

การเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมกำลังคานด้วยวิธีการป้องกันการหลุดล่อน
ของแผ่นเส้นใยแก้วเสริมโพลิเมอร์
Performance Enhancement of Glass Fiber Reinforced
Polymer (GFRP) Plates by Debonding Preventions

กันต์ธร ประชากุล^{1*} และ กิตติภูมิ รอดสิน²
Kanton Prachakul^{1*} and Kittipoom Rodsin²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

²ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

¹Construction Engineering Technology ,College of Industrial Technology. King Mongkut's University
of Technology North Bangkok Bangkok , 10800

²Civil and Environmental Engineering Technology ,College of Industrial Technology. King Mongkut's University
of Technology North Bangkok ,Bangkok , 10800

Received : 2024-05-28 Revised : 2024-09-26 Accepted : 2024-10-03

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการวิบัติของโครงสร้างที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเส้นใยแก้วเสริมกำลังโพลิเมอร์ หรือ แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforcement polymer ; GFRP) ที่มีจำนวนชั้นและความหนา โดยมีสาเหตุมาจากการหลุดล่อน (Debonding) ออกของแผ่นเสริมกำลัง และเพื่อให้แผ่น GFRP สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการใช้วัสดุยึดเชิงกล (Mechanical Fasteners หรือ MF) เข้ามาช่วยยึดแผ่น GFRP โดยทำการทดสอบกับคาน 3 ตัวอย่าง ได้แก่คานควบคุม (CB) คานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น GFRP (EB-3) และคานที่เสริมกำลังภายนอกที่ติดตั้งวัสดุป้องกัน MF (IEB-3) ทำการทดสอบด้วยวิธีการกดน้ำหนักลงกลางคานทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งวัสดุป้องกัน MF นั้นสามารถป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP ได้ และคานทดสอบ IEB-3 สามารถรับกำลังโมเมนต์ดัดได้มากกว่าคานทดสอบ CB และคานทดสอบ EB-3 ถึง 2.01 และ 1.19 เท่าตามลำดับ ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้สามารถนำไปป้องกันการวิบัติที่มีสาเหตุมาจากการ

หลุดล่อนออกของโครงสร้างที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเส้นใยเสริมกำลังโพลิเมอร์ที่มีจำนวนชั้นและความหนาที่มาก และทำให้การเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP ได้ประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, การหลุดล่อน, การเสริมกำลังภายนอก, การป้องกันการวิบัติ

Abstract

This research has objective to prevent the failure of externally reinforcement structure with glass fiber reinforcement polymer (GFRP) plates which, have multiple layers and thickness, Cause by debonding of GFRP plate, The goal is to enable the GFRP plates to perform at full efficiency by using mechanical fasteners (MF) for improving bonding of GFRP plates. This research has been testing by 3 RC beam. control beams (CB), external reinforcement beam with GFRP plates 3 layers (EB-3) and external reinforcement beam with GFRP plates 3 layers (EB-3) improve bonding with MF (IEB-3). The testing method by

*กันต์ธร ประชากุล

E-mail address: kanton254@gmail.com

applying load at mid span of beams. The result revealed installing MF can prevent debonding of GFRP plate and IEB-3 beam can withstand greater bending moments compared to CB beam and EB-3 beam by 2.01 and 1.19 time respectively. The result of this research can be utilized to prevent debonding failure for reinforcement structure with GFRP plate and achieves that GFRP plate can use full potential.

Keywords : GFRP Plate, Debonding, External Bonding Failure prevention

1. บทนำ

การเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ โดยการใช้แผ่นวัสดุเส้นใยเสริมกำลังโพลิเมอร์ หรือ FRP (fiber-reinforcement polymer) ยึดติดภายนอกโครงสร้าง (External Bonding) ได้รับความนิยมและการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นหนึ่งในวิธีการที่ทำให้โครงสร้างแข็งแรงมากยิ่งขึ้น [1] เนื่องจากวัสดุ FRP รูปแบบแผ่นนั้นเป็นวัสดุที่มีค่ากำลังรับแรงดึงที่สูง สามารถผลิตให้มีขนาดความหนาและจำนวนชั้นที่ต้องการได้ มีน้ำหนักที่เบา ทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถติดตั้งได้ง่าย [2-4] และจากการวิจัยที่มีมาอย่างยาวนานทำให้สามารถคำนวณวิเคราะห์การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย มีมาตรฐาน [5-7] ซึ่งการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่มีจำนวนชั้นมากจะทำให้โครงสร้างสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้น แต่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเสริมกำลัง จำเป็นต้องมีการจำกัดจำนวนชั้นและความหนาในการเสริมกำลังเพื่อป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่น FRP ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างเกิดการวิบัติก่อนที่จะสามารถรับน้ำหนักได้เต็มประสิทธิภาพ [8]

จากการศึกษาศึกษาพฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น FRP ของ Nguyen และคณะ [9] ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของปริมาณการเสริมกำลังของแผ่น FRP มีผลต่อขนาดความกว้างรอยแตกร้าวบนคาน และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่น FRP ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคานเสริมกำลัง และการวิบัติที่เกิดจากการหลุดล่อนออกของแผ่นเสริมกำลัง และจากการศึกษาพฤติกรรม

คานเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP ของ Xiaoyong และ Zhigang [10] โดยการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นเสริมกำลังภายใต้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four point load) พบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั้น เกิดการวิบัติจากการฉีกขาดของแผ่น FRP และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักได้มากขึ้น แต่คานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP จำนวน 5 และ 6 ชั้น เกิดการวิบัติมาจากการหลุดล่อนออกของแผ่น FRP โดยที่คานยังไม่สามารถรับน้ำหนักได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและแผ่นเสริมกำลังยังไม่เกิดการฉีกขาด

อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันการเกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเสริมกำลังสูง Yu-Fei และ Yue [11] ได้ศึกษาคิดค้นและปรับปรุงการยึดเกาะคานทดสอบกับแผ่น FRP ด้วยการใช้วัสดุอื่นเข้ามาช่วยในการยึดเกาะ โดยการเจาะยึดด้วยตัวยึดเชิงกล (Mechanical fastener) และใช้กาวอีพ็อกซีในการเชื่อมประสานตัวยึดเชิงกลเข้ากับคานทดสอบตลอดแนวความยาวของแผ่นเสริมกำลังเพื่อป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่น FRP จากผิวของคอนกรีต จากผลทดสอบคานที่ติดตั้งตัวยึดเชิงกลสามารถแก้ปัญหาการหลุดล่อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับคานทดสอบที่ติดตั้งตัวยึดเชิงกลจำนวนมากจะได้ประสิทธิภาพในป้องกันการหลุดล่อนสูง แต่การป้องกันการหลุดล่อนด้วยวิธีดังกล่าวอาจเกิดการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมได้ เนื่องด้วยตัวยึดเชิงกลเป็นเหล็กดังนั้น Fu, Chen และ Teng [12] จึงได้ศึกษาและคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาการหลุดล่อนด้วยวิธีการใช้แถบเส้นใยเสริมกำลังที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ในการโอบรัดแผ่นเสริมกำลัง FRP เป็นรูปทรงตัวยู เรียกว่า U-jacket โดยทำการทดสอบกับคานเสริมกำลังที่มีลักษณะแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า การใช้ U-jacket สามารถช่วยป้องกันการเกิดการหลุดล่อนได้ อีกทั้งตำแหน่งและรูปทรงในการติดตั้งของ U-jacket มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดหลุดล่อนอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการติดตั้งที่ปลายแผ่นเสริมกำลังหรือบริเวณที่เกิดโมเมนต์ต่ำจะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่การป้องกันการหลุดล่อนด้วยวิธีดังกล่าวนี้ใช้เวลานาน ติดตั้งได้ยาก และอาจไม่สามารถติดตั้งในกรณีที่มีพื้นที่จำกัด ซึ่งทำให้การป้องกันรูปแบบวัสดุยึดเชิงกลเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าทั้งความสะดวกและตำแหน่งที่ติดตั้ง

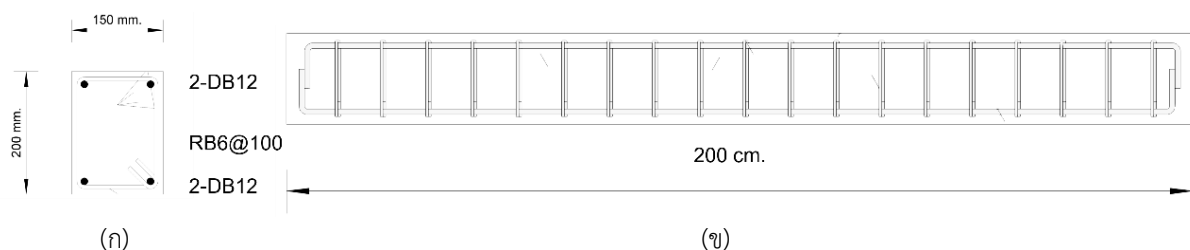
จากงานวิจัยของ Jones, Swamy และ Ang [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเสีรฐรูปของคาน คสล. ที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเหล็กโดยใช้กาวอีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานกับผิวคอนกรีต จากการทดสอบคานที่เสริมกำลังมีโอกาสร้อยครั้งที่เกิดการวิบัติโดยมีสาเหตุมาจากการหลุดล่อนที่บริเวณปลายแผ่น (plate-end debonding) เป็นส่วนมาก เมื่อสังเกตเห็นถึงพฤติกรรมการหลุดล่อนของแผ่นเสริมกำลัง Täljsten Björn [14] ได้เสนอสมการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนและความเค้นดัดงากที่บริเวณชั้นของวัสดุเชื่อมประสานในคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ภายใต้การทดสอบแรงกระทำแบบดัด โดยใช้ทฤษฎีความยืดหยุ่นเชิงเส้น พบว่าระดับความเค้นเฉือนและความเค้นดัดงากที่ปลายแผ่น FRP ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่น FRP หรือการลดปริมาณหรือความหนาของชั้นวัสดุเชื่อมประสาน จะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดัดงากมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดการหลุดล่อนออกของแผ่น FRP

