การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของเสาเหล็กที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Study on Loading Behaviour of Corrugated Web Steel Column using Finite Element Analysis

ชยสิทธิ์ สีห์โสภณ* และ อาทิตย์ เพชรศศิธร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: chayasit2538@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของเสาที่มีแผ่นเอวเป็นลอน (corrugated-web I-section column) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในขั้นตอนแรกแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกตรวจสอบความสามารถต่อผลการทดสอบจริงและผลของแบบจำลองเชิงตัวเลข ในเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง (flat-web I-section column) จากงานวิจัยที่ถูกอ้างอิง ในขั้นตอนที่สองแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกสร้างและถูกนำมาเปรียบเทียบกับเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นการศึกษาทางพารามิเตอร์ได้ถูกดำเนินไปเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ ของหน้าตัด ต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะ (buckling behaviour) และกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate load capacity) จากการศึกษาพบว่าในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนหลัก พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา (flexural buckling) จนกระทั่งผ่านจุดรับน้ำหนักสูงสุดของเสา การโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) จะเกิดขึ้นในแผ่นปีกและกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ขณะที่ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนรอง พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะยังคงถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนอยู่เล็กน้อย ในการศึกษาทางพารามิเตอร์ พบว่าในเสาที่เกิดการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนสามารถให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดมากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงได้ในบางกรณี

คำสำคัญ: เสาหน้าตัดรูปตัวไอ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, แผ่นเอวเป็นลอน, พฤติกรรมการโก่งเดาะ, กำลังรับน้ำหนักสูงสุด

Abstract

This paper presents the study on the loading behaviour of the corrugated-web I-section column using a finite element model. Firstly, the finite element models were validated against the experimental and numerical results of flat-web I-section column from the reference journal. Secondly, the finite element models of corrugated-web I-section column were created and compared with the results of flat-web I-section column. Then parametric studies were performed to investigate the influence of different proportions of the section on the buckling behaviour and the ultimate load capacity. It was found that in the column that bending about major axis;

ลดลง [1-2] โดยทั่วไปโครงสร้างที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะใช้ในโครงข้อแข็งของอาคารหนึ่งชั้น (รูปที่ 1) และโครงสร้างเสา (รูปที่ 2) [1]



รูปที่ 1 เสาและคานหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนในโครงข้อแข็ง (Corrugated web I-section portal frame) [1]



รูปที่ 2 เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนในโครงข้อแข็ง (Corrugated web I-section column) [1]

คานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน มีพฤติกรรมการรับแรงคล้ายคลึงกับ Lattice girder กล่าวคือ ภายใต้แรงอัดในแนวแกน (Normal force) หรือแรงดัดในแนวแกน (In-plane bending moment) แผ่นปีก (Flange) จะเป็นส่วนที่รับแรงเป็นหลัก เหมือนกับ Top และ Bottom chord ของ Lattice girder และภายใต้แรงเฉือน (Shear force) แผ่นเอว (Web) จะเป็นส่วนที่รับแรงเป็นหลัก เหมือนกับ Diagonal chord ของ Lattice girder [1] ทำให้พฤติกรรมการโก่งเดาะหลักของคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ได้แก่ การโก่งเดาะในแผ่นปีก (flange buckling) และการโก่งเดาะในแผ่นเอว (web buckling) [3] นอกจากนี้ยังมีการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral torsional buckling) [4]

Dabon, M. และ Elamary, A. [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ภายใต้แรงดัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียว โดยเปรียบเทียบกับคานที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง โดยพิจารณาทั้งคานที่แผ่นปีกไม่อัดแน่น (non-compact flange) และคานที่แผ่นปีกอัดแน่น (compact flange) ด้วยอัตราส่วนความยาวที่ยื่นออกมาของแผ่นปีกต่อความหนาของแผ่นปีก (outstand-to-thickness ratio) เท่ากับ 12.5 และ 5 ตามลำดับ และพบว่ากำลังรับแรงดัดของคานที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง มีค่าสูงกว่าคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน และกำลังรับแรงดัดของคานที่แผ่นปีกไม่อัดแน่น มีค่าต่ำกว่าคานที่แผ่นปีกอัดแน่น โดยพฤติกรรมการโก่งเดาะของคานที่แผ่นปีกไม่อัดแน่นและคานที่แผ่นปีกอัดแน่น คือการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ในแผ่นปีก และการโก่งเดาะในแผ่นเอวตามลำดับ

Guo-Qiang Li, Jian Jiang และ Qi Zhu [5] ได้ศึกษากำลังของการโก่งเดาะเฉพาะที่ในแผ่นปีกที่รับแรงอัด/แผ่นปีกบน (Compression flange/top flange) ภายใต้อิทธิพลของหน่วยแรงในแผ่นปีกล่าง (bottom flange) ในแบบต่างๆ กล่าวคือในขณะที่แผ่นปีกบนรับหน่วยแรงอัด และแผ่นปีกล่างรับหน่วยแรงที่แตกต่างกัน คือจากหน่วยแรงดึงมาเป็น ไม่มีหน่วยแรง และหน่วยแรงอัด ซึ่งหมายถึงโครงสร้างรับแรงจากแรงดัดเพียงอย่างเดียว มาเป็นแรงอัดที่แผ่นปีกบน และแรงอัดที่กึ่งกลางหน้าตัดตามลำดับ และพบว่าหน่วยแรงการโก่งเดาะในแผ่นปีกที่รับแรงอัด (compression flange buckling stress) จะมีค่าลดลงประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์

