

## พฤติกรรมการรับแรงเฉือนตรงของทรายผสมเศษยางรถยนต์

พูลพงษ์ พงษ์วิทยานุก\*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1826 0014 อีเมล: pulpong@eng.src.ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.005

รับเมื่อ 9 ธันวาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 27 ธันวาคม 2563 ตอรับเมื่อ 29 มกราคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 17 กันยายน 2564

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนตรงของทรายผสมเศษยางรถยนต์ โดยเป็นการทดสอบดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช ดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช ในสถานะความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่น ด้วยอัตราส่วนผสม 5, 15 และ 25% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นแห้งของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณส่วนผสมของเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงพบว่า กำลังรับแรงเฉือนและค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดินของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษยางรถยนต์เพิ่มมากขึ้น โดยมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนสุดท้าย และในส่วนผสมที่ดินทรายมีรูปร่างเม็ดดินลักษณะเป็นเม็ดเหลี่ยมและมีสภาพแน่น มีแนวโน้มในการลดลงของกำลังรับแรงเฉือน และมุมเสียดทานภายในมากกว่าดินทรายที่มีรูปร่างมนกลมในสภาพหลวม ในกรณีที่ความเค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีค่าสูงมากค่ากำลังรับแรงเฉือนสุดท้ายมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างดินสภาพแน่น และหากขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมในตัวอย่างดินทรายมีขนาดใหญ่ขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในสภาพหลวมมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินสภาพแน่นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของพฤติกรรมของความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ทั้งในสภาพหลวม และสภาพแน่นมีแนวโน้มในการหดตัวค่อนข้างมาก

**คำสำคัญ:** เศษยางรถยนต์ กำลังรับแรงเฉือนของดินทราย ค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน



## Direct Shear Behaviour of Sand-tyre Crumb Mixtures

Pulpong Pongvithayapanu\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University, Chon Buri, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 1826 0014, E-mail: pulpong@eng.src.ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.005  
Received 9 December 2020; Revised 27 December 2020; Accepted 29 January 2021; Published online: 17 September 2021  
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research studies the basic geotechnical properties, i.e. density and shear strength, of sand-tyre crumb mixtures. Silica and river sand were used as the soil sample mixed with tyre crumb at the sizes of 2 mesh and 20 mesh. A series of direct shear tests were conducted on both sands mixed with tyre crumb in loose and dense states with the percentages of 5, 15, and 25% by weight. Specific gravity and dry density of sand-tyre mixtures decrease when the percentage of tyre crumb increases. The results of direct shear test show that the higher the content of tyre crumbs in the mixture, the larger the reduction in the shear strength as well as shear strength parameter, i.e. angle of internal friction. The decline of those parameters is likely to dominate more on the mixtures of dense tyre crumbs and angular-shaped sand, i.e. river sand, than the loose tyre crumbs and the well round-shaped sand, i.e. Silica sand. The stress-strain characteristic of all testing for sand-tyre mixtures exhibits the ultimate shear strength behaviour. In case of very high stress, the ultimate shear strength of sand-tyre samples in a dense state obviously decreases with an additional amount of tyre crumb. The shear strength of a large-size tyre crumb in a loose state reduces whereas in a dense state increases. The volumetric strain of all sand-tyre mixtures in both states tends to significantly contract.

**Keywords:** Tyre Crumb, Shear Strength of Sand, Angle of Internal Friction

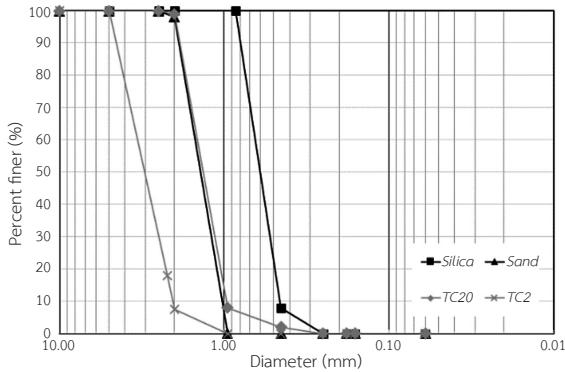
## 1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่ายางล้อรถยนต์กลายเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของเกือบทุกประเทศในโลกที่มีการใช้รถยนต์เพื่อการสัญจรในชีวิตประจำวัน ยางล้อรถยนต์โดยปกติแล้วเมื่อถูกใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่งนับตามอายุการใช้งาน หรือนับตามจำนวนระยะทางที่รถยนต์วิ่งไปบนท้องถนน ยางล้อรถยนต์ที่ใช้แล้วเหล่านี้ก็จะกลายเป็นของเหลือใช้หรือเศษขยะที่จำเป็นต้องมีการรีไซเคิลหรือนำเศษเหลือดังกล่าวไปแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในกิจกรรมด้านอื่นๆ ต่อไป จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม [1] ในข้อมูลการจำหน่ายยางรถยนต์ทุกประเภทประจำ พ.ศ. 2562 พบว่า การจำหน่ายรวมในประเทศมีจำนวนทั้งสิ้น 96.5 ล้านเส้น และส่งออกมีจำนวนทั้งสิ้น 78.1 ล้านเส้น ซึ่งจะพบว่า ในแต่ละปีมีจำนวนของเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้วจำนวนหลายสิบล้านเส้นซึ่งหากสามารถนำยางรถยนต์เหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุธรรมชาติได้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของวัสดุเหลือใช้ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการรีไซเคิลยางรถยนต์กลับเข้ามาสู่กระบวนการที่เป็นประโยชน์กับการดำรงชีวิตของมนุษย์ที่สำคัญได้ต่อไป แม้ว่าปัจจุบันการรีไซเคิลยางรถยนต์จะมีอยู่ในหลากหลายรูปแบบ เช่น การใช้กระบวนการทางกลและทางเคมีเพื่อนำกลับมาทำเป็นยางรถยนต์ใหม่ หรือผลิตภัณฑ์ทางเกษตรกรรม แต่กระบวนการเหล่านั้นอาจต้องอาศัยเทคโนโลยี และขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก และเป็นระยะเวลากว่า 40 ปี ในทางวิศวกรรมโยธาที่ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการนำเศษยางรถยนต์ (Tyre Chip/Scrap Tyre/Shredded Tyre/Tyre Crumb) ที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัสดุผสมในดิน ยางมะตอย และคอนกรีต เพื่อใช้ในงานถนน และงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาต่างๆ เช่น นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับหลังกำแพงกันดิน โดยยางล้อรถยนต์ที่ใช้แล้วจะถูกแปรสภาพโดยกระบวนการรีไซเคิลในโรงงานกลายเป็นเศษยางชิ้นเล็กๆ หลากหลายขนาด ซึ่งในบางกระบวนการอาจแปรสภาพกลายเป็นยางครัมบ์ (Tyre Crumb) หรือยางผง โดยเศษยางรถยนต์ที่ถูกแปรสภาพเป็นชิ้นเล็กๆ เหล่านี้สามารถนำมาใช้ผสมกับดินเพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มปริมาตรให้กับวัสดุถมกลับได้เป็นอย่างดี โดยมีงาน

