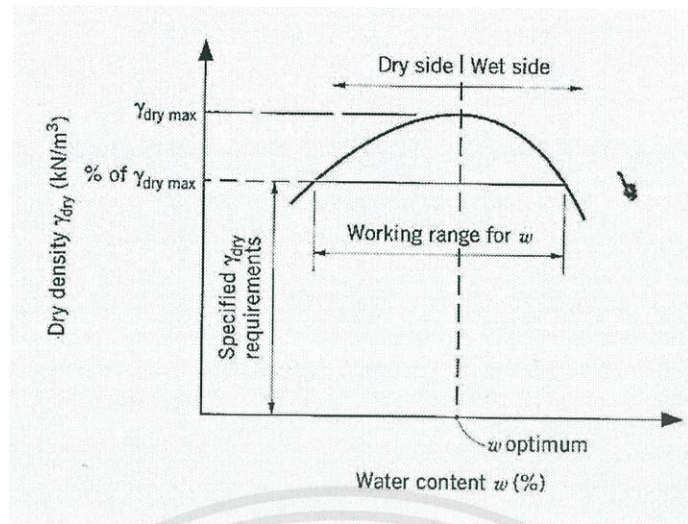
- ในขณะที่ก่อสร้าง และทันทีหลังก่อสร้างเสร็จ โดยทำการวิเคราะห์ทั้งเหนือน้ำและท้ายน้ำ
- หลังจากทีก่อสร้างแล้วเสร็จและกักเก็บน้ำแล้ว โดยทำการวิเคราะห์ด้านท้ายน้ำ
- หลังจากทีระดับน้ำในเขื่อนลดลงอย่างรวดเร็ว โดยทำการวิเคราะห์ด้านต้นน้ำ



รูปที่ 2.15 ผลเนื่องจากการลดลงทันทีของระดับน้ำทำให้เสถียรภาพของคันดินลดลง  
(ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง ,2554)

### 2.3 ทฤษฎีการบดอัดของ Proctor (1930)

R.R.Proctor ได้พัฒนาทฤษฎีการบดอัด และตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือ Engineering New Record (R.R.Proctor, 1933) โดยทฤษฎีดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เรียกว่า “Proctor Test” ซึ่งค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของการบดอัดจะแปรผันตามปริมาณน้ำ และพลังงานที่ใช้ในการบดอัด ซึ่งค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และปริมาณความชื้น (Moisture Content) ที่ได้จากห้องปฏิบัติการจะถูกนำไปพล็อตกราฟ เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content หรือ OMC) ที่ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) โดยจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เป็นจุดที่อนุภาคของดินเคลื่อนที่มาชิดติดกันมากที่สุด ทำให้เหลือปริมาณช่องว่างอากาศน้อย จึงเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพในการบดอัดมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติแล้วการบดอัดยังคงมีปริมาณช่องว่างอากาศเหลืออยู่ ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดได้ทั้งหมด ดังนั้น เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve) จึงไม่ตัดกับเส้นที่ช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Voids Line) หรือเรียกว่า เส้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation Line) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เส้นโค้งการบดอัดดิน (John N. Cernica ,1994)

จากกราฟการบดอัดดินพบว่า กราฟถูกแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ ด้านแห้ง (Dry Side) และด้านเปียก (Wet Side) สำหรับด้านแห้ง จะมีแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินที่สูงจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ทำให้อากาศต่อการบดอัด จากกราฟเมื่อปริมาณน้ำในดินเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยที่น้ำในดินจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ลดแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารีที่เกิดขึ้น เป็นผลให้เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้าไปแทรกกระหว่างกันได้ง่ายและทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง ความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้น ด้านดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปริมาณความชื้นด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Dry Sides of Optimum Moisture Content) และในทางตรงกันข้าม เมื่อปริมาณน้ำในดินเพิ่มมากขึ้นจนมีปริมาณมากเกินไป เกินค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นแห้งจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน และแทรกอยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ด้านดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปริมาณความชื้นด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Wet Sides of Optimum Moisture Content) เมื่อปริมาณความชื้นในดินสูงขึ้นมาๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

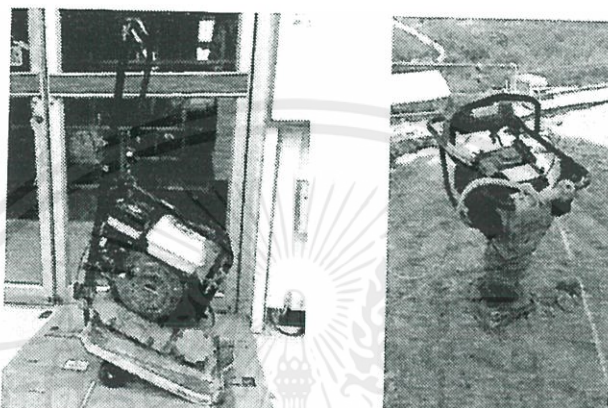
## 2.4 การบดอัดดินระดับตื้น (Shallow Compaction)

การบดอัดดินระดับตื้น เป็นการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินบริเวณผิวดินที่มีระดับไม่ลึก ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูก เนื่องด้วยงานทางด้านวิศวกรรมโยธา อาทิ งานถนน งานเขื่อน งานสาธารณูปโภคและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ในการก่อสร้างจำเป็นต้องมีการหาวัสดุจากแหล่งอื่นขนย้ายมายังบริเวณโครงการก่อสร้าง เพื่อก่อสร้างตามรูปแบบโครงการที่กำหนด โดยจะต้องบดอัดดินในสนามจนได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เครื่องจักรที่ใช้ในการบดอัดดินระดับตื้น สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. เครื่องจักรขนาดเล็ก (Light Soil Compaction) เหมาะสำหรับการบดอัดในพื้นที่แคบ มีพื้นที่ในการบดอัดน้อย ได้แก่

- 1.1 เครื่องตบสั่นสะเทือนแบบเรียบ (Vibrating Plate Compactors) เป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก ที่ใช้แรงสั่นสะเทือนในการบดอัดดิน เหมาะสำหรับการปรับระดับดินผิวดินให้เรียบก่อนจะปูพื้นด้วยวัสดุอื่นต่อไป
- 1.2 เครื่องกระทู้ (Rammer) เป็นเครื่องจักรขนาดเล็กให้แรงจากการกระแทก ทำให้ดินมีความหนาแน่นมากกว่าเครื่องตบสั่นสะเทือนแบบเรียบ เหมาะกับดินเม็ดหยาบ ดังรูปที่ 2.18(b)



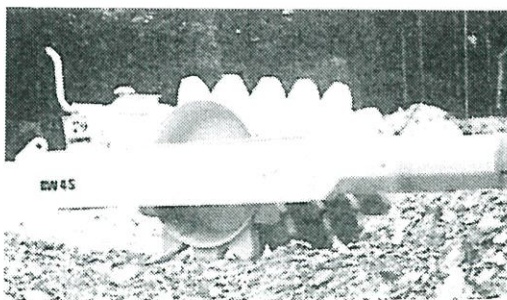
(a) Vibrating Plate Compactors (b) Rammer

#### รูปที่ 2.17 Light Soil Compaction (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

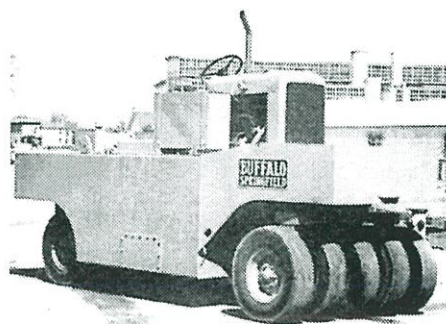
การบดอัดดินในพื้นที่เล็กๆ ควรที่จะใช้เครื่องจักรทั้งสองควบคู่กันไป เนื่องจากแรงกระแทกจากเครื่องกระทู้ จะมีประสิทธิภาพในการบดอัดดินให้มีความหนาแน่นตามต้องการ จึงเป็นการลดปัญหาการทรุดตัวและรอยร้าวของพื้นดินที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้ จากนั้นจึงใช้เครื่องตบสั่นสะเทือนแบบเรียบปรับระดับพื้นอีกครั้ง

2. เครื่องจักรขนาดใหญ่ (Heavy Soil Compaction) เหมาะสำหรับการบดอัดดินในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือบริเวณกว้างมากๆ ซึ่งลักษณะการทำงานของเครื่องจักรขนาดใหญ่จะเป็นแบบนวด (Kneading) โดยพลังงานการบดอัดดินจะแปรผันตรงกับจำนวนเที่ยวของเครื่องจักร หากจำนวนเที่ยวของเครื่องจักรมาก พลังงานที่ถ่ายลงสู่ดินข้างล่างก็จะมากตามไปด้วย ส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งเครื่องจักรขนาดใหญ่สามารถแบ่งประเภทการใช้งานตามชนิดและลักษณะของดินที่นำมาบดอัด ได้แก่

- 2.1 รถบดสำหรับวัสดุเม็ดละเอียด เช่น รถบดตีนแกะ (Sheepsfoot roller) ดังรูปที่ 2.19(a)
- 2.2 รถบดสำหรับวัสดุเม็ดหยาบ เช่น รถบดล้อยาง (Pneumatic roller), รถบดล้อเหล็กสองล้อสั่นสะเทือน (Vibratory roller), รถบดล้อเหล็กผิวเรียบ (Smooth wheel roller) ดังรูปที่ 2.19(b) – 2.19(d)



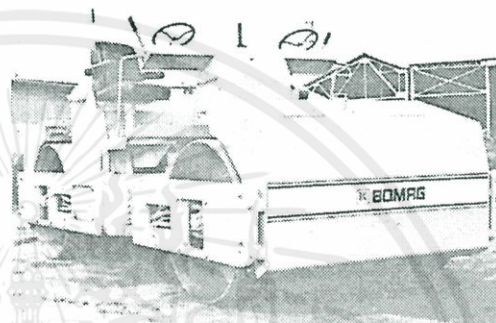
(a) Sheepsfoot roller



(b) Pneumatic roller



(c) Vibratory roller



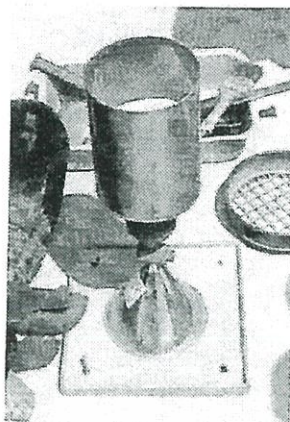
(d) Smooth wheel roller.

### รูปที่ 2.18 Heavy Soil Compaction (Cheng Liu and Jack B. Evett, 1998)

เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานในการควบคุมจำนวนเที่ยวของรถบดอัด ทำให้จำนวนเที่ยวการบดอัดขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ขับรถบด โดยจะขับรถให้ได้จำนวนเที่ยวมากที่สุด เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห่งตามที่ต้องการ จำนวนเที่ยวในการบดอัดดินมีผลอย่างมากต่อคุณภาพการบดอัด ถ้าจำนวนเที่ยวการบดอัดน้อยเกินไปจะทำให้ความหนาแน่นแห่งที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นแห่งในห้องปฏิบัติการ ขณะเดียวกันถ้าจำนวนเที่ยวมากเกินไปก็ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลา ค่าจ้างแรงงาน เชื้อเพลิง รวมถึงค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักร ดังนั้น เพื่อควบคุมการบดอัดให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าความหนาแน่นแห่งในสนาม โดยการตรวจสอบที่นิยมใช้มี 2 วิธี ได้แก่

1. วิธีแทนที่ด้วยทราย (Sand Cone Method) โดยใช้ทรายเม็ดกลมที่มีขนาดเท่ากัน (Ottawa Sand) เพื่อหาปริมาตรของหลุม ดังรูปที่ 2.20
2. วิธีการใช้รังสีนิวเคลียร์ (Nuclear) โดยการฉายรังสีลงไปในชั้นดิน เปรียบเสมือนการหาความหนาแน่นด้วยการ X-Ray

ซึ่งหากผู้ควบคุมงานพบว่า การบดอัดดินไม่เป็นไปตามข้อกำหนดหรือค่าที่ออกแบบไว้ ไม่ว่าจะเป็ค่าความหนาแน่นแห่งและปริมาณน้ำในดินบริเวณหน้างาน ไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในห้องปฏิบัติการ โครงการก่อสร้างนั้นจำเป็นต้องอัดดินใหม่ เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ ตามข้อกำหนด

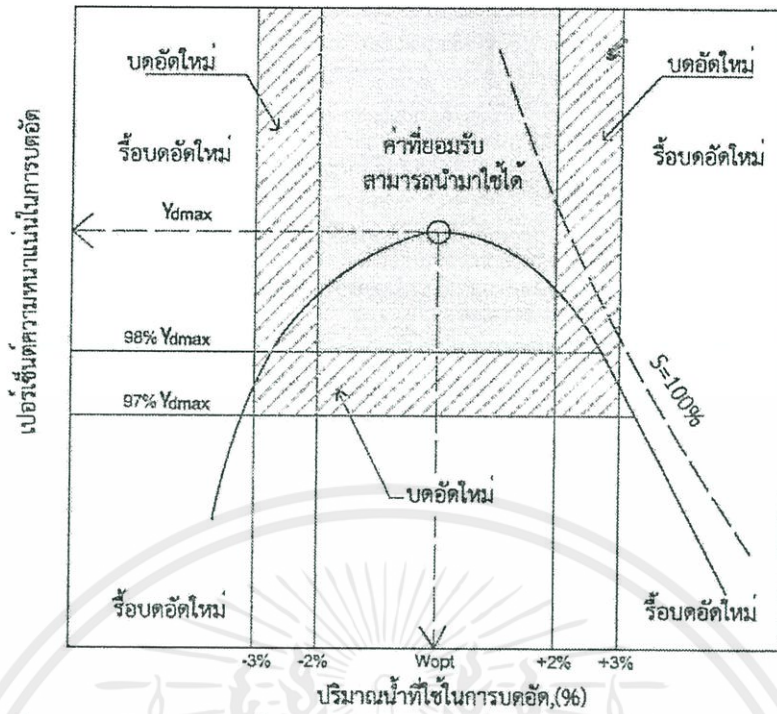


รูปที่ 2.19 Sand Cone Method (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

## 2.5 การควบคุมการบดอัด

การบดอัดดินจะมีประสิทธิภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานและปริมาณน้ำ โดยปริมาณน้ำหรือปริมาณความชื้นของดินแต่ละชนิดที่ได้จากห้องปฏิบัติการจะแตกต่างกันไป มีหลายหน่วยงานได้ออกข้อกำหนดเพื่อควบคุมคุณภาพการบดอัดดินให้มีประสิทธิภาพตามการออกแบบ โดยข้อกำหนดที่ว่ามีดังนี้

- ก. ความหนาแน่นแห้งที่ใช้ในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (95% Modified AASHTO) ดังรูปที่ 2.21
- ข. ปริมาณความชื้นที่ใช้ในสนามต้องมีค่าผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 2\%$  ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.21
- ค. ในการบดอัดจะต้องแบ่งดินเป็นชั้นย่อย โดยความหนาของชั้นดินย่อยจะต้องเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้บดอัด
- ง. ในการควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนามนิยมใช้วิธีทดสอบความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดแล้วด้วยวิธีกรวยทราย ถ้าความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ต้องทำการแก้ไขและทดสอบใหม่



รูปที่ 2.20 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดในสนาม  
(ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

## 2.6 งานหินทิ้ง

หินที่ใช้จะต้องเป็นหินที่มีความแข็งแรง ทนทาน ปราศจากส่วนประกอบของแร่ยิปซัม แอนไฮไดรต์ หินดินดาน หินเนื้ออ่อน หรือหินผุ มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีส่วนแบนเรียบน้อย ไม่มีรอยแตกร้าว หรือลักษณะอื่นใดที่แสดงให้เห็นว่าจะไม่ทนทานต่อการกัดเซาะ หินที่นำมาใช้ในงานหินทิ้งต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ความถ่วงจำเพาะที่จุดอิ่มตัว และผิวหน้าแห้ง ต้องไม่น้อยกว่า 2.65
- ความต้านทานต่อการขัดสี เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Test (ASTM C131) โดยส่วนสูญหายต้องไม่เกิน 40%
- ตรวจสอบความคงทน (Soundness) สูญเสียต้องไม่เกิน 12% โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบด้วยวิธี Sodium Sulphate (ASTM C88)
- ขนาดของหินที่ใช้ ถ้ามิได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่น ต้องประกอบด้วยก้อนขนาดคละตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความหนาของหินทิ้งที่ระบุในแบบ (กรมชลประทาน ,2553)

ขนาดคละ	ความหนาที่ระบุในแบบ			
	0.20 ม.	0.30 ม.	0.50 ม.	0.70 ม.
ใหญ่กว่า 50 ซม.	-	-	-	เกิน 30%
ใหญ่กว่า 30 ซม.	-	น้อยกว่า 20%	เกิน 50%	เกิน 50%
ใหญ่กว่า 15 ซม.	เกิน 20%	เกิน 60%	เกิน 70%	เกิน 70%
ใหญ่กว่า 7 ซม.	เกิน 60%	เกิน 80%	เกิน 90%	เกิน 90%
เล็กกว่า 3 ซม.	น้อยกว่า 5%	น้อยกว่า 5%	น้อยกว่า 5%	-

## 2.7 วัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetic)

### 2.7.1 ประวัติความเป็นมาของวัสดุใยสังเคราะห์

Koemer (1994) และ, Hooi (1994) ได้ให้นิยามวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) ว่าเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นจากโพลิเมอร์ (Polymer material) เพื่อใช้ในงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical engineering) รวมทั้งด้านโครงสร้างงานดินและงานระบบระบายน้ำและงานป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่งทะเลหรือริมแม่น้ำ

การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเพื่อใช้ในทางก่อสร้างมีมาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน อาทิ การปลูกพืชคลุมดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะหน้าดิน การใช้ไม้หรือก้อนหินมาเทปูทับหน้าดินเพื่อแยกชั้นดินและเสริมความแข็งแรง โดยในปี ค.ศ.1935 South Carolina Highway Department ได้ริเริ่มนำผ้าฝ้ายที่มีความหนาแน่นมากมาเสริมแรงให้กับคันทางด้วยการปูผ้าบนดินเดิมก่อนแล้วใช้แอสฟัลต์ร้อนเททับบนผ้า จากนั้นใช้ทรายชั้นบางๆปูทับอีกชั้นหนึ่งก่อนดำเนินการก่อสร้าง คันทางในชั้นตอนสุดท้าย ซึ่งถนนลาดยางเส้นนี้ได้มีการทดลองการใช้ในปี ค.ศ. 1935 และพบว่าคันทางดังกล่าวมี เสถียรภาพเพียงพอทรานานเท่าผ้าฝ้ายชำรุด การทดลองครั้งนี้เป็นจุดเริ่มต้นสู่การพัฒนาวัสดุต่างๆ เพื่อพัฒนากำลังและความสามารถในการรับแรงของดิน ทำให้ชั้นดินมีประสิทธิภาพสามารถนำมาใช้งานได้ตามต้องการ ในปัจจุบันแผ่นใยสังเคราะห์จึงถูกพัฒนาและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

### 2.7.2 วัสดุในการผลิตวัสดุใยสังเคราะห์

วัสดุใยสังเคราะห์ ผลิตจากพลาสติกประเภทโพลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer Materials) โดยพลาสติกประเภทโพลิเมอร์สังเคราะห์ สามารถจำแนกออกเป็นหลายประเภท แต่ที่นิยมนำมาผลิตเป็นวัสดุใยสังเคราะห์มีเพียงไม่กี่ประเภท ได้แก่

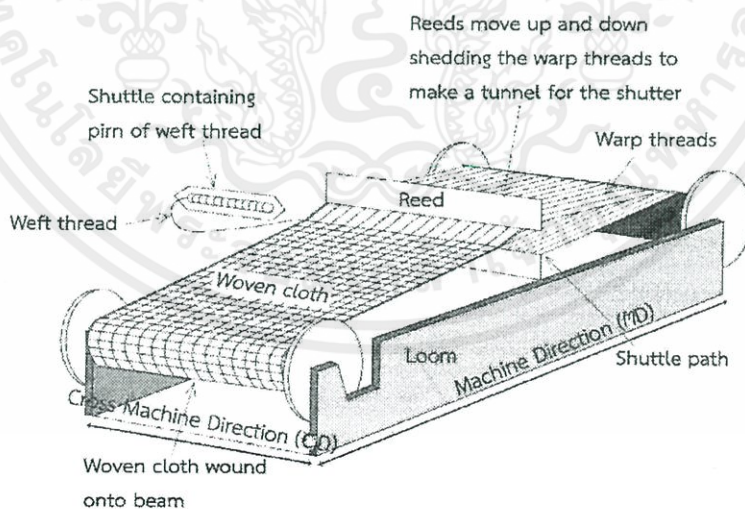
- โพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) เป็นวัสดุที่สามารถผลิตเป็นแผ่นได้ง่าย ความหนาแน่นขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิต สามารถอยู่ในรูปที่มีความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นปานกลาง และความหนาแน่นสูง มีส่วนผสมของคาร์บอนประมาณ 2% ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) จากแสงแดด ทนต่อความเป็นกรด - ด่างได้ดี และต่อต้านปฏิกิริยา Oxidation ได้ดี ทำให้มีความคงทนแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข. โพลีเอสเตอร์ (Polyester; PET or PES) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาผลิตมากที่สุด เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีความทนทานสูง สามารถทนต่อความเป็นกรด – ด่าง ได้ดี
- ค. โพลีโพรไพลีน (Polypropylene; PP) ถูกพัฒนามาจาก PE มีความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแต่เปราะ ค่าความทนทานต่อความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 3-13
- ง. เทอร์โมพลาสติก (Polyvinyl chloride; PVC) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาผลิตท่อน้ำ ในงานอุตสาหกรรม เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเหลว ในขณะที่แข็งจะเปราะและแตกหักง่าย สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวหน้าของวัสดุโพลีเอสเตอร์บางประเภท
- นอกจากวัสดุโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วยังมีการนำวัสดุโพลีเมอร์สังเคราะห์บางประเภทที่มีคุณสมบัติพิเศษ หรือมีคุณสมบัติเฉพาะตัว มาใช้ในการผลิตวัสดุสังเคราะห์เพื่อให้ได้วัสดุประสงค์และใช้งานที่ต้องการ เช่น โพลีเอไมด์ (Polyamide; PA) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อ ไนลอน (Nylon) มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูง โพลีสไตรีน (Polystyrene: PS) มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ความสามารถในการทนต่อความร้อนสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

