



## อิทธิพลร่วมระหว่างเส้นใยกับตาข่ายเสริมกำลังต่อสมบัติกำลังและการเสียรูปของทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกน

ปัญญาพนันนท์ ชัยวานิชยา และ วรัช ก้องกิจกุล\*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2470 9304 อีเมล: warat.kon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.08.011

รับเมื่อ 24 มีนาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 25 พฤษภาคม 2566 ตอรับเมื่อ 30 พฤษภาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 28 สิงหาคม 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

โครงสร้างทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีมักใช้ทรายเป็นวัสดุถมในหลายกรณี ทรายที่ใช้อาจมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ไม่เพียงพอหรืออาจมีการเสียรูปที่มากเกินไปจึงจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังเสียก่อน การเสริมกำลังที่นิยมใช้มีด้วยกัน 2 รูปแบบ กล่าวคือ 1) การผสมทรายกับเส้นใย และ 2) การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังพอลิเมอร์เป็นชั้น ๆ งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่สนใจศึกษาอิทธิพลของการผสมทรายกับเส้นใย และอิทธิพลของการใช้ตาข่ายเสริมกำลังแยกกรณีกัน งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติกำลังและการเสียรูปของทรายที่ผสมกับเส้นใยและเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเข้าด้วยกัน โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ ตัวอย่างทดสอบถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยระบบแรงดันสุญญากาศสองชั้น และใช้การอัดตัวอย่างจากภายในตัวอย่างด้วยแรงสุญญากาศบางส่วนเท่ากับ 30 60 และ 85 กิโลปาสคาล ตัวอย่างทดสอบจำแนกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ 1) ทรายไม่เสริมกำลัง 2) ทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใย 3) ทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง และ 4) ทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง อัตราส่วนผสมเส้นใยที่ใช้เท่ากับร้อยละ 0 ถึง 1 โดยมวลแห้ง การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังใช้ตาข่ายจำนวน 3 ชั้น ผลการทดสอบนำมาวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ค่ามุมเสียดทานภายในทราย ค่าโมดูลัสซีแคนท์ ( $E'_{50}$ ) และค่าอัตราส่วนปัวซองของเฉลี่ย ( $\nu_{50}$ ) แล้วทำการเปรียบเทียบสมบัติกำลังและการเสียรูปจากการศึกษาพบว่า การผสมทรายกับเส้นใยจะทำให้ 1) ตัวอย่างเกิดการขยายตัวด้านข้างมากขึ้นเมื่อรับแรงอัดในแนวตั้ง และ 2) ความเชื่อมโยงแน่นและมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำตาข่ายเสริมกำลังมาใช้ร่วมกันจึงทำให้ 1) เกิดแรงในตาข่ายเสริมกำลังที่มากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดแรงโอบรัดภายในมากขึ้น และ 2) มุมเสียดทานภายในที่มากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการเสริมกำลังทรายด้วยการผสมกับเส้นใยร่วมกับการใช้ตาข่ายเสริมกำลังสามารถปรับปรุงสมบัติกำลังและการเสียรูปได้ดีกว่าการใช้การเสริมกำลังด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงอย่างเดียว

**คำสำคัญ:** การทดสอบแรงอัดสามแกน กำลังรับแรงอัด ความแข็งแรง ตาข่ายเสริมกำลัง เส้นใย

การอ้างอิงบทความ: ปัญญาพนันนท์ ชัยวานิชยา และ วรัช ก้องกิจกุล, “อิทธิพลร่วมระหว่างเส้นใยกับตาข่ายเสริมกำลังต่อสมบัติกำลังและการเสียรูปของทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกน,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 1-14, เลขที่บทความ 251-156824, ม.ค.-มี.ค. 2568.



## Mutual Effect of Fibre and Geogrid on the Strength and Deformation Properties of Sand in Triaxial Compression Test

Panjapanon Chaiwanichaya and Warat Kongkitkul\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

\*Corresponding Author, Tel. 0 2470 9304, E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.08.011

Received 24 March 2023; Revised 25 May 2023; Accepted 30 May 2023; Published online: 24 August 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Sand is a typical backfilling material for geotechnical engineering structures. However, in many cases, its bearing capacity is insufficient, or its deformation is excessive, and therefore a reinforcing method is necessary. There are generally two reinforcing methods, i.e., 1) mixing with fibre; and 2) reinforced with geogrids in layers. Most of the past studies have been performed to investigate effect of these two methods separately. This study interests on studying the strength and deformation properties of a sand mixed with fibre and reinforced with geogrid layers by conducting a series of Consolidated-Drained Triaxial Compression (CDTC) tests. CDTC test samples were fully saturated by a double-vacuuming technique and consolidated by applying partial vacuuming of either 30, 60 or 85 kPa from the sample's inside. There are four sample types: 1) unreinforced sand; 2) sand mixed with fibre; 3) geogrid-reinforced sand; and 4) geogrid-reinforced sand mixed with fibre. Fibre contents were varied from 0 to 1% by dry mass. Three layers of reinforcing geogrid were used. Test results were analysed for compressive strength, internal friction angle, secant modulus ( $E'_{50}$ ) and average Poisson's ratio ( $\nu_{50}$ ), and then they were compared. It was found that mixing sand with fibre results in: 1) more lateral expansion upon applying the vertical compression; and 2) increase of cohesion and internal friction. Henceforth, when reinforcing the fibre-mixed sand with geogrid layers, the followings are resulted: 1) increase of the tensile force mobilised in geogrid which thus increases the confining stress; and 2) increase of compressive strength of geogrid-reinforced sand by the increasing internal friction angle. Therefore, reinforcing sand by mixing it with fibre and reinforcing it with geogrid layers mutually can improve its strength and deformation properties better than using only one of them alone.

**Keywords:** Triaxial Compression Test, Compressive Strength, Stiffness, Geogrid, Fibre

Please cite this article as: P. Chaiwanichaya and W. Kongkitkul, "Mutual effect of fibre and geogrid on the strength and deformation properties of sand in triaxial compression test," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 1, pp. 1-14, ID. 251-156824, Jan.-Mar. 2025 (in Thai).

## 1. บทนำ

ทราายเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญและนิยมใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี อาทิ คันทางถนน กำแพงกันดิน และงานถมดิน อย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานาน สมบัติที่โดดเด่นของทราย คือ การรับแรงเฉือนได้ดี มีการทรุดตัวต่ำ และสามารถบดอัดได้ง่าย อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงเฉือนของทรายจะแปรผันตามมุมเสียดทานภายในของทราย ความเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาค และแรงดันโอบรัดที่กระทำต่อมวลทราย ในกรณีที่ทรายมีกำลังรับแรงเฉือนไม่เพียงพอหรือมีการเสียรูปที่มากเกินไปมักนิยมใช้การเสริมกำลังด้วยวิธีการต่าง ๆ จากการสำรวจงานวิจัยในอดีตพบว่า การเสริมกำลังทรายมักแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเป็นชั้น ๆ [1] และ 2) การเสริมกำลังด้วยการผสมกับเส้นใย [2], [3]

วิธีการเสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยที่นิยมใช้กัน คือ การนำทรายมาผสมเข้ากับเส้นใยที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ แล้วหาค่าอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมมากที่สุด จากการศึกษาของ Consoli และคณะ [4] พบว่า เมื่อนำทรายมาผสมกับซีเมนต์คลุกด้วยเส้นใย ค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่อมา Consoli และคณะ [5] ศึกษาการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันสามชนิดประกอบด้วย โพลีเอสเตอร์ โพลีโพรพิลีน และเส้นใยแก้ว มาผสมร่วมกับซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและพบว่า การเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วสามารถเพิ่มมุมเสียดทานสูงสุดของตัวอย่างทรายทั้งที่ปราศจากซีเมนต์และที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ นอกจากนี้ การเสริมกำลังด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์และเส้นใยโพลีโพรพิลีนสามารถเพิ่มค่าสลิปเนสของตัวอย่างทรายได้ อันเป็นผลมาจากความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น Anagnostopoulos และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทรายที่ผสมด้วยเส้นใยและพบว่า การเสริมกำลังด้วยเส้นใยสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้กับทรายได้ โดยกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใย ความหนาแน่น และขนาดสัมพัทธ์ของเม็ดทราย นอกจากนี้ Choobbasti และคณะ [7] ศึกษาการเสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน

และพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรายจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น

การใช้ตาข่ายเสริมกำลังเพื่อเสริมกำลังในทรายได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย ซึ่งจะพบได้มากกับการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Reinforced Soil Retaining Wall) และลาดดินเสริมกำลัง (Reinforced Soil Slope) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเป็นชั้น ๆ สามารถเพิ่มกำลังอัดในแนวตั้งและลดการเสียรูปในแนวราบได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะแรงดันโอบรัดต่อทรายจะมากขึ้นเนื่องจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังจะมีค่ามากขึ้นจากการขยายตัวแนวราบเมื่อทรายรับแรงในแนวตั้ง ดังนั้นเมื่อเสริมกำลังทรายด้วยตาข่ายเสริมกำลังเป็นชั้น ๆ ความสามารถในการรองรับน้ำหนักและเสถียรภาพของโครงสร้างทรายก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถก่อสร้างกำแพงกันดินและลาดดินได้สูงหรือชันมากขึ้น Sommers และ Viswanadham [8] ทดสอบแบบจำลองข้อหมุนเหวี่ยงกับแบบจำลองฐานรากที่วางอยู่บนลาดดินเสริมกำลังและพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นเสริมกำลังในลาดดินสามารถเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินเมื่อรับแรงกระทำจากฐานรากแถบได้อย่างมีนัยสำคัญ สุรพันธ์ และ วรัช [9] ทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีรูปร่างช่องเปิดแตกต่างกันและพบว่า เมื่อกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมแรงมีค่าสูงเพียงพอ การวิบัติของทรายเสริมกำลังจะถูกควบคุมจากการวิบัติในส่วนของทรายโดยไม่เกิดการฉีกขาดที่ตาข่ายเสริมกำลัง นอกจากนี้ Liu และคณะ [10] ทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายแรงดันโอบรัด ประเภทของตาข่ายเสริมกำลังและเงื่อนไขการเสริมแรงแบบยัดรี้งและพบว่า ปัจจัยที่ศึกษาล้วนมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดทั้งสิ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตจะเห็นได้ว่า กระบวนการปรับปรุงคุณภาพทรายด้วยการเสริมกำลังทั้งวิธีการนำทรายไปผสมกับเส้นใยและการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเป็นชั้น ๆ สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักและลดการเสียรูปได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตยังไม่

ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้วิธีการเสริมกำลังทั้งสองวิธีร่วมกันที่มีต่อสมบัติกำลังและการเสีรูปของทราย งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของทรายที่เสริมกำลังด้วยการผสมกับเส้นใยร่วมกับการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเป็นชั้น ๆ ด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน แล้วนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสมบัติกำลังและการเสีรูปได้แก่ ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน ค่าสติเฟนส และการขยายตัวแนวราบ มาเปรียบเทียบกัน

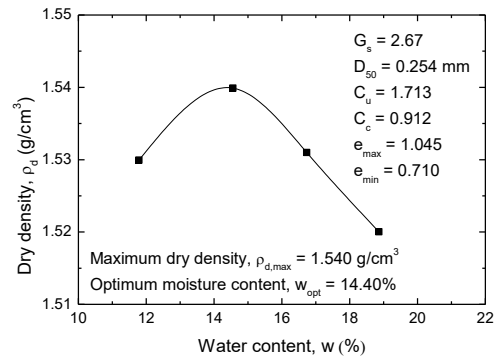
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายที่นำมาจากแม่น้ำนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม เมื่อนำมาที่ห้องปฏิบัติการ ทรายถูกนำมาผ่านกระบวนกรล้างด้วยน้ำประปาเพื่อขจัดสิ่งสกปรกและฝุ่นออกจนสะอาด แล้วจึงนำไปอบให้แห้งเพื่อขจัดสารอินทรีย์ [9], [11] จากนั้นจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน แล้วคัดเลือกเฉพาะส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.424 มม.) แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มม.) มาใช้งาน ดังนั้นทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแกนในงานวิจัยนี้ จึงเป็นทรายสะอาดและมีลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคแบบสม่ำเสมอ รูปที่ 1 แสดงสมบัติกายภาพสมบัติดัชนี และสมบัติการบดอัดของทรายนี้

เส้นใยที่ใช้ผสมกับทรายเพื่อเสริมกำลังในงานวิจัยนี้มาจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol; PVA) ซึ่งมีสมบัติการยึดตัวต่ำ มีความต้านทานแรงดึงสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เส้นใยแต่ละเส้นมีความยาวเฉลี่ยและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 12 มม. และ 0.1 มม. ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเส้นใยที่นำมาใช้ เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ไมโครเมตร ยาว 12 มม. มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.3 และกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 1079 กิโลปาสคาล ความเครียดจุดฉีกขาดเท่ากับร้อยละ 8.7 และมีค่าสติเฟนสเท่ากับ 28 จิกะปาสคาล

ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตาข่ายเสริมกำลังชนิดรับแรงดึงได้สองทิศทาง (Biaxial Geogrid) ผลิตจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester; PET) จากข้อมูลของ



รูปที่ 1 เส้นโค้งการบดอัดจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

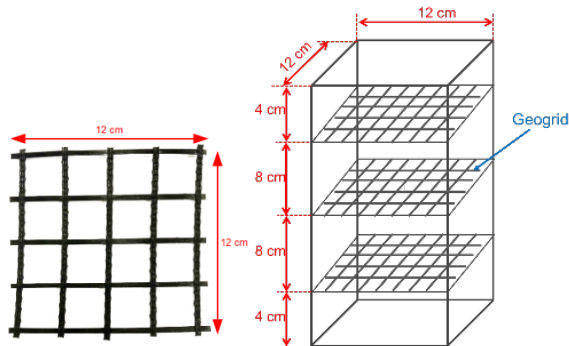


รูปที่ 2 เส้นใย PVA

ผู้ผลิตพบว่า มีกำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength;  $T_{ult}$ ) เท่ากับ 40 กิโลนิวตัน/เมตร แผ่นตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้มีขนาดกว้างเท่ากับ 12 ซม. และยาวเท่ากับ 12 ซม. การเสริมกำลังในตัวอย่างทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกนจะใช้แผ่นตาข่ายเสริมกำลังนี้จำนวน 3 ชั้น รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการจัดเรียงและระยะห่างระหว่างชั้นของแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง

### 2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนเริ่มด้วยการหล่อลื่นฝابนและฐานของเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยจารบีซิลิโคนสุญญากาศหนา 50 ไมครอน จากนั้นวางแผ่นยางพาราธรรมชาติขนาด 120×120×0.3 มม. ลงบนชั้นจารบีเพื่อลดแรงเสียดทานในการสัมผัสระหว่างตัวอย่าง



รูปที่ 3 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังและการจัดเรียงในตัวอย่างทรายสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน

ทรายทดสอบกับฝาบนและฐานของเครื่องทดสอบ จากนั้นใช้เมมเบรนหุ้มและรัดแน่นเข้ากับฐาน และนำแบบหล่อที่เตรียมไว้ล่วงหน้ามาติดตั้งกับฐานและให้แรงดันสุญญากาศบางส่วนเพื่อดูดผิวของเมมเบรนให้แนบสนิทกับผิวแบบหล่อด้านใน ตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้มีรูปทรงปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัดกว้าง 120 มม. ยาว 120 มม. และสูง 240 มม. (รูปที่ 3) ตัวอย่างทรงปริซึมนี้ออกคล่องกับทิศทางการรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังที่มีสองทิศทาง และมีความเหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถตัดแต่งตาข่ายเสริมกำลังที่มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปวงกลมได้

ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างทรายทั้งที่ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกัน โดยผสมทรายแห้งกับน้ำที่มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 14.4 ของมวลทรายแห้งที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ตามรูปที่ 1) ในกรณีที่ต้องเตรียมตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใย จะเติมเส้นใยเข้าไปในส่วนผสมทรายและน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณเส้นใยที่ใช้ได้คือร้อยละ 0.1 0.2 0.4 0.6 และ 1.0 ของมวลทรายแห้ง จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ได้มาบรรจุในแบบหล่อที่เตรียมไว้ล่วงหน้า

การเตรียมตัวอย่างในแบบหล่อทำโดยวิธีการตอกกระทุ้งเปียก (Wet Tamping) ใช้การแบ่งส่วนผสมลงในแบบหล่อเป็น 12 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนา 20 มม. หลังจากตอกกระทุ้งแล้ว ส่วนผสมในแต่ละชั้นมีปริมาณทรายแห้งเท่ากับ 0.426 กก. การตอกกระทุ้งจะใช้ค้อนยางส่งแรงผ่านแผ่น

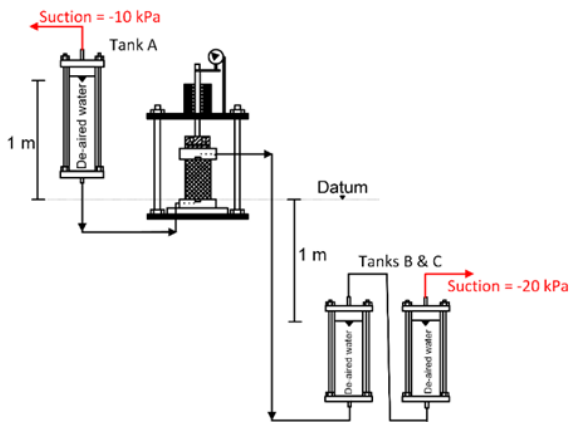
ไม้้อตรองรับบนผิวส่วนผสมในแบบหล่อ จนกว่าชั้นส่วนผสมที่กำลังตอกกระทุ้งจะมีความหนาเท่ากับ 20 มม. ด้วยวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบนี้จะทำให้ทุกตัวอย่างมีปริมาณทรายแห้งเท่ากับ 5.12 กก. เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากันหรือมีความหนาแน่นเท่ากันเนื่องจากมวลและปริมาณของเส้นใยที่ใช้มีค่าน้อยมาก เพื่อเตรียมตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง จะทำการตอกกระทุ้งส่วนผสมให้ตรงกับตำแหน่งการจัดเรียงแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง (รูปที่ 3) จากนั้นวางแผ่นตาข่ายเสริมกำลังบนผิวส่วนผสม และบรรจุส่วนผสมในแบบหล่อ จากนั้นทำการตอกกระทุ้งเป็นชั้น ๆ จนกระทั่งผิวบนส่วนผสมมาบรรจบกับตำแหน่งการจัดเรียงแผ่นตาข่ายเสริมกำลังของชั้นถัดไป ดำเนินการซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจัดเรียงแผ่นตาข่ายเสริมกำลังครบ 3 ชั้น หลังจากตอกกระทุ้งส่วนผสมชั้นสุดท้ายเสร็จสิ้น ทำการปิดผิวหน้าให้เรียบเนียนและประกบฝาบนตัวอย่าง จากนั้นหุ้มปลายเมมเบรนกับฝาบนและรัดให้แน่น และทำการต่อท่อเพื่อเชื่อมต่อภายในกับภายนอกของตัวอย่างที่บริเวณฝาบนและฐาน

### 2.3 วิธีการทำให้อิมตัวอย่างน้ำและวิธีการอัดตัวอย่าง

เนื่องจากตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยมีขนาดใหญ่และขาดแคลนเซลล์แรงอัดสามแกนที่มีขนาดใหญ่เพียงพอ วิธีการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการอัดตัวอย่างแบบให้แรงสุญญากาศบางส่วนกระทำต่อตัวอย่างจากภายใน อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ได้จากวิธีการเตรียมตัวอย่างนี้ไม่อิมตัวด้วยน้ำ และมีแรงดูดระหว่างอนุภาค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำก่อนที่จะใช้แรงสุญญากาศบางส่วนกระทำต่อตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคระบบสุญญากาศสองชั้น (Double Vacuuming Technique) [12] เพื่อให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำ

การทำให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำด้วยเทคนิคระบบสุญญากาศสองชั้นทำโดยนำน้ำไหลเข้าตัวอย่างจากฐานและไหลออกจากฝาบนพร้อมดูดฟองอากาศออกมา ใช้กระบอกน้ำทั้งหมด 3 กระบอก (A, B, C) โดยกระบอก A บรรจุน้ำเต็มโดยระดับผิวน้ำสูงกว่าระดับอ้างอิงที่ระดับฐานประมาณ 1 เมตร และมีแรงดันสุญญากาศ  $-10$  กิโลปาสกาล กระบอก B

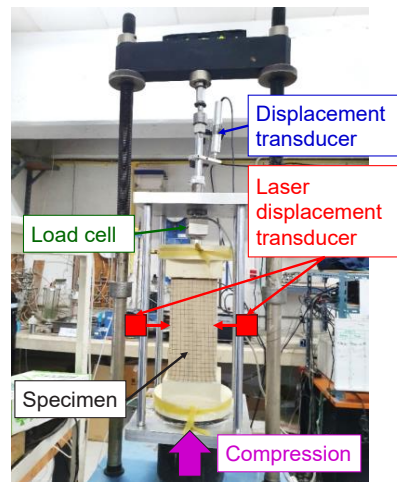




รูปที่ 4 แผนผังการไหลเข้าและออกจากตัวอย่างทดสอบเพื่อให้อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยเทคนิคระบบสุญญากาศสองชั้น

