

พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้วที่ฝังในคอนกรีต

BOND BEHAVIOR OF GLASS FIBER-REINFORCED POLYMER BARS EMBEDDED IN CONCRETE

สุรสิทธิ์ มุณิรัตน์*, กณิกนันต์ แก้วด้วง, ตะวันออก คลังนาค, สายันต์ ศิริมนตรี, ชนะชัย ทองโฉม และ ภิรม เหนือคลอง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: surasee.mun@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) ที่ฝังในคอนกรีต เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมคอนกรีต และวิเคราะห์หาระยะฝังที่เหมาะสมเพื่อให้ GFRP รับแรงดึงสูงสุดโดยไม่เกิดการวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยว การทดสอบใช้ GFRP ฝังในระยะ 15–50 ซม. และเหล็กฝังในระยะ 15–30 ซม. ในคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 50 ซม. กำลังอัด 240 และ 320 ksc จากนั้นทำการทดสอบแรงดึง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะฝังเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงของ GFRP จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงช่วยลดระยะฝังที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตาม เหล็กเสริมคอนกรีตมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวสูงกว่า GFRP ที่ระยะฝังเท่ากัน จากผลวิจัยวิศวกรรมควรกำหนดระยะฝัง GFRP อย่างเหมาะสม เพื่อให้วัสดุพัฒนาแรงดึงได้เต็มที่ ข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริม GFRP ให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงสุด

คำสำคัญ: พฤติกรรมการยึดเหนี่ยว, พฤติกรรมการรับแรงดึง, แท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว, ลักษณะการวิบัติ, ระยะฝังที่เหมาะสม

Abstract

This study investigates the bond behavior of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete, compared to steel reinforcement at identical embedment lengths. It also analyzes the optimal embedment length required for GFRP bars to achieve maximum tensile strength under ultimate conditions without bond failure. The experimental program involved embedding GFRP bars at lengths ranging from 15 to 50 centimeters (cm) and steel bars at lengths ranging from 15 to 30 cm to cylindrical concrete specimens with a 15 cm diameter, 50 cm height, and 240 and 320 kilograms per square cm compressive strength. Pull-out tests were conducted to assess maximum bond strength, slip behavior, and failure characteristics. Results were that increasing embedment length enhances GFRP bar tensile strength, while higher concrete compressive strength permits shorter embedment lengths. However, steel reinforcement has superior bond strength compared to GFRP bars at identical embedment lengths. This suggests that engineers should determine GFRP bar embedment length to ensure full tensile strength development. These findings may provide guidelines

for designing safe, structurally efficient concrete structures reinforced with GFRP bars

Keywords: Bond behavior, Tensile behavior, Glass fiber-reinforced polymer bars, Failure characteristics, Optimal development length

1. คำนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการก่อสร้างและงานวิศวกรรมโครงสร้างมีความต้องการวัสดุที่สามารถเสริมกำลังและความทนทานให้กับโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้น วัสดุคอมโพสิตประเภท GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) ได้กลายมาเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี เช่น น้ำหนักเบา แต่มีกำลังรับแรงดึงสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถคงสภาพได้ดีในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล หรือพื้นที่ที่มีสารเคมีที่อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุ โดย GFRP ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีต เช่น สะพาน อาคาร และโครงสร้างที่ต้องเผชิญสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนตลอดเวลา [1]

แม้ว่า GFRP จะมีคุณสมบัติที่ดี แต่ประสิทธิภาพในการรับแรงสูงสุดของ GFRP ในการใช้งานจริงนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ แต่ยังเกี่ยวข้องกับระยะฝังในคอนกรีต (Development Length) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทแรงดึงของ GFRP ไปยังโครงสร้างด้วยการยึดเหนี่ยว (Bond) กับคอนกรีต [2]. ระยะฝังที่เหมาะสมจะช่วยให้วัสดุเสริมกำลังสามารถรับแรงดึงสูงสุดโดยไม่เกิดการวิบัติด้วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond Failure) [3]

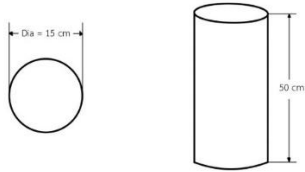
การกำหนดระยะฝังที่ไม่ถูกต้องอาจส่งผลให้ GFRP ไม่สามารถรับแรงดึงได้เต็มที่ หรืออาจเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างด้วยการวิบัติจากแรงยึดเหนี่ยวก่อนการรับแรงดึงสูงสุด ดังนั้น การศึกษาระยะฝังที่เหมาะสมของ GFRP จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบ การศึกษานี้จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่ใช้เป็นในการกำหนดระยะฝังที่เหมาะสม เพื่อให้ GFRP สามารถรับแรงดึงได้สูงสุดและเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้าง ทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงในระยะยาวและสนับสนุนให้เกิดการใช้งาน GFRP อย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง [4-5]

2. รายละเอียดการทดสอบ

2.1 รายละเอียดตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดถูกออกแบบให้ GFRP และ เหล็กเสริมข้ออ้อยฝังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ในแกนกลางของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 และ 2 ทั้งหมด 16 ตัวอย่าง ซึ่งทำการเปรียบเทียบระยะฝังของ GFRP โดยศึกษาผลกระทบของระยะฝังในคอนกรีต ตั้งแต่ 15

ถึง 50 เซนติเมตร และเหล็กกระยะฝังในคอนกรีต ตั้งแต่ 15 ถึง 30 เซนติเมตร ในคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยต่างกัน เพื่อศึกษากระยะฝังที่เหมาะสมที่ส่งผลให้วัสดุพัฒนาแรงไปถึงกำลังรับแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกสำหรับทดสอบ

2.2 คุณสมบัติวัสดุ

คอนกรีตตัวอย่างถูกหล่อให้มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเฉลี่ย 240 ksc และ 320 ksc จากผลการทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกเฉลี่ยเท่ากับ 210 ksc และ 304 ksc ตามลำดับ เหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากจากการทดสอบโดยเฉลี่ย 5670 ksc และกำลังรับแรงดึงประลัยจากการทดสอบโดยเฉลี่ย 6421 ksc ส่วน GFRP ที่ใช้เป็น GFRP12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงประลัยจากการทดสอบโดยเฉลี่ย 9570 ksc

2.3 การออกแบบระยะฝังเหล็ก และ GFRP

การคำนวณระยะฝังของเหล็กเบื้องต้น (Basic Development Length) ตามมาตรฐาน ACI [6] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$l_d = 0.06 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (1)$$

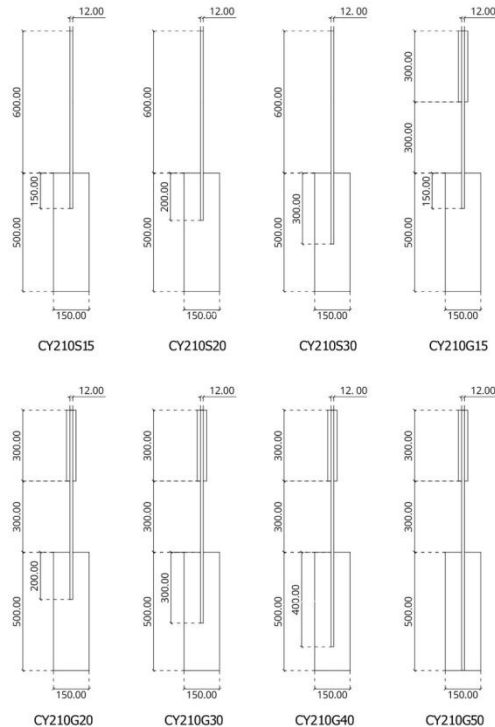
ระยะฝังของเหล็กในคอนกรีตโดยคำนวณจากคอนกรีต 240 ksc เหล็กกำลังรับแรงดึง 4000 ksc ได้ระยะฝัง 18.6 เซนติเมตร จึงออกแบบระยะฝังของเหล็ก 15, 20 และ 30 เซนติเมตร ด้วยข้อมูลเกี่ยวกับระยะฝังของ GFRP ในคอนกรีตที่ได้จากงานวิจัยมีค่อนข้างน้อย [1] งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาโดยแปรเปลี่ยนระยะฝังของ GFRP ในคอนกรีตที่ระยะ 15, 20, 30, 40 และ 50 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2

2.4 การเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง

คอนกรีตตัวอย่างถูกหล่อในแบบหล่อที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีความสูง 50 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 เซนติเมตร จากนั้นบ่มเป็นเวลา 28 วัน แท่ง GFRP ถูกออกแบบให้มีปลายจับเป็นท่อเหล็กกลมกลวงที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.2 เซนติเมตร ใช้ Non-Shrink Grout เข้าไปในท่อเหล็กกลมกลวงเพื่อหุ้มและยึด GFRP เมื่อแข็งตัว ตามที่แสดงในรูปที่ 2 เพื่อให้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) สามารถจับยึดได้อย่างมั่นคงโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือการแตกหักของ GFRP บริเวณจุดจับยึด ส่วนปลายอีกด้านของ GFRP และเหล็กเสริมข้ออ้อยถูกฝังในคอนกรีตที่ระยะฝังและกำลังอัดแตกต่างกัน ตามค่าที่ระบุในตารางที่ 1 ก่อนทำการทดสอบ ได้มีการติดตั้ง Strain Gauge บนเหล็กและ GFRP ในตำแหน่งถัดจากส่วนที่ฝังในคอนกรีต เพื่อใช้วัดค่าความเครียดของวัสดุอย่างแม่นยำ

2.5 การทดสอบตัวอย่าง

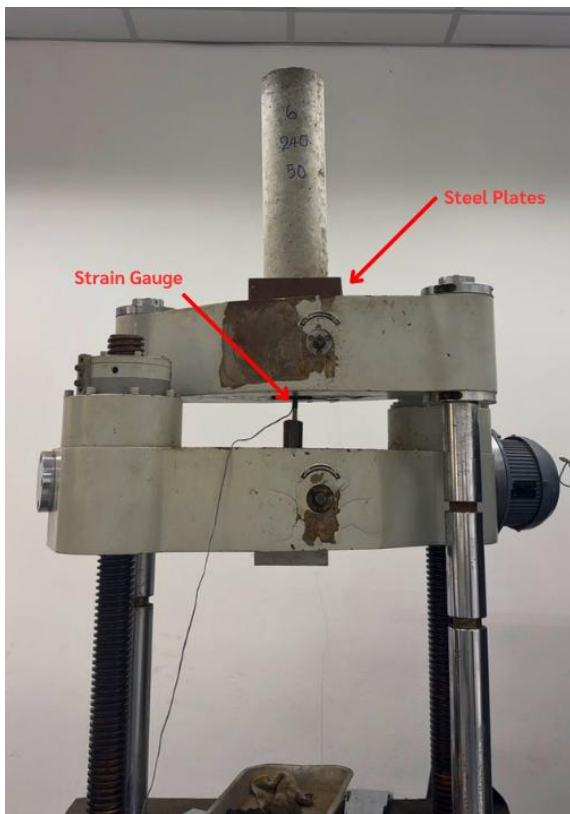
การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และ GFRP ที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีต โดยการนำตัวอย่างมาวางบนเครื่องทดสอบ UTM โดยให้เครื่องทดสอบจับยึด เหล็ก หรือ GFRP บริเวณที่ต้องการ วางแผ่นเหล็กกันระหว่างคอนกรีตกับเครื่องทดสอบ เพื่อช่วยในการกระจายแรงให้ทั่วหน้าตัดของคอนกรีต จากนั้นเชื่อมต่อ Strain gauge เข้ากับเครื่อง Data logger เริ่มทดสอบดึงเหล็ก หรือ GFRP จนวิบัติ จากนั้นเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ลักษณะการฝังและระยะการฝังของเหล็กและ GFRP

ตารางที่ 1 ตารางแสดงรายละเอียดการฝังของวัสดุในแท่งคอนกรีต

f'_c (ksc)	วัสดุที่ฝัง	ตัวอย่าง	ระยะฝัง (เซนติเมตร)
210	เหล็ก	CY210S15	15
		CY210S20	20
		CY210S30	30
	GFRP	CY210G15	15
		CY210G20	20
		CY210G30	30
		CY210G40	40
304	เหล็ก	CY304S15	15
		CY304S20	20
		CY304S30	30
	GFRP	CY304G15	15
		CY304G20	20
		CY304G30	30
		CY304G40	40
		CY304G50	50



รูปที่ 3 การทดสอบตัวอย่าง

3. ผลการทดสอบ

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดิ่งประลัยกับระยะฝัง

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังของ GFRP กับกำลังรับแรงดิ่งสูงสุดที่สภาวะประลัยซึ่งจากการทดสอบพบว่าเป็นการวิบัติเป็นแบบการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง GFRP กับคอนกรีตทุกตัวอย่างโดยเกิดการแตกร้าวด้านข้างของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตามแนวยาวของ GFRP

กำลังรับแรงดิ่งของ GFRP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะฝังเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พื้นที่ยึดเหนี่ยวระหว่าง GFRP และคอนกรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวสามารถถ่ายแรงได้มากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงดิ่งของ GFRP เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แนวโน้มนี้พบได้ทั้งในกรณีของแท่งเหล็กเสริมคอนกรีตและในคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบพบว่า ในกรณีของ GFRP ที่ระยะฝังสูงสุดที่ทดสอบ (50 เซนติเมตร) วัสดุยังไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงดิ่งไปถึงค่าสูงสุดได้ (9570ksc) เนื่องจากเกิดการวิบัติจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง GFRP และคอนกรีตก่อนวัสดุจะสามารถรับแรงดิ่งสูงสุดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการยึดเหนี่ยวของ GFRP ภายในคอนกรีตมีข้อจำกัด แม้ว่าการเพิ่มระยะฝังจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดิ่ง แต่ในบางกรณีอาจไม่เพียงพอที่จะพัฒนากำลังรับแรงดิ่งจนถึงค่ากำลังรับแรงดิ่งสูงสุดของวัสดุ ดังนั้นในการออกแบบคานหรือพื้นเพื่อรับโมเมนต์ดัด GFRP จะถูกออกแบบให้รับแรงดิ่งโดยหน่วยแรงดิ่งจะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับความเครียดในลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติหรืออาจไม่ถึงจุดวิบัติทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของ GFRP เมื่อเทียบกับหน้าตัดคอนกรีต (Reinforcement ratio) ACI 440.1R-15 ได้เสนอสมการเพื่อคำนวณหน่วยแรงดิ่งใน GFRP ดังกล่าวเมื่อคานรับโมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัย ซึ่งค่าดังกล่าวส่วนใหญ่แล้วจะน้อยกว่ากำลังรับแรงดิ่งสูงสุดที่สภาวะประลัยของ GFRP

ส่วนในกรณีของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตจะเห็นได้ว่าที่ระยะฝังในคอนกรีตตามสมการที่ (1) เหล็กเสริมสามารถพัฒนาหน่วยแรงดิ่งจนถึงจุดครากและจุดประลัยได้ โดยตัวอย่างไม่เกิดการวิบัติด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมยกเว้นตัวอย่างที่ฝังเหล็กในคอนกรีต 15 เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 การวิบัติเป็นแบบการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมและ GFRP แสดงดังรูปที่ 5-8 ความเครียดในเหล็กเสริมและ GFRP ได้จากการติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าในส่วนที่ไม่ได้ฝังในคอนกรีต

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในแท่ง GFRP ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 210 ksc เป็น 304 ksc กำลังรับแรงดิ่งของทั้ง GFRP และเหล็กที่ระยะฝังเท่ากันมีค่ามากขึ้น โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัด 304 ksc ให้กำลังรับแรงดิ่งสูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัด 210 ksc ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตสามารถช่วยลดระยะฝังของวัสดุที่จำเป็นในการพัฒนาแรงดิ่งได้

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 7 และ 8 จะเห็นได้ว่าเหล็กเสริมสามารถพัฒนาหน่วยแรงดิ่งจนถึงจุดครากและจุดประลัยได้โดยไม่เกิดการวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยวในทุกตัวอย่าง ยกเว้นตัวอย่างที่มีระยะฝังในคอนกรีตน้อยกว่าที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 1 (15 เซนติเมตร) ซึ่งจะเกิดการวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยวแต่ก็ยังสามารถพัฒนาหน่วยแรงดิ่งจนใกล้เคียงจุดครากได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระยะฝังน้อยกว่าที่คำนวณได้โดยสมการที่ 1 เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความเชื่อมั่นในการใช้สมการที่ 1 ในการคำนวณระยะฝัง ผลของกำลังอัดสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ฝังด้วยเหล็กเสริมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

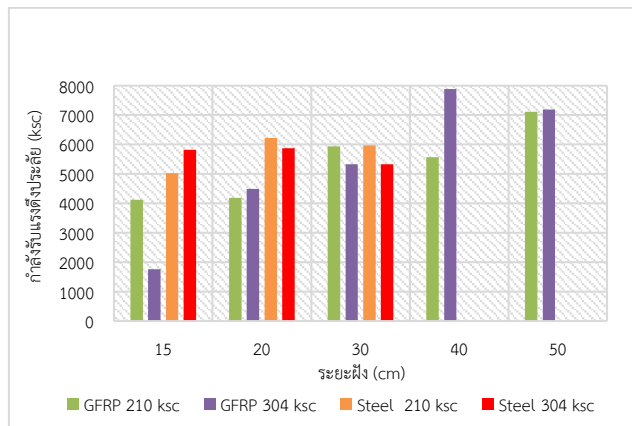
จากการเปรียบเทียบกราฟในรูปที่ 5 และรูปที่ 7 ที่ระยะฝังเท่ากันนั้นคือ 15 เซนติเมตร พบว่า GFRP มีกำลังรับแรงดิ่งเท่ากับ 4,128 ksc ในขณะที่เหล็กมีกำลังรับแรงดิ่งเท่ากับ 5,020 ksc ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กมีการพัฒนาหน่วยแรงดิ่งได้สูงกว่า GFRP สาเหตุสำคัญมาจากลักษณะพื้นผิวของวัสดุ โดยเหล็กขรุขระมีรูปร่างที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต ในขณะที่ GFRP มีวัสดุเคลือบผิวที่อาจไม่เหมาะสมต่อการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยว ส่งผลให้กำลังรับแรงดิ่งต่ำกว่า นอกจากนี้ ที่ระยะ

ฝั่ง 15 เซนติเมตร พบว่าวัสดุทั้งสองเกิดการวิบัติจากแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งบ่งชี้ว่าระยะฝั่งดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการพัฒนาแรงดึงอย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตาม ที่ระยะฝั่ง 20 และ 30 เซนติเมตร เหล็กยังคงสามารถพัฒนาหน่วยแรงดึงได้สูงกว่า GFRP แม้ว่า จะเกิดการวิบัติโดยการขาดก่อนก็ตาม

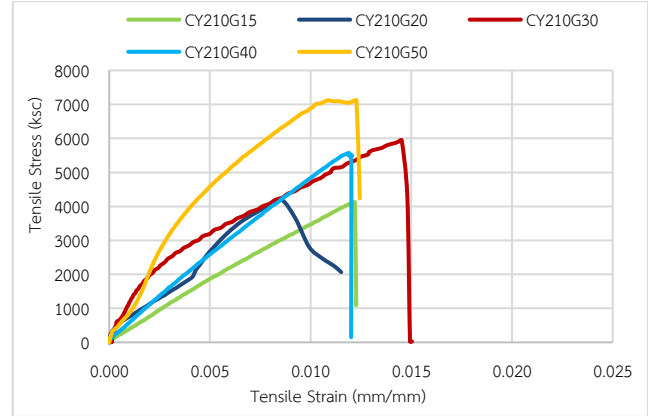
3.2 ลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 9-20 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง โดยตัวอย่าง CY210G15, CY210G20, CY210G30, CY210G40, CY210G50, CY304G15, CY304G20, CY304G30, CY304G40, CY304G50, CY210S15 และ CY304S15 เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวตามแนวฝั่งของวัสดุ นอกจากนี้ พบว่าขนาดและความยาวของรอยแตกร้าวมีความสัมพันธ์กับระยะฝั่งของวัสดุในคอนกรีต โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีระยะฝั่งมาก เช่น CY210G40, CY210G50, CY304G40 และ CY304G50 พบว่าการแตกร้าวของคอนกรีตมีความรุนแรงถึงขั้นที่เนื้อคอนกรีตแยกออกจากกัน ทำให้สามารถสังเกตลักษณะการวิบัติของแท่ง GFRP ได้อย่างชัดเจน รวมถึงวัสดุเคลือบผิวของ GFRP ที่ติดอยู่ตามแนวฝั่งของคอนกรีต

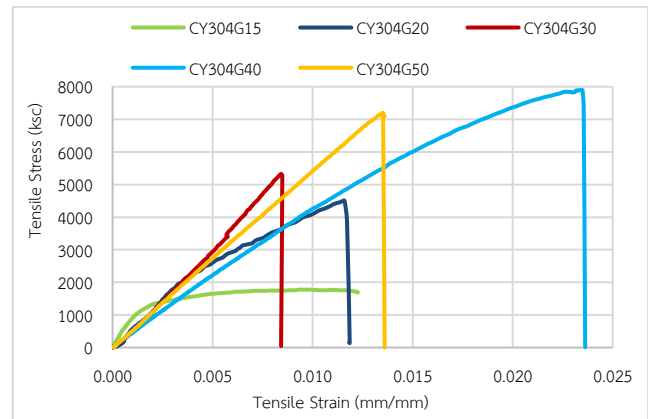
ขณะที่รูปที่ 21-24 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริม ได้แก่ CY204S20, CY204S30, CY304S20 และ CY304S30 พบว่าการวิบัติเกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมเอง โดยไม่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกลไกการวิบัติระหว่าง GFRP และเหล็กเสริมคอนกรีต โดยผิวของคอนกรีตส่วนที่เป็นข้อเป็นเนื้อเหล็กจริงในขณะที่เป็นข้อใน GFRP เป็นวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์เพื่อขึ้นรูปให้มีลักษณะเหมือนเหล็กข้ออ้อย ดังนั้นประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตของเหล็กเสริมจึงดีกว่าของ GFRP



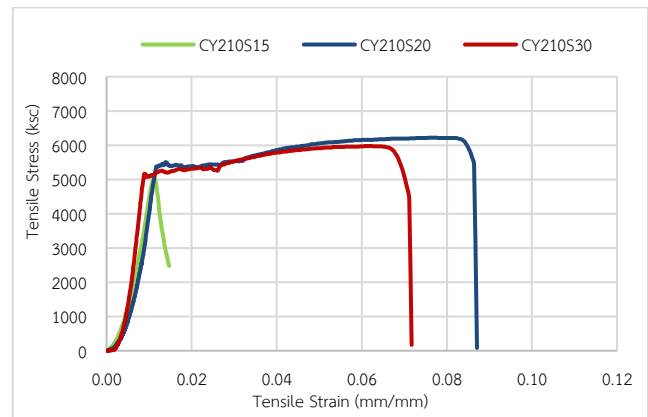
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงประลัยกับระยะฝั่ง



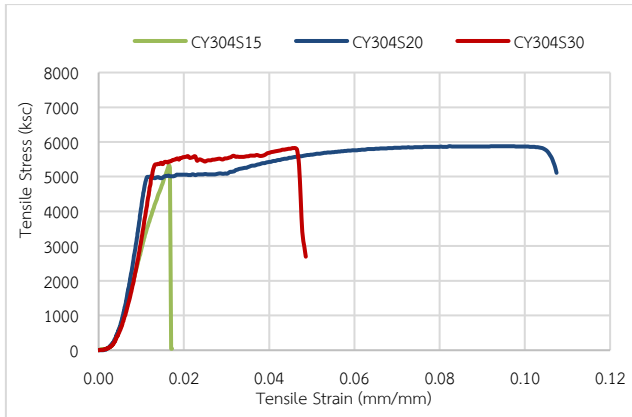
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ของ GFRP ที่ระยะฝั่งต่างกัน ในคอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ของ GFRP ที่ระยะฝั่งต่างกัน ในคอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ของเหล็กเสริมที่ระยะฝั่งต่างกัน ในคอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc



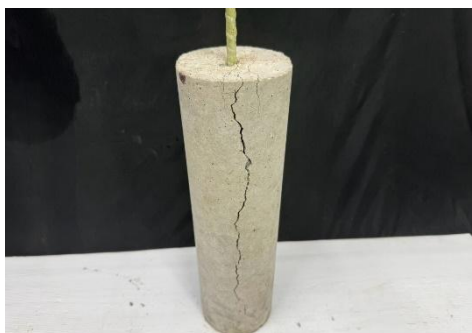
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ของเหล็กเสริมที่
ระยะฝังต่างกัน ในคอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc



รูปที่ 9 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210G15
(GFRP ระยะฝัง 15 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210G20
(GFRP ระยะฝัง 20 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210G30
(GFRP ระยะฝัง 30 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 12 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210G40
(GFRP ระยะฝัง 40 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 13 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210G50
(GFRP ระยะฝัง 50 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 14 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304G15
(GFRP ระยะฝัง 15 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 15 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304G20
(GFRP ระยะฝัง 20 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 16 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304G30
(GFRP ระยะฝัง 30 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 17 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304G40
(GFRP ระยะฝัง 40 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 18 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304G50

(GFRP ระยะฝัง 50 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 19 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210S15
(เหล็ก ระยะฝัง 15 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 20 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304S15
(เหล็ก ระยะฝัง 15 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 21 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210S20
(เหล็ก ระยะฝัง 20 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 22 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY210S30
(เหล็ก ระยะฝัง 30 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 210 ksc)



รูปที่ 23 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304S20
(เหล็ก ระยะฝัง 20 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)



รูปที่ 24 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตตัวอย่าง CY304S30
(เหล็ก ระยะฝัง 30 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังอัดประลัย 304 ksc)

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) และเหล็กเสริม ที่ฝังอยู่ในคอนกรีต จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ระยะฝังของ GFRP ที่เพิ่มขึ้นจาก 15, 20, 30, 40 ไปจนถึง 50 เซนติเมตร ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นตามระยะฝังที่มากขึ้นในคอนกรีต การวิบัติมีลักษณะเป็นแบบการสูญเสียการยึดเหนี่ยว (Bond failure)

เมื่อกำลังอัดคอนกรีตประลัยเพิ่มขึ้นจาก 210 ksc เป็น 304 ksc ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงของ GFRP ที่ฝังในระยะเดียวกันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ในกรณีที่ต้องการกำลังรับแรงดึงเท่ากัน คอนกรีตที่มีกำลังอัด 304 ksc สามารถใช้ระยะฝังของ GFRP น้อยกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัด 210 ksc

เหล็กเสริมสามารถพัฒนาหน่วยแรงดึงจนถึงจุดครากและจุดประลัยถ้ามีระยะฝังเพียงพอที่คำนวณจากสมการที่เสนอโดยมาตรฐาน ACI ระยะฝังที่ไม่เพียงพอจะเกิดการวิบัติโดยแรงยึดเหนี่ยว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง GFRP และเหล็กที่ระยะฝังเท่ากัน พบว่าเหล็กสามารถพัฒนากำลังรับแรงดึงได้มากกว่า GFRP ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงยึดเหนี่ยวที่สูงกว่าของเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีต

ดังนั้น วิศวกรที่ออกแบบโครงสร้างเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ควรคำนึงถึงระยะฝังที่เหมาะสม หากระยะฝังของ GFRP ในคอนกรีตน้อยเกินไป อาจทำให้วัสดุไม่สามารถรับแรงดึงได้สูงสุดตามที่ได้ออกแบบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อคณะผู้ให้ทุนสนับสนุน รวมถึงทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการดำเนินโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute (2015). *ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars*. Farmington Hills, MI: ACI Committee 440.
- [2] Canadian Standards Association (2012). *CSA S806-12: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Ontario, Canada: CSA Group.
- [3] Achillides, Z. and Pilakoutas, K. (2004). Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composites for Construction*, 8(2), pp.173-181.
- [4] Phoo-ngerngkham, T., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Thumrongvut, J., Suebsuk, S. and Sookasem, S. (2016). Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali-activated binders under different types of alkali solutions. *Construction and Building Materials*, 127, pp.673-678.
- [5] Thumrongvut, J. and Seangattith, S. (2016). Axial load capacity of cellular lightweight concrete-filled steel square tube columns. *Central Europe towards Sustainable Building (CESB16)*, Prague, Czech Republic, 22-24 June 2016, pp.1312-1319.
- [6] Hanus, J.P., Shield, C.K. and French, C.W. (2000). *Development Length of GFRP Reinforcement in Concrete Bridge Decks*. Final Report, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN: Minnesota Department of Transportation, Office of Research Services.