

พฤติกรรมเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเสริมกำลังโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นเหนียวอัดแรงภายหลัง

พงศธรณ์ จันทร์เพ็ญ และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ*

สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

สุรินทร์ สุทธิประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wu.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.012

รับเมื่อ 16 มีนาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 15 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 17 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นเหนียวภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นพืดกำลังสูง โดยแบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 2 ระยะ คือระยะที่ 1 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังอัดประลัยต่ำ (15 MPa) จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่มีการรัดรอบโดยมีระยะห่างการรัดรอบเท่ากับ 0 มีค่ากำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 262 และมีค่าดัชนีประสิทธิภาพเท่ากับ 1.655 ซึ่งนำมาใช้ในการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังประลัยต่ำจำนวน 12 ตัวอย่าง ในระยะที่ 2 ภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำด้วยวิธีการโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กเหนียวมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาน้อยมาก จนไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 28 และอิทธิพลการรัดรอบเสาทดสอบด้วยวิธีการเสริมกำลังดังกล่าว พบว่าการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังต่ำโดยโอบรัดด้วยเหล็กพืดกำลังสูงสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ โดยแปรผันตามจำนวนชั้นของการรัดรอบด้วยแผ่นเหล็กเหนียว

คำสำคัญ: แผ่นเหล็กอัดแรงภายหลัง คอนกรีตกำลังต่ำ เหล็กพืด ความเหนียว แรงเอียงศูนย์



Experimental Study of Low Strength Concrete Columns Strengthened with High Ductile Post-tensioned Metal Straps

Phongsatorn Chanpen and Thanongsak Imjai*

School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

Surin Sutthiprabha

Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Bangkok, Uthenthawai Campus, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2399 E-mail: thanongsak_im@wu.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.012

Received 16 March 2020; Revised 15 June 2020; Accepted 17 June 2020; Published online: 24 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research studies the performance of the lateral confined concrete columns under eccentric compression by the application of strapping technique with high-ductile metal straps. The objective is to study the efficiency of strengthening technique for low-strength concrete columns using high-strength metal straps as lateral confinement. The experimental testing program consists of two phases. Phase 1 features the examination of the effectiveness of lateral confinement using metal straps of cylindrical concrete samples with low compressive strength (15 MPa). The result shows an increase of compressive strength by up to 262% for a confined specimen with metal spacing = 0 and the performance index = 1.655. The performance index with a similar strengthening scheme from Phase 1 is used to strengthen 12 low strength concrete columns in Phase 2. All of the test specimens were subjected to a combination of axial compression and bending. The results of this study show that the lateral confinement using metal strapping technique has a little effect on increasing the flexural capacity of the sections. However, the confined sections show a significant increase in the axial capacity by up to 28% compared with an unconfined specimen. Based on the present study, it shows that the application of highly ductile metal straps for lateral confinement of low-strength concrete columns significantly improves axial compression capacity of low strength concrete columns with the numbers of strapping layers.

Keywords: Post-tensioned Metal Strapping, Low Strength Concrete, Metal Straps, Ductility, Eccentric Loading

Please cite this article as: P. Chanpen, T. Imjai, and S. Sutthiprabha, "Experimental study of low strength concrete columns strengthened with high ductile post-tensioned metal straps," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 484-495, Jul.-Sep. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบัน นวัตกรรมเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตประเภทต่างๆ เช่น แรงอัด แรงเฉือน หรือแรงบิด ได้มีการนำวัสดุเส้นใยคอมโพสิต (Fiber Reinforced Polymer; FRP) ประเภทแผ่น (Sheet) มาใช้ในการหุ้มรอบหรือโอบรัดองค์อาคาร เรียกว่าวิธี Externally Bonded Reinforcement หรือ EBR โดยทำการออกแบบเพื่อรับแรงส่วนเกินจากการวิเคราะห์กำลังหน้าตัดเดิมขององค์อาคาร เช่น แรงอัดหรือแรงเฉือน [1]

ในกรณีองค์อาคารรับแรงอัด เช่น โครงสร้างเสาคอนกรีต การเสริมกำลังด้วยวิธี EBR นี้ สามารถเพิ่มความเหนียวและเพิ่มแรงเฉือนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีการออกแบบควบคุมความเครียดในวัสดุให้เหมาะสม [2]–[4] อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิตและผิวคอนกรีต ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง และค่าใช้จ่ายของวัสดุประเภทวัสดุคอมโพสิตและวัสดุยึดเหนี่ยวมีราคาสูง เมื่อเทียบกับวิธีการหุ้มรอบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) หรือการพอกทับด้วยคอนกรีตใหม่ (Concrete Overlay) ด้วยปัจจัยเหล่านี้ เป็นผลให้การพิจารณาการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง โดยวิธี EBR สำหรับโครงสร้างอาคารในประเทศที่กำลังพัฒนาอาจไม่แพร่หลาย [4]–[6]

จากปัจจัยที่ต้องคำนึงของการเสริมกำลังโดยวิธี EBR ได้มีการศึกษาวิจัยวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กม้วนชนิดบางในการเสริมกำลังเสาคอนกรีต (Hot Rolled Coil Steel) โอบรัดองค์อาคารคอนกรีต คล้ายกับวิธี EBR แต่การใช้เหล็กแผ่นชนิดบางรัดรอบและทำการอัดแรงขณะทำการติดตั้งผลจากการวิจัยโดย Frangou และคณะ [4], [5] ได้พัฒนาเทคนิคการใช้เหล็กพีดรัดรอบอัดแรง (Post-tensioned Metal Straps หรือเรียกว่า PTMS) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัด โดยค่าความแข็งแรงของสายโลหะโดยทั่วไปจะแตกต่างกันไประหว่าง 300 ถึง 1000 MPa [รูปที่ 1 (ก)] เครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันอากาศ/แรงดันไฮดรอลิก [รูปที่ 1 (ข)] ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก โดยผลจากการอัดแรงขณะติดตั้งเหล็กพีด จะเป็นการเพิ่มแรงรัด



(ก)

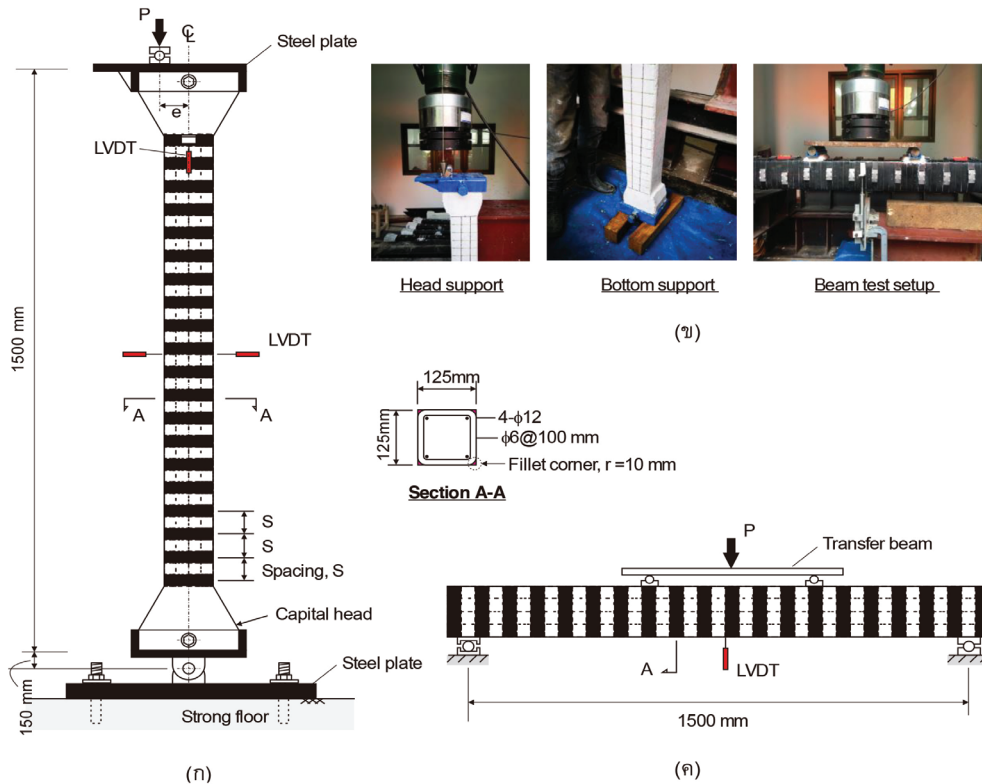


(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับเสริมโครงสร้างคอนกรีต ด้วยวิธี Post-tensioned Metal Strapping (PTMS) [6]

รอบองค์อาคารคอนกรีต เรียกว่า Confinement ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 20–40% [5], [6]

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย Imjai และคณะ [6] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้ทำการปรับปรุงวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จับยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวในระยะยาว เช่น Stress Relaxation โดยการเพิ่มการจับยึดด้วย Mechanical Anchorage โดยการใช้ Chemical Bolt ระหว่างช่วงของเหล็กพีด และใช้พื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบ และได้ทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึด Clip Lock ซึ่งเป็นเหล็กอ่อน (Mild Steel) เป็นสนิมได้ง่ายและไม่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอก โดยการเปลี่ยนมาใช้ Aluminum Clip Lock ดังรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 2 การให้น้ำหนักทดสอบเสาคอนกรีตในระยษะที่ 2 (ก) การทดสอบภายใต้แรงกระทำร่วมระหว่างแรงอัดและแรงดัด และ (ข) การทดสอบภายใต้แรงดัดอย่างเดียว

ในการศึกษาวิจัยในต่างประเทศ การเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตด้วยระบบ PTMS มีรายงานผลการศึกษางานวิจัย สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด เช่น เสาที่มีกำลังอัดปานกลางถึงกำลังสูง [7] แต่สำหรับการประยุกต์ใช้การเสริมกำลัง PTMS สำหรับเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นชนิดบางภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นชนิดบาง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำ ($f'c = 15$ MPa) และในระยะที่ 2 ทำการทดสอบเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน โดยในช่วงขั้นตอนที่ 1 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำ และทดสอบคุณสมบัติวัสดุในห้องปฏิบัติการ และระยะที่ 2 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการรับแรงกระทำร่วม คือ แรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก)

2.1 คุณสมบัติคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type 1) มีส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1 กำหนดกำลังระบุเท่ากับ 15 MPa คณะวิจัยทำการเก็บตัวอย่างการทดสอบประเภทละ 6 ตัวอย่าง ที่คอนกรีตมีอายุ 28 วัน เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด Cube Strength ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ 1 ลบ.ม.

Mix Proportion (kg) ต่ออัตราส่วน 1 ลบ.ม.				w/c Ratio	Slump (mm)
Cement	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	Water		
250	1120	757	200	0.8	75

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

Statistical Values	Cube Compressive Strength (f_c)	Cylinder Compressive Strength (f_c)	Tensile Strength (f_t)	Flexural Strength (f_b)
Mean (MPa)	17.1	15.3	1.4	1.9
Std. Dev. (MPa)	3.5	2.3	0.5	0.3
No. of Samples	6	6	6	6
Max.	20.5	17.2	1.5	2.1
Min.	15.5	13.2	1.2	1.7

เมกกะปาสคาล ค่ากำลังอัด Cylinder Strength เท่ากับ 15.3 เมกกะปาสคาล ค่ากำลังรับแรงดึง Tensile Strength เท่ากับ 1.4 เมกกะปาสคาล และค่ากำลังรับแรงดัดแบบ Flexural Tests on Prisms เท่ากับ 1.9 เมกกะปาสคาล ดังแสดงในตารางที่ 2

2.2 การออกแบบเสาทดสอบ

โครงการวิจัยนี้มีการเตรียมเสาตัวอย่างจำนวน 12 เสา ดังแสดงในตารางที่ 3 มีขนาดหน้าตัด 125×125 มิลลิเมตร ยาว 1500 มิลลิเมตร เหล็กเส้นข้ออ้อย 4 เส้น ขนาด $\phi 12$ มิลลิเมตร ($f_y = 392$ MPa) และเหล็กปลอกมีขนาด $\phi 6$ มิลลิเมตร ($f_y = 235$ MPa) ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร เพื่อต้องการให้เสาวิบัติกำหนดให้เหล็กเสริมครากตามข้อกำหนดของ ACI 318-14 [8] จึงกำหนดเหล็กเสริมหลักให้พอเพียง ($p_f = 1.70\%$) และออกแบบเสาทดสอบเป็นเสายาว ซึ่งมีขนาดหน้าตัดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดความยาวเสา โดยเสาทดสอบซึ่งมีค่าอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) เท่ากับ $kl/r = 41.5$ โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การยึดรั้งของเสา l_c คือ ความยาวประสิทธิผล และ r คือ รัศมีจอร์เจชัน โดยที่มาตรฐาน ACI 318-14 กำหนดเสายาวมี

อัตราส่วนความชะลูดไม่ควรต่ำกว่า 22

2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค

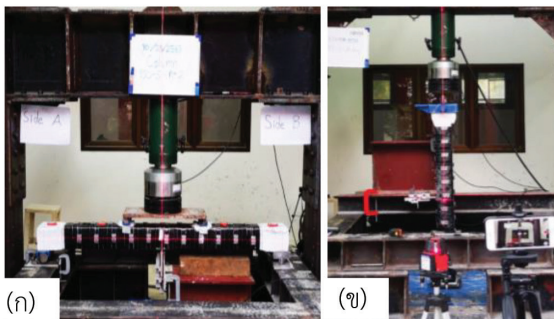
การวัดการแอ่นตัวทำได้โดยใช้เครื่องมือ Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) สามารถอ่านได้ละเอียดถึง 0.001 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด สำหรับตรวจวัดการแอ่นตัวตามแนวแกน (Axial Deformation) และ 2 ชุด ทางด้านข้าง (Lateral Deformation) สำหรับเสาทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 (ข) อนึ่ง การติดตั้ง LVDT สองชุดที่ส่องบริเวณดังกล่าวเพื่อใช้คำนวณค่าเฉลี่ยของการการแอ่นตัวสุทธิที่กึ่งกลางคาน เนื่องจากเสาที่ติดตั้งอาจมีการแอ่นตัวในด้านที่ไม่ได้สมมาตร แม้ว่าขณะก่อนทำการทดสอบจะตรวจหาค่าระดับขณะติดตั้ง ค่าของการแอ่นตัวของคานและการบันทึกค่าการแอ่นตัวมีการประมวลผลเข้าสู่ชุดบันทึกข้อมูลที่มีความถี่ 5 เฮิรตซ์ และแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์แบบ Real-time จ่ายไฟโดยเครื่องสำรองไฟฉุกเฉิน

การติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบภายใต้แรงดัด [รูปที่ 2 (ค)] และภายใต้แรงอัดแบบเยื้องศูนย์กลาง จากชุดทดสอบโครงสร้างมีกำลังกดสูงสุดเท่ากับ 100 ตัน ตัวอย่างภาพการทดสอบแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดเสาทดสอบในระยษที่ 2

Column ID	Longitudinal Reinforcement (mm)	Shear Reinforcement (mm)	Layers of Confinement	$\alpha\omega_w$	e (mm)
150-C-A	4- ϕ 12	2- ϕ 6@100	0	0	0
150-C-M				0	0
150-C-0.5b				0.231	0.5b
150-C-b				1.655	b
150-1n-A			n =1 layer	0	0
150-1n-M				0	0
150-1n-0.5b				0.231	0.5b
150-1n-b				1.655	b
150-2n-A			n =2 layers	0	0
150-2n-M				0	0
150-2n-0.5b				0.231	0.5b
150-2n-b				1.655	b

หมายเหตุ: Column ID = X-Y-Z โดยที่ X คือ กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 150 ksc หรือ 15 MPa, Y คือ ตัวอย่างเสาที่ไม่เสริมกำลังเป็นเสาควบคุม (C), เสาที่มีการเสริมกำลังโดยการรัด 1 รอบ (n =1) และเสาที่มีการเสริมกำลังโดยการรัด 2 รอบ (n =2), Z คือ ประเภทของการให้ทดสอบ แบ่งเป็น A = Pure Axial, M = Pure Moment, 0.5b คือ การให้นำหนักเสาด้อย่างแบบเอียงศูนย์ (= 60.25 มม.) และ b คือ การให้นำหนักเสาด้อย่างแบบเอียงศูนย์ (= 125 มม.) โดยที่ $\alpha\omega_w$ คือ ความกว้างของเสา $\alpha\omega_w$ คือ ดัชนีประสิทธิภาพของการโอบรัด และ e คือ ระยะเอียงศูนย์ของนำหนักทดสอบ



รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดัด (ก) และภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์ (ข) ในระยษที่ 2

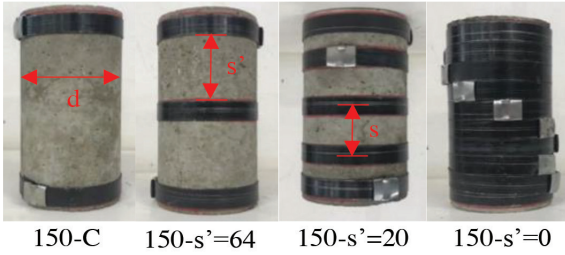
2.4 การให้นำหนักบรรทุกและการประมวลผล

รูปที่ 2 (ก) แสดงการให้นำหนักทดสอบเสาคอนกรีตในระยษที่ 2 ภายใต้แรงกระทำร่วมระหว่างแรงดัดและแรงดัด และรูปที่ 2 (ข) แสดงการทดสอบภายใต้แรงดัดอย่างเดียวกการทดสอบทั้งสองรูปแบบมีการให้นำหนักบรรทุกแบบ

Four-point Bending Test โดยเครื่อง UTM ขนาด 100 ตัน โดยการให้นำหนักบรรทุกจะเป็นแบบ Displacement Control เพื่อศึกษาพฤติกรรมของช่วง Post-peak ของความสัมพันธ์ Load-displacement Curve ตามแนวแกนและทางด้านข้างของตัวอย่างเสา

2.5 การเสริมกำลังเสาด้วยระบบ PTMS

ในระยษที่ 1 ทำการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำ ($f'_c = 15$ MPa) (รูปที่ 4) เพื่อศึกษาดัชนีของการเสริมกำลังแบบโอบรัดของแผ่นเหล็กพืดอัดแรงภายหลัง มีขนาด 0.9×25 มม. ($f_u = 950$ MPa) โดยเครื่องปรับแรงดึง (Pneumatic Strapping Tool) จะถูกควบคุมโดยแรงดันลมประมาณ 8 bar หรือ 116 psi (รูปที่ 1) โดยผู้ติดตั้ง และในระยษที่ 2 ทำการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำ และทดสอบศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจากการ



รูปที่ 4 การเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีระยะของการโอบรัดที่ต่างกัน ในระยะที่ 1

วิเคราะห์แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (P-M Interaction Diagram) ของเสาทดสอบ

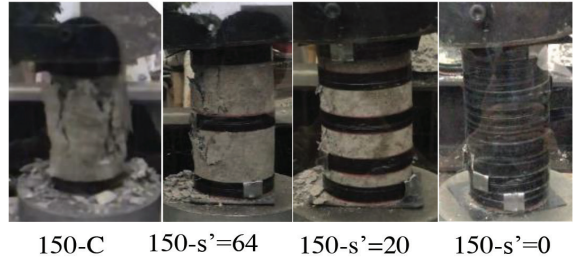
3. ผลการทดลอง

3.1 ระยะที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

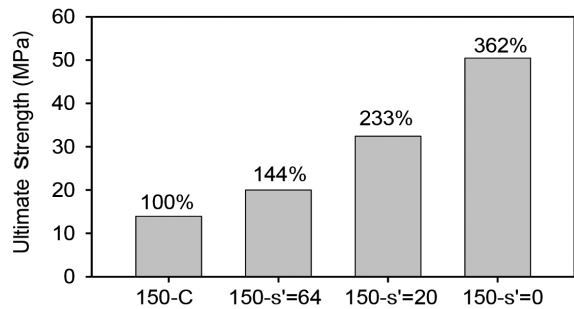
ในการทดสอบในระยะที่ 1 โดยการวัดของตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 100 มม. สูง 200 มม. ที่เสริมกำลังโดยโอบรัดด้วยเหล็กพีดรักรอบในระยะที่ 1 แสดงในรูปที่ 4 และภาพการวัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกภายหลังทดสอบแสดงในรูปที่ 5 และมีผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6

จากผลการทดสอบในระยะที่ 1 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีการเสริมกำลังโดยการโอบรัดมีค่ากำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นระหว่าง 144–362% โดยตัวอย่าง 150-s' = 0 มีกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้น 362% (50.4 เมกกะปาสคาล) เทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลัง (14.0 เมกกะปาสคาล) สำหรับตัวอย่าง 150-C มีการโอบรัดที่ห่วยหายของตัวอย่าง เพื่อป้องกันการแตกของคอนกรีตที่บริเวณหัวท้ายจากหน่วยแรงอัดที่สูงใกล้กับแทนทดสอบ ทำให้ได้ค่าหน่วยแรงอัดที่แท้จริงของตัวอย่างสำหรับเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบต่อไป

การทดสอบในระยะที่ 1 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำ ($f'_c=15$ เมกกะปาสคาล) และคำนวณหาดัชนีประสิทธิภาพของการโอบรัดคอนกรีต ($\alpha\omega_w$) โดยพิจารณาอัตราส่วนของ f_{cc}/f_{co} และดัชนีประสิทธิภาพ $\alpha\omega_w$ จากสมการทำนายของ Eurocode 8 [9] ดังสมการที่ (1) และ (2)



รูปที่ 5 วิกฤติของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบระยะที่ 1



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบกำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

$$f_{cc} = f_{co}(1 + 2.5\alpha\omega_w) \quad \text{for } \alpha\omega_w < 0.1 \quad (1)$$

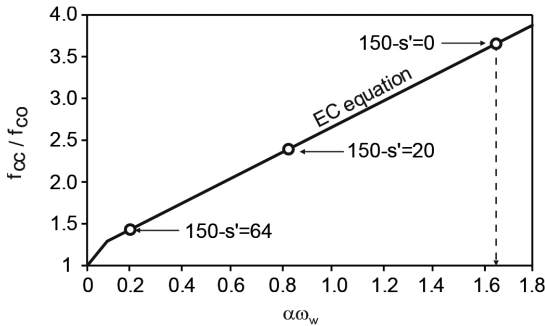
$$f_{cc} = f_{co}(1.125 + 1.5\alpha\omega_w) \quad \text{for } \alpha\omega_w > 0.1 \quad (2)$$

โดยที่ f_{co} คือ กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด f_{cc} คือ กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่มีการโอบรัด α คือ ตัวคูณลดกำลังประลัยสำหรับการโอบรัดและ ω_w คือ อัตราส่วนปริมาตรเชิงกลระหว่างเหล็กกรัดรอบและปริมาตรของคอนกรีตที่มีการโอบรัด แสดงดังสมการที่ (3)

$$\omega_w = \frac{\text{volume of stirrup}}{\text{volumne of confined concrete}} \cdot \frac{f_{yh}}{f_{co}} \quad (3)$$

กรณีเหล็กกรัดรอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก ค่า ω_w สามารถคำนวณได้ในสมการที่ (4)

$$\omega_w = \frac{A_s \pi d}{\pi d^2 s / 4} \cdot \frac{f_{yh}}{f_{co}} = \frac{4A_s}{ds} \cdot \frac{f_{yh}}{f_{co}} \quad (4)$$



รูปที่ 7 ค่าดัชนีประสิทธิผลของการโอบรัดเทียบกับสมการ Eurocode 8

โดยที่ f_{yh} คือ หน่วยแรงครากของแผ่นเหล็กีกรอบ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กีกรอบ s คือ ระยะห่างของแผ่นเหล็กีกรอบวัดจากศูนย์กลางแผ่นและ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

จากรูปที่ 7 แสดงค่าดัชนีประสิทธิภาพ $\alpha\omega_w$ จากสมการทำนายของ Eurocode 8 [9] ซึ่งสำหรับการโอบรัดของแผ่นเหล็กีที่อัดแรงของตัวอย่าง $150-s'=0$ สำหรับตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก มีค่าเท่ากับ 1.655 ซึ่งดัชนีประสิทธิภาพที่มีค่าสูงหมายถึงวัสดุที่นำมาโอบรัดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นและรูปแบบของการเสริมกำลังจะนำไปใช้กับตัวอย่างเสาทดสอบ โดยกำหนดระยะห่างของการโอบรัด $s'=0$ สำหรับเสาคอนกรีต ในระยะที่ 2

3.2 ระยะที่ 2 การทดสอบเสาคอนกรีต

ผลการทดสอบจากระยะที่ 2 สรุปในตารางที่ 4 ประกอบด้วยค่าแรงอัดสูงสุด (Ultimate Load) การเสียรูปตามแนวแกน (Axial Deformation) และการเสียรูปด้านข้าง (Lateral Deformation) ที่ได้จากค่าเฉลี่ยในระหว่างการทดสอบ โดยตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ทดสอบภายใต้แรงดัดเพียงอย่างเดียว (Pure Bending) จะไม่มีการเสียรูปตามแนวแกน เช่น เสา 150-C-M

รูปที่ 8 แสดงภาพการวิบัติของตัวอย่างเสาคอนกรีตทดสอบในระยะที่ 2 โดยแสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่

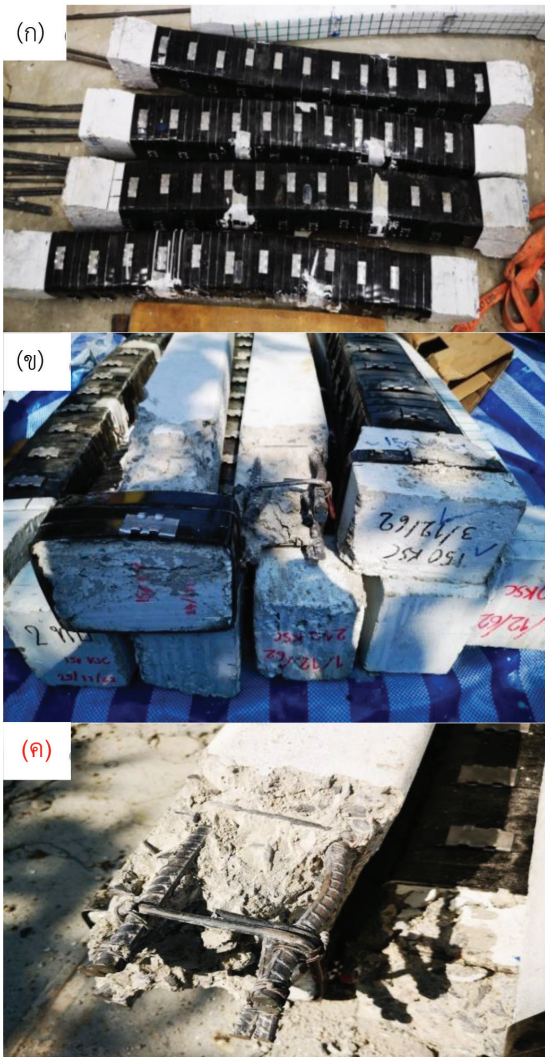
ของวิบัติของเสาที่เสริมแรงภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์ [รูปที่ 8 (ก)] การวิบัติของตัวอย่างที่เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใต้แรงอัดตามแนวแกน [รูปที่ 8 (ข)] และลักษณะการโก่งของเหล็กเสริมที่บริเวณด้านรับแรงอัด ภายหลังจากการสกัดคอนกรีตที่แตกบริเวณด้านที่รับแรงออก [รูปที่ 8 (ค)]

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบเสาคอนกรีต ในระยะที่ 2

Column ID	Ultimate Load (kN)	Displacement at Ultimate Load (mm)	
		Axial	Lateral
150-C-A	416.1	0.25	0.32
150-C-M	38.3	n/a	14.78
150-C-0.5b	309.2	0.42	0.62
150-C-b	138.4	0.44	12.84
150-1n-A	498.2	0.41	0.50
150-1n-M	38.9	n/a	16.60
150-1n-0.5b	343.2	0.50	0.60
150-1n-b	190.1	0.57	12.94
150-2n-A	534.4	0.54	0.61
150-2n-M	40.99	n/a	17.76
150-2n-0.5b	380.5	0.63	0.72
150-2n-b	198.6	0.72	13.04

ผลทดสอบในตารางที่ 4 จะพบว่า กำลังรับแรงอัดของเสา 150-C-A ที่ไม่ได้เสริมกำลัง ทดสอบภายใต้แรงอัด เท่ากับ 416.1 กิโลนิวตัน และเพิ่มขึ้น 498.2 กิโลนิวตัน (120%) และ 534.4 กิโลนิวตัน (128%) สำหรับการเสริมกำลังที่มีการรัดด้วย PTMS จำนวน 1 รอบ และ 2 รอบ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลที่เด่นชัดของประสิทธิภาพการเสริมกำลังด้วยระบบเหล็กแผ่นชนิดบางสำหรับเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำ

จากการทดสอบตัวอย่างเสาทั้งหมด สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (แกน y) และ Axial Displacement, Lateral Displacement (แกน x) เพื่อเปรียบเทียบค่า

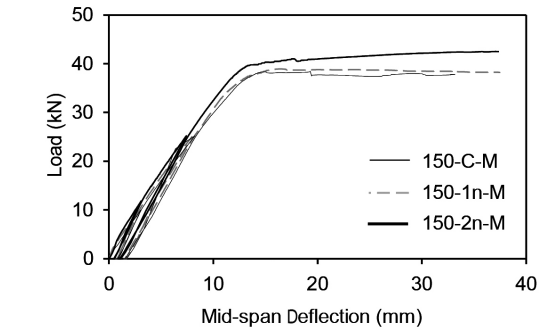


รูปที่ 8 การวัดขนาดของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ทดสอบในระยะที่ 2

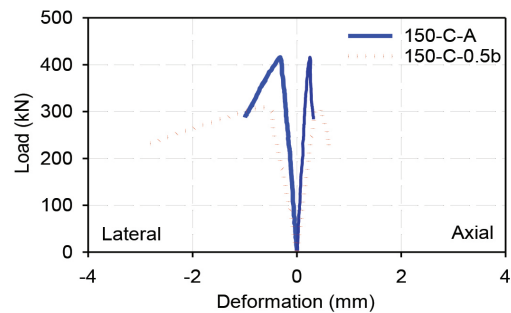
ความแตกต่างที่เกิดขึ้นหลังจากทำการเสริมกำลังเสาทดสอบด้วยการโอบรัดด้วยเหล็กพืด แสดงดังรูปที่ 9 ถึง 11

4. อภิปรายผลและสรุป

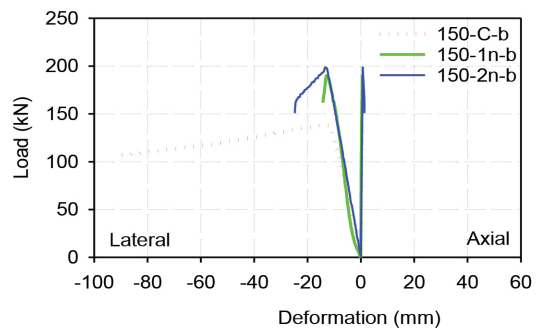
การเปรียบเทียบวิเคราะห์หาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (P-M Interaction Diagram) ของเสาทดสอบ คณะวิจัยทำการวิเคราะห์หน้าตัดร้าว (Crack-sectional Analysis; CSA) โดยโปรแกรม RESPONSE 2000 ที่พัฒนาขึ้นโดย Benz [10]



รูปที่ 9 Load vs Deflection ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ทดสอบภายใต้แรงดัดเพียงอย่างเดียว

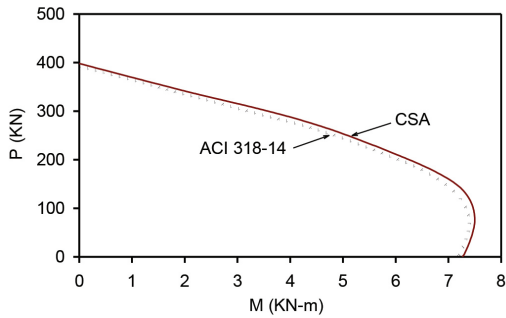


รูปที่ 10 Load vs Deflection ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ไม่เสริมแรงภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน



รูปที่ 11 Load vs Deflection ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่เสริมแรงภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน

ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎี Modified Compressive Field Theory [11], [12] โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตเหล็กเสริม และแผ่นเหล็กกร็อบ ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

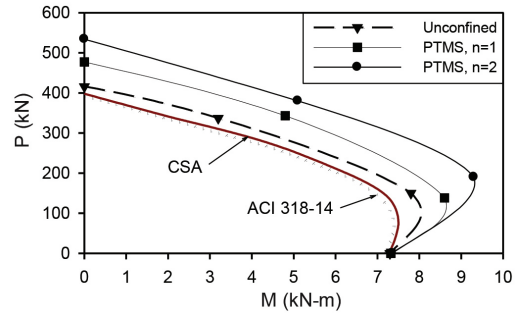


รูปที่ 12 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์จากวิเคราะห์หน้าตัดร้าว และทำนายโดยสมการ ACI 318-14

ผลการเปรียบเทียบ P-M Diagram ของหน้าตัดเสาคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง (Unconfined) กับผลการวิเคราะห์หน้าตัดร้าว Cracked-Sectional Analysis (CSA) โดยโปรแกรม RESPONSE 2000 และผลการทำนายโดยสมการของ ACI 318-14 [8] แสดงในรูปที่ 12 พบว่า เส้นแผนภูมิปฏิสัมพันธ์หน้าตัดเสาคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมกำลัง จากผลการวิเคราะห์ CSA ให้กำลังหน้าตัดที่มากกว่าผลการทำนายโดยสมการของ ACI 318-14 ประมาณ 5% เนื่องจากวิเคราะห์หน้าตัดร้าวจากทฤษฎี Modified Compressive Field Theory [11], [12] จะพิจารณาผลการเพิ่มขึ้นของกำลังหน้าตัดภายหลังคอนกรีตร้าว (Tension Stiffening) และอิทธิพลของ Strain Hardening ของเหล็กเสริมคอนกรีต ภายหลังเหล็กเสริมคราก

การศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงเป็นแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ P-M Interaction Diagram ดังรูปที่ 13 ของเสาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (Unconfined) และสำหรับการเสริมกำลังที่มีการรัดด้วย PTMS จำนวน 1 ชั้น ($n = 1$ Layer) และ 2 ชั้น ($n = 2$ Layers) ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพการเสริมกำลังด้วยระบบเหล็กพืดกำลังสูง สำหรับเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำ เพิ่มขึ้นสำหรับตัวอย่างเสาทดสอบภายใต้แรงอัดเพียงอย่างเดียว (Pure Axial Compression) โดยกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 28% สำหรับเสาที่มีการเสริมกำลังโดยการรัดจำนวน 2 ชั้น

ในส่วนของคุณสมบัติของการเสริมกำลังตัวอย่างเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบเอียงศูนย์ ผลของการ



รูปที่ 13 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ P-M Interaction Diagram ของเสาทดสอบในระยะที่ 2

เสริมแรงจากแผ่นเหล็กพืดกำลังสูง มีผลทำให้แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ P-M Interaction Diagram ของตัวอย่างที่มีการเสริมแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 13 และสำหรับอิทธิพลของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตภายใต้แรงอัดเพียงอย่างเดียว (Pure Bending) พบว่า ค่าแรงดัดของตัวอย่างที่เสริมกำลังเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาโดย Imjai และคณะ [13] ที่ระบุว่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กพืดเพิ่มขึ้นเพียง 5-10% เนื่องจากผลของ Poisson's ratio บริเวณช่วงเหนือแกนสะเทินที่คอนกรีตรับแรงอัด จากงานวิจัยนี้พบว่า ตัวอย่างการเสริมกำลังเสาคอนกรีตที่รับแรงตามแนวแกน แสดงผลของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำมีผลทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ

ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธีการโอบรัดด้วยเหล็กแผ่นชนิดบาง โดยทดสอบในระยะที่ 1 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก และในระยะที่ 2 ทำการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์

ผลจากการศึกษาในโครงการนี้พบว่า วิธีการเสริมกำลังเสาคอนกรีตด้วยวิธีการโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กพืดที่มีกำลังดึงสูง มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น



คิดเป็นร้อยละ 28 และอิทธิพลการรัตรอบเสาทดสอบด้วยวิธีการเสริมกำลังดังกล่าว พบว่า การเสริมกำลังเสาคอนกรีตกำลังต่ำโดยโอบรัดด้วยเหล็กพืดกำลังสูงสามารถเพิ่มความสามารในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ โดยแปรผันตามจำนวนชั้นของการรัตรอบด้วยแผ่นเหล็ก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI4YE 2019) โดยบริษัทสหวิริยา สตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และทุนสนับสนุนการวิจัย Science and Technology Research Grant (STRG 2019) โดย Thailand Toray Science Foundation

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Imjai and R. Garcia, "Performance of damaged RC beams repaired and/or strengthened with FRP sheets: An experimental investigation," in *Proceedings of the 24th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24)*, At Perth, Australia, vol. 1, 2016, pp. 115.
- [2] B. J. Bett, R. E. Klingner, and J. O. Jirsa, "Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, vol. 85, no. 5, pp. 499–508, 1988.
- [3] Y. H. Chail, M. J. N. Priestley, and F. Seible, "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance," *ACI Structural Journal*, vol. 88, no. 5, pp. 572–584, 1991.
- [4] M. Frangou, K. Pilakoutas, and S. Dritsos, "Structural repair strengthening of RC columns," *Construction Building Materials*, vol. 9, no. 5, pp. 259–266, 1995.
- [5] M. Frangou, "Strengthening of concrete by lateral confinement," Ph.D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK, 1996.
- [6] T. Imjai, U. 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.
- [7] 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: Experimental investigation and analytical modelling," *Structural Concrete Journal of the Fib.* vol. 17, no. 4, pp. 668–676, 2016.
- [8] B.M. Johnson and A.H. Wilson, *Building Code Requirements for Structural concrete and Commentary*. Terminology of Building Conservation Industry, Division of Building Research, NRC Canada, ACI 318-14, 2015.
- [9] Commission of the European Communities, "Eurocode No. 8: Structures in seismic regions-design part 1. generala and building," Report EUR 12266 EN, May 1988.
- [10] E. C. Bentz, "Sectional analysis of reinforced concrete," Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2000.
- [11] F.J. Vecchio and M.P. Collins, "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear," *ACI Journal, Proceedings*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.
- [12] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "Compression response of cracked reinforced concrete," *ASCE Journal of Structural Engineering*,



vol. 119, no. 12, pp. 3590–3610, 1993.

- [13] T. Imjai, M. Setkit, R. Garcia, and F. Figueiredo,
“Flexural strengthening of damaged low

strength concrete beams using PTMS and/or
NSM techniques,” *Case Studies in Construction
Materials*, in press, 2020.