

การพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางเพื่อการทดสอบสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟซ

Development of Bidirectional Tilt Table for Testing of Interface Shear Strength Property

กั๊ววณ กณดวรวรณ¹ ธนวรณ แฉงกรจาง² ยศพล เปมณรรรกร³ และ วรช กอองกจกุล^{4*}

^{1,2,3,4} ภาควจววทวรณโยธา คณวทวรณศาสตร มทวทยาลยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรงทมทหนคร

*Corresponding author; E-mail address: warat.kon@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

กำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟซเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี ในปัจจุบันนิยมใช้การประมาณค่าแทนการทดสอบจริง ซึ่งมักทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟซแตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสองทิศทางของอินเตอร์เฟซต่าง ๆ ที่นิยมใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ มอร์ต้า ไม้ และ จีโอเทกซ์ไทล์แบบไม่ถัก กับดินทรายในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ จากนั้นเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับการทดสอบในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูงที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรง จากผลการทดสอบพบว่า เส้นโค้งการวิบัติที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงมีลักษณะเป็นวงกลมที่รัศมีเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉากที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบแรงเฉือนตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

คำสำคัญ: การเฉือนสองทิศทาง, โต๊ะตะแคง, เส้นโค้งการวิบัติ, หน่วยแรงตั้งฉากต่ำ, อินเตอร์เฟซ

Abstract

The interface shear strength is an important parameter that is always used in the design of most of the geotechnical structures. Nowadays, many geotechnical engineers usually use the approximate values instead of the real value obtained from a relevant test. This leads to inconsistencies between the calculated value and real field value. This research aims to study and develop a tilt table for determining bidirectional interface shear strength for the low normal stress condition between sand and structural surfaces, which are mortar, plywood, and non-woven geotextile. Then, the coefficients of friction were compared with the values obtained for the high normal stress condition, which were obtained by the interface direct shear

tests. The results from the tilt table tests shows that failure envelopes were circular, with the radius increases with increasing normal stress. However, it was found that the coefficients of friction from the interface direct shear test are significantly higher than the ones from the tilt table test.

Keywords: Bidirectional shear, Tilt table, Failure envelope, Low normal stress, Interface

1. บทนำ

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี มักเกี่ยวข้องกันกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างต่าง ๆ (soil-structure interaction) เช่น เสาค้ำยัน กำแพงกันดินเสริมแรง เป็นต้น ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟซซึ่งเป็นสมบัติทางวิศวกรรมที่นำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่ในประเทศไทยมีฐานข้อมูลและงานวิจัยทางด้านนี้ค่อนข้างน้อย ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้การประมาณค่าสมบัติเหล่านี้แทนการทดสอบจริง ซึ่งจึงอาจทำให้ได้ค่าที่ต่ำเกินไปในการออกแบบ ถึงแม้ว่าผลลัพธ์จะอยู่ในด้านที่ปลอดภัย (on the safe side) แต่จะทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณการก่อสร้าง นอกจากนี้สมบัติทางวิศวกรรมของอินเตอร์เฟซเหล่านี้ส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากการทดสอบกำลังแรงเฉือนที่อินเตอร์เฟซแบบทิศทางเดียว ซึ่งค่อนข้างแตกต่างจากสภาพจริงในสนามที่อินเตอร์เฟซอาจรับแรงเฉือนพร้อมกันมากกว่าหนึ่งทิศทางได้ ในบางสถานการณ์ ในปัจจุบันการทดสอบแรงเฉือนตรงของอินเตอร์เฟซ (interface direct shear test) เป็นวิธีที่นิยมใช้หาพารามิเตอร์นี้ แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการคือการทดสอบแรงเฉือนสองทิศทางได้ยาก อย่างไรก็ตามการทดสอบสองทิศทางนี้สามารถทำได้โดยโต๊ะตะแคงทดสอบแทนได้ จึงเกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟซแบบสองทิศทางในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำระหว่างดินทรายกับวัสดุต่าง ๆ อาทิเช่น จีโอเทกซ์ไทล์แบบไม่ถัก (non-woven geotextile) มอร์ต้า (mortar) และ ไม้ (wood) เป็นต้น ทำการทดสอบโดยการให้แรงเฉือนแบบสองทิศทางจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบ

เลื่อนไกล เพื่อยืนยันเส้นโค้งการวิบัติที่อินเตอร์เฟสระหว่างทรายกับวัสดุที่ต้องการทราบ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับทฤษฎี และเปรียบเทียบผลกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในสถานะแรงตั้งฉากสูงโดยการทดสอบแรงเฉือนตรง

2. วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสองทิศทางของอินเตอร์เฟสต่าง ๆ ในสถานะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำที่มีการให้แรงเฉือนแบบต่อเนื่อง และทำการทดสอบเพื่อยืนยันเส้นโค้งการวิบัติ พร้อมเปรียบเทียบผลกับการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง

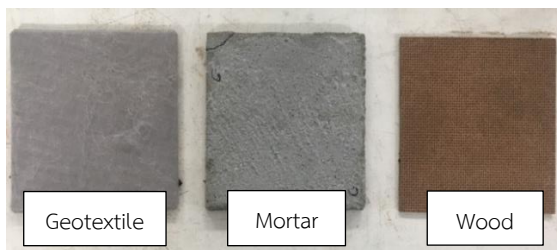
3. การเตรียมวัสดุและขั้นตอนการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยทราย KMUTT อบแห้ง เป็นทรายมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งมีสมบัติเบื้องต้นในตารางที่ 1 ส่วนอินเตอร์เฟสที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ mortar, non-woven geotextile และ wood ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติเบื้องต้นของทราย KMUTT

Specific gravity	Limited void ratio		Internal friction angle	Cohesion,
	Max. void ratio	Min. void ratio		
2.641	0.9541	0.6222	40.23	0



รูปที่ 1 อินเตอร์เฟสที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสโดยวิธีแรงเฉือนตรง (Interface direct shear test)

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D5321 [1] เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงแสดงดังรูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบคือ เตรียมตัวอย่างทรายโปรยลงในกล่องทดสอบแรงเฉือนจนล้น ปาดออกให้พื้นผิวสม่ำเสมอโดยควบคุมความหนาแน่นสัมพัทธ์ให้ได้ร้อยละ 70 และแขวนตุ้มน้ำหนักเพื่อให้หน่วยแรงตั้งฉาก เริ่มทำการทดสอบโดยการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราความเร็ว 0.5-2 มิลลิเมตร/ นาที เก็บค่าแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบทุก ๆ 1 วินาที สิ้นสุดการทดสอบเมื่อตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ต่ออินเตอร์เฟสด้วยหน่วยแรงตั้งฉากเท่ากับ 50 kPa 100 kPa และ 150 kPa ตามลำดับ



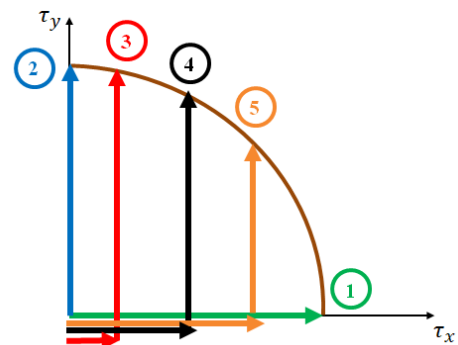
รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรง

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสสองทิศทางโดยโต๊ะตะแคง

เครื่องมือทดสอบโต๊ะตะแคงแสดงดังรูปที่ 3 มีขั้นตอนการทดสอบคือ เตรียมทรายแห้ง 500 กรัม ติดตั้งแผ่นอินเตอร์เฟสที่ต้องการทดสอบ เททรายลงในโมลด์และทำการบดอัดเพื่อควบคุมความหนาแน่นสัมพัทธ์ให้ได้ร้อยละ 70 วางตุ้มน้ำหนักลงในโมลด์ให้ได้หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้น (initial normal stress) ตามที่กำหนด ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดมุมและความเร่งปรับระดับฐานโต๊ะตะแคงให้ได้ระดับแล้วจึงเริ่มการทดสอบ ในการทดสอบหนึ่งชุดจะมี 5 การทดสอบย่อยดังรูปที่ 4 เพื่อหาเส้นโค้งการวิบัติ การทดสอบโดยโต๊ะตะแคงมีกรณีศึกษาทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2 การทดสอบย่อยที่ 3-5 คือการให้แรงเฉือนรอบแกน x เป็นมุมเท่ากับ 0.25, 0.50 และ 0.75 ของมุมที่ได้จากการทดสอบย่อยครั้งที่ 1 ก่อน แล้วจึงเอียงรอบแกน y จนเกิดการเลื่อนไกล



รูปที่ 3 โต๊ะตะแคงสองทิศทาง

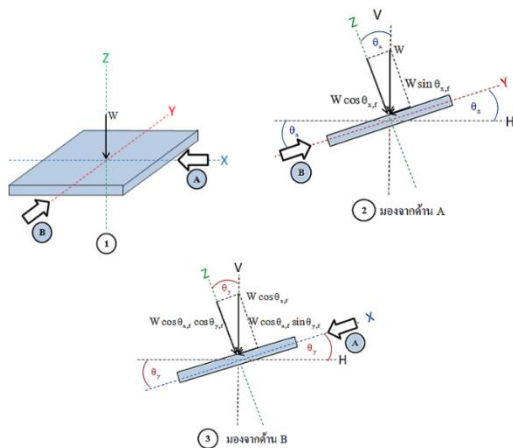


รูปที่ 4 การทดสอบย่อยสำหรับการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

