



## การเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำที่รับแรงบิดโดยวิธีการโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง

คติพนธ์ ศานุพงศ์ วีระสิทธิ์ ชำนาญกิจ คมสัน แดงแยม และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ\*

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านจัดการภัยพิบัตินานาชาติ สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak\_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.008

รับเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขเมื่อ 8 มกราคม 2564 ตอบรับเมื่อ 14 มกราคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 27 กรกฎาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นบางโอบรัดภายหลัง โดยวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำภายใต้แรงบิด โดยทดสอบในระยะที่ 1 ทำการทดสอบเพียงแค่วัยแรกเท่านั้น เพื่อจะศึกษาว่าแผ่นเหล็กเหนียวสามารถเพิ่มกำลังในการรับแรงบิดได้อย่างมีนัยสำคัญ และในระยะที่ 2 ทำการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำภายหลังจากที่เกิดรอยร้าวแล้วจากในระยะที่ 1 เพื่อจำลองสถานการณ์ที่อาคารได้รับความเสียหาย ภายใต้แรงบิดในห้องทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า วิธีการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยวิธีแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับแรงบิด สูงสุดร้อยละ 33 เมื่อเปรียบเทียบกับ การซ่อมแซมคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัวชนิดพิเศษที่มีกำลังอัดสูง (Non-shrink Grout) ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงบิดประลัยเพียงเล็กน้อย

**คำสำคัญ:** แรงบิด คานคอนกรีตกำลังต่ำ แผ่นเหล็กอัดแรงภายหลัง ระบบการเสริมกำลัง เหล็กพืด รอยร้าว



## Torsional Strengthening of Damaged Low-strength RC Beams Using Prestressed Ductile Metal Straps

Katipoj Sanupong, Weerasit Chamnankit, Komsan Dangyem and Thanongsak Imjai\*

Center of Excellence in Sustainable Disaster Management, School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2399, E-mail: thanongsak\_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.008

Received 17 November 2020; Revised 8 January 2021; Accepted 14 January 2021; Published online: 27 July 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research deals with the efficiency of torsional strengthening system on damaged low-strength reinforced concrete (RC) beams using post-tensioned metal strapping (PTMS) technique on 2-phase experiment. In phase 1, the test focused only on the first crack to determine the significant increase of torsional strength. In phase 2, all pre-cracked beam specimens from phase 1 were repaired with non-shrink cement and confined with high-ductile metal straps. To simulate the damage building, all strengthening beams were subsequently re-tested under pure torsion in the laboratory. Based on the test results, it is found that the use of the PTMS technique significantly enhances the torsional capacity. It is also found that the use of non-shrink cement as a crack repairing material for damaged concrete beams increased only the ultimate torsion capacity of the strengthening beams by up to 33%.

**Keywords:** Torsion, Low-strength Concrete, Post-tensioned Metal Strapping, Strengthening, Metal Straps, Cracks

Please cite this article as: K. Sanupong, W. Chamnankit, K. Dangyem, and T. Imjai, "Torsional strengthening of damaged low-strength RC beams using prestressed ductile metal straps," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 879–890, Oct.–Dec. 2022 (in Thai).

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนวัตกรรมการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงส่วนเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดัด แรงอัด แรงเฉือน หรือแรงบิด ได้มีการนำวัสดุเส้นใยคอมโพสิต (Fiber Reinforced Polymer; FRP) ประเภทแผ่น (Sheet) มาใช้ในการหุ้มรอบหรือโอบรัดองค์อาคาร [1]–[6] เรียกว่าวิธี Externally Bonded Reinforcement หรือ EBR โดยทำการออกแบบเพื่อรับแรงส่วนเกิน จากกำลังหน้าตัดขององค์อาคาร เช่น แรงดัด หรือแรงเฉือน ในกรณีของอาคารรับแรงบิด เช่น โครงสร้างที่เป็นระเบียงยื่นออกจากอาคารชั้นสอง การเสริมกำลังด้วยวิธี EBR นี้ สามารถเพิ่มความเหนียว และเพิ่มแรงบิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีการออกแบบควบคุมความเครียดในวัสดุให้เหมาะสม [7]–[13] อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิต และผิวคอนกรีตได้มีมาตรฐานการออกแบบ เช่น ACI 440.2R-08 [14] ซึ่งต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง และค่าใช้จ่ายของวัสดุประเภทวัสดุคอมโพสิต และวัสดุยึดเหนี่ยวมีราคาสูง เมื่อเทียบกับวิธีการหุ้มรอบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) หรือการพอกทับด้วยคอนกรีตใหม่ (Concrete Overlay) ด้วยปัจจัยเหล่านี้ เป็นผลให้การพิจารณาการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง โดยวิธี EBR สำหรับโครงสร้างอาคารในประเทศที่กำลังพัฒนาอาจไม่แพร่หลาย จากปัจจัยที่ต้องคำนึงของการเสริมกำลังโดยวิธี EBR ได้มีการศึกษาวิจัยวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงในการเสริมกำลังคานคอนกรีต (Hot Rolled Coil Steel) โอบรัดองค์อาคารคอนกรีต คล้ายกับวิธี EBR แต่การใช้เหล็กแผ่นชนิดบางรัดรอบและทำการอัดแรงขณะทำการติดตั้งผลจากการวิจัยโดย Frangou และคณะ [15], [16] ได้พัฒนาเทคนิคการใช้เหล็กพืดรัดรอบอัดแรง (Post-tensioned Metal Straps) หรือเรียกว่า (PTMS) ดังแสดงใน รูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงบิดโดยค่าความแข็งแรงของสายโลหะโดยทั่วไปจะแตกต่างกันไประหว่าง 300 ถึง 1,000 เมกะปาสคาล รูปที่ 1 เครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฮดรอลิก ดังรูปที่ 1 ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรง



(ก) แผ่นเหล็กเหนียว



(ข) ชุดเครื่องมือโอบรัด

รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับเสริมโครงสร้างคอนกรีต ด้วยวิธีการใช้เหล็กพืดรัดรอบอัดแรง (PTMS) [21]

กระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก โดยผลจากการอัดแรงขณะติดตั้งเหล็กเหนียวอัดแรง จะเป็นการเพิ่มแรงรัดรอบองค์อาคารคอนกรีต เรียกว่า Confinement ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 20–40% [17]–[20]

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย Imjai และคณะ [21] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้ทำการปรับปรุงวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จัดยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวในระยะยาว เช่น Stress Relaxation โดยการเพิ่มการจับยึดด้วย Mechanical Anchorage โดยการใช้ Chemical Bolt ระหว่างช่วงของเหล็กพืด และใช้พื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบ และได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จัดยึด Clip Lock ซึ่งเป็นเหล็กอ่อน (Mild Steel) เป็นสนิมได้ง่ายและไม่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอก โดยการเปลี่ยนมาใช้ Aluminum Clip Lock ในการศึกษาวิจัยในต่างประเทศ การเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตด้วยระบบ PTMS มีรายงานผลการศึกษางานวิจัย สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด เช่น เสาที่มีกำลังอัดปานกลางถึงกำลังสูง [22], [23] แต่

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงโอบรัดภายหลังเพื่อรับแรงบิด (Torsion) ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำที่รับแรงบิดเพียงอย่างเดียว (Pure Torsion)

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงบิดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง โดยทำการศึกษารูปแบบรอยร้าว (Crack Pattern) มุมบิด (Twist Angle) และเปรียบเทียบการวิบัติของคานภายใต้แรงบิดของคานตัวอย่างที่ร้าวในภาวะใช้งานภายหลัง ซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวิธีอัดแรงแผ่นเหล็กเหนียวภายหลัง

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ซึ่ง ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบคุณสมบัติวัสดุแผ่นเหล็กเหนียวในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้คานร้าวจากแรงบิด (First Cracking Torque) และขั้นตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพรับแรงบิดประลัย (Ultimate Torque) ของการซ่อมแซมโดยคอนกรีตกำลังอัดสูง และเสริมกำลังคานคอนกรีตที่ร้าวจากขั้นตอนที่ 2 โดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นเหนียวอัดแรงภายหลัง

### 2.1 รายละเอียดคานทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 5 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาด  $150 \times 250 \times 2,000$  มม. ซึ่งแต่ละตัวอย่างทดสอบจะมีรายละเอียดดังนี้ B0 (คานตัวอย่างควบคุมไม่มีเหล็กปลอก และทำการทดสอบจนวิบัติ) B1-I และ B1-II (คานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กปลอก และทำการทดสอบจนเกิดรอยร้าวแรก) และ B2-I, B2-II (คานคอนกรีตมีเหล็กปลอกระยะห่าง 100 มม.) รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งสำหรับตัวอย่างทดสอบ B2-I และ B2-II จะมีเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกคือ f12 มม. ( $f_y = 395$  MPa) และ f9 มม. ( $f_y = 235$  MPa) ตามลำดับ และสำหรับตัวอย่างทดสอบ B0, B1-I และ B1-II จะมีเหล็กเสริมหลักเหมือนกับ



รูปที่ 2 การซ่อมแซมคานคอนกรีตหลังจากผ่านการทดสอบจากระยะที่ 1 โดยคอนกรีตกำลังอัดสูง

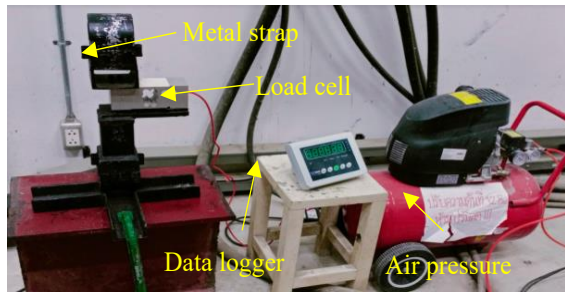
ตัวอย่างทดสอบ B2-I และ B2-II แต่ไม่มีการใส่เหล็กปลอก

### 2.2 คุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริม

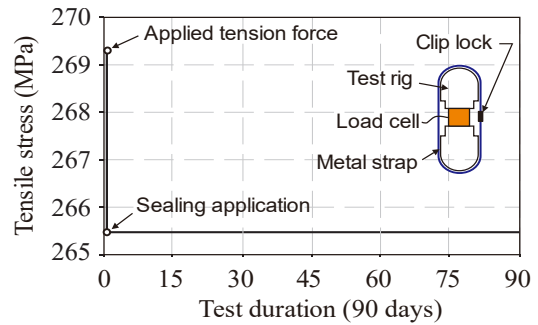
การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตามมาตรฐาน ASTM C39 [24] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type 1) มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 15 เมกะปาสคาล และผลจากการทดสอบหาค่าเฉลี่ยจากประเภทละ 6 ตัวอย่าง มีกำลังอัดคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เท่ากับ 18.8 เมกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก เท่ากับ 15.4 เมกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง Tensile Strength เท่ากับ 1.6 เมกะปาสคาล ในส่วนของการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริม 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กปลอก (f9) และเหล็กเสริมหลัก (f12) ชนิดละ 6 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเฉลี่ยเท่ากับ 262 เมกะปาสคาล และ 402 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และกำลังรับแรงดึงประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 514 เมกะปาสคาล และ 645 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

### 2.3 การซ่อมแซมคานที่ร้าวโดยคอนกรีตกำลังสูง

คณะวิจัยได้ทำการซ่อมแซมคานคอนกรีตหลังจากผ่านการทดสอบจากระยะที่ 1 โดยคอนกรีตกำลังอัดสูง ( $f_c = 70$  MPa) ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับคานตัวอย่างที่มีการซ่อมแซม (กำหนด R = Repair) คือ B1-I-R และ B2-I-R สำหรับการทดสอบในระยะที่ 2 จนวิบัติต่อไป



รูปที่ 3 ชุดทดสอบความคืบของแผ่นเหล็กอัดแรง



รูปที่ 4 ผลการลดลงของการอัดแรงจากอิทธิพลความคืบ

## 2.4 การเสริมกำลังโดยการอัดแรงแผ่นเหล็กบาง

การทดสอบในงานวิจัยนี้จะเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำ ( $f_c = 15 \text{ MPa}$ ) ด้วยการโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กเหนียว มีขนาดความกว้าง 32 มม. หนา 0.9 มม. และทำการอัดแรงขณะโอบรัดคานคอนกรีต ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุดทดสอบความคืบ (Creep Test) เพื่อหาค่าหน่วยแรงดึงประสิทธิผลของแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงในระยะยาวดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงเริ่มคงที่มีค่าเท่ากับ 265.5 เมกะปาสคาล และทำการเก็บตัวอย่างแผ่นเหล็กเหนียวจำนวน 6 ตัวอย่าง เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงที่จุดคราก ( $f_{y,PS}$ ) และแรงดึงประลัย ( $f_{u,PS}$ ) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 850.1 เมกะปาสคาล 950.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และมีค่า Elongation เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9.6 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กเหนียว

Sample ID	$f_{y,PS}$ (MPa)	$f_{u,PS}$ (MPa)	Elongation (%)
S1	850	951	9.60
S2	851	950	9.59
S3	850	949	9.61
S4	849	950	9.62
S5	851	950	9.58
S6	850	952	9.60
Avg.	850.1	950.3	9.60

รูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเหนียวจากเครื่องอัดแรง (Air Pressure) ที่ 8 บาร์ เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า ค่าหน่วยแรงดึงเริ่มต้น (Applied Tension Force) มีค่าเท่ากับ 269.3 เมกะปาสคาล และหลังจากทำการ Sealing Application ค่าหน่วยแรงดึงจะลดลงเหลือ 265.5 เมกะปาสคาล เนื่องจากเกิดการเลื่อนไถลที่จุดจับดึงแผ่นเหล็ก ทำให้มีการลดลงของค่าแรงดึงเริ่มต้นประมาณร้อยละ 1.5

การเตรียมตัวอย่างคานทดสอบโดยเริ่มจากขัดขอบคานให้มีรัศมีประมาณ 10 มม. เพื่อลดหน่วยแรงเค้นบริเวณมุมที่ขอบคาน ทำให้ผลของการอัดแรงแผ่นเหล็กเหนียวมีประสิทธิภาพดีขึ้น [15], [16], [21] และตีช่องตารางอ้างอิงบนคานตัวอย่างทำมุมประมาณ 45 องศา เพื่ออ้างอิงมุมรอยร้าวที่เกิดขึ้น และเสริมกำลังคานทดสอบโดยการโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง ตามระยะที่กำหนด (S) และติดตั้งคานทดสอบพร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์

หลังจากทดสอบในระยะที่ 1 และคานตัวอย่างเกิดรอยร้าวแรกแล้ว จึงทำการซ่อมแซมโดยปูนซีเมนต์กำลังอัดสูงชนิดพิเศษแบบไม่หดตัว (Non-shrink Grout) รุ่น LANKO 701 สำหรับคานตัวอย่าง B1-I-R, B2-I-R และเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง สำหรับคาน B1-II-PS, B2-II-PS ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจะควบคุมการเสริมกำลังโดยเครื่องปรับแรงดึง (Pneumatic Strapping Tool) จะถูกควบคุมโดยแรงดันลมประมาณ 8 บาร์ หรือ



รูปที่ 5 การเสริมกำลังและซ่อมแซมคานคอนกรีต

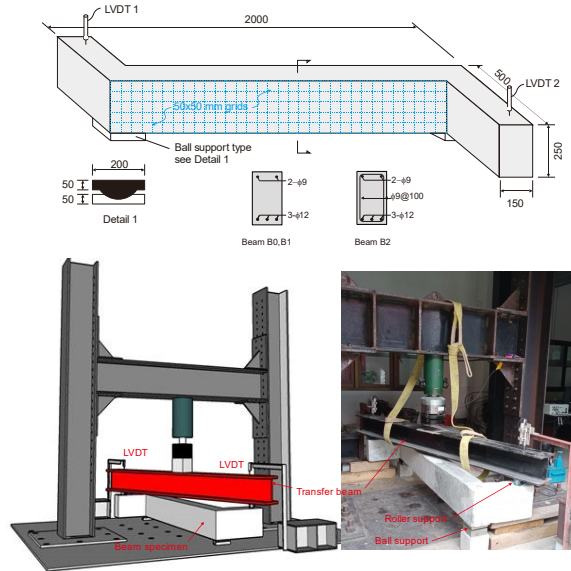
116 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ค่ามาตรฐานทั่วไป)

จากรูปที่ 5 คณะผู้วิจัยได้ทำการเสริมกำลังคานด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงโอบรัดภายหลังที่ระยะ  $S = 0$  และซ่อมแซมคานด้วยคอนกรีตกำลังอัดสูง ภายหลังจากการทดสอบในระยะที่ 1 เพื่อจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีในระยะที่ 2 และนำทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบความสามารถในการกำลังรับแรงบิด ในระยะต่อไป

### 2.5 การให้น้ำหนักบรรทุกและอุปกรณ์ตรวจวัด

การให้น้ำหนักคานบรรทุกทดสอบ ติดตั้งโดยเครื่อง UTM ขนาด 50 ตัน ติดตั้งคานทดสอบวางไว้บน Roller Support และนำคานเหล็กรูปพรรณขนาดความยาว 2 เมตร มาวางพาดไว้บนคานทดสอบเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังปีกคานทั้งสองฝั่งเพื่อให้เกิดแรงบิดเพียงอย่างเดียว และวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นโดย Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ติดตั้งที่ปลายคานทั้งสองฝั่ง โดยต่อเข้ากับชุดประมวลผล(Data Logger)ดังในรูปที่ 6 เพื่ออ่านค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับระยะการแอ่นตัว (Deflection) และนำค่าจากกราฟไปวิเคราะห์หาแรงบิด และมุมบิดที่เกิดขึ้นต่อไป

การวัดการแอ่นตัวจะใช้เครื่องมือ Linear Voltage



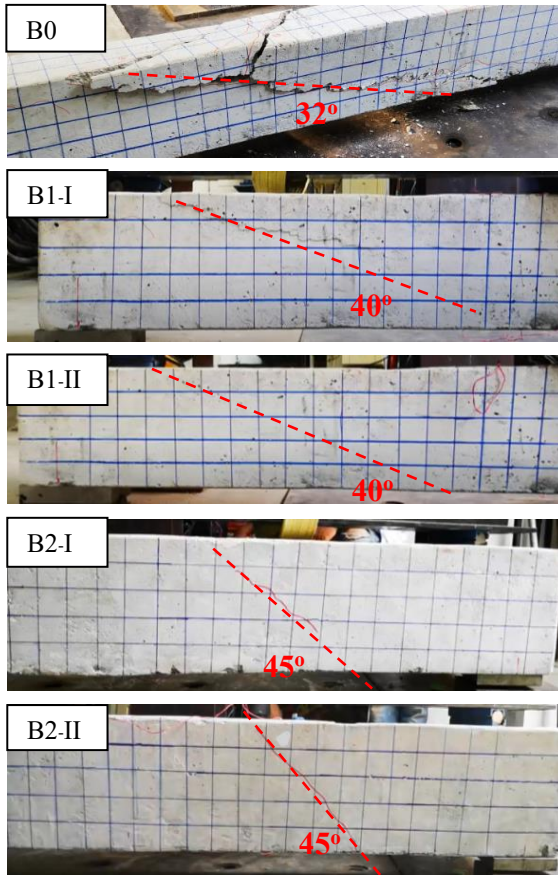
รูปที่ 6 การให้น้ำหนักบรรทุกและรายละเอียดคานทดสอบ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

Displacement Transducers (LVDT) ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มม. จำนวน 2 ชุด บริเวณปลายคานสำหรับใช้คำนวณค่ามุมบิด โดยการวัดการแอ่นตัวของคาน การบันทึกค่าการแอ่นตัวจะทำภายหลังการเพิ่ม หรือลด ช่วงน้ำหนักที่กระทำบนคาน ทำการตีกริดขนาด 50 มม. (Reference Grid) ตลอดความยาวคานเพื่อเป็นเส้นอ้างอิงตรวจสอบการทำมุมของรอยร้าวที่ขณะทดสอบ (รูปที่ 6)

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ระยะที่ 1

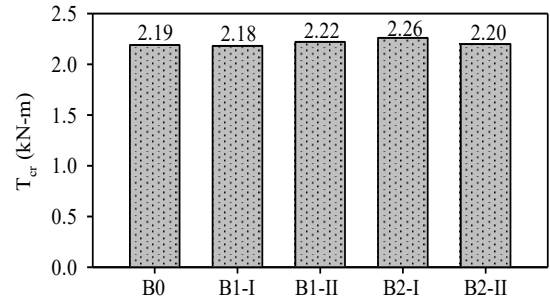
น้ำหนักวิกฤติและรูปแบบการวิบัติในระยะที่ 1 แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งรอยแตกร้าวมีลักษณะเป็นเกลียวหมุน โดยรอบทำมุมประมาณ 32-45 องศา แสดงโดยเส้นประสีแดง ใกล้กับแนวร้าวของคานทดสอบ ดังรูปที่ 7 การทดสอบในระยะที่ 1 คานทดสอบ B0 ทดสอบจนวิบัติเนื่องจากเป็นตัวควบคุมซึ่งมีพิกัดรอยร้าวแรก และแรงบิดประลัยเท่ากับ 2.19 กิโลนิวตัน-เมตร และ 2.24 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ โดยที่มีมุมบิดแรกและมุมบิดสูงสุดเท่ากับ 0.00438 และ 0.00531 Radians ตามลำดับ ในส่วนของ



รูปที่ 7 หน้าหน้ากวิบัติและรูปแบบการวิบัติในระยะที่ 1

คานตัวอย่าง B1-I, B1-II, B2-I, B2-II ทดสอบที่ระดับความเสียหายรอยร้าวแรก (First Crack) ซึ่งมีค่าพิกัทรอยร้าวแรก (Cracking Torque;  $T_{cr}$ ) ใกล้เคียงกันโดยที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.21 กิโลนิวตัน-เมตร รวมไปถึงค่าของมุมบิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันเฉลี่ยเท่ากับ 0.00435 radians ดังตารางที่ 2

คณะวิจัยใช้สมการคำนวณโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และมุมบิดของคานทดสอบในระยะที่ 1

ACI318-14 [25] ดังสมการที่ (1) และ (2) สำหรับคำนวณแรงบิด (Torque) และสมการคำนวณมุมบิด ดังนี้

$$T = \left(\frac{P}{2}\right) \cdot a \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_{avg}}{a}\right) \quad (2)$$

โดยที่  $P$  คือ แรงที่กระทำ  $a$  คือ ระยะตั้งฉากจากจุดหมุน  $\Delta_{avg}$  คือ ระยะแอ่นตัว

แรงที่กระทำบนคานทดสอบ คณะวิจัยได้ทำการคำนวณจากแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากถ่ายแรงผ่านคานเหล็กรูปพรรณไปเป็นแรงบิด และคำนวณมุมบิดจากระยะแอ่นตัวของคานทดสอบที่วัดโดย LVDT โดยอ้างอิงจากสมการมาตรฐาน ACI318-14 ซึ่งผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์แนวทางการเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กบางโอบรัดภายหลัง

จากกราฟในรูปที่ 8 จะสังเกตเห็นว่าค่า ( $T_{cr}$ ) จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากคานทดสอบทั้ง 5 ตัวอย่าง ใช้คอนกรีตชนิดเดียวกันซึ่งคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีตชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ ระยะที่ 1

Beam ID	$P_{max}$ (kN)	$T_{cr}$ (kN-m)	$T_u$ (kN-m)	$\theta_{cr}$ (radians)	$\theta_u$ (radians)	$T_c$ (kN-m)	Remarks
B0	12.51	2.19	2.24	0.00438	0.00531	2.32	Tested up to failure
B1-I	12.46	2.18	-	0.00430	-		
B1-II	12.69	2.22	-	0.00436	-		Load up to $T_{cr}$
B2-I	12.91	2.26	-	0.00453	-		
B2-II	12.57	2.20	-	0.00419	-		

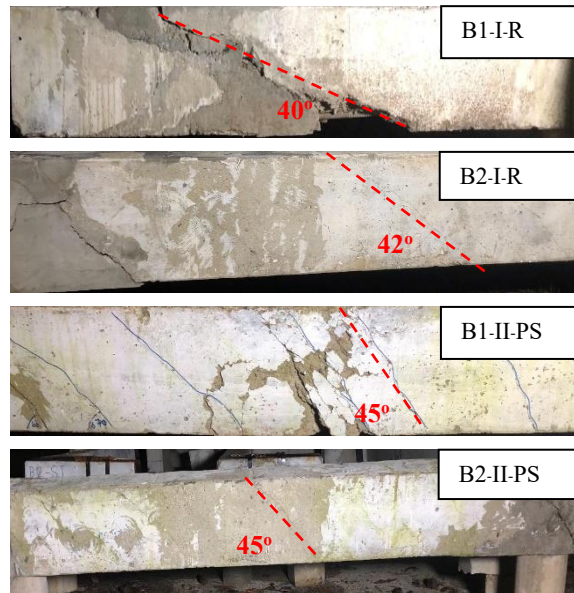
มีผลทำให้คานตัวอย่างเกิดรอยร้าวแรกเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 2.21 กิโลนิวตัน-เมตร รวมไปถึงค่าของมุมบิดซึ่งจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.00435 radians

### 3.2 ระยะที่ 2

น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติในระยะที่ 2 แสดงในตารางที่ 3 หลังจากคานทดสอบเกิดรอยร้าวแรก เนื่องจากแรงบิดเริ่มแรก ( $T_c$ ) ทำให้เกิดมุมบิดเริ่มแรก ( $\theta_{cr}$ ) จากระยะที่ 1 จึงทำการเสริมกำลังทั้ง 2 ระบบคือเสริมด้วยปูนซีเมนต์ไม่หดตัวชนิดพิเศษที่มีกำลังอัดสูง (Non-shrink Grout) และเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง ซึ่งรูปแบบการวิบัติและรอยร้าวในระยะที่ 2 ของคานทดสอบจะเกิดจากน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $P_{max}$ ) ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดประลัย ( $T_u$ ) และมุมบิดประลัย ( $\theta_u$ ) ที่กระทำกับแรงเฉือนทำให้คอนกรีตเป็นตัวรับแรงอัดและเหล็กเสริมเป็นตัวรับแรงดึง

จากคานที่ได้ทำการทดสอบในระยะที่ 1 ทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณด้านหน้าและด้านหลังคาน และภายหลังจากการซ่อมแซม และเสริมกำลังโดยวิธีอัดแรงแผ่นเหล็กเหนียวภายหลัง และทำการทดสอบจนคานวิบัติพบว่า รอยแตกร้าวจะมีลักษณะเป็นเกลียวหมุนโดยรอบทำมุมประมาณ 40-45 องศา แสดงโดยเส้นประสีแดง ใกล้เคียงกับแนวร้าวของคานทดสอบ ดังรูปที่ 9 และ ในส่วนของ Crack Twist Angle หรือค่ามุมบิดพบว่า คาน B1-I-R มีค่า

มุมบิด = 0.00144 radians น้อยกว่าคานอื่นๆ แต่เมื่อนำคาน B1-II-PS มาเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลังพบว่า ค่าแรงบิด และมุมบิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 252 พบว่า คานที่มีระยะเหล็กปลอก และเสริมกำลังมีค่า



รูปที่ 9 น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติในระยะที่ 2

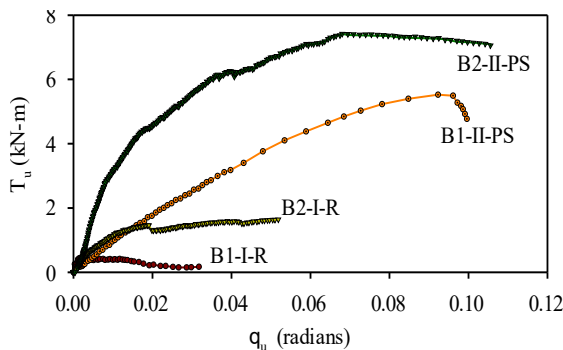
มุมบิดเท่ากับ 0.0680 radians แสดงให้เห็นว่าคานที่มีการเสริมกำลังสามารถเสียรูปได้มากกว่าคานที่ไม่เสริมกำลังการวิเคราะห์ค่าแรงบิดประลัยพบว่า คาน B1-II-PS เพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 252 (5.65 kN-m) และร้อยละ 331 (7.41 kN-m) สำหรับคาน B2-II-PS การวิเคราะห์ค่าความเหนียว Toughness โดยพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละเส้นดังรูปที่ 10 พบว่า คาน B1-I-R มีค่าต่ำสุดและค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นสำหรับคานที่มีเหล็กปลอก และคานที่มีการเสริมกำลัง ดังแสดงในตารางที่ 3

ซึ่งผลการทดสอบในระยะที่ 2 คณะวิจัยวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบในระยะที่ 1 มาคำนวณค่าความเหนียว ( $E$ ) และประสิทธิภาพการรับแรงบิดจากอัตราส่วน  $T_u/T_{u,B0}$

### ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ ระยะที่ 2

Beam ID	$P_{max}$ (kN)	$T_u$ (kN-m)	$\theta_u$ (radians)	$T_u/T_{u,B0}$ (%)	$E$ (kN.m). rad.	$T_c$ (kN-m)	$T_{ps}$ (kN-m)	$T_{tot}$ (kN-m)
B1-I-R	2.469	0.432	0.00144	1.93	144.56	2.24	-	4.56
B1-II-PS	32.337	5.659	0.1090	25.26	220.35	5.42	3.32	11.06
B2-I-R	9.389	1.643	0.0519	7.33	163.04	1.26	-	3.58
B2-II-PS	42.394	7.419	0.0680	33.12	311.87	6.68	3.32	12.32





รูปที่ 10 ผลการทดสอบในระยะที่ 2

สำหรับคานทดสอบ B0 เป็นคานควบคุม ซึ่งทดสอบจนวิบัติใน ระยะที่ 1 และนำมาคำนวณโดยอ้างอิงสมการตามมาตรฐาน ACI318-14 ดังแสดงในตารางที่ 3

จากผลการทดสอบในระยะที่ 2 คณะวิจัยได้นำผลการ ทดสอบจากตารางที่ 3 มาวิเคราะห์ผลได้ว่าคานทดสอบ B2-II-PS สามารถรับแรงบิดได้สูงสุดเนื่องจากมีเหล็กปลอก และเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง รองลงมาคือคาน ทดสอบ B1-II-PS เนื่องจากคานทดสอบไม่มีเหล็กปลอก ซึ่ง คานทดสอบที่ซ่อมแซมโดยปูนซีเมนต์ไม่หดตัวชนิดพิเศษ ที่มีกำลังอัดสูง คือ B1-I-R และ B2-I-R มีความสามารถรับ แรงบิดที่น้อยกว่าคานทดสอบทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น ดัง แสดงในรูปที่ 10

จากกราฟจะเห็นได้ว่า สำหรับคานที่ซ่อมแซมโดยใช้ Non-Shrink grout คือคานทดสอบ B1-I-R, B2-I-R จะมีความ สามารถในการรับแรงบิดที่น้อยกว่าคานทดสอบที่เสริมกำลัง โดยแผ่นเหล็กบางโอบรัดภายหลังคือ B1-II-PS, B2-II-PS ได้ อย่างชัดเจน

#### 4. อภิปรายผล

##### 4.1 สมการของ ACI 318-14

ในส่วนของการคำนวณเนื่องจากมาตรฐาน ACI 318-14 จะมีมาตรฐานการทดสอบเพียงแคโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงต้องมีการ ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในส่วนของมาตรฐานของการเสริมกำลัง โดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงโอบรัดภายหลังซึ่งได้สมการที่จะ

ใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดสอบการรับแรงบิด และมุมบิด โดย ( $T_c$ ) คือ กำลังรับแรงบิดจากคอนกรีต และ ( $T_s$ ) คือ กำลังรับแรงบิดจากเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$T_{cr} = \frac{0.33\sqrt{f'_c} A_c^2}{P_c} \quad (3)$$

$$T_s = \frac{2A_o A_t f_{y,s}}{S_s} \cot\theta \quad (4)$$

โดยที่

$f'_c$  = กำลังอัดคอนกรีต

$P_c$  = เส้นรอบรูปของคานทดสอบ

$A_o$  = พื้นที่หน้าตัดของคานทดสอบ

$A_t$  = พื้นที่เหล็กปลอก 1 ขา

$f_{y,s}$  = กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กปลอก

$S_s$  = ระยะห่างเหล็กปลอก

$A_{ps}$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเหนียวอัดแรง

$f_{y,ps}$  = กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กบาง

$S_{ps}$  = พื้นที่เหล็กอัดแรง 1 ขา

##### 4.2 อิทธิพลของการอัดแรงแผ่นเหล็กเหนียว

ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังของคานคอนกรีต กำลังอัดต่ำ แสดงผลในรูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงบิด และมุมบิด ดังรูปที่ 10 ของคานที่มีการ ซ่อมแซมโดยปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัวชนิดพิเศษที่มีกำลัง อัดสูง และสำหรับคานที่มีการเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็ก เหนียวอัดแรงภายหลังที่ระยะ  $S = 0$  พบว่า ประสิทธิภาพ การเสริมกำลังด้วยระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง สำหรับคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำ แสดงเด่นชัดสำหรับ ตัวอย่างคานทดสอบภายใต้แรงบิด โดยกำลังรับแรงบิด และมุมบิดจะเพิ่มขึ้น ประมาณร้อยละ 25.26 สำหรับคาน B1-II-PS ซึ่งเห็นได้ชัดสำหรับการเสริมกำลังด้วยระบบแผ่น เหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง เนื่องจากคานทดสอบไม่มี เหล็กปลอกช่วยในการรับแรงบิด และมุมบิดในส่วนของ ประสิทธิภาพของการซ่อมแซมโดยปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัว



ชนิดพิเศษที่กำลังอัดสูง ผลของการซ่อมแซมคาน และสำหรับ อิทธิพลของการซ่อมแซมคานคอนกรีตภายใต้แรงบิด พบว่า ค่าแรงบิดของคานตัวอย่างที่ซ่อมแซมไม่มีผลในการเพิ่มความสามารถรับแรงบิด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำด้วยระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลังมีผลทำให้เพิ่มกำลังรับแรงบิด และมุมบิดได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของประสิทธิภาพการรับแรงบิด ( $T_{tot}$ ) มาจากสามส่วนด้วยกันคือ กำลังรับแรงบิดที่มาจากคอนกรีต ( $T_C$ ) และเหล็กปลอก ( $T_s$ ) และกำลังรับที่มาจาก การเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กบางโอบรัดภายหลัง ( $T_{ps}$ ) ซึ่งแสดงโดยสมการที่ (5) และ (6)

$$T_{tot} = T_C + T_s + T_{ps} \quad (5)$$

โดยที่ค่ากำลังรับแรงบิดจากการเสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กบางโอบรัดภายหลัง ( $T_{ps}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$T_{ps} = \frac{2A_0 A_{ps} f_{y,ps}}{S_{ps}} \cot \theta \quad (6)$$

ผลการศึกษาถึงอิทธิพลกำลังรับแรงบิดของคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดย ทนงศักดิ์ และคณะ [26] พบว่า คานที่เสริมกำลังโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงภายหลัง สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดเริ่มแรก ( $T_{cr}$ ) ได้เท่ากับร้อยละ 15 และเพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดประลัยได้เท่ากับร้อยละ 25 สำหรับงานวิจัยนี้มีการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงจำนวน 2 ตัวอย่าง คือ B1-II-PS และ B2-II-PS ซึ่งภายหลังการเสริมกำลังในระยะที่ 2 ส่งผลให้คานทดสอบ B1-II-PS และ B2-II-PS เพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดประลัยได้เท่ากับร้อยละ 25.26 และ 33.12 ตามลำดับ

## 5. สรุป

ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริม

กำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง ภายหลัง และประสิทธิภาพของการซ่อมแซมคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษกำลังอัดสูงแบบไม่หดตัว โดยนำทั้งสองวิธีนี้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงบิดของคานทดสอบ โดยที่ในระยะที่ 1 ทำการทดสอบที่ระดับความเสียหายรอยร้าวแรก เพื่อจะศึกษาว่าแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงบิดได้อย่างมีนัยสำคัญ และในระยะที่ 2 ทำการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำภายหลังจากที่เกิดรอยร้าวแล้วจากในระยะที่ 1 เพื่อจำลองสถานการณ์ที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความเสียหาย ภายใต้อัดแรงบิดในห้องทดลอง ผลจากการศึกษาค่าที่ได้จากห้องทดสอบ และค่าที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน ACI318-14 พบว่า ค่าที่ได้ มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ จากการทดสอบนี้จึงสรุปได้ว่าวิธีการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำด้วยวิธีแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงโอบรัดภายหลัง มีผลต่อการเพิ่มความ สามารถในการรับแรงบิด อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ การซ่อมแซมคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยปูนซีเมนต์แบบไม่หดตัวชนิดพิเศษที่มีกำลังอัดสูง ซึ่งส่งผลต่อการรับแรงบิดของคานทดสอบ และมุมบิดที่เพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI4YE 2020) และทุนสนับสนุนทางด้านวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจาก มูลนิธิโทรแท่งประเทศไทย (ครั้งที่ 26) ประจำปี พ.ศ. 2562

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, and L. Lam, *FRP: Strengthened RC Structures*. Wiley-VCH, 2002, p. 266.
- [2] T. Imjai and R. Garcia, "Performance of damaged RC beams repaired and/or strengthened with FRP sheets: An experimental investigation," in



- Mechanics of Structures and Materials XXIV*, CRC Press, 2016.
- [3] T. Imjai, R. Garcia, M. Guadagnini, and K. Pilakoutas, "Strength degradation in curved fiber-reinforced polymer (FRP) bars used as concrete reinforcements," *Polymers*, vol. 12, 2020, Art. no. 1653.
- [4] S. B. Kandekar and R. S. Alkoti, "Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips," *International Journal of Advanced Structural Engineering*, vol. 9, no. 21, pp. 465–474, 2018.
- [5] G. Williams, R. Al-Mahaidi, and R. Kalfat, "The West Gate Bridge strengthening of a 20th century bridge for 21st century loading," in *Proceeding 10th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS)*, vol. 10, pp. 1–18, 2011.
- [6] A. Wiberg, "Strengthening of concrete beams using cementitious carbon fibre composites," PhD. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
- [7] A. Ghobarah, M. N. Ghorbel, and S. E. Chidiac, "Upgrading torsional resistance of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 4, pp. 257–263, 2002.
- [8] A. Ghobarah, M.N. Ghorbel, and S.E. Chidiac, "Upgrading torsional resistance of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 4, pp. 257–263, 2002.
- [9] M. Y. Alabdulhady and L. H. Sneed, "Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review," *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 148–163, 2019.
- [10] G. Al-Bayati, R. Al-Mahaidi, M.J. Hashemi, and R. Kalfat, "Torsional strengthening of RC beams using NSM CFRP rope and innovative adhesives," *Composite Structures*, vol. 187, pp. 190–202, 2018.
- [11] Y. Meyyada, A. Hady, and L.H. Sneed, "Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites A state of the art review," *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 148–163, 2019.
- [12] I. Gamal, G.I. Khalil, A.S. Debaiky, M.H. Makhlof, and A. EL-Sayed Ewis, "Torsional behavior of reinforced concrete beams repaired or strengthened with transversal external post – tension elements," *IJSTE International Journal of Science Technology and Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 54–73, 2017.
- [13] A. El-HakimKhalil, E. Etman, A. Atta, and S. Fayed, "Torsional strengthening of RC box beams using external prestressing technique," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 30–41, 2015.
- [14] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08, 2008.
- [15] M. Frangou, K. Pilakoutas, and S. Dritsos, "Structural repair/strengthening of RC columns," *Construction and building materials*, vol. 9, no. 5, pp. 259–266, 1995.
- [16] M. Frangou, "Strengthening of concrete by lateral confinement," Ph.D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK, 1996.



- [17] C. K. Ma, R. Garcia, S. C. S. Yung, A. Z. Awang, W. Omar, and K. Pilakoutas, "Strengthening of pre-damaged concrete cylinders using post-tensioned steel straps," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 172, no. 10, pp. 703–711, 2019.
- [18] C. K. Ma, A. Z. Awang, W. Omar, M. Liang, S. W. Jaw, and M. Azimi, "Flexural capacity enhancement of rectangular high-strength concrete columns confined with post-tensioned steel straps," *Structural Concrete*, vol. 4, pp. 668–676, 2016.
- [19] H. Moghaddam, M. Samadi, K. Pilakoutas, and S. Mohebbi, "Axial compressive behaviour of concrete actively confined by metal strips part A experimental study," *Materials and Structures*, vol. 43, no. 10, pp. 1369–1381, 2010.
- [20] T. Imjai, M. Setkit, R. Garcia, P. Sukontasukkul, and S. Limkatanyu, "Seismic strengthening of low strength concrete columns using high ductile metal strap confinement a case study of kindergarten school in northern Thailand," *Walailak Journal of Science Technology*, vol. 7, no. 12, 2020.
- [21] T. Imjai, C. Chaisakulkiet, R. Garcia, and K. Pilakoutas, "Strengthening of RC members using Post-tensioned Metal Straps state of the research," *Lowland Technology International Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 187–196, 2018.
- [22] M. Chau-Khun, A. Z. Awang, W. Omar, K. Pilakoutas, M. M. Tahir, and R. Garcia, "Elastic design of slender high-strength RC circular columns confined with external tensioned steel straps," *Advances in Structural Engineering*, vol. 18, no. 9, pp. 1487–1499, 2015.
- [23] H. P. Lee, A. Z. Awang, and W. Omar, "Steel strap confined high strength concrete under uniaxial cyclic compression," *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 48–55, 2014.
- [24] *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM C39/C39M-20, 2020.
- [25] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318-14, 2014.
- [26] M. Setkit, T. Imjai, U. Chaisakulkiet, R. Garcia, K. Dangyem, K. Sanupong, and W. Chamnankit, "Torsional strengthening of low-strength rc beams with post-tensioned metal straps an experimental investigation," *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 12, pp. 1399–1411, 2020.