

การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตปกติและคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ เพื่อการเสริมกำลังโครงสร้าง

Interfacial Bond Behavior between Conventional Concrete and Ultra-High Performance Concrete for Structural Strengthening

สวรรยา พรหมสำเภา¹ และ นันทวัฒน์ ขมหวาน^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: fengnw@ku.ac.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันเป็นที่นิยมและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยรูปแบบการใช้งานจะมีความแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานจริง การเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะทำให้องค์อาคารสามารถใช้งานได้นานมากขึ้น โดยการเสริมกำลังนั้นไม่เพียงแต่เป็นแนวทางในการใช้ซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดการเสื่อมสภาพเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางในการเสริมแรงให้โครงสร้างให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้นไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างที่ใหม่หรือเก่า ก็สามารถใช้วิธีเสริมกำลังกับโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักขององค์อาคารหรือการใช้งานจริง การเสริมกำลังด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC) จึงเป็นทางเลือกสำหรับการใช้งานเพื่อเสริมกำลังให้กับโครงสร้างในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคอนกรีต UHPC ด้วย โดยเปรียบเทียบวิธีการยึดเหนี่ยว 2 รูปแบบได้แก่ การยึดเหนี่ยวด้วยการสกัดพื้นผิว (Concrete Chipping) และการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน ASTM C293 ด้วยคานขนาดความกว้าง 10 ซม. ยาว 50 ซม. สูง 10 ซม. แบบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-point loading), การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting test) ASTM C496 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีต (Pull off test) กับชั้น UHPC ความหนา 2 และ 5 ซม. โดยจะวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยคอนกรีต UHPC ผลการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังด้วย UHPC ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 22%

คำสำคัญ: การเสริมกำลัง, การยึดเหนี่ยว, คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ, แรงยึดเหนี่ยว, การทดสอบกำลังรับแรงดึง, การเตรียมพื้นผิว

Abstract

Reinforced concrete structures are currently widely utilized across many countries, with variations in their application depending on specific functional requirements. Strengthening reinforced concrete structures is an effective strategy to extend the service life of buildings. Structural strengthening not only serves to repair deteriorated structures but also enhances the overall performance of both new and existing structures, particularly for load-bearing elements under actual service conditions. Among various strengthening methods, the use of Ultra-high Performance Concrete (UHPC) has emerged as a promising solution.

This study investigates the bond performance between reinforced concrete beams strengthened with UHPC. Two surface preparation techniques are compared: Concrete Chipping and Epoxy Bonding. Flexural strength tests were conducted according to ASTM C293 on beams measuring 10 cm in width, 50 cm in length, and 10 cm in height under center-point loading. Splitting tensile strength tests were performed following ASTM C496, and pull-off strength tests were carried out to evaluate the bond strength between the UHPC overlay and the substrate concrete, using UHPC layers with thicknesses of 2 cm and 5 cm. The results were compared to those of control specimens without UHPC strengthening. The findings indicate that strengthening with UHPC can enhance the flexural performance of reinforced concrete beams by up to 22%.

Keywords: Reinforced, Bonding, Ultra-high performance concrete, Bonding force, Pull-off test, Surface preparation

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบเดิมมีการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างที่แตกต่างหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นรูปการใช้วัสดุทั่วไปที่มีขายในท้องตลาดหรือรูปแบบการเสริมกำลังด้วยวัสดุพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง แต่ในปัจจุบันการใช้งานโครงสร้างของโครงสร้างต่างๆไม่ว่าจะเป็นอาคาร หรือสะพานที่มีการรับน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้นอาจทำให้การใช้วัสดุเสริมกำลังแบบเดิมที่มีอยู่ไม่เพียงพอหรือสึกหรอได้เร็วกว่าที่ควร การพิจารณาเลือกวัสดุในการเสริมกำลังจึงเป็นปัจจัยหลัก เพื่อให้การเสริมกำลังมีคุณภาพและสามารถทำงานได้ง่าย

คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ หรือ Ultra-High Performance Concrete (UHPC) จึงเป็นตัวเลือกที่นำมาใช้การเสริมกำลังให้กับพื้นที่หน้าตัดที่มีน้ำหนักมากกระทบต่อโครงสร้างได้อย่างดี การเสริมกำลังด้วย UHPC นอกจากคุณสมบัติที่มีกำลังอัดสูงแล้วนั้น การไหล และความคงทนยังมีประสิทธิภาพสูง [1-2] UHPC มีการใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3-4] การนำ UHPC มาใช้เสริมกำลังจึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ดี ในเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้าง มีอายุการใช้งานและประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

