

รหัสชุดโครงการ 7-712-58-24-43



รายงานการวิจัย

ปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด
ริต (Shear Interaction between Recycled
Concrete Aggregate and Geogrid)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว

รหัสชุดโครงการ 7-712-58-24-43



รายงานการวิจัย

ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด
(Shear Interaction between Recycled Concrete Aggregate
and Geogrid)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557-2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นไปได้ยาก ผู้เขียนต้องขอขมา มา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สาโรช รุจิวรรณ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณ คุณณรงค์ สารี และ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความช่วยเหลือในงานทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2558-2559

สุขสันต์ หอพิบูลสุข
หัวหน้าโครงการวิจัย
ธันวาคม 2559



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล ในพจน์ของขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลและขนาดช่องเปิดของจีโอกริด มวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลที่ใช้ในการศึกษามีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันสองแบบ คือ 1) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่าง และ 2) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตบน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับหินคลุก การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบการบดอัด การทดสอบซีปีอาร์ การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ การทดสอบหาค่าการสึกหรอ และการทดสอบแรงเฉือนตรง การทดสอบแรงเฉือนตรงและการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลและจีโอกริดดำเนินการทดสอบด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear test) ภายใต้อายุแรงตั้งฉากสามค่า ได้แก่ 50 100 และ 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร จีโอกริดที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิดสองแกนมีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันสามรุ่น ได้แก่ รุ่น 1) Miragrid GX60/60 2) Miragrid GX60/30 และ 3) Miragrid GX160/50

ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและซีปีอาร์ของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล แสดงว่ามวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถใช้เป็นวัสดุพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนนในประเทศไทย ผลทดสอบแรงเฉือนตรงแสดงให้เห็นว่าการกระจายขนาดคละที่แตกต่างกันส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล โดยมวลรวมหยาบคอนกรีตไร้ไซเคิลที่มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าจะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลที่มีขนาดคละเดียวกันและหน่วยแรงตั้งฉากเท่ากัน พบว่า กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลคอนกรีตไร้ไซเคิลและจีโอกริดมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกริด) ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลและจีโอกริดขึ้นกับขนาดช่องเปิดของจีโอกริดและขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล โดยที่ขนาดช่องเปิดที่ใหญ่ขึ้นเพิ่มอิทธิพลของการก้ำกั้นของเม็ดดิน ทำให้มีกำลังร่วมเฉือนสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการทำนายกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิลและจีโอกริด สมการที่พัฒนาขึ้นนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังร่วมเฉือนเพียงทราบ ขนาดช่องเปิดของจีโอกริด การกระจายขนาดคละ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตไร้ไซเคิล

ABSTRACT

This research aims to study shear interaction between recycled concrete aggregate (RCA) and geogrid in term of particle size of RCA and aperture size of geogrid. Two particle size distribution curves of RCA samples (lower and upper boundaries) were prepared based on the specification from Department of Rural Roads, Thailand for crushed rock. The laboratory tests carried out on these samples include compaction, California Bearing Ratio (CBR), absorption, Los Angeles (LA) abrasion and direct shear tests. Direct shear test on RCA and interface interaction test between geogrid and RCA were conducted using a large-scale direct shear test apparatus under the normal stress of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa. Three different biaxial geogrid with different aperture sizes (Maragrid GX60/60, Miragrid GX60/30 and Miragrid GX160/50) were used in this investigation.

Based on the basic properties and the CBR test results, it is found that RCA samples with particle size distribution curves lying between upper and lower boundary of the specification from Department of Rural Roads meet the requirement for base and sub base materials for road constructions in Thailand. Direct shear test results on RCA samples show that the different particle size distribution curve of RCA has an influence on the shear strength. RCA with larger average particle size (D_{50}) appears to have higher shear strength. For a given particle size distribution curve and normal stress, interface shear strength between RCA and geogrid is lower than shear strength of RCA. The interface shear strength depends on both aperture size of geogrid and particle size of RCA. Interface shear strength increases linearly with aperture size due to the increase in interlocking effect. Based on a critical analysis of the test results, the interface shear strength predictive equation for the geogrid-reinforced RCA is introduced. The developed equations are useful for the approximation of interface shear strength from aperture size of geogrid, and particle distribution curve and shear strength of RCA.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2. ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุวมลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	4
2.2 ผลกระทบจากขนาดกล่องรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	6
2.3 จีโกรีต.....	6
2.4 ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุสังเคราะห์และมวลรวมรีไซเคิล.....	7
บทที่ 3. ผลการศึกษาและสรุปผลการศึกษา.....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	15
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	15
3.2.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ปราศจากการเสริมจีโกรีตและการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือน ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโกรีต.....	18

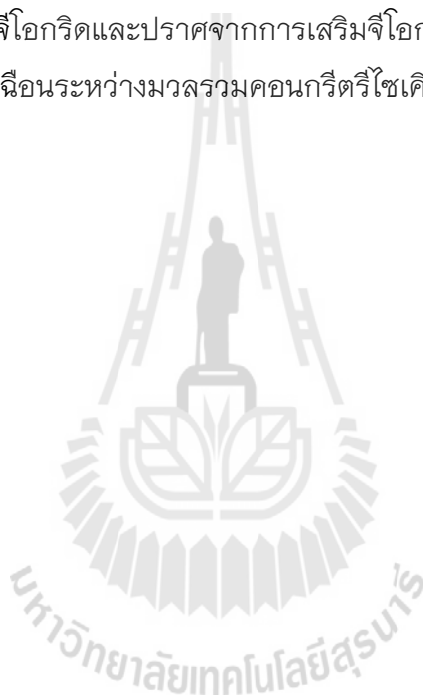
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ผลการทดสอบ	20
3.3.1 กำลังต้านทานแรงเหวี่ยงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ปราศจากการเสริมจีโอกรีต	20
3.3.2 ปฏิกริยาร่วมเหวี่ยงระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกรีต	25
3.4 สรุปผลการศึกษา	34
เอกสารอ้างอิง	36
ประวัตินักวิจัย	40



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง (ข้อมูลของผู้เขียน).....	4
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริด.....	17
3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล.....	17
3.3 กำลังต้านทานแรงเฉือน กำลังร่วมเฉือน และอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดและปราศจากการเสริมจีโอกริด.....	23
3.4 สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด.....	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยกล่องรับแรงเฉือนขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) และ ขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) (Sobol et al. 2015)	6
2.2 พฤติกรรมการทรุดตัวถาวรของถนนแบบเสริมและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์กับจำนวน รอบในการให้น้ำหนัก	7
2.3 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมหินบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)	8
2.4 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)	9
2.5 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากการรีดอากาศตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)	10
2.6 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมของเสียจากเหมืองตามเงื่อนไขต่างๆ (Touahamia et al. 2002)	10
2.7 พฤติกรรมการเฉือนของอิฐย้อย (Arulrajah et al. 2013)	11
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตามระนาบของจีโอกริดกับมวลรวม รีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013)	11
2.9 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลไม่เสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015)	12
2.10 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบา รีไซเคิลเสริมจีโอกริด (Arulrajah et al. 2015)	13
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเสริมแรง (α) และความเครียดปกติ (Arulrajah et al. 2015)	13
3.1 การกระจายขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	16
3.2 จีโอกริด รุ่น Miragrid GX60/60 Miragrid GX60/30 และ Miragrid GX160/50	16
3.3 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิบัติการร่วมเงื่อนไขระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	21
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	21
3.6 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	24
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	25
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	26
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	26
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง.....	27
3.11 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	29
3.12 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	30
3.13 ลักษณะของจีโอกริดหลังการทดสอบ.....	30

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวตั้ง ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจาย ขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	31
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวตั้ง ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจาย ขนาดคละที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	31
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวม คอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต.....	33
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่อง เปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต.....	33
3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดและ ปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจี โอกรีต.....	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

วัสดุผสมนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมการทางกันอย่างแพร่หลายในงาน เช่น วัสดุถมคันทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง เป็นต้น วัสดุผสมธรรมชาติส่วนใหญ่ได้จากการระเบิดภูเขา การใช้วัสดุผสมธรรมชาติในงานก่อสร้างระบบสาธารณูปโภค มีปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนา ประเทศเหล่านี้จึงต้องเผชิญกับปัญหาการขาดแคลนวัสดุตามธรรมชาติ อันนำมาซึ่งราคาค่าก่อสร้างที่สูงขึ้นตาม ในขณะที่วัสดุเหลือทิ้งจากการรื้อถอนอาคารและสิ่งปลูกสร้างกลับมีปริมาณที่สูงขึ้น และส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาขาดแคลนพื้นที่กำจัดวัสดุเหลือทิ้ง (Aatheesan et al. 2010; Hoyos et al. 2011; Arulrajah et al. 2012)

วัสดุเหลือทิ้งจากการรื้อถอนอาคารและสิ่งปลูกสร้าง เช่น เศษคอนกรีต เศษอิฐ หิน เหล็ก และไม้ เป็นต้น ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างไร้คุณค่าในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยจากประเทศที่พัฒนาแล้วแสดงให้เห็นว่า วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้ ตัวอย่างเช่น 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) มวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Taha et al. 2002; Han et al. 2011; Disfani et al. 2011; Hoyos et al. 2011; Puppala et al. 2011; Thakur et al. 2012) และเศษแก้ว (Ali et al. 2011; Disfani et al. 2011; Arulrajah et al. 2012d; Disfani et al. 2012; Imteaz et al. 2012) เป็นต้น วัสดุดังกล่าวได้รับการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการและในสนามว่ามีกำลังต้านทานแรงเฉือน และความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานในลักษณะต่างๆ

Wahlström et al. (2000); Jankovic et al. (2012); Engelsen et al. (2012) และ Poon and Chan (2012) ได้แสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทางและชั้นพื้นทาง แม้ว่าจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต่ำกว่าวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ 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) ดังนั้น จึงช่วยลดความหนาของชั้นรองพื้นทางได้ (Leu and Tasa 2001) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งมีอยู่อย่างจำกัด (Zekkos et al. 2010; Arulrajah et al., 2012) แม้ว่าจะเป็นเรื่องที่ทำหายและมีคุณค่าทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปฏิกิริยาร่วมเหนือนระหว่างจีโอกริด (Geogrid) และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate) และเพื่อสร้างสมการทำนายกำลังร่วมเหนือนในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกริดและการกระจายขนาดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล งานวิจัยนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ในงานก่อสร้างชั้นทางที่มีการกระจายขนาดคละอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544 บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะได้รับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ อันได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) และซีบีอาร์ ตัวแปรอิทธิพลที่ทำการศึกษา ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวมรีไซเคิล ค่าการสึกหรอทำการทดสอบโดย Loss Angeles abrasion ตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) การทดสอบแรงเฉือนตรงดำเนินการด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) ผลการศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ เพื่อพัฒนาสมการทำนายปฏิกิริยาร่วมเหนือนระหว่างจีโอกริดและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกริดและคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (การกระจายขนาดและกำลังต้านทานแรงเฉือน)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน และซีปาร์ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
2. เพื่อศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกรีตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกรีต และคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
3. เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต การกระจายขนาด และกำลังต้านทานแรงเฉือน ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
2. ทราบถึงพฤติกรรมร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต
3. ได้สมการทำนายกำลังร่วมเฉือนในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต การกระจายขนาด และกำลังต้านทานแรงเฉือน ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้จีโอกรีต ร่วมกับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และศึกษาปฏิกิริยาร่วมระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และจีโอกรีต ในพจน์ของคุณสมบัติของจีโอกรีต และคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆ และปฏิกิริยาร่วมเฉือนระหว่างจีโอกรีตและมวลรวมรีไซเคิล จะนำเสนอในหัวข้อนี้ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบวิธีการวิจัยและวิธีการวิเคราะห์ผลทดสอบ

