

กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์ม

เพิ่มพร บัวทอง^{1*} สมโพธิ อยู่ไ่ว² และ ฉัตรกมล เดชเรือง³

บทคัดย่อ

ปูนซีเมนต์มักนิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน แต่อย่างไรก็ตามดินซีเมนต์มักแสดงพฤติกรรมความเปราะมากกว่าดินที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เพื่อปรับปรุงความเปราะที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการนำเส้นใยสังเคราะห์หรือเส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงในดินซีเมนต์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 และ 7% ปริมาณเส้นใย 0.5, 1.0 และ 2.0% และความยาวเส้นใย 10, 20 และ 40 มิลลิเมตร ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดพบว่า การเพิ่มเส้นใยช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมเปราะของตัวอย่างทรายซีเมนต์ให้เป็นพฤติกรรมความเหนียวและช่วยลดการสูญเสียกำลังหลังจากกำลังสูงสุด โดยกำลังอัดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยแสดงการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเพิ่มปริมาณเส้นใย หลังจากนั้นจะมีการลดลง ซึ่งปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1.0% ขณะที่กำลังดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกับการเพิ่มปริมาณเส้นใย แต่กำลังรับแรงดัดคงค้างกับความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณการเพิ่มปริมาณเส้นใย อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรับกำลังดัดของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย แสดงการเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มเส้นใย อย่างไรก็ตามสังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์มีผลเล็กน้อยต่อค่าของอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับกำลังดัดของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยมากกว่ากำลังของเมทริกซ์

คำสำคัญ: ทรายซีเมนต์, เส้นใยปาล์ม, กำลังอัด, กำลังดัด, ความเหนียว, อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า

รับพิจารณา: 5 กันยายน 2562

แก้ไข: 17 ตุลาคม 2562

ตอบรับ: 29 ตุลาคม 2562

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +66 2470 8532 อีเมล: Phermphon.bual@kmutt.ac.th



Compressive and Flexural Strength of Cement-treated Sand Reinforced with Palm Fiber

Phermphorn Buathong^{1*} Sompote Youwai² and Chutkamon Dachrueang³

Abstract

Cement is commonly used as a stabilizing agent to improve engineering properties of soils. However, the cement-treated soil exhibits more brittle behavior than non-treated soil. To overcome such a brittle nature of cement-treated soil, either natural or synthetic fiber have been included in cement-treated soil. In this research, the influence of palm fiber on the mechanical properties of cement-treated sand was investigated. A series of unconfined compression (UC) and flexural tests (FX) were conducted for different cement content (5 and 7%), fiber content (0.5, 1.0 and 2.0%) and fiber length (10, 20 and 40 mm). The results from the UC and FX tests indicated that the inclusion of fiber changed the brittle behaviour of cement-treated sand to a ductile behaviour and decreased the loss of post-peak strength. The compressive strength of cement-treated sand reinforced with fiber presented an initial increase followed by a decrease with increasing fiber content. The optimum fiber content was found to be 1.0%. The addition of fiber content slightly increased the flexural strength of cement-treated sand. However, the residual strength and toughness significantly increased with the increase in the fiber content. The equivalent flexural strength ratio ($R_{T,150}^D$) indicating the performance of fiber after cracking showed increase as the fiber increases. It was observed that the change of cement content slightly influenced on the value of $R_{T,150}^D$. This indicated that the flexural performance of the cement-treated sand reinforced with fiber is controlled by the amount of fiber rather than the matrix strength.

Keywords: Cement-treated sand, Palm fiber, Compressive strength, Flexural strength, Toughness, Equivalent flexural strength ratio

Received: September 5, 2019

Revised: October 17, 2019

Accepted: October 29, 2019

¹ Lecturer, Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding Author, Tel. +66 2470 8532 e-mail: Phermphorn.bual@kmutt.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุที่มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นทางเริ่มขาดแคลนในบางพื้นที่ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่นมายังสถานที่ก่อสร้าง [1] ทรายเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีราคาถูก และสามารถหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นทาง อาจจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลายในการปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ

การผสมปูนซีเมนต์เข้ากับทรายจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) แต่อย่างไรก็ตามทรายซีเมนต์จะแสดงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (Stress-strain behavior) คล้ายกับวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle material) โดยเฉพาะที่ปริมาณปูนซีเมนต์สูง [2, 3] เพื่อเป็นการปรับปรุงพฤติกรรมดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดในการนำเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) มาผสมเข้ากับทรายซีเมนต์ [4, 5, 6] โดยเส้นใยที่เสริมเข้าไปจะช่วยให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) และแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างดินและเส้นใย ซึ่งจะช่วยให้ทรายซีเมนต์สามารถรับแรงได้ต่อไปแม้ว่าเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์กับเม็ดดินแล้วก็ตาม นอกจากนี้เส้นใยมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินซีเมนต์ที่แสดงความเปราะ (Brittle) ให้มีพฤติกรรมความเหนียว (Ductile) [7, 8, 9]

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปริมาณและความยาวของเส้นใยเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังอัดและกำลังดัดของดินที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [10, 11, 12] Santhi et al. [13] ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินผสมเส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal fiber) พบว่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย โดยกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 0.5% และความยาว 2.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง Wei et al. [14] ศึกษาคุณสมบัติทางกลของดินที่เสริมแรงด้วยฟางข้าวสาลี (Wheat straw) ฟางข้าว (Rice straw) เส้นใยปอ (Jute fiber) และเส้นใยโพลี

