

พฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย แผ่นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยอารามิด

Behavior of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with AFRP sheets

ภัทรพงษ์ ปุณฺณ^{1,*} และ วิฑิต ปานสุข²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 6670183421@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ผลการวิจัยทดลองกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 แผ่น ได้รับการอธิบายอย่างละเอียดในรายงานนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆต่อประสิทธิภาพทางโครงสร้างของแผ่นคอนกรีตเหล่านี้ โดยแบ่งเป็นในส่วนของแผ่นคอนกรีตที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังและได้รับการเสริมกำลัง แผ่นคอนกรีต 1 แผ่น ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น AFRP sheet ติดตั้งภายนอก การทดสอบเริ่มโดยการนำแผ่นตัวอย่าง 2 แผ่น ที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังและได้รับการเสริมกำลังถูกทำการทดสอบด้วยแรงสถิต (Monotonic Loadtest) การประเมินผลจะดำเนินการโดยการเปรียบเทียบกับแผ่นควบคุมซึ่งจะประเมินหลายด้านที่สำคัญ เช่น กำลังรับน้ำหนักสูงสุด รูปแบบการวิบัติ รูปแบบรอยแตกร้าว และค่าความเครียดในแผ่น AFRP sheet การศึกษาปัจจัยเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เข้าใจประสิทธิภาพและการทำงานของเทคโนโลยีการเสริมกำลังที่ใช้

คำสำคัญ: แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก, การเสริมกำลัง, พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยอารามิด, แรงเฉือนเฉาะทะลุ

Abstract

The experimental investigation of two reinforced concrete slabs is presented in this report. The primary objective was to examine the influence of various parameters on the structural performance of the slabs, both with and without external strengthening. One of the slabs was strengthened using an externally bonded Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) sheet, while the other remained unstrengthened. Both specimens were subjected to monotonic loading to evaluate their structural behavior. The performance of each slab was assessed in comparison with a control specimen, focusing on several critical parameters, including ultimate load capacity, failure mode, crack pattern and strain distribution in the AFRP sheet. The investigation aimed to provide a comprehensive understanding of the effectiveness and structural contribution of the applied strengthening technique.

Keywords: Reinforced Concrete Slab, Strengthening, AFRP

1. คำนำ

ในปัจจุบัน วิธีการที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงหรือซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือการเสริมกำลังภายนอกโดยใช้

วัสดุไฟเบอร์เสริมโพลิเมอร์ (Fiber Reinforced Polymer: FRP) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายจากคุณสมบัติเด่นด้านความเสถียรในการติดตั้ง น้ำหนักเบา และอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง แนวทางการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งวัสดุ FRP ภายนอกโดยใช้กาวยึดติด (Externally Bonded Reinforcement: EBR) ได้รับการพัฒนาและกำหนดเป็นมาตรฐานการออกแบบที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะในส่วนที่ต้องการเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงดัด เช่น แผ่นพื้นและคาน

คอนกรีตโดยธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเปราะและสามารถเกิดรอยร้าวได้ง่าย เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงดัดจำกัด ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรอยร้าวได้แก่ แรงกระทำทางกล ปฏิกริยาทางเคมีที่ไม่พึงประสงค์ และภาระจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง ทำให้เกิดความจำเป็นในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังเพื่อฟื้นฟูสมรรถนะโครงสร้างให้กลับมาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในทางปฏิบัติ มีเทคนิคมากมายที่สามารถใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น การติดตั้งแผ่นเหล็ก การฉีดยาซ่อมแซม การใช้ปูนซ่อมแซมหรือการใช้วัสดุ FRP ในรูปแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาหลายปัจจัย เช่น ขอบเขตของความเสียหาย ประเภทวัสดุที่ใช้ งบประมาณ และระยะเวลาดำเนินการ ในบรรดาวิธีการต่าง ๆ นั้น การใช้ FRP เสริมกำลังภายนอกถือเป็นวิธีที่โดดเด่น เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดได้ดี ลดต้นทุนด้านการบำรุงรักษา และลดความยุ่งยากในการก่อสร้าง

