

การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากน้ำท่วม โดยใช้ปูนซีเมนต์เพื่อการก่อสร้างพนังกั้นน้ำดินซีเมนต์ในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงราย Soil Quality Improvement of Silty Soils

Using Cement for Soil-Cement Weir Construction in Mueang Chiang Rai District

สุรเดช ต่างเพชร, ภูษงค์ มณีขัติย์*, อมเรศ มรรตส, ทวีโชค เตชะธรรมวงศ์ และเชมวิชญ์ วรรณศิริ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย จ.เชียงราย

*Corresponding author; E-mail address: idt_putchong_m@crru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากน้ำท่วมในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ เพื่อประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างพนังกั้นน้ำดินซีเมนต์ โครงการประกอบด้วยการศึกษาและเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ที่มีการสะสมของดินตะกอน การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดิน การทดสอบความชื้นที่เหมาะสม การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว การซึมผ่าน และแรงเฉือน โดยดินจากพื้นที่ศึกษาได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 25% พบว่าค่าความแข็งแรงทางกลและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่ปรับปรุงแล้วแสดงถึงโครงสร้างที่แน่นขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างดินซีเมนต์ในงานป้องกันน้ำหลาก การออกแบบพนังความสูง 2 เมตร ความชัน 1:1 และมีร่องแกนกันซึม ถูกนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลลัพธ์ชี้ว่าพนังที่ใช้ดินซีเมนต์มีค่าความปลอดภัยสูงกว่าค่ามาตรฐานในทุกกรณี รวมทั้งการทรุดตัวและการไหลซึมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ดินตะกอนที่มีอยู่ในท้องถิ่นร่วมกับปูนซีเมนต์สามารถพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมและยั่งยืนสำหรับการป้องกันน้ำในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำหลาก

คำสำคัญ: ดินตะกอนจากอุทกภัย, การปรับปรุงคุณภาพดิน, พนังกั้นน้ำดินซีเมนต์, สมบัติทางวิศวกรรมของดิน

Abstract

This study aims to evaluate the potential of improving the engineering properties of silty soils in Mueang Chiang Rai District using cement stabilization for application in soil-cement weir construction. Soil samples were collected from sediment-accumulated areas and subjected to laboratory testing to determine physical and engineering properties, including optimum moisture content, unconfined compressive strength, permeability, and shear strength. The results indicated that incorporating 25% cement by dry weight significantly enhanced the soil's strength and reduced its permeability. In addition, the maximum dry density of the stabilized soils reflected a denser soil structure, which enhances the load-bearing capacity of soil-cement applications in flood protection systems. A soil-

cement weir with a height of 2 meters, 1:1 side slopes, and a central cut-off trench was designed and analyzed using both the Limit Equilibrium Method (LEM) and Finite Element Method (FEM). The analysis revealed that the soil-cement structure satisfied or exceeded the minimum safety factor requirements under all critical conditions, while also exhibiting acceptable settlement and seepage performance. These findings demonstrate that locally sourced silty soils, when treated with cement, can be transformed into a structurally sound, cost-effective, and sustainable construction material for flood control applications in high-risk areas. The proposed weir design contributes to enhanced resilience in flood-prone communities and supports the sustainable use of local resources in geotechnical and hydraulic engineering practices.

Keywords: Silty soils, Soil quality improvement, Soil-cement weir, Engineering properties of soil

1. บทนำ

อำเภอเมืองเชียงราย เป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาท่วมและอุทกภัยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนสะสมสูงและมีลักษณะภูมิประเทศที่เอื้อต่อการเกิดการชะล้างพังทลายของดินอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสะสมของดินตะกอนในพื้นที่ลุ่มบริเวณสองฝั่งแม่น้ำกก ดินตะกอนที่ทับถมภายหลังเหตุการณ์น้ำท่วม มักไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม หรือไม่ได้รับการพัฒนาให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน จึงกลายเป็นภาระต่อการจัดการของชุมชนและหน่วยงานท้องถิ่น การหาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนเหล่านี้ เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน จึงเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาอย่างจริงจัง [1]

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ (Soil-Cement Stabilization) เป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของดินในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะความสามารถในการรับแรงอัด การต้านทานแรงเฉือน การลดการซึมผ่านของน้ำ และการเพิ่มความคงทนของวัสดุในระยะยาว ดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สามารถนำไปใช้งานในงานโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นคันดิน พื้นทาง คั่นดิน หรือโครงสร้างป้องกันน้ำ [2]

จากผลงานวิจัยในอดีตพบว่า ดินเหนียวอ่อนซึ่งโดยทั่วไปมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำและมีปัญหาการทรุดตัวสูง เมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านค่ากำลังรับแรงอัดไม่จำกัด และการซึมผ่านของน้ำที่ลดลงในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานในโครงสร้างทางวิศวกรรม [3][4] ผลที่ได้จากการปรับปรุงยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ ความชื้นในดิน และระยะเวลาการบ่ม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมในการออกแบบ [5]

ในบริบทของประเทศไทย กรมทางหลวงได้นำเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์มาใช้ในงานก่อสร้างมาตั้งแต่ พ.ศ. 2508 โดยเริ่มจากโครงการก่อสร้างถนนในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านวัสดุก่อสร้าง ก่อนที่จะพัฒนาแนวทางการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมกับลักษณะของดินในแต่ละภูมิภาค เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัสดุที่ปรับปรุงแล้วจะมีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดทางวิศวกรรมอย่างแท้จริง [6]

นอกจากการนำดินซีเมนต์ไปใช้ในงานทางและงานโครงสร้างทั่วไปแล้ว หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำ เช่น สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ ได้ส่งเสริมการใช้ดินซีเมนต์ในระดับชุมชน โดยเฉพาะในงานก่อสร้างฝายดินซีเมนต์และโครงสร้างชลื่อนน้ำขนาดเล็ก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดการพังทลายของตลิ่ง ชะลอการไหลของน้ำหลาก และเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำไว้ในฤดูแล้ง อีกทั้งยังส่งเสริมการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่น ลดต้นทุนในการขนส่งวัสดุก่อสร้างจากภายนอก และเพิ่มความยั่งยืนในการจัดการน้ำของชุมชน [6][7]

จากงานวิจัยล่าสุด พบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการตกตะกอนคาร์บอเนตจากจุลินทรีย์ (Microbially Induced Carbonate Precipitation: MICP) ร่วมกับการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ ส่งผลให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอน เช่น กำลังรับแรงอัดไม่จำกัด และความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยเร่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในระยะต้น ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของดินที่ผ่านการปรับปรุง [8] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาที่ประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ตะกอนดินจากการขุดลอกและตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยอาศัยกระบวนการลดความชื้นร่วมกับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งให้ผลลัพธ์เชิงบวกทั้งในด้านกำลังรับแรงอัดไม่จำกัด การพัฒนาโครงสร้างภายใน และความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน ต่อยุทธภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในงานวิศวกรรมโยธา [9]

จากแนวคิดและข้อมูลดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากน้ำท่วมในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย โดยการผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ได้แก่ กำลังรับแรงอัดไม่จำกัด ค่าการซึมผ่านของน้ำ และพฤติกรรมทางกลของดิน ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาจะถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบทั้งกั้นน้ำดินซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อสภาพภูมิประเทศและบริบทชุมชน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

2. ระเบียบการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากน้ำท่วมในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงราย โดยการผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ และประเมินผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ทั้งในด้านความแข็งแรงเชิงกลและพฤติกรรมการซึมผ่าน เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบและก่อสร้างกั้นน้ำดินซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.1 การสำรวจพื้นที่และเก็บตัวอย่างดิน

ทำการสำรวจพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมในเขตอำเภอเมืองเชียงราย เพื่อระบุบริเวณที่มีการสะสมของดินตะกอนในปริมาณมาก โดยมีพื้นที่เก็บตัวอย่างดินจำนวน 3 พื้นที่หลัก ได้แก่ (1) สนามฝึกกีฬาทหาร อำเภอเมืองเชียงราย (2) อาคารเทิดพระเกียรติ 90 ปี สมเด็จพระศรีนครินทร์ อำเภอเมืองเชียงราย แสดงตั้งรูปที่ 1 และ (3) บ้านเมืองจิม อำเภอเมืองเชียงราย โดยเลือกพื้นที่ที่มีความหลากหลายของลักษณะการสะสมตัวของดิน เพื่อให้ครอบคลุมตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ทั้งหมด จากนั้นนำตัวอย่างดินจากทั้ง 3 พื้นที่เข้าสู่กระบวนการเตรียมตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาเชิงลึกในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 1 สภาพพื้นที่ที่เกิดการทับถมของดินตะกอนบริเวณอาคารเทิดพระเกียรติ 90 ปี สมเด็จพระศรีนครินทร์ อำเภอเมืองเชียงราย

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ตัวอย่างดินจากแต่ละพื้นที่จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและทางเคมี เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินก่อนการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ โดยรายการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้มีดังนี้

- (1) ชีดจำกัดความชื้นเหลว (Atterberg Limits) ได้แก่ ค่าความชื้นในสถานะของเหลว (LL) และสถานะพลาสติก (PL) และการคำนวณค่าดัชนีความเหนียว (PI) โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM D4318 [10]
- (2) การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) โดยใช้การร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) และการตกตะกอน (Hydrometer test) ตามมาตรฐาน ASTM D422 [11]
- (3) การจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D2487 [12]
- (4) การจำแนกตามระบบ United States Department of Agriculture (USDA) โดยนำสัดส่วนของทราย ตะกอน และดินเหนียวที่ได้จากการวิเคราะห์อนุภาคละเอียด มาจัดกลุ่มตามสามเหลี่ยมเนื้อดิน (Soil Textural Triangle) ของ USDA
- (5) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D4972 [13]
- (6) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Content) ของดิน ตามมาตรฐาน AASHTO T 194 [14]

ผลการวิเคราะห์จากการทดสอบดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ประกอบในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะในด้านความสามารถในการยึดเกาะของอนุภาคดินกับปูนซีเมนต์ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และแนวโน้มการพัฒนาโครงสร้างของมวลดินหลังการปรับปรุง

2.3 การหาค่าความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด

ทำการหาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) โดยการทดสอบการบดอัด (Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D698 [15] ทั้งในตัวอย่างดินธรรมดาและดินที่ผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 20% และ 25% โดยน้ำหนักของดินแห้ง นอกจากนี้ยังมีการประเมินลักษณะกายภาพของดินหลังการผสม เช่น ความสามารถในการปั้นขึ้นรูป เพื่อให้มั่นใจว่าส่วนผสมสามารถใช้งานได้จริงในสภาพสนาม โดยดินที่มีค่าความชื้นที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในช่วงสภาวะพลาสติก (Plastic State) ซึ่งเป็นช่วงที่ดินสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่แห้งหรือเหลวจนเกินไป ในการทดสอบเลือกเฉพาะอัตราส่วนปูนซีเมนต์ 20% และ 25% เนื่องจากเป็นช่วงที่พบว่ามีกำลังอัดสูง คิดเป็นปริมาณปูนซีเมนต์ประมาณ 320 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 3.3 สำหรับตัวอย่างในขั้นตอนนี้แสดงดังรูปที่ 2



(ก) การผสมดินตะกอนกับปูนซีเมนต์



(ข) ตัวอย่างดินซีเมนต์ในสภาวะพลาสติก

รูปที่ 2 การผสมดินตะกอนกับปูนซีเมนต์ และตัวอย่างดินซีเมนต์ในสภาวะพลาสติก

2.4 การทดสอบอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์

ดำเนินการทดลองโดยผสมปูนซีเมนต์กับดินในอัตราส่วน 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนักของดินแห้ง การเลือกอัตราส่วนปูนซีเมนต์ในช่วง 0%–30% โดยเพิ่มครั้งละ 5% มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินที่ผ่านการปรับปรุงในช่วงที่หลากหลาย ตั้งแต่ไม่เติมปูนไปจนถึงระดับที่อาจเกิดการอิมตัวของปูนซีเมนต์ โดยช่วง 5% ถึง 25% เป็นช่วงที่คาดว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยใช้น้ำในปริมาณเท่ากับ OMC ที่ได้จากข้อ 2.3 ดินซีเมนต์ที่ผสมเสร็จจะนำไปบ่มภายใต้สองแบบ ได้แก่ (1) การบ่มแบบแห้ง (Dry curing) โดยหุ้มด้วยพลาสติกและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน และ (2) การบ่มแบบเปียก (Wet curing) โดยทิ้งให้แห้งในอากาศ 1 วัน จากนั้นแช่น้ำต่ออีก 6 วัน รวมระยะเวลาบ่ม 7 วัน ตัวอย่างทั้งสองแบบบ่มแสดงดังรูปที่ 3



(ก) การบ่มแบบแห้ง



(ข) การบ่มแบบเปียก

รูปที่ 3 กลุ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บ่มภายใต้การบ่มแบบแห้งและแบบเปียก

2.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

หลังจากการบ่มครบระยะเวลา 7 วัน ตัวอย่างดินซีเมนต์จะถูกนำออกจากพลาสติก และพักในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [16] เพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มที่แตกต่างกัน ตัวอย่างก่อนและระหว่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 โดยตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และความสูง 200 มิลลิเมตร



(ก) ตัวอย่างดินซีเมนต์ก่อนการทดสอบ



(ข) การทดสอบแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินซีเมนต์

รูปที่ 4 ตัวอย่างดินซีเมนต์ก่อนการทดสอบและการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

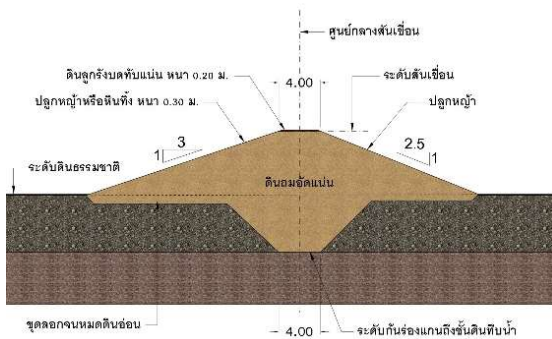
2.6 การทดสอบแรงเฉือนและการซึมผ่านของดิน

เลือกอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดีที่สุด (Optimum Cement Content: OCC) จากผลการทดสอบ UCS เพื่อนำไปทดสอบแรงเฉือนและการซึมผ่านเพิ่มเติม โดยใช้การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct Simple Shear Test) ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร (2.5 นิ้ว) และความสูง 25.4 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ตามมาตรฐาน ASTM D6528 [17] เพื่อประเมินพฤติกรรมด้านการต้านแรงเฉือน และการทดสอบการซึมผ่านของดิน (Soil Permeability Test) ดำเนินการโดยใช้โมล (mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และความสูง 128 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D5084 [18] โดยเลือกใช้วิธีความดันเปลี่ยน (Falling Head) สำหรับดินที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ และวิธีความดันคงที่ (Constant Head) สำหรับดินที่มีค่าการซึมผ่านสูง การเลือกวิธีการขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่างดินในแต่ละกรณี เพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการซึมผ่านที่แม่นยำและใกล้เคียงกับสภาวะจริง

2.7 การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของพนังกั้นน้ำท่วม

2.7.1 การออกแบบพนังกั้นน้ำท่วม

รูปที่ 5 แสดงหน้าตัดมาตรฐานของเขื่อนดินขนาดเล็กที่แนะนำโดยคู่มืองานเขื่อนดินขนาดเล็กและฝาย [19] โดยมีความชันของลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำเท่ากับ 1:3 และ 1:2.5 ตามลำดับ ซึ่งหากนำรูปแบบดังกล่าวไปใช้ในพื้นที่ชุมชนหรือพื้นที่จำกัด จะต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำดินตะกอนจากน้ำท่วมมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อนำไปใช้สร้างพนังกั้นน้ำดินซีเมนต์ที่มีความชันของลาดเขื่อนสูงขึ้น เพื่อลดพื้นที่ใช้สอยในการก่อสร้าง โดยออกแบบให้พนังมีความสูง 2 เมตร ซึ่งเหมาะสมกับระดับน้ำท่วมเฉลี่ยบริเวณริมแม่น้ำกม อำเภอมืองเชียงราย และสามารถบรรเทาความสูงได้ตามความจำเป็น ทั้งนี้ ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำถูกกำหนดให้มีความชัน 1:1 ตามที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 หน้าตัดมาตรฐานของเขื่อนดินขนาดเล็ก (หน่วย: เมตร) [19]

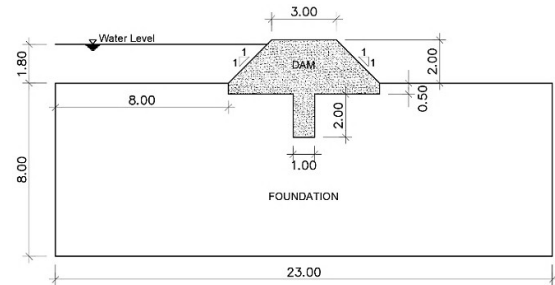


รูปที่ 6 แบบพนังป้องกันน้ำท่วมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากการสำรวจคุณสมบัติดินบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง พบว่าดินตามแนวแม่น้ำกมส่วนใหญ่เป็นดินทรายที่มีค่าการซึมผ่านของน้ำสูง จึงได้ออกแบบร่องแกนกันซึม (cut-off trench) ขนาดกว้าง 1 เมตร ลึก 2 เมตร ไว้บริเวณแกนกลางของพนัง เพื่อลดการไหลของน้ำผ่านฐานราก โดยข้อมูลดินฐานรากอ้างอิงจากรายงานการเจาะสำรวจบริเวณวิทยาลัยสงฆ์เชียงราย ซึ่งดำเนินการโดยใช้วิธีการเจาะสำรวจมาตรฐาน (Standard Penetration Test: SPT) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [20] ผลการจำแนกดินตามระบบ USCS ระบุว่าดินฐานรากส่วนใหญ่เป็น ทรายที่มีขนาดคละก้นไม่ดี (Sand, Poorly Graded: SP) ตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 14 เมตร โดยมีค่าการตอก SPT ที่ระดับความลึก 1-6 เมตร ประมาณ 14 ครั้ง ต่อฟุต คุณสมบัติดังกล่าวจะนำมาใช้ร่วมกับผลการทดสอบดินซีเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและค่าการทรุดตัวของพนังต่อไป

2.7.2 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

รูปที่ 7 แสดงขนาดและรูปทรงของแบบจำลองพนังกั้นน้ำดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการทรุดตัว โดยตัวพนังมีความสูงจากระดับพื้นดิน 2 เมตร ความกว้างของสันพนัง 3 เมตร โดยให้แรงบรรทุกจกระทำกับ 1 ต้นต่อตารางเมตร ลาดพนังด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำมีความชัน 1:1 มีร่องแกนกันซึมขนาดกว้าง 1 เมตร ลึก 2 เมตร ตัวพนังฝังลึกลงในดินจากระดับพื้นดิน 0.50 เมตร ระดับน้ำสูงสุดกำหนดไว้ที่ 1.80 เมตรจากระดับพื้นดิน ฐานรากของแบบจำลองมีความกว้าง 23 เมตร และความลึก 8 เมตร โดยเว้นระยะขอบเขตด้านข้างของฐานรากให้ห่างจากตัวพนัง 8 เมตร ซึ่งมากกว่า 2 เท่าของความสูงพนัง เพื่อป้องกันผลกระทบจากเงื่อนไขขอบเขต (boundary effects)

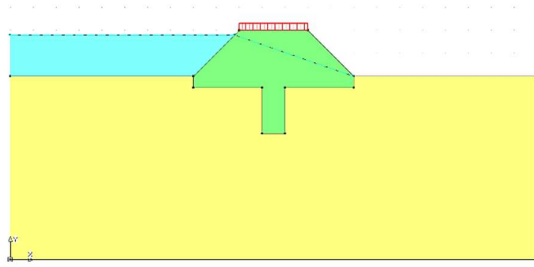


รูปที่ 7 ขนาดและรูปทรงของแบบจำลองพนังกั้นน้ำ (หน่วย: เมตร)

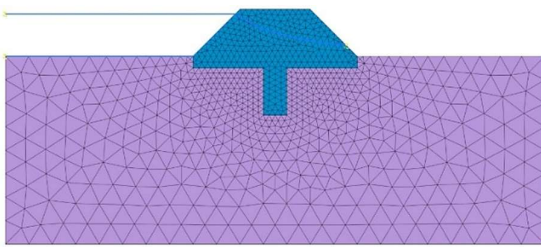
การวิเคราะห์เสถียรภาพของพนังดำเนินการโดยใช้วิธีการสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method: LEM) แบบสองมิติ โดยใช้โปรแกรม Kuslope [21] ซึ่งพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเป็นที่นิยมในงานวิเคราะห์ความมั่นคงของคันดิน โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Factor of Safety) และแนวพิบัติของมวลดิน ผลการวิเคราะห์จะนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของกรมชลประทาน [22] โดยพิจารณาใน 3 สถานการณ์หลัก ได้แก่ (1) ภายหลังการก่อสร้าง (End of Construction), (2) ระหว่างการกักเก็บน้ำ (Normal Operation), และ (3) เมื่อระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown)

เนื่องจากวิธีการ LEM ไม่สามารถแสดงค่าหน่วยแรง ความเค้น หรือการทรุดตัวของดินได้โดยตรง งานวิจัยจึงเพิ่มเติมการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) โดยใช้โปรแกรม Midas GTS NX [23] ซึ่งสามารถวิเคราะห์หลักไถการพังทลาย หน่วยแรงภายใน และการทรุดตัวได้อย่างครบถ้วน แบบจำลองใช้การวิเคราะห์แบบสองมิติ สร้างโครงข่ายองค์ประกอบสามเหลี่ยม (Triangular Element) ทั้งในส่วนของพนังและฐานราก โดยใช้เกณฑ์การวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria)

และวิธีลดกำลังวัสดุ (Strength Reduction Method: SRM) รูปที่ 8 แสดงแบบจำลองทั้งสองวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ



(ก) แบบจำลองด้วยวิธี LEM



(ข) แบบจำลองด้วยวิธี FEM

รูปที่ 8 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำท่วม

2.7.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยดินไม่ผสมซีเมนต์ ดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 25% และดินฐานราก (Foundation) โดยคุณสมบัติได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของงานวิจัยนี้ สำหรับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ใช้จากความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดแกนเดียว ตามข้อเสนอของ Do และคณะ [24] ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเชื่อมแน่น (Cohesion, c), มุมเสียดทานภายใน (Friction Angle, ϕ), หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ), มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E), ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวตั้ง (Vertical Permeability, k_v), ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวนอน (Horizontal Permeability, k_h) และอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำ

รายการ	ดินไม่ผสมซีเมนต์	ดินผสมซีเมนต์ 25%	ดินฐานราก (Foundation)
ประเภทแบบจำลอง (Model Type)	คูลอมบ์ (Coulomb)	คูลอมบ์ (Coulomb)	คูลอมบ์ (Coulomb)
ความเชื่อมแน่น (t/m^2)	1.5	4.2	0.0
มุมเสียดทานภายใน (องศา)	12	37	32
หน่วยน้ำหนัก (t/m^3)	1.51	1.51	1.68
มอดูลัสยืดหยุ่น (t/m^2)	630	15,736	753
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวตั้ง (cm/sec)	8.48×10^{-7}	7.88×10^{-8}	1.00×10^{-6}
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวนอน (cm/sec)	4.24×10^{-7}	3.94×10^{-8}	1.00×10^{-6}
อัตราส่วนช่องว่าง	1.47	1.47	0.50

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

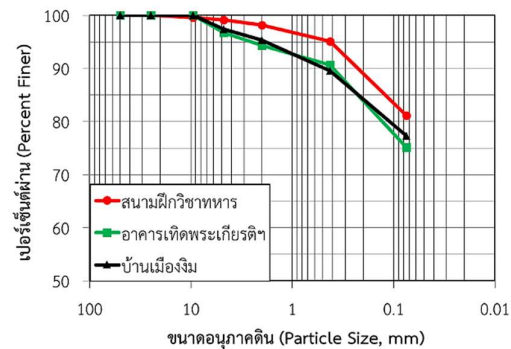
บทนำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนจากน้ำท่วมในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงราย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินเมื่อนำไปปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และใช้ในการก่อสร้างพังกันน้ำดินซีเมนต์ การนำเสนอผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ คุณสมบัติพื้นฐานของดิน การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดิน ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำดินซีเมนต์

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินและการจำแนกประเภทของดิน

เพื่อประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนที่เกิดจากน้ำท่วมในพื้นที่ศึกษา ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจาก 3 พื้นที่ ได้แก่ สนามฝึกวิชาทหาร อาคารเทิดพระเกียรติ 90 ปี สมเด็จพระศรีนครินทร์ และบ้านเมืองจิม ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการสะสมของดินตะกอนในปริมาณมาก

การทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงพบว่า ดินจากสนามฝึกวิชาทหารมีเปอร์เซ็นต์ที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดช่องเปิด 4.75 มม.) เท่ากับ 0.87% และมีเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดช่องเปิด 0.075 มม.) เท่ากับ 81.17% ส่วนดินจากอาคารเทิดพระเกียรติ มีเปอร์เซ็นต์ที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 3.20% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 75.14% ขณะที่ดินจากบ้านเมืองจิม มีเปอร์เซ็นต์ที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 3.60% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 77.32%

ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าดินจากทั้งสามพื้นที่มีสัดส่วนของอนุภาคขนาดเล็ก (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) สูงกว่า 75% ซึ่งเป็นลักษณะของดินเนื้อละเอียดตามเกณฑ์ของ ASTM D2487 [12] และเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากสามารถอัดแน่นได้ดี และมีพื้นที่ผิวเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยกราฟแสดงการกระจายตัวของเม็ดดินจากแต่ละพื้นที่ที่แสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงการกระจายตัวของเม็ดดินจากพื้นที่ศึกษา

นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน ได้แก่ ค่าความชื้นในสถานะของเหลว (Liquid Limit: LL), ค่าความชื้นในสถานะพลาสติก (Plastic Limit: PL) และค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index: PI) ซึ่งใช้ในการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS ผลการทดสอบแสดงไว้ใน ตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่าขีดจำกัดความชื้นเหลวและการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวและการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS

พื้นที่เก็บตัวอย่าง	LL (%)	PL (%)	PI (%)	การจำแนก (USCS)
สนามฝึกวิชาทหาร	49.20	41.38	7.82	ML
อาคารเทิดพระเกียรติฯ	37.35	33.42	3.93	ML
บ้านเมืองจิม	42.50	33.76	8.74	ML

ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดินจากทั้งสามแหล่งมีค่า PI ต่ำกว่า 10 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของดินตะกอนทรายอนินทรีย์ (ML) ตามระบบการจำแนกดิน USCS ซึ่งมีพฤติกรรมพลาสติกต่ำ ทำให้เหมาะสมต่อการบดอัดและปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างมากภายใต้แรงกระทำ

จากการทดสอบการตกตะกอนของอนุภาคดิน เพื่อจำแนกประเภทของดินตามระบบ USDA พบว่าดินทั้งสามแหล่งมีองค์ประกอบของตะกอน (Silt) และดินเหนียว (Clay) สูงกว่าทราย และสามารถจัดอยู่ในกลุ่มดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay Loam) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการตกตะกอนของอนุภาคดิน และการจำแนกดินตามระบบ USDA

พื้นที่เก็บตัวอย่าง	ทราย (%)	ตะกอน (%)	ดินเหนียว (%)	การจำแนก (USDA)
สนามฝึกวิชาทหาร	17.31	43.80	38.89	Silty clay loam
อาคารเทิดพระเกียรติฯ	19.16	48.41	32.43	Silty clay loam
บ้านเมืองจิม	17.98	50.11	31.91	Silty clay loam

ดินกลุ่ม Silty Clay Loam เป็นดินเนื้อละเอียดที่มีความสามารถในการยึดเกาะของอนุภาค มีความหนาแน่นเปียกสูง และมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ตอบสนองต่อการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ได้ดี โดยเฉพาะในด้านกำลังรับแรงอัดและความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณสารอินทรีย์ ของดินตัวอย่างจากบริเวณอาคารเทิดพระเกียรติฯ พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.58 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และมีปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 11.91% จึงถือว่าไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอนุภาคดินกับผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทั้งสามแหล่งพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกัน และสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มดินประเภทเดียวกันได้ เพื่อความสะดวกในการควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเพื่อความเหมาะสมในการดำเนินงานในระยะยาว จึงเลือกใช้ดินจากบริเวณอาคารเทิดพระเกียรติฯ เป็นตัวแทนในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณเพียงพอ เข้าถึงง่าย และสอดคล้องกับเกณฑ์ทางวิศวกรรมที่เหมาะสม อีกทั้งยังตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีชุมชนอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น จึงเหมาะสมต่อการนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่จริง

3.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด

การบดอัดดินให้ได้ความแน่นสูงสุดเป็นขั้นตอนสำคัญในงานวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งต้องพิจารณาค่า OMC และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) เพื่อให้ดินซีเมนต์สามารถรับน้ำหนักและต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการบดอัดกับ

ดินจากพื้นที่อาคารเทิดพระเกียรติฯ ซึ่งได้รับการคัดเลือกจากหัวข้อที่ 3.1 ให้เป็นดินในพื้นที่ศึกษา โดยทำการทดสอบในสามสภาวะ ได้แก่ ดินไม่ผสมซีเมนต์ ดินผสมซีเมนต์ 20% และดินผสมซีเมนต์ 25% โดยน้ำหนักของดินแห้ง

จากผลการทดสอบพบว่า ดินไม่ผสมซีเมนต์มีค่า OMC เท่ากับ 24.60% และมีค่า MDD เท่ากับ 1.49 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อผสมซีเมนต์ร้อยละ 20 ค่า OMC ลดลงเหลือ 23.50% และ MDD เพิ่มขึ้นเป็น 1.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนในกรณีที่มีผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 ค่า OMC ลดลงอีกเล็กน้อยเป็น 23.20% และค่า MDD เพิ่มขึ้นเป็น 1.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สรุปค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

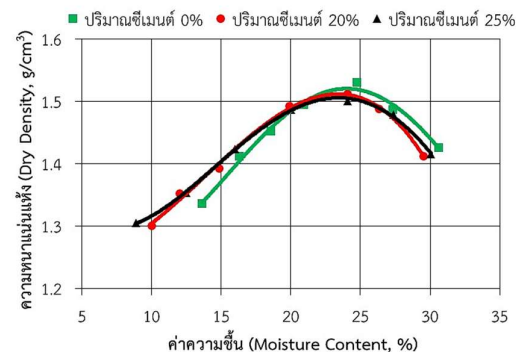
ตารางที่ 4 ค่าความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสมซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของดิน)	ความชื้นที่เหมาะสม (OMC, %)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD, g/cm ³)
0	24.60	1.49
20	23.50	1.54
25	23.20	1.57

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณซีเมนต์มีผลทำให้ค่าความชื้นที่เหมาะสมลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากซีเมนต์มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำบางส่วนไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยอนุภาคของซีเมนต์ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ทำให้โครงสร้างของมวลดินแน่นขึ้นและมีความสามารถในการรับน้ำหนักมากขึ้น

ผลการทดสอบทั้งหมดนี้มีความสอดคล้องกับเกณฑ์สำหรับกลุ่มดินประเภทเนื้อละเอียด (Fine-Grained Soils – Group D) ที่ระบุในคู่มือการก่อสร้างและออกแบบดินซีเมนต์ โดย PCA [25] ซึ่งระบุว่า OMC จะอยู่ในช่วง 22–26% และ MDD ในช่วง 1.45–1.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับดินกลุ่มนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและความหนาแน่นจากการทดลองจึงถือว่าอยู่ในช่วงปกติ และเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

รูปที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น (Moisture Content) และความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของดินที่ได้จากการทดสอบทั้งสามสภาวะ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ต่อไป



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและความหนาแน่นแห้งจากการทดสอบการบดอัด

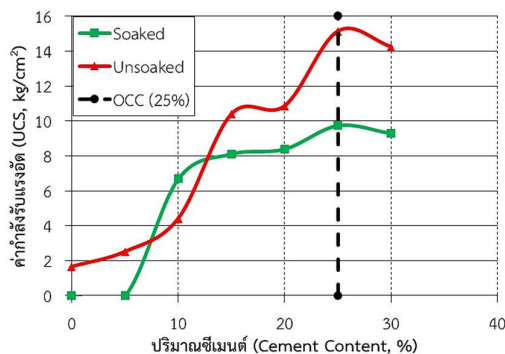
3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เป็นหนึ่งในวิธีหลักที่ใช้ประเมินคุณสมบัติทางกลของดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความสามารถของดินซีเมนต์ในการรับแรงอัดในแนวตั้ง โดยไม่เกิดการพังทลาย การทดสอบนี้ดำเนินการกับตัวอย่างดินที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ และบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะแห้ง (Unsoaked) และสภาวะเปียกชื้น (Soaked) ซึ่งจำลองเงื่อนไขการใช้งานจริงในสนาม

รูปที่ 11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวภายใต้สองสภาวะที่ได้จากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ดินที่ไม่ผสมซีเมนต์ (0%) และดินที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 5% ไม่สามารถคงสภาพได้เมื่อนำไปแช่น้ำ ส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่ากำลังรับแรงอัดได้ ในขณะที่ตัวอย่างดินที่ผสมซีเมนต์ตั้งแต่ 10% ขึ้นไปสามารถคงสภาพได้ และให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะดินที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดภายใต้สภาวะแห้งเท่ากับ 15.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และในสภาวะเปียกชื้นมีค่าเท่ากับ 9.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การเติมซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสภาวะแห้งซึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงต้นของการใช้งานของโครงสร้างพังกันน้ำดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบระหว่างสองสภาวะแสดงให้เห็นว่าแม้ดินจะสูญเสียกำลังบางส่วนเมื่ออยู่ในสภาวะเปียกชื้น แต่ยังคงมีกำลังรับแรงอัดในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งานในงานโครงสร้างขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เช่น พังกันน้ำดินซีเมนต์

นอกจากนี้ ความสามารถของดินที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 ในการคงรูปและรับแรงได้แม้ในสภาวะเปียกชื้น บ่งชี้ถึงคุณภาพของกระบวนการไฮเดรชันและการสร้างพันธะระหว่างอนุภาคดินกับผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างของดินซีเมนต์ ความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างตัวอย่างที่บ่มในสภาวะแห้งและสภาวะเปียกชื้นสะท้อนถึงผลกระทบของความชื้นต่อโครงสร้างของดินซีเมนต์ โดยในสภาวะเปียกชื้น น้ำที่แทรกซึมเข้าสู่รูพรุนภายในเนื้อวัสดุจะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างในสภาวะแห้งซึ่งไม่มีน้ำรบกวนพันธะดังกล่าว



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จึงเลือกใช้ตัวอย่างดินที่ผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 20% และ 25% ซึ่งเป็นช่วงที่ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง และแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อความชื้นได้อย่างชัดเจน

สำหรับตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 30% พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดกลับลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณน้ำที่มีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ปูนบางส่วนไม่ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ รวมถึงโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีความเปราะและไม่สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอภายในมวลดิน จึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้มากเท่าที่ควร

จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าดินตะกอนจากพื้นที่ศึกษาเมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 25% โดยน้ำหนักของดิน สามารถพัฒนาให้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับใช้ในงานโครงสร้างดินซีเมนต์ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง เช่น งานพังกันน้ำในพื้นที่ลุ่มหรือพื้นที่เสี่ยงน้ำหลาก

3.4 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดิน

คุณสมบัติด้านการซึมผ่าน ของดินมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาวัสดุสำหรับใช้ในโครงสร้างป้องกันน้ำ เช่น พังกันน้ำดินซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประเมินความสามารถของดินซีเมนต์ในการต้านทานการไหลของน้ำผ่านมวลดิน การทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้วิธีความดันเปลี่ยน ซึ่งเหมาะสมสำหรับดินเนื้อละเอียดที่มีอัตราการซึมผ่านต่ำ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านระหว่างดินธรรมชาติและดินที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของดิน

จากผลการทดสอบพบว่า ดินไม่ผสมซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability: k) มีค่าเท่ากับ 8.476×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ขณะที่ดินที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 มีค่า k ลดลงเหลือ 7.880×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของดิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k , cm/s)
0	8.476×10^{-7}
25	7.880×10^{-8}

จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มซีเมนต์สามารถลดค่าการซึมผ่านของดินได้อย่างมีนัยสำคัญถึงประมาณ 10 เท่า ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ส่งผลให้โครงสร้างของดินมีความแน่นและต่อเนื่องมากขึ้น

การลดลงของค่าการซึมผ่านนี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานดินซีเมนต์ในโครงสร้างกักเก็บหรือป้องกันการรั่วซึมของน้ำ เช่น พังกันน้ำหรือฝาย เนื่องจากช่วยลดการสูญเสียน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บ รวมทั้งเพิ่มความทนทานของโครงสร้างในระยะยาว

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดินตะกอนจากพื้นที่ศึกษาเมื่อนำมาปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 25% มีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำที่ดีมาก และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในโครงสร้างดินซีเมนต์ประเภทป้องกันน้ำ ซึ่งสามารถช่วยลดโอกาสการรั่วซึมและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง เป็นการประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานแรงเฉือนของดิน ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างป้องกันน้ำ เช่น พังกันน้ำดินซีเมนต์ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion: c) และมุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction: ϕ) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในสมการแรงเฉือนของดิน

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินในสภาวะเปียกชื้น เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมจริงที่โครงสร้างต้องเผชิญกับน้ำหรือน้ำท่วมขัง โดยใช้ตัวอย่างดินจากพื้นที่อาคารเทพระเกียรติฯ ที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 0% และ 25% ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวว่าเหมาะสมที่สุด

