

นวัตกรรมเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธีโอบรัดด้วยแผ่น โลหะอัดแรงภายหลัง

A Novel Strengthening Technique for Concrete Compression Members using Post-Tensioned Metal Strapping

พงศธรณ์ จันทรเพ็ญ¹, นฤเบศ ทองเฝือ¹, อัครชัย ชะริตตมา¹ และ ทนงศักดิ์ อัมใจ^{1*}

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้เสนอผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับนวัตกรรมระบบการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธีโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กอัดแรงภายหลัง เรียกว่า Post-Tensioned Metal Strapping (PTMS) ซึ่งเทคนิคนี้ประยุกต์การใช้เหล็กแผ่น ที่มีจุดครากที่สูงมารัดรอบองค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และทำการอัดแรงให้กับองค์อาคารโดยเครื่องมือรัดรอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ผลการวิจัยที่ผ่านมานำเสนอผลของการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวโดยการเพิ่มกำลังหน้าตัดและความเหนียว การใช้เทคนิค PTMS จึงเป็นการแก้ปัญหาโครงสร้างที่รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับวิธีการเสริมกำลังแบบดั้งเดิม บทความวิชาการนี้ได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิค PTMS ในการเสริมกำลังโครงสร้างในประเทศไทย

คำสำคัญ: แผ่นเหล็กอัดแรงภายหลัง ระบบการเสริมกำลัง เหล็กพืด ความเหนียว องค์อาคารรับแรงอัด

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* Corresponding author, e-mail: thanongsak.im@wu.ac.th

Abstract

This paper introduces the innovative technique in strengthening concrete compression members using the Post-Tensioned Metal Straps (PTMS) system. The PTMS utilizes high-strength straps to actively confine structural members. This prestressed steel straps are tensioned and wrapped around the structural members by using the simple strapping tools as those used in the packaging industry. The experimental results from literature indicate the success of PTMS in strengthening structural concrete members by increasing capacity and ductility of structures under seismic loads. Consequently, PTMS is considered the strengthening solution that is faster and more cost-effective compared to other traditional strengthening methods. This paper highlights and discusses the potential uses of PTMS in strengthening applications in Thailand.

Keywords: Post-tensioned Metal strapping, Strengthening system, Metal straps, Ductility, Compression member

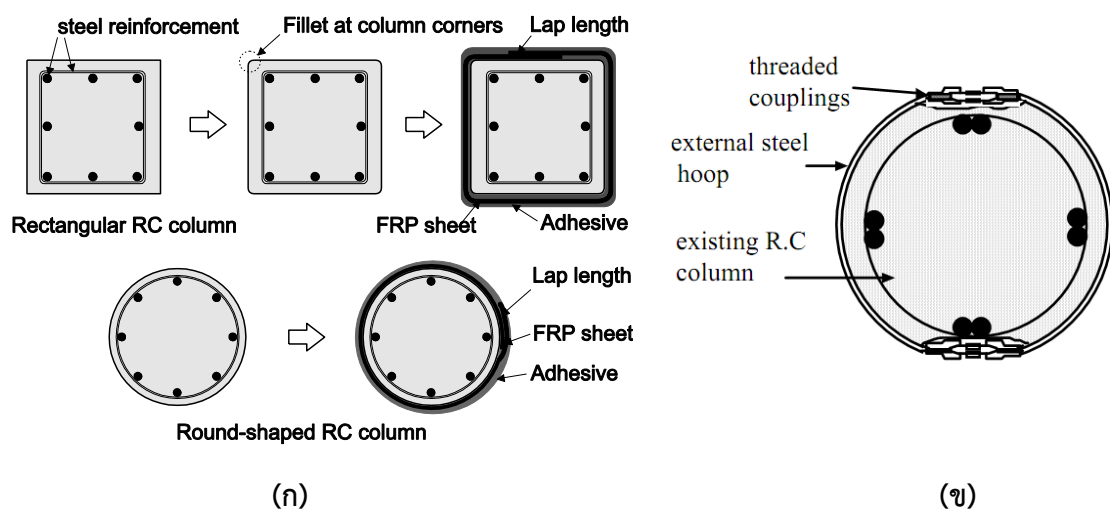
1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคการซ่อมแซมและเพิ่มกำลังให้กับองค์อาคารหลายวิธี การเสริมความแข็งแรงโดยขยายหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกว่า reinforced concrete jacketing ถือว่าเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้กัน [1] แต่วิธีนี้จะเป็นผลให้องค์อาคารมีหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจไปลดพื้นที่การใช้งานของอาคารได้ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับองค์อาคารที่จะไม่ส่งผลให้หน้าตัดใหญ่ขึ้นมากเกินไปและมีราคาถูกกว่า เช่น การใช้แผ่นเหล็กมาเสริมรอบหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกว่า steel jacketing [2] อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นเหล็กมาเสริมกำลังให้องค์อาคารนี้ต้องใช้การเชื่อมเหล็กเป็นขั้นตอนหลักที่สำคัญ การเชื่อมเหล็กนี้ต้องใช้เครื่องมือหนักและช่างที่มีทักษะสูงเพื่อให้ได้งานเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้จะต้องวางแผ่นเหล็กให้แนบกับคอนกรีตให้แน่นที่สุดเพื่อให้ผลการโอบรัดที่ดี ซึ่งเป็นการยากที่จะประเมินระดับของการโอบรัดได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่ยอมรับในการประเมินประสิทธิภาพของการเชื่อมอีกด้วย เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่าการใช้คอนกรีตหรือแผ่นเหล็กในการเสริมความแข็งแรงขององค์อาคารต้องใช้แรงงานและเวลาค่อนข้างมาก และอาจทำให้การใช้ประโยชน์ของพื้นที่อาคารลดลงไปด้วย

