พฤติกรรมโครงสร้างชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS ภายใต้แรงสลับทิศ
Behavior of High-Rise ASRS Steel Storage Rack Structure under Cyclic Loading

ปารณัท รัตนธรรมสกุล[1], เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย[2], วงศา วรารักษ์สัจจะ[3], สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[4] และ ชัยณรงค์ อธิสกุล[5]

[1,2,4,5]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[3]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
Corresponding author; E-mail address: paranut.rnt@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้งานชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับระบบจัดเก็บสินค้าแบบอัตโนมัติ (Automatic Storage and Retrieval System, ASRS) การศึกษาและทดสอบโครงสร้างชั้นวางสินค้าในงานวิจัยในอดีต จะเน้นไปที่การทดสอบโครงชั้นวางสินค้าปรกติทั่วไปที่มีความสูงไม่มาก โครงสร้างชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS ที่มีใช้ในประเทศ ในปัจจุบันจะมีความสูงกว่า 20 ถึง 30 เมตร ซึ่งยังไม่เคยมีข้อมูลการทดสอบพฤติกรรมและการรับแรงของโครงชั้นวางสินค้ารูปแบบนี้ในห้องปฏิบัติการมาก่อน บทความนี้นำเสนอการทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS ภายใต้แรงสลับทิศ โดยอาศัยการทดสอบส่วนของโครงสร้างชั้นวางสินค้า (Sub-assemblage) ที่ใช้องค์อาคารขนาดเท่าของจริง ตัวอย่างทดสอบโครงชั้นวางสินค้านี้กำหนดให้มีความสูงรวม 4 เมตร ความกว้างสองช่วงเสารวม 5 เมตร และความลึก 0.98 เมตร ที่เป็นตัวแทนของชั้นวางสินค้า 2 ชั้นล่างสุดของโครงสร้าง การทดสอบจะกระทำโดยการให้น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งที่มีค่าคงที่ ร่วมกับการให้แรงด้านข้างจำนวน 2 จุดตามความสูง โดยให้อัตราส่วนของแรงกระทำด้านข้างตามความสูงคงที่ ผลจากการทดสอบที่สำคัญประกอบด้วย ระยะการเคลื่อนตัว แรงเฉือนที่ฐาน และ รูปแบบการวิบัติของโครงชั้นวางสินค้า

คำสำคัญ: ชั้นวางสินค้า, แรงสลับทิศ, ระบบจัดเก็บสินค้าอัตโนมัติ

Abstract

Ultra-high steel storage racks are becoming more common to accommodate Automatic Storage and Retrieval System (ASRS). Past research studies on the behavior of steel storage rack focused on typical low-rise industrial racks. However, steel storage racks for ASRS system currently being used in Thailand might be as high as 20-30 meters. This article presents the behavior of high-rise ASRS steel storage rack structure under cyclic loading. The cyclic test was carried out by using a sub-assemblage structure which uses full-scaled cold-formed steel sections. The test specimen was 4 meters in height, 5 meters in width with 2 bays, and 0.98 meters in depth. The specimen represented the first 2 stories of the structure. The test was carried out under constant vertical load and varying lateral loads applying at 2 different points along the height of the structure. The magnitude of the lateral loads at the two levels were kept with a constant ratio. The key test results included displacement, base shear, and failure mode of the structure.

Keywords: Storage rack structure, Cyclic loading, Automatic Storage and Retrieval System

1. บทนำ

ระบบจัดเก็บสินค้ารูปแบบหนึ่งที่สามารถดึงประสิทธิภาพการใช้สอยพื้นที่ในอาคารให้เกิดประโยชน์สูงสุด คือ ระบบจัดเก็บสินค้า ASRS (Automated Storage and Retrieval Systems) ที่มีรูปแบบเป็นชั้นวางสินค้าที่ใช้ร่วมกับระบบอัตโนมัติในการจัดเก็บ และเบิกจ่ายสินค้า โดยทั่วไปแล้วระบบเหล่านี้ประกอบไปด้วย ชุดชั้นวางสินค้าที่ติดตั้งร่วมกับเครนยกและจัดเก็บสินค้า และเชื่อมต่ออยู่กับระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถจัดเก็บ และเบิกจ่ายสินค้าได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพ

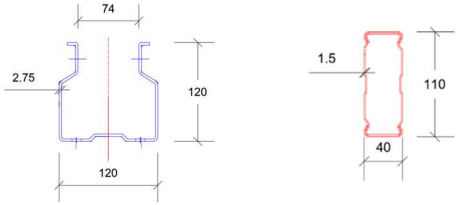
ในประเทศไทยระบบจัดเก็บสินค้า ASRS เริ่มมีการนำเข้ามาใช้เพิ่มมากขึ้น และใช้กับชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษ 20 ถึง 30 เมตร ซึ่งยังไม่เคยมีข้อมูลการทดสอบพฤติกรรมและการรับแรงของโครงสร้างชั้นวางสินค้ารูปแบบนี้ในห้องปฏิบัติการมาก่อน การทดสอบในอดีตมุ่งเน้นไปที่การทดสอบโครงชั้นวางสินค้าปรกติทั่วไปที่มีความสูงไม่มากตามมาตรฐาน ANSI RMI และ FEM 10.2.06 [1,2] การนำโครงสร้างชั้นวางสินค้าที่ใช้งานทั่วไป มาประยุกต์ใช้กับระบบจัดเก็บสินค้า ASRS วิศวกรจึงจำเป็นเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าที่มีความสูงมากเป็นพิเศษแตกต่างการใช้งานปรกติ จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและนำไปประยุกต์ให้เข้ากับการออกแบบและใช้งานจริงตามคลังสินค้า

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS ภายใต้แรงสลับทิศ เพื่อศึกษาพฤติกรรม รวมถึงรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นของโครงชั้นวางสินค้า ในการศึกษาจะใช้การทดสอบส่วนของโครงสร้างชั้นวางสินค้า (Sub-assemblage) ที่ใช้องค์อาคารขนาดเท่าของจริง ตัวอย่างทดสอบโครงชั้นวางสินค้านี้มีความสูงรวม 4 เมตร ความกว้างสองช่วงเสารวม 5 เมตร และความลึก 0.98 เมตร โดยจำลองมาจากชั้นวางสินค้า 2 ชั้นล่างสุดของโครงสร้างชั้นวางสินค้าจริงที่มีความสูงทั้งสิ้น 16 ชั้น วัสดุทำมาจากเหล็กรีดเย็น (Cold-formed steel) การทดสอบโครงสร้างทำโดยวิธีการให้แบบสลับทิศ (Cyclic Test) และแรงกระทำแบบทิศทางเดียว (Monotonic loading) ภายใต้แรงกดในแนวดิ่ง (Vertical load) เพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกของสินค้าทั้งหมด

2. การทดสอบภายใต้แรงสลับทิศ (Cyclic test)

การทดสอบให้แรงแบบสลับทิศจะเป็นการจำลอง การรับแรงด้านข้างในทิศทางตามยาวของชั้นวางสินค้า (Down Aisle Direction) [3] โดยโครงชั้นวางสินค้าสองชั้น ความสูงรวม 4 เมตร จำนวนสองช่วงเสา ดังแสดงในรูปที่ 1 วัสดุที่ใช้สำหรับเสาและคาน ทำจากเหล็กรีดเย็นชั้น Q345B โดยมีค่าความเค้นคราก (Yielding stress) ที่ 345 MPa หน้าตัดเสารูปแบบ Omega Section มีขนาด 120x120x2.75 มิลลิเมตร และ หน้าตัดคานรูปกล่องสี่เหลี่ยมมีขนาด 110x40x1.5 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้เสาและคานของโครงสร้างชั้นวางสินค้ามีขนาดและสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 1 โครงสร้างชั้นวางสินค้าที่ใช้ในการทดสอบ



