

Experimental Behavior of High-Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Various Load Application

การทดสอบพฤติกรรมเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตกำลังสูงภายใต้ลักษณะแรงกระทำที่แตกต่างกัน

นำชัย จ้อยสูงเนิน¹ จักขดา อารังวุฒิ^{2*} ธนพล สว่างงาม³ ศตคุณ เดชพันธ์⁴ จีรศักดิ์ สุพรรณวัน⁵

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁵ อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ARTICLE INFO:

Received January 14, 2021

Received Revised Form:

January 27, 2021

Accepted: February 9, 2021

ABSTRACT:

An experimental result of high-strength square concrete-filled tube columns and high-strength concrete columns subjected to axial load are presented in this paper. The dimension of square columns have the cross section of 150x150 mm and the length of 300 mm. The variables used in this observation are the wall thickness of steel tubes, which are 3.0 mm, 4.5 mm and 6.0 mm. A total of 20 specimens are tested to investigate the effects of three conditions to apply load to the column. The load is applied concentrically to the entire section, to the concrete section and to the steel tube section. From the test, it is found that the ultimate compressive strength and ductility of the high-strength concrete-filled tube columns are increased significantly compared to the reference columns. The results of these tests showed that the response curves of the high-strength concrete-filled tube columns have a linear elastic behavior up to approximately 60-80% of their maximum compressive load. Then, the behavior of the columns is nonlinear. The nonlinear behavior of the column can be classified into 2 types: Strain-Softening (SS) and Elastic-Perfectly Plastic (EPP), depending mainly on the studied variables.

KEYWORDS: Concrete-filled steel tube column, Square column, Steel tube, High-strength concrete

บทคัดย่อ:

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตกำลังสูงและเสาคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงอัดในแนวแกน เสาที่ใช้ทดสอบมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm ตัวแปรที่ใช้ทดสอบได้แก่ ความหนาของท่อเหล็ก 3 ค่าคือ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตัวอย่างจำนวน 20 ตัวอย่างถูกกระทำโดยแรงอัดในแนวแกน 3 ลักษณะได้แก่ แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด แรงกระทำต่อคอนกรีต และแรงกระทำต่อท่อเหล็ก จากการทดสอบพบว่าเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีความเหนียวและรับกำลังได้ดีกว่าเสาคอนกรีตอ้างอิงขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็ก โดยพฤติกรรมรับแรง

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

ของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตในช่วงแรกมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 60-80% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้นตัวอย่างเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติ โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นถูกแบ่งเป็น 2 แบบ คือ Strain-Softening (SS) และ Elastic-Perfectly Plastic (EPP) โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

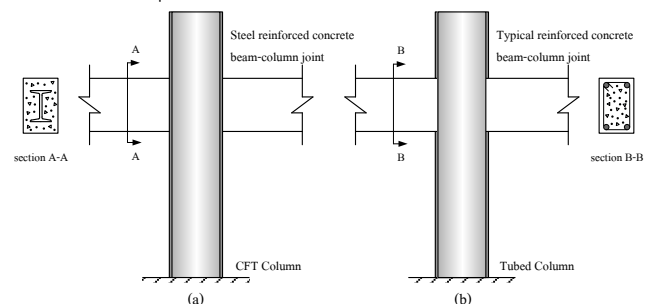
คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม, ท่อเหล็ก, คอนกรีตกำลังสูง

1. บทนำ

อาคารในประเทศไทยมักถูกก่อสร้างโดยคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ การก่อสร้างลักษณะนี้มักใช้ระยะเวลาก่อสร้างค่อนข้างมากและส่งผลให้ต้นทุนมีราคาสูง โดยเฉพาะการเข้าแบบ การเทคอนกรีตและถอดแบบหล่อ ขั้นตอนดังกล่าวจำเป็นต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือและจำนวนแรงงานสูง ซึ่งไม่สอดคล้องกับทิศทางเศรษฐกิจในปัจจุบันที่มีการแข่งขันในด้านราคาและความรวดเร็วด้านการก่อสร้าง [1] จากปัญหาในการก่อสร้างอาคารที่กล่าวข้างต้น จึงเกิดการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างโดยการนำระบบก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาช่วยเสริมในบางส่วนของอาคาร เช่น คานสำเร็จรูป เป็นต้น [2-3] หรือการใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าวออก เช่น การใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา เป็นต้น [4-8] เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column, CFT column) ถูกใช้งานโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยเสาดังกล่าวมีข้อดีคือ ช่วยให้การก่อสร้างมีความรวดเร็ว ลดปัญหาการใช้ไม้แบบโดยการใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวรให้กับโครงสร้าง [9-10] นอกจากนี้ในปัจจุบันคอนกรีตกำลังสูง (high-strength concrete, HSC) กำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ด้วยประสิทธิภาพและความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตกำลังสูง ทำให้ผู้ออกแบบได้รับประโยชน์หลายด้าน เช่น ลดขนาดของหน้าตัดเสาเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตกำลังปกติ โดยเสาที่ออกแบบได้มีขนาดลดลงแต่สามารถรับน้ำหนักได้เท่าเดิม [11-12] ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการใช้สอยอาคารเนื่องจากการลดลงของหน้าตัดเสาและระยะห่างระหว่างเสาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ของตัวอาคารลดลง อีกทั้งสามารถประหยัดปริมาณเหล็กเสริม ตลอดจนช่วยลดแรงงานในการก่อสร้างเนื่องจากขนาดของโครงสร้างที่ลดลง [13] จากข้อดีของคอนกรีตกำลังสูงที่กล่าวมาข้างต้น การนำวัสดุคอนกรีตกำลังสูงมาประยุกต์ใช้ร่วมกับท่อเหล็ก โดยการเสริมท่อเหล็กเพื่อเพิ่ม

ความสามารถในการรับน้ำหนักจะเป็นทางเลือกในการก่อสร้างเสาอีกทางเลือกหนึ่งทดแทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังปกติ

ปัจจุบันเสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบให้ท่อเหล็กกรอรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบ [14] ได้แก่ 1) ท่อเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงอัดในแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 1(a) เสา CFT รูปแบบนี้รองรับแรงอัดกระทำผ่านคอนกรีตและท่อเหล็กร่วมกัน และ 2) ท่อเหล็กทำหน้าที่เป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (transverse reinforcement) โดยเสา CFT ลักษณะนี้รองรับแรงอัดกระทำผ่านแกนคอนกรีตเท่านั้น อีกทั้งมีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อและการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 1(b) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษาผลของการใช้คอนกรีตกำลังสูงที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต โดยเน้นการทดสอบแรงอัดภายใต้ลักษณะแรงกระทำที่แตกต่างกัน ได้แก่ แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงและแรงอัดกระทำต่อท่อเหล็กเพื่อให้ครอบคลุมต่อการใช้งาน



รูปที่ 1 ลักษณะของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต [14]

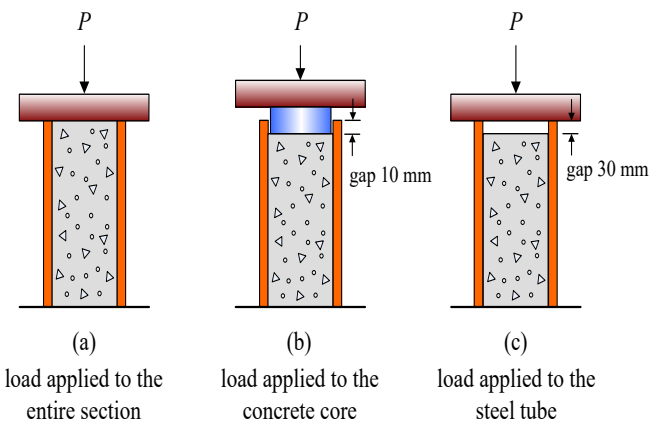
2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

ตัวอย่างเสาที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยเป็นเสาจำนวน 20 ตัวอย่างแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC column) ที่ไม่มีการเสริมท่อเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่างถูกใช้เป็นเสาอ้างอิง และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง (HSCFT column)

