

พฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคานเหล็กกล่องกลวงกับเสาเหล็กกล่องกลวงเติมคอนกรีต

Behavior of Connections between Hollow Section Steel Beam to Concrete in filled Column

ประภิต ชมชื่น¹ ธีรพล รักษาศิลป์^{2*} พนิดา สีมารุ³ และ ชลดา เลาะพอ⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: teerapol.golf339@gmail.com

บทคัดย่อ

การเติมคอนกรีตลงในเสาเหล็กกล่องกลวงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรับแรงอัดขององค์อาคารเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง เนื่องจากคอนกรีตที่เติมลงไปนั้นนอกจากจะรับกำลังอัดได้สูงตามความสามารถรับกำลังอัดของคอนกรีตแล้วยังมีกำลังสูงกว่ากำลังระบุเนื่องจากได้รับการโอบรัดสมบูรณ์โดยรอบด้วยเหล็กกล่อง อย่างไรก็ตาม การเติมคอนกรีตลงในเสาไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพรับแรงอัดในเสาเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคานกับเสาดัง การศึกษานี้ศึกษาผลของการเติมคอนกรีตลงในเสาที่มีต่อพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคานกับเสาเหล็กกล่องกลวงหน้าตัดปิดที่ความกว้างคานน้อยกว่าความกว้างเสาด้วยการทดสอบแบบคานยื่น ผลการศึกษาพบว่า การเติมคอนกรีตลงในเสาส่งผลต่อพฤติกรรมของรอยต่ออย่างมีนัยสำคัญ สติพเนสเริ่มต้นของรอยต่อเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า และกำลังรับโมเมนต์ดัดพลาสติกของรอยต่อเพิ่มขึ้นประมาณ 3.9 เท่าเมื่อเทียบกับรอยต่อที่เสาไม่ได้เติมคอนกรีต

คำสำคัญ: รอยต่อคาน-เสา, เหล็กกล่องกลวง, เสาเหล็กเติมคอนกรีต

Abstract

Infilling concrete into hollow section steel columns is a practical method to enhance the axial capacity of the members. The in filled concrete strength is typically higher than the specific value because the close section hollow steel is perfectly confined container. However, infilling concrete into the columns is not only enhance the axial capacity of the members but also affects to behavior of beam-to-columns connection. This paper aims to study about the influence of infilling concrete into the columns on the behavior of beam-to-column connections which the beam width is smaller than the column width. Cantilever tests of the studied beam-to-column connections are performed. Results show that initial stiffness of the connection with in filled concrete is increased about 2.5 time while moment capacity of the connection with in filled concrete is increased about 3.9 time compared to those without concrete.

Keywords: Beam-to-Column Connections, Hollow Section Steel, Concrete In filled Columns

1. คำนำ

โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมในการใช้งานเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ใช้เวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งโครงสร้างเหล็กที่นิยมใช้หนึ่งในนั้นก็คือโครงสร้างเหล็กกล่อง เพราะเหล็กกล่องมีน้ำหนักเบาแต่สามารถรับแรงได้ดีเพราะรูปแบบของหน้าตัด แต่เมื่อใช้เหล็กกล่องมาเป็นเสาที่มีการเชื่อมต่อกับคานนั้นจะทำให้กำลังในการรับแรงอัดของเสาลดลงจึงได้มีการคิดวิธีการเพิ่มกำลังให้กับเสาเหล็กกล่องโดยวิธีที่ใช้กันมีหลายวิธีหนึ่งในนั้นคือการเติมคอนกรีตลงในช่องว่างของเสาเหล็กกล่องเพิ่มกำลังในการรับแรงอัด แต่การเติมคอนกรีตนั้นยังส่งผลให้พฤติกรรมและกำลังของรอยต่อระหว่างเสาที่มีการเติมคอนกรีตกับคานนั้นมีรูปแบบเปลี่ยนไปด้วย ในการศึกษาที่ผ่านมา Eurocode 3 [1] เป็นแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างเหล็ก [2]-[10] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับรอยต่อของเสาเหล็กกล่องกับคานที่ไม่มีการเติมคอนกรีต และมีการเติมคอนกรีต ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถใช้มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของรอยต่อที่ทำการวิจัย ซึ่งการศึกษารอยต่อที่มีการเติมคอนกรีตในเสาเหล็กกล่องที่ผ่านมา นั้นได้แสดงให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของรอยต่อ ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบรอยต่อด้วย ดังนั้นบทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างเสาเหล็กกล่องที่มีการเติมคอนกรีตกับคานเหล็กกล่องที่มีขนาดความกว้างคานน้อยกว่าความกว้างเสาที่เชื่อมต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมรอบหน้าตัดคาน เพื่อที่จะทำนายรูปแบบของรอยต่อต่อไป

