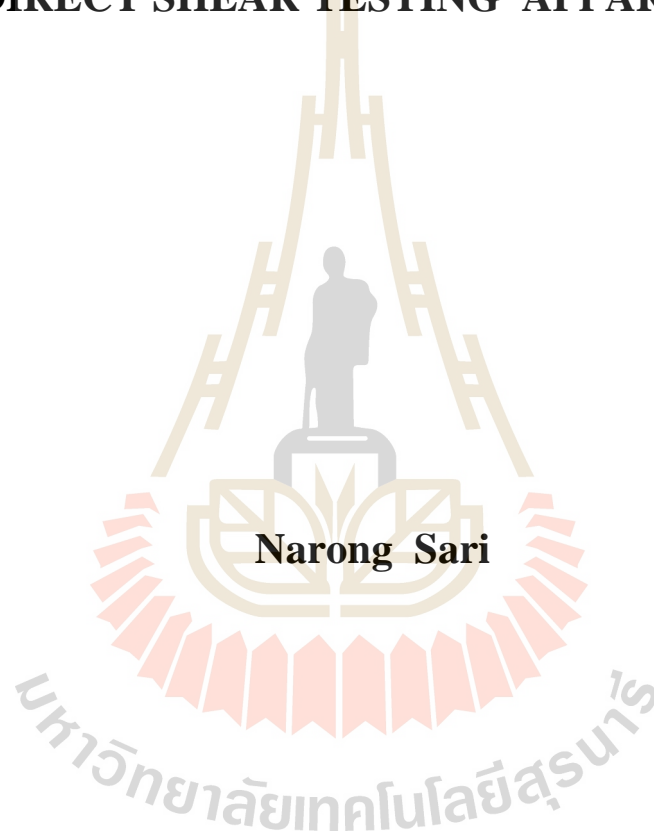


การศึกษาปฏิบัติการร่วมเดือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กเสริมจีโอกรีด
ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**EVALUATION OF INTERFACE SHEAR STRENGTH
PROPERTIES OF GEOGRID REINFORCED RECYCLED
CONCRETE AGGREGATE USING A LARGE-SCALE
DIRECT SHEAR TESTING APPARATUS**




**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2016

การศึกษาปฏิบัติการร่วมเดือนระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

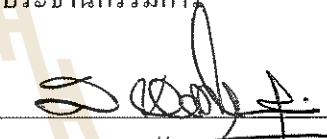
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ




(ศ. ดร. สุขสันต์ ห่อพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



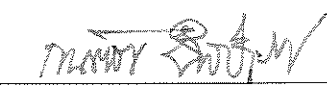
(ผศ. ดร. พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนดร์ ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณรงค์ สารี : การศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด
ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (EVALUATION OF INTERFACE SHEAR
STRENGTH PROPERTIES OF GEOGRID REINFORCED RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE USING A LARGE-SCALE DIRECT SHEAR TESTING APPARATUS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 65 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ตัวอย่าง
มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษามี 2 ประเภท คือ ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มี
การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างและขอบเขตบนของข้อกำหนดของวัสดุชั้นพื้นทางของ
กรมทางหลวง การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในห้องปฏิบัติการ
ประกอบด้วย การทดสอบการบดอัด การทดสอบซีบีอาร์ การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ การ
ทดสอบหาค่าการสึกหรอ และการทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล การทดสอบ
ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดดำเนินการด้วยชุดทดสอบแรง
เฉือนตรงขนาดใหญ่ภายใต้หน่วยแรงตั้งฉากเท่ากับ 50 100 และ 200 กิโลปาสคาล จีโอกริดที่ใช้ใน
การทดสอบมีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันสามขนาด ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวล
รวมคอนกรีตรีไซเคิลพบว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองขนาดคละมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม
ผ่านข้อกำหนดของวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงพบว่ามวลรวม
คอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่ามวลรวมที่
มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน ผลการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนพบว่ากำลังร่วมเฉือน
ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดช่องเปิดของจีโอกริด
และขนาดคละ (คอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างจะมีค่าสูงกว่าขอบเขตบนและให้ค่ากำลังร่วมเฉือน
สูงกว่า) ท้ายสุด ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด
ในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดและขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้ถูกนำเสนอ
ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในงานวิศวกรรมการทาง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา Abon
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]

NARONG SARI : EVALUATION OF INTERFACE SHEAR STRENGTH
PROPERTIES OF GEOGRID REINFORCED RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE USING A LARGE-SCALE DIRECT SHEAR TESTING
APPARATUS. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 65 PP.

SHEAR INTERACTION / RECYCLED CONCRETE AGGREGATE / GEOGRID

This research studies shear interaction between recycled concrete aggregate (RCA) and geogrid. Two RCA samples were used in this study: grain size distribution curve following the lower and upper boundaries of the specification from Department of Highways, Thailand for base materials. The laboratory tests on RCA samples included compaction, California Bearing Ratio (CBR), absorption, Los Angeles (LA) abrasion and direct shear tests. Interface shear strength properties of geogrid reinforced RCA determined using a large-scale direct shear test apparatus under the normal stress of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa. Three different aperture sizes of biaxial geogrid were investigated used. The engineering property test results showed that the engineering properties of both RCA samples met the specification from Department of Highways, Thailand. The direct shear test results showed that the RCA sample following the lower boundary had higher shear strength than the RCA sample following the upper boundary. The interface shear strength was higher for higher RCA particle size and larger opening geogrid. From the critical analysis of the test

result, the equation for predicting interface shear strength of geogrid reinforced RCA was proposed in term of RCA particle size and opening size of geogird.



School of Civil Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Handwritten signatures of the student and advisor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ การกล่าวขอบคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านนั้นเป็นไปได้ยาก ผู้วิจัยต้องขอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง กรรมการ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ คุณวิชญกร สมิงทอง คุณอาทิตย์ อุดมชัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา และ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาสเข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาและมหาบัณฑิตศึกษา

และท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมด้านการศึกษาและให้กำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

ณรงค์ สารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีความแข็งแรงของดินโดยมอร์.....	5
2.2 สมการของคูลอมป์.....	7
2.3 การทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรง.....	9
2.4 พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน.....	11
2.5 ความต้านทานแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ.....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 วิธีการดำเนินการ	28
3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	29
3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ.....	30
3.3 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุจีโอกรีต.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การเตรียมตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับการทดสอบ.....	31
3.5	การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ปราศจากการเสริมจีโอกรีตและการทดสอบปฏิกริยาร่วม เฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต.....	32
3.6	เงื่อนไขในการทดสอบ.....	34
4	ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	35
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	35
4.2	ผลการทดสอบ.....	36
5	บทสรุป	50
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	50
5.2	ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป.....	51
	รายการอ้างอิง.....	52
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	57
	ประวัติผู้เขียน.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง.....	16
2.2	คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการทดสอบและอัตราส่วนของ L / D_{50}	19
2.3	เงื่อนไขในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุรีไซเคิลเสริมกำลัง.....	21
3.1	คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกรีต.....	30
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	35
4.2	กำลังต้านทานแรงเฉือน กำลังร่วมเฉือน และอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดของ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตและปราศจากการเสริมจีโอกรีต.....	39
4.3	สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต.....	47

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขอบเขตความแข็งแรงของดิน	6
2.2	ตัวประกอบความต้านทานแรงเฉือน	7
2.3	เส้นขอบเขตความแข็งแรงของดิน	8
2.4	เครื่องมือทดลองดินแบบแรงเฉือนตรง	9
2.5	ขอบเขตความแข็งแรงของดิน โดยการทดลองวิธีแรงเฉือนตรง	10
2.6	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินของการทดลองหาความต้านทาน แรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนตรง	11
2.7	กราฟการทดลองแบบแรงอัดสามแนวแกนของทราย	13
2.8	ขอบเขตความแข็งแรงของทราย	14
2.9	แรงกระทำที่กล่องวางบนพื้นผิวด	15
2.10	พฤติกรรมการทรุดตัวของถนนแบบเสริมและไม่เสริม กำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์กับจำนวนรอบในการให้น้ำหนัก	17
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตาม ระนาบของจีโอกริตกับมวลรวมรีไซเคิล	18
2.12	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงที่ความชื้น 2 เปอร์เซ็นต์	20
2.13	ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงที่ความชื้น 8 เปอร์เซ็นต์	20
2.14	กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่าง	20
2.15	การเสริมจีโอกริตในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	22
2.16	กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมหินคลุกด้วยเงื่อนไขต่างๆ	22
2.17	กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมจากการรื้อถอน อาคารตามเงื่อนไขต่างๆ	23
2.18	กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมจากคอนกรีต รีไซเคิลตามเงื่อนไขต่างๆ	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมของเสีย จากหม้อต้มตามเงื่อนไขต่างๆ	24
2.20	มวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกรีตหลังจากทำการ ทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	25
2.21	กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลไม่เสริมจีโอกรีต	26
2.22	กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกรีต	26
2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ แก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมกำลัง(α) และความเครียดปกติ	27
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย	28
3.2	ขั้นตอนการปรับปรุงขนาดคละตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	29
3.3	การกระจายขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	29
3.4	จีโอกรีตรุ่น GX 60/60 GX 60/30 และ GX 160/50	30
3.5	มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ผสมน้ำแล้วพักทิ้งไว้ในภาชนะปิด	31
3.6	แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวม คอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต	32
3.7	เครื่องทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต	33
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและความสัมพันธ์ ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีต รีไซเคิลที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง	37
4.2	พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่างตาม มาตรฐานกรมทางหลวง	40
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและความสัมพันธ์ ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีต รีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของ กรมทางหลวง	41

สารบัญญรูล (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเนือ้นต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและ ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบ ของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง 42
4.5	พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเนือ้นของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริม จีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง 44
4.6	พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเนือ้นของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริม จีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง..... 44
4.7	ลักษณะของจีโอกรีตหลังการทดสอบ..... 45
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนือ้นและความเค้นแนวตั้ง ของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง..... 46
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนือ้นและความเค้นแนวตั้ง ของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง 46
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนือ้นและขนาดช่องเปิดของ จีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีต 48
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนือ้นและปริมาณอนุภาคที่มี ขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีต 48
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนือ้นและอัตราส่วนระหว่าง ขนาดช่องเปิดและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีต ของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีต 49

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน
σ	=	ความเค้นในแนวตั้งฉาก
τ	=	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ
ϕ	=	ค่ามุมเสียดทานภายในของวัสดุ
C	=	ค่าแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ
S	=	ค่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุใดๆ
Δz	=	ระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง
Δh	=	ระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบ
RCA	=	มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
CB	=	อิฐบด
WR	=	เศษหิน
RAP	=	ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล
FRG	=	แก้วรีไซเคิลละเอียด
MRG	=	แก้วรีไซเคิลขนาดกลาง
MSa	=	ทรายขนาดกลาง
ρ_d	=	ความหนาแน่นแห้ง
D_{50}	=	ขนาดเม็ดเฉลี่ยที่ผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน 50 เปอร์เซ็นต์
GP	=	กรวดที่มีขนาดคละกันไม่ดี
GW	=	กรวดที่มีขนาดคละกันดี
τ_{max}	=	ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด
$\tau_{interface}$	=	กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต
τ_f	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
D	=	ด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีต
F_D	=	ร้อยละของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมทางจำเป็นต้องนำวัสดุมวลรวมมาประยุกต์ใช้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น วัสดุถมคันทาง วัสดุชั้นรองพื้นทาง วัสดุชั้นพื้นทาง เป็นต้น ซึ่งวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ปัจจุบันมีการก่อสร้างมากขึ้นทำให้มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้นตามไปด้วย ทรัพยากรธรรมชาติเหล่านี้ย่อมหมดไปเพราะธรรมชาติไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนเองได้ จึงทำให้ในอนาคตย่อมเกิดปัญหาการขาดแคลนวัสดุอันนำมาซึ่งต้นทุนการก่อสร้างที่สูงขึ้น ในขณะที่วัสดุเหลือทิ้งจากการรื้อถอนอาคารและสิ่งปลูกสร้างกลับมีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาขาดแคลนพื้นที่กำจัดวัสดุเหลือทิ้ง (Aatheesan et al. 2010; Hoyos et al. 2011; Aruljah et al. 2012)

วัสดุเหลือทิ้งจากการรื้อถอนอาคารและสิ่งปลูกสร้าง เช่น เศษคอนกรีต เศษอิฐ หิน เป็นต้น ส่วนใหญ่ถูกนำไปทิ้งหรือใช้ถมที่ดิน ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างไม่คุ้มค่าในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และอาจทำให้เกิดปัญหาต่อการก่อสร้างในอนาคต งานวิจัยจากต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้เช่น มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (McKelvey et al. 2002; Poon and Chan 2006a, 2006b; Debieb and Kenai 2008; Arulrajah et al. 2012c; Azam and Cameron 2012; Gabr and Cameron 2012) มวลรวมเศษอิฐ (Aatheesan et al. 2010; Arulrajah et al. 2011a; Arulrajah et al. 2012a; Piratheepan et al. 2013) มวลรวมแอสฟัลต์รีไซเคิล (Taha et al. 2002; Han et al. 2011; Disfani et al. 2011; Hoyos et al. 2011; Puppala et al. 2011; Thakur et al. 2012) และมวลรวมเศษแก้ว (Ali et al. 2011; Disfani et al. 2011; Arulrajah et al. 2012b; Disfani et al. 2012; Imteaz et al. 2012) เป็นต้น วัสดุดังกล่าวได้รับการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการและในสนามว่ามีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความแข็งแรงทนทานต่อการนำมาใช้งานในลักษณะต่างๆ Wahlström et al. (2000) และ Poon and Chan (2006b) ได้แสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทางและชั้นพื้นทาง แม้ว่าจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ด้อยกว่าวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ

วัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก เสถียรภาพในชั้นทาง และความคงทนของถนน ในปี ค.ศ. 1926 South Carolina Highways Department (Becham et al. 1935) ได้ประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานทางเป็นครั้งแรก และพบว่าวัสดุสังเคราะห์ช่วยลดการแตกร้าวของผิวถนนได้เป็นอย่างดี วัสดุสังเคราะห์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับถนน ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง (Miura et al. 1990; Montanelli et al. 1997; Perkin and Ismeik 1997; Al-Qadi et al 2008; Howard and Warren 2009) ดังนั้นจึงช่วยลดความหนาของชั้นรองพื้นทางได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งมีอยู่อย่างจำกัด (Arulrajah et al. 2012) แม้ว่าจะเป็นเรื่องที่ทำหายและมีคุณค่าทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) เสริมจีโอกริด (Geogrid) และความเป็นไปได้ในการประยุกต์วัสดุผสมนี้ในงานวิศวกรรมการทาง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมาประยุกต์ในงานก่อสร้างชั้นทาง โดยมีขนาดคละที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544 บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะได้รับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ อันได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ซีบีอาร์ การดูดซึมน้ำ การสึกหรอ และการกระจายขนาดคละ ค่าการสึกหรอทำการทดสอบโดยเครื่อง Loss Angeles Abrasion ตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) การทดสอบแรงเฉือนตรงดำเนินการด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large Scale Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริดกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกัน

ท้ายสุดงานวิจัยนี้จะศึกษาปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริด (ขนาดช่องเปิด) และคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (การกระจายขนาด) ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมการทาง

1.2.2 ศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและศึกษาปฏิกิริยาร่วมเหนือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีตในพจน์ของขนาดช่องเปิดจีโอกรีตและร้อยละของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดช่องเปิดจีโอกรีต

1.2.3 หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกำลังร่วมเหนือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกรีตในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเหนือน α

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดละเอียดขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก (ทล.-ม.201/2544 กรมทางหลวง) ซึ่งได้แก่ ขนาดละเอียด หน่วยน้ำหนักแห้งบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ปริมาณความชื้นบดอัดเหมาะสม ค่าซีพีอาร์ ค่าการสึกหรอ ค่าการดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และยังศึกษาปฏิกิริยาร่วมเหนือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ในพจน์ของขนาดช่องเปิดจีโอกรีต ร้อยละของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้จากการบดย่อยก้อนลูกปูนคอนกรีตขนาด 15x15x15 เซนติเมตร (ทรงลูกบาศก์) และ 15 x 30 เซนติเมตร (ทรงกระบอก) จากสำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดนครราชสีมา และห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตถูกปรับแก้ขนาดละเอียดให้ได้ตามขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ทล.-ม.201/2544 ของกรมทางหลวง จีโอกรีตที่ใช้ศึกษามีขนาดช่องเปิด(Aperture Size)แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ Miragrid รุ่น GX 60/60 GX 60/30 และGX 160/50 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 7x7 21x24 แล 30x21 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากบริษัท Tencate Geosynthetics ประเทศไทย จำกัด

การทดสอบแรงเฉือนตรงกระทำด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (กล่องทดสอบขนาด 305x305 มิลลิเมตร) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) ผลทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกรีตในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน α

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมการทาง

1.4.2 รู้กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเข้าใจปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ในพจน์ของขนาดช่องเปิดจีโอกรีตและร้อยละของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดช่องเปิดจีโอกรีต

1.4.3 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกรีตในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน α

บทที่ 2

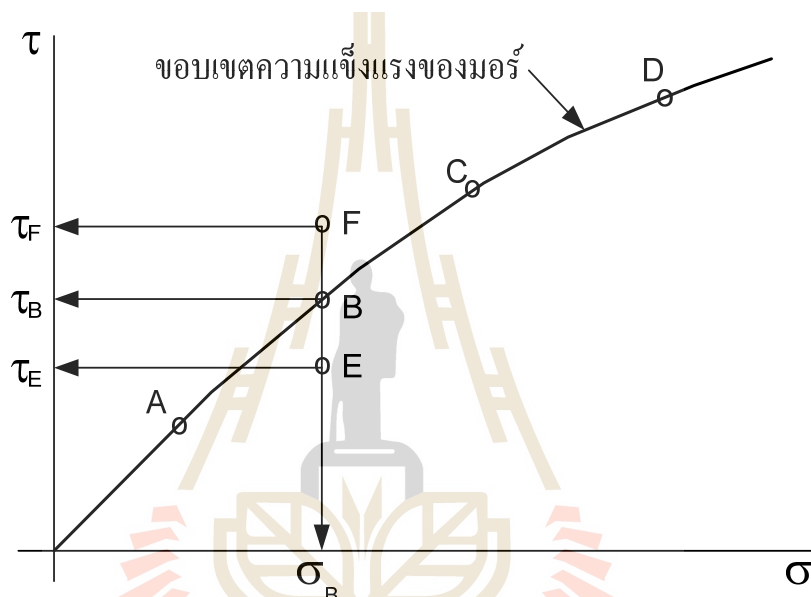
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุที่ถูกนำมาใช้งานในด้านวิศวกรรมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามประเภทการใช้งานและความแข็งแรงของวัสดุ เช่นในงานด้านวิศวกรรมโครงสร้างจะเกี่ยวข้องกับเหล็กและคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ ความแข็งแรงของเหล็กจะหมายถึงความสามารถในการต้านทานการรับแรงดึง (Tensile Strength) ความแข็งแรงของคอนกรีตจะหมายถึงความสามารถในการต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) งานด้านวิศวกรรมธรณีจะเกี่ยวข้องกับดินหรือมวลรวมเป็นส่วนใหญ่ ความแข็งแรงของดินและมวลรวมนั้นจะหมายถึงกำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) เนื่องจากจะวิบัติจากแรงเฉือน (Shear Failure) กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินหรือวัสดุมวลรวมนั้นมีหลายปัจจัยที่ทำให้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต่างกัน เช่น การจัดเรียงตัวของเม็ดดินหรือวัสดุมวลรวม ชนิดของดินหรือวัสดุมวลรวม ปริมาณความชื้น เป็นต้น