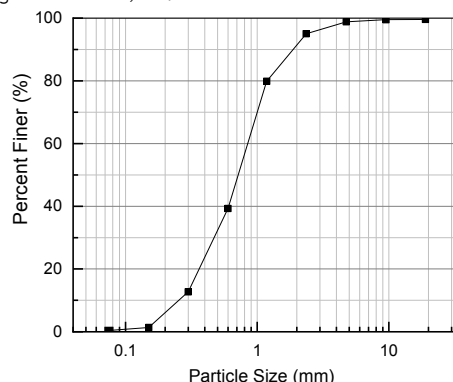
โพรพิลีน (Polypropylene fiber) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดอัดจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 0.2%-0.25% และความยาว 30%-40% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวอย่าง การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับกำลังดัดของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยพบว่า การเสริมเส้นใยจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวอย่างให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังได้ต่อไปหลังการแตกร้าว โดยพฤติกรรมการโก่งตัวหลังกำลังสูงสุดครั้งแรก (First peak) แบบ Softening หรือ Hardening จะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของเส้นใย [15, 16, 17, 18]

ปัจจุบันเริ่มมีการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้แทนเส้นใยสังเคราะห์เนื่องจากหาได้ง่ายตามท้องถิ่น มีราคาต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกเส้นใยปาล์มซึ่งเป็นเศษวัสดุที่เหลือจากการผลิตปาล์มน้ำมันมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติพฤติกรรมของทรายซีเมนต์ โดยการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มต่อพฤติกรรมของทรายซีเมนต์ประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) และการทดสอบกำลังดัด (Flexural test)

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุถมในการก่อสร้างถนน โดยลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินและคุณสมบัติทางกายภาพของทรายดังแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 เมื่อจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded sand, SP)



รูปที่ 1 กราฟการกระจายตัวของตัวอย่างทราย

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

Soil Properties	Values
D ₁₀ (mm)	0.634
D ₃₀ (mm)	0.984
D ₆₀ (mm)	1.689
Specific Gravity	2.66
Maximum and minimum void ratios (e _{max} e _{min})	0.68, 0.45
Modified compaction test	
Optimum water content	10%
Maximum dry density (kN/m ³)	19.5

เส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการเสริมแรงตัวอย่างทรายซีเมนต์ได้มาจากแกนของทะลายปาล์ม ซึ่งผ่านกระบวนการล้างน้ำและต้มด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นทำการอบให้แห้งและตัดตามความยาวที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2



ก) แกนทะลายปาล์มก่อนแปรรูป



ข) ลักษณะเส้นใยปาล์มหลังแปรรูป

รูปที่ 2 เส้นใยปาล์ม

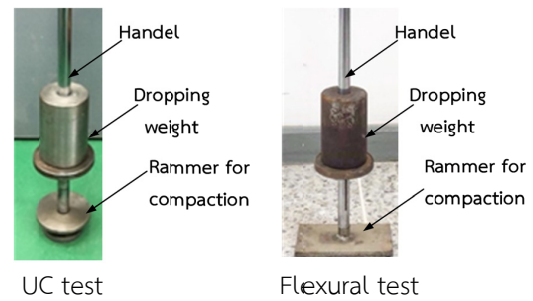
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเส้นใยปาล์ม

Properties	Values
Specific gravity	1.14
Average diameter (mm)	0.60
Breaking tensile strength (Mpa)	4.8
Elongation at Break (%)	29
Absorption (%)	328

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมตัวอย่างได้แก่ 5% และ 7% ของน้ำหนักทรายแห้ง โดยในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์จะใช้ปริมาณเส้นใย 0.5, 1.0 และ 2.0% ที่มีความยาว 10, 20 และ 40 มิลลิเมตร

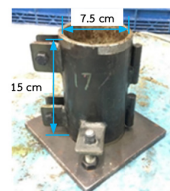
อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) และการทดสอบกำลังดัด (Flexural strength test) ดังแสดงในรูปที่ 3



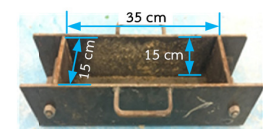
UC test

Flexural test

ก) ค้อนสำหรับเตรียมตัวอย่าง



UC test



Flexural test

ข) แบบหล่อตัวอย่าง

รูปที่ 3 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบ

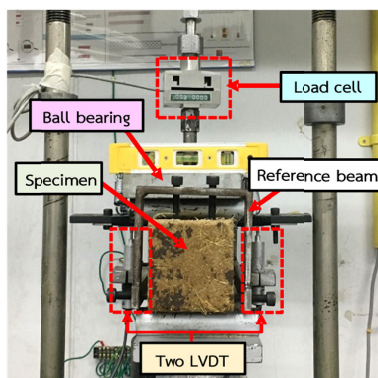
การเตรียมตัวอย่างแต่ละการทดสอบจะเริ่มจากการผสมทรายกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำเส้นใยปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงไปและทำการผสมให้มีการกระจาย

ตัวที่ดีไม่มีกองรวมกันอยู่จุดใดจุดหนึ่ง เมื่อวัสดุทั้งสามส่วนเข้ากันดีแล้วจึงทำการเติมน้ำลงไป โดยปริมาณน้ำที่ใช้เป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสม ($w_{opt} = 10\%$) ซึ่งได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกบดอัดลงในแบบด้วยค้อนบดอัดที่ออกแบบให้มีพลังงานเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในแต่ละตัวอย่างจะทำการควบคุมความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max} = 19.5 \text{ kN/m}^3$) เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วจะทำการหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วัน

