กำลังรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วภายหลังสภาวะเพลิงไหม้
Flexural Strength of GFRP-Reinforced Concrete Slab after Fire Exposure

ศุภวิชญ์ ไทรวิมาน* ชนะชัย ทองโฉม และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดภายหลังเผาไฟของพื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforced polymer; GFRP) พื้นตัวอย่างคอนกรีตที่ศึกษาเป็นพื้นคอนกรีตรับแรงทางเดียว (One-way stab) มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา 900 มิลลิเมตร 3300 มิลลิเมตร และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ จำนวนทั้งหมด 4 พื้นตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง (กลุ่มพื้นตัวอย่างควบคุม) และกลุ่มที่ทดสอบภายหลังการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ซึ่งถูกปล่อยให้เย็นตัวลงแล้ว 24 ชั่วโมง พฤติกรรมที่ศึกษาได้แก่ กำลังการรับแรงดัด ค่าการโก่งตัว ลักษณะการวิบัติ และรูปแบบรอยร้าว โดยศึกษาผลกระทบของระยะหุ้มคอนกรีต (ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร) จากผลการทดสอบพบว่าพื้นคอนกรีตที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่า สามารถต้านทานแรงดัดได้สูงกว่า และอุณหภูมิที่แท่ง GFRP ได้รับมีค่าน้อยกว่าพื้นที่มีระยะหุ้มคอนกรีตต่ำกว่า

คำสำคัญ: พื้นรับแรงทางเดียว, แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, เพลิงไหม้, พฤติกรรมการรับแรงดัด

Abstract

This research presents a study that aims to investigate the flexural behavior of concrete slabs reinforced with glass fiber reinforced polymer bars (GFRP bar) after being exposed to fire. The research focuses on one-way reinforced concrete slabs with dimensions of 900 mm. width, 3300 mm. length, and 20 mm. thickness. Four concrete specimens were tested, divided into two groups: the control group tested at room temperature and the test group exposed to simulated fire conditions and allowed to cool down for 24 hours. The study aims to determine the flexural strength, deflection, mode of failure, and crack pattern of the slab specimens. Furthermore, the research examines the effect of concrete covering length on the behavior of the concrete slabs, with two concrete covering distances of 20 mm and 40 mm.

Keywords: One-way slab, GFRP bars, fire, Flexural behavior

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อเสียของเหล็กนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ และออกซิเจน นำมาซึ่งการเกิดสนิมเหล็กได้ [1] การเกิดสนิมเหล็กส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง ซึ่งหมายถึงการสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงที่เกิดขึ้น ปัจจุบันวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนข้อเสียดังกล่าวรู้จักกันในชื่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced Polymer, FRP) ซึ่ง FRP สามารถขึ้นรูปให้เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ในชิ้นส่วนโครงสร้าง [2, 3] เช่น แท่ง (Bar), แผ่น (Sheet) หรือ ตาข่าย (Mesh) เป็นต้น

FRP มีน้ำหนักที่เบาแต่สามารถรับแรงดึงได้ดี (High weight to strength ratio) แต่ในขณะเดียวกันสามารถรับแรงอัดได้ต่ำ ชิ้นส่วนโครงสร้างแนวราบอย่างพื้นจึงเหมาะสมกับการเสริมกำลังด้วยวัสดุชนิดนี้ FRP มีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงสามารถต้านทานการเกิดสนิมและปฏิกิริยาอื่น ๆได้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น โครงสร้างในน้ำทะเลที่มีคลอไลด์ไอออนหรือภาวะความเป็นกรดสูง องค์ประกอบของแท่ง FRP ประกอบด้วยเส้นใยโพลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และถูกห่อหุ้มด้วยเรซินที่ทำหน้าที่ยึดเส้นใยทุกเส้นให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งองค์ประกอบในเส้นใยแต่ละชนิดให้คุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ FRP ชนิดเส้นใยแก้ว (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP)

เนื่องจากแท่ง GFRP เป็นวัสดุโพลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเหล็ก เมื่อแท่ง GFRP มีอุณหภูมิถึงค่าที่แก้วสามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นยาง (Glass transition temperature) หรือสามารถกล่าวได้ว่าแท่ง

