การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียวกรุงเทพโดยใช้สปอร์แบคทีเรีย

MICROBIAL INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION IN BANGKOK CLAY USING BACTERIAL SPORE

เบญญาภา ผันน้อย[1], สร้อยสน อาภาจิรกุล[2], วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี[3], ธนกร ชมภูรัตน์[4], สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง[5]
[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย
[2] นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย
[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย
[4] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา ประเทศไทย
[5] ศาสตราจารย์ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย
*Corresponding author address: 6170461921@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งมักให้ผลดีในดินทรายที่มีความพรุนสูง งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว โดยเลือกใช้แบคทีเรียยูรีโอไลติคในรูปแบบของสปอร์แบคทีเรียและกระตุ้นให้เกิดเอนไซม์ยูเรียเพื่อให้เกิดกิจกรรมย่อยสลายยูเรียและชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินเหนียวกรุงเทพสร้างใหม่เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นและสัดส่วนผสมได้ง่าย จากนั้นดำเนินการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยการทดสอบทั้งแบบทำลายและไม่ทำลายเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียว การทดสอบโดยคลื่นความถี่เรโซแนนท์ นำผลการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นว่าสารเชื่อมประสานทางชีวภาพหรือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ดินเหนียวกรุงเทพมีกำลังและความแข็งที่เหมาะต่อการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน

คำสำคัญ: *การปรับปรุงคุณภาพดิน, ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์, แบคทีเรียยูรีโอไลติค, ดินเหนียวกรุงเทพ*

Abstract

Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) is a new promising method for ground improvement. It has been widely reported that the MICP is efficiently used in porous media like sandy soil. This study aims to conduct a preliminary research on an application of MICP in clayey soil. In this study, spored ureolytic bacterial technique were used as treatment agent. The Bangkok clay specimen was reconstructed by oven-drying and grinding as powder. The treated soil specimens can be easily prepared from soil powder. To evaluate the efficiency of MICP process, the mechanical properties of MICP-treated soil were examined by destructive and non-destructive tests such as unconfined compression test and free-free resonant frequency test. The study can indicate that the spored MICP bacterial can be used for improving the strength and stiffness of Bangkok Clay.

Keywords: *Ground improvement, Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation, Ureolytic bacteria, Bangkok Clay*

1. บทนำ

เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพในชั้นบนสุดเป็นดินเหนียวอ่อนและยังเป็นชั้นที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อนชั้นนี้ไม่เหมาะสมต่องานฐานราก มีกำลังต่ำและเมื่อมีน้ำหนักกดทับมากเกินไป จะอัดตัวคายน้ำออกจากเนื้อดิน ทำให้เกิดการยุบตัวจนเกิดการทรุดตัวของฐาน ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง ทางวิศวกรเล็งเห็นปัญหาดังกล่าว จึงออกแบบวิธีปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างแต่ละประเภท

ปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Improvement) เพื่อพัฒนากำลังของดินหลายวิธีด้วยกัน เทคนิคหลัก ๆ ได้แก่ การทำให้แน่นขึ้น การเสริมกำลัง การระบายน้ำออกจากมวลดิน และการใช้วัสดุเชื่อมประสานจำพวกปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอย

โดยเทคนิคต่าง ๆ จะมีกรรมวิธีแตกต่างกันไป ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพดินอาจส่งผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบของเขตการก่อสร้าง เช่น พื้นที่รอบบริเวณก่อสร้างเกิดการทรุดตัว มลพิษทางอากาศจากฝุ่นควัน มลพิษทางเสียง รวมถึงมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในด้านธรรมชาติ ในบางขั้นตอนอาจมีของเสียหรือสารเคมีหลงเหลือหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดิน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ดินเหนียวกรุงเทพ

ดินเหนียวกรุงเทพมีเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ประกอบด้วย แร่มอนโมริลโลไนต์ 60% แร่เคโอลิไลต์ 25% และแร่อิลไรต์ 15% มีน้ำปนอยู่ในเนื้อดิน 24-30% มีค่าความกรดด่าง (pH) ประมาณ 5.5 มีค่าความเหนียวนำกระแสไฟฟ้าสูงมาก จากการทดสอบพบว่ามีกำลังรับแรงต่ำ ความยืนหยุ่นสูงมาก จึงสามารถหดและขยายตัวได้มาก ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) สูงซึ่งบ่งบอกถึงความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ ดินที่ค่าดัชนีพลาสติกสูงจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงขอปริมาณน้ำที่ มีค่ากำลังรับแรงเฉือนประมาณ 20-40 กิโลปาสคาล (kPa)

2.2. แบคทีเรีย

แบคทีเรีย Bacillus Pasteurii (American Type Culture Collection, ATCC 6453) สายพันธุ์บริสุทธิ์สามารถอาศัยอยู่ในดินโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เป็นแบคทีเรียประเภทยูรีโอไลติคแบคทีเรีย (Ureolytic bacterial) ที่มีความสามารถในการผลิตเอมไซม์ยูรีเอส (Urease) ได้โดยอยู่ในรูปแบบของสปอร์แบคทีเรีย (Bacterial Spore) ที่สามารถเก็บรักษาได้นานกว่าในรูปแบบแบคทีเรียที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม (Vegetative)

2.3. กระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการทางชีววิทยาหรือ Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) คือการชักนำให้เกิดการตกตะกอนด้วยจุลินทรีย์ กระบวนนี้อาศัยแบคทีเรียที่เข้าสู่กระบวนการยูรีโอไลติค (Ureolytic) โดยสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอส (Urease) เพื่อการย่อยสลายยูเรีย (Urea) ได้ เมื่อมีปริมาณแคลเซียมไอออน (Calcium Ion) ที่เหมาะสม จะสามารถทำปฏิกิริยาจนชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ได้ดังสมการต่อไปนี้ [4]

$$CO(NH_2)^2 + H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

2.4. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเชื่อมประสาน

การเชื่อมประสาน (Cementation) ทำได้โดยใช้สารเป็นตัวเชื่อมระหว่างมวลดินเพื่อลดช่องว่างระหว่างมวลดิน ซึ่งจะส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังได้ดีขึ้นปัจจุบันนิยมใช้ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นสารเชื่อมประสานและสารอื่น ๆ ซึ่งหลังจากจบกระบวนอาจมีสารเคมีหรือของเสียหลงเหลืออยู่ที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

งานวิจัยทดสอบเพื่อหากำลังของดินเหนียวบวมตัวโดยการปรับปรุงปรับคุณภาพด้วยปูนขาวและซีเมนต์ ทำการศึกษาดินเหนียวบวมตัวจากเมือแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง หลังการทดสอบดินตัวอย่างด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) พบว่าตัวอย่างดินที่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีแนวโมของประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่มีการปรับปรุงด้วยปูนขาว และกำลังการรับแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการบ่มศึกษาจากการบ่ม 7วัน 28วัน 60วัน และ 90วัน และการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์ (Free-Free Resonant Frequency) พบว่าความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคามเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ที่วัดได้จากตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ในขณะที่ดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยปูนค่ามีค่าความเร็วคลื่นลดลงหลังระยะเวลาบ่ม 28 วัน [3]

การนำกระบวนการทางชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในเทคนิคการเชื่อมประสานเป็นอีกทางเลือกที่สามารถใช้ตะกอนจากการชักนำด้วยจุลินทรีย์รูปแบบของสปอร์แบคทีเรียจนเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างมวลดินเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมและเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม ปัจจุบันมีการศึกษาที่นำเอากระบวนการ MICP มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินกับดินเหนียวกรุงเทพ โดยใช้ยูรีโอไลติคแบคทีเรีย (Ureolytic bacteria) ในรูปแบบมีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม (Vegetative) เพื่อเข้าสู่กิจกรรมยูรีโอไลติค (Ureolytic) และชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ในสภาวะที่เหมาะสม พบว่าดินเหนียวกรุงเทพหลังถูกปรับปรุงคุณภาพดินแล้วมีประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังรับแรง (Axial Stress) สูงขึ้นถึงสองเท่า [2]

2.5. การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

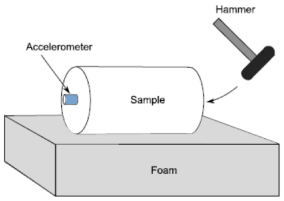
3.1.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity), ASTM D854

3.1.2 การทดสอบหาความชื้นในมวลดิน ณ จุดเปลี่ยนสถานภาพด้วยวิธี Atterberg's Limit, ASTM D4318

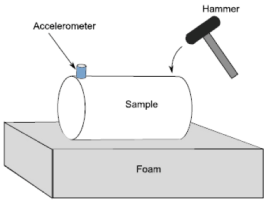
3.1.3 การทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, ASTM D1557

3.1.4 การทดสอบด้วยความถี่เรโซแนนท์ (Free-Free Resonant Frequency, FFR Test)

การทดสอบด้วยความถี่เรโซแนนท์เป็นทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อทดสอบความแข็ง (Stiffness) ของตัวอย่างโดยวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G) จากการหาความถี่ของคลื่นตามแนวยาวหรือคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และความถี่ของคลื่นตามแนวขวางหรือคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) สามารถนำมาคำนวณหาความเร็วคลื่นตามแนวแกนการทดสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 1



(a) การทดสอบตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวยาว



(b) การทดสอบตัวอย่างเพื่อหาความถี่ตามแนวขวาง

รูปที่ 1 การทดสอบการทดสอบด้วยความถี่เรโซแนนท์ [1]

3.1.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UC Test), ASTM D2166-06

2.6. การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

3.2.1 ตัวอย่างที่ 1 ดินเหนียวกรุงเทพ

โดยนำไปอบแห้งและทุบให้เป็นผงละเอียด ใช้สัญลักษณ์ว่า Soil

3.2.2 ตัวอย่างที่ 2 ดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์และยูเรีย

ซึ่งสารกระตุ้นให้แบคทีเรียเกิดปฏิกิริยาที่สามารถชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้สัญลักษณ์ว่า Treatment

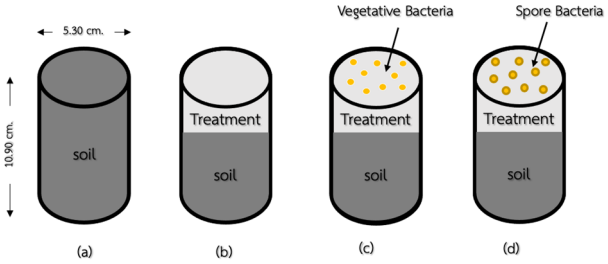
3.2.3 ตัวอย่างที่ 3 ดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ยูเรีย และแบคทีเรียที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม

ใช้ปริมาณของแบคทีเรียรูปแบบดังกล่าว 1%น้ำหนักโดยน้ำหนัก ของดินเหนียวตัวอย่าง ใช้สัญลักษณ์ว่า Vegetative

3.2.4 ตัวอย่างที่ 4 ดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ยูเรีย และสปอร์แบคทีเรีย

ใช้ปริมาณของแบคทีเรียรูปแบบดังกล่าว 1%น้ำหนักโดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ว่า Spore

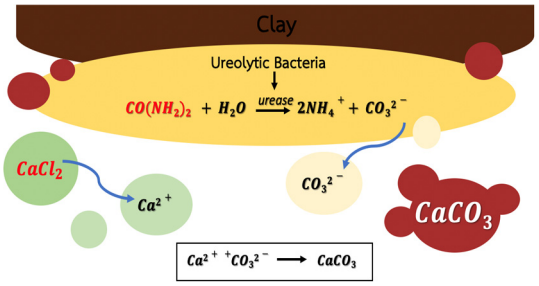
การเตรียมตัวอย่างทุกประเภทใช้การบดอัดดินตัว-อย่างใส่คอลัมน์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.30 เซนติเมตร ความสูง 10.90 เซนติเมตร และบ่มในระยะเวลา 3 วันทุกประเภทดังรูปที่ 2 แสดง หมายเหตุด้วยข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างที่ดำเนินการทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นประเภทตัวอย่างละ 2 ชิ้นงาน



รูปที่ 2 ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ (a) ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์และยูเรีย (b) ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ยูเรีย และแบคทีเรียที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม (c) ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ยูเรีย และสปอร์แบคทีเรีย (d)

2.7. การเกิดกระบวนการทางชีวภาพ (MICP) โดยสปอร์แบคทีเรียกับดินเหนียวกรุงเทพ

ใช้ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพอบแห้งในสภาพผงผสมกับยูเรียและแคลเซียมคลอไรด์ตามปริมาณน้ำสูงสุดจากการทดสอบบดอัดคายน้ำ เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์รูปแบบสปอร์แบคทีเรียและแบคทีเรียมีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม รูปที่ 3 โดยกำหนดปริมาณของจุลินทรีย์ทั้งสองรูปแบบอยู่ที่ 1%น้ำหนักโดยน้ำหนัก ของดินเหนียวตัวอย่าง บดอัดลงในคอลัมน์ตัวอย่างและบ่มเป็นเวลา 3 วัน และนำไปการทดสอบเพื่อหาความแกร่งทั้งแบบทำลายและไม่ทำลายตัวอย่าง

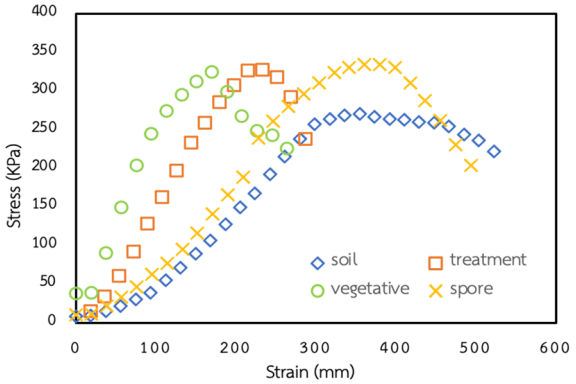


รูปที่ 3 การชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียวกรุงเทพ

3. ผลการศึกษา

ผลจากการทดสอบการรับกำลังแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UC Test) ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (Unconfined Compressive Strength, UCS) ค่าความเครียดที่แรงกดสูงสุด (Strain at peak, ϵ_{peak}) และนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Secant Young's modulus at 50% of strength, E_{50}) ดังรูปที่ 3 และผลการทดสอบด้วยคลื่น

ความถี่เรโซแนนท์ (Free-Free Resonant Test, FFR Test) ได้ค่าความถี่ตามแนวแกนยาว (P-wave) และตามแนวแกนขวาง (S-wave) และคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นตามแนวแกนยาว (V_p) ค่าความเร็วคลื่นตามแนวแกนขวาง (V_s) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E_0) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G_0) แสดงผลดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเค้นและความเครียดจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการทดสอบด้วยคลื่นเรโซแนนท์

Test	Soil	Treatment	Vegetative	Spore
UC Test				
UCS (kPa)	270.6	327.6	324.7	334.8
E_{50} (MPa)	19.4	18.4	31.3	41.9
ϵ_{peak}(mm)	380.0	233.0	364.0	380.0
FFR Test				
V_p (m/s)	240.8	379.4	467.5	472.7
E_0 (MPa)	101.5	251.9	382.5	391.1
V_s (m/s)	218.9	212.0	297.5	252.1
G_0 (MPa)	83.9	78.7	154.9	111.2

4. วิจารณ์และสรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปรับปรุงดินเหนียวตัวอย่างด้วยแบคทีเรียยูรีโอไลติคทั้งรูปแบบที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม (Vegetative) และรูปแบบสปอร์ (Spore) ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของตัวอย่างดินภายในระยะเวลาบ่ม 3 วัน ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการรับกำลังเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้รับการปรับปรุงมากถึง 1.2 เท่า และค่าโมดูลัสที่ได้จากพฤติกรรมของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเครียดเพิ่มขึ้น 1.5 - 2 เท่า

ในขณะเดียวกันผลจากการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถคำนวณความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (V_p) และคลื่นทุติยภูมิ (V_s) พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุงด้วยแบคทีเรียยูรีโอไลติคทั้งรูปแบบที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม(Vegetative) และรูปแบบสปอร์ (Spore) เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ รวมถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E_0) และโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G_0) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น 3.5 - 4 เท่า และ 1.5 - 2 เท่า ตามลำดับ โดยผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวกรุงเทพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (MICP) จากการนำยูรีโอไลติดแบคทีเรียรูปแบบที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรมใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วันพร้อมทั้งเติมยูเรียและแคลเซียมคลอไรด์อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการบ่ม พบว่าค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น 1.5 -2 เท่า และค่าโมดูลัสแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 2เท่า [2]

จากแนวโน้มของประสิทธิภาพกำลังรับแรงและค่าโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงความแกร่งขึ้นของดินเหนียวกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยแบคทีเรียยูรีโอไลติคทั้งรูปแบบที่มีชีวิตพร้อมทำกิจกรรม (Vegetative) และรูปแบบสปอร์ (Spore) สามารถนำไปประยุกต์และปรับปรุงใช้กับงานก่อสร้างฐานรากเพิ่มเติมต่อในอนาคตเพื่อเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ทั้งนี้การทดสอบจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยกระบวนการทางชีววิทยา (MICP) นี้จะต้องปรับปรุงเพื่อหาสภาวะและปริมาณที่เหมาะสมของปริมาณจุลินทรีย์ต่อการไปใช้งานก่อสร้างในสนามจริงและศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคต่อไป

5. การอ้างอิง

[1] R.D. Verástegui-Flores, G.D. Emidio, A. Bezuijen, J. Vanwalleghem, M. Kersemans (2015). Evaluation of the free–free resonant frequency method to determine stiffness moduli of cement-treated soil. *Soil and Foundation 2015*, 943-950. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.09.001

[2] S. Arpajirakul, W. Pungrasmi, S. Likitlersuang (2021). Efficientcy of microbrially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement. *Construction and Building Materials 2021*, 1-11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122722

[3] T. Chompoorat, S. Likitlersuang, S. Sitthiawiruth, V. Komolvilas, P. Jamsawang, P. Jongpradit (2021). Mechanical properties and microstructures of stabilised dredged expansive soil from coal mine.

Geomechanics and Engineering 2021, 143-157. DOI: https://doi.org/10.12989/gae.2021.25.2.143

[4] V.S. Whiffin, L.A. van Paassen, M.P. Harkes (2007). Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique. *Geomicrobiology Journal 2007*, 417-423. DOI: 10.1080/01490450701436505