

ผลกระทบของประเภทรอยต่อหน้าสัมผัสต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่างคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีต สมรรถนะสูงพิเศษ

Effect of Interface Joint Types on Shear Bond Strength Between Normal Concrete and Ultra-High Performance Concrete

ลีน่า ปริก^{1,*} ปิติศานต์ กร้ามาตร² พุฒิพงศ์ ศรีมุข³ ทวีชัย สำราญวานิช⁴ กันต์ไชย ธนาพรวิภักดิ์⁵ และ สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล⁶

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

^{5,6} ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: lyna_p@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของประเภทรอยต่อหน้าสัมผัสต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่างคอนกรีตธรรมดา (NC) และคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC) โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่มีลักษณะรอยต่อหน้าสัมผัสหกประเภทที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ลักษณะพื้นผิวรอยต่อหน้าสัมผัสมีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC อย่างมีนัยสำคัญ จากลักษณะพื้นผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสทั้งหมดพบว่า พื้นผิวรอยต่อหน้าสัมผัสแบบบากร่องให้กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนสูงกว่าพื้นผิวรอยต่อหน้าสัมผัสแบบอื่น ผลการศึกษานี้แสดงถึงความสำคัญของการออกแบบประเภทรอยต่อหน้าสัมผัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC

คำสำคัญ: คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ, กำลังยึดเหนี่ยวเฉือน, รอยต่อหน้าสัมผัส

Abstract

This research aims to study the influence of interface joint types on shear bond strength between normal concrete (NC) and ultra-high performance concrete (UHPC) via a push-out test. Specimens with six different types of interface joints were tested. The results indicate that the shear bond strength between NC and UHPC varies significantly based on the interface conditions. Among the interface joints, groove joints showed higher shear bond strength than other interface conditions. These findings show the importance of interface design in optimizing the shear bond strength between NC and UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete, shear bond strength, interface joint

1. คำนำ

คอนกรีตธรรมดา (Normal concrete, NC) อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายและรวดเร็วเนื่องจากคุณสมบัติทางกลและความทนทานที่ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะเมื่อต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงซึ่งส่งผลทำให้มีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควรจะเป็น จำเป็นต้องมีการซ่อมแซมและเสริมความแข็งแรงเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง เทคนิคการซ่อมแซมและเสริมกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหายจากการทำลายโดยสิ่งแวดล้อมรุนแรงหรือเนื่องจากแรงกระทำต่าง ๆ เช่น การหุ้มโอบรัดด้วยเหล็ก การหุ้มโอบรัดด้วยคอนกรีต [1-3] การหุ้มโอบรัดด้วยโพลีเมอร์เสริมไฟเบอร์ (Fiber-reinforced polymer, FRP) [4, 5] หรือการอัดฉีดด้วยวัสดุยาแนวโพลียูรีเทน [6] เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม เทคนิคเหล่านี้ก็มีจุดอ่อน ตัวอย่างเช่น การซ่อมแซมด้วยวิธีการหุ้มโอบรัดด้วยคอนกรีตจะต้องใช้แรงงานมาก ในขณะที่การซ่อมแบบหุ้มโอบรัดด้วยเหล็กจะเผชิญกับปัญหาการกัดกร่อนของเหล็ก ส่วนการใช้ FRP มีต้นทุนที่สูงและความทนทานก็ยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะเมื่อต้องเผชิญในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ในการกำหนดวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างถูกพิจารณาเลือกตามระดับความเสียหายและตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหาย ตัวอย่างเช่น การใช้สารอุดรอยแตกกร้าว การเททับด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต หรือการฉาบปิดเหมาะกับการซ่อมแซมพื้นและขอบบนของคานสะพาน [1, 7] ในขณะที่ FRP เหมาะกับการใช้ในการซ่อมแซมความเสียหายส่วนด้านข้างและด้านล่างของโครงสร้าง [8, 9]

ปัจจุบัน คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (Ultra-high performance concrete, UHPC) กำลังได้รับความสนใจและถูกนำมาศึกษาวิจัยเพื่อใช้ในงานซ่อมแซมและใช้เป็นแบบหล่อถาวร (คอนกรีตสำเร็จรูป) สำหรับงานก่อสร้างใหม่ ซึ่งเมื่อใช้เป็นแบบหล่อถาวร UHPC สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรองรับและแบบหล่อในเวลาเดียวกันทั้งในระหว่างก่อสร้างและช่วงใช้งานโครงสร้าง [10, 11] ด้วยคุณสมบัติทางกลที่ยอดเยี่ยม มีความทนทาน และความต้านทานสูงต่อการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม UHPC กำลังได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมก่อสร้างตลอดจนการฟื้นฟูและการปรับปรุง

โครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตได้ [1, 12, 13] อย่างไรก็ตาม การผสมผสานรวมกันระหว่าง UHPC กับวัสดุอื่น เช่น คอนกรีตธรรมดา (NC) นับเป็นสิ่งที่มีความท้าทาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งเป็นตำแหน่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่คาดหวังให้วัสดุทั้งสองชนิดทำงานร่วมกันเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างคอมโพสิต จากงานวิจัยในอดีตมีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง UHPC และ NC โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัส เช่น ผลของการเตรียมพื้นผิวหน้าสัมผัส วิธีการบ่ม กำลังอัดของ NC และสภาพความชื้นของ NC [14, 15] ซึ่งในบรรดาปัจจัยเหล่านี้ พบว่า สภาพการเตรียมพื้นผิวหน้าสัมผัสของ NC เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง UHPC และ NC [16]

ดังนั้น บทความนี้มุ่งการศึกษาผลกระทบของสภาพการเตรียมพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัสต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC โดยในการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มจากการหล่อ NC ก่อน จากนั้นบ่มจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดจึงหล่อ UHPC ประทับภายหลัง ทั้งนี้เพื่อพิจารณาผลกระทบของ UHPC ต่อกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนเมื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC) และคอนกรีตธรรมดา (NC) ถูกใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ โดย UHPC ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย ซิลิกาฟูม เส้นใยเหล็กความยาว 13 มม. (2.0% โดยปริมาตร) น้ำ และสารเคมีผสมเพิ่มสองประเภท ได้แก่ ประเภท D (ลดน้ำและหน่วงเวลาการก่อตัว) และประเภท F (โพลีคาร์บอกซิเลตอีเทอร์, PCE) ส่วน NC เป็นคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 สารลดน้ำประเภท F (แนฟทาไลน์) และขนาดโกลของมวลรวมหยาบ 19 มม. โดยรายละเอียดส่วนการผสมของคอนกรีตทั้งสองประเภทแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ศึกษา

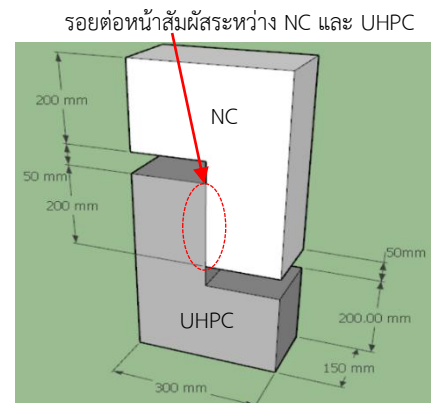
Mix proportions (kg/m ³)		
Materials	UHPC	NC
Cement	963	377
Sand	1,101	780
Silica fume	138	0
Coarse aggregate	-	1030
Steel fiber	156	-
Water	187	189
Water-reducing type D (cc)	2,200	-
Superplasticizer type F (naphthalene-based) (cc)	-	3,800
Superplasticizer type F (polycarboxylate ether) (cc)	27,000	-
Water to binder ratio (w/b)	0.18	0.50

นอกจากนี้ น้ำยาประสานคอนกรีต (Bonding agent, BA) เป็นวัสดุที่ใช้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวหน้าสัมผัสของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งมักใช้ในโครงการก่อสร้างและซ่อมแซม โดยในการศึกษานี้ใช้น้ำยาประสานคอนกรีตชนิดลาเทกซ์ (Latex bonding agent) ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์จากยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการปรับแต่งคุณสมบัติคุณสมบัติที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ คอนกรีต และปูนฉาบ ให้มีการยึดเกาะที่ดีและเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง การขัดถู และแรงกระแทก

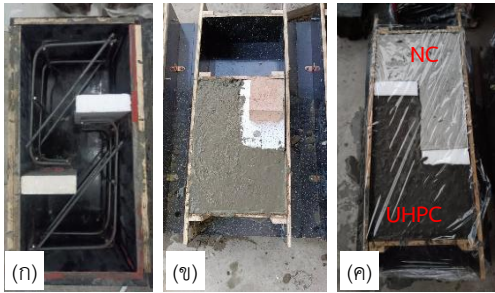
2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

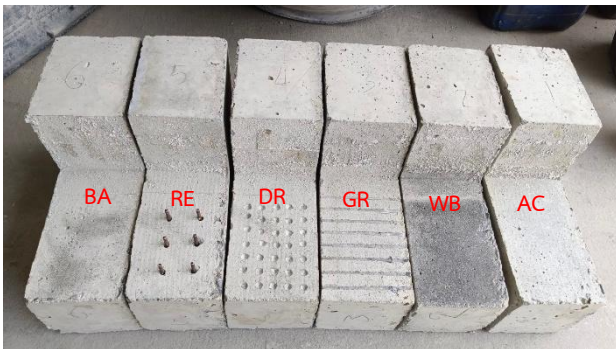
ตัวอย่างทดสอบเป็นชิ้นส่วนประกอบด้วยวัสดุสองชนิดได้แก่ คอนกรีตธรรมดา (NC) และวัสดุซ่อมแซมซึ่งเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC) โดยมีขนาด 700 มม. × 300 มม. × 150 มม. โดยมีพื้นที่ระนาบรับแรงเฉือน (รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC) ขนาด 200 มม. × 150 มม. ตามรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1 ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มจากการหล่อส่วนที่ตัวอย่าง NC ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ตามส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบไว้ จากนั้นทำการถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยวิธีป้องกันการสูญเสียความชื้นโดยใช้พลาสติกหุ้มเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่าง NC มาเตรียมพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสก่อนหล่อ UHPC ประทับ ดังรูปที่ 2(ค) โดยจะถอดแบบที่ 4 วันหลังหล่อ UHPC จากนั้นบ่มตัวอย่างด้วยวิธีการป้องกันการสูญเสียความชื้นโดยใช้พลาสติกหุ้มเป็นระยะเวลา 14 วัน (รวมตั้งแต่วันเริ่มหล่อตัวอย่าง UHPC) ก่อนนำไปทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนโดยวิธีการผลักออก (Push-off test) [17] ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติในส่วนที่ไม่ต้องการก่อนตัวอย่างวิบัติในบริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสหลักกลมผิวเรียบขนาด 9 มม. (RB9) ถูกใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับตัวอย่าง ดังรูปที่ 2(ก) ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือสภาพพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC ซึ่งสภาพพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัสมีหกประเภทแตกต่างกัน ได้แก่ (i) พื้นผิวเรียบ (as cast, AC), (ii) การขัดผิวด้วยแปรงลวด (wire brushing, WB), (iii) การเจาะรู (drill holes, DR), (iv) การบากร่อง (grooves, GR), (v) การเจาะเสียบเหล็ก (rebar embedment, RE) และ (vi) การทาน้ำยาประสาน (bonding agent, BA) สำหรับรายละเอียดการเตรียมพื้นผิวดังแสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดขนาดตัวอย่าง



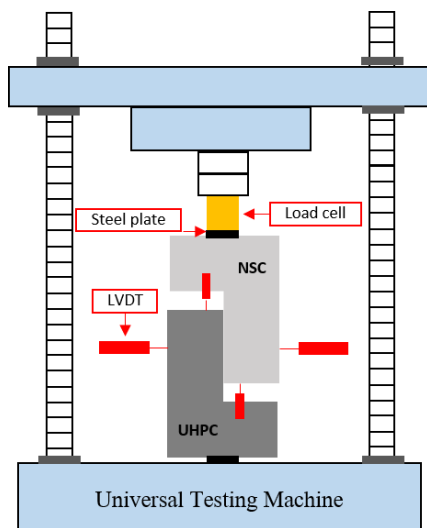
รูปที่ 2 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่าง (ก) รายละเอียดเหล็กเสริม (ข) การหล่อ NC และ (ค) การหล่อ UHPC ประทับกับ NC



รูปที่ 3 รายละเอียดสภาพพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัส

2.2.2 การทดสอบ

การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบผลักออก (Push-off test) [17] มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4 ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ขนาด 100 ตัน โดยหลังจากติดตั้งตัวอย่างเสร็จเริ่มทำการทดสอบโดยการให้แรงแบบสถิตที่ความเร็ว 0.6 มม./นาที ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉือน (Shear bond strength) ระหว่าง NC และ UHPC คำนวณจากแรงสูงสุด (F) ที่ได้จากการทดสอบหารด้วยพื้นที่ผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC (A) ซึ่งมีขนาด 200×150 มม.



รูปที่ 4 การทดสอบแบบผลักออก (Push-off test)

3. ผลการทดสอบและอภิปราย

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดา (NC) และคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC) ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาที่อายุครบ 28 วันมีค่าเท่ากับ 36.6 MPa (373 kg/cm²) ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษที่อายุ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 123.9 MPa (1263 kg/cm²) ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตธรรมดามากคิดเป็น 3.4 เท่าของกำลังอัดคอนกรีตธรรมดา

ตารางที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีต

Concrete types	Compressive strength (MPa)
NC	36.6
UHPC	123.9

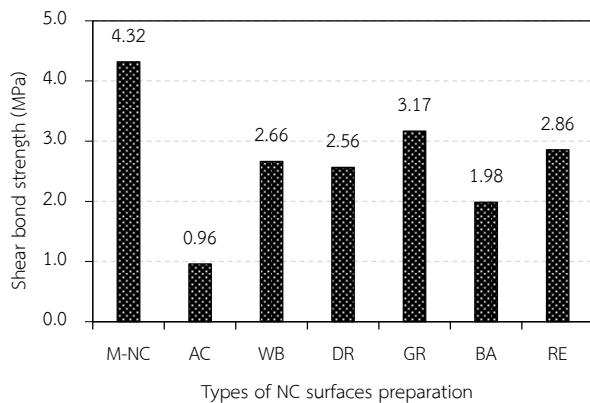
3.2 กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC

ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวเฉือน (Shear bond strength) ที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC จากตัวอย่าง NC-UHPC ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 5 ซึ่งกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนของตัวอย่าง AC, WB, DR, GR, RE และ BA เท่ากับ 0.96, 2.66, 2.56, 3.17, 1.98 และ 2.86 MPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลกระทบของลักษณะพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัสจากรูปที่ 5 พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC ในกรณีที่มีการเตรียมพื้นผิวของ NC มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการเตรียมพื้นผิว (AC) ทุกกรณี เนื่องจากพื้นผิวของ NC ที่มีความขรุขระซึ่งเกิดจากการเตรียมพื้นผิวก่อนหล่อประกบ UHPC จึงสามารถแทรกซึมเข้าไปยึดเกาะตามช่องต่าง ๆ ใน NC ทำให้ตัวอย่าง NC-UHPC สามารถรับแรงได้ดีขึ้น กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC จึงสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากตัวอย่างที่มีการเตรียมพื้นผิวของ NC ที่รอยต่อหน้าสัมผัส พบว่า GR ให้กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนสูงที่สุดรองลงมาเป็น RE, WB, DR และ BA ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการบากร่องทำให้ UHPC สามารถแทรกซึมเข้าไปในร่องและยึดเกาะกับ NC ได้ดีส่งผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนสูงขึ้นตามไปด้วย

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่ได้จากการทดสอบกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระนาบเดียวกันในคอนกรีตธรรมดาที่หล่อเป็นชิ้นเดียว (Monolithic, M-NC) พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่าง NC และ UHPC มีค่าต่ำกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน M-NC เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง M-NC เป็นความต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของคอนกรีตที่ไม่มีรอยต่อซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ที่เป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) ส่งผลทำให้สามารถรับแรงเฉือนได้ดีกว่า โดยกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนของตัวอย่างคอมโพสิต AC, WB, DR, GR, RE และ BA เมื่อเทียบกับตัวอย่าง M-NC มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.22, 61.69, 59.37, 73.33, 45.97 และ 66.15 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่างหน้าสัมผัส NC และ UHPC เทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่หล่อเป็นชิ้นเดียวกัน

Specimen types	Shear bond strength (MPa)	Relative shear bond strength ratio (%)
M-NC	4.32	100.00
AC	0.96	22.22
WB	2.66	61.69
DR	2.56	59.37
GR	3.17	73.33
BA	1.98	45.97
RE	2.86	66.15



รูปที่ 5 กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC

4. บทสรุป

จากการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่างคอนกรีตธรรมดา (NC) และคอนกรีตผสมรณณะสูงพิเศษ (UHPC) สำหรับกรณีที่ UHPC ถูกหล่อบนผิวหน้าสัมผัสของ NC สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังยึดเหนี่ยวเฉือนที่รอยต่อหน้าสัมผัสระหว่างคอนกรีตธรรมดา (NC) และคอนกรีตผสมรณณะสูงพิเศษ (UHPC) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยขึ้นอยู่กับสภาพลักษณะการเตรียมพื้นผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสของคอนกรีตธรรมดา จากลักษณะการเตรียมพื้นผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสทั้งหมดพบว่า การเตรียมพื้นผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสแบบบากร่องให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉือนสูงกว่าลักษณะการเตรียมพื้นผิวที่รอยต่อหน้าสัมผัสแบบอื่น
2. การออกแบบประเภทรอยต่อหน้าสัมผัสมีความสำคัญต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพกำลังยึดเหนี่ยวเฉือนระหว่าง NC และ UHPC

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงาน

คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สัญญาเลขที่ RGNS 65-095) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-shawafi, A., Zhu, H., Bo, Z., Haruna, S.I., Ibrahim, Y.E., Farouk, A.I.B., Laqsum, S.A. and Shao, J. (2024). Bond behavior between normal concrete and UHPC and PUC layers subjected to different loading conditions coupled with fracture analysis technique. *Journal of Building Engineering*, 86, 108880.
- [2] Yang, Y., Du, X., Yu, Y. and Pan, Y. (2020). Experimental study on the seismic performance of composite columns with an ultra-high-strength concrete-filled steel tube core. *Advances in Structural Engineering*, 23, pp. 794-809.
- [3] Hung, C.-C., Hsiao, H.-J., Shao, Y. and Yen, C.-H. (2023). A comparative study on the seismic performance of RC beam-column joints retrofitted by ECC, FRP, and concrete jacketing methods. *Journal of Building Engineering*, 64, 105691.
- [4] Ouyang, L.-J., Chai, M.-X., Song, J., Hu, L.-L. and Gao, W.-Y. (2021). Repair of thermally damaged concrete cylinders with basalt fiber-reinforced polymer jackets. *Journal of Building Engineering*, 44, 102673.
- [5] Wei, Z., Shuaiwen, K., Benqing, L. and Yiqun, H. (2024). Mixed-mode debonding in CFRP-to-steel fiber-reinforced concrete joints. *Journal of Composites for Construction*, 28(1).
- [6] Haruna, S.I., Ibrahim, Y.E., Han, Z. and Farouk, A.I. (2023). Flexural response of concrete specimen retrofitted with PU grout material: experimental and numerical modeling. *Polymers*, 15(20), 4114.
- [7] Granju, J.-L. (2001). Debonding of thin cement-based overlays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(2), pp. 114-120.
- [8] Farzad, M., Sadeghnejad, A., Rastkar, S., Moshkforoush, A. and Azizinamini, A. (2020). A theoretical analysis of mechanical and durability enhancement of circular reinforced concrete columns repaired with UHPC. *Engineering Structures*, 209, 109928.
- [9] Junaedi, H., Khan, T. and Sebaey, T.A. (2023). Characteristics of carbon-fiber-reinforced polymer face sheet and glass-fiber-reinforced rigid polyurethane foam sandwich

- structures under flexural and compression tests. *Materials*, 16(14), 5101.
- [10] Al-Nimry, H.S. and Al-Rabadi, R.A. (2019). Axial–flexural interaction in FRP-wrapped RC columns. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(53).
- [11] Ge, W., Zhang, Z., Ashour, A., Guan, Z., Jiang, H., Sun, C., Qiu, L., Yao, S. and Cao, D. (2023). Flexural performance of prefabricated U-shaped UHPC permanent formwork–concrete composite beams reinforced with FRP bars. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(108).
- [12] Du, J., Meng, W., Khayat, K.H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-oheidah, A., Nassif, H. and Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 224, 109220.
- [13] Li, P.P., Sluijsmans, M.J.C., Brouwers, H. and Yu, Q. (2020). Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107680.
- [14] Zhang, Y., Zhang, C., Zhu, Y., Cao, J. and Shao, X. (2020). An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC. *Construction and Building Materials*, 236, 117480.
- [15] Zhang, Y., Zhu, P., Liao, Z. and Wang, L. (2020). Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material. *Construction and Building Materials*, 235, 117431.
- [16] Farouk, A.I.B. and Jinsong, Z. (2022). Prediction of interface bond strength between ultra-high-performance concrete (UHPC) and normal strength concrete (NSC) using a machine learning approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, pp. 5337–5363.
- [17] Liu, J., Chen, Z., Guan, D., Lin, Z. and Guo, Z. (2020). Experimental study on interfacial shear behaviour between ultra-high performance concrete and normal strength concrete in precast composite members. *Construction and Building Materials*, 261, 120008.