

ผลของแรงโอบรัดด้านข้างต่อรูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Effect of Confining Pressure on Failure Patterns of Square Section Concrete Filled Steel Tube Column

วัชรา โพธิ์สาวัง,¹เปรมปรีดา กงนะ² และ วัจนวงศ์ กรีพละ^{3,*}

¹⁻³ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จ.สกลนคร

*Corresponding author; E-mail address: wadchara.pos@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาสมรรถนะของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการให้แรงโอบรัดทางด้านข้าง ตัวอย่างเสาเหล็กกรอกคอนกรีตจะถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษากำลังและรูปแบบการวิบัติภายใต้การรับแรงอัดตามแนวแกน ตัวแปรหลักในการศึกษานี้คือหน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0, 2.4, 4.8 and 7.2 MPa คิดเป็น 0%, 11.4%, 22.9% และ 34.3% ของกำลังอัดของแกนคอนกรีต ปลอกเหล็ก มอก. SM490 ขนาด 98x98x350 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ทำเป็นปลอกเสาเพื่อโอบรัดแกนคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัด 20.98 MPa. การให้แรงทางโอบรัดทางด้านข้างจะกระทำผ่านแจ็คเก็ต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง 11.4%-34.3% ของกำลังอัดของแกนคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพิ่มขึ้น 3.01-19.21% สาเหตุหลักของการวิบัติเกิดจากการวิบัติแบบเฉือนในแกนคอนกรีตดันให้ปลอกเหล็กโก่งออกด้านนอก นอกจากนี้ ยังพบว่า หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างส่งผลให้ระนาบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตเปลี่ยนไป โดยระนาบวิบัติทำมุมกับแนวราบต่ำสุดเมื่อให้หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างเท่ากับ 11.4% ของกำลังอัดของแกนคอนกรีต

คำสำคัญ: แจ็คเก็ต, ระนาบวิบัติ, กำลังรับแรงอัด, การให้แรงโอบรัด, การวิบัติ

Abstract

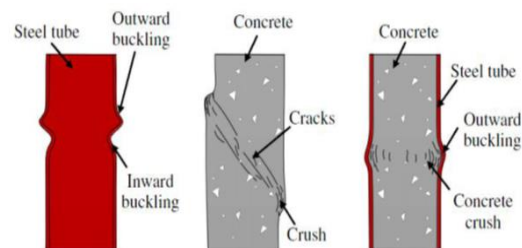
This paper aims to develop the performance of the square section of the CFT column using preconfining pressure. The square sections of CFT columns were experimentally investigated for its compressive strength and failure patterns under uni-axial load test. The main parameter investigated was the confining pressure, which various from 0, 2.4, 4.8 and 7.2 MPa corresponding to 0%, 11.4%, 22.9% and 34.3% of concrete strength. The steel tubes grade TIS SM490 with external dimensions of 98 mm, 98 mm and 350 mm were used to confine

the core concrete having a compressive strength of 20.98 MPa. The confining pressure was applied by preconfining of the steel jacket. Test results revealed that increasing of confining pressure of 11.4%-34.3% of concrete strength significantly improved the compressive strength of the square section of CFT column by 3.01-19.21%. The main failure mode of the test specimen was due to shear failure in the concrete core which induced outward buckling in steel tube. Moreover, it was also found that changing of confining pressure affected the failure plane angle of CFT column. The minimum failure plane angle occurred at the confining pressure of 11.4% of concrete strength.

