การศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP กับคอนกรีต และการรับแรงภายในของคานคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเหล็กเสริมและแท่ง GFRP

A Study of the Bond of GFRP Rods in Concrete and the Internal Forces of Concrete Beams Reinforced with Rebars and a GFRP Rod

วรากร อุ่นสมบัติ[1] และ ชูชัย สุจิวรกุล[2,*] และ ประวีณ ชมปรีดา[3]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2] สาขาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[3] บริษัท เค.ซี.เอส. แอนด์ แอสโซซิเอทส์ จำกัด
**Corresponding author; E-mail address: chuchai.suj@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer) กับคอนกรีต และพฤติกรรมการรับแรงภายในของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมและแท่ง GFRP ด้วยระบบการติดตั้งใกล้ผิว (Near-Surface-Mount System, NSM) ตัวอย่างทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 150 มิลลิเมตร โดยแท่ง GFRP จะถูกฝังในคอนกรีตที่ระยะฝังและระยะขอบจากผิวแตกต่างกัน โดยแท่ง GFRP จะถูกเชื่อมประสานด้วยอีพ็อกซี่ คานที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงภายในมีขนาดหน้าตัด 150x250 มิลลิเมตร ยาว 2000 มิลลิเมตร ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นและแท่ง GFRP และถูกทดสอบด้วยการดัดแบบ 4 จุด ผลการทดสอบได้พบว่า การกรีดร่องและการเชื่อมประสานแท่ง GFRP กับคอนกรีตด้วยอีพ็อกซี่สามารถช่วยให้กำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าการฝังแท่ง GFRP ลงในคอนกรีตโดยตรง การเพิ่มระยะฝังของแท่ง GFRP ในคอนกรีตส่งผลทำให้แรงถอนมีค่ามากขึ้น แต่กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าลดลง นอกจากนี้การเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีต(ระยะขอบ) ให้กับแท่ง GFRP ไม่ส่งผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวมากขึ้น การทดสอบแรงภายในของคานคอนกรีตพบว่า คานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ให้ค่าแรงดัดและสตีฟเนสหลังการแตกร้าวน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากแท่ง GFRP มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กเส้นอย่างมาก นอกจากนี้การเสริมกำลังคานด้วยแท่ง GFRP ให้ค่าแรงดัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับคานควบคุม แต่ไม่ได้เพิ่มสตีฟเนสของคานหลังการแตกร้าว

คำสำคัญ: การเสริมกำลัง, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, แท่ง GFRP, แรงยึดเหนี่ยว

Abstract

The objective of this research was to study the bond strength of GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer) rods embedded in concrete and to study the internal force behavior of concrete beams strengthened with rebars and a GFRP rod by using Near-Surface-Mount system (NSM). Concrete sample for bond strength test was a cubic size of 150 mm, whereby a GFRP rod was embedded in the concrete at different embedment lengths and edge distances from the concrete surface. The rebar or GFRP bar was bonded with epoxy inside the prepared grooves. The beams used to study the internal force behavior had a cross section of 150x250 mm and a length of 2000 mm. Reinforced concrete beam samples were strengthened with a rebar and a GFRP rod, and they were tested under four-points bending. Test results had showed that bonding of a GFRP rod to concrete groove with epoxy could provide better bond strength than embedding GFRP rods directly into concrete. An increase in embedded length of the GFRP rod into the concrete resulted in a greater pullout load, but the bond strength would decrease. In addition, increasing the concrete cover (edge distance) of the GFRP rod did not increase the bond strength. The investigation of the internal forces in concrete beams revealed that concrete beams reinforced with GFRP rods showed lesser bending force and stiffness after crack than those reinforced with rebars, because GFRP rod has a lower modulus of elasticity than rebar. Moreover, strengthening concrete beams with GFRP rod would provide greater bending force compared to the control beam, but they did not increase the stiffness of the beams after crack.

