

พฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง โดยใช้แถบยางพาราอัดแรง

ชัชญาส์ บุญมี^{1*}, กิตติภูมิ รอดสิน²

^{1*} ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email : chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th^{1*}, kittipoom.kmutnb@gmail.com²

Received: May 22, 2019

Revised: June 11, 2019

Accepted: June 13, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรง ซึ่งการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ประเภทที่ 1 คือ การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยว โดยทำการทดสอบแบบไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา และแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราตามแนวยาวของชิ้นส่วนสะพาน เพื่อเสริมกำลังการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วน ประเภทที่ 2 คือ การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นคู่ โดยทำการทดสอบแบบไม่เสริมกำลังจนรอยต่อเกิดการแตกร้าวโดยจำลองเหตุการณ์ว่าไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน Shear Key และทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน โดยการทดสอบทั้ง 2 ประเภทนี้จะทำการทดสอบแบบภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Test) จากผลการทดสอบ พบว่า การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยวชิ้นส่วนที่ไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเกิดการแตกร้าวที่การแอ่นตัวเท่ากับ 5 มิลลิเมตร แต่เมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังเริ่มมีการแตกร้าวที่ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 7 มิลลิเมตร และการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่แบบไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา เมื่อโดนแรงกดทดสอบ 5.92 ตันจนทำให้เกิดการแอ่นตัวเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เริ่มมีการแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ แต่ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวแกนขวางเพื่อเพิ่มแรงอัดแนวตามขวาง เมื่อทดสอบชิ้นส่วนไปที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ที่แรงกด 7.606 ตัน ยังไม่เกิดการแตกร้าวเกิดขึ้นในรอยต่อแผ่นพื้น

คำสำคัญ : ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป, ยางพารา, เสริมกำลัง

Static Behavior of a Plank Girder Strengthening by Pre-Stressed Rubber Pads

Chichaya Boonmee^{1*}, Kittipoom Rodsin²

^{1*} Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Civil and Environmental Engineering Technology, Center of Excellence in Structural
Dynamics and Urban Management, The College of Industrial Technology King Mongkut's University
of Technology North Bangkok

Email : chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th^{1*}, kittipoom.kmutnb@gmail.com²

Received: May 22, 2019

Revised: June 11, 2019

Accepted: June 13, 2019

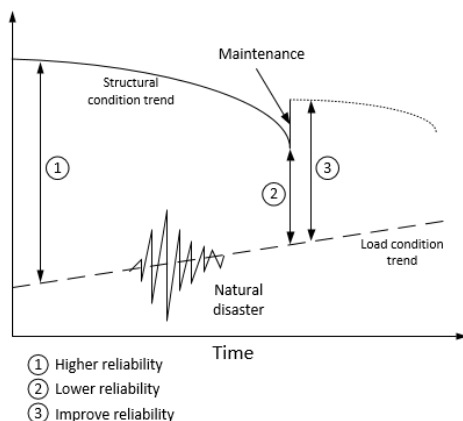
Abstract

This paper aims to investigate the behavior of a plank girder strengthen by pre-stressed rubber pads. There are two test schemes. For the first scheme, the capability of the rubber pad in improving bending moment capacity of the plank has been investigated. In the strengthened specimen, the rubber pad will be attached along the longitudinal axis of the plank and tested under static load in order that the moment capacity could be compared to the controlled specimen. For the second scheme, in the controlled specimen, two planks were placed adjacently and filled up with non-shrink mortar. Then, the load was eccentrically applied, and the test will be terminated when the cracks were observed between the planks. The rubber pad was then attached laterally across the joint and test under the same procedure. For the first scheme, the test results revealed that the first crack was observed at 5 mm and 7 mm for the controlled specimen and strengthened specimen respectively. The strengthening method using rubber pad found to a promising method in improving the flexural capacity of beam. For the second scheme, the crack along the joint was found when the load reached 5.92 ton at the deflection around 6 mm for the controlled specimen. In contrast, the plank strengthening with rubber pad could withstand the load up to 7.606 ton (at deflection around 10 mm) without any cracks along the joint.

Keywords : Plank Girder, Rubber, Strengthening

บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาการพัฒนาความต้องการด้านโครงสร้างพื้นฐานถูกให้ความสำคัญจากทุกรัฐบาล โดยเฉพาะการสร้างระบบโครงสร้างเพื่อการคมนาคม ได้แก่ ถนน สะพาน ฯลฯ โครงสร้างสะพานก็เป็นโครงสร้างหนึ่งที่ถูกสร้างจำนวนมากในประเทศไทย ซึ่งโครงสร้างสะพานเหล่านี้ได้มีการก่อสร้าง และใช้งานมาอย่างยาวนานส่งผลให้สภาพการใช้งานของโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพ นอกจากนั้นปริมาณการใช้งานและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยทางเศรษฐกิจหรือบางครั้งมีการใช้งานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด รวมถึงผลกระทบจากภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้น (Natural Disaster) เช่น น้ำท่วม ฯลฯ จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน รวมถึงส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) และความมั่นคงแข็งแรง (Strength) ตลอดอายุการใช้งานหรือความทนทานของสะพาน (Durability)



รูปที่ 1 การเสื่อมสภาพของสะพานตามเวลาที่เปลี่ยนที่ ที่มา Grubb, Michael A Corven, John A Wilson, Kenneth E Bouscher, Justin W Volle and Laura E (2017)

ซึ่งปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะส่งผลต่อระดับความเชื่อมั่นที่มีต่อระบบโครงสร้าง (Reliability) และปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างของสะพาน ด้วยวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน (Strengthening) ซึ่งหากไม่ได้เสริมกำลังของโครงสร้างหรือได้รับการบำรุงรักษาซ่อมแซม อาจส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัย หรือเป็นอันตรายต่อการใช้งานของสะพานได้ (Lower Reliability) ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างหรือซ่อมแซม (Maintenance) สะพาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานนั้นกลับคืนมา

สะพานถือเป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงชนิดหนึ่ง ซึ่งการเสริมกำลังของโครงสร้างมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โครงสร้างเดิมสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้น หรือเพื่อให้โครงสร้างที่เสื่อมสภาพให้สามารถรับแรงได้ดังเดิม ซึ่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างนั้นมีด้วยกันหลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการใช้บล็อกเหล็ก R.S. Aboutaha, M.D. Engelhardt, J.O. Jirsa, and M.E. Kreger (1999) and Y. Xiao, and H. Wu (2003) and A. Ghobarah, A. Biddah, and M. Mahgoub (1997) and An He, Jian Cai, Qing-Jun Chen, Xinpei Liu, Hua Xue, and Chenjie Yu (2017) and Gia Toai Truong, Jong-Chan Kim, and Kyoung-Kyu Choi (2017) หรือการใช้วัสดุไฟเบอร์ในการโอบรัดโครงสร้าง เช่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เส้นใยแก้ว (GFRP) ฯลฯ Kittipoom Rodsin (2017) แต่วัสดุที่นิยมนำมาเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สุด คือ แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและมีงานวิจัยและผลการทดสอบรองรับอยู่จำนวนมาก A.R. Rahai, P. Sadeghian, and M.R. Ehsani (2008) and Colomb F, Tobbi H, Ferrier E, Hamelin P (2008) and Pedro Faustino,

Pedro Frade, and Carlos Chastre (2016) and Mohamed Elchalakani, and Guowei Ma (2017) and Ruo-Yang Wu, and Chris P. Pantelides (2017) แต่ก็มีข้อเสียที่แผ่นเส้นใยคาร์บอนราคาสูงมาก เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ บางครั้งจึงไม่เหมาะกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีงบประมาณอยู่อย่างจำกัด

การหาวัสดุในประเทศมาทดแทนการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) น่าจะเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากจะเป็นวัสดุที่หาง่าย และราคาถูกเพราะลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในปัจจุบันยางพาราในท้องตลาดนั้นมีราคาถูกมาก รัฐบาลจึงให้ความสำคัญในการพัฒนาวัสดุยางพาราเพื่อนำมาเพิ่มมูลค่าอุปกรณ์ยางพาราก็เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงพอ เนื่องจากสามารถรับแรงดึงได้ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืดประมาณ 100% จากการทดสอบ ซึ่งน่าจะนำมาเสริมกำลังโครงสร้างชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้วัสดุยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังของโครงสร้างสะพานเพื่อที่จะสามารถเพิ่มการรับโมเมนต์ของโครงสร้างได้มากขึ้น และยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวตามรอยต่อของชิ้นส่วนของสะพาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปขึ้นเดียวแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราตามแนวยาว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปขึ้นคู่ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวาง

ระเบียบวิธีวิจัย

การทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมิน

ความสามารถในการรับแรงระหว่างการเสริมแรงและไม่เสริมแรงด้วยวัสดุยางพาราโดยการทดสอบที่เกิดขึ้นจะทดสอบจนถึงการแตกร้าวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปหรือมีการแอ่นตัวไม่เกิน 10 มิลลิเมตร โดยการทดสอบตรวจวัดพฤติกรรมชิ้นส่วนสะพานจะดำเนินการในลักษณะของ Diagnostic Load Test ซึ่งเป็นทดสอบหาการตอบสนองของโครงสร้าง สะพานภายใต้น้ำหนักของรถบรรทุก โดยการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำ แบบสถิตยศาสตร์ (Static load test) และการทดสอบภายใต้ แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamic load test) ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์ Static test เท่านั้น โดยวิธีการประมวลผลการตรวจวัดแบบสถิตยศาสตร์ จะพิจารณาเปรียบเทียบแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเพื่อจะทราบถึงค่าความแข็งแรงชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป (Stiffness)

ผู้วิจัยขอเสนอวิธีการทดสอบและ ดำเนินการในการทำวิจัยเริ่มตั้งแต่การทดสอบหาค่าดึงของแผ่นยางพารา และชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง โดยใช้แถบยางพาราอัดแรง สำเร็จรูปทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) อุปกรณ์วัดแรงแบบดึง (Tension Load Cell)
- 2) อุปกรณ์ให้แรงดึง (Hydraulic Pump)
- 3) โครงข้อแข็ง (Frame Test)
- 4) อุปกรณ์จับยึด

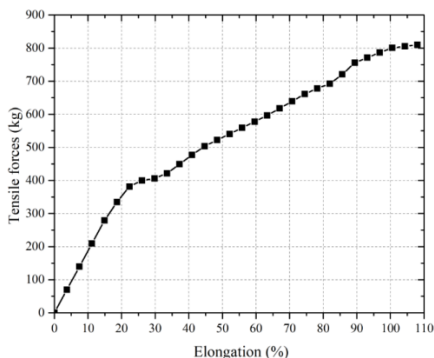
ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าดึงของแผ่นยางพารา โดยผู้วิจัยจะใช้ยางพาราเกรด Hardness 60 ซึ่งเป็นเกรดเดียวกันกับแผ่นยางรองสะพาน (Plain Pad) ที่ใช้ในสะพานช่วงสั้นของกรมทางหลวง (Span 5-10 เมตร)

นำแผ่นยางพารา ขนาดกว้างยาวหนาเท่ากับ 20 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร มายึดติดกับอุปกรณ์จับยึด และดึงแผ่นยางพารา

โดยมีการยึดตัวของแผ่นยางเป็น 2 เท่า เนื่องจากต้องการให้ได้แรงมากที่สุด และถ้าดึงมากไปกว่านี้ ก็ไม่สามารถทำได้เนื่องจากยางอาจเสียหายจากความยาวเดิมและตรวจวัดแรงดึงของแผ่นยางเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อวัดแรงดึงที่ลดลงเมื่อวัสดุถูกดึงทิ้งไว้เป็นเวลานาน



รูปที่ 2 การดึงแผ่นยางพาราโดยมีการยึดตัวของแผ่นยางเป็น 2 เท่าจากความยาวเดิม



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยืด

จากผลการทดสอบพบว่า แถบยางพาราขนาดดังกล่าว สามารถรับแรงดึงได้ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืดประมาณ 100% ระยะยืดดังกล่าวเป็นระยะยืดที่สูงมากและหากยืดเกินกว่าระยะนี้จะทำให้ยางพาราเสียรูปไปมาก ไม่เหมาะกับการติดตั้งกับโครงสร้าง ดังนั้น ในการออกแบบจะแนะนำให้ยืดยางพาราที่ระยะ 100% หรือ 2 เท่าจากความยาวเดิม

ขั้นตอนการเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเสริมแถบยางพาราอัดแรง

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นยางพาราขนาด 20 x 4 x 50 เซนติเมตร มาติดตั้งกับชุดอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารา

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ปั๊มไฮดรอลิกดึงแผ่นยางพาราให้มีการยืดเป็น 2 เท่าของความยาวเดิม และล็อกอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราให้ยางพารามีการยืดตัวค้างไว้

ขั้นตอนที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารา กับชิ้นส่วนที่ตำแหน่งชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป (บริเวณท้องของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปตามแนวยาว)

ขั้นตอนที่ 4 ติดแผ่นยางพาราเข้ายึดติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปตามแนวยาว โดยวิธีการยัดน็อตล็อกแผ่นยางพาราเข้ากับอุปกรณ์จับยึดในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 ปลดล็อกอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราให้ยางพารามีการดึงตัวกลับแรงจะถ่ายเข้าสู่ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปผ่านอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารา



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป



รูปที่ 5 ภาพภาพแสดงขั้นตอนการติดตั้งแผ่นยางพาราเข้ากับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป

การออกแบบตัวอย่างการทดสอบ

การออกแบบตัวอย่างชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่จะนำมาทดสอบเป็นตัวแทนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปชนิดท้องเรียบ ที่พบทั่วไปโดยส่วนมากในประเทศ คือ สะพานของกรมทางหลวง ฯลฯ โดยในงานวิจัยนี้ จะนำแถบยางพารามายึดและติดตั้งเข้ากับแผ่นพื้นสำเร็จรูป และทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดเปรียบเทียบกับ แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยจะใช้แถบยางพาราจำนวน 9 แผ่น และแต่ละแผ่นมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และหนาเท่ากับ 4 เซนติเมตร และนำแถบยางพาราดังกล่าวมายึดออก 2 เท้าของความยาวเดิม แล้วนำมายึดติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 7 เมตร และหนา 35 เซนติเมตร การทดสอบจะทดสอบการรับโมเมนต์ดัดแบบ 3 จุด (3-point flexural test) โดยจะทำการทดสอบแบบเดียวกัน สำหรับแผ่นพื้นที่เสริมและไม่เสริมยางพารา การทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบควบคุมระยะการแอ่นตัว (displacement-controlled test) โดยจะบันทึกค่าการทดสอบทุก ๆ การแอ่นตัว 1 มิลลิเมตร และจะหยุดการทดสอบเมื่อการแอ่นตัวประมาณ 10 มิลลิเมตร เนื่องจากการแอ่นตัว (Deflection) ที่สูงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการโยก (Pumping) และต่อมาก็ทำให้เกิดความเสียหาย (Faulting)

โดยมีรายละเอียดการทดสอบ และจำนวนตัวอย่างที่นำมาทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงรายละเอียดการทดสอบ

ลำดับการทดสอบ	รูปแบบ	การเสริมกำลัง
1	เดี่ยว	ไม่เสริม
2	เดี่ยว	เสริมตามแนวยาว
3	คู่	ไม่เสริม
4	คู่	เสริมตามแนวขวาง

การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด

การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง ดังนี้

Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความสั่นของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 6 โดยกำหนดให้ทิศทางตามแนวแกน Y เครื่องหมาย + มีทิศทางขึ้นบน และเครื่องหมาย - มีทิศทางลง



รูปที่ 6 Accelerometer

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความยุบตัวของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 7 โดยวัดในรูปแบบระยะแอ่นตัวของโครงสร้าง โดยกำหนดให้ เครื่องหมาย - เป็นระยะแอ่นตัวลงในแนว แกน Z ของโครงสร้าง เครื่องหมาย + เป็นระยะแอ่นตัวขึ้นในแนว แกน Z ของโครงสร้าง



รูปที่ 7 Linear Variable Differential Transducer

Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าการยืด/หดตัวของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 8 โดยกำหนดให้ทิศทางการติดตั้งเครื่องหมาย + มีการยืดตัวของโครงสร้าง และเครื่องหมาย - มีการหดตัวของโครงสร้าง

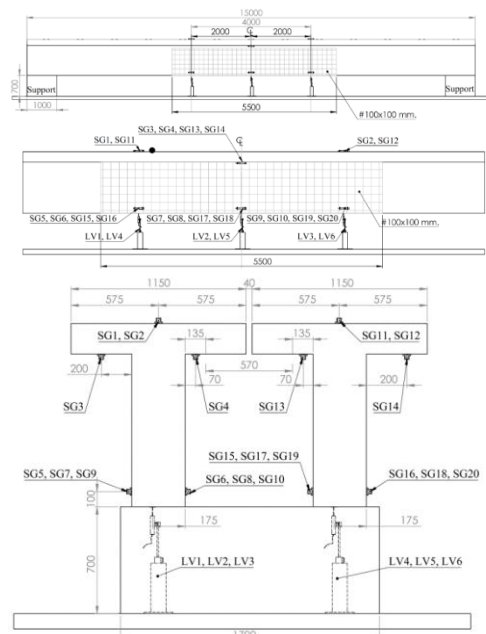


รูปที่ 8 Strain Gage

Data Logger ชนิดไร้สายสำหรับบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บและแปลงข้อมูลจาก Accelerometer, LVDT และ Strain gage ซึ่งส่งข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เข้ามาในรูปของสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งต่อไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล Data logger

วิธีการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์บนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ซึ่งในการทดสอบแบบภาวะสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดียวจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Linear Variable Differential Transformer) ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 10 ตำแหน่ง แต่ในการทดสอบแบบสภาวะสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Linear Variable Differential Transformer) ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 6 ตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดค่าความเครียดของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 20 ตำแหน่ง และบันทึกภาพการทดสอบในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบแล้วบันทึกค่าผลทดสอบ



รูปที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งแบบเดี่ยว และแบบคู่



รูปที่ 10 การติดตั้ง LVDT



รูปที่ 11 การติดตั้ง Strain Gage

การทดสอบเพื่อประเมินการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเดี่ยวแบบสถิติศาสตร์จะเปรียบเทียบแรงกดทดสอบระหว่างก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพาราตามภาพที่ 12



รูปที่ 12 ภาพการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเดี่ยวแบบสถิติศาสตร์

การทดสอบเพื่อประเมินการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่แบบสถิติศาสตร์จะเปรียบเทียบแรงกดทดสอบระหว่างก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพารา โดยพิจารณาการแตกร้าวระหว่างรอยต่อของแผ่นพื้นทั้ง 2 แผ่น โดยมีขั้นตอนการทดสอบแบบเดียวกันกับแบบเดี่ยว ตามภาพที่ 13

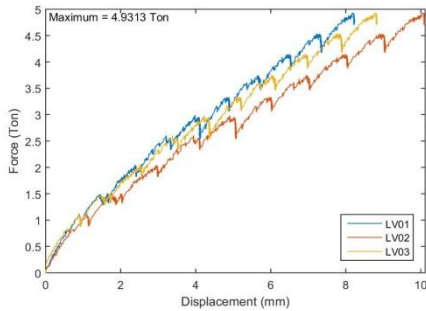


รูปที่ 13 ภาพการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่แบบสถิติศาสตร์ เพื่อพิจารณารอยแตกร้าวระหว่างแผ่น

ผลการวิจัย

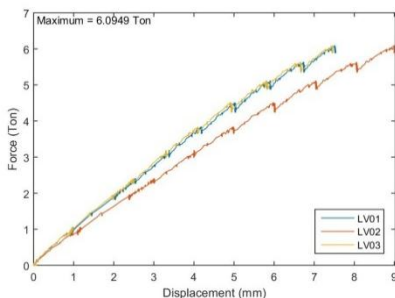
ผลการทดสอบแบบสถิติศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยว ชนิดเสริมกำลัง และไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารา

ก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพาราชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพารา เมื่อถูกแรงกดทดสอบ ด้วยขนาดของแรงเท่ากับ 2.87 ตัน ทำให้เกิดระยะการแอ่นตัวของชิ้นส่วนเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ทำให้ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเริ่มมีการแตกร้าวที่บริเวณกลางสะพาน และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ขนาดของแรงกดทดสอบที่ทำให้ระยะตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปมีการแอ่นตัวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เท่ากับ 4.931 ตัน ตามภาพที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

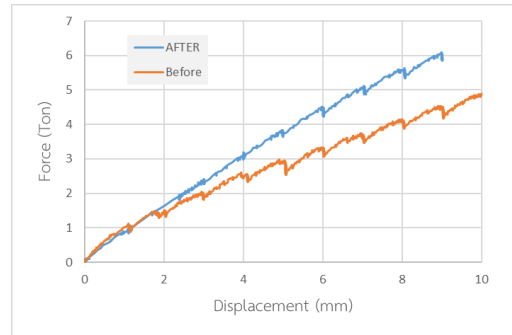
ภายหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารามีการเกิดการแตกร้าวที่การแอ่นตัวเท่ากับ 7 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการเสริมยางพาราทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานโดยรวมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสามารถรับแรงกดสูงสุดได้ถึง 6.095 ตัน ซึ่งมากกว่าแผ่นพื้นที่ไม่เสริมกำลัง ตามภาพที่ 15



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

จากผลการทดสอบก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยวย พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่เท่ากันชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา สามารถรับแรงกดทดสอบได้

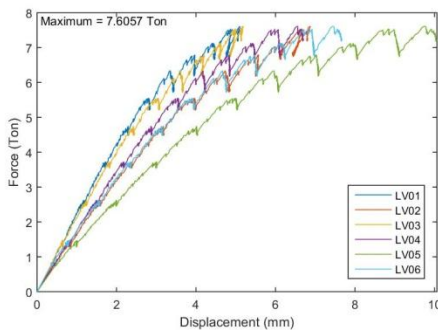
เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง เนื่องจากแถบยางพาราอัดแรงทำหน้าที่เหมือนกับลวดอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดทีหลัง (Posttensioned System) แต่แตกต่างกันที่การเสริมกำลังจะกระทำภายนอก ไม่ได้กระทำผ่านท่อร้อยเหล็ก ตามภาพที่ 16



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัว ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

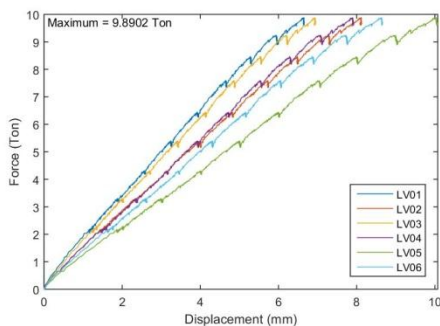
ผลการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ ชนิดเสริมกำลัง และไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารา

ก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ผลทดสอบของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่แบบไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเมื่อโดนแรงกดทดสอบ 5.92 ตัน จนทำให้เกิดแอ่นตัวเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เริ่มมีการแตกร้าวที่จุดบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ แรงกดทดสอบที่จะทำให้เกิดการแอ่นตัวเท่ากับ 10 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 7.606 ตัน ตามภาพที่ 17



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

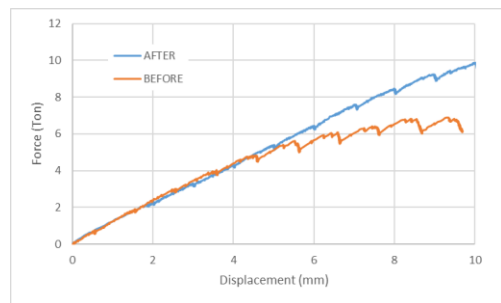
ภายหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวแกนขวาเพื่อเพิ่มแรงอัดแนวตามขวางบททดสอบเมื่อกดทดสอบชิ้นส่วนทดสอบไปที่ระยะ 10 mm ยังไม่เกิดการแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ จึงหยุดทดสอบ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปคู่ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

