

การวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างอาคารอุตสาหกรรมระบบโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณ เนื่องจากผลของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ

Damage Analysis of Industrial Steel-Building Structures Subjected to Potential Earthquake in the Northeast of Thailand

เพทาย อุดมการเกษตร (Petai Udomkamkaset)* เมธี บุญพิเชษฐวงศ์ (Maete Boonpichetvong)**

ชั้นยดา พรรณเชษฐ์ (Tanyada Pannachet)** พนมเทพ เนตรพระ (Panomthep Natepra)*

(Received: June 3, 2020; Revised: August 5, 2020; Accepted: August 6, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงผลการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างตัวอย่างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมระบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเมื่อได้รับแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น โดยใช้แบบจำลองจุดหมุนพลาสติกตามมาตรฐาน ASCE41-17 การศึกษานี้สนใจความรุนแรงของแผ่นดินไหวทั้งที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบและที่ความรุนแรงของแผ่นดินไหวระดับความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน โดยอ้างอิงใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีความรุนแรงสูงสุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61) เปรียบเทียบกับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาการประเมินระดับภัยแผ่นดินไหวในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากงานวิจัยของ Foytong และคณะ จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมรับแรงแผ่นดินไหวของตัวอย่างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมจะขึ้นกับการกระจายน้ำหนักลงสู่เสาเหล็กในอาคารโรงงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณและอัตราส่วนกำลังของหน้าตัดเสาที่มีอยู่เดิม เสาเหล็กรูปพรรณของอาคารที่ศึกษามีโอกาสพบความเสียหายได้แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานอาคารที่ทำการศึกษา

ABSTRACT

This paper outlines an evaluation of industrial steel-building structures located in the Northeast of Thailand for potential seismic damage. Nonlinear static analyses were performed using plastic hinge model according to ASCE41-17 standard. This study focused on two levels of earthquakes i.e., at the level of design basis earthquake and the level of basic safety earthquake. Reference was made to the maximum considered earthquake in the Northeast of Thailand guided by both DPT-1301/1302-61 standard and recent results by Foytong et al. The results show that behavior of the steel-building structures depends on load distribution and initial axial load ratio of the steel columns. The steel column may experience small structural damage. However, there are no adverse effects on performance of the studied buildings at the immediate occupancy level.

คำสำคัญ: วิธีสถิตไม่เชิงเส้น โครงสร้างเหล็ก การประเมินความเสียหายจากแผ่นดินไหว

Keywords: Pushover analysis, Steel structures, Seismic damage assessment

¹ Corresponding author: tanpan@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยกำลังมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ซึ่งทำให้ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นจำนวนมากโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมระบบ โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ซึ่งในอดีตนั้น การออกแบบตึก อาคาร บ้านเรือนหรือแม้กระทั่งโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของแรงแผ่นดินไหว เนื่องมาจากในอดีต ประเทศไทยนั้นไม่เคยประสบกับภัยพิบัติอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในระดับที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรง ซึ่งแผ่นดินไหว เป็นภัยพิบัติที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า ดังนั้น หากอาคารของโรงงานอุตสาหกรรมได้รับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวจึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุตสาหกรรมในประเทศเป็นอย่างมาก ดังนั้นเพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมปลอดภัยจากความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหว จึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมและประเมินความเสียหายของโครงสร้างอาคารอุตสาหกรรม

ในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่สร้างความเสียหายในประเทศไทย เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมา ถึงแม้จะพบว่าบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจะเป็นพื้นที่ที่มีระดับภัยแผ่นดินไหวที่ต่ำ แต่ก็ยังมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่สามารถรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนได้ และยังคงตรวจพบรอยเลื่อนที่มีพลังได้แก่ รอยเลื่อนท่าแขกและรอยเลื่อนเพชรบูรณ์ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้ บทความนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความเสียหายของโรงงานอุตสาหกรรมโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตย์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) หรือวิธีแรงผลักดันข้าง (Pushover Analysis) โดยใช้แบบจำลองจุดหมุนพลาสติกตามมาตรฐาน ASCE41-17 [1] และใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีความรุนแรงสูงสุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [2] เปรียบเทียบกับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาการประเมินระดับภัยแผ่นดินไหวในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากงานวิจัยของ Foytong และคณะ [3] ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานมยผ. 1301/1302 [2] ได้ระบุไว้

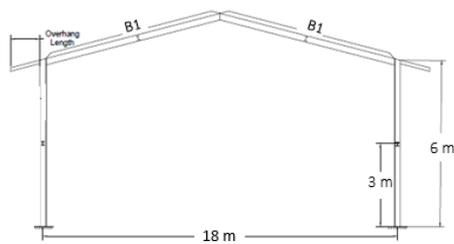
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประเมินความเสียหายของโครงสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมระบบเหล็กรูปพรรณที่มีอยู่เดิมเมื่อได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) จากมาตรฐาน ASCE41-17 [1]
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมระบบเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจากงานวิจัยของ Foytong และคณะ [3]

