การปรับปรุงกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดด้วยเส้นใยโพลีโพรพีลีน

พิทยา แจ่มสว่าง[1] พานิช วุฒิพฤกษ์[2]* และ สันชัย อินทพิชัย[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดด้วยเส้นใยโพลีโพรพีลีน ซึ่งเสริมลงในดินมวลเม็ดเพื่อช่วยหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของรอยแตกร้าว จำนวนของรอยแตกร้าวแปรผันตามปริมาณของเส้นใย และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยเป็นเส้นตรง โดยค่าความลาดชันแสดงถึงอัตรากำลังดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้กำลังดัดสูงสุดมีอัตราเพิ่มสูงยิ่งขึ้น ทั้งนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังดัดสูงสุดขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์เป็นหลัก เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่ม มากขึ้น กำลังดัดคงเหลือหลังจากเกิดการแตกร้าวหรือหลังจากกำลังดัดสูงสุดครั้งแรกมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังดัดคงเหลือขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์ เส้นใยที่เสริมลงในดินทำหน้าที่ดูดซับพลังงานของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุก เส้นใยทำงานได้ดีเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น เพราะกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนจับยึดเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใย มากกว่ากำลังของเมทริกซ์ ดังนั้นเมื่อใช้เส้นใยชนิดเดียวกันในปริมาณเท่ากัน อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าจึงใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: กำลังดัด ทรายซีเมนต์บดอัด เส้นใยโพลีโพรพีลีน เมทริกซ์

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3247 อีเมล: pnv@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 21 พฤษภาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 10 ตุลาคม 2556

Improvement of the Bending Stress of Polypropylene Fiber-Reinforced Compacted Cement Sand

Pitthaya Jamsawang[1] Panich Voottipruex[2]* and Sunchai Inthapichai[2]

Abstract

This paper presents the improvement of the bending strength of cement-stabilized polypropylene fiber sand. The fiber added can stop the movement of cracks. It was found that the number of cracks varied as the amount of fiber was added. A linear relationship between the maximum bending stress and the amount of fiber was observed, where the slope represented the maximum increment rate of bending. As the input of cement increased, the maximum bending stress increased because the increment rate of the maximum bending stress depends largely on the strength of the matrix. Moreover, the residual bending stress rate after cracking or after initial maximum bending stress increased as the amount of cement increased. The test results revealed that the incremental rate of the residual bending stress depends on the matrix strength. Moreover, the fibers added to the soil can absorb the energy of the beam under service load. The results showed that the greater was the cement content, the better was the effectiveness of the fibers added. This was due to the increase in the bond strength between the fiber surfaces and soil matrix. The equivalent bending stress ratio depends on the amount of fibers rather than the matrix strength. Therefore, with the same amount of the same type of fiber, the equivalent bending stress is essentially the same.

Keywords: Bending Stress, Compacted Sand Cement, Polypropylene Fiber, Matrix

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[2] Associate Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext.3247, E-mail: pnv@kmutnb.ac.th

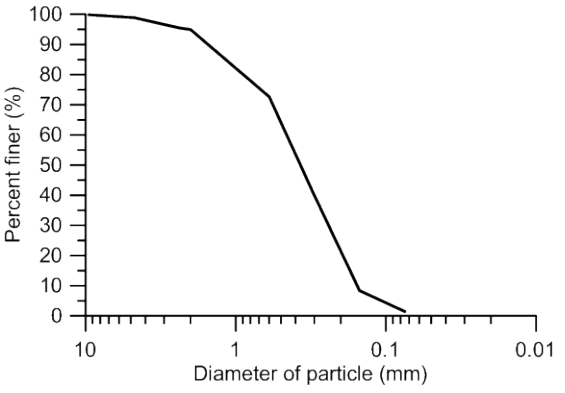
Received 21 May 2013; Accepted 10 October 2013

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย คุณสมบัติทางวิศวกรรมคือสามารถรับแรงเฉือนได้ และสามารถรับแรงอัดได้หากอยู่ในสภาพหุ้มล้อม แต่ดินไม่สามารถรับแรงดึงหรือแรงดัดได้ นอกจากนี้ดินในสภาพธรรมชาติบางชนิดเช่นดินทราย เป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น หากนำมาใช้ในทางวิศวกรรมปฐพีเช่นเป็นวัสดุรองพื้นทาง อาจต้องปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีโดยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรง และลดพฤติกรรมการยุบตัว [1] แต่เมื่อผสมซีเมนต์ลงในดินมักทำให้เกิดรอยแยกเนื่องจากดินซีเมนต์เกิดการหดตัว [2], [3] นอกจากนี้การนำดินมาใช้ในทางวิศวกรรม บางครั้งอาจเกิดแรงดัดขึ้นในโครงสร้างดินทำให้เกิดรอยแยก ซึ่งเมื่อดินได้รับความชื้นหรือน้ำ รอยแยกอาจขยายใหญ่ขึ้น นำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างดินหรือคันทางได้ การเสริมความแข็งแรงแก่ดินด้วยเส้นใยสังเคราะห์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเสริมแรงแก่ดิน

ถึงแม้ว่าการเสริมความแรงแก่ดิน ด้วยเส้นใยสังเคราะห์ได้เริ่มมาประมาณ 30 ปีแล้ว แต่มีผู้นำเส้นใยมาเสริมแรงในดินมวลเม็ดหรือดินที่มีความเชื่อมแน่นต่ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีผู้วิจัยเกี่ยวกับดินเสริมแรงจำนวนมาก [4], [5] และมีการอธิบายความแข็งแรงที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ในบริเวณที่เกิดแรงเฉือน [6] - [8]

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ซึ่งนำมาเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีโพรพีลีน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผิวทาง ภายใต้แรงกระทำจะมีลักษณะเป็นแบบคานรับแรงดัด บทความนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดด้วยเส้นใยโพลีโพรพีลีน โดยการทดสอบในลักษณะคานเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะแอ่นตัว กำลังดัดสูงสุด ครั้งแรกและกำลังดัดสูงสุด กำลังดัดคงเหลือ ความสามารถในการดูดซับพลังงาน หรือความเหนียว



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของทรายที่ใช้ทดลองรวมทั้งอัตราส่วนการคัดเทียบเท่า ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างชั้นทางได้

