

การประยุกต์ใช้ระบบฐานรากแบบแรงเสียดทานในการออกแบบที่อยู่อาศัยต้านแผ่นดินไหว Application of Friction Base Systems in Earthquake-Resistant Residential Design

สุพิษณีย์ ไส้สุวรรณชาติ¹, กฤตนันท์ อภิศักดิ์ศิริกุล² และ ทศพล ปิ่นแก้ว³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบ Isolator โดยอาศัยระบบ Friction หรือ Friction-Based isolator ที่ใช้ PTFE (Polytetrafluoroethylene) เป็นวัสดุหลักในการลดและสลายพลังงานจากแผ่นดินไหว ซึ่งจะช่วยลดแรงที่ถ่ายเข้าสู่โครงสร้างด้านบน เพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้อยู่อาศัย และเพิ่มความสามารถในการต้านแผ่นดินไหวของอาคารบ้านเรือนในประเทศไทย โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีการติดตั้ง Friction-Based isolator แทรกบริเวณเสาตอม่อและ pile cap และทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคารต่อแรงแผ่นดินไหวสมมติจำนวน 8 คู่คลื่น ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาผ่านโปรแกรม ETABS โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ติดตั้งระบบ อาคารที่ไม่ติดตั้งระบบ และแบบบ้านเสริมเหล็กต้านทานแผ่นดินไหวจากกรมโยธา จากผลการวิเคราะห์พบว่าระบบ Friction-Based Isolator ที่ออกแบบสามารถลดค่าการตอบสนองของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่น Base Shear, Story Shear, Overturning Moment และ Story Drifts นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนพบว่าระบบดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม โดยคิดเป็นประมาณ 0.66% ของมูลค่ารวมบ้านทั้งหลัง ทั้งนี้ในการติดตั้งระบบ Friction-Based isolator ยังคงอาจมีข้อจำกัดเมื่อเทียบกับแบบบ้านเสริมเหล็กต้านทานแผ่นดินไหวจากกรมโยธา เนื่องจากต้องมีการบำรุงรักษาในระยะยาว จึงอาจเหมาะนำไปประยุกต์ใช้ในงานปรับปรุงอาคารเก่าซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในเขตเมือง โดยไม่จำเป็นต้องรื้อถอนหรือดัดแปลงโครงสร้างเดิมอย่างซับซ้อน จึงสรุปได้ว่า ระบบ Friction-Based Isolator ที่ออกแบบมีความเป็นไปได้ในเชิงทฤษฎี และมีแนวโน้มในการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานจริง

คำสำคัญ: Friction-Based Isolator, PTFE, การออกแบบโครงสร้างต้านแผ่นดินไหว, พลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

Abstract

This research purposes the design of an isolator system based on a friction mechanism —referred to as a Friction-Based Isolator—using PTFE (Polytetrafluoroethylene) as the primary material for dissipating seismic energy. The system aims to reduce the transmission of earthquake forces to the superstructure, thereby enhancing the safety of occupants and improving the seismic resistance of residential buildings in Thailand. The study focuses on evaluating the structural response of a two-story reinforced concrete house located in Bangkok, equipped with friction isolator installed between the pile caps and column bases. The building's response to ground motions was simulated using eight earthquake records through Nonlinear Time History Analysis conducted in ETABS. Three cases were compared: (1) a structure equipped with the isolator system, (2) a fixed-base structure without the system, and (3) a seismically strengthened design recommended by the Department of Public Works and Town & Country Planning. The analysis results show that the proposed Friction-Based Isolator significantly reduces structural responses including base shear, story shear, overturning moment, and story drifts. From a cost perspective, the isolator system incurs only approximately 0.66% of the total building cost, making it a cost-effective solution. While long-term maintenance may be a limitation compared to a reinforced design based on DPT, the system offers a practical solution for retrofitting existing urban buildings without requiring extensive structural modifications. Therefore, it is concluded that the proposed Friction-Based Isolator is theoretically feasible and holds strong potential for further development and practical implementation.

Keywords: Seismic design, Friction-Based Isolator, PTFE, Nonlinear Time History Analysis

1 บทนำ

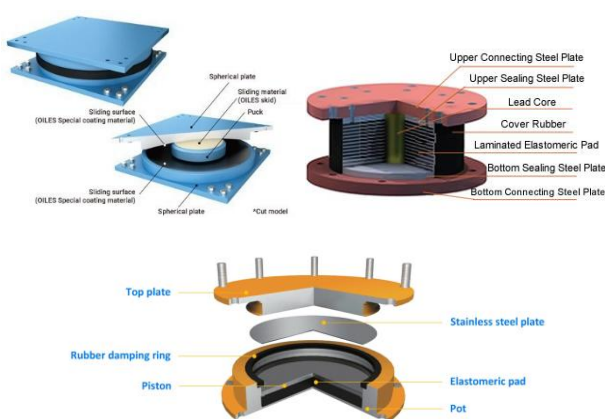
แผ่นดินไหว เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกตามรอยเลื่อน (Faults) หรือการระเบิดของภูเขาไฟ ผลกระทบจากแผ่นดินไหว เป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตทรัพย์สิน เศรษฐกิจ และสร้างความเสียหายทางจิตใจ

แม้ว่าแผ่นดินไหวในประเทศไทยจะไม่รุนแรงเทียบเท่ากับประเทศที่ตั้งอยู่ในแนวรอยเลื่อน แต่ประเทศไทยก็ยังสามารถพบรอยเลื่อนที่มีพลัง เช่น รอยเลื่อนแม่จัน และ รอยเลื่อนแม่ปัวที่มีแนวโน้มในการขยายตัวมากขึ้น นอกจากนี้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เชียงราย ขนาด 6.3 ริกเตอร์ เป็นเครื่องยืนยันว่าแผ่นดินไหวในประเทศไทยสามารถสร้างความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้าง เช่น อาคารเรียน วัด และบ้านเรือน

