

พฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subjected to
eccentric loadings



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
โดย	นายรณพีร์ รุ่งมงคลรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติรี)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวีณ ชมปรีดา)	

รณพีร์ รุ่งมงคลรัตน์ : พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง. (Behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subjected to eccentric loadings) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อัครวัชร เล่นวารีย์

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง รูปแบบการทดสอบประกอบด้วย เสารับแรงกระทำตรงศูนย์กลาง เสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง และคานรับแรงดัด หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 มิลลิเมตร เติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเฉลี่ยเท่ากับ 22.5 เมกะปาสคาล ที่เสริมด้วยเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอส (H) ขนาด 100x9.30 กิโลกรัมต่อเมตร เสามีความสูง 450 มิลลิเมตร และคานมีความยาว 1500 มิลลิเมตร ตัวแปรทดสอบที่ศึกษาได้แก่ ระยะเยื้องศูนย์กลาง (0, 15 และ 30 มิลลิเมตร) และการติดตั้งหรือไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน จากการทดสอบพบว่า (1) เสาจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อแรงกระทำตรงศูนย์กลาง โดยกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อแรงกระทำห่างจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดมากขึ้น (2) การติดตั้งสลักรับแรงเฉือนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด ให้เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ และช่วยเพิ่มความต้านทานการโก่งเดาะเฉพาะที่ของตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง (3) เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าผลรวมของกำลังรับแรงอัดจากท่อเหล็ก เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต ที่มีขนาดและวัสดุเดียวกัน และมากกว่าผลรวมของกำลังรับแรงอัดจากเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณ เนื่องจากพฤติกรรมเชิงประกอบของวัสดุ และคอนกรีตถูกโอบรัดโดยเสาท่อเหล็กและท่อเหล็ก ศึกษาสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากข้อกำหนด AISC360-16และมาตรฐาน Eurocode4 พบว่าการประยุกต์ใช้สูตรการคำนวณจากข้อกำหนด AISC 360-16 และมาตรฐาน Eurocode4 ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยทำนายค่ากำลังรับแรงกระทำตรงศูนย์กลางไว้สูงกว่าผลการทดสอบ แต่ทำนายค่ากำลังรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางและแรงดัดต่ำกว่าผลการทดสอบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870419021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Composite column, eccentric loadings, interaction curve

Ronnapee Rungmongkolrat : Behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subjected to eccentric loadings. Advisor: Assoc. Prof. Akhrawat Lenwari, Ph.D.

This research investigates the behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) columns subjected to eccentric loadings. Three experiments type of conducted: columns subjected to concentric and eccentric loads, beams subjected to bending. cross section of tested columns and beams was 150x150 mm square tube filled concrete, that was reinforced with wide flange 100x9.30 kg/m. An average compressive strength of concrete was 22.5 MPa. The height of columns was 450 mm and the length of beam was 1,500 mm. The test variables parameters were eccentricity of the axial load and use of shear studs at flange. The test results showed that: (1) Compressive strength of columns decreased with the increase in eccentricity. (2) The flange shear studs enhanced the compressive strength of columns and improved local buckling resistance of SRCFST columns subjected to eccentric loadings. (3) SRCFST columns had higher strength than the sum of individual strength of concrete, steel tube and steel section and sum of the strength of concrete filled tube and steel section due to the composite behavior. Finally, the strength interaction equations of AISC 360-16 and Eurocode4 predicted similar the strength values to the experimental results. The concentric strength values predicted by both equations were higher than experimental ones, while the predicted eccentric strength values were lower than the experimental

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายรณพีร์ รุ่งมงคลรัตน์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชชา จองวิวัฒนสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประวีณ ชมปรีดา กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง โดยเฉพาะนายวรการ อนันตเสนา นายชนะชัย ทองโถม และนายธนวัฒน์ อ้นถาวร สำหรับคำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณนายณรงค์ รุ่งมงคลรัตน์ และนางวาสนา รุ่งมงคลรัตน์ ผู้เป็นบิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่สั่งสอนและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดมา

รณพีร์ รุ่งมงคลรัตน์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัย.....	4
2.1 การทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) รับแรงกระทำตรง ศูนย์.....	4
2.2 การทดสอบเสาวัสดุผสมเหล็กและคอนกรีตรับแรงกระทำเอียงศูนย์.....	17
2.3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาวัสดุผสมเหล็กและคอนกรีตรับแรงกระทำเอียงศูนย์.....	48
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	73
3.1 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน AISC 360 ปี 2016.....	73

3.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4	78
บทที่ 4 รายละเอียดการทดสอบ.....	90
4.1 คุณสมบัติวัสดุ	90
4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ	92
4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด	95
4.4 ขั้นตอนการทดสอบ.....	102
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	105
5.1 พฤติกรรมรับแรงอัดและแรงดัดของตัวอย่างทดสอบ	105
5.2 ประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสม	115
5.3 การประยุกต์ใช้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐานการออกแบบ AISC 360-16 และ Eurocode4	119
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	128
6.1 สรุปผลการวิจัย	128
6.2 ข้อเสนอแนะ	129
ภาคผนวก	130
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์หุ้มครอบเพื่อให้แรงกระทำเยื้องศูนย์	130
ภาคผนวก ข. การตรวจสอบความถูกต้องของรายการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัด และแรงดัด.....	132
ภาคผนวก ค. รายละเอียดการคำนวณออกแบบระยะเรียงของสลักรับแรงเฉือน.....	142
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองเพิ่มเติม	145
บรรณานุกรม	161
ประวัติผู้เขียน	164

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 หน้าตัดของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)	4
รูปที่ 2.2 การเชื่อมตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)	8
รูปที่ 2.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004).....	8
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดสำหรับตัวอย่างเสาสั้น (Wang และคณะ, 2004).....	9
รูปที่ 2.5 ประเภทของการวิบัติ (Wang และคณะ, 2004).....	9
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำตามแนวแกนกับการโก่งตัวด้านข้างสำหรับตัวอย่างเสายาว (Wang และคณะ, 2004).....	10
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการทดสอบ (ก) เสาตัวอย่างหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณรูปกากบาท (ข) เสาตัวอย่างหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณรูปตัวไอ (I) (Zhu และคณะ, 2010).....	11
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบหล่อ (Zhu และคณะ, 2010)	11
รูปที่ 2.9 หน้าตัดของตัวอย่างก่อนทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010).....	12
รูปที่ 2.10 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010).....	13
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดในแนวแกนของเสาสั้น (Zhu และคณะ, 2010)	14
รูปที่ 2.12 การวิบัติของเสาตัวอย่าง S4H (Zhu และคณะ, 2010).....	15
รูปที่ 2.13 การวิบัติของเสาตัวอย่าง S4H10 (Zhu และคณะ, 2010)	15
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักรต่อน้ำหนักประลัย และอัตราส่วนปัวซอง (Zhu และคณะ, 2010)	16
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและผลกระทบจากอัตราส่วนความยาว ต่อความกว้าง (Zhu และคณะ, 2010)	16
รูปที่ 2.16 รูปแบบหน้าตัดของตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012).....	17

รูปที่ 2.17 ตำแหน่งที่ติดตั้งโครงและอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Ellobody และคณะ, 2012)	20
รูปที่ 2.18 รูปและการตั้งค่าเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012)	21
รูปที่ 2.19 รูปถ่ายของเครื่องที่ทำการทดสอบตัวอย่าง C11 (Ellobody และคณะ, 2012)	21
รูปที่ 2.20 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C1 (Ellobody และคณะ, 2012)	23
รูปที่ 2.21 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C6 (Ellobody และคณะ, 2012)	23
รูปที่ 2.22 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C8 (Ellobody และคณะ, 2012)	24
รูปที่ 2.23 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C10 (Ellobody และคณะ, 2012)	24
รูปที่ 2.24 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C12 (Ellobody และคณะ, 2012)	25
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบของเสาสั้น (C1, C2 และ C5) (Ellobody และคณะ, 2012)	26
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบเสายาว (C8 และ C11) (Ellobody และคณะ, 2012)	26
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบของเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (C9 และ C12) (Ellobody และคณะ, 2012)	27
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการหดตัวเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบ C2 และ C5 (Ellobody และคณะ, 2012)	27
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ C12 (Ellobody และคณะ, 2012)	28
รูปที่ 2.30 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทำสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดาประเภทเสายาว (Ellobody และคณะ, 2012)	29
รูปที่ 2.31 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทำสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดาประเภทเสาสั้น (Ellobody และคณะ, 2012)	29

รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทดสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเส้นใย (Ellobody และคณะ, 2012)	30
รูปที่ 2.33 รูปแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	31
รูปที่ 2.34 (ก) ภาพร่างเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (ข) ภาพถ่ายเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	33
รูปที่ 2.35 ประเภทของการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ข) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	34
รูปที่ 2.36 เส้นโค้งแสดงการเสียรูปทางด้านข้าง (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	35
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (ก)	C-200 (ข) C-240 (Xuanding Wang และคณะ, 2015)
รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ก) C-200 (ข) C-240 (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	36
รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและแรงดัด (ก) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร (ข) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	37
รูปที่ 2.40 ภาพร่างแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	39
รูปที่ 2.41 เครื่องทดสอบและการติดเครื่องมือวัด (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	40
รูปที่ 2.42 รูป 2.1 ประเภทการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ข) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	41
รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการเคลื่อนที่ตามยาว (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	42
รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและเคลื่อนที่ด้านข้างบริเวณกึ่งกลางเสา (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	42
รูปที่ 2.45 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน (ก) S-1.5 (ข) S-2.0 (Xuanding Wang และคณะ, 2016)	43
รูปที่ 2.46 ภาพร่างและภาพถ่ายของเครื่องทดสอบ (Jiepeng LU และคณะ, 2015)	44

รูปที่ 2.47 ภาพแสดงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (Jiepeng LU และคณะ, 2015)	45
รูปที่ 2.48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบภายใต้ กระทำเยื้องศูนย์กลาง (ก) C-200-25 (ข) C-240-25 (Jiepeng LU และคณะ, 2015).....	46
รูปที่ 2.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ในแนวแกนสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำตรง ศูนย์กลาง (ก) C-200-0 (ข) C-240-0 (Jiepeng LU และคณะ, 2015)	46
รูปที่ 2.50 การกระจายความเค้นในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่สภาวะพลาสติก (Jiepeng LU และคณะ, 2015).....	47
รูปที่ 2.51 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน (ก) ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร (ข) ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร (Jiepeng LU และ คณะ, 2015)	47
รูปที่ 2.52 หน้าตัดเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ	48
รูปที่ 2.53 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง NSA1 (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016).....	50
รูปที่ 2.54 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง HSA1 (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016).....	51
รูปที่ 2.55 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง HSB1 (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016).....	51
รูปที่ 2.56 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง SC1 (ธนวัฒน์ อัน ถาวร, 2016).....	52
รูปที่ 2.57 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง SC7 (ธนวัฒน์ อัน ถาวร, 2016).....	52
รูปที่ 2.58 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วย คอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016)	55
รูปที่ 2.59 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วย คอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016).....	55
รูปที่ 2.60 หน้าตัดเสาทดสอบท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (Liu และคณะ 2015)56	

รูปที่ 2.61 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์กลางกับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-200-25 (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016).....57

รูปที่ 2.62 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์กลางกับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-240-25 (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016).....58

รูปที่ 2.63 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว .60

รูปที่ 2.64 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด AISC360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว.60

รูปที่ 2.65 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตของ Abbas และ Shahari (2003) [19]62

รูปที่ 2.66 ความเค้นในแนวแกนของคอนกรีตในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่สภาวะใกล้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา (วรการ อนันตเสนา, 2015).....63

รูปที่ 2.67 ความเค้นในแนวแกนของคอนกรีตในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัดของเสา ลดลง (วรการ อนันตเสนา, 2015).....63

รูปที่ 2.68 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังโดยลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดกำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา,2015).....66

รูปที่ 2.69 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC (วรการ อนันตเสนา, 2015)66

รูปที่ 2.70 แสดงผลกระทบของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ค่าต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา, 2015)67

รูปที่ 2.71 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....68

รูปที่ 2.72 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....68

รูปที่ 2.73 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....	69
รูปที่ 2.74 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ค่าต่าง ๆ ของกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (วรการ อนันตเสนา, 2015).....	69
รูปที่ 2.75 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....	70
รูปที่ 2.76 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 2000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....	71
รูปที่ 2.77 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 4000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015).....	71
รูปที่ 3.1 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังแรงอัดและแรงดัดในคาน-เสา ตามมาตรฐาน AISC [20].....	75
รูปที่ 3.2 ประเภทของหน้าตัดวัสดุผสมที่ออกแบบได้โดยมาตรฐาน Eurocode4 [22]	78
รูปที่ 3.3 ขอบเขตความชะลูดของหน้าตัดต่าง ๆ [22].....	79
รูปที่ 3.4 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังแรงอัดและแรงดัด ตามมาตรฐาน Eurocode4 [22].....	83
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังแรงอัดและแรงดัดอย่างง่าย และการกระจายหน่วยแรง ตามมาตรฐาน Eurocode4 [22].....	84
รูปที่ 3.6 ค่า μ_{dy} และ μ_{dz} ออกแบบสำหรับแรงอัดและแรงดัดแกนเดียว [22].....	89
รูปที่ 4.1 ภาพจำลองเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบ (ติดสลักรับแรงเฉือน).....	91
รูปที่ 4.2 ภาพจำลองสลักรับแรงเฉือน	91
รูปที่ 4.3 เหล็กกลางและเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบ	92
รูปที่ 4.4 ขนาดของหน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบ (มิลลิเมตร).....	94
รูปที่ 4.5 หน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	94

รูปที่ 4.6 ภาพจำลองตำแหน่งติด LVDT ของตัวอย่าง C1 ถึง C5.....	95
รูปที่ 4.7 ภาพจำลองตำแหน่งติด LVDT ของตัวอย่าง C6 ถึง C11	96
รูปที่ 4.8 ภาพจำลองตำแหน่งติด LVDT ของตัวอย่าง C12 ถึง C14 (ก) 3 มิติ (ข) 2 มิติ	98
รูปที่ 4.9 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C1(A).....	99
รูปที่ 4.10 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C1(B).....	99
รูปที่ 4.11 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C2(A) และ C3(A).....	100
รูปที่ 4.12 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C2(B) และ C3(B).....	100
รูปที่ 4.13 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C4(A).....	101
รูปที่ 4.14 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง C4(A).....	101
รูปที่ 4.15 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดสเตรนเกจของตัวอย่าง CFT	102
รูปที่ 4.16 การทดสอบตัวอย่างเสารับแรงกระทำตรงศูนย์.....	102
รูปที่ 4.17 การทดสอบตัวอย่างเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์	103
รูปที่ 4.18 การทดสอบตัวอย่างคานรับแรงดัด.....	104
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ท่อเหล็กของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์	107
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่เหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์	108
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์.....	108
รูปที่ 5.4 รูปการวิบัติของเสาท่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์หลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน.....	109
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ท่อเหล็กของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร	110
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่เหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร	110

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสา รับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 มิลลิเมตร.....	111
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสา รับแรงกระทำเอียงศูนย์ 30 มิลลิเมตร.....	111
รูปที่ 5.9 รูปการณ์วิบัติเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์หลัง การทดสอบ (ก) 15 มิลลิเมตร ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) 15 มิลลิเมตร ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ค) 30 มิลลิเมตร ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ง) 30 มิลลิเมตร ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน	112
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ท่อเหล็กของ ตัวอย่างคานทดสอบรับแรงดัด	113
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการโก่งตัวของตัวอย่างคานทดสอบรับแรงดัด	113
รูปที่ 5.12 รูปการณ์วิบัติคานท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงดัดหลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน.....	114
รูปที่ 5.13 ท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต หลังการทดสอบ.....	116
รูปที่ 5.14 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต, ท่อเหล็ก, เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ, และผลรวมของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีตและท่อ เหล็ก.....	117
รูปที่ 5.15 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ, เสาเหล็กเติมด้วย คอนกรีต, เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ, และผลรวมของเหล็กรูปพรรณร่วมกับ เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีต	118
รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของที่คำนวณได้จาก มาตรฐาน Eurocode4 กับผลการทดสอบ.....	121
รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของที่คำนวณ.....	122

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สัดส่วนการผสมคอนกรีตของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)	4
ตารางที่ 2.2	รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004).....	5
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติและผลการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010).....	12
ตารางที่ 2.4	สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้เป็นส่วนผสมของเสาตัวอย่าง (Zhu และคณะ, 2010).....	12
ตารางที่ 2.5	รายละเอียดของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012)	18
ตารางที่ 2.6	ขนาดของตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Ellobody และคณะ,	19
ตารางที่ 2.7	กำลังและส่วนผสมของคอนกรีต (Ellobody และคณะ, 2012).....	19
ตารางที่ 2.8	กำลังของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบและจากการ ออกแบบ (Ellobody และคณะ, 2012).....	22
ตารางที่ 2.9	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)	31
ตารางที่ 2.10	คุณสมบัติของวัสดุ (Xuanding Wang และคณะ, 2015).....	32
ตารางที่ 2.11	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2016).....	38
ตารางที่ 2.12	คุณสมบัติของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และสลักเกลียวรับแรงเฉือน (Xuanding Wang และคณะ, 2016).....	39
ตารางที่ 2.13	คุณสมบัติของคอนกรีต (Xuanding Wang และคณะ, 2016).....	39
ตารางที่ 2.14	คุณสมบัติของวัสดุ (Jiepeng LU และคณะ, 2015).....	44
ตารางที่ 2.15	ขนาดหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016)	49
ตารางที่ 2.16	คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016).....	49
ตารางที่ 2.17	กำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (ธนพัฒน์ อ้น ถาวร, 2016).....	53
ตารางที่ 2.18	การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการทดสอบกับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10 (ธนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016).....	53

ตารางที่ 2.19 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10 (ธนวัฒน์ อัน ถาวร, 2016).....	54
ตารางที่ 2.20 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบและระยะรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (ธนวัฒน์ อันถาวร , 2016).....	57
ตารางที่ 2.21 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต (ธนวัฒน์ อันถาวร, 2016)....	58
ตารางที่ 2.22 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต (วรการ อนันตเสนา, 2015)..	62
ตารางที่ 2.23 ขนาดหน้าตัด ความสูงของเสาและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ (วรการ อนันตเสนา, 2015)	64
ตารางที่ 2.24 ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทงยาวและเหล็กเสริมปลอก (วรการ, 2015).....	64
ตารางที่ 2.25 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต เหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม (วรการ อนันตเสนา, 2015).	64
ตารางที่ 2.26 ผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ระยะเอียงศูนย์ต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา, 2015)	65
ตารางที่ 3.1 การจำแนกหน้าตัดของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-16 (2016) [20].....	73
ตารางที่ 3.2 การสร้างจุดต่าง ๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดและกำลังแรงดัดของเสาต่อ เหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กรูปพรรณหุ้มด้วยคอนกรีต [21]	76
ตารางที่ 3.3 ค่าความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตของหน้าตัดแต่ละแบบ [22]	81
ตารางที่ 3.4 ค่าตัวประกอบโมเมนต์เทียบเท่าเพื่อคำนวณหาผลการวิเคราะห์ลำดับที่สอง [22].....	88
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตผสมเสร็จ.....	92
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ	93
ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบเสาและคาน	106
ตารางที่ 5.2 การวิบัติของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของต่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ, และคอนกรีต ที่ใช้ใน การทดสอบ.....	115
ตารางที่ 5.3 อัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ กับผลรวม แรงอัดของส่วนประกอบเสาตัวอย่างทดสอบ.....	116

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณค่าในแต่ละจุดของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดด้วย
มาตรฐาน Eucocode4..... 120

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณค่าในแต่ละจุดของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดด้วย
มาตรฐาน AISC 360-16..... 120

ตารางที่ 5.6 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาต่อ
เหล็กเติมคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (CFT+H) จากมาตรฐาน Eurocode4 ต่อกำลังรับแรงอัด
และแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ..... 124

ตารางที่ 5.7 อัตราส่วนระหว่างกับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสา
เหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก (ENCASE+TUBE) จากมาตรฐาน Eurocode4 ต่อกำลังรับ
แรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ..... 125

ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนระหว่างกับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาต่อ
เหล็กเติมคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (CFT+H) จากมาตรฐาน AISC 360-16 ต่อกำลังรับแรงอัด
และแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ..... 126

ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาเหล็ก
หุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก (ENCASE+TUBE) จากมาตรฐาน AISC 360-16 ต่อกำลังรับแรงอัด
และแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ..... 127

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เสาวัสดุผสมระหว่างเหล็กและคอนกรีต (composite steel-concrete columns) ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างอย่างกว้างขวาง ประโยชน์ของเสาวัสดุผสมคือ มีกำลังสูง (high strength) มีความเหนียว (ductility) เสาวัสดุผสมมีหน้าตัดที่เล็กกว่าและกำลังสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเท่ากัน ซึ่งทำให้มีพื้นที่ใช้สอยมากขึ้นและประหยัดวัสดุได้มากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพให้แก่คอนกรีตในโครงสร้างมากขึ้นโดยเฉพาะคุณสมบัติการเพิ่มกำลังรับแรงดึงให้ดียิ่งขึ้น

เสาวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (concrete-encased steel columns) และเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (concrete-filled steel tubes หรือชื่อย่อ CSFT) ในกรณีของเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณด้านในสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงเฉือนของเสาได้ ส่วนคอนกรีตที่หุ้มเหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการโก่งเดาะและการโก่งเดาะเฉพาะที่ รวมไปถึงป้องกันการเกิดสนิมจากสารเคมีต่าง ๆ และช่วยในเรื่องของการทนไฟ ข้อเสียของเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตคือต้องใส่เหล็กกันร้าวเพื่อป้องกันการกระเทาะ (spalling) ของคอนกรีต นอกจากนี้ยังต้องใช้แบบหล่อซึ่งยุ่งยากในการก่อสร้างอีกด้วย ในขณะที่เสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตไม่ต้องใช้เหล็กกันร้าวและใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อไปในตัว คอนกรีตภายในท่อเหล็กมีความเสถียรและท่อเหล็กยังให้การโอบรัดแก่คอนกรีตซึ่งทำให้เสามีความเหนียวและมีกำลังที่สูงขึ้น ข้อเสียของเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตคือมีความทนไฟต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต Kodur และ Lee (1996) [1, 2] ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันไฟให้เสาวัสดุผสมระหว่างเหล็กและคอนกรีตเสริมเส้นใย พบว่าควรใส่เหล็กเสริมเข้าไปในเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังและเพิ่มอัตราการทนไฟให้สูงขึ้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณ (steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns หรือชื่อย่อ SRCFST) เป็นการรวมข้อดีของเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเข้าด้วยกัน โดย Wang และคณะ (2004) [3] ได้ทำการศึกษาเสาแบบดั่งกล่าว โดยได้มีการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณแรงกระทำตรงศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางมีจำนวนจำกัดและไม่ได้ระบุใน

มาตรฐานในปัจจุบัน คือ AISC360-10 และ Eurocode4 (รายละเอียดการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาจะอยู่ในบทที่ 2) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ และนำผลการทดสอบไปศึกษาความเหมาะสมของสมการทำนายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน (strength interaction curve)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
2. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
3. ศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐานการออกแบบเสาวัสดุผสมในปัจจุบันคือ AISC 360-16 และ Eurocode4

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขตดังนี้

1. พฤติกรรมที่ศึกษา ประกอบด้วย
 - รูปแบบการวิบัติ
 - ความเครียดในแนวแกนและทางขวางของท่อเหล็กด้านนอกและเหล็กรูปพรรณภายใน
 - การหดตัวในแนวแกนและทางขวางของท่อเหล็กด้านนอกและเหล็กรูปพรรณภายใน
 - กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณ
2. ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย
 - ระยะเอียงศูนย์ (0, 15, 30 มิลลิเมตร)
 - หมุดรับแรงเฉือน (ติดตั้ง/ไม่ติดตั้ง)
3. รูปแบบของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณ คือ
 - เสาสั้น ($L/B = 3$)
 - หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
 - เหล็กรูปพรรณด้านในมีหน้าตัดรูปตัวเอช (wide flange)

4. มาตรฐานที่ประยุกต์ใช้ในการทำนายสมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง (strength interaction curves) ประกอบด้วย

- AISC 360-16
- Eurocode4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. เข้าใจพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
2. ทราบผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
3. สมการทำนายกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

1.5 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

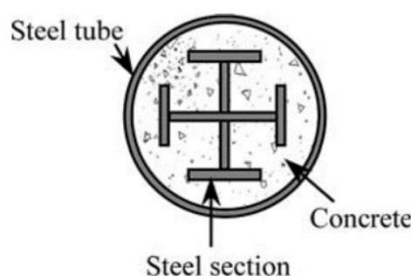
1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเสาวัสดุผสมรับแรงกระทำตรงศูนย์
2. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์
3. วางแผนและออกแบบการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
4. จัดเตรียมอุปกรณ์และติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
5. ทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผลงานวิจัย
7. เขียนบทความวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัย

2.1 การทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) รับแรงกระทำตรงศูนย์

Wang และคณะ (2004) [3] ได้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดเป็นรูปวงกลมรับแรงกระทำตรงศูนย์ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับกำลังและความเหนียวในการรับแรงอัดของเสา รูปที่ 2.1 แสดงหน้าตัดของเสาท่อเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.1 หน้าตัดของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กำลังของคอนกรีต (concrete strength) ดัชนีการโอบรัด (confinement index) ดัชนีเหล็กโครงสร้าง (structural steel index) และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) โดยทดสอบทั้งหมด 16 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) โดยเหล็กรูปพรรณเป็นรูปตัว X 15 ตัวอย่าง และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) 1 ตัวอย่าง คอนกรีตแบ่งเป็น คอนกรีตกำลังธรรมดา (NC) และ คอนกรีตกำลังสูง (HSC) ประเภทของท่อเหล็กแบ่งออกเป็น 3 ประเภท อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา มีค่าอยู่ระหว่าง 45.4 ถึง 72 ความสูงของหน้าตัดมีค่า 100 และ 120 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความยาวต่อหน้าตัดมี 3 ค่า ได้แก่ 2.8 7 และ 10 สำหรับสัดส่วนการผสมคอนกรีต ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนการผสมคอนกรีตของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

Mix type	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)	Water/cement ratio
HSC	470	695	1053	179	14.1	0.38
NC	360	676	1177	197	-	0.547

ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วันมีค่า 36.8 เมกะปาสคาลสำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา และ 65.6 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังสูง และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ วันที่ทำการทดสอบมีค่า 44.2 เมกะปาสคาลสำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา และ 68.9 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังสูง ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 33490 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา และ 42480 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังสูง และค่า f_c เท่ากับ 67% ของกำลังคอนกรีต ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

Specimen no.	Length (L, mm)	Diameter (D, mm)	Thickness (t, mm)	D/t ratio	L/D ratio
NS-A1	465	166	2.7	61.5	2.8
NS-A2	465	166	2.7	61.5	2.8
NS-B1	470	168	3.7	45.5	2.8
HS-A1	465	166	2.7	61.5	2.8
HS-A2	465	166	2.7	61.5	2.8
HS-B1	470	168	3.7	45.4	2.8
HS-B2	470	168	3.7	45.4	2.8
HS-C1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-C2	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-D1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-D1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-E1	470	168	3.7	45.4	2.8
HM-1	1176	168	3.7	45.4	7.0
HM-2	1176	168	3.7	45.4	7.0
HL-1	1680	168	3.7	45.4	10.0
HL-2	1680	168	3.7	45.4	10.0

ตาราง 2.2 (ต่อ) รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (2) (Wang และคณะ, 2004)

Specimen no.	f_y^t (MPa)	E_t (MPa)	A_s (mm ²)	f_y^s (MPa)	E_s (MPa)	f_c (MPa)
NS-A1	318	191	2324	288	207	29.6
NS-A2	318	191	2324	288	207	29.6
NS-B1	318	191	2324	288	207	29.6
HS-A1	318	191	2324	288	207	46.2
HS-A2	318	191	2324	288	207	46.2
HS-B1	318	191	2324	288	207	46.2
HS-B2	318	191	2324	288	207	46.2
HS-C1	269	190	2324	288	207	46.2
HS-C2	269	190	2324	288	207	46.2
HS-D1	269	190	3570	314	197	46.2
HS-D1	269	190	3570	314	197	46.2
HS-E1	318	191	-	-	-	46.2
HM-1	318	191	2324	288	207	46.2
HM-2	318	191	2324	288	207	46.2
HL-1	318	191	2324	288	207	46.2
HL-2	318	191	2324	288	207	46.2

ตาราง 2.2 (ต่อ) รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (3) (Wang และคณะ, 2004)

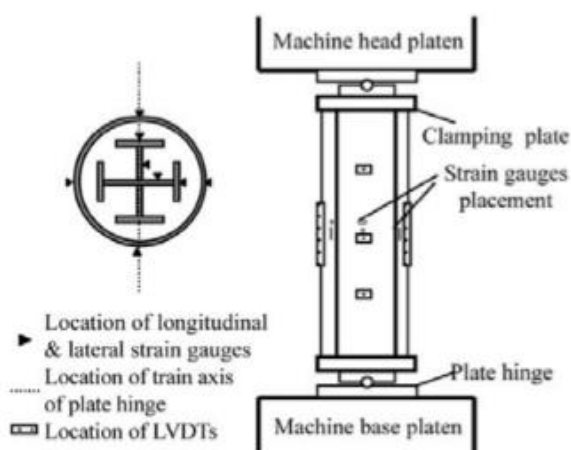
Specimen no.	Loading Method	N_u (kN)
NS-A1	Monotonic	2350
NS-A2	Monotonic	2100
NS-B1	Monotonic	2640
HS-A1	Monotonic	2700
HS-A2	Cyclic	2650
HS-B1	Monotonic	2835
HS-B2	Cyclic	2832
HS-C1	Monotonic	3640
HS-C2	Cyclic	3550
HS-D1	Monotonic	4130
HS-D1	Cyclic	4330
HS-E1	Monotonic	2358
HM-1	Monotonic	2830
HM-2	Monotonic	2735
HL-1	Monotonic	2468
HL-2	Monotonic	2430

โดยที่ f'_y คือกำลังครากของท่อเหล็ก, f'_y คือกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ, E_t คือมอดุลัสยืดหยุ่นของท่อเหล็ก, E_s คือมอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ, A_s คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ, f_c คือ 67% ของกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต



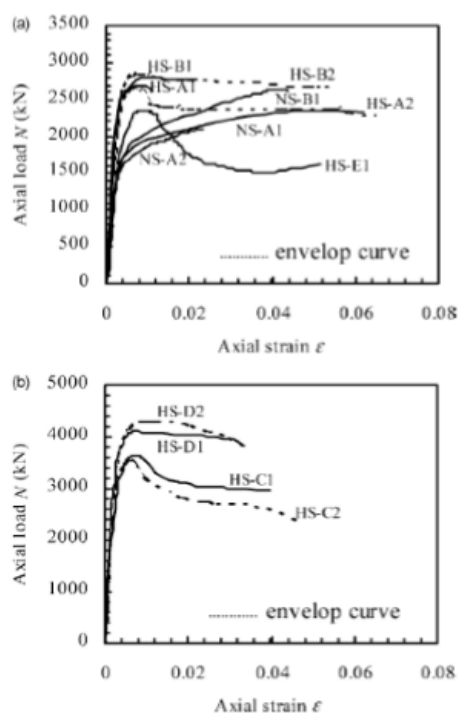
รูปที่ 2.2 การเชื่อมตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

ตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่มีกำลัง 5000 กิโลนิวตัน รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ สเตรนเกจ (strain gauges) 8 ตัว ถูกติดไว้ที่ปีกและเอวของเหล็กรูปพรรณบริเวณกึ่งกลางความสูงเพื่อวัดค่าความเครียดในแนวแกนและความเครียดด้านข้าง สเตรนเกจอีก 8 ตัวติดไว้ที่ผิวด้านนอกของท่อเหล็กบริเวณกึ่งกลางเพื่อวัดค่าการเสียรูปและการขยายตัวของผนังท่อเหล็ก การทดสอบในครั้งนี้นำแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ ทดสอบภายใต้แรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (monotonic) และทดสอบภายใต้แรงอัดกระทำเป็นรอบ (cyclic) เสาานั้นจะเพิ่มน้ำหนักอย่างช้า ๆ เพื่อให้สังเกตเห็นพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยการทดสอบสิ้นสุดเมื่อค่าการเสียรูปถึงค่าที่กำหนดหรือเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่



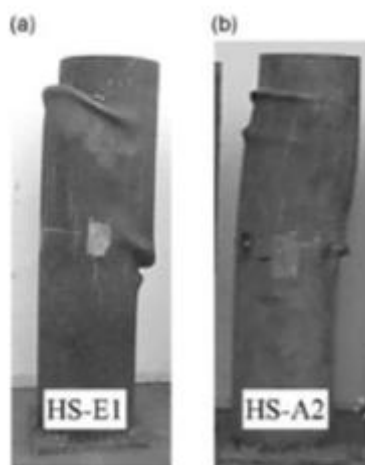
รูปที่ 2.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

รูปที่ 2.4 แสดงผลการทดสอบเสาสั้นได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียด และรูปที่ 2.5 แสดงประเภทของการวิบัติ จากความสัมพันธ์พบว่าเส้นค่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงจนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณ 60% ของน้ำหนักประลัยสำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา และ 70 % สำหรับคอนกรีตกำลังสูง เมื่อแรงกระทำสูงกว่าจุดนี้แล้วเหล็กจะเริ่มครากและเส้นค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากคอนกรีตด้านในถูกโอบรัดโดยท่อเหล็กด้านนอก



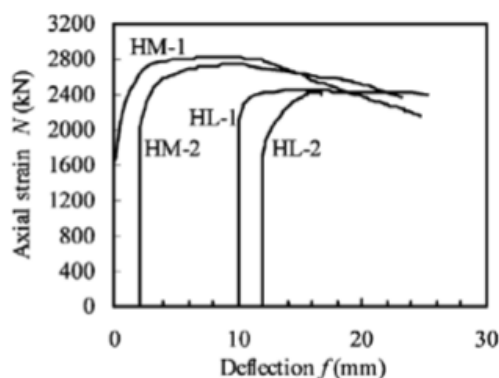
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดสำหรับตัวอย่างเสาสั้น

(Wang และคณะ, 2004)



รูปที่ 2.5 ประเภทของการวิบัติ (Wang และคณะ, 2004)

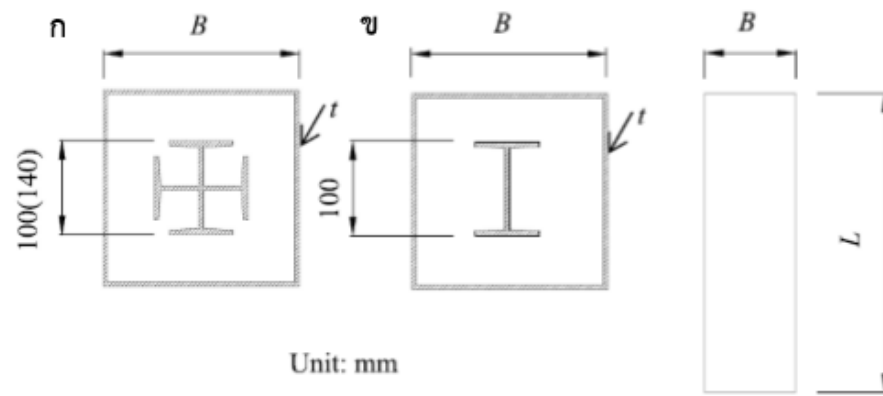
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำตามแนวแกนกับการโก่งตัวด้านข้างของตัวอย่างเสายาว การโก่งตัวด้านข้างจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำตามแนวแกนมีค่า 0.6 ถึง 0.7 เท่าของน้ำหนักประลัย การโก่งตัวด้านข้างเกิดขึ้นจากแรงกระทำตามแนวแกนจนถึงระยะการโก่งทางด้านข้างของโครงสร้าง (secondary moment) และทำให้มีโอกาสวิบัติจากการดัดมากกว่าแรงอัด



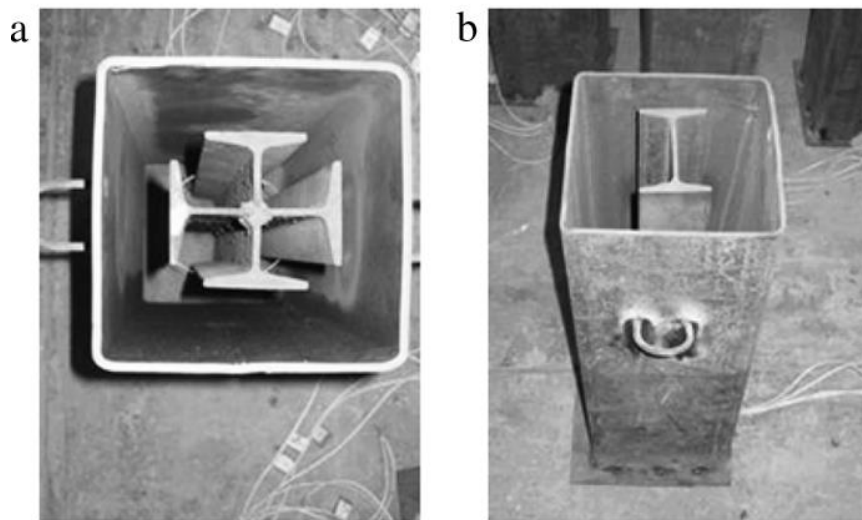
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำตามแนวแกนกับการโก่งตัวด้านข้างสำหรับตัวอย่างเสายาว (Wang และคณะ, 2004)

จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรพบว่า เมื่อกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของเสาต่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยแต่ค่าความเหนียวจะลดลง ในขณะที่ค่าดัชนีการโอบรัดและค่าดัชนีเหล็กโครงสร้างเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ทั้งกำลังและความเหนียวของเสาต่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นไปตามไปด้วย ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา เมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กำลังของเสาต่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กรูปพรรณมีค่าลดลง

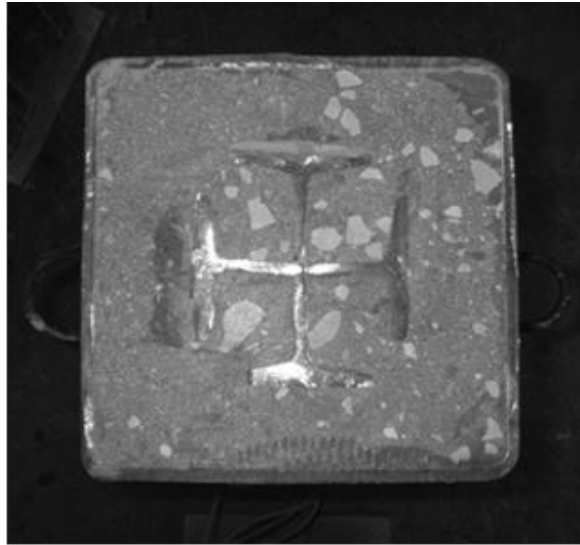
จากนั้น Zhu และคณะ (2010) [4] ได้ทำการทดสอบเสาต่อเหล็กเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพื่อศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับกำลังและลักษณะการเสียรูป โดยตัวแปรที่ทำการทดสอบได้แก่ กำลังของคอนกรีต (concrete strength) มีค่าเท่ากับ 48.4 เมกะปาสคาลและ 70.8 เมกะปาสคาล อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของต่อเหล็ก (B/t ratio) มีค่าเท่ากับ 35 และ 43 อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเสา (L/B ratio) มีค่าเท่ากับ 3, 6, 9 และ 12 อัตราส่วนของเหล็กรูปพรรณ (ratio of steel section) มีค่าระหว่าง 0% ถึง 12.3% โดยทดสอบทั้งหมด 18 ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน รูปที่ 2.7 แสดงหน้าตัดของเสาดตัวอย่าง รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างแบบหล่อ รูปที่ 2.9 แสดงหน้าตัดของตัวอย่างก่อนที่ทดสอบ ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติและผลการทดสอบของเสา และตารางที่ 2.4 แสดงสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้เป็นส่วนผสมของเสาดตัวอย่าง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการทดสอบ (ก) เสาตัวอย่างหน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปกากบาท (ข) เสาตัวอย่างหน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ (I) (Zhu และคณะ, 2010)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบหล่อ (Zhu และคณะ, 2010)



รูปที่ 2.9 หน้าตัดของตัวอย่างก่อนทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติและผลการทดสอบของตัวอย่างเสาทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010)

Specimen	$B \times t \times L_0$ (mm)	L/B	f'_c (MPa)	A_c (mm ²)	f_{yt} (MPa)	A_s (mm ²)	f_{ys} (MPa)	A_s (mm ²)	ρ_w	μ_{ES}	N_u^{exp} (kN)	N_u^{num} (kN)	$\frac{N_u^{num}}{N_u^{exp}}$
S5L10V	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30 990	288	4169	338	2866	0.085	a	4035	3669	1.10
S5L10	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30 990	288	4169	338	2866	0.085	a	4050	3669	1.10
S5H10V	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30 990	288	4169	338	2866	0.085	2.77	4880	4363	1.12
S5H10	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30 990	288	4169	338	2866	0.085	2.34	4880	4363	1.12
S4L10	195 × 4.5 × 600	3	48.4	31 730	289	3429	338	2866	0.083	a	3930	3495	1.12
S4H10	195 × 4.5 × 600	3	70.8	31 730	289	3429	338	2866	0.083	2.16	4750	4206	1.13
S4L10I	195 × 4.5 × 600	3	48.4	33 163	289	3429	338	1433	0.041	2.04	3410	3080	1.11
S4H14	195 × 4.5 × 600	3	70.8	30 726	289	3429	327	4300	0.123	2.90	47 10	4572	1.03
S5L10I	195 × 5.5 × 600	3	48.4	32 423	288	4169	338	1433	0.042	2.75	3620	3254	1.11
S5L10C	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30 990	288	4169	338	2866	0.085	a	3860	3669	1.05
S5H10C	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30 990	288	4169	338	2866	0.085	2.58	4980	4363	1.14
S4L	195 × 4.5 × 600	3	48.4	34 596	289	3429	-	0	0.000	1.81	2985	2665	1.12
S4H	195 × 4.5 × 600	3	70.8	34 596	289	3429	-	0	0.000	1.78	3900	3440	1.13
L4L10-6	195 × 4.5 × 1200	6	48.4	31 730	289	3429	338	2866	0.083	-	3765	3495	1.08
L4L10-9	195 × 4.5 × 1800	9	48.4	31 730	289	3429	338	2866	0.083	-	3720	3495	1.06
L4L10-12	195 × 4.5 × 2400	12	48.4	31 730	289	3429	338	2866	0.083	-	3410	3495	0.98
L5L10I-9	195 × 5.5 × 1800	9	48.4	32 423	288	4169	338	1433	0.042	-	3520	3254	1.08
L5L10I-12	195 × 5.5 × 2400	12	48.4	32 423	288	4169	338	1433	0.042	-	3245	3254	1.00

a—the axial load did not fall to 85% of the maximum load when the test stopped.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

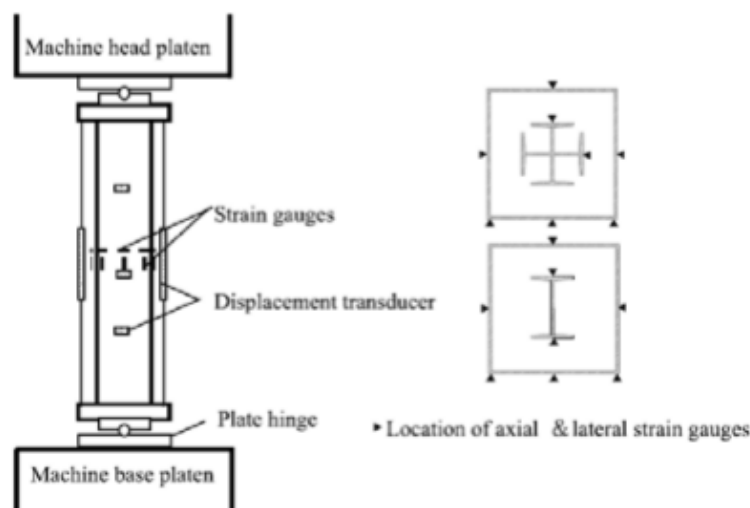
โดยที่ B คือความกว้างของหน้าตัดท่อนเหล็ก, t คือความหนาของท่อนเหล็ก, L คือความยาวของเสาตัวอย่างทดสอบ, f'_c คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, f_{yt} คือกำลังครากของท่อนเหล็ก, f_{ys} คือกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อนเหล็ก, A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณภายใน, N_u^{exp} คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากการทดสอบ, N_u^{num} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากการคำนวณ

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้เป็นส่วนผสมของเสาตัวอย่าง (Zhu และคณะ, 2010)

Mixture proportions (kg/m ³)						Slump (mm)	Slump flow (mm)	$f_{y, 28}$ (MPa)		E_c (MPa)
Cement	Fly ash	Water	Sand	Coarse aggregate	Superplasticizer			28d	81d ^a	
420	140	185	730	925	11.2	255	650	63.7	73.2	38 500
467	155	168	710	900	12.4	260	680	86.4	103.8	43 030

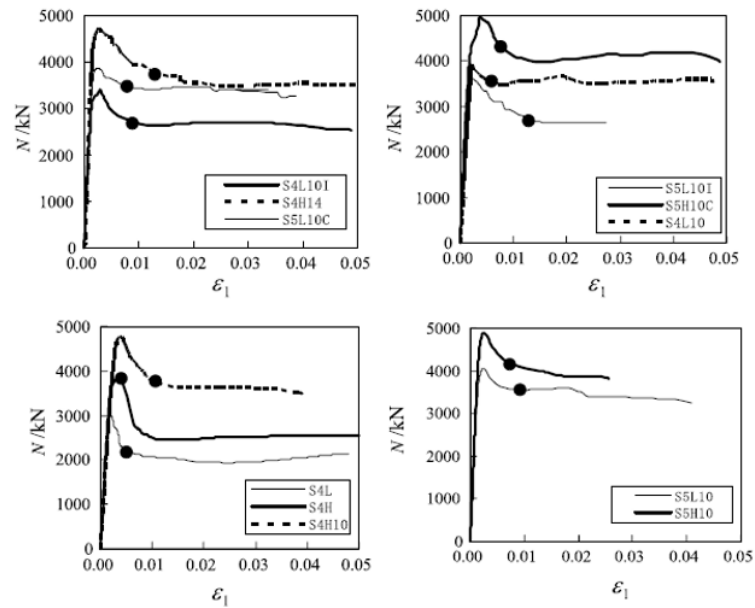
^a 81d—the day of test.

ตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่มีกำลัง 5000 กิโลนิวตัน รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการติดตั้งและเครื่องมือที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ โดยสเตรนเกจ 4 ตัวติดไว้ที่ปีกของเหล็กรูปพรรณเพื่อวัดค่าความเครียดในแนวแกนและความเครียดด้านข้าง และสเตรนเกจ 12 ตัวติดไว้ที่ผิวนอกของท่อเหล็กเพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวแกนและการขยายตัวของท่อเหล็ก อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (displacement transducers) 2 ตัวถูกติดตั้งที่ด้านบนและด้านล่างของเสาเพื่อวัดการเสียรูปตามแนวแกน และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ 3 ตัวถูกติดไว้ที่ $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ และ $\frac{3}{4}$ ของความยาวของเสาเพื่อวัดการโก่งตัวด้านข้างของเสาตัวอย่างที่เป็นเสายาว เครื่องบันทึกจะบันทึกน้ำหนัก การเสียรูป และความเครียดของตัวอย่างทดสอบ การทดสอบในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ ทดสอบภายใต้แรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่และทดสอบภายใต้แรงอัดกระทำซ้ำการทดสอบสิ้นสุดเมื่อความเครียดในแนวแกนถึง 0.05 หรือรอยเชื่อมแตก (ruptured) สำหรับเสาสั้น และเมื่อความสามารถในการรับแรงลดลงอย่างรวดเร็วและการโก่งตัวทางด้านข้างมีค่ามากสำหรับเสายาว



รูปที่ 2.10 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (Zhu และคณะ, 2010)

สำหรับเสาสั้นท่อเหล็กด้านนอกจะเกิดการหักย่น (crinkled) เมื่อการทดสอบสิ้นสุด รูปที่ 2.11 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างเสาสั้น 11 ตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดในแนวแกนของเสาสั้น (Zhu และคณะ, 2010)

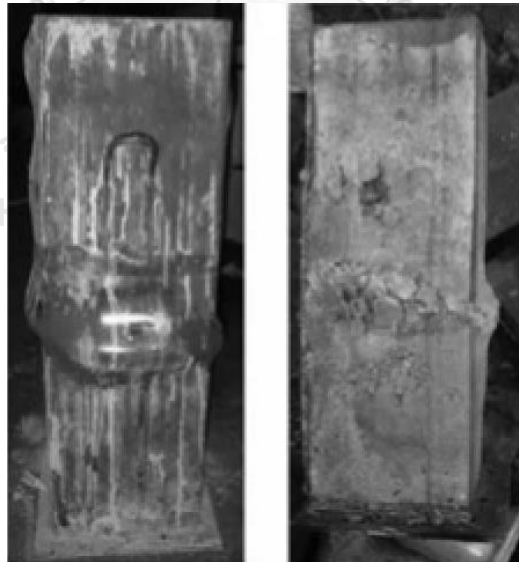
จากรูปที่ 2.11 พบว่ากราฟจะเป็นเส้นตรงก่อนที่แรงกระทำไปถึงประมาณ 80% ของน้ำหนักประลัย หลังจากนั้นเหล็กจะเริ่มคราก (จุดกลมสีดำในรูป) พฤติกรรมหลังจากการรับแรงประลัยขึ้นอยู่กับ f_c , B/t , และ ρ_{ss} โดยที่รูปแบบการวิบัติจะแตกต่างกันไป

รูปที่ 2.12 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่าง S4H ซึ่งเป็นเสาที่เติมเฉพาะคอนกรีตกำลังสูงเข้าไปในท่อเหล็ก พบรอยนูน (bulges) 2 รอยที่ความสูงต่างกันและฝั่งตรงกันข้าม โดยสังเกตเห็นร่นาบของแรงเฉือนระหว่างรอยนูน พบว่าเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท่อเหล็กมากไป ซึ่งในกรณีนี้อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท่อเหล็กมีค่า 43 ทำให้ท่อเหล็กไม่สามารถป้องกันแรงเฉือนในคอนกรีตกำลังสูงได้



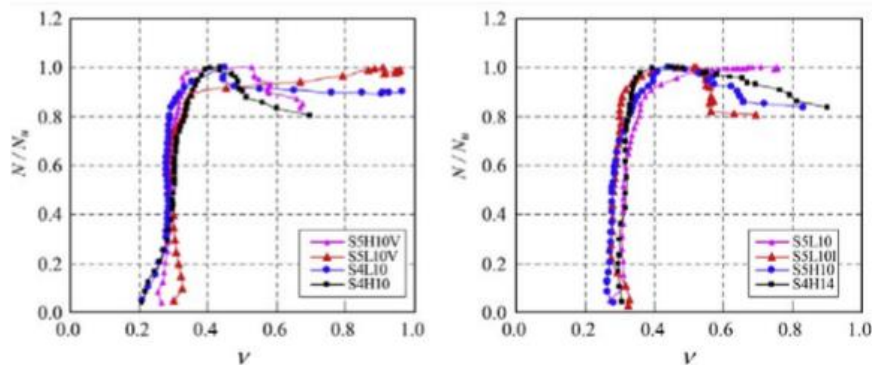
รูปที่ 2.12 การวิบัติของเสาดตัวอย่าง S4H (Zhu และคณะ, 2010)

ในกรณีของเสาดตัวอย่าง S4H10 ซึ่งแตกต่างจาก S4H คือใส่เหล็กรูปพรรณลงไปในท่อด้วย จากรูป 2.11 พบว่ากำลังของเสาดตัวอย่าง S4H10 ลดลงอย่างสม่ำเสมอและช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาดตัวอย่าง S4 รูปที่ 2.13 แสดงการวิบัติของเสาดตัวอย่าง S4H10 เมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าเสาดตัวอย่าง S4H10 ไม่พบรอยที่เกิดจากแรงเฉือนอย่างชัดเจน



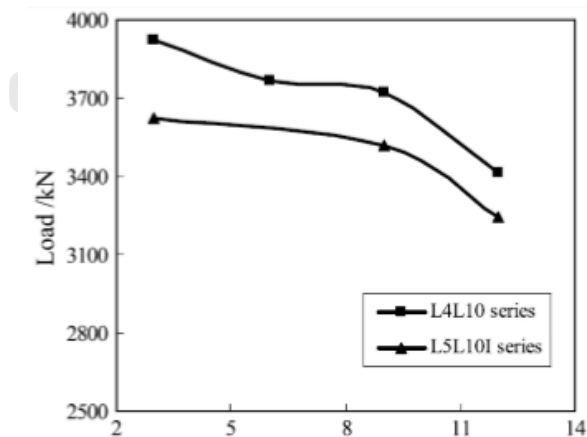
รูปที่ 2.13 การวิบัติของเสาดตัวอย่าง S4H10 (Zhu และคณะ, 2010)

รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างแรงกระทำและอัตราส่วนความเครียด พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนน้อยกว่า 0.8 อัตราส่วนปัวซองของคองกรีต หลังจากค่าอัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนสูงกว่า 0.8 อัตราส่วนความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้น และท่อเหล็กเริ่มแสดงผลพฤติกรรมโอบรัดให้แก่คองกรีต



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักประลัย และอัตราส่วนปัวซอง (Zhu และคณะ, 2010)

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำและผลกระทบจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง ผลกระทบของค่าความยาวต่อความกว้างสำหรับเสายาว (อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 12) พบว่าการโอบรัดไม่มีผลต่อเสายาวมากนัก

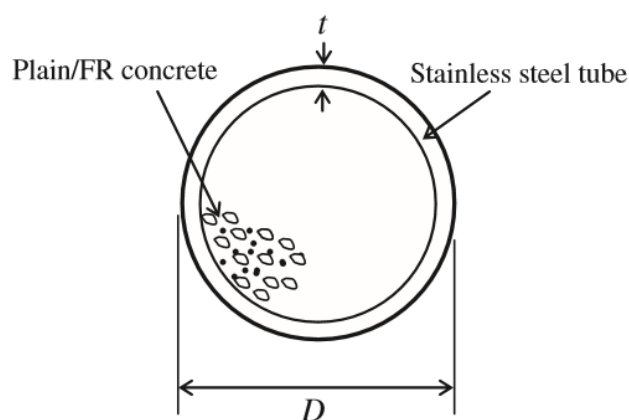


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำและผลกระทบจากอัตราส่วนความยาว ต่อความกว้าง (Zhu และคณะ, 2010)

จากการทบทวนงานวิจัยทั้งหมดได้พบว่า การที่มีเหล็กรูปพรรณเสริมภายในท่อเหล็กและการที่ไม่มีเหล็กรูปพรรณเสริมภายในท่อเหล็กแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยเหล็กรูปพรรณภายในสามารถช่วยลดการเกิดแรงเฉือนในคอนกรีตกำลังสูงได้ จากการวัดความเครียดของท่อเหล็กแสดงให้เห็นว่าการพฤติกรรมโอบรัดไม่เกิดขึ้นจนกระทั่งแรงกระทำในแนวแกนมีค่าถึง 80% ของน้ำหนักประลัย ค่าความยาวต่อความกว้างที่มากเกินไปก่อให้เกิดพฤติกรรมการโอบรัดได้ ท่อเหล็กช่วยเพิ่มกำลังและความเหนียวให้แก่คอนกรีตได้และเหล็กรูปพรรณที่ถูกใส่ลงไปภายในท่อเหล็กมีอิทธิพลอย่างมากในพฤติกรรมหลังการรับน้ำหนักประลัยของเสาวัสดุผสม

2.2 การทดสอบเสาวัสดุผสมเหล็กและคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์

1) การทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFT) รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ Ellobody และคณะ(2012) [5] ได้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดาและคอนกรีตเสริมเส้นใยรับแรงตรงศูนย์และแรงเยื้องศูนย์ หน้าตัดของเสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงกลมทั้งหมด ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) เท่ากับ 50 เสาวัสดุผสมในการทดสอบมีความยาวที่แตกต่างกันโดยมีค่าระหว่าง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (3D) ถึง 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (12D) โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางนี้วัดจากขอบด้านนอกของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม รูปที่ 2.16 แสดงหน้าตัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบทำการวัดค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการหดตัว ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งงอทางด้านข้างของกึ่งกลางความสูงของเสาวัสดุผสมในการทดสอบและสังเกตพฤติกรรมการวิบัติของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ



รูปที่ 2.16 รูปแบบหน้าตัดของตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012)

ตารางที่ 2.5 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างในการทดสอบ เสาตัวอย่างมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง เขียนแทนแต่ละตัวอย่างด้วย C1 ถึง C13 โดยที่ C1 เป็นเสาสั้นหน้าตัดวงรีเพื่อทำการหาค่ากำลังของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ขณะที่ C2 ถึง C4 เป็นเสาสั้นความยาว 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดา C5 ถึง C13 เติมด้วยคอนกรีตเสริมเส้นใย โดยที่ C5 ถึง C7 มีความยาว 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเสาสั้น C8 ถึง C10 มีความยาว 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเสาความยาวปานกลาง C11 ถึง C13 มีความยาว 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเสายาว การทดสอบทั้งหมดมีชิ้นส่วนรองรับเป็นแบบยึดหมุน ทดสอบแบบให้แรงตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลางมีค่าเป็น 0.1 ของเส้นผ่านศูนย์กลาง (0.1D) และ 0.2 ของเส้นผ่านศูนย์กลาง (0.2D) โดยตัวแปรของการทดสอบครั้งนี้ประกอบด้วย ความยาวของเสา (สั้นหรือยาว) ตำแหน่งที่ให้แรง (ตรงศูนย์กลางหรือเยื้องศูนย์กลาง) ระยะเยื้องศูนย์กลาง (0.1D หรือ 0.2D) และประเภทของคอนกรีต (คอนกรีตกำลังธรรมดาหรือคอนกรีตเสริมเส้นใย)

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของเสาวัสดุผสมในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012)

Specimen	Filled	Concrete type	Length (L)	Loading	Eccentricity (e)
C1	Hollow	–	Stub (3D)	Axial	–
C2	Filled	Plain	Stub (3D)	Axial	–
C3	Filled	Plain	Stub (3D)	Eccentric	0.1D
C4	Filled	Plain	Stub (3D)	Eccentric	0.2D
C5	Filled	FR	Stub (3D)	Axial	–
C6	Filled	FR	Stub (3D)	Eccentric	0.1D
C7	Filled	FR	Stub (3D)	Eccentric	0.2D
C8	Filled	FR	Long (6D)	Axial	–
C9	Filled	FR	Long (6D)	Eccentric	0.1D
C10	Filled	FR	Long (6D)	Eccentric	0.2D
C11	Filled	FR	Long (12D)	Axial	–
C12	Filled	FR	Long (12D)	Eccentric	0.1D
C13	Filled	FR	Long (12D)	Eccentric	0.2D

ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดของตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม โดยท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ความยาวของท่อตัวอย่างทดสอบมีค่า 300 มิลลิเมตร, 600 มิลลิเมตร และ 1200 มิลลิเมตร กำลังของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่า 40 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 2.6 ขนาดของตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Ellobody และคณะ,

Specimen	Depth	Thickness	D/t	Length	L/D	Stainless steel area	Concrete area	Material properties of stainless steel tube				
	D (mm)	t (mm)		L (mm)		A _s (mm ²)	A _c (mm ²)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	E _o (GPa)	ε _f (%)	n
C1	100	2.0	50	300	3.0	615.8	–	324	651	195	64	9
C2	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C3	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C4	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C5	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C6	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C7	100	2.0	50	300	3.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C8	100	2.0	50	600	6.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C9	100	2.0	50	600	6.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C10	100	2.0	50	600	6.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C11	100	2.0	50	1200	12.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C12	100	2.0	50	1200	12.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9
C13	100	2.0	50	1200	12.0	615.8	7238.2	324	651	195	64	9

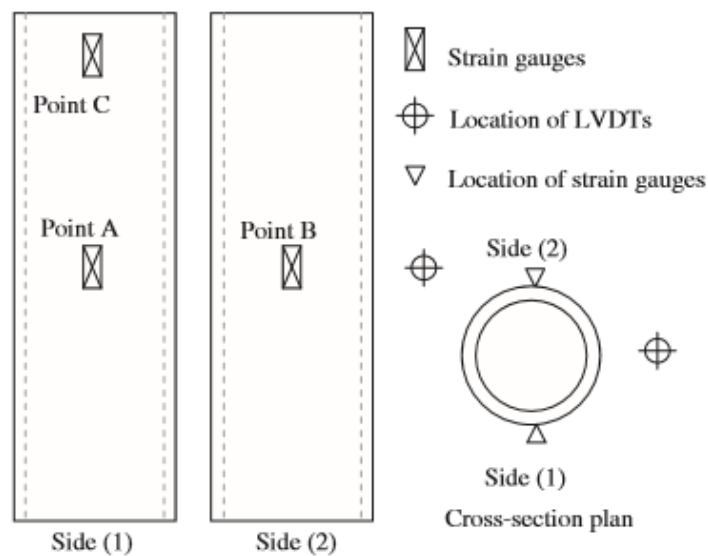
โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของท่อเหล็ก, T คือ ความหนาของท่อเหล็ก, L คือ ความยาวของท่อเหล็ก, A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, f_y คือกำลังครากของท่อเหล็ก, f_u คือกำลังรับแรงดึงประลัยของท่อเหล็ก, E_o คือค่า Young's Modulus เริ่มต้นของท่อเหล็ก, ϵ_f คือค่าการยืดออกหลังการแตกของท่อเหล็ก (elongation after fracture), n คือค่าตัวแปร Ramberg-Osgood [6]

ตารางที่ 2.7 แสดงกำลังและส่วนผสมของคอนกรีต คอนกรีตที่เทใส่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมนำมาจากการทดสอบในปริมาตร 100x100x100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร คอนกรีต 2 แบบออกแบบเพื่อให้มีกำลังของคอนกรีต 40 เมกะปาสคาลที่ 28 วัน แบบแรกคือคอนกรีตกำลังธรรมดา แบบที่สองคือคอนกรีตเสริมเส้นใยซึ่งเส้นใยมีเส้นขนาดความยาว 19 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 มิลลิเมตร หินที่ใช้ในการผสมเป็นหินปูนบดละเอียด หินที่ใช้ในการผสมมีค่ามอดุลัสความละเอียดเท่ากับ 2.6 ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เกรด 52.5N ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 42 เมกะปาสคาล และ 39 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาและคอนกรีตเสริมเส้นใยตามลำดับ

ตารางที่ 2.7 กำลังและส่วนผสมของคอนกรีต (Ellobody และคณะ, 2012)

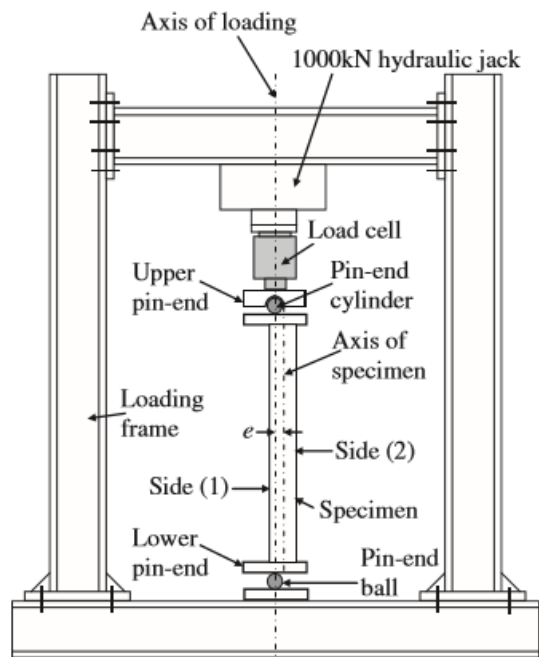
Mix	Strength (MPa)	Water/cement ratio	Mix proportions (to the weight of cement)						
			Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fibre	Silica fume	Super-plasticiser
Plain concrete mix	42	0.50	1.0	0.50	1.71	3.24	0	0	0
FR concrete mix	39	0.50	1.0	0.50	1.71	1.24	0.5%	10%	2%

จากรูปที่ 2.17 สเตรนเกจ 2 ตัว ถูกติดที่ด้านที่ 1 ที่กึ่งกลางความยาว (จุด A) และที่ด้านบน (จุด C) สเตรนเกจ 1 ตัวติดที่ด้านที่ 2 ที่กึ่งกลางความยาว (จุด B) สเตรนเกจทั้งหมดติดไว้ที่ด้านนอกของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อวัดความเครียดในแนวแกนของแต่ละตัวอย่าง ในการทดสอบแรงกระทำเยื้องศูนย์จุดสูงสุดของกราฟขึ้นอยู่กับการอัด จุดต่ำสุดของกราฟขึ้นอยู่กับการดึง อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (LVDT) สองตัวใช้วัดค่าการหดตัวและการโก่งทางด้านข้าง ยกเว้นในการทดสอบเสาสั้นและการทดสอบแรงกระทำตรงศูนย์ไม่ทำการบันทึกค่าการโก่งทางด้านข้าง



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจและอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Ellobody และคณะ, 2012)

รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองการตั้งค่าเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 2.19 แสดงรูปถ่ายของเครื่องที่ทำการทดสอบตัวอย่าง C11 เครื่องทำการทดสอบติดตั้งกับพื้นของห้องทดสอบยึดด้วยสลักเกลียวกำลังสูง มีกำลังในการทดสอบแรงอัดได้ 1000 กิโลนิวตัน ฐานรองรับแรงเป็นแบบหมุดทั้งบนและล่าง ก่อนการทดสอบจริงทำการให้แรง 5 กิโลนิวตันเพื่อยึดตัวอย่างทดสอบไว้ แรงค่อย ๆ เพิ่มทีละ 10 กิโลนิวตัน ทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติถือเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ



รูปที่ 2.18 รูปและการตั้งค่าเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (Ellobody และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.19 รูปถ่ายของเครื่องที่ทำการทดสอบตัวอย่าง C11 (Ellobody และคณะ, 2012)

ตารางที่ 2.8 กำลังของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบและจากการออกแบบ (Ellobody และคณะ, 2012)

Test strengths and design strengths of concrete-filled stainless steel circular tubular columns.

Specimen	Loading	e (mm)	$\bar{\lambda}$	Test				EC4		Test/EC4	
				u_{Test} (mm)	P_{Test} (kN)	M_{Test} (kNm)	Failure mode	P_{EC4} (kN)	M_{EC4} (kNm)	$\frac{P_{Test}}{P_{EC4}}$	$\frac{M_{Test}}{M_{EC4}}$
C1	Axial	-	0.11	-	205.9	-	SY	199.5	-	1.03	-
C2	Axial	-	0.13	-	667.1	-	LB + CC	544.0	-	1.23	-
C3	Eccentric	10	0.13	-	573.7	57.4	LB + CC	340.0	41.4	1.69	1.39
C4	Eccentric	20	0.13	-	464.7	92.9	LB + CC	277.0	64.4	1.68	1.44
C5	Axial	-	0.13	-	591.2	-	LB + CC	510.6	-	1.16	-
C6	Eccentric	10	0.13	-	462.4	46.2	LB + CC	310.0	37.7	1.49	1.23
C7	Eccentric	20	0.13	-	427.8	85.6	LB + CC	251.0	58.3	1.70	1.47
C8	Axial	-	0.26	-	497.0	-	LB + CC	451.2	-	1.10	-
C9	Eccentric	10	0.26	2.1	379.5	45.9	F	301.0	41.1	1.26	1.12
C10	Eccentric	20	0.26	3.8	349.0	83.1	F	244.0	61.0	1.43	1.36
C11	Axial	-	0.52	-	399.9	-	F	386.9	-	1.03	-
C12	Eccentric	10	0.52	4.4	350.0	50.4	F	275.0	50.1	1.27	1.01
C13	Eccentric	20	0.52	6.2	336.7	88.2	F	224.0	68.0	1.50	1.30
Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.35	1.29
COV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.175	0.118

โดยที่ e คือระยะเยื้องศูนย์กลาง, $\bar{\lambda}$ คือความชะลูดของตัวอย่างทดสอบ, u_{Test} คือการโก่งตัวทางด้านที่กึ่งกลางความสูง, P_{Test} คือกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ, M_{Test} คือกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการทดสอบ, P_{EC4} คือกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4, M_{EC4} คือกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4

ตารางที่ 2.8 แสดงแรงอัดประลัย แรงต้านทานโมเมนต์ในกรณีของแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง รูปแบบการวิบัติ ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีต ค่าความต้านทานโมเมนต์ในกรณีของแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางได้คำนวณโดยนำแรงอัดประลัยคูณด้วยระยะโก่งทางด้านข้างที่กึ่งกลางเสา มีพฤติกรรมการวิบัติ ไว้ 4 แบบ การวิบัติที่เกิดจากการครากของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel tube yielding, SY) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (local buckling, LB) การแตกของคอนกรีต (concrete crushing, CC) และการโก่งเดาะจากการดัด (flexural buckling, F) วิบัติที่เกิดจากการครากของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมพบเจอในตัวอย่าง C1 เพียงอันเดียวเพราะเป็นท่อกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 การโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดขึ้นในตัวอย่าง C2 ถึง C4 ที่เป็นเสาสั้น และ C5 ถึง C8 ที่เป็นเสาความยาวระดับกลาง โดยที่การแตกของคอนกรีตเกิดขึ้นหลังจากที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวอย่างของการวิบัติเช่นนี้แสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 สุดท้ายการวิบัติแบบโก่งเดาะจากการดัดที่เกิดจากการทดสอบแบบแรงเยื้องศูนย์กลาง เกิดขึ้นในตัวอย่างเสายาว C9 ถึง C13 แสดงในรูปที่ 2.23 และ 2.24



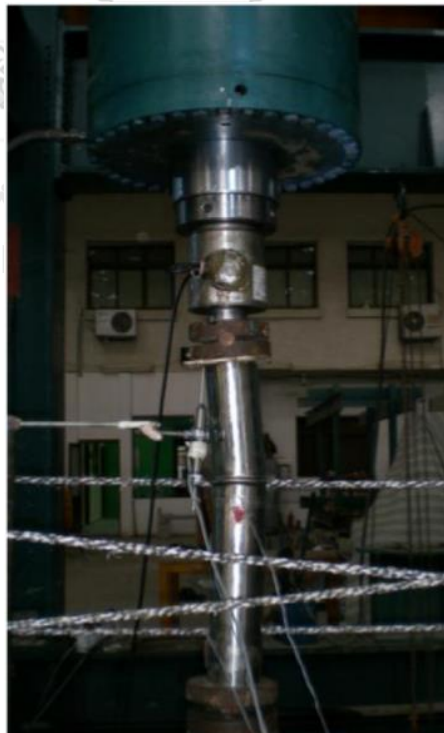
รูปที่ 2.20 การวัดของตัวอย่างทดสอบ C1 (Ellobody และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.21 การวัดของตัวอย่างทดสอบ C6 (Ellobody และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.22 การวัดของตัวอย่างทดสอบ C8 (Ellobody และคณะ, 2012)

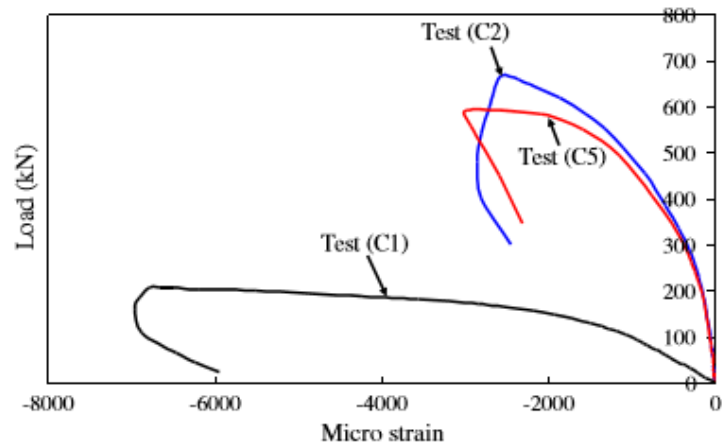


รูปที่ 2.23 การวัดของตัวอย่างทดสอบ C10 (Ellobody และคณะ, 2012)

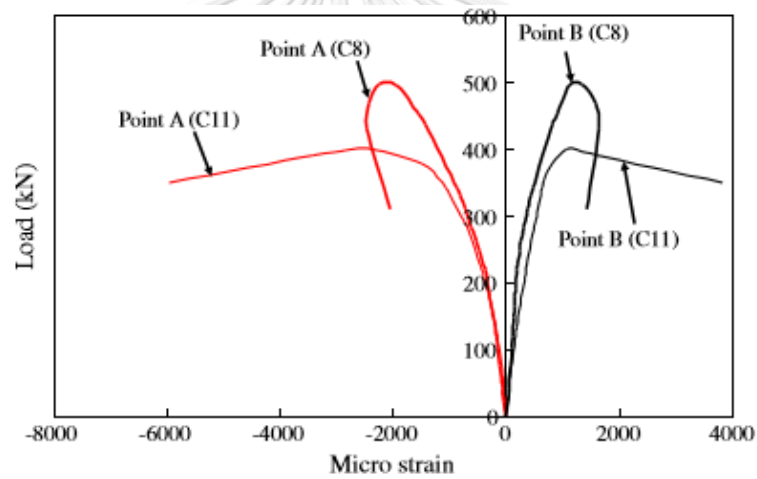


รูปที่ 2.24 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ C12 (Ellobody และคณะ, 2012)

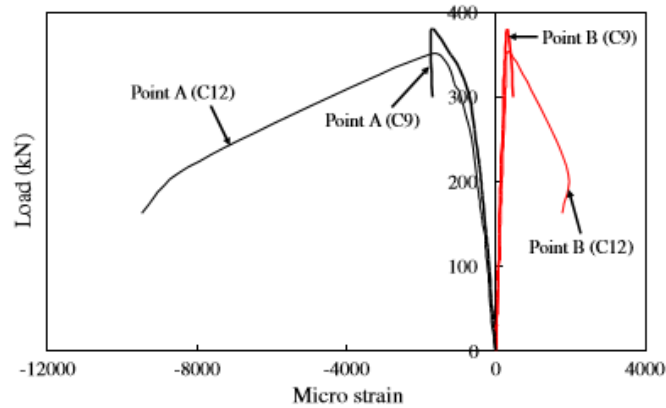
รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบเสาสั้น C1, C2 และ C5 ในการทดสอบครั้งนี้เครื่องหมายความเครียดที่เป็นค่าลบแทนแรงอัด ส่วนเครื่องหมายความเครียดที่เป็นค่าบวกแทนแรงดึง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบ C2 ซึ่งคอนกรีตกำลังธรรมชาติมีกำลังสูงกว่าตัวอย่างทดสอบ C5 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นด้านกำลังของท่อ ในส่วนของความเหนียว C5 มีความเหนียวกว่า C2 เนื่องจากคอนกรีตเสริมเส้นใย ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบเสายาว C8 และ C11 แสดงในรูปที่ 2.26 ในขณะที่รูป 2.27 เป็นของตัวอย่าง C9 และ C12 ซึ่งรับแรงกระทำเอียงศูนย์



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบของเสาสั้น (C1, C2 และ C5) (Ellobody และคณะ, 2012)

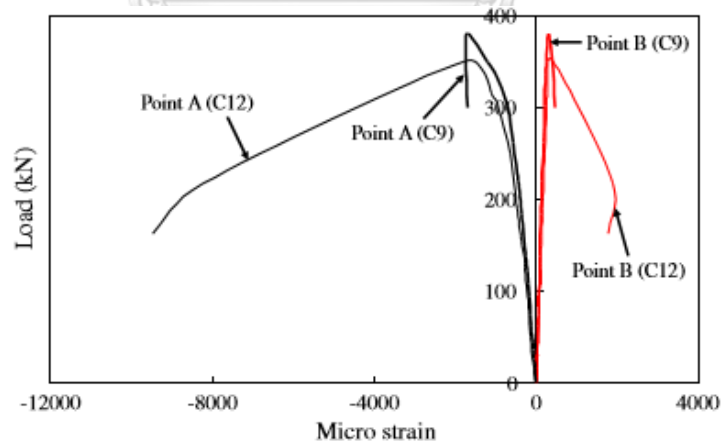


รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบเสายาว (C8 และ C11) (Ellobody และคณะ, 2012)



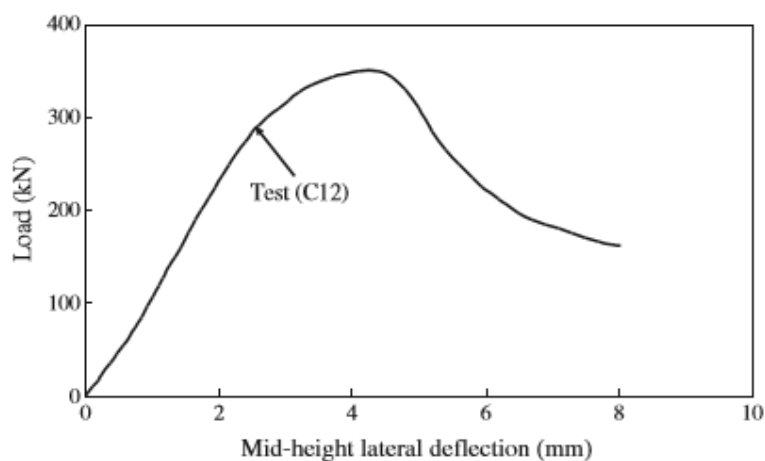
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบของเสา
ตัวอย่างรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (C9 และ C12) (Ellobody และคณะ, 2012)

รูปที่ 2.28 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการหดตัวของตัวอย่างทดสอบ C2 และ C5 เป็นอีกตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบ C2 มีกำลังสูงกว่า C5 อย่างไรก็ตามค่าการหดตัวในแนวแกนของ C2 เริ่มคงที่หลังจากมีค่าการหดตัวไป 5.6 มิลลิเมตร ในขณะที่ C5 อยู่ที่ 8.3 มิลลิเมตร ค่าการหดตัวที่แรงประลัยของ C2 และ C5 อยู่ที่ 7.9 มิลลิเมตร และ 10.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ค่าการหดตัวของ C5 สูงกว่า C2 อยู่ 35% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นใยในคอนกรีตสามารถเพิ่มความเหนียวให้กับเสาวัสดุผสมในการทดสอบได้



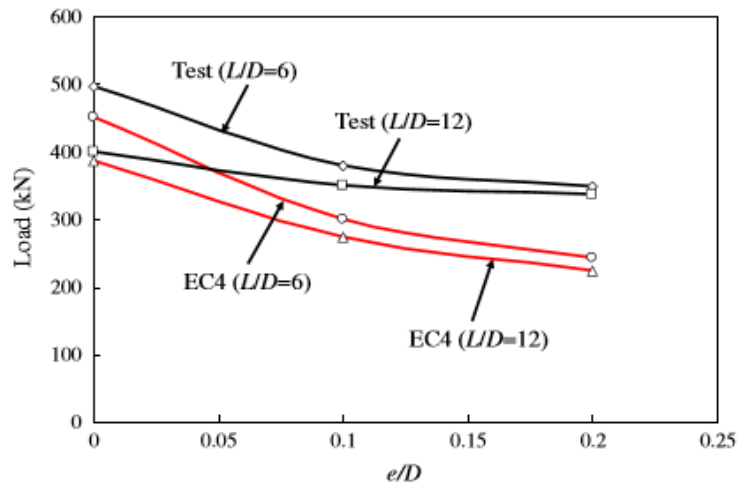
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการหดตัวเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบ C2
และ C5 (Ellobody และคณะ, 2012)

รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งทางด้านข้างสำหรับพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบเสายาว (C12) ที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ พบว่าแรงเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงประมาณ 80% ของแรงประลัย หลังจากนั้นการโก่งทางด้านข้างไม่เป็นเส้นตรง ค่าการโก่งทางด้านข้างที่แรงประลัยวัดได้ 4.4 มิลลิเมตร ค่าการโก่งทางด้านข้างของตัวอย่าง C9 C10 และ C13 สรุปลไว้ในตารางที่ 2.9

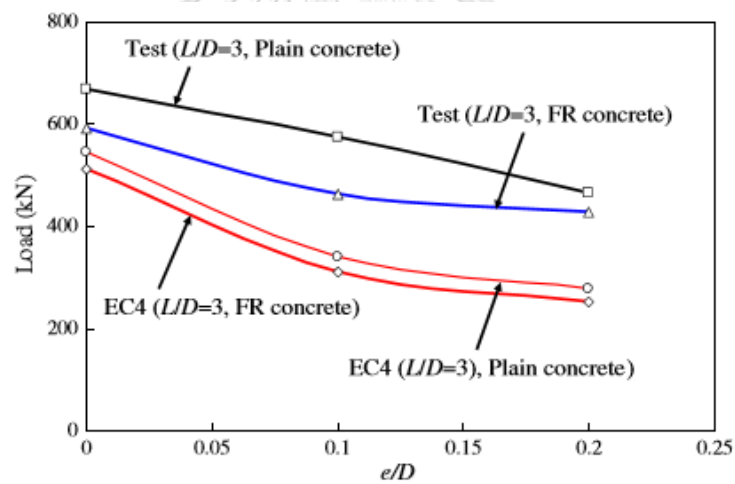


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ C12 (Ellobody และคณะ, 2012)

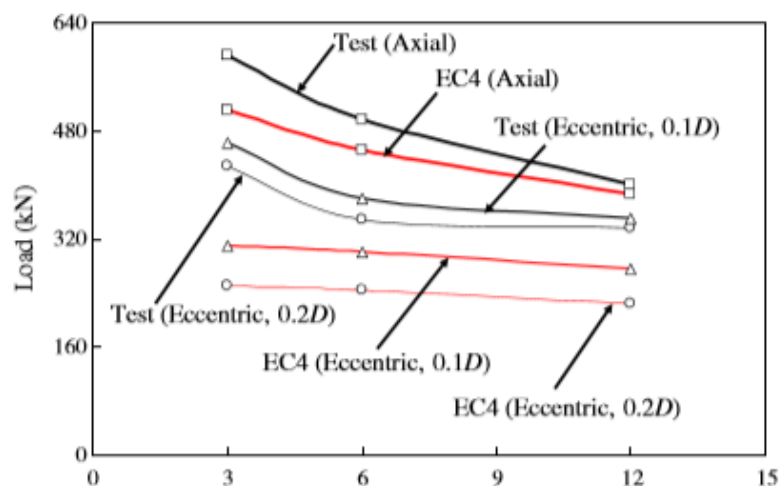
กำลังรับแรงอัดประลัยและโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดประลัยและโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 [7] รูปที่ 2.30 ถึง 2.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบและกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 มีค่า 1.35 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ตรงกันเท่ากับ 0.175 โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบต่อโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 มีค่า 1.29 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ตรงกันเท่ากับ 0.118



รูปที่ 2.30 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทำสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดาประเภทเสายาว (Ellobody และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.31 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทำสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดาประเภทเสาสั้น (Ellobody และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังที่ได้จากการทดสอบและกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วย Eurocode4 ของเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเส้นใย (Ellobody และคณะ, 2012)

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเส้นใยมีความเหนียวกว่าเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดา กำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบนำไปเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 เสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตกำลังธรรมดา และคอนกรีตเสริมเส้นใย จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 มีความแม่นยำสำหรับเสาวัสดุผสมในการทดสอบที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ แต่สำหรับแรงกระทำเยื้องศูนย์นั้นการคำนวณด้วยมาตรฐาน Eurocode4 มีการเผื่อค่ามากเกินไป ผลการทดสอบจากการศึกษาครั้งนี้ให้ประโยชน์สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับเสาท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเส้นใยได้เป็นอย่างดี

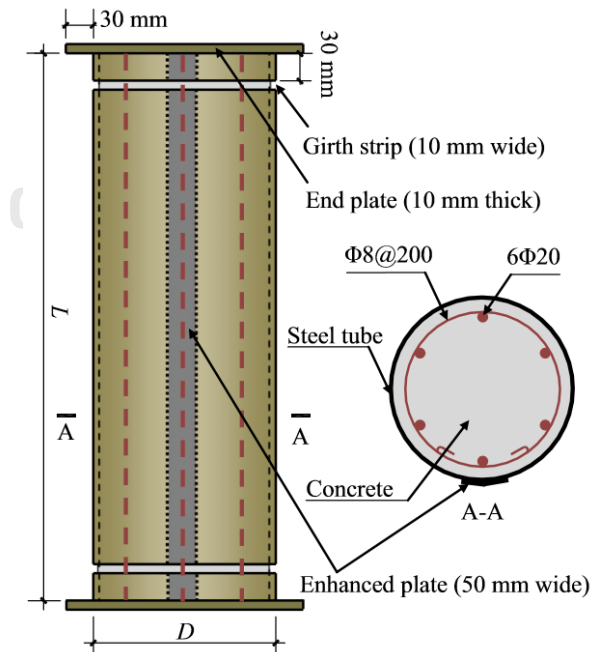
2) การทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น Xuanding Wang และคณะ (2015) [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น (tube-reinforced-concrete column) โดยท่อหุ้มด้านนอกด้วยท่อเหล็กผนังบางโดยที่จุดเชื่อมระหว่างเสาและคานไม่ต่อเนื่องกัน เสาสั้น 18 ตัวอย่างได้รับการทดสอบ โดยเสาทั้งหมดเป็นหน้าตัดท่อวงกลม ทดสอบภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์และแรงกระทำเยื้องศูนย์ ตัวแปรในการทดสอบประกอบด้วย ระยะเยื้องศูนย์ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก ซึ่งทำการสำรวจพฤติกรรมของการวิบัติ น้ำหนักบรรทุกและความเค้นในเสาท่อเหล็ก ตารางที่ 2.9 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 2.33 แสดงรูปของตัวอย่างทดสอบ ท่อเหล็กผลิตด้วยวิธีการหล่อเย็นและเสริมรอยเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กกว้าง 50 มิลลิเมตรเพื่อป้องกันการวิบัติก่อนกำหนดของรอยเชื่อม ต่อมาทำการเชื่อมแผ่นเหล็กหนา 10 มิลลิเมตร ที่ปลายของท่อเหล็กและใส่เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร 6 เส้น พร้อมด้วยเหล็กปลอกขนาด 8 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการเท

คอนกรีตลงไปท่อเหล็กและใช้เครื่องสั่นคอนกรีตให้คอนกรีตกระจายตัว หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วเชื่อมปลายท่อเหล็กอีกฝั่งหนึ่ง สูดท้ายตัดรอยเส้นรอบวง 10 มิลลิเมตร ห่างจากปลายของท่อเหล็ก 30 มิลลิเมตร เพื่อให้แรงกระทำถ่ายแรงสู่เสา

ตารางที่ 2.9 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

Specimens	e (mm)	L (mm)	D (mm)	t (mm)	α_c (%)	α_b (%)	Longitudinal bars	Stirrups	P_u (kN)
c-200-0-1	0	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	3106
c-200-0-2	0	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	3181
c-200-0-3	0	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	3209
c-200-25-1	25	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	2128
c-200-25-2	25	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	2002
c-200-25-3	25	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	2103
c-200-50-1	50	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	1406
c-200-50-2	50	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	1276
c-200-50-3	50	600	200	1.5	3.0	6.0	6Φ20	Φ8@200	1336
c-240-0-1	0	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	3711
c-240-0-2	0	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	3721
c-240-0-3	0	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	3609
c-240-25-1	25	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2702
c-240-25-2	25	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2628
c-240-25-3	25	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2613
c-240-50-1	50	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2138
c-240-50-2	50	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2009
c-240-50-3	50	720	240	1.5	2.5	4.2	6Φ20	Φ8@200	2077

โดยที่ e คือระยะเยื้องศูนย์กลาง, L คือความยาวท่อเหล็ก, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อเหล็กภายนอก, t คือความหนาท่อเหล็ก, α_c คืออัตราส่วนพื้นที่ท่อเหล็กต่อพื้นที่คอนกรีต, α_b คืออัตราส่วนการเสริมแรงตามแนวยาวต่อพื้นที่คอนกรีต, P_u คือกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ



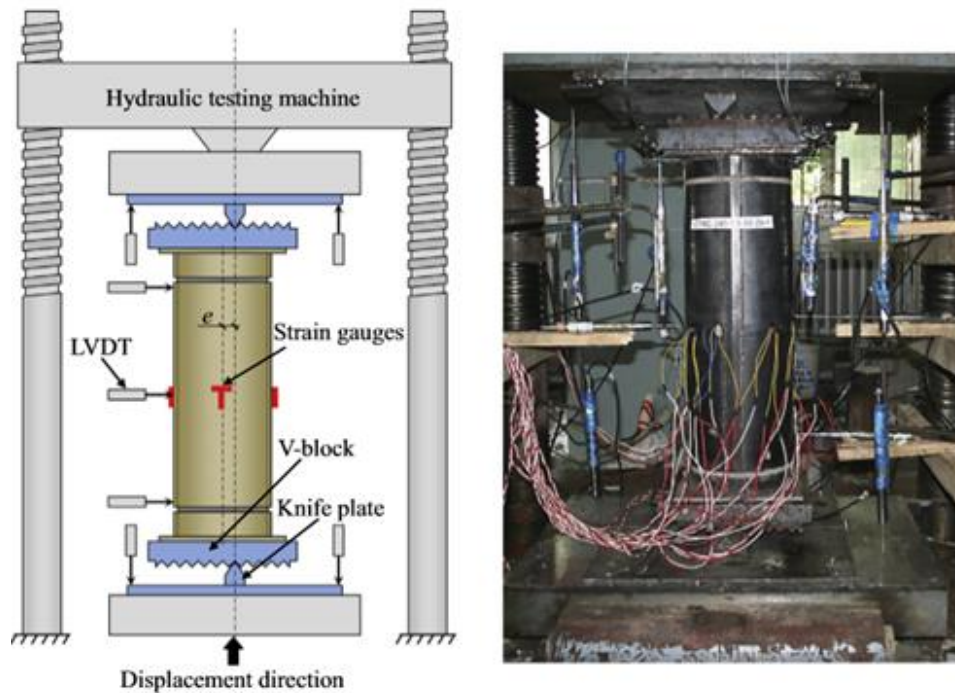
รูปที่ 2.33 รูปแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

ตัวอย่างทั้งหมดหล่อด้วยคอนกรีตผสมเสร็จเทคอนกรีตเป็นชั้นเพื่อการกระจายตัวและความหนาแน่นของคอนกรีต คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มิลลิเมตรและทรงปริซึมขนาด 150x150x300 มิลลิเมตร ถูกเตรียมและบ่มภายใต้เงื่อนไขเดียวกันเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นตามที่ต้องการ การทดสอบแรงถึงทดสอบตามมาตรฐานของประเทศจีน (GB/T228-2010) [9] เพื่อทดสอบคุณสมบัติของท่อเหล็กและเหล็กเสริม รายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของวัสดุ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

Parameter	Nominal value
Average 100 mm cube strength of concrete, $f_{cu,100}$	55.8 MPa
Average compressive strength of concrete, f_{co}	41.9 MPa
Elastic modulus of concrete, E_c	34,400 MPa
Yield strength of the longitudinal bar, f_{by}	477.2 MPa
Yield strength of the stirrup, f_{sy}	285.6 MPa
Yield strength of the steel tube, f_{ty}	364.3 MPa

เสาตัวอย่างทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นคงที่ หัวทดสอบเป็นแบบปลายแหลมและตัวครอบที่ปลายเสาเป็นแบบวีบล็อก (V-Block) เพื่อให้หัวทดสอบเสียบเข้าโดยรองรับการทดสอบแบบเอียงศูนย์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.34 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง 3 ตัวถูกใส่ไว้เพื่อหาค่าการโก่งตัวทางด้านข้างและอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งอีก 4 ตัวใช้วัดความเค้นในท่อเหล็ก และสเตรนเกจ 4 ตัวถูกติดไว้ที่กึ่งกลางของท่อเหล็ก

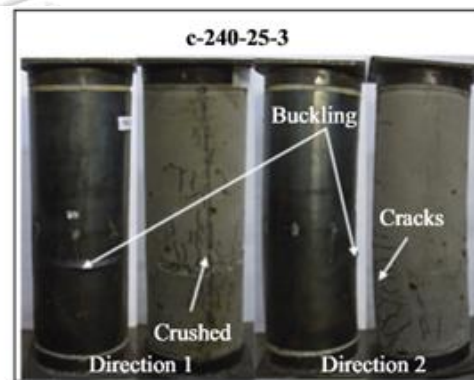
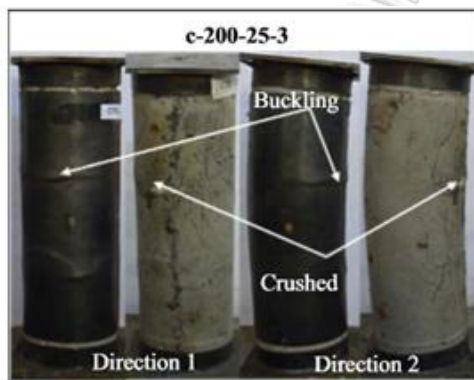


รูปที่ 2.34 (ก) ภาพร่างเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (ข) ภาพถ่ายเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

รูปที่ 2.35 (ก) แสดงประเภทของการวิบัติของเสาตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์และ (ข) รับแรงกระทำเยื้องศูนย์รอยฉีกและการแตกในด้านทแยงมุมของหน้าตัดปรากฏให้เห็นในเสาตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์ ส่วนเสาตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณต่อเหล็กหลังจากผ่านจุดที่แรงกระทำสูงสุด คอนกรีตจะแตกในบริเวณที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และรอยแตกที่เกิดจากแรงดัดเกิดในบริเวณตรงข้ามกับจุดที่เกิดแรงดิ่ง ดังนั้นการวิบัติของเสาตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์และรับแรงกระทำเยื้องศูนย์จะทำการพิจารณาการวิบัติจากการฉีกและการวิบัติจากการดัดตามลำดับ ประเภทของการเสียรูปทางด้านข้างของเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ได้ผลที่ดีเมื่อแสดงในรูปของเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.36

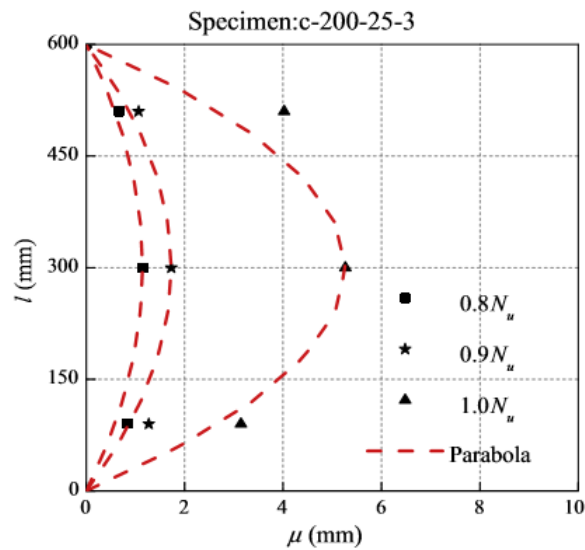


(ก)



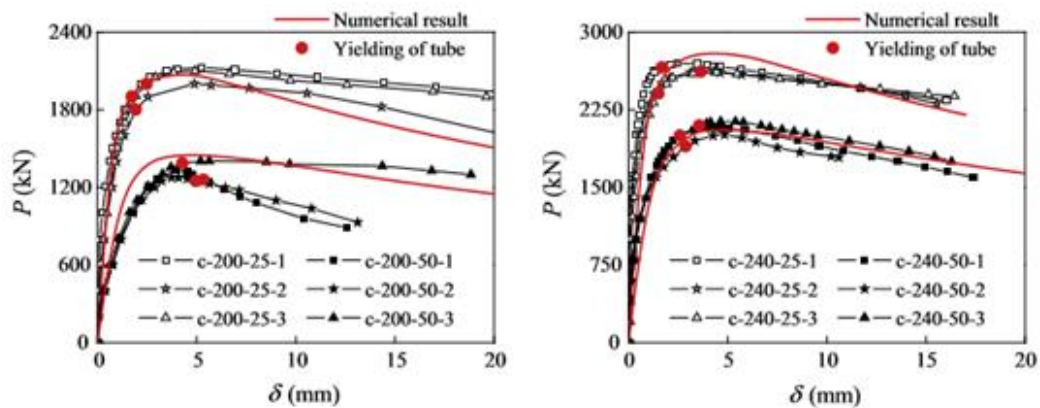
(ข)

รูปที่ 2.35 ประเภทของการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ข)
ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (Xuanding Wang และคณะ, 2015)



รูปที่ 2.36 เส้นโค้งแสดงการเสียรูปทางด้านข้าง (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

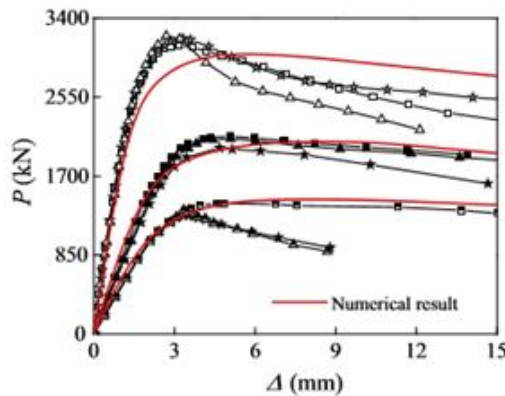
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำเอียง ศูนย์และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์แสดง ในรูปที่ 2.37 และ 2.38 ตามลำดับ เห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวที่ดี การเพิ่มระยะเยื้อง ศูนย์ทำให้ความแข็งและความสามารถในการรับแรงลดลง ท่อเหล็กที่รับแรงอัดเริ่มครากเมื่อแรงเข้า ใกล้จุดสูงสุด และความเหนียวของตัวอย่าง c-200-50-2 และ c-000-50-3 มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากเกิดการวิบัติเฉพะที่



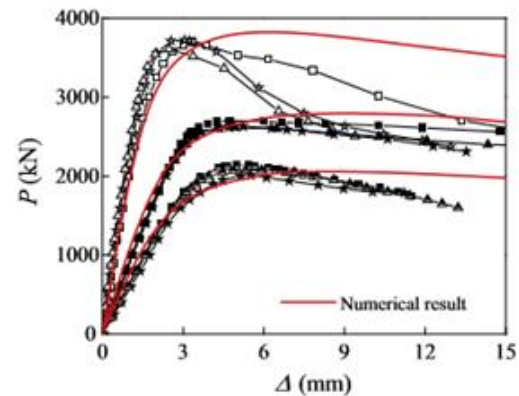
(ก) C-200

(ข) C-240

รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำเอียง ศูนย์ (ก)C-200 (ข) C-240 (Xuanding Wang และคณะ, 2015)



(ก) C-200



(ข) C-240

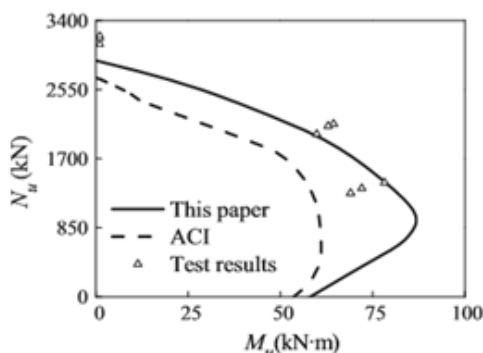
รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ก) C-200 (ข) C-240 (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

ความเครียดตามแนวยาวของตัวอย่างทดสอบไม่นำมาคิดในการทดสอบครั้งนี้เนื่องจากต้องการปรับใช้วิธีอย่างง่ายในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กมาใช้ในเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงจากวิธี equivalent rectangular concrete stress block หน้าตัดที่รับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันมีสูตรคำนวณแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดย รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและแรงดัด (ก) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 200 มิลลิเมตร (ข) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 240 มิลลิเมตร

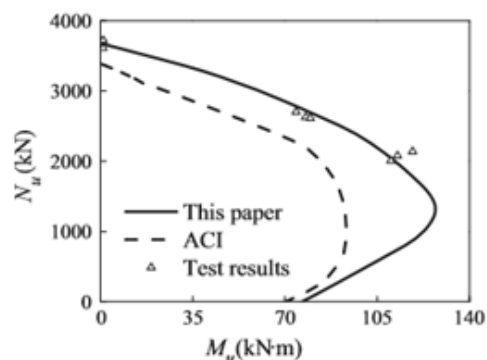
$$N_u = \alpha f_{cc} S_c \frac{2\theta - \sin 2\theta}{2\pi} + \sum_{i=1}^{n_b} \sigma_{bi} S_{bi} \quad (2.1)$$

$$M_u = \alpha f_{cc} S_c D \frac{\sin^3 \theta}{3\pi} + \sum_{i=1}^{n_b} \sigma_{bi} S_{bi} r_{bi} \varphi_i \quad (2.2)$$

โดยที่ N_u คือความสามารถในการรับแรงตามแนวแกน, M_u คือความสามารถในการรับแรงดัด, α คือตัวคูณลดค่ากำลังของ concrete stress block, f_{cc} คือกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด, S_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, σ_{bi} คือความเครียดในเหล็กเสริม, S_{bi} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแนวยาว, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ, r_{bi} คือรัศมีของเหล็กเสริมในแนวยาว, φ_i คือมุมระหว่างเส้นในแนวราบกับเส้นเชื่อมระหว่างศูนย์กลางถ่วง (centroid) ของหน้าตัดและศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมตามยาว



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ของแรงอัดและแรงดัด (ก) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร (ข) ตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร (Xuanding Wang และคณะ, 2015)

จากการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติของเสาขึ้นอยู่กับระยะเยื้องศูนย์กลาง ยิ่งระยะมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงในแนวแกนและการต้านทานแรงอัดประลัยลดลง ที่แรงกระทำสูงสุดคิดค่าการโอบรัดของตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเพียงเล็กน้อยให้เท่ากับตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์กลาง ค่าพลังงานความเค้นใช้ในการประมาณค่าการต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่มีการโอบรัดโดยท้อเหล็ก

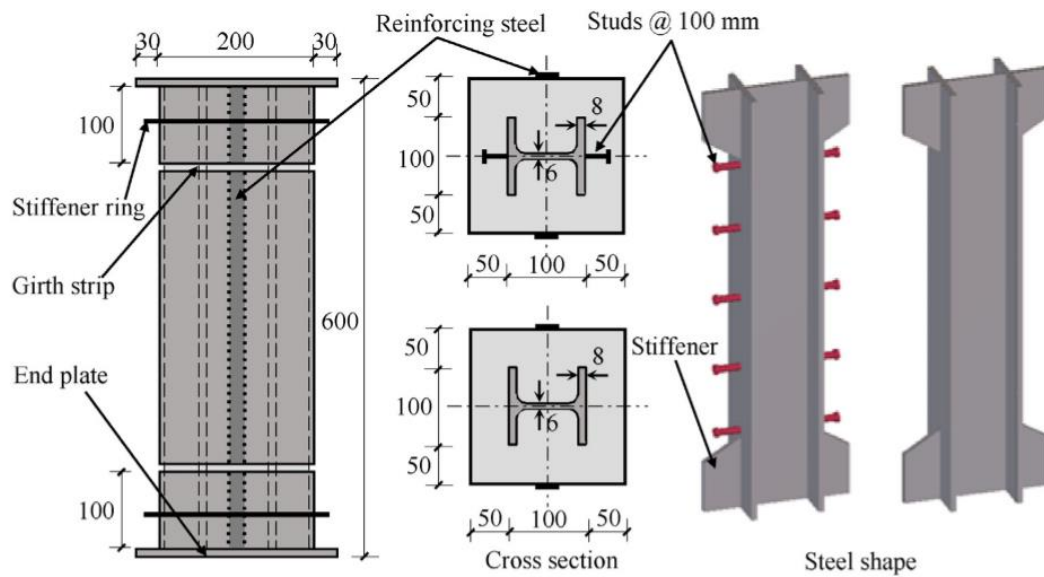
3) ต่อมา Xuanding Wang และคณะ (2016) [10] ทำการศึกษาเสาท้อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมโดยใช้ผนังท้อเหล็กบางแทนเหล็กปลอกด้านในเพื่อที่จะโอบรัดแกนคอนกรีต ท้อเหล็กไม่ต่อเนื่องที่จุดเชื่อมระหว่างเสาและคาน ดังนั้นทำให้ไม่ได้รับแรงกระทำตามแนวแกนใด ๆ โดยในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบเสาตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่างสำรวจความสามารถในการรับน้ำหนัก พฤติกรรมการเสียรูปภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท้อเหล็ก ระยะเยื้องศูนย์กลาง และสลักเกลียวรับแรงเฉือนที่บริเวณปีกของเหล็กเสริม โดยการทดสอบสิ้นสุดเมื่อตัวอย่างทดสอบวิบัติ ตัวอย่างแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบไปด้วย 3 ตัวอย่างที่เหมือนกัน กำหนดความแตกต่างของตัวอย่างให้ติดสลักเกลียวรับแรงเฉือนที่บริเวณปีกของเหล็กเสริม และไม่ติดสลักเกลียวรับแรงเฉือนที่บริเวณปีกของเหล็กเสริม อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท้อเหล็กมีค่า 100 และ 133 และอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของท้อเหล็กมีค่า 0 และ 0.125 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

Specimens	L (mm)	B (mm)	t (mm)	e (mm)	e/B	B/t	α_c (%)	h_s (mm)	b_s (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	α_s (%)	Studs (mm)	P_u (kN)	P_c (kN)	P_c/P_u
S-1.5-0-n	600	200	1.5	0	0	133	3.2	100	100	8	6	5.8	None	3277	3268	0.99
S-1.5-0-s1	600	200	1.5	0	0	133	3.2	100	100	8	6	5.8	@100	3450	3268	0.95
S-1.5-0-s2	600	200	1.5	0	0	133	3.2	100	100	8	6	5.8	@100	3328	3268	0.98
S-2.0-0-n	600	200	2.0	0	0	100	4.2	100	100	8	6	5.8	None	3496	3327	0.95
S-2.0-0-s1	600	200	2.0	0	0	100	4.2	100	100	8	6	5.8	@100	3346	3327	0.99
S-2.0-0-s2	600	200	2.0	0	0	100	4.2	100	100	8	6	5.8	@100	3458	3327	0.96
S-1.5-25-n	600	200	1.5	25	0.125	133	3.2	100	100	8	6	5.8	None	2310	2237	0.97
S-1.5-25-s1	600	200	1.5	25	0.125	133	3.2	100	100	8	6	5.8	@100	2230	2237	1.00
S-1.5-25-s2	600	200	1.5	25	0.125	133	3.2	100	100	8	6	5.8	@100	2093	2237	1.07
S-2.0-25-n	600	200	2.0	25	0.125	100	4.2	100	100	8	6	5.8	None	2161	2280	1.06
S-2.0-25-s1	600	200	2.0	25	0.125	100	4.2	100	100	8	6	5.8	@100	2230	2280	1.02
S-2.0-25-s2	600	200	2.0	25	0.125	100	4.2	100	100	8	6	5.8	@100	2180	2280	1.04

โดยที่ L คือความยาวท่อนเหล็ก, B คือความกว้างท่อนเหล็ก, t คือความหนาท่อนเหล็ก, e คือระยะเยื้องศูนย์กลาง, α_c คืออัตราส่วนพื้นที่ท่อนเหล็กต่อพื้นที่คอนกรีต, h_s คือความยาวของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ, b_s คือความกว้างของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ, t_f คือความหนาปีกของเหล็กรูปพรรณ, t_w คือความหนาเววของเหล็กรูปพรรณ, α_s คืออัตราส่วนเหล็กพื้นที่รูปพรรณต่อพื้นที่คอนกรีต, P_u คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ, P_c คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากคำนวณเชิงตัวเลข

รูป 2.40 แสดงภาพร่างแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ ท่อนเหล็กผลิตด้วยวิธีหล่อเย็น โดยการตัดแผ่นเหล็ก ท่อนเหล็กเชื่อมกับแผ่นเหล็กเว้นระยะ 30 มิลลิเมตรจากขอบแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันการวิบัติก่อนกำหนด เชื่อมแผ่นเหล็กเสริมที่ปลายของเหล็กรูปพรรณและวงแหวนแผ่นเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มกำลังให้เสา เชื่อมแผ่นเหล็กหนา 10 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองด้าน และสร้างดัดรอยเส้นรอบวง 10 มิลลิเมตร ห่างจากปลายของท่อนเหล็ก 100 มิลลิเมตร เพื่อให้แรงที่กระทำลงสู่แกนคอนกรีต และติดสลักเกลียวรับแรงเฉือนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร เว้นระยะห่าง 100 มม. ปีกทั้งสองข้างของเหล็กรูปพรรณ



รูปที่ 2.40 ภาพร่างแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุเหล็กเป็นไปตามมาตรฐานประเทศจีน (GB/T228-2010) [9] ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดหล่อด้วยคอนกรีตผสมเสร็จและเทคอนกรีตเป็นชั้นเพื่อ การกระจายตัวและความหนาแน่นของคอนกรีต คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร และ ทรงปริซึมขนาด 150x150x300 มิลลิเมตร ถูกเตรียมและบ่มภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นตามที่ต้องการ คุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 2.12 และ 2.13

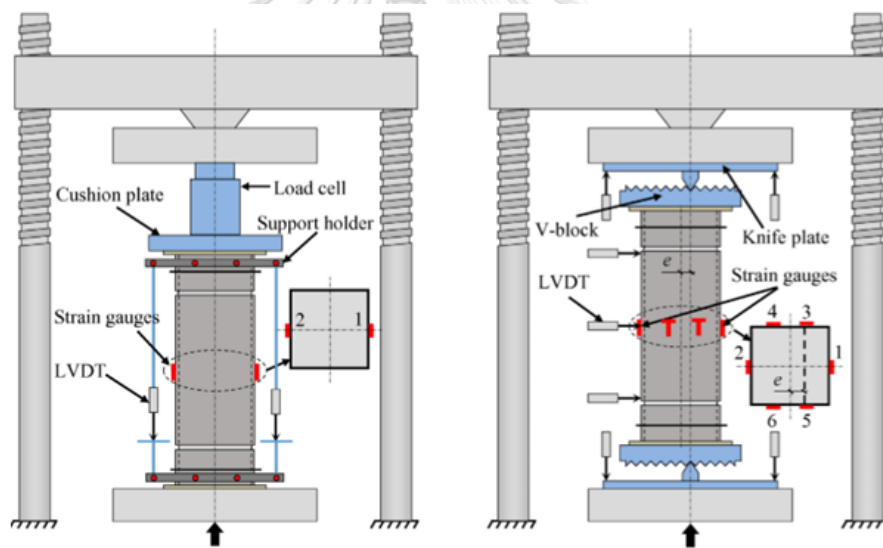
ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และสลักเกลียวรับแรงเฉือน (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

Steel type	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Steel tube (1.5 mm)	324.4	479.0	203
Steel tube (2.0 mm)	290.1	444.6	199
Steel shape	285.4	440.8	205
Stud	343.1	437.4	200

ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติของคอนกรีต (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

Testing time	100 mm cube strength $f_{cu,100}$ (MPa)	Average prism strength f_{co} (MPa)	Elastic modulus (GPa)
The 28th day	63.6	50.4	37.2
The test day	80.6	61.1	36.5

ตัวอย่างทั้งหมดทดสอบภายใต้แรงกระทำเพิ่มขึ้นคงที่ แผ่นเหล็กแข็งถูกใช้เป็นหัวทดสอบสำหรับตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ ส่วนตัวอย่างที่รับแรงกระทำเอียงศูนย์เป็นหัวทดสอบแบบปลายแหลมและตัวครอบที่ปลายเสาเป็นแบบวีบล็อก (V-Block) เพื่อให้หัวทดสอบเสียบเข้า แรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ถูกวัดโดยโหลดเซลล์ (load cell) และสำหรับตัวอย่างที่รับแรงกระทำเอียงศูนย์วัดผ่านระบบของเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.41 สเตรนเกจถูกติดตั้งที่กึ่งกลางของท่อเหล็กเพื่อวัดความเครียดตามยาวและตามขวางในท่อเหล็กสำหรับตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ ในขณะที่สเตรนเกจ 6 ตัวถูกติดตั้งสำหรับตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเอียงศูนย์ อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง 4 ตัว ติดที่ฐานรองรับเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนสำหรับตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ สำหรับตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเอียงศูนย์ติดอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง 3 ตัว เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและอีก 4 ตัวเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน



รูปที่ 2.41 เครื่องทดสอบและการติดเครื่องมือวัด (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

รูปที่ 2.24 (ก) แสดงการวิบัติของตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ หลังจากแรงกระทำสูงสุดท่อเหล็กจะเกิดการปองเล็กน้อยโดยปราศจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคอนกรีตด้วยการตัดท่อเหล็กออกโดยพบว่าแกนของคอนกรีตวิบัติภายใต้แรงเฉือนโดยพบรอยแตกในทิศทางแนวทแยง และ รูปที่ 2.24 (ข) การวิบัติของตัวอย่างที่รับแรงกระทำเอียงศูนย์ การโก่งเดาะเฉพาะที่ภายนอกพบเจอที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบหลังจากแรงผ่านจุดสูงสุด คอนกรีตเกิดการแตกในบริเวณที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และรอยแตกจากการตัดพบเจอในบริเวณที่เกิดแรงดึง โดยต้องพิจารณาผลของแรงดัดด้วย



(ก)

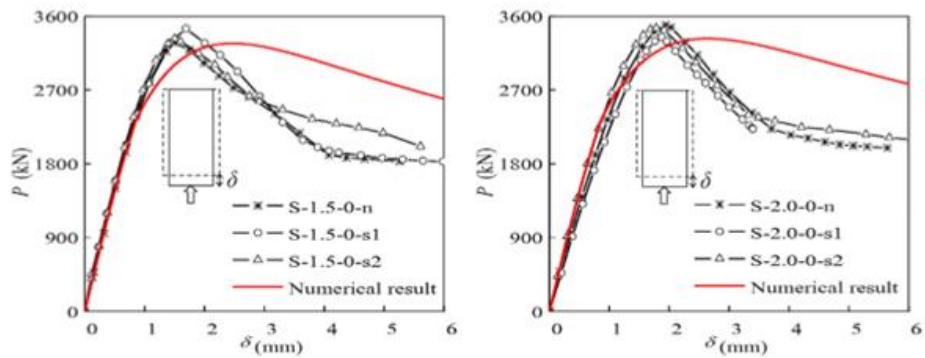


(ข)

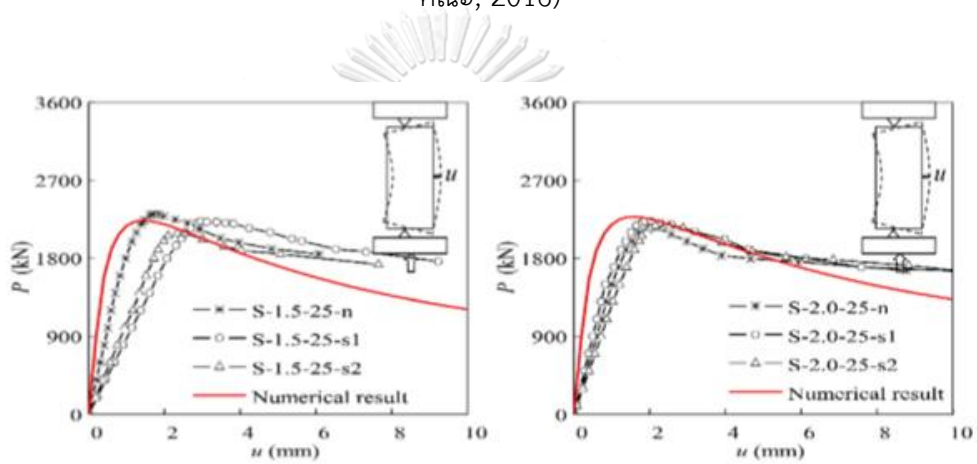
รูปที่ 2.42 รูป 2.1 ประเภทการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์
(ข) ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูป 2.43 และ 2.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการเคลื่อนที่ตามยาวสำหรับตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการเคลื่อนที่ด้านข้างบริเวณกึ่งกลางเสาสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวแสดงพฤติกรรมว่าเสาตัวอย่างทั้งหมดมีความเหนียวขณะที่รับแรง ค่าเฉลี่ยของแรงอัดประลัยของตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์มีค่า 35% ต่ำกว่าตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์ อิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท่อนเหล็กที่มีให้กับความสามารถในการรับแรงไม่ปรากฏชัดเจน ส่วนสลักเกลียวรับแรงเฉือนที่บริเวณปีกของเหล็กเสริมไม่ได้เพิ่มความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการรับแรง และความเหนียวให้ตัวอย่างทดสอบ



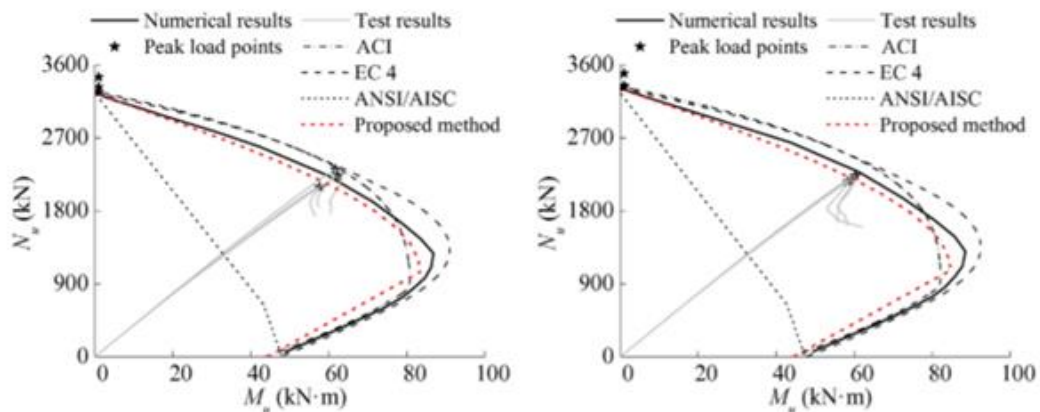
รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการเคลื่อนที่ตามยาว (Xuanding Wang และคณะ, 2016)



รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและเคลื่อนที่ด้านข้างบริเวณกึ่งกลางเสา (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 2.45 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันที่ได้จากผลการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและมาตรฐานการออกแบบในปัจจุบัน (ACI 318-08, Eurocode 4, ANSI/AISC 360-10 [11])



รูปที่ 2.45 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน (ก) S-1.5 (ข) S-2.0 (Xuanding Wang และคณะ, 2016)

จากการทดสอบพบว่าเสาวัสดุผสมในการทดสอบมีพฤติกรรมของความเหนียวที่ดีภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ เหล็กเสริมด้านในสอดคล้องกับคอนกรีตเนื่องจากเกิดการโอบรัด สลักเกลียวรับแรงเฉือนที่บริเวณปีกของเหล็กเสริมมีผลน้อยมากต่อการวิบัติของตัวอย่างทดสอบรวมทั้งความสามารถในการรับแรงและพฤติกรรมความเหนียว สิ่งที่จะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อหน้าตัดเสาได้แก่ เหล็กเสริมรูปพรรณที่มีกำลังครากสูง คอนกรีตกำลังสูง อัตราส่วนความกว้างหน้าตัดต่อความหนาที่น้อย และขนาดเหล็กเสริมรูปพรรณที่ใหญ่

ต่อมา Jiepeng LU และคณะ (2015) [12] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ ทดสอบทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ตัวแปรหลักที่ศึกษาประกอบด้วย ระยะเยื้องศูนย์ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก และผลของสลักเกลียวรับแรงเฉือนต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง

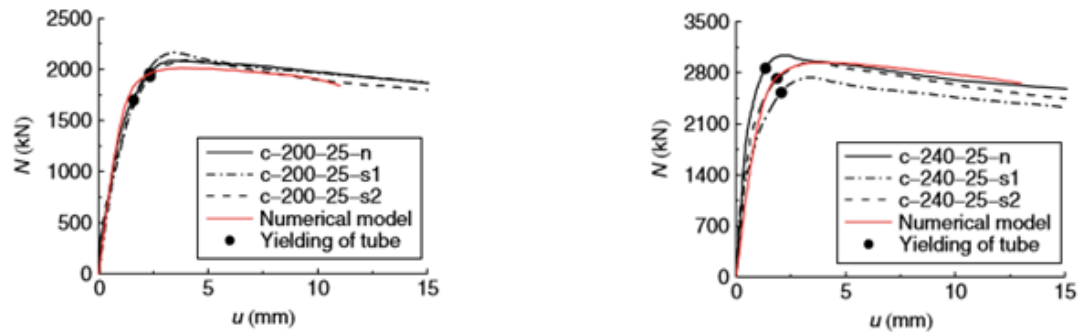
ตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยตัวอย่างที่มีสลักเกลียวรับและเฉือนและไม่มีสลักเกลียวรับแรงเฉือน ตัวอย่างทั้งหมดหล่อคอนกรีตจากแบบหล่อเดียวกัน เทและบ่มภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด คุณสมบัติของวัสดุสรุปไว้ในตารางที่ 2.14 เพื่อป้องกันท่อเหล็กที่ทดสอบจากแรงกระทำโดยตรง ท่อเหล็กทำให้เกิดช่องว่าง 10 มิลลิเมตร ห่างจากปลายทั้งสองข้าง 30 มิลลิเมตร ที่ปลายของตัวอย่างทดสอบเสริมด้วยแผ่นเหล็กเสริมที่เหล็กรูปพรรณและวงแหวนเหล็กเสริมที่ท่อเหล็กเพื่อป้องกันการวิบัติก่อนกำหนด รูปที่ 2.46 แสดงภาพร่างและภาพถ่ายของเครื่องทดสอบ

รูปที่ 2.47 แสดงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่ม C-200-25 และ C-200-0 ไม่พบการโก่งเดาะเฉพาะที่จนกระทั่งแรงถึงจุดสูงสุด หลังจากตัดท่อเหล็กออกพบว่าคอนกรีตเกิดการแตกที่ด้านรับแรงอัดและรอยร้าวที่เกิดจากการตัดเกิดที่ด้านรับแรงดึง ตัวอย่างทดสอบที่รับแรงกระทำตรงศูนย์เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน ในขณะที่เดียวกันถ้าเพิ่มระยะเยื้องศูนย์ การวิบัติเกิดเนื่องจากแรงดัด สลักเกลียวรับแรงเฉือนไม่มีผลต่อการวิบัติของเสา

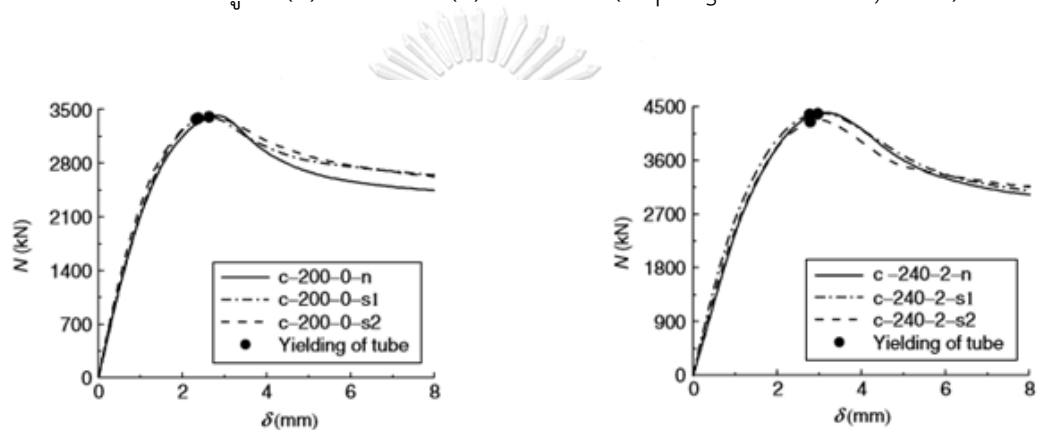


รูปที่ 2.47 ภาพแสดงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (Jiepeng LU และคณะ, 2015)

รูปที่ 2.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบภายใต้กระทำเยื้องศูนย์ ท่อเหล็กเริ่มร้าวเมื่อด้านรับแรงอัดมีค่าถึง 90% ของแรงสูงสุดสลักเกลียวรับแรงเฉือนมีผลกระทบเล็กน้อยต่อกำลัง ความแข็ง และความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ในแนวแกนสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์แสดงในรูปที่ 2.49 ท่อเหล็กเกิดการร้าวที่แรงกระทำสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ พบว่าตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์มีกำลังที่น้อยกว่าแต่ค่าความเหนียวมากกว่า

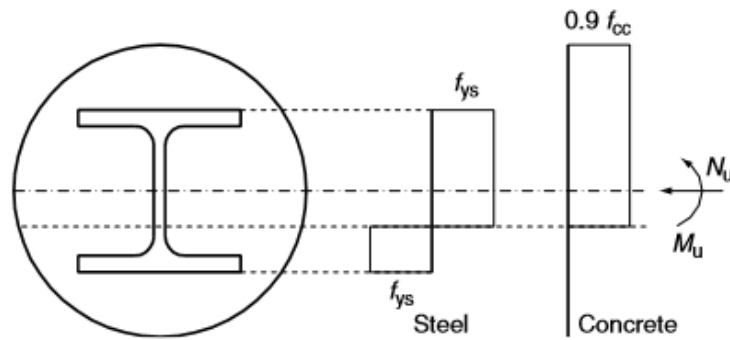


รูปที่ 2.48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบภายใต้กระทำเยื้องศูนย์ (ก) C-200-25 (ข) C-240-25 (Jiepeng LU และคณะ, 2015)

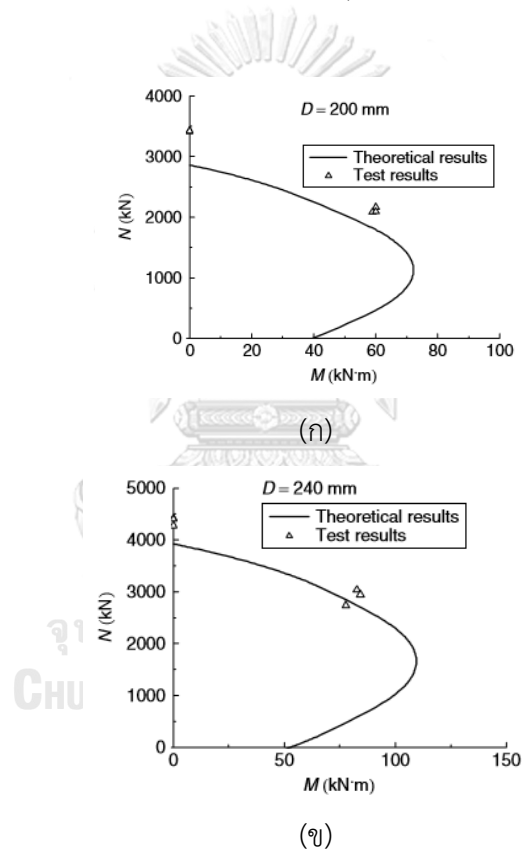


รูปที่ 2.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ในแนวแกนสำหรับตัวอย่างรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ก) C-200-0 (ข) C-240-0 (Jiepeng LU และคณะ, 2015)

ตามมาตรฐาน Eurocode4 (2004) [11] ค่ารับแรงประลัยของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณโดยสมมติให้หน้าตัดทั้งหมดเป็นสถานะพลาสติกและไม่คิดกำลังรับแรงดึงในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.50 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งของแกนกลาง สำหรับหน้าตัดท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณค่าการโอบรัดของคอนกรีตแก้ไขตามมาตรฐาน Eurocode4 และค่ากำลังลดค่าสัมประสิทธิ์จาก 0.85 เป็น 0.9 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันแสดงในรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.50 การกระจายความเค้นในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่สภาวะพลาสติก (Jiepeng LU และคณะ, 2015)



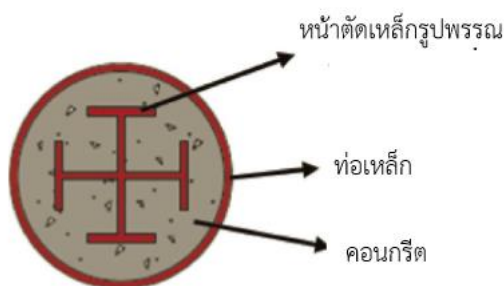
รูปที่ 2.51 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน (ก) ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร (ข) ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร (Jiepeng LU และคณะ, 2015)

จากการศึกษาพบว่าเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดวงกลมมีพฤติกรรมความเหนียวที่ดีในการรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ สลักเกลียวรับแรงเฉือนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการวิบัติ ความสามารถในการรับแรงและความเหนียวของเสาตัวอย่าง และยังพบอีกว่ามีความเหมาะสมในการเปลี่ยนค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับคอนกรีตในท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันสามารถกำหนดให้หน้าตัดทั้งหมดเป็นสถานะพลาสติกตามมาตรฐาน Eurocode4 โดยการเปลี่ยนค่าการโอบรัดของกำลังคอนกรีต

2.3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาวัสดุผสมเหล็กและคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์

ธนวัฒน์ อ้นถาวร [13] (2016) ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดวงกลมรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ โดยจะศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบที่มีต่อพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ศึกษาความเหมาะสมและประยุกต์ใช้สมการออกแบบเสาวัสดุผสมที่มีในปัจจุบันสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

โดยทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบการรับแรงกระทำตรงศูนย์ในอดีตของ Wang และคณะ [3] (2004) และ Xiao และคณะ [14] (2009) ซึ่งทั้งหมดเป็นเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST column) ดังรูปที่ 2.52 ซึ่งมีข้อมูลหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 2.15 และ 2.16



รูปที่ 2.52 หน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

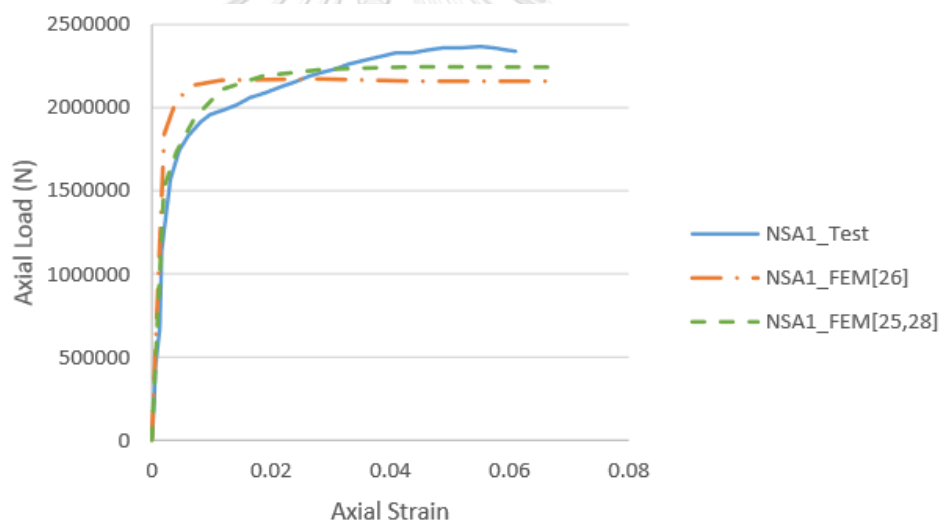
ตารางที่ 2.15 ขนาดหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด			
	ความยาว (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความหนาต่อ เหล็ก (มิลลิเมตร)	พื้นที่เหล็ก รูปพรรณ (ตารางมิลลิเมตร)
NSA1	465	166	2.7	2324
HSA1	465	166	2.7	2324
HSB1	470	168	3.7	2324
SC1	876	219	4	2996
SC7	876	219	4	1810

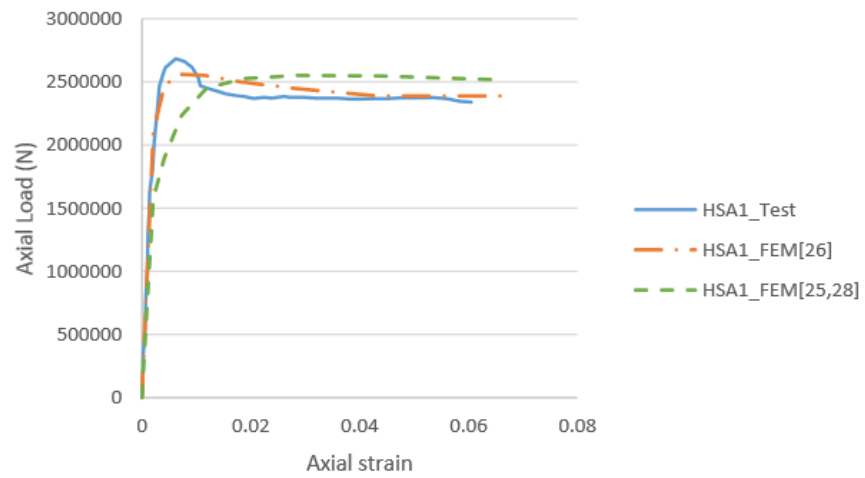
ตารางที่ 2.16 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด		
	คอนกรีต	เหล็กรูปพรรณ	ท่อเหล็ก
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)
NSA1	35.34	288	318
HSA1	55.16	288	318
HSB1	55.16	288	318
SC1	52.10	318	337
SC7	52.10	318	337

ผลจากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงจากผลการทดสอบในอดีตกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.53 ถึงรูปที่ 2.57 และตารางที่ 2.17 พบว่าการเลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย Han และคณะ [15] (2007) สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสมได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย E.Hognestad [16] และ Mander [17] โดยอัตราส่วนความแตกต่างเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนจากผลทดสอบต่อผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.1015 และ 0.982 ตามลำดับ โดยทั้งสองแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ดังนั้นในส่วนต่อไปของงานวิจัยจึงจะใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Han และคณะ [15] ทั้งหมด

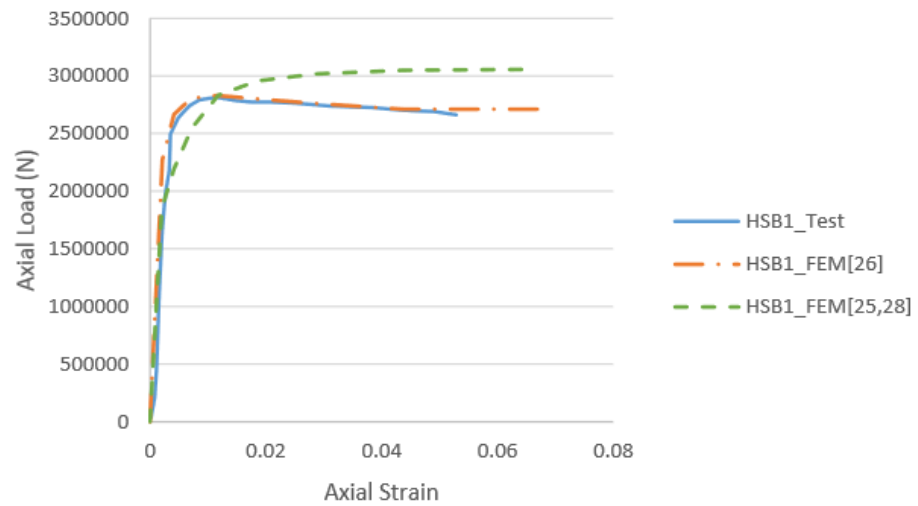


รูปที่ 2.53 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง NSA1 (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)



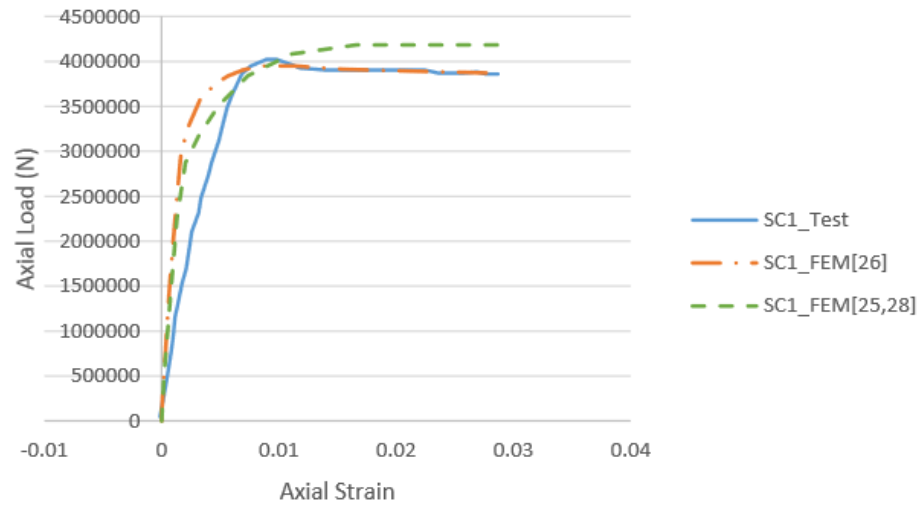
รูปที่ 2.54 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง HSA1 (ธนวัฒน์

อันถาวร, 2016)

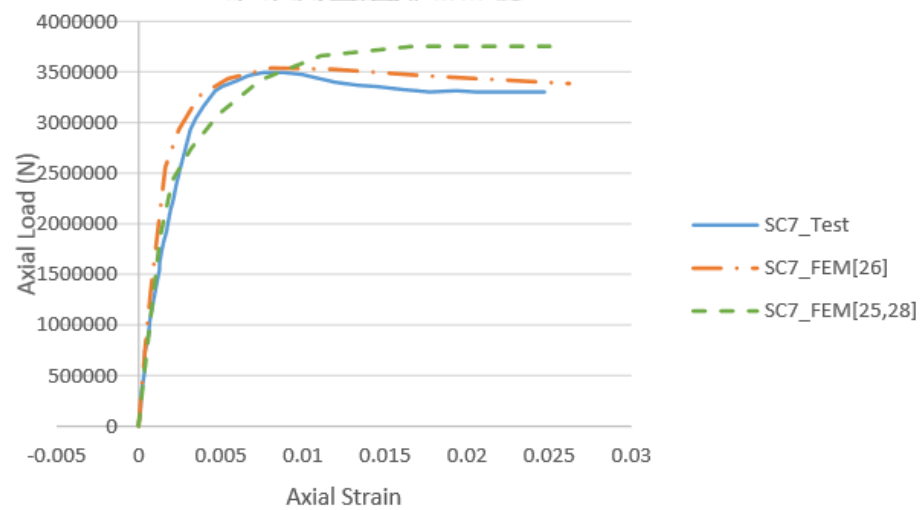


รูปที่ 2.55 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง HSB1 (ธนวัฒน์

อันถาวร, 2016)



รูปที่ 2.56 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง SC1 (ธนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016)



รูปที่ 2.57 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบตัวอย่าง SC7 (ธนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

ตารางที่ 2.17 กำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (ชนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

หน้าตัด	กำลังรับแรงในแนวแกน (กิโลนิวตัน)						
	A.Test	B.FEM*	C.FEM**	D.AISC CFST	E.AISC SRC	F.AISC CFST+ steel section	G.AISC SRC+ steeltube
NSA1	2350	2174	2246	1149	1327	1874	1767
HSA1	2700	2561	2551	1768	1836	2493	2277
HSB1	2835	2831	3058	1894	1808	2619	2408
SC1	4021	3949	4184	2274	2075	3198	2557
SC7	3496	3799	3819	2640	1783	3218	2694

*B.FEM ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย Han และคณะ [15]

*C.FEM ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย E.Hognestad [16] และ Mander [17]

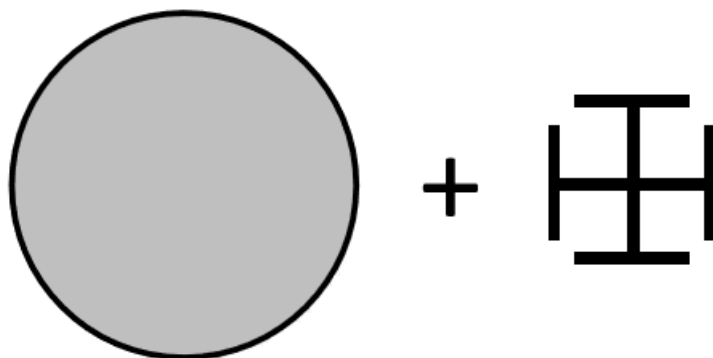
ตารางที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากการทดสอบกับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10 (ชนพัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

หน้าตัด	อัตราส่วน					
	A/B	A/C	A/D	A/E	A/F	A/G
NSA1	1.08	1.05	2.05	1.77	1.25	1.33
HSA1	1.05	1.06	1.53	1.47	1.08	1.19
HSB1	1.00	0.93	1.5	1.57	1.08	1.18
SC1	1.02	0.96	1.77	1.94	1.26	1.57
SC7	0.92	0.92	1.32	1.96	1.09	1.30
ค่าเฉลี่ย	1.02	0.982	1.63	1.74	1.15	1.31

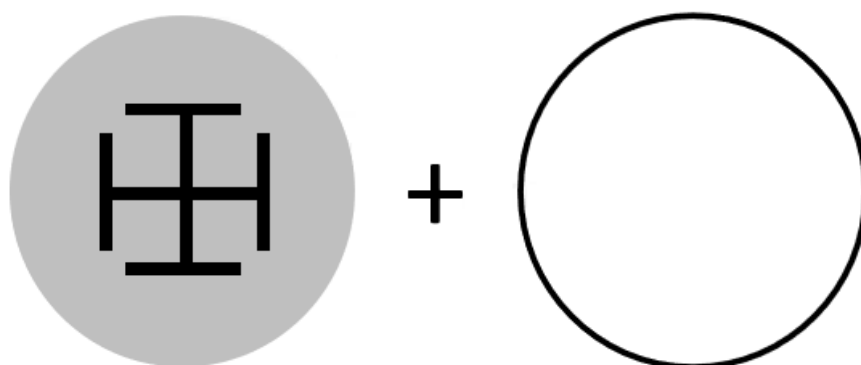
ตารางที่ 2.19 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10 (ธนวัฒน์ อ้น
ถาวร, 2016)

หน้าตัด	อัตราส่วน			
	B/D	B/E	B/F	B/G
NSA1	1.89	1.64	1.16	1.23
HSA1	1.45	1.39	1.03	1.12
HSB1	1.49	1.59	1.08	1.18
SC1	1.74	1.90	1.23	1.54
SC7	1.44	2.13	1.18	1.41
ค่าเฉลี่ย	1.602	1.73	1.14	1.30

เนื่องจากตามมาตรฐาน AISC 360-10 (2010) ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบโดยใช้มาตรฐาน
ออกแบบของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและมาตรฐานออกแบบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตมา
เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ 2.18 และ
2.19 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความต่างกับผลที่คำนวณมา
จากมาตรฐานเป็นอย่างมาก ธนวัฒน์ อ้นถาวร (2016) จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนข้อกำหนดโดยแยก
พิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ พิจารณาเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาต่อ
เหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ ดังแสดงในรูปที่ 2.58 และพิจารณาเสาต่อเหล็กเติมด้วย
คอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับต่อเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.59



รูปที่ 2.58 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)



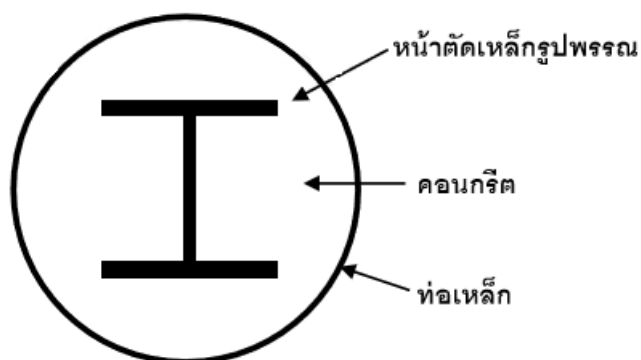
รูปที่ 2.59 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการเปรียบเทียบตามตารางที่ 2.18 และ ตารางที่ 2.19 พบว่าการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่าการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก โดยอัตราส่วนความแตกต่างของการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณเทียบกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.15 และ อัตราส่วนความแตกต่างของการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็กเทียบกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.31 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณเทียบมีอัตราส่วนความแตกต่างเท่ากับ 1.14 และการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 โดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กมีอัตราส่วนความแตกต่างเท่ากับ 1.30 ดังนั้นการคำนวณด้วยข้อกำหนด AISC 360-10 ในการศึกษาต่อไปจะพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณทั้งหมด

และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบการรับแรงกระทำเอียงศูนย์ในอดีตของ Liu และคณะ [12] ซึ่งเป็นผลการทดสอบเสารับแรงอัดเอียงศูนย์ โดยเสามี 2 ขนาด คือ เสาหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ความหนาท่อเหล็ก 1.5 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร และเสาหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร ความหนาท่อเหล็ก 2.0 มิลลิเมตร ยาว 720 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดของเสาทดสอบ ดังรูปที่ 2.60 และตารางที่ 2.20

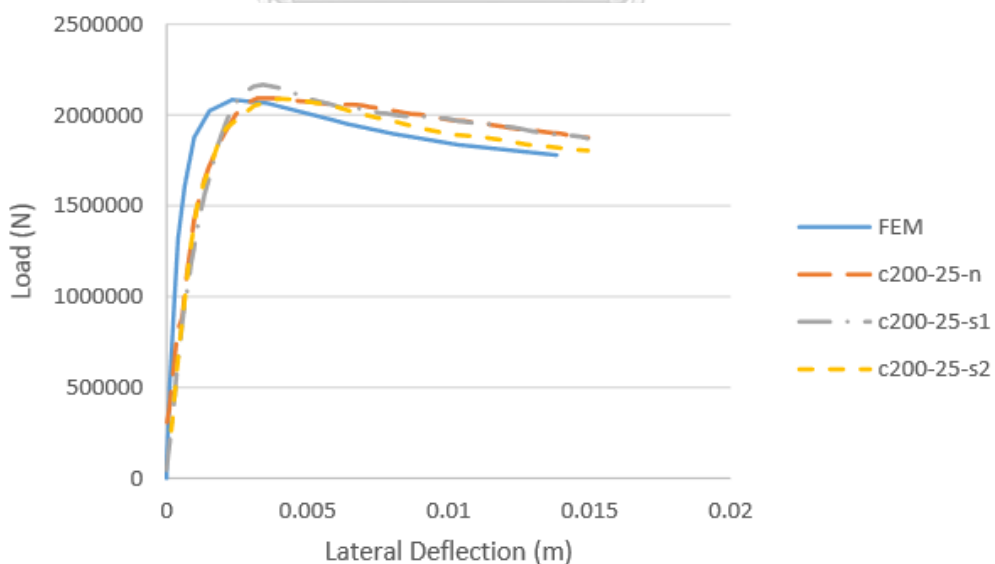


รูปที่ 2.60 หน้าตัดเสาทดสอบท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (Liu และคณะ 2015)

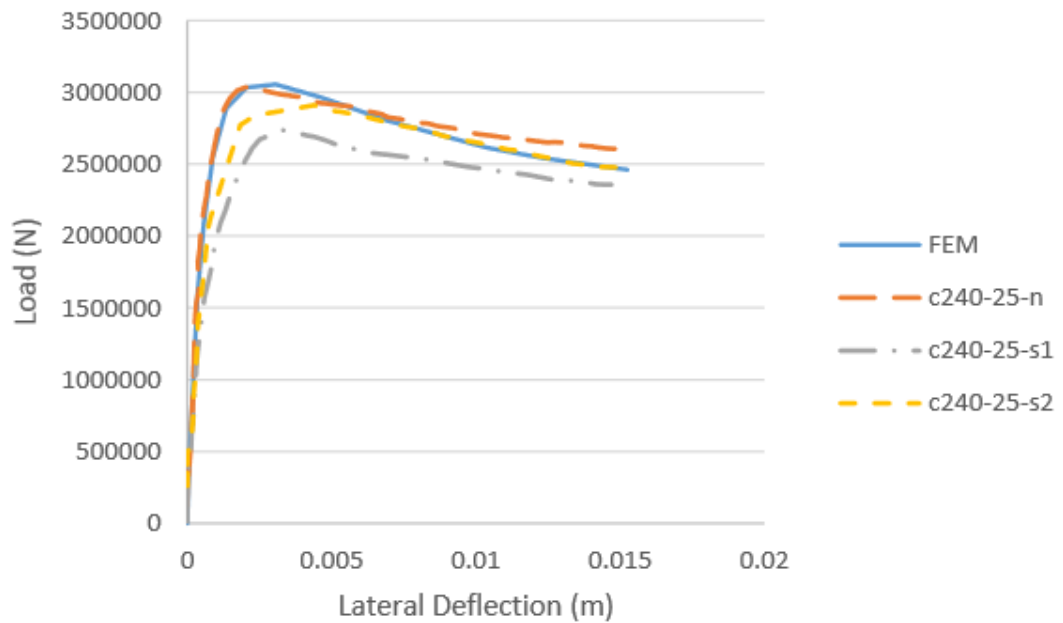
ตารางที่ 2.20 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบและระยะรับแรงกระทำเอียงศูนย์ (ธนวัฒน์ อ้นถาวร , 2016)

ชื่อตัวอย่าง	ความสูง (mm.)	ระยะเอียงศูนย์ (mm.)	ท่อเหล็ก		หน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ		กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c) (MPa)	กำลังรับแรงดึงสูงสุด (KN)
			D/t	f_y (MPa)	รูปแบบหน้าตัด	f_y (MPa)		
c-200-25-n	600	25	133.3	324	HW100	285	81	2084
c-200-25-s1								2166
c-200-25-s2								2090
c-240-25-n	720	25	120	290	HW100	285	62	3040
c-242-25-s1								2736
c-240-25-s2								2946

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบของเสาทำโดยการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์ของเสากับระยะการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral deflection) ที่กึ่งกลางเสาดังรูปที่ 2.61 และ 2.62 และเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์สูงสุดของเสาดังตารางที่ 2.21



รูปที่ 2.61 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์กับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-200-25 (ธนวัฒน์ อ้นถาวร, 2016)



รูปที่ 2.62 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์กลางกับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-240-25 (ธนพัฒน์ อินถาวร, 2016)

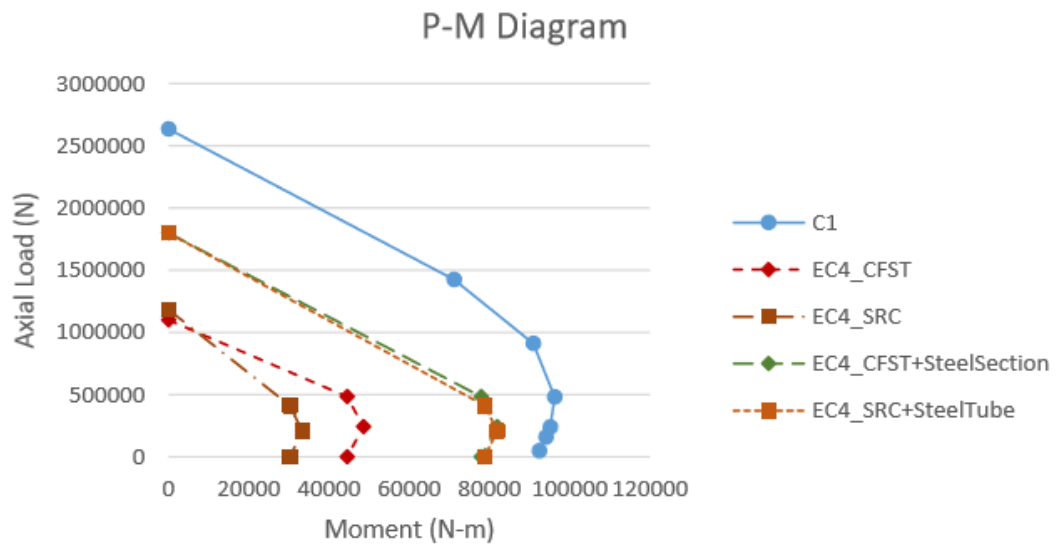
ตารางที่ 2.21 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต (ธนพัฒน์ อินถาวร, 2016)

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดในแนวแกน		อัตราส่วน
	A test	B FEM	
c-200-25-n	2084	2083.18	1.00
c-200-25-s1	2166		1.04
c-200-25-s2	2090		1.00
c-240-25-n	3040	3054.84	1.00
c-240-25-s1	2736		0.90
c-240-25-s2	2946		0.96
ค่าเฉลี่ย			0.98

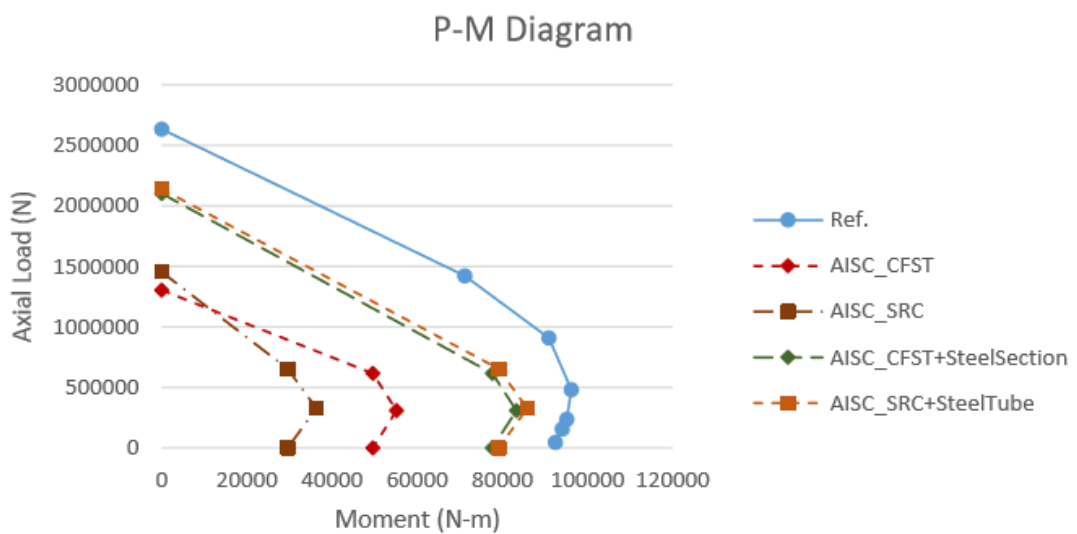
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดเบื้องต้นของเสาได้อย่างเหมาะสม โดยมีอัตราส่วนความแตกต่างเฉลี่ยกำลังแรงอัดสูงสุดจากผลการทดสอบต่อผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 0.98

การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด Eurocode4 และ AISC 360-10 ของเสาแบบจำลอง C1 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ความสูง 600 มิลลิเมตร ความหนาต่อเหล็ก 3 มิลลิเมตร กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต 24.5 เมกะปาสคาล กำลังครากของต่อเหล็ก 365 เมกะปาสคาล และกำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 365 เมกะปาสคาล โดยพบว่าเสาแบบจำลอง C1 มีค่าสูงกว่าการคำนวณกำลังรับแรงตามข้อกำหนด ซึ่งการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า Eurocode4

เพื่อพัฒนาความเหมาะสมในการใช้ข้อกำหนดทั้งสองในการออกแบบทำโดยการสมมติให้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณคำนวณจากวิธีเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในและเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของต่อเหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.75 และ 2.76 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างได้จะแสดงดังรูปที่ 2.63 และ 2.64 ซึ่งพบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของต่อเหล็กภายนอกมีผลใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า โดยการคำนวณตามข้อกำหนด AISC360-10 ยังคงมีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า Eurocode4



รูปที่ 2.63 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว

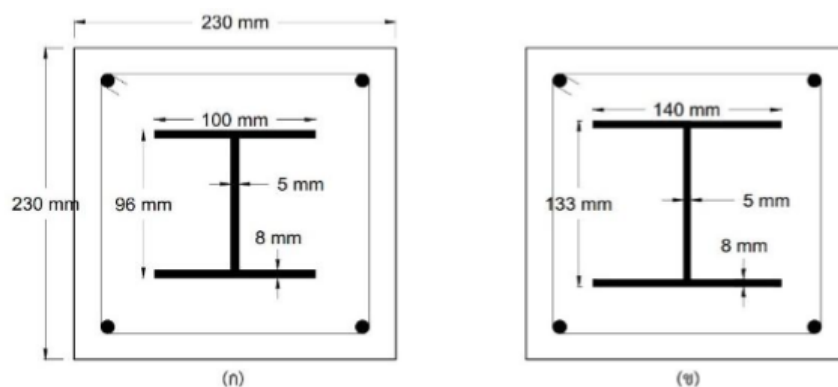


รูปที่ 2.64 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด AISC360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

จากการศึกษาข้อกำหนด AISC 360-10 และ Eurocode4 ไม่มีข้อกำหนดสำหรับการออกแบบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยเฉพาะทำให้เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการทดสอบมีความแตกต่างจากการคำนวณจากข้อกำหนดอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณออกเป็น 2 กรณีคือ พิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ และพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก ซึ่งกรณีที่ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์เมื่อคำนวณด้วยข้อกำหนดโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกว่า แต่กรณีที่ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงมากกว่า โดยข้อกำหนดที่ปรับปรุงแล้วสามารถใช้ในการออกแบบได้อย่างปลอดภัย

วรการ อนันตเสนา [18] (2015) ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ โดยพิจารณาผลกระทบจากการโอ버รัดตัวของคอนกรีต มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ สร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยขอบเขตของงานวิจัยได้แก่ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วน เหล็กรูปพรรณในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ไม่พิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริมทางยาว ไม่พิจารณาการลื่นไถลระหว่างวัสดุในแบบจำลอง ไม่พิจารณาผลกระทบของความขรุขระ

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีตของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ Abbas และ Shahari [19] (2003) ทำการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขนาดหน้าตัด 230x230 มิลลิเมตร สูง 2-3 เมตร เสริมเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช (H) 2 ขนาดได้แก่ 100x96 มิลลิเมตร และ 140x133 มิลลิเมตร เหล็กเสริมทางยาว 4 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กปลอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ระยะห่าง 140 มิลลิเมตร



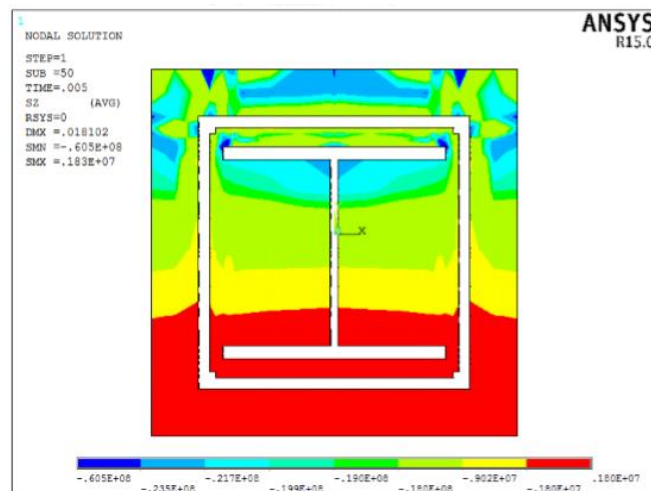
รูปที่ 2.65 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตของ Abbas และ Shahari (2003) [19]

ตารางที่ 2.22 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต พบว่าแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางได้อย่างใกล้เคียง โดยอัตราส่วนความแตกต่างเฉพาะเท่ากับ 1.03

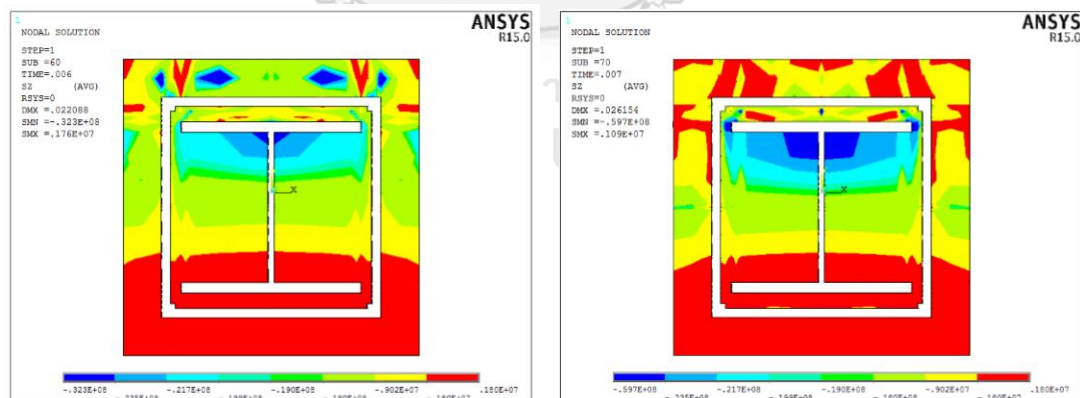
ตารางที่ 2.22 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต (วรการ อนันตเสนา, 2015)

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดในแนวแกน (kN)		อัตราส่วน I/II
	I Test	II FEM	
SRCE1	654	635	1.03
SRCE2	558	559	1.00
SRCE3	962	833	1.16
SRCE4	949	975	0.97
SRCE5	641	574	1.12
SRCE6	554	507	1.09
SRCE7	895	782	1.14
SRCE8	900	926	0.97
SRCE9	813	903	0.90
SRCE10	704	768	0.92
ค่าเฉลี่ย (Mean)			1.03

ศึกษาพฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ พบว่าพื้นที่คอนกรีตถูกโอบรัดสูงจะอยู่บริเวณด้านนอกและด้านในของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณที่สภาวะใกล้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา แสดงในรูปที่ 2.66 (ระยะหดตัวในแนวแกน 0.005 เมตร) จากนั้นเมื่อกำลังรับแรงอัดของเสาลดลง (ระยะหดตัวในแนวแกน 0.006-0.007 เมตร) พื้นที่คอนกรีตถูกโอบรัดสูงจะอยู่ที่ด้านในของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ แสดงในรูปที่ 2.67



รูปที่ 2.66 ความเค้นในแนวแกนของคอนกรีตในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่สภาวะใกล้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา (วรการ อนันตเสนา, 2015)



รูปที่ 2.67 ความเค้นในแนวแกนของคอนกรีตในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัดของเสา ลดลง (วรการ อนันตเสนา, 2015)

สร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยไม่พิจารณาโมเมนต์ดัดรอบแกนรองแต่พิจารณาทั้งเสารับแรงอัดเอียงศูนย์และแรงดึงเอียงศูนย์ โดยสร้างแบบจำลองที่มีระยะของแรงเอียงศูนย์ที่ต่าง ๆ ตารางที่ 2.23 ถึง 2.25 แสดงขนาดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 2.23 ขนาดหน้าตัด ความสูงของเสาและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ (วรการ อนันตเสนา, 2015)

หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด	สูง (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
	กว้าง x ยาว (มม.)		รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
SRC PM Example	280 x 280	1,200	H-Shape	150 x 150 x 7 x 10

ตารางที่ 2.24 ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กเสริมปลอก (วรการ, 2015)

หน้าตัด	เหล็กเสริมทางยาว		เหล็กเสริมปลอก	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	จำนวน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ระยะห่าง (มม.)
SRC PM Example	15.9	12	8	75

ตารางที่ 2.25 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต เหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม (วรการ อนันตเสนา, 2015)

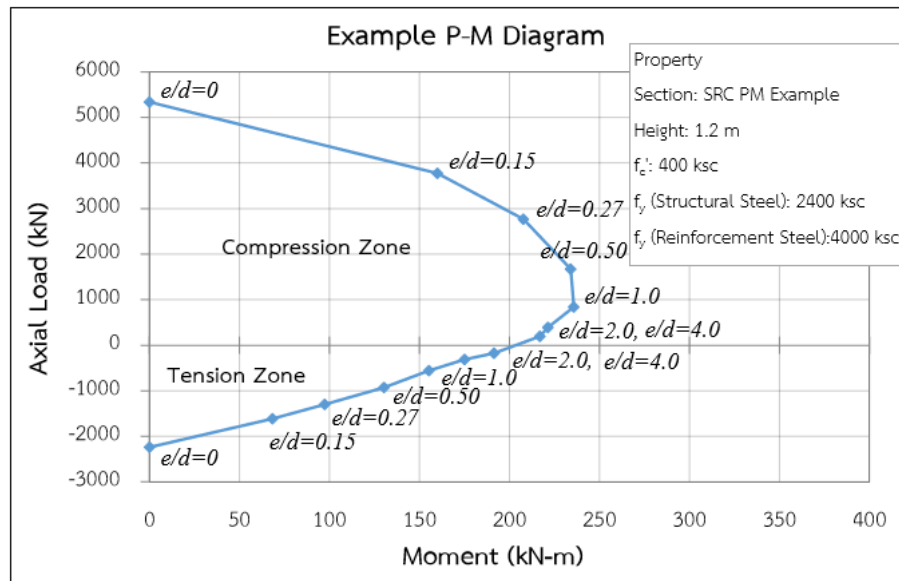
หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต		กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ		กำลังครากของเหล็กเสริมกำลัง	
	(ksc)	(MPa)	(ksc)	(MPa)	(ksc)	(MPa)
SRC PM Example	400**	39.2	2400	235	4000	392

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อกำลังรับแรงจะมีค่าน้อยลงเมื่อแรงกระทำห่างจากจุดศูนย์ถ่วงมาก แต่โมเมนต์จะมีค่ามากขึ้น ตารางที่ 2.26 แสดง ผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ระยะเอียงศูนย์ต่าง ๆ

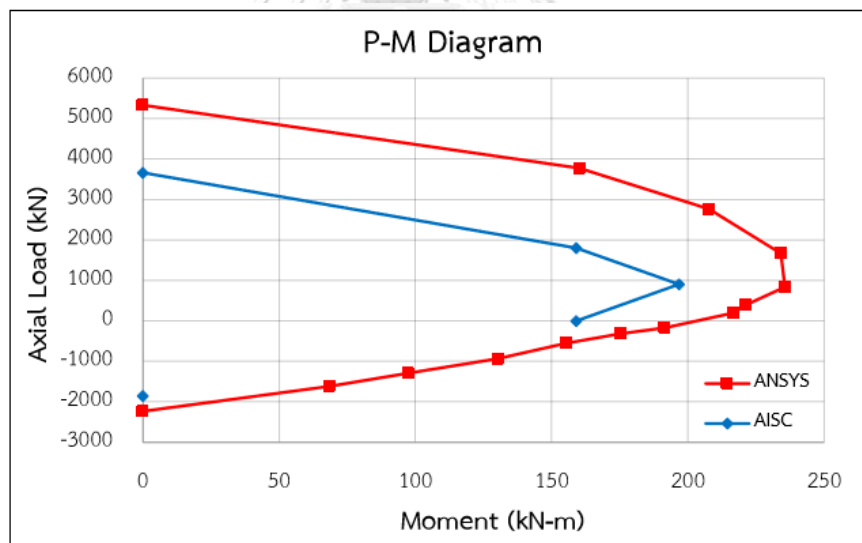
ตารางที่ 2.26 ผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา,2015)

Specimen	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN)	อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลาง (e/D)	ระยะเยื้องศูนย์กลาง (m)	โมเมนต์ (kN-m)
Axial Compression	5334	0	0.0000	0
Compression 0.15	3776	0.15	0.0424	160
Compression 0.27	2770	0.27	0.0750	208
Compression 0.50	1673	0.50	0.1400	234
Compression 1.00	842	1.0	0.2800	236
Compression 2.00	395	2.0	0.5600	221
Compression 4.00	194	4.0	1.1200	217
Tension 4.00	-171	4.0	1.1200	192
Tension 2.00	-313	2.0	0.5600	175
Tension 1.00	-555	1.0	0.2800	155
Tension 0.50	-930	0.50	0.1400	130
Tension 0.27	-1297	0.27	0.0750	97
Tension 0.15	-1615	0.15	0.0424	68
Axial Tension	-2237	0	0.0000	0

รูปที่ 2.68 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังโดยลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดกำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ จากนั้นนำเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC 360-10 (รูปที่ 2.69) พบว่ากำลังรับแรงที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-

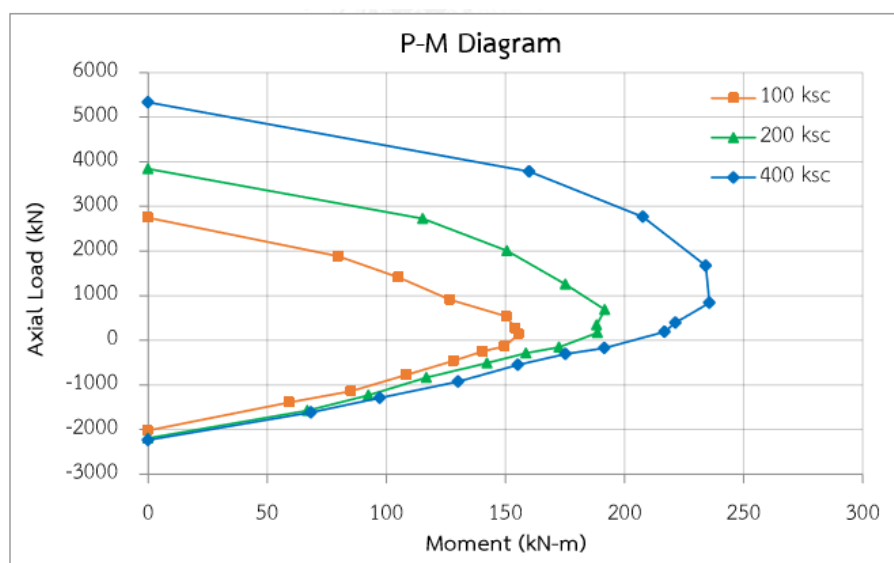


รูปที่ 2.68 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังโดยลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดกำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา, 2015)



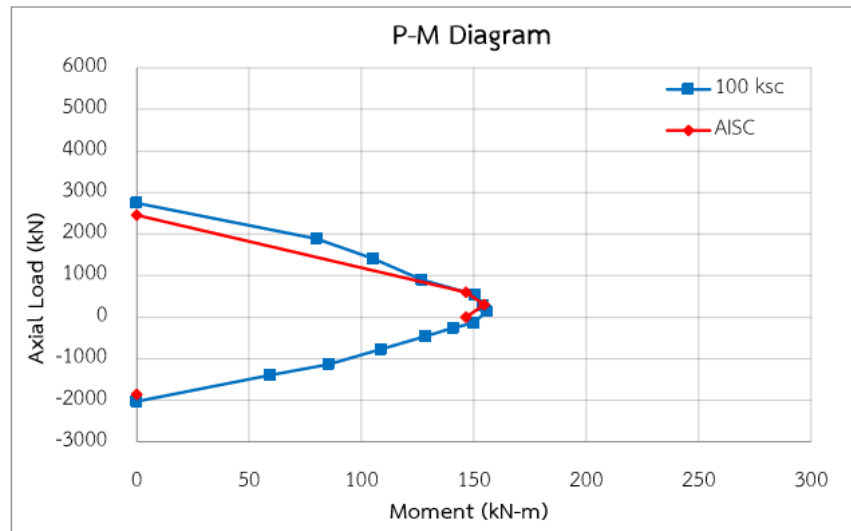
รูปที่ 2.69 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงและโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC (วรการ อนันตเสนา, 2015)

วิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวแปรต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยตัวแปรที่ใช้ประกอบไปด้วย กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 100-400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีผลกระทบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์มากในช่วงกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงอัดร่วมกับแรงดัดของคอนกรีต มีผลกระทบต่อเล็กน้อยในช่วงกำลังรับแรงดัดร่วมกับแรงดัดของคอนกรีต และน้อยที่สุดในช่วงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต รูปที่ 2.70 แสดงผลกระทบของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ค่าต่าง ๆ

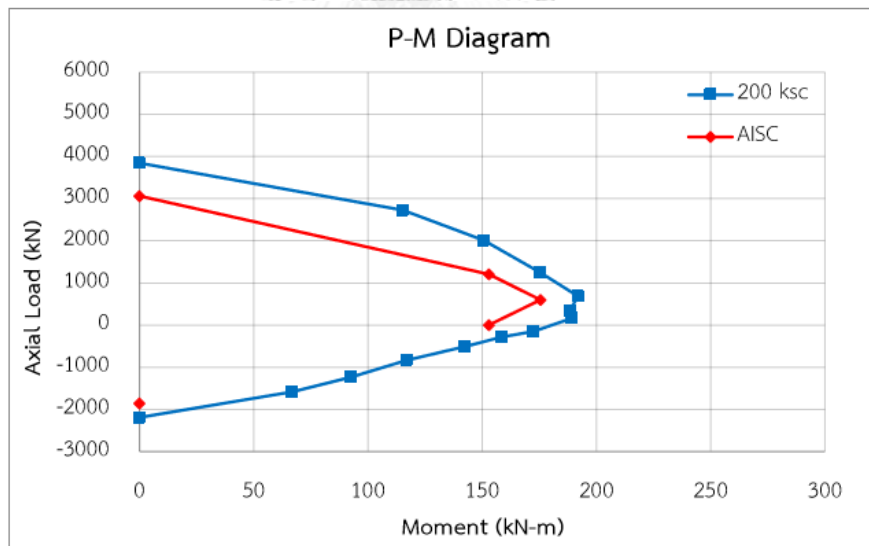


รูปที่ 2.70 แสดงผลกระทบของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ค่าต่าง ๆ (วรการ อนันตเสนา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2015)

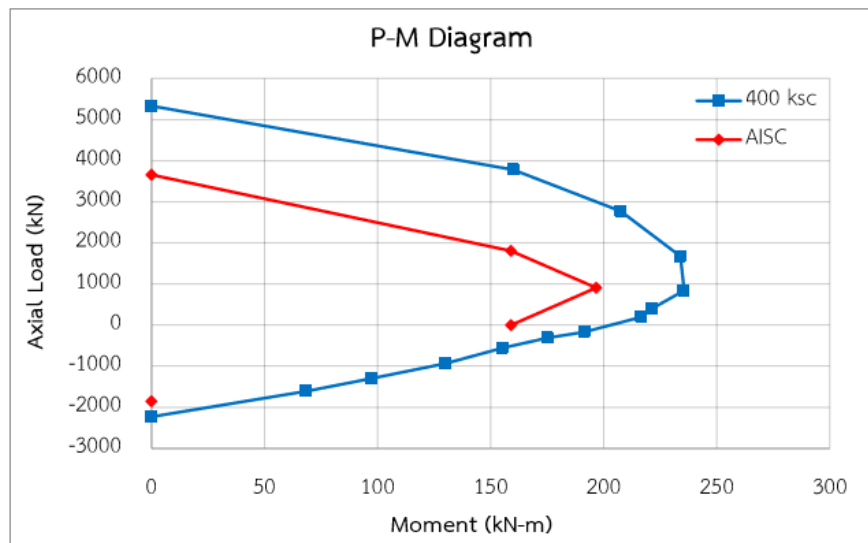
เปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณด้วยข้อกำหนด AISC 360-10 พบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จากข้อกำหนด AISC 360-10 จะไม่ปลอดภัยที่ค่ากำลังรับแรงประลัยของคอนกรีตน้อย แต่อย่างไรก็ตามข้อกำหนดของ AISC 360-10 ได้กำหนดกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าไม่ต่ำกว่า 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์ผลที่ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตในช่วงดังกล่าวพบว่ามีความปลอดภัย (conservative) รูปที่ 2.71 ถึง 2.73 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่าง ๆ



รูปที่ 2.71 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)

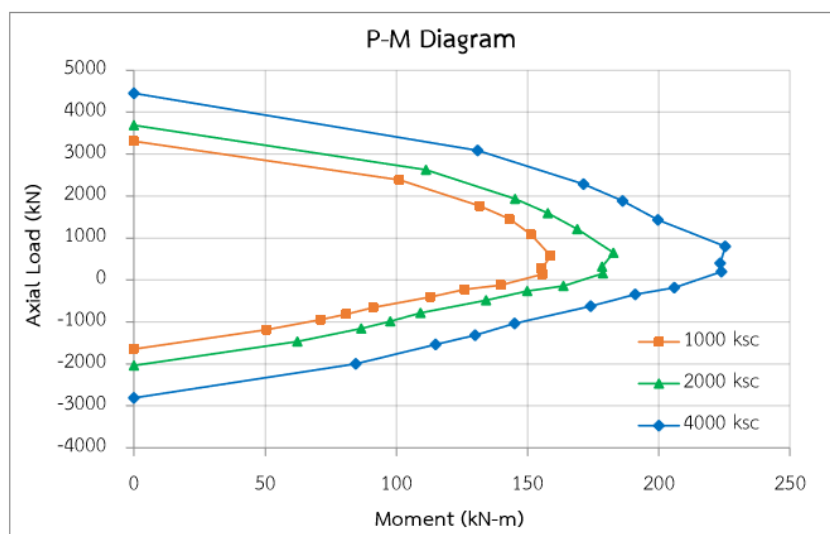


รูปที่ 2.72 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)



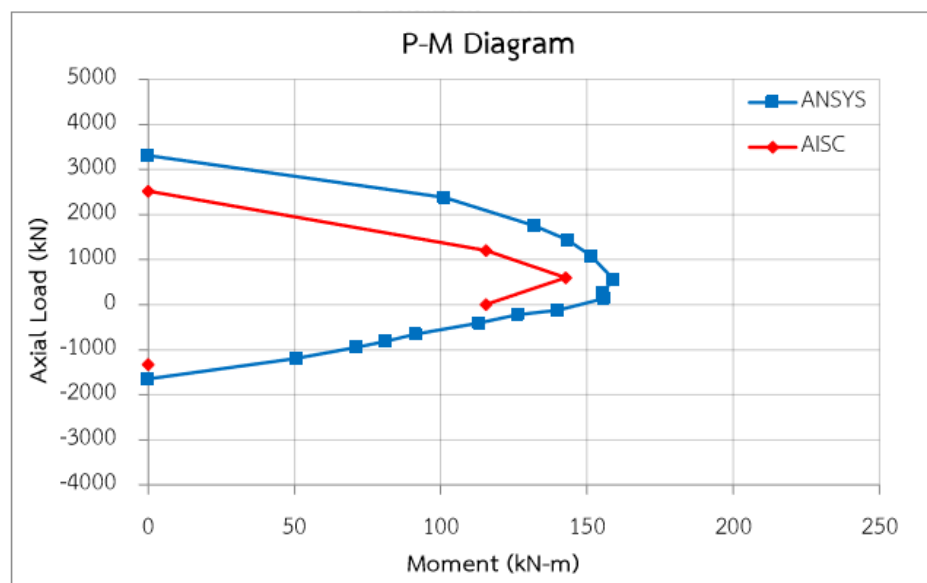
รูปที่ 2.73 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)

กำลังครากของเหล็กรูปพรรณที่ศึกษาอยู่ในช่วง 1000-4000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ขนาดเหล็กรูปพรรณรูปตัว H ขนาด 150x150x7x10 (มิลลิเมตร) พบว่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณมีผลต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังในช่วงกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดร่วมกับแรงดัด กำลังรับแรงดัดร่วมกับแรงดัด และกำลังรับแรงดัด เท่า ๆ กัน (รูปที่ 2.74) โดยกำลังครากของเหล็กรูปพรรณไม่มีผลต่อลักษณะรูปร่างของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์

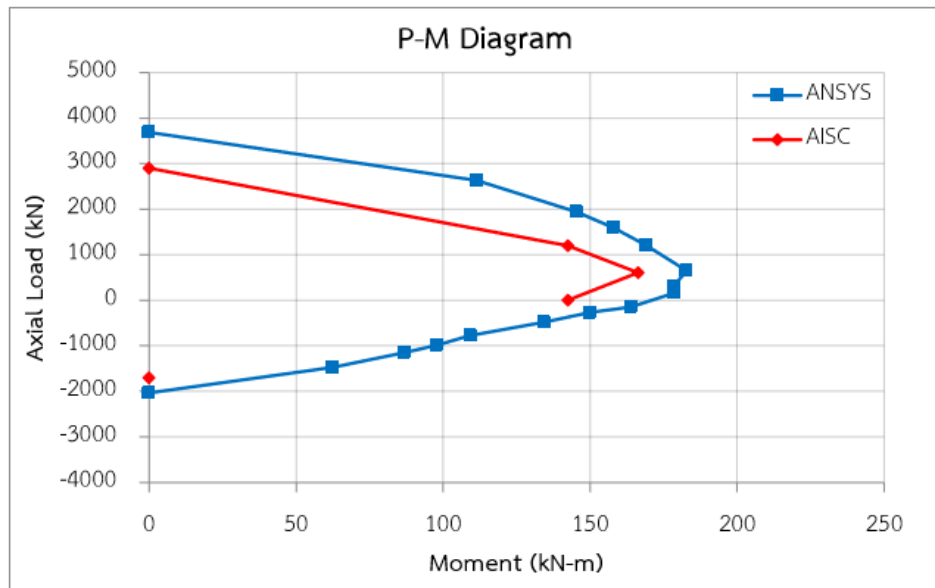


รูปที่ 2.74 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ค่าต่าง ๆ ของกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (วรการ อนันตเสนา, 2015)

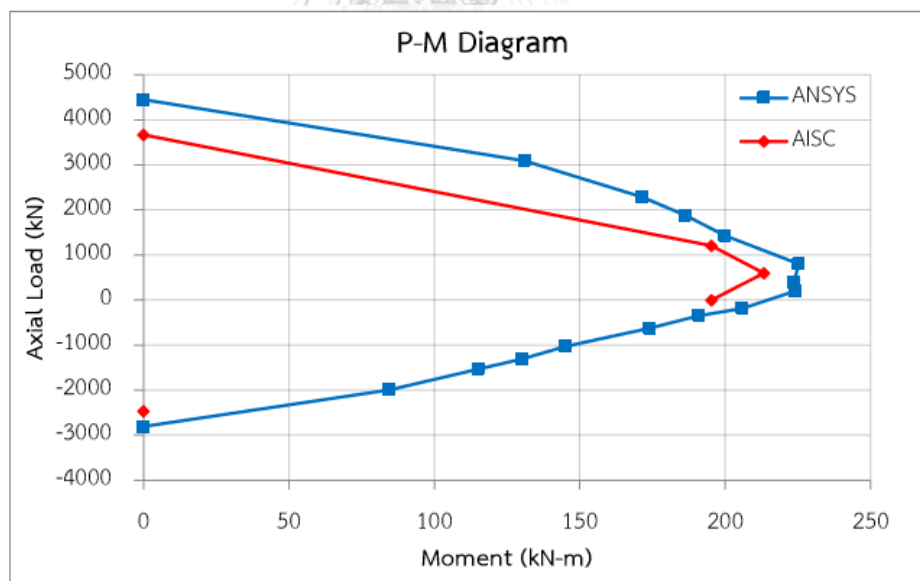
เปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณด้วยข้อกำหนด AISC 360-10 ที่กำลังครากของเหล็กรูปพรรณต่าง ๆ การออกแบบตามข้อกำหนด AISC 360-10 มีความปลอดภัย (conservative) น้อยลงเมื่อกำลังครากของเหล็กรูปพรรณสูงขึ้น ซึ่งข้อกำหนด AISC 360-10 มีการควบคุมกำลังครากสูงสุดของคอนกรีตไม่เกิน 5250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รูปที่ 2.75 ถึง 2.77 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่กำลังครากของเหล็กรูปพรรณต่าง ๆ



รูปที่ 2.75 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่กำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)



รูปที่ 2.76 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 2000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)



รูปที่ 2.77 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ค่ากำลังครากของเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 4000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรการ อนันตเสนา, 2015)

จากการวิเคราะห์พบว่า กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีผลกระทบโดยตรงต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในช่วงกำลังรับแรงอัด แต่มีผลกระทบน้อยต่อเส้นปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาในช่วงกำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีผลต่อลักษณะรูปร่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังในช่วงกำลังรับแรงอัด กำลังครากของเหล็กรูปพรรณมีผลกระทบโดยตรงต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งในช่วงกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึง แต่ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะรูปร่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด AISC 360-10 พบว่าข้อกำหนด AISC 360-10 มีความปลอดภัยในการนำไปใช้ออกแบบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต แต่มีความปลอดภัยน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณที่มีกำลังครากสูง



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน AISC 360 ปี 2016

ในข้อกำหนดของมาตรฐาน AISC 360-16 (2016) [20] ได้กล่าวถึงการออกแบบเสาวัสดุผสม จำแนกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1.เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (encased composite columns) และ เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (filled composite columns) ซึ่งในการศึกษานี้ทำการศึกษาเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตในมาตรฐาน AISC 360-16 (2016) [20] มีข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริม ดังนี้

คอนกรีตมีหน่วยแรงอัดไม่น้อยกว่า 210 กก./ตร.ซม. และไม่เกิน 700 กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ หรือ 420 กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตามในคำนวณการโค้งตัว สามารถใช้ค่าที่สูงกว่าได้

หน่วยแรงครากะบุต่ำสุด (specified minimum yield stress) ของเหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริมไม่เกิน 5250 กก./ตร.ซม.

ในเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ได้จัดเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เสาหน้าตัดอัดแน่น ($\lambda \leq \lambda_p$) เสาหน้าตัดไม่อัดแน่น ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) และเสาหน้าตัดชะลูด ($\lambda > \lambda_r$) โดยที่ λ คืออัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนบางในหน้าตัด ซึ่งค่า λ_p , λ และ λ_r ได้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การจำแนกหน้าตัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-16 (2016) [20]

ชิ้นส่วน	λ	λ_p	λ_r	λ_{max}
1. หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม	$\frac{b}{t}$	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
2. หน้าตัดท่อวงกลม	$\frac{D}{t}$	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\frac{0.19E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

สำหรับหน้าตัดอัดแน่น

$$P_{no} = F_y A_s + C_2 f_c' \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) = P_p \quad (3.1)$$

โดยที่ C_2 คือ 0.85 สำหรับหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม และ 0.95 สำหรับหน้าตัดกลม, F_y คือกำลังรับแรงที่จุดคราก, f_c' คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก, A_{sr} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, E_s คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเหล็ก, E_c คือค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

สำหรับหน้าตัดไม่อัดแน่น

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3.2)$$

โดย λ , λ_p และ λ_r มีค่าจากตารางที่ 3.1 และ มีค่าจากสมการที่ 3.1

$$P_y = F_y A_s + 0.7 f_c' \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.3)$$

สำหรับหน้าตัดชะลูด

$$P_{no} = F_{cr} A_s + 0.7 f_c' \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.4)$$

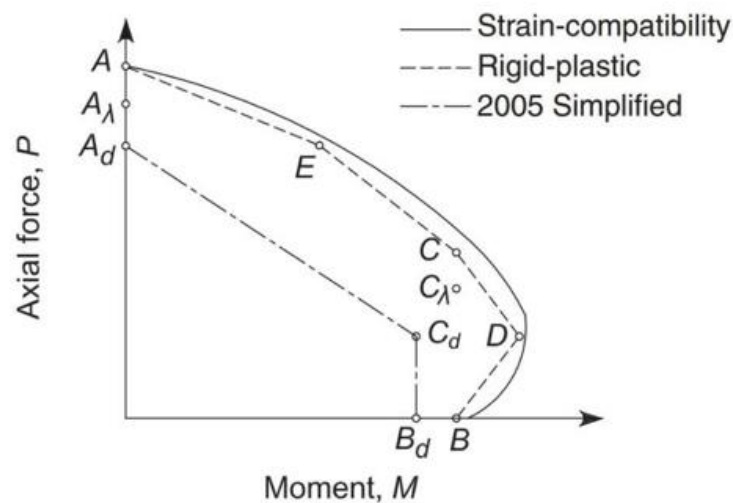
สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$F_{cr} = \frac{9E_s}{\left(\frac{b}{t} \right)^2} \quad (3.5)$$

สำหรับหน้าตัดกลม

$$F_{cr} = \frac{0.72F_y}{\left(\left(\frac{D}{t} \right) \frac{F_y}{E_s} \right)^{0.2}} \quad (3.6)$$

การคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด สามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่ วิธีความสอดคล้องของความเครียด (strain compatibility) และ วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก (plastic stress distribution) การสร้างเส้นโค้งสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดในคาน-เสาตามมาตรฐาน AISC สามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดในคาน-เสา ตามมาตรฐาน AISC [20]

- จุด A = แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของหน้าตัดโดยไม่คิดผลความชะลูดของเสาเมื่อโมเมนต์เป็นศูนย์
 จุด B = แสดงค่ากำลังรับแรงดัดระบุของหน้าตัด (M_n) เมื่อกำลังรับแรงอัดเป็นศูนย์
 จุด C = แสดงค่ากำลังรับแรงดัดระบุของหน้าตัด (M_n) ที่จุด B เมื่อมีแรงอัดร่วมด้วย
 จุด D = แสดงค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดที่จุด C เมื่อมีแรงดัดร่วมด้วย
 จุด E = จุดใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น มักใช้กรณีหน้าตัดเหล็กรูปพรรณหุ้มด้วยคอนกรีตรับโมเมนต์รอบแกนรอง

เพื่อความง่ายในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดสามารถสร้างเส้นตรงเชื่อม 3 จุด B_d , C_d , A_d ในรูปที่ 3.1 และสมการเส้นตรงเขียนได้ดังนี้

$$P_r < P_c: \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1 \quad (3.7)$$

$$P_r \geq P_c: \frac{P_r - P_c}{P_A - P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1 \quad (3.8)$$

โดยที่

$$P_r = \text{กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ} \quad (\text{กก.})$$

$$M_{rx} = \text{กำลังแรงดัดรอบแกน x (แกนหลัก) ที่ต้องการ} \quad (\text{กก. ซม.})$$

$$M_{ry} = \text{กำลังแรงดัดรอบแกน y (แกนรอง) ที่ต้องการ} \quad (\text{กก. ซม.})$$

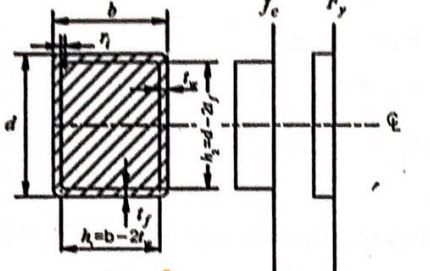
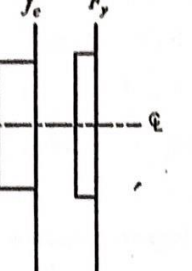
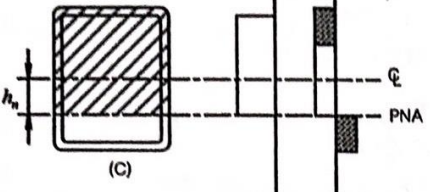
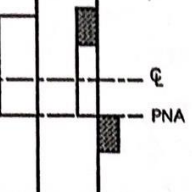
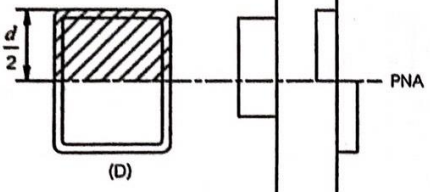
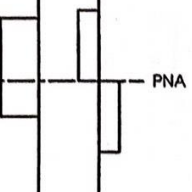
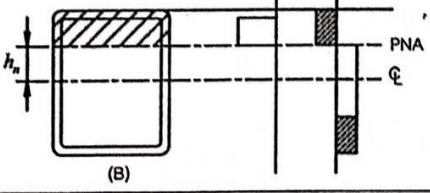
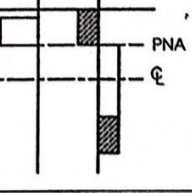
$$P_A = \text{กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ (จุด } A_d) \quad (\text{กก.})$$

$$P_c = \text{กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ (จุด } C_d) \quad (\text{กก.})$$

$$M_{cx} = \text{กำลังแรงดัดรอบแกน x (แกนหลัก) ที่สามารถรับได้} \quad (\text{กก. ซม.})$$

$$M_{cy} = \text{กำลังแรงดัดรอบแกน y (แกนรอง) ที่สามารถรับได้} \quad (\text{กก. ซม.})$$

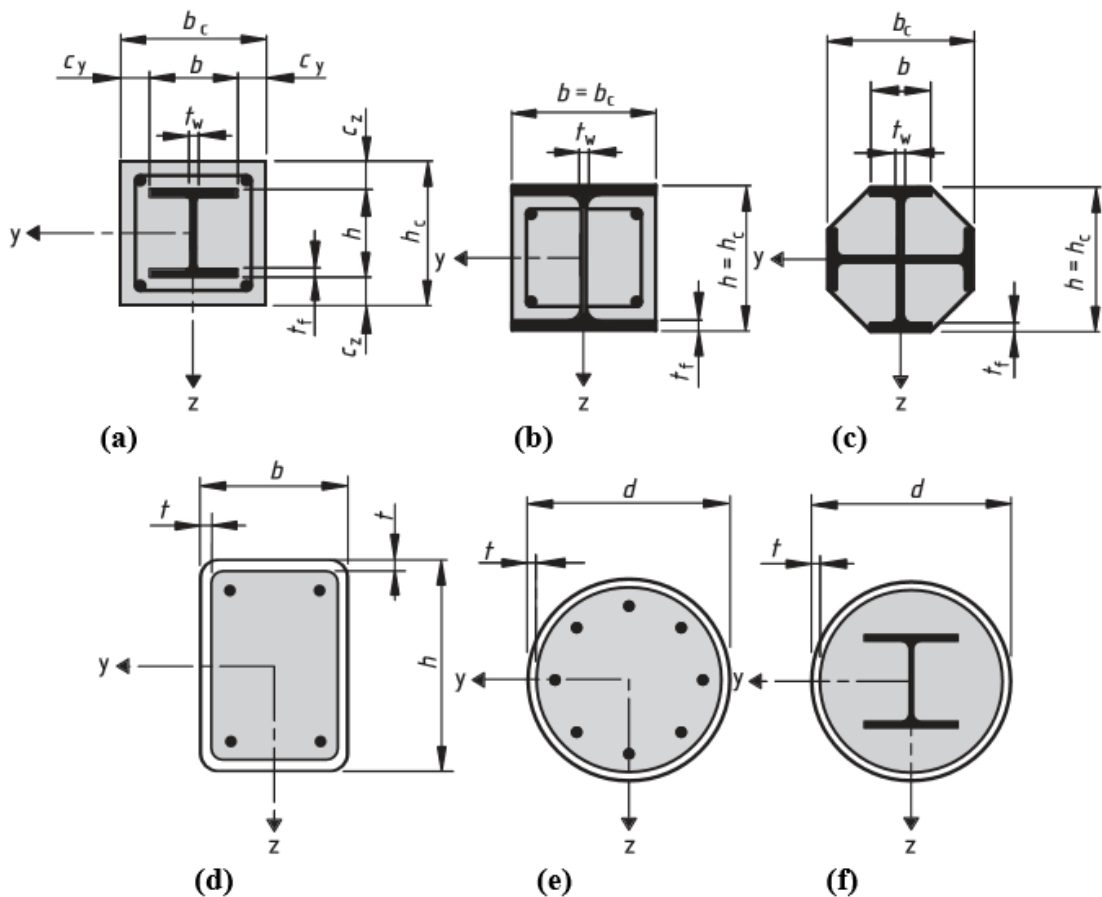
ตารางที่ 3.2 การสร้างจุดต่าง ๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดและกำลังแรงดัดของเสาต่อ เหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กรูปพรรณหุ้มด้วยคอนกรีต [21]

หน้าตัด	การกระจายของหน่วยแรง	จุด	สมการ
 <p>(A)</p>		A	$P_A = A_s F_y + 0.85 f'_c A_c$ $M_A = 0$ $A_s = \text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$ $A_c = h_1 h_2 - 0.858 r_1^2$
 <p>(C)</p>		C	$P_C = 0.85 f'_c A_c$ $M_C = M_B$
 <p>(D)</p>		D	$P_D = 0.85 f'_c A_c / 2$ $M_D = Z_s F_y + Z_c (0.85 f'_c) / 2$ $Z_s = \text{โมเมนต์เสถียรภาพรอบแกน y ของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$ $Z_c = \frac{h h_n^2}{4} - 0.192 r_1^3$
 <p>(B)</p>		B	$P_B = 0$ $M_B = M_D - Z_{sm} F_y - Z_{cn} (0.85 f'_c) / 2$ $Z_{sm} = 2 t_w h_n^2$ $Z_{cn} = h_1 h_n^2$ $h_n = \frac{0.85 f'_c A_c}{2 [0.85 f'_c + 4 t_w F_y]} \leq \frac{h_2}{2}$

หน้าตัด	การกระจายของหน่วยแรง	จุด	สมการ
<p>(A)</p>		A	$P_A = A_s F_y + A_w F_w + 0.85 f'_c A_c \text{ และ } M_A = 0$ $A_s = \text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$ $A_w = \text{พื้นที่ของเหล็กเสริมอื่นทั้งหมด}$ $A_c = h_1 h_2 - A_s - A_w$
<p>(C)</p>		C	$P_C = 0.85 f'_c A_c \text{ และ } M_C = M_B$
<p>(D)</p>		D	$P_D = 0.85 f'_c A_c / 2$ $M_D = Z_s F_y + Z_s F_w + Z_c (0.85 f'_c) / 2$ $Z_s = \text{โมเมนต์สถลศาสตร์ของแกน x ของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$ $A_{ms} = \text{พื้นที่ของเหล็กเสริมอื่นที่แนวศูนย์กลางของหน้าตัด}$ $Z_s = (A_w - A_{ms}) \left(\frac{h_2}{2} - c \right)$ $Z_c = \frac{h_1 h_2^2}{4} - Z_s - Z_r$
<p>(B)</p>		B	$P_B = 0$ $M_B = M_D - Z_m F_y - Z_m (0.85 f'_c) / 2$ $Z_m = h_1 h_n^2 - Z_{ms}$ <p>เมื่อ h_n อยู่ในปีกคาน ($h_n \leq \frac{d}{2} - t_f$)</p> $h_n = \frac{0.85 f'_c (A_c + A_{ms}) - 2 F_w A_{ms}}{2 [0.85 f'_c (h_1 - t_w) + 2 F_y t_w]}$ $Z_{ms} = t_w h_n^2$ <p>เมื่อ h_n อยู่ในปีกคาน ($\frac{d}{2} - t_f < h_n \leq \frac{d}{2}$)</p> $h_n = \frac{0.85 f'_c (A_c + A_s - db_f + A_{ms}) - 2 F_y (A_s - db_f) - 2 F_w A_{ms}}{2 [0.85 f'_c (h_1 - b_f) + 2 F_y b_f]}$ $Z_{ms} = Z_s - b_f \left(\frac{d}{2} - h_n \right) \left(\frac{d}{2} + h_n \right)$ <p>เมื่อ h_n อยู่เหนือปีกคาน ($h_n > \frac{d}{2}$)</p> $h_n = \frac{0.85 f'_c (A_c + A_s + A_{ms}) - 2 F_y A_s - 2 F_w A_{ms}}{2 (0.85 f'_c h_1)}$ $Z_{ms} = Z_{ms} = \text{โมเมนต์สถลศาสตร์ของแกน x ของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$

3.2 การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4

จากการศึกษาการออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 [22] ระบุคุณสมบัติทั่วไปไว้ดังนี้ การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 [22] มีไว้สำหรับออกแบบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตทั้งหน้าตัดวงกลมและสี่เหลี่ยม ตามแสดงในรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ประเภทของหน้าตัดวัสดุผสมที่ออกแบบได้โดยมาตรฐาน Eurocode4 [22]

การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 ประยุกต์ใช้กับเสาที่รับแรงอัดด้วยเหล็กเกรด S235 ถึง S460 และคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาเกรด C20/25 ถึง C50/60

การออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 ประยุกต์ใช้กับเสาเดี่ยวหรือชิ้นส่วนในโครงข้อแข็งที่ชิ้นส่วนอื่น ๆ เป็นชิ้นส่วนประกอบหรือเหล็กเท่านั้น

ค่าอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (steel contribution ratio) (δ) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.9 โดยที่

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (3.9)$$

โดยที่

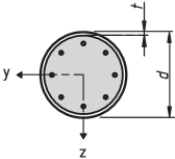
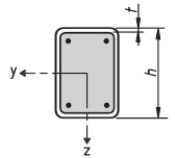
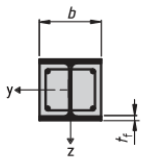
A_a = พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ, f_{yd} = กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ

เสาวัสดุผสมหรือชิ้นส่วนวัสดุผสมรับแรงอัดหน้าตัดใด ๆ ควรทำการตรวจสอบ กำลังต้านทานชิ้นส่วน กำลังต้านทานการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ น้ำหนักบรรทุก กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กและคอนกรีต

วิธีการออกแบบตามแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีทั่วไป (General method) ใช้ได้กับทั้งหน้าตัดที่สมมาตรและไม่สมมาตรและหน้าตัดที่ไม่คงที่ตลอดความยาว และวิธีแบบง่าย (Simplified method) ใช้ได้เฉพาะหน้าตัดมีสมมาตรทั้งสองแกนและหน้าตัดคงที่ตลอดความยาว

สำหรับชิ้นส่วนวัสดุผสมที่รับแรงดัดและแรงในแนวแกนที่อิสระต่อกัน partial factor (γ) จะการลดกำลังของชิ้นส่วนลง 20%

การออกแบบนี้จะพิจารณาผลของการโก่งเดาะเฉพาะที่ด้วย รูปที่ 3.3 แสดงขอบเขตความชะลุคของหน้าตัดต่าง ๆ

Cross-section	Max (d/t), max (h/t) and max (b/t)
Circular hollow steel sections 	$\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
Rectangular hollow steel sections 	$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Partially encased I-sections 	$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

รูปที่ 3.3 ขอบเขตความชะลุคของหน้าตัดต่าง ๆ [22]

ในการออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 ด้วยวิธีทั่วไป ได้ระบุข้อกำหนดไว้ดังนี้

การออกแบบจะต้องคำนึงถึงความมั่นคงของโครงสร้าง โดยจะต้องพิจารณาผลของการวิเคราะห์ลำดับที่ 2 รวมไปถึง หน่วยแรงค้ำในเหล็ก ข้อบกพร่องทางคณิตศาสตร์ ความขาดเสถียรภาพเฉพาะที่ รอยแตกของคอนกรีต ความล้า การหดตัวของคอนกรีต และการครากของเหล็ก รูปพรรณและเหล็กเสริมรูปพรรณและเหล็กเสริม การออกแบบต้องทำให้มั่นใจว่าความมั่นคงจะไม่เกิดขึ้นที่การรวมแรงแบบสถานะขีดจำกัดด้านกำลัง และจะไม่พิจารณากำลังรับแรงของหน้าตัดที่รับเฉพาะโมเมนต์ดัด แรงใน แนวแกนและแรงเฉือน

การวิเคราะห์ลำดับที่ 2 ต้องวิเคราะห์ทุกทิศทางที่จะส่งผลต่อโครงสร้าง

แรงภายในจะวิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสโต-พลาสติก (elasto-plastic analysis)

สมมติให้ระนาบในหน้าตัดคงเป็นระนาบเดิมจนกระทั่งเสาวิบัติ และการยึดเหนี่ยว (bonding) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กเป็นไปอย่างสมบูรณ์

ไม่พิจารณาแรงดึงในคอนกรีต แต่พิจารณากำลังของคอนกรีต ณ จุดที่เริ่มแตก

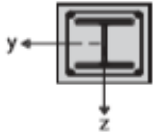
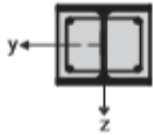
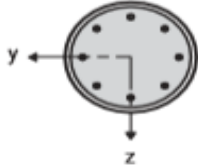
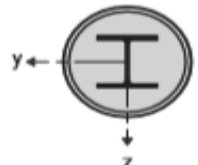
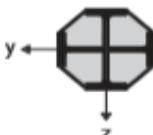
พิจารณาผลของการหดตัวและการคืบถ้าผลนั้นทำให้เสถียรภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

ผลของการหดตัวและการคืบจะไม่นำมาพิจารณาเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ถ้าผลนั้นเพิ่มโมเมนต์ดัดลำดับที่หนึ่งเนื่องจากการเสียรูปจากการคืบและแรงในแนวแกนแบบถาวรไม่มากกว่า 10%

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สำหรับคอนกรีตรับแรงอัดพิจารณาตาม Eurocode2 (ค.ศ.2004) สำหรับเหล็กเสริมพิจารณาตาม Eurocode2 (ค.ศ. 2004) สำหรับเหล็กโครงสร้าง Eurocode3 (ค.ศ.2005)

ผลของหน่วยแรงค้ำในเหล็กและความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิต (geometric Imperfection) จะไม่นำมาพิจารณาหากความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตมีค่าต่ำกว่าค่าในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตของหน้าตัดแต่ละแบบ [22]

Cross-section	Limits	Axis of buckling	Buckling curve	Member imperfection
concrete encased section 		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
partially concrete encased section 		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
circular and rectangular hollow steel section 	$\rho_s \leq 3\%$	any	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	any	b	$L/200$
circular hollow steel sections with additional I-section 		y-y	b	$L/200$
		z-z	b	$L/200$
partially concrete encased section with crossed I-sections 		any	b	$L/200$

ในการออกแบบเสาวัสดุผสมตามมาตรฐาน Eurocode4 ด้วยวิธีอย่างง่ายระบุข้อกำหนดไว้ดังนี้

ใช้สำหรับหน้าตัดสมมาตรทั้งสองแกนและหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวเสา ได้ทั้งกับเหล็กกรีดร้อน เหล็กขึ้นรูปเย็นหรือหน้าตัดแบบเชื่อม จะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ถ้าหากส่วนประกอบเหล็กประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ชิ้นขึ้นไปและมีค่าความชะลูดสัมพัทธ์ ($\bar{\lambda}$) ไม่เกิน 2 โดยค่าความชะลูดสัมพัทธ์หาได้จากสมการ

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (3.10)$$

โดยที่

$N_{pl,Rk}$ = ค่าลักษณะเฉพาะของค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงพลาสติก ($N_{pl,Rd}$) ที่ใช้ในการออกแบบ, N_{cr} = แรงในแนวแกนวิกฤติแบบยืดหยุ่นที่สัมพันธ์รูปแบบการวิบัติของเสา ซึ่ง คำนวณได้จากสถิติเนสการดัดประสิทธิผล

- สำหรับหน้าตัดแบบเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.1 ความหนาของระยะหุ้มคอนกรีตคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\max c_z = 0.3h \quad (3.11)$$

$$\max c_y = 0.4b \quad (3.12)$$

โดยที่

c_z = ความหนาของคอนกรีตจากผิวจนถึงเหล็กรูปพรรณในทิศทางแกน z, c_y = ความหนาของคอนกรีตจากผิวจนถึงเหล็กรูปพรรณในทิศทางแกน y, h = ความลึกทั้งหมดของเหล็กรูปพรรณ, b = ความกว้างทั้งหมดของเหล็กรูปพรรณ

เหล็กเสริมในทางยาวไม่ควรเกิน 6% ของพื้นที่คอนกรีต

อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของหน้าตัดวัสดุผสมควรมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 0.5

การคำนวณกำลังรับแรงของหน้าตัดด้วยวิธีอย่างง่ายมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

กำลังรับแรงอัดในช่วงพลาสติก ($N_{pl,Rd}$) ของหน้าตัดวัสดุผสมคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

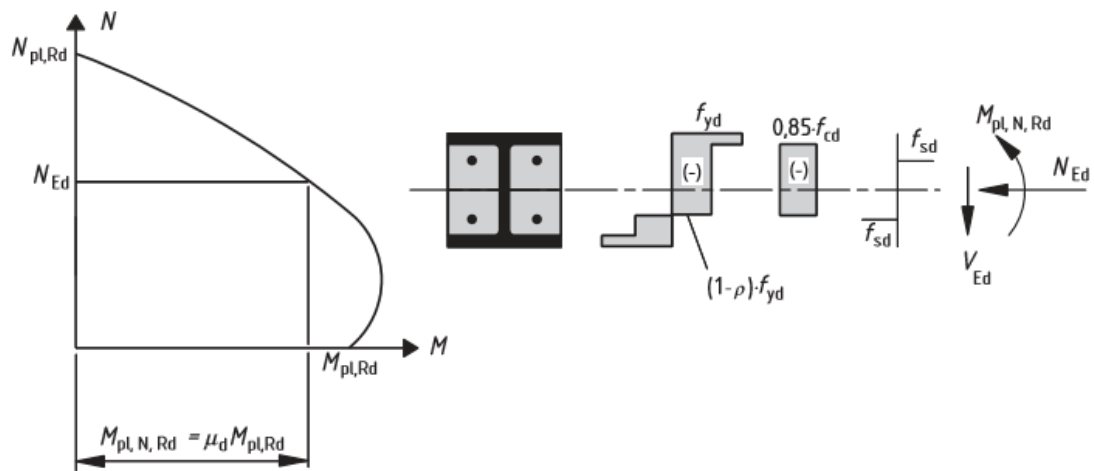
$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0.85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.13)$$

โดยที่

A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต , A_s = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางยาว , f_{cd} = กำลังรับแรงของคอนกรีต , f_{sd} = กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัดคอนกรีต (A_c) จะเท่ากับ 0.85 สำหรับหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และ 1.0 สำหรับหน้าตัดเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

กำลังรับแรงของหน้าตัดที่รับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์โดยสมมติให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยกำลังรับแรงดัดในคอนกรีตจะไม่นำมาพิจารณา



รูปที่ 3.4 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด ตามมาตรฐาน Eurocode4 [22]

แรงเฉือนในแนวขวางหน้าตัดจะนำมาพิจารณาหากแรงเฉือนบนหน้าตัดเหล็ก ($V_{a,Ed}$) มีค่าเกิน 50% ของกำลังแรงเฉือนออกแบบ ($V_{pl,a,Rd}$) ของหน้าตัดเหล็ก

V_{Ed} อาจกระจายสู่ $V_{a,Ed}$ ซึ่งกระทำบนหน้าตัดเหล็กและ $V_{c,Ed}$ ซึ่งกระทำบนคอนกรีตด้วยสมการดังต่อไปนี้

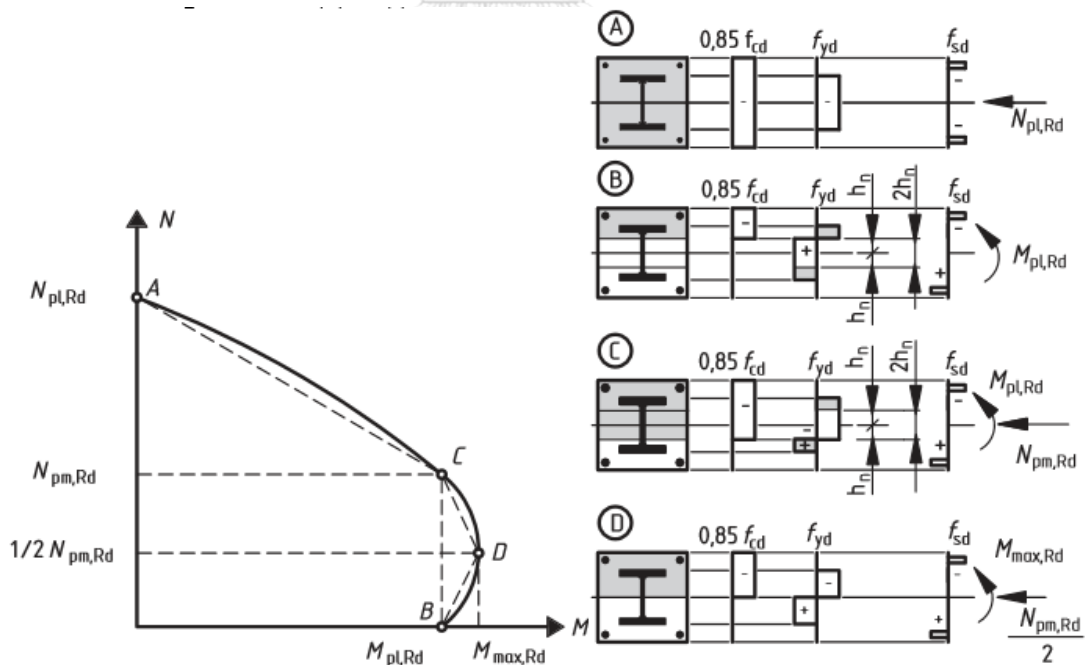
$$\text{แรงเฉือนที่กระทำต่อชิ้นส่วนเหล็ก } V_{a,Ed} = V_{Ed} \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (3.14)$$

$$\text{แรงเฉือนที่กระทำต่อคอนกรีต } V_{c,Ed} = V_{Ed} - V_{a,Ed} \quad (3.15)$$

โดยที่ $M_{pl,a,Rd}$ = โมเมนต์ต้านทานพลาสติกของหน้าตัดเหล็ก

$M_{pl,Rd}$ = โมเมนต์ต้านทานพลาสติกของหน้าตัดผสม

เพื่อความสะดวกเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์อาจแทนด้วยแผนภาพหลายเหลี่ยมดังแสดงเป็นเส้นปะในรูปที่ 3.4 เชื่อมระหว่างสถานะต่าง ๆ ของการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัด โดย $N_{pm,Rd}$ มีค่า $0.85 f_{cd} A_c$ สำหรับหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และ $f_{cd} A_a$ สำหรับหน้าตัดเหล็กเต็มด้วยคอนกรีต



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังแรงอัดและแรงดัดอย่างง่าย และการกระจายหน่วยแรง ตาม

มาตรฐาน Eurocode4 [22]

โดยกำลังแรงที่จุดต่าง ๆ ของหน้าตัดต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต สามารถหาได้จากสมการดังนี้

สำหรับท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

$$\text{จุด A : } N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.16)$$

$$\text{จุด B : } M_{max,Rd} = W_{pa} f_{yd} + W_{ps} f_{sd} + 0.5W_{pc} f_{cd} \quad (3.17)$$

$$0.5 N_{pm,Rd} = 0.5 A_c f_{cd} \quad (3.18)$$

$$\text{จุด C : } N_{pm,Rd} = 2 \times 0.5 N_{pm,Rd} \quad (3.19)$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} \quad (3.20)$$

$$\text{จุด D : } h_n = \frac{N_{pm,Rd}}{(2H \cdot f_{cd}) + 4t(2f_{yd} - f_{cd})} \quad (3.21)$$

$$W_{p,an} = 2th_n^2 \quad (3.22)$$

$$W_{p,cn} = (H - 2t)h_n^2 \quad (3.23)$$

$$M_{n,Rd} = W_{p,an} f_{yd} + 0.5W_{p,cn} f_{cd} \quad (3.24)$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} \quad (3.25)$$

สำหรับเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

$$\text{จุด A : } N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.26)$$

$$\text{จุด B : } M_{max,Rd} = W_{pa} f_{yd} + W_{ps} f_{sd} + 0.5W_{pc} 0.85 f_{cd} \quad (3.27)$$

$$0.5 N_{pm,Rd} = (0.5)(0.85)A_c f_{cd} \quad (3.28)$$

$$\text{จุด C : } N_{pm,Rd} = 2 \times 0.5 N_{pm,Rd} \quad (3.29)$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} \quad (3.30)$$

$$\text{จุด D : } h_n = \frac{N_{pm,Rd}}{(2X \cdot f_{cd}) + 2t_w(2f_{yd} - f_{cd})} \quad (3.31)$$

$$W_{p,an} = t_w h_n^2 \quad (3.32)$$

$$W_{p,cn} = (X - t_w) h_n^2 \quad (3.33)$$

$$M_{n,Rd} = W_{p,an} f_{yd} + 0.5W_{p,cn} f_{cd} \quad (3.34)$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} \quad (3.35)$$

โดย $N_{pl,Rd}$ = กำลังต้านทานแรงอัดพลาสติก, A_a = พื้นที่หน้าตัดท่อเหล็ก, f_{yd} = กำลังครากของท่อเหล็ก, A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต, f_{cd} = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต, A_s = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม, f_{sd} = กำลังครากของเหล็กเสริม, $M_{max,Rd}$ = กำลังต้านทานแรงดัด, W_{pa} = โมดูลัสพลาสติกของท่อเหล็ก, W_{ps} = โมดูลัสพลาสติกของเหล็กเสริม, W_{pc} = โมดูลัสพลาสติกของคอนกรีต, $N_{pm,Rd}$ = กำลังต้านทานแรงดัด, $M_{pl,Rd}$ = กำลังต้านทานแรงดัด, h_n = ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนสะเทินเมื่อไม่มีแรงในแนวแกน, X = ความกว้างคอนกรีต, H = ความยาวเหล็กรูปพรรณ, t = ความหนาท่อเหล็ก, t_w = ความหนาปีกเหล็กรูปพรรณ, $W_{p,an}$ = โมดูลัสพลาสติกของเหล็กในขอบเขต 2 เท่าของ h_n , $W_{p,cn}$ = โมดูลัสพลาสติกของคอนกรีตในขอบเขต 2 เท่าของ h_n

วิธีการวิเคราะห์และความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วน มีไว้สำหรับแสดงว่าชิ้นส่วนโครงสร้าง ควรวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นอันดับสองหรือไม่ โดยความไม่สมบูรณ์ทางรูปทรงเรขาคณิตดังแสดงในตารางที่ 3.3 หากชิ้นส่วนโครงสร้างมีความไม่สมบูรณ์ทางรูปทรงเรขาคณิต จะต้องทำการวิเคราะห์แบบยึดหยุ่นเชิงเส้นอันดับสอง หรือพิจารณาผลของการวิเคราะห์ลำดับที่สอง เมื่อใช้การวิเคราะห์ลำดับหนึ่งและคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกวิกฤตยึดหยุ่น โดยใช้ค่าสติเฟเนสการดัดประสิทธิผลลำดับที่สอง ซึ่งได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$(EI)_{eff,II} = K_0 (E_a I_a + E_s I_s + K_{e,II} E_{cm} I_c) \quad (3.36)$$

โดยที่

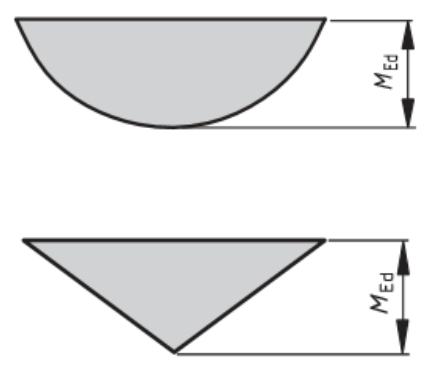
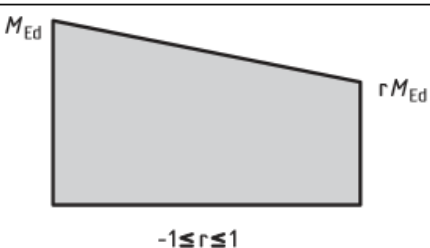
E_a = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ , E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม , E_{cm} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต , I_a = พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของเหล็กรูปพรรณ , I_s = พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของเหล็กเสริม , I_c = พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของคอนกรีต , $K_{e,II}$ = ตัวประกอบการแก้ไข ควรใช้ 0.5 , K_0 = ตัวประกอบการปรับเทียบ ควรใช้ 0.9

ผลการวิเคราะห์ลำดับที่สองอาจได้มาจากโมเมนต์ดัดออกแบบลำดับที่หนึ่ง (M_{Ed}) คูณด้วยค่า k

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1.0 \quad (3.37)$$

$N_{cr,eff}$ = แรงแรงในแนวแกนสูงสุดโดยคำนึงถึงค่าสติเฟเนสการดัดประสิทธิผลลำดับที่สองและความยาวของเสา , β = ค่าตัวประกอบโมเมนต์เทียบเท่า ได้จากตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวประกอบโมเมนต์เทียบเท่าเพื่อคำนวณหาผลการวิเคราะห์ลำดับที่สอง [22]

Moment distribution	Moment factors β	Comment
	<p>First-order bending moments from member imperfection or lateral load:</p> $\beta = 1,0$	<p>M_{Ed} is the maximum bending moment within the column length ignoring second-order effects</p>
	<p>End moments:</p> $\beta = 0,66 + 0,44r$ <p>but $\beta \geq 0,44$</p>	<p>M_{Ed} and $r M_{Ed}$ are the end moments from first-order or second-order global analysis</p>

เพื่อความง่ายต่อการออกแบบกำลังต้านทานชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกน ควรใช้วิธีวิเคราะห์ลำดับที่สองและพิจารณาความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วนตามสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.38)$$

$N_{pl,Rd}$ = กำลังต้านทานแรงในแนวแกนในช่วงพลาสติกของหน้าตัด, χ = ค่าตัวประกอบลดค่าตามรูปแบบการพังของเสาพิจารณาตาม Eurocode3 (ค.ศ. 1993) ขึ้นอยู่กับความชะลูดสัมพัทธ์

กำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกันของชิ้นส่วน ได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ซึ่งตรวจสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดตามสมการดังต่อไปนี้

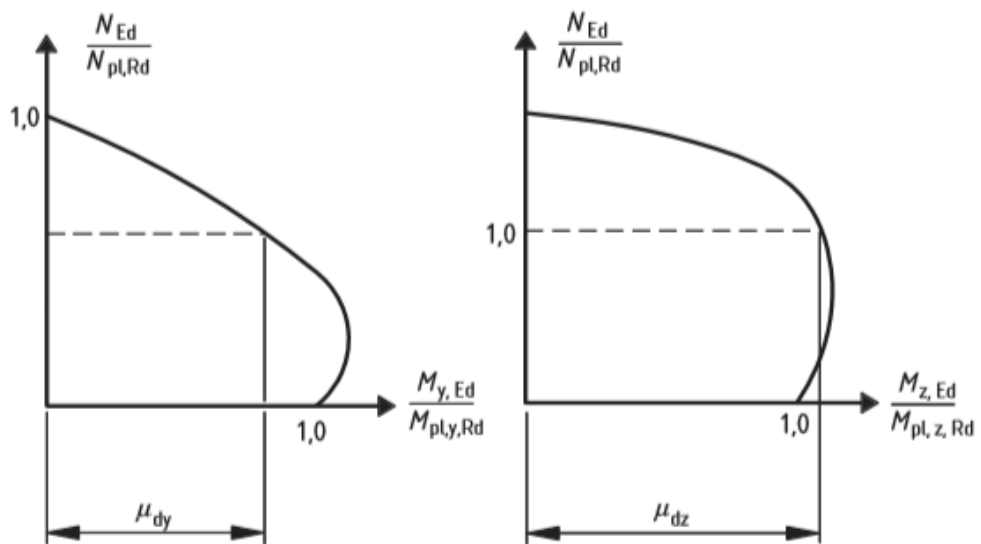
$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (3.39)$$

M_{Ed} = โมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาโดยคิดผลรวมของชั้นส่วนและการวิเคราะห์ลำดับที่สอง

$M_{pl,N,Rd}$ = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในช่วงพลาสติกที่รวมผลของแรงในแนวแกน

$M_{pl,Rd}$ = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่จุด B ในรูป 3.4

ค่า $\alpha M = 0.9$ สำหรับเหล็กชั้นเกรด S235 ถึง S355 และ $\alpha M = 0.8$ สำหรับเหล็กเกรด S420 ถึง S460 ค่าคงที่ μ_{dy} และ μ_{dz} แสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 ค่า μ_{dy} และ μ_{dz} ออกแบบสำหรับแรงอัดและแรงดัดแกนเดียว [22]

บทที่ 4

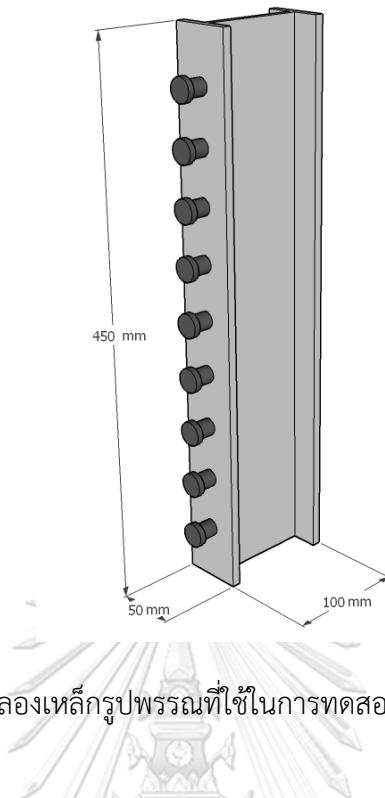
รายละเอียดการทดสอบ

ในบทนี้นำเสนอรายละเอียดการทดสอบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ และศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐาน AISC360-16 และ Eurocode4

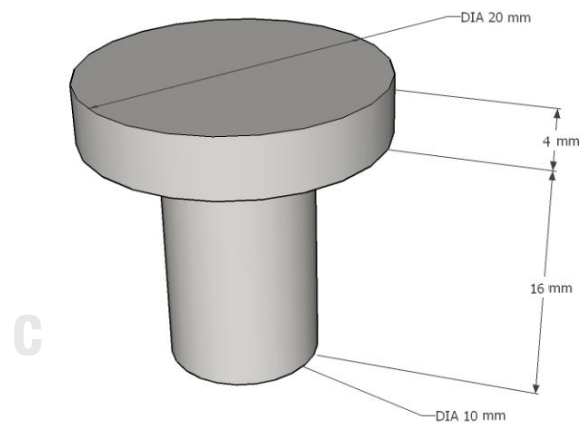
4.1 คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย ท่อนเหล็ก เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต ท่อนเหล็กที่ใช้เป็นท่อนเหล็กกลวง ขนาด 150x150 มิลลิเมตร ความหนาท่อน 3.2 มิลลิเมตร กำลังครากเท่ากับ 405.99 เมกะปาสคาล (4,140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช (H) มีขนาด 100x50 มิลลิเมตร ความหนาปีกเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ความหนาเอวเท่ากับ 5 มิลลิเมตร กำลังครากเท่ากับ 429.53 เมกะปาสคาล (4,380 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) แบ่งเป็นเหล็กรูปพรรณที่ติดสลักรับแรงเฉือนและเหล็กรูปพรรณที่ไม่ติดสลักรับแรงเฉือน สลักรับแรงเฉือนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวสลัก 20 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร มีความยาว 16 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของช่วงความยาวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางตลอดความยาวปีกของเหล็กรูปพรรณ ระยะห่างของสลักรับแรงเฉือนที่ตัวอย่างเสาเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างคาน 100 มิลลิเมตรที่ช่วงกลางของความยาวคานและ 50 มิลลิเมตรที่ด้านข้าง

ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ค่าการยุบตัว (slump) มีค่า 23.5 เซนติเมตร ขนาดมวลรวมหยาบสูงสุดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร ($\frac{3}{4}$ นิ้ว) เนื่องจากระยะช่องว่างระหว่างท่อนเหล็กกลวงและเหล็กรูปพรรณมีจำกัด ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตรจำนวน 3 ชิ้นงาน ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 28 วันเท่ากับ 22.55 (230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) รูปที่ 4.1 แสดงภาพจำลองภาพจำลองเหล็กรูปพรรณติดตั้งสลักรับแรงเฉือนที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ 4.2 แสดงภาพจำลองของสลักรับแรงเฉือน และรูปที่ 4.3 แสดงเหล็กกลวงและเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.1 ภาพจำลองเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบ (ติดสลักรับแรงเฉือน)



รูปที่ 4.2 ภาพจำลองสลักรับแรงเฉือน



รูปที่ 4.3 เหล็กกลวงและเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตผสมเสร็จ

Cement	Pozzolan	Water	Fine Agg	Course Agg	Admixture
Type I (kg)	F class (kg)	(liters)	(kg)	3/4 inch (kg)	Plasticizer & retarder
336	69	160	884	1050	1.29
fc' (28 day) = 22.55 MPa					

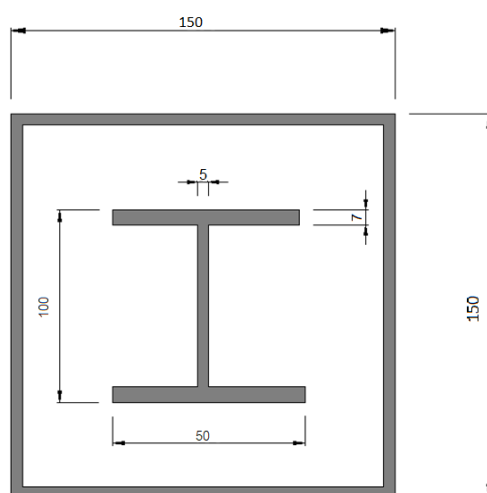
4.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tube คือ ท่อเหล็กกลวง สูง 450 มิลลิเมตร W100x50 คือเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช สูง 450 มิลลิเมตร Concrete มีขนาดหน้าตัด 150x150 มิลลิเมตร สูง 450 มิลลิเมตร ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 14 ตัวอย่าง มีหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นวัสดุผสมระหว่างคอนกรีตและเหล็ก ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีต (CFT) ตัวอย่างที่ 3 ถึงตัวอย่างที่ 14 เป็นหน้าตัดท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) โดยจะแบ่งเป็นเสาความสูง 450 มิลลิเมตร และคานความยาว 1500 มิลลิเมตร C1 คือเสาที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ C2 คือเสาที่รับแรงกระทำเอียงศูนย์ ขนาด 15 มิลลิเมตร C3 คือเสาที่รับแรงกระทำเอียงศูนย์ 30 มิลลิเมตร และ C4 คือคานรับแรงดัด ตัวอย่างที่ 3 ถึงตัวอย่างที่ 14 วงเล็บ A คือ ตัวอย่างทดสอบที่ติดสลักรับแรงเฉือนที่ปีกของเหล็กรูปพรรณ วงเล็บ B คือตัวอย่างทดสอบที่ไม่ติดสลักรับแรงเฉือนที่ปีกของเหล็กรูปพรรณ หมายเลข 1 และ 2 เป็นการทำชิ้นตัวอย่างซ้ำ

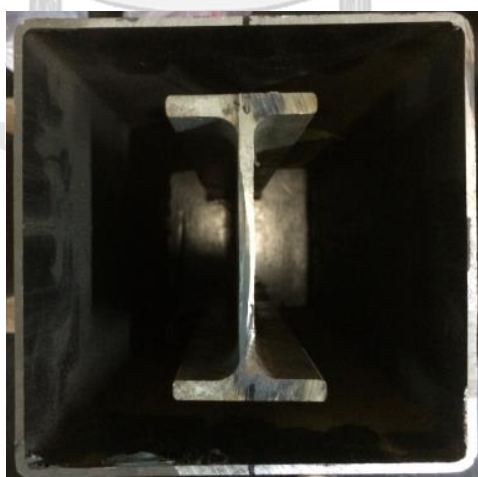
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง ที่	ชื่อตัวอย่างทดสอบ	(mm) เส้นผ่าศูนย์กลาง	เลขบวกลบเส้นผ่าศูนย์กลาง คาน้ำหนัก	ชนิดของวัสดุ	(mm) ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ของท่อ	(mm) ขนาดของท่อ ภายนอก
-	Tube	450	0	-	150x150x3.2	-
-	W100x50	450	0	-	-	100x50x7x5
-	Concrete-1	450	0	-	-	-
-	Concrete-2	450	0	-	-	-
1	CFT-1	450	0	-	150x150x3.2	-
2	CFT-2	450	0	-	150x150x3.2	-
3	C1(A)	450	0	มี	150x150x3.2	100x50x7x5
4	C1(B)-1	450	0	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
5	C1(B)-2	450	0	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
6	C2(A)	450	0.1	มี	150x150x3.2	100x50x7x5
7	C2(B)-1	450	0.1	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
8	C2(B)-2	450	0.1	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
9	C3(A)	450	0.2	มี	150x150x3.2	100x50x7x5
10	C3(B)-1	450	0.2	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
11	C3(B)-2	450	0.2	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
12	C4(A)	1500	-	มี	150x150x3.2	100x50x7x5
13	C4(B)-1	1500	-	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5
14	C4(B)-2	1500	-	ไม่มี	150x150x3.2	100x50x7x5

รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงภาพจำลองขนาดและภาพถ่ายหน้าตัดเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ ทำการเตรียมแบบหล่อซึ่งใช้ท่อเหล็กเป็นแบบ โดยทำการสวมเหล็กรูปพรรณที่กึ่งกลางของท่อเหล็ก กลวงวางยึดกับไม้แบบด้านล่างของท่อเหล็ก หลังจากเทคอนกรีต ทำการบ่มคอนกรีตด้วยพลาสติก เป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้กำลังคอนกรีตตามที่ต้องการ การทดสอบทั้งหมดทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Amsler 5000 กิโลนิวตัน ใช้ Load cell 500 ตันวัดกำลังรับแรงของตัวอย่าง ในการทดสอบให้แรงต่อเนื่องจนสิ้นสุดเมื่อแรงลดลงเหลือ ร้อยละ 80-90 จากกำลังรับแรงสูงสุด (peak load)



รูปที่ 4.4 ขนาดของหน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบ (มิลลิเมตร)



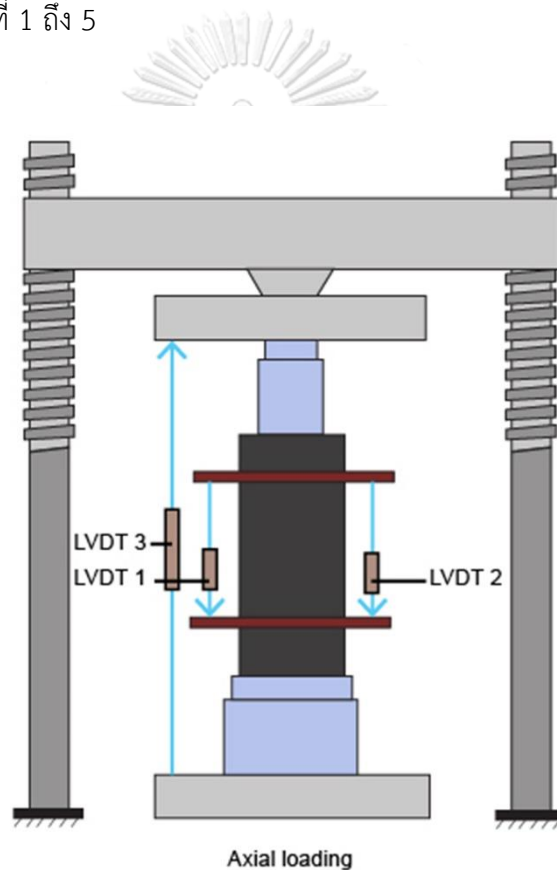
รูปที่ 4.5 หน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบ

4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (LVDT) ถูกติดตั้งเพื่อวัดค่าการเสียรูปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่างเสา และวัดค่าการโก่งตัวของตัวอย่างคาน

ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 1 ถึง 5 (เสารับแรงกระทำตรงศูนย์)

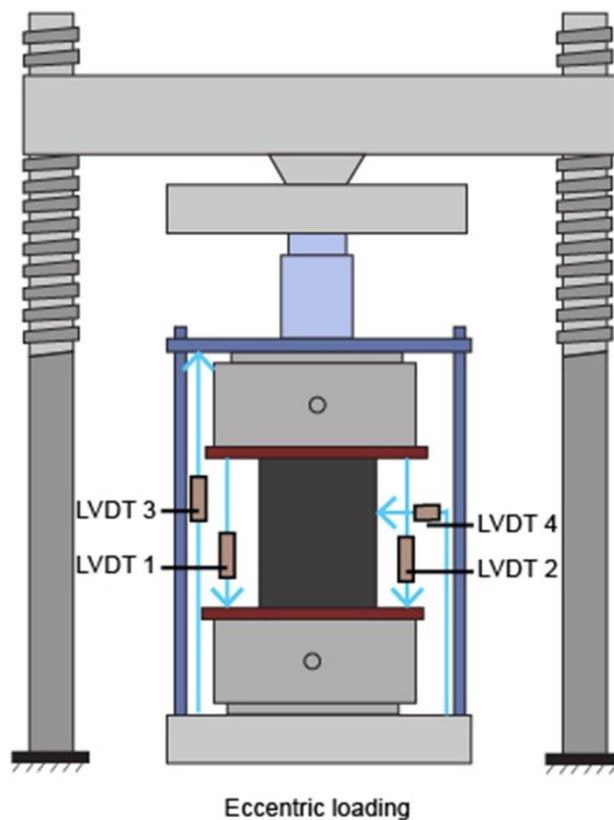
LVDT ทั้งหมด 3 ตัว จะถูกติดตั้งในการทดสอบเสาตัวอย่างทดสอบที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ติดที่ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ เพื่อวัดค่าการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ ตัวที่ 3 จะติดที่แผ่นด้านบนของเครื่องทดสอบ เพื่อวัด Head Speed รูปที่ 4.6 แสดงภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 4.6 ภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่าง C1 ถึง C5

ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 6 ถึง 11 (เสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์)

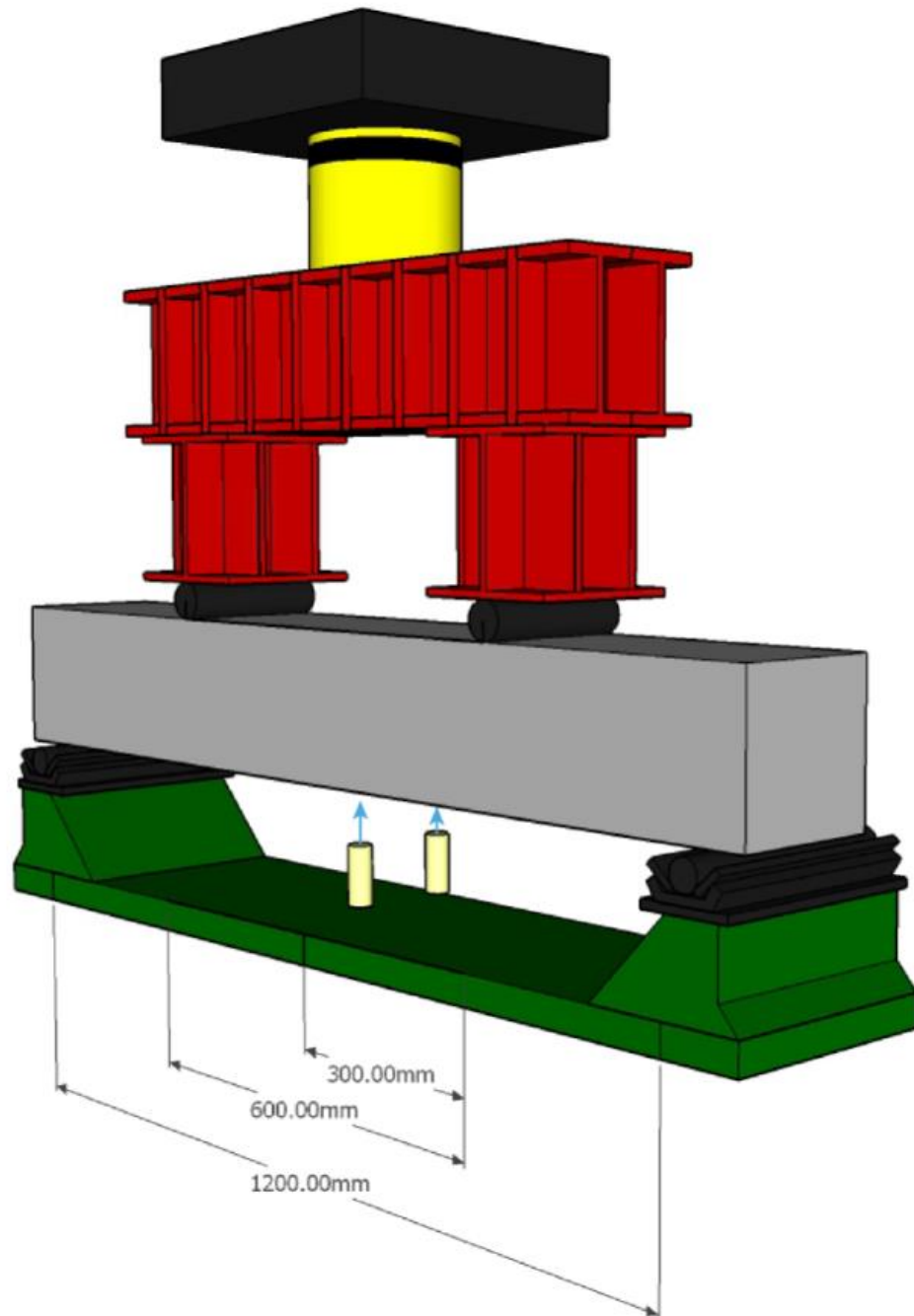
LVDT ทั้งหมด 4 ตัว จะถูกติดตั้งในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ติดที่ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ ตัวที่ 1 ติดด้านที่รับแรงดึงเพื่อวัดการขยายตัวของตัวอย่างทดสอบ ตัวที่ 2 ติดด้านที่รับแรงอัดเพื่อวัดการหดตัวของตัวอย่างทดสอบ ตัวที่ 3 จะติดที่บริเวณแผ่นด้านบนของหัวครอบ เพื่อวัด Head Speed ตัวที่ 4 ติดตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ด้านที่รับแรงดึง เพื่อหาการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 4.7 แสดงภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 6 ถึง 11



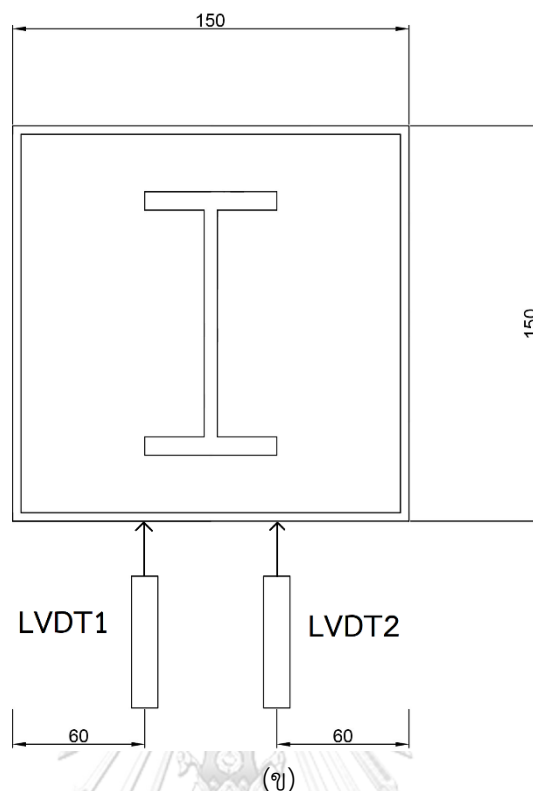
รูปที่ 4.7 ภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่าง C6 ถึง C11

ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 12 ถึง 14 (คาน)

LVDT ทั้งหมด 2 ตัว จะถูกติดตั้งในการทดสอบคานตัวอย่างรับแรงดัด ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ติดตั้งใต้คานบริเวณกึ่งกลางความยาวของคาน เพื่อวัดการโก่งตัวของคาน รูปที่ 4.8 แสดงภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่างที่ 12 ถึง 14 (ก) 3 มิติ (ข) 2 มิติ



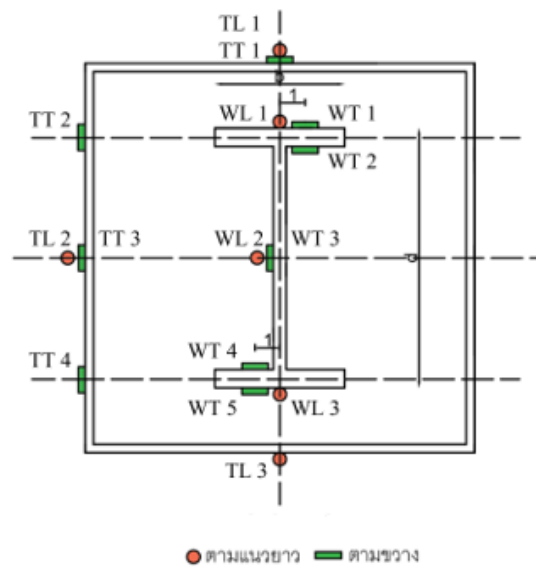
(ก)



รูปที่ 4.8 ภาพจำลองตำแหน่งติดตั้ง LVDT ของตัวอย่าง C12 ถึง C14 (ก) 3 มิติ (ข) 2 มิติ

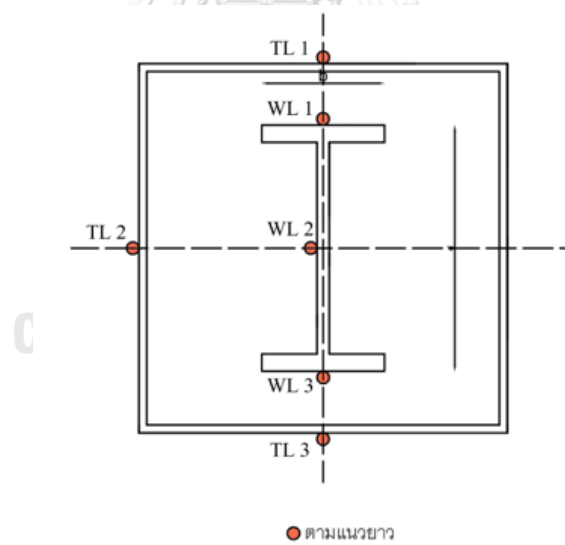
สเตรนเกจถูกติดตั้งเพื่อวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวอย่างเสาและตัวอย่างคาน โดยติดตั้งสเตรนเกจที่ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณภายใน ตำแหน่งของสเตรนเกจใช้อักษรย่อเป็นภาษาอังกฤษสองตัว อักษรภาษาอังกฤษตัวหน้า T และ W หมายถึง ท่อเหล็ก และเหล็กรูปพรรณ ภายในตามลำดับ อักษรภาษาอังกฤษตัวหลัง L และ T หมายถึง ติดตั้งตามแนวยาว และติดตั้งตามแนวขวางตามลำดับ หมายเลขด้านหลังอักษรภาษาอังกฤษหมายถึงลำดับที่ของสเตรนเกจ รูปที่ 4.9 ถึง 4.15 แสดงภาพจำลองตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจของตัวอย่างทดสอบ

ตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C1(A)



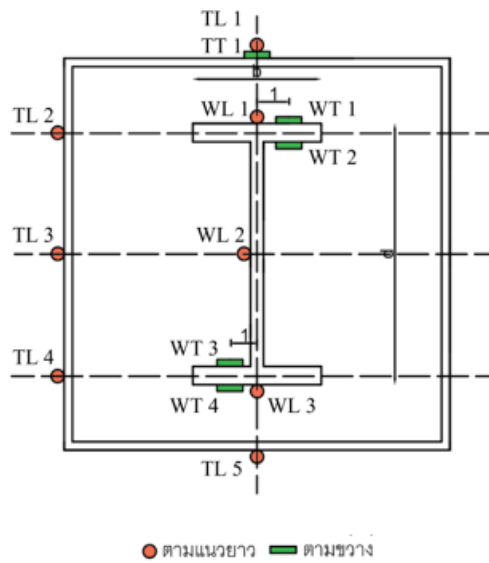
รูปที่ 4.9 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C1(A)

ตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C1(B)



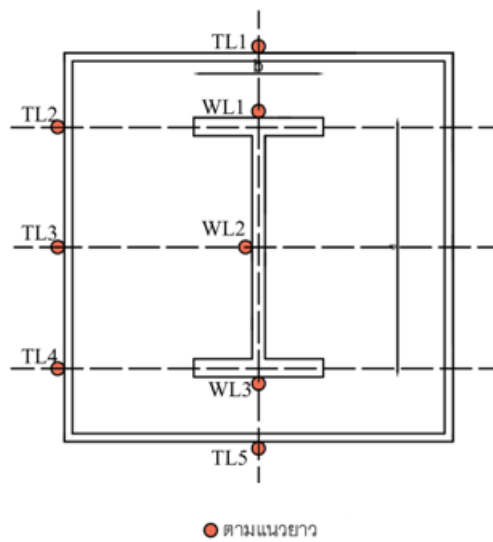
รูปที่ 4.10 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C1(B)

ตำแหน่งติดตั้งทรานเจกซ์ของตัวอย่าง C2(A) และ C3(A)



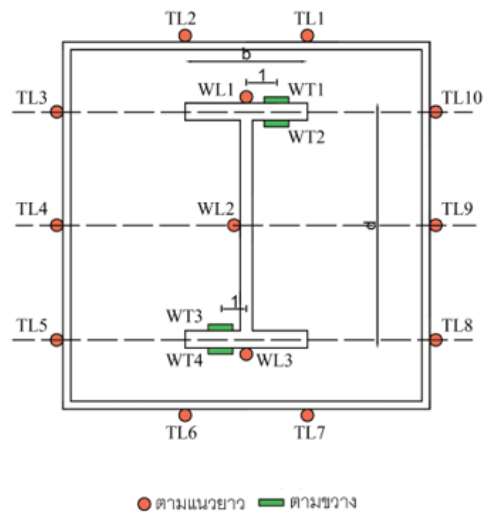
รูปที่ 4.11 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเจกซ์ของตัวอย่าง C2(A) และ C3(A)

ตำแหน่งติดตั้งทรานเจกซ์ของตัวอย่าง C2(B) และ C3(B)



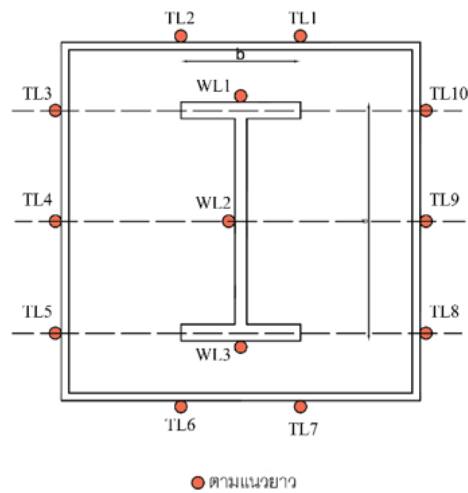
รูปที่ 4.12 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเจกซ์ของตัวอย่าง C2(B) และ C3(B)

ตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C4(A)



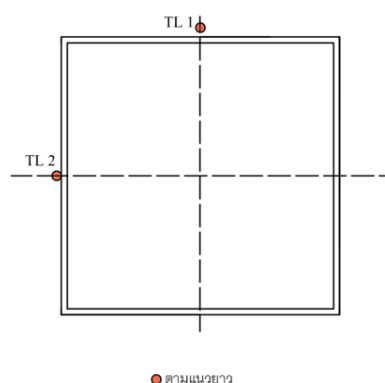
รูปที่ 4.13 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C4(A)

ตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C4(B)



รูปที่ 4.14 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งทรานเกจของตัวอย่าง C4(A)

ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ของตัวอย่าง CFT

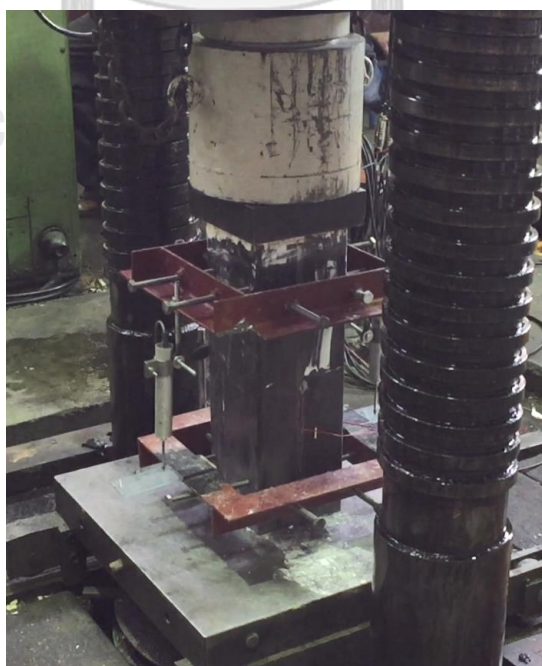


รูปที่ 4.15 ภาพจำลองแสดงตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ของตัวอย่าง CFT

4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ตัวอย่างที่ 1 ถึง 5 (เสารับแรงกระทำตรงศูนย์)

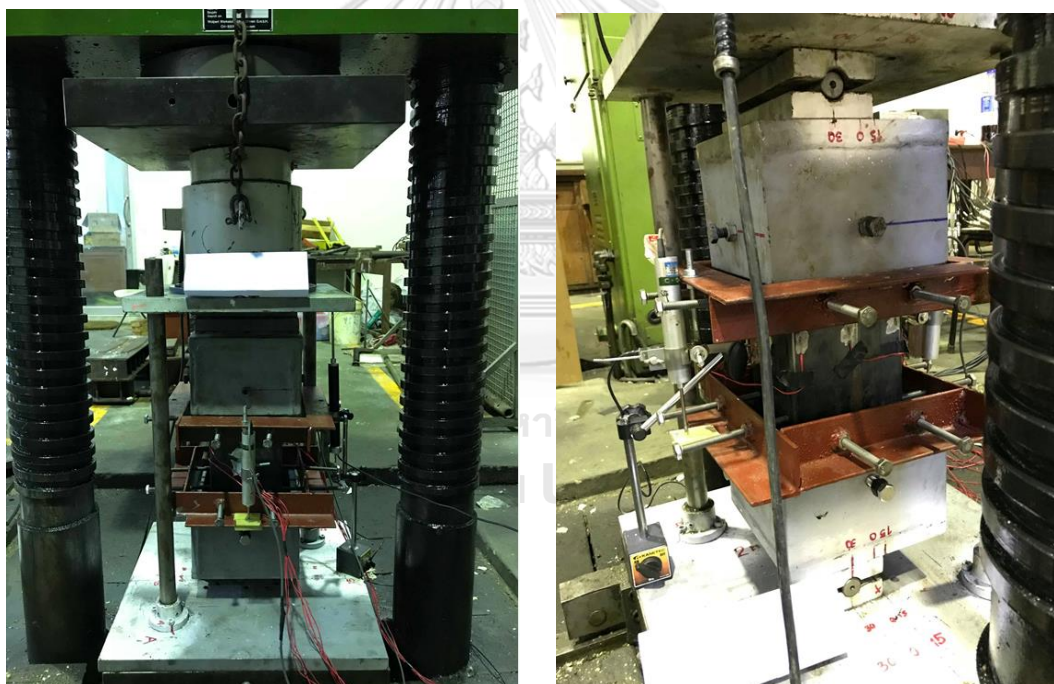
ตัวอย่าง 1 ถึง 5 เป็นการให้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ต่อเสาวัสดุผสม โดยตัวอย่างที่ 1 และ 2 เป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต ในขณะที่ตัวอย่างที่ 3, 4 และ 5 เป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามหัวข้อที่ 4.3 ในการทดสอบให้แรงต่อเนื่องจนสิ้นสุดเมื่อแรงลดลงเหลือ ร้อยละ 80 ถึง 90 จากจุดรับแรงสูงสุด ภาพที่ 4.16 แสดงภาพการทดสอบเสาวัสดุผสมรับแรงกระทำตรงศูนย์



รูปที่ 4.16 การทดสอบตัวอย่างเสารับแรงกระทำตรงศูนย์

ตัวอย่างที่ 6 ถึง 11 (เสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง)

ตัวอย่างที่ 6 ถึง 11 เป็นการให้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางต่อเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามหัวข้อที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวอย่างเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางเป็นกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 186x186 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกำลังสูงใช้สวมกับตัวอย่างทดสอบ มีสลักชั้นบริเวณรอบกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อยึดตัวอย่างทดสอบ แผ่นเหล็กหนา 25 มิลลิเมตร ติดกับกล่องสี่เหลี่ยมด้านล่างและบน ทำร่องเพื่อให้แรงกระทำเยื้องจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะ 15 และ 30 มิลลิเมตร ประทับกับแผ่นเหล็กหนา 25 มิลลิเมตร โดยมีเหล็กหน้าตัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร วางบริเวณร่องเพื่อถ่ายแรงลงสู่ชิ้นงาน ในการทดสอบให้แรงต่อเนื่องจนสิ้นสุดเมื่อแรงลดลงเหลือ ร้อยละ 80 ถึง 90 จากจุดรับแรงสูงสุด ภาพที่ 4.17 แสดงภาพการทดสอบเสาวัสดุผสมรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง



รูปที่ 4.17 การทดสอบตัวอย่างเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

ตัวอย่างที่ 12 ถึง 14 (คาน)

ตัวอย่างที่ 12 ถึงที่ 14 เป็นการให้แรงดัดแก่คานท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามหัวข้อที่ 4.3 ทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four point bending) ระยะจากจุดให้แรงจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 เท่ากับ 300 มิลลิเมตร จุดที่ 2 ถึงจุดที่ 3 เท่ากับ 600 มิลลิเมตร และจุดที่ 3 ถึงจุดที่ 4 เท่ากับ 300 มิลลิเมตร ในการทดสอบให้แรงต่อเนื่องจนสิ้นสุด เมื่อแรงลดลงเหลือ ร้อยละ 80 ถึง 90 จากจุดรับแรงสูงสุด ภาพที่ 4.18 แสดงภาพการทดสอบคาน วัสดุผสมรับแรงดัด



รูปที่ 4.18 การทดสอบตัวอย่างคานรับแรงดัด

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ และคานเหล็กเติมคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัด โดยแสดงกำลังรับแรงอัดและแรงดัด พฤติกรรมในการรับแรงและการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ และตรวจสอบความเหมาะสมของการประยุกต์สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐาน AISC360-16 และ Eurocode4 รายละเอียดการศึกษามีดังนี้

5.1 พฤติกรรมรับแรงอัดและแรงดัดของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจำนวน 14 ตัวอย่าง เสาตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์แสดงค่ากำลังรับแรงอัดเพียงอย่างเดียว เสาตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์แสดงค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัด โดยค่ากำลังรับแรงดัดได้จากการนำค่ากำลังรับแรงอัดคูณด้วยระยะเยื้องศูนย์ และคานตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้แรงดัดแสดงค่ากำลังรับแรงดัดเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบเสาและคาน

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)	กำลังรับแรงดัดสูงสุด (กิโลนิวตัน-เมตร)
1	CFT-1	1104.6	-
2	CFT-2	1208.3	-
3	C1(A)	1718.6	-
4	C1(B)-1	1611.0	-
5	C1(B)-2	1606.0	-
6	C2(A)	1503.4	22.5
7	C2(B)-1	1407.3	21.1
8	C2(B)-2	1471.5	22.1
9	C3(A)	1195.6	35.9
10	C3(B)-1	1030.4	30.9
11	C3(B)-2	1182.8	35.5
12	C4(A)	-	76.0
13	C4(B)-1	-	77.1
14	C4(B)-2	-	75.1

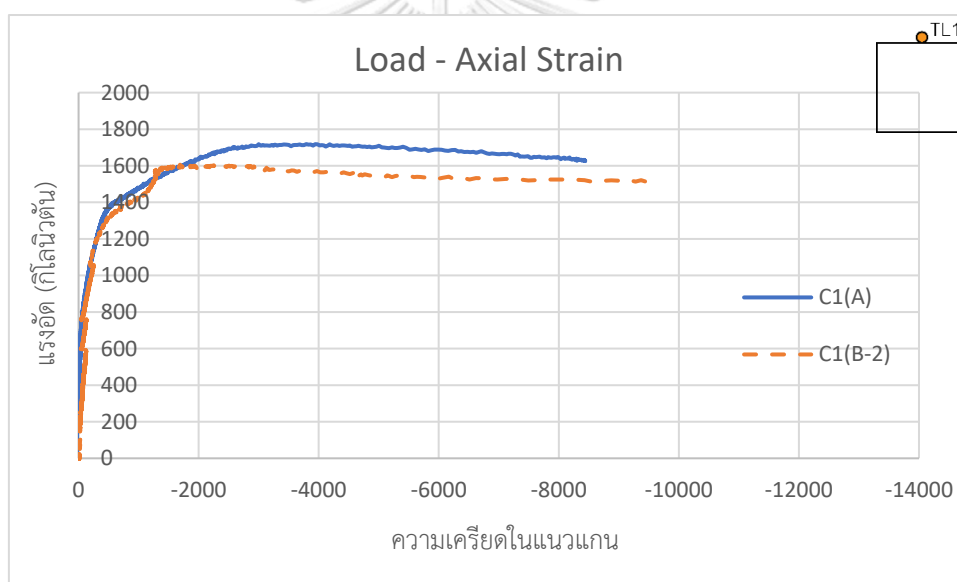
* หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 10 ทำการทดสอบขณะหัวครอบรับแรงเยื้องศูนย์ไม่สมบูรณ์

จากตารางที่ 5.1 พบว่าการเสริมเหล็กรูปพรรณของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ จะทำให้เสาที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ (C1) มีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นโดยเฉลี่ย ร้อยละ 42.26 เมื่อเทียบกับเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFT)

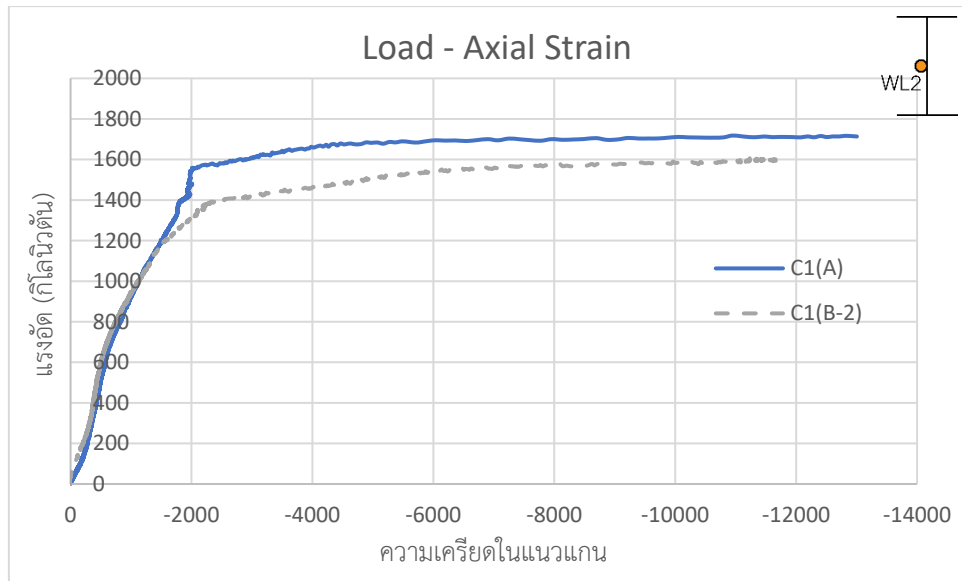
เมื่อระยะที่แรงกระทำต่อเสาห่างจากจุดศูนย์ถ่วงเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาลดลง โดย C1 (A) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1718.6 กิโลนิวตัน C2(A) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตรติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1503.4 กิโลนิวตัน C3(A) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 30 มิลลิเมตรมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1195.6 กิโลนิวตัน กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนลดลงร้อยละ 14.31 เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และร้อยละ 43.74 เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 30 มิลลิเมตร C1(B) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1608.5 กิโลนิวตัน C2(B) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์

15 มิลลิเมตรไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1439.4 กิโลนิวตัน C3 (B) คือตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 30 มิลลิเมตรไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1106.6 กิโลนิวตัน กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนลดลงร้อยละ 11.75 เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และร้อยละ 45.35 เมื่อรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 30 มิลลิเมตร

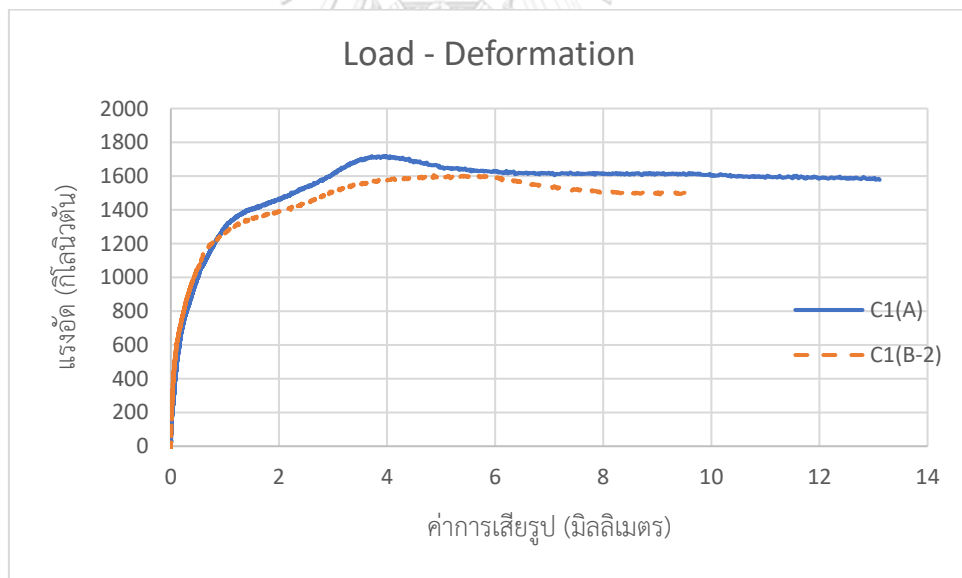
การติดตั้งสลักรับแรงเฉือนในเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้มากขึ้นทั้งตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์และตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ โดยกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่รับแรงกระทำตรงศูนย์เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.01 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.83 และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 30 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.03



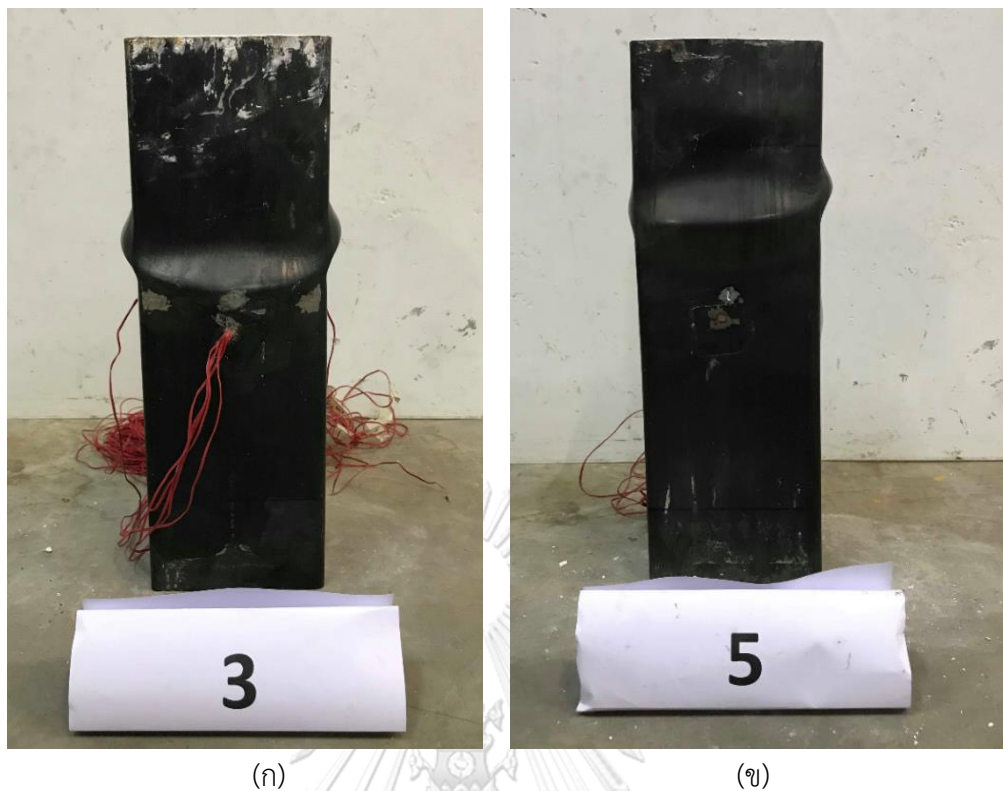
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ต่อเหล็กของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่เหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์

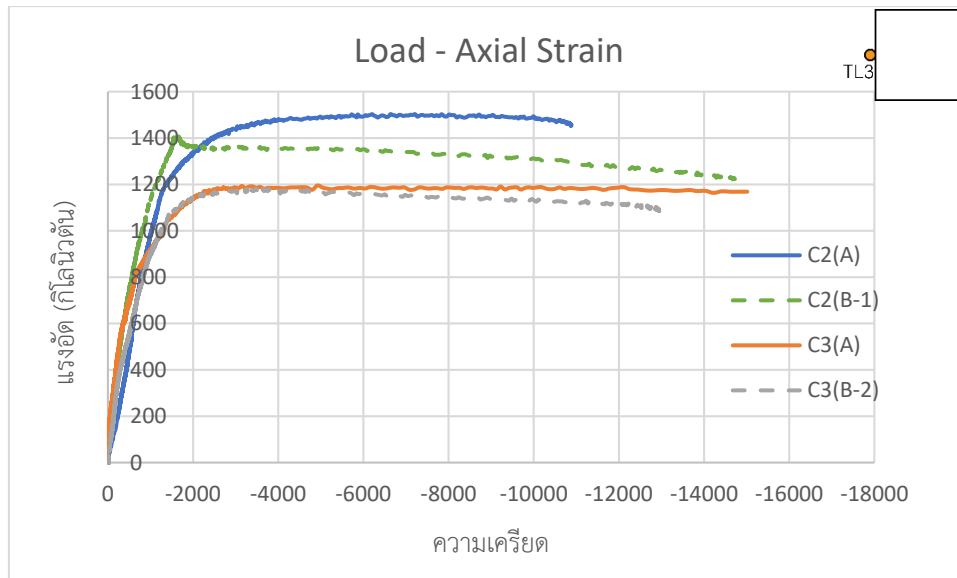


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์

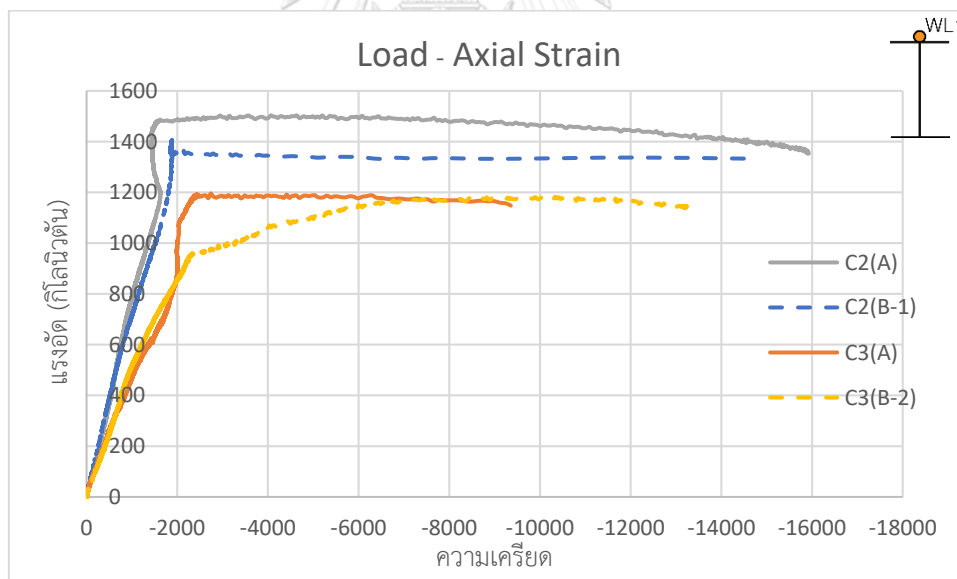


รูปที่ 5.4 รูปการวิบัติของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์หลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน

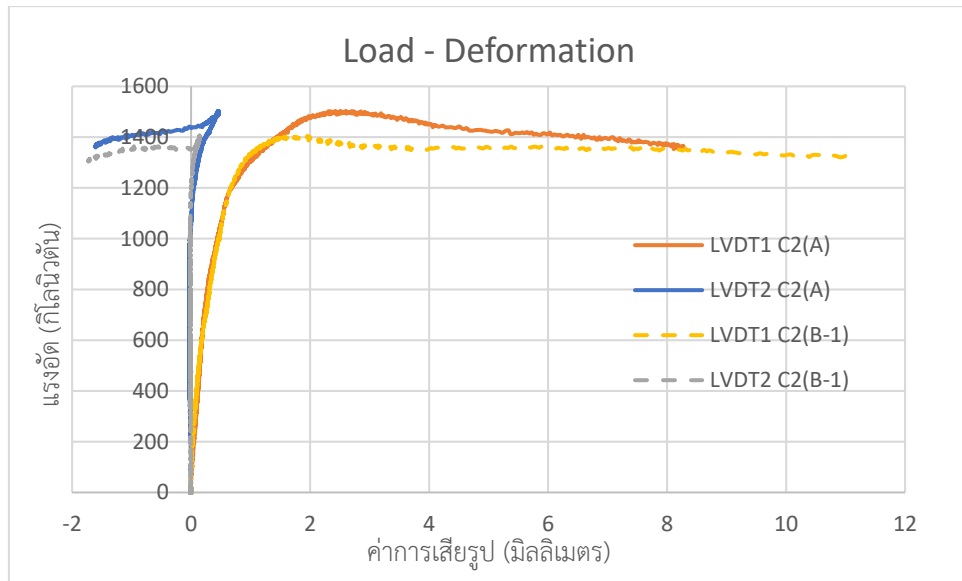
รูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำตรงศูนย์ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างเสาที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีกำลังรับแรงอัด และกำลังที่จุดครากมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนเล็กน้อย รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำตรงศูนย์พบว่าค่าสตีเฟนของตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจะเกิดการเสียรูปที่แรงกระทำสูงสุดต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน รูปที่ 5.4 แสดงรูปการวิบัติของตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์หลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนหลังจากการทดสอบพบว่าเสาดตัวอย่างทั้งสองรูปแบบเกิดการวิบัติด้วยแรงอัดโดยจะเกิดการโก่งเดาะที่บริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของท่อเหล็ก



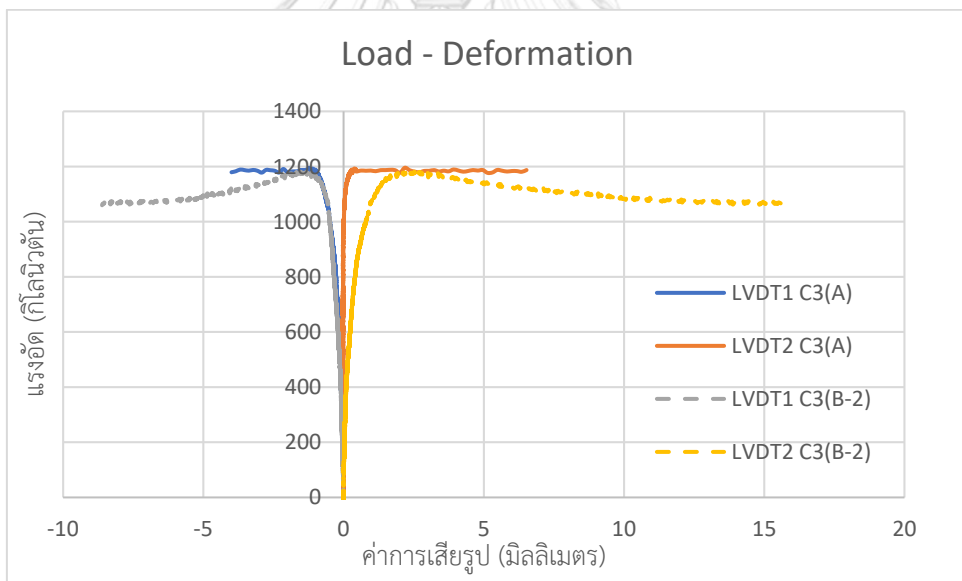
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ต่อเหล็กของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร



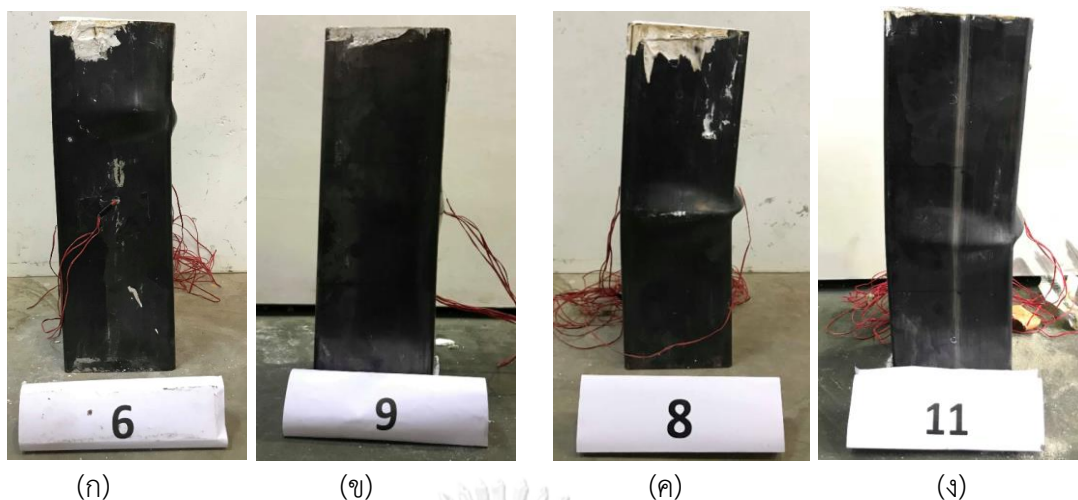
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่เหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสา
รับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

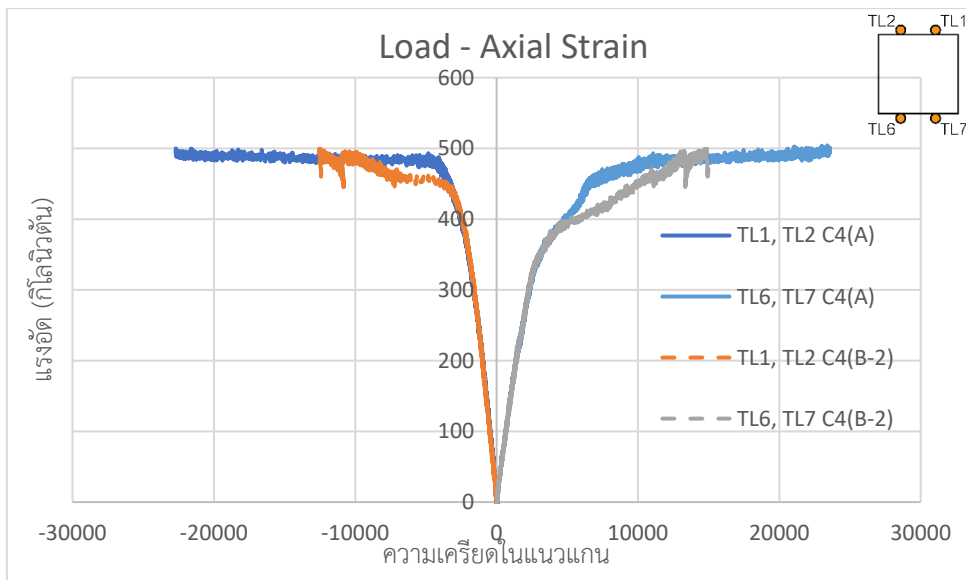


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสา
รับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

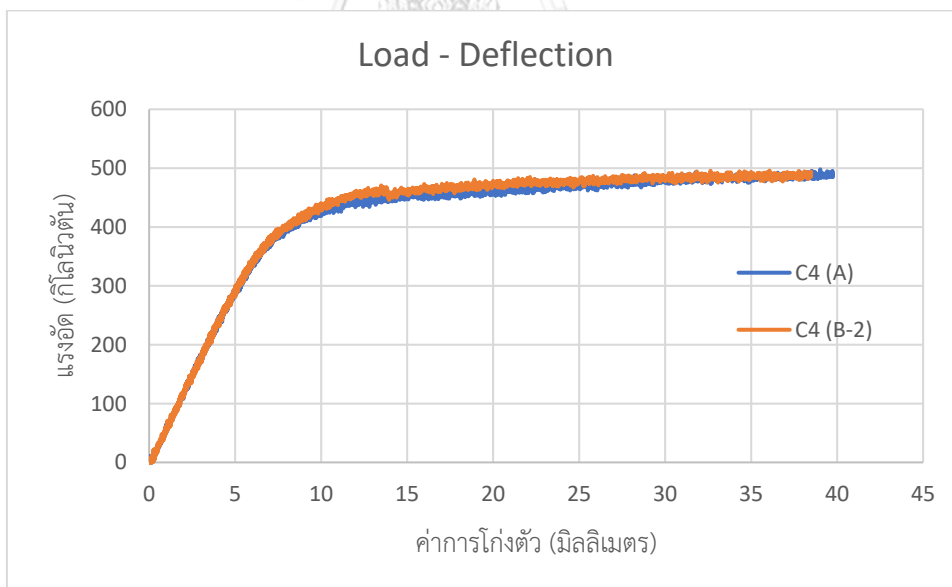


รูปที่ 5.9 รูปการณวิบัติเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์หลังการทดสอบ (ก) 15 มิลลิเมตร ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) 15 มิลลิเมตร ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ค) 30 มิลลิเมตร ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ง) 30 มิลลิเมตร ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของท่อเหล็กของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของท่อเหล็กรูปพรรณของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร รูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวจาก LVDT ของตัวอย่างทดสอบเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยค่าการหดตัวที่มีค่าบวกหมายถึงด้านที่รับแรงอัด ค่าการหดตัวที่มีค่าลบหมายถึงด้านที่รับแรงดึง พบว่าค่าสตีเฟนสมิแวนโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน โดยตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจะมีกำลังรับแรงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน เกิดแรงอัดที่ด้านแรงกระทำเยื้องศูนย์และแรงดึงที่ด้านตรงข้าม โดยที่ตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีแวนโน้มค่าการเสียรูปสูงกว่าตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจากค่าการหดตัวจาก LVDT ที่มากกว่า รูปที่ 5.9 แสดงรูปการวิบัติของตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์หลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน 15 มิลลิเมตร (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน 15 มิลลิเมตร (ค) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน 30 มิลลิเมตร (ง) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน 30 มิลลิเมตร หลังจากการทดสอบ พบว่า เสาตัวอย่างจะดัดโค้งไปด้านที่รับแรงอัด โดยเสาตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจะเกิดการโก่งเดาะเล็กน้อยบริเวณท่อเหล็ก เสาตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจะเกิดการโก่งเดาะบริเวณกึ่งกลางความสูงของเสาและเสาตัวอย่างดัดโค้งอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของที่ท่อเหล็กของตัวอย่างคานทดสอบรับแรงดัด



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการโก่งตัวของตัวอย่างคานทดสอบรับแรงดัด



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.12 รูปการวิบัติคานท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงดัดหลังการทดสอบ

(ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน

รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนที่ท่อเหล็ก ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างทดสอบคานรับแรงดัด พบว่าหน้าตัดคานด้านล่างรับกำลังดึงและจะเกิดการครากก่อนหน้าตัดคานด้านบนที่รับกำลังอัดทั้งตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนและตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าการโก่งตัวของ ตัวอย่างคานรับแรงดัด พบว่าคานที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนจะเกิดการครากที่ค่าการโก่งตัวเดียวกัน โดยตัวอย่างที่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนคานจะมีค่าดัชนีความเหนียว (อัตราส่วนค่าโก่งตัวสูงสุดต่อค่าโก่งตัวที่จุดคราก) เท่ากับ 5.68 ค่าการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 39.02 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือนมีค่าดัชนีความเหนียวเท่ากับ 5.47 ค่าการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 38.30 มิลลิเมตร รูปที่ 5.12 แสดงรูปการวิบัติตัวอย่างคานท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงดัดหลังการทดสอบ (ก) ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน (ข) ไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน หลังการทดสอบพบว่าคานวิบัติด้วยแรงดัด โดยเกิดการเสียรูปบริเวณจุดรองรับแรงกระทำ

จากการทดสอบพบว่า การเสริมเหล็กรูปพรรณในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจะทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น กำลังรับแรงอัดของเสาจะมากที่สุดเมื่อรับแรงกระทำตรงศูนย์ โดยจะน้อยลงเมื่อระยะของแรงกระทำเอียงศูนย์เพิ่มขึ้น และการติดตั้งสลักรับแรงเฉือนในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะช่วยลดการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์

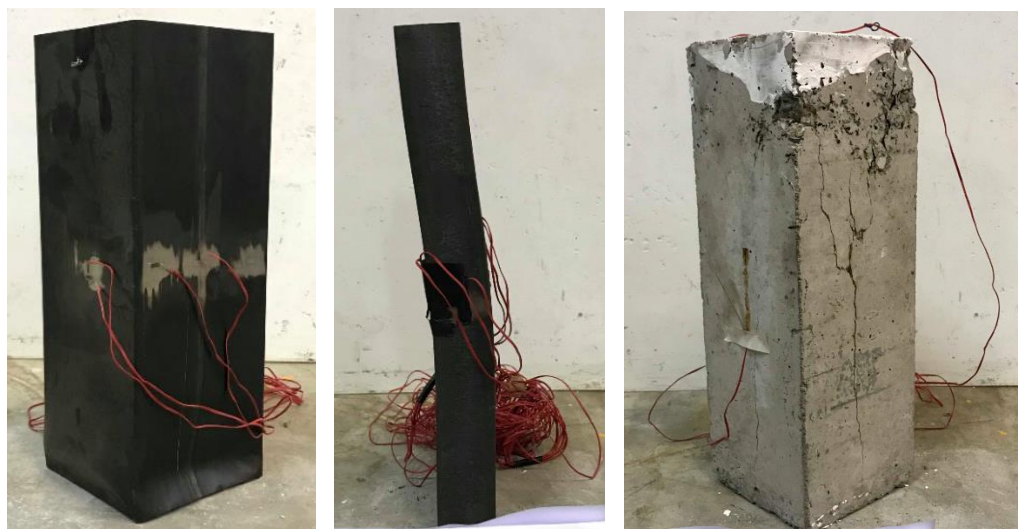
5.2 ประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสม

การถูกโอบรัดตัวของคอนกรีตเกิดจากคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อเหล็กเกิดการขยายตัวด้านข้าง เมื่อมีการหดตัวทางแนวแกนแต่ไม่สามารถขยายตัวได้เนื่องจากการโอบรัดของท่อเหล็ก จึงทำให้คอนกรีตบริเวณดังกล่าวมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนสูงกว่าคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว โดยในหัวข้อนี้จะศึกษาประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสมเมื่อนำมารวมเป็นเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

ตารางที่ 5.2 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ วัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณด้วยแรงกระทำตรงศูนย์ ได้แก่ ท่อเหล็กกลวงและคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 150x150 มิลลิเมตร สูง 450 มิลลิเมตร และเหล็กรูปพรรณรูปตัวเอช (H) ขนาดหน้าตัด 100x50 มิลลิเมตร สูง 450 มิลลิเมตร รูปที่ 5.4 แสดงภาพการวิบัติของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต หลังการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 การวิบัติของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ, และคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (กิโลนิวตัน)	ค่ากำลังรับแรงอัดจากการคำนวณ (กิโลนิวตัน)
Tube	446.0	786.2
W100x50	477.9	519.0
Concrete	580.4	475.2
รวม	1504.3	1780.4



รูปที่ 5.13 ท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต หลังการทดสอบ

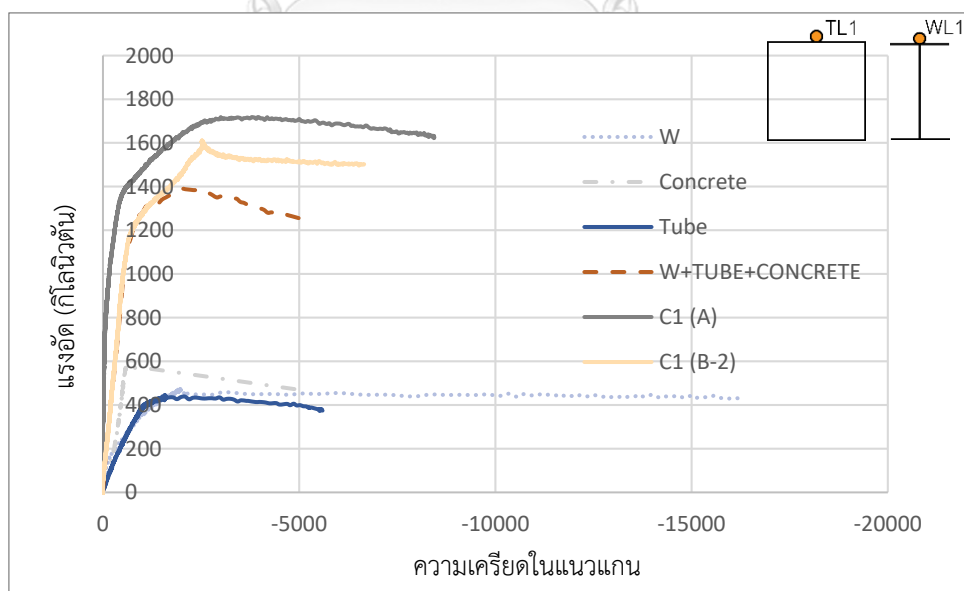
เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต กับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ (ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน) โดยนำกำลังรับแรงอัดสูงสุดของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต มารวมกันได้ค่าแรงอัดเท่ากับ 1504.3 กิโลนิวตัน ซึ่งต่ำกว่ากำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ โดยตารางที่ 5.3 แสดงอัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ กับผลรวมแรงอัดสูงสุดของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต

ตารางที่ 5.3 อัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำตรงศูนย์ กับผลรวมแรงอัดของส่วนประกอบเสาตัวอย่างทดสอบ

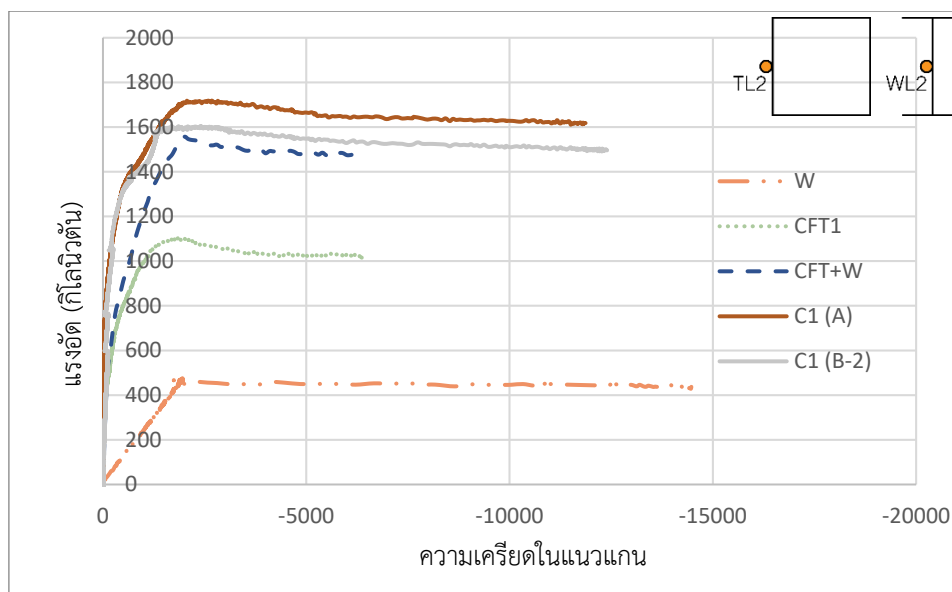
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)	ชื่อตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)	อัตราส่วน
C1 (A)	1718.6	ผลรวมกำลังของ ท่อเหล็ก, เหล็ก รูปพรรณ และ คอนกรีต	1504.3	1.14
C1(B-1)	1611			1.04
C1(B-2)	1606			1.03
ผลเฉลี่ย				1.07

จากการเปรียบเทียบหาอัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำตรงศูนย์ กับผลรวมของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต พบว่าเมื่อนำส่วนประกอบของเสาตัวอย่างทดสอบมารวมเป็นเสาตัวอย่างทดสอบจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีประสิทธิภาพมากขึ้นเล็กน้อย โดยผลเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์กับผลรวมของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต เท่ากับ 1.07

รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบตำแหน่ง TL1 ของตัวอย่างท่อเหล็ก , คอนกรีต และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน) และที่ตำแหน่ง WL1 ของตัวอย่างเหล็กรูปพรรณ ค่าความเครียดสูงสุดของผลรวมของท่อเหล็ก, เหล็กรูปพรรณและคอนกรีต สิ้นสุดที่ค่าเท่ากับค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีต รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่ง TL2 ของตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน) และที่ตำแหน่ง WL2 ของตัวอย่างเหล็กรูปพรรณ ค่าความเครียดสูงสุดของผลรวมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณสิ้นสุดที่ค่าเท่ากับค่าความเครียดสูงสุดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต



รูปที่ 5.14 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต, ท่อเหล็ก, เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ, และผลรวมของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีตและท่อเหล็ก



รูปที่ 5.15 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ, เสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีต, เสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ, และผลรวมของเหล็กรูปพรรณร่วมกับเสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 พบว่าเสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (ติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน) มีค่ากำลังรับแรงมากกว่าผลรวมของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีต และท่อเหล็ก และผลรวมของเสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณ เนื่องจากการรวมกันของเสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณทำให้คอนกรีตถูกโอบรัดจากเสาคเหล็กและเหล็กรูปพรรณภายในและเกิดการยึดเหนี่ยวของวัสดุ จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงและความเหนียวสูงขึ้น โดยผลรวมของเสาคเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณมีค่ามากกว่าผลรวมของเหล็กรูปพรรณ, คอนกรีตและท่อเหล็ก

5.3 การประยุกต์ใช้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐานการออกแบบ AISC 360-16 และ Eurocode4

การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากการทดสอบจะแสดงค่าจุด 4 จุด จากเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ 15 และ 30 มิลลิเมตร และคานท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงดัด โดยแรงดัดของจุดที่รับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน คำนวณจากค่ากำลังรับแรงอัดคูณด้วยระยะเอียงศูนย์

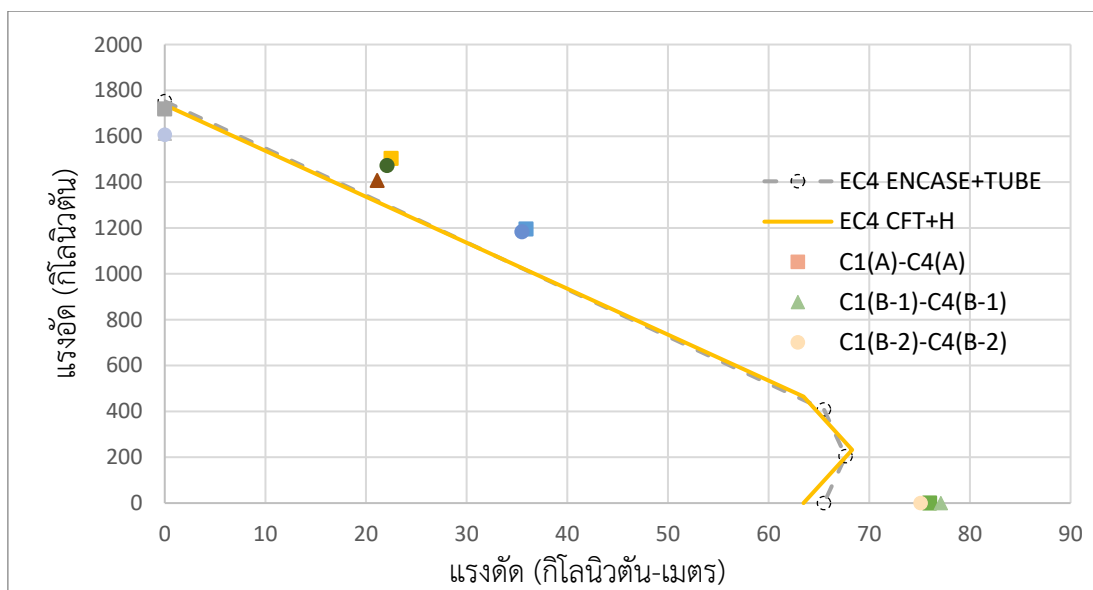
ในปัจจุบันหน้าตัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณนั้นไม่มีสูตรการคำนวณหาค่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดโดยตรง นายธนวัฒน์ อ้นถาวร [8] (2016) ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดวงกลมรับแรงกระทำเอียงศูนย์ ประยุกต์วิธีสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัด โดยคำนวณจากสูตรการคำนวณตามมาตรฐาน Eurocode4 และ AISC360-16 ด้วยการนำเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ โดยนำกำลังในแต่ละจุดที่ได้จากสูตรการหาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต รวมกับกำลังในแต่ละจุดที่ได้จากสูตรการหาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยที่ไม่คิดกำลังของคอนกรีต และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กโดยนำกำลังในแต่ละจุดที่ได้จากการสูตรการหาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับกำลังในแต่ละจุดที่ได้จากการหาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตโดยไม่คิดกำลังของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.58 และ 2.59 ได้เส้นที่ลากเชื่อมจุด 4 จุด เป็นเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของหน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ตารางที่ 5.4 และ 5.5 แสดงผลการคำนวณค่าในแต่ละจุดของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ทั้งกำลังรับแรงอัดและแรงดัดด้วยมาตรฐาน Eurocode4 และ AISC360-16 ตามลำดับ จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมจุด 4 จุด เปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของการใช้สมการดังแสดงในรูปที่ 5.16 และ 5.17

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณค่าในแต่ละจุดของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดด้วย
มาตรฐาน Eucocode4

เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ				
จุด	A	C	D	B
แรงอัด (กิโลนิวตัน)	1736.87	465.00	232.50	0
แรงดัด (กิโลนิวตัน-เมตร)	0	63.46	68.30	63.46
เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก				
จุด	A	C	D	B
แรงอัด (กิโลนิวตัน)	1752.52	408.55	204.28	0
แรงดัด (กิโลนิวตัน-เมตร)	0	65.50	67.64	65.5

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณค่าในแต่ละจุดของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดด้วย
มาตรฐาน AISC 360-16

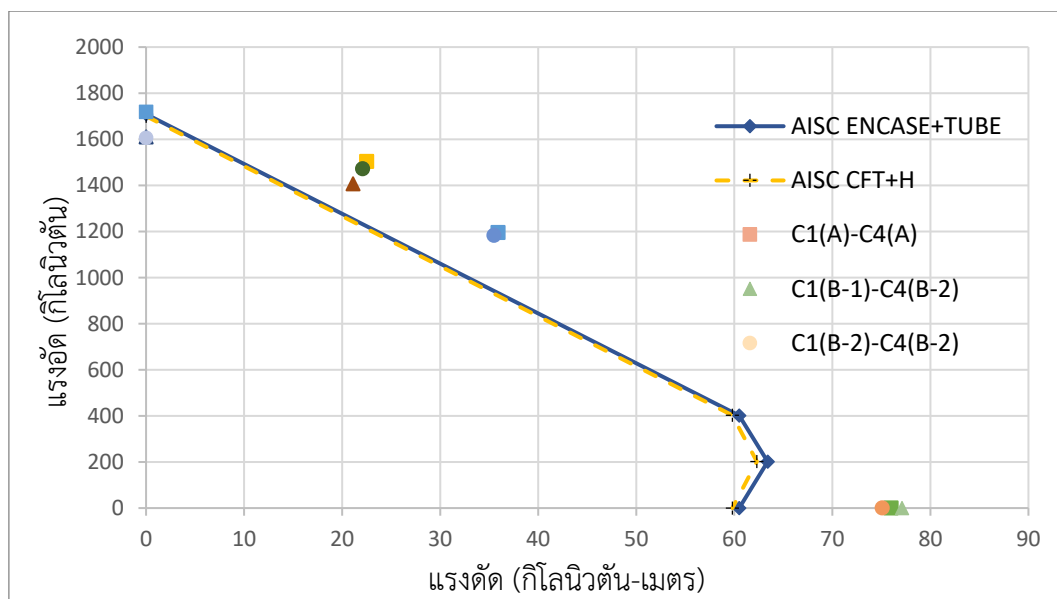
เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ				
จุด	A	C	D	B
แรงอัด (กิโลนิวตัน)	1700.23	403.00	201.70	0
แรงดัด (กิโลนิวตัน-เมตร)	0	59.80	62.30	59.80
เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก				
จุด	A	C	D	B
แรงอัด (กิโลนิวตัน)	1709.20	401.30	201.40	0
แรงดัด (กิโลนิวตัน-เมตร)	0	60.50	63.40	60.50



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของที่คำนวณได้จากมาตรฐาน Eurocode4 กับผลการทดสอบ

*EC4 ENCASE+TUBE คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของท่อเหล็กกลางตามมาตรฐาน Eurocode4

*EC4 CFT+H เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ (รูปตัว เอช) ตามมาตรฐาน Eurocode4



รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของที่คำนวณได้จากมาตรฐาน AISC 360-16 กับผลการทดสอบ

*AISC ENCASE+TUBE คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของท่อเหล็กกลางตามมาตรฐาน AISC 360-16

*AISC CFT+H เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ (รูปตัว เอช) ตามมาตรฐาน AISC 360-16

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด พบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ประยุกต์ใช้สมการออกแบบคำนวณจากมาตรฐาน AISC 360-16 และ Eurocode4 โดยการรวมกันของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (ENCASE+TUBE) และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (CFT+H) มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยกำลังรับแรงอัดจะใกล้เคียงมากกว่ากำลังรับแรงดัด ตารางที่ 5.6 ถึง 5.9 แสดงอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการออกแบบคำนวณจากมาตรฐาน AISC 360-16 และ Eurocode4 ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ พบว่าการประยุกต์ใช้สมการออกแบบจากมาตรฐาน AISC 360-16 ด้วยวิธีการนำเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด โดยผลเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากสมการออกแบบต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบเท่ากับ 1.03 ในขณะที่การประยุกต์ใช้สมการออกแบบจากมาตรฐาน Eurocode4 ด้วยวิธีการนำเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดที่สุด โดยผลเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากสมการออกแบบต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบเท่ากับ 1.07 การประยุกต์ใช้สมการออกแบบจากมาตรฐาน AISC 360-16 ด้วยวิธีการเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดและใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด โดยผลเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากสมการออกแบบต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบเท่ากับ 0.89

ตารางที่ 5.6 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาต่อเหล็กเสริมคอนกรีตรวมกับเหล็กgrupพรรณ (CFT+H) จากมาตรฐาน Eurocode4 ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดจาก Eurocode4	กำลังรับแรงอัดจากการทดสอบ	อัตราส่วน
C1(A)	1736.87	1718.6	1.01
C1(B-1)		1611	1.08
C1(B-2)		1606	1.08
ผลเฉลี่ย			1.06
ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัดจาก Eurocode4	กำลังรับแรงดัดจากการทดสอบ	อัตราส่วน
C4(A)	63.46	76	0.83
C4(B-1)		77.1	0.82
C4(B-2)		75.1	0.84
ผลเฉลี่ย			0.83

ตารางที่ 5.7 อัตราส่วนระหว่างกับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก (ENCASE+TUBE) จากมาตรฐาน Eurocode4 ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดจาก Eurocode4	กำลังรับแรงอัดจากการทดสอบ	อัตราส่วน
C1(A)	1752.52	1718.6	1.02
C1(B-1)		1611	1.09
C1(B-2)		1606	1.09
ผลเฉลี่ย			1.07
ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัดจาก Eurocode4	กำลังรับแรงดัดจากการทดสอบ	อัตราส่วน
C4(A)	65.50	76	0.86
C4(B-1)		77.1	0.85
C4(B-2)		75.1	0.87
ผลเฉลี่ย			0.86

ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนระหว่างกับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาต่อเหล็กเติมคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (CFT+H) จากมาตรฐาน AISC 360-16 ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดจาก AISC 360-16	กำลังรับแรงอัดจาก การทดสอบ	อัตราส่วน
C1(A)	1700.23	1718.6	0.99
C1(B-1)		1611	1.05
C1(B-2)		1606	1.06
ผลเฉลี่ย			1.03
ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัดจาก AISC 360-16	กำลังรับแรงดัดจาก การทดสอบ	อัตราส่วน
C4(A)	59.80	76	0.79
C4(B-1)		77.1	0.78
C4(B-2)		75.1	0.80
ผลเฉลี่ย			0.79

ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก (ENCASE+TUBE) จากมาตรฐาน AISC 360-16 ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดจาก AISC 360-16	กำลังรับแรงอัดจาก การทดสอบ	อัตราส่วน
C1(A)	1709.2	1718.6	0.99
C1(B-1)		1611	1.06
C1(B-2)		1606	1.06
ผลเฉลี่ย			1.04
ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัดจาก AISC 360-16	กำลังรับแรงดัดจาก การทดสอบ	อัตราส่วน
C4(A)	60.5	76	0.80
C4(B-1)		77	0.78
C4(B-2)		75	0.81
ผลเฉลี่ย			0.80

ตารางที่ 5.6 ถึง 5.9 แสดงอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ได้จากการรวมกำลังของหน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ (CFT+H) และหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก (ENCASE+TUBE) ที่ประยุกต์ใช้สูตรจากมาตรฐาน AISC 360-16 และ Eurocode4 ในการคำนวณ ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงสุดจากผลการทดสอบ พบว่าผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการจากมาตรฐานข้างต้นมีกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ แต่ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการจากมาตรฐานข้างต้นบางส่วนมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบ ในขณะที่ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการจากมาตรฐานข้างต้นนั้นมีกำลังรับแรงดัดที่น้อยกว่าผลที่ได้จากการทดสอบทุกชิ้นงาน โดยการประยุกต์ใช้สมการออกแบบจากมาตรฐาน AISC 360-16 ด้วยวิธีการนำเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด ในขณะที่การประยุกต์ใช้สมการออกแบบจากมาตรฐาน AISC 360-16 ด้วยวิธีการนำเสาเหล็กหุ้มคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การประยุกต์ใช้สูตรจากมาตรฐาน AISC 360-16 และ Eurocode4 ในการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดนั้นไม่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

เสาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นการรวมคุณสมบัติเด่นของวัสดุเหล็กและคอนกรีต มีกำลังรับแรงและความเหนียวสูง และเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่โครงสร้างมากขึ้น ในปัจจุบันงานวิจัยที่ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงเยื้องศูนย์ มีอยู่จำนวนจำกัด งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ ได้แก่ การติดตั้งและไม่ติดตั้งสลักรับแรงเฉือน และระยะเยื้องศูนย์ (0, 15, 30 มิลลิเมตร) รูปแบบของเสาเป็นเสาสั้น หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเหล็กเสริมรูปพรรณด้านในเป็นตัวเอช (H) จากนั้นศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้สมการเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากมาตรฐานการออกแบบเสาวัสดุผสมในปัจจุบันคือ AISC 360-16 และ Eurocode4 โดยในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบสำหรับหน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ธนพัฒน์ อ้นถาวร (2016) จึงได้ทำการประยุกต์โดยแบ่งเป็น 2 กรณีได้แก่ 1) เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตมารวมกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (ไม่คิดผลของคอนกรีต) และ 2) เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตมารวมกับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (ไม่คิดผลของคอนกรีต) รวมเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

จากการทดสอบได้ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาและคานาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ นอกจากนี้ทดสอบกำลังรับกระทำตรงศูนย์ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ได้แก่ ท่อเหล็ก เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต ด้วยขนาดที่เท่ากับเสาตัวอย่างทดสอบ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาผลกระทบของตัวแปรได้ข้อสรุปดังนี้

1. เสาจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อแรงกระทำที่จุดศูนย์ถ่วง โดยกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อแรงกระทำห่างจากจุดศูนย์ถ่วงมากขึ้น เนื่องจากแรงดัดที่มากขึ้นตามระยะห่างของจุดศูนย์ถ่วงที่เพิ่มขึ้น

2. การติดตั้งสลักรับแรงเฉือนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด แก่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ร้อยละ 7.01 และเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ร้อยละ 6.83 และ ร้อยละ 16.03 ตามลำดับ และช่วยลดการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์
3. เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าผลรวมกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก เหล็กรูปพรรณ และคอนกรีต ที่มีขนาดและใช้วัสดุเดียวกัน และผลรวมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 9.37 % และ 0.2 % ตามลำดับ เนื่องจากการนำวัสดุมารวมกันเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างวัสดุ และทำให้คอนกรีตถูกโอบรัดจากท่อเหล็ก
4. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดโดยการประยุกต์ใช้สูตรการคำนวณจากมาตรฐาน AISC 360-16 และ Eurocode4 มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการจากมาตรฐานดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบ ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการจากมาตรฐานดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบทุกกรณี

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ขนาดหน้าตัดของท่อเหล็กหรือเหล็กรูปพรรณ อัตราส่วนความขรุขระ เป็นต้น
2. พัฒนาอุปกรณ์สำหรับรับแรงเยื้องศูนย์เพิ่มเติม เพื่อให้เปลี่ยนแปลงระยะเยื้องศูนย์ได้มากขึ้น และใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

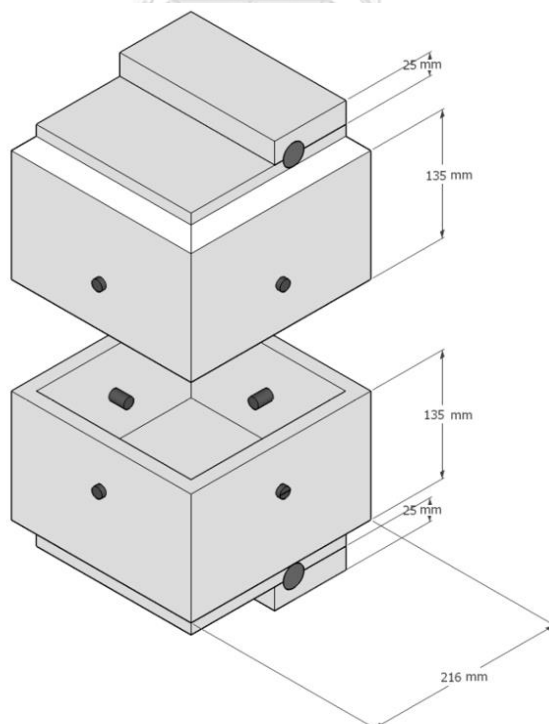
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

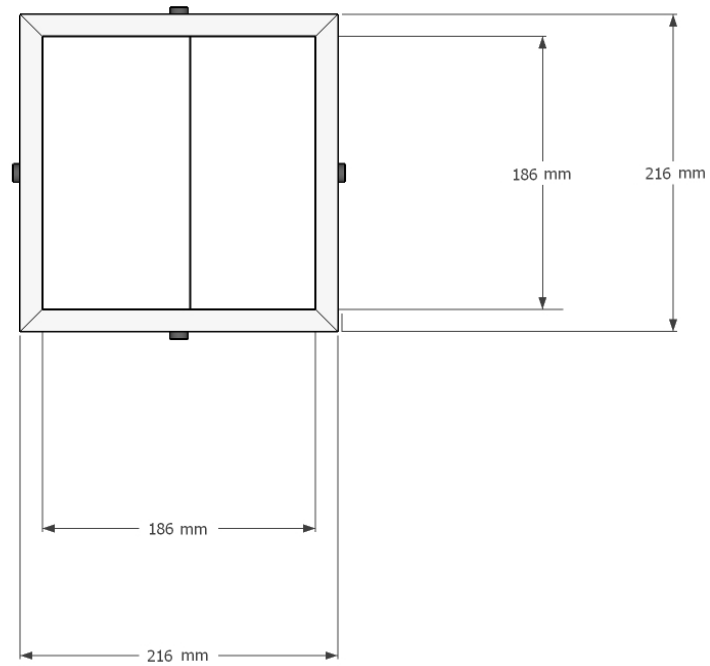
รายละเอียดอุปกรณ์หัวครอบเพื่อให้แรงกระทำเยื้องศูนย์

ในการทดสอบตัวอย่างเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ ใช้หัวครอบเหล็กในการถ่ายแรงจากเครื่องทดสอบให้เป็นแรงกระทำเยื้องศูนย์ลงสู่ตัวอย่างทดสอบ

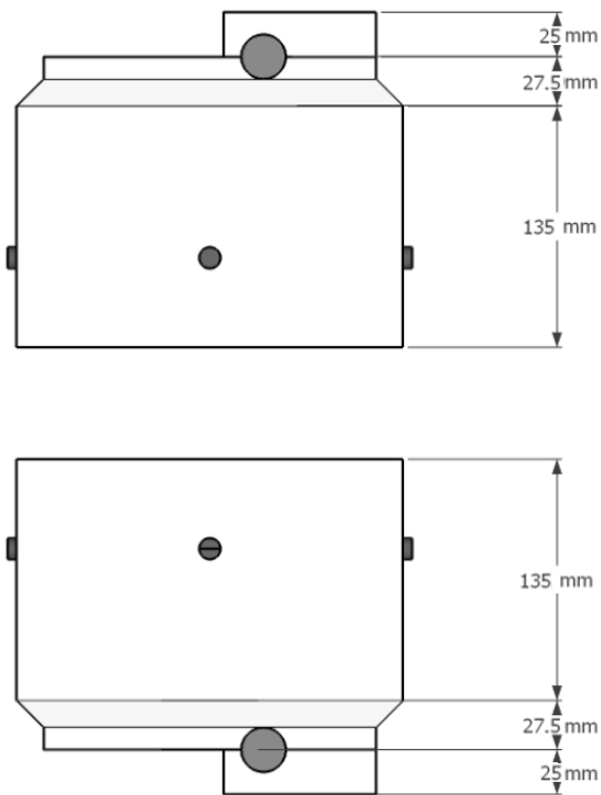
หัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ทำมาจากเหล็กกำลังสูง ใช้ครอบด้านบนและด้านล่างของเสาตัวอย่าง ขนาดหน้าตัดด้านใน 186x186 มิลลิเมตร หนา 30 มิลลิเมตร สูง 135 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมเซาะร่องครึ่งวงกลมห่างจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะ 15 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตรในทิศทางตรงกันข้าม เพื่อวางเหล็กกลมกำลังสูงประกบกับแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมหนา 25 มิลลิเมตร เป็นแรงกระทำเยื้องศูนย์ลงสู่ชิ้นงาน รูปที่ ก.1 แสดงภาพจำลอง 3 มิติของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ รูปที่ ก.2 แสดงภาพจำลองด้านบนของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ และรูปที่ ก.3 แสดงภาพจำลองด้านหน้าของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์



รูปที่ ก.1 ภาพจำลอง 3 มิติของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์



รูปที่ ก.2 ภาพจำลองด้านบนของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้องศูนย์



รูปที่ ก.3 แสดงภาพจำลองด้านหน้าของหัวครอบที่ใช้ในการทดสอบเสาตัวอย่างรับแรงกระทำเยื้อง

ศูนย์

ภาคผนวก ข.

การตรวจสอบความถูกต้องของรายการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัด

ข.1 รายการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดตามมาตรฐาน AISC 360-16

คุณสมบัติของวัสดุ

Tube: $F_y = 405.99 \text{ MPa}$ (4140 ksc)

W 100x50: $F_y = 429.53 \text{ MPa}$ (4380 ksc)

Concrete: $f'_c = 22.55 \text{ MPa}$ (230 ksc) $E_c = 15200 \sqrt{f'_c} = 25818.16 \text{ MPa}$ (263272 ksc)

คุณสมบัติทางเรขาคณิต

Tube: $I_x = I_y = 675 \text{ cm}^4$ $A_{s(\text{tube})} = 18.99 \text{ cm}^2$ $Z_s = 90.03 \text{ cm}^3$

W 100x50: $A_s = 11.85 \text{ cm}^2$ $I_x = 187 \text{ cm}^4$ $I_y = 14.8 \text{ cm}^4$ $Z_x = 41.8 \text{ cm}^3$

$Z_s = Z_y = 9.29 \text{ cm}^3$ $d = 100 \text{ mm}$ $b_f = 50 \text{ mm}$ $t_f = 7 \text{ cm}$ $t_w = 5 \text{ cm}$

Concrete: $A_c = 206.62 \text{ cm}^2$ $I_c = 3528.95 \text{ cm}^4$

กรณีที่ 1: ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ

ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจุด A:

$$P_A = (A_s \times F_y) + (0.85 \times f'_c \times A_c) = 119.01 \text{ ton} = P_{no}$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + \left[0.6 + 2 \frac{A_s}{A_c + A_s} \right] = 13.5 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^3$$

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{(KL)^2} = 6579.74 \text{ ton}$$

$$\frac{P_{no}}{P_e} = 0.018$$

$$P_{nA} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 118.12 \text{ ton}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = \frac{0.85 f'_c A_c}{2} = 20.20 \text{ ton} = P_{no}$$

$$P_{nD} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 20.17 \text{ ton}$$

$$Z_c = \frac{h_1 h_2^2}{4} - 0.912 t^3 = 740.26 \text{ cm}^3$$

$$Z_s = 90.03 \text{ cm}^3$$

$$M_D = Z_s F_y + \frac{Z_c (0.85 f'_c)}{2} = 4.40 \text{ ton-m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$h_n = \frac{0.85 f'_c A_c}{2[0.85 f'_c h_1 + 4tF_y]} = 2.49 \text{ cm}$$

$$Z_{sn} = 2th_n^2 = 3.97 \text{ cm}^3$$

$$Z_{cn} = h_1 h_n^2 = 89.03 \text{ cm}^3$$

$$M_B = M_D - Z_{sn} F_y - Z_{cn} (0.85 f'_c) / 2 = 4.15 \text{ ton-m}$$

จุด C:

$$P_c = 0.85 f'_c A_c = 40.40 \text{ ton} = P_{no}$$

$$P_{nc} = P_c \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 40.35 \text{ ton}$$

$$M_c = M_B = 4.15 \text{ ton-m}$$

เหลือรูปพรรณ

จุด A:

$$P_A = A_s F_y = 51.90 \text{ ton} = P_{no}$$

$$EI_{eff} = 3.74 \times 10^8 \text{ kg-cm}^3$$

$$P_e = 1822.83 \text{ ton}$$

$$\frac{P_{no}}{P_e} = 0.028$$

$$P_A = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 51.30 \text{ ton}$$

จุด D:

$$P_D = 0$$

$$M_D = Z_s F_y = 1.83 \text{ ton-m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$M_B = M_D = 1.83 \text{ ton-m}$$

จุด C:

$$P_c = 0$$

$$M_c = M_B = 1.83 \text{ ton-m}$$

รวมกำลังเสาที่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณ

จุด A:

$$P_A = 118.91 + 51.29 = 170.2 \text{ ton} = 1702 \text{ kN}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = 20.17 \text{ ton} = 201.7 \text{ kN}$$

$$M_D = 4.40 + 1.83 = 6.23 \text{ ton-m} = 62.3 \text{ kN-m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$M_B = 4.15 + 1.83 = 5.98 \text{ ton-m} = 53.22 \text{ kN-m}$$

จุด C:

$$P_C = 40.30 \text{ ton} = 403 \text{ kN}$$

$$M_C = 4.15 + 1.83 = 5.98 \text{ ton-m} = 59.8 \text{ kN-m}$$



กรณีที่ 2:เสาเหล็กหุ้มคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก

เหล็กหุ้มคอนกรีต

จุด A:

$$P_A = A_s F_y + 0.85 f'_c A_c = 92.30 \text{ ton} = P_{no}$$

$$C_1 = 0.1 + 1 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) = 0.15$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + C_1 E_c I_c = 513.36 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$P_e = \pi^2 EI_{eff} / (KL)^2 = 2502.05 \text{ ton}$$

$$P_{nA} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 90.89 \text{ ton}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = \frac{0.85 f'_c A_c}{2} = 20.20 \text{ ton} = P_{no}$$

$$P_{nD} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 20.14 \text{ ton}$$

$$Z_c = \frac{h_1 h_2^2}{4} - Z_s = 801.95 \text{ cm}^3$$

$$M_D = Z_s F_y + Z_c (0.85 f'_c) / 2 = 2.61 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

จุด B

$$P_B = 0$$

$$h_n^2 = 2.85$$

$$Z_{sn} = t_w h_n^2 = 4.06 \text{ cm}^3$$

$$Z_{cn} = h_1 h_n - Z_{sn} = 117.78 \text{ cm}^3$$

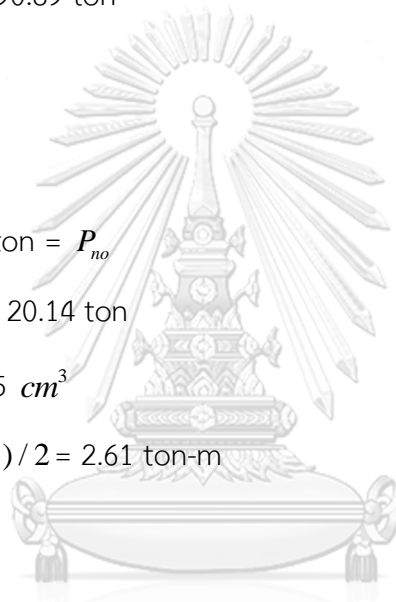
$$M_B = M_D - Z_{sn} F_y - Z_{cn} (0.85 f'_c) / 2 = 2.32 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

จุด C:

$$P_c = 0.85 f'_c A_c = 40.40 \text{ ton} = P_{no}$$

$$P_{nc} = P_c \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 40.13 \text{ ton}$$

$$M_c = M_B = 2.32 \text{ ton} \cdot \text{m}$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ท่อเหล็ก**จุด A**

$$P_A = A_s F_y = 78.62 \text{ ton} = P_{no}$$

$$EI_{eff} = 13.5 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^3$$

$$P_e = 6579.74 \text{ ton}$$

$$\frac{P_{no}}{P_e} = 0.012$$

$$P_A = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} = 78.23 \text{ ton}$$

$$M_A = 0$$

จุด D

$$P_D = 0$$

$$M_D = Z_s F_y = 3.73 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

จุด B

$$P_B = 0$$

$$M_B = M_D = 3.73 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

จุด C

$$P_c = 0$$

$$M_c = M_D = 3.73 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

**รวมกำลังเหล็กหุ้มคอนกรีตและท่อเหล็ก****จุด A:**

$$P_A = 92.30 + 78.62 = 170.92 \text{ ton} = 1709.2 \text{ kN}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = 20.14 \text{ ton} = 201.4 \text{ kN}$$

$$M_D = 2.61 + 3.73 = 6.34 \text{ ton} \cdot \text{m} = 63.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$M_B = 2.32 + 3.73 = 6.05 \text{ ton-m} = 6.05 \text{ kN-m}$$

จุด C:

$$P_C = 40.13 \text{ ton} = 401.3 \text{ kN}$$

$$M_C = 2.32 + 3.73 = 6.05 \text{ ton-m} = 60.5 \text{ kN-m}$$

ข.2 รายการคำนวณเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดตามมาตรฐาน Eurocode4

คุณสมบัติของวัสดุ

$$\text{Tube: } F_y = 405.99 \text{ MPa}$$

$$\text{W } 100 \times 50: F_y = 429.53 \text{ MPa}$$

$$\text{Concrete: } f'_c = 22.55 \text{ MPa}$$

คุณสมบัติทางเรขาคณิต

$$\text{Tube: } A_a = 1879.04 \text{ mm}^2$$

$$W_{pa} = \frac{H^3}{4} - \frac{(H-2t)^3}{4} = 103457.54 \text{ mm}^3$$

$$W_{pc} = \frac{(H-2t)^3}{4} = 740292.46 \text{ mm}^3$$

$$\text{W}100 \times 50: A_a = 1185 \text{ mm}^2$$

$$W_{pa} = Bt_f(H-t_f) + [0.25t_w(H-2t_f)^2] = 41795 \text{ mm}^3$$

$$W_{pc} = \frac{X \times Y^2}{4} - W_{pa} = 801955 \text{ mm}^3$$

$$\text{Concrete: } A_c = 20620.96 \text{ mm}^2$$

สร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด

กรณีที่ 1: ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ

ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

จุด A:

$$N_{pl,Rd} = A_a F_y + A_c F_c = 1227874.098 \text{ N}$$

จุด D:

$$M_{max,Rd} = W_{pa} f_y + 0.5W_{pc} f_c = 50349524.15 \text{ N-mm}$$

$$0.5N_{pm,Rd} = 0.5A_c F_c = 232501.324 \text{ N}$$

จุด C:

$$N_{pm,Rd} = 2 \times 0.5A_c F_c = 465002.648 \text{ N}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} = 47145140.14 \text{ N-mm}$$

จุด B:

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd}}{(2H \cdot f_c) + 4t(2f_y - f_c)} = 27.5644 \text{ mm}$$

$$W_{p,an} = 2th_n^2 = 4862.6953 \text{ mm}^3$$

$$W_{p,cn} = (H - 2t)h_n^2 = 109106.7268 \text{ mm}^3$$

$$M_{n,Rd} = W_{p,an} f_y + 0.5W_{pc} f_c = 3204384.01 \text{ N-mm}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} = 47145140.14 \text{ N-mm}$$

เหล็กรูปพรรณ

จุด A:

$$N_{pl,Rd} = A_a F_y = 508993.05 \text{ N}$$

จุด D:

$$M_{max,Rd} = W_{pa} f_y = 17952206.35 \text{ N-mm}$$

$$0.5N_{pm,Rd} = 0$$

จุด C:

$$N_{pm,Rd} = 0$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} = 16320111.6 \text{ N-mm}$$

จุด B:

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} = 16320111.6 \text{ N-mm}$$

รวมกำลังต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณ

จุด A:

$$P_A = 1227874.098 + 508993.05 = 1736867.148 = 1736.87 \text{ kN}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = 232501.324 \text{ N} = 232.50 \text{ kN}$$

$$M_D = 508349524.15 + 17952206.35 = 68301730.5 \text{ N-mm} = 68.30 \text{ kN-m}$$

จุด C:

$$P_C = 465002.648 \text{ N} = 465.00 \text{ kN}$$

$$M_C = 47145140.14 + 163201111.6 = 634465251.74 \text{ N-mm} = 63.45 \text{ kN-m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$M_B = 47145140.14 + 163201111.6 = 634465251.74 \text{ N-mm} = 63.45 \text{ kN-m}$$

กรณีที่ 2:เสาเหล็กหุ้มคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก**เหล็กหุ้มคอนกรีต****จุด A:**

$$N_{pl,Rd} = A_a F_y + A_c F_c = 989646.3 \text{ N}$$

จุด D:

$$M_{\max,Rd} = W_{pa} f_y + 0.5W_{pc} 0.85 f_c = 25637942.58 \text{ N-mm}$$

$$0.5N_{pm,Rd} = 0.5A_c 0.85 F_c = 204277.6313 \text{ N}$$

จุด C:

$$N_{pm,Rd} = 2 \times 0.5A_c F_c = 408555.2625 \text{ N}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} = 24494205.97 \text{ N-mm}$$

จุด B:

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd}}{(2X \cdot f_{cd}) + 4t_w (2f_{yd} - f_{cd})} = 17.3889 \text{ mm}$$

$$W_{p,an} = t_w h_n^2 = 1511.8692 \text{ mm}^3$$

$$W_{p,cn} = (X - t_w) h_n^2 = 43844.20727 \text{ mm}^3$$

$$M_{n,Rd} = W_{p,an} f_y + 0.5W_{p,cn} f_c = 1443736.614 \text{ N-mm}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} - M_{n,Rd} = 24494205.97 \text{ N-mm}$$

ท่อเหล็ก**จุด A:**

$$N_{pl,Rd} = A_a F_y = 762871.4496 \text{ N}$$

จุด D:

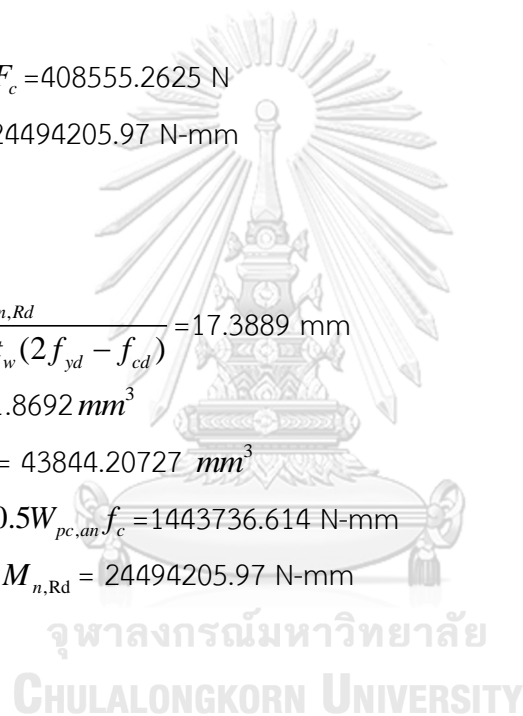
$$M_{\max,Rd} = W_{pa} f_y = 42002726.66 \text{ N-mm}$$

$$0.5N_{pm,Rd} = 0$$

จุด C:

$$N_{pm,Rd} = 0$$

$$M_{pl,Rd} = M_{pl,Rd} = 42002726.66 \text{ N-mm}$$



จุด B:

$$M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} = 42002726.66 \text{ N-m}$$

รวมกำลังเหล็กหุ้มคอนกรีตและท่อเหล็ก

จุด A:

$$P_A = 989646.3 + 762871.4496 = 1752517.75 \text{ N} = 1752.52 \text{ kN}$$

$$M_A = 0$$

จุด D:

$$P_D = 204277.6313 \text{ N} = 204.28 \text{ kN}$$

$$M_D = 25637942.58 + 42002726.66 = 67640669.24 \text{ N} = 67.64 \text{ kN-m}$$

จุด C:

$$P_C = 408555.2625 \text{ N} = 40.85 \text{ kN}$$

$$M_C = 24494205.97 + 42002726.66 = 66496932.56 \text{ N-mm} = 66.50 \text{ kN-m}$$

จุด B:

$$P_B = 0$$

$$M_B = 24494205.97 + 42002726.66 = 66496932.56 \text{ N-mm} = 66.50 \text{ kN-m}$$

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดการคำนวณออกแบบระยะเวลาเรียงของสลักรับแรงเหวี่ยง

$$h = 1.205$$

$$F_1 = B \cdot t_t \cdot f_{yt} = 9 \times 10^3 \quad F_2 = \left(\frac{D}{2} - h - t_t\right) \cdot t_t \cdot f_{yt} = 3.657 \times 10^3$$

$$F_3 = \left(\frac{D}{2} + h - t_t\right) \cdot t_t \cdot f_{yt} = 5.103 \times 10^3 \quad F_4 = B \cdot t_t \cdot f_{yt} = 9 \times 10^3$$

$$C_1 = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_t\right) \cdot (B - 2 \cdot t_t) \cdot 0.85 \cdot f_c = 1.855 \times 10^5$$

$$C_2 = \left(\frac{B}{2} - \frac{b}{2} - t_f\right) \cdot (t_f) \cdot 0.85 \cdot f_c = 751.4$$

$$C_3 = \left(\frac{d}{2} - h - t_f\right) \cdot \left(\frac{B}{2} - \frac{t_w}{2} - t_t\right) \cdot 0.85 \cdot f_c = 1.158 \times 10^4$$

$$f_1 = b \cdot t_t \cdot f_{ys} = 2.8 \times 10^4 \quad f_2 = \left(\frac{d}{2} - h - t_f\right) \cdot t_w \cdot f_{ys} = 6.29 \times 10^4$$

$$f_3 = \left(\frac{d}{2} + h - t_f\right) \cdot t_w \cdot f_{ys} = 1.135 \times 10^4 \quad f_4 = b \cdot t_t \cdot f_{ys} = 2.8 \times 10^4$$

$$A_1 = \frac{D}{2} - h - \frac{t_t}{2} = 6.195 \quad A_2 = \frac{\frac{D}{2} - h - t_t}{2} = 3.047$$

$$A_3 = \frac{\frac{D}{2} + h - t_t}{2} = 4.253 \quad A_4 = \frac{D}{2} + h - \frac{t_t}{2} = 8.605$$

$$a_1 = \frac{d}{2} - h - \frac{t_f}{2} = 3.395 \quad a_2 = \frac{\frac{d}{2} - h - t_f}{2} = 1.498$$

$$a_3 = \frac{\frac{d}{2} + h - t_f}{2} = 2.703 \quad a_4 = \frac{d}{2} + h - \frac{t_f}{2} = 5.805$$

$$B_1 = \frac{\frac{D}{2} + \frac{d}{2} - t_t}{2} + \left(\frac{d}{2} - h \right) = 4.945 \quad B_2 = \frac{d}{2} - h - \frac{t_f}{2} = 3.395$$

$$B_3 = \frac{\left(\frac{d}{2} - h - t_f \right)}{2} = 1.498$$

$$F_1 A_1 + 2F_2 A_2 + f_1 a_1 + f_2 a_2 + C_1 B_1 + 2C_2 B_2 + 2C_3 B_3 = 3.141 \times 10^5$$

$$2F_3 A_3 + F_4 A_4 + f_3 a_3 + f_4 a_4 = 3.141 \times 10^5$$

$$\begin{aligned} \text{Moment} &= \left(2F_3 A_3 + F_4 A_4 + f_3 a_3 + f_4 a_4 \right) \\ &\quad + \left(F_1 A_1 + 2F_2 A_2 + f_1 a_1 + f_2 a_2 + C_1 B_1 + 2C_2 B_2 + 2C_3 B_3 \right) \\ &= 6.281 \times 10^5 \text{ kg-cm} = 6.281 \text{ t-m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Shear} &= F_4 + f_4 + 2F_3 + f_3 + f_2 + 2C_3 + f_1 + 2C_2 + 2F_2 - C_1 - F_1 \\ &= 9.728 \times 10^4 = 97.28 \text{ t} \end{aligned}$$

$$B = 15 \quad b = 10 \text{ cm}$$

$$t_f = 0.2 \quad t_t = 0.8 \quad t_w = 0.6 \text{ cm}$$

$$f_{yt} = 3000 \quad f_{ys} = 3500 \quad f_c = 650 \text{ ksc}$$

$$F_1 = B \cdot t_t f_{yt} \quad F_2 = \left(\frac{D}{2} - h - t_t \right) \cdot t_t f_{yt}$$

$$F_3 = \left(\frac{D}{2} + h - t_t \right) \cdot t_t f_{yt} \quad F_4 = B \cdot t_t f_{yt}$$

$$C_1 = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_t \right) \left(B - 2 \cdot t_t \right) 0.85 f_c \quad C_2 = \left(\frac{B}{2} - \frac{b}{2} - t_f \right) \left(t_f \right) 0.85 f_c$$

$$C_3 = \left(\frac{d}{2} - h - t_f \right) \left(\frac{B}{2} - \frac{t_w}{2} - t_t \right) 0.85 f_c$$

$$f_1 = b \cdot t_f f_{ys} \quad f_2 = \left(\frac{d}{2} - h - t_f \right) \cdot t_w f_{ys}$$

$$f_3 = \left(\frac{d}{2} + h - t_f \right) \cdot t_w \cdot f_{ys} \quad f_4 = f_1 = b \cdot t_f \cdot f_{ys}$$

$$A_1 = \frac{D}{2} - h - \frac{t_t}{2} \quad A_2 = \frac{\frac{D}{2} - h - t_t}{2}$$

$$A_3 = \frac{\frac{D}{2} + h - t_t}{2} \quad A_4 = \frac{D}{2} - h - \frac{t_t}{2}$$

$$a_1 = \frac{d}{2} - h - \frac{t_f}{2} \quad a_2 = \frac{\frac{d}{2} - h - t_f}{2}$$

$$a_3 = \frac{\frac{d}{2} + h - t_f}{2} \quad a_4 = \frac{d}{2} + h - \frac{t_f}{2}$$

$$F_1 A_1 + 2F_2 A_2 + f_1 a_1 + f_2 a_2 + C_1 B_1 + 2C_2 B_2 + 2C_3 B_3$$

$$= 2F_3 A_3 + F_4 A_4 + f_3 a_3 + f_4 a_4 \quad \text{slove, } h \rightarrow \begin{pmatrix} 1.2050007575530272803 \\ 40.605665047230424562 \end{pmatrix}$$

$$A_s = 21.9 \text{ cm}^2$$

$$V_{r1} = A_s f_{ys} = 7.665 \times 10^4 \quad V_{r2} = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t_t \right) (B - 2t_t) 0.85 f_c = 1.855 \times 10^4$$

$$dd = 1.0 \quad A_{sc} = \pi \frac{dd^2}{4} = 0.785$$

$$E_c = 15200 \sqrt{f_c} = 3.875 \quad f_c = 650 \quad F_u = 4500 \quad R_g = 1 \quad R_p = 0.75$$

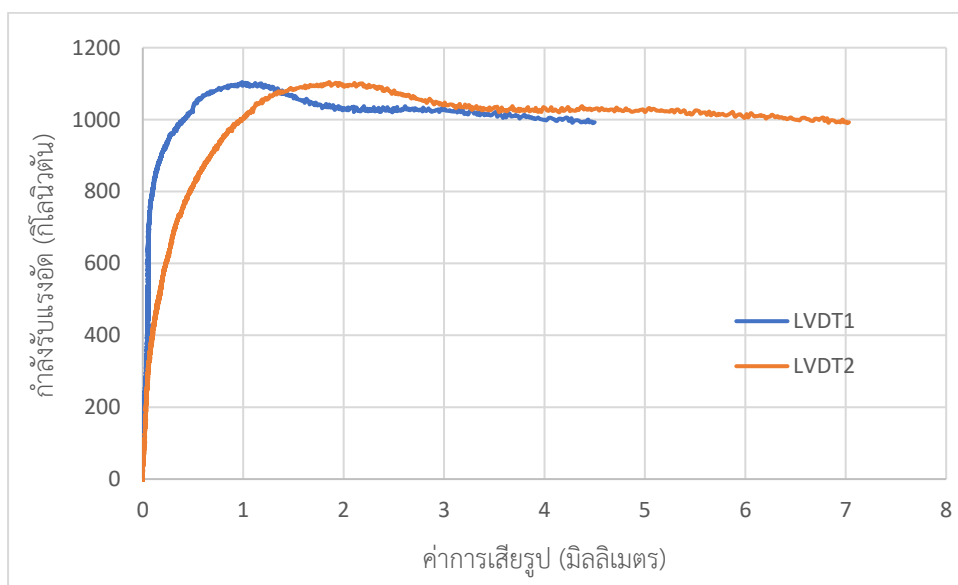
$$Q_1 = 0.5 \cdot A_{sc} \sqrt{f_c E_c} = 6.233 \times 10^3 \quad Q_2 = R_g R_p A_{sc} F_u = 2.651 \times 10^3$$

$$Q = Q_2 = 2.651 \times 10^3 \quad n = \frac{V_{r1}}{Q} = 28.917$$

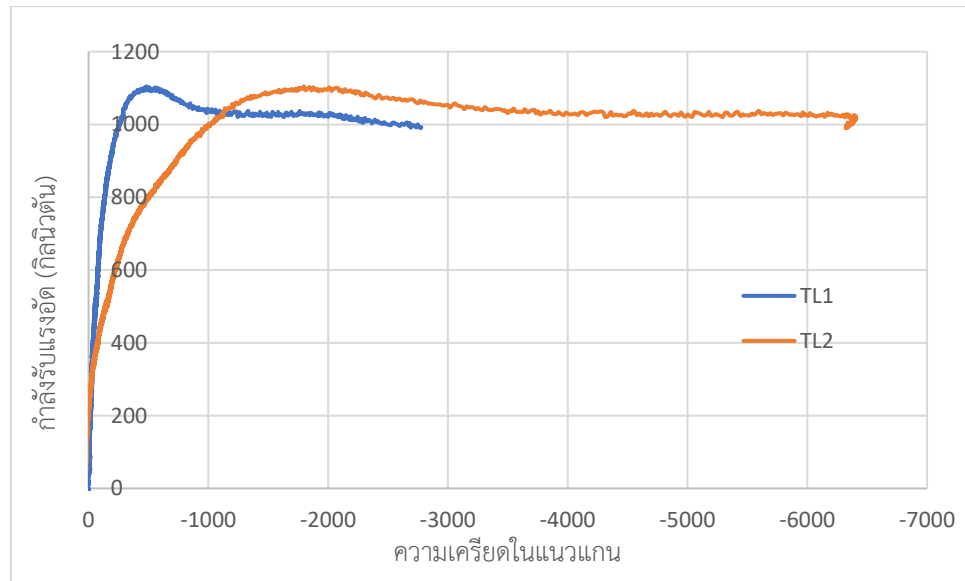
$$\text{studs spacing} = \frac{1.5 \times 100}{29} = 5.172 \text{ cm}$$

ภาคผนวก ง.
ผลการทดลองเพิ่มเติม

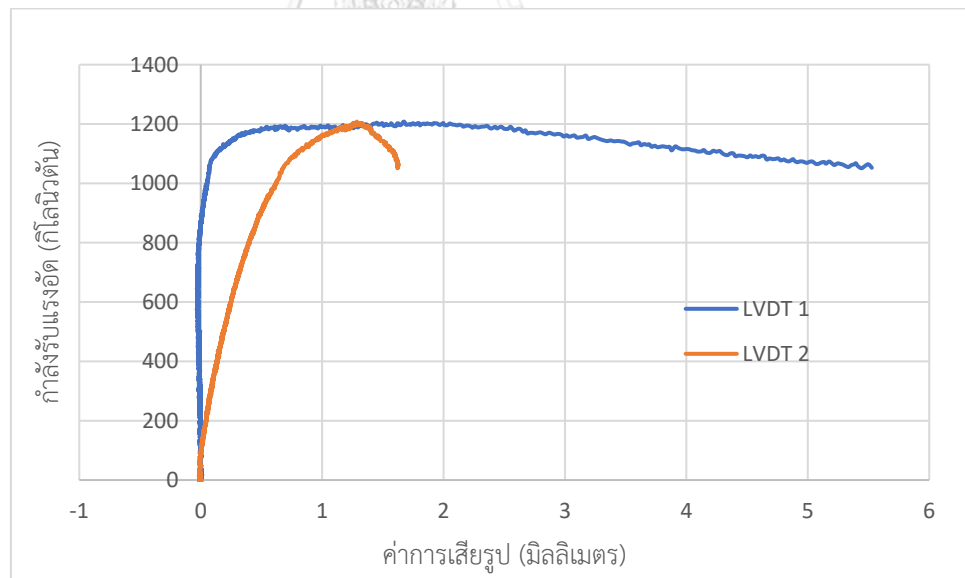
จากการทดสอบได้บันทึกค่าการทดสอบประกอบไปด้วย ค่ากำลังรับแรง ค่าความเครียดในแนวแกนที่ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ ค่าความเครียดในแนวขวางที่ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ และค่าการเสียรูป ดังนี้



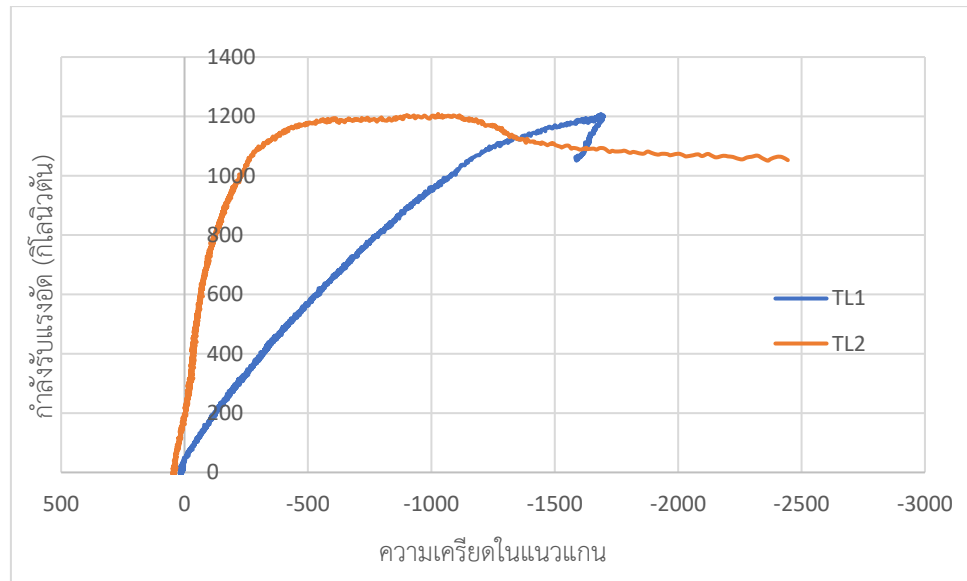
รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง CFT-1



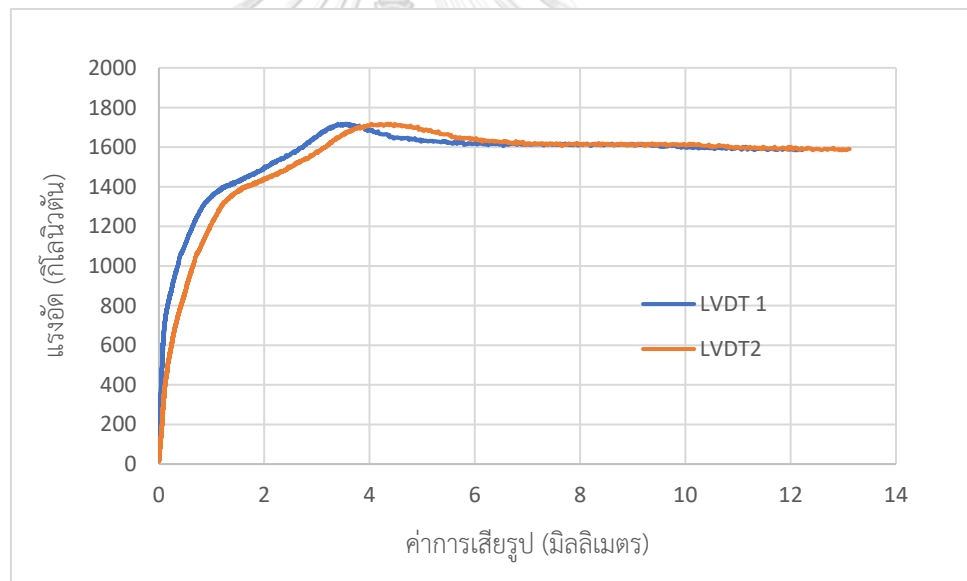
รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง CFT-1



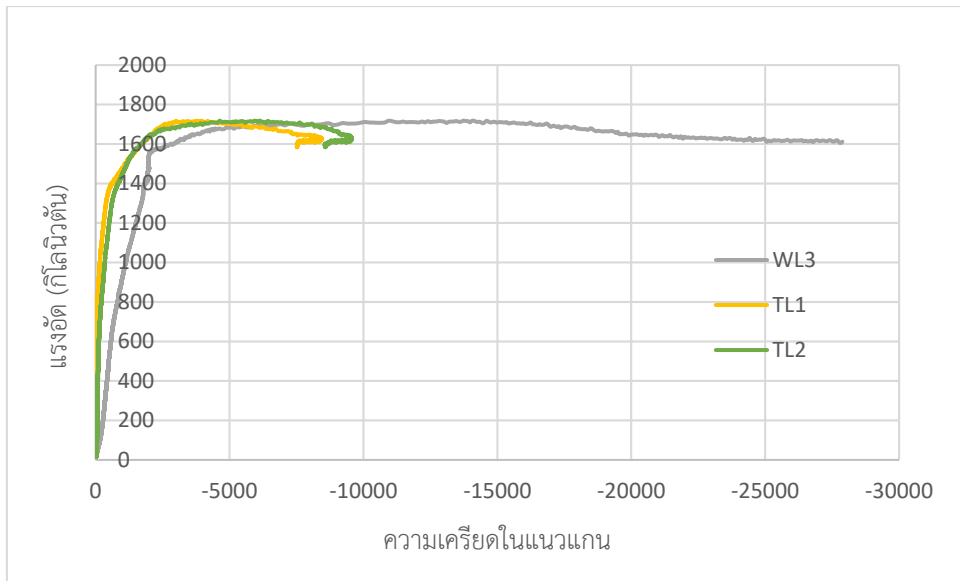
รูปที่ ง.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง CFT-2



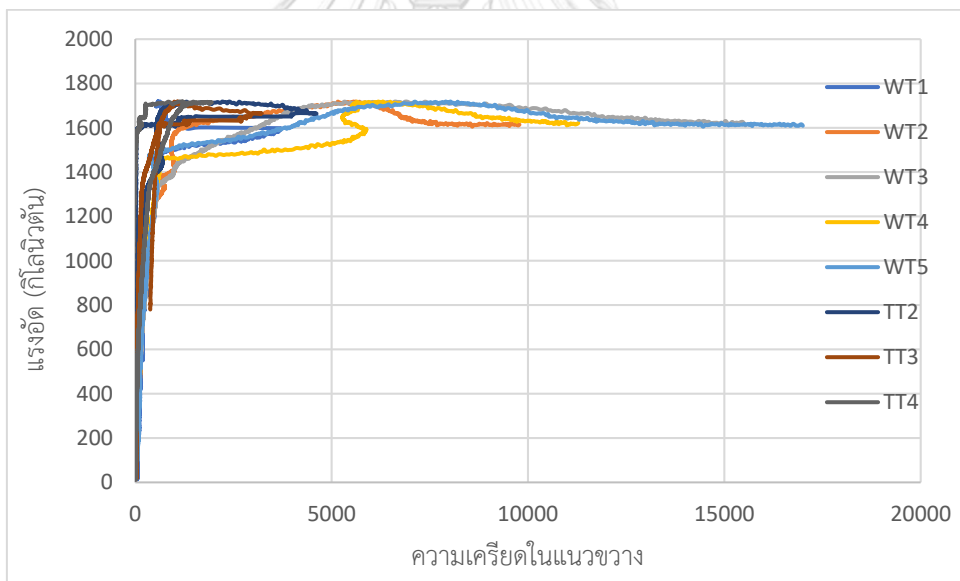
รูปที่ ๔.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง CFT-2



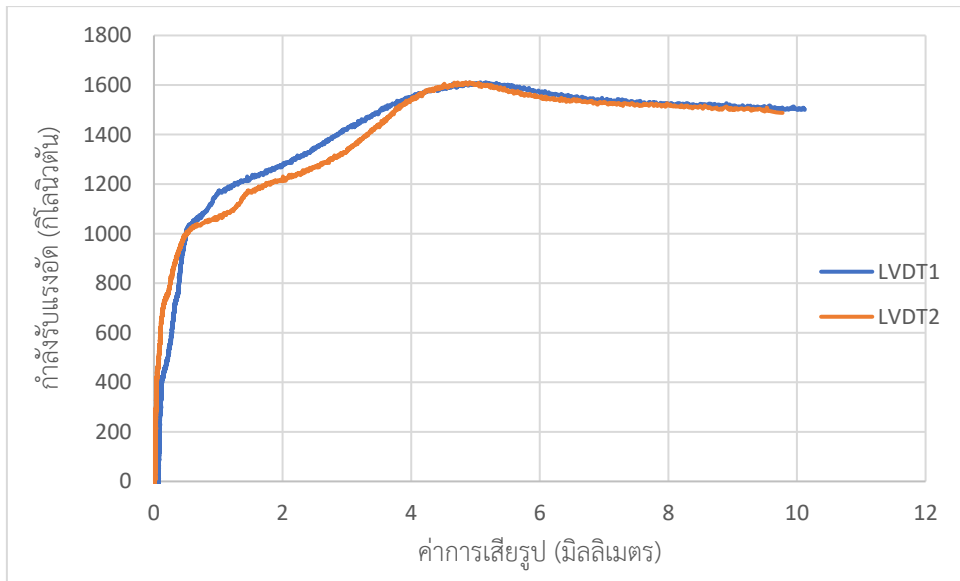
รูปที่ ๕.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C1(A)



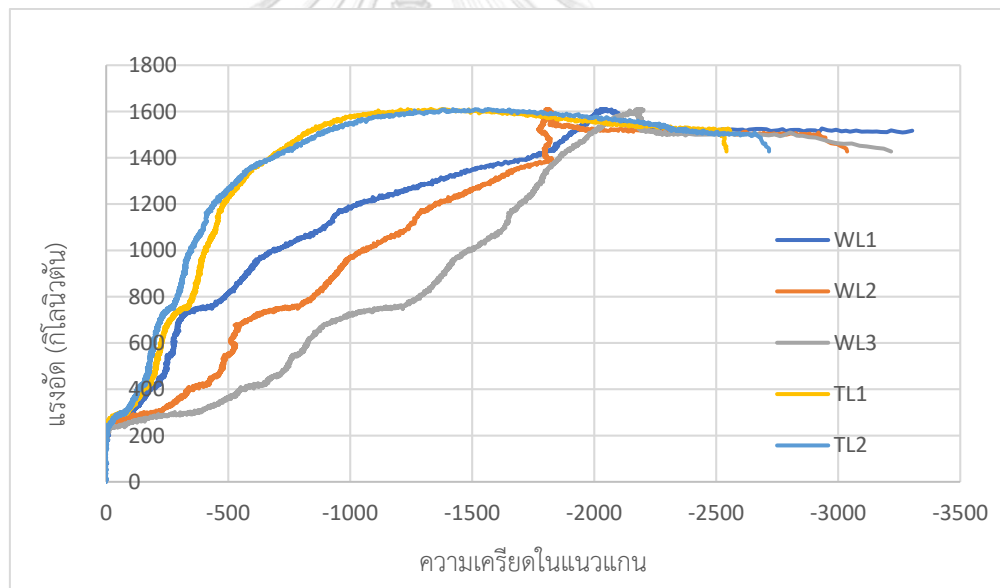
รูปที่ ง.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C1(A)



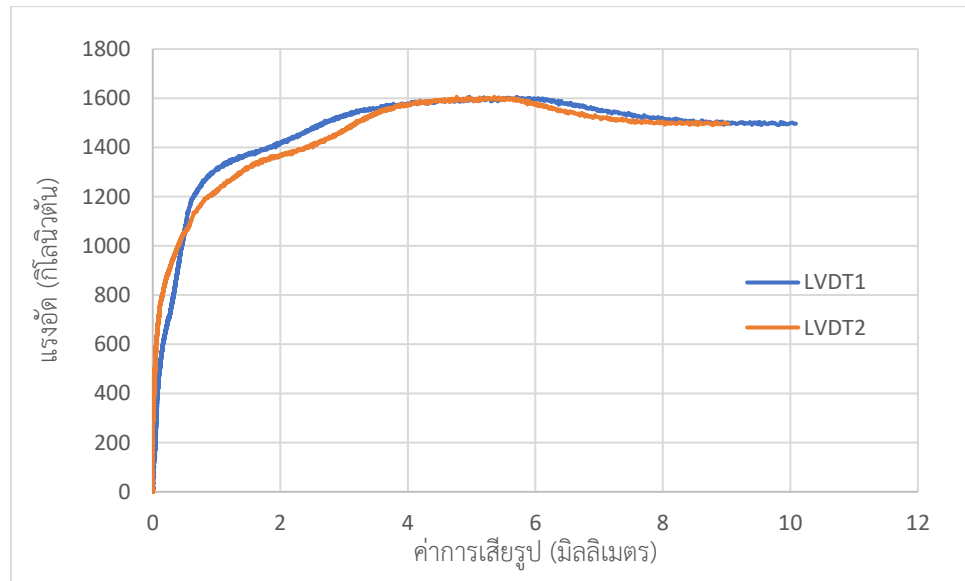
รูปที่ ง.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวขวางของตัวอย่าง C1(A)



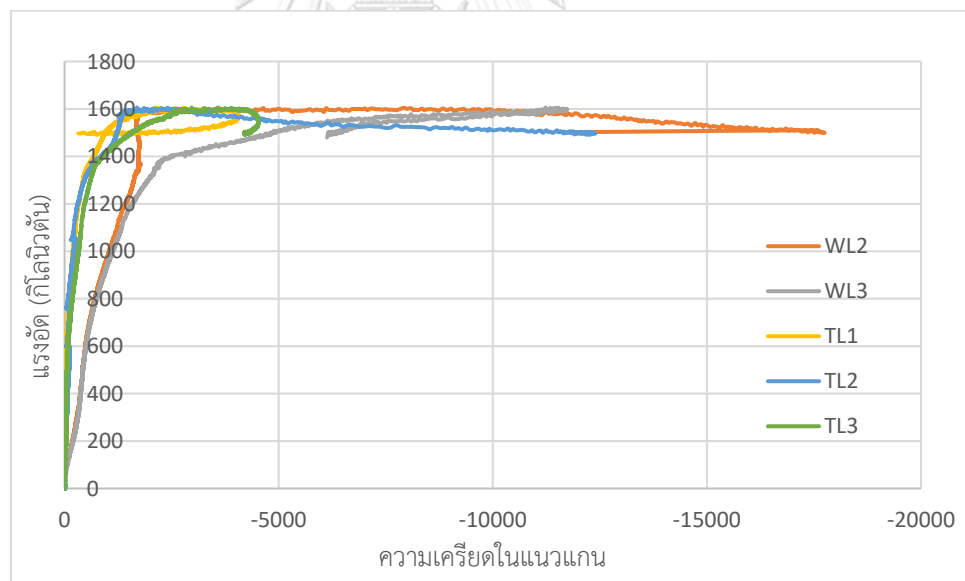
รูปที่ ๘.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C1(B-1)



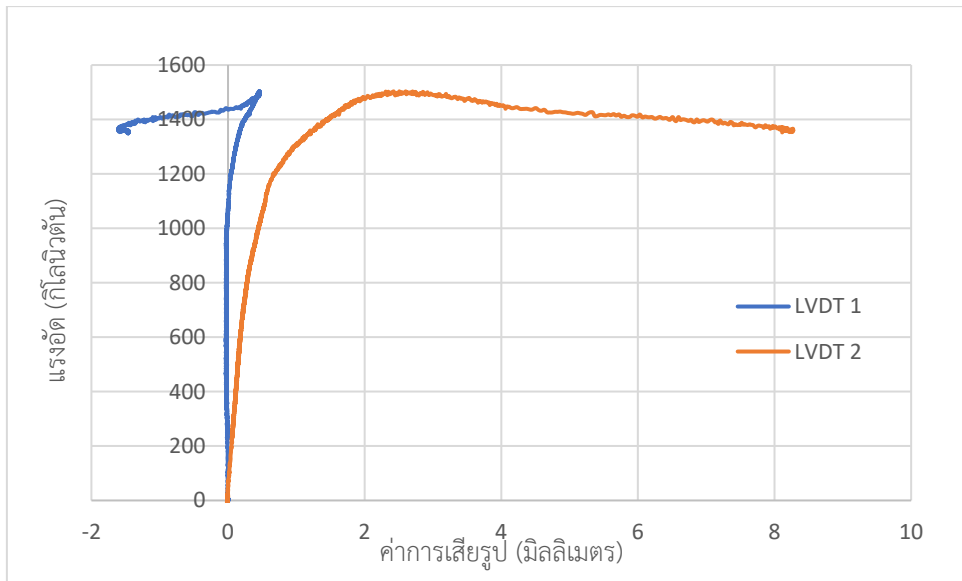
รูปที่ ๘.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C1(B-1)



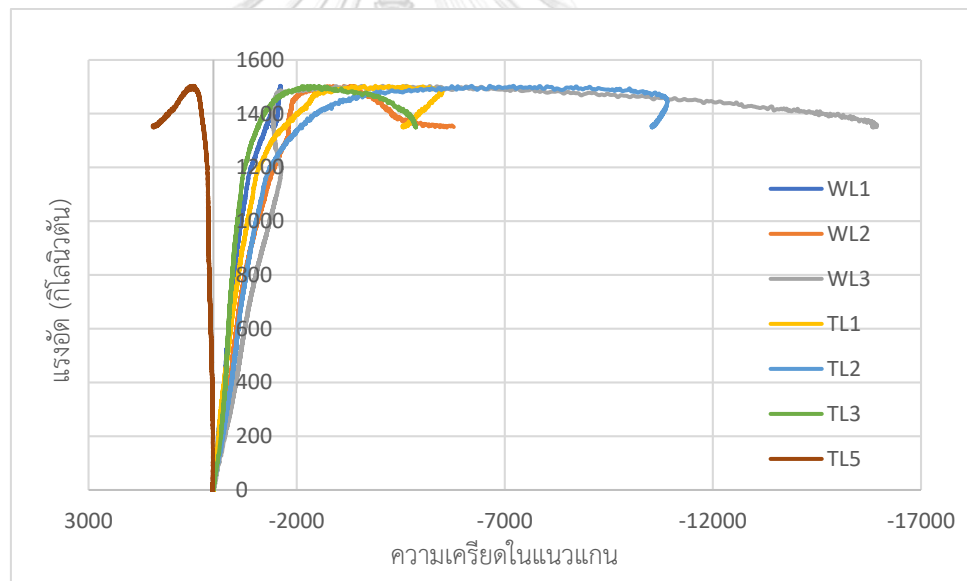
รูปที่ ง.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C1(B-2)



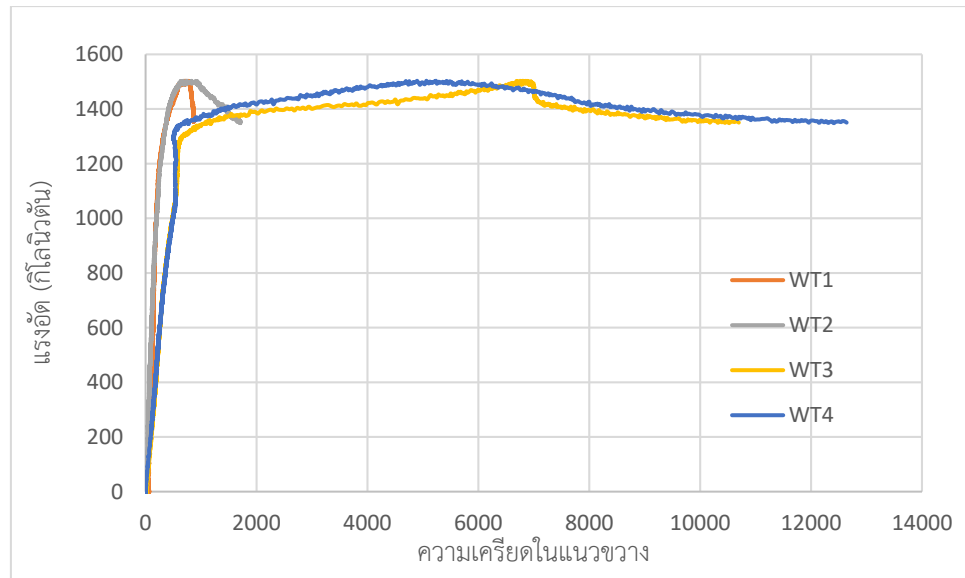
รูปที่ ง.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C1(B-2)



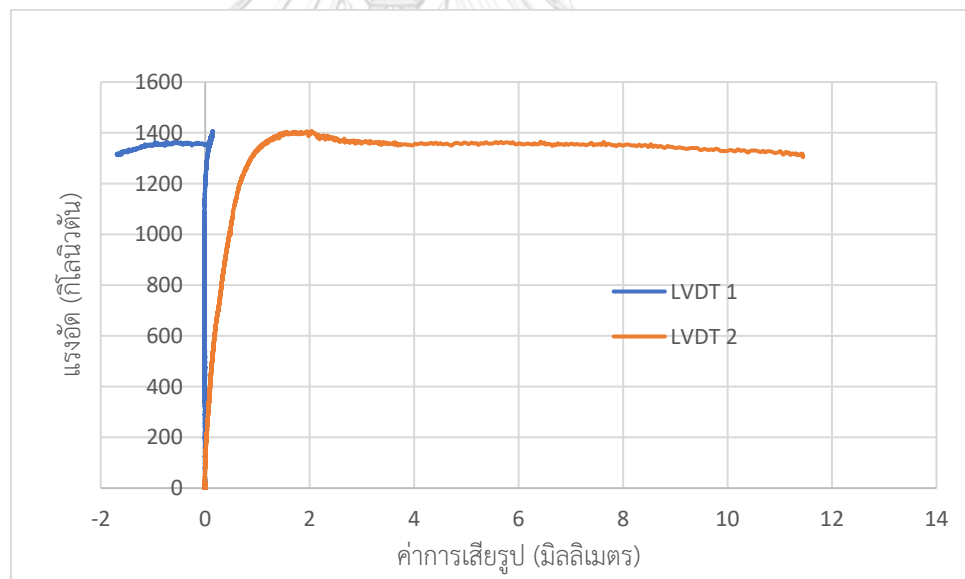
รูปที่ ง.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C2(A)



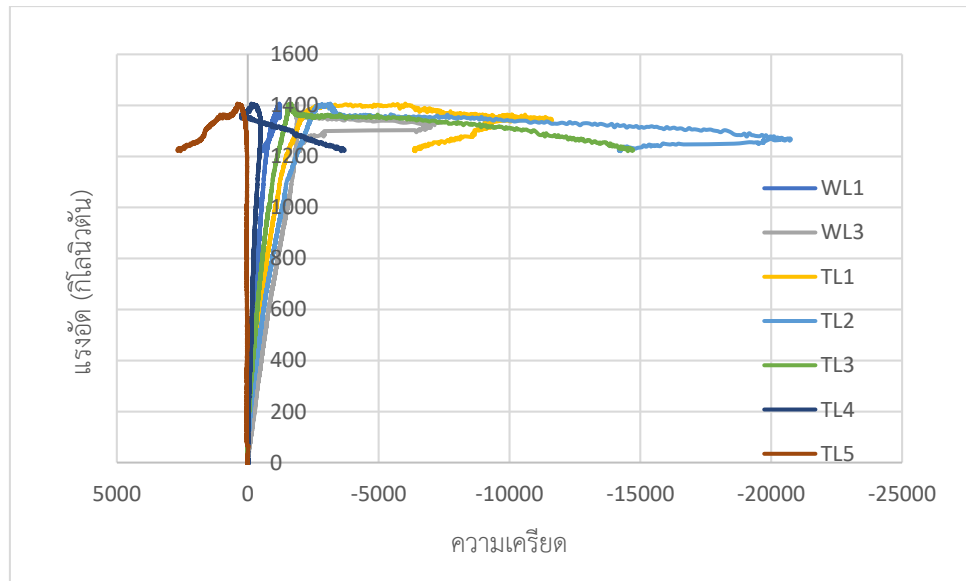
รูปที่ ง.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C2(A)



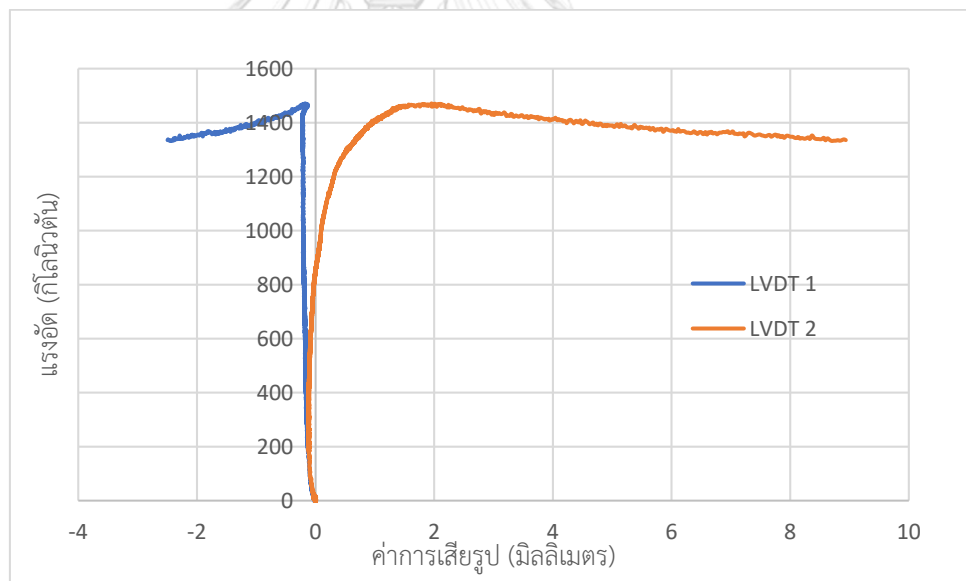
รูปที่ ง.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวขวางของตัวอย่าง C2(A)



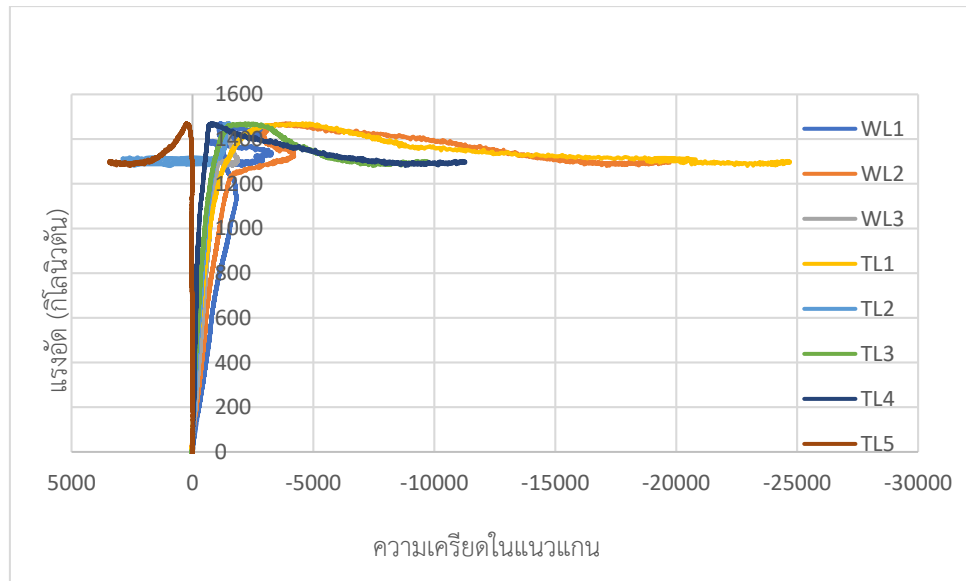
รูปที่ ง.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C2(B-1)



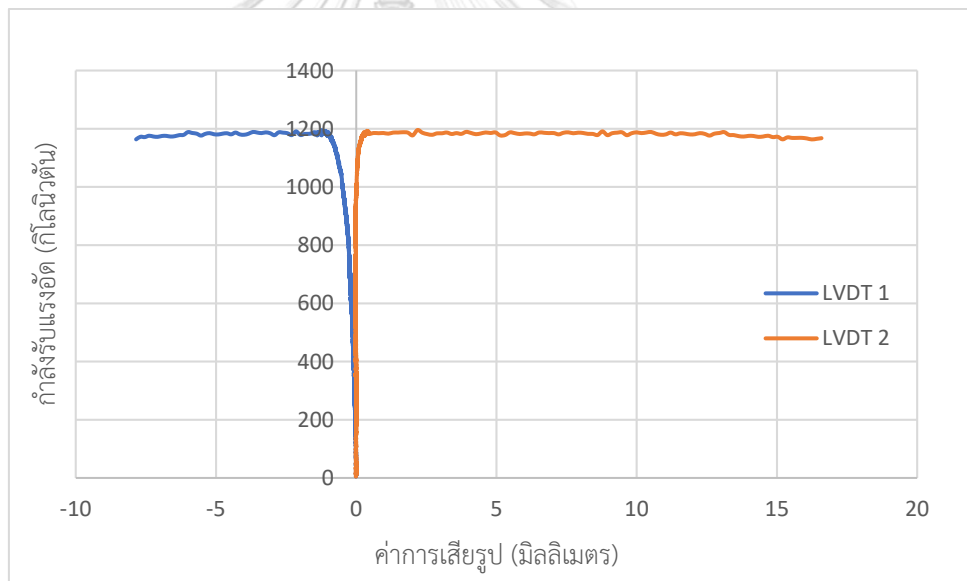
รูปที่ ง.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C2(B-1)



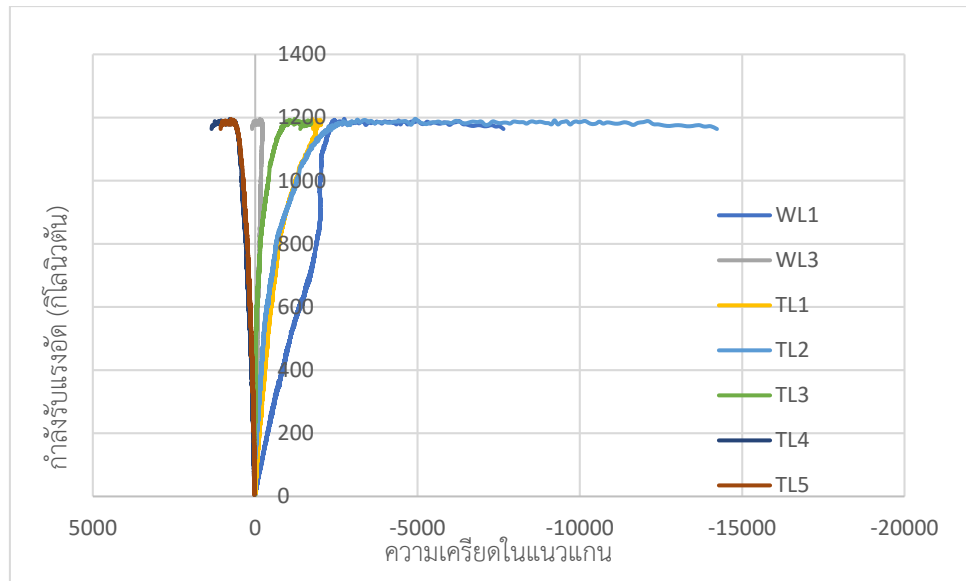
รูปที่ ง.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C2(B-2)



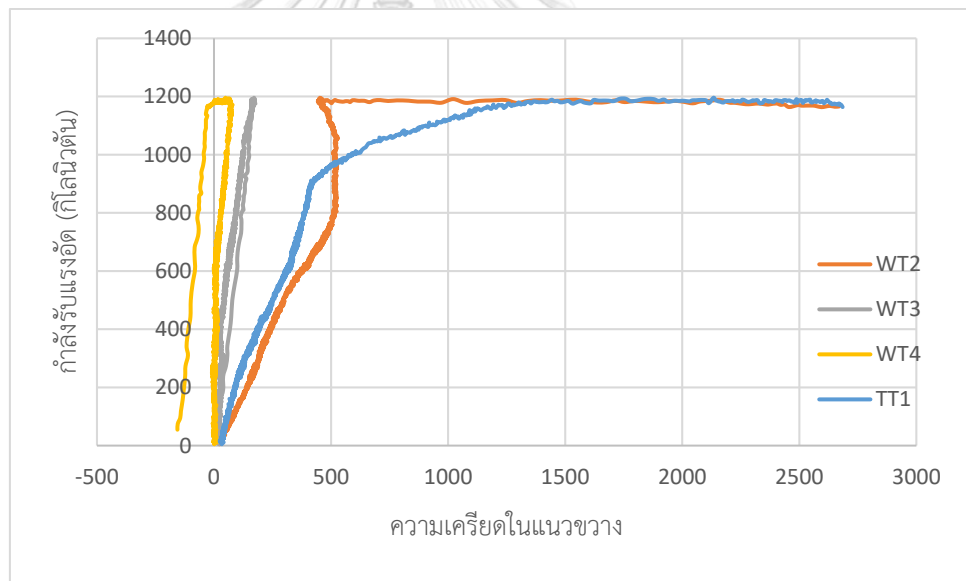
รูปที่ ง.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C2(B-2)



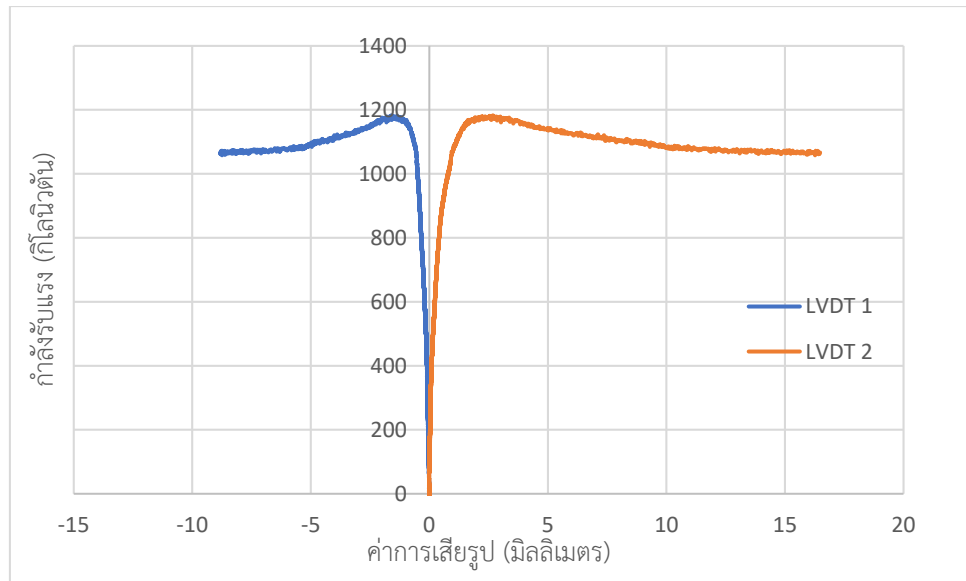
รูปที่ ง.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C3(A)



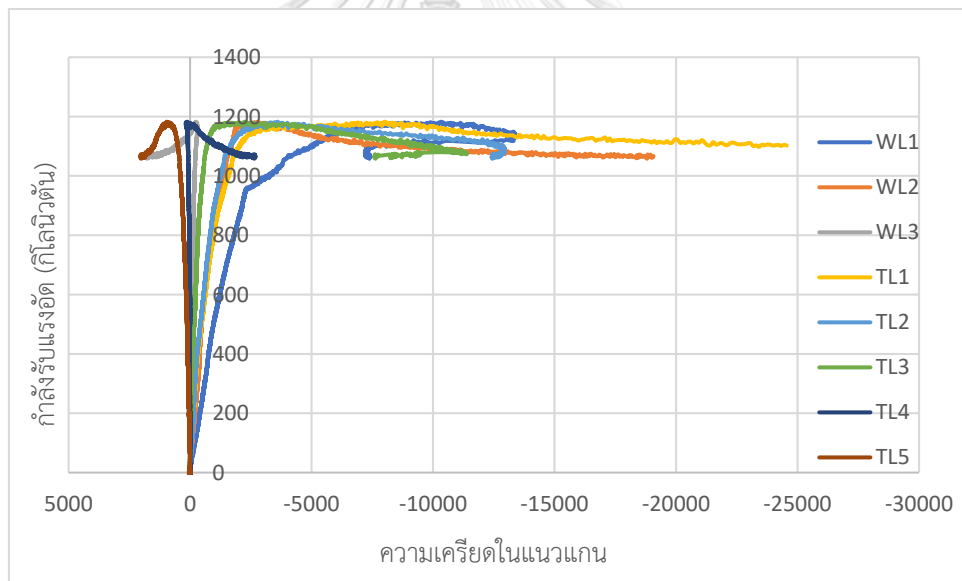
รูปที่ ง.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C3(A)



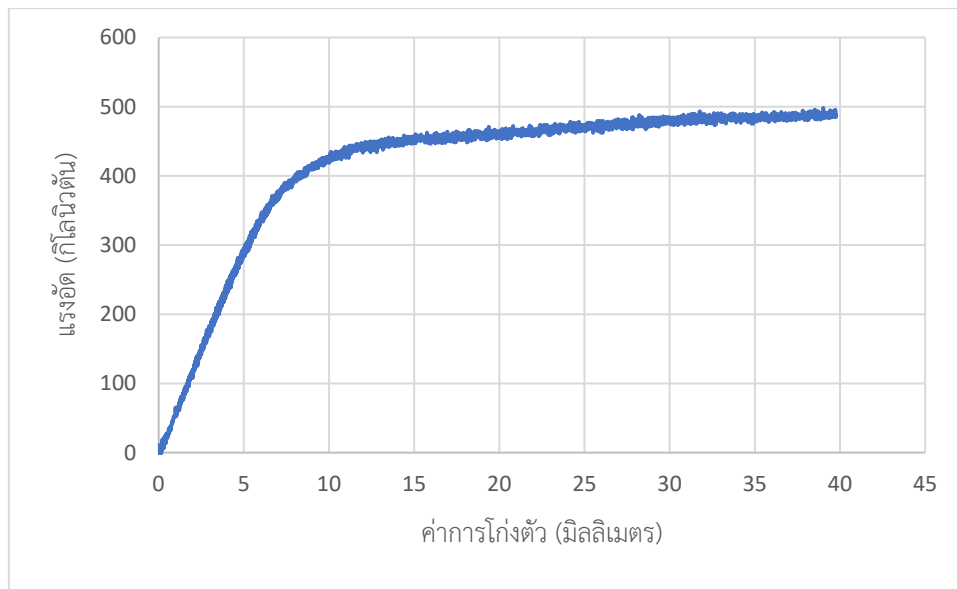
รูปที่ ง.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวขวางของตัวอย่าง C3(A)



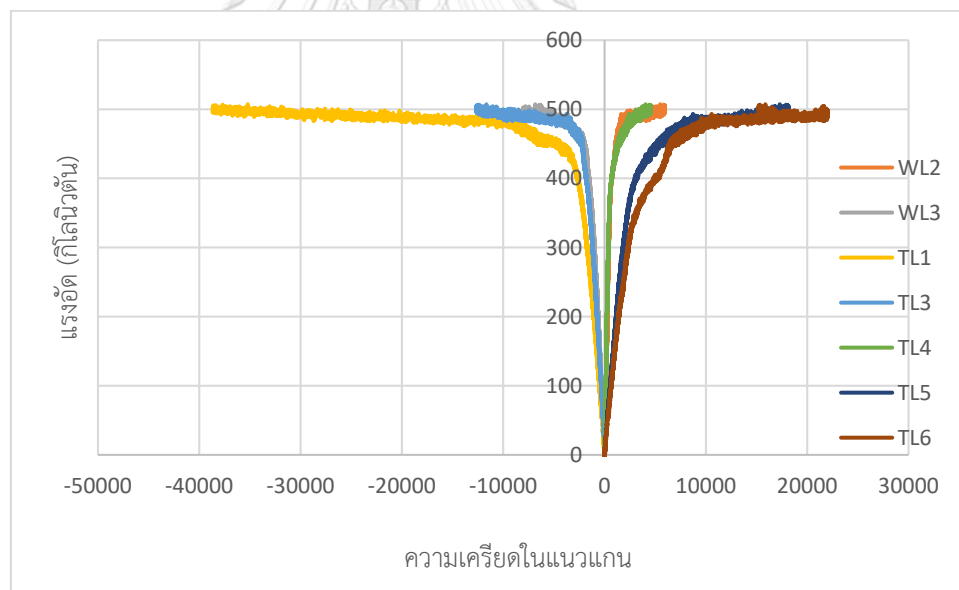
รูปที่ ง.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการเสียรูปของตัวอย่าง C3(B-2)



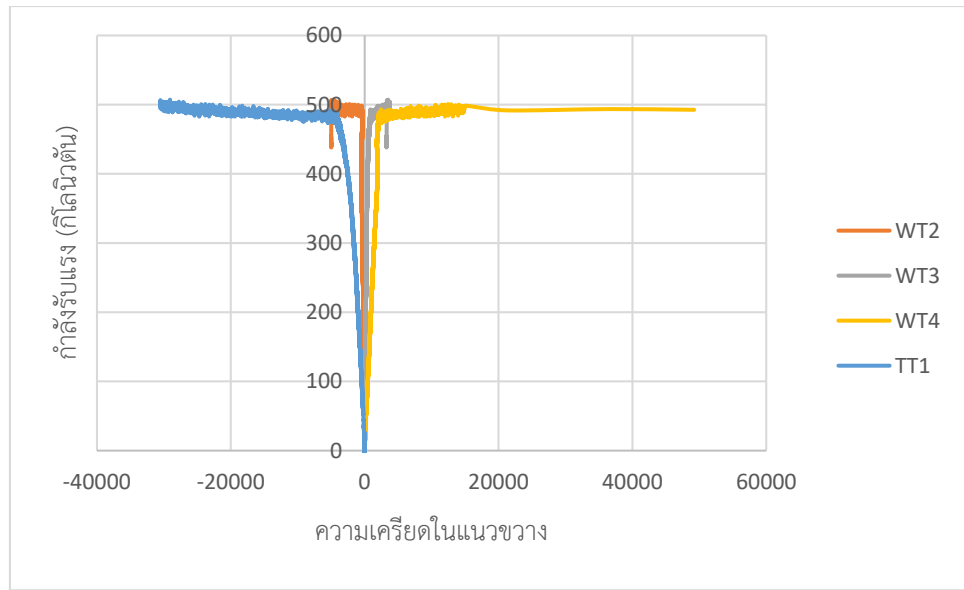
รูปที่ ง.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C3(B-2)



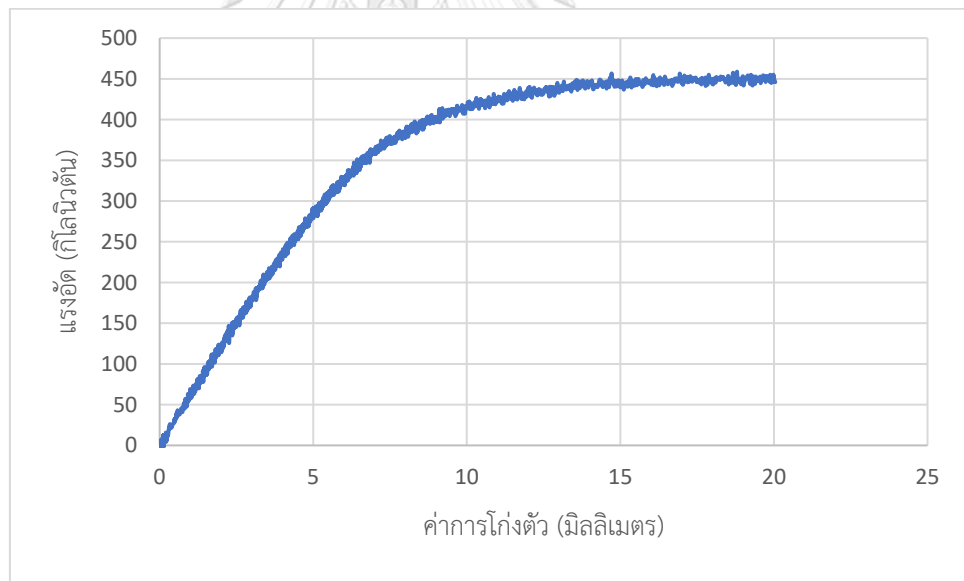
รูปที่ ง.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการโก่งตัวของตัวอย่าง C4(A)



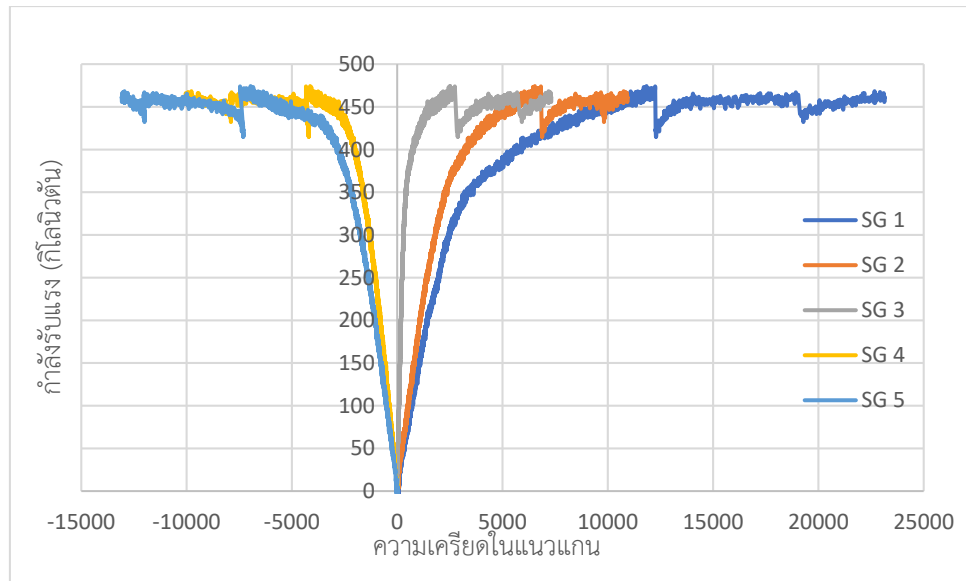
รูปที่ ง.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C4(A)



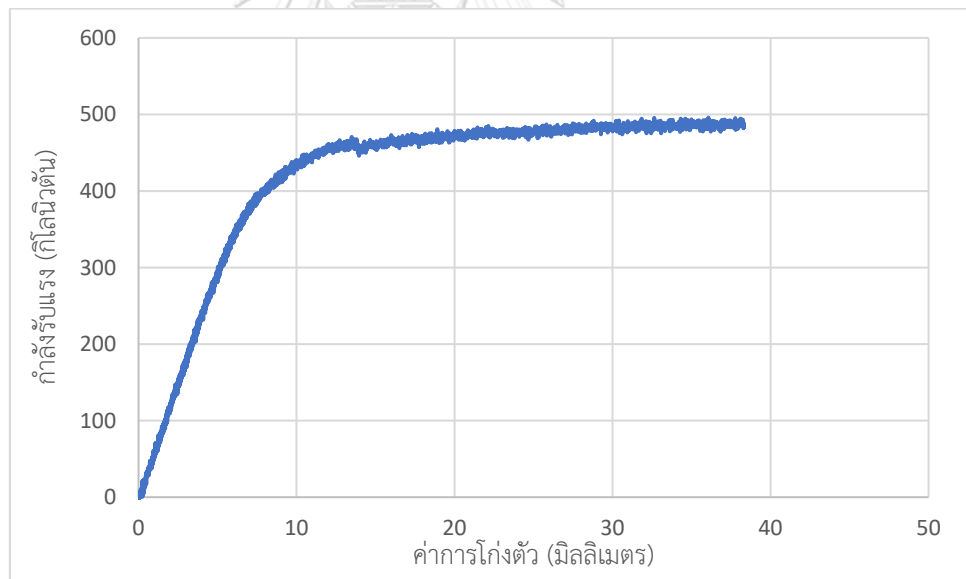
รูปที่ ง.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวขวางของตัวอย่าง C4(A)



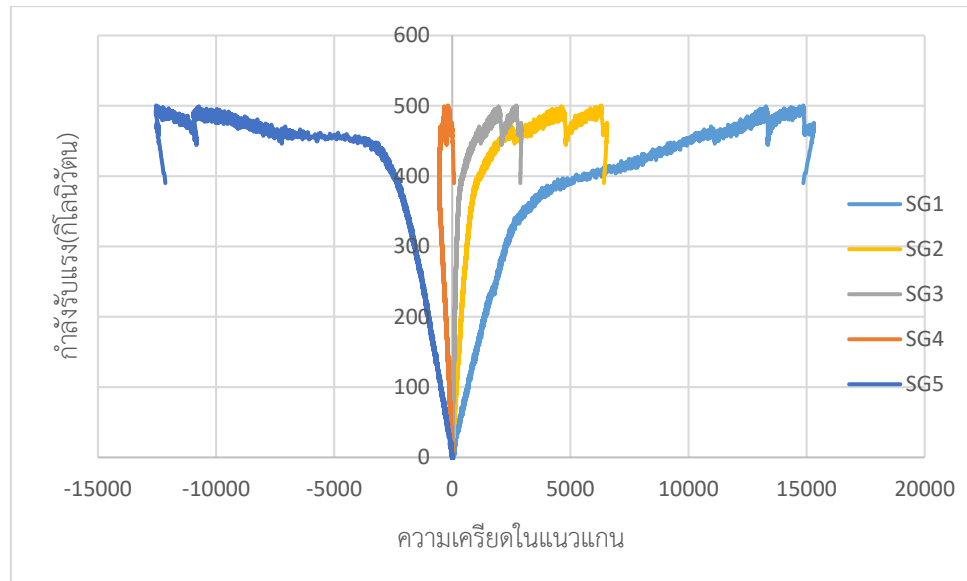
รูปที่ ง.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการโก่งตัวของตัวอย่าง C4(B-1)



รูปที่ ง.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่าง C4(B-1)



รูปที่ ง.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าการโก่งตัวของตัวอย่าง C4(B-2)



รูปที่ 3.0 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงและค่าความเคียดในแนวแกนของตัวอย่าง C4(B-2)

บรรณานุกรม

1. Lie, T. and V. Kodur, *Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete*. Journal of Structural Engineering, 1996. 122(1): p. 30-36.
2. Kodur, V. and T. Lie, *Fire resistance of circular steel columns filled with fiber-reinforced concrete*. Journal of structural engineering, 1996. 122(7): p. 776-782.
3. Wang, Q., D. Zhao, and P. Guan, *Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete*. Engineering Structures, 2004. 26(7): p. 907-915.
4. Zhu, M., et al., *Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load*. Engineering Structures, 2010. 32(8): p. 2278-2286.
5. Ellobody, E. and M.F. Ghazy, *Experimental investigation of eccentrically loaded fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2012. 76: p. 167-176.
6. Ramberg, W. and W.R. Osgood, *Description of stress-strain curves by three parameters*. 1943.
7. Eurocode, C., 4: *Design of composite steel and concrete structures*. 1994, Part.
8. Wang, X., J. Liu, and S. Zhang, *Behavior of short circular tubed-reinforced-concrete columns subjected to eccentric compression*. Engineering Structures, 2015. 105: p. 77-86.
9. 228-2010, G.T., *Metallic materials-tensile testing-Part 1: method of test at room temperature*. Beijing: China Standard Press; 2010 [in Chinese].
10. Wang, X., J. Liu, and X. Zhou, *Behaviour and design method of short square tubed-steel-reinforced-concrete columns under eccentric loading*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. 116: p. 193-203.
11. Johnson, R.P. and D. Anderson, *Designers' Guide to EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings*. 2004: Thomas Telford.
12. Liu, J., et al., *Behavior and Strength of Circular Tubed Steel-Reinforced-Concrete*

- Short Columns under Eccentric Loading*. Advances in Structural Engineering, 2015. 18(10): p. 1587-1595.
13. ธนพัฒน์ อ้นถาวร, การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณหน้าตัดวงกลมรับแรงกระทำเยื้องศูนย์. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2016.
 14. A.L.Xiao, *Behavior and Design Method of Steel-Reinforced High-Performance Concrete Filled Steel Tubular Columns Under Axial Load*. 2009.
 15. Han, L.-H., G.-H. Yao, and Z.J.T.-W.S. Tao, *Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion*. 2007. 45(1): p. 24-36.
 16. Hognestad, E., *Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*. 1951, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering
 17. Mander, J.B., M.J. Priestley, and R.J.J.o.s.e. Park, *Theoretical stress-strain model for confined concrete*. 1988. 114(8): p. 1804-1826.
 18. วรการ อ้นตเสนา, การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2016.
 19. Al-Shahari, A.M., et al., *Behavior of lightweight aggregate concrete-encased composite columns*. 2003. 3(2): p. 97-110.
 20. Committee, A., *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*. American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, 2010.
 21. ทักษิณ เทพชาตรี และ อัครวัชร เล่นวารีย์, *พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก ปรับปรุงครั้งที่สี่*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2012.
 22. de Normalisation, C.E., *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. part 1-2: General rules-structural fire design*. CEN ENV, 1994.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายรณพีร์ รุ่งมงคลรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	31 สิงหาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2558 จนถึงปัจจุบัน