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 วัสดุ

ทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายจากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย ซึ่งมักใช้เป็นวัสดุบดอัดสำหรับงานทางและงานถมโดยทั่วไป ขนาดคละของอนุภาคแสดงในรูปที่ 1 และคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังได้แก่ เส้นใยโพลีโพรพีลีน ดังรูปที่ 2ก (Polypropylene Fiber) ซึ่งมีคุณสมบัติทั่วไปดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการทดสอบ

Property	Value
Specific gravity	2.67
Coefficient of uniformity	2.65
Coefficient of gradation	0.82
Soil classification (Unified soil classification system)	SP
Maximum dry unit weight (kN/m^3)	17.7
Minimum dry unit weight (kN/m^3)	13.3
Maximum dry unit weight from standard compaction test (kN/m^3)	17.6
Optimum moisture content from standard compaction test	12.8%

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในการทดสอบ

Property	Value
Length (mm)	58
Shape	Crimped
Section (mm x mm)	Square 1x0.5
Specific gravity	0.90
Aspect ratio	52
Tensile strength (N/mm^2)	450
Surface Area / Fiber (mm^2)	174
Surface Area / 1 kg Fiber (mm^2)	4872000

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ การบดอัดดินใช้แบบมาตรฐาน (ASTM D-698) [9]

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัด

ตัวอย่างคานทดสอบมีขนาด กว้าง 100 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร โดยนำทรายมาผสมกับปูนซีเมนต์ คลุกเคล้าจนเข้ากันดี หลังจากนั้นนำเส้นใยมาผสมกับทรายซีเมนต์ เมื่อเส้นใยกระจายทั่วเนื้อทรายซีเมนต์ดีแล้ว จึงเติมน้ำเพิ่มลงไป เตรียมตัวอย่างโดยเททรายซีเมนต์บดอัดผสมเส้นใยโพลีโพรพีลีน (Fiber Reinforced Compacted Cement-sand) หรือ FRCS ลงในแบบหล่อคานเป็นชั้นๆ แล้วบดอัดโดยใช้ค้อนไม้กระทุ้งเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนักของดินแห้ง โดยแต่ละปริมาณใช้ปริมาณเส้นใย 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5% และ 2% โดยน้ำหนักของดินแห้งเช่นเดียวกัน (รูปที่ 2ก) เพื่อนำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละสัดส่วน เตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด (Plain Compacted Cement-sand) หรือ PCS ได้เตรียมตัวอย่างในลักษณะเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมภายใต้แรงดัด เมื่อตัวอย่างทรายซีเมนต์ผสมเส้นใยบดอัดจนเต็มแบบหล่อแล้ว จึงห่อหุ้มด้วยพลาสติกใส (รูปที่ 2ข) แล้วบ่มเป็นเวลา 28 วันก่อนนำมาทดสอบรับแรงดัด

(ก) เส้นใย Polypropylene

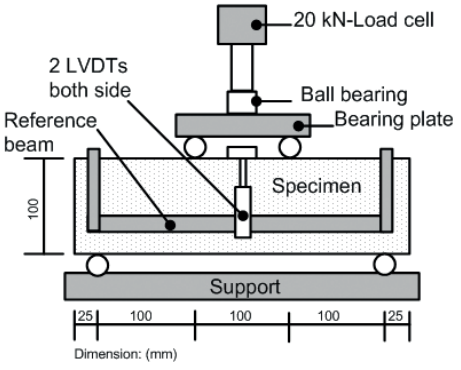
(ข) ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์บดอัด บ่ม 28 วัน

รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.3 ขั้นตอนการทดสอบแรงดัด

หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน จึงนำมาทดสอบการรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C 1609 – 10 [10] โดยการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ดังรูปที่ 3ก และ 3ข มาตรวัดน้ำหนักเป็นแบบ Load Cell ขนาด 20 kN มาตรวัดระยะแอ่นตัวใช้ LVDT จำนวน 2 ตัว ในแต่ละด้านของคานตัวอย่าง ติดตั้งตรงตำแหน่งกึ่งกลางคาน เพื่อหาระยะแอ่นตัวเฉลี่ย ซึ่ง LVDT แต่ละตัวจะติดอยู่บนคานอ้างอิงที่ปลายของคานอ้างอิงทั้ง 2 ด้านยึดกับจุดรองรับ เพื่ออ่านค่าระยะแอ่นตัวสุทธิ ด้วยการวัดระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเทียบเทียบกับจุดรองรับ โดยควบคุมอัตราการแอ่นตัวให้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.05 มม./นาที ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยปรากฏรอยแตกร้าวเกิดขึ้นจนกระทั่งมีระยะแอ่นตัวสุทธิ 4 มิลลิเมตร จึงหยุดการทดสอบ

(ก) ตัวอย่างก่อนการทดสอบ



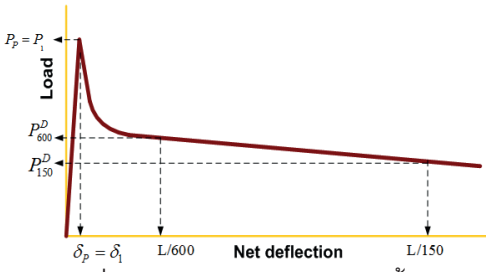
(ข) รายละเอียดของการติดตั้งเครื่องมือ

รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C 1609 – 10 [10]

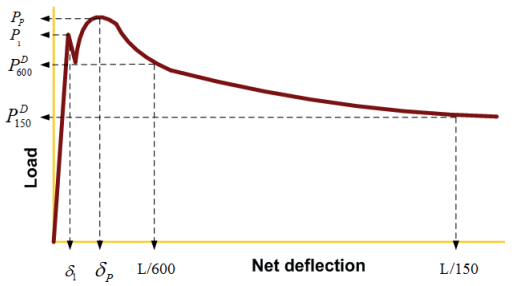
2.4 การคำนวณ

จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวสุทธิดังรูปที่ 4ก และ 4ข หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 1609–10 [10] เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลกระทบของปริมาณเส้นใยและซีเมนต์ที่มีต่อพฤติกรรมของ FRCS โดยตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้

L = ช่วงพาดคาน
P_1 = น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก
P_P = น้ำหนักสูงสุด
δ_1 = ระยะแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก



(ก) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสำหรับน้ำหนักสูงสุดตอนแรกเท่ากับน้ำหนักสูงสุด



