การศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนและพฤติกรรมการคืบอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กและแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว

A Study on Axial Load-Bearing Capacity and Compression Creep Behavior of Concrete Reinforced with Steel and GFRP Bars

วุฒิชัย สกุลสุรารักษ์* ภาคิณ ขาววงค์ ธรรมสรณ์ บ่อหลี พีระพัฒน์ ชากระโทก วรายุธ ดอกเดื่อ พีรพล อินคล้าย และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: wuttichai20tong@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนัก ลักษณะการวิบัติ และพฤติกรรมการคืบอัดตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมเหล็กและแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. และสูง 800 มม. มีรูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกันตามลักษณะการเสริมแรง โดยมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดวัสดุเสริมแรง (เหล็ก และ GFRP) ต่อหน้าตัดคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 1.50, 2.88 และ 5.12 มีระยะห่างของปลอกแบบเดี่ยวและเกลียวเท่ากับ 150 และ 75 มม. ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ของวัสดุเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP มากขึ้น คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักตามแนวแกนได้มากขึ้น การลดระยะห่างของปลอกและเปลี่ยนรูปแบบของปลอกส่งผลให้ลดการเสียรูปและรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากขึ้น การคืบอัดของคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP มีการเสียรูปสะสมมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของ GFRP ที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าทำให้มีการเสียรูปมากขึ้นเมื่อรับแรงต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

คำสำคัญ: พอลิเมอร์เสริมใยแก้ว, คอนกรีต, การรับน้ำหนักตามแนวแกน, พฤติกรรมการคืบอัด

Abstract

This study investigates the axial load capacity, failure behavior, and compression creep performance of concrete columns reinforced with steel and glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars. The experimental program utilized circular columns measuring 200 mm in diameter and 800 mm in height with difference reinforcements. Longitudinal reinforcement ratios (1.50%, 2.88%, and 5.12%) were prepared for both steel and GFRP bars, combined with transverse reinforcement, ties and spirals, at spacings of 150 mm and 75 mm. Results demonstrated that increasing the GFRP bar reinforcement ratio significantly enhanced axial load capacity. Furthermore, reduced tie spacing and the use of spiral reinforcement could improve both load capacity and axial deformation. However, at identical reinforcement ratios, GFRP bar reinforced concrete exhibited lower axial capacity than that of concrete reinforced with teel. For compression creep, it was revealed that the greater long-term deformation in GFRP bar reinforced specimens was found, attributed to the lower elastic modulus of GFRP under sustained loads.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Concrete, Compressive Strength, Creep Behavior

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าคอนกรีตแม้มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดี แต่กลับมีข้อจำกัดสำคัญในการรับแรงดึง ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นในหลายส่วนของโครงสร้าง เช่น พื้น คาน หรือเสา ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงและให้โครงสร้างมีความแข็งแรง ทนทาน และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการ "เสริมแรง" ด้วยวัสดุที่สามารถรับแรงดึงได้ดี โดยเฉพาะวัสดุประเภทเหล็กเส้น

เหล็กเส้น (Steel Rebar) ได้รับความนิยมมาอย่างยาวนานในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการทำงานร่วมกับคอนกรีต สามารถรับแรงดึงได้ดี ยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี และมีต้นทุนที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เหล็กเส้นธรรมดายังประสบปัญหาในด้านความทนทาน โดยเฉพาะการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับความชื้น น้ำฝน หรือสารเคมี ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็น เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาและนำวัสดุเสริมแรงชนิดใหม่มาใช้ในงานก่อสร้าง โดยหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันคือแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) เนื่องจากเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง และความทนทานต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ดังนั้น ประสิทธิภาพของการเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP จึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างที่ทนทานและมีประสิทธิภาพในงานก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง

คอนกรีตเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP ได้รับความนิยมมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาและผลกระทบของแท่ง GFRP ต่อสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมแรง เพื่อประเมินความสามารถสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากเทคโนโลยีการเสริมแรงเป็นตัวพื้นฐานที่ใช้อย่างแพร่หลาย มีข้อจำกัดหลายด้าน โดยเฉพาะในเรื่องการกัดกร่อนและต้นทุนการใช้งาน แท่ง GFRP เป็นวัสดุที่มีสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้นจากการวิจัยหลายแห่งพบว่า คอนกรีตที่เสริม GFRP แสดงการแตกร้าวเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่เสริมเหล็กซึ่งมีการแตกร้าวมากกว่า [1] อีกทั้งพฤติกรรมของเสาคอนกรีตกำลังต่ำรับแรงตามแนวแกนที่เสริมด้วย GFRP [2] เมื่อถูกกระทำด้วยแรงตามแนวแกนคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็ก และคอนกรีตที่เสริมปลอก GFRP แบบเกลียวแสดงความแข็งแรงและความทนทานที่ดีกว่าปลอกแบบ

