

Strengthening of Square Concrete-Filled Steel Tube Column with Steel Bars under Uni-Axial Load

การเสริมกำลังเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตด้วยเหล็กเส้นภายใต้แรงในแนวแกน

พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย¹ จักษดา อารงวุฒิ^{2*} นำชัย จ้อยสูงเนิน³ วีรพันธุ์ เจริญมีปรีชา⁴ คมกร ไชยเดชาร⁵

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁵ อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ARTICLE INFO:

Received January 8, 2021

Received Revised Form:

January 22, 2021

Accepted: January 25, 2021

ABSTRACT:

The aim of this research presents the experimental results on the structural responses and modes of failure of square concrete-filled steel tube (CFT) column strengthened with steel bars under axial compressive load. A total of eighteen specimens included: two CFT columns (reference CFT columns) and sixteen CFT columns strengthened with steel bars. The nominal dimension of the square specimens are 150 mm in width and 750 mm in height. The main parameters used in this research, including the four types of steel bars, which are RB6, RB9, DB12 and DB16, and the two positions of strengthening with steel bars. In total specimens are prepared and loaded concentrically in compression to failure. The results of these tests showed that the CFT columns strengthened with steel bars have a linear elastic behavior up to approximately 80-90% of their maximum compressive load. Then, the behavior of the columns is nonlinear. The mode of failure of the columns is identified as the crushing of concrete core and local wall buckling of the steel hollow tube. In addition, it is also noted that the CFT columns strengthened with steel bars at inside center of tube (pattern 1) showed higher increase in ductility performance as compared with the CFT columns strengthened with steel bars at the inside corners of the tube (pattern 2).

KEYWORDS: Concrete-Filled Steel Tube Column, Square Steel Tube, Steel Bar, Strengthening

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการทดสอบสำหรับการตอบสนองทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นภายใต้แรงอัดในแนวแกน ตัวอย่างทดสอบจำนวน 18 ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (เสาอ้างอิง) จำนวน 2 ตัวอย่าง และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นจำนวน 16 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 150 mm สูง 750 mm ตัวแปรหลักประกอบด้วย ชนิดของเหล็กเส้น 4 ขนาด คือ RB6 RB9 DB12 และ DB16 และตำแหน่งเหล็กเส้นในการเสริมกำลัง 2 รูปแบบ

*Corresponding Author,
Email address: jaksada.th@rmuti.ac.th

ตัวอย่างเสาถูกเตรียมและทดสอบโดยให้แรงกระทำในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติจากการทดสอบพบว่า ในช่วงแรกเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นจะมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นจนถึงแรงกระทำประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นเสามีพฤติกรรมไร้เชิงเส้นตรง การวิบัติของตัวอย่างเกิดจากการอัดแตกของคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก นอกจากนี้การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางภายในท่อเหล็ก (รูปแบบที่ 1) จะเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของเสามากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ตำแหน่งมุมของท่อเหล็ก (รูปแบบที่ 2)

คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, เหล็กเส้น, การเสริมกำลัง

1. บทนำ

การก่อสร้างในยุคปัจจุบันของประเทศไทยมีการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องในหลายด้าน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการทำงานสูงสุด การก่อสร้างโครงสร้างอาคารและบ้านพักอาศัยมักถูกก่อสร้างด้วยวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะเป็นระบบก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place) การก่อสร้างลักษณะนี้มักใช้ระยะเวลาก่อสร้างค่อนข้างมาก ส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้าง ซึ่งสวนทางกับทิศทางของเศรษฐกิจประเทศในปัจจุบันที่มีการแข่งขันกันด้านระยะเวลาและราคาในการก่อสร้าง [1] จากปัญหาที่กล่าวข้างต้นรวมถึงปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจที่มีแนวโน้มความต้องการสิ่งปลูกสร้างที่มากขึ้นภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาและลดต้นทุนที่ลดลง จึงทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างเชิงประกอบ โดยเฉพาะเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube (CFT) column) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของเสาเชิงประกอบที่ได้จากการนำวัสดุมาใช้ในการรูปแบบใหม่ (คอนกรีตและท่อเหล็ก) เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด [2] ปัจจุบันเสาดังกล่าวถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างหรือถูกประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้าง [3-5] เสดังกล่าวมีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง กำลัง และความเหนียว โดยมีความสามารถดูดซับพลังงานได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [6-7]