Initial normal stress (kPa)	Non-woven geotextile	Mortar	Wood
2	G-2kPa-1	M-2kPa-1	W-2kPa-1
	G-2kPa-2	M-2kPa-2	W-2kPa-2
	G-2kPa-3	M-2kPa-3	W-2kPa-3
	G-2kPa-4	M-2kPa-4	W-2kPa-4
	G-2kPa-5	M-2kPa-5	W-2kPa-5
3	G-3kPa-1	M-3kPa-1	W-3kPa-1
	G-3kPa-2	M-3kPa-2	W-3kPa-2
	G-3kPa-3	M-3kPa-3	W-3kPa-3
	G-3kPa-4	M-3kPa-4	W-3kPa-4
	G-3kPa-5	M-3kPa-5	W-3kPa-5
4	G-4kPa-1	M-4kPa-1	W-4kPa-1
	G-4kPa-2	M-4kPa-2	W-4kPa-2
	G-4kPa-3	M-4kPa-3	W-4kPa-3
	G-4kPa-4	M-4kPa-4	W-4kPa-4
	G-4kPa-5	M-4kPa-5	W-4kPa-5

เมื่อพิจารณารูปที่ 5 ซึ่งแสดงนิยามมุมรอบแกน x ($\theta_{x,f}$) และมุมเอียงรอบแกน y ($\theta_{y,f}$) ขณะเกิดการวิบัติ สามารถคำนวณมุมรวมของระนาบกับแนวราบ ($\theta_{t,f}$) ได้จากสมการที่ 1 สามารถคำนวณหาหน่วยแรงตั้งฉากขณะเกิดการวิบัติ ($\sigma_{n,f}$) ได้จากสมการที่ 2 ส่วนแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน x และแกน y ($\tau_{x,f}$, $\tau_{y,f}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 5 การหาพารามิเตอร์จากการทดสอบโต๊ะตะแคง

$$\theta_{t,f} = \cos^{-1}(\cos \theta_{x,f} + \cos \theta_{y,f}) \quad (1)$$

$$\sigma_{n,f} = \frac{W \cos \theta_{x,f} \cos \theta_{y,f}}{A} \quad (2)$$

$$\tau_{x,f} = \frac{W \sin \theta_{x,f}}{A} \quad (3)$$

$$\tau_{y,f} = \frac{W \cos \theta_{x,f} \sin \theta_{y,f}}{A} \quad (4)$$

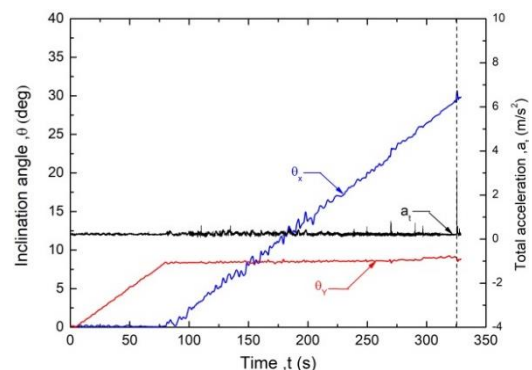
โดยที่ $\sigma_{n,f}$ คือหน่วยแรงตั้งฉากรวมขณะเกิดการวิบัติ (kPa), W คือน้ำหนักทราย KMUTT+กล่อ่ง+ฝา+น้ำหนักแผ่นเหล็ก (kN), $\theta_{x,f}$ คือมุมเอียงรอบแกน x ขณะเกิดการวิบัติ (deg), $\theta_{y,f}$ คือมุมเอียงรอบแกน y ขณะเกิดการวิบัติ (deg), $\theta_{t,f}$ คือมุมเอียงเฉลี่ยของระนาบกับแนวราบขณะเกิดการวิบัติ (deg), $\tau_{x,f}$ คือหน่วยแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน x ขณะเกิดการวิบัติ (kPa), $\tau_{y,f}$ คือหน่วยแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน y ขณะเกิดการวิบัติ (kPa) รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงรอบแกน x และ y กับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา ซึ่งเก็บข้อมูลโดยใช้แอปพลิเคชัน Physics toolbox (เส้นสีน้ำเงินแสดงมุมเอียงรอบแกน X เส้นสีแดงแสดงมุมเอียงแกน Y และเส้นสีดำแสดงความเร็วรวม) ซึ่งในทุกการทดสอบแรงเฉือนสองทิศทางจะทดสอบโดยเอียงมุมรอบแกน y ก่อนจนถึงค่าที่ต้องการแล้วจึงเอียงมุมรอบแกน x จนเกิดการวิบัติ รูปที่ 6ข แสดงรูปขยายในช่วงเวลาขณะเลื่อนไกลและขั้นตอนหาค่ามุมขณะเลื่อนไกลเมื่อเกิดการเลื่อนไกล ค่าความเร็วรวม (a_t) ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด จึงกำหนดให้มุมเอียงขณะนั้นคือมุมขณะเกิดการวิบัติ โดยขั้นตอนการหามุมขณะเลื่อนไกลดังรูปที่ 6ข มีดังนี้

1. วาดเส้นแนวตั้งผ่านจุดที่ความเร็วรวมเพิ่มขึ้นทันทีทันใด (เส้นประดำ)
2. วาดเส้นเอียงสำหรับประวัติเวลาของมุมเอียงรอบแกน x (เส้นประน้ำเงิน)
3. วาดเส้นเอียงสำหรับประวัติเวลาของมุมเอียงรอบแกน y (เส้นประแดง)
4. อ่านค่าที่จุดตัดระหว่างเส้นประดำกับเส้นประน้ำเงิน จะได้ $\theta_{x,f}$ และอ่านค่าจุดตัดระหว่างเส้นประดำกับเส้นประแดง จะได้ $\theta_{y,f}$