2.1 วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การประยุกต์ใช้วัสดุมวลรวมรีไซเคิลเริ่มต้นจากการบดย่อยเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างและโรงงานให้มีขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเหลือทิ้ง

(Arulrajah et al., 2013a)

Engineering Properties	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG	Typical Quarry Materials
Gravel content (%)	50.7	53.6	44.7	48.0	9.2	53.0	-
Sand content (%)	45.7	39.8	45.1	46.0	85.4	41.8	-
Fines content (%)	3.6	6.6	10.2	6.0	5.4	5.2	-
USCS classification	GW	GW	SW	GW	SW	SW	-
Los Angeles Abrasion (max)	28	36	21	42	25	25	< 40

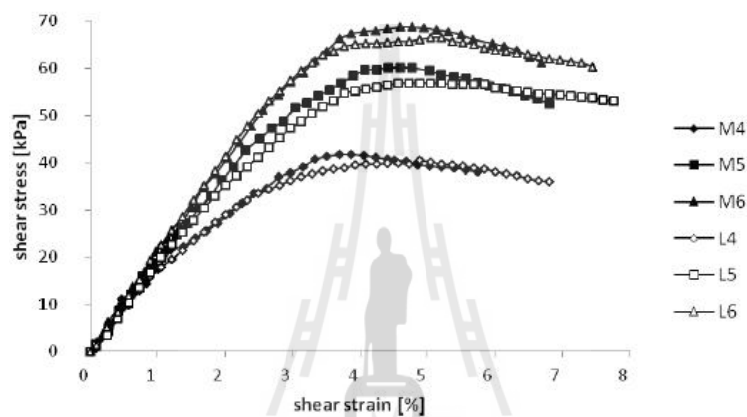
Engineering Properties	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG	Typical Quarry Materials
Modified Compaction: Max dry density (Mg/m^3)	1.96	2.02	2.23	2.00	1.78	1.99	> 1.78
Modified Compaction: Optimum moisture content (%)	12.0	10.7	9.3	8.1	10.0	8.8	8 – 15
California Bearing Ratio (%)	118 – 160	123 – 138	121 – 204	30 – 35	42 – 46	73 – 76	> 80
Unconfined Compression Test: q_u (kPa)	310 – 378	86 – 130	153 – 207	100 – 117	– –	– –	–
Direct Shear Test: Apparent cohesion (kPa)	154	61	285	9	6	14	> 35
Direct Shear Test: Friction angle (degrees)	45	52	48	49	45	49	> 35
Triaxial Test (CD): Apparent cohesion (kPa)	45	41	46	53	0	2	> 35
Triaxial Test (CD): Friction angle (degree)	49	49	51	37	35	41	> 35

ซึ่ง RCA คือมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate) CB คืออิฐบด (Crushed brick) WR คือเศษหิน (Waste rock) RAP คือผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement) FRG คือแก้วรีไซเคิลละเอียด (Fine recycled glass) และ MRG คือแก้วรีไซเคิลขนาดกลาง (Medium recycled glass) จะเห็นได้ว่าวัสดุรีไซเคิลเกือบทั้งหมดมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามข้อกำหนดทั่วไปสำหรับหินคลุก (Typical quarry materials)

นอกจากนี้ นักวิจัยบางท่าน (Tam and Tam 2007; Gomez and Soberon 2002; Poon and Chan 2006a; Poon and Chan 2006b; Courard et al 2010; Arulrajah et al. 2013a; McKelvey et al. 2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมการเฉือน (Shear behavior) ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

2.2 ผลกระทบจากขนาดกล่องรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

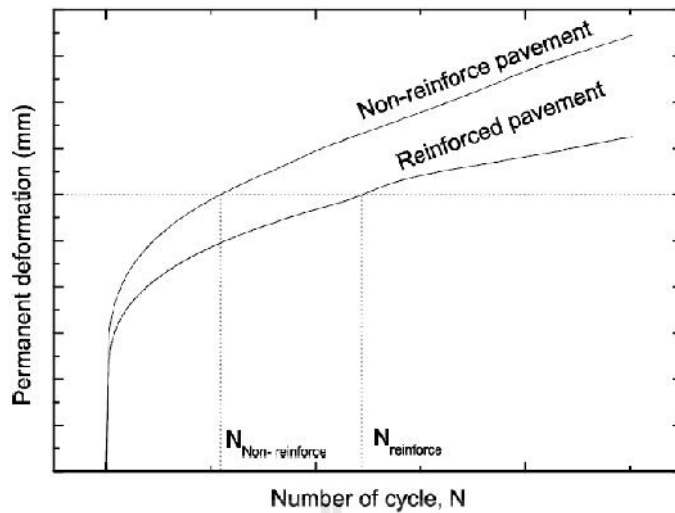
Sobol et al. (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและอิทธิพลของขนาดกล่องการทดสอบแรงเฉือนตรงต่อกำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้กล่องรับแรงเฉือน 2 ขนาด คือ ขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) และ ขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) ผลทดสอบที่ได้จากกล่องทดสอบทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มุมเสียดทานภายในของกล่องทดสอบขนาดกลาง (120 x 120 มิลลิเมตร) สูงกว่ากล่องทดสอบขนาดใหญ่ (250 x 250 มิลลิเมตร) ประมาณ 1.2 องศา



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

2.3 จีโอกิริด

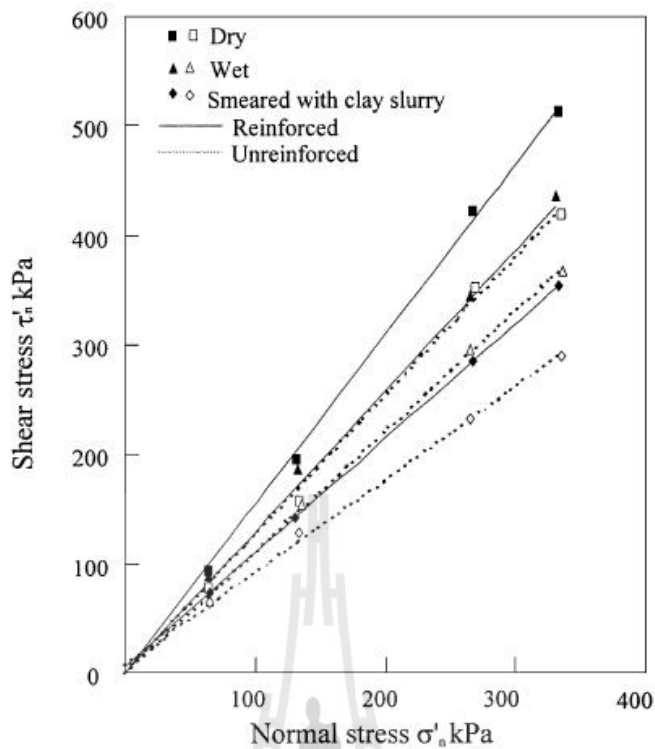
การใช้จีโอกิริดเสริมกำลังในชั้นทางและชั้นรองพื้นทางช่วยให้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และช่วยลดการทรุดตัวของผิวทาง อันนำมาซึ่งอายุการใช้งานที่ได้นานขึ้น จีโอกิริดมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดร่องล้อลึก การเสียรูปเฉือน (Shear Deformation) (Montanelli et al. 1997; Henry et al. 2009) ดังนั้น จึงช่วยลดความหนาของชั้นทางได้ การติดตั้งจีโอกิริดหลายชั้นจะช่วยเสริมแรงในชั้นทาง (Cancelli et al. 1997; Perkins 1999) Youwai et al. (2010) ได้สร้างแบบจำลองของถนนที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุสังเคราะห์ต่อพฤติกรรมของถนน เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถนนที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เกิดการทรุดตัวถาวรน้อยกว่าถนนที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ ที่จำนวนรอบในการให้น้ำหนักที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการทรุดตัวของถนนแบบเสริมและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ กับจำนวนรอบในการให้น้ำหนัก

2.4 ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุสังเคราะห์และมวลรวมรีไซเคิล

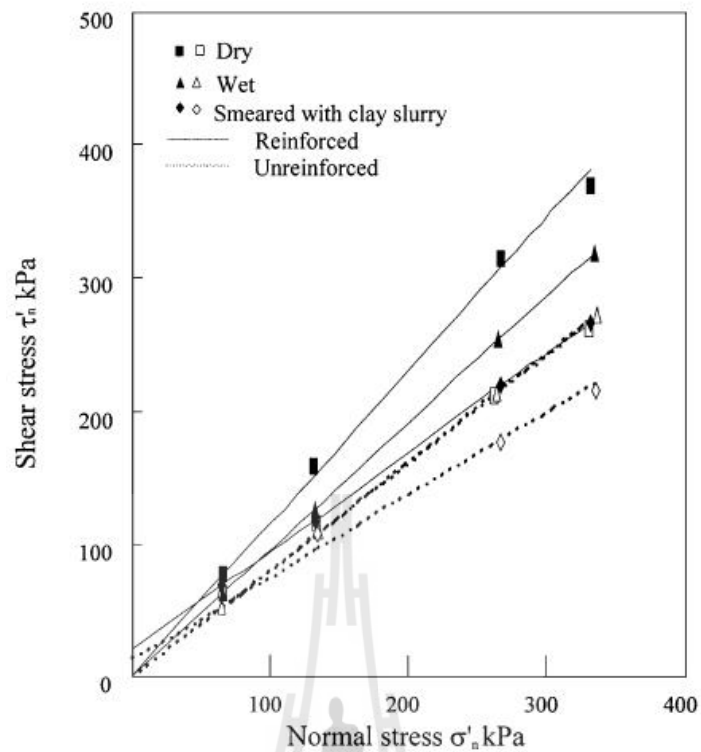
งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างดินกับวัสดุจีโอกรีต (Kazimierowicz 2007; Araujo et al. 2009; Liu et al. 2009a; Liu et al. 2009b; Rowe and Taechakunthorn 2011; Palmeira et al. 2010) ในขณะที่ การศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมรีไซเคิลกับวัสดุจีโอกรีต (Zekkos et al. 2010; Arulrajah et al. 2012) ยังมีอยู่อย่างจำกัด และต้องการการศึกษาเพิ่มอย่างจริงจัง เพื่อประโยชน์ด้านวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และ เศรษฐศาสตร์ Touhamia et al. (2002) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมจากเศษการรีไซเคิลถนนอาคาร มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และมวลรวมของเสียจากเหมือง ด้วยกล่องทดสอบแรงเฉือนขนาดใหญ่ ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของหินคลุก โดยทดสอบที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าความชื้นปกติที่เหมาะสม และต่ำกว่าความชื้นปกติที่เหมาะสม และผสมดินเหนียวร้อยละ 20 และเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างการเสริมวัสดุจีโอกรีตและไม่เสริมวัสดุจีโอกรีต ผลการทดลองพบว่า เมื่อปรับค่าความชื้นดินที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นปกติที่เหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงเฉือนจะสูงกว่าการปรับค่าที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นปกติที่เหมาะสม) เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไปตัวอย่างทดสอบ กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลง แต่เมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกรีตเข้ามาพบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมหินบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

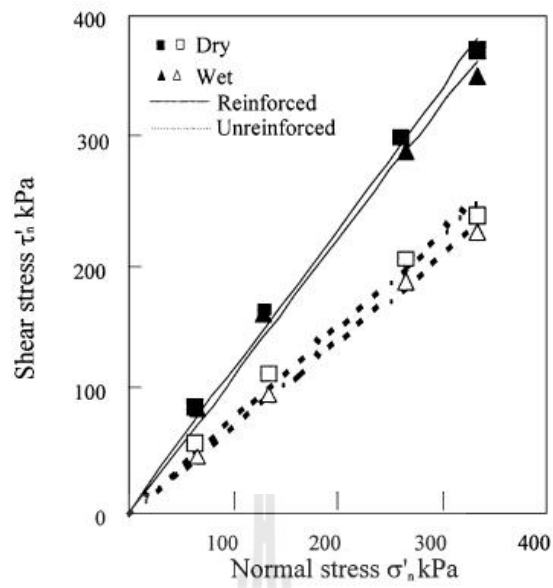
(Touahamia et al. 2002)

ผลการทดสอบมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แต่เมื่อมีการเพิ่มดินเหนียวลงไปกำลังต้านทานแรงเฉือนลดลง และเมื่อมีการเสริมวัสดุจีโอกรีตเข้ามาพบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกรีต และการบดอัดด้านเปียกยังมีค่าสูงกว่าการบดอัดด้านแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนผลการทดสอบมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารเมื่อบดอัดที่ความชื้นด้านแห้ง (ต่ำกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนใกล้เคียงกับการบดอัดที่ใช้ความชื้นด้านเปียก (สูงกว่าความชื้นบดอัดเหมาะสม) เช่นเดียวกับมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิล และเมื่อมีการการเสริมวัสดุจีโอกรีตเข้ามาพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการไม่เสริมจีโอกรีตและการบดอัดด้านเปียก และด้านแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงรูปที่ 2.5 ผลการทดสอบเศษมวลรวมจากของเสียจากเหมืองนั้น ได้ทำการทดสอบบดอัดเพียงด้านแห้งด้านเดียว พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างการเสริมจีโอกรีตและไม่เสริมจีโอกรีตมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงรูปที่ 2.6

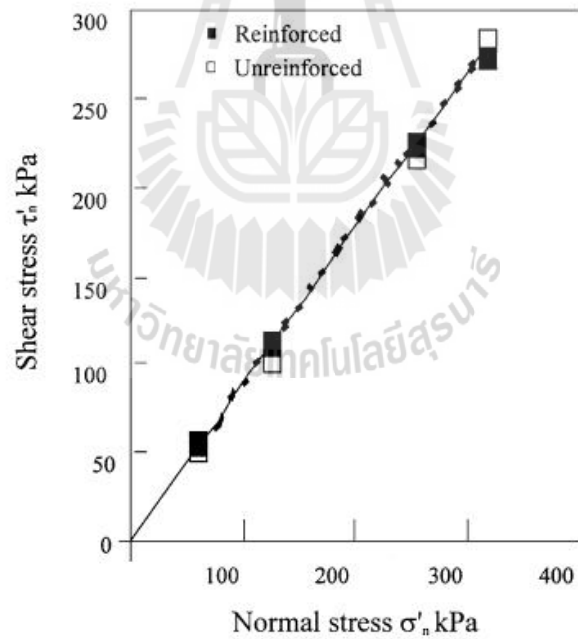


รูปที่ 2.4 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลตามเงื่อนไขต่างๆ (Touchamia et al. 2002)

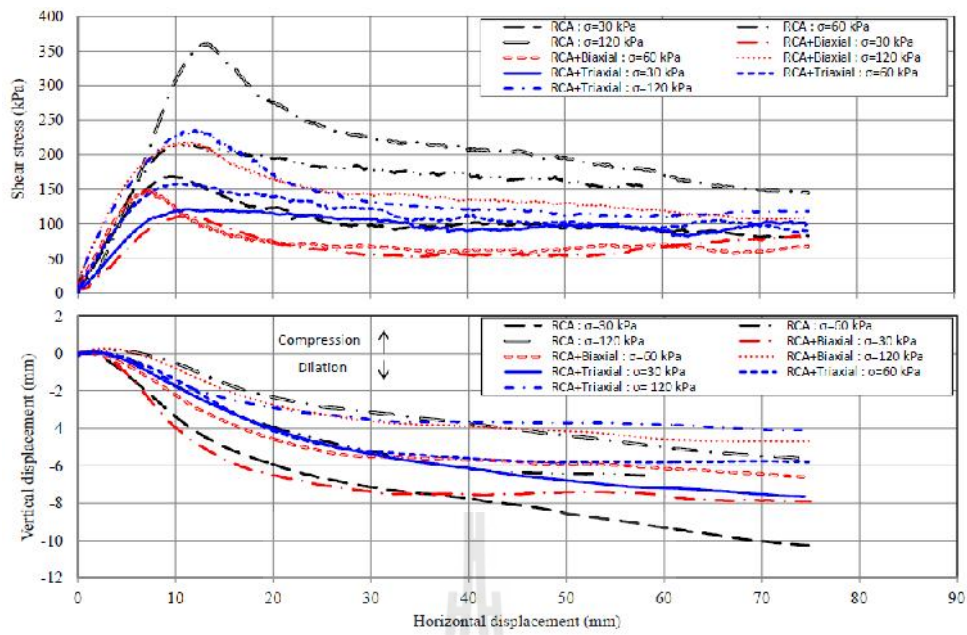
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับการเคลื่อนตัวตามแนวเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลกับจีโอกรีต ความสัมพันธ์ความระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากของผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA, CB และ RAP) และจีโอกรีต แสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่ามุมเสียดทานภายในมีค่าสูงเกินกว่า 37 องศา ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมการทาง (Arulrajah et al. 2013b)



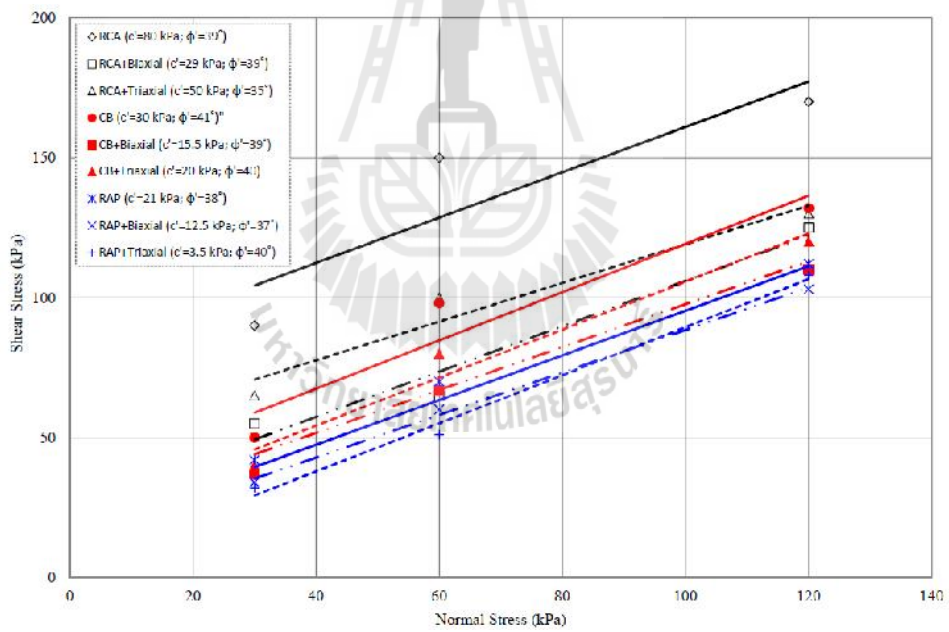
รูปที่ 2.5 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมจากการรื้อถอนอาคารตามเงื่อนไขต่างๆ (Touhamia et al. 2002)



รูปที่ 2.6 กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบด้วยมวลรวมของเสียจากเหมืองตามเงื่อนไขต่างๆ (Touhamia et al. 2002)

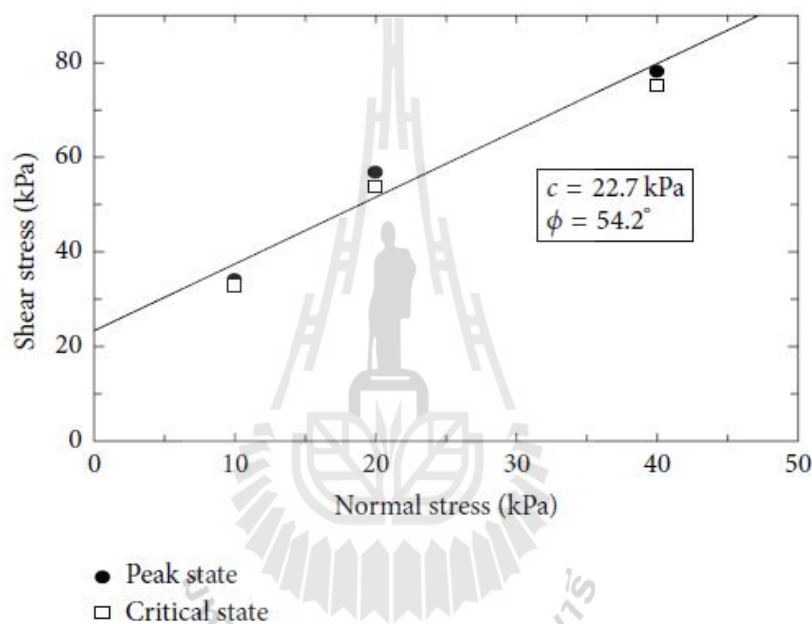


รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการเฉือนของอิฐย่อย (Arulrajah et al. 2013b)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตามระนาบของจีโอกริตกับมวลรวมรีไซเคิล (Arulrajah et al. 2013b)