อย่างไรก็ตามภายใต้แรงอัด เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมักจะเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของผนังท่อเหล็กของเสา [8-9] ดังนั้นการหาแนวทางป้องกันการโก่งเดาะโดยการเสริมกำลังเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตด้วยเหล็กเส้น (steel bar) น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถต้านทานและชะลอการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก เนื่องจากเหล็กเส้นที่เชื่อมติดตามแนวยาวของ

ผนังท่อเหล็กจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง (stiffness) ให้แก่ผนังท่อเหล็ก รวมถึงวิธีการดังกล่าวสามารถกระทำได้สะดวก ตลอดจนมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นภายใต้แรงอัดในแนวแกน และทราบถึงผลของการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีต่อกำลังเสา

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังอัดประลัยโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28 MPa ที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน ส่วนท่อเหล็กผลิตโดยการพับแผ่นเหล็กโครงสร้างแบบรีดเย็นโดยเป็นเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm ความหนาเท่ากับ 3.0 mm เหล็กเส้นที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. ประกอบด้วย เหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 2 ขนาด ได้แก่ RB6 และ RB9 และเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 2 ขนาด ได้แก่ DB12 และ DB16

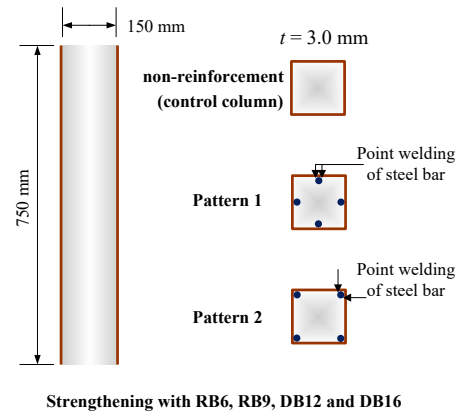
การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุกระทำตามมาตรฐาน ASTM โดยคอนกรีตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C469 การทดสอบท่อเหล็กและเหล็กเส้นตามมาตรฐาน ASTM E8 ตารางที่ 1 แสดงผลทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ท่อเหล็ก และเหล็กเส้น ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกใช้สัญลักษณ์ SCFT-X-Y-Z ซึ่งตั้งขึ้นโดยใช้หลักการต่อไปนี้ SCFT หมายถึง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต X หมายถึง ความหนาของท่อเหล็กในหน่วย mm Y หมายถึง ชนิดของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง และสุดท้าย Z หมายถึง รูปแบบการวางเหล็กเส้นเสริมกำลัง

ตารางที่ 1 ผลของการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial stage)

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	Concrete		Steel Tube		Steel Bar				จำนวน
		A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	t (mm)	A_{st} (mm ²)	$f_{y,st}$ (MPa)	Type	A_{sb} (mm ²)	$f_{y,sb}$ (MPa)	
1	SCFT-3.0-0	20,228	29.03	3.0	1,741	387.1	-	-	-	2
	SCFT-3.0-6-1	20,114	29.03	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	SCFT-3.0-9-1	19,973	29.03	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	SCFT-3.0-12-1	19,775	29.03	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	SCFT-3.0-16-1	19,423	29.03	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2
2	SCFT-3.0-6-2	20,114	29.03	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	SCFT-3.0-9-2	19,973	29.03	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	SCFT-3.0-12-2	19,775	29.03	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	SCFT-3.0-16-2	19,423	29.03	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2

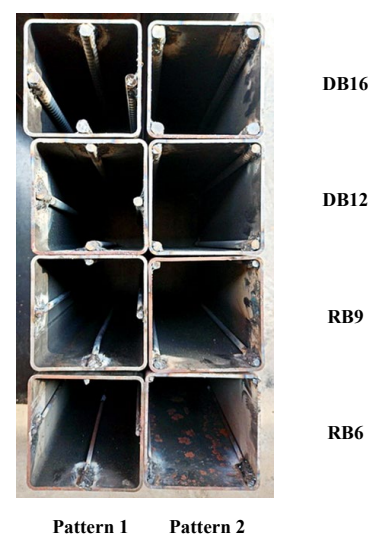
2.2 ตัวอย่างการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นเสาเส้นมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความสูง 750 mm ตัวแปรในการทดสอบประกอบด้วยเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง 4 ขนาด ได้แก่ RB6 RB9 DB12 และ DB16 รูปแบบการเสริมกำลังของเหล็กเส้น 2 รูปแบบ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตจำนวน 18 ตัวอย่าง ถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตแบบปกติที่ไม่ถูกเสริมกำลังซึ่งถูกใช้เป็นเสาอ้างอิง กลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นโดยวิธีการเชื่อมเหล็กเส้นที่กึ่งกลางติดกับผนังเสาในแต่ละด้าน (จำนวน 4 เส้น) และถูกเรียกการเสริมกำลังในลักษณะนี้ว่าการเสริมกำลังรูปแบบที่ 1 สุดท้ายกลุ่มที่ 3 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นด้วยวิธีการเชื่อมเหล็กเส้นติดที่มุมของเสาทั้งสี่ด้าน โดยเรียกการเสริมกำลังลักษณะนี้ว่าการเสริมกำลังรูปแบบที่ 2 รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดและรูปหน้าตัดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ศึกษา และขออธิบายเพิ่มเติมว่า เหล็กเส้นที่นำมาเสริมกำลังจะมีความยาวเท่ากับความสูงของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต รูปที่ 2 แสดงลักษณะรูปแบบการเสริมเหล็กเส้นก่อนกรอกคอนกรีต



Strengthening with RB6, RB9, DB12 and DB16

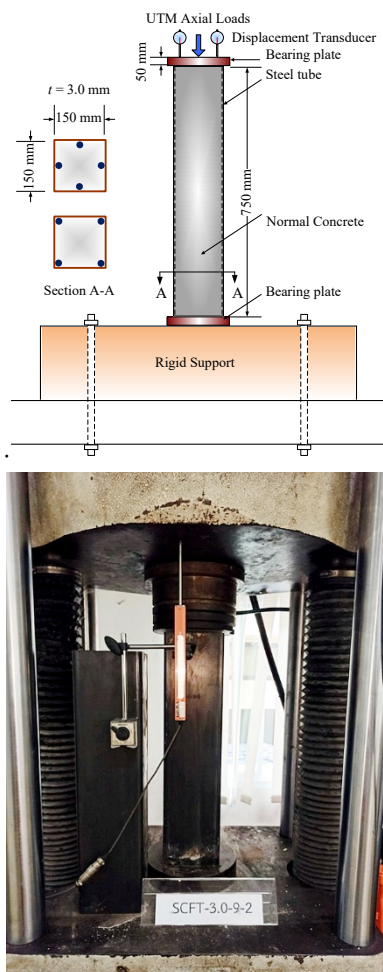
รูปที่ 1 รายละเอียดลักษณะของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต



รูปที่ 2 รูปแบบการเสริมเหล็กเส้นก่อนกรอกคอนกรีต

2.3 การทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

ขั้นตอนการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตเริ่มจากปรับฐานรองรับตัวอย่างให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นติดตั้ง Displacement Transducer ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบเพื่อวัดระยะการหดตัวของเสา ลักษณะการให้แรงอัดกระทำต่อเสาเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (entire section) ของตัวอย่างทดสอบ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แล้วทำการ Pre-loading แก่ตัวอย่างทดสอบโดยให้แรงกระทำประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต จากนั้น Unloading และปรับค่าต่าง ๆ เป็นศูนย์อีกครั้ง จากนั้นทำการบันทึกเพื่อเริ่มต้นการทดสอบตัวอย่าง เพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเท่ากับ 1 mm/min [10] พร้อมสังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ จนตัวอย่างทดสอบเกิดการโก่งเดาะที่ผนังท่อเหล็ก จากนั้นให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



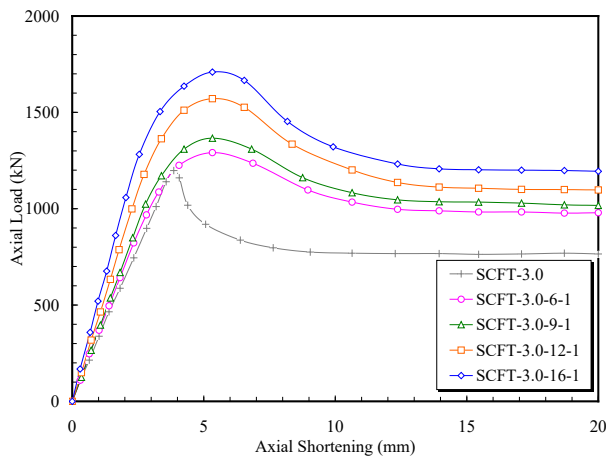
รูปที่ 3 รูปแบบการเสริมเหล็กเส้นก่อนกรอกคอนกรีต