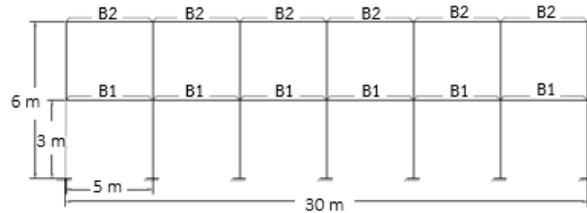
วิธีการวิจัย

โครงสร้างที่ถูกเลือกเพื่อนำมาเป็นตัวอย่างในการประเมินประกอบด้วย โรงงานอุตสาหกรรมระบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณขนาด 1 ชั้นจำนวน 3 หลัง อาคารตัวอย่างถูกออกแบบให้เป็นตัวแทนของโรงงานอุตสาหกรรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ถูกสร้างและใช้งานมาตั้งแต่อดีตซึ่งมีรูปแบบและขนาดหน้าตัดสอดคล้องกับแบบรายละเอียด (Catalog) ที่ได้รวบรวมมา วัสดุเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กกำลังไม่สูงเกรด A36 มีกำลังที่จุดคราก (F_y) เท่ากับ 2,500 กก./ซม.² รูปแบบโครงสร้างเป็นโครงต้านแรงค้ำ (Moment-Resisting Frame) ไม่มีค้ำยันด้านข้าง โครงสร้างไม่ได้รับการ

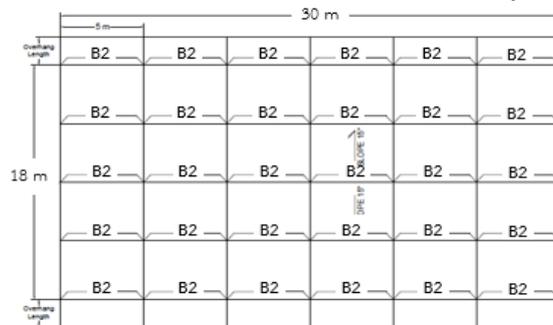
ออกแบบให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวมาก่อน โดยโครงสร้างและจุดต่อบริเวณฐานรากสามารถรับน้ำหนักตามแรงโน้มถ่วงและแรงลมได้ตามมาตรฐาน ASCE7-16 [1] โรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาเป็นตัวอย่างมีระยะห่างช่วงเสา (Span) เท่ากับ 18 เมตร ความสูงของเสา 6 เมตรและระยะห่างช่วงเสาด้านข้าง (Bay Width) เท่ากับ 5 เมตร ภาพที่ 1 แสดงรูปแบบของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน และภาพที่ 2 แสดงรูปแบบของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครน โดยจำลองให้เครนอยู่ตำแหน่งบริเวณเสากลางของอาคาร โรงงานมีกำลังใช้งานขนาด 10 ตัน จำนวน 2 หลัง (อาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 และหลังที่ 2) ซึ่งมีความแตกต่างกันโดยเสาที่ใช้ในอาคารอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 มีกำลังเหลือมากกว่าเสาที่ใช้ในอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 จะมีกำลังของหน้าตัดที่ต่ำกว่าอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 เพื่อให้ค่าอัตราส่วนของแรงที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทาน (Demand-Capacity Ratio) ของชิ้นส่วนก่อนรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยที่ตัวอย่างอาคารมีค่าการเสียรูป (Deflection) ไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้เมื่อรับน้ำหนักตามแรงโน้มถ่วงและแรงลมตามมาตรฐาน ASCE7-16 [1] ในตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราส่วนของแรงที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 เปรียบเทียบกับโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 โดยที่ขนาดของหน้าตัดแต่ละอาคารเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 2



ก) รูปตัดด้านหน้า

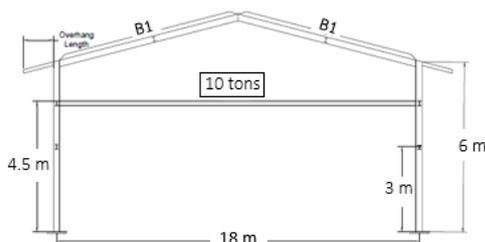


ข) รูปตัดด้านข้าง

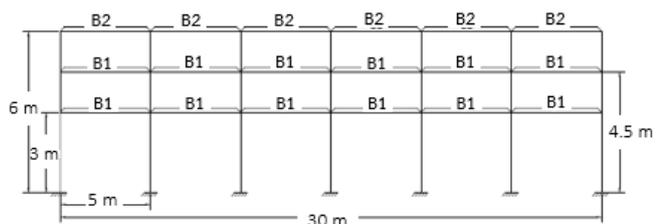


ค) แปลนด้านบน

ภาพที่ 1 รูปแบบของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน

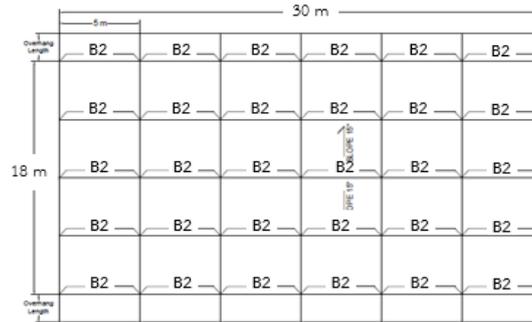


ก) รูปตัดด้านหน้า



ข) รูปตัดด้านข้าง

ภาพที่ 2 รูปแบบของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครน



ค) แปลนด้านบน

ภาพที่ 2 รูปแบบของอาคาร โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครน (ต่อ)

ตารางที่ 1 ค่าอัตราส่วนของโมเมนต์ดัดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 เปรียบเทียบกับ โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 เมื่อรับน้ำหนักตามแรง โน้มถ่วงและแรงลม ตามมาตรฐาน ASCE7-16 [1]

ชนิดของอาคารตัวอย่าง	อัตราส่วนของโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงในแนวแกนที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานของเสาที่มีค่ามากที่สุด
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1	0.563
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2	0.805

ตารางที่ 2 ตารางสรุปหน้าตัดหลักของอาคารตัวอย่าง

ชนิดของอาคารตัวอย่าง	หน้าตัดองค์อาคารหลัก			ปีกคานยื่น (Overhang Section)
	หน้าตัดคาน (B1)	หน้าตัดคาน (B2)	หน้าตัดเสา (C)	
โรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน	W300x150x36.7 กก./ม.	W250x125x29.6 กก./ม.	W300x150x36.7 กก./ม.	W150x75x14.0 กก./ม.
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1	W300x150x36.7 กก./ม.	W250x125x29.6 กก./ม.	W300x150x36.7 กก./ม.	W150x75x14.0 กก./ม.
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2	W300x150x36.7 กก./ม.	W250x125x29.6 กก./ม.	W250x125x29.6 กก./ม.	W150x75x14.0 กก./ม.