Keywords: Strengthening, Reinforced Concrete Beam, GFRP Rod, Bond

1. คำนำ

ปัจจุบันวัสดุในการก่อสร้างมีการพัฒนาไปอย่างมาก รวมถึงวัสดุที่นำมาใช้ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังให้กับโครงสร้างอาคาร โดยที่ผ่านมาได้พบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ การเสื่อมสภาพของวัสดุตามอายุการใช้งานหรือการเกิดสนิมของเหล็กเสริม การใช้น้ำหนักบรรทุกเกินกว่าที่ออกแบบไว้ การเกิดความเสียหายจากภัยพิบัติตามธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างอาคารได้ ดังนั้นการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งานจึงมีความจำเป็น

การเสริมกำลังให้กับโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก แต่ก็มีปัญหาในเรื่องเหล็กเป็นสนิม น้ำหนักของโครงสร้างเพิ่มขึ้น และการติดตั้งที่ยุ่งยาก การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon-Fiber Reinforced Polymer, CFRP) ได้รับความนิยมในการนำมาเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเนื่องจากติดตั้งได้

ง่ายและใช้พื้นที่น้อย แต่ต้องใช้ความชำนาญในการติดตั้งเพื่อให้แผ่น CFRP ไม่เกิดการหลุดล่อน เช่น ต้องตรวจสอบกำลังดึงและความชื้นที่ผิวคอนกรีต [1] การเสริมกำลังด้วยแท่งคาร์บอนไฟเบอร์บนพื้นผิว (NSM : Near-Surface-Mount) เป็นการเสริมกำลังอีกรูปแบบที่ทำให้โครงสร้างสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น แต่ด้วยสาเหตุที่แท่งคาร์บอนไฟเบอร์ยังมีราคาที่สูง จึงยังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานมากนัก การเสริมกำลังด้วยแท่งเส้นใยแก้ว (GFRP) ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ใกล้เคียงกับเหล็ก ทนต่อกรดและด่างได้ดี ไม่เป็นสนิม และมีราคาที่ถูกกว่าแท่งคาร์บอนไฟเบอร์ จึงอาจเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างเพื่อแก้ปัญหาเหล็กเสริมเป็นสนิม [2]

ในการออกแบบของโครงสร้างอาคารที่ใช้แท่ง GFRP ในการเสริมแรงนั้น ได้มีการทำการวิจัยและทดสอบจำนวนมาก และได้มีการพัฒนาเป็นคู่มือเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลัง นั้นคือ คู่มือการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมแรงด้วยแท่งโพลีเมอร์เสริมไฟเบอร์ (Fiber-Reinforced Polymer; FRP) ของ ACI-440.1R-15 [1]

ที่ผ่านมา Ding และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาถึงการยึดเหนี่ยวระหว่างแท่ง GFRP กับคอนกรีต โดยตัวอย่างทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 150 มม. โดยแท่ง GFRP จะถูกถอนออกที่ระยะฝังแตกต่างกัน จากการทดลองได้พบว่าการใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีนลงในคอนกรีตสามารถเพิ่มความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP กับคอนกรีต Capozucca [4] ได้ทำการศึกษาเรื่องการเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแท่ง GFRP ที่ติดตั้งบนพื้นผิวของคอนกรีต โดยเตรียมคานตัวอย่าง 2 ชุดเพื่อเปรียบเทียบกัน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP กับคอนกรีตด้วย พบว่าคานที่เสริมกำลังด้วยแท่ง NSM GFRP จะสามารถรับน้ำหนักจนกระทั่งเกิดการวิบัติโดยไม่สูญเสียการยึดติดของแท่ง GFRP และเกิดการแยกส่วนของคอนกรีต Habeeb และ Ashour [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและ GFRP โดยเตรียมคานตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 6 ตัว แบ่งเป็น 2 ชุด โดยคานชุดที่ 1 มีจำนวน 4 ตัวมีความยาวอยู่ที่ 5,500 มม. มีความกว้าง 200 มม. และความลึก 300 มม. คานถูกรองรับอย่างต่อเนื่องมีช่วงยาวช่วงละ 2,750 มม. คานชุดที่ 2 มีจำนวน 2 ตัวอย่างมีความยาวอยู่ที่ 2,750 มม. ความกว้าง 200 มม. และความลึก 300 มม. การทดสอบได้รับการออกแบบมาเพื่อให้เกิดความวิบัติ 2 แบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ การขาดของแท่ง GFRP และการบดอัดคอนกรีต แบบแรกทำได้โดยใช้อัตราส่วนการเสริมแรงที่น้อยกว่าอัตราส่วนการเสริมแรงที่สมดุล (ρ_b) ตามที่กำหนดไว้ในแนวทาง ACI 440.1R-06 [2] และแบบหลังโดยใช้อัตราส่วนการเสริมแรงที่มากกว่า (ρ_b) คานตัวอย่างชุดที่ 1 ถูกทำการทดสอบด้วยวิธี Four-point bending test และคานชุดที่ 2 ถูกทำการทดสอบโดยวิธี three-point bending test ผลการศึกษาพบว่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแท่ง GFRP มีค่าต่ำ จึงทำให้คานคอนกรีตสามารถเกิดรอยแตกได้เร็วกว่าและกว้างกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP อย่างต่อเนื่องไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการกระจายโหลดที่โดดเด่น