เดี่ยว [3] เนื่องจากการกระจายแรงได้ดีและช่วยลดการแตกหักของคอนกรีต การใช้แท่ง GFRP ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดและแรงอัดของเสาคอนกรีตที่มีความแข็งแรงต่ำ คอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP มีน้ำหนักเบากว่าและทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้เหล็กกล้าแบบดั้งเดิม สามารถลดปัญหาการกัดกร่อนและน้ำหนักเบา

นอกจากความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนแล้วพฤติกรรมการคืบอัด (Compression Creep) ของวัสดุก่อสร้างเป็นอีกสมบัติสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่รับน้ำหนักคงค้างในระยะยาวซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของเสาคอนกรีตเสริมแรง โดยเฉพาะการเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP ที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าเหล็ก อาจมีการเสียรูปสะสมภายใต้แรงอัดอย่างต่อเนื่อง การศึกษาพฤติกรรมการคืบของคอนกรีตเสริมแรงด้วยแท่ง GFRP ยังมีข้อจำกัดในแง่ของข้อมูลและการใช้งานจริง เนื่องจากปัจจุบันโครงสร้างส่วนใหญ่ยังคงใช้เหล็กเป็นวัสดุหลัก การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุนี้สามารถนำไปใช้งานในโครงสร้างระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและการคืบอัดตามแนวแกนของคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมแรง (เหล็กและ GFRP) ต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต ระยะห่างของปลอก รวมไปถึงชนิดของปลอก เพื่อเข้าใจถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ GFRP ในการกำหนดสัดส่วนของวัสดุเสริมแรงให้เกิดประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างที่ยั่งยืนในระยะยาว เช่น การเพิ่มปริมาณ GFRP เพื่อทดแทนเหล็กในสภาวะแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนสูง รวมถึงการออกแบบระยะห่างและชนิดของปลอกเสริมแรงเพื่อควบคุมการเสียรูปและการคืบอัดของโครงสร้างให้เหมาะสมกับอายุการใช้งานที่ต้องการ เป็นต้น

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 สัดส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จจากบริษัท เอ็มคอนกรีต จำกัด ที ออกแบบให้กำลังรับแรงอัด เท่ากับ 28 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วันแสดงดังตารางที่ 1 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 28.5, 30.6 และ 33.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมคอนกรีต

Cement (kg)	FA (kg)	Water (kg)	Coarse (kg)	Fine (kg)	Admixture Type G (ml)	F'_c (MPa)		
						28-d	60-d	90-d
185	155	145	1125	845	4100	28.5	30.6	33.5

2.1.2 วัสดุเสริมแรง

เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 [4] ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (มม.) และมีความยาว 750 มม. ใช้สำหรับเสริมแรงในเสาคอนกรีตเพื่อรับแรงอัดในแนวแกน เหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 [5] ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ใช้เป็นปลอกเดี่ยวโดยมีระยะห่างเหล็กปลอกเท่ากับ 150 มม. ใช้สำหรับเสริมแรงในเสาคอนกรีตเพื่อรับแรงเฉือนและป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต รวมถึงรักษาเหล็กเสริมให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

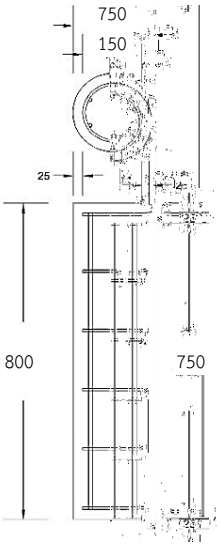
แท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้วชั้นคุณภาพ 2 [6] แสดงดังรูปที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 12 และ 16 มม. และมีความยาว 750 มม. ใช้สำหรับเสริมแรงในคอนกรีตเพื่อรับแรงอัดตามแนวแกนและแท่ง GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ใช้เป็นปลอกเดี่ยวโดยมีระยะห่างระหว่างปลอก GFRP เท่ากับ 75 มม. ใช้สำหรับเสริมแรงในเสาคอนกรีตเพื่อรับแรงเฉือนและป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต รวมถึงรักษาเหล็กเสริมให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม



รูปที่ 1 แท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)

2.1.3 ตัวอย่างเสาคอนกรีต

คอนกรีตหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. และสูง 800 มม. โดยระยะคอนกรีตหุ้มผิววัสดุเสริมแรง (เหล็กและ GFRP) เท่ากับ 25 มม. แสดงดังรูปที่ 2



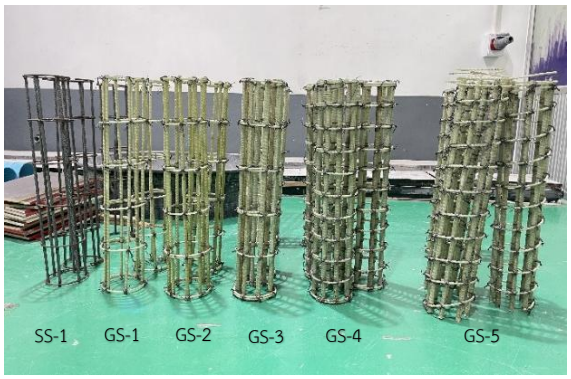
รูปที่ 2 รูปแบบตัวอย่างเสาคอนกรีต

2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของเสาคอนกรีต

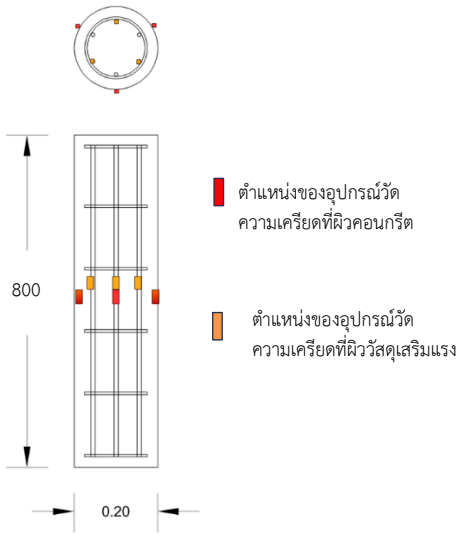
การทดสอบการรับน้ำหนักในแนวแกนของคอนกรีตเสริมแรงที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 4 โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) ที่ผิวคอนกรีต และที่วัสดุเสริมแรงก่อนการหล่อคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 รายละเอียดการเสริมแรงสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด

Symbol	Longitudinal reinforcement			Transverse reinforcement		
	Diameter (mm)	No. of bars	As (%)	Diameter (mm)	Spacing (mm)	Types
SS-1	DB10	6	1.50	RB6	150	Tie
GS-1	GFRP10	6	1.50	GFRP6	150	Tie
GS-2	GFRP12	8	2.88	GFRP6	150	Tie
GS-3	GFRP16	8	5.12	GFRP6	150	Tie
GS-4	GFRP16	8	5.12	GFRP6	75	Tie
GS-5	GFRP16	8	5.12	GFRP6	75	Spiral



รูปที่ 4 การเตรียมตัวอย่างวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ผิวคอนกรีตและวัสดุเสริมแรง

จากนั้นจึงทำการถอดแบบตัวอย่างหลังจากหล่อคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างด้วยการทำให้เปียกชื้นและคลุมด้วยแผ่นพลาสติก เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วัน ทำการติดตั้งตัวอย่างในเครื่องทดสอบแรงอัดแสดงดังรูปที่ 6 ทำการให้น้ำหนักกดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบถึงจุดประลัย บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด ความเครียดที่ผิวคอนกรีต ความเครียดที่วัสดุเสริมแรง และลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง



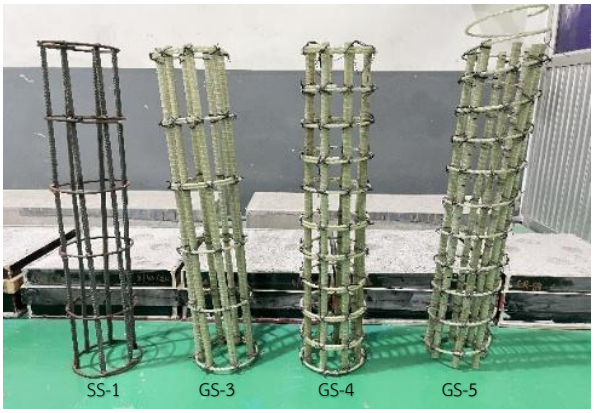
รูปที่ 6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในเครื่องทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกน

2.3 การทดสอบการคืบของคอนกรีตภายใต้แรงอัด

การทดสอบการคืบอัดของเสาคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีต ที่มีการเสริมแรงที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 7 ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) ที่ผิวคอนกรีต และที่วัสดุเสริมแรงก่อนการหล่อคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 3 รายละเอียดการเสริมแรงสำหรับการทดสอบการคืบอัด

Symbol	Longitudinal reinforcement			Transverse reinforcement		
	Diameter (mm)	No. of bars	As (%)	Diameter (mm)	Spacing (mm)	Types
SS-1	DB10	6	1.50	RB6	150	Tie
GS-3	GFRP16	8	5.12	GFRP6	150	Tie
GS-4	GFRP16	8	5.12	GFRP6	75	Tie
GS-5	GFRP16	8	5.12	GFRP6	75	Spiral



รูปที่ 7 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการคืบอัด

ทำการถอดแบบตัวอย่างหลังจากหล่อคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างด้วยการทำให้เปียกชื้นและคลุมด้วยแผ่นพลาสติก ทดสอบกำลังอัดเมื่ออายุครบ 28 วันเพื่อนำค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมาใช้เป็นเกณฑ์ในการให้น้ำหนักกดค้าง โดยเมื่อคอนกรีตอายุ 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบติดหมุดตามแนวและระยะคงที่ของเครื่องมือวัดการหดตัวเนื่องจากน้ำหนักคงค้าง แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบทำการติดตั้งบนเครื่องให้น้ำหนักคงค้างด้วยปั๊มไฮดรอลิกและสปริงแสดงดังรูปที่ 8 และเริ่มทำการทดสอบให้น้ำหนักคงค้างมีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีต ทำการเก็บข้อมูลวัดระยะห่างระหว่างหมุดทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นวัดทุกๆ 7 วัน จนครบ 49 วัน สามารถคำนวณค่าการคืบแสดงดังสมการที่ (1)

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{total}(t) - \varepsilon_i \quad (1)$$

โดยที่ $\varepsilon_{cr}(t)$ คือ Creep strain ที่เวลาใดๆ
$\varepsilon_{total}(t)$ คือ Total strain ที่เวลาใดๆ
ε_i คือ Initial strain ($x10^{-6}$ มม/มม)



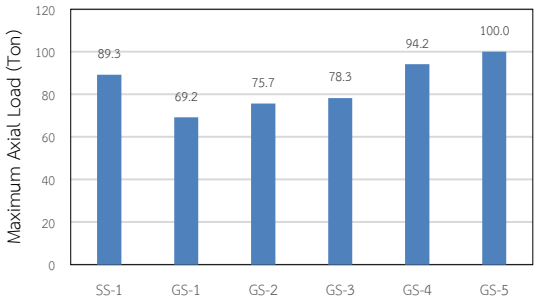
รูปที่ 8 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในเครื่องทดสอบการคืบอัดตามแนวแกน

