

ประสิทธิภาพแรงอัดในแนวแกนของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
กรอกคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Axial Compression Performance of Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Columns Using Environmentally Friendly Hydraulic Cement

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹ จักษดา อารังวุฒิ^{1*} จีระศักดิ์ สุพรหมวัน¹ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹ นำชัย จ้อยสูงเนิน¹
และวาริน ชุบขุนทด¹

Saksith Pantawee¹ Jaksada Thumrongvut^{1*} Jeerasak Supromwan¹
Cherdsak Suksiripattanapong¹ Namchai Joysoongnern¹ and Warin Chupkhunthod¹

Received: September 30, 2023; Revised: December 5, 2023; Accepted: December 7, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้เน้นศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้ากรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-CSFT) ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 36 ตัวอย่าง เป็นเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 150 x 75 mm และสูง 750 mm ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ประเภทของปูนซีเมนต์ ความหนาของท่อเหล็ก กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และอายุบ่มของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ 2 ประเภทที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ถูกใช้สำหรับกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ที่อายุบ่มของคอนกรีตเท่ากับ 28 และ 90 วัน และท่อเหล็กมี 3 ความหนา ได้แก่ 3.0 4.5 และ 6.0 mm การให้แรงอัดกระทำอย่างสม่ำเสมอต่อหน้าตัดทั้งหมดของเสา และทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติของเสา จากการทดสอบพบว่าเสา HC-CSFT แสดงพฤติกรรมการรับแรงในลักษณะเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด หลังจากนั้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ การแตกร้าวของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กเป็นรูปแบบการวิบัติของเสา HC-CSFT เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดสูงกว่าเสา

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author, Tel. 08 1548 4799, E - mail: jaksada.th@rmu.ac.th

HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % ที่อายุบ่ม 28 วัน อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST มีแรงอัดสูงสุดสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานทดแทนการใช้ปูนเม็ด นอกจากนี้ยังพบว่าสมการออกแบบของ ACI สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST ได้อย่างถูกต้อง โดยสรุป จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นทางเลือกทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกรณีของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต; ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก; ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า; แรงอัดในแนวแกน

Abstract

This paper focuses on the study of the axial load behavior and failure characteristics of rectangular concrete-filled steel tubular columns using hydraulic cement (HC-CFST columns) under concentric axial loading. The experimental specimens consisted of 36 rectangular columns, each measuring 150 x 75 mm in cross-sectional dimensions and 750 mm in height. The key variables examined in this study encompass the type of cement, the thickness of the steel tube, the ultimate compressive strength of the concrete, and curing time. Two distinct variants of cement, hydraulic cement and ordinary Portland cement, were employed at three different compressive strengths of 18, 25, and 32 MPa, with curing times of 28 and 90 days. Steel tubes were available in three thicknesses: 3.0, 4.5, and 6.0 mm. The compressive load was uniformly applied to the entire section and tested by progressively increasing the axial load until the column reached failure. According to the test results, the HC-CFST columns display linear elastic behavior up to almost 90 - 95 % of their maximum compressive loads, after which the behavior transforms nonlinear until failure. Cracking of the concrete core, as well as local buckling of the hollow steel tube, were observed as modes of failure in the HC-CFST columns. The PC-CFST columns demonstrated a maximum compressive load that was approximately 1 - 2 % higher than that of the HC-CFST column at 28 days of curing. Nevertheless, for 90 days, the HC-CFST columns exhibited a greater maximum compressive load compared to the PC-CFST column due to the presence of pozzolanic components in the HC-based concrete instead of clinker. In addition, it has been observed that the ACI design equations are capable of accurately predicting the maximum compressive load of the HC-CFST columns. In summary, the findings of this study suggest that hydraulic cement could be used as an effective alternative to ordinary Portland cement in the case of concrete-filled steel tubular columns.

Keywords: Concrete-Filled Steel Tube Column; Hydraulic Cement; Rectangular Steel Tube; Axial Compression

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาจากขั้นตอนการก่อสร้างระบบแบบหล่อในที่ (Cast-In-Place Construction) ส่งผลให้ใช้ระยะเวลานานในการดำเนินงาน รวมถึงจำนวนแรงงานและต้นทุนค่อนข้างสูง และสิ่งที่ผู้รับเหมาต้องเผชิญตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคือ ปัญหาการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างที่มีทักษะสูง [1] ถึงแม้ว่ามีจำนวนแรงงานต่างด้าวที่เข้ามาทดแทน

แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับการขับเคลื่อนนโยบายด้านการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ยิ่งส่งผลให้เกิดความต้องการจำนวนแรงงานที่เพิ่มสูงขึ้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ระบบก่อสร้างแบบหล่อในที่ดังกล่าวอาจไม่สอดคล้องกับทิศทางการก่อสร้างที่มีการแข่งขันกันในด้านระยะเวลาและต้นทุน [2] นอกจากนี้ยังมีผลกระทบทางอ้อมคือ ระบบก่อสร้างแบบหล่อในที่ต้องใช้ไม้เป็นค้ำยันและแบบหล่อคอนกรีตในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลเสียโดยตรงต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [3] - [4] จากข้อจำกัดที่กล่าวมา จึงเกิดการพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (Prefabrication) เพื่อตอบสนองการขยายตัวและเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนโครงสร้าง (Structural Member) เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาในการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบเดิม [5] นอกจากนี้ สามารถลดปัญหาการขาดแคลนแรงงานรวมถึงลดมลภาวะเรื่องขยะและของเสียในสถานที่ก่อสร้างได้เป็นอย่างดี [6] ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ท่อเหล็กกลวง (Steel Hollow Tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา โดยการออกแบบให้ท่อเหล็กรับแรงร่วมกับโครงสร้างเสาโดยไม่ถอดแบบหล่อเสาดังกล่าวออก [7] - [10] เสาเชิงประกอบประเภทนี้ถูกเรียกว่าเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-Filled Steel Tube Column, CFST) ข้อดีของเสาดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเดิม ได้แก่ (1) ก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากท่อเหล็กกลวงถูกใช้เป็นแบบหล่อถาวรให้โครงสร้างเสา ทำให้ต้นทุนและเวลาในการก่อสร้างลดลง [11] (2) ท่อเหล็กกลวงทำหน้าที่ร่วมกับแกนคอนกรีตในการรับแรงอัดโดยอาศัยหลักการ กระทำร่วมกันแบบคอมโพสิต (Composite Action) และแกนคอนกรีตยังช่วยป้องกันการโก่งเดาะของท่อเหล็กในระยะเริ่มต้นและเพิ่มประสิทธิภาพของหน้าตัด ส่งผลให้เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [12] - [14] (3) เสาเชิงประกอบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน ส่งผลให้เหมาะสำหรับโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหว [15]

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตใช้วัสดุเชื่อมประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นหลัก โดยขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศในอัตราสูง และเป็นลำดับที่ 1 ของอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ในประเทศไทย [16] ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน มีปริมาณการปล่อย CO_2 ประมาณ 1 ตัน เช่นเดียวกัน [17] ผลกระทบจากปรากฏการณ์เรือนกระจกส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสังคมของมนุษย์ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศทำให้เกิดผลกระทบด้านสุขภาพต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เป็นต้น [18] ดังนั้น การใช้วัสดุเชื่อมประสานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นผลกระทบเชิงบวกต่อการลดปัญหาการปล่อย CO_2 และสถานะเรือนกระจก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบจากปูนเม็ด (Clinker) ยิปซัม (Gypsum) เถ้าลอย (Fly Ash) และหินปูน (Limestone) โดยลดปริมาณการใช้ปูนเม็ดและแทนที่ด้วยวัสดุทดแทนตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [19] เมื่ออัตราส่วนผสมปูนเม็ดลดลง ทำให้ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อย CO_2 น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนหลายรายในประเทศไทย ยังขาดความเชื่อมั่นสำหรับการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกไปใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากยังขาดข้อมูลผลทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกภายใต้แรงกระทำ [20] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC-CSFT) ภายใต้แรงอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC-CSFT) โดยบทความนี้ได้เน้นศึกษาเสาที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Section) เนื่องจากการก่อสร้างอาคารในปัจจุบันนิยมให้ด้านแคบของเสามีความกว้างเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความหนาของผนังก่ออิฐหรือผนังสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มเนื้อที่การใช้สอยแก่ตัวอาคาร รวมถึงเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยังไม่มีผู้ศึกษามากนัก [21] สุดท้าย ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยจะช่วยยกระดับความเชื่อมั่นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เพื่อเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพที่ทันต่อสถานการณ์ในการดำเนินงานก่อสร้างต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สมบัติของวัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบมี 2 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) ประเภทใช้งานทั่วไป (GU) ตาม มอก. 2594-2556 [19] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (PC) ตาม มอก. 15-2562 [22] คอนกรีตกำลังปกติ (หน่วยน้ำหนักประมาณ $2,400 \text{ kg/m}^3$) ออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 [23] โดยมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยในช่วงใช้งานและมักใช้ก่อสร้างอาคารขนาดเล็กในประเทศไทย ท่อเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ($H \times B$) เท่ากับ $150 \times 75 \text{ mm}$ ผลิตโดยการพับแผ่นเหล็กโครงสร้างแบบรีดเย็น ซึ่งเป็นท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไปตาม มอก. 107-2561 [24] ที่มีความหนาเท่ากับ 3.0 4.5 และ 6.0 mm ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C39 [25] ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน และทดสอบกำลังรับแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนรูปกระดุกจากท่อเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน ASTM A500 [26] จากผลการทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยตามเป้าหมายเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 mm และความสูง 200 mm โดยมีจำนวน 5 ตัวอย่างต่อส่วนผสมพบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเฉลี่ยเท่ากับ 18.2 25.1 และ 33.8 MPa ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเฉลี่ยเท่ากับ 18.8 25.4 และ 34.2 MPa ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 จากตารางเห็นได้ว่า ทุกส่วนผสมของคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยผ่านเกณฑ์ตามเป้าหมายที่กำหนด โดยคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ HC เล็กน้อยเนื่องจาก HC มีอัตราส่วนผสมปูนเม็ดน้อยกว่า PC ประมาณ 10 % ของปริมาณทั้งหมด [27] ส่งผลให้การพัฒนาำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่าที่อายุบ่ม 28 วัน อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ PC ประมาณ 1 - 2 % เนื่องจาก HC เลือกใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนปูนเม็ด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่อกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น เมื่ออายุบ่มคอนกรีตเกินกว่า 28 วัน [16]

2. ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (เสา CFST) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ($H \times B$) เท่ากับ $150 \times 75 \text{ mm}$ ความสูง (L) เท่ากับ 750 mm มีอัตราส่วนความสูงต่อด้านแคบสุดของหน้าตัด (L/B) เท่ากับ 10 โดยเสา CFST เป็นเสาสั้นตามมาตรฐาน วสท. 1007-34 ข้อ 5303(ก) ที่ระบุว่า อัตราส่วนของ L/B ของเสา มีค่าไม่เกิน 15 ตัวอย่างเสาจำนวน 36 ตัวอย่างถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ HC (เสา HC-CFST) และกลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ PC (เสา PC-CFST) ซึ่งใช้เป็นเสาอ้างอิง ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1 แสดงลักษณะของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตที่ใช้ศึกษา

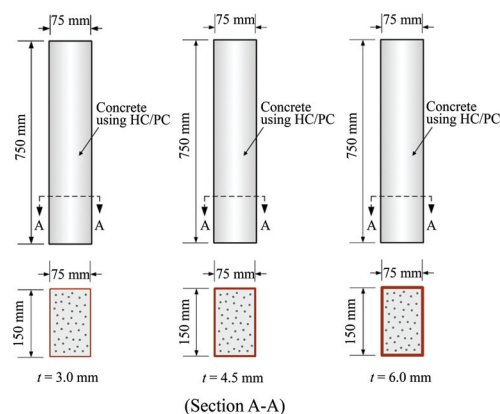
ชื่อตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม ถูกกำหนดสัญลักษณ์ในรูปแบบ XX-YY-ZZ โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ XX หมายถึง ประเภทของเสา CFST มี 2 รูปแบบ ได้แก่ HC-CFST และ PC-CFST เป็นสัญลักษณ์แทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ HC และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ PC ตามลำดับ YY หมายถึง กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยตามเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน สุดท้าย ZZ เป็นสัญลักษณ์แทน ความหนาของท่อเหล็กกลวงที่มีความหนา 3 ค่า ได้แก่ 3.0 4.5 และ 6.0 mm ตัวอย่างเช่น HC-CFST-25-6.0 หมายถึง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตเท่ากับ 25 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 6.0 mm และ PC-CFST-32-3.0 คือ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตเท่ากับ 32 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุและตัวอย่างเสา CFST

