ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารมควัน

Interface shear strength coefficient of geogrid made from ribbed smoked sheet

อนุพุทธ์ เลียงสุนทรสิทธิ์[1], ภัคภณ จรูญรัตน์[2], ศลิษา ไชยพุทธ[3*], จิรัชญา อายะวรรณา[4], และ อุบะ ศิริแก้ว[5]

[1,2,3,5]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร
[4]สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก, สำนักวิชาวิศวกรรมศาตร์, มหาวิยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

** Corresponding author; E-mail address: salisa.ch@kmitl.ac.th.*

บทคัดย่อ

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) เป็นวัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีลักษณะคล้ายตาข่าย สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาความแข็งแรงและเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โครงสร้างชั้นดิน ในการศึกษานี้แผ่นยางพารารมควัน (ribbed Smoked Sheet; RSS) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากยางพาราและนับเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติถูกนำมาศึกษา เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ทดแทนแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ การศึกษาประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารมควัน (RSS geogrid) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (Interface shear strength coefficient ; R_{in}) จากการทดสอบการเฉือนตรงขนาดใหญ่ (large-scale direct shear) ภายใต้เงื่อนดินเสริมกำลังและไม่เสริมกำลัง แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารมควันถูกนำไปติดตั้งเพื่อเสริมกำลังดิน 2 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว (ดินเม็ดละเอียด) และ ดินทราย (ดินเม็ดหยาบ) จากการศึกษาพบว่า ค่า R_{in} ของดินเหนียว และ ดินทราย มีค่าเท่ากับ 1.033 และ 1.479 ตามลำดับ แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารมควัน โดยเฉพาะดินทราย ซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบ

คำสำคัญ: การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่, การปรับปรุงคุณภาพดิน, แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน, ยางพารา, สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว

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), which is a para rubber as natural polymer, was studied as a new alternative material to replace synthetic-polymers geogrid. The study of reinforcement efficiency of geogrid made form RSS (RSS geogrid) was the interface shear strength coefficient (R_{in}) by large-scale direct shear test under the condition of non-reinforced soil and reinforced soil. RSS geogrid was installed in 2 types of soil, which were clay (fine-grained soil) and sand (coarse-grained soil). From the study, it was found that the R_{in} of clay and sand were 1.033 and 1.479, respectively. The results shown that RSS geogrid affected to increase of interface shear strength, especially in the sand that is coarse-grained soil.

Keywords: Large-scale direct shear test, Ground improvement, Geogrid, Para-rubber, Interface shear strength coefficient.

1. คำนำ

ตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) เป็นอุปกรณ์รูปร่างคล้ายตาข่ายที่สร้างจากวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีหน้าที่เสริมความแข็งแรง และเสถียรภาพของดิน ตาข่ายเสริมกำลังดินมีหลักการทำงาน 3 ประการได้แก่ 1. กระจายและลดความเค้นตั้งฉาก 2. การลดการเคลื่อนตัวในแนวระดับ และ 3. ขัดขวางแนวการเฉือนในโรงสร้างดิน [1] ตาข่ายเสริมกำลังดินนิยมนำมาใช้งานในงานประเภทที่มีการถมดิน เช่น การสร้างคันดิน การสร้างถนน และการสร้างกำแพงกันดิน

เนื่องจากปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์จากยางพาราของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อการลดลงของราคายางพารา แนวคิดในการนำแผ่นยางพารารมควัน (ribbed smoke sheet) ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมาใช้ในการสร้างตาข่ายเสริมกำลังดินแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์จึงถูกคิดขึ้น โดยได้มีการศึกษาคุณสมบัติการเสริมกำลังแบกทานของดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และได้ผลว่าตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันสามารถเพิ่มค่าแคริฟอเนีย แบริ่ง เรโช (CBR) ของดินที่มีค่าแคริฟอเนีย แบริ่ง เรโช ต่ำได้ [2]

มีการศึกษาการเสริมกำลังดินด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินเป็นจำนวนมากในช่วงที่ผ่านมา ซึ่งการทดสอบที่นิมใช้งานคือการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (large-scale direct shear) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงความเป็นจริงและไม่ถูกจำกัดด้วยขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ และหนึ่งในคุณสมบัติของดินที่นิยมนำมาศึกษาคือค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (shear strength) เนื่องจากการพังทลายในรูปแบบการ