### 2.7.3 คุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์

กระบวนการผลิตวัสดุสังเคราะห์ ผู้ผลิตจะกำหนดทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย หรือแถบพลาสติก เป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางในแนวนานความยาวเครื่องจักร (Machine Direction; MD) และทิศทางในแนวตั้งฉากกับเครื่องจักร (Cross Machine Direction; CD) ดังรูปที่ 2.22



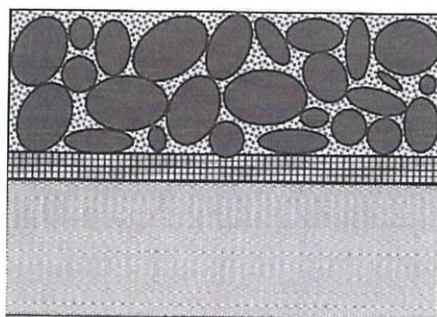
รูปที่ 2.21 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจากการผลิตวัสดุสังเคราะห์ (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

โดยทั่วไปคุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์ 1 ชนิด สามารถมีคุณสมบัติได้มากกว่า 1 คุณสมบัติ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ดังนั้น การออกแบบและเลือกใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมปฐพี จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

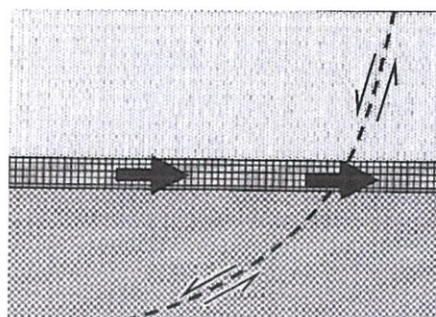
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การแยกชั้น (Separation) เป็นการใช้นวัตกรรมวัสดุสังเคราะห์ในการแยกชั้นของวัสดุ 2 ชนิด เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุคัดเลือกว่ามีคุณสมบัติที่ดีกว่า ผสมติดกันหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ดี วัสดุสังเคราะห์จะถูกนำมาแทรกกลางระหว่างชั้นดิน ป้องกันพฤติกรรมการกระจาย และ แทรกตัวของ เม็ดดิน เนื่องจากเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก จะเรียงตัวอยู่ในชั้น ล่าง ในขณะที่เม็ดดินที่มีขนาดเล็กหรือน้ำหนักน้อย จะเรียงซ้อนทับอยู่ชั้นบน เช่น การนำ แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) มาใช้ในงานก่อสร้างถนน หรือคันทาง เพื่อแยกวัสดุ คัดเลือกกับดินเดิมที่เป็นดินเหนียวอ่อน ดังรูปที่ 2.23(a)
2. การเสริมกำลัง (Reinforcement) ดินมีความสามารถในการรับแรงอัด ในขณะที่ ความสามารถในการรับแรงดึงมีไม่มากนัก การนำวัสดุสังเคราะห์มาใช้จึงเป็นการเพิ่ม ความสามารถในการรับแรงของดินและช่วยลดการเสียรูปร่างดิน เปรียบเสมือนการนำเหล็กมา ใช้กับคอนกรีต เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น การใช้แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrids) เพื่อเสริมกำลังในกำแพงกันดิน หรือเสริมกำลังในคันดินถม ให้มีเสถียรภาพเพิ่ม มากขึ้น เพิ่มความลาดชันให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.23(b)
3. การระบายน้ำ (Drainage) ดินเมื่กละเอียด มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ ทำให้น้ำไม่ สามารถระบายออกได้อย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลายาวนาน ซึ่งวัสดุสังเคราะห์จะถูกนำมา ติดตั้งในชั้นดิน ทำหน้าที่ช่วยในการระบายน้ำ ตัวอย่างเช่น สนามบินสุวรรณภูมิตั้งอยู่ใน บริเวณพื้นที่ดินเหนียวอ่อน น้ำในดินมีปริมาณสูง เมื่อถูกน้ำหนักของโครงสร้าง หรืออาคาร กดทับมีผลให้อัตราการทรุดตัวเกิดสูง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างที่วางอยู่บนดิน ดังนั้น แผ่นระบายน้ำในแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drains; PVD) จึงถูกนำมาช่วย ระบายน้ำเร่งการทรุดตัว ดังรูปที่ 2.23(c)
4. การกรอง (Filtration) เม็ดดินมีการเคลื่อนตัว และถูกพัดพาโดยกระแส น้ำ วัสดุสังเคราะห์ จึงถูกนำมาใช้ป้องกันการไหลออกของเม็ดดิน ทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องกรองน้ำ เช่น การปู แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextiles) ในระบบระบายน้ำ เพื่อดักเม็ดดินที่ถูกกระแส น้ำพัดพาให้ ค้างอยู่ไม่สามารถไหลผ่านออกไปได้ ดังรูปที่ 2.23(d)
5. การดูดซับแรง (Energy Absorber) เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ อาทิ แรงจากการไหล ของกระแส น้ำ แรงดันน้ำ และน้ำขึ้นน้ำลง มีผลทำให้เม็ดดินเกิดการเคลื่อนตัว ซึ่งเป็นปัจจัยที่ ทำให้เกิดการกัดเซาะ และการพังทลาย โดยเฉพาะบริเวณริมฝั่งแม่น้ำ ชายฝั่งทะเล ผิวดิน หรือลาดคันดิน การปูวัสดุสังเคราะห์จะช่วยดูดซับแรง ลดความเสียหายที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้วัสดุสังเคราะห์บริเวณริมตลิ่ง เพื่อป้องกันการกัดเซาะ หรือบริเวณลาด เขียงเขา เพื่อช่วยลดการพังทลายของหน้าดิน ดังรูปที่ 2.23(e)
6. การกั้นน้ำ (Barrier) วัสดุสังเคราะห์บางชนิด มีคุณสมบัติกั้นน้ำ สามารถป้องกันการไหล ผ่านของของเหลว และแก๊สได้ ตัวอย่างเช่น การใช้แผ่นพลาสติกความหนาแน่นสูง (Geomembranes) และแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (Geosynthetic Clay Liners หรือ GCL)

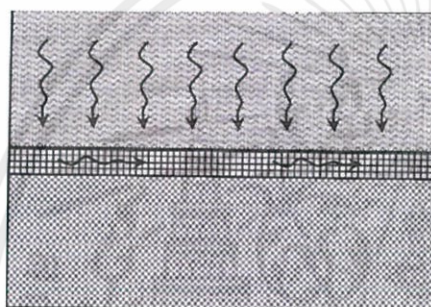
ปูบริเวณพื้นและผนังบ่อเก็บขยะ เพื่อป้องกันการซึมผ่านของของเสีย หรือสารเคมีในบ่อขยะ กระจายสู่พื้นที่รอบข้าง ดังรูปที่ 2.23(f)



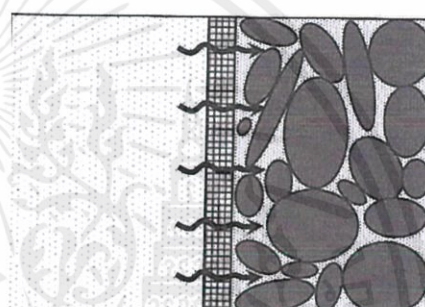
(a) การแยกชั้น (Separation)



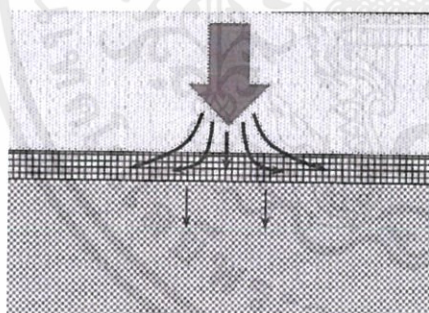
(b) การเสริมกำลัง (Reinforcement)



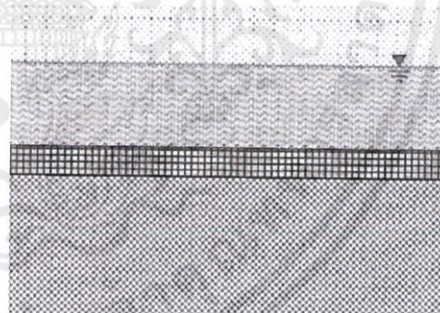
(c) การระบายน้ำ (Drainage)



(d) การกรอง (Filtration)



(e) การดูดซับแรง (Energy Absorber)



(f) การกั้นน้ำ (Barrier)

รูปที่ 2.22 คุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์แต่ละประเภท (ดร. ศลิษา ไชยพุทธ ,2561)

วัสดุสังเคราะห์	1	2	3	4	5	6
แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile; GT)	x	x	x	x	x	
แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid; GG)					x	
แผ่นตาข่ายระบายน้ำ (Geonet; GN)			x			
แผ่นพลาสติกความหนาแน่นสูง (Geomembrane; GM)						x
แผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (Geosynthetic Clay Liner; GCL)						x
แผ่นตาข่ายรังผึ้ง (Geocell; GL)	x	x			x	
บล็อกโฟม (Geofoam; GF)	x					
ท่อระบายน้ำ (Geopipe; GP)			x			
วัสดุเชิงประกอบ (Geocomposite; GC)	x	x	x	x	x	x

#### หมายเหตุ

1. การแยกชั้น (Separation)
2. การเสริมกำลัง (Reinforcement)
3. การระบายน้ำ (Drainage)
4. การกรอง (Filtration)
5. การดูดซับแรง (Energy Absorber)
6. การกั้นน้ำ (Barrier)

#### 2.7.4 มาตรฐานการทดสอบวัสดุสังเคราะห์

การสร้างสิ่งปลูกสร้างหรืออาคาร บ้านเรือนต่างๆ วิศวกรหรือผู้ออกแบบโครงสร้างของอาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆ จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เหล็ก และไม้ เพื่อให้เลือกใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้งานวัสดุได้อย่างเหมาะสม และในการควบคุมงาน เราต้องทราบวิธีการตรวจสอบวัสดุที่นำมาใช้ว่ามีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้เมื่อตอนออกแบบหรือไม่ หากขาดความรู้จากก่อให้เกิดความเสียหายโดยตรงต่อโครงสร้าง เช่น พังทลายหรือใช้งานไม่เต็มที่ ต้องซ่อมแซมหรืออาจก่อให้เกิดความไม่ประหยัด เนื่องจากใช้วัสดุที่มีสมบัติดีเกินจำเป็น (ที่มา: <http://app.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/1302423/>)

ดังนั้น วัสดุสังเคราะห์จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบขึ้น เพื่อควบคุมคุณภาพของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการและมีความเป็นมาตรฐานตามหลักสากล โดยมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุโพลีเอทิลีน (FHWA NHI ,2008)

PROPERTY	TEST METHOD	UNITS OF MEASUREMENT
<b>I. GENERAL PROPERTIES (from manufacturers)</b>		
Type and Construction	N/A	----
Polymer	N/A	----
Mass per Unit Area	ASTM D 5261	g/m <sup>2</sup>
Thickness (geotextiles and geomembranes)	ASTM D 5199	mm
Roll Length	Measure	m
Roll Width	Measure	m
Roll Weight	Measure	kg
Roll Diameter	Measure	m
Specific Gravity & Density	ASTM D 792 and D 1505	g/m <sup>3</sup>
Surface Characteristics	N/A	----
<b>II. INDEX PROPERTIES</b>		
<b>MECHANICAL STRENGTH – UNIAXIAL LOADING</b>		
a) Tensile Strength (Quality Control)		
1) Grab Strength (geotextiles and CSPE reinforced geomembranes)	ASTM D 4632	N
2) Single Rib Strength (geogrids)	ASTM D 6637	N
3) Narrow Strip (geomembranes)		
- EDPM, CO, IR, CR	ASTM D 412	N
- HDPE	ASTM D 638	N
- PVC, VLDPE	ASTM D 882	N
b) Tensile Strength (Load-Strain Characteristics)		
1) Wide-Width Strip (geotextiles)	ASTM D 4595	N
2) Single or Multi-Rib (geogrids)	ASTM D 6637	N
3) Wide Strip Strength (geomembranes)	ASTM D 4885	N
4) 2% Secant Modulus (PE geomembranes)	ASTM D 882	N
c) Junction Strength (geogrids)	GRI:GG2	N
d) Dynamic and Cyclic Resistance	no standard	----
e) Creep Resistance	ASTM D 5262 (Note, interpretation required)	creep strain: %/hr creep rupture: kN/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ (FHWA NHI ,2008) ต่อ

MECHANICAL STRENGTH – UNIAXIAL LOADING (cont.)		
PROPERTY	TEST METHOD	UNITS OF MEASUREMENT
f) Index Friction	GRI:GS7	dimensionless
g) Seam Strength		
1) Sewn (geotextiles)	ASTM D 4884	N
2) Factory Peel and Shear (geomembranes)	ASTM D 4545	N/m
3) Field Peel and Shear (geomembranes)	ASTM D 4437	N/m
h) Tear Strength		
1) Trapezoid Tearing (geotextiles)	ASTM D 4533	N
2) Tear Resistance (geomembranes)	ASTM D 1004	N
MECHANICAL STRENGTH – RUPTURE RESISTANCE		
a) Burst Strength		
1) Mullen Burst (geotextiles)	ASTM D 3786	Pa
2) Static Puncture with 50-mm “CBR” Probe (geotextiles, geonets, geomembranes)	ASTM D 6241	Pa or N
3) Large Scale Hydrostatic (geomembranes and geotextiles)	ASTM D 5514	Pa
b) Puncture Resistance		
1) Index (geotextiles and geomembranes)	ASTM D 4833	N
2) Pyramid Puncture (geomembranes)	ASTM D 5494	N
3) Static Puncture with 50-mm “CBR” Probe (geotextile, geonets, and geomembranes)	ASTM D 6241	N
c) Penetration Resistance (Dimensional Stability)	No standard	----
d) Geosynthetic Cutting Resistance	No standard	----
e) Flexibility (Stiffness)	ASTM D 1388	Mg/cm <sup>2</sup>
ENDURANCE PROPERTIES		
a) Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability	ASTM D 5819	--
b) Abrasion Resistance (geotextiles)	ASTM D 4886	%
c) Ultraviolet (UV) Radiation Stability		
1) Xenon-Arc Apparatus (geotextiles)	ASTM D 4355	%
2) Outdoor Exposure (geotextiles)	ASTM D 5970	%
d) Chemical Resistance		
1) Geotextiles	ASTM D 6389	% change
2) Geogrids	ASTM D 6213	% change
3) Geomembranes	ASTM D 5747	% change
4) Geonets	ASTM D 5288	% change
5) Chemical Immersion—Laboratory	ASTM D 5322	temperature & time
6) Oxidative Induction Time	ASTM D 5885	minutes
7) Environmental Exposure	EPA 9090	N/A
e) Biological Resistance		
1) Biological Clogging (geotextile)	ASTM D 1987	m <sup>3</sup> /s
2) Biological Degradation	ASTM G 21 and G 22	----
3) Soil Burial	ASTM D 3083	% change
f) Wet and Dry Stability	No standard	----
g) Temperature Stability		
1) Temperature Stability (geotextile)	ASTM D 4594	% change
2) Dimensional Stability (geomembrane)	ASTM D 1204	% change

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุใยสังเคราะห์ (FHWA NHI ,2008) ต่อ

II. INDEX PROPERTIES (continued)		
PROPERTY	TEST METHOD	UNITS OF MEASUREMENT
<b>HYDRAULIC</b>		
a) Opening Characteristics (geotextiles)		
1) Apparent Opening Size (AOS)	ASTM D 4751	mm
2) Porimetry (pore size distribution)---Capillary flow or bubble point test	ASTM D 6767	mm or $\mu\text{m}$
3) Percent Open Area (POA)	See Christopher & Holtz (1985)	%
4) Porosity (n)	$(V_{\text{voids}}/V_{\text{total}}) 100$	%
b) Permeability (k) and Permittivity ( $\psi$ )	*ASTM D 4491	m/s and $\text{s}^{-1}$
c) Soil Retention Ability	Empirically Related to Opening Characteristics	----
d) In-Plane Flow Capacity (Transmissivity, $\theta$ )	ASTM D 4716	$\text{m}^2/\text{s}$
<b>III. PERFORMANCE PROPERTIES</b>		
a) Stress-Strain Characteristics;		kN/m and % strain
1) Tension Test in Soil	See Elias et al. (1998)	
2) Triaxial Test Method	See Holtz et al. (1982)	
3) CBR on Soil Fabric System	See Christopher & Holtz (1985)	
4) Tension Test in Shear Box	See Christopher & Holtz, (1985)	
5) Plane Strain In-Soil Device	See Boyle (1995) and Boyle et al. (1996)	
b) Creep Tests:		kN/m and % strain
1) Extension Test in Soil	See Elias et al. (1998)	
2) Triaxial Test Method	See Holtz et al. (1982)	
3) Extension Test in Shear Box	See Christopher & Holtz (1985)	
4) Pullout Method	ASTM D 6706*	
c) Friction/Adhesion,		
1) Direct Shear (soil-geosynthetic)	ASTM D 5321*	degrees ( $^{\circ}$ )
2) Direct Shear (geosynthetic-geosynthetic)	ASTM D 5321*	degrees ( $^{\circ}$ )
3) Pullout Resistance (geogrids)	ASTM D 6706*	dimensionless
4) Pullout Resistance (geotextiles)	ASTM D 6706*	dimensionless
5) Anchorage Embedment (geomembranes)	GRI:GM2	kN/m
d) Dynamic and Cyclic Resistance:	no standard procedures	N/A
e) Puncture		
1) Gravel, truncated cone or pyramid	ASTM D 5494	kPa
f) Chemical Resistance:		
1) In-Situ Immersion Testing	ASTM D 5496	N/A
g) Soil Retention and Filtration Properties:		
1) Gradient Ratio Method – for noncohesive sand and silt type soils	ASTM D 5101	Dimensionless
2) Flexible Wall Gradient Ratio Test – for fine-grained soils	See Harney and Holtz (2001) and Harney et al. (2007)	Dimensionless
3) Hydraulic Conductivity Ratio (HCR) - for fine-grained soils	ASTM D 5567	Dimensionless
4) Slurry Method – for silt fence applications	ASTM D 5141	%
<b>NOTES:</b>		
* -- Interpretation required.		
N/A – not available or not applicable.		

## 2.8 แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)

Geotextiles เป็นวัสดุประเภทหนึ่งในวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetic) ซึ่งถูกนำมาใช้และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทุกปี Geotextiles เริ่มถูกนำมาใช้ในช่วง ค.ศ.1950 – 1960 โดยในเบื้องต้นใช้เป็นวัสดุกรอง (Filter) เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุมวลดินหลุดออกไปตามน้ำที่ไหลเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือออกจากมวลดิน และต่อมาได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น การเสริมแรงในถนน และการแยกชั้นดินในถนน เป็นต้น

โดยแผ่นใยสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นแผ่นใยผืนใหญ่ น้ำหนักเบา น้ำสามารถซึมผ่านได้ เส้นใยที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลิโพรไพลีน (Polypropylene) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ทำให้เป็นผืนโดยการนำเส้นใยมาผลิตโดยตรง ไม่ต้องผ่านการทำให้เป็นเส้นด้ายก่อน เส้นใยสามารถยึดติดกันและทำให้แข็งแรงด้วยกระบวนการเชิงกล กระบวนการทางเคมี และ/หรือ กระบวนการทางความร้อน ใน 3 ลักษณะ คือ การทอ (มีลักษณะคล้ายกระสอบ) การถลุงด้วยเข็ม (มีลักษณะคล้ายผ้าสักหลาด) และ การใช้ความร้อนประสาน (มีลักษณะคล้ายผ้าสักหลาดรีดเรียบ) แผ่นใยสังเคราะห์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิ

- งานสถาปัตยกรรม: การจัดตกแต่งสวน แยกหินประดับตกแต่งทางเดิน ไม่ให้จมลงไป  
ในดินเดิม
- งานอุตสาหกรรม: ป้องกันการฉีกขาดของแผ่นพลาสติกกันซึมและการรั่วไหลของ  
สารเคมี
- งานวิศวกรรมโยธา: ควบคุมการกัดเซาะริมตลิ่ง ทำวัสดุกรองระบบระบายน้ำ รักษา  
เสถียรภาพของโครงสร้างบนดิน และชั้นดิน เสริมกำลังดินคันทาง และลาดคันดิน

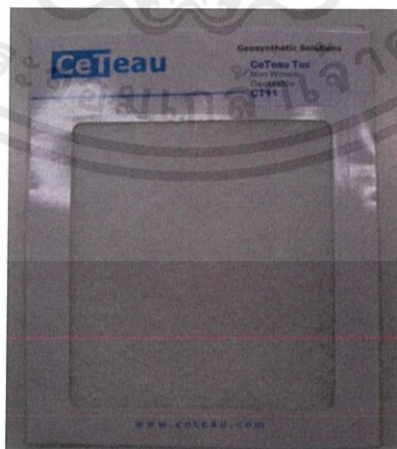
การนำแผ่นใยสังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของงาน โดยมีหน้าที่ในการกรอง การเสริมกำลังและความแข็งแรง ป้องกันการกัดเซาะบริเวณผิวดินและหน้าดิน การระบายน้ำ โดยแผ่นใยสังเคราะห์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอ (Woven Geotextile) โดยทั่วไปแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอผลิตจากพลาสติกประเภท โพลิโพรไพลีน (Polypropylene) และนำมาถักทอ ประกอบไปด้วยเส้นใยในแนวตามความยาวของแผ่นใยสังเคราะห์ เรียกว่า “Warp” และเส้นใยในแนวตามขวาง เรียกว่า “Weft” โดยแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้ จะมีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมีต่างๆ ช่วยลดการแตกกะเทาะ ป้องกันการทะลุผ่านอย่างมีประสิทธิภาพและมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ดี เหมาะสำหรับการทำถนนลาดยางภายใต้ชั้นดินที่มีความร้อนสูง การก่อสร้างถนนใหม่ หรือซ่อมแซมถนนเดิม โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมหรือรอยแตกกะเทาะ การป้องกันชายฝั่งทะเล การปูใต้หมอนรองรางรถไฟ งานเพิ่มความแข็งแรงของงานคอสะพาน รั้วเวย์สนามบิน และงานปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นต้น การเชื่อมต่อกันของแผ่นใยสังเคราะห์ใช้วิธีการปูทับกัน โดยมีระยะทับไม่น้อยกว่า 0.50 เมตร และเย็บติดกันตามมาตรฐาน SEWING SEAM STANDARD (BS 8006 : 1995) โดยใช้วัสดุ Fiberglass เป็นเส้นใยในการถักทอ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดถักทอ (Woven Geotextile)

2. แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ (Non-Woven Geotextile) ผลิตจากเส้นใยโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) มีความยาวของเส้นใยที่ต่อเนื่อง ประสานกันโดยใช้อุณหภูมิสูงละลายเส้นใย เพื่อประสาน (Heat) หรือ การใช้เข็มถักร้อยประสานเส้นใย (Needle Punched) ขนาดความกว้างตั้งแต่ 4 เมตร จนถึง 5.50 เมตร และมีน้ำหนักตั้งแต่ 100 กรัมต่อตารางเมตร ไปจนถึง 1,500 กรัมต่อตารางเมตร โดยทั่วไปแผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ จะมีสารเคลือบเพื่อป้องกันความเสียหายจากแสง UV ที่ได้รับจากแสงแดด แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการซึมผ่านของน้ำได้ดี ความยืดหยุ่นสูง และเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง ในด้านการกรอง เหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุ แยกชั้นดิน กรองดิน และเพิ่มเสถียรภาพให้กับชั้นดินอ่อน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน งานดังต่อไปนี้ งานถนนที่มีผิวทางและไม่มีผิวทางหรือชั้นดินเพิ่มเสถียรภาพ (Platform) งานถมพื้นที่หนองน้ำเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ งานลานกองเก็บวัสดุหรือวางตู้สินค้า งานก่อสร้างรางรถไฟ และงานระบบระบายน้ำข้างทาง หรือใต้ชั้นทาง งานก่อสร้างจัดสวนบนหลังคา และงานภูมิสถาปัตยกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.24 แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ (Non-Woven Geotextile)

แผ่นใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลุ่มที่ใช้เส้นใยยาวสีขาว ผลิตจากโพลีพรอเพิลีน (Polypropylene; PP) ดังรูปที่ 2.25(a)

- กลุ่มที่ใช้เส้นใยสั้นสีขาว ผลิตจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester; PS) ดังรูปที่ 2.25(b) โดยแผ่นใยสังเคราะห์กลุ่มที่ใช้เส้นใยยาวให้ค่าผลการทดสอบสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เส้นใยสั้นทุกรายการของผลการทดสอบ เมื่อแผ่นใยสังเคราะห์มีหน่วยน้ำหนักเท่ากัน

การประยุกต์ใช้หน้าที่ Geotextiles สามารถใช้ประโยชน์อย่างมากในหลายด้านของงานวิศวกรรมปฐพีสามารถสรุปได้เป็น 5 หัวข้อหลัก คือ

- ก. Separation คือ การแยกชั้นของดินแต่ละชั้นออกจากกันและไม่ปนกันอย่างถาวร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุในการก่อสร้าง และเป็นประโยชน์ทางอ้อมที่ทำให้เกิด การทรุดตัวของชั้นดินแต่ละชั้นใกล้เคียงกัน เช่น งานถนน งานสนามบิน งานลานจอดรถ งานเขื่อน เป็นต้น
- ข. Drainage คือ การระบายน้ำออกจากมวลดิน ทำให้ลดน้ำในมวลดินดินหรือลดแรงดันน้ำ หากใช้ร่วมกับ Geonets จะสามารถระบายน้ำได้ดีมากขึ้นอีก
- ค. Filtration คือ การกรองวัสดุไม่ให้ น้ำที่ไหลผ่านมวลดินพัดพาเอาอนุภาคของดิน หรือทราย ออกไปด้วย มีประโยชน์ในงานเกี่ยวกับการกักเซาะของน้ำโดยเฉพาะ บริเวณชายฝั่งตลิ่งและงานกรองในด้านอื่นๆ ดังรูปที่ 2.27 และเป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ เพื่อนำคุณสมบัติดังกล่าวมาวิเคราะห์หารูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่เหมาะสมสำหรับงานเขื่อนป้องกันตลิ่ง
- ง. Reinforcement คือ การเสริมแรงในดินเพื่อเพิ่มความสามารถในการก่อสร้าง โครงสร้างงานดิน เช่นการเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยต่อเสถียรภาพเชิงลาด หรือ เพิ่มกำลังในการรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของดิน เป็นต้น มีประโยชน์ในการก่อสร้างโครงสร้างงานดินหลายประเภท เช่น งานก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง งานดินถม เป็นต้น
- จ. Protection คือ การป้องกันเพื่อการใช้งานในระยะยาวหรือเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างงานดิน เช่น ลดการกัดเซาะบริเวณริมฝั่ง และปัญหาจากการผสมกัน ของชั้นรองพื้นที่ทางกับดินเดิม เป็นต้น

#### ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของ Geotextiles

- ก. ข้อดีของการใช้แผ่นใยสังเคราะห์
  - คุณภาพของวัสดุสม่ำเสมอ เนื่องจากผลิตจากโรงงานที่ได้มาตรฐาน
  - การติดตั้งสะดวก ประหยัดเวลา น้ำหนักเบา ราคาถูก
  - อายุการใช้งานยาวนาน เพราะผลิตจากสารสังเคราะห์ทำให้ทนต่อการย่อยสลาย
  - มีความสามารถในการระบายน้ำสูง
  - มีความสามารถในการทนต่อรังสี UV
- ข. ข้อเสียของการใช้แผ่นใยสังเคราะห์
  - การยึดตัวสูง

## 2.9 การแก้ไขซ่อมแซมลาดดินเพื่อเสริมความมั่นคง

เมื่อเกิดการพิบัติแล้วหรือเพียงมีสิ่งบอกว่าอาจจะเกิดการพิบัติ จำเป็นต้องมีการแก้ไขปรับปรุงให้ลาดดิน หรือคันดิน มีความมั่นคงปลอดภัยต่อการพิบัติ ซึ่งมีหลัก 2 ประการคือ

- ก. ลดน้ำหนักหรือแรงที่จะจุดให้มวลดินเคลื่อนที่ลง
- ข. เพิ่มแรงต้านทานการเคลื่อนตัวของมวลดิน

วิธีปฏิบัติที่นำมาใช้ในการปรับปรุงเพิ่มความมั่นคงของลาดดิน มีดังนี้

### 2.9.1 วิธีการตัดเปลี่ยนลาด (Geometrical Method)

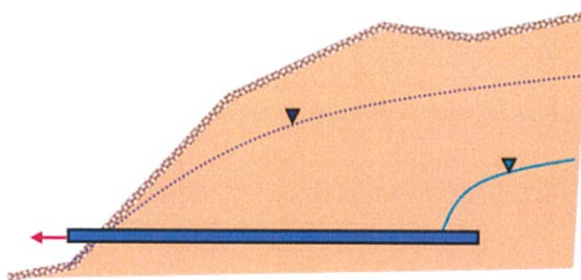
โดยพยายามลดน้ำหนักส่วนบนของลาดดิน และเพิ่มน้ำหนักส่วนตีนของลาดดิน วิธีนี้มักใช้เมื่อมีพื้นที่เพียงพอที่จะขยายดินเขื่อนหรือตีนลาดดินหรือตัดส่วนบนออกไปได้ ดังรูปที่ 2.28



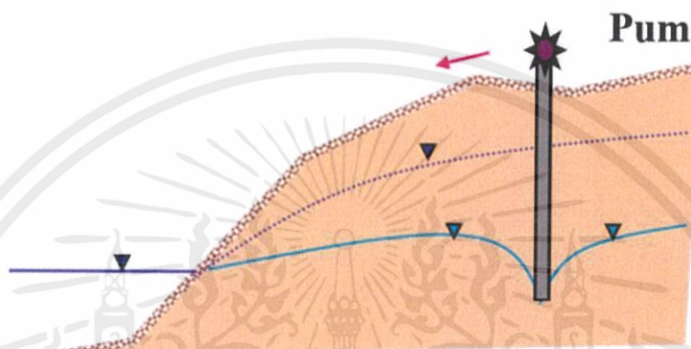
รูปที่ 2.25 วิธีเพิ่มความมั่นคงโดยวิธีตัดเปลี่ยนลาดดิน (ผศ.ดร. ธนาทศ คงสมบูรณ์ ,2547)

### 2.9.2 วิธีการระบายน้ำ (Hydrological Method)

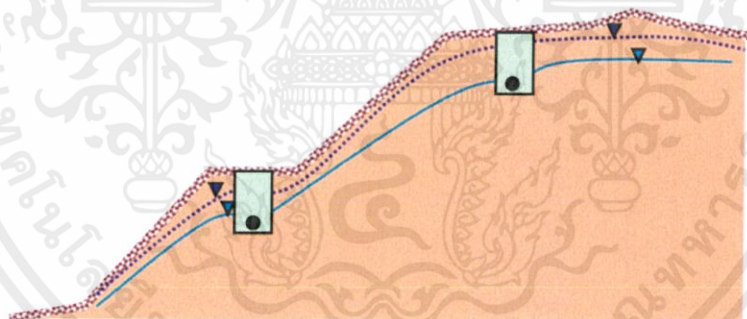
เป็นการปรับปรุงความมั่นคงของลาดดินโดยลดแรงดันของน้ำในมวลดิน โดยพยายามลดระดับน้ำในมวลดินของลาดดิน เช่น การเจาะท่อระบายน้ำ สูบน้ำจากบ่อระบาย ทำร่องระบายเบี่ยงทางน้ำ เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้ลดแรงดันยกของน้ำ และเพิ่มกำลังของดินไปด้วย ดังรูปที่ 2.29 และ 2.30



(a) Horizontal Drain



(b) Pump Drain



(c) Surface Drain

รูปที่ 2.26 วิธีเพิ่มความมั่นคงโดยวิธีการระบายน้ำออกจากลาดดิน

(ผศ.ดร. ธนาตล คงสมบูรณ์ ,2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



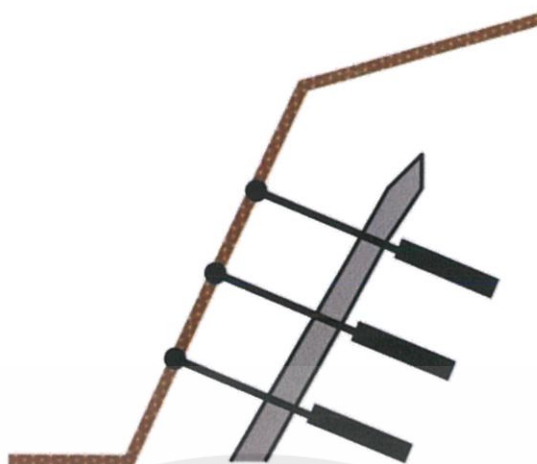
รูปที่ 2.27 การฝังท่อน้ำออกจากราดดินบริเวณริมถนนอวามมลา จ.ภูเก็ต  
(ผศ.ดร. ธนาตล คงสมบูรณ์ ,2547)

### 2.9.3 วิธีเพิ่มความแข็งแรง (Strength Improvement Method)

โดยการเพิ่มกำลังให้มวลดินบริเวณที่เส้นผิวการวิบัติตัดผ่าน เช่น การทำ Grouting, Lime Treatment, Soil Improvement, การตอกเสาเข็ม, การเสริมด้วยวัสดุสังเคราะห์ และการเพิ่มน้ำหนักที่ ดินลาด เป็นต้น สำหรับลาดดินธรรมชาติที่มีบริเวณกว้าง เช่น พื้นที่ต้นน้ำ ขอบอ่างเก็บน้ำ ชายฝั่งทะเล เป็นต้น หรือเมื่อต้องการปรับปรุงเสถียรภาพโดยคำนึงถึงสภาพธรรมชาติเป็นหลัก การปลูกต้นไม้เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง



(a) เสาเข็มเสริมแรง



(b) Rock bolt

รูปที่ 2.28 รูปแบบการเสริมความแข็งแรงของลาดดิน (ผศ.ดร. ธนาตล คงสมบูรณ์ ,2547)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK (2015)

Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK (2015) ได้ทำการศึกษารณีการพังทลายของลาดดินของช่องทางระบายน้ำลึก ที่มีสาเหตุมาจากการอุดตันของแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ซึ่งการอุดตันนี้มีสาเหตุมาจากการเลือกวัสดุใยสังเคราะห์ที่ไม่เหมาะสมกับคุณสมบัติของดิน และสาเหตุการพังทลายอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ การลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการพังทลายของลาดดิน โดยการใช่วัสดุใยสังเคราะห์วางระหว่างชั้นหินและดินเหนียว แม้จะมีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์แล้วก็ตาม ในช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณน้ำฝนอย่างรุนแรงก็ส่งผลให้เกิดการพังทลายของลาดดินไหลลงมายังด้านล่างของช่องทางระบายน้ำ เช่นกัน



รูปที่ 2.29 รูปตัดของการออกแบบวัสดุเสริมแรงในลาดดิน

(Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK ,2015)

### การทดสอบของงานวิจัย

- ก. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ โดยมีเงื่อนไข คือ ต้องเป็นดินตามธรรมชาติหรือดินเดิมเท่านั้น
- ข. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ที่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ โดยมีการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่าน ดังนี้
  - ทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์
  - ทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์ สำหรับดินเหนียวที่อยู่ใต้น้ำ

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์

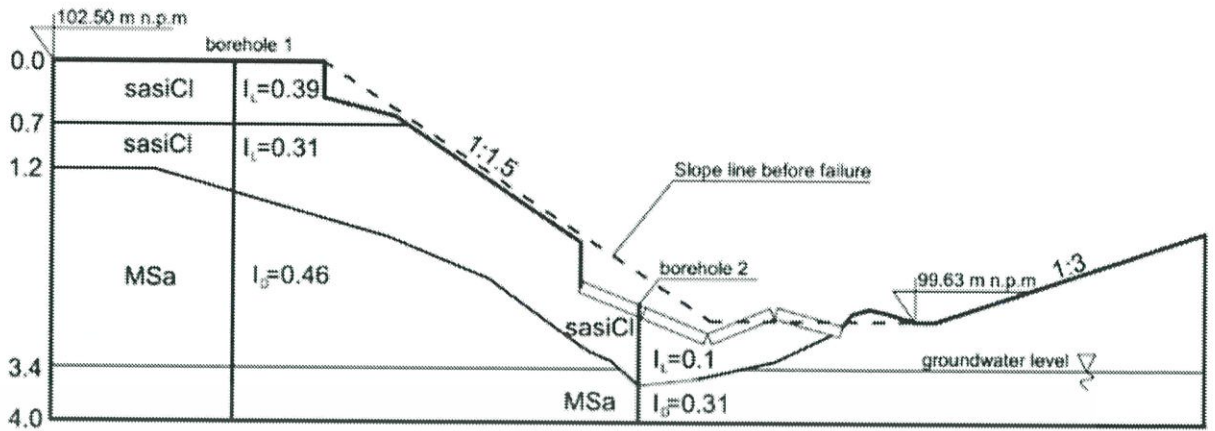
Conditions of filtration	Hydraulic gradient $i$ [-]	Flow time during the measurement $t$ [s]	Average volume of water flowing in time $t$ $V_{wa}$ [cm <sup>3</sup> ]	Coefficient of permeability $k_{10}$ [m/s]
through geotextile	40.00	30.00	241.40	$3.05 \cdot 10^{-5}$

ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นใยสังเคราะห์ สำหรับดินเหนียวที่อยู่ใต้น้ำ

Conditions of filtration	Hydraulic gradient $i$ [-]	Flow time during the measurement $t$ [h]	Average volume of water flowing in time $t$ $V_{wa}$ [cm <sup>3</sup> ]	Coefficient of permeability $k_{10}$ [m/s]
Flow of clay suspension through the geotextile	40.00	8.00	8.57	$6.07 \cdot 10^{-9}$

### ผลการศึกษา

ในระยะยาวเมื่อดินเหนียวที่อยู่ใต้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) จะเกิดการชุ่มน้ำ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านของแผ่นใยสังเคราะห์ลดลง ส่วนหินที่อยู่ด้านบนจะแทรกตัวลงมา ทำให้กำลังการรับแรงของลาดดินลดลง และแผ่นคอนกรีต ส่งผลให้แผ่นใยสังเคราะห์ขาดคุณสมบัติการซึมผ่าน เนื่องจากการอุดตัน



รูปที่ 2.30 รูปตัดของลาดดินหลังเกิดการพังทลาย  
(Krzysztof PARYLAK, Zofia ZIEBA and Kinga WITEK ,2015)

2.10.2 J. Recio-Molina and K. Yasuhara (2005)

Recio-Molina and K. Yasuhara (2005) ได้ศึกษาการดัดแปลงการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) แบบ Wrap-around revetments (GWR) โดยสร้างแบบจำลองแล้วใช้แผ่นใยสังเคราะห์ห่อทราย ซึ่งมีอยู่ 4 รูปแบบ คือ การปูแบบ GWR ปกติ, การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบ GWR แต่มีการเย็บชั้นให้ติดกัน, การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบ GWR แต่มีการฉีดยาเข้าไป และใช้วัสดุเชิงประกอบ (Geocomposite) โดยทั้ง 4 รูปแบบจะทำการทดลองบนฐานรากที่เป็นทรายหนา 14 เซนติเมตร และบนเครื่อง Wave Flume ดังรูปที่ 2.34(a) และ (b)

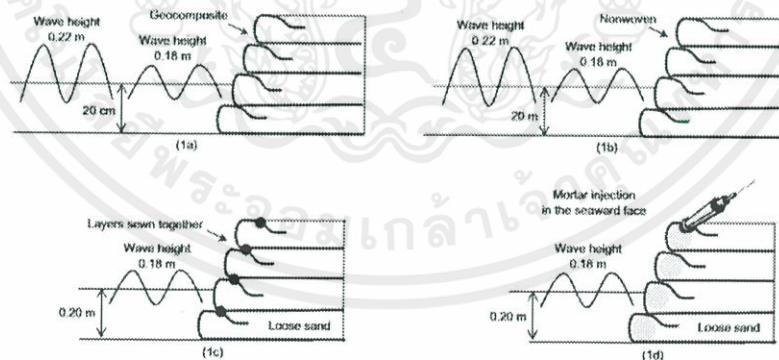


Figure 3. Model test scenarios during first stage (GWR structure constructed directly on wave flume): (1a) geocomposite GWR; (1b) nonwoven GWR; (1c) GWR with layers sewn together; (1d) GWR with seaward face injected with mortar

รูปที่ 2.31(a) การสร้างแบบจำลองบนเครื่อง Wave Flume  
(Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005)

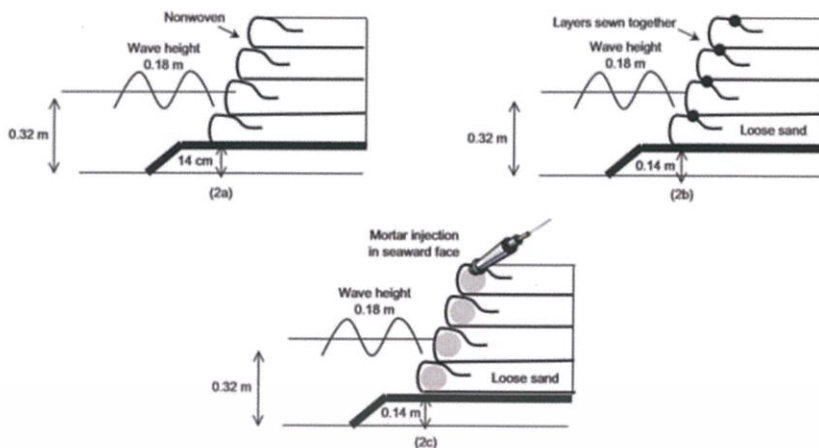
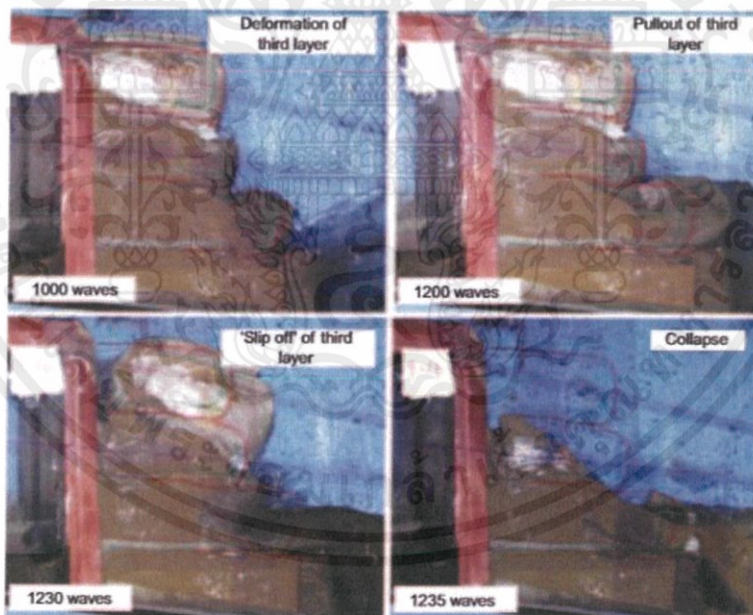


Figure 4. Model test scenarios during second stage (GWR structure constructed on sand foundation): (2a) nonwoven GWR; (2b) GWR with layers sewn together; (2c) GWR with seaward face injected with mortar

รูปที่ 2.32(b) การสร้างแบบจำลองบนฐานรากที่เป็นทรายหนา 14 cm.  
(Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005)

ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองที่มีสเกลเล็กสร้างแบบจำลองในเครื่อง Wave Flume พร้อมกับการสร้างคลื่นให้มากระทบกับแบบจำลองให้คล้ายลักษณะงานจริง เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง และแบบจำลองนี้สร้างบนพื้นแข็ง



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างการทดสอบและลักษณะการพังทลาย (Recio-Molina and K. Yasuhara ,2005)

ผลการทดลองที่ได้ คือ การปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) แบบ Wrap-around revetments (GWR) แล้วมีการเย็บชั้นให้เชื่อมติดกัน ทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพ มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และสามารถต่อต้านการกัดเซาะได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

