

การเสริมกำลังด้านทานแรงแผ่นดินไหวของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกด้วยค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม SEISMIC STRENGTHENING OF EXTERNAL REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINT BY RECTANGULAR HOLLOW STEEL BRACING

กิตติศักดิ์ ขอนเอบ^{1,*}, ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา¹, ชินพัฒน์ บัวชาติ¹, พุทธิรักษ์ จรัสพันธุ์กุล¹, กิตติคุณ จิตไพโรจน์¹, รัฐพล เกติยศ²
และ ชยานนท์ พรรชภิญโญ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงราย, ประเทศไทย

*Corresponding author address: Kittisak_Khonoeb@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างโดยไม่ได้ออกแบบรับแผ่นดินไหวจะมีความอ่อนแอและเกิดความเสียหายที่จุดต่อหรือชิ้นส่วนเสา บทความนี้ นำเสนอการทดสอบการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกของอาคารที่ไม่ได้รับการออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว โดยทำการ จำลองตัวอย่างจุดต่อภายนอกคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคาร 3 ตัวอย่างที่เหมือนกัน ขนาดหน้าตัดของคาน 0.15x0.40 เมตร และเสา 0.15x0.15 เมตร ความยาวครึ่งช่วงพาดคาน และความสูงครึ่งชิ้นเสา เท่ากับ 1.15 เมตร และ 1.91 เมตร ตามลำดับ และทำการเสริมกำลัง โครงสร้างจุดต่อ 2 ตัวอย่างโดยการใช้ค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม จากนั้นทำการทดสอบการให้แรงสลับทิศทางข้างไปมาจนกระทั่งเกิดความเสียหาย จากการทดสอบพบว่า จุดต่อคาน-เสาที่ไม่ได้เสริมกำลังเกิดความเสียหายในบริเวณโคนเสาและจุดต่อมีความเหนียวต่ำ ทั้งนี้การเสริมกำลังด้วยค้ำยัน เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมทำให้ระยะเสาสั้นลงและเพิ่มพื้นที่จุดต่อ ทำให้จุดต่อคาน-เสาสามารถรับแรงกระทำด้านข้างได้เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับ การเสริมกำลังด้วยค้ำยัน

คำสำคัญ: เสริมกำลังด้านแผ่นดินไหว, เสาอ่อน-คานแข็ง, ค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม

Abstract

Non-Seismically designed reinforced concrete buildings are susceptible to earthquake loading, severely damaging the joints and columns. This article presents a strengthening of external reinforced beam-column joint that has not been designed to withstand the seismic loads. Three identical beam-column joint specimens were made the cross-sectional dimensions of the beam and columns are 0.15x0.40 meter and 0.15x0.15 meter, respectively. The half-span length of the beam is 1.15 meter and the haft-height of the column is 1.91 meter. Two specimens were seismically strengthened by Rectangular hollow steel braces. Then, all specimens were tested under the lateral cyclic loads until failure. From the experimental results, the original specimen was damaged at columns near the joint and at the joint. It had low lateral sway and low ductility. For the strengthened specimens, the column length was shortened and the joint area was increased resulting to a higher lateral load capacity compared with that of the original specimen.

Keywords: Seismic strengthening, Strong beam-weak column, Rectangular hollow steel bracing

1. คำนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมสูงสุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการก่อสร้างแล้วหลาย ๆ อาคาร คำนึงถึงเพียงแค่การออกแบบเพื่อรองรับแรงกระทำจากน้ำหนักในแนวตั้งเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงผลจากแรงด้านข้าง มีพฤติกรรมชั้นที่อ่อนแอและพฤติกรรมของโครงสร้างมีลักษณะ “เสาอ่อน-คานแข็ง” ซึ่งเมื่ออาคารลักษณะนี้ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่เสาและจุดต่อคาน-เสาตัวอย่างเช่น ความ

เสียหายบริเวณจุดต่อคาน-เสาของอาคารโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม จังหวัดเชียงรายที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ดังรูปที่ 1 เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ ซึ่งเป็นผลให้อาคารพังถล่มทั้งหลังแบบทันทีทันใด ได้ วิธีการย้ายจุดหมุนแบบพลาสติก(plastic hinge) จากบริเวณจุดต่อคาน-เสา ไปที่คาน เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้สำหรับการเสริมกำลังและปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของโครงสร้าง โดยย้ายตำแหน่งการวิบัติหรือจุดหมุนแบบพลาสติกจากบริเวณจุดต่อคาน-เสา ไปที่ชิ้นส่วนคาน โดยจุดหมุนพลาสติกดังกล่าวจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว

บทความนี้ นำเสนอผลการทดสอบและการเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวอย่างจุดต่อคาน-เสากลางรูปตัวที (T) ที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกด้วยค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่าง SC1 เป็นโครงสร้างที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง ตัวอย่าง SC2 เสริมกำลังภายนอกด้วยค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมแบบกลวง มีลักษณะจุดต่อค้ำยันเป็นแบบจุดหมุน (pinned connection) และตัวอย่าง SC3 เสริมกำลังภายนอกด้วยค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมแบบกลวงเช่นเดียวกัน แตกต่างที่จุดต่อค้ำยันเป็นแบบเชื่อมติด (welded connection) โดยมีจุดประสงค์เพื่อย้ายจุดหมุนแบบพลาสติกให้เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนคาน ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้าง



รูปที่ 1 ความเสียหายบริเวณจุดต่อคาน-เสาของอาคารเรียน โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม จังหวัดเชียงราย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

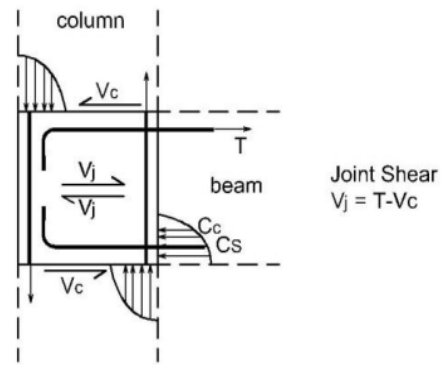
2.1. การออกแบบการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเหล็กกล่อง

2.1.1. กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อคาน-เสา

Muhsen [1] ได้เสนอการประมาณกำลังต้านทานแรงเฉือนของจุดต่อคาน-เสาที่มีผลใกล้เคียงกับแรงที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI318-05 [2] และ AU [3] ซึ่งสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของจุดต่อคาน-เสา (V_n) ได้จาก สมการที่ (1)

$$V_n = (f'_c)^{0.67} A_j + 0.7 A_t f_t + 0.05 P_{col} \quad (1)$$

โดยที่ A_j คือพื้นที่ต้านทานแรงเฉือนในแนวอนประสิทธิผลของจุดต่อ, f_t คือแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมในจุดต่อ, A_t คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในจุดต่อ, P_{col} คือแรงแนวแกนที่กระทำกับเสา, f'_c คือกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

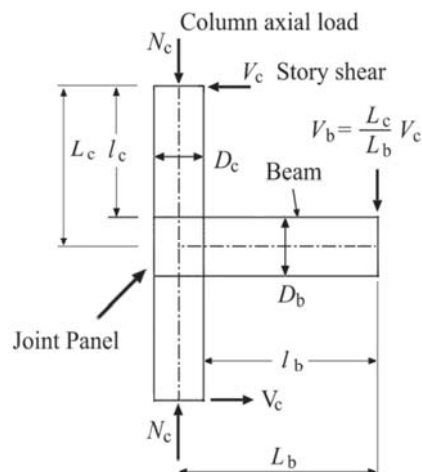


รูปที่ 2 แรงเฉือนในแนวนอนสูงสุดที่กระทำต่อข้อต่อ (V_j)

นอกจากนี้ จากสมมูลแรงในจุดต่อคาน-เสา ดังรูปที่ 2 และจาก V_n ในสมการที่ (1) สามารถคำนวณโดยประมาณเพื่อตรวจสอบแรงเฉือนระหว่างชั้น (story shear, V_c) สูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดต่อคาน-เสา ($V_j = V_n$) จาก สมการที่ (2)

$$V_c = \frac{V_n K L_b (D_b + D_c) / L}{2(L_b d_b I_c + L_c d_c I_b) - K(L_b + L_c)} \quad (2)$$

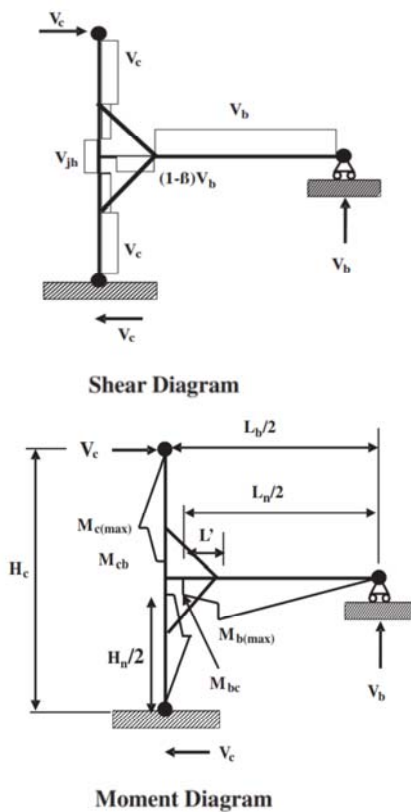
โดยที่ $K = j d_b d_c$, $j d_b$ คือระยะระหว่างแรงดึงและแรงอัดในหน้าตัดคาน, d_c คือระยะจากผิวคอนกรีตรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัดเหล็กรับแรงดึงในหน้าตัดเสา, L_b คือความยาวของจุดศูนย์กลางจุดต่อถึงจุดรองรับคาน, L_c คือความยาวของจุดศูนย์กลางเสาถึงจุดรองรับคาน, I_b คือความยาวของขอบนอกของเสาถึงจุดรองรับคาน, $I_c = L_c - 0.5 D_b$, D_b คือความยาวของหน้าตัดคาน, D_c คือความยาวของหน้าตัดเสา, $L = L_n / 2 - L'$, $L_n / 2$ คือความยาวคานวัดจากหน้าเสาถึงจุดรองรับคาน, L' คือระยะค้ำคานวัดจากหน้าเสา และ d_b คือระยะจากผิวคอนกรีตรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัดเหล็กรับแรงดึงในหน้าตัดคาน ภาพประกอบตัวแปลแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 การประมาณแรงเฉือนระหว่างชั้นของตัวอย่าง

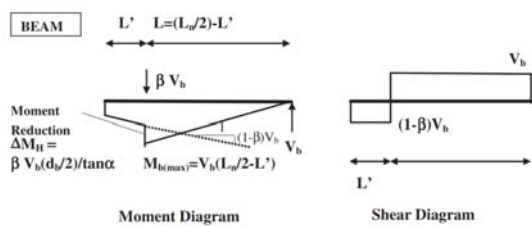
2.1.2. การเสริมกำลังจุดต่อคานเสาโดยค้ำยัน

Pampanin [4] ได้ศึกษาการเสริมกำลังของจุดต่อโดยใช้เหล็กเสริมกำลังภายนอกเพื่อเป็นค้ำยันให้กับจุดต่อคาน-เสาภายนอกรูปตัวที (T) โดยที่ค้ำยันเสริมกำลังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำหน้าที่ถ่ายแรงจากเสาสู่คานและย้ายตำแหน่งการวิบัติจากจุดต่อคาน-เสา ไปยังชิ้นส่วนคาน เมื่อเสริมค้ำยันในตัวอย่างแล้วจะสามารถวิเคราะห์เพื่อหาแรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างจุดต่อคาน-เสา ได้ โดยค่าแรงภายในดังกล่าว ถูกรนำมาใช้เพื่อออกแบบชิ้นส่วนค้ำยันสำหรับการติดตั้ง เมื่อติดตั้งค้ำยันเข้ากับตัวอย่างคาน-เสาจะเกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ในตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4

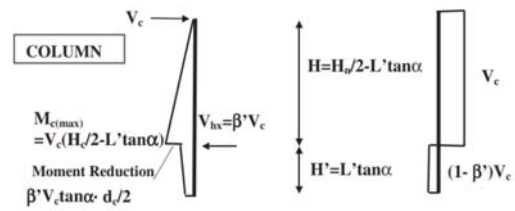


รูปที่ 4 shear force diagram และ bending moment diagram ของตัวอย่างหลังการเสริมกำลัง

จากรูปที่ 4 สามารถหาแรงภายในชิ้นส่วนที่ตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 5 shear force diagram และ bending moment diagram ของคานหลังการเสริมกำลัง



รูปที่ 6 shear force diagram และ bending moment diagram ของเสาหลังการเสริมกำลัง

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะปรากฏค่า β ซึ่งเป็นค่าสำหรับการคำนวณที่สำคัญในการออกแบบค้ำยันเพื่อกำหนดตำแหน่งของค้ำยันที่จะติดตั้งบนตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา และยังเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาแรงภายในของตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา โดยที่ค่า β สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (3)

$$\beta = \left(\frac{b}{a} \right) \cdot \frac{A_1 + B_1 + C_1}{A_2 + B_2 + C_2} \quad (3)$$

โดยที่ $a = L'$ คือระยะค้ำคานวัดจากหน้าเสา, $b = H'$ คือระยะค้ำเสาวัดจากหน้าคาน

จากสมการที่ (3) สามารถคำนวณค่า A_1, B_1, C_1, A_2, B_2 และ C_2 ได้จากสมการ (4), (5), (6), (7), (8) และ (9) ตามลำดับ

$$A_1 = 6Ld_b + 3ad_b + 6bL + 4ab \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{2I_b L_b b^3}{I_c a H_c} + \frac{3I_b H L_b b^2}{I_c a H_c} + \frac{3I_b d_c L_b b^3}{2I_c a^2 H_c} + \frac{3I_b d_c H L_b b^2}{I_c a^2 H_c} \quad (5)$$

$$C_1 = \left\{ \frac{12EI_b}{K_j a} \left(b + \frac{d_b}{2} \right) \left(a + \frac{d_c}{2} + L \right) \right\} \quad (6)$$

$$A_2 = 3d_b^2 + 6bd_b + 4b^2 \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{12EI_b}{(2K_b a \cos^2 \alpha)} + \frac{6I_b b^2}{a^2 A_c} + \frac{2I_b b^3}{I_c a} + \frac{3I_b d_c b^2}{I_c a^2} + \frac{3I_b d_c^2 b^3}{2I_c a^3} \quad (8)$$

$$C_2 = \left\{ \frac{12EI_b b}{K_j a} \left(b + \frac{d_c}{2} \right) \left(1 + \frac{d_b}{2b} + \frac{d_c}{2a} \right) \right\} \quad (9)$$

โดยที่ d_b คือระยะจากผิวคอนกรีตรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัดเหล็กรับแรงดึงในหน้าตัดคาน, d_c คือระยะจากผิวคอนกรีต

รับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัดเหล็กรับแรงดึงในหน้าตัดเสา, $L = L_n / 2 - L'$, $L_n / 2$ คือความยาวคานวัดจากหน้าเสาถึงจุดรองรับคาน, L' คือระยะค้ำคานวัดจากหน้าเสา, I_c คือ moment of inertia ของหน้าตัดเสา, I_b คือ moment of inertia ของหน้าตัดคาน, $H = H_n / 2 - H'$, H' คือระยะค้ำเสาวัดจากหน้าคาน, H_n คือความสูงของเสาไม่รวมความลึกของคาน, K_j คือ stiffness ของจุดต่อคาน-เสา, A_c คือพื้นที่หน้าตัดเสา, E คือ modulus of elasticity ของคอนกรีต

หลังจากทราบค่าของแรงภายในตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาและกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งค้ำยันที่คานและเสา ระยะในการติดตั้งค้ำยันจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาที่ได้รับการเสริมกำลัง

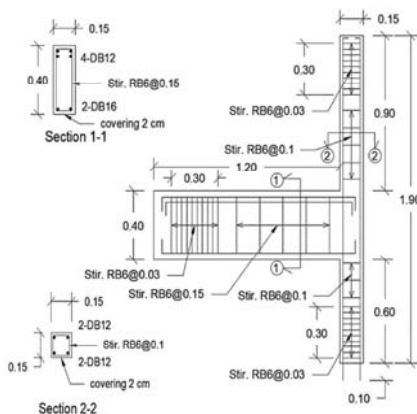
3. วิธีการวิจัย

3.1. ตัวอย่างในการศึกษา

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาสำหรับการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ออกแบบโดยไม่ได้พิจารณาแรงแผ่นดินไหว ซึ่งมีรายละเอียดของขนาดมิติของชิ้นส่วนโครงสร้างและเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 7 และมีคุณสมบัติของเหล็กเสริมดัง ตารางที่ 1 โดยที่ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f'_c) เท่ากับ 42.2 MPa การออกแบบการเสริมกำลังและการวิบัติแสดงดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

เหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)
RB6	SR24	419.7
DB12	SD40	413.6
DB16	SD40	484.8



รูปที่ 7 รายละเอียดเหล็กเสริมในตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2 รายละเอียดการเสริมกำลังและการวิบัติที่คาดการณ์

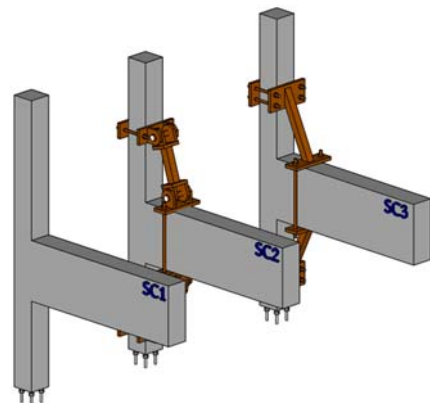
ชื่อตัวอย่าง	รูปแบบการเสริมกำลัง	การวิบัติที่คาดการณ์
SC1	ไม่มี	แรงเฉือนในจุดต่อ
SC2	ค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมแบบจุดหมุน	โมเมนต์ในคาน
SC3	ค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมแบบเชื่อมติด	โมเมนต์ในคาน

3.1.1. ตัวอย่างทดสอบ SC1

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา มีรายละเอียดขนาดหน้าตัดเหล็กเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 7 โดยไม่มีการเสริมกำลังให้กับตัวอย่าง

3.1.2. ตัวอย่างทดสอบ SC2

ตัวอย่างทดสอบมีขนาดและรายละเอียดเหล็กเสริมเหมือนกับตัวอย่าง SC1 แต่สำหรับตัวอย่าง SC2 มีการติดตั้งค้ำยันภายนอกเป็นเหล็กกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบกลวง ขนาด 50x50x2.00 มิลลิเมตร ลักษณะของจุดต่อค้ำยันเป็นแบบยึดหมุน (pinned connection) การติดตั้งค้ำยันที่ชิ้นส่วนเสา วัดระยะจากขอบคานเท่ากับ 0.45 เมตร และที่ชิ้นส่วนคานวัดระยะออกจากหน้าเสาเท่ากับ 0.20 เมตร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การติดตั้งค้ำยันให้กับตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา

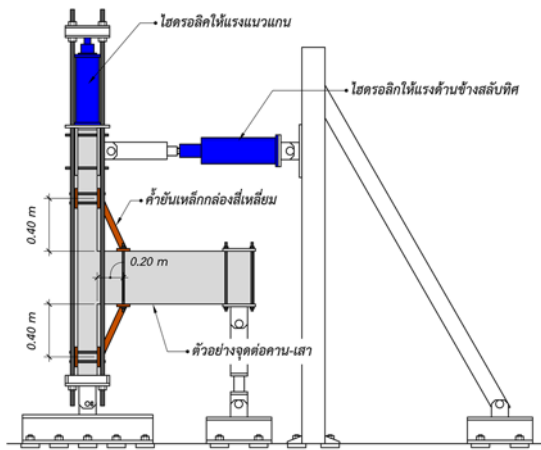
3.1.3. ตัวอย่างทดสอบ SC3

ตัวอย่างทดสอบมีขนาดและรายละเอียดเหล็กเสริมเหมือนกับตัวอย่าง SC1 แตกต่างที่ตัวอย่าง SC3 มีการติดตั้งค้ำยันภายนอกโดยใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมแบบกลวง ขนาดเท่ากับ 50x50x2.00 มิลลิเมตร ลักษณะของจุดต่อค้ำยันเป็นแบบยึดแน่นโดยวิธีการเชื่อม (welded connection) การติดตั้งค้ำยันที่ชิ้นส่วนเสา วัดระยะจากขอบคานเท่ากับ 0.40 เมตร และที่ชิ้นส่วนคานวัดจากหน้าเสาเท่ากับ 0.20 เมตร ดังรูปที่ 8

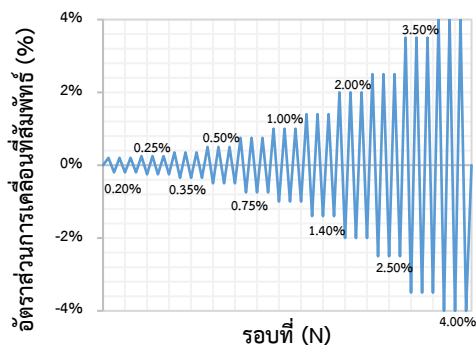
3.2. การติดตั้งและการทดสอบตัวอย่าง

การติดตั้งสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9 โดยกำหนดสภาวะยึดรั้งที่ปลายคานามีสภาวะยึดรั้งแบบล้อเลื่อน(roller support) และเคลื่อนที่ได้ 1 มิติ ที่ตำแหน่งฐานเสาด้านล่าง กำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบยึดหมุน(pinned support) ส่วนปลายเสาด้านบนปล่อยให้เคลื่อนที่อิสระ(free-end) และกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ตามแนวแกนกระทำกับเสาตลอดการทดสอบเท่ากับ 20% ของกำลังรับแรงอัดเสา($0.20f_c A_g$)

สำหรับการทดสอบ ใช้แรงกระทำด้านข้างแบบสลับทิศที่บริเวณด้านบนของเสา โดยควบคุมการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพันธ์(drift ratio) ตามมาตรฐาน ACI T1.1-01 [5] ดังรูปที่ 10 โดยในแต่ละระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์ทำการทดสอบวนซ้ำ 3 รอบ หลังจากนั้นจึงเพิ่มระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์ในระดับต่อไปจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ



รูปที่ 9 รายละเอียดการติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบ



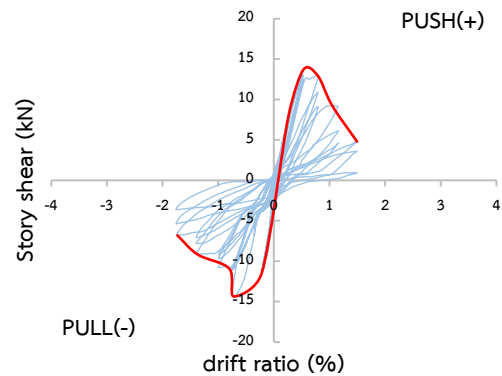
รูปที่ 10 อัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพันธ์

4. ผลการวิจัย

4.1. ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา SC1

ตัวอย่าง SC1 มีพฤติกรรม hysteresis แสดงดังรูปที่ 11 โดยตัวอย่างเริ่มเกิดรอยร้าวเป็นแนวทแยง (diagonal cracks) ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 0.75\%$ ในการเคลื่อนที่รอบที่ 3 และที่ระยะ

การเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 1.00\%$ เริ่มเกิดรอยร้าวเป็นแนวทแยง จากซ้ายมาขวาชนกับรอยแตกเดิม จากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดรอยร้าวสะสมบริเวณจุดต่อคาน-เสาเพิ่มขึ้น รวมทั้งความกว้างของรอยแตกก็มีการขยายเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์เท่ากับ $\pm 1.75\%$ รอยแตกจากการเคลื่อนที่ตัวเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อมีสะสมจนทำให้กำลังรับแรงของเสาไม่สามารถรับแรงได้ ส่งผลให้คอนกรีตบริเวณจุดต่อเกิดการหลุดร่อนออกมาเป็นรูปลิ้ม(clone failure)จนเห็นเหล็กเสริมของเสาชัดเจน ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 พฤติกรรม hysteresis ของตัวอย่าง SC1

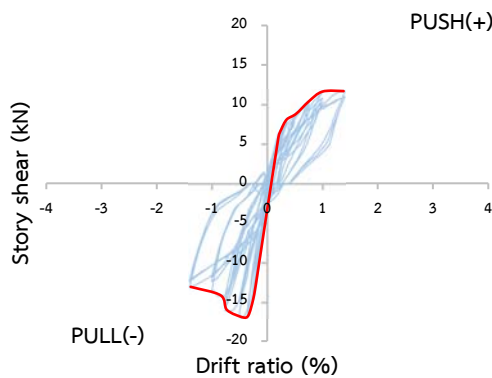


รูปที่ 12 ความเสียหายของตัวอย่าง SC1 หลังการทดสอบ

4.2. ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา SC2

ตัวอย่าง SC2 มีพฤติกรรม hysteresis แสดงดังรูปที่ 13 โดยรอยร้าวแรกเริ่มปรากฏในชั้นส่วนคานที่ตำแหน่งค้ำยัน ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 0.35\%$ ในรอบที่ 1 รอยร้าวแรงดัด (flexural crack) มีทิศทางแนวตั้งจากท้องคานยาวขึ้นไปเกือบถึงด้านบนคาน มีความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร นอกจากนี้ปรากฏรอยร้าวแรงดัดบริเวณหน้าเสาเป็นแนวตรง (horizontal cracks) รวมทั้งเกิดรอยร้าวแนวทแยง (diagonal cracks) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตรจากมุมขวาล่างของจุดต่อ เมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 0.35\%$ ในการทดสอบรอบที่ 2 รอยร้าวแนวทแยงปรากฏจากซ้ายบนของจุดต่อ ความยาวประมาณ 35 เซนติเมตร ที่ระยะการ

เคลื่อนที่สัมพันธ์ระดับเดียวกัน ในการทดสอบรอบที่ 3 เกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดเพิ่มเติมบริเวณคาน ความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่สัมพันธ์เท่ากับ $\pm 0.50\%$ ในการทดสอบรอบที่ 1 เกิดรอยร้าวแนวทแยงเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อคาน-เสา และเหล็กประกับที่ติดตั้งชิ้นส่วนค้ำยันกับหน้าเสาเกิดการเลื่อนไถล เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าที่แรงต้านทานแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับหน้าเสาคอนกรีตรับได้ ส่งผลให้ตัวค้ำยันเกิดการขยับซึ่งไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ และเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของค้ำยันแล้วทำให้ชิ้นส่วนค้ำยันที่ถูกติดตั้งเพื่อต้องการส่งผ่านแรงจากเสาไปที่คานไม่สามารถทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพเป็นผลให้แรงเฉือนระหว่างชั้น (story shear) ยังคงส่งผลต่อจุดต่อคาน-เสา ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสา หลังจากนั้น ได้เพิ่มระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ค้ำยันที่ติดตั้งไว้ไม่สามารถทำหน้าที่ถ่ายแรงได้ จึงเกิดการสะสมของรอยร้าวบริเวณจุดต่อคาน-เสาเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์เท่ากับ $\pm 1.40\%$ จุดต่อคาน-เสา ไม่สามารถรับแรงกระทำกับจุดต่อคาน-เสาได้จึงเกิดการวิบัติของตัวอย่าง ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 พฤติกรรม hysteresis ของตัวอย่าง SC2

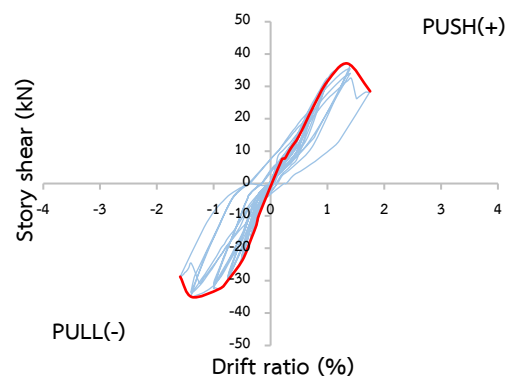


รูปที่ 14 ความเสียหายของตัวอย่าง SC2 หลังการทดสอบ

4.3. ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา SC3

ตัวอย่าง SC3 มีพฤติกรรม hysteresis แสดงดังรูปที่ 15 โดยเริ่มเกิดรอยร้าวแรงดัด (flexure cracks) ที่คานบริเวณฐานค้ำยันที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 0.35\%$ มีความยาวรอยร้าวประมาณ

23 เซนติเมตร และมีรอยร้าวแนวทแยง (diagonal cracks) ปรากฏที่มุมด้านล่างซ้ายของคานบริเวณหน้าเสาเป็นแนวทแยงไปทางขวาเข้าหาค้ำยันที่คาน โดยมีความยาวของรอยร้าวประมาณ 15 เซนติเมตร ในขณะที่ระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์เพิ่มขึ้น ปรากฏรอยร้าวแรงดัดเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณคานเป็นเส้นตรงยาวจากกลางชิ้นบนจากด้านขอบบนของคานลงมาที่ด้านขอบล่างของคาน เมื่อระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์เพิ่มมากขึ้นรอยร้าวที่คานด้านบนและคานด้านล่างปรากฏเพิ่มมากขึ้น โดยรอยร้าวที่เกิดจากด้านท้องคานนั้นมีความยาวที่มากกว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของคาน ที่ระดับการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 0.75\%$ เกิดรอยร้าวแนวทแยงจากมุมด้านล่างขวาของจุดต่อเป็นแนวเข้าไปด้านในจุดต่อความยาวรอยร้าวประมาณ 5 เซนติเมตร และมีรอยร้าวเกิดขึ้นเพิ่มขึ้นบริเวณคาน ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ $\pm 1.00\%$ ปรากฏรอยร้าวบริเวณจุดต่อเพิ่มมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากเหล็กฐานของค้ำยันเข้ากับคานเกิดการรูดเสียหายทำให้ฐานค้ำยันบริเวณคานเกิดการขยับ เนื่องจากแรงที่ถ่ายมาตามค้ำยัน เป็นผลให้ค้ำยันไม่ได้ทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพเหมือนกับช่วงต้นของการทดสอบ จนเมื่อเกิดรอยร้าวที่จุดต่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้จุดต่อคาน-เสาไม่สามารถรับแรงได้จนเกิดการวิบัติที่จุดต่อทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหายดังรูปที่ 16

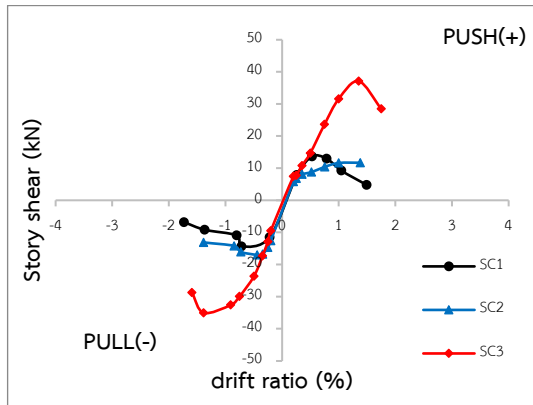


รูปที่ 15 พฤติกรรม hysteresis ของตัวอย่าง SC3



รูปที่ 16 ความเสียหายของตัวอย่าง SC3 หลังการทดสอบ

4.4. กำลังสูงสุดของตัวอย่าง



รูปที่ 17 เส้นโค้งรอบนอก (backbone curve)

จากการทดสอบตัวอย่างได้ผลว่าตัวอย่าง SC2 สามารถรับแรงด้านข้างสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่าง SC1 จนกระทั่งตัวอย่าง SC2 เกิดการเคลื่อนตัวของฐานค้ำยันที่ตำแหน่งเสาส่งผลให้ระบบค้ำยันไม่ทำหน้าที่ในการถ่ายแรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดต่อเหมือนกับตัวอย่าง SC1 สำหรับตัวอย่าง SC3 นั้นได้มีการปรับปรุงการติดตั้งค้ำยันใหม่โดยการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากตัวอย่าง SC2 โดยเปลี่ยนการติดตั้งของเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจากรูปแบบยึดหมุน เป็นแบบยึดแน่นโดยการเชื่อม เพื่อแก้ปัญหาการขยับของจุดต่อบริเวณค้ำยันและทำให้ระบบค้ำยันสามารถทำหน้าที่ถ่ายแรงได้เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้ความเสียหายย้ายไปเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนคาน เป็นผลให้กำลังรับแรงด้านข้างสูงสุดของตัวอย่าง SC3 เมื่อเทียบ SC1 นั้นสูงขึ้นถึงร้อยละ 271 และกำลังรับแรงสูงสุดของตัวอย่าง SC2 เมื่อเทียบกับตัวอย่าง SC1 สูงขึ้นถึงร้อยละ 117 สามารถดูได้จากกราฟเส้นโค้งรอบนอก ดังรูปที่ 17 ซึ่งค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างการทดสอบแสดงดัง ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำลังสูงสุดและอัตราการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด

ตัวอย่าง	Push		Pull	
	Strength (kN)	Drift Ratio (%)	Strength (kN)	Drift Ratio (%)
SC1	13.68	0.75	14.36	-0.72
SC2	11.69	1.38	17.00	-0.44
SC3	37.10	1.35	35.04	-1.39

4.5. ความเหนียวของตัวอย่าง

ค่าความเหนียว เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด (ultimate displacement) ต่อระยะการเคลื่อนตัวที่จุดคราก (yield displacement) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว สำหรับการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการหาระยะการ

เคลื่อนตัวทั้งสอง ที่ถูกนำเสนอโดย Park [7]

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่าง SC2 มีค่าความเหนียวเฉลี่ยสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง SC1 และ SC3 ดังแสดงใน ตารางที่ 4 เนื่องจากตัวอย่างมีการเสริมกำลัง สำหรับตัวอย่าง SC3 ที่มีการเสริมกำลังเช่นเดียวกันแต่ค่าความเหนียวเฉลี่ยต่ำกว่าตัวอย่าง SC2 เนื่องจากการที่ชุดติดตั้งค้ำยัน (เหล็กยึดเหล็กประกับที่ตำแหน่งคาน) ของตัวอย่าง SC3 เกิดการวิบัติ ทำให้โหมดการวิบัติเปลี่ยนจากการวิบัติในชิ้นส่วนคานตามทีออกแบบไว้เป็นการวิบัติที่จุดต่อเหมือนกับตัวอย่าง SC1 และตัวอย่าง SC2 ซึ่งหากค้ำยันยังคงทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ คาดว่าตัวอย่างจะยังคงสามารถรับแรงด้านข้างได้มากขึ้นและค่าความเหนียว ของตัวอย่าง SC3 จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4 ความเหนียวของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ ตัวอย่าง	ความเหนียว, Push	ความเหนียว, Pull	ความเหนียวเฉลี่ย
SC1	1.89	1.50	1.69
SC2	-	3.55	3.55
SC3	1.61	1.84	1.73

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบให้รองรับแรงแผ่นดินไหว โดยมีการเสริมการค้ำยันภายนอกด้วยเหล็กกล่องสี่เหลี่ยม ทดสอบด้วยการให้แรงด้านข้างสลับทิศตามมาตรฐานการทดสอบ ACI T1.1-01 จำนวน 3 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่า

1. การเสริมค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมในตัวอย่าง SC2 และ SC3 ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างแบบสลับทิศเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง SC1 ที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง
2. กำลังสูงสุดของตัวอย่าง SC2 และ SC3 มากกว่ากำลังสูงสุดของตัวอย่าง SC1 เท่ากับร้อยละ 117 และ 271 ตามลำดับ
3. ค่าความเหนียวเฉลี่ยของตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกด้วยค้ำยันเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความเหนียวของตัวอย่าง SC1 ที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง

หมายเหตุ เนื่องจากการในการทดสอบ ค้ำยันเกิดการขยับและเหล็กยึดค้ำยันเกิดการเสียรูปทำให้ค้ำยันทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้ ผลที่ได้จากการทดสอบนี้จึงมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

6. การอ้างอิง

- [1] Muhsen, B. A., Umemura, H. (2011). New model for estimation of shear strength of reinforced concrete interior beam-column joints. *Procedia Engineering*, **14**, 2151-2159. DOI: 10.1016/j.proeng. 2011.07.270
- [2] American Concrete Institute (2005). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318-05)*. Detroit, USA.
- [3] Architectural Institute of Japan (1995). *AJ Structural Design Guidelines for RC Buildings*. Tokyo.
- [4] Pampanin, S., Christopoulos, C., Chen, T.-H. (2006). Development and Validation of a Metallic Haunch Seismic Retrofit Solution for Existing under-Designed RC Frame Buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(14), 1739-1766. DOI:10.1002 /eqe.600
- [5] American Concrete Institute (2001). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing (ACI T1.1-01)*. Detroit, USA.
- [6] ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา (2556). สมรรถนะรับแรงวัฏจักรของจุดต่อชิ้นส่วนคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารโดยหน้าตัดฝั่งเหล็กรูปตัวที. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ประเทศไทย, หน้า 37-38.
- [7] Park, R. (1989). Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **22**(3), pp. 155-166.