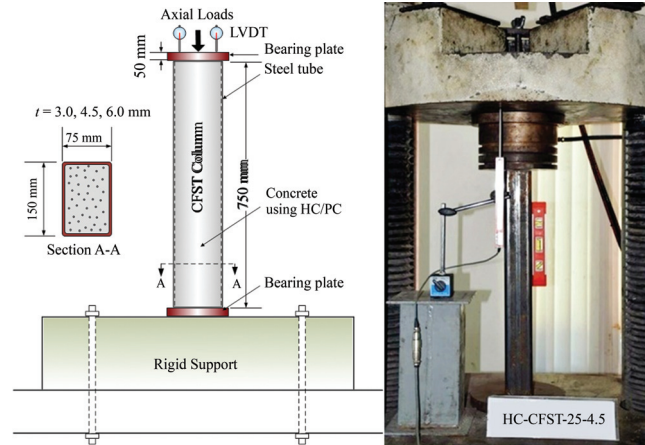
Group	Specimen	Binder	Concrete			Steel Tube			Number
			A_c (mm ²)	$f'_{c,28D}$ (MPa)	$f'_{c,90D}$ (MPa)	t (mm)	A_{st} (mm ²)	$f_{y,st}$ (MPa)	
1	HC-CFST-18-3.0	HC	9,959	18.2	21.9	3.0	1,291	384.5	2
	HC-CFST-18-4.5	HC	9,358	18.2	21.9	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-18-6.0	HC	8,787	18.2	21.9	6.0	2,463	395.4	2
	HC-CFST-25-3.0	HC	9,959	25.1	28.1	3.0	1,291	384.5	2
	HC-CFST-25-4.5	HC	9,358	25.1	28.1	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-25-6.0	HC	8,787	25.1	28.1	6.0	2,463	395.4	2
	HC-CFST-32-3.0	HC	9,959	33.8	39.0	3.0	1,291	384.5	2
	HC-CFST-32-4.5	HC	9,358	33.8	39.0	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-32-6.0	HC	8,787	33.8	39.0	6.0	2,463	395.4	2
2	PC-CFST-18-3.0	PC	9,959	18.8	21.6	3.0	1,291	384.5	2
	PC-CFST-18-4.5	PC	9,358	18.8	21.6	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-18-6.0	PC	8,787	18.8	21.6	6.0	2,463	395.4	2
	PC-CFST-25-3.0	PC	9,959	25.4	27.9	3.0	1,291	384.5	2
	PC-CFST-25-4.5	PC	9,358	25.4	27.9	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-25-6.0	PC	8,787	25.4	27.9	6.0	2,463	395.4	2
	PC-CFST-32-3.0	PC	9,959	34.2	38.5	3.0	1,291	384.5	2
	PC-CFST-32-4.5	PC	9,358	34.2	38.5	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-32-6.0	PC	8,787	34.2	38.5	6.0	2,463	395.4	2

3. ขั้นตอนการทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเสา CFST กับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) แผ่นเหล็กความหนาเท่ากับ 50 mm จำนวน 2 แผ่น ถูกติดบริเวณปลายด้านบนและด้านล่างของเสา CFST เพื่อถ่ายแรงอัดจากเครื่องทดสอบลงสู่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด นอกจากนี้ Linear Variable Differential Transformer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ถูกติดตั้งที่บริเวณด้านบนหัวกดของเครื่อง UTM เพื่อวัดค่าเฉลี่ยของระยะหดตัวในแนวแกนของเสา CFST จากนั้น เริ่ม Pre-load โดยใช้แรงกระทำประมาณ 25 % ของกำลังรับแรงอัดคอนกรีต เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสาและแผ่นเหล็ก [20] สุดท้าย เพิ่มแรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 mm/min [14] พร้อมเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบโดยใช้ KYOWA DAQ จนเสา CFST เกิดการวิบัติโดยสมบูรณ์หรือหยุดทดสอบที่ระยะหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 50 mm [21]



