

ผลกระทบของลักษณะแรงกระทำต่อตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูง

Effects of Load Application on High-Strength Concrete-Filled Circular Steel Tube Specimens

จักษดา อารังวุฒิ¹ และกมลรัตน์ ฤทธิ์รักษา¹

Received: August, 2015; Accepted: February, 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ตัวอย่างมีหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และสูง 300 mm ตัวแปรหลักในงานวิจัย ได้แก่ ความหนาของท่อเหล็ก 3 ค่า คือ 3.0 4.5 และ 6.0 mm ตัวอย่างทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อศึกษาผลของลักษณะการให้แรงกระทำในแนวแกน 3 รูปแบบ ได้แก่ แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) แรงกระทำต่อแกนคอนกรีต และแรงกระทำต่อท่อเหล็ก จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างในช่วงแรกมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 60 - 80 ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติ โดยแบ่งพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นเป็น 2 แบบ คือ Elastic - Perfectly Plastic (EPP) และ Strain - Softening (SS) โดยพฤติกรรมไร้เชิงเส้นตรงเกิดจากการแตกร้าวของคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของท่อเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของเสา นอกจากนี้ กำลังรับแรงอัดสูงสุดและความเหนียวของตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็ก และลักษณะการให้แรงกระทำ

คำสำคัญ : เสาท่อกกรอกคอนกรีต; เสาหน้าตัดกลม; ท่อเหล็ก; คอนกรีตกำลังสูง; แรงกดอัดในแนวแกน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E - mail : jaksada.th@rmuti.ac.th

Abstract

The objectives of this research were to study the structural behaviors and mode of failure of high - strength concrete - filled circular steel tube specimens subjected to concentrically axial loads. The dimension of the circular column specimens were 150 mm in diameter and 300 mm in height. The main variable used in this study was the thickness of the steel tubes, which were 3.0, 4.5 and 6.0 mm. A total of 20 specimens were tested to investigate the effects of three methods to apply a load to the specimens. The load was applied concentrically to the entire section, to the concrete section and to the steel tube section. From the study, it was found that the response curves of the high - strength concrete - filled tube specimens have a linear elastic behavior up to approximately 60 - 70% of the maximum compressive load. Then, the behavior of the specimen is nonlinear. The nonlinear behavior of the specimen can be classified into 2 types: Elastic - Perfectly Plastic (EPP) and Strain - Softening (SS). For nonlinear behavior, it occurred due to the cracking in concrete and the local tube wall buckling of the steel tube in the area near the top and bottom end of the columns. In addition, the ultimate compressive strength and ductility of the high - strength concrete - filled tube columns increased significantly compared to the reference specimens, depending mainly on the thickness of the steel tube and the load applied to the specimens.

Keywords: Concrete-Filled Tube (CFT) Columns; Circular Columns; Steel Tube; High-Strength Concrete (HSC); Axial Compression

บทนำ

การก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยที่ผ่านมา เป็นการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (Cast-In-Place) ในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งต้องมีการผูกเหล็ก ตั้งแบบ เทคอนกรีต และถอดแบบหล่อคอนกรีต เมื่อได้อายุบ่ม ในส่วนประกอบขององค์อาคาร เช่น เสา และคาน เป็นต้น (Haas, A.M., 1983) อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างลักษณะนี้มักใช้เวลาก่อสร้างยาวนานและทำให้ต้นทุนการก่อสร้างมีราคาสูง การทำงานและการควบคุมงานทำได้ยาก โดยเฉพาะในชั้นสูง ๆ นอกจากนั้น การก่อสร้างดังกล่าวต้องมีการจัดเตรียมไม้แบบเพื่อทำแบบหล่อและติดตั้งค้ำยัน ซึ่งมักใช้แรงงานที่มีฝีมือค่อนข้างสูง ไม่เช่นนั้นอาจเกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา รวมทั้งส่งผลกระทบทางอ้อม คือการใช้ไม้เป็นแบบหล่อคอนกรีตก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้และเป็นผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งไม่สอดคล้องกับทิศทางของเศรษฐกิจในปัจจุบันที่มีการแข่งขันกันในด้านฝีมือ ราคาและความรวดเร็วในการดำเนินการ

จากปัญหาการก่อสร้างอาคารที่กล่าวข้างต้น จึงเกิดการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างแบบต่าง ๆ ขึ้นมา โดยเฉพาะการนำระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาช่วยเสริมในบางส่วน of โครงสร้าง โดยการผลิตสามารถควบคุมคุณภาพได้ทุกชิ้นส่วน ลดเศษขยะจากการใช้ไม้แบบ การทำงานมีระบบ ลดต้นทุนค่าแรงคนงาน ลดระยะเวลาการก่อสร้าง ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างโดยรวมลดลง (Elliott, K.S., 2002) ตัวอย่างเช่น คานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (Thumrongvut, J. and Seangatith, S., 2006; Thumrongvut, J. et al., 2013; Thumrongvut, J. et al., 2014) และการใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและได้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าวออกจากโครงสร้าง เช่น การใช้ท่อเหล็ก (Huang, C.S. et al., 2002; Han, L.H. and Yao, G.H., 2003; Giakoumelis, G. and Lam, D., 2004; Zhang, S. and Liu, J., 2007; Seangatith, S. and Thumrongvut, J., 2009) และท่อ Stainless Steel (Roufegarinejad, A. et al., 2004; Ellobody, E. and Young, B., 2006) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา เป็นต้น โดยในปัจจุบันเสาเชิงประกอบหรือเสาคอมโพสิต เช่น เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-Filled Steel Tube Column, CFT Column) ได้นำมาใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ดังปรากฏรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบในมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานการรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (วสท. 1008-38) ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (The Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage, 1995) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318) ของ American Concrete Institute (American Concrete Institute, 2005) และ Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของ American Institute of Steel Construction (AISC) (American Institute of Steel Construction, 1999) เป็นต้น โดยเสาเชิงประกอบดังกล่าวมีข้อดีที่สำคัญคือ ช่วยให้การก่อสร้างมีความรวดเร็ว โครงสร้างมีความสวยงามโดยใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวรให้โครงสร้าง

