การศึกษาเชิงทดสอบคอนกรีตเสริม FRP rebars ภายใต้แรงอัดในแนวแกน

Experimental Study on FRP Rebars Reinforced Concrete under Axially Compressive Loads

สิทธิชัย แสงอาทิตย์[1,*] รัฐพงศ์ ดาขวา[2] ศตาวิชญ์ ศีลธรรมพิทักษ์[2] วิมลวรรณ ธิมา[2] ภารดา น้อยนรินทร์[2] และ ณปภา กัญหา[2]

[1] รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

[2] บัณฑิตปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

**Corresponding author; E-mail address: sitichai@sut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดสอบของคอนกรีตเสริม FRP rebars ภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมทางกล ลักษณะการวิบัติ และกำลังของคอนกรีตเสริม FRP rebars และเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดสอบดังกล่าวของคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีตัวอย่างทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และสูง 300 มม. รวม 84 ตัวอย่าง มีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตได้แก่ 300ksc 350ksc 400ksc และ 500ksc และร้อยละของพื้นที่หน้าตัดวัสดุเสริมกำลัง (steel rebars และ FRP rebars) ต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ได้แก่ 0% 2.56% 3.84% และ 5.12% และเหล็กปลอกมีค่าคงที่เท่ากันทุกตัวอย่างทดสอบ จากการทดสอบ พบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริม FRP rebars มีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกสูงถึง 60-80% ของกำลังรับแรงสูงสุด คล้ายคลึงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก และสูงกว่าคอนกรีต จากนั้น จะเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนถึงจุดรับแรงสูงสุดและมีกำลังลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยรูปแบบการวิบัติของคอนกรีตเสริม FRP rebars มีลักษณะเปราะมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่น้อยกว่าคอนกรีต และสุดท้าย FRP rebars สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 18-45% เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่เสริมกำลังคอนกรีตได้ 22-70%

คำสำคัญ: แรงอัดในแนวแกน, เสาคอนกรีต, แท่งเสริมเอฟอาร์พี, หน้าตัดทรงกลม

Abstract

This paper presents the experimental study results of the FRP rebars reinforced concrete under axially compressive loads. The objectives are to study the mechanical behaviors, modes of failure and strengths of the FRP rebars reinforced concrete and to compare the obtained results with those of the concrete and the steel reinforced concrete. The specimens have circular cross section with 150 mm diameter and 300 mm height. The total of 84 specimens were studied. The variables are ultimate compressive strength of concrete of 300ksc 350ksc 400ksc and 500ksc and the percentage of the cross sectional area of the reinforcements (steel rebars and FRP rebars) to the cross sectional area of the concrete of 0% 2.56% 3.84% and 5.12%. The stirrups are equal for all specimens. From the experiments, it was found that the FRP rebars reinforced concrete has linear behavior up to 60-80% of their maximum strength, similar to those of the steel reinforced concrete and higher than the concrete. Then, the behavior is nonlinear to their maximum strength with the continuous decreasing in its strength. The modes of failure of the FRP rebars reinforced concrete are more brittle than the steel reinforced concrete and less brittle than the concrete. Finally, the FRP rebars can strengthening the concrete by increasing the compressive strength in the range of 18 to 45%, compared to those of the steel rebars strength in the range of 22 to 70%.

Keywords: Axially Compressive Loads, Concrete columns, FRP rebar, circular cross section

1. คำนำ

เสาเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีความสำคัญมาก โดยเสาคอนกรีตจะมีการเสริมด้วยเหล็กแกนและเหล็กปลอกเพื่อช่วยรับแรงและโมเมนต์กระทำ ช่วยเพิ่มความแกร่ง และช่วยเพิ่มความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเสาดังกล่าวต้องออกแบบตามที่มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกำหนด เช่น มาตรฐาน ACI 318-14 [1] หรือ ว.ส.ท. 1008-38 [6] เป็นต้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อไม่พิจารณาถึงผลของ accidental moment และ strength reduction factor จะหาได้จากสมการที่ 1 อยู่ในรูป

$$P_{u,ACI} = 0.85 f_c' (A_g - A_s) + A_s f_y \quad (1)$$

เมื่อ $P_{u,ACI}$ = กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามสมการที่ 1 f_c' = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต f_y = หน่วยแรงอัดที่จุด