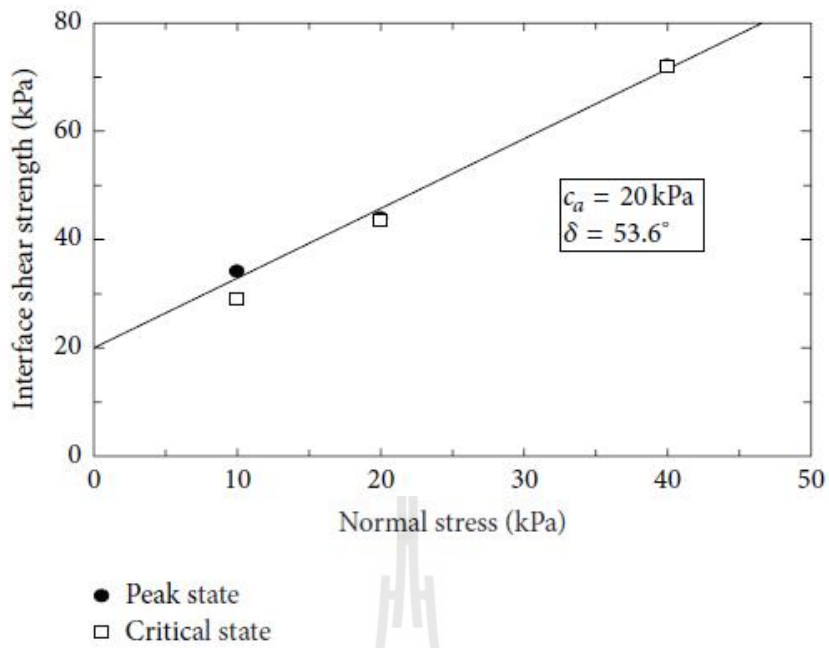
Arulrajah et al. (2015) ได้ศึกษาการปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมแก้วมวลเบา ไรโซเคลิลและจีโอกรีตแบบสามแกนด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ ซึ่งโพนแก้ว ที่นำมาทดสอบผลิตมาจากตะกอนน้ำเสียในเขตเมืองเมลเบิร์น ประเทศออสเตรเลีย ผลการทดสอบพบว่ามวลรวมแก้วมวลเบาไรโซเคลิลมีหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 22.7 กิโลปาสคาล และมีมุมเสียดทานภายใน 54.2 องศา ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนกรวดแน่นเพื่อ เป็นวัสดุถมกลับหลังกำแพงกันดินเสริมกำลังตามมาตรฐาน AASHTO พารามิเตอร์กำลังเฉือน ร่วมของมวลรวมแก้วมวลเบาไรโซเคลิลเสริมจีโอกรีตประกอบด้วยหน่วยแรงยึดเกาะเท่ากับ 20 กิโลปาสคาล และมุมเสียดทานระหว่างมวลรวมและจีโอกรีตเท่ากับ 53.6 องศา ดังรูปที่ 2.10



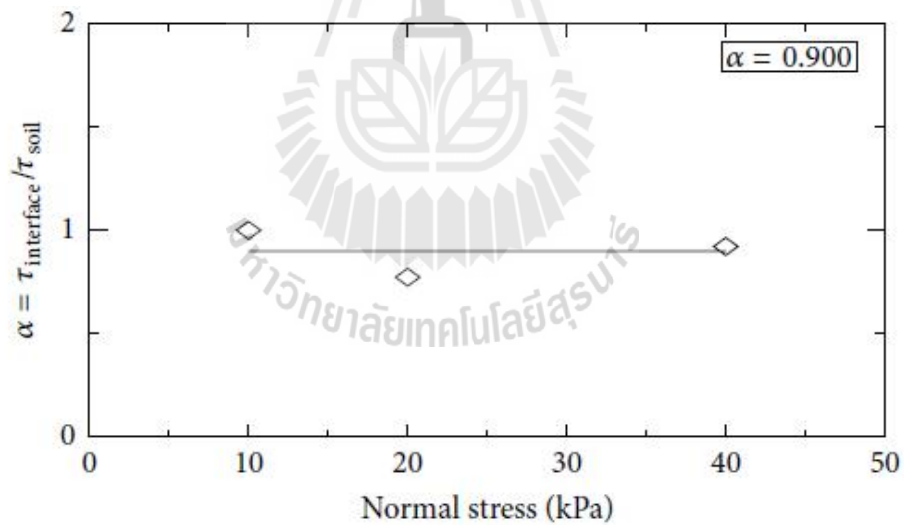
รูปที่ 2.9 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบาไรโซเคลิลไม่เสริมจีโอกรีต

(Arulrajah et al. 2015)

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของโพนแก้วเสริมกำลังมีค่า 0.90 ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีค่า สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เช่น มวลรวมผิวทางเสริมกำลัง ($\alpha = 0.88$) มวลรวมอิฐบด เสริมกำลัง ($\alpha = 0.79$) และมวลรวมคอนกรีตไรโซเคลิลเสริมกำลัง ($\alpha = 0.71$) เป็นต้น



รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงเฉือนของมวลรวมแก้วมวลเบาไร้เซลลูโลสเสริมจีไอกริด
(Arulrajah et al. 2015)



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

บทที่ 3

ผลการศึกษาและสรุปผลการศึกษา

3.1 บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งจากการรีไซเคิลอาคารและสิ่งปลูกสร้าง เช่น เศษคอนกรีต เศษอิฐ หิน เหล็ก และไม้ เป็นต้น ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างไม่คุ้มค่า ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยจากประเทศที่พัฒนาแล้วแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทางและชั้นพื้นทาง แม้ว่าจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต่ำกว่าวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ การประยุกต์ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก เสถียรภาพในชั้นทาง และความคงทนของถนน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งมีอยู่อย่างจำกัด (Zekkos et al. 2010; Arulrajah et al., 2012a) แม้ว่าจะเป็นเรื่องที่ทำหายและมีคุณค่าทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

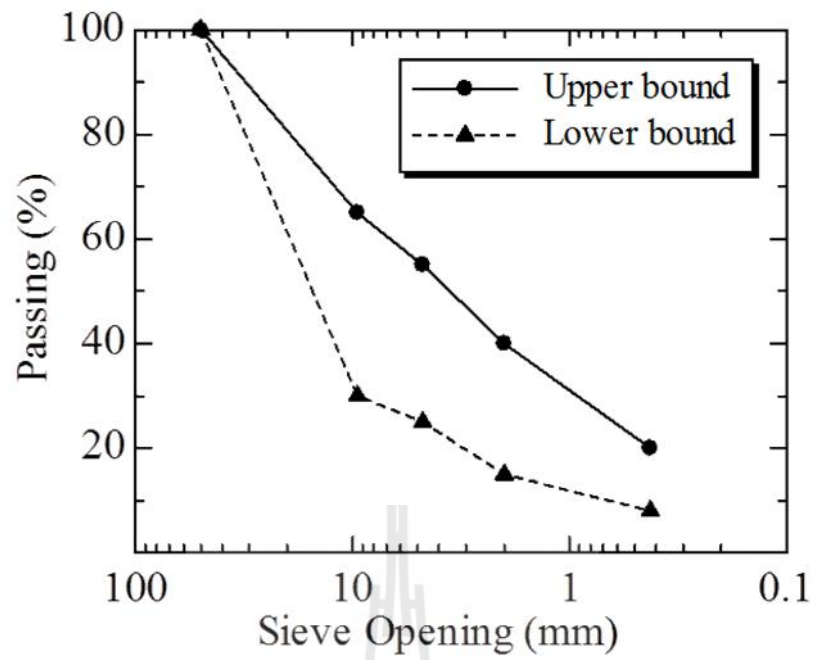
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของจีโอกริดและคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด (Geogrid) มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษามีการกระจายขนาดคละแตกต่างกัน 2 แบบ และจีโอกริดมีขนาดช่องเปิดแตกต่างกัน 3 ขนาด คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้รับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ ชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test) ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมและจีโอกริด ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงได้ถูกวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริดต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกริด) ในพจน์ของคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและคุณสมบัติของจีโอกริด

3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

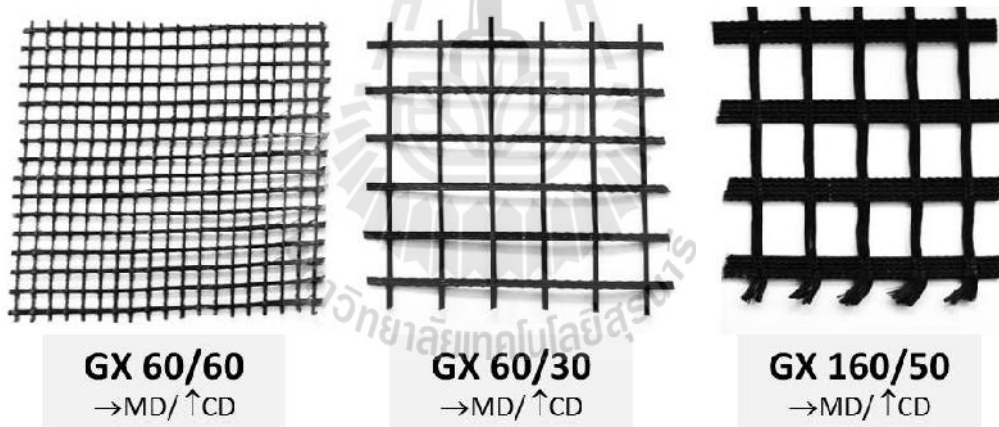
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

มวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่ใช้ในการศึกษาได้จากการบดคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากสำนักโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา แล้วนำมาคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 (2007) และปรับปรุงให้มีการกระจายขนาดคละ 2 แบบ คือ 1) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตบนของมาตรฐานของกรมทางหลวง และ 2) การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 201/2544) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อได้ตัวอย่างมวลรวมที่มีการกระจายขนาดคละที่ต้องการแล้ว ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 (2012) ทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Loss Angeles abrasion ตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) ทดสอบการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified Proctor energy) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($X_{d,max}$) และปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC)

จีโอกริดที่ใช้ในงานวิจัยมีทั้งหมด 3 รุ่น ได้แก่ 1) Miragrid GX60/60 2) Miragrid GX60/30 และ 3) Miragrid GX160/50 โดยทั้ง 3 รุ่นมีขนาดช่องเปิดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอกริดแสดงดังตารางที่ 3.1 การทดสอบแรงเฉือนตรงของวัสดุมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิล และการทดสอบปฏิริยาร่วมเนื้อระหว่างมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลและจีโอกริด ดำเนินการโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D5321 (2008) การทดสอบทั้งหมดดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 3.2 จีโกริด รุ่น Miragrid GX60/60 Miragrid GX60/30 และ Miragrid GX160/50

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโกริด

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	-

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

Parameter	Recycled concrete aggregate sample	
	Lower bound	Upper bound
Bulk specific gravity	2.65	2.67
D_{10} (mm)	0.75	0.15
D_{30} (mm)	9.5	1.0
D_{60} (mm)	20.0	6.5
C_u	26.7	43.3
C_c	6.0	1.0
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

คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแสดงดังตารางที่ 3.2 ตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 17 มิลลิเมตร และถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันไม่ดี (GP) ตามระบบเอกภาพ (USCS)

ตัวอย่างมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 6.07 และการสึกหรอ (LA) เท่ากับร้อยละ 36.4 ซึ่งไม่เกินกว่าร้อยละ 40 ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ถูกบดอัดภายใต้พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน) มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 20.1 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 11.9 ซีปียาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 122.35 ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง สำหรับวัสดุพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