รูปที่ 1 รายละเอียดและลักษณะของเสา CFST

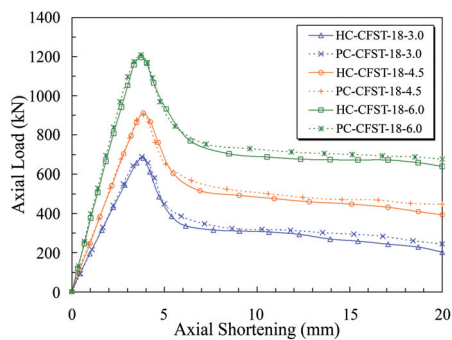


รูปที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างเสา

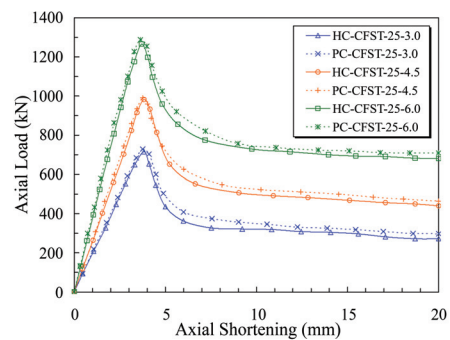
ผลการทดสอบและอภิปรายผล

1. พฤติกรรมรับแรงและลักษณะการวิบัติ

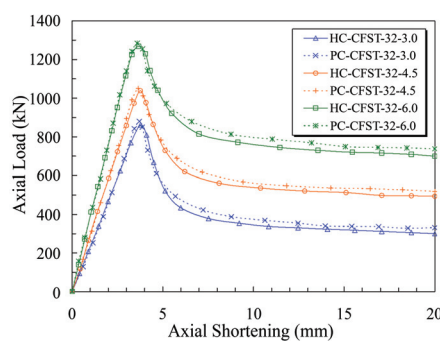
งานวิจัยนี้จำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวในแนวแกน (Axial Shortening) ของเสาเท่ากับ 20 mm หรือเท่ากับ 0.0267 mm/mm ของค่าความเครียดในแนวแกน (Axial Strain) คอนกรีต ซึ่งมีค่าประมาณ 10 เท่าของความเครียดที่กำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก และนิยามให้แรงอัดสูงสุด (Maximum Load) หรือ เป็นแรงอัดสุดท้ายที่เกิดขึ้นของเสา CFST โดยปราศจากการโค้งไถ่ของท่อเหล็ก [21] รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ที่ได้จากการทดสอบ โดยแบ่งกลุ่มตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ตามลำดับ



(ก) f'_c เท่ากับ 18 MPa



(ข) f'_c เท่ากับ 25 MPa

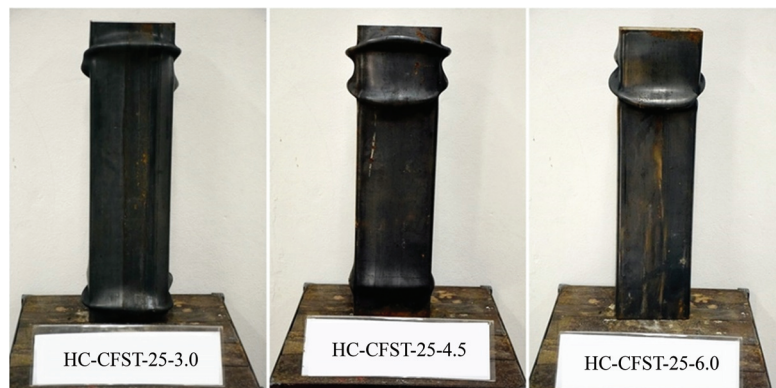


(ค) f'_c เท่ากับ 32 MPa

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST

จากรูปที่ 3 พบว่า พฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพฤติกรรมรับแรงทั้งหมดสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วง ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด ณ จุดนี้แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวและการหดตัวในแกนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง [28] การขยายตัวของคอนกรีตดังกล่าวทำให้ท่อเหล็กที่โอบรัดแกนคอนกรีตเกิดการคดโค้งออกของผนังท่อเฉพาะที่ตำแหน่งด้านกว้างของผนังท่อเหล็กหน้าคดโค้งที่เหลื่อมพื้นผิว [29] จากนั้นพฤติกรรมของเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อตัวอย่างเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนเริ่มมีค่าลดลงและเปลี่ยนรูปแบบในลักษณะไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) อย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติ [10] โดยพฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบ Strain-Softening เนื่องจากผนังท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ส่งผลให้ความแกร่งของเสามีค่าลดลง [8]

รูปที่ 4(ก) และรูปที่ 4(ข) แสดงลักษณะการวิบัติของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST โดยเรียงลำดับตามความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 4.5 และ 6.0 mm จากรูปพบว่าเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะการวิบัติใกล้เคียงกัน โดยแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและขยายตัวออกทางด้านข้าง ส่งผลให้คอนกรีตเกิดแรงดันและผลักผนังท่อเหล็กที่โอบรัดจนเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ [14] ลักษณะการวิบัติดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลการศึกษาเสาท่อเหล็กหน้าคดโค้งที่เหลื่อมพื้นผิวกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ูล่า [29] นอกจากนี้ เสา HC-CFST และเสา PC-CFST ทุกตัวอย่างมีการหดตัวในแนวแกนเกินกว่า 30 mm หรือเทียบได้กับเสามีความเครียดเชิงอัด (Compressive Strain) มากกว่า 0.040 mm/mm (4.0 %) ซึ่งบ่งชี้ว่า เสา HC-CFST และเสา PC-CFST สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนการวิบัติได้สูงเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [20]



(ก) เสา HC-CFST



(ข) เสา PC-CFST

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของเสา

2. แรงอัดสูงสุดและเปรียบเทียบกับสมการเสาเชิงประกอบ

ผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ภายใต้แรงอัดในแนวแกน ดังตารางที่ 2 กำหนดให้แรงอัดสูงสุด (Maximum Load) ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ใช้สัญลักษณ์เป็น $P_{test,25D}$ และ $P_{test,90D}$ จากตารางที่ 2 เห็นได้ว่า เมื่อท่อเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น แรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากท่อเหล็กเป็นวัสดุหลักในการรับแรง และควบคุมการวิบัติของเสา [8], [27] นอกจากนี้เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่าเสา HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังตารางที่ 1 โดยคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ HC เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานทดแทนการใช้ปูนเม็ด ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นที่อายุบ่ม 90 วัน [17]