อย่างไรก็ตามในการออกแบบอาคารที่พักอาศัย ไม่ได้บังคับให้ต้องออกแบบมาเพื่อรองรับแผ่นดินไหวเหมือนกับอาคารสาธารณะ โครงสร้างบ้านพักอาศัยยังคงใช้ ฐานรากแบบเดิม (Fixed Base) ที่ไม่สามารถลดผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนได้ดีพอ นอกจากนี้การใช้ระบบ Base Isolation แบบ Bearing หรือ Damping Devices อื่นๆ ยังมีต้นทุนสูงและซับซ้อน

ลักษณะบ้านเรือนในประเทศไทยส่วนมาก นิยมสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กและกำแพงก่ออิฐ โดยกำแพงก่ออิฐมีคุณสมบัติในการรับแรงดัด และแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้มีความเปราะบางในการรับแรงแผ่นดินไหว นำไปสู่การแตกร้าว หรือพังทลาย โดยเฉพาะบ้านเรือนที่ไม่ได้มีการเสริมความแข็งแรงเพื่อรับแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในภาคเหนือและตะวันตก เนื่องจากข้อจำกัดทางเศรษฐกิจ และความรู้ทางวิศวกรรมของผู้ก่อสร้าง [1-2]

ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาแนวทางการนำระบบ Friction-Based isolator ซึ่งอาศัยการสลายตัวด้วยการเคลื่อนที่แบบ Sliding ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมในการใช้งานในสะพานซึ่งปัจจุบัน และ นำวัสดุแรงเสียดทานต่ำ PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในระยะยาวโดยไม่เกิดการสึกหรอและมีต้นทุนที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการติดตั้งกับระบบอื่นๆ ที่ใกล้เคียง เช่น Laminated Rubber Bearings หรือ Pendulum Bearings ดังแสดงในรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 ลักษณะของ อุปกรณ์ Base Isolator

โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ เพื่อออกแบบระบบฐานรากที่สามารถลดการส่งผ่านแรงจากแผ่นดินไหวไปยังโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์และประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเมื่อใช้ระบบ Sliding Friction Basement ภายใต้แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว นอกจากนี้ยังมีเป้าหมายในการเสนอแนวทางการออกแบบและติดตั้งระบบดังกล่าวให้มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมสำหรับใช้งานในอาคารขนาดเล็กถึงขนาดกลาง โดยขอบเขตของการศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้วัสดุ PTFE เป็นองค์ประกอบหลักของระบบ Sliding Friction Basement เนื่องจากมีคุณสมบัติแรงเสียดทานต่ำ ความคงทนสูง และต้นทุนที่เหมาะสม โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้น ซึ่งเป็ณลักษณะทั่วไปของบ้านพักอาศัยในประเทศไทยที่มีผนังก่ออิฐ และมีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น ETABS ในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยอ้างอิงข้อมูลมาตรฐานด้านแรงแผ่นดินไหวของประเทศไทย

2 การทบทวนวรรณกรรม

ระบบ Base Isolation แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ Elastomeric-Based Systems ซึ่งประกอบด้วยชั้นยางและแผ่นเหล็กที่ให้ความแข็งแรงในแนวตั้งและยืดหยุ่นในแนวนอน และ Sliding/Friction-Based Systems ที่ลดแรงสั่นสะเทือนโดยอนุญาตให้โครงสร้างเลื่อนไถลผ่านแรงเสียดทาน ช่วยสลายพลังงานและควบคุมการเร่งที่ส่งเข้าสู่อาคาร โดยเฉพาะอาคารก่ออิฐขนาดเล็กระบบนี้มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ [3]

โครงสร้างที่ใช้ฐานแบบเลื่อนไถลเสียน้อยกว่าโครงสร้างที่มีฐานยึดติดถาวร [4] ตัวอย่างเช่น ในปี 1909 Dr. Calantarients ได้เสนอให้ใช้ Talc ระหว่างฐานรากและโครงสร้างอาคารเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน และจาก เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Tangshan ในปี 1976 ทำให้นักวิจัยชาวจีนพบว่าอาคารที่มีฐานรากเลื่อนไถลได้รับความเสียหายน้อยกว่าอาคารที่มีฐานรากยึดติดแน่น จึงได้มีการพัฒนาระบบ Friction-based Base Isolation โดยใช้เม็ดทรายกลมคั่นกลางระหว่างแผ่นหินแข็งสองแผ่น [5] ซึ่งสอดคล้องกับการค้นพบว่า ฐานรากแบบเลื่อนไถล ช่วยลดการตอบสนองของโครงสร้างหลักต่อแรงสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6] นอกจากนี้ระบบนี้ช่วยลด torsion ที่ฐาน เพิ่มความสามารถในการสลายพลังงานในช่วงความถี่กว้าง และควบคุมการถ่ายเทความเร่งสูงสุดเข้าสู่โครงสร้าง [7] โดย Jangid (2000) วิเคราะห์ผลของค่า Friction Coefficient ที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimum) ซึ่งช่วยลดการเร่งของโครงสร้างได้มากที่สุด [8]

วัสดุที่เหมาะสมสำหรับ Friction-Based System ได้แก่ PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งมีความเฉื่อยทางเคมี ทนทาน และมีค่า Friction Coefficient ต่ำ โดยแนะนำค่า Friction Coefficient ของ PTFE-on-PTFE อยู่ที่ ~0.04 และ PTFE-on-Stainless Steel อยู่ในช่วง 0.05–0.2 ค่าเหล่านี้ขึ้นกับลักษณะพื้นผิว แรงกดสัมผัส ความเร็วในการเลื่อน และระยะการเลื่อน ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสลายแรงสั่นสะเทือน [9]

ในด้านพฤติกรรมการสั่นสะเทือน Marui & Kato (1984) อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของระบบ Friction-Based ว่าอาจเกิด

เป็น Continuous Motion ซึ่งให้ผลดีในการสลายพลังงานแบบสม่ำเสมอ หรือเกิดการหยุดชะงักหลายครั้ง (multi-stop) ซึ่งเสี่ยงต่อความเสียหายมากกว่า [10] ขณะที่ Dai et al. (2022) พบว่าแรงเสียดทานสามารถลด Amplitude ของแรงสั่นสะเทือนได้ทั้งในช่วงความถี่ต่ำและสูง โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูง พลังงานจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนผ่านแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11]

