



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

Parametric Study of Critical Load on Concrete-Filled Steel Pipe Column under Axial Compression

หทัยกาญจน์ หนันดูญ¹ วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา^{1*} สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Hathaikan Nandun¹ Weeraphan Jiammeepreecha^{1*} Sittisak Jamnam²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: weeraphan.ji@rmu.ac.th; Telephone: 09 1779 0935

วันที่รับบทความ 2 มิถุนายน 2562; วันที่แก้ไขบทความ 16 กรกฎาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 14 สิงหาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ขึ้นส่วนประเภท C3D8R การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และสูง 300 มม. ความหนา 3.0 4.5 และ 6.0 มม. ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำแบบจำลองที่ผ่านการสอบเทียบแล้วมาใช้ในการศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้แก่ ความหนาและความสูงของเสาท่อเหล็ก สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พบว่าความหนาของเสาท่อเหล็กจะส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ นั่นคือการเพิ่มความหนาของเสาท่อเหล็กจะส่งผลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความสูงและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติน้อยมาก

คำสำคัญ

น้ำหนักบรรทุกวิกฤติ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลม แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Abstract

This paper presents a parametric study of the critical loads on the concrete-filled steel pipe column (CFT) under axial compression by ABAQUS program based on C3D8R element. The diameter and height of CFT column are 150 mm and 300 mm, respectively. The thicknesses of the pipe steel columns are varied from 3.0, 4.5, and 6.0 mm. These values were used to validate the finite element model of the CFT column. The results indicate that the accuracy results of the finite element model showed good agreement with the experimental results. Therefore, the finite element model, which is calibrated with the experimental results, is used to study the parametric effects on the failure behavior of CFT columns are thicknesses and heights of steel columns, friction coefficients, which are investigated. The results show that the thickness variation has a major effect on the critical loads, that is, the values of critical load increase as the thickness becomes higher, while the height of CFT column and friction coefficient have a little effect on the critical loads.

Keywords

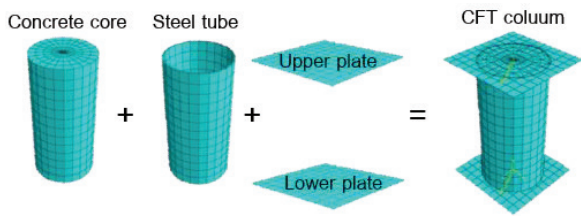
critical loads; concrete-filled steel pipe column; finite element model; experimental result

1. บทนำ

การก่อสร้างได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วจากระบบเดิมซึ่งใช้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่ามีราคาการก่อสร้างสูงอีกทั้งใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนาน ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้าง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel columns) จึงถือเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีสมบัติที่ดีทั้งด้านความแข็งแรง กำลัง ความเหนียว และเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงแผ่นดินไหวนอกจากนี้การผลิตยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ดี ช่วยลดเศษขยะจากไม้แบบ ต้นทุนค่าแรง และระยะเวลาในการก่อสร้างซึ่งทำให้ต้นทุนการก่อสร้างโดยภาพรวมลดลง [1-4]

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีสมบัติเป็นโครงสร้างเชิงประกอบ (composite) ซึ่งได้จากวัสดุพื้นฐานได้แก่ คอนกรีต และเสาท่อเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นปลอกเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวขวาง ได้แก่ โมเมนต์ และแรงเฉือนอันเนื่องมาจากการรับแรงแผ่นดินไหวส่งผลทำให้เสาดังกล่าวมีความเหนียวมากขึ้น [4,5] เพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติ และใช้ปริมาณเหล็กลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เสาเหล็กโครงสร้าง จากข้อดีดังกล่าวทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้รับ

ความนิยมเป็นอย่างสูงในปัจจุบัน [2] Ellobody และคณะ [6] ได้ศึกษาผลการบิดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตพบว่ากำลังของเสาจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของปลอกเหล็กมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงค่าอัตราส่วน 55 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ไปจนกระทั่งอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของปลอกเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 55 ถึง 70 นอกจากนี้ค่ากำลังของเสาจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีตในขณะที่ค่าความเหนียว (ductile) ของเสาจะมีค่าลดลง จากนั้น Han และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาสรรณะของเสาท่อเหล็กผนังบาง (thin-wall tube) และเสาท่อเหล็กผนังบางกรอกคอนกรีตภายใต้แรงบิด (torsion) ซึ่งประกอบด้วยเสาน้ำดัดวงกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบจำลองสำหรับคอนกรีตที่เกิดการเสียหายในช่วงพลาสติก (concrete damage plasticity) พบว่าผลการเปรียบเทียบการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการให้ผลใกล้เคียงกัน จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาสร้างสมการสำหรับการออกแบบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงบิด Liang และ Fragomeni [8] ได้ทำการวิเคราะห์เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่รับแรง



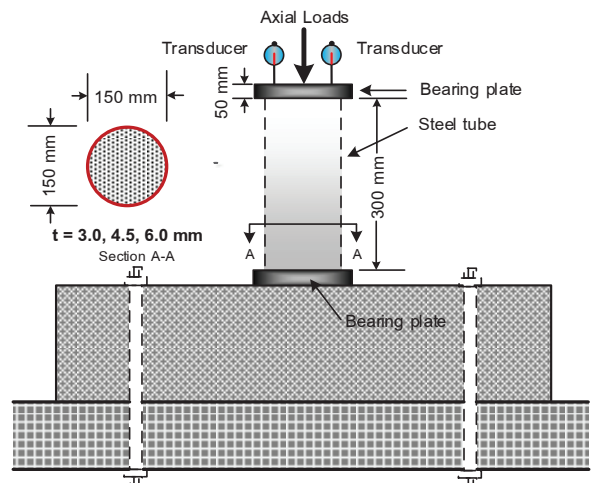
รูปที่ 1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