2. รอยต่อคาน-เสาที่ศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษารอยต่อของเสาเหล็กกล่องกับคานเหล็กกล่องที่ความกว้างคานน้อยกว่าความกว้างเสาโดยมีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 2 กรณี คือ 1) กรณีที่ไม่มีการเติมคอนกรีต E00-XXX-YY (XXX คือ ขนาดเสาดตัวอย่างทดสอบ, YY คือ ลำดับตัวอย่างทดสอบ) 2) กรณีที่มีการเติมคอนกรีต E10-XXX-YY แต่ละกรณีจะมี 2 รูปแบบ คือ 1) กรณีเสาขนาด 150 x 150 x 3.2 มม. 2) กรณีเสาขนาด 125 x 125 x 3.2 มม. โดยขนาด

ของคานที่ใช้ในการทดสอบในทุกตัวอย่างมีขนาดเท่ากันทุกตัวอย่างคือ คานขนาด 75 x 125 x 3.2 มม. รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบมีดังต่อไปนี้

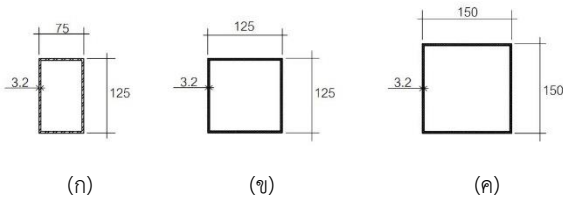
ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดเสา (มม.)	การเติมคอนกรีต	รูปแบบการเชื่อมต่อ
E00-125	125 x 125	ไม่มี	เชื่อมรอบหน้าตัดคาน
E00-150	150 x 150	ไม่มี	เชื่อมรอบหน้าตัดคาน
E10-125	125 x 125	มี	เชื่อมรอบหน้าตัดคาน
E10-150	150 x 150	มี	เชื่อมรอบหน้าตัดคาน

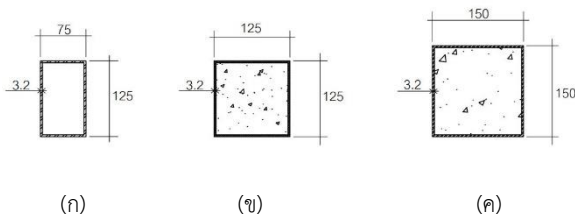
หมายเหตุ* ขนาดของคานตัวอย่างทดสอบมีขนาดเท่ากันคือ 75 x 125 มม.

