น้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติของโครงถักแบบโฮว์ที่ประกอบจากชิ้นส่วนหน้าตัดแบบเปิดและหน้าตัดแบบปิด

Critical Load and Ideal Brace Stiffness of Howe Trusses Fabricated from Opened and Closed-Section Truss Members

ภัทรกร จันทร์สมุทร รังสรรค์ วงศ์จีรภัทร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงถักเหล็กสามารถเกิดปัญหาการโก่งตัวทางด้านข้างและการบิดได้เช่นเดียวกับเสาและคาน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและ Stiffness ของค้ำยันในโครงถักแบบโฮว์ (Howe truss) รับแรงกระทำแบบจุดที่กึ่งกลางโครงถัก ที่มีและไม่มีการค้ำยันตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบน ที่ประกอบจากชิ้นส่วนหน้าตัดแบบเปิด และหน้าตัดแบบปิด โดยวิเคราะห์ค่า Eigenvalue Buckling Analysis จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นกับ Stiffness ของค้ำยัน ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและ Stiffness ของค้ำยัน ได้แก่ ความยาวรวม, โมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าของโครงถักทั้งระบบ ขนาดและประเภทของหน้าตัด โดยความยาวรวมต่อความสูงของโครงถักที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติของโครงถักลดลง จำนวนช่องของโครงถักและมุมของชิ้นส่วนทแยง มีผลเพียงเล็กน้อย และการเพิ่มขนาดของหน้าตัดของคอร์ดจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงของโครงถักดีกว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดของเว็บทั้งในกรณีโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและชิ้นส่วนหน้าตัดปิด อีกทั้งยังพบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถักเพิ่มมากขึ้นตามค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าของโครงถักที่เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติคูณระยะปราศจากค้ำยันยกกำลังสอง ($P_{cr}L_b^2$) และโครงถักหน้าตัดปิดมีค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ที่สูงกว่าโครงถักหน้าตัดเปิด ที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าที่เท่ากัน

คำสำคัญ : น้ำหนักบรรทุกวิกฤติ, รูปแบบการโก่งตัวของโครงถัก, Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ, โครงถักแบบโฮว์

Abstract

Truss structures are susceptible to lateral deflection and torsion similar to column and beam. This research studied the critical load and brace stiffness of Howe trusses fabricated from opened and closed-section members and subjected to point load at midspan with and without bracing at midspan top chord. The mathematical models of the trusses were created and Eigenvalue Buckling Analysis was performed.

According to the study, it was found that critical load has nonlinear relationship with brace stiffness and factors affecting the buckling load and brace stiffness include span length, equivalent out-of-plane moment of inertia, size and type of the cross-sections. Increasing of span-to-depth ratio results in decreasing of critical load and ideal brace stiffness, and number of panel and angle of diagonal members slightly affect the buckling capacity. Increasing of chord sizes is more effective than increasing size of web of truss members in both opened and closed-section trusses. Additionally, the critical load increases with the increase of equivalent out-of-plane moment of inertia and has linear relationship with $P_{cr}L_b^2$. The truss with closed-section members has higher critical load than opened-member truss at the same equivalent out-of-plane moment of inertia.

Key words : Buckling load, Buckling mode shape, Ideal brace stiffness, Howe truss

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้งานเหล็กรูปพรรณในด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลายมากขึ้น หนึ่งในรูปแบบโครงสร้างที่นิยมใช้เหล็กรูปพรรณ ได้แก่ โครงถัก (Truss) ซึ่งนิยมใช้งานในโครงสร้างสะพาน หลังคาของอาคารคลังสินค้าหรือโรงงานที่มีช่วงเสากว้าง หรือเสาส่งสายไฟฟ้าแรงดันสูง เนื่องจากเหล็กรูปพรรณมีน้ำหนักที่เบาเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการรับแรง มีความแข็งแรง และใช้เวลาในการก่อสร้างที่รวดเร็ว สามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโรงงานและใช้ระยะเวลาในการประกอบที่หน้างานได้ภายในระยะเวลาอันสั้น ทำให้สามารถลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการก่อสร้างลงได้ส่วนหนึ่ง

ในส่วนของการคำนวณโครงถักในด้านวิศวกรรมนั้น ทางทฤษฎีจะมีการตั้งสมมุติฐานว่า แรงที่เกิดขึ้นในโครงถักจะเป็นแรงภายในระนาบเท่านั้น ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของโครงถัก เนื่องจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของโครงถักเหล็กสามารถเกิดแรงภายนอกระนาบหรือเกิดแรงภายในระนาบแต่ส่งผลให้เกิดการวิบัตินอกระนาบเนื่องจากการโก่งเดาะทางด้านข้าง (Lateral Buckling) หรือการโก่งเดาะจากการบิด (Torsional Buckling) หรือการโก่งเดาะทางข้างและการบิด (Lateral Torsional Buckling) ได้เช่นเดียวกับเสาและคาน ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับแรงของโครงถักลดลงจากที่ออกแบบ โดยการแก้ปัญหาการโก่งเดาะจะดำเนินการโดยการใช้การค้ำยันในรูปแบบที่เหมาะสมทั้งทางด้านกำลังและ Stiffness ของค้ำยัน

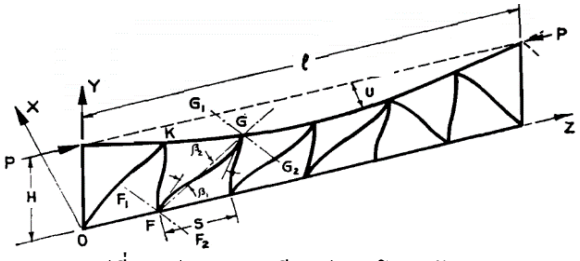
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและรูปแบบการโก่งตัวของโครงถักแบบโฮว์ (Howe truss) รับแรงกระทำแบบจุดที่กึ่งกลางโครงถัก ที่มีและไม่มีการค้ำยันตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบน ซึ่งประกอบจากชิ้นส่วนหน้าตัดแบบเปิด และหน้าตัดแบบปิด โดยวิเคราะห์ค่า Eigenvalue Buckling Analysis จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าการค้ำยันที่เหมาะสมของโครงถักและรูปแบบการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในหน้าตัดแบบเปิด และแบบปิด

2. ทบทวนวรรณกรรม

รูปแบบของโครงถักที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ โครงสร้างสะพาน หรือ หลังคาอาคาร เป็นต้น โดยชิ้นส่วนที่นำมาใช้มักจะเป็นเหล็กรูปพรรณเนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาเมื่อเทียบ

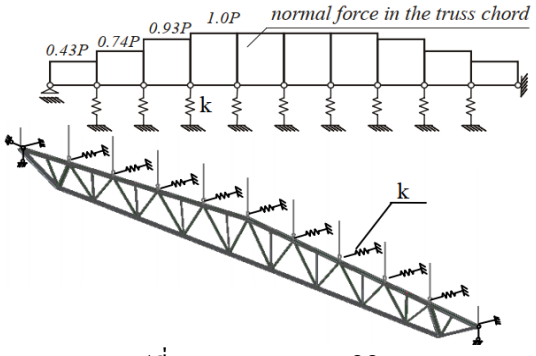
กับประสิทธิภาพในการรับแรง และสามารถที่จะลดเวลาการก่อสร้างลงได้ แต่เนื่องจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของโครงถักนั้น ทำให้อาจจะเกิดการโก่งตัวนอกระนาบเกิดขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากแรงที่มากระทำทั้งภายในระนาบ และภายนอกระนาบ ส่งผลให้เกิดการวิบัติได้

Horne [4] พบว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของโครงถักจะมีแรงที่กระทำร่วมกันอยู่คือ โมเมนต์ดัดที่กระจายตัวสม่ำเสมอและแรงตามแนวแกน เมื่อมีแรงกระทำสูงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ โครงถักจะเกิดการโก่งตัวทางด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 1 ทั้งนี้รูปแบบการวิบัติสามารถเป็นได้ทั้งรูปแบบโค้งเดี่ยว (Single half-wave) หรืออาจจะมีการโก่งตัวเป็นรูปแบบหลายโค้งต่อเนื่อง (Series of almost equal half-waves)



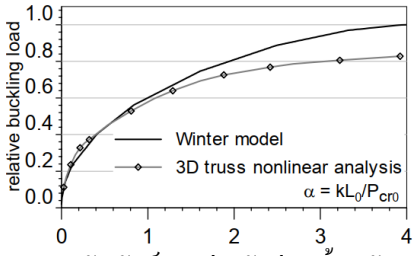
รูปที่ 1 รูปแบบการเสียรูปของโครงถัก [4]

Iwicki [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับการโก่งตัวทางด้านข้างของโครงถักที่มีจุดรองรับทางด้านข้างในช่วงอีลาสติก โดยเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผลของแบบจำลองของ Winter [3] ซึ่งจะใช้มาตรฐานการออกแบบของ Eurocode 3 [2] , PN-90 [8] และแบบจำลองโครงถักแบบสามมิติ ดังรูปที่ 2



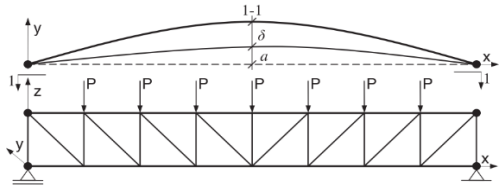
รูปที่ 2 แบบจำลองสามมิติ [5]

จากการศึกษาพบว่าค่าความยาวประสิทธิผลของแบบจำลองโครงถักสามมิติ จะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองของ Winter ที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบโครงถัก แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งบ่งบอกถึงการออกแบบโดยใช้มาตรฐานของ Eurocode 3 และ PN-90 นั้นจะได้ชิ้นส่วนหน้าตัดที่ใหญ่กว่าการใช้แบบจำลองโครงถักสามมิติ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่าสัมประสิทธิ์ Stiffness ของค้ำยัน [5]

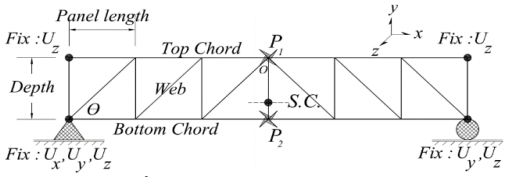
Jankowska-Sandberg [6] ได้ทำการศึกษาทดลองการโก่งตัวทางด้านข้างและการบิดในช่วงอิลาสติก และเปรียบเทียบค่าความยาวประสิทธิผลของการโก่งตัวด้านข้างกับค่ามาตรฐาน Eurocode 3 โดยจะกำหนดค่าความโก่งตัวเริ่มต้นในชิ้นส่วนโครงถักที่รับแรงอัด ในรูปแบบการโก่งตัวแบบโค้งเดี่ยว (Half sine curve) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเสียรูปของชิ้นส่วนภายใต้แรงกระทำ [6]

จากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกวิกฤติกับการโก่งตัวทางด้านข้างและการบิด จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 ประการคือ ตำแหน่งของแรงที่กระทำ, ระยะห่างของค้ำยันทางด้านข้าง, ความต้านทานของค้ำยัน, ประเภทของค้ำยัน และความยืดหยุ่นของวัสดุ

Pitiphon [7] ได้ทำการศึกษาค่าความแข็งแรงของโครงถักภายนอกระนาบของโครงถักแบบโฮว์ โดยการประเมินค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่า (Equivalent Out-of-Plane Moment of Inertia) ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่า (S.C.) ตามแบบจำลองโครงถักดังรูปที่ 5 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบได้แก่ ความยาวของโครงถัก, ความลึกของโครงถัก, ค่ามุมของชิ้นส่วนทแยงและขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนของคอร์ดและเว็บ และได้เสนอสมการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่า



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงถัก [7]

นอกจากปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถักที่กล่าวในข้างต้นแล้ว ประเภทของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจมีผลต่อน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถัก โดยในคานพบว่า ประสิทธิภาพในการต้านทานโมเมนต์บิดของหน้าตัดปิด จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานโมเมนต์บิดดีกว่าของหน้าตัดเปิดแบบหน้าตัดปีกกว้างและแบบตัวซี [9]

3. วิธีดำเนินการ

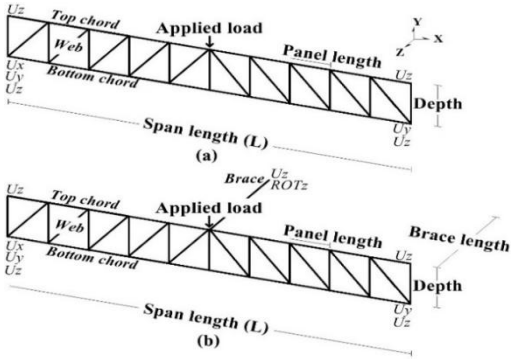
งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและรูปแบบการโก่งตัวของโครงถักแบบโฮว์ที่ประกอบจากชิ้นส่วนหน้าตัดแบบเปิดและหน้าตัดแบบปิด โดยจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ANSYS [1] เพื่อวิเคราะห์ค่า Elastic Eigenvalue Buckling Analysis โดยกำหนดคุณสมบัติ และขนาดของชิ้นส่วนและสัญลักษณ์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มิติและคุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนโครงถัก

รูปร่างหน้าตัด	ตัวย่อ	ขนาดหน้าตัด (mm.)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	โมเมนต์ความเฉื่อย (cm^4)
แบบเปิด	I1	100 x 100 x 6 x 8	21.9	383
	I2	150 x 125 x 8.5 x 14	46.15	1760
	I3	250 x 125 x 10 x 19	70.73	7310
	I4	300 x 150 x 11.5 x 22	97.88	14700
แบบปิด	S1	100 x 100 x 4	14.95	226
	S2	175 x 175 x 6	39.63	1860
	S3	250 x 250 x 8	75.79	7320
	S4	300 x 300 x 9	102.7	14300

ความยาวของโครงถัก 12-24 เมตร, องศาของชิ้นส่วนทแยงของโครงถักมีมุม 30-60 องศา จำนวนช่องของโครงถักมีจำนวน 12-20 ช่อง และความสูงของโครงถัก 1.2 เมตร

กำหนดให้โครงถักรับแรงกระทำแบบจุดในระนาบที่กึ่งกลางคอร์ดบน และสร้างแบบจำลองโครงถักแบบโฮว์ที่ไม่มีค้ำยัน แสดงดังรูปที่ 6(a) และโครงถักที่มีการค้ำยันที่ตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบนดังรูปที่ 6(b) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้สมการของ Pitiphon [7] ในการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าของโครงถัก

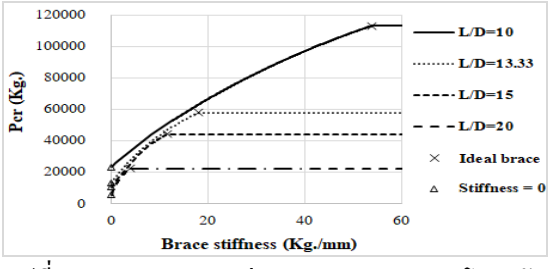


รูปที่ 6 แบบจำลองโครงถักที่ไม่มีค้ำยัน (a) และมีค้ำยัน (b)

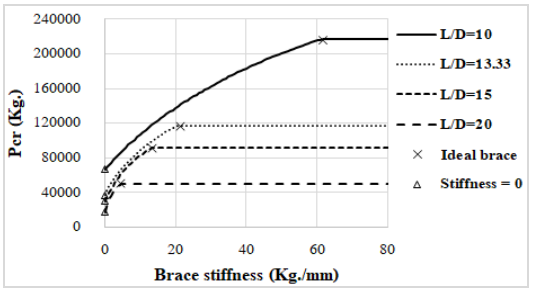
4. ผลและการวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ และรูปแบบการโก่งตัวของโครงถักแบบโฮว์ (Howe truss) ที่มีการค้ำยันตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบน และมีการโก่งตัวจากรูปแบบโค้งเดี่ยว (Half sine curve) เป็นรูปแบบโค้งคู่ (Full sine curve) ที่ตำแหน่งค้ำยันในอุดมคติ (Ideal brace stiffness) ซึ่งโดยพิจารณาผลของความสัมพันธ์ต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้

4.1. ผลของความยาวต่อความสูง (L/D) งานวิจัยนี้เปรียบเทียบความยาวต่อความสูงในช่วง 10 – 20 โดยกำหนดให้ความลึกของโครงถักมีค่าคงที่ และมีการค้ำยันที่กึ่งกลางคอร์ดบน โดยชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดพิจารณาที่หน้าตัดคอร์ด (C-I2) และหน้าตัดเว็บ (W-I1) ส่วนชิ้นส่วนหน้าตัดปิดพิจารณาที่หน้าตัดคอร์ด (C-S2) และหน้าตัดเว็บ (W-S1) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 โดยพบว่าความยาวรวมต่อความสูงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ (Ideal brace stiffness)



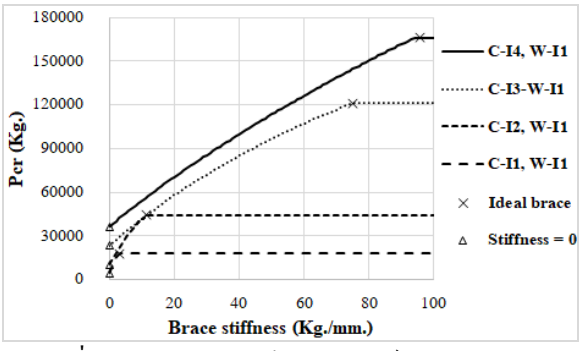
รูปที่ 7 ผลของความยาวต่อความสูง (L/D) ของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิด



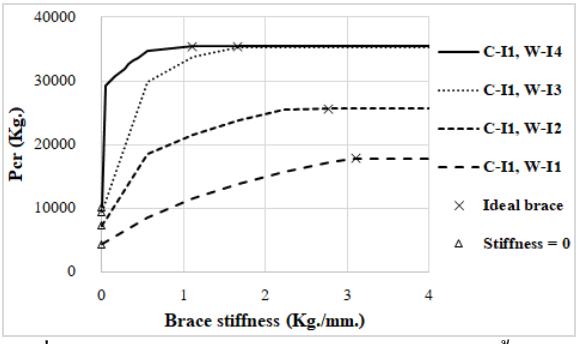
รูปที่ 8 ผลของความยาวต่อความสูง (L/D) ของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดปิด

จากรูปที่ 7 และ 8 พบว่าผลของค่า Stiffness ของค้ำยันต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและชิ้นส่วนหน้าตัดปิด มีค่าไปในทางเดียวกัน โดยค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Stiffness ของค้ำยัน เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความสูงที่มากขึ้น (โครงถักยาวขึ้น) จะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติลดลงและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ (Ideal brace stiffness) ลดลง ซึ่งโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและปิดที่ไม่มีค้ำยัน (ค่า Stiffness = 0) ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่ L/D = 20 มีค่าลดลงจาก L/D = 10 ประมาณ 76 และ 74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนกรณีมีค้ำยันอุดมคติ (สัญลักษณ์กากบาท) การเปลี่ยนค่า L/D จาก 20 เป็น 10 พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมีค่าลดลง 80 และ 71 เปอร์เซ็นต์ ของกรณีหน้าตัดเปิดและปิด ตามลำดับ และค่า Stiffness มีค่าลดลง 77 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความยาวต่อความสูงยิ่งมากทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงถัก และความต้องการ Stiffness ของค้ำยันลดลง ทั้งหน้าตัดแบบเปิดและแบบปิด

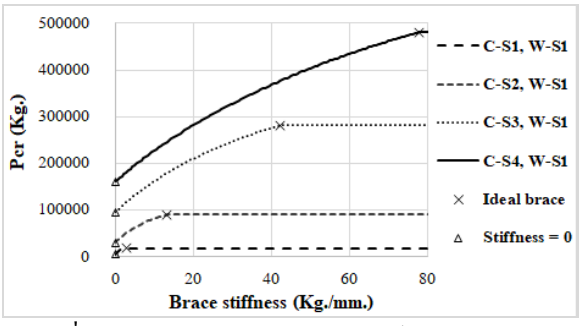
4.2. ผลของขนาดของโครงถักที่มีการค้ำยันตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบน โดยมีขนาดหน้าตัดแตกต่างกันของคอร์ดและเว็บ พิจารณา 2 กรณี คือ ขนาดหน้าตัดของคอร์ดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดหน้าตัดเว็บคงที่ และขนาดหน้าตัดของเว็บเพิ่มขึ้นแต่ขนาดหน้าตัดของคอร์ดคงที่ ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกวิกฤติกับค่า Stiffness ของค้ำยัน แสดงดังรูปที่ 9 ถึง 12 สำหรับกรณีโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดปิดและหน้าตัดเปิด โดยแกน x จะเป็นค่า Stiffness ของค้ำยัน ส่วนแกน y จะเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ ซึ่งพบว่าขนาดของหน้าตัดคอร์ดและเว็บส่งผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ



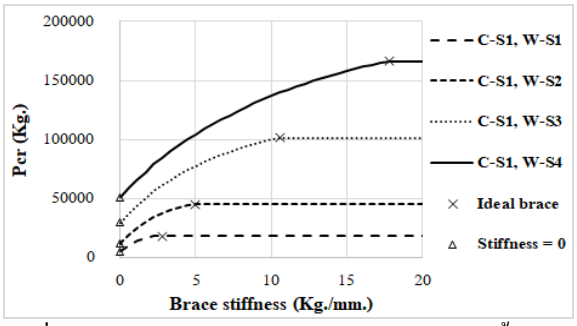
รูปที่ 9 ผลของขนาดหน้าตัดของคอร์ดของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิด



รูปที่ 10 ผลของขนาดหน้าตัดของเว็บของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิด



รูปที่ 11 ผลของขนาดหน้าตัดของคอร์ดของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดปิด



รูปที่ 12 ผลของขนาดหน้าตัดของเว็บของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดปิด

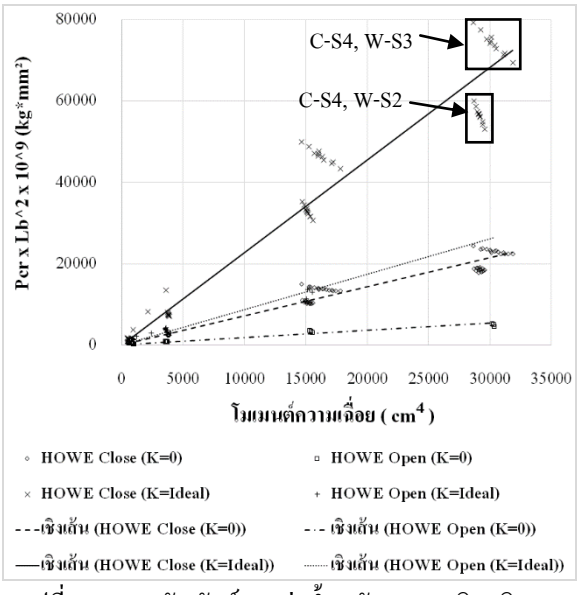
จากผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดหน้าตัดของคอร์ดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 9 และ 11) จะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ และค่า Stiffness ของค้ำยันมีค่ามากขึ้นเนื่องจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบของคอร์ดมีค่าที่มากขึ้นทำให้มีความต้านทานต่อการโก่งตัวและการบิดตัวสูงขึ้น โดยค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติกรณีมีการค้ำยันเต็มที่ (Ideal brace stiffness) ของกรณีที่ศึกษาในชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 9 เท่า จากหน้าตัด C-I1, W-I1 ไปยัง C-I4, W-I1 โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอร์ดเพิ่มขึ้น 38 เท่า ส่วนหน้าตัดปิดเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 26 เท่า จากหน้าตัด C-S1, W-S1 ไปยัง C-S4, W-S1 ที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอร์ดเพิ่มขึ้น 63 เท่า และค่า Stiffness อุดมคติของค้ำยันมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของขนาดคอร์ด โดยพบว่าค่า Stiffness อุดมคติกรณีชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและหน้าตัดปิดเพิ่มขึ้น 30 และ 28 เท่า ตามลำดับ จากกรณีศึกษาดังกล่าว

ในส่วนของการเพิ่มขนาดของเว็บ แสดงดังรูปที่ 10 และ 12 พบว่าขนาดที่เพิ่มขึ้นของเว็บมีผลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติในชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดกรณีที่มีการค้ำยันเต็มที่ (Ideal brace stiffness) เพิ่มขึ้น 2 เท่า จากหน้าตัด C-I1, W-I1 ไปยัง C-I1, W-I4 โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเว็บเพิ่มขึ้น 38 เท่า และเพิ่มขึ้น 9 เท่า จากหน้าตัด C-S1, W-S1 ไปยัง C-S1, W-S4 โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเว็บเพิ่มขึ้น 63 เท่า กรณีหน้าตัดปิด และค่า Stiffness ของค้ำยันทางข้างในโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดที่มีการค้ำยันเต็มที่ลดลง 0.6 เท่า จากหน้าตัด C-I1, W-I1 ไปยัง C-I1, W-I4 ทั้งนี้พบว่าค่า Stiffness ที่ต้องการให้มีการค้ำยันเต็มที่ มีค่าน้อยมาก (ประมาณ 1-3 kg/mm) ขณะเดียวกันค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติก็มีค่าไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับกรณีหน้าตัดปิด ในทางกลับกัน ค่า Stiffness ในอุดมคติของหน้าตัดปิดเพิ่มขึ้น 6 เท่า คล้ายกับกรณีของผลจากการเปลี่ยนขนาดคอร์ด โดยในภาพรวมสามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดของคอร์ดจะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติเพิ่มขึ้นดีกว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดของเว็บประมาณ 3 – 5 เท่า ทั้งในกรณีโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและชิ้นส่วนหน้าตัดปิด

นอกการพิจารณาผลของตัวแปรต่อโครงถักชนิดเดียวกันแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและ Stiffness ของค้ำยัน ระหว่างโครงถักโฮว์ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและปิด ทั้งนี้การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและหน้าตัดปิดไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติของหน้าตัดและชิ้นส่วนที่แตกต่างกันโดยเฉพาะค่าโมเมนต์ความเฉื่อย จึงอาศัยการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่า ($I_{equivalent}$) ของโครงถักทั้งระบบโดยใช้สมการของ Pitiphon [7]โดยอาศัยสมการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสา ดังสมการ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_b^2} \quad (1)$$

เพื่อเปรียบเทียบค่า $I_{equivalent}$ กับค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติคูณกับความยาวของโครงถักที่ปราศจากค้ำยันยกกำลังสอง ($P_{cr}L_b^2$) โดยเปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีค้ำยัน (โดยใช้ L_b=L/2) และกรณีที่มีค้ำยัน ที่ค่า Stiffness ของค้ำยันมีค่าเท่ากับค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ ($K=K_{Ideal}$) แต่ทั้งนี้ในชิ้นส่วนหน้าตัดปิดที่มีค้ำยันของคอร์ดและเว็บที่มีขนาดใหญ่ (C-S4, W-S2 และ C-S4, W-S3) จะมีการกระจายตัวของข้อมูลที่มากกว่าในขนาดหน้าตัดอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและความยาว ($P_{cr}L_b^2$) ต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบเท่าของโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและปิด

จากรูปที่ 13 พบว่าเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าของโครงถักมีค่าเพิ่มขึ้น น้ำหนักบรรทุกวิกฤติจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลของน้ำหนักบรรทุกวิกฤติคูณระยะของค้ำยันยกกำลังสอง ($P_{cr}L_b^2$) กับค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่า และการใช้ค้ำยันที่มีค่า Stiffness ในอุดมคติ จะทำให้ความสามารถในการรับแรงของโครงถักมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น (เส้นทึบ) เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งค้ำยัน (เส้นประ) โดยในชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดเพิ่มขึ้น 4.9 เท่า และชิ้นส่วนหน้าตัดปิดเพิ่มขึ้น 3.2 เท่า

5. สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและความต้องการ Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติในโครงถักแบบโฮว์ที่มีและไม่มีค้ำยัน ซึ่งประกอบด้วยหน้าตัดแบบเปิดและแบบปิด พบว่า

1. ความยาวรวมต่อความสูงของโครงถักที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่า Stiffness ของค้ำยันในอุดมคติ ของโครงถักลดลง ส่วนจำนวนช่องของโครงถัก และมุมของชิ้นส่วนทแยง มีผลเพียงเล็กน้อย ทั้งในกรณีโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและชิ้นส่วนหน้าตัดปิด
2. ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนของคอร์ดและเว็บที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถักเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขนาดของหน้าตัดของคอร์ดจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงของโครงถักดีกว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดของเว็บประมาณ 3 - 5 เท่า ทั้งในกรณีโครงถักชิ้นส่วนหน้าตัดเปิดและชิ้นส่วนหน้าตัดปิด
3. เมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าของโครงถักมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของโครงถักเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถประมาณความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติคูณระยะปราศจากค้ำยันยกกำลังสอง ($P_{cr}L_b^2$) และโครงถักหน้าตัดปิดมีค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ($P_{cr}L_b^2$) ที่สูงกว่าโครงถักหน้าตัดเปิด ที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนอกระนาบเทียบเท่าที่เท่ากัน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ANSYS, “ANSYS Version 15.0,” ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA, 2014.

[2] Eurocode 3, “Design of Steel Structures,” Part1.1: General rules and rules for buildings, ENV 1993 1-1, CEN, Brussels, 1992.

[3] Winter, G., “Lateral Bracing of Columns and Beams,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 84, No. ST2, March, 1561-1 – 1561-22, 1958.

[4] Horne, M. R., “The Elastic Lateral Stability of Trusses,” Structures Engineer. 38(5): 147-155, 1960.

[5] Iwicki, P, “Comparison of classical Winter's bracing requirements of compressed truss chord with stability analysis of 3D truss-model,” Pamm. 9(1): 247-248, 2009.

[6] Jankowska-Sandberg, J. and J. Kolodziej , “Experimental study of steel truss lateral–torsional buckling,” Engineering Structures. 46: 165-172, 2013.

[7] Pitiphon Sawaengdi, “Equivalent Out-of-Plane Moment of Inertia for Steel Howe Truss,” Master Thesis, Kasetsart University, 2016.

[8] PN-90/B-03200, “Steel structures,” Design rules, Polish standard, 1990.

[9] Seaburg, P.A. and Carter, C.J., “Torsional Analysis of Structural Steel Members,” Steel Design Guide Series No. 9, AISC, Chicago, IL, 1997.

[10] Yura, J. A., “Fundamentals of beam bracing,” Engineering Journal-American Institute of Steel Construction. 38(1): 11-26, 2001.