

กลไกการรับแรงที่จุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการ เสริมกำลังด้วยบ่าคอนกรีตเสริมเหล็ก

Resisting Mechanism of RC Beam-Column Joints Strengthened with RC Brackets

ณัฐวรรณ เกษกุล (Nattawat Ketgoon)* ธันยดา พรรณเชษฐ์ (Tanyada Pannachet)^{1**}

เมธี บุญพิเชฐวงศ์ (Maetee Boonpichetvong)**

(Received: December 1, 2021; Revised: March 14, 2022; Accepted: March 15, 2022)

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้สามารถต้านทานแรงเฉือนในแนวราบเพิ่มเติมในจุดต่อโดยการเพิ่มบ่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีการเพิ่มพื้นที่ประสิทธิภาพบริเวณจุดต่อ โดยสามารถติดตั้งได้สะดวกสำหรับโครงสร้างที่มีอยู่เดิม ในการศึกษาได้ดำเนินการทดสอบชิ้นตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอกในห้องปฏิบัติการภายใต้แรงกระทำที่ปลายคาน จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยบ่าคอนกรีตเสริมเหล็กจะพบว่าการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาด้วยบ่าคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำที่ปลายคานได้มากขึ้น ตัวอย่างเสริมกำลังมีค่าความต้านทานแรงเฉือนในแนวราบสูงสุดมากกว่าตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาที่แรงกระทำที่ปลายคานเท่ากันพบว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยบ่าคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถในการลดความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมคานได้ ส่งผลให้แรงเฉือนที่ส่งถ่ายไปยังจุดต่อมีค่าลดน้อยลงด้วย

ABSTRACT

This paper aims to study a strengthening technique for reinforced concrete beam-column joints to resist additional horizontal shear forces by adding reinforced concrete (RC) brackets. Based on increasing the effective area of the joint, the method provides convenient and easy installation for existing structures. In this study, two exterior beam-column joints were tested under monotonic loading at the end of the beam. The behaviors of the original joint and the joint strengthened with RC brackets were compared. It was found that strengthening the joint using RC brackets increased the load carrying capacity. Strengthening the joint using RC brackets could increase the horizontal shear force resistance at the joint. Moreover, at the same load levels, the strengthened specimen showed lower strain values in the steel reinforcement of the beam, also implying lower values of horizontal shear force transfer at the joint.

คำสำคัญ: จุดต่อคาน-เสา บ่าคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลัง

Keywords: Beam-column joints, Reinforced concrete brackets, Strengthening

¹Corresponding author: tanpan@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

จุดต่อคาน-เสาเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในโครงสร้างอาคารเนื่องจากเป็นจุดที่เชื่อมระหว่างคานและเสา มีหน้าที่ส่งถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ หากอาคารได้รับแรงกระทำทางด้านข้างและจุดต่อมีกำลังไม่เพียงพอ ความไม่สมดุลของโมเมนต์รอบชิ้นส่วนจุดต่อคาน-เสา จะเป็นเหตุให้จุดต่อคาน-เสาเกิดการวิบัติได้ นอกจากนั้น การเกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีตหรือการออกแบบก่อสร้างอาคารโดยอิงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ซึ่งได้กำหนดกำลังอัดประลัยของคอนกรีตไว้ที่ 15 MPa [1] อาจจะทำให้อาคารที่สร้างไปแล้วในอดีตมีคุณสมบัติกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต่ำเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ ณ ปัจจุบันและอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่บริเวณจุดต่อคาน-เสา เมื่อมีความจำเป็นในการประเมินสมรรถนะของอาคารที่มีอยู่

สำหรับรูปแบบการวิบัติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหว พบว่าการวิบัติที่เกิดขึ้นจุดต่อเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งกลไกต้านทานแรงเฉือนภายในบริเวณจุดต่อนั้นอยู่กับกลไกรับแรงอัดและแรงดึงในแนวทแยง (Strut and tie mechanism) [2] ที่ผ่านมานักวิจัยพยายามทำการเสริมกำลังที่บริเวณจุดต่อโดยวิธีการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติที่บริเวณจุดต่อไปยังตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกบนคาน (Beam hinging mechanisms) ยกตัวอย่างเช่น การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymer; FRP) [3-5] การเสริมกำลังโดยใช้เหล็กหุ้มบริเวณจุดต่อ (Steel jacketing) [6-7] และการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่รับแรงเฉือนประสิทธิผลบริเวณจุดต่อ [8-9] จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปูนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเจาะเสียบเหล็กและหล่อเป็นปูนคอนกรีตที่บริเวณมุมของเสาและคานทำให้จุดต่อมีความสามารถในการรับแรงกระทำมากขึ้น กระบวนการติดตั้งสามารถทำได้ไม่ยากนักสำหรับอาคารที่ก่อสร้างแล้ว อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการออกแบบระบบการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็กยังไม่มีข้อกำหนดไว้ในมาตรฐานที่ชัดเจน งานวิจัยการเสริมกำลังที่จุดต่อจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

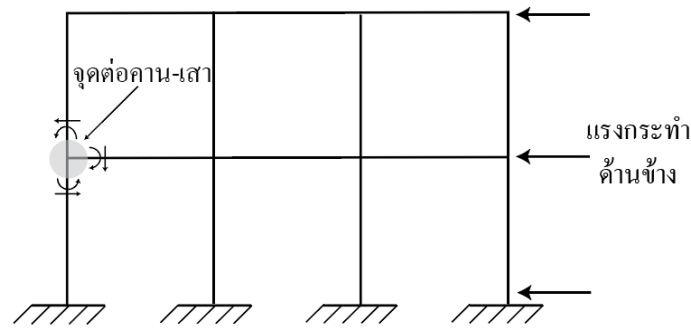
ในการทดสอบนี้ได้ศึกษาจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ทำจากคอนกรีตกำลังต่ำ โดยชิ้นตัวอย่างในการทดสอบประกอบไปด้วย ชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังและชิ้นตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีต การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่ความเข้าใจรายละเอียดวิธีการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมุ่งเน้นในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมและกลไกการรับแรงที่เปลี่ยนไปโดยการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็ก

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปภายหลังจากการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาภายนอกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. เพื่อศึกษากลไกการรับแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่อคาน-เสาภายนอกหลังจากได้รับการเสริมกำลังด้วยปูนคอนกรีตเสริมเหล็ก

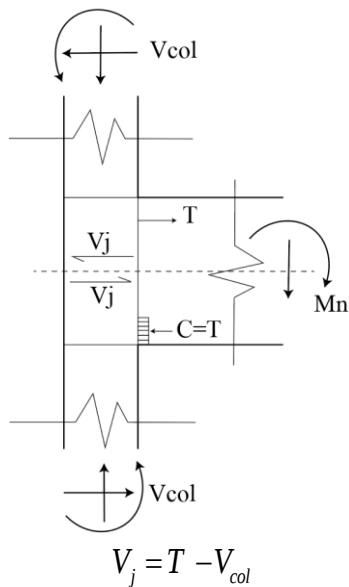
เครื่องมือและวิธีการ

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อเมื่อโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำทางด้านข้าง เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว จุดต่อคาน-เสาเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้น จะรับแรงภายในดังภาพที่ 1

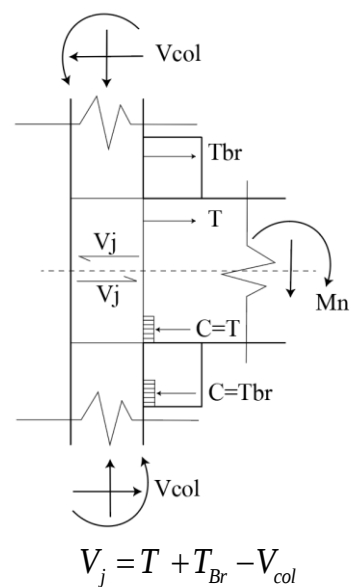


ภาพที่ 1 แรงภายในชิ้นส่วนเมื่ออาคารได้รับแรงกระทำด้านข้าง

เมื่อพิจารณาแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างได้รับแรงกระทำด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสา (V_{col}) และเกิดโมเมนต์ที่คานส่งผลให้เหล็กเสริมคานในแนวนอนเกิดแรงดึง (T) ซึ่งถ่ายแรงไปยังบริเวณจุดต่อคาน-เสาทำให้เกิดแรงเฉือนในแนวนอน (V_j) ที่ส่งถ่ายเข้ายังจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยภายหลังโครงสร้างได้รับการเสริมกำลังด้วยขาคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีแรงดึงของเหล็กภายในบารวมด้วย (T_{br}) ดังภาพที่ 2



(ก) จุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลัง



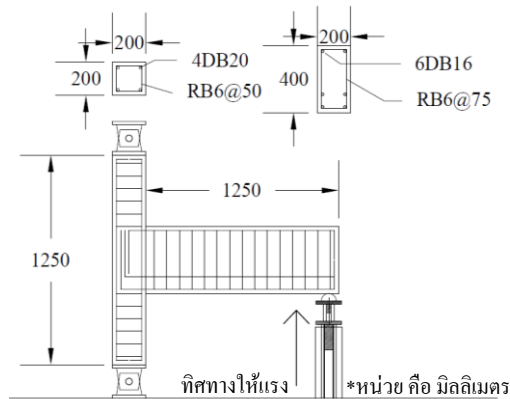
(ข) จุดต่อคาน-เสาภายนอกที่เสริมกำลัง

ภาพที่ 2 สมการในการคำนวณแรงเฉือนในแนวนอนที่จุดต่อภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่เสริมกำลัง

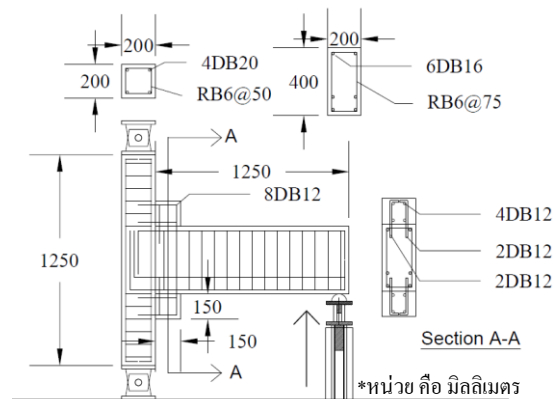
รายละเอียดชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) และที่เสริมกำลัง (BCJ-2)

สำหรับตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่มีกำลังคอนกรีตกำลังต่ำ [1] ได้ทำการออกแบบการทดสอบโดยกำหนดความสูงและความยาวของคานที่เป็นจุดตัดกลับของโครงอาคารตามทฤษฎี ดังภาพที่ 3 และวิธีการเสริมกำลังดังภาพที่ 4-5 โดยคำนึงถึงข้อจำกัดให้สามารถทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ การยึดตัวอย่างที่บริเวณบนหัวเสาและเสาต้นล่างถูกยึดด้วยฐานแบบหมุน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ การให้แรงกระทำแบบไปในทิศทางเดียวแบบผลักขึ้น เพื่อทำให้เกิดแรงเฉือนที่จุดต่อ โดยให้แรงที่ละ 300 กิโลกรัม จนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ

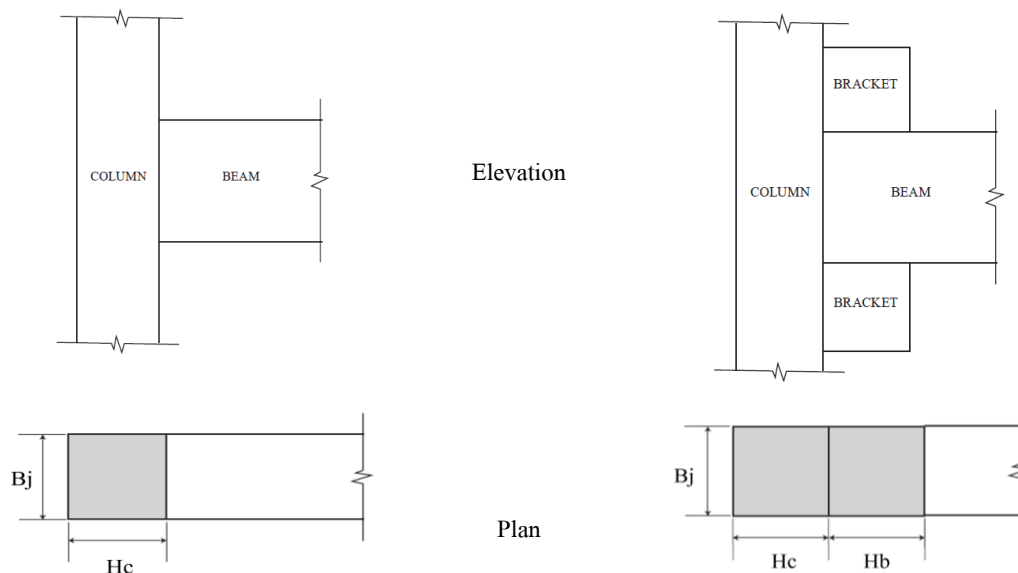


(ก) ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1)



(ข) เสริมกำลังด้วยผ้าคอนกรีตเสริมเหล็ก (BCJ-2)

ภาพที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างในการทดสอบตัวตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่มีการเสริมกำลัง



$$A_j = B_j \times H_c$$

(ก) ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1)

$$A_j = (B_j \times H_c) + (B_j \times H_b)$$

(ข) เสริมกำลังด้วยผ้าคอนกรีตเสริมเหล็ก (BCJ-2)

ภาพที่ 4 การคิดพื้นที่ประสิทธิผลที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาภายนอกก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยผ้าคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ก) ฉีด Epoxy ในรูที่เตรียมไว้



(ข) เจาะเสียบเหล็กเสริม



(ค) ประกอบแบบปากคอนกรีต



(ง) เทคอนกรีตที่บริเวณปาก

ภาพที่ 5 วิธีการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสาภายนอกด้วยปากคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุ

ในการศึกษานี้การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตจะเป็นไปตามมาตรฐาน C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens [10] และเนื่องจากการทดสอบได้ควบคุมให้บริเวณจุดต่อคาน-เสาเกิดการวิบัติ จึงกำหนดให้คุณสมบัติของคอนกรีตจุดต่อคาน-เสามีกำลังคอนกรีตที่ต่ำ โดยสรุปคุณสมบัติคอนกรีตไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่าง	กำลังอัดเฉลี่ยของ คอนกรีตคาน (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย ของคอนกรีตเสา (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย ของคอนกรีต จุดต่อ (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ยของ คอนกรีตที่ ปากคอนกรีต (MPa)
ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1)	38.93	38.93	13.24	-
เสริมกำลัง (BCJ-2)	38.93	38.93	13.92	33.05

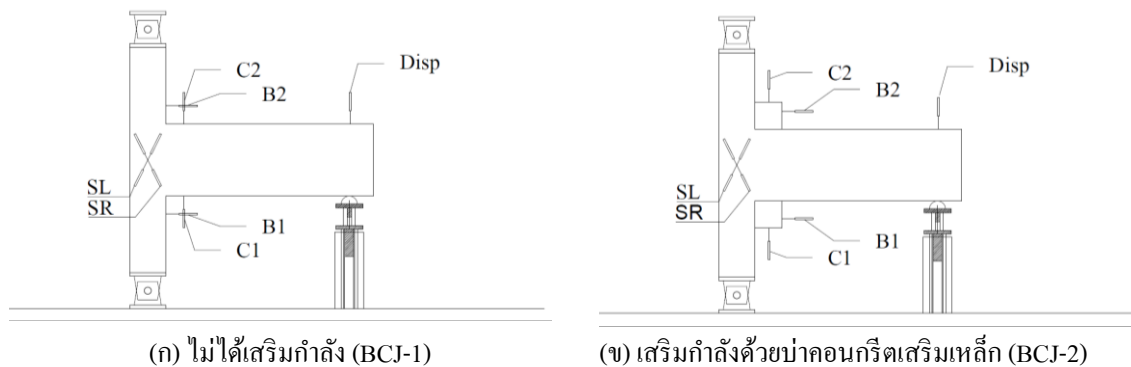
สำหรับเหล็กการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products [11] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเค้นครากและความเค้นประลัยของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็กเสริม	หน้าตัด (cm ²)	ความเค้นคราก (MPa)	ความเค้นประลัย (MPa)	ร้อยละการยืดตัว
RB6	0.28	333.13	458.06	33.30
DB12	1.13	524.65	654.59	20
DB16	2.01	551.42	650.86	22.50
DB20	3.14	541.32	647.53	24.50

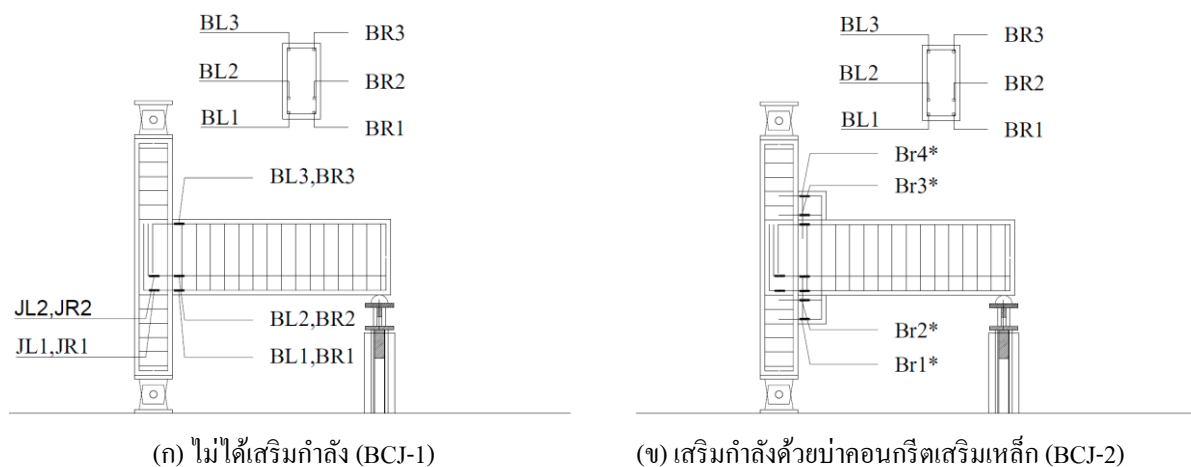
การติดตั้งตัวอย่างและอุปกรณ์วัดผล

สำหรับการติดตั้งเครื่องวัดระยะ (Displacement Transducers) เพื่อดูพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งหมด 7 ตำแหน่ง โดยมุ่งเน้นการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อคาน-เสา ที่ถูกติดตั้งในแนวทแยง ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดระยะสำหรับตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอก

การติดตั้งการวัดค่าการยืดตัวเหล็ก (Strain gauge) ที่บริเวณคานและบ่วงคอนกรีตสำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลัง เพื่อดูพฤติกรรมของเหล็กภายในคาน ดังแสดงในภาพที่ 7

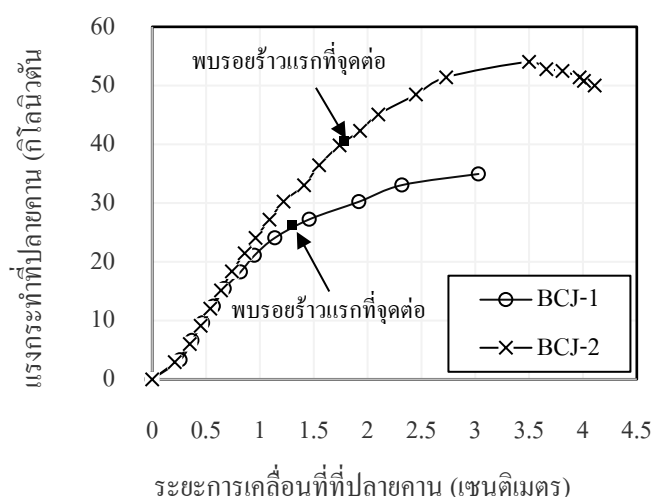


ภาพที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดการยืดตัวของเหล็กเสริมสำหรับตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอก

ผลการวิจัย

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานและระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน

ในตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง เริ่มพบรอยร้าวแรกเมื่อมีแรงกระทำปลายคานเท่ากับ 24 กิโลนิวตัน และตัวอย่างที่เสริมกำลังพบรอยร้าวแรกที่แรงกระทำปลายคานเท่ากับ 40 กิโลนิวตัน หลังจากนั้น รอยร้าวที่บริเวณจุดต่อจะเริ่มขยายใหญ่ขึ้นและครอบคลุมทั้งบริเวณจุดต่อ ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่ปลายคานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 35 กิโลนิวตันและสำหรับตัวอย่างที่เสริมกำลังจะรับแรงได้สูงสุด 54 กิโลนิวตัน จากภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานระหว่างจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) เปรียบเทียบกับจุดต่อที่มีการเสริมกำลังด้วยบาคอนกรีต (BCJ-2) แสดงให้เห็นว่า ค่าความชันของกราฟตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยบาคอนกรีตมีความชันมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าสติเฟนส์ที่สูงกว่า



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) และที่เสริมกำลังด้วยบาคอนกรีต (BCJ-2)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับความเครียดดึงและความเครียดอัดของคอนกรีตในแนวทแยงที่บริเวณจุดต่อภายนอก

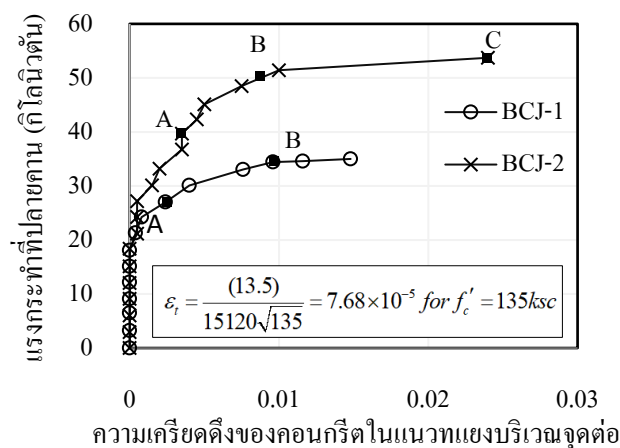
สำหรับการพิจารณาค่าความเครียดดึงและอัดของตัวอย่างได้จากเครื่องวัดระยะที่ติดตั้งในแนวทแยงบริเวณจุดต่อดังภาพที่ 6 โดยเปลี่ยนจากระยะการเคลื่อนที่ในแนวทแยงเป็นความเครียด

ในตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เสริมกำลัง (BCJ-2) พบว่าความเครียดดึงของคอนกรีตที่บริเวณจุดต่อทั้งสองตัวอย่าง ณ แรงกระทำที่ปลายคานสูงสุดมีค่ามากกว่าความเครียดที่กำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต ($\varepsilon_1 > \varepsilon_t$) ดังภาพที่ 9 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่บริเวณจุดต่อที่เกิดรอยร้าวในแนวทแยง ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมรอยร้าวที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 11 และ 12

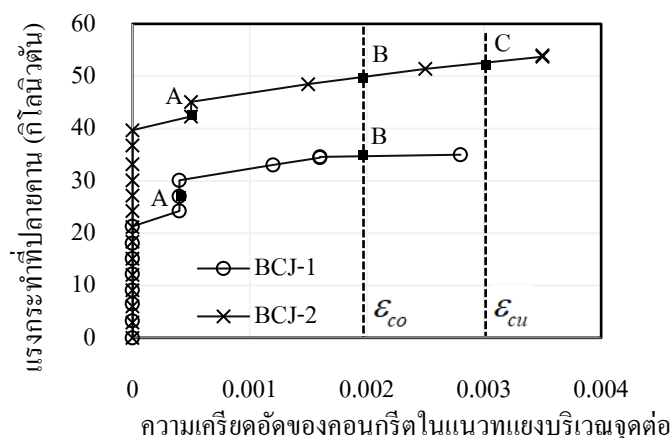
จากภาพที่ 10 พบว่าที่จุด A เป็นบริเวณที่เริ่มพบรอยร้าวในแนวทแยงโดยพบว่ารอยร้าวแรกที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อภายหลังการเสริมกำลังเกิดขึ้นที่ค่าแรงกระทำที่ปลายคานที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพื้นที่ประสิทธิผล

บริเวณจุดต่อเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแรงและส่งผลให้ชะลอการเกิดรอยร้าวที่บริเวณจุดต่อ สำหรับจุด B เป็นจุดที่ความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อมีค่าเท่ากับความเครียดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด ($\varepsilon_2 = \varepsilon_{co}$) โดยจากการทดสอบพบว่า ทั้งตัวอย่างก่อนเสริมกำลังและตัวอย่างภายหลังการเสริมกำลังเกิดรอยแตกเป็นแนวยาวที่บริเวณจุดต่อที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และจุด C เป็นจุดที่ความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อมีค่าเท่ากับความเครียดดัดประลัย ($\varepsilon_2 = \varepsilon_{cu}$) โดยพบว่าเกิดรอยร้าวขยายใหญ่ขึ้นและเกิดการอัดของคอนกรีตแตกเป็นรอยยาวครอบคลุมบริเวณจุดต่อ

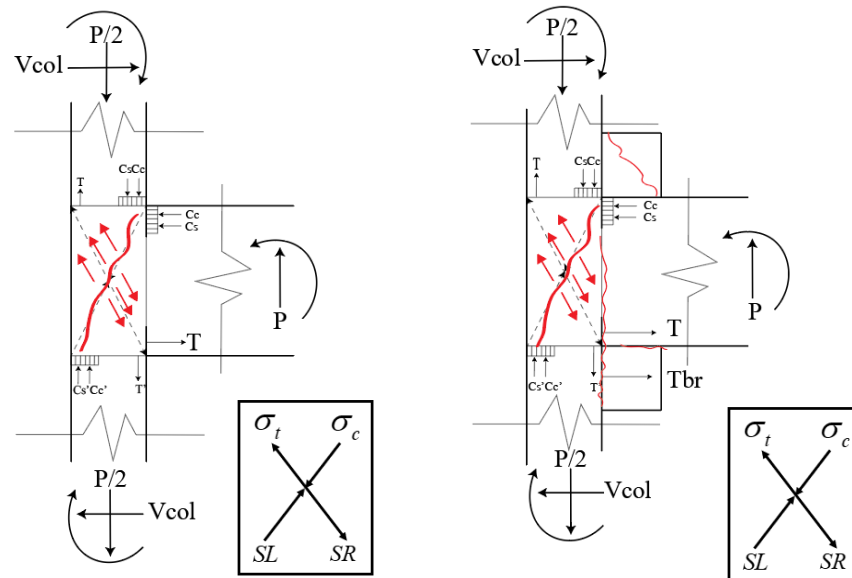
จากความเครียดดึงและอัดในแนวทแยงบริเวณจุดต่อกาน-เสาจะพบว่าลักษณะการวิบัติของจุดต่อสอดคล้องกับกลไกการรับแรงดึงและแรงอัดในแนวทแยง (Strut and Tie Mechanism) จากการสังเกตจะพบว่าการแตกของคอนกรีตในแนวทแยงที่รับแรงอัดจะเป็นตัวควบคุมการวิบัติของจุดต่อ ที่แรงกระทำสูงสุด



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับความเครียดดึงของคอนกรีตในแนวทแยงที่บริเวณจุดต่อ ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เสริมกำลัง (BCJ-2)



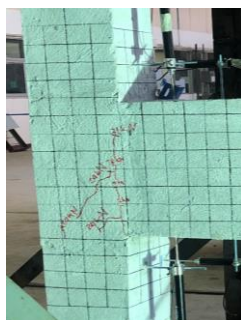
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับความเครียดอัดของคอนกรีตในแนวทแยงที่บริเวณจุดต่อ ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เสริมกำลัง (BCJ-2)



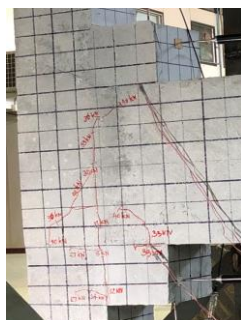
(ก) ไม่ได้เสริมกำลัง (BCI-1)

(ข) เสริมกำลังด้วยปากคอนกรีต (BCI-2)

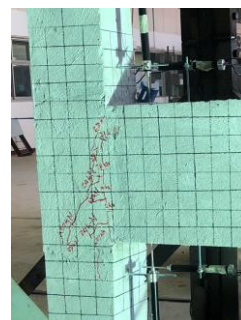
ภาพที่ 11 กลไกการวิบัติที่จุดต่อคาน-เสาในการศึกษา



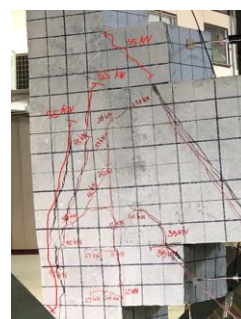
(ก) ตำแหน่ง ณ รอยร้าวแรกที่พบบริเวณจุดต่อ (จุด A)



(ข) ตำแหน่ง ณ ความเครียดอัดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อมีค่าเท่ากับความเครียดอัดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด (จุด B)



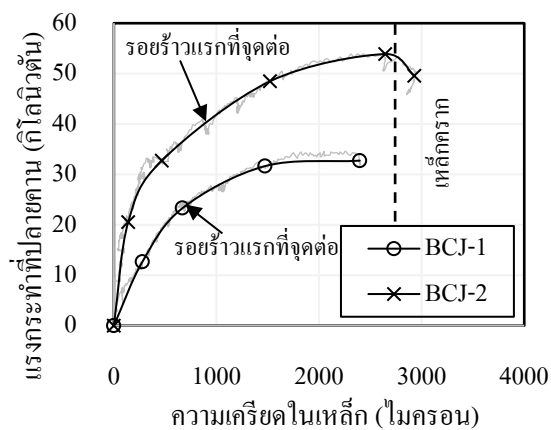
(ค) ตำแหน่ง ณ แรงกระทำที่ปลายคานสูงสุดกับตัวอย่าง



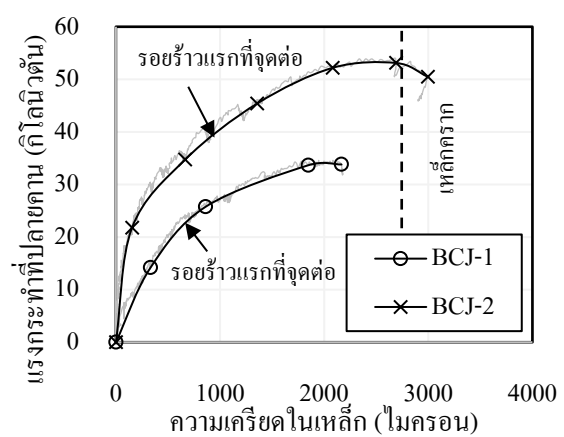
ภาพที่ 12 รอยร้าวที่พบบริเวณจุดต่อคาน-เสา ณ ตำแหน่งต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานและความเครียดในเหล็กเสริม

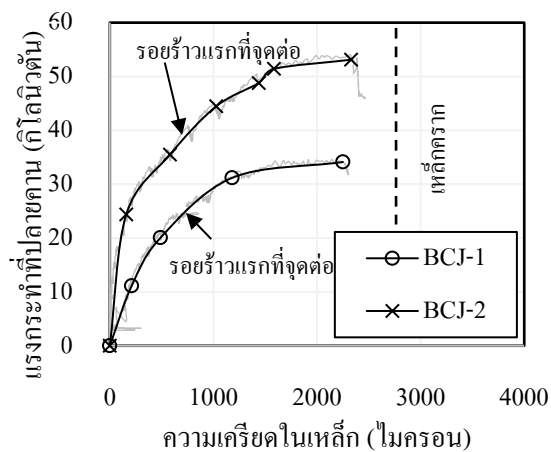
ในการทดสอบตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) พบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมคานยังไม่พัฒนาไปถึงจุดคราก และสำหรับตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาที่เสริมกำลังด้วยบาคอนกรีต (BCJ-2) พบว่าเหล็กเสริมคานเกิดการครากที่ตำแหน่ง BL1 และ BR1 หากพิจารณาที่แรงกระทำที่ปลายคานที่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าความเครียดของเหล็กเสริมคานของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยบาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีค่าลดน้อยกว่าตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง เนื่องจากการเพิ่มบาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นการเพิ่มความลึกประสิทธิภาพของคานทำให้ลดแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมคานบริเวณหน้าเสามีค่าลดลง (จุดครากความเครียดของเหล็กเท่ากับ 2700 ไมครอน สำหรับเหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงคราก 550 MPa) ดังภาพที่ 13



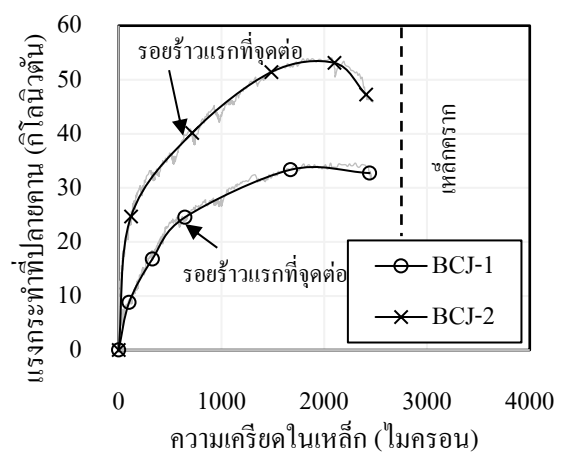
(ก) ตำแหน่ง BL1



(ข) ตำแหน่ง BR1



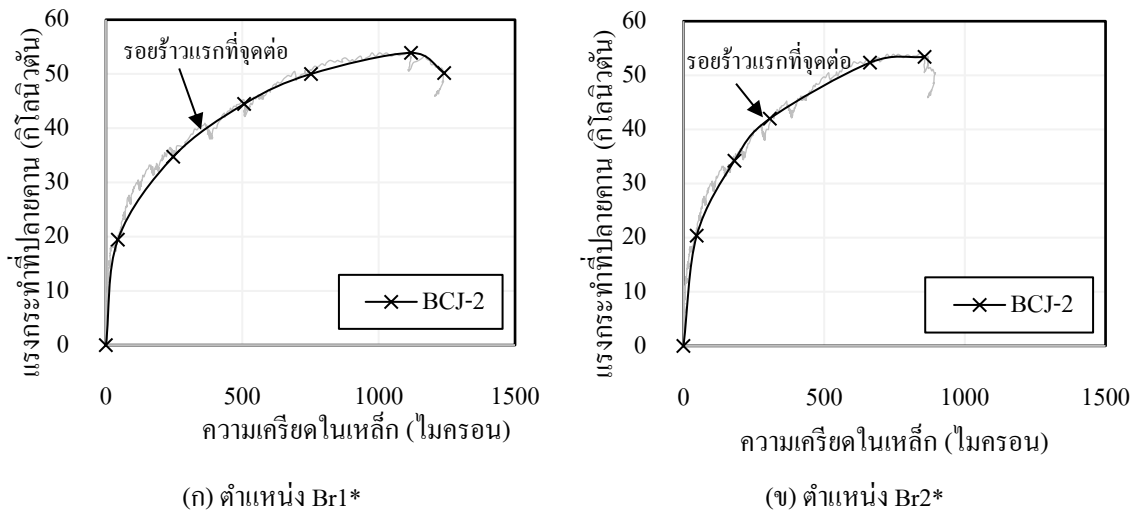
(ค) ตำแหน่ง BL2



(ง) ตำแหน่ง BR2

ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับความเครียดในเหล็กเสริมคาน

สำหรับเหล็กคานบริเวณบ่าคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าเหล็กเสริมดังกล่าวยังมีการพัฒนาไม่ถึงจุดครากดังแสดงในภาพที่ 14 (จุดครากความเครียดของเหล็กเท่ากับ 2700 ไมครอน สำหรับเหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงคราก 550 MPa)



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานกับความเครียดในเหล็กเสริมบริเวณบ่า

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในแนวราบที่จุดต่อและแรงกระทำที่ปลายคานของตัวอย่างจุดต่อภายนอก

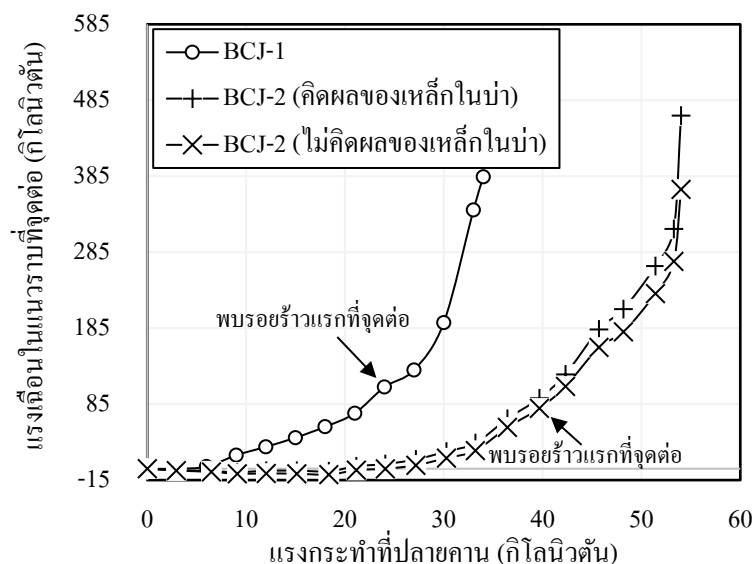
แรงเฉือนในแนวราบที่บริเวณจุดต่อที่เกิดขึ้นในการทดสอบสามารถคำนวณได้ดังภาพที่ 2 โดยการนำค่าจากการยึดตัวของเหล็กในภาพที่ 13-14 แปลงเป็นความเค้นเพื่อหาแรงดึงเหล็กและลบโดยแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสา สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือคิดผลแรงดึงเหล็กของบ่ารวมด้วย และไม่คิดผลของแรงดึงเหล็กในบ่าโดยสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปแรงเฉือนในแนวราบที่เกิดขึ้นในจุดต่อกับกำลังต้านทานระบุจุดต่อภายนอก

ตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีต จุดต่อ (MPa)	แรงเฉือนในแนวราบที่ เกิดขึ้นที่รอยร้าวแรก (kN)	แรงเฉือนในแนวราบ ที่เกิดขึ้นสูงสุด (kN)	หมายเหตุ
BCJ-1	13.24	105.40	384.15	-
BCJ-2*	13.92	98.20	464.95	คิดผลของเหล็กในบ่า
BCJ-2**	13.92	73.20	367.75	ไม่คิดผลของเหล็กในบ่า

จากภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงเฉือนในแนวราบสูงสุดที่ถ่ายเข้าไปยังจุดต่อที่ไม่ได้เสริมกำลังและจุดต่อที่เสริมกำลังโดยไม่คิดผลของเหล็กเสริมในบ่าคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาแรงกระทำที่ปลายคานที่เท่ากัน พบว่าแรงเฉือนที่ส่งถ่ายไปยังบริเวณจุดต่อของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยบ่าคอนกรีตมีค่าน้อยลงเนื่องจากการเพิ่มบ่าคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นการเพิ่มความลึกประสิทธิภาพของคาน ทำให้ลดแรงดึงของเหล็กเสริมคานบริเวณหน้าเสา และหากพิจารณาแรงเฉือนในแนวราบสูงสุดที่ถ่ายเข้าไปยังบริเวณจุดต่อของตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง

และภายหลังการเสริมกำลังที่คิดผลของเหล็กภายในพบว่ามีความสูงกว่าตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง เนื่องจากสมการจากภาพที่ 2 (ข) มีผลของแรงดึงเหล็กในบาร่วมด้วย



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในแนวราบที่จุดต่อกับแรงกระทำที่ปลายคานของตัวอย่างจุดต่อภายนอก เปรียบเทียบระหว่าง ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง (BCJ-1) และตัวอย่างที่เสริมกำลัง (BCJ-2)

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสาภายนอกที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่มีการเสริมด้วยปากคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วยปากคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแรงประสิทธิภาพของบริเวณจุดต่อทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่ปลายคานได้มากขึ้น
2. การวิบัติของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษาเกิดขึ้น โดยความเครียดของคอนกรีตที่พบในจุดต่อมีลักษณะสอดคล้องกับกลไกการรับแรงดึงและแรงอัดในแนวทแยง (strut and tie mechanism) โดยการบิดแตกของคอนกรีตในแนวทแยงเป็นตัวควบคุมการวิบัติของจุดต่อ ที่แรงกระทำสูงสุด
3. หากพิจารณาที่แรงกระทำที่เท่ากันแรงเฉือนในแนวราบที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อของตัวอย่างภายหลังการเสริมกำลังด้วยปากคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าลดลงจากค่าที่เกิดขึ้นในตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง และพบว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยปากคอนกรีตเสริมเหล็กมีความต้านทานแรงเฉือนในแนวราบที่สูงกว่าตัวอย่างก่อนเสริมกำลังเนื่องจากมีผลของแรงดึงเหล็กในบาร่วมด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ สำหรับนักศึกษามหาบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



เอกสารอ้างอิง

1. Ministerial Regulation No.6, 1984. Issued in Accordance with Thailand building control act. 1979; Thai.
2. Hwang SJ, Lee HJ. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model. J Struct Eng. 2002; 128(12), 1519–1526.
3. Ghobarah A, Said A. Seismic Rehabilitation of Beam-Column joints using FRP Laminates. 2001; 5(1), 113–129.
4. Ghobarah A, Said A. Shear strengthening of beam-column joints. 2002; 24, 881–888.
5. Antonopoulos CP, Triantafillou TC, Asce M. Experimental Investigation of FRP-Strengthened RC Beam-Column Joints. 2003; 7(1), 39–50.
6. Corazao M, Durrani AJ. Repair and Strengthening of Beamto- Column Connections Subjected to Earthquake Loading. Technical Report. 1989; NCEER-89-0013, 12, 115-130.
7. Ghobarah A, Aziz TS, Biddah A. Rehabilitation of Reinforced Concrete Frame Connections Using Corrugated Steel Jacketing. ACI Structural Journal. 1997; 4(3), 283-294.
8. Pimanmas A, Chaimahawan P. Shear strength of beam-column joint with enlarged joint area. Engineering Structures. 2010; 32(9), 2529–2545.
9. Pimanmas A, Chaimahawan P. Cyclic Shear Resistance of Expanded Beam-Column Joint. Procedia Eng. 2011; 14, 1292–1299.
10. ASTM C39/C39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. ASTM Stand B. 2003; (March):1-5.
11. ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM Int. (Approved). 2004; 1-48. doi:10.1520/A0370-16.2.