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคนิคที่เรียกว่า Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer (EBR FRP) โดยการนำเอาผลิตภัณฑ์เส้นใยพอลิเมอร์แบบเสริมแรง (FRP) มารัดรอบองค์อาคารเพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถเพิ่มความเหนียวและเพิ่มแรงเฉือนของเสาที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กได้โดยการห่อ FRP ไว้รอบหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 1ก [3] การใช้ FRP ในการเสริมความแข็งแรงขององค์อาคารนี้จะไม่ทำให้หน้าตัดใหญ่ขึ้นแต่อย่างใดเพราะ FRP เป็นมีลักษณะเป็นแผ่น

ชนิดบาง อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายเริ่มแรกของวัสดุประเภท FRP อาจสูงกว่าวิธีการทำ RC Jacketing หรือ Steel Jacketing ซึ่งอาจทำให้วิศวกรผู้ออกแบบอาจจะต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านงบประมาณในการก่อสร้างระบบเสริมกำลังจากวัสดุ FRP

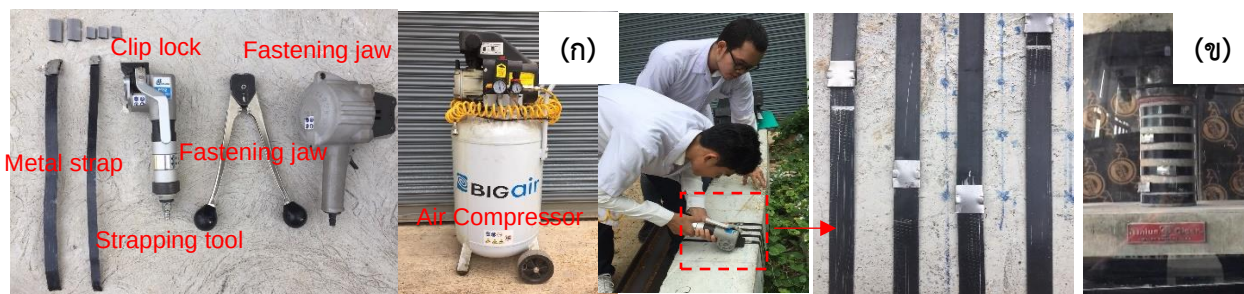
แม้ว่าเทคนิคการเสริมแรงดังกล่าวข้างต้นได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพมากในการเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน แต่ก็ยังเป็นวิธีการเพิ่มการโอบรัดแบบ passive เท่านั้น ในความพยายามที่จะเพิ่มการโอบรัดที่มีประสิทธิภาพนั้น จึงได้มีการคิดค้นวิธีการโอบรัดองค์อาคารแบบ active ขึ้นมา [4] ตัวอย่างเช่น การใช้ห่วงวงกลมรัดเสาด้วยข้อต่อเพื่อเพิ่มการโอบรัดในเสา อย่างไรก็ตามวิธีนี้ เสา มักได้รับความเสียหายในระหว่างการติดตั้งข้อต่อ เพราะต้องถูกสกัดเอาคอนกรีตบางส่วนออกเพื่อให้ข้อต่อแนบเรียบกับเสาได้อย่างเต็มที่ (รูปที่ 1ข)