กระทำแบบเสาเอียงศูนย์ (eccentric loading) เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (moment-curvature curves) ซึ่งพบว่าอัตราส่วนของโมเมนต์สูงสุดต่อโมเมนต์ที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นพบว่าการศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมีต้นทุนสูงและใช้ระยะเวลายาวนาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยการแบ่งรูปทรงโครงสร้างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่มีขนาดเท่ากันตามแนวพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate) และคุณสมบัติของคอนกรีตและเสาท่อเหล็กจะสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3] จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนได้แก่ ความหนา ความสูงของเสาท่อเหล็ก และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

2. การจำลองเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

การวิเคราะห์เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมได้พิจารณากำหนดให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คล้ายตัวอย่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติ



รูปที่ 2 การทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต [3]

จากโปรแกรม ABAQUS ประกอบด้วยแบบจำลองเสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม คอนกรีตภายในเสาท่อเหล็ก แผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกดด้านบน (upper rigid plate) และแผ่นโลหะสำหรับฐานรองรับ (lower rigid plate) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยจำลองการติดตั้งอยู่บนเครื่องทดสอบ UTM (universal testing machine) ดังแสดงในรูปที่ 2

2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) รูปแบบการโก่งเดาะพิจารณาจากการโก่งเดาะต่ำสุด
- 2) พิจารณาอัตราการให้แรงกระทำต่อเวลาที่มีค่าคงที่สม่ำเสมอ
- 3) พิจารณาแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ (friction coefficients)
- 4) กำหนดให้แรงกระทำในแนวแกนกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของแผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกดด้านบน
- 5) ไม่พิจารณาผลกระทบจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ในเสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม

2.2 สมบัติของคอนกรีตและเสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม

การสร้างแบบจำลองเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมโดยกำหนดให้เสาท่อเหล็กรูปพรรณเกิดการวิบัติจาก

ตารางที่ 1 สมบัติที่ใช้วิเคราะห์ท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	150	mm
ความสูง	300	mm
	600	mm
	900	mm
	1200	mm
	1500	mm
ความหนา	3.0	mm
	4.5	mm
	6.0	mm
โมดูลัสยืดหยุ่น	199.8 ⁽¹⁾	GPa
	198.1 ⁽²⁾	GPa
	201.2 ⁽³⁾	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.30	-

** (1) หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับเสาท่อเหล็กหนา 3.0 มม.

(2) หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับเสาท่อเหล็กหนา 4.5 มม.

(3) หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับเสาท่อเหล็กหนา 6.0 มม.

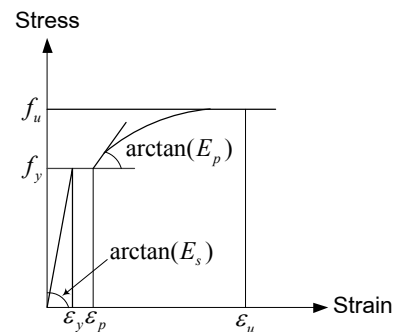
ตารางที่ 2 สมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์คอนกรีต

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	45.8	MPa
ความหนาแน่น	2,313	kg/m ³
โมดูลัสยืดหยุ่น	31,808	MPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.20	-

การคราก ดังแสดงในตารางที่ 1 คอนกรีตวิบัติจากการแตกร้าว และการอัดแตก ดังแสดงในตารางที่ 2 แผ่นโลหะสำหรับทดสอบแรงกดกำหนดให้มีความแข็งแรงสูงเพื่อป้องกันการเสียรูปและสามารถถ่ายแรงกระทำในแนวแกนได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

2.2.1 สมบัติทางกลสำหรับเสาท่อเหล็ก

การกำหนดสมบัติทางกลในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม ABAQUS ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น ความเค้นที่จุด



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [9]

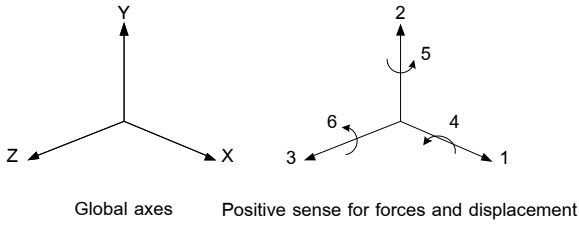
คราก ความเค้นสูงสุด ความเครียดที่จุดคราก และความเครียดสูงสุด ซึ่ง Tao และคณะ [9] ได้นำเสนอค่าที่จุดครากสำหรับเหล็กโครงสร้างในช่วง 200–800 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับเสาท่อเหล็กดังแสดงดังสมการที่ (1)

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_p \\ f_u - (f_u - f_y) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right)^p & \varepsilon_p \leq \varepsilon < \varepsilon_u \\ f_u & \varepsilon \geq \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงยืดหยุ่น (elastic range) สำหรับเสาท่อเหล็ก E_p คือโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงพลาสติก (plastic range) สำหรับเสาท่อเหล็ก ε คือความเครียดสำหรับเสาท่อเหล็ก ε_y คือความเครียดสำหรับเสาท่อเหล็กที่จุดคราก ε_p คือความเครียดของเสาท่อเหล็กที่จุดเริ่มต้นของการทำให้แข็งด้วยความเครียด (onset of strain hardening of steel tube) ε_u คือความเครียดสูงสุดของเสาท่อเหล็ก f_y คือความเค้นของเสาท่อเหล็กที่จุดคราก และ f_u คือความเค้นสูงสุดของเสาท่อเหล็ก

2.2.2 สมบัติทางกลสำหรับคอนกรีต

สมบัติทางกลสำหรับคอนกรีตที่กรอกภายในได้จากการพิจารณาผลของการโอบรัดอันเนื่องมาจากเสาท่อเหล็กโดยปฏิกิริยาเชิงประกอบ (composite action) ระหว่างคอนกรีต



รูปที่ 4 ระบบพิกัดฉากและการเคลื่อนที่

และเสาท่อเหล็ก ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาค่าแรงปฏิกิริยาดังกล่าวได้โดยการพิจารณาเลือกใช้แบบจำลองระหว่างความเค้นและความเครียดจากการกำหนดพฤติกรรมของคอนกรีตที่เกิดการเสียหายในช่วงพลาสติก (concrete damage plasticity) โดยมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 ค่า [2,10] ดังนี้ ψ คือมุมการขยายตัว (dilation angle) K_c คือค่าอัตราส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในลำดับที่สอง (second invariant) ของแรงดึงต่อแรงอัดในแนวเมอริเดียน f'_{b0} / f'_c คือค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตภายใต้แรงดันด้านข้าง ϵ คือค่าระยะเยื้องของการไหลแบบศักย์ (flow potential eccentricity) และ μ คือพารามิเตอร์ของความหนืด

2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตโดยการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงได้ดังสมการ [11]

$$[K]\{D\} + \{F\}_p + \{F\}_g + \{F\}_{\epsilon_0} + \{F\}_{\sigma_0} - \{R\} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ $[K]$ คือเมทริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง $\{F\}_p$ คือเวกเตอร์แรงที่กระทำต่อพื้นผิว $\{F\}_g$ คือเวกเตอร์แรงของวัตถุ $\{F\}_{\epsilon_0}$ คือเวกเตอร์แรงเนื่องจากความเครียดเริ่มต้น $\{F\}_{\sigma_0}$ คือเวกเตอร์แรงที่จุดต่อเนื่องจากความเค้นเริ่มต้น $\{R\}$ คือเวกเตอร์แรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อ และ $\{D\}$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของจุดต่อในโครงสร้าง ซึ่งสามารถนิยามได้ดังสมการ

$$[K] = \sum \int [B]^T [E] [B] dV \quad (3)$$

$$\{F\}_p = -\sum \int [N]^T [p] dV \quad (4)$$

$$\{F\}_g = -\sum \int [N]^T [g] dV \quad (5)$$

$$\{F\}_{\epsilon_0} = -\sum \int [B]^T [E] \{\epsilon_0\} dV \quad (6)$$

$$\{F\}_{\sigma_0} = \sum \int [B]^T \{\sigma_0\} dV \quad (7)$$

โดยที่ $[B]$ คือเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูปสำหรับเวกเตอร์บริเวณจุดต่อ $[E]$ คือเมทริกซ์ของสติฟเนสยืดหยุ่น และ dV คือปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย จากนั้นใช้กระบวนการ risk method ซึ่งเป็นกระบวนการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ร่วมกับวิธีการเพิ่มความยาวส่วนโค้งโดยรูปแบบการคำนวณซ้ำ (iterative method) จากการหาค่าเพิ่มขึ้นสำหรับการเคลื่อนที่ดังสมการ

$$P_{total} = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0) \quad (8)$$

โดยที่ P_0 คือน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลม P_{ref} คือแรงอ้างอิงในสภาวะเริ่มต้นของกระบวนการทำซ้ำ P_{total} คือแรงที่สภาวะรอบของการทำซ้ำ และ λ คือแฟคเตอร์สัดส่วนของแรงกระทำ

2.4 เงื่อนไขจุดรองรับ

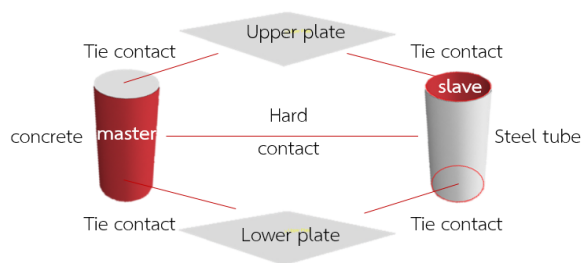
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมได้ทำการพิจารณากำหนดเงื่อนไขจุดรองรับในระบบพิกัดฉาก (cartesian coordinate) ซึ่งมีทิศทางแรงและการเคลื่อนที่จุดต่อดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกำหนดเงื่อนไขจุดรองรับของแผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกดด้านบนดังสมการ

$$U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0 \quad (9)$$

และกำหนดจุดรองรับบริเวณแผ่นโลหะสำหรับฐานรองรับแบบยึดหมุนโดยสมบุนด้านล่างดังสมการ

$$U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_3 = 0 \quad (10)$$

โดยที่ U_1, U_2, U_3 คือการเคลื่อนที่ตามแนวแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และ UR_1, UR_2, UR_3 คือการหมุนรอบแนวแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ประเภทพื้นผิวสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.5 การจำลองผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อวัสดุ

การจำลองโครงสร้างจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS [10] จำเป็นต้องกำหนดประเภทผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อของวัสดุระหว่าง master และ slave โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมได้พิจารณากำหนดให้ Master คือผิวด้านนอกของคอนกรีตที่ถูกกรอกภายในเสาท่อเหล็ก รวมทั้งแผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกดด้านบนและฐานรองรับ ในขณะที่ slave คือผิวด้านในของเสาท่อเหล็กดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเลือกใช้พื้นผิวสัมผัสแบบแข็ง (hard contact) สำหรับการจำลองผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับเสาท่อเหล็กในทิศทางตั้งฉาก (normal direction) และผิวสัมผัสแบบผูก (tie contact) สำหรับรอยต่อระหว่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตกับแผ่นโลหะเพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นส่วนทั้งสองจะเคลื่อนที่และหมุนไปพร้อมกันโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับพื้นผิวสัมผัสแบบแข็งมีค่าเท่ากับ 0.60 และผิวสัมผัสแบบผูกเท่ากับ 0.25 [12]

2.6 การจำลองรูปแบบของชิ้นส่วน

2.6.1 แผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกด

การกำหนดชิ้นส่วนแผ่นโลหะสำหรับการทดสอบแรงกดด้านบนและฐานรองรับ พิจารณาเลือกใช้รูปแบบ R3D4 ประเภทชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (rigid element) ที่มีจำนวน 4 จุดต่อดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวไม่เกิดการเสียรูปขณะถ่ายแรงกระทำลงสู่เสาและให้แรงกระทำในแนวแกนได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

2.6.2 เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

การกำหนดรูปแบบชิ้นส่วนสำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมจะพิจารณากำหนดให้การเสียรูปที่จุดต่อบริเวณชิ้นส่วนย่อยสามารถประมาณการเคลื่อนที่ในแนวแกนด้วยระบบพิกัดฉาก กล่าวคือ x, y และ z มีการเคลื่อนที่ u, v และ w ตามลำดับ โดยพิจารณาเลือกใช้ชิ้นส่วนย่อยประเภท C3D8R (8-node linear brick reduced integration hourglass control) [11] ดังแสดงในรูปที่ 8

2.7 การจำลองชิ้นส่วนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติพิจารณาเลือกใช้ชิ้นส่วนประเภท brick element (C3D8R) [10] ซึ่งแบ่งชิ้นส่วนตามแนวพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate system) ที่มีจำนวน 8 จุดต่อดังแสดงในรูปที่ 9 โดยใช้ชิ้นส่วนย่อยสำหรับเสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลมและคอนกรีต 312 และ 1560 ชิ้น ตามลำดับ ในที่นี้รูปทรงเรขาคณิตสำหรับชิ้นส่วนย่อยกับการเคลื่อนที่ของจุดต่อและความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับความเครียดจะแสดงดังสมการ

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_i N_i \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_i N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (12)$$

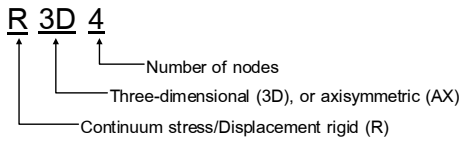
โดยที่ N_i คือฟังก์ชันรูปร่างสำหรับประมาณค่าการเสียรูปและค่าเวกเตอร์ความเครียด $\{\epsilon\}$ นิยามได้จากสมการ

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (13)$$

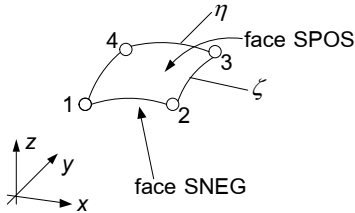
โดยที่ $\{d\}$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน

3. การคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกน

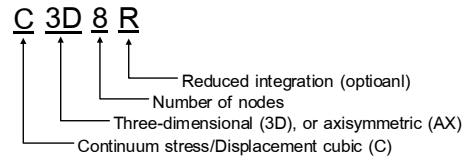
มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเชิงประกอบสำหรับชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนจะมี 2 มาตรฐาน ดังต่อไปนี้



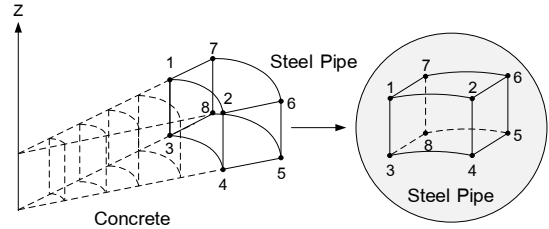
รูปที่ 6 สัญลักษณ์ของรูปแบบของชิ้นส่วน R3D4 [8]



รูปที่ 7 ชิ้นส่วนย่อยแบบแข็งเกร็ง [10]



รูปที่ 8 สัญลักษณ์ของรูปแบบของชิ้นส่วน C3D8R [10]



รูปที่ 9 จำลองการแบ่งชิ้นส่วนตามแนวพิกัดทรงกระบอก

3.1 มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 2005

มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 2005 [13] สมการในการคำนวณหา กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน สำหรับการออกแบบเสาเชิงประกอบดังแสดงในสมการ

$$P_n = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (14)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเสาท่อเหล็ก A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต F_y คือหน่วยแรงครากของเสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม และ f'_c คือกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต

3.2 มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ AISC 2005

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก AISC 2005 [14] ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการสภาวะขีดจำกัดสูงสุดหรือวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก โดยมีการกำหนดเกณฑ์สำหรับออกแบบเสาเชิงประกอบและสมการในการคำนวณดังแสดงในสมการ

$$P_n = P_o \left[0.658^{\frac{P_o}{P_e}} \right] \text{ เมื่อ } P_e \geq 0.44 P_o \quad (15)$$

$$P_n = 0.877 P_e \text{ เมื่อ } P_e < 0.44 P_o \quad (16)$$

$$P_o = A_s F_y + A_{sr} F_{yr} + 0.85 A_c f'_c \quad (17)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 (EI_{eff})}{(KL)^2} \quad (18)$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + 0.5 E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad (19)$$

$$C_1 = 0.1 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.3 \quad (20)$$

โดยที่ A_{sr} คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามยาว E_c คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาท่อเหล็ก F_{yr} คือหน่วยแรงครากของเหล็กเสริมตามยาว I_c คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีต I_s คือโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาท่อเหล็ก I_{sr} คือโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริมตามยาว K คือค่าตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล และ L คือความยาวเสาที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง

4. ผลการวิเคราะห์

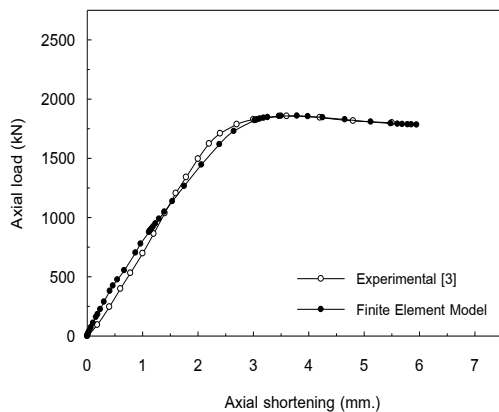
การศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS [10] จำเป็นจะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเปรียบเทียบจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยของจักขดา และ กมลรัตน์ [3] ที่ได้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่มีความสูงเสา 300 มม. ความหนาของท่อเหล็กขนาด 3.0 4.5

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตาม

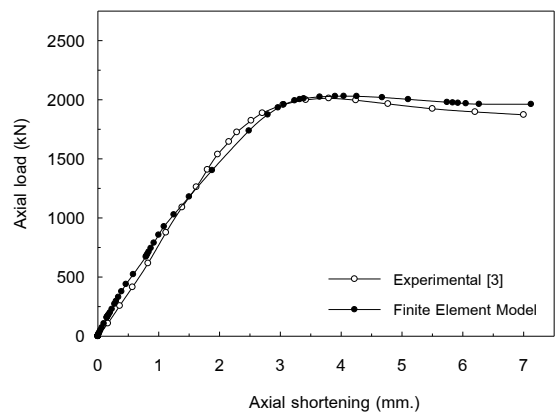
ความหนา ของเสาท่อเหล็ก (mm)	งานวิจัยนี้ P_{fem} (kN)	ผลการทดสอบ [3]		มาตรฐาน ACI (2005) [13]		มาตรฐาน AISI (2005) [14]	
		P_{exp} (kN)	P_{fem} / P_{exp}	P_{aci} (kN)	P_{fem} / P_{aci}	P_{aisi} (kN)	P_{fem} / P_{aisi}
3.0	1,858.35	1,857.80	1.0003	1,329.34	1.3979	1,324.02	1.4036
4.5	2,030.37	2,040.70	0.9949	1,547.99	1.3116	1,547.93	1.3117
6.0	2,461.63	2,489.50	0.9888	1,837.88	1.3394	1,837.81	1.3394

และ 6.0 มม. พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งพฤติกรรมการรับแรงในช่วงแรกมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (linear behavior) หลังจากนั้นพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตจะเข้าสู่ช่วงไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear behavior) นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก

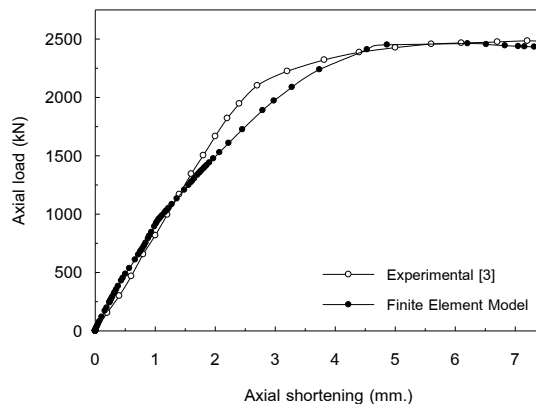
บรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่ได้จากแบบจำลองและการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดจะอยู่ที่ร้อยละ 0.03 สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 3.0 มม. และจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.51 และ 1.12 สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 4.5 และ 6.0 มม. ตามลำดับ



(ก) เสาท่อเหล็กความหนา 3.0 มม.



(ข) เสาท่อเหล็กความหนา 4.5 มม.

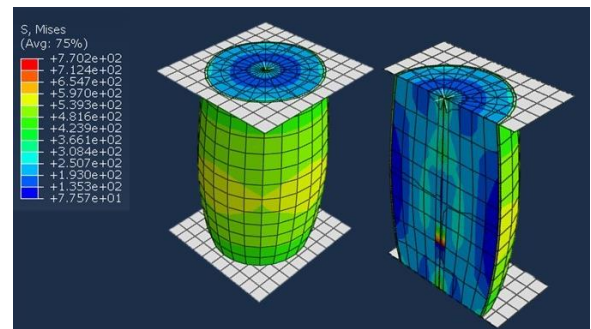


(ค) เสาท่อเหล็กความหนา 6.0 มม.

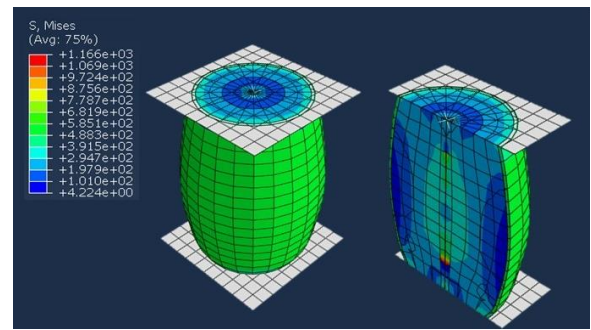
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3]

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระยะการเสีรูปที่น้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่มีความสูง 300 มิลลิเมตร

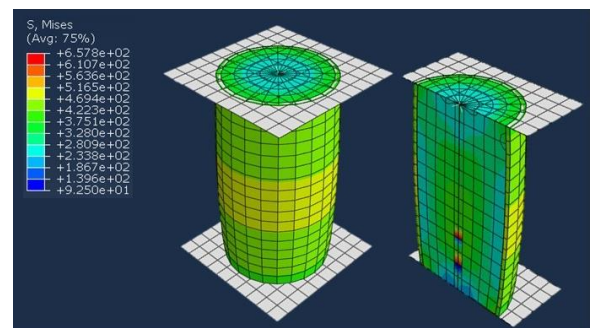
ความหนาของ เสาท่อเหล็ก (มม.)	งานวิจัยนี้ (มม.)	ผลการ ทดสอบ [3] (มม.)	ร้อยละ ความ แตกต่าง
3.0	3.79	3.60	5.28
4.5	4.04	3.80	6.32
6.0	6.20	7.20	13.89



(ก) เสาท่อเหล็กความหนา 3.0 มม.



(ข) เสาท่อเหล็กความหนา 4.5 มม.



(ค) เสาท่อเหล็กความหนา 6.0 มม.

รูปที่ 11 ความเค้นสูงสุดสำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

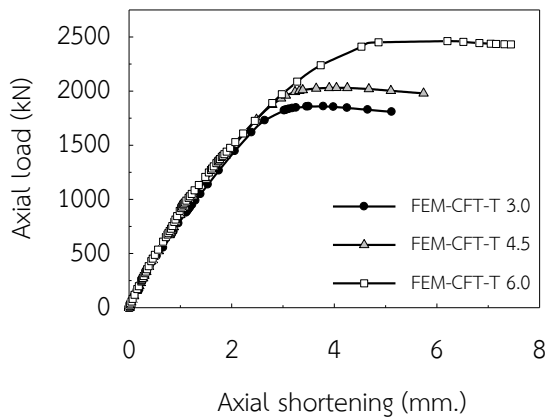
เมื่อเปรียบเทียบจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3] และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมการการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 2005 [13] และมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ AISC 2005 [14] จะพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 31.16 และ 31.17 ตามลำดับ สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 4.5 มม. และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 39.79 และ 40.36 ตามลำดับ สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 6.0 มม. ตารางที่ 4 แสดงค่าการเสีรูประหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3] ซึ่งมีค่าความแตกต่างต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 5.28 สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 3.0 มม. และมีค่าความแตกต่างสูงสุดเท่ากับร้อยละ 13.89 สำหรับกรณีที่เสาท่อเหล็กมีความหนา 6.0 มม. นอกจากนี้ยังพบว่าความเค้นสูงสุดในเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลม เกิดขึ้นบริเวณปลายด้านล่างของเสาทั้ง 3 กรณีได้แก่เสาท่อเหล็กที่มีความหนา 3.0 4.5 และ 6.0 มม. ดังแสดงในรูปที่ 11

4.1 การแปรเปลี่ยนความหนาของเสาท่อเหล็ก

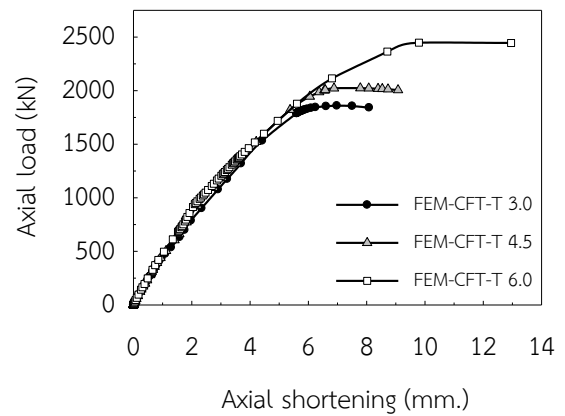
การศึกษาพารามิเตอร์ความหนาของเสาท่อเหล็กที่ส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลม จะสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 1 โดยที่ความหนาจะแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 3.0 4.5 และ 6.0 มม. ผลการศึกษาพบว่าความหนาของเสาท่อเหล็กจะส่งผลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสามีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12 จากการสอบเทียบผลระหว่างแบบจำลองและการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว จะสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาโดยการแปรเปลี่ยนความสูงของเสาและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในลำดับต่อไป

4.2 การแปรเปลี่ยนความสูงของเสาท่อเหล็ก

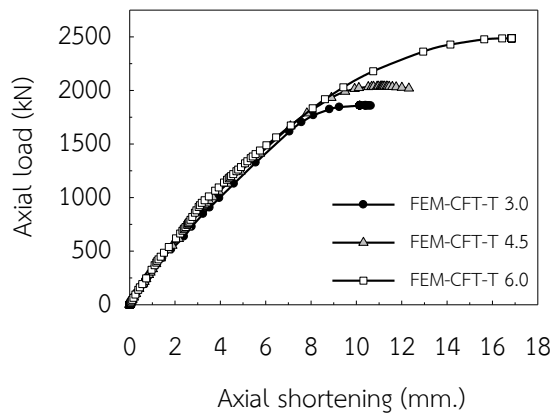
การศึกษาพารามิเตอร์ความสูงของเสาท่อเหล็กที่ส่งผลกระทบต่อค่าการวิบัติ โดยการแปรเปลี่ยนความสูง 300 600



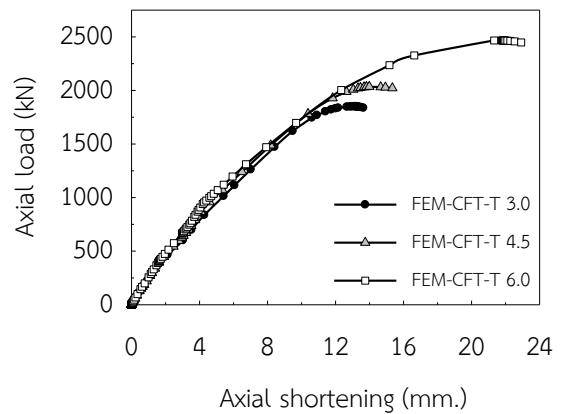
(ก) เสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตสูง 300 มิลลิเมตร



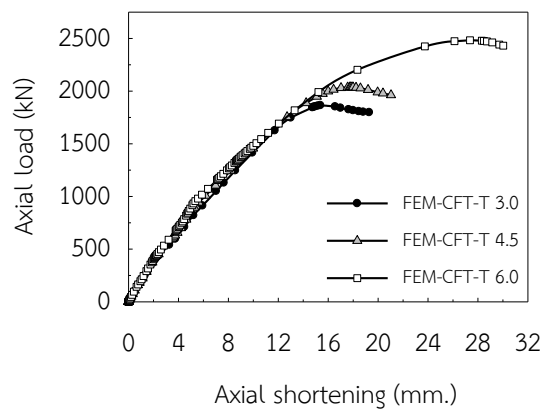
(ข) เสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตสูง 600 มิลลิเมตร



(ค) เสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตสูง 900 มิลลิเมตร

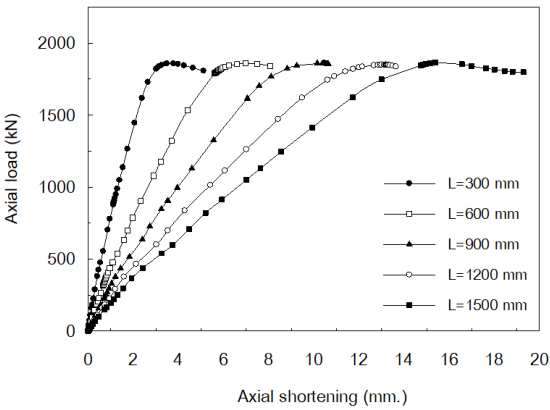


(ง) เสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตสูง 1200 มิลลิเมตร

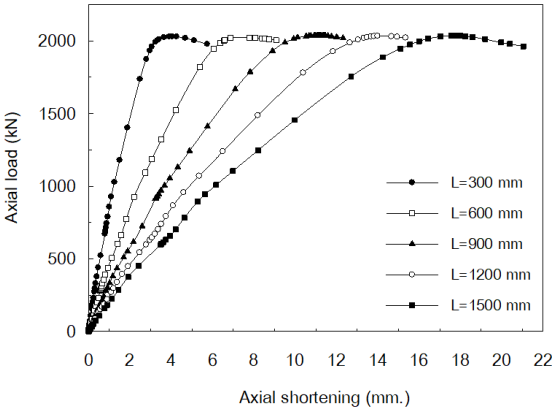


(จ) เสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตสูง 1500 มิลลิเมตร

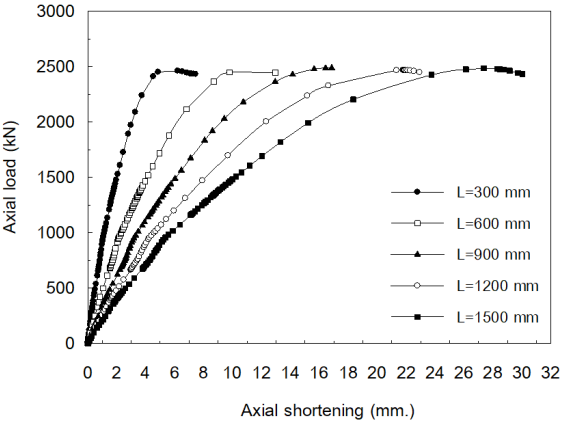
รูปที่ 12 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของเสาท่อนเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีต



(ก) เสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตหนา 3.0 มิลลิเมตร



(ข) เสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตหนา 4.5 มิลลิเมตร



(ค) เสาท่อเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตหนา 6.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 ผลการแปรเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและระยะการเสียรูปของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่มีความสูง 300 มิลลิเมตร

ความหนาของเสาท่อเหล็ก (มม.)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	น้ำหนักบรรทุกวิกฤติ (kN)	ค่าการเสียรูปตามแนวแกน
3.0	0.25	1,848.04	3.71
	0.40	1,846.47	3.26
	0.60	1,858.35	3.79
	0.80	1,858.81	3.41
	1.00	1,865.29	3.70
4.5	0.25	2,016.06	3.85
	0.40	2,025.12	4.06
	0.60	2,030.37	4.04
	0.80	2,025.82	4.40
	1.00	2,034.34	4.16
6.0	0.25	2,448.42	5.81
	0.40	2,471.47	5.73
	0.60	2,461.63	6.20
	0.80	2,492.60	5.62
	1.00	2,472.15	4.93

น้ำหนักบรรทุกวิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 13 เนื่องจากตัวอย่างเสา มีขนาดความสูงน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาท่อเหล็ก ดังนั้นค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและลักษณะการวิบัติจึงมีค่าใกล้เคียงกันเพราะเป็นการวิบัติแบบเสาสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าความลาดชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปมีค่าลดลงเมื่อความสูงของเสาท่อเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการแปรเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

การจำลองโครงสร้างจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS [10] จำเป็นต้องกำหนดประเภทผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อของวัสดุระหว่าง master และ slave ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเลือกใช้พื้นผิวสัมผัสแบบแข็ง (hard contact) ในทิศทางตั้งฉากของเสาท่อเหล็กและคอนกรีตที่ถูกกรอก

รูปที่ 13 ผลการแปรเปลี่ยนความสูงของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

900 1200 และ 1500 มม. และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าการแปรเปลี่ยนความสูงส่งผลโดยตรงต่อระยะการเสียรูปในแนวแกน แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า

ภายในทำให้ความเค้นระหว่างพื้นผิวสามารถส่งผ่านได้ในบริเวณรอยต่อของวัสดุ สำหรับผิวสัมผัสระหว่างแผ่นปิดหัวเสาบริเวณด้านบนกับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตเป็นผิวสัมผัสแบบผูก (tie contact) เพื่อให้แน่ใจว่าการเคลื่อนที่และการหมุนของจุดต่อเป็นค่าเดียวกัน ดังนั้นในหัวข้อย่อหน้านี้จึงเป็นการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่าการเสียรูปตามแนวแกน ณ ตำแหน่งที่แรงกระทำมีค่าสูงสุด โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานผิวสัมผัสแข็งตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.00 และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานผิวสัมผัสแบบผูกเท่ากับ 0.25 ซึ่งจะพบว่าผลของการแปรเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและค่าการเสียรูปตามแนวแกนน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 5

5. บทสรุป

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม ABAQUS และกระบวนการ risk method ซึ่งเป็นกระบวนการนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับวิธีการเพิ่มความยาวส่วนโค้ง สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะการหดตัวตามแนวแกนสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3] โดยที่ความหนาของเสาท่อเหล็กส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมนั้นคือเมื่อความหนาของเสาท่อเหล็กมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมีค่าเพิ่มสูงขึ้น
- 2) การแปรเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่มีความสูง 300 มม. ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกวิกฤติและระยะการเสีย

รูปตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตหน้าตัดวงกลมน้อยมาก

- 3) การแปรเปลี่ยนความสูงของเสาท่อเหล็กจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อระยะการเสียรูป แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนลำดับที่ 1 และ 2 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท สยาม เอเอ็นจี จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท สัญญาเลขที่ MSD61I0003 สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญกิจ ศิริยานนท์, วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา, จักรดา อารังวุฒิ, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, คมกร ไชยเดชาธร. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกน. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, นครราชสีมา ประเทศไทย 18-20 กรกฎาคม 2560. 2560. หน้า 320-325.
- [2] Al-Ani YR. Finite element study to address the axial capacity of the circular concrete-filled steel tubular stub columns. *Thin-Walled Structures*. 2018; 126: 2-15.
- [3] จักรดา อารังวุฒิ, กมลรัตน์ ฤทธิ์รักษา. ผลกระทบของลักษณะแรงกระทำต่อตัวอย่างท่อเหล็กหน้าตัดวงกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูง. *วารสารมทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2559; 9(1): 145-160.
- [4] นันทิกาน นามวิจิตร, สิทธิชัย แสงอาทิตย์, จักรดา อารังวุฒิ, ศาสน์ สุขประเสริฐ. พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2554; 4(1): 1-15.

- [5] Tomii M, Sakino K, Watanabe K, Xiao Y. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. In: *Proceeding of International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin. China.* 1985. p. 19–26.
- [6] Ellobody E, Young B, Lam D. Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research.* 2006; 62(7): 706–715.
- [7] Han LH, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members. *Journal of Constructional Steel Research.* 2014; 100: 211–228.
- [8] Liang QQ, Fragomeni S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research.* 2010; 66(2): 159–169.
- [9] Tao Z, Wang ZB, Yu Q. Finite Element Modelling of Concrete-Filled Steel Stub Columns under Axial Compression. *Journal of Constructional Steel Research.* 2013; 89: 121–131.
- [10] Abaqus. *ABAQUS Standard User's Manual.* Hibbit: Karlsson and Sorensen, Inc; 2017.
- [11] Cook RD, Malkus DS, Plesha ME, Witt RJ. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis.* New York: John Wiley & Sons, Inc; 2002.
- [12] Li G, Zhang R, Yang Z, Zhou B. Finite element analysis on mechanical performance of middle long CFST column with inner I-shaped CFRP profile under axial loading. *Structures.* 2017; 9: 63–69.
- [13] ACI Committee 318. *ACI318-02 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary.* USA: American Concrete Institute; 2005.
- [14] AISC. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings.* American Institute of Steel Construction. USA: 2005.