

การใช้หญ้าแฝกและจุลินทรีย์เพื่อป้องกันการชะล้างพังทลายของดินในห้องปฏิบัติการ

USE OF VETIVER GRASS AND MICROORGANISM FOR PREVENTING SOIL EROSION IN LABORATORY

รัตติยา ไชยรา¹, พิทยา แจ่มสว่าง² และ อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต^{3,*}

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

² ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

*Corresponding author address: s6001081814062@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์ (MICP) เพื่อควบคุมการชะล้างพังทลายของดินทราย โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ ดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ, ดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก, ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP และดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP ผลการศึกษพบว่า ดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีค่ากำลังยึดเกาะเท่ากับ 2.7 กิโลปาสกาล ในขณะที่ดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก, ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP และดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP จะมีค่ากำลังยึดเกาะเท่ากับ 7.3, 16.0 และ 18.9 กิโลปาสกาลตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนการปรับปรุงที่ 2.7, 5.9 และ 6.0 เท่าของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ อย่างไรก็ตามการเพิ่มกำลังด้วยการใช้หญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP มีผลเล็กน้อยต่อมุมเสียดทานภายใน ซึ่งผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงผลึกของแคลไซต์และธาตุประกอบของแคลเซียม โดยผลึกของแคลไซต์จะถูกเติมเต็มเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดทราย เนื่องจากตัวอย่างดินทรายที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP จะทำให้ค่ากำลังยึดเกาะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการใช้หญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP จะช่วยให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มมากขึ้นและช่วยลดปัญหาการพังทลายของดินทราย

คำสำคัญ: หญ้าแฝก, จุลินทรีย์, กำลังเฉือน, การชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยแบคทีเรีย, ปรับปรุงคุณภาพดิน

Abstract

This paper studies the direct shear strengths of vetiver grass and the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) process for sandy soil erosion control. The conventional direct shear tests were conducted on four sample types, including untreated sand, sand reinforced with vetiver grass, MICP-treated sand, and MICP-treated sand reinforced with vetiver grass. The results show that the cohesion of untreated sand was 2.7 kPa, whereas the cohesion values of sand reinforced with vetiver grass, MICP-treated sand, and MICP-treated sand reinforced with vetiver grass were 7.3, 16, and 18.9 kPa, corresponding to improvement ratios of 2.7, 5.9 and 7.0 respectively. However, strength improvements with vetiver grass and MICP had a negligible impact on the internal friction angle of the test samples. The scanning electron microscope results show that the calcite crystals and calcium components filled the voids between sand particles. This phenomenon indicated a significant increase in the cohesion value of the MICP-treated sand samples. Therefore, a combination of vetiver grass and MICP has the most effective in enhancing the sandy soils' shear strengths, reducing erosion problems.

Keywords: Vetiver grass, Microorganisms, Shear strength, Microbial Induce Calcium carbonate Precipitation, soil improvement

1. บทนำ

ปัญหาการชะล้างพังทลายของดินมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะบริเวณพื้นที่สูงหรือภูเขา ผลการศึกษาปัญหาการชะล้างพังทลายของดินโดยกรมพัฒนาที่ดิน พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ที่มีปัญหาการชะล้างพังทลายของดินรวมกันถึง 108.9 ล้านไร่หรือประมาณร้อยละ 34 ของพื้นที่ประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือ [1]

เนื่องจากมีสภาพภูมิประเทศเป็นพื้นที่สูงทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินได้ง่าย เมื่อฝนตกจะทำให้เกิดการไหลบ่าของน้ำบริเวณผิวดิน ทำให้ดินสูญเสียความอุดมสมบูรณ์และเกิดการเสื่อมโทรมทางกายภาพ อาจนำไปสู่การเกิดดินถล่ม (landslide)

หญ้าแฝก (Vetiver grass หรือชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Chrysopogon zizanioides*) เป็นพืชตระกูลหญ้าที่มีคุณสมบัติการ

