

การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมจุดต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานรากด้วยสลักเกลียว ภายใต้แรงกระทำวัฏจักร

An Experimental Study on the Behavior of Precast Concrete Column to Foundation Connections by Bolts Under Cyclic Loads

นิทัศน์ ศรีผ่องงาม^{1*} นภัทร วงษ์ศิริ¹ ปาณทัช ทองอุ¹ ศิริวิทย์ เทียนทอง¹ เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: S.Nitatch@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสะดวกและประหยัดเวลาในการติดตั้ง สามารถควบคุมคุณภาพได้ง่าย และลดต้นทุนได้เป็นอย่างดี แต่ในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหวจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนยังคงเป็นจุดที่จำเป็นต้องศึกษาและพัฒนา เนื่องจากบริเวณนี้มีมักเป็นตำแหน่งที่เกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้นเนื่องจากแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาจุดต่อคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยกระบวนการแบบแห้งระหว่างเสาและฐานราก โดยใช้จุดต่อแบบสลักเกลียว หรือคอลัมน์ชู (Column Shoes) ภายใต้การออกแบบด้วยแนวคิด Capacity Design เพื่อควบคุมและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อ ผ่านการทดลองดำเนินการภายใต้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต (Quasi-Static Reversed Cyclic Loading) ตามมาตรฐานการทดสอบโครงสร้าง ACI 374.1-05 โดยทดสอบตัวอย่างเสาและฐานรากที่ออกแบบให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเสาจริงของอาคารพาณิชย์ 3 ชั้น ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย โดยใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตเสาสำเร็จรูปขนาด หนาตัดความกว้าง 0.32 เมตร ความยาว 0.32 เมตร ความสูง 1.70 เมตร ที่มีการติดตั้งคอลัมน์ชูประกอบเข้ากับฐานราก จำนวน 1 ชิ้น เปรียบเทียบกับระบบคอนกรีตหล่อในที่แบบดั้งเดิมที่มีขนาดเท่ากัน ใช้อัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกน (Axial Load Ratio) ร้อยละ 5 และใช้อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเฉือน (Moment to Shear Ratio) ที่ 1 เมตร เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองประเมินความเสียหาย ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และความสามารถในการดูดซับพลังงาน จากการศึกษากฎพฤติกรรมครั้งนี้ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบจุดต่อตัวอย่างทดสอบ CS นั้นสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้ในระดับที่ดี สามารถรักษากำลัง ความแข็งแรงของโครงสร้างได้ทัดเทียมกับตัวอย่าง CIP ที่อัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Drift Ratio) ที่ $\pm 3.5\%$ ยังคงรักษาความแข็งแรง (Stiffness) ไว้ได้มากกว่า 25% และเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบโครงสร้าง ACI 374.1-05 ซึ่งใกล้เคียงระบบคอนกรีตหล่อในที่แบบดั้งเดิมอีกด้วย แต่เมื่ออัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เกิน 3.5% ค่าการสลายพลังงานตัวอย่าง CS ก็มีค่าต่ำกว่าตัวอย่าง CIP อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: คอนกรีตสำเร็จรูป, จุดต่อเสา-ฐานราก, แรงแผ่นดินไหว, คอลัมน์ชู

Abstract

Precast concrete construction systems have become increasingly popular due to their convenience, time efficiency, ease of quality control, and cost-effectiveness. However, in areas with earthquake risks, the connections between precast components are critical and require further research and development, as they often exhibit nonlinear behavior during seismic events. This research focuses on the behavior of dry-process precast concrete connections between columns and foundations that utilize column shoes. These connections are designed in accordance with the Capacity Design approach to minimize damage in the joint area. Reversed cyclic loading conditions under the ACI 374.1-05 structural testing standard were employed to test the column-foundation connections, which were intended to replicate the size of a three-story commercial building in Chiang Rai, Thailand. The precast column specimen featured a cross-section of 0.32 meters by 0.32 meters and a height of 1.70 meters, and they were connected to the foundation using the column shoe system. These precast specimens were also compared to traditional cast-in-place concrete systems of the same dimensions. The tests were conducted under an axial load ratio of 5% and a moment-to-shear ratio of 1 meter to assess and compare damage patterns, strength, stiffness, and energy dissipation capacity. The results indicate that the proposed connection system CS effectively resists lateral forces, reducing the risk of sudden structural collapse. It maintains structural strength and can withstand a drift ratio of 3.5% while retaining more than 25% of its initial stiffness, in compliance with ACI 374.1-05 standards, the performance of the precast concrete connection system demonstrates characteristic closely resembling those of the traditional cast-in-place concrete system. However, when the drift ratio exceeds 3.5%, the energy dissipation capacity of the CS specimen becomes noticeably lower than that of the CIP.

Keywords: Precast concrete, Column-foundation Connection, Seismic Loads, Column Shoe

1. คำนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมก่อสร้างให้ความสำคัญกับ ความรวดเร็วในการทำงาน การควบคุมต้นทุน และการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้การก่อสร้างในระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete System) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้าง ลดการใช้แรงงานคน และช่วยให้สามารถควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ในอดีต โครงสร้างสำเร็จรูปนั้นมักมีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหว เนื่องจาก จุดต่อ (Joint) เป็นจุดที่สำคัญส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างสำเร็จรูปมีความต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวไม่ทัดเทียมคอนกรีตหล่อในที่ (Monolithic Concrete) ซึ่งผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหวอยู่หลายชิ้น [1] ซึ่งหากนึกถึงแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่มีความรุนแรงที่สุดในรอบ 20 ปี จะพบว่าเกิดขึ้นในปี พ.ศ.2557 บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 [2] ซึ่งสร้างความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินรวมถึงอาคารบ้านเรือนไปเป็นจำนวนมาก

ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 วิศวกรเริ่มตระหนักว่า โครงสร้างบางประเภทสามารถอยู่รอดจากแผ่นดินไหว แม้ว่าจะได้รับความเสียหายบ้างก็ตาม จึงนำไปสู่การออกแบบภายใต้แนวคิด Capacity Design โดยมี การศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้นในเวลาต่อมา [3] เพื่อลำดับและควบคุมความเสียหายจากแผ่นดินไหวให้เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย โดยไม่เกิดการพังทลายแบบฉับพลัน แนวคิดดังกล่าวได้รับการศึกษาและพัฒนาทั้งในส่วนมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบอาคารที่ใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปต้านทานแรงแผ่นดินไหว และรูปแบบของจุดต่อโครงสร้างสำเร็จรูป โดยมีทั้ง จุดต่อแบบแห้ง (Dry Connection), จุดต่อแบบเปียก (Wet Connection) และจุดต่อแบบไฮบริด (Hybrid Connection) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคาร [4] ซึ่งระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแบบจุดต่อสลักเกลียว (Bolt Connection) ในรูปแบบแห้ง (Dry Connection) เริ่มเป็นที่นิยมเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถติดตั้งได้รวดเร็ว ไม่ต้องใช้ค้ำยัน ไม่ต้องรอบมคอนกรีต ลดการใช้แรงงานและเครื่องมือหนัก ดังเช่นงานวิจัยภายในประเทศของ[5] พัฒนาจุดต่อแบบ Steel Box Connection เป็นรูปแบบจุดต่อในรูปแบบแห้ง โดยมีพฤติกรรมเทียบเท่าคอนกรีตแบบหล่อในและมีศักยภาพที่ดีกว่าในด้านการสลายพลังงาน กำลังดัดและค่าความแข็งแรง เมื่อทดสอบภายใต้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต แต่หากเชื่อมประกอบจุดต่อไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการเสียหายแบบฉับพลัน (Brittle Failure) ได้และมีความซับซ้อนในการติดตั้งที่สูงกว่าจุดต่อในลักษณะ Column Shoe อยู่มากเมื่อเทียบกับระบบ Grouted Sleeves และ Corrugated Duct ที่เป็นจุดต่อในระบบเปียก