M.F. Hassanein, A.A. Elkawas และ Yong-Bo Shao [4] ได้ศึกษาการเกิดการโก่งเดาะในแผ่นปีกและการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด ในคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอนที่มีแผ่นปีกชะลูดและมีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัด (Cross-section aspect ratio) ต่ำ ภายใต้แรงดัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียว และพบว่าพบว่าการโก่งเดาะเฉพาะที่ในแผ่นปีกจะเกิดขึ้นในคานที่มีความยาวสั้น และเมื่อความยาวคานสูงขึ้นการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิดจะเข้ามามีอิทธิพลรวมกับการโก่งเดาะเฉพาะที่ในแผ่นปีก จนกระทั่งเกิดแต่การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด ในคานที่มีความยาวสูง

Yong-Bo Shao, Amany Refat Elsisy และ M.F. Hassanein [6] ได้ศึกษาค่า out-of-plane stiffness ในคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ซึ่งโดยทั่วไป ยิ่งค่า out-of-plane stiffness มาก ยิ่งส่งผลให้กำลังในการต้านการโก่งเดาะจากการบิดสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าค่า out-of-plane stiffness ของคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ไม่ได้สูงกว่าคานที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงเสมอไป โดยตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลให้ค่า out-of-plane stiffness สูงขึ้นคือค่าความลึกของระยะลอน (corrugation depth)

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมาย ที่ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะและกำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate load) ของคานที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ในขณะที่การศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะและพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาที่มีแผ่นเอวเป็นลอน (Corrugated web column) ยังไม่ได้รับการศึกษาเท่าที่ควร งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะ, พฤติกรรมการโก่งเดาะ และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน โดยนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของเสาที่มีรูปทรงของแผ่นเอวเป็นเส้นตรง ผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และศึกษาผลลัพธ์ของเสาที่มีแผ่นเอวเป็นรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน เมื่อความชะลูดของแผ่นปีกและแผ่นเอว และค่าอัตราส่วน outstand-to-thickness เปลี่ยนไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ในขั้นแรกโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกตรวจสอบความสามารถ ต่อผลการทดสอบจริงและผลของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical result) ในโครงสร้างเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง (flat-web I-section column) ที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนหลัก และรับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนรอง จากงานวิจัยอ้างอิง [7] ขั้นตอนที่สองจะสร้างแบบจำลองเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอนแบบต่างๆ โดยคงเงื่อนไขการรับแรง, คุณสมบัติของวัสดุ, ขนาดของชิ้นส่วน และความยาวของเสา ในงานวิจัยอ้างอิง เพื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นการศึกษาทางพารามิเตอร์ได้ถูกดำเนินไปเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะ และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา

2.1 แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ถูกสร้างจากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด Shell181 ในการสร้างทั้งแผ่นปีกและแผ่นเอว [8] โดยเอลิเมนต์ชนิด SHELL181 คือเอลิเมนต์ที่มี 4 จุดต่อ (node) และมี 6 Degree of freedom ในแต่ละจุดต่อ เอลิเมนต์ชนิด SHELL181 เหมาะกับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความบางจนถึงหนาปานกลาง และเหมาะกับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (linear analysis) และการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear analysis) โดยขนาดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในแผ่นเอวและแผ่นปีกคือ กว้างประมาณ 15 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะประกอบไปด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ การวิเคราะห์แบบการโก่งเดาะแบบเชิงเส้น (Linear buckling analysis) ในการหา eigenmode และ eigenvalue เพื่อใช้หาความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดตั้งต้น (initial/geometric imperfection) โดยไม่คำนึงถึงหน่วยแรงคงค้างจากการเชื่อม (welded residual stress) และการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่เป็นการจำลองการเสียรูปอย่างมาก พร้อมคำนึงถึง ความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุและรูปร่าง (material nonlinearity & geometrical nonlinearity) คือให้มีการกำหนดกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของวัสดุซึ่งมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear stress-strain relationship) และการสั่งให้โปรแกรมอัพเดต element stiffness matrix ไปตลอดการเสียรูปของโครงสร้าง

ความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดตั้งต้น จะใช้ eigenmode ที่มีค่าน้อยที่สุดในการกำหนดความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดตั้งต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปยังความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดตั้งต้นที่เป็นการโก่งเดาะทั้งเสา (global buckling mode) โดยกำหนดค่าการโก่งเดาะเท่ากับ L/1000 [7] โดย L คือความยาวของเสาส่วนที่อยู่ระหว่างจุดรับแรง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

คุณสมบัติของวัสดุ จะใช้อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ จะถูกกำหนดด้วยแบบจำลองวัสดุ two-stage Ramberg-Osgood แสดงในสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{f}{E} + 0.002\left(\frac{f}{f_y}\right)^n \quad \text{เมื่อ } f \le f_y \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{f-f_y}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{t,0.2} - \frac{f_u-f_y}{E_{0.2}}\right)\left(\frac{f-f_y}{f_u-f_y}\right)^m + \varepsilon_{t,0.2}$$