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่นเส้นใยเสริมกำลังโพลีเมอร์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของคาน คสล. ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเส้นใยแก้วเสริมกำลังโพลีเมอร์ หรือ แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforcement polymer ; GFRP) ที่เชื่อมติดกับคานทดสอบด้วยกาวอีพ็อกซี และติดตั้งวัสดุเชิงกล (Mechanical Fasteners ; MF) หรือ แผ่นเหล็กยึดน็อตที่หาได้ทั่วไป ในการป้องกันการหลุดล่อน โดยติดตั้งแผ่นเหล็กยึดน็อตที่ปลายแผ่นเสริมกำลัง GFRP เพื่อช่วยในการยึดและกระจายแรงทั่วหน้าตัดแผ่น เสริมกำลังเพื่อป้องกันการวิบัติที่เกิดจากการหลุดล่อน

2.วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1การออกแบบและสร้างคานทดสอบ

การทดสอบใช้คาน คสล. ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง คานทดสอบทั้งหมดหล่อจากคอนกรีตอัตราส่วนผสม 1:2:4 อัตราส่วนของน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.7 และค่าทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM-C78 ได้กำลังอัด 237 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คานทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าตัดคานกว้าง 15 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร และขนาดความยาวของคาน 2 เมตร มีช่วงความยาวสำหรับการทดสอบ 1.8 เมตร ภายในคานมีการเสริมเหล็ก DB12 ตามแนวยาวของคาน ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างอย่างละสองเส้น มีการใส่เหล็กปลอก RB6 ที่ทุกระยะ 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 คานทดสอบทุกตัวจะมีการติดตั้งเครื่องมือเกจวัดความเครียด (strain gauge) บริเวณกึ่งกลางเหล็กเสริมตามแนวยาวสองตัวด้านล่าง โดยคานทดสอบได้แก่ คานควบคุมหรือ คานทดสอบ CB จำนวน 1 คาน คานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP จำนวน 3 ชั้น หรือคานทดสอบ EB-3 จำนวน 1 คาน แผ่น GFRP มีขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร หนา 0.75 มิลลิเมตร และมีความยาว 1.54 เมตร ติดตั้งเกจความเครียดสองตัวบนผิวของแผ่น GFRP และคานที่ได้รับการป้องกันการหลุดล่อน หรือคานทดสอบ IEB-3 จำนวน 1 คาน เป็นคานทดสอบที่เสริมกำลังแบบเดียวกันกับคานทดสอบ EB-3 และติดตั้งด้วยวัสดุยึดเชิงกล (Mechanical Fasteners) หรือ MF ในการป้องกันการหลุดล่อน ซึ่งแสดงรายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบและคุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 (ก) หน้าตัดของคานทดสอบ (ข) ด้านข้างของคานทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดคานทดสอบ

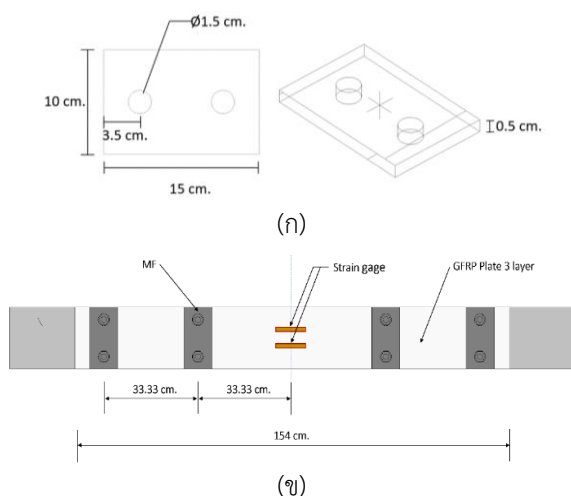
Beam	Span Length (cm.)	Width (cm.)	Height (cm.)	Strengthening type	Prevention
CB	180	15	20	-	-
EB-3	180	15	20	GFRP Plate	-
IEB-3	180	15	20	GFRP Plate	MF

