ความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยตัวเองของมอร์ตาร์ผสมสปอร์ของแบคทีเรียชนิดเอ็มไอซีพี
Self-healing performance of mortar containing MICP bacterial spores

ชนาธิป ลิ้มวรรณเดช[1] วรันธร ตันอนุชิตติกุล[2] และ พิชชา จองวิวัฒสกุล[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย *Bacillus Sphaericus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตผ่านปฏิกิริยายูรีโอไลซิส (MICP) โดยนำสปอร์ห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูลจากโซเดียมอัลจิเนต เพื่อให้สปอร์ดำรงอยู่ได้ในมอร์ตาร์ ปริมาณไมโครแคปซูลที่ใช้ในการศึกษาคือ 0% 0.5% และ 1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดจากการหดตัวแบบพลาสติกโดยพิจารณาจากความกว้างของรอยแตก 3 จุด ในแต่ละชุดทดลองเป็นเวลา 7 วัน จากการศึกษาพบว่าไมโครแคปซูลส่งผลให้อัตราการซ่อมแซมรอยแตกเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองแปรผกผันกับขนาดของรอยแตกเริ่มต้น โดยหากขนาดของรอยแตกมีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพของการซ่อมแซมน้อยลง โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณไมโครแคปซูล 0% มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองติดลบ ซึ่งเกิดจากขนาดของรอยแตกของชุดทดลองนี้ที่มีขนาดใหญ่มากถึง 0.90 มิลลิเมตรขึ้นไป มอร์ตาร์ที่มีปริมาณไมโครแคปซูล 0.5% มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองร้อยละ 5.9 ที่ขนาดรอยแตก 0.74-0.77 มิลลิเมตร ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีปริมาณไมโครแคปซูล 1.0% สามารถซ่อมแซมรอยแตกได้สมบูรณ์ภายใน 3 วันแรก ที่ขนาดรอยแตกกว้าง 0.5 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเอง, เอมไอซีพี, สปอร์ของแบคทีเรีย

Abstract

This study aimed to evaluate crack closing performance of mortar containing microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) bacterial spores. The mortar was mixed with bacterial spores (*Bacillus Sphaericus*) which induce carbonate precipitation in the process called ureolysis. The bacterial spores were encapsulated by sodium alginate microcapsule to protect the bacterial spores in mortar. The amount of microcapsule was 0%, 0.5%, and 1.0% by cement weight. Pictures of crack in each series were taken from the first day through the seventh day. The results showed that the use of microcapsule increased the healing ratio of mortar, and there is an inverse relationship between crack closing performance and initial crack width. The specimen without microcapsule has a negative healing ratio due to its wide initial crack width, which was larger than 0.9 mm. The healing ratio of specimen with 0.5% of microcapsule was 5.9% for the crack width of 0.74-0.77 mm. On the other hand, all the cracks were healed within 3 days in the specimen with 1% of microcapsule, which the crack width was 0.5 mm.

Keywords: Crack closing performance, MICP, Bacterial spores

1.บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คอนกรีตได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากความถูก ความทนทาน ความง่ายในการหล่อขึ้นรูปและลักษณะของผิวได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันว่าหนึ่งในข้อด้อยของคอนกรีตคือ การเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากหลายสาเหตุไม่ว่าจะเป็น การหดตัวแบบพลาสติก ความเครียดจากอุณหภูมิ การหดตัวแบบแห้ง การผุพังจากสภาพอากาศ และจากแรงภายนอกที่มากระทำ ซึ่งจะนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง ถึงแม้ว่าจะมีการเสริมคอนกรีตด้วยวัสดุเสริมแรงหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นเส้นใยโพลีเมอร์หรือเหล็ก การป้องกันมิให้เกิดรอยแตกเลยนั้นก็แทบจะเป็นไม่ได้ และเนื่องจากในปัจจุบันผู้ใช้งานมีการคำนึงถึงความโดดเด่นและความสวยงามทางสถาปัตยกรรมมากขึ้น การบำรุงรักษาและซ่อมแซมอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยในปัจจุบันการซ่อมแซมรอยร้าวบริเวณผิว

จะขึ้นอยู่กับขนาดรอยแตก หากรอยแตกมีขนาดเล็กก็จะใช้วัสดุอุดรอยต่อ เช่น อีพอกซี ปูนตกแต่งผิวบาง หรือหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ก็จะใช้การสกัดผิวปูนบริเวณรอยแตกออกและใส่วัสดุไม่หดตัวแทนที่ลงไป อย่างไรก็ตามในหลายๆกรณีการซ่อมบำรุงด้วยมือนั้นยากที่จะทำเพราะรอยแตกอยู่ในที่ที่ยากจะเข้าถึงหรือเราไม่สามารถมองเห็นได้ รวมทั้งยังต้องอาศัยความชำนาญของผู้ซ่อมแซม รวมทั้งยังมีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้วัสดุ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการเสนอทางเลือกใหม่ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยใช้แบคทีเรียกลุ่มชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือ Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่อาศัยปฏิกิริยาย่อยสลายยูเรียทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมาซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต โดยกระบวนการดังกล่าวไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1,2]

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตที่ผิว โดยใช้มอร์ตาร์เป็นวัสดุหลักในการทดสอบเพื่อเป็นตัวแทนของผิวของปูนฉาบในโครงสร้างต่างๆ และเลือกใช้มอร์ตาร์ที่มีรอยแตกชนิดการหดตัวแบบพลาสติกซึ่งพบได้มากในปูนฉาบ โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดจากการหดตัวแบบพลาสติกทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมกับสปอร์ของแบคทีเรีย *Bacillus Sphaericus* ที่อัตราส่วนสปอร์ร้อยละ 0.5 และ 1 ของน้ำหนักซีเมนต์ เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีแบคทีเรีย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์

การซ่อมแซมรอยแตกด้วยวิธีการ Capsule-based Self-healing ซึ่งเป็นเทคนิคห่อหุ้มสารเคมีที่ทำให้เกิดการกระบวนการซ่อมแซมตัวเองแบบแบคทีเรีย มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีอื่นๆคือความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และปริมาณของแบคทีเรียที่สามารถเพิ่มจำนวนได้ตามสารอาหารในสภาวะที่เหมาะสม โดยจะอาศัยกระบวนการ ยูรีโอไลซิส (Ureolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายยูเรียโดยใช้เอนไซน์ยูรีเอส (Urease) ให้กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดย จิรภา อินทรสุนทร [2] ได้สรุปขั้นตอนของกระบวนการดังกล่าวไว้ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

2.1.1 การย่อยสลาย (Hydrolysis)

จะเกิดการย่อยสลายทั้งหมด 2 ครั้ง ดังสมการด้านล่าง โดยสมการที่ (1) จะเกิดภายในเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งผลิตเอนไซน์ยูรีเอสมากระตุ้นปฏิกิริยา สมการที่ (2) และ (3) จะเกิดภายนอกเซลล์ ซึ่งจะส่งผลให้บริเวณโดยรอบมีค่า pH สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (3)

$$(NH_2)_2CO + H_2O \xrightarrow{\text{Urease}} NH_3 + NH_2COOH \quad (1)$$

$$NH_2COOH + 2H_2O \xrightarrow{\text{yields}} NH_3 + H_2CO_3 \quad (2)$$

$$NH_3 + H_2O \xrightarrow{\text{yields}} NH_4^+ + 2OH^- \quad (3)$$

2.1.2 การปรับสมดุลกรด-ด่าง (Acid-base-equilibrium)

หลังจากการย่อยสลาย ระบบจะปรับสมดุลให้ค่า pH ต่ำลง ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$NH_4^+ \xleftrightarrow{\text{yields}} NH_3 + H^+ \quad (4)$$

$$H_2CO_3 \xleftrightarrow{\text{yields}} 2CO_3^{2-} + 2H^+ \quad (5)$$

2.1.3 การตกผลึก (Precipitation)

แคลเซียมไอออนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันพร้อมกับเจล (สารประกอบซิลิเกต) จะจับตัวกับคาร์บอเนตจากสมการที่ (5) ก่อให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตรอบเซลล์แบคทีเรีย

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \xrightarrow{\text{yields}} CaCO_3 \quad (6)$$

2.2 แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

Microbial induced Calcium Carbonate Precipitation หรือ MICP เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ทำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยอาศัยกระบวนการยูรีโอไลซิส ซึ่งแบคทีเรียที่เลือกมาต้องสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอสได้มากพอ ได้แก่ *Bacillus Sphaericus*, *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Pasteurii* ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ *Bacillus Sphaericus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างเป็นแท่งกลมยาว พบได้ในดิน มีคุณสมบัติทนสภาวะอุณหภูมิสูง และสภาวะความเป็นด่างสูงภายในเนื้อมอร์ตาร์ แต่จะทำงานได้ดีที่สุดในสภาวะเบสอ่อนถึงปานกลาง (pH 7 ~ 9) การขยายพันธุ์แบคทีเรียนี้จำเป็นต้องใช้ Oxygen เป็นปัจจัยสำคัญ

2.3 เทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรีย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) ร่วมกับการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Drying) ทำให้แคปซูลมีขนาดที่เหมาะสมกับการผสมในมอร์ตาร์ แบคทีเรียยังมีอัตราการรอดชีวิตสูง และสามารถทำได้ในปริมาณมากจึงเหมาะกับการนำไปพัฒนาในอุตสาหกรรมด้วย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 เทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)

เทคนิคเอ็กซ์ทรูชันเป็นเทคนิคพื้นฐานที่มีการใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการห่อหุ้มไมโครแคปซูลโดยการลำเลียงแบคทีเรียและสารละลาย Alginate ผ่านท่อสายยางไปบีบอัดผ่านหัวเข็มของ syringe และบรรจุไว้ในภาชนะสำหรับดึงน้ำออกซึ่งบรรจุสารทำให้แข็งตัว เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เพื่อให้สารห่อหุ้มแข็งตัว วิธีการนี้มีข้อดีคือ แบคทีเรียสามารถดำรงชีวิตได้นานเนื่องจากออกซิเจนไม่สามารถผ่านสารห่อหุ้ม

2.3.2 เทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Drying)

เทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็งเป็นเทคนิคที่ทำให้ของเหลวภายในเซลล์ เช่น น้ำ เปลี่ยนสภาวะกลายเป็นของแข็งที่เป็นผลึก จากนั้นจึงทำการลดความดันสภาพแวดล้อมให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติเพื่อให้ผลึกน้ำแข็งเกิดการระเหิดกลายเป็นไอ ภายใต้อุณหภูมิเท่ากับ หรือต่ำกว่า 0°C ไมโครแคปซูลที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นใยคล้ายสำลี เทคนิคนี้มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อคงสภาพอาหารไว้ เช่น ผัก ผลไม้

2.3.3 การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกเป็นการเกิดรอยแตกขนาดเล็กบริเวณผิวมอร์ตาร์ในช่วงอายุต้นเนื่องจากการระเหยของน้ำบริเวณผิวที่สัมผัสอากาศ และการดูดน้ำของแม่แบบที่ทำให้บริเวณผิวมอร์ตาร์ที่สัมผัสแม่แบบมีอัตรการสูญเสียน้ำมากกว่าบริเวณอื่น โดยมักเกิดในมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง โดยในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐานการหดตัวแบบพลาสติก ASTM C1579-06 [3] โดยแบบหล่อจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของมาตรฐาน ประกอบด้วยมีชิ้นส่วนปริซึมสามเหลี่ยมทำมาจากโลหะ โดยชิ้นกลางเป็นตัวสร้างหน่วยแรงซึ่งทำให้เกิดรอยแตก ในขณะที่อีก 2 ชิ้นด้านข้างจะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการขยายภายใน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

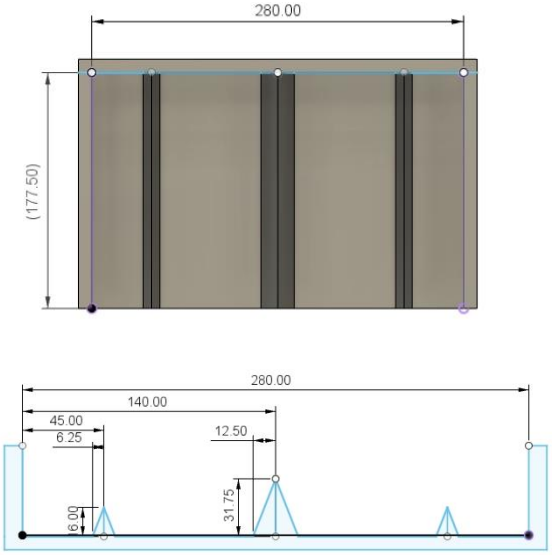
3.1 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

3.1.1 การเตรียมแบคทีเรีย

กระบวนการเตรียมสปอร์แบคทีเรียทั้งหมดจะต้องทำในห้องปลอดเชื้อ กระบวนการนี้ทำให้สปอร์แบคทีเรียสามารถคงอยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติ ใช้แบคทีเรียจำพวก MICP โดยมีขั้นตอนในการเตรียมแบคทีเรีย ดังนี้ (1) ถ่ายเชื้อแบคทีเรีย (2) เพาะเลี้ยงแบคทีเรีย (3) กระตุ้นให้เกิดสปอร์ (4) คัดแยกสปอร์ (5) หุ้ม Sodium alginate โดยเทคนิค Extrusion โดยผ่านหัวเข็ม Syringe needle (6) เข้าสู่กระบวนการ Freeze drying

3.1.2 การเตรียมแบบหล่อ

การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 [3] เพื่อจำลองการเกิดรอยแตกขนาดเล็กของมอร์ตาร์ ขนาด 280 x 177.5 x 50 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของแบบหล่อ

3.1.3 การเตรียมการผสม

เตรียมส่วนผสมซีเมนต์ ทราย น้ำ โดยใช้อัตราส่วนปูนต่อทราย เป็น 1 : 2.75 และ W/C เท่ากับ 0.6 ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ปริมาณสปอร์ร้อยละของน้ำหนักซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยน้ำจะผสมสารอาหารซึ่งประกอบด้วย สารสกัดยีสต์ ยูเรีย และแคลเซียมไนเตรท ปริมาณ 0.85% 4% และ 8% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ [8] โดยจะต้องปรับลดปริมาณน้ำลง 2.44% ของปริมาณน้ำเดิม เนื่องจากแคลเซียมไนเตรทมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 30.5% ของน้ำหนักสารทั้งหมด

ตารางที่ 1 สัดส่วนการผสม

ส่วนผสม	ซีเมนต์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ไมโครแคปซูล (กรัม)	สารอาหาร (กรัม)
spore 0%	100	275	58.54	0	12.85
spore 0.5%	100	275	58.54	0.5	12.85
spore 1%	100	275	58.54	1	12.85

3.1.4 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์เริ่มจากใส่น้ำซึ่งผสมอาหารลงในเครื่องผสม และใส่ซีเมนต์ลงในน้ำ และเปิดเครื่องผสมที่ความเร็วช้า (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที ต่อมาใส่ทรายลงผสมอย่างช้า ๆ โดยทำการเทให้หมดภายใน 30 วินาที หยุดเครื่องผสม และปรับความเร็วการผสมปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) ผสมต่อเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นหยุดเครื่องผสม และปล่อยทิ้งไว้ 90 วินาที โดยใน 15 วินาทีแรกของขั้นตอนนี้ให้โกยมอร์ตาร์ที่ติดกลับเข้าสู่อ่างผสม จากนั้นเปิดเครื่องผสมที่ความเร็วปานกลาง (285 ±10 รอบต่อนาที) จึงเสร็จ

3.1.5 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการประสานรอยแตก

เทมอร์ตาร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วลงในแบบหล่อขนาด 280 x 177.5 x 50 มิลลิเมตร อ้างอิงจาก ASTM C1579-06 [3] นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องบ่มที่อุณหภูมิ 36±3 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 30±10 องศาเซลเซียส และมีความเร็วลมไม่ต่ำกว่า 4.7 เพื่อทำให้เกิดรอยแตกหลังจากเกิดรอยแตกนำตัวอย่างไปบ่มในสภาวะอุณหภูมิ 28+2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80

รูปที่ 2 ห้องบ่ม

3.2 การควบคุมความชื้นและการให้น้ำแก่ตัวอย่างมอร์ตาร์

ในการควบคุมความชื้นจะเก็บตัวอย่างอยู่ในห้องปิด โดยไม่มีอากาศถ่ายเทในห้อง การทดลองจะใช้ลักษณะ Wet and Dry เป็นการสลับให้มีช่วงระเวลาที่เปียกและแห้งสลับกัน และหลังจากการติดตามทดลองประจำวันเสร็จสิ้น จะทำการให้น้ำแก่ตัวอย่าง 2 รอบใน 1 วัน โดยให้น้ำห่างกัน 6 ชั่วโมง โดยการควบคุมความแรงจะใช้การสเปรย์ (การฉีดฝอย) พ่นใส่บริเวณรอยแตก การให้น้ำ 1 รอบ ใช้น้ำครั้งละ 50 มิลลิลิตร เว้นระยะเวลา 15 นาที ทั้งหมด 4 ครั้ง เป็นจำนวนทั้งสิ้น 200 มิลลิลิตรต่อรอบ รวมทั้งหมด 400 มิลลิลิตรต่อวัน

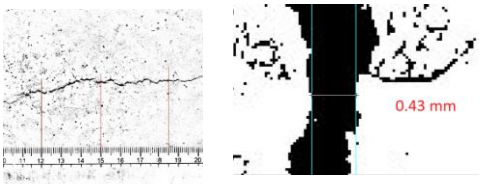
3.3 การติดตามผลการทดลองการ

ติดตามการทดลองในโครงงานนี้คือการติดตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยแตก โดยสามารถสังเกตได้จากการถ่ายภาพความละเอียดสูงจากภายนอก และใช้กระบวนการ image processing เพื่อทำให้วัดได้มีความแม่นยำสูง โดยการบันทึกภาพโดยใช้กล้องดิจิตอลบนขาตั้งที่มีความแข็งแรงที่สร้างขึ้นจากโครงเหล็ก และป้องกันการบิดเบือนจากแสงจากภายนอก โดยการถ่ายภาพจะถ่ายก่อนการฉีดน้ำในเวลาเดียวกันของทุกวันเป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 วัน

การควบคุมการถ่ายภาพจะใช้การควบคุมด้วยระยะความสูงที่เท่ากันทุกครั้งตัว การถ่ายภาพของแต่ละตัวอย่างจะทำการถ่ายทั้งหมด 3 ภาพ และแบ่งเป็นทั้งหมด 3 ระยะโดยทำการทำจุดสัญลักษณ์ไว้ เพื่อให้สามารถนำกลับมาถ่ายที่จุดเดิมได้ในทุกวัน จากนั้นจะนำภาพทั้ง 3 มารวมกัน

3.4 การวัดขนาดของรอยแตก

จากการ image processing เพื่อปรับรูปใหม่ให้เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม image J จะทำให้รอยแตกสามารถง่ายต่อการวัด จากนั้นทำการวัดขนาดของรอยแตกด้วยโปรแกรม Photoshop โดยการวัดขนาดในจุดเดียวกันซึ่งอ้างอิงจากการทำ benchmark ไว้โดยแบ่งส่วนรอยแตกเป็น 3 ส่วนจากนั้นทำการขยาย 700% เพื่อทำให้สามารถวัดได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งอ้างอิง 3 จุด และตัวอย่างการวัดขนาดรอยแตก

3.5 การคำนวณร้อยละของการซ่อมแซมตัวเอง

การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาขนาดของรอยแตกเพื่อสังเกตความสามารถในการซ่อมแซมตัวเอง ในขอบเขตระยะเวลา 7 วันนับตั้งแต่วันแรกที่มีการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์จากรอยแตกทั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งจากผลการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชุดควบคุม โดยผสมแบคทีเรีย 0% 0.5% และ 1% โดยวัดเป็นร้อยละของการซ่อมแซมตัวเอง (Healing Ratio) ดังนี้

$$\text{Healing Ratio (\%)} = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \times 100 \qquad (7)$$

เมื่อ d_0 หมายถึง ขนาดความกว้างของรอยแตกของวันที่ 1

d_i หมายถึง ขนาดความกว้างของรอยแตกของวันที่ทดสอบ

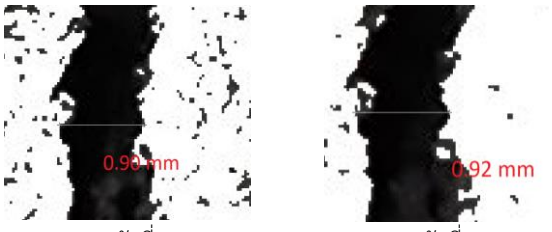
4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรีย

ผลการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรียได้ผลดังนี้ รอยแตกเริ่มต้นของการวัดทั้ง 3 ตำแหน่ง มีขนาด 1.14 มิลลิเมตร 1.21 มิลลิเมตร และ 0.90 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองมีค่าติดลบ อาจเกิดจากขนาดของรอยแตกของชุดทดลองนี้ที่มีขนาดใหญ่มากถึง 0.90 มิลลิเมตรขึ้นไป ทำให้การซ่อมแซมตัวเองแบบ Autogenous แทบไม่มีผล ดังแสดงในรูปที่ 4 และร้อยละของการซ่อมแซมตัวเองมีค่าเท่ากับ -1.4 -1.7 และ -2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย

DAY	Crack width (mm)		
	UPPER	MIDDLE	LOWER
1	1.14	1.21	0.90
2	1.16	1.20	0.90
3	1.15	1.21	0.89
4	1.13	1.21	0.87
5	1.16	1.23	0.92
6	1.15	1.23	0.92
7	1.16	1.23	0.92



(ก) วันที่ 1 (ข) วันที่ 7

รูปที่ 4 ขนาดของรอยร้าวในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรีย (ตำแหน่ง Lower)

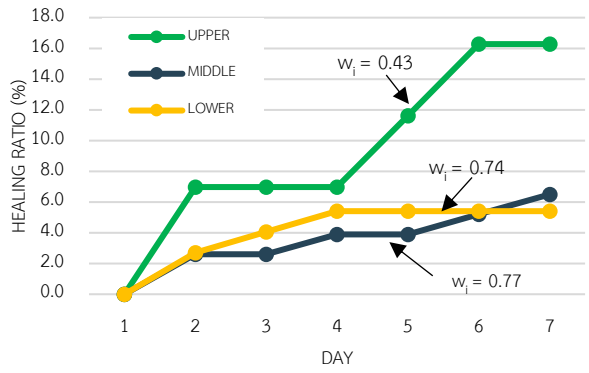
4.2 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 0.5%

ผลการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 0.5% พบว่า ขนาดรอยแตกเริ่มต้นของการวัดทั้ง 3 ตำแหน่งมีแนวโน้มเล็กลงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 3 และ ร้อยละของการซ่อมแซมตัวเองที่ 7 วันมีค่าเท่ากับ 16.3 6.5 และ 5.4 สำหรับขนาดรอยแตกเริ่มต้น (w_i) ขนาด 0.43 มิลลิเมตร 0.77 มิลลิเมตร และ 0.74 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า ในแต่ละจุดสังเกตมีขนาดของรอยแตกไม่เท่ากัน จึงทำให้ร้อยละของการ

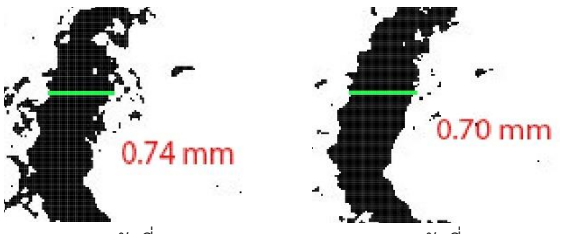
ซ่อมแซมมีค่ามากในจุดที่ความกว้างของรอยแตกน้อย และร้อยละของการซ่อมแซมจะน้อยลงเมื่อสังเกตจากจุดที่มีรอยแตกกว้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการพิจารณาจึงใช้ค่าเฉลี่ยของขนาดรอยแตกที่ใกล้เคียงกันเพื่อเป็นค่าอ้างอิงของการวัดแบบร้อยละได้เท่ากับ 5.9 ที่ขนาดรอยแตก 0.74 – 0.77 มิลลิเมตร โดยรวมประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย 0.5%

DAY	Crack width (mm)		
	UPPER	MIDDLE	LOWER
1	0.43	0.77	0.74
2	0.40	0.75	0.72
3	0.40	0.75	0.71
4	0.40	0.74	0.70
5	0.38	0.74	0.70
6	0.36	0.73	0.70
7	0.36	0.72	0.70



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการซ่อมแซมและเวลาของตัวอย่างที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย 0.5%



(ก) วันที่ 1 (ข) วันที่ 7

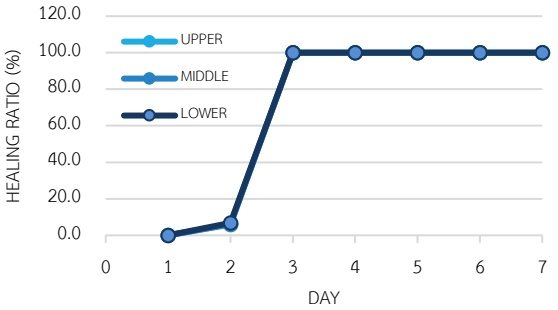
รูปที่ 6 ขนาดของรอยร้าวในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 0.5% (ตำแหน่ง Lower)

4.3 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 1%

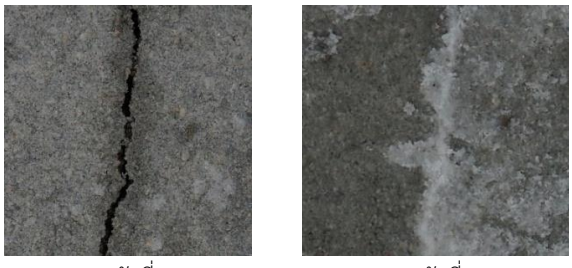
จากผลการทดลอง พบว่ารอยแตกเริ่มต้นของการวัดทั้ง 3 ตำแหน่งมีขนาด 0.49 มิลลิเมตร 0.50 มิลลิเมตร และ 0.44 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่4 พบว่ามอร์ตาร์ชุดนี้เกิดการซ่อมแซมตัวเองทั้งหมดภายในเวลา 3 วัน และร้อยละของการซ่อมแซมตัวเองมีค่าเท่ากับ 100 ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 1%ดีกว่าตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 0.5% เป็นอย่างมาก โดยจากผลการทดลองในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า สปอร์แบคทีเรีย 1% สามารถซ่อมแซมรอยแตกที่มีขนาดน้อยกว่า 0.50 มิลลิเมตรได้อย่างสมบูรณ์ และพบว่าการซ่อมแซมตนเองนั้นเกิดจากการสะสมของสปอร์จนได้ที่ และเกิดการซ่อมแซมอย่างรวดเร็วในรอยต่อของวันที่2 และ 3

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบตัวอย่างที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย 1%

DAY	Crack width (mm)		
	UPPER	MIDDLE	LOWER
1	0.49	0.50	0.44
2	0.46	0.47	0.41
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการซ่อมแซมและเวลาของตัวอย่างที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย 1%



(ก) วันที่ 1 (ข) วันที่ 7

รูปที่ 8 ขนาดของรอยร้าวในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรีย 1% (ตำแหน่ง Lower)

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณสปอร์แบคทีเรียต่ออัตราการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ ทั้งนี้กระบวนการที่ใช้จะเป็นการนำสปอร์แบคทีเรียนจำพวก MICP มาใช้ประโยชน์โดยการใช้ผสมเข้ากับมอร์ตาร์ โดยทดลองในส่วนผสม 0% 0.5% และ 1% โดยน้ำหนักซีเมนต์ และจำลองการเกิดรอยร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติก และติดตามการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ในระยะเวลา 7 วัน

ผลการติดตามผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองขึ้นอยู่ส่วนผสมของปริมาณสปอร์ที่ผสมกับมอร์ตาร์ตัวอย่าง ตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรียพบว่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองมีค่าติดลบ อาจเกิดจากขนาดของรอยแตกของชุดทดลองนี้ที่มีขนาดใหญ่มากถึง 0.90 มิลลิเมตรขึ้นไป ทำให้การซ่อมแซมตัวเองแบบ Autogenous แทบไม่มีผล

สำหรับตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรียปริมาณ 0.5% มีความสามารถในการซ่อมแซมที่ 7 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบจากขนาดรอยแตกเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน (ขนาดรอยแตก 0.74 – 0.77 มิลลิเมตร) จะได้ว่าอัตราการซ่อมแซมตัวเองมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 5.9 ทั้งนี้ร้อยละของการซ่อมแซมแปรผกผันกับขนาดรอยแตกเริ่มต้น หากขนาดรอยแตกเริ่มต้นมีค่ามากจะส่งผลให้ร้อยละของการซ่อมแซมน้อยลง

ตัวอย่างผสมสปอร์แบคทีเรียปริมาณ 1% พบว่าสามารถพบการซ่อมแซมตัวเองได้ตั้งแต่วันที่สองของการทดลอง และสามารถปิดรอยแตกขนาด 0.5 มิลลิเมตรได้สมบูรณ์ภายในเวลา 3 วัน โดยมีการซ่อมแซมอย่างรวดเร็วในรอยต่อของวันที่ 2 และ 3 ทั้งนี้ผู้ทดลองคิดเห็นว่าการซ่อมแซมของการใช้แบคทีเรีย 1% นั้นมีความสามารถในการซ่อมแซมได้มากกว่าผลทดสอบเนื่องจากรอยแตกสูงสุดของชุดทดลองนี้มีความกว้างเพียง 0.5 มิลลิเมตรซึ่งสามารถซ่อมแซมทั้งหมดได้ภายใน 3 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำการสังเกตระยะเวลาของการซ่อมแซมตัวเองให้ละเอียดกว่านี้ โดยการเพิ่มความถี่ในการเก็บข้อมูล เช่นการทำ time lapse ในตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพสูง

2) จากการทดลองความสามารถในการซ่อมแซมตนเองของคอนกรีตมีมากเกินกว่าการออกแบบรอยแตกไว้ที่ 0.05 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงควรออกแบบการทดลองให้สามารถรับการซ่อมแซมในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อให้ทราบถึงขอบเขตความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “ความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยตัวเองของมอร์ตาร์ผสมสปอร์ของแบคทีเรียชนิดเอ็มไอซีพี” สำเร็จลุล่วงเนื่องจากได้รับความกรุณา ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ และสนับสนุนกำลังใจจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะในสิ่งที่เป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณ คุณวนาลี ภานุพรประพงศ์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ให้คำติชม และความรู้เพื่อมาพัฒนาปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้ดีขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์กับการจัดทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณ ทุนวิจัยเพื่อต่อยอดองค์ความรู้สู่การใช้ประโยชน์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) รหัสโครงการ RGU6280001 และ ทุนวิจัยจากมูลนิธิกระจกอาซาฮี (the Asahi Glass Foundation) ที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., and Belie, N.D. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and Concrete Research. 56. pp. 139-152.

[2] จิรภา อินทรสุนทร. 2560. การประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองในมอร์ตาร์ด้วยสปอร์ของแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3] ASTM International. (2006). Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fibre reinforced concrete: Using a Steel Form Insert (ASTM C1579-06). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.