

การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน KUSlope 3.0 Development of Slope Stability Analysis Program KUSlope 3.0

ธนาสิน เวทยาวินมรัตน์^{1,*} วรากร ไม้เรียง² และ บรรพต กุลสุวรรณ³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address:korn.thanasin@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธี LEM เป็นการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนและใช้ระยะเวลา ดังนั้นโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเป็นเครื่องมือที่เพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ให้รวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่า 30 ปี รุ่นล่าสุดคือ KUSlope 2.1 ซึ่งยังมีข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลอง, การแสดงผล และการเสริมแรงของลาดดินด้วยรากพืชหรือวิธีอื่น ๆ โปรแกรมถูกพัฒนาด้วยภาษา C# บนโปรแกรม Visual studio โดยใช้ Windows application form เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการเขียนโปรแกรม ภาษา C# เป็นที่นิยมในการเขียนโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ เพราะเป็นภาษาที่ใกล้เคียงกับภาษาเครื่องจึงมีการคำนวณที่รวดเร็วกว่าภาษาอื่น การพัฒนาโปรแกรม KUSlope ครั้งนี้ จะพัฒนาในการสร้างแบบจำลองที่สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น ปรับปรุงการวิเคราะห์ เพิ่มฟังก์ชันการเสริมแรงของลาดดินให้หลากหลาย เช่น Anchor, Geosynthetic, Soil nail และ Pile เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน ทั้งยังเพิ่มฟังก์ชันวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินแบบ Probabilistic สำหรับวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่เกิดจากความแปรปรวนของกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อใช้วิเคราะห์ความเสี่ยงและโอกาสการเกิดการพิบัติ รวมถึงฟังก์ชันวิเคราะห์การเสริมแรงด้วยรากพืชในพื้นที่

คำสำคัญ: การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน, การเสริมแรงด้วยรากพืช, KUSlope

Abstract

Slope stability analysis using the Limit Equilibrium Method (LEM) is complex and time-consuming. Therefore, slope stability analysis software is a tool that enhances analysis efficiency, making it faster and more accurate. Kasetsart University has continuously developed slope stability analysis software for over 30 years. The latest version is KUSlope 2.1, which still has limitations in modeling, visualization, certain analysis cases, and slope reinforcement. The software is developed using C# on Visual Studio, utilizing the Windows application form as the

programming platform. C# is popular for analytical programming because it is close to machine language, leading to faster calculations than other languages. This development of KUSlope aims to create a more user-friendly modeling interface, improve analysis capabilities, and add diverse slope reinforcement functions, such as anchor, geosynthetic, soil nail, and pile, to meet user needs. Additionally, it will include probabilistic slope stability analysis functions to assess the probability caused by the variability of soil shear strength, which is used to evaluate risk and failure probabilities. It will also include reinforcement analysis functions using plant roots in the area.

Keywords: Development of the Slope Stability Analysis Program, Root reinforcement, KUSlope

1. บทนำ

การพิบัติของลาดดิน เกิดจากปัจจัยคงที่จากแรงเนื่องจากน้ำหนักของลาดดินเอง และปัจจัยที่ไม่คงที่ เช่น แรงกระทำภายนอก การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนและใช้เวลา ดังนั้นโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจึงเป็นเครื่องมือที่เพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ให้รวดเร็วและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโปรแกรมที่สามารถจำลองและวิเคราะห์ได้ทุกลักษณะเพื่อหาสภาวะที่วิกฤตที่สุด โดยเฉพาะปัจจัยที่ไม่คงที่ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการพิบัติของการลาดดิน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมาอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลามากกว่า 30 ปี รุ่นล่าสุดคือ KUSlope 2.1 ซึ่งยังมีข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ในบางกรณี โดยการพัฒนาในครั้งนี้จะปรับปรุงการสร้างแบบจำลองให้ง่ายขึ้น และตรวจสอบการวิเคราะห์บางกรณี ให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้ทุกลักษณะ รวมถึงเพิ่มฟังก์ชัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากของกำลังแรงเฉือนของดิน สำหรับประเมินความเสี่ยงและโอกาสการเกิดการพิบัติ และการวิเคราะห์การเสริมแรงด้วยรากพืชในพื้นที่

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 การพัฒนาโปรแกรม KUSlope

โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน KUSlope พัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากโปรแกรม REAME (Rotational equilibrium analysis of multilayered embankment) ของ University of Kentucky โดย [1] จากโปรแกรม REAME มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้พัฒนาโปรแกรมเป็นช่วงระยะเวลาดังตารางที่ 1

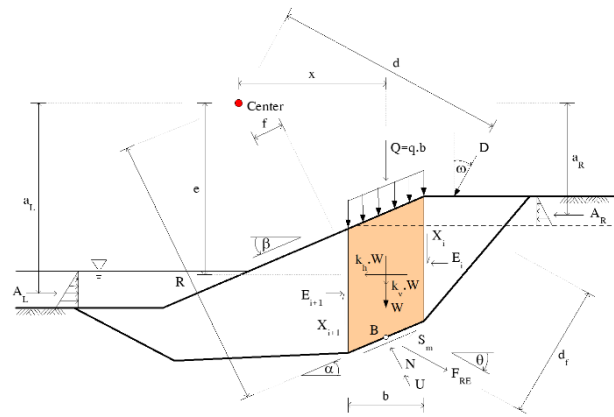
ตารางที่ 1 ประวัติการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน [2]

ชื่อโปรแกรม	คุณลักษณะ	ภาษาที่ใช้เขียน	ระบบปฏิบัติการ
RE	ใช้พื้นฐานเดิมจากโปรแกรม REAME	Interpreted basic	DOS
RE1-RE3	พัฒนาต่อจาก RE ปรับภาษาที่ใช้เขียน	Complied basic	DOS
RE4	พัฒนาเรื่องการแสดงผลและความเร็วในการคำนวณ	Pascal	DOS
RE5	พัฒนาให้สามารถบันทึกข้อมูลและนำข้อมูลมาแก้ไขได้	C	DOS
KUSlope 1.18	พัฒนาโปรแกรมให้ใช้งานจากระบบปฏิบัติการ DOS มาเป็น Windows รวมถึงพัฒนาการแสดงผลโดยใช้ภาษา C ในส่วนของ การคำนวณ และภาษา Delphi ใน ส่วนของการแสดงผล	C, Delphi	Windows XP
KUSlope 2.1	เพิ่มทฤษฎีการวิเคราะห์ และรวมส่วนการคำนวณและแสดงผลเป็น ภาษาเดียวกัน	Delphi	Windows XP

2.2 Generalized limit equilibrium

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยวิธี Limit equilibrium method (LEM) เป็นการแก้สมการสมดุลเพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังแรงเฉือนของดินกับ น้ำหนักของดินรวมทั้งแรงกระทำภายนอก เช่น น้ำหนักบรรทุกทุก แรงดันน้ำใต้ดิน

การแก้สมการสมดุลแรงเพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัยมีหลายทฤษฎี ซึ่งแต่ละทฤษฎีมีสมมติฐานที่ต่างกัน เช่น การเลือกใช้สมการสมดุลแรงแตกต่างกัน การเลือกพิจารณาของแรงระหว่างมวลดิน [3] ได้เสนอวิธี Generalized limit equilibrium (GLE) เมื่อพิจารณาแรงที่เกี่ยวข้องกับมวลดินในสภาวะสมดุลดังรูปที่ 1 สามารถจัดสมการหลัก 2 สมการได้แก่ สมการสมดุลโมเมนต์ และสมการสมดุลแรง สมการรอง 1 สมการคือ สมการหาค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานของมวลดิน



รูปที่ 1 แรงและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน [2]

โดยแต่ละทฤษฎีมีการแก้สมการสมดุลที่แตกต่างกัน หรือบางทฤษฎีมีการแก้สมการสมดุลทั้งโมเมนต์และแรง ค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานของมวลดินแต่ละทฤษฎี ก็แตกต่างกัน การแก้สมการสมดุลและแรงระหว่างมวลดินที่พิจารณาแต่ละทฤษฎีสรุปดังตารางที่ 2

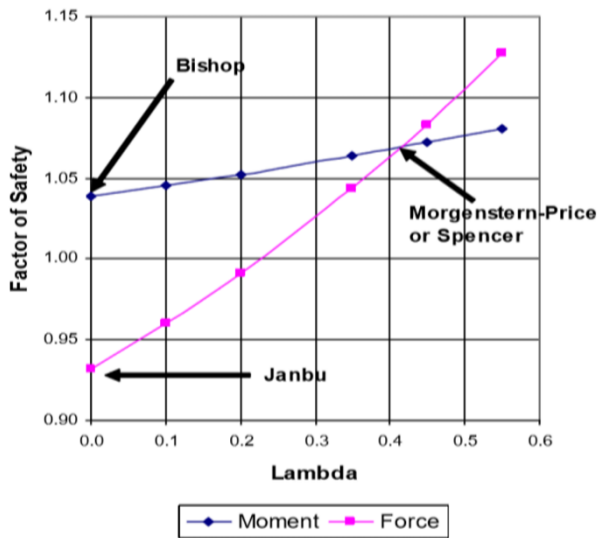
ตารางที่ 2 การพิจารณาสมดุลแรงและโมเมนต์ของแต่ละทฤษฎี [4]

ทฤษฎี	สมการสมดุลแรง	สมการสมดุลโมเมนต์	พิจารณาแรงระหว่างมวลดิน	
			Normal (E)	Shear (X)
Ordinary Method of Slices	Yes (Vertical only)	Yes	No	No
Simplified Bishop	Yes (Vertical only)	Yes	Yes	No
Simplified Janbu	Yes	No	Yes	No
Spencer	Yes	Yes	Yes	Yes

แรงระหว่างมวลดิน (Interslice force) เมื่อพิจารณามวลดินที่เกิดการพิบัติและแบ่งมวลดินที่เคลื่อนหึ่งออกเป็นชิ้น ๆ (Slices) ตามแนวดิ่ง จากผิวดินจนถึงผิวการพิบัติ จะมีแรงกระทำระหว่างชิ้นมวลดินนั้นทั้งแนวราบ (E) และแนวดิ่ง (X) ซึ่งทฤษฎี Ordinary, Simplified Bishop, และ Simplified Janbu พิจารณาแรงระหว่างมวลด้านข้างแค่แนวราบหรือไม่พิจารณา แต่ทฤษฎีของ Spencer [5] พิจารณาแรงระหว่างมวลดินทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงทั้งสองแนว เป็นสมมติฐานเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ ทำให้จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าเพิ่มเติม ความสัมพันธ์ของแรงทั้งสองแนวในทฤษฎีนี้คือ อัตราส่วนของแรงแนวดิ่งต่อแนวราบ (X/E) เท่ากันทุกชิ้นส่วน โดยที่อัตราส่วนนี้เรียกว่าแลมบ์ดา (lambda) หรือเท่ากับ tangent (tan) ของมุมระหว่างแรงแนวดิ่งและแนวราบ

การหาผลลัพธ์ของทฤษฎีหรืออัตราส่วนปลอดภัยของ Simplified Bishop และ Simplified Janbu จำเป็นต้องสมมติค่า F.S. เริ่มต้น แต่ทฤษฎีของ Spencer จำเป็นต้องสมมติค่า Lambda ด้วย และสมการสมดุล

แรงและโมเมนต์ต้องให้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากัน จึงผลลัพธ์หรือค่า
อัตราส่วนปลอดภัยของ Spencer ดังรูปที่ 2



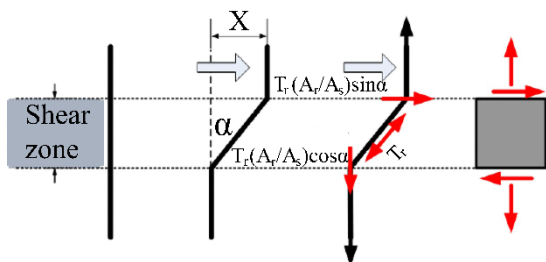
รูปที่ 2 อัตราส่วนปลอดภัยแต่ละทฤษฎีเทียบกับ Lambda [4]

การเสริมแรงด้วยรากพืช

รากพืชที่แข็งแรงทำให้ความเชื่อมั่นในมวลดิน (Cohesion of root, C_R) สูงขึ้น เนื่องจากรากพืชประสานกันเป็นโครงข่าย ส่งผลให้กำลังแรงเฉือนของดินมีค่าสูงขึ้น จากงานวิจัยของ [6-7] ตั้งสมมติฐานว่า หากแนวการพิบัตินี้ผ่านตั้งฉากกับรากพืชและเกิดแรงดึงสูงสุด (T_r) จะเกิดแรงดึงสูงสุดของรากพืชต่อหน่วยพื้นที่ของดิน (t_r) ได้ดังสมการที่ (1) โดยที่ (A_r/A_s) คืออัตราส่วนของรากต่อพื้นที่หน้าตัดดิน (Root area ratio, RAR) จากรูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ของรากพืชในแนวการพิบัติ หรือบริเวณที่เกิดการเฉือนรากพืชเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างเท่ากับ x และเอียงทำมุม α กับแนวดิ่ง ซึ่งความสามารถในการรับแรงเฉือนจากเส้นใยรากในดินแปลงค่าได้สองส่วนคือ ส่วนที่ขนานกับแนวการเฉือนมีค่าเท่ากับ $t_r \sin \alpha$ และส่วนที่ตั้งฉากกับแนวการเฉือนมีค่าเท่ากับ $t_r \cos \alpha \tan \phi'$ ซึ่งสามารถหาค่าความเชื่อมั่นที่เพิ่มขึ้นจากรากพืช (C_R) ได้ดังสมการที่ (2)