จำนวน 18 ตัวอย่าง โดยเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตถูกเสริมด้วยท่อเหล็กกลวง (hollow steel tube) ที่ผลิตโดยการม้วนแผ่นเหล็กโครงสร้างแบบรีดเย็นตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของมอก. ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดหน้าตัด 150x150 mm ความยาว เท่ากับ 300 mm ส่งผลให้อัตราส่วนความกว้างของหน้าตัดต่อความยาว มีค่าเท่ากับ 2.0 (ถูกจำกัดด้วยความสูงของเครื่องมือทดสอบ) ความหนาของท่อเหล็ก 3 ขนาดคือ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จมีกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 54 MPa (ประมาณ 540 kg/cm²) รูปที่ 2 แสดงลักษณะการให้แรงกระทำต่อเสา 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) แสดงในรูปที่ 2(a) รูปแบบที่ 2 แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีต โดยในการหล่อตัวอย่างเสาจะเว้นระยะห่างระหว่างท่อเหล็กและแกนคอนกรีตเท่ากับ 10 mm เพื่อสามารถวางแผ่นเหล็กและจำลองแรงอัดให้กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงแสดงในรูปที่ 2(b) และรูปแบบที่ 3 แรงอัดกระทำต่อท่อเหล็ก สำหรับการหล่อตัวอย่างเสาจะเว้นระยะห่างระหว่างท่อเหล็กและแกนคอนกรีตเท่ากับ 30 mm เพื่อให้แน่ใจว่าพฤติกรรมการหดตัวของท่อเหล็กภายหลังแรงอัดสูงสุด (post-peak) จะไม่สัมพันธ์กับแกนคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2(c)

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษา โดยสัญลักษณ์ชื่อตัวอย่างทดสอบ WW-XX-YY-Z ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ WW หมายถึง ประเภทของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ทดสอบมี 2 รูปแบบได้แก่ SC และ SS เป็นสัญลักษณ์แทนเสาคอนกรีตกำลังสูงอ้างอิง (เสาที่ไม่มีการเสริมท่อเหล็ก) และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง ตามลำดับ XX หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีตในหน่วย MPa และ YY แทนความหนา ของท่อเหล็กในหน่วย mm สุดท้าย Z หมายถึง ลักษณะการให้แรงอัดในแนวแกนกระทำต่อเสาทั้ง 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2 ได้แก่ E, C และ S เป็นสัญลักษณ์แทนแรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก), แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีต และแรงอัดกระทำต่อท่อเหล็ก ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น SS-54-4.5-C หมายถึง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 54 MPa ความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 4.5 mm และให้แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีต ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อเสา

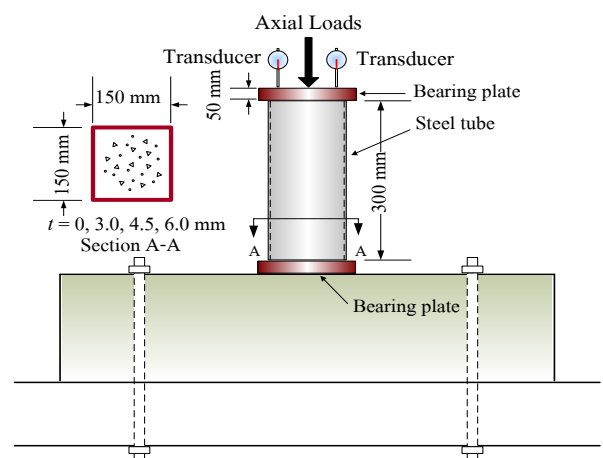
2.2 ตัวอย่างการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

1) ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน และติดตั้งตัวอย่างเสาเข้ากับเครื่อง Compression Machines ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกรองรับโดย Bearing plate ความหนา 50 mm

2) ติดตั้ง Transducer จำนวน 2 ชุด ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบ เพื่อวัดระยะการหดของเสาในแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 3

3) ทำการ Pre-loading ตัวอย่างทดสอบโดยให้แรงกระทำประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและหน้าสัมผัสของตัวอย่างและเตรียมความพร้อมอุปกรณ์

4) ปรับค่าต่าง ๆ ให้เป็นศูนย์อีกครั้ง จากนั้นทำการบันทึกเพื่อเริ่มต้นทดสอบตัวอย่างเสา และเพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่องทดสอบด้วยอัตราการเสียรูปของเสาเท่ากับ 2 mm/min พร้อมสังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ



รูปที่ 2 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงอัด

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบและสมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	Thickness (mm)	Load Application	B/t	Concrete Properties		Steel Tube Properties		Number of Tests
				A_C (mm ²)	f'_C (MPa)	A_{St} (mm ²)	f_{St} (MPa)	
SC-54-0	-	Entire	-	22,500	56.2	-	-	2
SS-54-3.0-E	3.0	Entire	50.0	20,228	56.2	1,741	387.1	2
SS-54-4.5-E	4.5	Entire	33.3	19,408	56.2	2,567	382.3	2
SS-54-6.0-E	6.0	Entire	25.0	18,776	56.2	3,363	384.1	2
SS-54-3.0-C	3.0	Concrete	50.0	20,228	56.2	1,741	387.1	2
SS-54-4.5-C	4.5	Concrete	33.3	19,408	56.2	2,567	382.3	2
SS-54-6.0-C	6.0	Concrete	25.0	18,776	56.2	3,363	384.1	2
SS-54-3.0-S	3.0	Steel Tube	50.0	20,228	56.2	1,741	387.1	2
SS-54-4.5-S	4.5	Steel Tube	33.3	19,408	56.2	2,567	382.3	2
SS-54-6.0-S	6.0	Steel Tube	25.0	18,776	56.2	3,363	384.1	2

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 พฤติกรรมรับแรงภายใต้แรงกระทำหลายรูปแบบ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนของ HSCFT column ภายใต้แรงกระทำหลายรูปแบบ โดยรูปที่ 4(a) ถึงรูปที่ 4(c) นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของ HSCFT column ที่มีความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ และรูปที่ 4(d) แสดงการเปรียบเทียบผลของความหนาท่อเหล็กที่มีต่อ HSCFT column

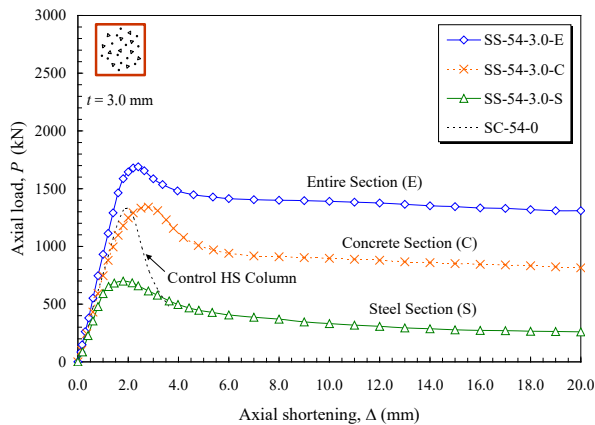
จากรูปที่ 4(a) ถึงรูปที่ 4(c) พฤติกรรมการรับแรงอัดของ HSCFT column เมื่อให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (รูปแบบ E) พบว่า ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสาคอนกรีตอ้างอิงและ HSCFT column มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจาก HSCFT column มีคอนกรีตและท่อเหล็กเป็นวัสดุหลักในการรับแรง ส่งผลให้ HSCFT column มีความแกร่งและความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนสูงกว่าเสาคอนกรีตอ้างอิง ในทางตรงกันข้าม เมื่อให้แรงอัดในแนวแกนที่กระทำต่อคอนกรีตโดยตรง (รูปแบบ C) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกนและการหดตัวของเสาคอนกรีตอ้างอิงและ HSCFT column จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในช่วงแรก เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ที่ต่ำ คอนกรีตจะมีการขยายตัวทางด้านข้างน้อยมากและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัดเช่นเดียวกับเสาคอนกรีตอ้างอิง

