ผลกระทบของการใช้สารเชื่อมประสานที่ผิวสัมผัสและความขรุขระที่มีต่อแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่

Effects of Interface Bonding Agent and Surface Roughness on the Direct-Shear Bond between Existing Concrete and New Concrete

วาสิฏฐกฤษ จันทร์เกตุ[1] และ ชูชัย สุจิวรกุล[2,*]

[1,2] สาขาวิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: chuchai.suj@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การประสานคอนกรีตใหม่บนคอนกรีตเดิมสำหรับการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังโครงสร้าง จะต้องคำนึงถึงการถ่ายแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างจุดต่อได้แก่ แรงดึง แรงอัด และโมเมนต์ การส่งถ่ายแรงที่สำคัญหนึ่งคือแรงเฉือนระหว่างจุดต่อ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ หลากหลาย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ยาว 300 mm โดยทำการต่อกันในช่วงกลางระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย (1) ลักษณะของผิวสัมผัส 2 ลักษณะ ผิวเรียบ และผิวขรุขระ และ (2) การใช้สารเชื่อมประสานชนิดต่างๆ (อีพ็อกซี เรซิน, ลาเทกซ์, กาวซีเมนต์ และคลิสตัลไลน์) บนผิวสัมผัส จากการศึกษาพบว่าลักษณะผิวสัมผัสบริเวณจุดต่อที่มีความขรุขระจะให้ความสามารถในการรับแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงได้ดีกว่าผิวสัมผัสแบบเรียบ และการใช้สารเชื่อมประสานเป็นชั้นกลาง โดยเฉพาะสารเชื่อมประสานประเภทอีพ็อกซี เรซิน สามารถเพิ่มแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

คำสำคัญ: คอนกรีตเดิม, คอนกรีตใหม่, ความขรุขระ, สารเชื่อมประสาน

Abstract

Bonding new concrete on existing concrete for structural repair or strengthening must consider the various transferring forces occurred at the connection such as tensile, compression, and moment. One of the important transferring force is the shear force which depends on various factors. This research is the study of the parameters affecting on the direct-shear bond between existing concrete and new concrete. The sample used in the direct-shear bond test was a cylinder, diameter 150 mm, length 300 mm, connected in the middle between the existing concrete and the new concrete. The parameters of this study were: (1) two different types of the surfaces of existing concrete defined as smooth surfaces and rough surfaces; and (2) various types of bonding agent (Epoxy resins, Latex, Cement glue and Crystallization). The results of this study were found that the interface with rough surfaces would provide a better direct-shear bond than smooth surfaces. The use of the bonding agent as the interface layer, especially epoxy resin, would enhance significantly the direct-shear bond.

Keywords: Existing concrete, New concrete, Roughness, Bonding agent

1. บทนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารนิยมใช้ “คอนกรีต” เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้อาคารเป็นระยะเวลานานก็สามารถทำให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตอาจเสื่อมสภาพจนเกิดการแตกร้าว และเหล็กเสริมเป็นสนิม เป็นต้น การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่นิยมใช้กัน คือการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ด้วยวิธีการฉีดอัด เกราท์ ฉาบปะ หล่อเพิ่มขนาด และอื่นๆ โดยวัสดุที่ใช้ได้แก่ มอร์ตาร์ที่หดตัวน้อย คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตเสริมเส้นใย นอกจากนี้ยังมีการนำคอนกรีตรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนำมาซ่อมแซมโครงสร้างอีกมากมาย ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่จะต้องยึดติดกัน ดังนั้น คุณภาพของการยึดหน่วง (Bond) ระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่เป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องการทราบ ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยหลากหลายที่ศึกษาการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ อเนก ศิริพานิชกร [1] ได้กล่าวว่า การยึดหน่วงแบบเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของคอนกรีตทั้งสอง โดยการต้านแรงเฉือนที่เกิดจากการ

