



ประสิทธิภาพการเสริมกำลังคานคอนกรีตที่เสียหายในภาวะใช้งานโดยใช้ระบบเหล็กพืดรัดรอบอัดแรงภายหลัง

มนเพียร เสรีจกิจ* และ ทนงศักดิ์ อิมใจ

สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2355 อีเมล: smonthia@mail.wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.09.004

รับเมื่อ 17 เมษายน 2562 แก้ไขเมื่อ 7 มิถุนายน 2562 ตอรับเมื่อ 24 มิถุนายน 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 9 กันยายน 2562

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังคานคอนกรีตที่เสียหายจากการตัดในภาวะใช้งาน โดยใช้ระบบเหล็กพืดรัดรอบอัดแรงภายหลัง (Post-Tensioned Metal Strapping; PTMS) สำหรับคานคอนกรีต โดยแบ่งการทดสอบในระยะที่ 1 เพื่อจำลองคานคอนกรีตที่ร้าวและวิบัติในภาวะใช้งาน และทำการซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่ร้าว และเสริมกำลังด้วย PTMS ก่อนทดสอบกระทั่งวิบัติในระยะที่ 2 ผลจากการศึกษาพบว่าค่าการดูดซับพลังงานลดลง 11% เนื่องจากคานมีการวิบัติโดยเหล็กเสริมมีการครากแล้ว ก่อนทำการเสริมกำลัง PTMS ในส่วนของดัชนีความเหนียวพบว่า ค่าความเหนียวที่น้ำหนักสูงสุดเพิ่มขึ้น 18.4% และที่น้ำหนักวิบัติเพิ่มขึ้น 29.3% ซึ่งผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่าระบบ PTMS มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังคานตัวอย่างที่เสียหายในภาวะใช้งาน

คำสำคัญ: ระบบเหล็กพืดรัดรอบ PTMS การโอบรัดภายหลัง EBR FRP ความเหนียว พลังงาน



Strengthening Performance of Damaged Concrete Beams in Service Conditions Using Post-tensioned Metal Strapping Technique

Monthian Setkit* and Thanongsak Imjai

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

* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2355, E-mail: smonthia@mail.wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.09.004

Received 17 April 2019; Revised 7 June 2019; Accepted 24 June 2019; Published online: 9 September 2019

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research article investigates the strengthening performance of the post-tensioned metal strapping (PTMS) technique. An experimental program was divided into two phases. The testing of flexural failure concrete beam specimens was carried out in phase I; then damaged concrete was removed prior to repairing with high-strength concrete. The strengthening work using PTMS was then applied to the repaired beam before testing in phase II. Based on the test result, it was found that the energy adsorption increased up to 8.2% with ductility at ultimate and failure increased up to 18.4% and 29.3%, respectively. Therefore, the PTMS technique could be used to strengthen damaged concrete beams under service conditions.

Keywords: Post-tensioned metal strapping, PTMS, Externally bonded reinforcement, EBR, FRP, Ductility, Energy

Please cite this article as: M. Setkit and T. Imjai, "Strengthening performance of damaged concrete beams in service conditions using post-tensioned metal strapping technique," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 4, pp. 577–584, Oct.–Dec. 2019 (in Thai).

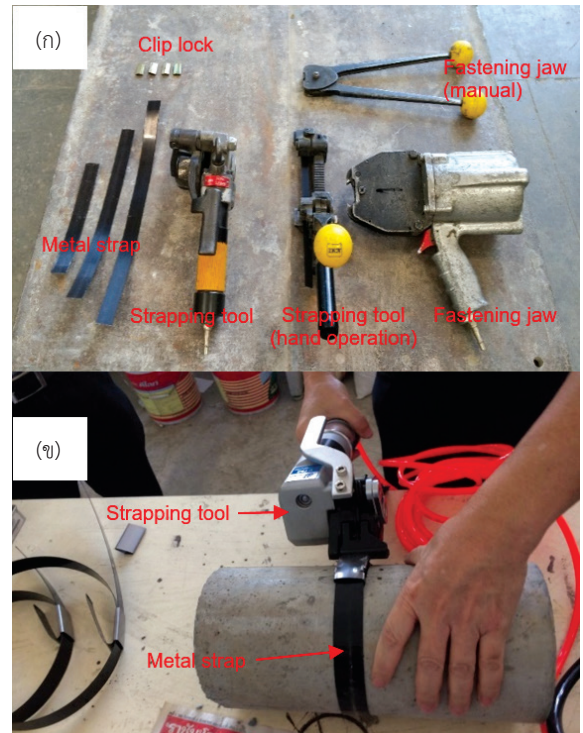
1. บทนำ

การเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงส่วนเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดัด แรงอัด แรงเฉือน หรือแรงบิด ได้มีการศึกษาวิจัยนำวัสดุเส้นใยคอมโพสิต (FRP) ประเภทแผ่นมาใช้ในการหุ้มรอบภายหลัง โดยวิธี Externally Bonded Reinforcement; EBR เพื่อเสริมกำลังให้กับองค์อาคารในกรณีองค์อาคารรับแรงอัด เช่น โครงสร้างเสาคอนกรีต การเสริมกำลังด้วยวิธี EBR นี้สามารถเพิ่มความเหนียวและเพิ่มแรงเฉือนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีการออกแบบควบคุมความเครียดในวัสดุให้เหมาะสม [1]-[4]

อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการดำเนินการติดตั้งเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอมโพสิตและผิวคอนกรีต ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง และค่าใช้จ่ายของวัสดุประเภทวัสดุคอมโพสิตและวัสดุยึดเหนี่ยวมีราคาสูง เมื่อเทียบกับวิธีการหุ้มรอบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) หรือการปกทับด้วยคอนกรีตใหม่ (Concrete Overlay) ด้วยปัจจัยเหล่านี้เป็นผลให้การพิจารณาการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง โดยวิธี EBR สำหรับโครงสร้างอาคารในประเทศที่กำลังพัฒนาอาจไม่แพร่หลาย จากปัจจัยดังกล่าว [4]

จากปัจจัยที่ต้องคำนึงข้างต้น ได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุและวิธีการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กพืด (High Strength Steel Strapping) โอบรัดองค์อาคารคอนกรีต คล้ายกับวิธี EBR แต่การใช้เหล็กพืดรัดรอบจะเป็นการอัดแรงขณะทำการติดตั้ง ซึ่งผลจากการอัดแรงดังกล่าวเป็นผลทำให้องค์อาคารคอนกรีตโดยเฉพาะองค์อาคารรับแรงอัด มีความสามารถที่เพิ่มกำลังหน้าตัดและความเหนียวได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการเสริมกำลังโดยการหุ้มรอบแบบไม่อัดแรง [1], [5]

ผลจากการวิจัยโดย Frangou *et al.* [1] ได้พัฒนาเทคนิคการใช้เหล็กพืดรัดรอบอัดแรง (Post-Tensioned Metal Straps; PTMS) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัด โดยค่าความแข็งแรงของสายโลหะโดยทั่วไปจะแตกต่างกันไประหว่าง 300 เมกะปาสคาล ถึง 1,000 เมกะปาสคาล [รูปที่ 1(ก)] เครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันอากาศ/แรงดันไฮดรอลิก [รูปที่ 1(ข)] ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้ง



รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับเสริมโครงสร้างคอนกรีต ด้วยวิธี Post-Tensioned Metal Strapping (PTMS)

เครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิก โดยผลจากการอัดแรงขณะติดตั้งเหล็กพืด จะเป็นการเพิ่มแรงรัดรอบ เรียกว่า Confinement ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก เพิ่มขึ้น 20%-40%