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน เช่น Tomii, M. et al. (Tomii, M. et al., 1985), Mander, J.B. et al. (Mander, J.B. et al., 1988), Schneider, S.P. (Schneider, S.P., 1998) และ Xiao, Y. et al. (Xiao, Y. et al., 2005) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนท่อเหล็กทำงานร่วมกับแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กในการรับแรงกระทำโดยอาศัย Composite Action ซึ่งเป็นผลทำให้เสาดังกล่าวมีกำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาก Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011) และ Auyyuenyong, C. et al. (Auyyuenyong, C. et al., 2011) ได้ศึกษาผลของ Passive Confinement และ Active Confinement ต่อแกนคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบ Passive Confinement โดยท่อเหล็กมีพฤติกรรมแตกต่างจากคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบ Active Confinement โดยขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็กและขนาดของการเปลี่ยนรูปร่างตามขวางของแกนคอนกรีตภายใต้แรงอัด การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวของตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง นอกจากนั้นแล้ว Composite Action ยังช่วยทำให้เสาดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่าก่อนที่จะเกิดการวิบัติ และเหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่มีแผ่นดินไหว (Elremaily, A. and Azizinamini, A., 2002; Han, L.H. et al., 2003)

อย่างไรก็ตาม เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบันผลิตจากคอนกรีตปกติที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยอยู่ในช่วงประมาณ 15 - 35 MPa (150 - 350 kg/cm²) ส่งผลให้เสาที่รับน้ำหนักต้องมีขนาดใหญ่และพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารลดลง ฐานรากอาจมีขนาดใหญ่เพื่อสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทั่วตัวอาคารได้ ดังนั้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างที่พิกัดภัยให้เหมาะสมกับสภาวะการก่อสร้างในยุคกระแสโลกาภิวัตน์ที่มีความก้าวหน้าทางวิศวกรรมและเทคโนโลยีก่อสร้างจึงผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High - Strength Concrete, HSC) ขึ้นมาใช้งานก่อสร้าง ซึ่งปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ด้วยประสิทธิภาพและความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตกำลังสูงทำให้ผู้ออกแบบและผู้รับเหมาได้รับประโยชน์ในแง่มุมต่าง ๆ หลายด้าน เช่น คอนกรีตกำลังสูงมีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับการก่อสร้างเสา สามารถลดขนาดของหน้าตัดเสาลงได้อย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตกำลังปกติ โดยเสาที่ออกแบบได้มีขนาดเล็กลงแต่สามารถรับน้ำหนักได้เท่าเดิม (Cusson, D. and Paultre, P., 1994) และช่วยเพิ่มเนื้อที่ในการใช้สอยอาคาร เนื่องจากการลดลงของขนาดเสาและระยะห่างระหว่างเสาที่เพิ่มขึ้น จึงมีผลให้พื้นที่สำหรับใช้สอยในอาคารเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถประหยัดปริมาณเหล็กเสริม ตลอดจนช่วยลดแรงงานในการก่อสร้าง เนื่องจากขนาดของโครงสร้างที่เล็กลงทำให้ปริมาณของคอนกรีตที่ใช้ลดลงตาม สำหรับการใช้คอนกรีตกำลังสูงในงานด้านอื่น ๆ ส่วนมากเป็นพฤติกรรมด้านความทนทาน เช่น งานโครงสร้างในทะเล (Offshore Structure) เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมีค่าซึมผ่านน้ำต่ำ จึงช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตกำลังปกติ ส่งผลให้โครงสร้างดังกล่าวมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (Sata, V. et al., 2004)

จากข้อดีของคอนกรีตกำลังสูงที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุคอนกรีตกำลังสูงมาประยุกต์ใช้ร่วมกับท่อเหล็ก โดยการเสริมท่อเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการรับน้ำหนักน่าจะเป็นทางเลือกในการก่อสร้างอาคารอีกทางเลือกหนึ่งแทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังปกติ โดยแรงงานในท้องถิ่นสามารถนำองค์ความรู้ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อต่อยอดภูมิปัญญาการก่อสร้างแบบเดิมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูง เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมกำลังอีกรูปแบบหนึ่งให้กับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต โดยตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วยความหนาของท่อเหล็ก และลักษณะแรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

1. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ในปี ค.ศ. 1997 ACI Committee 363 (American Concrete Institute, 1997) ได้ให้คำจำกัดความคอนกรีตกำลังสูง คือคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบเท่ากับ 42 MPa (420 kg/cm²) หรือมากกว่า แต่ไม่รวมคอนกรีตที่ทำด้วยวัสดุหรือเทคนิคพิเศษในการศึกษานี้พิจารณาโดยยึดถือคำจำกัดความว่า คอนกรีตกำลังสูง คือคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยสูงกว่าที่มีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน ACI 318-05 (American Concrete Institute, 2005) หรือมีกำลังรับแรงอัดประลัยเกินกว่า 40 MPa (400 kg/cm²) โดยในการศึกษานี้ใช้คอนกรีตผลิตเสร็จที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1 f'_c ที่ 28 วัน เท่ากับ 42 MPa (420 kg/cm²) ท่อเหล็กที่ใช้

