

ประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต
ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น

**Axial Load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns
With Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars**

จักขดา ธารงวุฒิ^{1*}, พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย¹, สิทธิชัย แสงอาทิตย์², ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹ และ จีรศักดิ์ สุพรมวัน¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ในเมือง เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรนารี เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

Jaksada Thumrongvut^{1*}, Pirunluck Khamphay¹, Sittichai Seangatith², Saksith Pantawee¹ and Jeerasak Supromwan¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,

Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Suranaree, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

Received: Sep 26, 2022; Revised: Feb 13, 2023; Accepted: Apr 24, 2023

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสาอ้างอิง) จำนวน 6 ตัวอย่าง และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น จำนวน 24 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้างและความสูงเท่ากับ 150 mm และ 750 mm ตามลำดับ ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ชนิดของเหล็กเส้น 4 ประเภท (RB6 RB9 DB12 และ DB16) และรูปแบบของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง 2 ตำแหน่ง จากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) จะเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวมากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) นอกจากนี้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตพบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, เหล็กเส้น, การเสริมกำลัง

Abstract

The purpose of this study is to present the experimental findings on the axial load performance of concrete-filled steel tube (CFST) columns with hydraulic cement strengthened by steel bars. Six CFST columns with hydraulic cement

(referenced CFST columns) and twenty-four CFST columns with hydraulic cement strengthened by steel bars comprise a total of thirty specimens. The nominal width and height of the square specimens are 150 mm and 750 mm, respectively. The primary parameters utilized in this study are the four types of steel bars (RB6, RB9, DB12, and DB16) and the two locations of the strengthening steel bar. These experimental results showed that the CFST columns with hydraulic cement strengthened with steel bars at the inner center of the steel tube (location 1) had a greater improvement in ductility efficiency than the CFST columns with hydraulic cement and strengthened with steel bars at the inside corners of the steel tube (location 2). Lastly, by comparing the performance of hydraulic cement to ordinary Portland cement (OPC) for the concrete-filled steel tube column employed in this study, it can be stated that hydraulic cement could be utilized as a replacement material for OPC.

Keywords: Concrete-filled steel tube column, Hydraulic cement, Square steel tube, Steel bar, Strengthening

1. บทนำ

การก่อสร้างแบบหล่อในที่ (Cast-in-place construction) เป็นระบบที่มักใช้เวลาดำเนินงานค่อนข้างมาก ส่งผลให้ต้นทุนก่อสร้างมีราคาสูง ดังนั้น การพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (Fabrication) หรือแบบกึ่งสำเร็จรูป (Pre-fabrication) จึงมีบทบาทเพื่อช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง [1] เนื่องจากประสิทธิภาพการก่อสร้างที่รวดเร็วและควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนได้ดีกว่าระบบหล่อในที่ [2–4] รวมถึงช่วยแก้ปัญหาด้านแรงงานลงได้มาก ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับชิ้นส่วนโครงสร้าง และออกแบบให้ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกพร้อมกับโครงสร้าง โดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าว เช่น การใช้ท่อเหล็กรูปพรรณกลวง (hollow steel tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปตลอดความยาวของเสา ดังแสดงในงานวิจัยของ Cai and He [5], Wang et al. [6], Ding et al. [7], Thumrongvut and Tiwjanuk [8] ปัจจุบันเสาเชิงประกอบดังกล่าวถูกเรียกว่า เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled tube (CFT) column) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นทั่วโลก [9] และมีจุดเด่นคือ การก่อสร้างดำเนินงานได้อย่างรวดเร็วโดยการใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวร [10–12] และท่อเหล็กกลวงดังกล่าวยังทำหน้าที่ร่วมกับแกนคอนกรีตในการรับแรง โดยอาศัย Composite action ส่งผลให้เสามีแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [13],[14] โดยความเหนียว (Ductility) เป็นปัจจัยสำคัญของโครงสร้างอาคารที่มีผลต่อความสามารถด้านทาน