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย ทนงศักดิ์ และคณะ [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้ทำการปรับปรุงวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จัดยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวของแรงในระยะยาว (Stress Relaxation) โดยการเพิ่มการจับยึดด้วยตัวยึดเชิงกล (Mechanical Anchorage) โดยการใช้ฟุกเคมี (Chemical Bolt) ระหว่างช่วงของเหล็กพืด แล้วพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบ และทำการออกแบบตัวยึด (Clip Lock) ใหม่จากเหล็กกำลังต่ำที่เป็นสนิมง่าย มาใช้เป็นตัวยึดแบบอะลูมิเนียมแทน



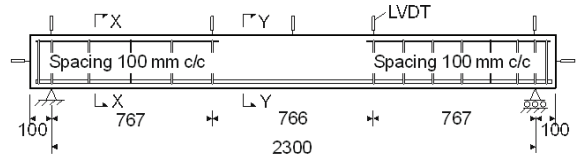
(ก) (ข)
รูปที่ 2 การเสริมกำลังคานด้วยวิธี PTMS

ในต่างประเทศได้มีรายงานผลการศึกษางานวิจัยการเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด เช่น เสา แต่สำหรับการประยุกต์ใช้การเสริมกำลัง PTMS สำหรับคานคอนกรีตที่ร้าวในภาวะใช้งาน ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง [4] ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอผลการศึกษาระยะแรกของโครงการวิจัย การศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวิธี PTMS กับคานคอนกรีตที่ร้าวในภาวะใช้งาน โดยทำการเสริมกำลังในช่วงที่คอนกรีตรับแรงอัด เช่น บริเวณเหนือแกนสะเทิน ผลจากการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางทำให้การเสริมกำลังของคานที่เกิดการเสียหายเนื่องจากการตัดทำได้ง่ายขึ้นโดยใช้เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน

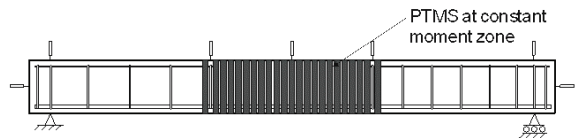
2. วิธีการทดสอบ

2.1 การออกแบบคานทดสอบ

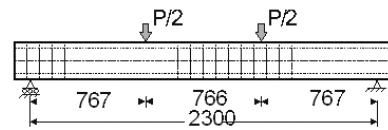
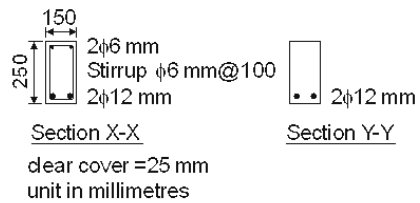
โครงการวิจัยนี้ทำการทดสอบคานซึ่งมีขนาด 150×250×2,500 มม. เสริมเหล็กเส้นกลมแบบผิวเรียบดำนบน 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ($f_y = 235$ เมกะปาสคาล) ระยะห่าง 100 มม. เหล็กเสริมเหล็กข้ออ้อยด้านล่าง 2 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ($f_y = 392$ เมกะปาสคาล) เพื่อต้องการให้คานวิบัติภายใต้แรงดัด จึงกำหนดปริมาณเหล็กปลอกให้พอเพียง โดยใช้เหล็กเส้นกลมแบบผิวเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ($f_y = 235$ เมกะปาสคาล) ระยะห่าง 100 มม. และทำการทดสอบในระบะที่ 1 เพื่อจำลองคานที่แตกร้าวในภาวะใช้งาน และทำการซ่อมแซมคานคอนกรีตส่วนที่ร้าวและเสริมกำลังด้วย PTMS ดังรูปที่ 2 ก่อนทดสอบกระทั่งวิบัติในระบะที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3



(ก) ทดสอบในระบะที่ 1 (Phase I)



(ข) ทดสอบในระบะที่ 2 (Phase II)