ตารางที่ 2 แรงอัดสูงสุดและแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบ

Group	Specimen	Binder	f'_c (MPa)	t (mm)	$P_{test,25D}$ (kN)	$P_{test,90D}$ (kN)	$P_{n,ACI}$ (kN)
1	HC-CFST-18-3.0	HC	18	3.0	685.8	714.2	650.5
	HC-CFST-18-4.5	HC	18	4.5	918.5	946.1	879.2
	HC-CFST-18-6.0	HC	18	6.0	1,165.7	1196.9	1,109.8
	HC-CFST-25-3.0	HC	25	3.0	742.2	771.8	708.9
	HC-CFST-25-4.5	HC	25	4.5	980.9	1004.8	934.1
	HC-CFST-25-6.0	HC	25	6.0	1,233.8	1279.3	1,161.3
	HC-CFST-32-3.0	HC	32	3.0	821.8	869.5	782.5
	HC-CFST-32-4.5	HC	32	4.5	1,032.8	1080.4	1,003.3
	HC-CFST-32-6.0	HC	32	6.0	1,263.0	1308.0	1,226.3
2	PC-CFST-18-3.0	PC	18	3.0	693.5	704.3	655.5
	PC-CFST-18-4.5	PC	18	4.5	924.5	942.3	884.0
	PC-CFST-18-6.0	PC	18	6.0	1,170.5	1188.0	1,114.3
	PC-CFST-25-3.0	PC	25	3.0	748.7	767.9	711.4
	PC-CFST-25-4.5	PC	25	4.5	989.8	996.8	936.5
	PC-CFST-25-6.0	PC	25	6.0	1,243.1	1250.4	1,163.6
	PC-CFST-32-3.0	PC	32	3.0	829.9	850.5	785.9
	PC-CFST-32-4.5	PC	32	4.5	1,038.7	1069.8	1,006.5
	PC-CFST-32-6.0	PC	32	6.0	1,275.1	1300.5	1,229.3

3. เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับสมการเสาเชิงประกอบ

สำหรับการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเสา HC-CFST และเสา PC-CFST กับสมการออกแบบเสาตามมาตรฐาน ACI 318 [30] ในเบื้องต้นสมมติให้เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีปฏิสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ (Full Interaction) ระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กภายใต้แรงอัด โดยแรงอัดในแนวแกนระบุ (Nominal Axial Load) ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST สามารถหาจากสมการที่ (1)

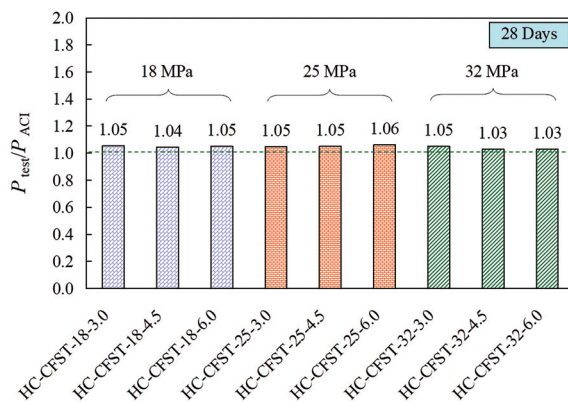
$$P_{n,ACI} = 0.85A_c f'_c + A_{st} f_{y,st} \quad (1)$$

โดยที่

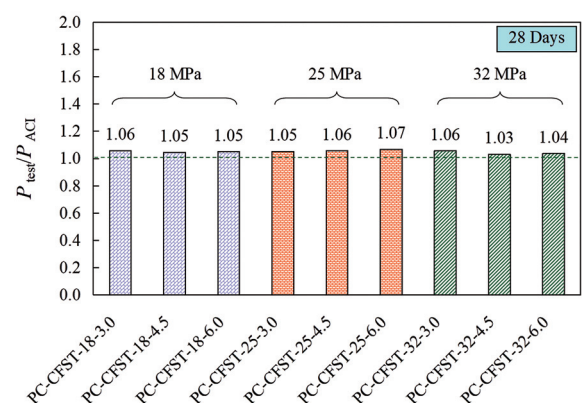
A_c และ A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก

f'_c และ $f_{y,st}$ คือ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตและกำลังครากของท่อเหล็ก