แรงกระทำ [15],[16] ซึ่งหมายถึงความสามารถของโครงสร้างที่สามารถรับแรงได้แม้ว่าเกิดการเสียรูป (ภายหลังเกิดความเสียหาย) ซึ่งการเสียรูปอาจเป็นการแอ่นตัว การหดตัว หรือค่าความเครียด เป็นต้น อย่างไรก็ตามภายใต้แรงอัดในแนวแกนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมักเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก [17],[18] ดังนั้น การชะลอหรือลดการโก่งเดาะโดยการเสริมกำลังเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตด้วยเหล็กเส้น (Steel bar) จะเป็นตัวเลือกรูปแบบหนึ่งที่สามารถลดและด้านทานการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก เนื่องจากเหล็กเส้นที่เชื่อมติดกับผนังท่อเหล็กตามแนวยาวจะช่วยเพิ่มความแกร่งให้ผนังท่อเหล็ก ตลอดจนกระบวนการดังกล่าวสามารถทำได้อย่างสะดวก รวมถึงมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก

นอกจากนี้ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทั่วไปถูกผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จำนวนมาก [19],[20] ดังนั้น การเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติน่าจะเป็นทางเลือกที่สามารถลดปัญหาสถานะเรือนกระจก [21] หนึ่งในวัสดุที่เริ่มนิยมใช้ทดแทนคือปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบจากปูนเม็ด เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีจุดเด่นคือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อย CO₂ ต่ำกว่า

เมื่อเทียบการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [22] รวมถึงใช้วัสดุดิบบางส่วนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในชิ้นส่วนโครงสร้างยังมีจำนวนไม่มากนัก [23] ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นภายใต้แรงในแนวแกน และผลของการเสริมเหล็กเส้นที่มีต่อกำลังเสา

2. วัสดุ ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้งานทั่วไป (GU) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน การออกแบบ

ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 [24] โดยมีกำลังอัดประลัย (ultimate compressive strength) เท่ากับ 28 MPa (ประมาณ 280 kg/cm²) สำหรับท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 150 mm และความยาว 750 mm ความหนาท่อเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.0 mm เหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตประกอบด้วยเหล็กเส้นกลม 2 ขนาด ได้แก่ RB6 และ RB9 (ชั้นคุณภาพ SR24) และเหล็กข้ออ้อย 2 ขนาด ได้แก่ DB12 และ DB16 (ชั้นคุณภาพ SD40) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [25] และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กและเหล็กเสริมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 [26] ตารางที่ 1 แสดงผลทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุและเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

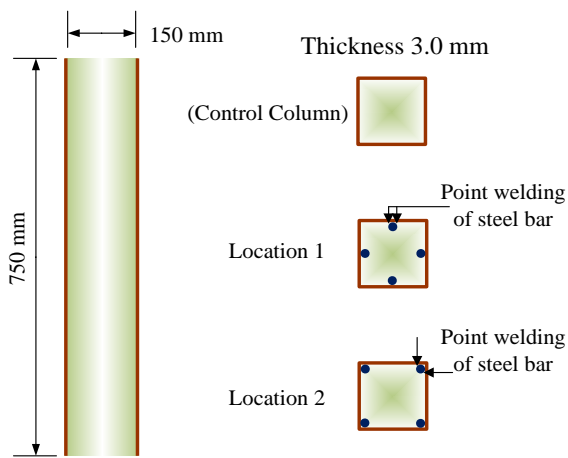
Group	Specimen	Concrete		Steel Tube			Steel Bar			Number
		A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	t (mm)	A_{st} (mm ²)	$f_{y,st}$ (MPa)	Type	A_{sb} (mm ²)	$f_{y,sb}$ (MPa)	
1	HCFT	20,228	28.6	3.0	1,741	387.1	-	-	-	2
2	HCFT-6-1	20,114	28.6	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	HCFT-9-1	19,973	28.6	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	HCFT-12-1	19,775	28.6	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	HCFT-16-1	19,423	28.6	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2
3	HCFT-6-2	20,114	28.6	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	HCFT-9-2	19,973	28.6	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	HCFT-12-2	19,775	28.6	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	HCFT-16-2	19,423	28.6	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทั้งหมดเป็นเสาสั้น มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 150 mm สูง 750 mm ตัวแปรหลักในการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของเหล็กเส้น 4 ประเภท (RB6 RB9 DB12 และ DB16) และลักษณะการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น 2 ตำแหน่ง ตัวอย่างทดสอบจำนวน 18 ตัวอย่างถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแบบ

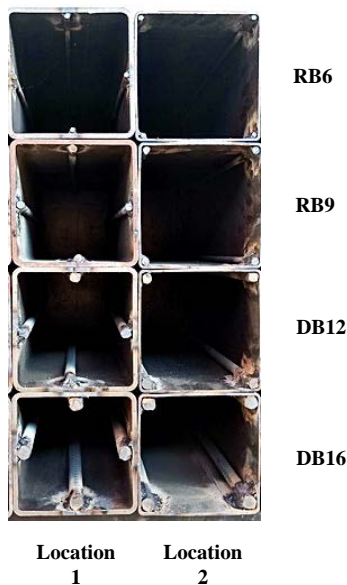
ปกติ (เสา HCFT) กลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นด้วยการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางภายในแต่ละด้านของท่อเหล็ก รวมจำนวน 4 เส้น และเรียกลักษณะการเสริมกำลังแบบนี้ว่า การเสริมกำลังตำแหน่งที่ 1 และกลุ่มที่ 3 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นด้วยการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็กทั้งสี่ด้าน และเรียกลักษณะการเสริม

กำลังแบบนี้ว่า การเสริมกำลังตำแหน่งที่ 2 ทั้งนี้ขออธิบายเพิ่มเติมว่า เหล็กเส้นที่เสริมกำลังมีความยาวเท่ากับความสูงของตัวอย่างเสา รูปหน้าตัดและรายละเอียดของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ตำแหน่งของการเสริมเหล็กเส้นก่อนการเทคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2 สำหรับชื่อตัวอย่างทดสอบในตารางที่ 1 ใช้สัญลักษณ์ HCFT-A-B ซึ่งกำหนดขึ้น โดยมีหลักการดังนี้ HCFT หมายถึง เสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก A หมายถึง ประเภทของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง และ B หมายถึง ตำแหน่งการวางเหล็กเส้น



Strengthening with RB6, RB9, DB12 and DB16

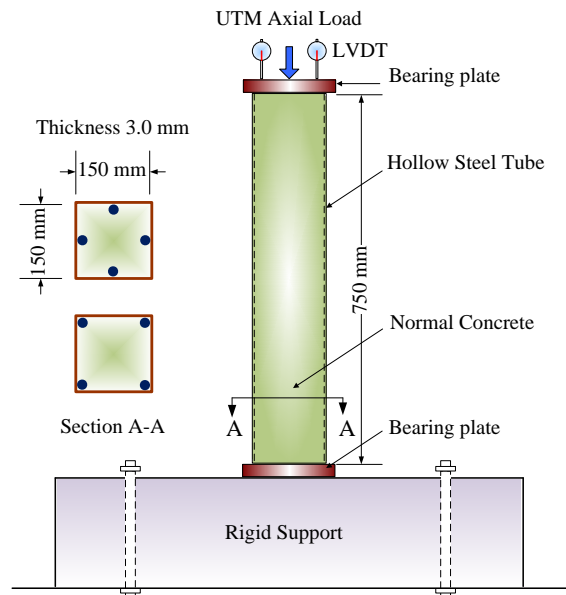
รูปที่ 1 แบบรายละเอียดของตัวอย่างเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีต



รูปที่ 2 ตำแหน่งการเสริมเหล็กเส้น

2.3 วิธีการทดสอบ

เริ่มต้นการทดสอบด้วยการติดตั้งตัวอย่างเสาเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 3 ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกรองโดยแผ่นเหล็กหนา 50 mm จากนั้นติดตั้ง Displacement Transducer จำนวน 2 ตัว ที่ด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะหดตัวเฉลี่ยของตัวอย่างเสาภายใต้แรงกระทำ ลักษณะการให้แรงอัดกระทำต่อเสาเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวอย่างเสา เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ครบถ้วน เริ่ม Pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังรับแรงอัดปลายคอนกรีตเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสา [23] จากนั้น เริ่มทดสอบโดยเพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องที่อัตรา 1 mm/min [27] และเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบโดย KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition Unit จนกระทั่งตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติหรือหยุดทดสอบที่ระยะหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดในแนวแกน

3. ผลทดสอบและอภิปรายผล

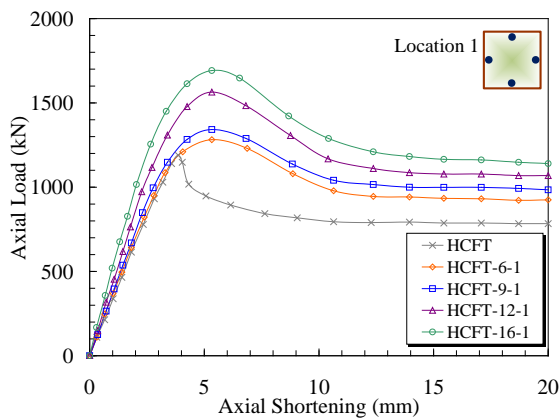
3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของตัวอย่าง

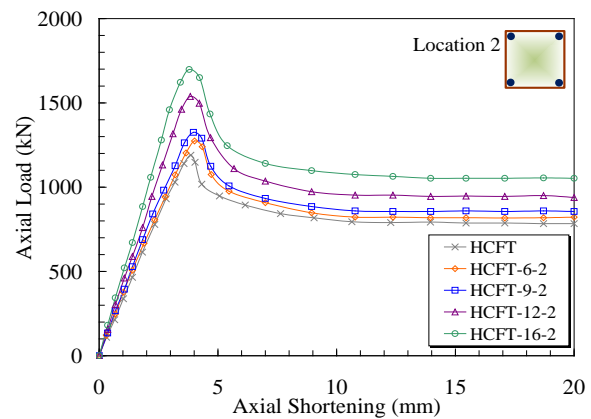
เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) แสดงดังรูปที่ 4(a) และรูปที่ 4(b) ตามลำดับ การแสดงผลทดสอบจำกัดที่ค่าการหดตัวเท่ากับ 20 mm หรือความเครียดในแนวแกน (Axial strain) ของตัวอย่างเสาเท่ากับ 0.027 mm/mm ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าความเครียดอัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้ให้นิยามแรงอัดสูงสุด (Maximum axial load) ที่ได้จากการทดสอบ (P_u) เป็นแรงอัดที่เกิดขึ้นในเสาโดยปราศจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก [8]

จากพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นในรูปที่ 4 พบว่า พฤติกรรมรับแรงในช่วงเริ่มต้นของตัวอย่างเสา HCFT ทั้งหมดมีความใกล้เคียงกัน ช่วงแรกพฤติกรรมของเสามีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 70–80% ของแรงอัดสูงสุด และพบว่า ค่าความชันเส้นกราฟมีค่าแตกต่างกัน

กันขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเป็นหลัก โดยเสาที่มีปริมาณของเหล็กเส้นมากที่สุดจะมีความชันสูงสุดและไล่เรียงลำดับลงไปยังเสาที่มีปริมาณของเหล็กเส้นน้อยที่สุด จากนั้น พฤติกรรมของเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-cracking) ในเนื้อคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวด้านข้างเพิ่มขึ้น [13] จากนั้น ความชันของเส้นกราฟเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากการอัดแตกของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะของเหล็กเสริมและผนังท่อเหล็ก [7] และพฤติกรรมของตัวอย่างเสาจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนถึงจุดวิบัติของเสา โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างเสามีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยเสาสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้น เสาจะมีความสามารถในการรับแรงและความแกร่งลดลง (degrading stiffness) [8],[14] อย่างรวดเร็วด้วยผลของการเกิดการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็กที่เพิ่มมากขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา HCFT ที่เสริมกำลังโดยเหล็กเส้น (a) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 (b) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5 จากการสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึง

กัน โดยเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) และมีระยะหดตัวในแนวแกนที่จุดวิบัติเกิน 50 mm แสดงให้เห็นว่าเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นมีความเหนียวในแนวแกนสูง [13] รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก โดยสามารถเห็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กได้ชัดเจนหลังจาก

จุดที่แรงอัดมีค่าสูงสุด [8] นอกจากนี้ เสา HCFT เสริมกำลัง โดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 เกิดการ โกงเดาะของผนังท่อ เหล็กอยู่ในบริเวณที่ต่ำกว่าเสา HCFT เสริมกำลัง โดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 เล็กน้อยเนื่องจากการเชื่อมเหล็กเส้น

ที่บริเวณกึ่งกลางภายในผนังท่อเหล็กแต่ละด้าน (ตำแหน่ง ที่ 1) ส่งผลให้ผนังท่อเหล็กบริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรง (Stiffness) สูงกว่าการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายใน ของท่อเหล็กทั้งสองด้าน (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของเสา HCFT

3.2 แรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงอัดสูงสุด (Maximum axial load) ของเสา HCFT ที่ได้จากการทดสอบ (P_u) จากตารางพบว่า เมื่อเสา HCFT เสริมกำลัง โดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงขึ้น ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้น สำหรับการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลัง (เสา HCFT อังอิง) อยู่ในช่วงประมาณ 9–44% และการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลังอยู่ในช่วงประมาณ 7–43% ดังนั้น การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ช่วยเพิ่มแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT ได้อย่างมีนัยยะสำคัญ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันพบว่า การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น ตัวอย่าง HCFT-12-1 และตัวอย่าง HCFT-12-2 สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เท่ากับ 1,550 kN และ 1,539 kN ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาดัชนีความเหนียว (Ductility index, DI) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ระบุความเหนียวของ โครงสร้างภายใต้แรงกระทำ โดยดัชนีความเหนียวสามารถคำนวณจากสมการที่ (1)

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

โดยที่ Δ_{max} คือ อัตราส่วนระหว่างระยะหดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 85% หลังจากแรงอัดสูงสุด และ Δ_y คือ ระยะหดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 75% ของแรงอัดสูงสุด [28] (สามารถหาค่าดังกล่าวได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในรูปที่ 4) ยกตัวอย่างการคำนวณดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ HCFT-12-1 สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วน Δ_{max}/Δ_y มีค่าเท่ากับ $8.76/2.72 = 3.22$ เป็นต้น

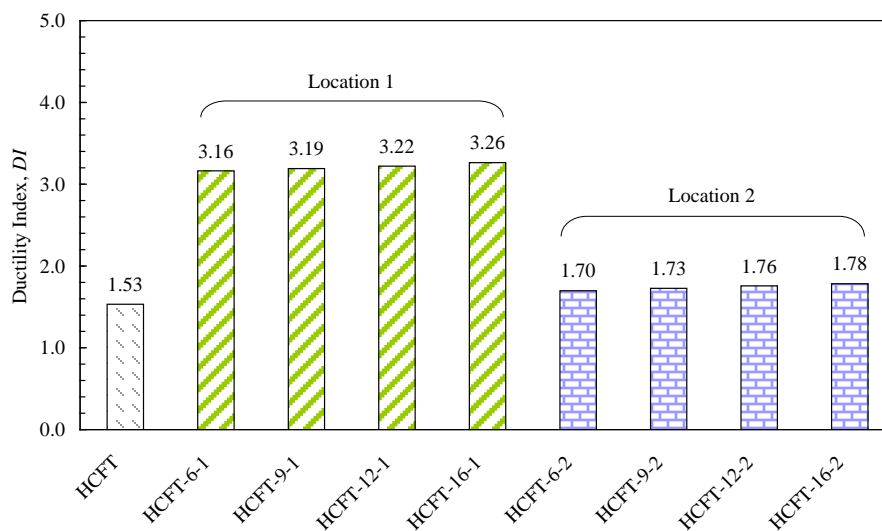
จากรูปที่ 6 พบว่า เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 มีดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 3.16 ถึง 3.26 และมีค่าสูงกว่าดัชนีความเหนียวของเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลัง (เสา HCFT อังอิง) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.53 อย่างไรก็ตาม เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีดัชนี

ความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.70 ถึง 1.78 และโดยมีค่าสูงกว่าดัชนีความเหนียวของเสา HCFT อ้างอิงไม่มากนัก ดังนั้นการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวให้แก่เสา HCFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 เนื่องจากการเสริมเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางภายในผนังท่อเหล็กแต่ละด้าน

(ตำแหน่งที่ 1) ช่วยเพิ่มความแกร่งและความสามารถด้านทานการโก่งเดาะบริเวณกึ่งกลางของผนังท่อกว่าเหล็กมากกว่าการเสริมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็กทั้งสองด้าน (ตำแหน่งที่ 2) นอกจากนี้ พบว่าประเภทของเหล็กข้ออ้อย (DB12 และ DB16) และเหล็กเส้นกลม (RB6 และ RB9) ยังแสดงค่าดัชนีความเหนียวของเสาที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว

Group	Specimen	Type	Diameter of steel bar (mm)	Location	Maximum Axial Load		Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)
					P_u (kN)	Increase (%)		
1	HCFT	-	-	-	1,182	-	2.82	4.32
2	HCFT-6-1	RB6	6	1	1,286	9	2.80	8.86
	HCFT-9-1	RB9	9	1	1,333	13	2.77	8.84
	HCFT-12-1	DB12	12	1	1,550	31	2.72	8.76
	HCFT-16-1	DB16	16	1	1,698	44	2.66	8.68
3	HCFT-6-2	RB6	6	2	1,270	7	2.78	4.72
	HCFT-9-2	RB9	9	2	1,320	12	2.72	4.70
	HCFT-12-2	DB12	12	2	1,539	30	2.67	4.69
	HCFT-16-2	DB16	16	2	1,686	43	2.62	4.67



รูปที่ 6 ดัชนีความเหนียวของเสา HCFT

3.3 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับมาตรฐานออกแบบ

สมมติฐานเบื้องต้นกำหนดให้เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นเกิดปฏิสัมพันธ์เต็มรูปแบบ (Full interaction) ระหว่างแกนคอนกรีต เหล็กเส้น และท่อเหล็กภายใต้

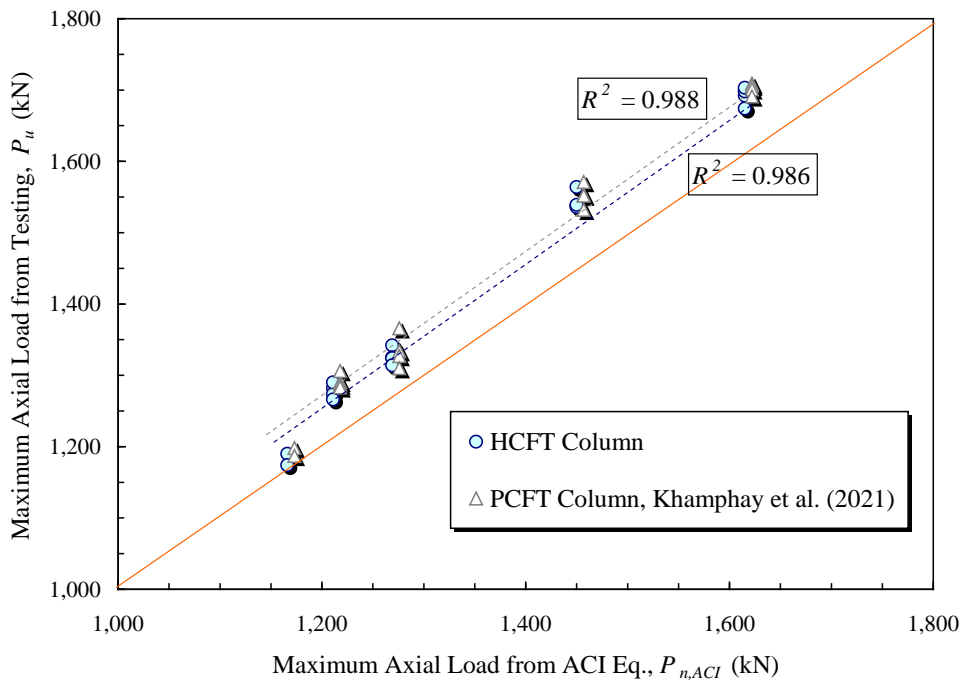
แรงอัด โดยเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT ที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานการออกแบบเสาของ ACI 318 [29] แรงอัดสูงสุดของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นสามารถหาจากสมการที่ (2)

$$P_{n,ACI} = 0.85f'_c A_c + f_{y,st}A_{st} + f_{y,sb}A_{sb} \quad (2)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต $f_{y,st}$ และ $f_{y,sb}$ คือ กำลังครากของท่อเหล็กและเหล็กเส้นตามลำดับ A_{st} และ A_{sb} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กและเหล็กเส้น ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_u) กับแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI ($P_{n,ACI}$) ของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้น จากรูปพบว่า เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้น

ตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่าแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI อยู่ในช่วงระหว่าง 5–7% และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่าแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI อยู่ในช่วงระหว่าง 4–6% ซึ่งในทั้งสองกรณีนี้เกิดจากผลของการโอบรัดของท่อเหล็กที่มีต่อแกนคอนกรีตเป็นหลัก [13],[28] ดังนั้น จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสมการออกแบบเสาของ ACI สามารถใช้ประเมินแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นได้อย่างถูกต้องภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา [30]



รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบกับสมการออกแบบของ ACI

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นและเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (เสา PCFT) เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นจากผลการศึกษาของ Khamphay et al. [27] พบว่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_u) และแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ ACI ($P_{n,ACI}$) ของวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิดมีความสอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้น จากประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอ

ลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

4. สรุปผล

1) พฤติกรรมรับแรงในช่วงเริ่มต้นของตัวอย่างเสา HCFT มีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 70–80% ของแรงอัดสูงสุด และความชันเส้นกราฟมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับปริมาณของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเป็นหลัก จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างเสาจะ

เปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างเสามีลักษณะแบบ Strain-Softening

2) ลักษณะการวิบัติของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อนเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อนเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดการวิบัติโดยการ โกงงเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อนเหล็ก

3) เมื่อเหล็กเส้นที่เสริมกำลังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น ส่งผลให้เสา HCFT สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้นและมีความแกร่งในช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นสูงขึ้น

4) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของเสา HCFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2

5) การนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานของคอนกรีตในการก่อสร้างเสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FRB650059-NMA-22

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Thumrongvut, S. Seangatith, C. Phetchuay and C. Suksiripattanapong, "Comparative Experimental Study of Sustainable Reinforced Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete Beams Using Rice Husk Ash," *Sustainability*, vol. 14, no. 16, 2022, Art. no. 9856, doi: 10.3390/su14169856.
- [2] Y. Chen, G. E. Okudan and D. R. Riley, "Sustainable Performance Criteria for Construction Method

Selection in Concrete Buildings," *Automation in Construction*, vol. 19, no. 2, pp. 235–244, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.10.004.

- [3] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumluue, "Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints," *RMUTI Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 15–30, 2013. (in Thai)
- [4] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumluue, "Effects of Flexural Strengthening With Non-Prestressed Wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams," *RMUTI Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 16–33, 2014. (in Thai)
- [5] J. Cai and Z. -Q. He, "Axial Load Behavior of Square CFT Stub Column with Binding Bars," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 5, pp. 472–483, 2006, doi: 10.1016/j.jcsr.2005.09.010.
- [6] W. -H. Wang, L. -H. Han, W. Li and T. -H. Jia, "Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Stub Columns and Beams Using Dune Sand as Part of Fine Aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 352–363, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.049.
- [7] F. -X. Ding, J. Liu, X. -M. Liu, Z. -W. Yu and D. -W. Li, "Mechanical Behavior of Circular and Square Concrete Filled Steel Tube Stub Columns under Local Compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 94, pp. 155–166, 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.04.020.
- [8] 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, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2417.
- [9] L. -H. Han, W. Li and R. Bjorhovde, "Developments and Advanced Applications of Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Structures: Members," *Journal of*

- Constructional Steel Research*, vol. 100, pp. 211–228, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016.
- [10] S. Zhang and J. Liu, “Seismic Behavior and Strength of Square Tube Confined Reinforced-Concrete (STRC) Columns,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, no. 9, pp. 1194–1207, 2007, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.11.017.
- [11] J. Thumrongvut, A. Tipcharoen and K. Prathumwong, “Post-Fire Performance of Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Uni-Axial Load,” *Materials Science Forum*, vol. 1016, pp. 618–623, 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.618.
- [12] M. M. Lazovic Radovanovic, J. Z. Nikolic, J. R. Radovanovic and S. M. Kostic, “Structural Behaviour of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tube Columns during the Top-Down Construction Method,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 8, 2022, Art. no. 3771, doi: 10.3390/app12083771.
- [13] S. Seangatith and J. Thumrongvut, “Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns under Axial Compression,” *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 205–220, 2009.
- [14] J. Thumrongvut, S. Seangatith, T. Siriparinyanan and S. Wangrakklang, “An Experimental Behaviour of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Square Tube Columns under Axial Compression,” *Materials Science Forum*, vol. 860, pp. 121–124, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.860.121.
- [15] B. Uy, “Stability and Ductility of High Performance Steel Sections With Concrete Infill,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 7–8, pp. 748–754, 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.01.036.
- [16] S. Xu, C. Wu, Z. Liu and R. Shao, “Experimental Investigation on the Cyclic Behaviors of Ultra-High-Performance Steel Fiber Reinforced Concrete Filled Thin-Walled Steel Tubular Columns,” *Thin-Walled Structures*, vol. 140, pp. 1–20, 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.03.008.
- [17] G. Giakoumelis and D. Lam, “Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 7, pp. 1049–1068, 2004, doi: 10.1016/j.jcsr.2003.10.001.
- [18] N. Joysoongnoen, J. Thumrongvut, T. Sawang-ngam, S. Detphan and J. Supromwan, “Experimental Behavior of High-Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Various Load Application,” *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 15–23, 2021. (in Thai)
- [19] A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo and C. Lopez-Hombrados, “Engineering Properties of Alkali Activated Fly Ash Concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 2, pp. 106–112, 2006.
- [20] L. F. Ferreira, H. S. Costa, I. I. Barata, E. N. Santos Julio, P. M. Tiago and J. F. Coelho, “Precast Alkali-Activated Concrete towards Sustainable Construction,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 66, no. 12, pp. 618–626, 2014, doi: 10.1680/macr.13.00091.
- [21] M. Sanchaiwut, J. Thumrongvut, S. Pantawee and S. Seangatith, “Effects of Substitution of Fine Aggregate With Recycled Asphalt Pavement on Compressive Strength of Normal Concrete,” *Key Engineering Materials*, vol. 922, pp. 163–168, 2022, doi: 10.4028/p-5h70w4.
- [22] A. R. Mazumdar and T. Pheeraphan, “Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland cement (TIS 15),” *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2021.

- [23] N. Bokkhunthod, J. Thumrongvut, J. Supromwan and S. Seangatith, "Experimental study of cellular lightweight concrete-filled steel tube columns using hydraulic cement," *Key Engineering Materials*, vol. 922, pp. 147–152, 2022, doi: 10.4028/p-3zquh9.
- [24] *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
- [25] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen*, ASTM C39-18, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [26] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [27] P. Khamphay, J. Thumrongvut, N. Joysoongnoen, W. Jiammeepreecha and K. Chaidachatorn, "Strengthening of square concrete-filled steel tube column with steel bars under uni-axial load," *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no 1, pp. 7–14, 2021. (in Thai)
- [28] Z. Yang and C. Xu, "Research on compression behavior of square thin-walled CFST columns with steel-bar stiffeners," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, 2018, Art. no. 1602, doi: 10.3390/app8091602.
- [29] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI CODE-318-11: American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2011.
- [30] F. Aslani, B. Uy, Z. Tao and F. Mashiri, "Predicting the Axial Load Capacity of High-Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 967–993, 2015, doi: 10.12989/scs.2015.19.4.967.