ทั้งนี้การเสริมกำลังด้วยคอนกรีตให้กับพื้นผิวคอนกรีตเดิมมีปัจจัยในการทำงานอย่างหนึ่งที่สำคัญคือการยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของคอนกรีตใหม่เข้ากับคอนกรีตเก่า การยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของคอนกรีตใหม่และคอนกรีตเก่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลกับประสิทธิภาพในการเสริมกำลัง เช่น การทำความสะอาดพื้นผิว ความชื้น หรือแม้กระทั่งลักษณะของพื้นผิว หรือพื้นผิวเดิมมีลักษณะเรียบหรือขรุขระนั้นอาจทำให้คอนกรีตใหม่ไม่สามารถยึดเกาะได้ดี การหลุดร่อนหรือการหดตัว (Shrinkage) การเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตเก่าก่อนการเสริมกำลังจึงมีหลายหลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วย UHPC ได้แก่ การพ่นทราย (Sandblast), การใช้สลักยึด (Anchorage), การตัดด้วยความเย็น (Water Jetting), การสกัดพื้นผิว (Concrete Chipping) และการใช้สารเคมีเช่น อีพ็อกซีในการยึดเหนี่ยว [5]

การเลือกใช้วิธีการเตรียมพื้นผิวที่แตกต่างนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมกำลังมีความแตกต่างกันไปด้วย โดยการศึกษาพฤติกรรมการเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการเสริมกำลังด้วย UHPC บนพื้นผิวของคานคอนกรีตปกติที่มีพื้นผิวพ่นทราย จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรับกำลังที่เปลี่ยนแปลงจากการวิบัติแบบเปราะเป็นการวิบัติแบบเหนียวและแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งในแรกเริ่ม ได้มีการศึกษาการยึดเหนี่ยวด้วยรูปการใช้สารเคมีอีพ็อกซีมาทากับพื้นผิวคอนกรีตปกติก่อนทำการเททับด้วย UHPC จะพบว่าความสามารถในการรับกำลังของคานเมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีแรงกดคานสองจุดจะพบว่าความสามารถในการรับกำลังแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกัน Bahraq และคณะ [6-7] จากนั้นได้มีการศึกษาการยึดเหนี่ยวในลักษณะเดียวกันกับ Bahraq โดยจะมีการศึกษาการจำลองรูปแบบการวิบัติด้วยวิธี Finite element (FE) ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการยึดเหนี่ยวทั้งสองมีประสิทธิภาพที่คล้ายคลึงกันและการจำลองด้วย FE มีความสามารถ

ในการรับกำลังแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน Al-Osta และคณะ [8] และในงานวิจัยที่มีการศึกษาความสามารถในการรับแรงเมื่อมีการเพิ่มพื้นผิวให้กับคอนกรีตปกติ โดยใช้วิธีที่มีอยู่เดิมคือการสกัดพื้นผิวเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตปกติและ UHPC Spyridon A. Paschalis [9] ได้ทำการทดลองความสามารถในการรับกำลังเมื่อมีการเสริมด้วย UHPC กับพื้นผิวที่สกัดจะพบว่าความสามารถในการรับกำลังสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีเสริมด้วย UHPC

นอกจากพื้นผิวที่เป็นปัจจัยในการยึดเหนี่ยวด้วยนั้น Luo และคณะ [10] ยังพบอีกว่าปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการยึดเหนี่ยวด้วยสารเคมีอีพ็อกซี คือความชื้นที่อยู่ในตัวอย่างของคอนกรีต โดยในการศึกษาได้มีการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต กับพื้นผิวทั้งหมด 3 สถานะ ได้แก่ พื้นผิวแห้งสนิท (Oven drying), พื้นผิวแห้งด้วยอากาศ (Air surface dry; AD) และ พื้นผิวอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry; SSD) จะพบว่าความชื้นจากตัวอย่างพื้นผิวอิ่มตัวผิวแห้ง มีความแตกต่างจากพื้นผิวแห้งสนิท และพื้นผิวแห้งด้วยอากาศ เนื่องจากกลไกของพันธะระหว่างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ที่จะส่งผลต่อการทำงานของสารเคมี

นั่นจึงทำให้งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตปกติและคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษเพื่อการเสริมกำลังโครงสร้าง โดยพิจารณาการพื้นผิวคอนกรีตปกติ 4 รูปแบบ ได้แก่ 1. พื้นผิวปกติ (พื้นผิวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ) , 2. พื้นผิวสกัด (พื้นผิวที่ผ่านการเตรียมผิวโดยการสกัด), 3. พื้นผิวแห้งในอากาศด้วยอีพ็อกซี และ 4. พื้นผิวอิ่มตัวผิวแห้งทาด้วยอีพ็อกซี จากนั้นทำการเสริมกำลังด้วย UHPC ให้กับตัวอย่างทั้งหมด 4 การทดสอบได้แก่ 1. การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตกับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ซม. 2. การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตกับตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. 3. Flexural Strength Test กับตัวอย่างคานขนาด 10×10×50 ซม. และ 4.การทดสอบกำลังรับแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีต กับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 ซม. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเสริมกำลังเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลัง, เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวแต่ละรูปแบบ อีกทั้งเพื่อเปรียบเทียบความชื้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีและความสามารถในการรับแรงที่แตกต่างของความชื้นกับพื้นผิวคอนกรีต

2. ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษากฎการการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตปกติและคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษเพื่อการเสริมกำลังโครงสร้าง โดยจะมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวในรูปแบบที่แตกต่างได้แก่การยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวปกติ, การยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวที่ถูกสกัด, การยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวที่มีการใช้สารเคมีด้วยการทาสีอีพ็อกซีที่ผิวตัวอย่าง ซึ่งปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของอีพ็อกซีคือความชื้นที่พื้นผิวของคอนกรีต ทำให้งานวิจัยนี้จึงเพิ่มขอบเขตการวิจัยอีกอย่างสำหรับการใช้อีพ็อกซีคือการพิจารณาที่พื้นผิวแห้งด้วยอากาศ (AD) และพื้นผิวอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) โดยที่

ตัวอย่างคอนกรีตทั่วไปจะทำการบ่มจนครบ 28 วันจากนั้นพิจารณาการทดสอบหลังเสริมกำลังด้วย UHPC ที่ 7 วัน และ 28 วันตาม โดยอัตราการการส่วนผสมของคอนกรีตในตารางที่ 1 คอนกรีตปกติที่ใช้จะมีกำลังอัดอยู่ที่ 280 ksc ที่อายุ 28 วัน และคอนกรีต UHPC มีกำลังอัดอยู่ที่ 1,300 - 1,400 ksc ที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ตัวอย่าง	วัสดุ						
	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ	สารผสม เพิ่ม	Silica Fume	Steel fiber
คอนกรีต ปกติ	1	2	4	0.4	-	-	-
UHPC	1	1.05	-	0.18	0.023	0.14	0.16

2.1 วัสดุ

การเลือกใช้วัสดุสำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาจากท้องตลาดที่มีในปัจจุบัน เพื่อให้การทำงานมีความสะดวกมากขึ้น โดยในเมื่อก่อนการผสม UHPC จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แต่ด้วยในปัจจุบัน กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบเดิมก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยรวม การเลือกใช้วัสดุที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้น้อยลงจึงเป็นผลทำให้งานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบไฮบริด

2.2.1 สมบัติของวัสดุ

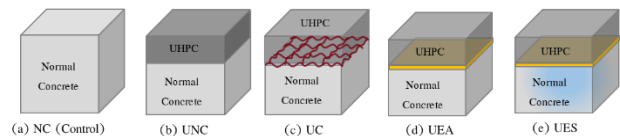
- 1.) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) เป็นปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป (GU) ที่ใช้ขั้นตอนในการผลิตจะใช้พลังงานทดแทนแทนการใช้ถ่านหิน ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556
- 2.) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ใช้สำหรับ UHPC เนื่องจากจะช่วยในการเพิ่มกำลัง และเพิ่มความหนาแน่นให้กับคอนกรีต อีกทั้งยังลดรอยแตกจากการหดตัว ในงานวิจัยจะใช้ซิลิกาฟุ้ง ชนิด Unidentified ที่รับรองจาก ISO 9001 คุณสมบัติมีความหนาแน่น 200-350 kg/m³ ความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม./กก. มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm
- 3.) ทราย (Sand) งานวิจัย UHPC จะเลือกใช้ทรายละเอียดเบอร์ 30 ซึ่งจะต้องไม่มีสิ่งแปลกปลอมและสารเคมีเจือปน
- 4.) สารผสมเพิ่ม ในงานวิจัย UHPC จะเลือกใช้สารผสมเพิ่มคือสารลดน้ำประสิทธิภาพสูง (High-range water-reduction admixture; HRWRA)
- 5.) เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) เส้นใยเหล็กจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง และเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีต ขนาดที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มม. ยาว 6 มม.แรงดึง 3,000 (นิวตัน/มม.)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบตัวอย่างกับคอนกรีตควบคุม 1 ชุด และคอนกรีตปกติที่มีการเททับด้วย UHPC จำนวน 4 ชุดตามรูปที่ 1 โดยชื่อตัวอย่างแต่ละชุดได้จำแนกตามประเภทของการเสริมกำลังกับพื้นผิวรูปแบบต่างๆ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดตัวอย่าง