คราก ของเหล็กเสริม A_g = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา และ A_s = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริม

ในหลายกรณี เสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกใช้ในพื้นที่มีสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม เช่น ในบ่อบำบัดน้ำเสีย และในพื้นที่ชายฝั่งทะเลและในทะเล เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน มีการแก้ปัญหาเรื่องนี้กันในหลายด้าน เช่น การพัฒนาคอนกรีตพิเศษที่มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมดังกล่าว และการเพิ่มระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กให้มากขึ้นกว่าที่มาตรฐานกำหนด เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ในหลายประเทศได้มีการนำวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic, FRP) ในรูป FRP rebar ที่ผลิตด้วยกระบวนการ Pultrusion มาใช้ทดแทนเหล็กเสริมคอนกรีตในเสาคอนกรีต เพราะ FRP เป็นวัสดุที่ทนการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดีและมีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูงกว่าเหล็กโครงสร้าง [7] อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก FRP เป็นวัสดุที่มีการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) แตกต่างกับเหล็กเสริมคอนกรีตที่มีการวิบัติแบบเหนียว (ductile failure) และ FRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าของเหล็กเสริมมาก โดย ACI Committee 440 [2] ตีพิมพ์ในปี 2549 ได้เน้นย้ำเกี่ยวกับปัญหาการใช้ FRP ในเสาภายใต้แรงอัดว่า ต้องการการศึกษาในเชิงลึกเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่เสริม FRP rebars และ Canadian design rules [3] ตีพิมพ์ในปี 2553 ได้อนุญาตให้ใช้ FRP ในชิ้นส่วนโครงสร้างรับการอัดและการดัด โดยกำหนดให้ไม่นำความสามารถการรับแรงของ FRP มารวมในความสามารถในการรับแรงรวมของชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าว [4] ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาการใช้ FRP rebars ในการเสริมคอนกรีตในชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ โดยในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมด้วย FRP rods นั้น มีงานวิจัยที่สำคัญคือ ในปี 2556 M. Z. Afifi และทีมงาน [5] ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริม FRP rods และได้เสนอสมการที่ 2 ในรูป

$$N = 0.85 f'_c (A_g - A_F) + \alpha_F f_{tn} A_F \quad (2)$$

เมื่อ N = กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริม FRP rods f_{tn} = หน่วยแรงดึงสูงสุดของ FRP rods A_F = พื้นที่หน้าตัดของ FRP rods และ α_F = ตัวคูณลดกำลังรับแรงอัดของ FRP rods จากค่า f_{tn} ที่ทดสอบได้ ซึ่งผู้วิจัยเสนอค่า α_F = 0.25 เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (1) และ (2) พบว่าแตกต่างกันที่เทอมของวัสดุที่ใช้เสริมคอนกรีต เนื่องด้วย FRP rods ไม่มีการคราก (yielding) และกำลังรับแรงอัดของ FRP rods มีค่าโดยประมาณ 25% ของกำลังรับแรงดึง และจากการวิจัยของ Vanagas et.al. [4] ในปี 2559 สรุปว่า กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริม

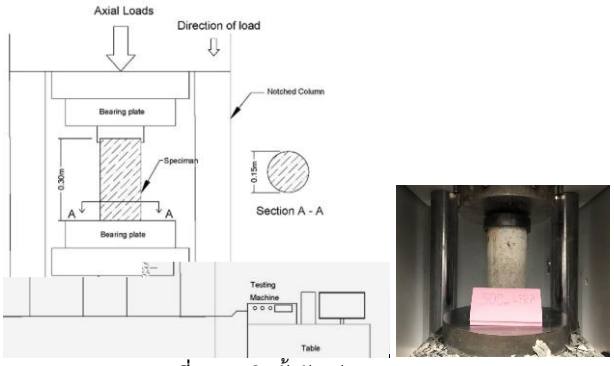
สี่เหลี่ยมและไม่ได้ศึกษาของผล confinement เหล็กปลอกต่อกำลังคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (ksc)	สัดส่วนการเสริม (%)	จำนวน
1	300-0-0	300	0	3
	350-0-0	350	0	3
	400-0-0	400	0	3
	500-0-0	450	0	3
2	300-F-4	300	2.56	3
	300-F-6	300	3.84	3
	300-F-8	300	5.12	3
	350-F-4	350	2.56	3
	350-F-6	350	3.84	3
	350-F-8	350	5.12	3
	400-F-4	400	2.56	3
	400-F-6	400	3.84	3
	400-F-8	400	5.12	3
	500-F-4	500	2.56	3
	500-F-6	500	3.84	3
	500-F-8	500	5.12	3
3	300-S-4	300	2.56	3
	300-S-6	300	3.84	3
	300-S-8	300	5.12	3
	350-S-4	350	2.56	3
	350-S-6	350	3.84	3
	350-S-6	350	5.12	3
	400-S-4	400	2.56	3
	400-S-6	400	3.84	3
	400-S-8	400	5.12	3
	500-S-4	500	2.56	3
	500-S-6	500	3.84	3
	500-S-8	500	5.12	3

จากตารางที่ 1 ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูปตัวแปร X-Y-Z โดยตัวแปร X หมายถึง ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ได้แก่ 300ksc 350 ksc 400 ksc และ500ksc ตัวแปร Y หมายถึง ประเภทของวัสดุที่ใช้เสริม โดยที่ 0 = ไม่ได้เสริมเหล็ก F = FRP rods และ S = steel และตัวแปร Z หมายถึง จำนวนเส้นของเหล็กเสริมหลักหรือของ FRP rods ที่ใช้เสริมแท่งคอนกรีตตัวอย่างทดสอบ โดยที่ตัวเลข 0, 4, 6 และ 8 แสดงจำนวนเส้น และสอดคล้องกับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมหลักหรือของ FRP rods ต่อพื้นที่หน้าตัดแท่งคอนกรีต 0% 2.56% 3.84% และ 5.12% ตามลำดับ

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างการทดสอบเข้าเครื่องทดสอบแรงกดอัดระบบ hydraulic เมื่อติดตั้งเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบจะถูก pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ จากนั้น จึงเริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลแรงอัดและการหดตัวของตัวอย่างทดสอบอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

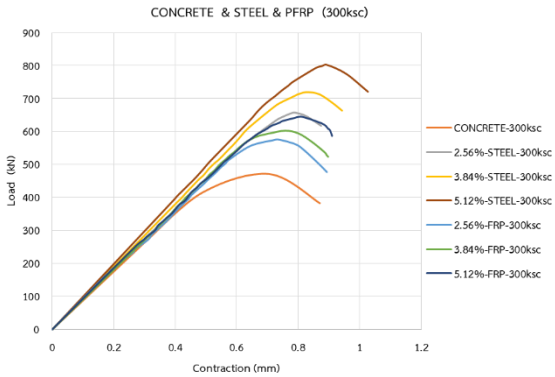


รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ

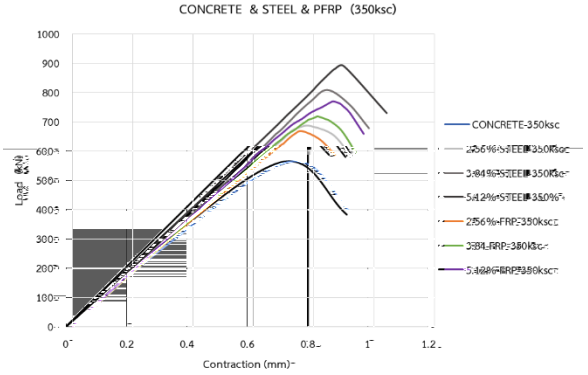
3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัด

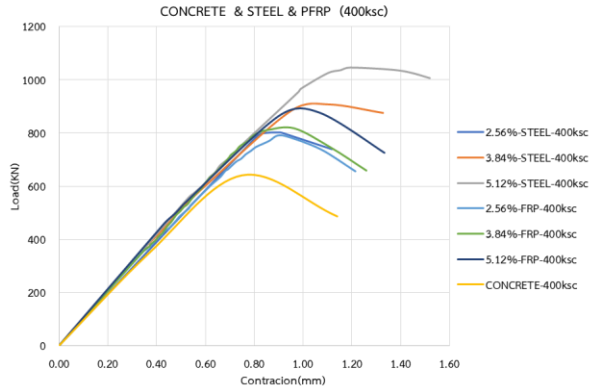
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงอัดในแนวแกนและการหดตัวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจัดกลุ่มตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต 300 ksc 400 ksc และ 500 ksc ตามลำดับ จากรูปพบว่า ตัวอย่างการทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่เป็นคอนกรีตล้วน มีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นถึงประมาณ 50–70% ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างการทดสอบ จากนั้น จะเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยจะเริ่มสังเกตเห็นการแตกร้าวขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น จนถึงจุดรับแรงอัดสูงสุด จากนั้น การแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้เกิดการกระจายหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตไปยังบริเวณใกล้เคียง ทำให้แรงอัดเริ่มตกลงเรื่อย ๆ จนกระทั่ง แท่งตัวอย่างทดสอบวิบัติในที่สุด



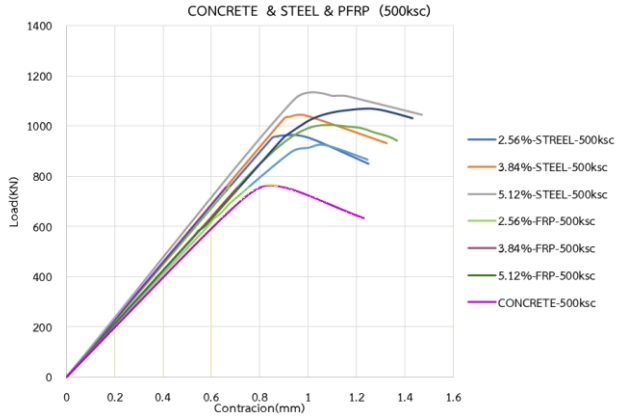
ก. ตัวอย่างทดสอบ 300 ksc



ข. ตัวอย่างทดสอบ 350 ksc



ค. ตัวอย่างทดสอบ 400 ksc



ง. ตัวอย่างทดสอบ 500 ksc

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของแรงอัดในแนวแกนและการหดตัวของตัวอย่างทดสอบจำแนกกลุ่มตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ส่วนตัวอย่างการทดสอบกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ที่มีการเสริมคอนกรีตด้วยเหล็กเสริมและ FRP rods นั้น จะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นที่สูงกว่ากลุ่มที่ 1 ถึงประมาณ 70–90% ของกำลังอัดประลัยของแท่งตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากเหล็กเสริมและ FRP rods ช่วยรับภาระแรงอัดจากคอนกรีตและการเกิด composite action จากนั้น จะเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้น จนถึงแรงอัดสูงสุด โดยจะมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 1 มากขึ้นขึ้นกับสัดส่วนการเสริม จากนั้น แรงอัดจะเริ่มค่อย ๆ ลดลง แสดงให้เห็นถึงการที่เหล็กเสริมและ FRP rods ช่วยรับภาระแรงอัด แต่เนื่องด้วยมีความจำกัดในเครื่องทดสอบที่ใช้ เมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงสูงสุดและกำลังเกิดการแตกร้าวและวิบัติอย่างต่อเนื่องและกราฟความสัมพันธ์เริ่มตกลงมาประมาณประมาณ 10-20% ของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ โปรแกรมควบคุมเครื่องทดสอบจะสั่งระบบหยุดทดสอบ ทำให้ผลการทดสอบไม่สามารถระบุพฤติกรรมการรับแรงหลังจากนั้นที่ชัดเจนของตัวอย่างทดสอบ แต่จากการทบทวนหนังสือการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก จะพบว่า ตัวอย่างทดสอบกลุ่มทดสอบที่ 2 และกลุ่มที่ 3 จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติและมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มทดสอบที่ 1 ที่เป็นคอนกรีตล้วน

