

การเปรียบเทียบการออกแบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ
กับโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง สำหรับอาคารสำนักงาน
A Comparison of the Design of Special RC Moment Resisting Frames (SMRF) with
Intermediate RC Moment Resisting Frames (IMRF) for Office Building

ชัยภัคดี สุวาชาติ^{1*} นิชกานต์ ฐิติวิรุฬห์² และไพญญ์ ปัญญาคะโป³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บางเขน มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: chaipak.2404@gmail.com

บทคัดย่อ

แผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติที่อาจส่งผลกระทบต่ออาคารพักอาศัย อาคารสำนักงาน และระบบสาธารณูปโภคต่างๆ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า แบบมาตรฐานของหน่วยงานราชการ ไม่ปลอดภัยจากแผ่นดินไหว ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายหากเกิดแผ่นดินไหว บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษกับโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง สำหรับอาคารสำนักงานความสูง 2 ชั้นรูปร่างสมมาตร ความกว้าง 16.0 เมตร ความยาว 45.5 เมตร ความสูง 8.2 เมตร ในพื้นที่อำเภอแม่เอย จังหวัดเชียงใหม่ การคำนวณแรงแผ่นดินไหวใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโครงสร้างแรงดัดความเหนียวปานกลาง ออกแบบโดยเพิ่มแรงเฉือนที่ฐานอีกร้อยละ 40 ตามข้อเสนอแนะมาตรฐานการออกแบบ ผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างแรงดัดความเหนียวปานกลางมีค่าแรงเฉือนที่ฐาน และค่าโมเมนต์พลิกคว่ำมากกว่าโครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษ คิดเป็น 1.6 เท่า และการเคลื่อนตัวสูงสุด 93 มม.มากกว่าโครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษ คิดเป็น 1.3 เท่า แต่โครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกในเสามีค่ามากกว่า 33% และ 36% ตามลำดับ เนื่องจากกำลังต้านทานโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นตามหลักการเสาค้ำยัน-คานอ่อน ส่วนโครงสร้างแรงดัดความเหนียวปานกลางมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในคานมากกว่า 49% เมื่อพิจารณาด้านเสถียรภาพของโครงสร้าง จึงแนะนำให้ออกแบบโดยโครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษ ทั้งนี้ค่าปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมดของโครงสร้างทั้งสองระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: อาคารต้านทานแผ่นดินไหว โครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษ
โครงสร้างแรงดัดความเหนียวปานกลาง เสาค้ำยัน-คานอ่อน

Abstract

In earthquake prone area, seismic risk may affect to residential buildings, office structures, and essential infrastructure systems. Previous investigations have revealed that buildings that have been built according to standard drawing may be inadequate to ensure seismic safety. The objective of this research was to compare the design of Special Moment-Resisting Frames (SMRF) with Intermediate Moment-Resisting Frames (IMRF) for a two-story symmetric RC office building with dimensions of 16.0 meters in width, 45.5 meters in length, and 8.2 meters in height, located in Mae Ai District, Chiang Mai Province. The seismic force was calculated using the equivalent static force method. In the case of IMRFs, the base shear was increased by 40% in accordance with design code recommendations. The results indicate that IMRF exhibited base shear forces and overturning moments approximately 1.6 times greater than those of SMRF, while the maximum lateral displacement of IMRF (93 mm) was 1.3 times greater than SMRF. But SMRF required 33% more longitudinal reinforcement and 36% more transverse reinforcement in columns due to the increase of moment capacity according to strong-column weak-beam concept. Conversely, IMRF necessitated 49% more longitudinal reinforcement in beams. Although the total reinforcement quantities between the two systems were comparable, from the structural stability perspective, SMRF is recommended for seismic design.

Keywords: Earthquake-Resistant Buildings, Special Moment-Resisting Frames, Intermediate Moment-Resisting Frames, strong column-weak beam

1. บทนำ

แผ่นดินไหวถือเป็นภัยธรรมชาติประเภทหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานอาคารบ้านเรือน อาคารสำนักงาน และระบบสาธารณูปโภคต่างๆ ที่ผ่านประเทศไทยได้รับภัยพิบัติประเภติดังกล่าวเช่นกัน จากนั้นจึงมีการออกมาตรการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวออกโดยกระทรวงมหาดไทย ในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งต่อมามาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1301/1302-61 [1] แบ่งเป็น 4 ประเภท คือ ประเภท ก ข ค และ ง สำหรับประเภท ง อยู่ในพื้นที่ ที่มีระดับความรุนแรงสูงมาก จะต้องมีการออกแบบโดยใช้ระบบโครงสร้างต้านแรงดัดคองกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (SMRF) แต่หากต้องการใช้ระบบโครงสร้างต้านแรงดัดคองกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (IMRF) ได้ แต่ให้เพิ่มแรงเฉือนพื้นฐาน (BASE SHEAR: V) มาใช้ในระบบ IMRF อีกร้อยละ 40 ซึ่งในส่วนการคำนวณค่าการเสียรูปไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าแรงที่ใช้ในการคำนวณ โดยหลักการออกแบบของ SMRF เป็นออกแบบให้สามารถดูดซับพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวโดยยอมให้มีการโก่งตัวเกินจากจุดเอลลิสติกไปสู่ช่วงอินลาสติก ที่ตำแหน่งจุดข้อหมุนพลาสติกบริเวณปลายคานซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างคานและเสา เพื่อให้เสามีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดมากกว่าคาน หรือที่เรียกว่าหลักการของเสาแข็ง-คานอ่อน ส่วนหลักการออกแบบของ IMRF เป็นการออกแบบให้โครงสร้างมีความเหนียวปานกลางด้วยการกำหนดรายละเอียดการเสริมเหล็กปลอกที่จุดต่อระหว่างเสาคาน