วิจัยที่ได้ทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ามุมเสียดทานภายใน ค่าการเปลี่ยนรูป รวมถึงค่าการพองตัวของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่ขนาดแตกต่างกันครั้งนี้ [2] ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตัวอย่างดินทรายอยุธยา (ขนาด  $D_{10}$  เท่ากับ 0.27 มิลลิเมตร) ผสมกับเศษยางรถยนต์ (ขนาด  $D_{10}$  เท่ากับ 5.00 มิลลิเมตร) ด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำที่อัตราส่วนผสมเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์ตั้งแต่ 100 : 0 จนกระทั่ง 0 : 100 ตามลำดับพบว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันดินด้านข้าง และตัวอย่างดินที่มีส่วนผสมของดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือน และหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนตัว (Deformation) ของตัวอย่างดิน เนื่องจากแรงอัดแบบเท่ากันทุกทิศทางจะมีค่าลดลง นักวิจัยอีกหลายท่านได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของเศษยางรถยนต์ในดินทรายจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงตามเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้น [3]–[5] ซึ่งผลงานวิจัยข้างต้นเป็นการใช้เศษยางรถยนต์ที่มีขนาดไม่ใหญ่ (ขนาดประมาณไม่เกิน 5.00 มิลลิเมตร) หรือขนาดเท่ากับยางผง แต่อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยอีกหลายงานวิจัยที่ทดสอบตัวอย่างดินในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน โดยใช้ดินทรายผสมกับเศษยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 12.5 ถึง 50 มิลลิเมตร) พบว่า การเพิ่มปริมาณของเศษยางรถยนต์ในส่วนผสมของดินทรายจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน และค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น [6], [7] หรือในบางกรณีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่ง เช่น ที่ส่วนผสมของเศษยางรถยนต์กับดินทรายในอัตราส่วน 30% โดยปริมาตร [8]

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

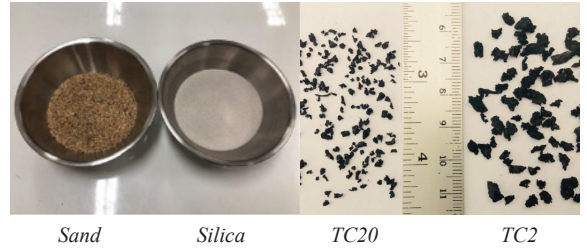
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินทรายที่ใช้ทดสอบทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ ดินทรายซิลิกา (Silica) ดินทรายแม่น้ำ (Sand) โดยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานคือ ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน



**รูปที่ 1** เส้นกราฟการกระจายตัวของดินทรายแม่น้ำ ดินทรายซิลิกา และเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช และ 2 เมช

ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงตามวิธีมาตรฐานของ ASTM รวมถึงการหาค่าความหนาแน่นสูงสุด และความหนาแน่นต่ำสุดของดินทรายเพื่อใช้คำนวณหาอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุดและอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด ตามลำดับ ซึ่งจุดประสงค์ที่สำคัญในการเลือกใช้ดินทราย 2 ชนิด ดังกล่าวก็เพื่อดูผลกระทบจากลักษณะรูปร่างของเม็ดดินทรายต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายทั้งก่อนและหลังการผสมเศษยางรถยนต์แล้ว กล่าวคือ ดินทรายซิลิกามีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดกลมมน และดินทรายมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดเหลี่ยมโดยดินทรายทั้งสองชนิดจำแนกตามระบบเอกภาพ ได้เป็น *SP* หรือทรายคละกันไม่ดี

ในส่วนของตัวอย่างเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในการผสมกับดินทรายในการทดสอบเป็นเศษยางรถยนต์ที่ได้จากการย่อย



**รูปที่ 2** ลักษณะของดินทรายแม่น้ำ ดินทรายซิลิกา และเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช และ 2 เมช

ยางรถยนต์เก่าที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว โดยถูกกระบวนการย่อยทางกายภาพจากโรงงานทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช (Tyre Crumb 2; *TC2*) มีขนาด  $D_{50}$  ประมาณ 3 มิลลิเมตร และเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช (*TC20*) มีขนาด  $D_{50}$  ประมาณ 1.4 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1 ค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 854 [9] ของเศษยางรถยนต์มีค่าเท่ากับ 1.06 และ 1.08 สำหรับ *TC2* และ *TC20* ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงลักษณะของดินทราย และเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินทราย และเศษยางรถยนต์ทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 1

การผสมดินทรายทั้งสองชนิดเข้ากับเศษยางรถยนต์เป็นการผสมแบบแห้ง โดยดินทรายก่อนการผสมจะผ่านการอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเศษยางรถยนต์ผสมกับดินทรายทั้งสองชนิดตามปริมาณเปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติพื้นฐานของดินทรายและเศษยางรถยนต์

	<i>Silica</i>	<i>Sand</i>	<i>TC20</i>	<i>TC2</i>
การจำแนกดินตามระบบเอกภาพ	<i>SP</i>	<i>SP</i>	<i>SP</i>	<i>SP</i>
ขนาดเม็ดดิน $D_{50}$	0.60	1.50	1.45	3.00
ค่าความถ่วงจำเพาะ, $G_s$	2.64	2.61	1.08	1.06
ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด, $\rho_d (max)$	1.75	1.58	-	-
ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด ( $e_{min}$ )	0.51	0.65	-	-
ค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุด $\rho_d (min)$	1.55	1.44	-	-
ค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด ( $e_{max}$ )	0.70	0.82	-	-

โดยน้ำหนักของเศษยางรถยนต์เทียบกับดินทราย โดยมีอัตราส่วนผสมในอัตราส่วน 5, 15 และ 25% ของดินทราย ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบมีการผสม 3 รูปแบบ ดังนี้ ดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช (*Silica - TC2*) ดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช (*Silica - TC20*) และดินทรายแม่น้ำผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช (*Sand - TC20*)

ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{d(max)}$ ) และความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ( $\rho_{d(min)}$ ) คำนวณได้ตามสมการที่ (1) โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลของการทดสอบการบดอัดดินรวมถึงการหาค่าความหนาแน่นของดินในสนาม และในการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ ( $G_s(mix)$ ) ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 854 โดยผลของการหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและต่ำสุด รวมถึงค่าความจำเพาะของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในอัตราส่วนต่างๆ กันแสดงได้ดังตารางที่ 2

$$\rho_d = \frac{G_s(mix)\rho_w}{1+e} \quad (1)$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio;  $e$ ) ที่มากที่สุด และอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุดของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) โดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ

ความหนาแน่นต่ำสุด รวมถึงค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในการคำนวณดังสมการ

$$e_{max} = \frac{G_s(mix)\rho_w}{\rho_{d(min)}} - 1 \quad (2)$$

$$e_{min} = \frac{G_s(mix)\rho_w}{\rho_{d(max)}} - 1 \quad (3)$$

โดย  $e_{max}$  และ  $e_{min}$  คือ อัตราส่วนช่องว่างมากที่สุด และอัตราส่วนช่องว่างน้อยที่สุดของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงเพื่อหาค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Parameter) ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Frictional Angle;  $\phi$ ) โดยสัญลักษณ์ *Silica - TC20* แสดงดินทรายซิลิกาผสมกับเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช สัญลักษณ์ *Sand - TC20* แสดงดินทรายแม่น้ำผสมกับเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช และสัญลักษณ์ *Silica - TC2* แสดงดินทรายซิลิกาผสมกับเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช จากตารางจะพบว่า เมื่อปริมาณอัตราส่วน หรือเปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์โดยน้ำหนักถูกผสม และเพิ่มปริมาณมากขึ้นในทั้งตัวอย่างดินทรายซิลิกา และตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ ค่า  $\rho_{d(max)}$ ,  $\rho_{d(min)}$  รวมถึงค่า  $G_s(mix)$  จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์ โดยน้ำหนัก	$G_s(mix)$	$\rho_{d(max)}$ ( $g/cm^3$ )	$e_{min}$	$\rho_{d(min)}$ ( $g/cm^3$ )	$e_{max}$
<i>Silica - TC20</i>	5%	2.44	1.654	0.477	1.424	0.715
	15%	2.22	1.456	0.526	1.144	0.941
	25%	1.97	1.277	0.539	0.990	0.986
<i>Sand - TC20</i>	5%	2.45	1.498	0.638	1.280	0.916
	15%	2.18	1.333	0.638	1.083	1.017
	25%	1.92	1.180	0.629	0.920	1.089
<i>Silica - TC2</i>	5%	2.49	1.662	0.497	1.435	0.734
	15%	2.18	1.504	0.447	1.212	0.795
	25%	1.91	1.335	0.429	1.058	0.804

ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงตัวอย่างดิน จะถูกทดสอบในกล่องเฉือน โดยตัวอย่างดินจะถูกกดอัดให้ได้ ความหนาแน่นแบบหลวม และความหนาแน่นแบบแน่น โดยคำนวณค่าดัชนีความหนาแน่น (Density Index;  $I_D$ ) หรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามสมการที่ (4) เพื่อใช้อ้างอิง สถานะของดินตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบ [10] ได้แสดงค่า ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนาแน่น ( $I_D$ ) และค่าสถานะ ความหนาแน่นทางกายภาพ โดย  $I_D = 15-35\%$  ดินมีสถานะ หลวมและหาก  $I_D = 65-85\%$  ดินจะอยู่ในสถานะแน่น

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4)$$

โดย  $e$  เป็นค่าอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างดินใน ปัจจุบันคำนวณได้ตามสมการที่ (5)

$$e = \frac{G_s(\text{mix})\rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (5)$$

รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงที่มีโปรแกรมในการเก็บค่าจากการทดสอบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ กล่องทดสอบแรงเฉือนมีลักษณะเป็น วงกลมสามารถเตรียมตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 2.5 นิ้ว โดยใช้ Stepper Motor เป็นอุปกรณ์ในการ ให้แรงตามแนวราบ มวลที่ใช้สำหรับค่าความเค้นปกติตาม แนวตั้งใช้แผ่นเหล็กที่มีมวลเท่ากับ 5, 15 และ 30 กิโลกรัม ซึ่งมวลที่กระทำนี้จะทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 159, 477 และ 953 กิโลปาสคาล กระทำกับตัวอย่างดินตามแนวแกนตั้ง ตามลำดับ โดยในช่วงแรกก่อนการทดสอบแรงเฉือน ตัวอย่างดิน เมื่อมีความเค้นตามแนวตั้งมากระทำจากมวลของแผ่นเหล็ก ตัวอย่างดินจะถูกปล่อยให้เกิดการอัดตัว เป็นระยะเวลา ประมาณ 2-10 นาที หรือจนกระทั่งการหดตัวในแนวตั้ง สิ้นสุดลง จากนั้นตัวอย่างดินจะเริ่มถูกทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ด้วยอัตราการเฉือนเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร/นาที โดยมีเงื่อนไข ในการสิ้นสุดการบันทึกข้อมูล เมื่อตัวอย่างดินเกิดการเคลื่อนตัว ตามแนวราบในระยะประมาณ 12-13 มิลลิเมตร หรือมี ค่าความเครียดตามแนวราบเท่ากับ 20% เนื่องจากข้อจำกัด



รูปที่ 3 อุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

ของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสถานะทางกายภาพของดิน เช่น ความหนาแน่น และความเค้นกระทำตามแนวแกนตั้ง มีผล กระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดิน ที่ไม่มีความเชื่อมั่นแน่นที่มีความเค้นกระทำตามแนวแกนตั้ง กระทำเพิ่มขึ้น และไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาเพิ่ม ความเค้นเฉือน กล่าวคือ ในดินทรายสถานะหลวม ค่ากำลัง รับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าการเคลื่อนตัวตามแนว แรงเฉือนจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หรือคงที่ไปตลอดแม้ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง สามารถนิยามกำลังรับแรงเฉือนในกรณีดังกล่าวได้ว่า กำลัง รับแรงเฉือนสุดท้าย ( $\tau_{ult}$ ) อย่างไรก็ตาม ในทางกลับกัน ใน ดินทรายสถานะแน่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่า เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด ( $\tau_{peak}$ ) จากนั้นค่าความเค้นต้านทานต่อความเค้นเฉือนจะมีค่าลดลง ตามลำดับตามค่าการเคลื่อนตัวตามแนวแรงเฉือนที่เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งค่าความต้านทานต่อความเค้นเฉือนมีค่าเกือบคงที่ ไปตลอดตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงเฉือนที่ คงที่นี้คือ กำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย ( $\tau_{ult}$ ) เหมือนในกรณีของ ดินในสถานะหลวมนั่นเอง นอกจากนี้พฤติกรรมที่สำคัญของ ดินทรายในช่วงเวลารับแรงเฉือน ได้แก่ ลักษณะการเปลี่ยนรูป หรือการเคลื่อนตัว หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินทราย ในช่วงเวลารับแรงเฉือน ซึ่งอาจแสดงได้โดยความเครียด