FRP เริ่มสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล [4, 5] ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ภายใต้กราฟไฟมาตรฐาน ISO 834 สำหรับพฤติกรรมของพื้นคอนกรีตเสริมด้วยแท่ง GFRP ภายใต้สภาวะเพลิงไหม้นั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการศึกษา เช่น การหาอัตราการทนไฟของพื้นคอนกรีตเสริมด้วยแท่ง FRP เพื่อศึกษาระยะเวลาในการต้านทานไฟของชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าว แต่โครงสร้างนั้นยังสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ เป็นหน้าที่ของวิศวกรที่ต้องทดสอบ และหาคำตอบเพื่อยืนยันถึงความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้อาคาร เนื่องจากแท่ง GFRP มีพฤติกรรมเชิงกลที่ความแตกต่างกับเหล็กเมื่อสัมผัสความร้อน [6] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงดำเนินการทดสอบ และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเมื่อเย็นตัวลงแล้วในลำดับถัดมา

2. รายละเอียดการทดสอบ

พื้นตัวอย่างทั้งหมดถูกออกแบบให้เป็นพื้นคอนกรีตรับแรงทางเดียว ขนาด 900x3300 มิลลิเมตร มีความหนา 200 มิลลิเมตร โดยศึกษาผลกระทบของระยะหุ้มคอนกรีต (20 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร) หล่อพื้นตัวอย่างภายใต้ตัวแปรดังกล่าวเป็นจำนวน 4 พื้นตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการต้านแรงดัดระหว่างพื้นตัวอย่างภายหลังเผาไฟ (กลุ่ม F) และพื้นตัวอย่างที่ยังไม่ถูกเผาไฟหรือพื้นตัวอย่างควบคุม (กลุ่ม C) แสดงดังตารางที่ 1

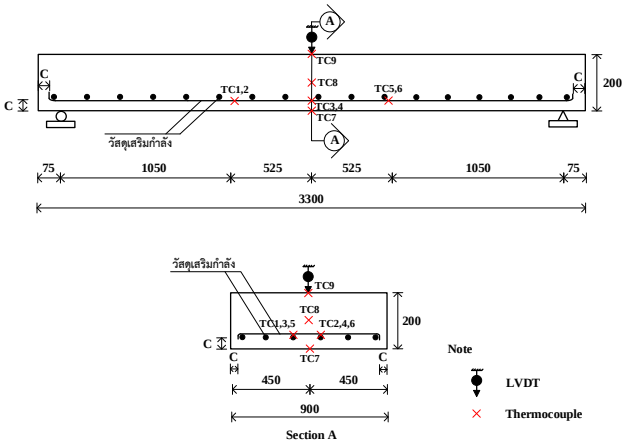
พื้นตัวอย่างทั้งหมดถูกหล่อด้วยคอนกรีตผสมสำเร็จที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ย 286 ksc เหล็กเสริมที่ใช้ในการเสริมกำลังพื้นตัวอย่างคอนกรีตเป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ย 4662.69 ksc ส่วนแท่ง GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (GFRP12) มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงสูงสุด 8567 ksc

พื้นตัวอย่างทั้งหมดมีระยะเรียงตามยาวและตามขวางของแท่ง GFRP มีระยะ 150 มิลลิเมตร เท่ากันทุกพื้นตัวอย่าง โดยมีระยะหุ้มคอนกรีตเป็นตัวแปรในการศึกษาดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1 รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดการเสริมกำลังของพื้นตัวอย่างทั้งหมด

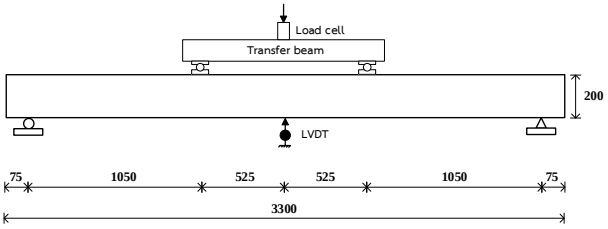
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพื้นตัวอย่าง ใช้แม่แรงไฮดรอลิกให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของพื้นตัวอย่างในมุมตั้งฉาก และทดสอบโดยกระจายแรงออกเป็น 4 ตำแหน่ง (Four-point bending test) แรงอัดกระทำลงมาที่ระยะ L/3 จากซัพพอร์ตทั้งสองด้าน (Clear-span length) ติดตั้งมาตรวัดแรง (Load cell) และมาตรวัดค่าการยืดหดแนวแกน (LVDT) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการโก่งตัวของพื้นตัวอย่าง บันทึกข้อมูลทั้งหมดด้วยเครื่อง Data logger ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของพื้นตัวอย่าง

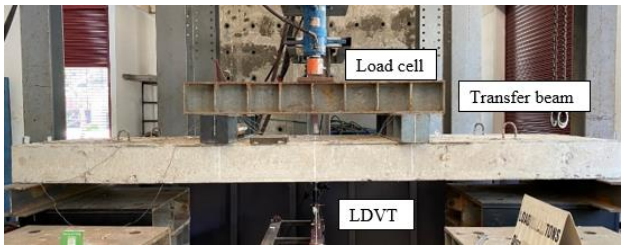
พื้นตัวอย่าง	การเสริมกำลัง (มิลลิเมตร)	ระยะหุ้มคอนกรีต (มิลลิเมตร)	การทดสอบสภาวะเพลิงไหม้
C20	GFRP12@150#	20.0	-
C40		40.0	-
F20		20.0	ทดสอบ
F40		40.0	ทดสอบ



รูปที่ 1 รายละเอียดการเสริมกำลังของพื้นตัวอย่าง (มิลลิเมตร)



(ก) ภาพวาด



(ข) ภาพถ่าย

รูปที่ 2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพื้นตัวอย่าง

3. ผลการทดสอบ

ตารางที่ 2 แสดงอุณหภูมิของแท่ง GFRP ภายในหน้าตัดของพื้นตัวอย่าง (°C) และรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของพื้นตัวอย่าง จากการทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่วัสดุเสริมกำลัง ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวนี้มีนัยสำคัญเป็นอย่างมาก

หากอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าเกินกว่าอุณหภูมิวิกฤต แท่ง GFRP จะสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล รวมถึงกำลังรับแรงดึงนั้นลดลงด้วยเช่นกัน แท่ง GFRP เป็นวัสดุหลักในการรับแรงดึงที่เกิดขึ้นจากภาระที่พื้นตัวอย่างต้องแบกทาน หากแท่ง GFRP สูญเสียกำลังรับแรงดึงจะส่งผลให้พื้นคอนกรีตรับแรงดัดได้น้อยลงด้วยเช่นกัน

โดยทั่วไปแล้ว แท่ง GFRP มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 300-330°C [7] ในงานวิจัยนี้ แท่ง GFRP ของพื้นตัวอย่าง F20 และ F40 สัมผัสอุณหภูมิในช่วง 427-578°C ซึ่งสูงกว่าช่วงอุณหภูมิวิกฤต ส่งผลให้แท่ง GFRP สูญเสียคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อน หรือสามารถกล่าวได้ว่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [4, 5]

จากรูปที่ 3 สามารถเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิที่บริเวณแท่ง GFRP ของพื้น C40 ซึ่งมีระยะหุ้มคอนกรีตสูงกว่านั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้น C20 ที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่า ดังนั้นการเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตสามารถชะลอการแพร่หรือการส่งผ่านของความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้ที่บริเวณวัสดุเสริมกำลังมีค่าลดลง

ตารางที่ 2 อุณหภูมิของแท่ง GFRP ภายในหน้าตัดของพื้นตัวอย่าง (°C)

พื้นตัวอย่าง	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6
F20	N/A	505	543	578	525	500
F40	427	439	465	464	471	N/A

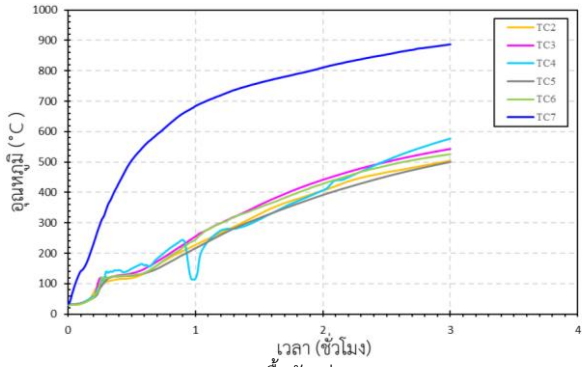
ตารางที่ 3 แสดงกำลังรับแรงดัดสูงสุด และระยะโก่งตัว รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะโก่งตัวของพื้นตัวอย่างทั้งหมด จากการทดสอบการรับแรงดัดกลุ่มพื้นตัวอย่างควบคุม พื้นตัวอย่าง C20 และ C40 มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด 189.8 กิโลนิวตัน และ 169.4 กิโลนิวตัน ระยะการโก่งตัว 108.5 มิลลิเมตร และ 95.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าพื้นตัวอย่าง C20 สามารถต้านทานแรงดัดได้สูงที่สุด พื้นตัวอย่าง C20 และ C40 เริ่มมีรอยร้าวแรกเมื่อแรงกระทำไปถึง 40 กิโลนิวตัน จากนั้นลักษณะความสัมพันธ์ของแรงและระยะโก่งตัวเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนกระทั่งพื้นตัวอย่างวิบัติ

ส่วนกลุ่มพื้นตัวอย่างที่ทดสอบภายหลังการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ พื้นตัวอย่าง F20 และ F40 มีค่าแรงอัดประลัย 24.5 กิโลนิวตัน และ 26.8 กิโลนิวตัน มีระยะการโก่งตัว 46.0 มิลลิเมตร และ 43.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดัดลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพื้นตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของแท่ง GFRP จากการสัมผัสความร้อน โดยพื้นตัวอย่างกลุ่มนี้มีกำลังรับแรงดัดเหลือเพียง 12% ถึง 15% จากกำลังรับแรงดัดของกลุ่มพื้นตัวอย่างควบคุม

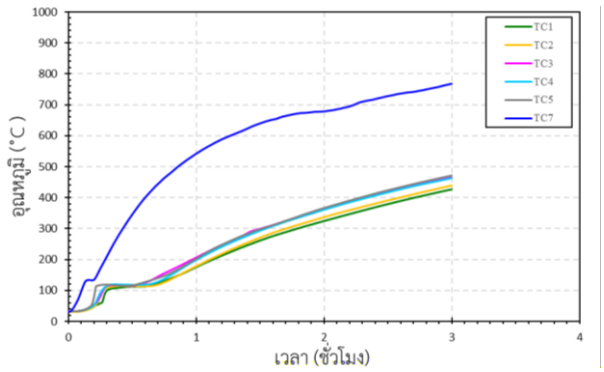
รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่าง พื้นตัวอย่าง C20 วิบัติโดยแรงเฉือนร่วมกับการสูญเสียหน่วยแรงยึดหน่วง เนื่องจากคอนกรีตบริเวณท้องพื้นหลุดกะเทาะออก ส่วนพื้นตัวอย่าง C40 วิบัติโดยแรงเฉือนโดยแท่ง GFRP ของพื้นตัวอย่างแตกหักจากในระนาบที่รับแรงเฉือนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 6 ไม่พบการถูกอัดแตกของคอนกรีตบริเวณด้านบน ทั้งพื้นตัวอย่าง C20 และ C40 เป็นการวิบัติแบบเปราะทั้งหมด

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดสูงสุด และระยะการโก่งตัวของพื้นตัวอย่าง

พื้นตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (กิโลนิวตัน)	ระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางพื้นตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
C20	189.8	108.5
C40	169.4	95.5
F20	24.5	46.0
F40	26.8	43.6

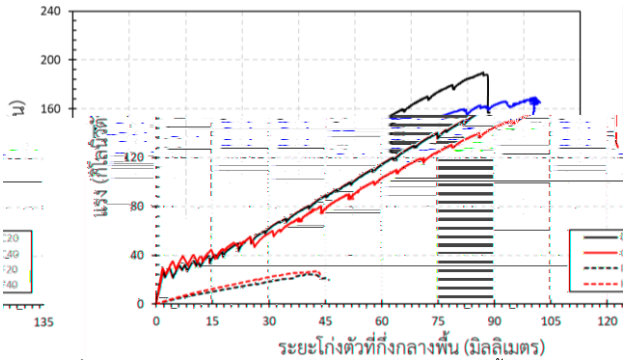


(ก) พื้นตัวอย่าง F20



(ข) พื้นตัวอย่าง F40

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของพื้นตัวอย่าง

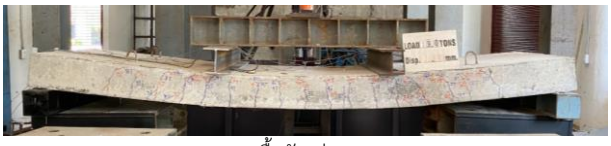


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะการโก่งตัวของพื้นตัวอย่าง

กลุ่มพื้นตัวอย่างที่ทดสอบภายหลังสภาวะเพลิงไหม้ จากการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติของพื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP เกิดขึ้นจากการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากความร้อน และเกิดการสูญเสียแรงยึดหน่วงระหว่างผิวสัมผัสแท่ง GFRP กับผิวสัมผัสคอนกรีตไปตั้งแต่การทดสอบการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ เนื่องจากมีการหลุดร่อนออกของคอนกรีตบริเวณท้องพื้น ดังแสดงในรูปที่ 7 ไม่พบการถูกอัดแตกของคอนกรีตบริเวณด้านบนเช่นเดียวกันกับกลุ่มพื้นตัวอย่างควบคุม และความเสียหายของแท่ง GFRP ที่เกิดจากแรงดึง มีเพียงคราบเขม่าสีดำที่เกิดจากการเผาไหม้

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบรอยร้าวของพื้นตัวอย่าง พื้นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP สามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่ารอยร้าวแนวทแยงเกิดขึ้นที่บริเวณที่รับแรงเฉือน โดยรอยร้าวดังกว่างมีความกว้างเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบจนกระทั่งพื้นตัวอย่างวิบัติที่ตำแหน่งการรับแรงเฉือน

รอยร้าวของพื้นตัวอย่างที่ทดสอบภายหลังสภาวะเพลิงไหม้พบรอยร้าวตามยาวเกิดขึ้นบริเวณที่เสริมวัสดุเสริมกำลัง บ่งบอกถึงการสูญเสียกำลังยึดหน่วงระหว่างวัสดุเสริมกำลังและคอนกรีต ตำแหน่งของการวิบัติเกิดขึ้นที่บริเวณที่แรงเฉือนสูงสุดกระทำเช่นเดียวกันกับกลุ่มพื้นตัวอย่างควบคุม



(ก) พื้นตัวอย่าง C20



(ข) พื้นตัวอย่าง C40



(ค) พื้นตัวอย่าง F20



(ง) พื้นตัวอย่าง F40

รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่าง

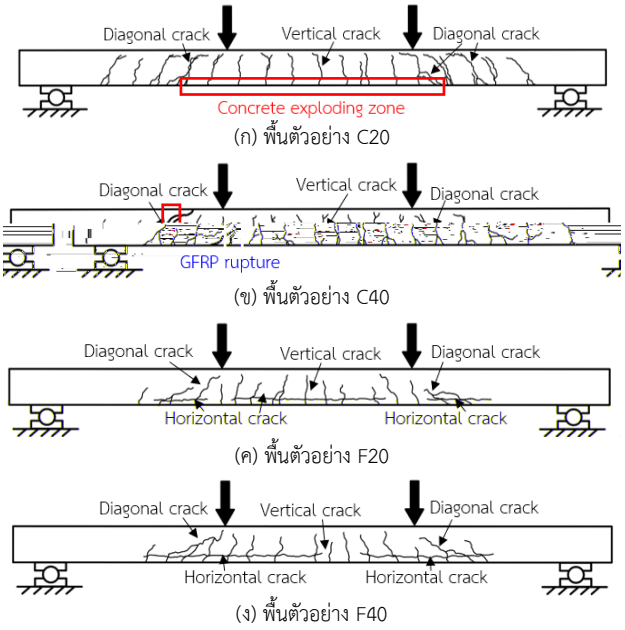


รูปที่ 6 การวิบัติของแท่ง GFRP (พื้นตัวอย่าง C40)



รูปที่ 7 การหลุดร่อนออกของคอนกรีตบริเวณท้องพื้นจากการทดสอบสภาวะเพลิงไหม้

เมื่อแท่ง GFRP สัมผัสความร้อน 400°C และทดสอบการรับแรงชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นภายหลังเย็นตัวลง หน่วยแรงยึดหน่วงจะสูญเสียไปกว่า 40% เมื่อสูญเสียหน่วยแรงยึดหน่วง [8] การถ่ายเทแรงที่เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตกับแท่ง GFRP จึงถูกรบกวนให้มีประสิทธิภาพลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่สามารถแสดงประสิทธิผลสูงสุดของแท่ง GFRP ก่อนที่พื้นคอนกรีตจะวิบัติ



รูปที่ 8 รูปแบบรอยร้าวของพื้นตัวอย่าง

4. สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ภายหลังสภาวะเพลิงไหม้ และผลกระทบของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีต่อกำลังรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตภายหลังเผาไฟ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ระยะหุ้มคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 มิลลิเมตร เป็น 40 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความร้อนส่งผ่านไปสู่แท่ง GFRP ลดลงตามระยะหุ้มคอนกรีตที่มากขึ้น

พื้นคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 40 มิลลิเมตร สามารถต้านทานแรงดัดที่เกิดขึ้นภายหลังสภาวะเพลิงไหม้ได้สูงกว่าพื้นคอนกรีตเสริมแท่ง GFRP ที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 20 มิลลิเมตรเล็กน้อย

พื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ที่เป็นพื้นตัวอย่างควบคุม (ไม่สัมผัสความร้อน) มีลักษณะการวิบัติแบบเปราะ และวิบัติโดยแรงเฉือนทั้งหมด ส่วนพื้นตัวอย่างที่ทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ วิบัติโดยแรงเฉือนร่วมกับการสูญเสียแรงยึดหน่วง โดยมีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเปราะเช่นเดียวกัน

วิศวกรที่ออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเสริมกำลังด้วยแท่ง GFRP ควรคำนึงถึงระยะหุ้มคอนกรีตที่สอดคล้องต่ออุณหภูมิวิกฤตของแท่ง GFRP หากความร้อนแพร่ไปสู่แท่ง GFRP เร็วเกินไป จะส่งผลให้อัตราการทนไฟของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นต่ำ หากแท่ง GFRP สัมผัสอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าอุณหภูมิวิกฤต ชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นจะสูญเสียกำลังในการรับแรงกระทำจากการเสื่อมสภาพของแท่ง GFRP เนื่องจากความร้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อีกทั้งงานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย (วิทยาเขตสระบุรี) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เขียนขอขอบคุณที่อำนวยความสะดวกด้านการทดสอบ และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ บริษัท ไทยไฟเบอร์ รีบาร์ จำกัด สำหรับการจัดเตรียมตัวอย่างพื้นทดสอบอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Nanni, A., De Luca, A., and Zadeh, H. J. (2014).
.

[2] Mufti, A. A., Banthia, N., Benmokrane, B., Boulfiza, M., and Newhook, J. P. (2007). Durability of GFRP composite rods
, 29(2), pp.37-42.

[3] Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., and Nanni, A. (2017). Precast concrete tunnel segments with GFRP reinforcement.
, 21(5), 04017020.

[4] Galati, N., Vollintine, B., Nanni, A., Dharani, L. R., and Aiello, M. A. (2004). Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete.
, pp.501-508.

[5] Katz, A., and Berman, N. (2000). Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete. , 22(6), pp.433-443.

[6] Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., and Nanni, A. (2017). Precast concrete tunnel segments with GFRP reinforcement.
, 21(5), 04017020.

[7] Bazli, M., and Abolfazli, M. (2020). Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview. , 12(11), 2600.

[8] Hajiloo, H., Green, M. F., and Gales, J. (2018). Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures.
, 162, pp.142-154.