ผลการทดสอบพบว่า ดินไม่ผสมซีเมนต์มีค่าความเชื่อมแน่นเท่ากับ 1.5 ตันต่อตารางเมตร และมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 12 องศา ในขณะที่ดินที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 25 มีค่าความเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 4.2 ตันต่อตารางเมตร และมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นเป็น 37 องศา ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความเชื่อมแน่นและมุมเสียดทานภายในของดินซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของดิน)	ความเชื่อมแน่น (C , t/m ²)	มุมเสียดทานภายใน (ϕ , องศา)
0	1.5	12
25	4.2	37

ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนของดิน ซึ่งเป็นผลจากการสร้างพันธะระหว่างอนุภาคดินและผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างมวลดิน

นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายในจาก 12 องศา เป็น 37 องศา บ่งชี้ว่าดินมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวภายใต้แรงเฉือนได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงจากดินด้านข้างหรือน้ำ เช่น พังกันน้ำในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงหรือเกิดน้ำหลาก

ผลการทดสอบนี้ยืนยันว่า ดินตะกอนจากพื้นที่ศึกษาเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถพัฒนาคุณสมบัติทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในโครงสร้างดินซีเมนต์สำหรับงานด้านป้องกันน้ำ

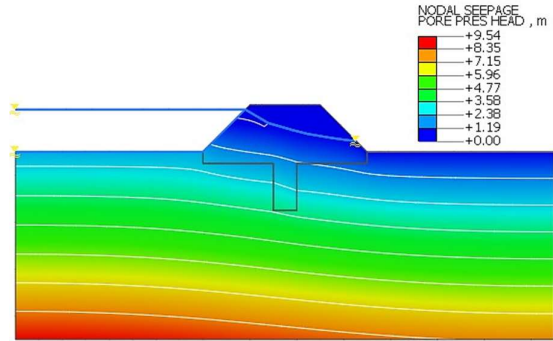
3.6 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำดินซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ประกอบด้วยผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ และพังกันน้ำดินซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของดินแห้ง โดยใช้ทั้งวิธี LEM และวิธี FEM เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบเขื่อนดินของกรมชลประทาน [22] รวมถึงผลการวิเคราะห์การทรุดตัวและการไหลซึมของน้ำผ่านพังกันและฐานราก

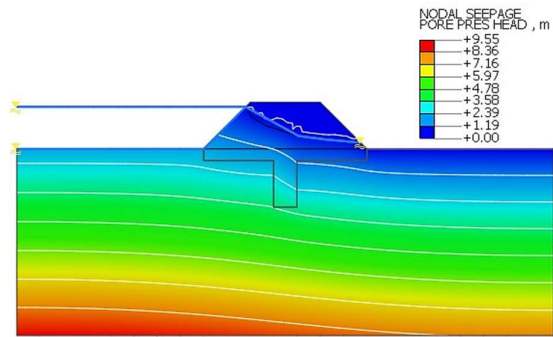
3.6.1 ผลการวิเคราะห์แนวการไหลของน้ำผ่านพังกัน (Phreatic Line)

การประเมินเสถียรภาพของพังกันน้ำดินซีเมนต์จำเป็นต้องกำหนดแนวเส้นแรงดันน้ำ (Phreatic Line) ที่ไหลผ่านมวลดินของพังกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์จากการกระจายของแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) ภายใต้สภาวะระดับน้ำคงที่ (Steady State) ด้วยวิธี FEM ผลที่ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในแบบ LEM และ FEM รูปที่ 12 แสดงการกระจายของแรงดันน้ำภายในพังกันและแนวเส้น Phreatic Line โดยบริเวณที่อยู่เหนือเส้นนี้ถือเป็นพื้นที่ที่ไม่มีแรงดันน้ำ (Free water

surface) ซึ่งแรงดันน้ำมีค่าเป็นศูนย์สัมพัทธ์ รูปที่ 12 (ก) แสดงกรณีพังกันที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และรูปที่ 12 (ข) แสดงกรณีพังกันที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 25 สำหรับกรณีระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว แนว Phreatic Line ภายในพังกันจะยังคงค้างอยู่ ขณะที่ระดับน้ำด้านเหนือน้ำลดลงถึงระดับพื้นดิน



(ก) กรณีที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยซีเมนต์



(ข) กรณีที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 25%

รูปที่ 12 การกระจายแรงดันน้ำภายในพังกันน้ำดินซีเมนต์และแนว Phreatic Line

3.6.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังกันน้ำดินซีเมนต์

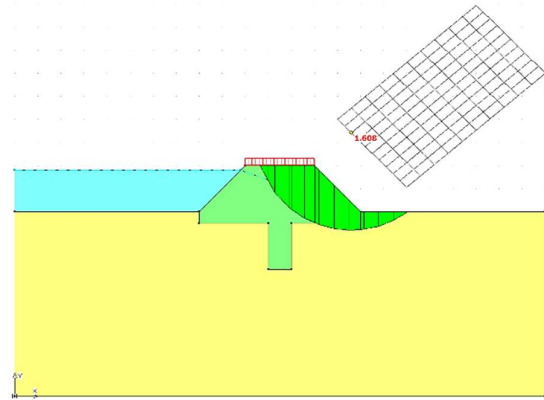
ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM และวิธี FEM ได้รับการประเมินภายใต้ 3 สภาวะ ได้แก่ (1) หลังการก่อสร้าง (End of Construction), (2) ระหว่างกักเก็บน้ำ (Normal Operation), และ (3) ระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7 โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (Min. Allowable F.S.) ตามแนวทางของกรมชลประทาน [22]

ตารางที่ 7 อัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับ

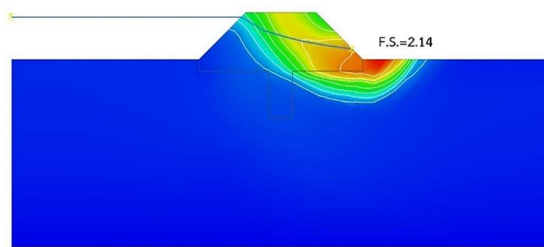
สภาวะการใช้งาน	ดินไม่ผสมซีเมนต์		ดินผสมซีเมนต์ 25%		ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ [22]
	LEM	FEM	LEM	FEM	
เขื่อนเพิ่งสร้างเสร็จ	1.92	2.58	3.80	4.62	1.30
ระหว่างกักเก็บน้ำ	1.60	2.14	2.70	3.56	1.50
ระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว	0.53	1.75	1.37	3.15	1.25

จากผลการวิเคราะห์พบว่า พังทลายที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำเฉพาะในสภาวะ (1) และ (2) แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ในสภาวะ (3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในพื้นที่ที่อาจเกิดการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ในขณะที่พังทลายที่พังทลายซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงกว่าเกณฑ์ในทุกสภาวะ ทั้งนี้ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM มีแนวโน้มสูงกว่าวิธี LEM แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบโดยตรงกับเกณฑ์มาตรฐาน [3] ได้ เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวอ้างอิงจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM เท่านั้น

นอกจากนี้ รูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15 แสดงระนาบการพิบัติ (Failure Plane) ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของพังทลายที่น้ำดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ภายใต้ทั้งสามสภาวะ ได้แก่ ภายหลังการก่อสร้าง (End of Construction – รูปที่ 13), ระหว่างกักเก็บน้ำ (Normal Operation – รูปที่ 14), และระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown – รูปที่ 15) โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM และวิธี FEM จากรูปจะเห็นว่าแนวระนาบการพิบัติที่ได้จากทั้งสองวิธีมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งยืนยันความเหมาะสมของแบบจำลองการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีของพังทลายที่น้ำดินซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 25 ไม่ได้นำมาเสนอในบทความนี้ เนื่องจากแนวระนาบการพิบัติมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ได้ปรับปรุง และไม่มี ความแตกต่างที่มีนัยสำคัญต่อการตีความผลการวิเคราะห์

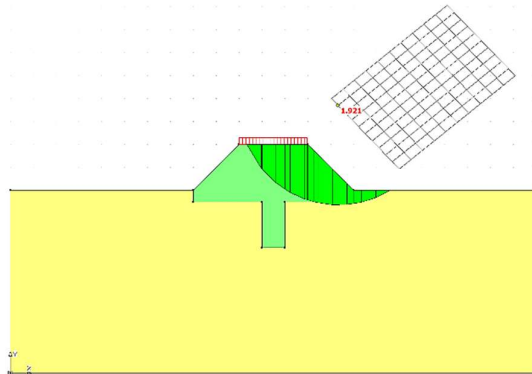


(ก) การวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM

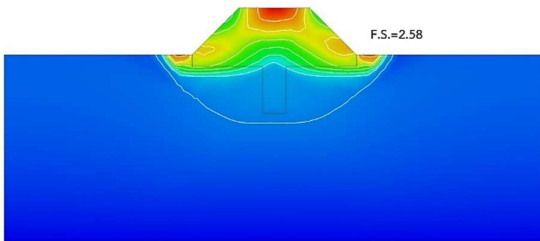


(ข) การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

รูปที่ 14 ระนาบการพิบัติ กรณีระหว่างกักเก็บน้ำ และเป็นดินไม่ผสมซีเมนต์

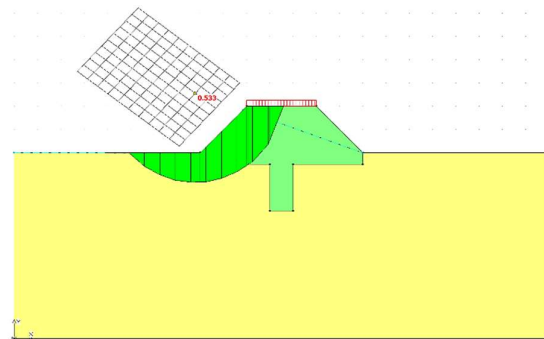


(ก) การวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM

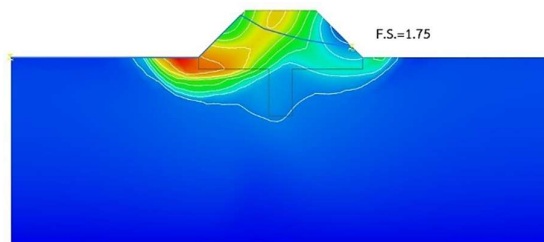


(ข) การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

รูปที่ 13 ระนาบการพิบัติ กรณีเขื่อนเพิ่งสร้างเสร็จ และเป็นดินไม่ผสมซีเมนต์



(ก) การวิเคราะห์ด้วยวิธี LEM

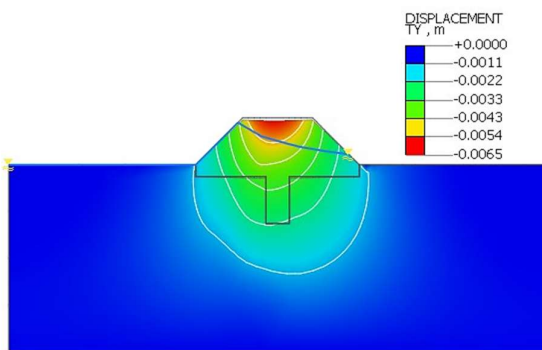


(ข) การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

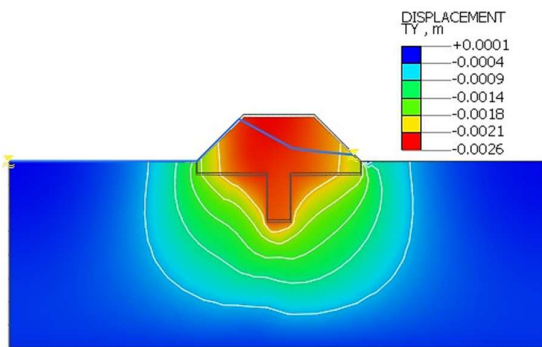
รูปที่ 15 ระนาบการพิบัติ กรณีระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว และเป็นดินไม่ผสมซีเมนต์

3.6.3 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวและไหลซึมของน้ำของพังกันน้ำดินซีเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM สามารถใช้ในการประเมินการเสียรูปของพังกันน้ำดินซีเมนต์ได้ รูปที่ 16 แสดงผลการทรุดตัวของโครงสร้างพังกันน้ำในกรณีระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว โดยพังกันที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 6.5 มิลลิเมตร (รูปที่ 16 (ก)) ในขณะที่พังกันที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเพียง 2.6 มิลลิเมตร (รูปที่ 16 (ข)) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ช่วยลดการทรุดตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการทรุดตัวของพังกันดินซีเมนต์มีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่าพังกันที่ไม่ได้ปรับปรุง ตารางที่ 8 แสดงค่าการทรุดตัวสูงสุด (Maximum Settlement) ในแต่ละกรณีภายใต้สภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าการทรุดตัวสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว



(ก) กรณีที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยซีเมนต์



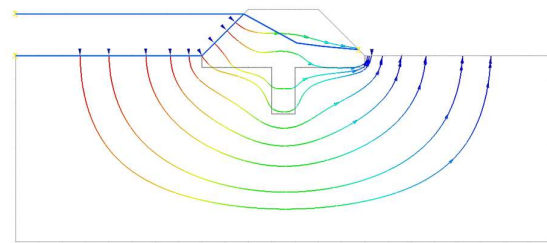
(ข) กรณีที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 25%

รูปที่ 16 การทรุดตัวของโครงสร้างพังกันน้ำ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM กรณีระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 8 การทรุดตัวสูงสุดของพังกันน้ำในแต่ละกรณี

สภาวะการใช้งาน	การทรุดตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)	
	ดินผสมซีเมนต์	ดินผสมซีเมนต์ 25%
เขื่อนเพิ่งสร้างเสร็จ	6.20	2.50
ระหว่างกักเก็บน้ำ	6.20	2.50
ระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว	6.50	2.60

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ (Flow Path) ภายใต้ระดับกักเก็บน้ำปกติแสดงในรูปที่ 17 พบว่าแนวการไหลซึมสัมพันธ์กับเส้นแรงดันน้ำ โดยร่องแกนที่ออกแบบมีบทบาทสำคัญในการลดการไหลซึมผ่านฐานราก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพังกันมีความกว้างจำกัดเพื่อลดต้นทุนและพื้นที่ใช้สอย อาจยังคงมีน้ำซึมผ่านผิวด้านท้ายน้ำ ซึ่งหากไม่มีการป้องกันอาจเกิดการพังทลายของดินได้ โดยเฉพาะเมื่อเกิดการแตกร้าวจากการทรุดตัวหรือจากความไม่สม่ำเสมอของส่วนผสมดินซีเมนต์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของพังกันในระยะยาว จึงแนะนำให้ใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ปิดผิวด้านท้ายน้ำ และพิจารณาการเคลือบผิวด้วยน้ำปูนทรายเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแกร่งและต้านการกัดเซาะ



รูปที่ 17 การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก (ปริมาณซีเมนต์ 25%)

4. สรุปผลการทดสอบ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากน้ำท่วมในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย โดยใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อประเมินผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ได้แก่ ความสามารถในการบดอัด ความแข็งแรงทางกล และการซึมผ่านของน้ำ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบพังกันน้ำดินซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน

ดินจากพื้นที่ศึกษา 3 แห่งจัดอยู่ในกลุ่ม ML ตามระบบ USCS และ Silty Clay Loam ตามระบบ USDA มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.58 และปริมาณสารอินทรีย์ 11.91% อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์ แสดงถึงศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้งานทางวิศวกรรม

4.2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด

การเพิ่มซีเมนต์เป็น 25% ทำให้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ลดลงจาก 24.60% เป็น 23.20% และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) เพิ่มขึ้นจาก 1.49 เป็น 1.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สะท้อนถึงโครงสร้างดินที่แน่นขึ้นและเหมาะสมต่อการรองรับน้ำหนัก

4.3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ดินผสมซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด โดยเฉพาะในสภาวะแห้ง 15.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และยังคงมีความแข็งแรงในสภาวะเปียกชื้น 9.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.4 ค่าการซึมผ่านของน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงจาก 8.476×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (ดินธรรมชาติ) เหลือ 7.880×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อผสม

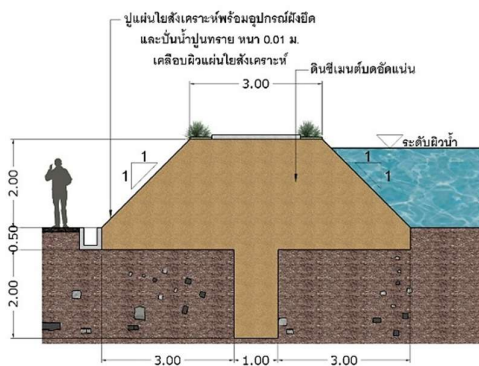
ซีเมนต์ 25% แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการรั่วซึมที่ดี เหมาะกับโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บน้ำ

4.5 พฤติกรรมแรงเฉือนของดิน

ดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 25% ให้ค่าความเชื่อมั่น (c) เพิ่มขึ้นจาก 1.5 ตันต่อตารางเมตร เป็น 4.2 ตันต่อตารางเมตร และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) เพิ่มขึ้นจาก 12° เป็น 37° แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นซึ่งจำเป็นต่อเสถียรภาพของพนังกั้นน้ำ

4.6 การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของพนังกั้นน้ำดินซีเมนต์

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของพนังกั้นน้ำดิน การทรุดตัว และการไหลซึมของน้ำ พบว่าพนังกั้นที่ก่อสร้างด้วยดินซีเมนต์ 25% มีความมั่นคงและเสถียรภาพสูงกว่าพนังกั้นที่ใช้ดินธรรมชาติโดยไม่ได้รับการปรับปรุง และยังให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดโดยกรมชลประทานในทุกกรณีของการใช้งาน การออกแบบพนังกั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความสูง 2 เมตร ความชันลาดพนัง 1:1 ทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ พร้อมร่องแกนขนาดกว้าง 1 เมตร ลึก 2 เมตร เพื่อช่วยลดอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านฐานราก อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงอาจยังเกิดความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากการยึดหดตัว การทรุดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ หรือการกัดเซาะที่ผิวพนัง ดังนั้นจึงควรป้องกันด้วยการปิดผิวพนังด้วยแผ่นโพลีเอทิลีนและเคลือบผิวด้วยน้ำปูนทรายเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการชะล้างและลดการสูญเสียเสถียรภาพในระยะยาว รูปแบบหน้าตัดของพนังกั้นน้ำที่แนะนำจากงานวิจัยนี้แสดงไว้ใน รูปที่ 18



รูปที่ 18 ขนาดหน้าตัดของพนังกั้นน้ำที่แนะนำ (หน่วย: เมตร)

โดยสรุป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงดินตะกอนจากน้ำท่วมด้วยปูนซีเมนต์ 25% ช่วยเพิ่มสมรรถนะทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างพนังกั้นน้ำ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความมั่นคง และความสามารถในการต้านทานการไหลซึมของน้ำรูปแบบพนังกั้นน้ำที่ได้จากการออกแบบตามผลการทดสอบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากอุทกภัยหรือในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านวัสดุก่อสร้าง โดยเป็นแนวทางที่ช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพการก่อสร้าง และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นอย่างเหมาะสมและยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์บริการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้คาม

อนุเคราะห์ในการดำเนินการทดสอบจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง. (2562). *การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์*. กรมทางหลวง.
- [2] Aytekin, M. and Nas, E. (1998). Soil stabilization with lime and cement. *Digest*, 98, pp. 471–477.
- [3] Nontananandh, S., Boonyong, S., Yoobanpot, T. and Chantawarangul, K. (2004). Strength development of soft marine clay stabilized with cement and fly ash. *Kasetsart Journal of Natural Science*, 38(4), pp. 539–552.
- [4] ศุภกิจ นนทนนท์ และ กมล อมรฟ้า (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8*, ขอนแก่น, 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า 120-125.
- [5] Broms, B.B. and Boman, P. (1979). Stabilisation of soil with lime columns. *Ground Engineering*, May 1979, pp. 23–32.
- [6] สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. (2567). *คู่มือฝายดินซีเมนต์*. คณะอนุกรรมการพัฒนาหลักเกณฑ์วันตรกรรมการบริหารทรัพยากรน้ำ.
- [7] ปฎิพล วงษ์พระจันทร์. (2561). *การปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวในท้องถิ่นเพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินป้องกันน้ำทะเล*. กรณีศึกษา พื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [8] Zhang, J., Lin, W., Zhuo, Z., Tang, X., Wu, S. and Luo, L. (2025). Experimental investigation of strengthening silt with the MICP technique combined with cement. *Advances in Civil Engineering*, 2025, Article ID 6234497.
- [9] Nontananandh, S., Khumsuprom, N., Thongdetsri, T., Jotisankasa, A., Chaiprakaikeow, S. and Inazumi, S. (2025). Sustainable utilization of dredged sediments and water treatment sludges as construction materials through combined dewatering and cement stabilization techniques. *Recycling*, 10(1), 22.
- [10] ASTM D4318-10 (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [11] ASTM D422-63 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [12] ASTM D2487-17. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [13] ASTM D4972-01 (2007). Standard Test Method for pH of Soils. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [14] AASHTO T 194-14 (2014). Standard Method of Test for Organic Matter in Soils by Loss on Ignition. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C.

- [15] ASTM D698-91 (1992). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [16] ASTM D2166/D2166M-13 (2013). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [17] ASTM D6528-07 (2007). Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [18] ASTM D5084-16a (2016). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [19] ปราโมทย์ ไม่กลัด (2524). *คู่มืองานเชื่อมดินขนาดเล็กและฝาย*. กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [20] ห้างหุ้นส่วนจำกัดลำปาง ซอยเทสต์ แอนด์ คอนสตรัคชั่น (2558). *รายงานการเจาะสำรวจดิน โครงการก่อสร้างอาคารเรียนรวม มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย วิทยาเขตเชียงราย. อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย*.
- [21] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2562). *KUslope 3.0: โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [22] คณะทำงานจัดทำแบบมาตรฐานเชื่อมกักเก็บน้ำและอาคารประกอบกรมชลประทาน (2545). *แนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนกักเก็บน้ำและอาคารประกอบ*. กรุงเทพมหานคร: กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [23] MIDAS IT (2021). *Midas GTS NX v2021: User Manual – Geotechnical and Tunnel Analysis System*.
- [24] Do, H.-D., Pham, V.-N., Pham, A.-D., Huynh, P.-N. and Oh, E. (2021). An investigation of the elastic modulus of cement-stabilised soil by wet mixing method for sand ground. *The Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 52(1), pp. 67–74.
- [25] Portland Cement Association. (1995). *Soil-Cement Construction Handbook*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.