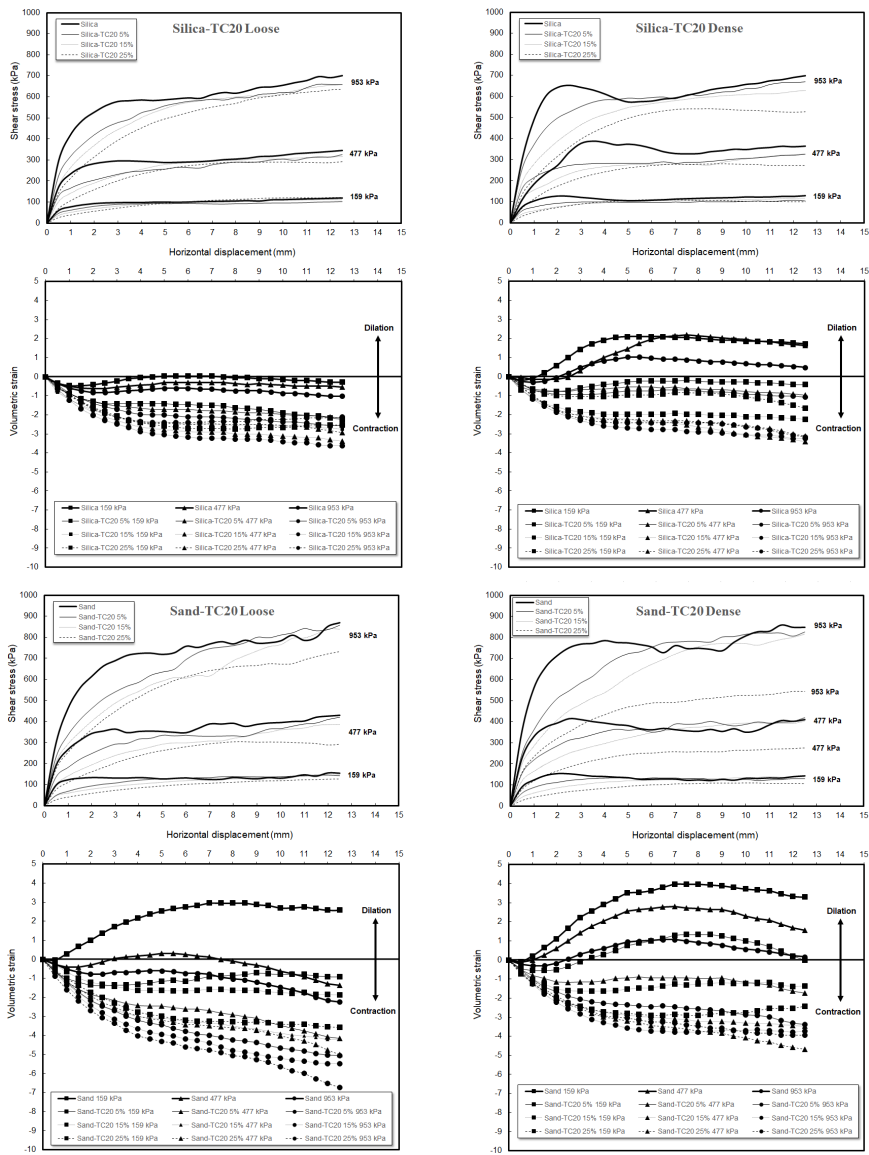
เชิงปริมาตร คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างดินระหว่างการทดสอบต่อค่าความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างดิน ซึ่งจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าความเครียดตามแนวแกน ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ 3 แกน หากค่าความเครียดเชิงปริมาตรมีค่าเป็นลบแสดงว่าตัวอย่างดินขณะนั้นเกิดการหดตัวหรือถูกบีบอัด แต่ในทางตรงกันข้าม หากค่าความเครียดเชิงปริมาตรมีค่าเป็นบวกแสดงว่าตัวอย่างดินขณะนั้นเกิดการพองตัวหรือขยายตัว

ในกรณีของดินทรายที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม แรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินจะมีค่ามากกว่าในดินทรายที่มีรูปร่างมนกลมที่สภาพความหนาแน่นเดียวกัน และในดินทรายที่มีลักษณะรูปร่างเดียวกัน เช่น ดินทรายที่มีลักษณะกลมมน หรือดินทรายที่มีรูปร่างแบบเหลี่ยมมุม หากตัวอย่างดินมีสถานะความหนาแน่นแบบแน่นแรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินที่มีสถานะแบบหลวม ดังนั้นในดินทรายสภาพแน่นแรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินจะมีค่าสูงมาก โดยเมื่อมีความเค้นเฉือนมากกระทำกับตัวอย่างดินทรายดังกล่าว ในช่วงแรก (ที่ความเครียดน้อยมาก) ตัวอย่างดินจะเกิดการเคลื่อนตัวแบบหดตัว ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างดินจะสามารถรับแรงเฉือน หรือความเค้นเฉือนที่มากกระทำได้สูงมาก (สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกำลังรับแรงเฉือนของดิน) จากนั้นเมื่อความเครียดเพิ่มมากขึ้น หากความเค้นเฉือนมีค่ามากพอ และมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดิน ตัวอย่างดินจะเกิดการขยายตัว (Expansion/Dilation) และในขณะเดียวกันกำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าคงที่เป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย ในกรณีของดินทรายสภาพหลวมแรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าน้อย เมื่อมีความเค้นเฉือนมากกระทำกับตัวอย่างดินดังกล่าว ตัวอย่างดินจะเกิดการเคลื่อนตัวแบบหดตัว (Compression/Contraction) โดยตัวอย่างดินจะสามารถรับแรงเฉือนที่มากกระทำได้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามความเครียดที่เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุด และคงที่กลายเป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย โดยไม่แสดงให้เห็นพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเหมือนในกรณีของดินทรายสภาพแน่นที่มีแรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินสูง

### 3. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในตัวอย่างดินทรายซิลิกา และตัวอย่างดินทรายแม่น้ำที่ไม่มีผลผสมเศษยางรถยนต์ ตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่มีสถานะหลวมแสดงพฤติกรรมในการรับแรงเฉือนตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือ กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและคงที่เป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าไม่สูงมากนัก ( $\sigma' = 159$  กิโลปาสคาล) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าสูงขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินจะเพิ่มขึ้น และคงที่จนถึงค่าการเคลื่อนตัวตามแนวราบระดับหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยกำลังรับแรงเฉือนสุดท้ายที่ความเครียดมากกว่า 20% มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของค่าความเครียดเชิงปริมาตร แม้ว่าตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมหดตัว (Contraction) ตลอดช่วงของการเพิ่มขึ้นของความเครียดตามแนวราบก็ตาม ตัวอย่างดินยังแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมขยายตัวเล็กน้อยในช่วงกลางการทดสอบ โดยหากปริมาณเศษยางรถยนต์ถูกผสมลงในตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมหดตัวอย่างต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามการเคลื่อนตัวตามแนวราบ แสดงดังรูปที่ 4 (Silica - TC20 Loose)

ในส่วนของตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพแน่น ที่ความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าไม่สูงมาก กำลังรับแรงเฉือนของดินมีลักษณะแบบกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย เมื่อความเค้นปกติตามแนวตั้งสูงขึ้น ตัวอย่างดินมีพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และกำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในลักษณะของพฤติกรรมรับน้ำหนักแบบกำลังถดถอย หรือสภาวะอ่อนตัวจากความเครียด (Strain Softening) โดยสภาวะอ่อนตัวจากความเครียดนี้พบได้โดยทั่วไปในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่มีสภาพแน่น ซึ่งตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมในการรับแรงเฉือนได้ลดลงในขณะที่ค่าความเครียดตามแนวราบพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าการเคลื่อนตัวตามแนวราบของตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอีกครั้ง แม้ความเครียดตามแนวราบจะมีค่ามากขึ้นกว่า 20%



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ความเครียดเชิงปริมาตร และการเคลื่อนตัวตามแนวราบ (Horizontal Displacement) ของดินทรายเม่น้ำ ดินทรายซิลิกา และเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช (TC20)

แล้วก็ตาม ดังรูปที่ 4 (Silica-TC20 Dense) หากสังเกตพฤติกรรมของความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างดินทรายซิลิกา สภาพแน่นที่ไม่มีเศษยางรถยนต์ผสมอยู่จะพบว่า ในช่วงแรก ตัวอย่างดินมีพฤติกรรมของความเครียดเชิงปริมาตรแบบหดตัว ซึ่งเป็นพฤติกรรมเคลื่อนตัวโดยทั่วไปแบบเดียวกันกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่พบได้ทั่วไปจากการทดสอบ

กำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือ ตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมแบบหดตัวในช่วงแรก จากนั้นจะเกิดการพองตัวหรือขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงการเคลื่อนตัวตามแนวราบประมาณ 1.5 มิลลิเมตร (ความเครียดประมาณ 2%) เป็นต้นไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ โดยหากค่าความเค้นปกติกระทำกับตัวอย่างดินตามแนวตั้งเพิ่มมากขึ้น การพองตัว



จะมีค่าลดลง ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน และความเครียดเชิงปริมาตรของดินทราย และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงที่ค่าความเค้นปกติที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4 (Sand – TC20 Loose) ตัวอย่างดินทรายแม่น้ำที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์สภาพหลวม พฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนคล้ายกับตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ในสภาพหลวม กล่าวคือมีลักษณะกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย ในกรณีที่มีความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าสูงมาก ( $\sigma' = 953$  กิโลปาสคาล) กำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่าง

ตัวอย่างดินทรายซิลิกา และตัวอย่างดินทรายแม่น้ำที่ไม่มีเศษยางรถยนต์ผสมในสภาพความหนาแน่นเดียวกัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนในตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินทรายซิลิกาหากความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าต่ำ ดินสภาพหลวมจะมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำกว่าดินสภาพแน่นเล็กน้อย แต่หากค่าความเค้นปกติตามแนวตั้งมีค่าสูงขึ้นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้ายจะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด ( $\tau_{ult} > \tau_{peak}$ ) รายละเอียดผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 สำหรับตัวอย่างดินทรายแม่น้ำที่ไม่มีการผสมเศษยางรถยนต์สภาพแน่น กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ความเค้นปกติตามแนวตั้งไม่สูงมากจะมีลักษณะของกำลังรับแรงเฉือน

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับแรงเฉือนและความเครียดเชิงปริมาตรของดินทรายและดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงที่ค่าความเค้นปกติที่แตกต่างกัน

%เศษยางรถยนต์ (TC 20, TC 2)	ค่าความเค้นปกติ ( $\sigma$ ) kPa	ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, $\tau$ ) และความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain, $\epsilon$ )											
		Silica – TC20				Sand – TC20				Silica – TC2			
		Loose		Dense		Loose		Dense		Loose		Dense	
		( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$	( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$	( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$	( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$	( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$	( $\tau$ ) kPa	$\epsilon$
0%	159	119 <sup>U</sup>	D <sup>1</sup>	129 <sup>U</sup>	D	155 <sup>P</sup>	D	153 <sup>P</sup>	D	119 <sup>U</sup>	D	129 <sup>U</sup>	D
	477	345 <sup>U</sup>	C <sup>2</sup>	388 <sup>P</sup>	D	429 <sup>U</sup>	D	414 <sup>P</sup>	D	345 <sup>U</sup>	C	388 <sup>P</sup>	D
	953	701 <sup>U</sup>	C	697 <sup>U</sup>	D	869 <sup>U</sup>	C	858 <sup>P</sup>	D	701 <sup>U</sup>	C	697 <sup>U</sup>	D
5%	159	102 <sup>U</sup>	C	108 <sup>P</sup>	C	144 <sup>P</sup>	C	133 <sup>P</sup>	D	118 <sup>U</sup>	C	129 <sup>U</sup>	D
	477	326 <sup>U</sup>	C	324 <sup>U</sup>	C	420 <sup>U</sup>	C	419 <sup>U</sup>	C	330 <sup>U</sup>	C	362 <sup>U</sup>	C
	953	659 <sup>U</sup>	C	668 <sup>U</sup>	C	857 <sup>U</sup>	C	825 <sup>U</sup>	C	662 <sup>U</sup>	C	645 <sup>U</sup>	C
15%	159	111 <sup>U</sup>	C	116 <sup>U</sup>	C	144 <sup>U</sup>	C	140 <sup>U</sup>	C	109 <sup>P</sup>	C	130 <sup>U</sup>	C
	477	316 <sup>U</sup>	C	325 <sup>U</sup>	C	385 <sup>U</sup>	C	402 <sup>U</sup>	C	351 <sup>U</sup>	C	314 <sup>P</sup>	C
	953	658 <sup>U</sup>	C	629 <sup>U</sup>	C	838 <sup>U</sup>	C	815 <sup>U</sup>	C	586 <sup>P</sup>	C	708 <sup>U</sup>	C
25%	159	122 <sup>U</sup>	C	110 <sup>P</sup>	C	126 <sup>U</sup>	C	109 <sup>P</sup>	C	107 <sup>U</sup>	C	131 <sup>P</sup>	C
	477	292 <sup>U</sup>	C	279 <sup>P</sup>	C	302 <sup>P</sup>	C	275 <sup>U</sup>	C	273 <sup>P</sup>	C	318 <sup>P</sup>	C
	953	637 <sup>U</sup>	C	541 <sup>P</sup>	C	733 <sup>U</sup>	C	543 <sup>P</sup>	C	525 <sup>P</sup>	C	611 <sup>P</sup>	C

<sup>P</sup> กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength,  $\tau_{peak}$ )

<sup>U</sup> กำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย (Ultimate shear strength,  $\tau_{ult}$ ) ที่ความเครียด 20%

หมายเหตุ: หากกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ความเครียด 20% มีค่ามากที่สุด ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างนั้นจะแสดงเป็นค่า  $\tau_{ult}$  และหากกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่ามากที่สุดก่อนสิ้นสุดการทดสอบ (ที่ความเครียด 20%) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างนั้นจะแสดงเป็นค่า  $\tau_{peak}$  D<sup>1</sup> คือ ตัวอย่างดินเกิดการพองตัว (Dilation) หรือ  $\epsilon$  เป็นบวก และ C<sup>2</sup> คือ ตัวอย่างดินเกิดการหดตัว (Contraction) หรือ  $\epsilon$  เป็นลบ