(ข) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเมื่อน้ำหนักสูงสุดมากกว่าน้ำหนักสูงสุดในตอนแรก

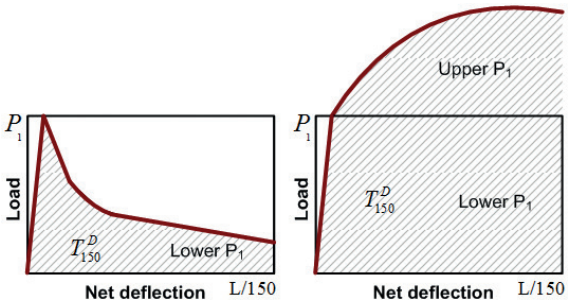
รูปที่ 4 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัว (ASTM C 1609 – 10)

δ_P = ระยะแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุด
f_1 = กำลังดัดสูงสุดครั้งแรก
f_P = กำลังดัดสูงสุด
P^D_{600} = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวเท่ากับ L/600
f^D_{600} = กำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวเท่ากับ L/600
P^D_{150} = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวเท่ากับ L/150
f^D_{150} = กำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวเท่ากับ L/150
T^D_{150} = พื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัว ตั้งแต่ 0 ถึง L/150

โดยที่กำลังดัดที่ต้องการ

$$f = \frac{PL}{bd^2} \qquad (1)$$

เมื่อ P คือน้ำหนักใด ๆ ที่ต้องการทราบค่ากำลังดัดสำหรับอัตราส่วนกำลังเทียบเท่า



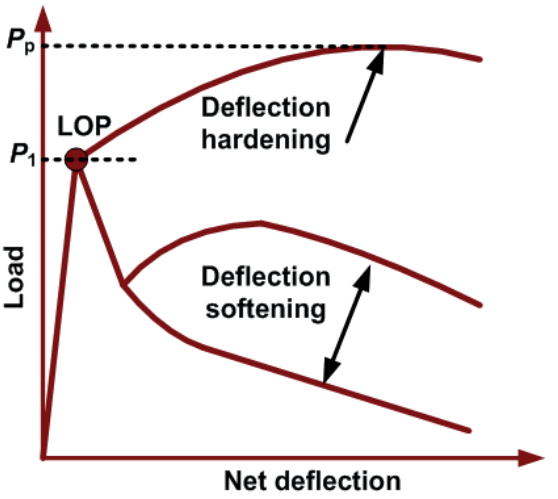
(ก) ค่า $R_{T,150}^D < 100\%$ (ข) $R_{T,150}^D > 100\%$

รูปที่ 5 ความหมายของค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า

$$R_{T,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1 bd^2} \times 100\% = \frac{150T_{150}^D}{\frac{P_1 L}{bd^2} bd^2} = \frac{T_{150}^D}{P_1 \frac{L}{150}} \qquad (2)$$

อัตราส่วนการดัดเทียบเท่าจากสมการที่ 2 แสดงถึงพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวต่อกำลังสูงสุดครั้งแรกคูณกับระยะแอ่นที่ L/150 ซึ่งแสดงความหมายของค่านี้ได้โดยอาศัยรูปที่ 5 ก และ 5 ข

Naaman และ Reinhardt [11] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของตัวอย่าง FRCC ภายใต้แรงดัดดังรูปที่ 6 โดยแบ่งลักษณะของการแอ่นตัวออกเป็น 2 แบบ ได้แก่พฤติกรรมของการแอ่นตัวเป็นแบบ Hardening ซึ่งทำให้มีความสามารถรับน้ำหนักหลังตัวอย่างเกิดการแตกร้าวครั้งแรกได้สูงกว่า FRCC ที่มีพฤติกรรมแบบ Softening สำหรับมาตรฐาน ASTM C 1609 – 10 [10] นิยามว่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก (P_1) เป็นจุดที่ความลาดชันของเส้นโค้งเป็นศูนย์ ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่แสดงพฤติกรรมการแอ่นตัวเป็นแบบ Hardening ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้จุดที่เรียกว่า LOP (Limit of Proportionality) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรงเพื่อคำนวณค่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก (P_1) และกำลังดัดสูงสุดครั้งแรก (f_1) ส่วนกรณีที่ตัวอย่าง FRCC แสดงพฤติกรรมการแอ่นตัวเป็นแบบ Softening จะใช้ค่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก (P_1) ตามนิยามของมาตรฐาน ASTM C 1609 – 10 [10] ดังรูปที่ 4ก และ 4ข



รูปที่ 6 ลักษณะของทั่วไปของกราฟน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวสำหรับคาน FRCC

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะแอ่นตัว

พฤติกรรมต้านทานแรงดัดของ FRCS แสดงในรูปที่ 7ก ข และ ค กราฟแต่ละกราฟเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากผลทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างดังที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

รายละเอียดของข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบแสดงเป็นตัวเลขในตารางที่ 3 ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของผลทดสอบที่ได้ โดยแต่ละตัวแปรจะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการดัดของ FRCS เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักที่แสดงไว้ในแกน y ในแต่ละรูป พบว่ามีมาตราส่วนแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ต่างกัน ทำให้สามารถรับน้ำหนักแตกต่างกัน เห็นได้ว่าค่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแปรผันตรงตามระยะแอ่นตัวของคานที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบไปจนถึงน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก (First Peak Load) หลังจากนั้นน้ำหนักที่กระทำจะลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นการชี้ให้เห็นว่าวัสดุตัวอย่างแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเปราะ ซึ่งพบในตัวอย่าง PCS โดยภายหลังการวิบัติ ตัวอย่างไม่สามารถรับน้ำหนักต่อไปได้อีก สำหรับตัวอย่าง FRCS พบว่าพฤติกรรมระหว่างแรงดัดกับระยะ

แอ่นตัว ก่อนถึงน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก มีความคล้ายคลึงกันกับตัวอย่าง PCS โดยก่อนที่จะถึงค่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกนั้น เริ่มปรากฏรอยแตกร้าวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยรอยร้าวขยายขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก เป็นสาเหตุให้เมทริกซ์ (Matrix) หรือส่วนจับยึดซึ่งหมายถึงทรายผสมซีเมนต์บดอัดเกิดการวิบัติขึ้น หลังจากนั้นเส้นใยซึ่งทำหน้าที่เสริมแรงจะเริ่มทำงาน ทำให้คานตัวอย่างสามารถรับแรงดัดต่อไปได้ตามระยะแอ่นตัวเพิ่มขึ้น แตกต่างจากตัวอย่าง PCS ซึ่งไม่สามารถรับน้ำหนักต่อไปได้อีกหลังจากทดสอบจนถึงน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