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของการเสริมกำลังแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่น AFRP ติดตั้งภายนอก โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ ได้แก่ กำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load), รูปแบบการวิบัติ (Failure Mode), รูปแบบรอยแตกร้าว (Crack Pattern), พฤติกรรมการโก่งตัว (Deflection Behavior) และค่าความเครียดในแผ่น AFRP ผลการศึกษาคาดว่าจะช่วยให้เกิดความเข้าใจในกลไกการทำงานของเทคนิคการเสริมกำลังด้วย AFRP และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการพัฒนาแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ FRP

วัสดุไฟเบอร์เสริมโพลิเมอร์ (Fiber Reinforced Polymer: FRP) เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติเฉพาะอันโดดเด่น เช่น ความทนทานต่อความล้า ความต้านทานการกัดกร่อน อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และค่าการนำความร้อนต่ำ อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งทั้งด้านคุณสมบัติวัสดุและรูปทรงทางเรขาคณิตให้เหมาะสมกับความต้องการเฉพาะด้านได้ FRP จึงถูกนำมาใช้ในงานเสริมกำลัง ซ่อมแซม และปรับปรุงโครงสร้างอย่างแพร่หลาย โดยจำแนกลักษณะการใช้งานหลักออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การเสริมกำลัง

เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้าง การซ่อมแซมเพื่อฟื้นฟูองค์ประกอบที่เสื่อมสภาพ และการปรับปรุงเพื่อให้โครงสร้างสามารถรองรับภาระเพิ่มเติม เช่น แรงกระทำซ้ำหรือแรงแผ่นดินไหว วัสดุ FRP ประกอบด้วยเส้นใยหลัก 4 ประเภท ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน แก้ว อารามิด และบะซอลต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ทั้งด้านมอดูลัสยืดหยุ่น ความสามารถในการดูดซับพลังงาน และความต้านทานต่อการกัดกร่อน โดยทั่วไปวัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ยึดเส้นใยในระบบ FRP มักเป็นอีพ็อกซีเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าและมีต้นทุนสูงกว่าวัสดุเมทริกซ์ประเภทอื่น วัสดุ FRP มีลักษณะเป็นวัสดุเชิงแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) โดยชนิดที่ใช้กันแพร่หลายในการเสริมกำลังรับแรงดัดของคานและแผ่นพื้นคือ FRP ชนิดเส้นใยในแนวเดียว (unidirectional) เนื่องจากสามารถรับแรงได้ดีในทิศทางหลักของแรงกระทำ ความสามารถของวัสดุ FRP ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ปริมาณเส้นใย ทิศทางของการจัดวางเส้นใย และคุณสมบัติของวัสดุเมทริกซ์ ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลังโดยรวม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเส้นใยแต่ละประเภท [1]

Fibre type	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Failure strain (%)
Carbon (HS/S)	160 - 250	1400 - 4930	0.8 - 1.9
Carbon (IM)	276 - 317	2300 - 7100	0.8 - 2.2
E glass	69 - 72	2400 - 3800	4.5 - 4.9
S-2 glass	86 - 90	4600 - 4800	5.4 - 5.8
Aramid (Kevlar 29)	83	2500	-
Aramid (Kevlar 49)	131	3600 - 4100	2.8
Basalt	78 - 90	4150 - 4800	4.1 - 4.4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุเมทริกซ์ [1]

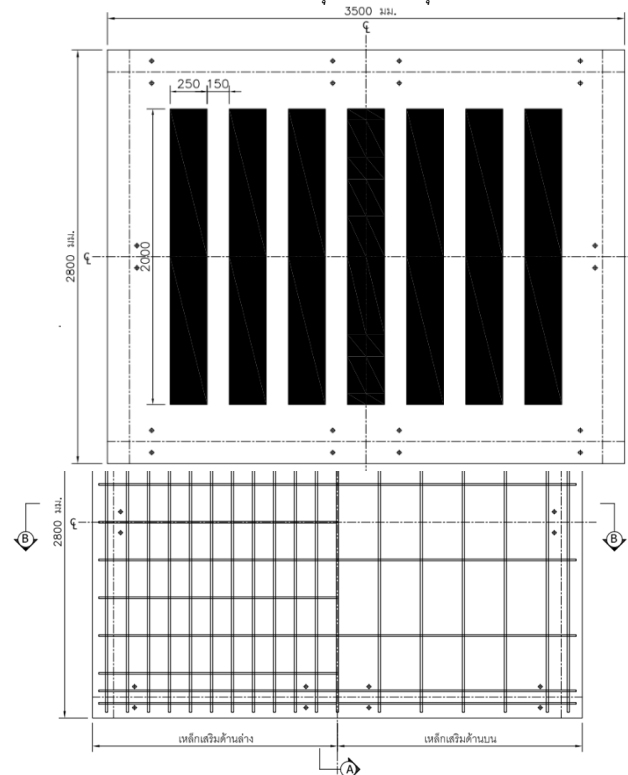
Matrix	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Failure strain (%)
Polyester	3.1 - 4.6	50 - 75	1.0 - 6.5
Vinylester	3.1 - 3.3	70 - 81	3.0 - 8.0
Epoxy	2.6 - 3.8	60 - 85	1.5 - 8.0

2.2 การศึกษาพฤติกรรมการดัดขององค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย FRP ภายใต้แรงสถิต

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาองค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย FRP ภายใต้แรงสถิต โดยพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง ได้แก่ ความหนา ความยาว และชนิดของวัสดุ FRP วิธีการติดตั้ง ประเภทของแรงกระทำ และรูปแบบการรองรับโครงสร้าง พบว่าการเสริมกำลังด้วยแถบ FRP ทำให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 370% แต่เปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติจากแบบเหนียวเป็นแบบฉับพลันเนื่องจากการหลุดล่อนของแผ่น FRP จากคอนกรีต [2] FRP สามารถฟื้นฟูกำลังรับน้ำหนักได้สูงถึง 540% ในแผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมเหล็ก และ 200% ในแผ่นพื้นที่เสริมเหล็กบางส่วน [3] การเสริม CFRP และ GFRP ทำให้กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 40% และ 31% ตามลำดับ แม้ค่าความเหนียวจะลดลง [4] มีการศึกษาแผ่นพื้นสองทางทั้งที่มีและไม่มีช่องเปิด พบว่าเทคนิคการยึด

กลไกสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] การเสริมกำลังบริเวณแผ่นพื้น-เสาด้วยแผ่น CFRP ทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นถึง 67% โดยเฉพาะในตำแหน่งเสาที่อยู่ใกล้ขอบของแผ่นพื้น [6] นอกจากนี้การเติมใยบะซอลต์ในคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมชนิด BFRP และ GFRP ช่วยเพิ่มกำลังดัดได้ถึง 41% และ 33% ตามลำดับ [7] ทั้งหมดนี้สะท้อนให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วย FRP มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมกับสถานะโครงสร้างที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติวัสดุ



แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบได้รับการออกแบบและผลิตตามมาตรฐาน AASHTO [8] เพื่อให้สามารถรองรับแรงกระทำได้อย่างเหมาะสม วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับการคัดเลือกตามข้อกำหนดทางโครงสร้างเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแผ่นพื้น ได้ทำการหล่อแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3500 × 2800 × 190 มม. จำนวน 2 แผ่น โดยมี 1 แผ่น ที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น AFRP sheet แบบติดตั้งภายนอก (Externally Bonded Reinforcement: EBR) ด้วยวิธีติดตั้งแบบเปียก

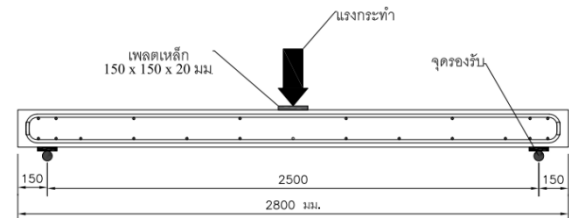
ตารางที่ 3 คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุ	คุณสมบัติ
เหล็กเสริม	เกรด : SD-40 ขนาด : 12 มม. และ 16 มม. กำลังรับแรงที่จุดคราก (F_y) : 395 MPa กำลังรับแรงดึง (F_u) : 560 MPa
คอนกรีต	กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f'_c) : 40 MPa (Cylinder)
AFRP sheet	กำลังรับแรงดึง (F_u) : 2,060 MPa มอดูลัสยืดหยุ่น (E_f) : 118,000 MPa ความหนา : 0.43 มม.