2.1 ทฤษฎีความแข็งแรงของดินโดยมอร์

ถ้านำตัวอย่างดินคงสภาพและอิ่มตัวด้วยน้ำมาอัดโดยรอบด้วยความเค้นคงที่ค่าหนึ่ง จะทำให้น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเกิดความดันขึ้นและน้ำจะพยายามไหลหนีออกไป ปล่อยให้ น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินถูกระบายออกจนหยุด จากนั้นให้ตัวอย่างดินนี้ได้รับความเค้นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งความเค้นนี้จะทำให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนที่ระนาบหนึ่ง นำค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal Stress) ที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ดินวิบัติ มาพล็อตลงในรูปที่ 2.1 จากนั้นนำตัวอย่างดินชิ้นใหม่ (ดินชนิดเดิมและมีสภาพเหมือนเดิม) มาทำการทดลองใหม่เหมือนที่กล่าวข้างต้นแต่เพิ่มความเค้นที่อัดโดยรอบ(มีค่าคงที่)มากกว่าเดิม จากการทำทดลองจะได้ค่าความเค้นเฉือนและค่าความเค้นในแนวตั้งฉากที่ระนาบที่ดินวิบัติอีกค่าหนึ่ง นำค่าความเค้นทั้งสองมาพล็อตลงในรูปที่ 2.1 อีกครั้ง จะได้จุด B และหากใช้ตัวอย่างดินอีก 2 ตัวอย่างมาทำการทดลองดังกล่าวอีก จะได้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นในแนวตั้งฉากที่ระนาบที่ดินวิบัติอีก 2 ค่า นำมาพล็อตลงในรูปที่ 2.1 จะได้จุด C และ D ตามลำดับ จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทั้งหมด จะได้เป็นเส้นโค้ง ABCD ซึ่งเส้นโค้ง ABCD นี้เรียกว่า ขอบเขตความแข็งแรงของมอร์ (Mohr Strength Envelope) เส้นโค้งนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงขอบเขตความแข็งแรงของดินนั้น โดยจะไม่มีค่าความแข็งแรงใดๆ อยู่เหนือเส้นโค้งนี้ได้ ซึ่งจะสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.1

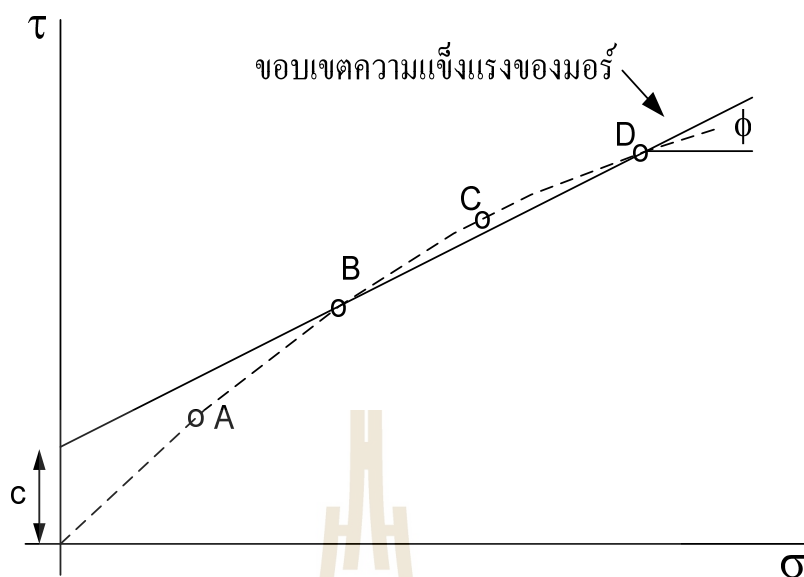
จากรูปนี้จะได้เห็นจุด F B และ E มีค่าความเค้นในแนวตั้งฉากเท่ากันคือ σ_B จุด F ซึ่งอยู่เหนือเส้นโค้ง ABCD จะมีความเค้นเท่ากับ σ_B และ τ_F ซึ่งความเค้นนี้จะไม่มีการเกิดขึ้นได้ในดินนี้ ทั้งนี้เพราะดินจะวิบัติเนื่องจากความเค้นที่เท่ากับจุด B (σ_B, τ_B) ก่อนในขณะที่จุด E (σ_B, τ_E) ซึ่งอยู่ใต้เส้นขอบเขตความแข็งแรงของดินโดยมอร์ จะมีค่าความเค้นเฉือนน้อยกว่าค่าความเค้นเฉือนของจุด B (τ_E น้อยกว่า τ_B) ดังนั้นค่าความเค้นที่จุด E นี้จะไม่ทำให้ดินเกิดการวิบัติ และสามารถเกิดได้ในดินนี้ได้



รูปที่ 2.1 ขอบเขตความแข็งแรงของดิน

ทฤษฎีความแข็งแรงของดินโดยมอร์ (Mohr Strength Theory) นี้เป็นทฤษฎีที่มีประโยชน์มากเมื่อใช้ศึกษาความแข็งแรงของดิน โดยทฤษฎีนี้ได้กล่าวว่า การวิบัติของดินไม่ได้เกิดขึ้นในระนาบที่มีค่าความเค้นเฉือนมากที่สุด แต่จะเกิดขึ้นในระนาบที่วิกฤติเนื่องจากผลของความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือนรวมกัน ดังจุดต่างๆบนเส้นโค้ง ABCD

ในการหาค่าความเค้นต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil) จะเป็นการง่ายหากแปลงเส้นโค้ง ABCD ให้เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.2 แต่เนื่องจากค่าความเค้นเฉือนของดินเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเค้นในแนวตั้งฉาก ดังเส้นโค้ง ABCD ในรูปที่ 2.1 ดังนั้นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินจึงต้องหาอยู่ในรูปของตัวประกอบความความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength of Parameter) คือค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction, ϕ) และค่าความยึดเหนี่ยว (Cohesion, c)



รูปที่ 2.2 ตัวประกอบความต้านทานแรงเฉือน

2.2 สมการของคูลอมบ์

ในปี ค.ศ. 1773 วิศวกรทหารชาวฝรั่งเศสชื่อ ชาลส์ ออگัสติน คูลอมบ์ (Charles Augustin Coulomb) ได้เสนอสมการความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุใดๆ เป็นสมการเส้นตรงดังนี้

$$S = C + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

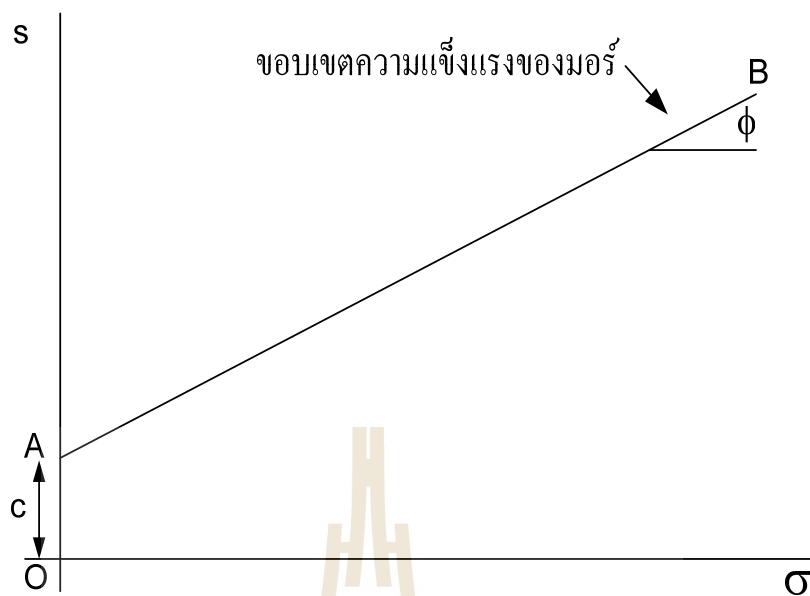
เมื่อ S คือความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุใดๆ

C คือแรงยึดเหนี่ยว

σ คือความเค้นในแนวตั้งฉาก

ϕ คือมุมเสียดทานภายใน

สมการที่ 2.1 นี้เรียกว่า สมการของคูลอมบ์ (Coulomb's Equation) ซึ่งสมการนี้มีความหมายว่า ความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุใดๆ จะมีองค์ประกอบสองส่วนคือ ความเหนียว (C) และความฝืด ($\sigma \tan \phi$) และจะสามารถเขียนเป็นรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งรูปกราฟจะเห็นเป็นเส้นตรง AB เอียงทำมุม ϕ กับแนวนอนและตัดแกน S ที่ A โดยระยะ OA เท่ากับ C ดังนั้นเส้นตรง AB จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเส้นขอบเขตความแข็งแรงของดิน จึงทำให้เมื่อพูดถึงความแข็งแรงของดินจะนิยมใช้สมการดังกล่าวเป็นสมการอ้างอิง



รูปที่ 2.3 เส้นขอบเขตความแข็งแรงของดิน

ดังนั้นสมการที่ 2.1 จึงกลายเป็น

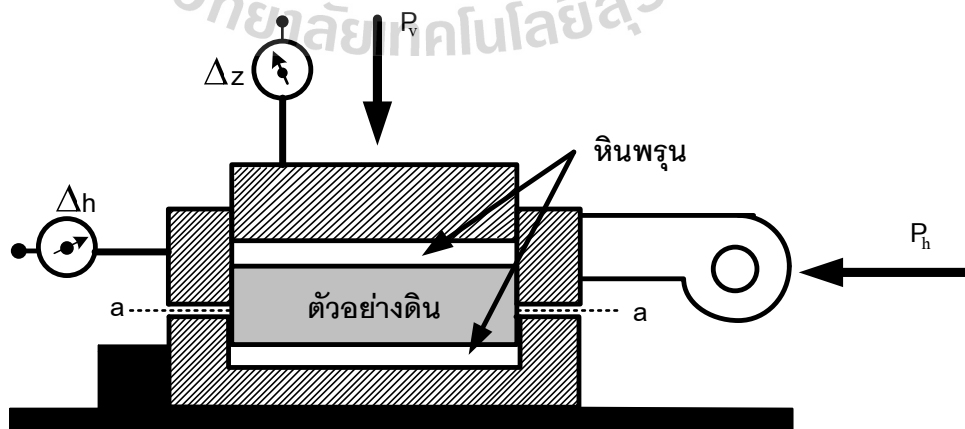
$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- τ คือความต้านทานแรงเฉือนของดิน
 - C คือแรงยึดเหนี่ยว
 - σ คือความเค้นในแนวตั้งฉาก
 - ϕ คือมุมเสียดทานภายใน

ค่าแรงยึดเหนี่ยวในสมการที่ 2.2 จะเกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินเนื่องจากประจุไฟฟ้า (Ionic Bond) ซึ่งจะมีค่าสูงในดินประเภทที่มีความเชื่อมแน่น ในขณะที่มุมเสียดทานภายในจะเกิดจากความต้านทานการลื่นไถลทั้งจากแรงเสียดทานและการขัดกันของเม็ดดิน ซึ่งค่านี้จะมีมากในดินประเภทที่ไม่มีความเชื่อมแน่น

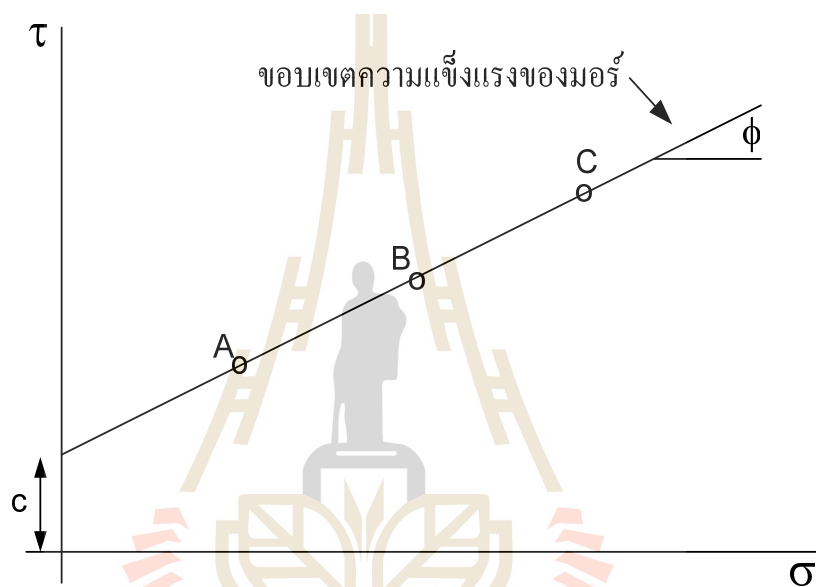
2.3 การทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test)

การทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) การทดลองวิธีนี้ จะทำโดยนำตัวอย่างดินมาใส่ลงในกล่องแรงเฉือน (Shear Box) โดยจะใส่หินพรุน (Porous Stone) ประกบดินไว้เพื่อให้น้ำได้มีการระบายออกจากตัวอย่างดินทางด้านบนและล่าง กล่องแรงเฉือนนี้จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนและส่วนล่าง จากนั้นกดตัวอย่างดินด้วยน้ำหนักคงที่ค่าหนึ่ง (P_v) ซึ่งน้ำหนักนี้จะทำให้เกิดความเค้นกดตัวอย่างดินเท่ากับ หรือใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่กดทับดินอยู่ในสนามดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากนั้นทำการเฉือนตัวอย่างดินโดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวนอน (P_h) ซึ่งคือ แรงเฉือน (Shear Force) นั้นเอง และจากรูปที่ 2.4 จะเห็นตัวอย่างดินครึ่งบน (ซึ่งอยู่ในกล่องแรงเฉือนส่วนบน) จะดันให้เลื่อนไปทางด้านซ้าย ในขณะที่ตัวอย่างดินครึ่งล่าง (ซึ่งอยู่ในกล่องแรงเฉือนส่วนล่าง) ไม่สามารถเคลื่อนตามไปได้ ทำให้ตัวอย่างดินถูกเฉือนในแนวระนาบ a-a วัดระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (Δz) และแนวนอน (Δh) เพิ่มแรงกระทำในแนวนอนขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ วัดค่าแรงกระทำในแนวนอนที่สูงที่สุด แล้วนำค่าน้ำหนักกดคงที่และแรงกระทำในแนวนอนที่สูงที่สุด (แรงเฉือนสูงสุด) มาแปลงเป็นความเค้น ซึ่งความเค้นทั้งสองจะเป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนระนาบที่ดินวิบัติ (ระนาบ a-a) นำค่าความเค้นทั้งสองไปพล็อตลงในกราฟโดยให้แกนในแนวนอนเป็นค่าความเค้นตั้งฉาก และแกนตั้งเป็นค่าความเค้นเฉือนที่สูงที่สุด จะได้จุด A ในรูปที่ 2.5 จากนั้นนำตัวอย่างดินชนิดเดิมก้อนใหม่มาทำการทดลองซ้ำแบบเดิม แต่เปลี่ยนน้ำหนักกดคงที่ให้มากกว่าเดิม และทำการทดลองอีกอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง จะได้จุด B และ C ตามลำดับ ลากเส้นตรงผ่านจุดทั้งสาม เส้นตรงนี้คือเส้นขอบเขตความแข็งแรงของมอร์และมูมที่เส้นตรงนี้กระทำกับแนวนอนคือ มุมเสียดทานภายใน และค่าที่เส้นขอบเขตความแข็งแรงของมอร์ตัดกับแกนตั้งคือ ค่าแรงยึดเหนี่ยว



รูปที่ 2.4 เครื่องมือทดลองดินแบบแรงเฉือนตรง

การทดลองหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินโดยวิธีแรงเฉือนตรงนี้ สามารถกระทำได้กับทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ซึ่งหากจะทดลองกับดินเม็ดหยาบ เช่น ทราย เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพของดินเม็ดหยาบกระทำได้ยาก ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างทดลองวิศวกรจะนำดินนั้นมาบดอัดลงในกล่องแรงเฉือน ให้มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับดินในสนาม และเนื่องจากดินเม็ดหยาบสามารถระบายน้ำได้เร็ว ดังนั้นการทดลองกับดินเม็ดหยาบจะสามารถทดลองได้ในสภาพระบายน้ำ



รูปที่ 2.5 ขอบเขตความแข็งแรงของดินโดยการทดลองวิธีแรงเฉือนตรง

สำหรับดินเม็ดละเอียด ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพ และใช้แหวนตัดดิน (Cutting Ring) ตัดดินให้มีขนาดเท่ากับกล่องแรงเฉือนแล้วดันตัวอย่างดินจากแหวนตัดดินลงไปในกลุ่มแรงเฉือน

การทดลองหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน โดยวิธีแรงเฉือนตรงนี้มีมานานแล้ว และมีข้อเสียหลายประการที่ทำให้มีการโต้แย้งถึงผลการทดลองที่ไม่ค่อยจะถูกต้อง และทำให้ความนิยมของการทดลองนี้ลดน้อยลง ซึ่งข้อเสียที่สำคัญสามารถสรุปได้ 3 ข้อ ได้แก่

1. การทดลองวิธีนี้จะเป็นการบังคับให้ตัวอย่างดินวิบัติในระนาบที่กำหนดเท่านั้น (ระนาบ a-a ของรูปที่ 2.4) ซึ่งในความเป็นจริงตัวอย่างดินจะวิบัติในระนาบที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจไม่ใช่ระนาบ a-a

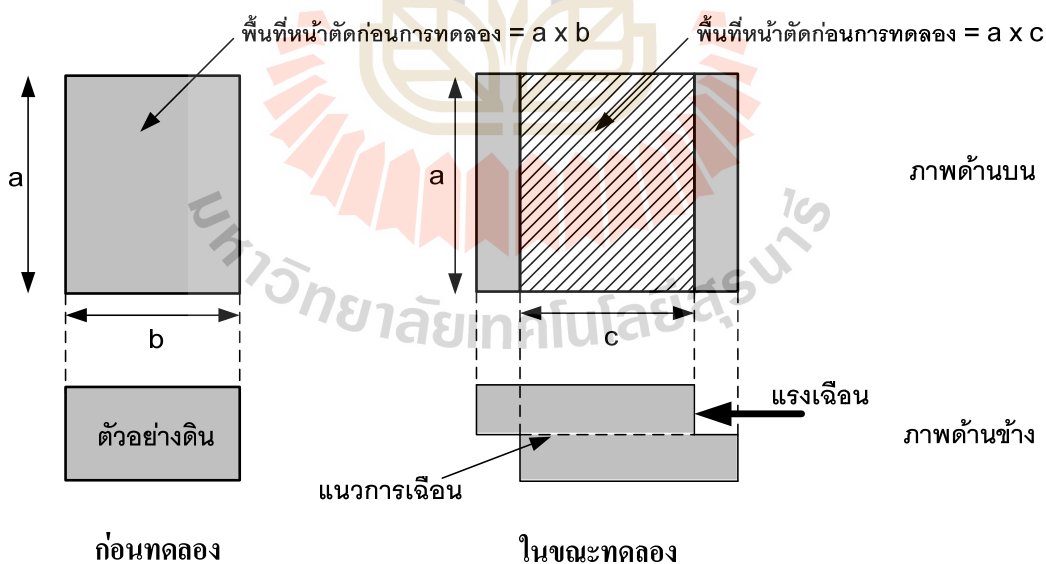
2. การทดลองวิธีนี้ต้องใช้ตัวอย่างดินที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าการทดลองแบบอื่น ซึ่งการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ๆ ที่ความลึกมาก ๆ จะมีราคาแพงมาก ดังนั้นจึงอาจเป็นการไม่คุ้มค่าในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทดลองโดยวิธีนี้

3. การทดลองวิธีนี้ไม่สามารถหาหรือวัดค่าตัวประกอบอื่นๆ ได้ เช่น ค่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้น หรือค่าอัตราส่วนปัวร์ซอง เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือทดลองสมัยใหม่สามารถวัดค่าเหล่านี้ได้

ถึงจะมีข้อเสียต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว แต่การทดลองวิธีนี้ก็ยังคงเป็นที่นิยมใช้อยู่ เพราะสามารถกระทำได้รวดเร็ว ราคาค่อนข้างถูก และให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2.4 พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

สำหรับการทดลองหาความต้านทานแรงเฉือนของดินโดยวิธีแรงเฉือนตรง จะไม่นิยมทำการปรับแก้พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินในขณะที่ทดลองจะเล็กลงเรื่อยๆ ในขณะที่ค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินมีขนาดเล็กกลง หากนำไปทำการคำนวณหาค่าความเค้นเฉือนจะทำให้ค่าแรงเฉือนและค่าความเค้นเฉือนไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นในการทดลองโดยวิธีแรงเฉือนตรงจึงนิยมใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินก่อนทดลองมาคำนวณหาค่าความเค้นเฉือน



รูปที่ 2.6 พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินของการทดลองหาความต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนตรง

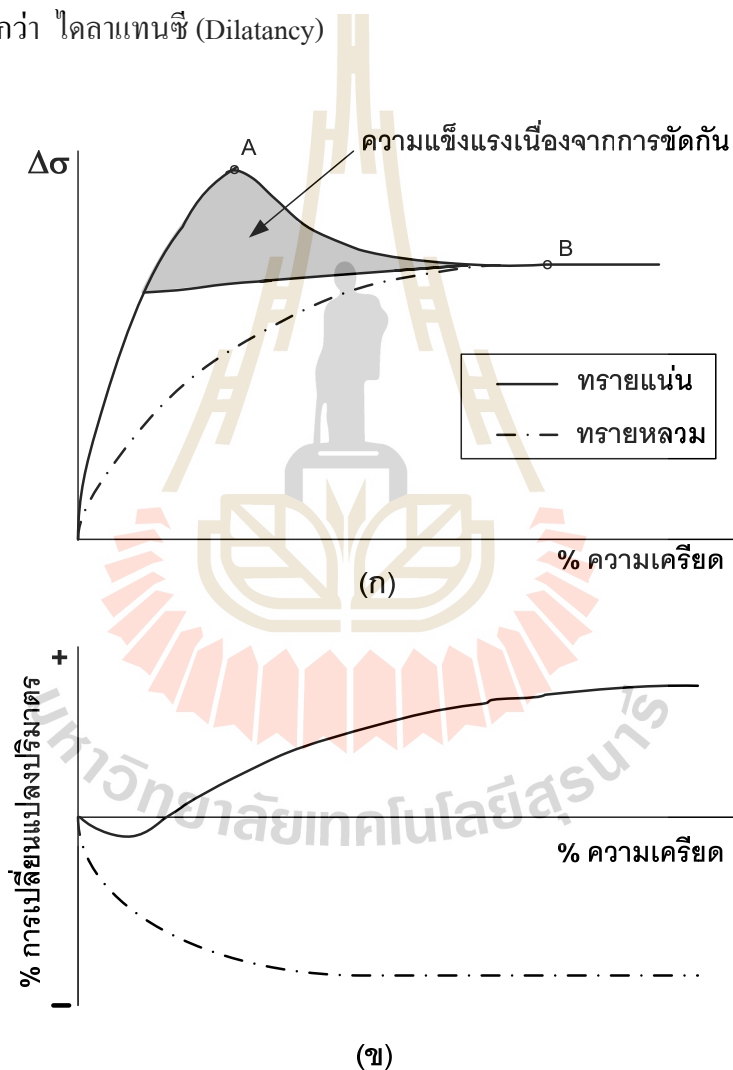
2.5 ความต้านทานแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ

เนื่องจากดินเม็ดหยาบจะมีขนาดเม็ดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงไม่แสดงความสามารถในการเกาะกันซึ่งทำให้ดินชนิดนี้เปรียบเสมือนไม่มีค่าแรงยึดเหนี่ยว ดังนั้นค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบมักจะหมายถึงความต้านทานการลื่นไถล ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะต่างๆ ของเม็ดดิน และลักษณะเฉพาะของดินนั้นๆ เช่น ค่าอัตราส่วนช่องว่าง ลักษณะรูปร่างของเม็ดดิน ลักษณะผิวของเม็ดดิน และลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดิน แต่ที่มีผลต่อการต้านทานแรงเฉือนอย่างมากคือ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง และค่าหน่วยน้ำหนักของดินแห้ง ซึ่งถ้าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินชนิดนี้มีค่าสูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินก็จะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นสามารถอธิบายได้จากการนำทรายตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง มาทดลองด้วยการทดสอบแรงอัดสามแนวแกนมีการอัดตัวคายน้ำและมีการระบายน้ำ (CD Test) ซึ่งทรายตัวอย่างทั้งสองนี้จะเป็นทรายชนิดเดียวกัน แต่ทรายตัวอย่างแรกจะถูกอัดให้แน่น (Dense) และอีกตัวอย่างถูกทำให้หลวม (Loose) ทำการทดลองกับทรายทั้งสองด้วยแรงดันรอบข้างที่เท่ากัน จากนั้นวัดค่าความเค้นเบี่ยงเบน นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองมาพล็อตลงในกราฟได้ดังรูปที่ 2.7 โดยที่รูปที่ 2.7 ก เป็นการพล็อตระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด (Percent Strain) กับค่าความเค้นเบี่ยงเบน และรูปที่ 2.7 ข เป็นการพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเครียด กับค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่าง (Percent Volume Change)

จากรูปที่ 2.7 ก จะเห็นได้ว่าทรายที่ถูกอัดให้แน่นจะมีจุดยอด (Peak Point) ของค่าความเบี่ยงเบนที่จุด A จากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะลดลงมาถึงจุด B ซึ่งจุด B นี้คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของทรายหลวม ซึ่งเรียกว่าค่าความเค้นประลัย (Ultimate Stress) ดังนั้นเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้น จะสามารถนำข้อมูลมาวาดเส้นขอบเขตความแข็งแรงของมอร์ได้ 2 เส้น คือเส้นที่ใช้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่จุดยอดและเส้นที่ใช้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่จุดประลัย ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในการนำมาใช้งานจะต้องพิจารณาว่าเส้นไหนเหมาะสมตามสภาพใด แต่โดยทั่วไปนิยมใช้เส้นที่ใช้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่จุดยอด

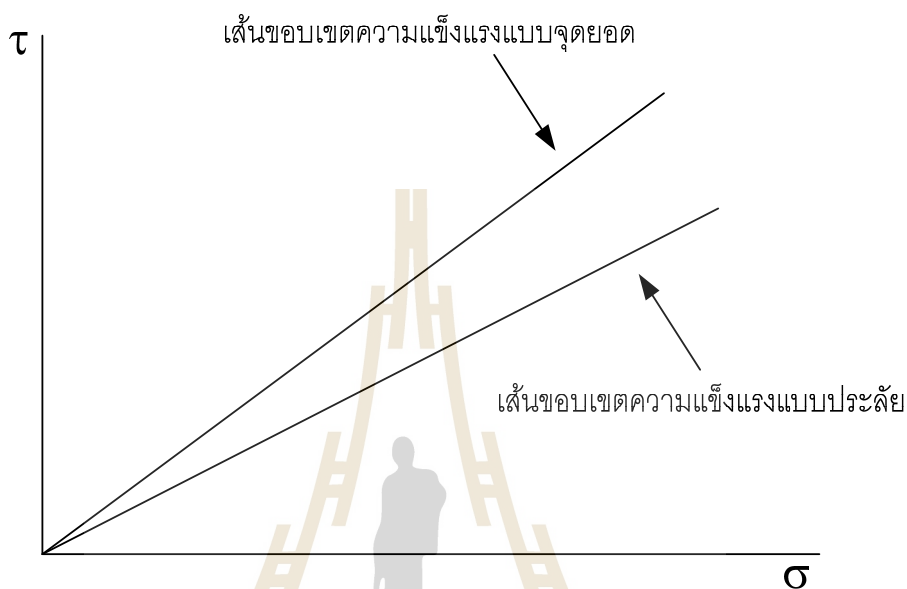
ในบางครั้งเมื่อทำการทดลองกับทรายตัวอย่างที่ถูกอัดให้หลวม จะพบว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดกับค่าความเบี่ยงเบนไม่มีจุดสูงสุด ดังนั้นเพื่อหาค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด จึงมักใช้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่กำหนดเช่นค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด เป็นต้น สำหรับรูปที่ 2.7 ข ซึ่งเป็นกราฟพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเครียดกับค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่าง จะเห็นว่าปริมาตรของตัวอย่างที่บดอัดให้หลวมลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเค้นเบี่ยงเบน

ทั้งนี้เพราะเม็ดทรายสามารถอัดตัวลงไปในช่วงว่างระหว่างเม็ดดินได้เนื่องจากทรายยังอยู่ในสภาพหลวม ในขณะที่กราฟของตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นจะมีการลดลงของปริมาตรในช่วงแรกของการเพิ่มความเค้นเบี่ยงเบน จากนั้นปริมาตรของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมากกว่าปริมาตรของตัวอย่างเดิม ทั้งนี้เพราะทรายแน่นเมื่อถูกความเค้นกระทำจะทำให้เม็ดทรายพยายามเคลื่อนที่ซึ่งในช่วงแรกอาจสามารถเคลื่อนที่ลงไปแทรกในช่องว่างที่เหลืออยู่ได้จึงทำให้ปริมาตรลดลง แต่เมื่อทำการทดลองต่อไปเม็ดทรายจะไม่มีช่องว่างเหลือที่จะเคลื่อนที่ลงไปได้ ดังนั้นเม็ดทรายจึงป็นข้ามกันทำให้ปริมาตรของตัวอย่างทรายนี้อเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ทรายแน่นพยายามเพิ่มปริมาตรเมื่อมีการเสีรูปร่างเรียกว่า ไดลาแทนซี (Dilatancy)



รูปที่ 2.7 กราฟการทดลองแบบแรงอัดสามแนวแกนของทราย

ในบางกรณีเมื่อนำตัวอย่างทรายมาบดอัดให้ค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่างแน่นกับหลวม ถ้าปริมาตรของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการทดลองเพิ่มค่าความเค้นเบี่ยงเบน ค่าอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างนั้นเรียกว่า ค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติ (Critical Void Ratio)



รูปที่ 2.8 ขอบเขตความแข็งแรงของทราย

จากการทดลองดังกล่าวนี้จะสามารถสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบจะมีองค์ประกอบของความต้านทานการลื่นไถลอยู่ 2 ส่วน คือ

2.5.1 ความต้านทานเนื่องจากความฝืด ทั้งนี้ดังแสดงโดยตัวอย่างของทรายหลวม โดยที่ความต้านทานเนื่องจากความฝืดนี้จะเป็นความฝืดระหว่างเม็ดทรายด้วยกันเอง โดยสามารถอธิบายได้ด้วยรูปกล่องใบหนึ่งวางอยู่บนพื้นฝืด ดังรูปที่ 2.9 โดยที่กล่องนี้มีน้ำหนักเท่ากับ W ดังนั้นแรงปฏิกิริยาเนื่องจากกล่องวางบนพื้นฝืดจะเท่ากับ N และเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างพื้นและกล่องมีความฝืดมาก เมื่อมีแรง P (ที่มีขนาดเล็ก) มาดันกล่องด้านข้าง ทำให้กล่องไม่มีเลื่อนไปตามทิศทางที่แรงกระทำ ทั้งนี้เพราะมีแรงเสียดทาน F เป็นตัวต้านทานไว้ เมื่อเพิ่มแรง P ขึ้นเรื่อยๆ ค่าแรงเสียดทานก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน จนกระทั่งถึงค่าแรง P ที่เท่ากับแรงเสียดทานสูงสุด

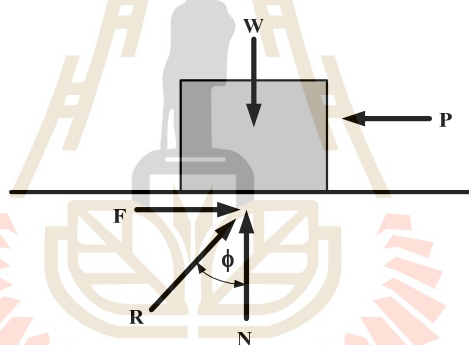
กล่องใบนี้จะอยู่ในสถานการณ์ที่กำลังจะเคลื่อนที่ และเมื่อเพิ่มแรง P ต่อไปกล่องนี้จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แรง P กระทำ ค่าแรงเสียดทานที่สูงสุดนี้คือ

$$F = N \tan \phi \quad (2.3)$$

เมื่อหารด้วยพื้นที่ของกล่องจะได้

$$S = \sigma \tan \phi \quad (2.4)$$

เมื่อ S คือความต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากความฝืด
 σ คือความเค้นในแนวตั้งฉาก
 ϕ คือมุมเสียดทานภายในที่สูงที่สุด



รูปที่ 2.9 แรงกระทำที่กล่องวางบนพื้นฝืด

2.5.2 ความต้านทานเนื่องจากการขัดกันของเม็ดดิน (Grain Interlock) ดังแสดงให้เห็นจากกรณีของตัวอย่างทรายอัดแน่นดังรูปที่ 2.7 ก บริเวณที่สี่เหลี่ยมที่อยู่ใต้จุด A ของกราฟทรายอัดแน่นจะเป็นผลเนื่องจากการขัดกันของเม็ดทราย

เนื่องจากดินเม็ดหยาบมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสูง ดังนั้นในขณะที่ทำการทดลองหาค่าความต้านทานแรงเฉือน น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะสามารถระบายออกได้โดยเร็ว ทำให้ค่าความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในการทดลองหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินชนิดนี้จึงใช้การทดลองในลักษณะระบายน้ำ (Drained Test) และค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จึงเป็นค่าความต้านทานแรงเฉือนในลักษณะมีการระบายน้ำ (Drained Shear Strength)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้จีโอกรีตร่วมกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และศึกษาปฏิริยาร่วมระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ในพจน์ของขนาดช่องเปิดและสติเฟนสของจีโอกรีต และขนาดเฉลี่ย กำลังต้านทานแรงเฉือน และการสึกหรอ ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆ และปฏิริยาร่วมเหมือนระหว่างจีโอกรีตและมวลรวมรีไซเคิล จะนำเสนอในหัวข้อนี้ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบวิธีการวิจัยและวิธีการวิเคราะห์ผลทดสอบ

2.6.1 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การประยุกต์ใช้วัสดุมวลรวมรีไซเคิลเริ่มต้นจากการบดย่อยเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างและโรงงานให้มีขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆ ได้รับการศึกษาโดย ศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ดังแสดงในตารางที่ 2.1 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) จะเห็นว่าวัสดุรีไซเคิลเกือบทั้งหมดมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามข้อกำหนดทั่วไปสำหรับหินคลุก (Typical Quarry Materials)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง (ศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

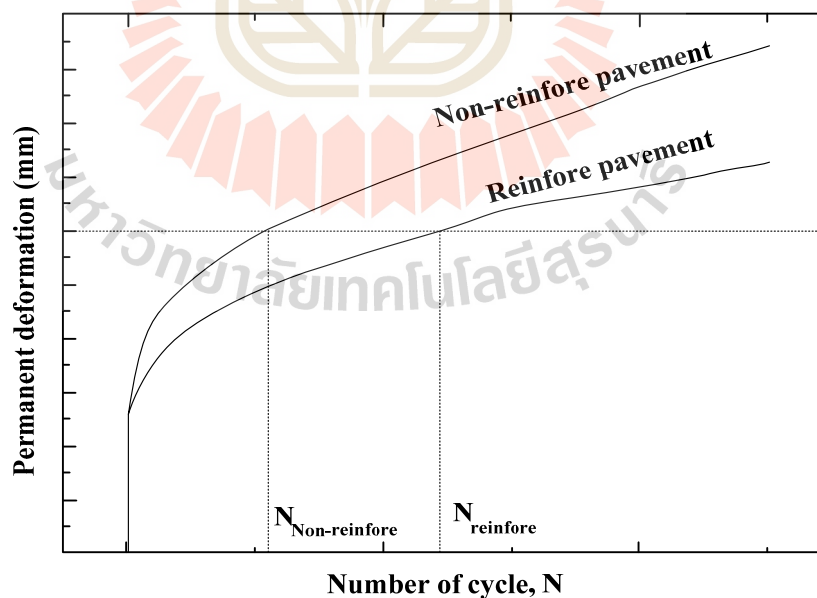
Engineering Properties	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG
Gravel content (%)	50.7	53.6	44.7	48.0	9.2	53.0
Sand content (%)	45.7	39.8	45.1	46.0	85.4	41.8
Fines content (%)	3.6	6.6	10.2	6.0	5.4	5.2
USCS classification	GW	GW	SW	GW	SW	SW
Los Angeles Abrasion (max)	28	36	21	42	25	25
Modified Compaction: Max dry density (Mg/m ³)	1.96	2.02	2.23	2.00	1.78	1.99
Modified Compaction: Optimum moisture content (%)	12.0	10.7	9.3	8.1	10.0	8.8
California Bearing Ratio (%)	118-160	123-138	121-204	30-35	42-46	73-76
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
Direct Shear Test: Friction angle (degrees)	45	52	48	49	45	49

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง
(ศ.ดร.สุบสันต์ หอพิบูลสุข) (ต่อ)

Engineering Properties	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG
Triaxial Test (CD): Apparent cohesion (kPa)	45	41	46	53	0	2
Triaxial Test (CD): Friction angle (degree)	49	49	51	37	35	41

2.6.2 จีโอกริด

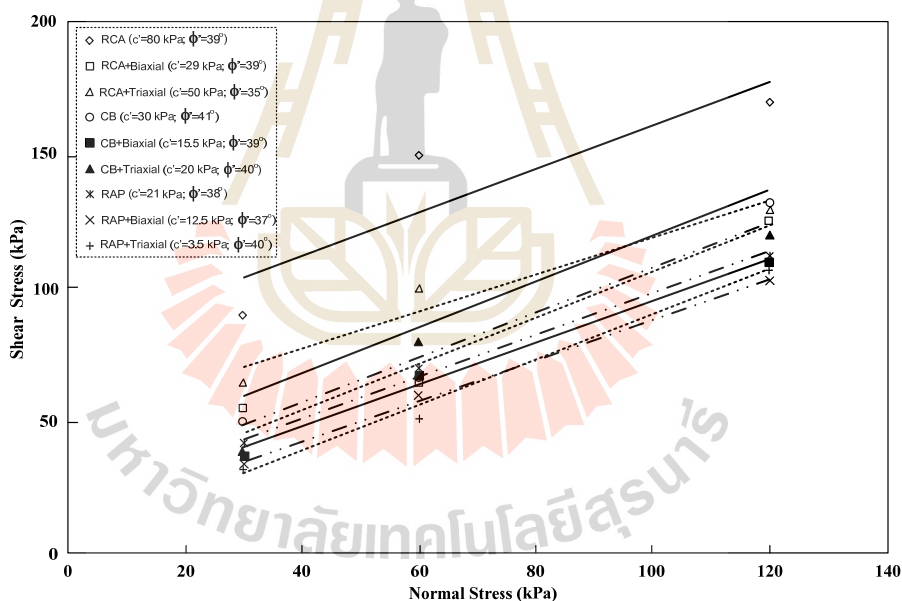
การใช้จีโอกริดเสริมกำลังในชั้นทางและชั้นรองพื้นทางช่วยให้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และช่วยลดการทรุดตัวของผิวทาง อันนำมาซึ่งอายุการใช้งานที่ได้ยาวนานขึ้น จีโอกริดมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดร่องล้อลึก การเสียรูปเฉือน (Shear Deformation) (Montanelli et al., 1997) ดังนั้น จึงช่วยลดความหนาของชั้นทางได้ การติดตั้งจีโอกริดหลายชั้นจะช่วยเสริมแรงในชั้นทาง Youwai et al. (2010) ได้สร้างแบบจำลองของถนนที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุสังเคราะห์ต่อพฤติกรรมของถนน เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถนนที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เกิดการทรุดตัวถาวรน้อยกว่าถนนที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ ที่จำนวนรอบในการให้น้ำหนักที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการทรุดตัวถาวรของถนนแบบเสริมและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์กับจำนวนรอบในการให้น้ำหนัก

2.6.3 ปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่างวัสดุสังเคราะห์และมวลรวมรีไซเคิล

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ศึกษาปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่างดินกับวัสดุจีโอกรีต (Araujo et al. 2009; Liu et al. 2009a; Liu et al. 2009b; Rowe and Taechakunthorn 2011; Palmeira et al. 2010) ในขณะที่ การศึกษาปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมรีไซเคิลกับวัสดุจีโอกรีต ยังมีอยู่อย่างจำกัด (Arulrajah et al. 2012) และต้องการการศึกษาเพิ่มอย่างจริงจัง เพื่อประโยชน์ด้านวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเนื่องกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนของมวลรวมเศษอิฐย่อยกับวัสดุจีโอกรีต ความสัมพันธ์ความระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากของผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA CB และ RAP) และจีโอกรีตแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่ามุมเสียดทานภายในมีค่าสูงเกินกว่า 37 องศา ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมทาง (Arulrajah et al. 2012)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตามระนาบของจีโอกรีตกับมวลรวมรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2012)

2.6.4 ผลกระทบจากขนาดกล่องรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็ก