และ C บรรจุบางส่วนโดยระดับผิวน้ำต่ำกว่าระดับอ้างอิงประมาณ 1 เมตร และมีแรงดันสุญญากาศ  $-20$  กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 4 น้ำจะไหลผ่านตัวอย่างออกมาทางกระบอก B และ C โดยใช้เวลาประมาณ 2–3 ชั่วโมง เพื่อขจัดฟองอากาศและทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ

หลังจากทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ลดระดับความสูงของกระบอก A ให้เท่ากับกระบอก B และ C จากนั้นปรับระดับแรงดันสุญญากาศบางส่วนในกระบอก A เป็น  $-20$  กิโลปาสคาล ให้เท่ากับระดับแรงดันสุญญากาศบางส่วนในกระบอก B และ C เพื่อหยุดการไหลของน้ำ รอยจนกระทั่งน้ำหยุดไหลเข้าและออกตัวอย่าง จากนั้นเพิ่มแรงดันสุญญากาศบางส่วนให้เท่ากับ  $-30$  กิโลปาสคาล เท่ากันในกระบอก A, B และ C เพื่ออัดตัวอย่าง หลังจากอัดตัวอย่างด้วยแรงดันสุญญากาศบางส่วนเสร็จสิ้น แรงดันโอบริดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันรวมซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ และแรงดันน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-30$  กิโลปาสคาล หรือ  $30$  กิโลปาสคาล จากนั้นนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อและติดตั้งเครื่องมือวัด แล้วเชื่อมตัวอย่างโดยกดตัวอย่างในแนวตั้งด้วยอัตราการเคลื่อนที่  $0.3$  มม./นาที หรือคิดเป็นอัตราความเครียดร้อยละ  $0.125$  ต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ



รูปที่ 5 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าและเครื่องมือทดสอบ

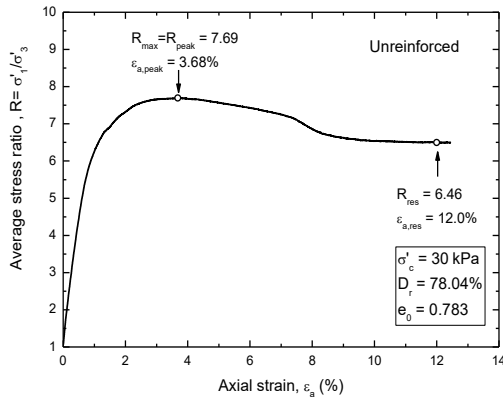
## 2.4 เครื่องมือวัด

รูปที่ 5 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดเข้ากับเซลล์กดตัวอย่างที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องกดตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือวัดที่ใช้ประกอบด้วย 1) เซลล์วัดแรง (Load Cell) จำนวน 1 ตัว ติดตั้งเหนือฝาดบนเพื่อวัดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างในแนวตั้ง 2) ทรานสดิวเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement Transducer) จำนวน 1 ตัว ติดตั้งบริเวณด้านบนเซลล์กดตัวอย่างเพื่อวัดการเสียรูปของตัวอย่างในแนวตั้ง 3) เซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัด (Laser Displacement Sensor) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณกึ่งกลางความสูงตัวอย่างเพื่อวัดการเสียรูปของตัวอย่างในแนวราบ และ 4) ทรานสดิวเซอร์วัดแรงดัน (Pressure Transducer) จำนวน 1 ตัว เพื่อวัดแรงดันสุญญากาศบางส่วนที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้ง 4 ประเภทจะถูกเก็บและบันทึกผลด้วยเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) แบบอัตโนมัติ ซึ่งจะเก็บและบันทึกค่าทุก ๆ 1 วินาที

## 3. ผลการทดลองและอภิปราย

### 3.1 กำลังรับแรงเฉือนของทรายไม่เสริมกำลัง

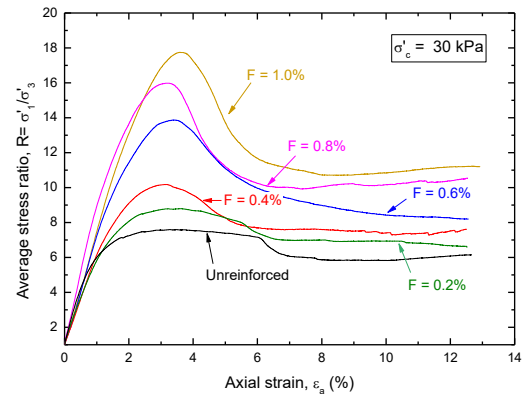
งานวิจัยนี้ใช้ค่าอัตราส่วนความเค้นเฉื่อย ( $R$ ) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างความเค้นหลักประสิทธิภาพสูงสุด ( $\sigma'_1$ )



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  จากตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง

ต่อความเค้นหลักประสิทธิผลต่ำสุด ( $\sigma'_3$ ) เนื่องจากการกระจายความเค้นในตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีค่าไม่สม่ำเสมอ หรือค่า  $\sigma'_1$  และ  $\sigma'_3$  ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นค่า  $\sigma'_1$  ในที่นี้จึงกำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของความเค้นดิ่งประสิทธิผล ( $\sigma'_1$ ) ที่วัดได้จากเซลล์วัดแรงและค่า  $\sigma'_3$  เท่ากับค่าเฉลี่ยของแรงดันโอบรัดประสิทธิผล ( $\sigma'_3$ ) ที่วัดได้จากทรานดิวเซอร์วัดแรงดัน ดังนั้นค่า  $R$  เป็นค่าอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยที่คำนวณจากค่าที่วัดจากเซลล์วัดแรงและทรานดิวเซอร์วัดแรงดัน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับความเครียดแนวแกน ( $\epsilon_a$ ) ที่ได้จากตัวอย่าง ทรายที่ไม่เสริมกำลัง จากรูปนี้จะพบว่า ค่า  $R$  จะเพิ่มขึ้นตามค่า  $\epsilon_a$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมาถึงจุดยอดซึ่ง  $R$  มีค่าสูงสุด ค่า  $R$  ณ จุดนี้จะเรียกว่าอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยที่จุดยอด ( $R_{peak}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.69 ค่าความเครียดแนวแกน ณ จุดนี้ ( $\epsilon_{a,peak}$ ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.68 คุณลักษณะดังกล่าวแสดงพฤติกรรมการแข็งขึ้นด้วยความเครียด (Strain-hardening) เมื่อค่า  $\epsilon_a$  เพิ่มขึ้นต่อไปจนพ้นจุดนี้ไปแล้วจะพบว่า ค่า  $R$  จะค่อย ๆ ลดลงตามค่า  $\epsilon_a$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงพฤติกรรมการอ่อนลงด้วยความเครียด (Strain-softening) จวบจนเริ่มเข้าสู่จุดเริ่มต้นของสถานะคงเหลือ (Residual State) ซึ่งค่า  $R$  จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า  $\epsilon_a$  ที่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ค่า  $R$  เริ่มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อค่า  $\epsilon_a$  มีค่าตั้งแต่



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ปริมาณแตกต่างกัน

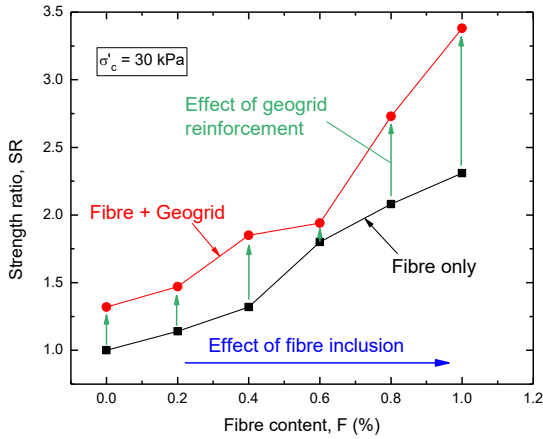
ร้อยละ 10 ขึ้นไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกนิยามค่า  $R$  เมื่อเข้าสู่สถานะคงเหลือ หรืออัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยคงเหลือ ( $R_{res}$ ) ที่ค่า  $\epsilon_a$  เท่ากับร้อยละ 12 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.46

### 3.2 กำลังรับแรงเฉือนของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใย

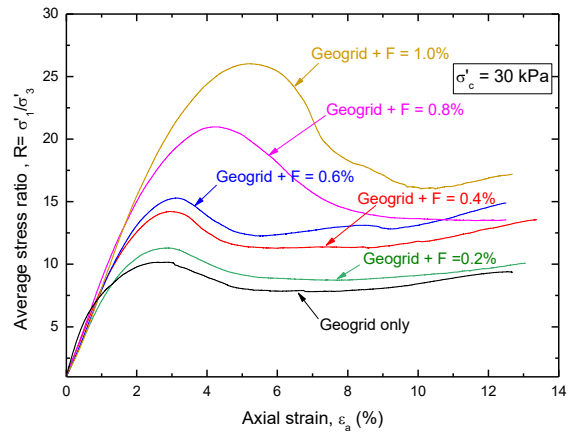
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  ที่ได้จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยด้วยปริมาณเส้นใย ( $F$ ) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากทรายที่ไม่เสริมกำลัง (รูปที่ 6) จากรูปนี้จะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R$  และค่าความเครียด ( $\epsilon_a$ ) สำหรับค่า  $F$  ที่แตกต่างกันแสดงพฤติกรรมแข็งตัวด้วยความเครียดจวบจนถึงค่าความเครียดควบคุมค่าหนึ่ง (อยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึง 4) ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่เสริมกำลัง อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยสูงสุด ( $R_{max}$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้ เมื่อทดสอบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ค่า  $R$  จากตัวอย่างที่มีค่า  $F$  มากกว่าจะยังคงมีค่าสูงกว่าค่า  $R$  จากตัวอย่างที่มีค่า  $F$  น้อยกว่า แม้ว่าความแตกต่างจะลดลงเมื่อเทียบกับความแตกต่างของค่า  $R_{max}$

ค่า  $R_{max}$  ในรูปที่ 7 มีความหมายเดียวกันกับค่า  $R_{peak}$  ในรูปที่ 6 ในที่นี้เราจะนิยามค่าอัตราส่วนกำลัง (Strength Ratio; SR) ให้เท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่า  $R_{max}$  ของตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ค่า  $F$  ต่าง ๆ ต่อค่า  $R_{max}$  ของ



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $SR$  กับ  $F$  ระหว่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลัง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ปริมาณแตกต่างกันร่วมกับตาข่ายเสริมกำลัง

ตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง (เท่ากับ 7.69) ตารางที่ 1 รวบรวมค่า  $R_{max}$  และ  $SR$  ที่ได้จากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 7 รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $SR$  กับ  $F$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 7 จากรูปที่ 8 พบได้ว่า ค่า  $SR$  เพิ่มขึ้นตามค่า  $F$  ที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 1.0 ค่า  $SR$  เท่ากับ 2.31 หรือกำลังรับแรงอัดของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยด้วยปริมาณเส้นใยเพียงร้อยละ 1.0 มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของทรายที่ไม่เสริมกำลังถึง 2.31 เท่า อย่างไรก็ตาม ค่า  $SR$  ยังคงแสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นโดยยังไม่แสดงจุดสูงสุดเมื่อค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 1.0 ซึ่งเป็นปริมาณเส้นใยสูงสุดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังเฉือนของทรายเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นเพราะว่า เส้นใยที่ผสมกับทรายจะช่วยปรับปรุงการประสานกันระหว่างอนุภาค ซึ่งจะทำการกระจายความเครียดภายในทราย (Strain Distribution) มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้แรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Particle Interlocking) มีประสิทธิภาพดีขึ้น พฤติกรรมนี้เปรียบเสมือนว่า ค่ามุมเสียดทานภายในที่ปรากฏ (Apparent Internal Friction Angle) และค่าความเชื่อมแน่นที่ปรากฏ (Apparent Cohesion) ของทรายจะมีค่าเพิ่ม

ขึ้นตามค่า  $F$  ที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Choobbasti และคณะ [10] ซึ่งได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวอย่างคายน้ำกับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และพบว่าเส้นใยที่ผสมกับทรายจะทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวประสานกันระหว่างเส้นใยกับอนุภาคทราย ทำให้แรงระหว่างอนุภาคทรายสามารถกระจายไปสู่เส้นใยในรูปแบบของแรงดึงในเส้นใย และแรงดึงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีปฏิสัมพันธ์ย้อนกลับกับอนุภาคทรายซึ่งจะทำให้อนุภาคทรายยึดเกาะกันดีขึ้น

### 3.3 กำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  ที่ได้จากตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ค่า  $F$  ต่าง ๆ ร่วมกับการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพียงอย่างเดียว ค่า  $R$  และค่าความเครียด ( $\epsilon_a$ ) มีความสัมพันธ์ที่แสดงถึงการแข็งตัวด้วยความเครียดในลักษณะที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 7 โดยค่า  $R_{max}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ณ จุดที่ ค่า  $R$  สูงสุด ( $R = R_{max}$ ) ค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นกับค่า  $F$  นอกจากนี้ เมื่อทดสอบจนเข้า



ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กำลังและการเสียรูประหว่าง 1) ทราายไม่เสริมกำลัง 2) ทราายเสริมกำลังด้วยเส้นใย 3) ทราายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง และ 4) ทราายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