รูปที่ 1 เทคนิคการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการโอบรัด (ก) การใช้ FRP โอบรัด (ข) การใช้ห่วงเหล็กวงกลมรัดเสา ([3-5])

2. นวัตกรรมการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดโดยใช้ระบบแผ่นเหล็กโอบรัดรอบภายหลัง

วิธีการเสริมความแข็งแรงให้เสาและคานโดยใช้ระบบแผ่นเหล็กโอบรัดรอบภายหลัง (Post-tensioned Metal Straps – PTMS) ได้ถูกริเริ่มโดย Frangou และคณะ ในช่วงปี 1995-1996 [4,5] เทคนิคนี้ใช้สายรัดเหล็กที่มีความแข็งแรงและยืดตัวสูงมาช่วยโอบรัดองค์อาคารโดยรอบโดยใช้เครื่องมือจับยึดที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ (ดังรูปที่ 2ก) การโอบรัดนี้ใช้แนวความคิดการอัดแรงเข้ามาช่วยเนื่องจากในระหว่างการรับน้ำหนัก องค์อาคารจะพยายามขยายตัวออก แต่ถูกโอบรัดไว้ ทำให้กำลังและความเหนียวขององค์อาคารเพิ่มมากขึ้น สำหรับเทคนิค PTMS นี้จะใช้แถบโลหะที่มีจำหน่ายได้หลายขนาด ขึ้นกับความหนาและกำลังที่ต้องการ โดยทั่วไปแผ่นเหล็กที่ใช้จะมีกำลังครากระหว่าง 300 MPa ถึง 1000 MPa ส่วนเครื่องดึงเหล็กแผ่นที่จะรัดรอบ องค์อาคาร ใช้แรงดันอากาศหรือแรงดันไฮดรอลิกในการดึงแผ่นเหล็กฟิตรอบองค์อาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2ข

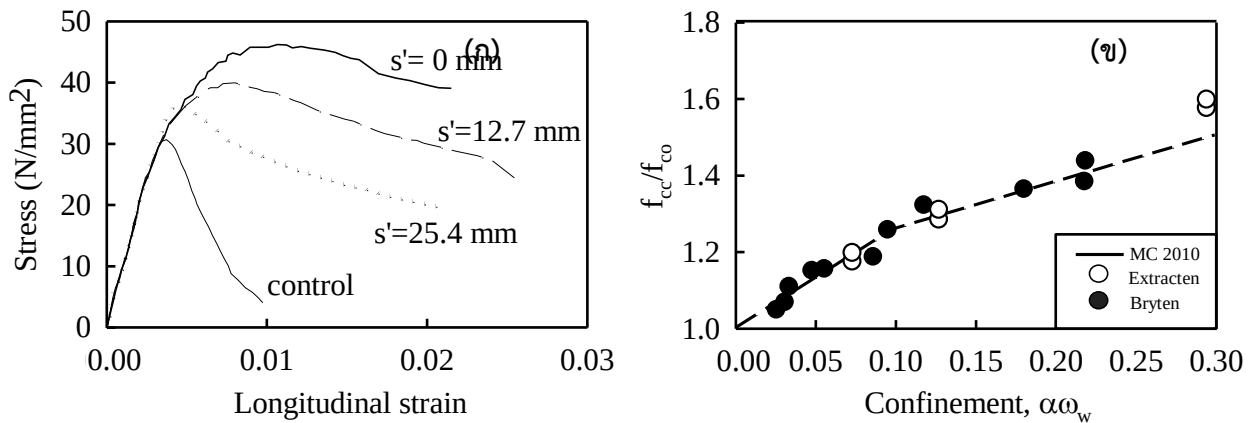


รูปที่ 2 (ก) ชุดเครื่องมือยึดสายรัดโลหะ (PTMS) (ข) การยึดสายรัดรอบคอนกรีตโดยใช้เทคนิค PTMS

การเสริมกำลังโดยวิธี PTMS นี้จะใช้หลักการโอบรัดองค์อาคารดั่งนั้นแรงดึงในแผ่นเหล็กจะต้องถูกรักษาไว้ให้ดีโดยใช้ตัวยึด จะเห็นว่าการโอบรัดตัวอย่างนี้จะใช้การดึงแผ่นเหล็กและยึดด้วยตัวจับยึดเท่านั้น โดยใช้เครื่องมือง่ายๆ ไม่จำเป็นต้องใช้กาวหรือวัสดุประสานชนิดพิเศษที่มีราคาสูง ซึ่งทำให้ระบบ PTMS ทำได้ง่ายกว่าการเสริมความแข็งแรงโดยใช้คอนกรีต (RC jacketing) แผ่นเหล็ก (steel jacketing) หรือ FRP นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเรื่องราคา ระบบ PTMS จะมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเพราะวัสดุและแรงงานที่ใช้ ไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมา

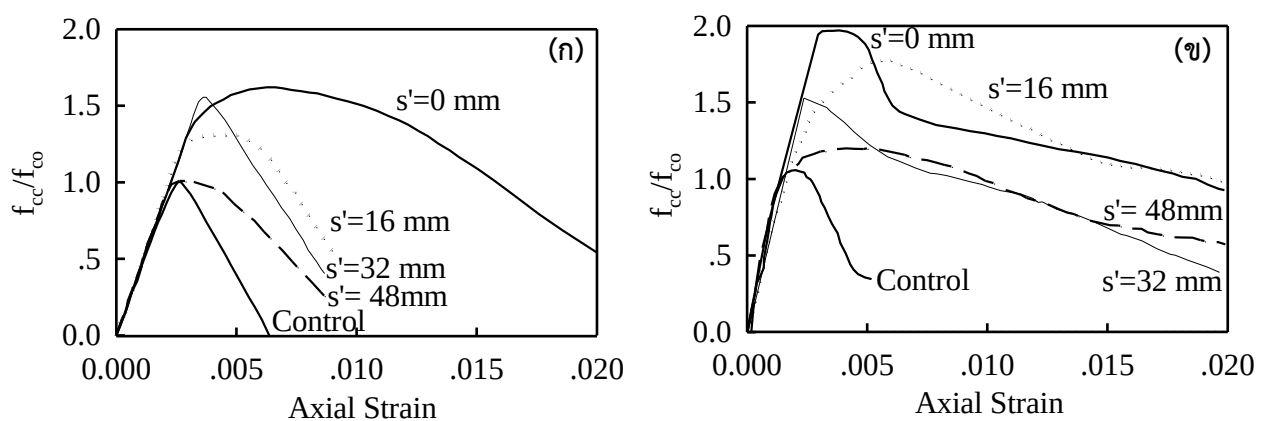
3. งานวิจัยที่ข้องกับการเสริมกำลังแบบเหล็กรัดรอบอัดแรงภายหลังสำหรับเสาคอนกรีต