สุดท้าย เมื่อความเค้นปกติตามแนวตั้งสูงขึ้น ตัวอย่างดินมีพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนแบบสูงสุดและจะมีค่าลดลงในลักษณะของสภาวะอ่อนตัวจากความเครียด เช่นเดียวกับกับตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ไม่มีการผสมเศษยางรถยนต์สภาพแน่นตามรูปที่ 4 (*Sand – TC20 Dense*) ในส่วนของพฤติกรรมความเครียดเชิงปริมาตร ตัวอย่างดินทรายแม่น้ำที่ไม่มีการผสมเศษยางรถยนต์ทั้งในสภาพหลวมและแน่นในช่วงที่ความเครียดต่ำมาก (ความเครียดไม่เกิน 1%) เมื่อเริ่มมีการเฉือนตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมหดตัวเล็กน้อยเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น (ช่วงความเครียดตามแนวราบประมาณ 1–10%) ตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมของการพองตัวอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบที่มีค่าความเค้นปกติต่ำ

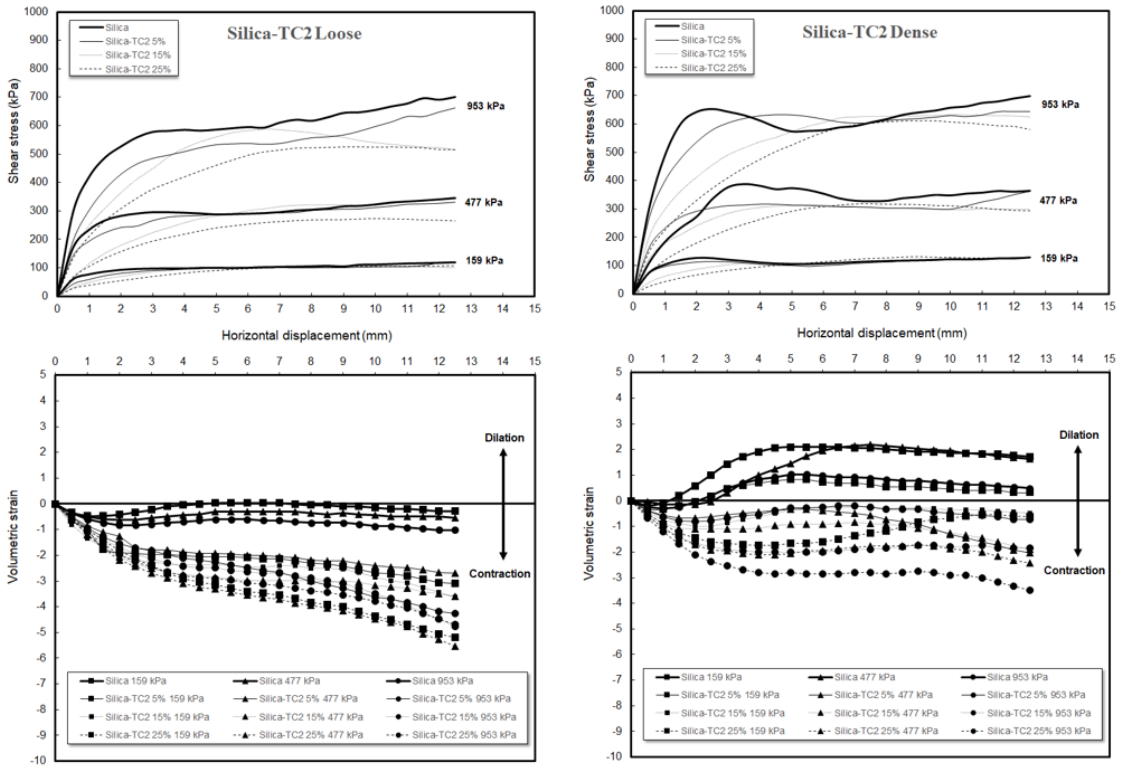
อย่างไรก็ตาม หากความเค้นปกติกระทำกับตัวอย่างดินตามแนวตั้งมีค่าเพิ่มมากขึ้นการพองตัวของตัวอย่างดินจะมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง โดยตัวอย่างดินจะกลับมาหดตัวอีกครั้งในช่วงการเคลื่อนตัวตามแนวราบที่เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างดินสภาพแน่น พฤติกรรมของการพองตัวของตัวอย่างดินทรายแม่น้ำจะเกิดขึ้นสูงมากโดยเกิดการพองตัวมากที่สุดและเด่นชัดที่สุดหากเทียบกับการทดสอบในตัวอย่างดินอื่น ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ เมื่อถูกผสมด้วยเศษยางรถยนต์ ตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวแบบหดตัวอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับกับตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่สภาพความหนาแน่นเดียวกัน โดยดินทรายแม่น้ำเมื่อถูกผสมด้วยเศษยางรถยนต์ ตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมหดตัวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่ถูกผสมเพิ่มเข้าไป โดยในกรณีของดินทรายแม่น้ำ สภาพหลวมที่ถูกกระทำโดยความเค้นปกติตามแนวตั้งที่สูงขึ้นจะมีแนวโน้มในการหดตัวค่อนข้างมาก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเมื่อผสมเศษยางรถยนต์ในตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่าลดลงทั้งในตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพหลวมและสภาพแน่น (ดูได้จากค่าโมดูลัสสัมผัสเริ่มต้น หรือ Initial Tangent Modulus ที่มีความชันน้อยลงเรื่อยๆ) โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนจะพัฒนาขึ้นอย่างช้าๆ ตามค่าการเคลื่อนตัวตามแนวราบของตัวอย่างดิน พฤติกรรมรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย นอกจากนี้หากความ

เค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินมีค่าสูงมาก ( $\sigma' = 953$  กิโลปาสกาล)  $\tau_{ult}$  จะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่มีส่วนผสมของเศษยางรถยนต์ โดยดินทรายซิลิกาที่ผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช ทั้งในสถานะหลวมและสถานะแน่น ไม่พบปรากฏการณ์สภาวะอ่อนตัวจากความเครียด และมีลักษณะหดตัวอย่างต่อเนื่อง

สำหรับตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช (ขนาดใหญ่กว่า 20 เมช) ทั้งในสถานะหลวมและในสถานะแน่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีลักษณะเดียวกับผลการทดสอบในตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินมีค่าไม่สูงมาก ( $\sigma' = 159$  kPa) กล่าวคือค่ากำลังรับแรงเฉือนจะพัฒนาขึ้นอย่างช้าๆ ตามค่าการเคลื่อนตัวตามแนวราบของตัวอย่างดิน โดยพฤติกรรมรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความเค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินมีค่าสูงมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนสุดท้ายจะลดลงค่อนข้างมากในตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพหลวมที่มีส่วนผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 (*Silica – TC2 Loose*)

นอกจากนี้หากพิจารณาถึงผลกระทบของขนาดของเศษยางรถยนต์ต่อกำลังรับแรงเฉือนพบว่า ในตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพหลวม หากขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมในตัวอย่างดินมีขนาดใหญ่ขึ้น (จาก *TC20* จากเป็นขนาด *TC2*) แนวโน้มของกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์จะมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพแน่น หากขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมในตัวอย่างดินมีขนาดใหญ่ขึ้น (จาก *TC20* จากเป็นขนาด *TC2*) แนวโน้มของกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 3 โดยพฤติกรรมของความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างดินทรายซิลิกาทั้งในสภาพหลวม และสภาพแน่นที่ถูกผสมด้วยเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช นี้จะมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่คล้ายกันกับในกรณีของดินทรายซิลิกาที่ถูกผสมด้วยเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช ตามรูปที่ 5 (*Silica – TC2 Loose* และ *Silica – TC2 Dense*) โดยในดินทรายซิลิกาสภาพหลวม



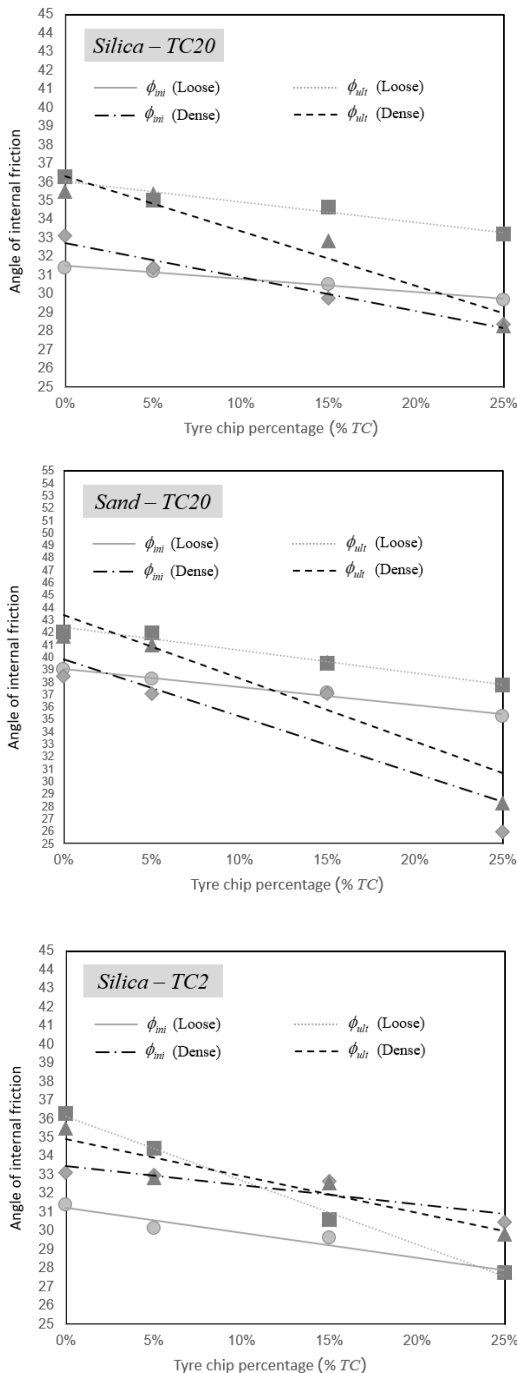
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ความเครียดเชิงปริมาตรและการเคลื่อนตัวตามแนวราบของดินทรายซิลิกาและเศษยางรถยนต์ (TC2)

ที่ผสมด้วยเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีแนวโน้มในการหดตัวมากกว่าในดินทรายซิลิกาสภาพหลวมที่ผสมด้วยเศษยางรถยนต์ขนาด 2 เมช

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเมื่อผสมเศษยางรถยนต์ในตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ ที่ผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช มีค่าลดลงทั้งในตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ ในสถานะหลวมและในสถานะแน่น โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนจะพัฒนาขึ้นอย่างช้าๆ ตามค่าการเคลื่อนตัวตามแนวราบของตัวอย่างดิน พฤติกรรมรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีความเค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินมีค่าสูงมาก  $\tau_{ult}$  มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างดินสภาพแน่น และมีค่าความเค้นปกติตามแนวตั้งกระทำสูง

ทั้งนี้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นอาจสรุปได้ว่า เศษยางรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นในตัวอย่างดินทรายแม่น้ำ ทำให้แรงเชื่อมเกี่ยวระหว่างเม็ดดินในดินทรายแม่น้ำ ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแบบเหลี่ยมมุมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

การแสดงผลค่ามุมเสียดทานภายในแสดงได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 ของดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำ ตามเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 20 เมช และ 2 เมช (TC20 และ TC2 ตามลำดับ) ที่สถานะหลวมและสถานะแน่น โดยผลการวิเคราะห์ค่ามุมเสียดทานภายในเป็นการวิเคราะห์มุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงซึ่งมีการคำนวณสองวิธี วิธีแรกเป็นการวิเคราะห์ค่า  $\phi$  จากค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงแรก หรือจาก  $\tau_{peak}$  ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนในลักษณะนี้ได้ในการทดสอบดินที่มีความหนาแน่น



รูปที่ 6 ค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction) ของดินทรายซิลิกา และดินทรายแม่น้ำตามเปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมเศษยางรถยนต์ (Tyre Crumb; TC) ขนาด 20 เมช และ 2 เมช

แบบแน่นและมีค่าความเค้นปกติกระทำกับตัวอย่างดินตามแนวตั้งที่สูงมาก ซึ่งการวิเคราะห์ค่า  $\phi$  จาก  $\tau_{peak}$  นี้จะเรียกว่าค่ามุมเสียดทานภายในเริ่มต้น (Initial Angle of Internal Friction;  $\phi_{ini}$ ) ในส่วนวิธีที่สอง เป็นการวิเคราะห์ค่า  $\phi$  จากค่ากำลังรับแรงเฉือนสุดท้ายที่เกิดขึ้นในช่วงสุดท้าย หรือจาก  $\tau_{ult}$  ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนในลักษณะนี้ได้ในการทดสอบดินที่มีความหนาแน่นแบบหลวม ซึ่งในบางกรณีพบว่าค่า  $\tau_{ult}$  มีค่าสูงกว่า  $\tau_{peak}$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบที่ความเค้นปกติกระทำกับตัวอย่างดินตามแนวตั้งสูงมาก ( $\sigma' = 953$  กิโลปาสคาล) ซึ่งการวิเคราะห์ค่า  $\phi$  จาก  $\tau_{ult}$  นี้ จะเรียกว่าค่ามุมเสียดทานภายในสุดท้าย (Ultimate Angle of Internal Friction;  $\phi_{ult}$ )

ผลการวิเคราะห์ค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  พบว่า เมื่อเศษยางรถยนต์มีปริมาณมากขึ้นค่ามุมเสียดทานภายในทั้งสองแบบลดลงอย่างต่อเนื่อง (ตารางที่ 4 และ รูปที่ 6) ทั้งในส่วนของดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำสภาพหลวมและสภาพแน่น โดยในส่วนของดินทรายซิลิกาสภาพหลวมเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์ทั้งขนาด 20 เมช และ 2 เมช (TC20 และ TC2) เพิ่มขึ้น ค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  จะมีค่าลดลง โดยหากพิจารณาขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมพบว่า ดินทรายซิลิกาที่มีลักษณะมนกลมขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมหากมีขนาดใหญ่ขึ้น (TC2) การลดลงของค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  จะลดลงมากกว่าขนาดของเศษยางรถยนต์ที่มีขนาดเล็กกว่า (TC20) ในดินทรายแม่น้ำสภาพหลวมเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์ (TC20) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  จะมีค่าลดลงโดยแนวโน้มการลดลงมีลักษณะเหมือนกับในดินทรายซิลิกาสภาพหลวม อย่างไรก็ตาม ในดินทรายแม่น้ำ สภาพแน่น แนวโน้มการลดลงของค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  มีแนวโน้มลดลงอย่างมากในส่วนผสมของดินทรายแม่น้ำ ที่มีปริมาณส่วนผสมของเศษยางรถยนต์ (TC20) สูง (ปริมาณเศษยางรถยนต์ 25%) โดยค่าการลดลงของค่ามุมเสียดทานภายในแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  ลดลงประมาณ 32% จากดินทรายแม่น้ำที่ไม่มีส่วนผสมของเศษยางรถยนต์อยู่เลย