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาถึงแรงยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP โดยมีน้ำยาอีพ็อกซี่เป็นวัสดุเชื่อมประสานคอนกรีตกับแท่ง GFRP และศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงภายในที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเหล็กเสริมและแท่ง GFRP พร้อมศึกษารูปแบบการวิบัติต่าง ๆ ที่ได้รับจากการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้แก่อาคารต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างแท่ง GFRP กับคอนกรีต ภายใต้การเชื่อมประสานด้วยน้ำยาอีพ็อกซี่

2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงภายในของคานคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเหล็กเสริมและแท่ง GFRP

3. กระบวนการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้การวิจัย

3.1.1 คอนกรีตผสมเสร็จ กำลังอัดประลัยออกแบบเท่ากับ 24 MPa ตามมาตรฐาน มอก. 213-2560 [6]

3.1.2 เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ชั้นคุณภาพ SR24 ตามมาตรฐาน มอก. 20-2543 [7]

3.1.3 เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน มอก. 24-2559 [8]

3.1.4 แท่งเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ผิวตามความยาวของเส้นมีลักษณะเป็นบั้งหรือปล้องหรือครีบเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มม. ที่ใช้ทดสอบมี 2 สีได้แก่ สีเขียว (G) และสีฟ้า (B)

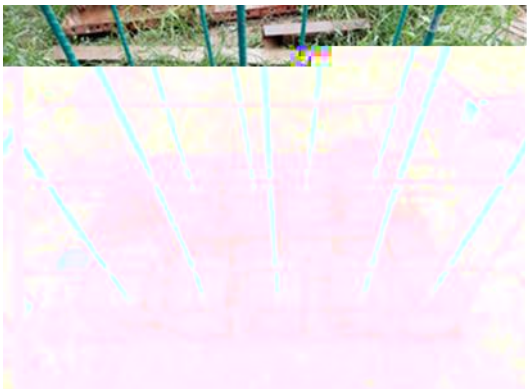
3.1.5 น้ำยาอีพ็อกซี (Epoxy) Sikadur®-31 CF Normal ผลิตภัณฑ์ของ บริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.2.1 สำหรับการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว ตัวอย่างคอนกรีตมีขนาดลูกบาศก์เท่ากับ 0.15 ม. โดยทำการฝังแท่ง GFRP ที่ระยะฝังและระยะขอบจากผิวคอนกรีตที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบมี 2 แบบคือ ฝังแท่ง GFRP หล่อในคอนกรีต และกรีดร่องแล้วฝังยึดแท่ง GFRP ด้วยอีพ็อกซี่ที่ขอบอีกด้านหนึ่งของลูกบาศก์ รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 1 ถึง รูปที่ 3

ตารางที่ 1 รายละเอียดการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

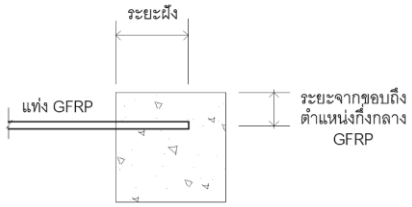
ตัวอย่าง	ระยะฝัง (mm)	ระยะจากขอบถึงตำแหน่งกึ่งกลาง GFRP (mm)	หมายเหตุ
G10ECD15	150	75	ฝังหล่อในคอนกรีต
G10ECD10	100	75	
G10ECD05	50	75	
G10E05D15	150	50	ฝังหล่อในคอนกรีต
G10E05D10	100	50	
G10E05D05	50	50	
G10E03D15	150	30	
G10E03D10	100	30	
G10E03D05	50	30	
G10E05S15	150	50	กรีดร่องแล้วยึดด้วยอีพ็อกซี่
G10E05S10	100	50	
G10E05S05	50	50	
G10E03S15	150	35	
G10E03S10	100	35	
G10E03S05	50	35	



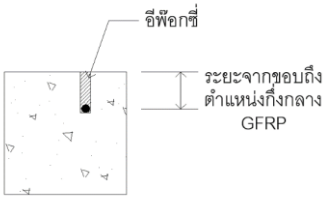
รูปที่ 1 แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต มีขนาดทรงลูกบาศก์ 150 มม.



