

การศึกษาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กเซลลูลาร์สั้น

A study on strength interaction diagram for short cellular column

กฤษฎา สุวรรณฉาย¹ กัญจน์ อัสวโสภี² กิตติศักดิ์ เกษมปัญญาวัฒน์³ และ อัครวิษ เล่นวารีย์⁴

^{1,2,3} นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงการทางวิศวกรรมโยธา นี้ นำเสนอการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์กับเสาเหล็กเซลลูลาร์สั้น โดยใช้การทดสอบ, การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS และจากการคำนวณตาม AISC Design guide 31 โดยเสาเหล็กเซลลูลาร์สั้นที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้ มีขนาดรูและระยะห่างระหว่างรูที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติในการรับแรงของเสาเหล็กเซลลูลาร์สั้นชนิดต่างๆ และนำคุณสมบัติในการรับแรงมาสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง พบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กเซลลูลาร์แต่ละชนิด มีกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน แต่ในเสาเหล็กเซลลูลาร์ที่มีรูขนาดใหญ่สามารถรับแรงอัดได้มากกว่าเสาเหล็กเซลลูลาร์ที่มีรูขนาดเล็ก ซึ่งประกอบมาจากเหล็กรูปพรรณรูปตัว H ชนิดเดียวกัน และในโครงการนี้ได้เสนอแนวทางในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง ซึ่งเมื่อตรวจสอบกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลจากการทดสอบ และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่เหนือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ได้จากการคำนวณตาม AISC Design guide 31

คำสำคัญ: เสาเหล็กเซลลูลาร์สั้น, เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง, AISC Design guide 31

Abstract

This civil engineering project proposes ways to develop a strength interaction diagram of short cellular steel column. The study consists of destructive test of short cellular steel columns subjected to concentric and eccentric loadings, the finite element analysis by using ANSYS software and calculated following the design equations based on AISC Design Guide 31. There are two main variables for short cellular steel columns which are the web opening size and the opening spacing. The study found that a strength interaction diagram of short

cellular steel column depends on the web opening size. In which the one with larger openings will have higher flexural strength than the one with smaller openings. When correlated between the destructive test results and the finite element analysis results have found that both have equivalent results and higher in strength than a strength interaction diagram developed based on the AISC Design Guide 31.

Keywords: Short cellular steel column, Strength interaction diagram, AISC Design Guide 31

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้งานเหล็กรูปพรรณในประเทศไทยมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะมีน้ำหนักเบาและมีความสามารถในการรับแรงได้สูง เซลลูลาร์คือเหล็กรูปพรรณตัว H ซึ่งมีช่องเปิดรูปวงกลมอยู่ที่บริเวณแผ่นเอว ซึ่งเกิดจากการตัดเหล็กรูปพรรณตัว H และนำมาประกอบใหม่ด้วยการเชื่อม เพื่อให้มีคุณสมบัติรับแรงดัดที่มากขึ้น โครงการนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของเสาเหล็กเซลลูลาร์สั้นที่มีขนาดช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่แตกต่างกันจากการทดสอบ และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงอัดที่กระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเซลลูลาร์สั้นโดยอ้างอิงสมการตาม AISC Design Guide 31 โดยการศึกษา มีขอบเขต ดังนี้

1. เสาเหล็กเซลลูลาร์แสดงพฤติกรรมแบบเสาสั้นโดยมีอัตราส่วนความขะลุดน้อยกว่า $4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ โดย E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น, F_y คือความเค้นที่จุดคราก
2. เสาไม่รับแรงเฉือน
3. ไม่เกิดการวิบัติบริเวณรอยเชื่อม
4. ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คำนึงถึงหน่วยแรงค้ำและความไม่สมบูรณ์เชิงเรขาคณิตของเสา
5. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ finite element software คือ ANSYS 2019

6. ในการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์สมมติให้เหล็กมีพฤติกรรม elastic-perfectly plastic

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์และเอียงศูนย์ของเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์

2.1 รายละเอียดเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์ที่ใช้ทดสอบ

เสาเซลล์ลูลาร์ที่ทดสอบประกอบด้วยเสาเหล็กรูปประพจน์ตัว H 15x15 ซม. ยาว 60 ซม. ซึ่งมีกำลังรับแรงที่จุดคราก 3070 ksc และโมดูลัสความยืดหยุ่น 2.10×10^6 ksc โดยมีขนาดดัง

