



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การทดสอบทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

Structural Test of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Square Tube Columns under Axial Compressive Load

จักษดา อารมวณ^{1*} ธนารัตน์ ศิริปริญญานันต์¹ สิทธิชัย แสงอาทิตย์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jaksada Thumrongvut^{1*} Thanarat Siriparinyanan¹ Sittichai Seangatith²

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

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

* Corresponding author.

E-mail: jaksada.th@muti.ac.th; Telephone: 08 1548 4799

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการทดสอบในส่วนการตอบสนองทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบเพื่อศึกษาความเหมาะสมของสมการ โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตและความหนาของท่อเหล็ก และเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150×150 mm และสูง 750 mm จำนวน 24 ตัวอย่างได้ถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการรับแรงในช่วงเริ่มต้นของตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80–90% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นมีลักษณะแบบ strain-softening ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการแตกร้าวของคอนกรีตในส่วนของเสาที่ถูกแรงกระทำและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD พบว่าสมการดังกล่าวสามารถทำนายกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ในกรอบที่ยอมรับได้

คำสำคัญ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ แรงกดอัดในแนวแกน วิธี LRFD

Abstract

The aim of this paper is to report the experimental results on the structural responses and modes of failure of cellular lightweight concrete-filled steel square tube (CLCFT) columns under axial compressive load. The maximum compressive loads obtained from the experiment were compared with those calculated by using AISC-LRFD composite column design equations in order to check the adequacy of the design equations. The key parameters were the compressive strengths of the concrete and wall thicknesses of the steel hollow section. A total of 24 square columns, having the dimensions of 150×150 mm in width and 750 mm in height, were tested. Based on the test results, it was found that the response

curves of the CLCFT columns have a linear elastic behavior up to approximately 80–90% of their maximum compressive load. After that, the behavior of the columns is nonlinear. The nonlinear behavior of the columns is the strain-softening type. The mode of failure of the CLCFT columns was due to the concrete cracking under the loading portion and the local buckling of hollow steel tube. Additionally, when comparing the experimental results with those obtained from the AISC-LRFD design equations, it was found that the design equations are acceptable for predicting the maximum compressive load of the CLCFT columns.

Keywords

concrete-filled tube (CFT) columns; cellular lightweight concrete (CLC); axial compression; LRFD approach

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาหลักปัญหาหนึ่งในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่คือ ใช้ระยะเวลาก่อสร้างมากและทำให้ต้นทุนมีราคาสูงเนื่องจากต้องดำเนินงานเป็นลำดับขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การตั้งไม้แบบและค้ำยัน ผูกเหล็กเสริม เทคอนกรีต และรอให้คอนกรีตแข็งตัวจนมีกำลังเพียงพอจึงทำการถอดแบบ ซึ่งการก่อสร้างลักษณะนี้มักใช้ระยะเวลาก่อสร้างมากและทำให้ต้นทุนมีราคาสูง โดยเฉพาะระหว่างขั้นตอนการเทคอนกรีตและถอดแบบหล่อคอนกรีต [1] นอกจากนี้ การก่อสร้างดังกล่าวมักสิ้นเปลืองวัสดุและแรงงานมากกว่า รวมทั้งต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือค่อนข้างสูง ไม่เช่นนั้นแล้วจะเกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เช่น แบบหล่อไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด แบบรั่วและแบบแตก ทำให้คอนกรีตไหลออกในขั้นตอนการเท เป็นต้น ส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับทิศทางของเศรษฐกิจในปัจจุบันที่มีการแข่งขันกันในด้านราคาและความรวดเร็วในการดำเนินการ [2]

จากปัญหาที่กล่าวมาจึงเกิดการพัฒนารูปแบบการก่อสร้าง โดยเฉพาะการนาระบบก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง [3] เช่น คานสำเร็จรูป ผนังสำเร็จรูป และการใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกับองค์อาคารโดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าวออกภายหลัง ตัวอย่างเช่น การใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา หรือเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled tube column, CFT column) เป็นต้น [4–8] เสาดังกล่าวช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างเมื่อเทียบกับระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ และลดปัญหาด้านการขาดแคลนแรงงานได้เป็นอย่างดี โครงสร้างมีความสวยงามเนื่องจากใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กเป็นแบบหล่อถาวรให้โครงสร้าง โดยท่อเหล็กยังทำหน้าที่ร่วมกับแกน

คอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการรับแรงกระทำโดยอาศัยผลของ composite action ซึ่งส่งผลให้เสาดังกล่าวมีกำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [9,10] นอกจากนี้ยังช่วยให้เสามีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ เหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว [11–14]

อย่างไรก็ตาม เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบันถูกสร้างขึ้นโดยใช้คอนกรีตปกติที่มีหน่วยน้ำหนักค่อนข้างมาก ดังนั้นหากสามารถใช้คอนกรีตน้ำหนักเบา ตัวอย่างเช่น คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (cellular lightweight concrete, CLC) น่าจะเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับงานก่อสร้าง โดยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านั้นมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ แต่อาจมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตามปริมาณฟองอากาศที่ไล่ไปในกระบวนการผสม ลักษณะโพรงอากาศแบบปิดต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตก่อให้เกิดผลดี เช่น น้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน สามารถไหลเข้าแบบโดยไม่ต้องจี้ดีกว่าคอนกรีตปกติ [15,16] อย่างไรก็ตาม คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ายังมีข้อเสียบางประการคือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตสามารถผลิตได้ในค่าที่จำกัดเนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นการนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลามาประยุกต์ใช้ร่วมกับท่อเหล็กจึงเป็นการเพิ่มความแกร่งในการรับน้ำหนักของวัสดุ 2 ชนิดนี้ โดยผลทดสอบที่ได้รับจากงานวิจัยนี้จะช่วยส่งเสริมและต่อยอดให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการวิบัติของเสาดังกล่าว ตลอดจนสามารถนำความรู้และความเข้าใจที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากขึ้น

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

Compressive Strength (f'_c) (MPa)	Cement (kg)	Sand (kg)	Foaming (kg)	Water (kg)	Cement/ Sand	Water/ Cement
15	688	688	0.195	324	1 : 1	0.48
20	688	688	0.209	303	1 : 1	0.45
25	688	688	0.222	282	1 : 1	0.42

ตารางที่ 2 ตัวอย่างทดสอบและสมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	Thickness (mm)	B/t	Concrete Properties		Steel Tube Properties		Number of tests
			A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	A_{st} (mm ²)	f_{st} (MPa)	
SC-15-0	0	-	22500	15.8	0	0	2
SS-15-3.0	3.0	50.0	20228	15.8	1741	387.1	2
SS-15-4.5	4.5	33.3	19408	15.8	2567	382.3	2
SS-15-6.0	6.0	25.0	18776	15.8	3363	384.1	2
SC-20-0	0	-	22500	20.9	0	0	2
SS-20-3.0	3.0	50	20228	20.9	1741	387.1	2
SS-20-4.5	4.5	33.3	19408	20.9	2567	382.3	2
SS-20-6.0	6.0	25.0	18776	20.9	3363	384.1	2
SC-25-0	0	-	22500	25.5	0	0	2
SS-25-3.0	3.0	50.0	20228	25.5	1741	387.1	2
SS-25-4.5	4.5	33.3	19408	25.5	2567	382.3	2
SS-25-6.0	6.0	25.0	18776	25.5	3363	384.1	2

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 การออกแบบแบบปฏิภาคส่วนผสม

การออกแบบแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าถูกออกแบบตามมาตรฐาน ASTM C796 [17] โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย 3 ค่า ได้แก่ 15 20 และ 25 MPa (หรือประมาณ 150 200 และ 250 kg/cm² ตามลำดับ) ซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดประลัยในช่วงใช้งานและมักถูกใช้ในการก่อสร้างอาคารขนาดเล็กในประเทศไทย หน่วยน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1,600–1,800 kg/m³ ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมจำเป็นต้องกำหนดส่วนผสมบางส่วนให้คงที่เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีความแปรผันเนื่องจากองค์ประกอบอื่น ๆ งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ค่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย (C:S) มีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 1 และอัตราส่วนน้ำยาผลิตโฟมต่อน้ำ (F:W) มีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 30 จากการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตสามารถปริมาณวัสดุ

ผสมตามกำลังรับแรงอัดประลัยต่อคอนกรีตปริมาตร 1 m³ ดังแสดงในตารางที่ 1

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับมวลรวมละเอียดและสารเพิ่มฟอง Sika Poro 40 ส่วนต่อเหล็กที่ใช้เป็นท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของ มอก. ที่มีขนาดหน้าตัด 150×150 mm มีความหนา (t) 3 ค่า ได้แก่ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM คือ การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกทดสอบภายใต้แรงดึงเนื่องจากในรูแบบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต ท่อเหล็กถูกกระทำโดยแรงดึงเนื่องจากการ

ขยายตัวของแกนคอนกรีตเป็นหลัก โดยค่าคุณสมบัติทางกลเฉลี่ยของคอนกรีตและท่อเหล็กได้ถูกนำเสนออยู่ในตารางที่ 2

2.3 ตัวอย่างทดสอบ

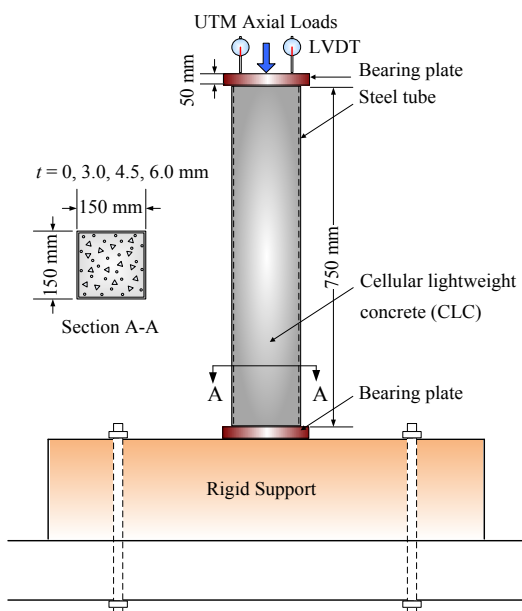
ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นเสาสั้นที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง (B) 150×150 mm มีความสูง (L) 750 mm เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบส่งผลให้ตัวอย่างเสามีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (L/B) เท่ากับ 5.0 และมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาท่อเหล็ก (B/t) เท่ากับ 50.0, 33.3 และ 25.0 สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (เสา CLCFT) ที่มีความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm, 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ นอกจากนี้ เสาตัวอย่างไม่มีระบบที่ใช้ในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 24 ตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยแยกตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต กลุ่มที่ 1 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 15 MPa กลุ่มที่ 2 f'_c เท่ากับ 20 MPa และกลุ่มสุดท้าย f'_c เท่ากับ 25 MPa ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกนำเสนอในตารางที่ 2 โดยสัญลักษณ์ของชื่อเสาตัวอย่างถูกกำหนดในรูป XX-YY-ZZ โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ XX หมายถึง ประเภทของเสาหน้า

สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ทดสอบมี 2 รูปแบบได้แก่ SC และ SS เป็นสัญลักษณ์แทน เสาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสอ้างอิง (เสา CLC) และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (เสา CLCFT) ตามลำดับ YY หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในหน่วย MPa และ ZZ แทนความหนาของท่อเหล็กในหน่วย mm