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

Material	Elastic modulus (ksc)	Compressive Strength (ksc)	Yield Strength (ksc)
GFRP	613061	-	-
Concrete	232461	237	-
Steel	2019530	-	5046

2.2 การติดตั้งวัสดุป้องกันการหลุดล่อน หรือ MF

เริ่มต้นขั้นตอนด้วยการขัดผิวและทำความสะอาดแผ่น GFRP จากนั้นติดตั้งแผ่นเหล็ก MF ดังรูปที่ 2(ก) ลงไปตามตำแหน่งที่กำหนดตามรูปที่ 2(ข) ทำการเจาะรูด้วยสว่านลึก 7 เซนติเมตร ลงไปบริเวณปลายด้านข้างของแผ่นเพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างจุดอ่อนให้กับแผ่นเสริมกำลังจากการเจาะรูบริเวณตรงกลาง จากนั้นนำแผ่นเหล็ก MF ออกก่อน เพื่อทำความสะอาดรูเจาะด้วยเครื่องเป่าลม ทำการหยอดอีพ็อกซีเสียบเหล็กลงในรูพร้อมทั้งใส่แท่งเหล็กเกลียวความยาว 10 เซนติเมตร หลังจากทีอีพ็อกซีเสียบเหล็กแข็งตัวจึงติดตั้งแผ่นเหล็ก MF กลับตำแหน่งเดิมโดยการทาอีพ็อกซีเสียบเหล็กบริเวณใต้แผ่น จากนั้นทำการใส่แหวนรองยึดนอตและแผ่นวัสดุเข้ากับคานให้แน่นดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 (ก) รายละเอียดของวัสดุยึดเชิง และ (ข) ระยะการติดตั้งของตัวปรับแก้



รูปที่ 3 คานเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP ที่ได้รับการติดตั้งตัวป้องกันการหลุดล่อน หรือ คานทดสอบ IEB-3

2.3 อุปกรณ์การทดสอบและการเตรียมทดสอบ

คานทดสอบทั้งหมดจะผ่านการทดสอบโดยเครื่องกดไฮดรอลิกโดยการถ่ายน้ำหนักลงบนคานทดสอบที่วางอยู่บนฐานรองรับทั้งสองข้าง กดน้ำหนักบรรทุกลงจุดกึ่งกลาง (Three point load) ใช้เกจวัดแรง (Load Cell) ที่สามารถรับน้ำหนัก 20 ตันติดตั้งไว้ระหว่างแท่นกดไฮดรอลิกในการเก็บค่ากำลังน้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบ และติดตั้งทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer) หรือ LVDT ไว้ 2 ตำแหน่งบริเวณด้านบนเหนือคานทดสอบทั้งด้านหน้าและหลังเพื่อเก็บค่าระยะการแอ่นตัวของคานทดสอบ โดยวิธีการทดสอบนำคานทดสอบวางบนฐานรองรับทั้งสองข้าง ทำการทาสีและขีดเส้นตารางขนาด 5x5 เซนติเมตร เพื่อให้่ายต่อการสังเกตรอยแตกร้าวของคานขณะทดสอบ ต่อสายอุปกรณ์เครื่องมือวัดทั้งหมดเข้าอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) สุดท้ายทำการวางตำแหน่ง

กล้องถ่ายภาพและบันทึกวิดีโอการทดสอบก่อนสำหรับเริ่มการทดสอบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างคานสำหรับการทดสอบ

2.4 วิธีดำเนินการทดสอบ

เริ่มทำการกดน้ำหนักบนคานด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกผ่านเกจวัดแรง โดยการทดสอบจะควบคุมจากระยะการแอ่นตัว (Displacement Controlled Test Scheme) ของคานที่ทุก 1 มิลลิเมตร จากนั้นทำการผ่อนแรงกด และเริ่มหารอยแตกร้าวของคาน ทำการขีดเส้นข้างรอยแตกร้าวด้วยปากกา เพื่อถ่ายรูปและบันทึกข้อมูลก่อนจะทำการเพิ่มกำลังน้ำหนักบรรทุกในการทดสอบขั้นถัดไป ทำวนซ้ำในลักษณะเดียวกันไปจนกว่าคานทดสอบจะเกิดการวิบัติหรือแผ่น GFRP เกิดการหลุดล่อนออกก่อน

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 การวิบัติของตัวอย่างคานทดสอบ

