

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดิน ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์

Numerical Analysis of Slope Stability for Soil-Cement Improved Slopes Using Finite Element Method

เจษฎาพงษ์ หาญสุทธิเวชกุล^{1,*} นฤนาท เหมะ^{1,*} วุฒิชัย ไชยยะ¹ และ อรสา ธรรมสร้างกุล¹

¹ หลักสูตรวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

*Corresponding author; E-mail address: narunat2835@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาดินถล่มเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบสลับกับพื้นที่เขาที่มีความลาดชันสูง วิธีการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ (Soil-cement) ได้รับความนิยมมากขึ้นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของดินถมบริเวณลาดชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่แตกต่างกัน โดยผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 8%, 10%, 12%, 14% และ 16% ต่อน้ำหนักดินแห้ง และทำการทดสอบคุณสมบัติของดินผสมซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินเดิมในห้องปฏิบัติการโยธาและวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020 ผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) และกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) ของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เมื่อปรับปรุงลาดชันด้วยดินผสมซีเมนต์จะช่วยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ให้เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่ 8-10% ต่อน้ำหนักดินแห้งสามารถเพิ่มค่า F.S. ประมาณ 22%, อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่ 12%-14% ต่อน้ำหนักดินแห้งสามารถเพิ่มค่า F.S. ประมาณ 27% และสามารถเพิ่มค่า F.S. ประมาณ 30% เมื่อใช้อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่ 16% ต่อน้ำหนักดินแห้งเมื่อเทียบกับค่า F.S. ที่ได้จากดินเดิมที่ไม่ได้มีการผสมซีเมนต์

คำสำคัญ: การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์, เสถียรภาพลาดดิน, อัตราส่วนความปลอดภัย, การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์, กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

Abstract

Landslides are a problem in northern Thailand, characterized by alternating plains and steep mountainous terrain. Soil cement stabilization has gained popularity as a solution to mitigate this issue. This research investigates the changes in the properties of embankment soil at varying cement mixing ratios. Cement was

mixed at proportions of 8%, 10%, 12%, 14%, and 16% by dry unit weight of soil. The properties of the cement-soil mixtures were tested and compared with those of the original soil in the laboratory. The stability of the slope, expressed as the Factor of Safety (F.S.), was analyzed using PLAXIS 2D Version 2020. The results showed that the unconfined compressive strength and shear strength of the soil increased with increasing cement content. The analysis of the F.S. indicated that soil cement stabilization improved slope stability. Specifically, cement mixing ratios of 8-10% by dry unit weight of soil increased the F.S. by approximately 22%, ratios of 12-14% increased the F.S. by approximately 27%, and a ratio of 16% increased the F.S. by approximately 30% compared to the untreated original soil.

Keywords: Soil-Cement Stabilization, Slope Stability, Factor of Safety, Finite Element Analysis, Unconfined Compression Strength

1. บทนำ

ดินถล่มเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมาก โดยเฉพาะในภาคเหนือของประเทศไทยที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบสลับกับพื้นที่เขาที่มีความลาดชันสูง มักมีปัญหาดินถล่มเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี ทั้งในบริเวณลาดดินตามธรรมชาติและลาดดินที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ การพังทลายของดินในประเทศไทยส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักจากฝนที่ตกเป็นระยะเวลานาน ซึ่งน้ำส่วนหนึ่งจะไหลไปสะสมกับน้ำใต้ดิน ทำให้ดินเกิดการอิ่มตัวและเกิดการกัดเซาะของน้ำในดิน การกัดเซาะของกระแสน้ำ การชะล้าง และการสลายของดินเมื่อเจอน้ำภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จนทำให้มวลดินแตกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 1

ดังนั้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของหน้าดินให้มีความแข็งแรง การยึดเกาะและเพิ่มกำลังรับของดินให้มากขึ้นเพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำบนผิวดินได้มีการนำซีเมนต์ผสมเข้ามาผสมกับดินที่มีความแข็งแรงต่ำเพื่อปรับปรุงให้ดิน

มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น หรือที่รู้จักกันในชื่อวิธีดินผสมซีเมนต์ (Soil-Cement) [1-5] ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการทำไม่ยุ่งยาก



รูปที่ 1 ตัวอย่างการพังทลายของลาดชัน

การผสมซีเมนต์เพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพของดินในงานก่อสร้างต่าง ๆ สำหรับการแก้ปัญหาในการป้องกันดินทรุด ดินถล่ม ซึ่งซีเมนต์เป็นวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติในการยึดและประสานทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมวัสดุต่าง ๆ โดยที่ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติป้องกันน้ำซึมผ่าน เมื่อดินได้เคลือบวัสดุผสมแล้วโอกาสที่น้ำซึมผ่านจะเป็นไปได้ยาก และประกอบกับปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับดินแล้วจะมีสมบัติเป็นที่มีความตึงน้ำ เป็นสารหน่วงการใช้น้ำและเป็นสารเชื่อมประสานน้ำจะช่วยลดข้อด้อยของดินในเรื่องป้องกันการซึมผ่านน้ำเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความคงทนของพื้นดินและความสามารถในการรับน้ำหนักของดินได้ดี [6]

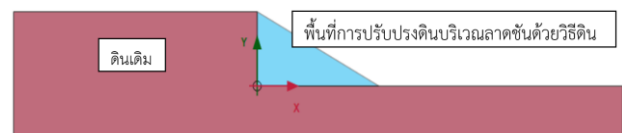
ในอดีตกมล อมรฟ้า, 2545 [7] ทำการศึกษาการผสมซีเมนต์และปูนขาวในดินเหนียวเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความแข็งแรงมากขึ้นต่อมาศิริศักดิ์ จินดาพล และคณะ, 2550 [8] ได้ศึกษาต่อโดยนำซีเมนต์และปูนขาวมาผสมในดินที่แน่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินแน่น จากนั้นในปี 2561, สยาม ยิ้มศิริ และคณะ [9] ได้ศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวอินทรีย์ ชนิด Clay of low plasticity (CL) และ Clay of high plasticity (CH) ด้วยการผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ สำหรับใช้ในการก่อสร้างคันตลิ่งเพื่อป้องกันปัญหาน้ำท่วมชายฝั่งพบว่า การผสมซีเมนต์ในดินเหนียวช่วยเพิ่มความตึงน้ำและความแข็งแรงของดินเหนียวได้ แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาอัตราส่วนความความภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันด้วยวิธีการผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินเดิมที่ใช้ก่อสร้างลาดชันในงานป้องกันดินถล่มนั้นยังคงมีการศึกษาอยู่น้อย

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการพัฒนาอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน (Factor of safety : F.S.) เมื่อทำการก่อสร้างลาดชันด้วยดินผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง [10] แบ่งกรณีศึกษาออกเป็นตามปริมาณร้อยละของส่วนผสมซีเมนต์ต่อน้ำหนักดินที่ 8%, 10%, 12%, 14% และ 16% ตามลำดับ ทำการศึกษาหาคุณสมบัติของดินเดิมและดินผสมซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการโยธา สำหรับการศึกษาหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นนั้นจะใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Plaxis 2D

Version 2020 [11-13] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับในประเทศไทยอย่างกว้างขวาง

2. กรณีศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน (Factor of safety : F.S.) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับปรุงดินบริเวณลาดชันด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 2 ดินที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่า F.S. เป็นดินถมลูกรังภูเขาในจังหวัดเชียงราย และทำการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือเรียกว่าการปรับปรุงด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์ (Soil-Cement: SC) โดยแบ่งตามกรณีศึกษาได้แก่ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในเนื้อดินเดิมที่ 8%, 10%, 12%, 14% และ 16% ตามน้ำหนักดิน ในการวิเคราะห์นี้จะไม่คำนึงถึงระดับของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนตัวของลาดชันที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง กำหนดให้แบบจำลองมีอัตราส่วนความลาดชันแนวดิ่งต่อแนวนอนเท่ากับ 1:2 ตามการก่อสร้างจริงบริเวณด้านหลังอาคารห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย



รูปที่ 2 แสดงพื้นที่การปรับปรุงดินบริเวณลาดชันด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์

3. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองการศึกษาอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน (F.S.) เมื่อทำการปรับปรุงดินบริเวณลาดชันด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำหนักของดินที่เปลี่ยนแปลงไปกำหนดขนาดของแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020

3.1 ชนิดของแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์

ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil-model) ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการจำลองพฤติกรรมของชั้นดินแบบอีลาสติค-พลาสติก แบบสมบูรณ ตามทฤษฎี Mohr-Coulomb (MC) โดยปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา เพื่อทำการวิเคราะห์ค่า F.S. โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดินทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มาจากการเก็บตัวอย่างดินจากลาดชันที่เกิดการพังทลายบริเวณด้านหลังอาคารห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ซึ่งเป็นชั้นดินถล่มมีลักษณะเป็นสัณฐานดินเหนียวปนทรายเล็กน้อยกับดินเม็ดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำตัวอย่างดินมาผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามอัตราส่วนในหัวข้อที่ 2 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน และหาคุณสมบัติของดินเดิมและดินผสมซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธามาตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง [10] และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองการประเมิน

อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ Plaxis 2D Version 2020 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1 และจากการทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



รูปที่ 3 ตัวอย่างดินเดิมที่ใช้ในการศึกษา

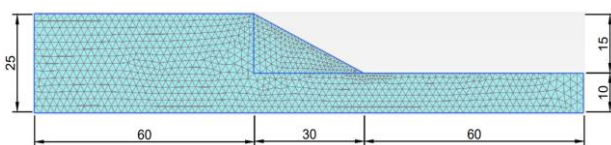
ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020

พารามิเตอร์	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (องศา)	ψ	ν
Soil	17.66	1,309	9.8	23.6	0	0.25
*SC 8%	18.56	3,750	34.2	23.6	0	0.25
SC 10%	20.54	4,310	39.2	23.6	0	0.25
SC 12%	18.43	5,560	45.6	23.6	0	0.25
SC 14%	19.11	6,550	61.0	23.6	0	0.25
SC 16%	19.08	8,360	66.4	23.6	0	0.25

* SC 8% = Soil-Cement ที่อัตราส่วนซีเมนต์ร้อยละ 8 ของน้ำหนักดิน

3.2 โครงข่ายของแบบจำลอง

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงโครงข่าย (meshes) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ 2 มิติ มีขนาดความกว้าง 150 เมตร แบ่งเป็นพื้นที่ด้านหลังและด้านหน้าของลาดชัน 60 เมตรและบริเวณพื้นที่ลาดชัน 30 เมตร ความสูง 25 เมตรแบ่งเป็น ความสูงของลาดชัน 15 เมตร และชั้นดินใต้ลาดชัน 10 เมตร และกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrain analysis)



รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

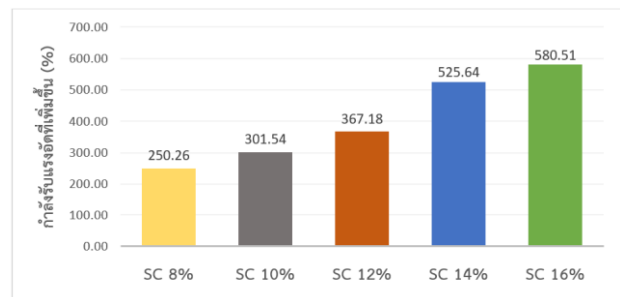
4. ผลการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการโยธา

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการโยธาพบว่าดินเดิมที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินชนิด A-7-5 และดินตะกอนทรายที่ยืดหยุ่น (MH) เมื่อจำแนกประเภทดินในระบบ AASHTO และ USCS ตามลำดับ โดยดินที่นำมาทดสอบนั้นมีค่า Liquid Limit (L.L.) เท่ากับ 52%, ค่า Plastic limit (P.L.) เท่ากับ 37.5% และค่า Plasticity index (P.I.) เท่ากับ 14.5%

เมื่อทำการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ของดินตัวอย่างได้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Maximum Dry Density) เท่ากับ 1.721 กรัม/ลูกบาศก์เมตร และค่าความชื้นที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Water Content, OMC) เท่ากับ 20.21% ค่า ซี.บี.อาร์ (California Bearing Ratio) เท่ากับ 49% ที่ความหนาแน่น 95% Modified Compaction Test

นอกจากนี้การศึกษานี้ยังได้ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ของตัวอย่างดินเดิมและดินผสมซีเมนต์พบว่าค่ากำลังรับแรงแบบไม่ถูกจำกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นโดยที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำหนักดินที่ 8%, 10%, 12%, 14% และ 16% พบว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเพิ่มมากขึ้นถึง 2.5, 3.0, 3.6, 5.2 และ 5.8 เท่าของดินเดิมดังแสดงในรูปที่ 5

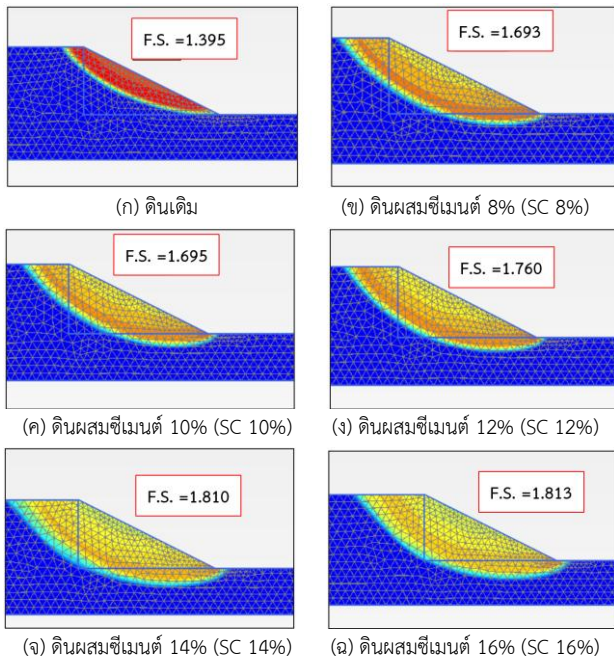


รูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่เพิ่มขึ้น

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน (Factor of safety : F.S.) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020

การศึกษาเชิงวิศวกรรมเกี่ยวกับอิทธิพลของการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังภูเขาประเภทดินตะกอนทราย (Silty Sand: MH) ด้วยวิธีการผสมซีเมนต์ โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020 พบว่ากระบวนการเสริมความมั่นคงให้กับพื้นที่ลาดชันสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเทคนิคการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานทางธรณีเทคนิค ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S.) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของดินเดิมเท่ากับ 1.395 และเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 จากรูปจะพบว่าเมื่อผสมซีเมนต์ที่ 8-12% จะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ที่ 1.693 – 1.760 และจะ

เพิ่มขึ้นเป็น 1.810-1.813 เมื่อผสมซีเมนต์ที่ 14-16% ซึ่งถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพความปลอดภัยของลาดชันได้มากกว่า 29% จากสภาวะเริ่มต้น

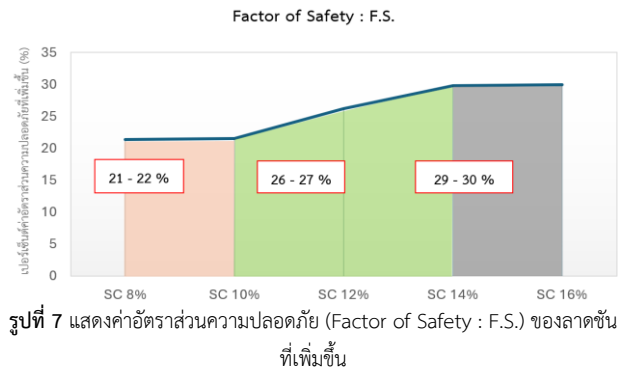


รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020

5. บทสรุป

การศึกษาการปรับปรุงลาดชันด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ในดินที่แตกต่างกัน โดยการผสมซีเมนต์ลงในดินเดิมโดยแบ่งกรณีตัวอย่างเป็น 8%, 10%, 12%, 14% และ 16% ต่อน้ำหนักดิน และทำการทดสอบหาคุณสมบัติของดินผสมซีเมนต์เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของดินเดิม และวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยของลาดชันด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D Version 2020 มีข้อสรุปดังนี้

จากการปรับปรุงลาดชันด้วยวิธีดินผสมซีเมนต์ตามกรณีศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยดินผสมซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนผสมซีเมนต์อยู่ที่ช่วง 8% - 10% สามารถพัฒนาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันเพิ่มขึ้นจากกรณีดินเดิมเพิ่มขึ้นประมาณ 21 - 22% ซึ่งหากผสมดินผสมซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนผสมซีเมนต์อยู่ที่ช่วง 12% สามารถพัฒนาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันเพิ่มขึ้นจากกรณีดินเดิมเพิ่มขึ้นประมาณ 26 - 27% และที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์อยู่ที่ช่วง 14 - 16% จะสามารถพัฒนาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันเพิ่มขึ้นจากกรณีดินเดิมเพิ่มขึ้นประมาณ 29 - 30% ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety : F.S.) ของลาดชันที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุทธิพงศ์ คาคี, สุริยะ ทองมณี และ พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม (2563). อิทธิพลของปริมาณดินเม็ดละเอียดและปริมาณซีเมนต์ต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า (GTE42) 1 - 6.
- [2] กัญจน์ สลิวงค์, พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม และ กรกฎ นุสิทธิ์ (2563). การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า (GTE18) 1 - 6.
- [3] เขาวรินทร์ เขียวพิมาย, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง, นันทชัย ชูศิลป์ และ จุฬามาศ ลักษณะกิจ (2563). อิทธิพลของค่าระยะต่อกำลังอัดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานผสมปูนซีเมนต์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า (GTE25) 1 - 4.
- [4] อนุพงศ์ คำปลอด, ธนกฤต เทพอุโมงค์, อภิชาติ บัวกล้า และ ธนกร ชมภูรัตน์ (2564). สมการควบคุมอัตราส่วนกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, การประชุมรูปแบบออนไลน์, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า (GTE25) 1 - 7.
- [5] จุฬา สุนิตย์สกุล, ศุภกร วชิราภรณ์ และธวัช สวัสดิ์สานต์ (2549). คุณสมบัติของดินผสมซีเมนต์. รายงานฉบับที่ วพ. 229 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. กทม.
- [6] Rauch, A. F., Katz, L. E., & Liljestrand, H. M. (1993). AN analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers: VOLUME. Work, 1.
- [7] กมล อมรฟ้า. (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. *วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- [8] ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยัมศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และสัญญา มิตรเอม. (2550). การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแห้งน้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11*, หน้า (GTE) 42-43.

- [9] สยาม ยิ้มศิริ, ชาญยุทธ กาฬกาญจน์ และ ปฏิพล วงษ์พระจันทร์ (2561). การปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวในท้องถิ่นเพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินป้องกันน้ำทะเล กรณีศึกษาพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอมะเข็ง จังหวัดสตูล. *วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*.
- [10] ASTM-D1633 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil Cement Cylinders ASTM International, 2007
- [11] Abbas J.M. (2014). Slope stability analysis using numerical method. *Journal of Applied Sciences*, 2014, pp. 1-13
- [12] Chakrabarti B. and Shivananda Dr. P. (2017). TWO-DIMENSIONAL SLOPE STABILITY ANALYSIS WITH VARYING SLOPE ANGLE AND SLOPE HEIGHT BY PLAXIS-2D. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, Volume 4(11), pp. 659-662.
- [13] Luc Leroy M.N., Kenmoe ORM., Nkuissi H.J.T., Kouayep S.L., Chebou G.N., Chamgoué A.C. and Mohamadou I. (2024). Comparative Analysis of the Slope Stability Using Slide and Plaxis 2D Software: A Case Study of Tombel Pozzolan Quarry (South-West Cameroon), *Journal of Applied and Environmental Soil Science*, pp. 1-8