

พฤติกรรมข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูป ระหว่าง ข้อต่อแบบสลักเกลียวและข้อต่อแบบเบี้ย

THE PERFORMANCE OF COLUMN-TO-FOUNDATION JOINTS IN PRE-CAST HOME SYSTEMS: A COMPARISON BETWEEN BOLT CONNECTION AND POCKET JOINTS

วัชรกร ฉิมพันธ์^{1*}, วิฑิต ปานสุข²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบบ้านสำเร็จรูปได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในประเทศไทย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความรวดเร็วในการก่อสร้าง และความสามารถในการควบคุมคุณภาพของวัสดุที่ใช้ ซึ่งตอบสนองความต้องการได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันมีการพัฒนาให้บ้านสำเร็จรูปมีการคงทนต่อแรงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ได้แก่ แรงแผ่นดินไหว และหนึ่งในส่วนสำคัญของระบบบ้านสำเร็จรูปที่มีผลต่อความแข็งแรงหรือความสามารถในการทนทานต่อแรงแผ่นดินไหว คือ ข้อต่อระหว่างส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง เช่น ข้อต่อระหว่างเสา-คาน และข้อต่อระหว่างเสา-ฐานราก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของข้อต่อระหว่างเสาและฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูป ที่ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว โดยเปรียบเทียบข้อต่อสองประเภท ได้แก่ ข้อต่อแบบเบี้ย และข้อต่อแบบสลักเกลียว ภายใต้แรงจากแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับข้อกำหนดในประเทศไทย

ผลการวิจัยช่วยให้การออกแบบข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูปสามารถรองรับแรงจากแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งช่วยประเมินการประหยัดเวลาและต้นทุนในการติดตั้ง การเลือกข้อต่อที่เหมาะสมจะเพิ่มความปลอดภัยในการก่อสร้างบ้านสำเร็จรูปในประเทศไทย

การทดสอบดำเนินการโดยการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างบ้านสำเร็จรูปที่มีความสูง 3 ชั้น จากนั้นนำแรงที่วิเคราะห์ได้มาออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อตามมาตรฐาน และใช้การทดสอบแรงแบบซ้ำ (Cyclic Loading) โดยวิธี Finite Element ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหว และทดสอบการรับแรงของข้อต่อทั้งสองประเภทจนถึงจุดวิบัติ นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ความแตกต่างของกำลังการรับแรงโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในแต่ละประเภทเพื่อพัฒนาแนวทางในการเลือกใช้ข้อต่อที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการรับแรงจากแผ่นดินไหว เพื่อให้การออกแบบและก่อสร้างในข้อต่อระหว่างเสาและฐานรากมีความเหมาะสมและปลอดภัย สำหรับการใช้งานบ้านสำเร็จรูปในประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : บ้านสำเร็จรูป, การทดสอบการรับแรงแผ่นดินไหว, ข้อต่อระหว่างเสาและฐานราก

Abstract

This article presents guidelines for making a correctly- Currently, pre-cast housing systems have gained widespread popularity in Thailand due to their numerous advantages, such

as expedited construction timelines and the ability to control the quality of materials used, which effectively meet the growing demand. Furthermore, ongoing developments aim to enhance the resilience of pre-cast homes against natural disaster, particularly seismic activity. One crucial component of the pre-cast system that significantly influences its structural integrity and earthquake resistance is the joint between various structural elements, including the connections between columns and beams, as well as the column-to-foundation joints.

This research aims to investigate the failure behavior of the column-to-foundation joint in pre-cast homes subjected to seismic forces. Specifically, it compares two types of joints: Pocket joint and the Bolt Connection joint, under earthquake forces in compliance with Thailand's seismic design standards.

The findings from this research will facilitate the design of column-to-foundation joints in pre-cast homes that can effectively withstand seismic forces. Additionally, it will assess the potential for time and cost savings during installation. By selecting the most appropriate joint type, construction costs can be reduced, while safety and structural integrity will be enhanced in the construction of pre-cast homes in Thailand.

Testing will be conducted by analyzing the forces acting on a three-story pre-cast home structure. The forces derived from the analysis will be used to design joint components according to established standards, followed by testing under cyclic loading conditions by finite element method to simulate seismic activity. The load-bearing capacity of both joint types will be assessed until failure. Furthermore, the study will examine the differences in bending moment capacity and shear force across the joint types, providing guidelines for selecting the most effective joint for seismic resistance, ensuring that the column-to-foundation joint designs are both suitable and safe for use in Thailand.

Keywords: Pre-cast homes, Cyclic load testing, Column-to-foundation joint.

บทนำ

ปัจจุบันระบบบ้านสำเร็จรูป (Pre-cast) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในประเทศไทย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความรวดเร็ว

ในการก่อสร้าง ความสะดวกสบายในการติดตั้ง และความสามารถในการควบคุมคุณภาพของวัสดุที่ใช้ นอกจากนี้ ระบบบ้านสำเร็จรูปยังได้รับการพัฒนาให้สามารถทนทานต่อแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เช่น แรงแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้พัฒนาต้องคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างของบ้าน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด

หนึ่งในส่วนสำคัญของระบบบ้านสำเร็จรูปที่มีผลต่อความแข็งแรงและความสามารถในการทนทานต่อแรงแผ่นดินไหว คือข้อต่อระหว่างส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง เช่น ข้อต่อระหว่างเสา-คาน และข้อต่อระหว่างเสา-ฐานราก ข้อต่อเหล่านี้จะต้องมีคุณสมบัติในการรับแรงได้ดีและทนทานต่อแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยในปัจจุบัน ข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูปมักใช้ 2 ประเภทหลัก คือ ข้อต่อแบบเบ้า และ ข้อต่อแบบขุดสลักเกลียว ซึ่งทั้งสองประเภทมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันในด้านวิธีการก่อสร้าง, ต้นทุนการผลิต, และความสามารถในการรับแรง

การศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อทั้งสองประเภทจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากจะช่วยให้สามารถเลือกใช้ข้อต่อที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและประเภทของการใช้งาน จึงสนใจที่จะศึกษาและทดสอบพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากทั้งสองประเภท ภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยจะทำการทดสอบแรงกระทำแบบสลับ (Cyclic load) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงและการวิบัติของข้อต่อทั้งสองประเภท ทั้งในด้านความสามารถในการรับแรง ความคงทนต่อการใช้งาน และความปลอดภัยในการใช้งานในระยะยาวการศึกษานี้จะช่วยให้สามารถปรับปรุงการออกแบบและพัฒนาข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูป ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของความแข็งแรงในการรับแรงจากแผ่นดินไหวและความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างบ้านสำเร็จรูป ช่วยให้การก่อสร้างบ้านสำเร็จรูปในประเทศไทยมีความทนทานและสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากที่ออกแบบสอดคล้องกับกฎหมายในประเทศไทย โดยทำการทดสอบด้วยแรงกระทำแบบสลับ (Cyclic Load) กับข้อต่อ 2 ชนิด ได้แก่ ข้อต่อแบบเบ้า (Pocket Joint) และ ข้อต่อแบบสลักเกลียว (Bolt and Plate Connection) ด้วยวิธี Finite Element
2. เปรียบเทียบกำลังการรับแรงจากแผ่นดินไหวของข้อต่อทั้งสองประเภท เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการทนทานต่อแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว
3. วิเคราะห์พฤติกรรมข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากจากแรงกระทำแบบสลับ (Cyclic Load) ด้วยวิธี Finite Element ในการพัฒนาการออกแบบข้อต่อดังกล่าว

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของข้อต่อระหว่างเสา-ฐานราก 2 ชนิด ได้แก่ข้อต่อแบบเบ้า (Pocket Joint) และ ข้อต่อแบบสลักเกลียว (Bolt and Plate Connection)
2. จำลองแรงกระทำสลับโดยวิธี Finite Element ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ABAQUS
3. ออกแบบข้อต่อโดยมาตรฐาน AISC 360 ภายใต้ข้อกำหนดของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.1301/1302-61) [1] และ กฎกระทรวงปี พ.ศ. 2566 [2]

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการวิบัติของข้อต่อระหว่างเสาและฐานราก ที่มีข้อต่อต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ ข้อต่อแบบเบ้า และข้อ

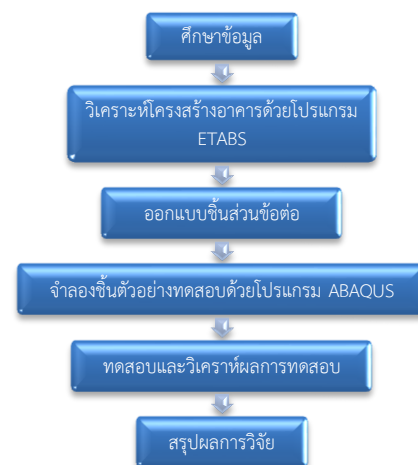
ต่อแบบสลักเกลียว ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงความสามารถในการรับแรงและความทนทานของแต่ละประเภทในการรองรับแรงแผ่นดินไหว

2. ได้ทราบถึงความแตกต่างของกำลังในการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของข้อต่อ ซึ่งสามารถนำไปประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการเลือกใช้ข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในโครงสร้างบ้านสำเร็จรูปที่ต้องรองรับแรงแผ่นดินไหว

3. สามารถนำผลการทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือน รวมถึงพฤติกรรมการวิบัติของข้อต่อ เพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบข้อต่อระหว่างเสา-ฐานรากในระบบบ้านสำเร็จรูป ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งในแง่ของความสามารถในการทนทานต่อแรงแผ่นดินไหวและความปลอดภัยในระยะยาว

4. สามารถประเมินการการเลือกใช้ข้อต่อที่มีการติดตั้งรวดเร็วและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน

ระเบียบการวิจัย



การออกแบบอาคารรับแผ่นดินไหวในประเทศไทย

การออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย จะใช้มาตรฐานการออกแบบตาม มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1301/1302-61) [1] และ กฎกระทรวง ปี พ.ศ. 2566 [2] ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารและสิ่งก่อสร้างให้สามารถรับมือนกับแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการกำหนดข้อกำหนดและมาตรการต่างๆ เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะมีความปลอดภัยในกรณีที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณและออกแบบชิ้นส่วนข้อต่อระหว่างเสาและฐานรากด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

วิธีแรงสถิตเทียบเท่าใช้ออกแบบอาคาร วิธีนี้เริ่มจากการคำนวณหา ค่าแรงสถิตเทียบเท่าในรูปของแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Seismic Base Shear) จากนั้นจึงกระจายแรงไปยังชั้นต่าง ๆ ของอาคาร แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่ออาคาร ณ ชั้นใด ๆ ในแนวราบ (F) คำนวณจากสมการที่ (1) และ (2)

$$F_x = C_{vx} V \quad (1)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2)$$

แรงเฉือน ณ ชั้นใด ๆ ของอาคารที่เกิดจากแรงสถิตเทียบเท่า (F) ให้คำนวณจากสมการที่ (3)

$$V_x = \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

ความสอดคล้องของการเคลื่อนตัวด้านข้าง

ในกรณีที่อาคารมีประเภทการออกแบบอาคารด้านทานแผ่นดินไหวแบบทุกองค์อาคารที่มีได้เป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้างต้านแรงแผ่นดินไหว จะต้องได้รับการออกแบบให้ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งร่วมกับแรงภายในองค์อาคารที่เกิดจากเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Δ) เท่ากับองค์อาคารของระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีใช้ส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้างต้านแรง [1]

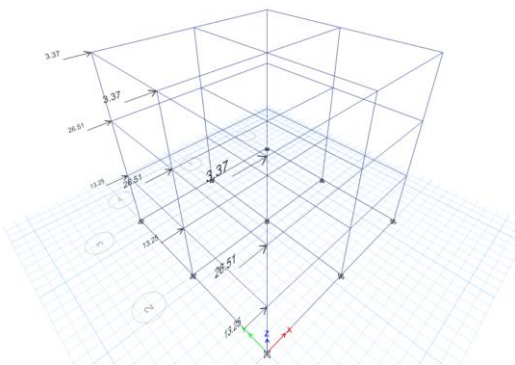
ตารางที่ 1 ค่าเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมให้ (Δ)

ลักษณะโครงสร้าง	ประเภทความสำคัญของอาคาร		
	I หรือ II	III	IV
โครงสร้างที่ไม่ใช่ผนังก่ออิฐรับแรงเฉือนและสูงไม่เกิน 4 ชั้น ซึ่งผนังภายในฉากกันห้อง ฝ้าเพดาน และผนังภายนอกถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้มาก	0.025h _{sx}	0.020h _{sx}	0.015h _{sx}
โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบยื่นจากฐานรองรับ	0.010h _{sx}	0.010h _{sx}	0.010h _{sx}
โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบอื่นๆ	0.007h _{sx}	0.010h _{sx}	0.010h _{sx}
โครงสร้างอื่นๆทั้งหมด	0.020h _{sx}	0.015h _{sx}	0.010h _{sx}

จากตารางที่ 1 ในการวิจัยนี้จะกำหนดการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมให้ในการออกแบบที่ 2.5 % ของความยาวเสา เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของอาคารที่ทำการวิจัย

จำลองวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ETABS

นำแรงที่ได้จากการคำนวณแรงแผ่นดินไหวใส่ในแบบจำลอง ที่จำลองขึ้นด้วยโปรแกรม ETABS เพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นที่ฐาน (Basement) แต่ละเสา ดังรูปที่ 1



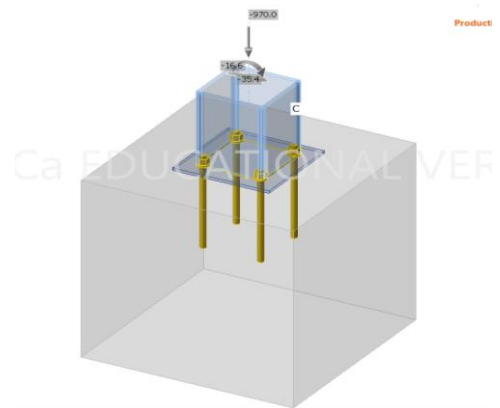
รูปที่ 1 แสดงโมเดลอาคาร 3 ชั้นด้วยโปรแกรม ETABS

FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m
-16.5507	0.1132	62.5494	3.6243	-35.0394	0
-16.5507	-0.1132	62.5494	-3.6243	-35.0394	0
-16.5507	0	85.1544	0	-35.0394	0
-12.9945	0.1132	30.4672	3.6243	-36.0837	0
-12.9945	-0.1132	30.4672	-3.6243	-36.0837	0
-12.9945	0	53.0722	0	-36.0837	0
-13.5848	0.1132	61.005	3.6243	-28.2491	0
-13.5848	-0.1132	61.005	-3.6243	-28.2491	0
-13.5848	0	83.61	0	-28.2491	0

รูปที่ 2 แสดงแรงเฉือนและโมเมนต์ในแต่ละเสา

การออกแบบชุดสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก

นำแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในแต่ละเสามาใช้ในการออกแบบ Bolt and Plate Connection ด้วยโปรแกรม IDEA STRATICA โดยมาตรฐานการออกแบบ AISC 360 [3] และกฎกระทรวงปี 2566 [2] สำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงมาตรฐาน ACI 318 [4] ใช้ภายใต้ข้อบังคับของกฎกระทรวง [5] โดยคอนกรีตกำลังอัด 430 KSC, เหล็กแผ่นเกรด SS400, เหล็กเสริมเกรด SD40 และ SR24, สลักเกลียวมาตรฐาน ASTM A325, และบริเวณรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กและเหล็กชุบด้วยใช้ลวดเชื่อม E70 ซึ่งได้ขนาดชุดสลักเกลียวและความหนาของแผ่นเหล็กดังตารางที่ 2



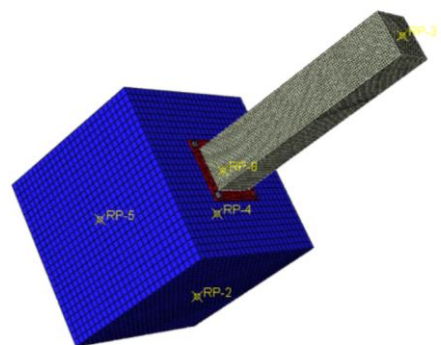
รูปที่ 2 แสดงการออกแบบชุดสลักเกลียวด้วยโปรแกรม IDEA STRATICA

ตารางที่ 2 แสดงขนาดชิ้นส่วนข้อต่อแบบสลักเกลียว

ชิ้นส่วน	ขนาดชิ้นส่วน
ความหนาแผ่นเหล็ก	8 มิลลิเมตร
ขนาดแผ่นเหล็ก	250x250 ตารางมิลลิเมตร
สลักเกลียว	16 A325
ขนาดรอยเชื่อม	E70 ขนาด 5 มิลลิเมตร

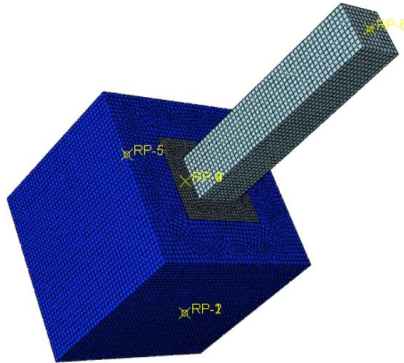
การจำลองตัวอย่างโดยโปรแกรม ABAQUS

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบด้วยวิธี Finite Element โดยโปรแกรม ABAQUS โดยจะใช้ 2 ตัวอย่างได้แก่ ตัวอย่างที่ J-BF01 ตัวอย่างข้อต่อแบบ Bolt and Plate Connection เป็นข้อต่อที่ออกแบบโดยผู้วิจัย อ้างอิงจากลักษณะอาคาร 3 ชั้น และ ตัวอย่างที่ J-BF02 ตัวอย่างข้อต่อแบบ เบ้า (Pocket Joint) ซึ่งเป็นรูปแบบข้อต่อที่มีการใช้อยู่ทั่วไปในการก่อสร้างบ้านสำเร็จรูปสำหรับอาคาร 3 ชั้น โดยแบบของข้อต่อนี้ได้รับการจากสำรวจในบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนบ้านสำเร็จรูป ทั้งสองข้อต่อจะจำลองเสามีความยาว 1.0 เมตร ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 ตัวอย่างที่ J-BF01 ตัวอย่างข้อต่อแบบ Bolt and Plate Connection

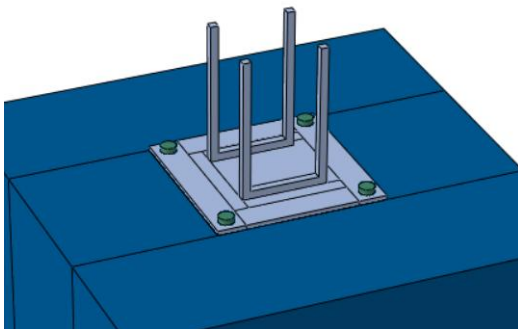
ตัวอย่างที่ J-BF01 จะกำหนดชิ้นส่วนย่อยถูกเลือกให้เป็นแบบ Solid Element โดยมีส่วนประกอบย่อยที่สำคัญ ดังนี้ ฐานรากและเหล็กเสริมฐานราก, แผ่นเหล็ก, สลักเกลียว, เสาค้ำและเหล็กเสริมเสาค้ำ, และเหล็กยึดตัวที่เชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กและเหล็กเสริมเสาค้ำดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ตัวอย่างที่ J-BF02 ตัวอย่างข้อต่อแบบแบริ่ง (Pocket Joint)

ตัวอย่างที่ J-BF02 มีองค์ประกอบของชิ้นส่วนหลักได้แก่ ฐานรากและเหล็กเสริมฐานราก, เสาค้ำและเหล็กเสริม, และ ชิ้นส่วนเกราะที่คอนกรีต

ส่วนสัมผัส (Contact) ส่วนสัมผัสระหว่างเหล็กและคอนกรีตจะกำหนดเป็นแบบ Fictitious Contact ที่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.6 [6] ส่วนสัมผัสระหว่างสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก จะถูกกำหนดเป็น General Contact แบบ Hard Contact และส่วนสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีตจะกำหนดเป็น Embedded Region



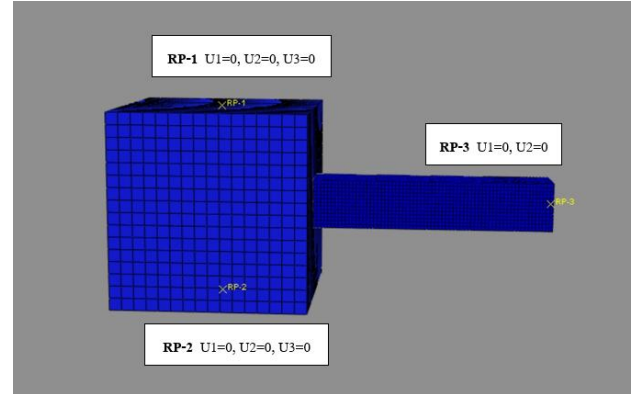
รูปที่ 5 แสดงเหล็กยึดตัว

การกำหนดวัสดุจะกำหนดเป็น Nonlinear Material โดยเหล็กจะจำลองวัสดุแบบ อีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic constitutive model) กำหนดค่า Poisson's ratio เท่ากับ 0.3 และคอนกรีตจะจำลองวัสดุโดยใช้ CDP (Concrete Damaged Plasticity) [7] โดยมีค่าคุณสมบัติที่สำคัญดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดง Concrete Damaged Plasticity parameter

Eccentricity	Dilation angle	f_{bo}/f_{co}	K	viscosity	Poisson's ratio
0.10	30	0.667	0.667	0.0005	0.3

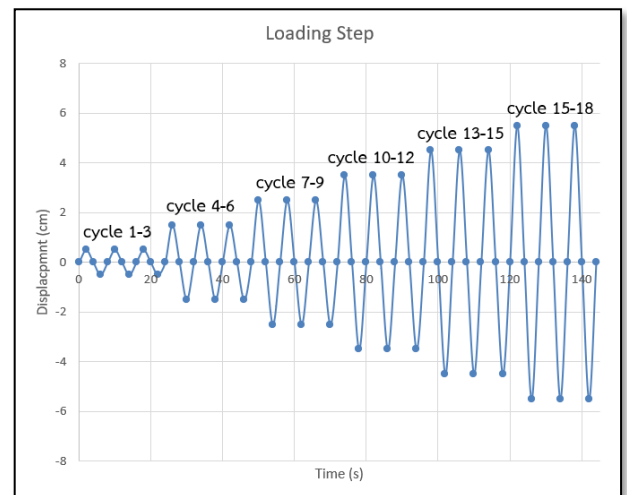
การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ในการจำลองตัวอย่างทั้งสองชิ้นจะมีการกำหนดเงื่อนไขขอบที่เหมือนกัน โดยจะมีการกำหนด 3 จุดได้แก่ ด้านบนฐานราก (RP-1) จะกำหนดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ ($U_1, U_2, U_3 = 0$) เช่นเดียวกับด้านล่างฐานราก (RP-2) ส่วนบริเวณปลายเสาค้ำ (RP-3) จะกำหนดให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้ง ($U_1, U_2 = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จะทำการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบค่าแรงที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดสอบให้แรงแบบสถิต (Static) ในโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 เปรียบเทียบกับการทดสอบในแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ เมื่อแบบจำลองมีความถูกต้องจึงเริ่มทำการทดสอบแบบวัฏจักร (Cyclic Load)

การทดสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยจำลองการรับแรงแผ่นดินไหวซึ่งเป็นแรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) โดยการใส่แรงที่ปลายคาน ในลักษณะไป-กลับหลายรอบ โดยให้โปรแกรม ABAQUS แสดงค่าระยะการเคลื่อนตัว (Displacement) ในแนวดิ่งที่จุดปลายคาน ที่สัมพันธ์กับแรง ที่ตำแหน่งปลายคานที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ จะกำหนดระยะเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 2 เท่าของระยะเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมรับให้ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง [1] หรือที่ 5.0 ซม. และในทุกๆ ระยะการเคลื่อนตัวหนึ่งๆ จะทำซ้ำ 3 รอบ [8] ดังรูปที่ 7

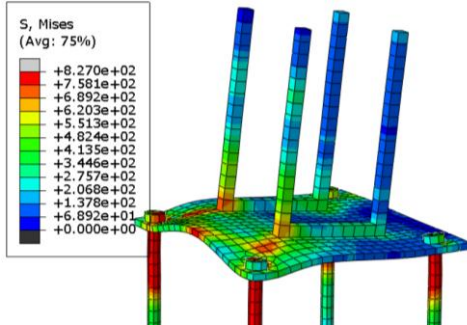


รูปที่ 7 การให้แรงในการทดสอบ

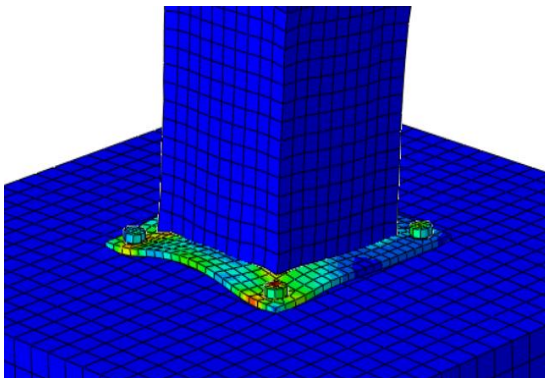
ผลทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างที่ J-BF01 หรือตัวอย่างแบบชุดสลักเกลียว (Bolt and Plate connection) พบว่า การวิบัติจะเกิดบริเวณแผ่นเหล็กและสลักเกลียว จะเห็นได้จากความเค้น (Von-Mises) ที่ตำแหน่งการเคลื่อนตัวสูงสุดในวัฏจักรหนึ่ง ชุดสลักเกลียวเกิดความเสียหายก่อนเนื่องจากแรงดึงและแรงอัด อีกทั้งแผ่นเหล็กเกิดการโก่งตัวเสียรูป แสดงในลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 8 และ 9 ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการเคลื่อนตัว (Hysteresis response) ดังรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังแรงเฉือนสูงสุดที่ตัวอย่างรับได้ในแรงกระทำที่คืบ (Push Up) เท่ากับในทิศลบ (Pull Down) ซึ่งมีค่าประมาณ 42.0 kN ในวัฏจักรที่ 13-15 ที่การเคลื่อนตัวของปลายเสาค้ำ

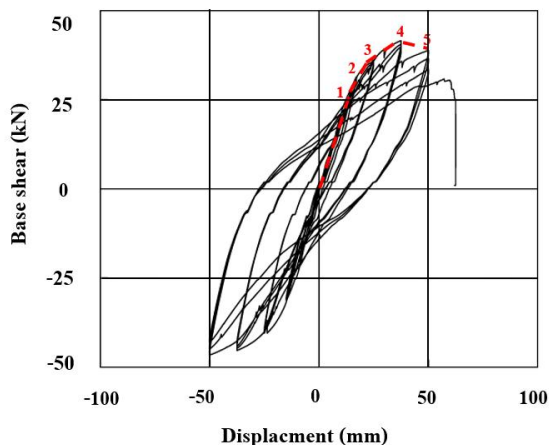
เท่ากับ 40 มม. ก่อนที่แรงจะเริ่มลดลงในวัฏจักรที่ 16 ซึ่งอาจอนุมานได้ว่า
ขึ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติในวัฏจักรนี้ เมื่อพิจารณาในช่วงวัฏจักรที่ 1 ถึง 6 จะ
เห็นได้ชัดว่าพฤติกรรมของรอยต่อเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งค่าแรงสูงสุด
ในช่วงนี้มีค่าประมาณ 30.0 kN เมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอม
ให้ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง [1] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 มม.
พบว่าตำแหน่งนี้ ค่าแรงเฉือนนั้นมีค่าประมาณ 35.0 kN สามารถคำนวณค่า
Factor of safety (Test force / Design force) ได้เท่ากับ 2.10



รูปที่ 8 von-mises stress บริเวณชุดสลักเกลียวและเหล็กดัดรูปตัวยู

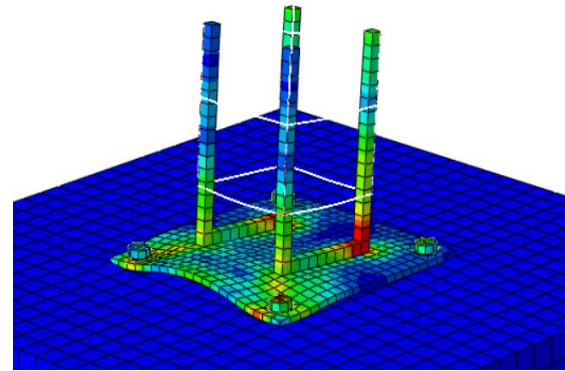


รูปที่ 9 von-mises stress บริเวณแผ่นเหล็ก



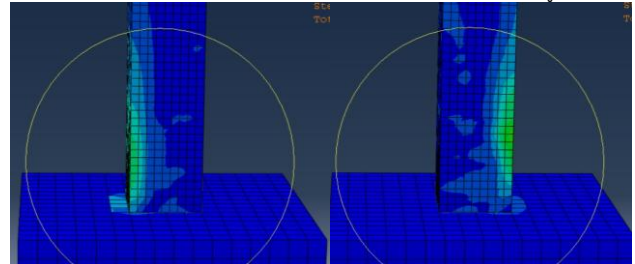
รูปที่ 10 แสดง hysteresis response ของตัวอย่างที่ J-BF01

อีกหนึ่งส่วนสำคัญในการรับแรงได้แก่ชิ้นส่วนเหล็กที่ดัดถูกเป็นรูปตัว
ด้านหนึ่งเป็นส่วนยึดกับแผ่นเหล็กด้วยรอยเชื่อม และอีกด้านจะถูกฝังไว้ใน
เนื้อคอนกรีตของเสา เพื่อเป็นส่วนยึดติดระหว่างเสาคอนกรีตและแผ่นเหล็ก
อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ถ่ายแรงจากเสมายังแผ่นเหล็ก จากผลการวิเคราะห์จะ
เห็นได้ว่า เกิดการเสียหายขึ้นบริเวณรอยดัด ดังรูปที่ 11 เนื่องจากเป็นจุดที่มี
การถ่ายเทแรงดัดจากเสามากที่สุด อีกทั้งยังพบว่าการวิบัตินี้ไม่เกิดบริเวณ
รอยเชื่อม



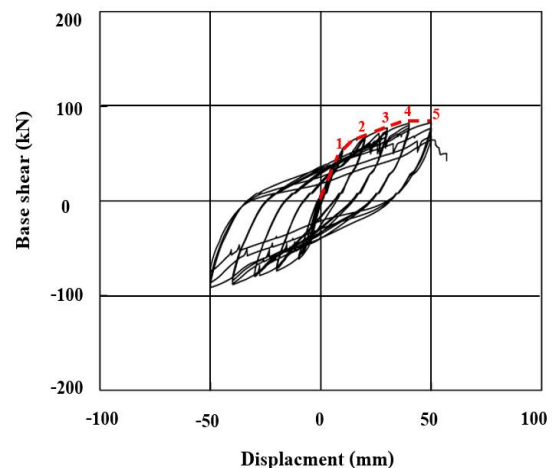
รูปที่ 11 von-mises stress บริเวณเหล็กดัดรูปตัวยู

จากการทดสอบตัวอย่างที่ J-BF02 หรือตัวอย่างแบบเบา พบว่า การ
วิบัติจะเกิดบริเวณ โคนเสาในลักษณะที่คอนกรีตจะเกิดความเสียหาย
เนื่องจากแรงเฉือนดังรูปที่ 12 และ 13 และเหล็กเสริมเกิดการคราก ซึ่งจาก
การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรง
เฉือนและการเคลื่อนตัว (Hysteresis response) ดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 และ 13 แสดง von-mises stress บริเวณโคนเสา

จะเห็นได้ว่าค่ากำลังแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างนี้ในแรงกระทำที่ศบวก
(Push up) และ ทิศลบ (Pull Down) มีค่าประมาณ 80.0 kN เมื่อพิจารณา
ในช่วงวัฏจักรที่ 1-3 จะเห็นได้ชัดว่าพฤติกรรมของรอยต่อเป็นแบบยืดหยุ่น
(Elastic) ซึ่งค่าแรงสูงสุดในช่วงนี้มีค่าประมาณ 50.0 kN จากนั้นเริ่ม
เปลี่ยนเป็นพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic) ในวัฏจักรที่ 4 เป็นต้นไปและ
แรงเฉือนเริ่มลดลงในวัฏจักรที่ 12-15 ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าขึ้นตัวอย่าง
เกิดการวิบัติ เมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐานกรม
โยธาธิการและผังเมือง [1] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 มม. พบว่าตำแหน่งนี้ ค่าแรง
เฉือนนั้นมีค่าประมาณ 72.0 kN คำนวณค่า Factor of safety (Test
force /Design force) ได้เท่ากับ 4.30



รูปที่ 14 แสดง hysteresis response ของตัวอย่างที่ J-BF02

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element นั้น มีข้อจำกัดที่มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากการกำหนดสมมติฐานต่างๆ ทั้ง การสมมติฐาน Boundary conditions เพื่อให้สะดวกขึ้นในการวิเคราะห์ (Simplified) แต่อาจไม่ตรงกับพฤติกรรมของการก่อสร้างจริง หรือ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่อาจจะคลาดเคลื่อน เช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบจริงมักจะมากกว่าค่าที่ออกแบบ (Mix Design) ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element ควรมีการทดสอบจริงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อความแม่นยำและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง

บทสรุป

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการจำลองแรงกระทำแบบสลับ (Cyclic load) ในตัวอย่างทั้งสองขึ้นพบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.) ลักษณะการวิบัติของทั้งสองตัวอย่างมีความแตกต่างกันในส่วนของส่วนที่ใช้ในการรับแรง กล่าวคือตัวอย่างข้อต่อแบบเป้าจะมีการวิบัติที่โคนเสา บริเวณเนื้อคอนกรีต โดยส่วนที่ทำการรับแรง จะเป็นบริเวณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เชื่อมระหว่างเสากับฐานราก ส่วนตัวอย่างข้อต่อแบบชุดสลักเกลียว จะเห็นได้ชัดว่ารอยวิบัติจะอยู่ที่บริเวณแผ่นเหล็ก สลักเกลียว และเหล็กดัดรูปตัวยู โดยจากการวิเคราะห์แผ่นเหล็กจะเกิดการวิบัติแบบโค้งงอ ดังนั้นในการออกแบบข้อต่อชนิดนี้จะต้องคำนึงถึง 3 ส่วนนี้เป็นหลัก

2.) เมื่อเปรียบเทียบกำลังในการรับแรงเฉือนของทั้งสองตัวอย่าง จะพบว่าตัวอย่างข้อต่อแบบหล่อในที่จะให้กำลังในการรับแรงแบบสลับที่มากกว่าตัวอย่างแบบชุดสลักเกลียวอีกทั้งข้อต่อแบบสลักเกลียวสามารถแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นได้ดีกว่าข้อต่อแบบเป้า พบว่าข้อต่อแบบชุดสลักเกลียว จะได้ค่า Factor of Safety เหมาะสมกว่าข้อต่อแบบเป้า เนื่องจาก ข้อต่อแบบชุดสลักเกลียวมีส่วนการรับแรงที่แยกส่วนกัน เช่น มีแผ่นเหล็กและสลักเกลียวเป็นส่วนประกอบในการรับแรงโดยตรง ทำให้สะดวกและมีแม่นยำในการออกแบบ ผลการวิเคราะห์ยังพบว่า ข้อต่อแบบเป้ามีการเคลื่อนตัว Drift Ratio ที่น้อยกว่า แต่ในในแง่ของการติดตั้งชุดข้อต่อแบบสลักเกลียวจะทำได้รวดเร็วและแม่นยำมากกว่า

3.) ในการพัฒนาข้อต่อแบบชุดสลักเกลียว เนื่องจากแผ่นเหล็กและสลักเกลียวเป็นส่วนที่รับแรงเป็นหลัก จึงสามารถออกแบบปรับขนาดของแผ่นเหล็กและขนาดของสลักเกลียวให้สอดคล้องกับขนาดของแรงได้ แม่นยำกว่าการออกแบบข้อต่อแบบเป้า ดังนั้น สำหรับอาคาร 1-3 ชั้น ที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยหรือพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว จึงควรเลือกใช้ข้อต่อแบบชุดสลักเกลียว ซึ่งการออกแบบขนาดของสลักเกลียวและความหนาแผ่นเหล็กจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะของอาคารและบริเวณพื้นที่ตั้งของอาคาร

กิตติกรรมประกาศ

วิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.วิจิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยมาโดยตลอด คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ บริษัท แลนด์ โธม (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท โนวา โมดูลา จำกัด ที่สนับสนุนการผลิตชิ้นส่วนตัวอย่างการทดสอบและคำแนะนำ แก่คณะผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการทดลอง ทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] มยผ. 1301/1302-61. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง. กระทรวงมหาดไทย. กรุงเทพมหานคร.
- [2] กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. ๒๕๖๔. (2564). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม ๑๓๘ ตอนที่ ๑๖ ก หน้า ๑๓-๑๘.
- [3] AISI 360-22. (2022). Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.
- [4] ACI 318-08. (2008). Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute. USA
- [5] กฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะ และ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. ๒๕๖๖. (2566). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม ๑๔๐ ตอนที่ ๕๔ ก หน้า ๔-๒๐.
- [6] L.H. Chen, J.D. Feng, Y.T. Xue, C.W. Liang. (2023), Seismic behavior of an innovative prefabricated steel-concrete composite beam-column joint, J. Build. Eng, 76, pp. 4-5
- [7] H. Hou, W. Wang, Y. Chen, (2023), An assembled beam-to-double skin composite wall joint with insert diaphragm: configuration, experiment, mechanical model and design method, J. Build. Eng. 74, pp.5-6
- [8] Deokhee Won, Jeonghwa Lee, Jihye Seo, Young-Jong Kang, Seungjun Kim, (2020), Hysteretic performance of column-footing joints with steel composite hollow RC columns under cyclic load, Journal of Building Engineering, 29, pp.5-6