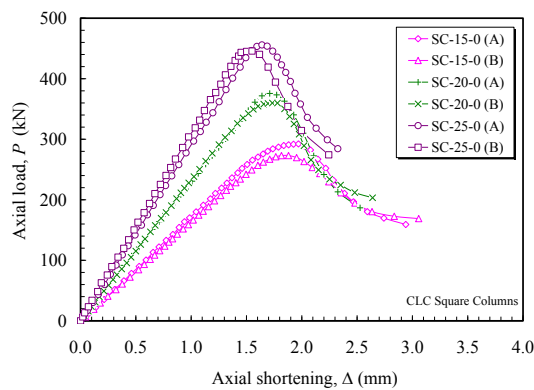
2.4 การทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบกับเครื่องทดสอบ universal testing machine (UTM) โดยในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนจะกระทำที่ปลายด้านบนและด้านล่างของเสาผ่านแผ่นเหล็กหนา 50 mm ลงสู่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวอย่างทดสอบ การหัดตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบถูกบันทึกโดย linear variable differential transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบ เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งเข้าที่แล้ว เสาจะถูก pre-loading 50 kN และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่าง รวมทั้งตรวจสอบความพร้อมของเครื่องมือ จากนั้น การทดสอบจะถูกระงับโดยการเพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ และใช้ Yokogawa MW100 data acquisition unit เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติหรือหยุดการทดสอบที่ระยะการ

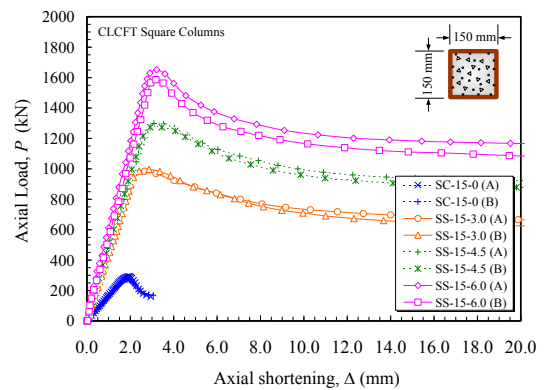
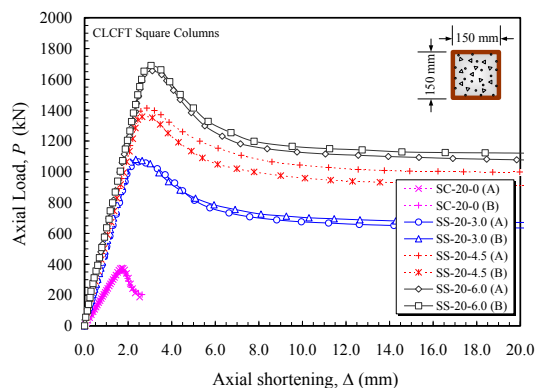
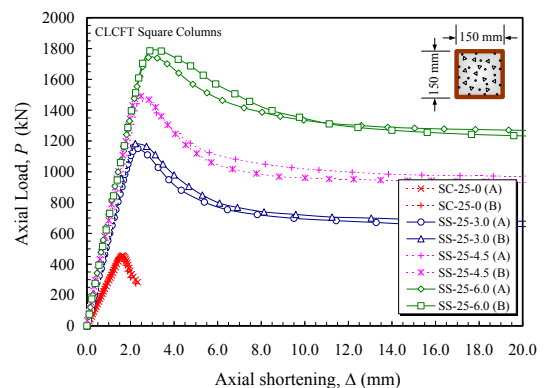


รูปที่ 1 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเสา





(a) เสา CLC อ้างอิง

(b) เสา CLCFT $f'_c = 15$ MPa(c) เสา CLCFT $f'_c = 20$ MPa(d) เสา CLCFT $f'_c = 25$ MPa

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

หตุตัวมีค่าเกินกว่า 50 mm ซึ่งคิดเป็น averaged axial strain ที่เกิดขึ้นเสาตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 0.0667 mm/mm ซึ่งสูงกว่าความเครียดที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 25 เท่า

