ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

นายชนินนันท์ นันทะเสนา

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

____

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)
กรรมการ

____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชนินนันท์ นันทะเสนา : ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (SHEAR INTERACTION BETWEEN RECYCLED CONCRETE AGGREGATE AND NATURAL FIBER GEOGRIDS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ในพจน์ของการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล กำลังรับแรงดึง และขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษาถูกเตรียมให้มีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันสองแบบ คือ 1) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่าง และ2) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตบน ใกล้เคียงตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติได้จากการถักสานเส้นใยปอแบบเรียบ (Plain pattern) ให้มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันสองขนาด ได้แก่ 7 และ 21 มิลลิเมตร การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าซีบีอาร์ และ ทดสอบการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor energy) ของมวลรวมทั้งสองของขนาด การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ซึ่งดำเนินการทดสอบด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear test) ผลการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจาก การเสริมจีโอกริด พบว่า ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและ จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดของจีโอกริด (D) และปริมาณอนุภาค ที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริด (F_D) นอกจากนี้ยังพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (α) และอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติได้ (D / F_D) มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีประโยชน์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ เมื่อทราบการกระจายขนาดของ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและขนาดช่องเปิดของจีโอกริด

สาขาวิชา <u>การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค</u>	ลายมือชื่อนักศึกษา__________________
ปีการศึกษา 2560	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา____________

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

CHANINNUN NUNTASENA: SHEAR INTERACTION BETWEEN RECYCLED CONCRETE AGGREGATE AND NATURAL FIBER GEOGRIDS. ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This research aims to study shear interaction between recycled concrete aggregate (RCA) and natural fiber geogrids in term of particle size distribution of recycled concrete aggregate, tensile strength and aperture size of natural fiber geogrids. Two particle size distribution curves of RCA samples (recycled concrete aggregate with lower particle size distribution curve and recycled concrete aggregate with upper particle size distribution curve) were prepared based on the specification from Department of Highways, Thailand. Two different aperture sizes (7 and 21 mm) of natural fiber geogrids (plain pattern in machine direction) were used in this study. The laboratory tests on RCA sample carried out in this study include specific gravity, compaction test under modified Proctor energy, CBR and direct shear tests. Direct shear test on RCA and interface interaction between natural fiber geogrid and RCA were conducted using a large-scale direct shear test apparatus. The interface shear strength was found to be highly dependent upon the aperture width of the natural fiber geogrids, D, as well as the RCA particles finer than the aperture width of natural fiber geogrids, F_D. Based on the analysis of test results, a linear relationship between interface shear strength coefficient (α) which is the ratio of interface shear strength of natural fiber geogrids/RCA and shear strength of RCA was proposed, with respect to the D/F_D ratio. The proposed relationship will be useful for a rapid assessment of the interface shear strength coefficient of natural fiber geogrid-reinforced RCA based on the aperture size of natural fiber geogrids and gradation of RCA.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature________

Academic Year 2017 Advisor's Signature_______

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานนี้ สำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ผู้ให้แนวคิด ให้โอกาศ ให้คำแนะนำรวมทั้งช่วยแก้ปัญหา ตรวจทานเนื้อหาอย่างละเอียด รวดเร็วอันเป็นความกรุณาและคุณประโยชน์ต่อผู้จัดทำอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการที่ปรึกษาโครงงานมหาบัณฑิต ที่ได้ทุ่มเทเวลา อบรมพร่ำสอนทั้งด้านคุณวุฒิและคุณธรรม ชี้แนวทางในการศึกษาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วมโครงงานมหาบัณฑิต ที่ชี้แนวทางในการศึกษาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นทางด้านวัสดุที่ใช้ทดสอบ การเตรียมการทดสอบ วิธีการทดสอบ รวมถึงการสรุปและการจัดทำเอกสาร ตลอดการสนับสนุนในด้านต่างๆ จนโครงงานมหาบัณฑิตครั้งนี้สำเสร็จไปด้วยดี ซึ่งผู้เขียนมีความซาบซึ้งใจเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีตและเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบตลอดระยะเวลาในการศึกษาครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อนพี่น้อง รุ่นที่ 15 ทุกท่านที่ช่วยเหลือกันฝ่าฟันมาจนถึงจุดหมายปลายทาง

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ขอขอบคุฯพี่ชายและครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการเรียน ช่วยเหลือให้สามารถทำโครงงานนี้สำเร็จด้วยดี ใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ชนินนันท์ นันทะเสนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	4
2.2 กำลังรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	5
2.3 จีโอกริด	5
2.4 ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุสังเคราะห์และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	6
2.5 แนวคิดพื้นฐานของการเสริมแรงในดิน	13
2.5.1 สาระสำคัญเกี่ยวกับทฤษฎีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวัสดุเสริมแรง (Earth Reinforcement)	13
2.5.2 สาระสาคัญเกี่ยวกับการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง (Natural Fiber for Earth Reinforcement)	15
2.5.3 คุณสมบัติและความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยธรรมชาติ เพื่อผลิตเป็นวัสดุเสริมแรง	16
2.5.4 ทฤษฎีการใช้งานเส้นใยธรรมชาติที่มีอายุการใช้งานจากัด (Limited Life Geotextiles - LLGs Theory)	19
2.6 ประเภทวัสดุที่ใช้เสริมแรง	25
2.6.1 Inextensible Reinforcement	25
2.6.2 Extensible Reinforcement	25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.7 การประยุคต์ใช้ตาข่ายเสริมแรง (Geogrid) 25
2.7.1 ช่วยในการก่อสร้างบนดินอ่อน 26
2.7.2 เสริมในโครงสร้างชั้นทาง 26
2.7.3 กระบวนการรับแรงโดยตะข่ายเสริมแรง (Geogrid) 26
2.8 วิธีการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนของผิวระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลัง 27
2.8.1 การทดสอบโดยวิธีเฉือนโดยตรง (Direct shear Test) 27
2.8.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงออก (Pullout Test) 28
2.9 การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง 28
3 วิธีดำเนินการศึกษา 31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 31
3.2 วิธีการดำเนินงานและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา 31
3.2.1 ลักษณะการถักสารเส้นใย 31
3.2.2 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) 32
3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเสริมแรง (Tensile Test) 32
3.2.4 การทดสอบโดยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test) 33
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล 34
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 35
4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 35
4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง 35
4.1.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 38
4.2 ผลการทดสอบ 39
4.2.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ปราศจากการเสริม จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 39
4.2.2 ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 43
5 สรุปและข้อเสนอแนะ 57
5.1 สรุปผลการศึกษา 57
เอกสารอ้างอิง 58
ประวัติผู้เขียน 62

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง 4

2.2 สารประกอบทางเคมีของตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติ (Methacanon et al., 2010) 17

2.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติ (Methacanon et al., 2010) 18

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 37

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 37

4.3 กำลังต้านทานแรงเฉือน และกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดและปราศจากการเสริมจีโอกริด 42

4.4 สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยกล่องรับแรงเฉือนขนาดกลาง(120 x 120 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) (Sobol et al. 2015) 5

2.2 พฤติกรรมการทรุดตัวถาวรของถนนแบบเสริม และไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์กับจำนวนรอบในการให้น้ำหนัก 6

2.3 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมหินบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002) 7

2.4 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002) 8

2.5 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002) 8

2.6 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมของเสียจากเหมืองตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002) 9

2.7 พฤติกรรมการเฉือนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013) 10

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และความเค้นตั้งฉากตามระนาบของจีโอกริดกับมวลรวมรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013) 10

2.9 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015) 11

2.10 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015) 11

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเสริมแรง (α) และความเครียดปกติ (Arulrajah et al. 2015) 12

2.12 (ก) พื้นผิวสัมผัสของชนิด และวัสดุเสริมแรง (ข) การเสียรูปของมวลดินเมื่อมีการรับแรง 14

2.13 การพิจารณาเสถียรภาพภายใน (Internal Stability) ของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน 14

2.14 เสถียรภาพภายนอก (External Stability) ของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน 15

2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยจากพืชธรรมชาติชนิดต่างๆ (Anand, 2008) 17

2.16 ภาพขยายเส้นใยธรรมชาติ (a) ปอ (b) ป่าน (c) กก (d) ผักตบชวา (Methacanon et al., 2010) 18
2.17 (ก)ค่ากาลังรับแรงดึงและระยะยืดขณะขาดของตัวอย่างเส้นใย (Methacanon et al., 2010) 19
2.18 (ข) ค่าระยะยืดขณะขาดของตัวอย่างเส้นใย (Methacanon et al., 2010) 19
2.19 แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์คันดินเสริมแรงด้วยแผ่นถักสานเส้นใยธรรมชาติบนดินเหนียวอ่อน (Mwasha, 2009) 21
2.20 แบบจำลองที่ใช้ทดสอบคันดินเสริมแรงด้วยแผ่นถักสานจากเส้นใยปอ (Mwasha and Petersen, 2010) 22
2.21 ผลทดสอบแรงปฏิสัมพันธ์แบบดึงออกของแผ่นถักสานจากเส้นใยปอในดิน (Mwasha and Petersen, 2010) 22
2.22 ช่วงเวลาในการใช้งานแผ่นวัสดุสังเคราะห์ในคันดินเสริมแรง (Sarsby, 2007) 23
2.23 การใช้งานวัสดุเสริมแรงในคันภายในช่วงเวลาสั้น ๆ (a) คันดินทั่วไป (b) การป้องกันการแยกตัว (c) การป้องกันการเลื่อนไถล (d) การทรุดตัวที่มากเกินไปบริเวณฐาน (e) การป้องกันการทรุดตัวที่มากเกินไปบริเวณฐาน (Anand, 2008) 24
2.24 ความเค้นที่เกิดขึ้นในมวลดินเสริมด้วย Geogrid (Berg et al. 2000) 27
2.25 Classification of natural fibers 29
2.26 Different types of natural fibers 29
2.27 Different types of natural fibers 30
3.1 การถักสารเส้นใยปอแบบเรียบ 32
3.2 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 33
4.1 การกระจายขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) 36
4.2 จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ขนาดช่องเปิด 7x7 มิลลิเมตร และ 21x21 มิลลิเมตร ถักสานแบบเรียบ (Plain pattern) 36
4.3 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 38
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเค้นเฉือน และการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง และขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง 40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวราบ และการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง และขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง 40
4.6 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง 42
4.7 ผลทดสอบแรงเฉือนและปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง 44
4.8 ผลทดสอบแรงเฉือนและปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน 45
4.9 อิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานกรมทางหลวงเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 46
4.10 อิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดคละตามขอบเขตบนของมาตรฐานกรมทางหลวงเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ 47
4.11 อิทธิพลของขนาดของมวลรวมต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดช่องเปิด 7 มิลลิเมตร 48
4.12 อิทธิพลของขนาดของมวลรวมต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดช่องเปิด 21 มิลลิเมตร 49
4.13 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง 51
4.14 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง 51
4.15 ลักษณะของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติก่อนและหลังการทดสอบ 52
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวดิ่งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง 53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและขนาดช่องเปิดของจีโอกริด ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด 54
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด 54
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด 55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น เช่น อิฐ ไม้ และเหล็ก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปโครงสร้างคอนกรีตเกิดการชำรุด สิ้นสุดอายุการใช้งานหรือต้องเปลี่ยนลักษณะการใช้งาน จึงต้องมีการรื้อถอนเพื่อสร้างสิ่งก่อสร้างใหม่ขึ้นมาทดแทน ทำให้มีเศษวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างไร้คุณค่าในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ วัสดุที่ได้จากการรื้อถอนนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธาได้ Wahlstrom et al. (2000); Jankovic et al. (2012); Engelsen et al. (2012) และ Poon and Chan (2012) ได้แสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทางและชั้นพื้นทาง แม้ว่าจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ด้อยกว่าวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ วัสดุสังเคราะห์(Geosynthetics) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเสถียรภาพในชั้นทาง และความคงทนของถนน ในปี ค.ศ.1926 South Carolina Highways Department (Becham et al. 1935) ได้ประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานทางเป็นครั้งแรก พบว่าวัสดุสังเคราะห์ช่วยลดการแตกร้าวของผิวถนนได้เป็นอย่างดี และวัสดุสังเคราะห์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับถนนชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง

วัสดุเส้นใยธรรมชาติของพืชจำพวก ปอ หรือป่าน ซึ่งเป็นพืชที่มีจำนวนมากในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย อีกทั้งเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่นมีราคาถูก และสามารถนำมาใช้โดยไม่มีต้นทุนวัตถุดิบ ในปี 2556 การศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน โดย ดร. ธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์ จากผลการทดสอบเบื้องต้นในส่วนของกำลังรับแรงดึงของเส้นใยที่ถักสานเป็นโครงตาข่าย พบว่า กลุ่มเส้นใยขนาดยาวจำพวก ปอ หรือป่าน มีกำลังรับแรงดึงค่อนข้างสูงประมาณ 22 กิโลนิวตันต่อเมตร (ตามแนวการถักสานแบบเรียบ) ซึ่งจะเหมาะสำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงในดิน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเส้นใยปอ (Kenaf) ที่ถักสานเป็นโครงตาข่ายในลักษณะเรียบ (Plain pattern) โดยที่มีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกันคือ 7 และ 21 มิลลิเมตร เพื่อมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่ถนนชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง เพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และเพื่อสร้างสมการทำนายกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมคอนกรีต

รีไซเคิล งานวิจัยนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างใกล้เคียงตามมาตรฐาน ทล.-ม.201/2544 บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะได้รับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการอันได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) และ ซีบีอาร์ ตัวแปรอิทธิพลที่ทำการศึกษาได้แก่คุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล การทดสอบแรงเฉือนตรงดำเนินการด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) ท้ายสุดงานวิจัยนี้จะศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (ขนาดช่องเปิด) และคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือน) ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

1.2.2. เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้เส้นใยปอ (Kenaf) เอามาถักแบบเรียบด้วยมือนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึง

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของการกระจายขนาดมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) โดยใช้มวลรวม 2 ขนาด คือ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง(ทล.-ม. 201/2544)

1.3.2.1 ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C127 (2012)

1.3.2.2 ทดสอบการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified Proctor energy) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009)

1.3.2.3 การทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883-99

1.3.3 ศึกษากำลังร่วมเฉือนดำเนินการโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008)

1.3.3.1 ใช้ Normal stress เท่ากับ 50 100 และ 200 กิโลพาสคาล

1.3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของช่องเปิดโดยใช้ขนาดช่องเปิด 7 และ 21 มิลลิเมตร

1.3.3.3 ในการทดสอบจะทำซ้ำการทดสอบละ 3 ครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

1.4.2 ได้สมการทำนายกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการกระจายขนาดกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆและปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดและมวลรวมรีไซเคิล จะนำเสนอในหัวข้อนี้ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบวิธีการวิจัยและวิธีการวิเคราะห์ผลทดสอบ

2.1 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การประยุกต์ใช้วัสดุมวลรวมรีไซเคิลเริ่มต้นจากการบดย่อยเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างและโรงงานให้มีขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง

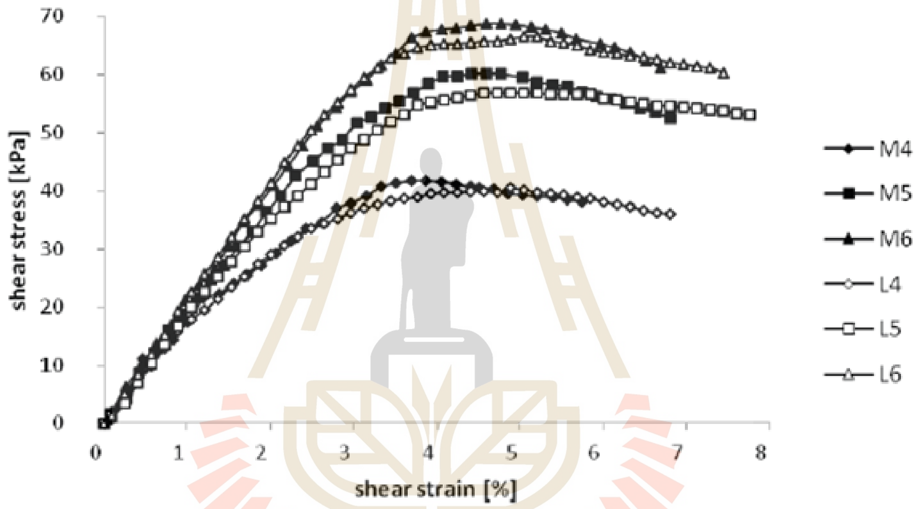
Engineering Properties	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG	Typical Quarry Materials
Gravel content (%)	50.7	53.6	44.7	48.0	9.2	53.0	-
Sand content (%)	45.7	39.8	45.1	46.0	85.4	41.8	-
Fines content (%)	3.6	6.6	10.2	6.0	5.4	5.2	-
USCS classification	GW	GW	SW	GW	SW	SW	-
Los Angeles Abrasion (max)	28	36	21	42	25	25	< 40
Modified Compaction: Max dry density (Mg/m^3)	1.96	2.02	2.23	2.00	1.78	1.99	> 1.78
Modified Compaction: Optimum moisture content (%)	12.0	10.7	9.3	8.1	10.0	8.8	8 - 15
California Bearing Ratio (%)	118-160	123-138	121-204	30-35	42-46	73-76	> 80
Unconfined Compression Test: q_u (kPa)	310-378	86-130	153-207	100-117	-	-	-
Direct Shear Test: Apparent cohesion (kPa)	154	61	285	9	6	14	> 35
Direct Shear Test: Friction angle (degrees)	45	52	48	49	45	49	> 35
Triaxial Test (CD): Apparent cohesion (kPa)	45	41	46	53	0	2	> 35
Triaxial Test (CD): Friction angle (degree)	49	49	51	37	35	41	> 35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ซึ่ง RCA คือมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate) CB คืออิฐบด (Crushed brick) WR คือเศษหิน (Waste rock) RAP คือผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement) FRG คือแก้วรีไซเคิลละเอียด (Fine recycled glass) และ MRG คือแก้วรีไซเคิลขนาดกลาง (Medium recycled glass) จะเห็นได้ว่าวัสดุรีไซเคิลเกือบทั้งหมดมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามข้อกำหนดทั่วไปสำหรับหินคลุก (Typical quarry materials) นอกจากนี้ นักวิจัยบางท่าน (Tam and Tam 2007; Gomez and Soberon 2002; Poon and Chan 2006a; Poon and Chan 2006b; Courard et al 2010; Arulrajah et al. 2012b; McKelvey et al. 2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมการเฉือน (Shear behavior) ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

2.2 กำลังรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Sobol et al. (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและอิทธิพลของขนาดกล่องการทดสอบแรงเฉือนตรงต่อกำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้กล่องรับแรงเฉือน 2 ขนาด คือ ขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) พบว่า เมื่อทำการเฉือนที่กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากกล่องทดสอบทั้งสองขนาด จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มุมเสียดทานภายในของกล่องทดสอบขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) สูงกว่ากล่องทดสอบขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) ประมาณ 1.2 องศา



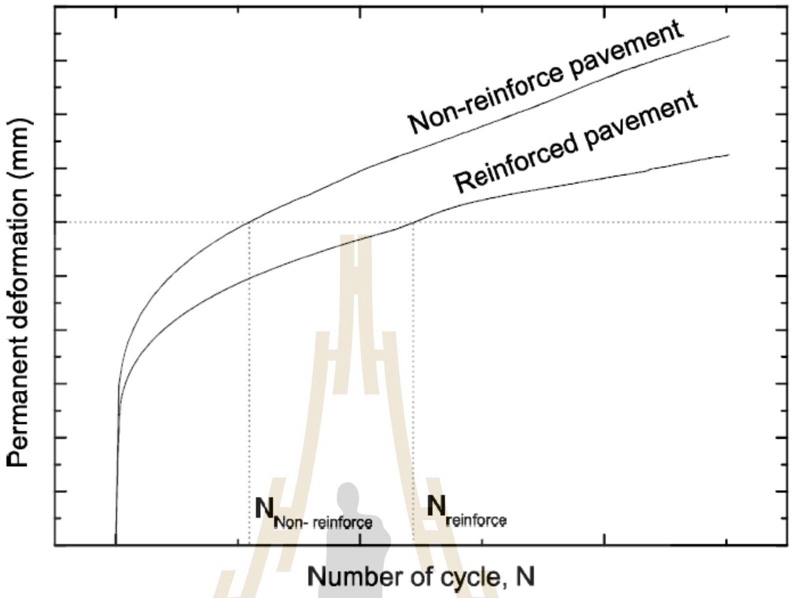
รูปที่ 2.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยกล่องรับแรงเฉือนขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) (Sobol et al. 2015)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 จีโอกริด