คุณสมบัติพลศาสตร์เชิงโหนดของอาคาร

คุณสมบัติพลศาสตร์เชิงโหนดของอาคาร โรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000 [5] สำหรับโหนดการสั่นไหวในทิศทาง X ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง X ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลัง 1 และหลังที่ 2 เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ สำหรับโหนดการสั่นไหวในทิศทาง Y จะพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง Y ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลัง 1 และหลังที่ 2 เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4, 6 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 โหมดการสั้นไหวในทิศทาง X ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง X ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง X (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง X (%)
1	0.56	81.1	81.1
2	0.48	5.4	86.5
3	0.41	0.9	87.4
4	0.38	3.1	90.5

ตารางที่ 4 โหมดการสั้นไหวในทิศทาง Y ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง Y ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง Y (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง Y (%)
1	0.98	85.4	85.4
2	0.35	10.4	95.9

ตารางที่ 5 โหมดการสั้นไหวในทิศทาง X ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง X ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง X (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง X (%)
1	0.65	70.2	70.2
2	0.50	19.4	89.6
3	0.40	0.8	90.4

ตารางที่ 6 โหมดการสั้นไหวในทิศทาง Y ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง Y ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง Y (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง Y (%)
1	0.89	77.6	77.6
2	0.39	21.4	99.0

ตารางที่ 7 โหมดการสั้นไหวในทิศทาง X ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง X ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง X (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง X (%)
1	0.77	78.2	78.2
2	0.57	14.5	92.7

ตารางที่ 8 โหมดการสั่นไหวในทิศทาง Y ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลในทิศทาง Y ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2

โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวลใน ทิศทาง Y (%)	ผลรวมของอัตราส่วนการมีส่วนร่วมของ มวลในทิศทาง Y (%)
1	1.01	87.3	87.3
2	0.43	12.3	99.6

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

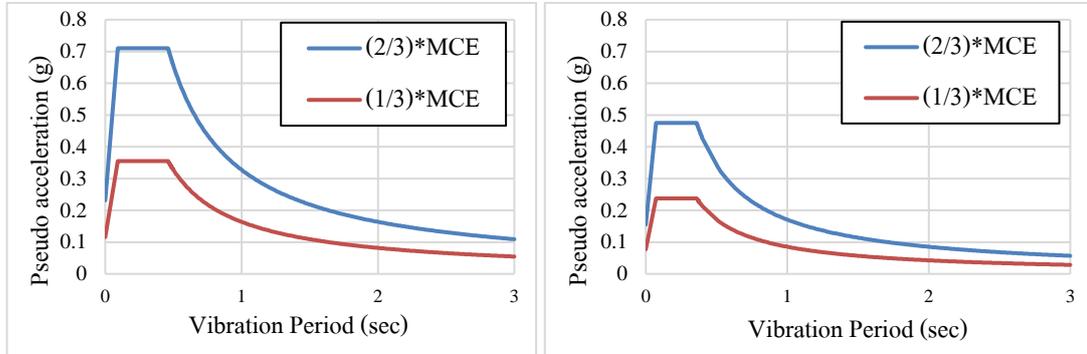
เมื่อพิจารณาความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่พิจารณา โดยอ้างอิงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่รายงานโดย Foytong และคณะ [3] จะพบว่า ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยอยู่ที่จังหวัดบึงกาฬและนครพนมมีค่าสูงกว่าที่ระบุในมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [2] ซึ่งอยู่ที่อำเภอนาหว้า จังหวัดเลย ทำให้ในการศึกษานี้จะทำการประเมิน โครงสร้างอาคาร โดยการเปรียบเทียบค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจาก มยผ. 1301/1302-61 [2] และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่พบใหม่จากบทความของ Foytong และคณะ [3] ตารางที่ 9 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake, MCE) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) จาก มยผ. 1301/1302-61 [2] และจากบทความของ Foytong และคณะ [3]

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุดระหว่าง มยผ. 1302-61 [2] และ Foytong และคณะ [3]

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สูงสุดที่พิจารณา	ความแตกต่างจาก		
	มยผ. 1301/1302-61 [2]	Foytong และคณะ [3]	มยผ. 1301/1302-61 [2]
ค่าความเร่งตอบสนองเชิง สเปกตรัมสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ การสั่น 0.2 วินาที (S_s), g	0.390	0.7	เพิ่มขึ้น 1.79 เท่า
ค่าความเร่งตอบสนองเชิง สเปกตรัมสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ การสั่น 1 วินาที (S_1), g	0.087	0.2	เพิ่มขึ้น 2.30 เท่า

จากตัวแปรข้างต้น เมื่อกำหนดให้ชั้นดินเป็นประเภท D จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน α ที่ตั้งอาคารสำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาทีและ 1 วินาที (F_s และ F_1) เท่ากับ 1.6 และ 2.4 ตามลำดับ จากนั้นสามารถนำไปสร้างสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ซึ่งพิจารณาแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DE) หรือแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงประมาณ (2/3)MCE โดยมีการปรับค่าความหน่วงให้มีค่าเท่ากับ 2% จากนั้นทำการคำนวณปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินและออกแบบการเสริมความมั่นคงแข็งแรง โครงสร้างซึ่งมีค่าครึ่งหนึ่งของสเปกตรัมผลสนองสำหรับการออกแบบ สามารถนำไปสร้างสเปกตรัมสำหรับแผ่นดินไหวที่ระดับความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน (Basic Safety Earthquake, BSE) หรือแผ่นดินไหวที่มีความ

รุนแรงประมาณ $(1/3)MCE$ [6] โดยมีการปรับค่าความหน่วงให้มีค่าเท่ากับ 2% ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมผลตอบสนองซึ่งพิจารณาแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงประมาณ $(2/3)MCE$ และ $(1/3)MCE$ ระหว่างค่าสเปกตรัมผลตอบสนองที่ได้จาก มยผ.1302-61 [2] และ Foytong และคณะ [3]



ก) ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจาก

Foytong และคณะ [3]

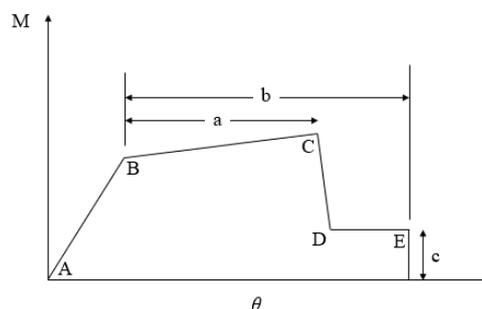
ข) ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจาก

มยผ.1302-61 [2]

ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมผลตอบสนองซึ่งพิจารณาแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงประมาณ $(2/3)MCE$ และ $(1/3)MCE$

แบบจำลองจุดหมุนพลาสติก

ปัจจุบันมาตรฐานที่นิยมใช้ในการประเมินโครงสร้างเหล็กคือมาตรฐาน ASCE ซึ่งบทความนี้จะใช้แบบจำลองแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนที่สร้างจากมาตรฐาน ASCE41-17 [1] ซึ่งเป็นฉบับล่าสุด ภาพที่ 4 แสดงแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของมาตรฐาน ASCE41-17 [1] โดยเส้น AB แสดงพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ของชิ้นส่วนโครงสร้าง และพฤติกรรมในช่วงพลาสติกจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรก เส้น BC จะแสดงพฤติกรรมพลาสติกช่วงก่อนถึงจุดสูงสุด (Pre-peak Plastic) ซึ่งในช่วงนี้กำลังของชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้น ต่อมาในช่วงของเส้น CD แสดงพฤติกรรมของชิ้นส่วนในช่วงหลังจุดสูงสุด (Post-peak Plastic) ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังของชิ้นส่วนและความแข็ง (Stiffness) ของชิ้นส่วนลดลง สุดท้าย เส้น DE แสดงกำลังคงค้าง (Residual Strength) ของชิ้นส่วนและในจุด E ชิ้นส่วนสูญเสียความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก



ภาพที่ 4 แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในมาตรฐาน ASCE41-17 [1]

สมการในการคำนวณหาโมเมนต์พลาสติกตามมาตรฐาน ASCE41-17 [1] ของชิ้นส่วนคานเป็นไปตามสมการที่ (1) ในขณะที่สมการการคำนวณหาโมเมนต์พลาสติกของชิ้นส่วนเสาเป็นไปตามสมการที่ (2) หรือ (3)

$$M_{pe} = F_{ye}Z \quad (1)$$

$$M_{pce} = F_{ye}Z \left(1 - \frac{|P|}{2P_{ye}} \right) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{|P|}{P_{ye}} < 0.2 \quad (2)$$

$$\text{หรือ} \quad M_{pce} = F_{ye}Z \frac{9}{8} \left(1 - \frac{|P|}{P_{ye}} \right) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{|P|}{P_{ye}} \geq 0.2 \quad (3)$$

โดยที่	M_{pe}	คือ	โมเมนต์พลาสติกที่คาดหวังของชิ้นส่วนคาน
	M_{pce}	คือ	โมเมนต์พลาสติกที่คาดหวังของชิ้นส่วนเสา
	F_{ye}	คือ	ความเค้นที่จุดครากที่คาดหวังของเหล็ก
	Z	คือ	โมดูลัสพลาสติกของหน้าตัด
	P	คือ	แรงตามแนวแกนในเสา (แรงอัดหรือแรงดึง)
	P_{ye}	คือ	กำลังรับแรงตามแนวแกนที่จุดครากที่คาดหวังของชิ้นส่วนเสา (มีค่าเท่ากับ $A_g F_{ye}$)

การคำนวณหามุมหมุนที่จุดครากของชิ้นส่วนคานและเสาตามมาตรฐาน ASCE41-17 [1] เป็นไปตามสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

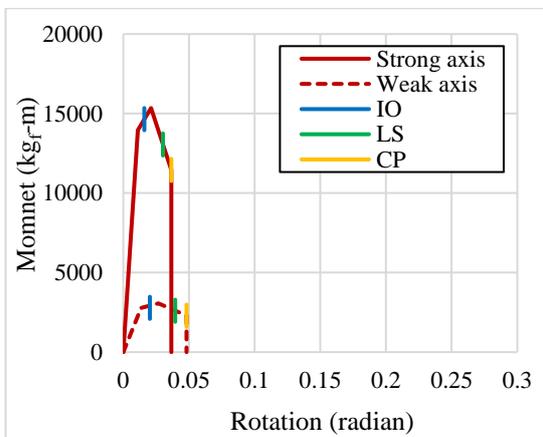
$$\theta_y = \frac{M_{pe}L}{6EI} \left(1 + \frac{12EI}{L^2 GA_s} \right) \quad (4)$$

$$\theta_y = \frac{M_{pce}L}{6\tau_b EI} \left(1 + \frac{12EI}{L^2 GA_s} \right) \quad (5)$$