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

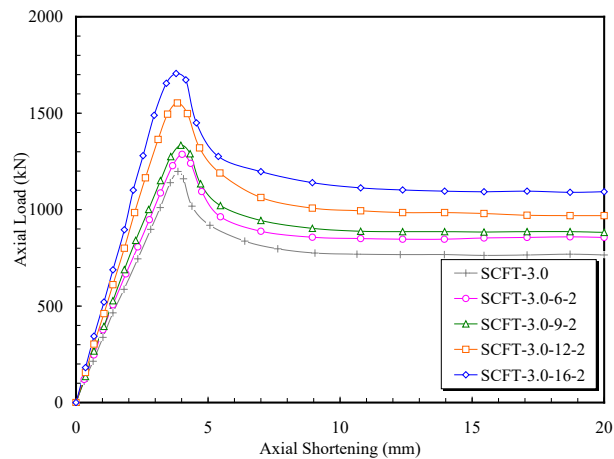
3.1 พฤติกรรมรับแรงและลักษณะการวิบัติ

พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (เสา CFT) อ่างอิง และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดพบว่า ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา CFT ทั้ง 2 แบบมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพฤติกรรมของตัวอย่างเสาทุกต้นเป็นแบบเชิงเส้นตรง จนถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90 % ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นในช่วงที่สอง เมื่อเสาถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวในแนวแกนและขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น และความชันของกราฟความสัมพันธ์เริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของเสา CFT จะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง มากขึ้นจนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงของเสา CFT มีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยที่เสารับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากผนังท่อเหล็กมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง [9-10] ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5

สำหรับลักษณะการวิบัติพบว่า เสา CFT อ่างอิง และเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นจะเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปและมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กและการอัดแตก (crushing) ของแกนคอนกรีตของเสา นอกจากนี้การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 จะมีการโก่งเดาะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากการเชื่อมเหล็กเส้นที่กึ่งกลางติดกับผนังเสาในแต่ละด้าน ส่งผลให้ผนังท่อเหล็กบริเวณนั้นมีความแข็งแรง (stiffness) สูงกว่าการเชื่อมเหล็กเส้นติดที่มุมของเสาทั้งสองด้าน โดยหลังจากการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็กจะส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา CFT มีค่าความชันลดลง และสอดคล้องกับพฤติกรรมของเสาแบบ Strain-Softening [11-12] ที่นำเสนอในรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2



รูปที่ 6 เปรียบเทียบลักษณะการวิบัติของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น 2 รูปแบบ

3.2 แรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว

ตารางที่ 2 แสดงผลแรงอัดสูงสุด ของเสา CFT อ่างอิงและเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น จากตารางพบว่า เมื่อเสา CFT ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้น สำหรับการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา CFT อ่างอิงอยู่ในช่วงระหว่าง 9-43% และการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา CFT อ่างอิงอยู่ในช่วงระหว่าง 8-42% ดังนั้นการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มกำลังแรงอัดสูงสุดของเสา CFT ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2 แรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียวของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	Pattern	แรงอัดสูงสุด		ดัชนีความเหนียว		
			P_u (kN)	ร้อยละเพิ่มขึ้น (%)	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	DI
1	SCFT-3.0-0	-	1,192	-	2.83	4.39	1.55
2	SCFT-3.0-6-1	1	1,298	9	2.82	8.96	3.18
	SCFT-3.0-9-1	1	1,347	13	2.78	8.76	3.15
	SCFT-3.0-12-1	1	1,562	31	2.66	8.36	3.14
	SCFT-3.0-16-1	1	1,705	43	2.55	8.18	3.21
3	SCFT-3.0-6-2	2	1,285	8	2.83	4.76	1.68
	SCFT-3.0-9-2	2	1,322	11	2.75	4.72	1.72
	SCFT-3.0-12-2	2	1,542	29	2.63	4.68	1.78
	SCFT-3.0-16-2	2	1,698	42	2.54	4.56	1.80

