



กำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาเหล็กกลวงเอียงขึ้นรูปเย็น

การรอกคอนกรีตภายใต้แรงสลับทิศในแนวตั้ง

Axial Strength of Inclined Concrete-Filled Cold-Formed Steel Tubular Columns under Vertical Cyclic Loading

กฤษณะ เป็งถากาศ*, ชยานนท์ หรรษภิญโญ ชินพัฒน์ บัวชาติ และ พุทธรักษ์ จรัสพันธ์กุล

Kritsana Pengtakad*, Chayanon Hansapinyo, Chinapat Buachart and Bhuddarak Charatpangoon

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

*E-mail: kritsana.tn23@gmail.com

Tel: 053-944156, Fax: 053-892376

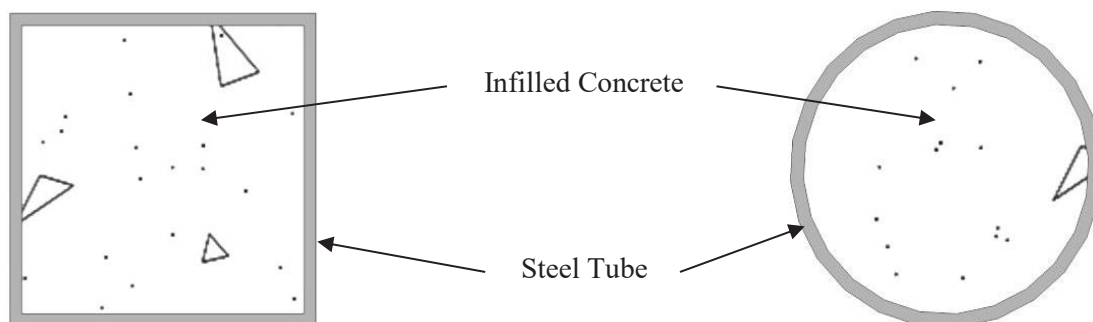
บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสลับทิศในแนวตั้งของเสาเหล็กกลวงเอียงกรอกคอนกรีต (ซึ่งในที่นี้เรียกว่า เสา CFST) โดยตัวอย่างเสาทดสอบมีขนาด 75×75 มม. ยาว 500 มม. รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่างทำการทดสอบภายใต้การรับแรงสลับทิศในแนวตั้ง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความหนาของเสาเหล็กกลวง (1.8 และ 3.0 มม.) การกรอกคอนกรีต (ไม่กรอกคอนกรีต และกรอกคอนกรีตกำลังอัด 20 MPa) และมุมเอียงของเสา (0° , 4° และ 9°) จากการทดสอบพบว่า เสาตัวอย่างเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยคอนกรีตที่กรอกลงไปทำให้เสาตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทั้งนี้เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดึงของเสาพบว่า การกรอกคอนกรีตไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด โดยกำลังรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับกำลังดึงครากของเสาเหล็กกลวงเท่านั้น และยังพบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณออกแบบตามมาตรฐาน AISC (2005) พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the vertical cyclic loading behavior of the inclined concrete-filled steel tubular columns (hereinafter, CFST columns). A total 12 specimens were tested. All test specimens are 75×75 mm square tube section and 500 mm length. The main parameters varied in the test are thickness of steel tube (1.8 and 3.0 mm), filled concrete (without concrete and 20 MPa concrete) and inclined angle (0° , 4° and 9°). The experimental results showed that all specimens were failed due to local buckling. The results also exhibited that in CFST columns, the infilled concrete provided a greater compressive strength to the steel tube section up to its ultimate strength. The compressive strength decreased slightly with the increasing of the inclined angle. Besides, it could be seen that the tensile strength was not affected by infilled concrete, the tensile strength only relied on the yield strength of steel tubular columns. In addition, comparison of the compressive and the tensile strength, between the tested results and those from AISC (2005) standard were presented with good agreement.

Keywords: Concrete-filled steel tube, Inclined column, Cyclic loading



รูปที่ 1 เสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต (หน้าตัดสี่เหลี่ยมและวงกลม)

2. กำลังรับแรงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

2.1 กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

จากข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ AISC ปี ค.ศ. 2005 [10] ซึ่งมาตรฐานการออกแบบนี้ไม่คิดผลของมุมเอียงของเสา โดยกำหนดขนาดของเนื้อที่หน้าตัดเหล็กโครงสร้าง (A_s) ต้องไม่น้อยกว่า 1% ของเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t) ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมต้องไม่เกิน $2.26\sqrt{E/F_y}$ กำลังครากของเหล็ก $F_y \leq 525$ MPa กำลังของคอนกรีต $21 \leq f'_c \leq 70$ MPa สำหรับคอนกรีตธรรมดา และ $21 \leq f'_c \leq 42$ MPa สำหรับคอนกรีตมวลเบา อัตราส่วนการออกแบบกำลังของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีตคล้ายกับกำลังของเสาเหล็กธรรมดา เพียงแต่ออกแบบโดยพิจารณากำลังของวัสดุเหล็กและคอนกรีตร่วมกัน โดยกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีตสำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีที่ $P_e < 0.44P_0$