ตารางที่ 1 รายละเอียดเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์

No.	set (Study design)	Specimen code	Opening		
			Hole dia. mm	Hole spacing mm	Number of hole
1	Concentric load	C1E0	90	126	3
2		C2E0	75	126	3
3		C3E0	90	108	3
4		C4E0	-	-	-
5	Eccentric load 17.5 mm	C1E17.5	90	126	3
6		C2E17.5	75	126	3
7		C3E17.5	90	108	3
8		C4E17.5	-	-	-
9	Eccentric load 35 mm	C1E35	90	126	3
10		C2E35	75	126	3
11		C3E35	90	108	3
12		C4E35	-	-	-

2.2 วิธีการเก็บข้อมูล

ทำการเก็บข้อมูลแรงอัดและการเคลื่อนตัวโดยการติดตั้ง Load cell และ LVDT ไว้ขณะทดสอบโดยทำการติดตั้ง LVDT ไว้ที่บริเวณกึ่งกลางของปีกระยะ 20 ซม. ทั้งสองด้านดังที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ(ซ้าย) ชิ้นงานหลังจากการทดสอบ(ขวา)

3. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์ด้วยโปรแกรม ANSYS

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์สร้างขึ้นจากวัสดุ SHELL 281 ซึ่งเป็นวัสดุแบบเปลือกบางมีจุดต่อทั้งหมด 8 จุด (8 node) ต่อเอลิเมนต์โดยแต่ละจุดมีลำดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) 6 ลำดับขั้น ได้แก่ การเคลื่อนตัวและการหมุนตัวในแนวแกน X Y และ Z

3.1 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

ในแบบจำลองได้มีการจำลองการรับแรงของวัสดุเป็นแบบ elastic-perfectly plastic เพื่อจะหาลำดับรับแรงของเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์ที่จุดคราก โดยตั้งค่าคุณสมบัติต่างๆดังนี้

โมดูลัสยืดหยุ่น (Ex)	=	2.10×10^6	ksc
อัตราส่วนของปัวซอง (PRXY)	=	0.3	
ความเค้นคราก (Yield Stress)	=	3070	ksc
โมดูลัส แบบแทนเจนต์ (Tang Mod)	=	0	ksc

3.2 การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์และเอียงศูนย์

การใส่แรงอัดแบบตรงศูนย์เข้าไปในแบบจำลองทำโดยใส่การเคลื่อนตัวในแกน Y เข้าไปที่ขอบบนและล่างของชิ้นเพื่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาขึ้นและนำแรงปฏิกิริยาที่ได้กับระยะยุบตัวมาสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง

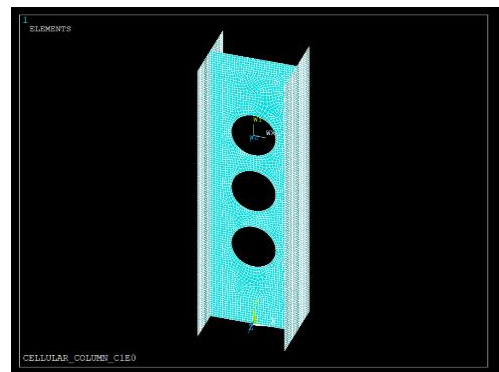
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กเซลล์ลูลาร์ที่จุดครากเปรียบเทียบกับค่าแรงที่จุดครากของหน้าตัดตัวที่โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_n = F_y A_{tee-net} \quad (1)$$

$$\%Error = \frac{P_n - P_{n,FEM}}{P_n} \times 100 \quad (2)$$

โดย P_n คือกำลังรับแรงอัดระบุ, F_y คือความเค้นที่จุดคราก, $A_{tee-net}$ คือหน้าตัดตัวที่เล็กสุด



รูปที่ 2 รูปร่างและจำนวน Element ของแบบจำลอง C1E0

4. การวิเคราะห์กำลังของคานเหล็กเซลล์ลูลาร์ตาม AISI Design Guide 31

4.1 แรงดัดวีเรนดิล

แรงดัดวีเรนดิลเกิดจากถ่ายเทของแรงเฉือนบริเวณช่องเปิด ทำให้เกิดแรงดัดเฉพาะที่ที่ด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ ซึ่งทำให้ที่จุดนี้เกิดแรงอัดและแรงดึงร่วมกับแรงดัด

