การศึกษาสมบัติเชิงกลของตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE GEOGRID MADE OF RIBBED SMOKED SHEET AND RUBBER COMPOUND SHEET

อนุพุทธ์ เลียงสุนทรสิทธิ์

Anubud Liangsunthonsit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2023-EN-M-097-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE GEOGRID MADE OF RIBBED SMOKED SHEET AND RUBBER COMPOUND SHEET

Anubud Liangsunthonsit

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION MANAGEMENT

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2023-EN-M-097-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติเชิงกลของตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารามควันและแผ่นยางคอมปาวด์
นักศึกษา	นายอนุพุทธ์ เลียงสุนทรสิทธิ์
รหัสประจำตัว	64601164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

บทคัดย่อ

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) เป็นวัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือพลาสติก (มีลักษณะคล้ายตาข่าย) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาความแข็งแรงและเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โครงสร้างชั้นดิน ในการศึกษานี้ แผ่นยางพารามควัน (Ribbed Smoked Sheet; RSS) และแผ่นยางคอมปาวด์ (Rubber Compounded Sheet) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบหลักจากยางพาราและนับเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติถูกนำมาศึกษา เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ทดแทนแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากพลาสติก การศึกษาประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารามควัน (RSS geogrid) และแผ่นยางคอมปาวด์ (RCS geogrid) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (Interface shear strength coefficient ; R_{in}) จากการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear) ภายใต้เงื่อนดินเสริมกำลังและไม่เสริมกำลัง แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 ชนิดถูกนำไปติดตั้งเพื่อเสริมกำลังดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินลูกรัง และ ดินทราย จากการศึกษาพบว่า ค่า R_{in} ของตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารามควันในดินเหนียว ดินลูกรัง และดินทราย มีค่าเท่ากับ 1.033, 1.075 และ 1.479 ตามลำดับ และสำหรับค่า R_{in} ของตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยาง คอมปาวด์ในดินทั้งสามชนิดมีค่าเท่ากับ 1.082, 1.233 และ 1.654 ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางคอมปาวด์จะสูงกว่าแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารามควัน โดยเฉพาะในดินทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study of mechanical properties of the geogrid made of ribbed smoked sheet and rubber compound sheet
Student	Mr.Anubud Liangsunthonsit
Student ID.	64601164
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
Year	2022
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Salisa Chaiyaput

Abstract

Geogrid is a reinforced material in geotechnical engineering, that is made from synthetic polymers with a mesh shape and is applied to increases the strength and stability of soil structure. In this study, ribbed smoked sheet (RSS) and rubber compounded sheet (RCS), which are a para rubber (Natural polymer) as a main component, were studied as a new alternative material to replace synthetic-polymers geogrid. The study of reinforcement efficiency of geogrid made form RSS (RSS geogrid) and RCS (RCS geogrid) was the interface shear strength coefficient (Rin) by large-scale direct shear test under the condition of non-reinforced soil and reinforced soil. RSS geogrid and RCS geogrid were installed in 3 types of soil, which were clay, lateritic soil and sand. The R_{in} of RSS geogrid reinforced in clay lateritic soil and sand were 1.033, 1.075, and 1.479, respectively. While R_{in} of RCS geogrid reinforced in three types of soil were 1.082, 1.233, and 1.654, respectively. This showed reinforcement efficiency of RCS geogrid was higher than RSS geogrid, especially in sand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกเรื่องตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำในการวิจัย ระเบียบวิธีการวิจัย การเขียนบทความทางวิชาการ การเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิรัชญา อายะวรรณา ที่ได้ให้คำปรึกษาในเรื่องการนำเสนองานวิชาการ รูปแบบการนำเสนองาน และการเขียนบทความทางวิชาการแก่ข้าพเจ้า

เหนือสิ่งอื่นใดต้องขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกเรื่อง ขอขอบพระคุณครอบครัวและคนที่ข้าพเจ้ารัก ที่เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อนุพุทธ์ เลียงสุนทรสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VI

สารบัญรูป..... VII

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา..... 3

1.4 ขั้นตอนการศึกษา..... 3

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์..... 5

2.1 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) 5

2.2 การทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดิน..... 7

2.3 พิกัดอัตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) 10

2.4 การทดสอบการบดอัด..... 11

2.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear test) 15

2.6 เสถียรภาพในระยะสั้นและระยะยาวของคันดินถม..... 16

2.7 แผ่นยางพารามควัน..... 18

2.8 แผ่นยางคอมปาวด์..... 21

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย..... 27

3.1 เงื่อนไขการทดสอบ..... 28

3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์..... 29

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน..... 36

3.4 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดิน..... 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear)..... 45

บทที่ 4 ผลการทดสอบ..... 49

4.1 คุณสมบัติดิน..... 49

4.2 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสม..... 55

4.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดิน..... 55

4.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่..... 57

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 66

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 66

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 66

6. บรรณานุกรม..... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละกันดี 8
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวิธีการและเครื่องมือระหว่างวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) กับ การทดสอบแบบโมดิฟายด์ 12
ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของแผ่นยางรมควัน (RSS) 20
ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวของตาข่ายเสริมกำลังดิน 7 ชนิด..... 22
ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบ CBR ของตัวอย่าง E1, E2, E1-RSS และ E2-RSS 24
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบ 28
ตารางที่ 3.2 สูตรยางคอมปาวด์ 33
ตารางที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด 36
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงของดินลูกรัง 50
ตารางที่ 4.2 พิกัดเหลวของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง..... 50
ตารางที่ 4.3 พิกัดเหลวของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง 51
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงของดินทราย 52
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบพิกัดเหลวของดินเหนียว 53
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบพิกัดพลาสติกและดรรชนีพลาสติกของดินเหนียว..... 53
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดิน..... 57
ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของแรงเชื่อมแน่น กับแรงยึดติด และมุมเสียดทานภายในของมวลดิน กับมุมเสียดทานที่ผิวของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน..... 63
ตารางที่ 4.9 ค่า R_{in} ของตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข..... 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน 6
รูปที่ 2.2 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Well graded soil 9
รูปที่ 2.3 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Uniform graded soil..... 9
รูปที่ 2.4 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Gap graded soilรูปที่ 2.5 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน หรือ Grain size distribution curve 10
รูปที่ 2.6 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่างกัน 11
รูปที่ 2.7 กราฟการบดอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดิน 12
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น 13
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของพลังงานการบดอัดต่อกลางกราฟบดอัด 14
รูปที่ 2.10 กราฟเพิ่มเติม Mohr Coulomb failure envelope 15
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ Large-scale direct shear 16
รูปที่ 2.12 ค่าความปลอดภัย แรงเฉือน แรงดันน้ำส่วนเกิน หน่วยแรงประสิทธิผล ของลาดดินถมที่ระยะเวลาต่างๆ 17
รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบปัจจัยด้านคุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลังดิน 23
รูปที่ 2.14 วัสดุเสริมแรง RSS-geogrid สำหรับการทดสอบ CBR 25
รูปที่ 2.15 ตำแหน่งการวาง RSS-geogrid ขณะบดอัดในเงื่อนไขที่มีการเสริมกำลัง 25
รูปที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของตาข่ายเสริมกำลังดินกับดิน 26
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัยและมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษา 27
รูปที่ 3.2 ดินเหนียวแห้งหลังจากการอบและบด (ก่อนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100) 30
รูปที่ 3.3 การเก็บดินเหนียวแห้งที่ผ่านการบดเพื่อรอนำไปทดสอบ (หลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100) ... 30
รูปที่ 3.4 ดินทราย 31
รูปที่ 3.5 ดินลูกรัง 32
รูปที่ 3.6 แผ่นยางสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน 34
รูปที่ 3.7 ตาข่ายเสริมกำลังดิน 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์สำหรับเจาะรูช่องเปิด..... 35
รูปที่ 3.9 ตะแกรงที่ใช้สำหรับการทดสอบร่อนผ่านตะแกรงพร้อมเครื่องเขย่า..... 37
รูปที่ 3.10 การทดสอบไฮโดรมิเตอร์..... 39
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาพิกัดพลาสติกและพิกัดเหลว..... 41
รูปที่ 3.12 การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน..... 42
รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินแบบ A 44
รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินวิธี A 44
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ในการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่และกล่องเฉือน 45
รูปที่ 3.16 กล่องเฉือนสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตร..... 46
รูปที่ 3.17 การบดอัดดินชั้นที่ 2 ในกล่องเฉือน..... 47
รูปที่ 3.18 ลักษณะของการเฉือนตัวอย่าง..... 48
รูปที่ 3.19 การเตรียมตัวอย่างและบดอัดในกล่องเฉือน 48
รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว 49
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงพิกัดเหลวของดินละเอียดของดินลูกรัง 51
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงพิกัดเหลวของดินเหนียว 54
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณ 55
รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ 56
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควัน 56
รูปที่ 4.7 กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน 59
รูปที่ 4.8 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉาก 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ตาข่ายเสริมกำลังดินเป็นวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง และเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โครงสร้างดินโดยการติดตั้งลงในชั้นดินและบดอัดดินเป็นชั้น ๆ ซึ่งวิธีนี้เป็นที่แพร่หลายอย่างมากในงานโครงสร้างประเภทที่เป็นคันดินถม เช่น งานก่อสร้างถนน กำแพงกันดิน และ งานถมดิน เป็นต้น โดยการทำงานของตาข่ายเสริมกำลังดินประกอบด้วย 3 หน้าที่หลัก คือ 1) การกระจายความเค้นตั้งฉากออกไปตามแนวกิ่งของตาข่ายเสริมกำลังดิน 2) เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยการขัดขวางและเปลี่ยนแปลงแนวการเฉือนของดิน 3) การลดการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของดินด้วยแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นจากการบังคับให้เกิดการขัดกันของเม็ดดินที่อยู่ในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลังดิน (Mohammed et al., 2015)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีการศึกษามากมายที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของดินหลังจากติดตั้งตาข่ายเสริมกำลังดิน ตัวอย่างเช่น การศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินหลังเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน (Bergado et al., 1993) การลดลงของการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของทรายที่ติดตั้งตาข่ายเสริมกำลังดิน (Haeri et al., 2000) และ การศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (CBR) ในดินที่มีความแข็งแรงต่ำหลังจากได้รับการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน (Hufenus et al., 2006) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดิน เช่น การศึกษาผลจากขนาดช่องเปิดต่อกำลังรับแรงดึง และความแข็งแรงข้อต่อของตาข่ายเสริมกำลังดินต่อประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดินด้วยการทดสอบเฉือนตรงขนาดใหญ่ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน (R-interface, R_{in}) และศึกษาถึงปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ ชนิดของดินและปริมาณน้ำในดิน (Sakleshpur et al., 2020) และการศึกษาผลของการกระจายตัวของขนาดคละเม็ดดินต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน (Mahmood and Mehdi, 2022) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหนึ่งในคุณสมบัติของดินที่ได้รับความสนใจในการศึกษามาก คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สามารถประเมินกำลังรับแรง ความแข็งแรง และเสถียรภาพของโครงสร้างดินได้ เนื่องจากการพังและการวิบัติของดินในทางวิศวกรรม ส่วนมากขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือนที่โครงสร้างดินได้รับ กล่าวคือเมื่อโครงสร้างดินได้รับความเค้นเฉือนเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่โครงสร้างดินสามารถรับได้ โครงสร้างดินจะเกิดการวิบัติและพังทลายลง รูปแบบการพังจากความเค้นเฉือนที่มีลักษณะ การไหลแบบวงกลม นอกจากจะพบได้บ่อยแล้วยังมีความอันตรายที่สูงอีกด้วย (Abolfazl et al., 2020) เพื่อป้องกันการวิบัติของโครงสร้างดินจากความเค้นเฉือนจึงเกิดการศึกษามากมายเพื่อเพิ่มกำลังรับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉือนให้แก่โครงสร้างดิน ซึ่งการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นเป็นหนึ่งในวิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อที่จะบ่งบอกถึงพฤติกกรมของกำลังรับแรงเฉือนบริเวณผิวสัมผัสระหว่างตาข่ายสริมกำลังดินและดินว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจากกำลังรับแรงเฉือนเดิมที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับดิน จึงมีการนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือน (R_{in}) มาใช้เป็นตัวชี้วัดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตาข่ายเสริมกำลังดินกับดิน และกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับดิน

ยางพาราเป็นหนึ่งในผลผลิตทางการเกษตรท้องถิ่นของไทยซึ่ง สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากและอัตราการผลิตยางพาราก็ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้ปริมาณยางพาราที่ผลิตได้เกินความต้องการของตลาด ส่งผลให้ราคาของยางพาราลดลงจนเกิดเป็นปัญหาต่อเกษตรกรและภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตและแปรรูปยางพารา เพื่อแก้ปัญหานี้จึงได้เกิดการศึกษาการนำแผ่นยางพารารมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS) ที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ และเป็นผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่เป็นที่ต้องการของตลาดค่อนข้างน้อย ในขณะที่วัสดุดังกล่าวมีสมบัติในการรับแรงดึงที่ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตตาข่ายเสริมกำลังดิน แทนที่วัสดุเดิมที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือพลาสติกที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันสามารถเพิ่มค่าแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (CBR) ของดินที่มีความแข็งแรงต่ำได้ (Chaiyaput et al., 2022) แต่เมื่อทำการเปลี่ยนเทียบกำลังรับแรงดึงแล้วทางผู้วิจัยพบว่าแผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 นั้นมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติก และกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของตาข่ายเสริมกำลังดิน (Sakleshpur et al., 2020) ดังนั้นแผ่นยางอีกชนิดที่เรียกว่าแผ่นยางคอมปาวด์จึงถูกนำมาใช้งาน โดยแผ่นยางคอมปาวด์ คือแผ่นยางธรรมชาติที่ถูกปรับปรุงคุณภาพจากการเติมสารผสมชนิดต่างๆ ลงไปเพื่อให้ได้แผ่นยางที่มีความแข็งแรงคงทนมากขึ้นกว่าแผ่นยางเดิม (สถาบันพลาสติก, 2015)

การศึกษานี้เป็นการนำแผ่นยางพารารมควัน และแผ่นยางคอมปาวด์ (Rubber Compounded Sheet) มาใช้ในการทดสอบ แผ่นยางพารารมควันที่ใช้เป็นแผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 (RSS3) ซึ่งเป็นแผ่นยางพารารมควันชนิดที่มีปริมาณมากที่สุดในตลาดเนื่องจากเป็นชั้นคุณภาพพื้นฐานของแผ่นยางพารารมควัน และแผ่นยางคอมปาวด์ที่ใช้เกิดจากการนำแผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 ไปเข้ากระบวนการเติมสารผสมต่างๆ เพื่อพัฒนาความแข็งแรง และความทนทาน โดยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน (RSS geogrid) และตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ (RCS geogrid) จะถูกนำมาใช้ในการเสริมกำลังดินจำนวน 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันชัดเจนได้แก่ ดินเหนียว ดินทราย และดินลูกรัง เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากยางพารา และดินแต่ละชนิด เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินด้วยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (Interface shear strength coefficient; R_{in}) ด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์

2. เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in}) ที่เกิดขึ้นระหว่างดินเหนียว ดินทราย และดินลูกรังกับตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ขอบเขตด้านวัสดุ

- เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ model: 2012-HPF จากบริษัท Karol Warner (ASTM D5321)

- ดินที่ใช้ในการทดสอบ คือ ดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 3 ชนิดคือ ดินเหนียว ดินทราย และดินลูกรัง

- ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้แผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 และตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางผสมคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไปตามส่วนผสมที่ระบุในตารางที่ 3.2 โดยตาข่ายเสริมกำลังดินมีขนาดช่องเปิด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร ช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน 20 มิลลิเมตรทั้งในแนวตั้งและแนวนอน

1.3.2 ขอบเขตด้านการทดสอบ

- ทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตาข่ายเสริมกำลังดิน และดินเท่านั้น

- ไม่ทดสอบถึงผลกระทบจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ สารเคมี และเวลาต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดิน

1.3.3 ขอบเขตด้านบุคคล และสถานที่

- การเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2. กำหนดปัญหาการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย และสมมุติฐานเบื้องต้น

4. กำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

5. ศึกษาและทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน และตาข่ายเสริมกำลังดินที่จะนำมาใช้ศึกษา

6. ศึกษาการใช้งานและอ่านค่าอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

7. ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลที่ต้องการจากการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

8. วิเคราะห์ข้อมูล

9. สรุปผล อภิปรายผล และรับฟังข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid)

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) เป็นประเภทหนึ่งของวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการเสริมกำลังชั้นดิน และเพิ่มเสถียรภาพให้โครงสร้างดิน เนื่องจากตาข่ายเสริมกำลังดินมีคุณสมบัติในการรับและกระจายแรงที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นดิน อีกทั้งยังสามารถรับแรงเฉือนที่กระทำกับดินได้อีกด้วย โดยตาข่ายเสริมกำลังดินส่วนมากในปัจจุบันจะถูกผลิตจากวัสดุประเภทพลาสติก เช่น ไฮเดนซิตี้พอลิเอทิลีน (HDPE) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึง (Tensile) ที่สูงแต่มีการยืดตัว (Elongation) ที่ต่ำ ตาข่ายเสริมกำลังดิน จะมีลักษณะคล้ายตาข่ายที่ประกอบด้วย ช่องเปิด (Apertures) จำนวนมากที่เกิดจากการสานกันระหว่างกิ่งวัสดุตามแนวยาว (Longitudinal ribs) และกิ่งวัสดุตามแนวขวาง (Transverse ribs) อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมดมีค่าเท่ากับตั้งแต่ร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 90 และมีขนาดของแต่ละช่องตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิเมตรเพื่อให้มวลรวมของดินสามารถถูกบรรจุอยู่ในช่องเปิดพร้อมมีส่วนที่ยื่นออกมาได้

2.1.1 ประเภทของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน

(1) แบ่งตามการขึ้นรูป

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินสามารถผลิตขึ้นรูปได้ 2 วิธี ดังนี้ วิธีที่ (1) Woven geogrids เป็นการถักเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นสูง ผลิตโดยเส้นด้าย Polyester ที่มีการคืบน้อยความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีลักษณะเป็นเส้นด้ายมีความมั่นคงและเชื่อมต่อกันเป็นตารางโดยอยู่ภายใต้ความตึง ถูกเคลือบอย่างสม่ำเสมอด้วยสารปลอดสารพิษที่เป็นโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มความต้านทานโดยรวมต่อการเสียดสี อัลตราไวโอเลต สภาพอากาศ กรด ด่าง การสลายตัวทางชีวภาพ และ สภาพภายนอกอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ และวิธีที่ (2) Extruded geogrids เป็นแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่อัดขึ้นรูปนั้นทำจาก Polypropylene โดยการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นแบนแล้วเจาะรู เพื่อสร้างความต้านทานแรงดึง วัสดุจะถูกยืดออกไปทั้งแนวยาวและแนวขวาง ใช้ในงานปรับปรุงเสถียรภาพของโครงสร้างของถนนและทางรถไฟ, ถนนชั่วคราว, กำแพงกันดินเสริมกำลัง (MSE wall) และพื้นผิวดินที่มีความลาดชัน

(2) แบ่งประเภทตามแนวการรับแรง

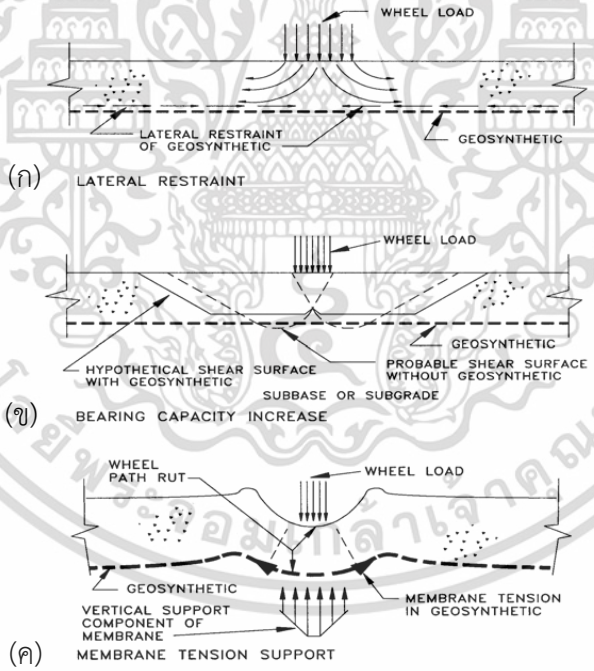
แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินสามารถแบ่งตามประเภทตามแนวการรับแรงของแถบรับแรงดึงได้ 3 ประเภท ดังนี้ ประเภทที่ (1) แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินทีมีแนวการรับแรงเพียงเดียว หรือ Uniaxial geogrid นิยมใช้กับงานกำแพงกันดินเสริมกำลัง (MSE wall) ช่องเปิดมีรูปแบบเป็นตารางสี่รูปเหลี่ยมผืนผ้า มีช่องเปิดตรงกลางตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาว มีกำลังรับรงดึงสูงในทิศทางเดียว ความต้านทานการพังทลายสูง ความคืบต่ำ ประเภทที่ (2) ตาข่ายเสริมกำลังดินรับแรงสองทาง หรือ Biaxial geogrid มีช่องเปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สามารถกระจายแรงได้ทั้ง 2 ทิศทาง ตามแนวยาวและตามแนวขวาง จึงสามารถกระแรงได้ดีกว่าตาข่ายเสริมกำลังดินชนิดอื่น มีความต้านทานการพังทลายสูง ความคืบต่ำ เหมาะสำหรับการก่อสร้างถนน ทางรถไฟ และลาดคันดิน เป็นต้น ประเภทที่ (3) Triaxial geogrid ลักษณะเป็นช่องเปิดรูปสามเหลี่ยม มุมภายใน 60 องศา ทำให้สามารถรับน้ำหนักได้สูง การเสียรูปและการลื่นไถลต่ำ ความต้านทานแรงบิดสูง มีประสิทธิภาพในการแยกชั้นวัสดุ สามารถกระจายและต้านทานแรงไม่สูงเท่าตาข่ายเสริมกำลังดินชนิดอื่นแต่สามารถต้านทานแรงได้ในหลายทิศทางมากกว่า

2.1.2 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในงานถนน

ในงานเกี่ยวกับการเสริมกำลังโครงสร้างดินพบว่าหน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นมีดังนี้ คือ (1) ลดการเคลื่อนตัวในแนวข้างของดิน (2) เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน และ (3) กระจายความเค้นตั้งฉากผ่านเมมเบรน โดยแสดงลักษณะของการกระจายแรงในแต่ละหน้าที่ได้ดังรูปที่ 2.1ก, 2.1ข และ 2.1คตามลำดับ (Cuelho et al., 2014)



รูปที่ 2.1 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน: (ก) ลดการเคลื่อนตัวในแนวข้างของดิน (Lateral restraint); (ข) เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน (Bearing capacity increase); และ (ค) กระจายความเค้นตั้งฉากผ่านเมมเบรน (Membrane tension support) (Cuelho et al., 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดิน

ดินเป็นวัสดุมวลรวมที่ประกอบจากเม็ดดินจำนวนมมากรวมตัวกัน โดยเม็ดดินแต่ละเม็ดจะมีขนาดที่แตกต่างกัน การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินเป็นนการทดสอบเพื่อหาว่าในมวลรวมมีเม็ดดินขนาดใดบ้างและเม็ดดินแต่ละขนาดมีอัตราส่วนเท่าไร ซึ่งการกระจายตัวของเม็ดดินนี้ส่งผลต่อทั้งค่า อัตราการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of settlement) และยังบอกถึงคุณสมบัติด้านกำลังของดินได้อีกด้วย โดยการหาการกจะจายตัวสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. การร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ใช้สำหรับมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตรหรือค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 โดยการทดสอบจะนำมวลรวมมาเข้าตะแกรงที่ประกอบด้วยตะแกรงขนาดต่างๆโดยตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่บนและไล่ลงมาเป็นขนาดเล็กซึ่งจำทำการแยกเม็ดดินที่มีขนาดต่างกันออกจากันและทำการหาอัตราส่วนของเม็ดดินแต่ละขนาด แตกต่างกันออกไป สำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด 3/8 นิ้วเบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ200 โดยเบอร์ตะเกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือเบอร์ 4, 100 และ200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่ด้านบนและไล่ตามลำดับลงมา ดินหรือหินที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไปดินที่ใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรง
2. วิธีตกตะกอนโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) โดยจะใช้สำหรับดินที่มีเม็ดดินส่วนใหญ่ขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.0075 มิลลิเมตร โดยใช้หลักการแรงโน้มถ่วงที่เม็ดดินขนาดใหญ่จะตกตะกอนก่อนเม็ดดินที่มีขนาดเล็ก การใช้วิธีการตกตะกอนเพื่อแยกขนาดของเม็ดดินเหมาะสำหับเม็ดดินที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2 มม. ถึง 0.0002 มม. โดยส่วนมากนิยมทำการทดสอบควบคู่ไปกับการทดสอบแบบร่อนผ่านตะแกรง

สำหรับดินโดยทั่วไปจะใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้จะเกี่ยวเนื่องกัน เมื่อได้ผลแล้วต้องนำผลทั้ง 2 วิธีมาเขียนกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินต่อไป กล่าวคือ ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของเม็ดดินโดยทั่วไปขนาดของเม็ดดินกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดดิน (Diameter) ที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าที่ระบุหรือเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงค่าต่าง ๆ จะถูกนำมาเขียนกราฟมากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางบันทึกผลก็จะเห็นลักษณะการกระจายตัวได้ทันที (ดูตัวอย่างรูปที่ 2.5) จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าลักษณะกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (1) ดินที่มีขนาดคละกันดี (Well graded soil), (2) ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform graded) และ (3) ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap graded) ซึ่งประเภทที่ 2 และ 3 เป็นดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) คือ โดยในแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินที่มีขนาดคละกันดี

ดินที่มีขนาดคละกันดี (Well graded soil) คือดินที่มีขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็กคละกันอย่างเหมาะสม (ดูรูปที่ 2.2) เส้นกราฟที่เกิดขึ้นจะเป็นเส้นโค้งที่สม่ำเสมอ ลากจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง (ดูรูปที่ 2.5) หรือสามารถคำนวณได้จากค่า Coefficient of uniformity (Cu) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความสม่ำเสมอของเม็ดดิน โดยใช้สมการที่ 2.1 นอกจากนี้ เรายังสามารถหาค่า Coefficient of curvature (CC) ที่เป็นตัวบ่งบอกความโค้งของเส้นกราฟได้ จากสมการที่ 2.2 ดินที่มีลักษณะขนาดคละกันดีจะต้องมีลักษณะตามตารางที่ 2.1

$$C_u = \frac{D_{10}}{D_{60}} \tag{2.1}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^{\ 2}}{D_{10} \times D_{60}} \tag{2.2}$$

โดยที่

D_{10} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 10% โดยน้ำหนัก เรียกว่าขนาด ประสิทธิผล (Effective size)

D_{30} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 30% โดยน้ำหนัก

D_{60} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 60% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละกันดี (มานิต ช่วยงาน. 2554)

ชนิดของดิน	C_u	C_c
กรวด	มากกว่า 4	1-3
ทราย	มากกว่า 6	1-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Well graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)

ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ

ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform graded) คือดินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 2.3) เส้นกราฟจะให้ลักษณะที่เป็นเส้นขนานกับแกน y (รูปที่ 2.5) เรียกดินลักษณะนี้ว่า Narrowly graded ซึ่งเป็นหนึ่งใน Poorly graded soil

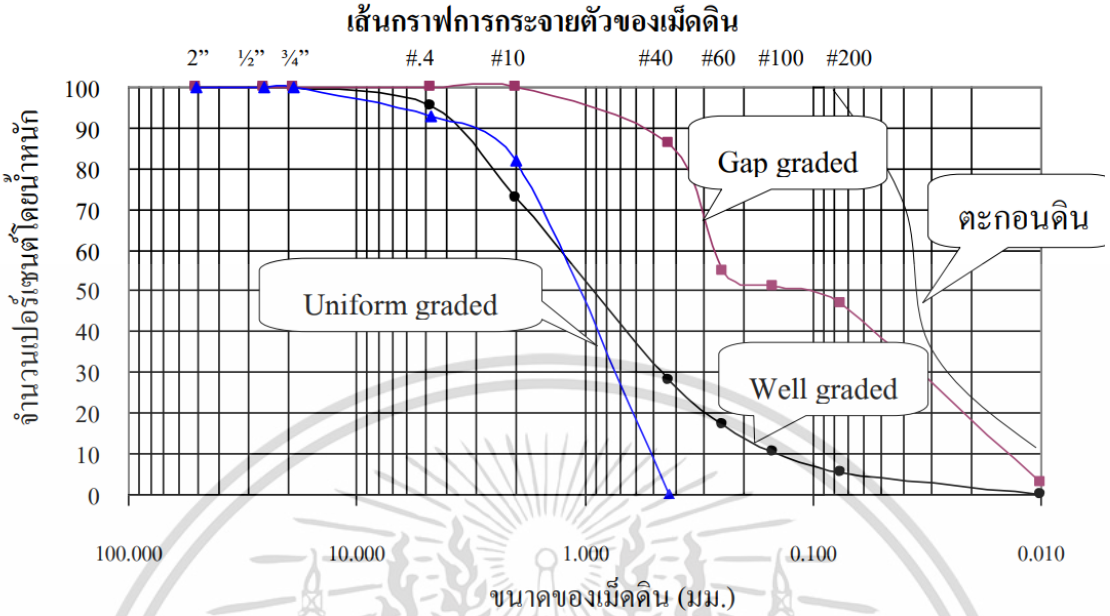
รูปที่ 2.3 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Uniform graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)

ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง

ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap graded) ลักษณะของเส้นการกระจายตัวดินจะมีบางช่วงซึ่งทอดตัวในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงถึงดินที่มีเม็ดบางขนาดหายไป (รูปที่ 2.4) ซึ่งเป็นหนึ่งใน Poorly graded soil

รูปที่ 2.4 ลักษณะขนาดของเม็ดดิน Gap graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน หรือ Grain size distribution curve (มานิต ช่วยงาน. 2554)

2.3 พิกัดอัตเตอร์เบอร์ก (Atterberg’s limit)

ความชื้นในดินเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและวิศกรรมของดิน ในเชิงกายภาพการมีความชื้นในดินที่ต่ำจะทำให้ดินมีสถานะเป็นของแข็งและเหนียวขึ้นเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น ในเชิงวิศกรรมปริมาณน้ำมีผลต่อความแข็งแรง ความต้านทานแรงอัดสนอง และความหนาแน่นของดิน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะมีผลที่ชัดเจนมากต่อดินเม็ดละเอียด เช่น ดินเหนียว และจะมีผลน้อยลงในดินเม็ดหยาบ สาเหตุที่ดินเม็ดละเอียดมีความแข็งแรงมากเกิดจากค่าความยึดเหนียวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าระหว่างเม็ดดิน

ความชื้นในมวลดินที่เกิดการเปลี่ยนสภาพหรือสถานะจะเรียกว่า "ขอบเขตสถานะภาพ" เช่น ปริมาณความชื้นที่ดินเริ่มมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละชนิดของดิน ขอบเขตสถานะภาพนี้ใช้ในการจัดหมวดหมู่ดินและคาดคะเนคุณสมบัติและพฤติกรรมของดิน นอกจากนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์และการคาดคะเนทางวิศวกรรม เช่น ในกระบวนการทรุดตัวและการวิบัติ

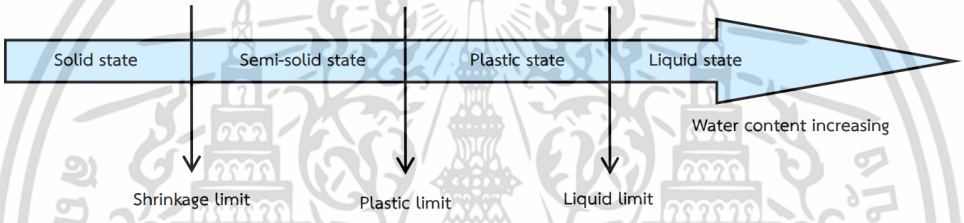
พิกัดอัตเตอร์เบอร์ก (Atterberg’s limits) เป็นตัวบ่งชี้จุดที่ดินจะเปลี่ยนสถานภาพไปเป็นรูปแบบต่างๆซึ่งสถานภาพของมวลดินแบ่งออกเป็น 5 สถานภาพ ดังนี้

1. Cohesion limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เศษดินเริ่มมีการยึดเกาะเข้าด้วยกัน
2. Sticky limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ท้าให้มวลดินเริ่มมีการยึดเกาะกับผิวของโลหะ
3. พิกัดเหลว (Liquid limit, LL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. พิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL)
5. พิกัดการหดตัว (Shrinkage limit, SL)

ในการประยุกต์ใช้ค่าพิกัดดังกล่าวในวิศวกรรมโยธา เราสามารถใช้ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) และค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) เพื่ออธิบายคุณสมบัติของดินมวลละเอียดเมื่อมีปริมาณความชื้น (Water content) ที่แตกต่างกันในมวลดิน การแบ่งสภาพของดินที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในมวลดินสามารถทำได้เป็น 4 สถานะหลักคือ สถานะของเหลว (Liquid state) สถานะพลาสติก (Plastic state) สถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) และสถานะของแข็ง (Solid state) ช่วงแบ่งสภาพของดินที่แตกต่างกันตามปริมาณความชื้นในมวลดินเรียกว่า "ค่าพิกัดข้นเหลว" หรือ "ค่าพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก" (Atterberg's limit) ซึ่งประกอบด้วย ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) และค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่างกัน
(วรรณวรางค์ รัตนานิคม. 2560)

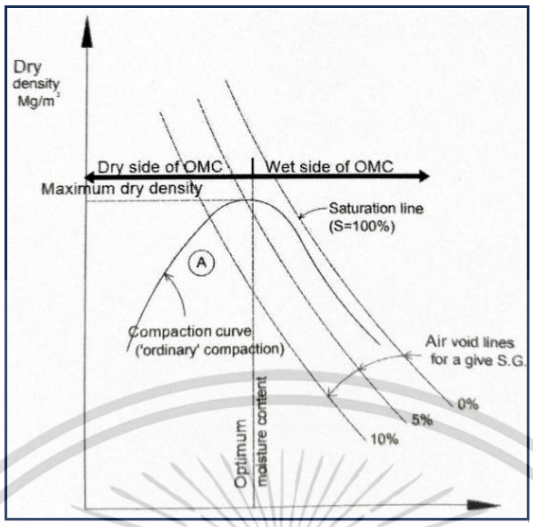
2.4 การทดสอบการบดอัดดิน

การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction) เป็นการให้พลังงานแก่ดินด้วยแรงกระทำภายนอกเช่น การกระแทก โดยจะส่งผลให้ช่องว่าง (Void) ในดินลดลง ซึ่งผลตามมาหลังจากการบดอัดคือ ดินมีการทรุดตัวในอนาคตน้อยลง มีเสถียรภาพมากขึ้น และลดอัตราการซึมผ่านของน้ำ

2.4.1 ทฤษฎีการบดอัดของ Proctor

จากทฤษฎีการบดอัดของ Proctor ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความหนาแน่นของดินหลังการบดอัดเป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นต่อความหนาแน่นของดินที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของดิน โดยเรียกจุดที่ความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้นถึงจุดที่มากที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดเรียกว่าว่า Maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้จะเรียกว่า Optimum moisture content (OMC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



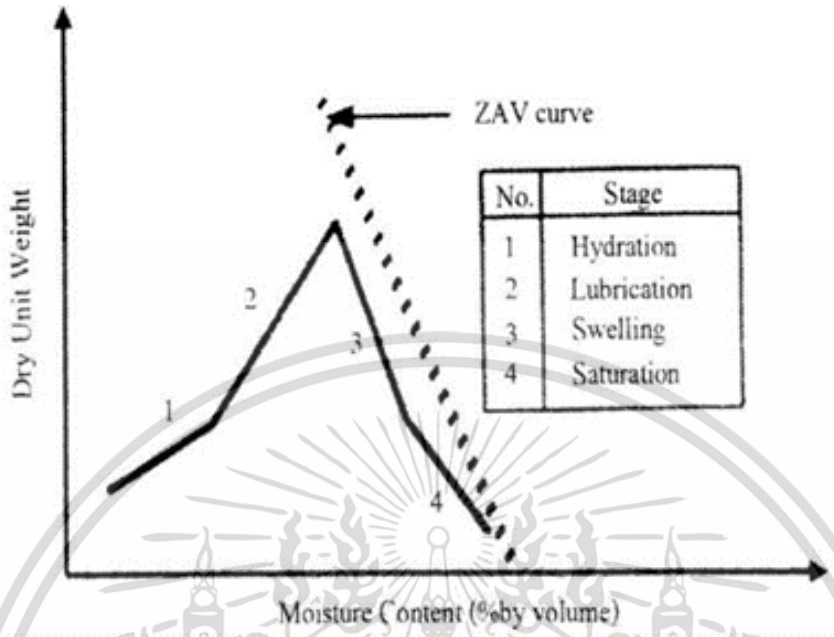
รูปที่ 2.7 กราฟการบดอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดิน

โดยการบดอัดจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) และการบดอัดแบบโมดิฟายด์ (Modified proctor test) โดยความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีนี้คือพลังงานที่ให้แก่ดินซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีในการบดอัดจะเลือกใช้ตามความเหมาะสมของงาน โดยการเปรียบเทียบการบดอัดแต่ละวิธีเป็นไปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวิธีการและเครื่องมือระหว่างวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) กับ การทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified proctor test)

Using	Standard		Modified	
Mold	Ø 4”x4.6”	Ø 6”x5”	Ø 4”x4.6”	Ø 6”x5”
Rammer (lb)	5.5	5.5	10	10
No. of layer	3	3	5	5
No. of blow per layer	25	56	25	56
Rammer fall (in)	12	12	18	18
Compaction energy (ft-lb/ft^3)	12375	12375	56250	56250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น (Hogentogler. 1936)

Hogentogler นำเสนอกราฟการบดอัดที่แตกต่างจากกราฟของ Proctor โดยเส้นกราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry density) และปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (Molding moisture content: VW/V) ลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรงที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 การนำเสนอกราฟแบบนี้เกิดจากการพบว่าน้ำมีบทบาทที่สำคัญในกระบวนการบดอัดดิน โดยแบ่งเป็น 4 ช่วงที่มีผลต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดและมีผลต่อโครงสร้างของดินที่บดอัดโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง

1. ในช่วง Hydration stage น้ำจะถูกดูดซึมเข้าสู่อนุภาคของดิน โดยจะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่ห่อหุ้มอนุภาคดิน อย่างเดียวกับเมื่อพรมน้ำเข้าไปในดินแห้งในช่วงแรก อนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน ในช่วงนี้ยังไม่มีการเกิดขึ้นของน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น

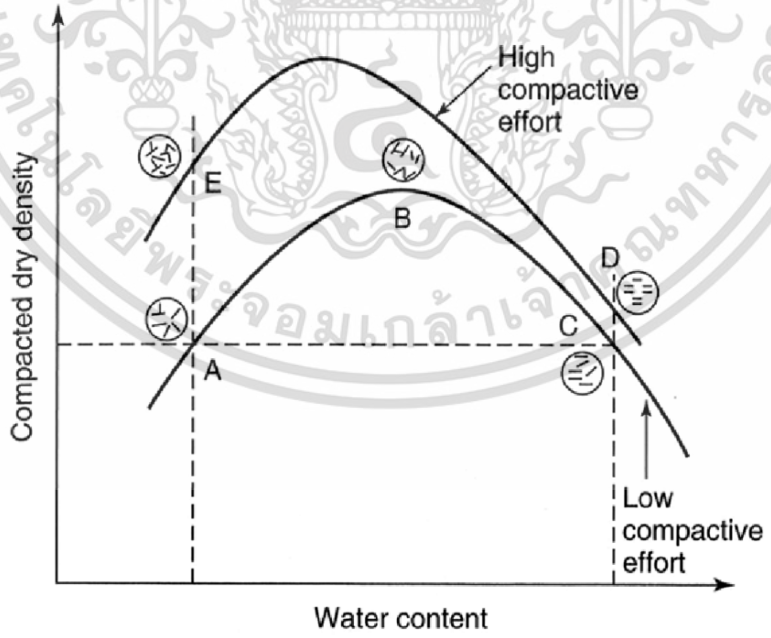
2. ในช่วง Lubrication stage น้ำมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น ซึ่งทำให้โครงสร้างของดินเรียงตัวใหม่ในลักษณะที่มวลดินเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันยังคงมีอากาศอยู่ภายในมวลดินบางส่วน ซึ่งหมายถึงการเพิ่มความหนาแน่นแห้งของดินจนเมื่อเจอปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content; OMC) ค่าความหนาแน่นแห้งจะมีค่าสูงสุด (Maximum dry density)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในช่วงของการบวมตัว Swelling stage เกิดจากการเติมน้ำเข้าไปเกินปริมาณน้ำที่เหมาะสมในดิน อากาศในพื้นที่ที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยและอยู่ในสภาพที่แน่นซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่หลุดออกไป ดังนั้นเมื่อมีการเติมน้ำเข้าไปในดินเพิ่มเติม มวลดินจะเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรของอากาศคงที่และอากาศที่มีอยู่จะออกไป ดังนั้นการเติมน้ำเข้าไปเพิ่มเติมจะทำให้มวลดินบวมตัว
4. ในช่วงของการอิ่มตัว (Saturation stage) เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินเพิ่มเติม น้ำจะเข้ามาแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน ซึ่งทำให้ระดับความอิ่มตัว (Degree of saturation) เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้กับเส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero air void; ZAV)

2.4.2 การบดอัดด้วยพลังงานที่แตกต่างกัน

การบดอัดด้วยวิธีการทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified proctor test) มีค่าพลังงานที่ให้กับดินสูงกว่าวิธีการบดอัดมาตรฐานและมีปริมาณความชื้นน้อยกว่า ในวิธีการบดอัดเดียวกันหากเพิ่มจำนวนครั้งหรือ พลังงานในการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีประมาณน้ำในมวลดินลดลง กราฟการบดอัดจะมีลักษณะคล้ายกันแต่จะมีการขยับขึ้นและขยับไปทางซ้ายตามพลังงานที่เพิ่มเข้าไป



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของพลังงานการบดอัดต่อกลางกราฟบดอัด (Lambe, 1958)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น

2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

ทั้งนี้พลังงานในการบดอัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 (Das, 2013)

$$\text{Compaction energy} = \frac{NnWh}{v} \tag{2.3}$$

โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการบดอัดต่อชั้น

n คือ จำนวนชั้น

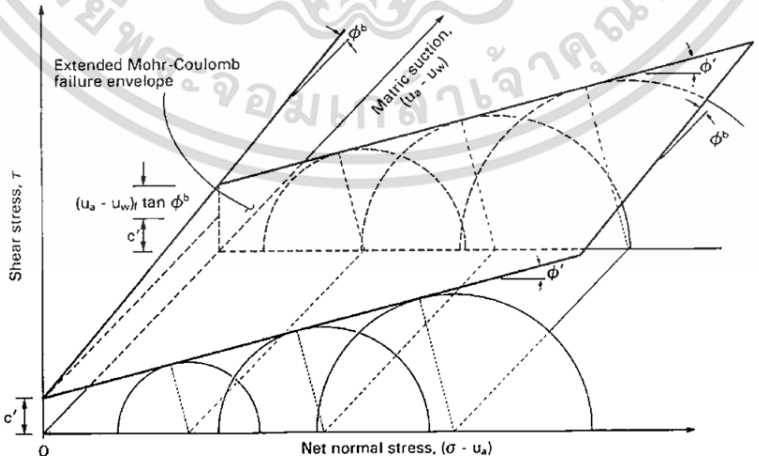
W คือ น้ำหนักค้อนบดอัด

h คือ ความสูงการตกกระทบของค้อน

v คือ ปริมาตรของโมล

2.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear test)

ตามทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของ Mohr-coulomb กำลังรับแรงเฉือนของดินจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลสามารถคำนวณได้จากสมการ $\tau = c' + (\sigma - u)\tan\phi'$ โดย c' คือ Effective cohesion และ ϕ' คือ Effective friction angle

