

การศึกษาพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงเฉือนของระบบจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตและเสาเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง

The study of the behavior and punching shear strength of the joint system between concrete slabs and hollow structural steel columns.

เมธี สุวรรณสนธิ^{1,4}, ณัฐพล สุทธิธรรม^{2,*}, วิศาล ตรงศรีพานิชย์³, และ เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย⁴

^{1, 2, 3} บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) จ.กรุงเทพมหานคร

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nuttapons@ssi-steel.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำตัวอย่างทดสอบผลิตภัณฑ์ “ระบบจุดต่อฝังในพื้นคอนกรีตใช้งานร่วมกับเสาโครงสร้างเหล็กรูปพรรณกลวง (โพสค์คอนเน็คส์)” คิดค้นโดยนักวิจัยจาก บมจ.สหวิริยาสตีลอินดัสตรี มาทดสอบร่วมกับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ดังนี้ 1) หมุดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (Shear headed stud) 2) ความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังทั้งทางตั้งและทางขวาง (Vertical and horizontal stiffeners) 3) เส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว 4) กำลังดัดครากของเหล็กแผ่นหัวเสา โดยทดสอบเงื่อนไข 2 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนทะลุ (Punching shear) และศึกษาพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์เมื่อรับน้ำหนักตรงศูนย์กลางในแนวดิ่ง โดยนำผลการทดสอบที่ได้มาประเมินเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนทะลุที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI318-19 และทฤษฎี Critical Shear Crack Theory (CSCT) ผลการเปรียบเทียบพบว่า กำลังรับแรงเฉือนทะลุจากผลทดสอบที่มีและไม่มีหมุดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้จากสมการประมาณ 42% และ 28% ตามลำดับ รวมถึงค่าจากผลทดสอบยังสอดคล้องไปกับทฤษฎี CSCT ดังนั้นจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า “โพสค์คอนเน็คส์” มีความปลอดภัยจากการวิบัติแบบเฉือนทะลุ สามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนทะลุได้จากทฤษฎี CSCT และอนุมานได้ว่าสามารถนำมาใช้งานเป็นเสาโครงสร้างสำหรับงานอาคารเพื่อรับแรงในแนวดิ่งได้จริง

คำสำคัญ: แรงเฉือนทะลุ, เสาเหล็กรูปพรรณกลวง, ระบบจุดต่อ, พื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, โพสค์คอนเน็คส์

Abstract

Researchers from Sahaviriya Steel Industries PCL. Or SSI, initiated the innovative construction system using hollow steel sections as gravity columns with the splicing joints that are capable of supporting while being embedded in the reinforced

concrete floor, commercially called “PostConnex”. The research was performed via laboratory testing with 2 samples per 1 testing condition of the fabricated steel PostConnex system being cast in reinforced concrete slab, for which testing conditions varied (1) Shear headed stud, (2) connection cap-plate and stiffener-assembly thicknesses, (3) bolt diameter and (4) cap plate yield strength, in order to investigate punching shear capacity and to observe system behavior in comparison with punching shear capacity as per ACI 318-19, as well as Critical Shear Crack Theory, CSCT. The results showed that the testing conditions either with or without Shear headed studs were higher than calculated value per the above-mentioned standard for approximately 42% and 28% consecutively, while in line with Critical Shear Crack Theory. This can be concluded that PostConnex can be safely designed in accordance with the current design standard and CSCT with the alignment of the assumed behavior of connecting components. Hence, PostConnex can be practically used for the gravity column application for multi-story buildings.

Keywords: Punching Shear, Hollow Steel Column, Connection System, RC Flat Plate, PostConnex

1. คำนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างและค่าจ้างแรงงานก่อสร้างที่เพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับปัญหาด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม เช่น ปัญหาฝุ่นละออง ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ และเป็นสิ่งที่สังคมและหน่วยงานภาครัฐ ผู้กำกับดูแลด้านงานก่อสร้างกำลังให้ความสำคัญเพื่อเสริมสร้างให้การพัฒนาเมืองเป็นไปอย่างยั่งยืน ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจาก บมจ.สหวิริยาสตีลอินดัสตรี มีแนวคิดในการผลักดันผลิตภัณฑ์ “ระบบจุดต่อฝังในพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้งานร่วมกับเสาโครงสร้าง

เหล็กรูปพรรณกลวง (โพสต์คอนกรีต) ซึ่งก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็วกว่าเสาคอนกรีต รวมถึงลดการเกิดมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการก่อสร้างในไซต์งานตามระบบก่อสร้างแบบตั้งเดิมเพราะเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่ผลิตมาจากโรงงาน เสนอเป็นทางเลือกของเสาโครงสร้างรับแรงในแนวดิ่ง (Gravity column) สำหรับงานอาคารทั่วไป

ระบบพื้นไร้คานคอนกรีตที่ใช้งานร่วมกับเสาโครงสร้างเหล็กมักจะไม่ค่อยได้รับความนิยมนัก เหตุผลหนึ่งเพราะระบบดังกล่าวมีกำลังรับแรงเฉือนทะเลของโครงสร้างน้อยเมื่อใช้งานร่วมกัน เนื่องจากผิวที่เรียบและขนาดเล็กกว่าเสาคอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักเดียวกัน ดังนั้นในต่างประเทศหากมีการใช้งานเสาเหล็กร่วมกับพื้นไร้คานคอนกรีต จึงมักจะมีการเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทะเล เช่น หมุดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนทะเลของระบบโครงสร้างให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยมีงานวิจัยสนับสนุนเผยแพร่แล้วในวารสารทางวิชาการที่น่าเชื่อถือ เช่น Bompas และ Elghazouli [1] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม แม้การเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนทะเลได้จริง แต่ในทางปฏิบัติยังคงต้องคำนึงถึงมูลค่าการก่อสร้างด้วย ซึ่งการเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะทำให้ราคาเสาโครงสร้างสูงขึ้น ดังนั้นทีมวิจัยจึงได้ออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ “โพสต์คอนกรีต” ให้มีลักษณะรูปร่างที่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนทะเลให้กับระบบโครงสร้างที่ใช้งานร่วมกันกับพื้นไร้คานคอนกรีต สามารถใช้งานได้ปลอดภัย โดยระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยเสาเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวงเชื่อมต่อเข้ากับระบบแผ่นเหล็กและกลุ่มบารองรับ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง (โพสต์คอนกรีต)

ในต่างประเทศก็ได้ให้ความสนใจกับผลิตภัณฑ์ในลักษณะคล้ายกันนี้ รวมถึงได้มีผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติแล้ว เช่น Yu และ Wang [2] ด้วยเหตุนี้ คณะทำงานจึงออกแบบงานวิจัยโดยการนำตัวอย่างทดสอบ “โพสต์คอนกรีต” มาทดสอบร่วมกับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 6 เงื่อนไข ๆ ละ 2 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนทะเลและศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นของระบบจุดต่อดังกล่าว

2. ทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 ACI318-19

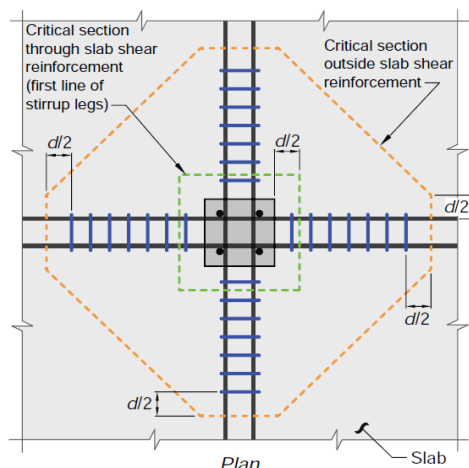
มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กล่าสุดของประเทศสหรัฐอเมริกา (ACI318-19) [3] ระบุกำลังรับแรงเฉือนทะเลของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางที่ไม่มีการเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_v = 0.33\lambda_s b_0 d \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1+0.004d}} \leq 1 \quad (2)$$

ซึ่งหน้าตัดวิกฤตจะเกิดขึ้นบริเวณรอบหัวเสาและมีระยะห่างออกมาจากผิวหน้าเสาประมาณ $0.5d$ โดย λ_s คือ แฟกเตอร์ปรับค่าผลกระทบของขนาดแผ่นพื้นคอนกรีต, b_0 คือ เส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤตที่ระยะ $0.5d$ จากผิวหน้าเสา (mm), d คือ ความลึกประสิทธิภาพของแผ่นพื้น (mm), f'_c คือ ค่ากำลังอัดคอนกรีตทดสอบที่อายุ 28 วัน (MPa)

ส่วนกรณีที่มีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนทะเลด้วยเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนั้น หน้าตัดวิกฤตสามารถเกิดขึ้นได้ 2 บริเวณ คือรอบเสาห่างออกมาที่ระยะ $0.5d$ จากผิวหน้าเสา (วงใน) กับความยาวเส้นรอบวงที่ระยะห่างจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตัวนอกสุดออกไป $0.5d$ (วงนอก) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน้าตัดวิกฤตที่พิจารณา กรณีแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน ACI318-19

โดยมาตรฐาน ACI ได้กำหนดสมการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนทะเลของแผ่นพื้นดังนี้

$$P_{v,inside} = V_c + V_s \quad (3)$$

$$V_c = 0.25\lambda_s b_0 d \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y t d}{s} \quad (5)$$

โดย V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนทะเลจากคอนกรีต (N), V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนทะเลจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (N), A_v คือ พื้นที่รับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (mm^2), f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (MPa), s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (mm)

ในส่วนของการหน้าตัดวิถุตรอบนอก ACI318-19 กำหนดสมการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนทะเลไว้ดังนี้

$$P_v = V_c = 0.17 \lambda_s b d \sqrt{f_c} \quad (6)$$

โดย b คือ ความยาวเส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิถุตร (วงนอก) ที่ระยะ ห่างจากมุมเหล็กรับแรงเฉือนออกไปเป็นระยะ 0.5d

2.2 ทฤษฎี Critical Shear Crack Theory (CSCT)

ทฤษฎี CSCT [4] เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการดัดตัว (Rotation) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนทะเลของแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมหมุดเหล็กรับแรงเฉือน ตามสมการที่ (7) โดยพบว่าค่าการดัดตัวที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบทำให้กำลังรับแรงเฉือนของแผ่นพื้นคอนกรีตลดลง

$$\psi = 0.33 \frac{L}{d} \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{V_d}{8M_r} \right)^{3/2} \quad (7)$$

โดย ψ คือ ค่าการดัดตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต, V_d คือ กำลังรับแรงเฉือนของแผ่นพื้นคอนกรีต (N), M_r คือ กำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้นคอนกรีต (N-m)

3. ตัวอย่างทดสอบและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 6 รูปแบบ No.1 – No.6 ประกอบไปด้วยระบบจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตและเสาเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบให้แตกต่างกันของ มิติ ขนาด ความหนา เกรดวัสดุ ขนาดของสลักเกลียว และการเสริมกำลังรับแรงเฉือนทะเลด้วยชุดรางหมุดเหล็กรับแรงเฉือน (Shear headed stud) ดังสรุปตามตารางที่ 1 โดยทดสอบซ้ำรูปแบบละ 2 ครั้ง

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Type	Column	Concrete Slab		Shear	Cap Plate		
	SS400	WxH	Thk	Stud /	W	Thk	Grade
	m x m	m x m	mm	ACI318	mm	mm	
No.1	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	no	320	16	HY370*
No.2	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	yes	320	16	HY370*
No.3	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	yes	320	16	HY370*
No.4	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	yes	320	16	HY370*
No.5-1	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	yes	320	16	HY370*
No.5-2	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	yes	320	16	HY370*
No.6	0.15x0.15	1.5x1.5	0.18	no	320	16	SS400

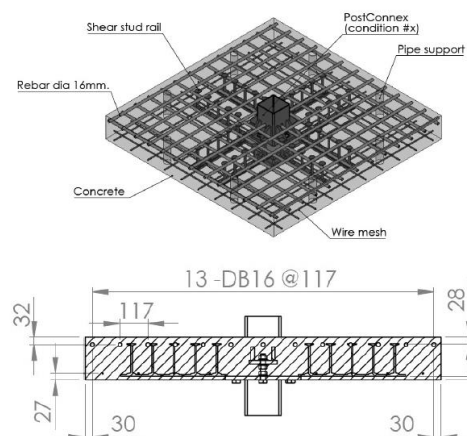
*HY370 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรดพิเศษ กำลังรับแรงดึงคราก (yield strength)

370 MPa โดย บมจ. สหวิริยาสตีลอินดัสตรี

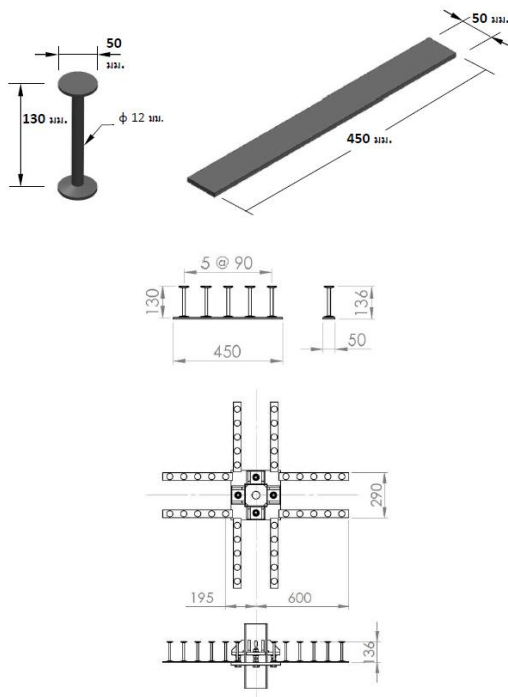
ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)

Type	Bolt Size	Horizontal Plate		Stiffener	No. of Specimen
	A490	WxD	Thk	Thk	
	mm	mm x mm	mm	mm	
No.1	M18	120x80	16	16	2
No.2	M18	120x80	16	16	2
No.3	M18	120x80	16	6	2
No.4	M18	120x80	6	16	2
No.5-1	M10	120x80	16	16	1
No.5-2	-	120x80	16	16	1
No.6	M18	120x80	16	16	2

รายละเอียดทั่วไปของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการเสริมเหล็กในพื้นคอนกรีตจะใช้ เหล็กเสริมบน 13DB16# เพื่อรับแรงดัด และเสริมเหล็กตะแกรง (Wire mesh) ไว้ด้านล่างเพื่อทำหน้าที่ต้านทานการยิดหดตัวของคอนกรีตและป้องกันการแตกร้าวระหว่างเคลื่อนย้ายตัวอย่างทดสอบและมีการเสริม Shear headed stud ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับบางกรณีของตัวอย่างทดสอบเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนทะเลให้กับแผ่นพื้น



รูปที่ 3 รูปแบบการจัดวางตะแกรงเหล็ก และเหล็กเสริมภายในแผ่นพื้นคอนกรีต



รูปที่ 4 ขุดทางหมุดเหล็กกับแรงเฉือนและรูปแบบการจัดวาง

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

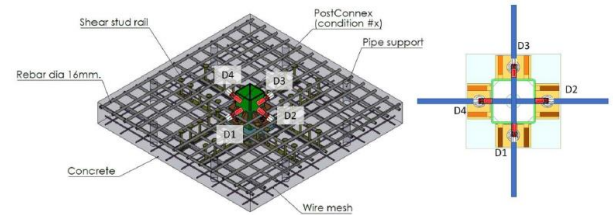
ใช้การสร้างไม้แบบเพื่อหล่อคอนกรีต ทำการผูกเหล็กและติดตั้ง Shear headed stud ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยมีกรึงท่อเอาไว้เพื่อสอดติดตั้ง PT Bar สำหรับยึดรั้งตัวอย่างในระหว่างที่ทำการทดสอบ



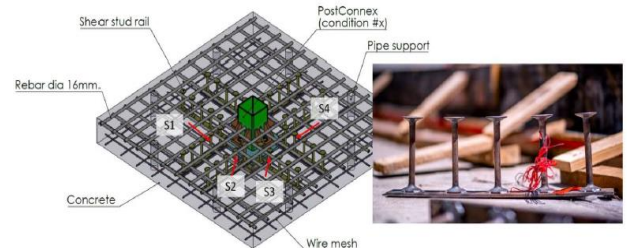
รูปที่ 5 การผูกเหล็กและติดตั้งขุดหมุดเหล็กกับแรงเฉือนในตัวอย่างทดสอบ

ภายในชิ้นตัวอย่างทดสอบจะมีการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) ตามตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อวัดระดับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ดังนี้ 1) ที่เหล็กเสริมบน ตำแหน่ง D1-D4 (ดังรูปที่ 6) 2) บน Shear headed stud แห่งที่ 2 จากหน้าเสาทั้งสี่ด้าน ตำแหน่ง S1-S4 (ดังรูปที่ 7) 3) บนเหล็กแผ่นหัวเสา (Cap plate) ตำแหน่ง C1-C8 (ดังรูปที่ 8) 4) ที่แผ่นเหล็กเสริมแรงในแนวตั้ง (Vertical stiffener) ตำแหน่ง A1 A2 A4 A5 และแผ่นเหล็กเสริมแรงในแนวราบหรือบ่ายื่นรองรับ

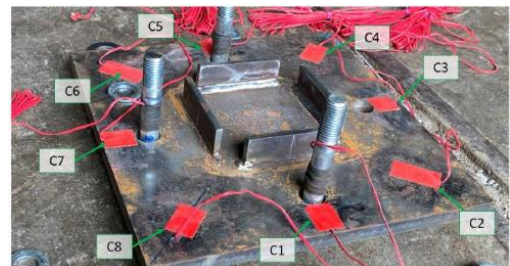
(Horizontal stiffener) ตำแหน่ง A3 และ A6 (ดังรูปที่ 9) 5) ที่สลักเกลียว (ดังรูปที่ 10) และชั้นตอนสุดท้ายจะทำการเทคอนกรีตและจี้เขย่าคอนกรีตเพื่อป้องกันการเกิดโพรงภายในตัวอย่างทดสอบ (ดังรูปที่ 11)



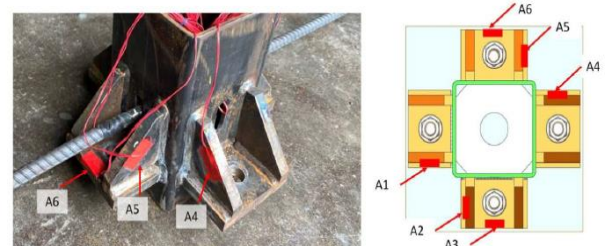
รูปที่ 6 ตำแหน่งของ Strain gage บนเหล็กเสริม (D1-D4)



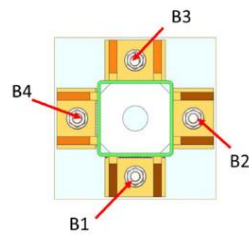
รูปที่ 7 ตำแหน่งของ Strain gage บน Shear headed stud (S1-S4)



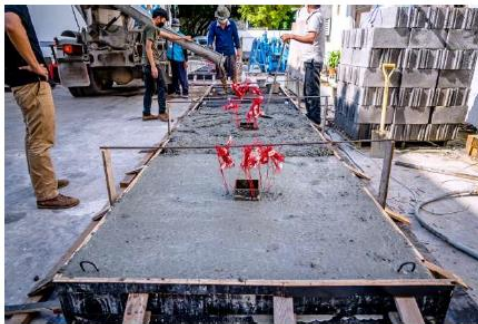
รูปที่ 8 ตำแหน่งของ Strain gage บนแผ่นเหล็กหัวเสา (C1-C8)



รูปที่ 9 ตำแหน่งของ Strain gage บนแผ่นเหล็กเสริมแรงในแนวราบ (A3-A6) และแนวตั้ง (A1, A2, A4, A5)



รูปที่ 10 ตำแหน่งของ Strain gage บน Bolt (B1-B4)



รูปที่ 11 การทดสอบคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ

3.3 กำลังวัสดุ

ในการก่อสร้างตัวอย่างทดสอบมีการเทคอนกรีต 2 ครั้ง โดยมีผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยผลการทดสอบกำลังอัดทั้งสองครั้งมีค่าต่างกันมากเนื่องจากความแปรปรวนของการผสมคอนกรีตที่แตกต่างกันในแต่ละครั้ง ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีกำลังอัดของคอนกรีตที่ต่างกันได้ ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้จากผลทดสอบจะถูกปรับค่า (Normalized) ด้วยค่า $b_0 d \sqrt{f_c}$ โดย $b_0 = 1156 \text{ mm}$ และ $d = 139 \text{ mm}$ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต

ครั้งที่	ตัวอย่างทดสอบ	กำลังอัดเฉลี่ย 28 วัน	$b_0 d \sqrt{f_c}$
		MPa	KN
1	No 1, No 2, No 6	28.74	861.42
2	No 3, No 4, No 5	21.24	740.54

ค่ากำลังดึงสูงสุดและกำลังดึงครากของเหล็กgrupพรรณชนิด SS400 และ HY370 ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนผลทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของสลักเกลียว หมุดรับแรงเฉือนและเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กgrupพรรณ

ชั้นคุณภาพ	ความหนา (mm)	กำลังดึงครากเฉลี่ย (MPa)	กำลังดึงสูงสุดเฉลี่ย (MPa)	การยืดตัว (%)
SS400	16.06	308.90	438.00	31.43
SS400	5.43	417.70	478.67	19.33
HY370	15.91	425.90	576.86	21.71
HY370	6.05	430.20	538.33	21.83

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแรงดึงของ Bolt, Shear Stud และเหล็กเสริมคอนกรีต

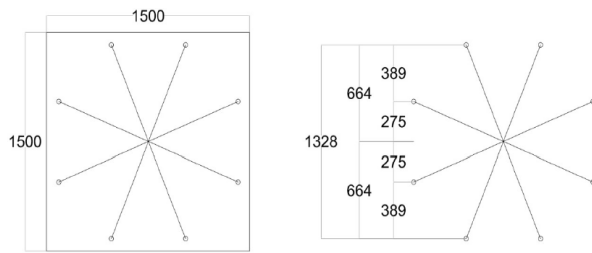
ขนาด	ชั้นคุณภาพ	กำลังดึงครากเฉลี่ย (MPa)	กำลังดึงสูงสุดเฉลี่ย (MPa)
Bolt M10	10.9	-	779.06
Bolt M18	10.9	-	833.49
Stud D12	-	-	725.93
DB16	SD40	533.45	609.89

3.4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

การให้แรงต่อแผ่นพื้นตัวอย่างทดสอบจะดำเนินการดัดแม่แรงไฮดรอลิกในทิศทางขึ้นที่จุดถ่ายแรงข้างใต้แผ่นพื้น โดยก่อนการติดตั้งแผ่นพื้นเข้ากับเฟรมรองรับ จะทำการติดตั้งแท่งเหล็กสี่เหลี่ยมตัน ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อใช้สำหรับถ่ายแรงจากแม่แรงไฮดรอลิก การดันตัวขึ้นของแม่แรง จะทำให้เกิดแรงกระทำกระจายลงบนแผ่นพื้นทดสอบที่ถูกยึดไว้ด้วยเหล็ก PT Bar จำนวน 8 เส้น เพื่อที่จะสร้างรูปแบบการกระจายแรงในลักษณะวงกลมรอบล้อมเสา โดยมีรายละเอียดระยะระหว่างจุดยึดรั้ง ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเหล็ก PT Bar เหล่านี้จะถูกยึดไว้กับโครงเหล็กที่ถูกติดตั้งไว้กับรางรับแรงของห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 การติดตั้งแท่งเหล็กสี่เหลี่ยมตันที่จุดรับแรงจากแม่แรงไฮดรอลิกใต้แผ่นพื้น

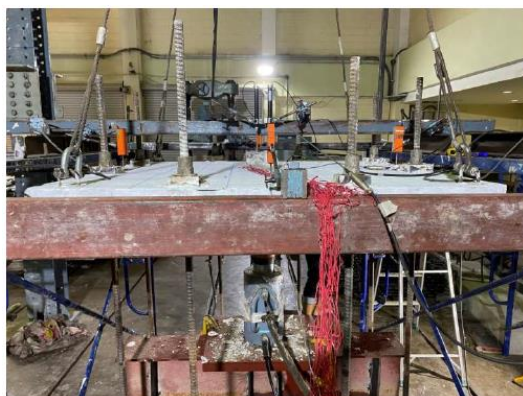


รูปที่ 13 จุดยึดด้วย PT bar บนแผ่นพื้นทดสอบ



รูปที่ 14 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบ ค่าแรงกระทำจะถูกอ่านด้วย Load cell ขนาด 100 ตันติดตั้งไว้ที่ปลายของแม่แรง ส่วนค่าการเคลื่อนตัวของเสาด้านบนของแผ่นพื้นจะถูกวัดด้วย Displacement transducer จำนวน 2 ตัว อีกทั้งยังวัดค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นพื้นบริเวณจุดยึดตั้งทั้ง 4 ทิศทางด้วย Displacement transducer จำนวน 4 ตัว ตามที่แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 Displacement transducer สำหรับวัดค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นพื้นตัวอย่างทดสอบ

4. ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ได้ค่าแรงกระทำสูงสุดและค่าการแอ่นตัวสัมพันธ์ระหว่างแผ่นพื้นเทียบกับเสาเหล็ก เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการตามมาตรฐาน ACI318 แสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยแยกเป็นฝั่งกรณีที่มีและไม่มีเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยชุดหมุดเหล็กรับแรงเฉือน (Shear headed stud) ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าการใส่ Shear headed stud จะช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักได้อย่างชัดเจน โดยกำลังรับน้ำหนักสูงสุดปรับค่าจะอยู่ระหว่าง 0.51 - 0.69 และ 0.83 - 0.94 สำหรับกรณีที่ไม่มี Shear headed stud และมี Shear headed stud ตามลำดับ

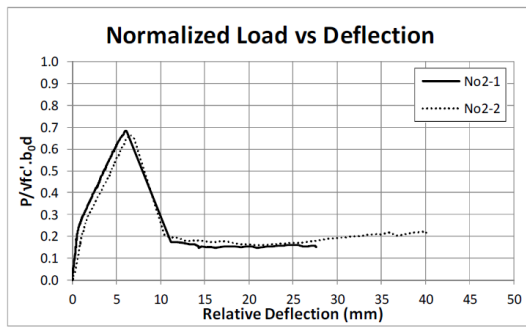
ตารางที่ 5 ค่าแรงกระทำสูงสุดและค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้นจากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ ACI318

ไม่มีการเสริม Shear headed stud				
Test Case	Max Load (KN)	Analytical Punching Shear (ACI318)	Normalized Load (KN)	Deflection (mm)
No.1-1	587.93	451.49	0.68	5.97
No.1-2	569.85	451.49	0.66	6.64
No.6-1	595.16	451.49	0.69	6.03
No.6-2	587.60	451.49	0.68	7.45

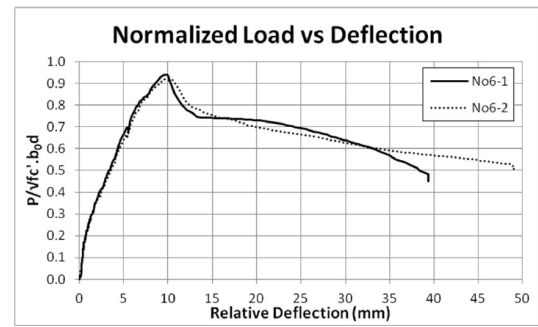
ตารางที่ 5 ค่าแรงกระทำสูงสุดและค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้นจากการทดสอบ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ ACI318 (ต่อ)

มีการเสริม Shear headed stud				
Test Case	Max Load (KN)	Analytical Punching Shear (ACI318)	Normalized Load (KN)	Deflection (mm)
No.2-1	739.43	519.33	0.86	10.66
No.2-2	734.83	519.33	0.85	10.62
No.3-1	611.26	471.33	0.83	8.20
No.3-2	676.66	471.33	0.91	9.82
No.4-1	679.29	471.33	0.92	9.82
No.4-2	682.57	471.33	0.92	10.25
No.5-1	694.02	471.33	0.94	9.55
No.5-2	681.92	471.33	0.91	9.57

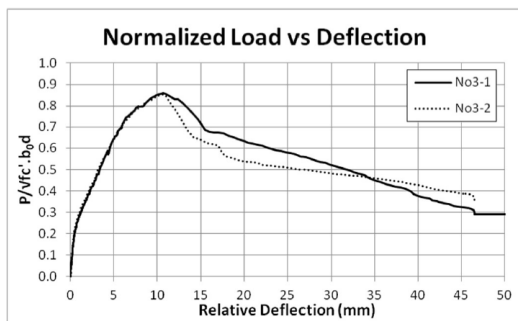
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรับค่า (Normalized load) และค่าการแอ่นตัวของแต่ละตัวอย่างถูกแสดงไว้ในรูปที่ 16 - 21 โดยพบว่ากรณีที่ไม่มีการเสริม Shear headed stud กำลังรับน้ำหนักของแผ่นพื้นจะลดลงเกินกว่าครึ่งอย่างรวดเร็วหลังจากกำลังขึ้นถึงจุดสูงสุด ส่วนกรณีที่มี Shear headed stud นั้นกลับพบว่ากำลังรับน้ำหนักจะลดลงประมาณ 20% จากกำลังสูงสุดเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหนียวของโครงสร้างที่สูงกว่าอันเป็นผลมาจากการเสริม Shear headed stud ซึ่งสอดคล้องไปกับงานวิจัยอ้างอิง [1]



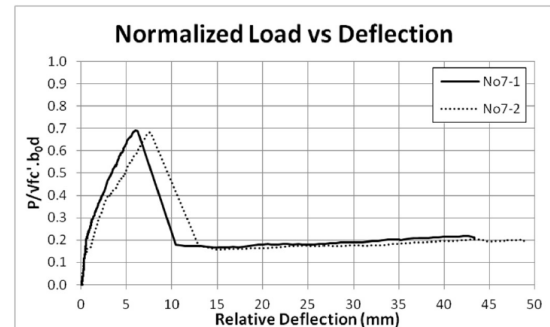
รูปที่ 16 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.1



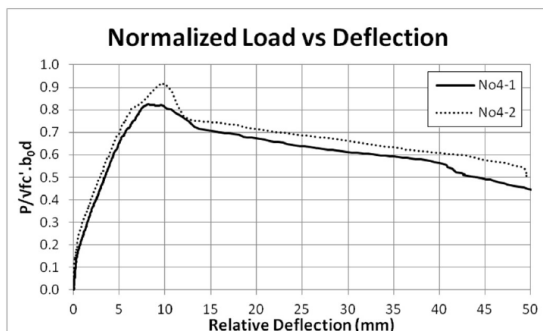
รูปที่ 20 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.5



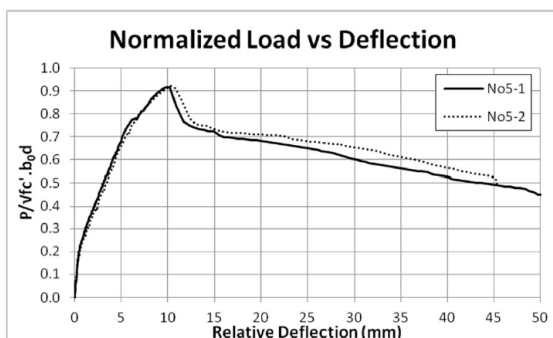
รูปที่ 17 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.2



รูปที่ 21 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.6



รูปที่ 18 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.3



รูปที่ 19 แรงกระทำปรับค่าและการอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ No.4

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ “โพสคอนเน็คส์” เมื่อใช้งานร่วมกับพื้นไร้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งหมด 6 เงื่อนไข โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ดังนี้ 1) ไม่มีการเสริมหมุดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 2) มีการเสริมหมุดเหล็กเสริมรับแรงเฉือน 3) เปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางดิ่ง 4) เปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางขวาง 5-1) เปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว 5-2) ไม่มีการใส่สลักเกลียว 6) เปลี่ยนแปลงกำลังดัดครากของเหล็กแผ่นหัวเสา โดยทดสอบตัวอย่างที่ 1-4 และ 6 เงื่อนไขละ 2 ตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 5-1 และ 5-2 ทดสอบเงื่อนไขละ 1 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่างทดสอบ เพื่อตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนและศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรับน้ำหนักตรงศูนย์กลางในแนวตั้ง มีข้อสรุปต่อไปนี้

1. การเสริม Shear headed stud ช่วยให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น มีความเหนียวและกำลังที่เหลืออยู่หลังการวิบัติสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเสริม Shear headed stud
2. การปรับลดความหนาของแผ่นเสริมกำลังทางดิ่ง (Vertical stiffener) ไม่ส่งผลต่อภาพรวมของความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ปรับลดความหนาของแผ่นเสริมกำลังทางดิ่ง โดยสามารถวัดค่า Strain ที่แผ่น Vertical stiffener ได้เพิ่มขึ้น

3. การปรับลดความหนาของแผ่นเสริมกำลังทางขวาง (Horizontal Stiffener) ไม่ส่งผลต่อภาพรวมของความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ปรับลดความหนาของแผ่นเสริมกำลังทางขวาง โดยสามารถวัดค่า Strain ที่แผ่น Horizontal stiffener ได้เพิ่มสูงขึ้น

4. การปรับลดขนาดของ Bolt ไม่ส่งผลต่อภาพรวมของความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ปรับลดขนาดของ bolt โดยค่า Strain ใน Bolt ของทั้งสองตัวอย่างอยู่ในระดับที่ไม่แตกต่างกัน และการไม่ใส่ Bolt ในแผ่นพื้นตัวอย่างทดสอบ ก็ไม่พบว่ามีแรงลดลงของกำลังรับน้ำหนักแต่อย่างใด

5. การเปลี่ยนชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่น Cap plate ไม่ส่งผลต่อภาพรวมของความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเปลี่ยนชั้นคุณภาพของแผ่น Cap plate

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นของระบบจุดต่อโพสต์คอนเน็กซ์ (PostConnex) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการวิบัติแบบเฉือนทะลุเป็นหลัก การนำไปใช้งานจริงควรออกแบบให้แผ่นพื้นมีพฤติกรรมแบบเหนียวหรือควบคุมด้วยแรงดัดเป็นหลัก

2. การทดสอบนี้เป็นการให้แรงกระทำกับเสาแบบตรงศูนย์ โดยไม่มีแรงดัดหรือโมเมนต์เกิดขึ้นในแผ่นพื้นตัวอย่างทดสอบ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับกรณีมีโมเมนต์ร่วมกับแรงตรงศูนย์เกิดขึ้นเพิ่มเติม

3. การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมแบบให้แรงในทิศทางเดียว ควรศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรเพื่อรองรับการใช้งานในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

4. ศึกษาปัจจัยที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของรอยต่อเพิ่มเติม เช่น การเสริมเหล็กกับแรงดัดที่ไม่ได้ร้อยทะลุผ่านเสาเหล็ก ความหนาของเสาเหล็กกล่อง ความหนาของเหล็กแผ่นหัวเสา (Cap plate) เป็นต้น

5. ศึกษาแนวทางในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม เพื่อทำนายพฤติกรรม และใช้ในการออกแบบระบบการก่อสร้างที่เหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บมจ.สหวิริยาสตিলอินดัสตรี ขอขอบพระคุณ นางสาวกาญจนา ศิริไพฑูริย์ นายสันติณิธิต แสงภูวา และนายหัตตวุฒิ เชิดดีติก นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือให้การทดสอบนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยบมจ.สหวิริยาสติลอินดัสตรี หวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bompa, D. V., and A. Y. Elghazouli. (2016). Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads. *Engineering Structures*, 117, pp. 161–183.
- [2] J. L. Yu and Y. C. Wang. (2020). Punching Shear Behaviour of an Innovative Connection between Steel-Tubular Column and Flat-Concrete Slab. *Journal of Structural Engineering*, 146(8), 04020159.
- [3] American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA, 2019.
- [4] Muttoni, A. (2008). Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI structural Journal*, 105, pp. 440-450.