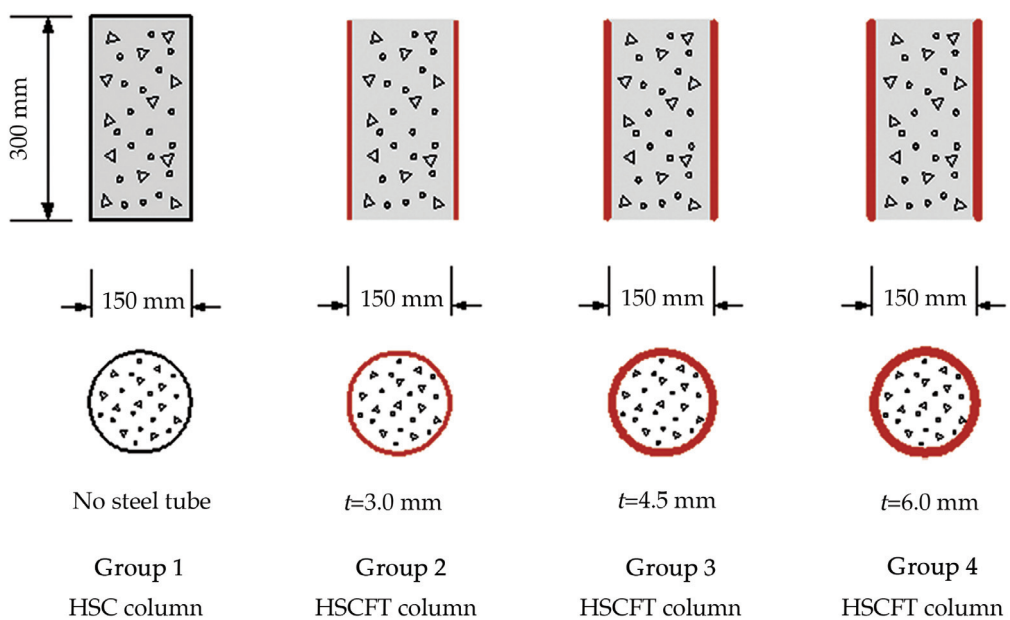
เป็นท่อเหล็กหน้าตัดกลม (Steel Circular Tube) ที่ผลิตโดยการพับแผ่นเหล็กโครงสร้างแบบเย็น (Cold - Formed) นำมาเชื่อมรอยต่อในแนวแกนเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมไฟฟ้าแบบ Machine Welding โดยเป็นท่อเหล็กตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของ มอก. ที่มีความหนา 3.0 4.5 และ 6.0 mm โดยท่อเหล็กที่มีความหนา 4.5 mm มีค่า D/t ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน วสท. 1008-38 แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของข้อกำหนดของ AISC-LRFD ท่อเหล็กที่มีความหนา 3.0 mm มีค่า D/t ไม่ผ่านเกณฑ์ทั้งสองข้างต้น และท่อเหล็กที่มีความหนา 6.0 mm มีค่า D/t ผ่านเกณฑ์ทั้งสองข้างต้น อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสามากกว่า 4% ตามข้อกำหนดของ AISC - LRFD โดยที่ D และ t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กและความหนาของท่อเหล็ก การทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้กระทำตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยท่อเหล็กหน้าตัดกลมทดสอบภายใต้แรงดึงเนื่องจากในรูปแบบตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีต ท่อเหล็กถูกกระทำโดยแรงดึงเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตเป็นหลัก โดยค่าสมบัติทางกลเฉลี่ยของคอนกรีตและท่อเหล็กได้นำเสนออยู่ในตารางที่ 1