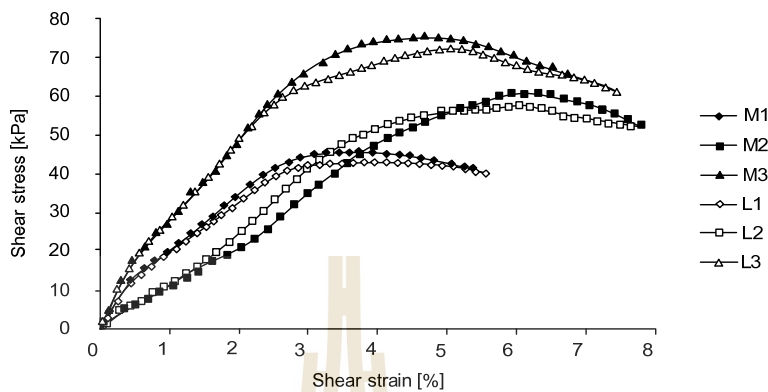
EMIL SOBÓL et al. (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและอิทธิพลของขนาดกล่อง การทดสอบแรงเฉือนตรงต่อกำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็ก พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ กล่องรับแรงเฉือน 2 ขนาดขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) มิลลิเมตร การศึกษากระทำโดยการนำมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กมาทำการทดสอบหา กำลังรับแรงเฉือนตรง ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม (ด้านแห้ง) 3 ตัวอย่างและ ปริมาณความชื้นบดอัดเหมาะสม 3 ตัวอย่าง มวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กที่ถูกนำมาทดสอบจำแนก ตามมาตรฐาน Euro Code 7 เป็นทรายขนาดกลาง (MSa) มีความชื้นบดอัดที่เหมาะสม 8.67 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นแห้ง 1.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวอย่างที่ทดสอบมีคุณสมบัติ ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการทดสอบและอัตราส่วนของ L / D₅₀

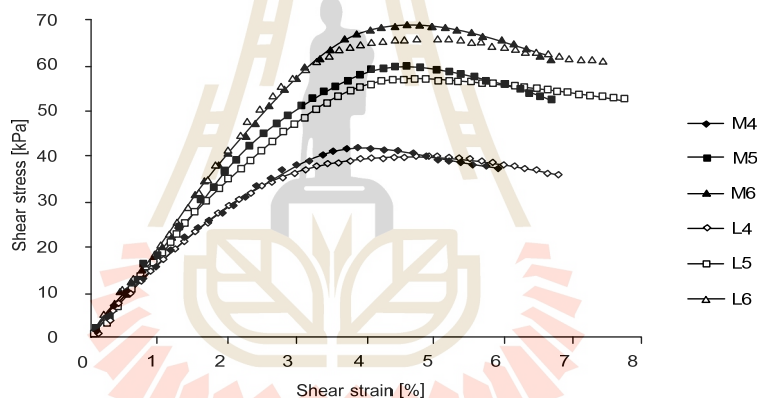
Test No.	L/D ₅₀	Water content (%)	Normal Stress (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	I _d
M1	545	2.21	48.73	1.881	0.665
M2		2.01	71.38	1.883	0.667
M3		2.13	85.42	1.887	0.669
M4		8.59	50.21	1.963	0.736
M5		8.71	70.87	1.972	0.742
M6		8.35	84.26	1.961	0.734
L1	1136	2.15	49.25	1.889	0.669
L2		2.02	69.14	1.882	0.662
L3		2.1	84.69	1.886	0.668
L4		8.56	49.91	1.968	0.735
L5		8.69	70.64	1.971	0.741
L6		8.43	83.75	1.961	0.731

การทดสอบแรงเฉือนตรงของวัสดุมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กได้ทำการทดสอบบนกล่อง แรงเฉือนสองขนาดคือ ขนาดกลางและขนาดใหญ่ โดยแต่ละขนาดจะทำการทดสอบการเฉือน 6 ตัวอย่าง ที่ความเร็วการเฉือน 0.01 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการเฉือนที่ ความชื้นบดอัดเหมาะสม กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กจากกล่องทดสอบทั้งสอง ขนาดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.12

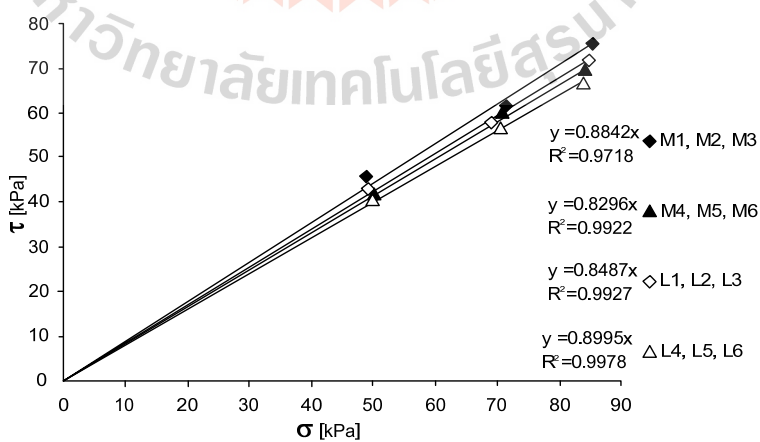
มูมเสียดทานภายในของกล่องทดสอบขนาดกลาง(120 x 120 มิลลิเมตร)โดยเฉลี่ยแล้วสูงกว่ากล่องทดสอบขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) อยู่ 1.2 องศา ซึ่งแสดงตามรูปที่ 2.12 - 2.14



รูปที่ 2.12 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง ที่ความชื้น 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรง ที่ความชื้น 8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.14 กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่าง

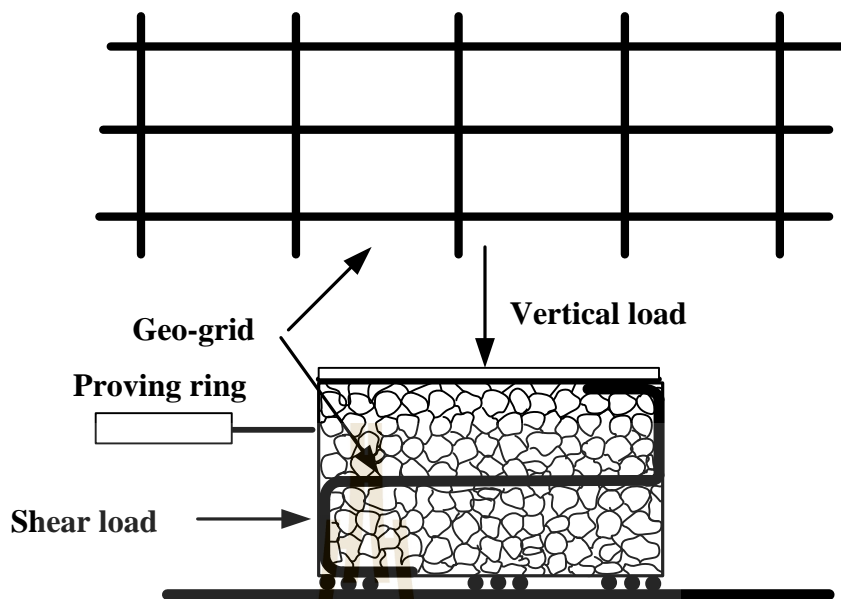
2.6.5 กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุรีไซเคิลเสริมกำลัง

M. Touahamia et al. (2002) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของ มวลรวมจากเศษการรีไซเคิล ออกริด คอนกรีต มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และมวลรวมของเสียจากเหมือง การทดสอบได้ทำการ ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุทั้ง 3 ชนิดเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของหินคลุก โดยทดสอบตามเงื่อนไขดังนี้ บดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ต่ำกว่าและความชื้นบดอัดเหมาะสม ผสมดินเหนียว 20 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างการเสริมวัสดุจีโอกรีต และไม่เสริมวัสดุจีโอกรีต ซึ่งเงื่อนไขการทดสอบสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุรีไซเคิลเสริมกำลัง

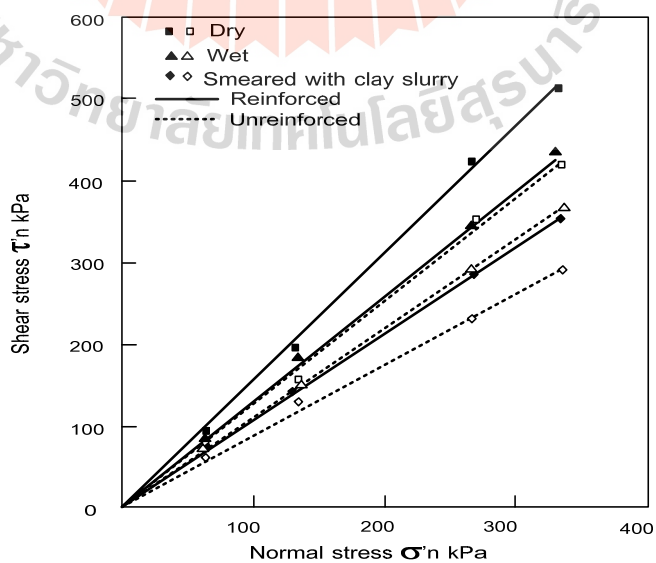
Materials	Test conditions	Dry	Wet	Smearred
Basalt Stone	Reinforced	x	x	x
Crushed concrete		x	x	x
Crushed building debris		x	x	-
Quarry waste		x	-	-
Basalt Stone	Unreinforced	x	x	x
Crushed concrete		x	x	x
Crushed building debris		x	x	-
Quarry waste		x	-	-

การทดลองนี้ได้ทำการทดสอบบนกล่องรับแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (305 x 305 x 205 มิลลิเมตร) ที่ความเร็วในการเฉือน 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีแรงกระทำตั้งฉากที่ 60, 120, 240 และ 300 กิโลปาสคาล การทดลองในครั้งนี้มีการเปรียบเทียบระหว่างการเสริมกำลังและไม่เสริม กำลังเสริมด้วยจีโอกรีต ซึ่งการติดตั้งจีโอกรีตในการทดสอบได้แสดงดังรูปที่ 2.15 การติดตั้ง จีโอกรีตตามรูปที่ 2.15 นั้นเป็นการติดตั้งเพื่อลดแรงต้านทานเนื่องจากแรงดึงในจีโอกรีต



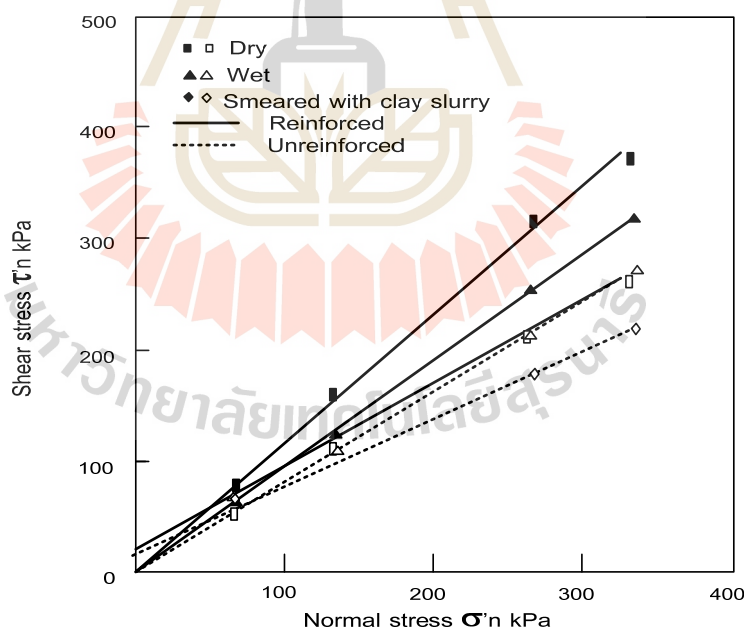
รูปที่ 2.15 การเสริมจีโอกริดในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ผลการทดลองพบว่า มวลรวมหินคลุกเมื่อปรับที่ความชื้นด้านแห้ง(ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบหาลังรับแรงเฉือนตรง กำลังรับแรงเฉือนจะสูงกว่าการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก(สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไปกำลังรับแรงเฉือนได้ลดลงอย่างเห็นนัย และเมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกริดเข้ามาพบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกริด ซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 2.16

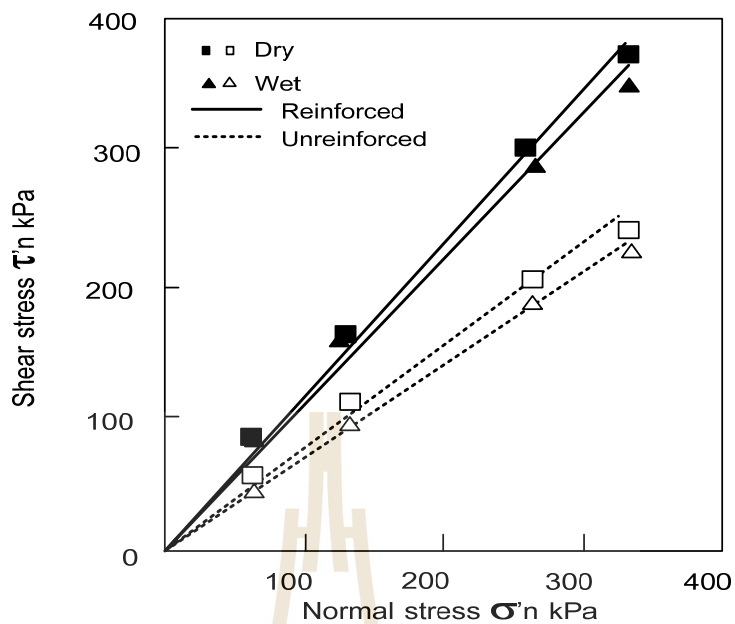


รูปที่ 2.16 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมหินคลุกด้วยเงื่อนไขต่างๆ

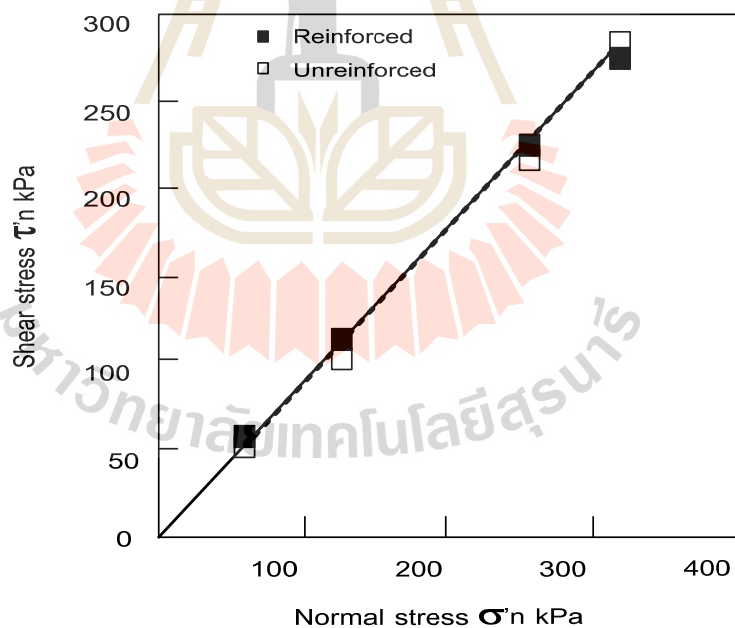
ผลการทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง(ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบหาค่ารับแรงเฉือน พบว่าค่ารับแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก(สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แต่เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไป ค่ารับแรงเฉือนได้ลดลง และเมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกรีตเข้ามาพบว่าค่ารับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกรีตและการบดอัดด้านเปียกยังมีค่าสูงกว่าการบดอัดด้านแห้ง ซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 2.17 ส่วนผลการทดสอบมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง(ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนตรง พบว่าค่ารับแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก(สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) เช่นเดียวกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และเมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกรีตเข้ามาพบว่าค่ารับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกรีตและการบดอัดด้านเปียกและด้านแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 2.18 ผลการทดสอบเศษมวลรวมจากของเสียจากเหมืองนั้น ได้ทำการทดสอบบดอัดเพียงด้านแห้งด้านเดียว พบว่าค่ารับแรงเฉือนระหว่างการเสริมจีโอกรีตและไม่เสริมจีโอกรีตมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 ค่ารับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารตามเงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 2.18 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมจากคอนกรีตไร้เหล็กตามเงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 2.19 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบมวลรวมของเสี้ยจากเหมืองตามเงื่อนไขต่างๆ

2.6.6 การประเมินผลอินเทอร์เฟซของกำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลเสริมจีโอกรีต ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่

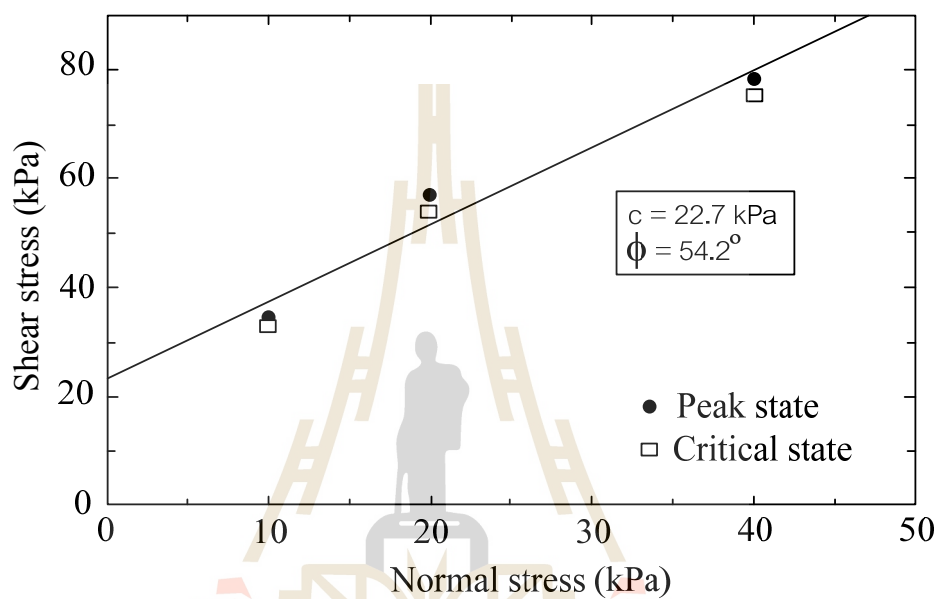
Arul Arulrajah et al. (2015) ได้ศึกษาประเมินผลอินเทอร์เฟซของกำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลเสริมจีโอกรีตแบบสามแกนด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ มวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลที่นำมาทดสอบผลิตจากตะกอนน้ำเสียในเขตเมืองเมลเบิร์น ประเทศออสเตรเลีย มวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลที่นำมาทำการทดลองนี้มีคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดังนี้ ความหนาแน่นของมวลรวมละเอียด (0.08-0.3 มิลลิเมตร) 14.8 กิโลนิตันต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบ (10-35 มิลลิเมตร) 4.5 กิโลนิตันต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำมวลรวมหยาบ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ค่าซี.บี.อาร์ 9-12 เปอร์เซ็นต์ ค่าการสึกหรอทดสอบด้วยเครื่องลอสมองเจอร์ริส 90 เปอร์เซ็นต์ จีโอกรีตที่นำมาทำการทดลองเป็นแบบสามแกนผลิตจากโฟฟิสัน มีขนาดช่องเปิด 46 x 46 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่า 500 กิโลนิตันต่อตารางเมตร

กล่องรับแรงเฉือนตรงที่ทำการทดสอบเป็นแบบกล่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (ขนาดกว้าง 305 x 305 มิลลิเมตร ลึก 204 มิลลิเมตร) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนกระทำที่ความเร็วในการเฉือน 0.025 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีแรงกระทำตั้งฉากที่ 10 20 และ 40 กิโลปาสคาล