เมื่อ $f_y < f \le f_u$ (2)

E คือมอดุลัสของยัง (Young's modulus), f_u คือความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress), ε_u คือความเครียดที่ความเค้นแรงดึงสูงสุด, f_y คือความเค้นที่จุดคราก (Yield stress), $E_{0.2}$ คือมอดูลัสของความชัน (tangent modulus) ที่ 0.2% proof stress และ $\varepsilon_{t,0.2}$ คือความเครียดรวมทั้งหมด (total strain) ที่ 0.2% proof stress โดยค่าของตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ ที่ใช้ในแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [9]

ชนิดของเหล็ก	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_u	n	m
Duplex grade 2205	530	770	0.30	9.3	3.6

รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

2.2 การตรวจสอบงานวิจัยอ้างอิงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดย Kucukler M. Flexural buckling behaviour and design of duplex and ferritic stainless steel I-section columns [7]

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะถูกตรวจสอบความสามารถต่อผลการทดสอบจริงและผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขจากงานวิจัยอ้างอิงโดย Kucukler M. [7] โดยเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง ที่เลือกนำมาเปรียบเทียบเป็นเสาเหล็กชนิด duplex stainless grade 2205 มีขนาดหน้าตัดคือ กว้าง 150 มิลลิเมตร, ลึก 150 มิลลิเมตร, ความหนาแผ่นปีก 10 มิลลิเมตร และความหนาแผ่นเอว 6 มิลลิเมตร โดยรับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนหลักทั้งหมด 4 ความยาว (I-2205) ก

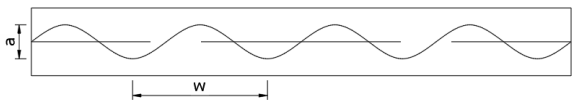
แรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนรองทั้งหมด 4 ความยาว (H-2205) โดยทิศทางของแรงดัดจะถูกกำหนดโดยทิศทางของจุดรับแรงแบบ pin-end ผ่านตัวถ่ายแรง knife edge ทั้งด้านบนและด้านล่างของเสา ทำให้ความยาวประสิทธิผลของเสามีค่าเท่ากับ L+340 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปการทดสอบจริงและทดสอบด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข ในเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง [7]

2.3 เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน

เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน จะถูกสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS โดยคงเงื่อนไขการรับแรง , คุณสมบัติของวัสดุ, ขนาดของชิ้นส่วน และความยาวของเสา ตามงานวิจัยของ Kucukler M. [7] เพื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง โดยค่าฟังก์ชั่นของรูปทรงคลื่นไซน์ของแผ่นเอว (รูปที่ 5) จะใช้ที่ค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3



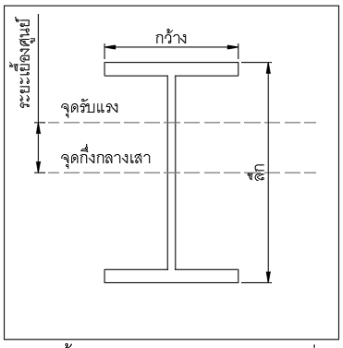
รูปที่ 5 ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดฟังก์ชั่นของรูปทรงคลื่นไซน์

2.4 การศึกษาทางพารามิเตอร์ (Parametric studies)

การศึกษาทางพารามิเตอร์จะถูกใช้เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะ และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา คือเมื่อความชะลูด (ความหนา) ของแผ่นปีกเปลี่ยนไป (ตารางที่ 4) และเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดพร้อมด้วยระยะเยื้องศูนย์ระหว่างจุดรับแรงกับจุดกึ่งกลางเสาเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 6 (ตารางที่ 5)

3. ผลการวิจัย

3.1 การตรวจสอบงานวิจัยอ้างอิง โดย Kucukler M. [7]



รูปที่ 6 ระยะเยื้องศูนย์ระหว่างจุดรับแรงกับจุดกึ่งกลางเสา

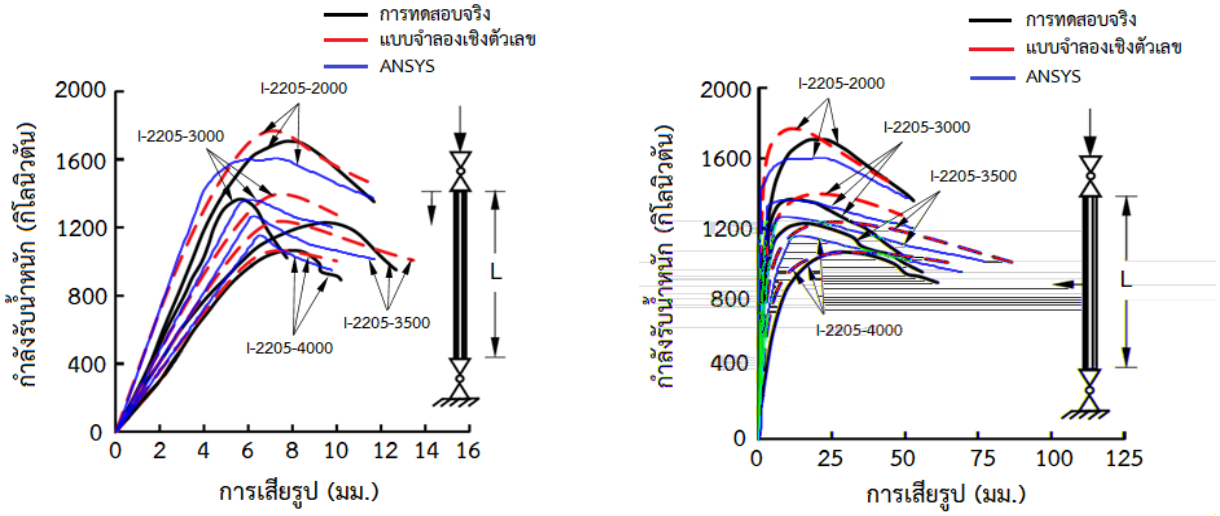
จากการตรวจสอบความสามารถของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะได้ตารางแสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา โดยเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากทั้งการทดสอบจริงและผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขจากงานวิจัยอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 2 และพบว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดใกล้เคียงกับทั้งการทดสอบจริงและผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขในทั้งเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนหลักและเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนรอง รูปที่ 7 และ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการเสียรูปในทิศของแรงอัด (ก) และทิศของแรงดัด (ข) ของเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนหลักและเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนรอง ตามลำดับ ซึ่งกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS มีความสามารถในการจำลองการเสียรูปและกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาได้

3.2 เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน

จากการสร้างเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะได้ตารางแสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา โดยเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนหลัก พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา (flexural buckling) ในขณะที่เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสาจนกระทั่งผ่านจุดรับน้ำหนักสูงสุดของเสา การโก่งเดาะเฉพาะที่จะเกิดในแผ่นปีกฝั่งที่รับแรงอัดที่สูงกว่าโดยเฉพาะในแผ่นปีกที่มีอัตราส่วนความยาวที่ยื่นออกมาของแผ่นปีกต่อความหนาของแผ่นปีกสูงหรือมีความลึกของระยะลอนและความยาวคลื่นสูง (รูปที่ 9) และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ขณะที่ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนรอง พฤติกรรมการโก่งเดาะของทั้งเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน จะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา (รูปที่ 9) และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนอยู่เล็กน้อย

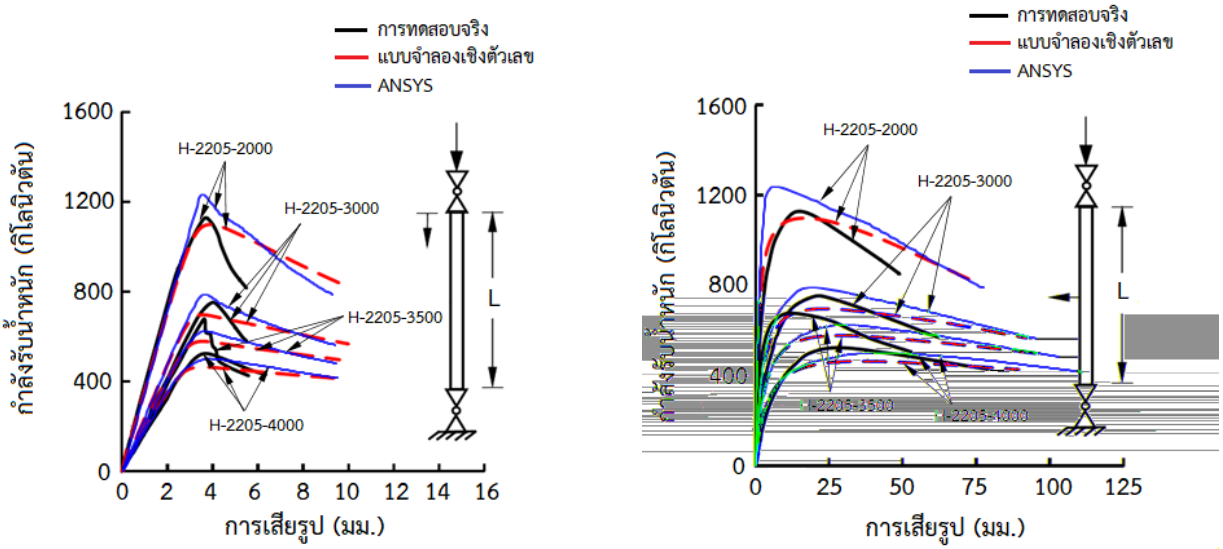
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา

เงื่อนไขการรับแรง	ชื่อเสาที่ใช้ทดสอบ	ความยาวเสา (ม.)	(1) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา จากการทดสอบจริง (กิโลนิวตัน)	(2) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา จากแบบจำลองเชิงตัวเลข (กิโลนิวตัน)	(3) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS (กิโลนิวตัน)	(1) / (3)	(2) / (3)
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก	I2205-2000	2.04	1705	1768	1610	1.06	1.10
	I2205-3000	3.04	1366	1395	1368	1.00	1.02
	I2205-3500	3.54	1228	1236	1272	0.97	0.97
	I2205-4000	4.04	1065	1064	1163	0.92	0.91
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนรอง	H2205-2000	2.04	1128	1098	1233	0.91	0.89
	H2205-3000	3.04	751	696	790	0.95	0.88
	H2205-3500	3.54	677	578	625	1.08	0.92
	H2205-4000	4.04	524	464	502	1.04	0.92
					ค่าเฉลี่ย	0.99	0.95