ที่ผ่านมา ภูวดล กลทิพย์ [2] วิเคราะห์ราคาก่อสร้างที่เพิ่มมาจากการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในอาคาร คสล. ความสูง 2-3 ชั้น อ.เมือง จ.เชียงใหม่ ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวง เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เมื่อ พ.ศ. 2564 วิเคราะห์แรงด้วยวิธีสถิตเทียบเท่า และวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นตามที่กำหนดใน มยผ. 1301/1302-61 โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการออกแบบของอาคารพบว่า ราคาก่อสร้างเพิ่มขึ้นร้อยละ 8-10 เมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวและไม่ได้เสริมเหล็กให้อาคารมีความเหนียวตาม มยผ. 1301/1302-61 วัฒนา ทองปัญญา [3] ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบงบประมาณก่อสร้างของอาคาร คสล. ที่ออกแบบโดยพิจารณาและไม่พิจารณาการต้านทานแผ่นดินไหว ในพื้นที่ภาคกลาง (บริเวณที่ 1) และภาคเหนือ (บริเวณที่ 2) ของมยผ. ด้วยวิธีหน่วยแรง และวิธีสถิตเทียบเท่า ด้วยใช้โปรแกรม SAP2000 และ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบ และประมาณราคาก่อสร้าง ผลการเปรียบเทียบพบว่าอาคารคสล. ที่ตั้งในพื้นที่ภาคเหนือมีแรงเฉือนพื้นฐาน มากกว่า พื้นที่ภาคกลาง ส่งผลให้ต้องเพิ่มงบประมาณส่วนโครงสร้าง ในภาคกลางและภาคเหนือร้อยละ 12.22 และ 14.07 ตามลำดับ เพื่อสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ อนิรุทธ์ นุชประเสริฐ [4] ศึกษาความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร คสล. ความสูงไม่เกิน 15 เมตร กับอาคาร 3 รูปแบบ ตามแบบมาตรฐานของหน่วยงานราชการ ได้แก่ อาคารเรียน อาคารสำนักงาน และบ้านพักอาศัย โดยจำลองที่ตั้งในอำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเลย อำเภอเมืองสุ

ราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี และกรุงเทพมหานคร ในแต่ละรูปแบบ ผลการศึกษาพบว่า แบบมาตรฐานของหน่วยงานราชการที่ศึกษาไม่ปลอดภัยจากแผ่นดินไหว ซึ่งผู้วิจัยให้ข้อเสนอแนะว่ายังมีอาคารมาตรฐานของหน่วยงานราชการอีกมากที่ต้องมีการตรวจสอบความต้านทานแรงสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวที่กำหนดใน มยผ. 1301/1302-61 สีวะลักษณ์ ชำนุรักษ์ [5] ได้คำนวณด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1301/1302-61) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงแผ่นดินไหว (C_u) 926 อำเภอทั่วประเทศสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณรูปทรงสม่ำเสมอ ความสูงไม่เกิน 2 ชั้น คำนวณที่ความสูง 6 เมตร ความสำคัญอาคารแบ่งเป็นน้อย ปกติ สูง และสูงมาก โดยใช้ระบบโครงสร้างต้านแรงดัดเหล็กที่มีความเหนียวธรรมดา เหนียวปานกลาง และเหนียวพิเศษ ในสภาพชั้นดินประเภท D ด้วยซอฟต์แวร์ DON_1302 พบว่า อาคารสูงไม่เกิน 2 ชั้น ในภาคเหนือทุกระดับความสำคัญจะต้องออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว ห้ามใช้ระบบโครงสร้างต้านแรงดัดเหล็กความเหนียวธรรมดา ในภาคกลางอาคารที่จะต้องออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวส่วนใหญ่เป็นอาคารที่มีความสำคัญสูงมาก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ไม่ต้องออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว ในภาคตะวันตกต้องออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวในบางพื้นที่ นารเมธ ปรีไทย [6] ได้ประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเหล็กรูปพรรณที่มีความแตกต่างกันทางด้านข้าง ความเหนียว ความสูง และพื้นที่ตั้งของอาคาร โดยระบบโครงสร้างที่นำมาศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ โครงสร้างแรงดัดเหล็ก (Moment Resisting Frame) โครงสร้างแรงดัดเหล็กศูนย์ (Concentric Braced Frame) โครงสร้างแรงดัดเหล็กเอียงศูนย์ (Braced Frame) ในแต่ละระบบประกอบด้วยระดับความเหนียว 3 ระดับ 1.แบบธรรมดา 2.ความเหนียวปานกลาง 3.ความเหนียวพิเศษ ของอาคารสูง 3 และ 8 ชั้น ที่ตั้งในอำเภอเมืองเชียงใหม่ และกรุงเทพมหานคร พบว่าอาคารสูง 3 ชั้นที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมืองเชียงใหม่ มีการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าระดับความเหนียวปานกลาง (IMRF) เกิดแรงเฉือนพื้นฐานอาคาร 248.38 ตัน การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น โดยชั้น 3 เท่ากับ 0.0291 เมตร ชั้น 2 เท่ากับ 0.0313 เมตร ชั้น 1 เท่ากับ 0.0611 เมตร สัมประสิทธิ์เสถียรภาพ ในทิศทาง X-X ชั้น 3 เท่ากับ 0.0133 ชั้น 2 เท่ากับ 0.0148 ชั้น 1 เท่ากับ 0.02 ส่วนการออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหวด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าระดับความเหนียวพิเศษ (SMRF) จะเกิดแรงเฉือนพื้นฐานอาคาร 140.50 ตัน การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น ในทิศทาง Y-Y ชั้น 3 เท่ากับ 0.0166 เมตร ชั้น 2 เท่ากับ 0.0210 เมตร ชั้น 1 เท่ากับ 0.0475 เมตร สัมประสิทธิ์เสถียรภาพ ในทิศทาง X-X ชั้น 3 เท่ากับ 0.0101 ชั้น 2 เท่ากับ 0.0129 ชั้น 1 เท่ากับ 0.0298 สามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการดูดซับและสลายพลังงานจะขึ้นอยู่กับระดับความเหนียวของอาคาร ซึ่งสังเกตได้จากค่าการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารที่เพิ่มขึ้นตามระดับความเหนียว

จากการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นดินไหวในประเทศไทยส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร คสล. ทำให้ต้องเพิ่มขนาดของอาคารและใช้ปริมาณโครงสร้างมากขึ้นประมาณ 8%-14% เพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

และยังพบว่าแบบมาตรฐานหน่วยงานราชการ สำหรับอาคารสาธารณะในปัจจุบัน เมื่อใช้ในพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว อาจไม่ปลอดภัย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบอาคารสำนักงานหน่วยงานราชการ ให้ปลอดภัยต่อแผ่นดินไหว โดยศึกษาภายใต้ มยผ.1301/1302 – 61 ซึ่งได้ระบุไว้ สำหรับการออกแบบประเภท ง จะต้องมีกรอบโดยให้ระบบ SMRF แต่หากต้องการใช้ระบบ IMRF ได้ แต่ให้เพิ่มแรงเฉือนพื้นฐาน ที่ใช้ในการออกแบบระบบ IMRF อีกร้อยละ 40 ซึ่งในส่วนการคำนวณค่าการเสียรูปไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าแรงเฉือนที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจเปรียบเทียบออกแบบ ระหว่างโครงสร้างแรงดัดความเหนียวพิเศษ และโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลาง อีกทั้งทำการเปรียบเทียบปริมาณวัสดุจากการออกแบบ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือน โมเมนต์พลิกคว่ำ และเสถียรภาพของอาคารระหว่างระบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (Special Moment-Resisting Frame, SMRF) กับ ระบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Moment Resisting Frame, IMRF)
2. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกของการออกแบบระหว่างระบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (Special Moment-Resisting Frame, SMRF) กับ ระบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Moment Resisting Frame, IMRF)

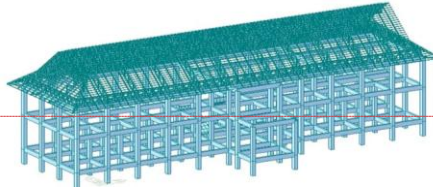
3. วิธีการศึกษา

3.1 อาคารตัวอย่างและพื้นที่ดำเนินการศึกษา

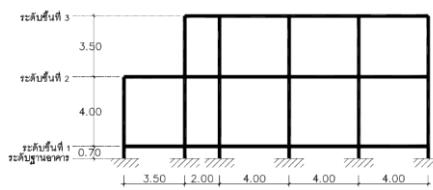
แบบอาคารสำนักงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสูง 2 ชั้น รูปร่างสมมาตร ความสูงชั้นฐานอาคารถึงชั้นที่ 1 มีความสูง 0.7 เมตร ชั้นที่ 1-2 มีความสูง 4.0 เมตร และความสูงชั้นที่ 2-3 มีความสูง 3.5 เมตร น้ำหนักอาคารรวม 1,187 ตัน มีตึกอาคาร ด้านกว้าง 16.0 เมตร ด้านยาว 45.5 เมตร ความสูง 8.2 เมตร แสดงดังรูปที่ 1, 2 และ 3 ในการคำนวณออกแบบจะออกแบบของอาคารเสา-คาน โดยให้ขนาดเสาของ SMRF เท่ากับ IMRF และขนาดคานของ SMRF เท่ากับ IMRF จะเปรียบเทียบความแตกต่างเพียง เหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก



รูปที่ 1 รูปด้านหน้าอาคารสำนักงาน



รูปที่ 2 ภาพโมเดลสามมิติอาคารสำนักงาน



รูปที่ 3 รูปด้านข้างอาคาร

โดยอาคารจัดประเภทความสำคัญ III มีค่าตัวประกอบความสำคัญเท่ากับ 1.25 พิจารณาตั้งในพื้นที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดเชียงใหม่ กำหนดชั้นดินปกติ (ประเภท D) จึงใช้สัมประสิทธิ์ในการพิจารณาแรงแผ่นดินไหว ทั้ง 2 วิธีการออกแบบคือ การออกแบบด้วยระบบโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวพิเศษและโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลาง ได้แก่ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที S_u เท่ากับ 1.080 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที S_1 เท่ากับ 0.317 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ III ที่ตั้งอาคาร F_a เท่ากับ 1.068 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ III ที่ตั้งอาคาร F_v เท่ากับ 1.766 เมื่อคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์ที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที $S_{u\delta}$ เท่ากับ 0.769 และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที S_{d1} เท่ากับ 0.373

จากการพิจารณาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ พบว่า $0.50 \leq S_{u\delta}$ จึงต้องกำหนดประเภทการแบดันทานแผ่นดินไหว ประเภท ง อีกทั้งยังพบว่า $0.50 \leq S_{d1}$ จึงต้องกำหนดประเภทการออกแบบด้านทานแผ่นดินไหว ประเภท ง เช่นกัน โดย มยผ.ได้แนะนำให้ออกแบบโดยใช้โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (SMRF) แต่เนื่องด้วยข้อกำหนดความสูงไม่เกิน 40 เมตร ในการออกแบบ ประเภท ง สามารถใช้โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กความเหนียวปานกลาง (IMRF) ทั้งนี้การคำนวณด้านกำลังให้เพิ่มแรงเฉือนพื้นฐานอีกร้อยละ 40 ซึ่งในส่วนการคำนวณค่าการเสียรูปไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าแรงที่ใช้ในการคำนวณ

ให้ข้อคิดเห็น [CS1]: กล่าวถึง ข้อความใน มยผ. หรือไม่ ที่บอกว่า SMRF สามารถ ใช้ IMRF

ให้ข้อคิดเห็น [CS2R1]: กล่าวด้วย

3.2 มาตรฐานและสัมประสิทธิ์ที่ใช้ออกแบบ

3.2.1 มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

คำนวณแรงเฉือนพื้นฐาน โมเมนต์พลิกคว่ำ และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ขององค์อาคาร ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Force) ตลอดจนการคำนวณออกแบบขนาดหน้าตัดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1301/1302-61

วิธีออกแบบ SMRF เป็นออกแบบให้สามารถดูดซับพลังงานจากแรงแผ่นดินไหว โดยยอมให้มีการโก่งตัวเกินจากจุดอีลาสติกไปสู่ช่วงอินลาสติก ที่ตำแหน่งจุดข้อมุมนพลาสถิกบริเวณปลายคานซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างคานและเสา เพื่อให้เสามีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดมากกว่าคาน หรือที่เรียกว่าหลักการของเสาแข็งแรง-คานอ่อน

วิธีออกแบบ IMRF เป็นการออกแบบให้โครงสร้างมีความเหนียวปานกลางด้วยการกำหนดรายละเอียดเสริมเหล็กปลอกที่จุดต่อระหว่างเสา-คาน

3.2.2 สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวพิเศษและโครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลาง

จากประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ประเภท มีระบบโครงสร้าง 2 รูปแบบ ที่สนใจศึกษา คือ SMRF และ IMRF ตาม มยผ. 1301/1302-61 กำหนดค่าตัวประกอบ ที่นำไปใช้ในการคำนวณแรงเฉือนพื้นฐาน และออกแบบต่อไป โดยมีค่าที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวประกอบ R และ Ω_0 สำหรับระบบโครงสร้าง SMRF และ IMRF

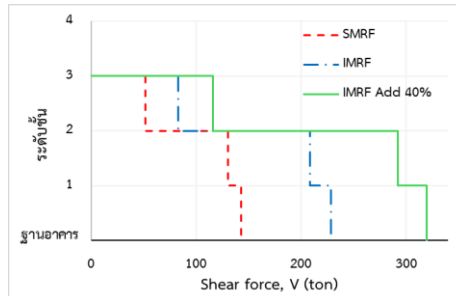
ค่าตัวประกอบ	SMRF	IMRF
ค่าตัวประกอบปรับลดตอบสนอง (Response Modification Factor: R)	8	5
ค่าตัวประกอบกำลังเกิน (System Overstrength Factor: Ω_0)	3	3
ค่าตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor: C_d)	5.5	4.5

เมื่อคำนวณแรงเฉือนพื้นฐานแล้ว นำไปออกแบบ เสาและคาน[7] สำหรับต้านทานแรงแผ่นดินไหว 2 วิธี ได้แก่ วิธี SMRF และวิธี IMRF โดยเพิ่มแรงเฉือนพื้นฐานของ IMRF อีก 40% แต่ไม่เพิ่มสำหรับการคำนวณการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ จากนั้นนำผลการออกแบบเสาและคาน คำนวณปริมาณเหล็กเสริมเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

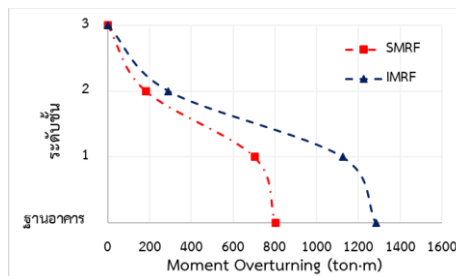
4.1 ผลการคำนวณแรงเฉือนพื้นฐาน และโมเมนต์พลิกคว่ำ

ผลการคำนวณแรงเฉือนพื้นฐาน และโมเมนต์พลิกคว่ำ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ของ SMRF และ IMRF มีรายละเอียดดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4 แรงเฉือนแต่ละระดับชั้น วิธีแรงสถิตเทียบเท่า ของ SMRF และ IMRF

จากรูปที่ 4 แสดงแรงแผ่นดินไหวที่กระทำที่แต่ละชั้น โดยพิจารณาที่ฐานอาคาร ในวิธี SMRF, IMRF, และ IMRF ที่เพิ่มร้อยละ 40 มีค่าเท่ากับ 142, 228 และ 319 ตัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า แรงเฉือนพื้นฐานของ IMRF ที่เพิ่มร้อยละ 40 ที่นำมาออกแบบองค์อาคาร นั้นมีค่ามากกว่า SMRF เท่ากับ 177 ตัน คิดเป็น 2.25 เท่าของวิธี SMRF เป็นผลมาจากค่าตัวประกอบปรับลดตอบสนอง : R ของวิธี IMRF ที่มีค่าน้อยกว่า SMRF