การจำแนกประเภท	การเตรียมตัวอย่าง	ชื่อตัวอย่าง
ชุดคอนกรีตปกติ	คอนกรีตปกติ	NC
ชุดคอนกรีตปกติและ UHPC	คอนกรีตปกติผิวแห้งแบบไม่สกัดผิว + UHPC	UNC
	คอนกรีตปกติผิวแห้งแบบสกัดผิว + UHPC	UC
	คอนกรีตปกติผิวแห้งในอากาศหาวีฟ็อกซ์ + UHPC	UEA
	คอนกรีตปกติผิวแห้งหาวีฟ็อกซ์ + UHPC	UES



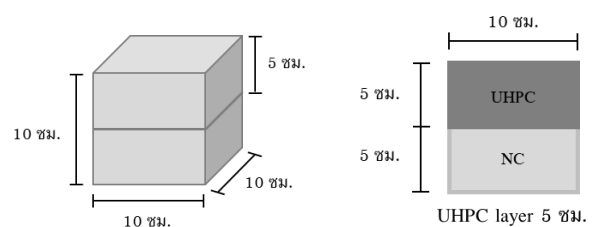
รูปที่ 1 รูปแบบการเตรียมพื้นผิวคอนกรีตปกติ

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้มีการทดสอบกับตัวอย่างทั้งหมด 4 การทดสอบดังตารางที่ 1 โดยรายละเอียดการทดสอบทั้งหมดมีดังนี้

2.3.1 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 [11] สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ตัวอย่างขนาด 10×10×10 ซม. โดยความหนาของ UHPC ชุดที่มีการเททับด้วย UHPC นั้นจะมีความหนาของคอนกรีตปกติที่ 5 ซม. และ UHPC 5 ซม.

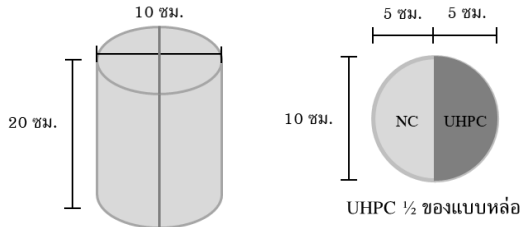


รูปที่ 2 แบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting test)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting test) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [12] งานวิจัยนี้ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. โดยจะทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตปกติครึ่งแบบหล่อแบ่งเป็นสองซีกซ้ายขวา เมื่ออายุครบ 28 วัน จากนั้นทำการเตรียมพื้นผิวและหล่อ UHPC อีกครึ่งหนึ่งแล้วบ่มตามอายุการทดสอบที่กำหนด



รูปที่ 3 แบบจำลองตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต

2.3.3 Flexural Strength Test

การทดสอบ Flexural Strength Test ตามมาตรฐาน ASTM C293 [13] งานวิจัยนี้ให้แบบหล่อคานขนาด 10×10×50 ซม. โดยการหล่อคอนกรีตปกติจะมีความสูงอยู่ที่ 8 ซม. และเททับด้วย UHPC 2 ซม. เติมน้ำแบบหล่อโดยการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตในรูปแบบโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ได้ตามสมการดังนี้

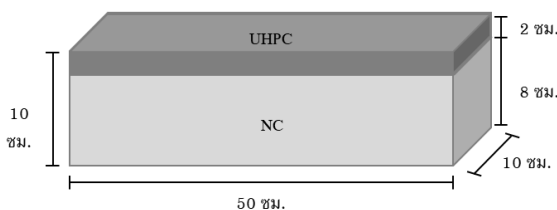
$$f_b = \frac{PL}{bd^2}$$

f_b = โมดูลัสการแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)

P = น้ำหนักสูงสุด (กก.)

L = ช่วงยาวคาน (ซม.)

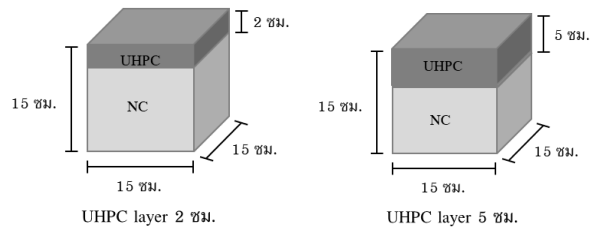
b, d = ความกว้าง, ความลึกของคาน (ซม.)



รูปที่ 4 แบบจำลองตัวอย่างการทดสอบ Flexural Strength Test

2.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีต (Pull off test)

การทดสอบแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีต (Pull off test) ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [14] งานวิจัยนี้จะทำการแยกตัวอย่างจำนวน 2 ชุดคือ 1.ชุดที่มีการเททับด้วย UHPC หนา 2 ซม. และ 2.ชุดที่มีการเททับด้วย UHPC หนา 5 ซม. แบบหล่อที่ใช้เป็นแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 ซม.



รูปที่ 5 แบบจำลองตัวอย่างการทดสอบ Pull off test

3. ผลการวิจัย

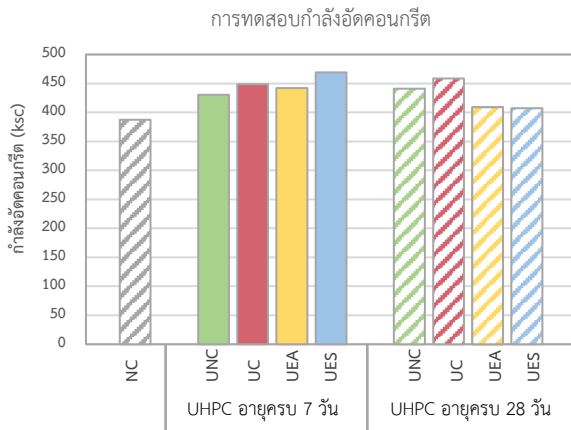
3.1 ผลการทดสอบกำลัง

จากการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตความสามารถในการรับแรงอัดเมื่อมีการเสริมกำลังด้วย UHPC ที่อายุ 28 วันแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าการเสริมทำให้มีกำลังเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง NC ที่อายุ 28 วัน ในรูปที่ 6 โดยกำลังอัดตัวอย่าง UNC, UC, UEA และ UES จะเพิ่มขึ้น 13.96%, 18.52%, 5.55% และ 5.24% ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบตัวอย่างที่ UHPC อายุครบ 7 วันกับอายุครบ 28 วัน สำหรับการยึดเหนี่ยวด้วยรูปแบบปกติและแบบสกัดเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการรับกำลังอัดก็จะมากขึ้นตามโดยตัวอย่าง UNC และ UC จะเพิ่มขึ้น 2.43% และ 3.42% ตามลำดับ แต่ในส่วนของการยึดเหนี่ยวโดยใช้อีพ็อกซีเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับกำลังจะลดลง แต่ในทางพฤติกรรมการวิบัติการยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวปกติอายุ UHPC ครบ 28 วัน เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วนั้นการหลุดร่อนของคอนกรีตปกติและ UHPC เกิดขึ้นในลักษณะการแยกออกเป็นสองชิ้นโดยกำลังอัดของตัวอย่าง UEA และ UES จะลดลง 7.55% และ 13.14% ตามลำดับด้วยคุณสมบัติของอีพ็อกซีที่เมื่อระยะเวลาในการก่อตัวนานมากขึ้นจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งที่เปราะและยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวเป็นแบบแผ่นฟิล์มนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เมื่อระยะเวลาครบ 28 วันตัวอย่าง UEA และ UES เกิดการหลุดร่อนเมื่อทำการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างที่ยึดเหนี่ยวด้วยวิธีอื่นยังไม่มีหลุดร่อนของชั้น UHPC แต่ชั้นคอนกรีตปกติของตัวอย่าง UNC และ UC จะวิบัติเยอะกว่าตัวอย่างที่มีการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซี คือเกิดการหลุดร่อนที่บริเวณโดยรอบที่ชั้นคอนกรีตปกติของตัวอย่าง UNC และ UC อีกทั้งมีการแตกร้าวและเสียหายที่ชั้นคอนกรีตปกติทั้งสี่ด้าน นั้นจึงทำให้การใช้อีพ็อกซีสามารถช่วยลดการวิบัติที่ชั้นของคอนกรีตปกติที่เปรียบเสมือนโครงสร้างเดิมได้ดีกว่าการไม่ใช้ แต่ในด้านกำลังรูปแบบการทำงานที่ไม่ใช้อีพ็อกซีจะมีกำลังที่สูงกว่า

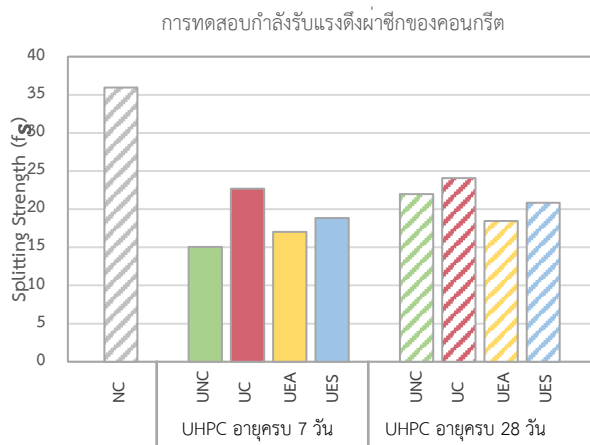
3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting test)

จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตการยึดเหนี่ยวในรูปแบบทั้งหมด 4 รูปแบบ จะพบว่าความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีตปกติที่ใช้ UHPC ร่วมกัน เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการรับแรงดึงจะเพิ่มตาม แต่หากเปรียบเทียบกับ NC จะพบว่าตัวอย่างที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมด 4 รูปแบบ ความสามารถในการรับดึงลดลงมา 22% เมื่อเทียบกับ UHPC ที่

อายุครบ 28 วัน และลักษณะรูปแบบในการวิบัติจะพบได้ว่าตัวอย่าง UC จะสามารถรับกำลังแรงดึงผ่าซีกได้ดีกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากพื้นผิวของตัวอย่างที่ไม่ได้สกัดและใช้อีพ็อกซีนั้นจะมีลักษณะการวิบัติที่หลุดร่อนออกมาพร้อมกันทั้งพื้นผิว แต่หากเปรียบเทียบกับตัวอย่างรูปแบบเดียวกันที่อายุต่างกันนั้นจะพบว่า UNC, UC, UEA และ UES ที่อายุครบ 28 วัน จะมีความสามารถในการรับแรงดึงผ่าซีกได้เพิ่มขึ้น 46.14%, 5.96%, 8.22% และ 10.65% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับอายุครบ 7 วัน



รูปที่ 6 กราฟแสดงกำลังอัดคอนกรีต



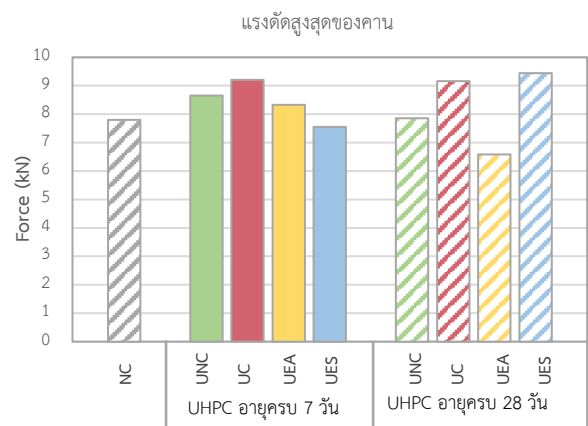
รูปที่ 7 กราฟแสดงผล Splitting test

3.3 ผลการทดสอบ Flexural Strength Test

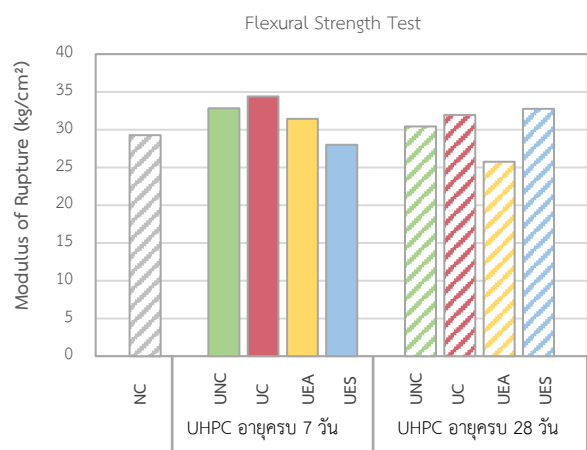
การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตจะพบว่า การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นสองครั้ง ในครั้งแรกจะเกิดการวิบัติสูงสุด ณ จุดที่ยังไม่วิบัติถึงรอยต่อระหว่างคอนกรีตปกติและ UHPC ในทุกตัวอย่างและการวิบัติครั้งที่สอง จะเป็นการวิบัติที่ UHPC จะเห็นได้ว่าความสามารถในการยึดเหนี่ยวของ UHPC ส่งผลทำให้คานตัวอย่างไม่เกิดการวิบัติแบบคานคอนกรีตปกติ คุณสมบัติพิเศษของ UHPC ช่วยเปลี่ยนสถานะการวิบัติของ

คานคอนกรีตจากที่จะก่อให้เกิดรูปแบบการแตกหักแบบเปราะเป็นลักษณะแบบยืดแทน

เมื่อหลังจากการทดสอบแล้วนั้นหาจุดตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำสูงสุด โดยจะเลือกจากตำแหน่งที่เกิดขึ้นหลังการวิบัติที่ระหว่างการยึดเหนี่ยวจะพบว่าตัวอย่าง UES นั้นเมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการรับแรงดัดจะเพิ่มมากขึ้นต่างจากรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากในการทดสอบพื้นผิวรูปแบบอื่นมีการวิบัติที่ระหว่างการยึดเหนี่ยวชั้น UHPC ที่มีการเสริมกำลังให้กับคานจะเกิดการหลุดร่อนทำให้ความสามารถในการรับกำลังแรงดัดลดลงทั้งพื้นผิวส่งผลให้การวิบัติที่ UHPC เกิดขึ้นเร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่มีหลุดร่อนของชั้น UHPC และหากเปรียบเทียบจากกำลังสูงสุดจากกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงแรงดัดสูงสุดของคาน



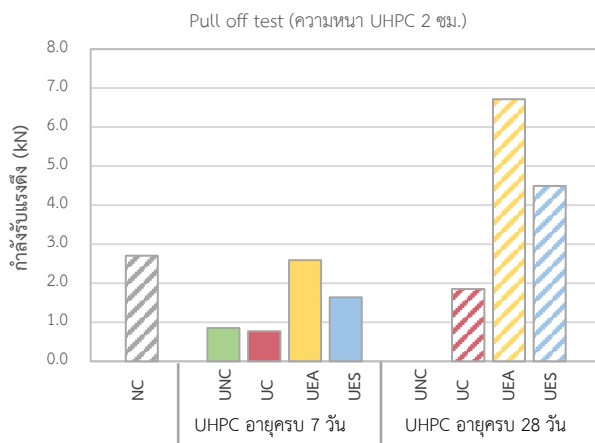
รูปที่ 9 กราฟแสดงผลโมดูลัสการแตกร้าว

จะพบว่าตัวอย่าง UES สามารถรับแรงอัดได้ดีที่สุดเมื่อ UHPC อายุครบ 28 วัน และหากเปรียบเทียบตัวอย่างแต่ละรูปแบบกับคาน NC ตัวอย่าง UNC, UC และ UES ความสามารถในการรับแรงดัดที่จุดสูงสุดจะเพิ่มขึ้น 0.76%, 17.44% และ 21.09% ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่าง UEA เมื่อ

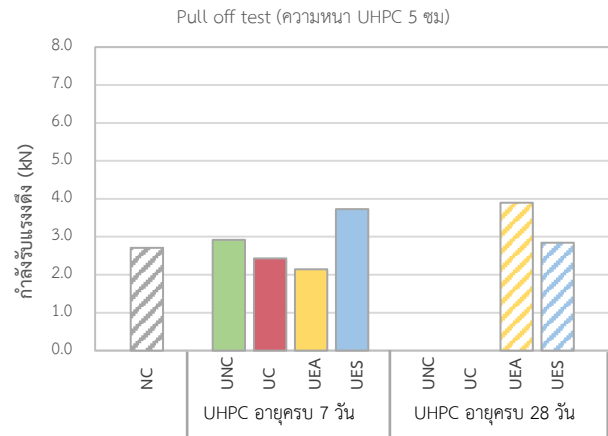
อายุครบ 28 วันความสามารถในการรับกำลังลดลงมา 15.64% ทำให้ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (f_p) ในรูปที่ 9 มีลักษณะอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายกับรูปที่ 9 โดยหากเปรียบเทียบกับคาน NC ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของตัวอย่าง UNC, UC และ UES จะมีค่าเพิ่มขึ้น 3.88%, 9.09% และ 11.85% ตามลำดับ แต่ตัวอย่าง UEA ที่อายุครบ 28 วันค่าโมดูลัสการแตกร้าวจะลดลงไป 12.08% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคาน NC

3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีต (Pull off test)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงหรือแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวคอนกรีตจะพบว่าตัวอย่าง UNC ที่อายุครบ 28 วันกับตัวอย่างแท่น UHPC หน้า 2 และ 5 ซม. นั้นไม่สามารถนำค่ากำลังรับแรงดึงได้เนื่องจากในขณะเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเกิดการหลุดร่อนของชั้น UHPC ทำให้ค่าการทดสอบจึงเป็นศูนย์ แต่หากเปรียบเทียบกับความหนาของชั้น UHPC ความหนาที่ 2 ซม. รูปแบบการยึดเหนี่ยวที่ใช้อีพ็อกซีจะมีประสิทธิภาพดีมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่าง UEA และ UES ที่ความหนาของชั้น UHPC 2 ซม. อายุครบ 28 วันในรูปที่ 10 แรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้น 148.24% และ 65.98% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง NC ที่อายุครบ 28 วัน และความหนาของชั้น UHPC 5 ซม. ในรูปที่ 11 ตัวอย่าง UEA และ UES แรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้น 44.18% และ 5.18% ตามลำดับ หากพิจารณาจากการหลุดร่อนของตัวอย่างที่ UC ที่อายุครบ 28 วัน ในรูปที่ 11 ที่ชั้น UHPC หน้า 5 ซม. จะพบว่าตัวอย่างที่มีการหลุดร่อนที่พื้นผิวระหว่างรอยต่อของตัวอย่าง UC และหากเปรียบเทียบกับการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซีกับพื้นผิวความชื้นที่แตกต่างกันแล้วนั้นจะพบว่าความหนาทั้งสองระยะตัวอย่าง UEA จะมีประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าตัวอย่าง UES เนื่องจากตัวอย่าง UES เมื่อระยะความหนาของชั้น UHPC เพิ่มขึ้นความสามารถในการยึดเหนี่ยวลดลงมา 36.64% เมื่อเปรียบเทียบกับอายุครบ 28 วัน



รูปที่ 10 กราฟแสดงกำลังรับแรงดึง (ชั้น UHPC หน้า 2 ซม.)



รูปที่ 11 กราฟแสดงกำลังรับแรงดึง (ชั้น UHPC หน้า 5 ซม.)

4. สรุป

ผลการวิจัยการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมรณณะสูงพิเศษเพื่อการเสริมกำลังโครงสร้าง หากเปรียบเทียบความสามารถกับตัวอย่าง NC จะพบว่าความหนาของชั้น UHPC ในแต่ละรูปแบบยังมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึงดัดหากพิจารณาที่ระยะเพิ่มมากขึ้นตัวอย่าง UNC และ UC จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวอย่างที่มีการใช้อีพ็อกซีแต่ลักษณะการหลุดร่อนนั้นของตัวอย่างที่ใช้อีพ็อกซีจะทำให้ลดการแตกร้าวหรือหลุดร่อนของคอนกรีตปกติได้ดีกว่ารูปแบบอื่น นั้นทำให้รูปแบบที่ยึดเหนี่ยว UHPC ส่งผลกระทบต่อคอนกรีตปกติลดลงด้วยเช่นกัน และการรับกำลังดัดและการยึดเหนี่ยวนั้นตัวอย่างที่ยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซีจะสามารถรับกำลังได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้ ด้วยลักษณะการวิบัติที่ไม่มีการหลุดร่อนออกมาอย่างแยกชั้น ทำให้การทำงานของคุณสมบัติ UHPC มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังให้กับคานดีขึ้น และการรับแรงดึงก็มีประสิทธิภาพ

หากการพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่ยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซีกับพื้นผิวที่แห้งในอากาศและอิมมัลชันจะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับแรงดัดมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ด้วยลักษณะการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน หากจะพิจารณาในการใช้งานนั้นอาจจะต้องเลือกใช้ตัวอย่างที่คอนกรีตผิวแห้งในอากาศ เพื่อความสะดวกในการทำงาน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังที่ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธาในการใช้อุปกรณ์ รวมไปถึงห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบคอนกรีตต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทวัฒน์ ขมหวาน และ นิมิตร เติตฉันทิพัฒน์ (2017). Thailand 4.0 : อุตสาหกรรม Ultra High Performance Concrete (UHPC). *TCA e-magazine วารสารคอนกรีต*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 30, หน้า 10-21.
- [2] Patomphop Wongtala, Nida Chaimoon, Nantawat Khomwan, Krit Chaimoon (2023). Experimental and numerical study on structural behavior of reactive powder concrete corbels without stirrups. *Case Studies in Construction Materials*, 19, pp.e02372.
- [3] จุฑา มีพฤษ และ วิทิต ปานสุข. (2554) *การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงมากเพื่อการซ่อมแซมพื้นผิวถนนคอนกรีตโดยวิธีเททับหน้า*. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ประเทศไทย, หน้า 46-72.
- [4] Haibo Jiang , Wenjie Tu , Mingyi Li , Weibin Liang and Xingjun Gao (2024). Flexural performance of UHPC-filled narrow joints between precast concrete bridge slabs. *Case Studies in Construction Materials*, 22, pp.e04187.
- [5] F. B. Ahmed, R. K. Biswas, D. Sen and S. Tasnim (2024). Flexural and Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Construction Materials*, 4, pp.468-492.
- [6] A. A. Bahraq, M. A. Al-Osta, S. Ahmad, M. M. Al-Zahrani, S. O. Al-Dulaijan and M. K. Rahman (2019). Experimental and numerical investigation of shear behavior of RC beams strengthened by ultra-high performance concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13, pp.1-19.
- [7] Bahraq, A.A.A. (2017). *Shear Behaviour of RC Beams Strengthened by Ultra- High Performance Concrete (UHPC)*. Master's Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, pp.73-104.
- [8] M.A. Al-Osta, M.N. Isa, M.H. Baluch and M.K. Rahman (2017). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 134, pp. 279-296.
- [9] S. A. Paschalis (2017). *Strengthening of existing reinforced concrete structures using ultra high performance fiber reinforced concrete*. PhD Dissertation, University of Brighton, England.
- [10] Q. Luo, T. Qin, Z. Chen, B. Pang, J. Qu and Z. Gao (2023). The influence of moisture and epoxy bonding agents on interfacial behavior between normal concrete substrate and ultrahigh performance concrete as a repair material: Experimental and molecular dynamics study. *Construction and Building Materials*, 372, pp.130779.
- [11] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [12] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [13] ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Centre-Point Loading).
- [14] ASTM D4541. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers.