

Strengthening of Flexural Member by Using Post-Tensioning CFRP Strip System

การเสริมกำลังชิ้นส่วนรับแรงดัดด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์

ชูชัย สุจิรวกุล^{1*} ชูชีพพล คณะพันธ์² สมภาพ อัมรนนท์²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²นักศึกษา ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received July 31, 2020

Received Revised Form:

August 6, 2020

Accepted: August 14, 2020

ABSTRACT:

The objective of this research was to study the flexural behavior of reinforced concrete slab strengthened by using carbon fiber reinforced polymer plate (CFRP). Slab samples consisted of 3 pieces including the control sample which was strengthened by CFRP at the bottom of slab without post-tensioning, while the other two samples were strengthened by posttensioning with CFRP at 20% and 40% of the tensile strength of CFRP. All samples were tested under four-points bending tests. LVDTs were installed at the bottom of slab to measure the deflection, and strain gauges were installed to measure the strain at the surface of concrete and CFRP. Experimental results showed that control sample without post-tensioning exhibited the lowest performance in bending strength. The delamination between CFRP and concrete surface was occurred, which led to the sudden drop of applied load. However, samples strengthened by post-tensioning CFRP at 20% and 40% of its tensile strength would exhibit the flexural strength at first cracking of concrete with 76% and 104% higher than that of control samples, respectively. Moreover, it was observed from initial jacking force that CFRP plate with 20% and 40% prestressing had the prestress loss at 22 hours of 4.41% and 4.35%, respectively. This result might be from the adjustment of end clamps, the relaxation of epoxy and CFRP plate as well as creep in concrete. Finally, very good agreement was observed from the comparative results between the predictions using mechanical models and the testing results.

KEYWORDS: Active strengthening, Post-tensioning, Carbon fiber reinforced polymer strip

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ (CFRP) ตัวอย่างแผ่นพื้นประกอบไปด้วย 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างควบคุมที่เสริมกำลังด้วย CFRP บริเวณท้องพื้นแต่ที่ไม่มีการอัดแรงที่หลัง ส่วนอีกสองตัวอย่างจะทำการเสริมกำลังโดยอัดแรงที่หลังด้วย CFRP บริเวณท้องพื้นที่ร้อยละ 20 และ 40 ของกำลังดึงของ CFRP ตัวอย่างแผ่นพื้นได้ถูกทำการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (Four-Points Bending Tests) โดยติดตั้ง LVDT เพื่อวัดค่าการโก่งตัว และติดตั้ง Strain Gauges เพื่อวัดความเครียดของวัสดุคอนกรีต และ CFRP ผลการ

*Corresponding Author,
Email address:
chuchai.suj@kmutt.ac.th

ทดสอบพบว่า ตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้อัดแรงให้ความสามารถในการรับแรงดัดน้อยสุด โดยสังเกตเห็นการหลุดร่อนของแผ่น CFRP ออกจากผิวคอนกรีต ส่งผลทำให้แรงดัดตกลงทันทีในทางกลับกันตัวอย่างแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP ร้อยละ 20 และ 40 ของกำลังดึงของ CFRP จะให้กำลังดัดที่การแตกร้าแรกของคอนกรีต มากกว่าร้อยละ 76 และ 104 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้รับจากตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ นอกจากนี้จากผลการอัดแรงเริ่มต้นพบว่า แผ่น CFRP ที่ทำการอัดแรงเท่ากับร้อยละ 20 และ 40 ของกำลังดึงสูงสุดให้ค่าการสูญเสียการอัดแรงในช่วงเวลา 22 ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 4.41 และ 4.35 ตามลำดับ การสูญเสียการอัดแรงคาดว่าเกิดจากการปรับตัวของอุปกรณ์จับยึด การคลายตัวของอีพ็อกซีและแผ่น CFRP รวมถึงการคืบของคอนกรีต สุดท้ายนี้ เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้โมเดลทางกลศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้อง

คำสำคัญ: การเสริมกำลังเชิงรุก, การอัดแรงที่หลัง, แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์

1. บทนำ

เมื่อโครงสร้างคอนกรีตของอาคาร หรือสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น สะพาน และ ทางยกระดับ ได้ถูกใช้งานไประยะหนึ่ง จะเกิดการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักได้น้อยลง หรือกล่าวได้ว่ามีค่าความปลอดภัยที่ลดลง นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้น้อยลง หรือมีค่าความปลอดภัยลดลง ได้แก่ การเกิดอุบัติเหตุจากการชนของรถ การเกิดอัคคีภัย การสั่นไหวจากแรงแผ่นดินไหว หรือ การเปลี่ยนแปลงการใช้งานจากวัตถุประสงค์เดิม เช่น เปลี่ยนแปลงการใช้งานจากสำนักงานไปเป็นคลังเก็บสินค้า หรือ จากห้องเรียนเป็นห้องสมุด เป็นต้น หรือ อาจเกิดจากข้อผิดพลาดในการออกแบบ [1]

การที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ อาจเลือกทำการรื้อถอนและสร้างโครงสร้างคอนกรีตขึ้นมาใหม่ แต่จะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก และใช้ระยะเวลาที่มาก อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายประการที่ทำให้ไม่สามารถที่จะทำการก่อสร้างขึ้นมาใหม่ได้ทดแทนของเดิม ดังนั้นวิธีการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้โครงสร้างสามารถที่จะรับน้ำหนักได้มากขึ้น หรือมีค่าความปลอดภัยที่สูงขึ้น โดยการเสริมกำลังโครงสร้างคือกระบวนการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความมั่นคงแข็งแรง หรือความสามารถในการรับน้ำหนักให้กับโครงสร้าง กล่าวคือ การทำให้โครงสร้างนั้นสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น การที่จะทำการเสริมกำลังโครงสร้างจะต้องทำการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ 1) เป้าหมายในการเสริมแรง 2) สภาพปัจจุบันและคุณสมบัติของโครงสร้าง 3) วัสดุ และวิธีการเพื่อเสริมกำลัง 4) ผลกระทบต่อโครงสร้างหลังการ

เสริมแรง และ 5) การป้องกันการเสื่อมสภาพและการบำรุงรักษา [2]

วิธีการเสริมกำลังแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การเสริมกำลังแบบเชิงรับ (Passive strengthening) โดยการเสริมกำลังในประเภทนี้จะไม่ช่วยโครงสร้างรับแรงในทันที แต่จะช่วยกระจายแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มขึ้นมาภายหลังจากการเสริมกำลังแล้ว ตัวอย่างเช่น การเพิ่มความหนาของหน้าตัดพื้นของสะพาน การติดตั้งแผ่นเหล็กที่ผิวของโครงสร้าง หรือการติดตั้งแผ่น CFRP ที่ผิวของโครงสร้าง เป็นต้น [3, 4] และ 2) การเสริมกำลังแบบเชิงรุก (Active strengthening) เป็นการเสริมกำลังโดยการใส่แรงอัดเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเพื่อต้านทานแรงที่กระทำกับโครงสร้าง เช่น ระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้ลวดอัดแรงหรือโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบอัดแรงที่หลัง (Post-tensioning CFRP strip system)

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะทำการศึกษาวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างแบบเชิงรุกด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ ซึ่งลักษณะการทำงานของระบบนี้จะทำการอัดแรงเข้าไปในชิ้นส่วนพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยจะนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไปติดตั้งที่ผิวของโครงสร้างพื้น ส่งผลทำให้โมเมนต์ในแผ่นพื้นที่มีทิศทางสวนทางกับโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างพื้นถูกยกตัวขึ้นหรือดันขึ้นทันที และส่งผลให้โครงสร้างสามารถที่จะรับน้ำหนักภายนอกได้มากขึ้น [5 - 11] ระบบการเสริมกำลังนี้มีข้อได้เปรียบหลายอย่างที่มากกว่าระบบอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกำลังดึงของวัสดุ และความทนทานของวัสดุ CFRP ต่อสภาพแวดล้อม โดยระบบนี้ยังไม่มีเคยมีการนำมาใช้งานในประเทศไทย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้สนใจศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างแบบเชิงรุกด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ (CFRP) เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง และเผยแพร่วิธีการเสริมกำลังนี้ให้กับผู้ที่สนใจต่อไป งานวิจัยจะทำการศึกษาการออกแบบ และการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างรับแรงดัด รวมถึงศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของชิ้นส่วนที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการออกแบบและการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างในการอัดแรงที่หลังของชิ้นส่วนรับแรงดัด

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกลศาสตร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของชิ้นส่วนรับแรงดัดที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์

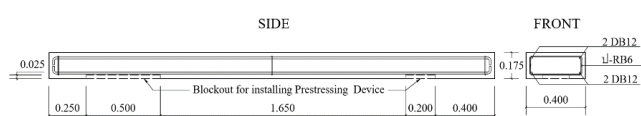
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดกว้าง 40 ซม. หนา 17.5 ซม. และ ยาว 3.0 ม. จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่

- ตัวอย่างที่ 1 : ตัวอย่างควบคุมที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP บริเวณท้องพื้นแต่ไม่มีการอัดแรงที่หลัง (สัญลักษณ์ : S1-00) ดังแสดงในรูปที่ 1

- ตัวอย่างที่ 2 และ 3 : ตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP บริเวณท้องพื้นที่ร้อยละ 20 (สัญลักษณ์ : S2-20) และที่ร้อยละ 40 (สัญลักษณ์ : S3-40) ของกำลังดึงของ CFRP ตามลำดับ โดยจะทำการเจาะช่องคอนกรีตบริเวณท้องพื้นสำหรับติดตั้งชุดอุปกรณ์อัดแรงที่หลัง ดังแสดงในรูปที่ 2



3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 คอนกรีต

ใช้คอนกรีตผสมเสร็จ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 350 กก./ซม.² โดยค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจริงได้ 362 กก./ซม.²

3.2.2 เหล็กเสริม

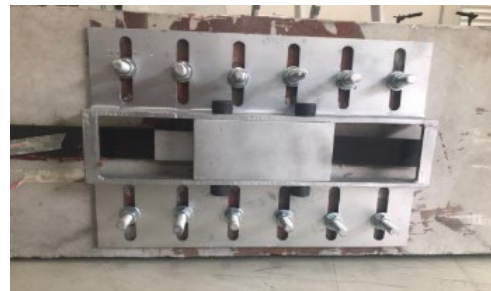
เหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ชั้นคุณภาพ SD40 โดยค่ากำลังที่จุดครากที่ได้จากการทดสอบจริงเท่ากับ 5,515 กก./ซม.² และเหล็กเส้นกลม (Round Bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ชั้นคุณภาพ SR24 โดยค่ากำลังที่จุดครากที่ได้จากการทดสอบจริงเท่ากับ 3,331 กก./ซม.²

3.2.3 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมพอลิเมอร์ (CFRP)

แผ่น CFRP ที่ใช้เป็นรุ่น PTS 1428 ของ บริษัทเซ็มกริต (ประเทศไทย) จำกัด ขนาดหน้าตัดกว้าง 50 มม. หนา 1.4 มม. มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 160 GPa มีกำลังดึงสูงสุดเท่ากับ 2800 MPa และมีค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 1.70% ของความยาวเดิม

3.2.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับยึดรั้งแผ่น CFRP

ชุดอุปกรณ์สำหรับยึดรั้งแผ่น CFRP ที่ด้านจับยึด และด้านที่ดึงแผ่น CFRP สำหรับการอัดแรงพื้นคอนกรีต ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 การติดตั้งพุกและอุปกรณ์สำหรับยึดรั้งแผ่น CFRP (สำหรับด้านจับยึด)



รูปที่ 4 การติดตั้งพุก อุปกรณ์สำหรับยึดรั้งแผ่น CFRP และ ไฮดรอลิกแจ๊ค (สำหรับด้านอัดแรง)

3.2.5 อุปกรณ์ฝังยึด (Anchor bolt)

พุกเคมี (Adhesive Anchor) ที่ใช้เป็นของบริษัทเซมกริต (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.6 อีพ็อกซีสำหรับติดแผ่น CFRP และอุปกรณ์ฝังยึด

อีพ็อกซีที่ใช้เป็นระบบฉีดยา สูตรแห้งเร็ว รุ่น EA118 ของ บริษัทเซมกริต (ประเทศไทย) จำกัด มีค่ากำลังดึงสูงสุด เท่ากับ 70 MPa

3.3 การเตรียมตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลัง โดยใช้แผ่น CFRP

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างควบคุม

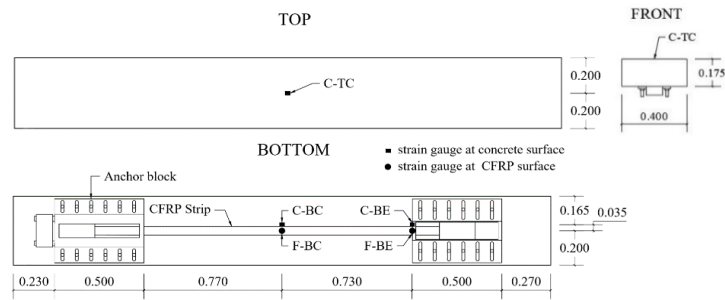
ตัวอย่าง S1-00 มีรายละเอียดในรูปที่ 1 โดยทำการติดตั้งแผ่น CFRP ที่ท้องพื้นของตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีโดยจะไม่มีแรงอัดแรงที่หลัง แล้วปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้อย่างน้อย 1 วัน ก่อนการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง S2-20 และ S3-40 และการเก็บข้อมูลตัวอย่าง

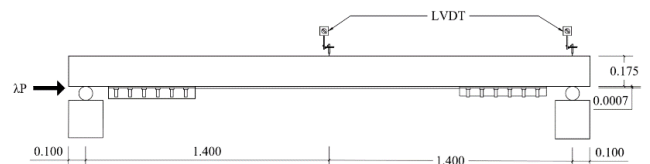
ตัวอย่าง S2-20 และ S3-40 มีรายละเอียดในรูปที่ 2 ทำการติดตั้งพุกเคมีตามตำแหน่งที่ทำเครื่องหมาย โดยปล่อยให้กาวยาเคมีแข็งตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน จากนั้นทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับยึดแผ่น CFRP และไฮดรอลิกแจ็คสำหรับการอัดแรง ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ติดตั้ง Strain Gauges และ LVDT ตามตำแหน่งในรูปที่ 6 และ 7 จากนั้นทำการทาอีพ็อกซีไว้ที่ผิวของ CFRP และนำไปติดตั้งบริเวณท้องพื้นกับชุดอุปกรณ์ยึดแผ่น CFRP โดยจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วก่อนที่อีพ็อกซีจะแข็งตัว ทำการอัดแรงพร้อมกับทำการบันทึกค่าต่างๆ ที่ได้จาก Strain Gauge และ LVDT เมื่ออัดแรงถึงระดับที่กำหนดแล้วให้ทำการยึดแผ่น CFRP ด้วยอุปกรณ์ยึดจนแน่น และบันทึกค่าเพื่อเก็บข้อมูลความเครียดและค่าการโก่งตัวเป็นระยะเวลาประมาณ 1 วัน



รูปที่ 5 การติดตั้งแผ่น CFRP ที่ตัวอย่าง S1-00



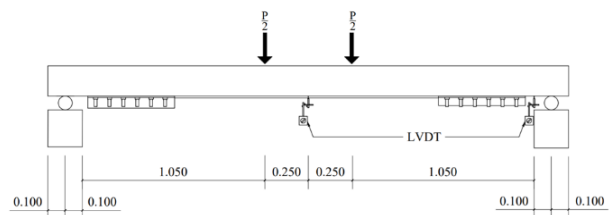
รูปที่ 6 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauge



รูปที่ 7 ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ขณะทำการเสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP

3.3 การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (Four-Points Bending Tests)

ทำการทดสอบตัวอย่างพื้นที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยใช้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ดังรูปที่ 8 และ 9 ทำการให้น้ำหนักกระทำกับตัวอย่างพื้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกับบันทึกค่าที่ได้รับจาก Strain Gauge และ LVDT โดยจะทำการให้น้ำหนักจนกระทั่งแผ่น CFRP เกิดการวิบัติ แล้วนำข้อมูลจากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 8 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauge



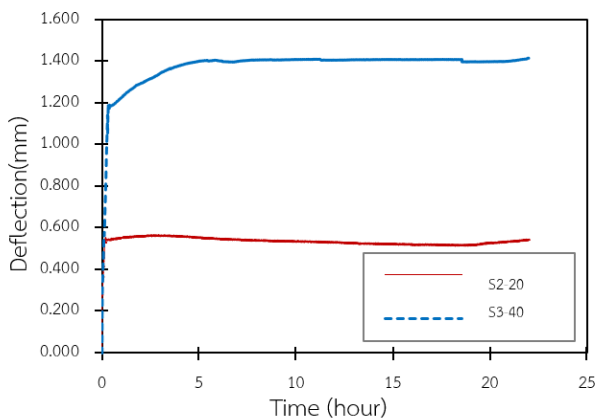
รูปที่ 9 ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ขณะทำการเสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 พฤติกรรมของแผ่นพื้นเนื่องจากการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP

4.1.1 การโก่งตัวและความเครียดเนื่องจากการอัดแรงที่หลัง ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น

ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial stage) ของการอัดแรง ตัวอย่างพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้แผ่น CFRP ด้วยระบบอัดแรงที่หลัง ที่ระดับการอัดแรงร้อยละ 20 (S2-20) และ 40 (S3-40) จะสังเกตเห็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับเวลาของตัวอย่างแผ่นพื้น โดยพบว่า การโก่งตัวของแผ่นพื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ยกตัวขึ้น) ตามระดับของการอัดแรง โดยผลของการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจริงที่เวลาเริ่มการอัดแรง ได้แสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่าการโก่งตัวขึ้นของแผ่นพื้นตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลา ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากการคืบ (Creep) ของคอนกรีต



รูปที่ 10 การโก่งตัว (ยกตัว) ของแผ่นพื้นตัวอย่างภายหลังอัดแรง

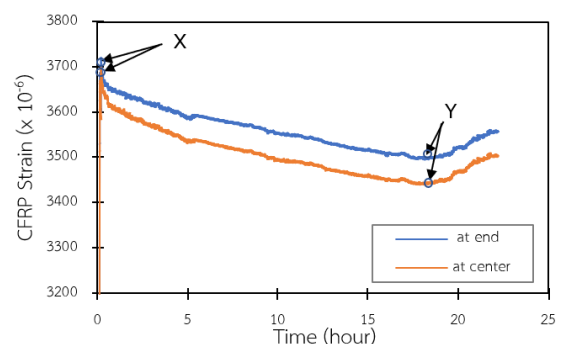
ตารางที่ 1 ผลของการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial stage)

Sample ID	Strain in CFRP plate (10^{-6})	Deflection (mm)
S2-20	3699	-0.508
S3-40	7212	-1.150

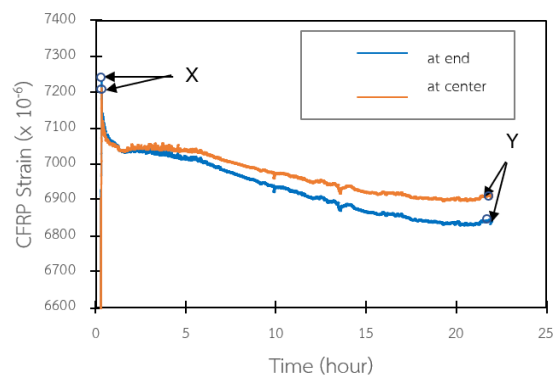
4.1.2 การสูญเสียการอัดแรงของแผ่น CFRP (Losses of CFRP Prestressing)

ภายหลังจากทำการเสริมกำลังตัวอย่างแผ่นพื้นโดยการอัดแรงที่หลังที่ร้อยละ 20 และ 40 ของกำลังดึงสูงสุดของแผ่น CFRP ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP จะอยู่ที่ตำแหน่ง X ดังแสดงใน

รูปที่ 11 และ 12 จากนั้นทำการบันทึกค่าความเครียดเพิ่มเติมเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งพบว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ของแผ่นพื้นทั้งสองตัวอย่างจะค่อยๆ ลดลงมาจนถึงจุดหนึ่ง (ตำแหน่ง Y) หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น ไปเปรียบเทียบกับช่วงเวลาสุดท้าย (ที่ 22 ชั่วโมง) พบว่า แผ่น CFRP ที่มีการอัดแรงร้อยละ 20 และ 40 มีการสูญเสียความเครียด หรือ สูญเสียการอัดแรง ร้อยละ 4.41 และ 4.35 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองตัวอย่างให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก การสูญเสียการอัดแรงของ CFRP คาดว่าเกิดจากการปรับตัวของอุปกรณ์ยึดจับ การคลายตัวของอิฐที่ยึดแผ่น CFRP รวมถึงการคืบของคอนกรีต [5, 10]



รูปที่ 11 ความเครียดบนแผ่น CFRP ของตัวอย่าง S2-20



รูปที่ 12 ความเครียดบนแผ่น CFRP ของตัวอย่าง S3-40

X = ตำแหน่งที่ทำการอัดแรงถึงระดับที่กำหนด

Y = ตำแหน่งที่ความเครียดบนแผ่น CFRP ลดลงมากที่สุด

จากรูปที่ 11 (ตัวอย่าง S2-20) จะสังเกตเห็นว่า ความเครียดในแผ่น CFRP ที่บริเวณกึ่งกลางของความยาวช่วงพื้นมีค่าต่ำกว่าบริเวณใกล้จุดรองรับเล็กน้อย แต่หากพิจารณารูปที่ 12 (ตัวอย่าง S3-40) กลับพบว่าความเครียดในแผ่น CFRP ที่บริเวณกึ่งกลางของความยาวช่วงพื้นมีค่ามากกว่าบริเวณใกล้จุดรองรับเล็กน้อย ทั้งนี้ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการคลายตัวที่

แตกต่างกันของอุปกรณ์สำหรับยึดรั้งที่ปลายแผ่น CFRP และการใช้อีพ็อกซีมาช่วยยึด CFRP กับผิวคอนกรีต นอกจากนี้ จากรูปที่ 12 จะเห็นว่าการอัดแรงที่ระดับมากจะทำให้ความเครียดในช่วงชั่วโมงแรกที่เกิดในแผ่น CFRP ทั้ง 2 ตำแหน่งลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งคาดว่าเกิดจากการปรับตัวของอุปกรณ์ยึดจับ แต่เมื่อผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเครียดที่แผ่น CFRP มีแนวโน้มลดลงที่น้อยลง ซึ่งอาจเกิดจากอีพ็อกซีที่ยึดติด CFRP กับผิวคอนกรีตได้แข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้วช่วยจึงช่วยยึดเหนี่ยว CFRP ไว้

4.1 พฤติกรรมของแผ่นพื้นเนื่องจากการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP

4.1.1 การโก่งตัวและความเครียดเนื่องจากการอัดแรงที่หลัง ณ ช่วงเวลาเริ่มต้น

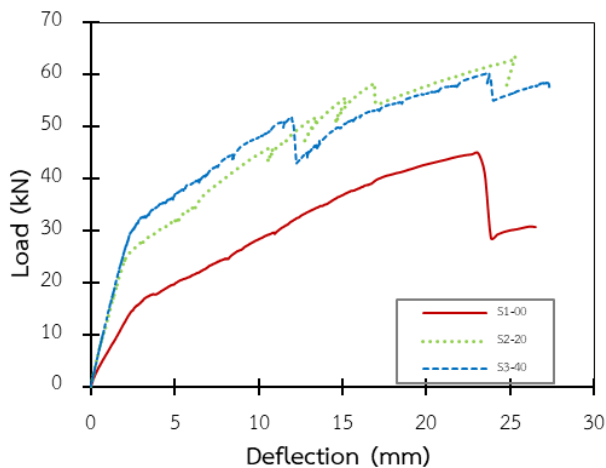
การทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่างจะทำการเพิ่มน้ำหนักอย่างต่อเนื่องพร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการคืบ โดยผลที่ได้รับจากการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบของแผ่นพื้นทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ผลการเปรียบเทียบตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้อัดแรง (S1-00) กับตัวอย่างที่มีการอัดแรงที่ระดับต่างกัน (S2-20 และ S3-40) ได้พบว่าตัวอย่างควบคุมมีความสามารถในการรับแรงดัดน้อยสุด โดยการวิบัติเกิดจากการหลุดร่อนของแผ่น CFRP ออกจากผิวคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 16(ก) ส่งผลทำให้แรงดัดตกลงทันที ในขณะที่ตัวอย่างแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP ที่ร้อยละ 20 และ 40 ของกำลังดัดของแผ่น CFRP จะให้ภาพรวมของการรับน้ำหนักของตัวอย่างพื้นคอนกรีตสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมาก โดยแรงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแรกของคอนกรีตในตัวอย่างพื้นที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP ที่ร้อยละ 20 และ 40 มีค่ามากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 76 และ 104 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยการอัดแรงที่หลังโดยใช้แผ่น CFRP จะมีจุดที่แรงดัดลดลงชั่วคราวและเพิ่มขึ้นเป็นระยะๆ ซึ่งเกิดจากผิวล่างของคานเกิดรอยแตกจำนวนมาก (Multiple cracks) ดังรูป 16(ข, ค) ทำให้เกิดการส่งถ่ายแรงระหว่างแผ่น CFRP กับผิวคอนกรีตผ่านอีพ็อกซี เมื่อน้ำหนักทดสอบมีค่าสูงมากระดับหนึ่ง แผ่น CFRP ก็เริ่มเกิดการหลุดร่อนบางส่วนและส่งผลให้ความสามารถรับน้ำหนักของพื้นคอนกรีตลดลง

4.2.2 เปรียบเทียบค่าแรง และความเครียดในแผ่น CFRP ที่ตำแหน่งสำคัญ

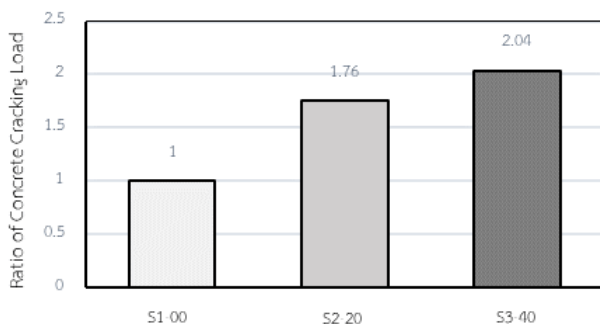
รูปที่ 15 แสดงความเครียดที่ได้รับจาก Strain Gauge ที่ติดบนผิวคอนกรีต และผิวของแผ่น CFRP ของตัวอย่างแผ่นพื้น S2-20 ซึ่งที่ผิวด้านบนของแผ่นพื้นคอนกรีตจะให้ค่าเป็นลบเนื่องจากเป็นแรงอัด ส่วนผิวด้านล่างซึ่งมีค่าเป็นบวกเนื่องจากเป็นแรงดึง โดยจะเห็นว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นพื้นจะเกิดค่าความเครียดสูงกว่าที่ปลายแผ่นพื้นเนื่องจากมีโมเมนต์ที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว แผ่น CFRP จะรับแรงดึงมากขึ้นโดยสังเกตจากความชันของกราฟที่สูงขึ้น ในระหว่างการเพิ่มน้ำหนักทดสอบ ค่าความเครียดมีการลดลงและติดขึ้นซึ่งเป็นผลจากรอยแตกที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตที่เพิ่มจำนวนมากขึ้น ท้ายที่สุดแผ่น CFRP จะเกิดการหลุดร่อนออกจากคอนกรีต

ตารางที่ 2 ได้สรุปค่าน้ำหนักและความเครียดที่สำคัญบริเวณกึ่งกลางพื้นที่ได้รับการทดสอบการคืบแบบ 4 จุด โดยจะเห็นว่าน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแรก น้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งตัวที่ยอมให้เท่ากับ $L/360$ และน้ำหนักที่ทำให้แผ่น CFRP เริ่มเกิดการหลุดร่อน จะเพิ่มขึ้นตามระดับการอัดแรง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า น้ำหนักสูงสุด (Ultimate load) ของแผ่นพื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP โดยสังเกตเห็นว่าน้ำหนักสูงสุดที่ได้รับจากตัวอย่าง S2-20 และ S3-40 มีค่าใกล้เคียงกัน และการวิบัติของตัวอย่าง S2-20 และ S3-40 เกิดจากการหลุดร่อน (Debonding) ของแผ่น CFRP ออกจากผิวคอนกรีต เหมือนที่ได้รับในตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตามเนื่องจากที่ปลายทั้ง 2 ด้านของแผ่น CFRP ถูกยึดด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับยึดรั้งจึงส่งผลให้สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้เกิดการหลุดร่อนออกของแผ่น CFRP ประกอบกับการฉีกแยกออกตามแนวยาวของแผ่น CFRP ซึ่งเป็นทิศทางตามแนวเส้นใยคาร์บอน โดยเกิดขึ้นที่บริเวณอุปกรณ์สำหรับยึดยึดแผ่น CFRP ดังแสดงในรูปที่ 17

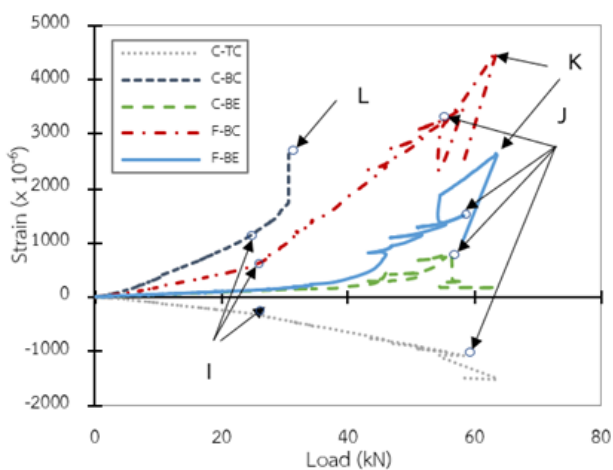
นอกจากนี้ ตารางที่ 2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเครียด ($\Delta\epsilon$) ที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP บริเวณช่วงกลางพื้น ตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงตำแหน่งต่างๆ ที่สำคัญ โดยความเครียดรวม $\epsilon_{rs}(\mu)$ จะได้จากผลรวมของความเครียดในแผ่น CFRP ที่เกิดจากการอัดแรงเริ่มต้น ϵ_{fpi} กับการเปลี่ยนแปลงความเครียด ($\Delta\epsilon$) ที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP จากตารางจะสังเกตเห็นว่าความเครียดรวมในแผ่น CFRP ที่เกิดจากการอัดแรงเริ่มต้น และความเครียดที่น้ำหนักสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับของการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัว



รูปที่ 14 เปรียบเทียบน้ำหนักที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวแรก



รูปที่ 15 ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุของแผ่นพื้น S2-20

คำอธิบายภาพในรูปที่ 15 มีรายละเอียดดังนี้

C คือ ความเครียดที่ผิวคอนกรีต

F คือ ความเครียดที่แผ่น CFRP

TC คือ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นพื้นด้านบน (Top/Center)

BC คือ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นพื้นด้านล่าง (Bottom/Center)

BE คือ ตำแหน่งปลายแผ่นพื้นด้านล่าง (Bottom/End-span)

I คือ ตำแหน่งที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าวแรก

J คือ ตำแหน่งที่แผ่น CFRP เกิดการหลุดร่อน

K คือ ตำแหน่งที่แผ่น CFRP เกิดการฉีกขาดหลังจากเกิดการหลุดร่อน

L คือ ตำแหน่งที่ Strain Gauge ที่เกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักและความเครียดที่สำคัญที่ได้รับจากการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด

	Slabs ID		
	S1-00	S2-20	S3-40
P_{cr} , kN	14.60	25.64	29.75
P at $L/360$, kN	24.30	39.44	43.28
P_d , kN	44.85	46.06	51.73
P_u , kN	44.85	63.47	60.05
e_{fpi} (μ)	0	3699	7212
CFRP strain loss (μ)	0	163	314
De_{fcr} (μ)	700	558	398
De_{fd} (μ)	4672	2409	2284
De_{fs} (μ)	4672	4527	2284
e_{fs} (μ)	4672	8063	9098

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 2

P_{cr} = น้ำหนักที่ทำให้แผ่นพื้นเกิดการแตกร้าวแรกของคอนกรีต

P at $L/360$ = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งตัวที่ยอมให้เท่ากับ $L/360$ หรือ 7.78 mm

P_d = น้ำหนักที่ทำให้แผ่น CFRP เกิดการหลุดร่อน

P_u = น้ำหนักสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น

e_{fpi} = ความเครียดของแผ่น CFRP ที่เกิดจากการอัดแรงเริ่มต้น

De_{fcr} = การเปลี่ยนแปลงความเครียดของแผ่น CFRP ที่การแตกร้าวแรกของคอนกรีต

De_{fd} = การเปลี่ยนแปลงความเครียดของแผ่น CFRP ที่แผ่นเกิดการหลุดร่อน

De_{fs} = การเปลี่ยนแปลงความเครียดของแผ่น CFRP ที่แรงสูงสุด

e_{fs} = ความเครียดของแผ่น CFRP ที่น้ำหนักสูงสุด

$$= \epsilon_{fpi} - \text{CFRP strain loss} + \Delta\epsilon_{fs}$$



(ก) การวัดตัวของตัวอย่าง S1-00



(ข) การวัดของตัวอย่าง S2-20



(ค) การวัดของตัวอย่าง S3-40

รูปที่ 16 ภาพรวมของการวัดของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 17 การฉีกแยกของแผ่น CFRP ตามทิศทางของเส้นใยคาร์บอน ที่บริเวณอุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น CFRP ของตัวอย่าง S2-20

4.2.3 การทำนายค่าน้ำหนักที่แตกร้าแรก (First cracking load) และน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load)

โดยใช้ทฤษฎีหน่วยแรงใช้งานและการคำนวณแรงดัดของแผ่นพื้นภายใต้หน้าตัดที่เป็นคอมโพสิต สมการอย่างง่ายที่ใช้ในการทำนายค่าแรงดัดที่ทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าแรก ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของการอัดแรงที่หลังและกำลังดัดแตกร้าของคอนกรีต คือดังต่อไปนี้

$$P_{cr} = \frac{2 \left(\frac{f_{cr} I_{gc}}{y'_{bc}} + \frac{\sigma_{b,F} I_g}{y_b} \right)}{a_p} \quad (1)$$

- โดยที่ P_{cr} = น้ำหนักที่ทำให้แผ่นพื้นเกิดการแตกร้าแรก
 a_p = ระยะจากจุดรองรับถึงตำแหน่งที่น้ำหนัก ทดสอบ
 I_g = โมเมนต์อินเนอร์เซียของแผ่นพื้น
 I_{gc} = โมเมนต์อินเนอร์เซียของแผ่นพื้นแบบคอมโพสิต
 y_b = ระยะจากแกนสะเทินถึงบริเวณผิวด้านล่างของแผ่นพื้น
 y'_{bc} = ระยะจากแกนสะเทินถึงบริเวณผิวด้านล่างของแผ่นพื้นแบบคอมโพสิต
 f_{cr} = กำลังดัดแตกร้าของคอนกรีต
 $\sigma_{b,F}$ = ความเค้นอัดที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตเนื่องจากการอัดแรงโดยคิดการสูญเสียจากการอัดแรงก่อนเริ่มการทดสอบ

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 พบว่าน้ำหนักที่ทำให้แผ่นพื้นเกิดการแตกร้าแรก (First-Cracking load) ที่ได้รับการทดสอบมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 18 ทั้งนี้เกิดจากค่าที่ใช้ในการสมมติสำหรับการคำนวณ โดยกำหนดให้การสูญเสียจากการอัดแรงเท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งมีค่ามากกว่าที่พบจริงเล็กน้อย และสมมติค่ากำลังดัดแตกร้าของคอนกรีต () เท่ากับ 0.625 [MPa] ตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบโดยวิธีกำลัง ซึ่งในสภาพจริงกำลังดัดแตกร้าของคอนกรีตจะมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวอีกเล็กน้อย

โดยใช้ทฤษฎีกำลัง และสมมติให้แผ่น CFRP มีความเค้นดัดที่เกิดขึ้น () เท่ากับ $\times$ โดยค่า เป็นสัดส่วนของความเค้นดัดที่เกิดขึ้นจริงในแผ่น CFRP เทียบกับกำลังดัดประลัยของแผ่น CFRP สมการที่ใช้ในการทำนายผลน้ำหนักสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP คือดังต่อไปนี้

$$P_n = \frac{2 \left[A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) + \psi A_{CFRP} f_{pu} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \right]}{a_p} \quad (2)$$

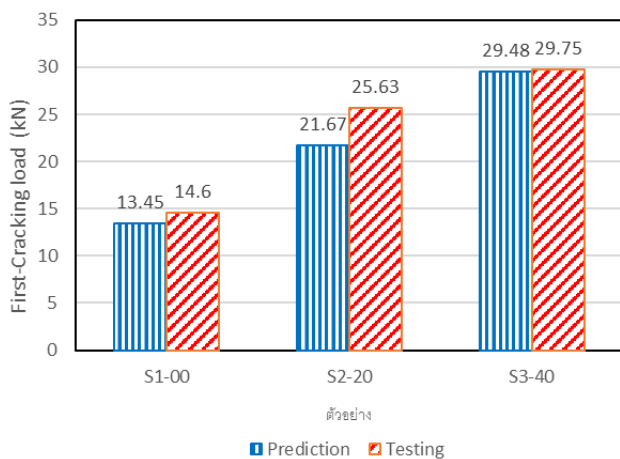
$$\text{เมื่อ } a = \frac{A_{CFRP} f_{ps} + A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (3)$$

- โดยที่ P_n = น้ำหนักกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น
 A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
 A_{CFRP} = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
 f_y = กำลังดึงของเหล็กเสริม
 d_s = ระยะจากผิวด้านบนของคอนกรีตถึงระยะกึ่งกลางของเหล็กเสริมหลักด้านล่าง
 d_p = ระยะจากผิวด้านบนของคอนกรีตถึงระยะกึ่งกลางของแผ่น CFRP
 f_{ps} = ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นจริงในแผ่น CFRP ขณะรับน้ำหนักสูงสุด = $\epsilon_{fs} E_{ps}$
 f_{pu} = กำลังดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
 E_{ps} = โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น CFRP

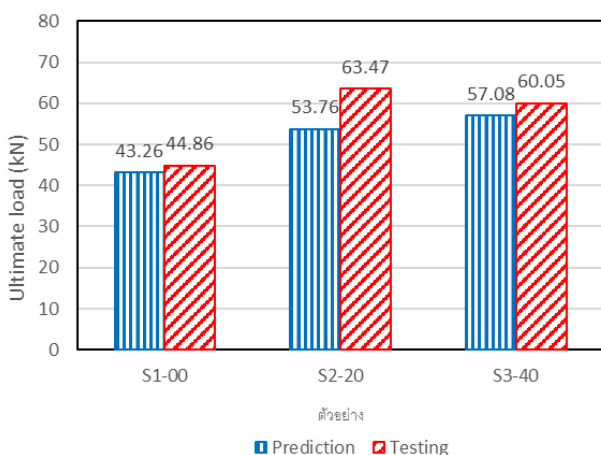
การหาค่า ที่เกิดจริงในแผ่น CFRP ขณะรับน้ำหนักสูงสุดเป็นเรื่องที่ยากมาก ดังนั้นในการทำนายผลนี้ ค่าความเค้นนี้ได้จาก $f_{ps} = \epsilon_{fs} E_{ps}$ ที่ ϵ_{fs} คือความเครียดของแผ่น CFRP ที่น้ำหนักสูงสุด ดังแสดงค่าที่ได้รับการทดสอบในตารางที่ 2

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 พบว่าน้ำหนักสูงสุด (Ultimate load) ที่เกิดขึ้น

ในแผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่ได้รับการทดสอบมีค่ามากกว่าผลที่ได้รับจากการคำนวณเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 19 ทั้งนี้เกิดจากการสมมุติค่าการสูญเสียจากการอัดแรงเท่ากับร้อยละ 5 นอกจากนี้จะสังเกตเห็นตัวอย่าง S2-20 มีผลการทำนายที่น้อยกว่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผลทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีรอยแตกกว้างจำนวนมากที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตจากน้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดที่อ่านได้บนผิว CFRP มีความแปรปรวนซึ่งเกิดจากการส่งถ่ายแรงของวัสดุ CFRP กับคอนกรีต โดยบริเวณรอยแตกของคอนกรีตจะให้ค่าความเครียดบนแผ่น CFRP ที่มากที่สุด และจะลดลงเมื่อมีระยะห่างจากรอยแตก ดังนั้นจึงคาดว่าค่าความเครียดที่ได้รับและไปใช้ในการทำนายผลจึงมีค่าน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 18 เปรียบเทียบน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแรก (First-Cracking load) ที่ได้จากทดสอบกับผลที่ได้จากการทำนาย



รูปที่ 19 เปรียบเทียบน้ำหนักสูงสุด (Ultimate load) ที่ได้จากการทดสอบ กับผลที่ได้จากการทำนาย

5. สรุปผลการวิจัย

1. แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP เป็นระบบการเสริมกำลังเชิงรุก นอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดของแผ่นพื้นอย่างมากแล้ว ยังจะช่วยลดการโก่งตัวของแผ่นพื้นได้อย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากแผ่นพื้นจะถูกยกตัวขึ้นขณะทำการอัดแรง

2. แผ่นพื้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แบบไม่อัดแรง หรือ ตัวอย่างควบคุม เป็นระบบการเสริมกำลังเชิงรับจะให้ความสามารถในการรับแรงดัดสูงสุดน้อยกว่าแผ่นพื้นที่เสริมกำลังโดยใช้ระบบอัดแรงที่หลังด้วย CFRP อย่างมาก เนื่องจากเกิดจากหลุดร่อนจากการเสียดของแผ่น CFRP ออกจากคอนกรีตที่ยึดติดด้วยอีพ็อกซีที่ค่อนข้างเร็ว โดยสังเกตเห็นความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจริงในแผ่น CFRP ที่น้ำหนักสูงสุดมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าตัวอย่างที่อัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP

3. การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตด้วยระบบอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP โดยระดับการอัดแรงเท่ากับร้อยละ 20 และ 40 ให้ น้ำหนักที่แตกร้าวแรก (First cracking load) ของคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 76 และ 104 เทียบกับตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ โดยสังเกตเห็นว่าน้ำหนักที่การแตกร้าวแรกของพื้นคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับของการอัดแรงที่หลังด้วยแผ่น CFRP

4. การสูญเสียการอัดแรงในแผ่น CFRP ที่ 22 ชั่วโมง ทั้งระดับของการอัดแรงร้อยละ 20 และ 40 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยร้อยละการสูญเสียการอัดแรงในแผ่น CFRP เท่ากับ 4.41 และ 4.35 ตามลำดับ การสูญเสียการอัดแรงจะเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงชั่วโมงแรกก่อนการแข็งตัวของอีพ็อกซี โดยคาดว่าเกิดจากการคลายตัวของอุปกรณ์จับยึด CFRP ที่ปลายทั้งสองด้าน

5. การทำนายผลที่ได้รับโดยใช้แบบจำลองทางกลศาสตร์โครงสร้างพบว่า ให้ค่าน้ำหนักที่ทำให้แผ่นพื้นเกิดการแตกร้าวแรก (First-Cracking load) และ น้ำหนักสูงสุด (Ultimate load) น้อยกว่าค่าที่ได้รับจากการทดสอบเล็กน้อย ซึ่งถือว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ทำนายผลได้เป็นอย่างดี และการทำนายผลอยู่ในลักษณะที่ค่อนข้างปลอดภัย (Conservative Prediction)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณบดี มณีงามเลิศ บริษัท เช็มกริต (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุแผ่น CFRP อีพ็อกซี และอุปกรณ์จัดยึด รวมถึงให้คำแนะนำเกี่ยวกับการติดตั้ง นอกจากนี้ ขอขอบคุณทางบริษัท พรอสเพอริตีคอนกรีต จำกัด ที่

ให้การสนับสนุนการจัดเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ รวมทั้งขอขอบคุณวิศวกรประจำห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุและโครงสร้างของบริษัทฯ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดสอบและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2019.
- [2] กรมทางหลวงชนบท, “การศึกษาและพัฒนาสะพานให้สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นโดยวิธีการเสริมกำลังพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ ช่วง 5-10 ม.”, บริษัท ไอเอ็มเอ็มเอส จำกัด, หน้า 2/3-9/1, 2550.
- [3] Wijitsombat, S. and Sujivorakul, C., “Factors Affecting on the Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Steel Plate”, *Proceeding of The 2 nd ACF Symposium 2017: Innovations for Sustainable Concrete Infrastructures*, Chiang Mai, Paper ID-D020, 2017, pp.1-8.
- [4] สมบูรณ์ เชียงฉิน และปรีดา ไชยมหาวัน, พฤติกรรมการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, 2562, หน้า 48-63.
- [5] M. R Garcez, et al., “Applying Post-Tensioning Technique to Improve the Performance of FRP Post-Strengthening”, in *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair: Edition 1*, InTech Publisher, 2013, pp.119-148.
- [6] K. S. Choi, et al., “Behavior of RC Beams Strengthened with Externally Post-Tensioning CFRP Strips”, *Proceedings of Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7)*, New Orleans, Louisiana, USA, 2005, pp.515-528.
- [7] A. Tateishi, et al., “Application of Tensioned CFRP Strip Method to an Existing Bridge”, *Proceedings of Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7)*, New Orleans, Louisiana, USA, 2005, pp.1177-1190.
- [8] W. Wang, et al., “Prestress Losses and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Posttensioned CFRP Sheets,” *Journal of Composites for Construction* © ASCE, 16(2), pp.207-216, 2012.
- [9] J. W. Schmidt, et al., “External Post-Tensioning of CFRP Tendons Using Integrated Sleeve-Wedge Anchorage”, *Proceedings of the 6 th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Rome, Italy, 2012, pp.1-8.
- [10] M. Aslam, et al., “Strengthening of RC Beams Using Prestressed Fiber Reinforced polymers - A Review”, *Construction and Building Materials*, Vol. 82, pp.235-256, 2015.
- [11] P. Bartosz and S. Tomasz, “Development of the New CFRP Strip Prestressing System for Structural Strengthening”, *Proceedings of 9 th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018)*, Paris, France, 2018, pp.918-925.