รูปที่ 5(ข) ตัวอย่างคานทดสอบ EB-3 ในช่วงการเริ่มทดสอบมีลักษณะการเกิดรอยร้าวเช่นเดียวกับคานทดสอบ CB แต่มีขนาดรอยร้าวที่เล็กกว่าในการกดน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่เท่ากัน จนกระทั่งถึงช่วงที่น้ำหนักบรรทุกเข้าใกล้จุดคลาก (Yield point) ของเหล็กเสริมภายในคานทดสอบแผ่น GFRP นั้นเริ่มมีการหลุดล่อนจากออกจากปลายคานเข้าสู่กึ่งกลางคานทดสอบเป็นลักษณะการหลุดล่อนแบบมีทิศทางจากปลายแผ่นสู่กลางแผ่น (Plate-end debonding) และคานเกิดการวิบัติจากแรงดัด ในรูปที่ 5(ค) คานทดสอบคาน IEB-3 เริ่มเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่มากขึ้นและลากขึ้นไปบริเวณพื้นที่รับแรงอัดของคานทดสอบ ในช่วงน้ำหนักบรรทุกวิบัติของคานทดสอบ IEB-3 คานทดสอบนี้ไม่เกิดการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP จนกระทั่งคานทดสอบวิบัติจากแรงเฉือนเกิดรอยแตก

ขนาดใหญ่ลากตัดบริเวณวัสดุป้องกัน MF ทำให้เกิดหลุดล่อนบริเวณปลายคานด้านหนึ่ง ซึ่งคานทดสอบ IEB-3 ที่ติดตั้งวัสดุป้องกัน MF สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวิบัติได้



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของคานทดสอบทั้งหมด

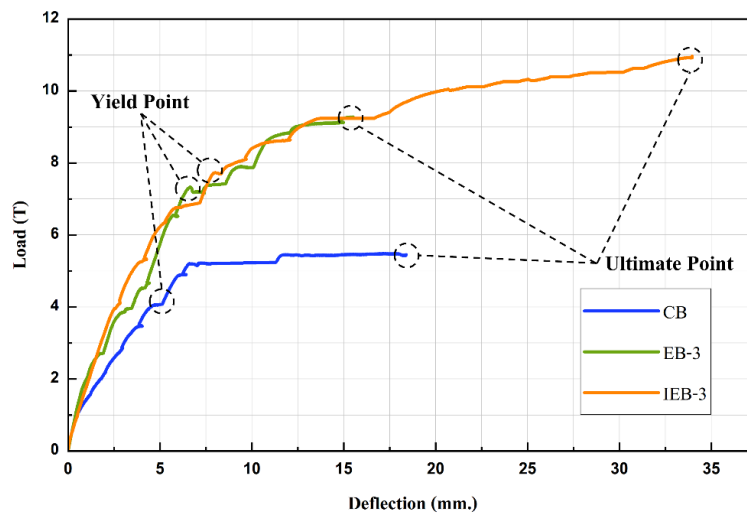
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบรรทุกและระยะการแอ่นตัวของคานทดสอบ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังน้ำหนักบรรทุก (Load) ของคานทดสอบและค่าการแอ่นตัวที่ช่วงกึ่งกลางคาน ของคานทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกำลังน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเสริมกำลังด้วยแผ่น GFRP รวมถึงค่าการแอ่นตัวที่สูงขึ้นตามไปด้วย คานทดสอบ CB และ EB-3 ในช่วงแรกของการทดสอบคานทดสอบ ทั้งสองนั้นสามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกได้ดี ช่วงจุดคลากของเหล็กเสริมภายในคานทดสอบ คานทดสอบ EB-3 นั้นยังสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับคานทดสอบ CB ที่อัตราการรับกำลังเริ่มคงที่ จนถึงช่วงการวิบัติ คานทดสอบ EB-3 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อยู่ที่ 9.29 ตัน มีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 15.49 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าคานทดสอบ CB ในช่วงการวิบัติถึง 1.70 เท่า แต่คานทดสอบ EB-3 มีค่าการแอ่นตัวที่ต่ำกว่า คานทดสอบ EB-3 ยังมีแนวโน้มจะรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าขึ้นแต่คานเกิดการวิบัติเนื่องมาจากการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP ก่อนที่คานทดสอบจะรับกำลังน้ำหนักบรรทุกได้เต็มประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับคานทดสอบ IEB-3 ที่ได้รับการติดตั้งวัสดุป้องกัน MF สามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกและมีค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 7 ในช่วงกำลังน้ำหนักบรรทุกวิบัติของคานทดสอบ EB-3 คานทดสอบ IEB-3 ยังสามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้ จนกระทั่งถึงช่วง