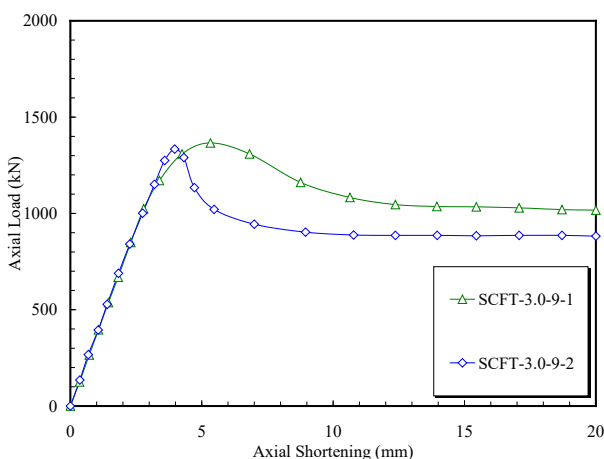
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 พบว่า การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้ใกล้เคียงกัน และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับเสา CFT ใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

ดัชนีความเหนียว (ductility index, DI) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกความเหนียวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [13]

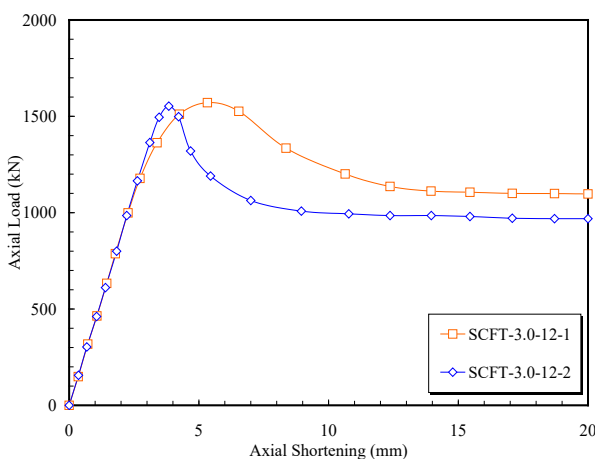
$$DI = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

โดยที่ Δ_{max} คือ ระยะหดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 85% หลังจากแรงอัดสูงสุด

Δ_y คือ ระยะหดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 75% ของแรงอัดสูงสุด



รูปที่ 7 เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นกลม



รูปที่ 8 เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กข้ออ้อย

จากตารางที่ 2 พบว่า เสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 มีค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 3.14 ถึง 3.21 ซึ่งมีความมากกว่าดัชนีความเหนียวของเสา CFT อ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 1.55 ในทางตรงกันข้าม เสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2 มีค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.68 ถึง 1.80 และมีค่าสูงกว่าดัชนีความเหนียวของเสา CFT อ้างอิงเล็กน้อย นอกจากนี้เหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยมีความสามารถในการเพิ่มความเหนียวได้ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย ตามลำดับ จากรูปพบว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ตำแหน่งกลางของท่อนเหล็ก (รูปแบบที่ 1) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของเสา CFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ตำแหน่งมุมของท่อนเหล็ก (รูปแบบที่ 2) สาเหตุเนื่องจากการเสริมเหล็กเส้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อนเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะของผนังท่อนเหล็ก (เพิ่มความแกร่งบริเวณกึ่งกลางผนังท่อนเหล็ก) ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการเสริมเหล็กเส้นที่ตำแหน่งมุมของท่อนเหล็ก

3.3 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง

การเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับมาตรฐานการออกแบบเสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตที่เกี่ยวข้อง โดยกำหนดให้เสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นมีปฏิสัมพันธ์เต็มรูปแบบ (full interaction) ระหว่างแกนคอนกรีต ท่อนเหล็กและเหล็กเส้นภายใต้แรงอัดในแนวแกน แรงอัดสูงสุดของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตามสมการออกแบบของ ACI 318 [14] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$P_{n,ACI} = 0.85f'_c A_c + f_{y,st} A_{st} + f_{y,sb} A_{sb} \quad (1)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต $f_{y,st}$ คือ กำลังครากของท่อนเหล็ก A_{st} พื้นที่หน้าตัดของท่อนเหล็ก $f_{y,sb}$ คือ กำลังครากของเหล็กเส้น และ A_{sb} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้น

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับการคำนวณจากสมการออกแบบ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	Steel Bar Type	Pattern	P_u	$P_{n,ACI}$	$P_u/P_{n,ACI}$
1	SCFT-3.0-0	-	-	1,192	1,173	1.02
2	SCFT-3.0-6-1	RB6	1	1,298	1,218	1.07
	SCFT-3.0-9-1	RB9	1	1,347	1,276	1.06
	SCFT-3.0-12-1	DB12	1	1,562	1,457	1.07
	SCFT-3.0-16-1	DB16	1	1,705	1,622	1.05
3	SCFT-3.0-6-2	RB6	2	1,285	1,218	1.06
	SCFT-3.0-9-2	RB9	2	1,322	1,276	1.04
	SCFT-3.0-12-2	DB12	2	1,542	1,457	1.06
	SCFT-3.0-16-2	DB16	2	1,698	1,622	1.05

การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ (P_u) และแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI ($P_{n,ACI}$) ของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นแสดงในตารางที่ 3 จากตารางพบว่า อัตราส่วนแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ และแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI ($P_u/P_{n,ACI}$) ของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 1.05-1.07 และอัตราส่วน $P_u/P_{n,ACI}$ ของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 1.04-1.06 โดยอัตราส่วน $P_u/P_{n,ACI}$ ของเสาทั้ง 2 รูปแบบมีค่ามากกว่า 1.00 โดยสมการดังกล่าวประเมินแรงอัดสูงสุดได้ต่ำกว่าผลทดสอบประมาณ 4-7% ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณและประเมินแรงอัดสูงสุดของเสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา

4. สรุปผล

1. การรับแรงอัดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น ในช่วงแรกพฤติกรรมของตัวอย่างเสาเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90 % ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นในช่วงที่สอง พฤติกรรมของเสา CFT จะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้นจนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงของเสา CFT มีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยที่เสารับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้วเสามีความแข็งแรงลดลง

2. เสา CFT ที่ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น และเสา CFT อ่างอิงมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กและการอัดแตกของแกนคอนกรีต รวมถึงการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 มีลักษณะวิบัติที่ไม่แตกต่างกัน

3. เสา CFT ถูกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้น

4. การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของเสา CFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นรูปแบบที่ 2 นอกจากนี้เหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยมีความสามารถในการเพิ่มความเหนียวได้ใกล้เคียงกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Sacks, et al., "Process model perspectives on management and engineering procedures in the precast/prestressed concrete industry", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 130(2), pp. 206-215, 2004.

- [2] J. Chen, et al., "Concrete-filled steel tubes with reinforcing bars or angles under axial tension", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 133, pp.374-382, 2017.
- [3] T. Ishizawa, et al., "Experimental study on partially concrete-filled steel tubular columns", *Steel and Composite Structures*, Vol. 6(1), pp.55-69, 2006.
- [4] L.H. Han, et al., "Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 100, pp.211-228, 2014.
- [5] F. Ding, et al., "Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression", in *Thin-Walled Structures*, Vol. 94, 2015, pp.155-166.
- [6] A. Varma, et al., "Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, pp.169-179, 2004.
- [7] Z. Shen, et al., "Experimental study on seismic behavior of concrete-filled l-shaped steel tube columns. Advances in Structural Engineering", in *Advances in Structural Engineering*, Vol. 16(7), 2013, pp.1235-1248.
- [8] B. Chen, et al., "Performance investigation of square concrete-filled steel tube columns", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol. 26(4), pp.730-736, 2011.
- [9] J. Thumrongvut, et al., "An experimental behaviour of cellular lightweight concrete-filled steel square tube columns under axial compression", *Materials Science Forum*, Vol. 860, pp.121-124, 2016.
- [10] J. Thumrongvut and P. Tiwjantuk, "Strength and axial behavior of cellular lightweight concrete-filled steel rectangular tube columns under axial compression" *Materials Science Forum*, Vol. 941, pp. 2417-2422, 2018.
- [11] J. Thumrongvut and K. Ritaksa, "Effects of load application on high-strength concrete-filled circular steel tube specimens", *RMUTI Journal Science and Technology*, Vol. 9(2), pp.145-160, 2016.
- [12] M.X. Xiong, et al., "Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high-strength materials", *Engineering Structures*, Vol. 136, pp. 494-510, 2017.
- [13] Z. Yang, and C. Xu, "Research on compression behavior of square thin-walled CFST columns with steel-bar stiffeners", *Applied Sciences*, Vol. 8, pp.1602, 2018.
- [14] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11)*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2011.