



แบบจำลองทำนายพฤติกรรมรับแรงอัดของเสาสั้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

ANALYTICAL MODEL FOR COMPRESSION BEHAVIOR OF CONCRETE-ENCASED STEEL STUB COLUMNS

วรการ อนันตเสนา¹ และอัครวัชร เล่นวาริ^{2*}

¹นิสิตดุษฎีบัณฑิต, หน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างคอมโพสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

^{2*}รองศาสตราจารย์, หน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างคอมโพสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: Akhrawat.L@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของเสาสั้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ โดยแบบจำลองนี้พิจารณาผลกระทบของการถูกโอบรัดของคอนกรีตจากเหล็กรูปพรรณและเหล็กปลอก การลดกำลังแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณจากแรงดันทางด้านข้างของคอนกรีต และการลดกำลังของเหล็กเสริมทแยงเนื่องจาก การโก่งเดาะ และสามารถใช้ได้กับเสาสั้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ใช้หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่สมมาตรสองแกนทุกรูปแบบ หลังจากทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลทดสอบในอดีต แบบจำลองได้ถูกใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อการรับแรงอัดและดัชนีความเหนียวของเสาวัสดุผสม นอกจากนี้ บทความนี้ยังได้นำเสนอสมการอย่างง่ายเพื่อทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาสั้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

คำสำคัญ: เสาวัสดุผสม, เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต, การถูกโอบรัดของคอนกรีต, กำลังรับแรงอัด, ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียด

ABSTRACT

This paper presents an analytical model for predicting the load-deformation relationships of concrete-encased steel stub columns under axial compression. The model considers the concrete confinement effects, which increase the compressive strength of confined concrete and reduce the web strength of structural steel, and the buckling of longitudinal steel reinforcements. The model is applicable to the composite columns that use any doubly-symmetric structural steel shapes. After validated with previous test data, the model is used to investigate the effects of design parameters on strength and ductility index of composite columns. Moreover, a simplified equation for predicting the compressive strength of composite columns is proposed.

KEYWORDS: composite columns, concrete-encased steel columns, concrete confinement, compressive strength, load – deformation relationship

1. บทนำ

เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (concrete-encased steel columns) เป็นเสาวัสดุผสมรูปแบบหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้แพร่หลายในการก่อสร้างอาคารสูง เสาวัสดุผสมรูปแบบนี้ประกอบด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณและเหล็กเส้น โดยเหล็กรูปพรรณที่นิยมใช้ประกอบด้วย หน้าตัดรูปตัวไอ (I-shape) ตัวเอช (H-shape) และ กากบาท (cross-shape) จุดเด่นของเสาวัสดุผสมรูปแบบนี้คือมีกำลังรับแรงอัดสูง มีความต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหว ผลกระทบจากอัคคีภัยและสภาวะการกัดกร่อนที่ดี

งานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็นการศึกษาโดยวิธีการทดสอบ (Experimental study) [1, 4, 6-9, 13-14] วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) [11-12] วิธีไฟเบอร์เอลิเมนต์ (fiber element method) [15] และวิธีแบบจำลองของหน้าตัด [2-3, 5, 10, 16] โดยพฤติกรรมที่ศึกษาประกอบด้วย พฤติกรรมภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ พฤติกรรมภายใต้แรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ และพฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหว สำหรับงานวิจัยที่เสนอแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของเสาต้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำตรงศูนย์ได้พิจารณาผลรวมของกำลังรับแรงของวัสดุภายในหน้าตัดเสาและพิจารณาผลกระทบจากการโอบรัดคอนกรีต (concrete confinement) โดยงานวิจัยของ Chen และ Lin (2006) [10] ได้เสนอแบบจำลองและค่าตัวประกอบการโอบรัด (confinement factor) ต่อมา Chen และ Wu (2017) [16] ได้เสนอแบบจำลองและวิธีทำนายค่าตัวประกอบการโอบรัดในกรณีเหล็กรูปพรรณมีหน้าตัดเป็นรูปกากบาทเท่านั้น จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่เสนอแบบจำลองสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์และเสนอวิธีทำนายค่าตัวประกอบการโอบรัดสำหรับของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในกรณีที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเป็นรูปอื่น ๆ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทำนายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของเสาต้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต และวิธีทำนายค่าตัวประกอบการโอบรัดคอนกรีตจากเหล็กรูปพรรณในกรณีที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเป็นรูปตัวไอ ตัวเอช หรือหน้าตัดสมมาตรสองแกนอื่นๆ จากนั้น ใช้แบบจำลองที่เสนอไปศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบ (กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก ความขรุขระของแผ่นปีกและเอวของเหล็กรูปพรรณ) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว นอกจากนี้ ได้นำเสนอสมการอย่างง่ายสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาต้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่พิจารณาผลกระทบของการถูกโอบรัดของคอนกรีตและการลดกำลังของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ

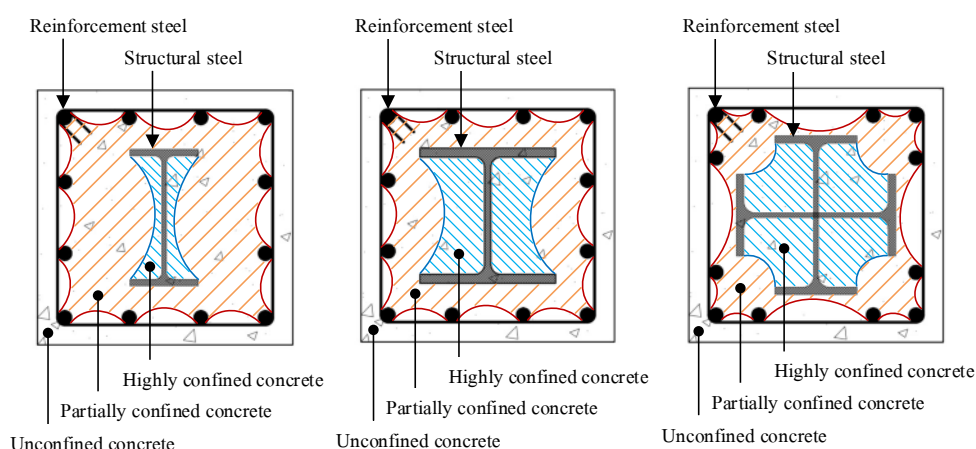
2. แบบจำลองทำนายพฤติกรรมรับแรงอัดของเสาต้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

การพัฒนาแบบจำลองทำนายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดตามแนวแกนของเสามีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์หน้าตัด (section analysis) ของเสาวัสดุผสม โดยการรวมกำลังของวัสดุต่าง ๆ ภายในเสาวัสดุผสมเข้าด้วยกัน ประกอบด้วย เหล็กรูปพรรณ เหล็กเสริมทางยาว คอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (unconfined concrete) คอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน (partially confined concrete) และคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง (highly confined concrete) ดังแสดงในรูปที่ 1 และเหล็กปลอกจะถูกนำไปพิจารณาผลกระทบต่อการโอบรัดคอนกรีตเท่านั้น

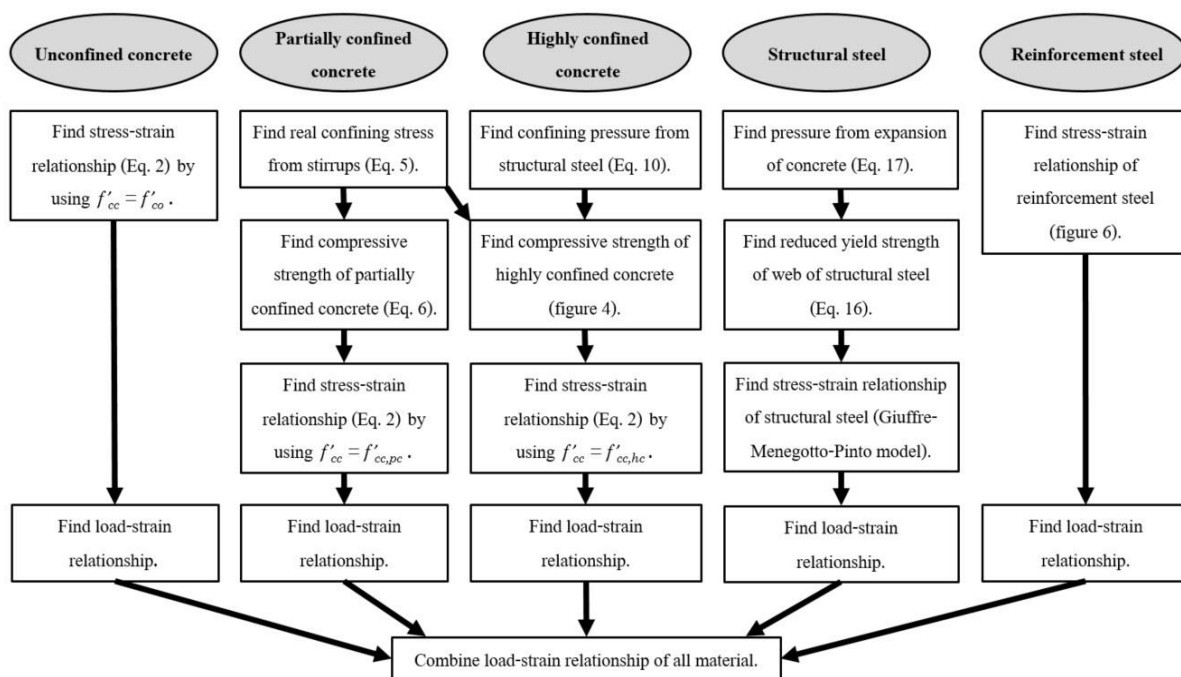
รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสมที่พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุภายในหน้าตัด ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในส่วนถัดไป แบบจำลองนี้มีสมมุติฐาน คือ 1. การกระจายของความเครียดตามแนวแกนของเสามีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด 2. หน่วยแรงอัดของแต่ละวัสดุเป็นไปตามแบบจำลองของวัสดุรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงแกนเดียว (uniaxial material model) และ 3. ไม่พิจารณาผลกระทบของการวิเคราะห์ลำดับสอง (second-order analysis)