ความแตกต่างระหว่าง FRCS และ PCS อย่างชัดเจนแสดงพฤติกรรมหลังจากผ่านการรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก สำหรับ PCS ตัวอย่างจะวิบัติทันทีที่พลังงานความเครียดสูงเพียงพอที่ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น แต่ FRCS มีเส้นใยซึ่งเปรียบเสมือนส่วนเสริมกำลัง (Reinforcement) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการสลายพลังงาน ดังนั้นจึงยังคงสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้หลังจากการรับน้ำหนักสูงสุด โดยน้ำหนักส่วนที่เกินจากน้ำหนักสูงสุดเรียกว่าน้ำหนักคงเหลือ อย่างไรก็ตามการที่คานจะรับน้ำหนักคงเหลือได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยและกำลังยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยและส่วนจับยึด หากทรายซีเมนต์มีกำลังสูง กำลังยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับทรายซีเมนต์จะสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 3 การทำงานของเส้นใย

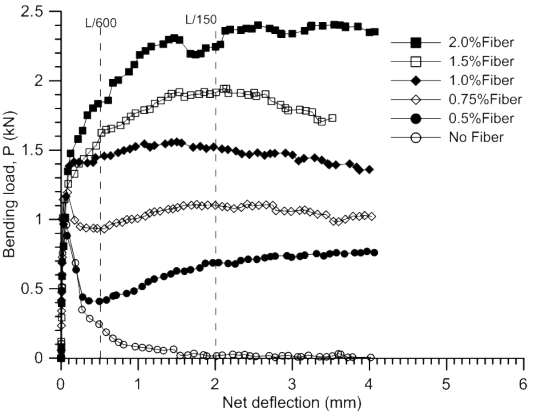
Specimen	First Peak Load P_1(kN)	Peak Load P_p (kN)	Deflection					
			L/600 (0.5 mm)		L/150 (2 mm)			
			P^D_{600} (kN)	f^D_{600} (MPa)	P^D_{150} (kN)	f^D_{150} (MPa)	T^D_{150} (N-m)	$R^D_{T,150}$ (%)
3% cement								
0% fiber	0.96	0.96	0.25	0.074	0.02	0.005	0.37	19
0.5% fiber	0.88	0.88	0.41	0.123	0.69	0.207	1.15	65
0.75% fiber	1.20	1.14	0.93	0.280	1.10	0.331	2.06	86
1% fiber	1.42	1.20	1.46	0.437	1.51	0.453	3.08	109
1.5% fiber	1.49	1.00	1.63	0.488	1.92	0.575	3.41	115
2% fiber	1.50	1.00	1.80	0.541	2.25	0.674	4.01	134
5% cement								
0% fiber	2.58	2.58	0.87	0.261	0.33	0.100	1.39	27
0.5% fiber	1.58	1.58	1.00	0.299	0.95	0.285	2.17	68
0.75% fiber	2.24	2.24	1.76	0.527	2.03	0.610	3.97	88
1% fiber	2.40	3.20	2.46	0.737	3.20	0.960	5.48	114
1.5% fiber	2.65	4.34	3.52	1.055	4.32	1.296	7.75	125
2% fiber	2.25	5.20	4.21	1.263	5.12	1.535	9.03	137
7% cement								
0% fiber	4.31	4.31	1.28	0.10	0.54	0.163	2.37	28
0.5% fiber	3.87	3.87	3.02	0.285	3.56	1.069	6.65	86
0.75% fiber	4.04	4.70	4.60	0.610	4.50	1.349	8.75	108
1% fiber	4.35	6.14	4.78	0.960	6.14	1.841	10.82	124
1.5% fiber	4.13	6.52	5.07	1.296	6.47	1.940	10.98	133
2% fiber	3.83	8.14	5.87	1.535	8.17	2.417	13.64	143

รูปที่ 7ก แสดงพฤติกรรมของ PCS และ FRCS ที่มีปริมาณซีเมนต์ 3% ภายใต้แรงดัดคาน PCS และ FRCS ที่ใช้ปริมาณเส้นใย 0.5% และ 0.75% แสดงพฤติกรรมของการแอ่นตัวเป็นแบบ Softening ในขณะที่ FRCS ที่ใช้ปริมาณเส้นใย 1% ขึ้นไปแสดงพฤติกรรมของการแอ่นตัวเป็นแบบ Hardening กล่าวคือเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้น หรือเมื่อคานตัวอย่างรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกแล้ว น้ำหนักยังไม่ลดลงแต่กลับมีค่าสูงกว่าค่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยสูงกว่า 1% แรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับทรายซีเมนต์มีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ตัวอย่างรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นหลังเกิดการวิบัติได้ทันที

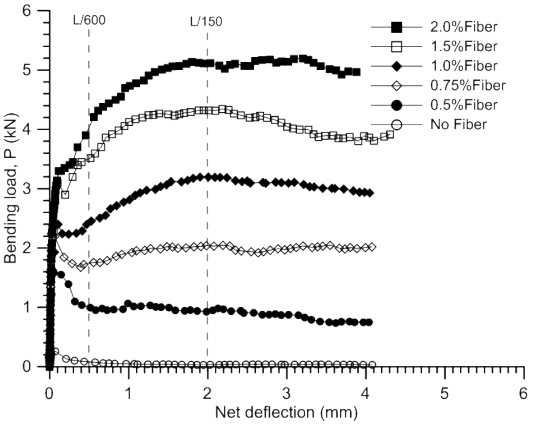
ปริมาณเส้นใยแสดงความสามารถในการรับน้ำหนักคงเหลือได้ดีที่สุดเนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับทรายซีเมนต์ซึ่งมีค่าสูงนั่นเอง เพราะเมื่อปริมาณเส้นใยสูงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับทรายซีเมนต์สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยน้อยกว่า 1% แรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับส่วนจับยึดมีค่าน้อยไม่เพียงพอที่จะทำให้ตัวอย่างรับน้ำหนักคงเหลือให้เท่ากับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกได้