4.1.1 ค่าแรงตามแนวแกนและแรงดัดวีเรนดิลที่ช่องเปิด

การคำนวณแรงตามแนวแกนเนื่องจากแรงดัดโดยรวมโดยการแบ่งแรงดัดออกเป็นแรงคู่ควบกระทำที่ตำแหน่งบนและล่างของหน้าตัดตัวที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$P_r = \frac{M_r}{d_{effec}} \quad (3)$$

เมื่อ M_r คือ แรงดัดโดยรวมที่กระทำตรงตำแหน่งช่องเปิด (kg.cm)

P_r คือ แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของหน้าตัดตัวที่ (kg)

d_{effec} คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของด้านบนและด้านล่างหน้าตัดตัวที่ (cm)

การคำนวณแรงดัดวีเรนดิลนั้นหาได้จากแรงเฉือนที่กระทำบริเวณด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดตัวที่ซึ่งคำนวณได้จากสมการนี้

$$M_{vr} = V_r \left(\frac{A_{tee}}{A_{net}} \right) \left(\frac{D_0}{4} \right) \quad (4)$$

เมื่อ

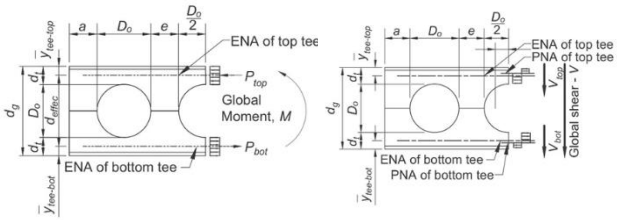
M_{vr} คือ แรงดัดวีเรนดิลที่กระทำ (kg.cm)

V_r คือ แรงเฉือนที่กระทำ (kg)

A_{tee} คือ พื้นที่หน้าตัดตัวที่ (cm²)

A_{net} คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของหน้าตัดตัวที่ (cm²)

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด (cm)



รูปที่ 3 (ซ้าย) สัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณแรงตามแนวแกนตามสมการที่ 3

(ขวา) สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณแรงดัดวีเรนดิลตามสมการที่ 4^[1]

4.1.2 ค่าแรงกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ส่วนบนและส่วนล่างของหน้าตัดตัวที่

(ก.) หน่วยแรงอัดการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติกจากการโก่งเดาะเนื่องจากการดัด

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r} \right)^2} \quad (5)$$

เมื่อ $K_x = 0.65$ (กำหนดระยะปลายทั้งสองข้างของหน้าตัดตัวที่ยึดแน่น)

$K_y = 1.0$

L = ระยะที่ปราศจากค้ำยันด้านข้าง (cm)

$= \frac{D_0}{2}$ สำหรับคานเหล็กเซลล์ลูลาร์

$L_c = K_x L$ หรือ $K_y L$ ใช้ตามแกนที่คำนวณ

(ข.) หน่วยแรงอัดการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติกจากการโก่งเดาะเนื่องจากการบิด

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right] \quad (6)$$

เมื่อ C_w = warping constant ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยว

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{r_y} \right)^2} \quad (7)$$

$$F_{ez} = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{A_g \bar{r}_0^2} \quad (8)$$

G = โมดูลัสการเฉือน (ksc)

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \quad (9)$$

I_x, I_y = โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่คำนวณ (cm⁴)

J = ค่าคงที่เนื่องจากการบิด (cm⁴)

K = สัมประสิทธิ์ความยาว

L_c = ความยาวประสิทธิผล (cm)

$L_c = K_x L$ หรือ $K_y L$

$$\bar{r}_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \quad (10)$$

r = รัศมีจายเรชั่นสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (cm)

x_0, y_0 = ระยะจากจุดศูนย์กลางแรงเฉือนถึงจุดเซนทรอยด์ (cm)

(ค.) ค่าแรงกำลังรับแรงตามแนวแกนของหน้าตัดตัวที่

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (11)$$

เมื่อ $A_g = A_{tee}$ และหน่วยแรงอัดวิกฤต F_{cr} สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

เมื่อ $\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ หรือ $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$ (พฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก)

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (12)$$

เมื่อ $\frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ หรือ $\frac{F_y}{F_e} > 2.25$ (พฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก)

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (13)$$

4.1.3 ค่าแรงกำลังรับแรงดัดที่ส่วนบนและส่วนล่างของหน้าตัดตัวที่

(ก.) กำลังรับแรงดัดระบุจากการคราก

$$M_n = M_p \quad (14)$$

$$M_p = M_y \quad (15)$$

เมื่อ $M_y = F_y S_{x-tee}$

S_{x-tee} = โมดูลัสอีลาสติกของหน้าตัดตัวที่ (cm³)

(ข.) กำลังรับแรงดัดระบุจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

ไม่ต้องพิจารณาการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เนื่องจาก

$$L_b \leq L_p \quad (17)$$

เมื่อ $L_b = \frac{D_0}{2}$ สำหรับคานเหล็กเซลล์ลูลาร์

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(ค.) กำลังรับแรงดัดระบุจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกที่หน้าตัดรูปตัวที่

ไม่ต้องพิจารณาเนื่องจากหน้าตัดปีกเป็นแบบอัดแน่นในแรงอัดจากการดัด

$$\lambda_f \leq \lambda_{pf} \quad (18)$$

เมื่อ $\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f}$, b_f = ความกว้างของปีก (cm),

t_f = ความหนาของปีก (cm)

$\lambda_{pf} = \lambda_p$, ขีดจำกัดความขะลุคของปีกแบบอัดแน่นจากตาราง

(AISC-2016, B4.1b)

(ง.) กำลังรับแรงดัดระบุจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเอวที่หน้าตัดรูปตัวที่

ไม่ต้องพิจารณาเนื่องจากหน้าตัดเอวเป็นแบบอัดแน่นในแรงอัดจากการดัด

$$\frac{d}{t_w} \leq 0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (19)$$

เมื่อ $d = d_t$

**4.1.4 การตรวจสอบการรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดคร่อมกันของ
ด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดรูปตัวที**

สำหรับ $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (20)$$

สำหรับ $\frac{P_r}{P_c} \leq 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (21)$$

เมื่อ P_c = กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ (kg)

P_r = แรงอัดตามแนวแกนที่กระทำบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของ

หน้าตัดตัวทีหรือแรงอัดที่ต้องการ(kg)

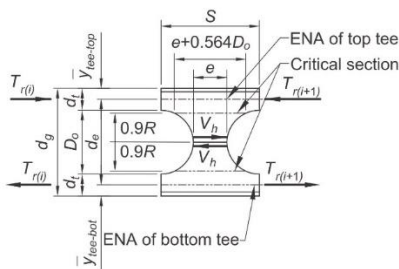
M_c = กำลังต้านทานแรงดัดที่สามารถรับได้ (kg.cm)

M_r = แรงดัดรวมที่กระทำตรงตำแหน่งช่องเปิด หรือแรงดัดที่

ต้องการ (kg.cm)

4.2 การโค้งเตาะของแผ่นเอวระหว่างช่องเปิด

ไม่เกิดขึ้น เนื่องจากหากตัดชิ้นส่วนแรงที่กระทำด้านบนและด้านล่าง
ของหน้าตัดรูปตัวทีทั้ง 2 ด้านนั้นหักล้างกันหมด ทำให้ไม่เกิดแรงเฉือนใน
แนวราบ และแนวตั้ง ตามรูปที่ 2



รูปที่ 4 สัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณการโค้งเตาะของแผ่นเอวระหว่างช่องเปิด^[3]

4.3 การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบและแนวตั้งตาม

ไม่เกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีการเกิดแรงเฉือนที่กระทำบริเวณด้านบนและ
ด้านล่างของหน้าตัดตัวที

5. อภิปรายผลการวิเคราะห์

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่กระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กเซลลูลาร์

Model	eccentricity	Yield Strength	Ultimate Strength
	mm	Ton	Ton
C1E0	0	111.5	119.3
C2E0		111.2	128.9
C3E0		108.4	121.8
C4E0		133.7	148.2
C1E17.5	17.5	79.0	87.0
C2E17.5		81.6	84.2
C3E17.5		91.6	99.5
C4E17.5		96.1	99.7
C1E35	35	75.7	81.6
C2E35		75.1	80.2
C3E35		80.0	87.8
C4E35		81.8	86.8

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของเสาในกรณีตรงศูนย์เสา
C4 ที่มีรูเจาะมีความสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าเสาเหล็กเซลลูลาร์ และใน
การทดสอบกำลังรับแรงอัดกรณีเยื้องศูนย์ 35 มม. กำลังของเสาทุกต้นลดลง

จากในกรณีรับแรงตรงศูนย์จนมีค่ากำลังที่ใกล้เคียงกันซึ่งเมื่อนำกำลัง
ที่ลดลงมาเปรียบเทียบกับพบเสา C4 มีกำลังลดลงมากที่สุด และจากการ
เปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงในเสาเซลลูลาร์ชนิดต่างๆพบว่าผลของตัว
แปรด้านขนาดยังแสดงผลของตัวแปรออกมาไม่ชัดเจน

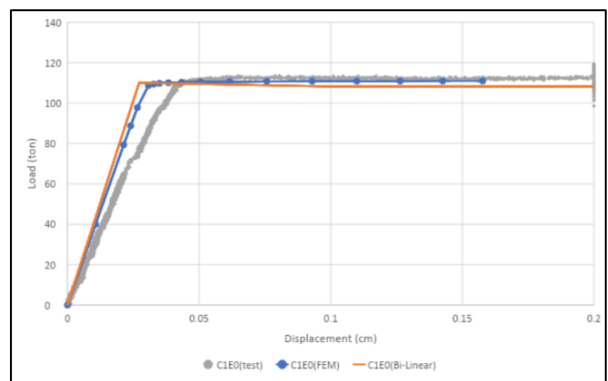
**5.2 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดที่กระทำตรงศูนย์จากแบบจำลองไฟ
ไนต์เอลิเมนต์**

จากการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดที่กระทำตรงศูนย์ของเสาเซลลูลาร์
โดยการสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาและการ
หดตัวของแบบจำลองชนิดต่างได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดจากการทดลองและแบบจำลองไฟ
ไนต์เอลิเมนต์

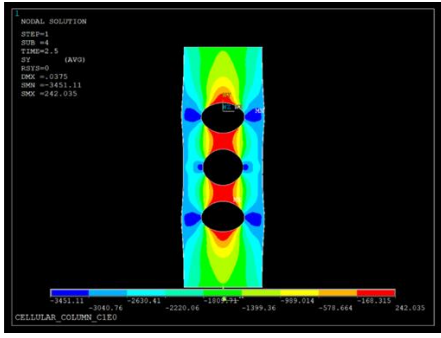
Model	Pn (FEM)	Py (Test)	%Diff (FEM/Test)
	Ton	Ton	
C1E0	110.3	111.5	-1.1%
C2E0	109.1	111.2	-1.9%
C3E0	110.0	108.4	1.5%
C4E0	122.2	133.7	-8.6%

พบว่าแบบจำลอง C4E0 มีกำลังรับแรงอัดแบบกระทำตรงศูนย์สูงสุด
เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ไม่มีรูเจาะจึงมีหน้าตัดสม่ำเสมอทำให้สามารถรับ
แรงอัดที่กระทำได้เต็มพื้นที่ และจากแบบจำลอง C1E0 กับ C3E0 ซึ่งมี
ขนาดของรูเจาะเท่ากันแต่แบบจำลอง C3E0 จะมีระยะห่างระหว่างรูเจาะ
น้อยกว่าข้อมูลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งสองมีความสามารถ
ในการรับแรงอัดแบบกระทำตรงศูนย์ได้เท่ากันแสดงให้เห็นว่าระยะห่างของ
รูเจาะไม่มีผลกับกำลังรับแรงอัดในกรณี และจากแบบจำลอง C2E0 ซึ่งมี
ขนาดของรูเจาะใหญ่ที่สุดทำให้มีกำลังรับแรงอัดแบบกระทำตรงศูนย์ลดลง
เล็กน้อยตามหน้าตัดตัว T ที่ลดลง



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงอัดและการยุบตัวของแบบจำลองกับการทดสอบของ
ชิ้น C1E0

จากรูปที่ 5 และตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดที่กระทำตรง
ศูนย์ที่จุดครากจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบมีค่า
ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 ความเค้นในแกน Y ของแบบจำลอง C1E0

จากรูปที่ 6 การเปลี่ยนรูปร่างของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ใส่แรงเกิดการอัดตัวขึ้นบริเวณหน้าตัดตัว T บริเวณด้านบนและล่างของชิ้นส่วนซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนรูปที่ได้จากการทดสอบ การเปลี่ยนรูปลักษณะนี้เกิดจากการที่ความเค้นในแนวแกน Y ที่มาจากแรงอัดรวมตัวกันบริเวณด้านข้างของรูเจาะจึงเกิดการครากบริเวณชิ้นส่วนนี้