การรวมน้ำหนักบรรทุกของวัสดุต่าง ๆ ภายในเสาวัสดุผสมจะเป็นไปตามสมการ (1) โดยจะรวมกำลังของวัสดุที่แต่ละหน่วยความเครียด รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการนำแบบจำลองไปใช้ทำนายพฤติกรรมของเสาตัวอย่างทดสอบของ Chen และ Yeh (1996) [6] และ Zhu และคณะ (2014) [14]

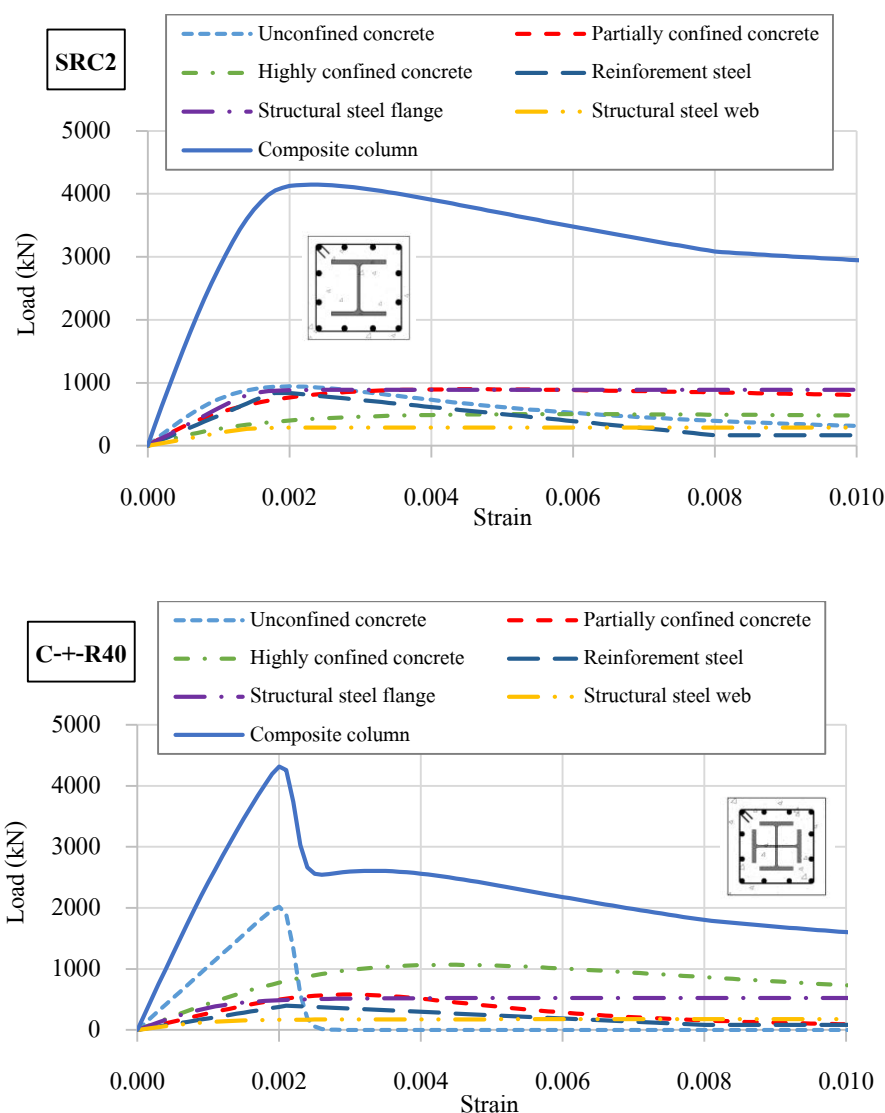
$$P_{Analy} = f_s A_s + f_{sr} A_{sr} + f_{uc} A_{uc} + f_{pc} A_{pc} + f_{hc} A_{hc} \quad (1)$$



รูปที่ 1 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [10]



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสม



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและความเครียดตามแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและวัสดุต่างๆ ภายในเสา (ตัวอย่าง SRC2 ของ Chen และ Yeh (1996) [6] และ C+-R40 ของ Zhu และคณะ (2014) [14])

2.1 แบบจำลองวัสดุคอนกรีต

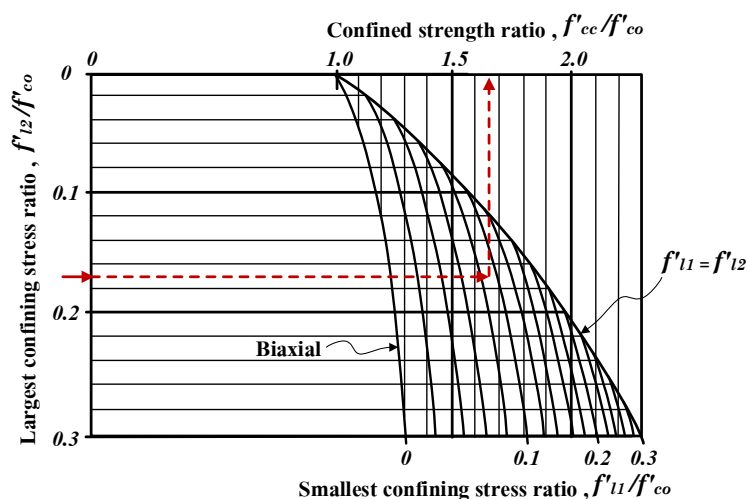
รูปที่ 1 แสดงการจำแนกพฤติกรรมของคอนกรีตภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตประกอบด้วย คอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด คอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน และคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง โดยคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง หมายถึง คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กรูปพรรณและเหล็กปลอก คอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน หมายถึง คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกเพียงอย่างเดียว และ คอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด หมายถึง คอนกรีตที่อยู่บริเวณด้านนอกของเหล็กปลอกซึ่งไม่ถูกโอบรัด แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดคอนกรีตทั้งหมดจะอ้างอิงแบบจำลองของ Mander และคณะ (1988) [17] ซึ่งเป็นแบบจำลองสำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอก แสดงในสมการที่ (2)

$$f_c = \frac{f'_{cc}}{r-1+X^r} \quad (2)$$

เมื่อ $X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}, \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}, \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \text{ และ } \varepsilon_{co} = 0.002$

ในบริเวณคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (f'_{cc}) หาได้จากกราฟในรูปที่ 4 ที่เสนอโดย Mander และคณะ (1988) [17] ซึ่งใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งแรงดันโอบรัดทางด้านข้างสองทิศทางมีค่าไม่เท่ากัน จึงนำมาประยุกต์ใช้ได้ในการหีเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคอนกรีต โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันโอบรัดทางด้านข้างทั้งสองทิศทางที่กระทำต่อคอนกรีต

ในบริเวณคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตหาได้จากสมการของ Cusson และ Paultre (1995) [18] ซึ่งได้พัฒนามาจาก Mander และคณะ (1988) [17] ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด [15]

แรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตภายในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเกิดขึ้นในขณะที่คอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกน และเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง แต่การขยายตัวนั้นได้ถูกรั้งไว้ด้วยเหล็กปลอกและเหล็กรูปพรรณ ทำให้คอนกรีตในบริเวณนั้นถูกโอบรัดและมีกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น โดยบริเวณคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน แรงดันโอบรัดจะเกิดจากเหล็กปลอกเพียงอย่างเดียวแสดงดังสมการที่ (3) บริเวณคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง แรงดันโอบรัดจะเกิดจากเหล็กปลอกและเหล็กรูปพรรณแสดงดังสมการที่ (4) และบริเวณคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด แรงดันโอบรัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($f'_{le,u} = 0$)

$$f'_{le,p} = f'_{le,r} \quad (3)$$

$$f'_{le,h} = f'_{le,r} + f'_{le,s} \quad (4)$$

การหาแรงดันโอบรัดประสิทธิภาพจากเหล็กปลอกตามวิธีของ Mander และคณะ (1988) [17] มีสมมติฐานให้แรงดันโอบรัดมีค่าเท่ากับแรงที่ทำให้เหล็กปลอกเกิดการคราก ต่อมา Cusson และ Paultre (1995) [18] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาแรงดันโอบรัดที่เกิดขึ้นจริงภายในเหล็กปลอก โดยการหาแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กปลอกจะต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาแรงดันโอบรัดในเหล็กปลอก ($f'_{le,r}$) โดยสมมติให้เหล็กปลอกเกิดการคราก ($f_{hcc} = f_y$) โดยใช้สมการที่ (5)
2. คำนวณหาค่ารับแรงอัดสูงสุดและความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยใช้สมการที่ (6-7)
3. คำนวณหาความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในคอนกรีตโดยใช้สมการที่ (8)
4. คำนวณหาแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กปลอก (f_{hcc}) โดยใช้สมการที่ (9)
5. คำนวณหาแรงดันโอบรัดใหม่อีกครั้งโดยใช้สมการที่ (5)
6. ทำซ้ำในขั้นตอน 2-5 จนค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกมีค่าลู่เข้าค่าหนึ่ง และเมื่อได้ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกจะสามารถหาค่ารับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนได้จากสมการที่ (6)

$$f'_{le,r} = \frac{k_{e,p} f_{hcc} A_{sh}}{s c} \quad (5)$$

เมื่อ

$$k_{e,p} = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6 c_x c_y}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 c_x}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 c_y}\right)}{(1 - \rho_c)}$$

$$f_{cc} = f_{co} + 2.1 f'_{le,r}{}^{0.7} f_{co}{}^{0.3} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.21 \left(\frac{f'_{le,r}}{f_{co}} \right)^{1.7} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{hcc} = \nu_c \varepsilon_{cc} - \frac{(1 - \nu_c) f'_{le,r}}{E_{sec}} \quad (8)$$

$$f_{hcc} = E_s \varepsilon_{hcc} \quad (9)$$

การหาแรงดันโอบรัดประสิทธิภาพจากเหล็กรูปพรรณจะใช้สมการของ Chen และ Wu (2017) ที่แสดงในสมการที่ (10) โดย $k_{e,h}$ คือ ค่าคงที่พื้นที่การโอบรัดประสิทธิภาพ และ $f'_{l,s}$ คือ แรงดันโอบรัดจากแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ โดยแรงดันโอบรัดจากแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณหาได้จากการสมมติให้แผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณเกิดการครากเนื่องจากแรงดัดเมื่อคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณจะมีลักษณะเป็นคานยื่นที่ถูกแรงดันออกจากคอนกรีตและมีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเท่ากับ M_u แสดงในสมการที่ (11) โดยสมมติให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแบบไม่เชิงเส้นขณะที่เหล็กรูปพรรณรับแรงอัดในแนวแกนเท่ากับ 0.75 เท่าของกำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ และแรงดันออกของคอนกรีตมีลักษณะไม่คงที่เป็นรูปพาราโบลาที่มีแรงสูงสุดเท่ากับ q_u แสดงในสมการที่ (12) และนำมาแปลงเป็นแรงดันเฉลี่ยที่กระทำต่อแผ่นปีก $f'_{l,s}$ แสดงในสมการที่ (13) จากนั้น เมื่อได้ค่าแรงดันโอบรัดจากเหล็กปลอกและจากเหล็กรูปพรรณจะสามารถหาค่ารับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูงได้จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4

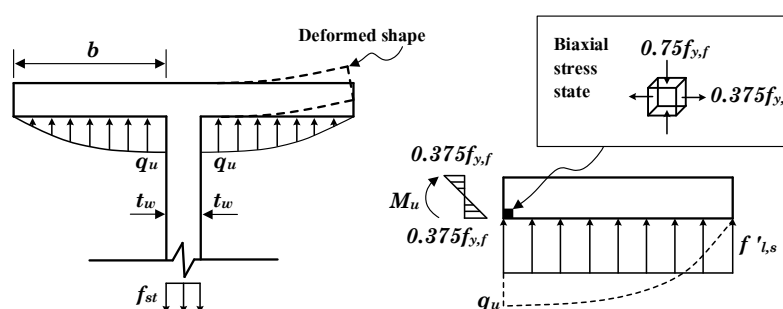
$$f'_{le,s} = k_{e,h} f'_{l,s} \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } k_{e,h} = \frac{(d-2t_f)(b-t_w) - \frac{(d-2t_f)^2}{6}}{(d-2t_f)(b-t_w)}$$

$$M_u = \frac{f_{y,f} t_f^2}{16} \quad (11)$$

$$q_u = \frac{t_f^2}{4b^2} f_{y,f} \quad (12)$$

$$f'_{l,s} = \frac{2}{3} q_u \quad (13)$$



รูปที่ 5 แรงดันโอบรัดจากแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ [16]

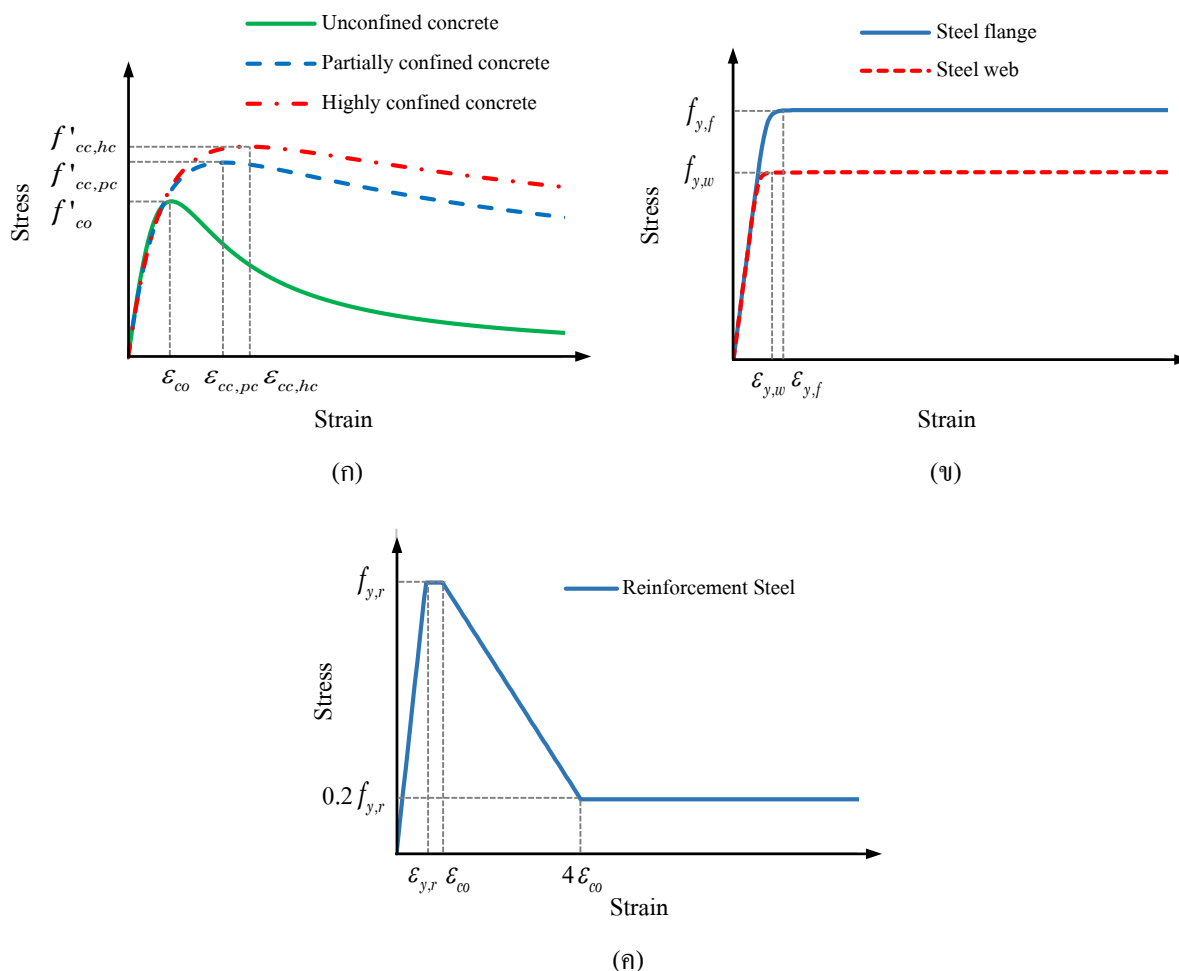
เมื่อกำหนดหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดได้จะสามารถหาค่าตัวประกอบการโอบรัด (confinement factor) ได้จากสมการที่ (14-15) โดย K_p คือ ตัวประกอบการโอบรัดคอนกรีตบริเวณที่ถูกโอบรัดบางส่วน และ K_h คือ ตัวประกอบการโอบรัดคอนกรีตบริเวณที่ถูกโอบรัดสูง

$$K_p = \frac{f'_{cc,p}}{f'_{co}} \quad (14)$$

$$K_h = \frac{f'_{cc,h}}{f'_{co}} \quad (15)$$

2.2 แบบจำลองวัสดุเหล็กรูปพรรณ

การขยายตัวของคอนกรีตทำให้แผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณถูกแรงดันออกส่งผลให้แผ่นเอวมีกำลังรับแรงตามแนวแกนลดลง ในแบบจำลองจึงแบ่งพิจารณากำลังรับแรงของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณออกเป็น 2 ส่วน คือ แผ่นปีกและแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ การลดกำลังแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณจะพิจารณาแผ่นเอวภายใต้หน่วยแรงสองทิศทางโดยอ้างอิงทฤษฎี Biaxial Stress Ellipse Theory ซึ่งเป็นไปตามสมการ (16) และแรงดันออกที่แผ่นเอวจากการขยายตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 5 โดยแรงภายในแผ่นเอวสามารถหาได้จากสมการสมดุลแสดงดังสมการที่ (17)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต (ก) เหล็กรูปพรรณ (ข) และเหล็กเสริมทางยาว (ค) [16]

$$f_{st}^2 + f_{sv}^2 - f_{st}f_{sv} = f_y^2 \quad (16)$$

$$f_{st} = \frac{4b}{3t_w} q_u \quad (17)$$

แบบจำลองความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของแผ่นเหล็กรูปพรรณทั้งสองส่วนอ้างอิงแบบจำลองของ Giuffre-Menegotto-Pinto แสดงดังรูปที่ 6 (ข) โดยใช้ค่าตัวประกอบ ดังนี้ $R = 10$ สำหรับเหล็กกรีดร้อนทั่วไป และ $R = 3$ สำหรับเหล็กที่มีการเชื่อมประกอบ และ $\epsilon_{su} = 0.02$ และเมื่อสามารถคำนวณหาค่ากำลังรับแรงตามแนวแกนของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณได้ จะสามารถหาค่าตัวประกอบลดค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ (reduction factor) ได้จากสมการที่ (18)

$$K_w = \frac{f_{sv}}{f_y} \quad (18)$$

2.3 แบบจำลองวัสดุเหล็กเสริมทางยาว

รูปที่ 6 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมทางยาวอ้างอิงแบบจำลองของ Chen และ Wu (2017) โดยเหล็กเสริมทางยาวจะมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นจนถึงกำลังที่จุดครากของเหล็ก จากนั้นจะมีหน่วยแรงคงที่เท่ากับหน่วยแรงที่จุดครากจนความเครียดมีค่าเท่ากับค่าความเครียดสูงสุด (peak strain) ของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (unconfined concrete) จากนั้น หน่วยแรงจะลดลงแบบเส้นตรงจนมีกระทั่งเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็ก

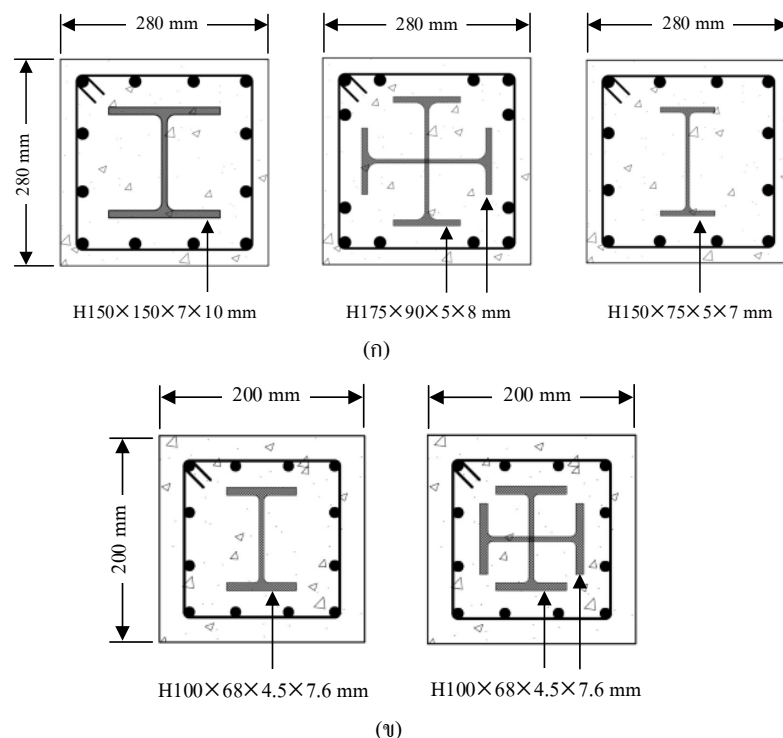
3. การตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้ผลการทดสอบในอดีต

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการวิเคราะห์ห้จัดทำโดยการนำผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัดตรงศูนย์ และน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาตัวอย่างในอดีต โดยเสาตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 22 ตัวอย่างจากงานวิจัยของ Chen และ Yeh (1999) [6], Tsai และคณะ (1996) [7], Liang และคณะ (2014) [13] และ Zhu และคณะ (2014) [14]

เสาวัสดุผสมตัวอย่างของ Chen และ Yeh (1999) [6] และ Tsai และคณะ (1996) [7] มีขนาดหน้าตัด 280 x 280 มม. สูง 1200 มม. เหล็กเสริมทางยาวขนาด 16 มม. จำนวน 4 และ 12 เส้น เหล็กปลอกขนาด 6 และ 8 มม. หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเป็นรูปตัวเอช รูปตัวไอ และรูปกากบาท แสดงดังรูปที่ 7 (ก) เสาวัสดุผสมตัวอย่างของ Liang และคณะ (2014) [13] มีขนาดหน้าตัด 600 x 600 มม. สูง 1200 มม. เหล็กเสริมทางยาวขนาด 29 มม. จำนวน 12 เส้น เหล็กปลอกขนาด 13 มม. หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเป็นรูปกากบาท และเสาวัสดุผสมตัวอย่างของ Zhu และคณะ (2014) [14] เป็นเสาวัสดุผสมที่ใช้คอนกรีตกำลังสูง ที่มีขนาดหน้าตัด 200 x 200 มม. สูง 600 มม. เหล็กเสริมทางยาวขนาด 10 มม. จำนวน 12 เส้น เหล็กปลอกขนาด 6.5 มม. หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเป็นรูปตัวไอและรูปกากบาท แสดงดังรูปที่ 7 (ข)

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบเสาตัวอย่างกับผลการวิเคราะห์เสาตัวอย่างด้วยแบบจำลองการวิเคราะห์ โดยพบว่า แบบจำลองการวิเคราะห์สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบเสาตัวอย่าง โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดจากแบบจำลองใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ และน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทำนายจากแบบจำลองการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเสาตัวอย่างในอดีต โดยค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากแบบจำลองการวิเคราะห์ต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบเสาตัวอย่างเท่ากับ 1.00 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.05 แสดงดังตารางที่ 1

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้นำน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของหน้าตัดเสาวัสดุผสมโดยไม่คิดผลของความชะลูด (squash load) แสดงดังสมการที่ 19 ซึ่งสมการนี้คำนวณกำลังของเสาวัสดุผสมโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากการถูกโอบรัดของคอนกรีตและการลดกำลังแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ นำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบเสาตัวอย่าง จากการศึกษพบว่า สมการคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของหน้าตัดทำนายกำลังของเสาวัสดุผสมต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาวัสดุผสม โดยค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากแบบจำลองการวิเคราะห์ต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบเสาตัวอย่างเท่ากับ 1.09 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.07 แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจากการทดสอบ (ก) Chen และ Yeh (1999) [6] และ (ข) Zhu และคณะ (2014) [14]

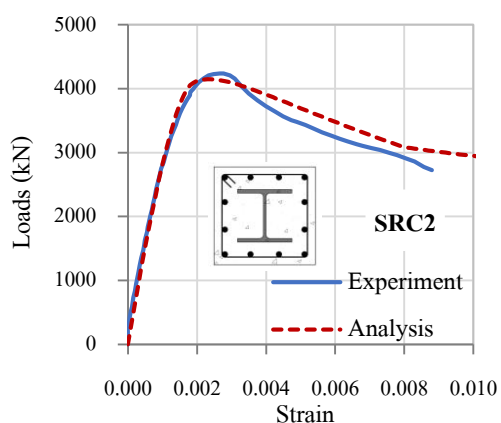
$$P_{Squash} = 0.85f_{co}'A_c + f_{y,s}A_s + f_{y,sr}A_{sr} \quad (19)$$

4. การศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

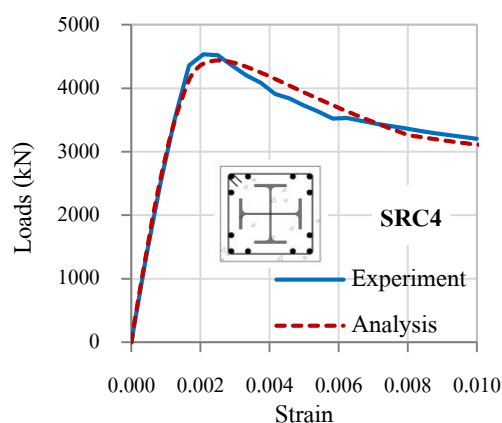
แบบจำลองการวิเคราะห์ที่อธิบายในหัวข้อที่ 3 ได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์กลางของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยตัวแปรออกแบบที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ ระยะห่างเหล็กปลอก อัตราส่วนความชะลุดแผ่นปีกและแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ และพฤติกรรมรับแรงอัดที่ศึกษาประกอบด้วย 1. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด 2. ดัชนีความเหนียว (ductility index) 3. ตัวประกอบการโอบรัด และ 4. ตัวประกอบลดกำลังแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ โดยดัชนีความเหนียวของเสาวัสดุผสมแสดงดังสมการ (20)

$$\mu = \frac{\epsilon_{0.85P_u}}{\epsilon_y} \quad (20)$$

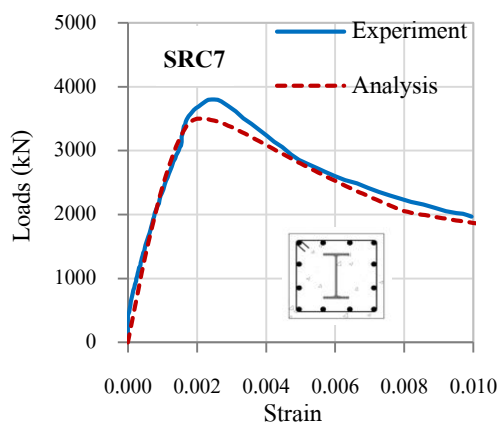
เสาวัสดุผสมที่ใช้ในการศึกษาตัวแปรอ้างอิงคุณสมบัติของเสาตัวอย่าง SRC2 โดยเสาตัวอย่างที่ใช้ในการควบคุมตัวแปร มีหน้าตัดเสามีขนาด 280 x 280 มม. เหล็กรูปพรรณเป็นรูปตัวไอ ความกว้างแผ่นปีกเท่ากับ 150 มม. ความลึกทั้งหมดของหน้าตัดเท่ากับ 150 มม. ความหนาแผ่น 10 มม. ความหนาแผ่นเอว 7 มม. กำลังรับแรงที่จุดครากเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 245 เมกะปาสกาล เหล็กเสริมทางยาวจำนวน 12 เส้น ขนาด 16 มม. กำลังรับแรงที่จุดครากเหล็กเสริมทางยาวเท่ากับ 400 เมกะปาสกาล และเหล็กปลอกขนาด 8 มม. ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 50 มม. กำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากับ 400 เมกะปาสกาล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 30 เมกะปาสกาล



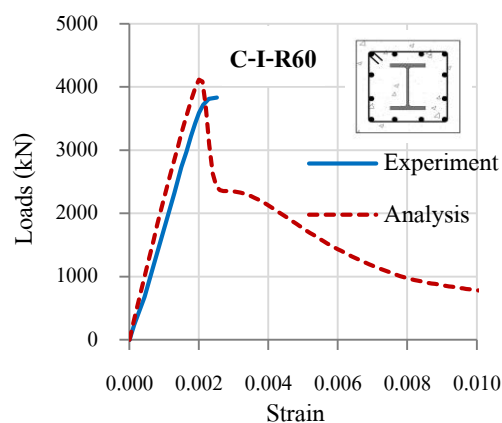
(ก)



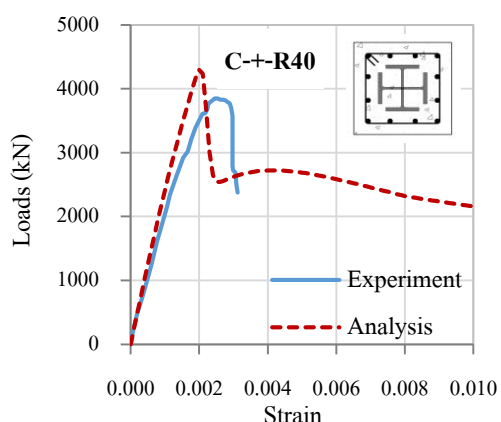
(ข)



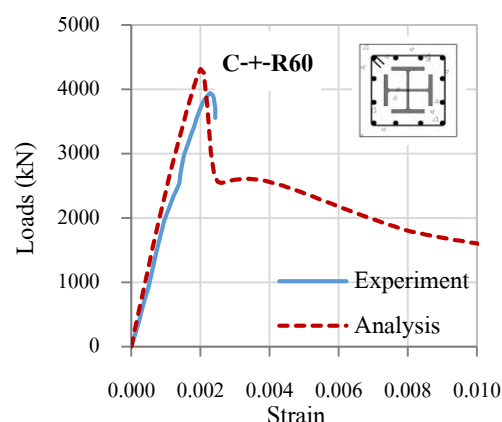
(ค)



(ง)



(จ)



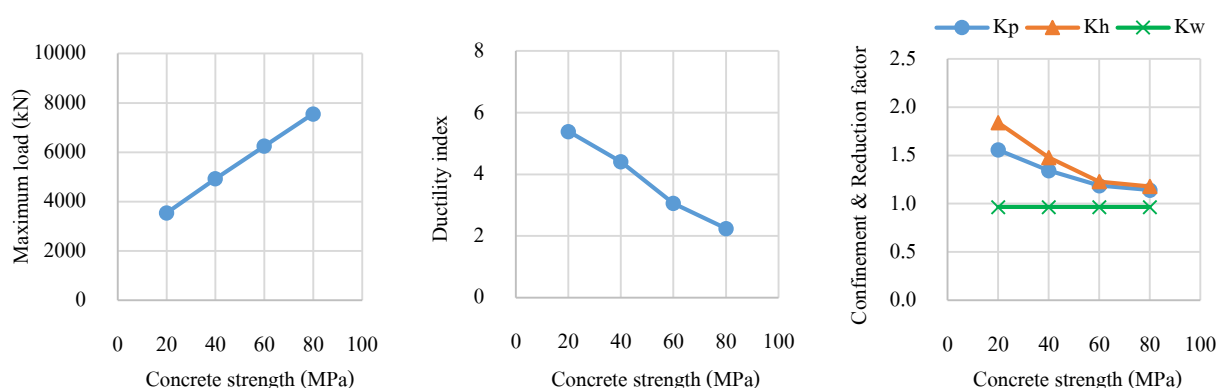
(ฉ)

รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ตัวอย่างการทดสอบ (ก-ค) Chen และ Yeh (1999) [6] และ (ง-ฉ) Zhu และคณะ (2014) [14]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากผลการทดสอบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

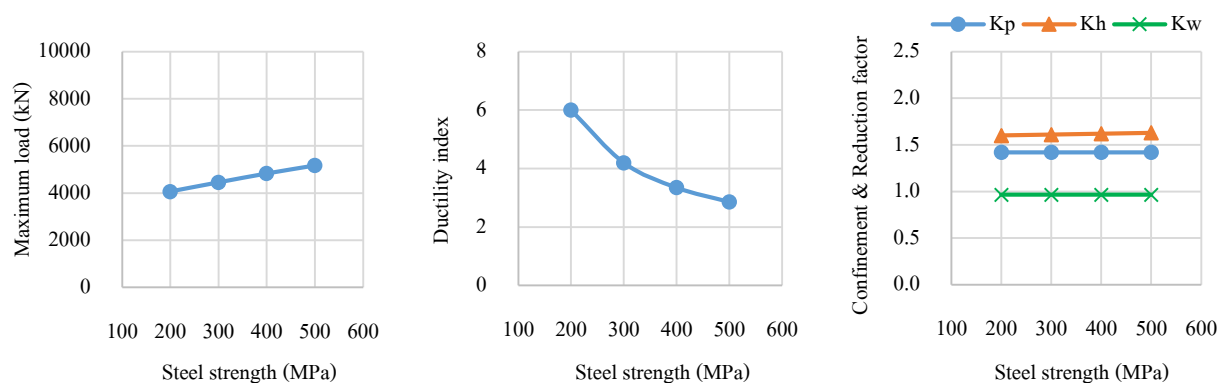
Author	Specimen	Maximum load				
		Experiment	Squash	Analysis	Experiment / Squash	Experiment / Analysis
		(kN)	(kN)	(kN)		
Tsai และ คณะ (1996)	src1	3602	3227	3587	1.12	1.00
	src2	3502	3202	3567	1.09	0.98
	src5	3063	2664	2918	1.15	1.05
	src6	3009	2684	2974	1.12	1.01
	src8	3088	2703	3000	1.14	1.03
	src9	3748	3515	3533	1.07	1.06
Chen และ Yeh (1999)	SRC1	4220	3833	4187	1.10	1.01
	SRC2	4228	3747	4147	1.13	1.02
	SRC3	4399	3851	4385	1.14	1.00
	SRC4	4441	4231	4438	1.05	1.00
	SRC5	4519	4231	4471	1.07	1.01
Chen และ Yeh (1999)	SRC6	4527	4213	4549	1.07	1.00
	SRC7	3788	3153	3502	1.20	1.08
	SRC8	3683	3046	3434	1.21	1.07
	SRC9	3630	3153	3502	1.15	1.04
	SRC10	3893	3261	3674	1.19	1.06
Liang และ คณะ (2014)	DH-TI-75	18188	18447	19259	0.99	0.94
	DH-TI-90	17952	18447	19229	0.97	0.93
Zhu และ คณะ (2014)	C-I-R40	3809	3685	4088	1.03	0.93
	C-I-R60	3838	3685	4114	1.04	0.93
	C++-R40	3855	3926	4294	0.98	0.90
	C++-R60	4010	3926	4317	1.02	0.93
Average					1.09	1.00
Standard deviation					0.07	0.05

รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ระหว่าง 20 ถึง 80 เมกะปาสกาล) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นแต่มีความเหนียวลดลง นอกจากนี้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูงของเสามีค่าลดลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อตัวประกอบการลดค่ากำลังรับแรงของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ



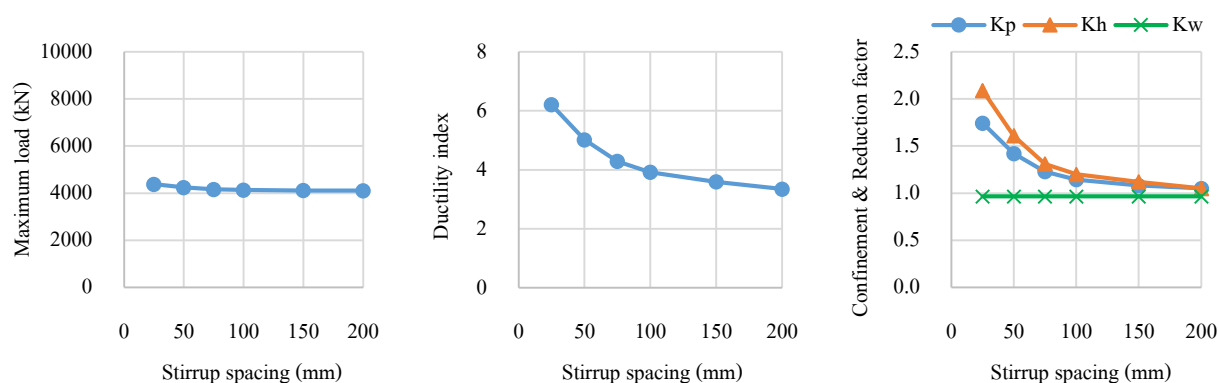
รูปที่ 9 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของกำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ (ระหว่าง 200 ถึง 500 เมกะปาสกาล) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา พบว่า กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณที่สูงขึ้นทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นแต่มีความเหนียวลดลง อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณไม่ส่งผลกระทบต่อตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูง รวมทั้งตัวประกอบการลดค่ากำลังรับแรงของแผ่นอาของเหล็กรูปพรรณ



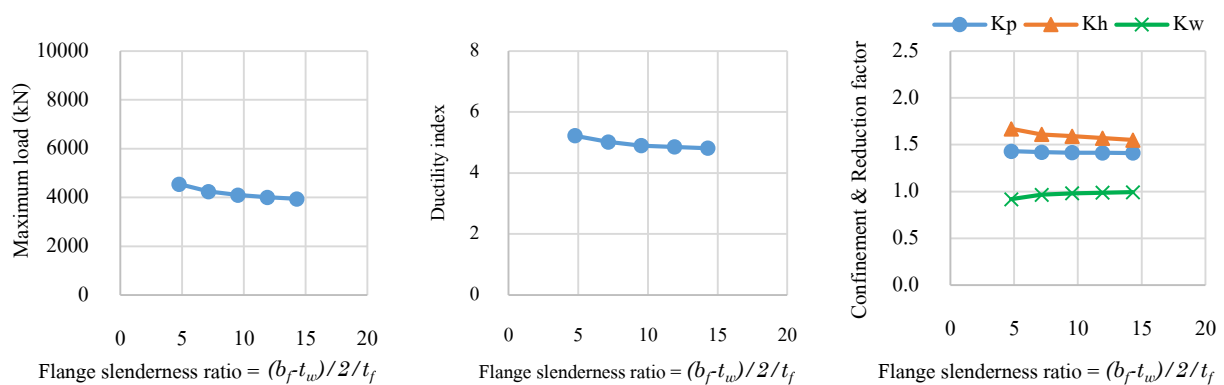
รูปที่ 10 ผลกระทบของกำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ

รูปที่ 11 แสดงผลกระทบของระยะห่างเหล็กปลอก (ระหว่าง 25 ถึง 200 มม.) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา พบว่า ระยะห่างเหล็กปลอกมีผลกระทบเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา แต่มีผลกระทบต่อดัชนีความเหนียวของเสา โดยเสาที่มีระยะห่างเหล็กปลอกสูงจะมีความเหนียวลดลง นอกจากนี้ ระยะห่างเหล็กปลอกที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูงของเสามีค่าลดลง แต่ระยะห่างเหล็กปลอกไม่ส่งผลกระทบต่อตัวประกอบการลดค่ากำลังรับแรงของแผ่นอาของเหล็กรูปพรรณ



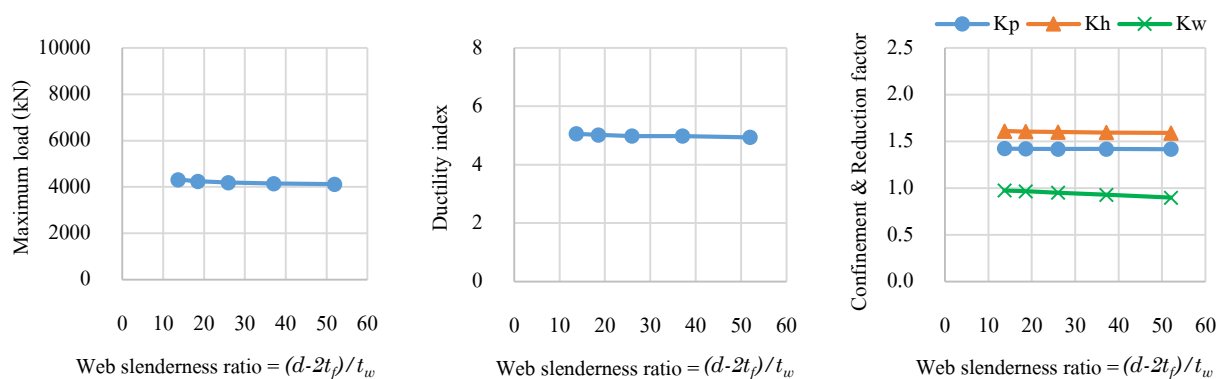
รูปที่ 11 ผลกระทบของระยะห่างเหล็กปลอก

รูปที่ 12 แสดงผลกระทบของความชะลูดของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ (ระหว่าง 4.8 ถึง 14.3) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา พบว่า อัตราส่วนความชะลูดของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณมีผลกระทบเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัดของเสาและดัชนีความเหนียวของเสา โดยเสาที่แผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณมีความชะลูดต่ำจะมีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาที่แผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณมีความชะลูดสูง อาจเกิดเนื่องมาจากอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณต่อคอนกรีตที่ลดลงเมื่อแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณมีความชะลูดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนความชะลูดของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณส่งผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูง รวมทั้งตัวประกอบลดค่ากำลังรับแรงของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ โดยเสาดังกล่าวที่ศึกษาที่มีความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 12 ผลกระทบของความชะลูดแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ

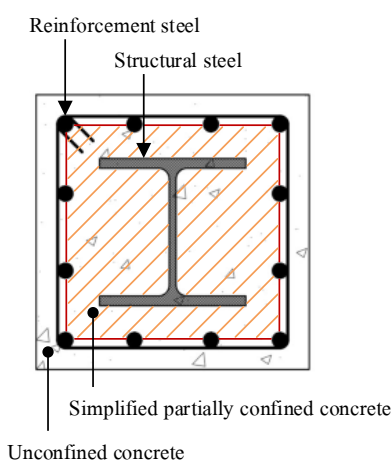
รูปที่ 13 แสดงผลกระทบของความชะลูดของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ (ระหว่าง 13.7 ถึง 52) ต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเสา พบว่า อัตราส่วนความชะลูดของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของเสาและดัชนีความเหนียวของเสา นอกจากนี้ อัตราส่วนความชะลูดของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณส่งผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูง รวมทั้งตัวประกอบลดค่ากำลังรับแรงของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ โดยเสาดังกล่าวที่ศึกษาที่มีความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 13 ผลกระทบของความชะลูดแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ

5. สมการอย่างง่ายสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอสมการคำนวณกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยแบบจำลองอย่างง่ายที่พิจารณาผลของการโอบรัดคอนกรีตและการลดกำลังของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ โดยจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4 พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและระยะห่างเหล็กปลอกมีอิทธิพลต่อค่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนและโอบรัดสูง และตัวประกอบการโอบรัดสูงจะมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการโอบรัดบางส่วนเสมอ

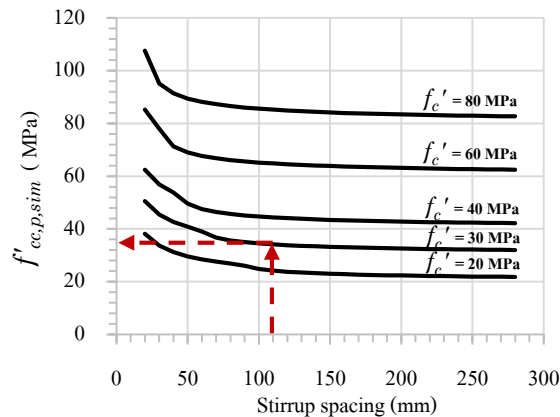


รูปที่ 14 การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสำหรับการคำนวณกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์กลางในแบบจำลองอย่างง่าย

รูปที่ 14 แสดงการแบ่งหน้าตัดคอนกรีตในเสาวัสดุผสมออกเป็น 2 บริเวณ คือ คอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนและคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ทั้งนี้ ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคำนวณได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดที่พิจารณาผลกระทบของการโอบรัดคอนกรีตและการลดกำลังของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ แสดงดังสมการที่ (21) โดยค่าตัวประกอบการลดค่ากำลังของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณสามารถหาได้จากขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.2

$$P_{Simplified} = 0.85(f'_{co}A_{uc} + f'_{cc,p,sim}A_{pc,sim}) + f_{y,sf}A_{sf} + K_w f_{y,sw}A_{sw} + f_{y,sr}A_{sr} \quad (21)$$

สำหรับการพิจารณาผลกระทบจากการโอบรัดคอนกรีตจะใช้ตารางออกแบบ (design chart) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนแบบง่าย (simplified partially confined concrete, $f'_{cc,p,sim}$) กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและระยะห่างเหล็กปลอก โดยตารางออกแบบสามารถจัดทำได้โดยการกำหนดขนาดหน้าตัดเสาและรูปแบบเหล็กเสริมปลอกที่ต้องการ แล้วนำไปคำนวณหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนตามวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 2.1 โดยไม่พิจารณาเหล็กรูปพรรณที่อยู่ด้านใน รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างกราฟสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนสำหรับหน้าตัดเสาขนาด 280 x 280 มม. เหล็กปลอกขนาด 8 มม. ที่มีกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากับ 400 เมกะปาสกาล



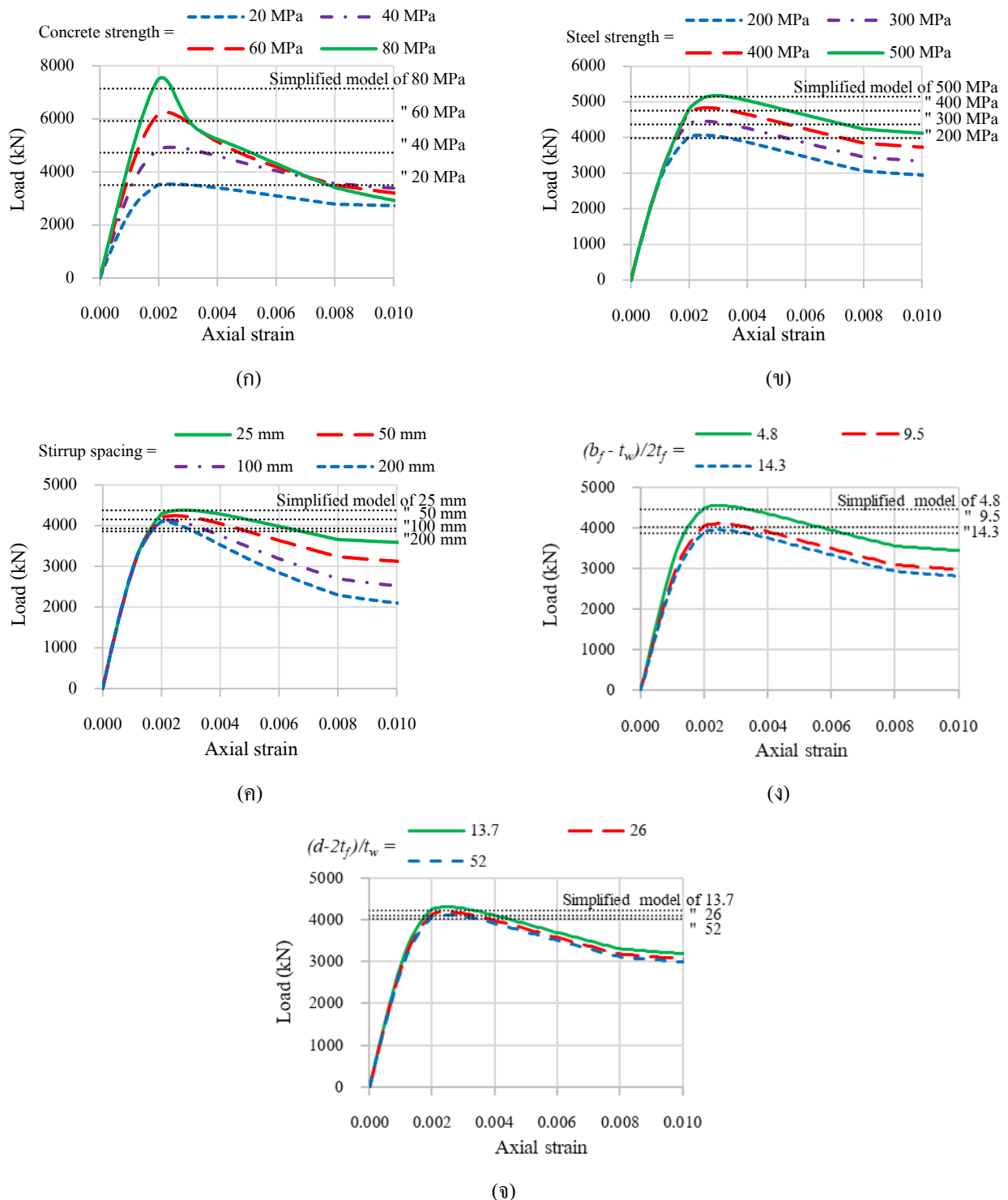
รูปที่ 15 ตัวอย่างกราฟสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนสำหรับหน้าตัดเสาขนาด 280 x 280 มม. เหล็กปลอกขนาด 8 มม. ที่มีกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากับ 400 เมกะปาสกาล

รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเสาตัวอย่างที่ศึกษาในหัวข้อที่ 4 จากการใช้แบบจำลองอย่างละเอียดกับกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ทำนายได้จากแบบจำลองอย่างง่าย โดยพบว่า การคำนวณกำลังรับแรงสูงสุดด้วยวิธีอย่างง่ายมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากการใช้แบบจำลองอย่างละเอียด โดยอัตราส่วนกำลังรับแรงสูงสุดด้วยวิธีอย่างง่ายต่อวิธีอย่างละเอียดเท่ากับ 0.97 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.02 ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าวิธีคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของหน้าตัดเสาวัสดุผสมโดยไม่คิดผลของความชะลูด (สมการที่ 19) ที่มีอัตราส่วนกำลังรับแรงสูงสุดด้วยวิธีกำลังรับแรงของหน้าตัดต่อวิธีอย่างละเอียดเท่ากับ 0.89 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.01 นอกจากนี้ การคำนวณกำลังรับแรงอัดด้วยวิธีอย่างง่ายยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าวิธีอย่างละเอียดอยู่เสมอ ทำให้วิธีอย่างง่ายมีความน่าเชื่อถือในด้านความปลอดภัยในการนำไปใช้งานอีกด้วย