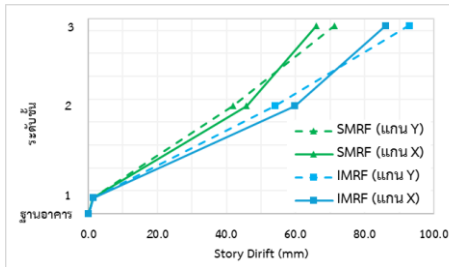


รูปที่ 5 โมเมนต์พลิกคว่ำแต่ละระดับชั้น วิธีแรงสถิตเทียบเท่า ของ SMRF และ IMRF

จากรูปที่ 5 แสดงโมเมนต์พลิกคว่ำจากแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นแต่ละชั้น โดยพิจารณาโมเมนต์พลิกคว่ำตำแหน่งฐานอาคารซึ่งมีค่าสูงสุด พบว่าวิธี SMRF, และ IMRF มีค่าเท่ากับ 802, 1,284 ตัน-เมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับโมเมนต์ต้านทานโมเมนต์พลิกคว่ำจากน้ำหนักของอาคาร มีค่าเท่ากับ 4,867, 4,867 ตัน-เมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความปลอดภัยต่อโมเมนต์พลิกคว่ำของอาคาร มีค่าเท่ากับ 6.07, 3.79 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าที่ระบุไว้ 1.5 [1] สามารถสรุปได้ว่าอาคารปลอดภัยต่อโมเมนต์พลิกคว่ำที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

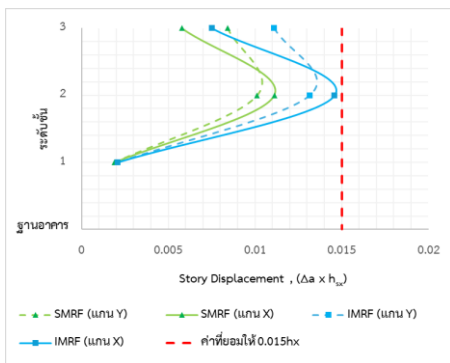
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้านเสถียรภาพของอาคาร

ผลการวิเคราะห์ด้านเสถียรภาพของอาคาร ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ของ SMRF และ IMRF มีรายละเอียดดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6 ระยะเวลาการเคลื่อนแต่ละระดับชั้น วิธีแรงสถิตเทียบเท่า
ของ SMRF และ IMRF

จากรูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวของโครงสร้างแต่ละระดับชั้นจากแรงแผ่นดินไหว พบว่า การเคลื่อนของ SMRF และ IMRF ชั้นที่ 1 แกน Y และ X มีค่าเท่ากับ 1.3, 1.4 มม. ตามลำดับ ชั้นที่ 2 แกน Y มีค่าเท่ากับ 42.0, 54.0 มม. ตามลำดับ ชั้นที่ 2 แกน X มีค่าเท่ากับ 46.0, 60.0 มม. ตามลำดับ ชั้นที่ 3 แกน Y มีค่าเท่ากับ 71.0, 93.0 มม. ตามลำดับ และชั้นที่ 3 แกน X มีค่าเท่ากับ 66.0, 86.0 มม. ตามลำดับ โดยการเคลื่อนตัวสูงสุดของ IMRF มากกว่า SMRF เท่ากับ 22.0 มม. คิดเป็นร้อยละ 30 ของ SMRF



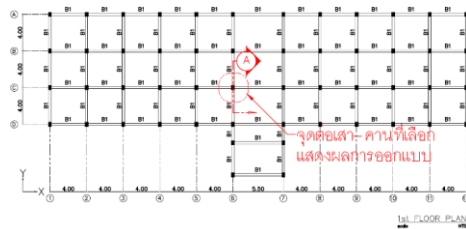
รูปที่ 7 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แต่ละระดับชั้น วิธีแรงสถิตเทียบเท่า
ของ SMRF และ IMRF

จากรูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แต่ละระดับชั้นจากแรงแผ่นดินไหว โดยการหาเป็นสัดส่วนต่อความสูงในแต่ละชั้น :h_x พบว่า การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ SMRF และ IMRF ชั้นที่ 1 เท่ากับ 0.002, 0.002 ตามลำดับ ชั้นที่ 2 แกน Y มีค่าเท่ากับ 0.010, 0.013 ตามลำดับ ชั้นที่ 2 แกน X มีค่าเท่ากับ 0.011, 0.014 ตามลำดับ ชั้นที่ 3 แกน Y มีค่าเท่ากับ 0.008, 0.011 ตามลำดับ และชั้นที่ 3 แกน X มีค่าเท่ากับ 0.005, 0.007 ตามลำดับ โดยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 0.014 ในตำแหน่งชั้นที่

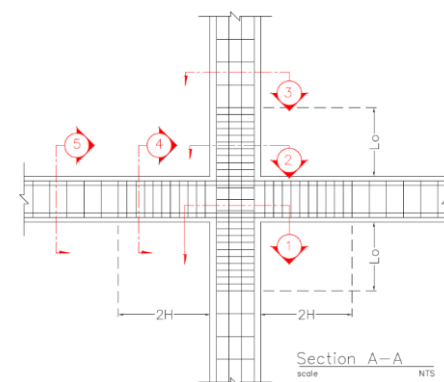
2 แกน X ของ IMRF และเมื่อเทียบในตำแหน่งเดียวกันของ SMRF มีค่ามากกว่า 0.003 คิดเป็นร้อยละ 31 ของ SMRF
จากผลการคำนวณแรงเฉือนที่ฐาน โมเมนต์พลิกคว่ำ และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ขององค์อาคาร ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ของ SMRF และ IMRF ที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าแรงเฉือนที่ฐานสำหรับออกแบบของ IMRF มีค่ามากกว่า SMRF ซึ่งอาจทำให้ผลการออกแบบขององค์อาคารในวิธี IMRF มีแนวโน้มขนาดที่จะใหญ่กว่า SMRF และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์จะเห็นว่า การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของวิธี IMRF มีค่ามากกว่า SMRF และใกล้เคียงจำกัดที่มาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ได้กำหนดไว้ไม่เกิน 0.015 เท่าของความสูงที่ชั้นนั้นๆ ซึ่งจะช่วยให้ขนาดขององค์อาคาร วิธี IMRF มีแนวโน้มขนาดใหญ่กว่า SMRF ด้วยเช่นกัน

