

การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนพลาสติก  
ของเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างรับแรงในแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด  
เมื่อใช้แบบจำลองจากมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17  
Comparative Study of Moment-Plastic Rotation Model of Wide Flange  
Steel Columns Subjected to Axial Load and Moment  
by Using ASCE41-13 and ASCE41-17

เพทาย อุดมการเกษตร<sup>1</sup> เมธี บุญพิเชษฐวงศ์<sup>2</sup> และ ธันยดา พรรณเชษฐ์<sup>3,\*</sup>

<sup>1,2,3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

\*Corresponding author; E-mail address: tanpan@kku.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างเมื่อรับแรงในแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดตามมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 โดยการศึกษาเปรียบเทียบเสาน้ำตัดปีกกว้างจำนวน 10 หน้าตัดจะพบว่า ตัวแปรที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกในเสาประกอบด้วย 1) ขนาดหน้าตัดของเสา 2) ความยาวของชิ้นส่วนเสาที่ปราศจากการค้ำยัน และ 3) อัตราส่วนแรงในแนวแกน การศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกในเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-13 จะไม่ได้ให้ค่าความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนพลาสติกในเสาที่อนุรักษ์กว่าค่าความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนพลาสติกที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-17 เสมอไป เสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างที่มีหน้าตัดตั้งแต่ W300x150x36.7 กก./ม. และขนาดเล็กลงไป มาตรฐาน ASCE41-17 อาจจะไม่มีความอนุรักษ์กว่า ASCE41-13

คำสำคัญ: โครงสร้างเหล็ก, แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุน, จุดหมุนพลาสติก

## Abstract

In this paper, model of plastic hinge for non-linear static analysis of 10 wide-flange steel column sections under axial load and bending are comparatively studied based on both ASCE41-13 and ASCE 41-17 standards. It is found that parameters affecting the backbone of plastic hinge of wide-flange steel columns comprise of size of steel sections, unbraced length of members and axial load ratios. This study shows that the backbone response of moment-plastic rotation for wide-flange steel

columns according to ASCE41-13 is not always conservative in comparison with ASCE41-17. For wide-flange steel sections that are not larger than W300x150x36.7 kg/m, ASCE41-17 instead of ASCE41-13 may yield the conservative backbone response.

Keywords: steel structures, moment-rotation model, plastic hinge

## 1. คำนำ

งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า มาตรฐาน ASCE41-13 มีข้อจำกัดเกี่ยวกับข้อกำหนดของโครงสร้างเหล็กในบางประการ โดยในงานวิจัยของ D.G. Lignos และคณะ (2016) ได้ทำการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมรับแรงแบบเป็นวัฏจักรของเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างในโครงด้านแรงดัด โดยเสาตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงด้านข้างที่เปลี่ยนแปลงภายใต้แรงอัดคงที่ตามแนวแกน โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงในแนวแกน ( $P_u/P_{ye}$ ) มีค่าตั้งแต่ 0.50 ถึง 0.75 โดยที่  $P_u$  คือ แรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกและ  $P_{ye}$  มีค่าเท่ากับผลคูณของพื้นที่หน้าตัดเสา ( $A_g$ ) และค่าความเค้นคานดัดที่จุดคราก ( $F_{ye}$ ) เสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างภายหลังจากรับแรงด้านข้างถึงจุดครากยังมีความสามารถในการเสียรูปพลาสติก (Plastic Deformation) ชิ้นส่วนยังสามารถรับแรงแบบเป็นวัฏจักรต่อไปจนชิ้นส่วนเกิดการโก่งเดาะและสูญเสียความสามารถในการรับแรงในแนวแกนท้ายที่สุด ในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-13 ได้กำหนดให้ชิ้นส่วนเสามีพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง (Force-Controlled) เมื่อแรงในแนวแกนของเสามีค่าตั้งแต่  $0.5P_{ye}$  จะสูญเสียความสามารถในการรับแรงของเสาทันทีเมื่อเสารับแรงด้านข้างจนถึงจุดคราก

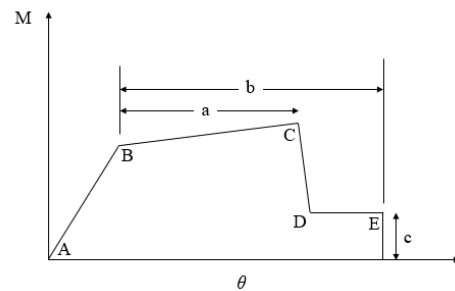
ในงานวิจัยของ Bech และคณะ (2015) ซึ่งได้ประเมินอาคารโครงสร้างเหล็กสูงที่ก่อสร้างระหว่างปี 1973 และ 1985 ก่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองนอร์ทริดจ์ ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 3 อาคาร โดย