3 เรียบวิธีวิจัย

3.1 ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และเลือกแบบบ้านต้นแบบ

ทำการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารงานวิจัย และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทาง และกำหนดกรอบแนวคิดในการดำเนิน งานวิจัย จากนั้นจึงทำการเลือกประเภทของแผ่น PTFE ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยต้องสามารถที่จะรับน้ำหนักในแนวตั้ง ต่อเนื่องจากอาคาร ทนทานต่อการรับแรงเฉือนซ้ำไปมา และต้องมีค่า friction coefficient ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการไถลตัวได้ง่าย ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกวัสดุ Graphite-Filled PTFE (15%) มาใช้เป็นวัสดุหลักเพื่อนำค่า friction coefficient ไปจำลองต่อในโมเดล โดยที่คำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลเมื่อนำไปใช้งานจริง เมื่อเทียบกับแผ่น PTFE บริสุทธิ์แล้ว Graphite-Filled PTFE (15%) มี friction coefficient ต่ำกว่า และมีความทนทานต่อการรับโหลดและไม่เสีรูปร่างง่าย มากกว่า

จากนั้นทำการเลือกบ้านต้นแบบที่จะนำมาใช้ในการจำลองเป็นบ้านต้นแบบ โดยในงานวิจัยนี้เลือกจากแบบบ้านมาตรฐานจากกรมโยธาธิการและผังเมือง ดังนี้ 1) แบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัยฯ และ 2) แบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัยฯ แบบด้านแผ่นดินไหว โดยเป็นบ้านโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 2 ชั้น

3.2 การออกแบบระบบ Friction-based isolator

กำหนดขนาดและรูปแบบระบบ Friction-based isolator โดยกำหนดความกว้าง, ยาว, หนาของแผ่น PTFE และ ชนิดของ PTFE ซึ่งพิจารณาจากคุณสมบัติของประเภทต่างๆร่วมกับลักษณะการรับแรงและสภาพแวดล้อมในการใช้งานของแผ่น PTFE เพื่อนำคุณสมบัติของวัสดุไปใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบในซอฟต์แวร์ ETABS ในการจำลองโมเดล Friction-based isolator ร่วมกับโมเดลบ้านต้นแบบที่เลือกมา โดยแรงเสียดทานที่สูงสุดที่จะต้านทานการเคลื่อนตัวจะสามารถประเมินได้จากสมการที่ (1)

$$F_f = \mu \cdot N \quad (1)$$

โดย μ = คือค่าแรงเสียดทานของ PTFE

N = คือแรงปกติที่เกิดจากน้ำหนักของอาคาร

ซึ่งจะส่งผลต่อการประเมินพฤติกรรมของ Friction-based isolator ในการแบ่งช่วงพฤติกรรมที่ไถลติดกันไปและเคลื่อนตัวออกจากกัน

3.3 การสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

ทำการจำลองแบบอาคารตามแบบบ้านที่เลือกในหัวข้อที่ 3.1 ลงในโปรแกรม ETABS โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุ และขนาดหน้าตัดของโครงสร้างรับแรงเป็นไปตามแบบบ้านมาตรฐานจากกรมโยธาธิการและผังเมืองที่เลือกไว้ โดยที่คุณสมบัติของหน้าตัดของโครงสร้าง

จะต้องคำนึงถึงผลของการแตกร้าวของคอนกรีต (Cracked Section) ที่อาจเกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในองค์ประกอบรับแรงด้านข้าง เช่น คาน เสา และผนังเฉือน เนื่องจากคอนกรีตจะสูญเสียความแข็ง (stiffness) บางส่วนหลังจากแตกร้าว จึงต้องกำหนด ค่าลดทอนโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia Reduction Factor) สำหรับหน้าตัดขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้:

คาน จะใช้ค่า $I_{cracked}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35 I_g

หรือ 35% ของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเดิม

เสา จะใช้ค่า $I_{cracked}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.70 I_g

หรือ 70% ของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเดิม

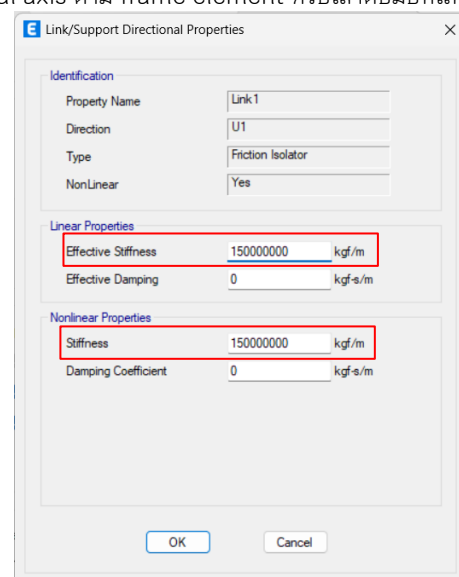
พื้น จะใช้ค่า $I_{cracked}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.25 I_g

หรือ 25% ของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเดิม

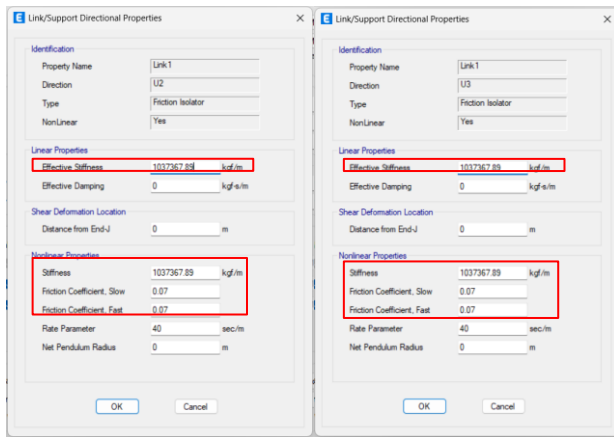
ในส่วนของการจำลองระบบ Friction-based isolator จะทำโดยการแทรก Link element โดยให้ Link type เป็น Friction isolator ที่อนุญาตให้มีการเคลื่อนที่ในแนวราบ โดยตั้งค่าให้ Effective stiffness ทั้ง Linear และ Nonlinear Properties ของ U1(แนวตั้ง) ไว้ที่ 150,000,000 kgf/m ดังแสดงในรูปที่ 3-1 เพื่อให้สามารถถ่ายแรงในแนวตั้งจากโครงสร้างสู่ฐานรากได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง สำหรับการตั้งค่าคุณสมบัติในแนวราบ U2(แกนX) และ U3(แกนY) ตั้งค่าให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็น 0.07 ตามชนิดวัสดุ PTFE ที่เลือกใช้ และจะประมาณค่า Effective stiffness จากสมการที่(2) โดยภาพการตั้งค่าดังแสดงในรูปที่ 3-2

$$Effective\ Stiffness = \frac{12EI}{L^3} \quad (2)$$

เนื่องจากการประเมินให้ปลายเสามีการยึดรั้งแบบ fixed เพราะค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าเสาเกิน 2 เท่า จากนั้นจะทำการแทรก Link Element บริเวณโคนเสาตอม่อ (ระหว่างเสาตอม่อ และ pile cap) โดยมีระยะแทรกกรวม 4 มม. ซึ่งมาจากการออกแบบแผ่นประกบคู่ PTFE ที่มีความหนาแผ่นละ 2 มม. และตั้ง local axis ตาม frame element หรือเสาตอม่อที่แทรก



รูปที่ 3-1 การตั้งค่า Link Properties ในทิศทาง U1



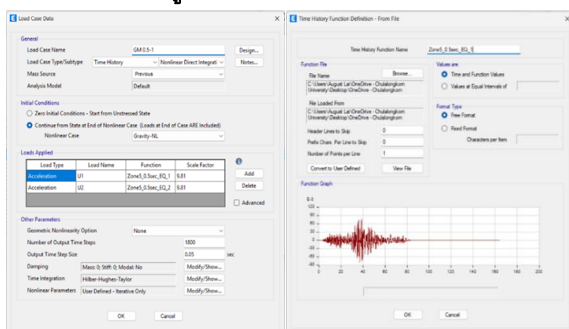
รูปที่ 3-2 การตั้งค่า Link Properties ในทิศทาง U2,U3

น้ำหนักและแรงที่กระทำ กำหนดตามกฎ กระแสทงปี 2566 และพิจารณาแรงแผ่นดินไหวตาม มาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 โดยการตั้งค่าโหลดบรรทุกในแนวดิ่ง(Gravity Load) จะต้องวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การสั่นไหวของพื้นดิน โดยมีน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดและน้ำหนักบรรทุกจรไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของค่าที่ใช้ออกแบบกระทำพร้อมกัน น้ำหนักบรรทุกทุกแนวดิ่งนี้ไม่สามารถแยกคำนวณและนำไปรวมในภายหลังได้เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้าง โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะเรียก Gravity Load ดังกล่าวภายใต้ชื่อ Gravity-NL ซึ่งคือ 1.0(DL+SDL)+0.25LL และจะกำหนด Mass source ให้มีความสอดคล้องกับ Gravity load ที่วิเคราะห์พฤติกรรม [12]

3.4 การจำลองแผ่นดินไหว

เลือกชุดข้อมูลแผ่นดินไหว โดยเลือกโซนจากตำแหน่งที่ใช้เป็นขอบเขตวิจัย ซึ่งคือ กรุงเทพมหานคร จึงถือเป็น Zone 5 ตาม มยผ. 1301/1302-61 จากนั้นนำแบบจำลองโครงสร้างมาวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติ ได้ผลอยู่ที่ 0.882 วินาที และ 0.803 วินาที แล้วจึงทำการเลือกแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรง MCE (Maximum Considered Earthquake) ที่มีค่าคู่คลื่นใกล้เคียง ได้เป็น คาบ 0.5 วินาที และ 1.0 วินาที อย่างละ 4 คู่คลื่น แล้วทำการป้อนข้อมูลคู่คลื่นลงใน ETABS แบบ Nonlinear Direct Integration ซึ่งรองรับการวิเคราะห์แบบประเภท Time History Analysis และให้ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวต่อจาก ผลที่เกิดขึ้นภายในอาคารจากโหลด Gravity-NL

ในงานวิจัยฉบับนี้จะกำหนดให้ค่า damping ของทุกอาคารที่นำมาพิจารณาให้เป็น 0 เพื่อความ conservative ในการวิเคราะห์ผล เนื่องจากไม่มีการลดทอนแรงสั่นสะเทือนของตัวอาคาร โดยตัวอย่างการตั้งค่าแผ่นดินไหว และกำหนดเงื่อนไขของ Load case ที่สร้าง จะเป็นไปดัง รูปที่ 3-3

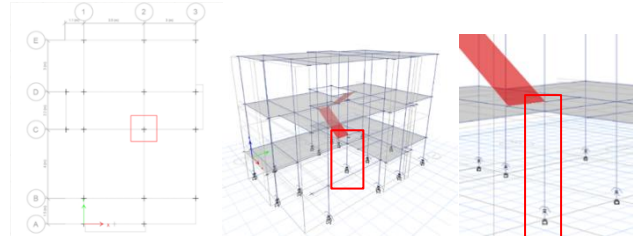


รูปที่ 3-3 ตัวอย่างการตั้งค่าและกำหนดเงื่อนไขแผ่นดินไหว

3.5 การ Run analysis และประเมินผล

ในการพิจารณาการไหลของ Friction-based isolator ภายใต้แผ่นดินไหว จะเลือกเสาต้นกลางอาคารเป็นตัวแทนในการใช้พิจารณา เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากแรงกระทำในทั้งสองทิศทาง (X และ Y) มากกว่าตำแหน่งริมอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3-4 หากเกิดการไหลก็จะสามารถอนุมานได้ว่าเสาต้นรอบๆมีพฤติกรรมเดียวกัน จึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวแทนพฤติกรรมการไหลของ Friction-based isolator โดยประกอบด้วยเกณฑ์หลัก 3 ประการดังนี้

1. การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างแผ่น PTFE บนล่าง หากมีค่ามากกว่าศูนย์อย่างมีนัยสำคัญ จึงจะแสดงถึงการเคลื่อนตัวระหว่างแผ่น PTFE ของระบบ Friction-based isolator
2. ค่าสัดส่วนแรงเฉือนต่อแรงในแนวแกน ณ เวลาใดๆ ในแต่ละทิศทาง ต้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตย์ของ Link Element จึงจะถือว่าระบบเกิดการไหล
3. Hysteresis curve พล็อตเทียบระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของ joint ในแต่ละทิศทาง หากเส้นกราฟมีลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นวงปิด หรือมีแนวราบในบางช่วงจะชี้ถึงพฤติกรรมการไหลหรือเคลื่อนตัวของระบบ



รูปที่ 3-4 ภาพประกอบของเสา C2 ในมุมมอง 2 มิติ และ 3 มิติ

4 ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนตัว ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว MCE ภายใต้แผ่นดินไหวระดับความรุนแรง MCE 8 คู่คลื่น ที่กล่าวไปในหัวข้อ 3.4 พบว่ามีการเคลื่อนตัวทั้งหมด โดยตัวอย่างผลที่แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวจะเป็นไปดังตารางที่ 4-1

ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างแผ่น PTFE บน-ล่าง	หมายเหตุ Relative Story displacement > 0 ดังนั้น มีการเคลื่อนตัว
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนเทียบเคียง ณ เวลาใดๆ ในแนว X และ Y	V/P > μ_s และ กราฟ Hysteresis ลักษณะเป็นวงปิด หรือมีแนวราบในบางช่วง ดังนั้น มีการเคลื่อนตัว
Hysteresis ในแนว X และ Y	

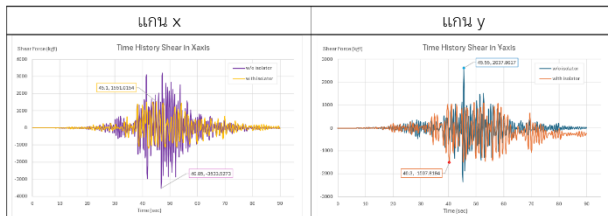
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบการเคลื่อนตัว Friction-based isolator ภายใต้คลื่น GM 1.0-5

4.2 ผลตอบสนองอาคารในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้ง

Friction-based isolator

4.2.1 Base shear force

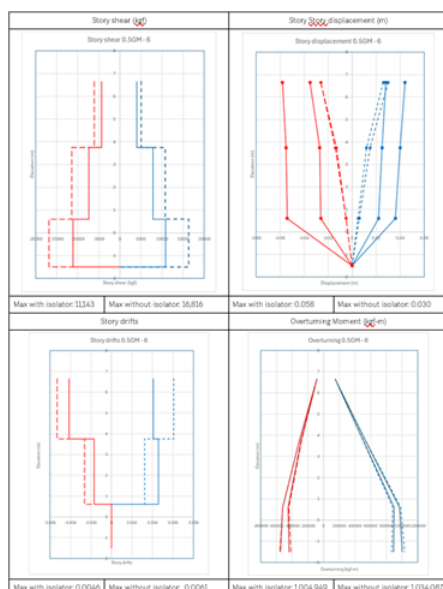
เกิดจากการพล็อตเปรียบเทียบแรงเฉือนที่กระทำอาคารบริเวณตำแหน่งเสา C-2 ในแต่ละช่วงเวลา ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง Friction-based isolator โดยมีจุดประสงค์เพื่อ ดูผลแนวโน้มในการลดแรงสั่นสะเทือน และดูลักษณะการกระจายแรงเฉือนของแผ่นดินไหวและเปรียบเทียบ peak shear ที่เกิดขึ้น และช่วยยืนยันพฤติกรรมการไหลตัว โดยแนวโน้มของผลทดสอบโดยภาพรวมแรงเฉือนจะมีค่า peak ลดลงและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในกรณีติดตั้ง Friction-based isolator ดังตารางที่ 4-2



ตารางที่ 4-2 ผลการเปรียบเทียบ Base shear force
คลื่นแผ่นดินไหว GM 1.0-5

4.2.2 Story shear, Drifts, Displacement และ Overturning moment

เป็นการตรวจสอบผลตอบสนองของอาคารที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการสลายพลังงานแผ่นดินไหวและลดแรงที่ถ่ายเข้าสู่โครงสร้าง ของการติดตั้ง Friction-based isolator เมื่อเทียบกับ อาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง โดยในตัวอย่างดังตารางที่ 4-3 จะเป็นการแสดงตัวอย่างผลตอบสนองของคลื่น GM 1.0-5 ซึ่งเป็นคลื่นที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อ เนื่องจากพิจารณาความรุนแรงของผลตอบสนองในหมวด Story drifts เป็นหลัก เนื่องจาก โครงการวิจัยมุ่งเน้นให้อาคารสามารถเข้าอยู่อาศัยได้ทันทีหลังเกิดแผ่นดินไหว โดยไม่ปรากฏความเสียหายต่อโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมภายใน เช่น ผนังและฝ้าเพดาน ซึ่งไม่ได้รับแรงโดยตรง



ตารางที่ 4-3 ผลการตอบสนองของอาคาร ภายใต้คลื่น GM 1.0-5

ซึ่งในการเปรียบเทียบค่า Story drifts มาตรฐาน มยผ. 1301/1302 ได้มีการกำหนดขอบเขตการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ยอมให้ได้ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกประเภทความสำคัญของอาคารประเภทที่ 4 (ความสำคัญสูงสุด) ซึ่งมีการกำหนดค่าที่ยอมให้ได้โดยคำนึงถึงความปลอดภัยสูงสุด กล่าวคือ 0.010hsx [12] ดังนั้นสำหรับอาคารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีค่าที่ยอมให้ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ประเภทความสำคัญ		IV
Floor	hsx	allowable
2-หลังคา	2.9	0.02900
1-2	3.15	0.03150

ตารางที่ 4-4 ค่า Story drifts ที่ยอมให้ได้

4.2.3 สรุปผลค่าสูงสุดจากผลตอบสนองของอาคารและแรงเฉือนที่ฐานของเสาต้นกลาง C2

ผลการตอบสนองของอาคารที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ Friction-based isolator ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว 8 คู่คลื่นจะสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4-5 โดยใช้การเปรียบเทียบกันด้วยวิธีค่าเฉลี่ยจากผลตอบสนองของโครงสร้างตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 และผลเปรียบเทียบค่า Story drift กับค่าที่ยอมให้ได้ จะแสดงในตารางที่ 4-6

Wave No.	Type	Story Displacement (mm)	Story Drifts	Story Shear (kgf)	Overturning Moment (kgf-m)	Base shear (kgf)
GM 0.5 second -1	Fixed isolator	0.077	0.0127	34772	1123012	2741
GM 0.5 second -2	Fixed isolator	0.098	0.0072	11317	1016586	1993
GM 0.5 second -3	Fixed isolator	0.034	0.0069	19432	1048152	1462
GM 0.5 second -4	Fixed isolator	0.071	0.0068	11225	1007489	1539
GM 0.5 second -5	Fixed isolator	0.104	0.0163	27813	1171148	3071
GM 0.5 second -6	Fixed isolator	0.05	0.0048	11254	1004359	1536
GM 0.5 second -7	Fixed isolator	0.08	0.0147	32569	1134880	2499
GM 0.5 second -8	Fixed isolator	0.074	0.0064	11232	1003036	1546
GM 1.0 second -1	Fixed isolator	0.083	0.0185	41166	1184564	2434
GM 1.0 second -2	Fixed isolator	0.16	0.006	11314	1007019	1531
GM 1.0 second -3	Fixed isolator	0.03	0.0061	16816	1034087	1426
GM 1.0 second -4	Fixed isolator	0.058	0.0046	11143	1004949	1539
GM 1.0 second -5	Fixed isolator	0.069	0.0117	30174	1105331	2362
GM 1.0 second -6	Fixed isolator	0.066	0.0058	11283	1014799	1543
GM 1.0 second -7	Fixed isolator	0.066	0.0141	25176	1086136	2142
GM 1.0 second -8	Fixed isolator	0.067	0.0061	11300	1014540	1591
Average	Fixed isolator	0.07	0.0126	29643	1110901	2417
	Isolator	0.063	0.0063	11260	1009347	1583
		Decreased by	10.25%	62.21%	9.44%	33.34%

ตารางที่ 4-5 ตารางสรุปผลตอบสนองของอาคาร

Wave No.	Floor	Max story drifts	Check
GM 0.5 second -1	ชั้น 1-2	0.0072	Pass
GM 0.5 second -2	ชั้น 1-2	0.0068	Pass
GM 0.5 second -3	ชั้น 1-2	0.0048	Pass
GM 0.5 second -4	ชั้น 1-2	0.0064	Pass
GM 0.5 second -5	ชั้น 1-2	0.0066	Pass
GM 1.0 second -1	ชั้น 1-2	0.0046	Pass
GM 1.0 second -2	ชั้น 1-2	0.0058	Pass
GM 1.0 second -3	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 1.0 second -4	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 1.0 second -5	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 1.0 second -6	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 1.0 second -7	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 1.0 second -8	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
Avg		0.0061	Pass

Wave No.	Floor	Max story drifts	Check
GM 0.5 second -1	ชั้น 1-2	0.0127	Pass
GM 0.5 second -2	ชั้น 1-2	0.0069	Pass
GM 0.5 second -3	ชั้น 1-2	0.0163	Pass
GM 0.5 second -4	ชั้น 1-2	0.0147	Pass
GM 0.5 second -5	ชั้น 1-2	0.0185	Pass
GM 0.5 second -6	ชั้น 1-2	0.0061	Pass
GM 0.5 second -7	ชั้น 1-2	0.0117	Pass
GM 0.5 second -8	ชั้น 1-2	0.0141	Pass
Avg		0.0126	Pass

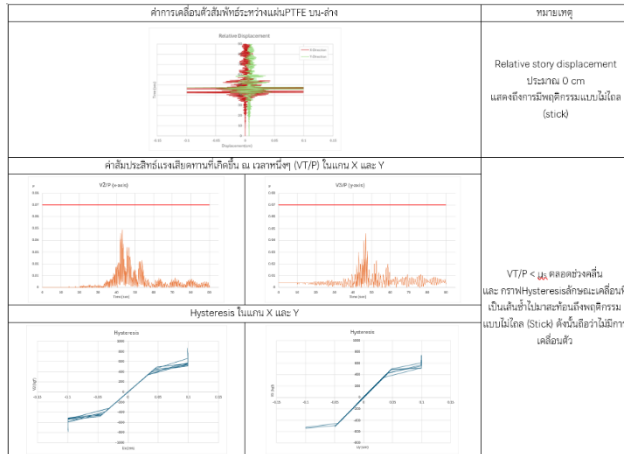
ตารางที่ 4-6 ตารางสรุปผลการเปรียบเทียบค่า Story drifts กับค่าที่ยอมให้ได้

4.3 การวิเคราะห์หาค่ากีดของระบบ Friction-based isolator

4.3.1 ผลตอบสนองจากการ scale down แรงแผ่นดินไหว และการประเมิน interaction ratio

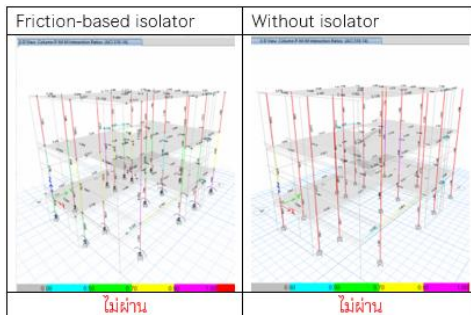
ระดับ MCE (Maximum Considered Earthquake) ที่มีคาบการเกิดเฉลี่ย 2,475 ปี ให้เหลือในระดับ DBE (Design Basis Earthquake) ซึ่งมีคาบการเกิดเฉลี่ยประมาณ 475 – 1,000 ปี และลดระดับความรุนแรงลงต่อด้วยการคูณ factor 0.5, 0.2 และ 0.15 โดยจากผลการทดสอบพบว่า Friction-based isolator

แสดงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวแบบติดกัน ที่ระดับความรุนแรง 0.2DBE และให้ผลแสดงดังตารางที่ 4-7



ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวของFriction-based isolator ภายใต้คลื่น 0.13GM 10-5 (0.2DBE)

เมื่อทำการตรวจสอบ Interaction ratio พบว่าโครงอาคารเดิมที่นำมาติดตั้ง Friction-based isolator ไม่สามารถรับแผ่นดินไหวได้ตั้งแต่ระดับ DBE ลงไป ดังแสดงในตารางที่ 4-8

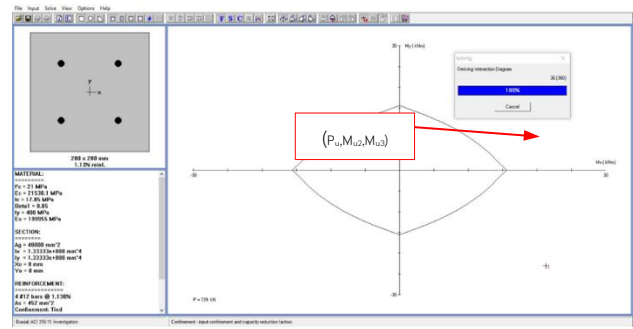


ตารางที่ 4-8 Interaction ratio ภายใต้คลื่น 0.67GM 10-5 (DBE)

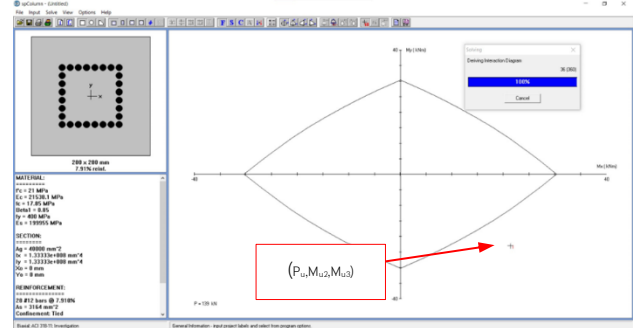
4.4 การปรับปรุงโครงสร้างเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวร่วมกับการใช้ Friction-based isolator

4.3.2 การปรับขนาดเสาอาคารที่ติดตั้ง Friction-based isolator และการประเมิน interaction ratio

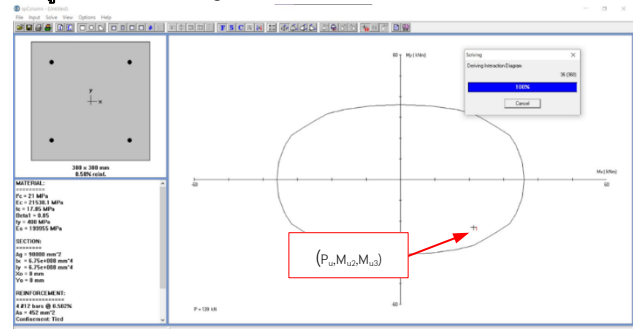
ในการประเมินแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างหลังการติดตั้งระบบ Friction-based isolator ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างการขยายหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับการเพิ่มปริมาณเหล็กภายในเสา โดยพิจารณาเลือกเสาตอม่อ ขนาดหน้าตัด 0.2x0.2 ม. ที่อยู่ในช่วงกลางอาคาร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่า Interaction ratio เกินกว่า 1.0 เป็นตัวแทน เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มจะรับแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ดัดสูงสุด โดยนำค่าแรงตามแนวแกน และโมเมนต์ดัดทั้งสองแนวแกน ไปประเมินการปรับแก้หน้าตัดด้วยโปรแกรม SpColumn ดังแสดงในรูปที่ 4-1 รูปที่ 4-2 และ รูปที่ 4-3



รูปที่ 4-1 PMM diagramของเสาก่อนการปรับปรุงขนาดหน้าตัด



รูปที่ 4-2 PMM diagramของเสา หลังเพิ่มเหล็กเสริมภายในหน้าตัด

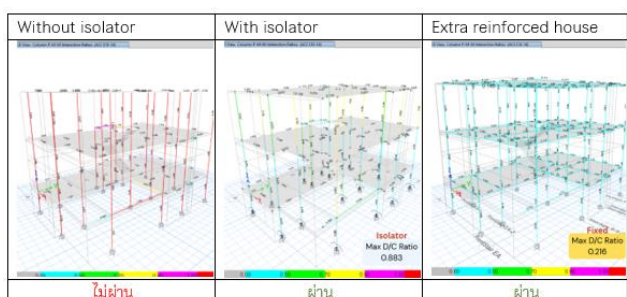


รูปที่ 4-3 PMM diagramของเสา หลังทดลองขยายหน้าตัดคอนกรีต

จากผลการวิเคราะห์พบว่า แม้จะเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจนเกือบถึงขีดจำกัดตาม ACI 318 แต่หน้าตัดเดิมยังไม่สามารถต้านทานโมเมนต์ได้เพียงพอ จึงเลือกขยายหน้าตัดคอนกรีตและ ปรับให้ปริมาณเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของพื้นที่หน้าตัด เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดและป้องกันการวิบัติแบบแรงอัด

4.3.3 ผลตอบสนองจากการ scale up แรงแผ่นดินไหว และการประเมิน interaction ratio

เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมหลังปรับแก้โครงสร้างเพื่อประเมินขอบเขตที่ Friction-based isolator สามารถรับไหวเมื่อแผ่นดินไหวมีความรุนแรงในระดับ MCE และในระดับ 1.5MCE โดยผลทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-9



ตารางที่ 4-9 Interaction ratio ภายใต้คลื่น 1.5GM 10-5 (1.5MCE)

โดยผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอาคารที่มีการปรับแก้ขนาดหน้าตัดเสาและมีการติดตั้ง Friction-based isolator จะสามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ถึงระดับ 1.5MCE และแม้ว่าแผ่นดินไหวจะมีความรุนแรงต่ำที่ระดับ 0.2DBE ก็ยังสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้และมี Interaction ratio น้อยกว่า 1.00

5 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาและประเมินระบบฐานรากแบบ Friction-based isolator โดยใช้วัสดุหลักคือ Graphite-Filled PTFE (15%) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ($\mu = 0.07$) ต้นทุนไม่สูง ทนต่อการรับแรงเฉือนซ้ำๆ ติดตั้งและบำรุงรักษาได้ง่าย ซึ่งระบบนี้ได้รับการออกแบบให้ใช้ แผ่น PTFE ความหนาแผ่นละ 2 มม. จำนวน 2 แผ่นประกบกัน แทรกบริเวณโคนเสาตอม่อ โดยระบบสามารถสลายพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวผ่านกลไกแรงเสียดทานที่เกิดจากการเคลื่อนของแผ่น PTFE และมีเป้าหมายเพื่อลดแรงที่ส่งผ่านเข้าสู่โครงสร้างด้านบน โดยมุ่งเน้นให้เพิ่มสมรรถนะในการรับแผ่นดินไหวของบ้านพักอาศัย ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น ในระดับที่ผู้อาศัยสามารถเข้าอยู่ได้ทันที และยังคงรู้สึกปลอดภัย หลังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งการประเมินผลทำโดยนำแบบบ้านต้นแบบมาจำลองร่วมกับการแทรก Friction-based isolator ไปบริเวณโคนเสาตอม่อ ในโปรแกรม ETABS และวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาในการออกแบบ (Maximum Considered Earthquake, MCE) 8 คู่แบบ Nonlinear Time History Analysis รวมถึงทำการขยายความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวเป็น 1.5MCE เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพที่แผ่นดินไหวที่มีคาบการเกิดแผ่นดินไหว มากกว่า 3,000–4,000 ปีขึ้นไป หรือเพื่อจำลองกรณีร้ายแรงพิเศษ จากนั้นทำการ scale down ความรุนแรงคลื่นแผ่นดินไหว เพื่อหาคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าต่ำสุด หรือรุนแรงน้อยสุด ที่จะทำให้เกิดพฤติกรรมของระบบ Friction-based isolator ไม่เกิดการไถล กล่าวคือเทียบเท่าการไม่ใส่ Friction-based isolator

จากผลการวิเคราะห์และข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า ระบบ Friction-Based Isolator ที่ออกแบบสามารถลดค่าการตอบสนองโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่น ช่วยลด Base Shear ได้สูงสุดถึง 62.27% และ Story Shear เฉลี่ย 28.55% แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดแรงที่ถ่ายเข้าสู่อาคารผ่านการไถลของแผ่น PTFE ในส่วนของอัตราการใช้รูประหว่างชั้น (Story Drift) ลดลงเฉลี่ยถึง 50.29% เนื่องจากพลังงานถูกดูดซับที่ฐานราก ขณะเดียวกัน Overturning Moment ลดลงเฉลี่ย 9.14% ช่วยลดความเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำภายใต้แผ่นดินไหวระดับ MCE

จากการวิเคราะห์ที่ระดับแผ่นดินไหวสูงกว่า MCE (1.5MCE) พบว่าระบบ Friction-based isolator ช่วยลด Base Shear ได้ถึง 65.78%, Story Shear 80.57%, Story Drift 82.29% และ Overturning Moment 16.31% โดยการเคลื่อนตัวยังคงอยู่ในขอบเขตของ pile cap อย่างปลอดภัย ส่วนในกรณีแผ่นดินไหวระดับปานกลาง (1.0DBE) ระบบยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยลด Base Shear เฉลี่ย 26.5%, Story Shear 59.25%, Story Drift 36.79% และ Overturning Moment 9.33% และพบว่าระบบจะหยุดการไถลโดยสมบูรณ์ที่ระดับแรงสั่นสะเทือนประมาณ 0.2DBE

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนพบว่าระบบดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม โดยอยู่ที่เพียง 14,065 บาท หรือประมาณ 0.66% ของมูลค่าบ้านหลัง ซึ่งต่ำกว่าระบบเสริมแรงทั่วไป อย่างไรก็ตามระบบ Friction-Based Isolator อาจมีข้อจำกัดในด้านการบำรุงรักษาในระยะยาวเมื่อเทียบกับแบบบ้านเสริมเหล็กจากกรรมโยธาธิการ จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานปรับปรุงอาคารเก่าซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในเขตเมือง โดยไม่จำเป็นต้องรื้อถอนหรือตัดแปลงโครงสร้างเดิมอย่างซับซ้อน สรุปได้ว่าระบบ Friction-Based Isolator ที่ออกแบบมีความเป็นไปได้ในเชิงทฤษฎีและมีแนวโน้มในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้จริงได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากปราศจากความเมตตาและความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ประจำหลักสูตรภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังช่วยชี้แนะและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วยความเคารพอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รับมือแผ่นดินไหว มนุษย์ทำได้แค่เตรียม. 2565.
- [2] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ไบ 5 ข้อสงสัย แผ่นดินไหวเชียงใหม่ 20 ตุลาคม 2565. 2565.
- [3] Wu, T.-C., *Design of base isolation system for buildings*. 2001, Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Sassu, M., *The reinforced cut wall (RCW): A low-cost base dissipator for masonry buildings*. Earthquake spectra, 2006. 22(2): p. 533-554.
- [5] Li, L. *Base isolation measure for aseismic buildings in China*. in *Proceedings of the 8th World conference on earthquake engineering*. 1984.
- [6] Barone, S., A. Pavese, and G.M. Calvi. *Characterization of frictional properties of different sliding materials for curved surface sliders*. in *7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*. 2017.
- [7] Jangid, R., *Response of pure-friction sliding structures to bi-directional harmonic ground motion*. Engineering Structures, 1997. 19(2): p. 97-104.

- [8] Jangid, R., *Optimum frictional elements in sliding isolation systems*. Computers & Structures, 2000. 76(5): p. 651-661.
- [9] Walker, J.S., *Physics*. 2003: Pearson/Prentice Hall.
- [10] Marui, E. and S. Kato, *Forced Vibration of a Base-Excited Single-Degree-of-Freedom System With Coulomb Friction*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1984. 106(4): p. 280-285.
- [11] Dai, W., J. Yang, and M. Wiercigroch, *Vibration energy flow transmission in systems with Coulomb friction*. International Journal of Mechanical Sciences, 2022. 214: p. 106932.
- [12] กรมโยธาธิการและผังเมือง, มยผ. 1301/1302-61 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว. 2561: กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.