ทำให้ในปัจจุบันการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแบบจุดต่อแบบสลักเกลียวนั้นมีรูปแบบที่หลากหลายทั้ง จุดต่อแบบแผ่นเหล็กประกบจุดต่อแบบสลักเกลียวเชื่อมต่อโครงข้อแข็ง หรือในแบบ Column Shoe ที่ได้รับการวิจัยและพัฒนา [6] ให้มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา แต่ยังคงประสิทธิภาพสูง และมีเอกสารในการออกแบบรองรับ [7] นอกจากนี้ยังเป็นชิ้นส่วนโลหะขนาดเล็กไม่เต็มหน้าตัดเสาฝังอยู่ในเสาคอนกรีตสำเร็จรูป และเชื่อมต่อกับฐานรากผ่านสลักเกลียวฝังในฐานราก เมื่อนำมารวมกับการออกแบบภายใต้แนวคิด Capacity Design จะยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของจุดต่อให้มากยิ่งขึ้นไปอีกด้วยโดยใช้มาตรฐานในการออกแบบเสา จุดต่อและฐานราก ตาม ACI318-14 [8]

งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างด้วยวิธีการทดสอบภายใต้แรงวัฏจักรกึ่งสถิต การทดสอบได้มีการพิจารณาประเมินความเสียหาย ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และความสามารถใน

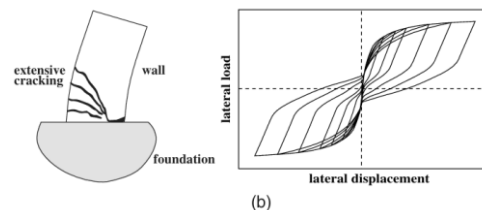
การสลายพลังงาน ระหว่างจุดต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานรากด้วยจุดต่อแบบ Column shoe กับจุดต่อระบบคอนกรีตหล่อในที่แบบดั้งเดิม เพื่อชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบทางเลือกนี้

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 หลักการออกแบบตัวอย่างทดสอบ

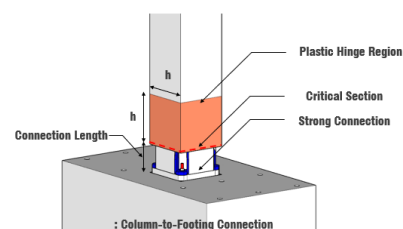
อาคารต้นแบบศึกษามีลักษณะอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่รูปแบบอาคารตึกแถว-อาคารพาณิชย์ 3 ชั้น ความยาวช่วงคานอยู่ที่ 4 เมตร ความสูงอาคาร 9 เมตร โดยพื้นที่ตั้งของอาคารอยู่ในพื้นที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย โดยอ้างอิงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบจาก มยผ.1301/1302-61 [9] จากนั้นนำไปวิเคราะห์แรงกระทำต่ออาคารในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสำเร็จรูป แล้วจึงนำแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นสูงสุดของชิ้นส่วนเสาและฐานรากนำมาออกแบบตัวอย่างทดสอบอีกครั้งหนึ่ง โดยการออกแบบโครงสร้างอาคารให้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI318-14 [8]

การออกแบบตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยส่วนของเสาและฐานราก จำเป็นต้องออกแบบให้ฐานรากไม่เกิดการเสียดรูปหรือแตกร้าวใดๆ เพื่อให้พฤติกรรมของฐานรากไม่ส่งผลต่อจุดต่อที่ใช้ในการศึกษา ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI318-14 [8] และการออกแบบเสาต้องการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบ โครงคดที่มีความเหนียวพิเศษ (Special Moment Frame) มีความสามารถในการต้านทานแรงดัด และแรงเฉือนจากเสาไปฐานรากได้อย่างสมบูรณ์ ออกแบบให้จุดต่อระหว่างเสาและฐานแข็งแรงกว่าตัวเสาด้วยวิธี Capacity Design เพื่อให้จุดต่อพลาสติก(Plastic Hinge) เกิดในเสา ไม่ใช่ที่จุดต่อตามมาตรฐาน ACI318-14 [8]



รูปที่ 1 ลักษณะการเสียดรูปของจุดต่อระหว่างเสาและฐานรากของคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ เมื่อมีแรงกระทำด้านข้าง [4]

จุดต่อสำเร็จรูปจะมีข้อแตกต่างในการออกแบบตรงที่กึ่งกลางด้านหน้าตัดออกแบบของเสาหลังคุณค่าลดความแข็งแรงแล้วต้องไม่น้อยกว่าศูนย์จุดสี่เท่าของกึ่งกลางด้านหน้าตัดที่เกิดขึ้นจริง โดยคำนวณตามกึ่งกลางด้านหน้าตัดจากแรงดัดของเหล็กที่เกินกำลัง (Overstrength) $1.25f_y$ และเหล็กเสริมตามแนวยาวหลักต้องต่อเนื่องผ่านรอยต่อ และต้องพัฒนาแรงได้เต็มที่ทั้งบริเวณรอยต่อและบริเวณจุดหมุนพลาสติก ดังรูปที่ 2



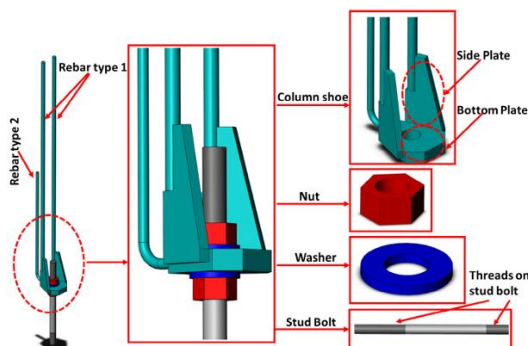
รูปที่ 2 การออกแบบจุดต่อสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานให้แข็งแรงกว่าตัวเสา

2.2 แนวคิดการออกแบบ Column Shoe

ต้นแบบ Column Shoe มาจากงานวิจัยของ Wang, G. et al. [10] โดยใช้วิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กหนา 3 แผ่นประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการยึดติดเข้ากับเหล็กแกนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยจำเป็นต้องออกแบบให้ Column Shoe นั้นมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่เกิดการวิบัติไปก่อนเหล็กแกนเสริมคอนกรีตหรือชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียรูประหว่างการทดสอบดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาตาม EOTA TECHNICAL REPORT. (2018) [7] ทั้งแรงเฉือนที่เกิดขึ้น แรงอัดตามแนวแกน แรงดัด โมเมนต์ที่เกิดขึ้น และความหนาของแผ่น Bottom Plate และ Side Plate ขนาดรอยเชื่อม โดยใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SS400 ที่มีทั่วไปตามท้องตลาด ในการออกแบบให้สามารถแรงกระทำด้านข้างจากการทดสอบแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตและแรงตามแนวแกนได้



รูปที่ 3 ลักษณะของ Column Shoe ที่มีการออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบครั้งนี้

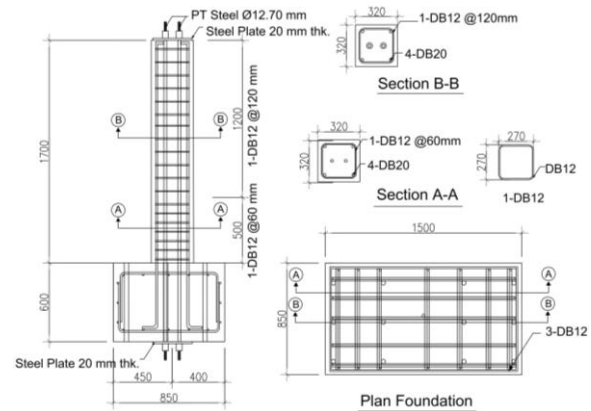


รูปที่ 4 ลักษณะของ Column Shoe จากงานวิจัย [10]

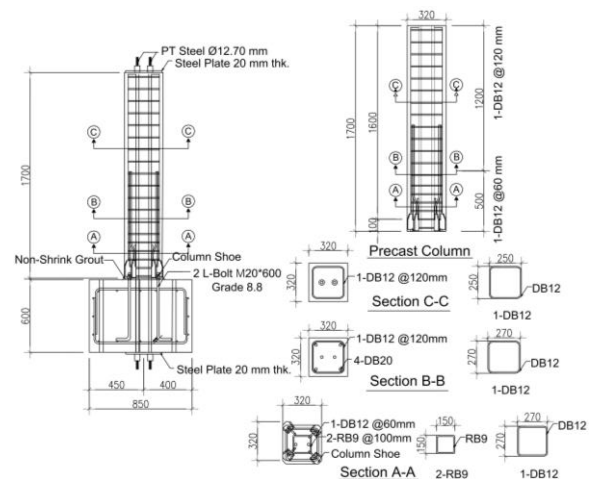
2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบจุดต่อโครงสร้างในครั้งนี้ เป็นขนาดมาตรฐาน 1:1 มีทั้งหมด 2 ตัวอย่างการทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบจุดต่อคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (CIP) และจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานราก (CS) โดยทั้งขนาดและรายละเอียดของเสาและฐานรากเหมือนกันแตกต่างกันเพียงรูปแบบของจุดต่อ โดยขนาดหน้าตัดเสามีขนาด กว้าง 320 มม. ยาว 320 มม. และสูง 1,700 มม. เหล็กแกนเสาขนาด DB20 SD40 จำนวน 4 เส้น เหล็กปลอกขนาด DB12 SD40 ขนาดฐานราก กว้าง 850 มม. ยาว 1500 มม. สูง 600 มม. และมีกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f'_c) เท่ากับ 34.5 MPa โดยมีระบบลวดอัดแรงเพิ่มกำลังอัดในแนวแกนเพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกด้วยลวดอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.70 มม. ชั้นคุณภาพ 1860 จำนวน 2 เส้น มีขนาดของแรงที่ใช้ในการดึงลวดอยู่ที่ร้อยละ 45 ของกำลังรับแรงดึงประลัย (f_{pu}) [11] เพื่อให้ลวดยังคงอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น โดยมีอัตราส่วนแรงอัดต่อกำลังอัดคอนกรีตหน้าตัดอยู่ที่ร้อยละ 5 โดยมีแผ่นเหล็กหนาประกบระหว่างก็์ลวดอัดแรงเพื่อกระจายแรงอัดที่เกิดจากลวดอัดแรงให้เต็มพื้นที่หน้าตัดเสา ซึ่งตัวอย่างทดสอบ CS จะแตกต่างจาก CIP บริเวณจุดต่อ โดยรอยต่อระหว่างเสาสำเร็จรูปและฐานราก ห่าง 15 มม. สำหรับกรอกปูนเกร้าที่ชนิดไม่หดตัวและมีส่วนผสมของเส้นใย เพื่อเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวและยึด

โครงสร้างให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน (Structural Integrity) และประกอบระหว่างเสากับฐานรากด้วยสลักเกลียวแบบฝังไว้กับฐานราก ขนาด M20 Grade 8.8 โดยใส่เฉพาะเกลียวเพื่อร้อยกับ Column Shoe ดังรูปที่ 5,6



รูปที่ 5 รายละเอียดจุดต่อคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ (CIP) (หน่วย มม.)



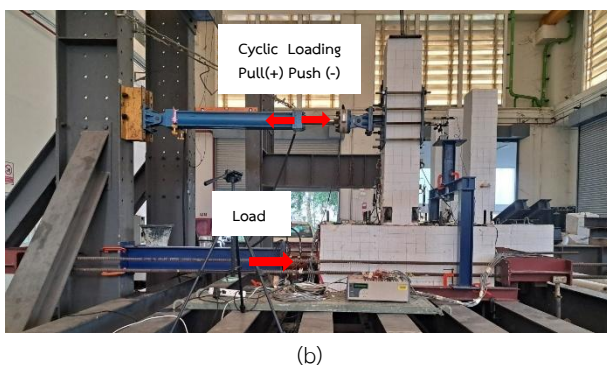
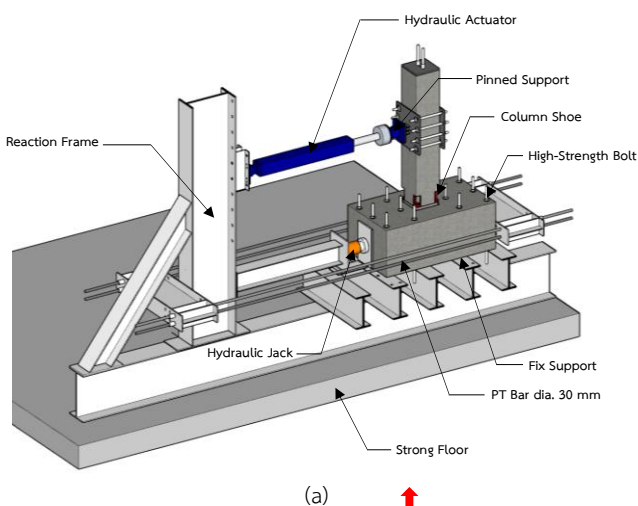
รูปที่ 6 รายละเอียดจุดต่อ Column Shoe คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานราก (CS) (หน่วย มม.)

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่าง	CIP	CS
ขนาดเสา	320X320 มม.	320X320 มม.
ขนาดฐานราก	1500x850x600 มม.	1500x850x600 มม.
ขนาดแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	4-DB20 SD40T	4-DB20 SD40T
ขนาดเหล็กปลอกเสาคอนกรีต	1-DB12 @60 มม. 1-DB12 @120 มม.	1-DB12 @60 มม. 1-DB12 @120 มม.
ชนิดจุดต่อเสา	หล่อในที่	Column Shoe
ขนาดสลักเกลียว	-	M20 Grade 8.8
ขนาดลวดอัดแรง	2-Ø12.70 มม. ชั้น 1860	2-Ø12.70 มม. ชั้น 1860
อัตราส่วนการดึงลวดอัดแรง	$0.45x f_{pu}$	$0.45x f_{pu}$

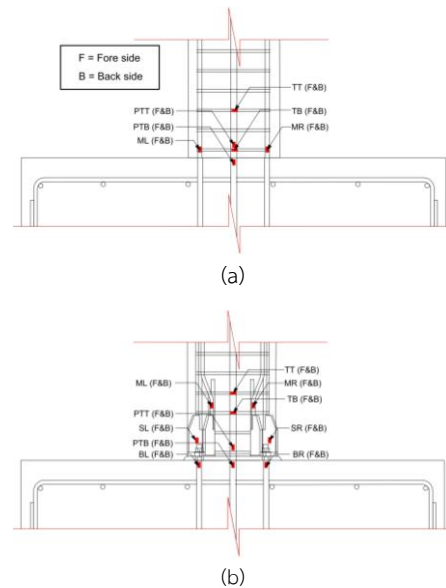
2.4 การติดตั้งและการทดสอบตัวอย่าง

การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแสดงตามรูปที่ 7 โดยติดตั้งฐานรากเข้ากับฐานรองรับ (Support) ด้วยสลักเกลียวบนโครงสร้างเฟรมขนาดใหญ่ด้วยคานเหล็กทั้งสองด้าน โดยด้านหนึ่งยึดติดเข้ากับโครงสร้างเสา ด้านข้างและอีกด้านยึดกับฐานรากของตัวอย่างทดสอบเชื่อมกันด้วยสลักเกลียว และให้แรงกระทำด้านข้างเพื่อยึดฐานรองรับให้เป็นรูปแบบฐานรองรับแบบยึดแน่น (Fix Support) ด้วยการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ในชั้นส่วนฐานราก โดยมีการติดตั้ง Displacement Transducer (DT) เพื่อตรวจเช็คการเลื่อนไถลด้านข้างและการพลิกหมุนของฐานราก ติดตั้งกึ่งกลาง Hydraulic Actuator ที่ตำแหน่งสูงกว่าผิวของฐานราก 1000 มม. (Moment to Shear Ratio) เพื่อให้แรงกระทำด้านข้างสำหรับการให้แรงผลักไปและดึงกลับ โดยติดตั้งบนโครงสร้างเฟรมและกำหนดการยึดรั้งที่ปลายเสาทั้งสองข้างมีสถานะยึดรั้งแบบจุดหมุน (Pinned Support) บนโครงสร้างเฟรมเสาขนาดใหญ่ จากนั้นแล้วจึงยึดตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียว โดยในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 374.1-05 [12] มีการติดตั้ง DT ด้านข้างของเสาเพื่อวัดระยะการโยกตัวของโครงสร้างและควบคุมให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด นอกจากนี้บริเวณด้านข้างของเสาตัวอย่างยังจำเป็นต้องติดตั้ง Pile Gauges (PG) และ DT เพื่อเฝ้าสังเกตการเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างเกิด การดัดงอ (Flexural Failure) สำหรับด้านหลังของเสาตัวอย่างยังจำเป็นต้องติดตั้ง PG เพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบลักษณะความเสียหายที่เกิดจาก แรงเฉือน (Shear Failure) เพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างละเอียดและแม่นยำต่อไป



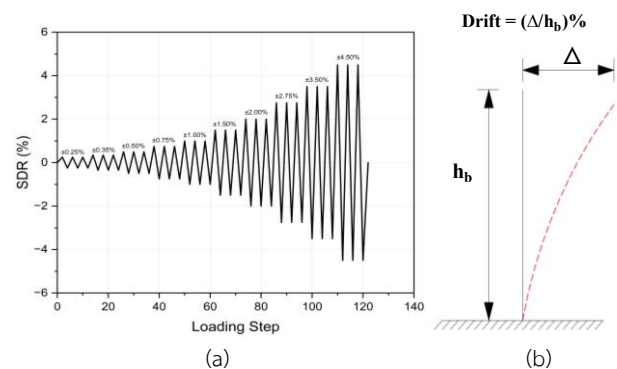
รูปที่ 7 การเตรียมการทดสอบตัวอย่าง: (a) การจำลองการทดสอบ (b) การทดสอบจริง

เมื่อโครงสร้างเกิดการให้ตัว การตรวจวัดความเสียหายที่จุดต่อเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะการเสียรูปของ เหล็กเสริมแกน เหล็กเสริมปลอก รวมถึงการร้าวร้าวที่เกิดขึ้นจากการดึงลวดอัดแรง เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอย่างแม่นยำ เภจวัดความเครียด (Strain Gauge) ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่คาดว่าจะเป็ จุดวิกฤต เช่น บริเวณเหล็กแกน เหล็กปลอกเสา สลักเกลียวและลวดอัดแรง ตำแหน่งตามที่แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauges: (a) CIP (b) CS

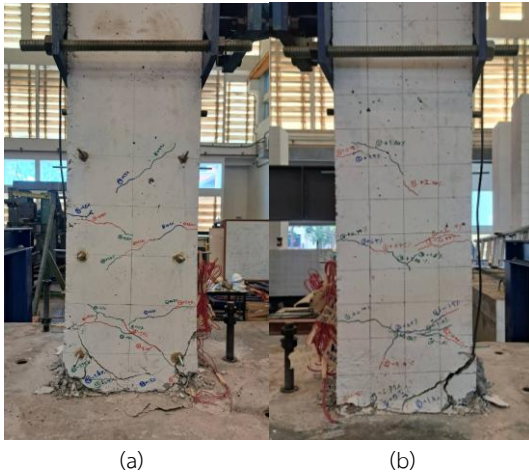
การทดสอบโดยใช้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต (Quasi-static Reversed Cyclic Loading) ใช้วิธีการทดสอบด้วยการควบคุมการเสียรูป (Displacement Control) ตามสัดส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น (Story drift ratio, SDR) โดยกำหนดระยะการเคลื่อนที่ในการดึงหรือดันด้วย Hydraulic Actuator พิจารณาการเสียรูปของเสาเป็นหลัก โดยใช้รูปแบบแรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ 9(a) โดยอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ (Drift Ratio) คำนวณจากสัดส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของกระบอกไฮดรอลิกกับความสูง (h_b) ซึ่งวัดจากหน้าตัดจุดต่อเสาและฐานรากไปจนถึงศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิก ตามที่แสดงใน รูปที่ 9(b) การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ถูกกำหนดไว้ที่ $\pm 0.25\%$, $\pm 0.35\%$, $\pm 0.50\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.00\%$, $\pm 1.50\%$, $\pm 2.00\%$, $\pm 2.75\%$, $\pm 3.50\%$, ± 4.5 ในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว จะมีการทำซ้ำการทดสอบจำนวน 3 รอบ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิต ตามมาตรฐาน ACI 374.1-05 [12]



รูปที่ 9 รูปแบบแรงกระทำด้านข้าง: (a) Loading History (b) Drift ratio

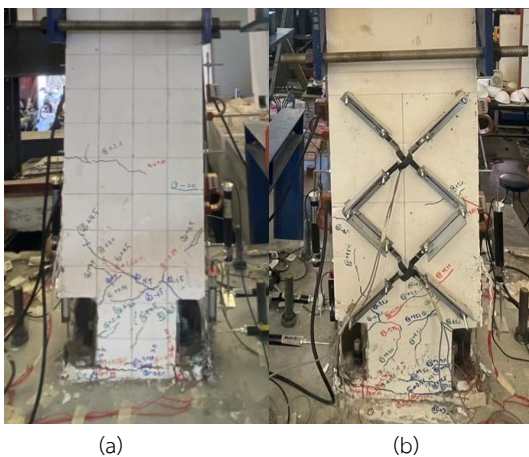
3. ผลการศึกษาวิจัย

3.1 ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 10 ความเสียหายของตัวอย่าง CIP: (a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง

ตัวอย่างทดสอบ CIP เป็นชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณทั่วทั้งเสาเป็นช่วงๆ โดยเริ่มเกิดรอยร้าวแนวขวาง (Transverse Cracks) ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ ตั้งแต่รอบแรกของการให้แรงดันท่าง โดยรอยร้าวด้านหน้าเกิดบริเวณใกล้รอยต่อของเสาและฐานรากความยาวประมาณ 10 ซม. ช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ รอยร้าวเริ่มเกิดรอยร้าวใหม่เพิ่มอีก 2 จุด จุดบริเวณช่วงกลางเสา ด้านบนของเสาและรอยร้าวเดิมก็ยังคงกระจายตัวเพิ่มขึ้นโดยพัฒนาเป็นแนวตั้งฉากกับตัวเสาเป็นส่วนใหญ่ ช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 2.75\%$ รอยร้าวเริ่มเปิดกว้างบริเวณจุดต่อระหว่างเสาและฐานรากอย่างเห็นได้ชัด ช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ซึ่งเมื่อการทดสอบสิ้นสุดจะพบว่าคอนกรีตบริเวณรอยร้าวจุดต่อระหว่างเสาและฐานราก มีการแตกของคอนกรีตอย่างชัดเจนหลุดออกมาเป็นชิ้นจากตัวเสา โดยรูปความเสียหายหลังสิ้นสุดการทดสอบแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 11 ความเสียหายของตัวอย่าง CS: (a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง

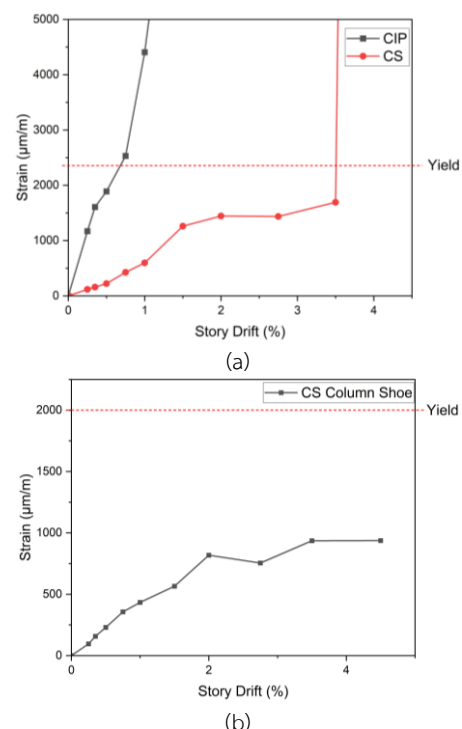
ตัวอย่างทดสอบ CS เป็นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ประกอบกันด้วยจุดต่อแบบ Column Shoe จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าความ

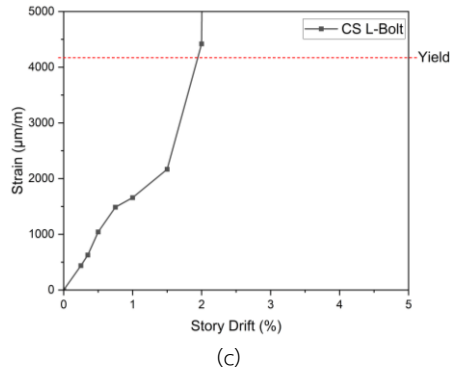
เสียหายที่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนเสาและฐานรากเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่เป็นรอยร้าวแนวทแยง (Diagonal Cracks) เป็นหลักช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ รอยร้าวเริ่มเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างเสาและฐานราก เป็นแนวยาวกระจายจากฐานของ Column Shoe จากอีกฝั่งไปอีกฝั่ง ช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.75\%$ รอยร้าวเริ่มเกิดขึ้นบริเวณขอบด้านบนของ Column Shoe เป็นรอยร้าวแนวทแยงขึ้นและพัฒนารอยต่อกระจายสูงขึ้นไปตามแนวเสา ซึ่งเมื่อการทดสอบสิ้นสุดจะพบว่าคอนกรีตบริเวณจุดต่อถูกบดอัดส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวรวมอยู่บริเวณจุดต่อเป็นหลัก และสลักเกลียวตำแหน่งซ้ายมือด้านหลังเกิดการขาดบริเวณจุดต่อกับนอต โดยรูปความเสียหายหลังสิ้นสุดการทดสอบแสดงในรูปที่ 11

จากการติดตั้ง PI gauge และเกจวัดระยะการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) ที่ตัวอย่างการทดสอบ ทำให้สามารถคำนวณหาสัดส่วนการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบได้ พบว่า ตัวอย่างทดสอบ CIP ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ จะมีรูปแบบการเสียหายเนื่องจาก การโยกตัว 75% การเฉือน 9% และการดัด 16% เป็นหลักซึ่งสังเกตได้ จากรอยร้าวที่ตัวชิ้นส่วนเสาที่มีรอยแตกร้าวในแนวนอนและแนวทแยงมุม ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบ CS ที่ อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ การโยกตัว 73% การเฉือน 6% และการดัด 15% โดยมีการโยกตัวเป็นรูปแบบความเสียหายหลักของทั้งสองตัวอย่างการดัด และการเฉือนเป็นรูปแบบความเสียหายที่ตามมา จะเห็นได้ชัดเจนว่ารูปแบบความเสียหายนั้นใกล้เคียงกัน ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบและตั้งสมมุติฐานเอาไว้

3.2 การตรวจของเหล็กเสริมคอนกรีตตำแหน่งต่างๆ

เนื่องจากการติดตั้ง Strain Gauges เพื่อติดตามค่าความเครียดในเหล็กแกน ตามตำแหน่งที่มีการพิจารณาคาดการณ์ว่าจะเป็นตำแหน่งวิกฤตเมื่อได้รับแรงดันท่างเมื่อทดสอบแล้วเสร็จจึงนำมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป



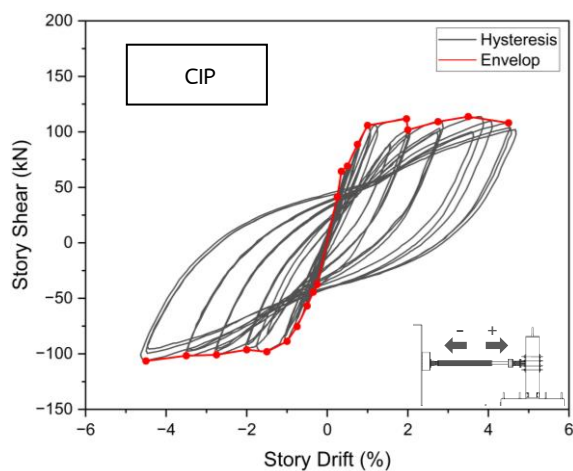


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ :
(a) เหล็กแกนเสา (b) CS Column Shoe (c) CS L-Bolt

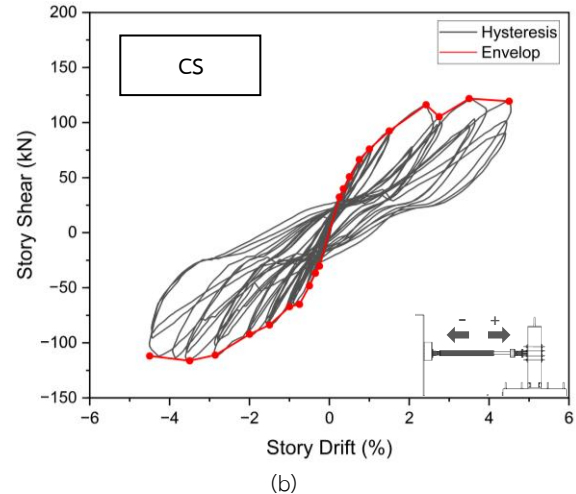
จากรูปที่ 12(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ โดยพิจารณาที่เหล็กเสริมตำแหน่งติดตั้ง ML(F&B), MR(F&B) เป็นหลักของทั้งชิ้นส่วนตัวอย่าง CIP และ CS โดย CIP ติดตั้งอยู่เหนือตำแหน่งรอยต่อ 15 มม. และ ชิ้นตัวอย่าง CS นั้นติดตั้งเหนือตำแหน่งรอยต่อ 200 มม. โดยเลือกค่าความเครียดสูงสุดในแต่ละอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ มาเปรียบเทียบกับค่าความเครียด ณ จุดครากของเหล็กเสริมคอนกรีตชั้นคุณภาพ SD40 จากการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 2360 $\mu\text{m/m}$ พบว่าเหล็กเสริมคอนกรีตทั้งสองตัวอย่างทดสอบมีการครากที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างทดสอบ CIP เหล็กเสริมจะเกิดการครากก่อนที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 0.75\%$ แต่ของตัวอย่างทดสอบ CS เกิดการครากที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 3.50\%$ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบ CS ความเสียหายเกิดขึ้นที่สลักเกลียวก่อนแล้วจึงแพร่กระจายไปที่เหล็กแกนตามหลัง เนื่องจากสลักเกลียวไม่ได้ยาวต่อเนื่องกับเหล็กเสริมคอนกรีต

จากรูปที่ 12(b) แสดงถึงค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นส่วนปีกของ Column Shoe โดยเปรียบเทียบกับจุดครากของแผ่นเหล็กหนาชั้นคุณภาพ SS400 จุดครากอยู่ที่ประมาณ 2000 $\mu\text{m/m}$ โดยจะพบได้ว่า ปีกของ Column Shoe ไม่เกิดการคราก หรือเกิดความเสียหายจะแรงด้านข้างเมื่อถึงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ของเสาอยู่ที่ $\pm 4.50\%$ เลย

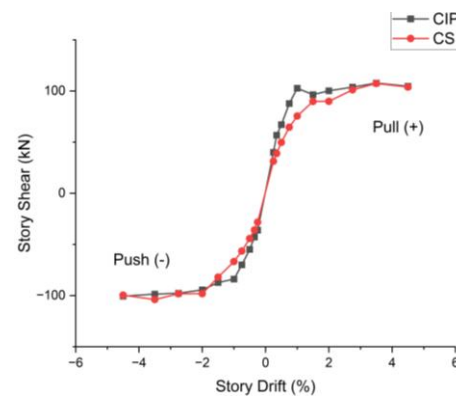
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ด้านข้าง



(a)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ ของแต่ละตัวอย่าง: (a) CIP (b) CS



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์สูงสุด

จากรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างในเสากับอัตราส่วนระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ ของตัวอย่างโดยมีการกำกับทิศทางในการทดสอบเมื่อให้แรงจากกระบอก Hydraulic Actuator ในทิศทางผลัก (+) และดึง (-) ตามลำดับ

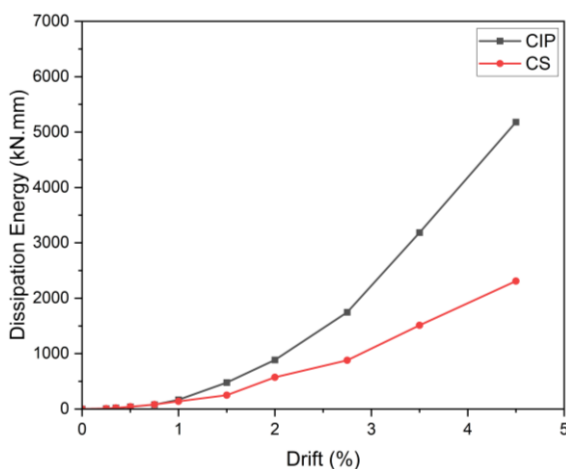
จากรูปที่ 13(a) จะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมที่เริ่มไม่เป็นแบบยืดหยุ่นตั้งแต่ช่วงอัตราส่วนระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ไม่เกิน $\pm 0.35\%$ หลังจากนั้นจะยังคงมีความแข็งแรงอยู่เพียงแต่ค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย จากกราฟจะพบว่าช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 2.00\%$ เกิดการสูญเสียค่าความแข็งแรงแบบเฉียบพลัน ทำให้เกิดระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ที่มากกว่าปกติในการให้แรงด้านข้างในรอบแรงของระยะนั้นๆ ทำให้เกิดรอยร้าวที่ชัดเจน มีชิ้นส่วนคอนกรีตแตกออกบริเวณรอยต่ออย่างชัดเจน และที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 3.50\%$ มีค่ากำลังต้านทานด้านข้างสูงสุด 113.71 kN และ -101.69 kN หลังจากนั้นกำลังต้านทานด้านข้างก็เริ่มลดลง ซึ่งก็เป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ในข้างต้น

จากรูปที่ 13(b) จะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมที่เริ่มไม่เป็นแบบยืดหยุ่นตั้งแต่ที่ระยะการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ไม่เกิน $\pm 0.25\%$ หลังจากนั้นจะมีค่าความชันของกราฟลดลงอย่างเห็นได้ชัดแต่กำลังรับแรงด้านข้างยังสามารถพัฒนาได้อย่างต่อเนื่องไปจนถึงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ $\pm 2.75\%$ เริ่มมีการแตกหลุดเป็นชิ้นส่วนที่บริเวณเสาทำให้กำลังรับแรงด้านข้างตกลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงนั้น แต่เสายังคงสามารถพัฒนากำลังรับแรงด้านข้างได้ต่อไป

จนถึงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ ค่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุด 121.75 kN และ -116.36 kN หลังจากนั้นกำลังต้านทานด้านข้างก็เริ่มลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากเกิดการขาดของสลักเกลียว ซึ่งก็เป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ในช่วงต้นอีกเช่นกัน

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุด เพื่อเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวอย่างทั้งสองชิ้น โดยจากการกราฟจะพบว่า ค่าความชันของกราฟตัวอย่างทดสอบ CIP จะชันกว่าในช่วงต้นแต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ขึ้นไปถึงค่าสูงสุดของกราฟ CS ก็พัฒนาไล่ตามได้ทันทีช่วงตั้งแต่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 2.75\%$ ขึ้นไปถึงขั้นที่ค่าสูงสุดของกราฟใกล้เคียงกันมากช่วงหนึ่งเลยทีเดียว จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทำให้พบว่าเนื่องจากจุดต่อของตัวอย่าง CS เป็นแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปไม่ได้ต่อเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์เหมือนแบบคอนกรีตหล่อใน แต่เมื่อระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นกำลังของตัวอย่าง CS ก็พัฒนาเพิ่มขึ้นได้ดีกว่าในช่วงแรกอย่างมากและพัฒนาจนทัดเทียมกับตัวอย่าง CIP ในช่วงระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 2.75\%$ ถึง $\pm 4.50\%$ ได้เลยทีเดียว

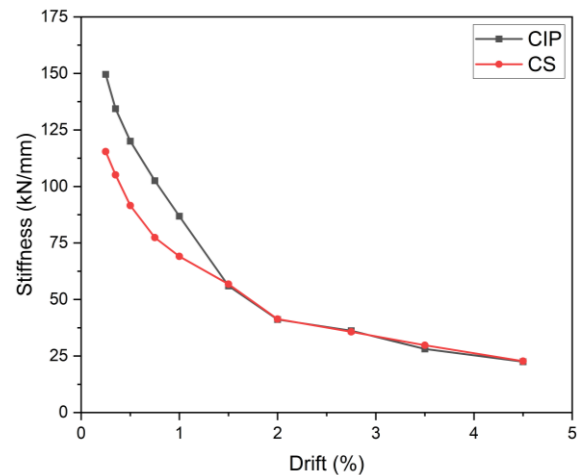
3.4 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างสลายพลังงานกับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

จากรูปที่ 15 แสดงค่าการสลายพลังงานเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างทดสอบ CIP และ CS ได้อย่างชัดเจน ในช่วงแรกของอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ รูปร่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ด้านข้างจะยังมีขนาดและความกว้างไม่มากทำให้ความสามารถในการสลายพลังงานของโครงสร้างยังมีไม่มากทั้งสองตัวอย่างทดสอบ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นมากกว่า $\pm 1.00\%$ แล้วจะพบว่าความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่าง CIP นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อเทียบกับตัวอย่าง CS เนื่องจากตัวอย่างทดสอบแบบหล่อในที่นั้นถูกออกแบบโดยยอมให้เกิดการครากของเหล็กเสริมตามยาว ทำให้เกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้นในชิ้นส่วนของเหล็กเสริมเสาและฐานรากที่ต่อเนื่องกันด้วย ทำให้ตัวอย่าง CIP สามารถกระจายพลังงานได้ดีกว่าและสลายพลังงานได้ดีกว่าด้วยเช่นกัน แต่ในทางกลับกันก็จะทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างในตำแหน่งของจุดต่อนั้นก็จะเสียหายมากขึ้น ความเสียหายก็จะกระจายตัวมากขึ้นตามความสามารถในการกระจายพลังงาน ทำให้สามารถซ่อมแซมได้ยากตามไปด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 10,11 เมื่อหลังจากการทดสอบแล้วเสร็จ

3.5 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

จากรูปที่ 16 พบว่าค่าความแข็งแรงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยตัวอย่าง CIP จะมีค่าความแข็งแรงในช่วงต้นสูงกว่าเนื่องจากคอนกรีตหล่อในที่ จะให้ความเป็นเนื้อเดียวกันที่มากกว่า ชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบตัวอย่าง CS อยู่แล้วเป็นทุนเดิมแต่ความเสื่อมถอยในช่วงแรกของ CIP นั้นรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับ CS ทำให้เมื่อหลังอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 1.50\%$ นั้นค่าการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงระหว่างตัวอย่าง CIP และ CS ก็มีค่าเข้าใกล้กันและเทียบเคียงกันได้ แม้ว่าในช่วงเริ่มแรก CS จะมีค่าการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงเริ่มต้นที่น้อยกว่า CIP ก็ตาม และค่าการเสื่อมถอยของทั้งสองชิ้นตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นก็ลดลงไปเหลือ 18.79% ในตัวอย่าง CIP และ 25.77% ในตัวอย่าง CS ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$

3.6 เปรียบเทียบเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน ACI 374.1-05

เนื่องจากการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ACI 374.1-05 [11] โดยใช้เกณฑ์สำหรับโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ และวิธีการออกแบบตามอาคารต้นแบบที่ได้อธิบายไว้ในช่วงต้นของรายงาน เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการทดสอบและยืนยันประสิทธิภาพของโครงสร้างต้านทานแรงดัดในพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหวสูงมี 3 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ค่าความสามารถในการรับแรงสูงสุด ในทิศทางที่กำหนดต้องไม่น้อยกว่า 75% ของค่า E_{max}
2. ค่าการดูดซับพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Energy Dissipation Ratio) ต้องไม่น้อยกว่า 1/8
3. ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง (Secant Stiffness) ที่วัดจาก Drift Ratio ± 0.0035 ต้องไม่น้อยกว่า 5% ของค่าความแข็งแรงเริ่มต้นของโครงสร้าง (Initial Stiffness)

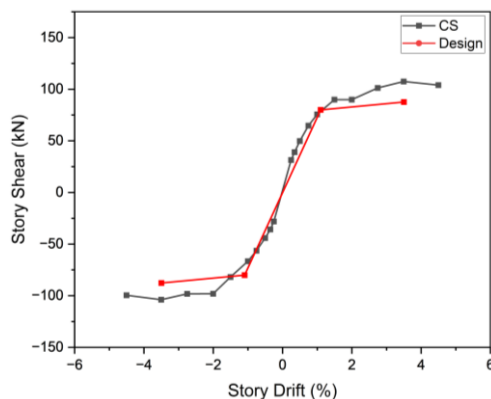
จากตารางที่ 2 พบว่าทั้งตัวอย่าง CIP และ CS สามารถรับแรงจากการทดสอบด้วยแรงกระทำวัฏจักรกึ่งสถิตได้ดี โดยมีความมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอ แม้ตัวอย่างทั้งสองจะผ่านเกณฑ์เหมือนกัน แต่ตัวอย่าง CIP มีความสามารถในการสลายพลังงานสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ทั้งสองตัวอย่างยังคงรักษาความแข็งแรง

(Stiffness) ได้ดี แม้เกิดการเสียรูปซ้ำหลายรอบ แสดงถึงความสามารถในการทนทานต่อการใช้งานและยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพของตัวอย่างอย่างรุนแรง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้าง CS มีพฤติกรรมโดยรวมที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างแบบหล่อในที่ (CIP) โดยเฉพาะในด้านความแข็งแรงและความแข็งแรงของโครงสร้าง ส่วนพฤติกรรมการสลายพลังงาน CS อาจต่ำกว่าเล็กน้อยแต่ยังคงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้ตามมาตรฐานการทดสอบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	ข้อกำหนด	ค่าจากการทดสอบ	เกณฑ์	ผ่าน
CIP	Peak force (kN)	+	100.031	113.712*0.75 ✓
		-	96.304	101.691*0.75 ✓
	The relative energy dissipation ratio	0.418	0.125	✓
	The secant stiffness (kN/mm)	27.699	149.574*0.05	✓
CS	Peak force (kN)	+	103.268	121.751*0.75 ✓
		-	113.369	116.367*0.75 ✓
	The relative energy dissipation ratio	0.174	0.125	✓
	The secant stiffness (kN/mm)	28.614	115.414*0.05	✓

3.7 พฤติกรรมเมื่อเทียบกับการออกแบบ



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

จากรูปที่ 17 กราฟผลการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบ พบว่าจุดต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานรากมีพฤติกรรมและกำลังที่ค่อนข้างสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมมติฐาน ซึ่งออกแบบมาให้มีกำลังเพียงพอที่จะไม่เกิดค่าความเสียหายที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ± 0.035 แต่จากกราฟกำลังต้านแรงด้านข้างของตัวอย่าง CS ไม่สามารถพัฒนาไปถึงค่าหลังจากอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ± 0.035 และลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของ ACI 374.1-05 [11] ค่าความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้าง (E_n) จากการออกแบบ ชิ้นส่วนโครงสร้างจำเป็นต้องพัฒนาความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างให้ได้ค่าตามที่ออกแบบได้ แต่ต้องไม่มากกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดอีกด้วย

4. สรุปผลการศึกษาวิจัย

บทความนี้ได้มีศึกษาจุดต่อโครงสร้างสำเร็จรูประหว่างเสาและฐานราก โดยใช้จุดต่อแบบ Column Shoe ที่พัฒนาขึ้น ทดสอบด้วยกระบวนการแบบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักรกึ่งสถิต เปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตแบบหล่อในที่ที่มีขนาดเดียวกัน โดยใช้ต้นแบบจากชิ้นส่วนของอาคารแบบอาคารพาณิชย์-ตึกแถวในอ.แม่ลาว จ.เชียงราย ประเทศไทย เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว พบว่า

1. ลักษณะการเสียหายของตัวอย่าง CIP มักจะเป็นรอยร้าวแนวขวาง (Transverse Cracks) โดยเริ่มต้นตั้งแต่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.25\%$ โดยความเสียหายกระจายไปทั่วทั้งเสาและพบมากขึ้นที่บริเวณจุดต่อระหว่างเสาและฐานราก และเมื่อถึงอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 4.50\%$ คอนกรีตบริเวณรอยต่อแตกร้าวรุนแรงหลุดเป็นชิ้น ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่าง CS ที่มีรอยร้าวแนวทแยง (Diagonal Cracks) และเริ่มเกิดรอยร้าวที่ช้ากว่าในช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ $\pm 0.35\%$ แต่ความเสียหายกลับรวมกันที่บริเวณ Column Shoe รอยต่อเสาและฐานรากเป็นหลัก โดยพบว่าสลักเกลียวบางตำแหน่งเกิดการขาดเสียหาย
2. พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบภายใต้ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรกึ่งสถิต นั้นคล้ายคลึงกันทั้งในรูปแบบความเสียหายจากการโยกตัว CIP อยู่ที่ร้อยละ 75 และตัวอย่าง CS อยู่ที่ร้อยละ 73 และโครงสร้างยังสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้มากกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ $\pm 3.50\%$ แต่ตัวอย่าง CS สามารถรักษาค่าความแข็งแรง (Stiffness) ได้ดีกว่า CIP ในช่วงอัตราส่วนระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงๆ ในขณะที่ค่าการสลายพลังงานของ CS ต่ำกว่า CIP ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการสลายพลังงานที่ต่ำกว่านี้ก็จะแลกมาด้วยความเสียหายที่ยากต่อการซ่อมแซมที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างหล่อในที่
3. เมื่อเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างจะทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตในตัวอย่าง CIP เกิดการครากที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ $\pm 0.75\%$ ในขณะที่ CS เกิดการครากที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ $\pm 3.50\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสลักเกลียวรับภาระแทนในช่วงแรกทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตนั้นมีการครากช้ากว่า CIP
4. เมื่อนำตัวอย่างทั้งสองมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการทดสอบ ACI 374.1-05 [12] พบว่าผ่านเกณฑ์การประเมินโครงสร้างทั้งสองตัวอย่าง และตัวอย่าง CS ยังมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับตัวอย่าง CIP แตกต่างกันเพียงพฤติกรรมการสลายพลังงานที่ CIP จะมากกว่า CS อย่างชัดเจนในช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่สูงกว่า $\pm 1.00\%$

จากผลการศึกษาพบว่าระบบจุดต่อระหว่างเสาและฐานรากของโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบ Column Shoe สามารถต้านทานแรงด้านข้างได้เป็นอย่างดี และผ่านตามเกณฑ์ ACI 374.1-05 [12] ได้ มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมแบบหล่อในที่ ทำให้สามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างสำเร็จรูปในพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว อีกทั้งยังให้ความสะดวกในการติดตั้ง ลดระยะเวลา

ก่อสร้าง และสามารถควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาการสลายพลังงานของโครงสร้างเพิ่มเติมจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างสำเร็จรูปให้ทัดเทียมกับโครงสร้างหล่อในที่ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและเนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีอยู่จำกัด จึงไม่อาจเพียงพอต่อการสรุปทางสถิติได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่างทดสอบเพิ่มเติมต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถพิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบจุดต่อคอนกรีตสำเร็จรูปแบบ Column Shoe ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะความสามารถในการต้านทานแรงดัดข้างและความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างหล่อในที่ แต่ยังคงมีข้อเสนอแนะในส่วนต่างๆเพิ่มเติมดังนี้

1. ควรมีการศึกษาภายใต้แนวทางที่หลากหลาย เพิ่มจำนวนตัวอย่างทดสอบให้มากขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการสรุปผลทางสถิติได้อย่างแม่นยำ และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น
2. แนวทางในการใช้งานจริงของระบบนี้ จำเป็นต้องควบคุมความยาวของสลักเกลียวให้มีความยาวมากกว่าระยะฝังเหล็กของฉาตามมาตรฐาน ACI 318-14 [8] หรือมากกว่า 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว ควรเลือกวัสดุเกร้าท์ที่มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตที่ 28 วัน โดยจำเป็นต้องเป็นปูนทรายชนิดไม่หดตัวผสมปูนที่มีส่วนผสมของไฟเบอร์ (Fiber Non-Shrink Grout Cement) ตลอดจนมีการติดตั้งในหน้างานอย่างแม่นยำตามการออกแบบ เพื่อป้องกันการเสียรูปที่อาจเกิดขึ้นนอกเหนือจากจุดที่ออกแบบไว้
3. ระบบนี้เหมาะสำหรับอาคารประเภทที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่มีความสูง 3-5 ชั้นในพื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหวและหากใช้ในอาคารที่สูงกว่านี้ควรมีการออกแบบและทดสอบเพื่อยืนยันสมรรถนะของจุดต่อภายใต้แรงแผ่นดินไหว เนื่องจากอาคารที่ทำการศึกษาคืออาคารเตี้ยถึงอาคารสูงปานกลาง

จากข้อเสนอแนะที่กล่าวมา หากมีการนำไปพัฒนาต่อยอดใช้งานจริงจะเป็นการส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของโครงสร้างสำเร็จรูปในประเทศไทยให้ตอบโจทย์การก่อสร้างในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว) และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลฐาน ปีงบประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน (เลขที่คำรับรอง FRB680074/0164)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2023). A systematic review of seismic-resistant precast concrete buildings. *Structures*, 58.
- [2] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (2557). บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางในเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย. การประชุมสัมมนาเรื่องบทเรียนแผ่นดินไหว แม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว, กรุงเทพมหานคร, พฤศจิกายน 2557: 99-114.
- [3] Kurama Yahya, C., Sritharan, S., Fleischman Robert, B., Restrepo Jose, I., Henry Richard, S., Cleland Ned, M., Ghosh, S. K., & Bonelli, P. (2018). Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art. *Journal of Structural Engineering*, 144(4), 03118001.
- [4] Chang, R., Zhang, N., & Gu, Q. (2023). A Review on Mechanical and Structural Performances of Precast Concrete Buildings. *Buildings*, 13(7).
- [5] Hansapinyo, C. (2018). Capacity Design Criteria for Seismic Resistance of Precast Concrete Columns Using Steel Box Connection. *International Journal of GEOMATE*, 14(45).
- [6] Nascimbene, R., & Bianco, L. (2021). Cyclic response of column to foundation connections of reinforced concrete precast structures: Numerical and experimental comparisons. *Engineering Structures*, 247, 113214.
- [7] EOTA TECHNICAL REPORT. (2018). Bending of column shoe connections-tests and results. European Organization for Technical Assessment.
- [8] American Concrete Institute, Building Code Requirement of Structural Concrete (ACI318-14). 2014
- [9] มยผ. 1301/1302. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง
- [10] Wang, G., Li, Y., Li, Z., & Ingham, J. M. (2020). Experimental and numerical study of precast concrete columns with hybrid bolted splice connections. *Structures*, 28, pp.17-36.
- [11] 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.
- [12] ACI Committee 374. (2005). Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: An ACI Standard. American Concrete Institute.