(ก) การเสียรูปในทิศของแรงอัด (ข) การเสียรูปในทิศของแรงดัด

รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการเสียรูปในเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนหลัก

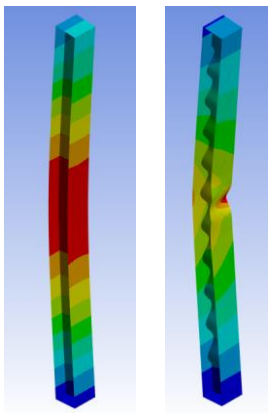


(ก) การเสียรูปในทิศของแรงอัด (ข) การเสียรูปในทิศของแรงดัด

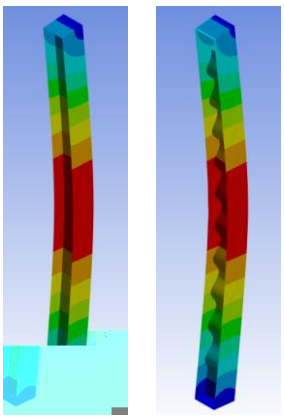
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและการเสียรูปในเสาที่รับแรงอัดในแนวแกนและแรงดัดรอบแกนรอง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน

เงื่อนไขการรับแรง	หน้าตัดเสารูปตัวไอ				ความยาวเสา (ม.)	ตัวแปรสำหรับค่าฟังก์ชั่นรูปทรงคลื่นไซน์		กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาจากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS (กิโลนิวตัน)
	ความกว้าง (มม.)	ความลึก (มม.)	ความหนาแผ่นปีก (มม.)	ความหนาแผ่นเอว (มม.)		ความลึกของระยะลอน, a (มม.)	ความยาวคลื่น, w (มม.)	
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก	150	150	10	6	2.04	-	-	1610
	150	150	10	6		25	102	1364 (ร้อยละ 85 ของ 1610)
	150	150	10	6		50	204	1358 (ร้อยละ 84 ของ 1610)
	150	150	10	6		85	340	1335 (ร้อยละ 83 ของ 1610)
	150	150	10	6	3.04	-	-	1368
	150	150	10	6		25	95	1144 (ร้อยละ 84 ของ 1368)
	150	150	10	6		50	190	1142 (ร้อยละ 83 ของ 1368)
	150	150	10	6		80	304	1141 (ร้อยละ 83 ของ 1368)
	150	150	10	6	3.54	-	-	1272
	150	150	10	6		25	110.625	1076 (ร้อยละ 85 ของ 1272)
	150	150	10	6		50	221.25	1077 (ร้อยละ 85 ของ 1272)
	150	150	10	6		80	354	1075 (ร้อยละ 84 ของ 1272)
	150	150	10	6	4.04	-	-	1163
	150	150	10	6		25	101	1000 (ร้อยละ 86 ของ 1163)
	150	150	10	6		50	202	999 (ร้อยละ 86 ของ 1163)
	150	150	10	6		83.33	336.66	997 (ร้อยละ 86 ของ 1163)
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนรอง	150	150	10	6	2.04	-	-	1233
	150	150	10	6		25	102	1081 (ร้อยละ 88 ของ 1233)
	150	150	10	6		50	204	1080 (ร้อยละ 88 ของ 1233)
	150	150	10	6		85	340	1085 (ร้อยละ 88 ของ 1233)
	150	150	10	6	3.04	-	-	790
	150	150	10	6		25	95	762 (ร้อยละ 96 ของ 790)
	150	150	10	6		50	190	765 (ร้อยละ 97 ของ 790)
	150	150	10	6		80	304	771 (ร้อยละ 98 ของ 790)
	150	150	10	6	3.54	-	-	625
	150	150	10	6		25	110.625	620 (ร้อยละ 99 ของ 625)
	150	150	10	6		50	221.25	619 (ร้อยละ 99 ของ 625)
	150	150	10	6		80	354	624 (ร้อยละ 100 ของ 625)
	150	150	10	6	4.04	-	-	502
	150	150	10	6		25	101	498 (ร้อยละ 99 ของ 502)
	150	150	10	6		50	202	500 (ร้อยละ 100 ของ 502)
	150	150	10	6		83.33	336.66	505 (ร้อยละ 101 ของ 502)



(ก) เสาทรบแรงดดรอบแกนหลก – ความยาวเสา 2.04 เมตร



(ข) เสาทรบแรงดดรอบแกนรอง – ความยาวเสา 2.04 เมตร

รปท 9 พฤตกรรมการโกงเดาะของเสา

3.3 การศึกษาทางพารามิเตอร์

จากการศึกษาทางพารามิเตอร์ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะได้ตารางแสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา โดยเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอนเมื่อความชะลูดของแผ่นปีกเปลี่ยนไป ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนหลัก พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา ทั้งในเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและในเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะยังให้ค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนแต่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ขณะที่ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนรองพฤติกรรมการโก่งเดาะของทั้งเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะยังคงมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนอยู่เล็กน้อยเช่นเดิม

เดิมทีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 1:1 เมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกนี้มีค่าลดลง eigenmode ที่มีค่าน้อยที่สุดที่เดิมทีแสดงถึงการโก่งเดาะทั้งเสาตามทิศทางของจุดรับแรงของเสา เปลี่ยนไปเป็นการโก่งเดาะของเสาในทิศทางของแกนอ่อน (รูปที่ 10) ทำให้การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด (รูปที่ 11) เข้ามามี

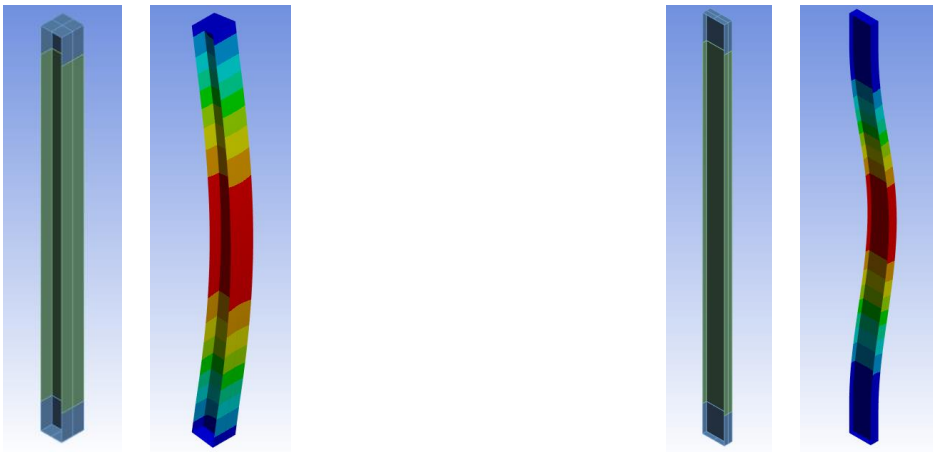
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา เมื่อความชะลูดของแผ่นปีกเปลี่ยนไป

เงื่อนไขการรับแรง	หน้าตัดเสารูปตัวไอ				ความยาวเสา (ม.)	ตัวแปรสำหรับค่าฟังก์ชั่นรูปทรงคลื่นไซน์		กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาจากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS (กิโลนิวตัน)
	ความกว้าง (มม.)	ความลึก (มม.)	ความหนาแผ่นปีก (มม.)	ความหนาแผ่นเอว (มม.)		ความลึกของระยะลอน, a (มม.)	ความยาวคลื่น, w (มม.)	
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก	150	150	20	6	2.04	-	-	2903
	150	150	20	6		25	102	2668 (ร้อยละ 92 ของ 2903)
	150	150	20	6		50	204	2667 (ร้อยละ 92 ของ 2903)
	150	150	20	6		85	340	2662 (ร้อยละ 92 ของ 2903)
	150	150	20	6	3.04	-	-	2470
	150	150	20	6		25	95	2243 (ร้อยละ 91 ของ 2470)
	150	150	20	6		50	190	2248 (ร้อยละ 91 ของ 2470)
	150	150	20	6		80	304	2252 (ร้อยละ 91 ของ 2470)
	150	150	20	6	3.54	-	-	2310
	150	150	20	6		25	110.625	2112 (ร้อยละ 91 ของ 2310)
	150	150	20	6		50	221.25	2118 (ร้อยละ 92 ของ 2310)
	150	150	20	6		80	354	2119 (ร้อยละ 92 ของ 2310)
	150	150	20	6	4.04	-	-	2134
	150	150	20	6		25	101	1967 (ร้อยละ 92 ของ 2134)
	150	150	20	6		50	202	1968 (ร้อยละ 92 ของ 2134)
	150	150	20	6		83.33	336.66	1970 (ร้อยละ 92 ของ 2134)
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนรอง	150	150	20	6	2.04	-	-	2303
	150	150	20	6		25	102	2133 (ร้อยละ 93 ของ 2303)
	150	150	20	6		50	204	2137 (ร้อยละ 93 ของ 2303)
	150	150	20	6		85	340	2147 (ร้อยละ 93 ของ 2303)
	150	150	20	6	3.04	-	-	1552
	150	150	20	6		25	95	1523 (ร้อยละ 98 ของ 1552)
	150	150	20	6		50	190	1525 (ร้อยละ 98 ของ 1552)
	150	150	20	6		80	304	1532 (ร้อยละ 99 ของ 1552)
	150	150	20	6	3.54	-	-	1238
	150	150	20	6		25	110.625	1234(ร้อยละ 100 ของ 1238)
	150	150	20	6		50	221.25	1232(ร้อยละ 100 ของ 1238)
	150	150	20	6		80	354	1240(ร้อยละ 100 ของ 1238)
	150	150	20	6	4.04	-	-	998
	150	150	20	6		25	101	994 (ร้อยละ 100 ของ 998)
	150	150	20	6		50	202	998 (ร้อยละ 100 ของ 998)
	150	150	20	6		83.33	336.66	1005 (ร้อยละ 101 ของ 998)

อิทธิพลต่อการโก่งเดาะของเสาและส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา ตารางที่ 5 แสดงกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงและเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอนเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดและระยะเยื้องศูนย์ระหว่างจุดรับแรงกับจุดกึ่งกลางเสาเปลี่ยนไป พบว่าในเสาที่มีอัตราส่วน 1:1.8 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนยังให้ค่าน้อยกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง ส่วนในเสาที่มีอัตราส่วน 1:3 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงเมื่อความยาวเสามีค่ามากกว่า 3.04 เมตร โดยยิ่งความลึกของระยะลอนและความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้นกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาจะมีค่าสูงขึ้น และในเสาที่มีอัตราส่วน 1:3.75 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน จะให้ค่าที่มากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง

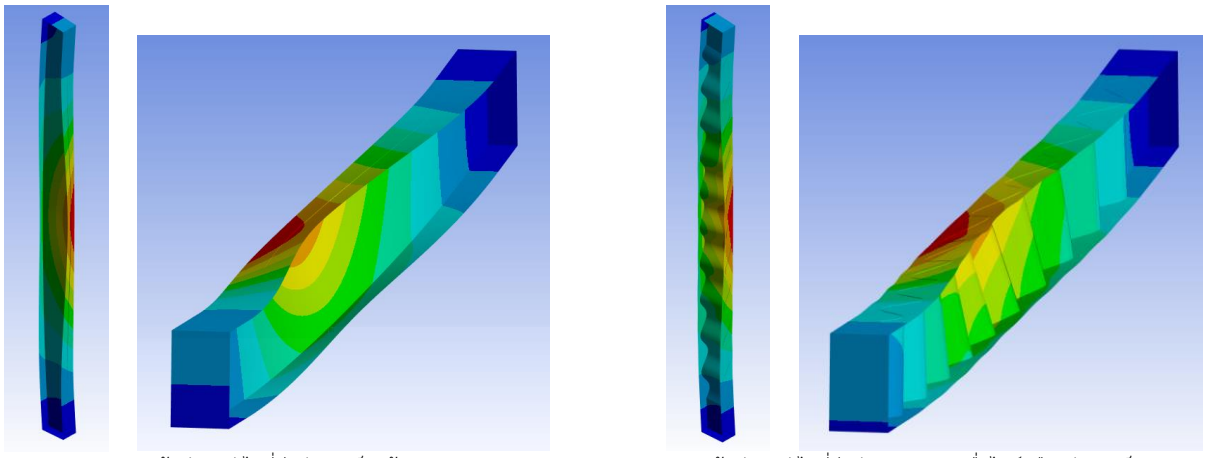
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดและระยะเยื้องศูนย์ระหว่างจุดรับแรงกับจุดกึ่งกลางเสาเปลี่ยนไป

เงื่อนไขการรับแรง	หน้าตัดเสารูปตัวไอ				ระยะเยื้องศูนย์ระหว่างจุดรับแรงกับจุดกึ่งกลางเสา (มม.)	ความยาวเสา (ม.)	ตัวแปรสำหรับค่าฟังก์ชั่นรูปทรงคลื่นไซน์		กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS (กิโลนิวตัน)
	ความกว้าง (มม.)	ความลึก (มม.)	ความหนาแผ่นปีก (มม.)	ความหนาแผ่นเอว (มม.)			ความลึกของระยะลอน, a (มม.)	ความยาวคลื่น, w (มม.)	
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก (อัตราส่วนความกว้างต่อความลึก 1:1.8)	85	150	10	6	35	2.04	-	-	593
	85	150	10	6	35		25	102	494 (ร้อยละ 83 ของ 593)
	85	150	10	6	35		50	204	493 (ร้อยละ 83 ของ 593)
	85	150	10	6	35		85	340	485 (ร้อยละ 82 ของ 593)
	80	150	10	6	35	3.04	-	-	403
	80	150	10	6	35		25	95	360 (ร้อยละ 89 ของ 403)
	80	150	10	6	35		50	190	363 (ร้อยละ 90 ของ 403)
	80	150	10	6	35		80	304	363 (ร้อยละ 90 ของ 403)
	80	150	10	6	35	3.54	-	-	338
	80	150	10	6	35		25	110.625	317 (ร้อยละ 94 ของ 338)
	80	150	10	6	35		50	221.25	320 (ร้อยละ 95 ของ 338)
	80	150	10	6	35		80	354	322 (ร้อยละ 95 ของ 338)
	83.5	150	10	6	35	4.04	-	-	307
	83.5	150	10	6	35		25	101	296 (ร้อยละ 96 ของ 307)
	83.5	150	10	6	35		50	202	301 (ร้อยละ 98 ของ 307)
	83.5	150	10	6	35		83.33	336.66	304 (ร้อยละ 99 ของ 307)
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก (อัตราส่วนความกว้างต่อความลึก 1:3)	50	150	10	6	35	2.04	-	-	264
	50	150	10	6	35		25	102	237 (ร้อยละ 90 ของ 264)
	50	150	10	6	35		50	204	241 (ร้อยละ 91 ของ 264)
	50	150	10	6	35	3.04	-	-	143
	50	150	10	6	35		25	95	147 (ร้อยละ 103 ของ 143)
	50	150	10	6	35		50	190	155 (ร้อยละ 109 ของ 143)
	50	150	10	6	35	3.54	-	-	109
	50	150	10	6	35		25	110.625	113 (ร้อยละ 104 ของ 109)
	50	150	10	6	35		50	221.25	123 (ร้อยละ 112 ของ 109)
	50	150	10	6	35	4.04	-	-	86
	50	150	10	6	35		25	101	90 (ร้อยละ 105 ของ 86)
	50	150	10	6	35		50	202	97 (ร้อยละ 113 ของ 86)
แรงอัดและแรงดัดรอบแกนหลัก (อัตราส่วนความกว้างต่อความลึก 1:3.75)	50	150	10	6	35	2.04	-	-	158
	50	150	10	6	35		25	102	158 (ร้อยละ 100 ของ 158)
	50	150	10	6	35	3.04	-	-	79
	50	150	10	6	35		25	95	85 (ร้อยละ 108 ของ 79)
	50	150	10	6	35	3.54	-	-	60
	50	150	10	6	35		25	110.625	64 (ร้อยละ 107 ของ 60)
	50	150	10	6	35	4.04	-	-	46
	50	150	10	6	35		25	101	50 (ร้อยละ 108 ของ 46)



(ก) อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกเท่ากับ 1:1 (ข) อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกเท่ากับ 1:1.8

รูปที่ 10 eigenmode ที่มีค่าน้อยที่สุดของเสา – ความยาวเสา 2.04 เมตร



(ก) เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง (ข) เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอน

รูปที่ 11 การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิด ในเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกเท่ากับ 1:1.8 - ความยาวเสา 2.04 เมตร

4. สรุปผลการวิจัย

1. ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนหลัก พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสาจนกระทั่งผ่านจุดรับน้ำหนักสูงสุดของเสา การโก่งเดาะเฉพาะที่จะเกิดในแผ่นปีกฝั่งที่รับแรงอัดที่สูงกว่า โดยเฉพาะในแผ่นปีกที่มีอัตราส่วนความยาวที่ยื่นออกมาของแผ่นปีกต่อความหนาของแผ่นปีกสูง และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอน ขณะที่ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนรอง พฤติกรรมการโก่งเดาะของทั้งเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนอยู่เล็กน้อย

3. เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นปีก พบว่าในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนหลัก พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะยังให้ค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนแต่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ขณะที่ในเสาที่รับแรงดัดรอบแกนรอง พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะของเสา และกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงจะยังคงมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนอยู่เล็กน้อยเช่นเดิม

4. เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดให้มีค่าลดลง การโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการบิดจะเข้ามามีอิทธิพลต่อการโก่งเดาะของเสาและส่งผลถึงกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสา พบว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวรูปทรงคลื่นไซน์หรือแผ่นเอวเป็นลอนสามารถให้กำลังรับน้ำหนักมากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงได้เมื่อเสามีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือเสาที่มีอัตราส่วน 1:3 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนจะมีค่ามากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรงเมื่อความยาวเสามีค่ามากกว่า 3.04 เมตร โดยยิ่งความลึกของระยะลอนและความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้นกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาจะมีค่าสูงขึ้น และในเสาที่มีอัตราส่วน 1:3.75 กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่น

เอวเป็นลอน จะให้ค่าที่มากกว่าเสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง

5. เมื่อต้องการเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดลดลง เพื่อให้สอดคล้องกับงานทางสถาปัตยกรรม การใช้เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นลอนแทนการใช้เสาหน้าตัดรูปตัวไอที่มีแผ่นเอวเป็นเส้นตรง สามารถทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาสูงขึ้นได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของหน้าตัดน้อยมาก เช่นอัตราส่วน 1:3 และ 1:3.75 เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ผศ. ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน สำหรับความรู้ที่เป็นประโยนช์ในการจัดทำบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Pasternak, H., & Kubieniec, G. (2010). Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16, pp. 166-171.

[2] Dabon, M., Elamary, A. (2006). Flange compactness effects on the behavior of steel beams with corrugated webs. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 34 (No. 5), pp. 1507-1523.

[3] Elamary A., Alharthi Y., Sharaky I. (2021). Behavior of steel beams with different web profiles along the beam length. *Journal of Constructional Steel Research*, 185, 106875.

[4] Hassanein M.F., Elkawas A.A., Shao Y.-B. (2020). Assessment of the suitability of eurocode design model for corrugated web girders with slender flanges. *Structures*, 27, pp. 1551-1569.

[5] Li G.-Q., Jiang J., Zhu Q. (2015). Local buckling of compression flanges of H-beams with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, pp. 69-79.

[6] Shao Y.-B., Elsisy A.R., Hassanein M.F. (2021). On the out-of-plane stiffness of I-section girders with corrugated webs using elastic finite element analyses. *Structures*, 29, pp. 1242-1258.

[7] Kucukler M. (2020). Flexural buckling behaviour and design of duplex and ferritic stainless steel I-section columns. *Thin-Walled Structures*, 156, 106953.

[8] de Oliveira J.P.S., Calenzani A.F.G., Fakury R.H., Ferreira W.G. (2016) Elastic critical moment of continuous composite beams with a sinusoidal-web steel profile for lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 113, pp. 121-132.

[9] Afshan S., Zhao O., Gardner L. (2019) Standardised material properties for numerical parametric studies of stainless steel structures and buckling curves for tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 152, pp. 2-11.