

การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับ
เสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูง
Utilization of Eco-Friendly Hydraulic Cement in
High-Strength Concrete-Filled Rectangular
Steel Tubular Columns

ชาญชัย เงาะปก¹, จักษดา ชำรงวุฒิ^{1*}, นำชัย จ้อยสูงเนิน², เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงษ์¹,
สิทธิชัย แสงอาทิตย์³

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

²วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

Chanchai Ngohpok¹, Jaksada Thumrongvut^{1*}, Namchai Joysoongnern²,
Cherdasak Suksiripattanapong¹, Sittichai Seangatith³

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

²College of Innovative Skills, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

³School of Civil Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

Received 27 September 2023; Received in revised 29 February 2024; Accepted 4 March 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแรงอัดในแนวแกนและเปรียบเทียบกับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตัวแปรหลักในการศึกษา ได้แก่ ประเภทของปูนซีเมนต์ อายุบ่มของคอนกรีต และความหนาของท่อเหล็กเสาทั้งหมด 24 ตัวอย่างถูกทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ตัวอย่างเสาทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้าง ความสามารถรับแรงในแนวแกน และพารามิเตอร์ที่สำคัญ จากการ

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jaksada.th@rmuti.ac.th

ทดสอบพบว่า ช่วงแรกพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 90-95% ของแรงอัดสูงสุด จากนั้น พฤติกรรมที่สังเกตได้ของเสาเป็นแบบไร้เชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติ พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นมีลักษณะแบบ Strain-Softening ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นแบบการแตกร้าวของคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบเสาของ ACI พบว่า สมการดังกล่าวสามารถทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้อง สุดท้าย การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีศักยภาพในการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ท่อเหล็กกรอกคอนกรีต; ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก; คอนกรีตกำลังสูง; แรงอัดในแนวแกน; เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This research focuses on studying the structural behavior of high-strength concrete-filled rectangular steel tubular columns with hydraulic cement under axial compression, and comparing them with high-strength concrete-filled steel tubular columns using Portland cement. The main parameters used in this study were the types of cement, curing time of concrete, and wall thicknesses of the steel tube. A total of 24 column specimens were tested under continuously increasing axial load until reaching their failure. The test columns were examined to determine their structural behavior, axial capacity, and key influencing parameters. From the tests, it was found that the response curves of the high-strength concrete-filled steel tubular columns exhibited linear elastic behavior up to approximately 90-95% of their maximum load capacity. Subsequently, the observed behaviors of the columns exhibited nonlinearity and high deformation before failure. The columns' nonlinear behavior was of the strain-softening type. The failure modes of the specimens initiated with the occurrence of concrete cracks, followed by localized buckling of the steel tube wall. Furthermore, when comparing the experimental findings with the results derived from the ACI design equations, it can be concluded that the ACI design equations are suitable for predicting the maximum load of the high-strength concrete-filled steel tubular columns with hydraulic cement. Finally, the utilization of hydraulic cement has the potential to efficiently substitute Portland cement. Hydraulic cement is one approach that may contribute to significantly minimizing carbon dioxide emissions.

Keywords: Concrete-filled tube column; Hydraulic cement; High-strength concrete; Axial compression; Eco-friendly

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานมักใช้วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยเฉพาะเป็นการก่อสร้างในระบบแบบหล่อในที่ (cast-in-place) อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างด้วยระบบแบบหล่อในที่เป็นระบบที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องมีการจัดเตรียมวัสดุเพื่อดำเนินการก่อสร้างที่หน้างานเป็นหลัก และการหาสถานที่จัดเก็บวัสดุ รวมถึงต้องมีกระบวนการก่อสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอน [1] ตัวอย่างเช่น การติดตั้งไม้แบบและค้ำยัน การผูกเหล็กเส้น เทคอนกรีต และรออายุบ่มของคอนกรีตจนมีกำลังที่เหมาะสมจึงทำการถอดแบบ ขั้นตอนดังกล่าวต้องใช้จำนวนแรงงานและระยะเวลาดำเนินการค่อนข้างมาก ส่งผลให้ต้นทุนการก่อสร้างมีราคาสูง [2-3] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในขั้นตอนการเทคอนกรีต ซึ่งต้องมีการจัดเตรียมไม้แบบเพื่อทำแบบหล่อขึ้นส่วนโครงสร้างและค้ำยัน โดยการใช้แรงงานที่มีความชำนาญงานและทักษะค่อนข้างสูงทั้งงานไม้และงานเหล็ก มิฉะนั้นอาจเกิดข้อบกพร่องต่าง ๆ เช่น แบบหล่อมีขนาดไม่ถูกต้องตามที่กำหนด แบบรั่วหรือแบบแตกส่งผลให้คอนกรีตไหลออกจากแบบในขั้นตอนการเทคอนกรีต เป็นต้น ส่งผลให้เสียระยะเวลาในการแก้ไขและมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น [4-5] ในปัจจุบันระบบก่อสร้างดังกล่าวอาจไม่ตอบโจทย์ตลาดและรองรับการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีการแข่งขันกันในด้านราคาและระยะเวลาจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดการพัฒนารูปแบบก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (fabrication) หรือแบบกึ่งสำเร็จรูป (pre-fabrication) เพื่อช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง เนื่องจากมีความรวดเร็วและควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6] เช่น การประยุกต์ใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อถาวรให้กับโครงสร้าง โดยการออกแบบให้แบบหล่อรับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบดังกล่าวออก ตัวอย่างเช่น การใช้ท่อเหล็กกลางหน้าตัดกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบหล่อสำเร็จรูป