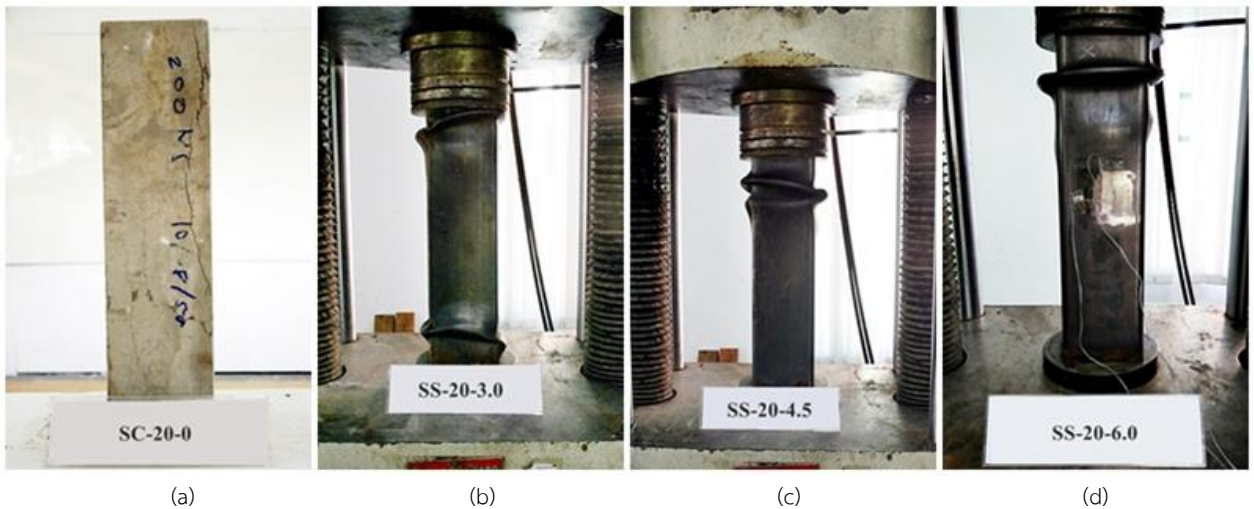
3. ผลการวิจัย

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ของเสาที่ได้จากการทดสอบ โดยแบ่งกลุ่มตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวเท่ากับ 20 mm หรือที่ Axial strain ในคอนกรีตเท่ากับ 0.0267 mm/mm หรือร้อยละ 2.67 ซึ่งเป็นความเครียดที่สูงกว่าความเครียดที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า และได้นิยามให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด (maximum load) ที่เกิดขึ้นในเสาโดยปราศจากการโก่งเดาะ

ของผนังท่อเหล็กหรือค่า squash load เป็น “กำลังรับแรงสูงสุด” หรือ P_{exp} ของเสา

จากรูปที่ 2 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา CLC อ้างอิงและเสา CLCFT มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของเสา CLCFT มีคอนกรีตและท่อเหล็กเป็นวัสดุหลักในการรับแรง ส่งผลให้เสา CLCFT มีความแกร่งสูงกว่าเสา CLC อ้างอิงอย่างชัดเจน โดยพฤติกรรมของตัวอย่างเสาเป็นแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่เสารับแรงกดอัดประมาณร้อยละ 80–90 ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้นเมื่อเสาถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนปริมาณช่องว่างของอากาศในคอนกรีต CLC ถูกบีบอัด ส่งผลให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวและขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นความชันของกราฟจึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของเสา CLCFT จะเริ่ม

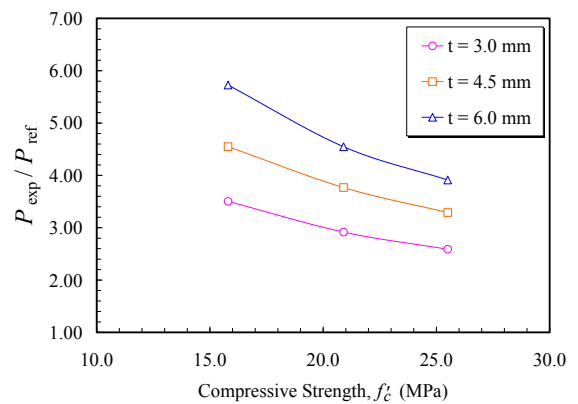


รูปที่ 3 ลักษณะการวิบัติของเสา (a) เสา CLC อ้างอิง (b) เสา CLCFT ที่มีท่อเหล็กหนา 3.0 mm (c) เสา CLCFT ที่มีท่อเหล็กหนา 4.5 mm และ (d) เสา CLCFT ที่มีท่อเหล็กหนา 6.0 mm

เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นมากขึ้นจนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของเสา CLCFT มีลักษณะแบบ strain-softening โดยที่เสาจะรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้วเสามีความแข็งแรงลดลง ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [7] และ Ding และคณะ [18]