เลขที่	ชื่อการทดสอบ	อัตราส่วนความเค้นสูงสุด, $R_{max}$	อัตราส่วนกำลัง, SR	ความเครียดแนวแกนที่อัตราส่วนความเค้นสูงสุด, $\epsilon_{a,max}$ (%)	ความเครียดแนวนอนที่อัตราส่วนความเค้นสูงสุด, $\epsilon_{h,max}$ (%)	ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด, $q_{max}$ (kPa)	อัตราส่วนปัวซองเฉลี่ย, $\nu_{50}$	โมดูลัสซีแคนต์เฉลี่ย, $E'_{50}$ (MPa)
1	URS-CP30	7.69	1.00	3.68	-3.68	200.70	0.15	20.91
2	0.2%F-CP30	8.79	1.14	3.58	-1.43	233.70	0.12	16.01
3	0.4%F-CP30	10.18	1.32	3.10	-1.99	275.38	0.21	15.83
4	0.6%F-CP30	13.87	1.80	3.36	-2.11	386.04	0.34	14.63
5	0.8%F-CP30	15.98	2.08	3.24	-2.45	449.47	0.58	24.17
6	1.0%F-CP30	17.75	2.31	3.59	-1.86	502.42	0.53	19.32
7	PET-CP30	10.16	1.32	2.86	-2.76	274.85	0.45	25.93
8	PET-0.2%F-CP30	11.30	1.47	2.89	-2.39	308.96	0.41	18.61
9	PET-0.4%F-CP30	14.22	1.85	2.93	-2.32	396.57	0.52	21.32
10	PET-0.6%F-CP30	15.29	1.99	3.17	-2.74	428.82	0.45	20.62
11	PET-0.8%F-CP30	20.98	2.73	4.19	-4.58	599.43	0.53	22.71
12	PET-1.0%F-CP30	26.03	3.38	5.16	-5.34	750.77	0.55	21.95

สู่สภาวะคงที่ ค่า  $R$  จากตัวอย่างที่มีค่า  $F$  มากกว่าจะยังคงมีค่าสูงกว่าค่า  $R$  จากตัวอย่างที่มีค่า  $F$  น้อยกว่า แม้ว่าความแตกต่างจะลดลงเมื่อเทียบกับความแตกต่างของค่า  $R_{max}$

ตารางที่ 1 รวบรวมค่า  $R_{max}$  และ  $SR$  ที่ได้จากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 9 จากตารางที่ 1 จะพบว่า 1) ค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 1.32 หรือกำลังอัดของทราายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มขึ้นเป็น 1.32 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังเฉือนของทราายที่ไม่เสริมกำลัง และ 2) ค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 1.0 และเสริมกำลังร่วมด้วยตาข่ายเสริมกำลังเท่ากับ 3.38 ซึ่งมากกว่าค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 1.0 เพียงอย่างเดียว (เท่ากับ 2.31) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังทราายด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของทราายได้อย่างทวีคูณ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $SR$  กับ  $F$  ของทราายเสริมกำลังด้วยเส้นใยที่วิเคราะห์จากรูปที่ 7 เปรียบเทียบกับ

ความสัมพันธ์ที่ได้จากกรณีของทราายเสริมกำลังด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลังที่วิเคราะห์จากรูปที่ 9 จากรูปที่ 8 พบว่า ค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มขึ้นตามค่า  $F$  ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับกรณีของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า  $F$  เดียวกัน ค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลังมากกว่าค่า  $SR$  ของทราายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตาข่ายเสริมกำลังที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของทราาย การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของทราายจากตาข่ายเสริมกำลังสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อตัวอย่างทราายอัดตัวในแนวตั้ง ทราายจะขยายตัวในแนวราบเนื่องจากผลกระทบของปัวซอง (Poisson's Effect) ซึ่งการขยายตัวแนวราบนี้จะทำให้ตาข่ายเสริมกำลังที่จัดเรียงในแนวราบยืดออกตามกันไปด้วย เมื่อตาข่ายยืดออกก็จะเกิดแรงดึงขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง แล้วแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลัง



ตารางที่ 2 ค่ามุมเสียดทานภายในสูงสุด ( $\phi'_{peak}$ ) และความเชื่อมแน่น ( $c'_{peak}$ ) ของทรายที่ไม่เสริมกำลังและทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใย

เลขที่	ชื่อการทดลอง	ความเค้นหลัก ประสิทธิภาพต่ำสุด (kPa)	ความเค้นหลักประสิทธิภาพ สูงสุดที่จุดยอด (kPa)	มุมเสียดทานภายในสูงสุด (deg.)	ความเชื่อมแน่น (kPa)
1	URS-CP30	30	230.09	39.14	23.29
2	URS-CP60	60	364.58		
3	URS-CP85	85	473.23		
4	0.4%F-CP30	30	305.38	42.85	32.13
5	0.4%F-CP60	60	460.96		
6	0.4%F-CP85	85	594.31		
7	1.0%F-CP30	30	532.42	48.02	62.96
8	1.0%F-CP60	60	734.84		
9	1.0%F-CP85	85	906.09		

มีปฏิสัมพันธ์ย้อนกลับไปที่ทรายทำให้แรงดันโอบรัดแนวราบที่กระทำต่อทรายเพิ่มขึ้น เมื่อทรายมีแรงดันโอบรัดมากขึ้น จะสามารถรับแรงเฉือนได้เพิ่มขึ้นตามเกณฑ์การวิบัติมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criterion)

### 3.4 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกนเพิ่มเติมกับตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังและทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 0.4 และ 1.0 โดยทำการอัดตัวอย่างไปยังค่าแรงดันโอบรัดเท่ากับ 60 และ 85 กิโลปาสกาล เพื่อนิยามเส้นการวิบัติตามเกณฑ์การวิบัติมอร์-คูลอมบ์ ตารางที่ 2 แสดงค่าความเค้นแนวแกนประสิทธิภาพสูงสุด ( $\sigma'_{1,peak}$ ) ที่ได้จากการทดสอบในกรณีต่าง ๆ เมื่อทราบค่า  $\sigma'_{1,peak}$  ที่ได้จากตัวอย่างทดสอบแบบเดียวกันแต่มีค่า  $\sigma'_c$  หรือ  $\sigma'_3$  ที่แตกต่างกัน จะสามารถวิเคราะห์หาค่ามุมเสียดทานภายในสูงสุด ( $\phi'_{peak}$ ) และความเชื่อมแน่น ( $c'_{peak}$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

$$\sigma'_{1,peak} = \sigma'_3 \left( \frac{1 + \sin \phi'_{peak2}}{1 - \sin \phi'_{peak2}} \right) + 2c'_{peak2} \sqrt{\frac{1 + \sin \phi'_{peak2}}{1 - \sin \phi'_{peak2}}} \quad (1)$$

จากตารางที่ 2 พบว่า มุมเสียดทานภายในของทรายมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยที่ใช้เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมุมเสียดทานภายในมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรายก็จะเพิ่มขึ้นตามกันไปด้วย พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) เมื่อกำหนดให้ค่า  $c'$  เท่ากับศูนย์ ค่า  $\sigma'_{1,peak}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเสียดทานภายในมีค่ามากขึ้นซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การวิบัติมอร์-คูลอมบ์ และ 2) เนื่องจากเส้นใยที่ใช้มีความยาวสั้น การจัดเรียงในส่วนผสมกับทรายมีลักษณะกระจุกกระจายไม่เป็นแบบแผนและปริมาณที่ใช้มีน้อย ดังนั้นอิทธิพลของเส้นใยต่อแรงดันโอบรัดประสิทธิภาพที่กระทำเพิ่มขึ้นต่อทรายจึงมีน้อยมาก ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Li [13]

นอกจากนี้ ค่า  $c'_{peak}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน พฤติกรรมที่กล่าวมาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Babu และคณะ [14] ที่ได้อธิบายว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับทรายจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดแรงต้านทานดึงมากขึ้นและแรงต้านทานดึงที่มากขึ้นจะสะท้อนออกมาให้เห็นทางค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่า  $c'_{peak}$  กับค่า  $\sigma'_{1,peak}$  พบว่า สัดส่วนของกำลังรับแรงอัดที่มาจากความเชื่อมแน่น

มีอยู่ค่อนข้างน้อย โดยมีค่าสัดส่วนที่มากที่สุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 12 (ตัวอย่างทดสอบ 1.0%F-CP85 มีค่า  $c'_{peak}/\sigma'_{1,peak}$  เมื่อ  $\sigma'_c = 30$  กิโลปาสคาล เท่ากับ  $(62.96/532.42) \times 100 =$  ร้อยละ 11.8) เท่านั้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ค่า  $\sigma'_{1,peak}$  หรือกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังด้วยเส้นใยนั้น เป็นผลมากจากการที่ค่ามุมเสียดทานภายในของทรายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นส่วนสำคัญ ในขณะที่อิทธิพลจากความเชื่อมั่นแน่นของทรายที่เพิ่มขึ้นต่อกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นมีค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตาม ที่ค่า  $F$  เท่ากับร้อยละ 1.0 ซึ่งเป็นปริมาณเส้นใยสูงสุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ค่า  $\sigma'_{peak}$  และ  $c'_{peak}$  ยังคงไม่แสดงพฤติกรรมการลดค่าลงเมื่อ  $F$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าปริมาณเส้นใยที่มีความเหมาะสมมากที่สุดไม่อาจทราบได้จากงานวิจัยนี้

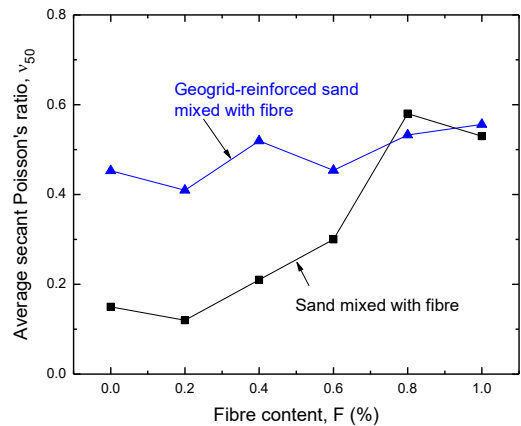
### 3.5 การขยายตัวแนวราบของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวในแนวราบระหว่างตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังแตกต่างกันจะทำโดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ในงานวิจัยนี้จะนิยามค่าอัตราส่วนปัวซองเฉลี่ย (Average Secant Poisson's Ratio;  $v_{50}$ ) โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเครียดแนวราบต่อความเครียดแนวแกนเมื่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่า  $q$  สูงสุด ( $q_{max}$ ) (นิยามขณะที่  $q = q_{max}/2$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$v_{50} = -\frac{\epsilon_{h,q_{max}/2}}{\epsilon_{v,q_{max}/2}} \quad (2)$$

โดยที่เราสามารถคำนวณค่า  $q_{max}$  ได้จาก  $q_{max} = (R_{max} \times \sigma'_c) - \sigma'_c$  และ  $\sigma'_c = 30$  กิโลปาสคาล จากนั้นหาค่า  $q = q_{max}/2$  แล้วนำไปหาค่า  $R$  เมื่อ  $q = q_{max}/2$  ได้จาก  $R_{q_{max}/2} = [(q_{max}/2) + \sigma'_c]/\sigma'_c$  แล้วจึงนำค่า  $R = R_{q_{max}/2}$  ไปหาค่า  $\epsilon_h$  และ  $\epsilon_v$  ตอบสนอง ( $\epsilon_{h,q_{max}/2}$  และ  $\epsilon_{v,q_{max}/2}$ ) แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ (2) เพื่อหาค่า  $v_{50}$

ตารางที่ 1 รวบรวมค่า  $v_{50}$  จากการทดสอบแต่ละกรณี และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $v_{50}$  กับค่า  $F$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v_{50}$  กับปริมาณเส้นใย ( $F$ ) เปรียบเทียบกันระหว่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยและตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง จากรูปนี้สามารถสังเกตพฤติกรรมดังนี้

1) เมื่อเสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยเล็กน้อย ทำให้ค่า  $v_{50}$  ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับทรายที่ไม่เสริมกำลัง ( $F = 0$ ) หรือทรายมีการขยายตัวแนวราบลดลง เนื่องจากเส้นใยที่กระจายอยู่ในตัวอย่างน้อยลง ทำให้การยึดเกาะและความเชื่อมั่นระหว่างผิวสัมผัสของทรายมีค่าน้อยลง พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ค่ากำลังรับแรงอัดของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีค่า  $F$  เท่ากับ 0.2 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจนเหมาะสม ค่า  $v_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้น อนุภาคทรายในตัวอย่างขยายตัวแนวราบมากขึ้นเนื่องจากปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับการพัฒนาแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคที่ดีขึ้นจากการเพิ่มปริมาณเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ibrahim และ Fourmont [3]

3) ค่า  $v_{50}$  ของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลังมีค่าสูงกว่าทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียว แต่รูปแบบการขยายตัวแนวราบของตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลังไม่สม่ำเสมอ โดยการขยายตัวน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่มีการจัดเรียง

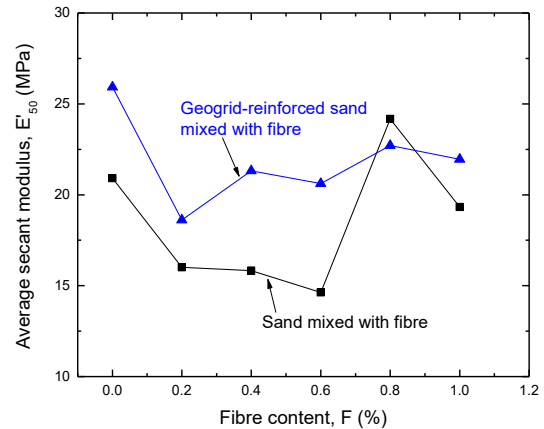
ตาข่ายเสริมกำลังเนื่องจากแรงดึงที่เพิ่มขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง และการขยายตัวมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตำแหน่งที่มีการจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลัง (รูปที่ 3) การวัดการเสียรูปแนวราบของตัวอย่างใช้เซนเซอร์เลเซอร์ วัดระยะกระจัดตรงกึ่งกลางความสูงของตัวอย่าง (รูปที่ 5) ดังนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการพิสูจน์ข้อมูลนี้

### 3.6 ค่าสติเฟนสของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

งานวิจัยนี้ใช้ค่าโมดูลัสซีแคนต์เฉลี่ย (Average Secant Modulus;  $E'_{50}$ ) เป็นพารามิเตอร์แสดงค่าสติเฟนสของตัวอย่างทรายทดสอบแบบต่าง ๆ ค่า  $E'_{50}$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $q$  กับ  $\varepsilon_a$  โดยจะนิยามจากความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเริ่มต้นไปยังจุดบนความสัมพันธ์  $q - \varepsilon_a$  ที่มีค่า  $q = q_{max}/2$  ค่า  $E'_{50}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ตารางที่ 1 รวบรวมค่า  $E'_{50}$  ที่ได้จากการทดสอบแต่ละกรณี

$$E'_{50} = \frac{[(q_{max}/2)/1000] \text{ (MPa)}}{[(\varepsilon_v \text{ at } q_{max}/2)/100] \text{ (unitless)}} \quad (3)$$

รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่า  $E'_{50}$  ระหว่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยกับทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลังที่ค่า  $F$  ต่างกัน จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมมีลักษณะแตกต่างกันเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก ค่า  $E'_{50}$  จะลดลงเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้น ต่อมาในช่วงที่ 2 ค่า  $E'_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้น พฤติกรรมทั้ง 2 ช่วงนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกลไก 2 กลไก กล่าวคือ กลไกที่ 1 คือ การผสมเส้นใยซึ่งมีค่าสติเฟนสน้อยกว่าทราย (นิ่มกว่าทราย) ทำให้วัสดุผสมองค์รวมมีค่าสติเฟนสลดลง และกลไกที่ 2 คือ เส้นใยที่ใช้ผสมทำให้มีแรงเสียดทานและความเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาคทรายมากขึ้น ทำให้วัสดุผสมองค์รวมมีค่าสติเฟนสมากขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยมีค่าน้อย อิทธิพลจากกลไกที่ 1 จะมากกว่ากลไกที่ 2 ในขณะที่เมื่อปริมาณเส้นใยมากพอ อิทธิพลจากกลไกที่ 2 จะมากกว่ากลไกที่ 1 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ค่า  $F$  เท่ากัน ค่า  $E'_{50}$  ของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E'_{50}$  กับปริมาณเส้นใย ( $F$ ) เปรียบเทียบกันระหว่างทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง

และตาข่ายเสริมกำลังมากกว่าค่า  $E'_{50}$  ของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นเพราะเมื่อเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง ค่าแรงดันโอบรัดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในทรายจะเพิ่มขึ้นเพราะอิทธิพลของแรงดึงที่พัฒนาขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง (Tensile Reinforcing Effect) เมื่อแรงดันโอบรัดประสิทธิผลมากขึ้น ทรายก็จะแสดงค่าสติเฟนสที่สูงขึ้น

### 4. สรุป

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังนี้

1) การเสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยทำให้อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยสูงสุด ( $R_{max}$ ) เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยช่วยในการยึดเกาะอนุภาคทรายและเพิ่มความเชื่อมแน่น แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทรายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ค่ามุมเสียดทานภายในทรายเพิ่มขึ้นและความเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาคทรายเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ค่า  $R_{max}$  ยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย ( $F$ ) ที่ผสมกับทรายอีกด้วย

2) การเสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลังช่วยเพิ่มค่า  $R_{max}$  อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การเสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียว โดยตาข่ายเสริมกำลังส่งผลให้แรงดันโอบรัดภายในตัวอย่างทรายเพิ่มขึ้น

เนื่องจากอิทธิพลของแรงดึงที่พัฒนาขึ้นในตาข่าย เสริมกำลังทรายด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มอิทธิพลของแรงเสียดทานและแรงดันโอบรัดภายในตัวอย่างทรายเป็นผลให้กำลังรับแรงอัดของทรายเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

3) เมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้นทรายขยายตัวแนวราบเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากค่าอัตราส่วนปัวซองเฉลี่ย ( $\nu_{50}$ ) ที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการยึดเกาะที่ดีขึ้นของทราย และเกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นในระหว่างการรับแรงเฉือน นอกจากนี้ เมื่อเสริมกำลังด้วยเส้นใยและตาข่ายเสริมกำลัง ตาข่ายเสริมกำลังสร้างแรงดึงที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากค่า  $F$  เพิ่มขึ้น

4) ค่าสติเฟนสของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยลดลงเมื่อค่า  $F$  เพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่ต่อมาจะเพิ่มขึ้นตามค่า  $F$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากการอ่อนตัวลงเมื่อผสมกับเส้นใยที่มีค่าสติเฟนสน้อยกว่า และอิทธิพลการจากเชิงตัวขึ้นเมื่อแรงเสียดทานและความเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาคทรายเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่แตกต่างกันเมื่อค่า  $F$  แตกต่างกัน เมื่อปริมาณเส้นใยมากพออิทธิพลอันหลังจะมากกว่าอันแรกทำให้ค่าสติเฟนสเพิ่มตามค่า  $F$  นอกจากนี้ ค่าสติเฟนสของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยร่วมกับตาข่ายเสริมกำลังมากกว่าค่าสติเฟนสของทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอิทธิพลของแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังทำให้แรงดันโอบรัดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] S. M. Haeri, R. Noorzad, and A. M. Oskoorouchi, "Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 18, no. 6, pp. 385–402, 2000.
- [2] N. C. Consoli, J. P. Montardo, M. Donato, and P. Prietto, "Effect of material properties on the behaviour of sand cement fibre composites," *Ground Improvement*, vol. 8, no. 2, pp. 77–90, 2004.
- [3] E. Ibraim and S. Fourmont, "Behaviour of sand reinforced with fibres," *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, pp. 807–818, Springer, 2007.
- [4] N. Consoli, P. D. M. Prietto, and L. A. Ulbrich, "Influence of fiber and cement addition on behavior of a sandy soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1211–1214, 1998.
- [5] N. C. Consoli, J. P. Montardo, M. Donato, and P. D. M. Prietto, "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fiber composites," *Ground Improvement*, vol. 8, no. 2, pp. 77–90, 2004.
- [6] C. A. Anagnostopoulos, D. Tzetzis, and K. Berketis, "Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils," *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 9, no. 3, pp. 241–251, 2013.
- [7] A. J. Choobbasti, S. S. Kutanaei, and M. Ghadakpour, "Shear behavior of fiber-reinforced sand composite," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 12, no. 157, 2019.
- [8] A. N. Sommers and B. V. S. Viswanadham, "Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 6, pp. 497–505, 2009.
- [9] S. Sutjai and W. Kongkitkul, "Effects of covering ratio and vertical spacing of biaxial geogrid on the compressive strength of reinforced sand," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 27, no. 1, pp. 198–211, 2020 (in Thai).
- [10] C. N. Liu, K. H. Yang, and M. D. Nguyen, "Behavior of geogrid reinforced sand and effect of reinforcement anchorage in large-scale plane strain compression," *Geotextiles and*





- Geomembranes*, vol. 42, no. 5, pp. 479-493, 2014.
- [11] O. Sumanuschai and W. Kongkitkul, "Effects of tensile strength and spacing of biaxial geogrids on the compressive strength and deformation of reinforced sand," in *Proceedings of the 25th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, July 15–17, 2020. (in Thai)
- [12] U. Aqil, "Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate as backfill material," M.Eng. Thesis, University of Tokyo, 2004.
- [13] C. Li, "Mechanical response of fiber-reinforced soil," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 2005.
- [14] G. L. S. Babu, A. K. V. Vasudevan, and S. Haldar, "Numerical simulation of fiber-reinforced sand behavior," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26, no.2, pp. 181–188, 2008.