การใช้จีโอกริดเสริมกำลังในชั้นทางและชั้นรองพื้นทางช่วยให้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และช่วยลดการทรุดตัวของผิวทางอันนำมาซึ่งอายุการใช้งานที่ได้นานขึ้น จีโอกริดมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดร่องล้อลึก การเสียรูปเฉือน (Shear Deformation) (Montanelli et al. 1997; Henry et al. 2009) ดังนั้น จึงช่วยลดความหนาของชั้นทางได้ การติดตั้งจีโอกริดหลายชั้นจะช่วยเสริมแรงในชั้นทาง (Cancelli et al. 1997; Perkins 1999) Youwai et al. (2010) ได้สร้างแบบจำลองของถนนที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุสังเคราะห์ต่อพฤติกรรมของถนนเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถนนที่

เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เกิดการทรุดตัวถาวรน้อยกว่าถนนที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ที่จำนวนรอบในการให้น้ำหนักที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

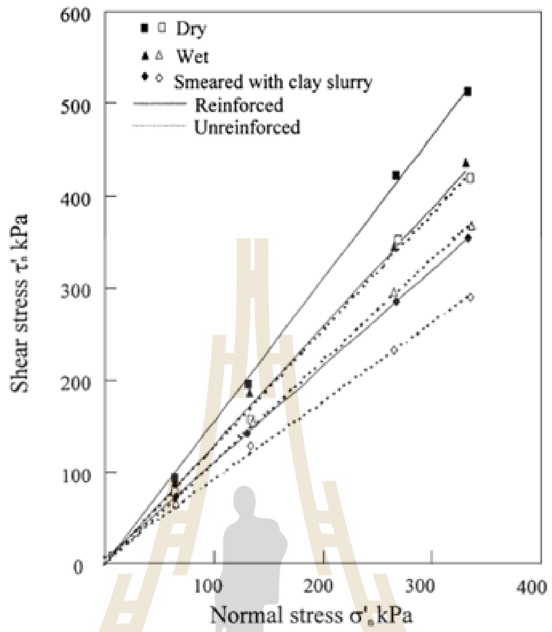


รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการทรุดตัวถาวรของถนนแบบเสริมและไม่เสริมกำลัง
ด้วยวัสดุใยสังเคราะห์กับจำนวนรอบในการให้น้ำหนัก

2.4 ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุสังเคราะห์และมวลรวมรีไซเคิล

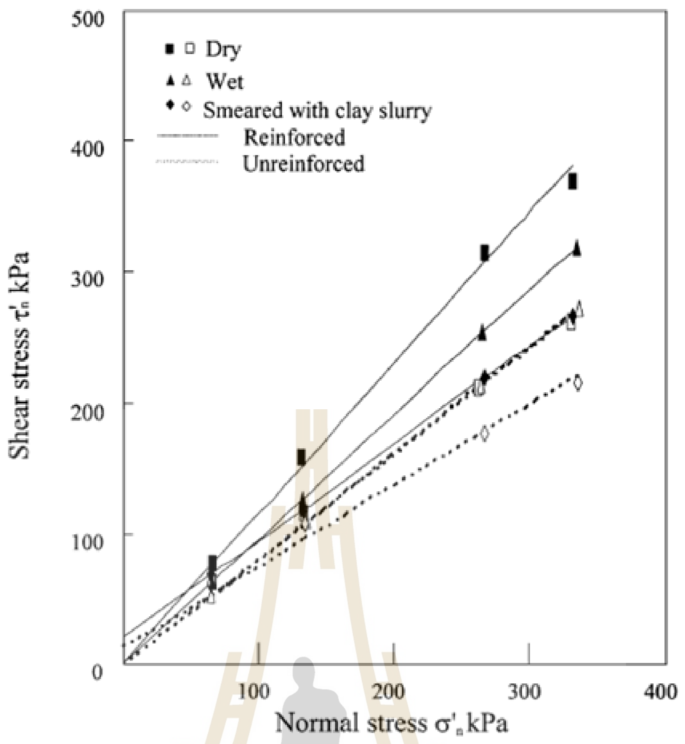
งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างดินกับวัสดุจีโอกริด (Kazimierowicz 2007; Araujo et al. 2009; Liu et al. 2009a; Liu et al. 2009b; Rowe and Taechakunthorn 2011; Palmeira et al. 2010) ในขณะที่การศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมรีไซเคิลกับวัสดุจีโอกริด (Zekkos et al.2010; Arulrajah et al. 2012a) ยังมีอยู่อย่างจำกัดและต้องการการศึกษาเพิ่มอย่างจริงจังเพื่อประโยชน์ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและเศรษฐ์ศาสตร์ Touahamia et al. (2002) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนโดยกล่องรับแรงเฉือนขนาดใหญ่ของมวลรวมจากเศษการรื้อถอนอาคารมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและมวลรวมของเสียจากเหมือง การทดสอบได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของหินคลุก โดยทดสอบที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสมและต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสมและผสมดินเหนียว 20% และเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างการเสริมวัสดุจีโอกริดและไม่เสริมวัสดุจีโอกริด ผลการทดลอง พบว่า เมื่อบดอัดหินคลุกที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงเฉือนจะสูงกว่าการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไปกำลังรับแรง

เฉือนได้ลดลง แต่เมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกริดเข้ามา พบว่า กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกริด ดังแสดงในรูปที่ 2.3

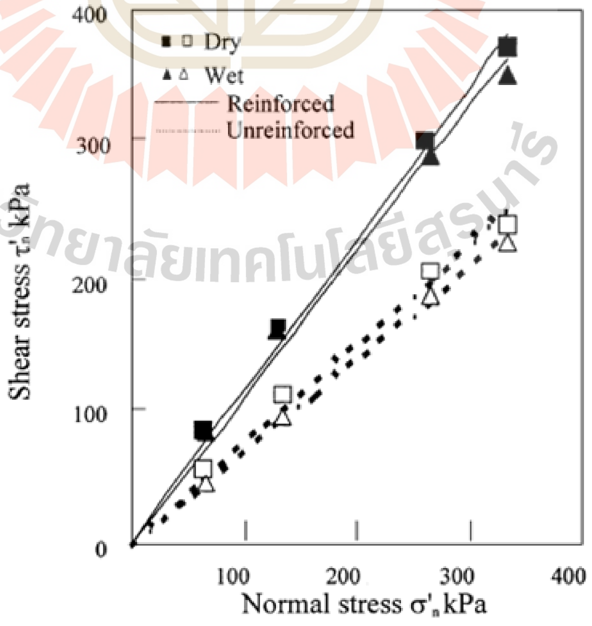


รูปที่ 2.3 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมหินบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)

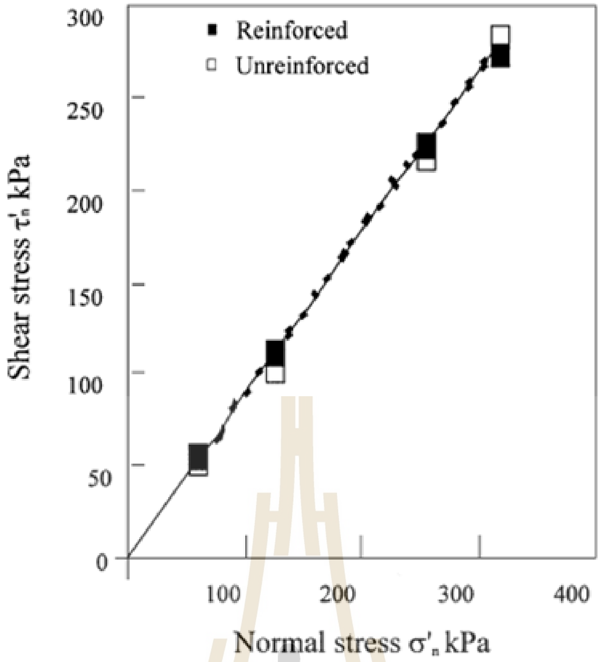
ผลการทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พบว่า กำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แต่เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไปกำลังรับแรงเฉือนได้ลดลงและเมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกริดเข้ามา พบว่า กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกริดและการบดอัดด้านเปียกยังมีค่าสูงกว่าการบดอัดด้านแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนผลการทดสอบมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พบว่า กำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) เช่นเดียวกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และเมื่อมีการการเสริมวัสดุจีโอกริดเข้ามา พบว่า กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกริด และการบดอัดด้านเปียกและด้านแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ผลการทดสอบเศษมวลรวมจากของเสียจากเหมืองนั้น ได้ทำการทดสอบบดอัดเพียงด้านแห้งด้านเดียว พบว่า กำลังรับแรงเฉือนระหว่างการเสริมจีโอกริดและไม่เสริมจีโอกริดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลตามเงื่อนไขต่างๆ(Touahamia et al. 2002)

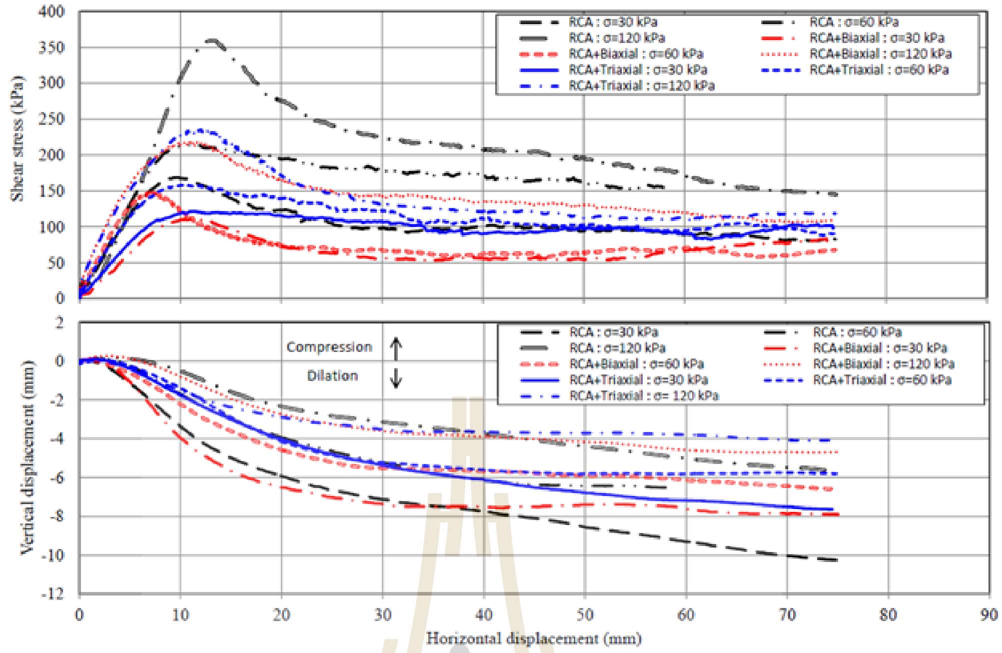


รูปที่ 2.5 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารตามเงื่อนไขต่างๆ(Touahamia et al. 2002)

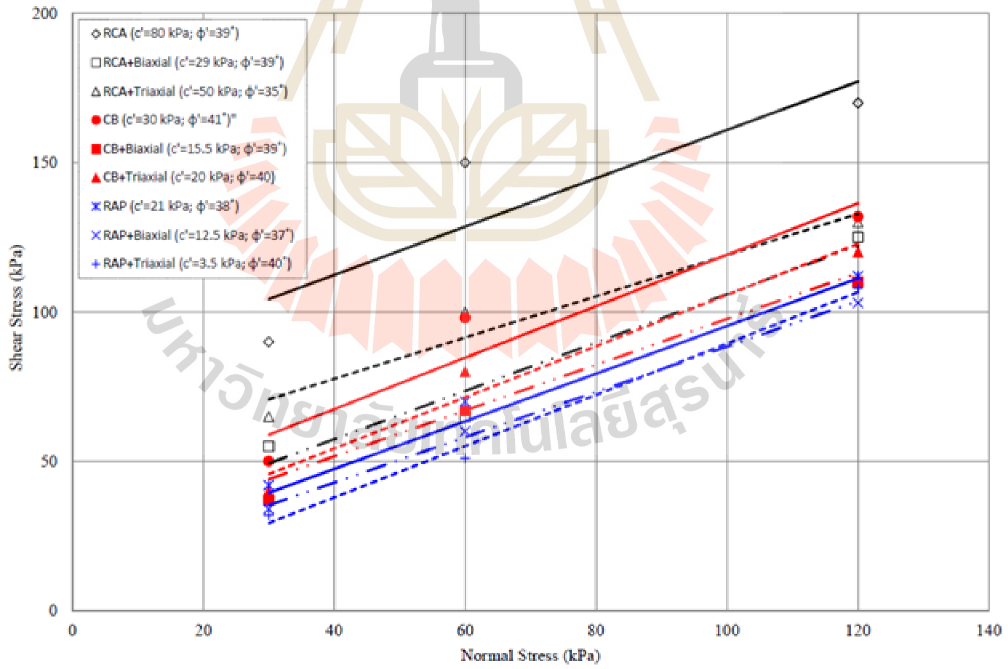


รูปที่ 2.6 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมของเสีย
จากเหมืองตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลกับจีโอกริด ความสัมพันธ์ความระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากของผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA, CB และ RAP) และจีโอกริด แสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า มุมเสียดทานภายในมีค่าสูงเกินกว่า 37 องศา ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมการทาง (Arulrajah et al. 2013)



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการเฉือนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013)

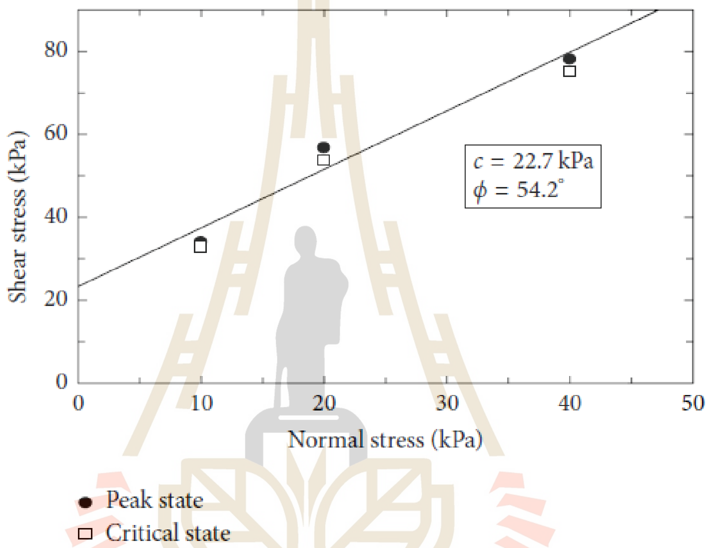


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตาม
ระนาบของจีโอกริดกับมวลรวมรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013)

Arulrajah et al. (2015) ได้ศึกษาการปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลและจีโอกริดแบบสามแกนด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ ซึ่งโฟมแก้วที่นำมาทดสอบ

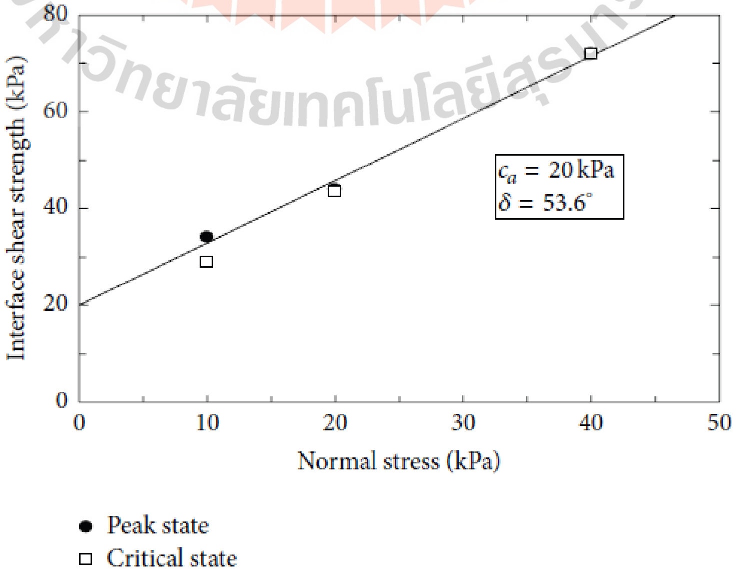
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลิตมาจากตะกอนน้ำเสียในเขตเมืองเมลเบิร์นประเทศออสเตรเลีย ผลการทดสอบ พบว่า มวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลมีกำลังยึดเหนี่ยว 22.7 กิโลปาสคาลและมีมุมเสียดทานภายใน 54.2 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนกรวดแน่นเพื่อเป็นวัสดุถมกลับหลังกำแพงกันดินเสริมกำลังตามมาตรฐาน AASHTO สำหรับมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกริดมีกำลังที่ลดลงเล็กน้อย โดยมีแรงยึดเหนี่ยว 20 กิโลปาสคาลและมีมุมเสียดทานภายใน 53.6 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.10



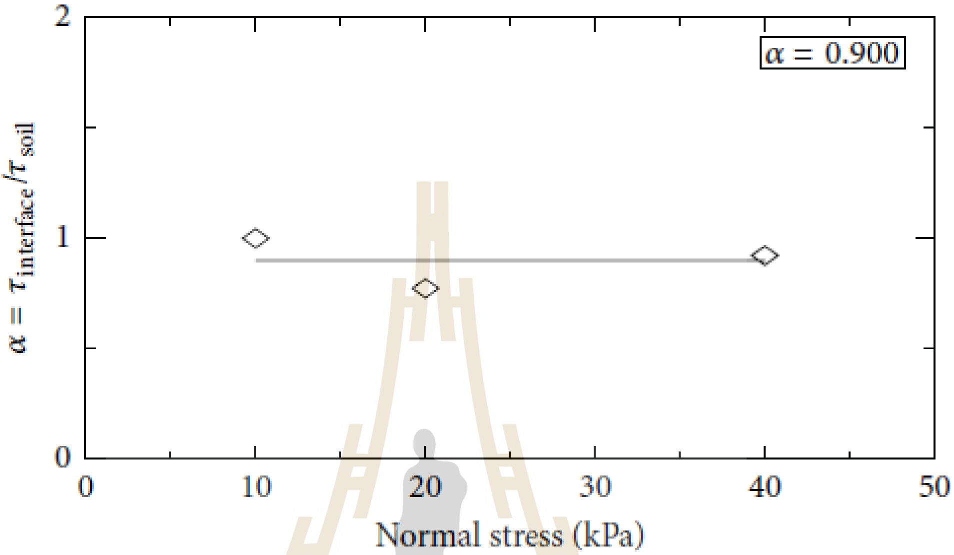
รูปที่ 2.9 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015)

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของโฟมแก้วเสริมกำลังมีค่า 0.90 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบกับวัสดุชนิดอื่น เช่น มวลรวมผิวทางเสริมกำลัง (α = 0.88) มวลรวมอิฐบดเสริมกำลัง (α =0.79) และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมกำลัง (α = 0.71) เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเสริมแรง (α) และความเครียดปกติ (Arulrajah et al. 2015)

จากผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและซีบีอาร์ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล พบว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีคุณสมบัติที่ดีสามารถใช้เป็นวัสดุพื้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนนในประเทศไทยและจากผลทดสอบแรงเฉือนตรง พบว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่ามวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน เนื่องจากอิทธิพลของขนาดเฉลี่ย (D50) ที่มีขนาดใหญ่กว่า

กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริด เนื่องจาก การลดลงของการขัดกัน (interlocking) ระหว่างอนุภาคของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในบริเวณที่มีการเสริมจีโอกริดซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดหน้าตัดเฉือน (shear plane) สำหรับมวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละแบบเดียวกันเมื่อขนาดช่องเปิดของจีโอกริดมีขนาดใหญ่มากขึ้นกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก การขัดกันของอนุภาคที่มีขนาด

เล็กกว่าจีโอกริดที่เพิ่มมากขึ้นและเมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกริดขนาดเดียวกันกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างมีค่าสูงกว่าขอบเขตบน เนื่องจาก อิทธิพลของขนาดเฉลี่ย (D50) ที่มีขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับผลทดสอบหากำลังต้านแรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริด

สมการกำลังร่วมเฉือนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน α ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริด สมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเพียงต้องการกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ขนาดช่องเปิดของจีโอกริดและการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

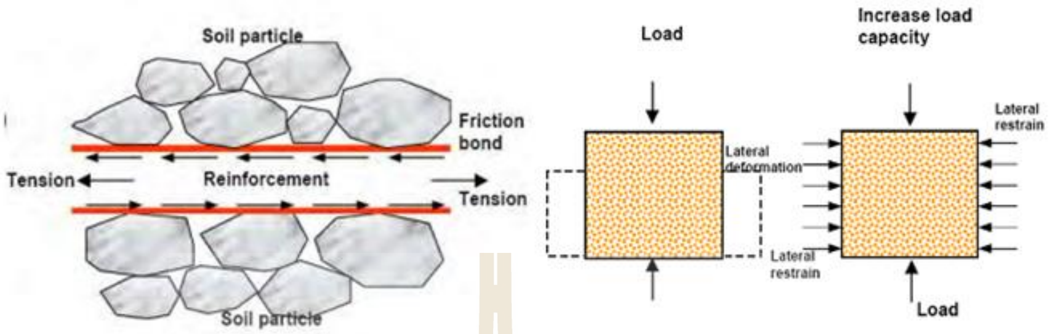
2.5 แนวคิดพื้นฐานของการเสริมแรงในดิน

2.5.1 สาระสำคัญเกี่ยวกับทฤษฎีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวัสดุเสริมแรง (Earth Reinforcement)

แนวคิดการเสริมกำลังให้แก่ดินนั้นมีการใช้งานมานานกว่า 20 ปี การวิวัฒนาการและพัฒนาแนวคิดการเสริมกาลังให้แก่ดินนั้นมาจากรากต้นไม้พืชที่เป็นโครงข่ายยึดเกาะมวลดินให้เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนไม่หลุดออกจากกันได้ง่ายแต่วัสดุรากต้นไม้มีการเสื่อมย่อยสลายพุพังเน่าเปื่อย มนุษย์มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาวัสดุที่สามารถควบคุมคุณภาพและมีความคงทนต่อการใช้งาน โดยมีการใช้วัสดุต่าง ๆ อาทิเช่น ไม้ไผ่ เหล็กเส้น เหล็กแผ่น โดยมีลักษณะการเสริมแรงเป็นชิ้นแยกจากกัน จากนั้นพัฒนามาเป็นลักษณะแบบโครงถักหรือตาข่ายเพื่อให้ง่ายต่อการก่อสร้างและสามารถรับแรงได้ดียิ่งขึ้น

โดยทั่วไปคุณสมบัติในการรับแรงดึงของดินแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะทางกายภายของดินซึ่งโดยปกติแล้วดินจะเป็นวัสดุที่มีค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Resistance) น้อย ดินเหนียวหรือดินลูกรังเป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กค่ากำลังรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesion) ในขณะที่กำลังรับแรงดึงของทรายหรือกรวด ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่าน้อยมากหรือไม่มีเลย การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้รับแรงดึงได้มากขึ้นสามารถทาได้หลายวิธีซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการเพิ่มวัสดุตัวอื่นเข้ามาในโครงสร้างดินเพื่อให้วัสดุดังกล่าวรับแรงดึงให้กับดินได้ดียิ่งขึ้น หลักการในการเสริมกำลังให้แก่ดินโดยใช้วัสดุอื่นนั้นเกิดจากพฤติกรรมของแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคดินกับวัสดุที่ใช้เสริมกำลัง โดยแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสดังกล่าวจะต้องเพียงพอกระทั่งทำให้อนุภาคดิน

ไม่เกิดการเคลื่อนตัวและสามารถกระจายแรงดึงที่เกิดขึ้นในมวลดินไปสู่วัสดุเสริมกำลัง ทำให้กำลังรับแรงดึงของดินเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.12)

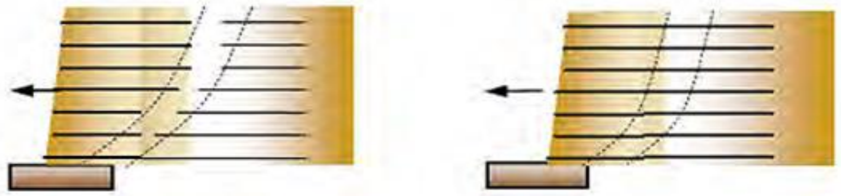


รูปที่ 2.12 (ก) พื้นผิวสัมผัสของชนิดและวัสดุเสริมแรง (ข) การเสียรูปของมวลดินเมื่อมีการรับแรง

2.5.1.1 เสถียรภาพของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน (Stability of Reinforced Earth Structures)

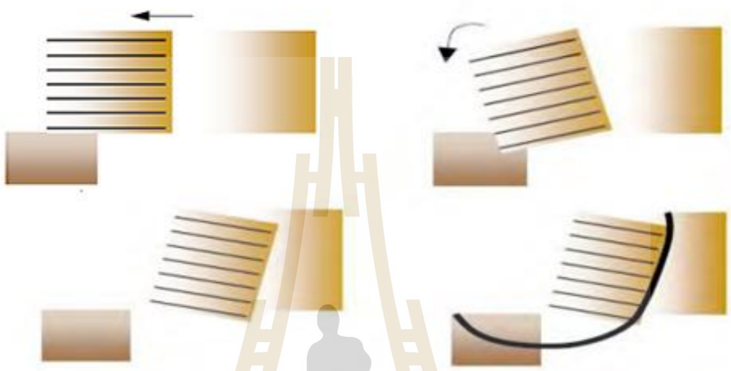
โดยทั่วไปโครงสร้างการเสริมแรงในดินจะต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างเมื่อใช้งานจริง โดยน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่กระทำอาจจะมาจากน้ำหนักที่กระทำด้านบนแรงดันดินด้านข้างขณะที่ฐานรากหรือดินที่รองรับโครงสร้าง การเสริมแรงในดินต้องมีความแข็งแรงและมั่นคงเพียงพอการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ (ปรีดิเทพและอเนก 2548)

ก. เสถียรภาพภายในโครงสร้างการเสริมแรงในดิน (Internal Stability) ซึ่งจะพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุเสริมแรงในดินเป็นสำคัญ คือ การวิบัติเนื่องจากกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงไม่เพียงพอ (Tension Failure) และการวิบัติเนื่องจากค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของดินและวัสดุเสริมแรงในดินมีค่ามากเกินไป (Pullout Failure) ลักษณะการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใน แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การพิจารณาเสถียรภาพภายใน (Internal Stability) ของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน

ข. เสถียรภาพภายนอกของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน (External Stability) โดยจะพิจารณาดินที่รองรับโครงสร้างทั้งหมดว่ามีเสถียรภาพเพียงพอต่อการรับน้ำหนักโครงสร้างการเสริมแรงในดินได้หรือไม่ อีกทั้งยังพิจารณา ถึงเสถียรภาพของลาดดินบริเวณด้านหลังโครงสร้างการเสริมแรงในดินอีกด้วย แสดงไว้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เสถียรภาพภายนอก (External Stability) ของโครงสร้างการเสริมแรงในดิน

2.5.2 สาระสำคัญเกี่ยวกับการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง (Natural Fiber for Earth Reinforcement)

การใช้ต้นไม้หรือหญ้าที่มีระบบรากที่แข็งแรงในการป้องกันการชะล้างพังทลาย (Erosion Control) ตลอดจนการเสริมเสถียรภาพเชิงลาด (Slope Stabilization) นั้นเป็นที่ประจักษ์จากประสบการณ์ของการใช้งานมาแต่ครั้งโบราณกาล การใช้วิธีการเสริมแรงให้แก่ดินโดยใช้พืชในลักษณะที่เป็นระบบและมีลักษณะเชิงวิชาการมากขึ้นนั้นเริ่มมีการพัฒนาองค์ความรู้ในราวปี พ.ศ. 2473 ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาความนิยมในวิธีการเช่นนี้มีมากขึ้นสืบเนื่องมาจากความตื่นตัวในเรื่องสิ่งแวดล้อม อีกทั้งความรู้และข้อมูลของวิธีการเหล่านี้สามารถหาได้ง่ายขึ้น ในการใช้อ้างอิงเพื่อการออกแบบ อันนาไปสู่ความน่าเชื่อถือของวิธีการเช่นนี้ วิศวกรจึงได้หันมาศึกษาคุณสมบัติของพืชหรือหญ้าที่มีระบบรากแข็งแรง เช่น หญ้าแฝก โดยที่เมื่อเทียบกับพืชนั้นหญ้าแฝกได้เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาการชะล้างพังทลายและเสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งการใช้งานหญ้าแฝกนั้นอาจใช้หญ้าแฝกแต่เพียงอย่างเดียวหรือจะใช้ร่วมกับวิธีการทางวิศวกรรมด้วยก็ได้ การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังการรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil) และกำลังรับแรงดึงของราก (Root Tensile Strength) จะทำให้เข้าใจคุณลักษณะของการเพิ่มเสถียรภาพเชิงลาด โดยใช้รากพืชในมากยิ่งขึ้น (ดิถีและวิฑูร 2543)

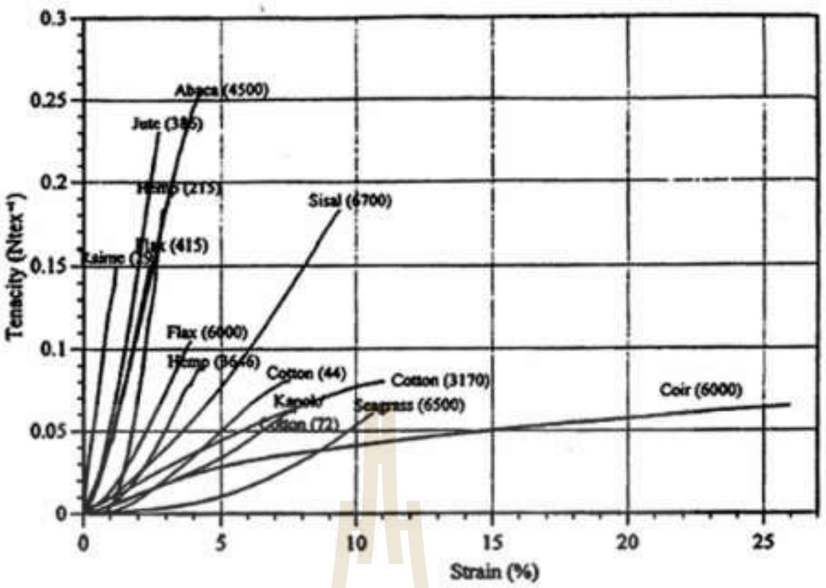
การนำเส้นใยที่ได้จากพืชตามธรรมชาติหรือพืชท้องถิ่นมาถักทอหรือสานให้เป็นลักษณะโครงตาข่ายหรือเป็นแผ่นนั้น ยังสามารถช่วยให้ประชาชนในพื้นที่ที่มีพืชเหล่านั้นอยู่มากได้มีรายได้เพิ่มมากขึ้นจากการนาเส้นใยธรรมชาติมาผลิตให้เป็นวัสดุเสริมแรงในดินอีกด้วย ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภูมิอากาศเหมาะสมและมีพืชหลากหลายชนิดที่สามารถนำเส้นใยมาผลิตเป็นวัสดุเสริมแรงในดินดังกล่าวอีกด้วย โดยข้อเสนอการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาข้อมูลจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาจากบทความทางวิชาการต่างๆ ซึ่งพบว่า ในต่างประเทศได้มีการศึกษาการใช้งานเส้นใยธรรมชาติ เพื่อนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในดินอย่างแพร่หลายในช่วงเวลาประมาณ 10 ปีที่ผ่านมาโดยประเทศที่เริ่มมีการศึกษาการใช้งานเส้นใยธรรมชาติดังกล่าวเช่น ประเทศอินเดีย ประเทศตรินิแดด และประเทศที่ประชาชนประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก เนื่องจากสามารถเลือกใช้พืชที่ให้เส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน

2.5.3 คุณสมบัติและความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นวัสดุเสริมแรง

เส้นใยจากพืชธรรมชาตินั้นสามารถแบ่งตามชนิดของลักษณะการเกิดของเส้นใย เช่น ลำต้น เมล็ด ใบ หรือผล เป็นต้น การนำเอาเส้นใยธรรมชาติต่างๆ เหล่านี้มาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาในช่วงเริ่มแรกนั้นหน่วยงานทางด้านทางหลวงของรัฐแคลิฟอร์เนียประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการทดสอบเส้นใยที่ได้จากฝ้ายเพื่อใช้ในงานก่อสร้างทาง (Beckman and Mills, 1957) โดยวางแผ่นเส้นใยนี้บนพื้นทางก่อนที่จะทำการปูผิวแอสฟัลท์ ซึ่งพบว่า สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างชั้นทางได้ โดยพฤติกรรมของแผ่นเส้นใยนี้จะเป็นแบบลักษณะแผ่นเรียบมากกว่าเป็นโครงตาข่ายทำให้ไม่สามารถยึดเกาะมวลดินเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากการใช้งานในเชิงวิศวกรรมโยธาแล้วเส้นใยธรรมชาติยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานโดยผสมในวัสดุต่าง ๆ เช่น ไม้เทียมที่ทำจากซีเมนต์ผสมเศษไม้และเส้นใยธรรมชาติ (Askew, 2000) การนำเส้นใยปอไปผสมกับซีเมนต์เพื่อผลิตกระเบื้องหลังคา (Mwasha et al., 2002) เส้นใยจากมะพร้าวนำไปผลิตเป็นวัสดุที่ใช้ป้องกันการกัดเซาะผิวดิน (Mandal, 1989)

งานวิจัยของ Anand (2008) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยจากพืชชนิดต่างๆ (รูปที่ 2.15) พบว่า เส้นใยจากพืชชนิดต่างๆ มีกำลังรับแรงดึงสูงมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นแผ่นวัสดุเสริมแรงในดิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย จากพืชธรรมชาติชนิดต่างๆ (Anand, 2008)

กลุ่มนักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ได้นำเสนองานวิจัยโดย Methacanon et. al, (2010) ซึ่งทำการศึกษาคุณสมบัติและความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นวัสดุเสริมแรง โดยเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติในประเทศไทยได้แก่ เส้นใยจากปอ (Sisal) ป่าน (Roselle) กก (Reed) และผักตบชวา (Water Hyacinth) โดยได้นำเอาเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มาทำการทดลองเพื่อหาสารประกอบทางเคมี ลักษณะเส้นใย การดูดความชื้น คุณสมบัติเชิงกลการย่อยสลายเป็นต้น ตารางที่ 2.2 แสดงสารประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติที่ศึกษา ส่วนตารางที่ 2.3 เป็นข้อมูลทางกายภาพด้านความยาวและความกว้างของเส้นใย การศึกษานี้ ยังได้ศึกษาลักษณะของเส้นใยจากภาพถ่ายกำลังสูงซึ่งจะสามารถเห็นความแตกต่างของเส้นใยแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.2 สารประกอบทางเคมีของตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติ (Methacanon et al., 2010)

Natural fiber	Composition (wt% on dry basis)				
	Cellulose	Hemicelluloses	Lignin	Ash	Moisture
Sisal	72.97	5.63	13.59	0.84	7.02
Roselle	70.2	7.21	14.91	0.72	6.97
Reed	47.46	18.75	19.81	4.65	9.32
Water hyacinth	52.2	16.76	9.42	12.14	9.46

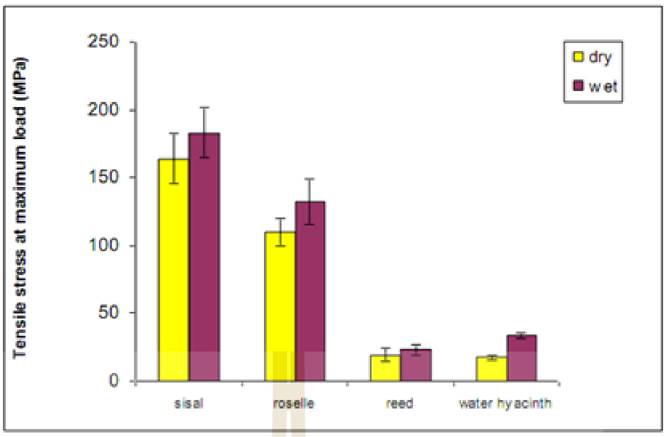
ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติ (Methacanon et al., 2010)

Natural fiber	Length (L,µm)	Width (W,µm)	Aspect ratio (L/W)
Sisal	201.1± 51.3	13.2± 1.9	15.3
Roselle	164.6± 52.9	12.0± 3.3	13.7
Reed	108.8± 29.6	5.1± 1.3	21.5
Water hyacinth	129.9± 32.4	81.8± 7.9	1.6

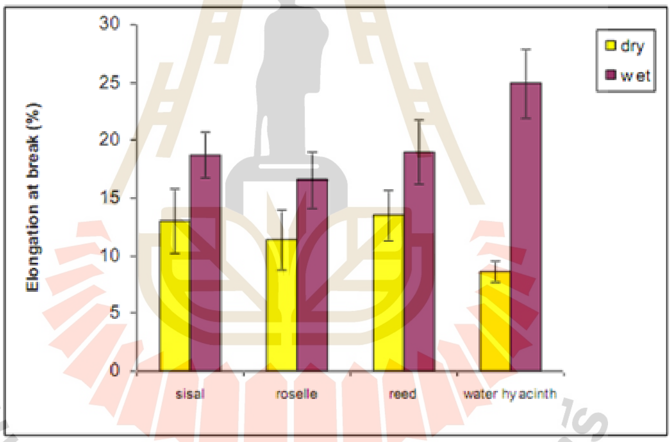
ในส่วนการทดสอบเชิงกลเพื่อหากำลังรับแรงดึงของเส้นใยนั้น พบว่า เส้นใยที่มีสภาพอุ้มน้ำมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงกว่าเส้นใยในสภาพแห้ง ค่ากำลังรับแรงดึงของเส้นใยปอและป่านมีค่าประมาณ 112 -180 MPa. ส่วนเส้นใยกกและเส้นใยผักตบชวามีค่าประมาณ 18-33 MPa. ผลการทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงดึงและระยะยืดขณะขาดของตัวอย่างเส้นใยแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 (ก) และ รูปที่ 2.19 (ข) ตามลำดับ ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าการใช้เส้นใยปอและเส้นใยป่านซึ่งมีลักษณะเส้นใยยาวและมีกำลังรับแรงดึงสูงเหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ลาดดินหรือคันดินเสริมแรงได้ ส่วนเส้นใยกกและเส้นใยผักตบชวานั้นมีลักษณะเส้นใยสั้นและมีกำลังรับแรงดึงต่ำจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายหน้าดิน

รูปที่ 2.16 ภาพขยายเส้นใยธรรมชาติ (a) ปอ (b) ป่าน (c) กก
(d) ผักตบชวา (Methacanon et al., 2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.17 (ก) ค่ากำลังรับแรงดึงและระยะยืดขณะขาดของตัวอย่างเส้นใย (Methacanon et al., 2010)



รูปที่ 2.18 (ข) ค่าระยะยืดขณะขาดของตัวอย่างเส้นใย (Methacanon et al., 2010)

2.5.4 ทฤษฎีการใช้งานเส้นใยธรรมชาติที่มีอายุการใช้งานจำกัด (Limited Life Geotextiles - LLGs Theory)

Sarsby et. al. (1992) ได้เสนอทฤษฎีการใช้งานเส้นใยธรรมชาติที่มีอายุการใช้งานจำกัด (Limited Life Geotextiles - LLGs Theory) โดยมีแนวคิดในการนำเส้นใยธรรมชาติมาทักทอเป็นแผ่นและนำมาใช้งานเสมือนเป็นแผ่นวัสดุสังเคราะห์ (Geotextiles) เพื่อใช้ในการเสริมแรงให้กับคันดินที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อน โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าเสถียรภาพของลาดดินหรือคันดินถมนั้นจะมีค่าน้อยหรือใกล้เคียงค่าวิกฤติในขณะที่ก่อสร้างแล้วเสร็จในเวลาช่วงแรก เมื่อเวลาผ่าน

ไปเสถียรภาพของลาดดินจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ดังนั้นการใช้งานเส้นใยธรรมชาติซึ่งมีอายุการใช้งานจำกัดนั้นสามารถนำมาใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินหรือคันดินได้ โดยที่จะต้องเลือกใช้งานเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงและอายุการใช้งานอยู่ในช่วงที่เหมาะสม การใช้งานแผ่นวัสดุสังเคราะห์หรือแผ่นวัสดุเส้นใยธรรมชาตินั้นสามารถนำมาใช้งานด้านต่างๆทางวิศวกรรมซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ (Sarsby, 2007)

ก. การใช้งานเป็นระบบกรอง (Filtration)

การใช้งานลักษณะนี้โดยมากจะใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์เพื่อห่อหุ้มทรายหรือกรวดที่ใช้ในการกรองน้ำ ซึ่งแผ่นวัสดุสังเคราะห์จะทำหน้าที่กรองไม่ให้ทรายหรือกรวดหลุดออกไปและช่วยให้น้ำหรือมวลละเอียดระบายออกไปจากระบบ

ข. การใช้งานเป็นชั้นแยก (Separation)

โดยมากจะใช้ในงานถนนโดยจะปูแผ่นวัสดุสังเคราะห์ระหว่างชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง เพื่อเป็นการแยกวัสดุสองประเภทระหว่างชั้นแยกจากกันและเพื่อป้องกันไม่ให้มวลรวมด้านบนเคลื่อนตัวลงไปด้านล่าง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างชั้นทางเสียหาย