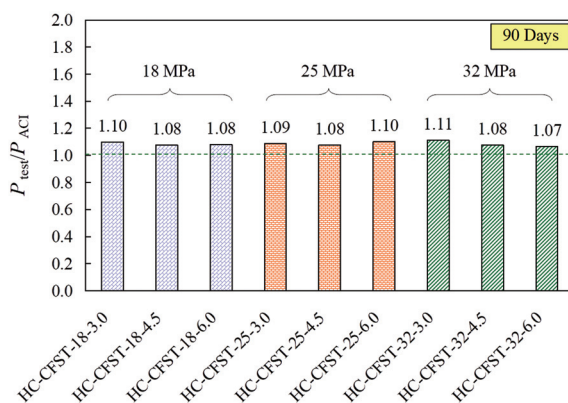
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ เสา HC-CFST และเสา PC-CFST กับแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบเสามาตรฐาน ACI 318 ($P_{n,ACI}$) จากรูปที่ 5 พบว่า เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ที่อายุบ่ม 28 วัน และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบของ ACI ($P_{test,28D} / P_{n,ACI}$) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.03 - 1.07 ดังรูปที่ 5(ก) - 5(ข) โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.00 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการออกแบบเสามาตรฐาน ACI 318 สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ได้อย่างถูกต้อง และสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [14], [29] นอกจากนี้ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีอัตราส่วนอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 - 1.11 ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) - (ง) และเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีส่วนต่างเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 3 - 4 %



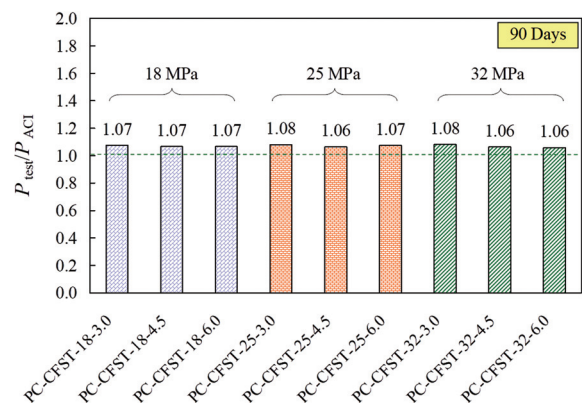
(ก) เสา HC-CFST ที่อายุบ่ม 28 วัน



(ข) เสา PC-CFST ที่อายุบ่ม 28 วัน



(ค) เสา HC-CFST ที่อายุบ่ม 90 วัน



(ง) เสา PC-CFST ที่อายุบ่ม 90 วัน

รูปที่ 5 อัตราส่วน $P_{test} / P_{n,ACI}$ ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST

ดังนั้นในภาพรวมของการศึกษานี้ เสา HC-CFST จึงมีประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกนเทียบเท่ากับเสา PC-CFST หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการใช้วัสดุดิบบางส่วนเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนนำไปสู่การวางมาตรฐานทางวิศวกรรมเพื่อนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานก่อสร้างต่อไป

สรุปผล

จากการศึกษาเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-CSFT) เปรียบเทียบกับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (เสา PC-CFST) พบข้อสรุป ดังนี้

1) พฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะใกล้เคียงกัน ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง จนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนมีค่าลดลงและเปลี่ยนรูปแบบในลักษณะไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) แบบ Strain-Softening เนื่องจากการโก่งเคาะของผนังท่อเหล็ก ส่งผลให้ความแข็งแรงของเสามีค่าลดลง

2) เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะการวิบัติคล้ายคลึงกัน โดยแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและขยายตัวออกทางด้านข้าง ส่งผลให้คอนกรีตเกิดแรงดันและผลึกผนังท่อเหล็กที่โอบรัดจนเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่

3) เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่าเสา HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานทดแทนการใช้ปูนเม็ด ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นที่อายุบ่ม 90 วัน

4) สมการออกแบบเสามาตามมาตรฐาน ACI สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประเมินแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ได้อย่างถูกต้อง โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยประมาณ 5 และ 9 % ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่สัญญา FF66-P2-010

References

- [1] Wang, Z., Hu, H., and Gong, J. (2018). Framework for Modeling Operational Uncertainty to Optimize Offsite Production Scheduling of Precast Components. **Automation in Construction**. Vol. 86, pp. 69-80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026
- [2] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlu, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI Journal**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30 (in Thai)
- [3] Hata, M., Sato, M., and Miyazawa, S. (2022). Experimental Study on the Application of Cementless Material with Industrial By-Products to Steam-Cured Precast Concrete Products. **Materials**. Vol. 15, p. 7624 DOI: 10.3390/ma15217624
- [4] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlu, K. (2014). Effects of Flexural Strengthening with Non-Prestressed Wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams. **RMUTI Journal**. Vol. 7, No. 2, pp. 16-33 (in Thai)
- [5] Kim, S., Hwang, S., and Son, J. (2022). Safety Management Guidelines for Precast Concrete Production Plants Using Importance-Performance Analysis. **Journal of Construction Engineering and Management**. Vol. 148, Issue 7, Article 04022038. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002298

