การพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางเพื่อการทดสอบสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟส

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

กังวาน กานดาวรวงศ์[1] ธนวรรณ แจ้งกระจ่าง[2] ยศพล เปมานุกรรักษ์[3] และ วรัช ก้องกิจกุล[4,*]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

กำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี ในปัจจุบันนิยมใช้การประมาณค่าแทนการทดสอบจริง ซึ่งมักทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสแตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสองทิศทางของอินเตอร์เฟสต่าง ๆ ที่นิยมใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ มอร์ต้า ไม้ และ จีโอเทกซ์ไทล์แบบไม่ถัก กับดินทรายในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ จากนั้นเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับการทดสอบในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูงที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรง จากผลการทดสอบพบว่า เส้นโค้งการวิบัติที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงมีลักษณะเป็นวงกลมที่รัศมีเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉากที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบแรงเฉือนตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

คำสำคัญ: การเฉือนสองทิศทาง, โต๊ะตะแคง, เส้นโค้งการวิบัติ, หน่วยแรงตั้งฉากต่ำ, อินเตอร์เฟส

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 เสาเข็ม กำแพงกันดินเสริมแรง เป็นต้น ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสซึ่งเป็นสมบัติทางวิศวกรรมที่นำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่ในประเทศไทยมีฐานข้อมูลและงานวิจัยทางด้านนี้ค่อนข้างน้อย ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้การประมาณค่าสมบัติเหล่านี้แทนการทดสอบจริง ซึ่งจึงอาจทำให้ได้ค่าที่ต่ำเกินไปในการออกแบบ ถึงแม้ว่าผลลัพธ์จะอยู่ในด้านที่ปลอดภัย (on the safe side) แต่จะทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณการก่อสร้าง นอกจากนี้สมบัติทางวิศวกรรมของอินเตอร์เฟสเหล่านี้ส่วนใหญ่จะได้มาจากการทดสอบกำลังแรงเฉือนที่อินเตอร์เฟสแบบทิศทางเดียว ซึ่งค่อนข้างแตกต่างจากสภาพจริงในสนามที่อินเตอร์เฟสอาจรับแรงเฉือนพร้อมกันมากกว่าหนึ่งทิศทางได้ในบางสถานการณ์ ในปัจจุบันการทดสอบแรงเฉือนตรงของอินเตอร์เฟส (interface direct shear test) เป็นวิธีที่นิยมใช้หาพารามิเตอร์นี้ แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการคือการทดสอบแรงเฉือนสองทิศทางได้ยาก อย่างไรก็ตามการทดสอบสองทิศทางนี้สามารถใช้โต๊ะตะแคงทดสอบแทนได้ จึงเกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสแบบสองทิศทางในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำระหว่างดินทรายกับวัสดุต่าง ๆ อาทิเช่น จีโอเทกซ์ไทล์แบบไม่ถัก (non-woven geotextile) มอร์ต้า (mortar) และ ไม้อัด (wood) เป็นต้น ทำการทดสอบโดยการให้แรงเฉือนแบบสองทิศทางจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบ

เลื่อนไถล เพื่อนิยามเส้นโค้งการวิบัติที่อินเตอร์เฟสระหว่างทรายกับวัสดุที่ต้องการทราบ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับทฤษฎีและเปรียบเทียบผลกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในสภาวะแรงตั้งฉากสูงโดยการทดสอบแรงเฉือนตรง

2. วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสองทิศทางของอินเตอร์เฟสต่าง ๆ ในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำที่มีการให้แรงเฉือนแบบต่อเนื่อง และทำการทดสอบเพื่อนิยามเส้นโค้งการวิบัติ พร้อมเปรียบเทียบผลกับการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง

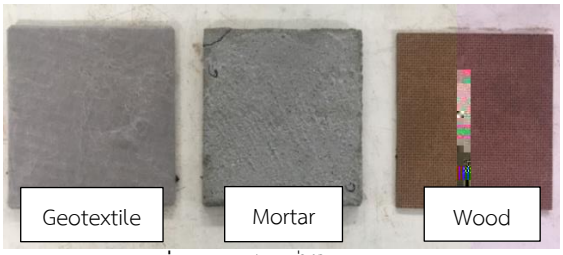
3. การเตรียมวัสดุและขั้นตอนการทดสอบ

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 และแขวนตุ้มน้ำหนักเพื่อใส่หน่วยแรงตั้งฉาก เริ่มทำการทดสอบโดยการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราการเฉือน 0.5–2 มิลลิเมตร/ นาที เก็บค่าแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบทุก ๆ 1 วินาที สิ้นสุดการทดสอบเมื่อตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ต่ออินเตอร์เฟสด้วยหน่วยแรงตั้งฉากเท่ากับ 50 kPa 100 kPa และ 150 kPa ตามลำดับ



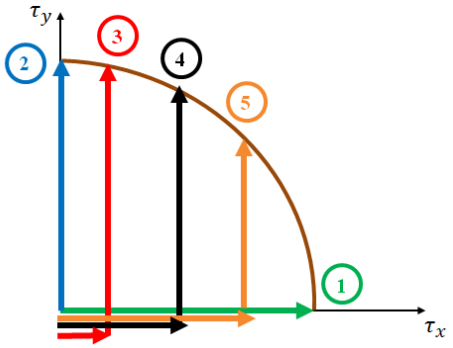
รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรง

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสสองทิศทางโดยโต๊ะตะแคง

เครื่องมือทดสอบโต๊ะตะแคงแสดงดังรูปที่ 3 มีขั้นตอนการทดสอบคือ เตรียมทรายแห้ง 500 กรัม ติดตั้งแผ่นอินเตอร์เฟสที่ต้องการทดสอบ เททรายลงในโมลด์และทำการบดอัดเพื่อควบคุมความหนาแน่นสัมพัทธ์ให้ได้ร้อยละ 70 วางตุ้มน้ำหนักลงในโมลด์ให้ได้หน่วยแรงตั้งฉากเริ่มต้น (initial normal stress) ตามที่กำหนด ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดมุมและความเร่ง ปรับระดับฐานโต๊ะตะแคงให้ได้ระดับแล้วจึงเริ่มการทดสอบ 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 จนเกิดการเลื่อนไถล



รูปที่ 3 โต๊ะตะแคงสองทิศทาง

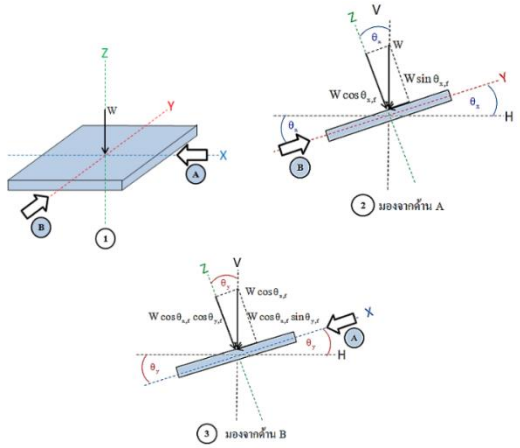


รูปที่ 4 การทดสอบย่อยสำหรับการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

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 ($_{x,f}$) และมุมเอียงรอบแกน y ($_{y,f}$) ขณะเกิดการวิบัติ สามารถคำนวณมุมรวมของระนาบกับแนวราบ ($_{t,f}$) ได้จากสมการที่ 1 สามารถคำนวณหาหน่วยแรงตั้งฉากขณะเกิดการวิบัติ ($_{n,f}$) ได้จากสมการที่ 2 ส่วนแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน x และแกน y ($_{x,f}$, $_{y,f}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 5 การหาพารามิเตอร์จากการทดสอบโต๊ะตะแคง

$$_{t,f} \quad \cos^{1} \cos_{x,f} \quad \cos_{y,f} \tag{1}$$

$$_{n,f} \quad \frac{W \cos_{x,f} \cos_{y,f}}{A} \tag{2}$$

$$_{x,f} \quad \frac{W \sin_{x,f}}{A} \tag{3}$$

$$_{y,f} \quad \frac{W \cos_{x,f} \sin_{y,f}}{A} \tag{4}$$

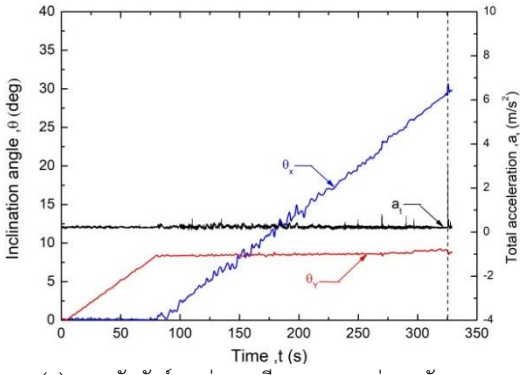
โดยที่ $_{n,f}$ คือหน่วยแรงตั้งฉากรวมขณะเกิดการวิบัติ (kPa), W คือน้ำหนักทราย KMUTT+กล่อง+ฝา+น้ำหนักแผ่นเหล็ก (kN), $_{x,f}$ คือมุมเอียงรอบแกน x ขณะเกิดการวิบัติ (deg), $_{y,f}$ คือมุมเอียงรอบแกน y ขณะเกิดการวิบัติ (deg), $_{t,f}$ คือมุมเอียงเฉลี่ยของระนาบกับแนวราบขณะเกิดการวิบัติ (deg), $_{x,f}$ คือหน่วยแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน x ขณะเกิดการวิบัติ (kPa), $_{y,f}$ คือหน่วยแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในแนวแกน y ขณะเกิดการวิบัติ (kPa) รูปที่ 6ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงรอบแกน x และ y กับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา ซึ่งเก็บข้อมูลโดยใช้แอพพลิเคชั่น Physics toolbox (เส้นสีน้ำเงินแสดงมุมเอียงรอบแกน X เส้นสีแดงแสดงมุมเอียงแกน Y และเส้นสีดำแสดงความเร่งรวม) ซึ่งในทุกการทดสอบแรงเฉือนสองทิศทางจะทดสอบโดยเอียงมุมรอบแกน y ก่อนจนถึงค่าที่ต้องการแล้วจึงเอียงมุมรอบแกน x จนเกิดการวิบัติ รูปที่ 6ข แสดงรูปขยายที่ช่วงเวลาขณะเลื่อนไถลและขั้นตอนหาค่ามุมขณะเลื่อนไถล เมื่อเกิดการเลื่อนไถล ค่าความเร่งรวม (a_t) ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด จึงกำหนดให้มุมเอียงขณะนั้นคือมุมขณะเกิดการวิบัติ โดยขั้นตอนการหามุมขณะเลื่อนไถลดังรูปที่ 6ข มีดังนี้

1. วาดเส้นแนวดิ่งผ่านจุดที่ความเร่งรวมเพิ่มขึ้นทันทีทันใด (เส้นประดำ)
2. วาดเส้นเฉลี่ยสำหรับประวัติเวลาของมุมเอียงรอบแกน x (เส้นประน้ำเงิน)
3. วาดเส้นเฉลี่ยสำหรับประวัติเวลาของมุมเอียงรอบแกน y (เส้นประแดง)
4. อ่านค่าที่จุดตัดระหว่างเส้นประดำกับเส้นประน้ำเงิน จะได้ $_{x,f}$ และอ่านค่าจุดตัดระหว่างเส้นประดำกับเส้นประแดง จะได้ $_{y,f}$

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสทิศทางเดียว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูงโดยวิธีแรงเฉือนตรงแสดงดังรูปที่ 7 ได้เส้นการวิบัติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ที่มีแรงยึดเกาะของอินเตอร์เฟสเท่ากับศูนย์



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและความเร่งรวมกับเวลา

(ข) การลากเส้นเพื่อหามุมเอียงขณะเกิดการวิบัติ

รูปที่ 6 ข้อมูลที่บันทึกจากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคง

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $_{peak}$ กับ $_{n}$ จากการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวโดยวิธีแรงเฉือนตรง

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

$$\tan \qquad (5)$$

จากการทดสอบพบว่ามุมเสียดทานของอินเตอร์เฟสที่ได้จากการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงจะมีค่าน้อยกว่าการค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรงซึ่งตรงกับที่ Wu [2] กล่าว โดยดูเหมือนว่าอิทธิพลจากทฤษฎีการทดสอบมีอิทธิพลแผ่คลอบคลุมอิทธิพลจากเส้นการวิบัติแบบไม่เชิงเส้นที่แสดงดังรูปที่ 9 ที่อธิบายว่าการทดสอบในสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากต่ำมักได้ค่ามุมเสียดทานสูงกว่าการทดสอบสภาวะหน่วยแรงตั้งฉากสูง แต่ผลการทดสอบโดยโต๊ะตะแคงกลับมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรง การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวในรูปของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับการประมาณค่าโดยใช้ β-*method* [3] จากสมการที่ 6 แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเตอร์เฟสจากการประมาณด้วย β-*method* มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยโต๊ะตะแคง และมีค่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง

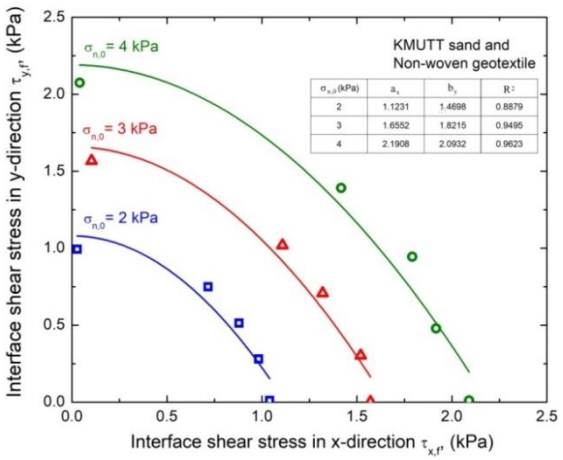
$$\tan_{theory} \quad \frac{0.18 \quad 0.0065D_r}{0.50 \quad 0.008D_r}$$

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสสองทิศทาง

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

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

เมื่อ a_x คือรัศมีในแนวแกน x และ b_y คือรัศมีในแนวแกน y ของเส้นโค้งการวิบัติแบบวงรี

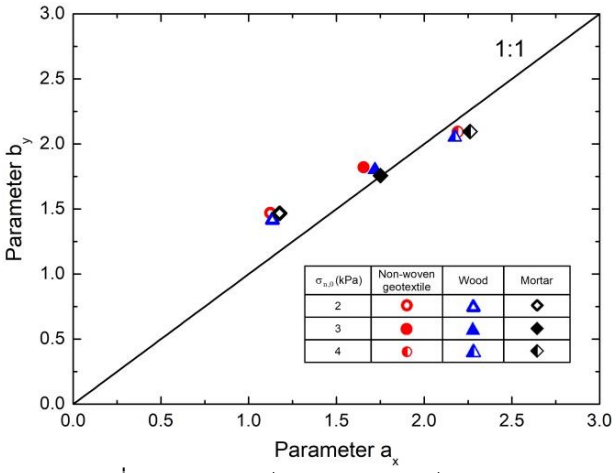


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tau_{y,f}$ กับ $\tau_{x,f}$ และเส้นโค้งการวิบัติแบบวงรีของอินเตอร์เฟสระหว่าง non-woven geotextile กับทราย KMUTT

ข้อมูลพารามิเตอร์ a_x, b_y และ R^2 ของอินเตอร์เฟสที่ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ b_y และ a_x สำหรับทุกอินเตอร์เฟสที่ทดสอบ 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



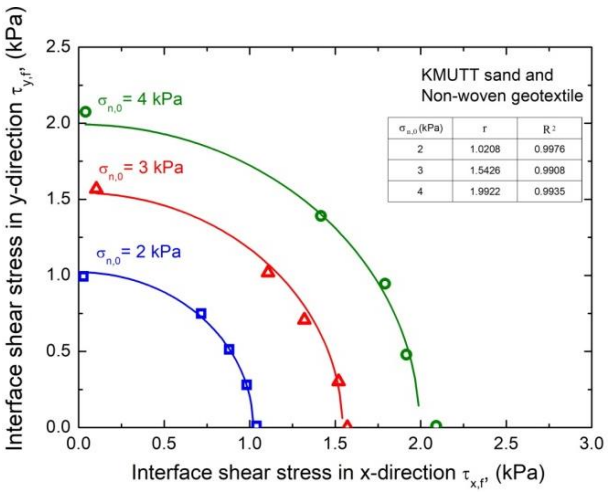
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ b_y กับ a_x

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

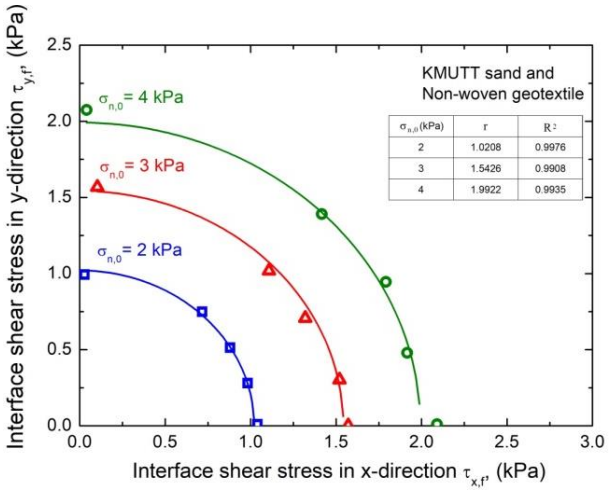
$$\tau_{x,f}^2 + \tau_{y,f}^2 = r^2 \qquad (8)$$

เมื่อ r คือรัศมีของเส้นโค้งการวิบัติแบบวงกลม

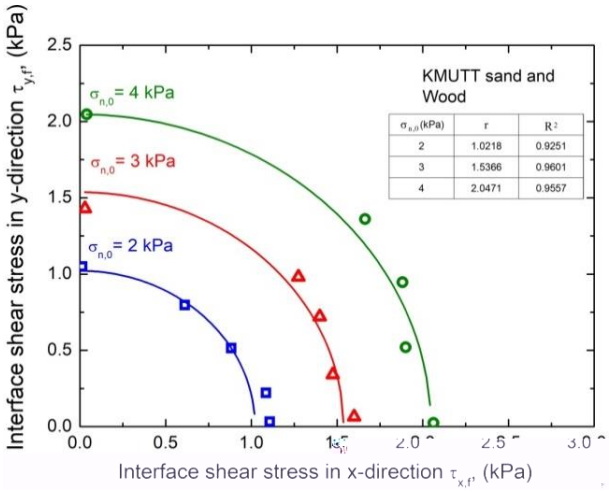
ผลการวิเคราะห์ในทุกอินเตอร์เฟสที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4 เมื่อใช้สมการที่ 8 ซึ่งเป็นสมการวงกลมในการหาเส้นโค้งการวิบัติ ได้ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าพารามิเตอร์ R^2 ในตารางที่ 3 ซึ่งวิเคราะห์จากสมการที่ 7 ซึ่งเป็นสมการวงรี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นโค้งการวิบัติของการให้แรงเฉือนสองทิศทางมีลักษณะเป็นวงกลม



(ก) Non-woven geotextile กับทราย KMUTT



(ข) Mortar กับทราย KMUTT



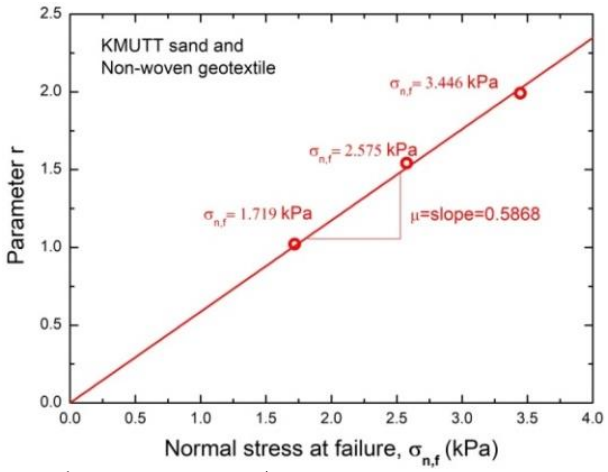
(ค) Wood กับทราย KMUTT

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $_{y,f}$ กับ $_{x,f}$ 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 $_{y,f}$ กับ $_{x,f}$ จะมีลักษณะเป็น 1/4 ของวงกลมที่มีขนาดรัศมีเพิ่มขึ้นตาม $_{n}$ ตามที่ Ming [5] กล่าวไว้ โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการให้แรงเฉือนสองทิศทางได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่งคือวิธีหาความชัน ดังรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ r กับ $_{n,f}$ สำหรับ non-woven geotextile ซึ่งจะได้เส้นตรงที่ผ่านจุด (0,0) โดยที่ความชันของกราฟคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

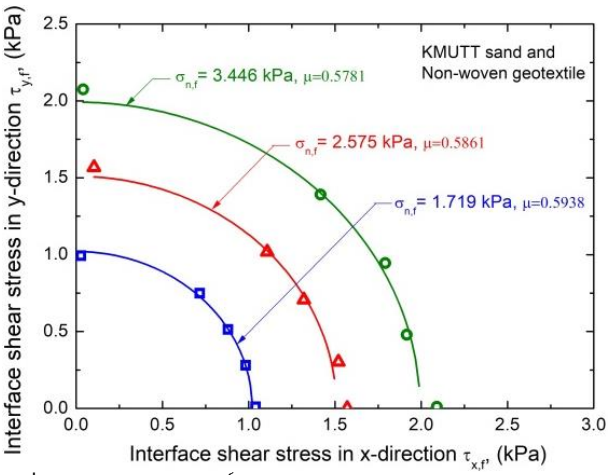


รูปที่ 14 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยวิธีหาความชันสำหรับอินเตอร์เฟสระหว่าง non-oven geotextile กับทราย KMUTT

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

$$\begin{matrix} 2 & 2 & 2 & 2 \\ x,f & y,f & & n,f \end{matrix} \qquad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดสอบให้แรงเฉือนสองทิศทางจากทั้ง 2 วิธีแสดงในตารางที่ 5 โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 15 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอินเตอร์เฟสระหว่าง non-oven geotextile กับทราย KMUTT

ตารางที่ 5 จากวิธีหาความชันและวิธีการวิเคราะห์ถดถอย

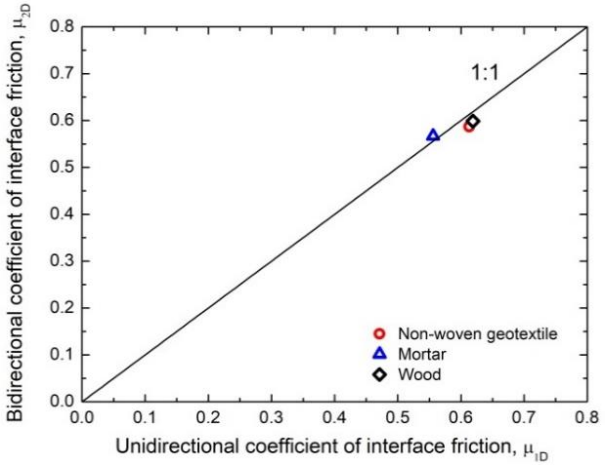
Material interface	Slope method	Regression analysis		
	$TT,2D$	n,f	$TT,2D$	Average
Non-woven geotextile	0.587	2	0.578	0.586
		3	0.586	
		4	0.594	
Mortar	0.567	2	0.553	0.573
		3	0.586	
		4	0.581	
Wood	0.599	2	0.598	0.599
		3	0.598	
		4	0.603	

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสหนึ่งทิศทางและสองทิศทางโดยใช้โต๊ะตะแคง

พารามิเตอร์ที่จะนำมาเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบหนึ่งทิศทางกับการทดสอบสองทิศทางโดยโต๊ะตะแคงครั้งนี้จะใช้พารามิเตอร์สองตัว คือมุมเสียดทานของอินเตอร์เฟสและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเตอร์เฟส ซึ่งแสดงในตารางที่ 6 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $TT,2D$ กับ $TT,1D$ ได้ดังรูปที่ 16 ซึ่งพบว่าชุดข้อมูลค่อนข้างใกล้เคียงกับสมการเส้นตรง y=x ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการให้ทิศทางการให้แรงเฉือนไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอินเตอร์เฟส

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสทิศทางเดียวและสองทิศทาง

Material interface	1-Directional		2-Directional	
	$TT,1D$ (deg)	$TT,1D$	$TT,2D$ (deg)	$TT,2D$
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 $TT,2D$ กับ $TT,1D$

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ 5 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. การพัฒนาโต๊ะตะแคงสองทิศทางสำหรับทำการทดสอบแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสแบบต่อเนื่อง
2. จากการทดสอบแรงเฉือนทิศทางเดียวด้วยวิธีแรงเฉือนตรงและโต๊ะตะแคง พบว่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉาก และได้เส้นการวิบัติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงผ่านจุด (0,0) ซึ่งหมายถึงแรงยึดเกาะของอินเตอร์เฟสเท่ากับศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับ δ_{theory} จากการประมาณด้วย β-$method$ พบว่า δ_{theory} มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยโต๊ะตะแคง และมีค่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีแรงเฉือนตรง ซึ่งดูเหมือนว่าอิทธิพลจากทฤษฎีการทดสอบมีอิทธิพลแผ่คลอบคลุมอิทธิพลจากเส้นการวิบัติแบบไม่เชิงเส้น ทำให้มุมเสียดทานของอินเตอร์เฟสที่ได้จากโต๊ะแคงที่ทดสอบด้วยหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ ก็ยังมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนตรง
3. จากการทดสอบให้แรงเฉือนสองทิศทางโดยโต๊ะตะแคง พบว่าเส้นโค้งการวิบัติจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนในแนวแกน y กับหน่วยแรงเฉือนในแนวแกน x เมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะมีลักษณะเป็น 1/4 ของวงกลม โดยมีขนาดรัศมีเพิ่มขึ้นตาม $_n$ จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ r (รัศมีของเส้นโค้งการวิบัติ) กับหน่วยแรงตั้งฉาก ขณะเกิดการวิบัติพบว่าพารามิเตอร์ r จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงตั้งฉากที่เพิ่มขึ้น และจะได้เส้นตรงที่ผ่านจุด (0,0) ซึ่งความชันของกราฟคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยที่มีมุมเสียดทาน เท่ากับ 30.92°, 30.41° และ 29.55° สำหรับอินเตอร์เฟสระหว่างทราย 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° สำหรับอินเตอร์เฟสระหว่างทราย KMUTT กับ wood, non-woven geotextile และ mortar ตามลำดับพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปว่ากำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสไม่ขึ้นกับทิศทางของการให้แรงเฉือน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาโต๊ะตะแคงเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟสสองทิศทาง” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายซึ่งขอกล่าวไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ นายปกรณ์ ม่วงสุข อาจารย์วิทยาลัยเทคนิคตราดที่ร่วมพัฒนาโต๊ะตะแคงนี้ขึ้นมา เพื่อใช้ในการศึกษาปริญญานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ ที่ใช้ในการศึกษาปริญญานิพนธ์นี้ ขออภัยสำหรับผู้มีส่วนช่วยเหลือท่านอื่น ๆ หากมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D5321/ 5321M, Standard Teat 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.