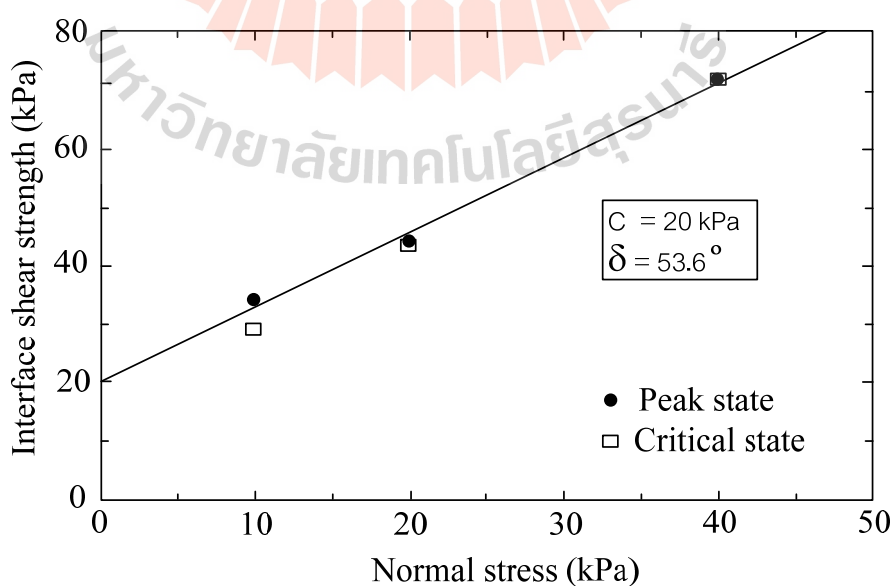


รูปที่ 2.20 มวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลเสริมจีโอกรีตหลังจากทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ผลการทดสอบพบว่ามวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลมีกำลังยึดเหนี่ยว 22.7 กิโลปาสกาลและมีมุมเสียดทานภายใน 54.2 องศา ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนกรวดแน่นเพื่อเป็นวัสดุถมกลับหลังกำแพงกันดินเสริมกำลังตามมาตรฐาน AASHTO ได้ สำหรับมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกริต มีกำลังที่ลดลงเล็กน้อยโดยมีแรงยึดเหนี่ยว 20 กิโลปาสกาลและมีมุมเสียดทานภายใน 53.6 องศา

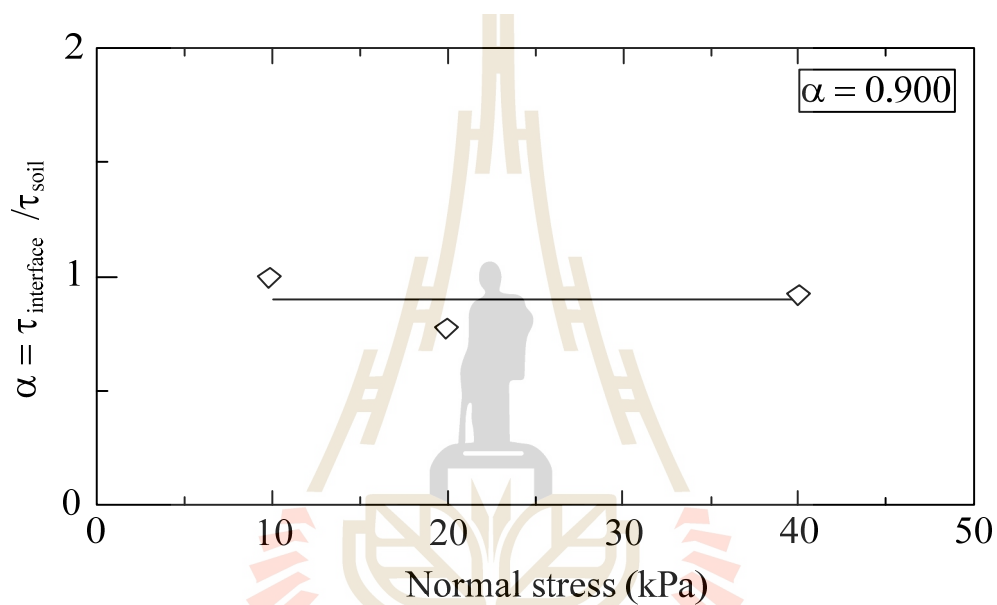


รูปที่ 2.21 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริต



รูปที่ 2.22 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบารีไซเคิลเสริมจีโอกริต

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมวลรวมแก้วมวลเบารีโซเคลิเสริมกำลัง (α) มีค่า 0.90 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมวลรวมผิวทางเสริมกำลัง ($\alpha = 0.88$) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมวลรวมอิฐบดเสริมกำลัง ($\alpha = 0.79$) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมวลรวมคอนกรีตรีโซเคลิเสริมกำลัง ($\alpha = 0.71$) ถือว่ามีค่าสูงมาก ข้อได้เปรียบของมวลรวมแก้วมวลเบารีโซเคลิคือ มีน้ำหนักเบาแต่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง (มีมุมเสียดทานภายในสูง) สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุถมกลับในงานกำแพงกันดินเสริมกำลัง (MSE Wall) ที่บริเวณที่ดินอ่อนได้



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแก้วมวลเบารีโซเคลิเสริมกำลัง (α) และความเครียดปกติ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดสอบ โดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างและทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตทั้ง 3 ขนาดช่องเปิด ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



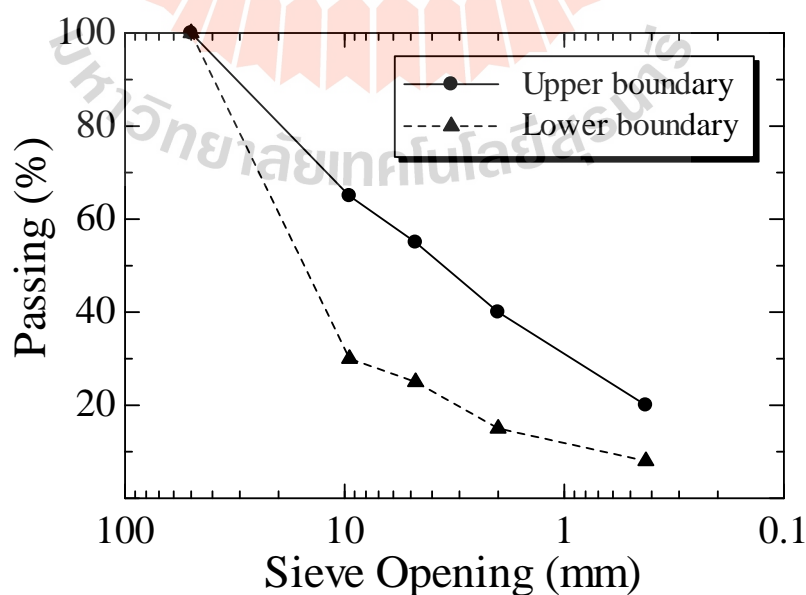
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การเตรียมตัวอย่างวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลนั้น เริ่มจากการนำก้อนลูกปูนขนาด 15x15x15 เซนติเมตรและขนาด 15x30 เซนติเมตร ที่เหลือทิ้งจากศูนย์ทดสอบวัสดุกรมโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดนครราชสีมา และห้องปฏิบัติการคอนกรีต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการบดย่อย ณ โรงบดย่อยคอนกรีต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อทำการบดย่อยแล้วได้นำมาคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 (2007) และปรับปรุงให้มีการกระจายขนาดละเอียด 2 ขนาดละเอียด คือ 1. การกระจายขนาดละเอียดตามขอบเขตบนของมาตรฐานของกรมทางหลวง และ 2. การกระจายขนาดละเอียดตามขอบเขตล่างของมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 201/2544) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการปรับปรุงขนาดละเอียดตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดละเอียดของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ได้ทำการทดสอบหลังจากทำการปรับปรุงขนาดคละของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแล้ว โดยทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังต่อไปนี้

- การทดสอบหาส่วนคละของวัสดุมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2014)
- การทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009)
- การทดสอบเพื่อหาค่า ซีบีอาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4429 (2009)
- การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่องทดสอบลอสแองเจลิส ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006)
- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 (2012)

3.3 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุจีโอกริด

วัสดุจีโอกริดที่นำมาทำการทดสอบนั้นเป็นจีโอกริดแบบ Biaxial Geogrid ผลิตจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ชนิดรับแรงดึงสูง เคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย Miragrid รุ่น GX 60/60 GX 60/30 และ GX 160/50 จากบริษัท Tencate Geosynthetics ประเทศไทย จำกัด ซึ่งนิยมใช้ในงานก่อสร้างกำแพงหรือลาดดินเสริมกำลัง งานเสริมความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทางเพื่อเพิ่มค่าสติเฟนสให้กับชั้นโครงสร้างทาง เป็นต้น จีโอกริดที่นำมาทำการทดลองนี้มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริด

Product	Manufacturing Process	Polymer Type	Coating Type	Aperture Size (mm)		Short Term tensile Strength (ISO 10319)		Elongation at Short Term tensile Strength (%)	
				MD	CD	MD	CD	MD	CD
Miragrid GX60/60	WOVEN	PET	PVC	7	7	60	60	11	-
Miragrid GX60/30	WOVEN	PET	PVC	21	24	60	30	11	-
Miragrid GX160/50	WOVEN	PET	PVC	30	21	160	50	12	-



รูปที่ 3.4 จีโอกริดรุ่น GX 60/60 GX 60/30 และ GX 160/50 (เรียงจากซ้ายไปขวา)

3.4 การเตรียมตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับการทดสอบ

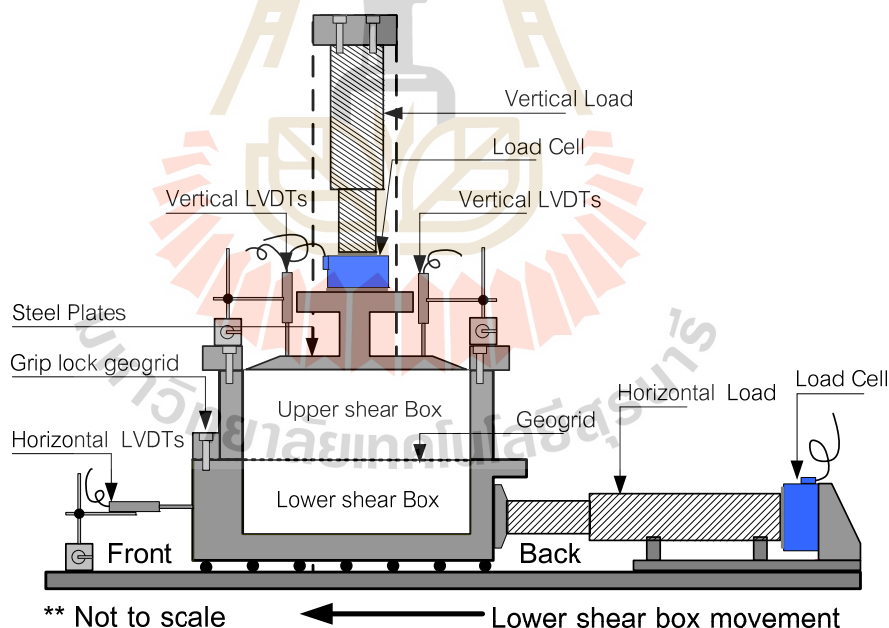
การเตรียมตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับการทดสอบนั้น เริ่มจากการนำมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทั้งสองขนาดคละที่ปรับปรุงขนาดคละตามมาตรฐานแล้ว (ขอบเขตบนขนาดเม็ดเฉลี่ย 3.7 มิลลิเมตร ขอบเขตล่างขนาดเม็ดเฉลี่ย 17 มิลลิเมตร) มาชั่งน้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้ มาผสมน้ำตามปริมาณความชื้นบดอัดเหมาะสม เพื่อให้ได้ความชื้นบดอัดที่เหมาะสม แล้วพักทิ้งไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาทำการบดอัดลงในกล่องทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป



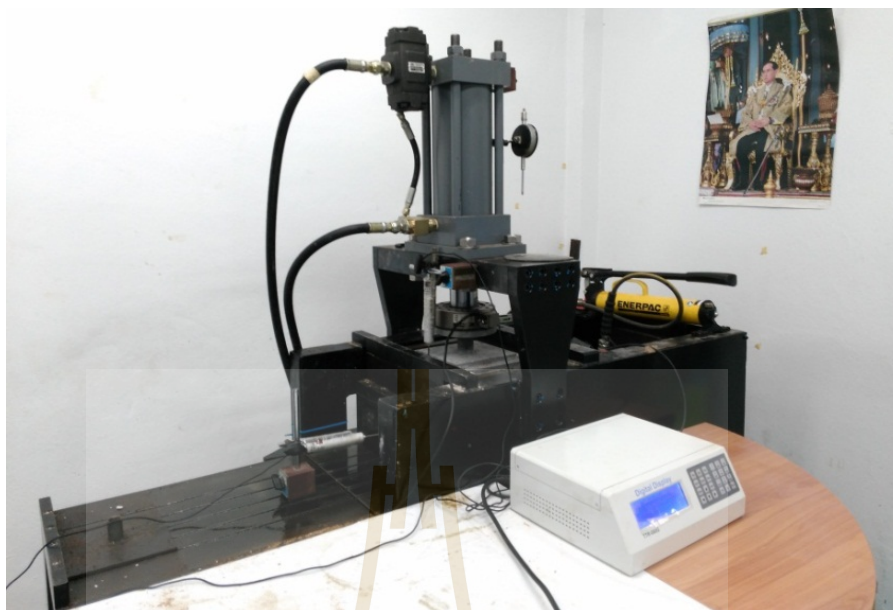
รูปที่ 3.5 มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ผสมน้ำแล้วพักทิ้งไว้ในภาชนะปิด

3.5 การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดและการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด

การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริดและการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด ดำเนินการด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large Scale Direct Shear Apparatus) ซึ่งประกอบด้วยกล่องแรงเฉือน (Shear Boxes) จำนวนสองกล่องคือ กล่องด้านบน (Upper Shear Box) และกล่องด้านล่าง (Lower Shear Box) โดยแต่ละกล่องมีขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความลึก เท่ากับ 305 x 305 x 204 มิลลิเมตร กล่องด้านบนถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่ขณะทดสอบ ขณะที่กล่องด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางกรให้แรงเฉือน สำหรับการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด จีโอกริดถูกติดตั้งบริเวณรอยต่อระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่างโดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับกล่องด้านล่างดังรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต

ระหว่างการเตรียมตัวอย่างกล่องด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดไว้ด้วยกัน มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกบดอัดภายในกล่องแรงเหวี่ยงด้วยความชื้นเท่ากับความชื้นบดอัดเหมาะสมเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดภายใต้พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลบดอัดถูกแช่ในน้ำโดยให้กล่องด้านล่างจมอยู่ในน้ำทั้งหมดและระดับน้ำอยู่ที่กึ่งกลางของความลึกของกล่องด้านบนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากับ 50 100 และ 200 กิโลปาสกาล หลังจากนั้นประกอบกล่องแรงเหวี่ยงเข้ากับอุปกรณ์ให้แรงและแรงแนวตั้ง ก่อนการทดสอบทำการปล่อยตัวยึดระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง และปรับให้กล่องด้านบนและกล่องด้านล่างห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างกล่องทั้งสอง แต่ละตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่สามค่า ได้แก่ 50 100 และ 200 กิโลปาสกาล ให้แรงเหวี่ยงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อวินาที ตลอดการทดสอบ บันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง การเคลื่อนตัวในแนวราบ และค่าแรงเหวี่ยง จนกระทั่งการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ อุณหภูมิขณะทดสอบถูกรักษาให้คงที่ประมาณ 25 ± 1 องศาเซลเซียส

3.6 เงื่อนไขในการทดสอบ

การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีตและการทดสอบปฏิกิริยาร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต กระทำภายใต้แรงกระทำตั้งฉากที่ 50 100 และ 200 กิโลปาสกาล โดยมีเงื่อนไขการทดสอบทั้งหมด 2 เงื่อนไขหลักดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 ขนาดคละตามเส้นขอบเขตบน ($D_{50} = 3.7$ มม.)

- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 60/60 (ขนาดช่องเปิด = 7 x 7 มม.)
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 60/30 (ขนาดช่องเปิด = 21 x 24 มม.)
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 160/50 (ขนาดช่องเปิด = 30 x 21 มม.)

เงื่อนไขที่ 2 ขนาดคละตามเส้นขอบเขตล่าง ($D_{50} = 17$ มม.)

- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 60/60 (ขนาดช่องเปิด = 7 x 7 มม.)
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 60/30 (ขนาดช่องเปิด = 21 x 24 มม.)
- มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตรุ่น GX 160/50 (ขนาดช่องเปิด = 30 x 21 มม.)

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

บทนี้ได้กล่าวถึงการนำเสนอผลการทดสอบ การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลที่ได้จากการทดสอบ โดยประกอบไปด้วย คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของจีโอกรีต ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ปฏิบัติการร่วมเพื่อนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลนั้น ได้มีการแบ่งเป็นสองตัวอย่างตามขนาดผลึกที่ทำการปรับปรุงขึ้น โดยตัวอย่างแรกมีขนาดผลึกที่เส้นขอบเขตบน ตัวอย่างที่สองมีขนาดผลึกที่เส้นขอบเขตล่าง ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544 กรมทางหลวง ผลการทดสอบพบว่าคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของทั้งสองตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกันแต่แตกต่างกันที่ขนาดผลึกซึ่งผลทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Parameter	Recycled concrete aggregate sample	
	Lower bound	Upper bound
Bulk specific gravity	2.65	2.67
Soil classification (USCS)	GP	GW
Los Angeles abrasion (%)	36.4	38.6
Average particle size (mm)	17	3.7
Absorption (%)	6.07	7.02
Optimum water content (%)	11.9	12.5
Maximum dry unit weight (kN/m ³)	20.1	22.4
California bearing ratio (%)	122.4	116.3
Internal friction angle (degree)	60.99	61.47
Cohesion (kPa)	109.65	68.41

สำหรับตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 17 มิลลิเมตร ถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันไม่ดี (GP) ตามระบบเอกภาพ (USCS) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเท่ากับร้อยละ 6.07 ค่าการสึกหรอมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.4 ซึ่งไม่เกินกว่าร้อยละ 40 ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลถูกบดอัดภายใต้พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 20.1 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 11.9 ค่าซีบีอาร์เท่ากับร้อยละ 122.35 ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับวัสดุพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

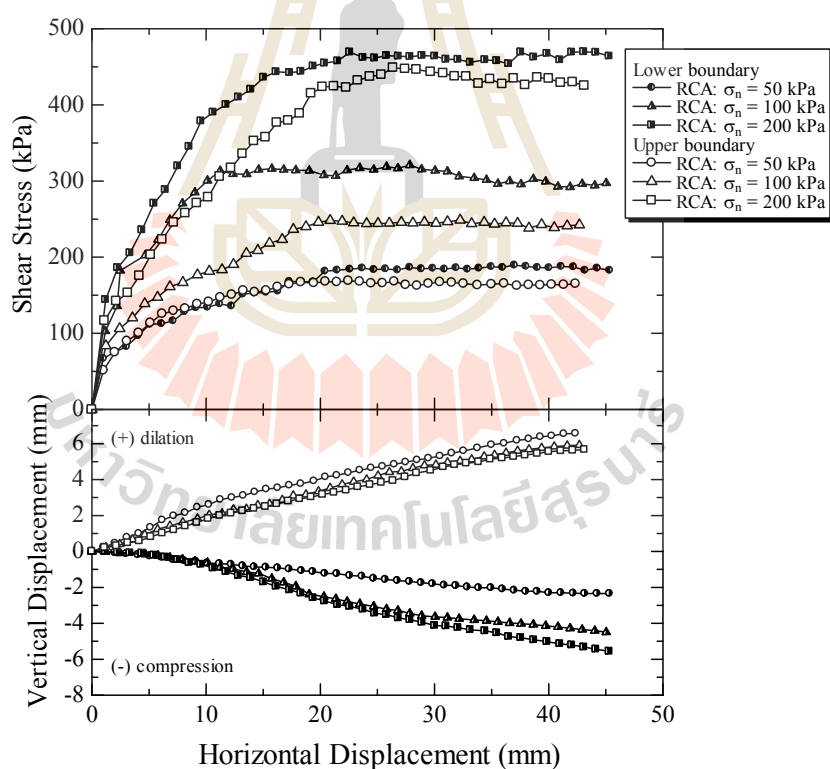
สำหรับตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร ถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันดี (GW) ตามระบบเอกภาพ (USCS) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเท่ากับร้อยละ 7.02 ค่าการสึกหรอ มีค่าเท่ากับร้อยละ 38.6 ซึ่งไม่เกินกว่าร้อยละ 40 ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลบดอัดภายใต้พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 22.4 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรและค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 12.5 ค่าซีบีอาร์เท่ากับร้อยละ 116.3 ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80) จากผลทดสอบหาค่าการสึกหรอและซีบีอาร์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง สำหรับงานก่อสร้างถนนในประเทศไทยได้

4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีต

ผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large Scale Direct Shear Apparatus) สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ และความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบแสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength, τ_{max}) เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าความเค้นเฉือนจะมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร

ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบยังพบว่าตัวอย่างมีพฤติกรรมการอัดตัว (Compression) โดยการอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบ เมื่อตัวอย่างถูกกระทำด้วยความเค้นตั้งฉากสูงขึ้นจะเกิดการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุหลวม (Loose Material) ทั้งนี้ จากตารางที่ 4.1 พบว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างนั้นถูกจำแนกเป็น กรวดที่คละกันไม่ดี (GP) ซึ่งมีความสามารถในการบดอัดต่ำ มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่ำกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนซึ่งถูกจำแนกเป็น กรวดที่คละกันดี (GW) โดยตัวอย่างมวลรวมทั้งสองมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน ดังนั้นตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างจึงยังมีช่องว่างเหลืออยู่จำนวนมากหลังจากการบดอัด เมื่อถูกเงื่อนไขอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงทำให้ตัวอย่างเกิดการอัดตัว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

ในรูปที่ 4.1 ยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน จากรูปความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength, T_{max}) เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร เมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลทดสอบของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบพบว่า มีพฤติกรรมขยายตัว (Dilation) อย่างสมบูรณ์ในทุกความเค้นตั้งฉาก ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุแน่น (Dense Material) ผลการทดสอบดังกล่าวแตกต่างจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง ทั้งนี้ เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนถูกจำแนกเป็น กรวดที่คละกันดี (GW) ซึ่งมีความสามารถในการบดอัดได้ดีกว่าทำให้ช่องว่างในตัวอย่งมีน้อยเมื่อตัวอย่างถูกเฉือนจะเกิดการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันทำให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว โดยปกติพฤติกรรมขยายตัวนี้สัมพันธ์กับพฤติกรรมลดลงของความเค้นเฉือนเนื่องจากความเครียด (Strain-softening) และค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณที่มีอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด (Maximum Dilatancy Ratio) ซึ่งเป็นค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ อย่างไรก็ตาม ผลทดสอบในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวอย่างไม่มีพฤติกรรมลดลงของความเค้นเฉือนเนื่องจากความเครียด (Strain-softening) หลังจากเกิดอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคของมวลรวมที่เกิดจากการแตกหักขณะทำการเฉือนตัวอย่าง โดยที่มวลรวมที่เกิดจากการแตกหักที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างในตัวอย่าง ทดสอบทำให้ยังมีความสามารถในการรับความเค้นเฉือนได้ (Arulrajah et al. 2014a; Arulrajah et al. 2014b; Arulrajah et al. 2014c) ผลทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด (Maximum Dilatancy Ratio) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

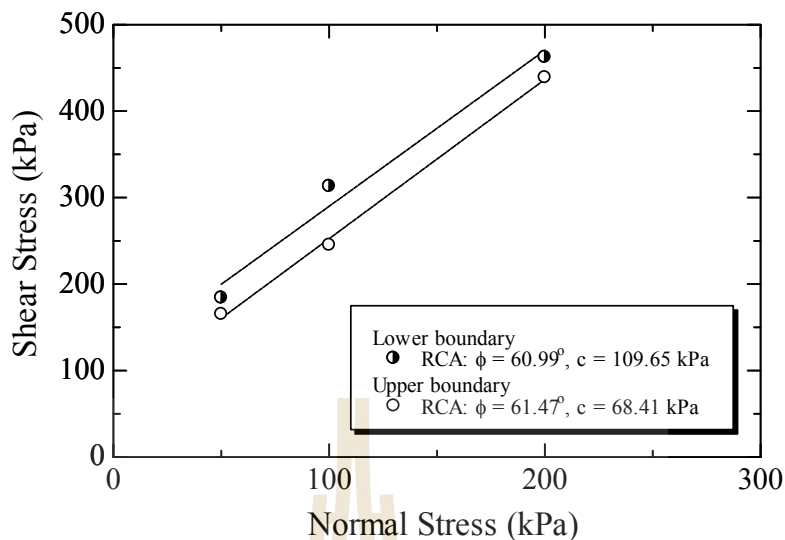
เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของตัวอย่างทั้งสองการกระจายขนาดคละพบว่า ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากัน ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน ในทุกความเค้นตั้งฉาก เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) ที่ใหญ่กว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim and Ha (2014)

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือน (Shear Strength Parameter) ซึ่งประกอบด้วยค่าการยึดเกาะ (Cohesion) และมุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle)

ตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criterion) ที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ค่ามุมเสียดทานภายในที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Internal Friction Angle) ของมวลรวมทั้งสองการกระจายขนาดคละมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าขนาดคละที่อยู่ภายในขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวงไม่มีผลต่อมุมเสียดทานภายในของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิล ส่วนค่าการยึดเกาะของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างให้ค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตริไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าการยึดเกาะของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลมีค่าสูงกว่ามวลรวมโดยทั่วไปเนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมในระหว่างการเตรียมตัวอย่าง (Touahamia et al. 2002; Piratheepan et al. 2013; Arulrajah et al. 2014b)

ตารางที่ 4.2 กำลังต้านทานแรงเฉือน กำลังร่วมเฉือน และอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเสริมจีโอกรีตและปราศจากการเสริมจีโอกรีต

RCA sample	Geogrid	Normal stress (kPa)	Shear strength, τ (kPa) Interface shear strength, $\tau_{\text{interface}}$ (kPa)	Maximum dilatancy ratio (degree)
Lower bound	-	50	184.28	-
		100	313.28	-
		200	462.55	-
	GX 60/60	50	172.53	11.69
		100	221.49	8.32
		200	380.88	7.04
	GX 60/30	50	179.30	15.21
		100	273.11	11.46
		200	443.90	7.59
	GX 160/50	50	187.33	14.77
		100	266.23	11.80
		200	408.19	8.25
Upper bound	-	50	165.28	10.13
		100	245.31	10.52
		200	439.06	8.54
	GX 60/60	50	102.63	11.69
		100	206.97	10.89
		200	342.34	9.64
	GX 60/30	50	128.28	10.14
		100	218.72	7.57
		200	409.25	5.99
	GX 160/50	50	148.33	16.21
		100	230.70	12.12
		200	375.61	7.86

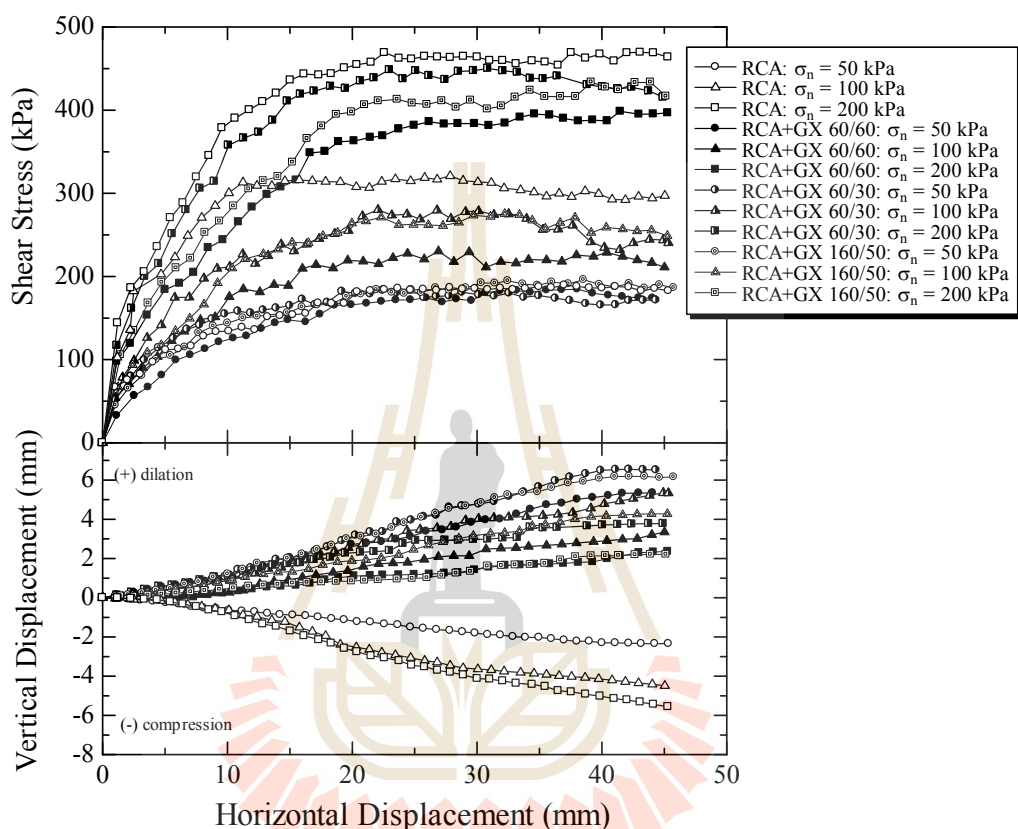


รูปที่ 4.2 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง

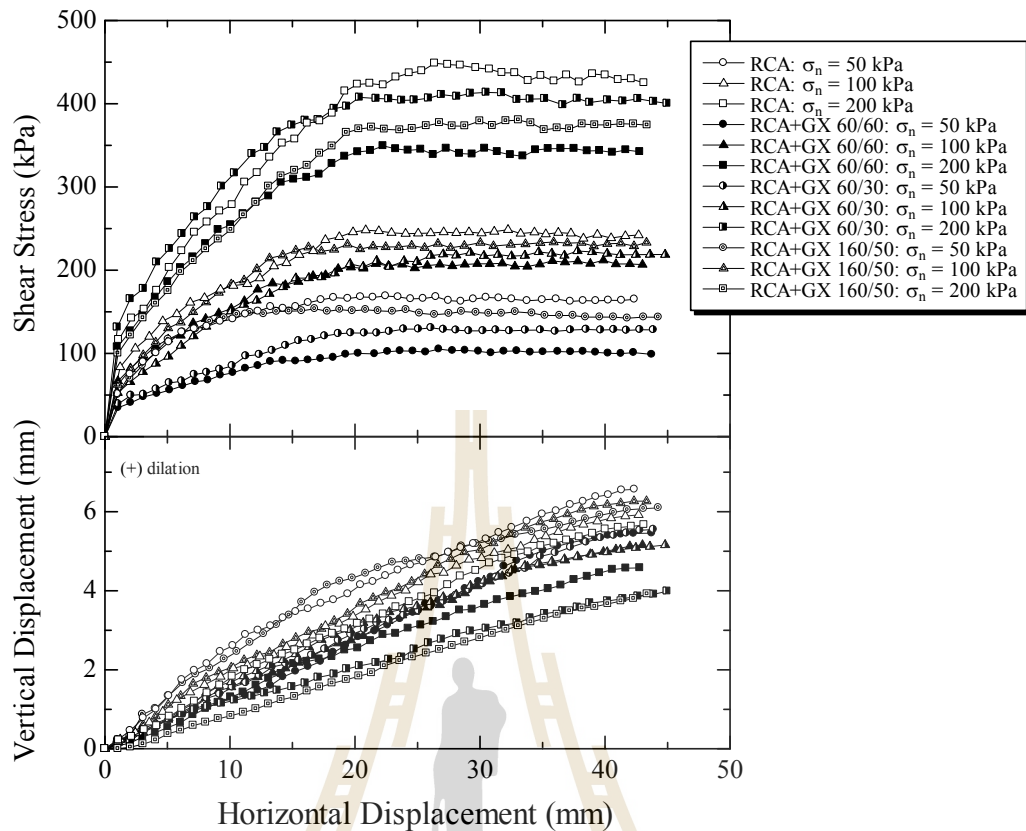
4.2.2 ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต

ผลทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีตเปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีตของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกรีตขนาดเดียวกัน พบว่า ในทุกความเค้นตั้งฉากและการกระจายขนาดคละ ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด เมื่อการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าประมาณคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร และเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตปราศจากจีโอกรีต อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบแสดงให้เห็นว่า ในทุกการทดสอบ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตมีพฤติกรรมขยายตัว (Dilation) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตปราศจากจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบเป็นแบบอัดตัว (Compression) ในทุกความเค้นตั้งฉาก

อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการขยายตัวในลักษณะนี้สามารถพบได้ทั่วไปในการทดสอบปฏิบัติการร่วมเลื่อนระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบและจีโอกรีด (Arulrajah et al. 2013 และ Arulrajah et al. 2015) ซึ่งมีสาเหตุจากการขัดกันระหว่างจีโอกรีดและอนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีด



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีดที่มีการกระจายขนาดละเอียดที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง



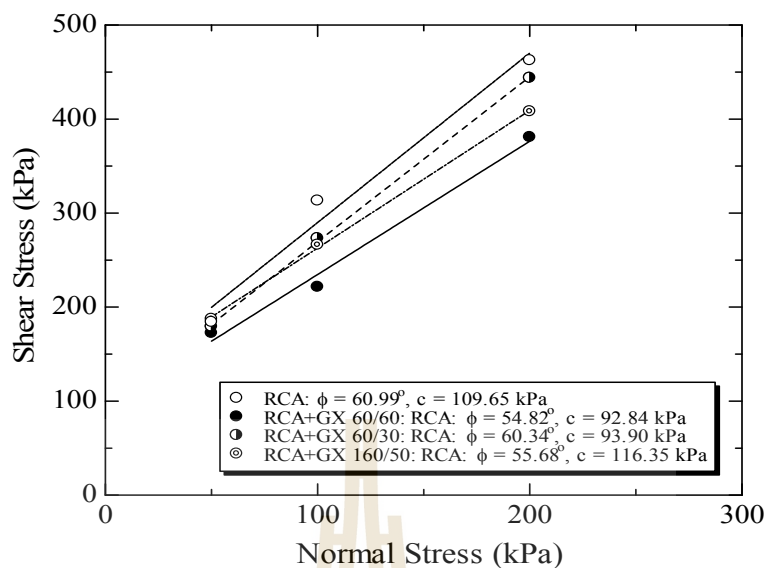
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งต่อการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

เมื่อพิจารณาที่ความเค้นตั้งฉากค่าเดียวกัน พบว่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear stress) ของมวลรวมคอนกรีตปราศจากการเสริมจีโอกรีตมีค่าสูงกว่าความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตเสริมจีโอกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้รายงาน โดยนักวิจัยจำนวนมาก (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) พบว่าพารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface Shear Strength Parameter) ของดินและวัสดุมวลรวมซึ่งถูกเสริมด้วยจีโอกรีตที่ทดสอบโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงจะมีค่าต่ำกว่าวัสดุอื่นๆที่ปราศจากการเสริมจีโอกรีต เนื่องจากผลของการลดลงของการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาควัสดุมวลรวมจากการเสริมจีโอกรีตบริเวณรอยต่อของกล่องความเค้นเฉือนด้านบนและด้านล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดระนาบเฉือน (Shear Plane) อีกทั้งผิวที่มีความเรียบของจีโอกรีตยังส่งผลต่อการลดลงของกำลังร่วมเฉือนด้วยเช่นกัน

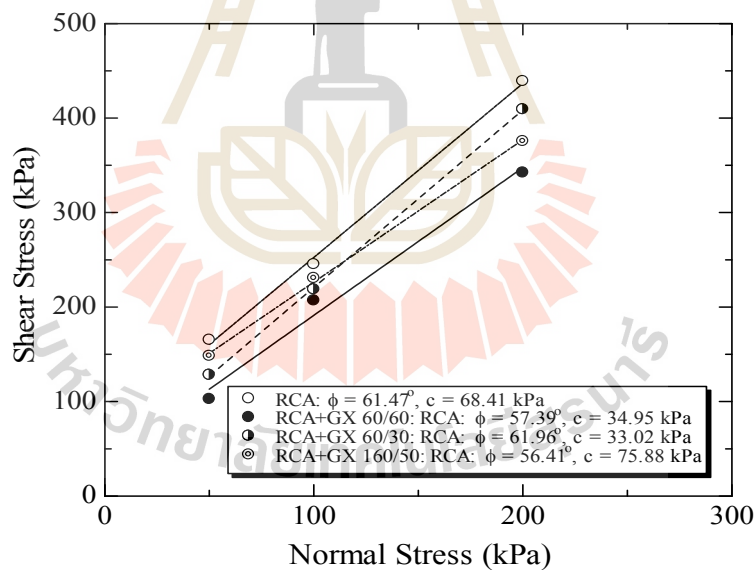
ตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าขนาดของช่องเปิดของจีโอกรีตส่งผลต่อกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต เห็นได้จากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดละเอียดเดียวกันเมื่อเสริมจีโอกรีตที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่มากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังร่วมเฉือนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้จีโอกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากขึ้นนั้นทำให้ปริมาณอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงมีโอกาสดเกิดการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงและอนุภาคมวลรวมกับจีโอกรีตบริเวณหน้าเฉือนเพิ่มมากขึ้น โดยที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตนี้เมื่อถูกต้านทานการเคลื่อนที่โดยจีโอกรีต อนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงเคลื่อนที่ไปรอบกันโดยไม่เกิดการไหลไปบนจีโอกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arulrajah et al. 2015 ที่ได้อธิบายว่าการเสริมจีโอกรีตที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่กว่าขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้นสามารถให้กำลังร่วมเฉือนได้สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมเสริมจีโอกรีตชนิดเดียวกันแต่มีมวลรวมมีการกระจายขนาดละเอียดแตกต่างกันพบว่าในทุกความเค้นตั้งฉากมวลรวมคอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดที่ขอบเขตต่างจะมีกำลังร่วมเฉือนสูงกว่า เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่มากกว่า ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตเสริมจีโอกรีตปราศจากการเสริมจีโอกรีต

พารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface Shear Strength Parameter) ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต ตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criterion) แสดงดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 จากรูปพบว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดละเอียดต่างกันถูกเสริมด้วยจีโอกรีตชนิดเดียวกัน มีค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) ใกล้เคียงกัน แต่ค่าแรงยึดเกาะ (Cohesion) ของมวลรวมคอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดตามขอบเขตต่างของมาตรฐานกรมทางหลวงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีต

มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำซึ่งสามารถวิบัติด้วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร (Traffic Load) เมื่อมวลรวมนี้ถูกเสริมด้วยจีโอกรีตลักษณะการวิบัติ (Mode of Failure) อาจเป็นได้ทั้งแบบแตกหักจากแรงดึง (Tensile Rupture Failure) หรือ การวิบัติแบบลื่นไถล (Slip Failure) ทั้งนี้การวิบัติแบบแตกหักเกิดขึ้นเมื่อแรงดึง (Tensile Stress) ที่เกิดกับจีโอกรีตมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของจีโอกรีต จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของจีโอกรีตหลังการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนพบว่าจีโอกรีตยังคงมีสภาพเดิมไม่เกิดการเสีรูปร่าง ดังนั้นลักษณะการวิบัติจึงเป็นแบบลื่นไถลซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลบนจีโอกรีตซึ่งถูกควบคุมโดยกำลังร่วมเฉือน (Interface Shear Strength) ระหว่างมวลรวมและจีโอกรีต



รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริม
จีโอกรีต ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง



รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริม
จีโอกรีต ที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