จากผลการทดสอบก่อน และภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่ 6 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อแผ่น ส่วนชิ้นส่วน

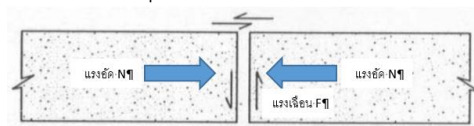
สะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราไม่เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อแผ่น จากภาพที่ 19 พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่เท่ากันชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา สามารถรับแรงกดทดสอบได้เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง เนื่องจากการเพิ่มแรงอัดเข้าไประหว่างแผ่นพื้น จะทำให้ความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างแผ่นพื้นเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของแรงอัด (N) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

โดยการเสริมกำลังความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนด้วยแถบยางพาราอัดแรงสามารถใช้หลักการของการถ่ายแรงเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีต เมื่อมีแรงอัดระหว่างแผ่นพื้น (N) จะทำให้การถ่ายแรงระหว่างแผ่นพื้น (F) เพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีต (μ) ตามสมการที่ 1 R. C. Hibbeler (2010)

$$F = \mu N \quad (1)$$



รูปที่ 19 การถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นพื้นตามสมการ

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการทดสอบการใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป พบว่า

1. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นเดียว ที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงตามแนวยาวของชิ้นส่วน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้นในสภาวะการใช้งานในสภาวะทางสถิติศาสตร์

2. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นเดียว ที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงตามแนวยาวของชิ้นส่วน เป็นวิธีที่ช่วยลดการแตกร้าวของระหว่างแผ่นของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปได้

3. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นคู่ ทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน สามารถรับแรงกดทดสอบได้เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง

4. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นคู่ ทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน ช่วยลดการแตกร้าวรอยต่อของแผ่นพื้นได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบจะพบว่าเป็นการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคานทอ้งเรียบ ซึ่งในอนาคตควรมีการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปชนิดอื่น ๆ เช่น คานรูปตัวที ฯลฯ เพื่อหาแนวทางในการเสริมกำลังต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมทางหลวงผู้สนับสนุนทุนวิจัย และทีมนักวิจัยจากศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่มีส่วนช่วยในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยนี้

References

- A. Ghobarah, A. Biddah, and M. Mahgoub, (1997). Rehabilitation of reinforced concrete columns using corrugated steel jacketing. *J. Earthquake Eng.* 1.
- A.R. Rahai, P. Sadeghian, and M.R. Ehsani. (2008). Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites.
- An He, Jian Cai, Qing-Jun Chen, Xinpei Liu, Hua Xue, and Chenjie Yu.(2017). Axial compressive behavior of steel-jacket retrofitted RC columns with recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*.
- Colomb F, Tobbi H, Ferrier E and Hamelin P. (2008). Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials. *Composite Structure*.
- Gia Toai Truong, Jong-Chan Kim, and Kyoung-Kyu Choi. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures*.
- Grubb, Michael A Corven, John A Wilson, Kenneth E Bouscher, Justin W Volle, Laura E. (2007). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) For Highway Bridge Superstructures*. (Fourth Edition). Arlington: Federal Highway Administration Final Submission National Highway Institute.

- Kittipoom rodsin (2017). *Reinforced concrete reinforcement design by Polymer fibers*. (First Edition).Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Mohamed Elchalakani, and Guowei Ma. (2017). Tests of glass fiber reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*.
- Pedro Faustino, Pedro Frade, and Carlos Chastre. (2016). Lateral Cyclic Behaviour of RC Columns Confined With Carbon Fibres. *Structures*.
- R. C. Hibbeler, (2010). *Engineering Mechanics Statics*. (Twelfth Edition). Pearson Education, Inc.
- R.S. Aboutaha, M.D. Engelhardt, J.O. Jirsa, and M.E. Kreger. (1999). Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets. *ACI Struct. J*.
- Ruo-Yang Wu, and Chris P. Pantelides. (2017). Rapid repair and replacement of earthquake-damaged concrete columns using plastic hinge relocation. *Composite Structure*.
- Y. Xiao, and H. Wu. (2003).Retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets. *J. Struct. Eng*.