$$P_n = 0.877P_e \quad (1)$$

กรณีที่ $P_e \geq 0.44P_0$

$$P_n = P_0 \left[0.658^{\left(\frac{P_0}{P_e} \right)} \right] \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } P_0 = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (3)$$

$$P_e = \pi^2 (EI_{eff}) / (KL)^2 \quad (4)$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + C_1 E_c I_c \quad (5)$$

$$C_1 = 0.1 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.3 \quad (6)$$

โดยที่ A_s และ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเหล็กกลวงและคอนกรีต F_y และ f'_c คือ กำลังครากของเสาเหล็กกลวง และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต EI_{eff} คือ สติเฟนสประสิทธิภาพของหน้าตัดประกอบ E_s และ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กและคอนกรีต I_s และ I_c คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กและคอนกรีต K คือ ตัวคูณความยาวประสิทธิภาพ L คือ ความยาวที่ปราศจากการยึดรั้งด้านข้าง

2.2 กำลังรับแรงดึงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

จากข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ AISC ปี ค.ศ. 2005 ได้ระบุให้กำลังรับแรงดึงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต สามารถคำนวณได้จาก

$$P_n = A_s F_y \quad (7)$$

3. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบเป็นเสาสั้นทั้งหมด 12 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

- กาลังอัดคอนกรท : ไมกรอกคอนกรท และ 20 MPa
- ความหนาเสาเหลกกลว : 1.8 และ 3.0 มม.
- มุมเอียงองเสา : 0° 4° และ 9°
ในการใชสญลคณแสดงดวอยางทดสอบ
- สญลคณดวที่ 1 “T” แสดงความหนาหน้าดัดเสาเหลกกลวองดวอยางทดสอบ

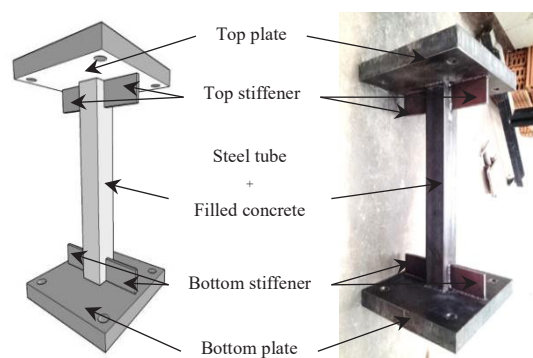
- สญลคณดวที่ 2 “C” แสดงกาลังอัดคอนกรทที่กรอกกลงไปนเหลกกลว
- สญลคณดวที่ 3 “A” แสดงมุมเอียงองดวอยางทดสอบ
เชน T1.8C20A4 หมายถึง ดวอยางนคมีความหนาองหน้าดัดเหลก 1.8 มม. กรอกคอนกรทกาลังอัด 20 MPa และมุมเอียงองดวอยางเทากบ 4°

ตารางที่ 1 ดวอยางทดสอบ

No.	Specimen	Dimension $b \times b \times t$ (mm.)	θ (°)	Concrete strength (MPa)
1	T1.8C0A0	75 × 75 × 1.8	0	Empty
2	T1.8C0A4	75 × 75 × 1.8	4	Empty
3	T1.8C0A9	75 × 75 × 1.8	9	Empty
4	T1.8C20A0	75 × 75 × 1.8	0	23
5	T1.8C20A4	75 × 75 × 1.8	4	23
6	T1.8C20A9	75 × 75 × 1.8	9	23
7	T3.0C0A0	75 × 75 × 3.0	0	Empty
8	T3.0C0A4	75 × 75 × 3.0	4	Empty
9	T3.0C0A9	75 × 75 × 3.0	9	Empty
10	T3.0C20A0	75 × 75 × 3.0	0	23
11	T3.0C20A4	75 × 75 × 3.0	4	23
12	T3.0C20A9	75 × 75 × 3.0	9	23

3.2 การเตรยมดวอยางทดสอบ

ในการทดสอบจะกรอกคอนกรทลงไปในเหลกกลวโดยทำการจเข้ขาเพื่อองกันไมใหเกิดโพรงภายในและการแยกตัวของคอนกรทซึ่งมผลตอพฤติกรรมองเสาพรอมกับเก็บกอนดวอยางคอนกรทเพื่อหากาลังอัดเหลกของคอนกรท หลังจากนั้นทำการบมจนคอนกรทมอยุครบ 28 วัน แลวนาดวอยางมาเชื่อมดัดกับแผนเหลกฐาน (plate) และแผนเสริมความแรง (stiffener) บริเวณปลายบนและปลายลางองดวอยางทดสอบ แสดงดงรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการดัดดงดวอยางทดสอบบนเครองทดสอบ Universal ขนาด 200 ตัน โดยทำการขดร้งทั้งปลายบนและปลายลางองดวอยางทดสอบใหมีลคณะเป็นการขดแนน (fixed) ทำการดัดดงแถบวัดความเครียด (strain gauge) และเกววัดระยะ (transducer) ทั้ง 3 ทิศทางไดแก ระยะเคลอนในแนวราบ 2 ทิศทาง และระยะเคลอนในแนวตั้ง แสดงดงรูปที่ 3



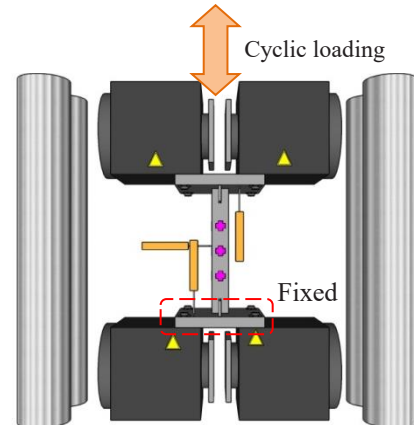
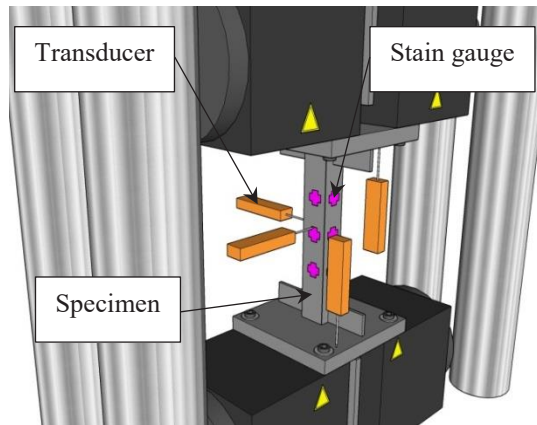
รูปที่ 2 ดวอยางทดสอบเสา CFST

3.3 รูปแบบองเสาเอียง

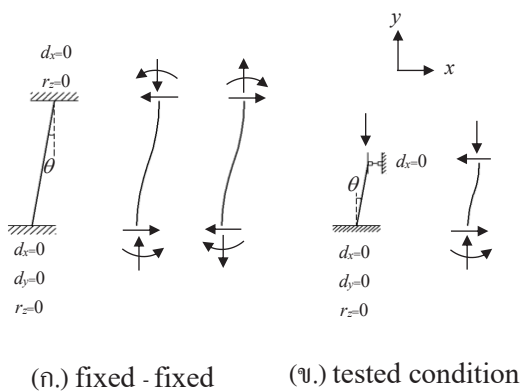
สำหรับเสาเอียงในโครงสร้งที่ไมมีการเซ (non-sway structure) ไดทำการระบุเงื่อนในการขดร้งแสดงดงรูปที่ 4 จะสังเกตไดวามีทั้งแรงดัด (bending) และแรงเงื่อน (shearing) ทั้งที่เกิดขึ้นจากแรงอัดและแรงดึงโดยที่ความยาวครึ่งหนึ่งของเสาดงรูปที่ 4(ข) จะใชเป็นรูปแบบ

ของเสา CFST ที่ใช้ในการทดสอบนี้ โดยเงื่อนไขการยึดรั้งที่ปลายล่างของเสาตัวอย่างจะเป็นแบบ fixed ที่ปลาย

บนจะให้แรงกระทำในแนวดิ่ง (แกน y) และจำกัดการเคลื่อนที่ตามแนวราบ (แกน x) [7]



รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบและติดตั้งเครื่องมือวัด



รูปที่ 4 รูปแบบของเสาเอียง

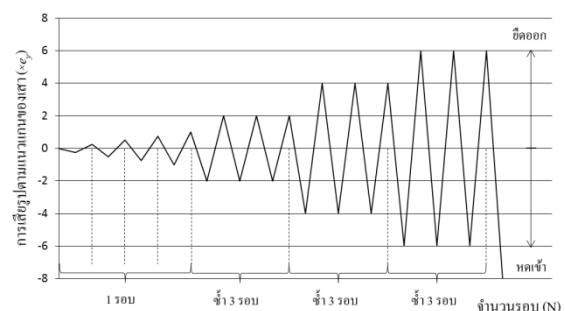
3.4 การทดสอบโดยการให้แรงสลับทิศ

ในการทดสอบจะให้แรงกระทำตามแนวแกน โดยให้แรงอัดสลับกับการให้แรงดึง (cyclic loading) ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียรูปแบบหดเข้าและยืดออก โดยการทดสอบจะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก (e_y) แสดงดังสมการที่ 8

$$e_y = \frac{F_y}{E} \times L \quad (8)$$

โดยที่ e_y คือ ระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก (มม.) F_y คือ หน่วยแรงดึงคราก (MPa) E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเหล็กกลวง (MPa) และ L คือ ความยาวตัวอย่างทดสอบ (มม.)

การควบคุมการเคลื่อนที่ในการทดสอบนั้น จะให้การเคลื่อนที่ที่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 เท่าของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก e_y กระทำ 1 รอบ และเพิ่มเป็น 3 รอบที่ 2, 4, 6, 8 เท่าของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก e_y ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติ แสดงดังรูปที่ 5

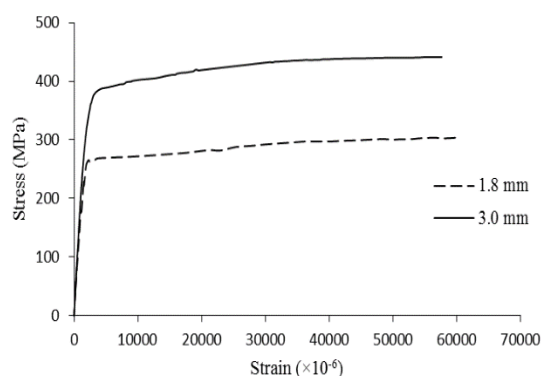


รูปที่ 5 รูปแบบการให้แรงตามระยะการยืดหด

4. ผลการทดสอบ

4.1 กำลังวัสดุ

ทดสอบแรงดึงของเหล็กหนา 1.8 และ 3.0 มม. ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.107-2533 [11] ได้กำลังกำลังดึงคราก (yield strength) เท่ากับ 264 และ 382 MPa ตามลำดับ และกำลังดึงประลัย (ultimate strength) เท่ากับ 305 และ 441 MPa ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 และกำลังอัดคอนกรีตซึ่งออกแบบไว้ที่ 20 MPa โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 23 MPa

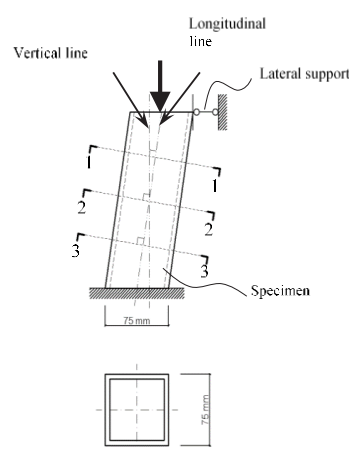


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

4.2 รูปแบบการวิบัติ

จากผลการทดสอบเสา CFST ที่ทดสอบโดยการให้ระยะยึด-หัดตามแนวแกน พบว่า เสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต จะรับน้ำหนักจนเกิดการครากของเสาเหล็กกลวง และเกิดการโก่งเดาะ ที่มีลักษณะตั้งฉากกับทิศทางตามแนวยาว (longitudinal direction) โดยหน้าตัดเสาตัวอย่างถูกกดอัดจนเสียรูป โดยตัวอย่างทั้งหมดจะเกิดการวิบัติที่บริเวณปลายบนหรือปลายล่าง ห่างจากแผ่นเสริมความแข็งแรงเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณนี้มีหน่วยแรงสูงกว่าบริเวณอื่น โดยที่ตัวอย่างที่เป็นเหล็กกลวงจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่แบบเข้าด้านในและออกด้านนอก ส่วนตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตจะเกิดการโก่งเดาะแบบออกด้านนอกอย่างเดียว เนื่องจากเกิดการเบ่งตัวของคอนกรีตด้านในเมื่อรับแรงกดอัด ซึ่งรูปแบบการวิบัติจะแสดงดังรูปที่ 8

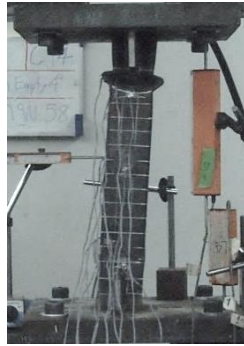
โดยพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับเส้นตามแนวยาว (longitudinal line) จะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง [7] ซึ่งจะใช้ในการคำนวณตามมาตรฐาน AISC (2005) (สมการที่ (3) (6) และ (7)) เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ เช่นตัวอย่างรูปตัดที่ 1-1 ในรูปที่ 7 ตัวอย่างที่เป็นเสาตรง เสาที่เอียง 4° และเสาที่เอียง 9° มีพื้นที่หน้าตัด 75×75 มม. 75×74.8 มม. และ 75×74 มม. ตามลำดับ โดยพบว่ามุมเอียงมีผลต่อพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการรับแรงของเสา ซึ่งมีผลทำให้กำลังรับแรงของเสาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง



รูปที่ 7 แบบจำลองของเสา CFST



(ก) T1.8C0A0



(ข) T1.8C0A4



(ค) T1.8C0A9



(ง) T1.8C20A0



(จ) T1.8C20A4



(ฉ) T1.8C20A9



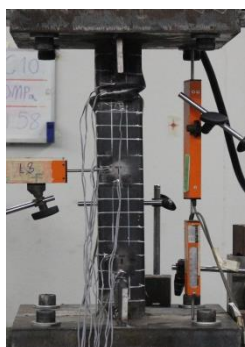
(ช) T3.0C0A0



(ซ) T3.0C0A4



(ฅ) T3.0C0A9



(ญ) T3.0C20A0



(ฎ) T3.0C20A4



(ฏ) T3.0C20A9

รูปที่ 8 รูปแบบของการวิบัติ

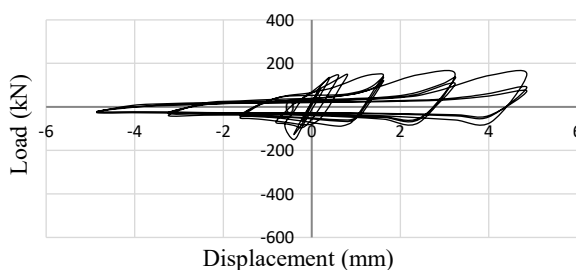
4.3 พฤติกรรมการรับแรงสลับทิศ และเส้นโค้ง Envelope

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงสลับทิศกับการเสียรูปของเสาตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 9 จะสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกเมื่อเสาตัวอย่างยังไม่เกิดการโก่งเดาะนั้น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเหล็กกลวงยังไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่น (proportional limit) และหน่วยแรงที่เกิดในคอนกรีตต่ำกว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต พฤติกรรมจะเป็นแบบยืดหยุ่น เสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดจะน้อยกว่าตัวอย่างเสาที่กรอกคอนกรีต เนื่องจากเสาเหล็กกลวงจะต้องรับน้ำหนักโดยที่ไม่มีคอนกรีตมาช่วยรับ จึงทำให้เสาตัวอย่างรับน้ำหนักจนเกิดการครากของเสาเหล็กกลวง จากนั้นกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างจะลดลงเรื่อย ๆ ในส่วนของกำลังรับแรงดึงของเสาตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจนถึงกำลังรับแรงดึงครากของเสาเหล็กกลวง ซึ่งในส่วนนี้เสาเหล็กกลวงจะเป็นตัวรับแรงซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของเสาเหล็ก

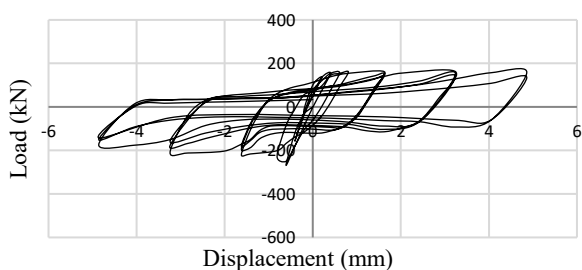
ในส่วนเสาตัวอย่างที่กรอกคอนกรีต จะสังเกตเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างจะสูงกว่าเสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตจะช่วยเสาเหล็กกลวงในการรับแรงอัด ซึ่งคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดที่ดี

และยังช่วยชะลอหรือลดความรุนแรงของการโก่งเดาะของเสาเหล็กกลวงได้ โดยเสาตัวอย่างจะมีกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกำลังถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต หรืออาจจะสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากผลของการโอบรัดของเสาเหล็กกลวง โดยเสาเหล็กกลวงจะจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงกดอัด และช่วยชะลอการแตกออกของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องขึ้นอยู่กับความหนาของเสาเหล็กกลวงด้วย แสดงดังรูปที่ 10 (ก, ง) ในส่วนของกำลังรับแรงดึงจะเหมือนกับเสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดึงครากของเสาเหล็กกลวง

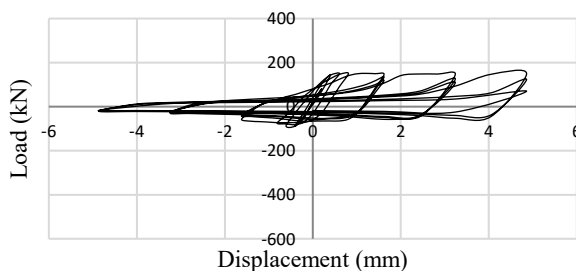
โดยในส่วนของเสาตัวอย่างที่เอียง จะสังเกตได้ว่าเสาตัวอย่างที่กรอกและไม่กรอกคอนกรีต จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเสาตรงเล็กน้อย โดยเสาที่มีความเอียงมากขึ้นก็จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดในการรับแรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง สำหรับกำลังรับแรงดึงในเสาตัวอย่าง การเพิ่มขึ้นของมุมเอียงไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก, ข)



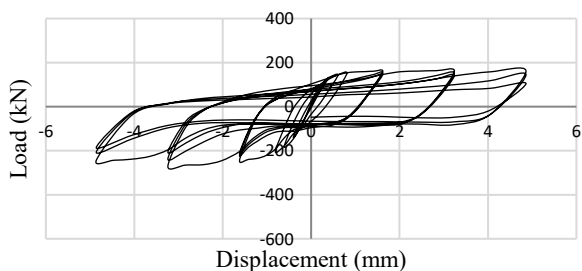
(ก) T1.8C0A0



(ข) T1.8C20A4

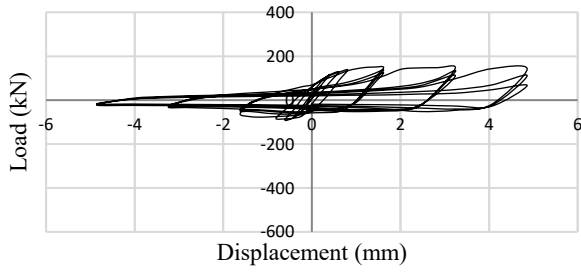


(ค) T1.8C0A4

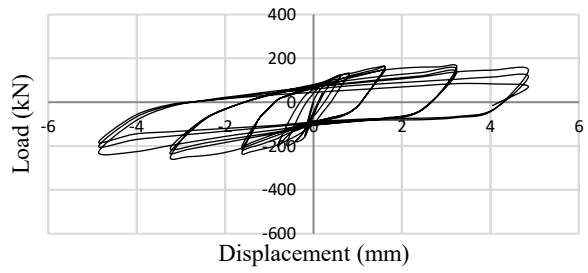


(ง) T1.8C20A0

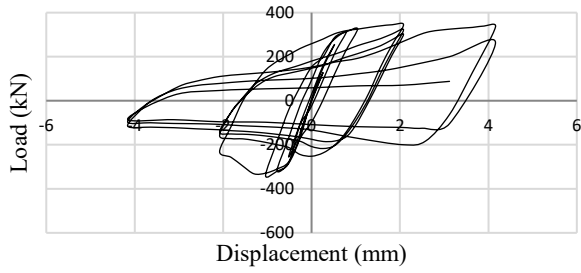
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงสลับทิศกับการเสียรูปของเสา CFST



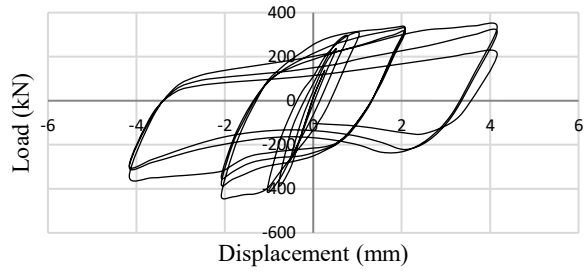
(จ) T1.8C0A9



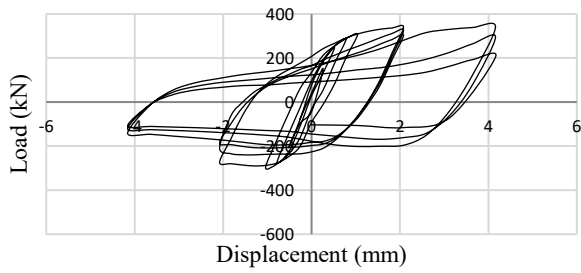
(ข) T1.8C20A9



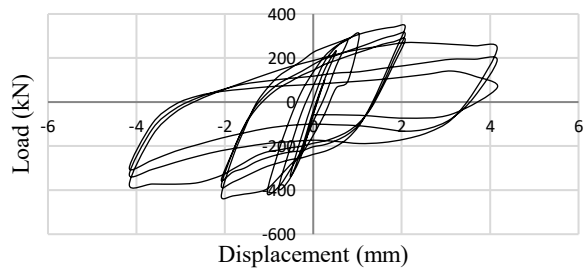
(ง) T3.0C0A0



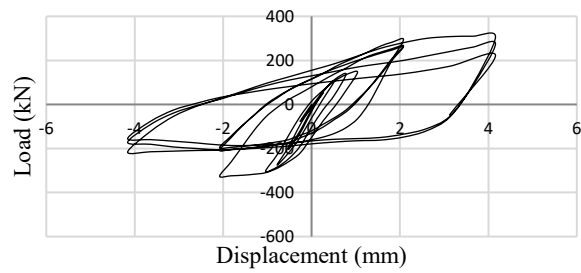
(ฉ) T3.0C20A0



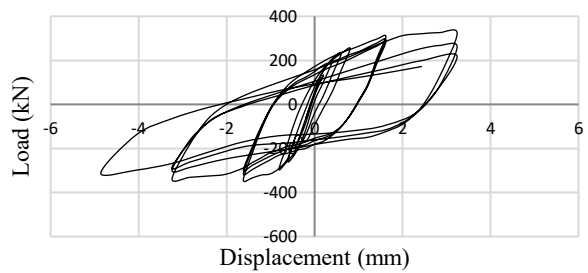
(ค) T3.0C0A4



(ช) T3.0C20A4

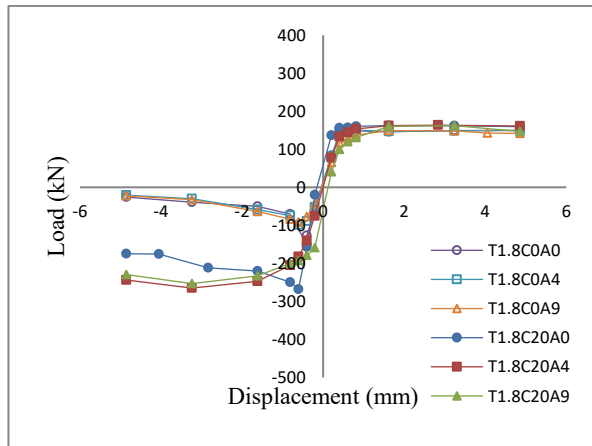


(ด) T3.0C0A9

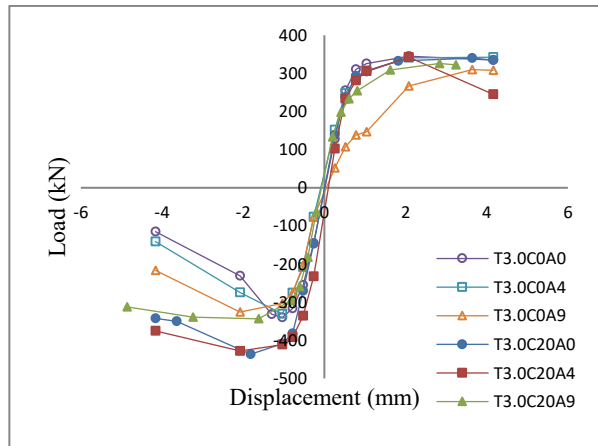


(ต) T3.0C20A9

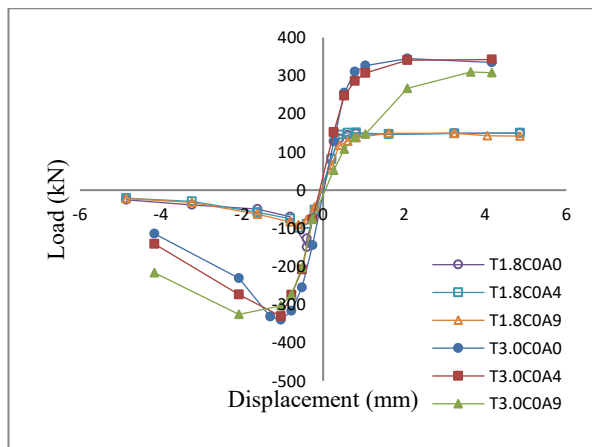
รูปที่ 9 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับพฤติกรรมการเสียรูปของเสา CFST



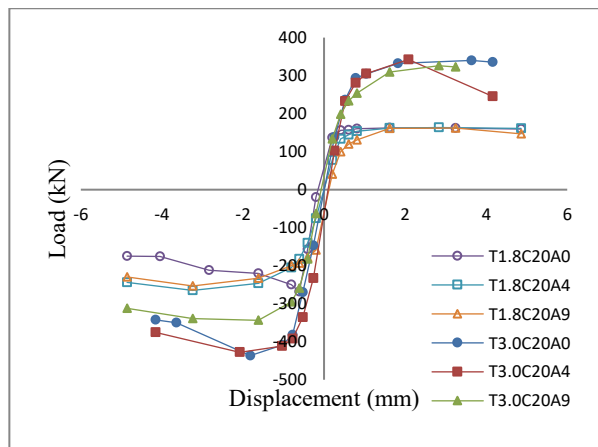
(ก) ตัวอย่างความหนา 1.8 มม. ที่กรอกและไม่กรอก



(ข) ตัวอย่างความหนา 3.0 มม. ที่กรอกและไม่กรอก



(ค) ตัวอย่างความหนา 1.8 และ 3.0 มม. ที่ไม่กรอก



(ง) ตัวอย่างความหนา 1.8 และ 3.0 มม. ที่กรอกคอนกรีต

รูปที่ 10 เส้นโค้ง Envelope

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากมาตรฐานการออกแบบ AISC (2005)

No.	Specimen	Compressive Strength			Tensile Strength		
		Test (kN)	AISC (2005) (kN)	AISC/Test (kN)	Test (kN)	AISC (2005) (kN)	AISC/Test (kN)
1	T1.8C0A0	124	138	1.110	149	140	0.937
2	T1.8C0A4	99	138	1.391	151	140	0.929
3	T1.8C0A9	91	138	1.512	149	140	0.939
4	T1.8C20A0	263	232	0.881	162	140	0.861
5	T1.8C20A4	260	232	0.892	163	140	0.856
6	T1.8C20A9	253	232	0.916	162	140	0.862
7	T3.0C0A0	340	330	0.969	340	337	0.992
8	T3.0C0A4	330	329	0.998	342	337	0.986
9	T3.0C0A9	325	329	1.013	309	337	1.092
10	T3.0C20A0	428	417	0.975	340	337	0.992
11	T3.0C20A4	427	417	0.977	342	337	0.986
12	T3.0C20A9	343	417	1.216	326	337	1.035
Mean				0.988	0.962		
Standard deviation				0.193	0.070		

5. บทสรุป

1) ความหนาของเสาเหล็กกลวงมีผลทำให้มีกำลังรับแรงดึงสูงขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งเสาเหล็กกลวงหนา 3.0 มม. จะสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าเสาเหล็กกลวงที่หนา 1.8 มม. โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังคราก (yield stress) ของเสาเหล็กกลวง

2) การกรอกคอนกรีตข้างในเสาเหล็กกลวง ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต ซึ่งการกรอกคอนกรีตจะช่วยชะลอการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กกลวงได้ โดยกำลังรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตที่กรอกลงไป ทั้งนี้การกรอกคอนกรีตจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงดึง

3) มุมเอียงมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างที่เป็นเสาตรง (0°) จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่เอียง 4° และ 9° ตามลำดับ ทั้งตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตและไม่กรอกคอนกรีต เนื่องจากตัวอย่างที่เอียงมีขนาดหน้าตัดรับแรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง

- ตัวอย่างเสาเหล็กกลวงหนา 1.8 มม. ที่ไม่กรอกคอนกรีต มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 20 และ 8% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ
- ตัวอย่างเสาเหล็กกลวงหนา 3.0 มม. ที่ไม่กรอกคอนกรีต มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 3 และ

2% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ

- ตัวอย่างเสา CFTS หนา 1.8 มม. มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 1 และ 3% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ
- ตัวอย่างเสา CFTS หนา 3.0 มม. มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 1 และ 20% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ

4) เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISC (2005) กับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 2

5) เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISC-ASD/LRFD (2005) พบว่าวิธี ASD ให้ค่าที่ปลอดภัย โดยที่วิธี LRFD ส่วนใหญ่ให้ค่าที่ปลอดภัย ยกเว้นตัวอย่างเสา T1.8C0A4 และ T1.8C0A9 ที่ได้ค่ามากกว่าการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยจึงขอใคร่แสดงความขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (R000011338)

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุคนธ์เมธ จิตรมหันตกุล. รอยเลื่อนและแผ่นดินไหว จ. เชียงราย, 2557. [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.geothai.net>
- [2] Schneider, S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*, 1998; 124(10): 1125-38.
- [3] กมลรัตน์ อุทธิรักษา และจักษดา ชำรงวุฒิ. พฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-11 กรกฎาคม, จังหวัดชลบุรี, ประเทศไทย, 2558.
- [4] Liu, D., Gho, W.M. and Yuan, J. Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003; 59: 1499-1515

- [5] Han, L.H. Test on stub columns of concrete-filled RHS section. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002; 58 (3): 353-72.
- [6] Lee, S.H., Kim, H.S., Bang, J.S., Won, Y.A. and Choi, S.M. Structural characteristics of welded built-up square concrete filled tubular stub columns associated with concrete strength. *Procedia Engineering*, 2011; 14, 1140-1148.
- [7] จั๊กษดา ชำรงวุฒิ, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. Tubed concrete column square tubed concrete columns and composite column design equations. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา, 2552.
- [8] Han, L.H., Ren, Q.X. and Li, W. Test on inclined, tapered and STS concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010; 66: 1186-95.
- [9] ณัฐชนก เอื้อตรงจิตต์, ชินพัฒน์ บัวชาติ และชยานนท์ หรรษภักญโย. เสาเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตรับแรงสลับทิศในแนวแกน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม, จังหวัดขอนแก่น, 2557.
- [10] ANSI/ AISC 360-05. Specification for structural steel buildings. Chicago (USA): American Institute of Steel Construction (AISC), An American National Standard, 2005.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก. 107-2553. กระทรวงอุตสาหกรรมกรุงเทพมหานคร, 2553.