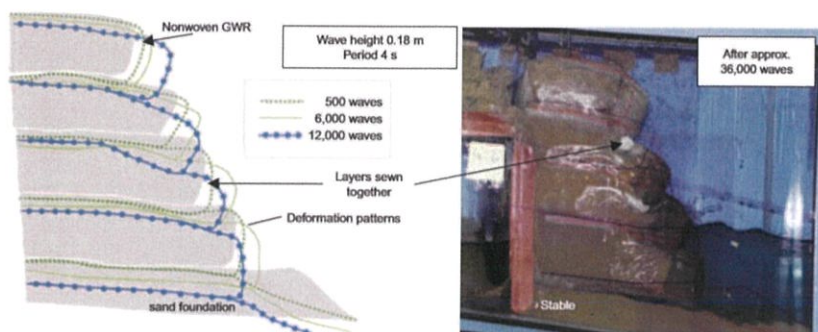


Figure 10. Deformation pattern of nonwoven GWR structure with layers sewn together on sand foundation

รูปที่ 2.34 รูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ แบบ GWR แล้วมีการเย็บชั้นให้เชื่อมติดกันบน  
ฐานรากที่เป็นทราย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 บทนำ

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างกันดินในงานชุดดินจริงในสนามเป็นการศึกษาที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากใช้ระยะเวลาและบางครั้งมีความเสี่ยงต่ออันตรายสูงยิ่งไปกว่านั้นการก่อสร้างจริงนั้นอาจจะเรียกได้ว่าไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ เป็นการศึกษาที่ไม่สามารถทำซ้ำเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สนใจได้ ดังนั้นการศึกษาด้วยแบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก

สวัสดี สุคนธรังสี (2520: 206) กล่าวว่า แบบจำลองหมายถึงตัวแทนที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรม หรือลักษณะบางประการของสิ่งที่เป็จริงอย่างหนึ่ง

Bardo and Hartman (1982: 70-71) กล่าวว่า แบบจำลองเป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อบรรยายคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแบบจำลองจึงมิใช่การบรรยายหรืออธิบายปรากฏการณ์อย่างละเอียดทุกแง่มุม เพราะการกระทำเช่นนั้นจะทำให้แบบจำลองนั้นด้อยลงไป ส่วนการที่จะระบุว่าแบบจำลองใดจะต้องประกอบด้วยรายละเอียดมากน้อยเพียงใดจึงจะเหมาะสมและแบบจำลองนั้นๆ ควรมืองค์ประกอบอะไรบ้าง ไม่ได้มีการกำหนดตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์แต่ละอย่างและวัตถุประสงค์ของผู้สร้างแบบจำลองนั้นว่าต้องการจะอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ อย่างไร

ในการศึกษาดังต่อไปนี้ เป็นการจำลองแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วง 1-G (Gravitational) โดยใช้แบบจำลองทางน้ำเปิด (Flume) เพื่อศึกษาพฤติกรรมรูปแบบการบิวัสดูโยสังเคราะห์ ประเภทแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ในงานเขื่อนป้องกันตลิ่ง

#### 3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในแบบจำลอง

ในการศึกษาแบบจำลอง จำเป็นต้องหาคุณสมบัติของดินที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งได้แก่ การหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis), การบดอัดดิน (Compaction), ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil), การซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability Test) และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองโดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.2.1 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (specific gravity of soil)

(มาตรฐาน: ASTM D 854)

ในมวลดินจะมีส่วนประกอบของแร่ธาตุสารต่างๆ อาจจะชนิดเดียวหรือต่างชนิดกันหลายอย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดิน  $G_s$  ก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุสารเหล่านั้น และโดยทั่วไป ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดินจะมีค่าประมาณ 2.60 ถึง 2.80 แล้วแต่แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ เช่น ดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า แต่หากดินมีสารอินทรีย์อยู่มากจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของมวลดิน สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ความพรุน (Porosity) ความอิ่มตัว (Degree of Saturation) หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) และค่าอื่นๆ ได้ รวมทั้งใช้คาดคะเนแร่ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของมวลดินนั้น เช่น ดินที่มี iron อยู่มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าดิน ที่มี silica เป็นส่วนประกอบ หรือดินเหนียวจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าทราย เนื่องจากดินเหนียวมีส่วนประกอบของแร่ธาตุซึ่งหนักกว่า (Quartz) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของทราย นอกจากนี้ค่าความถ่วงจำเพาะยังต้องนำไปใช้ในการทดสอบอื่นอีกด้วย

### อุปกรณ์

1. Pycnometer แบบขวดแก้วคอยาวกันป่อง (Volumetric Flask) หรือแบบขวดทรงกระบอก ปริมาตร 250 หรือ 500 mL
2. เตาบุงเส้นหรือเตาแผ่นร้อน (Hot plate) หรือ หม้อต้มน้ำ
3. Thermometer 0-100 องศาเซลเซียส อ่านละเอียด 0.5-1.0 องศาเซลเซียส
4. เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.1 กรัม
5. น้ำกลั่น (Distilled water)
6. ภาชนะ (ขันอลูมิเนียม)
7. เครื่องกวนดิน (Stirring Apparatus)
8. ตู้อบ (Drying oven)
9. อ่างแก้วดูดความชื้น (Desiccator) พร้อมฝาปิด



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน

### วิธีการทดสอบ

#### Calibration of Pycnometer

จุดประสงค์เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของขวด Pycnometer ซึ่งมีน้ำเต็มถึงขีดที่กำหนด ที่อุณหภูมิต่างๆระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับหาค่า  $\rho_w$  ของดินต่อไป การ Calibration มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

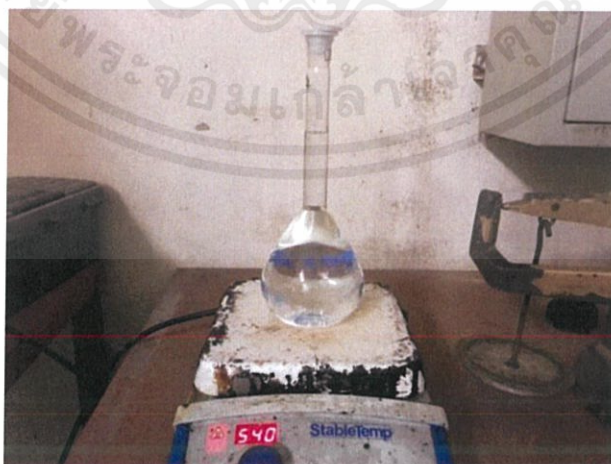
1. เติมน้ำกลั่นลงในขวด Pycnometer ให้ถึงขีดบอกปริมาตร  $500 \text{ cm}^3$
2. นำขวดไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศในน้ำ ด้วยการต้มน้ำให้เดือดบน Hot Plate หรือใส่ในหม้อต้มน้ำประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศที่ฟุดขึ้นมาจากน้ำหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปล่อยให้เย็นลง จนกระทั่งอุณหภูมิลดถึงประมาณ 40 องศาเซลเซียส ตรวจสอบว่าอุณหภูมิ น้ำในขวดแก้วเท่ากันทุกระดับหากต้องการให้อุณหภูมิลดลงรวดเร็วในอ่างน้ำ
4. ปรับระดับท้องน้ำให้อยู่ในระดับขีดบอกปริมาตร 250 หรือ 500 cm<sup>3</sup> โดยการเตรียมน้ำกลั่น ที่ต้มไล่ฟองอากาศที่เตรียมไว้แล้วลงในขวดแก้ว (ถ้าระดับท้องน้ำเกิน 500 cm<sup>3</sup> ให้เอาน้ำใน ขวดออก)
5. เช็ดขวดภายนอกให้แห้ง ใช้ผ้าซับน้ำที่ค้างอยู่ภายในขวดให้แห้ง นำขวดแก้ว+น้ำปั้งหาน้ำหนัก พร้อมกับวัดอุณหภูมิขณะนั้น โดยวัดที่หลายระดับ หากอุณหภูมิต่างกันมากให้ใช้ หลอดแก้วคน หรือเอียงขวดกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมกันดี ทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึก อุณหภูมิที่ถูกต้อง
6. ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง แล้วทำเช่นเดียวกับ ข้อ 4 และ 5 อีกประมาณ 3-4 ครั้ง ในช่วงอุณหภูมิจากประมาณ 40 องศาเซลเซียส จนถึง 20 องศาเซลเซียส (ถ้าต้องการให้ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจากห้องอาจใช้วิธีใส่น้ำในอ่างที่แช่ด้วยน้ำแข็ง)
7. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักและอุณหภูมิ

#### การหาความถ่วงจำเพาะของดิน

1. นำตัวอย่างดินแห้งประมาณ 50 กรัม ไปใส่น้ำกลั่นแล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นดินประมาณ 10 นาที
2. เทส่วนผสมของน้ำและดินลงในขวด Pycnometer ถึงประมาณ  $\frac{3}{4}$  ของขวด และใช้กระบอก ฉีดน้ำกลั่นฉีดล้างดินที่ติดอยู่ออกให้หมด
3. ไล่ฟองอากาศเช่นเดียวกับวิธีสอบเทียบขวดแก้วด้วยการต้มให้เดือดบน Hot Plate ประมาณ 10 นาที แล้วนำขวดแก้วออกมาปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หรือ แช่ลงในอ่างน้ำเย็น
4. หลังจากนั้นปรับระดับน้ำดินให้เท่ากับขีดบอกปริมาตร 250 หรือ 500 cm<sup>3</sup> วัดอุณหภูมิของน้ำ ดินในขวดเช็ดขวดให้แห้งแล้วนำไปชั่งให้ละเอียด 0.1 กรัม (ได้ค่า  $W_{BWS}$  ณ อุณหภูมิห้อง)
5. เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด Pycnometer ลงในภาตเพื่อนำไปอบให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักหา  $W_s$



รูปที่ 3.2 Pycnometer (แบบ Volumetric flask) ต้มน้ำไล่ฟองอากาศบน Hot Plate

## การคำนวณผล

$$G_S = G_T \left[ \frac{W_s}{W_{BW} + W_s - W_{BWS}} \right]$$

- เมื่อ  $W_s$  = น้ำหนักดินแห้ง (ณ อุณหภูมิห้อง)  
 $W_{BW}$  = น้ำหนักขวด + น้ำกลั่น (ถึงขีดระดับ 500 cm<sup>3</sup>, ได้กราฟ ณ อุณหภูมิห้อง)  
 $W_{BWS}$  = น้ำหนักขวด + ดิน + น้ำ (ถึงขีดระดับ 500 cm<sup>3</sup>, ณ อุณหภูมิห้อง)  
 $G_T$  = ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (หรือค่าองค์ประกอบปรับแก้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1)  
 $G_S$  = ความถ่วงจำเพาะของดินที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (ค่าองค์ประกอบปรับแก้อุณหภูมิ,  $G_T$ )

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999	0.9998
10	0.9997	0.9996	0.9995	0.9994	0.9993	0.9991	0.9990	0.9988	0.9986	0.9984
20	0.9982	0.9980	0.9987	0.9976	0.9973	0.9971	0.9968	0.9965	0.9963	0.9960
30	0.9957	0.9954	0.9951	0.9947	0.9944	0.9941	0.9937	0.9934	0.9930	0.9926
40	0.9922	0.9919	0.9915	0.9911	0.9907	0.9902	0.9898	0.9894	0.9890	0.9885
50	0.9881	0.9876	0.9872	0.9867	0.9862	0.9857	0.9852	0.9848	0.9842	0.9838
60	0.9832	0.9827	0.9822	0.9817	0.9811	0.9806	0.9800	0.9795	0.9789	0.9784
70	0.9778	0.9772	0.9767	0.9761	0.9755	0.9749	0.9743	0.9737	0.9731	0.9724
80	0.9718	0.9712	0.9706	0.9699	0.9693	0.9686	0.9680	0.9673	0.9667	0.9660
90	0.9653	0.9647	0.9640	0.9633	0.9626	0.9619	0.9612	0.9605	0.9598	0.9591

## 3.2.2 การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

(มาตรฐาน: ASTM D-422)

ในมวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมน้ำ (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) และความสามารถในด้านกำลัง (Strength) ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลอง

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินสามารถทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ด ดินและตามชนิดของดิน ดังนี้

1. วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ ( 0.075 มม.)
2. วิธีตกตะกอนโดยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. ) เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปนตะกอน (Silty Clay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ทรายเป็นดินตัวอย่าง จึงเลือกการทดสอบด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เนื่องจากดินตัวอย่างที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่

### Sieve Analysis

เป็นการวิเคราะห์ดินเม็ดหยาบ คือ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่การตะแกรงเบอร์ 200 สามารถหาขนาดเม็ดดินได้โดยการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ซึ่งวางเรียงลำดับโดยให้ตะแกรงหยาบที่สุดอยู่ข้างบนและตะแกรงละเอียดที่สุดอยู่ข้างล่างแล้วหาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ข้างบนตะแกรง แต่วิธีนี้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น เพราะรูปร่างขนาดเม็ดดินมีความแตกต่างกันไม่ใช่กลม หรือลูกบาศก์ แต่จะเป็นเหลี่ยมแหลมไปตามธรรมชาติ

### อุปกรณ์

1. ถาดใส่ตัวอย่างดิน (Mixing Plan)
2. ตะแกรงร่อน (Sieve)
3. เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker)
4. เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม
5. แปลงทำความสะอาดตะแกรง



(a)

(b)

รูปที่ 3.3 (a) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis)

(b) เครื่องเขย่าตัวอย่างดิน (Sieve Shaker)

### วิธีการทดลอง

ก.) การเตรียมตัวอย่างดิน

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักดินแห้งในการร่อนผ่านตะแกรง

ขนาดเม็ดดินใหญ่สุด , นิ้ว	3/8	3/4	1	1 1/2	2	3
น้ำหนักตัวอย่างดินอย่างน้อย , กรัม	500	1000	2000	3000	4000	5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาตาราง แล้วนำตัวอย่างดินแห้งมาตามจำนวนที่กำหนดไว้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดินใหญ่สุด

ข.) ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเลือกตะแกรงจากใหญ่ไปหาตะแกรงขนาดเล็กลงไปประมาณครึ่งเท่า ซึ่งอาจจะเป็นตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว เบอร์ 4 เบอร์ 10 เบอร์ 40 เบอร์ 100 เบอร์ 200 และภาครับ-ฝาปิดตามลำดับ
2. ใช้แปรงทำความสะอาดตะแกรงขนาดหยาบ และตะแกรงขนาดละเอียดด้วยแปรงขนอ่อนเพื่อป้องกันน้ำหนักผิดพลาด นำตะแกรงแต่ละอันชั่งน้ำหนักไว้
3. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ มีขนาดเพียงพอ ควรมีความแห้งพอประมาณที่ระหว่างการทดสอบ จะได้ไม่เปลี่ยนน้ำหนัก
4. ใส่ตัวอย่างดินลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปละเอียด ปิดฝาบนและรองด้วยถาด (Pan) ด้านล่าง แล้วเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) ประมาณ 10 นาที
5. แยกตะแกรงแต่ละอันออกมาจากเครื่องเขย่าแล้วทำการชั่งจะเป็นน้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด
6. เพราะนั้นจะได้น้ำหนักของดินที่ค้างแต่ละตะแกรง โดยนำ ( น.น.ตะแกรง + น.น.ดินที่ค้าง ) - น.น.ตะแกรง

การคำนวณผลการทดสอบ

1. เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง =  $\frac{\text{น้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100\%$
2. เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม = ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า
3. เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง , %Finer = 100 - เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม

จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) หาสัมประสิทธิ์การกระจายของเม็ดดิน

ก) สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity)  $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

ข) สัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature)  $C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$

### 3.2.3 การบดอัดดิน (Compaction)

(มาตรฐาน: ASTM D 698-78 และ ASTM D 1557-78)

งานส่วนใหญ่ทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานเขื่อน งานถนน งานสนามบิน จะใช้ดินเป็นวัสดุถม (Fill Material) ทั้งสิ้น ส่วนใหญ่จะทำการบดอัดดินเพื่อให้ดินแน่นขึ้น โดยมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ 1. ช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดินในระยะยาว (Decrease future settlement) 2. เพิ่มความสามารถทางด้านกำลังของดิน (Increase shear strength) ทำให้ดินรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น และ 3. ลดการซึมน้ำของดิน (Decrease permeability) การบดอัดดินจะใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่จำพวกรถบด ส่วนการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินในสนามถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นจึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมและเปรียบเทียบกับการบดอัดดินในสนาม

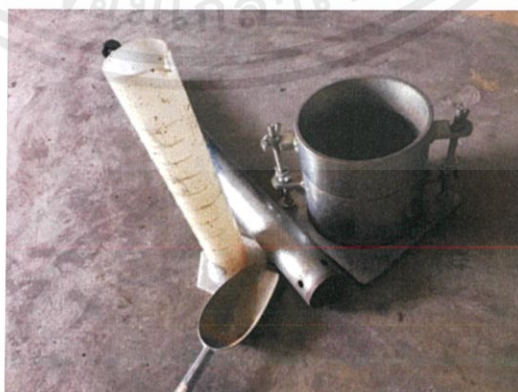
การทดลองการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ มีด้วยกัน 2 วิธี คือ Standard Proctor Test และ Modified Proctor test ซึ่งทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่พลังงานที่ใช้ในการบดอัด วิธี Modified Proctor test จะใช้พลังงานในการบดอัดดินที่สูงกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธี Standard Proctor Test เพื่อตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้การทดสอบแบบ Standard Proctor Test เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของดินตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง

### อุปกรณ์

1. แบบอัดดิน (Compaction Mold)  $\text{Ø}4" \times 4.6"$  พร้อมปลอก (Collar) และแผ่นฐาน (Base Plate) ตุ่มบดอัด (Drop Rammer หรือ Compaction Hammer)  $\text{Ø}2"$  หนัก 5.5 lb ระยะตก 12"
2. แปรงอ่อนใช้ปิดดิน
3. ช้อนตักดิน (Soil Scoop)
4. ไม้บรรทัดเหล็กปาดดิน (Straight Edge) ขนาด 30 cm.
5. ถาดผสมดิน (Mixing Pan)
6. ขวดฉีบน้ำ (Wash Bottle)
7. กระจกบอกรวง (Graduate Cylinder)
8. ตาชั่งขนาด 20 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม

### การหาความชื้น (Water Content)

1. ครอบใส่ตัวอย่างดิน (Can)
2. ตู้อบ (Drying oven)
3. ตาชั่งอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทดลอง

### การเตรียมตัวอย่างดิน

1. ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบความแห้งพอดี แต่ถ้าดินตัวอย่างชื้นเกินไปให้ผึ่งให้แห้งในห้องปฏิบัติการหรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน 140 °F (60 °C) จากนั้นใช้ช้อนอย่างทุบดินที่เกาะกันให้แยกออก หากเป็นพวกดินลูกรังหรือกรวดพยายามอย่าทุบก่อนดินจนเม็ดดินแตก ถ้าเป็นดินเหนียวควรผึ่งให้แห้งแล้วทุบดินให้แตกละเอียดหรือใช้เครื่องบด
2. แบ่งตัวอย่างดินโดยวิธี Quartering หรือแยกด้วยกลองแยกดินเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างดิน
3. พิจารณาขนาดเม็ดดิน เพื่อเลือกตัวอย่างดินที่จะทดสอบกับ Mold คนละขนาดเนื่องจากไม่เป็นการเหมาะสม หากใช้ดินขนาดเม็ดใหญ่บดอัดใน Mold เล็กๆ

### กรณีใช้ Mold ขนาด ๐4" x 4.6"

- เตรียมตัวอย่างโดยนำดินที่แห้งพอดีมาผ่านตะแกรงเบอร์ 4(4.75 มม.) แล้วนำส่วนดินที่ผ่านนี้ไปทดสอบ
  - การทดสอบจะใช้ได้กับดินที่ข้างบนตะแกรงขนาด 3/4" นี้ว ไม่เกิน 30% โดยน้ำหนักเท่านั้น
4. แบ่งตัวอย่างดินประมาณ 5 kg สำหรับทดสอบกับ Mold ขนาด ๐4" x 4.6"
  5. ประมาณปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (O.M.C.)

### ขั้นตอนการทดสอบ (Standard Proctor Test ใช้ Mold ขนาด ๐4" x 4.6")

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของ Mold ด้วยเวอร์เนียแล้วนำไปคำนวณหาปริมาตรของ Mold
2. ชั่งน้ำหนักของ Mold ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
3. ประกอบ Mold, Collar และ base plate เข้าด้วยกัน แล้วนำไปวางบนพื้นคอนกรีตที่แข็งแรงและเรียบ
4. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 kg มาผสมน้ำให้มีความชื้นห่างจากค่าความชื้นที่เหมาะสมที่เราประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ หรือหากเราไม่ได้ประมาณค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไว้ก็ให้ผสมน้ำลงไปประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดิน จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากันพยายามให้ทุกส่วนในดินมีปริมาณความชื้นที่เท่ากัน
5. ใช้ช้อนตักดินใส่ใน Mold ทีละชั้น โดยประมาณดินที่จะใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่าๆกัน แล้วใช้ Rammer ขนาด 5.5 lb บดอัดดินแต่ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง การยกตุ้มให้ยกก้านตุ้มซ้อนขึ้นจนแตะฝาปกแล้วจึงปล่อยตุ้มอย่างอิสระ แต่ละครั้งในการปล่อยตุ้มให้เคลื่อนตำแหน่งตุ้มวนไปทั่วๆ Mold ในชั้นสุดท้ายให้บดอัดดินเหลือพื้นที่ส่วนบนของ Mold เล็กน้อย (ไม่เกิน 13 มม.)
6. ถอด collar ของ Mold ออก ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ Mold ออกและอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอขอบ Mold ใช้แปรงปัดทำความสะอาดด้านนอก Mold แล้วถอด base plate ออก นำ Mold บรรจูดินไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ดันตัวอย่างดินออกจาก Mold ด้วยเครื่องดันดินหรือกระแทกแรงๆ ด้วยตุ้ม นำตัวอย่างดินบริเวณกลางตัวอย่าง อย่างน้อย 100 กรัม ไปหาปริมาณความชื้น โดยการนำไปชั่งแล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบ (ถ้าเป็นไปได้ควรเก็บตัวอย่างทั้ง บริเวณ บน กลาง ล่าง ไปหาปริมาณความชื้น)
8. นำตัวอย่างดินที่เหลือมาหุบให้ร่วนแล้วผสมกับตัวอย่างดินที่เหลือ แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 2-3% คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วทำการทดสอบตามข้อ 3-7 จนกระทั่งน้ำหนักดินใน Mold ที่ซึ่งลดลงแล้วทำการทดสอบอีก 1-2 จุดซึ่งจำนวนครั้งในการทดสอบทั้งหมดไม่ควรเกิน 5-6 ครั้ง

### การคำนวณผลการทดสอบ

$$1. \text{ ความหนาแน่นเปียกของดิน (Wet density)} = \frac{\text{น้ำหนักดินเปียก}}{\text{ปริมาตร Mold}} = \frac{W}{V} \quad \text{lb/ft}^3, \text{ g/cm}^3$$

$$2. \text{ ความหนาแน่นแห้งของดิน (Dry density)}, \gamma_d = \frac{W}{V(1+w)} \quad \text{lb/ft}^3, \text{ g/cm}^3$$

เมื่อ  $W =$  น้ำหนักดินเปียก (Wet weight) ใน Mold lb, g

$V =$  ปริมาตรของ Mold  $\text{ft}^3, \text{cm}^3$

$w =$  ความชื้นของดิน (water content), เปอร์เซ็นต์/100

### 3.2.4 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

(มาตรฐาน: ASTM D 3080)

ความสามารถที่เม็ดดินจะยึดเกาะติดกันเรียกว่า Cohesion ดินที่เม็ดดินยึดติดกันได้ดีเรียกว่าดินประเภท Cohesive Soil เช่น ดินเหนียว และดินที่เม็ดดินมีความสามารถในการยึดติดกันน้อยเรียกว่า Cohesionless Soil เช่น ดินทราย หรือกรวด และงานวิจัยนี้ได้ใช้ทรายเป็นตัวอย่างดินในแบบจำลอง จึงต้องทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear) ในการหาค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle,  $\phi$ ) อุปกรณ์

#### อุปกรณ์

1. Direct shear testing machine เป็นแบบหมุนทดสอบด้วยมือ หรือแบบอิเล็กทรอนิกส์
2. Shear box พร้อมอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง
3. Proving ring วัดขนาดแรง
4. Dial gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว (0.025 นิ้ว) และวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง อ่านได้ละเอียด 0.0001 นิ้ว (0.0025 นิ้ว)
5. plate loading (แผ่นน้ำหนัก)
6. เครื่องชั่ง และอุปกรณ์หาความชื้น
7. เวอร์เนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

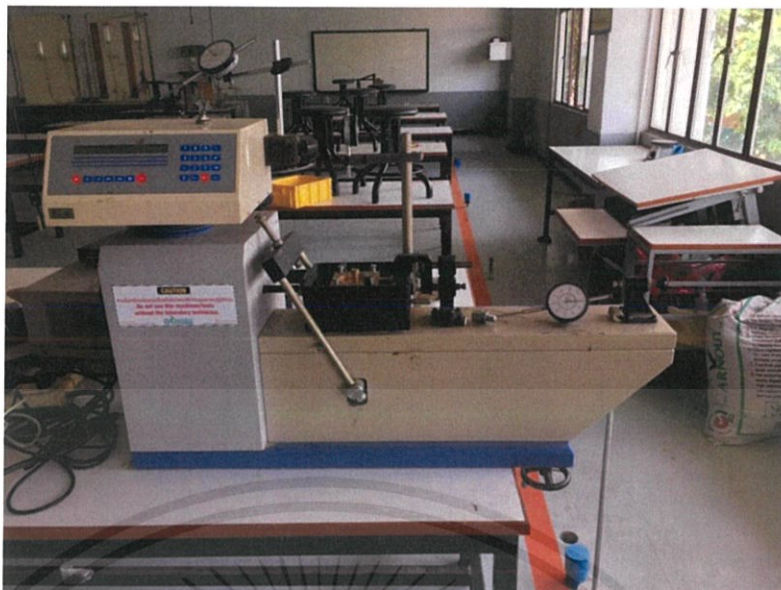
## วิธีการทดสอบ

### การเตรียมตัวอย่างดินและการติดตั้งเครื่องมือ

1. วัดขนาดของ ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cutting Ring พร้อมชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างทรายมาใส่ลงใน Shear Box ใช้ไม้กดทำการบดอัด จำนวนชั้นในการใส่ตัวอย่างและจำนวนการบดอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต้องการ จากนั้นแต่งตัวอย่างให้เรียบพอดีขอบแบบ หลังจากนั้นทำความสะอาดขอบแบบ
2. จากนั้นนำ Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินทรายมาทำการชั่งน้ำหนัก
3. ชั้นสกรูประกอบ Shear Box บนและล่าง วางแผ่นฐานล่าง (Retaining Plate) ลงเข้าไปใน Shear Box โดยให้แนวร่องวางในแนวขวางกับทิศทางของการเฉือนตัวอย่าง
4. วาง Cutting Ring ที่บรรจุตัวอย่างดินบนขอบของ Shear Box ใช้ไม้กด (Wooden pusher) ทำการกดนำตัวอย่างดินให้เข้าไปอยู่ใน Shear Box
5. วางแผ่นเหล็กด้านบน (Loading Pad) ให้ร่องขวางทิศการเฉือนตัวอย่างดินทราย

### การทำการเฉือนตัวอย่างดิน

1. ถอดสกรูล้อ Shear Box ออก ทำการปรับ Dial Gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและในแนวราบให้อยู่ที่ศูนย์
2. ทำการหมุนทดสอบ หรือตั้งค่าอัตราการให้ Strain บนหน้าปัดกรณีเครื่องทดสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่อัตราเร็วเป็นไปตามชนิดของตัวอย่างดินและชนิดของการทดสอบ ถ้าเป็นตัวอย่างทรายให้ใช้อัตราเร็วประมาณ 1.27 มม./นาที
3. อ่านค่าวงแหวนวัดแรงและการเคลื่อนตัวแนวตั้ง ทุกๆการเคลื่อนตัวในแนวราบ ประมาณ 10 หรือ 20 ซีต ( $\times 0.01$  มม.) โดยการอ่านจาก Dial Gauge อ่านค่าไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่าจาก Proving Ring ลดลงประมาณ 5 ค่าจึงหยุด
4. ถอดกล่องตัวอย่าง Shear Box ออก ส่วนตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ แยกเทลงในภาชนะอย่าให้ตกหล่น สำหรับใช้ในการทดสอบครั้งต่อไป (Normal Load อื่นๆ)
5. ทำการทดสอบใหม่ตามวิธีการดังกล่าวทั้งหมดอีก 2 ครั้ง พยายามเตรียมตัวอย่างดินให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน การทดสอบแต่ละครั้งให้เปลี่ยนน้ำหนักแวนตามที่ได้คำนวณไว้ เพื่อให้ได้ Normal Load และค่า Shear Max อีก 2 ค่า



รูปที่ 3.5 การทดสอบ Direct Shear Test

## การคำนวณผลการทดสอบ

1. หาความหนาแน่นของตัวอย่างที่ทดสอบ(3ค่า)(1 ค่าต่อการให้ normal load และการเฉือน 1 ครั้ง)

$$\rho_t = \frac{\text{แรงต่ายตัวอย่างดิน (kg)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (cm}^3\text{)}} \quad \text{กรัม/ซม}^3$$

$\rho_t$  = ความหนาแน่นของดินเปียก

2. ความเค้นแนวตั้งฉาก (Normal Stress)

$$\sigma_n = \frac{\text{น้ำหนักกด(kg)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (cm}^2\text{)}} \quad \text{ksc}$$

3. แรงเฉือน (Shear Stress,  $\tau$ )

$$\tau = \frac{\text{แรงต่ายตัวอย่างดิน (kg)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด shear box (cm}^3\text{)}} \quad \text{ksc}$$

$$\tau = \frac{RK \text{ (kg)}}{A \text{ (cm}^2\text{)}} \quad \text{ksc}$$

เมื่อ R = Proving Ring Reading

ขีด

K = Proving Constant

kg/ขีด

A = Shearing Area

cm<sup>2</sup>

4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ และหาค่า  $\tau_{\max}$  จากจุด peak ของกราฟ
5. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ
6. เขียนกราฟ Mohr's Diagram ระหว่าง  $\sigma$  และ  $\tau_{\max}$  แล้วลากเส้นตรงผ่านจุดเป็นเส้น strength envelope และหาค่า c และ  $\phi$  จากกราฟ ( $\tau = c + \sigma \tan \phi$ )

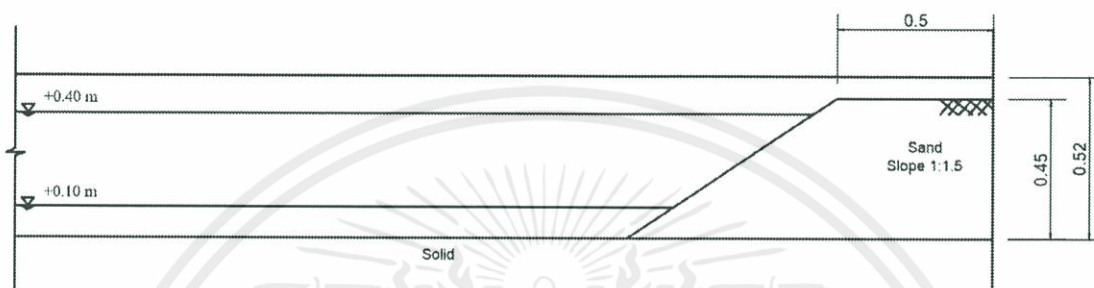
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.3.1 รูปแบบของแบบจำลอง

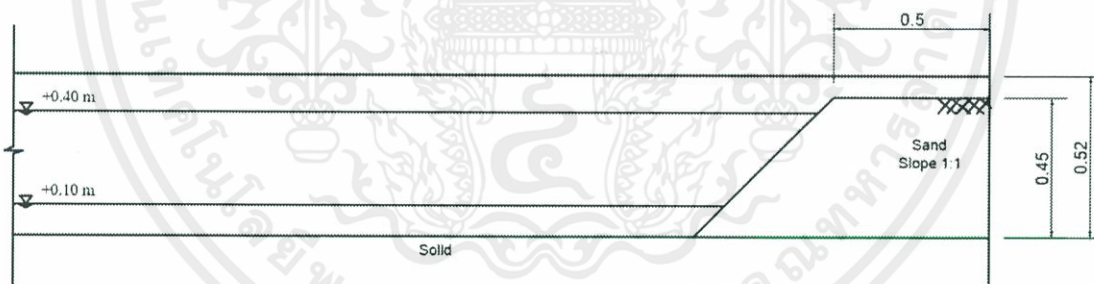
ในการศึกษาครั้งนี้มีแบบจำลอง 6 รูปแบบ ได้แก่

แบบจำลองที่ 1 เชื้อนป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชัน 1:1.5 เป็นแบบจำลองที่สร้างจากทราย โดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 cm. ไม่มีการปูหินทิ้งหรือวัสดุใยสังเคราะห์ แบบจำลองนี้ทำเพื่อศึกษาเสถียรภาพและรูปแบบการพังทลายของลาดดิน และใช้เป็นแบบจำลองต้นแบบในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ



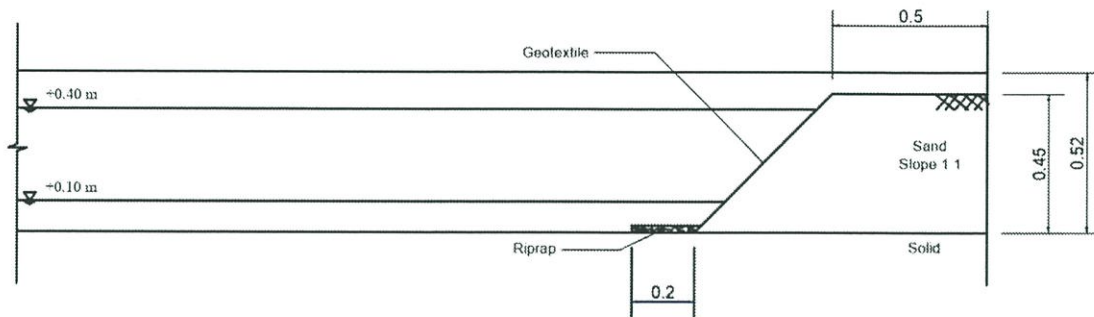
รูปที่ 3.6 แบบจำลองที่ 1

แบบจำลองที่ 2 เชื้อนป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชัน 1:1 เป็นแบบจำลองที่สร้างจากทราย โดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 cm. ไม่มีการปูหินทิ้งหรือวัสดุใยสังเคราะห์ แบบจำลองนี้ทำเพื่อศึกษาเสถียรภาพและรูปแบบการพังทลายของลาดดิน และนำผลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 เพื่อหาความลาดชันวิกฤต แล้วนำความลาดชันที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองต่อไป



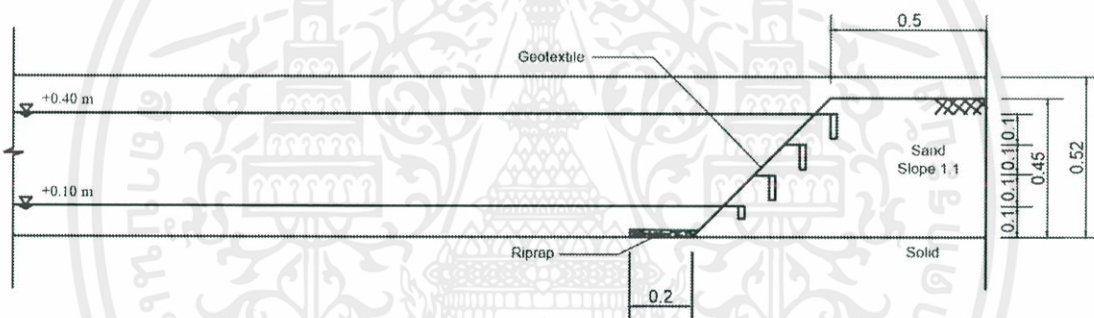
รูปที่ 3.7 แบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 3 เชื้อนป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชัน 1:1 เป็นแบบจำลองที่สร้างจากทราย โดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 cm. มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) พร้อมทั้งวางหินทิ้งที่บริเวณ Toe Slope เป็นระยะ 20 cm. หน้า 2 cm. ป้องกันการล่อยของแผ่นใยสังเคราะห์ พร้อมทั้งวางน้ำหนักขนาด 10 kg. บนลาดดิน เพื่อยึดรั้งแผ่นใยสังเคราะห์ แบบจำลองนี้ทำเพื่อศึกษาเสถียรภาพและรูปแบบการพังทลายของลาดดิน จากนั้นนำปัญหาที่พบไปใช้ในการออกแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ต่อไป

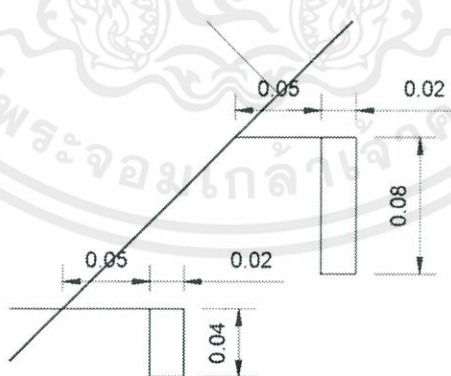


รูปที่ 3.8 แบบจำลองที่ 3

แบบจำลองที่ 4 เชื่อมป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชัน 1:1 เป็นแบบจำลองที่สร้างจากทราย โดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 cm. มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่มีรูปแบบเป็น ร่องลึก ดังรูปที่ 3.10 พร้อมทั้งวางหินทิ้งที่บริเวณ Toe Slope เป็นระยะ 20 cm. หนา 2 cm. ป้องกันการลอยของแผ่นใยสังเคราะห์ พร้อมทั้งวางน้ำหนักขนาด 10 kg. บนลาดดินเพื่อยึดรั้งแผ่นใยสังเคราะห์ แบบจำลองนี้ศึกษารูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ เพื่อบรรเทาปัญหาการพังทลายของลาดดิน โดยเปรียบเทียบกับความลาดชันเดิมที่ไม่เกิดการพังทลาย



รูปที่ 3.9 แบบจำลองที่ 4



รูปที่ 3.10 แบบขยายรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบจำลองที่ 4

แบบจำลองที่ 5 เชื่อมป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชัน 1:1 เป็นแบบจำลองที่สร้างจากทราย โดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 cm. มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่มีรูปแบบเป็น ร่องลึก ดังรูปที่ 3.12 พร้อมทั้งวางหินทิ้งที่บริเวณ Toe Slope เป็นระยะ 20 cm. หนา 2 cm. ป้องกันการลอยของแผ่นใยสังเคราะห์ พร้อมทั้งวางน้ำหนักขนาด 10 kg. บนลาดดินเพื่อยึดรั้งแผ่นใย



### 3.3.2 เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีการนำเครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) ที่มีขนาดความกว้าง 400 mm. ความลึก 500 mm. และมีความยาว 16 m. มาเป็นแบบจำลอง เพื่อใช้จำลองเขื่อนป้องกันตลิ่งให้มีความใกล้เคียงกับงานจริงมากที่สุด



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow)

### 3.3.3 แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile; GT)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้มีการใช้วัสดุใยสังเคราะห์ ชนิดแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) มาใช้ในการศึกษา โดยศึกษาคุณสมบัติการใช้งานการกรอง (Filtration) และการเสริมกำลัง (Reinforcement) ควบคู่กันไป ซึ่งแผ่นใยสังเคราะห์ที่นำมาใช้จะเป็นชนิด No-Woven รุ่น VM 150P มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์ (ที่มา: บริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัด)

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
Mass per unit area ISO 9864	150	g/m <sup>2</sup>
Grab Tensile Strength (MD/CD) ASTM D 4632	790/600	N
Trapezoid Tear Strength ASTM D 4533	270	N
CBR Puncture Resistance EN ISO 12236	1600	N
Water Permeability EN ISO 11058	125	l/m <sup>2</sup> /sec
Opening Size O <sub>90</sub> EN ISO 12956	0.130	mm.
Length	100	m/roll
Width	4	m/roll

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด No-Woven รุ่น VM 150P

### 3.3.4 ขนาดของแบบจำลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการนำเครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) มาใช้เป็นแบบจำลอง แต่เนื่องจากเครื่องทดสอบมีขนาดใหญ่มาก ยากแก่การควบคุมตัวแปรต่างๆ รวมถึงต้องการให้แบบจำลองมีความคล้ายกับงานจริงมากที่สุด จึงต้องกำหนดขอบเขตการศึกษา ความยาว ความกว้าง รวมถึงความลึกของโมเดล โดยลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้



รูปที่ 3.16 แบบจำลอง ขนาด 40x50x580 เซนติเมตร

## 3.4 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

### 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ทรายตัวอย่าง
2. แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด No-Woven รุ่น VM 150
3. ลูกม่ขนาดเล็ก สำหรับผสมทรายให้ได้ OMC เท่ากับ 12%
4. ชุดอุปกรณ์สำหรับการบดอัดทราย
5. สายยาง สำหรับการนำน้ำเข้าและออก
6. กล้องถ่ายรูป
7. ไม้บรรทัด
8. เครื่องชั่ง
9. ถาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ที่ตักทราย

11. เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow)



รูปที่ 3.17 ทรายตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 ลูกโม่ขนาดเล็ก สำหรับผสมทราย



รูปที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์สำหรับการบดอัดทรายใช้เป็นลูกปุนแบบ Cylinder ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 151 mm สูง 298 mm น้ำหนัก 12.087 kg และตรงกลางมีการใส่ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm เพื่อช่วยในการยึดจับที่ง่ายขึ้นเท่านั้น

#### 3.4.1 วิธีการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์การทดลองแบบจำลอง

1. หาค่า Parameter ของทราย เช่น มุมเสียดทานภายใน (Friction Angle) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity of Soil) และความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC)
2. เตรียมเครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) พร้อมติดตั้งสเกลวัดระยะการเคลื่อนตัวของทรายในแบบจำลอง
3. นำทรายตัวอย่างไปหา %WT จากนั้นทำการผสมน้ำลงไปให้ได้ค่า %WT เท่ากับค่า OMC
4. นำทรายตัวอย่างที่ผสมกับน้ำแล้ว มาสร้างแบบจำลองโดยทำการบดอัดทรายเป็นชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร จำนวน 9 ชั้น หรือสูง 45 เซนติเมตร ให้ความลาดเอียงเท่ากับ 1:1 ซึ่งแต่ละชั้นต้องมีการควบคุมการบดอัด และปริมาณทรายที่ใช้ในแต่ละชั้น โดยทำการเปรียบเทียบจากค่า WT = 12% ดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการชั่งเก็บตัวอย่างทรายในแต่ละชั้น เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตารางที่ 3.4 ปริมาณทรายที่ใช้ในแต่ละชั้น (kg) และจำนวนรอบในการบดอัด

ชั้น	ปริมาณทราย (kg)	จำนวนรอบในการบดอัด (รอบ)
1	37.44	50
2	35.52	50
3	33.60	50
4	31.68	50
5	29.76	50
6	27.84	50
7	25.92	50
8	24.00	50
9	22.08	50

6. ทำการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile: GT) ตามแบบจำลองต่างๆ

7. ติดตั้งกล่องให้ได้ระดับและต้องเป็นระนาบเดียวกันกับแบบจำลอง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของทรายและแผ่นใยสังเคราะห์

8. บันทึกภาพแรกก่อนการนำน้ำเข้าแบบจำลอง



รูปที่ 3.20 การเตรียมแบบจำลอง พร้อมทั้งติดตั้งสเกลวัดระยะการเคลื่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การผสมทรายให้ได้ %WT เท่ากับ OMC



รูปที่ 3.22 การชั่งเก็บตัวอย่างทราย



รูปที่ 3.23 การบดอัดทราย และสร้างแบบจำลองให้ได้ความลาดชันตามต้องการ



รูปที่ 3.24 การปูแผ่นใยสังเคราะห์



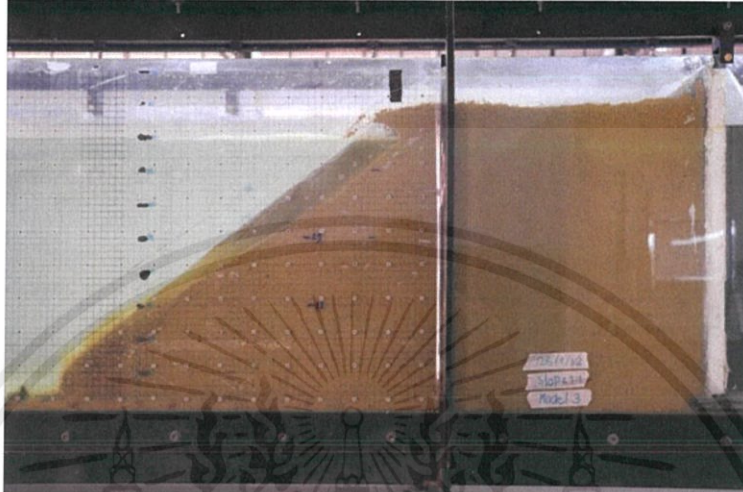
รูปที่ 3.25 การบันทึกภาพแรกเริ่ม

### 3.4.2 วิธีการทดลองแบบจำลองการปูแผ่นใยสังเคราะห์

1. จำลองการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำด้วยการเปิดน้ำเข้าแบบจำลอง จนกระทั่งระดับน้ำอยู่ที่ 40 เซนติเมตร แล้วทำการปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงแบบจำลอง และการเคลื่อนตัวของทราย
3. เมื่อระดับน้ำสูงถึง 40 เซนติเมตร ทำการปิดน้ำแล้วแช่แบบจำลองเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
4. จำลองการลดของระดับน้ำด้วยการปล่อยน้ำออกจากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อระดับน้ำลดลงเหลือ 10 เซนติเมตร นำน้ำหนัก 25 กิโลกรัม วางบนแบบจำลอง แล้วทำการปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
6. สังเกตการพังทลายของแบบจำลอง พร้อมทั้งถ่ายภาพ
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการวางตัวของแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.26 การพังทลายของแบบจำลองในระหว่างการเพิ่มระดับน้ำ



รูปที่ 3.27 ระดับน้ำลดลงเหลือ 10 cm.