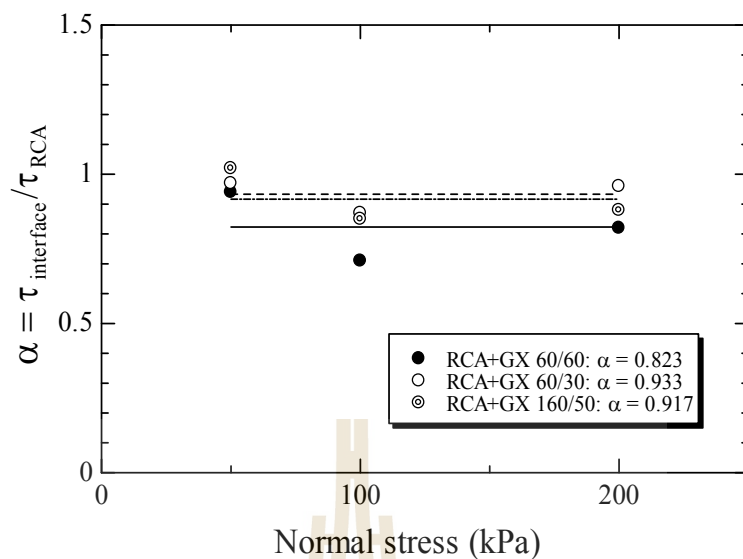


รูปที่ 4.7 ลักษณะของจีโอกรีตหลังการทดสอบ

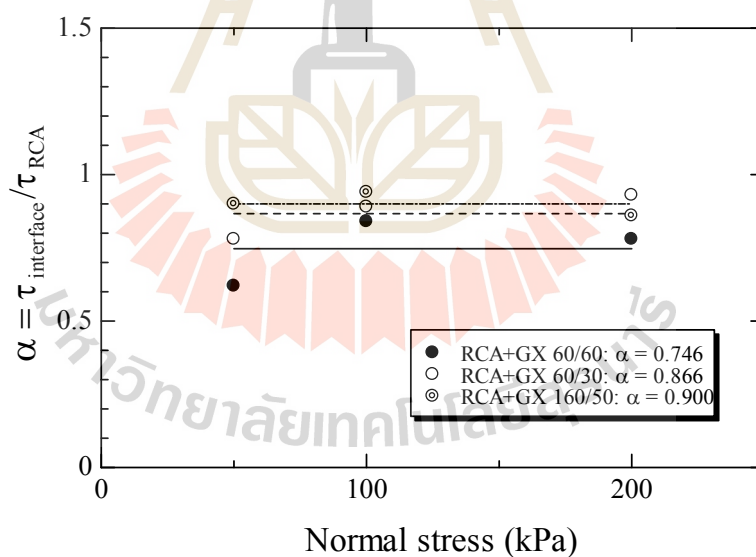
กำลังร่วมเฉือนระหว่างจีโอกรีตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสามารถอธิบายในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน (Interface Shear Strength Coefficient, α) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{interface}}}{\tau_f} \quad (4.1)$$

เมื่อ $\tau_{\text{interface}}$ คือ กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต และ τ_f คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการกระจายขนาดละเอียดแบบเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของจีโอกรีตที่มีขนาดช่องเปิดเท่ากันแปรผันในช่วงแคบๆ และจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) สามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้ ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนและความเค้นแนวตั้งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนและความเค้นแนวตั้งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนระหว่างมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กและจีโอกริด

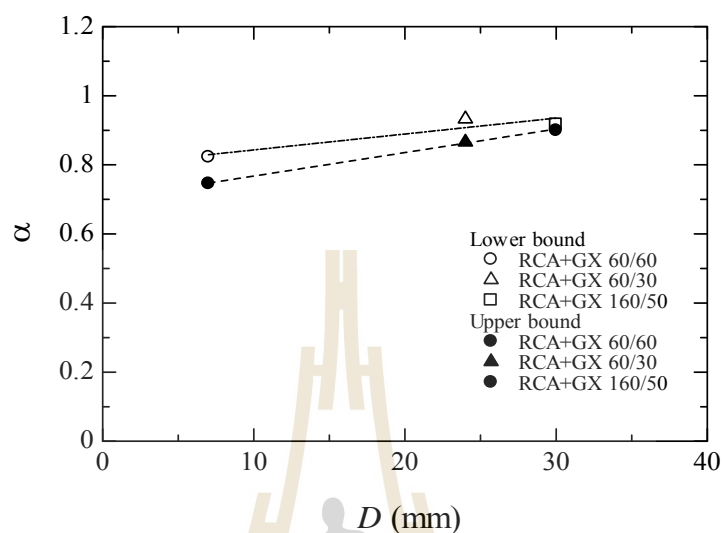
Particle size distribution	Product	Maximum aperture size, D (mm)	% finer than maximum aperture size, F	Interface shear strength coefficient, α
Lower bound	Miragrid GX 60/60	7	28	0.823
	Miragrid GX 60/30	24	60	0.933
	Miragrid GX 160/50	30	75	0.917
Upper bound	Miragrid GX 60/60	7	60	0.746
	Miragrid GX 60/30	24	80	0.866
	Miragrid GX 160/50	30	90	0.900

ตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกัน เมื่อถูกเสริมด้วยจีโอกริดที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้อุณหภูมิของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กำลังร่วมเนียนและสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กเสริมจีโอกริดสูงพิจารณาจากรูปที่ 4.11 เห็นได้ว่าเมื่อจีโอกริดมีขนาดเท่ากันการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียน โดยที่มวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนที่สูงกว่าเนื่องจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนของมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กเสริมจีโอกริดกับอัตราส่วนระหว่างด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกริดและร้อยละของอนุภาคมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกริด ดังรูปที่ 4.12 พบว่ามีความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงเดียวกัน ผลจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.2)

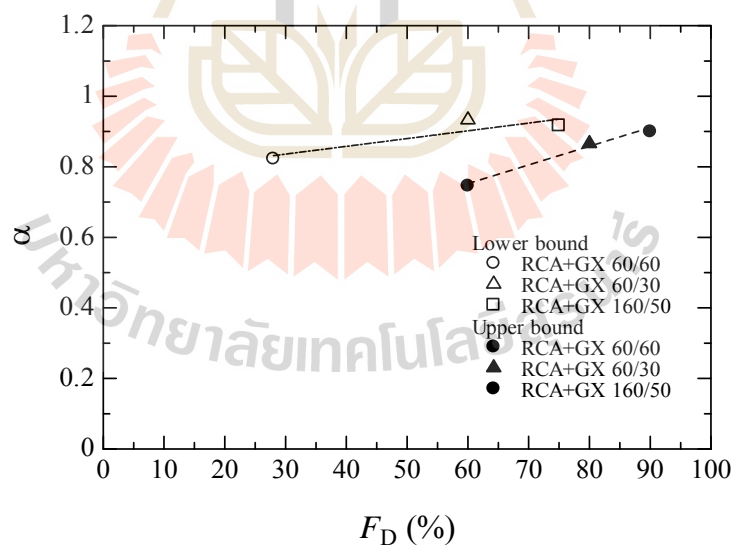
$$\alpha = 0.648 \left(\frac{D}{F_D} \right) + 0.67 \quad (4.2)$$

เมื่อ D คือด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกริด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และ F_D คือร้อยละของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตไร้เหล็กที่มีขนาดเล็กกว่าด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกริด ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีประโยชน์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนของมวลรวม

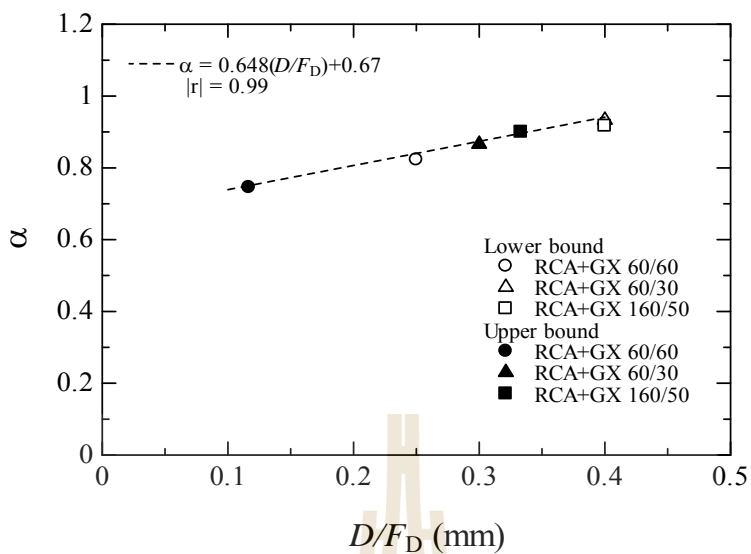
คอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต สำหรับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละภายใน
ขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังรวมเนียนและขนาดช่องเปิดของ
จีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังรวมเนียนและปริมาณอนุภาคที่มีขนาด
เล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังรวมเนื้อและอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิด และปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีต รีไซเคิลเสริมจีโอกรีต

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีด ในพจน์ของคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และศึกษาปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีด ในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีดและขนาดคละ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล การศึกษาใช้จีโอกรีดที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันสามขนาดได้แก่ รุ่น Miragrid GX 60/60 Miragrid GX 60/30 และ Miragrid GX 160/50 และใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันสองขนาดได้แก่ การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง การทดสอบแรงเฉือนตรงกระทำด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์ผลทดสอบนำมาซึ่งสมการทำนายกำลังร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีด ในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีด ขนาดคละและกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จากผลการดำเนินงานสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

- 1) มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดคละอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางในงานก่อสร้างถนนได้
- 2) จากผลการทดสอบแรงเฉือนตรงพบว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่ามวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน เนื่องจากอิทธิพลของขนาดเม็ดเฉลี่ย (D_{50}) ที่มีขนาดใหญ่กว่า
- 3) กำลังร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีดมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกรีด เนื่องจากการลดลงของการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาคของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในบริเวณที่มีการเสริมจีโอกรีดซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดหน้าตัดเฉือน (Shear Plane)
- 4) มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกัน เมื่อเสริมจีโอกรีดที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้น กำลังร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการขัดกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดช่องเปิดจีโอกรีดที่เพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกริดที่มีขนาดเดียวกัน กำลังร่วมเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างจะมีค่าสูงกว่าขอบเขตบน เนื่องจากอิทธิพลของขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ที่มีขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับผลทดสอบกำลังต้านทานแรงเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด

5) สมการกำลังร่วมเดือนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเดือน α ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังร่วมเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด สมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายกำลังร่วมเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดได้ เพียงทราบกำลังต้านทานแรงเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ขนาดช่องเปิดของจีโอกริด และการกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาร่วมเดือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริด ซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล กำลังรับแรงเดือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และกำลังร่วมเดือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปอาจทำการศึกษาปฏิกิริยาร่วมเดือนระหว่างวัสดุอื่นๆ เช่น หินคลุก ดินลูกรัง หรือเปลี่ยนประเภทของจีโอกริดที่นำมาใช้เสริมกำลัง

รายการอ้างอิง

- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. (2539). **ปฐพีกลศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยขอนแก่น :
หน่วยสารบรรณ งานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
ทล.-ม. 201/2544. (2544). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุก**. กรมทางหลวง. : สำนักมาตรฐานและ
ประเมินผล กรมทางหลวง.
- Aatheesan, T., Arulrajah, A., Bo, M.W., Vuong, B. and Wilson, J. (2010). “**Crushed brick
blends with crushed rock for pavement systems**”. *Proceedings of the Institution of
Civil Engineers, Waste and Resource Management* 163(1), 29–35.
- 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.
- Ali, M.M.Y., Arulrajah, A., Disfani, M.M. and Piratheepan, J. (2011). “**Suitability of using
recycled glass-crushed rock blends for pavement subbase applications**”.
*Geofrontiers 2011, Conference on Geotechnical and Foundation Design, American
Society of Civil Engineers, Dallas, TX, 1325–1334.*
- Al-Qadi, I.L., Brandon, T.L., Valentine, R.J., Lacina, B.A. and Smith, T.E. (1994). “**Laboratory
evaluation of geosynthetic reinforced pavement sections**”. *Transportation Research
Record* 1439, 25-31.
- Araujo, G.L.S., Palmeira, E.M. and Cunha, R.P. (2009). “**Behaviour of geosynthetic-encased
granular columns in porous collapsible soil**”. *Geosynthetics International* 16(6), 433-
451.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T. and Bo, M.W. (2011a). “**Geotechnical properties of
recycled crushed brick in pavement applications**”. *Journal of Materials in Civil
Engineering, ASCE* 23(10), 1444–1542.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M.M.Y. and Bo, M.W. (2012). “**Geotechnical properties of
recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications**”. *ASTM Geotechnical
Testing Journal* 35(5), 1-9.

- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M.W. and Sivakugan, N. (2012a). **“Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications”**. *Canadian Geotechnical Journal* 49(7), 796-811.
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M., Piratheepan J. and Bo, M.W. (2012b). **“Geotechnical performance of recycled glass-waste rock blends in footpath bases”**. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, (Article in press).
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M., Piratheepan J. and Bo, M.W. (2012c). **“Geotechnical performance of recycled glass-waste rock blends in footpath bases”**. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, (Article in press).
- 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.
- Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk, Farshid Maghoolpilehrood, Wisanukorn Samingthong, Yan-Jun Du, and Shui-Long Shen. (2015). **“Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid Reinforced Foamed Recycled Glass Using a Large-Scale Direct Shear Testing Apparatus”**. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering Volume 2015*, Article ID 235424, 8 pages
- 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. (2007). **“Standard test method for particle-size analysis of soils”**. ASTM-D422-63, 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. (2009). “**Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place**”. ASTM-D4429, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2012). “**Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate**”. ASTM-D127, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2014). “**Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**”. ASTM-C136, West Conshohocken, PA.
- Azam, A.M. and Cameron, D.A. (2012). “**Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction**”. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* (Article in press).
- Becham, W.K., and Mills, W.H. (1935). “**Cotton-fabric reinforced loads**”. *Engineering News Record*, 453–455.
- Debieb, F. and Kenai, S. (2008). “**The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete**”. *Construction and Building Materials* 22, 886–893.
- Disfani, M.M., Arulrajah, A., Bo, M.W. and Hankour, R. (2011). “**Recycled crushed glass in road work applications**”. *Waste Management* 31(11), 2341–2351.
- Disfani, M.M., Arulrajah, A., Bo, M.W. and Sivakugan, N. (2012). “**Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications**”. *Journal of Cleaner Production* 20(1), 170–179.
- Emil soból, wojciech sas, alojzy szymański. (2015). “**Scale effect in direct shear tests On recycled concrete aggregate**”. *Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 37, No. 2, 2015*.
- Gabr, A. and Cameron, D. (2012). “**Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction**”. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 24(6), 754–764.

- Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi, I., and Parsons, R.L. (2011). “**Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads**”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE 23(11), 1525-1534.
- Howard Isaac L. and Warren Kimberly A. (2009). “**Finite element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading**”. *Journal of Transportation Engineering* 135(2), 53-61.
- Hoyos, L.R., Puppala, A.J. and Ordonez, C.A. (2011). “**Characterization of cement fibertreated reclaimed asphalt pavement aggregates: preliminary investigation**”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE 23(7), 977–989.
- Imteaz, M.A., Ali, M.M.Y. and Arulrajah, A. (2012). “**Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material**”. *Waste Management & Research* 30(9), 917–921.
- Lee, K., and Manjunath, V.R. (2000). “**Soil-geotextile interface friction by direct shear tests**”. *Can. Geotech. J.*, 37(1), 238-252.
- 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.
- M. Touahamia, V. Sivakumar, D. McKelvey. (2002). “**Shear strength of reinforced-recycled material**”. *Construction and Building Materials* 16 (2002) 331–339.
- McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and McLaverty, G. (2002). “**Shear strength of recycled construction materials intended for use in vibro ground improvement**”. *Ground Improvement* 6(2), 59-68.

- Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. (1990). “**Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds**”. *Geotextiles and Geomembranes* 9(1), 99-123.
- Montanelli, F., Zhao, A. and Rimoldi, P. (1997). “**Geosynthetic reinforced pavement system: Testing and Design**”. *Proceedings of Geosynthetics*, IFAI, Vol. 2, Long Beach, California, USA, March 1997, pp. 619-632.
- Palmeira, E.M., Beirigo, E.A. and Gardoni, M.G. (2010). “**Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications**”. *Geotextiles and Geomembranes* 28(2), 136-148.
- Perkins, S.W. and Ismeik, M. (1997a). “**A synthetics and evaluation of geosynthetic reinforced base course layers in flexible pavements: Part I Experimental Work**”. *Geosynthetics International* 4(6), 549-604.
- Piratheepan, J., Arulrajah, A. and Disfani, M.M. (2013). “**Large-scale direct shear testing of recycled construction and demolition materials**”. *Advances in Civil Engineering Materials*, ASTM 2(1).
- Poon, C.S. and Chan, D. (2006a). “**Paving Blocks Made with Recycled Concrete Aggregate and Crushed Clay Brick**”. *Construction and Building Materials* 20, 569–577.
- Poon, C.S. and Chan, D. (2006b). “**Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-Base**”. *Construction and Building Materials* 20, 578–585.
- Puppala, A.J., Hoyos, L.R. and Potturi, A.K. (2011). “**Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates**”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE 23(7), 990-998.
- Rowe, R.K. and Taechakumthorn, C. (2011). “**Design of reinforced embankments on soft clay deposits considering the viscosity of both foundation and reinforcement**”. *Geotextiles and Geomembranes* 29(5), 448-461.
- Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. and Al-Zubeidi, M. (2002). “**Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases**”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE 14(3), 239-245.

- Thakur, J.K., Han, J., Pokharel, S.K. and Parsons, R.L. (2012). **“Performance of geocell reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic plate loading”**. *Geotextiles and Geomembranes* 35, 14-24.
- Touahamia, M., Sivakumar, V., and McKelvey, D. (2002). **“Shear strength of reinforced-recycled material”**. *Constr. Buil. Mater.*, 16(6), 331-339.
- Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Määtänen, A., Luotojärvi, T., and Kivekäs, L. (2000). **“Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in road constructions”**. *Waste Management* 20(2-3), 225-232
- Youwai, S., Kongkitkul, W., Punthutaecha, K., Anujorn, P. and Jongpradist, P. (2010). **“Geosynthetics in reinforced flexible pavement: Thailand experience”**. *Proceeding of International Symposium and Exhibition on Geotechnical and Geosynthetics Engineering: Challenges and Opportunities in Climate Change*. Vol. 28, pp. 119-127.





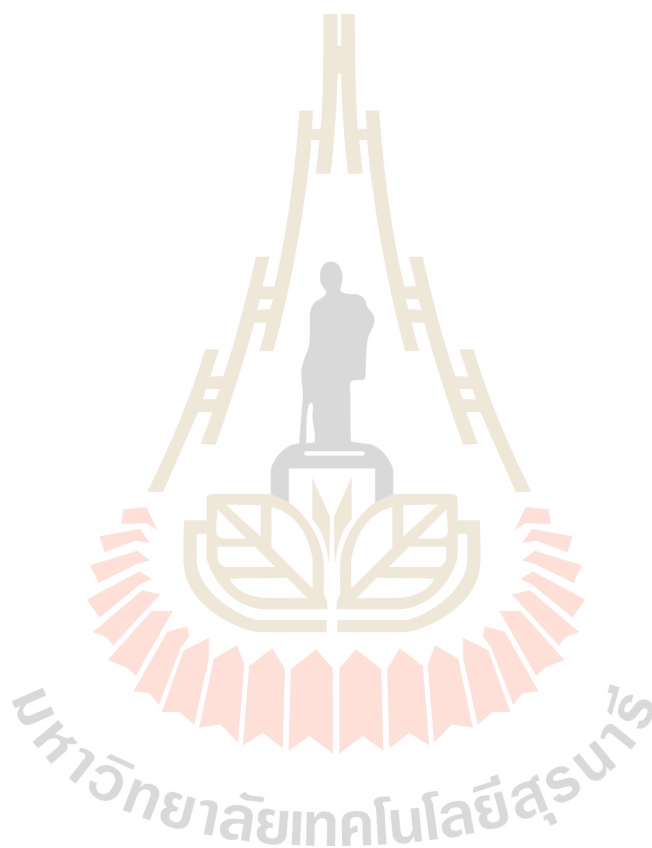
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

Narong Sari, Apichat Suddepong, Suksun Hopibulsuk. (2017) **INTERFACE SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF GEOGRID REINFORCED RECYCLED CONCRETE AGGREGATE**. 11th SEATUC SYMPOSIUM 2017 HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (HCMUT) 13 – 14 MARCH, 2017.



INTERFACE SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF GEOGRID REINFORCED RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Narong Sari ⁽¹⁾, Apichat Suddepong ⁽¹⁾, Suksun Hopibulsuk ⁽¹⁾

⁽¹⁾Suranaree University of Technology, Thailand

Email: narong.sa@hotmail.co.th and suksun@g.sut.ac.th

ABSTRACT

The interface shear strength properties of geogrid reinforced Recycled Concrete Aggregate (RCA) were determined using large-scale direct shear test (LDST) apparatus. Three different aperture sizes of biaxial geogrids were used to investigate the effect of aperture size of geogrid on shear interaction between geogrids and RCA. Comparisons were made between the results of RCA reinforced with geogrids having different aperture sizes and the unreinforced RCA. The LDST results indicated that the interface shear strength properties of geogrid reinforced RCA were less than the shear strength of RCA. The interface shear strength coefficient, α is dependent upon the aperture sizes of geogrid and particle size distribution curve of RCA.