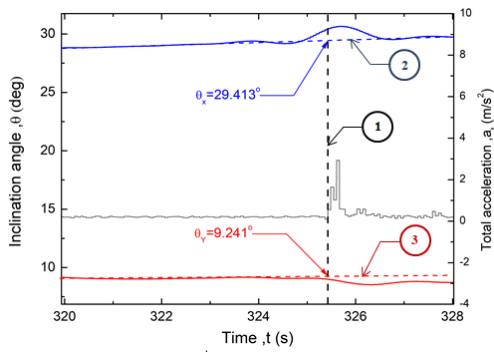
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสทิศทางเดียว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูงโดยวิธีแรงเฉือนตรงแสดงดังรูปที่ 7 ได้เส้นการวิบัติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ที่มีแรงยึดเกาะของอินเตอร์เฟสเท่ากับศูนย์

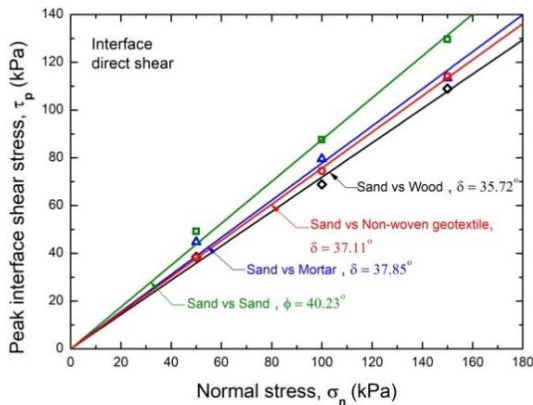


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและความเร่งรวมกับเวลา



(ข) การลากเส้นเพื่อหามุมเอียงขณะเกิดการวิบัติ

รูปที่ 6 ข้อมูลที่บันทึกจากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

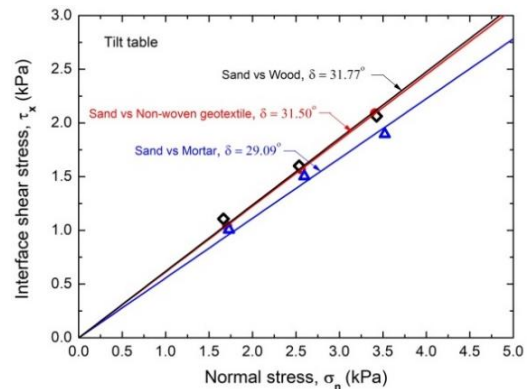


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ_{peak} กับ σ_n จากการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวโดยวิธีแรงเฉือนตรง

ตรง การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวในรูปของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับการประมาณค่าโดยใช้ β -method [3] จากสมการที่ 6 แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเตอร์เฟซจากการประมาณด้วย β -method มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยโต๊ะตะแคง และมีค่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง

$$\mu = \tan \delta_{theory} = \frac{0.18 + 0.0065D_r}{0.50 + 0.008D_r} \quad (6)$$

เมื่อ D_r คือความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นร้อยละของตัวอย่างทดสอบ

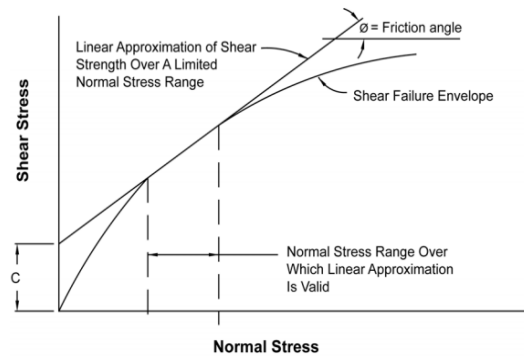


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง τ_x กับ σ_n จากการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวโดยโต๊ะตะแคง

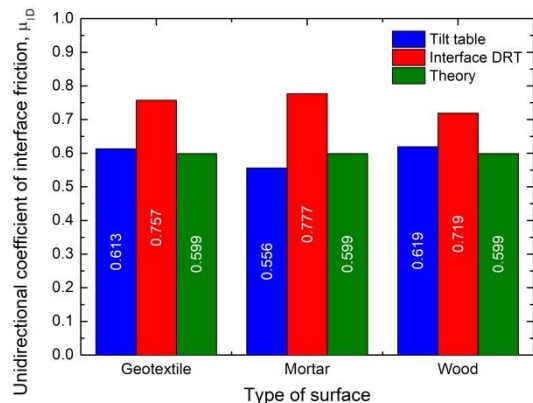
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากโดยโต๊ะตะแคงกรณีการให้แรงเฉือนทิศทางเดียว (รอบแกน x) พบว่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉาก และได้เส้นการวิบัติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงผ่านจุด (0,0) ซึ่งหมายถึงแรงยึดเกาะของอินเตอร์เฟซเท่ากับศูนย์ โดยมีมุมเสียดทานเท่ากับ 31.77°, 31.50° และ 29.09° สำหรับอินเตอร์เฟซระหว่างทราย KMUTT กับ wood, non-woven geotextile และ mortar ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรงที่ได้มุมเสียดทานเท่ากับ 37.85°, 37.11° และ 35.72° สำหรับอินเตอร์เฟซระหว่างทราย KMUTT กับ mortar, non-woven geotextile และ wood ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานของอินเตอร์เฟซ (δ) กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) แสดงดังสมการที่ 5

$$\mu = \tan \delta \quad (5)$$

จากการทดสอบพบว่ามุมเสียดทานของอินเตอร์เฟซที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรงซึ่งตรงกับที่ Wu [2] กล่าว โดยดูเหมือนว่าอิทธิพลจากทฤษฎีการทดสอบมีอิทธิพลแก่คอบคลุมอิทธิพลจากเส้นการวิบัติแบบไม่เชิงเส้นที่แสดงดังรูปที่ 9 ที่อธิบายว่าการทดสอบในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำมักได้ค่านุมเสียดทานสูงกว่าการทดสอบสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูง แต่ผลการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงกลับมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือน



รูปที่ 9 เส้นการวิบัติแบบไม่เชิงเส้นระหว่างอินเตอร์เฟซ [4]



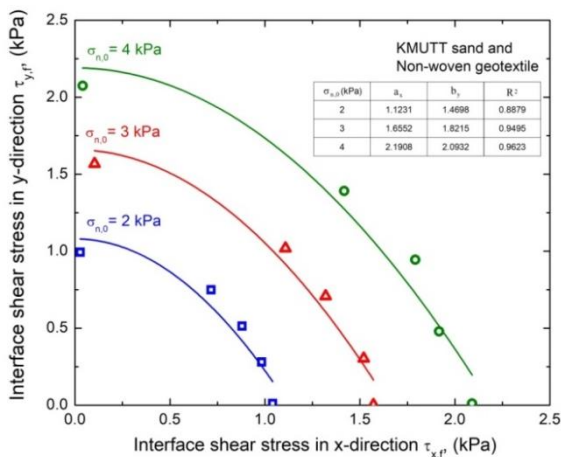
รูปที่ 10 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเตอร์เฟซทิศทางเดียว

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซสองทิศทาง

จากผลการทดสอบพบว่าเส้นโค้งการวิบัติอาจมีลักษณะเป็นวงรีที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด จึงใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ร่วมกับสมการที่ 7 เพื่อหาเส้นโค้งการวิบัติแบบวงรี โดยตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของอินเทอร์เฟซระหว่าง non-woven geotextile กับทราย KMUTT แสดงดังรูปที่ 11

$$\frac{\tau_{x,f}^2}{a_x^2} + \frac{\tau_{y,f}^2}{b_y^2} = 1 \quad (7)$$

เมื่อ a_x คือรัศมีในแนวแกน x และ b_y คือรัศมีในแนวแกน y ของเส้นโค้งการวิบัติแบบวงรี

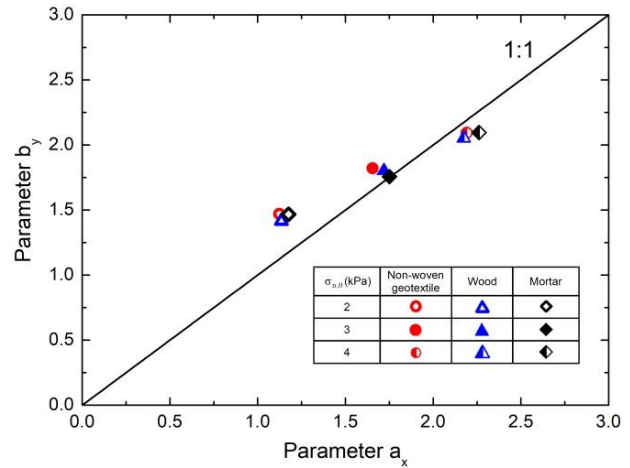


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{y,f}$ กับ $\tau_{x,f}$ และเส้นโค้งการวิบัติแบบวงรีของอินเทอร์เฟซระหว่าง non-woven geotextile กับทราย KMUTT

ข้อมูลพารามิเตอร์ a_x , b_y และ R^2 ของอินเทอร์เฟซที่ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ b_y และ a_x สำหรับทุกอินเทอร์เฟซที่ทดสอบ ได้ดังรูปที่ 12

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ a_x , b_y และ R^2

Material interface	Initial normal stress (kPa)	a_x	b_y	R^2
Non-woven geotextile	2	1.1231	1.4698	0.8879
	3	1.6552	1.8215	0.9495
	4	2.1908	2.0932	0.9623
Mortar	2	1.1353	1.4158	0.7578
	3	1.7190	1.8017	0.7808
	4	2.1746	2.0523	0.7834
Wood	2	1.1763	1.4668	0.9709
	3	1.7516	1.7573	0.8224
	4	2.2620	2.0962	0.8040



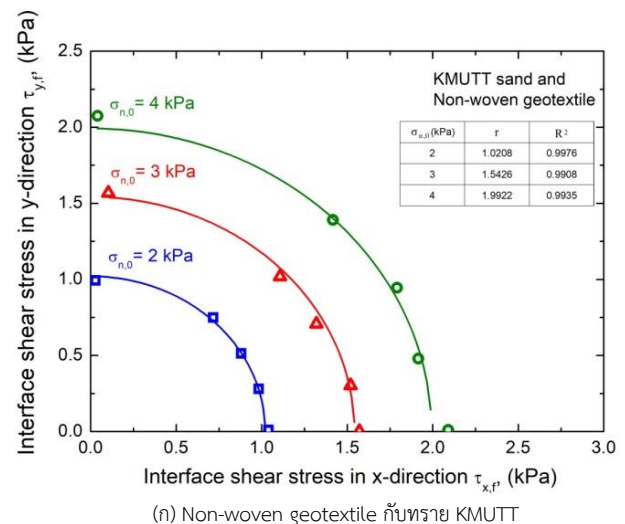
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ b_y กับ a_x

จากรูปที่ 12 พบว่าค่าพารามิเตอร์ a_x และ b_y มีความใกล้เคียงกันและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ b_y กับ a_x ใกล้เคียงกับสมการเส้นตรง $y=x$ ในทุกอินเทอร์เฟซที่ทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถอนุมานเส้นโค้งการวิบัติให้มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางที่จุดกำเนิด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และสมการที่ 8 เพื่อหาเส้นโค้งการวิบัติแบบวงกลม ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 13

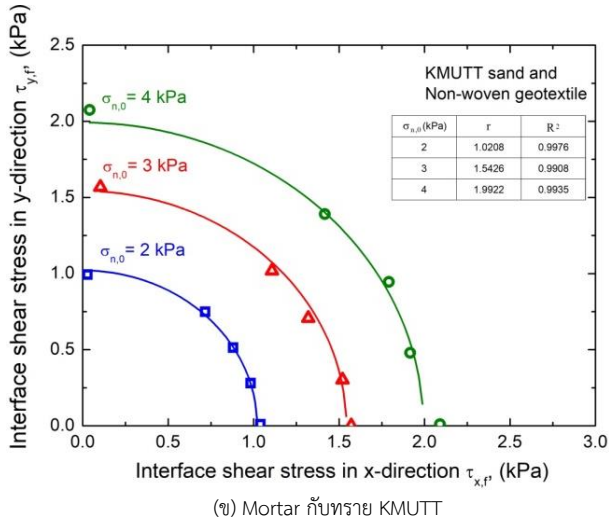
$$\tau_{x,f}^2 + \tau_{y,f}^2 = r^2 \quad (8)$$

เมื่อ r คือรัศมีของเส้นโค้งการวิบัติแบบวงกลม

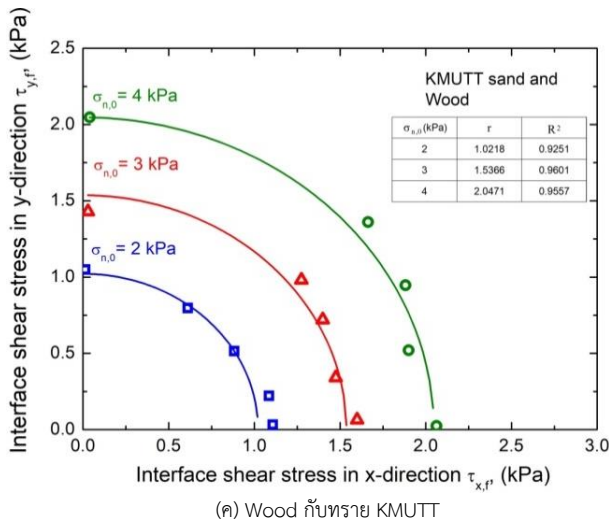
ผลการวิเคราะห์ในทุกอินเทอร์เฟซที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4 เมื่อใช้สมการที่ 8 ซึ่งเป็นสมการวงกลมในการหาเส้นโค้งการวิบัติ ได้ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าพารามิเตอร์ R^2 ในตารางที่ 3 ซึ่งวิเคราะห์จากสมการที่ 7 ซึ่งเป็นสมการวงรี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นโค้งการวิบัติของการให้แรงเฉือนสองทิศทางมีลักษณะเป็นวงกลม



(ก) Non-woven geotextile กับทราย KMUTT



(ข) Mortar กับทราย KMUTT



(ค) Wood กับทราย KMUTT

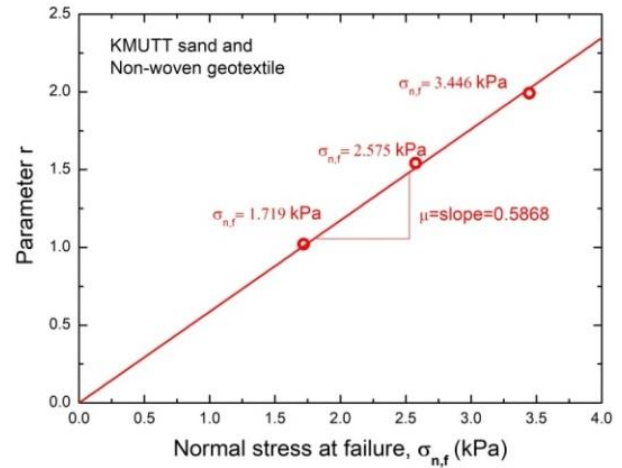
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{y,f}$ กับ $\tau_{x,f}$ และเส้นโค้งการวิบัติแบบวงกลม

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ r และ R^2

Material interface	Initial normal stress (kPa)	r	R^2
Non-woven geotextile	2	1.0208	0.9976
	3	1.5426	0.9908
	4	1.9922	0.9935
Mortar	2	1.0061	0.9564
	3	1.5033	0.8429
	4	1.9168	0.8390
Wood	2	1.0218	0.9251
	3	1.5366	0.9601
	4	2.0471	0.9557

จากรูปที่ 13 พบว่าเส้นโค้งการวิบัติจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{y,f}$ กับ $\tau_{x,f}$ จะมีลักษณะเป็น 1/4 ของวงกลมที่มีขนาดรัศมีเพิ่มขึ้นตาม σ_n ตามที่ Ming [5] กล่าวไว้ โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการให้แรงเฉือนสองทิศทางได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่งคือวิธีหาความชัน ดังรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ r กับ $\sigma_{n,f}$ สำหรับ non-woven

geotextile ซึ่งจะได้เส้นตรงที่ผ่านจุด (0,0) โดยที่ความชันของกราฟคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

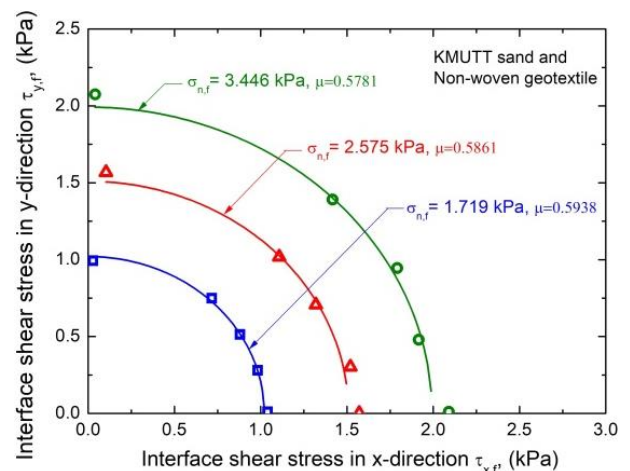


รูปที่ 14 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยวิธีหาความชันสำหรับอินเตอร์เฟสระหว่าง non-oven geotextile กับทราย KMUTT

วิธีที่สองคือวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) โดยใช้สมการที่ 9 ดังรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{y,f}$ กับ $\tau_{x,f}$ สำหรับ non-woven geotextile ซึ่งจะได้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนึ่งค่าต่อการทดสอบหนึ่งหน่วยน้ำหนักตั้งฉาก

$$\tau_{x,f}^2 + \tau_{y,f}^2 = \mu^2 \sigma_{n,f}^2 \quad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบให้แรงเฉือนสองทิศทางจากทั้ง 2 วิธีแสดงในตารางที่ 5 โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 15 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอินเตอร์เฟสระหว่าง non-oven geotextile กับทราย KMUTT

ตารางที่ 5 μ จากวิธีหาความชันและวิธีการวิเคราะห์ถดถอย

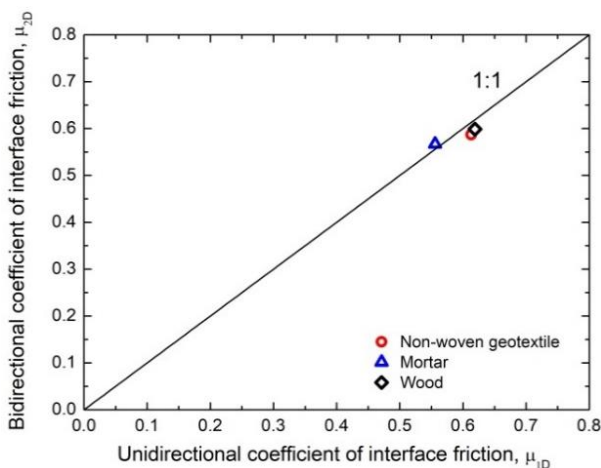
Material interface	Slope method $\mu_{TT,2D}$	Regression analysis		
		$\sigma_{n,f}$	$\mu_{TT,2D}$	Average
Non-woven geotextile	0.587	2	0.578	0.586
		3	0.586	
		4	0.594	
Mortar	0.567	2	0.553	0.573
		3	0.586	
		4	0.581	
Wood	0.599	2	0.598	0.599
		3	0.598	
		4	0.603	

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซหนึ่งทิศทางและสองทิศทางโดยใช้โต๊ะตะแคง

พารามิเตอร์ที่จะนำมาเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบหนึ่งทิศทางกับการทดสอบสองทิศทางโดยใช้โต๊ะตะแคงครั้งนี้จะใช้พารามิเตอร์สองตัว คือมุมเสียดทานของอินเทอร์เฟซและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเทอร์เฟซ ซึ่งแสดงในตารางที่ 6 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\mu_{TT,2D}$ กับ $\mu_{TT,1D}$ ได้ดังรูปที่ 16 ซึ่งพบว่าชุดข้อมูลค่อนข้างใกล้เคียงกับสมการเส้นตรง $y=x$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการให้ทิศทางการให้แรงเฉือนไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเทอร์เฟซ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซทิศทางเดียวและสองทิศทาง

Material interface	1-Directional		2-Directional	
	$\delta_{TT,1D}$ (deg)	$\mu_{TT,1D}$	$\delta_{TT,2D}$ (deg)	$\mu_{TT,2D}$
Non-woven geotextile	31.50	0.613	30.41	0.587
Mortar	29.09	0.556	29.55	0.567
Wood	31.77	0.619	30.92	0.599



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\mu_{TT,2D}$ กับ $\mu_{TT,1D}$

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้สามารถสรุปได้ 5 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. การพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางสำหรับการทดสอบแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซแบบต่อเนื่อง
2. จากการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวด้วยวิธีแรงเฉือนตรงและโต๊ะตะแคง พบว่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉาก และได้เส้นการวิบัติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงผ่านจุด (0,0) ซึ่งหมายถึงแรงยึดเกาะของอินเทอร์เฟซเท่ากับศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับ δ_{theory} จากการประมาณด้วย β -method พบว่า δ_{theory} มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยโต๊ะตะแคง และมีค่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง ซึ่งดูเหมือนว่าอิทธิพลจากทฤษฎีการทดสอบมีอิทธิพลแผ่คลุมครอบคลุมอิทธิพลจากเส้นการวิบัติแบบไม่เชิงเส้น ทำให้มุมเสียดทานของอินเทอร์เฟซที่ได้จากโต๊ะตะแคงที่ทดสอบด้วยหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ ก็ยังมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรง
3. จากการทดสอบให้แรงเฉือนสองทิศทางโดยใช้โต๊ะตะแคง พบว่าเส้นโค้งการวิบัติจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนในแนวแกน y กับหน่วยแรงเฉือนในแนวแกน x เมื่อเกิดการเลื่อนไหลจะมีลักษณะเป็น 1/4 ของวงกลม โดยมีขนาดรัศมีเพิ่มขึ้นตาม σ_n จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ r (รัศมีของเส้นโค้งการวิบัติ) กับหน่วยแรงตั้งฉากขณะเกิดการวิบัติพบว่าพารามิเตอร์ r จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉากที่เพิ่มขึ้น และได้เส้นตรงที่ผ่านจุด (0,0) ซึ่งความชันของกราฟคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยที่มีมุมเสียดทาน δ เท่ากับ 30.92°, 30.41° และ 29.55° สำหรับอินเทอร์เฟซระหว่างทราย KMUTT กับ wood, non-woven geotextile และ mortar ตามลำดับ
4. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบให้แรงเฉือนทิศทางเดียวกับการให้แรงเฉือนสองทิศทาง กล่าวคือ 31.77° กับ 30.92°, 31.50° กับ 30.41° และ 29.09° กับ 29.55° สำหรับอินเทอร์เฟซระหว่างทราย KMUTT กับ wood, non-woven geotextile และ mortar ตามลำดับพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปว่ากำลังรับแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซไม่ขึ้นกับทิศทางของการให้แรงเฉือน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเทอร์เฟซสองทิศทาง” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายซึ่งขอกล่าวไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณนายปรกรณ์ ม่วงสุข อาจารย์วิทยาลัยเทคนิคตราดที่ร่วมพัฒนาโต๊ะตะแคงนี้ขึ้นมา เพื่อใช้ในการศึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ ที่ใช้ในการศึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ขอภัยสำหรับผู้มีส่วนช่วยเหลือท่านอื่น ๆ หากมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D5321/ 5321M, Standard Test Methods for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.13, pp.1-7.
- [2] Wu, W., Wick, H., Ferstl, F. and Aschauer, F. (2007). A tilt table device for testing geosynthetic interfaces in centrifuge. *Geotextile and Geomembrane*, 26, pp. 31-38.
- [3] Joseph, E.B. (1997). *Foundation analysis and design*. 5th ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., Peoria., pp.901-903.
- [4] Thiel, R. (2001). Peak VS Residual shear strength for landfill bottom liner stability analyses. *The 15th Annual GRI Conference Hot Topics in Geosynthetics*. Folsom, PA, pp.40-70.
- [5] Yang, M., Taiebat, M. and Vaid, Y. (2016). Bidirectional monotonic and cyclic shear testing of soils: state of knowledge. *The 69th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, BC, Canada.