รูปที่ 2 การหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบแรงยึดเหนี่ยวทรงลูกบาศก์



(ก) การฝังแท่ง GFRP สำหรับทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว (ด้านข้าง)



(ข) การฝังแท่ง GFRP สำหรับทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว (รูปตัด)



(ค) การกรีดร่องและติดตั้ง GFRP ด้วยน้ำยาประสานอีพ็อกซี่

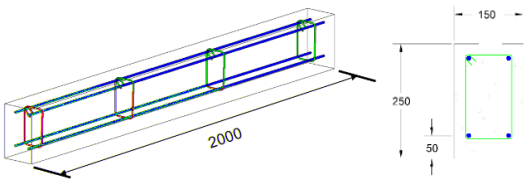
รูปที่ 3 การติดตั้งแท่ง GFRP ในตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำยาประสานอีพ็อกซี่

3.2.2 สำหรับการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังใช้ตัวอย่างคานขนาดหน้าตัด 150x250 มม. ยาว 2000 มม. รายละเอียดของตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างได้แสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 9 โดยคานมีทั้งหมด 7 ตัวอย่าง รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่าง	วัสดุเสริมแนวยาว (บนและล่าง)	เหล็กปลอก	วัสดุเสริมกำลัง
B1 Control	4-DB10	RB6@150	-
B2 G4	4-GFRP10	RB6@150	-
B3 S4+G1 (กรีดร่อง)	4-DB10	RB6@150	1-GFRP10
B4 S4+G1 (ติดตั้งก่อนเทคอนกรีต)	4-DB10	RB6@150	1-GFRP10
B5 S4+S1 (กรีดร่อง)	4-DB10	RB6@150	1-DB10
B6 S4+S1 (กรีดร่อง)	4-DB10	RB6@75	1-GFRP10
B7 S4+G1 (กรีดร่อง)	4-DB10	RB6@75	1-DB10

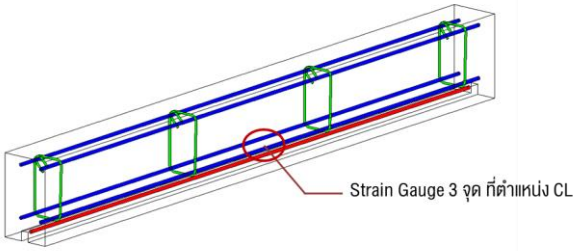
- ตัวอย่างคานควบคุมจะเป็นคานคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อย ขนาด 10 mm จำนวน 1 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมด้วยแท่ง GFRP ขนาด 10 mm จำนวน 1 ตัวอย่าง
- ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น จำนวน 2 ตัวอย่าง คือคาน B5S4+S1 และ B7S4+G1
- คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP จำนวน 3 ตัวอย่าง คือคาน B3S4+G1, B4S4+G1 และ B6S4+S1 โดยคาน B3 จะทำมาทำการเสริมกำลังคานภายหลังโดยการกรีดร่อง แล้วติดตั้ง GFRP ด้วยอีพ็อกซี่ ส่วนคาน B4 จะทำการติดตั้ง GRFP ไปพร้อมกันกับเหล็กเส้นและเทคอนกรีต



รูปที่ 4 รายละเอียดคานตัวอย่าง



รูปที่ 5 แบบที่ใช้หล่อคานตัวอย่าง ขนาด 150x250x2000 มม.



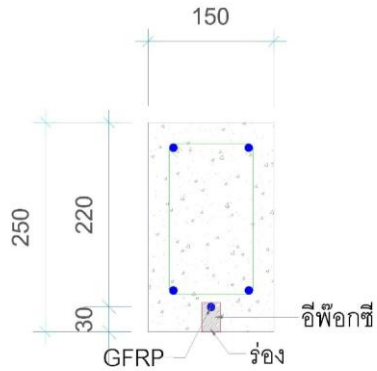
รูปที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดของคานตัวอย่าง



รูปที่ 7 การติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่ผิวเหล็ก



รูปที่ 8 การหล่อคานคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ขนาด 150x250x2000 มม.



