

เสาเหล็กสี่เหลี่ยมหน้าตัดกลวงเติมคอนกรีตในภายใต้แรงกระทำวนซ้ำ Concrete Infilled Rectangular Hollow Steel Columns under Cyclic Loading

ชยานนท์ หารษภิญโญ

Chayanon Hansapinyo

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

โทร. 053-944156 โทรสาร 053-892376

E-mail: chayanon@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบกำลังรับแรงตามแนวแกนแบบวนซ้ำของเสาเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเสาทดสอบมีขนาดหน้าตัด 100×100 มม.หนา 1.8 มม.ยาว 500 มม. รวมจำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย (1) วิธีการให้แรงตามแนวแกน 2 ลักษณะคือ แรงสลับทิศ และแรงอัดซ้ำ (2) การกรอกวัสดุในช่องว่าง ได้แก่ เสาเหล็กกลวง เติมคอนกรีตในรู และ เติมปูนทรายในรู ผลการทดสอบพบว่า เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของตัวอย่างเสา โดยตัวอย่างเสาที่มีการเติมคอนกรีตและปูนทรายจะมีกำลังอัดสูงสุดมากกว่าเสาที่ไม่ได้กรอก และมีความสามารถรับแรงหลังการโก่งเดาะได้เพิ่มขึ้นได้อีกจนกระทั่งมีกำลังสูงสุดเท่ากับกำลังประลัยของวัสดุกรอก นอกจากนี้ยังช่วยรักษากำลังรับแรงไม่ให้ลดลงมากภายใต้การเกิดการเสียรูปแบบอินทาสติอย่างรุนแรง

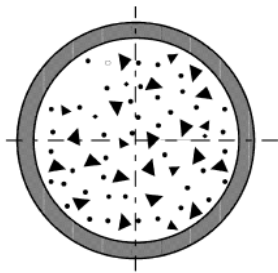
Abstract

This paper presents an experimental study on the response of rectangular hollow steel columns under cyclic loading. All 6 specimens had identical dimensions as 100×100 mm. and 1.8 mm. thick cross-section with 500 mm. length. The parameters were (1) concentric loadings, i.e. cyclic and compressive repeated loadings and (2) filling materials, i.e. No fill, concrete infilled and mortar infilled columns. The tested results indicate that all specimens exhibited local

buckling in which stable post-buckling strength could be observed for the infilled columns with higher bearing capacity corresponding to the ultimate strength of infilled materials. In addition, degradation of capacity under highly inelastic deformation can be effectively controlled.

1. บทนำ

การใช้งานโครงสร้างเหล็กในปัจจุบันได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจาก เมื่อเทียบกับงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้ก่อสร้างได้รวดเร็ว ไม่ต้องใช้แบบหล่อ และคุณสมบัติวัสดุมีความแน่นอนมากกว่า โดยเฉพาะเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดปิดหรือรูกลวงตรงกลางเนื่องจากให้รูปลักษณะที่มีความสวยงามไปพร้อมกันด้วย อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนดังกล่าวมักเกิดการบิดของหน้าตัดและเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local distortional buckling) จากผนังหน้าตัดที่บาง วิธีที่จะแก้ไขวิธีหนึ่งคือ การเติมคอนกรีตลงในช่องว่าง ดังแสดงในรูปที่ 1 เทคนิคนี้ได้ถูกใช้มามากกว่า 4 ทศวรรษ ทำให้ได้ความแข็งแรง ความทนทาน ความแข็งแกร่งสูง อย่างไรก็ตาม การกรอกคอนกรีตลงในชิ้นส่วนเหล็กหน้าตัดกลวง โดยเฉพาะเสาในขนาดหน้าตัดเล็กและยาว อาจเกิดปัญหาการแยกตัวของมวลรวมหยาบ หรือ หิน ที่อยู่ในสัดส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจะส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีโพรง และไม่สม่ำเสมอในตลอดความยาวเสา นอกจากนี้งานโครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นการออกแบบเพื่อรับแรงสถิต (Static) แต่เนื่องจากในบางพื้นที่ เช่น จังหวัดในเขตภาคเหนือนั้นอาจเกิดแผ่นดินไหวได้



รูปที่ 1 เสาเหล็กกลวงหน้าตัดกลวงกรอกคอนกรีต

ได้มีการศึกษาโดยการทดสอบการรับแรงสถิตของเสาเหล็กท่อกลวงเติมคอนกรีตในอดีตจำนวนมาก ได้แก่ งานศึกษา [1-6] งานศึกษาโดย Wright [7] ได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับเสาเหล็กท่อกลวงเติมคอนกรีต จากการศึกษาเหล่านี้สรุปได้ว่า คอนกรีตที่เติมลงในท่อกลวงจะเพิ่มความแข็งแรง ทนทาน และการดัดขึ้นพลางงานของท่อกลวง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเสาที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาสูง (D/t) เนื่องจากการโอบรัดแกนคอนกรีตและการยึดรั้งของผนังเหล็กท่อทำให้ป้องกันไม่ให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling)

งานศึกษาในช่วงแรกเกี่ยวกับการรับแรงของชิ้นส่วนเหล็กกลวงรับแรงสลับทิศโดย Popov et al. [8] ได้สรุปว่าเมื่อชิ้นส่วนเกิดการโก่งเดาะในระหว่างการทดสอบให้แรงสลับทิศกำลังรับแรงอัดจะลดลงในรอบการให้แรงถัดไป และค่าความแข็งแรงตามแนวแกน (axial Stiffness) ของตัวอย่างระหว่างการให้แรงดึงจะลดลงในแต่ละรอบแอมพลิจูดของระยะการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การโก่งเดาะเฉพาะที่ส่งผลให้เกิดการฉีกขาด งานศึกษาโดย Jain et al. [9] แสดงให้เห็นว่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดภายหลังการโก่งเดาะในระหว่าง รับแรงสลับทิศจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนความเพียวประสิทธิภาพ (slenderness ratio effective) ของชิ้นส่วน Remennikov and Walpole [10] แสดงให้เห็นถึงกำลังอัดภายหลังการโก่งเดาะ ของชิ้นส่วนเหล็กค้ำยันจะมีค่าระหว่าง 20%-100% ของกำลังอัดในรอบแรกโดยขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนความเพียวของชิ้นส่วนค้ำยันโดยเสาที่มีความเพียวจะเกิดการลดลงของกำลังอัดมากกว่า ส่วน Tremblay [11] ได้พิจารณางานทดสอบ 9 งานรวมการทดสอบการให้แรง

ทดสอบสลับทิศทั้งหมด 76 ทดสอบ โดยผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของเสาที่เกิดการโก่งเดาะโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดที่คำนวณโดยข้อกำหนดประเทศแคนาดา (CSA) [12] และข้อกำหนดอเมริกา (AISC LRFD) [13] ผลการศึกษาของ Tremblay ให้ข้อแนะนำว่าเสาค้ำยันที่มีความเพียวจะตอบสนองต่อแรงได้ดีภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ซึ่งสอดคล้องกับการค้นพบของ Jain et al. [9]

จากการทบทวนเอกสารในอดีต พบว่า งานศึกษาที่เกี่ยวข้องกับ กำลังรับแรงตามแนวแกนสลับทิศของเสาที่กรอกคอนกรีตหรือปูนทรายในรูปกลวงยังมีไม่มากนัก ทำให้การออกแบบใช้งานยังไม่เป็นที่แพร่หลาย บทความนี้แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงกดแบบสลับทิศของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวงที่กรอกด้วยคอนกรีต และปูนทรายเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาถึงกำลังรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน และการสูญเสียกำลังของเสาในแต่ละรอบการให้น้ำหนักสลับทิศ

2. กำลังรับแรงอัดของเสา

2.1 กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกลวง

ในข้อกำหนด AISI Specification ปี ค.ศ. 1996 สมการการออกแบบสำหรับคำนวณกำลังการโก่งเดาะดัดแบบอีลาสติกและอินอีลาสติก (P_n) ได้ถูกเปลี่ยนให้ใช้สมการคำนวณตามข้อกำหนดใน AISC LRFD Specification ดังที่ให้ไว้ในข้อกำหนด Section C4 (a) ดังนี้

$$P_n = A_e F_n \quad (1)$$

เมื่อ A_e คือ หน้าตัดประสิทธิภาพ และ F_n คือ หน่วยแรงโก่งเดาะแบบดัด เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$: $F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$ และเมื่อ $\lambda_c \geq 1.5$: $F_n = (0.877 / \lambda_c^2) F_y$ โดยที่ $\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e}$ และ $F_e = \frac{\pi^2 E_s}{(kl/r_s)^2}$ โดยที่ (kl) คือ ความยาวประสิทธิภาพ r_s และ E_s คือ รัศมีโมเมนต์เฉื่อย และโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก ตามลำดับ

2.3.2 กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กเติมคอนกรีต

การคำนวณกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กเติมคอนกรีตตามข้อกำหนดของ ACI [14] จะเป็นหลักการรวมกำลังของวัสดุทั้งสองดังแสดงในสมการที่ (2) และ AISC-LRFD ได้กล่าวไว้ในส่วนขององค์การเชิงประกอบ โดยใช้หลักการแปลงคุณสมบัติของวัสดุ ดังสมการ (3)

$$P_n = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (2)$$

$$P_n = A_s F_{cr} \quad (3)$$

โดยที่ A_s และ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กและคอนกรีต และ F_y และ f'_c คือ กำลังครากของเหล็ก และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ $F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my}$ เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$ หรือ $F_{cr} = (0.877 / \lambda_c^2) F_{my}$ เมื่อ $\lambda_c \geq 1.5$ โดยที่ $\lambda_c = (l / r_m \pi) \sqrt{F_{my} / (E_s + 0.4 E_c A_c / A_s)}$ และ $F_{my} = F_y + 0.85 f'_c A_c / A_s$ คือ รัศมีโรเจอร์สันดัดแปลงมีค่าเท่ากับ 0.3 เท่าของหน้าเสาหรือ รัศมีโรเจอร์สันของเหล็ก โดยเลือกใช้ค่ามาก

2.3.3 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของหน้าตัดเพื่อป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่

อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (D/t) สูงสุดของเหล็กกลวงที่นำมาใช้บรรจุคอนกรีตเพื่อป้องกันการเกิดการโก่งเฉพาะที่ (Local Buckling) ในแต่ละมาตรฐานแสดงไว้ดังนี้

$$D/t \leq 52 \sqrt{235 / F_y} \quad (\text{EC4 [15]}) \quad (4)$$

$$D/t \leq \sqrt{3 E_s / F_y} \quad (\text{AISC [13]}) \quad (5)$$

$$D/t \leq 111 / \sqrt{0.0102 F_y} \quad (\text{AIJ [16]}) \quad (6)$$

3. การทดสอบ

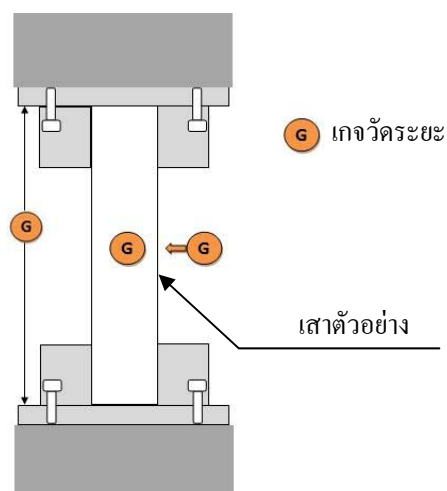
เสาทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่างเป็นเสาเหล็กสี่เหลี่ยมหน้าตัดกลวงหน้าตัดขนาด 100×100 มม. หนา 1.8 มม. ยาว 500 มม. ในแต่ละตัวอย่าง จะแปรผันการกรอกวัสดุในช่องว่าง และลักษณะการให้แรงในเสา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ

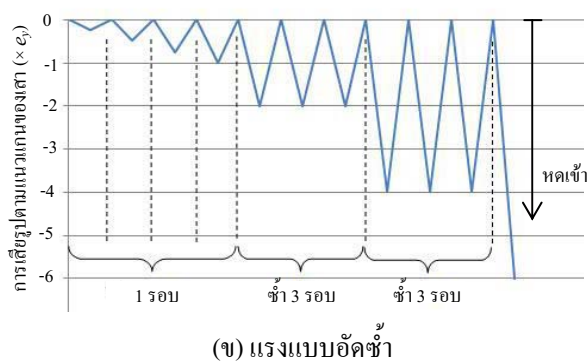
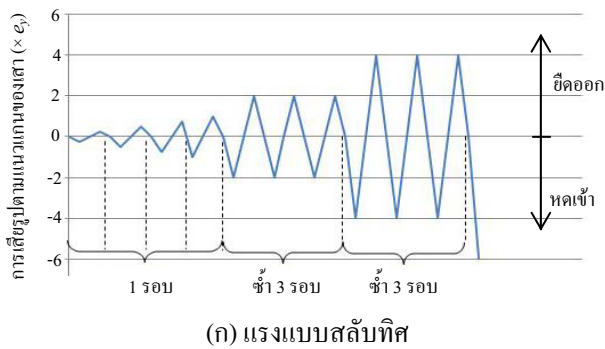
ลักษณะการให้แรง	การเติมลงในช่องว่างของเหล็กหน้าตัดกลวง		
	คอนกรีต	ปูนทราย	ไม่เติม
แรงกระทำสลับทิศ	CyCo	CyMo	CyEm
แรงกระทำอัดซ้ำ	RpCo	RpMo	RpEm
รวม	6 ตัวอย่าง		

สัญลักษณ์ตัวอย่าง AaBb โดยที่ Aa คือ ลักษณะของแรงทดสอบ ได้แก่ Cy หมายถึงการให้แรงตามแนวแกนแบบสลับทิศ (Cyclic loading) และ Rp หมายถึงการให้แรงตามแนวแกนแบบอัดซ้ำ (Repeated loading) และ Bb คือ การเติมวัสดุในช่องว่าง ได้แก่ Co หมายถึง มีการเติมคอนกรีต Mo หมายถึง มีการเติมปูนทราย และ Em หมายถึง ไม่มีการเติมทั้งคอนกรีตและปูนทราย

คอนกรีตและปูนทรายได้กรอกลงในช่องกลวงในแนวดิ่ง พร้อมกับจี้เข้าตลอดเพื่อป้องกันการเกิดรูโพรงภายใน พร้อมกับเก็บก่อนตัวอย่าง และบ่มโดยการห่อแผ่นพลาสติก ก่อนทดสอบเสานำตัวอย่างไปเชื่อมกับแผ่นเหล็กฐานและแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่จุดรองรับ และทดสอบค่ากำลังอัดเพื่อประเมินกำลังประลัยก่อนคอนกรีตหรือปูนทราย ในการทดสอบจะติดตั้งเกจวัดระยะใน 3 ทิศทาง ได้แก่ ระยะเคลื่อนแนวราบที่ตั้งฉาก 2 ทิศทาง และระยะตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 การให้แรงกำหนดด้วยระยะ e_y

รูปที่ 3 แสดงการควบคุมการเสียรูปในระหว่างทดสอบ สำหรับกรณีการให้เกิดการเสียรูปยืดออกและอัดเข้าไปมา (Cyclic loading) และสำหรับในกรณีการให้เกิดการเสียรูปแบบอัดซ้ำในทิศทางเดียว (Repeated loading) ตามลำดับด้วยเครื่องทดสอบ INSTRON 200 ตัน ในช่วงแรกก่อนการยืดคราก (e_y) การทดสอบจะควบคุมให้เกิดการเสียรูปเท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 เท่าของ e_y สลับไปมาจำนวน 1 รอบและจะเพิ่มเป็น 3 รอบเมื่อนาฬิกาของการเสียรูปเพิ่มขึ้นเป็น 2, 4, 6, 8 เท่าของ e_y ไปเรื่อย ๆ จนพังทลาย

4. ผลการทดสอบ

4.1 กำลังวัสดุ

การทดสอบกำลังดึงเหล็กตามมาตรฐาน มอก.107-2533 [17] ทั้งตัดเป็นชิ้น (Coupon) และเต็มหน้าตัด ได้ค่ากำลังดึงคราก 302 MPa และ 308 MPa และกำลังดึงประลัย เท่ากับ 338 MPa และ 328 MPa ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของคอนกรีตและปูนทรายที่รอก เท่ากับ 33 MPa และ 23 MPa ตามลำดับ

4.2 แรงและการยืด/ หดตามแนวแกนของเสา

โดยทั่วไป ในการทดสอบจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในเสาทั้ง 2 แกน ดังรูปที่ 4(ก) และเมื่อให้แรงกระทำสลับทิศไปมา ในตำแหน่งดังกล่าวจะเกิดความเข้มของความเครียดสูงขึ้น และเกิดการคอดและฉีกขาดในที่สุด ดังรูปที่ 4(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเสียรูปตามแนวแกนของตัวอย่างเสาจากการทดสอบให้แรงแบบสลับทิศและการให้แรงแบบอัดซ้ำแสดงในรูปที่ 5 (ก) – (ค) และรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับระยะยืด/หดตามแนว แกน โดยพิจารณาที่ขอบเขตนอกของความสัมพันธ์

4.3 กำลังรับแรงของเสา

กำลังรับแรงของเสาจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 โดยตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังอัด เช่น ค่ากำลังอัดทดสอบสูงสุด R_{max} และค่ากำลังอัดคำนวณแบบสถิติประลัย P_{cal} ตามมาตรฐาน AISC-LRFD และ ACI คำนวณตามสมการที่ (1)-(3) ในการคำนวณกำลังเสาปล้ำตามสมการที่ (1) ได้ใช้ค่าหน้าตัดเต็มทำให้ค่าที่คำนวณสูงกว่าที่ทดสอบได้มาก ซึ่งได้ชี้ถึงผลของการรอกวัสดุในช่องว่างที่ใช้ค่าหน้าตัดเหล็กเต็มเช่นกันต่อประสิทธิภาพการป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่โดยการคำนวณด้วยวิธี AISC จะมากกว่าที่คำนวณโดยวิธี ACI และผลการทดสอบตามลำดับ สำหรับกรณีเสาเดิมปูนทราย การคำนวณทั้งสองวิธีมีแนวโน้มให้ค่าต่ำกว่าเนื่องจากการประมาณค่ามอดูลัสของปูนทรายที่อาจสูงเกินจริง

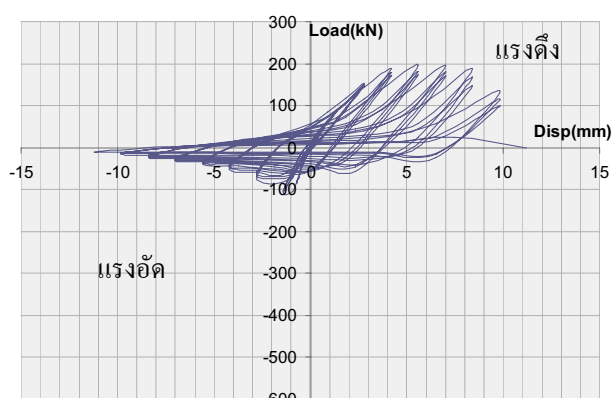


(ก) การโก่งเดาะเฉพาะที่

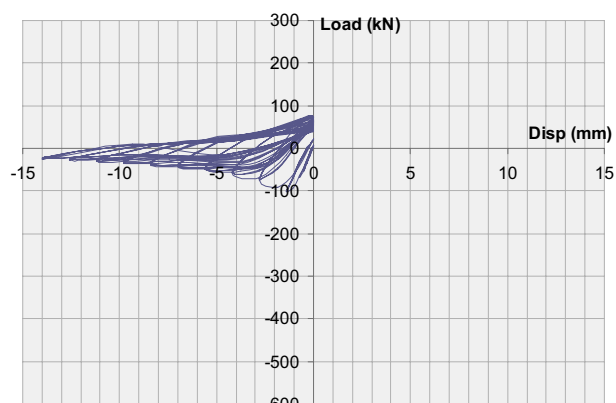


(ข) การคอดและฉีกขาด

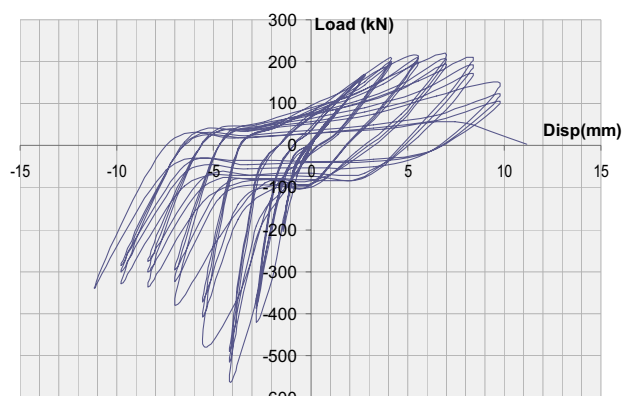
รูปที่ 4 การทดสอบตัวอย่างเสาปล้ำรับแรงสลับทิศ (CyEm)



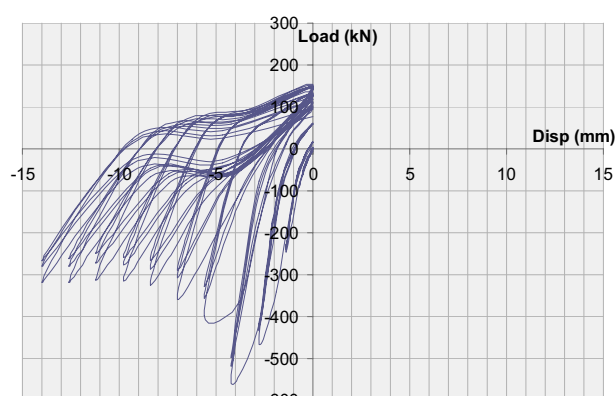
(ก) เสาปล้ำรับแรงสลับทิศ (CyEm)



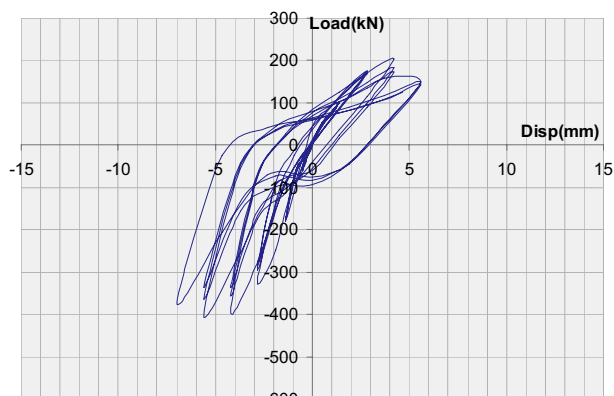
(ข) เสาปล้ำรับแรงอัดซ้ำ (RpEm)



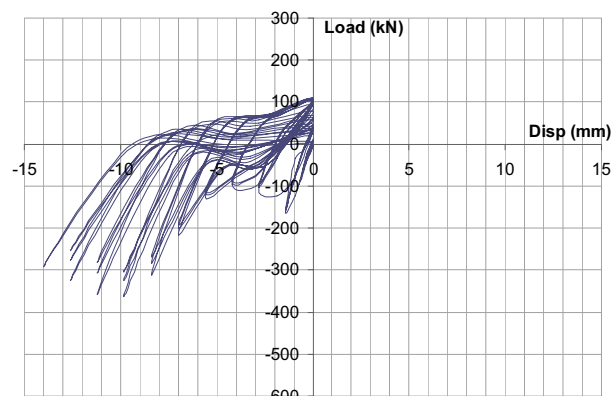
(ค) เสาเติมคอนกรีตรับแรงสลับทิศ (CyCo)



(ง) เสาเติมคอนกรีตรับแรงอัดซ้ำ (RpCo)



(จ) เสาเติมปูนทรายรับแรงสลับทิศ (CyMo)

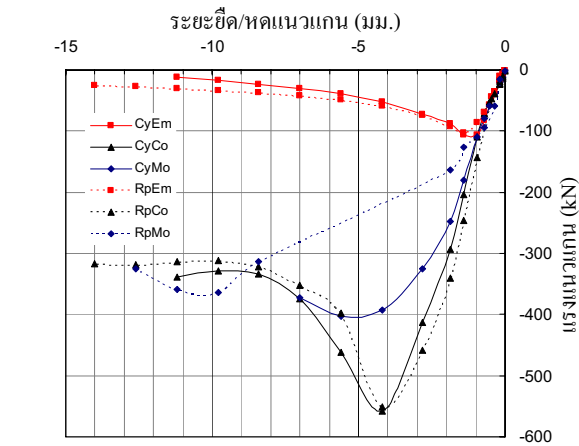


(ฉ) เสาเติมปูนทรายรับแรงอัดซ้ำ (RpMo)

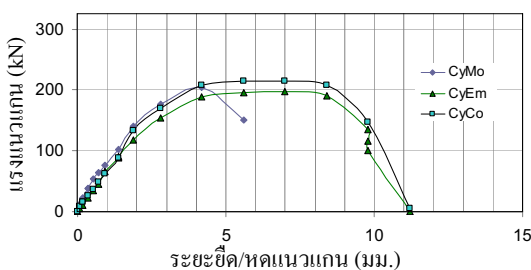
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเสียรูปตามแนวแกนของตัวอย่างเสา

ส่วนตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังในการให้แรงดึงทดสอบที่กำลังดึงคราก N_y และค่ากำลังดึงประลัยสูงสุด N_{max} จากการเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบแรงดึงสถิตหน้าตัดเต็ม กับตัวอย่างเสาทดสอบ จะเห็นว่า แรงกระทำสลับทิศจะทำให้

กำลังดึงของเสาลดลง เนื่องจากความเค้นซ้ำเฉพาะจุดในตำแหน่งที่เกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ในเสา ส่วนวัสดุที่กรอกไม่ค่อยมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงดึง โดยการกรอกคอนกรีตจะช่วยรักษากำลังดึงได้บ้าง เนื่องจากการโก่งเคาะเฉพาะที่ในตัวอย่างเสาดังกล่าวไม่รุนแรงเหมือนกับเสาที่ไม่ได้กรอก

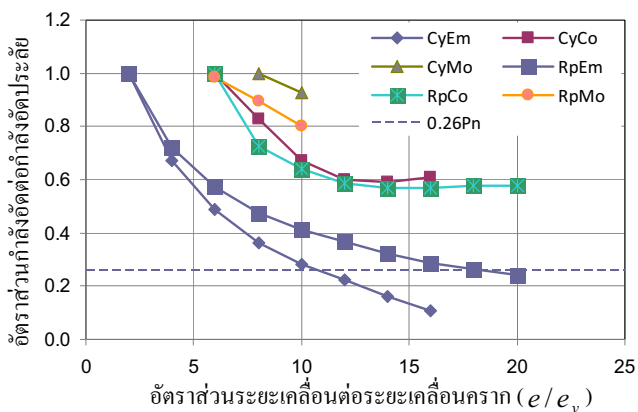


(ก) ด้านแรงอัด



(ข) ด้านแรงดึง

รูปที่ 6 แรงกับระยะยืด/หดตามแนวแกนที่ขอบเขตนอก



รูปที่ 7 การลดกำลังอัดของเสาภายใต้การเคลื่อนที่อันอิสระ

4.4 กำลังหลังการโก่งเดาะ

รูปที่ 7 แสดงพฤติกรรมของการลดกำลังอัดของตัวอย่างที่มีการกรอกปูนทราย กรอกคอนกรีต และไม่มีการกรอก ที่เทียบเป็นอัตราส่วนกับกำลังอัดประลัยสูงสุดของเสาที่ค่า e/e_y ต่างๆ จากมาตรฐาน AISC เกี่ยวกับแผ่นดินไหว [18] กำหนดให้ค่ากำลังหลังการโก่งเดาะจะมีค่าเท่ากับ $0.26 P_n$ เมื่อ

P_n คือ กำลังอัดสูงสุด โดยไม่พิจารณาถึงระดับความเหนียว ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างเสาที่ไม่มีการกรอกและให้แรงสลับทิศพบว่า จะได้ค่าระดับความเหนียว e/e_y ประมาณ 10 และที่ระดับความเหนียวประมาณ 18 สำหรับตัวอย่างเสาที่ไม่กรอกและให้แรงอัดซ้ำ สำหรับตัวอย่างอื่น จะมีค่ากำลังอัดที่ลดลงจากค่ากำลังอัดสูงสุดมากกว่าค่า $0.26 P_n$ ทั้งหมด การกรอกโดยปูนทรายแม้ว่าจะเพิ่มกำลังอัดได้สูงขึ้น แต่จะมีความเปราะมากกว่า

ตารางที่ 2 กำลังอัดเสาที่ทดสอบและคำนวณ

ตัวอย่างทดสอบ	$P_{\max}$ (kN)	P_{cal} (kN)		$P_{\max} / P_{cal}$	
	Test	AISC	ACI	AISC	ACI
CyEm	106.4	178.5	-	0.60	-
CyCo	557.3	466.8	495.2	1.19	1.13
CyMo	402.4	389.5	410.2	1.03	0.98
RpEm	102.5	178.5	-	0.57	-
RpCo	550.5	466.8	495.2	1.18	1.11
RpMo	363.9	389.5	410.2	0.93	0.89

ตารางที่ 3 กำลังดึงเสาที่ทดสอบ

ตัวอย่าง	กำลังดึงคราก N_y (kN)	กำลังดึง ประลัย N_{max} (kN)	กำลังดึง ประลัยเทียบ กับหน้าตัด เต็ม	หมายเหตุ
หน้าตัดเต็ม	215.2	229.3	1.00	แรงแบบสถิต
CyEm	-	196.6	0.86	แรงสลับทิศ
CyCo	-	215.5	0.94	
CyMo	-	203.3	0.89	

5. บทสรุป

การศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบเสาทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่างที่หน้าตัดและความยาวเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของตัวอย่างเสาในทุกๆ ตัวอย่าง โดยตัวอย่างเสาที่มีการเติมคอนกรีตและปูนทรายจะมีกำลังอัดสูงสุดมากกว่าเสาที่ไม่ได้กรอก และมีความสามารถรับแรงหลังการโก่งเดาะได้เพิ่มขึ้นได้อีก จนกระทั่งมีกำลังสูงสุดเท่ากับกำลัง

ประลัยของวัสดุรอก นอกจากนี้ยังช่วยรักษากำลังรับแรงไม่ให้ลดลงมากภายใต้การเกิดการเสียรูปแบบอินลาสติกอย่างรุนแรง อย่างไรก็ตามการรอกโดยปูนทรายแม้ว่าจะเพิ่มกำลังอัดได้สูงขึ้นเทียบเท่ากับการรอกด้วยคอนกรีต แต่จะมีความเปราะมากกว่า

ในการคำนวณกำลังเสาปล้ำตามสมการที่ (1) โดย AISC ที่ใช้ค่าหน้าตัดเดิมทำให้ค่าที่คำนวณสูงกว่าที่ทดสอบได้มาก แต่สำหรับเสาที่มีการรอกวัสดุในช่องว่างที่ใช้ค่าหน้าตัดเหล็กเดิมเช่นกัน ให้ผลการคำนวณใกล้เคียง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการป้องกันการโก่งเคาะเฉพาะที่โดยวัสดุก่อ โดยการคำนวณด้วยวิธี AISC จะมากกว่าที่คำนวณโดยวิธี ACI และผลการทดสอบตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า สำหรับกรณีเสาเติมปูนทราย การคำนวณทั้งสองวิธีมีแนวโน้มให้ค่าต่ำกว่าเนื่องจากการประมาณค่ามอดูลัสที่สูงเกินจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Furlong, R. W., "Strength of steel encased concrete beam columns", Journal of Structural Division ASCE, 93(ST5), 1967, 113-124.
- [2] Gardner, N. J. and Jacobson, E. R., "Structural behavior of concrete filled steel tubes", ACI 1967, 64(11), 404-13.
- [3] Trezona, J. R. and Warner, R. F., "Design of slender concrete-filled circular steel tubular columns", Australian/Civil Engineering Journal, (4), 1997, 153-62.
- [4] Schneider, S. P., "Axially loaded concrete-filled steel tubes", Journal of Structural Engineering ASCE, 124(10), 1998, 1125-38.
- [5] Bridge, R. Q. and O'Shea, M. D., "Local buckling and confinement in axially loaded steel tubes filled with normal concrete", Australian Journal of Structural Engineering, 2, 1999, 19-30.
- [6] Uy, B., "Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling", Journal of Structural, Engineering ASCE, 126(3), 2000, 341-52.
- [7] Wright, H. D., "Buckling of plates in contact with a rigid body", The Structural Engineer, 71(12/15), 1993, 209-15.
- [8] Popov, E.P., Zayas VA, Mahin SA., "Cyclic inelastic buckling of thin tubular columns", Journal of the Structural Division ASCE, 105(ST11), 1979, 2261-77.
- [9] Jain, A. K., Goel, S. C. and Hanson, R. D., "Hysteretic cycles of axially loaded steel members", Journal of the Structural Division ASCE, 106(ST8), 1980, 1777-95.
- [10] Remennikov, A. M. and Walpole, W. R., "A note on compression strength reduction factor for a buckled strut in seismic-resisting braced system", Engineering Structures, 20(8), 1998, 779-82.
- [11] Tremblay, R., "Inelastic seismic response of steel bracing members", Journal of Constructional Steel Research, 58, 2002, 665-701.
- [12] CSA., CAN/CSA-S16.1-01: Limit states design of steel structures, Canadian Standard Association, 2001.
- [13] AISC., Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. Chicago (IL), American Institute of Steel Construction, Inc., 1999.
- [14] ACI Committee 318., ACI318-02-Building code requirements for reinforced concrete and commentary. American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [15] Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures: Part 1.1 General rules and rules for buildings, Brussels, Commission of European Communities, 1994.
- [16] AIJ., Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures, Architectural Institute of Japan, Tokyo, 1994.
- [17] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก.107-2533, กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ, 2533.
- [18] AISC., Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago (IL), American Institute of Steel Construction, 2002.