3.2 ลักษณะการวิบัติ

จากการสังเกตลักษณะการวิบัติ เสา CLCFT เกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสา CLCFT ทุกตัวอย่างเกิดการวิบัติที่ค่าการหดรัดตัวเกินกว่า 50 mm แสดงให้เห็นว่าเสา CLCFT เป็นเสาที่สามารถหดรัดตัวในแนวแกนได้สูงหรือมีความเหนียวในแนวแกนสูงมากเมื่อเทียบกับเสา CLC อ้างอิง โดยการวิบัติของเสา CLC อ้างอิงเกิดจากการอัดแตกของคอนกรีตที่กำลังรับแรงสูงสุดของเสาดังแสดงในรูปที่ 3(a) ค่าการหดรัดตัวในแนวแกนของเสา CLC อ้างอิงที่กำลังรับแรงสูงสุดมีค่าประมาณ 1.60–1.93 mm โดยการวิบัติของเสา CLC อ้างอิงจะแตกต่างจากตัวอย่างเสา CLCFT ที่เกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กบริเวณปลายด้านบนหรือด้านล่างของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3(b) ถึงรูปที่ 3(d) และการอัดแตก (crushing) ของแกนคอนกรีตของเสาในบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 4 อัตราส่วน P_{exp} / P_{ref} และกำลังรับแรงอัดประลัย

3.3 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา CLCFT ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากัน เสา CLCFT ที่ใช้ท่อเหล็กที่มีความหนา 3.0 mm มีอัตราส่วนของแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบต่อแรงกดอัดสูงสุดของเสา CLC อ้างอิง (P_{exp} / P_{ref}) อยู่ในช่วงระหว่าง 2.59–3.50 ซึ่งต่ำกว่าเสา CLCFT ที่ใช้ท่อเหล็กความหนา 4.5 mm และ 6.0 mm ที่มีอัตราส่วน P_{exp} / P_{ref} อยู่ในช่วงระหว่าง 3.29–4.55 และ 3.91–5.73 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเลือกผนังท่อเหล็กที่หนาจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงในแนวแกน

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดเสา CLCFT และสมการเสาเชิงประกอบ

Specimen	Thickness (mm)	B/t	P_{exp} (kN)	Mode of failure	P_{exp}/P_{ref}	P_n (kN)
SC-15-0	0	-	282.7	Crushing	1.00	-
SS-15-3.0	3.0	50.0	990.5	Strain-Softening	3.50	931.3
SS-15-4.5	4.5	33.3	1286.1	Strain-Softening	4.55	1223.9
SS-15-6.0	6.0	25.0	1619.3	Strain-Softening	5.73	1521.4
SC-20-0	0	-	367.8	Crushing	1.00	-
SS-20-3.0	3.0	50.0	1072.7	Strain-Softening	2.92	1016.5
SS-20-4.5	4.5	33.3	1385.5	Strain-Softening	3.77	1305.8
SS-20-6.0	6.0	25.0	1672.7	Strain-Softening	4.55	1600.7
SC-25-0	0	-	450.8	Crushing	1.00	-
SS-25-3.0	3.0	50.0	1167.0	Strain-Softening	2.59	1093.3
SS-25-4.5	4.5	33.3	1482.7	Strain-Softening	3.29	1379.6
SS-25-6.0	6.0	25.0	1763.6	Strain-Softening	3.91	1672.1