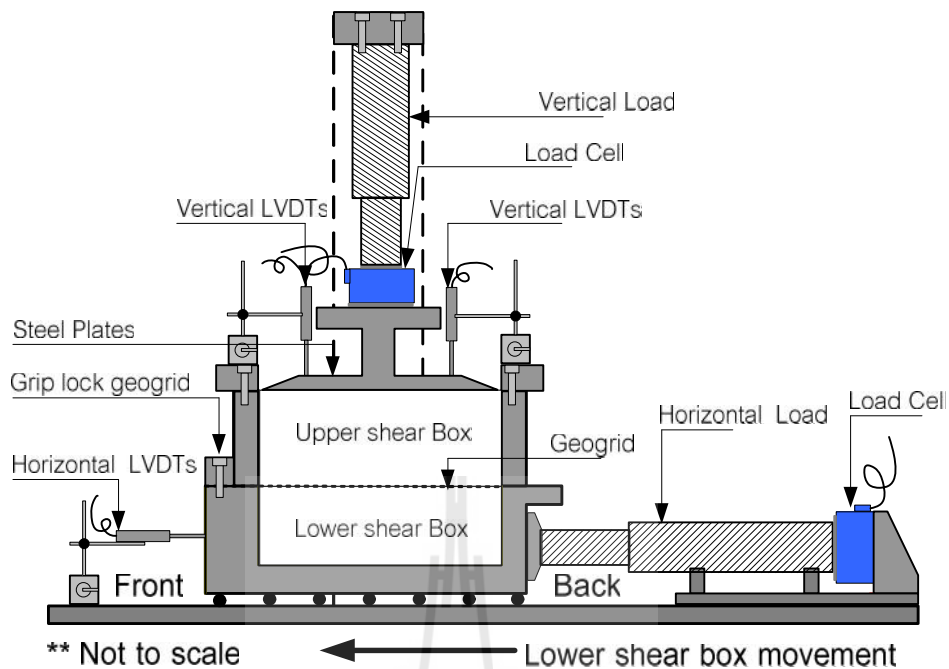
ตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดผลึกที่ขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร และถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันดี (GW) ตามระบบเอกภาพ (USCS) ตัวอย่างมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 7.02 ค่าการสึกหรอ (LA) และเท่ากับร้อยละ 38.6 ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่บดอัดภายใต้พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 22.4 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 12.5 และมีค่าซีปียาร์เท่ากับร้อยละ 116.3 ผลทดสอบหาค่าการสึกหรอและซีปียาร์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดผลึกระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุพื้นทางสำหรับงานก่อสร้างถนนในประเทศไทย

3.2.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

(ปราศจากการเสริมจีโอกริด) และการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือน

ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด

การทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกริด) และการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด ดำเนินการด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) ซึ่งประกอบด้วยกล่องแรงเฉือน (shear boxes) จำนวนสองกล่องคือ กล่องด้านบน (upper shear box) และกล่องด้านล่าง (lower shear box) โดยแต่ละกล่องมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความลึก เท่ากับ 305 x 305 x 204 มิลลิเมตร กล่องด้านบนถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่ขณะทดสอบ ขณะที่ กล่องด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางการให้แรงเฉือน สำหรับการทดสอบปฏิริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด จีโอกริดถูกติดตั้งบริเวณรอยต่อระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่างโดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับกล่องด้านล่าง ดังรูปที่ 3.3



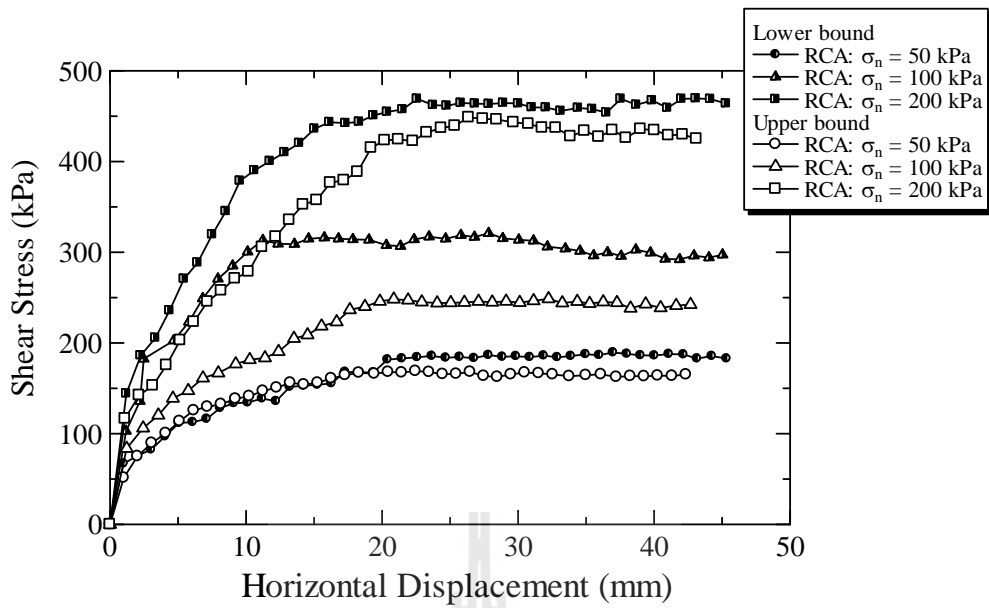
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงชุดทดสอบปฏิกริยาร่วมเนื้อระหว่าง
มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริด

ระหว่างการเตรียมตัวอย่าง กล่องด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดไว้ด้วยกัน มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกบดอัดภายในกล่องแรงเหวี่ยงที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดภายใต้พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลบดอัดถูกแช่น้ำโดยให้กล่องด้านล่างจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมดและระดับน้ำอยู่ที่กึ่งกลางของความลึกของกล่องด้านบนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากับ 50 100 และ 200 กิโลปาสคาล หลังจากนั้นประกอบกล่องแรงเหวี่ยงเข้ากับอุปกรณ์และแรงแนวตั้ง ก่อนการทดสอบทำการปล่อยตัวยึดระหว่างกล่องด้านบนและกล่องด้านล่าง และปรับให้กล่องด้านบนและกล่องด้านล่างห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างกล่องทั้งสอง อัตราเร็วการเหวี่ยงเท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่ออนาที ระหว่างทดสอบ ผู้วิจัยบันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง การเคลื่อนตัวในแนวราบ และค่าแรงเหวี่ยง จนการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ อุณหภูมิขณะทดสอบถูกควบคุมให้คงที่ประมาณ 20 ± 1 องศาเซลเซียส

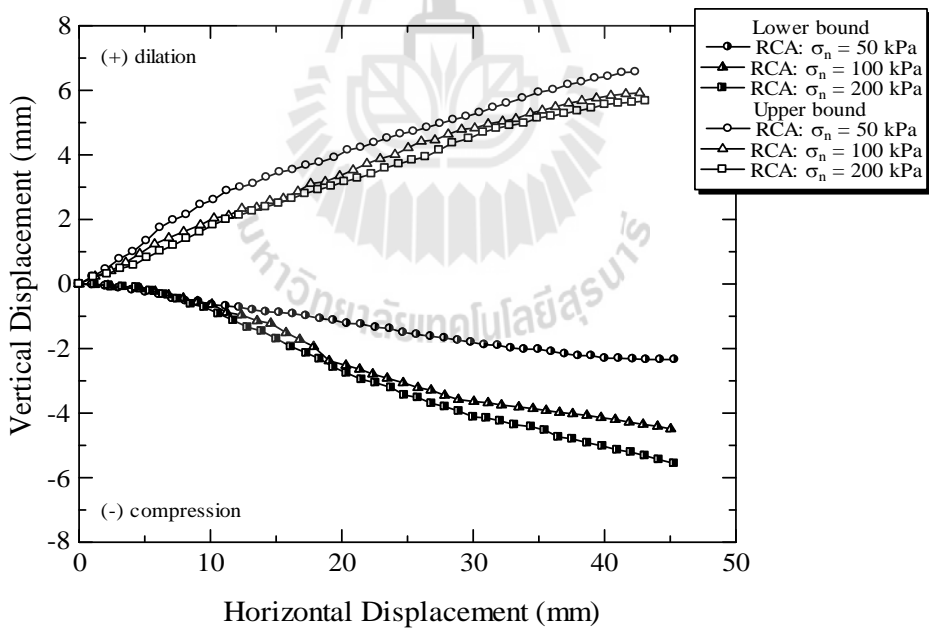
3.3 ผลการทดสอบ

3.3.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

ผลทดสอบแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงด้วยชุดทดสอบความเค้นเฉือนขนาดใหญ่ (Large scale direct shear apparatus) แสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength, τ_{max}) มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้น ความเค้นเฉือนมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบ (ประมาณ 45 มิลลิเมตร) ความเค้นเฉือนสูงสุดและความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นตั้งฉาก รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ ตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการอัดตัว (Compression) โดยการอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบ สำหรับทุกค่าความเค้นตั้งฉาก การอัดตัวสูงสุด (สิ้นสุดการทดสอบ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นตั้งฉากสูงขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุหลวม (Loose material) มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างจัดเป็นกรวดที่คละกันไม่ดี (GP) จึงมีความสามารถในการบดอัดต่ำ และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่ำกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน (ซึ่งถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันดี (GW)) แม้ว่าตัวอย่างมวลรวมทั้งสองจะมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้เอง ตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างจึงมีช่องว่างเหลืออยู่จำนวนมากหลังจากการบดอัด และเมื่อถูกเฉือน อนุภาคที่มีขนาดเล็กจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง และขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง และขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

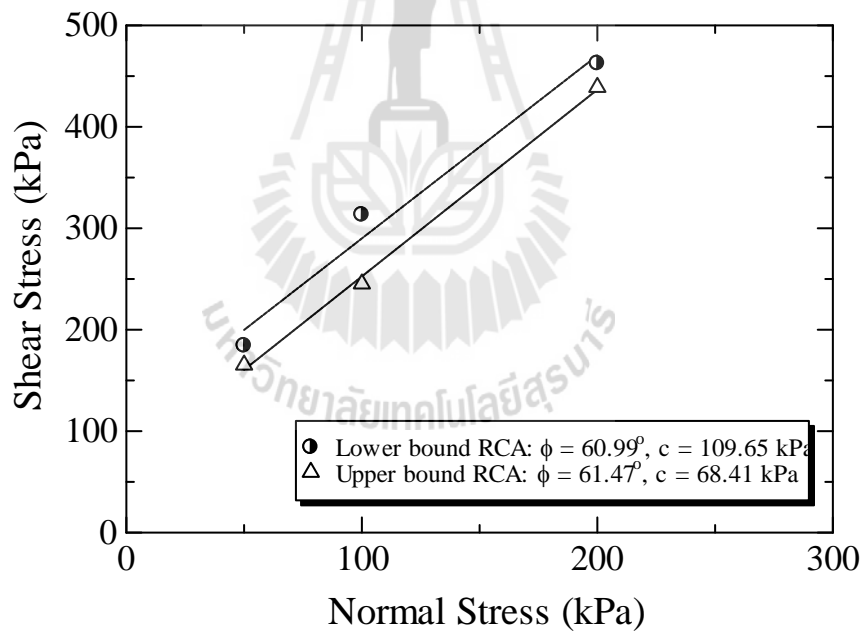
รูปที่ 3.4 ยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength, τ_{max}) ที่ค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบประมาณ 45 มิลลิเมตร ความเค้นเฉือนสูงสุดและความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นความเค้นตั้งฉาก เช่นเดียวกับผลทดสอบของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง อย่างไรก็ตาม มวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนแสดงพฤติกรรมการขยายตัว (Dilation) อย่างสมบูรณ์ในทุกความเค้นตั้งฉาก (รูปที่ 3.5) ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุแน่น (Dense material) ผลการทดสอบดังกล่าวแตกต่างจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนถูกจำแนกเป็นกรวดที่คละกันดี (GW) มีความสามารถในการบดอัดได้ดีกว่าทำให้ช่องว่างในตัวอย่างมีน้อย เมื่อตัวอย่างถูกเฉือนจึงเกิดการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกัน ทำให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว โดยปกติพฤติกรรมการขยายตัวนี้สัมพันธ์กับพฤติกรรมการลดลงของความเค้นเฉือนเนื่องจากความเครียด (Strain-softening) และค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณที่มีอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด (Maximum dilatancy ratio) ซึ่งเป็นค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ อย่างไรก็ตาม ผลทดสอบในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวอย่างไม่แสดงพฤติกรรมการลดลงของความเค้นเฉือนเนื่องจากความเครียด (Strain-softening) หลังจากเกิดอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคของมวลรวมที่เกิดจากการแตกหักขณะทำการเฉือนตัวอย่าง โดยที่มวลรวมที่เกิดจากการแตกหักที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างในตัวอย่างทดสอบ ทำให้ยังมีความสามารถในการรับความเค้นเฉือนได้ (Arulrajah et al. 2014a; Arulrajah et al. 2014b; Arulrajah et al. 2014c) ผลทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุด (Maximum dilatancy ratio) มีแนวโน้มลงเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากัน ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง (D_{50} สูง) มีค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตริโซเคลิที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน แม้จะมีความหนาแน่นแห้งต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim and Ha (2014) เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือน (Shear strength parameter) ซึ่งประกอบด้วยค่าหน่วยแรงยึดเกาะ (Cohesion) และมุมเสียดทานภายใน (internal friction angle) ตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb failure criterion) ที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าค่ามุมเสียดทานภายในที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak internal friction angle) ของมวลรวมทั้งสองการกระจายขนาดคละมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าขนาดคละที่อยู่ภายในขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวงไม่มีผลต่อมุมเสียดทานภายในของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิ ส่วนค่าหน่วยแรงยึดเกาะของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างให้ค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตริโซเคลิที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน ค่าหน่วยแรงยึดเกาะของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิมีค่าสูงกว่ามวลรวมโดยทั่วไป เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมในระหว่างการเตรียมตัวอย่าง (Touhamia et al. 2002; Piratheepan et al. 2013; Arulrajah et al. 2014)