เมื่อเพิ่มกำลังของส่วนจับยึดด้วยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เป็น 5% ดังแสดงในรูปที่ 7ข และ 7% ดังแสดงในรูปที่ 7ข และ ค ตามลำดับ พบว่าสำหรับพฤติกรรมการแอ่นตัวของ PCS และ FRCS เป็นแบบ Hardening เพราะเมื่อส่วนจับยึดมีกำลังเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำหนักคงเหลือดังตัวอย่าง FRCS ที่ปริมาณซีเมนต์ 5% ปริมาณเส้นใยสูงกว่า 0.75% และ ที่ปริมาณซีเมนต์ 7% ปริมาณเส้นใยสูงกว่า 0.5% สรุปได้ว่าพฤติกรรมของการแอ่นตัวขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยและกำลังของส่วนจับยึดซึ่งหมายถึงกำลังยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนจับยึดนั่นเอง

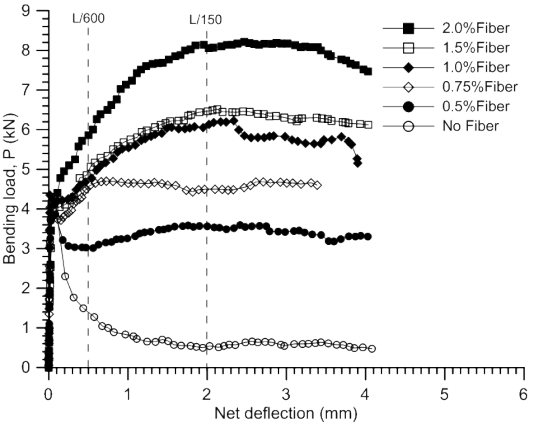
ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเนื่องจากสามารถใช้จำแนกการทำงานของเส้นใยได้ รูปที่ 8 แสดงรอยแตกร้าวของ FRCS หลังจากการทดสอบที่ระยะแอ่นตัวสูงสุด L/75 หรือ 4 มิลลิเมตร



(ก) ซีเมนต์ 3%

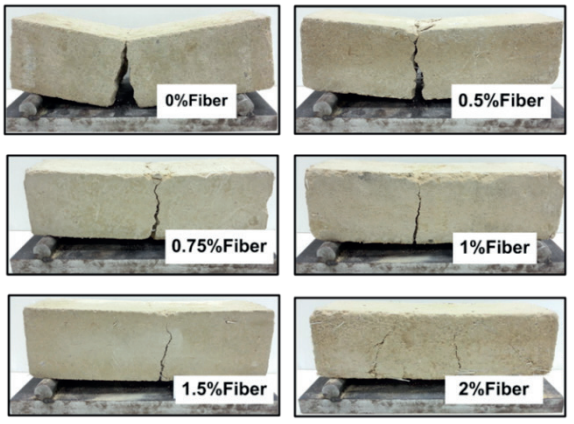


(ข) ซีเมนต์ 5%



(ค) ซีเมนต์ 7%

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



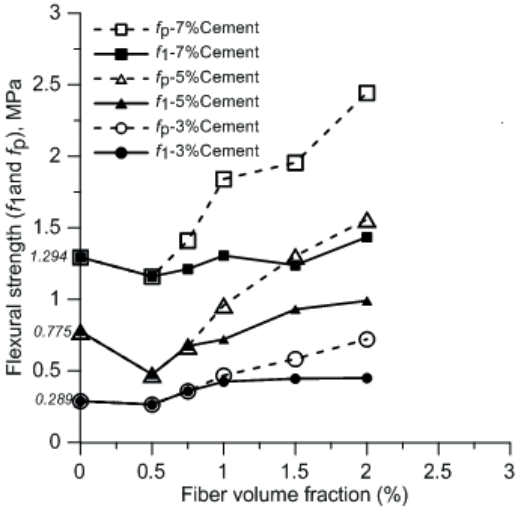
รูปที่ 8 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของ PCS และ FRCS

พบว่าตัวอย่าง PCS มีรอยแตกร้าวใหญ่ที่สุดและเป็นแนวตรง ในขณะที่ขนาดรอยแตกร้าวของ FRCS ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใย เมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นคานจะแตกออกอย่างช้าๆ เส้นใยที่อยู่บริเวณรอยแตกจะทำหน้าที่รับแรงกระทำหลังเกิดการแตกร้าว

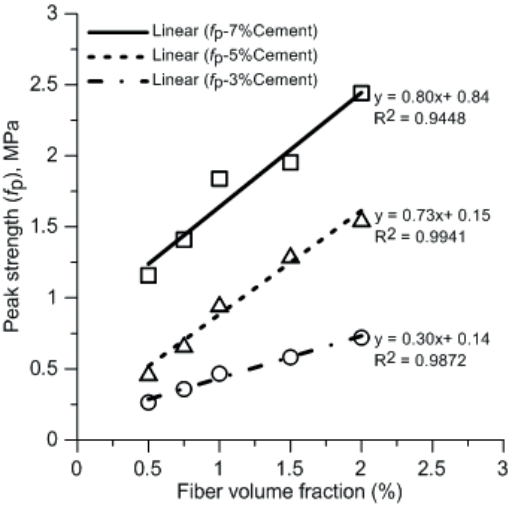
ในทุกกรณีจะพบเส้นใยอยู่ในบริเวณรอยแตกหัก รอยแตกร้าวที่พบมีการแตกแขนงและไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากเส้นใยช่วยหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของรอยร้าว (Crack Arrest) และทำให้รอยร้าวเกิดการแตกแขนง (Crack Branching) หรือเกิดการเบี่ยงออก (Crack Deviating) Sukontasukkul [12] พบว่าจำนวนของรอยแตกร้าวมีปริมาณแปรผันตามปริมาณของเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใยสูงจะเกิดรอยแตกร้าวมากกว่าที่ปริมาณเส้นใยต่ำ โดยที่ปริมาณเส้นใย 2% มีปริมาณรอยร้าวสูงที่สุด

3.2 กำลังดัดสูงสุดครั้งแรกและกำลังดัดสูงสุด

ผลกระทบของปริมาณเส้นใยและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ส่งผลต่อกำลังดัดสูงสุดครั้งแรก (f_1) และกำลังดัดสูงสุด (f_p) แสดงในรูปที่ 9ก เมื่อพิจารณาค่า f_1 ของตัวอย่าง FRCS และ PCS พบว่าค่า f_1 ของตัวอย่าง FRCS มีการเพิ่มขึ้นแต่ไม่ชัดเจนตามปริมาณเส้นใยในทุกสัดส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ เนื่องจากกำลังดัดสูงสุดครั้งแรกขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์เป็นหลัก สังเกตได้