สำหรับการให้แรงกระทำต่อท่อเหล็ก (รูปแบบ S) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกนและการหดตัวของเสาแตกต่างจากการให้แรงกระทำในรูปแบบ E และรูปแบบ C สาเหตุเนื่องจากแรงอัดทั้งหมดจะถูกรองรับโดยผนังของท่อเหล็ก (แกนคอนกรีตมีระยะห่างและต่ำกว่าท่อเหล็กประมาณ 30 mm) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตประมาณ 6-12 เท่า ส่งผลให้การรับแรงในรูปแบบ S มีความต้านทานต่อแรงกระทำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ E และรูปแบบ C

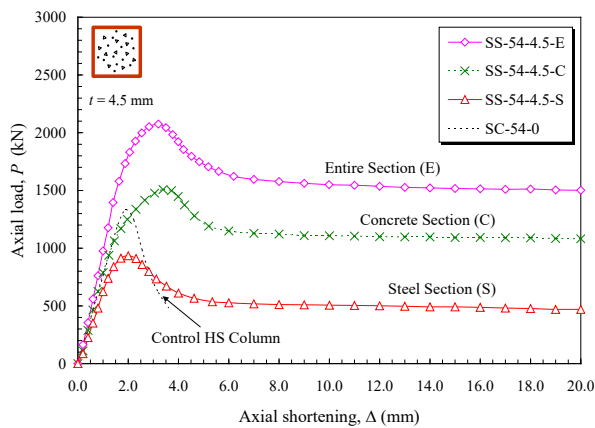
นอกจากนี้พฤติกรรมภายหลังแรงอัดสูงสุด (post-peak) ของ HSCFT column แบ่งได้เป็น 2 แบบ 1) Strain-Softening (SS) และ 2) Elastic-Perfectly Plastic (EPP) ขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็กและลักษณะการให้แรงกระทำต่อเสา โดย HSCFT column ส่วนใหญ่มีลักษณะพฤติกรรมภายหลังแรงอัดสูงสุดแบบ Strain-Softening โดยที่เสาจจะรองรับแรงอัดได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแกร่งลดลง (degrading stiffness) เนื่องจากผนังท่อเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง [8]

อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างเสา SS-54-6.0-C ในรูปที่ 4(c) เมื่อท่อเหล็กมีความหนามาก (6.0 mm) และให้แรงอัดกระทำผ่านแกนคอนกรีตโดยตรง พฤติกรรมภายหลังแรงอัดสูงสุดจะมีลักษณะแบบ Elastic-Perfectly Plastic (EPP) เนื่องจากผนังของท่อเหล็กมีความแกร่งต่อการดัดในการต้านทานต่อการ

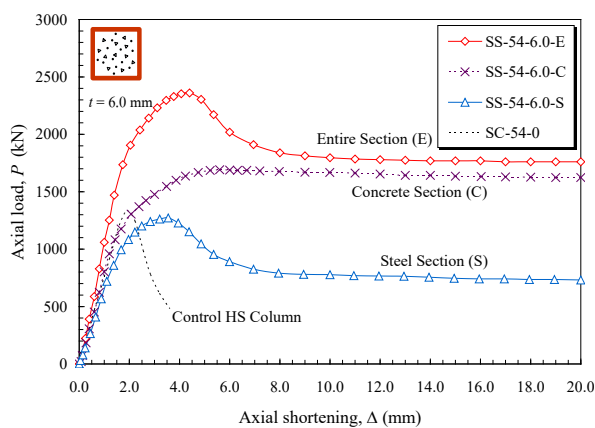
ขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ ส่งผลให้ท่อเหล็กทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงอัดคงที่ได้อย่างต่อเนื่อง [15] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Seangatith and Thumrongvut (2009) [14]



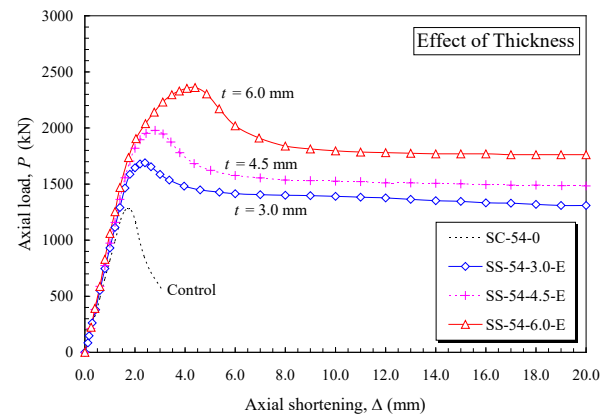
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกน ภายใต้แรงกระทำหลายรูปแบบ

3.2 ลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาภายใต้แรงอัดในแนวแกน จากผลการทดสอบพบว่า HSCFT column ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดและแกนคอนกรีต (รูปแบบ E และรูปแบบ C) เกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) โดยเสาส่วนใหญ่เกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 30 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.1 mm/mm ซึ่งแสดงว่า HSCFT column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตอัดแรง โดยลักษณะการวิบัติของ HSCFT column ที่ให้แรงกระทำดังกล่าวจะเกิดการวิบัติจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กและการอัดแตกของแกนคอนกรีต (crushing) ลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของ HSCFT column ที่ให้แรงกระทำต่อท่อเหล็กโดยตรง (รูปแบบ S) โดยจะเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณผนังของท่อเหล็กที่บริเวณผิวสัมผัสกับหัวกดของเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5(a)



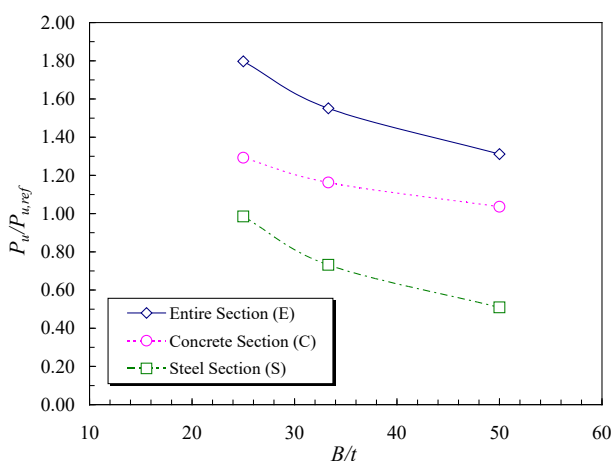
รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา

ตารางที่ 2 แรงอัดสูงสุดและลักษณะการวิบัติ

Specimen	Thickness (mm)	B/t	Load Application	P_1^* (kN)	P_2^* (kN)	P_u (kN)	$P_u/P_{u,ref}$	Post-peak Behavior
SC-54-0	-	-	Entire	1,280.0	1,332.6	1,306.3	1.00	Crushing
SS-54-3.0-E	3.0	50.0	Entire	1,689.8	1,736.8	1,713.3	1.31	SS
SS-54-4.5-E	4.5	33.3	Entire	2,075.0	1,978.1	2,026.5	1.55	SS
SS-54-6.0-E	6.0	25.0	Entire	2,360.6	2,334.1	2,347.3	1.80	SS
SS-54-3.0-C	3.0	50.0	Concrete	1,341.0	1,365.5	1,353.2	1.04	SS
SS-54-4.5-C	4.5	33.3	Concrete	1,507.8	1,530.5	1,519.2	1.16	SS
SS-54-6.0-C	6.0	25.0	Concrete	1,691.5	1,685.1	1,688.3	1.29	EPP
SS-54-3.0-S	3.0	50.0	Steel Tube	699.4	631.4	665.4	0.51	SS
SS-54-4.5-S	4.5	33.3	Steel Tube	934.3	977.8	956.1	0.73	SS
SS-54-6.0-S	6.0	25.0	Steel Tube	1,271.8	1,302.4	1,287.1	0.99	SS

3.3 แรงอัดสูงสุดและผลของความหนาท่อเหล็ก

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดของ HSCFT column จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณา HSCFT column ที่ใช้ท่อเหล็กที่มีความหนา 6.0 mm มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดของ HSCFT column ต่อแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ HSCFT column ที่ใช้ท่อเหล็กความหนา 3.0 mm และ 4.5 mm (ทุกประเภทของการให้แรงกระทำ) ซึ่งอธิบายได้ว่าท่อเหล็กที่มีอัตราส่วน B/t ต่ำจะส่งผลให้ HSCFT column สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าท่อเหล็กที่มีอัตราส่วน B/t สูง [16] ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ และ B/t

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะการให้แรงกระทำต่อเสาพบว่า การให้แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีต

ร่วมกับท่อเหล็ก, รูปแบบ E) มีอัตราส่วน อยู่ในช่วงระหว่าง 1.31-1.80 ส่วนการให้แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรง (รูปแบบ C) มีอัตราส่วน อยู่ในช่วงประมาณ 1.04-1.29 และการให้แรงอัดกระทำต่อท่อเหล็ก (รูปแบบ S) มีอัตราส่วน อยู่ในช่วงระหว่าง 0.51-0.99 ซึ่งเป็นอัตราส่วนต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้แรงกระทำใน 2 รูปแบบข้างต้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการให้แรงทั้ง 3 รูปแบบพบว่า การให้แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด และแรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงเป็นลักษณะที่ควรออกแบบในการประยุกต์ใช้งาน และควรหลีกเลี่ยงการก่อสร้างที่ก่อให้เกิดช่องว่าง (gap) ระหว่างท่อเหล็กและแกนคอนกรีตซึ่งมีลักษณะการทดสอบคล้ายกับรูปแบบ C

3.4 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับการคำนวณเชิงทฤษฎี

สำหรับการคำนวณเชิงทฤษฎี สมมติให้ HSCFT column มี Full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กภายใต้แรงกระทำ แรงอัดสูงสุดของเสาเชิงประกอบตามมาตรฐานออกแบบของ ACI 318 [17] ($P_{n,ACI}$) สามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต f_{st} คือ กำลังครากของท่อเหล็ก และ A_{st} พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับการคำนวณจากสมการออกแบบ

Specimen	Thickness (mm)	B/t	Load Application	P_u (kN)	$P_{n,ACI}$ (kN)	$P_u/P_{n,ACI}$
SS-54-3.0-E	3.0	50.0	Entire	1,713.3	1,640.3	1.04
SS-54-4.5-E	4.5	33.3	Entire	2,026.5	1,908.5	1.06
SS-54-6.0-E	6.0	25.0	Entire	2,347.3	2,188.5	1.07
SS-54-3.0-C	3.0	50.0	Concrete	1,353.2	1,640.3	0.83
SS-54-4.5-C	4.5	33.3	Concrete	1,519.2	1,908.5	0.80
SS-54-6.0-C	6.0	25.0	Concrete	1,688.3	2,188.5	0.77
SS-54-3.0-S	3.0	50.0	Steel Tube	665.4	673.9	0.99
SS-54-4.5-S	4.5	33.3	Steel Tube	956.1	981.4	0.97
SS-54-6.0-S	6.0	25.0	Steel Tube	1,287.1	1,291.6	1.00

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดระหว่างค่าแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ (P_u) และแรงอัดสูงสุดของ HSCFT column ที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ ACI ($P_{n,ACI}$) จากตารางพบว่า อัตราส่วน $P_u/P_{n,ACI}$ ของ HSCFT column ที่ให้แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (รูปแบบ E) มีค่าอยู่ในช่วง 1.04-1.07 ซึ่งมากกว่า 1.00 ดังนั้นตัวอย่างทดสอบมี Full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก เห็นได้จากการที่ตัวอย่าง HSCFT column เกิดการวิบัติโดยการ Crushing ของคอนกรีตและโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก (wall buckling) ที่บริเวณกึ่งกลางความยาวเสา สำหรับอัตราส่วน $P_u/P_{n,ACI}$ ของ HSCFT column ที่ให้แรงอัดกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรง (รูปแบบ C) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.77-0.83 อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่าง HSCFT column ไม่เกิด Full interaction ระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยแรงอัดดังกล่าวเมื่อกระทำผ่านแกนคอนกรีตโดยตรงจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงโอบรัด (confinement) ทางด้านข้างกระทำร่วมกับท่อเหล็ก [18] ส่งผลให้แรงอัดสูงสุดของเสาที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าสมการออกแบบของ ACI ประมาณ 17-23% นอกจากนี้เมื่อให้แรงอัดกระทำต่อท่อเหล็ก (รูปแบบ S) แรงอัดสูงสุดของเสาในสมการที่ (1) จะถูกปรับเหลือเพียงผลคูณระหว่างกำลังครากของท่อเหล็กและพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก จากการเปรียบเทียบพบว่าอัตราส่วน $P_u/P_{n,ACI}$ ของ HSCFT column ที่ให้แรงอัดกระทำต่อท่อเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.97-1.00 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.00 แสดงให้เห็นว่า การคำนวณแรงอัดสูงสุดจากผลคูณระหว่างกำลังครากของท่อเหล็กและพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก

สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสาที่ให้แรงอัดกระทำต่อท่อเหล็กได้อย่างถูกต้อง

4. สรุปผล

1) เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีพฤติกรรมโครงสร้างแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 60-80% ของแรงอัดสูงสุด และแบบไร้เชิงเส้นในช่วงที่สอง โดยพฤติกรรมของ HSCFT column แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ 1) Strain-Softening (SS) และ 2) Elastic-Perfectly Plastic (EPP) ขึ้นกับลักษณะการให้แรงกระทำและความหนาของท่อเหล็ก

2) การวิบัติของตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กและการอัดแตกของแกนคอนกรีต นอกจากนี้ท่อเหล็กยังทำหน้าที่โอบรัดแกนคอนกรีตที่เกิดการอัดแตกทั้งในแนวแกนและแนวขวางอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นและต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิง

3) เมื่อความหนาของท่อเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสามีแรงอัดสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาของท่อเหล็กจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำของแกนคอนกรีต

4) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ควรออกแบบให้แรงอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดของเสาเพื่อการพัฒนากำลังของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Blismas, et al., "Benefit evaluation for off-site production in construction," *Construction Management and Economics*, Vol. 24(2), pp.121-130, 2006.
- [2] J. Thumrongvut, et al., "Tests on structural behaviors of precast partially-prestressed concrete beam's joints. *RMUTI Journal Science and Technology*, Vol. 6(2), pp.15-30, 2013.
- [3] J. Thumrongvut, et al., "Effects of flexural strengthening with non-prestressed wires on precast partially-prestressed concrete beams," *RMUTI Journal Science and Technology*, Vol. 7(2), pp.16-33, 2014.
- [4] D. Liu, et al., "Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59(12), pp.1499-1515, 2003.
- [5] M. Mursi, and B. Uy, "Strength of concrete filled steel box columns incorporating interaction buckling," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129(5), pp.626-639, 2003.
- [6] Y. Xiao, et al., "Confined concrete filled tubular columns," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131(3), pp.488-497, 2005.
- [7] F. Ding, et al., "Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression," *Thin-Walled Structures*, Vol. 94, pp.155-166, 2015.
- [8] J. Thumrongvut, and P. Tiwajantuk, "Strength and axial behavior of cellular lightweight concrete-filled steel rectangular tube columns under axial compression," *Materials Science Forum*, Vol. 941, 2417-2422, 2018.
- [9] G. Giakoumelis, and D. Lam, "Axial capacity of circular concrete-filled tube columns," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60(7), pp.1049-1068, 2004.
- [10] J. Thumrongvut, and S. Seangatith, "Axial load capacity of cellular lightweight concrete-filled steel square tube columns," in *Central Europe towards Sustainable Building (CESB 2016)*, Czech Republic, 22-24 June 2016, pp.1312-1319.
- [11] C. Jaturapitakkul et al., "Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(4), pp.549-555, 2004.
- [12] L. Hussein, and L. Amleh, "Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members," *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp.1105-1116, 2015.
- [13] H. Beushausen, and T. Dittmer, "The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 74, pp.132-139, 2015.
- [14] S. Seangatith, and J. Thumrongvut, "Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression," *Suranaree Journal of Science and Technology*, Vol. 16(3), pp.205-220, 2009.
- [15] S. Seangatith, and J. Thumrongvut, "Investigation on square tubed concrete columns subjected to axial compressive loads," *KKU Engineering Journal*, Vol. 25(1), pp.81-99, 2008.
- [16] 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.
- [17] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11)*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2011.
- [18] M. Johansson, and K. Gylltoft, "Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns

under various means of load application,” *Steel and Composite Structures*, Vol. 1(4), pp.393-410, 2001.