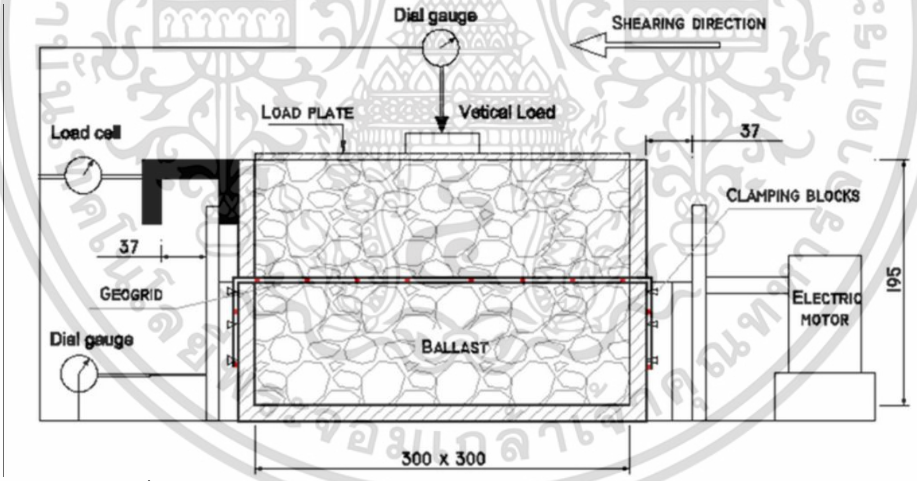


รูปที่ 2.10 กราฟเพิ่มเติม Mohr Coulomb failure envelope (Fredlund and Morganstern, 1977)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินนั้นขนาดของตัวอย่างเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญเนื่องจากเป็นตัวแทนของชั้นดิน ซึ่งในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรง (Direct shear test) ตามที่กำหนดไว้ใน ASTM D3080 เม็ดดินที่มีขนาดโตสุดจะต้องมีขนาดไม่เกิน 1/6 ของความสูงตัวอย่าง ในกรณีทั่วไปตัวอย่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตรทำให้มีข้อจำกัดในการทดสอบเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่หรือในกรณีที่มีการใส่วัสดุเสริมกำลังที่มีความหนาลงไปในตัวอย่าง จึงได้มีการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear test) เพื่อแก้ไขข้อกัดในส่วนของขนาดเม็ดดิน และการทดสอบนี้ยังเหมาะและได้รับความนิยมในการใช้ศึกษาการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินอีกด้วย

ตามมาตรฐาน ASTM D5321 ในการทดสอบ Large-scale direct shear จะต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่ากล่องเฉือน (Shear boxes) ซึ่งประกอบจากกล่องเฉือนส่วนบน และกล่องเฉือนส่วนล่างประกอบกัน โดยกล่องเฉือนแต่ละก่องต้องมีความกว้างและยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตรและมีความสูงไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตรหรือ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ใหญ่ที่สุด การทดสอบจะถูกดำเนินการโดยให้ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) แก่ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ค่าเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนที่ความเค้นตั้งฉากนั้นๆ และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน (Shear stress) โดนในขั้นตอนการเฉือนกล่องเฉือนจะต้องถูกดันด้วยอัตราเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที และเก็บข้อมูลแรงเฉือนอย่างน้อย 50 จุดต่อ 1 ความเค้นตั้งฉาก



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ Large-scale direct shear (Indraratna et al., 2015)

2.6 เสถียรภาพในระยะสั่นและระยะยาวของคันดินถม

ในกรณีของคันดินถมทั่วไป ความสูงของคันดินถมจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำภายในดิน รวมทั้งหน่วยแรงประสิทธิผลและค่าความปลอดภัยของดินถมเมื่อผ่านไปเวลา สามารถแบ่งสภาวะได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้:

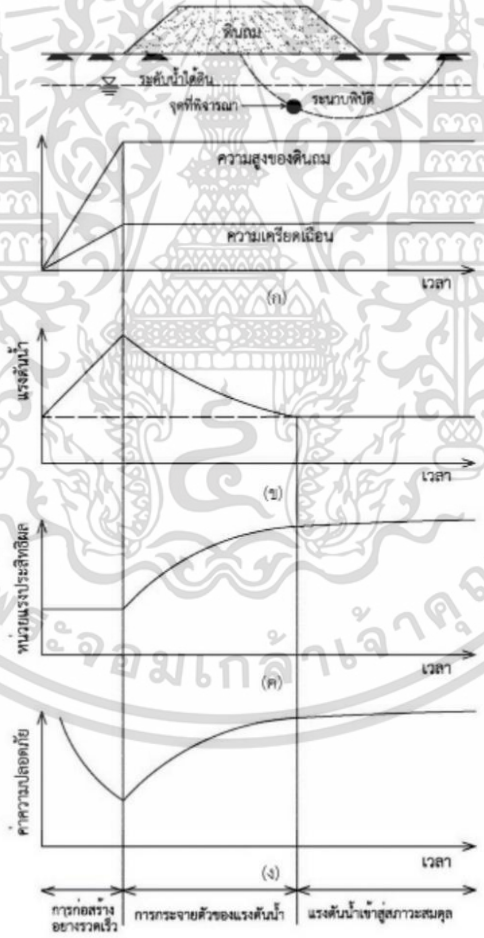
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ช่วงการก่อสร้างอย่างรวดเร็ว: ในช่วงนี้เมื่อคันดินถมมีความสูงมากขึ้น จุดที่กำลังพิจารณาจะมีความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น แต่หน่วยแรงประสิทธิผลคงที่ และค่าความปลอดภัยลดลง เนื่องจากเกิดการก่อสร้างอย่างรวดเร็วทำให้ดินถมมีความแน่นหนาและเครียดมากกว่าปกติ

2. ช่วงการกระจายตัวของแรงดันน้ำ: เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินเพิ่มเติม แรงดันน้ำจะกระจายตัว ทำให้ความเครียดเฉือนคงที่ แรงดันน้ำลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของแรงดันน้ำจนคงที่

3. ช่วงแรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล: เมื่อเติมน้ำเข้าไปเพิ่มและถึงจุดที่แรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล ค่าความปลอดภัยและหน่วยแรงประสิทธิผลจะคงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป

การเข้าสู่ช่วงที่ 3 เป็นจุดเน้นสำคัญ เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปและแรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล คันดินจะมีค่าความปลอดภัยที่คงที่ ซึ่งเป็นสถานะที่ดีที่สุดในกรณีของคันดินถม



รูปที่ 2.12 ค่าความปลอดภัย แรงเฉือน แรงดันน้ำส่วนเกิน หน่วยแรงประสิทธิผล ของลาดดินถมที่ระยะเวลาต่างๆ (ดัดแปลงจาก Bishop และ Bjerrum, 1960)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 แผ่นยางพารารมควัน

2.7.1 การผลิตแผ่นยางรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

การผลิตแผ่นยางรมควัน (RSS) เป็นกระบวนการแปรรูปยางโดยใช้ความร้อนและควัน โดยควบคุมอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพื่อให้ยางแผ่นแห้งและลดความชื้น ยางที่ผ่านกระบวนการรมควันจะมีความยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ สารจากควันยังช่วยป้องกันการเกิดราซึ่งเป็นตำหนิหนึ่งในการจัดชั้นยาง กระบวนการผลิตแผ่นยางรมควันสามารถทำได้โดยวิธีการต่อไปนี้ 1. การนำน้ำยางสดมาจับตัวและรีดให้เป็นแผ่น จากนั้นแผ่นยางจะถูกผึ่งให้สะเด็ดน้ำและนำเข้าห้องรมควัน 2. การล้างแผ่นยางดิบด้วยเครื่องล้าง จากนั้นแผ่นยางที่ล้างแล้วจะถูกนำไปรมควันในกระบวนการผลิตทั้ง 2 วิธีนี้ ขั้นตอนการผลิตแผ่นยางดิบจะเริ่มต้นด้วยกรองน้ำยางสดโดยใช้ตะแกรงกรองขนาดเบอร์ 60 เพื่อกรองสิ่งปนเปื้อนที่อาจติดมากับน้ำยาง ที่สำคัญต้องไม่นำน้ำยางที่เริ่มเสียสภาพมาผสมกับน้ำยางที่ยังสด เพื่อป้องกันรอยตำหนิในยาง กระบวนการผลิตแผ่นยาง พารารมควันนั้นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากหากไม่ปฏิบัติตามวิธีการที่ถูกต้อง อาจทำให้แผ่นยางรมควันที่ผลิตออกมามีรอยตำหนิและเกิดของเสีย ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น จึงต้องให้ความสำคัญในการเลือกใช้อุปกรณ์การผลิตที่สะอาดและพร้อมใช้งานตลอดเวลา โดยในการผลิตแผ่นยางพารารมควันมีขั้นตอนดังตอไปนี้

2.7.1.1 ขั้นตอนการผลิตแผ่นยางพารารมควัน

1. เติมน้ำในตะกงจับตัวยางที่ได้คำนวณ DRC ที่เจือจางแล้ว จนได้ระดับที่ต้องการ

2. กวนน้ำยางสดในบ่อรวมยางที่หาให้เข้ากัน จากนั้นปล่อยลงในตะกงที่เติมน้ำสะอาดไว้แล้ว จนได้ระดับที่ต้องการด้วยการผ่านตะแกรงกรองขนาด 100

3. กวนน้ำกับน้ำยางให้เข้ากัน

4. กวาดฟองออกให้มากที่สุด

5. เทสารละลายกรดฟอร์มิคที่เจือจางแล้วเข้มข้น 4% อย่างช้าๆ ในอัตรา 0.6% ต่อปริมาณเนื้อยางแห้งจนทั่วตะกง

6. กวนสารละลายกรดฟอร์มิคเจือจางกับน้ำยาง 15 ครั้งให้สารเข้ากัน

7. กวาดฟองออกให้หมด

8. ทำการเสียบแผ่นยางโดยเริ่มจากส่วนริมที่มีฟองน้อยสุด แล้วไปกลางตะกง และจบที่ริมที่มีฟองมากสุด

9. ทิ้งไว้ประมาณ 45 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการแตะเพื่อตรวจสอบสภาพแผ่นยาง หากน้ำยางไม่ติดนิ้วให้ทำการหล่อน้ำเพื่อป้องกันผิวหน้ายางมีสีคล้ำ

11. ปล่อยทิ้งไว้อีกประมาณ 90 นาที เพื่อให้ยางจับตัวสมบูรณ์

12. เติมน้ำในตะกงจนท่วม ดึงแผ่นเสียบออกและยกแผ่นยางออกจากตะกงไว้ในบ่อที่มีน้ำหล่อเต็มเพื่อเตรียมการรีดแผ่น ให้เรียงแผ่นยางเพื่อสะดวกในการหยิบแผ่นยางเข้าเครื่องรีด

13. ทำการรีดยางทีละแผ่นผ่านเครื่องจักรรีดยางที่มีน้ำหล่อผ่าน ลงในบ่อล้างยางหลังรีดที่มีน้ำไหลผ่านตลอดระยะเวลาการรีด

14. พาดยางบนไม้ราวที่สะอาด เรียงบนรถตากยางให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน

15. ผึ่งจนยางสะเด็ดน้ำ

16. สางยางทุกแผ่นเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นยางติดกัน

17. นำเข้าห้องรมควัน

2.7.3 วิธีการรมควัน

ใช้เทคนิคของความร้อนและควันเพื่อสร้างอุณหภูมิและควันที่เหมาะสมในการทำให้แผ่นยางแห้ง การรมควันช่วยลดความชื้นในแผ่นยางและทำให้ยางยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ ควันยังช่วยป้องกันการเกิดเชื้อราด้วย อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการรมควันคือไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส การเริ่มต้นให้อุ่นเตาไว้ที่ประมาณ 45 องศาเซลเซียสและใช้เวลาประมาณครึ่งชั่วโมงในการรมควันหลังจากนำแผ่นยางเข้ารมควัน ในระยะแรก แผ่นยางที่มีความชื้นเฉลี่ย 30% เมื่อได้รับความร้อน น้ำจะเริ่มระเหยพร้อมกับการหดตัวของเนื้อยางอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะนี้อุณหภูมิจะลดลงประมาณ 10-15 องศาเซลเซียส อาจใช้เวลาประมาณ 10-12 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น ในวันถัดไปควรเติมเชื้อเพื่อรักษาอุณหภูมิในห้องไว้ที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียสและเพิ่มขึ้นเป็น 55-60 องศาเซลเซียสในวันที่ 3-4 จากนั้นลดอุณหภูมิก่อนยางแห้งสนิทโดยไม่ต้องเติมเชื้อ ใช้ความร้อนที่ระอุอยู่เพื่อให้แผ่นยางแห้งสนิทประมาณ 1-3 ซม.

2.7.4 ประเภทของยางแผ่นรมควัน (RSS) ตามมาตรฐาน Green Book

มีทั้งหมด 6 ประเภท ได้แก่ RSS1X, RSS1, RSS2, RSS3, RSS4, และ RSS5 โดย RSS1X เป็นแผ่นยางที่มีคุณภาพดีที่สุด มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด และมีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น แผ่นยางต้องแห้งดี รมควันทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ในขณะที่ RSS5 เป็นแผ่นยางที่มีคุณภาพแย่ที่สุด ในกรณีปกติแผ่นยางทั้งหมดจะถูกจัดให้อยู่ในประเภทที่ 3 ก่อนทำการคัดแยกตามเกณฑ์การคัดแยก รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถดูได้ในตารางที่ 2.2 ของมาตรฐาน Green Book

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของแผ่นยางรมควัน (RSS) (การยางแห่งประเทศไทย. 2561)

ชื่อประเภท	คุณสมบัติ	ลักษณะของแผ่นยางรมควัน
RSS1X	คุณสมบัติพิเศษ	เป็นยางที่ควบคุมการผลิตทุกขั้นตอนโดยต้องตรวจกรรมวิธีการผลิตภายใน โรงงานผลิต ยางแผ่นดิบและโรงรมควัน ส่วนยางแผ่นรมควันชั้นอื่น ๆ ไม่ จำเป็นต้องตรวจขั้นตอนการผลิต ยางแผ่นรมควันชั้นนี้ต้องปราศจากราทุกชนิด และไม่อนุญาตให้มีตำหนิใด ๆ ที่แผ่นยางได้เลย
	ลักษณะแผ่นยาง	แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สะอาด แผ่นสมบูรณ์ 100% สีสม่ำเสมอ
RSS 1	ลักษณะแผ่นยาง	แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สะอาด แผ่นสมบูรณ์ สีสม่ำเสมอ (อนุญาตให้มีเปลือกไม้เล็ก ๆ ได้เล็กน้อย)
	ไม่อนุญาต	ยางพอง ยางฟองอากาศ ยางแก่รม ยางแก่ไฟ ยางไหม้ ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ผิวแผ่นเป็นตำหนิ
RSS 2	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นห่อกับผิวก้อน ได้ไม่เกิน 5%ของยาง ลูกขุนส่งมอบ แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สีสม่ำเสมอ ผิวแผ่นตำหนิ ได้เล็กน้อย ฟองอากาศขนาดเล็ก
	ไม่อนุญาต	ยางแก่รม ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางอ่อน ยางแก่ไฟ ยางไหม้
RSS 3	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นยางกับผิวก้อนได้ไม่เกิน 10% ของยางส่งมอบ แผ่นยางแห้ง สะอาด เนื้อแน่นแข็ง มีตำหนิผิวแผ่นได้เล็กน้อย ด่างดำเล็กน้อย ฟองอากาศเล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางแก่รม อ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางอ่อน ยางแก่ไฟ ยางไหม้ ยางฟองขนาดใหญ่
RSS 4	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นห่อกับผิวก้อนได้ไม่เกิน 20% ของยางลูกขุนส่งมอบ แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สะอาด ผิวแผ่นมีตำหนิ สีด่าง ด่างดำปานกลาง สีคล้ำเล็กน้อย ยางแก่รมได้เล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางแก่ไฟ ยางไหม้ ยางฟองขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RSS 5	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นห่อกับผิวก้อนได้ไม่เกิน 30% ของยางส่งมอบ แผ่นยางเนื้อแน่นแข็ง สะอาด แห้ง มีสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ขึ้นได้เล็กน้อย มียางแก่รมและยางอ่อนรมได้เล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางอ่อน ยางแก่ไฟ ยางไหม้

หมายเหตุ: ไม่อนุญาต หมายถึง ไม่อนุญาตให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.8 แผ่นยางคอมปาวด์

ยางคอมปาวด์ (Rubber compound) คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนเปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางเคมีของยางเช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์ในการพัฒนาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของแผ่นยางธรรมชาติ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ที่สามารถตอบโจทย์การใช้งานในด้านต่างๆ ตามความต้องการ เช่น ยางล้อ ถุงมือยาง ยางรองคอสะพาน ท่อยาง ยางรัดของ แผ่นยางพื้นรองเท้า ฯลฯ การจะผลิตยางคอมปาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบสูตรเคมียางและการผสมยางเพื่อให้ได้ยางคอมปาวด์สำหรับขึ้นรูป และคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ โดยทั่วไปส่วนผสมหลักของคอมปาวด์จะประกอบด้วย

1. ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber; SR) ยางผสม (Blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE)

2. สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)

4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

6. สารตัวเติม (Aillers)

7. สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and processing aids)

8. สารอื่นๆ เช่น สี (Pigments) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่สนับสนุนการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน

งานวิจัยที่ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนของดินหลังการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินได้แก่ Large-scale direct shear testing of geogrid reinforced aggregate base over weak subgrade (Sakleshpur et al., 2020)

งานวิจัย Large-scale direct shear testing of geogrid reinforced aggregate base over weak subgrade

งานวิจัยของ Sakleshpur และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังเฉือนของตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยใช้การทดสอบ Large-scale direct shear เพื่อศึกษาปัจจัยด้านลักษณะของตาข่ายเสริมกำลังดินที่มีผลต่อการเสริมกำลังดิน โดยจะใช้ตาข่ายเสริมกำลังดิน 7 ชนิดที่มีขนาดของช่องเปิด กำลังรับแรงดึงของแถบวัสดุ (Tensile strength of ribs) และความแข็งแรงข้อต่อ (Junction strength) ที่แตกต่างกันโดยค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในการทดสอบตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิดจะถูกนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยสมการที่ 2.4 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in}) ของแต่ละตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2.4

$$\alpha = \tau_{(\text{geogrid})} / \tau_{(\text{unreinforced})} \tag{2.4}$$

โดยที่ $\tau_{(\text{geogrid})}$ คือกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน

$\tau_{(\text{unreinforced})}$ คือกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมกำลัง

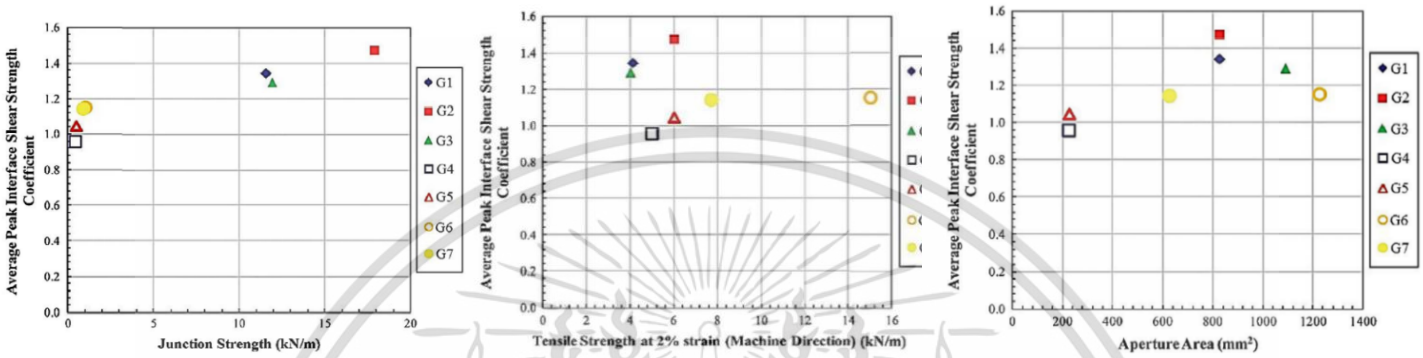
α คือสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in})

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวของตาข่ายเสริมกำลังดิน 7 ชนิด (Sakleshpur, 2020)

	Peak interface shear strength coefficient α_{peak}			
Geogrid	σ_n = 50 kPa	σ_n = 100 kPa	σ_n = 200 kPa	Average α_{peak}
G1	1.47	1.50	1.07	1.35
G2	1.45	1.59	1.40	1.48
G3	1.41	1.33	1.14	1.30
G4	0.87	1.10	0.90	0.96
G5	0.76	1.13	1.26	1.05
G6	1.05	1.33	1.08	1.16
G7	1.10	1.35	1.00	1.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 จะถูกแสดงคู่กับความแข็งแรงข้อต่อ (Junction strength) กำลังรับแรงดึงของแถบวัสดุ (Tensile strength of ribs) และขนาดช่องเปิด ดังรูปที่ 2.13 (ก) 2.13(ข) และ 2.13(ค) ตามลำดับเพื่ออธิบายถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิ์ภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดิน



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบปัจจัยด้านคุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลังดิน: (ก) ความแข็งแรงข้อต่อ; (ข) กำลังรับแรงดึงของแถบวัสดุ; และ (ค) ขนาดช่องเปิด (Sakleshpur, 2020)

จากรูปที่ 2.13(ก) ความแข็งแรงข้อต่อของตาข่ายเสริมกำลังดิน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือน (R_{in}) จากรูปที่ 2.13(ข) กำลังรับแรงดึงของแถบวัสดุไม่มีผลที่ชัดเจนต่อแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังรับแรงเฉือน และจากรูปที่ 2.13(ค) ขนาดของช่องเปิดมีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยต้องเลือกขนาดของช่องเปิดให้เหมาะสมกับขนาดของเม็ดดิน ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในการทดสอบตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิดจะถูกนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่มีการเสริมกำลัง

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.13(ก) มาประกอบกันแสดงให้เห็นว่าตาข่ายเสริมกำลังดิน G2 ที่มีความแข็งแรงข้อต่อสูงที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสูงที่สุด ความสัมพันธ์นี้ Sakleshpur ให้ความเห็นไว้ว่าตรงกับกลไกการทำงานของตาข่ายเสริมกำลังดินที่มีกลไกหลักในการรัดเม็ดดินที่อยู่ในช่องเปิดเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มการขัดกันของเม็ดดิน (Interlock) บริเวณผิวของตาข่ายเสริมกำลังดิน ดังนั้นเมื่อตาข่ายเสริมกำลังดินมีข้อต่อที่แข็งแรงสามารถรัดเม็ดดินในช่องเปิดได้ดีมากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวเพิ่มขึ้นตาม นอกจากนี้แนวโน้มที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13(ค) แสดงให้เห็นว่าขนาดของเม็ดดินที่เหมาะสมกับขนาดของช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวเนื่องจากเม็ดดินที่มีขนาดเหมาะสมจะสามารถเรียงตัวและรอดผ่านช่องเปิดของของตาข่ายเสริมกำลังดินได้ดี และไม่หลุดออกจากการรัดของแถบตาข่ายทำให้การขัดกันบริเวณผิวของตาข่ายเสริมกำลังสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 งานวิจัยที่สนับสนุนการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินเสริมกำลังดิน

งานวิจัยที่ศึกษาถึงการใช้ RSS หรือผลิตภัณฑ์จากยางพารามาแทนที่พลาสติกในการสร้างตาข่ายเสริมกำลังดิน และทดสอบการใช้งาน โดยการนตาข่ายเสริมกำลังดินไปเสริมกำลังในดินและทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้แก่ Effect of ribbed smoked sheet on CBR strength of lateritic soil (Arwaedo et al., 2020)

งานวิจัย Effect of ribbed smoked sheet on CBR strength of lateritic soil

การทดสอบนี้ถูกเสนอโดย Arwaedo และคณะ (2020) โดยได้ทำการผลิตตาข่ายเสริมกำลังดิน ที่สร้างจากวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติคือ RSS ชนิดที่ 3 ขึ้นมาแล้วเรียกตาข่ายเสริมกำลังดิน จากวัสดุทดแทนนี้ว่า “RSS-geogrid” ซึ่ง RSS-geogrid จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 โดยจะมีขนาดช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20 x 20 มิลลิเมตรและช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน 20 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งในการศึกษานี้จะนำ RSS-geogrid ไปเสริมกำลังในดินลูกรัง 2 ชนิดที่มีค่า CBR แต่เดิมที่แตกต่างกันโดยดินลูกรังชนิดแรกมีค่า CBR สูงและดินตัวที่สองมีค่า CBR โดยตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิดจะถูกแบบเป็น 2 เงื่อนไขการทดสอบ (1) แบบไม่มีการเสริมกำลัง และ (2) แบบเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ตัวอย่างในทั้ง 2 เงื่อนไขจะถูกนำไปบดอัดแบบโมดิฟายด์และเข้าสู่การทดสอบ CBR ซึ่งในเงื่อนไขที่มีการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จะทำการติดตั้ง RSS-geogrid อยู่ระหว่างชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ของการบดอัดในโมลซึ่งภาพตัดของการติดตั้ง RSS-geogrid เป็นไปตามรูปที่ 2.21 หลังจากทดสอบและเก็บข้อมูลทั้งหมดค่า CBR ของตัวอย่างในแต่ละชนิดดินและแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำมาเปรียบเทียบและถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

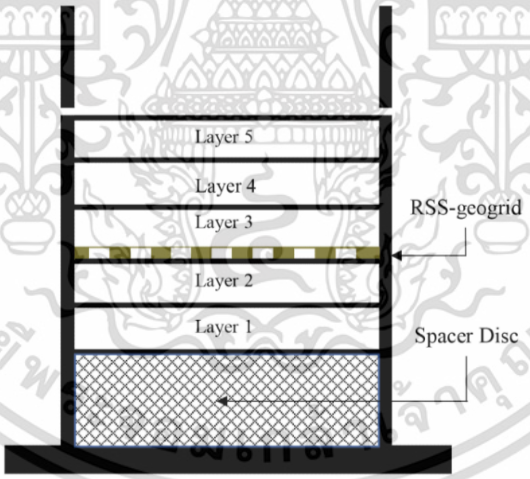
ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบ CBR ของตัวอย่าง E1, E2, E1-RSS และ E2-RSS (Arwaedo, 2020)

Soil Types	Conditions		CBR [%]	Percentage Difference [%]
E1	Non-reinforced	(E1)	64.53	-0.34
	Reinforced 1 layer	(E1-RSS)	64.31	(Decreased)
E2	Non-reinforced	(E2)	40.56	+23.15
	Reinforced 1 layer	(E2-RSS)	49.95	(Increased)

จากผลการทดสอบ Arwaedo และคณะได้รายงานว่าตาข่ายเสริมกำลังดินวามารถใช้เสริมกำลังเพื่อเพิ่มค่า CBR ของดินที่มีค่า CBR ต่ำได้ แต่ในกรณีที่ดินมีค่า CBR แต่เดิมสูงอยู่แล้วการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจะไปลดค่า CBR ของดินลง ดังนั้นคุณสมบัติของดินจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการบอกถึงความเหมาะสมว่าควรใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินในการเสริมกำลังหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 วัสดุเสริมแรง RSS-geogrid สำหรับการทดสอบ CBR (Arwaedo et al., 2020)



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งการวาง RSS-geogrid ขณะบดอัดในเงื่อนไขที่มีการเสริมกำลัง (Arwaedo et al., 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 งานวิจัยที่มีการนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวมาใช้

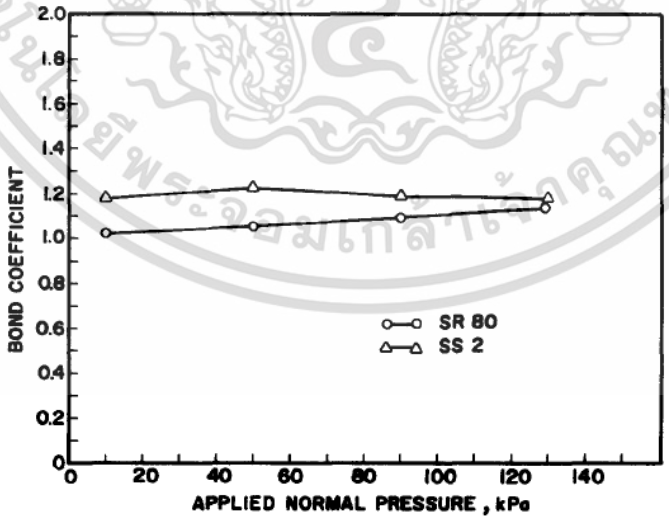
งานวิจัยที่ศึกษาถึงผลจากการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินชนิดต่างๆ มาเสริมกำลังดิน โดยมีคุณสมบัติหลักที่ศึกษาเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน และค่าแรงยึดเกาะระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบและแสดง จึงนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวมาใช้ ได้แก่ Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements (Bergado et al., 1993)

งานวิจัย Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements

การทดสอบนี้ถูกเสนอโดย Bergado และคณะ (1993) โดยได้ทำการนำตาข่ายเสริมกำลังดินชนิดต่างๆ มาติดตั้งในดินทรายและดินเหนียวเพื่อศึกษาถึงพฤติกกรรม กำลังรับแรงเฉือน และค่าแรงยึดเกาะระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวเป็นตัวเปรียบเทียบ ในการศึกษานี้ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวเป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$\text{Interface shear strength coefficient} = \frac{\text{resistance between soil and reinforcement}}{\text{resistance between soil and soil}} \qquad (2.5)$$

จากการศึกษา Bergado ได้ผลว่าตาข่ายเสริมกำลังดินชนิด Tensar SR 80 มีค่าสัมประสิทธิ์การยิดเกาะสูงที่สุด โดยที่ความเค้นตั้งฉาก 130 kPa ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของตาข่ายเสริมกำลังดินชนิด Tensar SR 80 มีค่าเท่ากับ 1.2 และตามมาด้วยตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินชนิด Tensar SS 5 มีค่าเท่ากับ 1.1



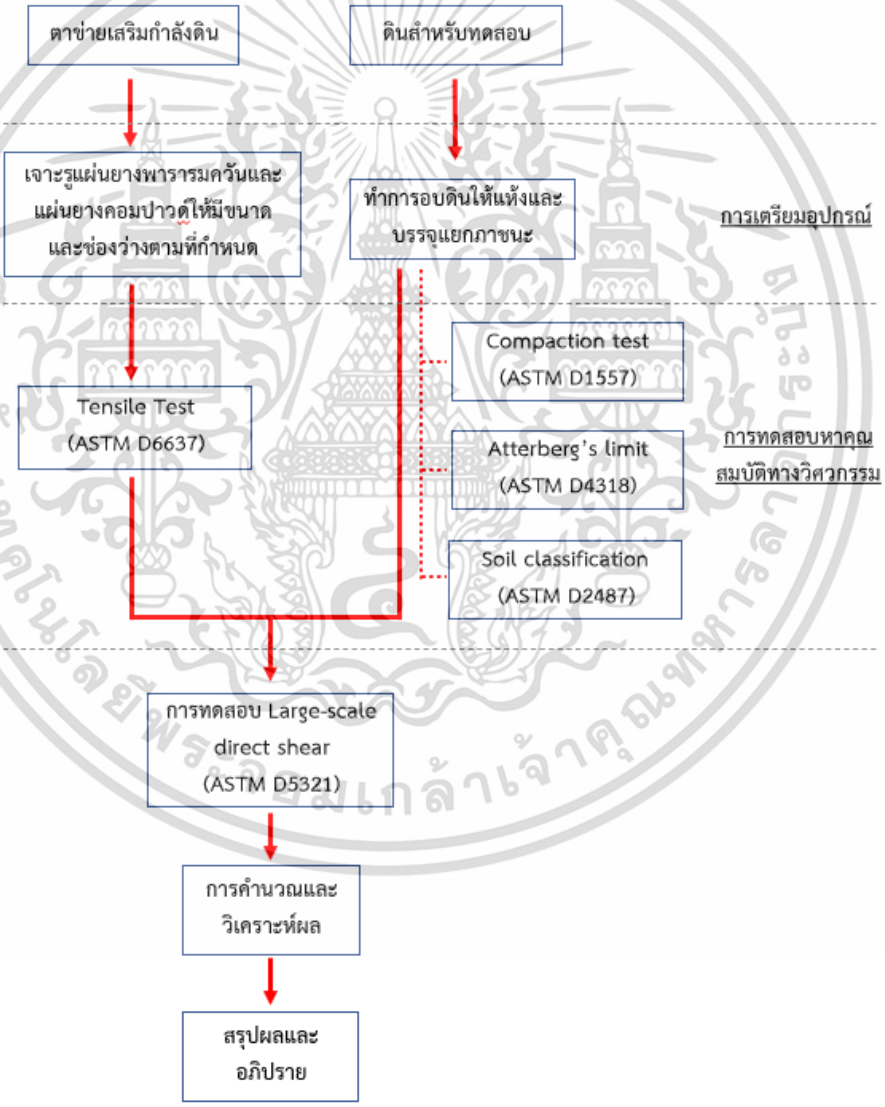
รูปที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของตาข่ายเสริมกำลังดินกับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยโดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมวัสดุทดสอบได้แก่การเตรียมดินตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินลูกรัง และ ดินทราย การเตรียมตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควันและแผ่นยางคอมปาวด์สำหรับเสริมกำลัง การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยในแต่ละการทดสอบได้อ้างอิงวิธีการและข้อกำหนดต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM ของแต่ละการทดสอบ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัยและมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เงื่อนไขการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ และเพื่อศึกษาค่า R_{in} ที่เกิดขึ้นระหว่างดินเหนียว ดินทราย และดินลูกรังกับตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิด โดยการเปลี่ยนเทียบสัมประสิทธิ์กำรับแรงเฉือนที่ผิวของดินทั้ง 3 ชนิดในกรณีไม่มีการเสริมกำลังและกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 ชนิดซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังนี้

1. Sand UR หมายถึง ดินทรายไม่เสริมกำลัง (ดินทรายเปล่า)
2. Sand RSS หมายถึง ดินทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน
3. Sand RCS หมายถึง ดินทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์
4. Lat UR หมายถึง ดินลูกรังไม่เสริมกำลัง (ดินลูกรังเปล่า)
5. Lat RSS หมายถึง ดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน
6. Lat RCS หมายถึง ดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์
7. Clay UR หมายถึง ดินเหนียวไม่เสริมกำลัง (ดินเหนียวเปล่า)
8. Clay RSS หมายถึง ดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน
9. Clay RCS หมายถึง ดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบ

ชนิดของดิน	**วัสดุที่ใช้เสริมกำลังดิน**	**ความเค้นตั้งฉาก (t/m^2)**		
		3.06	**6.12**	**12.24**
ดินทราย	Non-geogrid reinforced	Sand UR 3.06	Sand UR 6.12	Sand UR 12.24
(Sand)	RSS geogrid	Sand RSS 3.06	Sand RSS 6.12	Sand RSS 12.24
	RCS geogrid	Sand RCS 3.06	Sand RCS 6.12	Sand RCS 12.24
ดินลูกรัง	Non-geogrid reinforced	Lat UR 3.06	Lat UR 6.12	Lat UR 12.24
(Lateritic soil)	RSS geogrid	Lat RSS 3.06	Lat RSS 6.12	Lat RSS 12.24
	RCS geogrid	Lat RCS 3.06	Lat RCS 6.12	Lat RCS 12.24
ดินเหนียว	Non-geogrid reinforced	Clay UR 3.06	Clay UR 6.12	Clay UR 12.24
(Clay)	RSS geogrid	Clay RSS 3.06	Clay RSS 6.12	Clay RSS 12.24
	RCS geogrid	Clay RCS 3.06	Clay RCS 6.12	Clay RCS 12.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินที่ใช้ทั้ง 3 ชนิดเป็นตัวแทนของดินเม็ดหยาบ (ดินทราย), ดินเม็ดละเอียด (ดินเหนียว) และ ดินที่ขนาดเม็ดดินมีการคละกัน (ดินลูกรัง) ในการศึกษานี้ผู้วิจัยเลือกพิจารณาใช้ความเค้นตั้งฉากที่ 0.5 เท่า, 1 เท่า, และ 2 เท่า เท่ากับ 3.06, 6.12, และ 12.24 t/m^2 มีที่มาจาก การพิจารณาดินที่อยู่ที่ความลึก 1.4 เมตรซึ่งเป็นความสูงของถนนในประเทศไทยรวมชั้นดินเดิม และโดยทั่วไปความหนาแน่นสูงสุดของดินอยู่ที่ประมาณ 2.6 t/m^2 (The constructor building ideas, 2020) และน้ำหนักกดทับจากรถยนต์ส่วนบุคคลไม่เกิน 2.2 t/m^2 (ระเบียบกรมการขนส่งทางบก พ.ศ.2558)

3.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

ในขั้นต้นก่อนเริ่มการทดสอบจำเป็นจะต้องมีการเตรียมวัสดุที่จะใช้ในการทดสอบให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมและพร้อมต่อการทดสอบต่าง ๆ ทั้ง การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน 2 ชนิดได้แก่ ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ และการเตรียมดินสำหรับทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ ดินทราย ดินลูกรังและดินเหนียว โดยการเตรียมวัสดุแต่ละชนิดมีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมดินสำหรับทดสอบ

ดินที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ ดินเหนียว ดินทราย และดินลูกรัง โดยมีรายละเอียดในการเตรียมดินแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

1. ดินเหนียว

ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นดินเหนียวธรมชาติที่เก็บมาจากบริเวณพื้นที่ก่อสร้างลานบินฝั่งตะวันออกของสนามบินสุวรรณภูมิ โดยเป็นดินที่ความลึก 3-5 เมตร ถูกนำขึ้นมาโดยการขุดในขั้นตอนการปรับสภาพพื้นที่ ซึ่งดินเหนียวทั้งหมดถูกควบคุมให้มาจากบริเวณที่ใกล้เคียงกันในพื้นที่ก่อสร้างโดยต้องมีระยะห่างของการเก็บดินเหนียวสำหรับทดสอบไม่เกิน 10 เมตรเพื่อควบคุมให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน

หลังจากเก็บดินเหนียวจากแหล่งดิน ดินเหนียวสำหรับทดสอบจะถูกเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ป้องกันการปนเปื้อนจากสารเคมีภาพนอกที่อาจส่งผลต่อคุณสมบัติของดิน ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการอบให้ดินเหนียวอยู่ในสภาพดินแห้งด้วยวิธีการให้ความร้อนโดยเครื่องอบ โดยจะทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และตรวจสอบว่าน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้มั่นใจว่าความชื้นออกจากดินทั้งหมด จากนั้นนำดินแห้งที่ได้มาทำการบดให้ละเอียดเป็นผงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.15 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ดินเหนียวสำหรับการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 ดินเหนียวแห้งหลังจากการอบและบด (ก่อนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100)

ดินเหนียวแห้งที่ผ่านการบดเป็นผงแล้วจะถูกเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ป้องกันการเข้าออกของอากาศเพื่อป้องกันการความชื้นในอากาศผสมเข้ากับดินส่งผลให้การทดสอบเกี่ยวกับปริมาณน้ำเกิดความผิดพลาด ดินเหนียวที่ผ่านการบดแล้ว ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 การเก็บดินเหนียวแห้งที่ผ่านการบดเพื่อรอนำไปทดสอบ (หลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ดินทราย

ดินทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำที่ขุดจากแหล่งขุดบริเวณใกล้แม่น้ำลพบุรี ดินทรายที่ใช้ทั้งหมดมาจากแหล่งขุดเดียวกัน และมีการจัดซื้อจัดส่งดินทรายสำหรับทดสอบเพียงรอบเดียวเท่านั้นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่าง ๆ การเก็บดินทรายในสภาพที่ไม่มีการปนเปื้อนจากสารเคมีภายนอกและไม่ได้รับการกระทบกระเทือนที่รุนแรงจนอาจทำให้เม็ดดินบางส่วนมีขนาดเล็กลง ดินทรายสำหรับการทดสอบจะถูกนำมาทำให้แห้งด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยดินทรายที่ผ่านการทำให้แห้งแล้วจะถูกเก็บใส่ภาชนะปิดที่ป้องกันความชื้นได้เพื่อรอการนำไปใช้สำหรับการทดสอบต่อไป ดินทรายสำหรับการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4

(ก) (ข)

รูปที่ 3.4 ดินทราย: (ก) ดินทรายในสภาพเดิม; (ข) ดินทรายที่อบแล้วเก็บในภาชนะ

3. ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษามีแหล่งที่มาจากพื้นที่ขุดดินลูกรังสำหรับส่งขายในงานก่อสร้างของบริษัท KG จังหวัดสระบุรี โดยดินลูกรังทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาถูกจัดส่งจากแหล่งขุดเดียวกับและรอบการขนส่งเดียวกัน เพื่อควบคุมให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในดินลูกรังเดิมนั้นมีลักษณะที่ประกอบด้วยมวลรวมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 19 มิลลิเมตร (ค้างตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว) เป็นจำนวนมากจึงต้องทำการแยกมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 19 มิลลิเมตรออกจากมวลรวมทั้งหมดก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้แห้ง หลังจากการแยกมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 19 มิลลิเมตรออกแล้ว ดินลูกรังถูกทำให้แห้งโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงการทำการเก็บดินลูกรังแห้งไว้ในภาชนะปิดป้องกันความชื้นเพื่อรอทำการทดสอบต่อไป ดินลูกรังสำหรับทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.5 ดินลูกรัง: (ก) สภาพดินลูกรังเดิม; (ข) ดินลูกรังที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว และอบแห้งแล้ว

3.2.1 การเตรียมตาข่ายเสริมกำลังดิน

ตาข่ายเสริมกำลังดินที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพาราคอมปาวด์ แผ่นยางพารารมควันที่ใช้เป็นแผ่นยางพารารมควันสำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงานผลิตแผ่นยาง และแผ่นยางคอมปาวด์ได้มากจากการนำแผ่นยางพารารมควันข้างต้นมาผสมสารชนิดต่างๆ โดยมีผู้ผสมเป็นสถาบันภายนอกที่มีเทคโนโลยีในการผลิตยางคอมปาวด์ แผ่นยางทั้ง 2 ชนิดก่อนการแปรรูปเป็นตาข่ายเสริมกำลังดินมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 โดยตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 ชนิดมีขั้นตอนการผลิตที่เหมือนกันคือ นำแผ่นยางทั้ง 2 ชนิดมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมและเจาะช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม ให้มีขนาดและระยะห่างตามที่กำหนด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ตาข่ายเสริมกำลังดิน 1 แผ่นมีขนาด 300 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร

2. ช่องเปิดมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร

3. ช่องเปิดแต่ละช่องจะห่างกัน 20 มิลลิเมตร ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน

4. ตาข่ายเสริมกำลังดินขนาด 300 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร 1 แผ่นประกอบไปด้วยช่องเปิดจำนวน 49 ช่อง

5. ความหนาของตาข่ายเสริมต้องอยู่ในช่วง 2.5 – 3.0 มิลลิเมตร

6. สำหรับแผ่นยางพารารมควันต้องเลือกบริเวณที่มีไม่มีรอยยับหรือย่นในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน

7. แผ่นยางคอมปาวด์ที่นำมาใช้เกิดจากการนำแผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 มาผสมกบัสารเคมีต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 เพื่อให้ได้แผ่นยางคอมปาวด์ขนาด 1 ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สูตรยางคอมปาวด์

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr*)
แผ่นยางพารารมควันชนิดที่ 3 (RSS3)	100
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	3
กรดสเตียริก (Stearic acid)	1
ไดเมทิลบิวทิวฟีนิลลีนไดเอมีน (6PPD)	1
แคลเซียมคอบอร์เนต ($CaCO_3$)	50
เขม่าดำ (Carbon black)	50
ซิลิกา (Silica)	5
โพลีเอทิลีน ไกลคอล ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 (PEG4000)	1
น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)	30
กำมะถัน (Sulfur)	2
ไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (CBS)	1.5
Total phr*	**244.5**

*phr (part per hundred of rubber) หมายถึง หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่างๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)

สารผสมแต่ละชนิดที่ใช้ในการสร้างแผ่นยางคอมปาวด์สำหรับสร้างตาข่ายเสริมดินกำลังในการศึกษานี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแผ่นยางพารารมควันดังต่อไปนี้ (สถาบันพลาสติก, 2015)

1. ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาสาหรับการวัลคาไนซ์ การวัลคาไนซ์คือ การที่ยางทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่นำมาทำปฏิกิริยาด้วยนี้จะสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกัน ทำให้ยางมีคุณภาพคงตัวในอุณหภูมิต่าง ๆ มีความยืดหยุ่นได้ดีมากขึ้น ทนความร้อนและแสงแดด

2. ไดเมทิลบิวทิวฟีนิลลีนไดเอมีน เป็นส่วนผสมเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งาน และป้องกันการเสื่อมสภาพของแผ่นยางคอมปาวด์

3. แคลเซียมคาร์บอเนต ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อทำให้ซิลิกาแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของต้นทุน และเพิ่มความง่ายในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เขม่าดำ เป็นสารตัวเติม โดยการกระจายตัวของอนุภาคของเขม่าดำในแผ่นยาง มีผลในการเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

5. ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่มีคุณสมบัติในการเสริมแรงให้แก่ยาง แต่จะมีผลต่อการหน่วงการวัลคาไนซ์ของยางทำให้ต้องใส่ซิลิกาปริมาณน้อยในการเสริมแรงของยาง

6. โพลีเอทิลีน ไกลคอล เป็นสารเคมีตัวเติมที่เพื่อใช้แก้ปัญหาการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงของยางที่เป็นผลมาจากการเติมซิลิกา

7. น้ำมันพาราฟิน มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายน้ำมันพาราฟินนิกแต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง ไขพาราฟินเกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถใช้เป็นสารทาให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไขพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

8. กำมะถัน เป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี

9. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทาให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูง และให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

สารผสม และสารตัวเติมที่ใช้ส่งผลให้คุณสมบัติของแผ่นยางคอมปาวด์แตกต่างไปจากแผ่นยางพารารมควัน โดยคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปได้แก่ แผ่นยางคอมปาวด์มีความแข็งแรงมากขึ้น กำลังรับแรงดึงสูงขึ้น มีความทนทาน และอายุการใช้งานที่สูงขึ้น

(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 แผ่นยางสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน: (ก) แผ่นยางพารารมควัน; (ข) แผ่นยางคอมปาวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข)

รูปที่ 3.7 ตาข่ายเสริมกำลังดิน: (ก) ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควัน; (ข) ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์

โดยในขั้นตอนการเจาะช่องเปิดจะดำเนินการเจาะด้วยอุปกรณ์สำหรับเจาะแผ่นยาง (รูปที่ 3.8) ให้เกิดช่องเปิดขนาด 200 มิลลิเมตร x 200 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่นกดติดใบมีดเพื่อให้ช่องเปิดมีความสมบูรณ์และขนาดเท่ากันทุกช่อง รวมทั้งป้องกันความเสียหายจากการทำช่องเปิดแก่เนื้อยางในบริเวณติดกับช่องเปิดซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของตาข่ายเสริมกำลังดิน

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์สำหรับเจาะรูช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบหาคุณสมบัติของดินทำเพื่อจุดประสงค์หลัก 2 ประการได้แก่ การทดสอบหาคุณสมบัติเพื่อจำแนกชนิดของดิน และการทดสอบการบดอัดเพื่อความความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content) การทดสอบมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด

ชนิดของดิน	การจำแนกชนิดของดิน (ASTM D2487)		การทดสอบหาพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (ASTM D4318)	การทดสอบการบดอัดแบบปรับปรุง (ASTM D1557)
	การหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (ASTM D6913)	การหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (ASTM D7928)		
ดินเหนียว	✓	✓	✓	✓
ดินลูกรัง	✓	-	-	✓
ดินทราย	✓	-	-	✓

3.3.1 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis)

การทดสอบการหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงสำหรับดินดินทรายและดินลูกรังจะทำการร่อนทดสอบแบบแห้งตามมาตรฐาน ASTM D6913 โดยใช้ตะแกรง 7 ขนาดได้แก่ ตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ตะแกรงเบอร์ 4 ตะแกรงเบอร์ 10 ตะแกรงเบอร์ 20 ตะแกรงเบอร์ 40 ตะแกรงเบอร์ 100 และตะแกรงเบอร์ 200 และถาดรอง ตามลำดับ ร่อนด้วยเครื่องเขย่า โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. เตรียมดินสำหรับทดสอบ 2000 กรัม โดยเลือกจากหลาย ๆ ส่วนจากภาชนะที่บรรจุ

2. ชั่งน้ำหนักตะแกรงแต่ละขนาดแล้วจดบันทึก

3. ประกอบตะแกรงแต่ละขนาดเข้าด้วยกัน โดยตะแกรงขนาด 3/8 นิ้วซึ่งมีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่สุดจะถูกวางอยู่ด้านบนสุดตามด้วยตะแกรงที่มีขนาดเล็กลองลงมาได้แก่ตะแกรงเบอร์ 4 ตะแกรงเบอร์ 10 ตะแกรงเบอร์ 20 ตะแกรงเบอร์ 40 ตะแกรงเบอร์ 100 และ ตะแกรงเบอร์ 200 ที่มีถาดรองอยู่ด้านล่าง ตามลำดับ

4. นำดินสำหรับทดสอบเทใส่ตะแกรงที่ประกอบแล้ว จากนั้นปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำตะแกรงที่ภายในมีดินที่ค้างอยู่แต่ละขนาดไปชั่งน้ำหนัก

6. ทำความสะอาดตะแกรงด้วยแปรงให้เรียบร้อยไม่ให้มีดินตกค้าง

7. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 ซ้ำสามครั้งในดินแต่ละชนิดเพื่อหาค่าเฉลี่ย

นอกจากการทดสอบการร่อนด้วยตะแกรงแบบแห้ง จำเป็นต้องมีการทดสอบแบบล้างน้ำสำหรับดินเหนียวที่มีเม็ดดินขนาดเล็ก เพื่อหาอัตราส่วนของขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 200) โดยการทดสอบร่อนผ่านตะอกรงแบบล้างน้ำมีขั้นตอนดังนี้

1. นำดินเหนียวสำหรับทดสอบ 500 กรัมใส่ตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปล้าง โดยการเปิดน้ำให้ไหลจากด้านบนของ ตะแกรง ซึ่งจะทำให้ดินเม็ดเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับดินก้อนใหญ่ไหลผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ออกไปจนกระทั่งไม่มีดินไหลออกจากตะแกรงแล้ว จึงหยุดล้าง

2. นำตัวอย่างดินที่ยังเหลือค้างอยู่บนตะแกรงไปใส่ภาชนะ แล้วนำไปเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียล โดยใช้เวลาในการอบ 24 ชั่วโมง

3. ทำการชั่งน้ำหนักดินที่อบแห้งแล้วเพื่อหาน้ำหนักดินที่เหลือจากการล้าง

4. ทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 ซ้ำ 3 ตัวอย่าง

การทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้างน้ำของดินเหนียวนั้น ผลที่ได้บ่งบอกถึงอัตราส่วนของเม็ดดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรเท่านั้น ไม่สามารถบอกได้ว่าเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าที่กล่าวมีขนาดใดบ้างและแต่ละขนาดมีอัตราส่วนเท่าไร ตะแกรงสำหรับทดสอบ และเครื่องเขย่า ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 ตะแกรงที่ใช้สำหรับการทดสอบร่อนผ่านตะแกรงพร้อมเครื่องเขย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยไฮโดรมิเตอร์

การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยไฮโดรมิเตอร์จะอ้างอิงขั้นตอนการทดสอบจากมาตรฐาน ASTM D7928 โดยในการศึกษานี้จะทำการทดสอบกับตัวอย่างดิน 2 ชนิดได้แก่ ดินเหนียวและดินลูกรังลักษณะภายนอกเป็นที่ชัดเจนว่ามีมีอัตราส่วนของดินเม็ดละเอียดอยู่มากโดยเฉพาะดินเหนียว จึงต้องทำการทดสอบการทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยไฮโดรมิเตอร์เพิ่มสำหรับดินเหนียวและดินเม็ดละเอียดของดินลูกรังเพื่อให้ได้กราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรของทั้งดินเหนียวและดินลูกรัง โดยการทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยไฮโดรมิเตอร์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารช่วยกระจายตัว (dispersing Agent) ความเข้มข้น 4% โดยนำผง SodiumHexa - Metaphosphate มาละลายในน้ำในอัตราส่วนสาร 4 กรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง

2. สอบเทียบความถูกต้องอุปกรณ์ไฮโดรมิเตอร์สำหรับการทดสอบให้เรียบร้อย

3. เตรียมดินสำหรับทดสอบประมาณ 200 กรัมโดยเป็นดินที่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

4. ใช้เครื่องปั่นดินผสมตัวอย่างดินแห้งที่เตรียมไว้ 50 กรัม เข้ากับ สารช่วยกระจายตัว โดยปั่นเป็นเวลาประมาณ 10 นาที แล้วเทลงในกระบอกตกตะกอน ใช้น้ำกลั่นฉีดดินออกจากเครื่องผสมให้หมดแล้วเติมน้ำจนมีปริมาตร 1000 ลบ.ซม.

5. ใส่น้ำลงในกระบอกตกตะกอนอีกอันหนึ่ง เพื่อใช้ล้างน้ำโคลนที่ติดไฮโดรมิเตอร์มาหลังจากการวัด และใช้แช่ไฮโดรมิเตอร์ในระหว่างที่ไม่ใช้วัด

6. ใช้จุกยางปิดปากกระบอกตกตะกอนที่มีส่วนผสมดิน แล้วเขย่ากระบอกเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 1 นาที จากนั้นวางลงแล้วเริ่มจับเวลาทันที

7. หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในน้ำโคลนเพื่ออ่านค่า R ที่เวลา 15 วินาที 30 วินาที 1 นาที 2 นาที ตามลำดับโดยไม่มีการยกไฮโดรมิเตอร์ออกขณะที่อ่านค่าตามเวลาดังกล่าว เมื่ออ่านค่าเวลาครบแล้วจึงยกไฮโดรมิเตอร์ออกแล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำโคลน

8. เขย่ากระบอกอีกครั้งตามขั้นตอนที่ 4 แล้ววัดค่า R ที่ 2 , 5 , 10 , 20 , ... นาที โดยจะทำการเพิ่มระยะเวลาอ่านครั้งต่อไปประมาณ 2 เท่าจากช่วงเดิม จนกระทั้งค่าที่อ่านได้คงที่โดยประมาณจึงหยุดการทดลอง โดยทุกครั้งที่อ่านค่า R ต้องทำการวัดอุณหภูมิของน้ำโคลนควบคู่ไปด้วย หลังจากเสร็จการอ่านค่าแต่ละครั้งให้ยกไฮโดรมิเตอร์ออกไปจแช่ไว้ในกระบอกน้ำเปล่าที่เตรียมไว้และปิดปากกระบอกน้ำโคลนด้วยจุกยาง

9. หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วให้เขย่ากระบอก เทน้ำโคลนออกจากกระบอกใส่ภาชนะ โดยต้องล้างดินที่ก้นกระบอกออกให้หมด แล้วนำไปอบเพื่อหาน้ำหนักของดินแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการทดสอบตั้วแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 9 พร้อมกันสามตัวอย่าง

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบไฮโดรมิเตอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 การทดสอบไฮโดรมิเตอร์

3.3.3 การทดสอบหาพิกัดอัตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limits test)

การทดสอบหาพิกัดอัตเตอร์เบอร์กจะถูฏดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318 โดยเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสถานะของดินโดยในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบหา พิกัด 2 อย่างได้แก่ พิกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) ซึ่งบ่งบอกถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง และ พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเป็นพลาสติก (มีความเหนียวหนืดมากขึ้น) โดยการทดสอบพิกัดทั้ง 2 ชนิดจะถูกทดสอบในดินเหนียวและเม็ดดินละเอียดของดินลูกรัง โดยการทดสอบหาพิกัดเหลว มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อปนี้

1. เตรียมดินสำหรับทดสอบโดยการร่อนผงดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 100 กรัม

2. สอบเทียบความถูกต้องเครื่องทดสอบหาพิกัดเหลวให้มีความสูงการตกกระทบที่ถูกต้อง (1 ± 0.2 เซนติเมตร)

3. นำดินที่เตรียมไว้ใส่ในภาชนะเคลือบแล้วใส่น้ำในปริมาณที่ไม่ทำให้ดินเหนียวหรือเหลวจนเกินไปแล้วผสมให้เข้ากัน

4. ใช้มีดปาดดิน (Spatula) ตักดินใส่ลงในจาน แล้วปาดให้เรียบ โดยให้มีความหนาของดินตรงกลางประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วทำการบากดินในจาน ด้วย Grooving Tool ให้เป็นร่องในครั้งเดียวจนเห็นพื้นรองจานและรอยร่องนี้จะแบ่งดินออกเป็น 2 ข้างเท่า ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการหมุนให้จานตกกระทบกับพื้นรองในทันที ซึ่งใช้ความเร็วในการหมุนประมาณ 2 ครั้ง ต่อ 1 วินาที ทำการหมุนจนกระทั้งดินที่บากไว้ไหลเข้ามาชนกันเป็นระยะทางยาว 1/2 นิ้ว (12.7 มิลิเมตร) แล้วบันทึกจำนวนครั้งที่เคาะแล้วเก็บตัวอย่างดินในจานตกกระทบไปทำการอบเพื่อหาปริมาณน้ำ

6. ทำการเติมน้ำเพิ่มแล้วทำขั้นตอนที่ 4 ถึง 5 ซ้ำห้าครั้งโดยแต่ละครั้งควรได้จำนวนครั้งการเคาะในช่างต่อไปนี้

ครั้งที่ 1 ประมาณ 40 - 50 ครั้ง

ครั้งที่ 2 ประมาณ 30 - 40 ครั้ง

ครั้งที่ 3 ประมาณ 20 - 30 ครั้ง

ครั้งที่ 4 ประมาณ 10 – 20 ครั้ง

ครั้งที่ 5 ประมาณ 10 – 20 ครั้ง

โดยจะนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงเพื่อหาปริมาณน้ำที่จำนวนการเคาะ 25 ครั้งซึ่งเป็นจุดที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดพิกัดความเหลวตามมาตรฐาน ASTM D4318

7. ทำการทดสอบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 ซ้ำสามครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ

นอกจากค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวและเม็ดดินละเอียดของดินลูกรังแล้ว เพื่อจะระบุชนิดของดินเหนียวและเพื่อระบุชนิดดินที่ชัดเจนของดินลูกรัง จำเป็นจะต้องทำการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกเพิ่ม โดยขั้นตอนการทดสอบหาพิกัดพลาสติกของดินเหนียวและเม็ดดินละเอียดของดินลูกรังมีดังต่อไปนี้

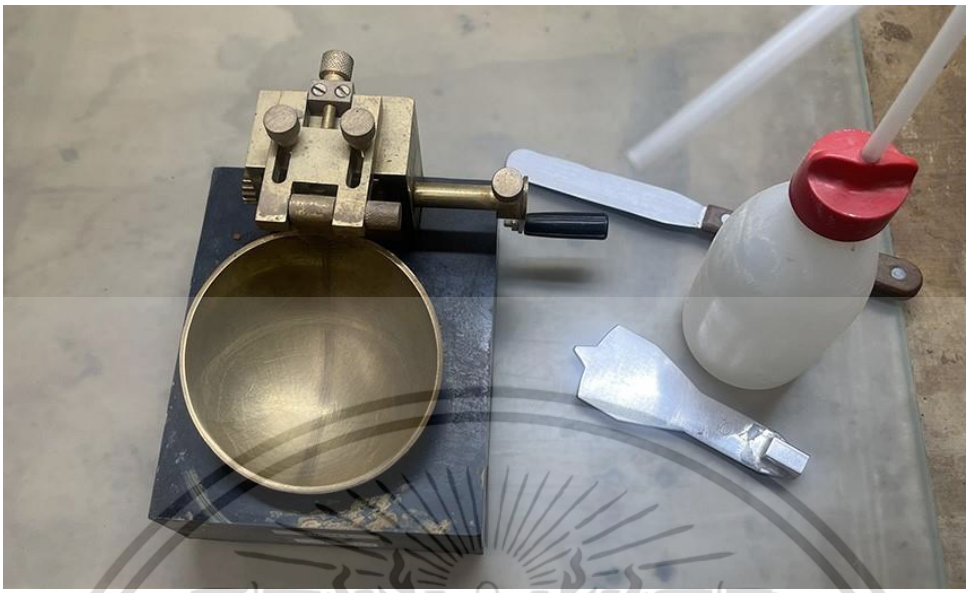
1. นำดินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาพิกัดพลาสติกซึ่งร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาประมาณ 20 กรัม ผสมกับน้ำให้เข้ากัน พยายามให้หมาดที่สุด แล้วปั้นเป็นก้อนกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร

2. นำไปคลึงบนแผ่นกระจกจนกระทั้งก้อนดินกลายเป็นเส้นกลมยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว (3.2 มิลิเมตร) แล้วให้เกิดรอยแตกเล็ก ๆ ทั่วไป จึงจะนำตัวอย่างที่ได้อบเพื่อหาปริมาณน้ำ

3. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำสามครั้งเพื่อให้ค่าพิกัดพลาสติกที่แม่นยำ

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาพิกัดเหลว และพิกัดพลาสติก เป็นไปตามรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาพิกัดพลาสติกและพิกัดเหลว

3.3.4 การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modify compaction test)

การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานจะถูกดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1557 โดยจะทำการทดสอบกับดินเหนียว ดินลูกรังและดินทราย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณน้ำที่เหมาะสมหรือปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum moisture content) ของดินทั้งสามชนิด โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำดินสำหรับทดสอบ 5 กิโลกรัมมาทำการผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วนประมาณ 2-3% ของน้ำหนักดินแห้งโดยต้องผสมดินและน้ำให้ทั่วถึง

2. เตรียมโมลสำหรับทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) และค้อนบดอัดขนาด 10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม) และทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวมทั้งความสูงของตัวโมล แล้วบันทึกค่า

3. ทำการประกอบโมลแล้วเทดินที่ผสมกับน้ำแล้วลงในโมลโดยแบ่งเป็นความสูง 5 ชั้นเท่า ๆ กัน ทำการบดอัดที่ละชั้นด้วยจำนวนครั้งการบดอัด 25 ครั้งต่อชั้น

4. หลังจากทำการบดอัดครบ 5 ชั้นทำการถอดฝาบนของโมลออก ปาดผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบแล้วทำการชั่งน้ำหนัก

5. เก็บตัวอย่างดินในโมลไปอบเพื่อหาปริมาณน้ำแท้จริงในดิน และจึงนำดินตัวอย่างออกจากโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทุบดินที่เป็นก้อนหลังนำออกจากโมลให้ละเอียดจากนั้นผสมน้ำเพิ่ม 2-3% ของน้ำหนักดินแห้งแล้วทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 โดยทำการเพิ่มปริมาณน้ำทีละ 2-3% ของน้ำหนักดินแห้งไปเรื่อยๆ จนน้ำหนักของโมลรวมกับดินจะมีค่าลดลง จึงเพิ่มปริมาณน้ำและทำการบดอัดครั้งสุดท้าย

7. ทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่างต่อดิน 1 ชนิดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ

8. ในกรณีของดินทรายและดินลูกรังให้ทำการเปลี่ยนตัวอย่างดินที่ใช้บดอัดทุกครั้งหลังการต่อหนึ่งปริมาณน้ำเพื่อป้องกันผลจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดดินที่แตกหลังได้รับพลังงานจากการบดอัด

การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานเป็นไปตามรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดิน

การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์เพื่อระบุความแตกต่างทางด้านกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 ชนิด ซึ่งอาจเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังและค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวระหว่างตาข่ายเสริมกำลังดินและดินแต่ละชนิด โดยคุณสมบัติที่จะทำการทดสอบได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูงสุด และกำลังรับแรงดึงความเครียด 2% โดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงนั้นจะดำเนินการมาตรฐาน ASTM D6637 ซึ่งสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจะประกอบด้วยการทดสอบแบบ วิธี A วิธี B และ วิธี C โดยในการทดสอบนี้เลือกใช้การทดสอบวิธี A โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. เตรียมตัวอย่างตาข่ายเสริมกำลังดินสำหรับทดสอบโดยให้ตัวอย่างมีลักษณะดังต่อไปนี้

   - ในแนวขวางทิศทางการดึงต้องประกอบด้วยกิ่ง 1 กิ่ง (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13)

   - ในแนวตามทิศทางการดึงต้องประกอบด้วยกิ่ง 3 กิ่ง

   - ทำการเคลือบกิ่งริมนอกทั้ง 2 ด้านตามแนวทิศทางการดึงสำหรับให้เครื่องทดสอบแรงดึงจับ

2. นำตัวอย่างสำหรับทดสอบติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยกำหนดให้เครื่องทดสอบอ่านค่าแรงดึงและความเครียดในแต่ละช่วงเวลา

3. นำค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้มาทำการคำนวณเพื่อให้ได้เป็นกำลังรับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ 3.1 (ASTM D 6637)

$$A_f = [(F_p - T_0)/N_r]\, N_t \qquad (3.1)$$

โดยที่ A_f = แรงต่อหนึ่งหน่วยความยาวรวม (N/m),

F_p = แรงสูงสุดจากการทดสอบ (N),

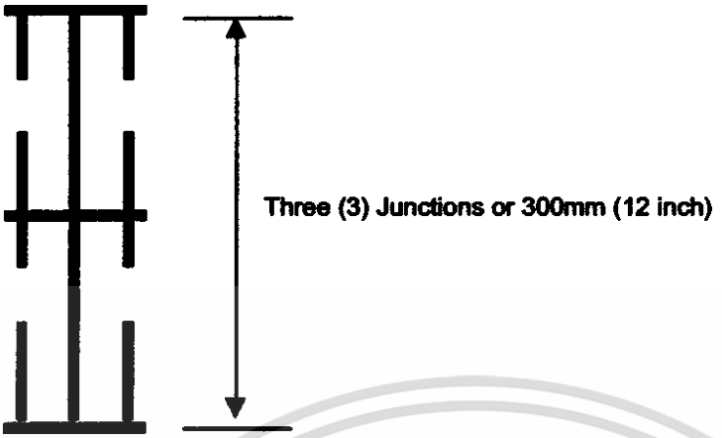
T_0 = ค่าปรับแก้การเลื่อนของตัวอย่าง (N),

N_r = จำนวนของตัวอย่างที่ทดสอบ,

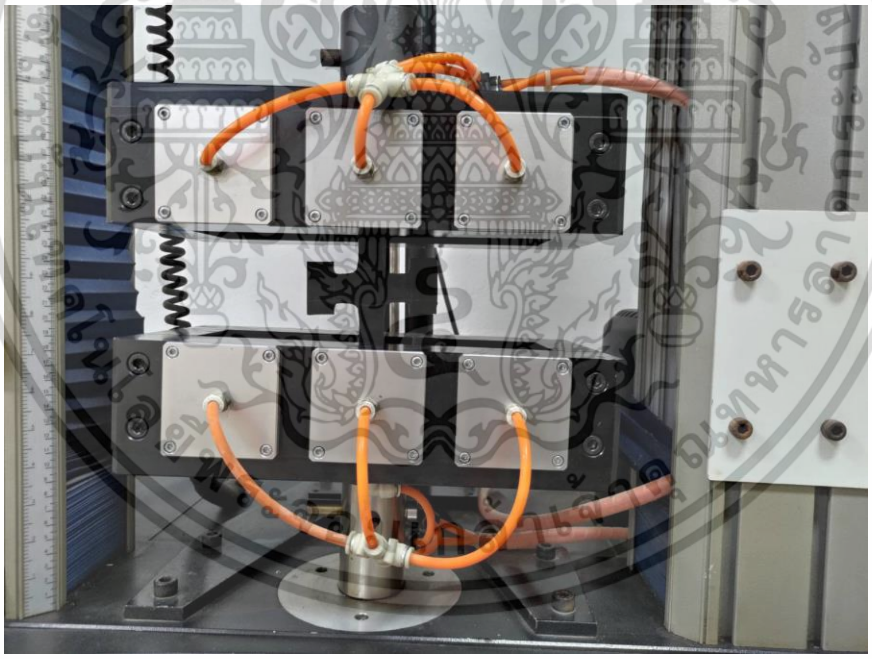
N_t = จำนวนของชิ้นส่วนรับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยความยาว

การทดสอบหากำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารามควันแสดงไว้ดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินแบบ A (ASTM D6637)



รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินวิธี A

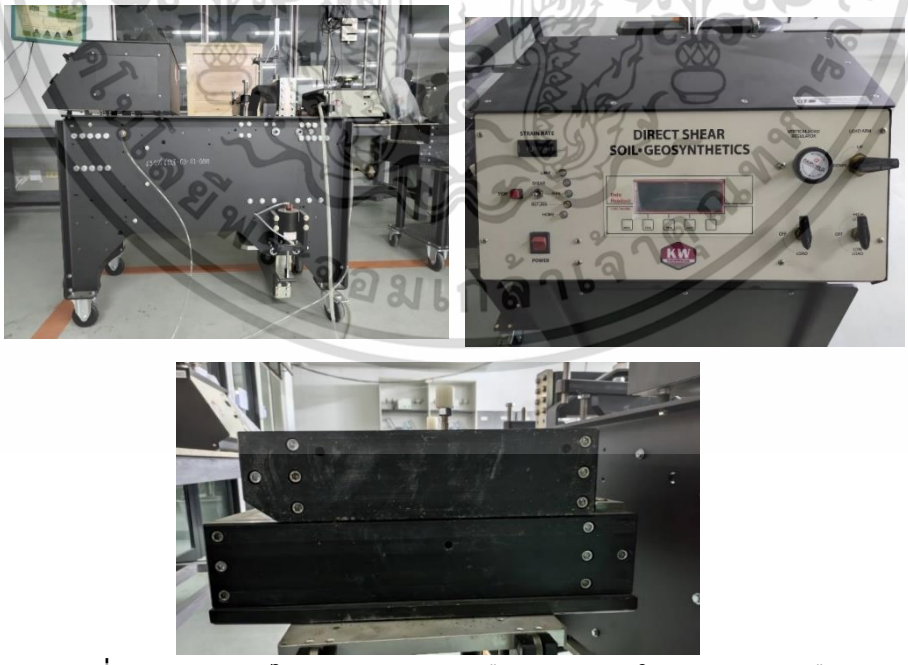
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear)

การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่จะทำการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการ ข้อกำหนดและเงื่อนไขต่างๆ จากมาตรฐาน ASTM D5321 โดยการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างของดินเปล่าที่ไม่เสริมกำลังทั้ง 3 ชนิด และกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์กับดิน 3 ชนิด ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับดินและผิวสัมผัสระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิดจะถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปของอัตราส่วนและแสดงผลในรูปแบบของสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (Interface shear strength coefficient) หรือ R_{in}

3.5.1 เครื่องทดสอบการเฉือนและกล่องเฉือน

เครื่องทดสอบการเฉือนขนาดใหญ่ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ model: 2012-HPF จากบริษัท Karol Warner ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15 กล่องเฉือนที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยกล่องเฉือนส่วนบนและส่วนล่างซึ่งกล่องล่างมีขนาด 405 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตร และกล่องบนมีขนาด 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตร โดยทั้ง 2 กล่องมีความสูง 100 มิลลิเมตรเท่ากัน ซึ่งเมื่อเริ่มทดสอบการเฉือน กล่องเฉือนส่วนบนจะถูกตรึงไว้กับที่ไม่ให้เกิดการขยับหรือเคลื่อนที่ทั้งในแนวดิ่งและแนวระดับ ในขณะที่กล่องเฉือนส่วนล่างจะถูกดันด้วยแม่แรงไฟฟ้าที่สามารถอ่านค่าแรงเฉือน ณ เวลานั้นๆได้ ความเค้นตั้งฉากที่กดทับตัวอย่างมาจากเครื่องปั๊มลมที่จะส่งความดันผ่านหัวกดโลหะลงสู่แผ่นเหล็กขนาด 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตรที่ด้านบนสุดของตัวอย่าง อุปกรณ์การทดสอบการเฉือนตรงขนาดใหญ่เป็นไปตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ในการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่และกล่องเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างการบดอัดดินในกล่องเฉือนและการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

สำหรับการบดอัดในกล่องเฉือนจะดำเนินการโดยใช้ค้อนบดอัดขนาด 10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม) ในการบดอัดดินตัวอย่างในกล่องเฉือนโดยมีการควบคุมให้การบดอัดดินในแต่รอบการทดสอบผู้บดอัดดินเป็นคนเดิมเพื่อรักษาความคงที่ของพลังงานในการบดอัด ตัวอย่างดินบดอัดที่จะทดสอบการเฉือนจะมีขนาดกว้างและยาว 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตร และมีความสูง 100 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างจะอยู่ในกล่องเฉือนส่วนล่างและส่วนบนชั้นละ 50 มิลลิเมตร มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้ โดยขั้นตอนที่งหมดเป็นไปตามรูปที่ 3.19

1. สอบเทียบความถูกต้องอุปกรณ์ (Calibrate) สำหรับอ่านค่าทุกตัวซึ่งประกอบด้วย เครื่องอ่านค่าแรงเฉือนที่ติดกับแม่แรงไฟฟ้าสำหรับการดันกล่องเฉือน อุปกรณ์อ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวรา บของกล่องเฉือน อุปกรณ์อ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างดินบดอัด และอุปกรณ์อ่านค่าความเค้นตั้งฉาก

2. ประกอบกล่องเฉือนส่วนบนและส่วนล่างเข้าด้วยกัน ในกล่องเฉือนส่วนล่างจะติดตั้งแท่งเหล็กที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร และมีความยาว 305 มิลลิเมตร เพื่อลดความยาวเดิมของกล่องเฉือนส่วนล่างจาก 405 มิลลิเมตร เป็น 305 มิลลิเมตร และแผ่นเหล็กที่มีหน้าตัดด้านบน 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตรและมีความสูง 50 มิลลิเมตร เพื่อให้กล่องเฉือนส่วนล่างมีความลึกลดลงจาก 100 มิลลิเมตรเป็น 50 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะมุมมองด้านบนเป็นดังรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.16 กล่องเฉือนสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 305 มิลลิเมตร x 305 มิลลิเมตร

3. เตรียมตัวอย่างดินซึ่งได้มาจากการคำนวณโดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพื่อให้ได้น้ำหนักของดินที่จะใช้เพื่อให้มีประมาตรเท่ากับ 305 x 305 x 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร หลังการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ใช้จะได้รับในขั้นตอนการทดสอบ การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (หัวข้อที่ 3.3.4)

4. นำดินที่เตรียมไว้มาผสมน้ำในอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินแต่ละชนิด โดยผสมให้น้ำกระจายตัวในดินอย่างทั่วถึงแล้วแบ่งตัวอย่างดินที่ผสมน้ำแล้วเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำดินที่เตรียมไว้ใส่ลงในกล่องเฉือนแล้วทำการบดอัดทีละชั้น โดยบดอัดเป็นจำนวน 303 ครั้งต่อชั้น ด้วยค้อนบดอัดขนาด 10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม) (จำนวนครั้งได้มาจากคำนวณให้มีพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2700 kN/m^3) หลังจากทำการบดอัดจนจำนวนครั้งครบแล้วจึงเริ่มทำการใส่ดินเพิ่มและบดอัดในชั้นต่อไป โดยมีการคำนวณจำนวนครั้งดังต่อไปนี้

จากสมการที่ 2.3 Compaction energy = $\frac{NnWh}{v}$

โดยที่ Compaction energy = 2700 kN-m/m^3

n คือ จำนวนชั้นการบดอัด = 4 ชั้น

W คือ น้ำหนักค้อนบดอัด = 0.045 kN

h คือ ความสูงการตกกระทบของค้อน = 0.457 m

v คือ ปริมาตรของโมล = 0.305 x 0.305 x 0.1 mm = 0.0093 mm^3

เมื่อแทนค่าทั้งหมดลงในสมการจะได้จำนวนครั้งการบดอัดต่อชั้น (N) = 303 ครั้ง

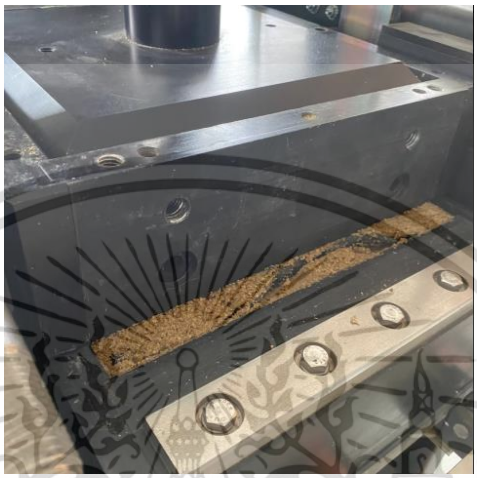
6. ในตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังให้ทำการบดอัดตามขั้นตอน 5 จนครบทั้ง 4 ชั้น แต่สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังให้ทำการวางตาข่ายเสริมกำลังดินด้านบนของชั้นที่ 2 หลังทำการบดอัดชั้นที่ 2 เสร็จโดยให้ทำการปาดและตกแต่งผิวหน้าให้ผิวด้านบนของตาข่ายเสริมกำลังดินอยู่เสมอกับรอยต่อระหว่างกล่องเฉือนส่วนบนและส่วนล่างแล้วจึงทำการบดอัด 2 ชั้นที่เหลือต่อไป การบดอัดในตัดชั้นที่ของกรณีตัวอย่างมีการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน และไม่มีการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน แสดงไว้ดังรูปที่ 3.17

(ก) (ข)

รูปที่ 3.17 การบดอัดดินชั้นที่ 2 ในกล่องเฉือน (ก) มีการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน (ข) ไม่มีการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

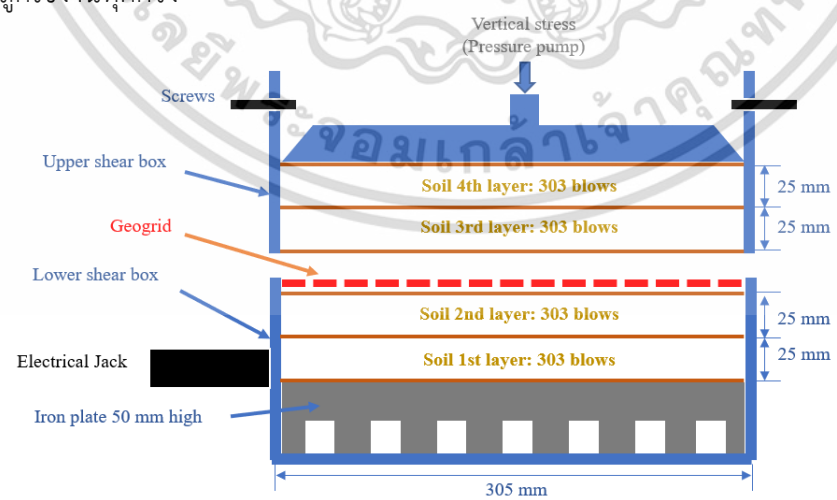
7. หลังจากการบดเสร็จแล้วจึงทำการติดตั้งกล่องเฉือนเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ โดยกำหนดค่าความเค้นตั้งฉากตามเงื่อนไขการทดสอบแต่ละเงื่อนไข และกำหนดให้มีอัตราการเฉือนคงที่ที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งระบุไว้ใน ASTM D5321 หลังจากกำหนดค่าทั้งหมดเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มการทำงานของเครื่องทดสอบการเฉือน โดยลักษณะของการเฉือนแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะของการเฉือนตัวอย่าง

8. เก็บค่าแรงเฉือนอย่างน้อย 50 ค่า โดยจะหยุดการเฉือนเมื่อการมีเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนถึง 50 มิลลิเมตร

9. หลังจากหยุดการเฉือนแล้วให้นำตัวอย่างดินในกล่องเฉือนออกมาแล้วทำการทดสอบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 โดยจะทำการทดสอบซ้ำจนครบทุกเงื่อนไขการทดสอบที่ถูกกำหนดไว้ โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งที่ทดสอบตัวอย่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดินที่ใช้จะต้องถูกเปลี่ยนดินและตาข่ายเสริมกำลังดินใหม่ที่ยังไม่เคยถูกใช้งานทุกครั้ง



รูปที่ 3.19 การเตรียมตัวอย่างและบดอัดในกล่องเฉือน

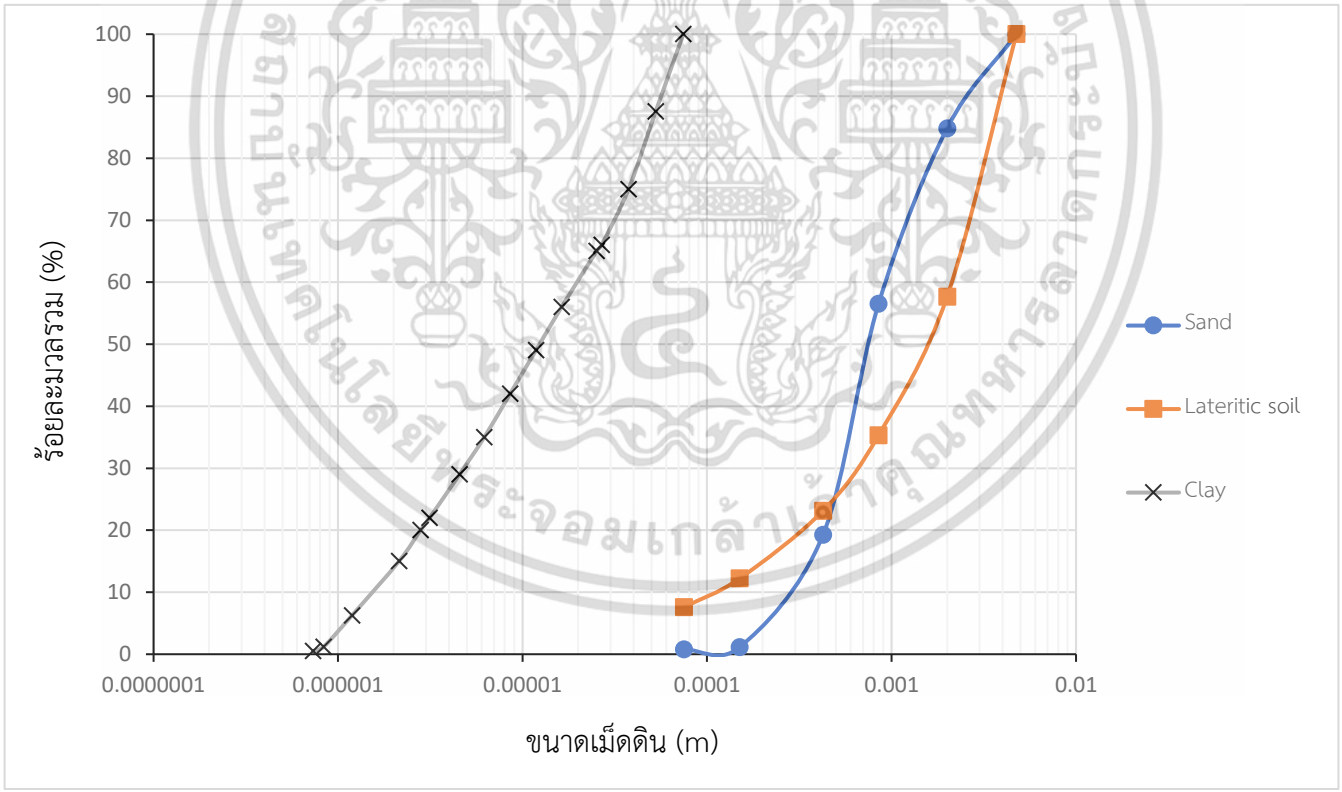
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติดิน

ผลการทดสอบการจำแนกชนิดของดินที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ระบบจำแนกตามมาตรฐานการจำแนกชนิดดินของ ASTM D2487 ร่วมกับคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ใช้ประกอบการจำแนกชนิดของดินได้แก่ ขนาดคละของเม็ดดิน (ASTM D6913 และ ASTM D7928)และพิกัดความข้นเหลวหรือพิกัดของอัตเตอร์เบอร์ก (ASTM D4318) ขนาดคละของเม็ดดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียวจะถูกแสดงในรูปของกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินที่ได้จากการทดสอบการหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงและการหาขนาดคละโดยการทดสอบด้วยไฮโดรมิเตอร์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 รายละเอียดขนาดคละมวลรวมของดินลูกรังแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 พิกัดพลาสติกของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 ค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 รายละเอียดขนาดคละมวลรวมดินทรายแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

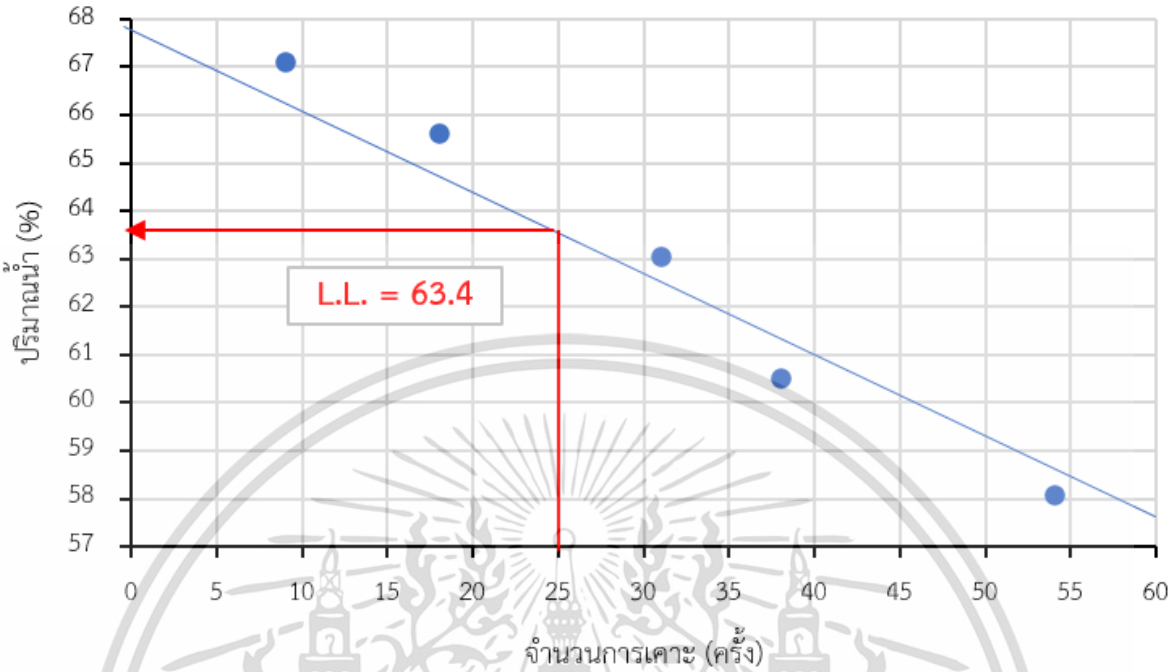
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงของดินลูกรัง

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (mm.)	น้ำหนักตะแกรง (g)	น้ำหนักตะแกรง + ดิน (g)	น้ำหนักดินค้าง (g)	น้ำหนักดินค้างสะสม (g)	ร้อยละน้ำหนักดินค้างสะสม (%)	ร้อยละน้ำหนักดินที่ผ่านสะสม (%)
3/8	9.5	798.61	798.61	0	0	0	100
4	4.75	772.06	773.01	0.95	0.95	0.031642513	99.96835749
10	2	476.24	1,746.22	1269.98	1270.93	42.33201989	57.66798011
20	0.85	393.29	1064.01	670.72	1941.65	64.67230014	35.32769986
40	0.425	366.05	731.54	365.49	2307.14	76.84600755	23.15399245
100	0.15	322.78	650.78	328	2635.14	87.77100147	12.22899853
200	0.075	512.78	651.48	138.7	2773.84	92.39080835	7.60919165
ถาด	-	502.38	730.1	227.72	3001.56	99.97568523	0.024314773

ตารางที่ 4.2 พิกัดเหลวของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง

พิกัดเหลว (L.L.)						
ถ้วยหมายเลข	LL1	LL2	LL3	LL4	LL5	LL6
จำนวนครั้งที่เคาะ	54	38	31	18	9	0
น้ำหนักถ้วย (g)	15.11	15.62	15.05	14.89	15.16	0
น้ำหนักถ้วย + ดิน (g)	21.87	24.14	21.32	27.51	26.42	0
น้ำหนักถ้วย + ดินแห้ง (g)	19.38	20.93	18.9	22.51	21.9	0
ปริมาณน้ำ (g)	2.49	3.21	2.42	5.01	4.52	0
น้ำหนักดินแห้ง (g)	4.27	5.31	3.85	7.61	6.74	0
ปริมาณน้ำ (%)	58.31	60.45	62.86	65.83	67.06	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงพิกัดเหลวของดินละเอียดของดินลูกรัง

ตารางที่ 4.3 พิกัดเหลวของดินเม็ดละเอียดของดินลูกรัง

พิกัดพลาสติก (P.L.)					
ถ้วยหมายเลข	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5
น้ำหนักถ้วย (g)	15.23	14.78	14.66	15.14	15.62
น้ำหนักถ้วย + ดิน (g)	16.51	16.73	16.62	16.92	16.71
น้ำหนักถ้วย + ดินแห้ง (g)	16.16	16.22	16.13	16.43	16.24
ปริมาณน้ำ (g)	0.35	0.51	0.49	0.49	0.29
น้ำหนักดินแห้ง (g)	0.93	1.44	1.47	1.29	0.8
ปริมาณน้ำ (%)	37.63	35.42	33.33	37.98	36.25
ปริมาณน้ำเฉลี่ย (%)	36.12				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินลูกรังที่ใช้มีเม็ดดินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ตะแกรงเบอร์ 4 ตะแกรงเบอร์ 10 ตะแกรงเบอร์ 20 ตะแกรงเบอร์ 40 ตะแกรงเบอร์ 100 ตะแกรงเบอร์ 200 และถาดเท่ากับ 0% 0.03% 42.31% 22.34% 12.18% 10.93% 4.62% และ 7.59% ตามลำดับ ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาจัดเป็น ทรายปนดินเหนียว (Clayey sand, SC) โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ร้อยละ 10 (D10) 30 (D30) และ 60 (D60) มีขนาดเท่ากับ 0.1 0.69 และ 2.05 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่า Uniformity coefficient (C_u) และค่า Coefficient of gradation (C_c) เท่ากับ 20.5 และ 2.32 ตามลำดับ ดินลูกรังมีดินเม็ดละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 40) อยู่ที่ 23.15% ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำนดไว้จึงต้องนำดินเม็ดละเอียดของดินลูกรังไปทดสอบพิกัดของ อัตเตอร์เบอร์ก เพื่อจำแนกชนิดของดินเพิ่มเติม ดินเม็ดละเอียดของดินลูกรังถูกจัดเป็นทรายปนดินเหนียว (Clayey sand; SC) ที่มีค่า พิกัดความเหลว (L.L.) พิกัดพลาสติก (P.L.) และดรรชนีพลาสติก (P.I.) ตามมาตรฐาน ASTM D4318 เท่ากับ 63.4% 36.3% และ 27.1% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงของดินทราย

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (mm.)	น้ำหนักตะแกรง (g)	น้ำหนักตะแกรง + ดิน (g)	น้ำหนักดินค้าง (g)	น้ำหนักดินค้างสะสม (g)	ร้อยละน้ำหนักดินค้างสะสม (%)	ร้อยละน้ำหนักดินที่ผ่านสะสม (%)
3/8	9.5	796	796	0	0	0	100
4	4.75	780	780	0	0	0	100
10	2	474	1091	617	617	15.18582328	84.81417672
20	0.85	382	1533	1151	1768	43.51464435	56.48535565
40	0.425	366	1879	1513	3281	80.75313808	19.24686192
100	0.15	320	1056	736	4017	98.86783165	1.132168349
200	0.075	307	322	15	4032	99.23701698	0.762983017
ถาด	-	502	533	31	4063	100	0

ดินทรายที่ใช้มีเม็ดดินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ตะแกรงเบอร์ 4 ตะแกรงเบอร์ 10 ตะแกรงเบอร์ 20 ตะแกรงเบอร์ 40 ตะแกรงเบอร์ 100 ตะแกรงเบอร์ 200 และถาดเท่ากับ 0% 0% 15.18% 28.33% 37.24% 18.11% 0.37% และ 0.76% ตามลำดับดินทรายถูกจัดเป็นดินทรายขนาดคละแย่ (Poor-grade sand; SP) โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่ร้อยละ 10 (D10) 30 (D30) และ 60 (D60) มีขนาดเท่ากับ 0.29 0.53, และ 0.91 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยมีค่า Uniformity coefficient (C_u) และค่า Coefficient of gradation (C_c) เท่ากับ 3.14 และ 1.06 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

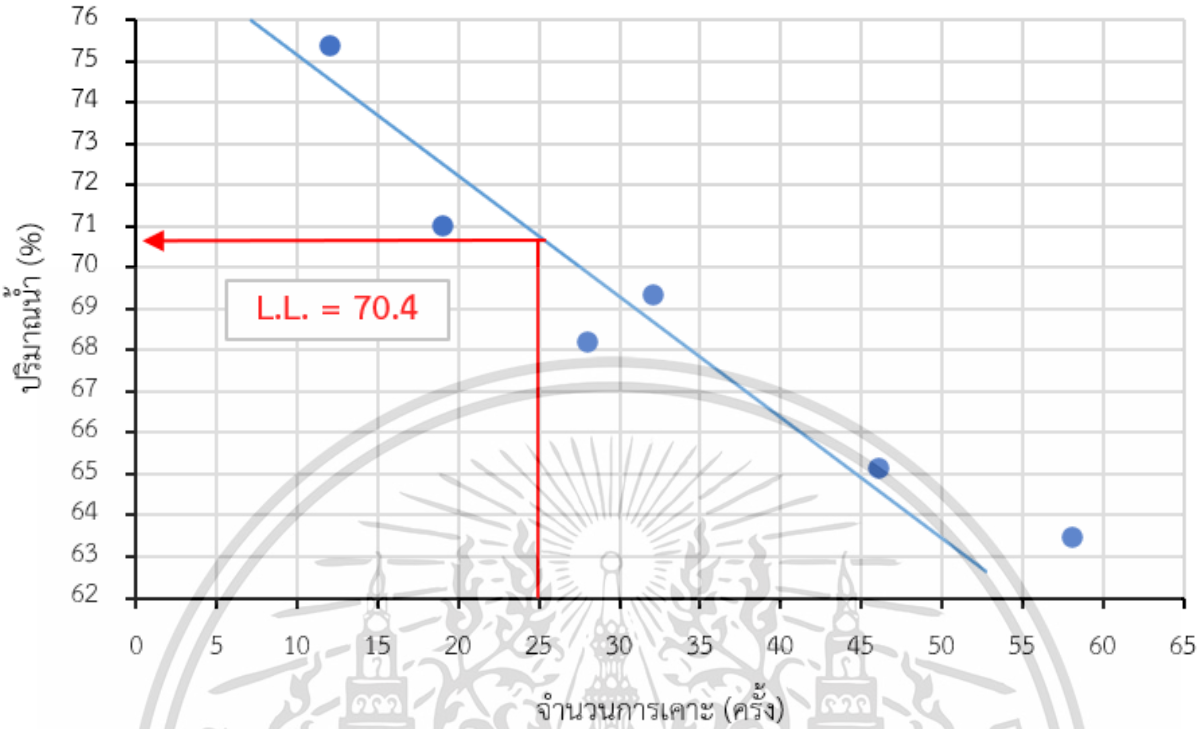
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบพิกัดเหลวของดินเหนียว

พิกัดเหลว (L.L.)						
ถ้วยหมายเลข	LL1	LL2	LL3	LL4	LL5	LL6
จำนวนครั้งที่เคาะ	58	46	32	28	19	12
น้ำหนักถ้วย (g)	15.75	16.55	19.47	16.91	16.4	15.39
น้ำหนักถ้วย + ดิน (g)	23.5	23.19	25.38	30.2	26.08	28.58
น้ำหนักถ้วย + ดินแห้ง (g)	20.49	20.57	22.96	24.81	22.06	22.91
ปริมาณน้ำ (g)	3.01	2.62	2.42	5.39	4.02	5.67
น้ำหนักดินแห้ง (g)	4.74	4.02	3.49	7.9	5.66	7.52
ปริมาณน้ำ (%)	63.50	65.17	69.34	68.23	71.02	75.40

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบพิกัดพลาสติกและดรรชนีพลาสติกของดินเหนียว

	พิกัดพลาสติก (P.L.)					ปริมาณน้ำธรรมชาติในดิน		
ถ้วยหมายเลข	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	1	2	3
น้ำหนักถ้วย (g)	14.58	13.34	14.42	19.35	15.14	12.02	13.87	15.31
น้ำหนักถ้วย + ดิน (g)	16.51	14.73	16.62	20.92	16.64	58.47	65.34	67.3
น้ำหนักถ้วย + ดินแห้ง (g)	15.95	14.31	16	20.48	16.24	44.59	49.31	50.93
ปริมาณน้ำ (g)	0.56	0.42	0.62	0.44	0.4	13.88	16.03	16.37
น้ำหนักดินแห้ง (g)	1.37	0.97	1.58	1.13	1.1	32.57	35.44	35.62
ปริมาณน้ำ (%)	40.88	43.30	39.24	38.94	36.36	42.62	45.23	45.96
ปริมาณน้ำเฉลี่ย (%)	39.74					44.60		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



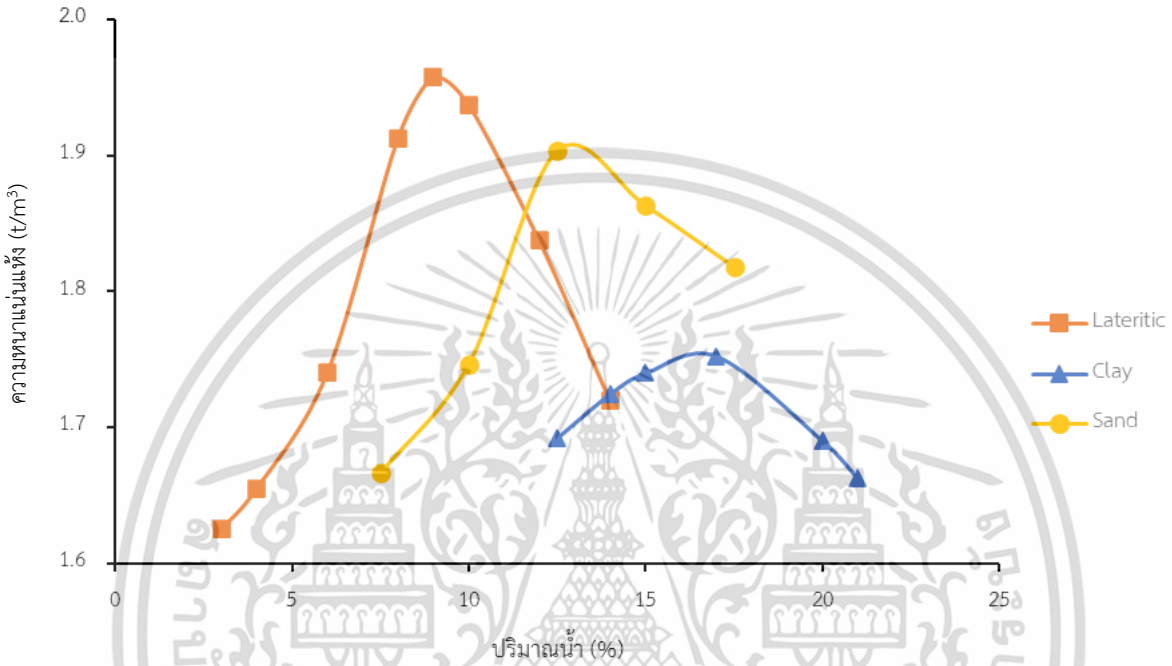
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงพิกัดเหลวของดินเหนียว

ดินเหนียวที่ถูกจัดเป็นตะกอนทรายที่มีความเป็นพลาสติกสูง (Elastic silt; MH) ที่มีค่า พิกัดความเหลว พิกัดพลาสติก และดรรชนีพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D4318 เท่ากับ 70.4% 39.47% และ 30.66% ตามลำดับ โดยผลการทดสอบพิกัดเหลว และพิกัดพลาสติกของดินเหนียวดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และผลการทดสอบพิกัดเหลวในตารางที่ 4.5 จะถูกทำมาสร้างเป็นกราฟดังรูปที่ 4.3 เพื่อระบุค่าพิกัดเหลวของดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสม

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำของดินทราย ดินลูกรังและดินเหนียว จากการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4



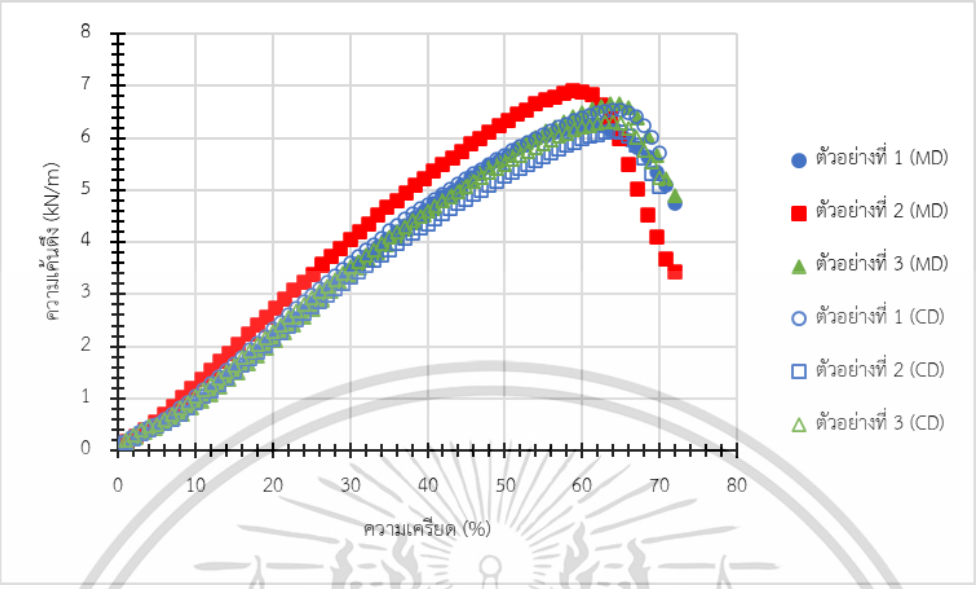
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณ

จากรูปที่ 4.4 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินหทราย ดินลูกรัง และดินเหนียวมีค่าเท่ากับ 1.91 1.96 และ 1.75 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินหทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว มีค่าเท่ากับ 12.76%, 8.80% และ 15.77% ตามลำดับ

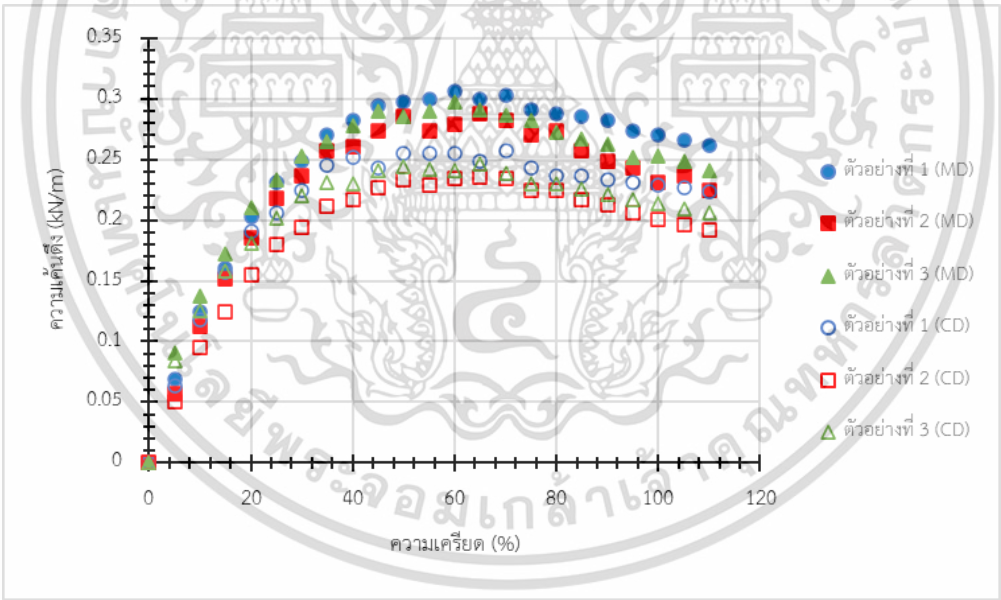
4.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดิน

คุณสมบัติทางวิศกรรมของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ ประกอบด้วยความหนา กำลังรับแรงดึงสูงสุด และกำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% โดยค่าความหนาเฉลี่ยของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าเท่า 2.41 และ 2.61 มิลลิเมตรตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าเท่ากับ 0.027 และ 0.687 ตันต่อเมตร ตามลำดับ และมีค่ากำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% เท่ากับ 0.005 และ 0.122 ตันต่อเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์



รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดิน

Properties	ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควัน	ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์
ขนาดช่องเปิด (mm)	20 x 20	20 x 20
พื้นที่ช่องเปิด (mm^2)	400	400
ความหนา (mm)	2.38	2.51
กำลังรับแรงดึงสูงสุด MD* (t/m)	0.030	0.661
กำลังรับแรงดึงสูงสุด CD** (t/m)	0.025	0.633
กำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% MD* (t/m)	0.007	0.025
กำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% CD** (t/m)	0.008	0.027

* ทิศทางขนาดแนวเครื่องจักร

**ทิศทางตั้งฉากแนวเครื่องจักร

4.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

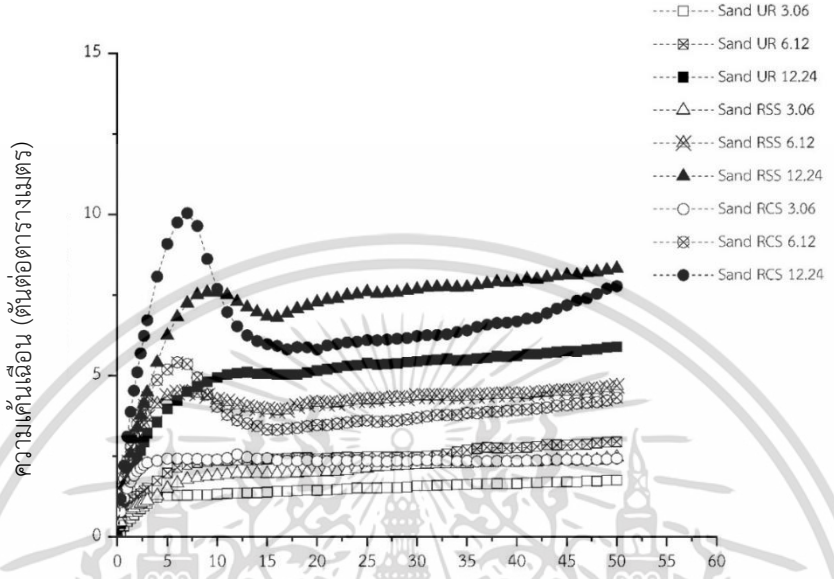
การศึกษาประสิทธิภาพในการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควันและแผ่นยางคอมปาวด์ จากค่า R_{in} ที่เกิดขึ้นระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิด โดยการเปรียบเทียบกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของตัวอย่างดินที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางทั้ง 2 ชนิด และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นตั้งฉาก ซึ่งจะแสดงคู่กับตารางเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) เป็นแรงยึดติด (Adhesion) และมุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle) เป็นมุมเสียดทานที่ผิว (Skin friction angle) ระหว่างตัวอย่างที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางทั้ง 2 ชนิด

4.4.1 การพัฒนาความเค้นเฉือน

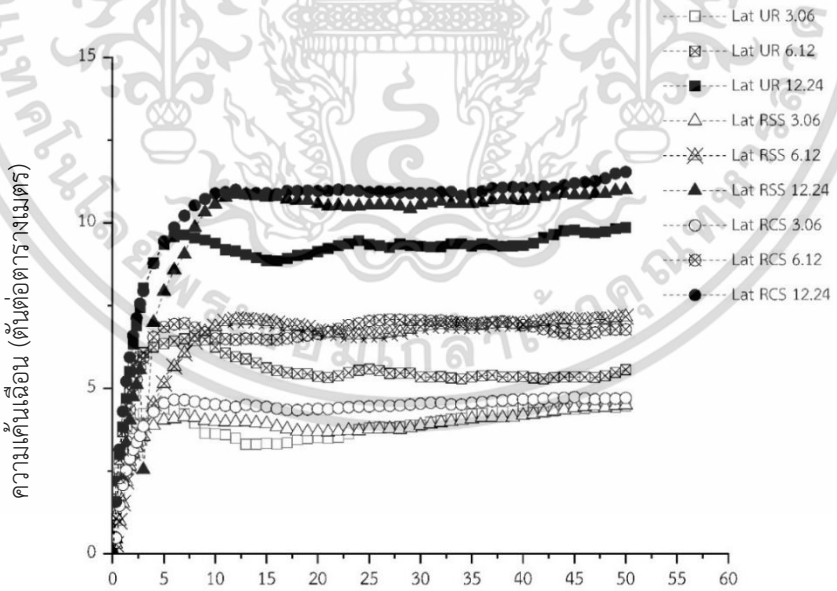
กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนบริเวณรอยต่อของกล่องเฉือนส่วนบนและกล่องเฉือนส่วนล่างซึ่ง ค่าความเค้นเฉือนที่อ่านได้ คือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดินกับดิน และดินกับตาข่ายเสริมกำลังดินภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ ในกรณีไม่เสริมกำลังดิน และเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควัน และเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ ที่ความเค้นตั้งฉาก 3.06 6.12 และ 12.24 ตันต่อตารางเมตร กราฟการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาความเค้นเฉือนของดินทรายดังแสดงในรูป 4.7(ก) กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินลูกรังดังแสดงในรูป 4.7(ข) และ กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินเหนียวดังแสดงในรูป 4.7(ค)

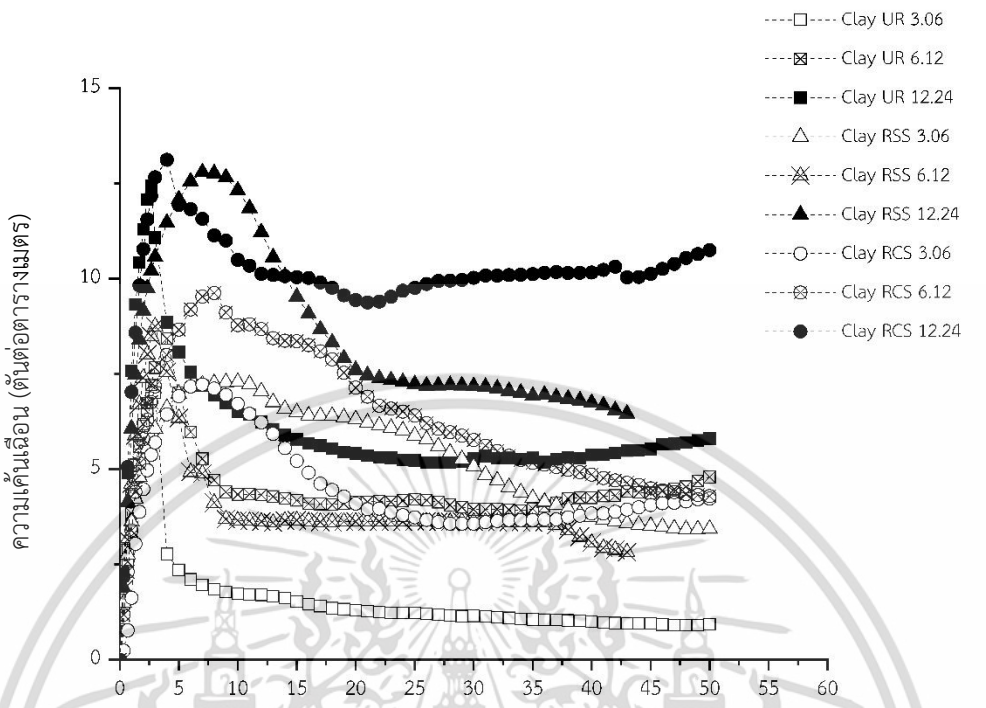


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.7 กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน: (ก) กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินทราย; (ข) กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินลูกรัง; (ค) กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินเหนียว

จากผลการทดสอบ รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเครื่องตัวในแนวเฉือนของดินในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 3.06 6.12 และ 12.24 ตันต่อตารางเมตร จาก รูปที่ 4.7(ก) การพัฒนาความเค้นเฉือนของทราย โดยจะสังเกตได้ว่าความเค้นเฉือนของทรายในช่วยแรกจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดอย่างรวดเร็ว หลังจากการเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ความเค้นเฉือนจะเริ่มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนและการลดลงของค่าความเค้นเฉือนทำให้เกิดกราฟเส้นโค้งขึ้นในช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน กราฟเส้นโค้งที่เกิดขึ้นมีจุดยอดของโค้งที่มีความชัดเจนแตกต่างกันตามชนิดของดินและเงื่อนไขในการเสริมกำลัง สังเกตได้ว่าในกรณีของดินทรายที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจะมีการลดลงของค่าความเค้นเฉือนหลังผ่านจุดยอดของเส้นโค้งไม่มาก ทำให้จุดยอดของกราฟเส้นโค้งช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของ Sand UR 12.24 ไม่ชัดเจนและไม่เกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งในช่วงต้นของกราฟการพัฒนาค่าความเค้นเฉือนของ Sand UR 3.06 และ Sand UR 6.12 ในกรณีของดินทรายไม่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะไม่ปรากฏที่จุดยอดของกราฟเส้นโค้งแต่ไปปรากฏที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสิ้นสุดของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน สำหรับดินทรายที่ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามรมควันสามารถสังเกตเห็นจุดยอดของกราฟเส้นโค้งในช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนได้ชัดเจนในเงื่อนไข Sand RSS 6.12 และ Sand RSS 12.24 แต่ไม่เกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งเงื่อนไข Sand RSS 3.06 ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของดินทรายในกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามรมควันไม่ปรากฏที่จุดยอดของกราฟเส้นโค้งบริเวณช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนแต่ไปปรากฏที่ช่วงสิ้นสุดของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน และสำหรับตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ สามารถสังเกตเห็นจุดยอดของกราฟเส้นโค้งในช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนได้อย่างชัดเจนในเงื่อนไข Sand RCS 6.12 และ Sand RCS 12.24 และค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของทั้ง 2 เงื่อนไขปรากฏที่จุดเดียวกับจุดยอดของกราฟเส้นโค้งบริเวณช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน โดยในการศึกษานี้ดินทรายได้รับการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานทำให้ดินมีความหนาแน่นสูง ปัจจัยที่ส่งผลต่อแนวโน้มการเกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งบริเวณช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน ในกรณีของดินเม็ดหยาบที่มีความหนาแน่นสูงคือการขัดกันของเม็ดดิน (Interlock) (Knappett et al., 2012) ซึ่งสำหรับดินที่มีการขัดกันของเม็ดดินดีจะทำให้เกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งชัดเจน โดยสำหรับดินทรายในตัวอย่างที่ทดสอบในเงื่อนไขที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินมีการเกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งชัดเจนแสดงให้เห็นว่ามีการขัดกันของเม็ดดินมากกว่าตัวอย่างที่ดินทรายไม่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน และในตัวอย่างดินทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ มีแนวโน้มการเกิดจุดยอดของกราฟเส้นโค้งชัดเจนกว่าตัวอย่างดินทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามรมควัน หมายความว่าตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางคอมปาวด์มีความสามารถในการสนับสนุนการขัดกันของเม็ดดินที่สูงกว่า และในภาพรวมความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีของ Sand RCS จะมากกว่า Sand RSS และ มีค่าต่ำสุดที่ Sand UR โดยทุกเงื่อนไขจะมีความเค้นเฉือนสูงสุดภายใต้การทดสอบด้วยคาวมเค้นตั้งฉาก 12.24 ตันต่อตารางเมตร ตามด้วย 6.12 ตันต่อตารางเมตร และต่ำสุดที่ความเค้นตั้งฉาก 3.06 ตันต่อตารางเมตร

รูปที่ 4.7(ข) การพัฒนาความเค้นเฉือนของดินลูกรังทุกเงื่อนไขการทดสอบจะปรากฏจุดยอดของกราฟเส้นโค้งในช่วงต้นของกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน แต่ไม่ชัดเจนเท่าในกรณีของดินทราย โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ (Lat RCS) ตามด้วยตัวอย่างดินลูกรังที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารามรมควัน (Lat RSS) และมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดน้อยที่สุดในตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่เสริมกำลัง (Lat UR) โดยความเค้นเฉือนสูงสุดมีความแตกต่างกันมากระหว่างตัวอย่างดินลูกรังที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 แบบกับตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน ในขณะที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในกรณีของดินลูกรังเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามรมควันและกรณีดินลูกรังเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์นั้นไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันมากนัก (Liu et al., 2009 และ Dafalla et al., 2012) โดยในแต่ละกรณีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่มากที่สุดจะเกิดภายใต้การทดสอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 12.24 t/m^2 ตามมาด้วย 6.12 t/m^2 และต่ำที่สุดที่ 3.06 t/m^2

สำหรับการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินเหนียวทั้ง 3 เงื่อนไขได้แก่ ดินเหนียวไม่เสริมกำลัง ดินเหนียวเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และดินเหนียวเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ อ้างอิงจากรูปที่ 4.7(ค) ไม่พบความแตกต่างของค่าความเค้นเฉือนสูงสุดระหว่างทั้งสามกรณี แต่ยังคงมีแนวโน้มที่เหมือนกับดินทรายและดินลูกรังคือการทดสอบการเฉือนภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 12.24 t/m^2 จะมีค่าความเค้นตั้งฉากสูงสุดมากที่สุดและตามด้วย การทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 6.12 t/m^2 และต่ำที่สุดที่ 3.06 t/m^2 ซึ่งหมายถึงการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวซึ่งมีกำลังรับแรงเฉือนเดิมสูง (Bergado et al., 1993; Gratchev Sassa et al., 2015; Sakleshpur et al., 2019)

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉาก

จากการผลการเปลี่ยนแปลงของการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนในแต่ละตัวอย่าง นำข้อมูลค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง (รูปที่ 4.5) และค่าความเค้นตั้งฉากมาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 2 ค่า เพื่อให้ได้กราฟเส้นตรงที่จะใช้บอกถึงการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) ระหว่างดินกับดินเป็นแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน และมุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Internal friction angle) เป็นเสียดทานที่ผิวของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน (Skin friction angle) เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกและคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการถูกเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.8

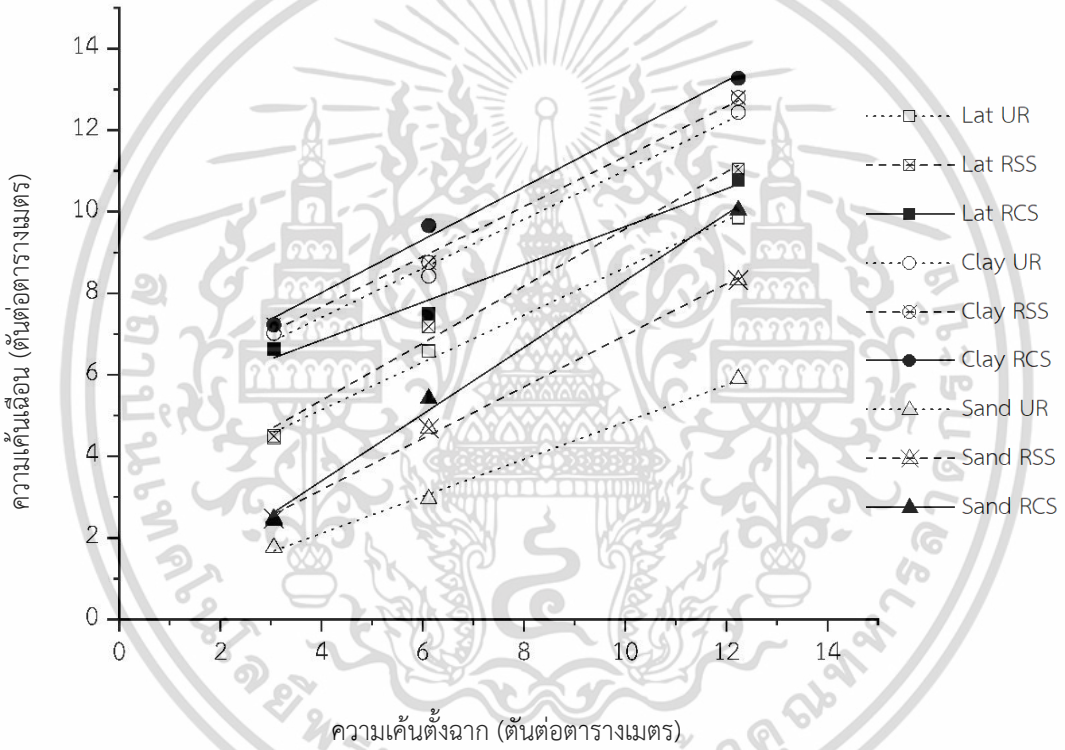
จากรูปที่ 4.8 ค่าความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นตั้งฉากในทุกเงื่อนไขการทดสอบ โดยพบว่าดินเหนียวมีค่ากำลังแรงเฉือนสูงที่สุดตามด้วย ดินลูกรังและดินทรายตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนตามเงื่อนไขการเสริมกำลัง คือกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยที่ตัวอย่างที่อยู่ในเงื่อนไขการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีกำลังรับแรงเฉือนมากที่สุด ตามมาด้วยตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยสุดในกรณีดินที่ไม่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดิน

จากแนวโน้มที่พบในรูปที่ 4.8 สาเหตุที่ดินเหนียวมีค่ากำลังรับแรงเฉือนมากที่สุดเป็นผลมาจากการที่ดินเหนียวถูกเตรียมที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (15.77%) ซึ่งน้อยกว่าค่าพิกัดพลาสติก (39.47%) ของตัวดินเหนียวเอง ซึ่งหมายความว่าดินเหนียวที่ถูกทดสอบอยู่ในสถานะของแข็ง โดยเมื่ออ้างอิงจาก Malizia และคณะ (2018) จะพบแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อดินเหนียวมีปริมาณน้ำน้อย โดยเฉพาะเมื่อปริมาณน้ำนั้นน้อยกว่าพิกัดพลาสติก ดินเหนียวในรูปแบบนี้จะมีความแข็งที่สูงมากเมื่อเทียบกับดินเหนียวในสถานะอื่น และสาเหตุที่การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบในเงื่อนไขที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนมากกว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันเนื่องจากตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีกำลังรับแรงดึงมากกว่าตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน (Palmeira et al., 1989)

จากรูปที่ 4.8 กราฟเส้นตรงของดินที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจะถูกแปลงค่าเป็นค่าแรงเชื่อมแน่นและมุมเสียดทานภายในของมวลดิน ในขณะที่กราฟเส้นตรงของดินในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจะถูกแปลงเป็นค่าแรงยึดติดและมุมเสียดทานที่ผิว ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของแรงเชื่อมแน่น กับแรงยึดติด และมุมเสียดทานภายในของมวลดิน กับมุมเสียดทานที่ผิวของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน

เงื่อนไขการทดสอบ	ความเค้นเชื่อมแน่น (Cohesion) (t/m^2)	ความเค้นยึดติด (Adhesion) (t/m^2)	มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle) (องศา)	มุมเสียดทานที่ผิว (Skin friction angle) (องศา)
Sand UR	0.289	-	24.48	-
Sand RSS	-	0.656	-	32.26
Sand RCS	-	0.127	-	39.28
Lat UR	2.819	-	30.15	-
Lat RSS	-	2.572	-	35.01
Lat RCS	-	4.997	-	36.19
Clay UR	5.008	-	30.97	-
Clay RSS	-	5.210	-	31.55
Clay RCS	-	5.414	-	33.01

จากตารางที่ 4.8 ในกรณีของดินทรายจะสังเกตเห็นว่าแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดในเงื่อนไข Sand UR Sand RSS และ Sand RCS ของดินทรายมีค่าเท่ากับ 0.289 0.656 และ 0.127 ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ แรงยึดติดของดินทรายในกรณี Sand RSS มากกว่าแรงเชื่อมแน่น แต่แรงยึดติดของดินทรายในกรณี Sand RCS น้อยกว่าแรงเชื่อมแน่น กรณีของดินลูกรังจะสังเกตเห็นว่าแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดในเงื่อนไข Lat UR Lat RSS และ Lat RCS ของดินทรายมีค่าเท่ากับ 2.819 2.572 และ 4.997 ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ แรงยึดติดของดินลูกรังในกรณี Lat RCS มากกว่าแรงเชื่อมแน่น แต่แรงยึดติดของดินทรายในกรณี Lat RSS น้อยกว่าแรงเชื่อมแน่น กรณีของดินเหนียวจะสังเกตเห็นว่าแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดในเงื่อนไข Clay UR Clay RSS และ Clay RCS ของดินทรายมีค่าเท่ากับ 5.008 5.210 และ 5.414 ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ แรงยึดติดของดินเหนียวมีค่ามากกว่าแรงเชื่อนแน่น โดยเรงเชื่อแน่นในเงื่อนไข Clay RCS สูงกว่าในเงื่อนไข Clay RSS

การเปลี่ยนแปลงของมุมเสียดทานภายในของมวลดิน ไปเป็นมุมเสียดทานที่ผิวมีแนวโน้มที่ชัดเจนในทุกชนิดดินโดยที่มุมเสียดทานที่ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมเสียดทานภายในของมวลดิน (24.48°, 30.15° และ 30.97° สำหรับดินทราย ดินลูกรังและดินเหนียว ตามลำดับ) ในทุกเงื่อนไข โดยที่มุมเสียดทานที่ผิวจะมากที่สุดในกรณีที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ (39.28°, 36.19° และ 33.01° ตามลำดับ) และตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ (32.26°, 35.01° และ 31.55° ตามลำดับ) โดยการเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายในเป็นมุมเสียดทานที่ผิวเป็นผลมาจากหนึ่งในหน้าที่หลักของตาข่ายเสริมกำลังดินนั่นคือการสนับสนุนการเกิดการขัดกันของเม็ดดิน (interlock) ของเม็ดดินในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลังดิน (Cuelho, 2014)

4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in})

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in}) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะที่มีการเสริมกำลังและดินในสภาวะปกติ โดยที่ค่า R_{in} ของทรายมีค่าสูงสุดในดินทั้งสามชนิดโดยมีค่า R_{in} เฉลี่ยเท่ากับ 1.479 และ 1.654 สำหรับกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ตามลำดับ และตามมาด้วยค่า R_{in} ที่มีค่าเท่ากับ 1.075 และ 1.233 สำหรับกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ตามลำดับ แต่ในกรณีของดินเหนียวค่า R_{in} ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แนวโน้มนี้มีสาเหตุมาจากตาข่ายเสริมกำลังดินจะมีประสิทธิการเสริมกำลังที่สูงขึ้นเมื่อใช้เสริมกำลังในดินที่มีความแข็งแรงต่ำแต่จะลดลงจนอาจกลายเป็นจุดอ่อนของโครงสร้างดินในดินที่มีความแข็งแรงสูง (Sakleshpur et al., 2019; Arwaedo et al., 2020) นอกจากนี้การที่กำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์สูงกว่าตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันส่งผลให้ค่า R_{in} ของตัวอย่างดินที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าสูงกว่า (Palmeira et al., 1989; Sakleshpur et al., 2019) โดยค่า R_{in} เฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ในกรณีการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินที่สร้างจากพลาสติก ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in}) จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.7 - 2.0 โดยค่าต่ำสุดอ้างอิงจากการศึกษาของ Sakleshpur และคณะ (2019) และค่าสูงสุดอ้างอิงจากการศึกษาของ Palmeira และคณะ (1989) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า R_{in} ที่ได้จากตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.033 - 1.479 และ 1.082 – 1.654 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีความสามารถในการเสริมกำลังดินใกล้เคียงกับตาข่ายเสริมกำลังดินจากพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่า R_{in} ของตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข

ตัวอย่าง	R_{in}			
	ความเค้นตั้งฉาก = 3.06	ความเค้นตั้งฉาก = 6.12	ความเค้นตั้งฉาก = 12.24	ค่าเฉลี่ย
Sand UR	1	1	1	1
Sand RSS	1.538	1.469	1.430	1.479
Sand RCS	1.563	1.669	1.730	1.654
Lat UR	1	1	1	1
Lat RSS	1.026	1.076	1.123	1.075
Lat RCS	1.396	1.229	1.075	1.233
Clay UR	1	1	1	1
Clay RSS	1.036	1.033	1.030	1.033
Clay RCS	1.081	1.082	1.082	1.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์มาเป็นวัสดุเสริมกำลังในดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว ด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์และเพื่อศึกษาค่า R_{in} ที่เกิดขึ้นระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละชนิด จากผลการทดสอบได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันและตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยมีผลมากที่สุดในดินทราย ตามด้วยดินลูกรังและเห็นผลน้อยที่สุดในดินเหนียว

2. ในดินชนิดเดียวกันค่า R_{in} ของตัวอย่าง Sand RCS จะมีค่ามากที่สุด และตามด้วย Sand RSS โดยค่า R_{in} ของดินทรายจะมีค่ามากที่สุดตามด้วยดินลูกรัง และน้อยสุดในดินเหนียว โดยในดินแต่ละชนิดค่า R_{in} ของเงื่อนไขที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางคอมปาวด์จะสูงกว่าเงื่อนไขที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันเสมอ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำ RSS geogrid และ RCS geogrid ไปใช้ในงานก่อสร้างคันดินถมจริง

1. การนำ RSS geogrid และ RCS geogrid ไปใช้ในการเสริมกำลังในงานก่อสร้างประเภทคันดินถมควรใช้ในคันดินถมที่มีวัสดุหลักเป็นดินเม็ดหยาบเช่น ดินทราย และดินลูกรัง

2. การนำ RSS geogrid และ RCS geogrid ไปใช้งานจริงในสนามควรนำไปใช้เสริมกำลังที่มี Interface shear strength ต่ำเนื่องจาก RSS geogrid และ RCS geogrid มีประสิทธิภาพการเสริมกำลังต่ำ เมื่อใช้ในดินที่มี Interface shear strength สูง

การนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อเพิ่มเติมในอนาคต

1. งานวิจัยนี้ศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดิน และตาข่ายเสริมกำลังเท่านั้น ควรทำการศึกษาเพิ่มเกี่ยวกับพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความสูงอื่นๆ จากบริเวณผิวสัมผัส

2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบทางเศรษฐกิจ และอายุการใช้งานของตาข่ายเสริมกำลังดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กรมการขนส่งทางบก. 2558 **“ระเบียบกรมการขนส่งทางบกว่าด้วยการขอจดทะเบียนรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีที่นั่งไม่เกิน 12 ที่นั่งและรถยนต์บรรทุกส่วนบุคคลที่มีน้ำหนักรวมไม่เกิน 2200 กิโลกรัม”**

การยางแห่งประเทศไทย. 2561. **“ข้อมูลวิชาการยางพารา ปี 2561.”** สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งผระเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

มานิต ช่วยงาน. 2554. **“ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics).”** เอกสารการสอน. สาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่.

วรรณวรางค์ รัตนานิคม. 2560. **“ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ Atterberg limit จากการทดสอบหลายวิธี.”** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงงานวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน). ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560. มหาวิทยาลัยบูรพา

สถาบันพลาสติก. 2015. **“เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์”** โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์.

Arwaedo, N., Chaiyaput, S., Sukchaisit, O., Auephattayakorn, K., Deawtipsukon, S. 2020. **“Effect of ribbed smoked sheet on CBR strength of lateritic soil.”** Proceeding of the 5 th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology, Pattaya, Chonburi, Thailand, December, 2020

ASTM D1557-12. **“Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)).”** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ASTM D2487-17e1. **“Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system).”** West Conshohocken, PA: ASTM International. 2020.

ASTM D4318-17e1. **“Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.”** West Conshohocken, PA: ASTM International. 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ASTM D5321/D5321M-21. **"Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear."** West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021.

Bergado, D.T., Chai, J.C., Abiera, H.O., Alfaro, M.C., Balasubramaniam, A.S. 1993. **"Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements."** Geotextiles and Geomembranes. 12. 327-349.

Bergado, D.T., Chai, J.C. 1994. **"Pullout force/displacement relationship of extensible grid reinforcements."** Geotextiles and Geomembranes. 13. 295-316.

Chaiyaput, S., Bergado, D.T., Artidteang, S. 2014. **"Measured and simulated results of a Kenaf limited life geosynthetics (LLGs) reinforced test embankment on soft clay."** Geotextiles and Geomembranes. 42. 39–47.

Chaiyaput, S., Arwaedo, N., Jamsawang, P., Ayawanna, J. 2018. **"Natural para rubber in road embankment stabilization."** Applied Sciences. 12. 1394.

Civil engineering notes, Standard Proctor Test. http://civilengineering-notes.weebly.com/compaction-test---proctor-test.html, 2010 (accessed 17 May 2022).

Cuelho, E., Perkins, S., Morris, Z. 2014. **"Relative operational performance of geosynthetics used as subgrade stabilization."** State of Montana, Department of Transportation Research Programs.

Dafalla, M.A. 2013. **"Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures."** Advances in Materials Science and Engineering. 2013.

Das, B.M., Sobhan, K. **Principles of Geotechnical Engineering.** eighth Ed., CL Engineering, Ad Dikwani, 2013.

Gratchev, I., Sassa, K. 2015. **"Shear strength of clay at different shear rates, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering."**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Haeri, S.M., Noorzad, R., Oskoorouchi, A.M. 2000. **“Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand.”** Geotextiles and Geomembranes. 18. 385-402.

Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M., Brönnimann, R. 2006. **“Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade.”** Geotextiles and Geomembranes. 24. 21–37.

Kamalzare, M., Moayed, R.Z. 2011. **“Influence of geosynthetic reinforcement on the shear strength characteristics of two-layer sub-grade”** Acta geotechnica Slovenica. 8. 39-49.

Knappett, J.A., Craig, R.F. **Craig’s soil mechanics**. eighth Ed., Spon Press, New York, 2012.

Liu, C.N., Ho, Y.H., Huang, J.W. 2009. **“Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces.”** Geotextiles and Geomembranes. 27. 19–30.

Malizia, J.P., Shakoor, A. 2017. **“Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils.”** Engineering Geology.

Nagrale, P., Sawant, P., Pusadkar, S. 2010. **“Laboratory investigations of reinforced subgrade soils.”** Indian Geotechnical Conference, GEO trendz December 16–18, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, pp.637-640.

Palmeira, E.M., Milligan, G.W.E. 1989. **“Large scale direct shear tests on reinforced soil.”** SOILS AND FOUNDATIONS. 29. 18-30.

Sakleshpur, V.A., Prezzi, M., Salgado, R., Siddiki, N.Z., Choi, Y.S. 2019. **“Large-scale direct shear testing of geogridreinforced aggregate base over weak subgrade.”** International Journal of Pavement Engineering. 20. 649-658.

Thailand department of highways. **“Standard drawing for highway design and construction.”** DH-S 102/2532. PA: Thailand department of highways, 1989.

The constructor building ideas. 2020. **“What is the average density of soil?”** https://theconstructor.org/question/what-is-the-average-density-of-soil/.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Umashankar, B., Chennarapu, H., Mouli, S.S. 2015. **"Interface properties of metal-grid and geogrid reinforcements with sand."** Geotechnical Special Publication, IFCEE 2015.

Yousif, H.F., Fattah, M.Y., Al-Adili, A.S., 2015. **"Effect of expansive subgrade soil on reinforced subbase layer."** University of Technology, Iraq.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้