3.2 ลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน กลุ่มที่ 1 โดยมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยรอยแตกร้าวเป็นการแตกแยกขนานไปกับทิศทางของแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ (column vertical cracking through both ends)



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน



ก. ตัวอย่างทดสอบ 300 ksc



ข. ตัวอย่างทดสอบ 350 ksc



ค. ตัวอย่างทดสอบ 400 ksc



ง. ตัวอย่างทดสอบ 500 ksc

รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กและ FRP rods จำแนกตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่เสริมเหล็กและเสริม FRP rods โดยจำแนกตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 300 ksc 400 ksc และ 500 ksc ตามลำดับ จากรูปพบว่า ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยการแตกร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนตัวอย่างทดสอบ เป็นลักษณะการกะเทาะออกของคอนกรีตที่หุ้มอยู่ภายนอก (side fractures at top or bottom) เนื่องด้วยมีเหล็กเสริมและ

FRP rebar ช่วยรับแรงอัดร่วมกับคอนกรีตและคอนกรีตถูกโอบรัดภายในแกนกลาง (confinement) ด้วยเหล็กปลอก จึงทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นและเกิดการการแตกออกของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 จะมีลักษณะการแตกร้าวที่ค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 เนื่องด้วยเหล็กเสริมมีการ yielding มีการวิบัติแบบเหนียว (ductile) โดยสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงกว่า FRP rods ที่มีพฤติกรรมรับแรงแบบ linear elastic to failure และวิบัติแบบทันทีทันใด

3.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต คอนกรีตเสริมเหล็ก และสมการที่ (1) ซึ่งจากตารางพบว่า การเสริมเหล็กสามารถเพิ่มกำลังให้กับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนอยู่ในช่วง 22-70% และกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้สูงกว่าสมการที่ 1 ในช่วง 1-14% ซึ่งถือได้ว่าใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต (Pu,ref) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Pu) และสมการที่ (1) (Pu,ACI)

ตัวอย่างการทดสอบ	Pg (%)	fc' (ksc)	Pu(kg)	Pu/Pu,ref	Pu,ACI (kg)	Pu/Pu,ACI
300-0-0	0	300	48,065	1.00	45,061	1.07
300-S-4	2.56	300	66,971	1.39	61,988	1.08
300-S-6	3.84	300	73,379	1.53	70,490	1.04
300-S-8	5.12	300	81,805	1.70	78,953	1.04
350-0-0	0	350	57,513	1.00	52,571.2	1.09
350-S-4	2.56	350	69,893	1.22	69,307	1.01
350-S-6	3.84	350	82,479	1.43	77,711	1.06
350-S-8	5.12	350	90,783	1.58	86,079	1.05
400-0-0	0	400	65,334	1.00	60,081	1.09
400-S-4	2.56	400	81,748	1.25	76,625	1.07
400-S-6	3.84	400	92,541	1.42	84,933	1.09
400-S-8	5.12	400	106,690	1.63	93,204	1.14
500-0-0	0	500	75,050	1.00	75,102	1.00
500-S-4	2.56	500	98,343	1.31	91,261	1.08
500-S-6	3.84	500	106,396	1.42	99,376	1.07
500-S-8	5.12	500	114,352	1.52	107,456	1.06