(ก) การเสริมกำลัง GFRP หรือเหล็กเส้น โดยการกรีดร่อง



(ข) ภาพแสดงการติดตั้ง GFRP ลงในรองด้วยอีพ๊อกซี่

รูปที่ 9 การติดตั้งแท่ง GFRP เสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยอีพ๊อกซี่

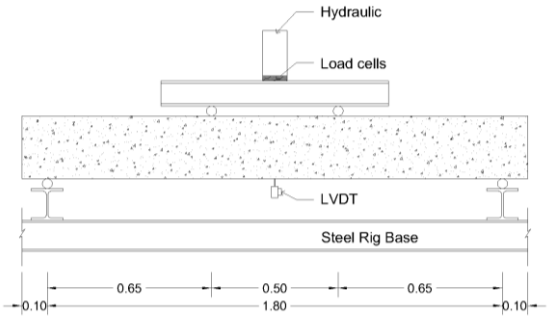
3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยว จะใช้เครื่อง Universal testing machine ดังแสดงในด 10 กาที่ทดสอบจฐ3ช้กาถอน (Pull-out test) โดยทำกา ยึดฐานคอนกรีตเข้าัน กับเคช องทดสอบใช้ะGrip ในกา ทำกาดึง ถอนแท่ง GFRP ออกจฒตัวอย่ฒ คอนกรีต อ่ฒค่ฒแป ถอนสูงสุดที่ได้รับจากเครื่องทดสอบ



รูปที่ 10 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยเครื่อง Universal testing machine

3.3.2 การทดสอบการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้วิธีการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (Four-point bending test) ระยะห่างของฐานรองรับเท่ากับ 1.80 ม. ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม และแท่ง GFRP นอกจากนี้ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ไว้ด้านล่างตรงกึ่งกลางคานเพื่อวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักทดสอบแรงดัดจะกระทำผ่านกระบอก ไฮดรอลิกและถูกวัดค่าด้วยเกจวัดแรง (Load cell) เมื่อคานเริ่มมีการแตกร้าว จะทำลากเส้นบันทึกตามรอยแตกร้าวบนคาน ทำการทดสอบจนกระทั่งคานวิบัติ



รูปที่ 11 การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (Four-point bending test)

4. ผลการวิจัย

4.1 กำลังดึงของเหล็กเสริมและ GFRP

ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย DB10 และ แท่ง GFRP ที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบกำลังดึงของเหล็กเสริมและแท่ง GFRP

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึง (MPa)	กำลังคลาก (MPa)
Rebar	495	423
GFRP (G)-B2	533	-
GFRP (B)-Bond	464	-

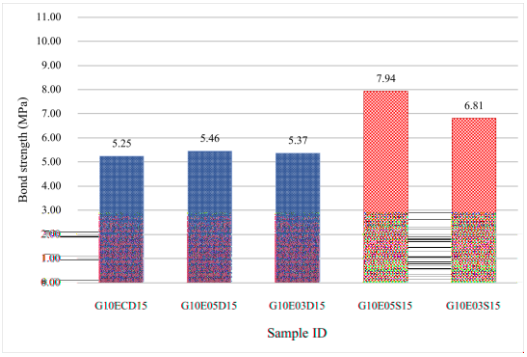
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็ก DB10 และ แท่ง GFRP ทำให้สามารถสรุปได้ว่า กำลังรับแรงดึงของเหล็ก DB10 สามารถรับแรงได้ตามมาตรฐาน ที่สามารถรับแรงดึงคลากได้มากกว่าที่ 393 MPa (SD40) ในขณะที่แท่ง GFRP รับแรงดึงได้น้อยกว่าค่าที่ระบุจากบริษัทผู้ผลิต (ประมาณ 600 MPa) ทั้งนี้อาจเกิดจากผลของอุปกรณ์จับยึดแท่ง GFRP ที่เตรียมไม่ดี ซึ่งก่อให้เกิดหน่วยแรงที่ไม่พึงประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การวิบัติของแท่ง GFRP

