

การศึกษาทดลองจุดต่อคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตและเสาคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มีระบบคืนศูนย์ร่วมกับอุปกรณ์หน่วงแบบเหล็ก

Experimental investigation of precast concrete hybrid-steel concrete beam-column connections with self-centering system and steel slit dampers

ฉัตรพร สุขเสริม^{1,*}, กฤษ จิตโรภาส¹, ดรณ์ย ภัคดี¹, วทีญญ อชเมตรา¹, เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author; E-mail address: chattaporn.sukse@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอจุดต่อคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตและเสาคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มีระบบคืนศูนย์และทำงานร่วมกับอุปกรณ์หน่วงแบบเหล็ก (Steel slit dampers, SSDs) เพื่อด้านแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยมีเป้าหมายให้ลดอัตราความเสียหายของโครงสร้างมีความสามารถในการคืนศูนย์สู่ตำแหน่งเดิม (Self-centering) หลังจากเกิดแผ่นดินไหว ในขณะที่ SSDs ถูกออกแบบให้เกิดการคราก (Yielding) ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวเพื่อดูดซับและสลายพลังงาน ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างคาน นอกจากนี้ยังมีการใช้คานเหล็กรูปตัวเอชที่ปลายคานเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่ถ่ายมาจาก SSDs และเพื่อประเมินความสามารถของโครงสร้างที่นำเสนอภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว การศึกษานี้จึงได้มีการออกแบบเพื่อควบคุมให้ความเสียหายอยู่ที่บริเวณจุดต่อของโครงสร้างด้วยวิธี Capacity design และทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งหมดภายใต้มาตรฐาน ACI374.1-05 โดยทำการทดสอบด้วยแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตย์ (Quasi-static reversed cyclic load) โดยทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของจุดต่อทั้งหมด 2 ตัวอย่างทดสอบ ประกอบด้วย 1) ตัวอย่างทดสอบจุดต่อเสา-คานแบบหล่อในที่ 2) ตัวอย่างทดสอบจุดต่อคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตและเสาคอนกรีตสำเร็จรูปพร้อมติดตั้งระบบดึงลวดอัดแรงและอุปกรณ์หน่วงแบบเหล็ก ซึ่งความสามารถของโครงสร้างได้ถูกประเมินโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง ความสามารถในการสลายพลังงาน และความแข็งแรง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าภายใต้แรงกระทำด้านข้างมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อโครงสร้างเสา-คาน หรือที่เรียกว่า Gap opening และสามารถกลับคืนศูนย์ปิดช่องว่างได้ด้วยลวดอัดแรง ในขณะที่อุปกรณ์หน่วงแบบเหล็กสามารถสลายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านการคราก นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมคงที่ภายใต้การเสียรูปขนาดใหญ่ และสามารถทำการทดสอบได้ถึงมุมหมุนที่คานเท่ากับ 2% ขณะที่ยังคงพฤติกรรมที่ไม่ด้อยไปกว่าจุดต่อเสา-คานแบบหล่อในที่

คำสำคัญ: โครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสา-คาน, อุปกรณ์หน่วงแบบเหล็ก, ลวดอัดแรง, แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตย์

Abstract

This study introduces a precast concrete hybrid-steel concrete beam-column connection incorporating a self-centering system and steel slit damper (SSDs) for seismic

resistance. The objective is to utilize post-tensioned steel to enable the structure to return to its original position (self-centering) after an earthquake, while SSDs are designed to yield under seismic loads, absorbing and dissipating energy to mitigate potential damage to the beam structure. The end of the beam is also installed with H-section steel beams to reduce the damage from SSDs. To evaluate the seismic performance of the proposed structure, the study applies the capacity design approach to control damage at the connection region. All test specimens were designed and tested following ACI 374.1-05, using quasi-static reversed cyclic loading. The behavior of two connection specimens was compared: 1) cast-in-place beam-column connection and 2) hybrid-steel concrete beam-column connections with unbonded post-tensioned steels and steel slit damper (SSD). The structural performance was assessed based on the force-displacement relationship, energy dissipation capacity, and stiffness. The test results indicate that a crack formed at the beam-column interface under lateral loads, known as a gap opening. However, the post-tensioned steel effectively closed this gap, demonstrating self-centering capability, while the SSDs efficiently dissipated energy through yielding. Furthermore, the specimens exhibited stable behavior under large deformations, withstanding beam rotations of up to 2% comparable to the cast-in-place beam-column connection.

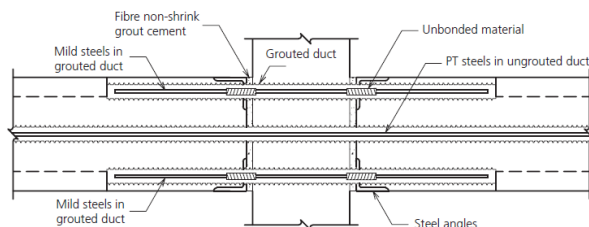
Keywords: Precast concrete beam-column, Steel slit damper, Unbonded post-tensioned steel, Quasi-static reversed cyclic load.

1. บทนำ

ระบบคอนกรีตชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast concrete) เป็นระบบโครงสร้างอาคารที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยระบบดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น ความรวดเร็วในการก่อสร้าง การลดต้นทุนในการก่อสร้าง รวมไปถึงการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง โดยรูปแบบของการก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามพฤติกรรมของโครงสร้าง ได้แก่ (1) ระบบที่ออกแบบให้โครงสร้างดังกล่าวมีพฤติกรรมเหมือนโครงสร้างแบบหล่อในที่ (Monolithic emulation) และ (2) ระบบที่ออกแบบให้มีพฤติกรรมไม่เหมือนแบบหล่อ

ในที่ (Jointed system) โดยประเทศไทยในปัจจุบันนิยมระบบโครงสร้างที่เสมือนแบบหล่อในที่ ซึ่งการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวนี้ก่อนที่จะมีการบังคับใช้กฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ.2540) และกฎกระทรวง พ.ศ.2564 ที่ออกตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 นั้น ได้ออกแบบโดยคำนึงถึงเพียงน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งเป็นหลัก (น้ำหนักบรรทุกทุกตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกจร) และไม่ได้คำนึงถึงแรงกระทำด้านข้าง (Lateral load) แต่จากผลสำรวจความเสียหายของโครงสร้างประเภทนี้หลังจากแผ่นดินไหวในปี ค.ศ.1994 ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า เมื่อระบบโครงสร้างประเภทดังกล่าวอยู่ภายใต้แรงแผ่นดินไหว จะมีจุดอ่อนอยู่หลายประการ และจุดอ่อนที่พบส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณรอยต่อของโครงสร้างเสาและคานเป็นหลัก [1] เมื่อพิจารณาถึงการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย พบว่าเมื่อปี พ.ศ.2557 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.3 ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ซึ่งเป็นแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดในรอบ 20 ปี [2] นอกจากการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้แล้วยังเกิดแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยอีกหลายครั้ง จากสถิติแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทย ของกองเฝ้าระวังแผ่นดินไหวพบว่าในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ.2565 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 4.1 และ 2.9 ที่อำเภอคลองสะแก จังหวัดเชียงใหม่ และที่จังหวัดแพร่ ตามลำดับ นอกจากนี้ในวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ.2568 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.7 ที่บริเวณตอนเหนือของเมืองสะกาย ประเทศเมียนมา ซึ่งการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้ได้ส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน และบ้านเรือนจำนวนมาก

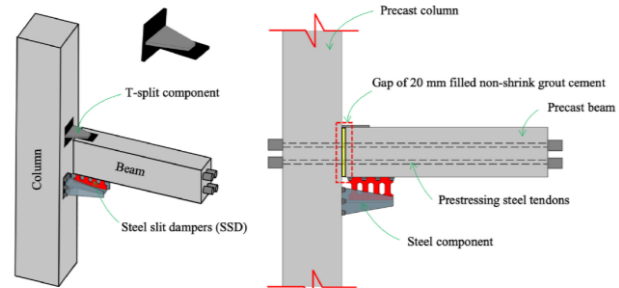
ในการออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้มีการพัฒนาในแนวทางใหม่ ซึ่งมุ่งเน้นในการพัฒนาระบบโครงสร้างที่มีพฤติกรรมไม่เสมือนแบบหล่อในที่ หนึ่งในนั้นคือโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปทำงานร่วมกับลวดอัดแรงและเหล็กเสริมแบบธรรมดา หรือระบบโครงสร้างจุดต่อไฮบริด (Hybrid system) [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหลักการการทำงานของรอยต่อในระบบดังกล่าวคือ เมื่อโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวและโมเมนต์ดัดที่รอยต่อมีค่าสูงขึ้น จนทำให้ระดับความเครียด (Strain) ของเหล็กเสริมแบบธรรมดามีค่าสูงเกินกว่าจุดคราก (Yield) และทำหน้าที่ในการสลายพลังงานจากแผ่นดินไหว และส่งผลให้เกิดช่องเปิด (Gap opening) ที่บริเวณหน้าตัดระหว่างเสาและคาน โดยเมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าลดลง ลวดอัดแรงจะทำหน้าที่ในการบีบอัดรอยต่อให้โครงสร้างสามารถกลับสู่สภาพตั้งต้นได้ อย่างไรก็ตามการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนเหล็กเสริมที่อยู่ในองค์อาคารที่เกิดการครากหลังจากได้รับแรงแผ่นดินไหวนั้นทำได้ยาก



รูปที่ 1 รายละเอียดของจุดต่อโครงสร้างเสาและคานระบบไฮบริด [3]

ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาและคานระบบลวดอัดแรงทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ที่ติดตั้งอยู่บริเวณจุดต่อเสาและคาน [4] ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจุดต่อดังกล่าวนี้นี้ได้มีการนำอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กมาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้สะดวกต่อการซ่อมแซมและการติดตั้งมากยิ่งขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเล็กและสามารถถอดเปลี่ยนได้ง่ายหากอุปกรณ์เกิดความเสียหาย โดยหลักการในการออกแบบนั้นคล้ายคลึงกับระบบโครงสร้างจุดต่อไฮบริดที่ได้กล่าวถึงไป ซึ่งจะเปลี่ยนจาก

การใช้เหล็กเสริมแบบธรรมดาที่อยู่ในองค์อาคาร เป็นการใช้อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กที่ติดตั้งบริเวณจุดต่อโครงสร้างเสาและคาน เพื่อทำหน้าที่ในการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว และยังคงใช้ระบบลวดอัดแรงเพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการกลับคืนศูนย์ได้ ถึงแม้ว่าวิธีตามความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังจากที่ระบบโครงสร้างดังกล่าวได้รับแรงกระทำด้านข้างนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณชิ้นส่วนโครงสร้างคานเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นผลจากการดึงออกของสลักเกลียว ส่งผลให้การสลายพลังงานจากอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กนั้นยังไม่เต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 รายละเอียดจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาและคานพร้อมลวดอัดแรงทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก [4]

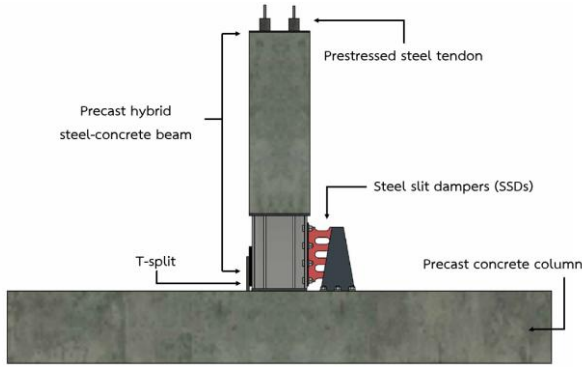
งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคืนศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ซึ่งอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก จะติดตั้งที่บริเวณจุดต่อโครงสร้างเสาและคาน โดย SSDs จะสามารถพัฒนากำลึงถึงจุดครากได้ด้วยแรงดึงและแรงอัด และมีหน้าที่ในการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว นอกจากนี้ยังใช้ลวดอัดแรงเพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการคืนศูนย์ หลังจากที่มีหน้าสัมผัสระหว่างโครงสร้างเสาและคานถูกเปิดออก รวมไปถึงการลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการถ่ายแรงของ SSDs ที่บริเวณโครงสร้างคานด้วยการใช้คานเหล็กรูปตัวเอชที่บริเวณปลายคาน และเพื่อประเมินความสามารถของโครงสร้างดังกล่าวภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว จึงได้มีการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง ความสามารถในการสลายพลังงาน และความแข็งแรง ระหว่างระบบจุดต่อโครงสร้างดังกล่าวกับระบบจุดต่อโครงสร้างเสมือนแบบหล่อในที่ และทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งหมดภายใต้มาตรฐาน ACI374.1-05 [5] โดยทำการทดสอบด้วยแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิติ เพื่อจำลองแรงกระทำแผ่นดินไหว

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 หลักการออกแบบตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสาและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคืนศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ดังรูปที่ 3 ซึ่งหลักการในการออกแบบตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ รวมถึงการออกแบบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่จุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสาและคานจะใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [3-4] โดยออกแบบไม่ให้เกิดความเสียหายที่ชิ้นส่วนโครงสร้างเสาและคาน แต่จะเกิดความเสียหายที่บริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อโครงสร้างเนื่องจากการโยกตัวเป็นหลัก ซึ่งเปลี่ยนจากการใช้เหล็กเสริมพิเศษบริเวณจุดต่อโครงสร้างเสาและคาน เป็นการใช้อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กในการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยยังคงใช้ระบบลวดอัดแรงเพื่อให้

โครงสร้างมีความสามารถในการคืนศูนย์กลางได้ด้วยตัวเอง พร้อมกับการเสริมกำลังด้วยคานเหล็กรูปตัวเอช



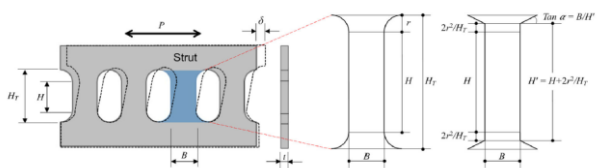
รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสาและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต

ตัวอย่างที่ทดสอบจะออกแบบให้เกิดการครากอยู่ที่อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กเท่านั้น ซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยวิธี Capacity design [6] โดยออกแบบให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเสาและคานที่ไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายมีกำลังมากกว่าอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก เพื่อกำหนดให้พฤติกรรมไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นที่บริเวณอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กที่ต้องการให้สลายพลังงานจากแรงกระทำแผ่นดินไหวได้ โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กที่บริเวณปีกกลางของคานเหล็กรูปตัวเอชและแผ่นเหล็กที่หน้าเสาโดยรูปแบบในการติดตั้งจะอ้างอิงมาจากการวิจัยของ Srisuwan และ Yooprasertchai [4] และ Oh และ คณะ [7] นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งแผ่นเหล็ก T-split ที่บริเวณปีกบนของคานเหล็กรูปตัวเอชและแผ่นเหล็กที่หน้าเสา เพื่อทำหน้าที่เป็นจุดหมุนบริเวณรอยต่อโครงสร้างเสาและคาน

โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมให้สัดส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของโมเมนต์ดัดจากหน้าตัดคานที่บริเวณรอยต่อ ($M_{SSDs} / M_T < 0.5$) โดย M_{SSDs} คือโมเมนต์ดัดที่เกิดบนอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก และคือ M_T โมเมนต์ดัดจากหน้าตัดคานทั้งหมด โดยแรงดึงในลวดอัดแรงที่เกิดจากแรงดึงประสิทธิผลและแรงดึงที่เกิดจากการยึดเนื่องจากบริเวณหน้าสัมผัสของจุดต่อโครงสร้างเสาและคานเปิดออก รวมไปถึงอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก จะถูกออกแบบไม่ให้เกิดการคราก ณ มุมหมุนที่ 3.5% ตามมาตรฐาน ACI374.1-05 [5] เพื่อให้โครงสร้างสามารถคืนศูนย์ได้เมื่อแรงกระทำจากแผ่นดินไหวสิ้นสุดลง

2.2 หลักการออกแบบอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

จากรูปที่ 4 Climent และ คณะ [8] ได้เสนอวิธีการออกแบบอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 1-7 โดยการหาค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (P_y) และกำลังรับแรงดึงประลัย (P_u) ของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4 รูปแบบของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก [4] และ [8]

$$P_y = \min \left(\frac{\sigma_y t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_y t B}{3\sqrt{3}} \right) = P_{SSDs} \quad (1)$$

$$P_u = \min \left(\frac{\sigma_u t B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_u t B}{3\sqrt{3}} \right) \quad (2)$$

เมื่อ n คือจำนวนค้ำยัน (Strut), t คือความหนาของค้ำยัน, B คือความกว้างของค้ำยัน, H' คือความสูงเทียบเท่าของค้ำยัน, r คือรัศมีของค้ำยัน, σ_y คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก และ σ_u คือกำลังรับแรงดึงที่จุดประลัยของเหล็ก ขั้นตอนถัดไปจะคำนวณระยะการเสียดรูปจากการคราก (δ_y) ของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ได้จากการสมการที่ 3

$$\delta_y = \frac{1.5P_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (3)$$

โดย E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก และ H_T คือความสูงทั้งหมดของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก จากนั้นคำนวณหาแรงเฉือน (Q_y) และโมเมนต์ดัด (M_y) เนื่องจากกำลังครากหรือกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$Q_y = \frac{P_y d_{st}}{l_{b2}} \quad (4)$$

$$M_y = Q_y \cdot l_b = \frac{P_y d_{st} l_b}{l_{b2}} = M_{SSDs} \quad (5)$$

ในกรณีกำลังประลัยของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก แรงเฉือนประลัย (Q_u) และโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) ของจุดต่อโครงสร้างคาน-เสาที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_u = \frac{P_u d_{st}}{l_{b2}} \quad (6)$$

$$M_u = Q_u \cdot l_b = \frac{P_u d_{st} l_b}{l_{b2}} \quad (7)$$

โดย d_{st} คือระยะห่างจากขอบด้านล่างอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กถึงขอบด้านบน, l_b คือความยาวคาน และ l_{b2} คือระยะจากปลายคานจนถึงกึ่งกลางอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

2.3 หลักการออกแบบจุดต่อของตัวอย่างทดสอบ

ในการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่จุดต่อจะต้องกำหนดมุมหมุน (θ_d) ซึ่งเป็นมุมที่ต้องการให้โครงสร้างมีกำลังต้านทานได้ จากนั้นคำนวณหาระยะยึดตัวของลวดอัดแรงโดยสมมติตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน (c) ได้ดังสมการที่ 8 และ 9

$$\Delta_{PS1} = \theta_d (e_1 - c) \quad (8)$$

$$\Delta_{PS2} = \theta_d (e_2 - c) \quad (9)$$

โดย Δ_{PS1} คือระยะยึดที่เกิดขึ้นของลวดอัดแรงด้านบน, Δ_{PS2} คือระยะยึดที่เกิดขึ้นของลวดอัดแรงด้านล่าง, e_1 คือระยะจากขอบคานถึงลวดอัดแรงด้านบน, e_2 คือระยะจากขอบคานถึงลวดอัดแรงด้านล่าง ขั้นตอนถัดไปคำนวณความเครียดของลวดอัดแรงได้จากสมการต่อไปนี้

$$\epsilon_{PS} = \frac{\Delta_{PS}}{L_{u,PS}} + \epsilon_{PS,ini} \quad (10)$$

โดย ε_{PS} คือ หน่วยความเครียดในลวดอัดแรง, $L_{u,PS}$ คือระยะ Unbounded ของลวดอัดแรง และ $\varepsilon_{PS,ini}$ คือหน่วยความเครียดของลวดอัดแรงที่เกิดจากแรงดึงประสิทธิผล ขั้นตอนถัดไปคือการหาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรง (f_{PS}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของลวดอัดแรงชั้นคุณภาพ 270 (1860) [9] โดยที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงต้องมีค่าไม่เกิน $0.80f_{PS}$ (Proportional limit)

$$T_{PS} = \sum A_{PS} F_{PS} \quad (11)$$

โดย T_{PS} คือแรงดึงในลวดอัดแรง, A_{PS} คือพื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงทั้งหมดในหน้าตัด และ F_{PS} คือหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรง จากนั้นคำนวณโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรง (M_{PS}) ตามสมการที่ 12 ถึง 14

$$M_{PS1} = T_{PS1} (e_1 - c) \quad (12)$$

$$M_{PS2} = T_{PS2} (e_2 - c) \quad (13)$$

$$M_{PS} = M_{PS1} + M_{PS2} \quad (14)$$

โดย M_{PS1} คือกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของลวดอัดแรงแถวบน, M_{PS2} คือกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของลวดอัดแรงแถวล่าง, T_{PS1} คือแรงดึงในลวดอัดแรงแถวบน และ T_{PS2} คือแรงดึงในลวดอัดแรงแถวล่าง ขั้นตอนถัดไปคือการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้ (M_T) ที่บริเวณรอยต่อ จากผลรวมระหว่างกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากลวดอัดแรงและกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ดังสมการที่ 15

$$M_T = M_{SSDs} + M_{PS} \quad (15)$$

ขั้นตอนสุดท้ายให้ทำการคำนวณตรวจสอบอัตราส่วน M_{SSDs}/M_T ถ้า $M_{SSDs}/M_T > 0.5$ จะต้องปรับแก้ด้วยการเพิ่มแรงดึงในลวดอัดแรง หรือลดกำลังรับแรงดึงของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

2.4 หลักการออกแบบคานาไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต

เพื่อไม่ให้ชิ้นส่วนคานาไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตเกิดความเสียหาย จึงต้องออกแบบให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้ของคานาไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่บริเวณรอยต่อ โดยสามารถคำนวณแรงอัด (C_c) ที่บริเวณหน้าสัมผัสเสาและชิ้นส่วนคานาได้ดังนี้

$$C_c = T_{PS1} + T_{PS2} + P_{SSDs} - P_{TS} \quad (16)$$

$$P_{TS} = A_{TS} f_{TS} \quad (17)$$

โดย P_{TS} คือแรงดึงในแผ่นเหล็ก T-split, A_{TS} คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็ก T-split ในแนวตั้งฉากกับแรงที่ให้ และ f_{TS} คือหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นเหล็ก T-split ขั้นตอนถัดไปคำนวณความลึกของแนวแกนสะเทินที่แท้จริง และคำนวณความลึกของหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่า (a) จากสมการของ Whitney ดังสมการที่ 18 และ 19 ตามลำดับ

$$c = \frac{C_c}{0.85 f'_c \beta_1 b} \quad (18)$$

$$a = \beta_1 \cdot c \quad (19)$$

โดย β_1 คืออัตราส่วนความลึกของหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่ากับความลึกของแกนสะเทิน, b คือความกว้างหน้าตัดคาน และ f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต จากนั้นเปรียบเทียบค่าความลึกของแกนสะเทินที่แท้จริงกับค่าจากการสมมติขึ้นในสมการที่ 8 และ 9 ถ้าค่าดังกล่าวไม่ตรงกันให้ทำการคำนวณใหม่ทั้งหมด จนกว่าค่าแกนสะเทินที่แท้จริงกับค่าจากการ

สมมติมีความใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เป็นไปได้ (M_{PR}) จากผลรวมของกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากลวดอัดแรง, กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก และกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคอนกรีต (M_c) ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{PR} = M_{SSDs} + M_{PS1} + M_{PS2} + M_c \quad (21)$$

$$M_{PS1} = T_{PS1} (h - e_1) \quad (22)$$

$$M_{PS2} = T_{PS2} (h - e_2) \quad (23)$$

$$M_c = C_c \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (24)$$

และภายใต้โมเมนต์ดัดทิศทางบวก T-split ด้านบนของคานาไม่เกิดการคราก และความลึกของพื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าน้อย จึงไม่พิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากกำลังอัดของคอนกรีต และให้ T-split รับแรงอัดทั้งหมด ดังนั้นสามารถคำนวณระยะยึดที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงได้ดังนี้

$$A_{PS1} = \theta_d (e_1) \quad (25)$$

$$A_{PS2} = \theta_d (e_2) \quad (26)$$

ในกรณีสำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในทิศทางบวก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 27 ถึง 29

$$M_{PR} = M_{SSDs} + M_{PS1} + M_{PS2} \quad (27)$$

$$M_{PS1} = T_{PS1} (e_1) \quad (28)$$

$$M_{PS2} = T_{PS2} (e_2) \quad (29)$$

2.5 ตัวอย่างการทดสอบ

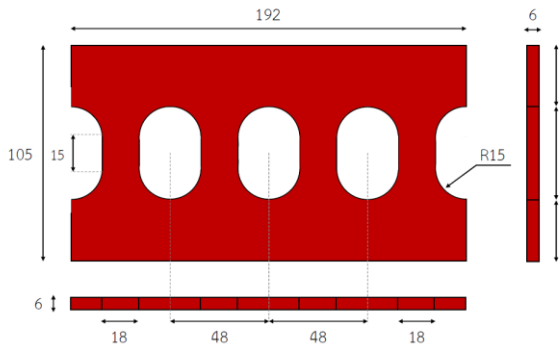
ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 ตัวอย่างทดสอบ ประกอบด้วยตัวอย่างทดสอบจุดต่อโครงสร้างเสาและคานาคอนกรีตสำเร็จรูปเสาและคานาเสมือนแบบหล่อในที่ (CIP) และ ตัวอย่างทดสอบจุดต่อโครงสร้างเสาและคานาไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตที่มีระบบค้ำยันทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก (JHPS) ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างจะถูกพิจารณาจากโครงสร้างเสาและคานาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [3] โดยมีรายละเอียดของขนาดมิติเท่ากันทั้ง 2 ตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างมีกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วันเท่ากับ 43.12 MPa และกำลังอัดของน้ำปูนเกราที่ชนิดไม่หดตัวที่มีส่วนผสมของเส้นใย (Fiber-non shrink Grout Cement) ที่ใช้บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนเสาและคานาของตัวอย่างทดสอบ JHPS มีค่าเท่ากับ 73.55 MPa

2.5.1 อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กเป็นแผ่นเหล็กชั้นคุณภาพ SS400 ที่ออกแบบให้มีความสามารถในการดูดซับและสลายพลังงานที่เกิดขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหว ประกอบด้วยรอยแยกหรือช่องว่างหลายชุดภายในองค์ประกอบโครงสร้าง ทำให้สามารถควบคุมการเสียรูปได้ ซึ่งรายละเอียดขนาดมิติของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 4

ตารางที่ 1 รายละเอียดขนาดมิติของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

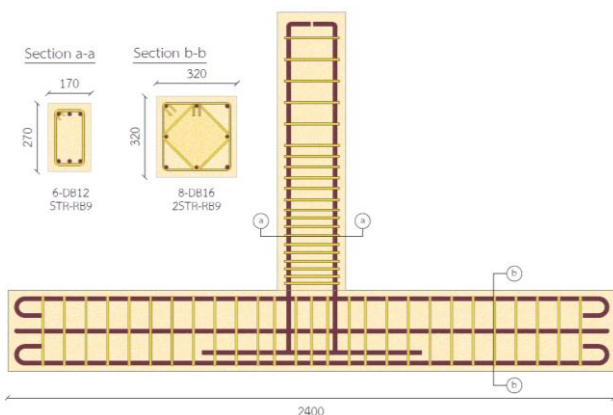
ตัวอย่างทดสอบ	รายละเอียดขนาดมิติ (มม.)				
	B	t	H	r	n
JHPS	18	6	15	15	4



รูปที่ 5 รายละเอียดขนาดมิติของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก (หน่วยมิลลิเมตร)

2.5.2 ตัวอย่างทดสอบ CIP

ตัวอย่างทดสอบ CIP จะเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อเหมือนโครงสร้างแบบหล่อในที่ เป็นตัวแทนของระบบจุดต่อที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยการออกแบบโครงสร้างคานขึ้นส่วนสำเร็จรูปของตัวอย่างทดสอบนี้ จะออกแบบให้เป็นรูปแบบของคานที่มีความเหนียวพิเศษ (Special moment beam) ตามมาตรฐาน ACI318-19 [6] แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 6 โดยมีขนาดมิติของโครงสร้างดังนี้ ขนาดหน้าตัดของเสาเท่ากับกว้าง 320 มม. ลึก 320 มม. ความสูงเสา 2,400 มม. และความกว้างหน้าตัดคานเท่ากับ 170 มม. มีความลึก 270 มม. ความยาวคานทั้งหมด 1,100 มม.

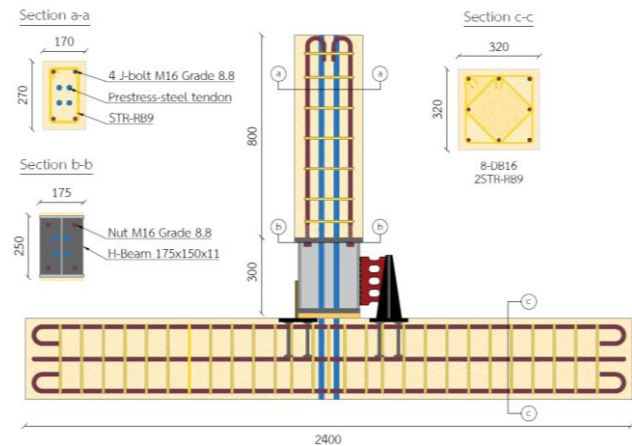


รูปที่ 6 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ CIP

2.5.3 ตัวอย่างทดสอบ JHPS

ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเป็นตัวอย่างที่มีระบบโครงสร้างจุดต่อขึ้นส่วนเสาคอนกรีตสำเร็จรูปและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคานศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ซึ่งมีรายละเอียดของขนาดมิติโครงสร้างเหมือนตัวอย่าง CIP แต่แตกต่างกันที่โครงสร้างคาน โดยโครงสร้างคานจะมีคานคอนกรีตหน้าตัดกว้าง 170 มม. ลึก 270 มม. ยาว 800 มม. ประกอบกับคานเหล็กรูปตัวเอช ขนาดหน้าตัด 250 x 175 x 11 ความยาวเท่ากับ 300 มม. โดยความยาวคานทั้งหมดเท่ากับ 1,100 มม. และมีระบบคานศูนย์จากลวดอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 มม. ชั้นคุณภาพ 270 (1860) [9] จำนวน 4 เส้น ร้อยทะลุผ่านขึ้นส่วนคานและเสา โดยแรงที่ใช้ในการดึงลวดอัดแรงอยู่ที่ร้อยละ 45 ของกำลังรับแรงดึงประลัย ($0.45F_{pu}$) และที่หน้าสัมผัสบริเวณรอยต่อโครงสร้างเสาและคานจะมีระยะห่าง 20 เซนติเมตร สำหรับกรอกปูนเกรทซ์ชนิดไม่หดตัวที่มีส่วนผสมของเส้นใย หลังจากประกอบขึ้นส่วนโครงสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กจะอยู่ที่บริเวณปีกล่างของคานเหล็กรูปตัวเอชและ

แผ่นเหล็กที่หน้าเสา และติดตั้งแผ่นเหล็ก T-split ที่บริเวณปีกบนของคานเหล็กรูปตัวเอชและแผ่นเหล็กที่หน้าเสา ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กและแผ่นเหล็ก T-split จะติดตั้งด้วยการเชื่อม รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 7

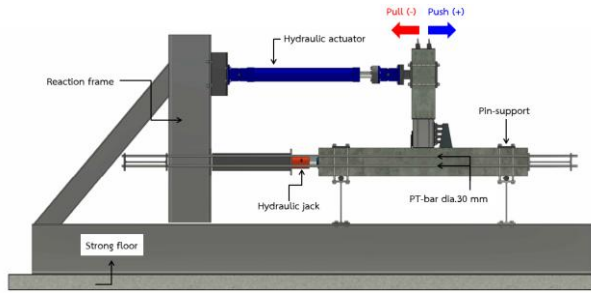


รูปที่ 7 รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ JHPS

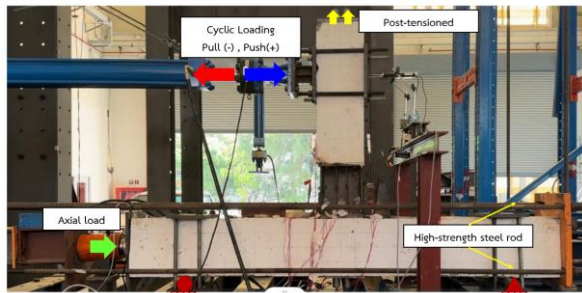
2.6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบของงานวิจัยนี้จะทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างด้วยการตั้งขึ้นส่วนโครงสร้างคานขึ้นมา 90 องศา และโครงสร้างเสาจะขนานไปกับพื้น ในการนำขึ้นส่วนคานของตัวอย่าง JHPS มาต่อกับขึ้นส่วนเสาดำเนินการโดยใช้เครนยกขึ้นส่วนคานแล้ววางให้ตำแหน่งของท่อ PVC ที่ฝังอยู่ในคานให้ตรงกับตำแหน่งของท่อ PVC ที่ฝังอยู่ในเสา โดยให้หน้าตัดคานอยู่ห่างจากหน้าตัดเสา 20 มม. หลังจากนั้นยึดขึ้นส่วนคานให้ตรงอยู่ในแนวตั้ง และเชื่อมอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กและแผ่นเหล็ก T-split เข้ากับเสาด้วยวิธีการเชื่อมพอก หลังจากนั้นประกอบไม้แบบ ณ บริเวณรอยต่อระหว่างขึ้นส่วนคาน-เสา เพื่อทำการกรอกปูนทรายชนิดไม่หดตัวผสมปูนที่มีส่วนผสมของเส้นใยลงไปที่ยึดต่อ

หลังจากเตรียมตัวอย่างและประกอบขึ้นส่วนสำเร็จรูปคาน-เสา รวมไปถึงอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กเรียบร้อยแล้ว จะดำเนินการติดตั้งตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 8 โดยเคลื่อนย้ายตัวอย่างทดสอบไปติดตั้งบนฐานรองรับ (Support) และกำหนดให้การยึดรั้งที่ปลายเสาทั้งสองด้านมีสภาวะยึดรั้งแบบจุดหมุน (Pin-support) ที่อยู่บนโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่ จากนั้นยึดตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียวและเหล็กเส้นอัดแรง (PT-Bar) เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างทดสอบไถลไปด้านข้างขณะทำการทดสอบ ในการให้แรงแก่ตัวอย่างทดสอบจะให้แรงด้วย Hydraulic actuator ที่ติดตั้งบริเวณปลายขึ้นส่วนโครงสร้างคานเพื่อให้แรงดึงและแรงผลัก รวมถึงติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ที่ขึ้นส่วนโครงสร้างเสา เพื่อจำลองการให้แรงตามแนวแกนที่กระทำกับโครงสร้างเสาตลอดการทดสอบเท่ากับ 10% ของกำลังรับแรงอัดที่หน้าตัดเสา ($0.1f_c A_g$) โดย f_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่โครงสร้างเสา และ A_g พื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด และเพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ จึงได้ติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อตรวจวัดความเสียหายของเหล็กเสริม ลวดอัดแรง แผ่นเหล็ก T-split และอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก นอกจากนี้ยังติดตั้ง Displacement transducer ที่บริเวณฝั่งตรงข้ามของ Hydraulic actuator เพื่อใช้กำหนดระยะเคลื่อนตัวทางข้าง (Displacement control) ระหว่างการทดสอบ



(ก)

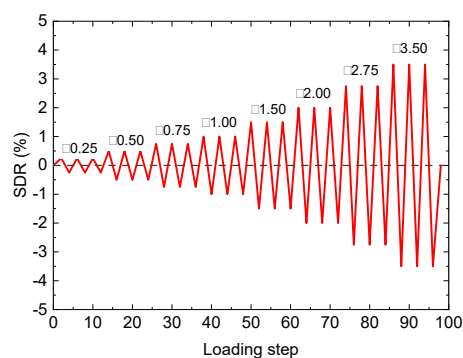


(ข)

รูปที่ 8 รายละเอียดการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (ก) จำลองการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (ข) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.7 การทดสอบตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบแรงกระทำทางจักรกึ่งสถิตจะเป็นการทดสอบด้วยการควบคุมระยะการเคลื่อนตัวทางข้าง โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ทางข้างของกระบอกไฮดรอลิกที่จับยึดไว้กับคานตัวอย่างทดสอบ ต่อความสูงของตัวอย่างทดสอบซึ่งวัดจากตำแหน่งศูนย์กลางเสาถึงตำแหน่งศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิก หรือ ระยะการเคลื่อนตัวทางข้างสัมพันธ์ (Story Drift Ratio, SDR) ของโครงสร้างคาน โดยประวัติการเคลื่อนที่นี้จะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบโดยตัวอย่างทดสอบจะให้แรงผลึกและแรงดึงไปและกลับอย่างช้า ๆ เป็นวัฏจักร (Quasi-static reversed cyclic load) โดยระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้มีค่าเป็น $\pm 0.25\%$, $\pm 0.50\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.00\%$, $\pm 1.50\%$, $\pm 2.00\%$, $\pm 2.50\%$ และ $\pm 3.50\%$ ตามลำดับหรือจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะเกิดความเสียหายจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ ดังรูปที่ 9 ตามมาตรฐาน ACI 374.1-05 [5] ตัวอย่างทดสอบจะให้แรงผลึกและดึงซ้ำในแต่ละระยะของการเคลื่อนตัวทางข้างสัมพันธ์เป็นจำนวน 3 รอบ เพื่อประเมินเสถียรภาพของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกระทำทางจักรกึ่งสถิต



รูปที่ 9 ระยะการเคลื่อนที่ทางข้างสัมพันธ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 ลักษณะการเสียรูปและการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

จากการสังเกตตัวอย่างทดสอบ CIP ที่มีระบบจุดต่อโครงสร้างเสมือนแบบหล่อในที่ด้วยตาเปล่า พบว่าที่ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความเสียหายอยู่ที่บริเวณชั้นส่วนโครงสร้างคานและรอยต่อเป็นส่วนใหญ่ โดยเริ่มมีความเสียหายเป็นลักษณะรอยร้าวแนวอนบริเวณด้านหน้าของชั้นส่วนคานคอนกรีตและบริเวณรอยต่อชั้นส่วนคานและเสา ที่วัฏจักรแรก ณ อัตราส่วนการเคลื่อนตัวทางข้างสัมพันธ์เท่ากับ 0.75% จากนั้นสามารถสังเกตเห็นรอยร้าวบริเวณรอยต่อชั้นส่วนคานและเสาได้ชัดเจนมากขึ้นในช่วงระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ที่ 2.0% ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่าที่บริเวณรอยต่อของโครงสร้างมีความเสียหายของคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยรอยร้าวมีขนาดที่กว้างและมีเศษคอนกรีตแตกออกมาจากชั้นส่วนคานของตัวอย่างทดสอบ ดังกล่าว ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ CIP แสดงในรูปที่ 10

ในส่วนของการสังเกตตัวอย่างทดสอบ JHPS ด้วยตาเปล่าระหว่างการทดสอบ พบว่าที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 0.50% เริ่มมีรอยร้าวแนวทแยงเกิดขึ้นที่ด้านหลังของคานคอนกรีต และรอยร้าวแนวอนยาวตลอดด้านซ้ายของชั้นส่วนคานคอนกรีต เนื่องจากแรงดึง ต่อมาที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 0.75% เกิดรอยแตกแนวทแยงเพิ่มขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชั้นส่วนคานคอนกรีตในฝั่งซ้ายของโครงสร้างคานที่มีการติดตั้งแผ่นเหล็ก T-split เนื่องจากแรงผลึก จากนั้นที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 1.00% เกิดรอยแตกในแนวตั้งฉากลงมาถึงขอบเหล็กรูปตัว X เนื่องจากแรงผลึก และที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 1.50% เกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้นที่ด้านขวาคานคอนกรีตฝั่งขวาเนื่องจากแรงดึง และเกิดรอยร้าวในแนวทแยงขึ้นที่ด้านขวาของคานคอนกรีตเนื่องจากแรงผลึก ต่อมาเมื่อให้แรงผลึกเพิ่มขึ้นที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ 2.00% รอยร้าวที่บริเวณด้านขวาของชั้นส่วนคานคอนกรีตนั้นเกิดการแตกอย่างรุนแรง ส่งผลให้ต้องยุติการทดสอบ



(ก)



(ข)

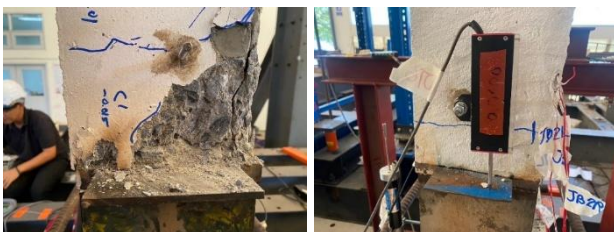
รูปที่ 10 ความเสียหายของตัวอย่าง CIP หลังการทดสอบ (ก) ความเสียหายบริเวณด้านหน้าชั้นส่วนคาน (ข) ความเสียหายบริเวณรอยต่อชั้นส่วนเสาและคาน

โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ JHPS หลังจากการทดสอบพบว่าความเสียหายหลักเกิดขึ้นที่คานคอนกรีตบริเวณที่ติดกับเหล็กgrupตัวเอช ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเกิดจากการแอ่นออกจากกันของคานคอนกรีตกับคานเหล็กgrupตัวเอช และเมื่อมีการให้แรงสลับทิศแก่ตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้เมื่อโครงสร้างรับแรงดึงจะเกิดการโยกตัวของชิ้นส่วนคานคอนกรีตขึ้นจนทำให้เกิดเป็นช่องว่าง ในขณะที่โครงสร้างได้รับแรงผลักที่ชิ้นส่วนคานจะไม่เกิดช่องว่างเนื่องจากทั้งคานคอนกรีตและคานเหล็กgrupตัวเอชอยู่ภายใต้แรงอัด ทำให้เกิดแรงแบกทาน (Bearing) ขึ้นกับชิ้นส่วนคานคอนกรีต ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรอยแตกขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านขวาของคานคอนกรีต อีกทั้งยังมีความเสียหายอีกเล็กน้อยเกิดขึ้นโดยรอบของคานคอนกรีตเนื่องจากแรงดัด สังเกตได้จากรอยร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นบนคานคอนกรีต และความเสียหายรองเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อชิ้นส่วนคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตและเสา เนื่องจากการแยกออกจากกันของปูนเกร้าท์และคานเหล็กgrupตัวเอชด้วยแรงเฉือน จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS เกิดการเสียรูปเนื่องจากการโยกตัว (Rocking) เป็นหลัก โดยในการให้แรงผลักแก่ตัวอย่างทดสอบ จะส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการโยกตัวที่รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนคานคอนกรีตและชิ้นส่วนคานเหล็กgrupตัวเอชเป็นหลัก ในทางกลับกัน การให้แรงดึงนั้นจะส่งผลให้เกิดการเสียรูปเนื่องจากการโยกตัวที่บริเวณรอยต่อโครงสร้างเสาและคานเป็นหลัก ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าในด้านที่มีการให้แรงผลักจะเกิดช่องว่างระหว่างคานคอนกรีตและคานเหล็กgrupตัวเอชมาก ส่งผลให้เหล็กเสริมหลัก (J-Bolt) ในชิ้นส่วนคานคอนกรีตทำหน้าที่ในการสลายพลังงานขณะได้รับแรงผลัก และในขณะที่มีการให้แรงดึง ช่องว่างส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่รอยต่อโครงสร้างเสาและคานส่งผลให้อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กจะทำหน้าที่ในการสลายพลังงานเมื่อได้รับแรงดึง



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 11 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ JHPS หลังการทดสอบ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านขวา (ง) ด้านซ้าย

3.2 การครากของ J-Bolt

จากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดของเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีต ที่ตำแหน่งวัดจากรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตและเหล็กgrupตัวเอชขึ้นไปประมาณ 15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คาดการณ์ไว้ว่าเป็นตำแหน่งวิกฤตนั้นไม่ถูกต้อง จึงไม่สามารถนำค่าความเครียดในเหล็กเสริม J-Bolt มา

ทำการวิเคราะห์โดยตรงได้ เพราะผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าตำแหน่งวิกฤตที่แท้จริงนั้นอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตและเหล็กgrupตัวเอช ทั้งนี้เนื่องจากการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบ ไม่ได้เสริมเหล็กเหมือนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป แต่เป็นการเสริมเหล็ก J-bolt ยาวทะลุคานคอนกรีตออกมา เพื่อยึดคานคอนกรีตและเหล็กgrupตัวเอชเข้าด้วยกัน ซึ่งในการทดสอบได้มีการติดตั้ง Displacement Transducer ไว้ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตกับเหล็กgrupตัวเอชด้วย ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงนำค่าจากเซนเซอร์วัดระยะกระจัดมาพิจารณาการครากของเหล็กเสริมแทน ดังตารางที่ 2

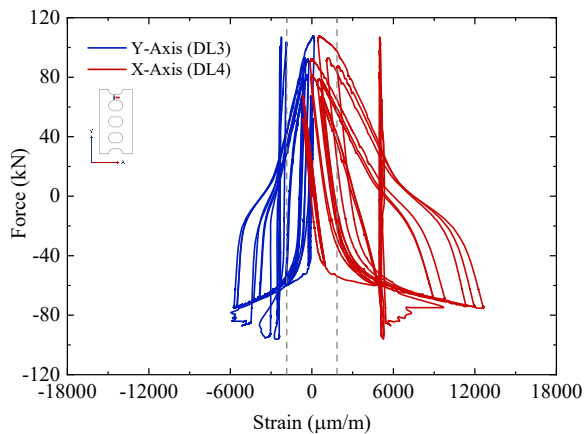
ตารางที่ 2 ความเครียดใน J-Bolt ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในทิศทางของแรงดึงและผลัก

SDR (%)	Push (+)		Pull (-)	
	Strain		Strain	
	DT5 (Right)	DT6 (Left)	DT5 (Right)	DT6 (Left)
0.25	0.00015	0.00022	0.00010	0.00034
0.50	0.00031	0.00101	0.00013	0.00058
0.75	0.00053	0.00203	0.00015	0.00059
1.00	0.00080	0.00295	0.00021	0.00062
1.50	0.00123	0.00468	0.00027	0.00055
2.00	0.00187	0.00583	0.00039	0.00054

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม J-Bolt มีค่าอยู่ที่ 0.003137 เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 โดย DT6 คือเซนเซอร์วัดระยะกระจัดที่ติดตั้งไว้ฝั่งซ้ายของรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตกับเหล็กgrupตัวเอช และ DT5 คือเซนเซอร์วัดระยะกระจัดที่ติดตั้งไว้ฝั่งขวาของรอยต่อระหว่างคานคอนกรีตกับเหล็กgrupตัวเอช ซึ่งพบว่าเมื่อให้แรงผลักจะเกิดการแอ่นออกจากกันที่ฝั่งด้านซ้ายของคานคอนกรีตและเหล็กgrupตัวเอช ทำให้เหล็กเสริมด้านซ้ายเกิดการยืดออกมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มเกิดการครากที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ +1.50% แสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริม (J-Bolt) ทำหน้าที่ในการสลายพลังงานในขณะที่ให้แรงผลักแก่ตัวอย่างทดสอบ

3.3 การครากของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก โดยนำค่าที่ได้จากเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งตามตำแหน่งต่าง ๆ บนอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กทั้งสองทิศทาง (แกน X และ Y) มาเปรียบเทียบกับความเครียด ณ จุดครากของแผ่นเหล็กชั้นคุณภาพ SS400 ความหนา 6 มิลลิเมตร ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีค่าความเครียด ณ จุดครากเท่ากับ 1,850 $\mu\text{m/m}$ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับแรงดึง ค่าความเครียดบนอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กนั้นมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงผลัก โดยหากพิจารณาค่าความเครียดบนแกนที่ 1 ของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก (จุด DL3 และ DL4) เมื่อแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเครียดในแนวแกน X มีค่าสูงถึง 12,000 $\mu\text{m/m}$ และค่าความเครียดในแนวแกน Y เพิ่มขึ้นถึง -6,000 $\mu\text{m/m}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเครียด ณ จุดคราก จากการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งบนอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก พบว่าอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กที่ติดตั้งบนตัวอย่าง JHPS นั้นทำหน้าที่ในการสลายพลังงานจากแรงกระทำด้านข้าง โดยเมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงดึงจะสลายพลังงานได้มากกว่าในขณะที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงผลัก



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กและแรงกระทำด้านข้าง

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางข้าง

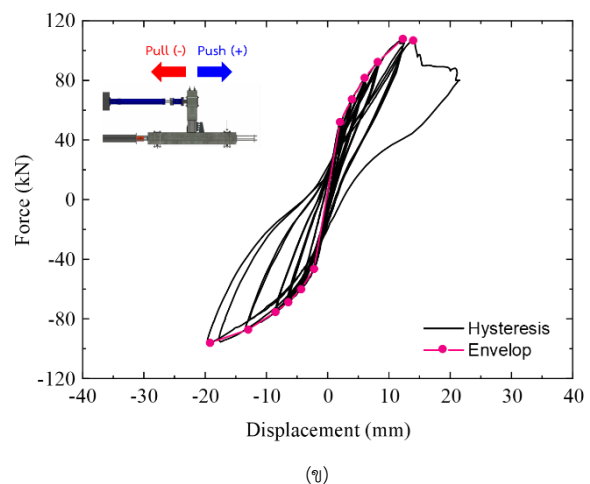
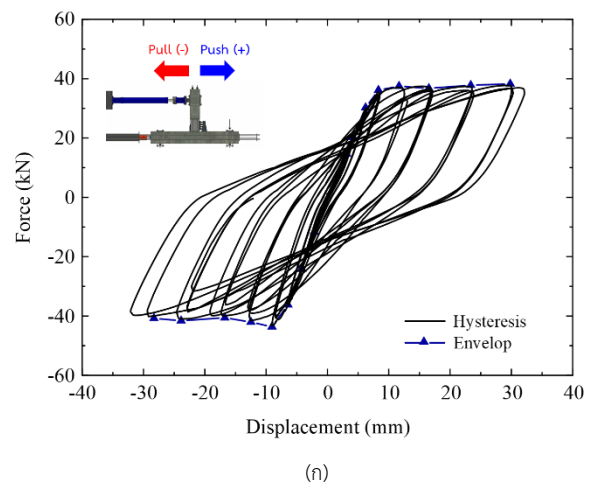
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางข้างของตัวอย่างทดสอบ CIP แสดงในรูปที่ 13 (ก) พบว่าตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมยืดหยุ่นถึงช่วงระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ 0.75% และตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการความเสียหายที่บริเวณชิ้นส่วนคาน เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละวัฏจักรของตัวอย่างทดสอบดังกล่าวพบว่าพื้นที่ใต้กราฟมีลักษณะกว้างแสดงให้เห็นถึงการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่มีค่ามาก แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการคืนตัวของโครงสร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางข้าง พบว่าตัวอย่างทดสอบ CIP ไม่สามารถคืนศูนย์ได้ด้วยตัวเองได้

จากรูปที่ 13 (ข) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางข้างของตัวอย่างทดสอบ JHPS พบว่าเมื่อให้แรงผลักแก่ตัวอย่างทดสอบ จะเกิดแรงกระทำสูงสุดต่อโครงสร้างเท่ากับ 107.83 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 1.50% หลังจากนั้นที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ 2.00% คานคอนกรีตเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรง ทำให้กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณาการให้แรงดึงแก่ตัวอย่างทดสอบ จะเกิดแรงกระทำสูงสุด 96.11 กิโลนิวตัน ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 2.00% ถึงอย่างไรก็ตาม จากการแตกร้าวของคานคอนกรีตที่เกิดขึ้นทำให้ต้องหยุดการทดสอบ นอกจากนี้เมื่อสังเกตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวทางข้างของตัวอย่างทดสอบ JHPS พบว่าตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความสามารถในการคืนศูนย์ หรือชิ้นส่วนคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีตสามารถกลับมามีค่าตรงได้ด้วยตัวเองหลังจากทำการถอนแรงกระทำด้านข้างออก ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้งลวดอัดแรงในชิ้นส่วนคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต

3.5 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ (Energy dissipation)

การสลายพลังงานของแต่ละตัวอย่างทดสอบ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวทางข้างสะสมหรือจากรูปที่ 13 (ก) สำหรับตัวอย่างทดสอบ CIP และรูปที่ 13 (ข) สำหรับตัวอย่างทดสอบ และเมื่อพิจารณาการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่างทดสอบ JHPS ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบ CIP ที่แสดงในรูปที่ 14 พบว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS มีค่าการสลายพลังงานสะสมมากกว่าตัวอย่างทดสอบ CIP จนกระทั่งที่ระยะเคลื่อนตัว

สัมพัทธ์ 2.0% ตัวอย่างทดสอบ JHPS มีค่าการสลายพลังงานที่ต่ำลงจากแนวโน้มที่ควรจะเป็น เนื่องจากสามารถทำการทดสอบที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 2.0% ได้เพียง 1 รอบก่อนที่ชิ้นส่วนคานคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องทำการทดสอบจนครบ 3 รอบแล้วคิดผลรวมของทั้ง 3 รอบ เป็นค่าการสลายพลังงานสะสมของระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์นั้น ๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวทางข้างตัวอย่างทดสอบ JHPS จากรูปที่ 13 (ข) จะสามารถสังเกตได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ในขณะที่ยตัวอย่างทดสอบรับแรงดึง นั้นมากกว่าพื้นที่ใต้กราฟในขณะที่ยตัวอย่างทดสอบรับแรงผลัก หรือสรุปได้ว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS นั้นมีความสามารถในการสลายพลังงานได้ดีเมื่อได้รับแรงดึง

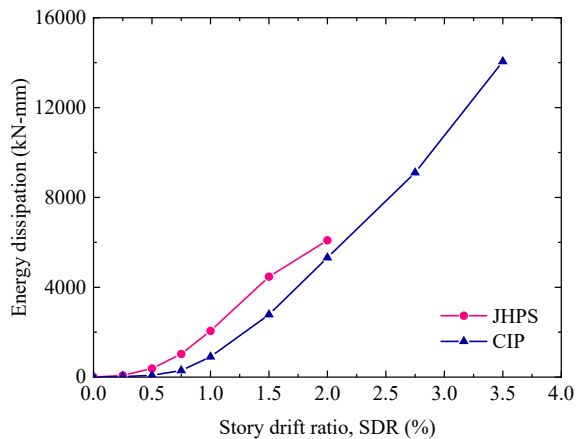


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวทางข้างของตัวอย่างทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบ CIP (ข) ตัวอย่างทดสอบ JHPS

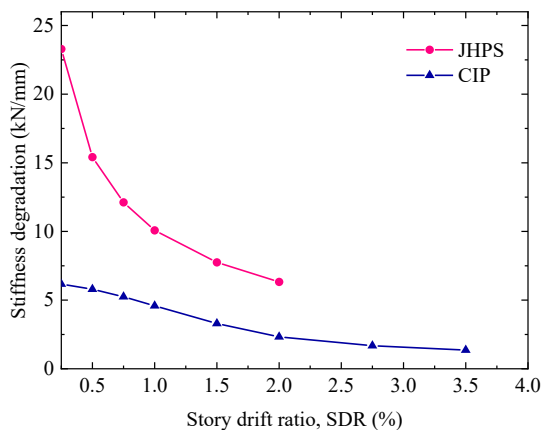
3.6 การเสื่อมถอยของความแข็งแกร่ง (Stiffness degradation)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 15 (ก) ความแข็งแกร่งเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ CIP มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS เป็นอย่างมาก เนื่องมาจากการเสริมความแข็งแกร่งที่บริเวณจุดติดตั้ง T-split ของตัวอย่าง JHPS ดังนั้นในช่วงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แรก ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจะมีความแข็งแกร่งมากกว่าตัวอย่าง CIP แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 15 (ข) หรือหลังจากการปรับแก้ค่า Stiffness พบว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS มีความชันของกราฟมากกว่าตัวอย่าง CIP หรือสรุปได้ว่าตัวอย่าง JHPS มีแนวโน้มการ

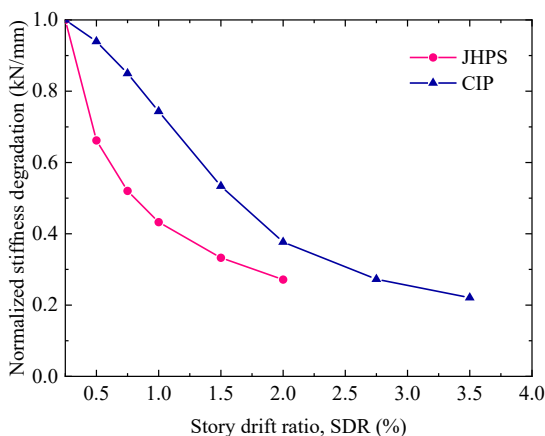
เสื่อมถอยของความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างทดสอบจุดต่อเสมือนแบบหล่อในที่ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ชิ้นส่วนคานคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวเอช มีพฤติกรรมไม่เป็นชิ้นเดียวกัน จนส่งผลให้ชิ้นส่วนคานคอนกรีตเกิดการวิบัติที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 2.0%



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงานและระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์



(ก)

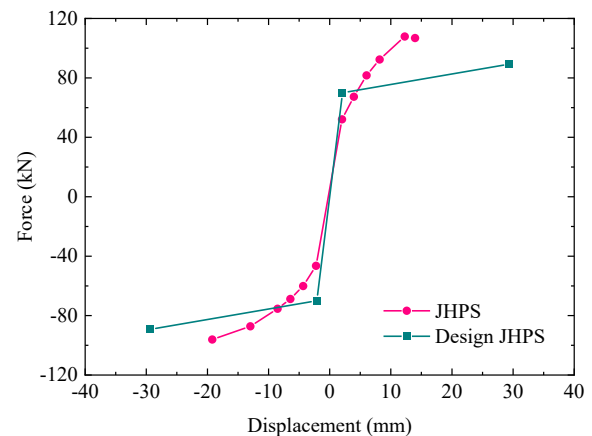


(ข)

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมถอยของความแข็งแรงและระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (ก) ก่อนปรับแก้ (ข) หลังปรับแก้

3.7 พฤติกรรมทดสอบเทียบกับการออกแบบ

การออกแบบตัวอย่างทดสอบ JHPS นั้นได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน ACI374.1-05 [5] โดยที่บริเวณรอยต่อของตัวอย่างทดสอบจะต้องไม่มีความเสียหาย ณ ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ 3.5% แต่เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวนี้เกิดความเสียหายที่ชิ้นส่วนคานคอนกรีตอย่างรุนแรง ในระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ 2.0% ทำให้การทดสอบต้องสิ้นสุดลง โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 16 พบว่ากราฟที่ได้จากการทดสอบและการออกแบบมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาผลของแรงกระทำด้านข้างที่ได้จากการทดสอบนั้นมีความน้อยกว่าแรงกระทำจากการออกแบบ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสริมกำลังที่ T-split ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงกระทำด้านข้างน้อยกว่าที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนที่ทางข้างจากผลการทดสอบ และการออกแบบของตัวอย่างทดสอบ JHPS

4. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคานศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็ก ที่ทำการทดสอบด้วยการให้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตย์ ตามมาตรฐาน ACI374.1-05 [5] และเปรียบเทียบกับตัวอย่างจุดต่อโครงสร้างเสาและคานเสมือนแบบหล่อในที่ โดยจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบ JHPS รับแรงดิ่งนั้นจะเกิดช่องว่างที่จุดต่อโครงสร้างเสาและคาน มากกว่าที่จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนคานคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวเอช ทำให้อุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กเกิดการสลายพลังงาน ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงผลักระนั้นจะเกิดช่องว่างที่จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนคานคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวเอชมากกว่าที่จุดต่อโครงสร้างเสาและคาน ส่งผลให้ J-bolt ในชิ้นส่วนคานคอนกรีตเกิดการคราก และเกิดการสลายพลังงานในขณะที่โครงสร้างได้รับแรงผลักระ ซึ่งในการออกแบบนั้นไม่ได้คำนึงถึงการออกแบบ J-Bolt เพื่อสลายพลังงาน ดังนั้น ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงผลักระนั้นจะมีความสามารถในการสลายพลังงานได้น้อยกว่าในขณะที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงดิ่ง
2. ตัวอย่างจุดต่อโครงสร้างเสาชิ้นส่วนสำเร็จรูปและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคานศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ห่วงแบบเหล็กมีความสามารถในการสลายพลังงานได้จริง ซึ่งเมื่อ

นำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างจุดต่อโครงสร้างเสมือนแบบหล่อในที่ พบว่ามีความสามารถในการสลายพลังงานที่ไม่ด้อยกว่าตัวอย่างจุดต่อโครงสร้างเสมือนแบบหล่อในที่

3. T-split มีความแข็งแรงมากเกินกว่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากมีการเพิ่ม Stiffener ที่บริเวณจุดติดตั้ง T-split ทำให้จุดต่อขึ้นส่วนคานเหล็กรูปตัวเอชและคอนกรีตที่ยึดด้วย J-bolt ไม่เป็นขึ้นส่วนเดียวกันเหมือนที่ออกแบบไว้ ดังนั้นเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับแรงผลัก ส่งผลให้เกิดแรงแบกทานที่มากขึ้นและขึ้นส่วนคานคอนกรีตวิบัติที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 2.0%
4. ตัวอย่างทดสอบ JHPS มีการคืนศูนย์ตนเอง แม้ว่าเกิดการสลายพลังงานที่ไม่เท่ากันทั้งในขณะที่ยตัวอย่างทดสอบถูกให้แรงผลักและแรงดึง
5. แนวโน้มค่าการเสื่อมถอยด้านความแข็งแรงของตัวอย่างทดสอบ JHPS เมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบ CIP แล้วมีแนวโน้มที่จะเสื่อมถอยมากกว่า แต่ตัวอย่างทดสอบ JHPS มีความแข็งแรงเริ่มต้นมากกว่าตัวอย่าง CIP

5. ข้อเสนอแนะการปรับปรุง

เพื่อให้ทำให้พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวของระบบจุดต่อโครงสร้างขึ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเสาและคานไฮบริดเหล็ก-คอนกรีต ที่มีระบบคืนศูนย์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์หน่วงแบบเหล็ก มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นแนะนำให้ปรับปรุงความแข็งแรงและประสิทธิภาพของโครงสร้างดังนี้

1. ในด้านการออกแบบควรทำการทดสอบกำลังของวัสดุทุกชนิดที่ใช้ในการแบบตัวอย่างทดสอบ เพื่อที่จะสามารถออกแบบจุดต่อของโครงสร้างได้แม่นยำมากขึ้น
2. ในการศึกษาพบว่าตัวอย่างทดสอบ JHPS วิบัติที่บริเวณคานคอนกรีตเนื่องจากขึ้นส่วนโครงสร้างคานคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวเอชมีพฤติกรรมไม่เป็นขึ้นส่วนเดียวกัน ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจุดต่อโครงสร้างดังกล่าว ควรพิจารณาการออกแบบเหล็กเสริม J-bolt ให้มีกำลังที่สูงขึ้นและลดกำลังของอุปกรณ์หน่วงแบบเหล็กลง ตามหลักการออกแบบด้วย Capacity design [6]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลนิธิ ปิงปองประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน (เลขที่คำรับรอง FRB680074/0164)

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.J.N. Priestley, F.S. (1995). Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures. Construction and Building Materials, 9(6), pp.365-377.
- [2] สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (2557). บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางในเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย. การประชุมสัมมนาเรื่องบทเรียนแผ่นดินไหว แม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว, กรุงเทพมหานคร, พฤศจิกายน 2557: 99-114.
- [3] 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.
- [4] Srisuwan, T. and Yooprasertchai, E. (2024). Effects of unbonded prestressing steel tendons and slit dampers on the seismic behavior of precast concrete beam-column joints. Structures, 59.
- [5] Committee, A., (2005) Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary.
- [6] American Concrete Institute, Building Code Requirement of Structural Concrete (ACI318-19). 2019
- [7] Oh, S.-H., Kim, Y.-J., and Ryu, H.-S. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. Engineering Structures, 31(9), pp.1997-2008.
- [8] Amadeo, B.C., OH, S.-H., and Akiyama, H. (1998). Ultimate energy absorption capacity of slit-type steel plates subjected to shear deformations. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 63(503), pp.139-147.
- [9] American Society for testing and Material, Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Strand for Prestressed concrete (ASTM A416/A416M-18). 2018