Keywords: Jacketing, Failure Plane, Compressive Strength, Preconfining, Failure

1. คำนำ

เสาเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete Filled Steel Tube Column, CFT) เป็นเสาเชิงประกอบที่เกิดจากการบรรจุคอนกรีตลงในท่อเหล็ก ปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างขนาดใหญ่หลายโครงการ [1-5] เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็ก ทำให้รูปแบบการวิบัติของเสาเชิงประกอบเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 1 [6] และเป็นผลทำให้เสาเหล็กกรอกคอนกรีตมีความแกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) เหนือกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [7-12]



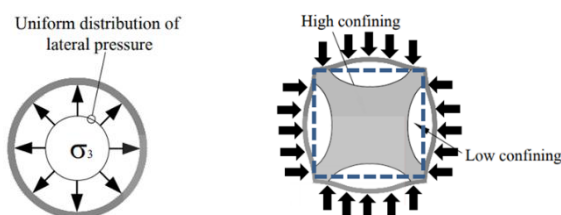
รูปที่ 1 รูปแบบการวิบัติของเสาเหล็ก เสาคอนกรีตและเสา CFT [6]

เสาเหล็กกรอกคอนกรีตจะมีแกนคอนกรีตทำหน้าที่ในการรองรับความเค้นในแนวแกนบางส่วนและยังช่วยป้องกันการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กในลักษณะการโก่งเข้า (Inward buckling) ในทางกลับกันปลอกเหล็กยังทำหน้าที่เสริมแรงตามแนวแกนและป้องกันการบ่งตัวของคอนกรีตตามขวาง ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตอยู่ภายใต้สภาวะความเครียดแบบสามแกน อันเป็นผลส่งต่อให้เสาเหล็กกรอกคอนกรีตเป็นเสาที่ใช้ปริมาณเหล็กลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็กรูปพรรณที่รับน้ำหนักเท่ากัน ปลอกเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างดำเนินการได้ง่ายและช่วยทำให้ราคาค่าก่อสร้างโครงสร้างลดลง [6, 13]

การออกแบบเสาเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถทำได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น Manual of steel construction: Load and Resistance Factor Design (AISC LRFD) และมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ปี พ.ศ. 2538 โดยถูกจำแนกได้ 2 ประเภทได้แก่ 1) CFT column เสาประเภทนี้จะถูกออกแบบให้ท่อปลอกเหล็กรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรงร่วมกับคอนกรีต ซึ่งเสาจะถูกก่อสร้างให้มีความสูงหลายชั้นต่อเนื่องกันหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร 2) Tubed column ท่อปลอกเหล็กของเสาประเภทนี้จะไม่ถูกออกแบบรับหน่วยแรงในแนวแกน แต่จะถูกออกแบบให้ท่อเหล็กเป็นเหล็กเสริมเพื่อรองรับแรงกระทำในแนวขวาง [33]

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน อันเป็นผลมาจากแกนคอนกรีตในเสาหน้าตัดรูปวงกลมมีการกระจายของความเค้นจากการโอบรัดของปลอกเหล็กสม่ำเสมอกว่าเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้น จึงมีหลายงานวิจัยพยายามศึกษา อิทธิพลของแรงโอบรัด พฤติกรรมการรับน้ำหนักและรูปแบบการวิบัติของเสากรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม [13-17] เพื่อหาวิธีลดข้อด้อยดังกล่าว

การศึกษาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่แรงโอบรัดในลักษณะ Passive Confinement ของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต [18-23] ซึ่งเป็นแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการบ่งตัวของคอนกรีตหลังจากที่เสารับน้ำหนักแล้ว สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตเนื่องจากแรงโอบรัดในลักษณะ Active Confinement ซึ่งเป็นการให้แรงโอบรัดก่อนที่เสารับน้ำหนักนั้น ยังมีน้อย [16, 24-26] ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษา อิทธิพลของแรงโอบรัดลักษณะ Active Confinement ที่มีผลต่อรูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ก. หน้าตัดวงกลม

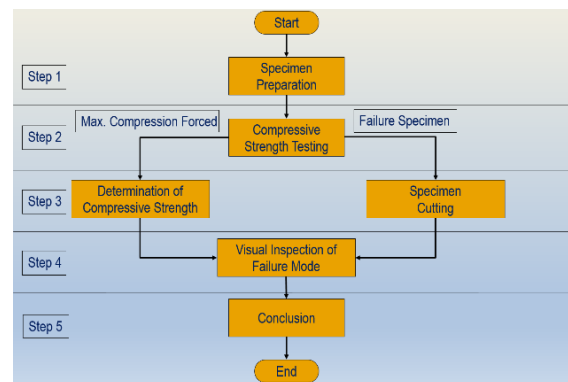
ข. หน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2 การกระจายความเค้นโอบรัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต [8, 16]