(ก) เสา: C1 (ข) คาน: B1

รูปที่ 2 โครงสร้างชั้นวางสินค้าที่ใช้ในการทดสอบ

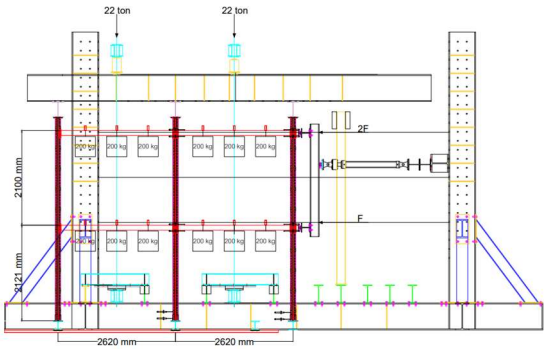
ตารางที่ 1 สมบัติเสาและคานของโครงสร้างชั้นวางสินค้า

Member	Area (cm^2)	I_x (cm^4)	I_y (cm^4)	Modulus of Elasticity (GPa)
Upright 120x120x2.75	12.12	264.78	207.58	200
Beam 110x40x1.5	6.14	113.92	22.12	200

2.1 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งอยู่ในโครงทดสอบ ประกอบด้วยโครง Reaction Frame สำหรับให้แรงทางด้านข้าง และร่วมกับการให้แรงในแนวดิ่งโดยใช้ ลวดอัดแรง (PT Bar) ติดตั้งอยู่บน Linear Bearing ที่สามารถเคลื่อนตัวในแนวราบ ไปพร้อมกับโครงอาคารตัวอย่าง เพื่อให้ให้แรงจากลวดอันแรงมีทิศทางอยู่ในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3

(ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



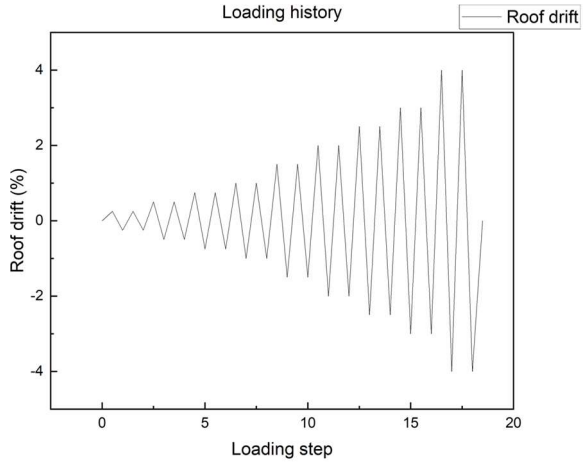
(ข) แบบแปลนการติดตังตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ

2.2 แรงในการทดสอบ

การทดสอบนี้จะใช้แรงในรูปแบบสามเหลี่ยมผกผัน (Inverse Triangular Loading Pattern) โดยให้แรงกระทำที่ที่ชั้นบน มีค่าเป็นสองเท่าของแรงกระทำในชั้นล่าง โดยการให้แรงผ่านคานกระจายแรงในแนวดิ่งก่อนการทดสอบด้วยแรงในแนวดิ่ง จะให้น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งด้วยลวดอัดแรงที่ 220 kN จำนวนสองจุด และกำหนดให้แรงกระทำในด้านข้างกระทำเป็นรอบๆ ตามค่าการเคลื่อนที่กำหนด โดยที่แต่ละค่าการเคลื่อนที่ (Loading Step) ดังแสดงในตารางที่ 3 จะให้แรงสองรอบ เป็นไปตามรูปแบบการให้แรง (Loading History) ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงค่าการเคลื่อนตัว โดยกำหนดเป็นค่าร้อยละของความสูงตัวอย่าง (Roof Drift) หลังการทดสอบเสร็จสิ้น จะเปลี่ยนเป็นการให้แรงกระทำด้านเดียว (Monotonic Loading) ดังจะอธิบายในรายละเอียดต่อไป ในการทดสอบจะทำการบันทึกผล ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการเคลื่อนตัวของโครงชั้นวางสินค้า



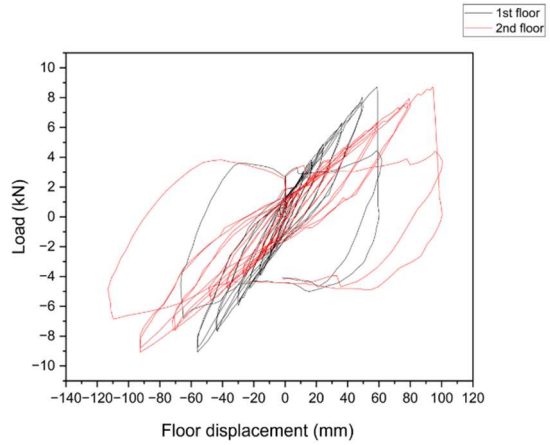
รูปที่ 4 Loading history ของแรงกระทำในด้านข้าง (Lateral load)

ตารางที่ 3 Loading history

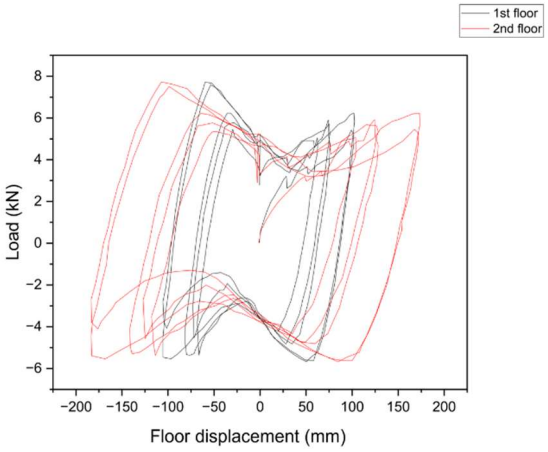
Loading Step	Roof drift (%)
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1.00
5	1.50
6	2.00
7	2.50
8	3.00
9	4.00

2.3 ผลการทดสอบภายใต้แรงสลับทิศ

ผลการทดสอบโครงสร้างชั้นวางสินค้าภายใต้แรงสลับทิศ จะแสดงผลแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก ทำการทดสอบที่ค่าการเคลื่อนตัวจาก 0 จนถึงค่าการเคลื่อนตัวที่ร้อยละ 2.5 และช่วงที่สอง ทำการทดสอบจากค่าการเคลื่อนตัวที่ ร้อยละ 2.5 ถึง ร้อยละ 4 ผลการทดสอบในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและระยะการเคลื่อนตัวดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนที่ฐานกับระยะการเคลื่อนตัวช่วงแรก

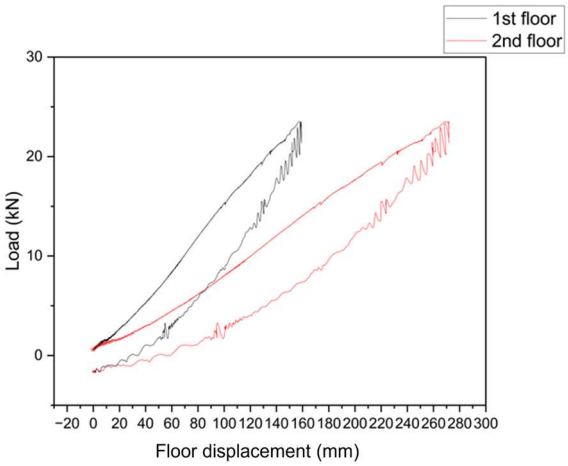


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนที่ฐานกับระยะการเคลื่อนตัวช่วงที่สอง

จากรูปที่ 5 พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงด้านข้างมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยในช่วงแรกของการทดสอบจะเกิดแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทาน เมื่อแรงกระทำที่ฐานอาคารมีค่าประมาณ 9 kN พบว่าแรงที่กระทำนั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากที่ราง Linear Bearing เริ่มทำงานและเกิดการไถล จากนั้นจึงเข้าสู่ช่วงที่สองของการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นกำลังต้านทานจริงที่เกิดจากตัวโครงชั้นวางสินค้าเอง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า โครงชั้นวางสินค้าสามารถเสียรูปได้มากโดยไม่เกิดการวิบัติวิบัติขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงชั้นวางสินค้ามีค่าค่อนข้างต่ำมาก ดังนั้นในการใช้งานจริงสำหรับการรับแรงด้านข้าง เช่น แรงแผ่นดินไหว จำเป็นต้องมีการใช้ระบบค้ำยันด้านข้าง (Lateral Bracing) ร่วมในการรับแรงด้วย

3. ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Test)

การทดสอบนี้นับเป็นการทดสอบในช่วงที่ 3 หลังจากที่ทำการทดสอบแบบ Cyclic Test จนกระทั่งตัวราง Linear Bearing ได้เคลื่อนตัวจนถึงระยะที่จำกัดแล้ว จึงต้องมีการถอนน้ำหนักในแนวดิ่งออก แล้วจึงทำการทดสอบโดยการให้แรงกระทำข้างเดียวในทิศทางเดียวต่อไป จนค่าการเคลื่อนไปถึงร้อยละ 6 เมื่อตัวอย่างเกิดการวิบัติที่จึงยุติการทดสอบ ผลการทดสอบในช่วงที่ 3 นี้แสดงในรูปที่ 7



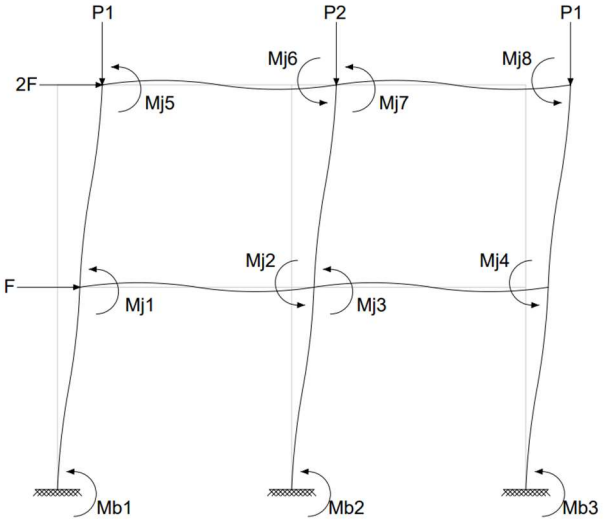
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนที่ฐานกับระยะการเคลื่อนตัวช่วงที่สาม

ผลการทดสอบพบว่าการวิบัติเกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อ (Joint Connection Failure) โดยตัวตะขอ (Tab) ที่ใช้ยึดคานเข้ากับเสา เกิดความเสียหายจากการฉีกขาด ดังแสดงในรูปที่ 9 แต่เนื่องจากสลักเกลียวนิรภัย (Safety Bolt) ที่ตั้งอยู่ที่บริเวณกึ่งกลาง ทำให้โครงชั้นวางสินค้า ยังสามารถตั้งอยู่ได้ ดังนั้นตัวสลักนิรภัยจึงมีความสำคัญอย่างมากในการใช้งานจริง

รูปที่ 8 ลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ

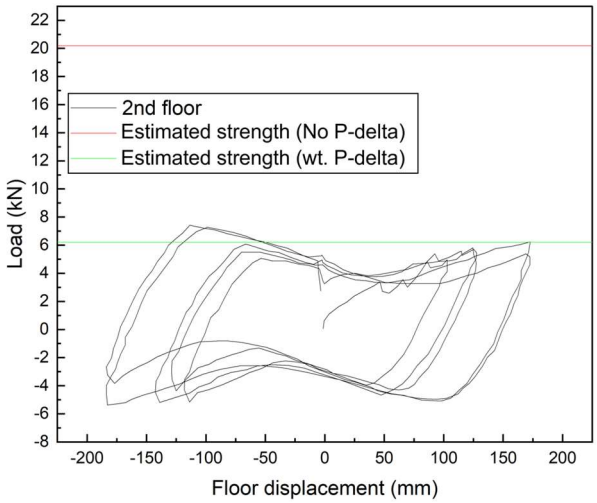
รูปที่ 9 การวิบัติเกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อ (Joint Connection Failure)

จากผลการทดสอบการรับแรงในช่วงที่ 3 พบว่าโครงตัวอย่าง มีค่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงขึ้นอย่างมีนัย หลังจากที่มีการปลดน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งออก ดังจะเห็นได้จากค่ากำลังต้านแรงด้านข้างในรูปที่ 7 ที่มีค่าสูงสุดที่ประมาณ 25 kN มากกว่าค่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างจากการทดสอบในช่วงที่ 2 (รูปที่ 6) ที่มีค่าประมาณ 7 kN กว่า 3 เท่าตัว ทั้งนี้สาเหตุหลักของความแตกต่างด้านกำลังต้านทานแรงด้านข้าง เป็นผลมาจากผลกระทบของ P-delta ที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง



รูปที่ 10 Free body diagram ของโครงชั้นวางสินค้าที่มีผลกระทบของ P-delta

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังต้านทานแรงด้านข้างที่ค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ 271.55 mm ด้วยวิธีการพิจารณากลไกการครากในรูปที่ 10 (Plastic Mechanism Analysis) โดยใช้ค่ากำลังต้านทานแรงดัดที่จุดต่อจากผลการทดสอบในการศึกษาที่เกี่ยวข้อง [4] พบว่าผลการวิเคราะห์กำลังในกรณีที่ไม่มีแรงในแนวดิ่ง จะได้ค่ากำลังสูงขึ้นเป็นอย่างมาก (ในรูปที่ 11) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า P-Delta Effect จึงมีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบโครงชั้นวางสินค้าระบบ ASRS ที่มีความสูงเป็นพิเศษ และจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาอย่างละเอียดในการออกแบบชั้นวางสินค้าประเภทนี้



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ที่มีผลกระทบ P-delta เกิดขึ้นในช่วงที่สอง

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบโครงชั้นวางสินค้าสำหรับระบบ ASRS ภายใต้การให้แรงแบบสลับทิศ และแบบทิศทางเดียว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. โครงชั้นวางสินค้าสามารถเสียรูปได้มากโดยไม่เกิดการวิบัติวิบัติขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงชั้นวางสินค้ามีค่าค่อนข้างต่ำมาก ดังนั้นในการใช้งานจริงสำหรับการรับแรงด้านข้าง เช่น แรงแผ่นดินไหว จำเป็นต้องมีการใช้ระบบค้ำยันด้านข้าง (Lateral Bracing) ร่วมในการรับแรงด้วย
2. การวิบัติของโครงชั้นวางสินค้า เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อเป็นหลัก โดยเฉพาะตัวตะขอ (Tab) ที่ใช้ยึดเสากับคาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพเป็นพิเศษ รวมถึงการติดตั้งอย่างเหมาะสม
3. ผลของ P-Delta Effect มีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบโครงชั้นวางสินค้าระบบ ASRS ที่มีความสูงเป็นพิเศษ และจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาอย่างละเอียดในการออกแบบชั้นวางสินค้าประเภทนี้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.)ภายใต้แผนกงาน Spearhead ด้านเศรษฐกิจ โดยการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) และบริษัท แม่น้ำแมคคานิกา จำกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Rack Manufacturers Institute (2008). *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks*, ANSI- RMI. North Carolina, NC, United States of America.

[2] Federation Europeenne De La Manutention, Section X (2001). *The Design of Static Steel Pallet Racking*, FEM 10.2.02. Birmingham, Great Britain.

[3] Castiglioni, C.A. (2016). *Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems*, Springer Nature, Milan, Italy.

[4] ณัฐพล บุญสุริยพันธ์, เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย, วงศา วรารักษ์สัจจะ, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และชัยณรงค์ อธิสกุล (2565). แบบจำลองโครงสร้างจุดต่อคาน-เสา สำหรับโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็กขึ้นรูปเย็นแบบสูงพิเศษ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26สิงหาคม 2565, หน้า 5-6.