พฤติกรรมการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสา-คาน ระบบดึงลวดอัดแรงยึดรั้งด้วยค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ

SEISMIC PERFORMANCE OF UNBONDED POST-TENSIONED PRECAST CONCRETE BEAM-COLUMN FRAME BUILDINGS WITH BUCKLING-RESTRAINED KNEE BRACES

เอกรินทร์ ชัยสนิท[1,*] , ฤทธิภูมิ นาคะอินทร์[1], วงศกร สื่อกลาง[1], พัณณิตา สุระอุดร[1], ธัญญพร ขำวิจิตร์[1] , เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย[1] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: akekarin.chaisanit2@mail.kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาพบว่าระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานภายใต้แรงแผ่นดินไหวส่วนใหญ่มีจุดอ่อนอยู่ที่บริเวณจุดต่อเสา-คาน เนื่องจากรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปมักจะมีกำลังความแกร่ง และความเหนียวน้อยกว่าคอนกรีตหล่อในที่ งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอรูปแบบทางเลือกของจุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานโดยใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ โดยในการศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมจุดต่อภายนอกของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานด้วย วิธีการทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิตซึ่งเป็นการให้ระยะเคลื่อนตัวสลับทิศแก่ตัวอย่างทดสอบ ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบพฤติกรรมของจุดต่อ 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย 1.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานแบบหล่อในที่ 2.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานภายนอกระบบดึงลวดอัดแรงอย่างเดียว และ 3.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานระบบดึงลวดอัดแรงทำการเสริมกำลังโดยการใช้ค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน ในการทดสอบได้มีการพิจารณาในด้านรูปแบบความเสียหาย, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้าง, ความแข็งแกร่ง, การสลายพลังงาน ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่า การเสริมท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะจะช่วยทำให้โครงสร้างมีความเหนียว มีกำลังต้านทานทางด้านข้างและการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบแบบหล่อในที่

คำสำคัญ: ชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสา-คาน, การทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิต, ลวดอัดแรง, ค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะ

Abstract

Based on previous earthquakes, it was discovered that precast concrete beam-column systems mostly have weaknesses at the beam-column joints because precast concrete joints tend to have less strength, stiffness and toughness than cast-in-place structures. This study presents an alternative system of precast concrete beam-column structure that utilizes prestressed steel reinforcement and buckling-restrained knee braces (BRKBs). In this study, the exterior beam-column subassemblies were investigated using a quasi-static reversed cyclic loading test to simulate seismic load. The behaviors of three beam-column joint specimens were studied in this study: 1) the cast-in-place beam-column joint 2) the unbonded post-tensioned precast beam-column joint, and 3) unbonded post-tensioned precast beam-column joint with the buckling-restrained knee brace (BRKB) installed around the beam-column joint's corner. The test considered damage patterns, force-drift relationship, strength, and energy dissipation. The tests revealed that reinforcing the structure with a buckling-restrained knee brace (BRKB) makes it ductile, with lateral force resistance and energy dissipation similar to the cast-in-place specimen.

Keywords: precast beam-column frame system, buckling-restrained knee braced, prestressed steel, quasi-static reversed cyclic loading tests

1. คำนำ

ปัจจุบันธรรมชาติมีการเตือนเราในรูปแบบภัยพิบัติเพิ่มมากขึ้น ภัยพิบัติทางธรรมชาตินั้นมีหลายรูปแบบ มีความรุนแรงแตกต่างกันไป ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อชีวิตซึ่งในอดีตที่ผ่านมาประเทศไทยเราเกิดแผ่นดินไหวเป็นจำนวนหลายครั้งด้วยกัน ครั้งที่มีความรุนแรงมากที่สุดในรอบ 20 ปีที่ผ่านมาก็คือปี พ.ศ.2557 ที่ จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 [1] ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง และ บ้านเรือนเป็นอย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงและลดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนจากภัยพิบัติทางธรรมชาติเนื่องจากแผ่นดินไหวในการออกแบบโครงสร้างจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการก่อสร้างอาคารต่างๆ มีมากมายแต่การใช้ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางอย่างมากในประเทศไทยเนื่องจากเป็นระบบที่สามารถก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว และมีความประหยัด ซึ่งจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาพบว่าระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวส่วนใหญ่มีจุดอ่อนอยู่ที่บริเวณจุดต่อเสา-คานเนื่องจากรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปมักจะมีกำลัง ความแกร่ง และความเหนียวน้อยกว่าคอนกรีตหล่อในที่ [2]

งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอรูปแบบทางเลือกของจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานโดยใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ (BUCKLING-RESTRAINED BRACE, BRB) ซึ่งท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะ (BRB) จะมีหน้าที่ในการสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นและช่วยเพิ่มกำลังและความแข็งแกร่ง ให้ระบบโครงสร้าง โดยท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะจะพัฒนากำลังถึงจุดครากได้ทั้งแรงดึงและแรงอัด [3]

ขณะที่รอยต่อบริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อเสา-คานถูกเปิดออก ระบบลวดอัดแรงจะมีการออกแบบให้โครงสร้างมีพฤติกรรมการคืนศูนย์กลางด้วยตนเอง มีหน้าที่หลักในการยึดจุดต่อเสา-คานเข้าด้วยกันและทำให้หน้าสัมผัสของจุดต่อเสา-คานปิดกลับคืนตำแหน่งเดิม และข้อดีของโครงสร้างนี้ คือ ระบบดึงลวดอัดแรงจะช่วยในการบีบอัดโครงสร้างเป็นผลให้มีการเสียรูปคงค้างลดลง และหลังจากการเกิดแผ่นดินไหวแล้วท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะที่มีความเสียหายจะสามารถซ่อมแซมหรือติดตั้งใหม่ได้ง่าย โดยงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างทดสอบมาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิตซึ่งเป็นการให้ระยะเคลื่อนตัวสลับทิศแก่ตัวอย่างทดสอบเพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหวซึ่งในการทดสอบได้มีการพิจารณาในด้านรูปแบบความเสียหาย, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้าง, ความแข็งแกร่ง, การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบเพื่อชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบทางเลือกนี้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดการออกแบบรอยต่อ

Yooprasertchai and Warnitchai [4] ได้ประยุกต์ใช้รอยต่อไฮบริด (Hybrid Connection) ในอาคารพักอาศัย 5 ชั้น ซึ่งรอยต่อไฮบริด หมายถึงรอยต่อของชิ้นส่วนเสา-คานสำเร็จรูปที่มีองค์ประกอบทางโครงสร้างชนิดต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 1 หลักการทำงานของรอยต่อไฮบริด คือ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะทำให้โครงสร้างเกิดการโยกไปมามีผลให้หน้าสัมผัสระหว่างเสา-คานเกิดการเปิดออก เมื่อรอยเปิดดังกล่าวมีช่องว่างถึงระดับหนึ่ง เหล็กเสริมที่สอดอยู่ระหว่างเสา-คานจะเกิดการครากและทำหน้าที่ในการสลายพลังงานที่เกิดจากแผ่นดินไหว ซึ่งความเสียหายจะถูกจำกัดอยู่ที่บริเวณหน้าสัมผัสเสา-คานเท่านั้น เมื่อ Plastic Tensile Strain ของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสเสา-คานนี้สูงเกิดค่าขีดจำกัดประลัยจะเป็นผลให้เหล็กเสริมขาดได้เพื่อป้องกันจึงมีการทำให้เหล็กสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเป็นระยะสั้นๆ และมีการใช้ลวดอัดแรงซึ่งจะมีหน้าที่ดึงรอยเปิดระหว่างปลายคานและหน้าเสารวมทั้งรอยร้าวในบริเวณใกล้เคียงให้ปิดลงเมื่อแผ่นดินไหวสิ้นสุดลง และส่งผลให้โครงสร้างไฮบริดกลับมาตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่งหรือเป็นระบบที่ตั้งศูนย์ด้วยตัวเอง (Self Centering) โดยแรงดึงในลวดอัดแรงนี้จะต้องสูงกว่าแรงครากในเหล็กเสริมที่ร้อยทะลุผ่าน

คาน (BRKB) เป็นท่อนค้ำยัน

เกิดขึ้นในท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะ และ ϕ คือ มุมระหว่างท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะกับชิ้นส่วนคาน ขั้นตอนถัดไปคำนวณแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตภายใต้ท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะเกิดแรงดึงและแรงอัด จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$C_c = T_{ps1} + T_{ps2} + T_{BRB^+} \quad (7)$$

$$C_c = T_{ps1} + T_{ps2} - C_{BRB^-} \quad (8)$$

โดย C_c คือ แรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขั้นตอนถัดไปคำนวณความลึกของแนวแกนสะเทินที่แท้จริงจากสมการที่ (9)

$$c = \frac{C_c}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (9)$$

โดย c คือ ความลึกของแนวแกนสะเทิน , b คือ ความกว้างของคาน และ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่จุดประลัย แล้วเปรียบเทียบค่า c ที่แท้จริงกับค่าที่สมมุติขึ้นถ้าค่า c ดังกล่าวไม่ตรงกันให้ทำการคำนวณใหม่ทั้งหมด จนกระทั่งค่า c ที่ได้มีค่าที่ตรงหรือใกล้เคียงกันขั้นตอนถัดไปทำการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้จากสมการที่ (10)

$$M_{pr} = M_{ps1} + M_{ps2} + M_{BRB} \quad (10)$$

โดย M_{pr} คือ กำลังโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้ , M_{ps1}, M_{ps2} คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดจากลวดอัดแรง , M_{BRB} คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดจากท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะ ซึ่งการคำนวณ M_{ps1}, M_{ps2} และ M_{BRB} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11), (12), (13) และ (14)

$$M_{ps1} = T_{ps1}(r_1 - 0.5\beta_1 c) \quad (11)$$

$$M_{ps2} = T_{ps2}(r_2 - 0.5\beta_1 c) \quad (12)$$

สำหรับท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะอยู่ภายใต้แรงดึง (+)

$$M_{BRB^+} = F_{y,BRB}\left[\left(h - \frac{a}{2}\right)\cos\phi + L_{BRB}\cos\phi\sin\phi\right] \quad (13)$$

สำหรับท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะอยู่ภายใต้แรงอัด (-)

$$M_{BRB^-} = \Omega\, F_{y,BRB}\left[\frac{a}{2}\cos\phi + L_{BRB}\cos\phi\sin\phi\right] \quad (14)$$

โดย h คือ ความลึกของคาน , a คือ ความลึกของ Stress block , L_{BRB} คือ ความยาวของท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะที่ยึดกับชิ้นส่วนเสา-คาน และ Ω คือ ตัวคูณปรับแก้กำลังอัดเนื่องจากแรงเสียดทานที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งจากการคำนวณข้างต้นค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้ (M_{pr}) ที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเสา-คานที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 ตัวอย่างการทดสอบ

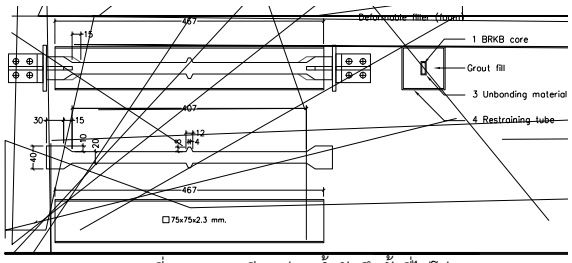
ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานสำหรับการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย 1.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานแบบหล่อในที่ (BC1) 2.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานภายนอกระบบดึงลวดอัดแรงอย่างเดียว (BC2) และ 3.) ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานระบบดึงลวดอัดแรงทำการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน (BC3) โดยทั้ง 3 ตัวอย่างถูกออกแบบให้มีกำลังรับแรงดัดที่จุดต่อสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างจะถูกพิจารณามาจากโครงสร้างเสา-คานชั้นที่ 2 ในทิศทางตามยาวของอาคารมาตรฐาน 5 ชั้น โดยมีรายละเอียดของขนาดมิติของชิ้นส่วนโครงสร้างเหมือนกันทั้ง 3 ตัวอย่างขนาดของคานกว้าง 170 มม. ความลึกของคาน 270 มม.ขนาดหน้าตัดของเสาเท่ากับ 320 x 320 มม. และมีกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c') เท่ากับ 36.5 MPa ส่วนกำลังอัดของน้ำปูนเกร้าท์ที่ใช้บริเวณรอยต่อซึ่งมีการผสมปูนชนิดไม่หดตัวกับปูนที่มีส่วนผสมของไฟเบอร์อยู่ที่ 43.2 MPa โดยคุณสมบัติของเหล็กเสริม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

เหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (MPa)
RB6	SR24	372.8	498.3
RB9	SR24	458.3	661.8
DB16	SD40	533.3	645.4

3.2.1 ท่อนค้ำยันยืดรั้งที่ไม่โก่งเดาะ

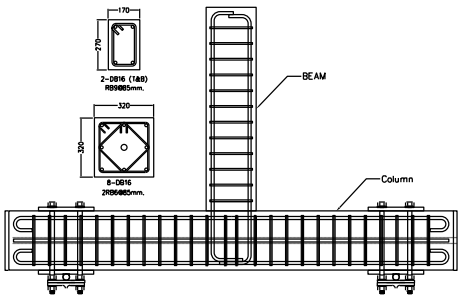
ท่อนค้ำยันยืดรั้งที่ไม่โก่งเดาะจะเป็นท่อนค้ำยันที่มีความสามารถในการสลายพลังงานซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบหลักดังนี้ คือ 1. แกนเหล็ก (Steel core) เป็นส่วนที่ถูกออกแบบให้เกิดการครากเพื่อป้องกันไม่ให้ท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะเกิดการขาดก่อนจึงต้องมีการกำหนดขีดจำกัดความเครียดของแกนเหล็กซึ่ง Yooprasertchai et al. [7] ได้กำหนดขีดจำกัดความเครียดที่ 2% และ 3% สำหรับการออกแบบโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว (DBE) และสำหรับการออกแบบโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCE) ตามลำดับซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกออกแบบให้แกนเหล็กมีขีดจำกัดความเครียดอยู่ที่ 3% จึงได้ขนาดหน้าตัดที่ 6x20 มม. มีระยะการคราก 407 มม. และมีแรงดึงที่จุดคราก ($F_{y,brb}$) เท่ากับ 30 kN ซึ่งที่กึ่งกลางของแกนเหล็กจะมีตัวป้องกันการไถลของแกนเหล็ก (Stopper) 2. ส่วนที่ถูกออกแบบให้ไม่เกิดการคราก ซึ่งจะมีการเชื่อมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (Stiffener) เพิ่มเข้าไป 3. วัสดุป้องกันการยึดเหนี่ยว (Unbonding material) จะใช้เทปยางละลายพันสายไฟ 3M พันรอบแกนเหล็กเพื่อให้แกนเหล็กที่อยู่ภายในสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ 4. ปลอกหุ้มจะใช้เหล็กกล่องขนาด 75x75 หนา 3.2 มม. ยาว 467 มม. โดยจะมีการกรอกน้ำปูนเกร้าท์ชนิดไม่หดตัวลงไปในเหล็กกล่องซึ่งมีกำลังอัดอยู่ที่ 68.1 MPa เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการโก่งเดาะออกด้านข้างของแกนเหล็กซึ่งมีรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รายละเอียดท่อนค้ำยันยืดรั้งที่ไม่โก่งเดาะ

3.2.2 ตัวอย่างทดสอบ BC1

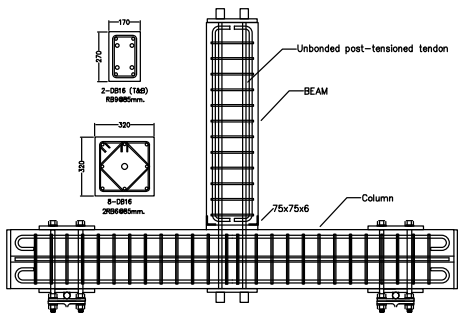
ตัวอย่างทดสอบ BC1 จะเป็นตัวอย่างที่มีจุดต่อแบบหล่อในที่ ที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางโดยรายละเอียดการเสริมเหล็กจะถูกออกแบบให้มีกำลังรับแรงดัดที่จุดต่อใกล้เคียงกับตัวอย่างรอยต่อไฮบริด ที่มุมหมุนที่ 3.5% ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] ดังรายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ BC1

3.2.3 ตัวอย่างทดสอบ BC2

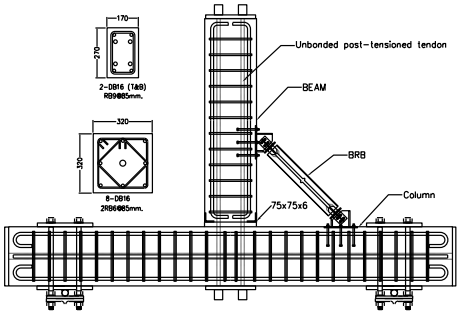
ตัวอย่างทดสอบ BC2 จะเป็นตัวอย่างจุดต่อที่ใช้ระบบลวดอัดแรงอย่างเดียว โดยระบบลวดอัดแรงที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 มม.เป็นจำนวน 4 เส้น ร้อยทะลุคานผ่านท่อ PVC และมีขนาดของแรงที่ใช้ในการดึงลวดอยู่ที่ร้อยละ 60 ของกำลังรับแรงดึงประลัย (f_{pu}) ซึ่งรอยต่อระหว่างเสา-คานมีระยะห่าง 20 มม. สำหรับกรอกปูนเกร้าท์หลังจากประกอบชิ้นส่วนเสาและคานเรียบร้อยแล้ว มีกำลังอัดที่จุดประลัย เท่ากับ 68.1 MPa เหล็กฉากขนาด 75×75×6 มม.ถูกยึดไว้ที่มุมคานทั้ง 4 ด้าน เพื่อเป็นการรัดบริเวณมุมของคานเพื่อลดการแตกของคอนกรีตที่มุมคานขณะทดสอบเนื่องจากบริเวณนี้จะต้องรับแรงอัดที่สูงขณะที่มีการเปิด-ปิดคาน โดยถูกออกแบบให้มีกำลังรับแรงดัดที่จุดต่อใกล้เคียงกับตัวอย่างรอยต่อไฮบริดที่ มุมหมุนที่ 3.5% ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] และมีรายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ BC2

3.2.4 ตัวอย่างทดสอบ BC3

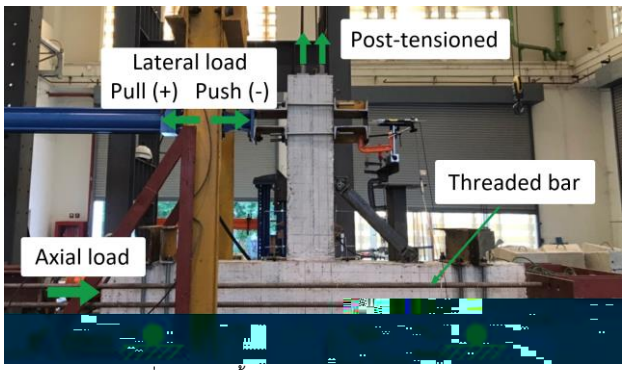
ตัวอย่างทดสอบ BC3 จะเป็นตัวอย่างจุดต่อที่ใช้ระบบลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ โดยระบบลวดอัดแรงและรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนกับตัวอย่าง BC2 ออกแบบให้มีอัตราส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะเท่ากับ 0.4 เท่าของกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดทั้งหน้าตัดทั้งหมด ($M_{BRKB} / M_T = 0.40$) ตำแหน่งการยึดค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะที่ชิ้นส่วนคานและเสาวัดระยะจากหน้าตัดจุดต่อเสา-คานเท่ากับ 0.50 เมตร สำหรับการออกแบบ Gusset plate จะถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมแบบอิลาสติก ซึ่งใช้เหล็กแผ่น เกรด SS400 หนา 6 มม. และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการโก่งเดาะจึงมีการเชื่อมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (Stiffener) เพิ่มเข้าไป การเชื่อมต่อระหว่าง BRKB กับชิ้นส่วนเสา-คานจะเป็นการฝังสลักเกลียว ซึ่งในการออกแบบรอยต่อจะพิจารณา 2 อย่างหลักๆ คือ กำลังต้านทานแรงดึงและกำลังต้านทานแรงเฉือนให้สลักเกลียวไม่เกิดการขาดขณะทำการทดสอบ โดยสลักเกลียวที่ใช้จะเป็นเกรด 8.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ยาว 120 มม. จำนวน 6 ตัว ดังรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ BC3

3.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

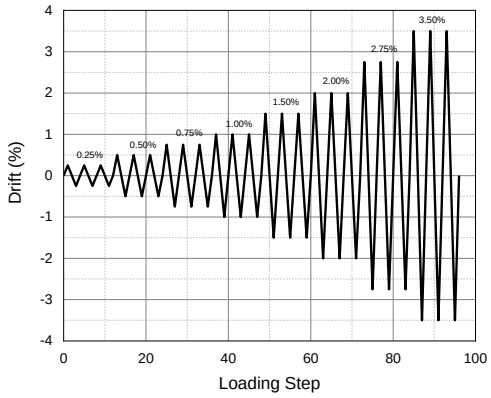
หลังจากการออกแบบตัวอย่างชิ้นส่วนเสา-คานแล้วจึงดำเนินการหล่อชิ้นส่วนเสา-คาน ซึ่งก่อนการหล่อชิ้นส่วนเสา-คานนั้นจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด Strain gauge บนเหล็กเสริมตามตำแหน่งที่ได้พิจารณาบริเวณที่คาดการณ์ไว้ว่าจะเป็นตำแหน่งวิกฤต และมีการฝังท่อ PVC ในชิ้นส่วนเสา-คานสำเร็จรูปใช้ในการร้อยลวดอัดแรงตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้เพื่อให้โครงสร้างมีพฤติกรรมการคืนศูนย์กลางด้วยตนเอง หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนเสา-คานมาประกอบกัน โดยทำการหมุนตัวอย่างทดสอบให้ชิ้นส่วนเสาอยู่ในแนวนอนแล้วติดตั้ง Support บนโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่แล้วยึดกับตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียวและป้องกันไม่ให้ตัวอย่างทดสอบไถลไปด้านข้างขณะทดสอบด้วยการใช้เหล็กเส้นอัดแรงยึดเข้ากับโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่แล้วทำการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (hydraulic jack) ที่ชิ้นส่วนเสาเพื่อจำลองแรงตามแนวแกนที่กระทำกับเสาโดยมีค่าประมาณ $0.10f_c'A_g$ โดย f_c' คือกำลังประลัยของคอนกรีตเสา และ A_g คือพื้นที่ของหน้าตัดเสา ดังรูปที่ 9 ติดตั้ง PI gauge บนตัวอย่างทดสอบและติดตั้งเกจวัดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) ที่ตัวอย่างการทดสอบและนำข้อมูลของ Strain gauge, PI gauge และ Displacement Transducer ด้วยการแปลงโดยใช้เครื่อง Data Logger



รูปที่ 9 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.4 การทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต

การทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตจะกระทำโดยการให้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ทางข้าง (Story Drift Ratio, SDR) ในการทดสอบ SDR หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ทางข้างของกระบอกไฮดรอลิกต่อความสูง (h) ซึ่งวัดจากหน้าตัดจุดต่อเสา-คาน ถึงศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิก ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ตัวอย่างทดสอบจะถูกดึงและผลักกลับไปกลับมา ตามเส้นทางแบบวัฏจักร (Loading History) ที่กำหนดโดยผลักปลายกำแพงและดึงย้อนกลับครบรอบอย่างช้าๆ ที่ทุกๆ ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ ±0.25%, ±0.50%, ±0.75%, ±1.00%, ±1.50%, ±2.00%, ±2.75%, ±3.5% หรือจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะพังจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกดึงและผลักที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แต่ละค่าทั้งหมดเป็นจำนวน 3 รอบ เพื่อประเมินเสถียรภาพและการเสื่อมถอยด้านกำลังและความแข็งแกร่ง



รูปที่ 10 ระยะการเคลื่อนที่ทางข้างที่ใช้ในการทดสอบ

4. ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 11 ความเสียหายของตัวอย่าง BC1

จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 ที่แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบโครงสร้างคอนกรีตแบบหล่อในที่ สังเกตเห็นความเสียหายที่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณชิ้นส่วนคานและรอยต่อ โดยเริ่มมีรอยแตกแนวนอนบริเวณด้านข้างที่ชิ้นส่วนคาน ที่ SDR = 0.5% ต่อมาที่ SDR = 1.5% จะสังเกตได้ว่าเกิดความเสียหายที่ชิ้นส่วนคานในลักษณะเป็นรอยแตกในแนวทแยงมุมบริเวณชิ้นส่วนคาน ซึ่งเมื่อการทดสอบสิ้นสุดจะพบว่าที่ชิ้นส่วนคานของตัวอย่างทดสอบเกิดความเสียหายในลักษณะการเสียรูปเนื่องจากการเฉือนและการดัดเป็นหลักทำให้เกิด Plastic hinge ขึ้นที่บริเวณปลายคาน



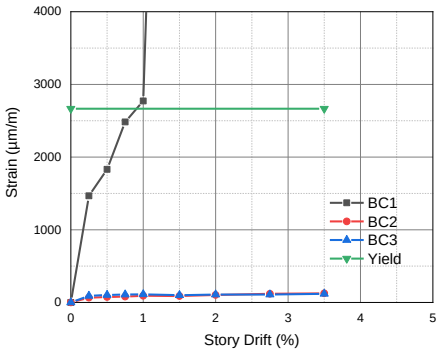
รูปที่ 12 ความเสียหายของตัวอย่าง BC2

ในส่วนของตัวอย่างทดสอบ BC2 ที่แสดงในรูปที่ 12 และ BC3 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงจะมีความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสแต่มีความเสียหายไม่มากนัก ทำให้ลวดอัดแรงที่อยู่ในท่อ PVC นั้นเกิดการยืดขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้มีการกระจายแรงที่มากขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และสังเกตเห็นการเปิดค้างของช่องว่างที่บริเวณรอยต่อ ที่ SDR เท่ากับ 0.50% ซึ่งเป็นการเสียรูปแบบการโยกตัวเป็นหลัก

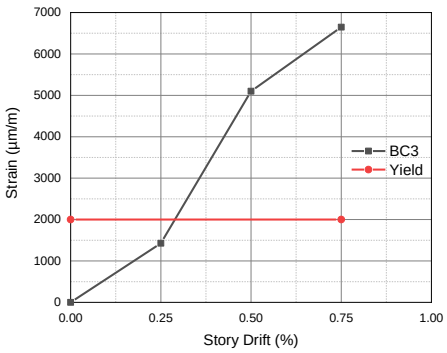
จากการติดตั้ง PI gauge และเกจวัดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) ที่ตัวอย่างการทดสอบ ทำให้สามารถคำนวณหาสัดส่วนการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบได้ พบว่า ตัวอย่างทดสอบ BC1 ที่ SDR เท่ากับ 3.50% จะมีรูปแบบการเสียหายเนื่องจากการโยกตัว 53% การเฉือน 35% และการดัด 12% เป็นหลักซึ่งสังเกตได้จากรอยร้าวที่ตัวชิ้นส่วนคานที่มีรอยแตกร้าวในแนวนอนและแนวทแยงมุมต่างกับตัวอย่างทดสอบ BC2 และ BC3 ที่ SDR เท่ากับ 3.50% จะมีรูปแบบการเสียเนื่องจากการโยกตัวหลักอยู่ที่ 97% และ 98% ตามลำดับ ทำให้ตัวชิ้นส่วนคานไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งบ่งบอกว่าการออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งเอาไว้

4.2 การคราก ของเหล็ก

การคราก ของเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญต่อกำลังรับแรงทางข้างและการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบซึ่งในการทดสอบได้ทำการติดตั้ง Strain gauge ตามตำแหน่งที่ได้พิจารณาบริเวณที่คาดการณ์ไว้ว่าจะเป็นตำแหน่งวิกฤต ซึ่งตำแหน่งที่ติดตั้งประกอบด้วย เหล็กเสริม แกนกลางของท่อนค้ำยันยืดรั้งไม่โก่งเดาะ และลวดอัดแรง



(a) เหล็กเส้น DB16



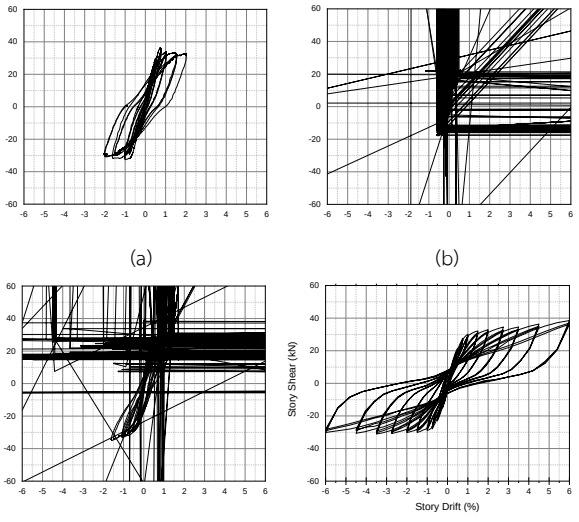
(b) BRKB

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและ SDR

จากรูปที่ 13(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและ SDR โดยการเอาค่าที่ได้จาก Strain gauge ที่ตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดในชิ้นส่วนคาน สำหรับตัวอย่าง BC1 จะอยู่ที่รอยต่อหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนเสา-คาน ส่วนตัวอย่าง BC2 และ BC3 จะอยู่ตำแหน่งที่วัดจากรอยต่อหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนเสา-คานขึ้นไปประมาณ 500 มม. โดยเลือกค่าความเครียดสูงสุดในแต่ละ SDR มาเปรียบเทียบกับความเครียด ณ จุดคราก ของเหล็กเส้น DB16 เกรด SD40 ที่ได้จากการนำไปทดสอบจะได้ค่าความเครียด ณ จุดครากอยู่ที่ประมาณ 2665 μm/m จะพบว่า จะมีแค่ตัวอย่าง BC1 ตัวอย่างเดียวที่เหล็กเส้นเกิดการคราก โดยจะเกิดการครากก่อน SDR เท่ากับ 1.00% ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่จะออกแบบให้ตัวอย่าง BC1 เกิดการครากที่เหล็กเส้นเพื่อสลายพลังงาน ส่วนตัวอย่าง BC3 จะออกแบบให้เกิดการครากที่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเท่านั้น โดยให้ชิ้นส่วนเสา-คานสำเร็จรูปอยู่ในช่วงอิลาสติกและไม่เกิดการวิบัติ

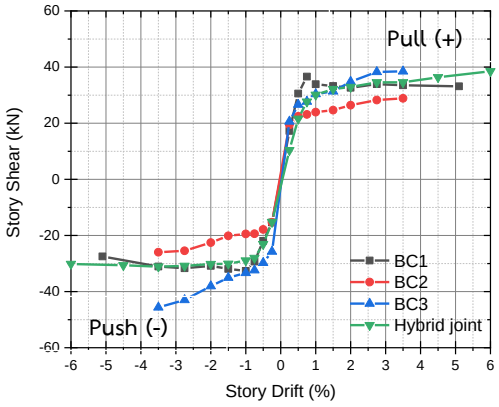
รูปที่ 13(b) แสดงค่าความเครียดสูงสุดในแต่ละ SDR เปรียบเทียบกับความเครียด ณ จุดคราก ของเหล็กแผ่น หนา 6 มม. เกรด SS400 ที่ได้จากการนำไปทดสอบแรงดึงในห้องปฏิบัติการได้ค่าความเครียด ณ จุดครากอยู่ที่ประมาณ 2000 μm/m โดยในความสัมพันธ์มีถึงแค่ SDR เท่ากับ 0.75% เนื่องจากตัว Strain gauge จะเกิดการเสียหายหลังจาก SDR เท่ากับ 0.75% ซึ่งจากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าตัวท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะจะเกิดการครากก่อน SDR เท่ากับ 0.50%

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้าง



(c) (d)

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ SDR ของแต่ละตัวอย่างทดสอบ
(a) BC1 (b) BC2 (c) BC3 และ (d) Hybrid joint [4]



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ SDR แบบ Envelope

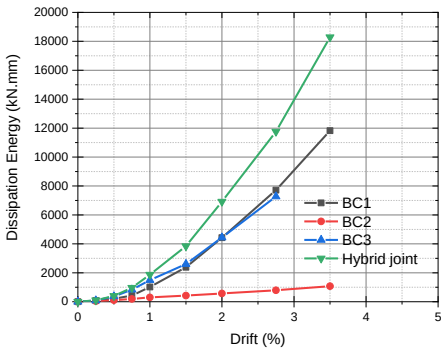
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในเสากับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (SDR) ของตัวอย่างการทดสอบโดยมีทิศทางในการทดสอบเมื่อถูกกระบอกไฮโดรลิกดึง (+) และผลัก (-) ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากที่สุดในแต่ละ SDR ของตัวอย่างการทดสอบ จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบ BC3 มีกำลังทางข้างสูงกว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 และ BC2 โดยตัวอย่างทดสอบ BC3 มีกำลังด้านข้างเท่ากับ 38.5 kN และ -45.64 kN ซึ่งท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะขาดที่ SDR เท่ากับ +3.50% รองลงมา ตัวอย่างทดสอบ BC1 มีกำลังด้านข้างเท่ากับ 36.59 kN และ -32.63 kN และตัวอย่างทดสอบ BC2 มีกำลังด้านข้างเท่ากับ 28.85 kN และ -25.99 kN จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าตัวอย่างจุดต่อเสา-คานระบบดึงลวดอัดแรงที่ทำการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน (BC3) จะมีกำลังทางข้างมากที่สุด

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างทดสอบสามารถหาค่าความเหนียวได้ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อระยะการเคลื่อนตัวที่จุดคราก โดยจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 มีค่าความเหนียวที่มากที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่างทดสอบ BC3 และ BC2 ตามลำดับ สำหรับตัวอย่าง BC3 ที่มีการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะมีค่าความเหนียวต่ำกว่า BC1 เนื่องจากท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเกิดการวิบัติทำให้หยุดการทดสอบต่างจากตัวอย่างทดสอบ BC1 ที่สามารถพัฒนากำลังจนมีระยะการเคลื่อนตัวที่มากกว่าตัวอย่างทดสอบ BC3 และ BC2 เป็นผลให้ตัวอย่างทดสอบ BC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบหล่อในที่มีค่าความเหนียวที่มากที่สุด

4.4 การสลายพลังงาน

จากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบ BC3 และ BC1 มีค่าสลายพลังงานสะสมที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าการสลายพลังงานที่น้อยกว่าตัวอย่าง Hybrid joint อาจเป็นผลมาเนื่องจากอัตราส่วน M_{BRKB} / M_T ของตัวอย่าง BC3 ที่ใช้ในการออกแบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.40 มีค่าที่น้อยกว่าอัตราส่วน M_s / M_T ของตัวอย่าง Hybrid joint ที่มีค่าเท่ากับ 0.45 ทำให้เหล็กเสริมที่ใช่ในการสลายพลังงานของตัวอย่าง Hybrid joint นั้นสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าตัวอย่าง BC3 ส่วนตัวอย่างทดสอบ BC3 จะมีการพลังงานสะสม

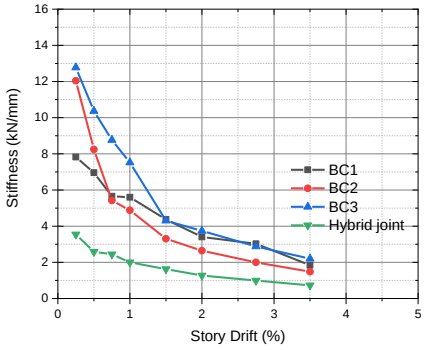
ที่มากกว่า BC1 เล็กน้อย ในช่วงที่ SDR ไม่เกิน ±2.00% อาจเกิดจากท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเกิดการครากทำให้การสลายพลังงานที่ได้ลดน้อยลง จนการการวิบัติที่ SDR เท่ากับ ±3.50% จึงทำการหยุดทดสอบตัวอย่าง BC3 ทำให้ไม่มีผลการสลายพลังงานที่ SDR เท่ากับ ±3.50% ของตัวอย่าง BC3 และในส่วนของตัวอย่าง BC2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่ใช้ระบบลวดอัดแรงโดยไม่มีการเสริมแรงด้วยค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะจึงทำให้ผลการสลายพลังงานของตัวอย่าง BC2 มีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทั้งสอง จึงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 ซึ่งเป็นตัวอย่างแบบหล่อในที่และ BC3 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะจะสามารถสลายพลังงานใกล้เคียงกัน



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างสลายพลังงานกับ SDR

4.5 ความแข็งแกร่ง

ความแข็งแกร่งของตัวอย่างทดสอบนั้นคือค่า K (Stiffness) ความแข็งแกร่งของตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนในแต่ละรอบของการทดสอบ ซึ่งความแข็งแกร่งของตัวอย่างเมื่อเทียบกับระยะการเคลื่อนตัว แสดงในรูปที่ 17 จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่างการทดสอบเพิ่มขึ้นความแข็งแกร่งของตัวอย่างทดสอบจะลดลงเรื่อย ๆ และในช่วง SDR แรกๆ ตัวอย่าง BC3 จะมีความแข็งแกร่งมากที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่าง BC2 และ BC1 ตามลำดับ ซึ่งจากความสัมพันธ์จะสังเกตได้ว่า ตัวอย่าง BC1 จะมีความแข็งแกร่งที่เสื่อมถอยน้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆ โดยในช่วงที่ SDR เท่ากับ ±0.75% จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบ BC2 จะมีความแข็งแกร่งที่ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง BC1 ต่อมาในช่วงที่ SDR เท่ากับ ±1.50% ตัวอย่าง BC3 จะมีความแกร่งที่ลดลงจนใกล้เคียงกันตัวอย่าง BC1 จนในตอนสุดท้ายจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทดสอบ BC3 มีความแกร่งที่มากกว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 และ BC2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าการใส่ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะนี้นอกจากจะเพิ่มกำลังของโครงสร้างแล้วยังเพิ่มความแกร่งอีกด้วย



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งกับ SDR

4.6 เปรียบเทียบเกณฑ์การยอมรับที่ระบุในมาตรฐาน ACI 374.1-05 [9]

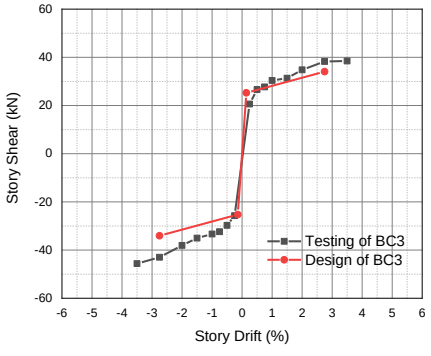
เมื่อนำเกณฑ์ที่ระบุในมาตรฐาน ACI 374.1-05 [9] ซึ่งเป็นเกณฑ์การยอมรับผลการทดสอบสำหรับโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ มีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) เท่ากับ 8 และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (C_d) เท่ากับ 5.5 ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ใช้ในการออกแบบอยู่ที่ 2.50% โดยค่า 8/5.5 คูณด้วยค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ใช้ในการออกแบบทำให้ได้ขีดจำกัดที่แท้จริงของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์อยู่ที่ 3.60% แต่ในมาตรฐานจะใช้ขีดจำกัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์อยู่ที่ 3.50% สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีค้ำยัน เช่น ตัวอย่าง BC1 และ BC2 ส่วนตัวอย่าง BC3 เป็นตัวอย่างที่มีค้ำยันที่มีความแข็งแกร่งที่มากกว่า ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานรองรับ โดย López et al. [8] ได้ทำการออกแบบโครงสร้างที่มีค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ และได้กำหนดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ใช้ในการออกแบบอยู่ที่ 2.00% เมื่อนำมาคำนวณหาขีดจำกัดที่แท้จริงของการการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์อยู่ที่ 2.90% แต่ในการทดสอบไม่มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 2.90% จึงได้พิจารณาให้ขีดจำกัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์อยู่ที่ 2.75% อีกทั้งสำหรับระบบโครงอาคารเหล็กซึ่งอ้างอิงจาก มยผ. 1301/1302. [10] นี้มีค่า R อยู่ที่ระหว่าง 6 – 8 จะได้ขีดจำกัดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 2.18 - 2.90 และยังมีเกณฑ์อื่นๆ อีกที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ตัวอย่าง BC1 และ BC3 จะเป็นตัวอย่างทดสอบที่ผ่านเกณฑ์นี้ ซึ่งบ่งบอกว่าระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะสามารถเป็นระบบโครงสร้างการต้านทานแผ่นดินไหวได้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ

Specimen	Criteria		Tested	Acceptance	Pass
BC1	Peak force (kN)	+	30.58	27.44 ($0.75E_{max}$)	✓
		-	25.30	24.47 ($0.75E_{max}$)	✓
	The relative energy dissipation ratio		0.29	0.125	✓
	The secant stiffness (kN/mm)		0.91	0.508 (0.05K)	✓
BC2	Peak force (kN)	+	28.06	21.64 ($0.75E_{max}$)	✓
		-	24.72	19.49 ($0.75E_{max}$)	✓
	The relative energy dissipation ratio		0.015	0.125	✗
	The secant stiffness (kN/mm)		2.97	0.551 (0.05K)	✓
BC3*	Peak force (kN)	+	33.74	28.86 ($0.75E_{max}$)	✓
		-	40.11	34.23 ($0.75E_{max}$)	✓
	The relative energy dissipation ratio		0.29	0.125	✓
	The secant stiffness (kN/mm)		2.59	0.638 (0.05K)	✓

* ตัวอย่าง BC3 ได้พิจารณาที่ Drift = 2.75%

4.7 พฤติกรรมเมื่อเทียบกับการออกแบบ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ SDR

จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการออกแบบโดยในการออกแบบจะถูกออกแบบให้มีจุดหมุนพลาสติกอยู่ที่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเท่านั้น โดยชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาและคานจะถูกออกแบบให้มีกำลังที่เพียงพอที่จะไม่เกิดความเสียหาย จะทำให้สามารถประมาณแรงที่กระทำที่ตัวอย่างทดสอบ BC3 ได้ เริ่มจากการหาการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (SDR) ที่ทำให้เกิดการครากที่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะกับที่ SDR เท่ากับ 2.75% ซึ่งเป็นระดับที่คาดว่าจะเป็นการเกิดแผ่นดินไหวที่มากที่สุดแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่จุดต่อเพื่อแปลงเป็นกำลังรับแรงด้านข้าง ซึ่งแสดงในรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าที่น้อยกว่ากำลังรับแรงด้านข้างที่ได้จากการทดสอบ

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างจุดต่อเสา-คานระบบดึงลวดอัดแรงทำการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คานซึ่งเป็นระบบทางเลือกด้วยการทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต จำนวน 3 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่า

1. การเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน (BC3) ซึ่งเป็นระบบทางเลือกจะทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังทางข้าง ความแกร่งและการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะ (BC2)
2. ในด้านการสลายพลังงานจะพบว่าการเสริมกำลังโดยการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะซึ่งเป็นระบบทางเลือกจะทำให้ตัวอย่างทดสอบมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างแบบหล่อในที่ (BC1)
3. ในด้านรูปแบบความเสียหายซึ่งเป็นระบบทางเลือกจะพบว่าจุดต่อเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะจะสามารถจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้อยู่แค่บริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อเสา-คานโดยชิ้นส่วนเสา-คานไม่เกิดความเสียหายได้ซึ่งจะทำให้สามารถซ่อมแซมได้ง่ายกว่าโครงสร้างชนิดหล่อในที่
4. ในด้านการเสื่อมถอยความแข็งแกร่งจะพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีการใช้ลวดอัดแรงซึ่งเป็นระบบทางเลือกจะมีการการเสื่อมถอยความแข็งแกร่งที่มากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบแบบหล่อในที่ (BC1)

จากผลการศึกษาที่ได้นี้ พบว่าระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะสามารถนำมาใช้เป็นหนึ่งในระบบโครงสร้างทางเลือกในการต้านทานแผ่นดินไหวได้

เอกสารอ้างอิง

[1] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (2557). บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางในเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย. การประชุมสัมมนาเรื่อง บทเรียนแผ่นดินไหวแม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว, กรุงเทพมหานคร, 20 พฤศจิกายน 2557, หน้า 99-114.

[2] Guan, Dongzhi, Zhengxing Guo, Quandong Xiao, and Yongfeng Zheng. (2016). Experimental study of a new beam-tocolumn connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading, *Advances in Structural Engineering*, 19(3), pp. 529–545.

[3] ชาตรี งามเสงี่ยม (2553). *การพัฒนาองค์อาคารรั้งยึดไร้การโก่งเดาะสำหรับการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[4] Yooprasertchai, E. and Warnitchai, P. (2016). An application of precast hybrid moment-resisting frames for seismic improvement, *Magazine of Concrete Research*, 68(20), pp. 1051–1069.

[5] Chen, S. C., L. Y. Zheng, W. M. Yan, and Kang Suk Kim. (2022). Seismic Performance of Post-tensioned Precast Concrete Joints Improved with Curved Steel Braces, *Journal of Earthquake Engineering*, 26(3), pp. 1461–1479.

[6] Junda, E., Leelataviwat, S. and Doung, P. (2018). Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 148, pp. 154–164.

[7] Yooprasertchai, E., Hadiwijaya, I.J. and Warnitchai, P. (2016). Seismic performance of precast concrete rocking walls with buckling restrained braces, *Magazine of Concrete Research*, 68(9), pp. 462–476.

[8] López, W. A., Rutherford, A., And, C., Sabelli, R. and Associate, S. (2004). *Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames*. www.steeltips.org

[9] ACI Committee 374. (2005). Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary : An ACI Standard. American Concrete Institute.

[10] มยผ. 1301/1302. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง