

บทความวิจัย

จุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮว

นาวัน ปิ่นลุ่ม และ รัชสรรค์ วงศ์จิรัฏฐ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2797 0999 อีเมล: fengrsw@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.004

รับเมื่อ 6 ธันวาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 18 มีนาคม 2569 ตอบรับเมื่อ 9 เมษายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ xx เดือน xxxx

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การประเมินค่าความแข็งแรง (Stiffness) ในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็ก โดยเทียบเคียงเสมือนพฤติกรรมของคานเหล็กที่มีหน้าตัดสมมาตรแกนเดียวนั้น เป็นหนึ่งในแนวทางที่สามารถกระทำได้โดยอาศัยข้อมูลของตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear Center) ร่วมด้วย ในกรณีที่เป็นคานเหล็กจะสามารถคำนวณหาค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนได้โดยง่าย แต่สำหรับโครงถักเหล็กนั้นไม่สามารถคำนวณหาค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนได้โดยตรงเนื่องจากผลของความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนเว็บ (Web) (ชิ้นส่วนแนวดิ่งและชิ้นส่วนแนวทแยง) จึงเป็นข้อจำกัดในการประเมินความแข็งแรงของโครงถักเหล็กในแนวนอกระนาบ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบกับมิติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปของโครงถัก จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวสามารถอยู่ได้ทั้งภายในและภายนอกความลึกของโครงถัก โดยขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บ เมื่อโครงถักมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดมากขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบวัดจากคอร์ดบนมีค่าลดลง และโครงถักที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนเว็บลดลงจะมีเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบที่ลดลงเช่นกัน งานวิจัยนี้เสนอสมการสำหรับคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวที่ดัดแปลงจากสมการของคานเหล็ก โดยสมการที่เสนอสามารถใช้ได้ดีภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

คำสำคัญ: การโก่งเดาะด้านข้างจากการบิดของโครงถักเหล็ก ความแข็งแรงในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็ก โครงถักเหล็กแบบไฮว จุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ วิธีเทียบเท่าคาน

การอ้างอิงบทความ: นาวัน ปิ่นลุ่ม และ รัชสรรค์ วงศ์จิรัฏฐ, “จุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮว,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 36, ฉบับที่ 4, หน้า 1-14, ต.ค.-ธ.ค. 2569. เลขที่บทความ 264-048329, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.004.



Research Article

Equivalent Out-of-Plane Shear Center of Steel Howe Truss

Navin Pinlom and Rangsarn Wongjeeraphat*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2797 0999, E-mail: fengrsw@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.004

Received 6 December 2025; Revised 18 March 2026; Accepted 9 April 2026; Published online: xx Month xxxx

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Evaluating the out-of-plane stiffness of a steel truss by comparing the behavior of the steel truss with that of a steel beam with a single symmetric cross section is possible. However, the location of the shear center is required. For a steel beam, the location of the shear center can be easily calculated. However, calculating the position of the shear center of a steel Howe truss is not possible due to the discontinuity of the web members. This research therefore investigates the relationship between the position of the equivalent out-of-plane shear center and the dimensions of the truss. From the study, it was found that the location of the equivalent out-of-plane shear center can be located both inside and outside the depth of the truss. It depends on the moment of inertia of the chord and web members. When the moment of inertia of the chord members increases, the percentage of the equivalent out-of-plane shear center position measured from the top chord decreases. A truss with a lower moment of inertia of the web members also has a lower percentage location of the equivalent out-of-plane shear center. This research also proposes an equation to calculate the equivalent out-of-plane shear center location of a steel howe truss, which is modified from the equation for a steel beam. The proposed equation shows good results under specific conditions.

Keywords: Lateral Torsional Buckling for Steel Truss, Out-of-Plane Stiffness for Steel Truss, Steel Howe Truss, Equivalent Out-of-Plane Shear Center, Equivalent Beam Method

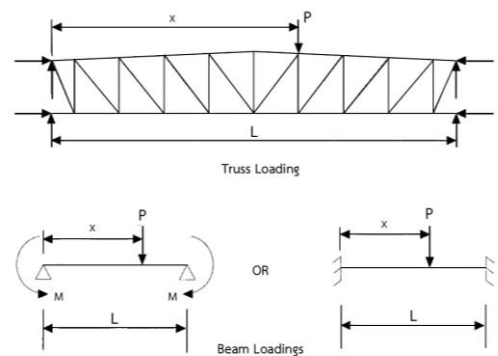
Please cite this article as: N. Pinlom and R. Wongjeeraphat, "Equivalent out-of-plane shear center of steel howe truss," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 4, pp. 1–14, Oct.–Dec. 2026 (in Thai), Art. no. 264-048329, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.004.