Epoxy	กำลังรับแรงดึง (F_{t0}) : 24.3 MPa มอดูลัสยืดหยุ่น (E_p) : 3,882 MPa อัตราส่วนผสม 3 (Epoxy resin) : 1 (Epoxy hardener)
-------	--

รูปที่ 1 ขนาดแผ่นพื้นและรายละเอียดเหล็กเสริม



ผิวเรียบสม่ำเสมอ หลังติดตั้งเสร็จ แผ่นพื้นจะถูกบ่มในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 7 วันก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบ

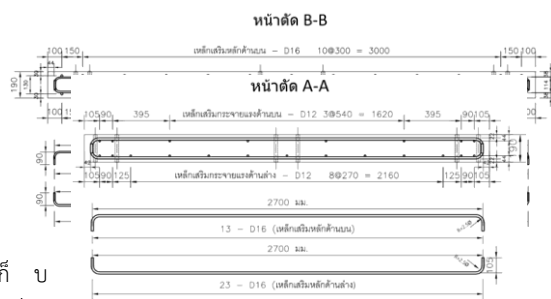
รูปที่ 3 การหล่อคอนกรีต



รูปที่ 2 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น AFRP sheet

2.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

กระบวนการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มจากการสร้างแบบหล่อเหล็กสำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3500 x 2800 x 190 มม. โดยทาน้ำมันที่พื้นผิวแบบหล่อเพื่อให้ง่ายต่อการถอดแบบ หลังจากนั้นติดตั้งเหล็กเสริมขนาด 12 มม. และ 16 มม. ตามแบบ พร้อมทั้งทวนลูกปูนเพื่อควบคุมระยะคูลม และติดตั้งหุยกเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย แผ่นพื้นแต่ละแผ่นถูกหล่อด้วยคอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังอัด 40 MPa และอัดแน่นด้วยเครื่องสั่น จากนั้นทำการบ่มแผ่นพื้นด้วยแผ่นพลาสติกต่อเนื่อง 14 วัน พร้อม



เก็บตัวอย่าง

คอนกรีตสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกล หลังจากบ่มแล้วจึงเริ่มการเตรียมพื้นผิวสำหรับการติดตั้งแผ่น AFRP โดยใช้เครื่องเจียรขัดผิวหน้าคอนกรีตจนเห็นมวลรวม ตามด้วยการดูแลและเช็ดพื้นผิวด้วยสารอะซิโตน ผสมอีพ็อกซีในอัตราส่วน 3:1 แล้วทาสีชั้นแรกลงบนคอนกรีต จากนั้นติดตั้งแผ่น AFRP sheet ตามขนาดที่ออกแบบไว้โดยใช้แรงกดผ่านเกรียงหรือไม้พายเพื่อไล่ฟองอากาศและกาวส่วนเกิน พร้อมเคลือบทับด้วยชั้นกาวอีกชั้นเพื่อให้



รูปที่ 4 การเตรียมพื้นผิวคอนกรีตและการติดตั้งแผ่น AFRP sheet 2.5 การติดตั้งการทดสอบ

การติดตั้งระบบทดสอบสำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการภายใต้โครงสร้างเหล็กที่ออกแบบให้สามารถรองรับแรงกระทำจากอุปกรณ์ทดสอบได้อย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพ โดยใช้พื้นรองรับ



(strong floor)
ยึดด้วย

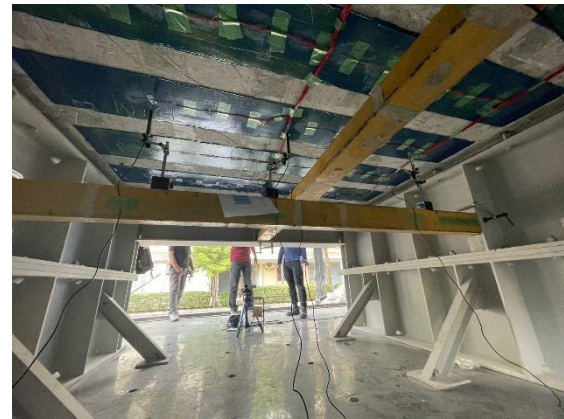
anchor rod ขนาด 16 มม. โครงเหล็กหลักประกอบด้วยคาน H-beam, คานขวาง, ค้ำยันเฉียง, แผ่นเสริมแรง และแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อถ่ายแรงสู่ฐานรองรับอย่างเหมาะสม แผ่นพื้นตัวอย่างถูกวางบนโครงทดสอบพร้อมระบบยึดด้วยเพลาและสลักเกลียว M20 เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบ ด้านระบบเครื่องมือวัด ได้ติดตั้ง strain gauge ที่เหล็กเสริมภายในก่อนการเทคอนกรีต และที่กึ่งกลางของแผ่น AFRP sheet ภายนอกเพื่อตรวจวัดค่าความเครียดในแนวตามยาว โดยติดตั้งด้วยวิธีการเตรียมผิวหน้าอย่างเหมาะสมและป้องกันความชื้นด้วยซิลิโคนและเทปพลาสติก นอกจากนี้ยังติดตั้งตัววัดการกระจัดแบบ LVDT ในตำแหน่งต่าง ๆ ได้ แผ่นพื้น เพื่อวัดค่าการโก่งตัวอย่างละเอียด ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกและจัดเก็บโดยระบบ Data Logger System ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อการวิเคราะห์ผลอย่างเป็นระบบและแม่นยำ

รูปที่ 5 การติดตั้งการทดสอบ

3. ผลการดำเนินงาน

พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวของแผ่นพื้นตัวอย่างทั้งสองแผ่น S01 และ S02 แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยที่ S01 คือแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง และ S02 คือแผ่นพื้นที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น AFRP ติดตั้งภายนอก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า S02 สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดประมาณ 500 กิโลนิวตัน ซึ่งสูงกว่า S01 ที่รับได้ประมาณ 450 กิโลนิวตัน หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 11% ถึงแม้ว่าจะได้รับความเสียหายจากแรงกระทำเข้าไปแล้ว นอกจากนี้ S02 ยังแสดงความแข็งแรงเริ่มต้น (initial stiffness) ที่สูงกว่าอย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากความชันของกราฟในช่วงต้น ซึ่งสะท้อนถึงความแข็งแรงทางดัดที่เพิ่มขึ้น

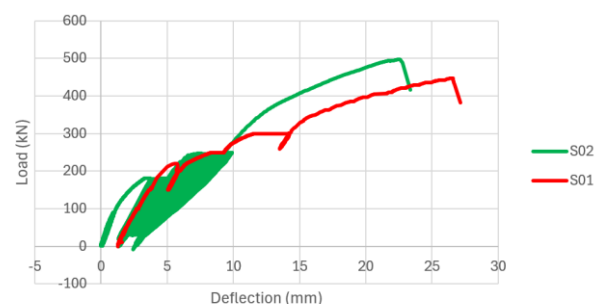
จากการเสริมกำลัง อย่างไรก็ตามหลังจากถึงจุดรับน้ำหนักสูงสุด แผ่น S02



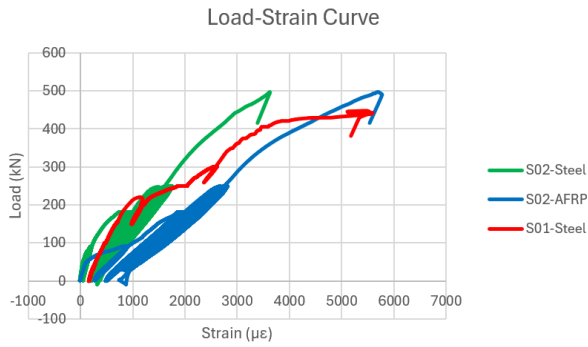
และแผ่น S01 แสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ โดยค่าแรงลดลงทันทีอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนทะลุ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียด (strain) ที่วัดได้จาก Strain gauge ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งเดียวกันบนเหล็กเสริมและแผ่น AFRP ของแผ่นพื้นตัวอย่าง S02 ซึ่งได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น AFRP ติดตั้งภายนอก ผลการทดสอบพบว่า ทั้งเหล็กเสริมและแผ่น AFRP แสดงพฤติกรรมการเสียรูปในช่วงเชิงเส้นตลอดการทดสอบ โดยไม่มีสัญญาณของการเข้าสู่ภาวะคราก โดยค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมอยู่ที่ประมาณ 3600 $\mu\epsilon$ และของ AFRP อยู่ที่ประมาณ 5600 $\mu\epsilon$ ณ ขณะรับแรงกระทำสูงสุดประมาณ 500 kN พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนทะลุ (punching shear failure) บริเวณจุดรับแรง ซึ่งทำให้แผ่นพื้นเกิดการพังทลายอย่างเฉียบพลันก่อนที่วัสดุเสริมกำลังทั้งสองชนิดจะเข้าสู่ระยะวิบัติเชิงกล (mechanical failure) การวิเคราะห์จากรูปที่ 7 ให้นิยามว่าแผ่น AFRP รับภาระได้ในอัตราที่สูงกว่าเหล็กเสริมเล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วงหลังของการรับแรง ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของ AFRP ในการรับแรงดึงได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการวิบัติไม่ได้เกิดจากการเสียกำลังของวัสดุ แต่เกิดจากกลไกแรงเฉือนทะลุ จึงอาจกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลังนี้ยังไม่ถูกใช้จนเต็มศักยภาพ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า แม้การเสริมกำลังด้วย AFRP จะเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงดัดของแผ่นพื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่การออกแบบเสริมกำลังในลักษณะนี้จำเป็นต้องพิจารณาถึงการวิบัติจากแรงเฉือนทะลุร่วมด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายก่อนเวลาอันควรและใช้ศักยภาพของวัสดุเสริมกำลังได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

Load-Deflection Curve



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัว



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียด

รูปที่ 8 และรูปที่ 9 จากการทดสอบพบว่า แผ่นพื้นคอนกรีตทั้งที่ไม่ได้เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วย AFRP แสดงพฤติกรรมการวิบัติหลักในลักษณะของแรงเฉือนเฉาะทะลุ (Punching Shear Failure) โดยในช่วงเริ่มต้นของการรับแรง แผ่นพื้นทั้งสองชนิดเริ่มเกิดรอยร้าวจากโมเมนต์ดัด โดยมีรอยร้าวแบบดิ่งในบริเวณด้านล่างของแผ่นซึ่งเป็นเขตแรงดิ่งสูงสุด รอยร้าวดังกล่าวค่อย ๆ ขยายตัวออกจากบริเวณจุดรับแรงกระทำเป็นลักษณะรัศมี ในกรณีของแผ่นพื้นที่เสริมด้วย AFRP แม้ว่า จะเกิดรอยร้าวเริ่มต้นในลักษณะเดียวกัน แต่ระบบเสริมกำลังช่วยชะลอการขยายตัวของรอยร้าวและควบคุมการกระจายรอยร้าวได้ดีขึ้น ทำให้รูปแบบรอยร้าวมีความสม่ำเสมอมากกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อแรงกระทำเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระยะวิบัติ แรงเฉือนที่สะสมบริเวณรอบจุดรับแรงทำให้เกิดรอยร้าวเฉือนทะลุจากจุดรับแรงไปยังบริเวณใกล้เคียงแนวรองรับ และส่งผลให้เกิดการพังทลายในลักษณะเฉาะทะลุเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง รูปแบบการพัฒนา รอยร้าวนี้แสดงให้เห็นว่า แรงดัดเป็นสาเหตุเริ่มต้นของรอยร้าว และเมื่อแรงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับวิกฤต กลไกความเสียหายจะเปลี่ยนเป็นแรงเฉือนทะลุ โดยการเสริม AFRP ช่วยชะลอการเกิดรอยร้าวหลักและเพิ่มความสามารถในการกระจายแรง แต่ไม่สามารถป้องกันการวิบัติแบบประจักษ์ได้อย่างสมบูรณ์