(ก) กำลังดัดสูงสุดครั้งแรกและกำลังดัดสูงสุด



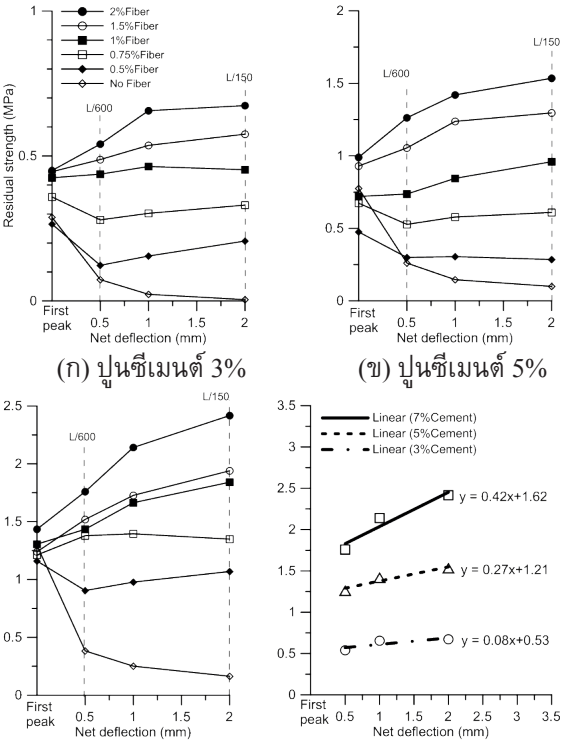
(ข) กำลังดัดสูงสุด

รูปที่ 9 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยที่มีต่อค่ากำลังดัดของ FRCS ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

จากตัวอย่าง PCS ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 3% 5% และ 7% มีค่า f_1 เท่ากับ 0.289 MPa, 0.775 MPa และ 1.294 MPa ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณเส้นใยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังดัดสูงสุดครั้งแรก สำหรับค่ากำลังดัดสูงสุด (f_p) ดังรูปที่ 9ก ตัวอย่าง FRCS เริ่มมีค่ากำลัง กำลังดัดสูงสุดมากกว่ากำลังดัดสูงสุดครั้งแรก

($f_p > f_1$) เมื่อมีปริมาณเส้นใยมากกว่า 1%, 0.75% และ 0.5% สำหรับตัวอย่าง FRCS ที่มีปริมาณซีเมนต์ 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเมทริกซ์มีกำลังสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการทำงานของเส้นใยก็สูงขึ้นตามไปด้วยและเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยลดลง ตัวอย่าง FRCS มีค่า $f_p > f_1$ ยิ่งไปกว่านั้นค่า f_p เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในทุกสัดส่วนของปูนซีเมนต์ ซึ่งต่างจากค่า f_1 ดังนั้นเมื่อคาน FRCS เกิดการแตกร้าวในครั้งแรกไปแล้ว เส้นใยจะทำหน้าที่รับน้ำหนักต่อทำให้คานสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้ซึ่งอาจเท่ากับหรือสูงกว่า f_1 โดยขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยที่ใช้

กราฟสัมพันธ์ระหว่าง กำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใย ทำให้เห็นแนวโน้มของค่า f_p ที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนขึ้น ดังรูปที่ 9ข ซึ่งเป็นกรณีของตัวอย่าง FRCS ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 3%, 5% และ 7% ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยเป็นเส้นตรง ที่มีความลาดชันเท่ากับ 0.30, 0.73 และ 0.80 โดยค่าความลาดชันแสดงถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังดัดสูงสุด เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น กำลังดัดสูงสุดมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า f_p ขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์เป็นหลัก



รูปที่ 10 กำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวต่างๆ

3.3 กำลังดัดคงเหลือ (f^D)

ค่ากำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัว L/600 และ L/150 แสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของ FRCS ภายหลังการเกิดรอยแตกร้าวครั้งแรกขึ้นที่ระยะแอ่นตัวต่างๆ โดยทั่วไปแล้วกำลังดัดคงเหลือจะลดลงหลังจากเกิดรอยร้าวขึ้นครั้งแรก ความเค้นดัดคงเหลือคำนวณจากน้ำหนักดัดที่ระยะแอ่นต่างๆ โดยใช้สมการที่ 1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ส่งผลต่อกำลังดัดคงเหลือแสดงในรูปที่ 10ก 10ข และ 10ค โดยตัวอย่าง PCS สูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดเมื่อระยะแอ่นตัวมีค่าเท่ากับ L/150 (2 mm) รูปที่ 10 ก แสดงตัวอย่าง FRCS ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 3% เมื่อปริมาณเส้นใยอยู่ในช่วงของ 0.5% ถึง 0.75% กำลังคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวเท่ากับ L/600 ถึง L/150 มีค่าน้อยกว่ากำลังสูงสุดครั้งแรก แสดงว่าพฤติกรรมของ FRCS เป็นแบบ Softening ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้ปริมาณเส้นใย 1% ขึ้นไป กำลังคงเหลือมีค่ามากกว่ากำลังสูงสุดครั้งแรกแสดงว่าพฤติกรรมของ FRCS เป็นแบบ Hardening ซึ่งสามารถพบพฤติกรรมในลักษณะนี้ได้ใน FRCS ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 5% และ 7% ดังแสดงในรูปที่ 10ข และ 10ค สรุปได้ว่าคาน FRCS ที่ใช้ปริมาณเส้นใยต่ำกว่า 1% แสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอ่นตัวกับน้ำหนักเป็นแบบ Softening ซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักคงเหลือต่ำ ปริมาณเส้นใยที่น้อย ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนที่เป็นเมทริกซ์มีค่าต่ำเกินกว่าที่จะรองรับน้ำหนักคงเหลือได้ แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใย 1% ขึ้นไป พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอ่นตัวกับน้ำหนักเป็นแบบ Hardening ซึ่งสามารถรับน้ำหนักคงเหลือได้มากขึ้น ปริมาณเส้นใยจำนวนมากทำให้