ให้แรงแผ่นดินไหวทั้งหมด 11 ชุด ซึ่งถูกเลือกจากฐานข้อมูลของ PEER NGA จากผลการศึกษาพบว่า เกณฑ์การยอมรับของมาตรฐาน ASCE41-13 นั้นมีสิ่งที่ต้องแก้ไขหลายประการ เช่น สมการการหามุมหมุนที่จุดคราก (Yield Rotation) ของเสาเหล็กควรพิจารณาผลของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Deformation) ด้วย ถึงแม้ว่าตัวอย่างส่วนมากของเสาในอาคารที่นำมาวิจัยจะถูกควบคุมโดยการเสียรูปเนื่องจากแรงอัด แต่ในบางตัวอย่างการรวมผลของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนก็ส่งผลกระทบต่อที่สำคัญ ซึ่งในงานวิจัยของ Newell (2008) พบว่า การรวมผลของการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่จุดครากนั้นจะเพิ่มค่าของมุมหมุนที่จุดครากจากสมการปัจจุบันของ ASCE41-13 มากถึง 10-50% ยิ่งไปกว่านั้น เร็ว ๆ นี้ D.G.Lignos และคณะ (2019) ได้รวบรวมข้อมูลการทดสอบของเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างเพื่อนำมาใช้ในการทำนายสมการสำหรับการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว และจากผลการทดสอบมากกว่า 151 ตัวอย่างภายใต้การทดสอบแบบแรงผลักทางเดียว (Monotonic) และแรงผลักแบบเป็นวัฏจักร (Reversed Cyclic) เมื่อทำการศึกษาลักษณะของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (Parametric Study) พบว่า ค่าการเสียรูปพลาสติกนั้นจะถูกกระทบโดยตัวแปรดังต่อไปนี้คือ อัตราส่วนความละเอียดของเอว (Web Slenderness Ratio,  $h/t_w$  โดยที่  $h$  คือ ความลึกของหน้าตัดและ  $t_w$  คือ ความหนาของเอว) อัตราส่วนความละเอียดของปีก (Flange Slenderness Ratio,  $b_f/2t_f$  โดยที่  $b_f$  คือ ความกว้างของปีกและ  $t_f$  คือ ความหนาของปีก) อัตราส่วนความละเอียดของชิ้นส่วน (Member Slenderness Ratio,  $L_b/r_y$  โดยที่  $L_b$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนที่ปราศจากการค้ำยันและ  $r_y$  คือ รัศมีโรเจอร์สันของแกนอ่อน) และอัตราส่วนแรงในแนวแกน (Axial Load Ratio,  $P_u/P_{ye}$ ) ซึ่งจากแนวโน้มของผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า เมื่อค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มุมหมุนพลาสติกมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนความละเอียดของเอวเพิ่มขึ้นก็จะเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) ได้รวดเร็วกว่า และจะรุนแรงขึ้นเมื่ออัตราส่วนแรงในแนวแกนมีค่ามากและเมื่ออัตราส่วนความละเอียดของชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้น การลดลงของกำลังจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการวิบัติร่วมกันของโก่งเดาะเฉพาะที่และการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (Lateral Torsional Buckling) ซึ่งในมาตรฐาน ASCE41-13 นั้น ค่าตัวแปร  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนไม่ได้จับผลของตัวแปรข้างต้น ในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-17 ได้มีการรวมเอาผลของตัวแปรเหล่านี้ในสมการการสร้างแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของเสาเหล็กเช่นเดียวกัน

ในบทความนี้จะรายงานผลการศึกษาคงความแตกต่างในแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกของเสาเหล็กระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 และตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมหมุนพลาสติกของเสาเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดต่าง ๆ ส่วนแบบจำลองของชิ้นส่วนคานจะไม่ได้ถูกกล่าวถึงในบทความนี้ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญของสมการการสร้างแบบจำลองมุมหมุนพลาสติกและเกณฑ์การยอมรับ (Acceptance Criteria) ระหว่างมาตรฐานเดิมและมาตรฐานใหม่

## 2. แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของเสาเหล็ก

แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 แสดงดังรูปที่ 1 โดยเส้น AB แสดงพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ของชิ้นส่วนโครงสร้าง และพฤติกรรมในช่วงพลาสติกจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรก เส้น BC จะแสดงพฤติกรรมพลาสติกช่วงก่อนถึงจุดสูงสุด (Pre-peak Plastic) ซึ่งในช่วงนี้กำลังของชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้นต่อมาในช่วงของเส้น CD แสดงพฤติกรรมของชิ้นส่วนในช่วงหลังจุดสูงสุด (Post-peak Plastic) ซึ่งเป็นช่วงที่ กำลังของชิ้นส่วน และความแข็ง (Stiffness) ของชิ้นส่วนลดลง สุดท้าย เส้น DE แสดงกำลังคงค้าง (Residual Strength) ของชิ้นส่วนและในจุด E ชิ้นส่วนสูญเสียความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก



รูปที่ 1 แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในมาตรฐาน ASCE

โดยที่โมเมนต์พลาสติกและมุมหมุนที่จุดคราก (Yield Rotation,  $\theta_y$ ) หรือค่ามุมหมุนที่จุด B ในรูปที่ 1 รวมทั้งตัวแปร  $a$ ,  $b$ ,  $c$  และเกณฑ์การยอมรับของชิ้นส่วนเสาสามารถคำนวณได้ตามบทที่ 10 ในมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17

ข้อกำหนดของเสาเหล็กในมาตรฐาน ASCE41-13 นั้นถูกพบว่ามีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เนื่องจากในมาตรฐาน ASCE 41-13 นั้น ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและเกณฑ์การยอมรับขึ้นอยู่กับค่ามุมหมุนที่จุดครากเพียงอย่างเดียวแต่ไม่ได้รวมผลของอัตราส่วนความละเอียดของเอว อัตราส่วนความละเอียดของปีก อัตราส่วนความละเอียดของชิ้นส่วน และอัตราส่วนแรงในแนวแกน ซึ่งถูกพบว่ามีความสำคัญต่อค่ามุมหมุนพลาสติก (Plastic Rotation) จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกขององค์อาคารเสาและการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อมุมหมุนพลาสติกระหว่างแบบจำลองจากมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 มีดังต่อไปนี้

### 2.1 ขนาดของหน้าตัดเสา

มุมหมุนพลาสติกที่ถูกเสนอในมาตรฐาน ASCE41-13 จะสัมพันธ์กับค่าของมุมหมุนที่จุดครากเพียงอย่างเดียว โดยหากเปรียบเทียบเสาที่มีความเค้นที่จุดคราก ( $F_y$ ) เดียวกัน มีความยาวของเสาและอัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากัน ค่ามุมหมุนที่จุดครากจะแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วนโมดูลัสพลาสติก (Plastic Modulus,  $Z$ ) ต่อโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia,  $I$ ) ของ

ระนาบที่ถูกตัด โดยที่สมการการหาค่ามูมหมุนที่จุดครากของมาตรฐาน ASCE41-13 เป็นไปตามสมการที่ 1

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}L_c}{6EI_c} \left( 1 - \frac{P}{P_{ye}} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $F_{ye}$  คือ ความเค้นจุดครากที่คาดหวัง (Expected Yield Stress)  
 $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น  
 $L_c$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนเสา  
 $I_c$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองด้วยมาตรฐาน ASCE41-13 พบว่า หากหน้าตัดมีขนาดใหญ่ อัตราส่วน  $Z_x/I_x$  มีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยกว่าหน้าตัดที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้มูมหมุนพลาสติกของหน้าตัดขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่า และค่ามูมหมุนที่จุดครากของมาตรฐาน ASCE41-17 เป็นไปตามสมการที่ 2

$$\theta_y = \frac{M_{pce}L_c}{6\tau_bEI_c} \left( 1 + \frac{12EI_c}{I_c^2GA_s} \right) \quad (2)$$

โดยที่  $M_{pce}$  คือ โมเมนต์พลาสติกที่คาดหวังของชิ้นส่วน  
 $G$  คือ โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็ก  
 $A_s$  คือ พื้นที่รับแรงเฉือนของหน้าตัด ( $A_s = (d_b - 2t_f)t_w$ )  
 $\tau_b$  คือ 1 เมื่อ  $\frac{|P|}{P_{ye}} \leq 0.5$

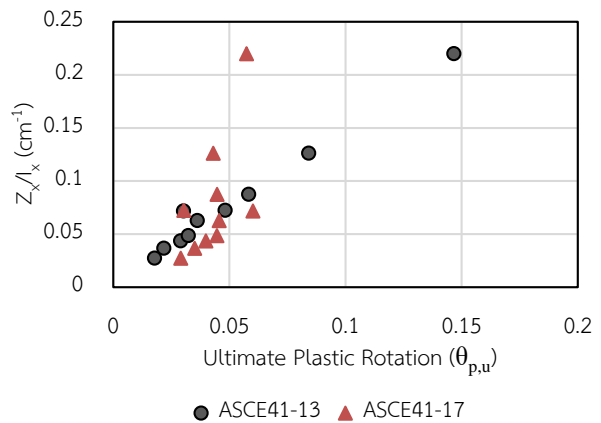
หรือ  $4 \frac{|P|}{P_{ye}} \left( 1 - \frac{|P|}{P_{ye}} \right)$  เมื่อ  $\frac{|P|}{P_{ye}} > 0.5$

สำหรับมาตรฐาน ASCE41-17 นั้น ค่ามูมหมุนพลาสติกไม่ได้สัมพันธ์กับมูมหมุนที่จุดครากแต่จะสัมพันธ์กับตัวแปร  $h/t_w$ ,  $b_f/2t_f$ ,  $L_c/r_y$  และ  $P_g/P_{ye}$  ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของหน้าตัดปีกกว้างที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบกับจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยที่  $\theta_{p,u}$  คือ มูมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติ หรือเท่ากับระยะ  $b$  ในรูปที่ 1 และในรูปที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z_x/I_x$  และมูมหมุนพลาสติกเมื่อชิ้นส่วนถูกตัดรอบแกนแข็ง (Strong Axis) โดยที่ชิ้นส่วนมีความยาว 3 เมตร  $F_y$  มีค่าเท่ากับ 2,500 กก./ซม.<sup>2</sup> และ  $P_g/P_{ye}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 และรูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองโมเมนต์และมูมหมุนระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 ของเสาหน้าตัดปีกกว้างขนาดต่าง ๆ เมื่ออยู่ภายใต้อัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากัน

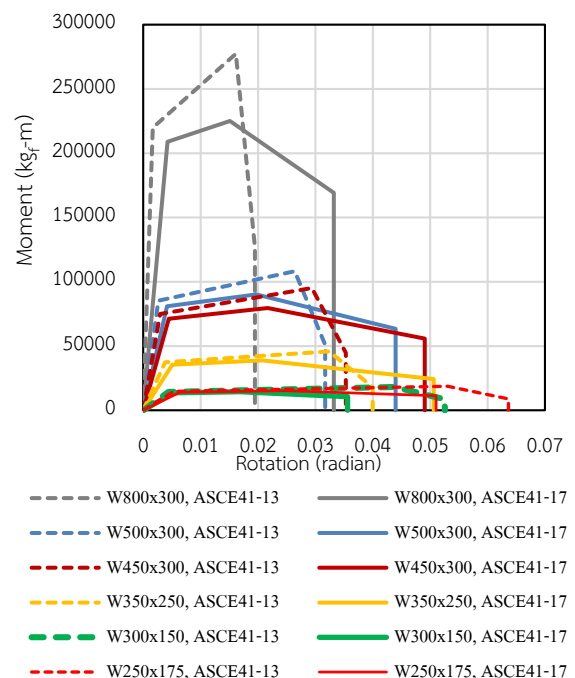
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวอย่างหน้าตัดปีกกว้างที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

หน้าตัด	$Z_x/I_x$	$b_f/2t_f$	$h/t_w$	$\theta_{p,u}$ (ASCE41-13)	$\theta_{p,u}$ (ASCE41-17)
W800x300x210 กก./ม.	0.0274	5.77	49.43	0.0178	0.0290
W600x300x137 กก./ม.	0.0367	8.82	41.00	0.0218	0.0350
W500x300x128 กก./ม.	0.0437	8.33	36.36	0.0290	0.0398

W450x300x124 กก./ม.	0.0486	8.33	32.36	0.0323	0.0446
W350x250x79.7 กก./ม.	0.0627	8.93	30.22	0.0362	0.0456
W300x300x94 กก./ม.	0.0718	10.00	23.40	0.0302	0.0601
W300x150x36.7 กก./ม.	0.0724	8.33	39.38	0.0481	0.0303
W250x175x44.1 กก./ม.	0.0874	7.95	27.14	0.0583	0.0447
W175x125x23.3 กก./ม.	0.1261	7.81	23.45	0.0842	0.0430
W100x100x17.2 กก./ม.	0.2198	6.25	10.67	0.1467	0.0574



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z_x/I_x$  และมูมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติเมื่อใช้แบบจำลอง ASCE41-13 และ ASCE41-17

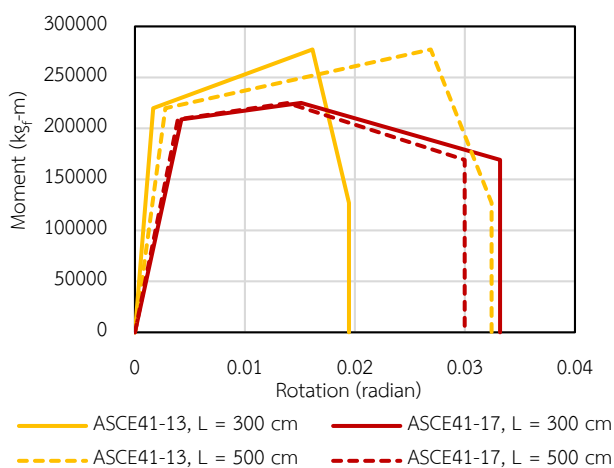


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนของเสาหน้าตัดปีกกว้างขนาดต่าง ๆ ภายใต้อัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากับ 0.1

จะเห็นได้ว่า กรณีสี่ชั้นส่วนมีความยาวและความเค้นที่จุดครากเท่ากัน และถูกกระทำภายใต้อัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากันพบว่า หน้าตัด W800x300, W500x300, W450x300 และ W350x250 เมื่อทำการสร้างแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนด้วยมาตรฐาน ASCE41-13 นั้นพบว่ามีค่าความอนูรักรักรกว่ามาตรฐาน ASCE41-17 แต่หน้าตัด W300x150 และ W250x175 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า พบว่า มาตรฐาน ASCE41-17 นั้นมีความอนูรักรักรกว่า ASCE41-13

### 2.2 ความยาวของชิ้นส่วนเสาที่ปราศจากการค้ำยัน

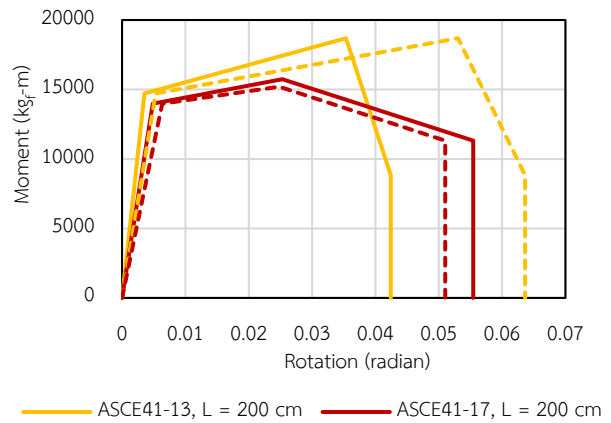
กรณีทีพิจารณาเสาหน้าตัดเดียวกัน ( $h/t_w$  และ  $r_y$  เดียวกัน) และมี  $P_g/P_{ye}$  เท่ากัน จะเห็นได้ว่า ตัวแปรสำคัญที่ทำให้มุมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติของทั้งสองมาตรฐานมีค่าแตกต่างกันคือ ความยาวของชิ้นส่วน ( $L_b$ ) ในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-13 มุมหมุนพลาสติกจะแปรผันตรงกับ ความยาวชิ้นส่วน แต่มาตรฐาน ASCE41-17 มุมหมุนพลาสติกจะแปรผกผันกับตัวแปรนี้ ซึ่งค่ามุมหมุนพลาสติกที่ได้จากมาตรฐาน ASCE41-17 นั้น จะขึ้นอยู่กับ  $h/t_w$ ,  $L_b/r_y$ ,  $b_f/2t_f$  และ  $P_g/P_{ye}$  โดยเมื่อตัวแปรเหล่านี้มีค่ามาก มุมหมุนพลาสติกก็ยังมีค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 ในกรณีของการเปรียบเทียบระหว่างหน้าตัดเสาที่มีขนาดใหญ่ W800x300 ที่มีความยาวชิ้นส่วนแตกต่างกัน สำหรับกรณีที  $P_g/P_{ye}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 จะเห็นได้ว่า กรณีที่ความยาวเสาน้อยกว่า ( $L_b$  มีค่าเท่ากับ 300 เซนติเมตร) แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนจากมาตรฐาน ASCE41-13 จะมีความอนูรักรักรกว่า แต่เมื่อเปลี่ยนความยาวเสาเป็น 500 เซนติเมตร มาตรฐาน ASCE41-13 มุมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติจะมีค่าสูงขึ้นในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-17 มุมหมุนพลาสติกจะให้ค่าน้อยลงทำให้กรณีนี้มาตรฐาน ASCE41-17 จะมีความอนูรักรักรกว่า



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 ของเสาหน้าตัด W800x300 เมื่อมีความยาวชิ้นส่วนที่ต่างกัน

ในอีกสถานการณ์หนึ่ง รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน้าตัดของเสาที่มีขนาดเล็ก W250x175 ที่มีความยาวชิ้นส่วนแตกต่างกัน สำหรับ

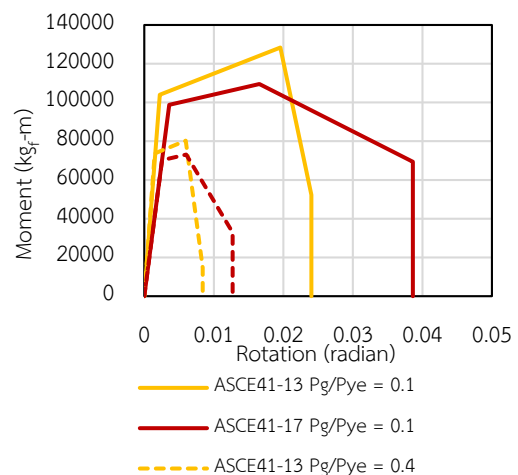
กรณีที  $P_g/P_{ye}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 จะเห็นได้ว่า กรณีที่ความยาวเสามากกว่า ( $L_b$  มีค่าเท่ากับ 300 เซนติเมตร) แบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนจากมาตรฐาน ASCE41-17 จะมีความอนูรักรักรกว่า แต่เมื่อเปลี่ยนความยาวเสาเป็น 200 เซนติเมตร มาตรฐาน ASCE41-13 มุมหมุนพลาสติกจะมีค่าน้อยลงในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-17 มุมหมุนพลาสติกจะมีค่ามากขึ้น ทำให้กรณีนี้มาตรฐาน ASCE41-13 จะมีความอนูรักรักรกว่า



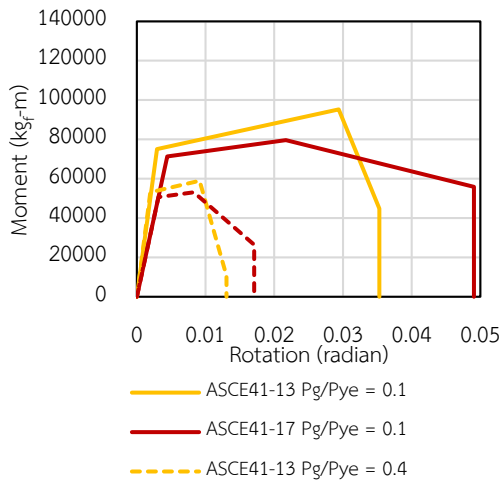
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 ของเสาหน้าตัด W250x175 เมื่อมีความยาวชิ้นส่วนที่ต่างกัน

### 2.3 อัตราส่วนแรงในแนวแกน (Axial Load Ratio)

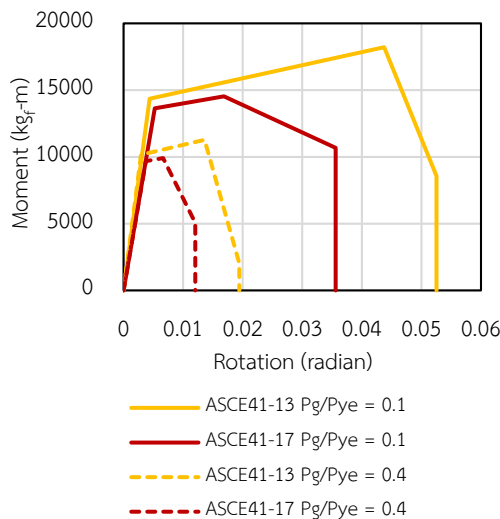
จากการศึกษาพบว่า หากอัตราส่วนแรงในแนวแกนมีค่ามาก มุมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติก็ยังมีค่าน้อย รูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนเมื่อเปรียบเทียบหน้าตัดด้วยแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกจากมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 เมื่อมีอัตราส่วนแรงในแนวแกนที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า ทั้งสองมาตรฐานให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันคือ เมื่ออัตราส่วนแรงในแนวแกนลดลง ค่ามุมหมุนพลาสติกที่จุดวิบัติก็จะลดลงด้วย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 เมื่ออยู่ภายใต้  $P_y/P_{ye}$  ที่แตกต่างกันของหน้าตัด W600x300



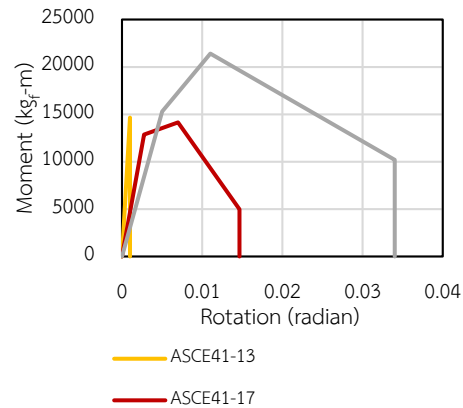
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 เมื่ออยู่ภายใต้  $P_y/P_{ye}$  ที่แตกต่างกันของหน้าตัด W450x300



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 เมื่ออยู่ภายใต้  $P_y/P_{ye}$  ที่แตกต่างกันของหน้าตัด W300x150

มาตรฐาน ASCE41-13 ได้กำหนดให้ ชิ้นส่วนเสาที่มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนมากกว่า 0.5 นั้นจะมีพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง ทำให้ชิ้นส่วนนั้นไม่มีช่วงการเสียรูปพลาสติก แต่ในผลการทดสอบเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างจาก Macrae และคณะ (1989) พบว่า เมื่อเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ที่  $P_y/P_{ye}$  มีค่าเท่ากับ 0.5 พบว่า ชิ้นส่วนยังคงมีการเสียรูปพลาสติกเกิดขึ้น ซึ่งหากยึดตาม ASCE41-13 นั้น ชิ้นส่วนควรจะไม่มีระยะการเสียรูปพลาสติก แต่ในมาตรฐาน ASCE41-17 นั้นได้มีข้อกำหนดให้ชิ้นส่วนเสาจะมีพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรงเมื่อ  $P_y/P_{ye}$  มีค่ามากกว่า 0.6 รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบเสาที่ถูกทดสอบ

ภายใต้แรงในแนวแกนมีค่าเท่ากับ 0.5 กับแบบจำลองจุดหมุนพลาสติกเมื่อใช้สมการของมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17

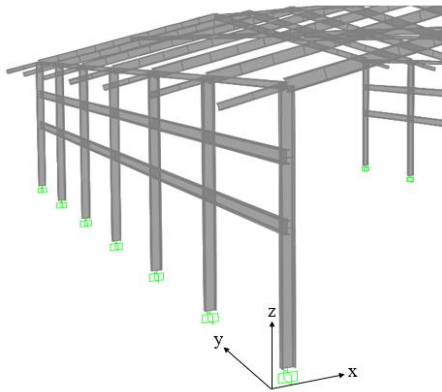


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13, ASCE41-17 และค่าจากการทดสอบ (MacRae et al., 1990) ของเสาหน้าตัด CA-250UC73 (W254x254 มม.) ภายใต้อัตราส่วนแรงในแนวแกนมีค่าเท่ากับ 0.5

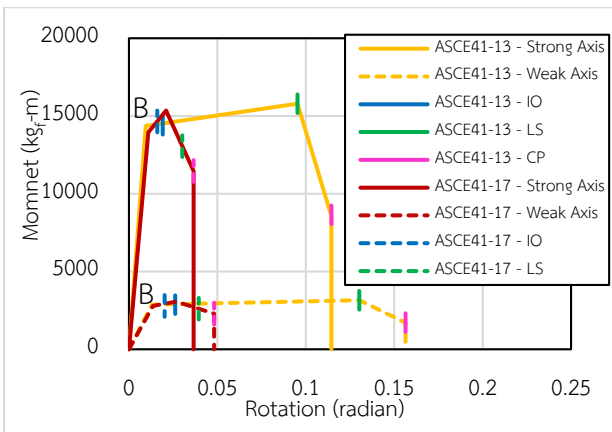
### 3. เสถียรภาพของโครงสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก

เมื่อทำการจำลองชิ้นส่วนเสาโครงสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กที่ได้รับแรงกระทำเนื่องจากผลของแผ่นดินไหว โดยใช้เสาตัวอย่างหน้าตัด W300x150x36.7 กก./ม. และกำหนดให้เป็นเหล็กรูปพรรณชั้นคุณภาพ A36 ที่มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากับ 0.02 พบว่า มาตรฐาน ASCE41-17 จะให้ค่าความสัมพันธ์ของโมเมนต์และมุมหมุนพลาสติกมีความอนุรักษ์กว่าค่าที่ได้จากมาตรฐาน ASCE41-13 นอกจากนี้ยังพบว่าเกณฑ์การยอมรับในมาตรฐาน ASCE41-17 และ ASCE41-13 มีความแตกต่างกัน โดยที่ในมาตรฐาน ASCE41-13 เกณฑ์การยอมรับจะสัมพันธ์กับค่ามุมหมุนที่จุดคราก ในขณะที่มาตรฐาน ASCE41-17 นั้น เกณฑ์การยอมรับจะสัมพันธ์กับตัวแปร a และ b ในรูปที่ 1

หากพิจารณาชิ้นส่วนเสาเดียวกันที่การดัดรอบแกนดัดหลักและแกนดัดรอง ค่าโมเมนต์พลาสติกและมุมหมุนที่จุดครากจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทั้งมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 กำหนดให้โมเมนต์พลาสติกแปรผันตรงกับค่าโมดูลัสพลาสติกของทิศทางที่ถูกดัด ส่วนมุมหมุนที่จุดครากจะแปรผกผันกับโมเมนต์ความเฉื่อย เมื่อนำเสาหน้าตัดปีกกว้างที่มีการวางแนวเสาตั้งรูปตัวอย่างที่ 10 มาพิจารณา จะเห็นว่าเมื่อเสาถูกผลักในทิศทาง X ชิ้นส่วนจะถูกดัดรอบแกนแข็ง (Strong axis) และเมื่อเสาถูกผลักในทิศทาง Y ชิ้นส่วนจะถูกดัดรอบแกนอ่อน (Weak axis) รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองโมเมนต์และมุมหมุนและเกณฑ์การยอมรับ โดยเปรียบเทียบระหว่างแกนแข็งและแกนอ่อนของมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17



รูปที่ 10 การวางแนวของเสาในอาคารตัวอย่าง



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบโมเมนต์และมูมหนูนที่สร้างจากมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 ระหว่างแกนแข็งและแกนอ่อนของหน้าตัด W300x150x36.7 กก./ม. ที่มีอัตราส่วนแรงในแนวแกนเท่ากับ 0.02

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า ค่าโมเมนต์ที่จุดคราก (จุด B) รอบแกนแข็งมีค่าสูงกว่าแกนอ่อน เนื่องจากโมดูลัสพลัสติกของแกนแข็ง ( $Z_x$ ) ซึ่งเท่ากับ 522 ซม.<sup>3</sup> นั้นมีค่ามากกว่าแกนอ่อน ( $Z_y$ ) ซึ่งเท่ากับ 104 ซม.<sup>3</sup> ส่วนมูมหนูนที่จุดครากในกรณีนี้ รอบแกนอ่อนจะมีค่ามากกว่าค่ามูมหนูนที่จุดครากรอบแกนแข็ง เนื่องจาก โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนอ่อน ( $I_y$ ) มีค่าน้อยกว่าแกนแข็ง ( $I_x$ )

#### 4. บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการศึกษเปรียบเทียบตัวแปรในการจำลองโมเมนต์และมูมหนูนของเสาเหล็กหน้าตัดปีกกว้างระหว่างมาตรฐาน ASCE41-13 กับมาตรฐาน ASCE41-17 ซึ่งเป็นมาตรฐานใหม่ โดยพบว่าในบางกรณีนั้นมาตรฐาน ASCE41-13 ก็มีความอนุรักษ์กว่า ASCE41-17 และในบางกรณีมาตรฐาน ASCE41-17 กลับถูกพบว่ามีความอนุรักษ์กว่า ซึ่งจากการศึกษาโดยเปรียบเทียบเสาหน้าตัดปีกกว้างจำนวน 10 หน้าตัด พบว่า ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันของทั้ง 2 มาตรฐานประกอบไปด้วย

1) ขนาดหน้าตัดของเสา ซึ่งพบว่า เสาหน้าตัดปีกกว้างที่มีขนาดใหญ่กว่า W300x150x36.7 กก./ม. (มีค่า  $Z/I$  น้อยกว่า) มาตรฐาน ASCE41-13 จะมีความอนุรักษ์กว่า ASCE41-17 ในขณะที่เสาหน้าตัดปีกกว้างที่มีขนาด

ตั้งแต่ W300x150x36.7 กก./ม. ลงมา (มีค่า  $Z/I$  มากกว่า) มาตรฐาน ASCE41-17 อาจจะมีค่าอนุรักษ์กว่า ASCE41-13

2) ความยาวของชิ้นส่วนเสาที่ปราศจากการค้ำยัน ในกรณีนี้ หากความยาวชิ้นส่วนมากขึ้น มาตรฐาน ASCE41-13 ก็จะมีค่ามูมหนูนพลาสติกที่สูงขึ้น แต่มาตรฐาน ASCE41-17 นั้น หากความยาวของชิ้นส่วนมากขึ้น ค่ามูมหนูนพลาสติกกลับมีค่าน้อยลง ทำให้ความอนุรักษ์ของทั้งสองมาตรฐานอาจเกิดความเปลี่ยนแปลงได้เมื่อความยาวของชิ้นส่วนเปลี่ยนไป

3) อัตราส่วนแรงในแนวแกน ซึ่งทั้งมาตรฐาน ASCE41-13 และ ASCE41-17 นั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ หากอัตราส่วนแรงในแนวแกนมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่ามูมหนูนพลาสติกน้อยลงเนื่องจากชิ้นส่วนมีโอกาสเกิดการโก่งเดาะเร็วมากขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยจากทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษาเพื่อให้นักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญประจำปีการศึกษา 2561

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ASCE. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Building, ASCE 41-13*. (2014). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, United States.
- [2] ASCE. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE 41-17*. (2017). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, United States.
- [3] A. Elkady and D.G.Lignos. (2014). *Analytical investigation of the cyclic behavior and plastic hinge formation in deep wide-flange steel beam-columns*. Bulletin of Earthquake Engineering.
- [4] A. Hartloper and D.G. Lignos. (2017) *Updates to the ASCE 41-13 provisions for the nonlinear modeling of steel wide-flange columns for performance-based earthquake engineering*. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland.
- [5] D. Bech, J. Houston and B. Tremayne. (2015). *Proposed Changes to Steel Column Evaluation Criteria for Existing Building*. Second ATC & SEI Conference 2015.
- [6] D. Bech, J. Houston and B. Tremayne. (2017). *ASCE 41-17 Steel Column Modeling and Acceptance Criteria*. Structures Congress 2017.
- [7] D.G. Lignos, J. Cravero and A. Elkady. (2016). *Experimental investigation of the hysteretic behavior of wide-flange steel columns under high axial load and lateral drift demands*.

11th Pacific Structural Steel Conference Shanghai, China.  
29-31 October, 2016.

- [8] D.G. Lignos, Alexander R. Hartloper, A. Elkady, Gregory G. Deierlein and R. Hamburger. (2019). *Proposed update to the ASCE 41 nonlinear modeling parameters for wide-flange steel columns in support of performance-based seismic engineering*. J. Struct. Eng.
- [9] MacRae G. (1989). *The seismic response of steel frame*. Ph.D. Dissertation. University of Canterbury Christchurch New Zealand.