ญ ญนบ พ2 พ พ งพ พ

Prediction Model for beam-upright connection in Ultra-high-rise cold-formed steel storage rack structures

ธ ต ฒ พ [1,*] ต [1] ญญ [2] ผ พ ผ ทพ [1] ธ [1]

[1] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร*
[2] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี*
**Corresponding author; E-mail address: nuttaphon.twk@mail.kmutt.ac.th*

ผ น

ปัจจุบันมีการใช้งานชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับระบบจัดเก็บสินค้าแบบอัตโนมัติ (Automatic Storage and Retrieval System, ASRS) โครงสร้างประเภทนี้อาศัยจุดต่อแบบกึ่งยึดแน่น (Partially Restrained Connection) ในการยึดเสาเข้ากับคานเหล็ก การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างประเภทนี้ จำเป็นต้องใช้แบบจำลองโครงสร้างที่สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงดัดของจุดต่อระหว่างคานและเสาที่เหมาะสม งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองจุดต่อโครงสร้างสำหรับใช้ในการออกแบบชั้นวางสินค้าที่ผลิตจากเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็น โดยมุ่งเน้นไปที่แบบจำลองส่วนจุดต่อคานและเสาของชั้นวางสินค้า การศึกษาประกอบไปด้วยการรวบรวมผลการทดสอบจากการศึกษาในอดีต และนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายพฤติกรรมการรับแรงดัดจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้าง ที่พัฒนาโดยสมการทางคณิตศาสตร์และกระบวนการทางสถิติ เมื่อนำแบบจำลองโครงสร้างจุดต่อคาน-เสาที่เสนอ ไปใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต และการทดสอบเพิ่มเติมในห้องปฏิบัติการ พบว่าพฤติกรรมจุดต่อที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและประเมินพฤติกรรมโครงสร้างชั้นวางสินค้าได้

คำสำคัญ: โครงสร้างชั้นวางสินค้า, เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็น, พฤติกรรมของจุดต่อคานเสาของโครงสร้างชั้นวางสินค้า

Abstract

Ultra-high steel storage racks are becoming more common to accommodate Automatic Storage and Retrieval System (ASRS). This type of structure employs partially restrained connections at the beam-to-column joints. Accurate structural analysis of this type of structure requires a realistic structural model for the beam-to-column joint. This research presents beam-to-column joints model for the design of high-rise cold-formed steel storage racks. This study consisted of analyzing beam-to-column joint tests from past studies and developing a moment-rotation joint model based on an appropriate mathematical function and statistical analysis. When compared with experimental investigation research and new experiment, it was found that the moment-rotation response from model could predict the beam-column joint behavior with acceptable accuracy. Therefore, it can be concluded that proposed model could be used in the design process and performance evaluation of the steel storage racks

Keywords: Rack structure, Cold formed steel, Beam-upright connection, Automatic Storage and Retrieval System, ASRS.

1. ผพ

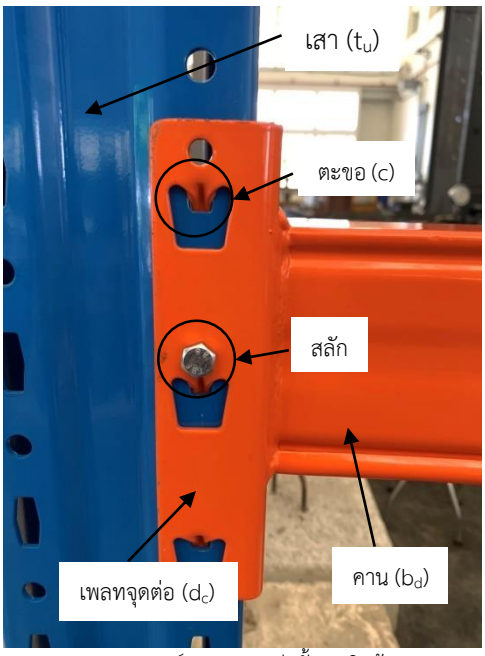
ในปัจจุบัน การเติบโตของอุตสาหกรรมการขนส่งสินค้า รวมถึงการค้าขายผ่านระบบอินเตอร์เน็ตมีการขยายตัวอย่างมาก ปัจจัยต่างๆในสายการดำเนินงานมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นแบบก้าวกระโดด อุตสาหกรรมคลังสินค้า เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีความต้องการสูงขึ้นจากการเติบโตดังกล่าว ปัจจุบันมีการใช้งานชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับระบบจัดเก็บสินค้าแบบอัตโนมัติ (Automatic Storage and Retrieval System, ASRS)ดังรูปที่ 1 โครงสร้างประเภทนี้อาศัยจุดต่อแบบกึ่งยึดแน่น (Partially Restrained Connection) ในการยึดเสาเข้ากับคานเหล็ก การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างประเภทนี้ จำเป็นต้องใช้แบบจำลองโครงสร้างที่สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงดัดของจุดต่อระหว่างคานและเสาที่เหมาะสม

พฤติกรรมของจุดต่อประเภทกึ่งยึดแน่น(Partially restraint) ในอดีตนิยมใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาพฤติกรรมของจุดต่อแต่ละตัว ซึ่งต้องใช้เวลา และมีค่าใช้จ่าย การวิจัยในต่างประเทศได้มีการทดสอบพฤติกรรมจุดต่อชั้นวางสินค้าไว้ในระดับหนึ่ง ทำให้เราสามารถนำข้อมูลมาใช้ทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาที่ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้นได้ ในอดีตได้มีการนำเสนอสมการในการคำนวณความสัมพันธ์ของแรงดัดและมุมหมุนของโครงสร้างเหล็กหลายรูปแบบ แต่ยังไม่มีแบบจำลองใดที่พิสูจน์ว่าใช้ได้ผลดีกับพฤติกรรมของจุดต่อกึ่งยึดแน่นในชั้นวางสินค้าเหล็กขึ้นรูปเย็น

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างชั้นวางสินค้า และตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยทำการตรวจสอบด้วยผลการทดสอบในอดีตและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้งานจริงในการออกแบบ และพัฒนากระบวนการศึกษาวิจัยและการออกแบบคลังสินค้าได้



ผ 6 ชั้นวางสินค้าแบบสูงพิเศษ(Ultra-high steel storage rack)



ผ องค์ประกอบจุดต่อชั้นวางสินค้า

2. ญ ญบ พ พ

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายพฤติกรรมจุดต่อคาน เสาของ Kishi-Chen[1]

ในอดีตได้มีการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและมุมหมุนสำหรับจุดต่อโครงสร้างเหล็กแบบกึ่งยึดแน่น แบบจำลองความสัมพันธ์ที่มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจุดต่อในโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็กคือแบบจำลองของ KishiและChen [1] ซึ่งได้นำเสนอสมการในการอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดัดและมุมหมุนออกมาเป็นสมการไม่เชิงเส้น 3 ตัวแปรโดยตัวแปรที่ใช้คือ ค่าความแข็งเกร็งช่วงต้น (R_{ki}) ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด (M_u) และค่าคงที่ของรูปร่างเส้นความสัมพันธ์(n) ดังสมการ 1 โดย M คือ แรงดัดบริเวณจุดต่อ, R_{ki}คือ ความแข็งเกร็งช่วงต้นของจุดต่อ, θ_r คือ มุมหมุนของจุดต่อ และ θ_0 คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดัดสูงสุดต่อความแข็งเกร็งช่วงต้น

$$M \quad \frac{R_{ki} \; r}{(1 \quad (\frac{r}{\quad})^n)^{\frac{1}{n}}} \qquad (1)$$

$$_0$$

โดยที่ $$_0 \quad \frac{M_u}{R_{ki}} \qquad (2)$$

ทั้งนี้การคำนวณค่าคงที่ต่างๆในสมการ 1 จะขึ้นกับคุณสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆเป็นตัวแปรในการคำนวณ ซึ่งสามารถคำนวณได้หลากหลายวิธี ในบทความนี้จะนำเสนอสมการในการคำนวณค่าดังกล่าวด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมของจุดต่อโครงสร้างชั้นวางสินค้า องค์ประกอบจุดต่อชั้นวางสินค้าแสดงในรูปที่ 2

2.2 ผลการทดสอบในอดีตและฐานข้อมูลผลการทดสอบ

การศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการทดสอบจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างชั้นวางสินค้าที่ผลิตจากเหล็กขึ้นรูปเย็นมาทั้งสิ้น 30 ตัวอย่างจากการศึกษาต่างๆในหลายๆประเทศ ได้แก่ ไทย จีน อินเดีย และ มาเลเซีย เป็นงานวิจัยของ Prabha et al. [2], Leelataviwat et al. [3], Lingfeng et al. [4], Shah et al. [5], และ Mahdi et al. [6] โดยตัวอย่างทดสอบที่รวบรวมได้แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยค่าความแข็งเกร็ง (K) ของแต่ละผลการทดสอบ คำนวณจากความชันของพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกของจุดต่อ

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสา

เมื่อนำเอาข้อมูลจากตารางที่ 1 และ 2 มาวิเคราะห์ด้วยวิธีสมการถดถอยเชิงเส้นแบบหลายตัวแปร(Multi-linear Regression) จะสามารถสร้างสมการในการคำนวณหาค่าความแข็งเกร็งช่วงต้น และกำลังรับแรงดัดสูงสุดดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ตามลำดับ

$$R_{ki} \quad 0.21b_d \quad 55c \quad 21.42t_u \quad 1.46d_c \qquad (3)$$

$$M_u \quad (\quad 2.52 \quad 10^{\ 8})b_d^3 \quad 0.013c^3 \quad 0.75t_u \qquad (4)$$

โดยที่ b_d คือ ความลึกคาน(มิลลิเมตร)
c คือ จำนวนตะขอ(ตัว)
t_u คือ ความหนาเสา(มิลลิเมตร)
d_c คือ ความลึกเพลทจุดต่อ(มิลลิเมตร)

เมื่อพิจารณาค่านัยสำคัญ (P-value) ของตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบกับแบบจำลอง จะพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบกับค่าความแข็งเกร็งช่วงต้นมากที่สุดคือความลึกของเพลทจุดต่อ จำนวนตะขอ ความลึกคาน และความหนาเสา ตามลำดับ ส่วนตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกำลังการรับแรงดัดมากที่สุดคือ ความหนาเสา จำนวนตะขอ ความลึกคานตามลำดับ และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดน้อยมากจนสามารถตัดออกจากแบบจำลองได้คือความลึกของเพลทจุดต่อ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Prabha [2] ในส่วนของค่าคงที่ของรูปร่างความสัมพันธ์(n) ผลการวิเคราะห์พบว่าจะขึ้นกับความหนาเพลทจุดต่อเป็นหลักโดยค่าที่แนะนำให้ใช้แสดงในตารางที่ 3

บ ผ 6 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและมุมหมุนของจุดต่อคานและเสาในอดีต

No.	Specimen	R_{ki} (kNm/rad)	M_u (kNm)	Reference
1	J1	66.1	2.15	Leelataviwat et al. [3]
2	J2	61.67	1.8	Leelataviwat et al. [3]
3	JZ1-1	161.9	2.18	Lingfeng et al. [4]
4	JZ1-2	169.2	1.87	Lingfeng et al. [4]
5	JZ1-3	143.9	1.94	Lingfeng et al. [4]
6	1.8UT-4L-100BD	57.29	2.21	Prabha et al. [2]
7	2.0UT-4L-100BD	57.29	2.21	Prabha et al. [2]
8	2.5UT-4L-100BD	71.62	2.36	Prabha et al. [2]
9	1.8UT-4L-125BD	71.62	2.42	Prabha et al. [2]
10	2.0UT-4L-125BD	71.62	2.22	Prabha et al. [2]
11	2.5UT-4L-125BD	71.62	2.61	Prabha et al. [2]
12	1.8UT-4L-150BD	66.84	2.28	Prabha et al. [2]
13	2.0UT-4L-150BD	66.84	2.57	Prabha et al. [2]
14	1.8UT-5L-100BD	71.62	2.65	Prabha et al. [2]
15	2.0UT-5L-100BD	85.94	2.96	Prabha et al. [2]
16	2.5UT-5L-100BD	114.59	2.64	Prabha et al. [2]
17	1.8UT-5L-125BD	114.59	3.07	Prabha et al. [2]
18	2.0UT-5L-125BD	114.59	3.51	Prabha et al. [2]
19	2.0UT-5L-150BD	114.59	2.69	Prabha et al. [2]
20	2.5UT-5L-150BD	137.62	2.31	Prabha et al. [2]
21	1.8UT-5L-150BD	153.33	2.45	Prabha et al. [2]
22	2.0UT-92BD-4T	154.95	2.44	Shah et al. [5]
23	2.0UT-110BD-4T	155.24	2.57	Shah et al. [5]
24	2.6UT-92BD-4T	113.1	3.58	Shah et al. [5]
25	2.6UT-110BD-4T	100.12	3.44	Mahdi et al. [6]
26	2.0UT-105BD-5L-1	98.7	3.47	Mahdi et al. [6]
27	2.0UT-105BD-5L-2	114.17	3.45	Mahdi et al. [6]
28	2.0UT-105BD-5L-3	103.8	3.59	Mahdi et al. [6]
29	2.6UT-105BD-5L-1	71.62	2.22	Mahdi et al. [6]
30	2.6UT-105BD-5L-2	71.62	2.61	Mahdi et al. [6]
31	1.8UT-4L-150BD	66.84	2.28	Mahdi et al. [6]

3. ผ ญ ผน พ นบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยผลการทดสอบในอดีตจะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายพฤติกรรมของจุดต่อที่เคยมีการทดสอบในการศึกษาที่ทำในอดีตโดยจะทำการเปรียบเทียบทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวอย่างเดียวกันกับตารางที่ 1 โดยมีคุณสมบัติของจุดต่อตัวอย่างต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อทำนายพฤติกรรมจากแบบจำลองโดยใช้สมการที่ 3 และ 4 ร่วมกับค่าคงที่ของรูปร่างที่แนะนำดังตารางที่ 3 และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีตในรูปของอัตราส่วนระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4

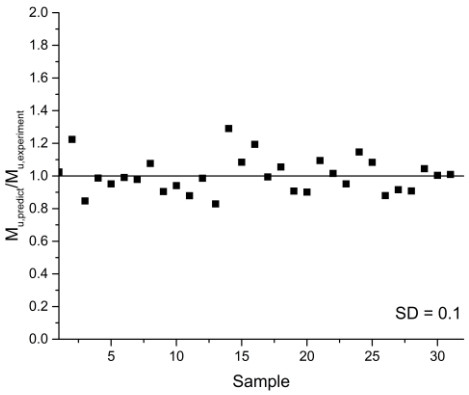
บ ผ 2 ขนาดมิติต่างๆของผลการทดสอบที่รวบรวมจากงานวิจัยในอดีต

Specimen	พ t_u(mm)	พ b_d(mm)	ผ ญบ d_c(mm)	ญ พ พ บ ง c
J1	2.5	122	165	3
J2	2.5	122	165	3
JZ1-1	2	100	200	3

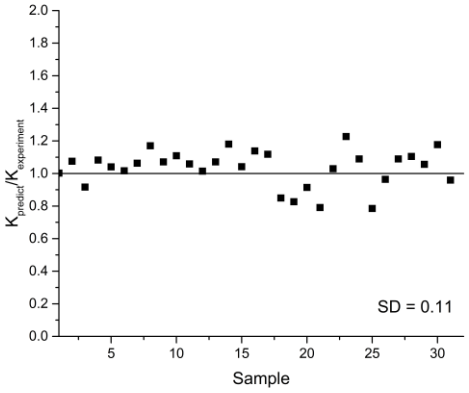
Specimen	พ t_u(mm)	พ b_d(mm)	ผ ญบบ d_c(mm)	ญ พ พ บ ง c
JZ1-2	2	100	200	3
JZ1-3	2	100	200	3
1.8UT-4L-100BD	1.8	100	200	4
2.0UT-4L-100BD	2	100	200	4
2.5UT-4L-100BD	2.5	100	200	4
1.8UT-4L-125BD	1.8	125	200	4
2.0UT-4L-125BD	2	125	200	4
2.5UT-4L-125BD	2.5	1125	200	4
1.8UT-4L-150BD	1.8	150	200	4
2.0UT-4L-150BD	2	150	200	4
1.8UT-5L-100BD	1.8	100	250	5
2.0UT-5L-100BD	2	100	250	5
2.5UT-5L-100BD	2.5	100	250	5
1.8UT-5L-125BD	1.8	125	250	5
2.0UT-5L-125BD	2	125	250	5
2.0UT-5L-150BD	2	150	250	5
2.5UT-5L-150BD	2.5	150	250	5
1.8UT-5L-150BD	1.8	150	250	5
2.0UT-92BD-4T	2	92	200	4
2.0UT-110BD-4T	2	110	200	4
2.6UT-92BD-4T	2.6	92	200	4
2.6UT-110BD-4T	2.6	110	200	4
2.0UT-105BD-5L-1	2	105	250	5
2.0UT-105BD-5L-2	2	105	250	5
2.0UT-105BD-5L-3	2	105	250	5
2.6UT-105BD-5L-1	2.6	105	250	5
2.6UT-105BD-5L-2	2.6	105	250	5
1.8UT-4L-150BD	2.6	105	250	5

บ ผ 8 ค่าแนะนำสำหรับค่าคงที่ของรูปร่างความสัมพันธ์ (n)

พ ผญบบ (บ)	ผ พ
2.5-3.0	1.0
3.5	1.2-1.7
4.0	2.0-2.5



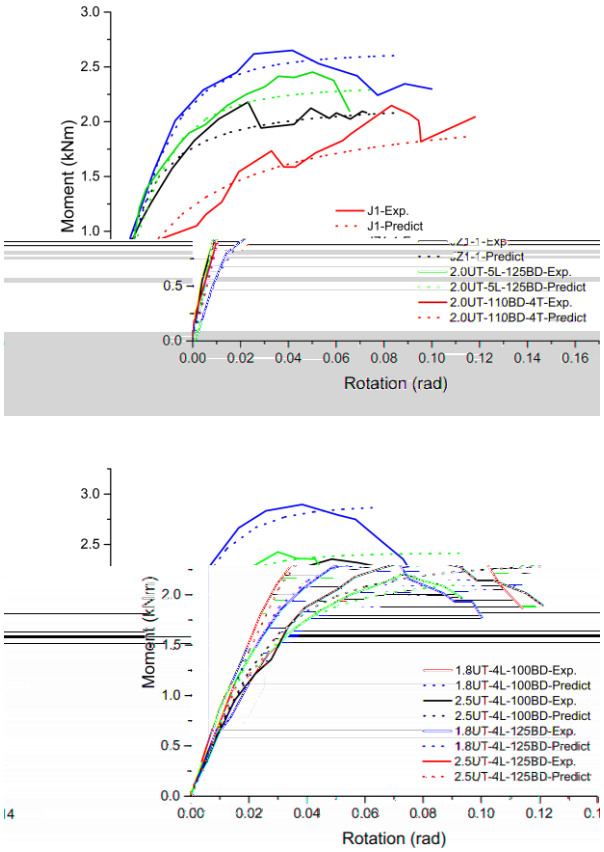
ผ 8 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง



ผ ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งเกร็งที่ได้จากแบบจำลอง

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการที่ 3 และ 4 ประกอบกับค่าคงที่ของรูปร่างที่แนะนำดังตารางที่ 3 แทนลงในสมการที่ 1 สามารถทำนายความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการรับแรงดัดในจุดต่อโครงสร้างคาน-เสาของชั้นวางสินค้าได้ดังรูปที่ 5 จากผลการวิเคราะห์พบว่าพฤติกรรมที่ได้จากผลการทำนายยังมีผลแตกต่างจากผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างบางตัว โดยพฤติกรรมในช่วงพลาสติก ค่าจากการทำนายจะมีค่าต่ำกว่าค่าพฤติกรรมจากการทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบความเสียหายหรือตัวแปรประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำให้ผลการเปรียบเทียบบางตัวอย่างมีความคลาดเคลื่อนในช่วง

การเสียรูปแบบพลาสติก อย่างไรก็ดีผลการเปรียบเทียบโดยรวมอยู่ในระดับที่แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลการทำนายพฤติกรรมที่แม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต ตัวอย่างการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5

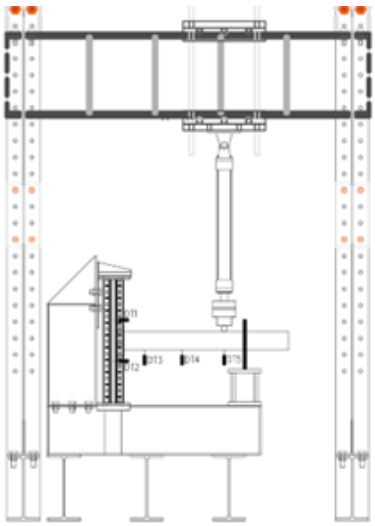


ผ เปรียบเทียบพฤติกรรมจากการทำนายกับผลการทดสอบในอดีต

4. บ ญ ญ น ผน พ ด บ

เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถนำแบบจำลองไปใช้กับชั้นวางสินค้าในประเทศไทย ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม เมื่อนำผลการทดสอบดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง รูปแบบการทดสอบที่ใช้ จะเป็นการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัดของจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างชั้นวางสินค้าด้วยการทดสอบตามมาตรฐาน FEM [7] และใช้ลักษณะชุดการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 โดยทำการทดสอบแบบให้แรงทิศทางเดียว และให้แรงแบบสลับทิศ ระยะการให้แรงกระทำเป็นไปตามมาตรฐาน FEM [7]

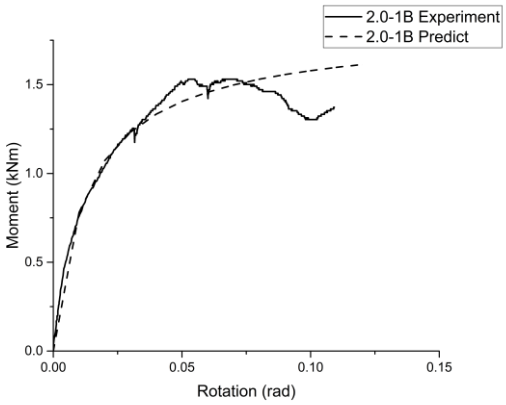
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้จะเป็นจุดต่อคานเสาโดยมีหน้าตัดเสาเป็นรูปโอเมก้า(Omega Section) 3 ขนาด คือ 120x120x2.75, 120x120x2.3 และ 120x80x2.0 ยึดกับคานลึก 100 มิลลิเมตร ด้วยเพลทจุดต่อแบบ 3 ตะขอ ลึก 210 มิลิเมตร และใช้สลักเพื่อความปลอดภัย 1 สลักดังรูปที่ 2

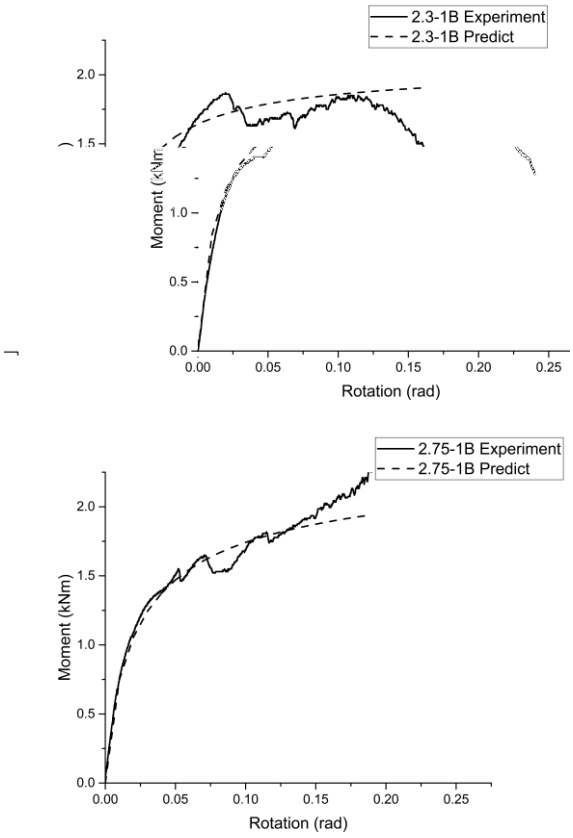


ผ ชุดทดสอบพฤติกรรมจุดต่อคาน-เสาโครงสร้างชั้นวางสินค้า

4.1 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและมุมหมุนของจุดต่อจากการทดสอบให้แรงทิศทางเดียวและการให้แรงแบบสลับทิศ แสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมของจุดต่อด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 2 กับผลการทดสอบจุดต่อโครงสร้างชั้นวางสินค้า ผลการเปรียบเทียบพบว่าพฤติกรรมที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบมาก เมื่อพิจารณาถึงผลการเปรียบเทียบในช่วงอีลาสติกซึ่งเป็นสภาวะใช้งานของโครงสร้าง พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอนั้นสามารถทำนายพฤติกรรมของจุดต่อในช่วงอีลาสติก และช่วงพลาสติกได้ใกล้เคียง จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถทำนายพฤติกรรมของจุดต่อชั้นวางสินค้าได้อย่างถูกต้อง



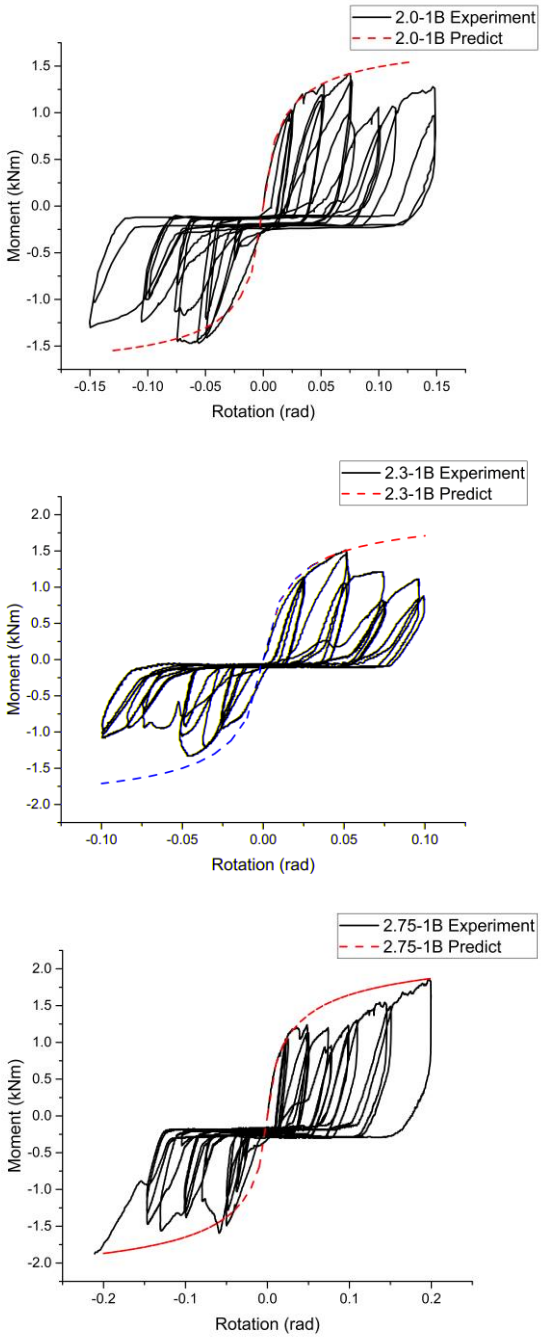


ผ 7 เปรียบเทียบพฤติกรรมจากการทำนายกับผลการทดสอบให้แรงทิศทางเดียว(Monotonic load test)

ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการทดสอบแบบสลับทิศ พบว่าในช่วงแรงดัดเป็นบวก(แรงกดลงในแนวดิ่ง) แบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมออกมาได้อย่างใกล้เคียงเช่นเดียวกัน โดยมีค่ากำลังรับแรงต่ำกว่าการทดสอบให้แรงแบบทิศทางเดียวเล็กน้อย แต่ในช่วงที่แรงดัดเป็นลบ(แรงดึงขึ้นในแนวดิ่ง) ค่ากำลังที่ได้จากการทำนายจะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบเล็กน้อย

5. ญ

ผลการศึกษาจากงานวิจัยฉบับนี้ สามารถสรุปผลได้ว่า แบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมจุดต่อแบบกึ่งยึดแน่นในจุดต่อคาน-เสาของโครงสร้างชั้นวางสินค้า ให้พฤติกรรมที่มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งการทดสอบด้วยชุดข้อมูลในอดีต และการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้งการทดสอบให้แรงแบบทิศทางเดียว และการทดสอบให้แรงแบบสลับทิศ โดยแบบจำลองจะสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงในช่วงอีลาสติก และช่วงพลาสติก แต่เนื่องจากรูปแบบของสมการจะเป็นการลู่เข้าหากำลังรับแรงดัดสูงสุด ทำให้ไม่สามารถทำนายช่วงการลดลงของกำลังได้ และมีความคลาดเคลื่อนในกรณีที่แรงดัดเป็นลบโดยจะมีค่าสูงกว่าพฤติกรรมจริงเล็กน้อย เนื่องจากฐานข้อมูลของแบบจำลองเป็นฐานข้อมูลการทดสอบในรูปแบบแรงดัดบวก จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานในกระบวนการออกแบบได้ ผลการศึกษาเหล่านี้จะช่วยให้กระบวนการออกแบบชั้นวางสินค้ามีประสิทธิภาพ สามารถนำผลการจำลองไปต่อยอด และลดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากการทดสอบชิ้นส่วนของโครงสร้างในห้องปฏิบัติการให้น้อยลงได้



ผ เปรียบเทียบพฤติกรรมจากการทำนายกับผลการทดสอบให้แรงแบบสลับทิศ(Cyclic load test)

บบ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ได้รับการสนับสนุนวัสดุและตัวอย่างจาก บริษัท แม่น้ำแมคคานิกา จำกัด และได้รับ

การสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[1] Kishi, N., and Chen, W.F, 1990, Moment rotation relations of semirigid connections with angles. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 116, No. 7, pp. 1813-1834

[2] Prabha, P., Marimuthu, V., Saravanan, M. and Arul Jayachandran S., (2010). Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. *Journal of Construction Steel Research*, 66, pp.863-872.

[3] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และ รุ่งรัตน์ ศิริรัตนาพานิชย์ (2563). รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ อาคารคลังสินค้าอัจฉริยะและระบบอัตโนมัติ(การพัฒนาอาคารคลังสินค้าและระบบอัตโนมัติแบบครบงจร)., สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ

[4] Lingfeng, Y., and Tang, G., 2016, Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with boltsin storage racks Engineering Struture,, Vol. 116, pp. 40-55

[5] Shah, S.N.R., Ramli Sulong, N.H., Khan, R., Jumaat , M.Z. and Shariati, M., 2016, Behaviour of Industrial Steel Rack Connections, Mechanical System and Signal Processing, Vol. 70-71, pp. 725-740

[6] Mahdi, S, Tahirb, M.M. and Chin, T., 2018, Experimental investigations on monotonic and cyclic behaviour of steel pallet rack connections, Engineering Failure Analysis, Vol. 85, pp. 149-166

[7] FEM10.2.02, 2001, The Design of Static Steel Pallet Racking, Federation Europeenne De La Manutention., Birmingham, Great Britain