5.3 ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสา

จากตารางที่ 3 พบว่ารูปแบบการวิบัติของ C1 และ C3 นั้นมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดตามแนวแกนมากกว่าของ C2 เนื่องจาก C1 และ C3 มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดตัว T ที่มากกว่า

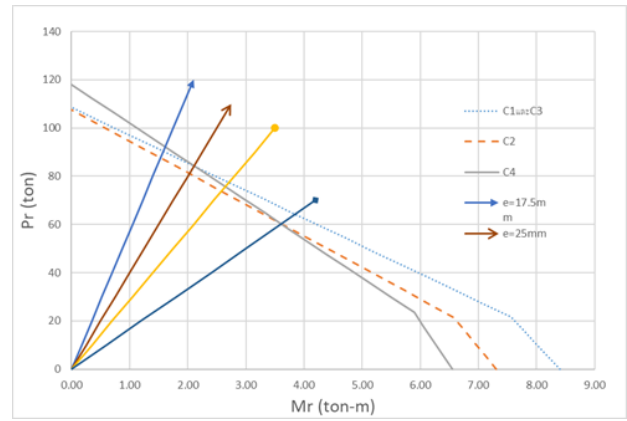
สรุปรูปแบบของการวิบัติที่ควบคุมกำลังต้านแรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กเซลล์ลาร์คือกำลังรับระบบแรงตามแนวแกนของหน้าตัดตัว T จากการโก่งคดเนื่องจากการบิด (flexural torsion buckling) และกำลังต้านแรงดัดของเสาเหล็กเซลล์ลาร์คือการดัดจนเกิดการคราก สรุปค่าได้ตามตาราง 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ความสามารถในการรับแรงของเสาเซลล์ลาร์ในรูปแบบการวิบัติชนิดต่างๆ

Model	Failure Mode	Capacity	
C1	flexural buckling	110.0	ton
	flexural torsion buckling	108.5	ton
	bending yield strength	8.4	ton.m
	vierendeel moment	9.0	ton.m
C2	flexural buckling	108.6	ton
	flexural torsion buckling	107.5	ton
	bending yield strength	7.3	ton.m
	vierendeel moment	7.9	ton.m
C3	flexural buckling	110.0	ton
	flexural torsion buckling	108.5	ton
	bending yield strength	8.4	ton.m
	vierendeel moment	9.0	ton.m
C4	flexural buckling	118.1	ton
	flexural torsion buckling	118.0	ton
	bending yield strength	6.5	ton.m

ตารางที่ 5 ความสามารถในการรับแรงของเสาเหล็กเซลล์ลาร์จากการคำนวณ

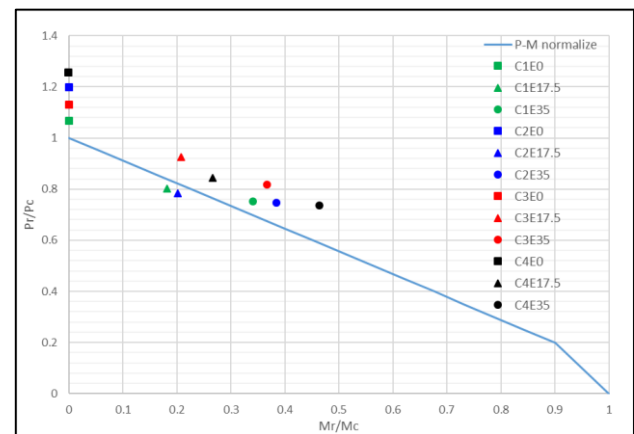
	Pc	Mc
	ton	ton.m
C1	108.5	8.4
C2	107.5	7.3
C3	108.5	8.4
C4	118.0	6.5



รูปที่ 7 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเซลล์ลาร์จากการคำนวณตาม Design Guide 31

จากรูปที่ 7 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงาน C1 กับ C3 ให้เส้นกราฟปฏิสัมพันธ์กำลังที่เท่ากัน เนื่องจากการคำนวณใน design guide 31 ไม่ได้มีการพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างรู และในชิ้นงาน C2 นั้นมีความสามารถรับแรงอัดได้ใกล้เคียง C1 กับ C3 แต่สามารถรับแรงดัดได้น้อยกว่า ซึ่งเกิดจากผลของขนาดรูที่มีขนาดเล็กกว่าของ C1 กับ C3 เนื่องจากมีโมเมนต์ความเฉื่อยที่หน้าตัดตัว T มีค่าน้อยกว่า

5.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบบนเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลทดสอบบนเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรูปแบบ Normalize

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อนำกำลังที่ได้จากการทดสอบมาหารด้วยความสามารถรับแรงของวัสดุชิ้นนั้นจะมีค่าอยู่เหนือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรูปแบบ Normalize แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยในการใช้งาน

6. สรุปผลโครงการ

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลทดสอบ

ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานทดสอบ มีค่ามากกว่า กำลังที่ได้จากการคำนวณตาม design guide 31 เล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าการออกแบบตาม design guide 31 มีความปลอดภัยในการนำไปออกแบบเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยม และ จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงในเสาเซลล์รูสี่เหลี่ยมต่างๆพบว่าผลของตัวแปรด้านขนาดยังแสดงผลของตัวแปรออกมาไม่ชัดเจน

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ความสามารถในการรับแรงที่จุดครากที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความแม่นยำ สามารถนำรูปแบบการขึ้นรูปแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการรับแรงอัดกระทำตรงศูนย์กลางอื่นเพื่อทำนายความสามารถในการรับแรงที่จุดครากของเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมได้

6.3 สรุปผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง

จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมที่ได้จากการคำนวณตาม Design guide 31 ของ C1กับC3 แสดงให้เห็นว่าผลของระยะห่างระหว่างรู ไม่มีผลต่อกำลังในการรับแรงของเสา และ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ C2 ที่มีขนาดรูเล็กกว่า พบว่ากำลังรับแรงตรงศูนย์กลางมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กำลังรับแรงดัดของ C1กับC3 นั้นมีค่ามากกว่า อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของขนาดรูที่ใหญ่กว่า เมื่อนำมาทำเป็นเซลล์รูแล้วทำให้ความกว้างของเสามีค่ามากขึ้น ซึ่งจะเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแกนหลัก ทำให้มีคุณสมบัติรับแรงดัดได้ดีกว่าเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมที่มีรูเล็ก

จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติการรับแรงตรงศูนย์กลางของเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมนี้ดีกว่าเสาเหล็กรูปพรรณรูปตัว H แต่เมื่อรับแรงเยื้องศูนย์กลางพอ กำลังรับแรงของเสาเหล็กรูปพรรณรูปตัว H จะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยม ตั้งแต่ค่าระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของเสา ประมาณ 0.14-0.36 และ หากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางต่อความกว้างของเสามากกว่านั้น ความสามารถในการรับแรงของเสาเหล็กเซลล์รูสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าเสาเหล็กรูปพรรณรูปตัว H ซึ่ง ระยะเยื้องศูนย์กลางดังกล่าว มากเกินไปที่จะเกิดขึ้นในเสาได้ แต่หากเซลล์รูสี่เหลี่ยมใช้รับแรงแบบคาน จะสามารถใช้ประสิทธิภาพในด้านการรับแรงดัดมากกว่าการใช้รับแรงแบบเสา

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรการ อนันตเสนา และพิมพ์รัตน์ เผ่าศรีเจริญ, “การออกแบบคานเหล็กที่มีช่องเปิดรูปวงกลม โดย “Eurocode 3”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556
- [2] วรเทพ แซ่ล่อง และปฐมเมศ ฝานิตพจนาน, “การเปรียบเทียบกำลังออกแบบ cellular beam ตามมาตรฐาน EUROCODE 3 และ ANSI/AISC 360-10”, วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม. อบ., vol. 8, no.2, 14-25, 2015.

- [3] Steel Design Guide 31, “Castellated and Cellular Beam Design”, 2016
- [4] Help viewer จากโปรแกรม ANSYS
- [5] ASTM A370 / ASME SA-370
- [6] ANSI/AISC 360-16, “Specification for Structural Steel Buildings”, July 7, 2016
- [7] ทักษิณ เทพชาติรี และ อัครวัชร เลี้ยววี, พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก (BEHAVIOR AND DESIGN OF STEEL STRUCTURES). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559