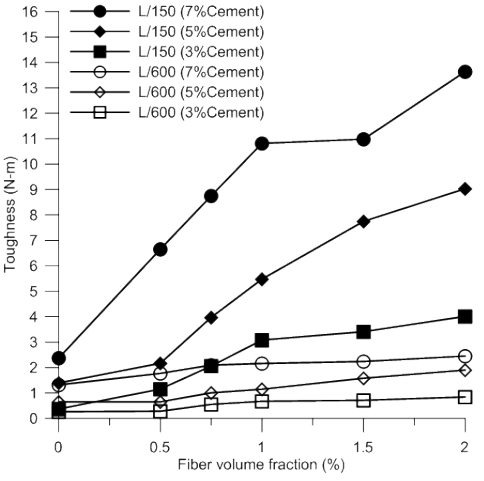
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนที่เป็นเมทริกซ์มีค่าสูงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักคงเหลือได้

เมื่อพิจารณา รูปที่ 10ก สำหรับตัวอย่างมีปริมาณเส้นใย 1.5% และ 2% ความสามารถในการรับกำลังคงเหลือมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายหลังการแตกร้าวจนการแอ่นตัวเกิดขึ้นเท่ากับ 1 มม. (L/300) หลังจากนั้นกำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนคงที่ ที่ระยะแอ่นตัว 2 มิลลิเมตร แต่เมื่อเมทริกซ์มีกำลังเพิ่มขึ้น (รูปที่ 10ข และ 10ค) กำลังดัดคงเหลือมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้น โดยพิจารณาที่ระยะแอ่นจาก 1 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร

รูปที่ 10ง อธิบายผลกระทบเนื่องจากกำลังของเมทริกซ์ที่มีต่อกำลังดัดคงเหลือให้ชัดเจนขึ้นโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังดัดคงเหลือที่ปริมาณเส้นใย 2% ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง โดยที่มีความชันเท่ากับ 0.08, 0.27 และ 0.42 สำหรับ FRCS ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น กำลังดัดคงเหลือหลังจากเกิดการแตกร้าวหรือหลังจากกำลังดัดสูงสุดครั้งแรกมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้น กล่าวได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ กำลังดัดคงเหลือขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์

3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน (ความเหนียว)

วัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานสูงสามารถบรรเทาอันตรายที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักพลศาสตร์ การศึกษาการดูดซับพลังงานทำให้ทราบข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ในงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักพลศาสตร์ ผลกระทบของปริมาณเส้นใยและปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน แสดงในรูปที่ 11 ที่สำหรับระยะการแอ่นตัว L/600 และ L/150 ค่าความเหนียวหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัว โดยค่าความเหนียวหรือพลังงานที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟขึ้นอยู่กับระยะแอ่นตัวที่ต้องการทราบค่า เมื่อพิจารณาความเหนียวของ FRCS ที่ระยะแอ่น L/600 พบว่าค่าที่เพิ่มขึ้นไม่มีนัยสำคัญตามปริมาณเส้นใยในทุกสัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยค่าความเหนียวของ



รูปที่ 11 ความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว L/600 และ L/150

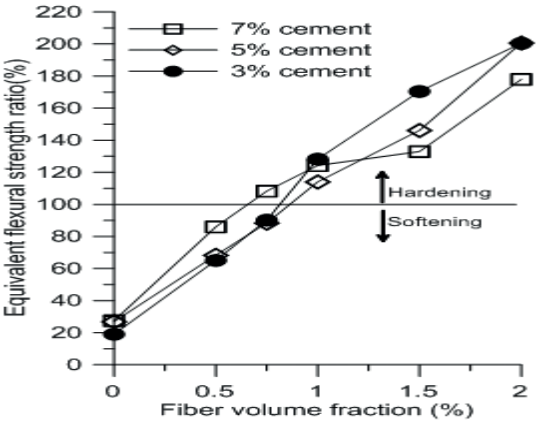
FRCS มีค่าใกล้เคียงกับความเหนียวของ PCS ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากัน สรุปได้ว่าความเหนียวของ FRCS ที่ระยะแอ่น L/600 ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับพลังงานของเมทริกซ์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากระยะแอ่นมีค่าน้อยเส้นใยยังไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ แต่เมื่อระยะแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเป็น L/150 ความเหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าเส้นใยทำหน้าที่เสริมแรงดีขึ้น ชี้ให้เห็นว่าความเหนียวขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใย ตัวอย่าง FRCS แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของเส้นใยซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รอยร้าวขยายขนาดและเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงานของคาน FRCS ภายใต้น้ำหนักบรรทุก เส้นใยทำงานได้ดีเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือเมื่อเมทริกซ์มีกำลังเพิ่มสูงขึ้น เส้นใยยิ่งทำงานได้ดีขึ้น เพราะกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนจับยึดเพิ่มสูงขึ้น

3.5 อัตราส่วนการดัดเทียบเท่า ($R^D_{T,150}$)

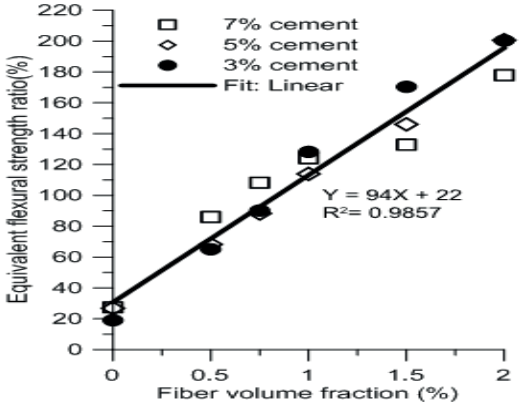
อัตราส่วนการดัดเทียบเท่า ($R^D_{T,150}$) หมายถึงอัตราส่วนของพื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัว กับผลคูณของกำลังสูงสุดครั้งแรกกับระยะแอ่นที่ L/150 ดังนั้นค่า $R^D_{T,150}$ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของ FRCS ในการการดูดซับพลังงานไปจนถึงระยะแอ่น L/150 เมื่อเทียบกับพลังงานทางทฤษฎี โดยสมมุติว่าตัวอย่าง

คานเกิดการแตกร้าวหรือเกิดกำลังสุดครั้งแรกที่ระยะแอ่น L/150 และเมื่อเกิดการแตกร้าวแล้วตัวอย่างสามารถมีค่ากำลังดัดคงเหลือเท่ากับกำลังสุดครั้งแรกไปจนถึงที่ระยะแอ่นเท่ากับ L/150 ดังรูปที่ 5ก และ 5ข

ดังนั้นการพิจารณาประสิทธิภาพของ FRCS โดยใช้ค่าอัตราส่วนการดัดเทียบเท่านี้ ไม่ได้คำนึงถึงกำลังดัดสูงสุดครั้งแรก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกำลังของเมทริกซ์ แต่จะคำนึงถึงความเหนียวที่เกิดขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของเส้นใยภายหลังการแตกร้าวแล้วเท่านั้น รูปที่ 5ก แสดงนิยามการหาค่า $R^D_{T,150}$ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวแสดงพฤติกรรมแบบ Softening ในกรณีนี้พลังงานที่เกิดขึ้นทำให้ได้ค่า $R^D_{T,150}$ ต่ำกว่า 100% พลังงานใต้กราฟจะอยู่ต่ำกว่าน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก P_1 ส่วนรูป 5ข กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวแสดงพฤติกรรมแบบ Hardening โดยพลังงานใต้กราฟมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่ต่ำกว่า P_1 และสูงกว่า P_2 ซึ่งในกรณีนี้พลังงานใต้กราฟในส่วนที่อยู่สูงกว่า P_1 ทำให้ค่า $R^D_{T,150}$ สามารถสูงกว่า 100% ได้ ซึ่งแสดงว่าคาน FRCS มีประสิทธิภาพด้านความเหนียวอยู่ในระดับสูง รูปที่ 12ก แสดงค่าอัตราส่วนการดัดเทียบเท่าของคาน PCS และ FRCS ซึ่งมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใย ตัวอย่างคาน FRCS ที่มีปริมาณซีเมนต์ 3% และ 5% ต้องการปริมาณเส้นใยสูงกว่า 0.75% เพื่อให้ได้ค่า $R^D_{T,150}$ สูงกว่า 100% ในขณะที่ตัวอย่างคาน FRCS ที่มีปริมาณซีเมนต์ 7% ต้องการปริมาณเส้นใยสูงกว่า 0.5% แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใย 1% ค่า $R^D_{T,150}$ มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนซีเมนต์และเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยมากกว่า 1% พบว่าค่า $R^D_{T,150}$ สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 7% ให้ค่าที่ต่ำกว่า 3% และ 5% อย่างไรก็ตามค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่มีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าค่า $R^D_{T,150}$ ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยมากกว่ากำลังของเมทริกซ์ ดังนั้นเมื่อใช้เส้นใยชนิดเดียวกันในปริมาณเท่ากันค่า $R^D_{T,150}$ จึงใกล้เคียงกัน รูปที่ 12ข แสดงเส้นแนวโน้มระหว่างปริมาณเส้นใยและอัตราส่วนการดัดเทียบเท่าซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง



(ก) ผลกระทบของปริมาณเส้นใย



(ก) ผลกระทบของปริมาณเส้นใย

รูปที่ 12 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า

4. สรุป

ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) เส้นใยที่เสริมลงในดินมวลเม็ดช่วยหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของรอยร้าว (Crack Arrest) และทำให้รอยร้าวเกิดการแตกแขนง (Crack Branching) หรือเกิดการเบี่ยงออก (Crack Deviating) จำนวนของรอยแตกร้าวแปรผันตามปริมาณของเส้นใย ที่ปริมาณเส้นใย 2% มีปริมาณรอยร้าวสูงที่สุด แตกร้าวที่เกิดขึ้นของ PCS และ FRCS

2) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยเป็นเส้นตรง โดยค่าความลาดชันแสดงถึงอัตรากำลังดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้น กำลังดัดสูงสุดมีอัตราเพิ่มตาม

ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังดัดสูงสุดขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์เป็นหลัก

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังดัดคงเหลือกับปริมาณเส้นใยเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น กำลังดัดคงเหลือหลังจากเกิดการแตกร้าวหรือหลังจากกำลังดัดสูงสุดครั้งแรกมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้น กล่าวได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ กำลังดัดคงเหลือขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์

4) เส้นใยทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รอยร้าวขยายขนาดและเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงานของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุก เส้นใยทำงานได้ดีเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือเมื่อเมทริกซ์มีกำลังเพิ่มสูงขึ้น เส้นใยยิ่งทำงานได้ดีขึ้น เพราะกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนจับยึดเพิ่มสูงขึ้น

5) อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยมากกว่ากำลังของเมทริกซ์ ดังนั้นเมื่อใช้เส้นใยชนิดเดียวกันในปริมาณเท่ากัน อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าจึงใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] "Soil Stabilization with Portland Cement," Highway Research Board 292, Washington, D.C., 1961.

[2] K.P. George, "Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures," Highway Research Record 255, Washington D.C., 1968.

[3] P.K. George, "Minimizing Cracking in Cement-Treated materials for Improved Performance," Research and Development Bulletin RD123, *Portland Cement Association*, Skokie, IL, 2002.

[4] O.B. Andersland and A.S. Khattak, "Shear strength of Kaolinite/fiber soil mixture," in *Proc., Int. Conf. on Soil Reinforcement: Reinforced Soil and Other Techniques*, 1979, vol.1, pp.11-16.

[5] R.M. Arenicz and R.N. Chowdhury, "Laboratory investigation of each walls simultaneously reinforced by strips and random reinforcement," *Geot.Testing J.*, vol.11, no.4, pp.241-247, 1988.

[6] D.H. Gray and h. Ohashi, "Mechanics of fiber reinforcement in sand," *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, vol. 109, pp. 335-353, 1983.

[7] D.J. Hoare, "Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibers," in *Proc., Int. Conf. on Soil Reinforcement: reinforced soil and other techniques*, 1979, vol.1, pp.47-52.

[8] M.H. Mather and D.H. Gray, "Static response of sands reinforced with randomly distribute fibers," *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, vol. 116(11), pp.1661-1677,1990.

[9] ASTM D-698 "Stand test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort," *American Society of Testing and Materials*, pp.1-8, 2006.

[10] 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*, pp.1-8, January 2006.

[11] A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, "Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response," *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 547-555, 2006.

[12] P. Sukontasukkul, "Tensile Behaviour of Hybrid Fibre Reinforced Concrete," *Advances in Cement Research (ACR)*, vol. 16, No. 3, pp. 115-122, July 2004.