ของเสา [7-9] เป็นต้น ในปัจจุบันเสาเชิงประกอบ เช่น เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled tube column, CFT) ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [10-11] เสาดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ก่อสร้างได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเดิม ให้ความประหยัดในแง่ของต้นทุนก่อสร้าง และโครงสร้างมีรูปลักษณ์ที่สวยงามเนื่องจากการใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กแบบหล่อถาวร รวมถึงท่อเหล็กดังกล่าวยังทำหน้าที่ร่วมกับแกนคอนกรีต (concrete core) หรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced-concrete core) ในการรับแรงกระทำโดยอาศัย Composite action ซึ่งส่งผลให้เสาดังกล่าวมีแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [12] นอกจากนี้ ยังเพิ่มประสิทธิภาพให้เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูงก่อนเกิดวิบัติ [13-14] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายในแกนคอนกรีต ซึ่งเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว

อย่างไรก็ตาม เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตในปัจจุบันผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ordinary Portland cement, OPC) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยผลกระทบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณสูง [15] และส่งผลให้เกิดการกระตุ้นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) กล่าวได้ว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการปล่อยก๊าซ CO_2 จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศ โดยประมาณอัตราการปล่อย CO_2 จำนวน 1 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 5 ของการอุตสาหกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก [16] ดังนั้นการเปลี่ยนมาใช้วัสดุเชื่อมประสานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น่าจะมีส่วนช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซ CO_2 และสถานะเรือนกระจก อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์จึงวิจัย

และพัฒนาจนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตาม มอก. 2594-2556 โดยมีองค์ประกอบจากเม็ดปูนยิปซัม และวัสดุทดแทนซีเมนต์ เป็นต้น โดยการลดปริมาณปูนเม็ดและแทนที่ด้วยวัสดุทดแทน [17] ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ ปลดปล่อยก๊าซ CO₂ ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามในประเทศไทยการใช้งานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกยังไม่ได้รับการยอมรับในช่วงแรก โดยหน่วยงานภาครัฐ รวมถึงผู้ประกอบการภาคเอกชน ยังขาดความเชื่อมั่นที่เกี่ยวข้องกับการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐานและการก่อสร้างเชิงพาณิชย์ เนื่องจากยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ [18] ดังนั้นจากข้อดีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูง (HSCFT) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเปรียบเทียบกับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยในบทความนี้เน้นศึกษาเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากในปัจจุบันนิยมก่อสร้างเสาในลักษณะให้ด้านแคบของเสามีความหนาใกล้เคียงความหนาของผนัง (บล็อกมวลเบาหรือผนังสำเร็จรูป เป็นต้น) เพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอยแก่ตัวอาคารตลอดจนข้อจำกัดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยังไม่มีผู้ศึกษามากนัก [19] สุดท้ายองค์ความรู้ที่ได้จะเป็นการเสริมสร้างความเชื่อมั่น และเข้าใจพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วน รวมถึงส่งเสริมการใช้งานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อสนับสนุนนโยบายของรัฐบาลที่ยกระดับเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศที่ร้อยละ 40 ภายในปี 2573 ต่อไป

2. วัสดุ ตัวอย่างทดสอบและวิธีทดสอบ

2.1 สมบัติของวัสดุ

คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ถูกออกแบบตามปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตของ ACI 211.1 [20] โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเท่ากับ 55 MPa (หรือประมาณ 550 kg/cm²) [21] ของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm ที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีตถูกผลิตจากปูนซีเมนต์ 2 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) ชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [17] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (PC) ตามมาตรฐาน มอก. 15-2562 [22] Table 1 แสดงผลทดสอบการหาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) จากพบว่า ผลรวมของอัตราส่วนออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO₂) ออกไซด์อะลูมินา (Al₂O₃) และออกไซด์เหล็ก (Fe₂O₃) ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 34.31 โดยน้ำหนัก และผลรวมของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 30.22 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีผลรวมอัตราส่วนออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 13.5%

Table 2 แสดงปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC-55) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC-55) ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไปตามมาตรฐาน มอก. 107-2561 [23] ที่มีความหนาเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [24] ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 90 วัน กำลังรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนของท่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A500 [25]

Table 1 Chemical composition of hydraulic cement and Portland cement.

| Chemical composition | Hydraulic cement, HC (%) | Portland cement, PC (%) |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CaO | 58.55 | 61.61 |
| SiO ₂ | 25.58 | 22.30 |
| Al ₂ O ₃ | 4.95 | 4.23 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.78 | 3.69 |
| MgO | 2.38 | 2.21 |
| SO ₃ | 2.95 | 3.50 |
| Na ₂ O | 0.00 | 0.42 |
| K ₂ O | 0.34 | 0.39 |
| Loss of Ignition | 1.47 | 1.65 |

Table 2 Mix proportions of concrete.

| Mixes | HC (kg) | PC (kg) | W (kg) | CA (kg) | FA (kg) | SP (kg) | Slump (mm) |
|-------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|------------|
| HC-55 | 578 | 0 | 200 | 1,008 | 633 | 2.89 | 8.8 |
| PC-55 | 0 | 578 | 200 | 1,008 | 633 | 2.89 | 9.2 |

* HC = Hydraulic cement, PC = Portland cement, W = Water, CA = Coarse aggregate, FA = Fine aggregate, SP = Superplasticizer

Table 3 แสดงสมบัติเชิงกลและตัวอย่างทดสอบ จากตารางพบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย เฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 55.9 MPa และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 56.6 MPa จากผล ทดสอบเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ศึกษามีกำลังรับแรงอัด ประสิทธิภาพเป้าหมายที่กำหนด โดยคอนกรีตที่ใช้ปูน ซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย เนื่องจากปูน ซีเมนต์ไฮดรอลิกมีอัตราส่วนของปูนเม็ดน้อยกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนัก

วัสดุเชื่อมประสาน [18] ส่งผลให้การพัฒนา กำลังรับแรง อัดมีค่าต่ำกว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ในทางตรงกันข้าม ที่อายุ บ่ม 90 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลัง รับแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกใช้ส่วนผสม ทดแทน เช่น วัสดุปอซโซลาน เป็นต้น โดยสอดคล้องกับ ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่มีผลรวมของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ สูงกว่าปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดที่สูง ขึ้น เมื่ออายุบ่มคอนกรีตมีค่าเกินกว่า 28 วัน [26]

Table 3 Mechanical properties and details of HSCFT specimens.

| Group | Specimen | Binder | Concrete | | | Steel Tube | | | Number (28D, 90D) |
|-------|-----------------|--------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | A_c (mm ²) | $f'_{c,28D}$ (MPa) | $f'_{c,90D}$ (MPa) | t (mm) | A_{st} (mm ²) | $f_{y,st}$ (MPa) | |
| 1 | HC-HSCFT-55-3.0 | HC | 9,959 | 55.9 | 59.8 | 3.0 | 1,291 | 383.8 | (2, 2) |
| | HC-HSCFT-55-4.5 | HC | 9,358 | 55.9 | 59.8 | 4.5 | 1,892 | 386.2 | (2, 2) |
| | HC-HSCFT-55-6.0 | HC | 8,787 | 55.9 | 59.8 | 6.0 | 2,463 | 394.4 | (2, 2) |
| 2 | PC-HSCFT-55-3.0 | PC | 9,959 | 56.6 | 59.4 | 3.0 | 1,291 | 383.8 | (2, 2) |
| | PC-HSCFT-55-4.5 | PC | 9,358 | 56.6 | 59.4 | 4.5 | 1,892 | 386.2 | (2, 2) |
| | PC-HSCFT-55-6.0 | PC | 8,787 | 56.6 | 59.4 | 6.0 | 2,463 | 394.4 | (2, 2) |

2.2 ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง (เสา HSCFT) ทั้งหมดเป็นเสาสั้น โดยมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด ($H \times B$) เท่ากับ 150×75 mm ความสูงเท่ากับ 750 mm ตัวอย่างเสาทั้งหมดจำนวน 24 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-HSCFT) และกลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เสา PC-HSCFT) ถูกใช้เป็นเสาอ้างอิง โดยในแต่ละตัวอย่างเสาทั้ง 2 กลุ่ม จะแบ่งการทดสอบเสาออกเป็น 2 อายุบ่มของคอนกรีต ได้แก่ ที่อายุบ่ม 28 วัน จำนวน 2 ตัวอย่าง และที่อายุบ่ม 90 วัน จำนวน 2 ตัวอย่าง ดังแสดงรายละเอียดใน Table 3 และ Figure 1 แสดงลักษณะของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ศึกษา

สัญลักษณ์ชื่อเสาดังกล่าวถูกกำหนดในรูปแบบ AA-BB-CC โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ AA หมายถึง ประเภทของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมี 2 รูปแบบ ได้แก่ HC-HSCFT และ PC-HSCFT เป็นสัญลักษณ์แทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์

ไฮดรอลิก และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เสาอ้างอิง) ตามลำดับ BB หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยมีค่าเท่ากับ 55 MPa ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ASTM ที่อายุบ่ม 28 วัน และ CC แทนความหนาของท่อเหล็กที่มีความหนา 3 ค่า ได้แก่ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตัวอย่างเช่น HC-HSCFT-55-4.5 หมายถึง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต 55 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 4.5 mm และ PC-HSCFT-55-3.0 คือ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต 55 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm

2.3 วิธีทดสอบ

ตัวอย่างเสา HSCFT ถูกติดตั้งเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) ดังแสดงใน Figure 2 ปลายของเสา HSCFT ทั้ง 2 ด้านถูกรองโดยแผ่นเหล็กความหนาเท่ากับ 50 mm เพื่อถ่ายแรงกระทำลงสู่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา รวมถึงติดตั้ง Linear Variable Differential Transformer (LVDT) จำนวน

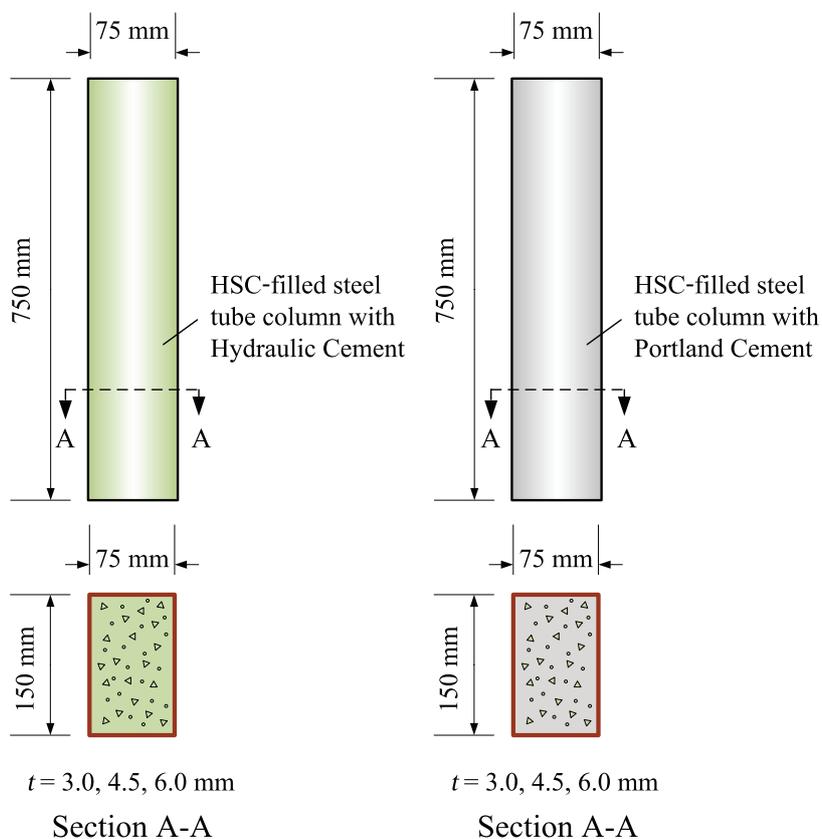


Figure 1 Dimension details for HSCFT columns.

2 ตัว บริเวณด้านบนหัวกดของเครื่อง UTM เพื่อบันทึก ระยะหดตัวในแนวแกน (axial shortening) โดยเฉลี่ย ของตัวอย่างเสา HSCFT จากนั้น ทำการ Pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังรับแรงอัดคอนกรีต เพื่อลดแรง เสียทานระหว่างหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสาและแผ่น เหล็ก [12] สูดท้าย เริ่มทดสอบโดยการเพิ่มแรงอัดอย่าง ต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 mm/min [19] พร้อมเก็บข้อมูล ตลอดการทดสอบโดยใช้ KYOWA EDX-10 Series DAQ จนกระทั่ง ตัวอย่างเสา HSCFT เกิดการวิบัติหรือหยุด ทดสอบที่ระยะหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 50 mm

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 พฤติกรรมรับแรงและลักษณะการวิบัติ

บทความนี้ นิยามให้แรงอัดสุดท้ายของเสาที่ ปราศจากการโก่งคาะของท่อเหล็กหรือ Squash load เป็นแรงอัดสูงสุด (maximum load) หรือ P_{Test} ของ ตัวอย่างเสา HSCFT และจำกัดการนำเสนอค่าการหดตัว ของตัวอย่างเสาเท่ากับ 20 mm หรือที่ความเครียดใน แนวแกนของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.0267 mm/mm โดยเป็นความเครียดที่สูงกว่าความเครียดที่กำลังรับแรง อัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า [12]

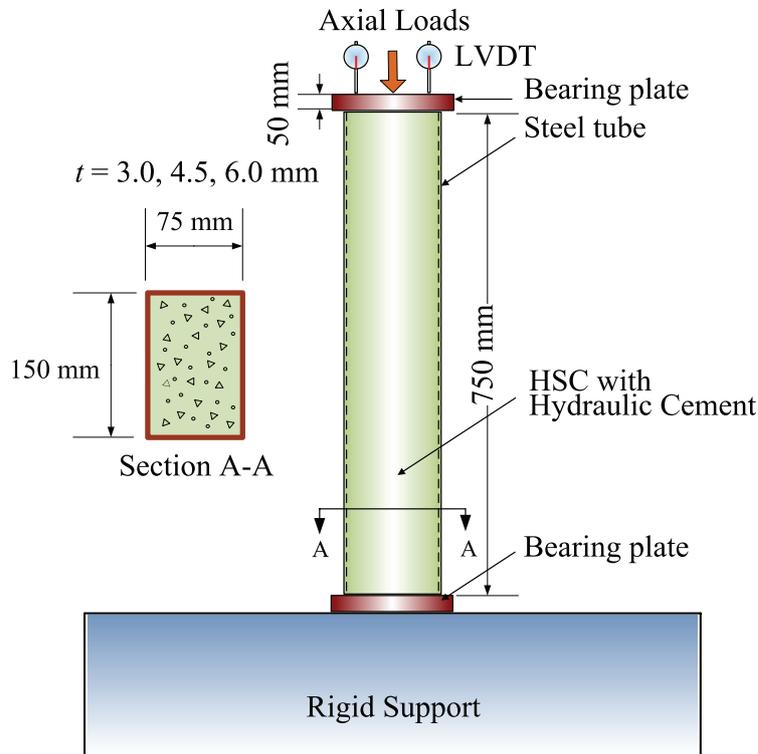
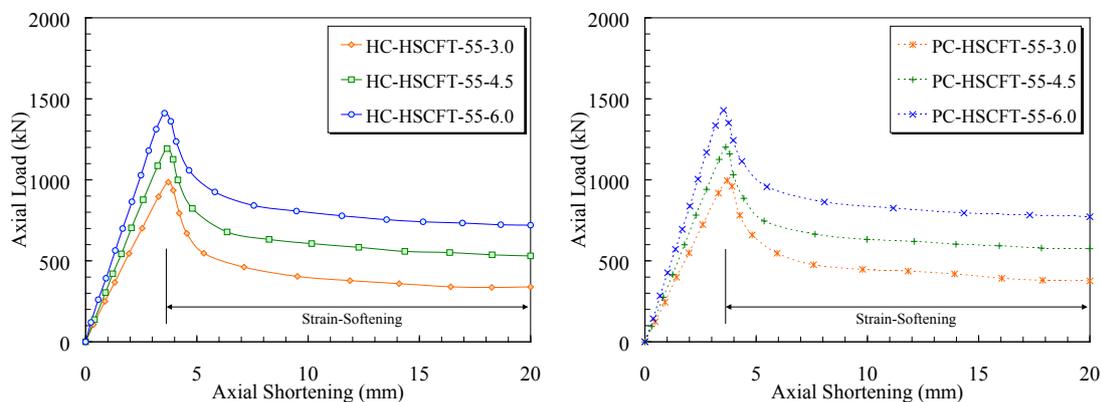


Figure 2 Test setup and instrumentations.

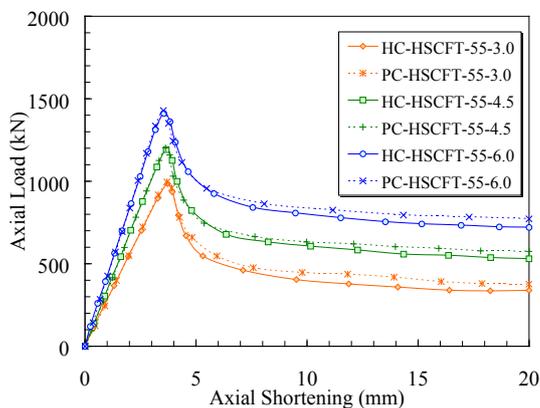
Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ที่ได้จากการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-HSCFT) และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (เสา PC-HSCFT) โดยแสดงค่าตามความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า พฤติกรรมรับแรงอัดของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีลักษณะใกล้เคียงกันดังแสดงใน Figure 3(c) และถูกแบ่งเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90-95% ของแรงอัดสูงสุด ที่จุดนี้พบว่าเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้แกน

คอนกรีตเกิดการหดตัวในแนวแกนและขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น [27] รวมถึงเริ่มเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) เล็กน้อยบริเวณผนังด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [11] ในช่วงที่สองเริ่มจากจุดที่ตัวอย่างเสามีแรงอัดสูงสุด ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนในช่วงนี้จะมีค่าลดลงและเปลี่ยนแปลงแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) จนถึงจุดวิบัติของตัวอย่างเสา [8] พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยตัวอย่างเสาเมื่อรับแรงอัดสูงสุด เสามีความแกร่งลดลงพร้อมกับการหดตัวในแนวแกนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากค่าแรงอัดสูงสุด ดังแสดงใน Figure 3(a) และ Figure 3(b) สาเหตุเนื่องจากเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณโดยรอบของผนังท่อเหล็ก [28] นอกจากนี้ เสา HC-HSCFT และเสา



(a) HC-HSCFT columns

(b) PC-HSCFT columns



(c) Comparison of HC-HSCFT columns vs. PC-HSCFT columns

Figure 3 Typical axial load-shortening curves of HSCFT columns.

PC-HSCFT เกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป สังเกตได้จากการหดตัวในแนวแกนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีการหดตัวในแนวแกนมากกว่า 40 mm หรือมีค่าความเครียดเชิงอัดเฉลี่ยมากกว่า 0.053 mm/mm (5.3%) แสดงให้เห็นว่าเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีความเหนียวในแนวแกนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งทั่วไปมีค่าความเครียดเชิงอัดเฉลี่ยประมาณ 0.005 mm/mm (0.5%) [18]

Figure 4(a) ถึง Figure 4(c) แสดงลักษณะการวิบัติของเสา HC-HSCFT และ Figure 4(d) ถึง Figure 4(e) แสดงลักษณะการวิบัติของเสา PC-HSCFT โดยเรียงตามความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ จากรูปพบว่าเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน การวิบัติเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตขยายตัวทางด้านข้าง และดันผนังของท่อเหล็กให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Du et al. [9] และ Thumrongvut and Tiwjantuk [19]



Figure 4 Typical failure modes of HSCFT columns.

3.2 ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ

สำหรับการวัดประสิทธิภาพของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต การประเมินผลกระทบเชิงประกอบระหว่างท่อเหล็กและแกนคอนกรีตสามารถอธิบายโดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ (performance index) 2 ประเภท ได้แก่ ดัชนีกำลัง (strength index, SI) และดัชนีความเหนียว (ductility index, DI)

ดัชนีกำลัง (SI) ถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (P_{Test}) ต่อผลรวมของกำลังวัสดุ (ท่อเหล็กและแกนคอนกรีต) [29-30] ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

โดยที่ f'_c คือ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต $f_{y,st}$ และ A_{st} คือ กำลังครากของท่อเหล็กและพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กตามลำดับ

ดัชนีความเหนียวเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมความเหนียวของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดในแนวแกน [31] ในที่นี้กำหนดให้มาจากสมการที่ (2)

$$DI = \frac{\Delta_{85\%}}{\Delta_u} \quad (2)$$

โดยที่ $\Delta_{85\%}$ คือ ระยะหดตัวของตัวอย่างเสาเมื่อแรงอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 85% หลังจากแรงอัดสูงสุด และ Δ_u คือ ระยะหดตัวของเสาที่ตำแหน่งแรงอัดมีค่าเท่ากับแรงอัดสูงสุด

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังและความหนาของท่อเหล็ก จากรูปพบว่า ดัชนีกำลังของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีค่าอยู่ในช่วง

ระหว่าง 1.02-1.03 และ 1.02-1.04 ตามลำดับ โดยเสาทั้ง 2 รูปแบบมีดัชนีกำลังใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าท่อเหล็กและแกนคอนกรีตมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันรับแรงอัดอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ดัชนีกำลังดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Zhang et al. [30] ที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.95-1.21 สำหรับ Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเหนียวและความหนา

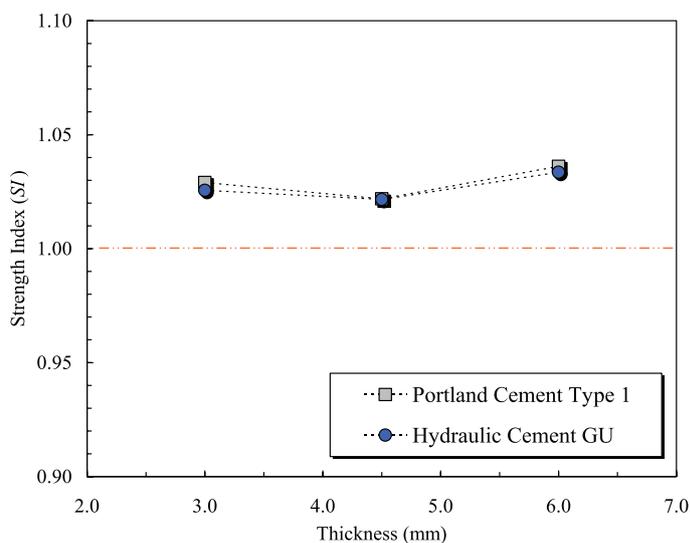


Figure 5 Strength index (SI) of HSCFT columns.

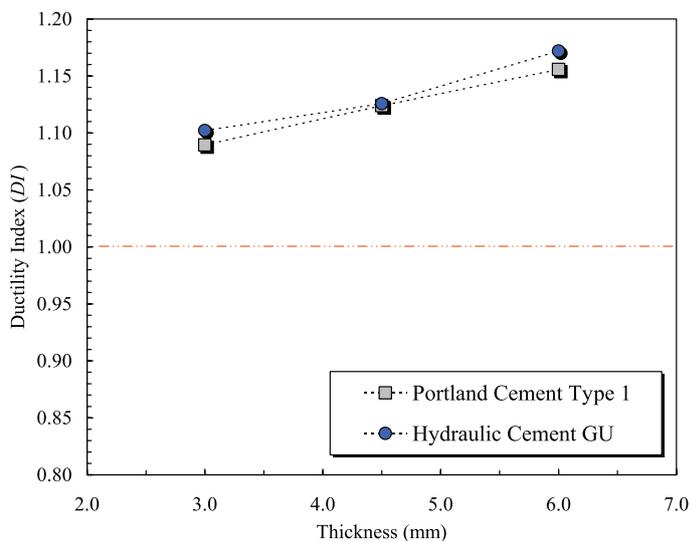


Figure 6 Ductility index (DI) of HSCFT columns.

ของท่อเหล็ก จากรูปพบว่า เสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.10-1.17 และ 1.09-1.16 ตามลำดับ โดยเมื่อความหนาของท่อเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีความเหนียวของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีค่ามากขึ้น รวมถึงยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Du et al. [31]

3.3 แรงอัดสูงสุดและเปรียบเทียบกับสมการออกแบบ

Table 4 แสดงผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT กำหนดให้ $P_{Test,28D}$ และ $P_{Test,90D}$ เป็นแรงอัดสูงสุด (maximum load) โดยเฉลี่ยของตัวอย่างเสาที่อายุบ่ม 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ จากตารางพบว่า แรงอัดสูงสุดของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อท่อเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น [8, 12] นอกจากนี้ ที่อายุบ่ม 28 วัน เสา HC-HSCFT มีแรงอัดสูงสุดต่ำกว่าเสา PC-HSCFT เล็กน้อย (น้อยกว่า 2%) เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงใน Table 3 ในทางกลับกัน ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-HSCFT มีแรงอัดสูงสุดสูงกว่าเสา PC-HSCFT ประมาณ 1-2% ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดประลัยของการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมี

ส่วนผสมของวัสดุทดแทนซีเมนต์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอลิโซลาน รวมถึงเห็นได้จากผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่มีผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) ออกไซด์อะลูมินา (Al_2O_3) และออกไซด์เหล็ก (Fe_2O_3) สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วันมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [16]

การเปรียบเทียบผลทดสอบเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบสมมติฐานเบื้องต้นกำหนดให้เสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีปฏิสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ (full interaction) ระหว่างท่อเหล็กและแกนคอนกรีตภายใต้แรงอัด โดยเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT ที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานการออกแบบเสาของ ACI 318 [21] แรงอัดในแนวแกนระบุของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถหาจากสมการที่ (3)

$$P_{n,ACI} = 0.85 f'_c A_c + f_{y,sl} A_{st} \quad (3)$$

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT ที่ทดสอบได้ (P_{Test}) และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการ

Table 4 Maximum loads and comparisons with ACI predictions.

| Group | Specimen | Binder | t (mm) | $P_{Test,28D}$ (kN) | $P_{Test,90D}$ (kN) | $P_{n,ACI}$ (kN) |
|-------|-----------------|--------|-------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | HC-HSCFT-55-3.0 | HC | 3.0 | 993.5 | 1,060.0 | 968.7 |
| | HC-HSCFT-55-4.5 | HC | 4.5 | 1,200.7 | 1,292.6 | 1,175.3 |
| | HC-HSCFT-55-6.0 | HC | 6.0 | 1,435.5 | 1,475.0 | 1,388.9 |
| 2 | PC-HSCFT-55-3.0 | PC | 3.0 | 1,002.9 | 1,049.6 | 974.6 |
| | PC-HSCFT-55-4.5 | PC | 4.5 | 1,206.7 | 1,272.5 | 1,180.9 |
| | PC-HSCFT-55-6.0 | PC | 6.0 | 1,444.5 | 1,467.6 | 1,394.1 |

ออกแบบเสาของ ACI 318 ($P_{n,ACI}$) ดังแสดงใน Figure 7 จากรูปพบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน เสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบของ ACI ($P_{Test,28D} / P_{n,ACI}$) อยู่ในระหว่างช่วง 1.02-1.04 แสดงให้เห็นว่า สมการออกแบบของ ACI สามารถประเมินแรงอัดเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT ได้อย่างถูกต้อง และผลการทดสอบที่ได้มีค่าสูงกว่าสมการออกแบบประมาณ 2-4% สอดคล้องกับผลการ

ทดสอบตัวอย่างเสา HC-HSCFT และเสา PC-HSCFT ที่อายุบ่ม 90 วัน มีอัตราส่วน $P_{Test,90D} / P_{n,ACI}$ อยู่ในระหว่างช่วง 1.04-1.07 โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ไม่มากนัก นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับการศึกษาของ Joysoongnern et al. [18] และ Bokkhumthod et al. [32] พบว่า ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงใน Figure 8 สุดท้าย จากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนของ

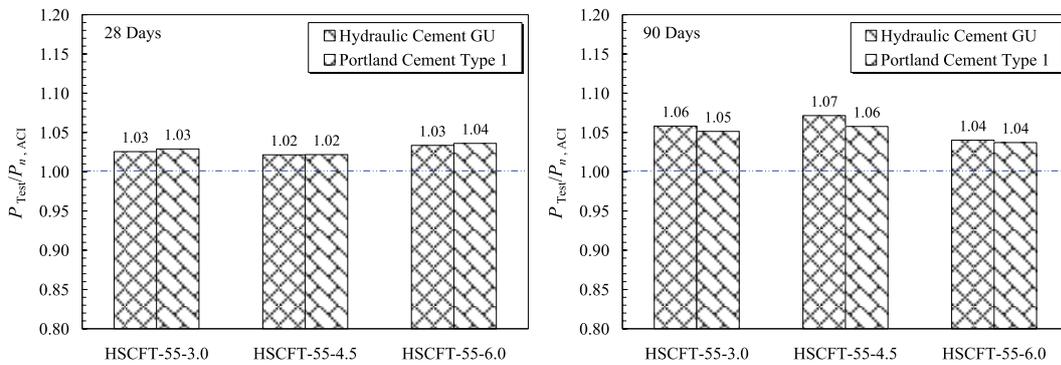


Figure 7 The $P_{Test} / P_{n,ACI}$ ratios at curing ages of 28 and 90 days.

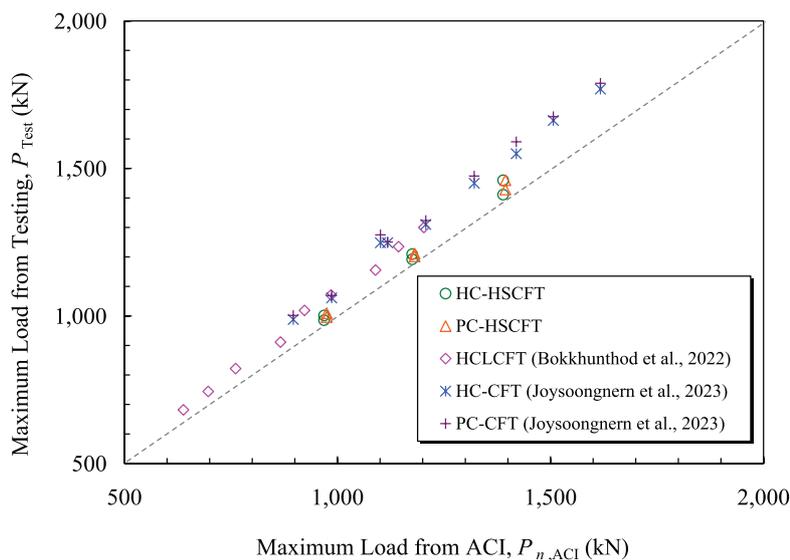


Figure 8 Comparison of test results with predicted results by ACI equation of HSCFT columns.

เสาต่อเหล็กหน้าดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแสดงให้เห็นว่า การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการศึกษาจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในวงการค้าสร้างที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂ เพื่อบรรลุเป้าหมายและตอบโจทย์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์อย่างยั่งยืน และสอดคล้องกับ Sustainable Development Goals ขององค์การสหประชาชาติและของรัฐบาลไทย

4. สรุปผล

จากการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาต่อเหล็กหน้าดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแรงอัดในแนวแกน พบว่า

1) พฤติกรรมการรับแรงอัดในช่วงแรกของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตทุกตัวอย่างเป็นแบบเชิงเส้นตรงจนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90-95% ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นช่วงที่สองความชันของกราฟความสัมพันธ์จะมีความลาดลงและเปลี่ยนแปลงแบบไร้เชิงเส้นตรงมากขึ้นจนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงมีลักษณะในรูปแบบ Strain-Softening โดยตัวอย่างเสาจะรับแรงกระทำสูงสุดถึงค่าหนึ่ง เสามีความแกร่งลดลงเนื่องจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังต่อเหล็ก

2) เสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการหดตัวในแนวแกนเกินกว่า 40 mm แสดงให้เห็นว่าเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีความเหนียวในแนวแกนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงเสาต่อเหล็กกรอก

คอนกรีตทั้งสองประเภทมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน เกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตขยายตัวทางด้านข้าง และต้นผนังของต่อเหล็กให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

3) เสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีแรงอัดสูงสุดต่ำกว่าเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อยที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีแรงอัดสูงสุดสูงกว่าเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

4) สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI สามารถประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างถูกต้อง แรงอัดสูงสุดเฉลี่ยที่ทดสอบได้ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 90 วัน มีค่ามากกว่าแรงอัดจากสมการออกแบบของ ACI ประมาณ 3% และ 5% ตามลำดับ

5) การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂ เพื่อบรรลุเป้าหมายและตอบโจทย์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FF66-P2-005

6. References

- [1] Jang, Y., Lee, J.-M., Son, J., 2022, Development and application of an integrated management system for off-site construction projects, *Buildings*, 12(7): 1063.
- [2] Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, K., 2014, Effects of flexural strengthening with non-prestressed wires on precast partially-prestressed concrete beams, *RMUTI Journal Science and Technology*, 7(2): 16-33. (in Thai)
- [3] Wang, Z., Hu, H. and Gong, J., 2018, Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components, *Automation in Construction*, 86: 69-80.
- [4] Thumrongvut, J. and Seangatith, S., 2006, Effect of embedded length steel channel sections on precast reinforced concrete beams, *Suranaree Journal of Science and Technology*, 13(1): 11-19. (in Thai)
- [5] Chen, J.-H., Hsu, S.-C., Chen, C.-L. Tai, H.-W. and Wu, T.-H., 2020, Exploring the association rules of work activities for producing precast components, *Automation in Construction*, 111: 103059.
- [6] Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, K., 2013, Tests on structural behaviors of precast partially-prestressed concrete beam's joints, *RMUTI Journal*, 6(2): 15-30. (in Thai)
- [7] Uy, B., 2008, Stability and ductility of high performance steel sections with concrete infill, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(7-8): 748-754.
- [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*, 14: 513-520.
- [9] Pantawee, S., Thumrongvut, J., Supromwan, J., Suksiripattanapong, C., Joysoon-gnern, N. and Chupkhunthod, W. (2023). Axial compression performance of rectangular concrete-filled steel tubular columns using environmentally friendly hydraulic cement. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal*, 16(3): 66-77. (in Thai)
- [10] EL-Heweity, M.M., 2012, On the performance of circular concrete-filled high strength steel columns under axial loading, *Alexandria Engineering Journal*, 51(2): 109-119.
- [11] Thumrongvut, J., Seangatith, S., Siriparin-yanan, 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.
- [12] 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.
- [13] Qin, Y., Chen, Z. and Wang, X., 2014, Experimental investigation of new internal-diaphragm connections to CFT

- columns under cyclic loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 98(7): 35-44.
- [14] Al-Rousan, R., Nusier, O., Abdalla, K., Alhassan, M. and Lagaros, N.D., 2022, NLFEA of sulfate-damaged circular CFT steel columns confined with CFRP composites and subjected to axial and cyclic lateral loads, *Buildings*, 12(3): 296.
- [15] 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.
- [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*, 14(16): 9856.
- [17] Thai Industrial Standard, 2013, Hydraulic cement (TIS 2594-2556), Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [18] 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*, 15(2): 348-360. (in Thai)
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] ACI Committee 318, 2019, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [22] Thai Industrial Standard, 2019, Portland Cement (TIS 15-2562), Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [23] Thai Industrial Standard, 2018, Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561), Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [24] ASTM C39, 2018, Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [25] ASTM A500, 2018, Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes, ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

- [26] Golewski, G.L., 2022, The role of pozzolanic activity of siliceous fly ash in the formation of the structure of sustainable cementitious composites, *Sustainable Chemistry*, 3(4): 520-534.
- [27] Konkam, T., Thumrongvut, J. and Suksiripattanapong, C., 2019, Experimental evaluation of high-strength concrete-filled steel rectangular tube columns under axial compression, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 600: 012021.
- [28] 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.
- [29] Ci, J., Ahmed, M., Jia, H., Chen, S., Zhou, D. and Hou, L., 2021, Experimental and numerical investigations of square concrete-filled double steel tubular stub columns, *Advances in Structural Engineering*, 24(11): 2441-2456.
- [30] Zhang, L., Yang, S.L., Fu, B., Tong, G.S., Tong, J.Z. and Jing, T., 2021, Behavior and design of concrete-filled narrow rectangular steel tubular (CFNRST) stub columns under axial compression, *Journal of Building Engineering*, 37: 102166.
- [31] Du, Y., Chen, Z. and Yu, Y., 2016, Behavior of rectangular concrete-filled high-strength steel tubular columns with different aspect ratio. *Thin-Walled Structures*, 109: 304-318.
- [32] 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*, 922: 147-152.