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต คอนกรีตเสริม FRP rods และสมการที่ (2) ซึ่งจากตารางพบว่า การเสริม FRP rods สามารถเพิ่มกำลังให้กับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนอยู่ในช่วง 18-45% โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลในตารางที่ 2 พบว่า การเสริมคอนกรีตด้วยเหล็กเสริมมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเสริมคอนกรีตด้วย FRP rods ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากการที่เหล็กเสริมมีค่าความแกร่งหรือค่า modulus of elasticity (200 GPa) สูงกว่าค่าดังกล่าวของ FRP rods (45 GPa) 4.4 เท่า ทำให้เหล็กเสริมช่วยรับแรงอัดได้ดีกว่า ในส่วนของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสมการที่ 2 ในช่วง 24-43% โดยความแตกต่างที่ค่อนข้างสูงนี้น่าจะมีสาเหตุมากจากการพัฒนาสมการที่ 2 ที่อยู่ในช่วงแรกจึงมีความอนุรักษ์นิยมเพื่อความปลอดภัยของการใช้งาน โดยเฉพาะการกำหนดค่า α_F ที่ 25% ของค่า f_{tn} ที่ทดสอบได้หรือ 0.25(700) = 175 MPa และต่ำกว่าค่ากำลังครากของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบนี้ที่ 300 MPa ค่อนข้างมาก ทั้งนี้ ขอแจ้งด้วยว่า การศึกษานี้ไม่ได้นำผลการทดสอบที่ได้เทียบกับสมการที่ 3 เนื่องจากสมการที่ 3 ยังอยู่ในช่วงที่กำลังพัฒนา

จากผลการศึกษาการเสริมคอนกรีตด้วย FRP rods นี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำ FRP rods ที่ผลิตในประเทศไทยมาประยุกต์ใช้งานจริง โดย FRP rods น่าจะเป็นวัสดุทดแทนเหล็กเสริมได้ในกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนเหล็กเสริมสูง เช่น ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลในภาคใต้ ภาคกลาง และภาคตะวันออกของประเทศไทย หรือในพื้นที่ที่มีดินเค็ม หรือกลางทะเล เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเสริมคอนกรีตด้วย FRP rods ยังจำเป็นที่จะต้องศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะการทดสอบแบบ full-scale และการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการใช้งานผลิตภัณฑ์ของประเทศไทยในอนาคต

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต (Pu,ref) คอนกรีตเสริม FRP rods (Pu) และสมการที่ (2) (N)

ตัวอย่างการทดสอบ	Pg (%)	fc' (ksc)	Pu(kg)	Pu/Pu,ref	N (kg)	Pu/N
300-0-0	0	300	48,065	1.00	45,061	1.07
300-F-4	2.56	300	58,715	1.22	46,621	1.26
300-F-6	3.84	300	61,868	1.29	47,404	1.31
300-F-8	5.12	300	65,773	1.37	48,183	1.37
350-0-0	0	350	57,513	1.00	52,571	1.09
350-F-4	2.56	350	68,125	1.18	54,006	1.26
350-F-6	3.84	350	73,301	1.27	54,727	1.34
350-F-8	5.12	350	78,404	1.36	55,444	1.41
400-0-0	0	400	65,334	1.00	60,081	1.09
400-F-4	2.56	400	80,531	1.23	61,392	1.31
400-F-6	3.84	400	83,391	1.28	62,050	1.34
400-F-8	5.12	400	89,408	1.37	62,706	1.43
500-0-0	0	500	75,050	1.00	75,102	1.00
500-F-4	2.56	500	94,272	1.26	76,096	1.24
500-F-6	3.84	500	101,630	1.35	76,596	1.33
500-F-8	5.12	500	108,935	1.45	77,093	1.41

4. บทสรุป

จากการศึกษาตามรายละเอียดข้างต้น สรุปได้ว่า

1. พฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โดยตัวอย่างฯ กลุ่มที่ 1 มีพฤติกรรมช่วงแรกแบบเชิงเส้นถึง 50-70% และกลุ่มที่ 2 และ 3 ถึง 70-90% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้น จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขนาดเล็กในเนื้อของคอนกรีตที่ชัดเจนขึ้นและมีการกระจายตัวไปยังบริเวณใกล้เคียง ทำให้การแตกร้าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งพฤติกรรมในช่วงนี้เป็นแบบไร้เชิงเส้นจนถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้นรอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่มากขึ้น และตัวอย่างฯ จะรับแรงได้น้อยลง โดยตัวอย่างฯ กลุ่มที่ 1 มีการลดลงรวดเร็วกว่าตัวอย่างฯ กลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีการเสริมด้วย FRP rods และ เหล็กเสริมตามลำดับ

2. ตัวอย่างฯ กลุ่มที่ 2 และ 3 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยการแตกร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนตัวอย่างทดสอบ เป็นลักษณะการกะเทาะออกของคอนกรีตที่หุ้มอยู่ภายนอก เนื่องด้วยมีเหล็กเสริมและ FRP rebar ช่วยรับแรงอัดร่วมกับคอนกรีตและคอนกรีตถูกโอบรัดภายในแกนกลาง (confinement) ด้วยเหล็กปลอก จึงทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 จะมีลักษณะการแตกร้าวที่ค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 เนื่องด้วยเหล็กเสริมมีการ yielding มีการวิบัติแบบเหนียว โดยสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงกว่า FRP rods ที่มีพฤติกรรมรับแรงแบบ linear elastic to failure และวิบัติแบบทันทีทันใด

3. การเสริมคอนกรีตด้วยเหล็กเสริมมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเสริมคอนกรีตด้วย FRP rods โดยเหล็กเสริมเสริมกำลังคอนกรีตได้ในช่วง 22-70% และFRP rebars ในช่วง 18-45% ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่เหล็กเสริมมีค่าความแกร่งหรือค่า modulus of elasticity สูงกว่าค่าดังกล่าวของ FRP rods 4.4 เท่า ทำให้เหล็กเสริมช่วยรับแรงอัดได้ดีกว่า นอกจากนั้นแล้วกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างฯ กลุ่มที่ 2 มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสมการที่ 2 ในช่วง 24-43% โดยความแตกต่างที่ค่อนข้างสูงนี้น่าจะมาจากการพัฒนาสมการที่ 2 ที่มีความอนุรักษ์นิยมเพื่อความปลอดภัยของการใช้งาน โดยเฉพาะการกำหนดค่า α_F ที่ 25% ของค่า f_{tn} ที่ทดสอบได้ และต่ำกว่าค่ากำลังครากของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบนี้ค่อนข้างมาก ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำ FRP rods ที่ผลิตในประเทศไทยมาประยุกต์ใช้งานจริงในการเสริมกำลังคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ดำเนินการศึกษา และเครื่องมือในการทดสอบ บริษัท ไทยไฟเบอร์รีบาร์ จำกัด (https://www.gfrpthailand.com/) ที่สนับสนุน FRP rods และ บริษัท ยงคอนกรีต จำกัด (มหาชน) (https://www.yongconcrete.co.th/) ที่สนับสนุนคอนกรีตและช่วยเหลือในการหล่อตัวอย่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.

[2] ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006.

[3] Canadian Standards Association 2006-S6S1-10 Edition 2010. Canadian Highway Bridge Design Code (Section 16). CANCSA-S6-06, Rexdale, Toronto.

[4] Vanagas, E., Kliukas, R. and Lukoseviciene, O. (2017). Strength of Circular Concrete Columns Reinforced with FRP Bars and Spirals. Procedia Engineering, 172, pp. 1220-1226.

[5] Afifi, M. Z., Mohamed, H. and Benmokrane, B. (2014). Strength and Axial Behaviour of Circular Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars and Spirals. Journal of Composites for Construction, 18(2).

[6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). มาตรฐานการสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.

[7] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2561). การทดสอบวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. บทที่ 6 หน้า 22-29.

[8] เอกสารผลิตภัณฑ์ของบริษัท ไทยไฟเบอร์รีบาร์ จำกัด. (2562).