ได้สูงกว่าการเลือกใช้ผนังท่อเหล็กบางดังแสดงตามความสัมพันธ์ในรูปที่ 4

นอกจากนี้จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาเสา CLCFT โดยใช้ท่อเหล็กที่มีความหนาเท่ากันพบว่า เสา CLCFT ที่กรอกคอนกรีตกำลังต่ำ (15 MPa) จะมีอัตราส่วน P_{exp}/P_{ref} มากกว่าเสา CLCFT ที่กรอกคอนกรีตกำลังสูงกว่า (25 MPa) ตัวอย่างเช่น พิจารณาท่อเหล็กที่มีความหนา 4.5 mm ตัวอย่างทดสอบ SS-15-4.5 มีอัตราส่วน P_{exp}/P_{ref} เท่ากับ 4.55 โดยมีค่าสูงกว่าตัวอย่างทดสอบ SS-25-4.5 ที่มีอัตราส่วน P_{exp}/P_{ref} เท่ากับ 3.29 โดยแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Seangatith และ Thumrongvut [6] กล่าวคือท่อเหล็กของเสา CLCFT ที่กรอกคอนกรีตกำลังรับแรงอัดต่ำช่วยพัฒนา กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนให้แก่เสาได้สูงกว่าเสา CLCFT ที่กรอกคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูง

3.4 เปรียบเทียบกำลังของเสา CLCFT กับสมการของ AISC-LRFD

ในการออกแบบเสาเชิงประกอบของ American institute of steel and construction (AISC) โดยวิธี load and resistant factor design (LRFD) [19] ถือเป็นข้อกำหนดที่นิยมสำหรับใช้การออกแบบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต โดยเริ่มจากการคำนวณค่ากำลังแรงอัดตามแนวแกนระบุของหน้าตัดเสาที่ไม่คิดผลของความชะลุด (P_{no}) จะมีค่าเท่ากับผลรวม

ของกำลังแรงอัดของท่อเหล็ก คอนกรีตและเหล็กเสริมหลัก ดังสมการ (1)

$$P_{no} = A_s F_y + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (1)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก F_y คือหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของท่อเหล็ก C_2 เท่ากับ 0.85 สำหรับท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม f'_c คือกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต A_{sr} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมหลัก E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของเหล็ก E_c คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

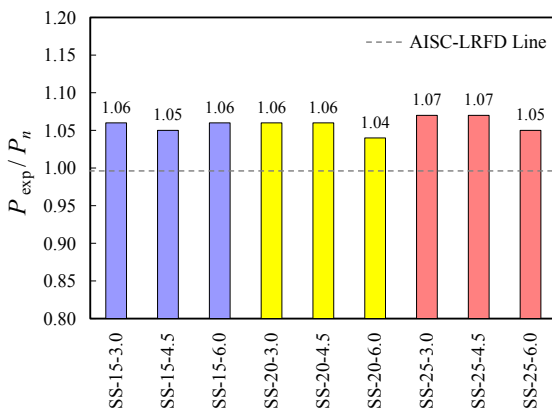
สติฟเนสประสิทธิภาพ (effective stiffness) ของหน้าตัดเสาท่อเสาเชิงประกอบหาได้จากสมการ (2)

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad (2)$$

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

โดยที่ I_s คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของท่อเหล็ก I_{sr} คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กยื่น I_c คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของคอนกรีต

สุดท้าย AISC-LRFD ได้นำเสนอสมการสำหรับทำนาย กำลังอัดในแนวแกนระบุ (nominal compressive strength, P_n) โดยสามารถหาได้จากสมการ (4)



รูปที่ 5 เปรียบเทียบกำลังของเสากับสมการของ AISC-LRFD

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

โดยที่ $P_e = \pi^2 EI_{eff} / (KL)^2$ เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผลของเสา

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา CLCFT ที่ทดสอบได้ (P_{exp}) กับกำลังอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD (P_n) หรืออัตราส่วน P_{exp}/P_n จากรูปพบว่า เสา CLCFT มีอัตราส่วน P_{exp}/P_n อยู่ในช่วงระหว่าง 1.04–1.07 ซึ่งมีความมากกว่า 1.0 โดยสมการดังกล่าวทำนายกำลังรับแรงสูงสุดได้ต่ำกว่า (underestimate) ผลทดสอบประมาณร้อยละ 4–7 และผลการเปรียบดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hunaiti และคณะ [20] โดยผลการทดสอบให้ค่ากำลังแรงกดอัดสูงสุดมากกว่าค่าที่คำนวณจากสมการของ AISC-LRFD อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 6–38 ดังนั้นภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณหากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

4. สรุปผล

- 1) เสา CLCFT มีพฤติกรรมโครงสร้างแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่เสารับแรงกดอัดประมาณร้อยละ 80–90 ของกำลังรับแรงสูงสุด และมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นในช่วงที่สองแบบ strain-softening โดยที่เสา

สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่ง จากนั้นเสาจะมีความแกร่งลดลง

- 2) การวิบัติของเสา CLCFT มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสาเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 50 mm ส่งผลให้เสา CLCFT มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนที่สูงมาก การวิบัติเกิดขึ้นโดยการโป่งออกในรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก โดยท่อเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับเสา CLCFT ได้ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเสา CLC อ้างอิง
- 3) พิจารณาผลของความหนาท่อเหล็ก การเลือกใช้ผนังท่อเหล็กที่หนาจะช่วยเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพในการรับแรงในแนวแกนได้สูงกว่าการเลือกผนังท่อเหล็กบาง ทั้งนี้ปัจจัยการเลือกความหนาของท่อเหล็กต้องมีปริมาณเหล็กไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดในมาตรฐานการออกแบบ เพื่อป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กในช่วงสภาวะใช้งาน
- 4) สมการออกแบบเสาของ AISC-LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้ และเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของเสา ท่อเหล็กจึงควรมีรอยเชื่อมต่อที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ผนังของท่อเหล็กสามารถรองรับความดันเนื่องจากการขยายตัวด้านข้างของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินผ่านมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าภายใต้แรงอัดในแนวแกน”

เอกสารอ้างอิง

- [1] Elliott KS. *Precast Concrete Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2002.
- [2] Clementi F, Scalbi A, Lenci S. Seismic performance of precast reinforced concrete

- buildings with dowel pin connections. *Journal of Building Engineering*. 2016; 7: 224–238.
- [3] Benayoune A, Samad AA, Trikha DN. Response of pre-cast reinforced composite sandwich panels to axial loading. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(3): 677–685.
- [4] Johansson M, Gylltoft K. Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application. *Steel and Composite Structures*. 2001; 1(4): 393–410.
- [5] Mursi M, Uy B. Strength of concrete filled steel box columns incorporating interaction buckling. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129(5): 626–639.
- [6] Seangatith S, Thumrongvut J. Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 2009; 16(3): 205–220.
- [7] Chen B, Liu X, Li SJ. Performance investigation of square concrete-filled steel tube columns. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*. 2011; 26(4): 730–736.
- [8] Ananthi BG, Knight S. Experimental and theoretical study on cold-formed steel box stub columns under uniaxial compression. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014; 39(10): 6983–6993.
- [9] Roeder CW, Cameron B, Brown CB. Composite action in concrete filled tubes. *Journal of Structural Engineering*. 1999; 125(5): 477–484.
- [10] Ding F, Li Z, Cheng S, Yu Z. Composite action of octagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2016; 107: 453–461.
- [11] Varma A, Ricles J, Sause R, Lu L. Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns. *Journal of Structural Engineering*. 2004; 130: 169–179.
- [12] Gajalakshmi P, Helena H. Behaviour of concrete-filled steel columns subjected to lateral cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012; 75: 55–63.
- [13] Ji X, Kang H, Chen X, Qian J. Seismic behavior and strength capacity of steel tube-reinforced concrete composite columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2013; 43(4): 487–505.
- [14] Patel V, Liang Q, Hadi M. Numerical analysis of high-strength concrete-filled steel tubular slender beam-columns under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 92: 183–194.
- [15] Nambiar EKK., Ramamurthy K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2006; 28(5): 475–480.
- [16] Amran YHM, Farzadnia N, Ali AAA. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*. 2015; 101: 990–1005.
- [17] ASTM C796. *Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam*, ASTM International. West Conshohocken: PA; 2012.
- [18] Ding F, et al. Comparative study of square stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2016; 98(B): 443–453.
- [19] ANSI/AISC 360-10. *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction. Chicago: Illinois; 2010.
- [20] Hunaiti Y, Falah N, Assi I. Evaluation of the concrete contribution factor for composite sections with lightweight concrete under axial compression. *Journal of Applied Sciences*. 2002; 2(10): 990–999.