ผลการทดสอบตัวอย่างที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะฝังเท่ากันเท่ากับ 150 มม. ได้แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งพบว่า การเพิ่มระยะขอบของคอนกรีตเพื่อหุ้มแท่ง GFRP ไม่ได้ส่งผลทำให้แรงถอนสูงสุด หรือกำลังยึดเหนี่ยวซึ่งคำนวณได้จากแรงถอนสูงสุดหารด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่ง GFRP กับคอนกรีต มีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้รับมีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างอาจจะเป็นแบบผ่าซีก และแตกกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 14

รูปที่ 15 และ 17 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะฝัง 100 มม. และ 50 มม. ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่า การเพิ่มระยะขอบของคอนกรีตเพื่อหุ้มแท่ง GFRP ไม่ได้ส่งผลทำให้แรงถอนหรือกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างอาจจะเกิดการวิบัติแบบหลุดออก และแตกกระจายบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 18



รูปที่ 13 เปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 150 มม. ในเนื้อคอนกรีตและการฝังโดยเชื่อมประสานด้วยอีพ็อกซี่ที่ระยะขอบต่าง ๆ

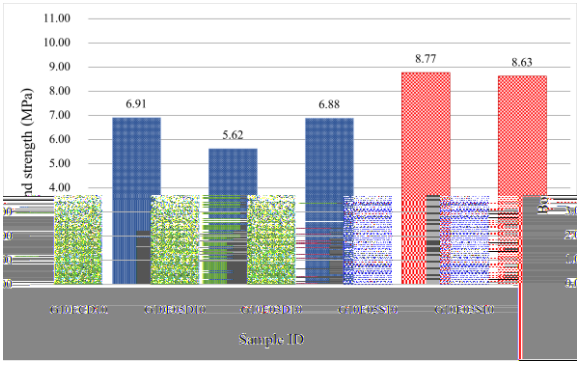


(ก) วิบัติแบบผ่าซีก



(ข) วิบัติแบบแตกกระจาย

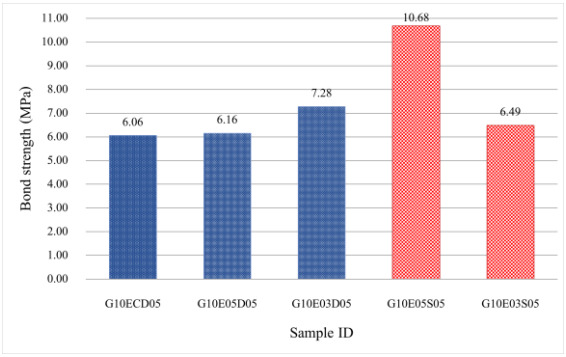
รูปที่ 14 การวิบัติของก้อนตัวอย่างกับแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 150 มม.



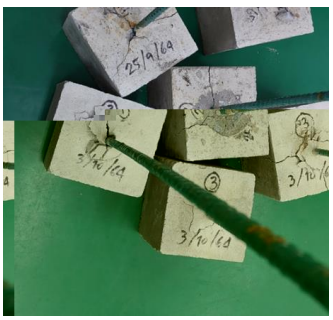
รูปที่ 15 เปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 100 มม. ในเนื้อคอนกรีตและการฝังโดยการเชื่อมประสานด้วยอีพ็อกซี่ที่ระยะขอบต่าง ๆ



รูปที่ 16 การวิบัติแบบหลุดออกของตัวอย่างกับแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 100 มม.



รูปที่ 17 เปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 50 มม. ในเนื้อคอนกรีตและเชื่อมประสานด้วยน้ำยาอีพ็อกซี่ที่ระยะขอบต่าง ๆ



(ก) วิบัติแบบชะลูด



(ข) วิบัติแบบแตกกระจายบางส่วน

รูปที่ 18 การวิบัติของก้อนตัวอย่างกับแท่ง GFRP ที่ระยะฝัง 50 มม.

ผลการทดสอบหากำลังยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP ที่ฝังในคอนกรีตยังสังเกตได้ว่า การกรีดร่องและทำการเชื่อมประสานแท่ง GFRP กับคอนกรีตด้วยอีพ็อกซี่สามารถรับกำลังยึดเหนี่ยวได้มากกว่าการฝังแท่ง GFRP ลงในคอนกรีตโดยตรง ดังสังเกตได้ในตารางที่ 4 นอกจากนี้ การเพิ่มระยะฝังของแท่ง GFRP ในคอนกรีตจะส่งผลทำให้แรงถอนสูงสุดมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าหากพิจารณาในเทอมของกำลังยึดเหนี่ยวจะสังเกตเห็นว่ากำลังยึดเหนี่ยวจะมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อระยะฝังของแท่ง GFRP ในคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ดังสังเกตได้ในตารางที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าสูงสุดที่ปลายบน (tip) และมีค่าลดลงตามระยะฝัง

ตารางที่ 4 ผลทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

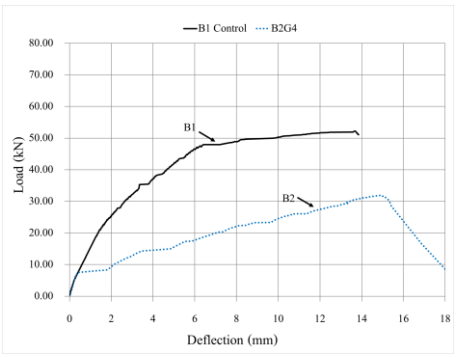
ตัวอย่าง	ระยะฝัง (mm)	เงื่อนไขการฝังยึด	กำลังยึดเหนี่ยว (MPa)
G10ECD15	150	ฝังหล่อในคอนกรีตและฝังกลางตัวอย่าง	5.25
G10ECD10	100		6.91
G10ECD05	50		6.06
G10E05D15	150	2621.15 ฝังหล่อในคอนกรีตและระยะขอบ 50 mm	5.46
G10E05D10	100		5.62
G10E05D05	50		6.16
G10E03D15	150	ฝังหล่อในคอนกรีตและระยะขอบ 30 mm	5.37
G10E03D10	100		6.88
G10E03D05	50		7.28
G10E05S15	150	กรีดร่องแล้วยึดด้วยอีพ็อกซี่และระยะขอบ 50 mm	7.94
G10E05S10	100		8.77
G10E05S05	50		10.68
G10E03S15	150	กรีดร่องแล้วยึดด้วยอีพ็อกซี่และระยะขอบ 30 mm	6.81
G10E03S10	100		8.63
G10E03S05	50		6.49

4.2 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานตัวอย่าง

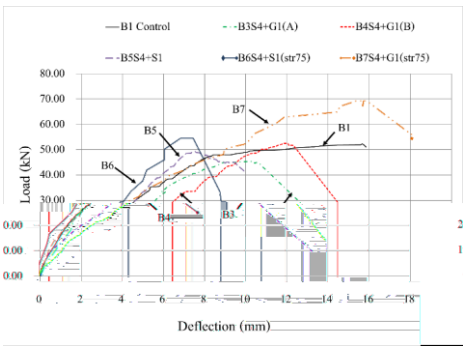
จากรูปที่ 19 พบว่าคาน B1 ที่เสริมแรงด้วยเหล็ก DB10 สามารถรับแรงดัดได้ถึง 50 kN แต่ยังไม่เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน แต่คาน B2 ที่เสริมแรงด้วยแท่งใยแก้ว GFRP มีค่าสตีฟเนสหลังการแตกของคอนกรีตน้อยมาก ซึ่งเป็นผลจากการที่แท่ง GFRP มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กเส้นประมาณ 4-6 เท่า โดยจะสังเกตเห็นว่าการโก่งตัวเกิดขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของแรงดัด คานนี้จะรับแรงดัดได้สูงสุดเพียง 30 kN ก็เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน ในที่นี้ ค่าสตีฟเนสหลังการแตกของคานคอนกรีตหาได้จากความลาดชัน (slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัวภายหลังจากที่คานตัวอย่างได้เกิดรอยแตกแรก

จากรูปที่ 20 พบว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP B3 สามารถรับแรงดัดได้ 45 kN และคาน B4 สามารถรับแรงดัดได้ 52 kN แต่คาน B7 ที่เพิ่มเหล็กปลอก สามารถรับแรงดัดได้ 69 kN ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าการเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP จะให้ค่ากำลังดัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับคานควบคุม B1 แต่ไม่ได้เพิ่มสตีฟเนส (Stiffness) ของคานหลังการแตกร้าวให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และการกรีดร่องเพื่อเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP มีผลที่ทำให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน

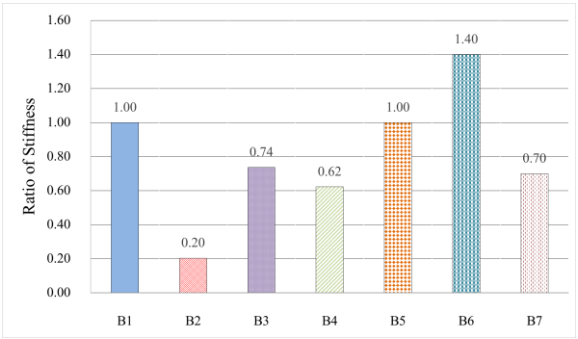
จากรูปที่ 21 พบว่าคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP (B2-B4 และ B7) มีค่าสตีฟเนส (Stiffness) ลดลงประมาณร้อยละ 26-38 เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม B1 ซึ่งการเพิ่มกำลังด้วยแท่ง GFRP ไม่ได้ช่วยให้คานคอนกรีตมีสตีฟเนส (Stiffness) มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น (B1 B5 และ B6) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกรีดร่องเพื่อติดตั้ง GFRP มีผลทำให้สตีฟเนส (Stiffness) ในคานมีค่าน้อยลงได้



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน B1 Control และ B2G4



รูปที่ 20 เปรียบเทียบพฤติกรรมของคานภายใต้แรงดัดระหว่างคานควบคุมกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP



รูปที่ 21 เปรียบเทียบค่าสตีฟเนสหลังการแตกของคานคอนกรีตควบคุมและคานที่ได้เสริมกำลังด้วย GFRP

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบแรงถอนของแท่ง GFRP ที่ฝังในเนื้อคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) การกรีดร่องและทำการเชื่อมประสานแท่ง GFRP กับคอนกรีตด้วยอีพ็อกซี่ สามารถรับแรงยึดเหนี่ยวได้มากกว่าการฝังแท่ง GFRP ลงในคอนกรีตโดยตรง
2) การเพิ่มระยะฝังของแท่ง GFRP ในคอนกรีต จะส่งผลทำให้แรงถอนสูงสุดมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าหากพิจารณากำลังยึดเหนี่ยวจะพบว่ามีค่าน้อยลงเมื่อระยะฝังของแท่ง GFRP ในคอนกรีตมีค่ามากขึ้น
3) การเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตของแท่ง GFRP จากขอบผิวตัวอย่างไม่ได้ส่งผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น โดยพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) ตัวอย่างคานคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่ง GFRP จะให้ค่ากำลังดัดน้อยกว่าคานควบคุมที่เสริมแรงด้วยเหล็ก เนื่องจากสตีฟเนส (Stiffness) หลังการแตกร้าวของคานมีค่าลดลงอย่างมากซึ่งมาจากการที่แท่ง GFRP มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กเส้นประมาณ 4-6 เท่า จึงส่งผลทำให้คานโก่งตัวอย่างมากและเกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือนในที่สุด
2) การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยแท่ง GFRP จะให้ค่ากำลังดัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับคานควบคุม แต่ไม่ได้เพิ่มสตีฟเนส (Stiffness) ของคานหลังการแตกร้าวให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน
3) การกรีดร่องเพื่อเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ควรจะต้องระวังการวิบัติภายใต้แรงเฉือน ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คานควบคุม) เนื่องจากการกรีดร่องทำให้หน้าตัดคานลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานได้น้อยลง

เอกสารอ้างอิง

[1] American Concrete Institute. (2015). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI440.1R-15)*, U.S.A.
[2] American Concrete Institute. (2006). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI440.1R-06)*, U.S.A.

[3] Ding, Y., Ning, X., Zhang, Y., Pacheco-Torgal, F. and Aguiar, J.B. (2014). Fibres for Enhancing of the Bond Capacity Between GFRP Rebar and Concrete, *Construction and Building Materials*, 12, pp. 303-312.

[4] Capozucca, R. (2014). On the Strengthening of RC Beams with Near Surface Mounted GFRP Rods, *Contents lists available at ScienceDirect*, 117, pp. 143-155.

[5] Habeeb, M.N. and Ashour, A.F. (2008). Flexural Behavior of Continuous GFRP Reinforced Concrete Beams, *Journal of Composites for Construction*, 12, pp. 115-124.

[6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก 213 ; 2560 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ*. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

[7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก 20 ; 2543 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลม*. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

[8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก 24 ; 2559 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กข้ออ้อย*. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.