การวิบัติของคานทดสอบ IEB-3 คานทดสอบสามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกได้ถึง 11.02 ตัน คิดเป็น 2.01 เท่าของคานทดสอบ CB และมีค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มเป็น 33.95 มิลลิเมตร คิดเป็น 1.85 เท่าของคานทดสอบ CB ซึ่งก่อนคานจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเสียก่อนซึ่งยังมีแนวโน้มที่คานทดสอบจะรับน้ำหนักได้อีกมากเนื่องจากแผ่น GFRP นั้นยังไม่เกิดจากฉีกขาด สรุปผลการทดสอบกำลังน้ำหนักบรรทุก และระยะ

การแอ่นตัวดังตารางที่ 3 และเพื่อให้เห็นประสิทธิภาพในการต้านกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานทดสอบจึงมีการแปลงกำลังน้ำหนักบรรทุกเป็นกำลังรับโมเมนต์ดัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$M = \frac{PL}{4} \quad (1)$$



รูปที่ 6 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบกำลังน้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบ EB-3 และ IEB-3

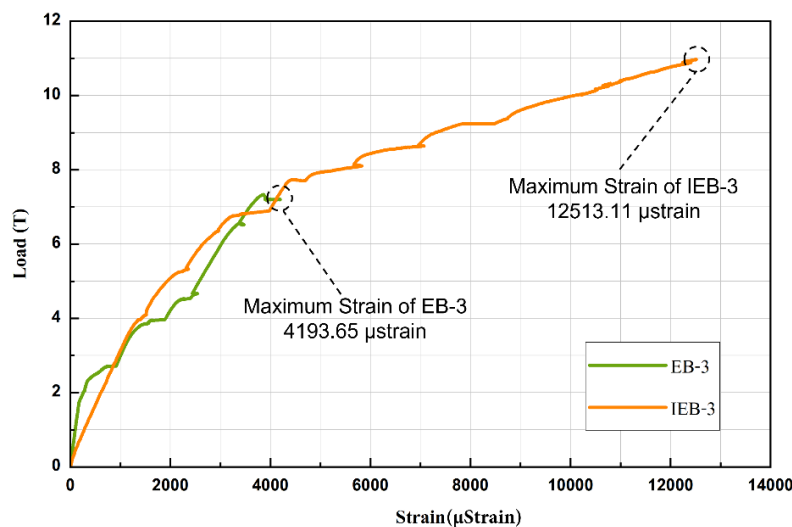
ตารางที่ 3 โมเมนต์น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

Beam	Yielding point		Ultimate point	
	Moment (T-m)	Deflection (mm)	Moment (T-m)	Deflection (mm)
CB	1.83	4.93	2.46	18.38
EB-3	3.30	6.37	4.18	15.49
IEB-3	3.49	8.68	4.96	33.95

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ผิวของแผ่น GFRP ก่อนและการติดตั้ง MF

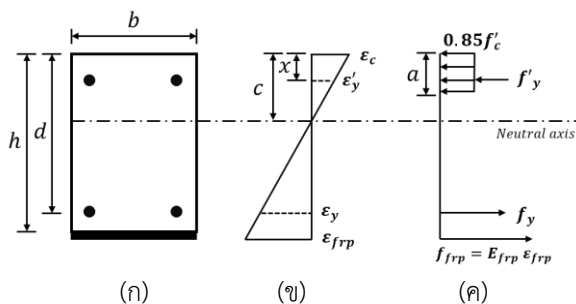
จากการทดสอบ ทำให้เราได้ทราบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่น GFRP จากเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้ แสดงออกมาเป็นเส้นความสัมพันธ์ของกำลังน้ำหนักบรรทุก (Load) และความเครียด (Strain) ดังรูปที่ 8 จากการทดสอบเปรียบเทียบคานทดสอบ EB-3 ที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกและคานทดสอบ IEB-3 ที่ได้รับการป้องกันการหลุดล่อนนั้น

แสดงให้เห็นว่าคานทดสอบ IEB-3 ที่ได้รับการป้องกันการหลุดล่อนนั้นทำให้แผ่น GFRP รับกำลังน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น และมีความเครียดที่เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย โดยคานทดสอบ EB-3 เกิดความเครียดสูงสุดที่บริเวณผิวของแผ่น GFRP คิดเป็นเพียง 22.37% ของความเครียดสูงสุดของแผ่น GFRP แต่คานทดสอบ IEB-3 สามารถพัฒนาความเครียดสูงสุดที่ผิวของแผ่น GFRP ได้ถึง 66.75% แสดงให้เห็นว่าการติดตั้ง MF ช่วยให้แผ่น GFRP ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 8 เส้นความสัมพันธ์ความเครียดของแผ่น GFRP ที่ได้รับและไม่ได้รับการป้องกันการหลุดล่อน