$$t_r = \sum T_{ri} \cdot \left(\frac{A_{ri}}{A_s} \right) \quad (1)$$

$$C_R = t_r \cdot (\cos \alpha \tan \phi' + \sin \alpha) \quad (2)$$

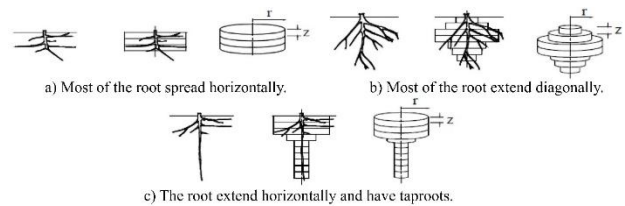


รูปที่ 3 แนวการพิบัตินี้ผ่านรากพืชเกิดแรงเฉือนสูงสุด [6]

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) [6-7] พบว่า $\cos \alpha \tan \phi' + \sin \alpha$ ในสมการที่ (2) มีค่าประมาณ 1.2 เมื่อ $40^\circ < \alpha < 70^\circ$ และ $25^\circ < \phi' < 40^\circ$ ซึ่งสามารถประมาณค่า C_R ได้ดังสมการที่ (3)

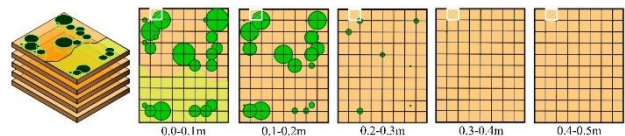
$$C_R = 1.2 \sum T_{ri} \cdot \left(\frac{A_{ri}}{A_s} \right) \quad (3)$$

เมื่อทราบกำลังรับแรงของรากพืช จะวิเคราะห์กำลังรับแรงของดินเมื่อเสริมแรงด้วยรากพืช ($C_S + C_R$) โดยสมมติให้รากพืชแผ่ออกเป็นวงกลมที่มีความหนา (z) และรัศมีการแผ่กระจายของรากพืช (r) ซ้อนกันดังรูปที่ 4 โดยรัศมีและกำลังรับแรงของรากพืชจะแตกต่างกันไปตามความลึก



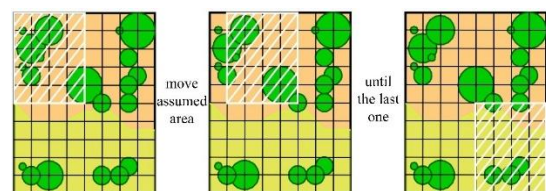
รูปที่ 4 แบบจำลองลักษณะการแผ่กระจายของรากพืช [8]

วิธีการวิเคราะห์ $C_S + C_R$ สามารถวิเคราะห์โดยเฉลี่ยพื้นที่รัศมีการแผ่กระจายของรากพืชกับพื้นที่ที่ไม่มีรากพืช ถ้าพื้นที่ใช้สอยมีขนาดใหญ่จะแบ่งพื้นที่เป็นขนาดเล็ก (Grid area) และวิเคราะห์ $C_S + C_R$ แต่ละ Grid ของแต่ละความลึกดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแผ่กระจายของรากพืชที่ระดับความลึกต่างกันของแต่ละ Grid [8]

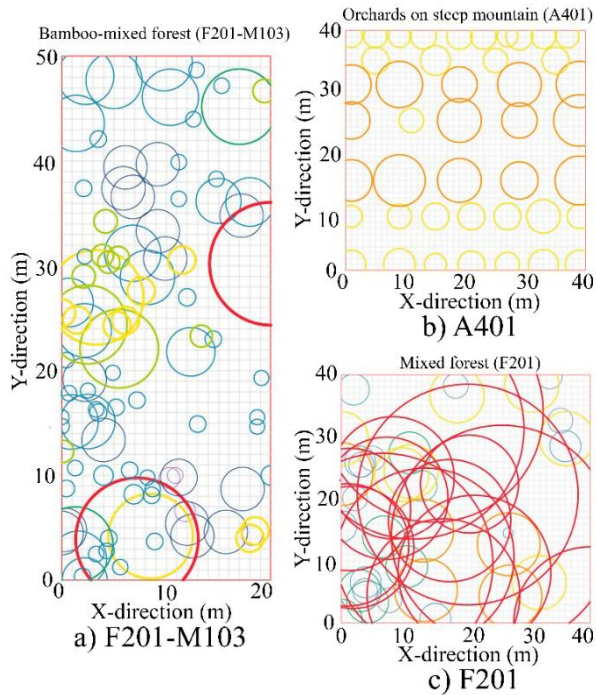
สมมติขนาดของพื้นที่เท่ากับขนาดของพื้นที่ที่เกิดดินถล่มในอดีตหรือเท่ากับขนาดที่คาดการณ์ว่าจะเกิดดินถล่ม และนำค่า $C_S + C_R$ เฉลี่ยของพื้นที่สมมติไปวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินของพื้นที่สมมติในพื้นที่ใช้สอย [8]

ผลการสำรวจตำแหน่งต้นไม้ในแต่ละพื้นที่ใช้สอย (Land use) ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พ่อง-แม่พูล [8-10] โดยมีพื้นที่ใช้สอยได้แก่ พื้นที่ป่า (F201),

พื้นที่สวนผลไม้ (A401) และพื้นที่ป่าไม้หลังเกิดดินถล่ม (F201-M103)
ดังรูปที่ 7 รัศมีวงกลมแทนการแผ่กระจายของรากพืช



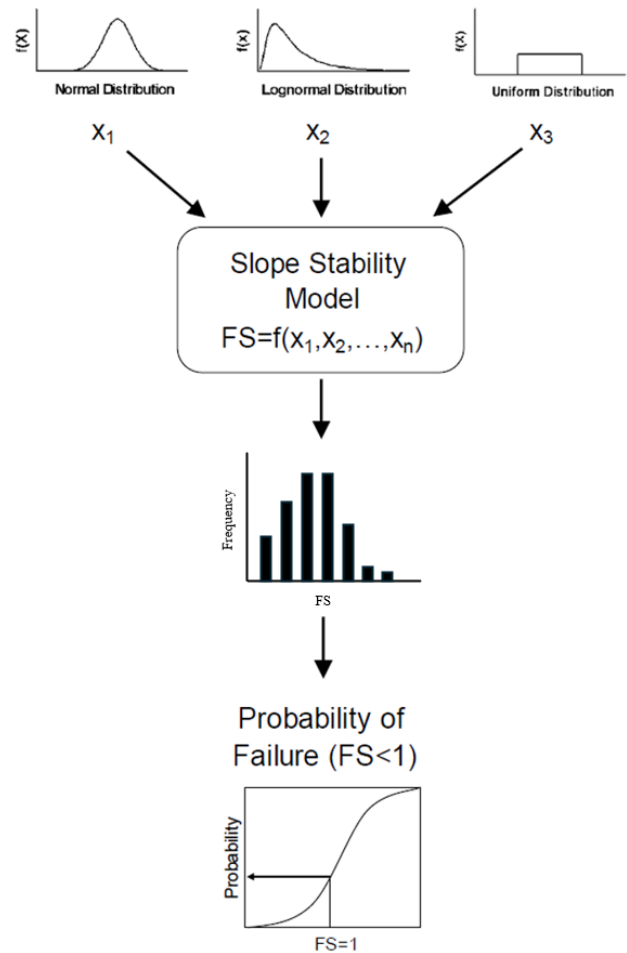
รูปที่ 7 ตำแหน่งต้นไม้และรัศมีการแผ่ของรากพืชในแต่ละพื้นที่ใช้สอย [10]

2.3 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินคือการวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพังทลายหรือโอกาสที่อัตราส่วนปลอดภัยน้อยกว่า 1 ($F.S.<1$) ซึ่งการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของเสถียรภาพลาดดินมีหลากหลายวิธี เช่น การเลือกใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (Strength parameter) ที่ต่ำที่สุด, การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินมาวิเคราะห์ร่วม โอกาสที่ฝนตกหนัก แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน คือ การศึกษาความแปรปรวนของ Strength parameter ได้จากทดสอบหรือสำรวจ นำมาจำลองแบบ Monte Carlo

Monte Carlo เป็นวิธีการวิเคราะห์โอกาสเกิดปรากฏการณ์ หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนของปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้น ในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็นการทำซ้ำโดยการสุ่ม Strength parameter ที่สร้างจากการแจกแจงความน่าจะเป็นของ Parameter และนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินตามทฤษฎี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปของโอกาสเกิดการพังทลายดังรูปที่ 8

Uncertainty Propagation



รูปที่ 8 การวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพังทลายด้วยวิธี Monte Carlo [11]

3. วิธีดำเนินการ

3.1 ศึกษารายละเอียดและ Source code ของโปรแกรม KUSlope 2.1

ดำเนินการศึกษา Source code ของโปรแกรมรุ่นล่าสุด เพื่อตรวจสอบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม และตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในบางกรณี

3.2 ศึกษาความเหมาะสมของแพลตฟอร์มและภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรม

เนื่องจาก Source code ของโปรแกรม KUSlope 2.1 ในส่วนของ User interface บางเครื่องมือ (Tool box) จำเป็นต้องใช้คลังโปรแกรม (Library) ที่มีอยู่ในเฉพาะระบบปฏิบัติการ Windows XP ส่งผลให้ปัจจุบันที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 หรือ Windows 11 เป็นส่วนใหญ่ไม่สามารถเปิด Source code หรือโปรแกรม KUSlope 2.1 ผ่านโปรแกรมสำหรับเขียนโปรแกรม (Code editors) Borderland Delphi 7 ได้ จึงดำเนินการศึกษา Source code ผ่านโปรแกรม Notepad กับแผนผังดำเนินการ (Flow chart) ของโปรแกรม

3.2.1 ศึกษาโปรแกรมที่มีลักษณะการนำเข้าข้อมูลตามความต้องการ

การพัฒนาในครั้งนี้ ปรับเปลี่ยนวิธีการนำเข้าข้อมูลและวิธีการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ให้สะดวกและง่ายต่อผู้ใช้งาน โดยศึกษาจากเว็บไซต์สำหรับเขียนโปรแกรมอย่าง <https://stackoverflow.com> เป็นหลัก

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ภาษาที่เหมาะสมคือภาษา C# เนื่องจากเหมาะสมต่อการคำนวณที่มีลักษณะแบบลูป (Loop) บนแพลตฟอร์ม Windows application form เพราะมี Tool box ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และพัฒนาโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Visual studio

3.2.2 ศึกษาไวยากรณ์ของภาษาและอีเว้นท์ของเครื่องมือ

เมื่อเลือกภาษาและแพลตฟอร์มของการเขียนโปรแกรมที่เหมาะสมแล้ว จะดำเนินการศึกษาไวยากรณ์ (Syntax) ของภาษา C# และไวยากรณ์อีเว้นท์ของเครื่องมือ (Event syntax) ให้สอดคล้องกับการนำเข้าข้อมูลด้วยเมาส์และคีย์บอร์ด

3.3 เขียนแผนผังและแบ่งส่วนการทำงานของโปรแกรม

3.3.1 เขียนแผนผังการทำงานของโปรแกรม

การเขียนแผนผัง (Flow chart) การทำงานของโปรแกรม เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบความถูกต้องของ Source code

3.3.2 แบ่งส่วนการทำงานของโปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมมีความซับซ้อนมาก มีตัวแปร, เงื่อนไขหรือลูปที่มีจำนวนมาก การแบ่งส่วนการทำงานเป็นโปรแกรมน้อย (Module) ซึ่งแต่ละ Module จะมีหน้าที่แตกต่างกัน ทำให้ปัญหาการเรียกชื่อตัวแปรหรือฟังก์ชันผิดพลาดน้อยลงและง่ายต่อการตรวจสอบแก้ไขเมื่อเกิดข้อผิดพลาด

3.4 ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจากตัวอย่างการป้อนข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง หรือเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรมอื่น ๆ ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

3.5 เปรียบเทียบและจัดทำคู่มือโปรแกรมให้กับวิศวกร

ให้ดาวน์โหลดโปรแกรมผ่านทาง Internet พร้อมทั้งจัดทำคู่มือและคลิปวิดีโอสอนการใช้โปรแกรมเบื้องต้น

4. ผลดำเนินการ

4.1 ลักษณะโปรแกรม

โปรแกรม KUSlope 3.0 เป็นซอฟต์แวร์ที่วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยอาศัยหลักการทางธรณีเทคนิคและวิศวกรรมโยธา ซึ่งมีแนวคิดเบื้องหลังการพัฒนาเชิงซอฟต์แวร์ดังนี้

1) โปรแกรมพัฒนามาจากภาษาซีชาร์ป (C#) ซึ่งเป็นภาษาระดับสูงที่มีการประมวลผลที่เร็วกว่าภาษาระดับสูงอื่น ๆ

2) โปรแกรมพัฒนามาบน Windows Forms (WinForms) ซึ่งเป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานแบบกราฟิกหรือ GUI โดย WinForms เป็นไลบรารีหนึ่งของคลาส GUI สำหรับสร้างแอปพลิเคชันเดสก์ท็อป Windows

3) วิเคราะห์โดยใช้วิธีสมมูลจำกัด (LEM)

4) การออกแบบเชิงโมดูล (Modular design) ซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาให้สามารถทำงานร่วมกันระหว่างส่วนการนำเข้าข้อมูล, ส่วนการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ และส่วนการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแต่ละส่วนยังมีโปรแกรมน้อยหรือฟังก์ชัน โดยมีหน้าที่แตกต่างกัน เพื่อความง่ายต่อการตรวจสอบหรือแก้ไขโปรแกรม

โปรแกรม KUSlope 3.0 พัฒนาให้อำนวยความสะดวกกับผู้ใช้งานทั้งการนำเข้าข้อมูลและการแสดงผล โดยความสามารถทั่วไปของโปรแกรมมีดังนี้

1) วิเคราะห์การพิบัติที่เป็นส่วนโค้งวงกลม

2) สามารถเลือกใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ Ordinary, Simplified Bishop, Simplified Janbu และ Spencer

3) การนำเข้าข้อมูลหรือคำสั่ง สามารถวาดลักษณะ (Geometry) ของลาดดินที่ต้องการวิเคราะห์บนพื้นที่ทำงานของโปรแกรม

4) สามารถนำเข้าข้อมูลชั้นดินที่แตกต่างกันได้หลายชั้น (Multi-layer)

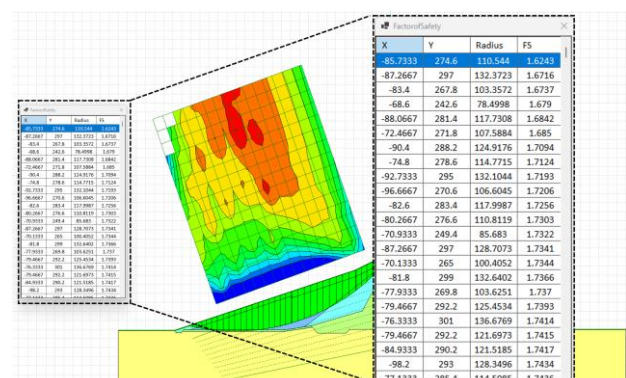
5) สามารถวิเคราะห์จากปัจจัยแรงดันน้ำใต้ดิน (Piezometric line), ปัจจัยจากแผ่นดินไหว (Seismic load), ปัจจัยจากรอยแตกที่ผิวดิน (Tension crack), ปัจจัยจากน้ำหนักบรรทุกทุก (External load) และปัจจัยจากการเสริมแรงของลาดดิน (Reinforcement loads)

6) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยแผนที่ความชันของอัตราส่วนปลอดภัย และตารางดังรูปที่ 9

7) สามารถกำหนดและแก้ไขข้อมูลที่นำเข้าเพื่อวิเคราะห์ด้วยตัวเลข

8) ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows 10 และ Windows 11

ความสามารถของโปรแกรม KUSlope 3.0 เปรียบเทียบกับ KUSlope 1.18 และ KUSlope 2.1 ดังตารางที่ 3



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินของโปรแกรม KUSlope 3.0

ตารางที่ 3 ความสามารถทั่วไปของโปรแกรม KUSlope 2.1, KUSlope 3.0 และ Commercial program

ความสามารถ	KUSlope 2.1	KUSlope 3.0	Commercial program
1. ลักษณะผิวการพิบัติ	ส่วนโค้งวงกลม และไม่เป็นส่วนโค้งวงกลม	ส่วนโค้งวงกลม	ส่วนโค้งวงกลม และไม่เป็นส่วนโค้งวงกลม
2. ทฤษฎีการวิเคราะห์	Ordinary, Simplified Bishop, Simplified Janbu และ Spencer	Ordinary, Simplified Bishop, Simplified Janbu และ Spencer	10 ทฤษฎีการวิเคราะห์ [4]
3. การติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface)	นำเข้าข้อมูลโดยการวาดบนพื้นที่ทำงาน	นำเข้าข้อมูลโดยการวาดบนพื้นที่ทำงาน โดยแบ่งวัสดุเป็นบริเวณ	นำเข้าข้อมูลโดยการวาดบนพื้นที่ทำงาน โดยแบ่งวัสดุเป็นบริเวณ
4. วิเคราะห์ผลกระทบจากน้ำ	No seepage, Water line และ Pore pressure ratio (จำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลระดับน้ำที่อยู่ภายนอกชั้นดิน เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักกดทับ)	No seepage, Water line และ Pore pressure ratio (ไม่จำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลแยกกัน)	No seepage, Water line และ Pore pressure ratio (ไม่จำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลแยกกัน)
5. วิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยภายนอก	Seismic, Tension crack, External loads, Anchor load และ Vegetation	Seismic, Tension crack, External loads, Reinforcement load และ Vegetation (Reinforcement ได้แก่ Anchor, Soil nail, Pile และ Geosynthetic)	Seismic, Tension crack, External loads, Reinforcement load และ Vegetation (Reinforcement ได้แก่ Anchor, Soil nail, Pile และ Geosynthetic)
6. วิเคราะห์ข้อมูลแบบต่อเนื่อง โดยการ RUN เพียงครั้งเดียว (Batched Files)	ได้	ได้	ไม่ได้
7. แสดง Contour ของความปลอดภัย	ได้ (เป็นวงกลมสีตรงจุดศูนย์กลางวงกลม)	ได้ (เป็นแผนที่ความชันของอัตราส่วนปลอดภัย)	ได้ (เป็นแผนที่ความชันของอัตราส่วนปลอดภัย)
8. การพิมพ์ข้อมูลและผลการคำนวณ	ข้อมูลเริ่มต้น, ข้อมูลลักษณะการพิบัติ, หน้าตัดที่พิบัติ และตั้งค่านักกระดาศได้	ข้อมูลเริ่มต้น, ข้อมูลลักษณะการพิบัติ, หน้าตัดที่พิบัติ และไม่จำเป็นต้องตั้งค่านักกระดาศ	ข้อมูลเริ่มต้น, ข้อมูลลักษณะการพิบัติ, หน้าตัดที่พิบัติ และไม่จำเป็นต้องตั้งค่านักกระดาศ
9. ภาษาในการใช้งาน	ไทย/อังกฤษ	อังกฤษ	อังกฤษ
10. การวิเคราะห์ทางสถิติ	ไม่ได้	ได้	ได้

4.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

4.2.1 วิเคราะห์ผลการคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด

การวิเคราะห์ผลการคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด ใช้วิธีการค้นหาผิวการพิบัติแบบโครงข่าย (Grid search) ซึ่งกำหนดให้จำนวนของกริดและตำแหน่งของกริดเท่ากัน

เปรียบเทียบอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดที่ได้จากโปรแกรม KUSlope 3.0 กับโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program) ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยใช้กรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี [10] ผลการวิเคราะห์ทั้ง 4 ทฤษฎีความแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 1.303 เปอร์เซนต์ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4

เปรียบเทียบอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุดที่ได้จากโปรแกรม KUSlope 3.0 กับโปรแกรม KUSlope 2.1 โดยใช้กรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี [10] ผลการวิเคราะห์ทั้ง 4 ทฤษฎีความแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 10.470 เปอร์เซนต์ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 เปอร์เซนต์ความแตกต่างเฉลี่ยของอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุดเมื่อเทียบกับ Commercial program

ทฤษฎีการวิเคราะห์	Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer
เปอร์เซนต์ความแตกต่างเฉลี่ยของอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด	2.521%	1.209%	0.204%	1.400%

ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์ความแตกต่างเฉลี่ยของอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุดเมื่อเทียบกับ KUSlope 2.1

ทฤษฎีการวิเคราะห์	Ordinary	Janbu	Bishop	Spencer
เปอร์เซนต์ความแตกต่างเฉลี่ยของอัตราส่วนปลอดภัยต่ำสุด	26.14%	33.67%	17.96%	17.96%

4.2.2 วิเคราะห์ผลการคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยที่แนวการพิบัติเดียวกัน

การวิเคราะห์ผลการคำนวณอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากผิวการพิบัติหรือตำแหน่งที่มีจุดศูนย์กลางและรัศมีการวิเคราะห์เดียวกัน

เปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรม KUSlope 3.0 กับโปรแกรม Commercial program มีความแตกต่าง 0.000%–1.426%

เปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรม KUSlope 3.0 กับโปรแกรม KUSlope 2.1 มีความแตกต่าง 0.000%–1.686%

โดยยกตัวอย่างจากกรณีศึกษาเขื่อน Carsington [12] วิเคราะห์เฉพาะเพียงทฤษฎี Spencer ทั้งหมด 10 ผิวการพิบัติดังตารางที่ 6

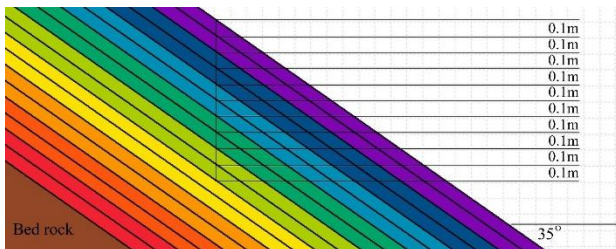
4.3 เสถียรภาพลาดดินเมื่อเสริมแรงด้วยรากพืช

การวิเคราะห์เสถียรของลาดดินเมื่อเสริมแรงด้วยรากพืช ใช้ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พ่อง–แม่พลู [8–10] เป็นกรณีศึกษา

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เมื่อเสริมกำลังด้วย
รากพืช โดยแบ่งความหนาของชั้นดินเป็นชั้น 0.1 เมตรดังรูปที่ 10 และ
คุณสมบัติของดินดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัยของผิวการพิบัติตำแหน่งเดียวกัน

ตำแหน่ง ที่	อัตราส่วนปลอดภัย			ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ KUSlope 3.0 (%)	
	KUSlope 3.0	KUSlope 2.1	Commercial program	KUSlope 2.1	Commercial program
1	1.949	1.949	1.949	0.000	0.000
2	2.429	2.430	2.430	0.041	0.049
3	2.212	2.212	2.212	0.000	0.004
4	1.780	1.780	1.779	0.056	0.028
5	2.030	2.030	2.030	0.020	0.000
6	2.101	2.100	2.101	0.000	0.033
7	3.008	3.013	3.008	0.000	0.160
8	2.848	2.852	2.848	0.000	0.140
9	3.261	3.263	3.261	0.000	0.052
10	7.701	7.650	7.702	0.669	0.013

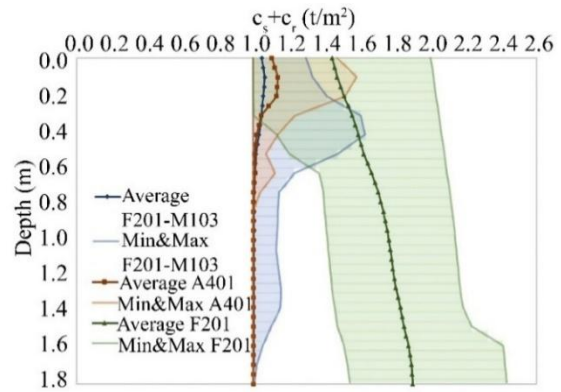


รูปที่ 10 แบบจำลองชั้นดินสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน
เมื่อเสริมกำลังด้วยรากพืช [10]

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของชั้นดินของพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พ่อง-แม่พูล [8-10]

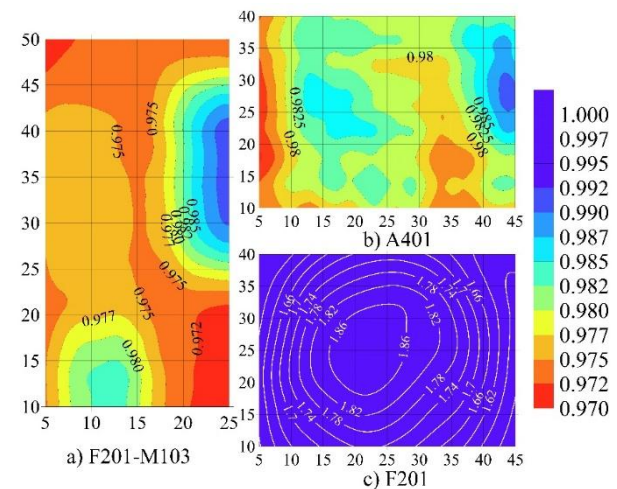
Material	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (degrees)	Unit weight (kN/m ³)
Soil	1.949	19.49	1.949

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของดินเมื่อเสริมแรงด้วยรากพืชแต่ละพื้นที่
ใช้สอย ของทุก ๆ Grid (ขนาด Grid เท่ากับ 1x1 m) และทุกระดับชั้นความ
ลึก (0.00–1.80 m) มีพื้นที่ป่า (F201) มีขนาด 50x50 m พื้นที่สวนผลไม้
(A401) มีขนาด 50x50 m และพื้นที่ป่าไผ่หลังเกิดดินถล่ม (F201–M103) มี
ขนาด 60x30 m และสมมติขนาดของพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มเท่ากับ
10x20 m โดยผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของดินเมื่อเสริมด้วยรากพืช
ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กำลังรับแรงของดินเมื่อเสริมกำลังด้วยรากพืชแต่ละพื้นที่ใช้สอย [10]