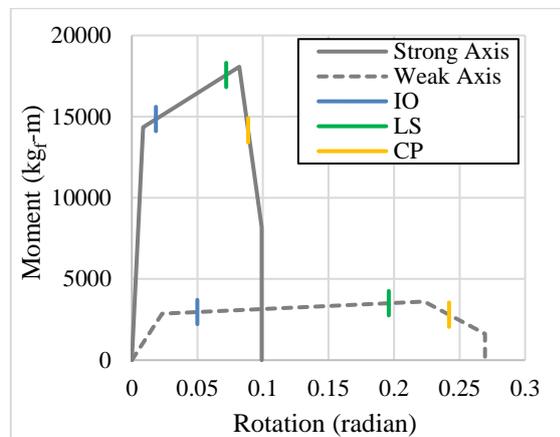
โดยที่	G	คือ	โมดูลัสการเฉือนของเหล็ก
	L	คือ	ความยาวของชิ้นส่วน
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก
	I	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด
	A_s	คือ	พื้นที่รับแรงเฉือนของหน้าตัด ($A_s = (d_b - 2t_f)t_w$)
	d_b	คือ	ความลึกของหน้าตัด
	t_f	คือ	ความหนาของปีก
	t_w	คือ	ความหนาของเอว
	τ_b	คือ	1 เมื่อ $\frac{ P }{P_{ye}} \leq 0.5$
		หรือ	$4 \frac{ P }{P_{ye}} \left(1 - \frac{ P }{P_{ye}} \right)$ เมื่อ $\frac{ P }{P_{ye}} > 0.5$

ในส่วนของตัวแปร a, b และ c ในภาพที่ 4 รวมทั้งเกณฑ์การยอมรับ สามารถคำนวณได้ตามบทที่ 10 ในมาตรฐาน ASCE41-17 [1] และหากเสาได้รับอัตราส่วนแรงในแนวแกนที่มีค่ามากกว่า 0.6 มาตรฐาน ASCE41-17 [1] จะกำหนดให้ชิ้นส่วนมีพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง (Force-Controlled) หรือมีระยะการเสียดรูปพลาสติกเท่ากับศูนย์ บทความนี้ได้ทำการจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของโมเมนต์คัตและแกนคัตของเสาและคานในอาคารเชิงเส้น แต่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากแรงเฉือนเมื่อโครงสร้างได้รับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนรอบแกนคัตหลักและแกนคัตรองของเสาและคานในอาคารโรงงานอุตสาหกรรมหลังที่ 1 ซึ่งเสาและคานใช้หน้าตัดปีกกว้าง W300x150x36.7 กก./ม. โดยที่เสาได้รับอัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากับ 0.05 มีการวางแนวของเสาและคานดังภาพที่ 6 โดยที่เมื่ออาคารตัวอย่างถูกผลักในทิศทาง X ชิ้นส่วนจะถูกคัตรอบแกนคัตหลัก ในขณะที่เมื่อถูกผลักในทิศทาง Y ชิ้นส่วนเสาจะถูกคัตรอบแกนคัตรอง

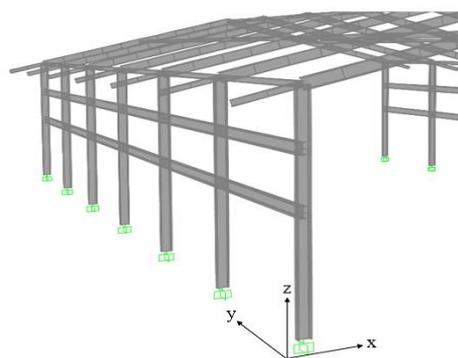


ก) แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของเสา



ข) แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของคาน

ภาพที่ 5 แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนในอาคารโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง

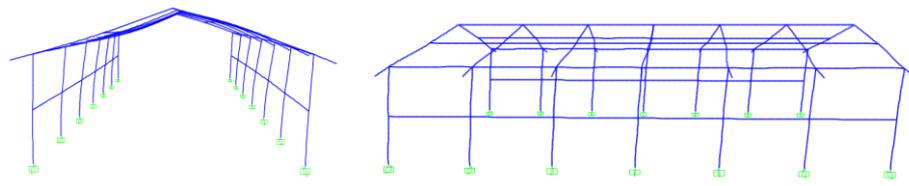


ภาพที่ 6 การวางแนวของเสาและคานในอาคารตัวอย่าง

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น

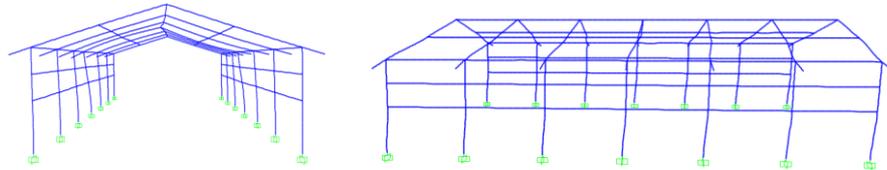
การวิเคราะห์โครงสร้างในบทความนี้พิจารณาการเสียดรูปแยกทิศทาง X และทิศทาง Y โดยในภาพที่ 7 และ 8 แสดงโหมดการสั่นไหวที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดหลักที่มีมวลประจำโหมด (Modal Mass) มากที่สุดของแต่ละตัวอย่างอาคาร โดยที่โหมดอื่น ๆ ของโครงสร้างนั้นไม่พบความเสียหายเกิดขึ้น