งานวิจัยในต่างประเทศ Frangou และ Pilakoutas [6] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวิธี PTMS ในการเพิ่มความเหนียวและกำลังขององค์อาคารคอนกรีต โดยทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 100x100x100 มม. ตัวอย่างถูกรัดด้วยแถบเหล็กพืด (แผ่นโลหะอ่อนมีขนาดบางแต่กำลังดึงสูง) ที่มีความกว้าง 12.7 มม. และความหนา 0.5 มม. ใช้แถบเหล็กสองชนิดที่มีกำลังประลัย 490 MPa (Bryten strap) และ 770 MPa (Extraten strap) ผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของเหล็กพืด (Bryten และ Extraten) และระยะห่างของ การโอบรัด ($s' = 0, 12.7, 25.4$ มม.) ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 3ก พบว่ากำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับกำลังของตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัด (Control specimen) ส่วนหน่วยการหดตัวตามแนวแกนสูงสุดของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 100 เมื่อเทียบกับหน่วยการหดตัวตามแนวแกนของตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัด รูปที่ 3ข แสดงสัดส่วนระหว่างกำลังของตัวอย่างทดสอบต่อกำลังของแถบโลหะ 2 ชนิดที่ใช้รัดตัวอย่างทดสอบ และเปรียบเทียบค่าทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากสมการของ Eurocode 2 [7]



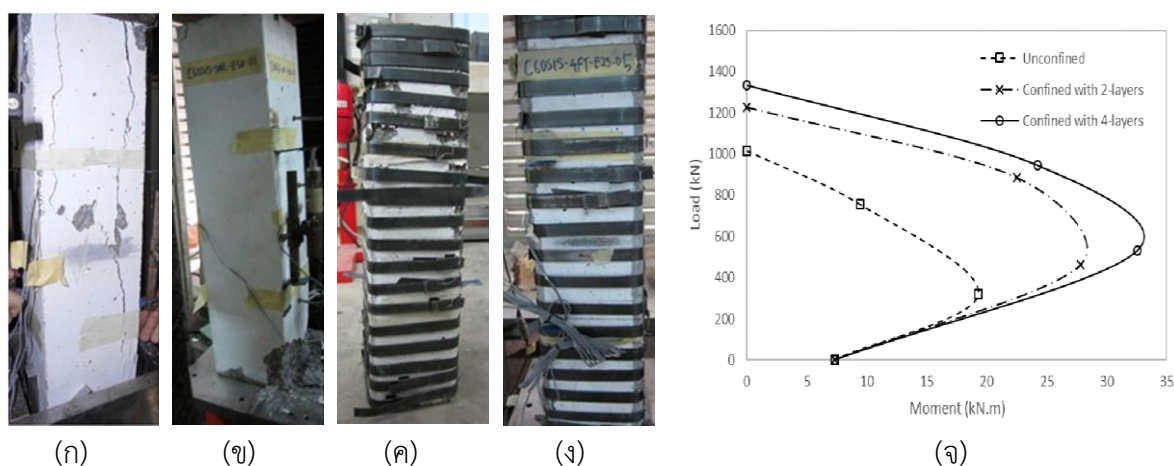
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและการหดตัวของตัวอย่างทรงกระบอกที่ถูกรัดด้วย PTMS และตัวอย่างทรงกระบอกที่ไม่ถูกรัด (after [5])

การศึกษาประสิทธิภาพของการเพิ่มการเสีรูปตามแนวแกนของคอนกรีต ได้มีการศึกษาโดย Moghaddam และคณะ [8,9] โดยทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกและลูกบาศก์จำนวน 72 ตัวอย่าง โดยมีตัวแปรคือกำลังประลัยของคอนกรีต (f'_c) ระยะแผ่นโลหะโอบรัด ($s'=0, 16, 32, 48$ มม.) แรงที่ใช้ดึงแผ่นโอบรัด จำนวนชั้นของแผ่นโลหะโอบรัด (n) และรายละเอียดการต่อของแผ่นโลหะโอบรัด ซึ่งผลการทดสอบของตัวอย่างทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์แสดงได้ดังรูปที่ 4ก และ 4ข ตามลำดับ จะเห็นว่ากำลังของตัวอย่างที่ใช้ PTMS (f_{cc}) ทหารด้วยกำลังของคอนกรีตล้วน (f_{co}) จะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 และ 82 สำหรับตัวอย่างทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยวิธี PTMS มีค่าเกิน 0.02 สำหรับตัวอย่างที่ถูกรัดรอบสำหรับ $s'=0$ โดยทั่วไปเมื่อใช้แผ่นโลหะโอบรัดตัวอย่าง $s'=0$ และจำนวน $n=2$ ชั้น จะช่วยเพิ่มกำลังและความเหนียวได้ดีที่สุด



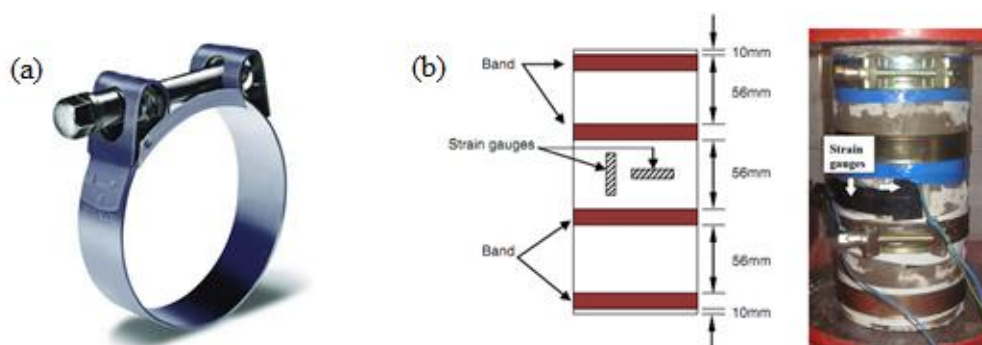
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพของการเพิ่มเสีรูปตามแนวแกนของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ถูกรัดด้วย PTMS และตัวอย่างทรงกระบอกที่ไม่ถูกรัด (after [8,9])

Ma et al. [10] ได้ทดสอบเสาที่ทำจากคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 9 ต้น โดยทำการโอบรัดเสา 6 ต้นด้วยวิธี PTMS เสาเหล่านี้มีขนาดหน้าตัด 140x140 มม. และยาว 600 มม. เสาที่ถูกทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน (รูปที่ 5ก,ค) และแรงอัดเฉียงศูนย์ (รูปที่ 5ข,ง) ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ PTMS ที่ช่วยเพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังช่วยเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของเสาจากลักษณะเปราะเป็นแบบเหนียว ส่วนกำลังรับแรงดัดของเสาเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 22 เมื่อใช้ PTMS ในการโอบรัด



รูปที่ 5 การเสริมกำลังเสาคอนกรีตและแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาจากการศึกษาวิจัยโดย Ma et al. [10]

งานวิจัยอีกชิ้นที่ยืนยันประสิทธิภาพของ PTMS คืองานของ Holmes และคณะ [11] ซึ่งได้ตรวจสอบการใช้รูปแบบต่างๆ ของเทคนิค PTMS ในการปรับปรุงความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก เทคนิคนี้ใช้แถบเหล็กอ่อนยึดรอบทรงกระบอก (รูปที่ 6) พบว่าค่าแรงดัดที่แตกต่างกันในแผ่นโลหะรัดรอบมีผลต่อความกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวแสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงตามขวาง (lateral stress) ที่จุดสูงสุดของกราฟจะเพิ่มขึ้น และความเหนียวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 53



รูปที่ 6 การอัดแรงดันของชิ้นงานคอนกรีตรูปทรงกระบอกโดยใช้แถบหนีบเหล็กอ่อน (a) และตำแหน่งของเครื่องวัดความเค้นบนชิ้นงานทดสอบ (b) (after Holmes et al. [11])

งานวิจัย PTMS ในประเทศไทย Keerathanikkul and Imjai [12] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวิธี PTMS รัตรอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 150x300 มม. มีตัวแปรคือค่ากำลังอัดคอนกรีต, $f'_c = 17, 21, 24, 28, 32$, และ 40 MPa มีการใช้แผ่นเหล็กรัตรอบแท่งตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ชุดของการทดสอบ มีรูปแบบระยะห่าง (s') ของการรัตรอบแผ่นเหล็กเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) คือ $s'=d$ และ $s'=0.5d$ โดย s' = ความกว้างของแผ่นเหล็กรัตรอบ (b_s) ผลจากการทดสอบพบว่าระบบการเสริมกำลังแบบ PTMS มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุด สำหรับกรณีคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดต่ำถึงปานกลาง แต่สำหรับกรณีคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูง ค่าการรับน้ำหนักสูงสุดเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 12 โดยรูปแบบการวิบัติทั้งหมดเป็นแบบการอัดแตก (crushing) ภาพการวิบัติแสดงรูปที่ 7

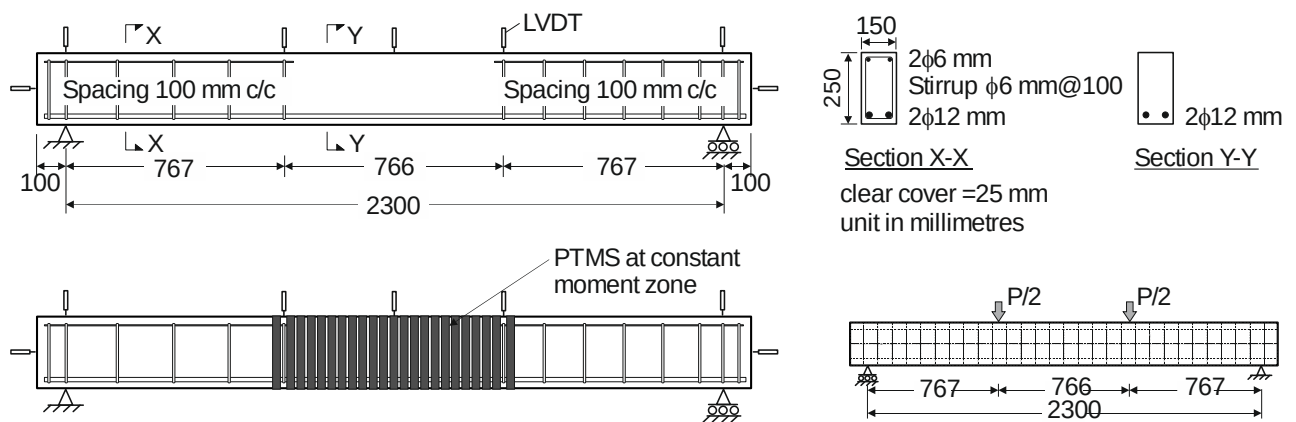


รูปที่ 7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวอย่างคอนกรีตเสริมแรงด้วย PTMS และภาพการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต โดย Keerathanikkul and Imjai [12]

4. งานวิจัยในประเทศไทย

งานวิจัยระบบการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วยวิธีโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กอัดแรงภายหลัง ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องที่ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ [12,13] โดยดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังโครงสร้างเสา และคานคอนกรีต ด้วย ระบบ PTMS แบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น สองระยะ คือระยะที่ 1 ให้น้ำหนักที่พิกัดรอยร้าว (First cracking load, P_{cr}) และทำการซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่ร้าวด้วยคอนกรีตกำลังสูง (High strength grouting, $f'_c = 80$ MPa) ทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วันก่อนทำการเสริมกำลังเหล็กแผ่นมีขนาด 0.8x25 มม. ($f_u = 950$ MPa) โดยเครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฮดรอลิก (ภาพที่ 8ก) ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก ติดตั้งเหล็กแผ่นช่วงบริเวณกลางคาน แสดงในรูปที่ 8 แล้วจึงนำไปทดสอบในระยะที่ 2 กระทั่งวิบัติ ต่อไป

การทดสอบระยะที่ 2 ประกอบด้วยคานห้แบบยาว 2500 มม. มีขนาดหน้าตัด 150 x 200 มม. ใช้เหล็กเสริมคอนกรีตแสดงในรูปที่ 8 ($f_y = 235$ MPa) โดยเหล็กเสริมหลักด้านล่างถูกใช้เพื่อรับการดัดของคานเหล็กปลอกของคานทดสอบใช้เหล็กขนาด 6 มม. ระยะห่าง 100 มม. ทำการทดสอบคานจนกระทั่งถึงพิกัดรอยร้าวแรก จึงหยุดทดสอบและนำคานมาทำการซ่อมแซมโดยทำการสกัดคอนกรีตที่เสียหายออกและเทวัสดุซ่อมแซมคือ High strength mortar และทำการเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS ขนาด 0.8×25 มม. และ $f_u = 950$ MPa ผลจากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังของคานทดสอบที่เสียหายจากการทดสอบในระยะที่ 1 สามารถทำให้คานที่เสียหายภายหลังซ่อมแซมแล้ว สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และองค์อาคารมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 8 รายละเอียดเหล็กเสริมของคานทดสอบและรูปแบบการให้น้ำหนัก

โดย Keerathanikkul and Imjai [12]

5. สรุป

เทคนิคการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดโดยการใช้ Post-tensioned Metal Strapping (PTMS) ได้ร้บศัษววิจัถึงประสิทธิภพในการเสริมแรงคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัด แรงเฉือน และแรงดัดสำหรับองค์อาคาร เช่น เสา และคาน ซึ่งใช้วัสดุเสริมกำลังที่ใช้มีต้นทุนต่ำ สามารถหาได้ในประเทศที่กำลังพัฒนา และมีความสะดวกและความเร็วในการใช้งาน ทำให้เทคนิคนี้มีความสามารถในการซ่อมแซมและสร้างความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การศัษววิจัถึงมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังชนิดนี้ โดยใช้แถบเหล็กพืดที่หาได้ในประเทศไทย และได้ทำการศึกษาพัฒนาแนวทางการออกแบบก่อนที่เทคนิคนี้จะสามารถใช้กันได้อย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติ

6. กิตติกรรมประกาศ

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

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bett, B.J., Klinger R.E., Jirsa J.O., 1988. Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 85 (S48):499-508.
- [2] Chai, Y.H., Priestley, M.J.N., Seible, F., 1991. Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance", *ACI Structural Journal*, 88(5): 572-584.
- [3] Imjai, T. and Garcia, R., 2016. Performance of damaged RC beams repaired and/or strengthened with FRP sheets: an experimental investigation. In 24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24). 7-9 December 2016 Perth, Western Australia.
- [4] Frangou, M., Pilakoutas, K., Dritsos, S., 1995. Structural repair strengthening of RC columns. *Construction Building Materials*, 9(5):259–266.
- [5] Frangou, M., 1996. Strengthening of concrete by lateral confinement. Ph.D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK.
- [6] Frangou, M., Pilakoutas, K., 1994. Strengthening of RC columns by lateral Tensioning, ERCAD Berlin.
- [7] CEN. (2004). “Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1: general rules and rules for building”, European Committee for Standardisation, Brussels.
- [8] Moghaddam, H., Samadi, M., Pilakoutas, K., Mohebbi, S., 2010. Axial compressive behavior of concrete actively confined by metal straps; part A: experimental study. *Materials and Structures*, 43(10):1369–1381.
- [9] Moghaddam, H., Samadi, M., Pilakoutas, K., 2010. Compressive behavior of concrete actively confined by metal strips, part B: analysis. *Materials and structures*, 43(10):1383-1396.
- [10] Ma, C.K., Awang, A.Z., Omar, W., Liang, M., Jaw, S.W., Azimi, M., 2016. Flexural capacity enhancement of rectangular high-strength concrete columns confined with post-tensioned steel straps *Structural Concrete*, 4:668-676.

- [11] Holmes, N., Niall, D., O'Shea, C., 2015. Active confinement of weakened concrete columns. *Materials and Structures*, 48:2759–2777.
- [12] Keerathanikkul, K. and Imjai, T. 2019. Strengthening of concrete in compression using lateral confinement high strength steel strapping, in annual concrete conference 14. Pechbury, March 6-8, 2019. Thailand.
- [13] Imjai, T., Chaisakulkiet, C., Garcia, R, and Pilakoutas, K. (2018) Strengthening of RC members using Post-tensioned Metal Straps: state of the research. *Lowland Technology International (LTI) journal*, vol. **20** (2), pp. 187-196.