



# ตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่

วาสิฏฐภุช จันท์เกตุ และ ชูชัย สุจิรวงศ์\*

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chuchai.suj@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 10 มกราคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 17 มกราคม 2565  
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 14 เมษายน 2565

**บทคัดย่อ:** การเชื่อมประสานคอนกรีตใหม่บนคอนกรีตเดิมสำหรับการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังโครงสร้างจะต้องคำนึงถึงการถ่ายแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อ การส่งถ่ายแรงที่สำคัญอย่างหนึ่งคือแรงเนียนที่จุดต่อซึ่งขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ได้ถูกเชื่อมต่อกันที่ช่วงกลางของตัวอย่าง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ (1) ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม 3 แบบ ได้แก่ ผิวเรียบ ผิวหยาบน้อย และผิวหยาบมาก (2) คอนกรีตใหม่ที่ใช้มี 2 แบบ คือ คอนกรีตล้วนและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (3) กำลังอัดคอนกรีต และ (4) การติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อ จากผลการศึกษาพบว่า ผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบมากขึ้นจะให้แรงยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรงและการดูดซับพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก การใช้เส้นใยเหล็กและการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตใหม่จะช่วยเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรง การเคลื่อนตัว และการดูดซับพลังงานเล็กน้อย โดยการใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเททับบนผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบมากจะเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวประมาณร้อยละ 2.28 ทั้งนี้อาจเกิดจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มการขัดกันระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง นอกจากนี้ การติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อจะช่วยเพิ่มขึ้นกำลังยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 54.58 และ 165.93 ตามลำดับ สุดท้ายนี้ จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีถดถอยเชิงพหุคูณได้พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรงอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม และการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อ และสมการที่ใช้ทำนายผลการทดสอบมีความสอดคล้องอย่างดีกับผลที่ได้รับจากการทดสอบ โดยให้ค่า  $R^2 = 0.9539$  และ  $F = 28.9824$

**คำสำคัญ:** คอนกรีตเดิม; คอนกรีตใหม่; จุดต่อ; เส้นใยเหล็ก; อุปกรณ์ฝังยึดเคมี

# Parameters Affecting Direct Shear Bond between Existing Concrete and New Concrete

Wasithagrit Jangate and Chuchai Sujivorakul\*

Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi

\* Corresponding author, E-mail: [chuchai.suj@kmutt.ac.th](mailto:chuchai.suj@kmutt.ac.th)

Received: 20 August 2021; Revised: 10 January 2022; Accepted: 17 January 2022

Online Published: 14 April 2022

**Abstract:** The bonding of new concrete on existing concrete for repair or strengthening of structures must consider the various transferring forces that occurred at the joint. One of the important transferring forces is a shear force at the joint which depends on various parameters. This research is to study the parameters affecting the direct shear bond between existing concrete and new concrete. The samples used for the test were a cylindrical shape with 150 mm in diameter and 300 mm in length. The existing concrete and the new concrete were connected in the middle of the sample. The parameters of this study were: (1) three different surface roughness of existing concrete, i.e. smooth, slightly rough, and very rough surface; (2) two types of new concrete, i.e. plain concrete and steel fiber reinforced concrete; (3) compressive strengths of concrete; and (4) installation of a chemical anchor at the joint. The results were found that the increase in surface roughness of the existing concrete increased significantly the direct shear bond and energy absorption. The use of steel fiber and higher compressive strength in new concrete would increase slightly the bond strength and its displacement as well as energy absorption. The use of steel fiber reinforced concrete and cast in existing concrete having a very rough surface would increase bond strength by about 2.28%. This might be caused by steel fibers increasing the locking at the interface. In addition, the installation of a chemical anchor at the interface would increase significantly the bond strength and its displacement at 55% and 166%, respectively. Finally, the statistical analysis by using Multiple Linear Regression was found that the parameters affecting direct shear bond with 0.05 significance were surface roughness of existing concrete and installation of a chemical anchor at the joint. The equation used to predict the test results were consistent with the results obtained from the test with  $R^2 = 0.9539$  and  $F = 28.9824$ .

**Keywords:** Existing Concrete; New Concrete; Joint; Steel Fiber; Chemical Anchor



## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน “คอนกรีต” ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างต่างๆ เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตนั้นมีความแข็งแรงและทนต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี หากการก่อสร้างมีการใช้วัสดุที่ไม่มีคุณภาพ การควบคุมการก่อสร้างไม่ดีพอ และมีการใช้อาคารเป็นระยะเวลานานก็อาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต การซ่อมแซมและเสริมกำลังส่วนของโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพที่นิยมใช้กัน คือการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ด้วยวิธีการอัดฉีด ฉาบปะ หล่อพอก และอื่นๆ โดยวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมโครงสร้าง เช่น มอร์ตาร์ที่หดตัวน้อย คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตเสริมเส้นใย นอกจากนี้ยังมีการนำคอนกรีตแบบอื่นๆ ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนำมาซ่อมแซมโครงสร้างอีกมากมาย

ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังโครงสร้าง คอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่จะต้องออกแบบให้ยึดติดกัน ดังนั้นคุณภาพของการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่เป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบต้องการทราบ ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลากหลายที่ศึกษาการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ S. Songpiriyakij และ A. Siripanichgorn [1] ได้กล่าวว่า การยึดหน่วงแบบเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของคอนกรีตทั้งสอง โดยการต้านแรงเฉือนที่เกิดจากการขัดกันของอนุภาคมวลรวมในหน้าตัด แรงเสียดทานของมวลรวมจะช่วยกันต้านทานแรงเฉือนที่ไหลผ่านหน้าตัด B.A. Tayeh และคณะ [2] ได้ประเมินการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตทั่วไปกับคอนกรีตเสริมเส้นใยสมรรถนะสูง (UHPFC) ที่ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม โดยทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และแรงเฉือนเฉียง มีการ

เตรียมพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ พบว่า พื้นผิวหยาบที่เตรียมด้วยการพ่นทรายจะให้หน่วยแรงยึดหน่วงมากกว่าการเตรียมด้วยวิธีอื่นๆ โดยการวิบัติส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่คอนกรีตเดิม แสดงให้เห็นว่า UHPFC สามารถใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมได้เป็นอย่างดี B. Wang และคณะ [3] ศึกษาการยึดหน่วงแบบดึงระหว่างวัสดุซ่อมแซมที่เป็นซีเมนต์คอมโพสิตความเหนียวสูง (Ultra High Toughness Cementitious Composites หรือ UHTCCs) กับคอนกรีตเดิม โดยมีตัวแปรได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม ชนิดของวัสดุซ่อมแซม และชนิดของวัสดุประสาน (Primer) พบว่า การแรงยึดหน่วงแบบดึงมีค่าสูงขึ้น เมื่อคอนกรีตเดิมมีผิวหยาบและระยะเวลาการบ่มนานขึ้น S. Xu และคณะ [4] ใช้วัสดุซ่อมแซม UHTCCs ร่วมกับการผสมเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) สำหรับฉีดพ่นลงบนคอนกรีตเดิมในทิศทางต่างๆ มีการเตรียมผิวแบบเซาะร่อง โดยทดสอบแรงดึง และแรงเฉือนตรง พบว่า ทิศทางการพ่นและแรงโน้มถ่วงมีผลต่อการยึดหน่วง ความหยาบผิวคอนกรีตเดิมมีอิทธิพลอย่างมากต่อความต้านทานแรงเฉือนตรง และการใช้เส้นใย PVA มีผลต่อการยึดหน่วงเพียงเล็กน้อย S. Gao และคณะ [5] ศึกษาการยึดหน่วงระหว่างซีเมนต์คอมโพสิตที่มีความเครียดแข็งสูง (Strain Hardening Cementitious Composites หรือ SHCC) กับคอนกรีตเดิม มีการใช้เส้นใย PVA ใน SHCC เพื่อลดรอยแตกร้าว ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ภายใต้การกัดกร่อนที่รุนแรงของซัลเฟต โดยทดสอบแรงดึง และ แรงเฉือนเฉียง พบว่า SHCC มีการยึดหน่วงและต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตเดิม J. Zhang และคณะ [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของวัสดุมวลรวมที่มีผลต่อการยึดหน่วง มีการเตรียมสภาพพื้นผิวด้วยขนาดของมวลรวมที่



แตกต่างกัน มีการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และแรงเฉือนเอียง พบว่าขนาดของมวลรวมที่หลากหลายจะทำให้เกิดการยึดหน่วงมากขึ้น โดยแนะนำให้ใช้มวลรวมที่มีขนาดกระจายตัวระหว่าง 5-20 mm โดยสามารถเพิ่มหน่วยแรงดึงแบบผ่าซีก และหน่วยแรงเฉือนแบบเอียงร้อยละ 24 และ 107ตามลำดับ A. M. Diaba และคณะ [7] ทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนเอียงระหว่างคอนกรีตไหลตัวด้วยตัวเองกับคอนกรีตเดิม โดยมีตัวแปรได้แก่ กำลังอัดคอนกรีต พื้นผิวของคอนกรีตเดิมแบบเซาะร่องชนิดของสารเชื่อมประสาน ได้แก่ น้ำยางที่ใช้สไตรีนบิวทาไดอิน และอีพ็อกซี เรซิน การเพิ่มลาเท็กซ์และเส้นใยโพลีโพรพิลีนลงในคอนกรีตไหลตัวด้วยตัวเอง พบว่า สภาพพื้นผิวคอนกรีตเดิมมีผลอย่างมากต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนเอียง ส่วนการเติมน้ำยางและเส้นใยโพลีโพรพิลีนจะเพิ่มการยึดหน่วงได้เล็กน้อย นอกจากนี้การใช้สารยึดเกาะอีพ็อกซี เรซิน สามารถเพิ่มกำลังยึดหน่วงได้มากที่สุดที่ 13.04 MPa นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับวัสดุซ่อมแซมใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นหลากหลาย เช่น คอนกรีตของ Green Universiti Sains Malaysia Reinforced Concrete (GUSMRC) [8] และคอนกรีตทราย (Sand Concrete) [9] ที่ทำเป็นวัสดุซ่อมแซมใหม่ อีกทั้งคอมโพสิตซีเมนต์ (Magnesium Potassium Phosphate Cement หรือ MKPC) [10] ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการตกผลึกสูงหลังจากปฏิกิริยาทางเคมีนำมาใช้ในการเชื่อมประสานซ่อมคอนกรีตที่มีการรบกวน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนมากจะหาการยึดหน่วงโดยใช้การทดสอบแบบเฉือนเอียง (Slant Shear Test) การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก

และการทดสอบแรงดึงแบบถอน ส่วนการทดสอบเพื่อหาการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงมีน้อยมาก ทั้งกรณีที่มีและไม่มีเหล็กเสริมช่วยในการรับแรงเฉือนที่จุดต่อ ทั้งนี้ที่วิศวกรมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบข้อมูลนี้สำหรับใช้ในการออกแบบจุดต่อ

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ และให้คำแนะนำในการใช้งานสำหรับคอนกรีตที่ใช้โดยทั่วไปในการก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้ (1) เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม ประเภทของคอนกรีตใหม่ กำลังอัดคอนกรีต และการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อ และ (2) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนตรง และสร้างสมการทำนายผลกำลังยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่าง คอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่

## 2. วิธีการศึกษาวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
2. ทราย แม่น้ำล้างน้ำสะอาด
3. น้ำสะอาด
4. หิน ใช้หินปูนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 in และ ค้างตะแกรงเบอร์ 4
5. เส้นใยเหล็กแบบตะขอ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.55 mm ยาว (L) 35 mm และ L/D = 65 โดยใช้ในอัตราส่วน 20 kg ต่อ 1 m<sup>3</sup> ของคอนกรีต ดังรูปที่ 1 (ก)



6. อุปกรณ์ฝังยึดเคมี รุ่น Hilti HIT-C8.8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ยาว 150 mm และมีกำลังดึงที่จุดครากเท่ากับ 640 MPa ดังรูปที่ 1 (ข)

7. เคมีประสานเหล็กกับคอนกรีต รุ่น Hilti HIT-HY 200-R



(ก) เส้นใยเหล็กแบบตะขอ



(ข) อุปกรณ์ฝังยึด

รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กแบบตะขอและอุปกรณ์ฝังยึด

### 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการยึดหน่วงแบบเนียนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่มีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.2.1 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ได้ถูกออกแบบ ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้แตกต่างกัน ได้แก่ 25 30 และ 35 MPa ค่าการยุบตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C143 [11] ได้ถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 80-100 mm และส่วนผสมได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก

Properties/ Materials	Concrete ID		
	Mix 1	Mix 2	Mix 3
Target Compressive Strength (MPa)	25	30	35
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	323	364	417
Sand (kg/m <sup>3</sup> )	837	802	768
Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	1031	1031	1031
Water (kg/m <sup>3</sup> )	200	200	200

#### 2.2.2 การเตรียมแบบพิมพ์พื้นผิวคอนกรีตเดิมและดัชนีความหยาบ

ผิวคอนกรีตเดิมที่ถูกเตรียมไว้มี 3 ลักษณะ โดยแยกตามความหยาบของผิวคอนกรีต ได้แก่ ผิวเรียบ ผิวหยาบน้อย และหยาบมาก การเตรียมผิวเรียบได้จากการปาดเรียบด้วยเกรียง ส่วนผิวหยาบจะใช้แบบพิมพ์ที่มีความหยาบแตกต่างกันกดลงบนผิวของคอนกรีตสด วิธีการนี้มีความสะดวก รวดเร็วและสามารถควบคุมค่าดัชนีความหยาบให้เท่ากันในทุกตัวอย่างคอนกรีต โดยแบบพิมพ์ผิวสัมผัสหยาบน้อย (แบบ M) และหยาบมาก (แบบ L) ดังแสดงในรูปที่ 2



แบบ M (หยาบน้อย)



แบบ L (หยาบมาก)

รูปที่ 2 แบบพิมพ์ผิวสัมผัส

กรณีที่ผิวคอนกรีตมีความหยาบสม่ำเสมอ ค่าดัชนีความหยาบของผิวคอนกรีตเดิมได้นิยามไว้ในที่นี้คือ

$$\text{ดัชนีความหยาบ} = \frac{V_r}{A_g} \quad \text{หน่วย mm} \quad (1)$$

เมื่อ  $V_r$  = ปริมาตรช่องว่างบนผิวสัมผัส [mm<sup>3</sup>]

$A_g$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของคอนกรีต [mm<sup>2</sup>]

ในงานวิจัยนี้  $V_r$  หาจากการแทนที่ช่องว่างบนผิวสัมผัสด้วยทรายละเอียดมาก จากการทดลองได้ค่าดัชนีความหยาบ 0.60-0.65 mm สำหรับผิวหยาบน้อย และ 1.95-2.00 mm สำหรับผิวหยาบมาก



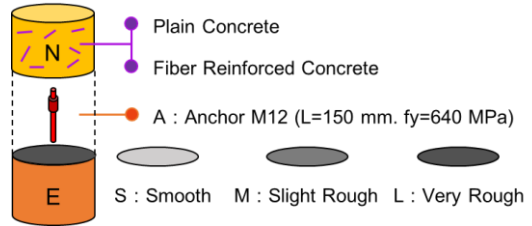
ค่าดัชนีความหยาบจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยความสูงของผิวหยาบ ดังนั้นกรณีที่มีผิวคอนกรีตมีความหยาบสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของคอนกรีต ความลึกของร่องหยาบมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าดัชนีความหยาบ

### 2.2.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกหล่อในแบบเหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm โดยรูปที่ 3 แสดงส่วนต่างๆ ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ คอนกรีตเดิมจะถูกลงในแบบลึกประมาณ 150 mm ทั้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วเตรียมผิวหยาบต่างๆ โดยใช้แบบพิมพ์กดลงบนผิวคอนกรีตเดิม โดยผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบต่างกัน ได้แก่ ผิวเรียบ (แบบ S) ผิวหยาบน้อย (แบบ M) และผิวหยาบมาก (แบบ L) พื้นผิวของคอนกรีตหลังแข็งตัวได้แสดงในรูปที่ 4 ทำการถอดแบบอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มน้ำ ส่วนนี้เรียกว่าคอนกรีตเดิม (E) เมื่อคอนกรีตอายุครบ 28 วัน ทำการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดเคมิตรงกึ่งกลางของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวมาใส่ลงในแบบหล่อแล้วเททับด้วยคอนกรีตใหม่ (N) จนเต็มแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 6

รายละเอียดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ถูกเตรียมตามตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ตัวอย่างทั้งหมดมี 13 ชุด แต่ละชุดมี 3 ก้อน โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจริงที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 25.35, 31.32 และ 35.12 MPa

โดยสังเกตว่าคอนกรีตเดิมจะมีอายุบ่ม 56 วัน เนื่องจากมีการบ่มเพิ่มเติมอีก 28 วัน ภายหลังจากการเทคอนกรีตใหม่ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตเดิมจะมีความมากกว่าเล็กน้อยที่ได้รับจากการทดสอบที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้ การใส่เส้นใยเหล็ก 20 kg/m<sup>3</sup> ผสมเพิ่มใน



รูปที่ 3 ลักษณะของตัวอย่าง



รูปที่ 4 พื้นผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบต่างกัน



รูปที่ 5 ตัวอย่างที่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด



รูปที่ 6 การหล่อคอนกรีตใหม่บนคอนกรีตเดิม

คอนกรีตใหม่จะสังเกตเห็นการเข้ากันของส่วนผสมเป็นอย่างดี แต่ส่งผลต่อค่าการยุบตัวลดลงเล็กน้อยและอาจส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นเล็กน้อย

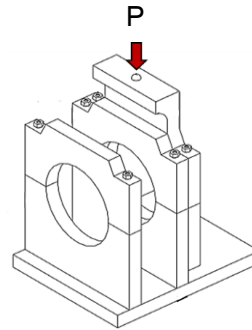


### 2.3 การทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่

เมื่อบ่มตัวอย่างจนครบอายุที่ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตมาติดตั้งในชุดทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนตรง ดังรูปที่ 7 (ก) จากนั้นเดินเครื่องทดสอบ UTM จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 7 (ข) ค่าที่ได้จากการทดสอบคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวของคอนกรีต ซึ่งถูกบันทึกค่าลงในเครื่องคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนตรง

รหัสตัวอย่าง	กำลังคอนกรีต (MPa)		ความแข็งแรง (F) (N)	เส้นใยเหล็ก	อุปกรณ์ฝ้าย
	คอนกรีตเดิม (E)	คอนกรีตใหม่ (N)			
E30 S N30	30	30	S		
E30 M N30	30	30	M		
E30 L N30	30	30	L		
E30 S N30F	30	30	S	✓	
E30 M N30F	30	30	M	✓	
E30 L N30F	30	30	L	✓	
E25 S N25	25	25	S		
E25 L N25	25	25	L		
E25 S N35	25	35	S		
E25 L N35	25	35	L		
E30 SA N30	30	30	S		M12
E30 MA N30	30	30	M		M12
E30 LA N30	30	30	L		M12



(ก) ชุดทดสอบ



(ข) คอนกรีตหลังทดสอบ

รูปที่ 7 ชุดทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและตัวอย่างคอนกรีตหลังทำการทดสอบ

### 2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและการคำนวณ

#### 2.4.1 หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง

$$\text{Bond Shear Stress} = \frac{P}{A} \text{ หน่วย Pa} \quad (2)$$

เมื่อ  $P$  = แรงเฉือนที่ได้จากเครื่องทดสอบ หน่วย N

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวอย่าง หน่วย  $\text{m}^2$

#### 2.4.2 หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ฝ้ายที่จุดต่อโดย ACI 318-19 [12]

ในกรณีนี้จุดต่อมีการส่งถ่ายแรงเฉือนระหว่างระนาบของชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยมีเหล็กเสริมสำหรับแรงเสียดทานเฉือนตั้งฉากกับระนาบเฉือน กำลังเฉือนระหว่างจุดต่อหาได้ดังนี้

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \text{ หน่วย MPa} \quad (3)$$

โดย  $A_{vf}$  = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ผ่านระนาบเฉือน

$\mu$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

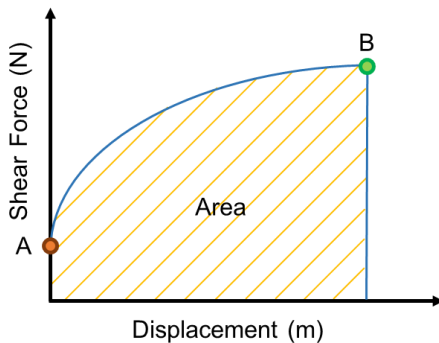
$\mu$  มีค่าเท่ากับ 1 กรณีคอนกรีตเดิมมีความสะอาดและมีการเตรียมผิวจุดต่อให้หยาบที่มีขนาดลึกลับประมาณ



6.3 mm และ  $\mu$  มีค่าเท่ากับ 0.6 กรณีคอนกรีตเดิมมีความสะอาดและไม่มีเกร็ดเตรียมผิวจุดต่อให้หยาบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318-19 [12] ในหัวข้อที่ 22.9.4.2 สำหรับงานวิจัยนี้ ผิวตัวอย่างคอนกรีตเดิมมีความหยาบน้อยกว่า 6.3 mm ผู้วิจัยจึงใช้การเทียบสัดส่วนเพื่อหาค่า  $\mu$  ที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไป

### 2.4.3 การดูดซับพลังงาน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (N) กับการเคลื่อนตัว (m) ที่ได้รับการทดสอบ ค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งจุดต่อเกิดการแยกตัว ดังนั้นค่าการดูดซับพลังงานสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ (Area under Curve) จากจุดกำเนิดไปจุด B



รูปที่ 8 ค่าการดูดซับพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัว

### 2.4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้วิธีถดถอยเชิงพหุคูณ และ ANOVA

การวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีถดถอยเชิงพหุคูณได้กำหนดรหัสของข้อมูลของตัวแปรต้น ดังนี้

- ก. ลักษณะผิว: กำหนดให้ ผิวเรียบ (S) = 1 ผิวหยาบน้อย (M) = 2 และผิวหยาบมาก (L) = 3

- ข. ชนิดคอนกรีต: กำหนดให้ คอนกรีตล้น = 0 และคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก = 1

- ค. อุปกรณ์ฝังยัด: กำหนดให้ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยัด = 0 และ ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยัด = 1

- ง. กำลังอัดคอนกรีต: โดยกำลังอัดคอนกรีตเก่าและใหม่แทนค่าด้วยค่ากำลังอัดของคอนกรีตนั้น

สำหรับการตั้งสมมติฐานมีรายละเอียดดังนี้ สมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) คือ ตัวแปรต่างที่ไม่ส่งผลต่อหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง หรือ  $\mu_1 = \mu_2$  และสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) คือ ตัวแปรต่างที่ส่งผลต่อหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง หรือ  $\mu_1 \neq \mu_2$  โดยที่  $\mu_1$  คือ ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงสำหรับตัวอย่างควบคุม  $\mu_2$  คือ ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงที่มีตัวแปรต่าง ๆ การทดสอบสมมติฐานกระทำที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังนี้

1. ค่า P-value  $\leq 0.05$  คือ ปฏิเสธ  $H_0$  ยอมรับ  $H_1$
2. ค่า P-value  $> 0.05$  คือ ยอมรับ  $H_0$  ปฏิเสธ  $H_1$

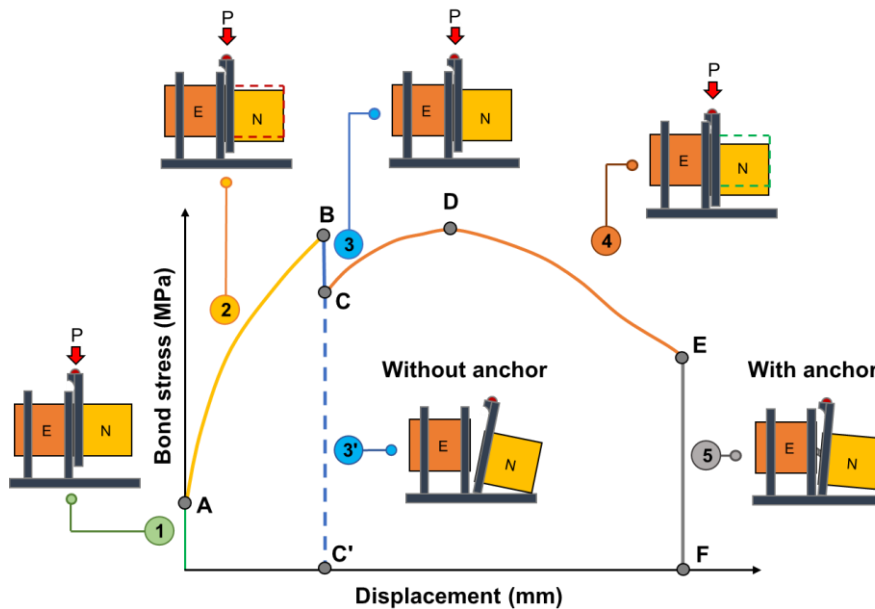
### 3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 3.1 พฤติกรรมที่ได้รับจากการทดสอบ

ผลที่ได้รับจากการทดสอบคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนตรงกับการเคลื่อนตัว โดยพฤติกรรมการรับแรงเฉือนตรงของจุดต่อกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยัด สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 9

ช่วงที่ 1 หน่วยแรงยึดหน่วงจะเกิดจากการยึดติด (Cohesion) ระหว่างผิวคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ทำให้ช่วงนี้จะไม่มีการเคลื่อนตัวของตัวคอนกรีตใหม่ จนกระทั่งหน่วยแรงยึดหน่วงถึงจุด A ซึ่งเป็นจุดสูงสุดในช่วงแรก ก่อนที่คอนกรีตใหม่จะเริ่มเคลื่อนตัว





รูปที่ 9 พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรง

ช่วงที่ 2 จุดต่อจะเกิดการยึดเหนี่ยวจากผิวสัมผัสระหว่างเดิมและคอนกรีตใหม่ โดยเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนตัวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในช่วงนี้จะเกิดจากการขัดกันของวัสดุมวลรวม นอกจากนี้หากมีการใช้เส้นใยเหล็กในคอนกรีตใหม่ เส้นใยจะช่วยให้เกิดการขัดกันบนผิวสัมผัสมากขึ้น เมื่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น จนถึงจุด B ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด หรือเรียกว่า กำลังยึดเหนี่ยวที่รอยร้าวแรก (First-cracking Bond Strength)

ช่วงที่ 3 ผิวสัมผัสของคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่จะเกิดแยกตัวออกจากกัน (Delaminate) ทำให้ไม่สามารถรับแรงได้ต่อไป การเคลื่อนตัวที่จุด C' และจุด B มีค่าเท่ากัน

กรณีจุดต่อได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด ในช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 3 ตามรูปที่ 9 จะให้พฤติกรรมการรับแรง

เฉือนเหมือนกันกับกรณีไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด แต่การยึดรั้งที่เกิดจากแรงเฉือนไม่เพียงเกิดจากการขัดกันของวัสดุมวลรวม แต่ยังเกิดจากการยึดรั้งโดยอุปกรณ์ฝังยึดด้วย จึงส่งผลให้แรงเฉือนที่จุด B และการเคลื่อนตัวที่จุดต่อมีค่าสูงกว่า เมื่อผิวสัมผัสเกิดการแยกตัวออกจากกัน แรงเฉือนจะตกลงเล็กน้อยมา (จุด C) จากนั้นช่วงที่ 4 จะเกิดขึ้น หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของจุดต่อจะเกิดจากอุปกรณ์ฝังยึดอย่างเดียว โดยอุปกรณ์ฝังยึดจะรับแรงเฉือนเดียว และกดลงบนรูเจาะคอนกรีต หน่วยแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเคลื่อนตัว หรือรอยแยกที่มากขึ้น จนถึงจุด D ที่ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด หรือเรียกว่า กำลังยึดเหนี่ยวหลังรอยร้าว (Post-cracking Bond Strength) หลังจากนั้นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุด E พร้อมกับการเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้น



### 3.2 อิทธิพลของความหยาบของผิวคอนกรีตเดิมและการใช้เส้นใยเหล็กในคอนกรีตใหม่

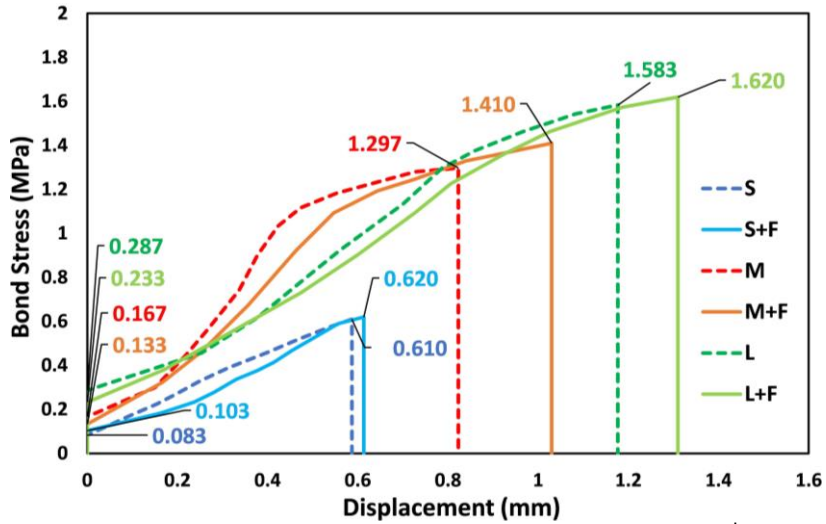
รูปที่ 10 (ก) แสดงผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวกับการเคลื่อนตัว เมื่อผิวคอนกรีตเดิมมีความหยาบแตกต่างกัน โดยพบว่า หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นผิวมีความหยาบมากขึ้น นอกจากนี้ในทุกความหยาบของผิวสัมผัส การใช้เส้นใยเหล็กเสริมในคอนกรีตใหม่จะช่วยทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากผิวสัมผัสที่มีความหยาบจะมีเหลี่ยมมุมให้เส้นใยเหล็กไปยึดจับทำให้เกิดการขัดกันระหว่างผิวคอนกรีตกับเส้นใยเหล็ก หากเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด A และ B ดังรูปที่ 10 (ข) พบว่า ผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบมากขึ้นจะทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด A และ B จะมียุทธศาสตร์เพิ่มขึ้นอย่างมาก เช่น กรณีผิวคอนกรีตเดิมหยาบมาก หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B จะให้ค่ามากกว่าผิวเรียบที่ร้อยละ 159.56 นอกจากนี้หากมีการใช้เส้นใยเหล็กในคอนกรีตใหม่จะเพิ่มหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B เล็กน้อย เช่นกรณีผิวคอนกรีตเดิมมีผิวเรียบ และความหยาบมาก หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.61 และ 2.28 ตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับผลวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลที่ได้รับจากการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนเอียง (Slant Shear test) โดยเมื่อผิวคอนกรีตเดิมถูกทำให้หยาบมากขึ้น เช่น การทำผิวให้หยาบอย่างสม่ำเสมอด้วยการพ่นทราย (B. A.Tayeh และคณะ [2]) หรือมีการเตรียมผิวคอนกรีตเดิมแบบเซาะร่อง (A. M. Diaba และคณะ [7]) จะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อใช้เส้นใยเหล็กเสริมในคอนกรีตใหม่จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและการเคลื่อนตัวของจุดต่อที่ตำแหน่งวิบัติเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับผลที่ได้รับจากการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงของ S. Xu และคณะ [4] ที่ใช้เส้นใย PVA ในคอนกรีตใหม่โดยส่งผลให้การยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน แต่การเคลื่อนตัวของจุดต่อไม่ได้ปรับปรุงให้เพิ่มมากขึ้น

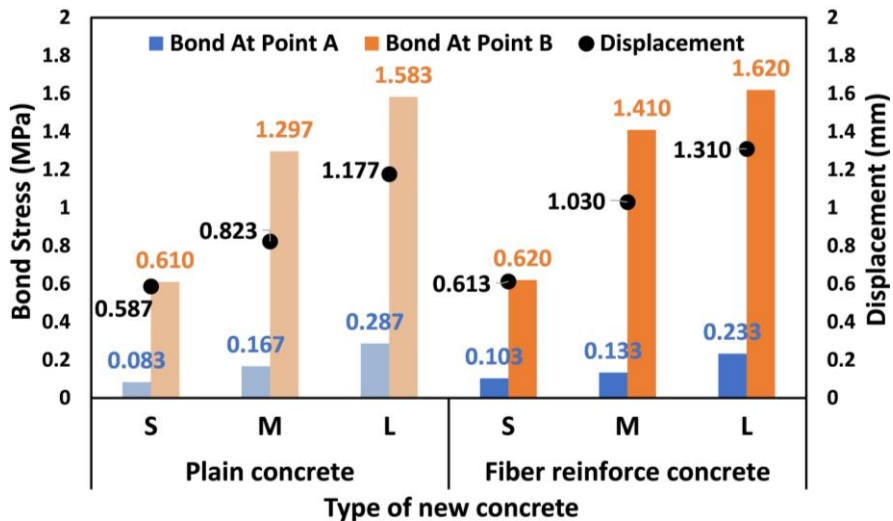
รูปที่ 11 แสดงค่าการดูดซับพลังงานจนกระทั่งถึงจุด B โดยพบว่า การดูดซับพลังงานมีค่ามากขึ้นเมื่อผิวคอนกรีตเดิมมีความหยาบมากขึ้นและมีการใช้เส้นใยเหล็กในคอนกรีตใหม่ ซึ่งมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่คอนกรีตเดิมมีผิวเรียบและคอนกรีตใหม่ไม่ได้เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก โดยจะให้ค่าการดูดซับพลังงานมากกว่าร้อยละ 470.96

### 3.3 อิทธิพลของกำลังอัดที่แตกต่างกันของคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่

รูปที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบการยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกัน โดยพบว่า หากคอนกรีตใหม่มีกำลังอัดคอนกรีตที่สูงขึ้นจะทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวทั้งที่จุด A และ B พร้อมการเคลื่อนตัวมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้สังเกตเห็นว่าหากผิวคอนกรีตเดิมมีความหยาบมาก การใช้คอนกรีตใหม่ที่มีกำลังอัดสูงขึ้นจาก 25 MPa เป็น 35 MPa จะทำหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B พร้อมการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.89 และ 11.10 ตามลำดับ รูปที่ 13 แสดงค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดสอบโดยพบว่า การดูดซับพลังงานมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้คอนกรีตใหม่ที่มีกำลังอัดมากขึ้น

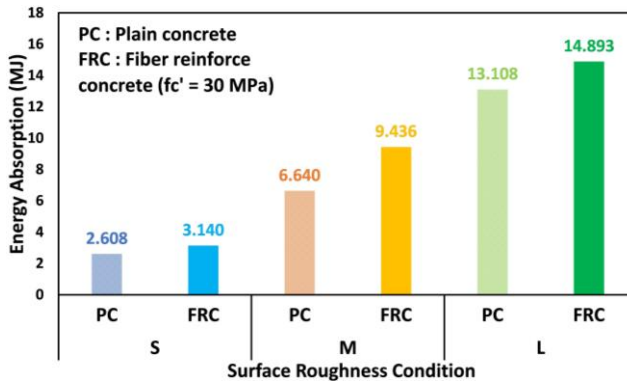


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงกับการเคลื่อนตัวของคอนกรีต

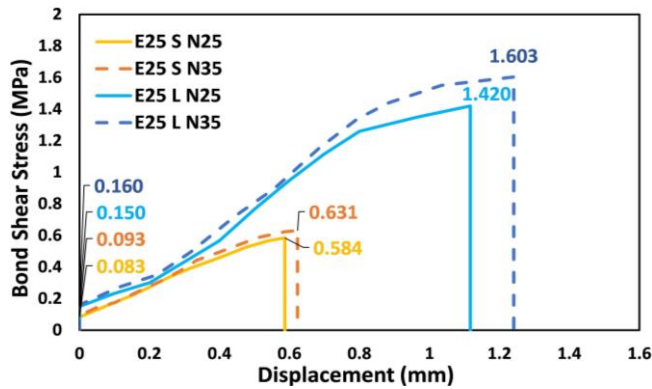


(ข) หน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงที่จุด A และ B กับเคลื่อนตัวที่จุด B

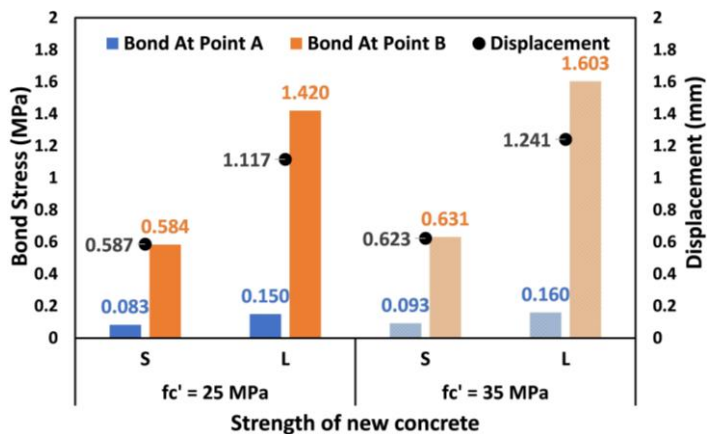
รูปที่ 10 แรงยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวของคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบแตกต่างกัน และใช้เส้นใยเหล็กเสริมในคอนกรีตใหม่



รูปที่ 11 ค่าการดูดซับพลังงานจากการทดสอบการยึดหน่วงแบบเงื่อนไขตรง

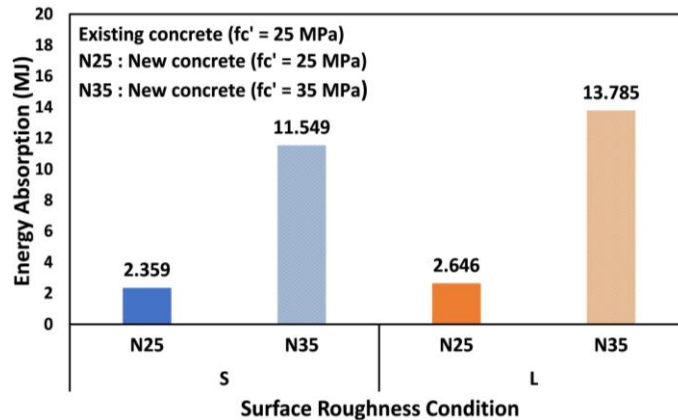


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเงื่อนไขตรงกับการเคลื่อนตัว



(ข) หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเงื่อนไขตรงที่จุด A และ B กับเคลื่อนตัวที่จุด B

รูปที่ 12 เปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กำลังอัดคอนกรีตแตกต่างกัน



รูปที่ 13 การดูดซับพลังงานของตัวอย่างที่ใช้กำลังอัดคอนกรีตแตกต่างกัน

หากเปรียบเทียบกับผลวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สอดคล้องกับ A. M. Diaba และคณะ [7] โดยแรงยึดหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตใหม่มากขึ้น และยิ่งสอดคล้องกับ B. A. Tayeh และคณะ [2] ที่ใช้คอนกรีตใหม่เป็น UHPFC ซึ่งมีกำลังอัดสูงอย่างมาก โดยแรงยึดหน่วงที่ได้รับมีค่ามากขึ้น และการวิบัติจะเกิดขึ้นที่คอนกรีตเดิม

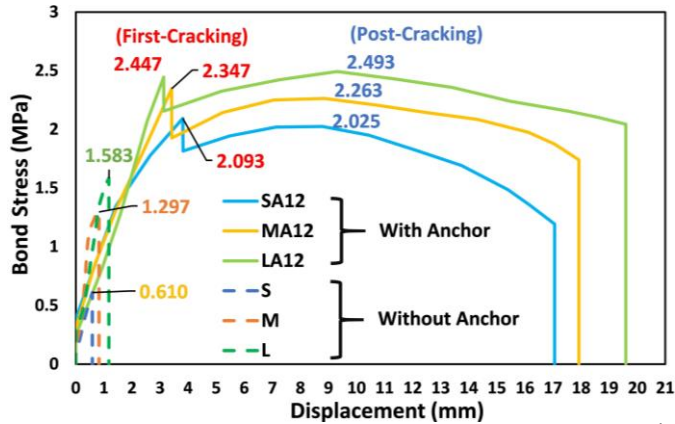
### 3.4 อิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่

จากรูปที่ 14 ได้พบว่าหากทำการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อ หน่วยแรงยึดหน่วงที่จุด B พร้อมการเคลื่อนตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้สังเกตว่าผิวคอนกรีตเดิมที่หยาบมากและทำการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดร่วมตัวจะให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงและการเคลื่อนตัวที่มากที่สุด โดยมีค่าหน่วยแรงยึดหน่วงที่จุด B และการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.58 และ 165.93 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดบนคอนกรีตเดิมที่มีผิวหยาบมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงเสียดทานเฉือน (Shear Friction) ที่ให้ไว้โดย

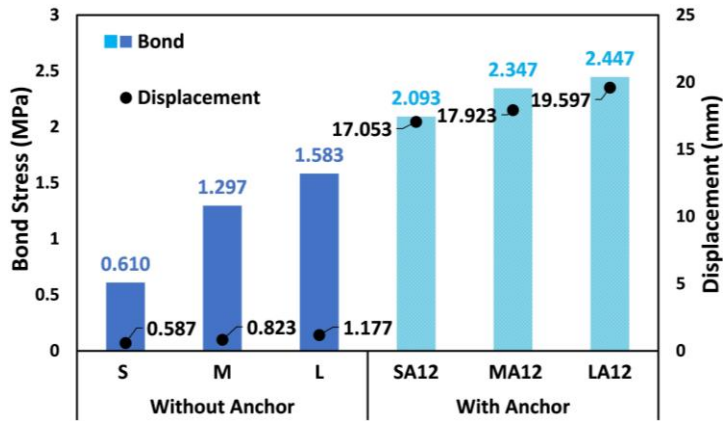
ACI 318-19 [12] กรณีที่จุดต่อมีการส่งถ่ายแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วนคอนกรีตโดยมีเหล็กเสริมสำหรับแรงเสียดทานเฉือนตั้งฉากกับระนาบ ซึ่งค่าแรงเสียดทานเฉือน หรือแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อผิวคอนกรีตเดิมมีความหยาบมาก

### 3.5 รูปแบบการวิบัติจากการทดสอบ

ตารางที่ 3 และ รูปที่ 15 แสดงรูปแบบการวิบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างจุดต่อของคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ โดยการวิบัติแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ (1) Mode A (Perfect Delamination) การแยกตัวอย่างสมบูรณ์ที่ผิวจุดต่อ โดยไม่เกิดรอยร้าวในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวเรียบและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด (2) Mode B (Shear Friction Delamination) การแยกตัวของจุดต่อ โดยมีรอยร้าวบางส่วนเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ ที่คาดว่าเกิดจากการขัดกันที่ผิวสัมผัสอย่างมาก ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวหยาบน้อยถึงผิวหยาบมากโดยเกิดได้ทั้งกรณีที่ใช้และไม่ใช้อุปกรณ์ฝังยึด



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงกับการเคลื่อนตัว



(ข) ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B และการเคลื่อนตัวที่จุด B และ E

รูปที่ 14 เปรียบเทียบคอนกรีตที่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด

(3) Mode C (Concrete Breakout Failure) รอยแตกเกิดขึ้นที่ขอบของตัวอย่างคอนกรีตจากการผลักหรือดีดออกโดยอุปกรณ์ฝังยึด ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีการใช้อุปกรณ์ฝังยึด และมีพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบหยาบมาก ซึ่งตัวอย่างเหล่านี้สามารถรับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวได้สูงมาก

ตารางที่ 3 รูปแบบของการวิบัติ

รหัสตัวอย่าง	รูปแบบการวิบัติ	รหัสตัวอย่าง	รูปแบบการวิบัติ
E30 S N30	A	E25 S N25	A
E30 M N30	B	E25 L N25	B
E30 L N30	B	E25 S N35	A
E30 S N30F	A	E25 L N35	B
E30 M N30F	B	E30 SA N30	B'
E30 L N30F	B	E30 MA N30	B'
		E30 LA N30	C



Mode A

Mode B (without anchor)

Mode B' (with anchor)

Mode C

รูปที่ 15 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

### 3.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีถดถอยเชิงพหุคูณ และ ANOVA

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้วิธีถดถอยเชิงพหุคูณ พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรงอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม และการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด โดยให้ค่า P-value เท่ากับ 0.00019 และ 0.00012 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ทางสถิตินี้สามารถสร้างสมการเส้นตรงเพื่อใช้ทำนายผล โดยมีค่า  $R^2 = 0.9539$  และ  $F = 28.9824$  ได้ดังนี้

$$\tau_u = -0.6317 + 0.0208E + 0.0115N + 0.4135S + 0.0533F + 1.1323A \quad (4)$$

โดยที่  $\tau_u$  = กำลังยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรง,  $E$  = กำลังอัดคอนกรีตเดิม,  $N$  = กำลังอัดคอนกรีตใหม่,  $S$  = ระดับความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม,  $F$  = การเสริมและไม่เสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีต, และ  $A$  = การติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดที่จุดต่อ

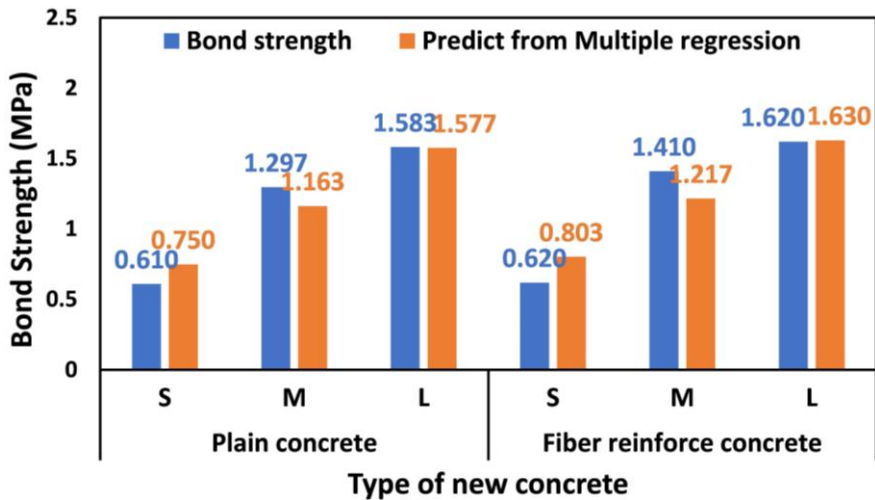
ตัวแปรเหล่านี้ได้นิยามค่าต่าง ๆ ไว้ในหัวข้อ 2.4.4 และจากการสังเกตพบว่า ค่า  $R^2 = 0.9539$  โดยมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการที่ใช้ทำนายผลตามตัวแปรเหล่านี้มีความแม่นยำอย่างมาก

ตาราง 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบเนียนตรง

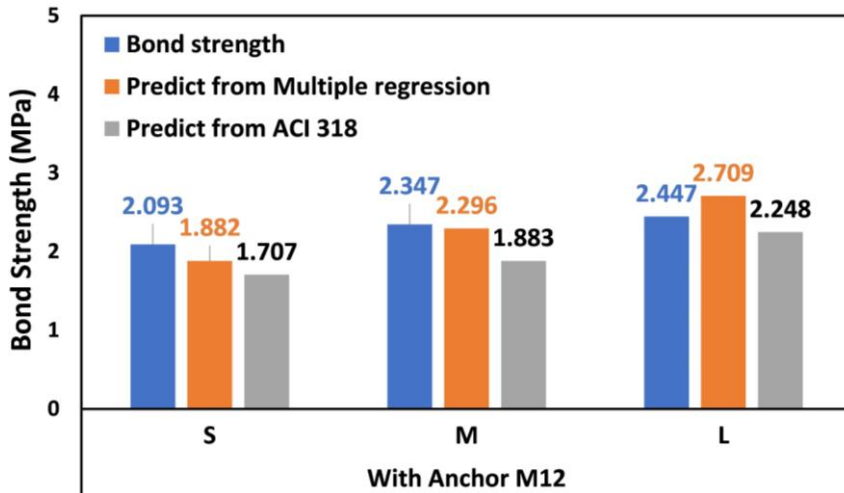
Regression Statistics		
$R^2 = 0.9539$	$F = 28.9824$	
ANOVA		
	ค่าสัมประสิทธิ์	P-value
จุดตัดแกน y	-0.6317	0.5261
กำลังคอนกรีตเดิม	0.0208	0.4821
กำลังคอนกรีตใหม่	0.0115	0.5500
ความหยาบของผิว	0.4135	0.0001
เส้นใยเหล็ก	0.0533	0.7318
อุปกรณ์ฝังยึด	1.1323	0.0001

และรูปที่ 16 (ก) แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้รับจากการทดสอบ และการทำนายผลโดยใช้สมการที่ (4) โดยพบว่าให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ รูปที่ 16 (ข) แสดงการทำนายผลสำหรับตัวอย่างที่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด โดย ACI 318-19 ที่ให้ไว้ในสมการที่ (3) พบว่ามีค่าน้อยกว่าผลที่ได้รับจากการทดสอบ และสมการทำนายผลทางสถิติค่อนข้างมาก โดยเฉพาะกรณีคอนกรีตเดิมที่มีผิวหยาบน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ACI 318-19 ไม่ได้คำนึงถึงการยึดติด (Cohesion) ระหว่างผิวคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่





(ก) ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด



(ข) ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด

รูปที่ 16 ค่ากำลังยึดหน่วงของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบและจากการทำนายผล





#### 4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ลักษณะผิวสัมผัสคอนกรีตเดิมที่หยาบมากจะทำให้กำลังยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงมากกว่าคอนกรีตเดิมที่มีผิวแบบเรียบร้อยละ 159.51 นอกจากนี้ ผิวคอนกรีตเดิมที่มีความหยาบมากขึ้นจะให้การเคลื่อนตัวและค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่จะเกิดแยกตัวออกจากกัน โดยรอยร้าวจะกินลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นคอนกรีตเดิม หรือคอนกรีตใหม่ก็ได้

2. การใช้เส้นใยเหล็กเสริมในคอนกรีตใหม่จะช่วยเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงมากขึ้นเล็กน้อย โดยตัวอย่างที่มีผิวเรียบ และผิวหยาบมาก หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่จุด B จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.61 และ 2.28 ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยเหล็กจะก่อให้เกิดการขัดกันระหว่างเส้นใยเหล็กกับผิวคอนกรีตที่หยาบ จึงส่งผลทำให้กำลังยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าการดูดซับพลังงานอีกด้วย

3. การใช้กำลังอัดของคอนกรีตใหม่ที่สูงขึ้นจะช่วยให้กำลังยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงและการเคลื่อนตัวมีค่ามากขึ้น โดยการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตจาก 25 MPa เป็น 35 MPa ลงบนผิวหยาบมากจะให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.89 และ 11.10 ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้คอนกรีตใหม่ที่มีกำลังอัดสูงขึ้นช่วยเพิ่มค่าการดูดซับพลังงานมากขึ้น

4. การติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดเคมีที่จุดต่อจะช่วยเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวที่รอยร้าวแรก (First-cracking Bond Strength) และก่อให้เกิดกำลังยึดเหนี่ยวหลังรอยร้าว (Post-cracking Bond Strength) โดยกำลังยึดเหนี่ยวที่รอยร้าวแรกขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม โดยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดขนาด M12 ที่จุดต่อที่มีผิวหยาบมาก กำลังยึดเหนี่ยวและการเคลื่อนตัวจะเพิ่มขึ้น ร้อยละ 54.58 และ 165.93 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด ลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่จะเกิดการแยกออกจากกันของจุดต่อโดยมีรอยร้าวที่กินลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต และอาจมีบางตัวอย่างจะวิบัติแบบ Concrete Breakout

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของผลที่ได้จากการทดสอบ ได้พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม และการติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึด โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.00019 และ 0.00012 ตามลำดับ นอกจากนี้สมการที่ได้รับจากวิธีถดถอยเชิงพหุคูณเพื่อทำนายกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ได้ให้ผลใกล้เคียงและสอดคล้องกันอย่างมากกับผลที่ได้รับการทดสอบ โดยมีค่า  $R^2 = 0.9539$  และ  $F = 28.9824$  นอกจากนี้ หากใช้กำลังยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงที่ให้ไว้โดย ACI 318-19 จะให้ค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลที่ได้รับจากการทดสอบและสมการทำนายผล ทั้งนี้เนื่องจาก ACI 318-19 ไม่ได้คำนึงถึงการยึดติด (Cohesion) ระหว่างผิวคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่



## 5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท อิลติ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัยนี้ และขอบคุณทุนการศึกษาเพชรพระจอมเกล้ามหานัทิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ผู้แต่งลำดับแรก

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Songpiriyakij and A. Siripanichgorn, Shear strength between old concrete and new concrete under pressure through cross section, TCA e-magazine, Thailand Concrete Association, 2009, 6(4), 10-13 (in Thai).
- [2] B.A. Tayeh, B.H. Abu Bakar, M.A.M. Johari and Y.L. Voo, Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE-2), Proceeding, 2013, 554-563.
- [3] B. Wang, S. Xu and F. Liu, Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate, Construction and Building Materials, 2016, 112, 595-606.
- [4] S. Xu, F. Mu, J. Wang and W. Li, Experimental study on the interfacial bonding behaviors between sprayed UHTCC and concrete substrate, Construction and Building Materials, 2019, 195, 638-649.
- [5] S. Gao, J. Jin, G. Hu and L. Qi, Experimental investigation of the interface bond properties between SHCC and concrete under sulfate attack, Construction and Building Materials, 2019, 217, 651-663.
- [6] J. Zhang, X. Ding and Q. Zhao, Experimental and numerical investigation of scattering gravels on the surface bond strength of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 2017, 145, 11-19.
- [7] A.M. Diab, A.E.M.A. Elmoaty and M.R.T. Eldin, Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete, Construction and Building Materials, 2017, 130, 73-82.
- [8] S.H.A. Sabah, M.H. Hassan, N.M. Bunnori and M.A.M. Johari, Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair material overlay, Construction and Building Materials, 2019, 216, 261-271.



- [9] K. Gadri and A. Guettala, Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect), *Construction and Building Materials*, 2017, 157, 1133-1144.
- [10] Y. Li, W. Bai and T. Shi, A study of the bonding performance of magnesium phosphate cement on mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 2017, 142, 459-468.
- [11] ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2020.
- [12] ACI 318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary, 2019.