กระจายของระบบรากที่แข็งแรงสามารถเจริญเติบโตหยั่งลึกลงสู่ดิน และมีอัตราการแพร่กระจายของรากสูง ส่งผลทำให้หญ้าแฝกมี ปริมาณของรากที่หนาแน่น โดยเฉพาะการเจริญเติบโตของระบบ รากฝอย จึงทำให้หญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะโครงสร้าง ของดินให้มีความแข็งแรง ดังนั้นการใช้หญ้าแฝกจึงเป็นอีกวิธีที่ช่วย ลดการชะล้างพังทลายและเสริมเสถียรภาพของเชิงลาด อีกทั้งยังเป็นพืชที่ราคาถูกและสามารถนำไปปลูกได้กับทุกสภาพดิน

การตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์ (Microbially induce calcium carbonate precipitation, MICP) เป็นกระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในดิน ที่สามารถผลิตเอนไซม์ยูเรียเอส เพื่อย่อยสลายยูเรีย (Urea hydrolysis) เกิดผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) เมื่อ ระบบอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างสูงประกอบด้วยมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่เพียงพอ จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียม คาร์บอเนตรอบเซลล์แบคทีเรีย [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการเสริมกำลังดินทรายด้วย หญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ (MICP) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดปัญหา การชะล้างพังทลายของดิน โดยอาศัยแบคทีเรียในการชักให้เกิด แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ที่เป็นตัวช่วยประสานเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวในมวลดิน เพื่อเสริมความ แข็งแรงของมวลดินและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. แนวทางการวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1. การเตรียมตัวอย่างหญ้าแฝก

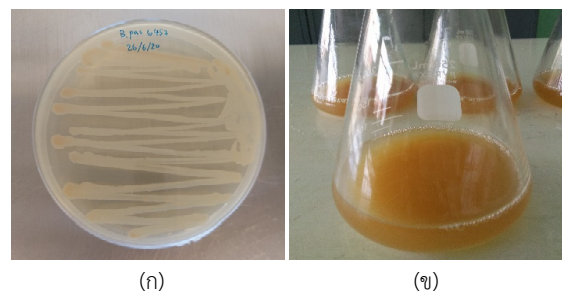
ในงานวิจัยนี้จะใช้หญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์สงขลา 3 โดยใช้ต้น กล้าหญ้าแฝกที่มีความยาว 20 ซม.และตัดรากให้เหลือ 5 ซม. ซึ่ง ก่อนนำไปปลูกจะทำการล้างน้ำให้สะอาดและแช่ทิ้งไว้ในน้ำเป็น ระยะเวลา 3-5 วัน



รูปที่ 1 ต้นกล้าหญ้าแฝกที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.2. การเตรียมตัวอย่างเชื้อแบคทีเรีย

สายพันธุ์แบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ *Bacillus pasteurii* หรือ *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 6453) เป็นแบคทีเรียที่ทน ต่อสภาพด่างและมีอัตราการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ยูเรียเอสสูง [3] ทำการถ่ายเชื้อแบคทีเรียลงในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง $\text{NH}_4\text{-YE}$ (Ammonium-yeast extract, ATCC 1376 growth medium) ที่ ประกอบด้วย สารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract) 20 ก./ล., $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 10 ก./ล., ฝรั่ง (Agar) 20 ก./ล. และ Tris buffer 0.13 โมลาร์ บ่มเชื้อในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C. นาน 48 - 72 ชม. จากนั้น นำโคโลนีที่ปรากฏมาเพาะเลี้ยงต่อในอาหาร $\text{NH}_4\text{-YE}$ broth ในอ่าง น้ำเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30°C. นาน 6 ชม. จนมีความหนาแน่นของเซลล์ในอาหารเหลวเท่ากับ 10^6 เซลล์/มล. โดยสังเกตจากการวัดค่าความขุ่นที่ความยาวคลื่น 600 นาโน เมตร (OD_{600}) ให้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8 - 1.2 [4] นำมาปั่น เหยี่ยวเพื่อแยกเซลล์ออกจากอาหาร $\text{NH}_4\text{-YE}$ broth ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที นาน 20 นาที เทส่วนใสทิ้งและล้างเซลล์ด้วย 0.85% NaCl 3 - 5 มล. เขย่า แล้วปั่นเหยี่ยวซ้ำ 2-3 ครั้ง เท สารละลายใสด้านบนทิ้งให้เหลือแต่ตะกอนเซลล์ที่ก้นหลอดทดลอง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C.



รูปที่ 2 (ก) แบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง (ข) แบคทีเรีย เจริญในอาหารเหลว $\text{NH}_4\text{-YE}$

2.1.3. การเตรียมตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อหรือ Cementation media เป็นตัวกระตุ้นให้ แบคทีเรียสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต ประกอบไปด้วยยูเรีย ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานและแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นแหล่งแคลเซียมสำหรับแบคทีเรียในการชักนำให้เกิดการ ตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยกำหนดให้อาหารเลี้ยงเชื้อมี ความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย Nutrient broth 3 ก./ล., NH_4Cl 10 ก./ล. และ NaHCO_3 2.12 ก./ล. เพื่อเป็นแหล่งอาหารและรักษาระดับพีเอชให้เหมาะสมต่อการ เกิดกิจกรรมของแบคทีเรีย

2.1.4. การเตรียมตัวอย่างดินทราย

ดินทรายที่ใช้ในการทดสอบจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°ซ. นาน 72 ชม. แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.25 มม. โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

คุณสมบัติทางกายภาพ	ดินทราย
Specific Gravity	2.66
Optimum water content (%)	13.8
Maximum dry density (kg/m ³)	1,880
Unified soil Classification	SP

3. วิธีการวิจัย

3.1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก

สำหรับตัวอย่างดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก จะทำการปลูกหญ้าแฝกลงในกล่องตัวอย่างที่มีขนาด 6x6x30 ซม. โดยควบคุมความหนาแน่นของดินทรายให้มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่าง กำหนดให้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,500 กก./ม³ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการปลูก 1 เดือน หลังจากหญ้าแฝกมีอายุครบตามกำหนด จึงทำการตัดตัวอย่างดินที่อยู่ด้านใต้ของหญ้าแฝกซึ่งมีการกระจายตัวของรากมากที่สุด เพื่อนำตัวอย่างไปบรรจุลงในกล่องทดสอบ

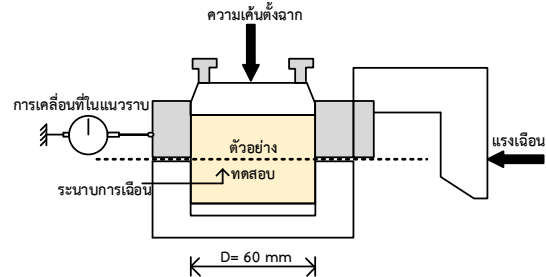
3.2. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP ซึ่งก่อนนำไปทดสอบจะทำการบดอัดดินทรายลงในกล่องตัวอย่างที่มีขนาด 6x6x5 ซม. โดยควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 1,500 กก./ม³ สำหรับตัวอย่างดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP นั้น จะทำการตัดตัวอย่างที่อยู่ด้านใต้ของหญ้าแฝกให้ได้ขนาด 6x6x5 เซนติเมตร จากนั้นจะทำการถ่ายเชื้อแบคทีเรียลงบนตัวอย่างทั้ง 2 รูปแบบ ทั้งไว้ประมาณ 24 ชม. เพื่อให้เซลล์แบคทีเรียสามารถยึดเกาะกับอนุภาคดินได้ เมื่อครบกำหนดจึงทำการให้อาหารเลี้ยงเชื้อ Cementation media เป็นระยะเวลา 7 วันและบ่มตัวอย่างที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

3.3. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM D3080-11 : Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions โดยอุปกรณ์ทดสอบ

ประกอบด้วยกล่องเหล็กเนื้อดินรูปสี่เหลี่ยมขนาด 60x60 มม. โดยจะใช้อัตราการเฉือนเท่ากับ 1 มม./นาที และความเค้นตั้งฉากที่กระทำต่อตัวอย่างเท่ากับ 20, 40 และ 80 กิโลปาสคาลตามลำดับ

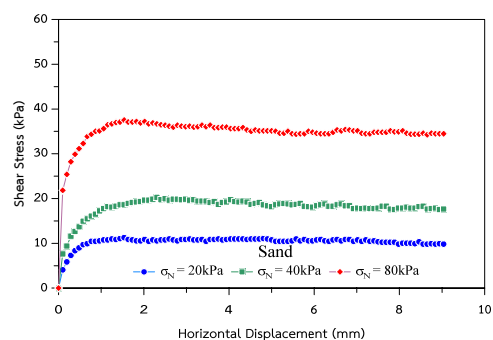


รูปที่ 3 แบบจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ

4. การวิเคราะห์ผล

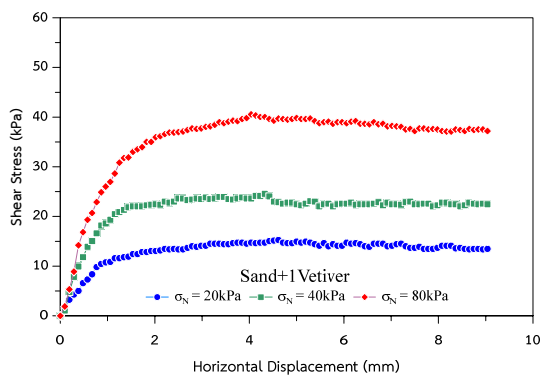
4.1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ ดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ, ดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก, ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP และดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP จากรูปที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ลักษณะการวิบัติของความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าความเค้นเฉือนถึงจุดวิบัติหลังจากนั้นความเค้นเฉือนจะมีแนวโน้มคงที่ตามการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เพิ่มขึ้น จากลักษณะการวิบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคล้ายการทดสอบทรายหลวม ซึ่งมีพฤติกรรมสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่ใช้ในการบดอัดตัวอย่าง (1,500 กก./ม³) โดยตัวอย่างทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 11.3, 20.3 และ 37.5 กิโลปาสคาลตามลำดับ



รูปที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

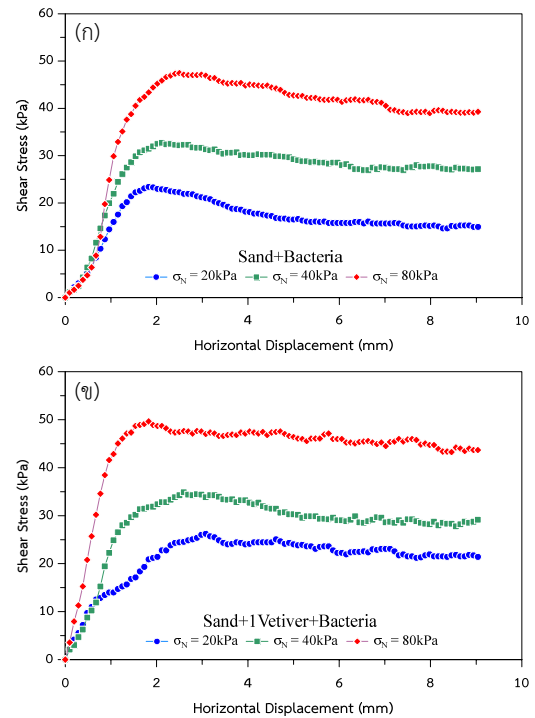
รูปที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินทรายที่มีการเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก พบว่า กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 15.3, 24.7 และ 40.6 กิโลปาสกาลตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพแสดงให้เห็นว่า ดินทรายที่มีการเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ [5] ได้ศึกษาการเสริมกำลังดินด้วยรากหญ้าแฝก พบว่าดินที่มีการเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกจะสามารถรับแรงได้มากกว่าดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝก เนื่องจากหญ้าแฝกมีระบบรากที่แตกแขนงประสานกันแน่นเสมือนตาข่าย จะทำหน้าที่ช่วยเสริมการยึดเกาะภายในมวลดินทำให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



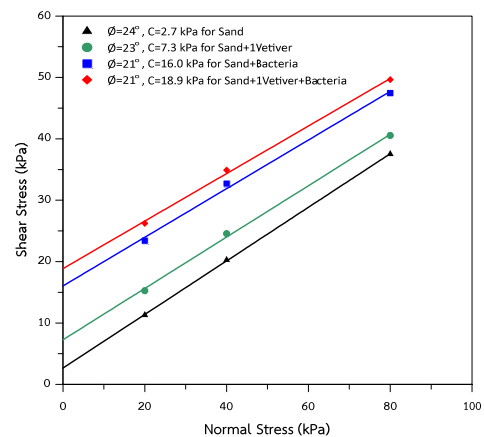
รูปที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก

รูปที่ 4-3 (ก) - 4-3 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของดินทรายที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP และเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP พบว่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวในแนวราบจนกระทั่งมีค่าถึงความเค้นเฉือนที่วิกฤตหลังจากเกิดการวิกฤตความเค้นเฉือนจะลดลงอย่างต่อเนื่องและจะมีแนวโน้มคงที่ จากลักษณะการวิกฤตของตัวอย่างดังกล่าวพบว่า เมื่อถึงจุดวิกฤตค่ากำลังจะลดลงอย่างชัดเจนคล้ายพฤติกรรมของวัสดุเปราะ ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 23.4, 32.7, 47.5 และ 26.2, 34.9, 49.6 กิโลปาสกาลตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับดินทรายที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก จะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงด้วยกระบวนการ MICP ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนได้อย่างชัดเจน เนื่องจากกระบวนการ MICP สามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเข้าไปจับบนผิวของเม็ดทรายและก่อให้เกิดการเชื่อมประสานทำให้เม็ดทรายยึดเกาะกันมากขึ้น ส่งผลทำให้ดินทราย

แข็งแรงขึ้น ซึ่ง [6] ได้เสนอว่าการปรับปรุงคุณภาพดินทรายด้วยกระบวนการ MICP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้ถึง 1.25 เท่าของตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ (ก) ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP (ข) ดินทรายเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP



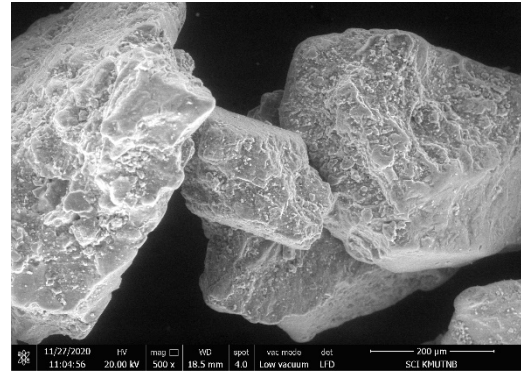
รูปที่ 4-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉากของตัวอย่างดินทรายก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

รูปที่ 4-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉากของตัวอย่างดินทรายก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า มุมเสียดทานภายใน (internal friction

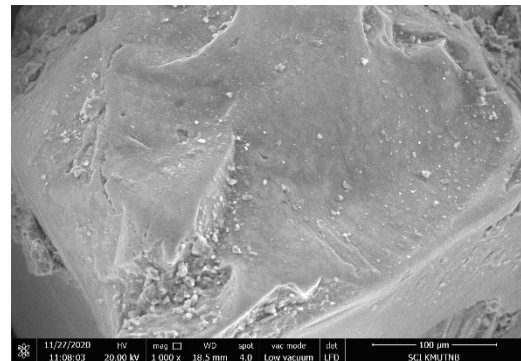
angle) มีค่าอยู่ในช่วง 21 ถึง 24 องศาในขณะที่ค่ากำลังยึดเกาะ (Cohesion) มีค่าอยู่ในช่วง 2.7 ถึง 18.9 กิโลปาสกาล ซึ่งสังเกตได้ว่าค่ากำลังยึดเกาะจะมีความอ่อนไหวมากเมื่อเปรียบเทียบกับมุมเสียดทานภายใน โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกนั้น จะทำให้กำลังยึดเกาะมีค่าเพิ่มขึ้นได้ถึง 2.7 เท่าของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก ได้กล่าวว่ารากของหญ้าแฝกสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินได้อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะค่ากำลังยึดเกาะ ซึ่งมีค่ากำลังยึดเกาะเพิ่มขึ้นประมาณ 7 กิโลปาสกาลหรือคิดเป็น 2 เท่าของดินที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยหญ้าแฝก นอกจากนี้การปรับปรุงดินทรายด้วยกระบวนการ MICP ยังส่งผลให้ดินมีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าการปรับปรุงด้วยหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว โดยการปรับปรุงคุณภาพดินทรายด้วยกระบวนการ MICP สามารถช่วยเพิ่มกำลังยึดเกาะในดินได้ถึง 5.9 และ 7.0 เท่าของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังยึดเกาะ โดยการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของค่ากำลังยึดเกาะเกิดจากการเชื่อมประสานกันของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากแบคทีเรีย *B. pasteurii* [8]

4.1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

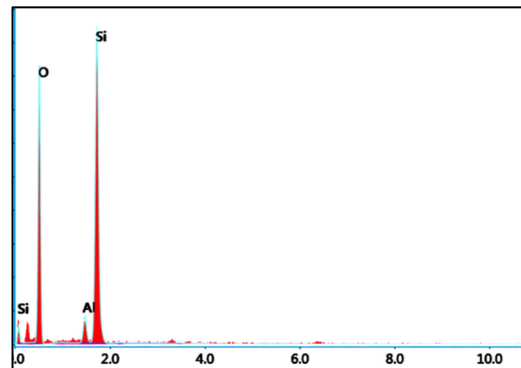
รูปที่ 4-5 (ก) - รูปที่ 4-5 (ค) แสดงถึงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (Untreated) รวมไปถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธี EDX ซึ่งจากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นถึงลักษณะของอนุภาคเม็ดทรายที่มีรูปร่างเหลี่ยม (Angular) พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และไม่มีผลึกเชื่อมประสานใดมาเกาะบนพื้นผิวหรือบริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาค จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี EDX แสดงให้เห็นอัตราส่วนน้ำหนักของซิลิคอน, อะลูมิเนียม เท่ากับ 39.9 และ 3.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลัก แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับกำลังของตัวอย่างดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจึงมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างดินทรายหลังปรับปรุงด้วยกระบวนการ MICP



(ก)



(ข)

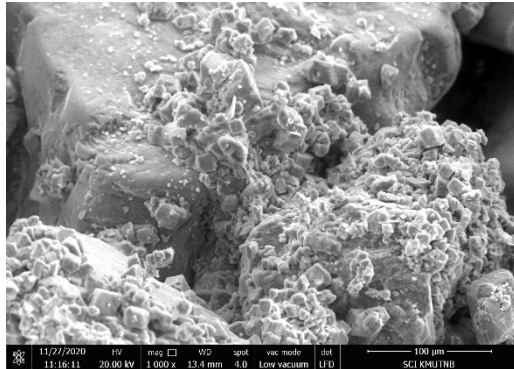


(ค)

รูปที่ 4-5 (ก) (ข) แสดงถึงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (ค) การวิเคราะห์ด้วย EDX ของตัวอย่างดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

รูปที่ 4-6 (ก) - รูปที่ 4-6 (ค) แสดงภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ด้วยวิธี EDX ของตัวอย่างดินทรายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการ MICP (Treated) จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นลักษณะการก่อตัวของผลึกรูปทรงคล้ายขนมเปียกปูน (Rhomboidal) ขนาดเล็กกระจายอยู่บนพื้นผิวของเม็ดทรายและมีการเกาะกลุ่มของผลึกบริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาค จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี EDX แสดงให้เห็นอัตราส่วนน้ำหนักของแคลเซียม, ซิลิคอน และอะลูมิเนียม เท่ากับ 33.0, 5.7 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงยืนยันได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยกระบวนการ MICP สามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

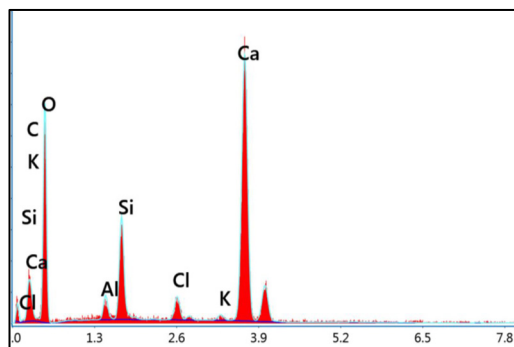
ได้ เนื่องจากดินทรายมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากพอที่จะทำให้
อาหารเลี้ยงเชื้อสามารถไหลผ่าน เพื่อกระตุ้นให้แบคทีเรียทำ
กิจกรรมและชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต โดย
ตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเข้าไปจับบนผิวของเม็ดทราย
ทำให้เกิดการเชื่อมประสานและอุดตันระหว่างอนุภาคของเม็ดทราย
ส่งผลให้กำลังและความหนาแน่นของมวลดินเพิ่มขึ้น [9]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4-6 (ก) (ข) แสดงถึงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างหลัง
ปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP (ค) การ
วิเคราะห์ด้วย EDX ของตัวอย่างหลังปรับปรุง
คุณภาพด้วยกระบวนการ MICP

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินทรายเสริมกำลังด้วย
หญ้าแฝกควบคู่กับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยกระบวนการชักนำ
ให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยแบคทีเรีย (MICP) สามารถ
สรุปผลได้ดังนี้

- ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พบว่า การใช้หญ้าแฝก
และการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ MICP มีส่วนช่วยในการ
เพิ่มค่ากำลังยึดเกาะในมวลดิน โดยสามารถเพิ่มกำลังยึดเกาะได้ถึง
2.7, 5.9 และ 6.0 เท่าของดินทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
- ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเป็นการบ่งชี้ว่า
กระบวนการชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์
หรือ MICP สามารถปรับปรุงคุณภาพดินทรายที่มีกำลังรับแรงเฉือน
ต่ำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยสามารถยืนยันจากการเกิดผลึกของ
แคลไซต์และองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์พิทยา แจ่มสว่างที่ให้คำปรึกษาและ
แก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี ผู้วิจัยตระหนัก
ถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ
ที่นี้

7. การอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาที่ดิน. (2545). *การประเมินการสูญเสียดินในประเทศไทย*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.
- [2] Dhami N. K., Reddy M. S., Mukherjee A. (2016). Significant indicators for biomineralisation in sand of varying grain sizes. *Construction and Building Materials*, 104, 198-207.
- [3] Wei S., Cui H., Jiang Z., Liu H., He H., Fang N. (2015). Biomineralization processes of calcite induced by bacteria isolated from marine sediments. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46(2), 455-464.
- [4] Dawoud O., Chen C., Soga, K. (2014). Microbial induced calcite precipitation for geotechnical and environmental applications. *New Frontiers in Geotechnical Engineering*, 11-18
- [5] Islam, M.S., Arifuzzaman. (2010). In situ shear strength of Vetiver rooted soil. Bangladesh Geotechnical Conference 2010, Natural Hazards and Countermeasures in Geotechnical Engineering Dhaka, Bangladesh, 274-279
- [6] Soon N.W., Lee L.M., Khun T.C., Ling H.S. (2013). Improvements in engineering properties of soils

- through microbial-induced calcite precipitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(4), 718–728.
- [7] Eab, K. H., Likitlersuang, S., Takahashi A. (2015). Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soils and Foundations*, 55(5), 1270-1281.
- [8] Khaleghi M., Rowshanzamir M.A. (2019). Biologic improvement of a sandy soil using single and mixed cultures: A comparison study. *Soil and Tillage Research*, 186(), 112–119.
- [9] Umar M., Kassim K. A., Ping Chiet K. T. (2016). Biological process of soil improvement in civil engineering: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 767-774.