ก) ทิศทาง X

ข) ทิศทาง Y

ภาพที่ 7 โหมดการสั่นไหวที่ 1 ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน



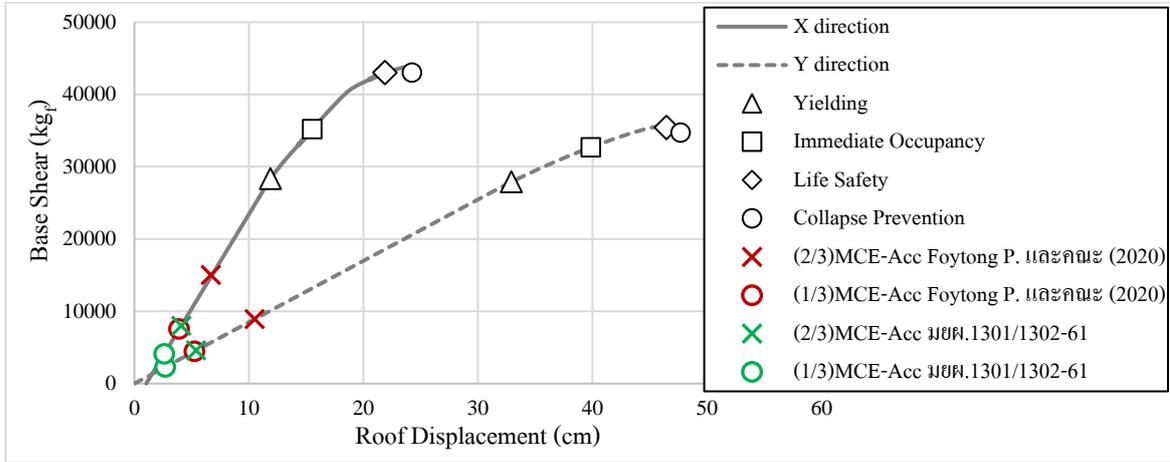
ก) ทิศทาง X

ข) ทิศทาง Y

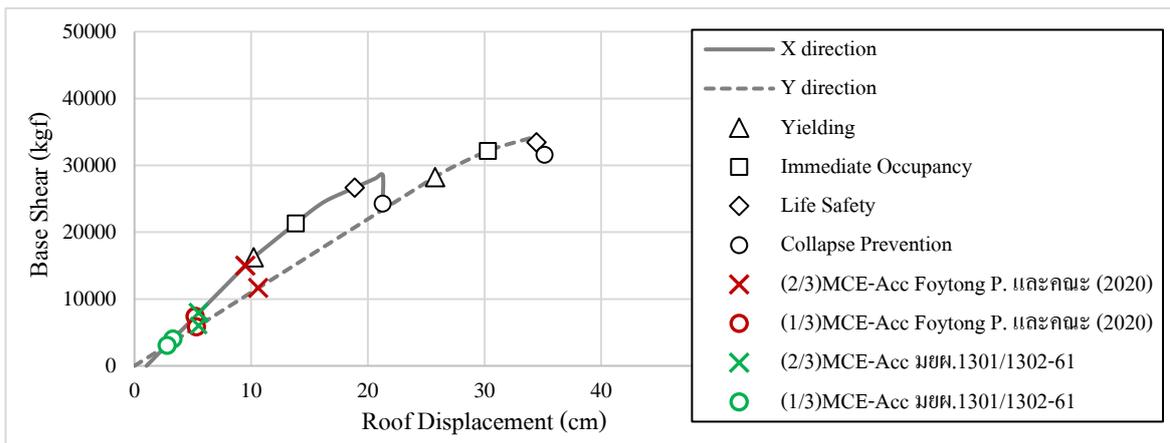
ภาพที่ 8 โหมดการสั่นไหวที่ 1 ของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 และ หลังที่ 2

ในการศึกษานี้ได้อ้างอิงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่ความรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [2] เทียบกับผลการศึกษาโดย Foytong และคณะ [3] ผลการวิเคราะห์ของโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างทั้ง 3 รูปแบบจะเห็นได้ว่า ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) ณ บริเวณหลังคา ที่ได้จากค่าความเร่งสูงสุดที่พิจารณาตาม มยผ. 1301/1302-61 [2] จะให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Foytong และคณะ [3] เนื่องจากค่าความเร่งสูงสุดที่พิจารณาตาม มยผ. 1301/1302-61 [2] มีค่าน้อยกว่าค่าจากงานวิจัยของ Foytong และคณะ [3] และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น โดยใช้แบบจำลองจุดหมุนพลาสติกตามมาตรฐาน ASCE41-17 [1] ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของเส้นโค้งกำลัง (Capacity Curve) ดังภาพที่ 9 ถึง 11 จากผลการศึกษาพบว่า โรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครนและ โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว (1/3)MCE และ (2/3)MCE เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของอาคารที่ถูกผลักไปทั้งในทิศทาง X และ Y ชั้นส่วนโครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น ในขณะที่โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว (1/3)MCE โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาจากผลการศึกษาโดย Foytong และคณะ [3] เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของอาคารที่ถูกผลักไปทั้งในทิศทาง X และ Y ชั้นส่วนโครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น แต่ภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง (2/3)MCE พบว่า ในทิศทาง X ชั้นส่วนเสาเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้น แต่ยังมีระดับสมรรถนะไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับให้ในระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy, IO) ในขณะที่ทิศทาง Y ยังไม่เกิดจุดหมุนพลาสติก และเมื่อพิจารณาใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาตาม มยผ. 1301/1302-61 [2] พบว่า ที่ความรุนแรง (1/3)MCE และ (2/3)MCE ทั้งทิศทาง X และ Y ชั้นส่วนโครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น โดยตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 แสดงในภาพที่ 12 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ชั้นส่วนเสาที่เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นคือเสาดำแหน่งบริเวณที่รับน้ำหนักของรางเครน ในโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน เสาที่มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนสูงที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางอาคาร มีค่าเท่ากับ 0.02 โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 เสาที่มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนสูงที่สุดเท่ากับ 0.05 ในขณะที่โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 ซึ่งมีขนาดหน้าตัดของเสาเล็กกว่า มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากับ 0.06 ซึ่งทำให้โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 มีแรงเฉือนที่ฐานน้อยกว่าโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครน

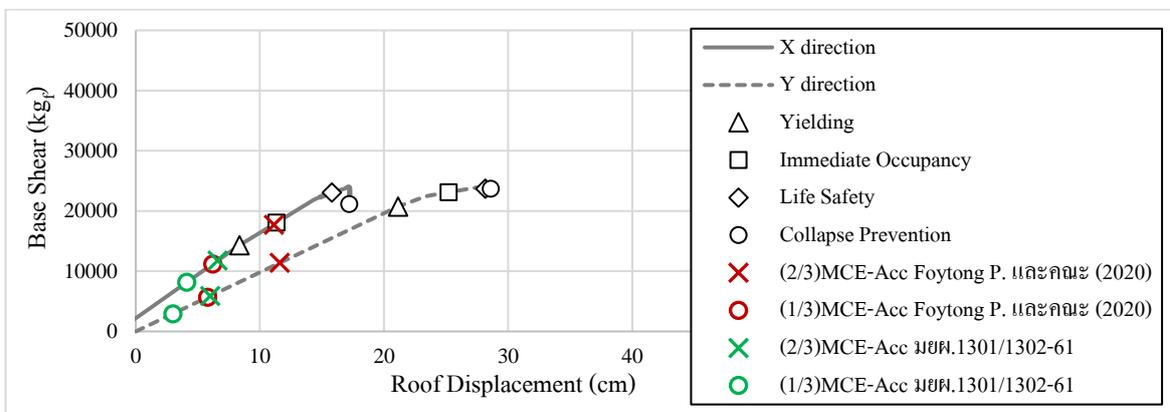
หลังที่ 1 ประมาณ 16% ทั้งโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 และหลังที่ 2 แรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนจะมีค่าเข้าใกล้จุดครากมากกว่าในกรณีของโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน ทำให้สรุปได้ว่า น้ำหนักของรางเครนส่งผลให้เสาบริเวณนั้นรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ทำให้เสาอาจเกิดความเสียหายได้



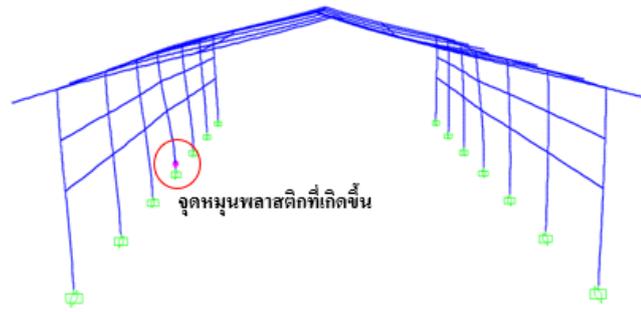
ภาพที่ 9 เส้นโค้งกำลังแบบโหมดที่ 1 ของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน



ภาพที่ 10 เส้นโค้งกำลังแบบโหมดที่ 1 ของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1



ภาพที่ 11 เส้นโค้งกำลังแบบโหมดที่ 1 ของอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2



ภาพที่ 12 ตำแหน่งที่เกิดจุดหมุนพลาสติกของอาคาร โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2
 ณ การเคลื่อนที่เข้าภายในทิศทาง X ภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง (2/3)MCE เมื่อ
 ใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา
 จากผลการศึกษา โดย Foytong และคณะ [3]

ผลตรวจสอบความเสียหายของเสาเนื่องจากแรงเฉือน

เนื่องจากในบทความนี้ได้สมมติให้แรงเฉือนมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น ทำให้ต้องมีการตรวจสอบความเสียหาย
 เนื่องจากแรงเฉือน จากการตรวจสอบค่าอัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทาน ดังแสดงใน
 ตารางที่ 10 พบว่า ชิ้นส่วนเสาไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน

ตารางที่ 10 อัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานของชิ้นส่วนเสา

ประเภทของอาคาร	อัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทาน			
	ทิศทาง X		ทิศทาง Y	
	Foytong และคณะ [3]	มยศ. 1301/1302-61 [2]	Foytong และคณะ [3]	มยศ. 1301/1302-61 [2]
โรงงานอุตสาหกรรม แบบไม่มีรางเครน	0.213	0.195	0.020	0.011
โรงงานอุตสาหกรรม แบบมีรางเครนหลังที่ 1	0.198	0.150	0.021	0.011
โรงงานอุตสาหกรรม แบบมีรางเครนหลังที่ 2	0.212	0.169	0.024	0.013