2.3 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทำตามมาตรฐาน ASTM D2116-00 [19] เพื่อหาอิทธิพลของเส้นใยต่อกำลังอัดของทรายซีเมนต์ การวัดกำลังอัดของตัวอย่างใช้ Load cell และการวัดการเคลื่อนในแนวตั้งใช้ LVDT โดยการทดสอบจะใช้อัตราการกดอยู่ที่ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที

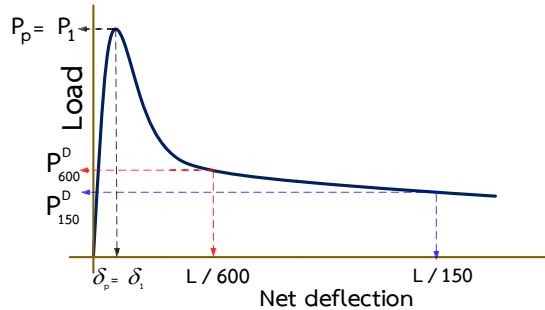
การทดสอบกำลังดัด (Flexural strength test) จะทำตามมาตรฐาน ASTM D 1609-10 [20] ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งการโก่งตัวของคานตัวอย่างจะทำการทำการติดตั้ง LVDT ทั้ง 2 ด้านของคานตัวอย่าง



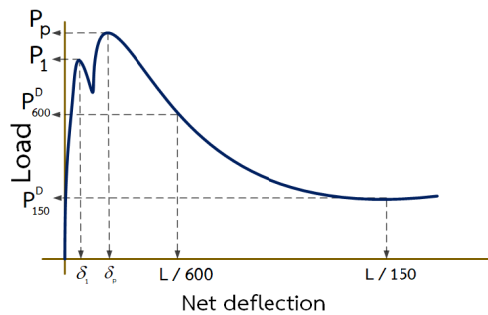
รูปที่ 4 รายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือ

โดยทั่วไปพฤติกรรมการรับกำลังดัดตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ 1) การโก่งตัวแบบ Softening และ 2) การโก่งตัว Hardening ดังแสดงในรูปที่ 5 การโก่งตัวแบบ Softening (รูปที่ 5ก) ตัวอย่างจะแสดงกำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่กำลังรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก (First-peak load, P_1) ขณะที่

การโก่งตัวแบบ Hardening (5ข) ตัวอย่างจะแสดงกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Peak load, P_p) หลังจากกำลังรับน้ำหนักสูงสุด ครั้งแรก โดยความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวและตัวแปรต่างๆจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาอิทธิพลของเส้นใยต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์



ก) แรงดัดสูงสุดเท่ากับแรงดัดสูงสุดครั้งแรก



ข) แรงดัดสูงสุดมากกว่าแรงดัดสูงสุดครั้งแรก

รูปที่ 5 พฤติกรรมการรับน้ำหนักกับระยะการโก่งตัว
ASTM D 1609-10 [20]

กำลังดัด (Flexural strength) ของคานตัวอย่างสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$f_{1/p} = \frac{P_{(1/p)}L}{bd^2} \quad (1)$$

โดยที่ P_1 คือ น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

P_p คือ น้ำหนักสูงสุด

f_1 คือ กำลังดัดสูงสุดครั้งแรก

f_p คือ กำลังดัดสูงสุด

L คือ ช่วงความยาวของคาน

b คือ ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก

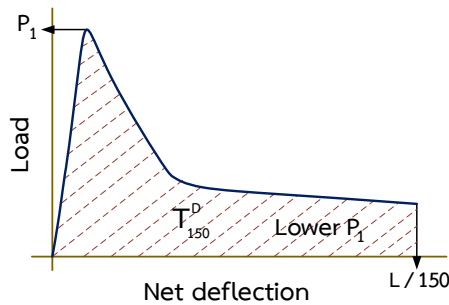
d คือ ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก

การแสดงผลประสิทธิภาพของเส้นใยต่อการดูดซับพลังงานหรือความเหนียวของทรายซีเมนต์จะแสดงในรูปแบบของ “อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า” (Equivalent Flexural Strength ratio, $R_{T,150}^D$) ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างน้ำหนักกับระยะการแอ่นตัวต่อน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกคูณกับระยะการแอ่นตัวที่ $L/150$ ดังแสดงในรูปที่ 6 การหาค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าตามนิยามของมาตรฐาน ASTM C 1609-10 [20] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$R_{T,150}^D = \frac{T_{150}^D}{P_1 \frac{L}{150}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ P_1 คือ น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

T_{150}^D คือ พื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัว ตั้งแต่ 0 ถึง $L/150$



รูปที่ 6 การหาค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า
ASTM D 1609-10 [20]

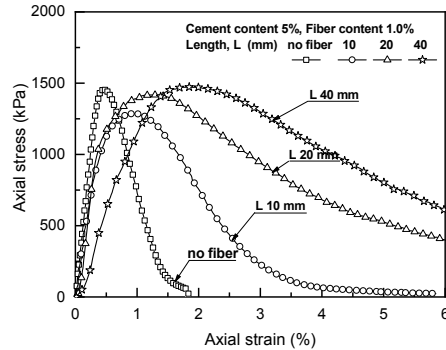
3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

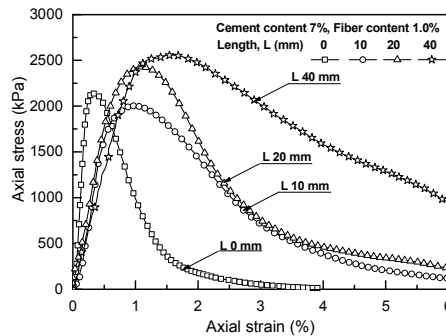
3.1.1 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียด

การเสริมเส้นใยทำให้ตัวอย่างทรายซีเมนต์เปลี่ยนพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่คล้ายกับวัสดุเปราะ (Brittle material) เป็นวัสดุที่มีความเหนียว (Ductile material) โดยความเค้นของตัวอย่างจะไม่ลดลงอย่างทันทีหลังถึงค่าสูงสุด แต่จะค่อย ๆ ลดลงตามความเครียดที่เพิ่มขึ้นในทุกปริมาณเส้นใย รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างทรายซีเมนต์ที่เสริมเส้นใยที่ปริมาณ 1.0% นอกจากนั้น

ยังพบว่า การลดลงของความเค้นหลังจุดสูงสุด (Post peak behavior) จะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใย



ก) ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



ข) ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

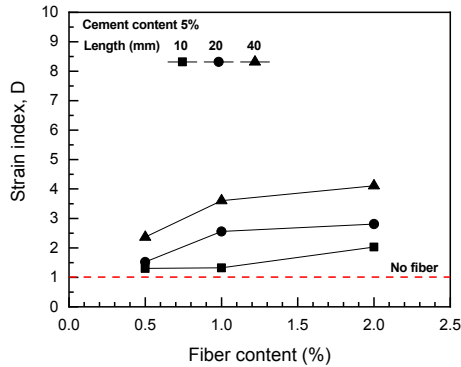
รูปที่ 7 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของตัวอย่าง
ทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย

เพื่อศึกษาความสามารถของเส้นใยการปรับปรุงพฤติกรรมความเหนียวตัวอย่างทรายซีเมนต์ ในการวิเคราะห์ผลจะแสดงในรูปแบบของดัชนีการเปลี่ยนรูป (Deformation index, D) ที่เสนอโดย Park [2] ดังแสดงในสมการที่ 3

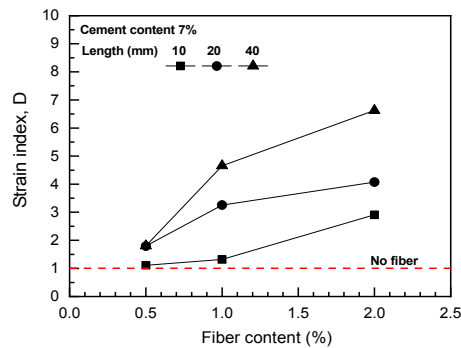
$$D = \frac{\Delta_{fiber}}{\Delta_{no fiber}} \quad (3)$$

โดยที่ Δ_{fiber} คือ ความเครียด ณ ตำแหน่งความเค้นสูงสุดของตัวอย่าง

$\Delta_{no fiber}$ คือ ความเครียด ณ ตำแหน่งความเค้นสูงสุดของตัวอย่าง



ก) ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



ข) ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

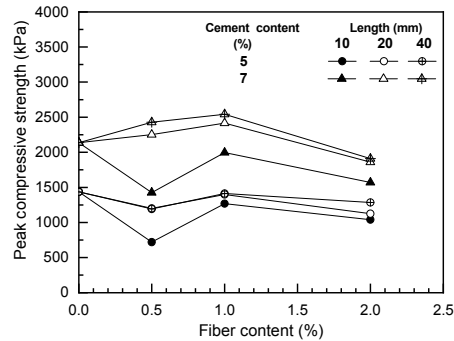
รูปที่ 8 ดัชนีการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างทรายซีเมนต์

รูปที่ 8 แสดงดัชนีการเปลี่ยนรูป (Deformation index, D) ของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่าง ๆ โดยค่าดัชนีการเปลี่ยนรูป จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวและปริมาณของเส้นใย โดยเฉพาะตัวอย่างปริมาณปูนซีเมนต์ 7% ที่แสดงพฤติกรรมความเปราะอย่างชัดเจน พบว่าค่าดัชนีการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อทำการเสริมเส้นใย นอกจากนั้นผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความยาวเส้นใยสั้น (10 มิลลิเมตร) จำเป็นต้องใช้ปริมาณเส้นใยที่มากในการช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมความเปราะของตัวอย่าง

3.1.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นใย

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยกับกำลังอัดสูงสุด ตัวอย่างที่ความยาวเส้นใย 10 มิลลิเมตรของทั้งปริมาณปูนซีเมนต์แสดงการลดลงของค่ากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ปริมาณเส้นใย 0.5% การลดลงของค่ากำลังอัดเกิดขึ้นเนื่องจากความยาวเส้นใยที่

สั้นทำให้พื้นที่ในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับทรายซีเมนต์มีน้อย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใย

ตัวอย่างที่ความยาวเส้นใยมากกว่า 10 มิลลิเมตร พบว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ตัวอย่างปริมาณปูนซีเมนต์ 7% แสดงการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่า 1.0% ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากทำให้เส้นจับตัวกันเป็นก้อนได้ง่ายและไม่กระจายตัว เมื่อมีแรงมากระทำจึงทำให้เกิดการเลื่อนไถลระหว่างเส้นใยด้วยกันเอง [14] ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยที่ทำให้ค่ากำลังอัดสูงสุดจะอยู่ที่ 1.0%