2.1 คานและเสา

เสาที่ใช้เป็นเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาด 150 x 150 x 3.2 มม. และ 125 x 125 x 3.2 มม. ขนาดของคานที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 125 x 75 x 3.2 มม. เสาที่ศึกษาทั้งแบบไม่เติมและเติมคอนกรีต ดังแสดงใน รูปที่ 1 และ รูปที่ 2 ตามลำดับ



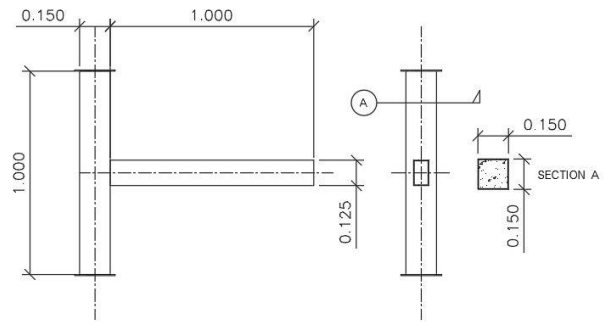
รูปที่ 1 (ก) หน้าตัดคาน (ข)และ(ค) หน้าตัดเสากรณีไม่เติมคอนกรีต



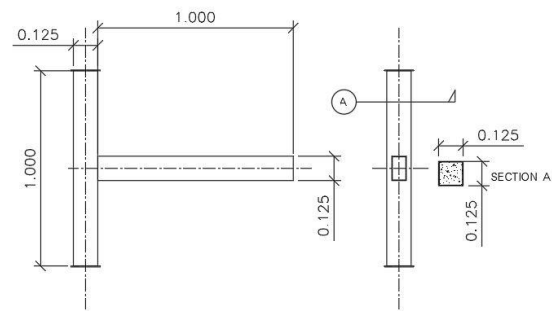
รูปที่ 2 (ก) หน้าตัดคาน (ข)และ(ค) หน้าตัดเสากรณีเติมคอนกรีต

2.2 รายละเอียดของรอยต่อและการทดสอบ

รอยต่อที่ศึกษาเป็นรอยต่อคาน-เสาที่มีการเติมคอนกรีต เสามีความสูง 1 เมตร โดยคานเชื่อมต่อกับเสาที่กึ่งกลางความสูงของเสา โดยคานมีความยาว 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 โดยรูปแบบในการเชื่อมต่อด้วยการเชื่อมรอบหน้าตัดคาน ขนาดขาเชื่อม 4 มม. เกรดลวดเชื่อมที่ใช้คือ E60 การทดสอบในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

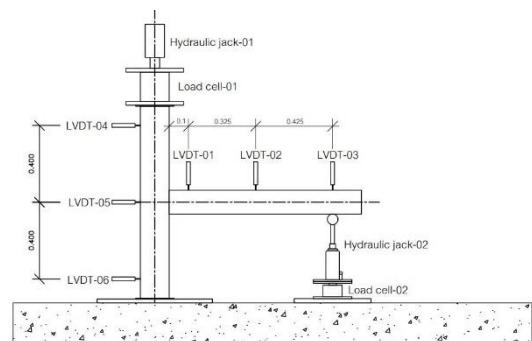


รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบขนาดเสา 150 x 150



รูปที่ 4 ตัวอย่างทดสอบขนาดเสา 125 x 125

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบในรูปแบบของคานยื่น ซึ่งได้มีการให้แรงกระทำที่หัวเสาเป็น Pre-loading 7.5 ตัน ก่อนการทดสอบ เพื่อจำลองรูปแบบในการทดสอบให้คล้ายกับการใช้งานจริงกรณีเสารับน้ำหนักขององค์อาคาร การทดสอบจะให้แรงดันโดยแม่แรงที่ระยะ 0.85 เมตร จากขอบเสาโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDT) เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของคานและเสาดังรูปที่ 5 โดยที่ตัวคานจะมี (LVDT) ติดตั้งทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ติดตั้งที่ระยะ 0.1 , 0.425 และ 0.85 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

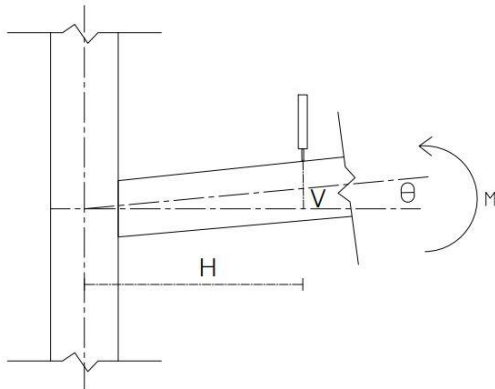
2.3 รายละเอียดของวัสดุทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยเหล็กกล่องกลวงที่ใช้เป็นเสาและคานของตัวอย่างทดสอบ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $E = 2.04 \times 10^6$ ksc.