ผลตรวจสอบความเสียหายของจุดต่อฐานเสา

เมื่อโครงสร้างอาคารได้รับแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว โครงสร้างต้องแบกรับน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้นจาก
 เดิม ทำให้อาจเกิดความเสียหายบริเวณจุดต่อฐานเสาได้ จึงต้องมีการตรวจสอบว่า บริเวณจุดต่อมีกำลังต้านทานแรงคด
 และกำลังต้านทานแรงเฉือนเพียงพอสำหรับถ่ายน้ำหนักจากเสาผ่านแผ่นรองไปยังฐานรากคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย
 หรือไม่ ซึ่งจากการตรวจสอบอาคาร โรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า จุดต่อฐานเสาเกิดความเสียหายเนื่องจาก
 โมเมนต์คดแต่ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน กำลังต้านทานของจุดต่อและกำลังที่ต้องต้านทานสูงสุดแสดงดัง
 ตารางที่ 11

ตารางที่ 11 กำลังต้านทานของจุดต่อและกำลังที่ต้องต้านทานสูงสุด

ประเภทของอาคาร	กำลังต้านทานของตัวยึด		กำลังที่ต้องต้านทานสูงสุด			
	โมเมนต์คัต (kg _r -m)	แรงเฉือน (kg)	โมเมนต์คัต (kg _r -m)		แรงเฉือน (kg)	
			Foytong และคณะ [3]	มยผ. 1301/1302-61 [2]	Foytong และคณะ [3]	มยผ. 1301/1302-61 [2]
โรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน	5484.97	13833.04	11820.8	8535.54	3276.8	2499.28
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1	5484.97	13833.04	13987.1	8848.57	4122.5	2738.33
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2	5484.97	13833.04	10843.2	7017.21	3472.2	2356.75

ผลตรวจสอบความเสียหายบริเวณรอยต่อของเสาและคาน (Panel Zone)

ในบทความนี้สมมติให้ไม่เกิดความเสียหายบริเวณรอยต่อของเสาและคานจึงไม่ได้ทำการจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของรอยต่อ แต่จำเป็นต้องทำการตรวจสอบความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน โดยวิธีการคำนวณ ซึ่งจากการตรวจสอบอาคารโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า เมื่อโครงสร้างได้รับแรงแผ่นดินไหวภายใต้ความเร่งตอบสนองสเปกตรัมจากทั้ง มยผ.1302-61 [2] และ Foytong และคณะ [3] รอยต่อของเสาและคานไม่เกิดความเสียหาย ค่าอัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานบริเวณรอยต่อของเสาและคาน แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 อัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานบริเวณรอยต่อของเสาและคาน

ประเภทของอาคาร	อัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทาน			
	ทิศทาง X		ทิศทาง Y	
	Foytong และคณะ [3]	มยผ. 1301/1302-61 [2]	Foytong และคณะ [3]	มยผ. 1301/1302-61 [2]
โรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน	0.088	0.057	0.267	0.175
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1	0.055	0.035	0.206	0.150
โรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2	0.061	0.012	0.256	0.157

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เมื่อทำการประเมินตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 รูปแบบด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองจุดหมุนพลาสติกตามมาตรฐาน ASCE41-17 [1] พบว่า

1) เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมแบบไม่มีรางเครน พบว่า ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ความเร่งจาก มยพ.1302-61 [2] และ Foytong และคณะ [3] ที่มีความรุนแรง $(1/3)MCE$ และ $(2/3)MCE$ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของอาคารที่ถูกผลักไปทั้งใน X และ Y ชั้นส่วน โครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น

2) เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 1 พบว่า ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ความเร่งจาก มยพ.1302-61 [2] และ Foytong และคณะ [3] ที่มีความรุนแรง $(1/3)MCE$ และ $(2/3)MCE$ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของอาคารที่ถูกผลักไปทั้งใน X และ Y ชั้นส่วน โครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น

3) เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมแบบมีรางเครนหลังที่ 2 พบว่า ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ความเร่งจาก Foytong และคณะ [3] ที่มีความรุนแรง $(1/3)MCE$ ทั้งทิศทาง X และ Y ชั้นส่วน โครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น แต่ภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง $(2/3)MCE$ พบว่า ในทิศทาง X ชั้นส่วนเสาเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้น แต่ยังมีระดับสมรรถนะไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับในระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy, IO) ในขณะที่ทิศทาง Y ยังไม่เกิดจุดหมุนพลาสติก ในขณะที่ ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้ความเร่งจาก มยพ.1302-61 [2] พบว่า ที่ความรุนแรง $(1/3)MCE$ และ $(2/3)MCE$ ทั้งทิศทาง X และ Y ชั้นส่วน โครงสร้างยังไม่มีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น

4) ตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 รูปแบบ ชั้นส่วนทั้งเสาและคานไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณรอยต่อของเสาและคานไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ในขณะที่จุดต่อฐานเสาเกิดความเสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัดแต่มีความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยจากทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษาเพื่อให้สามารถรับนักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญ ประจำปีการศึกษา 2561

เอกสารอ้างอิง

1. American Society of Civil Engineers. Seismic evaluation and retrofit of existing building, ASCE 41- 17. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. 2017.
2. DPT. Earthquake Resistant Design Code 1301/1302-18. Earthquake Resistant Design Code, Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand. 2018.
3. Foytong P, Ornthammarath T, Arjwech R, Janpila A, Areemit N, Ruangrassamee A, Chindaprasert P. Probabilistic seismic hazard assessment of North-Eastern Thailand. KSCE Journal of Civil Engineering, 24(6), 1845-1857; 2020.
4. American Society of Civil Engineers. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. 2016.
5. SAP2000 21. CSI, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, U.S.A.
6. DPT. Assessment and Strengthening of the Building Structures in Areas of the Earthquake Zone Code 1303-14. Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand. 2014.