- [6] Kamali, M. and Hewage, K. (2017). Development of Performance Criteria for Sustainability Evaluation of Modular Versus Conventional Construction Methods. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 142, Part 4, pp. 3592-3606. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.108
- [7] Ellobody, E. and Young, B. (2006). Design and Behaviour of Concrete-Filled Cold-Formed Stainless Steel Tube Columns. **Engineering Structures**. Vol. 28, Issue 5, pp. 716-728. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.09.023
- [8] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2011). Behaviors of Square Thin-Walled Steel Tubed RC Columns Under Direct Axial Compression on RC Core. **Procedia Engineering**. Vol. 14, pp. 513-520. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.064
- [9] Liew, J. Y. R. and Xiong, D. X. (2012). Ultra-High-Strength Concrete Filled Composite Columns for Multi-Storey Building Construction. **Advances in Structural Engineering**. Vol. 15, Issue 9, pp. 1487-1503. DOI: 10.1260/1369-4332.15.9.1487
- [10] Thumrongvut, J. and Ritaksa, K. (2016). Effects of Load Application on High-Strength Concrete-Filled Circular Steel Tube Specimens. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 9, No. 2, pp. 145-160 (in Thai)
- [11] Xiong, M. X., Xiong, D. X., and Richard Liew, J. Y. (2017). Axial Performance of Short Concrete Filled Steel Tubes with High- and Ultra-High- Strength Materials. **Engineering Structures**. Vol. 136, pp. 494-510. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.037
- [12] Chang, X., Ru, Z. L., Zhou, W., and Zhang, Y. B. (2013). Study on Concrete-Filled Stainless Steel-Carbon Steel Tubular (CFSCT) Stub Columns Under Compression. **Thin-Walled Structures**. Vol. 63, pp. 125-133. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.002
- [13] 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**. Vol. 1016, pp. 618-623. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.618
- [14] Bokkhunthod, N., Thumrongvut, J., Supromwan, J., and Seangatith, S. (2022). Experimental Study of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Hydraulic Cement. **Key Engineering Materials**. Vol. 922, pp. 147-152. DOI: DOI:10.4028/p-3zquh9
- [15] Skalomenos, K. A., Hatzigeorgiou, G. D., and Beskos, D. E. (2014). Parameter Identification of Three Hysteretic Models for the Simulation of the Response of CFT Columns to Cyclic Loading. **Engineering Structures**. Vol. 61, pp. 44-60. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.006
- [16] Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C., and Suksiripattanapong, C. (2022). Comparative Experimental Study of Sustainable Reinforced Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete Beams Using Rice Husk Ash. **Sustainability**. Vol. 14, No. 16, p. 9856. DOI: 10.3390/su14169856
- [17] Phojan, W., Luepongattana, S., Wonglakorn, N., Thumrongvut, J., Tabyang, W., Keawsawasvong, S., and Suksiripattanapong, C. (2023). Mechanical and Environmental Characteristics of High Calcium Fly Ash Geopolymer Stabilized Soft Bangkok Clay Contaminated with Zinc Sludge. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**. Vol. 8, DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100480
- [18] Sanchaiwut, M., Thumrongvut, J., Pantawee, S., and Seangatith, S. (2022). Effects of Substitution of Fine Aggregate with Recycled Asphalt Pavement on Compressive Strength of Normal Concrete. **Key Engineering Materials**. Vol. 922, pp. 163-168. DOI: 10.4028/p-5h70w4

- [19] Thai Industrial Standard. (2013). **Hydraulic cement (TIS 2594-2556)**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [20] Thumrongvut, J., Khamphay, P., Seangatith, S., Pantawee, S., and Supromwan, J. (2023). Axial load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 40, No. 2, pp. 117-127 (in Thai)
- [21] 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**. Vol. 860, pp. 121-124. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.860.121
- [22] Thai Industrial Standard. (2019). **Portland Cement (TIS 15-2562)**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [23] ACI Committee 211. (2009). **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [24] Thai Industrial Standard. (2018). **Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561)**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [25] ASTM C39. (2018). **Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [26] ASTM A500. (2018). **Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes**. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [27] Joysoongnern, N., Thumrongvut, J., Suksiripattanapong, C., and Seangatith, S. (2023). Behavior and Strength of Circular Hydraulic Cement Concrete-Filled Steel Tube Columns. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal**. Vol. 15, No. 2, pp. 348-360 (in Thai)
- [28] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2009). Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns Under Axial Compression. **Suranaree Journal of Science and Technology**. Vol. 16, No. 3, pp. 205-220
- [29] 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**. Vol. 941, pp. 2417-2422
- [30] ACI Committee 318. (2019). **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA