

การวิเคราะห์กำลังการโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติภายใต้แรงอัดร่วมศูนย์ โดยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

Nonlinear Finite Element Analysis of Buckling Strength of Irregular Section Cold-formed Steel Columns under Concentric Compressive Loading

ณัฐภณ ทັນศิริ และชยานนท์ หารรรษภิญโญ

Natapon Tansiri and Chayanon Hansapinyo

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

โทร. 053-944156 โทรสาร 053-892376 E-mail: Sotus_kho@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษากำลัง และพฤติกรรม การโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติภายใต้แรงอัดร่วมศูนย์โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น เสาที่ศึกษาประกอบด้วยเสาน้ำตัดที่ไม่ปกติจำนวน 4 รูปแบบ และในแต่ละรูปแบบมีความยาว 230 950 และ 1900 มิลลิเมตร รวมทั้งสิ้น 12 กรณีวิเคราะห์ ในเบื้องต้น ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างเสาที่ทดสอบ ผลการวิเคราะห์แสดงถึงรูปแบบการโก่งเดาะต่างๆ ตามความยาวของเสา โดยเสาสั้นจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ หรือร่วมกับการโก่งเดาะบิดเบี้ยว ส่วนการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดและบิดแบบทั้งหมดพบในเสายาว สำหรับเสายาวปานกลาง การโก่งเดาะนั้นอยู่ระหว่างการโก่งเดาะเฉพาะที่และการโก่งเดาะแบบทั้งหมดพร้อมกับการโก่งเดาะบิดเบี้ยว ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังอัดที่วิเคราะห์ได้กับผลการคำนวณกำลังโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นตามข้อกำหนดมาตรฐาน AISI พบว่า โดยเฉลี่ยแล้วการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ค่ากำลังสูงสุดสูงกว่าแรงที่คำนวณจากข้อกำหนดเล็กน้อย คิดเป็นอัตราส่วน $P_{FEM}/P_{AISC} = 1.074$

Abstract

This paper presents a study of capacity and buckling behavior of irregular section cold-formed steel columns under concentric compressive loading by using the Finite element method (FEM). The study specimens

are composed of 4 different section types with 230, 950 and 1900 mm. in length, totally 12 analysis cases. First, the finite element model was validated through an agreed behavior between corresponding test and analytical results. The analytical results show the different buckle modes depending on the length of column. The short columns exhibit local buckling or the combination with distortional buckling mode. A combination of overall flexural and torsional buckling modes can be observed for the long columns. For the intermediate columns, the buckling mode is that between the local and overall buckling modes together with distortional buckling. Regarding ultimate capacity, the calculated capacity by using AISI result under-estimation compared with those from FEM with an averaged ratio of P_{FEM}/P_{AISC} about 1.074.

1. บทนำ

เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นเป็น โครงสร้างเหล็กที่ขึ้นรูปหน้าตัดขึ้นส่วนจากเหล็กแผ่นบางที่อุณหภูมิห้อง หลักการที่สำคัญคือ การขึ้นรูปให้ได้รูปหน้าตัดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าที่จะเป็นการเพิ่มเนื้อที่หน้าตัดเพื่อที่จะรับแรงกระทำให้เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการออกแบบที่คุ้มค่าในด้าน การรับกำลังโครงสร้าง แต่เนื่องจากการมีผนังที่บางเทียบกับ

ความกว้างของช่วงแผ่นทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของเหล็กได้ง่าย พฤติกรรมของเหล็กขึ้นรูปเย็นจะมีความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการพฤติกรรมการโก่งเดาะมากกว่ากรณีเหล็กรูปพรรณรีดร้อน ในการออกแบบ นอกเหนือจากที่จะต้องพิจารณาผลทั่วไป ได้แก่ ความไร้เชิงเส้นวัสดุ หรือกำลังคราก ความไม่สมบูรณ์ หน่วยแรงคงค้าง เป็นต้น ยังคงต้องพิจารณาการโก่งเดาะในแต่ละรูปแบบที่จะเกิดขึ้น ร่วมกับผลปฏิสัมพันธ์ของแต่ละรูปแบบของการโก่งเดาะไปพร้อมกันด้วย

ในอดีต มีการศึกษากำลังโก่งเดาะของเสาเหล็กรับแรงตามแนวแกนมากมาย แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นเสาที่รูปหน้าตัดที่ใช้งานทั่วไป Young and Chen [7] ได้ทดสอบเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัดฉากที่มีขอบเม้ม ซึ่งชี้ให้เห็นถึงข้อกำหนด AISI นั้นสามารถนำมาคำนวณกำลังเสาที่มีหน้าตัดฉากแบบไม่สมมาตรได้ Narayanan and Mahendran [5] ได้ทำการศึกษากำลังสูงสุดของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดต่างไปจากการใช้งานทั่วไป การวิเคราะห์พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด (Imperfection) โดยให้ระยะบิดเบี้ยวของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็ก ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่สูงกว่าการทดสอบ 6% และ 2.8% ตามลำดับสำหรับเสาทำจากเหล็กกำลังสูง (เหล็ก G550 ค่ากำลังดึงครากเท่ากับ 656 MPa และ 637 MPa สำหรับความหนา 0.80 และ 0.95 มิลลิเมตรตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบข้อกำหนด AS/NZS 4600 [6] กับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบกำลังอัดสูงสุด นั้นแสดงให้เห็นว่า ข้อกำหนดนั้นประเมินค่ากำลังมากกว่าการวิเคราะห์ได้เฉลี่ย 32% และมากกว่าการทดสอบ 12% สำหรับเหล็กกำลังสูง ส่วนเหล็กปกติ (G230) ข้อกำหนดประเมินค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ 1% และน้อยกว่าผลการทดสอบ 15% สำหรับเสาที่มีหน้าตัดเหมือนกัน

ในส่วนการศึกษาโดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ellobody [3] ได้วิเคราะห์การโก่งเดาะของเหล็กกล้าไร้สนิมกำลังสูงของเสาขาคอนกรีตที่มีและไม่มีส่วนเสริมกำลัง โดยพบว่าหน้าตัดที่มีส่วนเสริมกำลังนั้นสามารถรับแรง

ได้ดีกว่าหน้าตัดที่ไม่มี ส่วนเสริมกำลัง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กับผลคำนวณจากข้อกำหนดของ American Specification Australian/New Zealand Standard และ European Code พบว่า ค่าที่ได้จากสมการทั้งสามให้ค่ากำลังน้อยกว่าสำหรับกรณีหน้าตัดที่ไม่มีส่วนเสริมกำลัง และมีค่ามากกว่ากรณีเสาที่มีส่วนเสริมกำลัง Freitas, Freitas and Souza [4] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาสั้นสำหรับชั้นเก็บสินค้า และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การจำลองโดยใช้ Shell เอลิเมนต์สามารถใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เสาสั้น ใช้คุณสมบัติของวัสดุด้วยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายรูปแบบการโก่งเดาะของเสาสั้นได้

จากการทบทวนงานวิจัยในอดีต พบว่า ข้อมูลกำลังโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติยังมีน้อย ทั้งนี้ พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติภายใต้แรงอัดมีความซับซ้อน เนื่องจากจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดและจุดศูนย์กลางแรงเฉือนต่างกัน บทความนี้ได้ทำการศึกษากำลังโก่งเดาะของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติ โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น เสาที่ศึกษาเป็นเสาที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างตู้ชั้นวางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพับขึ้นรูปจากเหล็กแผ่นบาง มีรูปตัดที่ซับซ้อนและไม่มีความสมมาตร

2. กำลังโก่งเดาะของเสาเหล็กผนังบาง

เมื่อขึ้นส่วนแผ่นบางขององค์อาคารเหล็กขึ้นรูปเย็นรับหน่วยแรงอัด ซึ่งอาจมาจากแรงอัดกระทำหรือแรงดัดขึ้นส่วนนั้นจะเกิดหน่วยแรงอัดตามแนวแกน (In-plane compressive stress) แต่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดหน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับระนาบแผ่น (Out-of-plane) เนื่องจากขึ้นส่วนมีค่าความแข็งเกร็งในการดัดต่ำ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับระนาบนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก หากแต่ละชิ้นส่วนของแผ่นบางประกอบเป็นส่วนของหน้าตัด องค์อาคารจะสามารถเกิดการโก่งเดาะในรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

(ก) การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling) เป็นรูปแบบการโก่งเดาะของชิ้นส่วนแผ่นบางที่ตำแหน่งของการ

คัตไม่เกิดการเลื่อน (Translation) แต่จะเกิดการหมุนได้ (Rotation) ระยะครึ่งช่วงคลื่นโก่งเดาะ (Half-wavelength) ของการโก่งเดาะเฉพาะที่ หรือ ความยาวช่วงรูปการโก่งเดาะที่จะมีรูปแบบซ้ำเดิมในช่วงความยาวขององค์อาคาร จะมีค่าค่อนข้างสั้นไม่เกินกว่ามิติที่มากที่สุดของหน้าตัดองค์อาคารรับแรงอัด

(ข) การโก่งเดาะทั้งหมด (Global buckling) เป็นรูปแบบการโก่งเดาะที่หน้าตัดทั้งหมดเกิดการคุดออกทางข้าง (Flexural buckling) หรือ หมุนบิด (Torsional buckling) หรือ การคุดออกทางข้างร่วมกับการบิดพร้อมกัน (Flexural-torsional buckling) ทั้งนี้ หน้าตัดยังคงมีรูปทรงเดิมไม่มีการบิดเบี้ยว (Distortional) ในบางกรณี จะเรียกว่า การโก่งเดาะออยเลอร์ (Euler buckling) ระยะครึ่งช่วงคลื่นโก่งเดาะ (Half-wavelength) จะเท่ากับ ระยะที่ปราศจากการยึดรั้ง (Unbraced length) ขององค์อาคาร

(ค) การโก่งเดาะบิดเบี้ยว (Distortional buckling) เป็นการโก่งเดาะที่ผสมกันระหว่างการโก่งเดาะเฉพาะที่และการโก่งเดาะทั้งหมด โดยที่ชิ้นส่วนแผ่นบาง (เช่น แผ่นปีก) จะมีการบิดหรือเลื่อนรอบจุดหนึ่ง เช่น จุดต่อระหว่างแผ่นปีกกับแผ่นเอว และชิ้นส่วนแผ่นบางอื่น (เช่น แผ่นเอว) จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของแผ่น ระยะครึ่งช่วงคลื่นโก่งเดาะ (Half-wavelength) จะอยู่ระหว่างค่าระยะครึ่งช่วงคลื่นโก่งเดาะแบบเฉพาะที่และการโก่งเดาะแบบทั้งหมด

ข้อกำหนดคุดออกแบบ AISI (American Iron Steel Institute, AISI) [1] ได้แนะนำให้คำนวณค่ากำลังการโก่งเดาะของเสาเหล็กผนังบาง ดังนี้

แรงอัดระบุ (P_n) สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_n = A_e F_n \tag{1}$$

เมื่อ A_e คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (มม.²) ที่คำนวณที่หน่วยแรงโก่งเดาะ (F_n) การคำนวณพื้นที่ประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้ตามหัวข้อ B2 ของข้อกำหนด AISI [1] และหน่วยแรงโก่งเดาะสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{สำหรับ } \lambda_c \leq 1.5 \Rightarrow F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \tag{2}$$

$$\text{สำหรับ } \lambda_c > 1.5 \Rightarrow F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \tag{3}$$

เมื่อ
$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \tag{4}$$

และ F_y คือ หน่วยแรงคราก (เมกะพาสคาล) และ F_e คือ หน่วยแรงโก่งเดาะแบบอิลาสติก (เมกะพาสคาล) ที่สามารถคำนวณได้จากค่ารากที่น้อยกว่าจากสมการที่ (5)

$$F_e^3 (r_o^2 - x_o^2 - y_o^2) - F_e^2 \left[r_o^2 (\sigma_{ex} + \sigma_{ey} + \sigma_t) - (\sigma_{ey} x_o^2 + \sigma_{ex} y_o^2) \right] + F_e r_o^2 (\sigma_{ex} \sigma_{ey} + \sigma_{ey} \sigma_t + \sigma_{ex} \sigma_t) - (\sigma_{ex} \sigma_{ey} \sigma_t r_o^2) = 0 \tag{5}$$

เมื่อ
$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K L_{ex} / r_x)^2} \tag{6}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K L_{ey} / r_y)^2} \tag{7}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \tag{8}$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2} \tag{9}$$

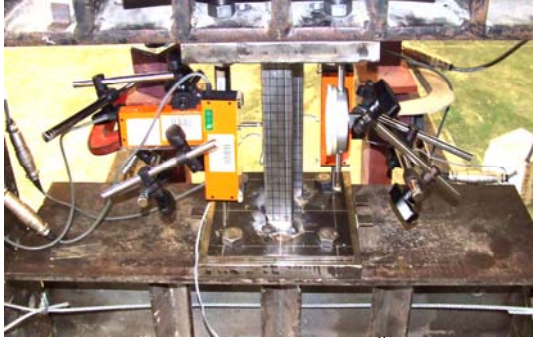
r_o คือ รัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดรอบศูนย์กลางแรงเฉือน (มม.) G คือ โมดูลัสเฉือน (เมกะพาสคาล) J คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของการบิด (มม.⁴) ของหน้าตัด $K_t L_t$ คือ ความยาวประสิทธิภาพของการบิด (มม.) x_o และ y_o คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนและจุดศูนย์กลางของหน้าตัดในระนาบ x และ y (มม.) C_w ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยว (มม.⁶)

3. วิธีการวิจัย

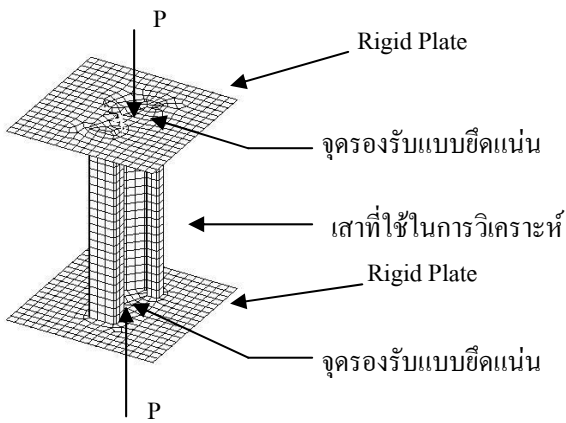
3.1 แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

การวิเคราะห์กำลังอัดของเสาเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปยื่นโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นที่ใช้โปรแกรม ANSYS [2] โดยอิลิเมนต์ที่ใช้เป็นอิลิเมนต์เปลือกบาง Shell93 ที่มี 8 โหนด ขนาด 10×10 มม. การจำลองได้รวมแผ่นเหล็กหนาที่ปลายติดกับชิ้นส่วนเสา และทำการให้แรงที่

ปลายทั้งสองข้างของแผ่นเหล็กในตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัด เสาแบบการควบคุมระยะเคลื่อนที่ โดยมีเงื่อนไขที่ปลายเป็นจุดรองรับบนแผ่นเป็นแบบยึดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) ตัวอย่างทดสอบเสาสั้น



(ข) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

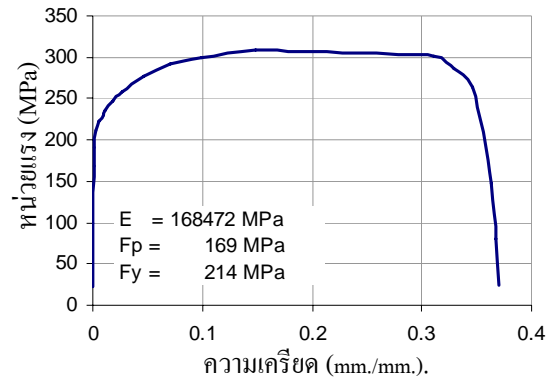
รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบและแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์เสา

3.2 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็ก

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเหล็ก จากการทดสอบกำลังดึงของแผ่นชิ้นส่วนที่สุ่มตัดจากเสาทดสอบ (Coupon test) และใช้จำลองคุณสมบัติของวัสดุของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

3.3 ตัวแปรในการศึกษา

เสาเหล็กที่ศึกษา เป็นเสามีหน้าตัด ไม่ปกติ 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร เสาในแต่ละหน้าตัด มีความยาว 3 ขนาด คือ 230 มิลลิเมตร 950 มิลลิเมตร และ 1900 มิลลิเมตร ซึ่งจัดกลุ่มเป็นเสาสั้น เสายาวปานกลาง และสำหรับเสายาว ตามลำดับ ดังในตารางที่ 1

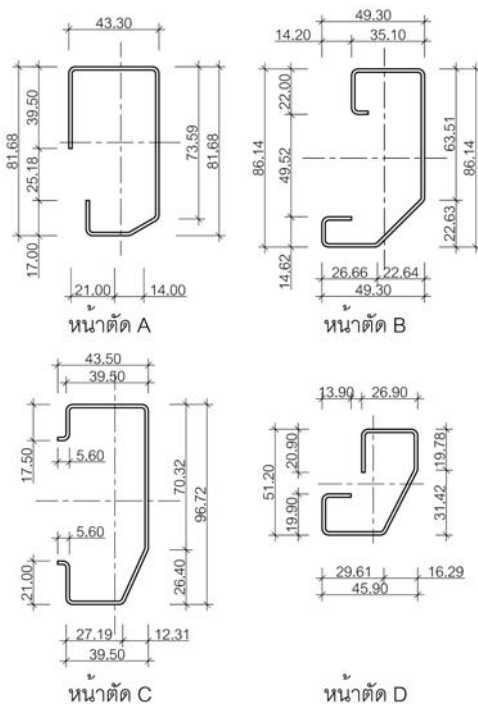


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก (Coupon test)

4. ผลการศึกษา

4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และการทดสอบ

เพื่อตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์กับการทดสอบเสาหน้าตัด B ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้ว ค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบพบว่า ผลการวิเคราะห์ประเมินค่ามากกว่าการทดสอบ 2.7%



รูปที่ 3 หน้าตัดเสาที่ศึกษา (หน่วย: มม.)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างที่ทดสอบ

ตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	r_{min} (มม.)	ความยาว (มม.)	สัญลักษณ์
หน้าตัด A	301.08	16.659	230	A230
			950	A950
			1900	A1900
หน้าตัด B	302.13	15.543	230	B230
			950	B950
			1900	B1900
หน้าตัด C	300.83	15.592	230	C230
			950	C950
			1900	C1900
หน้าตัด D	231.50	11.788	230	D230
			950	D950
			1900	D1900

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบเสา

ตัวอย่าง	P_{Test} (N)	P_{FEM} (N)	P_{FEM}/P_{Test}
B230	68810	61118	0.888
B950	60020	62025	1.033
B1900	45560	52780	1.158
		เฉลี่ย	1.027

การเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างผลการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในความสัมพันธ์ของแรงต่อระยะการหดตัวตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 4 (ก-ค)

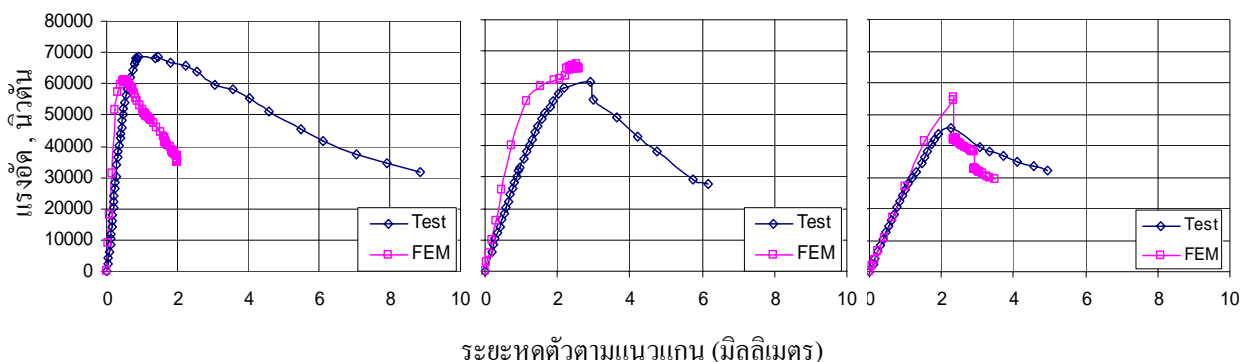
จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถให้ผลที่ดีสำหรับการวิเคราะห์เสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติ

4.2 กำลึงโค้งเดาะ

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หน้าตัดอื่นๆ ผลการวิเคราะห์กำลึงโค้งเดาะของเสาเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น พร้อมกับการคำนวณด้วยข้อกำหนดออกแบบ [1] (American Iron Steel Institute, AISI) แสดงไว้ในตารางที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลึงพบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นต่อการวิเคราะห์ด้วยข้อกำหนด AISI มีค่า 1.074

4.3 พฤติกรรมการโค้งเดาะ

พฤติกรรมของแรงต่อการเปลี่ยนแปลงระยะตามแนวแกนของเสาแต่ละหน้าตัดและแต่ละความยาวของเสาแสดงในรูปที่ 5

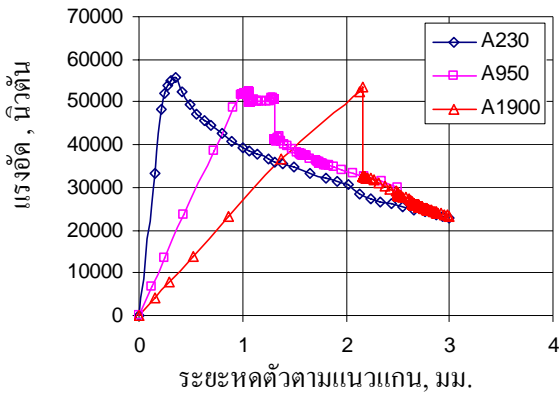


(ก) เสา B230

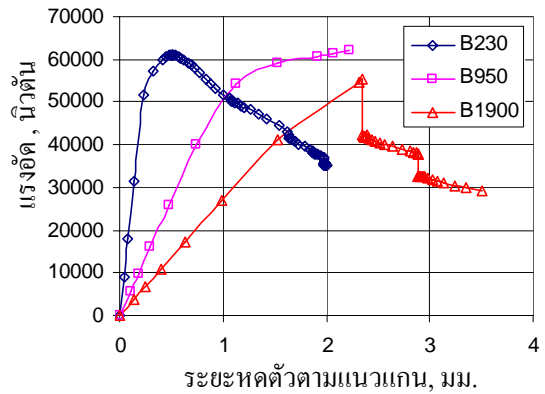
(ข) เสา B950

(ค) เสา B1900

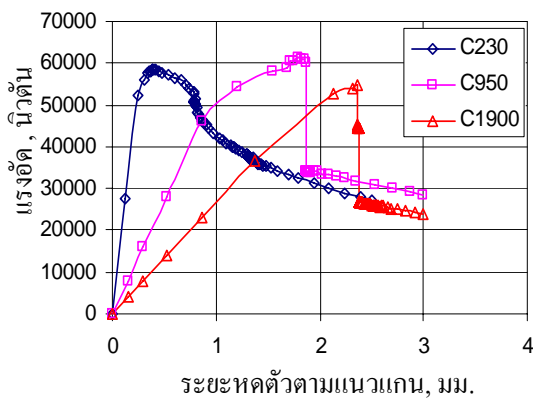
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการหดตัวของ การทดสอบและการวิเคราะห์ของเสา B



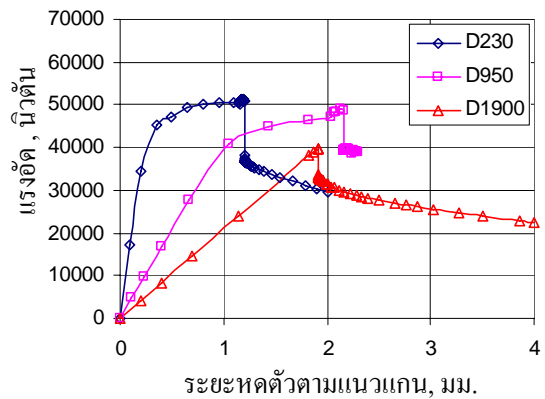
(ก) หน้าตัด A



(ข) หน้าตัด B



(ค) หน้าตัด C



(ง) หน้าตัด D

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการเปลี่ยนแปลงระยะตามแนวแกนของเสาที่วิเคราะห์

จากความสัมพันธ์ของแรงต่อการหดตัว (รูปที่ 5) เสา หน้าตัด A B และ C จะเกิดการสูญเสียกำลังอย่างทันทีทันใด ของเสาความยาว 950 และ 1900 มิลลิเมตร ส่วนในเสาสั้นที่มีความยาว 230 มิลลิเมตร หลังจากแรงสูงสุดแล้วการสูญเสียกำลังจะค่อยๆ ลดลง

สำหรับเสาหน้าตัด D จะเกิดการสูญเสียกำลังอย่างทันทีทันใดในทุกๆ ความยาวของเสา ผลของการสูญเสียกำลังอย่างทันทีทันใดนั้นเกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพอย่างทันที

ในเสาที่มีความยาวปานกลางจะสังเกตเห็นช่วงของเส้นกราฟที่เกิดการลดลงของสติเฟนส ทำให้เกิดความไร้เชิงเส้นและตามด้วยการเสียเสถียรภาพโดยรวม (เส้นกราฟตกลงทันที) ทั้งนี้เป็นผลจากการโก่งเดาะเฉพาะที่หรือการโก่งเดาะบิดเบี้ยวที่ภายหลังจากการโก่งเดาะนั้นยังคงสามารถรับแรงต่อได้อีก สำหรับเสายาวช่วงกราฟจะเป็นเส้นตรงโดยไม่เกิด

พฤติกรรมไร้เชิงเส้นจนกระทั่งเสาเสียเสถียรภาพ (กราฟตกลงทันที) รูปที่ 6-8 แสดงรูปแบบการเสียรูปในภาวะหนั่งการโก่งเดาะ



รูปที่ 6 รูปแบบการโก่งเดาะของกลุ่มเสาสั้น



รูปที่ 7 รูปแบบการโค้งงอของกลุ่มเสายาวปานกลาง



รูปที่ 8 รูปแบบการโค้งงอของกลุ่มเสายาว

4.3 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์และ AISI

จากตารางที่ 3 พบว่าผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบได้มากกว่าข้อกำหนด AISI ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังอัดประลัยจากการวิเคราะห์ต่อกำลังอัดสูงสุดจากข้อกำหนด P_{FEM}/P_u มีค่า 1.074 โดยข้อกำหนดจะให้ค่ามากกว่าในช่วงเสาสั้น และน้อยกว่าในช่วงเสายาว

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังโค้งงอของเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีหน้าตัดไม่ปกติภายใต้แรงอัดร่วมศูนย์

โดยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น เสาทั้งหมด 4 หน้าตัดที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร 3 ความยาวแบ่งเป็นเสาสั้น เสายาวปานกลาง และเสายาว รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่าง การศึกษาสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แสดงพฤติกรรมโค้งงอของเสาเหล็กในรูปแบบต่างๆ โดยในเสาสั้นจะเกิดการโค้งงอเฉพาะที่หรือร่วมกับการบิดเบี้ยว หากหน้าตัดเสาไม่มีส่วนขอบแข็งปลาย (Stiffening) ในส่วนเสายาวปานกลางจะเกิดการโค้งงอแบบบิดเบี้ยว และในส่วนเสายาวเสาจะมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นจนเกิดการโค้งงอทั้งหมดซึ่งทำให้สูญเสียกำลังแบบทันทีทันใด จากการวิเคราะห์เสาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยข้อกำหนด AISI พบว่า การวิเคราะห์ประเมินค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่าผลจากการคำนวณด้วยข้อกำหนด AISI อยู่ 1.074 เท่า อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มว่าค่าจากการคำนวณของ เสายาวตามข้อกำหนด AISI จะให้ค่าที่ต่ำเกินไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ บริษัท อีจีซเทค จำกัด ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม ประจำปี 2552

7. เอกสารอ้างอิง

[1] American Iron and Steel Institute. (1996). North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structure Member, Washington DC: American Iron and Steel Institute.
 [2] ANSYS. (2004). ANSYS Verification Manual. Canonsburg, PA.
 [3] Ellobody, E. (2007). “Buckling analysis of high strength stainless steel stiffened and unstiffened slender hollow section columns”, Journal of Constructional Steel Research, 63: 145-155.

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นเปรียบเทียบกับข้อกำหนดออกแบบ AISI

หน้าตัด	Area (mm ²)	L (mm.)	L/r	ไฟไนต์เอลิเมนต์			คำนวณจากข้อกำหนด AISI			$\frac{P_{FEM}}{P_n}$
				P _{FEM} (N)	P _{FEM} /A (MPa)	Failure Mode*	F _n (MPa)	A _e (mm ²)	P _n (N)	
A	301.08	230	13.8	55793	185.3	L+D	213.0	266.8	56826	0.982
		950	57.0	52462	174.2	D+T	197.8	269.9	53401	0.982
		1900	114.1	53584	178.0	D+FT	157.3	279.7	43990	1.218
B	302.13	230	14.8	61118	202.3	L	213.0	298.0	63457	0.963
		950	61.1	62025	205.3	D+F	197.2	299.8	59117	1.049
		1900	122.2	55523	183.8	FT	156.0	302.1	47119	1.178
C	300.83	230	14.8	58312	193.8	L	213.1	290.6	61938	0.941
		950	60.9	61557	204.6	D+F	199.6	292.5	58369	1.055
		1900	121.9	54966	182.7	FT	163.3	298.0	48646	1.130
D	231.50	230	19.5	51457	222.3	D	212.6	231.5	49209	1.046
		950	80.6	48928	211.4	FT	191.2	231.5	44255	1.106
		1900	161.2	39822	172.0	FT	139.3	231.5	32249	1.235
									เฉลี่ย	1.074

(*หมายเหตุ สัญลักษณ์ใน Failure Mode: L หมายถึง การโก่งเดาะเฉพาะที่ D หมายถึง การโก่งเดาะบิดเบี้ยว F หมายถึง การโก่งเดาะเนื่องจากการตัด และ FT หมายถึง การโก่งเดาะเนื่องจากการตัดและบิด)

[4] Freitas, A.M.S., Freitas, M.S.R and Souza, F. T. (2005).

“Analysis of steel storage rack columns”, Journal of Constructional Steel Research, 61: 1135-1146.

[5] Narayanan, S. and Mahendran, M. (2003). “Ultimate capacity of innovation cold-formed steel columns”, Journal of constructional steel research, 59: 480-508.

[6] Standards Australia. (1996). Australian/ New Zealand Standard AS/NZS4600. Cold formed steel structures. Sydney.

[7] Young, B. and Chen, J. (2008). “Column Tests of Cold-formed Steel non Symmetric Lipped Angle Section”, Journal of Constructional Steel Research, 64: 808-815.