รูปที่ 8 รูปแบบรอยร้าว S01



รูปที่ 9 รูปแบบรอยร้าว S02

4. บทสรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับ การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยอารามิด (AFRP) โดยเปรียบเทียบกับแผ่นควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง พบว่าการเสริม กำลังด้วย AFRP สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของแผ่นพื้น ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยแผ่นพื้นที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าแผ่นควบคุมประมาณ 25% อีกทั้งยังแสดงค่าความแข็งแรงเริ่มต้นที่สูงกว่า ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการต้านทานการโก่งตัวที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่า AFRP จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางโครงสร้างในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นได้อย่างชัดเจน แต่แผ่นพื้นที่ได้รับการเสริมกำลังก็ยังคงเกิดการวิบัติแบบประจักษ์จากแรงเฉือนทะลุ ซึ่งเป็นกลไกการพังทลายที่เกิดขึ้น ก่อนที่วัสดุเสริมกำลังจะถูกใช้งานจนถึงขีดจำกัดความสามารถทางกล การวิเคราะห์ค่าความเครียดที่วัดจาก Strain gauge ยังแสดงให้เห็นว่า ทั้งเหล็กเสริมและแผ่น AFRP ทำงานภายใต้พฤติกรรมเชิงเส้นโดยไม่มีการเข้าสู่ภาวะคราก ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติแบบเฉือนทะลุที่เกิดขึ้นก่อนกำลังสูงสุดของวัสดุ ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญโดยตรงต่อการเสริมกำลังแผ่นพื้น สะพานที่ ใช้งานอยู่ทั่วไปในประเทศไทย โดยเฉพาะในกรณีที่พื้นสะพานมีอายุการใช้งานยาวนานหรือประสบปัญหาการร้าวและกำลังรับน้ำหนัก ลดลงจากการใช้งานต่อเนื่อง การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเสริมกำลังด้วย AFRP แบบติดตั้ง ภายนอก (EBR) ถือเป็นทางเลือกที่สามารถยกระดับสมรรถนะของแผ่นพื้น เดิมได้โดยไม่รบกวนโครงสร้างหลักและสามารถดำเนินการได้ในภาคสนาม ด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การเสริมกำลังเกิดประสิทธิภาพ สูงสุด จำเป็นต้องออกแบบโดยพิจารณาจากการวิบัติของพื้นสะพานอย่าง รอบด้าน โดยเฉพาะแรงเฉือนทะลุ ซึ่งเป็นกลไกที่อาจจำกัดศักยภาพของ วัสดุเสริมกำลังหากไม่ได้รับการควบคุมอย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางประกอบการออกแบบเสริมกำลังสำหรับพื้นสะพานจริงได้ อย่างเป็นระบบและปลอดภัยในเชิงวิศวกรรม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ กรมทางหลวง และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับสะพาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ทดลอง และความเอื้อเฟื้อในด้าน



วิชาการตลอดกระบวนการศึกษาและปฏิบัติการตั้งแต่เริ่มต้นจนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Enochsson, O. (2005). CFRP Strengthening of Concrete Slabs with and without Openings. Experiment, analysis, design and field application. Licentiate thesis, Luleå University of Technology.
- [2] Seim, W., Hörmann, M., Karbhari, V., & Seible, F. (2001). External FRP Poststrengthening of Scaled Concrete Slabs. *Journal of Composites for Construction*, 5(2), 67–75.
- [3] Mosallam, A. S., & Mosalam, K. M. (2003). Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates. *Construction and building materials*, 17(1), 43-54.
- [4] Ebead, U., & Marzouk, H. (2004). Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slabs. *Structural Journal*, 101(5), 650-659.
- [5] Elsayed, W. E., Ebead, U. A., & Neale, K. W. (2009). Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts. *Journal of Composites for Construction*, 13(3), 198–207.
- [6] El-Enein, H. A., Azimi, H., Sennah, K., & Ghrib, F. (2014). Flexural strengthening of reinforced concrete slab–column connection using CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 57, 126–137.
- [7] Attia, K., Alnahhal, W., Elrefai, A., & Rihan, Y. (2019). Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite structures*, 211, 1-12.
- [8] AASHTO. (2007). AASHTO LRFD bridge design specifications – SI units. American Association of State Highway and Transportation Officials.