1. บทนำ

เหล็กจัดเป็นวัสดุโครงสร้างที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุโครงสร้างที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าคอนกรีตหลายอย่าง เช่น มีกำลังและอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่สูง ความคงทน ความเหนียว ความยืดหยุ่น และมีความคล่องตัวในการใช้งาน ถึงแม้จะมีข้อเสียในเรื่องความเสียหายที่เกิดจากสนิม และความทนไฟ แต่ก็สามารถหาวิธีป้องกันได้ [1], [2] รูปแบบหนึ่งของโครงสร้างที่นิยมใช้ในงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณคือ โครงถัก (Truss) ตัวอย่างโครงถักในงานก่อสร้าง เช่น งานอาคารคลังสินค้าหรือโรงงาน งานสะพาน งานเสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น กำลังรับแรงของโครงถักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยโครงถักมีค่าความแข็งแรง (Stiffness) ในระนาบสูงแต่มีค่าความแข็งแรงต่ำในแนวนอนกระนาบ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อกำลังรับแรงของโครงถัก การโก่งเดาะถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณากำลังรับแรงของโครงถัก งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้แสดงถึงพฤติกรรมการโก่งเดาะทางด้านข้างจากการบิด (Lateral Torsional Buckling) ของโครงถักเหล็กที่อยู่ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำในแนวตั้ง Sandberg และ Kolodziej [3] โดยน้ำหนักบรรทุกวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิดของโครงถักเหล็กหน้าตัดรูปท่อนในช่วงอิลาสติกขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

- 1) รูปแบบของการใส่น้ำหนักบรรทุกให้โครงถักเหล็ก (ใส่น้ำหนักที่คอร์ดบนหรือคอร์ดล่าง)
- 2) ระยะห่างระหว่างค้ำยันทางด้านข้างของโครงถักเหล็ก
- 3) ค่าความแข็งแรงของค้ำยันทางด้านข้าง
- 4) รูปแบบของเว็บและความแข็งแรงเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของคอร์ด

จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงถักนั้นมีพฤติกรรมที่คล้ายกับคานเหล็กที่อยู่ภายใต้สภาวะเดียวกัน Giltner และ Kassimali [4] ได้ทำการศึกษาโดยการเทียบเคียงพฤติกรรมของโครงถักให้เปรียบเสมือนพฤติกรรมของคาน ซึ่งเรียกว่า “วิธีเทียบเท่าคาน (Equivalent Beam Method)” ในการศึกษาจะประเมินและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างจริงกับแบบจำลองโครงสร้างเทียบเท่าในเงื่อนไขการกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกที่ในกรณีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์วิธีเทียบเท่าคานจะใช้การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบบจำลอง โครงสร้างจริงกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแบบจำลอง โครงสร้างเทียบเท่า โดยจะต้องมีค่าเท่ากัน ($I_{truss} = I_{beam}$) ผลจากการศึกษาพบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบเท่าในระนาบที่ได้จากการคำนวณการโก่งตัวของแบบจำลองคาน ในกรณีที่เป็นการคานช่วงเดียวธรรมดาและมีโมเมนต์กระทำที่ปลายทั้ง 2 ข้างให้ผลที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองโครงสร้างจริงซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย จึงเป็นการออกแบบที่ปลอดภัย แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการเทียบเคียงพฤติกรรมของโครงถักให้เปรียบเสมือนพฤติกรรมของคาน [4]

การประเมินความแข็งแรงของโครงถักในแนวนอกกระนาบวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกกระนาบ (Out-of-Plane Moment of Inertia) ของโครงถัก Sawaengdi [5] โดยทั่วไปโครงถักที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกกระนาบสูงจะมีความแข็งแรงต่อการโก่งตัวในแนวนอกกระนาบสูงตามไปด้วย ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกกระนาบจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงถักเหล็กในแนวนอกกระนาบ

อย่างไรก็ตามในการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกกระนาบของโครงถักจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear Center) ของโครงถักเสียก่อน ซึ่งหากเป็นคานเหล็กจะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนได้ แต่สำหรับโครงถักเหล็กนั้น ความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนเว็บ (Web) ได้แก่ ชิ้นส่วนแนวดิ่ง และชิ้นส่วนแนวทแยง รวมถึงรูปแบบ และทิศทาง การเรียงตัวของชิ้นส่วนเว็บเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนได้ หากสามารถคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือน และความแข็งแรงในแนวนอกกระนาบได้จะทำให้สามารถนำกำลังส่วนนี้ไปร่วมในการวิเคราะห์ และออกแบบระบบค้ำยันของโครงถักทำให้การออกแบบระบบค้ำยันของโครงสร้างได้มีประสิทธิภาพและประหยัดมากขึ้น

Sawaengdi [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกกระนาบของโครงถัก โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดของชิ้นส่วนในโครงถักแบบไฮว และประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติในการสร้างสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายในการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบของ

โครงถักเหล็กแบบไฮว ผลจากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าของโครงถักจะแปรผันตามมิติต่าง ๆ ของโครงถัก แต่ยังไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนได้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวกับมิติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปของโครงถัก และสร้างสมการความสัมพันธ์ที่สามารถนำไปใช้สำหรับการคำนวณความแข็งแรงในแนวนอกกระนาบของโครงถักเหล็กต่อไป

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวกับมิติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปของโครงถัก เพื่อใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโครงถักในแนวนอกกระนาบโดยการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Finite Element Analysis; FEA) โดยใช้โปรแกรม ANSYS Mechanical APDL [6] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวิศวกรรมโครงสร้าง

การวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ส่วนกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและคุณลักษณะเฉพาะของแบบจำลอง (Define) 2) ส่วนกำหนดแรงที่กระทำและลักษณะต่าง ๆ ของชิ้นส่วนรวมถึงชนิดของจุดต่อ (Assign) 3) ส่วนของการประมวลผล (Analyze) และ 4) ส่วนของการแสดงผลลัพธ์ (Result) โดยกำหนดคุณสมบัติ ขนาดของชิ้นส่วน และสัญลักษณ์ ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติ ขนาด และสัญลักษณ์ของชิ้นส่วน
โครงถัก

Section	Chord no.	Web no.	Area (in ²)	I _x (in ⁴)
W 4x13	C-1	W-1	3.83	11.30
W 6x16	C-2	W-2	4.74	32.10
W 8x21	C-3	W-3	6.16	75.30
W 10x26	C-4	W-4	7.61	144.00

*หมายเหตุ: Section หมายถึง ขนาดหน้าตัด Chord no. และ Web no. หมายถึง หมายเลขของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บตามลำดับ, Area หมายถึง พื้นที่หน้าตัด (หน่วย: ตารางนิ้ว) และ I_x หมายถึง โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน x (หน่วย: นิ้วยกกำลังสี่)

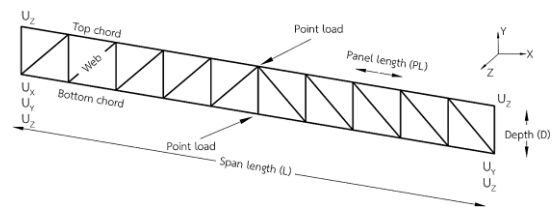
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์นี้กำหนดจุดต่อของโครงถักเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานในการวิเคราะห์ที่รวมผลของเสถียรภาพของโครงสร้าง โดย Sawaengdi [5] ได้ทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองรูปแบบเดียวกับงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมเพื่อการพาณิชย์อื่นพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

กำหนดให้ความยาวของโครงถัก (Span Length) อยู่ในช่วง 576–1,152 นิ้ว มุมของชิ้นส่วนแนวทแยง (Angle of Diagonal Members) อยู่ในช่วง 20.56–71.57 องศา ความลึกของโครงถัก (Depth) อยู่ในช่วง 36–72 นิ้ว และจำนวนช่องของโครงถัก (Number of Panels) มีจำนวน 12–24 ช่อง

ตำแหน่งคอร์ดล่าง (Bottom Chord) จุดรองรับที่ส่วนต้นของโครงถักกำหนดให้มีการยึดรั้งต้านทานการเคลื่อนที่ในลักษณะของ Pinned Support และจุดรองรับที่ส่วนปลายของโครงถักกำหนดให้มีการยึดรั้งต้านทานการเคลื่อนที่ในรูปแบบ Roller Support

ตำแหน่งคอร์ดบน (Top Chord) จุดต่อ (Joint) แรก และจุดสุดท้ายของโครงถักกำหนดให้มีการยึดรั้ง

ต้านทานการเคลื่อนที่ในแนวนอกระนาบเพียงอย่างเดียว กำหนดให้มีแรงภายนอกเป็นแรงที่กระทำแบบจุด (Point Load) กระทำที่กึ่งกลางของโครงถักในแนวนอกระนาบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคอร์ดบน และกึ่งกลางของคอร์ดล่าง โดยไม่พิจารณาถึงน้ำหนักของโครงถักเอง รูปแบบ และมีมิติต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงถักแสดงดังรูปที่ 2

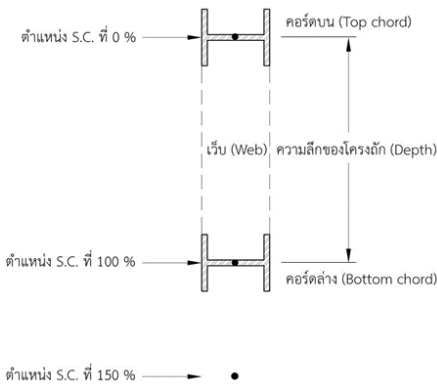


รูปที่ 2 แบบจำลองโครงถัก

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับตำแหน่งของโครงถักหลักแบบไฮวกับมิติต่าง ๆ ของโครงถัก ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับตำแหน่งของโครงถักในแนวนอกระนาบของแต่ละกรณีศึกษาแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์เทียบกับความลึกของโครงถัก โดยกำหนดให้ 0% หมายถึง ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับตำแหน่งกึ่งกลางของคอร์ดบน และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 100% ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคอร์ดล่าง และมีค่ามากกว่า 100% เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าคอร์ดล่าง แสดงดังรูปที่ 3

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับตำแหน่งของโครงถักสามารถมีค่าได้ตั้งแต่มากกว่า 50% ถึง มากกว่า 100% ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับตำแหน่งของโครงถักในแนวนอกระนาบนั้น สามารถอยู่ได้ทั้งภายในที่



รูปที่ 3 รูปตัดแสดงตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบ (S.C.)

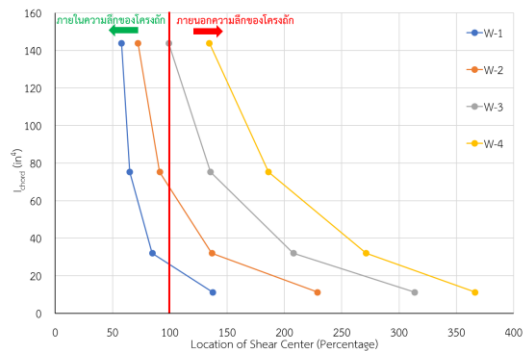
ระดับต่ำกว่าตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของโครงถัก (ช่วง 50 ถึง 100%) และภายนอก (มากกว่า 100%) ความลึกของโครงถัก

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮบริด

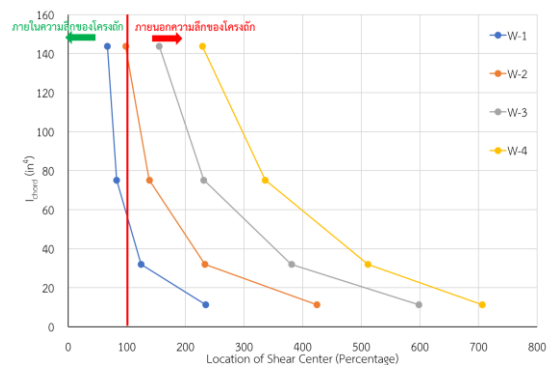
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด (I_{chord}) และชิ้นส่วนเว็บ (I_{web}) ต่อ เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮบริด การศึกษาความสัมพันธ์นี้ทำได้โดยการกำหนดให้โครงถักมีค่าความลึก ค่าความยาวของแต่ละช่อง (Panel Length) และมุมของชิ้นส่วนแนวทแยง ให้มีค่าคงที่แล้วปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนคอร์ด และชิ้นส่วนเว็บในแต่ละกรณีศึกษา ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด และชิ้นส่วนเว็บ ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บ ต่อ เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าที่ความลึกของโครงถัก (D) = 36 นิ้ว ความยาวช่วงของโครงถัก (L) = 576 นิ้ว และจำนวนช่องของโครงถัก ($No.P$) = 12 ช่อง

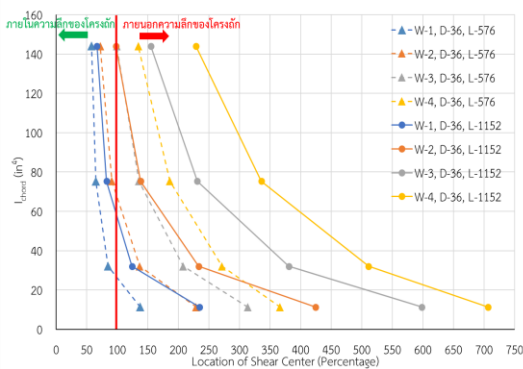


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บ ต่อ เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าที่ความลึกของโครงถัก (D) = 36 นิ้ว ความยาวช่วงของโครงถัก (L) = 1,152 นิ้ว และจำนวนช่องของโครงถัก ($No.P$) = 12 ช่อง

เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบมีค่าลดลง และโครงถักที่มี

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนเว็บที่ต่ำจะมีเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบที่ต่ำกว่า

จากการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของโครงถักที่กำหนดให้ค่าความลึก ค่าความยาวของแต่ละช่อง และค่าของมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงเท่ากันแต่ทำการปรับเปลี่ยนค่าความยาวช่วงของโครง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บ ต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบที่ความยาวช่วงของโครงถัก ($L = 576$ นิ้ว และความยาวช่วงของโครงถัก ($L = 1,152$ นิ้ว

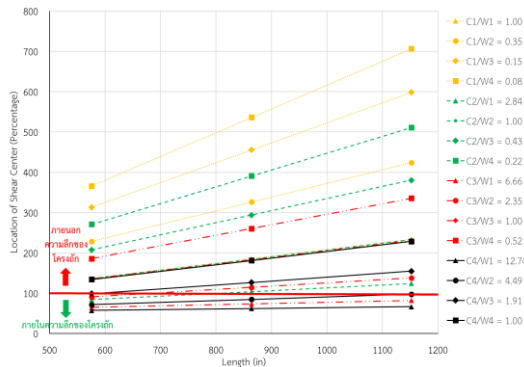
จากรูปที่ 6 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบจากผลของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด และชิ้นส่วนเว็บนั้น ส่งผลในลักษณะเดียวกันในกรณีศึกษาทั้งสองค่าความยาวช่วงของโครงถักคือ โครงถักที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดที่เท่ากัน โครงถักที่มีค่าความยาวช่วงของโครงถักที่น้อยกว่านั้นจะมีเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบน้อยกว่าในโครงถักที่มีค่าความยาวช่วงของโครง

ถักที่มากกว่า และโครงถักที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนเว็บที่เท่ากัน โครงถักที่มีค่าความยาวช่วงของโครงถักที่น้อยกว่าจะมีเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบน้อยกว่าในโครงถักที่มีค่าความยาวช่วงของโครงถักที่มากกว่าด้วยเช่นกัน

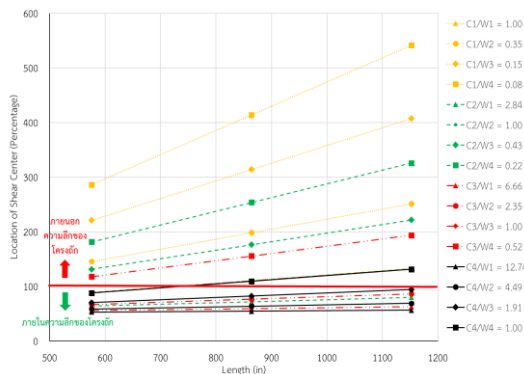
จากการเปรียบเทียบในกรณีศึกษาที่มีค่าความยาวช่วงของโครงถักแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด และชิ้นส่วนเว็บมีผลโดยตรงต่อตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่า โดยเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดเพิ่มขึ้น ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าจะมีแนวโน้มลดลง ขณะที่เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนเว็บเพิ่มขึ้น ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วงของโครงถัก

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วงของโครงถักต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบพิจารณาโดยการกำหนดให้โครงถักมีค่าความลึก ค่าความยาวของแต่ละช่อง ค่าของมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงให้มีค่าคงที่แล้วปรับเปลี่ยนความยาวของโครงถักด้วยการเพิ่มจำนวนช่องของโครงถัก (Panel) โดยขนาดหน้าตัด และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นไปตามตารางที่ 1 โดยจำแนกออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 คอร์ดบนและคอร์ดล่างมีขนาดเล็กกว่าเว็บ ($I_{chord} < I_{web}$) กรณีที่ 2 คอร์ดบนและคอร์ดล่างมีขนาดเท่ากับเว็บ ($I_{chord} = I_{web}$) และ กรณีที่ 3 คอร์ดบนและคอร์ดล่างมีขนาดใหญ่กว่าเว็บ ($I_{chord} > I_{web}$) ผลของความยาวช่วงของโครงถักที่เปลี่ยนไปต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกกระนาบแสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของโครงถักกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ ที่ความลึกของโครงถัก (D) = 36 นิ้ว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของโครงถักกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ ที่ความลึกของโครงถัก (D) = 60 นิ้ว

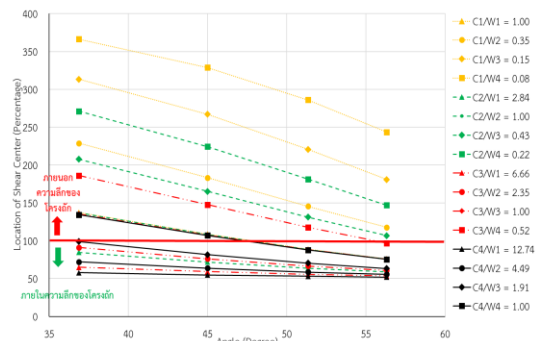
รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วงของโครงถักที่เปลี่ยนไปต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ จากผลการวิเคราะห์พบว่าผลของความยาวช่วงของโครงถัก จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะสอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อความยาวช่วง

ของโครงถักเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความลึกของโครงถัก (L/D) มีผลต่อแนวโน้มดังกล่าว โดยโครงถักที่มีค่า L/D สูง จะมีเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบสูงขึ้นตามไปด้วย

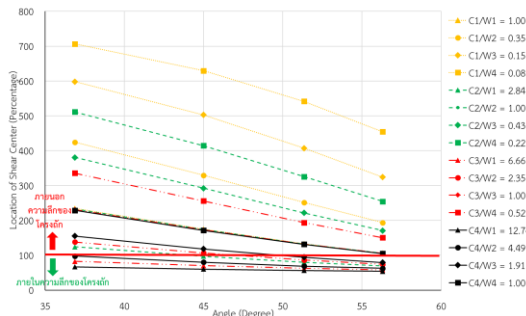
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนแนวทแยง

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์นี้ กำหนดให้โครงถักมีค่าความยาวช่วงของโครงถัก และค่าความยาวของแต่ละช่องคงที่ จากนั้นปรับเปลี่ยนค่ามุมของชิ้นส่วนแนวทแยง พร้อมกับค่าความลึกของโครงถัก โดยผลของมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงที่เปลี่ยนแปลงต่อเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



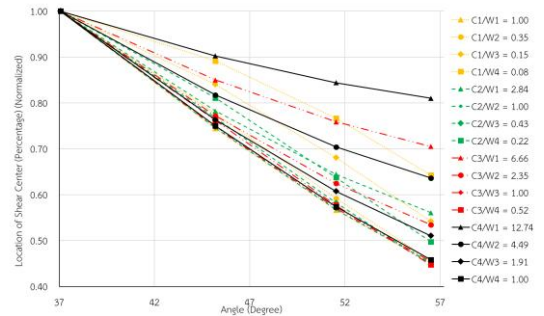
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนทแยงกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ ที่ความยาวของโครงถัก (L) = 576 นิ้ว



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนทแยงกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบ ที่ความยาวของโครงถัก (L) = 1,152 นิ้ว

จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงของโครงถักกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบ โดยพบว่าโครงถักที่มีความยาวของแต่ละช่อง และมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงเท่ากัน เมื่อมีค่าความยาวช่วงของโครงถักเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าโครงถักที่มีมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงมากขึ้น (หรือมีความลึกของโครงถักมากขึ้น) จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบลดลง

รูปที่ 11 เมื่อทำการ Normalized ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบ ที่ความยาวของโครงถัก (L) = 1,152 นิ้ว และความยาวของแต่ละช่อง = 48 นิ้ว โดยใช้ค่ามุมของชิ้นส่วนแนวทแยงเท่ากับ 36.87 องศา เป็นฐานในการ Normalized พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชิ้นส่วนทแยงกับค่า Normalized เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบที่ความยาวของโครงถัก (L) = 1,152 นิ้ว

เฉื่อยของชิ้นส่วนครัดต่อชิ้นส่วนเว็บ (I_{chord} / I_{web}) มีผลต่อพฤติกรรมการลดลงของเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบที่เกิดจากการเพิ่มมุมของชิ้นส่วนแนวทแยง (พร้อมกับความลึกของโครงถัก)

ในกรณีที่คอร์ดมีขนาดเล็กกว่าเว็บพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน I_{chord} / I_{web} ลดลง การลดลงของเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบจากการเพิ่มมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงจะมีค่าน้อยลง ส่วนในกรณีที่คอร์ดมีขนาดเท่ากับเว็บและกรณีที่คอร์ดมีขนาดใหญ่กว่าเว็บพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน I_{chord} / I_{web} ลดลง การลดลงของเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอนกระนาบ อันเนื่องมาจากการเพิ่มมุมของชิ้นส่วนแนวทแยง (พร้อมกับความลึกของโครงถัก) จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) กล่าวคือ เมื่อค่ามุมเพิ่มขึ้น ค่า Cosine จะลดลง

ผลการศึกษานี้ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Li และคณะ [7] และ Nguyen และคณะ [8] ซึ่งพบว่า

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต และขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของโครงถักอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลต่อความสามารถในการรับแรง และประสิทธิภาพของโครงสร้าง ทั้งนี้ Nguyen และคณะ [8] ได้ศึกษาพบว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อการกระจายแรงภายในและการตอบสนองของโครงสร้าง

นอกจากนี้ He และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงถักเหล็กโดยการทดสอบจริงร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพบว่าผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริง และพบว่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนคอร์ดและชิ้นส่วนเว็บรวมถึงจุดต่อมีอิทธิพลต่อการกระจายแรงภายใน การเสียรูป และความแข็งแรงของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มความแข็งแรงของจุดต่อสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรง และลดการเสียรูปของโครงสร้างได้ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโครงถัก เช่น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด และชิ้นส่วนเว็บย่อมส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง และตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าหากกำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของโครงถักต่อความลึกของโครงถักให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าอยู่ภายในความลึกของโครงถักได้ ทั้งนี้ ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดต่อชิ้นส่วนเว็บ และมุมของชิ้นส่วนแนวทแยงอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าหากกำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของโครงถักต่อความลึกของโครงถัก อัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดต่อชิ้นส่วนเว็บและมุมของ

ชิ้นส่วนแนวทแยงตามตารางที่ 2 จะสามารถทำให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าอยู่ภายในความลึกของโครงถักได้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความลึกของโครงถัก อัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดต่อชิ้นส่วนเว็บ และมุมของชิ้นส่วนแนวทแยง (Angle) ที่ทำให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าอยู่ภายในความลึกของโครงถัก

ความลึกของโครงถัก (L/D)	$I_{\text{chord}} / I_{\text{web}}$	Angle (Degree)
8-10	≥ 1.00	51.34-71.57
11-16	≥ 1.91	36.87-63.43
17-20	≥ 2.35	32.01-53.13
21-32	≥ 4.49	20.56-45.00

*หมายเหตุ: Angle มีหน่วยเป็นองศา

3.4 การประมาณค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือน

การประมาณค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวี โดยการเทียบเคียงพฤติกรรมของโครงถักเหล็กให้เปรียบเสมือนเป็นคานาเหล็กหน้าตัดขึ้นเดียว ซึ่งเรียกว่า “วิธีเทียบเท่าคานา” Giltner และ Kassimali [4] ภายใต้อิทธิพลของการโก่งเดาะทางด้านข้างจากการบิด จากการศึกษพบว่าโครงถักแบบไฮวีเมื่อใส่แรงกระทำแบบจุดด้วยขนาดของแรงที่เท่ากัน และทิศทางเดียวกันในแนวนอกระนาบที่กึ่งกลางคอร์ดบนและคอร์ดล่าง โครงถักรูปแบบไฮวีจะมีพฤติกรรมการโก่งตัวในแนวนอกระนาบโดยที่คอร์ดบนจะเคลื่อนตัวออกในแนวนอกระนาบมากกว่าคอร์ดล่าง จากพฤติกรรมดังกล่าว โครงถักรูปแบบไฮวีจึงมีพฤติกรรมที่คล้ายกับคานาเหล็ก

หน้าตัดรูปตัวไอที่สมมาตรแกนเดียวที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของปีกบนน้อยกว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของปีกล่าง ซึ่งมีตำแหน่งของจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิตและจุดศูนย์กลางแรงเฉือนในตำแหน่งที่ต่างกัน

สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวในงานวิจัยนี้ ถูกดัดแปลงมาจากสมการของ Galambos และ Surovek [10] ที่ใช้หาค่าโมเมนต์ดัดภายใต้การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีหน้าตัดสมมาตรแกนเดียว โดยจากการศึกษาพบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีหน้าตัดสมมาตรแกนเดียวจะอยู่ภายในความลึกของหน้าตัดของคานเหล็กเสมอ ดังนั้นหากจะคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮว โดยการดัดแปลงสมการของคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีหน้าตัดสมมาตรแกนเดียว จะต้องกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกันคือ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักต้องอยู่ภายในความลึกของโครงถักด้วยเช่นกัน

จากสมการของ Galambos และ Surovek [10] สำหรับหาค่าโมเมนต์ดัดภายใต้การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีหน้าตัดสมมาตรแกนเดียว ค่า y_o , h_o และ α หาได้ดังสมการ

$$y_o = \alpha h_o - \bar{y} \quad (1)$$

$$h_o = d - \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{b_{f1}}{b_{f2}}\right)^3 \left(\frac{t_{f1}}{t_{f2}}\right)} \quad (3)$$

โดยที่ y_o คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิตถึงจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (in)

h_o คือ ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของปีกบนถึงกึ่งกลางของปีกล่าง (in)

$\bar{y}$ คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิตถึงกึ่งกลางของปีกบน (in)

d คือ ความลึกของหน้าตัด (in)

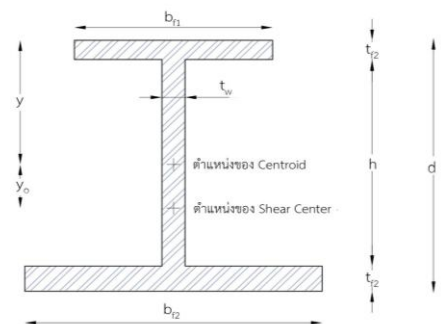
t_{f1} คือ ความหนาของปีกบน (in)

t_{f2} คือ ความหนาของปีกล่าง (in)

b_{f1} คือ ความกว้างของปีกบน (in)

b_{f2} คือ ความกว้างของปีกล่าง (in)

รูปที่ 12 และสมการที่ (1) และ (2) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของคานเหล็กสมมาตรแกนเดียวมีค่าเท่ากับ $\alpha \times h_o$ ซึ่งวัดจากกึ่งกลางความหนาของปีกบน (Top Flange) ลงมาถึงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือน โดยตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของคานเหล็กสมมาตรแกนเดียวจะต้องอยู่ภายในความลึกของหน้าตัดคานเหล็กเสมอเพราะค่าของ α จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1



รูปที่ 12 หน้าตัดคานเหล็กรูปตัวไอสมมาตรแกนเดียว

ค่า α ในสมการที่ (3) เมื่อพิจารณาเทอม $\left(\frac{b_{f1}}{b_{f2}}\right)^3 \left(\frac{t_{f1}}{t_{f2}}\right)$

พบว่าสัมพันธ์กับการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของปีกหางด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของปีกล่าง (Bottom Flange) โดยที่ไม่ได้คำนึงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของเอว (Web) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของปีกบนและปีกล่างจากการพิจารณาสมการทั้งหมดที่กล่าวมานั้นสามารถดัดแปลงสมการเพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมและคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮว โดยได้พิจารณาถึงผลของโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ด ชิ้นส่วนเว็บ และผลขององศาของชิ้นส่วนแนวทแยงได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$y = \alpha \times D \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{I_{topchord}}{I_{bottomchord} + (I_{diagonal} \times \cos \theta)}} \quad (5)$$

โดยที่ y คือ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่า (จากตำแหน่งกึ่งกลางคอร์ดบน) (in)

D คือ ความลึกของโครงถัก (in)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือน

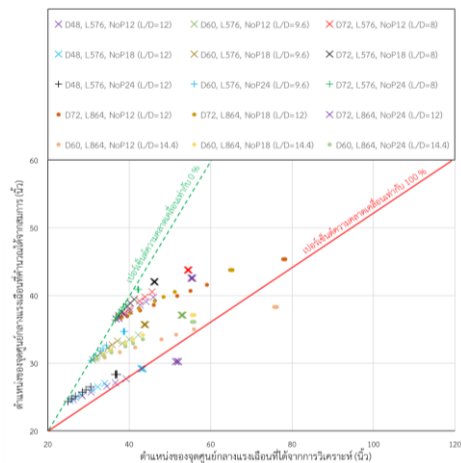
θ คือ มุมของชิ้นส่วนแนวทแยงเทียบกับคอร์ด (Degree)

$I_{topchord}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดบน (in⁴)

$I_{bottomchord}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคอร์ดล่าง (in⁴)

$I_{diagonal}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนแนวทแยง (in⁴)

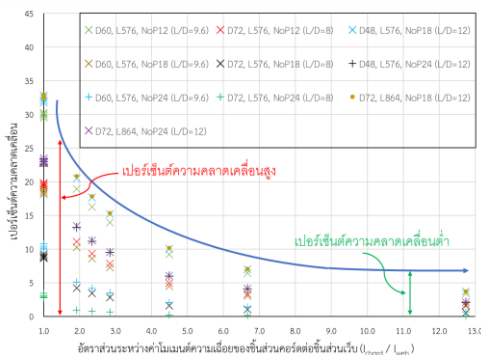
ภายใต้เงื่อนไขที่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบต้องอยู่ภายในความลึกของโครงถัก โดยใช้มิติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 เมื่อคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบจากสมการที่ (4) และ (5) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากสมการนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าค่าจากการวิเคราะห์โดยแนวโน้มของผลลัพธ์ส่วนมากจะอยู่ในช่วงที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0% (เส้นประสีเขียว) ถึง ช่วงที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 100% (เส้นทึบสีแดง) เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบที่คำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ยังพบอีกว่าเมื่อกำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของโครงถักต่อความลึกของโครงถัก

ให้อยู่ในช่วง 8–12 มุมของชิ้นส่วนทแยงไม่น้อยกว่า 51.34 องศา และอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนครัดต่อชิ้นส่วนเว็บไม่น้อยกว่า 1.91 จะทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ 20.8% แต่ถ้าหากกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนครัดต่อชิ้นส่วนเว็บไม่น้อยกว่า 2.35 จะทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ 17.84% และจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ 10.13% เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนครัดต่อชิ้นส่วนเว็บไม่น้อยกว่า 4.49 ดังที่แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตัวอย่างที่คำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบของโครงถักเหล็กแบบไฮวี สามารถสรุปได้ว่าโครงถักที่มีค่า

โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนครัดมากขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบมีค่าลดลง ความยาวของโครงถักมีค่ามากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่ามีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มุมของชิ้นส่วนทแยง ความลึกของโครงถัก ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนครัดต่อชิ้นส่วนเว็บที่เพิ่มขึ้น และความยาวช่วงของโครงถักที่ลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่ามีค่าลดลง

จากการเทียบเคียงพฤติกรรมของโครงถักเหล็กให้เปรียบเสมือนกับพฤติกรรมของคานเหล็กที่สมมาตรแกนเดี่ยวนั้น สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าได้ ตามสมการที่ (4) และ (5) โดยจะต้องมีตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบเท่าในแนวนอกระนาบอยู่ภายในความลึกของโครงถัก และสมการนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0–100% ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแนวนอกระนาบของโครงถัก ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการประเมินความแข็งแรงของโครงถักในแนวนอกระนาบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Jirawacharadet, “Structural steel design : Allowable stress design method,” *Suranaree University of Technology*, 2005 (in Thai).
- [2] T. Thepchatri, “Behavior and design of steel structures,” *Chulalongkorn University Press*, 2016 (in Thai).
- [3] J. Jankowska-Sandberg and J. Kolodziej,



- “Experimental study of steel truss lateral-torsional buckling,” *Engineering Structures*, vol. 46, pp. 165–172, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.07.033.
- [4] B. Giltner and A. Kassimali, “Equivalent beam method for trusses,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 5, no. 2, pp. 70–77, 2000, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0680(2000)5:2(70).
- [5] P. Sawaengdi, “Equivalent out-of-plane moment of inertia for steel howe truss,” M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2017 (in Thai).
- [6] ANSYS, Inc., ANSYS Mechanical APDL User’s Guide, Release 2020 R1, Canonsburg, PA, USA, 2020.
- [7] P. Li, X. Zhao, D. Ding, X. Li, Y. Zhao, L. Ke, X. Zhang, and B. Jian, “Optimization design for steel trusses based on a genetic algorithm,” *Buildings*, vol. 13, no. 6, 2023, Art. no. 1496, doi: 10.3390/buildings13061496.
- [8] N. T. Hieu, N. Q. Cuong, and V. A. Tuan, “Optimization of steel roof trusses using machine learning-assisted differential evolution,” *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 99–110, 2021, doi: 10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(4)-09.
- [9] J. He, F. Kong, P. Huang, and K. Mei, “Experimental and numerical investigation on behavior of rectangular closed section steel truss beams with concrete-filled joints,” *Buildings*, vol. 14, no. 12, 2024, doi: 10.3390/buildings14123857.
- [10] T. V. Galambos and A. E. Surovek, “Structural stability of steel: Concepts and applications for structural engineers,” *Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, Inc.*, 2008.