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

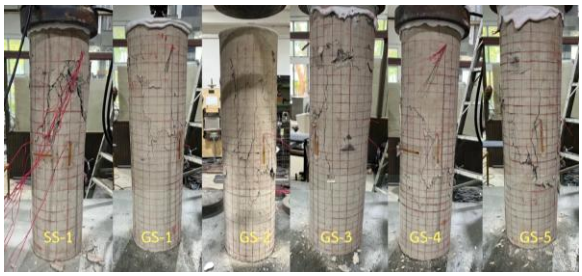
3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเหล็กและเสริมแท่ง GFRP ที่ขนาดเดียวกันทุกอย่างและมีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมแรงต่อพื้นที่น้าตดคอนกรีตร้อยละ 1.5 เสาคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กสามารถรับน้ำหนักได้ 89.3 ตัน และคอนที่เสริมแท่ง GFRP สามารถรับน้ำหนักได้ 69.2 ตัน จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP ร้อยละ 22.54 และเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมแรงแท่ง GFRP เป็นร้อยละ 2.88 และ 5.12 และระยะห่างของเหล็กปลอกเท่ากัน เสาคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มเป็น 75.7 ตัน และ 78.3 ตัน ตามลำดับ ซึ่งยังไม่สามารถรับน้ำหนักได้เท่ากับเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็ก เมื่อทำการลดระยะห่างของปลอกเสาที่เสริมด้วยแท่ง GFRP จาก 150 มม. เป็น 75 มม. เสาคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้ 94.2 ตัน ซึ่งสามารถรับรับได้มากกว่าคอนกรีตที่เสริมเหล็กและสุดท้ายเมื่อเปลี่ยนรูปแบบปลอกเป็นแบบเกลียวที่พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเสริมแรงแท่ง GFRP เป็นร้อยละ 5.12 คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้ 100.0 ตัน ซึ่งเป็นคอนกรีตที่สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fathi และคณะ [1] และสำหรับการทดสอบที่เสริมปลอกต่างกันแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าที่ขนาดปลอกและระยะห่างปลอกเท่ากันปลอกที่เป็นเหล็กสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP 20.1 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 22.54 และสำหรับปลอกที่เป็น GFRP เหมือนกัน แต่ลดระยะห่างของปลอกลง จาก 150 มม. เป็น 75 มม. ทำให้สามารถรับน้ำได้เพิ่มขึ้น 18.4 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 23.54 และเมื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบของปลอกจากแบบเดี่ยวเป็นแบบเกลียว สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม 4.3 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 4.42 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pu และคณะ [7]

หลังจากตัวอย่างวิบัติ แสดงดังลักษณะการวิบัติรูปที่ 10 คอนกรีตที่เสริมเหล็กแสดงการวิบัติแบบ Shear Failure เนื่องจากการเสริมเหล็กสามารถรับแรงอัดได้ดี แต่ระยะห่างของปลอกที่มากเมื่อเกิดการเสียหายแรงกดที่กระทำทำให้เกิดรอยแตกร้าวเฉียงจากบริเวณด้านล่างไปด้านบน การที่คอนกรีตยังมีความสามารถในการเสียรูป หมายความว่าเหล็กเสริมยังช่วยพยุงโครงสร้างก่อนพังทลาย และสำหรับคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP แสดงการวิบัติแบบ Crushing Failure เนื่องจากแท่ง GFRP ไม่ได้ช่วยรับแรงเฉือนได้ดีเท่ากับเหล็ก ทำให้ไม่มีการแตกร้าวเฉียงเด่นชัด แต่รอยร้าวกระจายทั่วทั้งเสาตั้งแต่บริเวณกลางคอนกรีตจนถึงด้านบน เมื่อแรงกดสูงทำให้คอนกรีตชั้นนอกหลุดออกมา เป็นรูปแบบของการพังทลายแบบเปราะ (Brittle Failure) สำหรับ GS-5 ไม่มีชิ้นส่วนคอนกรีตหลุดออกมาเหมือนคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP ตัวอย่างอื่น แสดงถึงผลจากการใช้ปลอกแบบเกลียว ทำให้เสามีพฤติกรรมเหนียวมากขึ้นคล้ายกับตอนกรีตที่เสริมเหล็ก



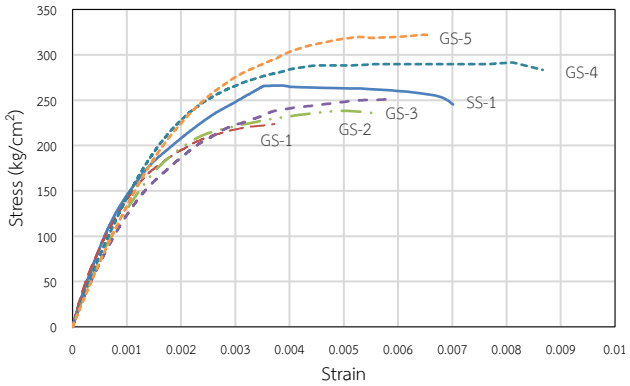
รูปที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาคอนกรีต



รูปที่ 10 ลักษณะการเสียรูปของเสาคอนกรีตภายใต้แรงอัด

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อดูพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรง

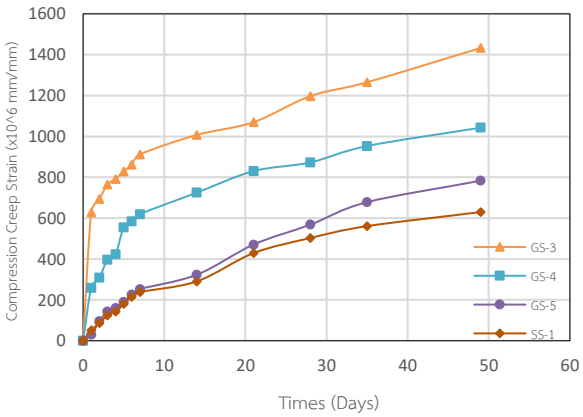
จากค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้เมื่อนำมาทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อดูพฤติกรรมของวัสดุเสริมแรงหลังจากรับแรง แสดงดังรูปที่ 11 พบว่าเส้นกราฟของคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเครียดประมาณ 0.006 - 0.008 ซึ่งเหล็กโดยทั่วไปมีจุดครากที่ชัดเจนในกรณีแรงดึง แต่เมื่ออยู่ภายใต้แรงอัด อาจเกิดการโก่ง (Buckling) หรือการแข็งตัวที่เกิดจากความเครียด (Strain Hardening) แทน แต่กราฟยังไม่แสดงการลดลงของความเค้นอย่างชัดเจน ซึ่งหมายความว่า เหล็กยังไม่ถึงจุดพังทลาย (Failure Point) และสำหรับพฤติกรรมของคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและไม่มีจุดครากที่ชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุประเภทนี้ แท่ง GFRP ไม่มีพฤติกรรมพลาสติก (Plastic Deformation) และมักแตกหักทันทีเมื่อถึงขีดจำกัดของวัสดุ (Brittle Failure) กราฟยังคงเพิ่มขึ้นโดยไม่มีการลดลงของความเค้นซึ่งหมายความว่าแท่ง GFRP ยังไม่ถึงจุดพังทลายเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุเหล็ก มีแนวโน้มที่จะสามารถเสียรูปได้มากกว่า และสำหรับแท่ง GFRP มีค่าความแข็งแรงสูงในช่วงต้น แต่ไม่มีจุดครากและอาจพังทลายแบบเปราะเมื่อถึงจุดวิกฤติ กราฟของคอนกรีตที่เสริมปลอกแบบเกลียวมีค่าความเค้นสูงสุดที่มากกว่าการเสริมแบบอื่นๆ ซึ่งหมายถึง โครงสร้างของเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ El-Gamal และคณะ [2]



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเสริมแรง

3.3 ผลการทดสอบการคืบอัด

จากผลการทดสอบรูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบการคืบอัด จากกราฟพบว่าตัวอย่างที่เสริมแท่ง GFRP ได้แก่ GS-3, GS-4 และ GS-5 มีค่า Creep Strain สูงกว่าตัวอย่าง SS-1 ที่เสริมเหล็ก แม้ว่ากลุ่มตัวอย่าง GFRP จะมีปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมมากกว่า แต่เนื่องจากแท่ง GFRP มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าเหล็ก จึงไม่สามารถจำกัดการเสียรูประยะยาวได้ดีเท่ากับเหล็ก ตัวอย่าง GS-3 แสดงค่าการคืบตัวสูงสุด เนื่องจากการเสริมปลอกระยะห่าง 150 มม. ในรูปแบบเดี่ยวซึ่งมีความสามารถในการควบคุมการขยายตัวด้านข้างจำกัดกว่าตัวอย่างอื่น ในขณะที่ตัวอย่าง GS-4 และ GS-5 ใช้ปลอกเสริมถี่ขึ้น โดยลดระยะห่างเหลือ 75 มม. ส่งผลให้มีอัตราการคืบตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ GS-3 โดยเฉพาะตัวอย่าง GS-5 ที่เปลี่ยนจากปลอกแบบเดี่ยวมาใช้ปลอกแบบเกลียวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคืบตัวที่ต่ำกว่า GS-4 เล็กน้อย สะท้อนให้เห็นว่าปลอกแบบเกลียวมีประสิทธิภาพในการจำกัดการขยายตัวด้านข้างได้ดีกว่าแบบเดียว อย่างไรก็ตาม ทั้ง GS-4 และ GS-5 ยังมีค่าการคืบตัวสูงกว่า SS-1 อย่างชัดเจน ซึ่งตัวอย่าง SS-1 เสริมเหล็ก และปลอกแบบแบบเดี่ยว ระยะห่าง 150 มม. มีค่าการคืบตัวต่ำที่สุดในกลุ่มที่ทดสอบ สะท้อนให้เห็นว่า วัสดุเหล็กซึ่งมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่ามีความสามารถในการต้านทานการเสียรูประยะยาวได้ดีกว่า GFRP อย่างชัดเจน และสำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่เสริม GFRP จะเห็นความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่รับได้มากขึ้น ทำให้ค่าการคืบอัดน้อย



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเนื่องจากการคืบอัดกับเวลา

4. บทสรุป

1) คอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP แสดงความสัมพันธ์ถึงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดวัสดุเสริมแรง GFRP ต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่มากขึ้น สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น แต่มีแนวโน้มเกิดการเสียรูปมากกว่าเหล็กเสริม

2) การลดระยะห่างของปลอกและเปลี่ยนรูปแบบของปลอกเป็นแบบเกลียวส่งผลให้ลดการเสียรูปได้ ช่วยควบคุมรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีตและช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด ทำให้โครงสร้างสามารถรักษาสภาพความสมบูรณ์ไว้ได้นานขึ้น และคอนกรีตที่เสริม GFRP สามารถรองรับแรงอัดได้ในระดับที่เทียบเท่าเหล็กก็ต่อเมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดวัสดุเสริมแรงแท่ง GFRP ต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต เท่ากับ 5.12 และมีระยะห่างของปลอก GFRP เท่ากับ 75 มม. แม้ว่าจะมีค่าการเสียรูปที่สูงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก

3) การคืบอัดของคอนกรีตเกิดการเสียรูปของตัวอย่างคอนกรีตเสริมแรงมีลักษณะของการเสียรูปแบ่งออกเป็นสองระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มต้นของการคืบ ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราการเสียรูปเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปรับตัวของโครงสร้างภายในคอนกรีต และ ระยะคงตัวของการคืบ ซึ่งเป็นช่วงที่การเสียรูปเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และค่อนข้างคงที่ เสาคอนกรีตที่เสริมแท่ง GFRP มี

การเสียรูปสะสมมากกว่าคอนกรีตที่เสริมเหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของแท่ง GFRP ที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าทำให้มีการเสียรูปมากขึ้นเมื่อรับแรงต่อเนื่อง และสำหรับคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP ที่มีปริมาณของวัสดุเสริมแรงและอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดวัสดุเสริมแรงแท่ง GFRP ต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตมาก รวมไปถึงการลดระยะของปลอกและเปลี่ยนชนิดปลอกจากปลอกเดี่ยวเป็นปลอกเกลียว ทำให้คอนกรีตมีค่าการคืบอัดน้อยลง แสดงถึงความสัมพันธ์ของคอนกรีตที่รับแรงอัดได้มากกว่า ทำให้ค่าการคืบอัดน้อยกว่า

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท จีเอฟอาพี คิงส์ จำกัด ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อพอลิเมอร์เสริมใยแก้วเพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัท เอ็ม คอนกรีตจำกัด ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อคอนกรีตเพื่อใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสนับสนุนมูลฐาน (Fundamental Fund 2568 : โครงการเทคโนโลยีก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

[1] Fathi, H.G., Ghali, M.K.N., Shanour, A.S. and Khater, A.N.M. (2023). Experimental and analytical study on eccentrically loaded Fiber concrete columns reinforced longitudinally with GFRP bars. Engineering Structures, Vol. 312, 118251

[2] El-Gamal, S. and AlShareedah, O. (2020). Behavior of axially loaded low strength concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. Engineering Structures, Vol. 216, 110732

[3] Raza, A., Khan, Q. and Ahmad, A. (2020). Investigation of HFRC columns reinforced with GFRP bars and spirals under concentric and eccentric loadings. Engineering Structures, Vol. 227, 111461

[4] กระทรวงอุตสาหกรรม (2559). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสากรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต(เหล็กข้ออ้อย). มาตรฐาน มอก. 24-2559, กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

[5] กระทรวงอุตสาหกรรม (2559). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสากรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต(เหล็กเส้นกลม). มาตรฐาน มอก. 20-2559, กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

[6] กระทรวงอุตสาหกรรม (2562). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสากรรม พอลิเมอร์เสริมเส้นใย สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง. มาตรฐาน มอก. 2973-2562, กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

[7] Pu, Z., Lv, X., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Y. and Sheikh, S.A. (2023). Eccentric behaviour of GFRP-reinforced square columns with composite spiral ties. Journal of Building Engineering, Vol. 79, 10791