ไถล (circular slip) จากการที่ดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่าความเค้นเฉือนที่ได้รับเป็นรูปแบบการพังทลายที่พบได้บ่อยและสร้างความเสียหายมาก การศึกษาการพัฒนาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส (interface shear strength) ที่เป็นค่าที่ใช้ในการคาดเดาพฤติกรรมการไถลของดินจึงเป็นที่นิยม นอกจากนี้เพื่อความสะดวกในการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส การใช้อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสในกรณีที่มีการปรับปรุงหรือติดตั้งวัสดุเสริมกำลังแล้วและกรณีดินเดิมที่เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส (interface shear strength coefficient, Rin) จึงถูกนำมาใช้งาน [3]

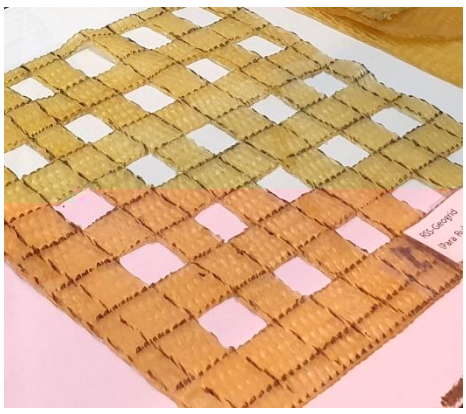
จากแนวคิดข้างต้น การศึกษานี้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวของดิน 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้แก่ ดินทราย และดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน (RSS geogrid) ด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่เพื่อหาชนิดของดินที่เหมาะสมในการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน

2. วัสดุ

วัสดุในการศึกษานี้ประกอบด้วย ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และดินสำหรับทดสอบ 2 ชนิดได้แก่ ดินเหนียว และดินทราย วัสดุแต่ละชนิดมีข้อหนดและการเตรียมดังต่อไปนี้

2.1 ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน

ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันสร้างจากแผ่นยางพารารมควันชั้น 3 มีความหนาอยู่ในช่าง 2.5-3.0 มิลลิเมตร และมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 300x300 มิลลิเมตร ช่องเปิดมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 มิลลิเมตร โดยมีช่องเปิด 49 ช่องในตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน 1 แผ่นช่องเปิดแต่ละช่องอยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตรทั้งในแนวตั้งและแนวนอน กำลังรับแรงดึงสูงสุดและกำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% ของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันตามแนวขนานเครื่องจักร (machine direction) เท่ากับ 0.298 และ 0.067 kN/m ตามลำดับ และสำหรับแนวตั้งฉากเครื่องจักรมีค่าเท่ากับ 0.246 และ 0.075 kN/m ตามลำดับ ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันมีลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยาพารารมควัน

ตารางที่ 1 กำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควัน

คุณสมบัติ	แนวรับแรงดึง (kN/m)	
	MD*	XD**
กำลังรับแรงดึงสูงสุด	0.30	0.07
กำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2%	0.25	0.08

* คือ แนวขนาดแนวเครื่องจักร
** คือ แนวตั้งฉากแนวเครื่องจักร

2.2 ดินสำหรับทดสอบ

ดินสำหรับทดสอบจะถูกทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินทราย และดินเหนียว ประกอบด้วยการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน [4] และการทดสอบพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก [5] เพื่อจำแนกชนิดของดิน [6] และการทดอสการบัดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน [7] เพื่อหาปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุด (optimum moisture content) และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน (maximum dry density)

