

ประสิทธิภาพการรับแรงบิดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำเสริมแรงด้วย แผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัตรอบภายหลัง

Torsional performance of low strength RC concrete beams strengthened with high-ductile metal straps

ณัฐพร คันทะประดิษฐ์^{1,*}, อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ² และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.นครปฐม

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช

*Corresponding author; E-mail address: bownatthaporn2537@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงบิดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัตรอบภายหลัง ซึ่งแรงบิดที่เกิดขึ้นในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย อาจเกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเยื้องศูนย์กลาง หรือเกิดจากแผ่นดินไหว ทำให้โครงสร้างเกิดการบิด โดยการทดสอบจะประกอบไปด้วย ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 คาน ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ คานคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดต่ำเท่ากับ 15 MPa ระยะห่างของเหล็กปลอก (50 และ 100 มม.) ระยะห่างของการรัตรอบเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง ผลการทดสอบที่จะทำการนำเสนอ ได้แก่ การวิบัติของแรงบิดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและมุมบิด, ค่าน้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ, รูปแบบและพฤติกรรมรอยร้าว, การวิเคราะห์พฤติกรรม การอ่อนตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพการรับแรงบิด, แผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, คอนกรีตกำลังอัดต่ำ, การเสริมกำลัง

Abstract

This research studies the Torsional performance of low strength RC concrete beams strengthened with post-tension metal strapping technique. The torsion that causes structural damage in reinforced concrete buildings may be a result of the load being focused at the center, or by an earthquake resulting in a structure twisting. The test consists of 4 reinforced concrete beam samples. The variable studies low strength concrete has the compressive strength (15 MPa), shear reinforcement ratio, with different spacings (50 and 100 mm), the distance of the fastening around the reinforcement by the pressed steel induction plate, test results that will be presented, torque failure in reinforced

concrete beams and torsional angles, maximum failure and failure form, cracks and behavior, and behavior analysis of reinforced concrete beams.

Keywords: Torsion Performance, Post - tensioned metal strapping, Reinforced Concrete Beams, low strength concrete, Reinforcement

1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมักจะมีแบบให้อาคารสามารถรับแรงเฉือน แรงอัด และแรงดัดได้ดี ในบางครั้งโครงสร้างจำเป็นต้องรับแรงบิด อาจเกิดจากแผ่นดินไหว หรือการรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง เช่น คานรับพื้นระเบียง คานรับพื้นกันสาด ซึ่งการวิบัติของอาคารจะทำให้เกิดการสูญเสียจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมักจะมีปัญหา เสากับคาน ที่เป็นองค์ประกอบหลักมักเกิดการวิบัติก่อน จึงได้มีการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับเสาและคานเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้น้อยลง [1]

การเสริมกำลังองค์อาคารรับแรงส่วนเกินไม่ว่าจะเป็น แรงดัด แรงอัด แรงเฉือน หรือแรงบิด ได้มีการศึกษาโดยใช้เส้นใยคอมโพสิต (FRP) ที่ทำจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยประเภทแผ่นมาใช้ทำการหุ้มรอบภายหลัง โดยวิธี Externally Bonded Reinforcement, EBR เพื่อเสริมกำลังให้กับองค์อาคาร [2-7] อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิตและผิวคอนกรีต ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง และค่าใช้จ่ายของวัสดุประเภทวัสดุคอมโพสิตและวัสดุยึดเหนี่ยวมีราคาสูง เมื่อเทียบกับวิธีการหุ้มรอบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel jacketing) หรือการพอกทับด้วยคอนกรีตใหม่ (Concrete overlay) ด้วยปัจจัยเหล่านี้ เป็นผลให้การพิจารณาการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง โดยวิธี EBR สำหรับโครงสร้างอาคารในประเทศที่กำลังพัฒนาอาจไม่แพร่หลาย [7]

จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุและวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงในการเสริมกำลังคานคอนกรีต (Post-tension metal strapping) โอบรัดองค์อาคารคอนกรีต คล้ายกับวิธี EBR แต่การใช้แผ่นเหล็กเหนียวรัดรอบจะเป็นการอัดแรงขณะทำการติดตั้ง [4,8] ซึ่งผลจากการวิจัยโดย Frangou และคณะ [4] ได้พัฒนาเทคนิคการใช้เหล็กพรีตension (Post-Tensioned Metal Straps, PTMS) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัด โดยค่าความแข็งแรงของสายโลหะโดยทั่วไปจะแตกต่างกันไประหว่าง 300 ถึง 1000 MPa ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก โดยผลจากการอัดแรงขณะติดตั้งเหล็กพรีตension จะเป็นการเพิ่มแรงรัดรอบเรียกว่า Confinement ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก เพิ่มขึ้น 20-40%



รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับเสริมโครงสร้างคอนกรีตด้วย Post-tensioned metal strapping (PTMS) (อ้างอิงจาก [7])

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย Imjai และคณะ [7,8] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้ทำการปรับปรุงวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จับยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวในระยะยาว เช่น Stress relaxation โดยการเพิ่มการจับยึดด้วย Mechanical anchorage โดยการใช้ Chemical bolt ระหว่างช่วงของเหล็กพรีตension แล้วพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบและทำการออกแบบ Clip lock ซึ่งเป็นเหล็ก low strength เกิดสนิมได้ง่าย จึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้ Aluminum clip lock ซึ่งจะประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังคานสำหรับงานวิจัยนี้

งานวิจัยในต่างประเทศได้มีการเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด เช่น เสาที่มีกำลังอัดปานกลางถึงกำลังสูง แต่สำหรับการประยุกต์ใช้การเสริมกำลัง PTMS สำหรับคานคอนกรีตรับแรงอัดที่ กำลังอัดต่ำยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง [8-12] ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงอัดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำ (ค่า f'_c ไม่เกิน 15 MPa) ที่เสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงอัดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง โดยขอบเขตงานวิจัยจะทำการทดสอบคานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบการวิบัติของแรงอัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและมุมบิด, ค่าน้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ, รูปแบบและพฤติกรรมรอยร้าวและการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์ตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเท่ากับ 15 MPa ระยะห่างของเหล็กปลอก 50 และ 100 มม.

3. วิธีการศึกษาและทดสอบ

3.1 รายละเอียดคานทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาด 150x250x2700 มม. ซึ่งแต่ละคานจะมีรายละเอียดดังนี้ B1 คานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กปลอก จำนวน 1 คาน, B2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 100 มม. จำนวน 1 คาน, B2-ST คานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง และ B3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 50 มม. (ออกแบบรับแรงอัด) ดังแสดงในรูปที่ 3

3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบเป็นคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (OPC type 1) ดังตารางที่ 1 ซึ่งกำหนดกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 15 MPa ได้เก็บตัวอย่างการทดสอบประเภทละ 6 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของคอนกรีต โดยมีผลการทดสอบดังนี้ ค่ากำลังอัด Cube strength เท่ากับ 18.8 MPa, ค่ากำลังอัด Cylinder strength เท่ากับ 15.4 MPa ที่เวลา 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2 ในส่วนของ การทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริม 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กปลอก (RB9) และเหล็กตามแนวยาว (DB12) ชนิดละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังจุดครากเฉลี่ยเท่ากับ 362 MPa และ 602 MPa และกำลังแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 514 MPa และ 645 MPa ตามลำดับ

3.3 การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง

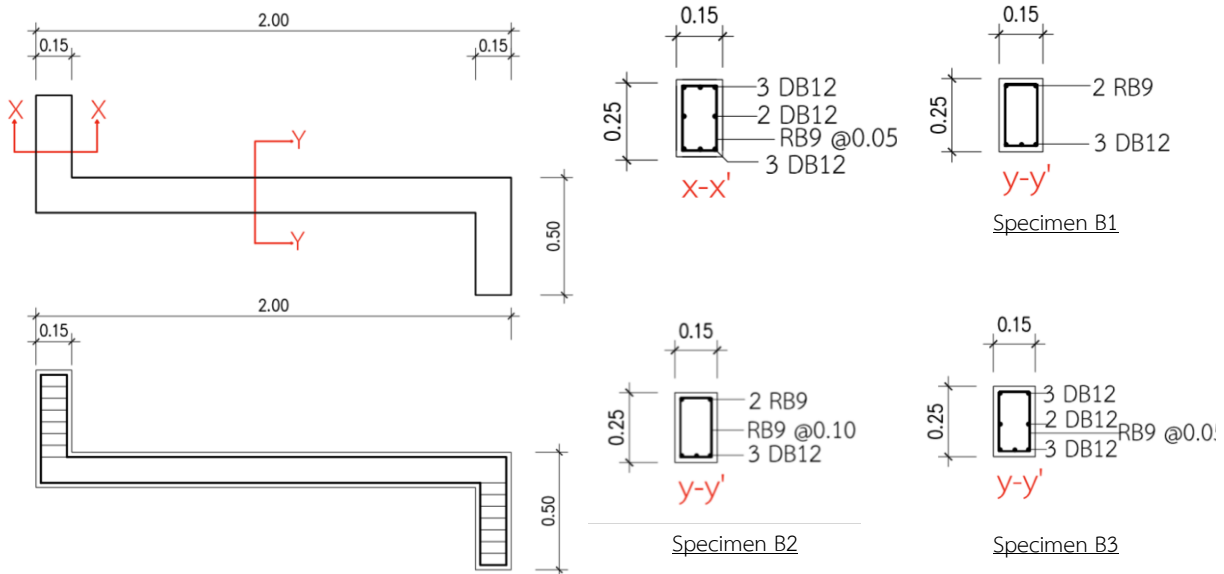
การทดสอบในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงอัดของคานคอนกรีต ที่มีกำลังอัดต่ำ ($f'_c=15$ MPa) เสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง มีขนาด 0.9x32 มม. ($f_u = 950$ MPa) โดยเครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฮดรอลิก (รูปที่ 2) ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก โดยแรงลมขนาด 8 bar หรือ 116 psi ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดึงในเหล็กแผ่นประมาณ 400 kg



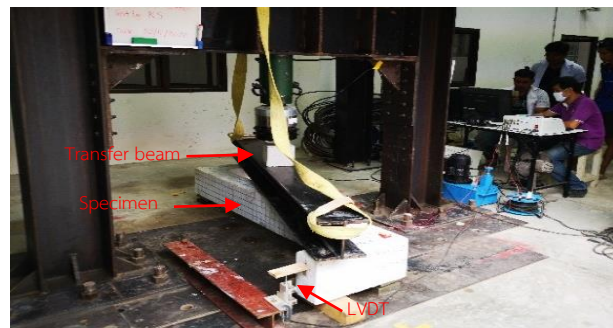
รูปที่ 2 การเสริมกำลังคานด้วยแผ่นเหล็กเหนียว (คาน B2-ST)

3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัว

การวัดการแอ่นตัวจะใช้เครื่องมือ Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มม. จำนวน 2 ชุด บริเวณปลายคานสำหรับใช้คำนวณค่ามุมบิด โดยการวัดการแอ่นตัว



รูปที่ 3 มิติคานทดสอบและรายละเอียดเหล็กเสริม



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและให้น้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ 1 ลบ.ม.

Mix proportion (kg/m ³)				w/c ratio	Slump (mm)
Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water		
248	1118	755	198	0.79	75

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

Statistical values	Cube Compressive strength (fc)	Cylinder Compressive strength (fc)	Tensile strength (ft)	Flexural Strength (fb)
Mean (MPa)	18.8	15.4	1.4	1.9
Std. Dev. (MPa)	3.1	2.8	0.5	0.3
Sample (No)	6	6	6	6
Min.	17.2	14.1	1.6	2.1
Mix.	21.5	18.9	1.3	1.4

4. ผลการทดสอบ

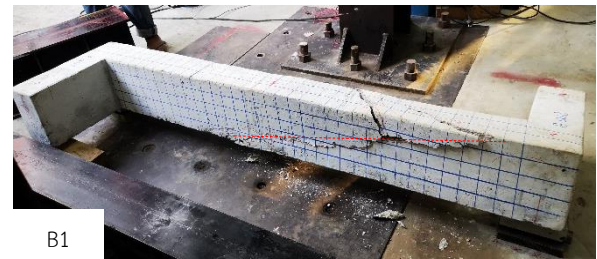
4.1 น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติ

น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติ แสดงในตารางที่ 3 โดยรูปแบบการวิบัติและรอยร้าวของคานทดสอบจะเกิดจากแรงบิดที่กระทำกับแรงเฉือน ทำให้คอนกรีตเป็นตัวรับแรงอัดและเหล็กเสริมเป็นตัวทำให้เกิดความเค้นดึง เมื่อช่วงเวลาที่หนึ่งที่ใช้แรงบิดมากขึ้นจะทำให้เกิดรอยแตกกว้างบริเวณด้านหน้าและด้านหลังคาน ซึ่งรอยแตกกว้างจะมีลักษณะเป็นเกลียวหมุน โดยรอบทำมุมประมาณ 22 - 45 องศา แสดงโดยเส้นประสีแดง ใกล้กับแนวร้าวของคานทดสอบ ดังรูปที่ 5 และมีพิกัดรอยร้าวแรก Cracking torque = 4.38 kN-m ต่ำกว่าคานทดสอบอื่นๆ และค่า Cracking torque เพิ่มขึ้น 114% (5.02 kN-m) และ 112% (4.92 kN-m) สำหรับคาน B3 และ B2-ST ตามลำดับ

ในส่วนของ Crack twist angle หรือค่ามุมบิด พบว่าคานควบคุม B1 มีค่ามุมบิด = 0.00432 Degree น้อยกว่าคานอื่นๆ และพบว่าคานที่มีระยะเหล็กปลอก และมีการเสริมกำลังมีค่ามุมบิดเท่ากับ 0.04650 และ 0.09168 Degree ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคานที่มีการเสริมกำลังสามารถเสียรูปได้มากกว่าคานที่ไม่มีการเสริมกำลัง

การวิเคราะห์ค่าแรงบิดประลัย พบว่าคาน B1 มีค่าความเหนียวเท่ากับ 4.40 kN-m และเพิ่มขึ้น 125% (5.54 kN-m), 150% (6.63 kN-m) และ 245% (10.78 kN-m) สำหรับคาน B2, B3 และ B2-ST ตามลำดับ

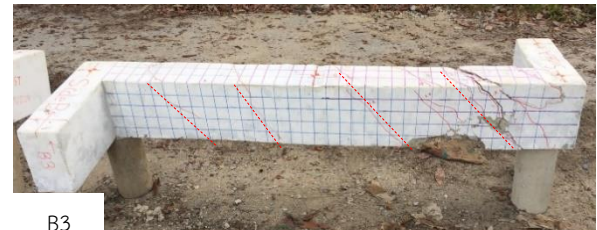
การวิเคราะห์ค่าความเหนียว Toughness โดยพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ พบว่าคาน B1 มีค่าต่ำสุดและเพิ่มขึ้นสำหรับคานที่มีเหล็กปลอกและคานที่มีการเสริมกำลัง ดังแสดงในตารางที่ 3



B1



B2



B3



B2-ST



B2-ST after remove steel straps

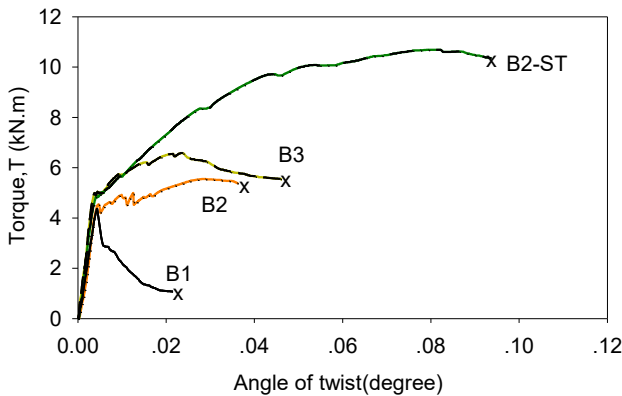
รูปที่ 5 ภาพการวิบัติของตัวอย่างคานทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ

Beam specimen	Cracking torque (kN-m)	Crack twist angle (Degree)	Ultimate torque (kN-m)	Ultimate twist angle (Degree)	Increase of ultimate torque (%)	Toughness (kN-m.rad. $\times 10^{-4}$)
B1	4.38	0.00096	4.40	0.00432	-	98.53
B2	4.56	0.00466	5.54	0.03540	125	415.72
B3	5.02	0.00384	6.63	0.04650	150	421.60
B2-ST	4.92	0.02437	10.78	0.09168	245	831.10

4.2 การวิเคราะห์แรงบิดและมุมบิด

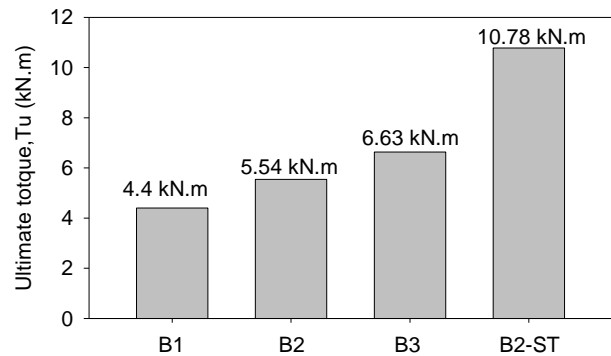
จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของคานทดสอบจะพบว่า แรงบิดที่กระทำลงบนคานในช่วงแรกจนถึงแรงบิดแตกร้า มุมบิดของคานมีค่าน้อยมากเนื่องจากคอนกรีตจะทำหน้าที่รับแรงบิดในช่วงแรก ดังตารางที่ 3 เมื่อทำการเปรียบเทียบจะพบว่าคาน B2-ST ที่เสริมกำลังจะสามารถรับแรงบิดได้ดีกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลังซึ่งแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 10.78 (kN.m) และมุมบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.09168 Degree



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิด

4.3 ประสิทธิภาพการเสริมกำลัง

จากรูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์บิดสูงสุดจากการทดสอบพบว่าคาน B2 มีค่าโมเมนต์บิดสูงกว่าคาน B1 อยู่ 20.58% และคาน B2-ST มีค่าโมเมนต์บิดสูงกว่าคาน B2 อยู่ 48.61% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังคานด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงทำให้เพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดแตกร้าและแรงบิดสูงสุดได้ดีกว่าคานที่ไม่เสริมกำลังอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์บิดสูงสุด

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงบิดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง โดยศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก คานไม่เสริมเหล็กปลอก และผลของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พิกัดรอยร้าวแรกของคานควบคุมที่ไม่มีเหล็กปลอก พบว่า Cracking torque = 4.38 kN-m ต่ำกว่าคานทดสอบอื่นๆ และค่า Cracking torque เพิ่มขึ้น 114% (5.02 kN-m) และ 112% (4.92 kN-m) สำหรับคาน B3 และ B2-ST ตามลำดับ
2. คานควบคุม B1 มีค่า Crack twist angle = 0.00432 Degree น้อยกว่าคานอื่นๆ และพบว่าคานที่มีระยะเหล็กปลอก และมีการเสริมกำลังมีค่ามุมบิดเท่ากับ 0.04650 และ 0.09168 Degree ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคานที่มีการเสริมกำลังสามารถเสียรูปได้มากกว่าคานที่ไม่มีการเสริมกำลัง
3. การวิเคราะห์ค่าแรงบิดประลัย พบว่าคาน B1 มีค่าความเหนียวเท่ากับ 4.40 kN-m และเพิ่มขึ้น 125% (5.54 kN-m), 150% (6.63 kN-m) และ 245% (10.78 kN-m) สำหรับคาน B2, B3 และ B2-ST ตามลำดับ
4. การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงบิดแตกร้าและกำลังต้านทานแรงบิดได้ดีกว่าคานที่ไม่มีการเสริมกำลัง เท่ากับ 245%

5. ระยะห่างเหล็กปลอกเมื่อเทียบกับไม่เหล็กปลอกทั้งสองแบบมีผลกระทบต่อกำลังการรับแรงบิดซึ่งเมื่อไม่มีเหล็กปลอกจะทำให้คานสามารถรับแรงบิดได้น้อยมากแต่ถ้าระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยจะทำให้สามารถรับแรงบิดได้ดีกว่าไม่มีเหล็กปลอก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับการแนะนำตลอดขั้นตอนการวิจัย งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือทดสอบในการดำเนินงานวิจัยและทุนสนับสนุนการวิจัย Science and Technology Research Grant (STRG 2019) โดย Thailand Toray Science Foundation ผ่านมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิวกร สร้อยศักดิ์, ชนะชัย ทองโถม, และ อัครวัชร เล่นวารี (2562). พฤติกรรมการรับแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24*, อุตรธานี, 10-12 กรกฎาคม 2562, หน้า STR022.
- [2] มณเฑียร เสรีจกิจ, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ (2562). ประสิทธิภาพการเสริมกำลังคานคอนกรีตที่เสียหายในภาวะใช้งานโดยใช้ระบบเหล็กพรีตริตรอบอัดแรงภายหลัง. *วารสารวิชาการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 577-584.
- [3] พงศธรณ์ จันทร์เพ็ญ, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ (2562). นวัตกรรมแผ่นเหล็กม้วนชนิดบางในการเสริมกำลังเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำโดยการอัดแรงรีตริตรอบภายหลัง. *วารสารวิชาการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, *in press*
- [4] Frangou, M., Pilakoutas, K. and Dritsos, S. (1995). Structural repair/strengthening of RC columns. *Construction and Building Material*, 9(5), pp. 259–266.
- [5] Chau-Khun, M., Awang, A. Z., Omar, W., Pilakoutas, K., Tahir, M. M., and Garcia, R. (2015). Elastic design of slender high-strength RC circular columns confined with external tensioned steel straps. *Advances in Structural Engineering*, 18(9), pp. 1487–1499.
- [6] Lee, H.-P., Awang, A. Z., and Omar, W. (2014). Steel strap confined high strength concrete under uniaxial cyclic compression. *Construction and Building Materials*, 72, pp. 48–55.
- [7] Imjai, T., Chaisakulkiet, C., Garcia, R. and Pilakoutas, K. (2017). Strengthening of RC members using Post-Tensioned Metal Straps: state of the research. *Lowland Technology International (LTI) Journal*, 2(2), pp. 187–196.
- [8] Imjai, T., Setkit, M, Garcia, R. and Figueiredo, F. (2020). Flexural strengthening of damaged low strength concrete beams using PTMS and/or NSM techniques, *Case Studies in Construction Materials*. Accepted.
- [9] Abd EL-HakimKhalil, Emad Etman, Ahmed Atta and Sabry Fayed. (2015). Torsional Strengthening of RC Box Beams Using External Prestressing Technique. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(2), pp. 30-41.
- [10] Meyyada, Y. Alabdulhady and Lesley H. Sneed. (2019). Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 205, pp. 148-163.
- [11] Gamal Ismail Khalil, Ahmed Saeid Debaiky, Mohamed Hussien Makhlof and Ahmed EL-Sayed Ewis. (2017). Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Repaired or Strengthened with Transversal External Post – Tension Elements. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, 4(4), pp. 54-73
- [12] Kandekar, S. B. and Talikoti, R. S. (2018). Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 9(21), pp. 465-474.