2. ตัวอย่างและการทดลอง

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษามูลของการให้แรงโอบรัดต่อรูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงได้แบ่งการทดลองเป็น 5 ขั้นตอนคือ การเตรียมตัวอย่าง, ทดสอบกำลังรับแรงอัด, การหาลำดับรับแรงอัด/การผ่าตัดตัวอย่าง, การตรวจพินิจรูปแบบการวิบัติและสรุปผล ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 ชุดทดสอบ ชุดทดสอบละ 2 ตัวอย่าง โดยตัวแปรหลักคือ แรงโอบรัดทางด้านข้าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0, 2.4, 4.8 และ 7.2 MPa ตามลำดับ คิดเป็น 0%, 11.4%, 22.9% และ 34.3% ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (20.98 MPa)

รายละเอียดของชุดทดสอบได้สรุปและแสดงไว้ในตารางที่ 1 ชุดทดสอบแต่ละชุดประกอบด้วยเสาเหล็กกรอกคอนกรีต 2 ตัวอย่าง ซึ่งหลังจากให้แรงโอบรัดแล้ว จะนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ตัวอย่างที่วิบัติแล้วจะถูกผ่าตัดตามความยาวเสาตามแนวเชื่อม (แนวให้แรงโอบรัด) 1 ตัวอย่าง และตัดตามแนวที่ไม่ได้เชื่อม (แนวที่ไม่ได้ให้แรงโอบรัด) 1 ตัวอย่าง จากนั้นดำเนินการตรวจพินิจลักษณะวิบัติพร้อมบันทึกและสรุปผล



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

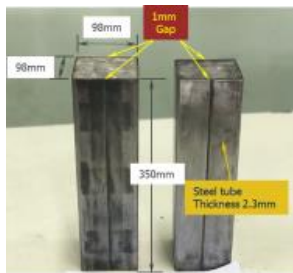
ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างเสาเหล็กกรอกคอนกรีต

Specimen series	D x H x t x L (mm)	Pre-Confining Ratio $\left(\frac{f_{lp}}{f_{cc}} \times 100\%\right)$	Pre-Confining Pressure (f_{lp}) (MPa)
CFT00 (Control)	98x98x2.3x350	0	0.0
CFT10	98x98x2.3x350	11.4	2.4
CFT20	98x98x2.3x350	22.9	4.8
CFT30	98x98x2.3x350	34.3	7.2

2.1 การใช้วัสดุและเตรียมตัวอย่าง

การวิจัยนี้ใช้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 20.98 MPa (BS1881-116 1983) [27] ปลอกเหล็กใช้เหล็กรูปพรรณเกรด TIS SM490 มีขนาด 98x98 มม.หนา 2.3 มม. โดยการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการกรอกคอนกรีตลงใน

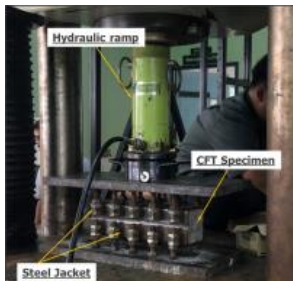
ปลอกเหล็กที่มีช่องว่างตามยาว 1 มม. ยาว 350 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นพลาสติกเป็นระยะเวลา 28 วันและตั้งไว้ภายใต้สภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการจนกว่าจะถึงเวลาให้แรงโอบรัดทางด้านข้างก่อนรับน้ำหนัก (Pre confining) สู่แกนคอนกรีต หลังจากบ่มตัวอย่าง ประกอบตัวอย่างเข้ากับแจ๊คเกิด ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ใช้แม่แรงถ่ายแรงสู่แจ๊คเกิด ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) จนกว่าจะได้แรงโอบรัดตามที่ต้องการ แล้วเชื่อมปลอกเหล็กตลอดความยาวช่องว่าง จากนั้นถอดแจ๊คเกิดออกเพื่อถ่ายแรงเข้าสู่ปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4 (ง) หลังจากนั้นตั้งไว้ภายใต้สภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการจนถึงเวลาของการทดสอบกำลังรับแรงอัด [14]



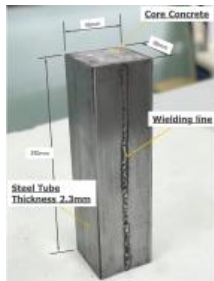
(ก) การหล่อเสาตัวอย่าง



(ข) ใส่แจ๊คเกิด



(ค) ถ่ายแรงผ่านแจ๊คเกิด



(ง) ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

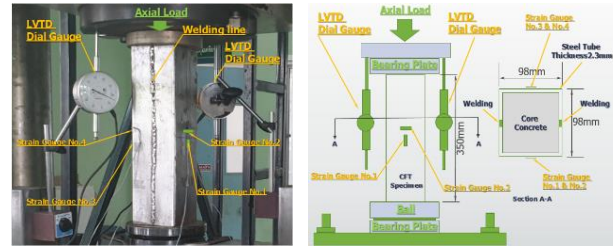
รูปที่ 4 การเตรียมตัวอย่างเสาเหล็กกรอกคอนกรีต [14]

2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2,000 kN โดยแรงอัดในแนวแกนกระทำลงสู่ตัวอย่างทดสอบโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 5 การหัดตัวในแนวแกนถูกวัดด้วย Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว การวัดความเครียด (Strain) จะวัดด้วย Strain Gauge สองด้านที่ไม่ได้เชื่อม ด้านละสองทิศทาง จำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อวัดความเครียดตามแนวแกนและแนววงรอบของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ทำการอัดแรงในแนวแกนเบื้องต้น (Pre-loading) ประมาณ 50 kN และคลายแรง (Unloading) เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ

เสาเหล็กกรอกคอนกรีตทั้งหมดจะถูกทดสอบภายใต้แรงอัดในแนวแกน อัตราการเคลื่อนที่ของแรงเริ่มต้นคือ 0.5 มม. / นาที จากนั้นจะเพิ่มอัตราเคลื่อนที่ของแรงช่วงละ 0.05 มม. / นาที สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกนทุก 2 มม. หลังจากนั้นจะหยุดทดสอบเมื่อการเสียรูปตามแนวแกน

มีการหัดตัว 10 มม. หรือเมื่อแรงที่ใช้ลดลงน้อยกว่า 80 % ของแรงสูงสุดที่วัดได้หรือเมื่อแรงที่ใช้ถึง 90 % ของความสามารถของเครื่องทดสอบ ในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ค่าแรงกระทำและการหัดตัวในแนวแกนจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 5 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ [14]

2.3 การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต (f'_{cmax}) สามารถหาได้จากแรงในแนวแกนสูงสุด (P_{max}) และพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวอย่างเสาเหล็กกรอกคอนกรีต (A_{gross}) โดยใช้สมการ (1):

$$f'_{cmax} = \frac{P_{max}}{A_{gross}} \quad (1)$$

2.4 การผ่าตัดตัวอย่างทดสอบ

การผ่าตัดตัวอย่างที่วิบัติแล้วใช้เครื่องตัดกระเบื้องแบบแท่นสไลด์ขนาด 10 นิ้ว ตัดแบ่งตัวอย่างตามความยาวเสาตามแนวเชื่อม (แนวให้แรงโอบรัด) และตัดแบ่งตัวอย่างตามแนวที่ไม่ได้เชื่อม (แนวที่ไม่ได้ให้แรงโอบรัด) ดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) ผ่าปลอกเหล็ก (ข) ยึดตัวอย่างกับเครื่องตัด (ค) ผ่าตัดตัวอย่าง (ง) ตัวอย่างที่ผ่าตัดแล้ว

รูปที่ 6 การผ่าตัดตัวอย่าง

2.5 การตรวจพินิจรูปแบบการวิบัติ

ในการตรวจพินิจรูปแบบการวิบัติ ตัวอย่างที่ผ่าตัดแล้วจะถูกนำมาพิจารณาทั้งลักษณะการวิบัติภายนอก เช่น การบวมตัวของปลอกเหล็ก การโก่งงอและการเสียรูปของเสา ฯลฯ และลักษณะการวิบัติภายใน เช่น การโก่งเคาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็ก การเสียรูปของปลอกเหล็กเนื่องจากคอนกรีตบ่งตัว ระบายการวิบัติของคอนกรีต ฯลฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป



รูปที่ 7 รูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและรูปแบบการวิบัติ เพื่อศึกษาผลของการให้แรงโอบรัดต่อรูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส หาได้จากค่าเฉลี่ยของ 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 กำลังรับแรงอัดเสาเหล็กกรอกคอนกรีต

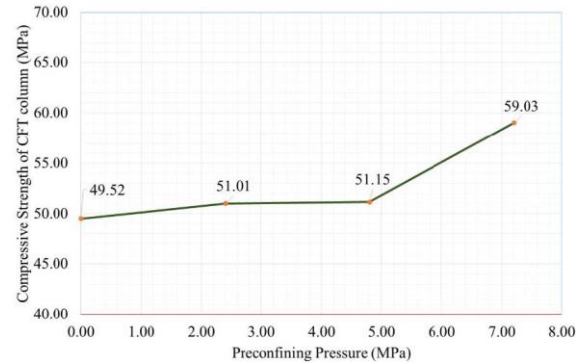
ชุดทดสอบ	หน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง (MPa)	กำลังรับแรงอัดของเสา (MPa)	ลักษณะการวิบัติ		มุมของระนาบวิบัติ
			ปลอกเหล็ก	แกนคอนกรีต	
CFT00 (ควบคุม)	0.0	49.52	คอนกรีตต้นบวมออก, โกงเคาะเฉพาะที่	การเฉือน, การอัดแตกบริเวณที่ติดกับปลอกเหล็ก	16°-41°
CFT10	2.4	51.01	คอนกรีตต้นบวมออก	การเฉือน, การอัดแตกบริเวณที่ติดกับปลอกเหล็ก	2°-8°
CFT20	4.8	51.15	คอนกรีตต้นบวมออก	การอัดแตกบริเวณที่ติดกับปลอกเหล็ก	17°-30°
CFT30	7.2	59.03	คอนกรีตต้นบวมออก, โกงเคาะเฉพาะที่	การเฉือน, การอัดแตกบริเวณที่ติดกับปลอกเหล็ก	24°-29°

3.1 กำลังรับแรงอัดสูงสุด

จากตารางที่ 2 พบว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างสู่แกนคอนกรีตเท่ากับ 0, 2.4, 4.8 และ 7.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 0%, 11.4%, 22.9% และ 34.3% ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (20.98 MPa) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตมีค่าเป็น 49.52, 51.01, 51.15 และ 59.03 MPa ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างตั้งแต่ 2.4-7.2 MPa ทำให้เสาเหล็กกรอกคอนกรีตพัฒนา กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 1.49-9.51 MPa คิดเป็น 3.01%-19.21% ของตัวอย่างที่ไม่ได้เพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง

อิทธิพลของแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ในช่วงที่มีการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่ำ คือตั้งแต่ 2.4-4.8 MPa กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างเพิ่มขึ้นเพียง 1.63 MPa (3.01%) เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อให้แรงโอบรัดทางด้านข้างมากกว่า 22.9% (4.8MPa) ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อให้แรงโอบรัดทางด้านข้าง 34.3% (7.2MPa) กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึง 9.51MPa คิดเป็น 19.21% ของชุดตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่าการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างที่ไม่มากพอจะส่งผลในการพัฒนากำลังรับแรงอัดน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากความเค้นโอบรัดในแกนคอนกรีตมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีความเค้นโอบรัดสูงบริเวณ

แกนกลางและมุมเท่านั้น [28] การที่จะทำให้บริเวณที่มีความเค้นโอบรัดต่ำได้รับอิทธิพลจากการโอบรัด จำเป็นต้องให้แรงโอบรัดด้านข้างที่มากพอ



รูปที่ 8 ผลของแรงโอบรัดด้านข้างต่อกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่าง

3.2 รูปแบบการวิบัติ

จากรูปที่ 7 พบว่าการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างจาก 0, 2.4, 4.8 และ 7.2 MPa ซึ่งคิดเป็น 0%, 11.4%, 22.9% และ 34.3% ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (20.98 MPa) จะทำให้รูปแบบการวิบัติเสาเหล็กกรอกคอนกรีตเปลี่ยนไปดังนี้

ในกรณีของเสาตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่มีการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง (CFT00) พบว่า ปลอกเหล็กมีการวิบัติสองรูปแบบคือ วิบัติจากการบ่งตันตัวของแกนคอนกรีตและวิบัติจากการโค้งงอเฉพาะที่ออกทางด้านนอกจากแรงอัดตามแนวแกน สำหรับแกนคอนกรีตพบว่ามีกรวิบัติเป็นแนวระนาบจากการเฉือน มีระนาบการวิบัติเฉียงทำมุม 16° (แนวเชื่อม) และ 41° (แนวที่ไม่ได้เชื่อม) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) ซึ่งลักษณะการวิบัติดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Johansson ที่พบว่า รูปแบบการวิบัติของคอนกรีตภายใต้แรงอัดในแนวแกนในกรณีที่มีแรงโอบรัดด้านข้างถึงแม้จะต่ำ จะมีลักษณะการวิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) เป็นหลัก [29, 30] และเมื่อเปรียบเทียบกับกรวิบัติของเสาคอนกรีตที่ไม่มีปลอกเหล็กหุ้ม [6] (รูปที่ 1) พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าปลอกเหล็กไม่มีประสิทธิภาพในการต้านทานการบ่งตัวของคอนกรีตได้ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอิทธิพลของแรงโอบรัดแบบ Passive Confinement จะมีผลน้อยเมื่ออัตราส่วนความกว้างของเสาต่อความหนาของปลอกเหล็กมากกว่า 30 (B/t>30) [31, 32] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีอัตราส่วน B/t เท่ากับ 42.6

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง 11.4 % (2.4 MPa) ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (CFT10) พบว่า ปลอกเหล็กมีการวิบัติจากการบ่งตันตัวของแกนคอนกรีตเท่านั้น สำหรับแกนคอนกรีตพบว่ามีกรวิบัติแบบเฉือนและมีการอัดแตกบริเวณใกล้ปลอกเหล็ก โดยระนาบการวิบัติเฉียงทำมุม 2° (แนวเชื่อม) และ 8° (แนวที่ไม่ได้เชื่อม) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) จะสังเกตได้ว่า มุมของระนาบวิบัติลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งใกล้เคียงกับรูปแบบการวิบัติโดยทั่วไปของเสาเหล็กกรอกคอนกรีต [6] (รูปที่ 1)

เมื่อเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างเป็น 22.9% (4.8 MPa) ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (CFT20) พบว่า ปลอกเหล็กมีการบวมจากการเบ่งดันตัวของแกนคอนกรีตเท่านั้น สำหรับแกนคอนกรีตพบว่ามีการวิบัติแบบเฉือนเป็นหลัก โดยระนาบเฉือนเอียงทำมุม 30° (แนวเชื่อม) และ 17° (แนวที่ไม่ได้เชื่อม) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ค) จะสังเกตได้ว่า มุมของระนาบเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง CFT10 ที่ให้แรงโอบรัด 11.4 % (2.4 MPa)

เมื่อเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างเป็น 34.3% (7.2 MPa) ของกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีต (CFT30) พบว่า ปลอกเหล็กมีการวิบัติจากการเบ่งตัวแกนคอนกรีตและมีวิบัติจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ออกทางด้านนอกเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกน สำหรับแกนคอนกรีตพบว่ามีการวิบัติแบบเฉือน โดยระนาบการวิบัติเอียงทำมุม 24° (แนวเชื่อม) และ 29° (แนวที่ไม่ได้เชื่อม) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ง) ซึ่งใกล้เคียงกับมุมของระนาบเฉือนของเสาตัวอย่างที่มีการให้แรงโอบรัด 22.9% (CFT20)

จากรูปแบบการวิบัติทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่า การวิบัติแบบเฉือนเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในแกนคอนกรีตของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส นอกจากนี้ ยังพบว่า อิทธิพลของการโอบรัดทางด้านข้างทำให้ มุมของระนาบการวิบัติเปลี่ยนไป โดยมุมของระนาบเฉือนลดลงเมื่อให้แรงโอบรัด 0%-11.4 % แต่เมื่อเพิ่มแรงโอบรัดมากขึ้น 11.4 %-34.3% มุมของระนาบการวิบัติกลับเพิ่มขึ้น สำหรับการวิบัติของปลอกเหล็กพบว่า เกิดจากแกนคอนกรีตเบ่งตัวดันจนวิบัติเป็นหลัก และพบเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่เนื่องจากแรงในแนวแกนเมื่อให้แรงโอบรัด 0% และ 34.3% เท่านั้น

4. บทสรุป

ผลของแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อรูปแบบการวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง 11.4% -34.3% ของกำลังอัดของแกนคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพิ่มขึ้น 3.01%-19.21% โดยเมื่อให้แรงโอบรัดทางด้านข้าง 34.3% (7.2 MPa) กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2) การวิบัติของเสาเหล็กกรอกคอนกรีตมีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนเป็นหลัก การเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง ทำให้มุมของระนาบการวิบัติเปลี่ยนไป โดยการใช้หน่วยแรงโอบรัดที่ 11.4 % (2.4 MPa) ของกำลังอัดของแกนคอนกรีต ทำให้ระนาบเฉือนทำมุมกับแนวราบน้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใครขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จ.สกลนคร ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Han, L.-H., Li, W. and Bjorhovde, R. (2014). Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular

(CFST) structures: Members. Journal of Constructional Steel Research, 100, pp. 211-228.

[2] Cai, J. and He, Z.-Q. (2006). Axial load behavior of square CFT stub column with binding bars. Journal of Constructional Steel Research, 62(5), pp. 472-483.

[3] Liew, J.Y.R., Xiong, M. and Xiong, D. (2016). Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete. structures, pp. 213-226.

[4] Sakai, J. (2018). Current state of studies of steel-concrete composite structures. Steel Construction Today & Tomorrow, 55(3), pp. 1-4.

[5] กมลวรรณ ประทุมวงศ์, จักษดา อารังวุฒิ, เด่น รักซ้อน และ วิชรินทร์ แซ่เตีย (2562). พฤติกรรมรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตหลังจากสัมผัสกับอุณหภูมิสูง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, อุตรดิตถ์, 11-12 กรกฎาคม 2562.

[6] Kalemi, B. (2016). Numerical modelling and assessment of circular concrete-filled steel tubular members. Istituito Universitario di Studi Superiori di Pavia. pp. 54.

[7] Schneider, S.P. (1998). Axially loaded concrete-filled steel tubes. Journal of Structural Engineering, 124(10), pp. 1125-1138.

[8] 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, 1(4), pp. 393-410.

[9] Liu, D., Gho, W.-M. and Yuan, J. (2003). Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. Journal of Constructional Steel Research, 59(12), pp. 1499-1515.

[10] Lai, Z. and Varma, A.H. (2016). Effective stress-strain relationships for analysis of noncompact and slender filled composite (CFT) members. Engineering Structures, 124, pp. 457-472.

[11] Han, L.-H., Yang, Y.-F. and Tao, Z. (2003). Concrete-filled thin-walled steel SHS and RHS beam-columns subjected to cyclic loading. Thin-walled Structures, 41(9), pp. 801-833.

[12] Zhang, S. and Liu, J. (2007). Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns. Journal of Constructional Steel Research, 63(9), pp. 1194-1207.

[13] ชูสิทธิ์ อู๋ยืนยงค์, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ (2553). การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูก

- โอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553.
- [14] Greepala, V., Chareerat, T., Wongthong, P. and Kongna, P. (2019). Effect of confining pressure on compressive strength and ductility of square section concrete filled tube column. 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC16), Brisbane, Australia, 3-6 December 2019.
- [15] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2554). การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, หน้า 2-13.
- [16] ชูสิทธิ์ อวยยืนยงค์ (2554). การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [17] ชูสิทธิ์ อวยยืนยงค์, สิทธิชัย แสงอาทิตย์, จักรกานต์ อารังค์วุฒิ และ ศาสตราจารย์สุประเสริฐ (2554). พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, นครปฐม, 18-20 พฤษภาคม 2554.
- [18] Elremaily, A. and Azizinamini, A. (2002). Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(12), pp. 1567-1591.
- [19] Nishiyama, I., Morino, S., Sakino, K., Nakahara, H., Fujimoto, T., Mukai, A., Inai, E., Kai, M., Tokinoya, H., Fukumoto, T., Mori, K., Yoshioka, K., Mori, O., Yonezawa, K., Uchikoshi M. and Hayashi Y. (2002). Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-JAPAN cooperative research program on composite and hybrid structures. *Building Research Institute*.
- [20] Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S. and Nishiyama, I. (2004). Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. *Journal of Structural Engineering*, 130(2), pp. 180-188.
- [21] Morino, S. and Tsuda, K. (2005). Design and construction of concrete-filled steel tube column system in japan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 4(1), pp. 51-74.
- [22] Kuranovas, A., Goode, D., Kvedaras, A.K. and Zhong, S. (2009). Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(1), pp. 21-33.
- [23] 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), pp. 205-220.
- [24] Xiao, Y., He, W. and Choi, K.-k. (2005). Confined concrete-filled tubular columns. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 131(3), pp. 488-497.
- [25] Holmes, N., Niall, D. and O'Shea, C. (2014). Active confinement of weakened concrete columns. *Materials and Structures*, 48, pp. 2759-2777.
- [26] นันทิกานันท์ นามวิจิตร (2554). การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม โดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [27] BS1881-116 (1983). Testing concrete - Part 116: Method for determination of compressive strength of concrete cubes.
- [28] Nardin, S.D. and Debs, A.L.H.C.E. (2006). Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, pp. 1-10.
- [29] Johansson, M. (2002). Composite action and confinement effects in tubular steel-concrete columns, Göteborg (Sweden), Chalmers University of Technology.
- [30] Oliveira, W.L.A.d., S.D. Nardin, Debs, A.L.H.d.C.E. and Debs, M.K.E. (2009). Influence of Concrete Strength and Length/Diameter on the Axial Capacity of CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, pp. 2103-2110.
- [31] Be, U. (1998). Concrete-filled fabricated steel box columns for multi-storey buildings: behaviour and design. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(12), pp. 150-158.
- [32] Jamaluddin, N. (2011). Behaviour of elliptical concrete-filled steel tube (CFT) columns under axial compression load, School of Civil Engineering, The University of Leeds. pp. 44.
- [33] นันทิกานันท์ นามวิจิตร, สิทธิชัย แสงอาทิตย์, จักรกานต์ อารังค์วุฒิ และ ศาสตราจารย์สุประเสริฐ (2554). พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* ปีที่ 4(1).