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์หุ้ม 4 กรณีด้วยกัน
ได้แก่ พื้นที่เปล่าไม่มีการเสริมแรงด้วยรากพืช (Bare slope), พื้นที่ F201,
พื้นที่ F201–M103 และพื้นที่ A401 ได้อัตราส่วนความปลอดภัยดังรูปที่ 12
และตารางที่ 8



รูปที่ 12 แผนที่ความชันของอัตราส่วนปลอดภัยแต่ละพื้นที่ใช้สอย

ตารางที่ 8 อัตราส่วนปลอดภัยแต่ละพื้นที่ใช้สอย

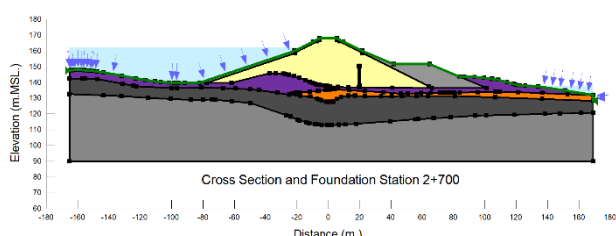
พื้นที่ใช้สอย	อัตราส่วนปลอดภัย		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
Bare slope	0.9701	0.9701	0.9701
F201–M103	0.9710	0.9913	0.9771
A401	0.9722	0.9912	0.9816
F201	1.5118	1.8866	1.7301

4.4 การวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติของลาดดิน

การพิบัติของลาดดินสามารถวิเคราะห์ได้เบื้องต้น โดยวิเคราะห์หาค่า
อัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) ซึ่งถ้าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าต่ำกว่า 1 หมายถึง
ลาดดินที่วิเคราะห์นั้นไม่เสถียรภาพหรืออาจเกิดการพิบัติได้

การวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติโดยใช้ Monte Carlo simulation ที่นำค่าพารามิเตอร์หรือคุณสมบัติของชั้นดินที่มีความแปรปรวนมาสุ่มค่าตามหลักสถิติ และวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จนได้อัตราส่วนปลอดภัยหลาย ๆ ค่า และคำนวณความน่าจะเป็นหรือโอกาสการเกิดการพิบัติได้จากจำนวนผลลัพธ์ที่ได้ $F.S. < 1$ ต่อจำนวนผลลัพธ์การวิเคราะห์ทั้งหมด

การวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติของลาดดิน ใช้ข้อมูลแบบจำลองเขื่อนดินช่องเขาขาด [13] ดังรูปที่ 13 และข้อมูลลักษณะชั้นดินดังตารางที่ 9



รูปที่ 13 แบบจำลองเขื่อนดินช่องเขาขาด [13]

ตารางที่ 9 คุณสมบัติชั้นดินของเขื่อนดินช่องเขาขาด [13]

Color	Material	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (degrees)	Unit weight (kN/m ³)
	Embankment	28.130	19.531	19.440
	Filter	0.000	35.000	24.000
	Berm/Rock-riprap	0.000	40.000	26.000
	Residual soil	11.000	30.00	21.000
	Moderately to completely weathered phyllite	700.000	28.000	23.000
	Highly fractured quartzitic schist	1000.000	30.000	24.500
	Moderately fractured quartzitic schist	1500.000	33.000	25.000

เขื่อนดินช่องเขาขาดมีการเจาะเพื่อติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อนบ่อยครั้ง ซึ่งระหว่างเจาะจะมีการเก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ของดินตัวเชื่อม (Embankment) ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชั้นดินตัวเชื่อมของเขื่อนดินช่องเขาขาด

ตัวแปร	ค่า
Mean cohesion (kN/m ²)	28.130
S.D. cohesion (kN/m ²)	12.665
Mean friction angle (degrees)	19.531
S.D. friction angle (degrees)	4.989
Mean unit weight (kN/m ³)	19.440
S.D. unit weight (kN/m ³)	0.642

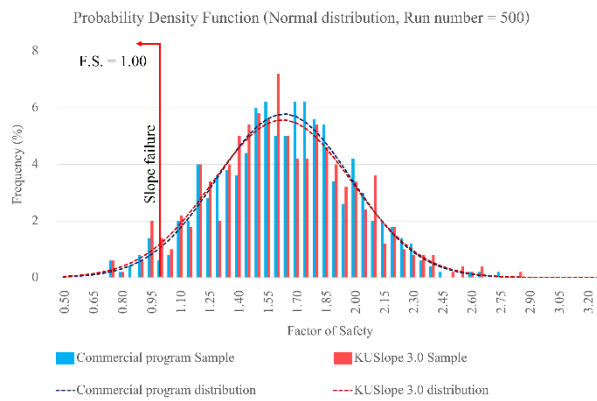
ผลการวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติดังตารางที่ 11 ซึ่งสุ่มพารามิเตอร์ของดินตัวเชื่อมโดยมีลักษณะการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) และการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Log-normal distribution) ซึ่งแต่ละกรณีสุ่มตัวอย่าง (Run number) 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000, 20,000, 50,000 และ 100,000 รอบ เทียบกับโปรแกรม Commercial program

ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัย เมื่อจำนวนรอบการสุ่มมากขึ้นโปรแกรม KUSlope 3.0 กับ Commercial program ให้ลักษณะการกระจายตัวคล้ายกัน รวมถึงผลการวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติ เมื่อจำนวนรอบการสุ่มมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ของ KUSlope 3.0 กับ Commercial program ได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

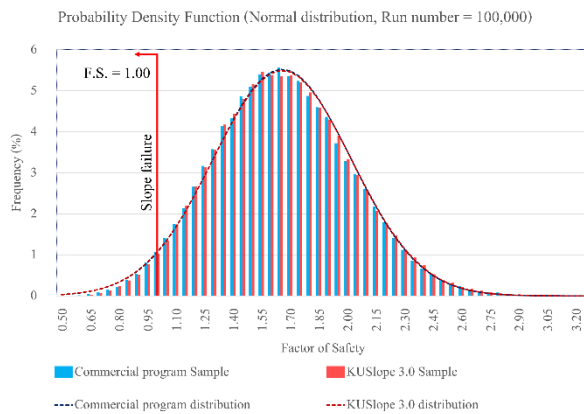
โดยตัวอย่างผลการวิเคราะห์อัตราส่วนปลอดภัยด้วยการสุ่มตัวอย่าง 500 รอบกับ 100,000 รอบของการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติ

ลักษณะการกระจายตัว-Run number (รอบ)	โอกาสการเกิดการพิบัติ (%)	
	Commercial program	KUSlope 3.0
Normal distribution-100,000	3.330	3.178
Normal distribution-50,000	3.147	3.060
Normal distribution-20,000	3.307	3.305
Normal distribution-10,000	3.550	3.420
Normal distribution-5,000	3.240	3.240
Normal distribution-2,000	3.500	3.150
Normal distribution-1,000	2.500	3.000
Normal distribution-500	4.000	4.800
Log-normal distribution-100,000	1.296	0.940
Log-normal distribution-50,000	1.192	0.930
Log-normal distribution-20,000	1.143	0.870
Log-normal distribution-10,000	1.390	0.930
Log-normal distribution-5,000	1.283	1.060
Log-normal distribution-2,000	1.400	1.100
Log-normal distribution-1,000	1.300	1.200
Log-normal distribution-500	1.800	0.600



รูปที่ 14 การกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัยโดยสุ่มพารามิเตอร์แบบ Normal distribution และ Run number เท่ากับ 500 รอบ



รูปที่ 15 การกระจายตัวของอัตราส่วนปลอดภัยโดยสุ่มพารามิเตอร์แบบ Normal distribution และ Run number เท่ากับ 100,000 รอบ

5. สรุปผล

1. โปรแกรม KUSlope ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีพื้นฐานมาจากโปรแกรม REAME ของ Huang 1975 เป็น RE1-RE5 บนระบบปฏิบัติการ DOS และเปลี่ยนเป็น KUSlope 1.18 และ KUSlope 2.1 บนระบบปฏิบัติการ Windows และในการศึกษานี้พัฒนาเป็น KUSlope 3.0 ทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็ว เหมาะสม สะดวกและถูกต้อง นอกจากนั้นยังลดปัญหาค่าลิขสิทธิ์ที่ต้องเสียให้กับโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจากต่างประเทศ เพื่อให้วิศวกรไทยมีโอกาสเข้าถึงโปรแกรมที่มีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน
2. โปรแกรม KUSlope 3.0 ถูกพัฒนาด้วยภาษา C# บน WinForms ซึ่งเป็นส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับโปรแกรมด้วยกราฟิก โดยทำหน้าที่รับและแสดงผลข้อมูลด้วยกราฟิก
3. โปรแกรม KUSlope 3.0 มีการแก้ไขข้อบกพร่องจากเดิม และเพิ่มเติมฟังก์ชันสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ รวมทั้งแก้ไขการนำเข้า

ข้อมูลให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น ตลอดจนมีการพัฒนาการแสดงผลของผลลัพธ์การวิเคราะห์

4. การวิเคราะห์กรณีศึกษา 6 กรณี ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ใกล้เคียงกับสภาพจริงในสนามที่เกิดขึ้น และเมื่อเทียบกับ Commercial program พบว่ามีความแตกต่าง 0.000-1.426 เปอร์เซนต์เมื่อวิเคราะห์ที่หน้าตัดเดียวกัน ซึ่งขึ้นกับความละเอียดของเทคนิคในขั้นตอนการคำนวณ

5. การเสริมแรงด้วยรากพืช เป็นปัจจัยที่ช่วยให้เสถียรภาพลาดดินมีความมั่นคงมากขึ้นจากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี พบว่า พื้นที่ป่าไม้ใหญ่มีต้นไม้ขนาดใหญ่ มีรากที่ยังลึก และมีแรงดึงของรากที่สูง มีเสถียรภาพลาดดินมากกว่าพื้นที่ที่มีพืชขนาดเล็กหรือกลาง โดยเฉพาะพืชเบิกนำ ที่มักพบหรือเติบโตหลังจากพื้นที่เกิดดินถล่ม

6. การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เนื่องจากปัจจัยความแปรปรวนของคุณสมบัติชั้นดิน ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างหรือ Monte Carlo simulation การใช้จำนวนรอบการสุ่มที่มาก ส่งผลให้การวิเคราะห์โอกาสการเกิดการพิบัติมีความน่าเชื่อถือมากกว่าจำนวนรอบการสุ่มที่น้อย การเลือกใช้รอบการสุ่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของคุณสมบัติชั้นดินที่วิเคราะห์

7. โปรแกรม KUSlope 3.0 มีศักยภาพการนำเข้าข้อมูล, การแสดงผล และการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินได้เหมือนกับ Commercial program แต่ยังขาดทฤษฎีการวิเคราะห์บางทฤษฎี และการวิเคราะห์แบบไม่เป็นส่วนโค้งวงกลม

6. ข้อเสนอแนะ

โปรแกรม KUSlope 3.0 ยังอยู่ในช่วงพัฒนา ในส่วนของการตรวจสอบการนำเข้าข้อมูลด้วยกราฟิก รวมถึงการจัดทำคู่มือเพื่อเผยแพร่ให้ทดลองใช้โปรแกรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang Y.H. (1975). Stability charts for earth embankments. *54th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, pp. 1-15.
- [2] รัฐธรรม อิลโรหาร (2547). *การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Generalized Limit Equilibrium*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [3] Fredlund Delwyn G, and Krahn J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical*, 14(3), pp. 429-439.
- [4] Geo-Slope International Ltd. (1998). *User's Guide SLOPE/W*. Geo-Slope International Ltd. Alberta, Canada.
- [5] Spencer Ef. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), pp. 11-26.
- [6] Wu, T.H. (1976). Investigation of Landslides on Prince of Wales Island. Geotechnical engineering report, Ohio State University, Columbus.

- [7] Wu, T.H., McKinnell III, W.P., and Swanston, D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical*, 16(1), pp. 19-33.
- [8] มรรษมนต์ เอกจิต (2561). การเสริมแรงของรากพืชในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม พื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล และลุ่มน้ำคลองคราม , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [9] มุลนิธิชัยพัฒนา (2559). โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาป้องกันแก้ไขปัญหาดินถล่มบนที่สูงชันตามแนวพระราชดำริ: การศึกษาแบบจำลองทางวิศวกรรมปฐพีเพื่อการทำนายการเกิดดินถล่มในพื้นที่ลาดชัน. 403 หน้า.
- [10] Wettayavigromrat, T., Kunsuwan B., Mairaing W., and Klaycham K. (2022). Effect of Land Use on Slope Stability. *International Journal of GEOMATE*, 23(100), pp. 17-25.
- [11] ธนาสิน เวทยาวิกรมรัตน์ (2566). การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน (KUSlope-3) ด้วยปัจจัยความน่าจะเป็น, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [12] Coxon Roy Eric. (1986). Failure of Carsington Embankment: Report to the Secretary of State for the Environment. HM Stationery Office.
- [13] ธวัชชัย เฉลิมพรชัย (2563). แบบจำลองการไหลซึมสำหรับพฤติกรรม การเกิดการขยายตัวเนื่องจากแรงดันน้ำในชั้นหินฐานราก กรณีศึกษาเขื่อนดินช่องเขาขาดเขื่อนสิริกิติ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.