

พฤติกรรมและกำลังของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

Behavior and Strength of Circular Hydraulic Cement Concrete-Filled Steel Tube Columns

นำชัย จ้อยสูงเนิน¹ จักษดา ชำรงวุฒิ^{1*} เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์²

Namchai Joysoongnern¹, Jaksada Thumrongvut^{1*}, Cherdsak Suksiripattanapong¹ and Sittichai Seangatith²

Received: 30 January 2021, Revised: 10 January 2022, Accepted: 17 January 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HCFT column) ภายใต้แรงอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสาที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสมการฯ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง โดยเป็นเสาหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และสูง 750 mm ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ถูกใช้ในการผลิตคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัย 18 MPa จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการรับแรงของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีลักษณะเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด จากนั้น ตัวอย่างเสาจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นนี้ถูกจำแนกเป็นแบบ Strain-Softening โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการแตกร้าวของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก นอกจากนี้ พบว่าสมการออกแบบเสาของ AISC-LRFD มีความน่าเชื่อถือเพียงพอในการประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สุดท้าย จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตพบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, ท่อเหล็กหน้าตัดกลม, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงอัดในแนวแกน

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): jaksada.th@rmu.ac.th Tel: 08 1548 4799

ABSTRACT

This paper aimed to study the axial load behaviors and failure modes of circular hydraulic cement concrete-filled steel tube columns (HCFT column) under concentrically axial load and to compare the maximum compressive loads obtained from the experiment with those calculated by using the AISC-LRFD composite column design equations in order to check the adequacy of the equation. In this study, a total of 24 circular column specimens was tested. The dimension of the specimens is 150 mm in diameter and 750 mm in height. Two different cement types, hydraulic cement (HC) and ordinary Portland cement (OPC), were used to produce the concrete with the targeted ultimate compressive strength of 18 MPa. From the tests, it was found that the HCFT columns had a linear elastic behavior up to approximately 80-90% of their maximum compressive loads. After that, the behavior of the columns was nonlinear until their failure. This nonlinear behavior can be classified as the strain-softening type. The mode of failure of the HCFT columns was in a form of cracking and crushing of the concrete core and local buckling of the hollow steel tube. Additionally, it was found that the AISC-LRFD composite column design equation is reliable for estimating the maximum compressive load of the HCFT columns. Finally, by comparing the efficiency of the hydraulic cement versus the ordinary Portland cement for the concrete-filled steel tube column used in this study, it can be concluded that the hydraulic cement can be used as a substitute material for the ordinary Portland cement.

Key words: concrete-filled tube column, circular steel tubular, hydraulic cement, axial compression

บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place construction system) เป็นระบบที่มักใช้ระยะเวลาดำเนินงานค่อนข้างมาก ส่งผลให้ต้นทุนก่อสร้างมีราคาสูง ดังนั้น การพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (fabrication) หรือแบบกึ่งสำเร็จรูป (pre-fabrication) จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง (Thumrongvut *et al.*, 2022) เนื่องจากประสิทธิภาพการดำเนินงานที่รวดเร็วและสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนได้ดีกว่าระบบเดิม (Yang *et al.*, 2016) อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการขาดแคลนแรงงานในการก่อสร้างลงได้มาก ตัวอย่างเช่น การใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อ

ดังกล่าวออก เช่น การใช้ท่อเหล็กกลวง (hollow steel tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา ดังแสดงในงานวิจัยของ Uy (2001), Huang *et al.* (2002), Hanand Yao (2003), Giakoumelis and Lam (2004), Thumrongvut and Tiwjantuk (2018), Joysoongnoen *et al.* (2021), Khamphay *et al.* (2021) ปัจจุบันเสาเชิงประกอบ เช่น เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled tube (CFT) column) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีข้อดีที่สำคัญคือ ช่วยให้การก่อสร้างมีความรวดเร็ว โครงสร้างมีความสวยงามโดยใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวร (Mursi and Uy, 2003; Eid and Dancygier, 2006; Zhang and Liu, 2007; Thumrongvut *et al.*, 2016, Thumrongvut *et al.*, 2021) และท่อเหล็กดังกล่าวยังทำงานร่วมกับแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริม

เหล็กในการรับแรงกระทำโดยอาศัย composite action ส่งผลให้เสามีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Seangatith and Thumrongvut, 2009; Ding *et al.*, 2016) นอกจากนี้ composite action ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติ (Boyd *et al.*, 1995; Nakanishi *et al.*, 1999; Ji *et al.*, 2013) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมอย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหว (Elremaily and Azizinamini, 2002; Han *et al.*, 2003)

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมักถูกผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยผลกระทบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมาก (Fernandez-Jimenez *et al.*, 2006) และก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) โดยปริมาณของการปล่อย CO_2 จำนวน 1 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์ในแต่ละตัน ซึ่งมากกว่าร้อยละ 5 ของการอุตสาหกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก (Ferreira *et al.*, 2014) ดังนั้น การเปลี่ยนมาใช้วัสดุเชื่อมประสานทางเลือกใหม่ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ น่าจะเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถลดปัญหาการปล่อย CO_2 และสภาวะเรือนกระจก (Bilodeau and Malhotra, 2000) ซึ่งหนึ่งในวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาทดแทนคือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้งานทั่วไป (GU) มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 (Thai Industrial Standard, 2013)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบจากปูนเม็ด (clinker) เถ้าลอย (fly ash) และหินปูน (limestone)

เป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีจุดเด่นคือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mazumdar and Pheeraphan, 2021) รวมถึงใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (eco product) ที่ผ่านงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในชิ้นส่วนโครงสร้างยังไม่มีมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยส่งเสริมให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดและการประเมินกำลังของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตลอดจนส่งเสริมชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ยกกระดับคุณภาพชีวิตให้กับผู้ใช้งาน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (คู่เทียบ) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย (ultimate compressive strength) เท่ากับ 18 MPa (ประมาณ 180 kg/cm^2) จากการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตสามารถสรุปส่วนผสมตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่อปริมาตร 1 m^3 ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Type of Cement	f'_c (MPa)	Cement (kg)	Water (kg)	Fine Aggregate (kg)	Coarse Aggregate (kg)	w/c Ratio
Hydraulic Cement	18	304	232	944	744	0.76
Portland Cement	18	304	232	944	744	0.76

2. การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์เป็นปูนซีเมนต์ประเภทใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 MPa (ประมาณ 180 kg/cm²) ซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดประลัยในช่วงใช้งานสำหรับอาคารโดยทั่วไป ท่อเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นท่อเหล็กหน้าตัดกลมตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก. 107-2561 (Thai Industrial Standard, 2018) ที่มีความหนาเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm แกนคอนกรีต (concrete core) ในเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตถูก

แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แกนคอนกรีตส่วนและแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กข้ออ้อย DB12 (SD40) และเหล็กกลม RB9 (SR24) ถูกใช้เป็นเหล็กเสริมหลัก (เหล็กยื่น) และเหล็กปลอก ตามลำดับ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกระทำตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM C39, 2018) และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กและเหล็กเสริมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 (ASTM E8, 2016) โดยคุณสมบัติทางกลเฉลี่ยของคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กเสริม แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	t (mm)	Concrete		Steel Tube		Steel Bar		Number
		A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	A_{st} (mm ²)	f_{yst} (MPa)	A_{sr} (mm ²)	f_{ysr} (MPa)	
HCFT-18-3.0-N	3.0	19,607	20.2	1,529	370.2	-	-	2
HCFT-18-4.5-N	4.5	19,483	20.2	2,272	347.5	-	-	2
HCFT-18-6.0-N	6.0	18,942	20.2	3,001	366.7	-	-	2
HCFT-18-3.0-R	3.0	19,607	20.2	1,529	370.2	452.4	561.7	2
HCFT-18-4.5-R	4.5	19,483	20.2	2,272	347.5	452.4	561.7	2
HCFT-18-6.0-R	6.0	18,942	20.2	3,001	366.7	452.4	561.7	2
PCFT-18-3.0-N	3.0	19,607	20.5	1,529	370.2	-	-	2
PCFT-18-4.5-N	4.5	19,483	20.5	2,272	347.5	-	-	2
PCFT-18-6.0-N	6.0	18,942	20.5	3,001	366.7	-	-	2
PCFT-18-3.0-R	3.0	19,607	20.5	1,529	370.2	452.4	561.7	2
PCFT-18-4.5-R	4.5	19,483	20.5	2,272	347.5	452.4	561.7	2
PCFT-18-6.0-R	6.0	18,942	20.5	3,001	366.7	452.4	561.7	2

3. ตัวอย่างทดสอบ

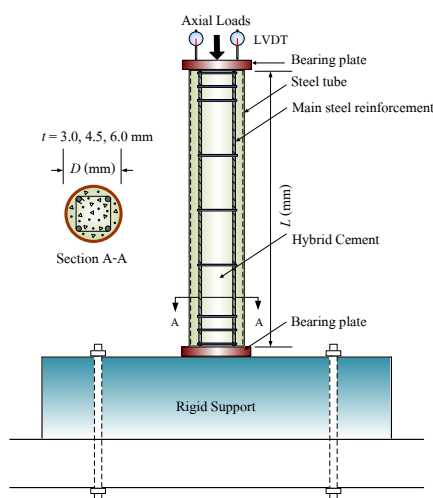
ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นเสาสั้นหน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 mm ความสูง 750 mm อัตราส่วนของความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 5.0 โดยตัวอย่างเสาถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม แยกตามประเภทของวัสดุเชื่อมประสาน โดยกลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และกลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีความหนา (t) ของท่อเหล็ก 3 ค่า ได้แก่ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 24 ตัวอย่าง โดยชื่อตัวอย่างทดสอบถูกนำเสนอดังตารางที่ 2 ทั้งนี้สัญลักษณ์ของตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป W-X-Y-Z โดย W หมายถึง ประเภทของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต ได้แก่ HCFT และ PCFT เป็นสัญลักษณ์แทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตามลำดับ X หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) ในหน่วย MPa และ Y แทนความหนาของท่อเหล็กในหน่วย mm

สุดท้าย Z หมายถึง ลักษณะของแกนคอนกรีตของเสาท่อเหล็ก ซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ N

และ R เป็นสัญลักษณ์แทน แกนคอนกรีตล้วน และ แกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามลำดับ

4. การทดสอบเสาตัวอย่าง

การทดสอบเริ่มต้นจากการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) ขนาด 2,000 kN ดังแสดงในภาพที่ 1 ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างเสารองรับโดยแผ่นเหล็กหนาเท่ากับ 50 mm จากนั้นติดตั้ง Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบเพื่อวัดระยะการหดตัวเฉลี่ยของเสา ลักษณะการให้แรงอัดกระทำต่อเสาเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (entire section) ของตัวอย่างทดสอบ จากนั้น เริ่มทำการ pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังรับแรงอัดประลัยคอนกรีต เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสา จากนั้น ทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 mm/min และใช้ KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition Unit เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่ง ตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์หรือหยุดการทดสอบที่ค่าการหดตัว 50 mm



ภาพที่ 1 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเสา

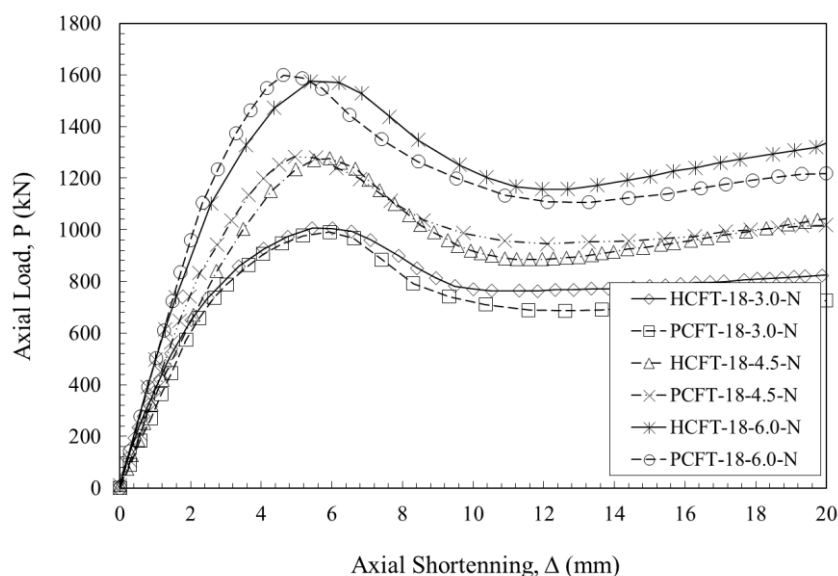
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน

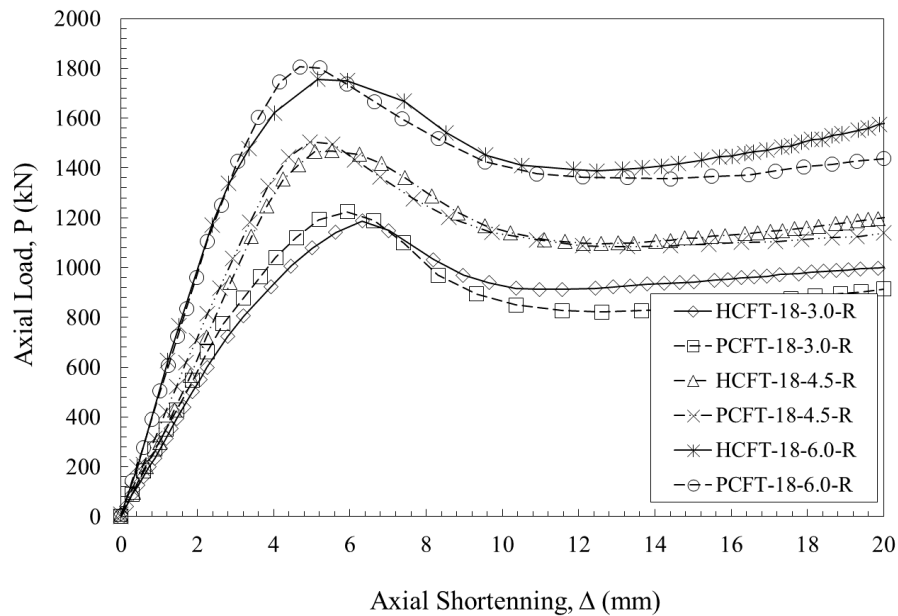
ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT โดยจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวเท่ากับ 20 mm หรือที่ Axial strain ในคอนกรีตเท่ากับ 0.0267 mm/mm (2.67%) ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่าความเครียดอัดประลัย (ultimate compressive strain) ของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า และนิยามให้ค่าแรงอัดสูงสุด (maximum load) ที่ได้จากการทดสอบ (P_{test}) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในเสาโดยปราศจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของผนังท่อเหล็ก

จากพฤติกรรมการรับแรงอัดของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (กระทำผ่านแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก) ในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 พบว่า พฤติกรรมรับแรงของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ทั้งหมดมีความใกล้เคียงกัน โดยช่วงแรกพฤติกรรมของเสามีลักษณะเชิงเส้นตรง

(linear) จนกระทั่งถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด และเห็นได้ว่าความชันเส้นกราฟของเสามีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็ก จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (micro-cracking) ในเนื้อคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจากผลของ Poisson's Effect หลังจากนั้น ความชันของเส้นกราฟเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากการอัดแตก (crushing) ของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก (Ding *et al.*, 2016) และพฤติกรรมของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้น จนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมในช่วงแบบไร้เชิงเส้นตรงของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT มีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยที่เสาจะสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้นเสาจะมีความแข็งแรงลดลง (degrading stiffness) (Thumrongvut *et al.*, 2016)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวภายใต้แรงอัดในแนวแกนของเสา HCFT และเสา PCFT (แกนคอนกรีตล้วน)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวภายใต้แรงอัดในแนวแกนของเสา HCFT และเสา PCFT (แกนคอนกรีตเสริมเหล็ก)

2. ลักษณะการวิบัติ

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาที่ได้จากการทดสอบ โดยภาพที่ 4(a) ถึงภาพที่ 4(c) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ และภาพที่ 4(d) ถึงภาพที่ 4(f) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา PCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ จากการสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างเสาทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยทุกตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) และมีค่าการหดตัวในแนวแกนที่จุดวิบัติเกินกว่า 50 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.0667 mm/mm (6.67%) แสดงให้เห็นว่าเสา HCFT และเสา PCFT เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกนสูง (Seangatith

and Thumrongvut, 2009) นอกจากนี้ รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ (โป่งออก) ของผนังท่อนเหล็กที่กึ่งกลางเสาหรือบริเวณใกล้เคียง โดยสามารถเห็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อนเหล็กได้ชัดเจนหลังจากจุดที่แรงอัดมีค่าสูงสุด (Ding *et al.*, 2016; Thumrongvut and Tiwajantuk, 2018) นอกจากนี้ ความหนาของท่อนเหล็กเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อแรงอัดสูงสุดและการเสียรูปของท่อนเหล็กภายใต้แรงอัดโดยตรง ท่อนเหล็กที่มีความหนาบาง (3.0 mm) จะมีความแข็งแรง (stiffness) ของผนังท่อนเหล็กต่ำกว่าท่อนเหล็กที่มีความหนาสูง (6.0 mm) ดังนั้นจึงส่งผลให้ท่อนเหล็กที่มีความหนาบางกว่ามีอัตราการเสียรูปของท่อนเหล็กมากกว่าท่อนเหล็กที่มีความหนาสูง (Khamphay *et al.*, 2021)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT

(a), (b) และ (c) เป็นเสา HCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm และ

(d), (e) และ (f) เป็นเสา PCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ

3. การเปรียบเทียบกำลังของเสา HCFT และเสา PCFT กับสมการของ AISC-LRFD

ในการออกแบบเสาเชิงประกอบของ American Institute of Steel and Construction (AISC) (2010) โดยวิธี Load and Resistant Factor Design

(LRFD) ถือเป็นข้อกำหนดที่นิยมสำหรับใช้ในการออกแบบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต โดยสมการแรงอัดในแนวแกนระบุของหน้าตัด (P_{no}) อยู่ในรูปของสมการที่ (1)

$$P_{no} = A_{st}F_{yst} + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_{sr}}{E_c} \right) \quad (1)$$

โดยที่ A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก F_{yst} คือ หน่วยแรงคราก (yielding stress) ของท่อ

เหล็ก C_2 คือ ค่าคงที่สำหรับท่อเหล็กหน้าตัดกลม เท่ากับ 0.95 f'_c คือ กำลังรับแรงอัดประลัยของ

คอนกรีต A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต A_{sr} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม E_{sr} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม และ E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และความแข็งแรงประสิทธิภาพ

(effective stiffness) ของหน้าตัดเสาต่อเหล็กเชิงประกอบ (EI_{eff}) อยู่ในรูปของสมการที่ (2)

$$EI_{eff} = E_{st}I_{st} + E_{sr}I_{sr} + C_3E_cI_c \quad (2)$$

เมื่อ C_3 คือสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณความแข็งแรงประสิทธิภาพของหน้าตัด สามารถคำนวณจากสมการที่ (3)

$$C_3 = 0.6 + 2 \left(\frac{A_{st}}{A_c + A_{st}} \right) \leq 0.9 \quad (3)$$

โดยที่ E_{st} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของท่อเหล็ก I_{st} คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของท่อเหล็ก I_{sr} คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กเสริม และ I_c คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของคอนกรีต

สุดท้าย AISC-LRFD ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณแรงอัดในแนวแกนระบุ (nominal compressive strength, $P_{n,LRFD}$) ของเสาเชิงประกอบอยู่ในรูปของสมการที่ (4)

$$P_{n,LRFD} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} \quad (4)$$

โดยที่ $P_e = \pi^2 EI_{eff} / (KL)^2$ เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพของเสา และ L คือความยาวของเสา

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ที่ทดสอบได้ (P_{test}) และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD ($P_{n,LRFD}$) จากตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่างเสา HCFT มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบของ AISC-LRFD ($P_{test} / P_{n,LRFD}$) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.07-1.19 โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.00 ซึ่งผลของแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าสมการออกแบบของ AISC-LRFD ประมาณ 7-19% สอดคล้องกับผลการทดสอบเสา PCFT