**ตารางที่ 4** ค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนดินทรายและดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงที่ค่าความเค้นปกติที่แตกต่างกัน

%เศษยางรถยนต์ (TC 20, TC 2)	ค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle; $\phi$ ) (องศา)											
	Silica – TC20				Sand – TC20				Silica – TC2			
	Loose		Dense		Loose		Dense		Loose		Dense	
	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$	$\phi_{ini}$	$\phi_{ult}$
0%	31.42	36.29	33.14	35.53	39.00	42.03	38.47	41.68	31.42	36.29	33.14	35.53
5%	31.24	35.05	31.42	35.38	38.27	41.97	37.08	40.96	30.17	34.45	32.98	32.84
15%	30.53	34.65	29.77	32.84	37.15	39.51	37.06	39.59	29.65	30.64	32.69	32.57
25%	29.70	33.21	28.36	28.28	35.27	37.79	25.94	28.28	27.74	27.78	30.46	29.82

#### 4. สรุป

1) ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นแห้งของดินทรายซิลิกาผสมเศษยางรถยนต์ TC20, TC2 และดินทรายแม่น้ำผสมเศษยางรถยนต์ TC20 ลดลงตามปริมาณ (โดยน้ำหนัก) เศษยางรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้น

2) ตัวอย่างดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำสภาพหลวมกำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามค่าความเค้นปกติกระทำตามแนวตั้ง โดยมีลักษณะกำลังรับแรงเฉือนสุดท้าย สำหรับตัวอย่างดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำสภาพแน่น ตัวอย่างดินมีพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนแบบสูงสุด และมีพฤติกรรมของสภาวะอ่อนตัวจากความเครียดอย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเมื่อผสมเศษยางรถยนต์ ขนาด 20 เมช และ 2 เมช ในตัวอย่างดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำ มีแนวโน้มลดลงทั้งในตัวอย่างดินสถานะหลวมและสถานะแน่น โดยมีพฤติกรรมรับแรงเฉือนสุดท้าย

3) ในกรณีที่ความเค้นปกติตามแนวตั้งที่กระทำกับตัวอย่างดินมีค่าสูงมาก ( $\sigma' = 953$  กิโลปาสคาล)  $\tau_{ult}$  มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างดินสภาพแน่น

4) พฤติกรรมของความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำ ทั้งในสภาพหลวมและสภาพแน่นที่ผสมด้วยเศษยางรถยนต์มีแนวโน้มในการหดตัวค่อนข้างมาก

5) หากขนาดของเศษยางรถยนต์ที่ผสมในตัวอย่างดินมีขนาดใหญ่ขึ้น (จาก TC20 จากเป็นขนาด TC2) กำลังรับ

แรงเฉือนของตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพหลวมมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างดินทรายซิลิกาสภาพแน่นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

6) ผลการวิเคราะห์ที่ค่ามุมเสียดทานภายในทั้งแบบ  $\phi_{ini}$  และ  $\phi_{ult}$  พบว่า เมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์มีปริมาณมากขึ้นค่ามุมเสียดทานภายในทั้งสองแบบลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของดินทรายซิลิกาและดินทรายแม่น้ำสภาพหลวมและสภาพแน่น

7) แม้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ผสมเศษยางรถยนต์จะลดลงเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มมากขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับงานวิจัยบางงานวิจัยที่ใช้เศษยางรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยคุณสมบัติที่สำคัญในเรื่องของความหนาแน่นที่ลดลงทำให้การประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีประโยชน์ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานการก่อสร้างที่ต้องการลดแรงดันดินตามแนวตั้งและตามแนวราบที่กระทำกับโครงสร้าง [11] เช่น ตอม่อริมสะพาน [12] ดินถมหลังกำแพงกันดิน [13], [14] และเป็นวัสดุถมเหนือท่อใต้ดิน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] The Office of Industrial Economics (2020, Dec.). *Industrial statistic (e-Statistic): The production of tyre and tyre tube (local and export distribution in 2019)* [Online] (in Thai). Available: <https://indexes.oie.go.th/industrialStatistics1.aspx>

- [2] S. Youwai and D. T. Bergado, "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire – sand mixtures," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 254–264, 2003.
- [3] E. Masad, R. Taha, C. Ho, and T. Papagiannakis, "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 297–304, 1996.
- [4] S. Kawata, M. Hyodo, R. P. Orense, S. Yamada, and H. Hazarika, "Undrained and drained shear behaviour of sand and tire chips composite material," *Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, in *Proceedings IW-TDGM*, 2007, pp. 277–284.
- [5] M. N. Sheikh, M. S. Mashiri, J. S. Vinod, and H. H. Tsang, "Shear and compressibility behaviours of sand–tyre crumb mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1366–1374, 2013.
- [6] I. Ahmed, "Laboratory study of properties of rubber-soils," Indiana Department of Transportation, Joint Highway Research Project, Purdue Uni., West Lafayette, IN. Final Rep. FHWA/IN/JHRP-93/4, May 1993.
- [7] T. B. Edil and P. J. Bosscher, "Engineering properties of tire chips and soil mixtures," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 453–464, 1994.
- [8] N. Tattisoz, T. B. Edil, and C. H. Benson, "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil tire chip mixtures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 11, pp. 1109–1119, 1998.
- [9] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D854-14, 2014.
- [10] R. Whitlow, "Basic physical properties of soils," in *Basic Soil Mechanics*, 3rd ed. Essex, England, 1995, ch. 3, pp. 45–70.
- [11] H. J. Alaa and Al-Rkaby, "Strength and deformation of sand-tire rubber mixtures (STRM): An experimental study," *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 41, no. 2, pp. 1–7, 2019.
- [12] D. T. Bergado, T. Tanchaisawat, P. Voottipruex, and T. Kanjananak, "Reinforced lightweight tire chips-sand mixtures for bridge approach utilization," *Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, in *Proceedings IW-TDGM*, 2007, pp. 45–58.
- [13] J. H. Lee, R. Salgado, A. Bernal, and C. W. Lovell, "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 132–141, 1999.
- [14] M. S. Mashiri, J. S. Vinod, M. N. Sheikh, and H. H. Tsang, "Shear strength and dilatancy behaviour of sand–tyre chip mixtures," *Soils and Foundations*, vol. 55, no. 3, pp. 517–528, 2015.