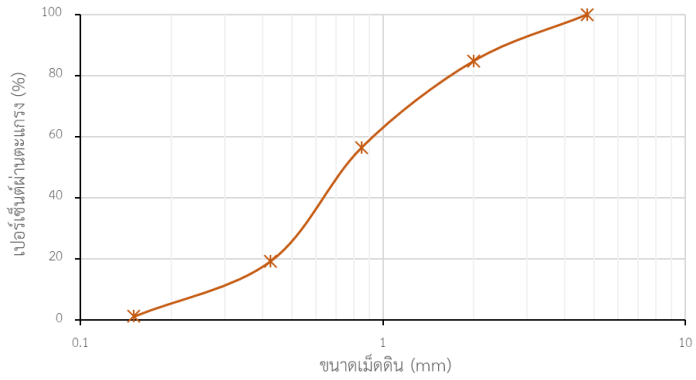
2.2.1 ดินทราย

ดินทรายสำหรับการทดสอบทั้งหมดเป็นทรายแม่น้ำที่ขุดจากแหล่งขุดบริเวณใกล้แม่น้ำลพบุรี ที่ผ่านการทำให้แห้งโดยการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นในดินทั้งหมดออกไปแล้วเก็บใส่ภาชนะปิดป้องกันความชื้น ดินทรายที่ใช้มีอัตราส่วนเม็ดดินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 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% ตามลำดับกราฟการกระจายตัวขนาดคละของเม็ดดินทรายแสดงไว้ดังรูปที่ 2 ขนาดของเม็ดดินที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (D_{10}) 30 เปอร์เซ็นต์ (D_{30}) และ 60 เปอร์เซ็นต์ (D_{60}) ของดินทรายมีค่าเท่ากับ 0.29 0.53 และ 0.91 มิลลิเมตรตามลำดับ ค่า C_u และ C_c เท่ากับ 3.14 และ 1.06 ตามลำดับ จัดเป็นดินชนิด poor-grade sand (SP) ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุด (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 12.76% และ 1.91 t/m^3

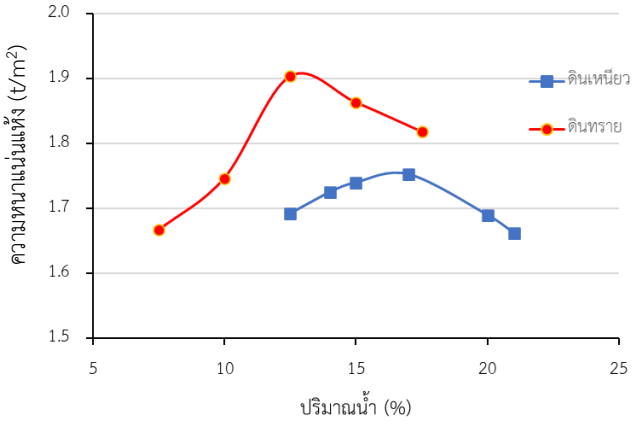
2.2.2 ดินเหนียว

ดินเหนียวสำหรับการทดสอบมาจากงานขุดและถมพื้นที่ก่อสร้างบริเวณลานบินฝั่งตะวันออกโดยมีความลึกที่ 3-5 เมตร ดินเหนียวสำหรับทดสอบจะต้องผ่านการทดให้แห้งด้วยการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นในดินทั้งหมดออกไปและทำการทุบดินเหนียวแห้งให้ละเอียด ทำการร่อผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และเก็บผงดินเหนียวแห้งที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ในภาชนะปิดป้องกันความชื้น โดยมีค่า พิกัดเหลว (LL) พิกัดพลาสติก (PL) และดรรชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 70.4% 39.74%

และ 30.66% ตามลำดับ จัดเป็นดินชนิด inorganic silt (MH) ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุด (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 15.77% และ 1.75 t/m^3



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินทราย



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินทรายและดินเหนียว

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 เงื่อนไขการทดสอบ

ตัวอย่างในการศึกษานี้จะแบ่งจำนวนตามเงื่อนไขการทดสอบหลัก 2 เงื่อนไข ได้แก่ 1.) ดิน 2 ชนิดได้แก่ดินทราย และดินเหนียว 2.) การเสริมกำลังได้ กรณีไม่มีการเสริมกำลัง และกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารามควัน เงื่อนไขการทดสอบทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.) SU* หมายถึง ดินทรายไม่เสริมกำลัง (ดินทรายเปล่า)

2.) SR* หมายถึง ดินทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควัน

3.) CU* หมายถึง ดินเหนียวไม่เสริมกำลัง (ดินเหนียวเปล่า)

4.) CR* หมายถึง ดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง ดินจากแผ่นยางพารามควัน

* คือตัวเลขตามท้ายที่หมายถึงความเค้นตั้งฉากที่ใช้ในการทดสอบเงื่อนนั้นๆ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดสอบ

เงื่อนไข		ชนิดดิน	
การเสริมกำลัง	ความเค้นตั้งฉาก (kN/m^2)	ดินทราย	ดินเหนียว
ไม่มีการเสริมกำลัง	30	SU 30	CU 30
	60	SU 60	CU 60
	120	SU 120	CU 120
เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางารามควัน	30	SR 30	CR 30
	60	SR 60	CR 60
	120	SR 120	CR 120

* ในแต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ได้รับค่าที่แม่นยำ

3.2 เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ในการศึกษานี้ใช้ model: 2012-HPF จากบริษัท Karol Warner [8] และกล่องเฉือนที่ประกอบจากกล่องเฉือนส่วนล่าง (ขนาด 400x300 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร) และกล่องเฉือนส่วนบน (ขนาด 300x300 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร) ในการทดสอบนี้จะทำการปรับปรุงกล่องเฉือนส่วนล่างให้มีขนาด 300x300 มิลลิเมตรและสูง 50 มิลลิเมตรเพื่อควบคุมความแม่นยำของการให้พลังงานการบดอัด



รูปที่ 4 อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

3.3 การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานในกล่องเฉือน

บดอัดดินในกล่องเฉือนขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่บดอัดแล้วมีความสูง 100 มิลลิเมตร โดยอยู่ในกล่องเฉือนส่วนล่าง และกล่องเฉือนส่วนบน ส่วนละ 50 มิลลิเมตร บดอัดดินด้วยค้อนบดอัดขนาด 4.54 กิโลกรัม มีจำนวนครั้งการบดอัด 303 ครั้งต่อชั้น จำนวน 4 ชั้นแบ่งเป็นกล่องเฉือนส่วนบนและส่วนล่างส่วนละ 2 ชั้นเท่ากันเพื่อให้ตัวอย่างได้รับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2700 kN/m^3 โดยจำนวนครั้งการบดอัดคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$E = NnWh/v \quad (1)$$

โดยที่ E = พลังงานการบดอัด (kN/m^3)

N = จำนวนครั้งการบดอัด (ครั้ง)

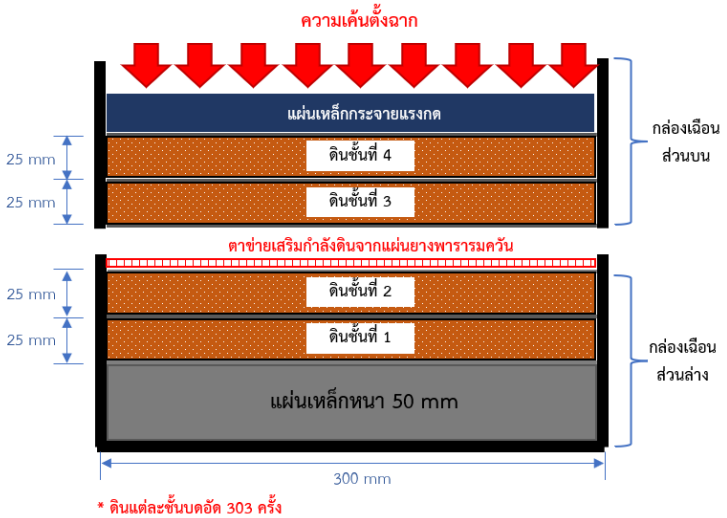
n = จำนวนชั้นการบดอัด (ชั้น)

W = น้ำหนักตุ้ม (kN)

h = ความสูงตกกระทบ (m)

v = ปริมาตรของโมล (m^3)

สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารามควันให้ทำการติดตั้งตาข่ายเสริมกำลังดินบริเวณรอยต่อระหว่างดินชั้นที่ 2 และ 3 โดนกำหนดให้ผิวด้านบนของตาข่ายเสริมกำลังดินเสมอกับของบนของกล่องเฉือนส่วนล่าง รายละเอียดการบดอัดแสดงไว้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การบดอัดในกล่องเฉือน