4. แบบจำลองเชิงทฤษฎี



รูปที่ 9 (ก) หน้าตัดคานทดสอบ, (ข) ความเครียด, (ค) ความเค้น

จากรูปที่ 9(ก) แสดงให้เห็นถึงหน้าตัดของคานที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น GFRP (ข) แสดงให้เห็นถึงความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าคานทดสอบ และ (ค) แสดงความเค้นและแรงภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งความเค้นบนหน้า

ตัดคานนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้กระจายหน่วยแรงความเค้น

การออกแบบคานเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น GFRP นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงความเครียดก่อนการหลุดล่อน (ϵ_{fd}) และความเครียดประสิทธิผล (ϵ_{fe}) ที่เกิดบริเวณตัวแผ่น GFRP เพื่อป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP ก่อนเวลาอันควร และเพื่อการเสริมกำลังให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด จึงต้องมีการจำกัดความเครียดที่ยอมให้เกิดขึ้นในการออกแบบการเสริมกำลังตามสมการที่ 2,3,4 โดยค่าความเครียดที่ได้จากสมการ 3,4 นั้นให้นำค่าความเครียดที่ได้น้อยที่สุดนำมาใช้ในการออกแบบการเสริมกำลัง

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (h - kd)}{I_{cr} \cdot E_c} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n_f E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fe} = \left[\left(\varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \right) - \varepsilon_{bi} \right] \leq \varepsilon_{fd} \quad (4)$$

ดัดตัวอย่างคานทดสอบ EB-3 ที่จำเป็นต้องมีการคำนวณตามสมการดังกล่าวเพื่อให้สามารถเสริมกำลังได้อย่างเหมาะสมเต็มประสิทธิภาพและป้องกันการเกิดการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP ก่อนเวลาอันควร ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างคานทดสอบ IEB-3 ที่ได้รับการติดตั้ง MF เพื่อป้องกันการหลุดล่อนแล้วที่สามารถนำค่าความเครียดของเส้นใยที่ใช้ออกแบบในการคำนวณ

การคำนวณกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม (T_s) และแผ่น GFRP (T_{frp}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5,6 ตามลำดับ และการคำนวณกำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต (C_c) และเหล็กเสริมรับแรงอัด (C_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ 7,8 โดยที่ A_s, A'_s เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมสำหรับรับแรงดึงและแรงอัดตามลำดับ f_y, f'_y เป็นความเค้นรับแรงดึงและแรงอัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามลำดับ A_{frp}, f_{frp} เป็นพื้นที่หน้าตัดของแผ่น GFRP และความเค้นรับแรงดึงตามลำดับ และจะสามารถหาระยะแนวแกนสะเทิน (C) ได้

จากสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดคานทดสอบทั้งสมการที่ 9,10 และ 11 ตามลำดับ

$$T_s = A_s f_y \quad (5)$$

$$T_{frp} = A_{frp} f_{frp} \quad (6)$$

$$C_c = 0.85 f'_c ab \quad (7)$$

$$C_s = A'_s f'_y \quad (8)$$

$$C_s + C_c = T_s + T_{frp} \quad (9)$$

$$A_s f_y + A_{frp} f_{frp} = 0.85 f'_c ab + A'_s f'_y \quad (10)$$

$$c = \frac{A_s f_y + A_{frp} f_{frp} - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b} \quad (11)$$

หลังจากที่หาระยะแนวแกนสะเทินของทุกคานทดสอบแล้วจะสามารถคำนวณหา กำลังต้านโมเมนต์ดัดได้จากสมการที่ 12 เมื่อกำลังให้โมเมนต์ดัดที่ระยะแนวแกนสะเทินมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งแสดงผลการคำนวณและเปรียบเทียบกำลังโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 4

$$M_n = T_{frp}(h-c) + T_s(d-c) + C_s(c-x) + C_c(c) \quad (12)$$

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความสามารถโมเมนต์ดัดเชิงทฤษฎีและโมเมนต์ดัดจากการทดสอบ

Beam	Yielding Moment		Relative Error (%)	Ultimate Moment		Relative Error (%)
	Analytical	Experimental		Analytical	Experimental	
CB	2.05	1.83	12.02	2.45	2.46	0.41
EB-3	3.53	3.30	6.97	3.77	4.18	9.81
IEB-3	3.71	3.49	6.30	4.29	4.96	13.51

5.สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการป้องกันการเกิดการหลุดล่อนออก และการเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมกำลังของแผ่น GFRP ด้วย

วิธีการติดตั้งวัสดุป้องกัน MF ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณทางทฤษฎี ของคานทดสอบทั้งหมดสรุปได้ว่า

5.1คานทดสอบ IEB-3 นั้น สามารถป้องกันการหลุดล่อนออกของแผ่น GFRP จำนวน 3 ชั้นได้อย่างดี แต่เนื่องจากคาน

ทดสอบเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน ทำให้มีรอยแตกกว้างลากผ่านบริเวณติดตั้งวัสดุป้องกัน MF ทำให้เกิดการหลุดออกบางส่วน

5.2 คานทดสอบ IEB-3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างคานทดสอบและแผ่น GFRP ได้อย่างดี จากการทดสอบคานทดสอบ EB-3 นั้นเกิดความเครียดสูงสุดที่บริเวณผิวของแผ่น GFRP คิดเป็นเพียง 22.37% ของความเครียดสูงสุดของแผ่น GFRP แต่คานทดสอบ IEB-3 สามารถพัฒนาความเครียดสูงสุดที่ผิวของแผ่น GFRP ได้ถึง 66.75% แสดงให้เห็นว่าการติดตั้ง MF ช่วยให้แผ่น GFRP ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3 คานทดสอบ IEB-3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับกำลังโมเมนต์ดัดได้มากกว่าคานทดสอบ CB และคานทดสอบ EB-3 เป็น 2.01 และ 1.19 เท่าตามลำดับ โดยที่คานทดสอบ IEB-3 ยังไม่เกิดการฉีกขาดของแผ่น GFRP

5.4 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีพบว่ามีความใกล้เคียงมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคู่มือปฏิบัติ ACI Committee 440 นั้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณกับการติดตั้งแบบ MF ซึ่งสรุปผลการทดสอบทั้งหมดตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราการเพิ่มโมเมนต์ดัดและระยะการแอ่นตัวของคานทดสอบทั้งหมด

Beam	Ultimate capacity				Failure
	Bending Moment (T-m)	Bending Moment ratio	Deflection (mm)	Deflection ratio	
CB	2.46	1	18.38	1	F
EB-3	4.18	1.70	15.49	0.84	F+DB
IEB-3	4.96	2.01	33.95	1.85	S

Note; F = Flexural Failure; C = Compression Failure; DB = Debonding Failure; S = Shear Failure

6. ข้อเสนอแนะ

การติดตั้งวัสดุป้องกัน MF นั้นสามารถช่วยป้องกันการหลุดล่อนได้จริง แต่เนื่องจากคานทดสอบ IEB-3 เกิดวิบัติจากแรงเฉือนเกิดรอยแตกกว้างลากตัดผ่านบริเวณที่ติดตั้งวัสดุป้องกัน MF พอดีทำให้วัสดุป้องกันหลุดออก และเกิดการหลุดล่อนของแผ่น GFRP จึงควรเพิ่มขนาดความยาวของแท่งเหล็กเกลียวที่ใช้ในวัสดุป้องกัน MF

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2023-GRAD-24 จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lc Holloway and Mb Leeming, *Strengthening of reinforced concrete structures : using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*, Boca Raton, Florida Crc Press, 1999.
- [2] P. Fanning and O. Kelly, "Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates," vol. 5, no. 2, pp. 122-127, May 2001.
- [3] H.-C. Wu and C. D. Eamon, *Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP)*, Woodhead Publishing, 2017.
- [4] P. Mukhopadhyaya, N. Swamy, C. Fellow, and L. Lynsdale, "Optimizing Structural Response of Beams Strengthened with GFRP Plates," *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, no. 2, pp. 87-95, May 1998.

- [5] R. Kotynia, *FRP Composites for Flexural Strengthening of Concrete Structures Theory, Testing, Design*, 2019.
- [6] H. A. Rasheed, *Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP*, CRC Press, 2014.
- [7] Hota V.S. GangaRao, Narendra Taly, and P. V. Vijay, *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*, CRC Press, 2006.
- [8] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08), 2008.
- [9] L. Nguyen-Minh et al., “Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams,” *Engineering Structures*, vol. 166, pp. 1–15, Jul. 2018.
- [10] X. Y. Li and Z. G. Zhang, “Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with Carbon Fiber Sheets,” *Advanced Materials Research*, vol. 179–180, pp. 955–959, Jan. 2011.
- [11] C. W. Lim and Y. Huang, “Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures,” vol. 12, no. 3, pp. 266–273, Jun. 2008. beams using FRP U-jackets,” *Composite Structures*, vol. 176, pp. 883–897, Sep. 2017.
- [12] B. Fu, G. M. Chen, and J. G. Teng, “Mitigation of intermediate crack debonding in FRP-plated RC. beams using FRP U-jackets,” *Composite Structures*, vol. 176, pp. 883–897, Sep. 2017.
- [13] R. Jones, R. N. Swamy, and T. H. Ang, “Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates,” *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 4, no. 1, pp. 19–32, Feb. 1982.
- [14] Björn Täljsten, “Strengthening of Beams by Plate Bonding,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 206–212, Nov. 1997.