(ค) รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

รูปที่ 3 รายละเอียดเหล็กเสริมและมิติของคานทดสอบและรูปแบบการให้น้ำหนัก

2.2 คุณสมบัติคอนกรีตและวัสดุซ่อมแซม

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จมีค่ากำลังอัดระบุเท่ากับ 24 เมกะปาสคาล เก็บตัวอย่างการทดสอบประเภทละ 6 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติวัสดุ โดยมีผลการทดสอบค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150×150×150 มม. เท่ากับ 33.4 เมกะปาสคาล ค่ากำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 150×300 มม. เท่ากับ 30.0 เมกะปาสคาล ค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 3.1 เมกะปาสคาล และค่ากำลังรับแรงดัดจากการทดสอบคานขนาด 100×100×500 มม. เท่ากับ 4.1 เมกะปาสคาล

2.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัว

การวัดการแอ่นตัวทำได้โดยใช้เครื่องมือ Linear Voltage

Displacement Transducers (LVDT) ที่สามารถอ่านได้ละเอียดถึง 0.001 มม. จำนวน 3 ชุด บริเวณด้านบนช่วงกลางคาน ดังรูปที่ 3 (ก) เพื่อลดผลของการอ่านผิดพลาด กรณีมีรอยร้าวที่เกิดขึ้นขณะทดสอบ และติดตั้ง LVDT อีก 2 ชุดที่ปลายคานตัวอย่างเพื่อคำนวณการแอ่นตัวสุทธิของคานบริเวณช่วงทดสอบ โดยการวัดการแอ่นตัวของคาน การบันทึกค่าการแอ่นตัวจะทำภายหลังการเพิ่มหรือลดช่วงน้ำหนักที่กระทำบนคาน

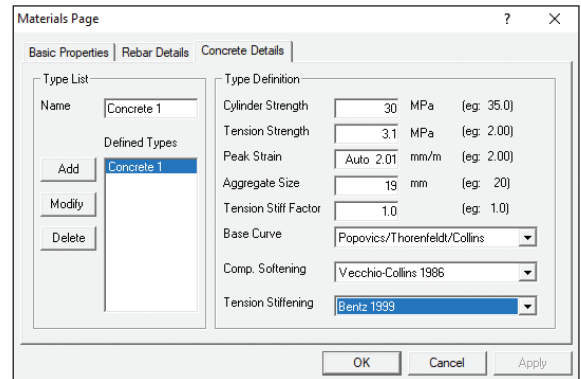
2.4 การให้น้ำหนักบรรทุกและการประมวลผล

รูปที่ 3 (ค) แสดงตัวอย่างการให้น้ำหนักบรรทุกบนคานทดสอบแบบ 4 จุด (Four-point Bending Test) โดยเครื่องทดสอบ UTM ขนาด 50 ตัน โดยกำหนดคานเหล็กด้านบนวางบนคานทดสอบและมีน้ำหนักกระทำตังภาพ การให้น้ำหนักบรรทุกจะเป็นแบบควบคุมด้วยระยะ (Displacement Control) เพื่อศึกษาลักษณะ Post-peak ของความสัมพันธ์ Load-displacement Curve พิกัดรอยร้าว (First Cracking Load, P_{cr}) และทำการซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่ร้าวด้วยคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Grouting, $f'_c = 80$ เมกะปาสกาล) ทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วัน ก่อนทำการเสริมกำลังด้วยเหล็กพืดขนาดหนา 0.8 มม. และกว้าง 25 มม. ($f_u = 950$ เมกะปาสกาล) ระยะห่างระหว่างเหล็กพืดแต่ละเส้นเท่ากับ 12.5 มม. รัศมีในช่วงกลางคานเป็นระยะ 766 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยเครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฮดรอลิก [รูปที่ 2 (ข)] ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องดึงระบบไฮดรอลิกโดยใช้แรงดึง 7 บาร์ ภาพภายหลังการติดตั้งเหล็กพืดช่วงบริเวณกลางคาน แล้วจึงนำไปทดสอบในระยะเวลาที่ 2 กระทั่งวิบัติต่อไป

3. การวิเคราะห์ผล

3.1 การวิเคราะห์หน้าตัดร้าว

การวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าว (Cracked-sectional Analysis; CSA) ของคานทดสอบในระยะเวลาที่ 1 โดยใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุ (คอนกรีตและเหล็กเสริม) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากคานตัวอย่างถูกออกแบบให้กำลังรับแรงดัดต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือน ดังนั้นคานตัวอย่าง



รูปที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตในโปรแกรม

จะวิบัติภายใต้แรงดัด คณะวิจัยได้ทำการวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าวของคาน โดยใช้โปรแกรม RESPONSE 2000 ที่พัฒนาขึ้นโดย Benz *et al.* [6] ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎี Modified Compressive Field Theory [7], [8] ซึ่งต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ของคอนกรีตที่ใช้จริง จึงจะสามารถวิเคราะห์กำลังหน้าตัดของคานคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง ในช่วงน้ำหนักภาวะใช้งานจนถึงช่วงวิบัติ [8]

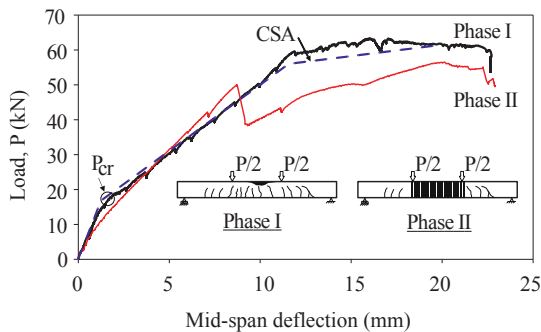
ผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวของคานทดสอบกับผลการวิเคราะห์หน้าตัดร้าวที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม RESPONSE 2000 แสดงในรูปที่ 5 โดยจะพิจารณาค่า Effective Modulus (I_e) ของหน้าตัดคานคอนกรีตจากสมการที่ (1)

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

โดยที่ I_g และ I_{cr} คือค่า Gross and Linear Cracked Moment of Inertia ตามลำดับ M_{cr} และ M_a คือค่า Cracking and Applied Moment ตามลำดับ

3.2 พฤติกรรมการแอ่นตัวและรอยร้าว

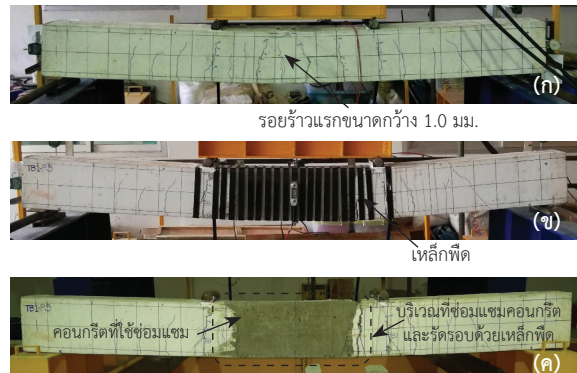
ผลการเปรียบเทียบกราฟ Load-deflection ของคานทดสอบในระยะเวลาที่ 1 แสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 1 โดยผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม RESPONSE 2000 จะแสดงในวงเล็บ พบว่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดพิกัดรอยร้าวแรก P_{cr} เท่ากับ 16.8 กิโลนิวตัน และค่าจาก RESPONSE 2000