3.4 การเฉือนตัวอย่าง

เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ในการศึกษานี้ใช้ model ดำเนินการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D5321 กำหนดการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนของกล่องเฉือนคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที และให้ความเค้นตั้งฉากที่ 30 60 และ 120 kN/m^2 ระหว่างการเฉือนจะทำการบันทึกค่าแรงเฉือน การเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน การเคลื่อนตัวในแนวระดับ และความเค้นตั้งฉากในช่วงเวลานั้นๆ โดยจะทำการบันทึกข้อมูลอย่างน้อย 50 จุด ค่าที่ได้จากการทดสอบจะคำนวณออกมาเป็นค่าความเค้นเฉือนจากสมการที่ 2 [8]

$$T = (F_s - F_{cor})/A_C \quad (2)$$

โดยที่ T = ความเค้นเฉือน (t/m^2)

F_s = แรงเฉือน (t)

F_{cor} = ค่าปรับแก้จากแรงเสียดทาน (t)

A_C = พื้นที่ปรับแก้ (m^2)

พื้นที่ ในสมการที่ 2 คือพื้นที่ปรับแก้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่รับแรงเฉือน การปรับแก้พื้นที่สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3 (ASTM D5321) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน จะถูกสร้างเป็นกราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน

$$A_C = A_0 - (d \text{ x } W) \quad (3)$$

โดยที่ A_C = พื้นที่ปรับแก้ (m^2)

A_0 = พื้นที่ที่ตัวอย่างสัมผัสกันตอนเริ่มต้น (m^2)

d = ระยะการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือน (m)

W = ความกว้างแนวตั้งฉากการเฉือน (m)

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ความเค้นตั้งฉากต่างๆ จะถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากเพื่อทราบค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) และมุมเสียดทานที่ผิว (skin friction angle) จากความชันของกราฟเส้นตรง และทราบค่าแรงเชื่อนแน่น (cohesion) และแรงยึดติด (adhesion) จากจุดตัดแกน y เปรียบเทียบผลของการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันด้วยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส (R_{in}) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนในกรณีมีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควัน และกำลังรับแรงเฉือนในกรณีไม่มีการเสริมกำลัง ค่า R_{in} คำนวณได้จากสมการที่ 4 [3]

$$R_{in} = (\sigma \tan\delta + c_i) / (\sigma \tan\phi + c) \quad (4)$$

โดยที่ σ = ความเค้นตั้งฉาก (t/m^2)

δ = มุมเสียดทานที่ผิว (องศา)

c_i = แรงยึดติด (t/m^2)

ϕ = มุมเสียดทานภายใน (องศา)

c = แรงเชื่อมแน่น (t/m^2)

4. ผลการทดสอบ

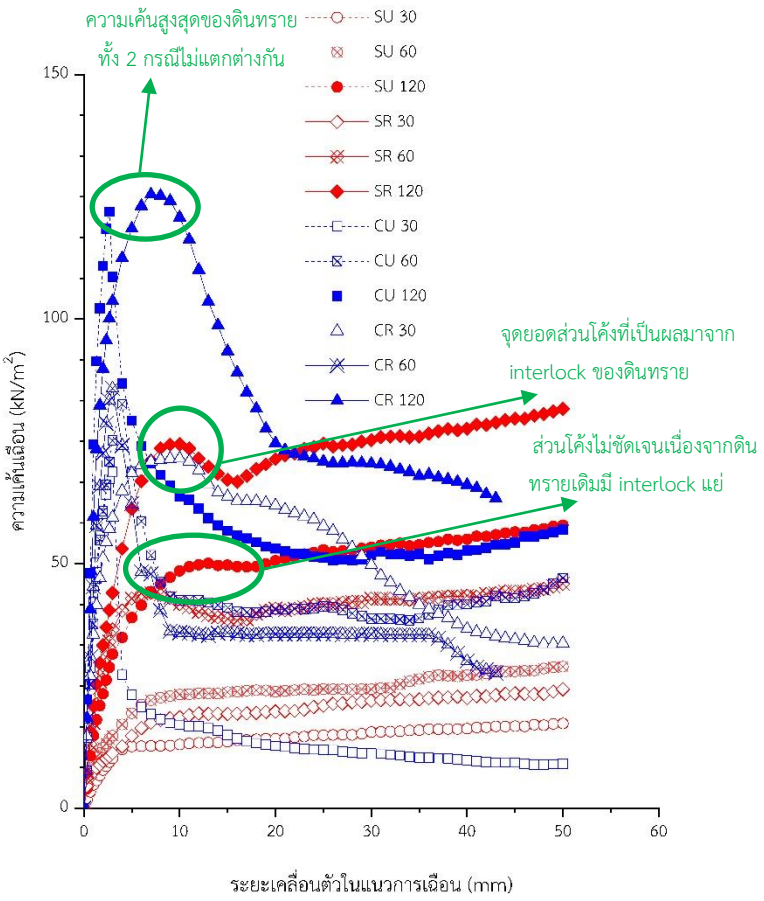
แบ่งการแสดงผลเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1. กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน 2. กำลังรับแรงเฉือน และ 3. สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือน แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือน

จากรูปที่ 6 กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินทรายแสดงให้เห็นว่าที่ความเค้นตั้งฉากเดียวกันความเค้นเฉือนของดินทรายที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันมีค่าสูงกว่าดินทรายที่ไม่มีการเสริมกำลัง [9] ในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควัน ค่าความเค้นเฉือนของตัวอย่าง SR 30 SR 60 และ SR 120 มีค่าความเค้นเฉือนสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 24.30 45.90 และ 81.64 kN/m^2 ตามลำดับ และสำหรับกรณีไม่มีการเสริมกำลัง ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของ SU 30 SU 60 และ SU 120 มีค่าเท่ากับ 17.30 28.93 และ 57.87 kN/m^2 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงต้นของกราฟที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนต่อการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวในแนวแรงเฉือนเป็นเส้นตรง ที่ความเค้นตั้งฉากเดียวกันความชันช่วงต้นของกราฟในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันที่ชันกว่ากรณีไม่มีการเสริมกำลังอย่างชัดเจน และเมื่อช่วงการพัฒนาแบบเส้นตรงสิ้นสุดลง ค่าความเค้นเฉือนจะเริ่มลดลงเมื่อการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนเพิ่มขึ้น และการลดลงของความเค้นเฉือนทำให้ในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันเกิดส่วนโค้งที่มีจุดยอดชัดเจนขึ้น ในทางกลับกันการลดลงของความเค้นเฉือนไม่ทำให้เกิดส่วนโค้งที่มีจุดยอด แนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการขัดกันของเม็ดดิน (interlock) ของทรายกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันมีมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเสริมกำลัง เนื่องจากส่วนโค้งที่เป็นรอยต่อระหว่างช่วงการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงและจุดเริ่มต้นการลดลงของความเค้นเฉือนเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงสภาพการขัดกันของเม็ดดิน ในกรณีที่ส่วนโค้งปรากฏชัดเจนและมีจุดยอดของส่วนโค้งเกิดขึ้นหมายถึง เม็ดดินมีการขัดกันดี และในกรณีที่ไม่เกิดส่วนโค้งขึ้นหมายถึงการขัดกันของเม็ดดินแย่ [10] ซึ่งการที่ส่วนโค้งปรากฏชัดเจนในกรณีดินทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควัน และไม่ปรากฏในดินทรายที่ไม่มีการเสริมกำลังแสดงให้เห็นว่าตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันช่วยส่งเสริมให้เกิดการขัดกันของเม็ดดิน

จากรูปที่ 6 การพัฒนาความเค้นเฉือนของดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันและดินเหนียวไม่เสริมกำลังมีค่าใกล้เคียงกันที่ความเค้นตั้งฉากเดียวกัน ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของ CR 30 CR 60 และ CR 120 มีค่าเท่ากับ 71.49 85.83 และ 125.48 kN/m^2 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของ CU 30 CU 60 และ CU มีค่าเท่ากับ 68.81 82.61 และ 121.97 kN/m^2 ตามลำดับ กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินเหนียวแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังดินเหนียวด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการพัฒนาความเค้นเฉือน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ดินเหนียวในการทดสอบนี้ถูกเตรียมที่ปริมาณน้ำเท่ากับ OMC ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดพลาสติก ทำให้ดินเหนียวมีสถานะเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรง และกำลังรับแรงเฉือนสูง ซึ่งตาข่ายเสริมกำลังดินจะมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังสูงเมื่อใช้ในดินที่มีความแข็งแรงต่ำ ในทางตรงข้ามประสิทธิภาพการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังจะลดลงจนอาจกลายเป็นจุดอ่อนของชั้นดินเมื่อนำไปเสริมกำลังในดินที่มีความแข็งแรงสูง [11]