ที่มีอัตราส่วน $P_{test} / P_{n,LRFD}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 1.08-1.25 จากการเปรียบเทียบภายใต้ขอบเขตของการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่า สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD สามารถประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างถูกต้อง โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 11.8% และ 15.7% สำหรับเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามลำดับ สุดท้าย จากประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีต การนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับคอนกรีตจะเป็นทางเลือกในการก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

ตารางที่ 3 แรงอัดสูงสุดของเสา HCFT และเสา PCFT จากการทดสอบและสมการออกแบบ ASIC-LRFD

Specimen	Type of Cement	t (mm)	Concrete Core	P_{test} (kN)	$P_{n,LRFD}$ (kN)	$P_{test} / P_{n,LRFD}$
HCFT-18-3.0-N	Hydraulic	3.0	Concrete	988.1	925.2	1.07
HCFT-18-4.5-N	Hydraulic	4.5	Concrete	1,248.4	1,146.2	1.09
HCFT-18-6.0-N	Hydraulic	6.0	Concrete	1,549.8	1,443.6	1.07
HCFT-18-3.0-R	Hydraulic	3.0	Tied Column	1,155.8	1,004.7	1.15
HCFT-18-4.5-R	Hydraulic	4.5	Tied Column	1,460.9	1,225.9	1.19
HCFT-18-6.0-R	Hydraulic	6.0	Tied Column	1,740.4	1,523.5	1.14
PCFT-18-3.0-N	Portland	3.0	Concrete	1,001.9	925.2	1.08
PCFT-18-4.5-N	Portland	4.5	Concrete	1,250.6	1,146.2	1.09
PCFT-18-6.0-N	Portland	6.0	Concrete	1,590.4	1,443.6	1.10
PCFT-18-3.0-R	Portland	3.0	Tied Column	1,246.3	1,004.7	1.24
PCFT-18-4.5-R	Portland	4.5	Tied Column	1,526.4	1,225.9	1.25
PCFT-18-6.0-R	Portland	6.0	Tied Column	1,795.4	1,523.5	1.18

สรุป

จากการศึกษาเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีลักษณะเป็นเสาสั้นครั้งนี้ พบข้อสรุปที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) พฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะการรับแรงแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด และมีพฤติกรรมในช่วงที่สองแบบไร้เชิงเส้นแบบ Strain-softening โดยที่เสาสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้น เสาจะมีกำลังและความแกร่งลดลง

2) การวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสาเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการหดตัวในแนวแกนมากกว่า 50 mm ส่งผลให้เสามีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใน

แนวแกนที่สูง การวิบัติเกิดขึ้นโดยการโป่งออกในรูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก โดยท่อเหล็กและการเสริมเหล็กในแนวแกนสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวให้แก่เสาได้ค่อนข้างสูง

3) การเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเสาที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD พบว่า สมการออกแบบของ AISC-LRFD สามารถประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างเหมาะสมในการใช้งาน โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 11.8% และ 15.7% ตามลำดับ

4) ผลที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานของคอนกรีตในการก่อสร้างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทดแทนการใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการนำปูนซีเมนต์ไฮ

ครอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงาน
โครงสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและ
นวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ
บริษัท โอเคเค เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด
โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม
(พวอ.) ระดับปริญญาโท: NRCT5-RR163008-M16
และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสานที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- American Institute of Steel and Construction (AISC).
2010. ANSI/AISC 360-10 Specification for
Structural Steel Buildings. AISC, Chicago,
Illinois.
- ASTM C39. 2018. ASTM C39 Standard Test Method
for Compressive Strength of Cylindrical
Concrete Specimens. Annual Book of ASTM
Standard, American Society for Testing and
Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM E8. 2016. Standard Test Methods for Tension
Testing of Metallic Materials. Annual Book
of ASTM Standard, American Society for
Testing and Materials, West Conshohocken,
PA, USA.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. 2000. High-volume
fly ash system: concrete solution for sustainable
development. **ACI Materials Journal** 97:
41-48.
- Boyd, F.P., Cofer, W.F. and McLean, D.I. 1995. Seismic
performance of steel-encased concrete columns
under flexural loading. **ACI Structural Journal**
92(3): 355-364.
- Ding, F., Li, Z., Cheng, S. and Yu, Z. 2016. Composite
action of octagonal concrete-filled steel tubular
stub columns under axial loading. **Thin-Walled
Structures** 107: 453-461.
- Eid, R. and Dancygier, A.N. 2006. Confinement
effectiveness in circular concrete columns.
Engineering Structures 28(13): 1885-1896.
- Elremaily, A. and Azizinamini, A. 2002. Behavior
and strength of circular concrete-filled tube
columns. **Journal of Constructional Steel
Research** 58: 1567-1591.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Lopez Hombrados,
C. 2006. Some engineering properties of
alkali activated fly ash concrete. **ACI Materials
Journal** 103(2): 106-112.
- Ferreira, L.F., Costa, H.S., Barata, I.I., Santos Julio, E.N.,
Tiago, P.M. and Coelho, J.F. 2014. Precast
alkali-activated concrete towards sustainable
construction. **Magazine of Concrete Research**
66(12): 618-626.
- Giakoumelis, G. and Lam, D. 2004. Axial capacity of
circular concrete-filled tube columns. **Journal
of Constructional Steel Research** 60(7):
1049-1068.
- Han, L.H. and Yao, G.H. 2003. Influence of concrete
compaction on the strength of concrete-filled
steel RHS columns. **Journal of Constructional
Steel Research** 59(6): 751-767.
- Han, L.H., Yang, Y.F. and Tao, Z. 2003. Concrete-
filled thin walled steel RHS beam-columns
subjected to cyclic loading. **Thin-walled
Structures** 41(9): 801-833.

- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., Wang, S.H. and Wu, M.H. 2002. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. **Journal Structural Engineering** 128(9): 1222-1230.
- Ji, X., Kang, H., Chen, X. and Qian, J. 2013. Seismic behavior and strength capacity of steel tube -reinforced concrete composite columns. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics** 43(4): 487-505.
- Joysoongnoen, N., Thumrongvut, J., Sawang-ngam, T., Detphan, S. and Supromwan, J. 2021. Experimental behavior of high-strength square concrete-filled steel tube columns under various load application. **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 15-23. (in Thai)
- Khamphay, P., Thumrongvut, J., Joysoongnoen, N., Jiammeepreecha, W. and Chaidachatorn, K. 2021. Strengthening of square concrete -filled steel tube column with steel bars under uni-axial load. **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 7-14. (in Thai)
- Mazumdar, A.R. and Pheeraphan, T. 2021. Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland cement (TIS 15). **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 1-6. (in Thai)
- Mursi, M. and Uy, B. 2003. Strength of concrete filled steel box columns incorporating interaction buckling. **Journal of Structural Engineering** 129(5): 626-639.
- Nakanishi, K., Kitada, T. and Nakai, H. 1999. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake. **Journal of Constructional Steel Research** 51(3): 297-319.
- Seangatith, S. and Thumrongvut, J. 2009. Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. **Suranaree Journal of Science and Technology** 16(3): 205-220.
- Thai Industrial Standard. 2013. Hydraulic cement (TIS 2594-2556). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. 2018. Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thumrongvut, J. and Tiwjantuk, P. 2018. Strength and axial behavior of cellular lightweight concrete -filled steel rectangular tube columns under axial compression. **Materials Science Forum** 941: 2417-2422.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C. and Suksiripattanapong, C. 2022. Comparative experimental study of sustainable reinforced Portland cement concrete and geopolymers concrete beams using rice husk ash. **Sustainability** 14(16): 9856.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S., Siriparinyanan, T. and Wangrakklang, S. 2016. An experimental behaviour of cellular lightweight concrete-filled steel square tube columns under axial compression. **Materials Science Forum** 860: 121-124.
- Thumrongvut, J., Tipcharoen, A. and Prathumwong, K. 2021. Post-fire performance of square concrete -filled steel tube columns under uni-axial

- load. **Materials Science Forum** 1016: 618-623.
- Uy, B. 2001. Strength of short concrete filled high strength steel box columns. **Journal of Constructional Steel Research** 57(2): 113-134.
- Yang, Z., Ma, Z. and Wu, S. 2016. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production. **Automation in Construction** 72: 321-329.
- Zhang, S. and Liu, J. 2007. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns. **Journal of Constructional Steel Research** 63(9): 1194-1207.