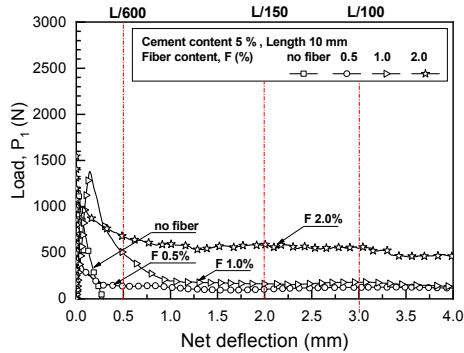
3.2 ผลการทดสอบกำลังอัด

3.2.1 พฤติกรรมกำลังรับน้ำหนัก-การโก่งตัว

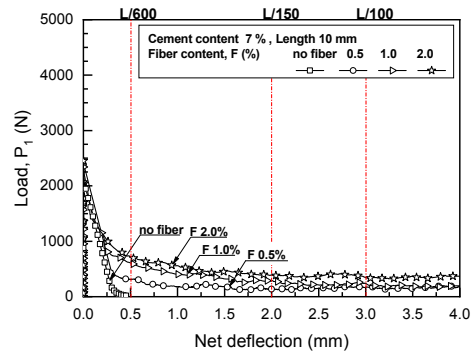
รูปที่ 10 และ 11 แสดงกำลังรับน้ำหนัก-การโก่งตัวของตัวอย่างคานที่ความยาวและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ โดยกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างไม่เสริมเส้นใยแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงกำลังรับน้ำหนักสูงสุด ($P1 = Pp$) หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่สามารถรับกำลังได้ต่อไปอีก ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมความเปราะของวัสดุ (Brittle material) แบบ Softening สำหรับตัวอย่างเสริมเส้นใยพบว่าแสดงพฤติกรรมการโก่งตัวคล้ายคลึงกับตัวอย่างไม่เสริมเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากถึงกำลังรับน้ำหนักสูงสุดและปรากฏรอยแตกร้าวขึ้นบนตัวอย่างคาน เส้นใยจะเริ่มทำหน้าที่เสริมแรงให้กับ ตัวอย่างคานทำให้ตัวอย่างยังคงรับ

น้ำหนักได้ต่อไปหลังการแตกร้าว นอกจากนั้นเส้นใยไปช่วยควบคุมอัตราการสูญเสียพลังงานและช่วยยับยั้งรอยแตกร้าวของตัวอย่างได้อีกด้วย [15]

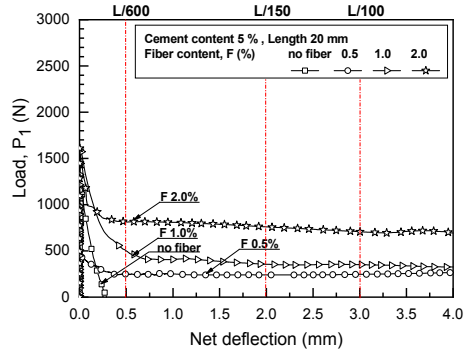
เส้นใย โดยสังเกตเห็นได้ชัดว่าที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7% ตัวอย่างจะแสดงการลดลงของกำลังรับน้ำหนักหลังจุดสูงสุดจนถึงกำลังรับน้ำหนักคงค้างมากกว่าตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



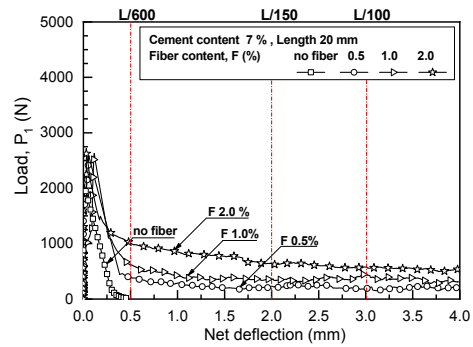
ก) ความยาวเส้นใย 10 มิลลิเมตร



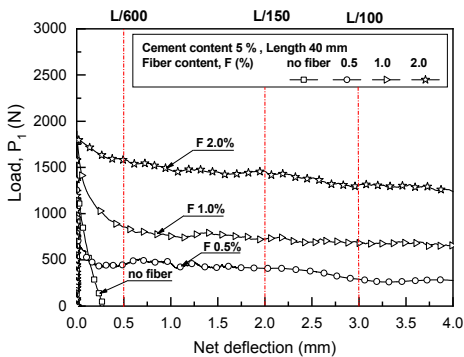
ก) ความยาวเส้นใย 10 มิลลิเมตร



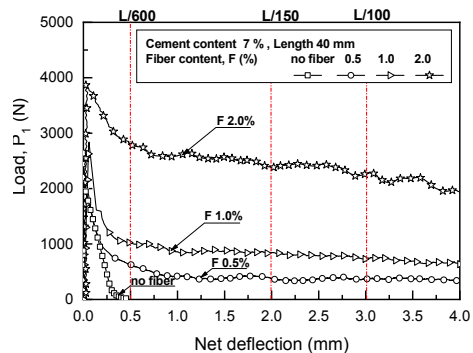
ข) ความยาวเส้นใย 20 มิลลิเมตร



ข) ความยาวเส้นใย 20 มิลลิเมตร



ค) ความยาวเส้นใย 40 มิลลิเมตร



ค) ความยาวเส้นใย 40 มิลลิเมตร

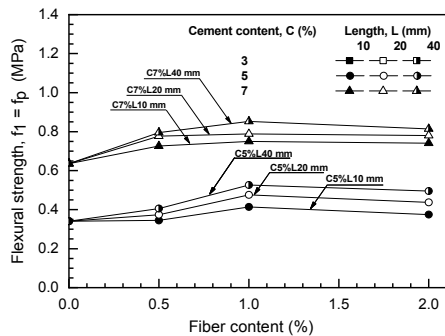
รูปที่ 10 พฤติกรรมการรับน้ำหนัก-การโก่งตัวที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%

รูปที่ 11 พฤติกรรมการรับน้ำหนัก-การโก่งตัวที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

โดยกำลังรับน้ำหนักหลังจุดสูงสุดจะเรียกว่า “กำลังรับน้ำหนักคงค้าง (Residual strength)” ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยและความยาวของ

3.2.2 อิทธิพลของเส้นใยต่อกำลังดัดสูงสุด จากพฤติกรรมกำลังรับน้ำหนัก-การโก่งตัวของตัวอย่างคานเสริมเส้นใยพบว่าค่ากำลังดัดสูงสุดครั้งแรก (f_1) และกำลังดัดสูงสุด (f_p) มีค่าเท่ากัน (รูปที่ 5

ก) ดังนั้นในการวิเคราะห์อิทธิพลของเส้นใยกำลังตัดสูงสุด จะพิจารณาเพียงกำลังตัดสูงสุดครั้งแรก (F_1) รูปที่ 12 แสดงกำลังตัดสูงสุดของตัวอย่างเสริมเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% และ 7% ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังตัดสูงสุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มปริมาณเส้นใยในทุกความยาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังตัดสูงสุดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายและปูนซีเมนต์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) หรือกำลังของเมทริกซ์ (Matrix) เป็นหลัก

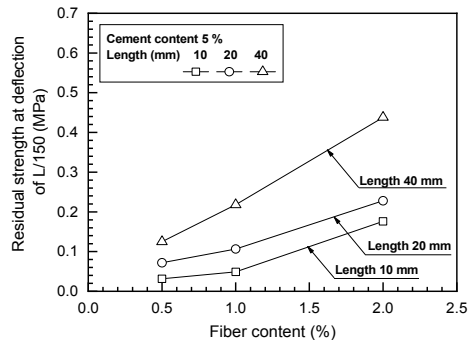


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงตัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใย

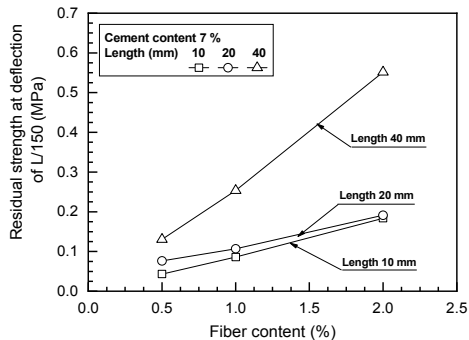
3.2.3 อิทธิพลของเส้นใยต่อกำลังตัดคงค้าง

ความสามารถในการรับกำลังตัดของตัวอย่างคานทรายซีเมนต์หลังการแตกร้าวคือ กำลังตัดคงค้าง (Residual strength) ซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาที่ระยะการโก่งตัว L/150 โดยที่ระยะการโก่งตัวนี้ตัวอย่างไม่เสริมเส้นใยแสดงการสูญเสียความสามารถในการรับกำลังตัดเกือบทั้งหมด (รูปที่ 10 และ 11) กำลังตัดคงค้างของตัวอย่างเสริมเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% และ 7% แสดงดังรูปที่ 13 และ 14 ผลการวิเคราะห์พบว่ากำลังตัดคงค้างมีค่าน้อยกว่ากำลังตัดสูงสุดครั้งแรกในทุกปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใย แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของตัวอย่างเสริมเส้นใยเป็นแบบ Softening กำลังตัดคงค้างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย โดยสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีความยาวเส้นใย 10 และ 20 มิลลิเมตร กำลังตัดคงค้างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่า 1.0% เนื่องจากความยาวที่น้อยทำให้พื้นที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและทรายซีเมนต์เกิดขึ้นน้อยจึงต้องการ

ปริมาณเส้นใยที่มากเพื่อเพิ่มพื้นที่แรงยึดเหนี่ยวรวมให้มากขึ้น ขณะที่ตัวอย่างเสริมเส้นใยยาว 40 มิลลิเมตร แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังคงค้างอย่างชัดเจนตามปริมาณเส้นใย ดังนั้นสรุปได้ว่าการเสริมเส้นใยช่วยควบคุมอัตราการสูญเสียพลังงาน (Loss energy) ทำให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังตัดหลังการแตกร้าวได้ต่อไปได้



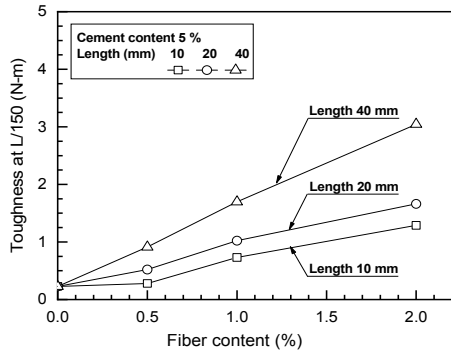
รูปที่ 13 กำลังตัดคงค้างที่ระยะการโก่งตัว L/150 กับปริมาณเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



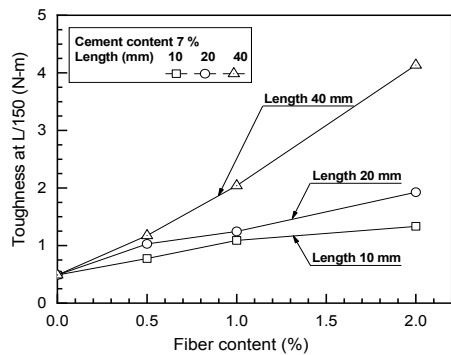
รูปที่ 14 กำลังตัดคงค้างที่ระยะการโก่งตัว L/150 กับปริมาณเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

3.2.4 อิทธิพลของเส้นใยต่อความเหนียว

การเสริมเส้นใยจะไปช่วยยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างคานสามารถรับกำลังตัดได้ต่อไปหลังเกิดการแตกร้าว โดยความสามารถในการรับกำลังตัดของตัวอย่างหลังการแตกร้าวเรียกว่า “ความเหนียว (Toughness) หรือความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption)” ค่าความเหนียวหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนัก-การโก่งตัว (รูปที่ 5) งานวิจัยนี้จะพิจารณาคความเหนียวของคานที่ระยะ T_{150}^D (1/150 ของความยาวช่วงคานทดสอบ



รูปที่ 15 ความเหนียวที่ระยะการโก่งตัว L/150 กับ ปริมาณเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



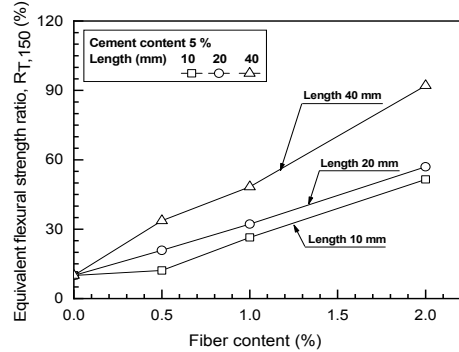
รูปที่ 16 ความเหนียวที่ระยะการโก่งตัว L/150 กับ ปริมาณเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

รูปที่ 15 และ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเหนียวกับปริมาณเส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% และ 7% ค่าความเหนียวของตัวอย่างทั้งสองปริมาณ ปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้น ใย โดยที่ตัวอย่างความยาวเส้นใย 40 มิลลิเมตรแสดงการ เพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวอย่างชัดเจนกับปริมาณเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเหนียวของตัวอย่างที่ ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% และ 7% พบว่าค่าความเหนียว ของตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7% มีค่าสูงกว่า ตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% เพียงเล็กน้อย แสดงให้ เห็นว่าค่าความเหนียวของตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับปริมาณ และความยาวของเส้นใยเป็นหลัก [15]

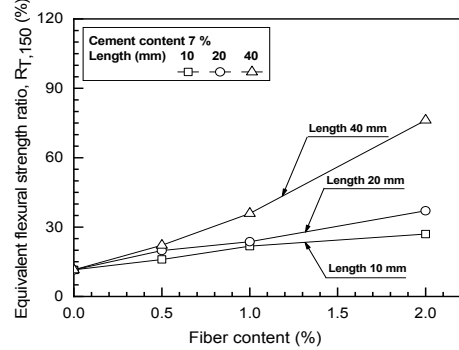
3.2.4 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า

การประเมินความสามารถการรับกำลังดัดของ ตัวอย่างเสริมเส้นใยโดยทั่วไปจะแสดงในรูปแบบของ อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า (Equivalent flexural

strength ratio, $R_{T,150}^D$) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการ ทำงานของเส้นใยหลังการแตกร้าว ดังแสดงในสมการที่ 2



รูปที่ 17 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่ากับปริมาณ เส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5%



รูปที่ 18 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่ากับปริมาณ เส้นใยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 7%

รูปที่ 17 และ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่ากับปริมาณเส้นใยที่ปริมาณ ปูนซีเมนต์ 5% และ 7% ผลการทดสอบพบว่าค่า $R_{T,150}^D$ ทั้งสองปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ เส้นใย เมื่อพิจารณาค่าของ $R_{T,150}^D$ ที่ปริมาณของเส้นใย เท่ากันพบว่า เส้นใยที่ยาวกว่าจะให้ค่า $R_{T,150}^D$ ที่สูงกว่า เพราะเส้นใยที่ยาวกว่าจะมีพื้นที่การจับยึดระหว่างทราย ซีเมนต์กับเส้นใยที่มากทำให้เส้นใยสามารถทำงานได้ อย่างเต็มที่ในการดูดซับพลังงานหลังการแตกร้าว เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นสังเกตเห็นว่าค่า $R_{T,150}^D$ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถ ในการรับกำลังดัดของตัวอย่างเสริมเส้นใยจะถูกควบคุม โดยปริมาณและความยาวของเส้นใยมากกว่ากำลังของ เมทริก [16]

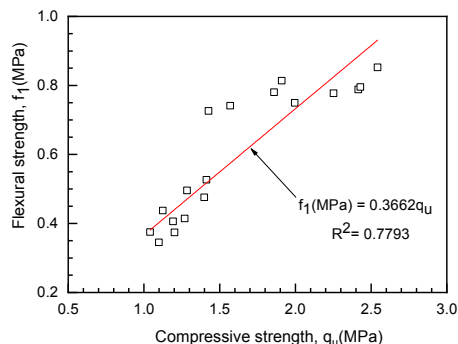
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดัด

ค่ากำลังอัดสูงสุด (Peak compressive strength, q_u) และกำลังดัดสูงสุด (Peak flexural strength, f_1) ของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ปริมาณเส้นใย ความยาวเส้นใยและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆถูกนำมา พล็อตร่วมกันเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังรับแรงดัด ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัด ของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยสามารถแสดง สมการที่ 4

$$f_1 \text{ (MPa)} = 0.3662q_u \quad (4)$$

โดยที่ f_1 คือ กำลังรับแรงดัดสูงสุด

q_u คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุด



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและ กำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย

4. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลการเส้นใยปาล์มต่อ พฤติกรรมทางด้านกำลังอัดและกำลังดัดของทรายซีเมนต์ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ (5% และ 7%) ปริมาณเส้นใย (0.5, 1.0 และ 2.0%) และ ความยาวเส้นใย (10, 20 และ 40 มิลลิเมตร) ผลการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแสดงให้เห็น ว่าการเสริมเส้นใยทำให้พฤติกรรมความเค้น-ความเครียด ของตัวอย่างทรายซีเมนต์ที่คล้ายกับวัสดุที่มีความเปราะ เป็นวัสดุที่มีความเหนียว โดยตัวอย่างสามารถรับกำลัง ได้ต่อไปหลังจากถึงค่ากำลังสูงสุด นอกจากนั้นพฤติกรรม ความเหนียวของตัวอย่างซึ่งแสดงด้วยดัชนีความเปลี่ยน

รูป (Deformation index, D) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ และความยาวของเส้นใย

4.2 การเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้ค่ากำลังอัด เพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากนั้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง โดย ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1.0%

4.3 ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์ม แสดงพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนัก-การโก่งตัวแบบ Softening ในทุกปริมาณและความยาวของเส้นใย โดยเส้นใยส่งผล ต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดง ให้เห็นว่ากำลังดัดสูงสุดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับแรงยึด เหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายและปูนซีเมนต์จากการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) หรือกำลัง ของเมทริกซ์ (Matrix) เป็นหลัก

4.4 กำลังดัดคงค้าง (Residual strength) ของ ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ระยะการโก่งตัว L/150 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยช่วยในการควบคุมอัตรา การสูญเสียพลังงานหลังการแตกร้าว

4.5 กำลังดัดเทียบเท่า (Equivalent flexural strength ratio, $R_{T,150}^D$) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการ ทำงานของเส้นใยหลังการแตกร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ของเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใยที่เท่ากันพบว่า เส้นใยที่ ยาวกว่าจะให้ค่า $R_{T,150}^D$ ที่มากกว่าเพราะมีพื้นที่ในการจับ ยึดระหว่างทรายซีเมนต์กับเส้นใยที่มาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงาน การวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. L. Santoni and J. S. Tingle, "Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction," *J. Geotech. Engrg., ASCE*, vol. 127, no. 3, pp. 258-268, 2001.
- [2] S. S. Park, "Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 1134-1138, 2011.



- [3] F. Schnaid, P. D. M. Prietto and N. C. Consoli, "Characterization of cemented sand in triaxial compression," *J. Geotech. Engrg., ASCE*, vol. 127, no. 10, pp. 857-868, 2001.
- [4] E. Kalkan, "Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils," *Appl. Clay Sci*, Vols. 80-81, pp. 117-125, 2013.
- [5] V. Anggraini, A. Asadi, B. B. K. Huat and H. Nahazanan, "Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil," *Measurement*, vol. 59, pp. 372-381, 2015.
- [6] M. Ayeldeen and M. Kitazume, "Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement stabilized soft clay," *Geotext. Geomembr.*, vol. 45, pp. 592-602, 2017.
- [7] D. Gupta and A. Kumar, "Strength Characterization of Cement Stabilized and Fiber Reinforced Clay-Pond Ash Mixes," *Int. J. Geosynthetics Ground Eng.*, vol. 2, no. 4, p. 32, 2016.
- [8] E. Kapogianni, M. Sakellariou, J. Laue and S. Springman, "Investigation of the Mechanical Behaviour of the Interface between Soil and Reinforcement, via Experimental and Numerical Modelling," *Procedia Eng.*, vol. 143, pp. 419-426, 2016.
- [9] N. Consoli, J. Montardo, M. Donato and P. D. M. Prietto, "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites," *Ground Improv.*, vol. 8, no. 2, pp. 77-90, 2004.
- [10] J. Maity, B. C. Chattopadhyay and S. P. Mukherjee, "Behaviour of Different Types of Sand Randomly Mixing with Various Natural Fibers," *J. Inst. Eng.*, vol. 93, no. 2, pp. 97-104, 2012.
- [11] S. K. Tiwari and A. Ghiya, "Behavior of randomly oriented fiber reinforced fly ash," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 18, pp. 3107-3128, 2013.
- [12] M. R. Abdi and H. Mirzaeifar, "Effects of Discrete Short Polypropylene Fibers on Behavior of Artificially Cemented Kaolinite," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 253-262, 2016.
- [13] K. K. Santhi and M. K. Sayida, "Behaviour of Black Cotton Soil Reinforced with Sisal fibre," in *10th National Conference on Technological Trends (NCTT09)*, Trivandrum, Kerala, India, 2009.
- [14] L. Wei, S. X. Chai, H. Y. Zhang and Q. Shi, "Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 300-308, 2018.
- [15] V. Anggraini, A. Asadi, A. Syamsir and B. B. K. Huat, "Three point bending flexural strength of cement treated tropical marine soil reinforced by lime treated natural fiber," *Measurement*, vol. 11, pp. 158-166, 2017.
- [16] P. Jamsawang, P. Voottipruex and S. Horpibulsuk, "Flexural Strength Characteristics of Compacted Cement-Polypropylene Fiber Sand," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 9, pp. 1-9, 2015.
- [17] P. Donkor and E. Obonyo, "Influence of fibers on flexural properties and failure mechanism," *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 25-33, 2016.
- [18] M. Mostafa and N. Uddin, "Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 5, pp. 53-63, 2016.



- [19] ASTM C2116-00, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," *American Society of Testing and Materials*.
- [20] ASTM C1609-10, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)," *American Society of Testing and Materials*.