2. ตัวอย่างทดสอบ

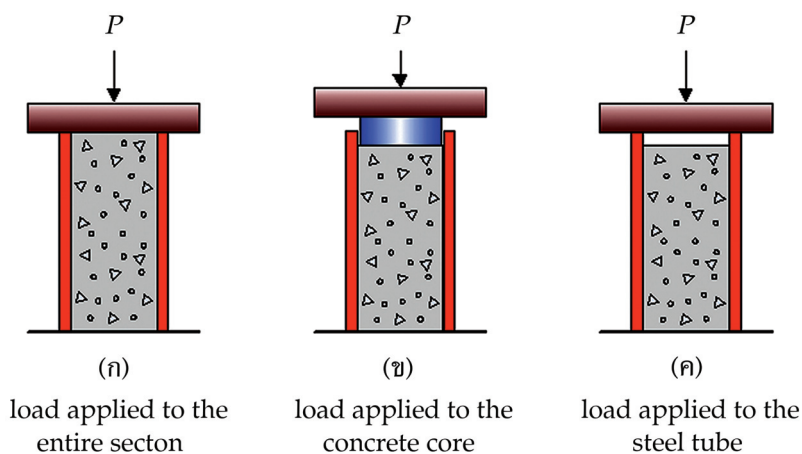
ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm โดยมีความสูง (L) 300 mm ทำให้มีค่า L/D เท่ากับ 2.0 (ถูกจำกัดโดยความสูงและประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบ) และมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาท่อเหล็ก D/t เท่ากับ 50 33.3 และ 20 สำหรับตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูงที่มีความหนาของท่อเหล็ก 3.0 4.5 และ 6.0 mm ตามลำดับ นอกจากนี้ ตัวอย่างไม่มีระบบที่ใช้ในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก (Smooth Surface) ตัวอย่างทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 20 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงอ้างอิง (Concrete Specimen) จำนวน 2 ตัวอย่าง และเสากลุ่มที่ 2 ถึง 4 เป็นตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง (ตัวอย่าง HSCFT) รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีจำนวนกลุ่มละ 6 ตัวอย่าง และชื่อตัวอย่างทดสอบได้นำเสนอในตารางที่ 1 โดยสัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างกำหนดในรูป WW-XX-YY-Z โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ WW หมายถึง ประเภทของตัวอย่างหน้าตัดกลมที่ใช้ทดสอบ ซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ CC และ CS เป็นสัญลักษณ์แทนตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงอ้างอิงและตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกำลังสูง ตามลำดับ XX หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต f'_c ในหน่วย MPa และ YY แทนความหนา (t) ของท่อเหล็ก ในหน่วย mm และสุดท้าย Z หมายถึง ลักษณะการให้แรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อตัวอย่างมี 3 รูปแบบ ได้แก่ E C และ S เป็นสัญลักษณ์แทน แรงกดอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) แรงกดอัดกระทำต่อแกนคอนกรีต และแรงกดอัดกระทำต่อท่อเหล็ก โดยลักษณะการให้แรงกระทำทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบและสมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	Thickness (mm)	Load application	D/t	L/D	Concrete Properties		Steel Tube Properties		Number of tests
					A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	A_{st} (mm ²)	f_{st} (MPa)	
CC-42-0	-	Entire	-	2.0	17672	45.8	-	-	2
CS-42-3.0-E	3.0	Entire	50.0	2.0	19607	45.8	1529	370.2	2
CS-42-4.5-E	4.5	Entire	33.3	2.0	19483	45.8	2272	347.5	2
CS-42-6.0-E	6.0	Entire	25.0	2.0	18942	45.8	3001	366.7	2
CS-42-3.0-C	3.0	Concrete	50.0	2.0	19607	45.8	1529	370.2	2
CS-42-4.5-C	4.5	Concrete	33.3	2.0	19483	45.8	2272	347.5	2
CS-42-6.0-C	6.0	Concrete	25.0	2.0	18942	45.8	3001	366.7	2
CS-42-3.0-S	3.0	Steel Tube	50.0	2.0	19607	45.8	1529	370.2	2
CS-42-4.5-S	4.5	Steel Tube	33.3	2.0	19483	45.8	2272	347.5	2
CS-42-6.0-S	6.0	Steel Tube	25.0	2.0	18942	45.8	3001	366.7	2



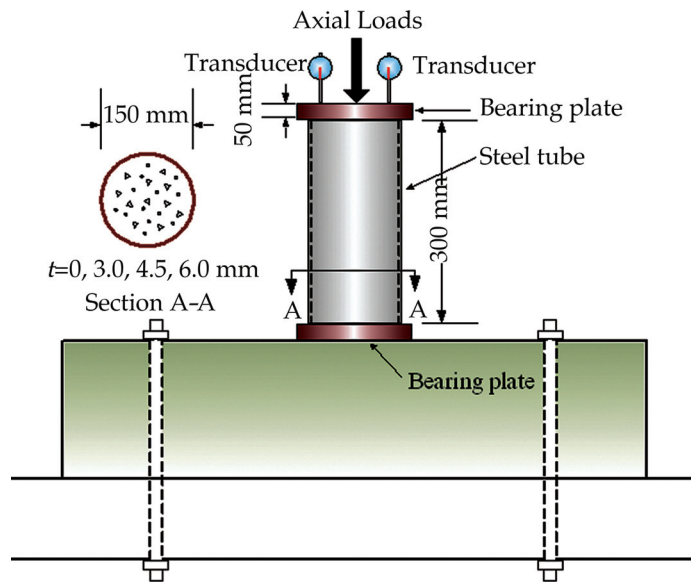
รูปที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบตัวอย่าง HSCFT



รูปที่ 2 ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อตัวอย่าง (ก) แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) (ข) แรงกระทำต่อแกนคอนกรีต และ (ค) แรงกระทำต่อท่อเหล็ก (Johansson, M. and Gylltoft, K., 2001)

3. การทดสอบ

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Compression Testing Machine ขนาด 5000 kN โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำที่ปลายของเสาผ่าน Steel Bearing Plate หนา 50 mm ลงสู่ตัวอย่างทดสอบตามลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อตัวอย่าง (รูปที่ 2) การทดสอบในแนวแกนถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่อง Compression Testing Machine เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้วตัวอย่างจะถูก Pre-Loading ประมาณ 50 kN และ Unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ โดยใช้ Yokogawa MW100 Data Acquisition Unit เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์หรือหยุดการทดสอบที่ระยะการทดสอบเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่าง HSCFT

ผลการวิจัย

1. พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial Load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial Shortening) ของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ โดยจัดกลุ่มตามลักษณะการให้แรงกระทำ และจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัว 20 mm หรือ Axial Strain ในคอนกรีตเท่ากับ 0.0667 mm/mm ซึ่งเป็นค่า Strain ที่สูงกว่า Ultimate Compressive Strain ของคอนกรีตประมาณ 20 เท่า โดยในการศึกษานี้ได้นิยามให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด (Maximum Load) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง หรือค่าแรง ณ จุดที่ผนังท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) ที่สามารถสังเกตเห็นได้เป็น “กำลังรับแรงสูงสุด” หรือ P_u

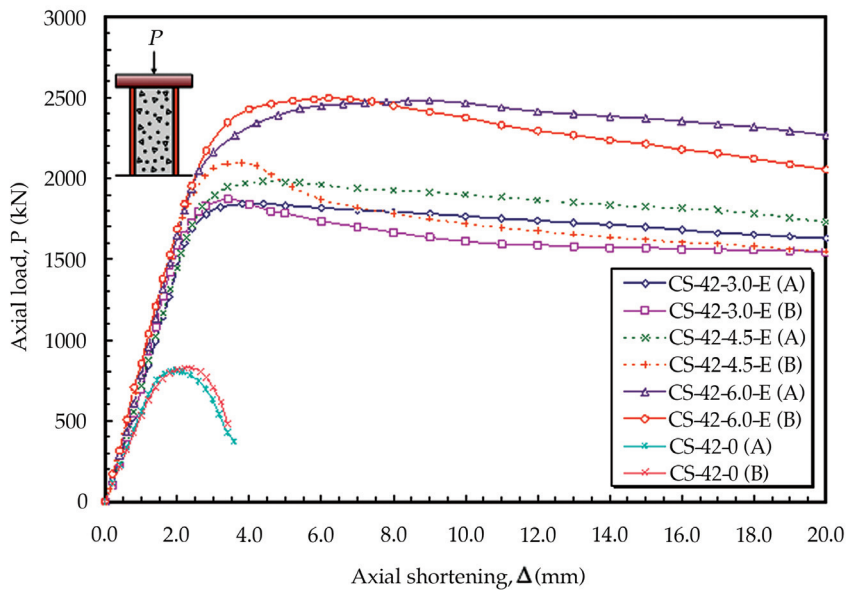
จากรูปที่ 4(ก) แสดงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (Entire Section) พบว่า ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงและตัวอย่าง HSCFT มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากตัวอย่าง HSCFT มีคอนกรีตและท่อเหล็กเป็นวัสดุหลักในการรับแรง ส่งผลให้ตัวอย่าง HSCFT มีความแกร่งสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้แรงกดอัดกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 4(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงและตัวอย่าง HSCFT จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในช่วงแรก เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's Ratio ที่ต่ำ ดังนั้น ในช่วงนี้คอนกรีตจึงมีการขยายตัวทางด้านข้างที่น้อยมากและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัด สำหรับรูปที่ 4(ค) แสดงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อท่อเหล็ก พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของตัวอย่าง HSCFT แตกต่างจากการให้แรงกระทำใน 2 รูปแบบแรก

สาเหตุเนื่องจากแรงกดอัดทั้งหมดรองรับโดยผนังของท่อเหล็ก ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตประมาณ 6 - 12 เท่า ส่งผลให้ตัวอย่างมีความต้านทานต่อแรงกระทำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง HSCFT ในรูปที่ 4(ก) และรูปที่ 4(ข)

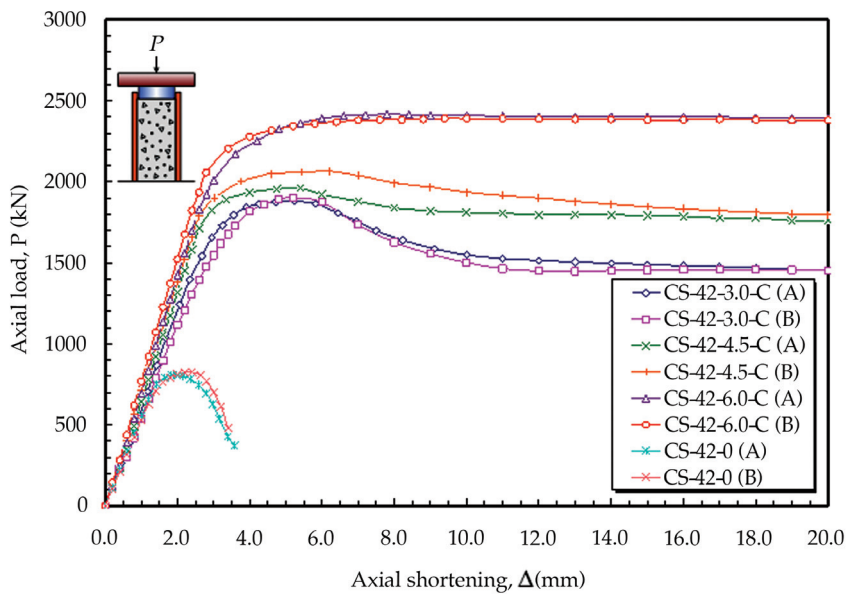
โดยพฤติกรรมของตัวอย่างทั้งหมด (ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง) เป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่เสารับแรงกดอัดประมาณร้อยละ 60 - 80 ของกำลังรับแรงสูงสุด (P_u) จากนั้นในช่วงที่สองเมื่อตัวอย่างถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro - Cracking) ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's Effect ดังนั้น ความชันของกราฟความล้ามันจึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของ HSCFT Column จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) มากขึ้นจนถึงจุดวิบัติ โดยพฤติกรรมในช่วงที่สองแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ แบบที่ 1 ตัวอย่างรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว ตัวอย่างมีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือ Elastic - Perfectly Plastic (EPP) ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่าง CS - 42 - 6.0 - C ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีผนังท่อเหล็กหนา 6.0 mm และให้แรงกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรง และแบบที่ 2 ตัวอย่างรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว ตัวอย่างมีความแข็งแรงลดลงหรือ Strain - Softening (SS) ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่าง HSCFT ทั้งหมดที่ไม่ได้กล่าวไว้ในแบบที่ 1

2. ลักษณะการวิบัติ

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดและแกนคอนกรีตจะเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive Failure) โดยตัวอย่างส่วนใหญ่เกิดการวิบัติที่ค่าการกดตัวเกินกว่า 30 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.1 mm/mm ซึ่งแสดงว่าตัวอย่าง HSCFT มีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง ซึ่งเกิดจากการอัดแตกของคอนกรีต (Crushing) ดังที่แสดงในรูปที่ 5(ก) โดยค่าการกดตัวในแนวแกนของตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงที่กำลังรับแรงสูงสุดมีค่าประมาณ 2.2 ถึง 2.4 mm และแตกต่างจากตัวอย่าง HSCFT ที่เกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างที่ตำแหน่งประมาณ 30 ถึง 50 mm วัดจากปลายทั้งสองด้านของตัวอย่าง ดังที่แสดงในรูปที่ 5(ข) และรูปที่ 5(ค) ลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อท่อเหล็กโดยตรง โดยจะเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณผนังของท่อเหล็กที่บริเวณผิวสัมผัสกับหัวกดของเครื่องทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5(ง)

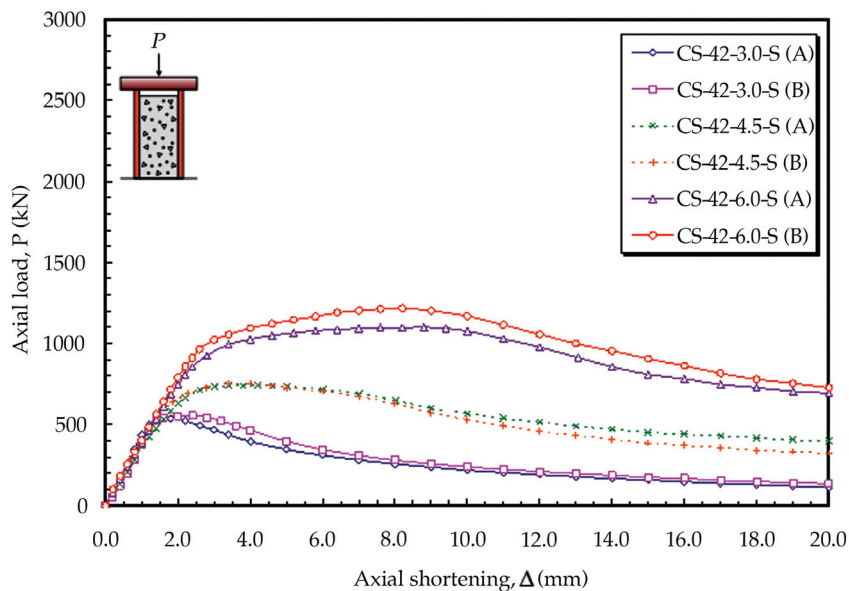


(ก) แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก)



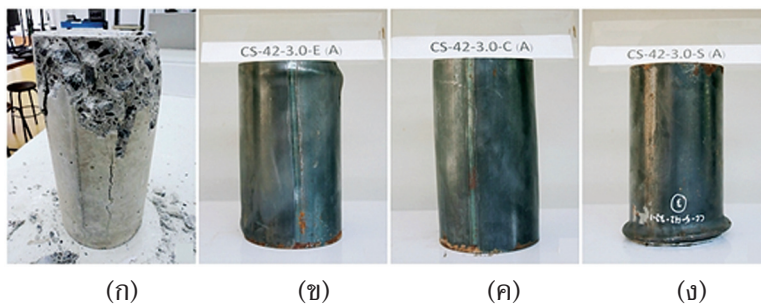
(ข) แรงกระทำต่อแกนคอนกรีต

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน



(ค) แรงกระทำต่อท่อเหล็ก

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน (ต่อ)



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติ (ก) ตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง (ข) แรงกดอัดกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (ค) แรงกดอัดกระทำต่อแกนคอนกรีต และ (ง) แรงกดอัดกระทำต่อท่อเหล็ก

3. กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดและค่าการหดตัวสูงสุด

ตารางที่ 2 แสดงสรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดและค่าการหดตัวสูงสุดของตัวอย่าง HSCFT ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบข้อมูลที่ทดสอบได้กับงานวิจัยของ Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011) โดยการศึกษาดังกล่าวนำเสนอผลทดสอบตัวอย่างคอนกรีตหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัย f'_c เท่ากับ 18, 25 และ 32 MPa ความหนาของท่อเหล็ก 3 ค่า ได้แก่ 3.2, 4.5 และ 6.0 mm ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างถูกกระทำผ่านแกนคอนกรีตโดยตรง (รูปที่ 2(ข))

จากตารางพบว่า เมื่อพิจารณาลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างในรูปแบบเดียวกัน ตัวอย่าง HSCFT ที่ใช้ท่อเหล็กที่มีผนังบางกว่า (3.0 mm) จะมีอัตราส่วนของแรงกดอัดสูงสุดต่อแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง ($P_u/P_{u,ref}$) อยู่ในช่วง 0.69 ถึง 2.31 ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่าง HSCFT ที่ใช้ท่อเหล็กที่หนากว่า (6.0 mm) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.42 ถึง 3.04 และเมื่อพิจารณาท่อเหล็กที่มีความหนาเท่ากัน อัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ ของตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดและกระทำต่อแกนคอนกรีตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น ท่อเหล็กที่มีความหนา 4.5 mm อัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ มีค่าเท่ากับ 2.49 และ 2.46 สำหรับตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมดและกระทำต่อแกนคอนกรีต โดยผลทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Johansson, M. and Gylltoft, K. (Johansson, M. and Gylltoft, K., 2001) อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่าง HSCFT ที่ให้แรงกระทำต่อท่อเหล็กมีอัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ เท่ากับ 0.91 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าลักษณะการให้แรงกระทำใน 2 รูปแบบข้างต้น สาเหตุเนื่องจากตัวอย่างเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่บริเวณผนังท่อเหล็กใกล้กับบริเวณหัวกด (ดังรูปที่ 5(ง))

จากเปรียบเทียบอัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ จากผลทดสอบที่ได้กับผลทดสอบของ Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011) พบว่า เมื่อพิจารณาตัวอย่าง HSCFT ที่มีความหนาท่อเหล็กเท่ากัน ตัวอย่าง HSCFT ที่กรอกคอนกรีตกำลังต่ำ (18 MPa) มีอัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ มากกว่าตัวอย่าง HSCFT ที่กรอกคอนกรีตกำลังสูง (42 MPa) ตัวอย่างเช่น พิจารณาท่อเหล็กที่มีความหนา 6.0 mm ตัวอย่างทดสอบ CS18-60-0 CS25-60-0 CS32-60-0 และ CS-42-6.0-C มีอัตราส่วน $P_u/P_{u,ref}$ เท่ากับ 4.54 3.78 3.41 และ 2.94 ตามลำดับ กล่าวคือตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตกำลังต่ำสามารถช่วยพัฒนากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนได้สูงกว่าตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับผลการศึกษาของ Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (Seangatith, S. and Thumrongvut, J., 2009)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่าง HSCFT ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

Specimen	f'_c (MPa)	Thickness (mm)	Load application	P_u (kN)	$P_u / P_{u,ref}$	$\Delta_u / \Delta_{u,ref}$	Failure behavior
CC-42-0	45.8	-	Entire	818.2	1.00	1.00	Crushing
CS-42-3.0-E	45.8	3.0	Entire	1857.8	2.27	1.77	SS
CS-42-4.5-E	45.8	4.5	Entire	2040.7	2.49	1.86	SS
CS-42-6.0-E	45.8	6.0	Entire	2489.5	3.04	3.45	SS
CS-42-3.0-C	45.8	3.0	Concrete	1891.6	2.31	2.36	SS
CS-42-4.5-C	45.8	4.5	Concrete	2013.7	2.46	2.64	SS
CS-42-6.0-C	45.8	6.0	Concrete	2404.7	2.94	3.91	EPP
CS-42-3.0-S	45.8	3.0	Steel Tube	548.4	0.67	0.91	SS
CS-42-4.5-S	45.8	4.5	Steel Tube	746.8	0.91	1.64	SS
CS-42-6.0-S	45.8	6.0	Steel Tube	1158.9	1.42	3.86	SS
CS18-32-0 *	19.9	3.2	Concrete	1144.64	2.93	2.00	SS
CS18-45-0 *	19.9	4.5	Concrete	1450.40	3.72	2.32	EPP
CS18-60-0 *	19.9	6.0	Concrete	1769.88	4.54	2.55	SH

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่าง HSCFT ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน (ต่อ)

Specimen	f'_c (MPa)	Thickness (mm)	Load application	P_u (kN)	$P_u / P_{u,ref}$	$\Delta_u / \Delta_{u,ref}$	Failure behavior
CS25-32-0 *	26.7	3.2	Concrete	1356.32	2.60	2.14	SS
CS25-45-0 *	26.7	4.5	Concrete	1687.56	3.22	2.33	SS
CS25-60-0 *	26.7	6.0	Concrete	1977.64	3.78	2.57	SH
CS32-32-0 *	31.9	3.2	Concrete	1611.12	2.58	2.29	SS
CS32-45-0 *	31.9	4.5	Concrete	1895.32	3.03	2.43	SS
CS32-60-0 *	31.9	6.0	Concrete	2130.52	3.41	2.52	SH

หมายเหตุ: * ผลวิจัยของ Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011)

SH คือ พฤติกรรมแบบ Strain Hardening

EPP คือ พฤติกรรมแบบ Elastic Perfectly Plastic

SS คือ พฤติกรรมแบบ Strain Softening

เมื่อพิจารณาค่าการหดตัวสูงสุด (Δ_u) ที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง HSCFT ในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อท่อเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น ตัวอย่างจะมีความเหนียวสูงขึ้น สังเกตได้จากอัตราส่วนของค่าการหดตัวสูงสุดต่อค่าการหดตัวสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง ($\Delta_u / \Delta_{u,ref}$) โดยตัวอย่าง HSCFT ที่มีความหนา 6.0 mm มีอัตราส่วน $\Delta_u / \Delta_{u,ref}$ อยู่ในช่วง 3.45 ถึง 3.91 ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวอย่าง HSCFT ที่มีความหนา 3.0 mm ที่มีอัตราส่วน $\Delta_u / \Delta_{u,ref}$ อยู่ในช่วง 0.91 ถึง 2.36 และมีแนวโน้มที่เหมือนกับผลการศึกษาของ Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011) ดังนั้น ตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนได้ค่อนข้างสูงและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

จากพฤติกรรมรับแรงในตารางที่ 2 เห็นได้ชัดว่าตัวอย่าง HSCFT ส่วนมากมีพฤติกรรมรับแรงแบบ Strain - Softening อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทดสอบ CS-42-6.0-C มีพฤติกรรมรับแรงแบบ Elastic - Perfectly Plastic ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างที่มีความหนาของท่อเหล็กเท่ากัน (CS-42-6.0-E CS-42-6.0-S) เนื่องจากตัวอย่างดังกล่าวมีลักษณะการให้แรงกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงโดยผนังท่อเหล็กมีความแข็งแรงและสามารถจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีต ส่งผลให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงกดอัดอย่างต่อเนื่องและมีความเหนียวในแนวแกนสูงเมื่อเทียบกับลักษณะการให้แรงกระทำแบบอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงจากการทดสอบของ Namvijitr, N. et al. (Namvijitr, N. et al., 2011) พบว่า โดยรวมตัวอย่างที่มีท่อเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 mm มีพฤติกรรมแบบ Strain Hardening และ Elastic - Perfectly Plastic ซึ่งเหมาะสมนำไปใช้งาน เนื่องจากตัวอย่างสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ ตลอดจนมีปริมาณเหล็กเพียงพอตามมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบที่มีความหนาท่อเหล็กต่ำสุดของ วสท.

บทสรุป

1. ตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูงมีพฤติกรรมโครงสร้างแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดที่ตัวอย่างรับแรงกดอัดประมาณร้อยละ 60 - 80 ของกำลังรับแรงสูงสุด และแบบไร้เชิงเส้นในช่วงที่สอง โดยพฤติกรรมของตัวอย่าง HSCFT แบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) Elastic - Perfectly Plastic และ 2) Strain - Softening ขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็กและลักษณะการให้แรงกระทำ
2. การวิบัติของตัวอย่าง HSCFT มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการกดตัวเกินกว่า 30 mm เห็นได้ชัดว่าตัวอย่าง HSCFT เป็นเสาที่มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมากการวิบัติเกิดขึ้นโดยการโป่งออกของผนังของท่อเหล็กที่ปลายด้านบนและล่าง ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของเสาบริเวณดังกล่าวควรเสริมด้วยท่อเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอเพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ
3. ท่อเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงได้ค่อนข้างสูงและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ สำหรับการใช้งานจริง พฤติกรรม Elastic - Perfectly Plastic และ Strain Hardening เป็นพฤติกรรมที่ควรออกแบบให้เกิดขึ้นโดยท่อเหล็กควรมีความหนาที่เพียงพอ ตลอดจนมีรอยเชื่อมต่อของผนังท่อที่สมบูรณ์จะช่วยให้ท่อเหล็กรองรับแรงดันเนื่องจากการขยายตัวด้านข้างของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
4. การให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (แกนคอนกรีตร่วมกับท่อเหล็ก) และแรงกระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงเป็นลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ควรนำมาประยุกต์ใช้งานเนื่องจากสามารถพัฒนากำลังภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนได้สูงกว่าการให้แรงกระทำต่อท่อเหล็กโดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้การสนับสนุนวัสดุ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

References

- American Concrete Institute. (1997). State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Committee 363. Farmington Hills, Michigan
- American Concrete Institute. (2005). Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary (ACI Committee 318R-05). Farmington Hills, Michigan
- American Concrete Institute. (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-05). Detroit
- American Institute of Steel Construction. (1999). Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings. AISC Specification. Chicago.

- Auyyuenyong, C., Seangatith, S., Thumrongvut, J. and Sukprasert, S. (2011). Effect of Preconfined with Steel Jackets on Behaviors of Square Concrete Cspecimens Under Axial Load. The 16th National Convention on Civil Engineering. Chonburi. May 18-20, 2011
- Elliott, K.S. (2002). *Precast Concrete Structures*. United Kingdom : Butterworth-Heinemann
- Ellobody, E. and Young, B. (2006). Design and Behaviour of Concrete-Filled Cold-Formed Stainless Steel Tube Columns. *Engineering Structures*. Vol. 28. No. 5. pp. 716-728
- Elremaily, A. and Azizinamini, A. (2002). Behavior and Strength of Circular Concrete-Filled Tube Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 58. No. 12. pp. 1567-1591
- Giakoumelis, G. and Lam, D. (2004). Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 60. No. 7. pp. 1049-1068
- Haas, A.M. (1983). *Precast Concrete Design and Applications*. London, United Kingdom: Applied Science Publishers Ltd.
- 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*. Vol. 59. No. 6. pp. 751-767
- 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 of Structural Engineering*. Vol. 128. No. 9. pp. 1222-1230
- 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*. Vol. 41. No. 9. pp. 801-833
- Johansson, M. and Gylltoft, K. (2001). Structural Behavior of Slender Circular Steel-Concrete Composite Columns under Various Means of Load Application. *Steel and Composite Structures*. Vol. 1. No. 4. pp. 393-410
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol. 114. No. 8. pp. 1804-1826
- Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvut, J. and Sukprasert, S. (2011). Behaviors and Compressive Strength of Circular Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets. *UBU Engineering Journal*. Vol.4 No.1. pp. 1-15
- Roufegarinejad, A., Uy, B. and Bradford, M.A. (2004). Behaviour and Design of Concrete Filled Steel Columns Utilizing Stainless Steel Cross Sections under Combined Actions. In *Proceedings of the 18th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. pp. 159-165

- Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. (2004). Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 16. No. 6. pp. 623-628
- Schneider, S.P. (1998). Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol. 124. No. 10. pp. 1125-1138
- 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
- The Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage. (1995). *Specification for Reinforced Concrete Buildings (Strength Design Method)*. Bangkok
- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2006). Effect of Embedded Length Steel Channel Sections on Precast Reinforced Concrete Beams. *Suranaree Journal of Science and Technology*. Vol. 13. No.1. pp. 11-19
- Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. *RMUTI Journal*. Vol. 6. No. 2. pp. 15-30
- Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, 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
- Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K. and Xiao, Y. (1985). Lateral Load Capacity of Reinforced Concrete Short Columns Confined by Steel Tube. In *Proceeding of International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures*. Harbin, China, pp. 19-26
- Xiao, Y., He, W. and Choi, K. (2005). Confined Concrete Filled Tubular Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol. 131. No. 3. pp. 488-497
- Zhang, S. and Liu, J. (2007). Seismic Behavior and Strength of Square Tube Confined Reinforced-Concrete (STRC) Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 63. No. 9. pp. 1194-1207