

Investigation and Stability Analysis of a Mountainous Slope in Bo Kluea District, Nan Province

การสำรวจและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินบนภูเขาในอำเภอบ่อเกลือจังหวัดน่าน

นิภาวรรณ ทองคำ¹ วีรเดช ธนพลังกร² วีรยุทธ โกมลวิลาศ² สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง²

1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสัณฐาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: Email address: 6670137621@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน ตั้งอยู่ในพื้นที่ภูเขาสูงทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยมีภูมิประเทศลาดชันและมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดดินถล่มโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่เกิดฝนตกหนักอย่างต่อเนื่อง การศึกษานี้ดำเนินการสำรวจภาคสนามของลาดดินในพื้นที่ภูเขาและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต่อการเกิดดินถล่ม โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ในการถ่ายภาพมุมประชิด และประมวลผลภาพเพื่อสร้างแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน พร้อมทั้งสำรวจความต้านทานไฟฟ้าเพื่อประเมินความหนาและลักษณะชั้นดินในพื้นที่ จากข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินเสถียรภาพทางลาดของพื้นที่ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีการสำรวจทางอากาศ การสำรวจภาคสนาม และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางลาด เพื่อประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม ซึ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการจัดการพื้นที่เสี่ยงภัย ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนเพื่อลดผลกระทบจากดินถล่มและเพิ่มความปลอดภัยให้กับชุมชนในพื้นที่เสี่ยงได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แผ่นดินถล่ม, แบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล, เสถียรภาพลาดดิน, สำรวจภาคสนาม

Abstract

Bo Kluea District in Nan Province, situated in the mountainous northern region of Thailand, features steep terrain that is highly susceptible to landslides triggered by prolonged heavy rainfall during the rainy season. This study involved conducting field surveys in the area to simulate the terrain with the objective of analysing landslide risks. The research utilised

aerial surveying with unmanned aerial vehicles to capture topographic images and generate a digital elevation model. Furthermore, soil boring tests and laboratory analyses were carried out to determine the engineering properties of the soil. Electrical resistivity surveys were also conducted to evaluate the thickness and characteristics of the soil layers in the region. All collected data were analysed to assess slope stability. The study underscores the potential of integrating aerial survey technologies, field investigations, and spatial data analysis for evaluating slope stability and identifying areas prone to landslides. This approach improves both the accuracy and efficiency of managing high-risk areas. The findings from this research provide a framework for planning measures to mitigate landslide impacts and enhance the safety of communities in at-risk areas in a sustainable manner.

Keywords: Landslide, Digital Elevation Model, Slope stability, Field investigation

1. คำนำ

อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน ตั้งอยู่ในพื้นที่ภูเขาสูงทางภาคเหนือของประเทศไทย มีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันสูงและมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการเกิดดินถล่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่มีฝนตกหนักต่อเนื่องอันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (กรมทรัพยากรธรณี, 2564) [1] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา พื้นที่ดังกล่าวประสบปัญหาดินถล่มหลายครั้ง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่ การศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพลาดดินและการเฝ้าระวังดินถล่มจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดความเสียหายจากภัยพิบัติดังกล่าว

ปัญหาดินถล่มเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วโลก โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงและมีปริมาณน้ำฝนมาก Crosta

และ Frattini (2008) [2] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและการเกิดดินถล่มในภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วโลก และพบว่า การเกิดดินถล่มมีความสัมพันธ์กับทั้งความเข้มของฝน (rainfall intensity) และปริมาณน้ำฝนสะสม (cumulative rainfall) นอกจากนี้ Guzzetti et al. (2020) [3] ได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดดินถล่มทั่วโลก และพบว่าปัจจัยด้านภูมิอากาศโดยเฉพาะปริมาณน้ำฝนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดดินถล่ม โดยพบว่าประมาณ 80% ของเหตุการณ์ดินถล่มทั่วโลกเกิดจากปริมาณน้ำฝนที่มากผิดปกติ และในประเทศไทยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและการเกิดดินถล่มในพื้นที่จังหวัดน่าน และพบว่าพื้นที่อำเภอบ่อเกลือเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดดินถล่มเมื่อมีปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงมากกว่า 120 มิลลิเมตร หรือปริมาณน้ำฝนสะสม 7 วันมากกว่า 300 มิลลิเมตร (เกรียงไกร และคณะ, 2563) [4]

Fan et al. (2019) [5] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำฝนต่อเสถียรภาพลาดดิน โดยพิจารณาทั้งอิทธิพลของความเข้มฝนและระยะเวลาของฝน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินจากน้ำฝนทำให้แรงเฉือนต้านทานของดินลดลง และเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้ลาดดินเกิดการพังทลาย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2020) [6] ที่ศึกษาเสถียรภาพลาดดินในประเทศจีนและพบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดินจากการซึมของน้ำฝนเป็นสาเหตุหลักของการเกิดดินถล่มในช่วงฤดูฝน สำหรับในประเทศไทย Komolvilas et al. (2021) [7] ได้ทำการวิเคราะห์การพังทลายของลาดดินที่เกิดจากฝนตกหนักบริเวณภูเขาบ้านห้วยขาบ จ.น่าน ในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศคล้ายคลึงกับพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำฝนสะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดดินถล่มในพื้นที่ดังกล่าว โดยกลไกการพังทลายเริ่มต้นจากการเพิ่มขึ้นของความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งลดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคดิน

เทคโนโลยีการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ได้รับการยอมรับว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลภูมิประเทศและสร้างแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล (Digital Elevation Model: DEM) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินได้อย่างแม่นยำ (Scaioni et al., 2018) [8] นอกจากนี้ การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการและการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity Survey) ยังช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะชั้นดินและความหนาของชั้นดินในพื้นที่ได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินเสถียรภาพของลาดดิน สุทธิศักดิ์ และคณะ (2563) [9] ได้ประยุกต์ใช้การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าในการประเมินความเสี่ยงดินถล่มในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (น้อยกว่า 100 โอห์ม-เมตร) มักจะมีความชื้นสูงและมีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มมากกว่าพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jomard et al. (2010) [10] ที่พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าในชั้นดินสามารถบ่งชี้ถึงพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวของมวลดินและมีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่ม

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการสำรวจภาคสนามของลาดดินในพื้นที่ภูเขอาเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต่อการเกิดดินถล่ม โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ในการถ่ายภาพภูมิประเทศ และประมวลผลภาพเพื่อสร้างแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน พร้อมทั้งสำรวจความต้านทานไฟฟ้าเพื่อประเมินความหนาและลักษณะชั้นดินในพื้นที่ ผลการศึกษาจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการเกิดดินถล่มและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพลาดดินในพื้นที่อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบเตือนภัยล่วงหน้าและมาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพ

การป้องกันและเสริมเสถียรภาพลาดดินเพื่อลดความเสี่ยงจากดินถล่มได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา Ngo et al. (2019) [11] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นคอมโพสิตซีเมนต์โพลิเมอร์สังเคราะห์ (geosynthetic cementitious composite mat, GCCM) ในการเสริมเสถียรภาพของลาดดินทรายในห้องปฏิบัติการ ต่อมา Likitlersuang et al. (2020) [12] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ GCCM ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝกในการควบคุมการกัดเซาะของดิน ล่าสุด Ngo et al. (2023) [13] ได้ใช้แบบจำลองเหวี่ยงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลาดดินที่เสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิตซีเมนต์โพลิเมอร์สังเคราะห์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นกลไกการเสริมเสถียรภาพและพฤติกรรมของลาดดินภายใต้สภาวะต่างๆ และ Ongpaporn et al. (2022) [14] ได้ศึกษาการใช้วิธีทางชีววิศวกรรม (bio-engineering) ในการเสริมเสถียรภาพของลาดดินในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการป้องกันดินถล่ม นอกจากนี้ Hong-in et al. (2024) [15] ได้นำเสนอการประเมินทางวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมของการใช้ถุงบรรจุดิน (soilbag) เพื่อเสริมเสถียรภาพลาดดินในพื้นที่ภูเขาสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่ยั่งยืนในการลดผลกระทบจากดินถล่ม การเลือกวิธีการป้องกันและเสริมเสถียรภาพลาดดินเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญสามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับชุมชนในพื้นที่เสี่ยงได้อย่างยั่งยืน