ตารางที่ 3.3 กำลังต้านทานแรงเฉือน กำลังรวมเฉือน และอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดของมวลรวมคอนกรีตริโซเคลิเสริมจีโอกริดและปราศจากการเสริมจีโอกริด

RCA sample	Geogrid	Normal stress (kPa)	Shear strength, τ (kPa) or 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	

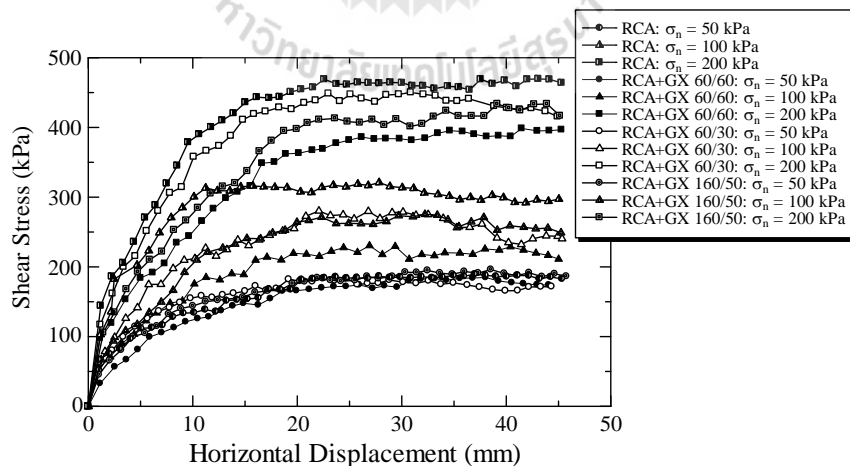
RCA sample	Geogrid	Normal stress (kPa)	Shear strength, τ (kPa) or Interface shear strength, $\tau_{\text{interface}}$ (kPa)	Maximum dilatancy ratio (degree)
Upper bound	-	50	165.28	10.13
		100	245.31	10.52
		200	439.06	8.54
	GX 60/60	50	102.63	11.69
		100	206.97	10.89
		200	342.34	9.64
	GX 60/30	50	128.28	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



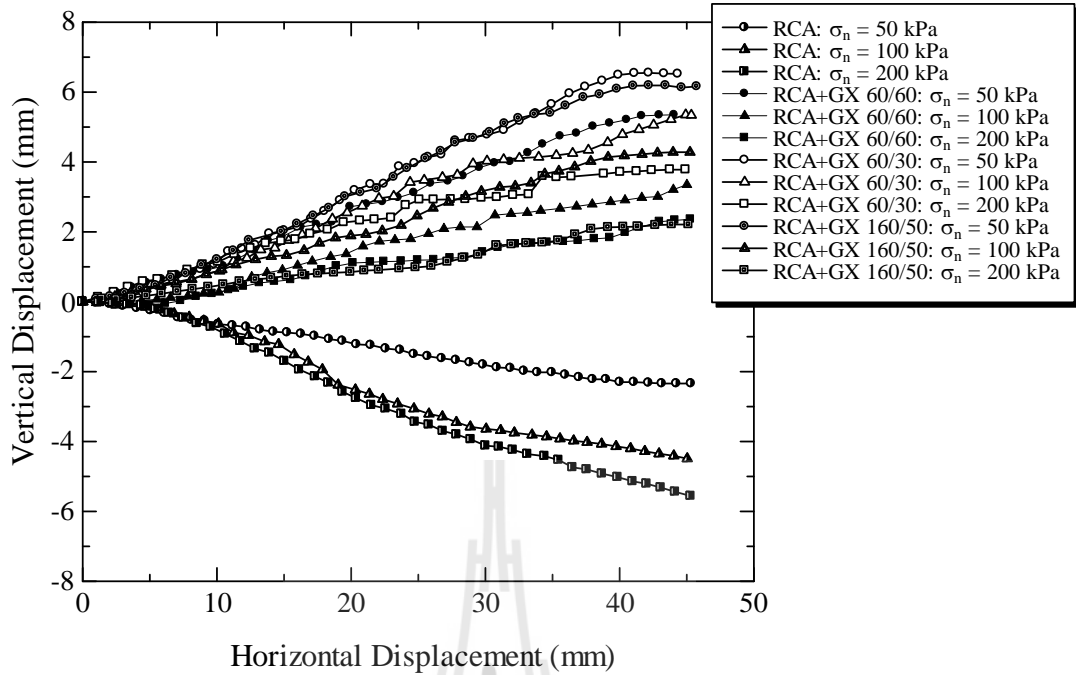
รูปที่ 3.6 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง

3.3.2 ปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต

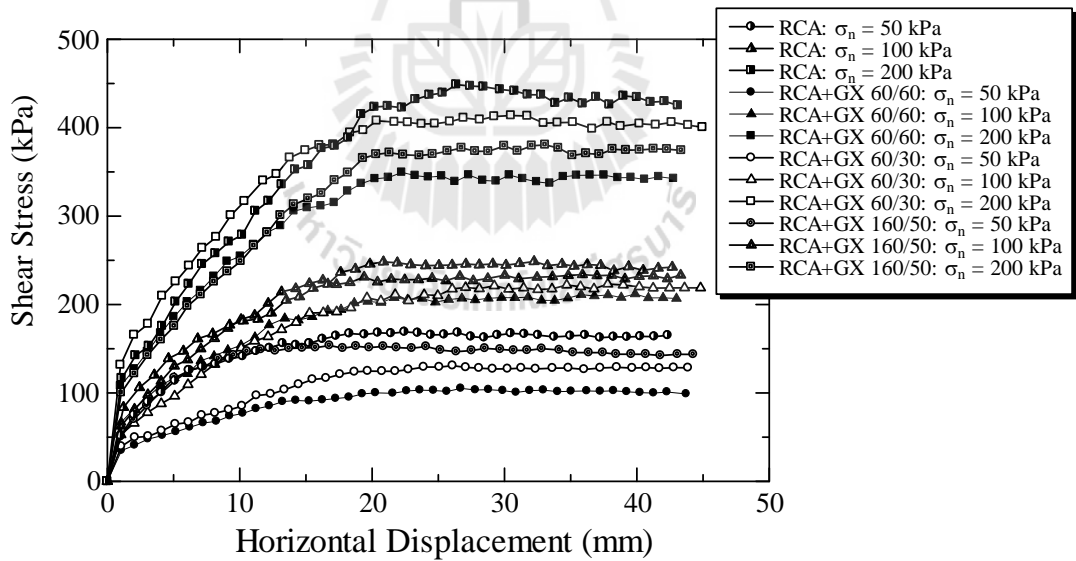
ผลทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต เปรียบเทียบกับผลทดสอบแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกรีต) ของตัวอย่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานกรมทางหลวง แสดงดังรูปที่ 3.7 ถึง รูปที่ 3.10 สำหรับการเสริมจีโอกรีตขนาดเดียวกัน ทุกความเค้นตั้งฉากและการกระจายขนาดคละ ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุด จนกระทั่งการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นความเค้นเฉือนมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบที่การเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าประมาณ 45 มิลลิเมตร และเมื่อความเค้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น ความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับพฤติกรรมรับแรงเฉือนตรงของมวลรวมคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบ แสดงให้เห็นว่า ในทุกการทดสอบ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตมีพฤติกรรมการขยายตัว (Dilation) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตปราศจากจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบเป็นแบบอัดตัว (Compression) ในทุกความเค้นตั้งฉาก พฤติกรรมการขยายตัวในลักษณะนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตสำหรับการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบและจีโอกรีต (Arulrajah et al. 2013 และ Arulrajah et al. 2015) ซึ่งมีสาเหตุจากการขัดกันระหว่างจีโอกรีตและอนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีต



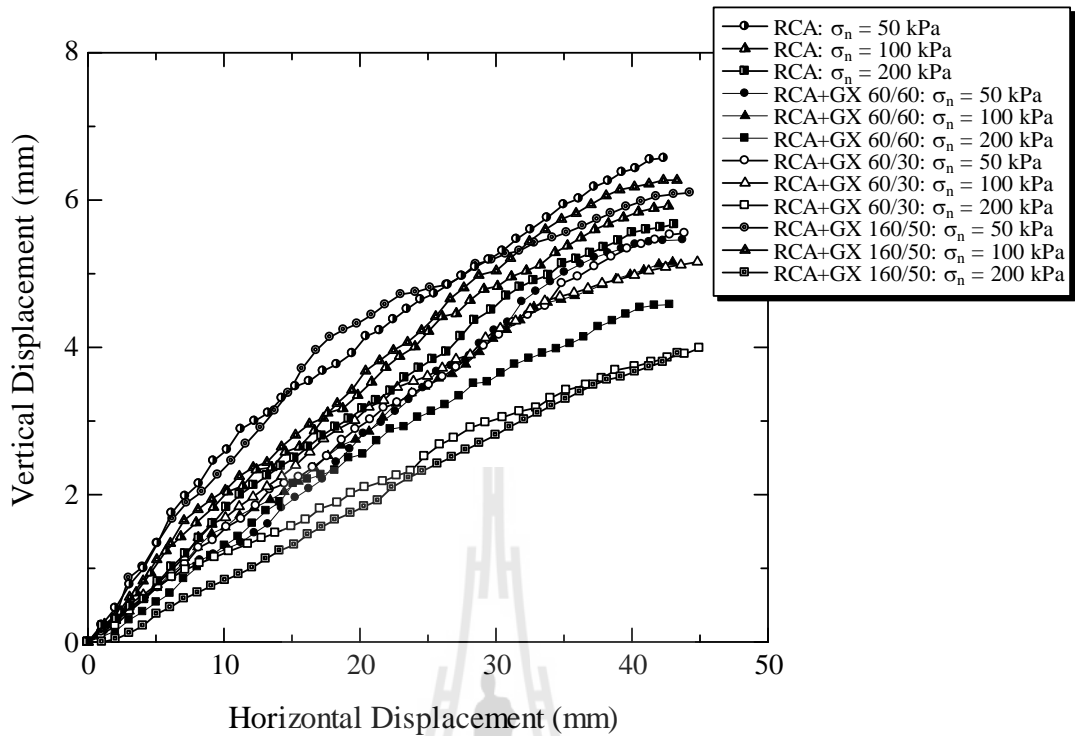
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวราบของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน

พิจารณาที่ความเค้นตั้งฉากค่าเดียวกัน ความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear stress) ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกรีต) มีค่าสูงกว่าความเค้นเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (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) พารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength parameters) ของวัสดุมวลรวมซึ่งถูกเสริมด้วยจีโอกรีตที่ทดสอบโดยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงจะมีค่าต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมรีไซเคิล เนื่องจากการลดลงของการขัดกัน (Interlocking) ระหว่างอนุภาควัสดุมวลรวมจากการเสริมจีโอกรีตบริเวณรอยต่อของกล่องทดสอบ ซึ่งเป็นระนาบเฉือน (Shear plane)

ตารางที่ 3.4 แสดงอิทธิพลของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตต่อกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต ขนาดช่องเปิดที่ใหญ่ขึ้นจะช่วยเพิ่มกำลังเฉือนร่วมระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ดังจะเห็นได้จากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกันมีกำลังเฉือนร่วมสูงขึ้น การใช้จีโอกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้ปริมาณอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น

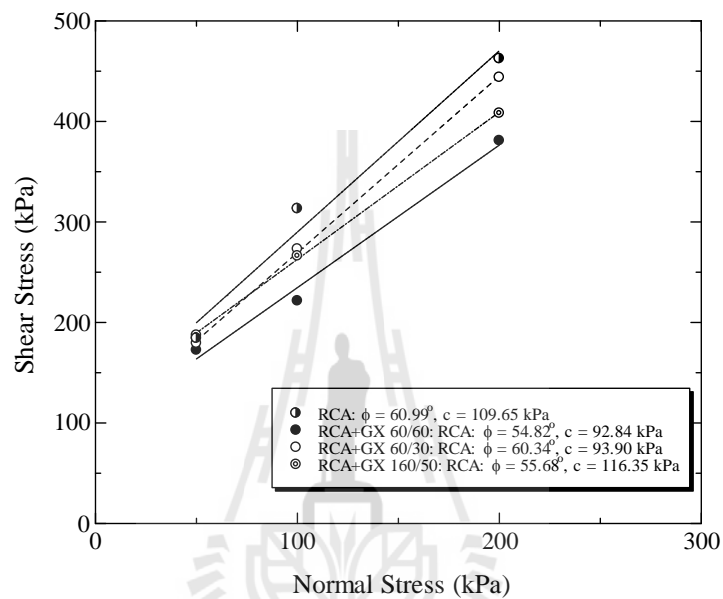
จึงมีโอกาสเกิดการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงและอนุภาคมวลรวมกับจีโอกริตบริเวณระนาบเฉือน (Shear plane) เพิ่มมากขึ้น โดยที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกริตนี้เมื่อถูกต้านทานการเคลื่อนที่โดยจีโอกริต อนุภาคของมวลรวมที่อยู่ข้างเคียงเคลื่อนที่ไปรอบกันโดยไม่เกิดการไหลไปบนจีโอกริต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arulrajah et al. 2015 ที่ได้อธิบายว่าการเสริมจีโอกริตที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่กว่าขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้นสามารถให้กำลังร่วมเฉือนได้สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริตชนิดเดียวกันแต่มีมวลรวมมีการกระจายขนาดคละแตกต่างกัน พบว่าสำหรับทุกความดันตั้งฉาก มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างจะมีกำลังร่วมเฉือนสูงกว่า เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่มากกว่า ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับผลทดสอบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (ปราศจากการเสริมจีโอกริต)

พารามิเตอร์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength parameter) ระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกริต ตามเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure criterion) แสดงดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันถูกเสริมด้วยจีโอกริตชนิดเดียวกัน มีค่ามุมเสียดทานระหว่างดินและจีโอกริต (Interface friction angle) ใกล้เคียงกัน แต่ค่าหน่วยแรงยึดเกาะ (Adhesion) ของมวลรวมคอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างของมาตรฐานกรมทางหลวงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกริต

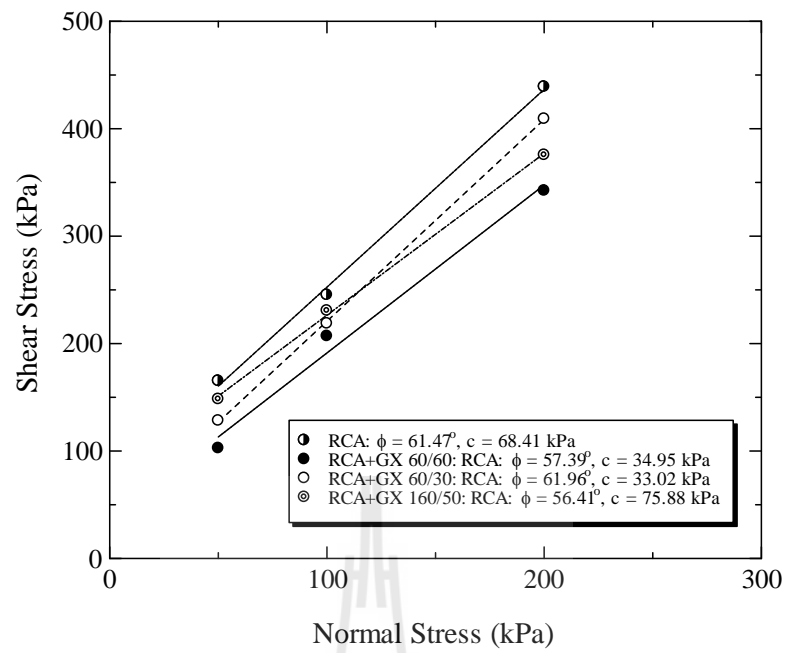
มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึง (Tensile strength) ต่ำซึ่งสามารถวิบัติด้วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจราจร (Traffic load) เมื่อมวลรวมนี้ถูกเสริมด้วยจีโอกริตลักษณะการวิบัติ (Mode of failure) มวลรวมหยาบรีไซเคิลเสริมจีโอกริตอาจวิบัติได้ในสองลักษณะ ได้แก่ การฉีกขาดจากแรงดึง (Tensile rupture failure) ของจีโอกริต และการลื่นไถล (Slip failure) ของมวลรวมรีไซเคิลบนจีโอกริต ทั้งนี้การฉีกขาดจากแรงดึง (Tensile stress) เกิดเมื่อแรงดึงที่เกิดขึ้นในจีโอกริตมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของจีโอกริต รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของจีโอกริตหลังการทดสอบปฏิกริยาร่วมเฉือน จีโอกริตยังคงมีสภาพเดิมไม่เกิดการเสียรูป ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าลักษณะการวิบัติระหว่างมวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกริตเป็นแบบลื่นไถล กำลังร่วมเฉือนระหว่างจีโอกริตและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสามารถอธิบายในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน (Interface shear strength coefficient, α) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$r = \frac{\tau_{i \text{ interface}}}{\tau_f} \quad (3.1)$$

เมื่อ $\tau_{\text{interface}}$ คือกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต และ τ_f คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล รูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงให้เห็นว่า สำหรับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละเดียวกัน และขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตค่าหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนมีค่าประมาณคงที่ แม้ว่าความเค้นกดทับจะมีค่าเพิ่มขึ้น



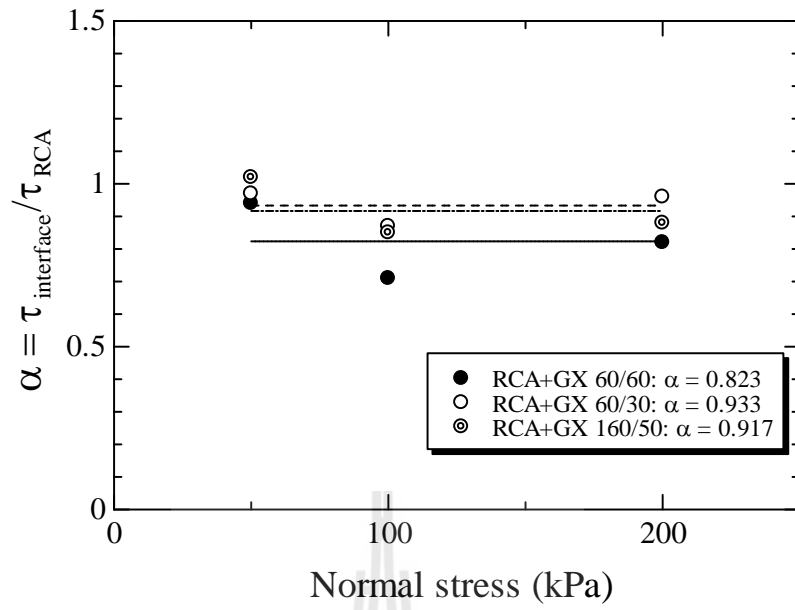
รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่าง



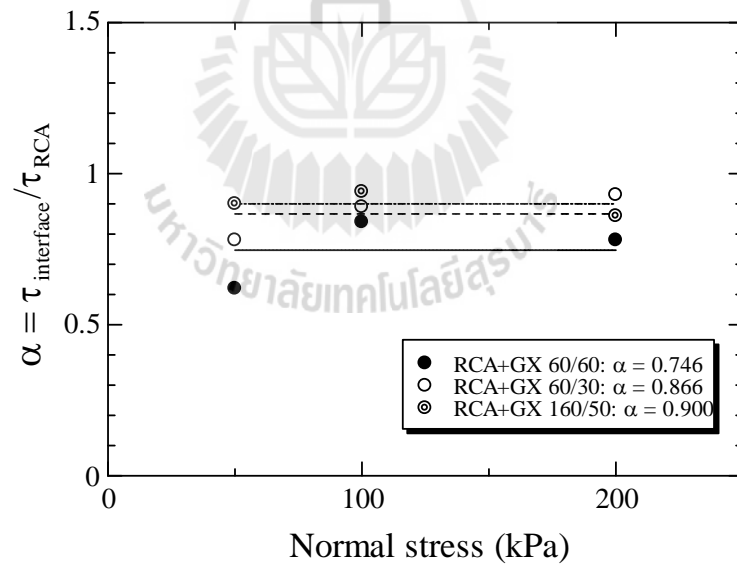
รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์กำลังต้านทานความเค้นเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอก
 ริดที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตบน



รูปที่ 3.13 ลักษณะของจีโอกริดหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวตั้งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโกรีตที่มีการกระจายขนาดผละที่ขอบเขตล่าง



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและความเค้นแนวตั้งของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโกรีตที่มีการกระจายขนาดผละที่ขอบเขตบน

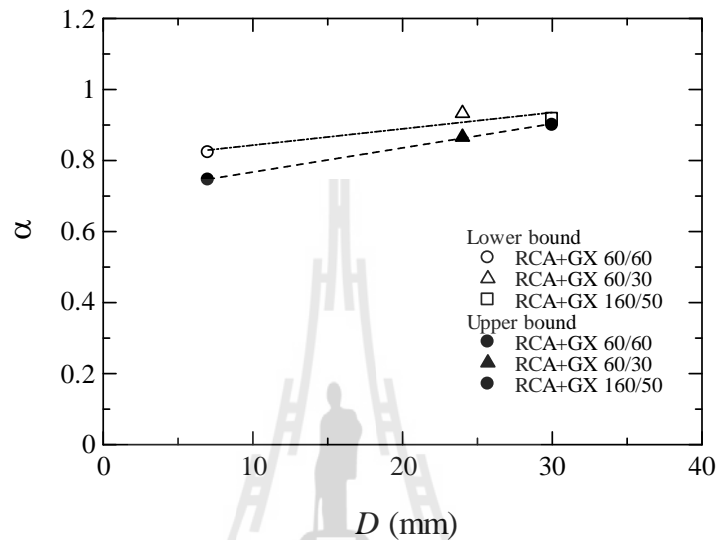
ตารางที่ 3.4 สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต

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

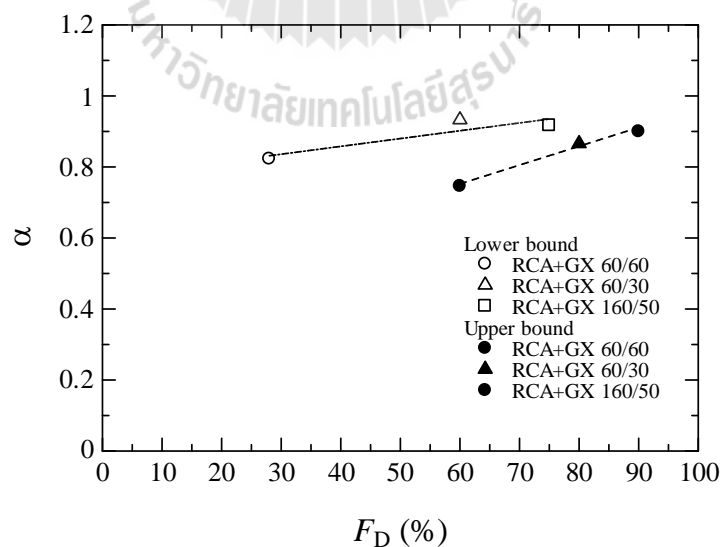
ตารางที่ 3.4 รูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสำหรับการกระจายขนาดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลค่าหนึ่ง เมื่อช่องเปิดของจีโอกรีตมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้กำลังร่วมเนียนและสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนมีค่าสูงขึ้น ที่ขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตค่าหนึ่ง การกระจายขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียน โดยที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละที่ขอบเขตล่างให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนที่สูงกว่า เนื่องจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเนียนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีตต่อร้อยละของอนุภาคมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีต (รูปที่ 3.18) ดังสมการที่ (3.2)

$$r = 0.648 \frac{D}{F_D} + 0.67 \quad (3.2)$$

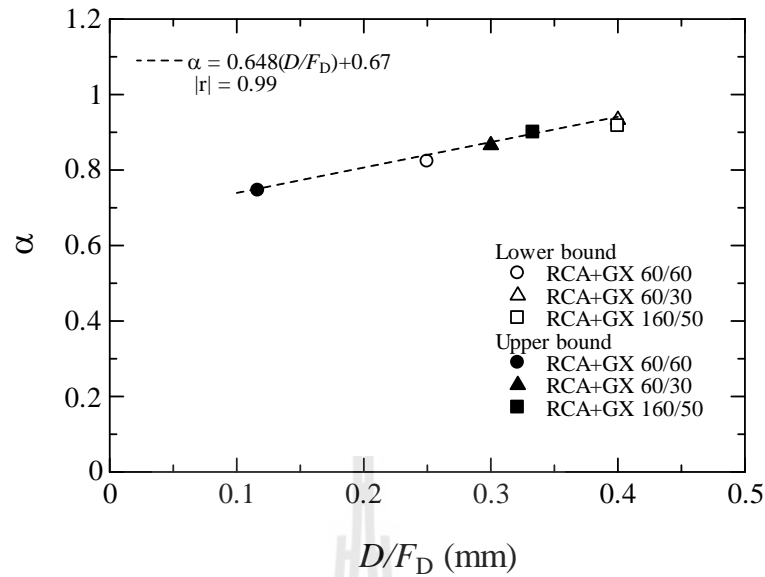
เมื่อ D คือด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีต มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และ F_D คือ ร้อยละของอนุภาคมวลรวมคอนกรีตตรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กกว่าด้านที่ยาวที่สุดของช่องเปิดของจีโอกรีต ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีประโยชน์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต สำหรับมวลรวมคอนกรีตตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดคละภายในขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐานกรมทางหลวง



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือนและอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดและปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของจีโอกรีตของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีต

3.4 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนและซีปียาร์ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และศึกษาปฏิกริยาร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต และขนาดคละ และกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จีโอกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันสามขนาดได้แก่ รุ่น Miragrid GX 60/60 Miragrid 60/30 และ Miragrid 160/50 และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันสองแบบ ได้แก่ การกระจายขนาดคละตามขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง การทดสอบแรงเฉือนตรงกระทำด้วยชุดทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-Scale Direct Shear Test Apparatus) ทำยสุด สมการทำนายกำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีต ได้ถูกนำเสนอในพจน์ของขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต ขนาดของอนุภาคมวลรวมรีไซเคิล และกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและซีปอาร์ของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล แสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดละเอียดบนขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มีคุณสมบัติที่ดีสามารถใช้เป็นวัสดุพื้นพื้นที่ทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนนในประเทศไทย และผลทดสอบแรงเฉือนตรงแสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการกระจายขนาดละเอียดที่ขอบเขตล่างตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่ามวลรวมที่มีการกระจายขนาดละเอียดที่ขอบเขตบน แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมหยาบรีไซเคิล
2. กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีตมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีต เนื่องจากการลดลงของการขัดกัน (interlocking) ระหว่างอนุภาคของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในบริเวณที่มีการเสริมจีโอกรีต ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดหน้าตัดเฉือน (shear plane) สำหรับมวลรวมที่มีการกระจายขนาดละเอียดเดียวกัน เมื่อขนาดช่องเปิดของจีโอกรีตมีขนาดใหญ่มากขึ้น กำลังร่วมเฉือนระหว่างมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและจีโอกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการขัดกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจีโอกรีตที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการเสริมจีโอกรีตขนาดเดียวกัน กำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ขอบเขตล่างมีค่าสูงกว่าขอบเขตบน เนื่องจากอิทธิพลของขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ที่มีขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับผลทดสอบกำลังต้านทานแรงของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีต
3. สัมประสิทธิ์กำลังร่วมเฉือน α ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตต่อมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปราศจากการเสริมจีโอกรีตสามารถใช้ทำนายกำลังร่วมเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเสริมจีโอกรีตเพียงต้องการกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ขนาดช่องเปิดของจีโอกรีต และการกระจายขนาดละเอียดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

เอกสารอ้างอิง

- 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.
- 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., 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. (2013a). "Geotechnical performance of recycled glass-waste rock blends in footpath bases". *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 25(5), 653-661.
- Arulrajah, A., Rahman, M. A., Piratheepan, J., Bo, M. W., and Imteaz, M. A. (2013b) "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), 1-12.

- Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghoolpilehrood, F., Samingthong, W., Du, Y.J., and Shen, S.L. (2015). "Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid Reinforced Foamed Recycled Glass Using a Large-Scale Direct Shear Testing Apparatus". *Advances in Materials Science and Engineering* doi: 10.1155/2015/235424.
- ASTM. (2007). "Standard test method for particle-size analysis of soils." *ASTM-D422-63*, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2012). "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate." *ASTM-C127-12*, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (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. (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.
- Cancelli, A., Cancelli, P., Recalcatti, P., and Rimoldi, P. (1997). "The use of geosynthetics to improve the bearing capacity of the foundation of road embankments". IGS International Conference Geosynthetics Asia '97, Bangalore, India.
- Courard, L., Michel, F., and Delhez, P. (2010). "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete". *Construction and Building Materials* 24, 390-395.
- Gomez-Soberon, JMV. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study". *International Journal of Cement and Concrete Research* 32, 1301-1311.
- Henry, K., Clapp, J., Davids, W., Humphrey, D., and Barna, L. (2009). "Structural improvements of flexible pavements using geosynthetics for base course reinforcement". *Report No. ERDC/CRREL TR-09-11*, U.S. Army Corps of Engineers in conjunction with U.S. Department of Transportation, Pooled Fund Program, Federal Highway Administration, McLean, VA.

- 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.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.
- McCartney, J.S., and Zornberg, J. G., and Swan, R. H. Jr. (2009). "Analysis of a large database of gcl–geomembrane interface shear strength results." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(2), 209–223.
- 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.
- 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. (1999). "Mechanical response of geosynthetic–reinforced flexible pavements". *Geosynthetics International* 6(5), 347–382.

- 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.
- 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.
- Sobol, E., Sas, W., and Szymanski, A. (2015). "Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate". *Studia Geotechnica et Mechanica* 37(2), 45–49.
- Tam, V.W.Y and Tam, C.M. (2007). "Crushed aggregates production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong". *Construction and Building Materials* 21, 879–86.
- Touahamia, M., Sivakumar, V., and McKelvey, D. (2002). "Shear strength of reinforced-recycled material." *Constr. Buil. Mater.*, 16(6), 331–339.
- 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.
- 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.

ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544



ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข เริ่มปฏิบัติงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2545 ต่อมาได้รับการแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 19 มีนาคม 2547 ได้รับการแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 18 เมษายน 2550 และได้มีพระบรมราชโองการโปรดเกล้าฯ ให้ดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ ในสาขาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 30 มีนาคม 2553 ในด้านงานบริหาร ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์วิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และกรรมการสภาวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ มีบทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูลสากล (ISI/SCOPUS) 152 เรื่อง รวมบทความวิจัยทั้งในระดับนานาชาติและระดับประเทศมากกว่า 350 เรื่อง มี H-index เท่ากับ 26 และมีผลงานประพันธ์หนังสือสามเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” “วิศวกรรมฐานราก” และ “เทคนิคการปรับปรุงพื้นดิน” และ Book Chapter 4 บท งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดิน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน คอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ และเทคนิคการปรับปรุงดิน ด้วยความโดดเด่นด้านงานวิจัยและวิชาการ ท่านได้รับรางวัล “เมธีวิจัยอาวุโส สกว” จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2556 และ 2559

ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข มีประสบการณ์การเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาาระดับบัณฑิตศึกษา และเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินผลงานวิจัยและหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ นอกจากนี้ ท่านมีประสบการณ์ในการให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมโยธาอย่างต่อเนื่อง และได้รับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับสามัญวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา จากสภาวิศวกร