รูปที่ 5 Load-deflection Curve ของคานทดสอบ

เท่ากับ 16.4 กิโลนิวตัน คำนวณน้ำหนักที่จุดครากของคานทดสอบ P_y เท่ากับ 58.5 กิโลนิวตัน และค่าจาก RESPONSE 2000 เท่ากับ 49.0 กิโลนิวตัน และค่าน้ำหนักสูงสุด P_u เท่ากับ 63.2 กิโลนิวตัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์ที่ได้ 54.4 กิโลนิวตัน พบว่าค่าน้ำหนักสูงสุดมากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมร้อยละ 16 ทั้งนี้เนื่องมาจากโปรแกรมพิจารณาลักษณะการร้าวแบบกระจาย (Smear Cracks) ในความเป็นจริงคานทดสอบมีลักษณะการร้าวแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Cracks) โดยรอยร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณช่วงกลางคานและมีขนาดกว้าง 0.5–1.0 มม. ดังรูปที่ 6 (ก) ทำให้ผลการเอนตัวของคานมีค่าสูงกว่าโปรแกรม จะสังเกตเห็นชัดในระยะเวลาที่ 2 และนอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมิได้รวมผลการร้าวในส่วนในช่วง Shear Span หรือที่เรียกว่า Shear Cracked Induced Deflection ดังที่มีการศึกษาวิจัยโดย ทนงศักดิ์ และคณะ [9] เมื่อคานในระยะที่ 1 ถึงจุดวิบัติที่น้ำหนัก P_y เท่ากับ 60.1 กิโลนิวตัน จึงทำการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS

สำหรับกราฟ Load-deflection ในระยะที่ 2 พบว่าค่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรก ไม่แสดงช่วงปรับเปลี่ยนของเส้นกราฟเนื่องจากพิกัดรอยร้าวแรก ดังเช่นการทดสอบระยะที่ 1 เนื่องจากคานทดสอบมีการร้าวในระยะที่ 1 ไปแล้วและหลังจากนั้น ปรากฏรอยร้าวบริเวณกลางคานที่น้ำหนักประมาณ 50 กิโลนิวตัน อย่างไรก็ตาม คานทดสอบที่เสริมกำลังด้วย PTMS สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P_u) ได้ถึง 56.1 กิโลนิวตัน และมีการวิบัติโดยการหักบริเวณช่วง



รูปที่ 6 ภาพการวิบัติของคานทดสอบและรูปแบบรอยร้าวของคานทั้งสองระยะ

กลางคานที่น้ำหนักบรรทุก (P_y) 49.3 กิโลนิวตัน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบ PTMS และพบว่าคานทดสอบมีค่าการเอนตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนรอยร้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งรูปแบบรอยร้าวสำหรับคานทดสอบในระยะที่ 1 แสดงในกราฟในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 (ก) โดยจะมีระยะห่างเฉลี่ยของช่วงรอยร้าวบริเวณช่วงกลางคานเท่ากับ 95 มม. และมีความกว้างรอยร้าวสูงสุดที่ 1.0 มม. ที่ภาวะใช้งาน โดยกำหนดค่าน้ำหนักทดสอบสุดท้ายเมื่อค่าความเครียดที่วัดได้จาก Strain Gauge ในเหล็กเสริมเกินกว่าจุดคราก ภายหลังคานทดสอบในระยะที่ 2 [รูปที่ 6 (ข)] ผู้วิจัยได้รื้อแผ่นเหล็กพืดบริเวณช่วงกลางคานออก และปรากฏลักษณะรอยร้าวดังรูปที่ 6 (ค)

3.3 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS

ตารางที่ 1 แสดงค่าน้ำหนักการเอนตัวจากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม RESPONSE 2000 ประสิทธิภาพการเสริมกำลังคานที่เสียหายในระยะที่ 1 ที่มีการเสริมกำลังด้วยระบบ PTMS สามารถแสดงในรูปของค่าการดูดซับพลังงาน (E_{ab}) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของ Load-deflection ดัชนีความเหนียวที่น้ำหนักสูงสุด (μ_u) ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างการโก่งตัวที่น้ำหนักสูงสุด (Δ_u) ต่อการโก่งตัวที่จุดคราก (Δ_y) และดัชนีความเหนียวที่จุดวิบัติ (μ_f)

ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างการโก่งตัวที่ภาวะวิบัติ (Δ_f) ต่อการโก่งตัวที่จุดคราก (Δ_y) จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลัง โดย Hosen *et al.* [10]

ตารางที่ 1 คำนวณน้ำหนักการแอนตัว และประสิทธิภาพการเสริมกำลัง

Parameters	ระยะ 1	ระยะ 2
P_{cr} (kN)	16.8 (16.4*)	n/a
P_y (kN)	58.5 (49.0*)	49.5
P_u (kN)	63.2 (54.4*)	56.1
Δ_u (mm)	20.4 (19.5*)	19.8
P_f (kN)	60.1 (50.1*)	49.3
Δ_f (mm)	22.4 (21.0*)	22.9
E_{ab} (kN-mm)	4497	3998
$\mu_u = \Delta_u/\Delta_y$	1.96	2.32
$\mu_f = \Delta_f/\Delta_y$	2.08	2.69

* ค่าในวงเล็บคือผลการวิเคราะห์โดย RESPONSE 2000

ผลจากการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังคานทดสอบในระยะที่ 2 พบว่าค่าการดูดซับพลังงาน (E_{ab}) ของคานทดสอบระยะที่ 2 ลดลง 11% เนื่องจากคานมีการวิบัติโดยเหล็กเสริมมีการครากแล้วในการทดสอบระยะที่ 1 ก่อนทำการเสริมกำลัง PTMS ในส่วนของดัชนีความเหนียวพบว่า ค่าความเหนียวของคานทดสอบระยะที่ 2 เพิ่มขึ้น 18.4% และ 29.3% สำหรับ μ_u และ μ_f ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบ PTMS มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังคานตัวอย่างที่เสียหายจากการศึกษาวิจัยนี้

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังระบบเหล็กที่ตรึงรอบอัดแรงภายหลัง สำหรับคานคอนกรีตโดยแบ่งการทดสอบในระยะที่ 1 เพื่อจำลองคานคอนกรีตที่ร้าวและวิบัติในภาวะใช้งาน และทำการซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่ร้าว และเสริมกำลังด้วย PTMS ก่อนทดสอบกระทั่งวิบัติในระยะที่ 2 ผลจากการศึกษา พบว่าค่าน้ำหนักที่จุดคราก (P_y) จุดสูงสุด (P_u) และจุดวิบัติ (P_f) มีค่าใกล้เคียงกับค่าจาก

การวิเคราะห์ ส่วนค่าการดูดซับพลังงาน E_{ab} ลดลงร้อยละ 11 เนื่องจากคานมีการวิบัติโดยเหล็กเสริมมีการครากแล้ว ก่อนทำการเสริมกำลัง PTMS ในส่วนของดัชนีความเหนียวพบว่า ค่าความเหนียวของคานทดสอบระยะที่ 2 เพิ่มขึ้น $\mu_u = 18.4\%$ และ $\mu_f = 29.3\%$ ซึ่งผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่าระบบ PTMS มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังคานตัวอย่างที่เสียหายจากการตัด

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประเภทบุคคล เลขที่ WU62227 จากมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 (LTI) Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 187–196, 2017.
- [5] H. L. Coffman, M. L. Marsh, and C. B. Brown, "Seismic durability of retrofitted reinforced-concrete columns," *Journal of Structural*



- Engineering*, vol. 119, no. 5, pp. 1643–1661, 1993.
- [6] E.C. Bentz, “Sectional analysis of reinforced concrete,” Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 2000.
- [7] F. J. Vecchio and M. P. Collins, “The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear,” *ACI Journal*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.
- [8] F. J. Vecchio and M. P. Collins, “Compression response of cracked reinforced concrete,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, no. 12, pp. 3590–3610, 1993.
- [9] T. Imjai, M. Guadagnini, R. Garcia, and K. Pilakoutas, “A practical method for determining shear crack induced deformation in FRP RC beams,” *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 353–364, 2016.
- [10] M. A. Hosen, M. Z. Jumaat, U. J. Alengaram, and N. R. Sulong, “CFRP strips for enhancing flexural performance of RC beams by SNSM strengthening technique,” *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 28–44, 2018.