KEYWORDS: *interface shear strength, large-scale direct shear test, recycled concrete aggregate, geogrid*

1. INTRODUCTION

The engineering properties of soil vary depending on the particle size. Generally, for the determination of shear behaviors of clay and sand, the small direct shear test is performed using the shear box with the size of 5×5 cm. For gravel, which is larger than sand, shear strength parameter is obtained using the large-scale direct shear test (LDST) apparatus. LDST apparatus could be also used to evaluate the interface shear strength between geosynthetics and soils (Liu et al. 2009a, b; Kazimierowicz 2007; Araujo et al. 2009; Rowe and Taechakumthorn 2011; Palmeria et al. 2010), and other materials such as municipal solid waste (Zekkos et al. 2010), foamed recycled glass (Arulrajah et al. 2015) and construction and demolition materials (Arulrajah et al. 2013a, 2014). Geogrids are used as a reinforcement material in various geotechnical engineering applications such as roads (Palmeria and Antunes 2010) and railway embankments (Arulrajah et al. 2009, 2013b). Many researchers reported that interface shear strength properties between soil/aggregates reinforced with geogrid materials is lower than that of the unreinforced control

materials (Liu et al. 2009a, b; Alfaro et al. 1995; Tatlisoz et al. 1998, Kim and Ha 2014). Kim and Ha (2014) reported effect of particle size on shear properties of sand that internal friction angles of unreinforced soil increased as maximum particle diameters increased. However, in case of reinforcement, friction efficiencies decreased as maximum particle diameters increased. Bergado et al. (1993) stated that aperture size of geogrid had significant influence on shear interfaces of geogrid reinforced soil.

In infrastructure works, virgin aggregates from quarries are used as construction materials. In order to reduce the negative environmental effects caused by virgin aggregates extraction, waste materials that produced from construction and demolition sector have been used as an alternative material. Recycled concrete aggregate (RCA) has recently been found to be viable alternative material in civil engineering applications such as pavement subbase and other road construction (Arulrajah et al. 2013a). However, its properties are not fully understood compared to natural quarried materials. In order to use this material for a particular application, the usage in reinforcement with geogrids is focused in this research. LDST apparatus is used to investigate interface behaviors of geogrids reinforced RCA.

2. EXPERIMENT

2.1 Materials and Methods

2.1.1 Recycled Concrete Aggregate (RCA)

In this research, 15×15×15 cm³ concrete specimens were obtained from the Department of Public Works and Town & Country Planning, Nakhon Ratchasima, Thailand. Specimens were crushed and sieved to a specific size to produce Recycled Concrete Aggregates (RCA). In order to investigate the effect of particle size distribution curve on the interface shear strength behaviors between geogrids and RCA, two RCA samples with gradation similar to the upper and the lower boundary for base/subbase material (DOH 2001) were prepared as shown in Fig. 1. The lower boundary sample, is classified as poorly graded gravel (GP) according to the Unified Soil Classification System (USCS). The bulk

specific gravity is 2.65. The water absorption is 6.07%. The maximum dry unit weight and the optimum water content of compacted sample under modified Proctor energy is 20.1 kN/m³ and 11.9%, respectively. The California Bearing Ratio (CBR) values is 122.35%, which is higher than the requirement of Department of Highways for base/subbase materials (typically a minimum of 80%) (DOH 2001). The Los Angeles abrasion (LA) value is 36.4%, which is lower than the maximum LA value of 40% typically specified for base/subbase material.

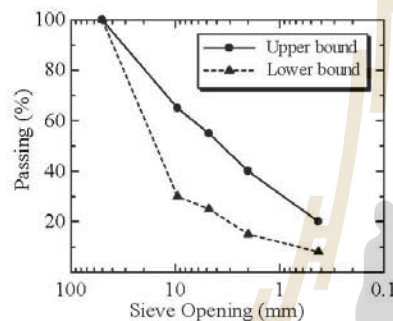


Fig. 1 Particle size distribution of RCA

For the upper boundary sample, it is classified as well graded gravel (GW) according to the USCS. The bulk specific gravity is 2.67. The water absorption is 7.02%. The maximum dry unit weight and the optimum water content under modified Proctor energy is 22.4 kN/m³ and 12.5%, respectively. The CBR value is 116.3%, which is also higher than the requirement by Department of Highways for subbase material (typically a minimum of 80%). The LA abrasion value is 38.6%, which meets the requirement for base/subbase material. The LA and CBR results for both RCA samples indicate that RCA is suitable for pavement base/subbase applications.

2.1.2 Geogrid

A commercially available biaxial geogrid used to reinforce RCA in this study is made from high tenacity polyester yarns, which are covered with a black polymeric coating. Three types of geogrid with different aperture sizes are used in this study; i) GX 60/60, GX 60/30 and GX 160/50. Physical and mechanical properties of these geogrids are given in Table 1.

2.1.3 Large-Scale Direct Shear Test (LDST)

A LDST apparatus, with shear boxes having 305 mm in length, 305 mm in width, and 204 mm in depth, was used to evaluate the interface shear strength interaction between RCA and geogrid reinforcement. The

shear tests on unreinforced RCA aggregate were also conducted to compare and the results are compared with those on the geogrid reinforced RCA. These tests were conducted as per ASTM D5321 (ASTM 2008).

There are two boxes in the LDST apparatus: a fixed upper box and a moveable lower box. During the sample preparation, the lower box and the upper box were clamped. The sample was compacted in the shear box in three layers by using hand tamping with a plastic hammer to attain the maximum dry density obtained from the laboratory modified compaction test. The sample was then submerged to commencement of consolidation stage, by filling the entire lower shear box and half of upper shear box with water. The consolidation stage was for 12 hours with three normal stress levels of 50 kPa, 100 kPa, and 200 kPa. When the consolidation was completed, the connection between the lower and upper box was released to provide an approximate 2 mm gap between the upper and lower boxes for friction minimization. The shearing was then conducted under the same normal stress levels of 50 kPa, 100 kPa, and 200 kPa. A constant shear displacement rate of 0.025 mm/min was maintained throughout the shearing stage. The horizontal displacements, vertical displacements, and shear stress were recorded. The tests were eliminated once the horizontal shear stress displacement reached approximately 45 mm. The room temperature was maintained at 20 ± 1 °C.

Table 1 Geogrid geometric Characteristics

Product	Miragrid GX60/60	Miragrid GX60/30	Miragrid GX160/50
Manufacturing Process	WOVEN	WOVEN	WOVEN
Polymer Type	PET	PET	PET
Coating Type	PVC	PVC	PVC
Aperture Size (mm)	MD	7	21
	CD	7	24
Short Term Tensile Strength (ISO 10319)	MD	60	60
	CD	60	30
Elongation at Short Term Tensile Strength %	MD	11	11
	CD	-	-

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 2 shows the LDST results of unreinforced RCA samples. For lower boundary sample, relationship between shear stress and horizontal displacement indicates that the shear stress increases with horizontal displacement and the maximum shear stress reaches at approximately 20 mm displacement and the shear stress is then almost constant with increasing horizontal displacement until the end of test at 45 mm. With increasing normal stress, both the maximum shear stress and the shear stiffness increase. Relationship between vertical and horizontal displacement shows that for the lower boundary sample, with increasing vertical displacement, the horizontal displacement increases. This shear response is consistent with the typical shear response for typical loose geomaterial. This is because this sample is poorly graded gravel (GP).

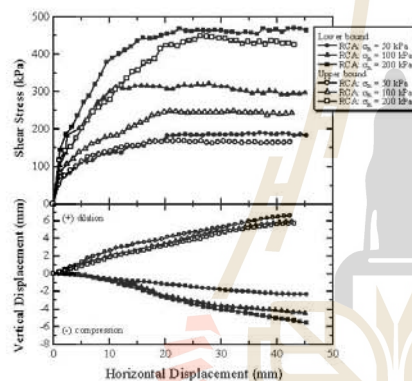


Fig.2 LDST test results of unreinforced RCA

For both upper and lower boundary samples, the shear stress increases with increasing horizontal displacement and the maximum shear stress is reached at approximately 20 mm and the shear stress is then almost constant with increasing horizontal displacement until the end of test at 45 mm. The upper boundary sample is found to exhibit completely dilatant behavior in the vertical and horizontal displacements relationship for all normal stress tested. While shear stress is almost constant with the increase in horizontal displacement after the maximum stress. This shear response is in contradiction to the typical shear response for typical dense geomaterial, where dilatant behavior is associated with strain-softening behavior. The constant shear stress after the maximum dilatancy ratio is caused by the rearrangement of crushed particles (fine crushed particles are driven into the voids or pores). The shear response of upper boundary sample is found to be similar to that of recycled glass cullets that has been used as aggregates in pavements and designated as having dilatancy associated

strain-hardening response (Arulrajah et al. 2014a, 2014b, 2014c, 2015). It is also observed that for a particular normal stress, the shear strength of the lower boundary sample is observed to be higher than that of the upper boundary sample.

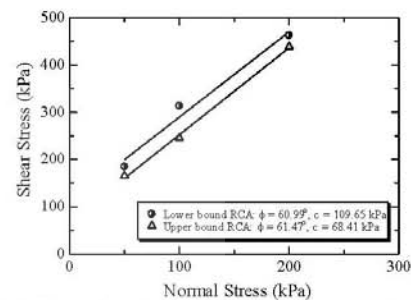


Fig.3 Shear strength failure envelope for unreinforced RCA

The cohesion, c and friction angle, ϕ based on the Mohr-Coulomb failure criterion at maximum shear stress for the lower and the upper boundary samples are presented in Fig. 3. The internal friction angle of the lower and the upper boundary samples are almost the same. In other words, the grain size distribution curve does not affect the internal friction angle. However, the upper boundary sample has higher apparent cohesion value. Granular soils, such as dense sands and gravels, typically specified in geotechnical engineering applications generally have peak friction values of 40 to 48 degrees (Sivakugan and Das 2010). As such, both the lower and the upper boundary samples meet the shear strength requirements for usage as a construction material in civil engineering application.

Figures 4 and 5 show the interface shear response of the geogrid reinforced lower and upper boundary samples, respectively. For both samples, the geogrid reinforced RCA exhibits constant interface shear stress after reached the maximum interface shear stress, which is similar to the unreinforced RCA. For a particular normal stress, the maximum interface shear stress is observed at approximately 20 mm displacement and then the interface shear stress tends to be constant. The maximum interface shear stress and interface shear stiffness increase with increasing normal stress.

For the relationship between vertical displacement and horizontal displacement, all the geogrid reinforced RCA samples exhibit completely dilatancy behavior. The relationship between vertical displacement and horizontal displacement of geogrid reinforced lower bound sample is completely different from the unreinforced sample.

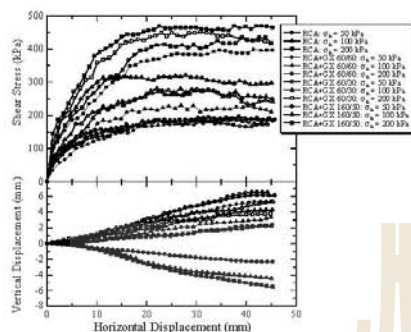


Fig.4 LDST test results of unreinforced lower bound RCA and geogrid reinforced lower bound RCA

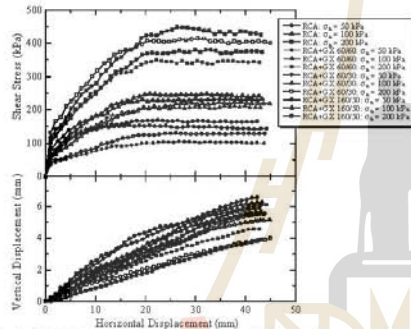


Fig.5 LDST test results of unreinforced upper bound RCA and geogrid reinforced upper bound RCA

The dilatant behavior in vertical and horizontal displacement relationship of geogrid reinforced RCA is caused by the interlocking between geogrid and RCA at the boundary between the lower and upper shear boxes. The maximum interface shear stress of geogrid reinforced RCA is found to give results that are lower than that of the maximum shear stress of unreinforced RCA. Many researchers (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) have reported similar results for soils and aggregates reinforced with geogrid materials. For a particular normal stress and RCA sample, the maximum interface shear strength increases with aperture size of geogrid increase. This can be attributed to the interlocking between geogrid and particle of RCA, which is finer than the aperture size of geogrid. The geogrid prevents the movement of the finer RCA particles; hence the RCA particles reorientate around each other, as these particles are unable to slide on the geogrid. Consequently, the

interface shear strength is mainly contributed from the interlocking between geogrid and aggregates.

Figures 6 and 7 show the interface shear strength parameters for geogrid reinforced lower and upper boundary samples, which are obtained from Mohr-Coulomb failure envelope line. For the same type of geogrid, the interface friction angles of lower bound and upper bound samples are almost the same. The upper boundary sample has higher apparent cohesion value which is similar to that of the unreinforced RCA samples.

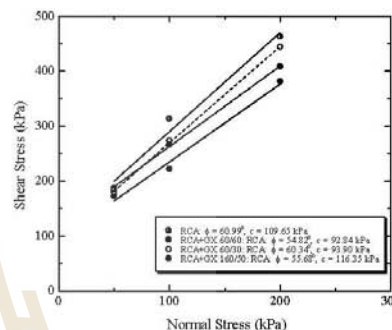


Fig.6 Interface stress failure envelope for lower bound RCA

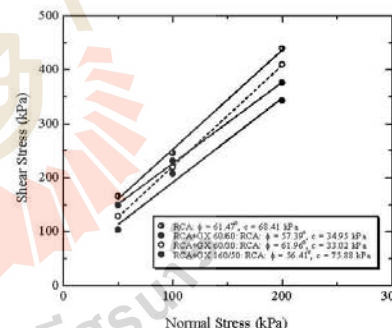


Fig.7 Interface stress failure envelope for upper bound RCA

The interface between geogrid and RCA can be expressed as the interface shear strength coefficient. The interface shear strength coefficient is obtained from the following equation:

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{reinforced}}}{\tau_{\text{unreinforced}}} \quad (1)$$

where α is the interface shear strength coefficient; $\tau_{\text{reinforced}}$ and $\tau_{\text{unreinforced}}$ are the interface shear strength between geogrid and RCA and shear strength of RCA, respectively.

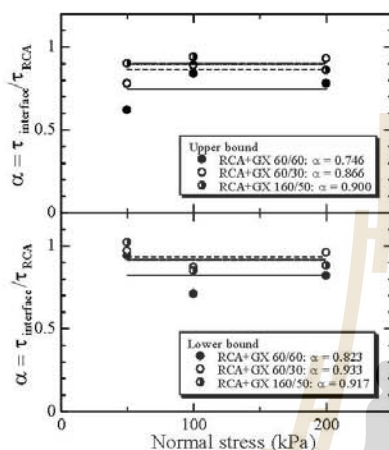


Fig. 8 Relationship between α and normal stress

Fig 8 shows the relationship between geogrid and normal stress. For a particular RCA sample and type of geogrid, the α value varies in a narrow band and can be considered as constant based on the linear regression analysis. The α values of the lower bound samples vary between 0.823 and 0.933. While, the α values of the upper bound samples vary between 0.746 and 0.900. For a particular RCA sample, the α values are found to increase with the aperture size of geogrid. It is also apparent that the α value of the upper boundary sample is higher than that of the lower boundary sample for the same type of geogrid. These results indicate that the interface shear strength coefficient changes with the aperture size of geogrid and particle size distribution curve of RCA.

4. CONCLUSIONS

The interface shear strength of geogrid reinforced RCA is determined from LDST apparatus. Tests were also undertaken on unreinforced RCA for comparisons. The following conclusions can be drawn:

1) The shear strength of the unreinforced RCA was found to be higher than the interface shear strength of geogrid reinforced RCA. Similar to the result of unreinforced RCA samples, the interface shear strength of the geogrid reinforced lower boundary RCA sample is observed to be higher than that of the upper boundary sample at a particular normal stress.

2) The maximum interface shear strength of geogrid reinforced RCA increases with aperture size of geogrid increase. The interface shear strength coefficient, α is dependent upon the aperture sizes of geogrid and particle size distribution curve of RCA.

REFERENCES

- Abu-Farsakh, M., Coronel, J., and Tao, M. (2007) "Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests." *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(540), 540-549.
- Alfaro, M. C., Miura, N., and Bergado, D. T. (1995). "Soil geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests." *Geotech. Test. J.*, 18(2), 157-167.
- Araujo, G.L.S., Palmeira, E.M. and Cunha, R.P. (2009). "Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil". *Geosynthetics International* 16(6), 433-451.
- Arulrajah, A., Abdullah, A., Bo, M. W., and Bouazza, A. (2009). "Ground improvement techniques for railway embankments." *Proc. Inst. Civ.Eng. Geotech. Eng.*, 162(1), 3-14.
- Arulrajah, A., Abdullah, A., Bo, M. W., and Leong, M. (2013a). "Geosynthetic applications in a high-speed railway: Case study." *Ground Improvement, Proc., Institution of Civil Engineers (UK)*, in press.
- Arulrajah, A., Ali, M. M. Y., Disfani, M. M., Piratheepan, J., and Bo, M.W. (2013b). "Geotechnical performance of recycled glass-waste rock blends in footpath bases." *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000617, 653-661.
- 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.

The 11th SEATUC Symposium

Anulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghoolpilehood, 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.

Bergado, D. T., Chai, J. C., Abiera, H. O., Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S. (1993). "Interaction between cohesive/frictional soil and various grid reinforcements." *Geotext. Geomembr.*, 12(4), 327-349.

DOH, Standard No. DH-S 201/2544 Standard of crusher rock base, Department of Highways, Thailand, 2001.

Kazimierowicz, F.K. (2007). "Influence of geosynthetic reinforcement on the load-settlement characteristics of two-layer subgrade". *Geotextiles and Geomembranes* 25(6), 366-376.

Kim, D., and Ha, S. (2014). "Effects of particle size on the shear behavior of coarse grained soils reinforced with geogrid". *Materials* 7, 963-979.

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

Ling, H.L., 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-yam geogrid interfaces". *Geotextiles and Geomembranes* 27(1), 19-30.

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

Palmeira, E. M., and Antunes, L. G. S. (2010). "Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance." *Geotext. Geomembr.*, 28(6), 547-558.

Palmeira, E.M., Beirigo, E.A. and Gardoni, M.G. (2010). "Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications". *Geotextiles and Geomembranes* 28(2), 136-148.

Sivakugan, N., and Das, B. M. (2010). *Geotechnical engineering: A practical problem solving approach*, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, FL.

Tatlisoz, N., Edil, T. B., and Benson, C. H. (1998). "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1109), 1109-1119.

Zekkos, D., Athanasopoulos, G. A., Bray, J. D., Grizi, A., and Theodoratos, A. (2010). "Large-scale direct shear testing of municipal solid waste." *Waste Manage.*, 30(8-9), 1544-1555.

PHOTOS AND INFORMATION

	<p>Narong Sari received the B.E. (2013) degrees in civil engineering from Rajamangala University of Technology Isan.</p> <p>He is a Graduate student, Department of civil Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include geotechnical.</p>
	<p>Apichat Suddeepong received the B.E. (2005), M.E. (2009) degree in civil engineering from Suranaree University of Technology, and Ph.D. (2015) degrees in Geotechnical engineering from Saga University.</p> <p>He is a Post-Doctoral researcher, Department of Civil Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include geotechnical.</p>
	<p>Suksun Hopibulsuk received the B.E. (1996) degree in civil engineering from Khon Kaen University, M.E. (1998) degree in Soil Engineering from Asian Institute of Technology, and Ph.D. (2001) degrees in Geotechnical engineering from Saga University.</p> <p>He is a Professor, Department of Civil Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include geotechnical and ground improvement.</p>

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์ สารี เกิดเมื่อวันที่ 5 เดือนกันยายน พ.ศ. 2534 ณ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวังน้ำเขียวพิทยาคม และปี พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (นครราชสีมา) เมื่อเรียนจบแล้วได้เริ่มทำงานที่ บริษัท ธนาธรคอนสตรัคชั่น จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร หลังจากนั้นในปี พ.ศ.2557 ได้มีโอกาสเข้ามาทำหน้าที่ผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย ที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเป็นการพัฒนาตนเองในด้านความรู้ และความสามารถด้านวิศวกรรมปฐพีซึ่งผู้เขียนมีความสนใจ ในปี พ.ศ. 2558 ผู้เขียนจึงได้เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และขณะศึกษามีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 1 เรื่อง ซึ่งมีรายละเอียดปรากฏ ในภาคผนวก ก.