กำลังครากเฉลี่ยจากการทดสอบที่ 350 MPa และกำลังดึงประลัยเฉลี่ยที่ 465 MPa คอนกรีตที่ใช้ในการเติมในช่องว่างของเสาเหล็กกล่องกลวงนั้นใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย ($f'c$) = 240 ksc. ที่อายุ 28 วัน

3. พฤติกรรมของรอยต่อจากการทดสอบ

ผลการทดสอบจะนำเสนอในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดกับมุมหมุนของรอยต่อที่ได้จากการทดสอบซึ่งโมเมนต์ดัดคำนวณจากสมการที่ (1) และ มุมหมุนคำนวณจากสมการที่ (2)



รูปที่ 6 ระยะเวลาการคิดมุมหมุนของรอยต่อ

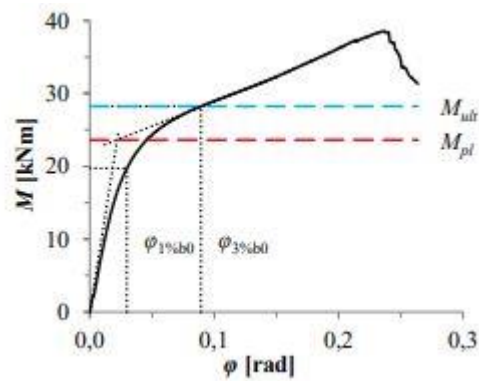
$$M = P \times L \quad (1)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์ดัด
 P คือ แรงกระทำที่จุดถ่ายแรง
 L คือ ระยะแขนของโมเมนต์ (ระยะเท่ากับ 0.85 ม.)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V}{H}\right) \quad (2)$$

เมื่อ θ คือ มุมหมุนของรอยต่อ
 V คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง
 H คือ ระยะจากกึ่งกลางเสาถึงจุดที่วัดการเคลื่อนที่ (ระยะเท่ากับ $1/2 \times$ ความกว้างเสา + 0.425 ม.)

การศึกษานี้ยังได้คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกจากกราฟด้วยวิธีที่ใช้การตัดกันของเส้นสตีฟเนสเริ่มต้นกับสตีฟเนสช่วงที่มีการเปลี่ยนไปซึ่งพบอ้างอิงได้ในหลายงานวิจัย และ ค่าสตีฟเนสเริ่มต้นซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากกราฟโดยใช้ลากเส้นขนานกับความลาดชันของกราฟในช่วงแรกเพื่อหาค่าความลาดชันของกราฟในช่วงแรก



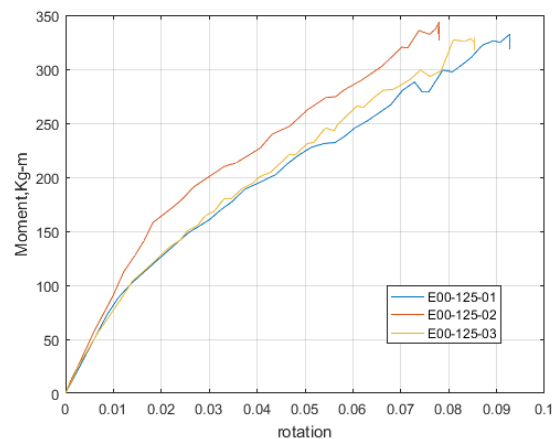
รูปที่ 7 วิธีหาโมเมนต์ดัดพลาสติกจากกราฟ[3]

3.1 รอยต่อกรณีไม่มีการเติมคอนกรีต

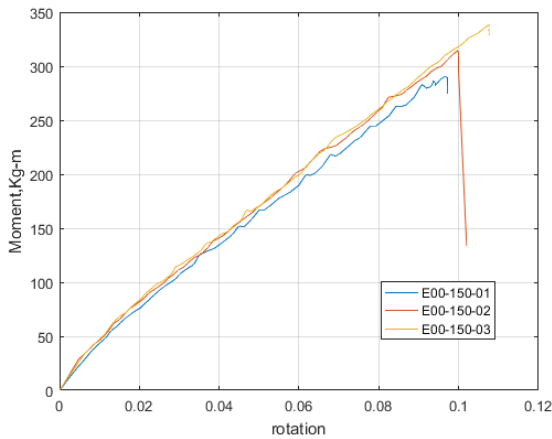
ผลการทดสอบรอยต่อของตัวอย่างทดสอบขนาดเสา 125 x 125 มม. (E00-125) ได้ค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกเฉลี่ย อยู่ที่ 128.33 kg-m และค่าสตีฟเนสเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 9183.33 kg-m/rad และ ผลการทดสอบของตัวอย่างขนาดเสา 150 x 150 มม. (E00-150) ได้ค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกเฉลี่ย อยู่ที่ 47.33 kg-m และค่าสตีฟเนสเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 6000 kg-m/rad กราฟผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

3.2 รอยต่อกรณีมีการเติมคอนกรีต

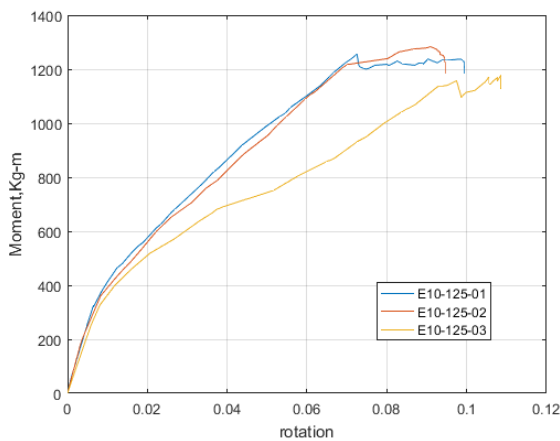
ผลการทดสอบรอยต่อของตัวอย่างทดสอบขนาดเสา 125 x 125 มม. (E10-125) ได้ค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกเฉลี่ย อยู่ที่ 440 kg-m และค่าสตีฟเนสเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 51166.67 kg-m/rad และ ผลการทดสอบของตัวอย่างขนาดเสา 150 x 150 มม. (E10-150) ได้ค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกเฉลี่ย อยู่ที่ 186.67 kg-m และค่าสตีฟเนสเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 15500 kg-m/rad กราฟผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



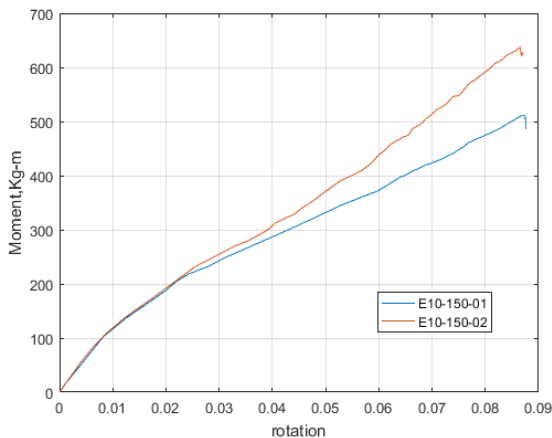
รูปที่ 8 กราฟผลการทดสอบตัวอย่าง E00-125



รูปที่ 9 กราฟผลการทดสอบตัวอย่าง E00-150



รูปที่ 10 กราฟผลการทดสอบตัวอย่าง E10-125



รูปที่ 11 กราฟผลการทดสอบตัวอย่าง E10-150

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

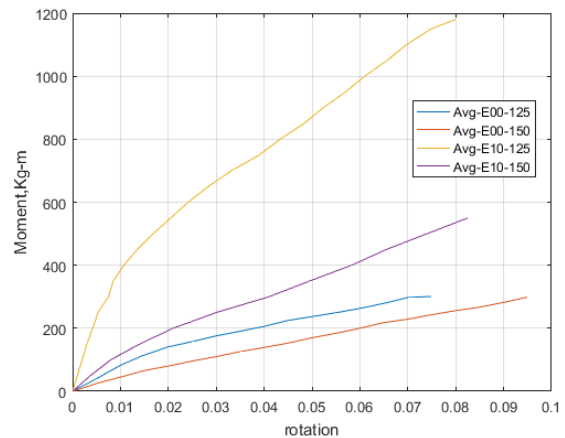
จากผลการทดสอบจะเห็นว่า อัตราส่วนความกว้างคานต่อความกว้างของเสา (B/C) จะมีส่งผลให้กำลังของรอยต่อสูงขึ้นตามสัดส่วนนั้นด้วย เห็นได้จาก ค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกของรอยต่อกรณีที่ไม่มีการเติมคอนกรีต

ทั้ง 2 ตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่อัตราส่วนความกว้างคานต่อความกว้างเสาน้อยนั้นจะได้กำลังที่น้อยกว่า ซึ่งเมื่อมีการเติมคอนกรีตลงไปในนั้นทำให้กำลังของรอยต่อสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนดังแสดงใน ตารางที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบกำลังของรอยต่อทั้ง 2 กรณี

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังจากผลการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	โมเมนต์ดัดพลาสติกเฉลี่ย, kg-m	สติฟเนสเริ่มต้นเฉลี่ยของรอยต่อ, kg-m/rad	อัตราส่วน B/C
E00-125	128.33	9183.33	0.6
E00-150	47.33	6000.00	0.5
E10-125	440.00	51166.67	0.6
E10-150	186.67	15500.00	0.5

จากตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า การเติมคอนกรีตนั้นส่งผลให้กำลังของรอยต่อมีกำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และยังส่งผลให้สติฟเนสเริ่มต้นของรอยต่อที่มีการเติมคอนกรีตในเสานั้นเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังแสดงให้เห็นในกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในรูปที่ 12



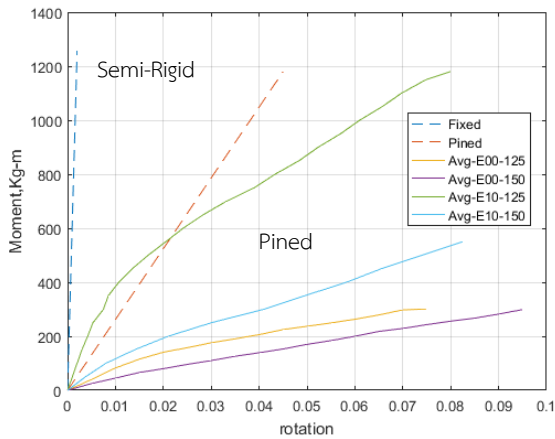
รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ

5. การจำแนกรอยต่อ

ตามการจำแนกรอยต่อที่มีการนำเสนอใน Eurocode-3 Part 1-8 (2005) [1] ด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าสติฟเนสเริ่มต้น (Initial stiffness) ของรอยต่อเสาคานที่ศึกษา กับ สติฟเนสของคาน (beam stiffness: S_b) ซึ่งผลการจำแนกรอยต่อจากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13

$$S_b = \frac{EI}{L} \quad (3)$$

เมื่อ S_b คือ สติฟเนสของคาน
E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
I คือ โมเมนต์อินทิเชียลของหน้าตัด
L คือ ความยาวของคาน



รูปที่ 13 การจำแนกรูปแบบรอยต่อ

จากกราฟจะเห็นได้ว่ารูปแบบของรอยต่อที่จำแนกโดยการใช้สตีฟเนสเริ่มต้นตามวิธีของ Eurocode-3 ตัวอย่างทดสอบ E00-125, E00-150 และ E10-150 จะตกอยู่ในรูปแบบของ Pined แต่สำหรับตัวอย่างทดสอบ E10-125 จะตกอยู่ระหว่างกลางของรูปแบบ Fixed กับ Pined ซึ่งเรียกว่า Semi-Rigid แสดงให้เห็นว่าการเติมคอนกรีตช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยต่อเพิ่มขึ้น

6. สรุปผล

ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อคานเหล็กกล่องกับเสาเหล็กกล่องที่มีการเติมคอนกรีตพบว่า

-การเติมคอนกรีตลงไปนในเสาเหล็กกล่องนั้นช่วยเพิ่มกำลังของรอยต่อให้สูงขึ้น โดยทำให้กำลังรับโมเมนต์ดัดพลาสติกเพิ่มขึ้นประมาณ 3.9 เท่า และสตีฟเนสเริ่มต้นของรอยต่อเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า

-คอนกรีตที่เติมลงไปนในเสาเหล็กกล่องจะไปช่วยรับแรงในส่วนของผิวหน้าเสาเหล็กกล่องในส่วนที่เป็นแรงอัดส่งผลให้สตีฟเนสเริ่มต้นและกำลังของรอยต่อสูงขึ้น

-อัตราส่วนความกว้างคานต่อความกว้างเสา (B/C) มีผลต่อกำลังของรอยต่อและสตีฟเนสเริ่มต้น อย่างมีนัยสำคัญ

-ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความกว้างคานต่อความกว้างเสา (B/C) ที่ 0.6 จะมีค่าโมเมนต์ดัดพลาสติกและสตีฟเนสเริ่มต้น มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความกว้างคานต่อความกว้างเสา (B/C) ที่ 0.5

เอกสารอ้างอิง

- [1] EN 1993-1-8 (2005). Eurocode 3 Design of Steel Structures Part 1-8 Design of Joints. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [2] Huu-Tai Thai, Brian Uy (2016). Rotational stiffness and moment resistance of bolted endplate joints with hollow or CFST columns. Journal of Constructional Steel Research 126. pp. 139-152.

- [3] Marsel, G. (2018). Experimental moment resistance of rectangular hollow section T joints. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018), Saint-Petersburg, Russia, 19-20, November 2018, pp. 1-6
- [4] L.A.P.Silva (2003). Rotational Stiffness of Rectangular Hollow Sections Composite Joints. Journal of Structural Engineering. Vol.129 ,No.4, April 1, 2003.
- [5] J.Szlendak (1991). Beam-Column Welded RHS Connection. Thin-Walled Structures 12 ,pp.63-80.
- [6] Gomes (1996) Moment capacity of beam-to-column minor-axis joints. IABSE Colloquium on Semi-Rigid Structural Connection, pp.319-326.
- [7] Pirmoz, A., Khoei, A.S., Mohammadrezapour, E., and Daryan, A.S. (2009). Moment-rotation behavior of bolted top-seat angle connections. Journal of Constructional Steel Research, 65, pp. 973-984.
- [8] Daryan, A.S., Sadri, M., Saberi, H., Saberi, V., and Moghadas, A.B. (2012). Behavior of semi-rigid connections and semi-rigid frames. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23, 3, pp.210-238.
- [9] Hadianfard, M.A., and Razani, R. (2003). Effects of semirigid behavior of connections in the reliability of steel frames. Structural Safety, 25, 2, pp.123-138
- [10] พรสวรรค์ (2019) การศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสาเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมกลวงที่มีการเชื่อมด้วยวิธีตัวเลข. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 24