รูปที่ 3.28 การพังทลายของแบบจำลอง

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและการเปรียบเทียบ

งานทางด้านวิศวกรรมได้มีการกำหนดค่าอัตราส่วนของความปลอดภัย (factor of safety) เพื่อป้องกันความปลอดภัยในการใช้งาน (Serviceability) รวมทั้งความประหยัด (Economic) ในการก่อสร้าง

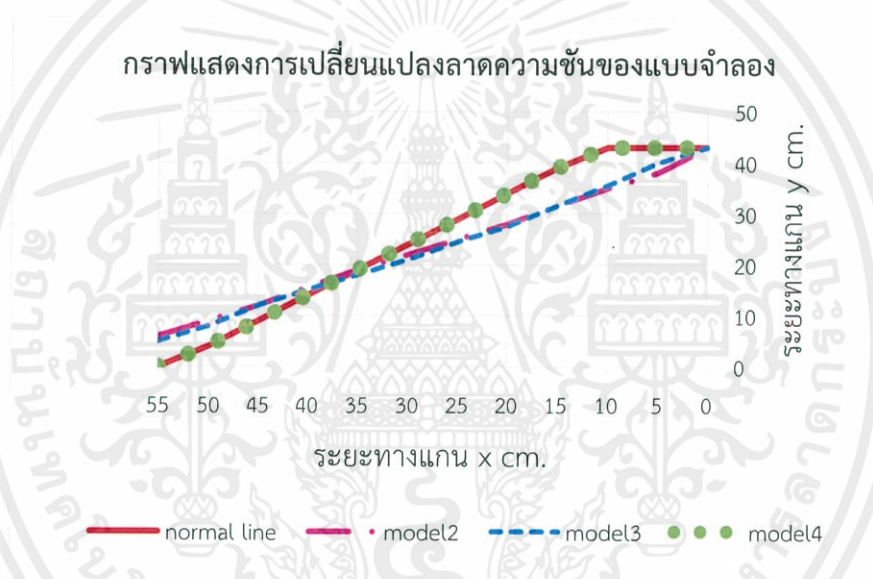
หลังจากทำการเก็บข้อมูลจากแบบจำลอง ผลที่ได้จากแบบจำลองก็คือ รูปแบบการพังทลายของลาดดิน และการเคลื่อนตัวของแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อที่จะได้เห็นความแตกต่างระหว่างรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ต่างๆ จึงต้องนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบรูปแบบการพังทลายของลาดดินและการเคลื่อนตัวของแผ่นใยสังเคราะห์

### 3.5.1 เปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทราย

การศึกษาครั้งนี้ได้มีการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของทรายตัวอย่าง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบตั้งแต่ก่อนเริ่มการทดลอง จนกระทั่งการทดลองเสร็จสิ้น โดยใช้ค่าสเกลที่ทำไว้เป็นตัวกำหนด รวมถึงภาพถ่ายที่ได้ระหว่างทำการทดลอง

### 3.5.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของแบบจำลอง

เพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของแผ่นใยสังเคราะห์ ได้มีการทดลองปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบว่ารูปแบบการปูแบบใดสามารถบรรเทาปัญหาการพังทลายได้ดีที่สุด และในส่วนของเปรียบเทียบรูปแบบนั้นๆ จะเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 4, 5 และ 6 โดยนำผลหลังจากทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกไปแล้ว 1 ชั่วโมง มาทำการเปรียบเทียบ แล้วสังเกตการเคลื่อนตัวของแผ่นใยสังเคราะห์จากสเกล รวมถึงลักษณะการพังทลาย



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลาดความชันของแบบจำลอง

## บทที่ 4 ผลการศึกษา

### 4.1 บทนำ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษารูปแบบการปูวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด ผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อบรรเทาการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง ซึ่งเป็นการศึกษารูปแบบการปูที่ต่างไปจากเดิม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของงานและลดต้นทุนในการก่อสร้าง โดยการศึกษาได้ใช้เครื่องทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) เป็นแบบจำลองในการศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเม็ดทรายของแบบจำลองที่ 1 กับแบบจำลองต่างๆ เพื่อหารูปแบบการปูวัสดุใยสังเคราะห์ที่เหมาะสม การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และรูปแบบการปูวัสดุใยสังเคราะห์ มีผลการศึกษาดังนี้

### 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.2.1 ผลการทดสอบผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด Non-Woven VM 150P

ผลการทดสอบนี้ได้จากทางบริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัด ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) และ EN ISO

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบผ้าใยสังเคราะห์ (Geotextile) ชนิด Non-Woven VM 150P

PRODUCT DATA		
Mass per unit area ; ISO 9864	150	g/m <sup>2</sup>
Grab Tensile Strength (MD/CD) ; ASTM D 4632	790/600	N
Trapezoid Tear Strength ; ASTM D 4533	270	N
CBR Puncture Resistance ; EN ISO 12236	1600	N
Water Permeability ; EN ISO 11058	125	l/m <sup>2</sup> /sec
Opening Size O <sub>90</sub> ; EN ISO 12956	0.130	mm.
Length	100	m/roll
Width	4	m/roll

### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.3.1 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (grain size and soil classification)

จากผลการทดลองพบว่า ดินมีคุณสมบัติเป็น SC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/4"	9.50	512.39	512.39	0	0	0	100
4	4.75	508.80	511.94	3.14	3.14	0.314	99.686
10	2.00	678.97	768.94	89.97	93.11	9.311	90.689
20	0.85	381.67	621.58	239.91	333.02	33.302	66.698
30	0.60	612.15	775.34	163.19	496.21	49.621	50.379
40	0.43	540.64	719.54	178.90	675.11	67.511	32.489
50	0.30	431.87	657.84	225.97	907.08	90.708	9.292
100	0.15	516.43	603.06	86.63	987.71	98.771	1.229
200	0.08	330.80	338.18	7.38	995.09	99.509	0.491
Pan	-	372.77	374.95	2.18	997.27	99.727	0.273

#### 4.3.2 การบดอัดดินและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่น (Compaction and Moisture-Density Relation)

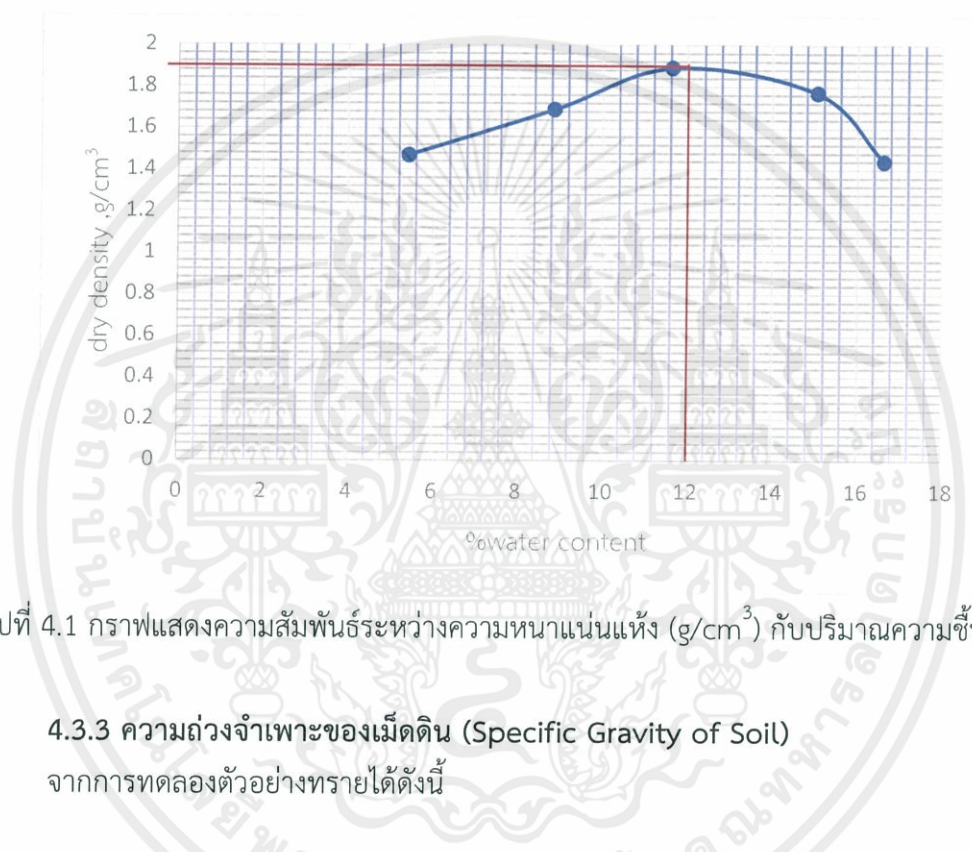
จากผลการทดลองพบว่า ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 Density Determination

Trail No.	1	2	3	4	5
WT. of soil+mold ,g	5110	5385	5638	5571	5236
WT. of mold ,g	3644	3644	3644	3644	3644
WT. of soil in mold ,g	1466	1741	1994	1972	1592
wet density ,g/cm <sup>3</sup>	1.55	1.84	2.11	2.04	1.68
dry density ,g/cm <sup>3</sup>	1.47	1.69	1.76	1.77	1.44

ตารางที่ 4.4 Water Content

water content					
wet soil+container ,g	169.78	185.47	159.23	157.88	175.92
dry soil+container ,g	161.81	171.50	144.07	139.08	152.88
WT of container ,g	15.13	13.97	13.89	14.18	14.47
WT of water ,g	7.97	13.94	15.16	18.80	23.04
WT of dry soil ,g	146.68	157.56	130.18	124.90	138.41
% water content	5.43	8.87	11.64	15.05	16.64

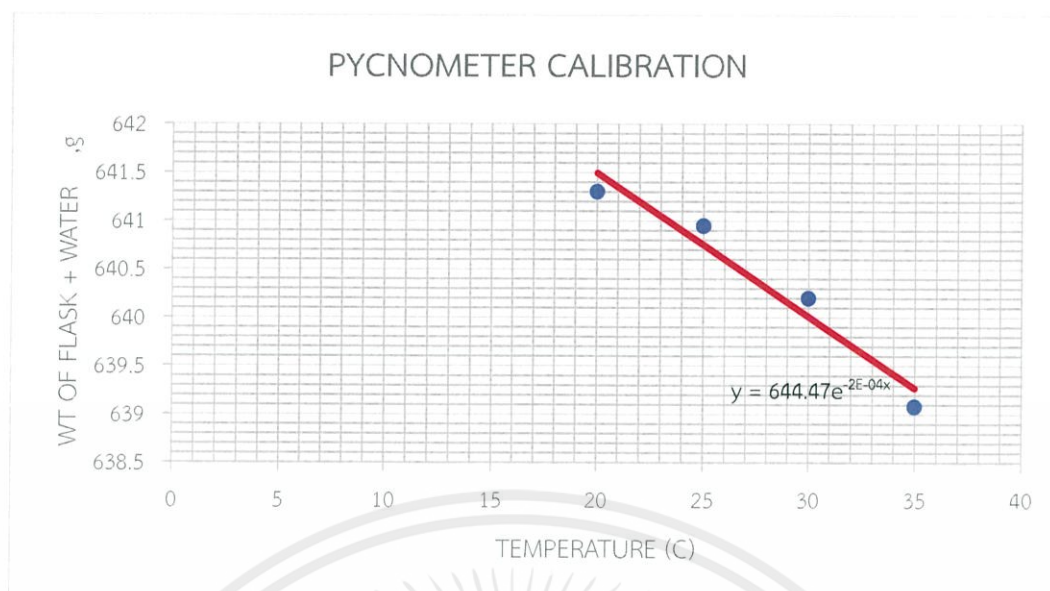
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) กับปริมาณความชื้น (%)

#### 4.3.3 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil)

จากการทดลองตัวอย่างทรายได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูล Calibration of Pycnometer

NO.	FLASK + WATER (g)	TEMPERATURE (C)
1	639.08	35
2	640.20	30
3	640.95	25
4	641.30	20



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (C) กับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ (g)

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

SAMPLE NO.	1	2	3
1. TEMPERATURE , (C)	30	30	30
2. FLASK + WATER ,g	640	640	640
3. FLASK + WATER + SOIL ,g	670.67	671.11	670.46
4. DRY SOIL + CONTAINER ,g	239.59	294.62	357.94
5. WT. OF CONTAINER ,g	191.41	246.92	311.79
6. DRY SOIL (4)-(5) ,g	48.18	47.76	46.15
7. GT	0.9957	0.9957	0.9957
8. G.S.	2.74	2.84	2.93
9. AVERAGE G.S.	2.84		

ดังนั้น จากการทดลองพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ทราย) มีค่าเท่ากับ 2.84

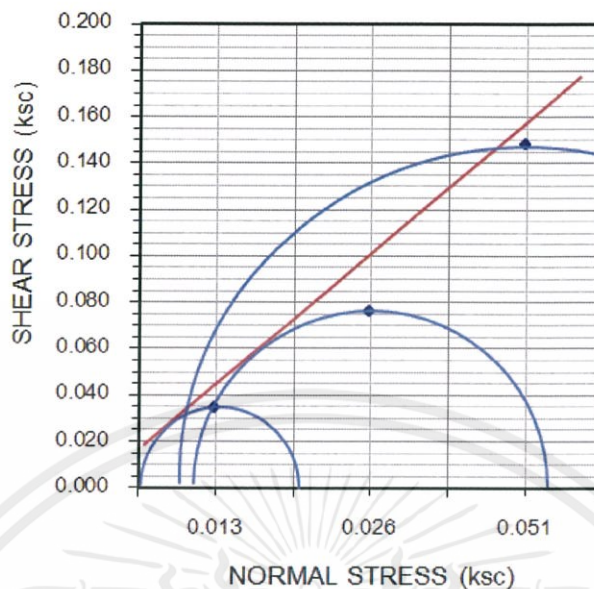
#### 4.3.4 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle)

จากผลการทดสอบ Direct shear พบว่าทรายมีค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) = 29.66°

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Direct shear

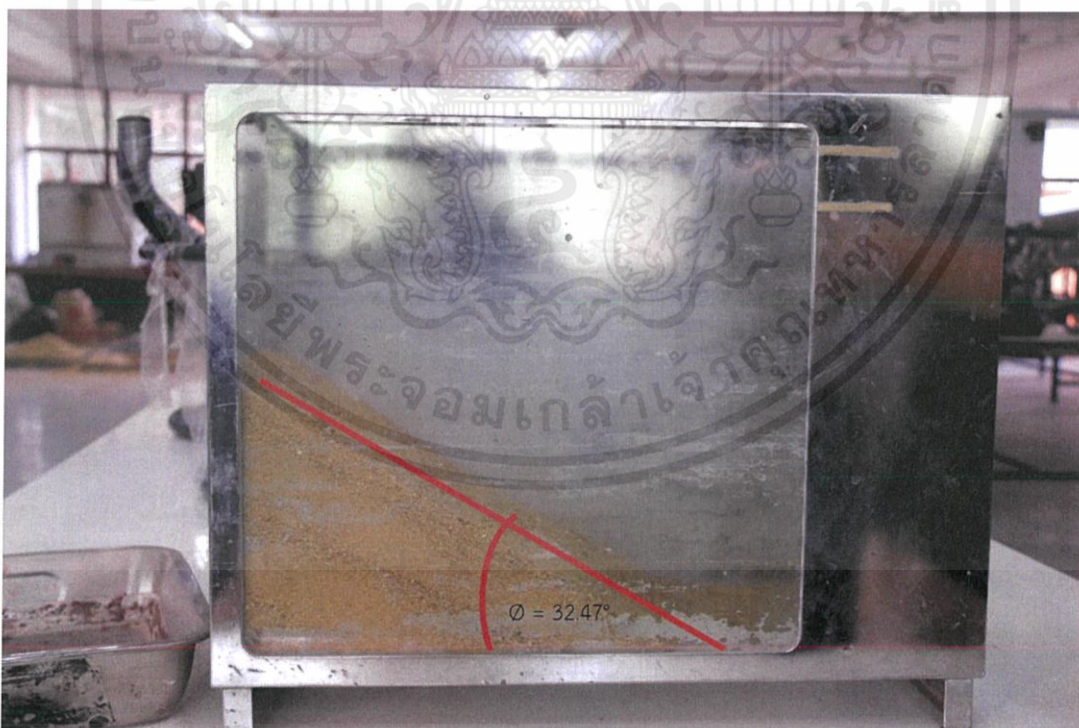
TEST NO.	Normal Stress (ksc)	Max. Shearing Stress (ksc)
1	0.013	0.034
2	0.026	0.076
3	0.051	0.148

## Mohr's Diagram from Direct Shear Test



รูปที่ 4.3 กราฟ Mohr's Diagram จากผลการทดสอบ Direct Shear

จากผลการปล่อยทรายลงอย่างอิสระโดยใช้ทฤษฎี Limit Equilibrium เพื่อทำการศึกษาความมั่นคงของลาดทรายที่กองอิสระ พบว่าได้มุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) = 32.47°



รูปที่ 4.4 แสดงการตกลงอย่างอิสระของทรายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง

##### 4.4.1 เปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทราย

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การเคลื่อนตัวของทรายในแบบจำลองต่าง ๆ นั้น มีความแตกต่างกัน บางแบบจำลองทรายไม่มีการเคลื่อนตัวเลย เนื่องจากมีเสถียรภาพสูงและความมั่นคงแข็งแรง บางแบบจำลองมีการเคลื่อนตัวมาน้อยแตกต่างกันไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



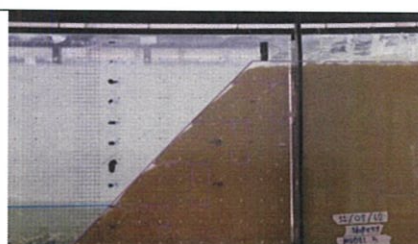
ตารางที่ 4.8 ตารางการเปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทรายในช่วงระยะเวลาต่างๆ

แบบจำลอง	ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา			
	ก่อสร้างแล้วเสร็จ	ระดับน้ำสูงสุด	ระดับน้ำต่ำสุด	การเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
<p>1</p> <p>Slope 1:1.5</p> <p>ไม่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์</p>	 <p>หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลองแล้วเสร็จ ความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด</p>	 <p>ระหว่างที่ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้น ความลาดชันยังคงเหมือนเดิม เนื่องจากค่ามุมที่ตีนเขื่อนป้องกันตลิ่ง มีค่าใกล้เคียงกับ Friction Angle</p>	 <p>เมื่อระดับน้ำลดลงจนเหลือเพียง 10 cm เขื่อนป้องกันตลิ่งยังคงมั่นคง ไม่เกิดการพังทลายแต่อย่างใดเนื่องจากค่ามุมที่ตีนเขื่อนป้องกันตลิ่ง มีค่าใกล้เคียงกับ Friction Angle</p>	 <p>เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิดการพังทลายแต่อย่างใด ยังคงมั่นคงและปลอดภัยเช่นเดิม</p>
<p>2</p> <p>Slope 1:1</p> <p>ไม่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์</p>	 <p>หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลอง Slope 1:1 แล้วเสร็จ ความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด</p>	 <p>ระหว่างที่ระดับน้ำสูงขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวของทรายเป็นรูปภาพข้างต้น เนื่องจากเสถียรภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่งมีค่าน้อย (<math>F.S. &lt; 1</math>) จึงทำให้เขื่อนเกิดการพังทลายแบบ Slope slide</p>	 <p>เมื่อระดับน้ำลดลง พบว่าทรายเป็นการพังทลายเพิ่ม แนวการพังทลายยังคงเท่าเดิม เนื่องจากทรายได้ไหลเข้าสู่เสถียรภาพความมั่นคงของทราย หรือมุมที่ตีนเขื่อนมีค่าเท่ากับ Friction Angle</p>	 <p>เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิดการพังทลายเพิ่มแต่อย่างใด แนวการพังทลายยังคงเหมือนเดิม</p>


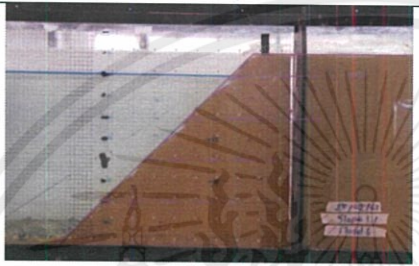
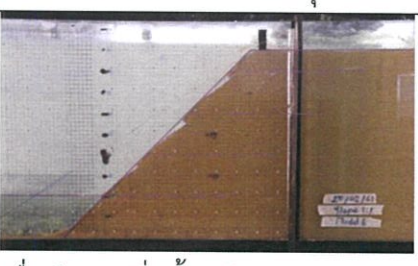
ตารางที่ 4.8 ตารางการเปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทรายในช่วงระยะเวลาต่างๆ (ต่อ)

แบบจำลอง	ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา			
	ก่อสร้างแล้วเสร็จ	ระดับน้ำสูงสุด	ระดับน้ำต่ำสุด	การเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
3 Slope 1:1 มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบธรรมดา				
	หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลองความชัน 1:1 พร้อมทั้งปู Geotextile ตามแนวลาดชัน แล้วเสร็จ ความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด	ระหว่างที่ระดับน้ำสูงขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวของทราย ดังรูปภาพข้างต้น เนื่องจากเสถียรภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่งมีค่าน้อย ( $F.S. < 1$ ) จึงทำให้เขื่อนเกิดการพังทลายแบบ Slope slide พร้อมทั้ง Geotextile มีน้ำหนักเบาทำให้ลอยอยู่ในน้ำ จึงไม่สามารถช่วยบรรเทาการพังทลายได้	เมื่อระดับน้ำลดลง พบว่าทรายไม่เกิดการพังทลายเพิ่ม แนวการพังทลายยังคงเท่าเดิม เนื่องจากทรายได้ไหลเข้าสู่เสถียรภาพความมั่นคงของทราย หรือมุมที่ดินเขื่อนมีค่าเท่ากับ Friction Angle	เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิดการพังทลายเพิ่มแต่อย่างใด แนวการพังทลายยังคงเหมือนเดิม
4 Slope 1:1 มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์				
	หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลองความชัน 1:1 พร้อมทั้งปู Geotextile	ระหว่างที่ระดับน้ำสูงขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวของทรายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น	เมื่อระดับน้ำลดลง พบว่าความลาดชันของเขื่อนป้องกันตลิ่งยังมีความมั่นคง	เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิด

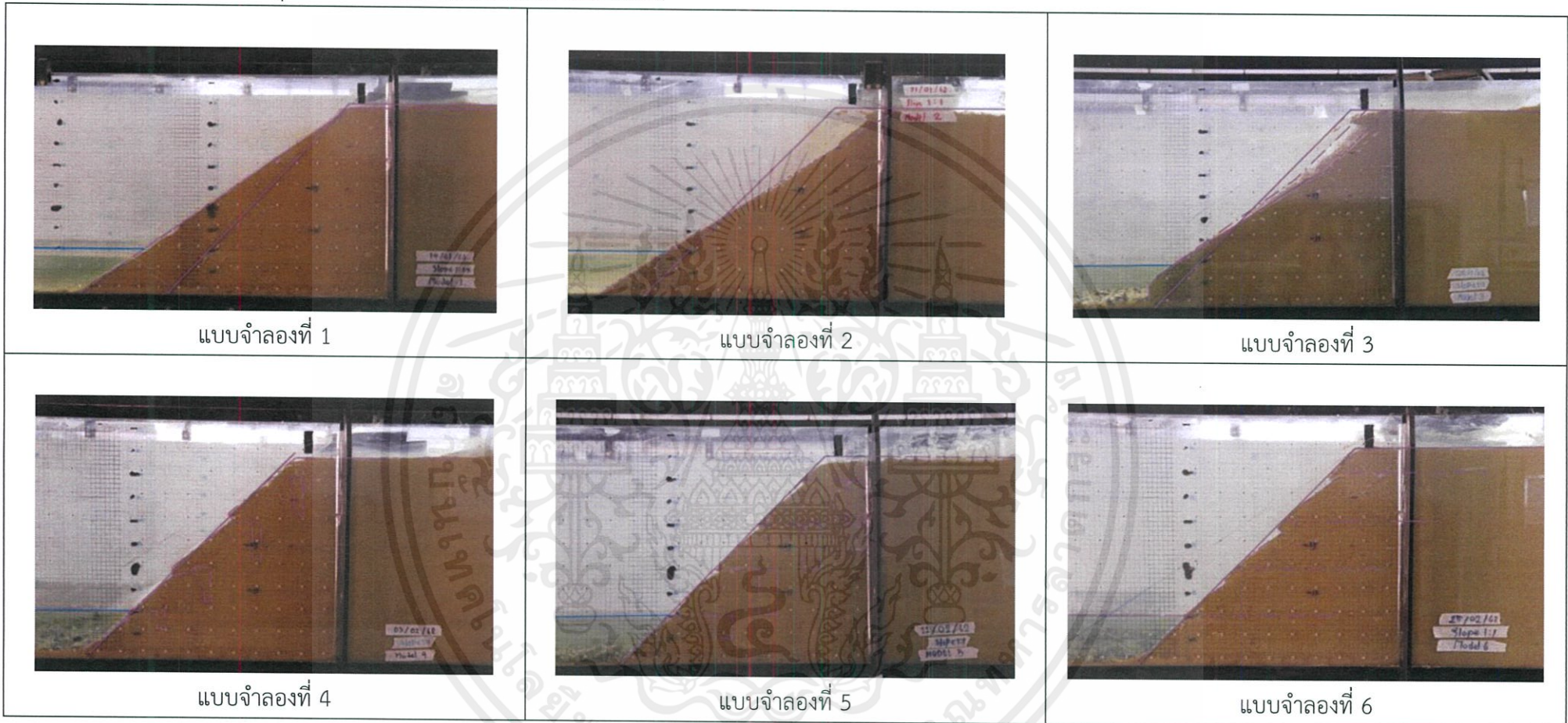
ตารางที่ 4.8 ตารางการเปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทรายในช่วงระยะเวลาต่างๆ (ต่อ)

แบบจำลอง	ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา			
	ก่อสร้างแล้วเสร็จ	ระดับน้ำสูงสุด	ระดับน้ำต่ำสุด	การเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
ในรูปแบบมีร่องลึก	ในรูปแบบร่องลึก แล้วเสร็จความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด	ตั้งรูปภาพข้างต้น แสดงว่าการปู Geotextile ในรูปแบบร่องลึกจะช่วยบรรเทาปัญหาการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง (F.S.>1) เพราะน้ำหนักทรายที่กดทับลงบน Geotextile รวมถึงร่องลึกที่ป้องกันการเคลื่อนตัวของ Geotextile ไว้เสมือนเหมือนแรงดันที่ช่วยบรรเทาการพังทลายได้	แข็งแรง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่าการปูแบบมีร่องลึกช่วยบรรเทาการพังทลายได้ (F.S.>1)	การพังทลายแต่อย่างใด ยังคงรักษาเสถียรภาพของเขื่อนได้เหมือนเดิม (F.S.>1) ถึงแม้จะวางน้ำหนักบรรทุกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
5 Slope 1:1 มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ ในรูปแบบมีร่องลึก	 <p>หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลองความชัน 1:1 พร้อมทั้งปู Geotextile ในรูปแบบร่องลึก แล้วเสร็จความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด</p>	 <p>ระหว่างที่ระดับน้ำสูงขึ้นไม่เกิดการเคลื่อนตัวของทราย ตั้งรูปภาพข้างต้น แสดงว่าการปู Geotextile ในรูปแบบร่องลึก จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความลึกในการปู Geotextile มากขึ้นจะช่วยบรรเทาปัญหาการพังทลายของเขื่อนได้ดีขึ้นจากแบบจำลองที่ 4</p>	 <p>เมื่อระดับน้ำลดลง พบว่าความลาดชันของเขื่อนป้องกันตลิ่งยังมีความมั่นคงแข็งแรง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่าการปูแบบมีร่องลึกช่วยบรรเทาการพังทลายได้ (F.S.&gt;1)</p>	 <p>เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิดการพังทลายแต่อย่างใด ยังคงรักษาเสถียรภาพของเขื่อนได้เหมือนเดิม (F.S.&gt;1) ถึงแม้จะวางน้ำหนักบรรทุกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง</p>

ตารางที่ 4.8 ตารางการเปรียบเทียบทางกายภาพของการเคลื่อนตัวของทรายในช่วงระยะเวลาต่างๆ (ต่อ)

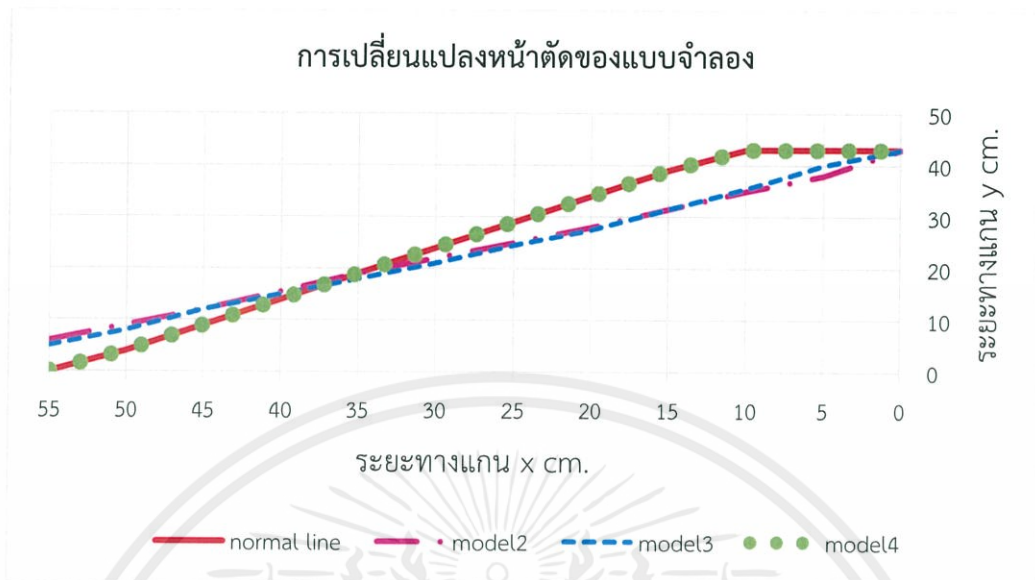
แบบจำลอง	ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา			
	ก่อสร้างแล้วเสร็จ	ระดับน้ำสูงสุด	ระดับน้ำต่ำสุด	การเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
<p>6</p> <p>Slope 1:1</p> <p>มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบพับผ้า</p>	 <p>หลังจากที่ทำการก่อสร้างแบบจำลองความชัน 1:1 ในรูปแบบของชั้นบันไดที่มีการวาง Geotextile ในรูปแบบ GWR แล้วเสร็จ ความลาดชันยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เนื่องจากยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งอื่นใด</p>	 <p>ระหว่างที่ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเกิดการเคลื่อนตัวของทรายเล็กน้อย ดังรูปภาพข้างต้น แสดงว่าการปู Geotextile ในรูปแบบพับผ้าหรือ GWR จะช่วยบรรเทาปัญหาการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง (F.S.&gt;1) เพราะน้ำหนักทรายที่กดทับลงบน Geotextile</p>	 <p>เมื่อระดับน้ำลดลง พบว่าความลาดชันของเขื่อนป้องกันตลิ่งยังมีความมั่นคงแข็งแรง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่าการปูแบบ GWR ช่วยบรรเทาการพังทลายได้ (F.S.&gt;1)</p>	 <p>เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบริเวณสันเขื่อนป้องกันตลิ่ง เขื่อนยังคงไม่เกิดการพังทลายแต่อย่างใด ยังคงรักษาเสถียรภาพของเขื่อนได้เหมือนเดิม (F.S.&gt;1) ถึงแม้จะวางน้ำหนักบรรทุกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง</p>

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปการเปลี่ยนแปลงที่กายภาพของแบบจำลอง

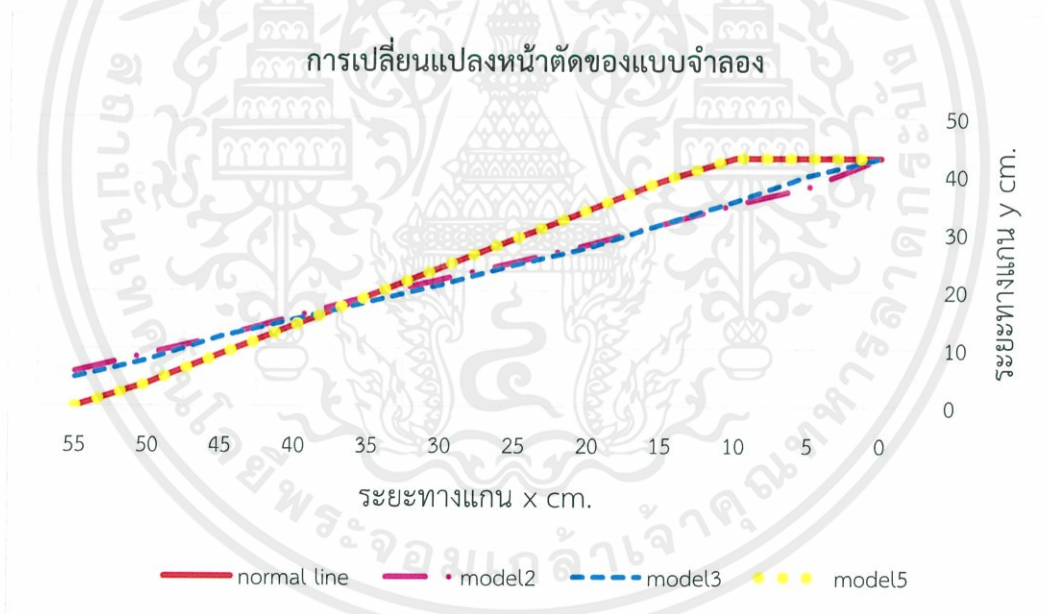


เมื่อนำแบบจำลองทั้งหมดมาทำการเปรียบเทียบกัน จะพบว่าแบบจำลองที่ 4 และ 5 ที่มีลักษณะการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึก (Key) กับแบบจำลองที่ 6 ที่มีลักษณะการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบพับผ้า หรือ GWR ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือการพังทลายของลาดคั่นดินแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าการปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบมีร่องลึก และแบบพับผ้าสามารถช่วยบรรเทาการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่งได้

#### 4.4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของแบบจำลอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 4

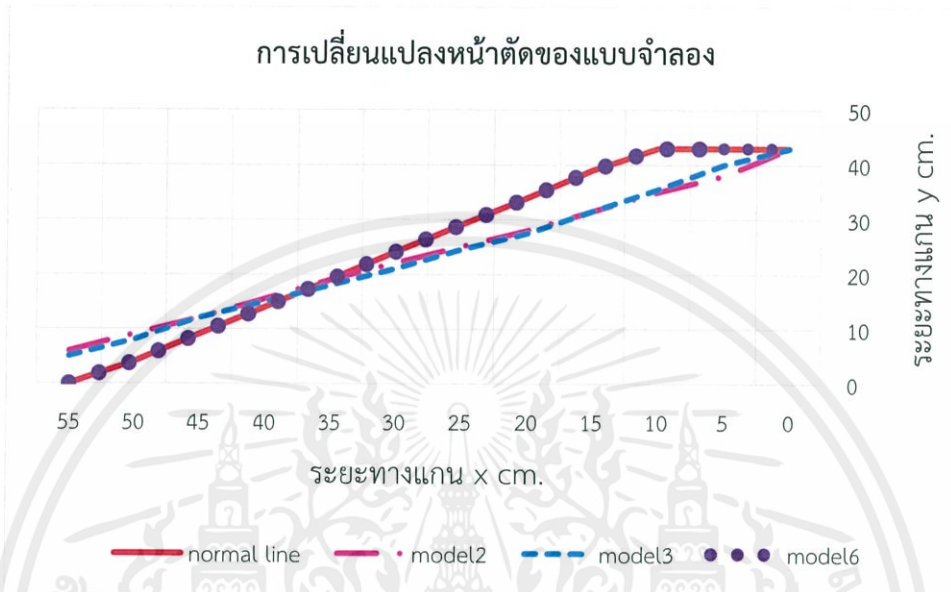


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 5

จากกราฟพบว่า แบบจำลองที่ 2 และ 3 มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด นั้นหมายความว่ามีการเคลื่อนตัวของมวลดิน เนื่องจากเสถียรภาพของลาดคันดินที่ไม่มั่นคงและมุมที่ toe slope ของแบบจำลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $45^\circ$  ซึ่งมากกว่า friction angle ของทรายตัวอย่าง ( $\phi = 32.47^\circ$ ) ส่วนแบบจำลองที่ 3 ที่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ที่ไม่ได้เสริมกำลังของลาดคันดินแต่อย่างใดเพียงแค่ออกันการกัดของทรายจากคลื่นเท่านั้น ทำให้หน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากแนวเดิม (Normal line) ส่วนแบบจำลองที่ 4 และ 5 เป็นรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) แบบมีร่องลึก ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด หน้าตัดของแบบจำลองยังเหมือนเดิม เนื่องจาก การปูในลักษณะแบบมีร่อง ช่วยเพิ่มกำลังของดินและป้องกันการไหลของมวลดิน รวมถึงทรายในแต่ละชั้นช่วยกักตักไม่ให้ geotextile ไม่ให้เกิดการไหลออกของทรายในแต่ละชั้น แสดงว่า การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึกช่วยบรรเทาการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่งได้จริง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 6

จากกราฟพบว่า แบบจำลองที่ 2 และ 3 การเปลี่ยนแปลงหน้าตัด นั้นหมายความว่ามีการเคลื่อนตัวของมวลดิน เนื่องจากเสถียรภาพของลาดคันดินที่ไม่มั่นคงและมุมที่ toe slope ของแบบจำลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $45^\circ$  ซึ่งมากกว่า friction angle ของทรายตัวอย่าง ( $\phi = 32.47^\circ$ ) ส่วนแบบจำลองที่ 3 ที่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์ไม่ได้เสริมกำลังของลาดคันดินแต่อย่างใดเพียงแค่ป้องกันการกัดของทรายจากคลื่นเท่านั้น ทำให้หน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากแนวเดิม (Normal line) ส่วนแบบจำลองที่ 6 เป็นรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) แบบพับผ้า หรือ GWR ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด หน้าตัดของแบบจำลองยังเหมือนเดิม แสดงว่า การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึกช่วยบรรเทาการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่งได้จริง

## สรุปผลการศึกษา

## 5.1 บทนำ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการวาง Geotextile และการฝังทลายของลาดตลิ่งสามารถศึกษาได้ด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้อย่างชัดเจน จากกราฟที่แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง และรูปภาพที่แสดงให้เห็นภาพรวมการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวและลักษณะการวาง Geotextile ของแบบจำลองทั้ง 6 แบบได้

## 5.2 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษารูปแบบการปูวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมเพื่อบรรเทาปัญหาการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง ซึ่งใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ในการศึกษา โดยได้ทำการศึกษารูปแบบการพังทลายก่อน ซึ่งจากผลการทดลองในแบบจำลองที่ 2 พบว่าการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นการพังในรูปแบบ Slope slide จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อหารูปแบบการปูที่สามารถบรรเทาการพังทลาย

สำหรับแบบจำลองที่ 3 เป็นการปูแบบแบบปกติ คือ การปูแบบลาดไปตามแนวลาดดิน พบว่าการปูในลักษณะดังกล่าวไม่ได้ช่วยป้องกันการพังทลายแต่อย่างใด เว้นแต่ว่าจะมีการปูหน้าด้วยหินทิ้ง (Riprap) ที่จะทำหน้าที่ช่วยกวดทับดินไม่ให้เกิดการพังทลาย ส่วนแบบจำลองที่ 4 และ 5 เป็นรูปแบบการปูแบบมีร่องลึกโดยแบบจำลองที่ 5 มีลักษณะการปูที่ลึกกว่า ซึ่งระหว่างการทดลองได้สมมุติสถานการณ์การเพิ่มและลดลงของระดับน้ำให้มีความเสมือนจริงมากที่สุด และจากการทดลองพบว่าการปูแบบมีร่องลึกสามารถบรรเทาและป้องกันการพังทลายของเขื่อนป้องกันตลิ่ง และแบบจำลองที่ 6 เป็นการปูแบบ GWR ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาก็เป็นไปตามที่คาดการณ์ คือการปูในรูปแบบดังกล่าวสามารถป้องกันการพังทลายได้

เมื่อนำผลการทดลองมาวาดกราฟการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ 2 และ 3 กับแบบจำลองที่ 4, 5 และ 6 จะพบว่าแบบจำลองที่ 4 และ 5 (การปูแบบร่องลึกใน) โดยในโมเดลที่ 4 มีระยะพับเท่ากับ 5 เซนติเมตร , ความหนาของร่องเท่ากับ 2 เซนติเมตร , ความสูงของร่องในชั้นที่ 1 เท่ากับ 4 เซนติเมตร และ ความสูงในชั้นที่ 2 ถึง 4 เท่ากับ 8 เซนติเมตร ในส่วนของโมเดลที่ 5 มีระยะพับเท่ากับ 10 เซนติเมตร , ความหนาของร่อง 4 เซนติเมตร , ความสูงของร่องในชั้นที่ 1 เท่ากับ 5 เซนติเมตร และความสูงของร่องในชั้นที่ 2 ถึง 4 เท่ากับ 10 เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 6 (การปูแบบพับผ้า) โดยมีระยะพับเท่ากับ 0.7H ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดแต่อย่างใด หน้าตัดยังคงมี Slope เท่ากับ 1:1 จึงแสดงให้เห็นว่าการปูแผ่นใยสังเคราะห์ในรูปแบบมีร่องลึกกับแบบพับผ้าสามารถช่วยบรรเทาและป้องกันการพังทลายของแนวเขื่อนป้องกันตลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในงานลาดคันดินและเขื่อนป้องกันตลิ่ง สามารถที่จะสร้างให้เขื่อนป้องกันตลิ่งลดการพังทลายได้ โดยใช้รูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ตามแบบจำลองที่ 4, 5 และ 6 นั่นคือการปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึก (Key) และแบบพับผ้า (GWR) จะทำให้บรรเทาและป้องกันการพังทลาย

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. นำผลที่ได้ไปศึกษาต่อเพื่อใช้ในการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง
2. เพิ่มกรณีศึกษาของแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลที่สามารถอธิบายได้เพิ่มขึ้น
3. เพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองและรูปแบบการปูแผ่นใยสังเคราะห์ให้มากขึ้น เพื่อหาแบบที่เหมาะสมและก่อสร้างได้ง่าย
4. เปลี่ยนสภาพแวดล้อมของแบบจำลองให้เหมือนกับสภาพหน้างานจริง เช่น ชนิดของดิน ตัวอย่าง การเกิดคลื่น รวมถึงการเพิ่มและลดลงของระดับน้ำ
5. นำผลทางการศึกษาไปวิเคราะห์ ด้วยวิธี Finite Element เพื่อหาระยะการปูที่เหมาะสม

## เอกสารอ้างอิง

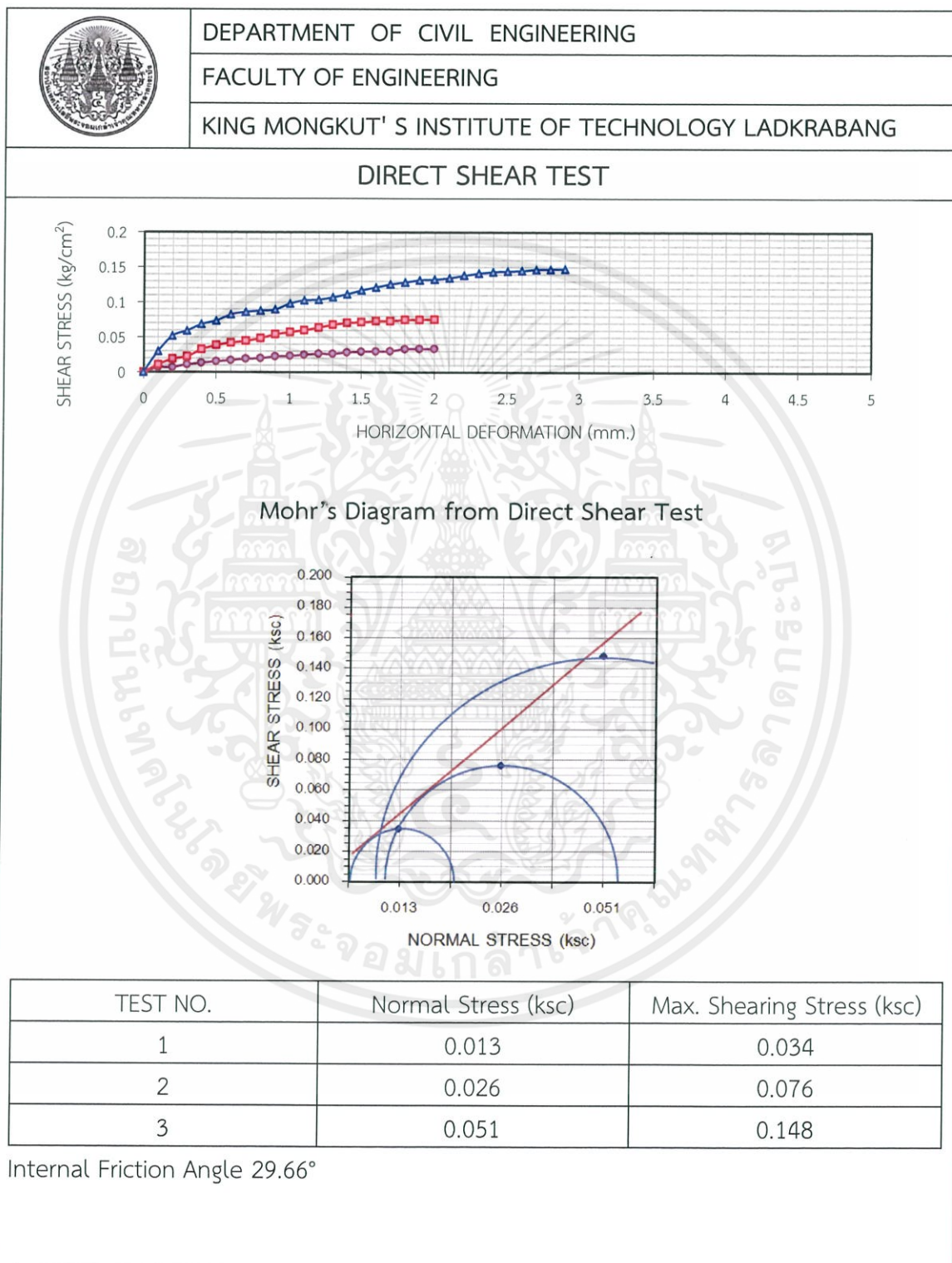
- [1] Krzysztof PARYLAK<sup>a</sup>, Zofia ZIĘBA<sup>b</sup> and Kinga WITEK<sup>c</sup>. (2015). *SLOPE FAILURE CAUSED BY AN INCORRECTLY SELECTED REINFORCEMENT*. Retrieved from <http://aceejournal.pl/cmd.php?cmd=download&id=dbitem:article:id=367&field=fullpdf>
- [2] J. Recio-Molina<sup>1</sup> and K. Yasuhara<sup>2</sup>. (2006). *Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/245408148\\_Stability\\_of\\_modified\\_geotextile\\_wrap-around\\_revetments\\_GWR\\_for\\_coastal\\_protection](https://www.researchgate.net/publication/245408148_Stability_of_modified_geotextile_wrap-around_revetments_GWR_for_coastal_protection)
- [3] ปิติญา นิธินันท์, ศิวกร สร้อยศักดิ์ และศุภวัฒน์ คงพาณิชย์กุล. (2559). *การศึกษาการจัดเรียงเข็มพืดในชั้นทรายด้วยแบบจำลอง*. ปรียญยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] นายยิ่งยศ บุญยานันต์. (2556). *การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนน ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร และคณะ. (2555). *คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [6] ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์. (2559). *เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน. การวิเคราะห์ด้วยวิธีลาดอนันต์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [6] ผศ.ดร. พรพจน์ ดันเส็ง. (2554). *วิศวกรรมฐานราก* (พิมพ์ครั้งที่1). สืบค้นจาก <http://www.gooshared.com/d/MTY4Ny0x>
- [7] ผศ.ดร. พรพจน์ ดันเส็ง. (2554). *ปฐพีกลศาสตร์*. สืบค้นจาก <http://www.gooshared.com/d/MTYyMC0x>
- [8] John N. Cernica (1995). *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*.
- [9] Cheng Liu and Jack Evett. *Soils and Foundations* (4<sup>th</sup> edition).
- [10] ดร.ศลิษา ไชยพุทธ. (พิมพ์ครั้งที่1,2561). *เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก


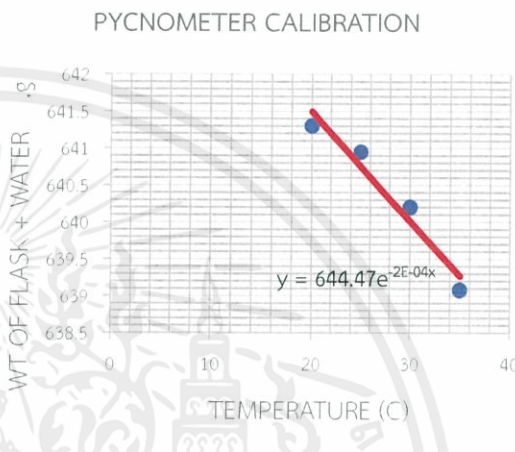
## ผลการทดสอบคุณสมบัติ

ก.1 มุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ของทรายตัวอย่าง




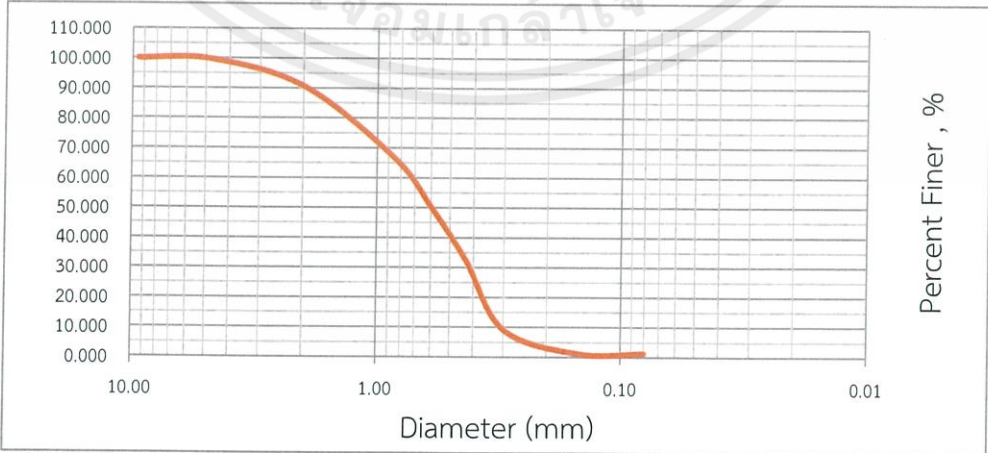
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของทรายตัวอย่าง

	DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING																																										
	FACULTY OF ENGINEERING																																										
	KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG																																										
<b>SPECIFIC GRAVITY TEST</b>																																											
PYCHOMETER CALIBRATION																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>FLASK + WATER (g)</th> <th>TEMPERATURE (C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>639.08</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>640.20</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>640.95</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>641.30</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>	FLASK + WATER (g)	TEMPERATURE (C)	639.08	35	640.20	30	640.95	25	641.30	20																																	
FLASK + WATER (g)	TEMPERATURE (C)																																										
639.08	35																																										
640.20	30																																										
640.95	25																																										
641.30	20																																										
<b>SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION</b>																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>SAMPLE NO.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1. TEMPERATURE ,(C)</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2. FLASK + WATER ,g</td> <td>640</td> <td>640</td> <td>640</td> </tr> <tr> <td>3. FLASK + WATER + SOIL ,g</td> <td>670.67</td> <td>671.11</td> <td>670.46</td> </tr> <tr> <td>4. DRY SOIL + CONTAINER ,g</td> <td>239.59</td> <td>294.62</td> <td>357.94</td> </tr> <tr> <td>5. WT. OF CONTAINER ,g</td> <td>191.41</td> <td>246.92</td> <td>311.79</td> </tr> <tr> <td>6. DRY SOIL (4)-(5) ,g</td> <td>48.18</td> <td>47.76</td> <td>46.15</td> </tr> <tr> <td>7. GT</td> <td>0.9957</td> <td>0.9957</td> <td>0.9957</td> </tr> <tr> <td>8. G.S.</td> <td>2.74</td> <td>2.84</td> <td>2.93</td> </tr> <tr> <td>9. AVERAGE G.S.</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">2.84</td> </tr> </tbody> </table>	SAMPLE NO.	1	2	3	1. TEMPERATURE ,(C)	30	30	30	2. FLASK + WATER ,g	640	640	640	3. FLASK + WATER + SOIL ,g	670.67	671.11	670.46	4. DRY SOIL + CONTAINER ,g	239.59	294.62	357.94	5. WT. OF CONTAINER ,g	191.41	246.92	311.79	6. DRY SOIL (4)-(5) ,g	48.18	47.76	46.15	7. GT	0.9957	0.9957	0.9957	8. G.S.	2.74	2.84	2.93	9. AVERAGE G.S.	2.84					
SAMPLE NO.	1	2	3																																								
1. TEMPERATURE ,(C)	30	30	30																																								
2. FLASK + WATER ,g	640	640	640																																								
3. FLASK + WATER + SOIL ,g	670.67	671.11	670.46																																								
4. DRY SOIL + CONTAINER ,g	239.59	294.62	357.94																																								
5. WT. OF CONTAINER ,g	191.41	246.92	311.79																																								
6. DRY SOIL (4)-(5) ,g	48.18	47.76	46.15																																								
7. GT	0.9957	0.9957	0.9957																																								
8. G.S.	2.74	2.84	2.93																																								
9. AVERAGE G.S.	2.84																																										


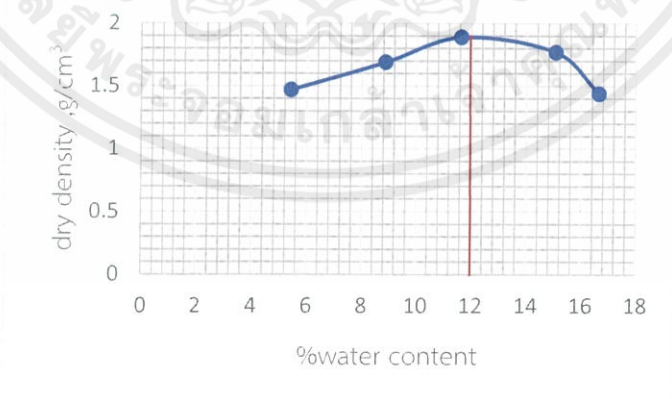
### ก.3 ขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน (Grain Size and Soil Classification)

	DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING						
	FACULTY OF ENGINEERING						
	KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG						
<b>Sieve Analysis (ASTM C136) for Coarse Grain Soil</b>							
Specific Gravity of Soil ,G.S. 2.84				Tray NO. 1			
Weight of Dry Soil ,g 1000				Sieves Standard ASTM E-11			
Sieves NO.	Sieve Opening ,mm	Weight of Sieve ,g	Weight of Sieve + Soil ,g	Weight of Soil Retained ,g	Cumulative Retained ,g	Cumulative Retained ,%	Percent Finer ,%
3/4"	9.50	512.39	512.39	0	0	0	100
4	4.75	508.80	511.94	3.14	3.14	0.314	99.686
10	2.00	678.97	768.94	89.97	93.11	9.311	90.689
20	0.85	381.67	621.58	239.91	333.02	33.302	66.698
30	0.60	612.15	775.34	163.19	496.21	49.621	50.379
40	0.43	540.64	719.54	178.90	675.11	67.511	32.489
50	0.30	431.87	657.84	225.97	907.08	90.708	9.292
100	0.15	516.43	603.06	86.63	987.71	98.771	1.229
200	0.08	330.80	338.18	7.38	995.09	99.509	0.491
Pan	-	372.77	374.95	2.18	997.27	99.727	0.273

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.4 การบดอัดดิน (Compaction)

	DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING					
	FACULTY OF ENGINEERING					
	KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG					
<b>COMPACTION TEST</b>						
DENSITY DETERMINATION						
	Trail No.	1	2	3	4	5
	WT. of soil+mold ,g	5110	5385	5638	5571	5236
	WT. of mold ,g	3644	3644	3644	3644	3644
	WT. of soil in mold ,g	1466	1741	1994	1972	1592
	wet density ,g/cm <sup>3</sup>	1.55	1.84	2.11	2.04	1.68
	dry density ,g/cm <sup>3</sup>	1.47	1.69	1.76	1.77	1.44
WATER CONTENT						
	wet soil+comtainer ,g	169.78	185.47	159.23	157.88	175.92
	dry soil+container ,g	161.81	171.50	144.07	139.08	152.88
	WT of container ,g	15.13	13.97	13.89	14.18	14.47
	WT of water ,g	7.97	13.94	15.16	18.80	23.04
	WT of dry soil ,g	146.68	157.56	130.18	124.90	138.41
	% water content	5.43	8.87	11.64	15.05	16.64
 <p style="text-align: center;">Optimum Moisture Content = 12%</p>						

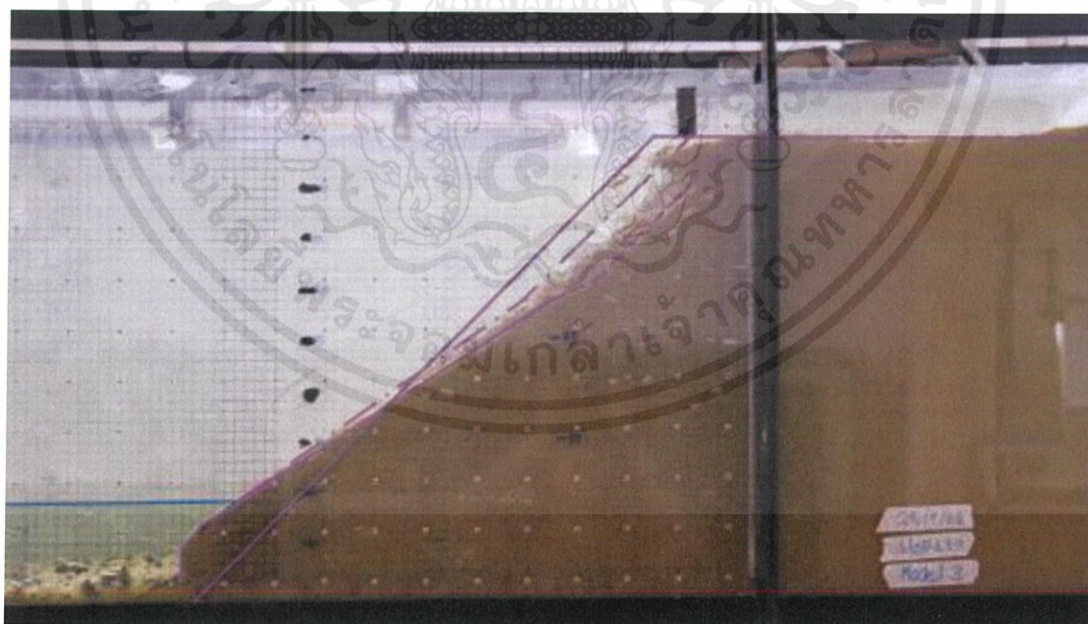
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
รูปภาพของแบบจำลอง

ข.1 ลักษณะการวิบัติของเขื่อนป้องกันตลิ่ง



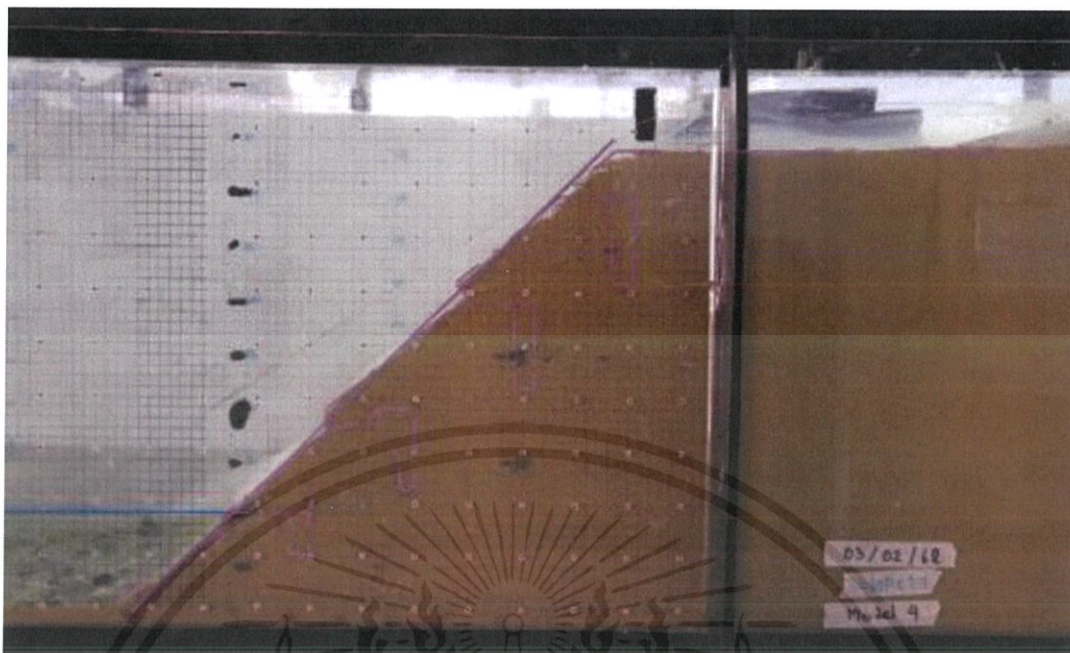
รูปที่ ข.1.1 การวิบัติของเขื่อนป้องกันตลิ่ง Slope 1:1 กรณีไม่มีการปูแผ่นใยสังเคราะห์



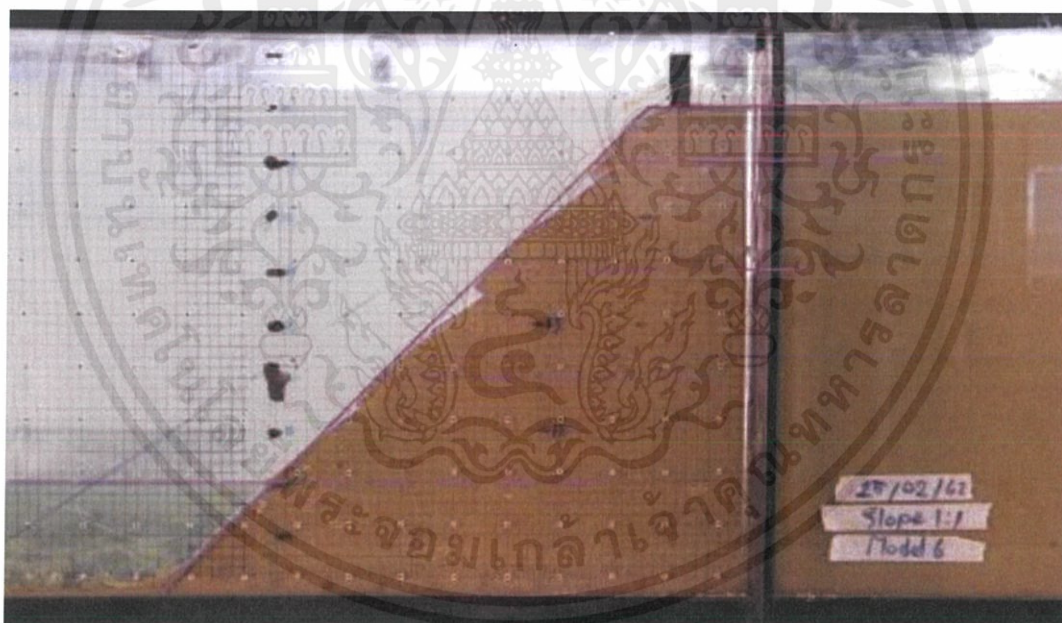
รูปที่ ข.1.2 การวิบัติของเขื่อนป้องกันตลิ่ง Slope 1:1 กรณีมีการปูแผ่นใยสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ลักษณะการปูแผ่นใยสังเคราะห์ที่ช่วยบรรเทาการพังทลาย



รูปที่ ข.2.1 การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบมีร่องลึก (Key)



รูปที่ ข.2.2 การปูแผ่นใยสังเคราะห์แบบพับผ้า (GWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้