ค. การใช้งานเป็นส่วนป้องกันการชะล้าง (Erosion Control)

การใช้งานลักษณะนี้จะแตกต่างจากการใช้งานเชิงวิศวกรรมแบบอื่น โดยจะใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ในการคลุมผิวดินเพื่อลดการชะล้างพังทลายของหน้าดิน อีกทั้งยังช่วยชะลอความเร็วของน้ำผิวดินได้อีกด้วย

ง. การใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

การใช้งานแผ่นวัสดุสังเคราะห์ในลักษณะนี้จะทำการเสริมแผ่นวัสดุสังเคราะห์เป็นชั้นๆ ภายในโครงสร้างกันดินหรือลาดดิน เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพป้องกันการเลื่อนไถลการแยกตัวของมวลดิน

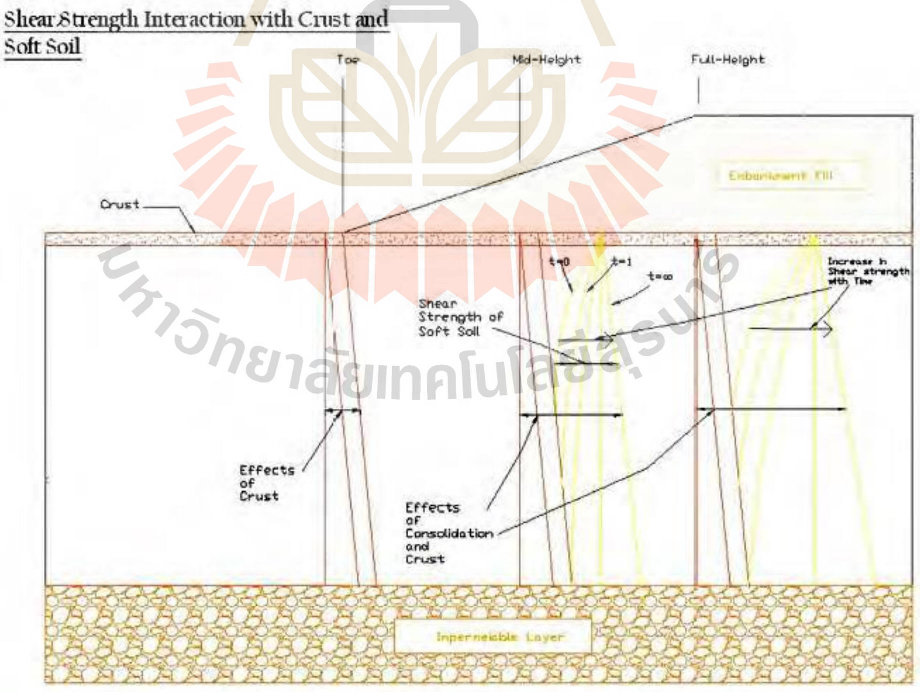
2.5.4.1 การใช้งานในลักษณะเพื่อเสริมแรงให้แก่ดิน (Soil Reinforcement)

การใช้งานเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงให้แก่ดินนั้นมีนักวิจัยได้ศึกษามาเป็นเวลากว่า 40 ปีแล้วโดย Kirby (1963) ได้รายงานผลการศึกษาถึงความคงทนและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ปอ และ มะพร้าว ซึ่งเส้นใยธรรมชาติจากปอมีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ย 580 MPa ขณะที่เส้นใยธรรมชาติจากมะพร้าวมีค่ากาลังรับแรงดึงเฉลี่ย 150 MPa จากนั้นในช่วง 10 ปีที่ผ่านมามีผู้วิจัยในการใช้งานเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงให้แก่ดินเพิ่มมากขึ้น Sarsby (2007) ได้ศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติที่นำมาถักสานเป็นวัสดุเสริมแรงในคันดินที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนพบว่า สำหรับคันดินที่มีความลาดชันไม่มาก (1:4 หรือ 1:5) ช่วงระยะเวลาตอนเริ่มต้นก่อสร้างที่คันดินมีเสถียรภาพต่ำนั้นอยู่ในช่วงสั้น ๆ ซึ่งวัสดุเสริมแรงที่ทำจากเส้นใยธรรมชาตินั้นสามารถใช้งาน

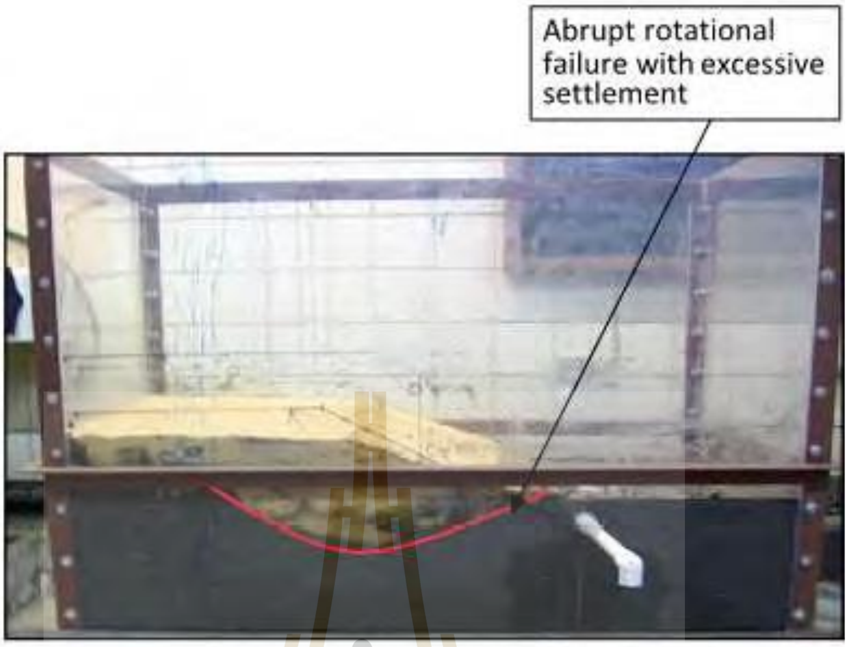
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้และมีค่ากำลังรับแรงดึงอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยในขณะที่คันดินที่มีความลาดชันมากขึ้น (1:2) วัสดุเสริมแรงจะต้องมีค่ากำลังรับแรงดึงอยู่ในช่วงปลอดภัย เป็นเวลามากกว่า 1 ปีขึ้นไป ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุเสริมแรงที่ทาจากเส้นใยธรรมชาติให้มากขึ้น นอกจากการใช้งานเพื่อเสริมกำลังให้แก่คันดินแล้วยังมีการใช้ในงานถนนอีกด้วย โดย Chandrakaranet al. (2008) ได้รายงานผลการทดสอบการใช้งานแผ่นทักสานจากเส้นใยมะพร้าวเพื่อเสริมแรงให้กับโครงสร้างชั้นทาง โดยพบว่า เมื่อใช้วัสดุเสริมแรงดังกล่าว ทำให้ ลดการทรุดตัวของผิวทางลดการเกิดร่องล้อและยังเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของดินในชั้นพื้นทางอีกด้วย

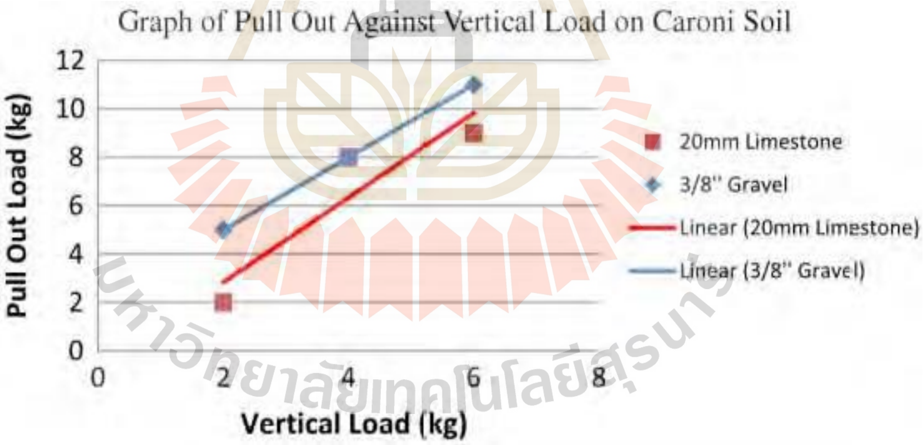
Mwasha and Petersen (2010) ศึกษาการใช้งานเส้นใยปอในการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงตามทฤษฎีการออกแบบโดยจำกัดอายุการใช้งานโดยตรวจสอบพฤติกรรมตามแบบจำลอง ในรูปที่ 2.21 พบว่า ขนาดช่องเปิดของโครงตาข่ายและขนาดของเม็ดดินมีผลต่อแรงปฏิสัมพันธ์แบบดึงออก ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะระหว่างวัสดุเสริมแรงกับดินเพิ่มขึ้นในขณะที่เกิดการอัดตัวระบายน้ำ เส้นใยปอซึ่งมีลักษณะยาวและหยาบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะที่ดีและเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับก่อสร้างคันดินเสริมแรง



รูปที่ 2.19 แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์คันดินเสริมแรงด้วยแผ่นถักสานเส้นใยธรรมชาติบนดินเหนียวอ่อน (Mwasha, 2009)



รูปที่ 2.20 แบบจำลองที่ใช้ทดสอบคันดินเสริมแรงด้วยแผ่นถักสาน
จากเส้นใยปอ (Mwasha and Petersen, 2010)

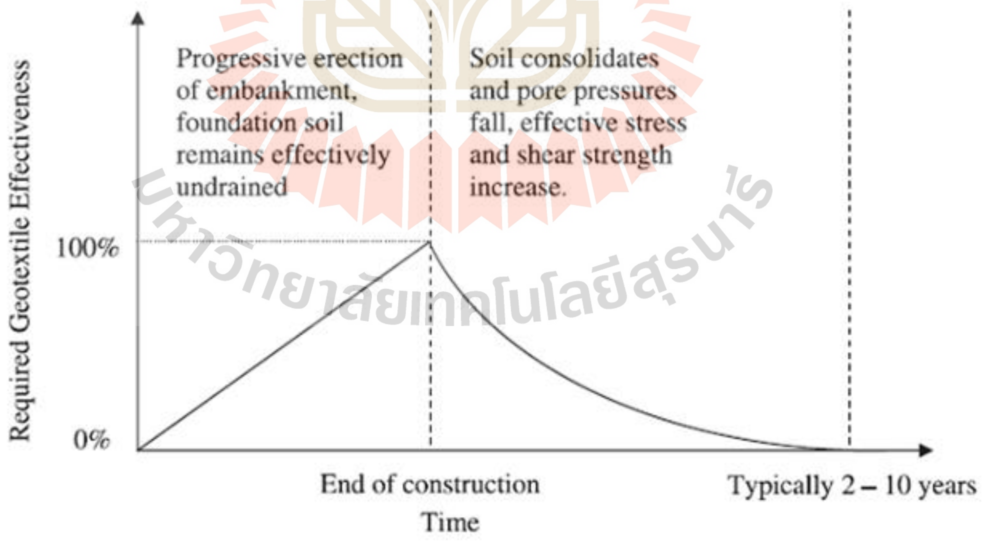


รูปที่ 2.21 ผลทดสอบแรงปฏิสัมพันธ์แบบดึงออกของแผ่นถักสาน
จากเส้นใยปอในดิน (Mwasha and Petersen, 2010)

จากงานวิจัยในต่างประเทศที่กล่าวถึงข้างต้น การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการนำเส้นใยธรรมชาติมาถักสานเป็นแผ่นวัสดุเสริมแรงให้แก่ดิน โดยการเสริมแรงให้กับลาดดินนั้น เสถียรภาพของลาดดินจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่วนแรงต้านทานการเลื่อนไถลจากวัสดุเสริมแรงนั้น จะลดลงตามเวลาเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งโดยส่วนใหญ่จะประมาณ 6 เดือนถึง 1 ปี ลาดดินหรือคันดินจะมีเสถียรภาพอยู่ได้เองโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยแรงต้านทานการเลื่อนไถลจากวัสดุ

เสริมแรง แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของแผ่นวัสดุสังเคราะห์กับเวลาแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 ด้วยเหตุดังกล่าวการใช้งานวัสดุสังเคราะห์เพื่อเสริมแรงให้กับลาดดินหรือคันดินถมนั้น จะทำให้เราใช้ความสามารถของวัสดุสังเคราะห์อย่างเต็มที่ภายในช่วงเวลาที่จำกัดเท่านั้น สำหรับการก่อสร้างแบบเดิมจะทำให้เราออกแบบการใช้งานวัสดุสังเคราะห์โดยไม่ประหยัด กล่าวคือหากเราสามารถออกแบบให้ใช้งานวัสดุสังเคราะห์ภายใน ช่วงเวลาที่กำหนดได้จะทำให้การใช้งานวัสดุสังเคราะห์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การนำเส้นใยธรรมชาติมาทักสานเป็นแผ่นวัสดุเสริมแรงจึงเป็นทางเลือกที่ดีเมื่อเราสามารถใช้งานความแข็งแรงของวัสดุเสริมแรงภายในช่วงเวลาที่จำกัดและทราบช่วงเวลาที่แน่นอน อีกทั้งการใช้เส้นใยธรรมชาตินี้สามารถนำวัสดุภายในท้องถิ่นมาใช้งานเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

เส้นใยธรรมชาตินั้นเป็นวัสดุที่มีการเสื่อมอายุหรือกำลังลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เส้นใยธรรมชาตินั้นมีมากมายหลายชนิดบางชนิดมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงบางชนิดมีกำลังรับแรงดึงต่ำบางชนิดค่ากำลังรับแรงดึงลดลงตามเวลา ดังนั้นหากสามารถนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาผลิตเป็นโครงตาข่ายหรือแผ่นเพื่อใช้ในการเสริมกำลังให้แก่ดิน โดยที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงมีความเหมาะสมต่อช่วงเวลาในงานวิศวกรรมต่างๆ แล้วการใช้เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิศวกรรม (Sarsby et al., 1992)

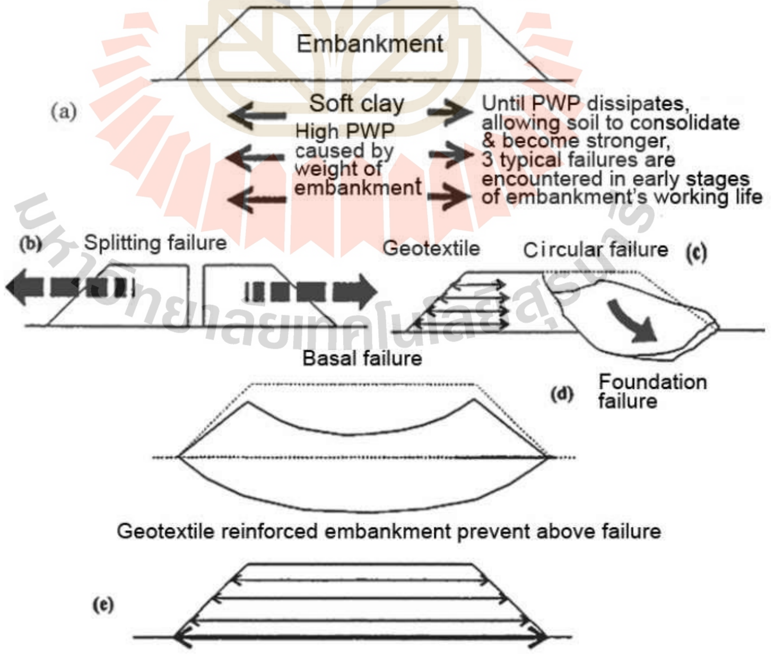


รูปที่ 2.22 ช่วงเวลาในการใช้งานแผ่นวัสดุสังเคราะห์ในคันดินเสริมแรง (Sarsby, 2007)

แนวคิดหลักในการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้งานวิศวกรรมนั้นจะเป็นการออกแบบที่คำนึงถึงหน้าที่การใช้งานเป็นหลัก ซึ่งจากปัญหาทางวิศวกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อเราสามารถผลิตและออกแบบให้เส้นใยธรรมชาติทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วเส้นใยธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เหล่านี้สามารถใช้งานทดแทนวัสดุสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปได้ กล่าวโดยสรุปจากการศึกษานี้พบว่า ตัวอย่างเส้นใยที่ศึกษาแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยที่มีลักษณะยาวและมีกำลังรับแรงดึงสูง คือ เส้นใยปอและป่าน อีกประเภทหนึ่งคือเส้นใยที่มีลักษณะสั้นและมีกาลังรับแรงดึงต่ำ คือ เส้นใย กกและผักตบชวา ในการนำมาใช้งานในเชิงวิศวกรรมนั้นเส้นใยลักษณะยาวและมีกำลังรับแรงดึงสูงเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดิน ส่วนเส้นใยลักษณะสั้นและมีกำลังรับแรงดึงต่ำเหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อเป็นวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของหน้าดิน การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้งานในเชิงวิศวกรรมนั้นยังต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาวะอากาศ ชนิดของดิน ลักษณะของลาดดินด้วย รูปที่ 2.24 แสดงถึงลักษณะการเสริมแรงแบบต่างๆ ของแผ่นวัสดุเสริมแรงซึ่งสามารถใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุได้ โดยจะใช้ประโยชน์จากวัสดุเสริมแรงนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดินหรือคันดินในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นก่อสร้างและก่อสร้างแล้วเสร็จในช่วงเวลาสั้นๆ (Short Term Stability) ซึ่งลาดดินหรือคันดินเสริมแรงลักษณะนี้จะมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ (Long Term Stability) ดังนั้นการใช้งานเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงนั้นจะมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะเพิ่มเสถียรภาพของคันดินหรือลาดดินได้ตามทฤษฎีการใช้งานแผ่นวัสดุเสริมแรงที่มีอายุการใช้งานจำกัด (Limited Life Geotextiles – LLGs)



รูปที่ 2.23 การใช้งานวัสดุเสริมแรงในคันภายในช่วงเวลาสั้นๆ (a) คันดินทั่วไป (b) การป้องกันการแยกตัว (c) การป้องกันการเลื่อนไถล (d) การทรุดตัวที่มากเกินไปบริเวณฐาน (e) การป้องกันการทรุดตัวที่มากเกินไปบริเวณฐาน (Anand, 2008)

2.6 ประเภทวัสดุที่ใช้เสริมแรง

การเสริมแรงสามารถใช้วัสดุหลายชนิด วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับการก่อสร้างคอนกรีตจะเป็นเหล็ก คอนกรีต ใยแก้ว ไม้ ยาง พลาสติกทนความร้อน อลูมิเนียมและการเสริมแรงอาจใช้รูปแบบของวัสดุแผ่นไม้กระดาน เชือก พืชและการรวมกันของวัสดุเหล่านี้หรือวัสดุรูปแบบอื่นๆ ในปัจจุบันนี้วัสดุเสริมแรงชนิดต่างๆได้ถูกใช้ในการก่อสร้างและการออกแบบฐานราก ผนังกันดิน ลาดตลิ่ง และโครงสร้างเสริมแรงดินอื่นๆ ตัวแปรพื้นฐานของวัสดุเสริมแรงที่เป็นตัวกำหนดในการเพิ่มคุณสมบัติด้านแรงดึงให้ดิน จึงทำให้ เพิ่มความมันคงภายในโครงสร้าง จากการพิจารณาการขยายตัวของวัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ Inextensible Reinforcement และ Extensible Reinforcement

2.6.1 Inextensible Reinforcement

ชนิดของการเสริมแรงนี้โดยปกติจะเป็นวัสดุที่แข็งเป็นวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยืดได้และการเปลี่ยนรูปของ Inextensible Reinforcement จะเกิดความวิบัติน้อยกว่าในโครงสร้างดิน ตัวอย่างของวัสดุเสริมแรงประเภทนี้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุประเภทโลหะ เช่น Metallic Strips, Metalllic Grids,Hexagonal Wire Meshes, Etc

2.6.2 Extensible Reinforcement

โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงชนิดนี้เมื่อเกิดการขยายตัวความแข็งแรงจะลดลงและจะขยายมากกว่าแบบ Inextensible การเพิ่มกำลังขยายมีค่าเทียบเท่าหรือมากกว่าในดินโดย Extensible Reinforcement จะเป็นวัสดุเสริมแรงที่ไม่ใช่โลหะ เช่น Geosynthetics ได้แก่ Geotextiles, Geogrids, Geocomposites โดยที่ Geotextile และ Geogrids มีพื้นฐานของ Strength Stiffness และคุณสมบัติความเครียดที่ค่อนข้างมาก Extensible Reinforcement มีข้อดีที่สำคัญ คือ จะไม่ถูกกัดกร่อนแต่มีแนวโน้มที่จะเกิดความล้า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยดูได้จากความเครียดที่มีแรงกระทำคงที่หรือส่วนเกินที่เกิดจากการให้แรงกระทำครั้งแรกในโครงสร้างชั่วคราว ความล้าจะทำให้เกิดปัญหาเล็กน้อยแต่ในระยะยาวที่เป็นโครงสร้างถาวรความล้าอาจมีผลรุนแรงมากขึ้น

2.7 การประยุกต์ใช้ตาข่ายเสริมแรง (Geogrid)

โดยทั่วไปแผ่นใยสังเคราะห์สามารถประยุกต์ใช้ได้ในหลายหน้าที่ ได้แก่ การแยกชั้นวัสดุเสริมกำลัง กรองวัสดุ ระบายน้ำและการกักกันวัสดุ อย่างไรก็ตามตาข่ายเสริมแรงมีลักษณะเป็นช่องซึ่งดินสามารถผ่านได้ หน้าที่หลักจึงเป็นการเสริมกำลังในกรณีที่จำเป็นต้องใช้คุณสมบัติในการแยกชั้นวัสดุมักใช้ร่วมกับ Geotextile ตาข่ายเสริมแรงซึ่งต่อไปจะขอแทนด้วย คำว่า Geogrid มักจะนำมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.7.1 ช่วยในการก่อสร้างบนดินอ่อน

การก่อสร้างในดินอ่อนมักเกิดปัญหาหลายอย่าง ได้แก่ ดินไม่สามารถรับน้ำหนักเครื่องจักรในการก่อสร้างทำให้ไม่สามารถเข้าไปทางานได้ การบดอัดให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนดทำได้ยาก โดยปกติก่อนการทำงานจะทำการไล่เลนทำการขุดวัสดุดินอ่อนออกแล้วแทนที่ด้วยดินที่มีกำลังสูงพอก่อน นอกจากนี้ในบางครั้งอาจต้องทำการเพิ่มกำลังของดินด้วยการผสมด้วยสารเคมี Geogrid จึงนำมาใช้งานเพื่อเป็นฐานรากชั่วคราวเพื่อให้คนเดินหรือรถบรรทุกวิ่งสำหรับการก่อสร้างในดินอ่อน (Cancelli et al.1996, Douglas 1997, และ Hass et al. 1988) ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการขุดรื้อและค่าใช้จ่ายในการแทนที่ด้วยวัสดุคุณภาพสูงอีกทั้งสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ Geogrid จะช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของวัสดุออกในแนวราบขณะทำการบดอัดทำให้การบดอัดบนดินอ่อนในสองสามชั้นแรกถัดจากชั้นดินอ่อนทำได้ง่ายขึ้น (Berg et al. 2000)

2.7.2 เสริมในโครงสร้างชั้นทาง

การเสริมกำลังโครงสร้างชั้นทางด้วย Geogrid จะมี 2 ลักษณะ ลักษณะแรกคือการเสริมเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของถนนเมื่อเทียบกับถนนลักษณะเดียวกันที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย Geogrid หรือลักษณะที่สอง คือช่วยลดความหนาของโครงสร้างชั้นทางโดยไม่กระทบกับอายุการใช้งาน (Cancelli et al. 1996,Collin et al. 1996, Haas et al. 1988, Perkins et al. 1997a/b และ Webster 1993) นอกจากนี้ Geogrid ยังนามาใช้ในคันทางบนดินที่มีการขยายตัวสูง (Expansive Soil) เพื่อลดการเกิด Reflective Crack อีกด้วย การเสริม Geogrid ในโครงสร้างชั้นทางจะมีอยู่ 3 ลักษณะ ดังนี้

2.7.2.1 เพิ่มเสถียรภาพให้กับชั้นดินเดิม (Mechanical Subgrade Stabilization)

2.7.2.2 เสริมกำลังชั้นพื้นทาง (Aggregate Base Reinforcement)

2.7.2.3 เสริมกำลังก่อนทำการ Overlay (Asphalt Concrete Overlay Reinforcement)

สำหรับการใช้งานเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับชั้นดินเดิมและการเสริมกำลังชั้นพื้นทางให้วาง Geogrid ที่ด้านล่างของชั้นพื้นทางสำหรับชั้นพื้นทางที่หนาน้อยกว่า 14 นิ้ว หากชั้นพื้นทางหนากว่า 14 นิ้วให้วาง Geogrid ที่กึ่งกลางของชั้นพื้นทาง (Webster 1993) ในบางกรณีให้ใช้ Geotextile ร่วมกับ Geogrid ขึ้นอยู่กับกำลังของชั้นดินเดิม

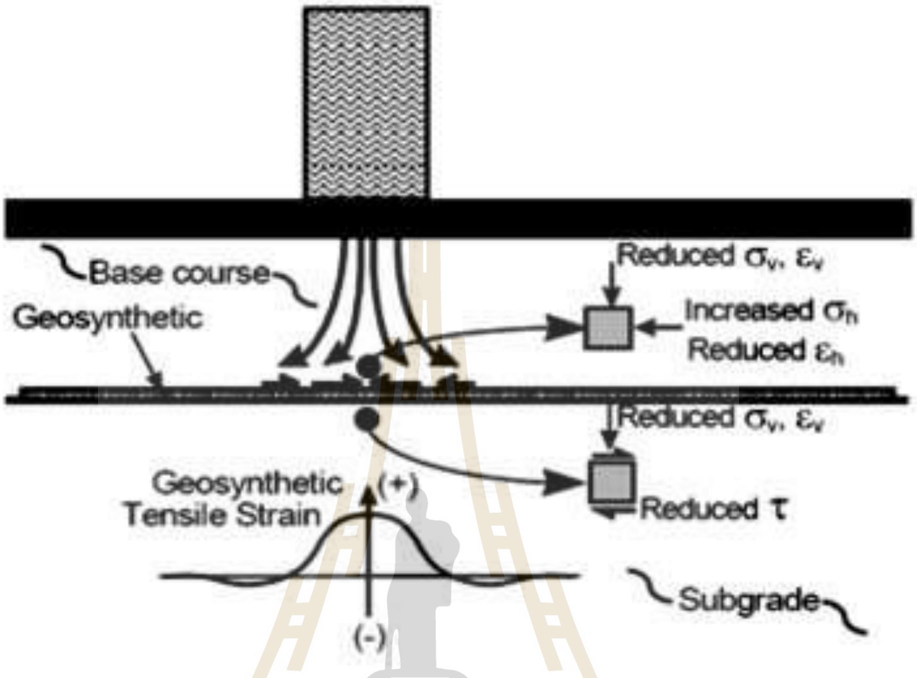
2.7.3 กระบวนการรับแรงโดยตะข่ายเสริมแรง (Geogrid)

เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำกับโครงสร้างชั้นทางแรงที่มากระทำกับผิวทางจะกระจายลงสู่โครงสร้างชั้นทางด้านล่างเมื่อทำการเสริมด้วย Geogrid จะเกิดกระบวนการเสริมแรงทำให้ความเค้นในดินคันทางเปลี่ยนแปลงไปดังนี้ (ดูรูปที่ 2.24)

2.7.3.1 วัสดุเหนือ Geogrid จะมีความเค้นในแนวดิ่งลดลง และความเค้นในแนวราบเพิ่มขึ้น ซึ่งความเค้นนี้จะถ่ายลงไปให้กับ Geogrid

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.7.3.2 วัสดุใต้ Geogrid จะมีค่าความเค้นในแนวดิ่งและความเค้นเฉือนลดลงจะไม่มีความเค้นเกิดขึ้นในแนวราบเนื่องจากได้ส่งผ่านไปที่ Geogrid แล้ว



รูปที่ 2.24 ความเค้นที่เกิดขึ้นในมวลดินเสริมด้วย Geogrid (Berg et al. 2000)

กระบวนการเสริมกำลังโดย Geogrid ประกอบด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการยึดรั้งด้านข้าง (Lateral Restraint)
2. กระบวนการเพิ่มกำลังแบกทาน (Improve Bearing Capacity)
3. กระบวนการเทนชั่นเมมเบรน (Tensioned Membrane Effect)

2.8 วิธีการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนของผิวระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลัง

2.8.1 การทดสอบโดยวิธีเฉือนโดยตรง (Direct shear Test)

การทดสอบโดยวิธีเฉือนโดยตรงเป็นวิธีที่ใช้มากที่สุดในการประเมินหาความต้านทานแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลัง Hausmann (1990) ได้สรุปรูปแบบของกล่องเครื่องมือทดสอบเฉือนโดยตรงของดินและวัสดุเสริมกำลังจากผู้วิจัยต่างๆ โดยที่แบบแรกเป็นกล่องเฉือนมาตรฐาน (Standard Direct Shear Box) แต่ให้มีแท่งวัสดุแข็งใส่ไว้ในครึ่งด้านล่างเพื่อรองรับวัสดุเสริมกำลังที่วางให้อยู่ตรงระนาบการเฉือน เครื่องมือทดสอบอีกรูปแบบหนึ่ง คือ แบบเฉือนจริง (True Shear Apparatus) ที่พัฒนาขึ้นเพื่อจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นตรงบริเวณ

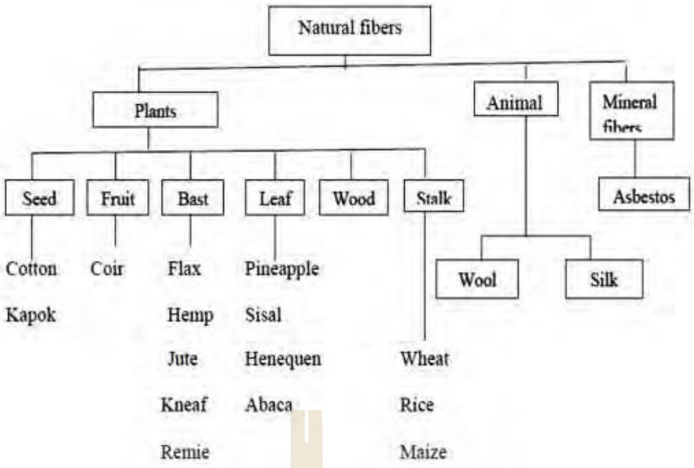
ผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุเสริมกาลังให้ใกล้เคียงที่สุดโดยลดแรงเสียดทานด้านข้างของฝาปิดด้านบน (CapBlock) ของกล่องเฉือน ดังแสดงในรูป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องเฉือนแบบมาตรฐานแล้ว ให้ผลการทดลองที่ถูกต้องมากกว่าเมื่อดินมีการขยายตัว (Dilatancy) ขณะที่เกิดการเฉือนเป็นกล่องเฉือนแบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume – Type Shear Box) ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ มวลดินจะถูกควบคุมให้มีปริมาตรคงที่ซึ่งหากนำไปใช้ทดสอบด้วยกล่องเฉือนนี้จะสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องเฉือนแบบมาตรฐาน จึงเหมาะสำหรับใช้ทดสอบเฉพาะในกรณีที่จะไม่เกิดการขยายตัวดินในสภาพจริง

2.8.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงออก (Pullout Test)

เครื่องมือและรูปแบบของการทดสอบกำลังรับแรงดึงออกของวัสดุเสริมกำลังที่ฝังอยู่ในดินนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นหลายวิธี เพื่อให้สามารถจำลองพฤติกรรมของดินและวัสดุเสริมกำลังให้เหมือนกับในสภาพจริงได้มากที่สุด โดยมีขนาดของการทดสอบตั้งแต่ที่เป็นกล่องขนาดเล็กสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งมีความหนาของดินปิดทับวัสดุเสริมกำลังน้อยกว่า 600 มิลลิเมตร ไปจนถึงการฝังวัสดุเสริมกำลังไว้ในคันดิน เพื่อทำการดึงออกในที่ก่อจริงในสนาม

2.9 การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง

เส้นใยตามธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จะมีการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมการชะล้างพังทลาย อีกทั้งยังมีประโยชน์มากมาย คือ การติดตั้งได้อย่างรวดเร็วสำหรับการใช้เส้นใยธรรมชาติในวิศวกรรมโยธาครั้งแรกได้เริ่มในปี 1926 เมื่อกรมทางหลวงในเซาท์แคโรไลนาสหรัฐอเมริกา ได้ทำการทดสอบโดยใช้ผ้าฝ้ายทอเป็น Geotextile เพื่อลดการแตกร้าวของถนน (Beckman and Mills, 1957) เส้นใยธรรมชาติที่มาจากพืช สัตว์ และแร่ธาตุเป็นแหล่งที่มาของเส้นใยธรรมชาติที่มีคุณสมบัติของเส้นใยทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ได้ สามารถนำมาออกแบบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆได้มากมาย เส้นใยธรรมชาติสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทหลักตามแหล่งกำเนิด ได้แก่ พืช สัตว์ และแร่ธาตุ ในรูปที่ 2.28 เส้นใยพืชโดยทั่วไปส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเซลลูโลส เส้นใยเหล่านี้สามารถพบได้ในใยเมล็ดพันธุ์ (ผ้าฝ้ายและนุ่น) ใยแก้วนาใบ (Sisalและ Agave) เส้นใย ผิวหนัง (แฟลกซ์ ปอกระเจาปอแก้วอุตสาหกรรมป่าน ผ้าป่านหวาย ใยถั่วเหลืองและกากใยกล้วย) ใยผลไม้ (ใยมะพร้าว) และก้านใยแก้วนำแสง (หลอดของข้าวสาลีข้าว ข้าวบาร์เลย์ไม้ไผ่และหญ้า) สิ่งเหล่านี้เป็นเส้นใยชนิดที่มีแรงดึงสูงกว่าเส้นใยอื่นๆ นอกจากนี้ยังเป็นเส้นใยที่มีความคงทนมากเมื่อนำมาใช้งาน



รูปที่ 2.25 Classification of natural fibers

เส้นใยธรรมชาติจะถูกดัดแปลงเป็น Geotextiles และใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีที่ระบุไว้ โดยทั่วไปเรียกว่า Limited Life Geosynthetics (LLGs) มีหลายการทดลองที่เกี่ยวข้องกับ LLGs เช่น Lekha andKavitha (2006), Dinu and Saska (2007), Mwasha and Pertersen (2010) สาหรับการเสริมความแข็งแรงของดิน การควบคุมการชะล้างพังทลายและการระบายน้ำ นอกจากนี้วัสดุ Geosynthetic ใน Embankments ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มความมั่นคง (Sarsby, 2007) Geotextiles ยังมีหลายชนิดที่ทาจากเส้นใยพืช เช่น มะพร้าว (Subaida etal., 2008) ปอกระเจา (Chattopadhyay and Chakravarty, 2009) ชานอ้อย (Dinu and Saska, 2007) เส้นใยธรรมชาติเป็นสิ่งแวดล้อมที่ไม่เป็นอันตรายและชีวภาพที่ย่อยสลายได้ ปัจจุบันผักตบชวา ปอแก้ว กก และป่านเป็นพืชที่มีราคาต่ำและอุดมสมบูรณ์สูงและยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย ดังรูปที่ 2.26

Water Hyacinth

รูปที่ 2.26 Different types of natural fibers

Sisal

Reed

รูปที่ 2.27 Different types of natural fibers

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเส้นใยปอหรือป่านที่ถักสานเป็นโครงตาข่ายในลักษณะเรียบโดยที่มีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกันเพื่อมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่ถนน ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางเพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมชั้นพื้นทางในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (ขนาดช่องเปิดและกำลังแรงดึง) และ คุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) (การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือน) ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาคุณสมบัติของการใช้งานวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ในงานก่อสร้างชั้นทางที่มีการกระจายขนาดคละอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544 บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) คุณสมบัติทางวิศวกรรมมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) จะได้รับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) และซีบีอาร์ ตัวแปรอิทธิพลที่ทำการศึกษา ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวมรีไซเคิล (RCA) การทดสอบแรงเฉือนตรงดำเนินการด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) ท้ายสุด งานวิจัยนี้จะศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (ขนาดช่องเปิด) และคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) (การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือน) ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

3.2 วิธีการดำเนินงานและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ลักษณะการถักสารเส้นใย

จากวัตถุประสงค์เบื้องต้นการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้งานเพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับดินนั้นเราจำต้องมีการถักสานเส้นใยเหล่านั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงให้มากขึ้น โดยลักษณะการรับแรงจะเป็นเหมือนโครงตาข่าย (Grid) โดยจะใช้เส้นใยปอ หรือ ป่านนำมาถักสานให้เป็นโครงตาข่ายในลักษณะเรียบที่มีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกัน (Opening Size) ของโครงตาข่าย

มี 2 ขนาดดังนี้ 7 และ 21 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นตัวอย่าง ประมาณ กว้าง 305 มิลลิเมตร ยาว 305 มิลลิเมตร การสานเส้นใยดังกล่าวเป็นลักษณะการสานด้วยมือซึ่งเป็นงานหัตถกรรม แสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 การถักสารเส้นใยปอแบบเรียบ

3.2.2 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)

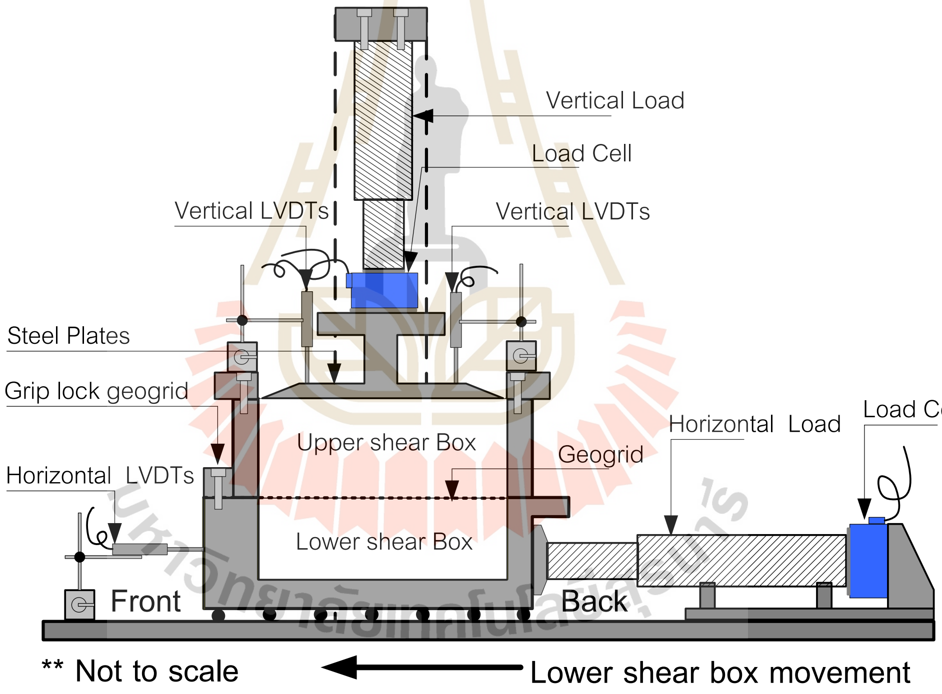
วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง จะปรับปรุงให้มีการกระจายขนาดคละ 2 แบบ คือ 1) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตบนของมาตรฐานของกรมทางหลวง และ 2) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 201/2544) เมื่อได้ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ที่มีการกระจายขนาดคละที่ต้องการแล้ว ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 (2012) ทดสอบการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified Proctor energy) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009)

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรง (Tensile Test)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุเสริมแรงนั้นทำการทดสอบแบบ Single rib tensile Strength (ASTM D6637/D6637M) โดยตัวอย่างทดสอบ จะมีขนาดยาว 200 มม. มีระยะจับยึดเพื่อวัดระยะยืด (Gauge Length) 100 มม. การทดสอบจะดึงวัสดุเสริมแรง ด้วยอัตรา 10 มม.ต่อนาที ภายใต้การให้แรงจากกระบอกน้ำมัน 3 ตัน โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบคงที่ที่ 22 องศา

3.2.4 การทดสอบโดยวิธีเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดสอบแรงเฉือนตรงของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ดำเนินการด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ซึ่งประกอบด้วยกล่องแรงเฉือน (shear boxes) จำนวนสองกล่อง คือ กล่องด้านบน (upper shear box) และกล่องด้านล่าง (lower shear box) โดยแต่ละกล่องมีขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความลึก เท่ากับ 305x305x204 มิลลิเมตร กล่องด้านบนถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่ขณะทดสอบขณะที่กล่องด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางการให้แรงเฉือน สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติถูกติดตั้งบริเวณรอยต่อระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่างโดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับกล่องด้านล่างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

ระหว่างการเตรียมตัวอย่างกล่องด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดไว้ด้วยกันมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ถูกบดอัดภายในกล่องแรงเฉือนด้วยความชื้นเท่ากับความชื้นเหมาะสมเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดภายใต้พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) บดอัดถูกแช่ในน้ำโดยให้กล่องด้านล่างจมอยู่ใต้น้ำ

ทั้งหมดและระดับน้ำอยู่ที่กึ่งกลางของความลึกของกล่องด้านบนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้ความเค้นตั้งฉาก เท่ากับ 50 100 และ 200 กิโลพาสคาล หลังจากนั้นประกอบกล่องแรงเฉือนเข้ากับอุปกรณ์ให้แรงและแรงแนวดิ่ง ก่อนการทดสอบทำการปล่อยตัวยึดระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง และปรับให้กล่องด้านบนและกล่องด้านล่างห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างกล่องทั้งสอง แต่ละตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่สามค่า ได้แก่ 50 100 และ 200 กิโลพาสคาล ให้แรงเฉือนด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อนาทีตลอดการทดสอบ บันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง การเคลื่อนตัวในแนวราบ และค่าแรงเฉือน จนการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ อุณหภูมิขณะทดสอบถูกรักษาให้คงที่ประมาณ 20±1 องศาเซลเซียส

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 ทราบถึงพฤติกรรมร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมชั้นพื้นทาง

3.3.2 เปรียบเทียบผลระหว่างการเสริมกับไม่เสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

3.3.3 เสนอความสัมพันธ์ระหว่างกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและการกระจายขนาดกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมชั้นพื้นทาง

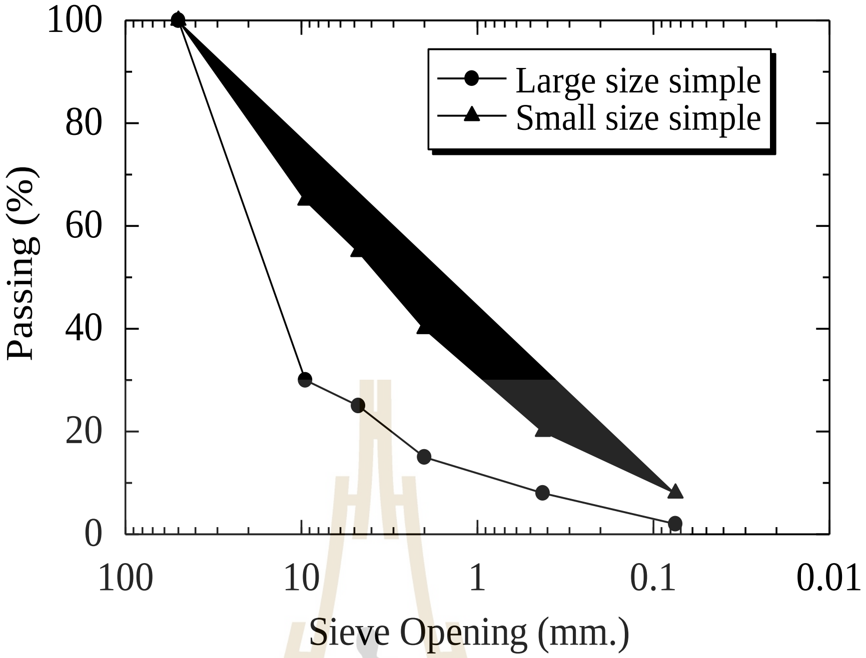
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

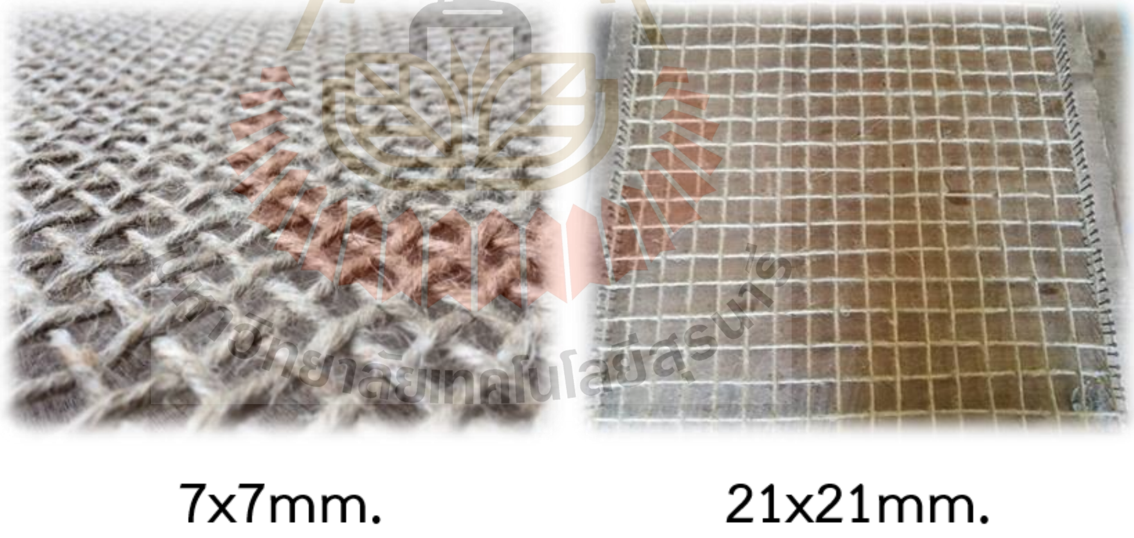
4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycle Concrete Aggregate, RCA) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากเศษก้อนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตนำมาผ่านเครื่องย่อยคอนกรีตแล้วนำมาคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ตามาตรฐาน ASTM D422-63 (2007) และ ปรับปรุงให้มีการกระจายขนาดคละ 2 แบบ คือ 1) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตบนของมาตรฐานของกรมทางหลวงและ 2) การกระจาย ขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 201/2544) แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อได้ตัวอย่างมวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละที่ต้องการแล้วทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 (2012) ทดสอบการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor energy) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) และปริมาณน้ำเหมาะสม (*OWC*) จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นเส้นใยปอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร โดยนำมาถักสานแบบเรียบ (Plain Pattern) ด้วยมือที่มีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกัน (Opening Size) ของโครงตาข่าย 2 ขนาด ดังนี้ 7 และ 21 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นตัวอย่างกว้าง 305 มิลลิเมตร ยาว 305 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงดึงของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติแบบเส้นเดียว (Single rip tensile strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6637/D6637M มีค่าเท่ากับ 43 เมคกะปาสคาล การทดสอบแรงเฉือนตรงของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ดำเนินการโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) การทดสอบทั้งหมดดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA)



รูปที่ 4.2 จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ขนาดช่องเปิด 7x7 มิลลิเมตร และ 21x21 มิลลิเมตร ถักสานแบบเรียบ (Plain pattern)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

Product	**Type**	**Rib thickness (mm)**	**Mesh type**	**Aperture Size (mm)**	**Single rib tensile Strength (MPa) (ASTM D6637/D6637M)**
Natural Fiber Geogrid	Kenaf	3	Plain square	7×7	43
Natural Fiber Geogrid	Kenaf	3	Plain square	21×21	43

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Parameter	**Recycled Concrete Aggregate (RCA)**	
	Large sized	**Small sized**
Bulk specific gravity	2.6	2.6
Soil classification (USCS)	GP	GW
Average particle size (mm)	17	3.7
Optimum water content (%)	10.60	10.60
Maximum dry unit weight (kN/m^3)	18.25	17.80
California bearing ratio (%)	122	116
Internal friction angle (degree)	70.54	63.67
Cohesion (kPa)	557.63	419.32

คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล แสดงดัง ตารางที่ 4.2

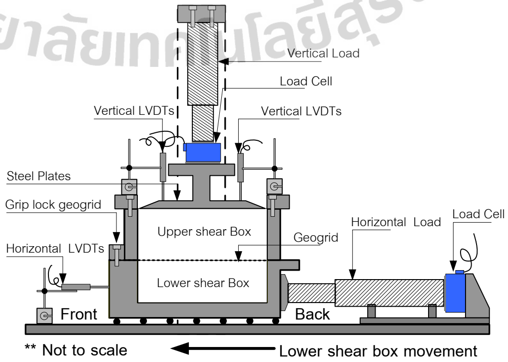
สำหรับตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดคละใกล้เคียงกับขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 17 มิลลิเมตร ถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันไม่ดี (GP) ตามระบบเอกภาพ (USCS) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.6 ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกบดอัดภายใต้ พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 18.25 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรและค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10.60 ค่าซีบีอาร์ที่ค่าการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับร้อยละ 122 ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับวัสดุพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดคละใกล้เคียงกับขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร ถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันดี (GW) ตามระบบเอกภาพ (USCS) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.6 ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลบดอัดภายใต้พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 17.80 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10.6 ค่าซีบีอาร์ที่ค่าการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ ร้อยละ 116 ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

4.1.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ดำเนินการด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ซึ่งประกอบด้วยกล่องแรงเฉือน (shear boxes) จำนวนสองกล่อง คือ กล่องด้านบน (upper shear box) และกล่องด้านล่าง (lower shear box) โดยแต่ละกล่องมีขนาดความกว้างxความยาวxความลึกเท่ากับ305x305x204มิลลิเมตร กล่องด้านบนถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่ขณะทดสอบขณะที่กล่องด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางการให้แรงเฉือน สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติถูกติดตั้งบริเวณรอยต่อระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับกล่องด้านล่างดังรูปที่ 4.3



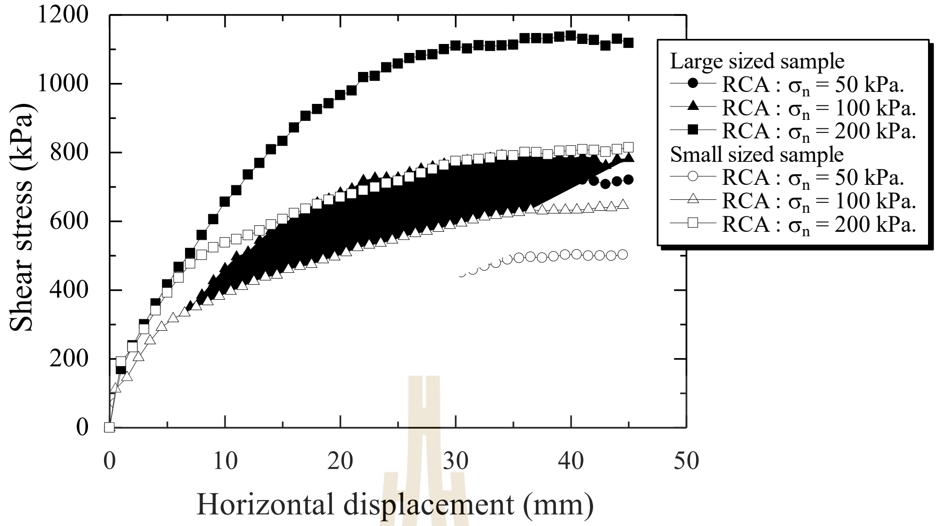
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

ระหว่างการเตรียมตัวอย่างกล่องด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดไว้ด้วยกัน มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกบดอัดภายในกล่องแรงเฉือนด้วยความชื้นเท่ากับความชื้นเหมาะสมเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ภายใต้พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน หลังจากนั้นประกอบกล่องแรงเฉือนเข้ากับอุปกรณ์ให้แรงแนวราบและแรงแนวดิ่ง ก่อนการทดสอบทำการปล่อยตัวยึดระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง และปรับให้กล่องด้านบนและกล่องด้านล่างห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างกล่องทั้งสอง แต่ละตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่สามค่า ได้แก่ 50 100 และ 200 กิโลพาสคาล ให้แรงเฉือนด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อนาที ตลอดการทดสอบบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งการเคลื่อนตัวในแนวราบและค่าแรงเฉือน จนการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 40 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ อุณหภูมิขณะทดสอบถูกรักษาให้คงที่ประมาณ 20±1 องศาเซลเซียส

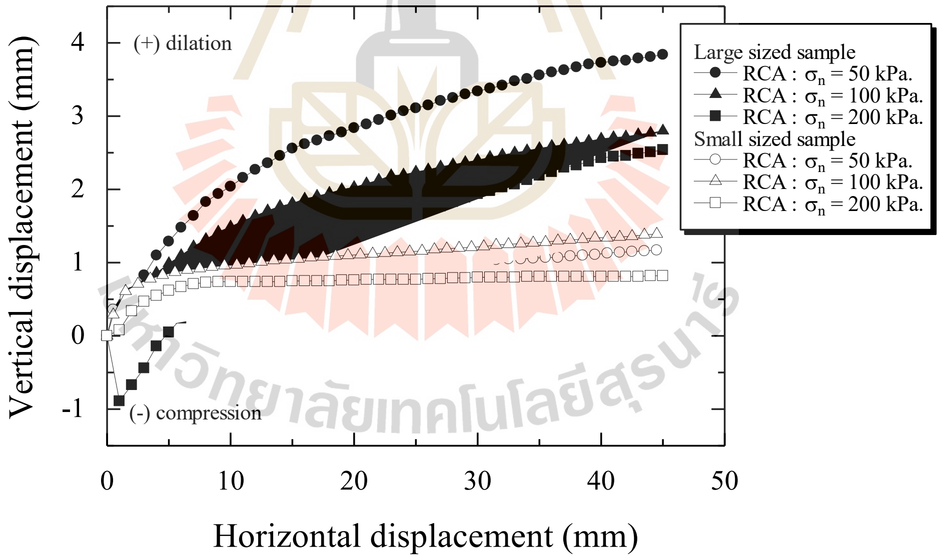
4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

ผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ แสดงในรูปที่ 4.4 และความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ แสดงดังรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.4 ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength, τ_{max}) เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าความเค้นเฉือนมีค่าลดลงเล็กน้อยและคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ตัวอย่างมีพฤติกรรมการอัดตัว (Compression) เล็กน้อยในช่วงแรกหลังจากนั้นตัวอย่างมีพฤติกรรมการขยายตัว (Dilation) โดยการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบเมื่อตัวอย่างถูกกระทำด้วยความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นค่าการอัดตัวในช่วงแรกมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่าการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง พฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุแน่น (Dense material)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง



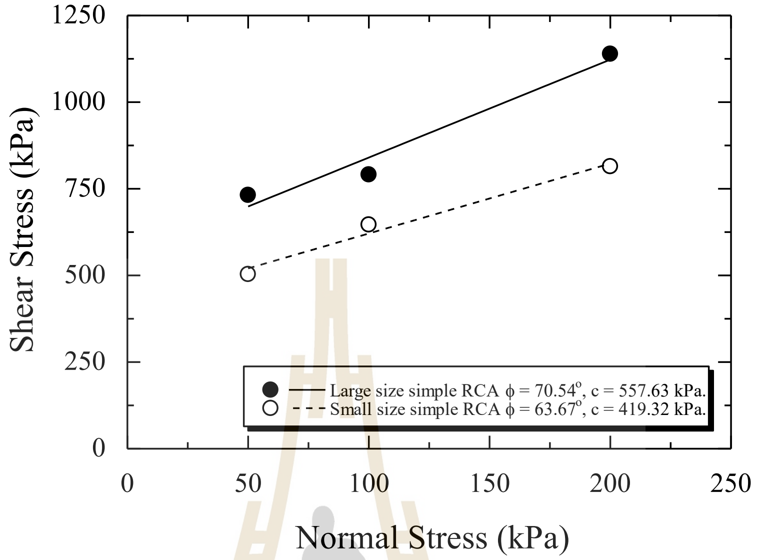
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวราบและการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

ในรูปที่ 4.4 ยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน จากรูปความเค้น

เฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength, τ_{max}) เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าลดลงเล็กน้อย และคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตรเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลทดสอบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง และการเคลื่อนตัวในแนวราบ (รูปที่ 4.5)พบว่ามีพฤติกรรมการอัดตัวในช่วงแรกหลังจากนั้นตัวอย่างมีพฤติกรรมการขยายตัวในทุกความเค้นตั้งฉากเช่นเดียวกับผลทดสอบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างซึ่งพฤติกรรมการขยายตัวนี้เกิดจากการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันขณะทำการเฉือนตัวอย่างทำให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว โดยปกติพฤติกรรมการขยายตัวนี้สัมพันธ์กับพฤติกรรมการลดลงของความเค้นเฉือนเนื่องจากความเครียด (Strain-softening) ผลทดสอบในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีพฤติกรรมการลดลงของความเค้นเฉือน เนื่องจากความเครียด (Strain-softenening) เพียงเล็กน้อยเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคของมวลรวมที่เกิดจากการแตกหักขณะทำการเฉือนตัวอย่าง โดยที่มวลรวมที่เกิดจากการแตกหักที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างในตัวอย่างทดสอบ ทำให้ยังมีความสามารถในการรับความเค้นเฉือนได้โดยเกิดการลดลงของความเค้นเฉือนเพียงเล็กน้อย (Arulrajah et al. 2014a; Arulrajah et al. 2014b; Arulrajah et al. 2014c)

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่าง แสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของตัวอย่างทั้งสองการกระจายขนาดคละ พบว่า ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากันค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนในทุกความเค้นตั้งฉาก เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) ที่ใหญ่กว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของKim and Ha (2014) เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือน (Shear strength parameter) ซึ่งประกอบด้วยค่าการยึดเกาะ (Cohesion, *c*) และมุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, ϕ) ตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure criterion) ที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ค่ามุมเสียดทานภายในที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak internal friction angle) และค่าการยึดเกาะของมวลรวมทั้งสองการกระจายขนาดคละมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอาจกล่าวได้ว่าขนาดคละที่อยู่ภายในขอบเขตบน และขอบเขตล่างตามมาตรฐาน

กรมทางหลวงไม่มีผลต่อมุมเสียดทานภายในและค่าการยึดเกาะของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เนื่องจากค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ใช้บดอัดตัวอย่างทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ตารางที่ 4.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนและกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด และปราศจากการเสริมจีโอกริด

RCA sample	**Aperture size**	**Normal stress (kPa)**	**Shear strength, τ (kPa) or Interface shear strength, $\tau_{interface}$ (kPa)**
Lower bound (Large sized simple)	-	50	731.76
		100	790.90
		200	1,139.16
	7x7 mm	50	679.51
		100	790.40
		200	935.44
	21x21 mm	50	702.23
		100	767.06
		200	1,045.51

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

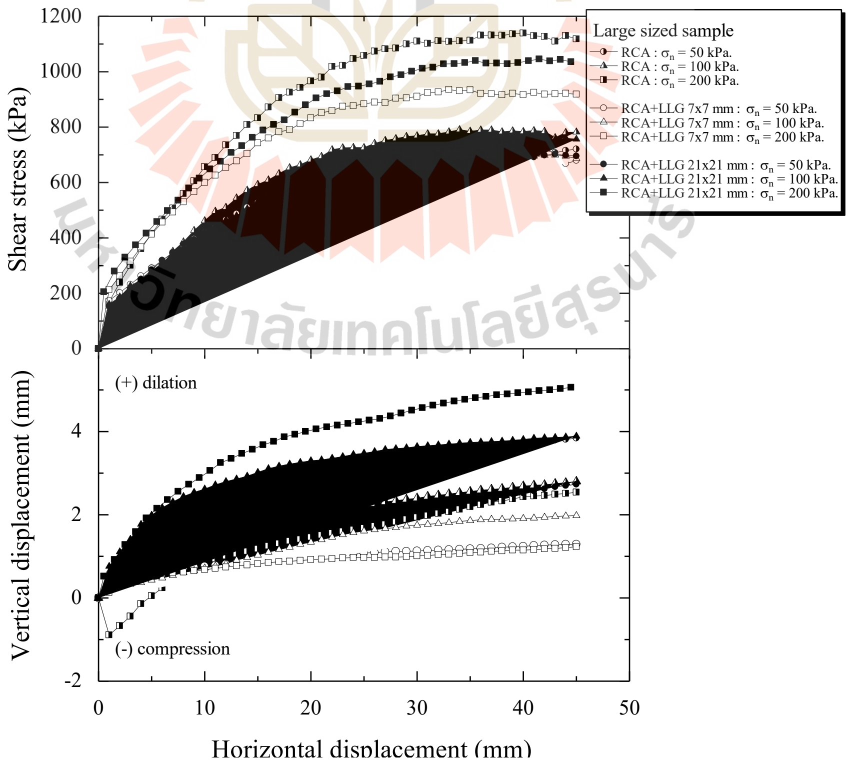
ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

RCA sample	Aperture size	Normal stress (kPa)	Shear strength, τ (kPa) or Interface shear strength, $\tau_{interface}$ (kPa)
Upper bound (Small sized simple)	-	50	503.36
		100	646.37
		200	814.44
	7x7 mm	50	398.32
		100	525.11
		200	669.21
	21x21 mm	50	452.52
		100	569.77
		200	727.15

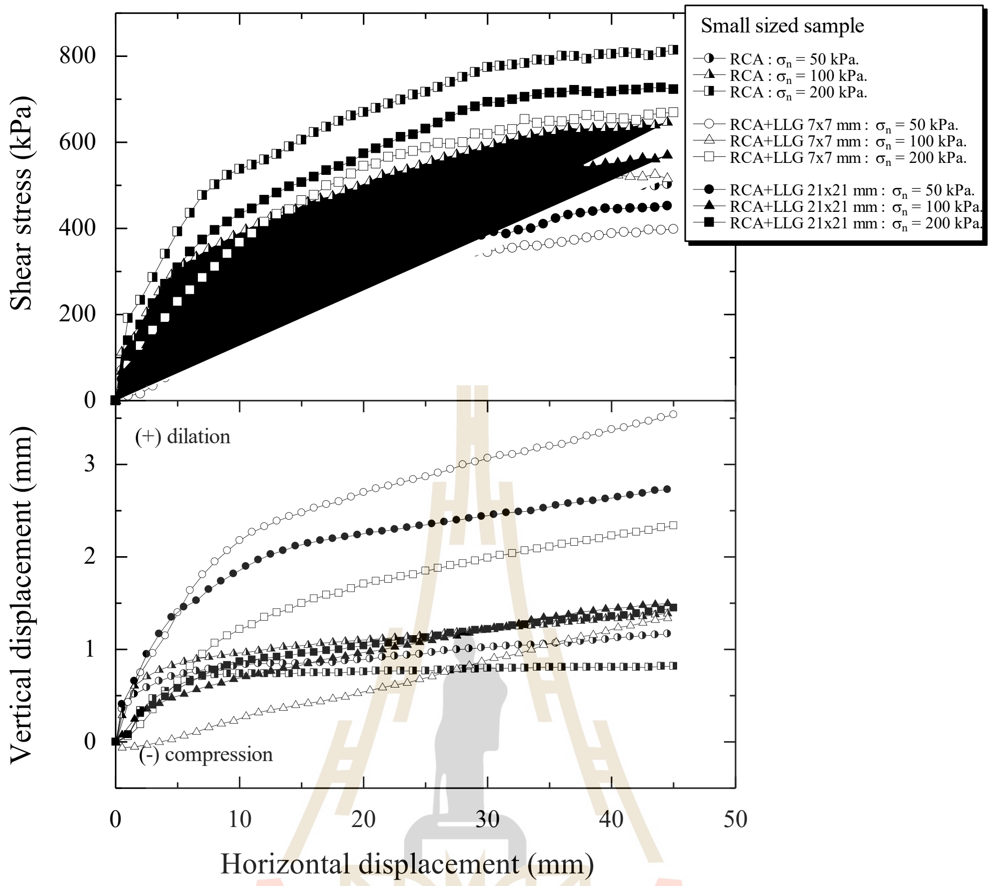
4.2.2 ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) และจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

ผลทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกริดขนาดเดียวกัน พบว่า ในทุกความเค้นตั้งฉากและการกระจายขนาดคละความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าลดลงเล็กน้อยและคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร และเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุด และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและการเคลื่อนตัวในแนวราบแสดงให้เห็นว่าในทุกการทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีพฤติกรรมการอัดตัวเล็กน้อยในช่วงแรกหลังจากนั้นมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีพฤติกรรมการขยายตัวซึ่งเหมือนกับผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

ปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งพฤติกรรมการอัดตัวและขยายตัวในลักษณะนี้สามารถพบได้ทั่วไปในการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบและจีโอกริด (Arulrajah et al. 2013, Arulrajah et al. 2015 และ Suddeepong et al. 2018) ซึ่งมีสาเหตุจากการขัดกันระหว่างจีโอกริดและอนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริด จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาที่ความเค้นตั้งฉากค่าเดียวกัน พบว่า ความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear stress) ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีค่าสูงกว่าความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้รายงานโดยนักวิจัยจำนวนมาก (Liu et al. 2009a; Liu et al. 2009b; Abu-Farsakh et al. 2007; Ling et al. 2008; McCartney et al. 2009; Lee and Manjunath 2000) พบว่า พารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength parameter) ของดินและวัสดุมวลรวมซึ่งถูกเสริมด้วยจีโอกริดที่ทดสอบโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงจะมีค่าต่ำกว่าวัสดุนั้นๆที่ปราศจากการเสริมจีโอกริด เนื่องจากผลของการลดลงของการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาควัสดุมวลรวมจากการเสริมจีโอกริดบริเวณรอยต่อของกล่องความเค้นเฉือนด้านบนและด้านล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดระนาบเฉือน (Shear plane) อีกทั้งผิวที่มีความเรียบของจีโอกริดยังส่งผลต่อการลดลงของกำลังร่วมเฉือนด้วยเช่นกัน

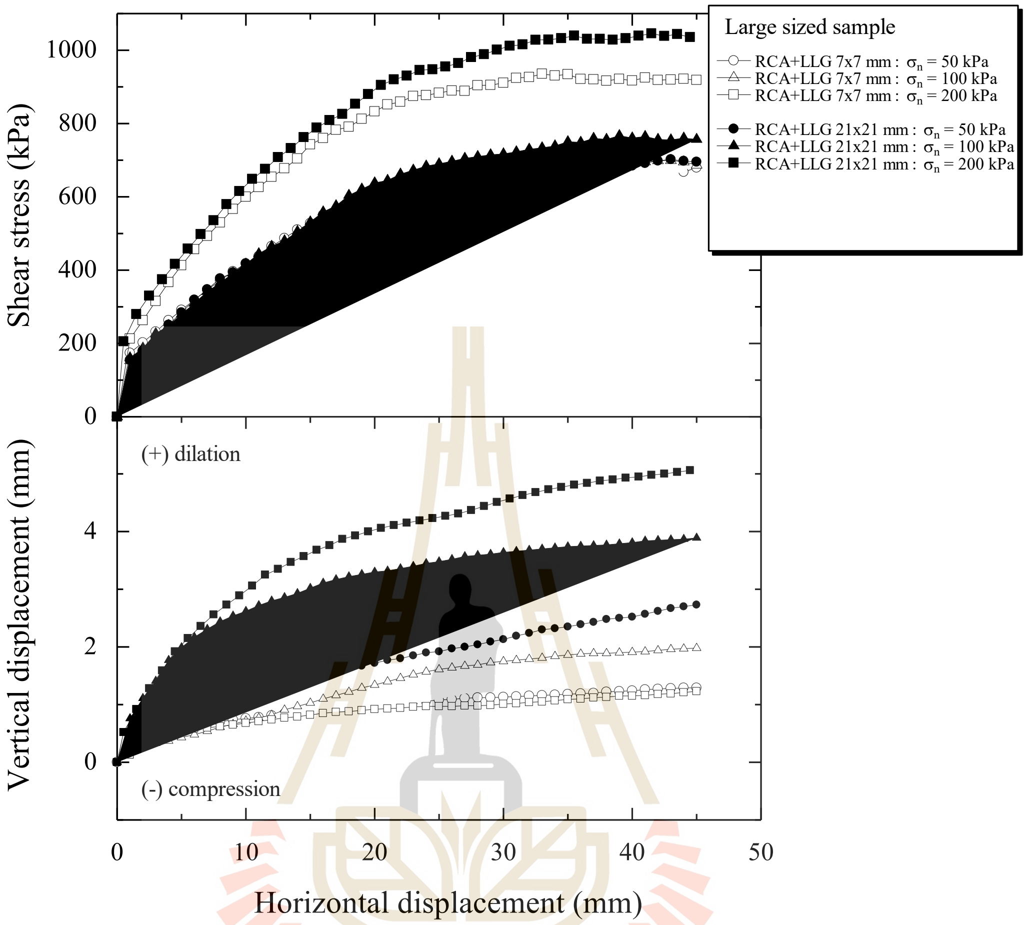


รูปที่ 4.7 ผลทดสอบแรงเฉือน และปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง

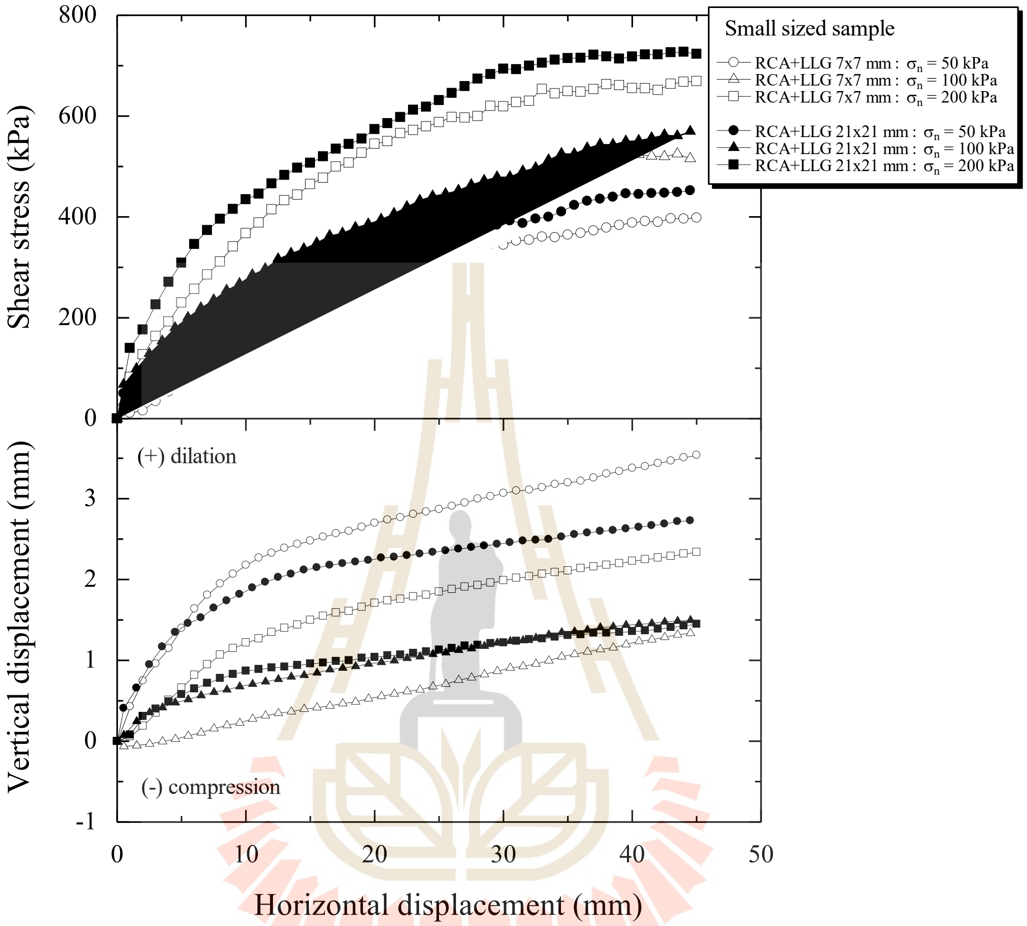


รูปที่ 4.8 ผลทดสอบแรงเฉือน และปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



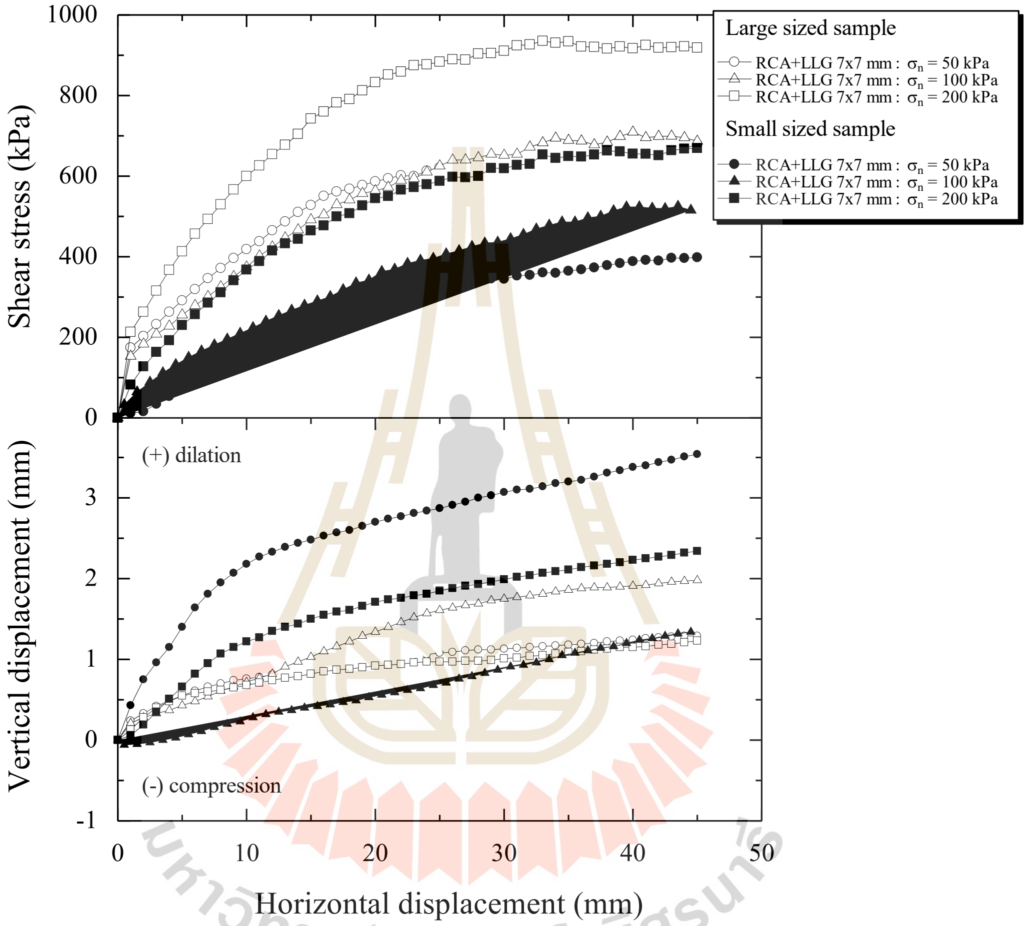
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานกรมทางหลวงเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดคละตามขอบเขตบนของมาตรฐานกรมทางหลวงเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

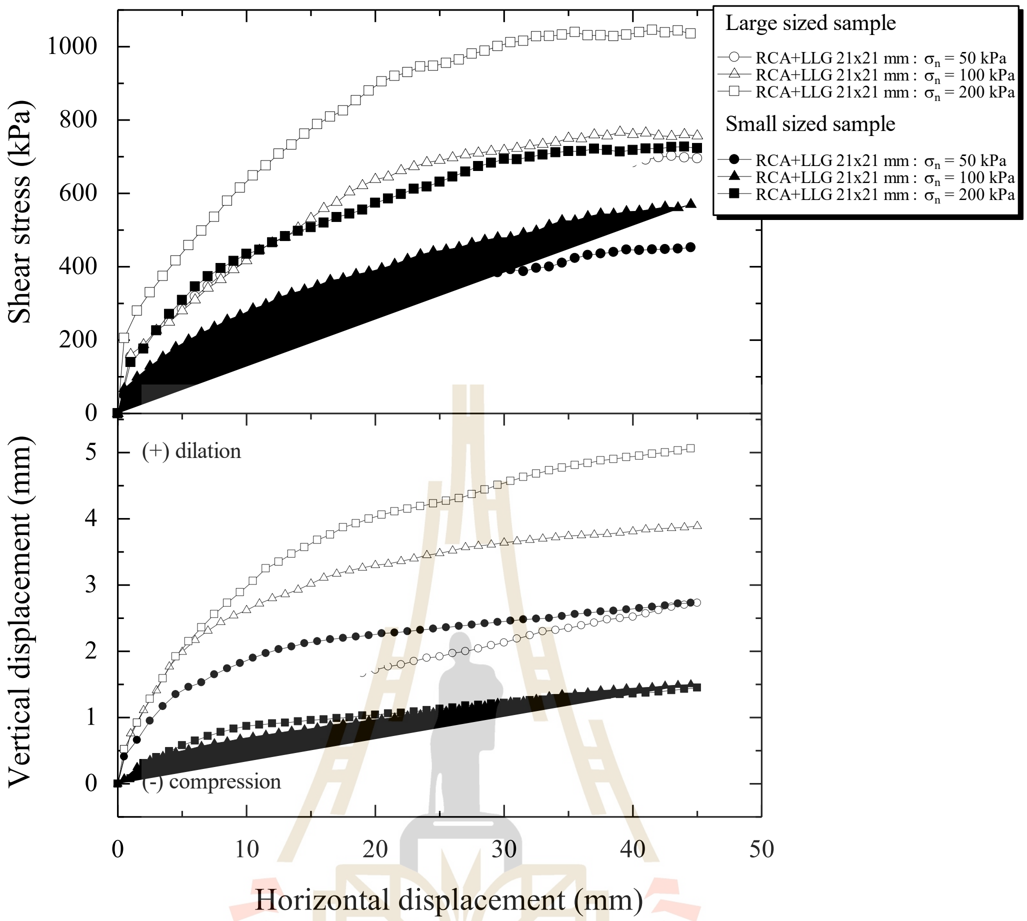
รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงอิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จะเห็นว่า มวลรวมชนิดเดียวกัน เมื่อขนาดช่องเปิดมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังร่วมเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้จีโอกริดที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากขึ้นนั้นทำให้ปริมาณอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดช่องเปิดของจีโอกริดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงและอนุภาคมวลรวมกับจีโอกริดบริเวณระนาบเฉือนเพิ่มมากขึ้น โดยที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดนี้เมื่อถูกต้านทานการเคลื่อนที่โดยจีโอกริดอนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงเคลื่อนที่ไป

รอบกันโดยไม่เกิดการไถลไปบนจีโอกริด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suddeepong et al. (2018) ที่ได้อธิบายว่าการเสริมจีโอกริดที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้นสามารถให้กำลังร่วมเฉือนได้สูงขึ้น เนื่องจากการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดมีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของขนาดของมวลรวมต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดช่องเปิด 7 มิลลิเมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของขนาดของมวลรวมต่อพฤติกรรมร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดช่องเปิด 21 มิลลิเมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

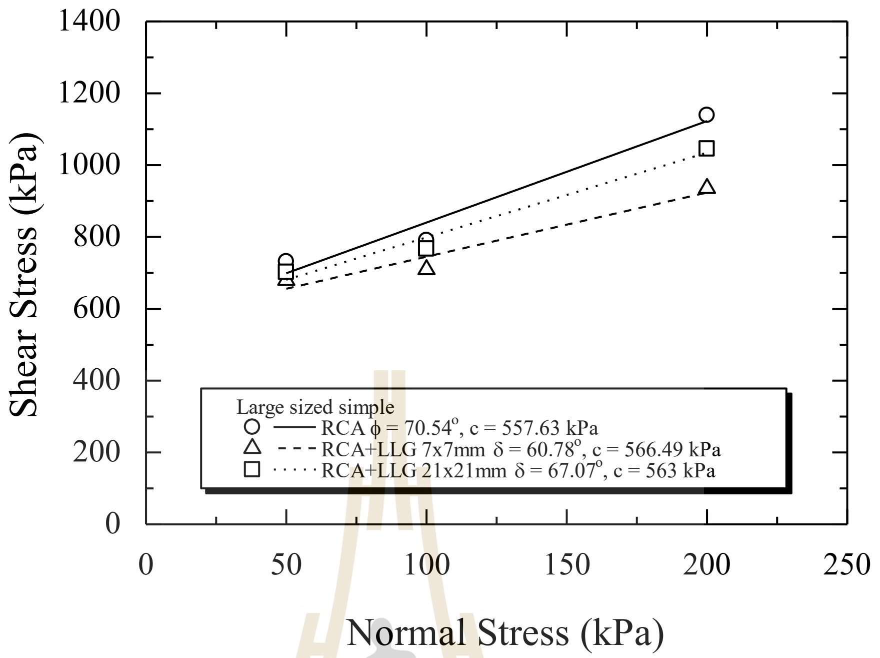
รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงอิทธิพลของขนาดของมวลรวมต่อพฤติกรรมร่วมเฉือน จะเห็นว่ากำลังร่วมเฉือนของมวลรวมเสริมจีโอกริดชนิดเดียวกันแต่มวลรวมมีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันพบว่า ในทุกความเค้นตั้งฉากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง จะมีกำลังร่วมเฉือนสูงกว่า เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่มากกว่า ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติพารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength parameter) ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure criterion) แสดงดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 จากรูป พบว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกันถูกเสริมด้วยจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันมีค่ามุมเสียดทานใกล้เคียงกันและมีค่าแรงยึดเกาะ

(Cohesion) ใกล้เคียงกันเช่นกัน อย่างไรก็ตามตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างมีค่ามุมเสียดทานสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละตามขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

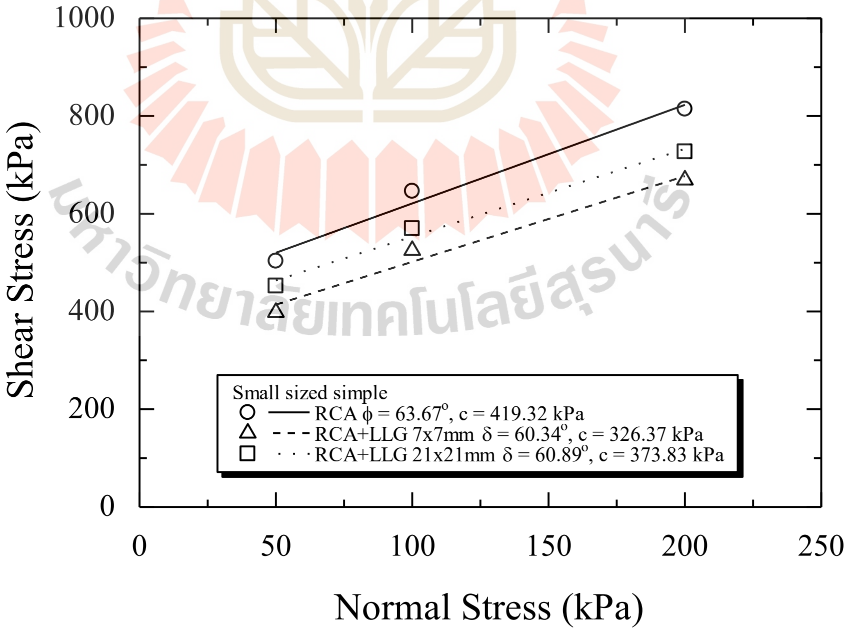
มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึง (Tensile strength) ต่ำซึ่งสามารถวิบัติด้วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร (Traffic load) เมื่อมวลรวมนี้ถูกเสริมด้วยจีโอกริดลักษณะการวิบัติ (Mode of failure) อาจเป็นได้ทั้งแบบแตกหักจากแรงดึง (Tensile rupture failure) หรือ การวิบัติแบบลื่นไถล (Slip failure) ทั้งนี้การวิบัติแบบแตกหักเกิดขึ้นเมื่อแรงดึง (Tensile stress) ที่เกิดกับจีโอกริดมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของจีโอกริด จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติหลังการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเฉือน พบว่า จีโอกริดเส้นใยธรรมชาติยังคงมีสภาพเดิมไม่เกิดการเสียรูป ดังนั้น ลักษณะการวิบัติจึงเป็นแบบลื่นไถลซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลบนจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติซึ่งถูกควบคุมโดยกำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength) ระหว่างมวลรวมและจีโอกริดกำลังร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล สามารถอธิบายในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength coefficient, α) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$\alpha = \tau_{interface}/\tau_{RCA} \qquad \text{...........(4.1)}$$

เมื่อ $\tau_{interface}$ คือ กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และ τ_{RCA} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริด จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการกระจายขนาดคละแบบเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของจีโอกริดที่มีขนาดช่องเปิดเท่ากันแปรผันในช่วงแคบๆ และจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) สามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง



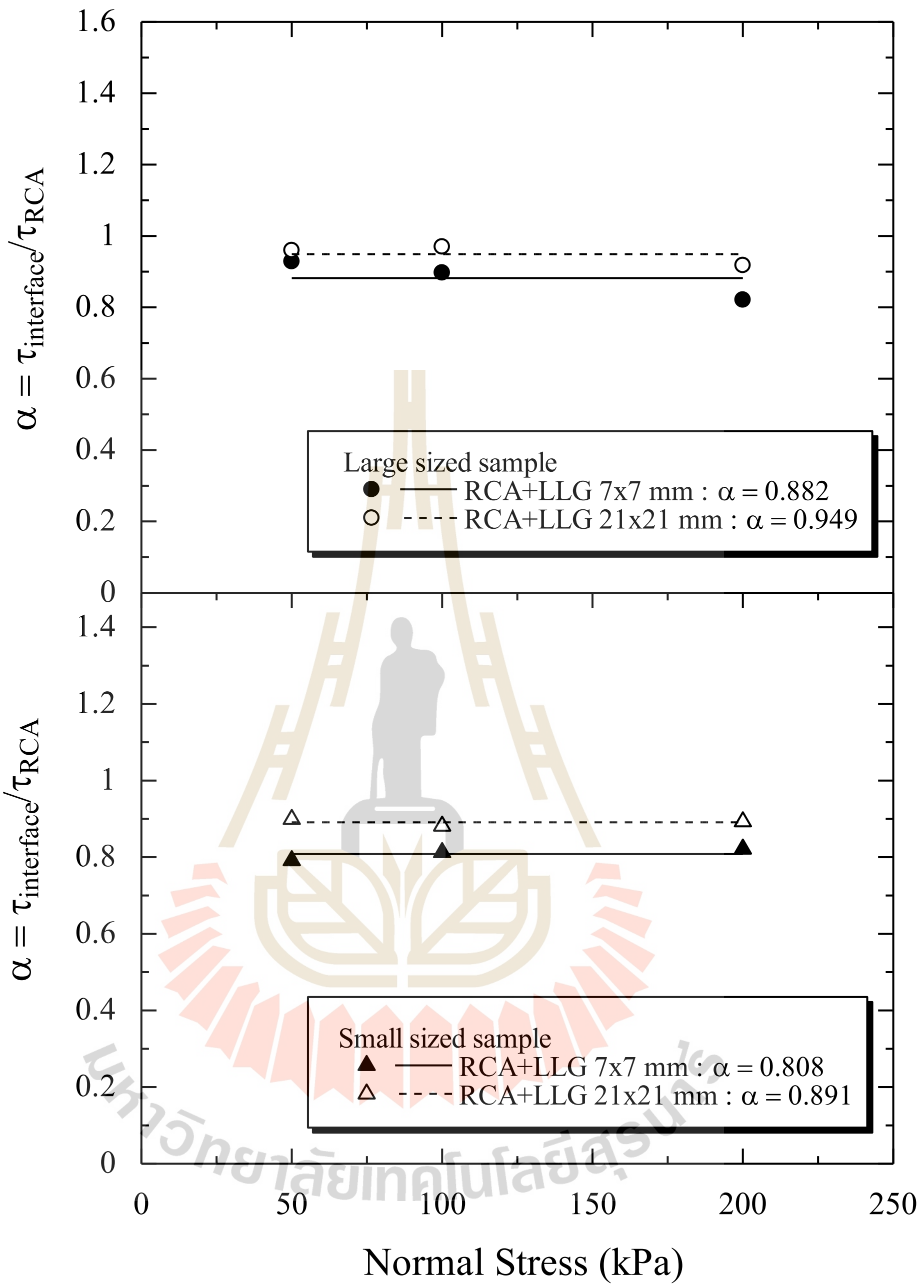
รูปที่ 4.14 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

รูปที่ 4.15 ลักษณะของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติก่อนและหลังการทดสอบ

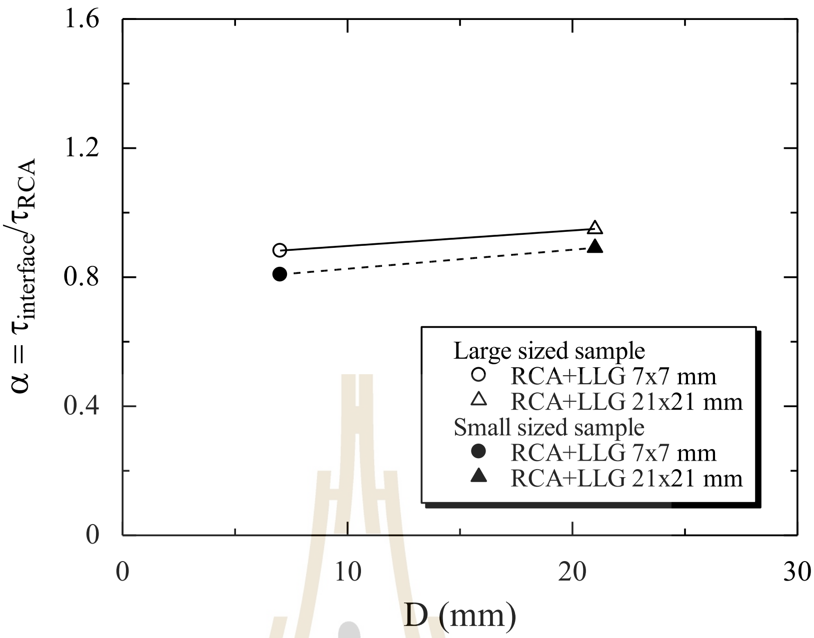
ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

RCA samples	**Aperture width of geogrid, *D* (mm)**	**RCA particles finer than aperture width of geogrid, F_D**	**Interface shear strength coefficient, α**
Large sized	7	0.28	0.882
	21	0.60	0.949
Small sized	7	0.60	0.808
	21	0.80	0.891

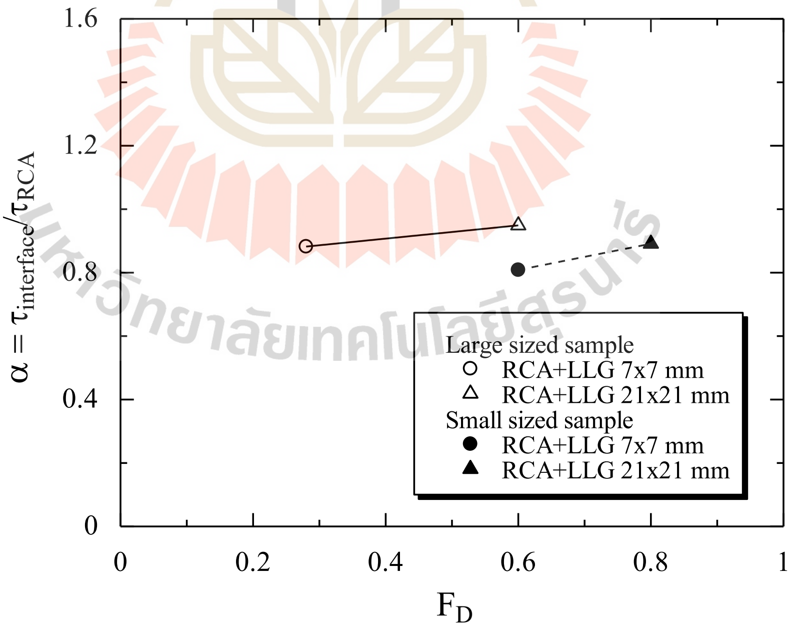
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



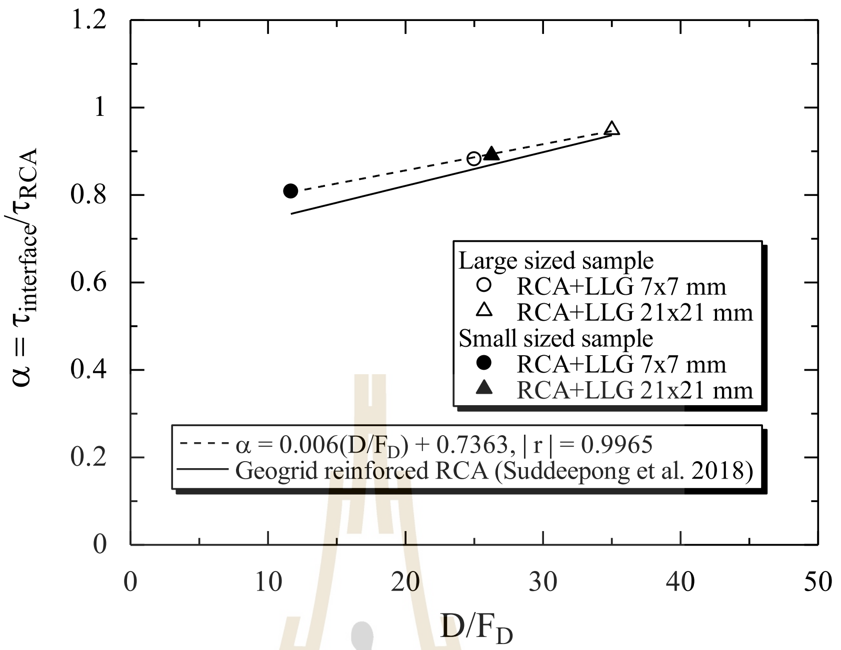
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวดิ่งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและขนาดช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงอิทธิพลของขนาดของช่องเปิดของจีโอกริดและปริมาณของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกัน เมื่อถูกเสริมด้วยจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้อนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กำลังร่วมเฉือนและสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติสูง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18เห็นได้ว่า ปริมาณของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน เมื่อพิจารณาตัวอย่างมวลรวมชนิดเดียวกันเมื่อปริมาณอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติกับอัตราส่วนระหว่างด้านขนาดของช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและปริมาณของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.19

พบว่ามีความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงเดียวกัน เช่นเดียวกับผลการศึกษากำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด (Geogrid reinforced recycled concrete aggregate) ของ Suddeepong et al. (2018) ผลจากการวิเคราะห์ ความถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.2)

$$\alpha = 0.006(D/F_D) + 0.736 \; ; \; 10 < D/F_D < 35 \qquad \text{.........} \; (4.2)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของช่องเปิดของจีโอกริด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และ F_D คือ ปริมาณของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ความสัมพันธ์ดังกล่าว มีประโยชน์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ สำหรับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละภายในขอบเขตบน และขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง เมื่อทราบขนาดของช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาเส้นใยปอ (Kenaf) ที่ถักสานเป็นโครงตาข่ายในลักษณะเรียบ (Plain pattern) โดยที่มีขนาดช่องเปิด (Opening Size) ที่แตกต่างกันของโครงตาข่าย มี 2 ขนาดดังนี้ 7 และ 21 มิลลิเมตร เพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยศึกษาปฏิกิริยาร่วมเฉือนในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ (ขนาดช่องเปิด) และคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือน) ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.11 กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากการลดลงของการขัดกัน (interlocking) ระหว่างอนุภาคของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในบริเวณที่มีการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดหน้าตัดเฉือน (shear plane) สำหรับมวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละแบบเดียวกัน เมื่อขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีขนาดใหญ่มากขึ้นกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการขัดกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติขนาดเดียวกันกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างมีค่าสูงกว่าขอบเขตบนเนื่องจากอิทธิพลของขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ที่มีขนาดใหญ่เช่นเดียวกับผลทดสอบหากำลังต้านแรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ

5.1.2 สมการกำลังร่วมเฉือนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน (α) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ สมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติเพียงต้องการกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลขนาดช่องเปิดของจีโอกริดเส้นใยธรรมชาติ และการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

ธวัชชัย ตัตชัยสวัสดิ์. (2556). **การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพและป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน.** สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพมหานคร.

ปรีดิเทพ อนุจร และเอนก สินวีรุทัย. (2548). **การเสริมไหล่คันทางความชันสูงด้วยวัสดุสังเคราะห์สำหรับการเสริมกำลัง**. ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง: กรุงเทพมหานคร.

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. (2559). **ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.

ดิถี แห่งเชาวนิช และนายวิฑร ชินพนธ์. (2543). **การใช้หญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพเชิงลาดและควบคุมการชะล้างพังทลาย เพื่อประยุกต์ในงานวิศวกรรม.** เอกสารทางวิชาการหมายเลข 2543/1 เครือข่ายหญ้าแฝกประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการพิเศษ เพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร.). ISBN 9747773988, 9789747773989.

ทล-ม. 203/2556. (2558). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์.** กรมทางหลวง ประเทศไทย.

Abu-Farsakh, M., Coronel, J., and Tao, M. (2007) **Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large directshear tests**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE) 0899-1561(2007)19:7(540), 540-549.

Anand, S. (2008). **Designer natural fiber geotextiles - A new concept.** Indian Journal of Fiber & Textile Research, Vol. 33, pp. 339-344.

ASTM. (2006). **Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine**. ASTM-C131, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012). **Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate**. ASTM-C127-12, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2008). **Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method**. ASTM-D5321, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2009). **Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort**. ASTM-D1557, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2015). **Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method**. ASTM-D6637, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012). **Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils**. ASTM-D1883, West Conshohocken, PA.

Askew, M. F. (2000). **Summary Report—Fibre Crops**. IENICA, Ref. 1495, Chapter 5, August 2000, pp. 23–38.

Arulrajah, A., Rahman, M. A., Piratheepan, J., Bo, M. W., and Imteaz, M. A. (2013). **Interface Shear Strength Testing of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials**. Advances in Civil Engineering Materials 2(1), 189-200.

Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., and Prongmanee, N. (2014a). **Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications**. Construction and Building Materials 58, 245–257.

Arulrajah, A., Rahman, M. A., Piratheepan, J., Bo, M. W., and Imteaz M. A. (2014b). **Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus**. Journal of Materials in Civil Engineering 26(5), 974–982.

Arulrajah, A., Ali M. M. Y., Disfani, M. M., and Horpibulsuk, S. (2014c). **Recycled-glass blends in pavement base/subbase applications: laboratory and field evaluation**. Journal of Materials in Civil Engineering 26(7), Article ID04014025.

Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghoolpilehrood, F., Samingthong, W., Du, Y.J., and Shen, S.L. (2015). **Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid Reinforced Foamed Recycled Glass Using a Large-Scale Direct Shear Testing Apparatus.** Advances in Materials Science and Engineering 2015(2015), Article ID235424.

Beckman, W. K., Mills, W. H. (1957). **Cotton fabric reinforced roads.** Engineering News Records Vol. 115, No. 14, pp. 453–455.

Chandrakaran, S., Sankar, N. and Subaida, E. A. (2008). **Performance of unpaved road section reinforced with woven coir geotextile.** Proceedings Indian Geotechnical Conference, December 17-19, 2008, Bangalore, INDIA.

Davidovits, J. (1991). **Geopolymers: inorganic polymeric new materials.** Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656.

Dinu, I. and Saska, M. (2007). **Production and properties of soil erosion control mats made from sugarcane bagasse.** Journal American Society of Sugar Cane Technologists, Vol. 27, pp. 36-47.

Kirby, R. H. (1963), **Vegetable fibres.** World Crops Books, Leonard Hill Ltd., London, UK.

Lee, K., and Manjunath, V.R. (2000). **Soil-geotextile interface friction by direct shear tests Can**. Geotech. J., 37(1), 238-252.

Lekha, K. R. (2004). **Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextilestabilizedslopes- A case study.** Geotextiles and Geomembranes, Vol. 22, pp. 399–413.

Ling, H.I., Wang. J. P., and Leshchinsky, D. (2008). **Cyclic behaviour of soil-structure interfaces associated with modular-block reinforced soil-retaining walls**. Geosynth. Int., 15(1), 14-21.

Liu, C.N., Zornberg, J.G., Chen, T.C., Ho, Y.H. and Lin, B.H. (2009a). **Behavior of geogrid sand interface in direct shear mode**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135(12), 1863-1871.

Liu, C.N., Ho, Y.H. and Huang, J.W. (2009b). **Large scale direct shear tests of soil/pet-yarn geogrid interfaces**. Geotextiles and Geomembranes 27(1), 19-30.

Mandal, J. N. (1989). **Geojute.** International Geotextile Society News, Vol. 5, No. 3, November,CANADA, p. 12.

McCartney, J.S., and Zornberg, J. G., and Swan, R. H. Jr. (2009). **Analysis of a large database of gcl-geomembrane interface shear strength results**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE) 1090-0241(2009)135:2(209), 209-223.

Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Prahsarn C. and Bergado, D. T. (2010). **Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles**. Carbohydrate Polymers, doi:10.1016/j.carbpl.2010.06.036 (in press).

Mwasha, A. (2009). **Designing bio-based geotextiles for reinforcing an embankment erected on soft soil**. Materials and Design, Vol. 30, No. 7, pp. 2657–2664.

Mwasha, A. and Petersen A. (2010). **Thinking outside the box: The time dependent behavior of a reinforced embankment on soft soil.** Materials and Design, Vol. 31, pp. 2360–2367.

Palomo, A., Grutzeck, M., and Blance, M. T. (1999). **Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future.** Cement and Concrete Research, 8, 1323-1329.

Sarsby, R. W., Ali, M., Alwis, R., de Khaffaf, J. H. and McDougall, J. M. (1992). **The use of natural and low cost soil reinforcement.** Proceeding of International Conference on Nonwoven, The Textile Institute, New Delhi, pp. 297-310.

Sarsby, R. W. (2007). **Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankment built on soft clay.** Geotextiles and Geomembranes, Vol. 25, Issue 4-5, pp. 302-310.

Subaida, E. A., Chandrakaran, S. and Sankar, N. (2008). **Experimental investigations on tensile and pullout behaviour of woven coir geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26, pp. 384-392.

Suddeepong, A., Sari, N.,Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A. and Arulrajah, A. (2018). **Interface shear behaviours between recycled concrete aggregate and geogrids for pavement applications.** International Journal of Pavement Engineering. doi.org/10. 1080/10298436.2018.1453609.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายชนินนันท์ นันทะเสนา เกิดวันที่ 3 กรกฎาคม 2535 ที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 448 หมู่ 7 ต.โพธิ์กลาง อ.เมือง จ.นครราชสีมา การศึกษามัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนบุญวัฒนา จ.นครราชสีมา การศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2557 หลังจากการจบการศึกษาทำงานบริษัทเอกชน ปี 2559 ศึกษาต่อปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนถึงปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี