

ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนเสาคานสำเร็จรูปต้านทาน
แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

STRUCTURAL SYSTEMS FOR EARTHQUAKE RESISTANT PRECAST
CONCRETE BEAM-COLUMN CONNECTIONS

เอกรินทร์ ชัยสนิท

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความเชี่ยวชาญ : การทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิต, ค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะ, ชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาคาน,
ลวดอัดแรง



ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความเชี่ยวชาญ : วิศวกรรมโครงสร้าง, การเสริมกำลังโครงสร้าง, การออกแบบโครงสร้างต้านทาน
แผ่นดินไหว, และการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้าง





1. บทนำ

การก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนหล่อสำเร็จได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและมีความประหยัด จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีตได้แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นหากไม่พิจารณาออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหว อาจทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา ประเทศไทยเกิดแผ่นดินไหวเป็นจำนวนหลายครั้งด้วยกัน ซึ่งครั้งที่มีความรุนแรงมากที่สุดในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา ก็คือปี พ.ศ.2557 ที่ จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 [1] ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างเป็นอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน

ที่ผ่านมา พบว่า ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวส่วนใหญ่มีจุดอ่อนอยู่ที่บริเวณจุดต่อเสา-คานเนื่องจากรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปมักจะมีกำลัง ความแกร่ง และความเหนียวน้อยกว่าคอนกรีตหล่อในที่ [2] อย่างไรก็ตามยังไม่มีระเบียบวิธีการและข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานกลางสำหรับงานก่อสร้างที่ใช้ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปในประเทศไทย ทำให้ผู้ออกแบบแต่ละรายมักจะคิดค้นพัฒนารูปแบบ เทคนิค วิธีการผลิตและการเชื่อมต่อโครงสร้างสำเร็จรูปขึ้นมาด้วยตนเอง หรือนำเทคโนโลยีมาจากต่างประเทศ ซึ่งส่วนมากแล้วจะดำเนินการโดยมีเป้าหมายหลักเพื่อให้เกิดความประหยัด สามารถทำงานได้ง่าย แต่ไม่ได้คำนึงถึงความเสี่ยงจากแผ่นดินไหว หรือมีการพิจารณาในบางอาคารที่ยังมีสัดส่วนอยู่น้อย ซึ่งในปี 2564 กฎกระทรวงฉบับใหม่ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของอาคารและผู้ใช้อาคารต่อแผ่นดินไหวได้เริ่มมีผลบังคับใช้ ทำให้อาคารที่อยู่ในบริเวณเสี่ยงภัยต้องได้รับการออกแบบให้ทนต่อการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ในระดับที่เหมาะสม

บทความนี้นำเสนอตัวอย่างรูปแบบของจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานโดยใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะเพื่อเป็นระบบโครงสร้างทางเลือกในการต้านทานแผ่นดินไหว โดยได้นำจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานมาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิตเพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหวซึ่งในการทดสอบได้มีการพิจารณาในด้านรูปแบบ ความเสียหาย, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้าง, ความแข็งแรง, การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ และนำมาเทียบกับระบบดั้งเดิมเพื่อชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบทางเลือกนี้

2. แนวคิดการออกแบบรอยต่อ

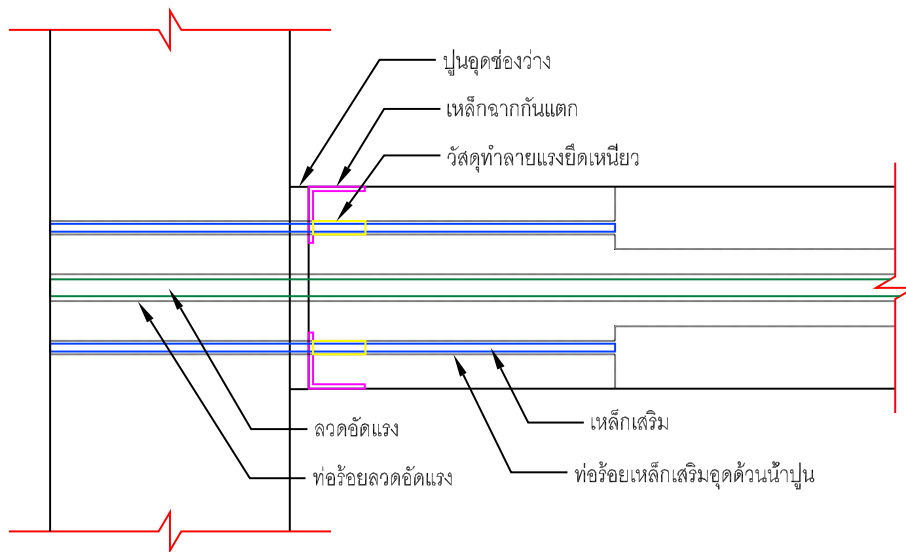
โครงสร้างอาคารระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คาน ที่เหมาะสมในการต้านทานแผ่นดินไหวสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทหลักตามพฤติกรรมโครงสร้างได้แก่ (1) ระบบที่ได้รับการออกแบบ

ให้มีพฤติกรรมโครงสร้างเลียนแบบระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่ (emulative precast concrete system) และ (2) ระบบที่ได้ถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมแตกต่างจากโครงสร้างแบบหล่อในที่ (jointed precast concrete system)

ระบบโครงสร้างประเภท (1) เป็นรูปแบบที่นิยมใช้กันทั่วไปทั่วโลก รวมถึงในประเทศไทยในงานออกแบบก่อสร้างอาคาร เนื่องจากวิศวกรผู้ออกแบบและผู้รับเหมาก่อสร้างของไทยมีความรู้ความชำนาญในการออกแบบและก่อสร้างอาคารชนิดนี้เป็นอย่างดี โดยมีการใช้หลักการออกแบบเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบหล่อในที่ ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาให้จุดต่อของระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีพฤติกรรมไม่ด้อยไปกว่าระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่ แต่ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปประเภทนี้มีจุดอ่อนหลายประการในด้านการต้านทานแผ่นดินไหว ดังที่เห็นได้จากผลการสำรวจความเสียหายของระบบโครงสร้างประเภทนี้ภายหลังจากการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1994 ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา [3]

เพื่อแก้ไขจุดอ่อนของระบบโครงสร้างประเภทที่ (1) ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาพัฒนาวิจัยระบบโครงสร้างรูปแบบอื่นๆ ที่มีพฤติกรรมแตกต่างจากระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่ ซึ่งก็คือระบบโครงสร้างประเภทที่ (2) ระบบโครงสร้างประเภทนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในหลายรูปแบบ เป็นระบบที่ออกแบบให้จำกัดความเสียหายอยู่ในบริเวณที่จำกัดเช่น บริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนสำเร็จรูป ความเสียหายจะไม่ลามเข้าไปในองค์อาคาร รูปแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดรูปแบบหนึ่งคือ ระบบโครงสร้างเสา-คานแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีลวดอัดแรงเสริมเพื่อยึดรั้งชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันและทำงานร่วมกันกับเหล็กเสริมธรรมดาในการสลายพลังงาน ซึ่งมีชื่อเรียกโดยย่อว่า ระบบไฮบริด (Hybrid Precast Frame)

Yooprasertchai and Warnitchai [4] ได้ประยุกต์ใช้รอยต่อไฮบริด (hybrid connection) ซึ่งรอยต่อไฮบริด หมายถึง รอยต่อของชิ้นส่วนเสา-คานสำเร็จรูปที่มีองค์ประกอบทางโครงสร้างชนิดต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 1 หลักการทำงานของรอยต่อไฮบริด คือ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะทำให้โครงสร้างเกิดการโยกไปมาส่งผลให้หน้าสัมผัสระหว่างเสา-คานเกิดการเปิดออก เหล็กเสริมที่สอดอยู่ระหว่างเสา-คานจะเกิดการครากและทำหน้าที่ในการสลายพลังงานที่เกิดจากแผ่นดินไหว ซึ่งความเสียหายจะถูกจำกัดอยู่ที่บริเวณหน้าสัมผัสเสา-คานเท่านั้น และมีการใช้ลวดอัดแรงซึ่งจะมีหน้าที่ดึงรอยเปิดระหว่างปลายคานและหน้าเสารวมทั้งรอยร้าวในบริเวณใกล้เคียงให้ปิดลงเมื่อแผ่นดินไหวสิ้นสุดลง และส่งผลให้โครงสร้างไฮบริดกลับมาตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งหรือเป็นระบบที่ตั้งศูนย์ด้วยตัวเอง (self-centering)



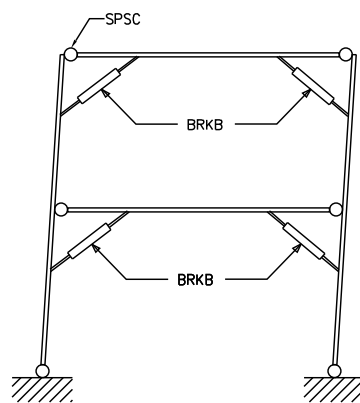
รูปที่ 1 องค์ประกอบของรอยต่อไฮบริด [4]

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการซ่อมแซมความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระบบโครงสร้างไฮบริดสามารถทำได้ยากเนื่องจากเหล็กเสริมที่ร้อยทะลุผ่านเสา-คานที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการครากของเหล็กเสริมนั้นอยู่ภายในจุดต่อเสา-คาน ต่อมา Chen, S.C. et al. [5] ได้เสนอแนวความคิดการออกแบบเกี่ยวกับจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานโดยใช้ลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันเหล็กโค้ง เป็นรูปแบบโครงสร้างที่คล้ายระบบโครงสร้างไฮบริด [4] กล่าวคือ ระบบโครงสร้างจะถูกออกแบบมาให้ความเสียหายถูกจำกัดอยู่ที่หน้าสัมผัสจุดต่อเท่านั้น และมีค้ำยันเหล็กโค้งเป็นตัวช่วยทำหน้าที่ในการสลายพลังงานที่เกิดจากแผ่นดินไหว โดยค้ำยันนี้ติดตั้งอยู่ภายนอกจุดต่อ จึงสามารถซ่อมแซมความเสียหายที่จะเกิดขึ้นหลังจากเกิดแผ่นดินไหวได้ง่าย ส่วนลวดอัดแรงจะทำหน้าที่บีบหน้าสัมผัสและเป็นผลให้โครงสร้างกลับมาตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งหรือเคลื่อนที่กลับมาที่เดิม (self centering) จากผลการศึกษาพบว่า การเสริมด้วยค้ำยันเหล็กโค้งจะช่วยให้โครงสร้างมีกำลังต้านข้าง ความแข็งแรงและการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างด้วยการดึงและผลักกลับไปกลับมา จะพบว่ากำลังการต้านทานในทิศทางที่ทำให้ค้ำยันเกิดแรงอัดจะมีกำลังการต้านทานที่น้อยกว่าทิศทางที่ทำให้ค้ำยันเกิดแรงดึงเนื่องจากจากรูปร่างค้ำยันเป็นเหล็กโค้งจึงมีโอกาสเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ได้ง่าย

จากปัญหาที่สำคัญของในการใช้โครงสร้างยึด คือ การสูญเสียเสถียรภาพจากการโก่งเดาะ (buckling) เนื่องจากท่อนค้ำยันมักมีขนาดบางและชะลูด ต่อมา ชาตรี งามเสถียร [6] ได้เสนอแนวความคิดการพัฒนาท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะโดยใช้ restrained part เป็นโครงสร้างเหล็ก (Steel Buckling Restrained

Brace, SBRB) โดยท่อนค้ำยันชนิดนี้มีข้อดี คือ มีเสถียรภาพในการรับแรงดึงและแรงอัดจนถึงจุดคราก โดยที่ไม่เกิดการโก่งเดาะ ส่งผลให้ท่อนค้ำยันสามารถสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวได้ดี

จากงานวิจัยของ Junda et al. [7] ได้เสนอแนวคิดการออกแบบจุดต่อโดยใช้ ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะที่ตำแหน่งมุมของจุดต่อเสา-คานในระบบโครงสร้างเหล็ก (Buckling Restrained Knee Braces, BRKB) ที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ใช้สอยที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเดิมการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะจะทำให้มีพื้นที่ใช้สอยในด้านที่ติดตั้งน้อยลง อีกทั้งการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะที่มุมยังสามารถเพิ่มความเหนียวและเพิ่มกำลังให้แก่โครงสร้างรวมถึงสามารถซ่อมแซมได้ง่ายหลังจากเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นบทความนี้จึงเลือกใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะที่มุมของจุดต่อเสา-คาน (BRKB) เป็นท่อนค้ำยันที่ใช้ในการสลายพลังงานให้แก่โครงสร้างในระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยรวมกับการใช้ระบบลวดอัดแรงเพื่อให้โครงสร้างสามารถกลับมาตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งหรือมีพฤติกรรมที่ตั้งศูนย์ด้วยตัวเอง (self centering)



รูปที่ 2 ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะที่มุมของจุดต่อเสา-คาน [7]

3. วิธีการศึกษา

3.1 หลักการออกแบบระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปในการต้านทานแผ่นดินไหว

บทความนี้เสนอระบบชิ้นส่วนสำเร็จเสา-คานด้วยระบบดิ่งลวดอัดแรงยึดทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ โดยหลักการที่ใช้ในการออกแบบตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่จะถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Yooprasertchai and Warnitchai [4] ซึ่งเปลี่ยนจากการใช้เหล็กเสริมพิเศษเป็นการใช้ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะในการสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวโดยยังคงใช้ระบบดิ่งลวดอัดแรง โดยมีหลักการออกแบบโครงสร้าง ดังนี้



- 1) ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกออกแบบให้เกิดการร้าวที่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเท่านั้น โดยการออกแบบด้วยวิธี Capacity Design
- 2) ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกควบคุมให้สัดส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของทั้งหน้าตัดทั้งหมด ($M_{BRKB} / M_T < 0.5$)
- 3) ขนาดของแรงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงจะถูกออกแบบไม่ให้เกิดร้าว ณ มุมหมุนที่ 3.50% ในขณะที่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะจะถูกออกแบบให้แกนเหล็กมีขีดจำกัดความเครียดอยู่ที่ 3.00% ซึ่งเป็นระดับที่คาดว่าโครงสร้างมีระดับความเหนียวไม่น้อยกว่าระดับที่ต้องการ

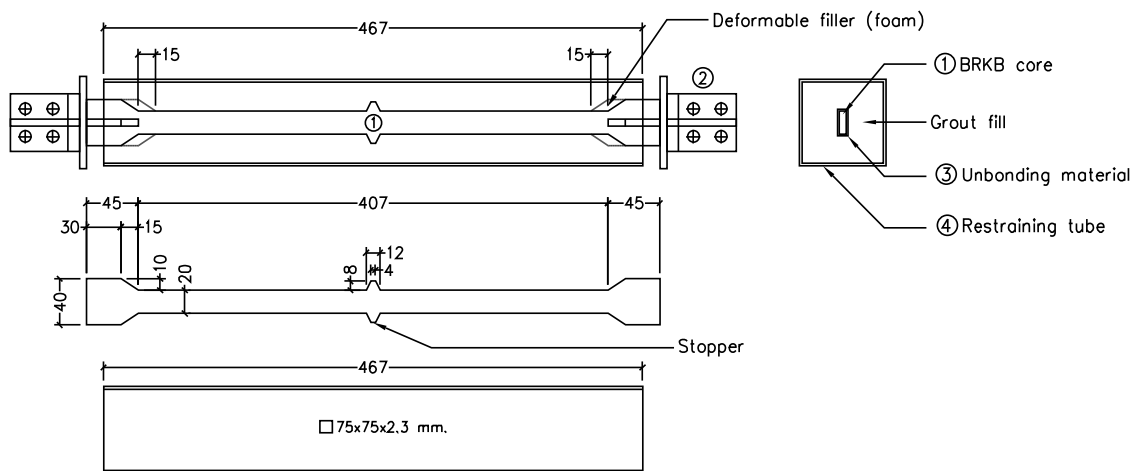
3.2 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างจุดต่อเสา-คานสำหรับการทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง ประกอบด้วย 1) ตัวอย่างจุดต่อขึ้นส่วนสำเร็จรูปเสา-คานชนิดเลียนแบบโครงสร้างหล่อในที่ (BC1) และ 2) ตัวอย่างจุดต่อขึ้นส่วนสำเร็จรูปเสา-คานระบบดึงลวดอัดแรงทำการเสริมกำลังโดยการใส่ท่อนค้ำยันยึดรั้งไม่โก่งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน (BC2) โดยทั้ง 2 ตัวอย่างถูกออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI318-05 [8] และมีกำลังรับแรงดัดที่จุดต่อสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] โดยมีรายละเอียดของขนาดมิติของขึ้นส่วนโครงสร้างเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัดของคานเท่ากับ 170 x 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	กำลังรับแรงดึงที่จุดร้าว (MPa)	กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (MPa)
RB6	SR24	372.8	498.3
RB9	SR24	458.3	661.8
DB16	SD40	533.3	645.4

ท่อนค้ำยันยี่ดรั้งที่ไม่โก่งเดาะจะเป็นท่อนค้ำยันที่มีความสามารถในการสลายพลังงานซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบหลักดังนี้ คือ 1. แกนเหล็ก (steel core) เป็นส่วนที่ถูกออกแบบให้เกิดการครากเพื่อช่วยในการสลายพลังงาน ได้เลือกออกแบบให้แกนเหล็กมีขีดจำกัดความเครียดอยู่ที่ 3.00% จึงได้ขนาดหน้าตัดที่ 6 x 14 มม. มีระยะการคราก 407 มม. และมีแรงดึงที่จุดคราก เท่ากับ 24.7 kN ซึ่งที่กึ่งกลางของแกนเหล็กจะมีตัวป้องกันการไหลของแกนเหล็ก (stopper) 2. ส่วนที่ถูกออกแบบให้ไม่เกิดการคราก ซึ่งจะมีการเชื่อมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (stiffener) เพิ่มเข้าไป 3. วัสดุป้องกันการยึดเหนี่ยว (unbonding material) จะใช้เทปยางละลายพันรอบแกนเหล็กเพื่อให้แกนเหล็กที่อยู่ภายในสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ ส่วน 4. ปลอกหุ้มจะใช้เหล็กกล่องขนาด 75x75 หนา 3.2 มม. ยาว 467 มม. โดยจะมีการรอกหน้าปูนเกร้าที่ชนิดไม่หดตัวลงไปในเหล็กกล่องซึ่งมีกำลังอัดอยู่ที่ 68.1 MPa เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการโก่งเดาะออกของแกนเหล็กซึ่งมีรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 3



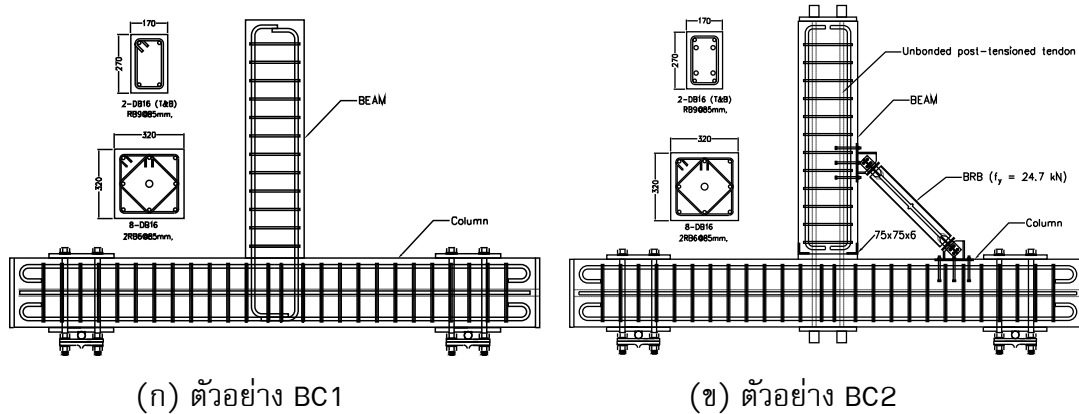
รูปที่ 3 รายละเอียดท่อนค้ำยันยี่ดรั้งที่ไม่โก่งเดาะ

1) ตัวอย่างทดสอบ BC1

ตัวอย่างทดสอบ BC1 เป็นตัวแทนของโครงสร้างชนิดเลียนแบบโครงสร้างหล่อในที่ โดยรายละเอียดการเสริมเหล็กจะถูกออกแบบให้มีกำลังรับแรงดัดที่จุดต่อใกล้เคียงกัน ที่มุมหมุนที่ 3.50% โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 4(ก)

2) ตัวอย่างทดสอบ BC2

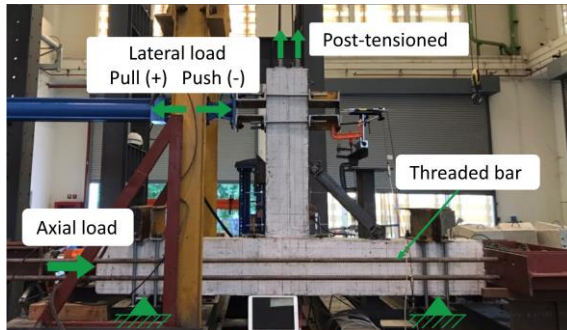
ตัวอย่างทดสอบ BC2 จะเป็นตัวอย่างจุดต่อที่ใช้ระบบลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ โดยระบบลวดอัดแรงที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 มม. เป็นจำนวน 4 เส้น ร้อยทะลุคานผ่านท่อ PVC และมีขนาดของแรงที่ใช้ในการดึงลวดอยู่ที่ร้อยละ 55 ของกำลังรับแรงดึงประลัย ($0.55f_{pu}$) ตำแหน่งการยึดท่อนค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะที่ขึ้นส่วนคานและเสาไว้ระยะจากหน้าตัดจุดต่อเสาคานเท่ากับ 0.50 เมตร โดยมีรายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 4(ข)



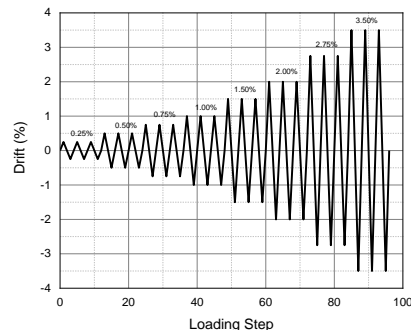
รูปที่ 4 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

3.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบและการทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต

ในการติดตั้งตัวอย่างทดสอบจะทำการหมุนตัวอย่างทดสอบให้ขึ้นส่วนเสาอยู่ในแนวนอนแล้วติดตั้ง Support บนโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่แล้วยึดกับตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียวและป้องกันไม่ให้ตัวอย่างทดสอบไถลไปด้านข้างขณะทดสอบด้วยการใช้เหล็กเส้นอัดแรงยึดเข้ากับโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่แล้วทำการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (hydraulic jack) ที่ขึ้นส่วนเสาเพื่อจำลองแรงตามแนวแกนที่กระทำกับเสาโดยมีค่าประมาณ $0.10f_c'A_g$ โดย f_c' คือกำลังประลัยของคอนกรีตเสา และ A_g คือพื้นที่ของหน้าตัดเสา ดังรูปที่ 5(ก) เพื่อที่จะเอาผลการทดสอบไปศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ



(ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



(ข) ระยะเวลาเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในการทดสอบ

รูปที่ 5 รายละเอียดการทดสอบตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตจะกระทำโดยการให้ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ทางข้าง (Story Drift Ratio, SDR) ในการทดสอบระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ทางข้างของกระบอกไฮดรอลิกต่อความสูง (h) ซึ่งวัดจากหน้าตัดจุดต่อเสา-คาน ถึงศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิก ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ตัวอย่างทดสอบจะถูกดึงและผลักกลับไปกลับมา ตามเส้นทางแบบวัฏจักร (loading history) ที่กำหนดโดยผลึกปลายชิ้นส่วนคานและดึงย้อนกลับครบรอบอย่างช้า ๆ ในแต่ละระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ $\pm 0.25\%$, $\pm 0.50\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.00\%$, $\pm 1.50\%$, $\pm 2.00\%$, $\pm 2.75\%$, $\pm 3.50\%$ หรือจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะพังจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ ตามมาตรฐาน ACI 374.1-05 [9] ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกดึงและผลักที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แต่ละค่าทั้งหมดเป็นจำนวน 3 รอบเพื่อประเมินเสถียรภาพและการเสื่อมถอยด้านกำลังและความแข็งแรง

4. ผลการทดสอบ

4.1 ลักษณะการเสีรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ

จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 ที่แสดงในรูปที่ 6(ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบโครงสร้างคอนกรีตแบบหล่อในที่ สังเกตเห็นความเสียหายที่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณชิ้นส่วนคานและรอยต่อ โดยเริ่มมีรอยแตกแนวอนบริเวณด้านข้างที่ชิ้นส่วนคาน ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ = 0.50% ต่อมาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ = 1.50% จะสังเกตได้ว่าเกิดความเสียหายที่ชิ้นส่วนคานในลักษณะเป็นรอยแตกในแนวทแยงมุมบริเวณชิ้นส่วนคานเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเมื่อการทดสอบสิ้นสุดพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นไปกระจุกตัวอยู่ที่ตำแหน่งชิ้นส่วนคานของตัวอย่างทดสอบและเป็นตำแหน่ง

ที่ทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นที่บริเวณชั้นส่วนคาน โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า อาจบอกได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในลักษณะการเสียรูปเนื่องจากการเฉือนและการดัดเป็นหลัก

จากรูปที่แสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่า ความเสียหายของตัวอย่าง BC2 ซึ่งเป็นตัวอย่าง ทดสอบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คานที่ใช้สวดอัดแรงทำการเสริมกำลังด้วยการใช้ท่อนค้ำยันยึด รัดไม่โก่งเดาะ พบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ในลักษณะที่เป็นรอยแตกใน แนวอนที่หน้าสัมผัสสุดต่อเสา-คานสำเร็จรูป โดยเริ่มมีรอยร้าวที่หน้าสัมผัสทั้งสองข้าง ที่ระยะ เคลื่อนที่สัมพัทธ์ = 0.50% ต่อมาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ = 0.75% สังเกตได้ว่าชั้นส่วนคานยกตัวขึ้น ขณะทำการทดสอบจนทำให้เกิดเป็นช่องว่าง (gap) และชั้นส่วนเสาและคานสำเร็จรูปไม่เกิดความเสียหาย โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าอาจบอกได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ใน ลักษณะการเสียรูปเนื่องจากการโยกตัวเป็นหลัก



(ก) ตัวอย่าง BC1



(ข) ตัวอย่าง BC2

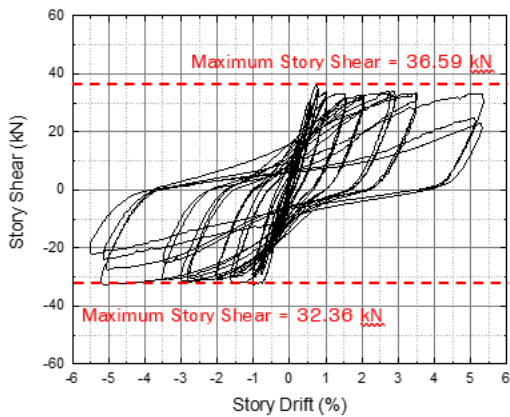
รูปที่ 6 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

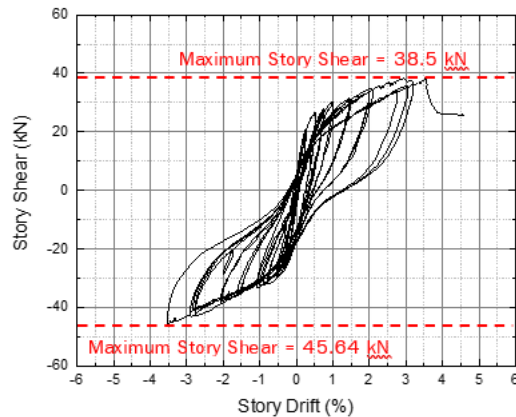
รูปที่ 7(ก) และ 7(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในเสากับระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่างการทดสอบโดยมีทิศทางในการทดสอบเมื่อถูกกระบอกไฮดรอลิกดึง (+) และผลัก (-) ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวอย่างทดสอบ BC1 มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ถึงช่วงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ สติฟเนสของชิ้นส่วนทดสอบช่วง Elastic นี้มีค่าเท่ากับ 6.95 kN/mm และต้านทานแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 36.59 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ +0.75% และ 32.63 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ -1.00% ในทิศทางดึงและผลักตามลำดับ ส่วนตัวอย่างทดสอบ BC2 มี

พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ถึงช่วงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ สติฟเนสของชิ้นส่วนทดสอบ ช่วง elastic นี้มีค่าเท่ากับ 12.77 kN/mm และต้านทานแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 38.5 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ +3.50% และ 45.64 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ -3.50% ในทิศทางตั้งและผลักตามลำดับ

จากตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสา-คานทั้ง 2 ตัวอย่าง โดยให้แรงกระทำทางข้างแก่ตัวอย่างการทดสอบด้วยวิธีแรงวัฏจักรกึ่งสถิต (quasi-static Reversed Cyclic Loads) พบว่าตัวอย่าง BC1 และ BC2 จะให้กำลังต้านทานแรงกระทำที่ใกล้เคียงกัน แต่ตัวอย่าง BC1 จะสามารถพัฒนากำลังได้จนถึงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 5.00\%$ และตัวอย่าง BC2 จะสามารถพัฒนากำลังได้จนถึงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ เนื่องจากท่อนค้ำยันยัดรี้งไม่โก่งเดาะจะเกิดการขาดที่แกนเหล็กเมื่อทำการทดสอบจนถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ $\pm 3.50\%$ ทำให้สามารถบอกได้ว่าตัวอย่างทดสอบแบบหล่อในที่มีความเหนียวที่มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีรอยต่อเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ อย่างไรก็ดีที่ระดับนี้ถือว่าผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานการทดสอบ



(ก) ตัวอย่าง BC1



(ข) ตัวอย่าง BC2

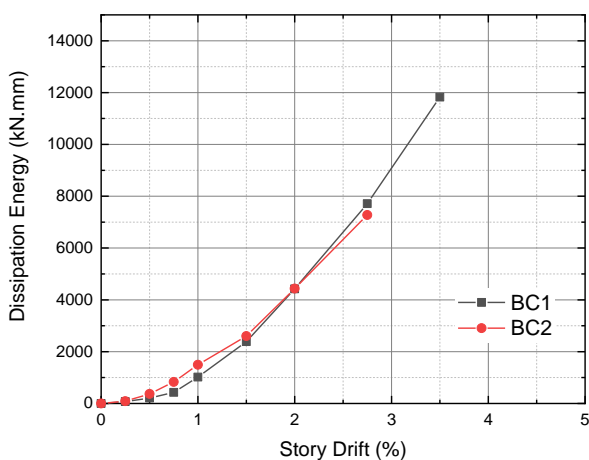
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวอย่างทดสอบ

4.3 การสลายพลังงานและความแข็งแรง

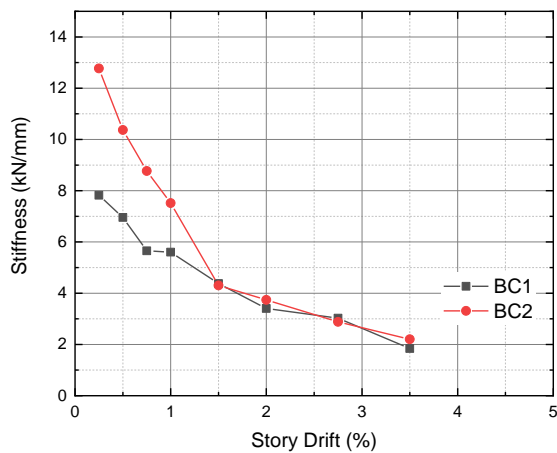
จากรูปที่ 8(ก) แสดงค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่าง ๆ ค่าสลายพลังงานนี้สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ภายในของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างที่ได้จากการทดสอบจากนั้นนำมารวมสะสมกันจนจบการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง

BC1 และ BC2 มีแนวโน้มของค่าสลายพลังงานสะสมที่ใกล้เคียงกัน จึงแสดงให้เห็นว่าใช้ท่อนค้ำยันที่ไม่โค้งเดาะมาช่วยในการเสริมกำลังสามารถช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบแบบหล่อในที่ได้

สำหรับความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบ หรือ สติฟเนส โดยความแข็งแรงของตัวอย่างจะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนในแต่รอบของการทดสอบ ซึ่งความแข็งแรงของตัวอย่างเมื่อเทียบกับระยะการเคลื่อนตัว แสดงในรูปที่ 8(ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ของตัวอย่างการทดสอบเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบจะลดลงเรื่อย ๆ และในช่วงที่ระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์แรก ๆ พบว่า ตัวอย่าง BC2 จะมีความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่าง BC1 แต่เมื่อทำการทดสอบต่อไปจนถึงระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 1.50\%$ ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่าง จะมีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นได้ว่าการใส่ค้ำยันที่ไม่โค้งเดาะ นอกจากจะเพิ่มกำลังของโครงสร้างแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอีกด้วย



(ก) การสลายพลังงาน



(ข) ความแข็งแรง

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างระบบที่ได้ถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมแตกต่างจากโครงสร้างแบบหล่อในที่ (jointed precast concrete system) โดยใช้ระบบดึงลวดอัดแรงทำการเสริมกำลังร่วมกับการใช้ท่อนค้ำยันยึดตั้งไม่โค้งเดาะเข้าที่บริเวณมุมของจุดต่อเสา-คาน และ ระบบที่ได้รับการออกแบบให้มีพฤติกรรมโครงสร้างเลียนแบบระบบโครงสร้างแบบหล่อในที่ (emulative

precast concrete system) ของจุดต่อเสา-คานด้วยวิธีการให้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต จากการศึกษาพบว่า

1. ในด้านรูปแบบความเสียหาย พบว่า จุดต่อเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะสามารถจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้อยู่แค่ก่อนค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะและบริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อเสา-คาน โดยไม่เกิดความเสียหายขึ้นที่ชิ้นส่วนเสาและคาน แตกต่างจากโครงสร้างแบบหล่อในที่ที่สามารถเห็นได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนคานทำให้ซ่อมแซมได้ยาก ในขณะที่โครงสร้างซึ่งเป็นระบบทางเลือกเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นสามารถถอดถอนค้ำยันไม่โก่งเดาะเปลี่ยนได้เสียเนื่องจากมีลวดอัดแรงช่วงบีบอัดให้โครงสร้างสามารถกลับมาตำแหน่งเดิมได้

2. ในด้านกำลังของโครงสร้าง พบว่า รอยต่อเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะสามารถทำให้โครงสร้างมีกำลังที่ใกล้เคียงกับรอยต่อเสา-คานแบบหล่อในที่ได้ นอกจากนี้ในด้าน การสลายพลังงาน พบว่า รอยต่อเสา-คานที่ใช้ลวดอัดแรงทำงานร่วมกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะและรอยต่อเสา-คานแบบหล่อในที่ที่มีการสลายพลังงานสะสมที่ใกล้เคียงกัน จึงแสดงให้เห็นว่าใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะมาเสริมกำลังสามารถช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างแบบหล่อในที่ได้

จากผลการศึกษาที่ได้นี้ พบว่า ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป jointed precast concrete system ที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมกับค้ำยันยัดตั้งไม่โก่งเดาะสามารถนำมาใช้เป็นหนึ่งในระบบโครงสร้างทางเลือกในการต้านทานแผ่นดินไหวได้เช่นเดียวกันกับรูปแบบดั้งเดิมระบบโครงสร้างแบบ emulative precast concrete system

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ รวมทั้งขอขอบคุณ ช่างเทคนิคและบุคคลท่านอื่นที่มีได้กล่าวถึง ที่ให้การช่วยเหลือในการศึกษาด้วยดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิงหรือบรรณานุกรม

- [1] Leelataviwat, S., & Warnitchai, P. (2014). Lessons Learned from the Damage of Small and Medium Buildings according to Maelao Earthquake, Chiang Rai. *Seminar on Lessons Learned from Maelao Earthquake*, Chiang Rai. November 20th, 2014. The Sukosol Hotel, Bangkok. (in Thai)

- [2] Guan, D., Guo, Z., Xiao, Q., & Zheng, Y. (2016). Experimental study of a new beam-tocolumn connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading, *Advances in Structural Engineering*, 19(3), 529–545.
- [3] Priestley, N. (1996). Seismic design philosophy for precast concrete frames. *Structural engineering international*, 6(1), 25–31.
- [4] Yooprasertchai, E., & Warnitchai, P. (2016). An application of precast hybrid moment-resisting frames for seismic improvement, *Magazine of Concrete Research*, 68(20), 1051–1069.
- [5] Chen, S. C., Zheng, L. Y., Yan, W. M., & Kang Suk Kim. (2022). Seismic Performance of Post-tensioned Precast Concrete Joints Improved with Curved Steel Braces, *Journal of Earthquake Engineering*, 26(3), 1461–1479.
- [6] Ngamsangiem, C. (2010). *Development of Buckling Restrained Braces for Seismic Retrofitting of RC Frame Structures* [Master's thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi] (in Thai)
- [7] Junda, E., Leelataviwat, S., & Doung, P. (2018). Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 154–164.
- [8] ACI (2005) ACI 318-05 and commentary ACI 318R: Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [9] ACI Committee 374. (2005). Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: An ACI Standard. American Concrete Institute.

เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ

เอกรินทร์ ชัยสนิท สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี งานวิจัยที่สนใจด้าน การออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปต้านทานแผ่นดินไหว

เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย งานวิจัยที่สนใจด้าน การเสริมกำลังโครงสร้าง และการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว

การอ้างอิงบทความ (citation)

เอกรินทร์ ชัยสนิท และ เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย (2565), "ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนเสา-คานสำเร็จรูปต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (Structural Systems for Earthquake Resistant Precast Concrete Beam-Column Connections)," *วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, บทความหมายเลข TCA_M 160305, กันยายน-ธันวาคม, 15 หน้า.

Chaisanit, A., & Yooprasertchai, E. (2022) "Structural Systems for Earthquake Resistant Precast Concrete Beam-Column Connections," *TCA Magazine, Thailand Concrete Association*, Vol.16, Issue 3, Paper ID TCA_M 160305, Sep.-Dec, 15 pages.