2. พื้นที่ศึกษาและกรอบวิจัย

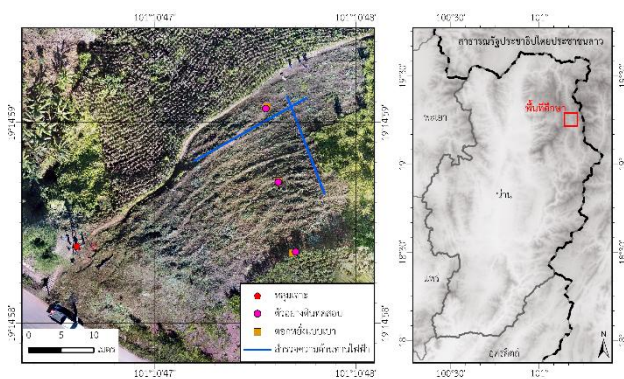
2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณลาดเขา อำเภอบ่อเกลือเหนือ จังหวัดน่าน (19.1785° N, 101.1642° E) ดังแสดงในรูปที่ 1 มีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันสูง ระดับความสูงของพื้นที่อยู่ที่ประมาณ 1,000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล พื้นที่ศึกษาดังอยู่ใกล้กับหมู่บ้านห้วยขาบ บริเวณหมู่บ้านห้วยขาบเป็นที่อยู่อาศัยของชุมชนชนเผ่าลัวะ ซึ่งเป็นกลุ่มชาติพันธุ์ที่มีประวัติการตั้งถิ่นฐานในพื้นที่แห่งนี้มายาวนาน ชุมชนแห่งนี้มีวิถีชีวิตที่ผูกพันกับป่าและภูเขา ประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก โดยพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวไร่ ข้าวโพด และกาแฟ ซึ่งปลูกตามไหล่เขาและที่ราบระหว่างหุบเขา นอกจากนี้บริเวณบ้านห้วยขาบและพื้นที่โดยรอบของอำเภอบ่อเกลือ เคยประสบปัญหาดินถล่มหลายครั้งในช่วงที่ผ่านมา

โดยเฉพาะในช่วงหน้าฝนที่มีฝนตกหนักต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเป็นอย่างมาก

2.2 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการสำรวจและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจทางอากาศผ่านอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อถ่ายภาพและสร้างแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล (Digital Elevation Model หรือ DEM) ที่มีความละเอียดสูงและแม่นยำ เพื่อประเมินสภาพภูมิประเทศและความลาดชันของพื้นที่ นอกจากนี้ยังได้ทำการสำรวจภาคสนามโดยการเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain size analysis) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ชีตจำกัดเหลว (Liquid limit) และชีตจำกัดพลาสติก (Plastic limit) รวมถึงการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน รวมถึงการใช้เทคโนโลยีการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity Survey) เพื่อประเมินความหนาและลักษณะของชั้นดินในพื้นที่ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดินและประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่

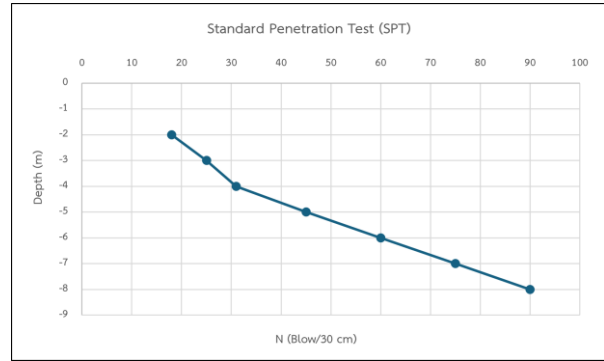


รูปที่ 1 แผนที่แสดงภูมิประเทศและตำแหน่งการทดสอบภาคสนาม

3. การสำรวจภาคสนาม

3.1 การทดสอบ Standard Penetration Test (SPT)

การทดสอบการเจาะแบบ Standard Penetration Test หรือ SPT เป็นวิธีการสำรวจภาคสนามที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ดำเนินการได้ง่ายและรวดเร็ว ถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1927 โดย Proctor และ Terzaghi (Peck et al., 1974) [16] การวัดจำนวนการตกของค้อน (Blows) ที่ใช้เจาะผ่านชั้นดินในระยะความลึก 30 ซม. ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกใช้ในการประเมินค่า N-value

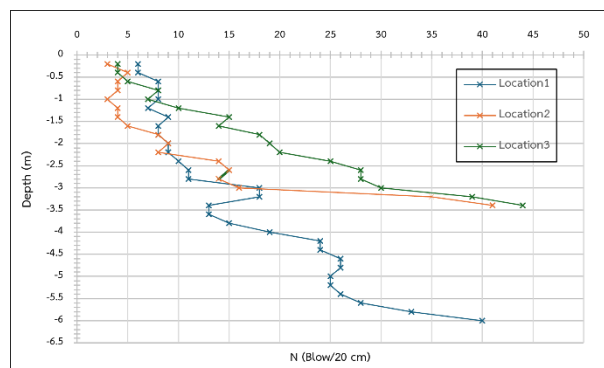


รูปที่ 2 กราฟแสดงการทดสอบด้วยวิธี Standard Penetration Test

ผลการทดสอบ SPT ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า ค่า N-value มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20-90 blows/ft ซึ่งบ่งชี้ว่าชั้นดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยชั้นดินที่ความลึก 2-3 เมตร มีความแน่นปานกลาง (medium dense) ชั้นดินที่ความลึก 4-5 เมตร มีความแน่น (dense) และชั้นดินที่ความลึก 6-8 เมตร มีความแน่นมาก (very dense)

3.2 การทดสอบด้วยวิธี Dynamic Probing

การทดสอบการเจาะแบบ Dynamic Probing เป็นวิธีการสำรวจภาคสนามที่มีประสิทธิภาพและประหยัด เหมาะสำหรับการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ด้วยอุปกรณ์เจาะขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ภูเขาสูงชันหรือพื้นที่ทางไกล เพื่อประเมินความแข็งแรงของชั้นดิน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้การทดสอบแบบ Dynamic Probing Light (DPL) ตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 โดยใช้หัวกรวย (cone) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35.7 มม. พื้นที่หน้าตัด 10 ตร.ซม. ใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก 10 กก. ยกสูง 50 ซม. สำหรับการตอก การทดสอบบันทึกจำนวนครั้งที่ตอกที่ระยะทุกๆ 20 ซม. (blow/20 cm) จนกว่าจะถึงความลึกที่ต้องการหรือจนกระทั่งพบชั้นดินแข็งที่ไม่สามารถเจาะผ่านได้



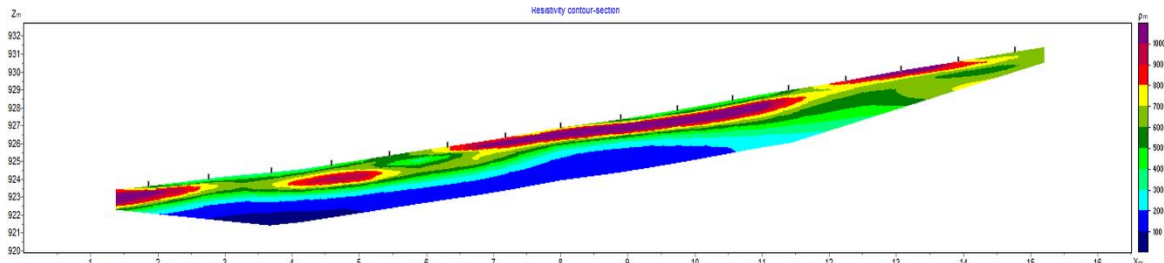
รูปที่ 3 กราฟแสดงการทดสอบด้วยวิธี Dynamic Probing

จากข้อมูลการเจาะสำรวจด้วยวิธี Dynamic Probing ที่แสดงในรูปที่ 3 สามารถวิเคราะห์ความหนาของดินชั้นบน ว่าความหนาของชั้นดินบนพื้นที่สำรวจอยู่ในช่วงประมาณ 1.5-2.5 เมตร โดยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละตำแหน่ง

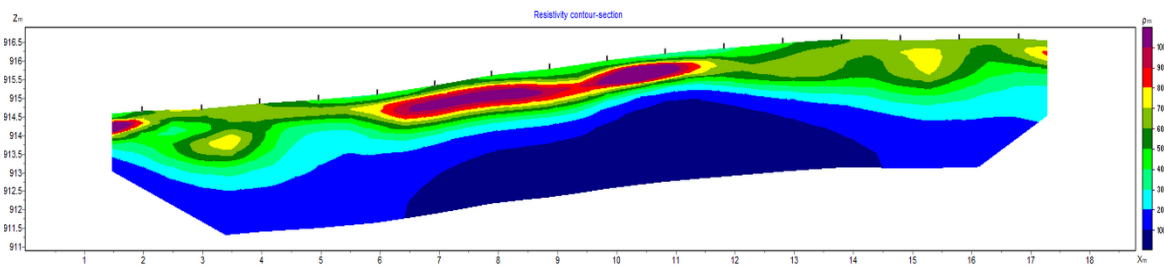
3.3 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) เป็นวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับใช้วัดความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในชั้นดินและหินใต้ผิว ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะชั้นดินของพื้นที่ และกำหนดขอบเขตความหนาในแนวตัดขวางของชั้นดินบริเวณลาดเขาในพื้นที่ศึกษา ผลการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าในรูปแบบ

ที่ 4(a) และ 4(b) แสดงภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินใต้พื้นผิวในสองแนวการสำรวจ จากการวิเคราะห์ภาพตัดขวางนี้ ความหนาของดินชั้นบนอยู่ที่ประมาณ 2 เมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า สามารถระบุค่าความหนาของชั้นดินบนมีค่าประมาณ 2 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบ Dynamic Probing ที่พบว่าชั้นดินบนมีความหนาประมาณ 1.5-2.5 เมตร



(a) ภาพตัดขวางตามแนวลาดเอียงของลาดดิน



(b) ภาพตัดขวางตามแนวขวางของลาดดิน

รูปที่ 4 ผลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า

3.4 การใช้เทคโนโลยีการสำรวจทางอากาศผ่านอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความแม่นยำ โดยหลักการสำคัญคือ การถ่ายภาพจากมุมสูงให้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย แล้วนำภาพที่มีการซ้อนทับกันมาประมวลผลด้วยเทคนิค Structure from Motion (SFM) เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติและแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล (Digital Elevation Model หรือ DEM) ในการศึกษาใช้กล้องที่มีความละเอียดของกล้อง 12 ล้านพิกเซล พร้อมระบบ GPS และเซนเซอร์บันทึกทิศทางกล้องในการสำรวจ ทำให้สามารถบันทึกพิกัดและข้อมูลการถ่ายภาพได้อย่างแม่นยำ ซึ่งรวมถึงละติจูด ลองจิจูด ระดับความสูง และข้อมูลทิศทางของกล้อง จากนั้นนำภาพถ่ายและข้อมูลพิกัดมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์เพื่อให้ได้แบบจำลอง 3 มิติ และแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล DEM ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพถ่ายแสดงแบบจำลอง 3 มิติ (Digital Elevation Model)

3.5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อสามารถระบุและจำแนกประเภทของดิน รวมถึงการหาสมบัติทางวิศวกรรม โดยการทดสอบมีดังนี้ ได้แก่ การทดสอบความถ่วงจำเพาะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D854-14 เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การทดสอบหาขีดจำกัด (Atterberg Limits Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-17 การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D2487-17 และการทดสอบแรงเฉือน

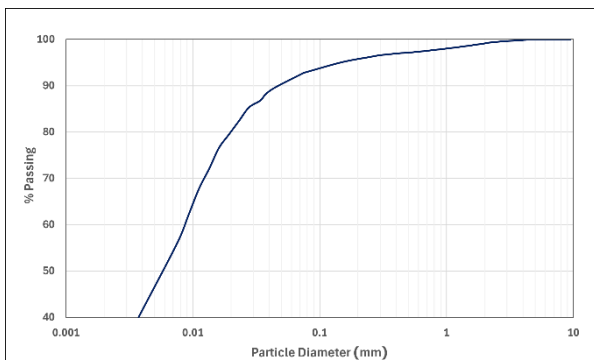
โดยตรง (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D3080M-11 เพื่อหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินตามเกณฑ์การวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) ซึ่งประกอบด้วยค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และมุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle, ϕ) โดยมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานดินในห้องปฏิบัติการ (ตัวอย่างดินจาก ความลึก 1.5 เมตร)

ความ ถ่วงจำเพาะ	ค่าขีดจำกัด เหลว (LL) %	ค่าขีดจำกัด พลาสติก (PL) %	ค่าดัชนี พลาสติก (PI) %	จำแนก ประเภทดิน (USCS)
2.705	62.703	30.32	32.38	CH

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ตัวอย่างดิน
เก็บแบบ disturbed จากความลึก 1.5 เมตร และเตรียมตัวอย่างแบบ
recompacted

ชนิดดิน	หน่วยน้ำหนัก (kN/m^3)	มุมเสียดทาน ภายใน ($^\circ$)	ค่าความเชื่อม แน่น (kPa)
CH	18	29	18



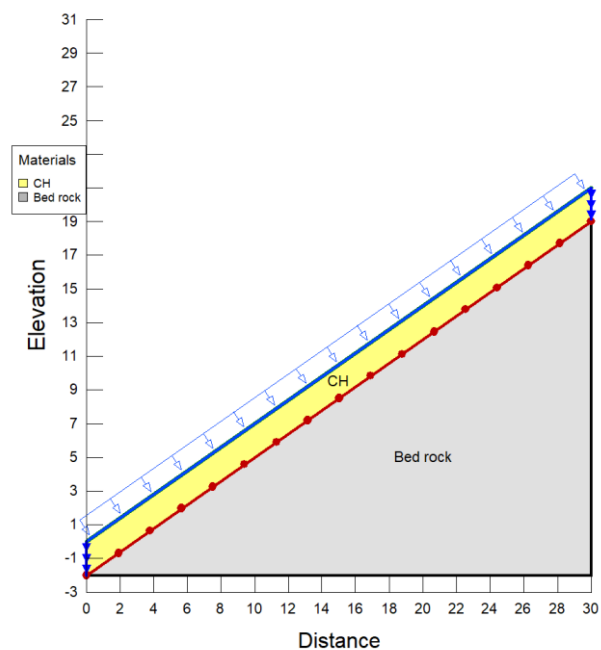
รูปที่ 6 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

จากกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 6 ลักษณะเส้นโค้งการกระจายตัวค่อนข้างลาดชัน โดยเฉพาะในช่วงอนุภาคขนาดเล็ก แสดงให้เห็นว่าดินมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหลายช่วง (Well Graded) แต่มีสัดส่วนของอนุภาคขนาดเล็ก (ดินเหนียว) เป็นจำนวนมาก ตามระบบการจำแนกดินแบบ USCS (Unified Soil Classification System) ดินที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. มากกว่า 50% จัดเป็นดินเม็ดละเอียด (Fine-Grained Soil) ซึ่งดินจากตัวอย่างนี้มีสัดส่วนของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) เป็นจำนวนมากถึงประมาณ 90% และเมื่อพิจารณาค่า LL และ PI ตามตารางที่ 1 จะพบว่าดินนี้จัดเป็นประเภท CH หรือดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High Plasticity Clay)

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด (Slope Stability Analysis)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล (DEM) ในรูปที่ 5 พบว่าลาดเขาในพื้นที่ศึกษามีลักษณะลาดเอียงต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในการศึกษา

ผลการสำรวจด้วยวิธี Dynamic Probing และการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าชั้นดินบนมีความหนาประมาณ 1.5-2.5 เมตร โดยดินชั้นบนเป็นประเภท CH (ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง) ได้ชั้นดินดังกล่าวเป็นชั้นที่มีความแข็งแรงมากกว่า ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นหินฐาน (Bedrock) หรือหินที่มีการผุพังบางส่วน ซึ่งสังเกตได้จากค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงขึ้นในชั้นดินลึก และสอดคล้องกับผลการทดสอบ Dynamic Probing ที่แสดงค่าการต้านทานที่สูงขึ้นมากเมื่อความลึกมากกว่า 2 เมตร ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเชิงเขา การศึกษานี้ได้จำลองชั้นหินฐานที่ชั้นดินที่มีความลึกกว่า 1.5-2.5m โดยอ้างอิงจากผลการสำรวจดังกล่าว จากหลักฐานการพังทลายในอดีตและงานวิจัยในพื้นที่ใกล้เคียง (Komolvilas et al., 2021) [7] พบว่าการพังทลายของลาดดินในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบตื้น (Shallow Slope Failure) ซึ่งเกิดในชั้นดินบนที่มีความหนาไม่เกิน 3 เมตร โดยมีระยะการเคลื่อนตัวอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นดินและชั้นหินฐานด้านล่าง ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์วิบัติแบบตื้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษา

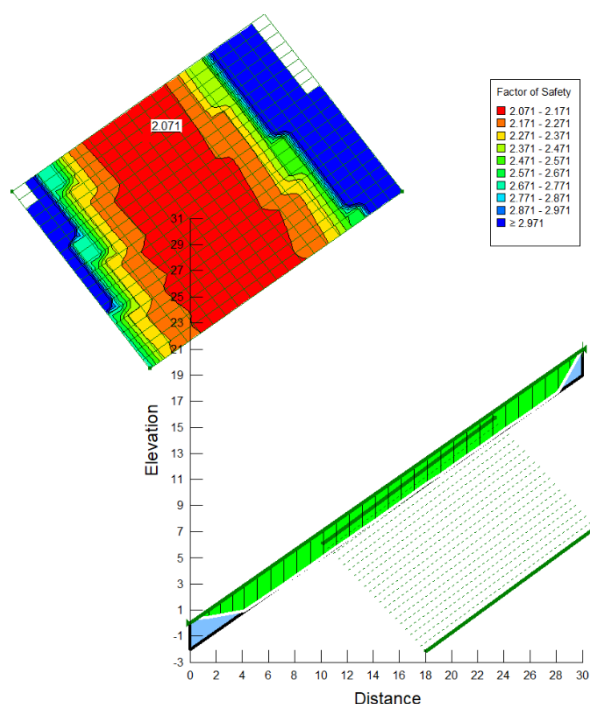


รูปที่ 7 แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด

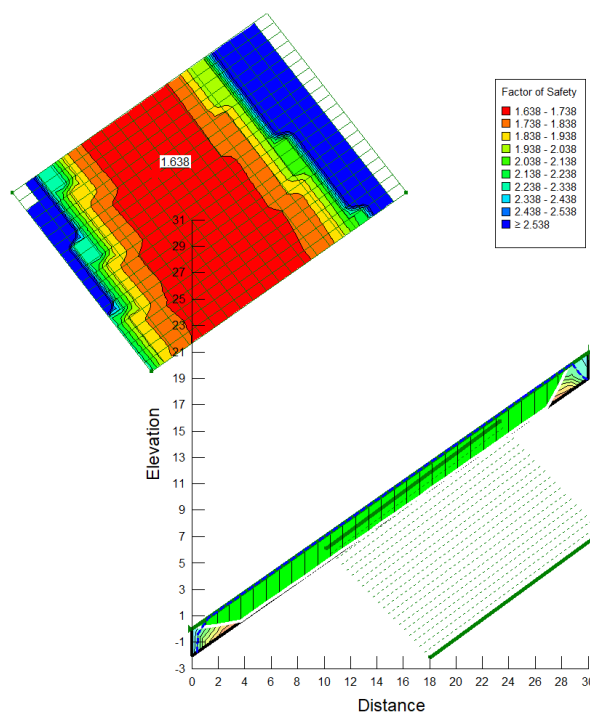
การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด (Slope Stability Analysis) ใช้ในการประเมินความเสี่ยงและความปลอดภัยของพื้นที่ลาดเอียง ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของพื้นที่ลาดเอียงคือน้ำฝน ซึ่งสามารถ

เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดที่ใช้ คือวิธี Morgenstern-Price ซึ่งอยู่ในกลุ่มวิธีการวิเคราะห์แบบสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method หรือ LEM) (Morgenstern & Price, 1965) [17] ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม GeoStudio โดยใช้โมดูล SEEP/W เพื่อคำนวณการไหลซึมของน้ำและ SLOPE/W เพื่อคำนวณค่า Factor of Safety (FS) ของลาดชันภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น การสะสมของน้ำจากฝนตกต่อเนื่อง โดยพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของเชิงลาดตั้งตารางที่ 2 และจำลองปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 50 มม./วันในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพของเชิงลาด แบบจำลองการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cai & Ugai (2004) [18] ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำฝนต่อเสถียรภาพลาด พบว่าฝนที่มีความเข้มข้น 50 มม./วัน เป็นเวลา 3-7 วัน สามารถลดค่า Factor of Safety ได้ประมาณ 20-40% และ Rahardjo et al. (2005) [19] ศึกษาผลกระทบของน้ำฝนต่อเสถียรภาพเชิงลาดในประเทศสิงคโปร์ พบว่าฝนที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 30 มม./วัน) สามารถทำให้ค่า Factor of Safety ลดลงมากกว่า 30% ภายในระยะเวลาไม่กี่วัน

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของน้ำฝนต่อเสถียรภาพของลาดเชิงเขา โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะเริ่มต้น (วันแรก) ที่ไม่มีฝนตกกับสภาวะหลังจากมีฝนตก 50 มม./วัน เป็นเวลา 7 วัน พบว่า ในวันแรก ดินจะมีเสถียรภาพที่สูงกว่าเนื่องจากความชื้นในดินยังคงอยู่ในระดับปกติ ไม่มีการสะสมน้ำเพิ่มขึ้นจากฝน ดังรูปที่ 8(a) ในวันที่มีฝนตก การสะสมน้ำฝนในดินจะทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นและลดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคดิน ทำให้ Factor of Safety ลดลง ซึ่งสามารถทำให้ลาดชันมีความเสี่ยงสูงขึ้นต่อการถล่ม ดังรูปที่ 8(b) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Factor of Safety (FS) ลดลงจาก 2.071 เหลือ 1.638 หลังจากมีฝนตก 50 มม./วัน เป็นเวลา 7 วัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำฝนมีผลอย่างมากต่อความเสถียรภาพของลาดดิน



(a) ลาดดินสภาวะเริ่มต้น



(b) หลังจากมีฝนตก 50 มม./วัน เป็นเวลา 7 วัน
รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

5. บทสรุป

จากการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจภาคสนามและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินบนภูเขาในพื้นที่อำเภอเบกเทือง จังหวัดน่าน ซึ่งมีความลาดชันสูงและมีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มโดยเฉพาะในช่วงที่มีฝน

ตกหนัก โดยใช้วิธีการบูรณาการระหว่างการสำรวจภาคสนามและการใช้เทคโนโลยีมาช่วยในการวิเคราะห์ผล

ผลการสำรวจภาคสนาม การทดสอบด้วยวิธี Dynamic Probing ในสามตำแหน่งพบว่าความหนาของชั้นดินบนในพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วงประมาณ 1.5-2.5 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าที่พบว่าชั้นดินบนมีความหนาประมาณ 2 เมตร

จากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ช่วยให้ได้แบบจำลองระดับความสูงดิจิทัล (DEM) ที่มีความละเอียดสูงของพื้นที่ศึกษา สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ดินในพื้นที่ที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.705 มีค่าขีดจำกัดเหลว (LL) 62.703% ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) 30.32% และค่าดัชนีพลาสติก (PI) 32.38% ทำให้จัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามระบบ USCS การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินพบว่า มีสัดส่วนของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) ถึงประมาณ 90% ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงพบว่า ดินมีความเชื่อมแน่น (Cohesion) 18 kPa และมุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) 29 องศา

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดพบว่า ค่า Factor of Safety (FS) ลดลงจาก 2.071 เหลือ 1.638 หลังจากมีฝนตก 50 มม./วัน เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำฝนมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน แม้ว่าค่า FS หลังจากมีฝนตกจะยังคงมากกว่า 1.0 ซึ่งหมายถึงลาดดินยังคงมีเสถียรภาพ แต่การลดลงของค่า FS ประมาณ 21% แสดงให้เห็นว่าหากมีฝนตกต่อเนื่องหรือมีความเข้มข้นมากกว่านี้ อาจส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มได้ และผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่งในการประเมินความเสี่ยงดินถล่ม และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเตือนภัยล่วงหน้าและมาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดความเสี่ยงและความเสียหายจากภัยพิบัติดินถล่ม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนเมธีวิจัยอาวุโส วสช 2567 และทุนอุดหนุนที่ได้รับจัดสรรเพื่อการวิจัยพื้นฐาน FF68 และขอบคุณทุนนักวิจัยหลังปริญญาเอก C2F จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทรัพยากรธรณี. (2564). รายงานสถานการณ์ธรณีพิบัติภัยประจำปี 2564. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- [2] Crosta, G. B., & Frattini, P. (2008). Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, 22(4), 473-477.
- [3] Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., & Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems.

- [4] เกรียงไกร เตชกานนท์, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และ อภินิติ โชติสังกาศ. (2563). การวิเคราะห์เกณฑ์วิกฤตปริมาณน้ำฝนสำหรับการเกิดดินถล่มในจังหวัดน่าน. *วารสารวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ*, 25(2), 45-58.
- [5] Fan, X., Xu, Q., Scaringi, G., Dai, L., Li, W., Dong, X., Zhu, X., Pei, X., Dai, K., & Havenith, H. B. (2019). Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, 16(6), 1137-1149.
- [6] Zhang, S., Wang, F., Zhang, K., & Liang, W. (2020). Real-time warning of rainfall-induced landslides using rainfall threshold in Southwest China. *Natural Hazards*, 104(1), 117-136.
- [7] Komolvilas, V., Tanapalungkorn, W., Latcharote, P. and Likitlersuang, S. (2021). Failure analysis on a heavy rainfall-induced landslide in Huay Khab Mountain in Northern Thailand. *Journal of Mountain Science* 18(10), 2580-2596.
- [8] Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., & Papini, M. (2018). Remote sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 10(12), 1971.
- [9] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, ปิยะ โชติไกร, และ อภินิติ โชติสังกาศ. (2563). การประยุกต์ใช้การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าในการประเมินความเสี่ยงดินถล่ม. *วารสารวิศวกรรมสำรวจ*, 33(1), 56-70.
- [10] Jomard, H., Lebourg, T., Binet, S., Tric, E., & Hernandez, M. (2010). Characterization of an internal slope movement structure by hydrogeophysical surveying. *Terra Nova*, 22(4), 248-257.
- [11] Ngo, T.P., Likitlersuang, S. and Takahashi, A. (2019). Performance of a geosynthetic cementitious composite mat for stabilising sandy slopes. *Geosynthetic International*, 26(3), 309-319.
- [12] Likitlersuang, S., Kounyou, K. and Prasetyaningtiyas, G.A. (2020). Performance of geosynthetic cementitious composite mat and vetiver on soil erosion control. *Journal of Mountain Science*, 17(6), 1410-1422.
- [13] Ngo, T.P., Takahashi, A. and Likitlersuang, S. (2023). Centrifuge modelling of a soil slope reinforced by geosynthetic cementitious composite mat. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(2), 881-896.
- [14] Ongpaporn, P., Jotisankasa A. and Likitlersuang, S. (2022). Geotechnical investigation and stability analysis of bio-engineered slope at Surat Thani province in Southern

- Thailand. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81, 84.
- [15] Hong-in, P., Takahashi, A. and Likitlersuang, S. (2024). Engineering and environmental assessment of soilbag-based slope stabilisation for sustainable landslide mitigation in mountainous area. Journal of Environmental Management 359, 120970.
- [16] Peck, R.B., Hanson, W.E., & Thornburn, T.H. (1974). Foundation Engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [17] Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79-93.
- [18] Cai, F., & Ugai, K. (2004). Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. International Journal of Geomechanics, 4(2), 69-78.
- [19] Rahardjo, H., Li, X. W., Toll, D. G., & Leong, E. C. (2005). The effect of antecedent rainfall on slope stability. Geotechnical & Geological Engineering, 23(4), 399-417.