4.3 ผลการออกแบบขนาดองค์อาคาร

โดยบทความนี้ศึกษาเฉพาะในส่วนของเสา-คาน เท่านั้น เนื่องจากขั้นตอนเหล่านี้มีรายละเอียดพิเศษที่แตกต่างจากการออกแบบโดยทั่วไป ซึ่งนำเสนอบริเวณจุดต่อเสา-คาน บริเวณชั้น 1 กริด C-6 ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องด้วยเป็นตำแหน่งจุดต่อที่มีปริมาณหน่วยแรงเฉือนและโมเมนต์สูงสุด เนื่องจากมาเป็นบริเวณช่วงของโอบันไดและมีเสาที่สั้นกับคานช่วงยาว[4] แสดงผลการออกแบบองค์อาคารดังรูปที่ 8 และ 9 และตารางที่ 2



รูปที่ 8 แบบแปลนเสา-คาน ชั้น 1



รูปที่ 9 รูปตัด A-A จุดต่อเสา-คาน ชั้น 1

ให้ข้อคิดเห็น [CS3]: การพลิก ควรรนำมาสรุปในทิศทางใด

ให้ข้อคิดเห็น [CS4R3]: ไม่ต้อง

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบหน้าตัดคานกริดเสริมเหล็ก

แบบขยายหน้าตัด	SMRF	IMRF
เสา C1 Section 1-1 **		
เสา C1 Section 2-2		
เสา C1 Section 3-3		
คาน B1 Section 4-4		
คาน B1 Section 5-5		

** Section ของเสาที่ตำแหน่งจุดต่อ

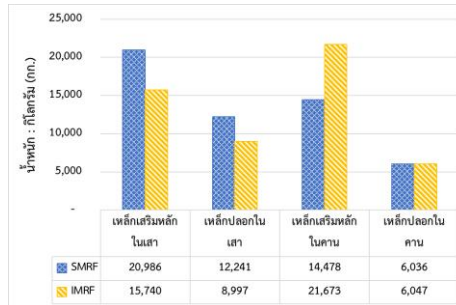
จากรูปที่ 8 และ 9 และตารางที่ 2 แสดงถึงผลการออกแบบขนาดของคานเสา-คาน ระหว่างวิธี SMRF และ IMRF พบว่าขนาดหน้าตัดเสา คานกริดเท่ากับ 0.40x0.55 ม. ขนาดหน้าตัดคานคานกริดเท่ากับ 0.25x0.50 ม. ทั้ง 2 วิธี

สำหรับเสา เหล็กเสริมหลักใช้ขนาดหน้าตัดเหล็ก DB20 ของ SMRF มีปริมาณ 16 เส้น IMRF มีปริมาณ 12 เส้น เหล็กปลอกวิธี SMRF ใช้ขนาดหน้าตัดเหล็ก DB10 ระยะห่าง 0.15 ม. ภายในจุดต่อเสา-คาน ระยะห่าง 0.075 ม. ภายในระยะ L_0 ที่ปลายเสา และระยะห่าง 0.30 ม. ภายนอก ระยะ L_0 ที่ช่วงกลางเสา เหล็กปลอกวิธี IMRF ใช้ขนาดหน้าตัดเหล็ก DB10 ใช้ระยะห่าง 0.20 ม. ภายในจุดต่อเสา-คาน ระยะห่าง 0.10 ม. ภายใน ระยะ L_0 ที่ปลายเสา และระยะห่าง 0.30 ม. ภายนอก ระยะ L_0 หรือที่ช่วง กลางเสา

สำหรับคาน เหล็กเสริมหลักใช้ขนาดหน้าตัดเหล็ก DB16 ของ SMRF มี ปริมาณ 10 เส้น IMRF มีปริมาณ 16 เส้น เหล็กปลอกวิธี SMRF ใช้ขนาด หน้าตัดเหล็ก DB10 ระยะห่าง 0.20 ม. ภายในระยะ 2H ที่ปลายคาน และ ระยะห่าง 0.30 ม. ภายนอก ระยะ 2H ที่ช่วงกลางคาน เหล็กปลอก วิธี IMRF ใช้ขนาดหน้าตัดเหล็ก DB10 ใช้ระยะห่าง 0.20 ม. ภายในระยะ 2H ที่ปลายคาน และระยะห่าง 0.30 ม. ภายนอก ระยะ 2H หรือที่ช่วงกลาง คาน

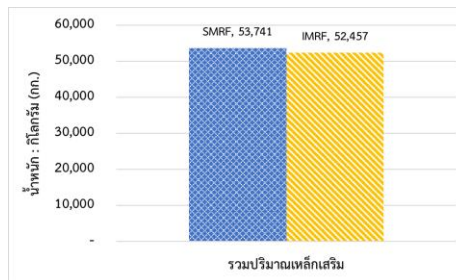
4.4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณวัสดุ

โดยบทความนี้ ศึกษาเฉพาะในส่วนของคาน-เสา เท่านั้น เนื่องจาก ขั้นตอนเหล่านี้มีรายละเอียดพิเศษที่แตกต่างจากการออกแบบโดยทั่วไป ซึ่งนำเสนอเพียงวัสดุจากออกแบบเสา-คาน แสดงรูปที่ 10-11



รูปที่ 10 ผลการถอดปริมาณวัสดุ แบ่งตามประเภทเหล็กในเสา-คาน

จากรูปที่ 10 แสดงปริมาณเหล็กเสริมจากผลการออกแบบของอาคาร เสาและคาน ทั้งหมดของอาคารที่ศึกษา เมื่อเทียบระหว่างวิธี SMRF กับ IMRF พบว่า เหล็กเสริมหลักในเสา SMRF มีค่าเท่ากับ 20,986 กก. มากกว่า IMRF ที่มีค่าเท่ากับ 15,740 กก. เป็นปริมาณ 5,246 กก. คิดเป็น ร้อยละ 33 เหล็กปลอกในเสา SMRF มีค่าเท่ากับ 12,241 กก. มากกว่า IMRF ที่มีค่าเท่ากับ 8,997 กก. เป็นปริมาณ 3,244 กก. คิดเป็น ร้อยละ 36 เหล็กเสริมหลักในคาน IMRF มีค่าเท่ากับ 21,673 กก. มากกว่า SMRF มีค่าเท่ากับ 14,478 กก. เป็นปริมาณ 7,195 กก. คิดเป็น ร้อยละ 49 เหล็กปลอกในคาน SMRF มีค่าเท่ากับ 6,036 กก. โกล่เคียง IMRF ที่มี ค่าเท่ากับ 6,047 กก. เป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



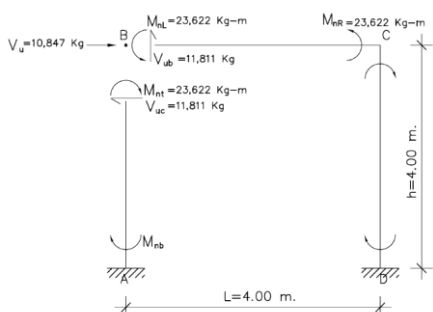
รูปที่ 11 ผลรวมปริมาณเหล็กเสริมในเสา-คาน

จากรูปที่ 11 แสดงปริมาณรวมของเหล็กเสริม เสาและคาน ทั้งหมด ของอาคารที่ศึกษา เมื่อเทียบระหว่างวิธี SMRF กับ IMRF พบว่า เหล็กเสริม SMRF มีค่าเท่ากับ 53,741 กก. มากกว่า IMRF ที่มีค่าเท่ากับ 52,457 กก. เป็นปริมาณ 1,284 กก. คิดเป็น ร้อยละ 2.5

จากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการออกแบบวิธี SMRF มีผลลดปริมาณแรงเฉือนที่ฐาน การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ที่น้อยกว่าวิธี IMRF ทำให้ขนาดของคานเสา-คาน ของวิธี IMRF จำเป็นต้องมีขนาดที่ ใหญ่เท่ากับ SMRF เพื่อให้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของวิธี IMRF ไม่เกิน

สัดส่วนที่ มยพ.1301/1302-61 กำหนดไว้ $0.015h_x$ [1] เมื่อผู้วิจัยกำหนดขนาดหน้าตัดเสา-คาน ของ 2 วิธีให้เท่ากันในจุดที่เหมาะสมแล้ว จึงพิจารณาการออกแบบเหล็กเสริม พบว่า เหล็กเสริมของเสาในวิธี SMRF มีความต้องการที่มากกว่า IMRF เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณ SMRF กำหนดให้กำลังต้านทานโมเมนต์ของเสาต้องมีค่า 1.2 เท่าของกำลังต้านทานโมเมนต์ของคาน ตามหลักการเสาแข็งแรง-คานอ่อน

แต่กระนั้นพบว่า เหล็กเสริมหลักของคานในวิธี IMRF มีความต้องการที่มากกว่า SMRF เนื่องจากแรงเฉือนที่ฐานของวิธี IMRF มีค่าที่มากกว่าวิธี SMRF จากสมมูลโมเมนต์ของเสาและคาน ณ จุดต่อเสา-คาน ทำให้มีความต้องการกำลังต้านทานโมเมนต์ของคานเพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 12 ซึ่งจากการออกแบบเหล็กเสริมของเสา-คานที่กล่าวมา เมื่อถอดปริมาณแล้ว จะเห็นว่าการออกแบบด้วยวิธี SMRF และ IMRF มีปริมาณเหล็กเสริมรวมที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 12 สมมูลของกำลังต้านทานโมเมนต์ ณ จุดต่อระหว่างเสา-คาน
สำหรับการออกแบบวิธี IMRF

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

(ก) แรงแผ่นดินไหว คำนวณโดยวิธีสถิตเทียบเท่า ตามข้อกำหนด มยพ. 1301/1302-61 ของโครงสร้างต้านแรงดัดความเหนียวพิเศษ มีค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน : R มากกว่า โครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบแทนแรงแผ่นดินไหว : C_s จะมีค่าแปรผกผัน ให้โครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ มีค่าน้อยกว่าโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง ตามสมการคำนวณแรงแผ่นดินไหว ในขณะที่น้ำหนักของอาคารมีน้ำหนักเท่ากัน ซึ่งจะทำให้แรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลางที่นำไปออกแบบองค์อาคารมีค่ามากกว่าโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ อีกทั้งยังมีการเพิ่มแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง อีกร้อยละ 40

(ข) โมเมนต์พลิกคว่ำ ของโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ และโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง มีความปลอดภัยต่อโมเมนต์พลิกคว่ำที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

(ค) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง มีค่ามากกว่าโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ เนื่องจากค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน : R และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว : C_d ที่แตกต่างกัน โครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลางมีค่า R ต่ำกว่า ส่งผลให้แรงกระทำด้านข้างสูงขึ้น และทำให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(ง) ปริมาณเหล็กเสริมหลักในเสา วิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ มีความต้องการมากกว่าวิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง เนื่องจากจากการออกแบบ ได้กำหนดสมมูลของกำลังต้านทานโมเมนต์ ณ จุดต่อระหว่างเสา-คาน เมื่อกำลังต้านทานโมเมนต์ของเสามีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงมีความต้องการเหล็กเสริมของคานเพิ่มมากขึ้นด้วย

(จ) ปริมาณเหล็กเสริมหลักในคานของ วิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง มีความต้องการมากกว่าวิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ เนื่องจากวิธีการออกแบบ ได้กำหนดสมมูลของกำลังต้านทานโมเมนต์ ณ จุดต่อระหว่างเสา-คาน เมื่อกำลังต้านทานโมเมนต์ของเสามีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงมีความต้องการเหล็กเสริมของคานเพิ่มมากขึ้นด้วย

(ฉ) ปริมาณเหล็กเสริมจากเสาและคานทั้งหมด วิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษมีความต้องการใกล้เคียงกับวิธีโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง

จากการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมรวมทั้ง 2 วิธีการออกแบบ มีค่าปริมาณเหล็กเสริมใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้วิจัยขอสรุปถึงแนวทางการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ในประเภท ให้ออกแบบด้วยระบบ SMRF ตามที่มาตรฐานโยธาธิการและผังเมืองได้แนะนำไว้ สืบเนื่องมาจากมีหลักการเสาแข็งแรง-คานอ่อน (Strong Column-Weak Beam Concept) ที่เสามีความแข็งแรงโดยมีพฤติกรรมแบบเสามีความแข็งแรงโดยมีพฤติกรรมแบบออสติก ในขณะที่ยอมให้คานมีความอ่อนกว่าเสา โดยยอมให้เกิดข้อหมุนพลาสติกที่ปลายคานได้ ดังนั้น จึงเป็นการป้องกันมิให้เกิดข้อหมุนพลาสติกในระหว่างชั้นของอาคาร โครงสร้างอาคารจึงมีการโยกไหวไปมาได้ อย่างเหนียวแน่นมั่นคงไม่พังทลายลงได้ จึงทำให้ระบบ SMRF รับแรงได้ดีกว่าระบบ IMRF

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมระหว่างโครงสร้างต้านดัดความเหนียวพิเศษ (Special Moment-Resisting Frame, SMRF) และโครงสร้างต้านดัดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Moment Resisting Frame, IMRF) การพิจารณาเลือกใช้ระบบโครงสร้างที่เหมาะสม จะต้องอ้างอิงจากพฤติกรรมของอาคารในสถานการณ์แผ่นดินไหว เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดและลดความเสียหายของโครงสร้างอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้ยังไม่ได้ครอบคลุมไปถึงการพิจารณาวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้าง ควรศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

ศึกษาพฤติกรรมของอาคารเมื่อได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวเพิ่มเติม เนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ขององค์อาคาร เพื่อระบุจุดที่เสี่ยงต่อการวิบัติ โดยเฉพาะในส่วนของคานและเสาที่ต้องรับแรงดัดและแรงเฉือนสูง

ศึกษาอาคารรูปแบบหรือประเภทอาคารอื่นๆ เพื่อทราบผลการออกแบบที่อาจแตกต่างกัน

นำผลการออกแบบของบทความนี้ ก่อสร้างตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบการรับน้ำหนักต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม บางเขน ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ และขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนด้านทุนการศึกษา และด้านอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย. (2561). มยผ. 1301/1302-61 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว.
- [2] ภูวดล กลไพมาย บุญมี ชินนาบุญ และสมชาย ชูชีพสกุล (2565). การวิเคราะห์ราคาก่อสร้างอาคารของอาคารเดี่ยวที่ออกแบบให้รับแผ่นดินไหว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 27 วันที่ 24-26 สิงหาคม 2565 จ.เชียงใหม่, หน้า 1,8-10.

- [3] วัฒนา ทองปัญญา (2557). การเปรียบเทียบงบประมาณการก่อสร้างของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบ โดยพิจารณาและไม่พิจารณาการต้านทานแผ่นดินไหว : กรณีศึกษาแบบตึกแถวอนุรักษ์ชั้น ของกรมโยธาธิการและผังเมือง. ปรญญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสุรนารี, นครราชสีมา, หน้า 45-51.
- [4] อนันต์ นุชประเสริฐ และ ชูชัย สุจิรัฐกุล. (2566). การศึกษาความต้านทานต่อการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวของอาคารเดี่ยวตามแบบก่อสร้างมาตรฐาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 28 วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566 จ.ภูเก็ต, หน้า 1,10.
- [5] สิวะลักษณ์ ขำนุรักษ์ และสรกานต์ ศรีทองอ่อน. (2563). คำสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวในทุกอำเภอของอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1301/1302-61).การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 25 วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563 จ.ชลบุรี.
- [6] นารเมธ ปรีไทย. (2565). การออกแบบและประเมินสมรรถนะของโครงสร้างอาคารเหล็ก รูปพรรณภายใต้แรงแผ่นดินไหว. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี
- [7] ไพบุลย์ ปัญญาตะโป (2567). การออกแบบอาคารและการออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหว, หน้า 93-181,209-270.