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองวิเคราะห์พฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์กลางของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต แล้วนำแบบจำลองไปศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์กลางของเสา และพัฒนาสมการสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. แบบจำลองการวิเคราะห์ที่พิจารณาผลกระทบจากการโอบรัดคอนกรีตและการลดกำลังแผ่นเอนของเหล็กรูปพรรณ สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีหน้าตัดสมมาตรสองแกนได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต
2. คุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและกำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและความเหนียวของเสาวัสดุผสม โดยเมื่อกำลังของวัสดุมีค่าสูงขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของเสามีค่าสูงขึ้นแต่จะทำให้ดัชนีความเหนียวของเสาตกลง
3. ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกมีผลกระทบต่อความเหนียวมากกว่ากำลังรับแรงอัดของเสา โดยระยะห่างเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้นทำให้ดัชนีความเหนียวของเสามีค่าลดลง



รูปที่ 16 ผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสม
(ก) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ข) กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ (ค) ระยะห่างเหล็กปลอก
(ง) ความชะลูดแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ และ (จ) ความชะลูดแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ

4. ความชะลูดของแผ่นปีกและแผ่นเอวของहेलीกรุปพรณมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดและความเหนียวของเสา
5. คุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและระยะห่างเหล็กปลอกมีผลกระทบที่ชัดเจนต่อค่าตัวประกอบการ โอบรัดคอนกรีต
6. แบบจำลองอย่างง่ายที่นำเสนอสามารถทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองอย่างละเอียด โดยค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองอย่างง่ายมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างละเอียด

สัญลักษณ์

A_{hc}	= พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง	f_{hcc}	= หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กปลอกจากแรงดันออกของคอนกรีต
A_{pc}	= พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน	f'_{le}	= หน่วยแรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีต
$A_{pc,sim}$	= พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนสำหรับแบบจำลองอย่างง่าย	$f'_{le,h}$	= หน่วยแรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง
A_s	= พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ	$f'_{le,p}$	= หน่วยแรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน
$A_{s,f}$	= พื้นที่หน้าตัดของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ	$f'_{le,r}$	= หน่วยแรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากเหล็กปลอก
$A_{s,w}$	= พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ	$f'_{le,s}$	= หน่วยแรงดันโอบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจากเหล็กรูปพรรณ
A_{sh}	= พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดภายในเหล็กปลอก	f_{pc}	= หน่วยแรงของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน
A_{sr}	= พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมทางยาว	f_s	= หน่วยแรงของเหล็กรูปพรรณ
A_{uc}	= พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด	f_{sr}	= หน่วยแรงของเหล็กเสริมทางยาว
b	= ความกว้างแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ	f_{st}	= หน่วยแรงทางขวางภายในแผ่นเอวเหล็กรูปพรรณ
c_x	= ความกว้างของคอนกรีตแกนกลางในแกน x	f_{sv}	= หน่วยแรงทางยาวภายในแผ่นเอวเหล็กรูปพรรณ
c_y	= ความกว้างของคอนกรีตแกนกลางในแกน y	f_{uc}	= หน่วยแรงของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด
d	= ความลึกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ	f_y	= หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็ก
E_c	= โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	$f_{y,f}$	= หน่วยแรงที่จุดครากของแผ่นปีกเหล็กรูปพรรณ
E_{sec}	= โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนท์ที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต	$f_{y,s}$	= หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ
f_c	= หน่วยแรงของคอนกรีต	$f_{y,w}$	= หน่วยแรงที่จุดครากของแผ่นเอวเหล็กรูปพรรณ
f'_{cc}	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด	$k_{e,h}$	= อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูงต่อคอนกรีตแกนกลาง
$f'_{cc,h}$	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง	$k_{e,p}$	= อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนต่อคอนกรีตแกนกลาง
$f'_{cc,p}$	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วน		
$f'_{cc,p,sim}$	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดบางส่วนสำหรับแบบจำลองอย่างง่าย		
f'_{co}	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด		
f_{hc}	= หน่วยแรงของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสูง		

P_{Analy}	= กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาวัสดุผสมจากแบบจำลอง	$\varepsilon_{0.85P_u}$	= ความเครียดเมื่อกำลังของเสาตกลงเหลือ 0.85 เท่าของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา
$P_{Simplified}$	= กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาวัสดุผสมจากแบบจำลองอย่างง่าย	ε_c	= ความเครียดของคอนกรีต
q_u	= หน่วยแรงสูงสุดที่กระทำต่อแผ่นปีกเหล็กรูปพรรณ	ε_{cc}	= ความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด
R	= พารามิเตอร์ในแบบจำลอง Giuffre-Menegotto-Pinto	ε_{co}	= ความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด
s	= ระยะห่างเหล็กปลอก	ε_{hcc}	= ความเครียดที่เกิดขึ้นจริงที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด
s'	= ระยะห่างที่ชัดเจนเหล็กปลอก	ε_{su}	= ความเครียดสูงสุดของเหล็ก
t_f	= ความหนาของแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณ	ε_y	= ความเครียดที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณ
t_w	= ความหนาของแผ่นเอวของเหล็กรูปพรรณ	ρ_c	= อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางยาวต่อคอนกรีตแกนกลาง
w'	= ผลรวมกำลังสองของระยะห่างที่ชัดเจนระหว่างเหล็กเสริมทางยาว	μ	= ดัชนีความเหนียวของเสา
		ν_c	= อัตราส่วนของปัวซองของคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนแรกได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากทุนการศึกษาหลักสูตรดุขฎิบัณฑิต “100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” (The 100th Anniversary Chulalongkorn University Fund for Doctoral Scholarship) และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช [The 90th Anniversary of Chulalongkorn University Fund (Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund)]

เอกสารอ้างอิง

- [1] Task Group 20, S.S.R.C. A specification for the design of steel-concrete composite columns. *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, 1979, 16, pp. 101-115.
- [2] Mirza, S.A. and Skrabek, B.W. Reliability of short composite beam-column strength interaction. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(8), pp. 2320-2339.
- [3] Mirza, S.A. and Skrabek, B.W. Statistical analysis of slender composite beam-column strength. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(5), pp. 1312-1332.
- [4] Ricles, J.M. and Paboojian, S.D. Seismic performance of steel-encased composite columns. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(8), pp. 2474-2494.
- [5] Kato, B. Column curves of steel-concrete composite members. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 39(2), pp. 121-135.
- [6] Chen, C.C. and Yeh, S.C. Ultimate Strength of Concrete Encased Steel Composite Columns. *The Third National Conference on Structural Engineering*, 1996, pp. 2197-2206.
- [7] Tsai, K.C., Lien, Y. and Chen, C.C. Behaviour of axially loaded steel reinforced concrete columns. *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 1996, 8(4), pp. 535-545.

-
- [8] Wang, Y. Tests on slender composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 1999, 49, pp. 25-41.
- [9] Al-Shahari, A.M. Behavior of lightweight aggregate concrete-encased composite columns. *Steel and Composite Structures*, 2003, 3(2), pp. 97-110.
- [10] Chen, CC. and Lin, NJ. Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(5), pp. 424-433.
- [11] Ellobody, E. and Young, B. Numerical simulation of concrete encased steel composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(2), pp. 211-222.
- [12] Ellobody, E., Young, B. and Lam, D. Eccentrically loaded concrete encased steel composite columns. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(1), pp. 53-65.
- [13] C.Y. Liang, C.C. Chen, C.C. Weng, S.Y.L. Yin, J.C. Wang, Axial compressive behavior of square composite columns confined by multiple spirals. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 103, pp. 230-240.
- [14] Zhu, W.Q., Meng, G. and Jia, J.Q. Experimental studies on axial load performance of high strength concrete short columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2014, 167(9), pp. 509-519.
- [15] Ky, V.S., Tangaramvong, S. and Thepchatri, T. Inelastic analysis for the post-collapse behavior of concrete encased steel composite columns under axial compression. *Steel and Composite Structures*, 2015, 19(5), pp. 1237-1258.
- [16] Chen, S. and Wu, P. Analytical model for predicting axial compressive behavior of steel reinforced concrete column. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 128, pp. 649-660.
- [17] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8), pp. 1804-1826.
- [18] Cusson, D. and Paultre, P. Stress-strain model for confined high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(3), pp. 468-477.