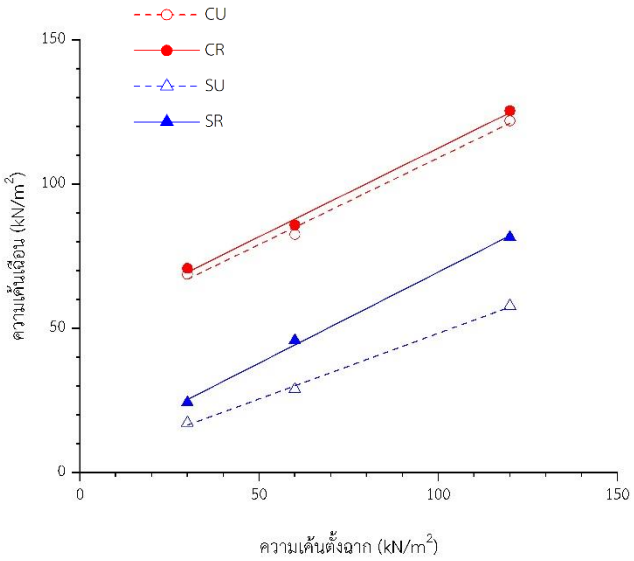


รูปที่ 6 กราฟการพัฒนาความเค้นเฉือนของดินทรายและดินเหนียวในกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันและเสริมกำลัง

4.2 กำลังรับแรงเฉือน

จากรูปที่ 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของดินทรายและดินเหนียวในกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันและกรณีไม่เสริมกำลังในรูปแบบกราฟเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันมีค่าสูงกว่าดินทรายที่ไม่เสริมกำลังอย่างชัดเจน ในขณะที่กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันมีค่าใกล้เคียงกับ

ดินเหนียวที่ไม่มีเสริมกำลัง นอกจากนี้กราฟเส้นตรงยังแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) ระหว่างดินกับดินเป็นแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดินและมุมเสียดทานภายในของมวลดิน (Internal friction angle) เป็นเสียดทานที่ผิวของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน (Skin friction angle) ค่าเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของดินทรายและดินเหนียว

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของแรงเชื่อมแน่น กับแรงยึดติดและมุมเสียดทานภายในของมวลดิน กับมุมเสียดทานที่ผิวของดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน

คุณสมบัติ	เงื่อนไขการทดสอบ			
	SU	SR	CU	CR
แรงเชื่อนแน่น (kN/m^2)	2.89	-	50.08	-
แรงยึดติด (kN/m^2)	-	6.56	-	52.10
มุมเสียดทานภายใน (องศา)	24.48	-	30.97	-
มุมเสียดทานที่ผิว (องศา)	-	32.26	-	31.55

จากตารางที่ 3 ในกรณีของดินทรายจะสังเกตเห็นว่าแรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติดในเงื่อนไข SU และ SR ของดินทรายมีค่าเท่ากับ 2.89 และ 6.56 kN/m^2 ตามลำดับ แรงยึดติดของดินทรายในกรณี SR มากกว่าแรงเชื่อมแน่น กรณีของดินเหนียวจะสังเกตเห็นว่าแรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติด โดยแรงเชื่อมแน่นของ CU และแรงยึดติดของ CR มีค่าเท่ากับ 50.08 เท่ากับ 52.10 kN/m^2 ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงของมุมเสียดทานภายในของมวลดิน ไปเป็นมุมเสียดทานที่ผิวมีแนวโน้มที่ชัดเจนทั้งในดินทรายและดินเหนียว โดยที่มุมเสียดทานที่ผิว (32.26° และ 31.55° สำหรับดินทรายและดินเหนียว ตามลำดับ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมเสียดทานภายในของมวลดิน (24.48° และ 30.97° สำหรับดินทราย และดินเหนียว ตามลำดับ) โดยการเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายในเป็นมุมเสียดทานที่ผิวเป็นผลมาจากหนึ่งในหน้าที่หลักของตาข่ายเสริมกำลังดินนั่นคือการสนับสนุนการเกิดการขัดกันของเม็ดดิน (interlock) ของเม็ดดินในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลังดิน [12]

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in})

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือน (*R*in) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะที่มีการเสริมกำลังและดินในสภาวะปกติ โดยที่ค่า R_{in} ของทรายมีค่าสูงสุดในดินทั้ง 2 ชนิดโดยมีค่า R_{in} เฉลี่ยเท่ากับ 1.479 สำหรับกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน c และในกรณีของดินเหนียวค่า R_{in} ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยค่า R_{in} ในกรณีเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันมีค่าเท่ากับ 1.033 ซึ่งพิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่า R_{in} ของดินทรายและดินเหนียวที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.96-2.02 ที่เป็นค่า R_{in} จากการนำตาข่ายเสริมกำลังพลาสติกไปเสริมกำลังในดินชนิดต่างๆ [8,13] การที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า R_{in} ในดินเหนียวนั้นมีสาเหตุมาจากตาข่ายเสริมกำลังดินจะมีประสิทธิการเสริมกำลังที่สูงขึ้นเมื่อใช้เสริมกำลังในดินที่มีความแข็งแรงต่ำแต่จะลดลงจนอาจกลายเป็นจุดอ่อนของโครงสร้างดินในดินที่มีความแข็งแรงสูง [13,14] แนวโน้มของค่า R_{in} แสดงให้เห็นว่าตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังสูงที่สุดเมื่อนำไปใช้ในการเสริมกำลังดินทราย และไม่มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังเมื่อนำไปเสริมกำลังในดินเหนียว ค่า R_{in} ของทุกตัวอย่างถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิว (R_{in}) ของดินทรายและดินเหนียว

ความเค้นตั้งฉาก	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือน R_{in}			
	SU	SR	CU	CR
30 kN/m^2	1	1.54	1	1.04
60 kN/m^2	1	1.47	1	1.03
120 kN/m^2	1	1.43	1	1.03
ค่าเฉลี่ย kN/m^2	1	1.48	1	1.03

5. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันมาเป็นวัสดุเสริมกำลังในดินทราย และดินเหนียว ด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน และเพื่อศึกษาค่า R_{in} ที่เกิดขึ้นระหว่างดินทราย และดินเหนียว กับตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควัน จากผลการทดสอบได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพารารมควันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยในดินทรายเห็นผลการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนได้อย่างชัดเจน ในขณะที่กำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในดินเหนียว

2. ค่า R_{in} ของตัวอย่าง SR มีค่ามากที่สุด และตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันทั้งดินทราย และดินเหนียวจะมีค่า R_{in} สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังในดินชนิดเดียวกันเสมอ

เอกสารอ้างอิง

[1] Yousif, H.F., Fattah, M.Y. and Al-Adili, A.S. (2015). Effect of expansive subgrade soil on reinforced subbase layer, University of Technology, Iraq, October, 2015.

[2] Chaiyaput, S., Arwaedo, N., Jamsawang, P. and Ayawanna, J. (2018). Natural para rubber in road embankment stabilization, Applied Sciences, 12, 1394. https://doi.org/10.3390/app12031394.

[3] Bergado, D.T. and Chai, J.C. (1994). Pullout force/displacement relationship of extensible grid reinforcements, Geotextiles and Geomembranes, 13, 295-316. https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90025-6.

[4] ASTM International. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM C136-06. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2018.

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

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

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

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

[9] Palmeira, E.M. and Milligan, G.W.E. (1989). Large scale direct shear tests on reinforced soil, SOILS AND FOUNDATIONS. 29, 18-30. https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.18.

[10] Knappett, J.A. and Craig, R.F. (2012). Craig's soil mechanics, eighth Ed., Spon Press, New York, pp.168-174.

[11] Malizia, J.P. and Shakoor, A. (2017). Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils, Engineering Geology. DOI:10.1016/j.enggeo.2018.07.028.

[12] Cuelho, E., Perkins, S. and Morris, Z. (2014). Relative operational performance of geosynthetics used as subgrade stabilization, State of Montana, Department of Transportation Research Programs.

[13] Sakleshpur, V.A., Prezzi, M., Salgado, R., Siddiki, N.Z. and Choi, Y.S. (2019). Large-scale direct shear testing of geogridreinforced aggregate base over weak subgrade. International Journal of Pavement Engineering, 20, 649-658. https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1321419.

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