ขัดกันของอนุภาคมวลรวมในหน้าตัด แรงเสียดทานของมวลรวมจะช่วยกันต้านทานแรงเฉือนที่ไหลผ่านหน้าตัด Bing Wang และคณะ [2] ศึกษาการยึดหน่วงแบบดึงระหว่างวัสดุซ่อมแซมที่เป็นซีเมนต์คอมโพสิตความเหนียวสูง (Ultra high toughness cementitious composites หรือ UHTCCs) กับคอนกรีตเดิม โดยมีตัวแปรได้แก่ ความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม ชนิดของวัสดุซ่อมแซม และชนิดของวัสดุประสาน (Primer) โดยพบว่า การแรงยึดหน่วงแบบดึงมีค่าสูงขึ้น เมื่อคอนกรีตเดิมมีผิวหยาบและระยะเวลาการบ่มนานขึ้น Ahmed M. Diab และคณะ [3] ทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนเอียงระหว่างคอนกรีตไหลตัวด้วยตัวเองกับคอนกรีตเดิม โดยมีตัวแปรได้แก่ กำลังอัดคอนกรีต พื้นผิวของคอนกรีตเดิมแบบเซาะร่อง ชนิดของสารเชื่อมประสาน ได้แก่ น้ำยางที่ใช้สไตรีนบิวทาไดอีน และอีพ็อกซี เรซิน การเพิ่มลาเท็กซ์และเส้นใยพอลิโพรพิลีนลงในคอนกรีตไหลตัวด้วยตัวเอง จากการศึกษาพบว่า สภาพพื้นผิวคอนกรีตเดิมมีผลอย่างมากต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนเอียง ส่วนการเติมน้ำยาง และเส้นใยพอลิโพรพิลีนจะเพิ่มการยึดหน่วงได้เล็กน้อย นอกจากนี้การใช้สารยึดเกาะอีพ็อกซี เรซิน สามารถเพิ่มกำลังยึดหน่วงได้มากสุดที่ 13.04 MPa Tianxiong Guo และคณะ [4] ได้ประเมินกำลังยึดหน่วงระหว่างพื้นผิวคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมทางเท้าแบบรวดเร็ว มีการเตรียมพื้นผิวหลายรูปแบบ การใช้สารยึดเกาะ เช่น RRMP (วัสดุซ่อมแซมโพลิเมอดัดแปลง) กาวโพลีไวนิลฟอร์มาลดีไฮด์ และ Epoxy resin นอกจากนี้มีการควบคุมอายุการบ่มที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าคอนกรีต RRMP มีความแข็งแรงสูงในช่วงต้นซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการซ่อมแซมอย่างรวดเร็ว และพื้นผิวที่หยาบสูงมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังยึดหน่วงซึ่งสัมพันธ์กับอายุการบ่ม Yan He และคณะ [5] ได้ศึกษาผลกระทบของความหยาบที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของการยึดติดระหว่างคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่า โดยพบว่า มิติของความหยาบส่วนที่สูงขึ้นทำให้มีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงขึ้น แรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตใหม่กับเก่าได้รับการปรับปรุงอย่างมากด้วยการใช้วิธีการเตรียมพื้นผิว และความหยาบของผิวมีผลต่อสารยึดเกาะที่จะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกล Imran Nazir and Khuram Rashid [6] ศึกษาความแข็งแรงของหน่วยแรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตซ่อมแซม โดยทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และแรงเฉือนเอียง มีการใช้ซิลิกาฟูม (Silica fume) เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ และใช้วัสดุประสานได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ อีพ็อกซี่ กาว และแผ่นเสริมเส้นใยโพลีเมอร์ อีกทั้งมีการเตรียมผิวหยาบด้วยวิธีแปลงขัด จากการศึกษาพบว่า การใช้แผ่นเสริมเส้นใยโพลีเมอร์จะให้ค่าแรงดึงแบบผ่าซีกและแรงเฉือนเอียงมากที่สุด Pu-Woei Chen และคณะ [7] ได้ศึกษางานคอนกรีตในด้านการซ่อมแซม โดยทำการศึกษาปรับปรุงพันธะระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ โดยทำการผสมเส้นใยคาร์บอนลงในคอนกรีตใหม่เป็นจำนวน 0.35% ของน้ำหนักรวม จากการศึกษาได้พบว่าการผสมเส้นใยคาร์บอนต้องใช้ควบคู่กับลาเท็กซ์ที่ 20% ของน้ำหนักซีเมนต์ จะทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 89% Rashmi R. Pattnaik [8] ได้ศึกษาอิทธิพลของความแข็งแรงของวัสดุซ่อมแซม ตามมาตรฐาน ASTM C882 มีการเตรียมพื้นผิวทั้งแบบยิงทรายและแปลงขัด โดยได้พบว่า การทดสอบที่ใช้ไม่สามารถนำมาอธิบายลักษณะของพันธะแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมแซมในงานจริงได้ นอกจากนี้พบว่าการวิบัติบนพื้นผิวลาดเอียงนั้นไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นกับวัสดุซ่อมแซมทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตเดิมกับวัสดุซ่อมแซมใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นหลากหลาย เช่น คอนกรีตของ Green Universiti Sains Malaysia Reinforced Concrete (GUSMRC) [9] และคอนกรีตทราย (Sand concrete) [10] ที่ทำเป็นวัสดุซ่อมแซมใหม่ อีกทั้งคอมโพสิตซีเมนต์ (Magnesium potassium phosphate cement หรือ MKPC) [11] ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการตกผลึกสูงหลังจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยนำมาใช้ในการเชื่อมประสานซ่อมคอนกรีตที่มีการวิบัติ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่า การหาแรงยึดหน่วงส่วนใหญ่จะใช้การทดสอบแบบเฉือนเอียง (Slant shear test) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยม แต่ผลการทดสอบไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้เนื่องจากการจะให้ค่าแรงยึดหน่วงที่สูงกว่าความเป็นจริง ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเพื่อหาแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงยังมีน้อยมาก โดยจะให้ค่าแรงยึดหน่วงที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า นอกจากนี้การใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อบนพื้นผิวคอนกรีตเดิม จะเป็นการช่วยเพิ่มการยึดเกาะและอาจช่วยลดระยะเวลาในการเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตเดิม ข้อมูลนี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบจุดต่อที่รับแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ และให้ค่าแนะนำในการใช้งานสำหรับการซ่อมแซมคอนกรีตที่ใช้โดยทั่วไปในการก่อสร้าง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเชื่อมประสานและความขรุขระของพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่ส่งผลต่อการยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่

2.2 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมที่ได้รับจากการทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง และรูปแบบการวิบัติต่างๆ

3. วิธีการศึกษาวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
2. ทราย ใช้ทรายแม่น้ำล้างน้ำสะอาด
3. น้ำสะอาด
4. หิน ใช้หินปูนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 in และค้างตะแกรงเบอร์ 4
5. สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ซึ่งประกอบไปด้วย

อีพ็อกซี เรซิน เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติ แข็งแรงทนทาน ป้องกันรอยขีดข่วนและทนความร้อน สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น การหล่อ การเคลือบ และงานคอมโพสิตต่างๆ สำหรับอีพ็อกซี เรซิน ที่นำมาใช้ คือ Sikadur®-31 CF Normal เป็นอีพ็อกซี่สำหรับงานเสียบเหล็กและเชื่อมประสานประเภทธิโซโทรปิค (Thixotropic) ชนิด 2 ส่วนผสม ประกอบด้วย

อีพ็อกซี เรซิน กับสารเติมแต่งพิเศษ โดยมีคุณสมบัติ กันน้ำและและความชื้นไม่สามารถซึมผ่านได้ ไม่เกิดการหดตัวเมื่อแห้ง แข็งตัวเร็ว สามารถใช้เป็นกาว หรือมอร์ตาร์ในการซ่อมได้มีแรงยึดเหนี่ยวดีเยี่ยมสำหรับงานก่อสร้าง รับกำลังได้สูงและรวดเร็ว

ลาเทกซ์ ตามมาตรฐาน ASTM C1059 [12] กล่าวถึง ลาเทกซ์ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ 1.) แบบกระจายตัวใหม่ได้ (Redispersible) สามารถทาบนพื้นผิวที่จะซ่อมแซมได้หลายวันก่อนจะลงวัสดุซ่อม และไม่ควรใช้กับบริเวณที่เปียกน้ำความชื้นสูง 2.) แบบกระจายตัวใหม่ไม่ได้ (Nonredispersible) เหมาะกับการยึดหน่วงเมื่อใช้ผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ โดยลาเทกซ์ประเภทที่ 1 ให้แรงยึดหน่วงน้อยกว่าประเภทที่ 2 สำหรับลาเทกซ์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ คือ SikaLatex® เป็นของเหลวประเภทอิมัลชั่นของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) ใช้ผสมกับปูนทราย ช่วยให้การยึดหน่วงที่ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี ลดการหดตัว มีความยืดหยุ่นสูง และเป็นสารที่มีเสถียรภาพสูงไม่เกิดการแยกตัว สามารถใช้งานในสภาวะที่เป็นด่างสูงๆได้

กาวซีเมนต์ ที่นำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสาน คือ กาวซีเมนต์จระเข้เงิน มาตรฐานสูงสำหรับงานปูทับ มาตรฐานอเมริกา ANSI A 118.1, A 118.4 ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และวัสดุผสมพิเศษอื่น ๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติที่ให้การยึดหน่วงสูง

คลิสตัลไลน์ เป็นวัสดุกันซึมที่มีสารประกอบในรูปแบบโพลิเมอร์เข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างโพรงและรอยร้าวขนาดเล็กที่ จะเกิดการจับตัวทำปฏิกิริยาสร้างผลึกคริสตัลไลเซชั่น อุดปิดช่องว่างโพรงและรอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสำหรับคลิสตัลไลน์ที่นำมาใช้ คือ Crystallization by Xypex เป็นการซ่อมแซมทางเคมีเฉพาะสำหรับการป้องกันการซึม และการซ่อมแซมคอนกรีต ถูกนำไปใช้เป็นสารละลายซีเมนต์กับพื้นผิวที่อิ่มตัวก่อนที่มีอยู่ก่อให้เกิดผลึกที่ไม่ละลายน้ำทั่วรูร่อง รอยแตกร้าว จะมีการปิดผนึกอย่างถาวรบนผิวคอนกรีต

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการใช้สารเชื่อมประสานที่ผิวสัมผัสและความขรุขระที่มีต่อแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ได้ถูกออกแบบกำลังอัดที่ 25 MPa ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 80-100 mm ตามมาตรฐาน ASTM C143 [13] และส่วนผสมได้แสดงในตาราง [1] โดยค่ากำลังอัดจากการทดสอบจริงได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 25.35 MPa

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก

Compressive Strength (MPa)	25
Cement (kg/m^3)	323
Sand (kg/m^3)	837
Aggregate (kg/m^3)	1031
Water (kg/m^3)	200

3.2.2 การเตรียมแบบพิมพ์พื้นผิวคอนกรีตเดิมและดัชนีความขรุขระ

คอนกรีตเดิมถูกเตรียมผิวไว้ 2 แบบ ได้แก่ ผิวเรียบ (Smooth : S) จะใช้เกรียงปาดเรียบ และส่วนผิวขรุขระ (Rough : R) จะใช้แบบพิมพ์กดลงบนผิวของคอนกรีตสด เป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็ว และสามารถควบคุมค่าดัชนีความขรุขระ ให้ใกล้เคียงกันในทุกตัวอย่าง โดย

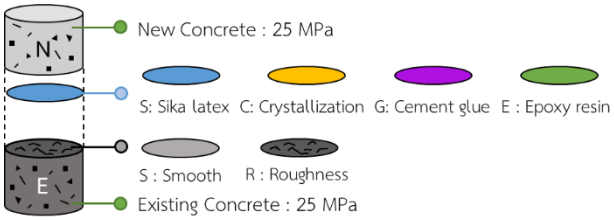
กรณีที่ผิวคอนกรีตมีความขรุขระสม่ำเสมอ ค่าดัชนีความหยาบของผิวคอนกรีตเดิม ได้นิยามไว้ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\text{ดัชนีความขรุขระ} = \frac{V_r}{A_g} \text{ หน่วย mm} \qquad (1)$$

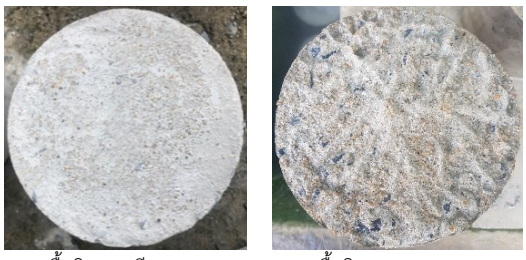
เมื่อ V_r คือ ปริมาตรช่องว่างบนผิวสัมผัส หน่วย mm^3

A_g คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของคอนกรีต หน่วย mm^2

ในงานวิจัยนี้ V_r ได้จากการแทนที่ช่องว่างบนผิวสัมผัสด้วยทรายละเอียดมาก จากการทดลองได้ค่าดัชนีความขรุขระ 1.95-2.00 mm สำหรับผิวขรุขระ และยังแสดงถึงค่าเฉลี่ยความสูงของผิวขรุขระ ดังนั้นความลึกของร่องจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าดัชนีความขรุขระ โดยเมื่อวัดความลึกเฉลี่ยจริงของผิวขรุขระจะอยู่ที่ 4.14 mm



รูปที่ 1 ลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ



พื้นผิวแบบเรียบ (S) พื้นผิวแบบขรุขระ (R)

รูปที่ 2 พื้นผิวคอนกรีตเดิม

อีพ็อกซี เรซิน ลาเทกซ์

คลิสตัลไลน์

กาวซีเมนต์

รูปที่ 3 พื้นผิวคอนกรีตเดิมหลังจากทาสารเชื่อมประสานต่างๆ

รูปที่ 4 ตัวอย่างคอนกรีตหลังหล่อคอนกรีตใหม่ลงบนคอนกรีตเดิม

3.2.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกหล่อในแบบเหล็กทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และความสูง 300 mm รายละเอียดส่วนต่างๆ ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ 1 คอนกรีตเดิมจะเทถูกลงในแบบลึกประมาณ 150 mm ทิ้งไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วนำแบบพิมพ์ผิวขรุขระกดลงบนผิวคอนกรีตเดิม หลังจากพื้นผิวของคอนกรีตหลังแข็งตัว แสดงในรูปที่ 2 เมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มน้ำก้อนตัวอย่างส่วนนี้เรียกว่า คอนกรีตเดิม (E) เมื่อคอนกรีตอายุครบ 28 วัน นำมาทาสารเชื่อมประสานต่างๆ แสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวมาใส่ลงในแบบหล่อแล้วเททับด้วยคอนกรีตใหม่ (N) จนเต็มแบบหล่อแล้วนำไปบ่มน้ำต่ออีก 28 วัน แสดงในรูปที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ถูกเตรียมตามตัวแปรที่ทำการศึกษา แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คอนกรีตตัวอย่างแต่ละชุดทดสอบ

รหัสตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีต (MPa)	พื้นผิว (S/R)	อีพ็อกซีเรซิน (E)	ลาเทกซ์ (S)	กาวซีเมนต์ (G)	คลิสตัลไลน์ (C)
E25 S N25	25	S	-	-	-	-
E25 SE N25	25	S	√			
E25 SS N25	25	S		√		
E25 SG N25	25	S			√	
E25 SC N25	25	S				√
E25 R N25	25	R	-	-	-	-
E25 RE N25	25	R	√			
E25 RS N25	25	R		√		
E25 RG N25	25	R			√	
E25 RC N25	25	R				√

3.3 การทดสอบ

เมื่อบ่มตัวอย่างจนครบอายุที่ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตมาติดตั้งในชุดทดสอบการยึดหน่วงแบบเฉือนตรง แสดงในรูปที่ 5 จากนั้นเดินเครื่องทดสอบ UTM จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ แสดงในรูปที่ 6 ค่าที่ได้จากการทดสอบคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนตรงกับการเคลื่อนตัวของคอนกรีต ซึ่งถูกบันทึกค่าลงในเครื่องคอมพิวเตอร์

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทดสอบเสร็จแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบมาวิเคราะห์หาหน่วยแรงยึดหน่วง และค่าการดูดซับพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\text{หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง} = \frac{P}{A} \text{ หน่วย Pa} \qquad (2)$$

เมื่อ P คือ แรงเฉือนที่ได้จากเครื่องทดสอบ หน่วย N

A คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวอย่าง หน่วย m^2

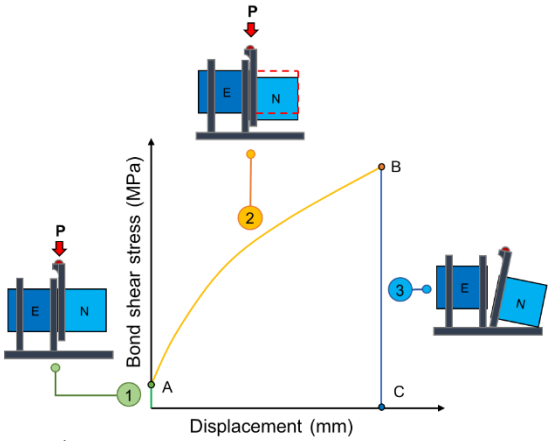
รูปที่ 5 ชุดทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง

รูปที่ 6 ตัวอย่างคอนกรีตหลังทำการทดสอบ

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 พฤติกรรมที่ได้รับจากการทดสอบ

ผลที่ได้รับจากการทดสอบคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนตรงกับการเคลื่อนตัว โดยพฤติกรรมการรับแรงเฉือนตรง สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง

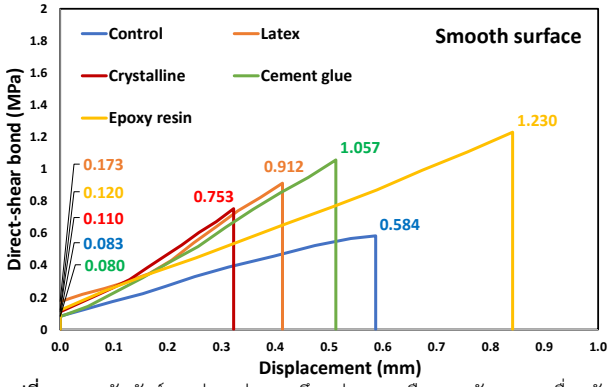
ช่วงที่ 1 หน่วยแรงยึดหน่วงจะเกิดจากการยึดติดต่อกัน (Cohesion) ของผิวคอนกรีตกับสารเชื่อมประสานที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผิวคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ทำให้ช่วงนี้จะไม่มีการเคลื่อนตัวของตัวคอนกรีตใหม่ จนกระทั่งหน่วยแรงยึดหน่วงถึงจุด A ซึ่งเป็นจุดสูงสุดในช่วงแรก ก่อนที่คอนกรีตใหม่จะเริ่มเคลื่อนตัว

ช่วงที่ 2 ในช่วงนี้ หน่วยแรงยึดหน่วงที่จุดต่อจะเกิดจากการขัดกันของวัสดุมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน โดยเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ เมื่อแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุด B ซึ่งเป็นค่ากำลังยึดหน่วงสูงสุด (Direct-shear bond strength) จะสังเกตเห็นการแยกตัวระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่

ช่วงที่ 3 ผิวสัมผัสของคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่จะเกิดการแยกตัวออกจากกัน (Delaminate) ทำให้ไม่สามารถรับแรงได้ต่อไป ระยะการเคลื่อนตัวที่จุด C และจุด B มีค่าเท่ากัน

4.2 อิทธิพลของการใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อ เมื่อคอนกรีตเดิมมีผิวสัมผัสแบบผิวเรียบ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบเรียบ พบว่า เมื่อมีการใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงในช่วงแรกจะมีค่าสูงขึ้นกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมประสาน โดยในช่วงนี้สารเชื่อมประสานลาเทกซ์ จะให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงสูงสุด ในช่วงที่สอง หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กัน โดยเฉพาะสารเชื่อมประสานอีพ็อกซี เรซิน จะช่วยให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะเคลื่อนตัวมากสุด

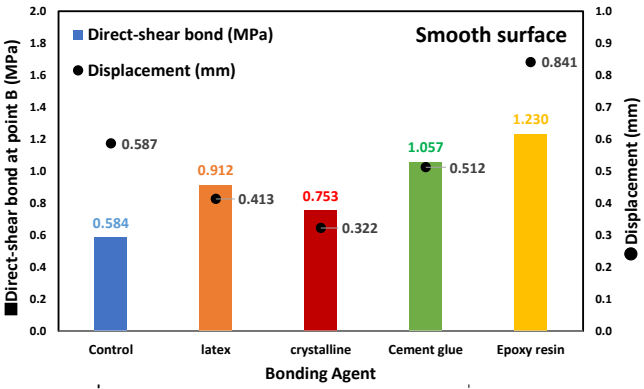


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบเรียบ

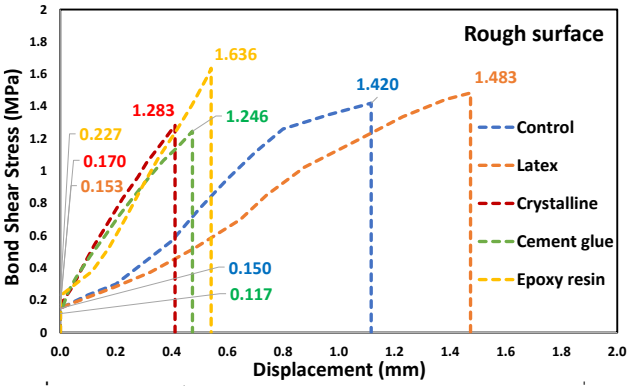
รูปที่ 9 แสดงค่ากำลังยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบเรียบ พบว่า ตัวอย่างที่ใช้สารเชื่อมประสานจะให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงเพิ่มขึ้นแต่ระยะการเคลื่อนตัวจะลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมประสาน อย่างไรก็ตามสารเชื่อมประสาน อีพ็อกซี เรซิน เท่านั้นที่ช่วยเพิ่มหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัวได้สูงสุด

4.3 อิทธิพลของการใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อ เมื่อคอนกรีตเดิมมีผิวสัมผัสแบบผิวขรุขระ

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบขรุขระ พบว่า การใช้สารเชื่อมประสานอีพ็อกซี เรซิน ช่วยเพิ่มหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงได้อย่างชัดเจน แต่ระยะการเคลื่อนตัวมีค่าลงลด นอกจากนี้ การใช้กาวซีเมนต์กับคลิสตัลไลน์ไม่ได้ช่วยให้แรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะเลื่อนไถลมีค่ามากขึ้น โดยสารเชื่อมประสานลาเทกซ์จะช่วยเพิ่มระยะการเคลื่อนตัวได้มากสุด



รูปที่ 9 กำลังยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบเรียบ



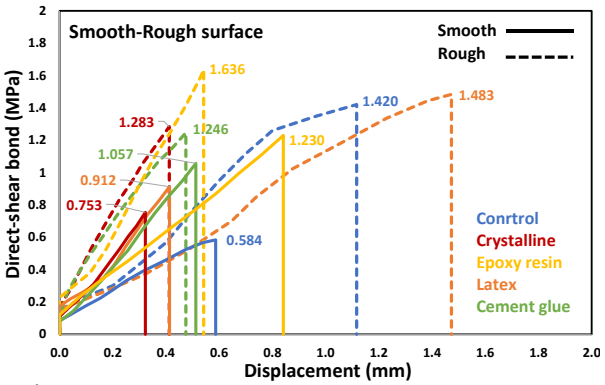
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมแบบขรุขระ

4.4 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานลงบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่แตกต่างกัน

รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวที่ต่างกัน พบว่า คอนกรีตเดิมที่มีพื้นผิวขรุขระจะให้หน่วยแรงยึดหน่วงที่มากกว่าพื้นผิวแบบเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5] [10] และเมื่อมีการใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่แตกต่างกัน ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงและระยะการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Y. He และคณะ [5] ซึ่งกล่าวว่า ความหยาบของพื้นผิวมีผลต่อสารยึดเกาะ นอกจากนี้ ยังพบว่าอีพ็อกซี เรซิน และกาวซีเมนต์ เมื่อทาลงบนพื้นผิวแบบขรุขระ จะทำให้ระยะการเคลื่อนตัวที่ลดลด เมื่อเทียบกับพื้นผิวแบบเรียบ อย่างไรก็ตาม อีพ็อกซี เรซิน จะให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงมากที่สุดทั้งแบบผิวเรียบและขรุขระ

4.5 รูปแบบการวิบัติจากการทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง เมื่อใช้สารเชื่อมประสานต่างๆ ลงบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่แตกต่างกัน

หลังจากการทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง ของการใช้สารเชื่อมประสานต่างๆ ระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ จากการสังเกต พบว่า การวิบัติจะมีรูปแบบลักษณะที่เกิดขึ้นบนรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ได้แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงกับระยะเคลื่อนตัว เมื่อใช้สารเชื่อมประสานบนพื้นผิวที่ต่างกัน

ตารางที่ 3 ผลทดสอบแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและรูปแบบการวิบัติ

รูปแบบการวิบัติ (Mode of failure)	
Mode A	Mode B
รอยแตกเกิดขึ้นที่พื้นผิวรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ไม่มีการแตกร้าวเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ นอกจากนี้ สารเชื่อมประสานยังคงยึดติดกับผิวคอนกรีตทั้งสองฝั่งอย่างสม่ำเสมอ	รอยแตกส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่พื้นผิวรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ แต่มีการแตกร้าว/บิ่น เข้าไปในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ และผิวรอยต่อมีการกระเทาะแตกหลุดออกมาบางส่วนพร้อมกับสารเชื่อมประสาน
รูปตัวอย่างการวิบัติ (Sample failure)	
กรณีตัวอย่างควบคุม (ไม่ใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อ)	
คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวแบบเรียบ (Smooth surface)	คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวแบบขรุขระ (Rough surface)
กรณีตัวอย่าง ที่ใช้สารเชื่อมประสานที่จุดต่อ	
คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวแบบเรียบ (Smooth surface) เมื่อใช้สารเชื่อมประสาน กาวซีเมนต์	คอนกรีตเดิมมีพื้นผิวแบบขรุขระ (Rough surface) เมื่อใช้สารเชื่อมประสาน อีพ็อกซี เรซิน

ผลทดสอบหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง เมื่อมีการใช้สารเชื่อมประสานลงบนพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่แตกต่างกัน ได้แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลทดสอบกำลังยึดหน่วงแบบเฉือนตรง การเคลื่อนตัวสูงสุด และรูปแบบการวิบัติ

รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง (MPa)	ระยะการเคลื่อนตัวสูงสุด (mm)	รูปแบบการวิบัติ (Mode of Failure)
E25 S N25 (Control)	0.584	0.587	A
E25 SE N25	1.230	0.841	B
E25 SS N25	0.912	0.413	A
E25 SG N25	1.057	0.512	A
E25 SC N25	0.753	0.322	A
E25 R N25 (Control)	1.420	1.117	B
E25 RE N25	1.636	0.542	B
E25 RS N25	1.483	1.473	B
E25 RG N25	1.246	0.475	B
E25 RC N25	1.283	0.412	A

5. สรุปผลการวิจัย

ผลกระทบของการใช้สารเชื่อมประสานที่ผิวสัมผัสและความขรุขระ ที่มีต่อแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเลือกใช้สารเชื่อมประสาน ที่เหมาะสมเพื่อเป็นชั้นกลางระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่สามารถช่วยเพิ่มหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงให้มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน แต่ระยะการเคลื่อนตัวอาจลดลง โดยสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง ได้แก่ อีพ็อกซี เรซิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานและมีการยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี รวมถึงสามารถสร้างลักษณะผิวที่ขรุขระเพื่อเชื่อมประสานกับคอนกรีตใหม่ได้อีกด้วย สำหรับการใช้วัสดุอีพ็อกซี เรซิน เป็นชั้นกลางจะให้ค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะเลื่อนไกลเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 111 และ 43 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีพื้นผิวแบบเรียบและไม่มีสารเชื่อมประสาน นอกจากนี้การใช้คลิสตัลไลน์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัวจะมีค่าลดอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีพื้นผิวแบบขรุขระและไม่มีสารเชื่อมประสาน

2. พื้นผิวสัมผัสคอนกรีตเดิม ที่มีพื้นผิวขรุขระจะให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเฉือนตรงพร้อมระยะเคลื่อนตัวมากกว่าคอนกรีตเดิมที่มีผิวแบบเรียบ โดยค่าหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงและระยะการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 143 และ 90 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีพื้นผิวแบบเรียบและไม่มีสารเชื่อมประสาน

3. พฤติกรรมจากการทดสอบหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรง สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่แรก หน่วยแรงยึดหน่วงจะเกิดจากการยึดติด (Cohesion) ของผิวคอนกรีตกับสารเชื่อมประสานที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผิวคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ ช่วงที่กลาง หน่วยแรงยึดหน่วงที่จุดต่อจะเกิดจากการขัดกันของวัสดุมวลรวม โดยเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนตัวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน และช่วงสุดท้าย ผิวสัมผัสของคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่จะเกิดการแยกตัวออกจากกัน

4. ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการใช้สารเชื่อมประสาน ส่วนใหญ่จะเกิดรอยแตกที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ โดยเฉพาะอีพ็อกซี เรซิน รอยแตกส่วนใหญ่จะมีการแตกร้าวเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพ็อกซี เรซิน เป็นสารเชื่อมประสานชั้นกลางสามารถเพิ่มหน่วยแรงยึดหน่วงแบบเฉือนตรงได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ เมื่อพื้นผิวสัมผัสมีความขรุขระมากขึ้นลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่จะเกิดรอยแตกขึ้นและกินลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตใหม่ด้วยเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท ซิก้า ประเทศไทย และ ซายน์เป็ค มาร์เก็ตติ้ง เซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุนการศึกษาเพรชพระจอมเกล้ามหาบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี : Petchra Pra Jom Klao Master's Degree Research Scholarship form King Mongkut's University of Technology Thonburi ที่ให้ผู้แต่งลำดับแรก

เอกสารอ้างอิง

[1] สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ อเนก ศิริพานิชกร (2009). กำลังรับแรงเฉือนระหว่างรอยต่อคอนกรีตเก่าและใหม่ของหน้าตัดรับแรงดัน. *วารสารคอนกรีต* ฉบับที่ 6, ประจำเดือน เมษายน, หน้าที่ 10

[2] Bing Wang, Shilang Xu and Fei Liu c (2016). Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate. *Construction and Building Materials*, 112, pp. 595-606.

[3] Ahmed M. Diab, Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty and Mohamed R. Tag Eldin (2017). Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, 130, pp. 73-82.

[4] Tianxiong Guo, Yuchen Xie and Xingzhong Weng (2018). Evaluation of the bond strength of a novel concrete for rapid patch repair of pavements. *Construction and Building Materials*, 186, pp. 790-800.

[5] Yan He, Xiong Zhang, R.D. Hooton and Xiaowei Zhang (2017). Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding, *Construction and Building Materials*, 151, pp. 582-590.

[6] Imran Nazir and Khuram Rashid (2018). Assessment of Bond Strength between Concrete and Repairing Cementitious Concrete in Tension and Shear, *Pakistan Journal of Engineering and Technology*, 1, pp. 66-70.

[7] Pu-Woei Chen, Xuli Fu and D.D.L. Chung (1995). Improving the Bonding between Old and New Concrete by Adding Carbon Fibers to the New Concrete, *Cement and Concrete Research,* 25, pp. 491-496.

[8] Rashmi R. Pattnaik (2015). Investigation on ASTM C882 Test Procedure of Slant Shear Bond Strength of Concrete Repair Material, *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*, 5, pp. 1-6.

[9] S.H. Abo Sabah, M.H. Hassan, N. Muhamad Bunnori and M.A. Megat Johari (2019). Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair

material overlay, *Construction and Building Materials*, 216, pp. 261-271.

[10] Karima Gadri and Abdelhamid Guettala (2017). Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect), *Construction and Building Materials*, 157, pp. 1133-1144

[11] Yue Li, Weiliang Bai and Tongfei Shi (2017). A study of the bonding performance of magnesium phosphate cement on mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 142, pp. 459-468.

[12] ASTM (2021). Standard Specification for Latex Agents for Bonding Fresh To Hardened Concrete. ASTM C1059. *ASTM International*, West Conshohocken, PA

[13] ASTM (2020), Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM C143. ASTM International, West Conshohocken, PA