

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแนวทางป้องกัน
กรณีศึกษา ตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ



ปัญจพล ปล้องมาก

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ตุลาคม 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแนวทางป้องกัน
กรณีศึกษา ตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ



ปัญจพล ปล้องมาก

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ตุลาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ANALYSIS OF SOIL SLOPE STABILITY AND PROTECTION: A CASE STUDY
OF THE MAE PUEM RIVER BANK IN MAE CHAI SUBDISTRICT



PANJAPON PLONGMAK

A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering
October 2025

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแนวทางป้องกัน
กรณีศึกษา ตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ

ของ ปัญจพล ปล้องมาก

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนันท์ ชูบุอุปการ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชนกร ชมภูรัตน์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บัวกล้า)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

- เรื่อง:** การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแนวทางป้องกัน
กรณีศึกษา ตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ
- ผู้วิจัย:** ปัญญพล ปล้องมาก, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2568
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ขวัญสุริยาภา ธนะวงศ์
- คำสำคัญ:** ลำน้ำแม่ปืม, เสถียรภาพลาดดิน, โปรแกรมคอมพิวเตอร์, โครงสร้างป้องกันตลิ่งลำน้ำ

บทคัดย่อ

การพัฒนาปรับปรุงภูมิทัศน์ลำน้ำแม่ปืมในเขตพื้นที่จังหวัดพะเยา เป็นการพัฒนาเพื่อใช้ทรัพยากรธรรมชาติของลำน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการอุปโภคบริโภค รวมไปถึงการประกอบอาชีพในภาคเกษตรกรรม ในอดีตจนถึงปัจจุบันปัญหาที่พบของลำน้ำแม่ปืม คือ เกิดการกัดเซาะตลิ่งของตลิ่งลำน้ำที่ขาดเสถียรภาพของลาดดินแล้วยังพบว่า มีรอยร้าวพร้อมที่จะเกิดการรื้อตัวของตลิ่งลำน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างบริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เริ่มดำเนินการสำรวจเก็บข้อมูลลักษณะการกัดเซาะในพื้นที่ศึกษา ผลการสำรวจเบื้องต้นการกัดเซาะส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเป็นการพังทลายของลาดดินแบบการเคลื่อนถล่มตัวของมวลดินที่แสดงรอยเฉือนเป็นแนวโค้ง (Rotational Slip Surface) ประกอบกับข้อมูลเจาะสำรวจดินพบว่า หลุมเจาะที่ 1 ที่มีข้อมูลดินอยู่ 2 ชั้นดิน โดยชั้นดินที่ 1 ลักษณะเป็นตะกอนดินทราย ค่ามุมเสียดทานภายใน 30 ส่วนชั้นดินที่ 2 ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้ม ค่าการรับน้ำหนักของดิน (Bearing Capacity) ประมาณ 35 ตันต่อตารางเมตร หลุมเจาะที่ 2 มีข้อมูลดินอยู่ 3 ชั้นดิน โดยชั้นดินที่ 1 ลักษณะเป็นดินทรายสีน้ำตาล ค่ามุมเสียดทานภายใน 31 ส่วนชั้นดินที่ 2 ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้ม ค่าการรับน้ำหนักของดิน ประมาณ 10 ตันต่อตารางเมตร ส่วนชั้นดินที่ 3 ลักษณะดินเหนียวสีเหลืองแกมน้ำตาล ค่าการรับน้ำหนักของดิน ประมาณ 15 ตันต่อตารางเมตร ยิ่งชั้นดินถูกกัดเซาะก็จะสูญเสียเสถียรภาพของมวลดิน อีกทั้งปัจจัยทางกายภาพ อัตราการไหลของน้ำในลำน้ำที่ไหลผ่านลาดดินตลิ่งตามธรรมชาติ โดยที่พิจารณาการเคลื่อนตัวของน้ำหลาก (Flood Routing) ในลำน้ำที่ศึกษา ผลการห่ออัตราการไหลของน้ำสูงสุด 0.160 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความเร็วของน้ำที่กระทำ 0.009 เมตรต่อวินาที กับพื้นที่หน้าตัดของน้ำไหลผ่านในจุดวัด การลดระดับของน้ำแบบฉับพลันที่ระดับต่าง ๆ ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ลาดดินตลิ่งลำน้ำขาดเสถียรภาพได้ ข้อมูลต่าง ๆ นำมาใช้วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ของเสถียรภาพลาดดินโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 โปรแกรม ในอดีตจนถึงปัจจุบันโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน คือ GeoStudio 2012 slop/w โดยวิธี Limit equilibrium ผลการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด 0.555 ภายหลังการวัดและ Plaxis 2D โดยวิธี Finite element ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด 0.386 ภายหลังการวัด ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมเป็นซอฟต์แวร์ที่อาศัยการโมเดลวิเคราะห์ด้วยวิธี Mohr Coulomb ถึงแม้จะมีวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลแตกต่างกันแต่สามารถประเมินเสถียรภาพลาดดินได้เช่นกันเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล ก่อนจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาประกอบการพิจารณาโครงสร้างป้องกันตลิ่งลำน้ำโดยอาศัยหลักวิศวกรรมโครงสร้าง งานวิจัยนี้ได้เสนอโครงสร้างป้องกันตลิ่งลำน้ำทั้งหมด 3 รูปแบบ ในการวิเคราะห์จุดวัดเดียวกัน รูปแบบที่ 1 การเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหิน ผลการวิเคราะห์ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.857 รูปแบบที่ 2 การเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการวิเคราะห์ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.798 และรูปแบบที่ 3 การเสริมเสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก) ผลการวิเคราะห์ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.356 ทั้ง 3 รูปแบบ เป็นวิธีที่ใช้ในงานก่อสร้างสำหรับนำไปเลือกใช้ให้เกิดประโยชน์ในการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำอย่างมั่นคงถาวร และเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไปในอนาคต

Title: ANALYSIS OF SOIL SLOPE STABILITY AND PROTECTION: A CASE STUDY
OF THE MAE PUEM RIVER BANK IN MAE CHAI SUBDISTRICT

Author: Panjapon Plongmak, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2025

Advisor: Associate Professor Dr. Thanakorn Chompoorat Co-advisor Dr.Kwansirinapa Thanawong

Keywords: Mae Pum River, Slope tability, Computer program, River bank protection structure

ABSTRACT

The landscape improvement and development of the Mae Puem River in Phayao Province aims to optimize the utilization of the river's natural resources for domestic consumption and agricultural activities. Historically and presently, a significant issue facing the Mae Puem River is the continuous failure and settlement of the riverbank due to slope instability. Cracks observed along the riverbank indicate ongoing potential for rotational failure, posing direct threats to increasing numbers of structures located along the banks. This study began with a site investigation to collect data on failure characteristics within the study area. Preliminary findings revealed that most failures involved rotational sliding of soil masses, indicated by curved slip surfaces. Soil boring data showed two soil layers at Borehole 1: the first layer consisting of sandy alluvium with an internal friction angle of 30° , and the second layer of dark brown clay with an estimated bearing capacity of approximately 35 t/m^2 . Borehole 2 presented three layers: the first being brown sandy soil with a friction angle of 31° , the second layer dark brown clay with a bearing capacity of 10 t/m^2 , and the third layer yellowish-brown clay with a bearing capacity of about 15 t/m^2 . As erosion progresses, soil layers lose stability. Physical factors, including river discharge and flow velocity across the geomorphology of the riverbank, also contribute to instability. The result of finding the maximum water flow rate $0.160 \text{ cubic meters per second (m}^3/\text{s)}$ and flow velocity of $0.009 \text{ meters per second (m/s)}$. with the cross-sectional area of the water flowing through the failure point Sudden decrease in water level at all levels is a factor that can cause instability of river bank slope. The data are used to analyze the safety factor. (Factor of Safety (FS) of slope stability was analyzed using two computer programs. Until now, the most widely used programs for slope stability analysis are GeoStudio 2012 slop/w by Limit equilibrium method. The analysis result found the lowest factor of safety of 0.555 after failure and Plaxis 2D by Finite element method. The lowest factor of safety was 0.386 after failure. Both programs are software that relies on Mohr-Coulomp analysis model. Although the data analysis methods are different, they can evaluate slope stability as well, increasing the reliability of the data. Before using the results to consider riverbank protection structures based on structural engineering principles, this research proposes three riverbank protection structures in the same failure point analysis. Model 1: Reinforced gabion boxes with rocks. The analysis result showed a factor of safety of 1.857. Model 2: Reinforced concrete retaining walls. The analysis result showed a factor of safety of 1.798. And Model 3: Reinforced piles (driven piles). The analysis results showed a safety factor of 1.356. All three methods are construction methods that can be selected for use in the construction of permanent river bank protection lines and as a guideline for relevant agencies in the future development.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยความเมตตาช่วยเหลือจากบุคคลกับหน่วยงานหลายภาคส่วน ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ได้ให้คำแนะนำ องค์ความรู้ ข้อเสนอแนะและผลักดันให้การสนับสนุนช่วยเหลืองานวิจัยฉบับนี้สำเร็จบรรลุขึ้นมาได้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ เชียงฉิน และ ดร.ขวัญสิริภา ธนะวงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือคอยแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาเสมอ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูอุปการ ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ บัวกล้า กรรมการสอบ เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำอันมีคุณค่าให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บุคลากรเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนาทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง แขวงทางหลวงชนบทพะเยา จังหวัดพะเยา สถานีวัดระดับน้ำ 117 ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา อุทยานแห่งชาติแม่ปืม ที่สนับสนุนด้านข้อมูลและสถานที่ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ธนกฤต เทพอุโมงค์ และนายอนุพงศ์ คำปลอด ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำด้วยไมตรีจิตในงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดามารดา ครอบครัว เพื่อน พี่ น้อง รวมถึงอีกหลายความช่วยเหลือที่ข้าพเจ้าไม่ได้กล่าวนามมาในที่นี้ ที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลังให้กำลังใจและเอาใจใส่ด้วยความห่วงใยต่อข้าพเจ้าเสมอมา

ปัญญาพล ปลั่งมาก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
วิธีการดำเนินการวิจัย	3
ประโยชน์ที่จะได้รับการจากการวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสารและวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
ความเป็นมาและความสำคัญของลำน้ำแม่ปืม	7
การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืม	9
การวิเคราะห์ข้อมูลดิน	14
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำ	19
แนวทางป้องกันการพังทลายของลาดริมตลิ่ง	30
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	60
ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	60

ขอบเขตพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูล	61
ข้อมูลลักษณะลาดดินจากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดิน	62
ข้อมูลระดับน้ำในลำน้ำแม่ปืม.....	65
การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และ PLAXIS 2D	66
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	69
ลักษณะการวิบัติพังทลายของลาดดินในจุดวิบัติต่าง ๆ	70
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ของระดับน้ำขึ้นลงที่กระทำต่อน้ำตลลาดดิน ณ จุดวิบัติต่าง ๆ	88
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยโมเดลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W มีผลการวิเคราะห์ทั้ง 7 จุดวิบัติ ดังนี้.....	96
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยโมเดลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D มีผลการวิเคราะห์ทั้ง 7 จุดวิบัติดังนี้.....	106
ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ทั้ง 7 จุดวิบัติ โดยผ่านโปรแกรม ซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D	116
ผลการวิเคราะห์การเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (GABIONS).....	123
ผลการวิเคราะห์การเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก (CONCRETE RETAINING WALL)	130
ผลการวิเคราะห์เสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก).....	135
บทที่ 5 บทสรุป	141
บรรณานุกรม.....	144
ประวัติผู้วิจัย.....	147

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางแผนการปฏิบัติงาน	5
ตาราง 2 ข้อมูลหมู่บ้านและประชากรที่อยู่ในเขตปกครองเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา	8
ตาราง 3 ประเภทรูปแบบการพังทลายของลาดดินและลาดหิน.....	30
ตาราง 4 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในดิน.....	42
ตาราง 5 ค่าโดยประมาณสำหรับความแปรปรวนของดินตามธรรมชาติ	43
ตาราง 6 คุณสมบัติของดินที่ทำการสำรวจ	55
ตาราง 7 ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 และ PLAXIS 2D	59
ตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 1 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6).....	82
ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 1 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6).....	83
ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8).....	85
ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8).....	86
ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8).....	87
ตาราง 13 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2563	88
ตาราง 14 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2563.....	90
ตาราง 15 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2564	91
ตาราง 16 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2564.....	92
ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2565	93

ตาราง 18 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2565..... 94

ตาราง 19 ความสัมพันธ์จากการหาอัตราการไหลของน้ำกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ที่วิเคราะห์ผ่าน GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ที่วิกฤต..... 121



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 การวิบัติพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ บ้านป่าตึงใต้ หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา	2
ภาพ 2 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	4
ภาพ 3 แนวเส้นทางลำน้ำปืมเขตพื้นที่รับผิดชอบของเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา	9
ภาพ 4 ลักษณะลำน้ำแม่ปืมช่วงปริมาณน้ำสูง	11
ภาพ 5 กราฟแสดงปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ช่วงปี พ.ศ. 2560-พ.ศ. 2565	12
ภาพ 6 การเจาะสำรวจดินโครงการก่อสร้างระบบประปาหมู่บ้าน หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้	15
ภาพ 7 การพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ บ้านป่าตึงเหนือ หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา	18
ภาพ 8 ตัวอย่างรูปตัดของโค้งลำน้ำที่มีตลิ่งเป็นแบบผสม.....	20
ภาพ 9 รูปบนแสดงรูปตัดขวางลักษณะลำน้ำตรงและรูปล่างแสดงลักษณะลำน้ำตรงในธรรมชาติ....	21
ภาพ 10 ลักษณะลำน้ำ (a) ลำน้ำกัดกร่อนเขาร่องเขาแนวตั้ง(downcutting), (b) ลำน้ำเปลี่ยนแปลงเป็นร่องหุบเขาลึก(canyon), (c) ลำน้ำเปลี่ยนแปลงเป็นรูปลักษณะตัววี (V-Shaped valley).....	21
ภาพ 11 ลักษณะลำน้ำ (a) ธารน้ำประสานสายช่วงต้นทาง เกิดบริเวณเนินตะกอนรูปพัดที่ธารน้ำเพิ่งไหลออกมาจากร่องเขา, (b) ภาพมุมสูงธารน้ำประสานสายที่ต่อมารจากร่องเขา และเนินตะกอนรูปพัด, (c) ธารน้ำประสานสายระยะใกล้.....	22
ภาพ 12 ลักษณะลำน้ำ (a) รูปการณ์กวัดแกว่งของลำน้ำแบบโค้งตัว, (b) ลำน้ำโค้งตัว, (c) ลำน้ำโค้งตัวร่องลึก,	23
ภาพ 13 แม่น้ำไวมาคารีรี (Waimakariri) ในประเทศนิวซีแลนด์ ตัวอย่างทางน้ำแบบเปีย	24
ภาพ 14 ลักษณะการกัดเซาะในโค้งลำน้ำที่คดเคี้ยว.....	25
ภาพ 15 ความเร็วกระแสน้ำในลำน้ำแม่ปืม หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา	25

ภาพ 16 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของกระแสน้ำที่ก่อให้เกิดการพังทลายของหน้าดิน ต่อคุณสมบัติของดิน	26
ภาพ 17 Bank failure mechanism: (a) Rotational; (b) Planar; (c) Cantilever and (d) Piping or sapping.....	27
ภาพ 18 Collapse of layer undercut by piping/sapping	28
ภาพ 19 Cavities of typical piping/sapping erosion	28
ภาพ 20 การกัดเซาะภายในโครงสร้างดินจากแรงดันการไหลซึม	29
ภาพ 21 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบลาดหินเรียง.....	32
ภาพ 22 การใช้หินและแผ่นใยสังเคราะห์เป็นโครงสร้างปิดทับหน้าลาดตลิ่ง	32
ภาพ 23 การเรียงกล่องบรรจุหิน (Gabion).....	33
ภาพ 24 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบเรียงหินยาว (Grouted Riprap).....	34
ภาพ 25 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบ Grouted Riprap.....	34
ภาพ 26 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบ Sheet-Piling Wall รูปแบบต่าง ๆ	35
ภาพ 27 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบ Relieving Platform	36
ภาพ 28 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบผสมเสาเข็มกับกล่องกาเบียน	37
ภาพ 29 แนวป้องกันตลิ่งแบบเรียงกระสอบกับเรียงหิน	37
ภาพ 30 การตรวจสอบและควบคุมการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธี Jet grouting ด้วย Acoustic column inspector	38
ภาพ 31 ภาพตัดขวางของเชื้อนคลองป่าบอน (0 + 297 ม.).....	44
ภาพ 32 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทาน, SASW และการตรวจสอบหลุมเจาะ (0 + 297 ม.).....	45
ภาพ 33 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากข้อมูล piezometer และ SEEP/W.....	46
ภาพ 34 การเปลี่ยนแปลงในปัจจัยความปลอดภัยกับระดับการลดลงตามจุดสูงสุด และกำลังคงเหลือ	47
ภาพ 35 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยกับจำนวนรอบของเชื้อนคลองป่าบอน	48

ภาพ 36 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข	49
ภาพ 37 (a) ความเค้นเฉือนสูงสุดของส่วนเขื่อนที่ 0 + 297 เมตร; (b) เส้นโค้งที่มาเวลา ความเค้นเฉือนที่โซนความล้มเหลว (จุด A); (c) เส้นโค้งเวลาความเครียดเชิงปริมาตร ที่โซนความล้มเหลว (จุด A); (d) เส้นกราฟเวลาความเค้นเฉือนที่โซนไม่เกิด ความผิดพลาด (จุด B); (e) เส้นโค้งเวลาความเครียดเชิงปริมาตรที่โซนไม่ขัดข้อง (จุด B).....	50
ภาพ 38 โหนดในการกำหนดขอบเขตของโมเดลที่ออกแบบ	51
ภาพ 39 ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดจากการให้น้ำหนักบนแถบโหนด.....	52
ภาพ 40 ลาดดินถล่มที่มีผลกระทบจาก ความลาดชัน 1	54
ภาพ 41 ลาดดินถล่มที่มีผลกระทบจาก ความลาดชัน 2	55
ภาพ 42 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรม GEO5 มีค่าความปลอดภัย = 1.71	56
ภาพ 43 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ความลาดชัน 2 โดยใช้โปรแกรม GEO5 มีค่าความปลอดภัย = 1.49	57
ภาพ 44 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ (Mesh)ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรมPLAXIS 2D.....	58
ภาพ 45 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D มีค่าความปลอดภัย = 1.78.....	58
ภาพ 46 รูปแสดงแนวสำรวจข้อมูลในขอบเขตที่จะดำเนินการศึกษา พิกัดจุดเริ่มต้น E 0588981 N 2137062 พิกัดจุดสิ้นสุด E 0588987 N 2137892 และตำแหน่งทั้ง 7 จุดวัด	61
ภาพ 47 รูปแสดงแนวขอบเขตเส้นทางลำน้ำไหลที่จะดำเนินการศึกษาพอสังเขป	62
ภาพ 48 แผนที่แสดงตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6 และหมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา	64
ภาพ 49 กราฟแสดงระดับน้ำขึ้นลงรายเดือน ในปี พ.ศ. 2563 - พ.ศ. 2565 จากสถานี I 17 เจริญงาม (แม่น้ำอิง) ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา	65
ภาพ 50 แสดง Slice 1- Slice 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W.....	67

ภาพ 51 โมเดลวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ในโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D	68
ภาพ 52 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 1 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	72
ภาพ 53 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 2 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	73
ภาพ 54 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 3 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	74
ภาพ 55 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 4 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	75
ภาพ 56 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 5 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	76
ภาพ 57 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 6 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	77
ภาพ 58 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 7 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D.....	78
ภาพ 59 กราฟความสัมพันธ์ความดันจากน้ำหนักดินที่มีผลต่อชั้นดิน Effective Overburden Pressure $\sigma_v'(t/m^2)$ กับ Correction Factor, C_N	80
ภาพ 60 กราฟความสัมพันธ์ มุมแรงเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction), ϕ' กับค่า N' หรือค่า SPT ที่ถูกปรับแล้ว (Corrected SPT Value).....	81
ภาพ 61 กราฟความสัมพันธ์ ค่าความแข็งแรงแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength, Q_u) หน่วย t/m^2 กับค่าผลการตอก SPT (Standard Penetration Test, N) หน่วย blow/ft	82
ภาพ 62 กราฟความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.50, 0.25 และ 0.125... 89	
ภาพ 63 กราฟความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.125 พ.ศ. 2564.....	91
ภาพ 64 กราฟความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.125 พ.ศ. 2565.....	93
ภาพ 65 ภาพเสมือนแสดงระดับน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืม	95

ภาพ 66 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 1	96
ภาพ 67 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 ที่ระดับน้ำ 2.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	97
ภาพ 68 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 2	97
ภาพ 69 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 2 ที่ระดับน้ำ 2.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	98
ภาพ 70 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 3	99
ภาพ 71 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 3 ที่ระดับน้ำ 2.75 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	99
ภาพ 72 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 4	100
ภาพ 73 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 4 ที่ระดับน้ำ 2.50 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	101
ภาพ 74 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 5	101
ภาพ 75 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 5 ที่ระดับน้ำ 3.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	102
ภาพ 76 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 6	103
ภาพ 77 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 ที่ระดับน้ำ 3.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	103
ภาพ 78 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 7	104
ภาพ 79 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 7 ที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	105
ภาพ 80 กราฟแสดงแนวโน้มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยทั้ง 7 จุดวิบัติ โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W	105
ภาพ 81 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D	106

ภาพ 95 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุดใน 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D.....	118
ภาพ 96 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ใน 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D.....	119
ภาพ 97 ผลการวิเคราะห์ก่อนการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (a) ทิศทางการเคลื่อนตัว เสถียรภาพลาดดิน (b) เส้นชั้นเสถียรภาพลาดดิน (C) ชาร์ตสีเสถียรภาพลาดดิน	123
ภาพ 98 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะขุดดินในช่วงที่ 1	124
ภาพ 99 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะขุดดินในช่วงที่ 2	125
ภาพ 100 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินในชั้นฐานล่าง	125
ภาพ 101 ลักษณะการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินชั้นฐานล่าง...	126
ภาพ 102 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินในชั้นที่สองถัดจากฐานล่าง.....	126
ภาพ 103 ลักษณะการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินชั้นที่สอง	127
ภาพ 104 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินในชั้นบนสุด.....	127
ภาพ 105 ลักษณะการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินชั้นบนสุด	128
ภาพ 106 ผลการวิเคราะห์หลังการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (a) ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน (b) เส้นชั้นเสถียรภาพลาดดิน (C) ชาร์ตสีเสถียรภาพลาดดิน	129
ภาพ 107 แบบรูปการก่อสร้าง รูปตัดการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน	130
ภาพ 108 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างฐานกำแพงกันดิน	131
ภาพ 109 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างฐานกำแพงกันดิน	131
ภาพ 110 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างผนังกำแพงกันดิน	132
ภาพ 111 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างผนังกำแพงกันดิน	132
ภาพ 112 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างกำแพงกันดิน	133
ภาพ 113 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างกำแพงกันดิน	133

ภาพ 114 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังเสริมกำแพงกันดิน.....	134
ภาพ 115 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเสริมกำแพงกันดิน	134
ภาพ 116 แบบรูปรายการก่อสร้าง รูปตัดการเสริมเหล็กกำแพงกันดิน	135
ภาพ 117 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ในแนวแกน x ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D.....	136
ภาพ 118 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ในแนวแกน Y ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D.....	136
ภาพ 119 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D	137
ภาพ 120 ผลการวิเคราะห์ เสาเข็มกันดิน โมเมนต์ที่เกิดขึ้น ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D.....	137
ภาพ 121 ผลการวิเคราะห์ เสาเข็มกันดิน แรงเฉือนที่เกิดขึ้น ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D.....	138
ภาพ 122 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการเสริมเสาเข็มกันดินผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D	138
ภาพ 123 แบบรูปรายการก่อสร้างเสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก) รูปตัดการเสริมเสาเข็มกันดิน	139



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตลิ่งลำน้ำแม่ปืม เขตตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา เป็นแหล่งน้ำหลักที่นำไปใช้ประโยชน์ทางภาคเกษตรกรรมบริเวณพื้นที่เกษตรริมตลิ่งลำน้ำ และมีผู้อยู่อาศัยบริเวณพื้นที่ตลิ่งลำน้ำแม่ปืมที่ไหลผ่าน ทั้งนี้ผู้ประกอบการอาชีพเกษตรกรรม ผู้อยู่อาศัยบริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมได้ใช้ประโยชน์จากลำน้ำแม่ปืมในการประกอบอาชีพเพื่อหารายได้มาหล่อเลี้ยงครอบครัวเป็นหลัก และดำเนินชีวิตประจำวัน รวมไปถึงการนำน้ำมาใช้ในระบบประปาหมู่บ้าน ในเขตตำบลแม่ใจ ทั้งนี้ผู้ใช้ประโยชน์มีการขยายพื้นที่มากขึ้นบริเวณบนตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างที่พักอาศัย การขยายพื้นที่เกษตรกรรม โดยเฉพาะผู้ประกอบการอาชีพทางภาคเกษตรกรรมเริ่มมีการสูบน้ำเก็บกักในพื้นที่เกษตรตนเองมากขึ้น จึงทำให้มีการขุดลอกลำน้ำเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้สะดวกเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำ แต่ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่ตามมาซึ่งเกิดการวิบัติพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ กลายเป็นปัญหาหลักของผู้ใช้ประโยชน์ทั้งผู้ประกอบการอาชีพเกษตรกรรมและผู้อยู่อาศัย การวิบัติพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืมเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อภาคเกษตรกรรม เพราะว่าเนื่องด้วยบริเวณลาดดินเกิดการวิบัติพังทลายจึงทำให้การปล่อยน้ำจากทางอ่างเก็บน้ำไม่สามารถปล่อยน้ำในปริมาณตามแผนการปล่อยได้ ถึงแม้ในฤดูฝนมีปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากฝน ผู้ประกอบการอาชีพเกษตรกรรมก็ไม่สามารถกักเก็บสูบน้ำขึ้นมาใช้ได้ตามความต้องการเนื่องจากปริมาณน้ำฝนนั้นค่อนข้างคาดการณ์ยากและเพิ่มขึ้นลดลงกะทันหัน และปัญหาที่พบของผู้อยู่อาศัยบริเวณตลิ่งลำน้ำบางครัวเรือนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างที่อยู่อาศัยทรุดตัว ถนนที่ใช้สัญจรเกิดความเสียหาย ดังภาพ 1 ก่อให้เกิดความหวาดกลัวต่อผู้อยู่อาศัยบริเวณตลิ่งลำน้ำ ดังนั้นปัญหาการวิบัติพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืมจึงเป็นปัญหาหลักของผู้อยู่อาศัย ผู้ใช้ประโยชน์ถนนสาธารณะ อาคารบ้านเรือนบริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมตลอดจนผู้ประกอบการอาชีพเกษตรกรรมที่ใช้ประโยชน์จากลำน้ำแม่ปืมอีกด้วย



ภาพ 1 การวิบัติพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ บ้านป่าตึงใต้ หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ
อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

จากปัญหาการวิบัติพังทลายของลาดดิน มีผู้ที่สนใจศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิบัติพังทลาย เสถียรภาพของดินด้วยวิธีการต่าง ๆ มากมาย (เสวต ประกายรุ่งรศมี และคณะ, 2554) ได้เคยศึกษา วิเคราะห์การชะล้างพังทลายของดิน โดยใช้สมการการสูญเสียดินสากล (Universal Soil Loss Equation) ตามวิธีของวิชไมเออร์และสมิธ (Wischmeier and Smith, 1978) ผลการศึกษาใช้เป็น แนวทางอนุรักษ์สภาพแวดล้อม จัดการที่ดินและวางแผนการใช้ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยแม่ประจัน (Arun, et al., 2020) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินถล่มในพื้นที่กุ่มเขอรี่ รัฐเกรละ ประเทศอินเดีย โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ 2 โปรแกรม วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าอัตราส่วน ความปลอดภัย แล้วแก้ปัญหาโดยการปลูกพืชปกคลุมรักษาฟื้นฟูสภาพลาดดินช่วยลดการกัดเซาะจาก พื้นผิวด้านบนและน้ำฝน ช่วยรักษาสภาพแวดล้อมทางอ้อมได้อีกวิธีหนึ่ง

ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้ โปรแกรมซอฟต์แวร์ Geoslop 2012 slop/w ใช้วิธีโมเดลแบบจำลอง Mohr-Coulomb และ โปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อ ใช้ประกอบพิจารณาเสนอแนวทางวิธีแก้ไขปัญหาการวิบัติพังทลายของเสถียรภาพลาดดินในพื้นที่ ศึกษา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

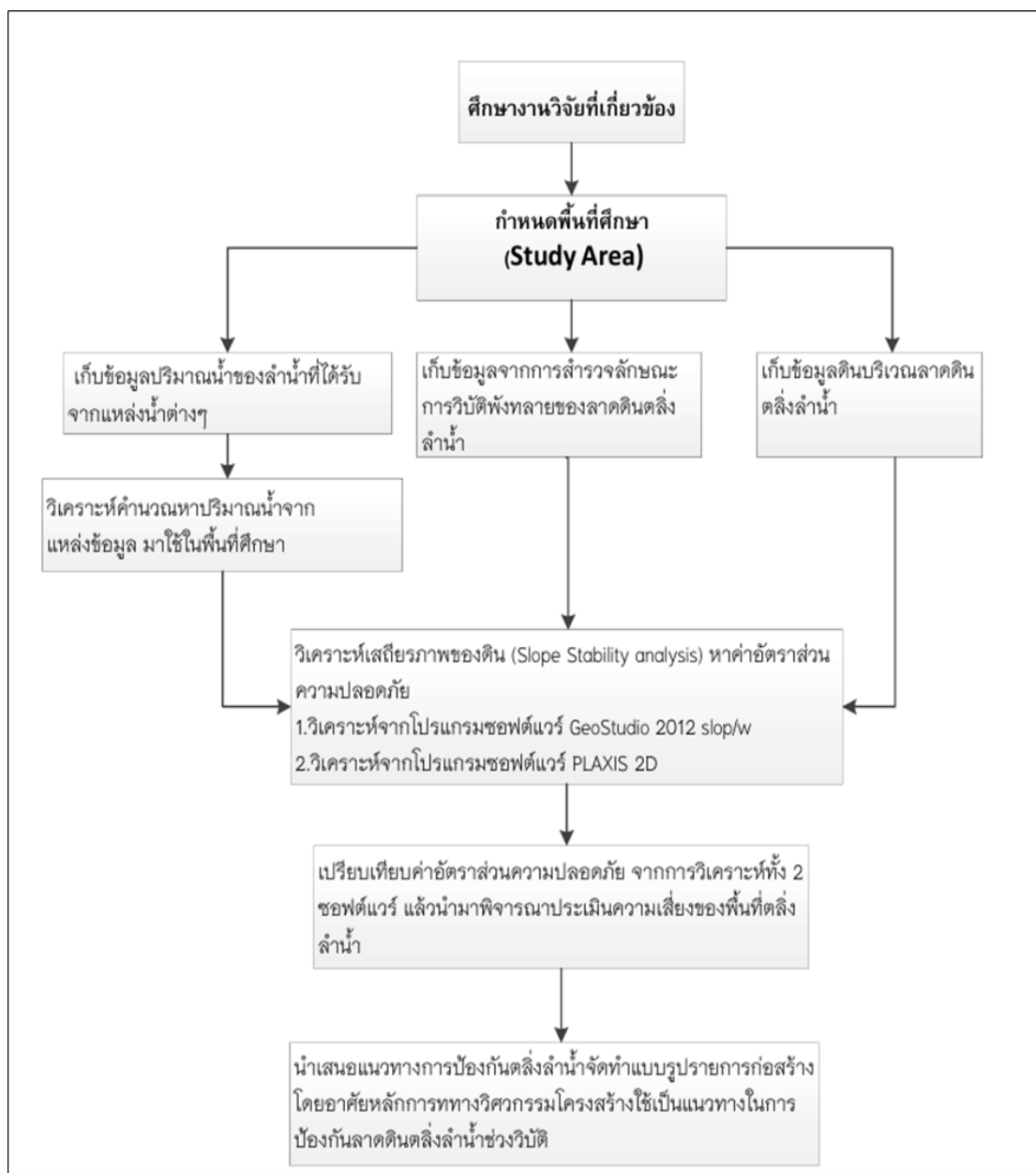
1. ประยุกต์ใช้ข้อมูลเก็บสำรวจลาดดินตลิ่งลำน้ำที่เกิดการวิบัติ มาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์
2. วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ของลาดดินที่เกิดการวิบัติพังทลายของลาดดินผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ ประยุกต์ใช้ผลการวิเคราะห์คาดการณ์เสถียรภาพลาดดิน
3. เสนอแนะแนวทางวิธีการป้องกันการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ

ขอบเขตของการวิจัย

1. การดำเนินการศึกษาลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืมที่ไหลผ่านอยู่ในแนวเขตพื้นที่ หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยาและหมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ซึ่งบริเวณทำการสำรวจเก็บข้อมูลลักษณะลาดดินในพื้นที่ศึกษา มีทั้งหมด 7 จุดพื้นที่วิบัติในแนวเขตตำบลแม่ใจ
2. ข้อมูลปริมาณน้ำที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ใช้ข้อมูลน้ำ 5 ปีย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561-พ.ศ. 2565 ใช้ข้อมูลอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ของกรมชลประทาน ส่วนปริมาณน้ำฝน ใช้ข้อมูลจากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ สถานีตรวจอากาศ จังหวัดพะเยา
3. ข้อมูลดินใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดินของหอดักน้ำประปาหมู่บ้านหมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ และข้อมูลเจาะสำรวจดินของหอดักน้ำประปาหมู่บ้านหมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ ขององค์การบริหารส่วนตำบลแม่ใจ
4. วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ Geoslop 2012 slop/w เปรียบเทียบกับโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D
5. รูปแบบแนวทางวิธีการป้องกันการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา พื้นที่บริเวณตลิ่งลำน้ำสายรองที่เกิดการวิบัติพังทลายของลาดดิน จึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์ประกอบกับข้อมูลสำรวจในพื้นที่ เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินตลิ่งลำน้ำโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ 2 โปรแกรมหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย แล้วนำมาพิจารณาข้อมูลเสนอแนะทางปฏิบัติเชิงวิศวกรรมในการป้องกันรักษาเสถียรภาพของลาดดิน เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ ในการศึกษาดำเนินงานวิจัยนี้จะเป็นรูปแบบเชิงวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจกับแหล่งข้อมูล โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยดังภาพ 2



ภาพ 2 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

2. เก็บรวบรวมข้อมูลน้ำ จากการปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำแม่ปืมและปริมาณน้ำฝนในเขตพื้นที่อำเภอแม่ใจ จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ สถานีตรวจอากาศ จังหวัดพะเยา เพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่ไหลผ่านลำน้ำแม่ปืมแล้วนำไปพิจารณาหาระดับน้ำ

3. รวบรวมข้อมูลดินจากหลุมเจาะสำรวจดิน บริเวณตลิ่งลำน้ำเพื่อนำมากำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินที่จะทำการวิเคราะห์

[illegible]

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ได้ทราบถึงลักษณะการวิบัติของเสถียรภาพลาดดินและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพของลาดดินที่เกิดขึ้นในจุดวิบัติต่าง ๆ
2. สามารถนำข้อมูลเสถียรภาพลาดดินที่วิเคราะห์ไปเป็นแนวทางคาดการณ์เสถียรภาพของลาดดินพื้นที่อื่น ๆ ได้
3. สามารถนำเสนอแบบรูปรายการก่อสร้าง แนวทางในการป้องกันการวิบัติพังทลายของลาดดินโดยจัดทำแบบรูปรายการก่อสร้างเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาลาดดินที่วิบัติได้



บทที่ 2

เอกสารและวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความเป็นมาและความสำคัญของลำน้ำแม่ปืม

ลำน้ำแม่ปืมเป็นลำน้ำที่ไหลผ่านเขตตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยาและเขตตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา แล้วไหลไปรวมกับลำน้ำอิงก่อนไหลลงสู่กว๊านพะเยา ในปี พ.ศ. 2532 พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราชบรมนาถบพิตร ทรงเล็งเห็นถึงคุณประโยชน์ของการของแก้มปัญหาการขาดแคลนน้ำ ทรงมีพระราชดำริให้ดำเนินการสร้าง อ่างเก็บน้ำแม่ปืม ไว้กักเก็บน้ำปล่อยน้ำผ่านลำน้ำแม่ปืม เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำที่นำมาใช้อุปโภคบริโภคและทำการเกษตร จึงทำให้ลำน้ำแม่ปืมมีน้ำไหลผ่านอยู่ตลอดทั้งปีเพราะเป็นแหล่งต้นน้ำที่รับการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ส่งผลต่อวิถีชีวิตของผู้ที่อยู่อาศัยอุปโภคบริโภคและผู้ประกอบอาชีพเกษตรกรรมน้ำใช้ได้อย่างเพียงพอตามความต้องการ

สภาพแวดล้อมบริบททั่วไปและแหล่งที่อยู่อาศัยบริเวณลำน้ำแม่ปืม การปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ลงสู่ลำน้ำแม่ปืมเป็นครั้งคราวกับปริมาณน้ำฝนที่ตกตามฤดูกาล ส่งผลให้การไหลของน้ำไม่มีความต่อเนื่อง องค์ประกอบจากปริมาณน้ำที่ท่วมสูงฉับพลันและน้ำลดลงฉับพลัน จึงก่อให้เกิดการทรุดการพังทลายของลาดดินได้ ทั้งนี้ยังมีถนนสัญจรบริเวณเรียบลำน้ำแม่ปืมที่ใช้ในการเดินทาง อาคารบ้านเรือนของประชาชนที่ปลูกเรียบลำน้ำแม่ปืม ในบางช่วงเวลาลำน้ำแม่ปืมขึ้นขึ้น กักเก็บน้ำในลำน้ำแม่ปืมได้น้อยลง น้ำขัง น้ำนิ่ง ทำให้เกิดวัชพืชขึ้นในลำน้ำ เช่น ผักตบชวา จอก แหน เถาวัลย์ หญ้า เศษใบไม้ที่ร่วงหล่นลงวัชพืชเน่าเสีย เกิดแก๊ส น้ำเน่าเหม็น สกปรก ไม่เหมาะแก่การอุปโภคบริโภค และยังเกิดปัญหาประชาชนที่อาศัยอยู่ริมลำน้ำแม่ปืม ลักลอบนำขยะจากครัวเรือน ไปเททิ้งในลำน้ำแม่ปืม หรือตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้หน้าน้ำเสียสกปรก จึงส่งไปถึงภาคเกษตรกรรมที่ใช้ประโยชน์จากลำน้ำแม่ปืม

เขตการปกครองของตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา มีหมู่บ้านอยู่ในเขตปกครอง 7 หมู่บ้าน ได้แก่ หมู่ที่ 1 บ้านแม่ใจปิง หมู่ที่ 4 บ้านสันต้นหมื่น หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้ หมู่ที่ 7 บ้านทุ่งโป่งห้วยลึก หมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ และหมู่ที่ 9 บ้านทุ่งรวงทอง เขตหมู่บ้านที่ประชากรอาศัยอยู่บริเวณริมตลิ่งลำน้ำแม่ปืม คือ หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้ หมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ หมู่ที่ 9 บ้านทุ่งรวงทอง ข้อมูลความหนาแน่นของประชากรที่อยู่ในการกำกับดูแล มีครัวเรือนทั้งสิ้น 497 ครัวเรือน มีจำนวนประชากร รวมทั้งสิ้น 2,062 คน ข้อมูลแยกจำนวนประชากร ดังตาราง 2 มีความหนาแน่นประชากรเฉลี่ย 305.176 คนต่อตารางกิโลเมตร ในส่วนของประชากรที่อาศัยอยู่บริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืม มีจำนวนประชากร 1,424 คน ความหนาแน่นประชากรเฉลี่ย 210.75 คนต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งจะมี

ประชากรอาศัยบริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมหลัก ๆ อยู่ 2 หมู่บ้าน ได้แก่ หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้ และหมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ

ตาราง 2 ข้อมูลหมู่บ้านและประชากรที่อยู่ในเขตปกครองเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา

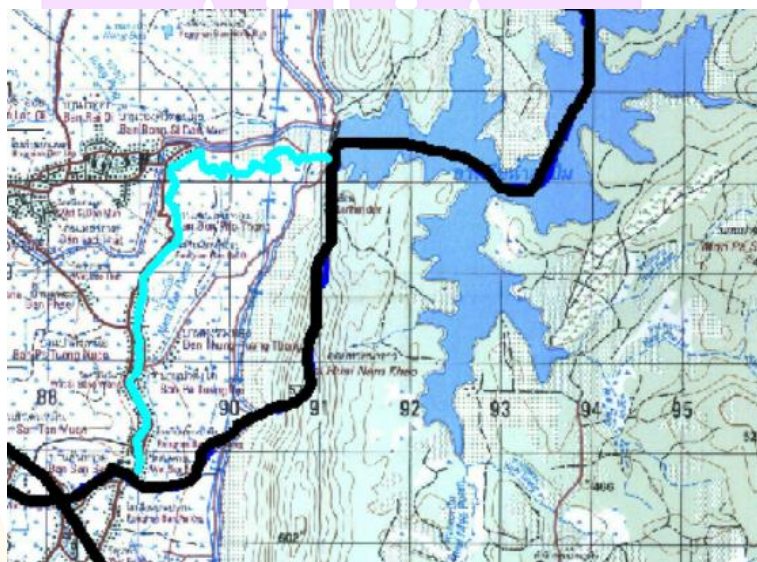
หมู่ที่	ชื่อหมู่บ้าน	ประชากร			ครัวเรือน	ประชากรผู้มีสิทธิเลือกตั้ง	
		ชาย	หญิง	รวม		เขต 1	เขต 2
1	แม่ใจปง	76	81	157	42	157	
4	บ้านสันต้นมีน	77	90	167	42	167	
5	บ้านศรีดอนแก้ว	27	30	57	15	57	
6	บ้านป่าตึงใต้	262	289	551	119	261	290
7	บ้านทุ่งโป่ง-ห้วยลึก	125	132	257	55	257	
8	บ้านป่าตึงเหนือ	326	334	660	170	166	494
9	บ้านทุ่งรวงทอง	106	107	213	54		213
รวม		999	1,063	2062	497		
รวมประชากรผู้มีสิทธิเลือกตั้ง (คน)						2,062	

ที่มา: สำนักทะเบียนอำเภอแม่ใจ ณ วันที่ 13 มกราคม 2563

ในปัจจุบันบริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมเริ่มมีบ้านเรือน อาคารสาธารณะประโยชน์ แหล่งชุมชน พื้นที่ทางการเกษตรขยายเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการใช้น้ำจากลำน้ำแม่ปืมเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีเขตพื้นที่ตำบลใกล้เคียงที่สูบกักเก็บน้ำจากลำน้ำแม่ปืมไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่สุกและตำบลแม่ปืม ทำให้ความต้องการใช้น้ำจากลำน้ำแม่ปืมเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการใช้น้ำจากลำน้ำแม่ปืมเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการบำรุงรักษาทางน้ำโดยมีการขุดลอกลำน้ำแม่ปืม เพื่อปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืมมีความคล่องตัวและรองรับปริมาณน้ำได้เพิ่มขึ้น ส่วนดินที่ทำการขุดลอกใช้เป็นดินถมบริเวณตลิ่งลำน้ำ ส่งผลให้ปัจจุบันตลิ่งลำน้ำแม่ปืมมีการวิบัติพังทลายของลาดดินหลายจุดพื้นที่ ซึ่งในอดีตมีการวิบัติพังทลายของลาดดินอยู่บางพื้นที่แต่ไม่ได้มีความรุนแรงเหมือนปัจจุบัน ทำให้ผู้ที่อยู่อาศัยอุปโภคบริโภคได้รับผลกระทบโดยตรง ถนนสาธารณะเสียหาย บ้านเรือนบางหลังในพื้นที่เกิดการทรุดตัวได้รับความเสียหาย

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืม

ลำน้ำแม่ปืมเป็นแม่น้ำที่มีการไหลของน้ำตลอดทั้งปี ได้รับการปล่อยส่งน้ำจาก อ่างเก็บน้ำแม่ปืม เนื้อที่ทั้งหมดประมาณ 5,000 ไร่ เป็นโครงการพระราชดำริดำเนินการสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2532 เพื่อกักเก็บน้ำใช้แก้ไขปัญหาการอุปโภคบริโภคกรมไปถึงภาคการเกษตร ลำน้ำแม่ปืม เป็นแหล่งต้นน้ำที่ไหลผ่านหมู่บ้านชุมชน โดยไหลไปบรรจบกับลำน้ำอิง ไหลลงสู่กว๊านพะเยาซึ่งมีพื้นที่ชุมชนและพื้นที่การเกษตรของประชาชน ที่ใช้ประโยชน์จากลำน้ำแม่ปืม ลำน้ำแม่ปืมก่อนลงสู่กว๊านพะเยา ทั้งสิ้น 7 ตำบล ได้แก่ ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่ใจ ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจตำบลแม่ปืม ตำบลบ้านใหม่ ตำบลบ้านต้า และตำบลบ้านต๋อม อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ในขอบเขตพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูลหมู่บ้าน ชุมชนที่ลำน้ำแม่ปืมไหลผ่าน (สำนักงานแขวงทางหลวงชนบทพะเยา, 2564) ดังภาพ 3



ภาพ 3 แนวเส้นทางลำน้ำปืมเขตพื้นที่รับผิดชอบของเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา

ที่มา: แขวงทางหลวงชนบทพะเยา, 2019

สภาพทั่วไปปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืมนอกจากจะได้รับปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืมแล้วยังมีปริมาณน้ำฝนที่ตกตามฤดูกาล ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำไหลผ่านลำน้ำอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งปริมาณน้ำฝนบางช่วงเวลาส่งผลถึงระดับน้ำที่กักเซาะในรูปแบบเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างกระชั้นชิด ยิ่งถ้าอ่างเก็บน้ำแม่ปืมไม่สามารถกักเก็บน้ำได้เพียงพอส่งผลกระทบท่อระดับน้ำในลำน้ำแม่ปืมเพิ่มขึ้นไปอีกด้วย

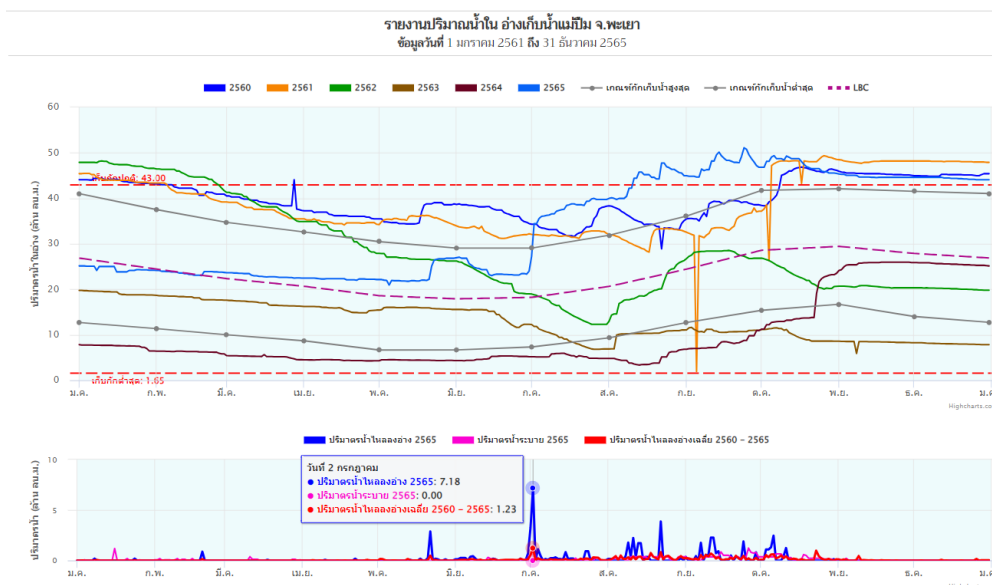
สภาพอ่างเก็บน้ำแม่ปืมมีปริมาณน้ำกักเก็บอยู่ที่ 43 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยสภาพอ่างมีเขื่อนดินสูงเฉลี่ย 19.30 เมตร ความยาวเขื่อนดิน 450 เมตร ฐานเขื่อนที่กว้างมากที่สุด 150 เมตร หลังเขื่อนอยู่ที่ 8 เมตร ส่งน้ำให้พื้นที่เพาะปลูกได้ 45,650 ไร่ ในเขตพื้นที่ 5 ตำบล คือ ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่ใจ ตำบลป่าแฝก ตำบลแม่สุก และตำบลแม่ปืม ในพื้นที่ 3 อำเภอ คือ อำเภอแม่ใจ อำเภอเมืองพะเยา และอำเภอกวน จังหวัดเชียงราย บางส่วน โดยแยกพื้นที่ส่งน้ำของคลองแต่ละสาย ดังนี้ 1) คลองส่งน้ำสาย 1RP-RMC ยาว 4.725 กิโลเมตร ส่งน้ำพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า อำเภอแม่ใจ พื้นที่ส่งน้ำรวม 1,550 ไร่ 2) คลองส่งน้ำสาย 1R-RMC ยาว 16.550 กิโลเมตร. ส่งน้ำพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า ตำบลป่าแฝก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา และอำเภอกวน จังหวัดเชียงรายบางส่วน พื้นที่ส่งน้ำรวม 12,300 ไร่ 3) คลองส่งน้ำสาย 1L-1R-RMC ยาว 1.420 กิโลเมตร ส่งน้ำพื้นที่ตำบลป่าแฝก อำเภอแม่ใจ พื้นที่ส่งน้ำรวม 1,150 ไร่ 4) คลองส่งน้ำสาย LMC ยาว 10.237 กิโลเมตร ส่งน้ำพื้นที่ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจและตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จ.พะเยา พื้นที่ส่งน้ำ 12,800 ไร่ 5) คลองส่งน้ำสาย ยาว 14.116 เมตร

ส่งน้ำพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่ใจ ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ และตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา สภาพลักษณะลำน้ำแม่ปืมตามธรรมชาติลักษณะลำน้ำในปัจจุบัน มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ทางธรรมชาติ เช่นเดียวกับแม่น้ำ ลำน้ำในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะเวลา ความลาดชันของพื้นที่ ปริมาณกระแสน้ำ ในส่วนของลำน้ำแม่ปืม มีพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำคล้ายเหมือนขามไค้ง ดังภาพ 4 อยู่ในพื้นที่ที่เป็นที่ราบน้ำท่วมถึง ความยาวของทางน้ำมีความโค้งไปมา บางจุดพื้นที่ลักษณะความโค้งลำน้ำคล้ายโค้งตัวด บางจุดพื้นที่บริเวณลำน้ำโค้งตัวดอาจมีการเปลี่ยนระดับพื้นที่องน้ำจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน น้ำจึงเปลี่ยนพฤติกรรมมากัดกร่อนในแนวตั้งคล้ายกับการกัดกร่อนต้นน้ำบนภูเขา น้ำจะกลับมากวัดแกว่งและกัดกร่อนในแนวราบอีกครั้ง



ภาพ 4 ลักษณะลำน้ำแม่ปืมช่วงปริมาณน้ำสูง

วิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณของน้ำในลำน้ำแม่ปืมจากแหล่งต่าง ๆ ข้อมูลระดับน้ำจากการสำรวจลาดดินริมตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ข้อมูลที่นำมาใช้เทียบวัดระดับน้ำ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561-2565 ซึ่งการขึ้นลงของระดับน้ำมีช่วงระดับน้ำที่แตกต่างกันไม่มากในแต่ละปี ยังอยู่ในช่วงการขึ้นลงของน้ำใกล้เคียงกัน และระดับสูงสุดไม่เกิน 2.50 เมตร ข้อมูลปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืมเกิดจากปริมาณน้ำปล่อยจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่เกิดขึ้นโดยปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม (กรมชลประทาน ส่วนระบบสารสนเทศและภูมิสารสนเทศ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมชลประทาน, 2565) ดังภาพ 5 และปริมาณน้ำฝนตามฤดูกาลเป็นหลัก (สถานีตรวจอากาศพะเยา ส่วนสารสนเทศอุตุนิยมวิทยา ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2565) เป็นแหล่งปริมาณน้ำหลักที่นำมาซึ่งข้อมูลน้ำของระดับขึ้นลงในลำน้ำแม่ปืมใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในดิน (Seepage analysis) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ได้จากกรมชลประทาน ตารางสรุปสภาพน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่ปืม แหล่งที่ตั้งอยู่ที่ทำการอุทยานแห่งชาติแม่ปืม ตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา พื้นที่ผิวน้ำ 5,100 ไร่ ห่างจากตัวจังหวัดพะเยามาทางจังหวัดเชียงราย ประมาณ 23 กิโลเมตร โดยการนำสถิติข้อมูลการปล่อยน้ำรายเดือนและรายปีย้อนหลังของเขตอำเภอแม่ใจ มาเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในลำน้ำแม่ปืม ข้อมูลจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืมที่ใช้ตั้งแต่ พ.ศ. 2561-2565 ข้อมูล 5 ปีย้อนหลัง



ภาพ 5 กราฟแสดงปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ช่วงปี พ.ศ. 2560-พ.ศ. 2565

ที่มา: กรมชลประทาน, ม.ป.ป.

ในส่วนของการคำนวณน้ำที่เกิดจากฝนตกตามฤดูกาล ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝน จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ สถานีตรวจอากาศ จังหวัดพะเยา ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561-พ.ศ. 2565 เป็นข้อมูล 5 ปีย้อนหลัง โดยการนำสถิติข้อมูลน้ำฝนรายปีมาเฉลี่ยในเขตพื้นที่อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

การวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากแหล่งข้อมูลอ่างเก็บน้ำแม่ปืมและข้อมูลปริมาณน้ำฝนจังหวัดพะเยา จะนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำไหลลงสู่ลำน้ำปืมระดับน้ำที่ขึ้นลงของน้ำในลำน้ำแม่ปืม โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำหลากผ่านลำน้ำ โดยวิธี Muskingum เป็นกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำหลาก (Flood Routing) วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำหลาก ใช้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นน้ำโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ ตามเวลาและบริบทสภาพพื้นที่ ซึ่งเป็นวิธีที่แสดงให้เห็นถึงระดับขึ้นลงของน้ำและเวลาที่ปริมาณน้ำสูงสุดใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง วิธีการการคำนวณน้ำท่วม (flood routing) สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ การคำนวณเส้นทางอ่างเก็บน้ำ (reservoir routing) และการคำนวณกระแสน้ำ (streamflow routing) สำหรับการคำนวณเส้นทางอ่างเก็บน้ำนั้น เป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณการเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ ต่อรูปร่างของกราฟน้ำท่าที่ไหลเข้ามาสู่อ่าง และไหลออกจากอ่างเก็บน้ำในเวลาต่อมา สามารถหาอัตราการไหลออกสูงสุด และระดับ

น้ำสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบฝายน้ำล้น ท่อระบายน้ำ อาคารสลายพลังงาน และโครงสร้างทางชลศาสตร์ต่าง ๆ ได้ควบคุม ป้องกัน หรือบรรเทาอุทกภัยที่เกิดจากพายุฝน ซึ่งสามารถ คำนวณการผันน้ำล่วงหน้าได้ ส่วนการคำนวณกระแสหน้านั้น เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกราฟน้ำท่าของเส้นทางคลื่นน้ำ เมื่อเคลื่อนตัวไปด้านท้ายน้ำ

ในส่วนงานวิจัยนี้ใช้หลักการการคิดการเคลื่อนตัวของน้ำหลากในลำน้ำ (Channel Routing) เป็นวิธีการหาระดับน้ำและอัตราการไหลที่หน้าตัดต่างๆทางด้านท้ายน้ำของลำน้ำ สามารถช่วยคาดการณ์ปริมาณน้ำท่วมได้ นำไปสู่การออกแบบคันป้องกันน้ำท่วมได้ (Levee) การหาปริมาตรเก็บกักในลำน้ำโดยวิธีของ Muskingum ดังสมการที่ 1 ถึง สมการที่ 7

$$S = K[xI + (1-x)Q] \quad (1)$$

เมื่อ

S คือ ปริมาตรเก็บกัก

K คือ ค่าคงที่ของเวลาเก็บกัก(เวลา)

x คือ สัดส่วนการไหลเข้าออก

$x = 0.0$ คือ S จะขึ้นอยู่กับ Q เท่านั้น

$x = 0.5$ คือ S จะขึ้นอยู่กับ I และ Q ในอัตราส่วนที่เท่าๆกัน

$x = 1$ คือ S จะขึ้นอยู่กับ I เท่านั้น

I คือ อัตราการไหลเข้า Q คือ อัตราการไหลออก

ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำ

$$S = KQ + Kx(I - Q) \quad (2)$$

ปริมาตรเก็บกักที่เวลา j

$$S_j = K[xI_j + (1-x)Q_j] \quad (3)$$

ปริมาตรเก็บกักที่เวลา $j+1$

$$S_{j+1} = K[xI_{j+1} + (1-x)Q_{j+1}] \quad (4)$$

$$\Delta S = S_{j+1} - S_j = K[xI_{j+1} + (1-x)Q_{j+1}] - K[xI_j + (1-x)Q_j] \quad (5)$$

$$S_{j+1}S_j = \left(\frac{I_j + I_{j+1}}{2}\right)\Delta t - \left(\frac{Q_j + Q_{j+1}}{2}\right)\Delta t \quad (6)$$

สมการที่ 5 = สมการที่ 6 จัดรูปใหม่ได้

$$Q_{j+1} = C_1I_j + C_2I_{j+1} + C_3Q_j \quad (7)$$

โดยที่

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_2 = \frac{Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$\text{แล้ว } C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

การวิเคราะห์ข้อมูลดิน

ลำน้ำแม่ปืมเป็นลำน้ำสายรองที่ได้รับการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืมเป็นหลัก เพื่อสาธารณะประโยชน์ต่าง ๆ การปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ลงสู่ลำน้ำแม่ปืมตามกำหนดการ ปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำแม่ปืมรวมกับกับปริมาณน้ำฝนที่ตกตามฤดูกาล ส่งผลให้การไหลของน้ำไม่มีความต่อเนื่อง องค์ประกอบจากปริมาณน้ำที่ท่วมสูงฉับพลันและน้ำลดลงฉับพลันจึงเกิดการทรุด การพังทลายของลาดดินได้ ตลอดทั้ง ช่วงลำน้ำแม่ปืมต้นเขิน กักเก็บน้ำในลำน้ำแม่ปืมได้น้อยลง น้ำขัง น้ำนิ่ง ทำให้เกิดวัชพืชขึ้นในลำน้ำ เช่น ผักตบชวา จอก แหน เถาวัลย์ หญ้า เศษใบไม้ที่ร่วงหล่นลง และวัชพืชเน่าเสีย ทำให้ต้องหาแนวทางแก้ไขปัญหาพืชรากที่เน่าเสียนี้ แล้วได้รับการอนุเคราะห์ ขุดลอกคลอง ดินที่ขุดลอกก็นำมาปรับแต่งลาดริมตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ในระยะยาวเนื่องด้วยมวลดินที่ถูก การขุดลอกมาปรับแต่งตลิ่งไม่ได้มีอนุภาคมวลดินที่เหนียวแน่น ตลิ่งที่ไม่มีความเชื่อมแน่นแล้ว มีลักษณะของดินเป็นดินทราย ทำให้การระบายน้ำของมวลดินความสามารถในการกักเก็บน้ำไม่ค่อยดี การยึดเหนี่ยวของมวลดินอาศัยแรงเสียดทานของมวลดิน ทำให้ตลิ่งด้านทานต่อการกัดเซาะของมวล น้ำได้ค่อนข้างน้อย จึงเกิดการพังทลายของหน้าดินตลิ่งลำน้ำ ลักษณะของตลิ่งลำน้ำแม่ปืมเป็นตลิ่ง แบบผสม ลักษณะของดินประกอบด้วยดินที่มีความเชื่อมแน่นและไม่มีความเชื่อมแน่น วางสลับตัว เป็นชั้น ๆ หรืออาจจะสลับกัน ทำให้ตลิ่งที่มีลักษณะประเภทนี้มีความต้านทานต่อการกัดเซาะของ มวลน้ำในระดับปานกลางขึ้นอยู่กับลักษณะของดินหรือตะกอนที่ผสม

ตัวอย่างข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินที่ทำการเจาะระบบประปาหมู่บ้าน ตั้งอยู่ในที่ สาธารณะประโยชน์หมู่บ้านใกล้เคียงบริเวณตลิ่งลำน้ำ (เทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา, 7 มกราคม 2551) ดังภาพ 6 โดยได้ทำการเจาะสำรวจได้ความลึกสูงสุดอยู่ที่ 9.45 เมตร



ภาพ 6 การเจาะสำรวจดินโครงการก่อสร้างระบบประปาหมู่บ้าน หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้

ที่มา: องค์การบริหารส่วนตำบลแม่ใจ, 2008

ชั้น A ดินชั้นนี้เริ่มจากผิวดินที่ทำการเจาะสำรวจ ลงไปถึงความลึกเฉลี่ย 2.50 เมตร ดินชั้นนี้ประกอบด้วยดิน ชนิด ทรายละเอียดมาก (SILTY VERY FINE SAND) โดยมี สีนํ้าตาลมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (RELATIVE DENSITY) ซึ่งตรวจวัดโดยใช้ช้อนแบ่งตัวอย่าง (SPLIT SPOON SAMPLE) มีค่าอยู่ในช่วงหลวมมาถึงปานกลาง (VERY LOOSE TO MEDIUM) ดินชนิดนี้จำแนกอยู่ในกลุ่ม SM-SP

ชั้น B ดินชั้นนี้เริ่มจากใต้ชั้น A ลงไปจนถึงก้นหลุมเจาะทดสอบ ที่ระดับความลึกเฉลี่ยประมาณ 9.45 เมตร ดินชั้นนี้ประกอบด้วยดินชนิด ดินเหนียว (SILTY CLAY) โดยมีดินแดง (LATERITES) แทรกปนอยู่ในชั้นล่างๆ มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ซึ่งตรวจวัดโดยใช้ ช้อนแยกตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วงแข็งถึงแข็งมาก (VERY STIF TO HARD) ดินชนิดนี้จำแนกอยู่ในกลุ่ม CL-ML, CL-SM

ระดับน้ำใต้ดินจะมีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ความต้านทานของมวลดิน เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินมีผลทำให้ค่านํ้าหนักของดิน (OVERBURDEN PRESSURE) ที่กดอยู่บนตัวอย่างดินที่ระดับแตกต่างกัน ดังนั้นการตรวจวัดระดับความลึกของค่าระดับน้ำใต้ดิน ในการเจาะสำรวจโครงการนี้อยู่ที่ 3.10 เมตร ซึ่งค่าระดับน้ำใต้ดินนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาลขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน การปล่อยน้ำจากอ่างแม่ปืม การไหลลงแม่น้ำ กักเก็บน้ำที่อยู่ใกล้บริเวณเจาะสำรวจ

ในการวิเคราะห์ชั้นดินต้องพิจารณาทางด้านเสถียรภาพและการทรุดตัวส่วนการคำนวณหา ค่าความต้านทาน ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในหลุมทดสอบ เมื่อมีน้ำฝนทำให้น้ำฝนซึมไหลลงไปในดิน ประมาณ 15%-20% ความต้านทานในแง่ของเสถียรภาพ เมื่อชั้นดินเป็น ดินที่ไม่มีความยึดเหนี่ยว ในที่นี้จะขอนำสูตรของ “TENG” ซึ่งได้รับการปรับปรุงจากสูตร TERZAGHI

$$Q_u = (N^z \times B \times R_w + 3(100 + N^z) \times R'_w) / 31 \text{ สำหรับขยายฐานราก}$$

$$Q_u = (N^z \times B \times R_w + 3(100 + N^z) \times D \times R'_w) / 50 \text{ สำหรับฐานรอง}$$

เมื่อ

Q_u คือ ความต้านทานประลัยของดิน ตัน/ตารางเมตร

N คือ จำนวนการแก้ไขการทดสอบการเจาะมาตรฐาน

B คือ ความกว้างของฐานราก เมตร

D คือ ความลึกของฐานราก

สำหรับ ดินที่ไม่มีความยึดแน่น ที่ทราบค่า ϕ สามารถหาค่าความต้านทานของดินจาก

$$Q_u = (q \times N_q \times R_w' + 0.5\gamma \times \gamma \times B \times N_\gamma \times R_w)$$

เมื่อ

Q_u คือ ความต้านทานประลัยของดิน ตัน/ตารางเมตร

q คือ ประสิทธิภาพของค่าความดัน , γD

γ คือ ความแน่นของมวลดิน ตัน/ตารางเมตร

B คือ ความกว้างของฐานราก เมตร

D คือ ความลึกของฐานราก เมตร

N_q, N_γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรับน้ำหนัก

R_w, R_w' คือ ผลกระทบเนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน

เมื่อดินเป็นดินที่ไม่มีความยึดเหนี่ยว ค่าความต้านทานประลัยของดินสามารถหาค่าได้

โดยใช้ การพัฒนาจากสูตรของ TERZAGH โดย สมมุติ ว่า $\phi = 0$ ดังนี้

$$Q_u = C_x \times N_c + \gamma D$$

เมื่อ

Q_u คือ ความต้านทานประลัยของดิน ตัน/ตารางเมตร

C คือ ค่าแรงเฉือนของดิน ตัน/ตารางเมตร

$$U_c / 2 \text{ หรือ } U_p / 2$$

N_c คือ ปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนัก

= 5.70 เมื่อเป็นฐานรับกำแพง

= 7.41 เมื่อเป็นฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลม

$= 5.70(1+0.3 B/L)$ เมื่อเป็นฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า

γ คือ ความแน่นของมลดิน ต้น/ลูกบาศก์เมตร

D คือ ความลึกของฐานราก เมตร

เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.00 จะได้ค่าความต้านทานปลอดภัยมีค่า

$$Q_a = Q_u / 3.00$$

ความต้านทานในแง่การทรุดตัว ในดินประเภท ดินที่ไม่มีความยึดแน่น สามารถหาความต้านทานความปลอดภัย โดยใช้สูตร TENG ซึ่งมีพื้นฐานจากกราฟความต้านทานของ TERZAGHI

$$Q_{an} = (3.5 \times (N - 3) \times [(B + 0.3) \times 2B]^2 \times R_w \times F_d \text{ สำหรับขยายฐานราก}$$

$$Q_{an} = 1.75 \times (N - 3) R_w \text{ สำหรับขยายฐานรองรับ}$$

เมื่อ

$$Q_{an} = \text{ความต้านทานปลอดภัยของดิน ต้น/ตารางเมตร}$$

N = จำนวนการปรับแก้การทดสอบมาตรฐาน

B = ความกว้างของฐานราก เมตร

R_w = ผลกระทบเนื่องจากตำแหน่งระดับน้ำใต้ดิน

$$F_d = (1 + D/B) < 2.00$$

การไหลของลำน้ำ ในลำน้ำแม่ตามสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติที่ส่งผลต่อลักษณะการพังทลายของตลิ่งลำน้ำแม่ ลักษณะของลำน้ำมีความโค้งไปมาบางช่วงมีความโค้งตัว (meandering channels) ลักษณะโค้งลำน้ำที่มีความคดเคี้ยว ตามหลักธรรมชาติ ทำให้มวลน้ำที่ไหลผ่านต้องโค้งคดเคี้ยวตัวไปมาตามลักษณะลำน้ำ ส่งผลให้บริเวณช่วงลาดดินตลิ่งแนวโค้งด้านนอกถูกกัดเซาะจากกระแสน้ำที่พัดผ่านมาในลำน้ำค่อนข้างมาก จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบพื้นที่ลาดดินตลิ่งลำน้ำหรือแม่น้ำเกิดการพังทลายได้สูง

การกัดเซาะที่เกิดขึ้นของลำน้ำ เป็นปัจจัยที่เกิดจากการไหลของมวลน้ำพัดผ่านหน้าลาดดินตลิ่งลำน้ำ การไหลของมวลน้ำมากกว่ากำลังแรงต้านทานของลาดดินตลิ่งลำน้ำก่อให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ หากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ากำลังเกินกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของเสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ ก็จะส่งผลกระทบต่อการพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ ทั้งนี้ในการกัดเซาะสามารถเกิดขึ้นได้บริเวณผิวลาดดินตลิ่งลำน้ำรวมถึงท้องน้ำบริเวณแนวฐานดินลาดดินตลิ่งลำน้ำ ซึ่งก็ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดินแล้วยังทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวิ่งของมวลน้ำรวมไปถึงการเพิ่มสูงขึ้นของตะกอนในลำน้ำอีกด้วย การกัดเซาะที่เกิดจากการการดำเนินชีวิตประจำวัน มีการใช้ประโยชน์จากลำน้ำ นำไปใช้ทางเกษตรกรรม อุปโภคบริโภค รวมถึงการสัญจรบริเวณตลิ่งลำน้ำ รถบรรทุกหนัก และบางช่วงลำน้ำมีน้ำขังนิ่ง ทำให้เกิดพวงวัชพืช เช่น ผักตบชวา จอก แหน เถาวัลย์ หย้า เศษใบไม้ที่ร่วงหล่นลงวัชพืชเน่าเสีย เกิดแก๊ส น้ำเน่าเหม็น สกปรก ไม่เหมาะสม

แก่การอุปโภคบริโภค และยังเกิดปัญหาประชาชนที่อาศัยอยู่ริมลำน้ำแม่ปืม ลักลอบนำขยะจากครัวเรือน ไปเททิ้งในลำน้ำแม่ปืม หรือตลิ่งลำน้ำแม่ปืมและระดับของน้ำลดลงกะทันหันแรงดันน้ำในดินค่อนข้างสูง ทำให้เสถียรภาพของลาดดินตลิ่งลำน้ำมีกำลังต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น น้ำหนักที่มากระทำบริเวณตลิ่งลำน้ำ เช่น ยานพาหนะที่ใช้ในการสัญจร เครื่องจักรที่ใช้ในงานก่อสร้าง ฯลฯ เป็นการเพิ่มแรงกระทำแรงกดในแนวดิ่ง มีผลต่อการเพิ่มการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ ดังภาพ 7



ภาพ 7 การพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ บ้านป่าตึงเหนือ หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

การตรวจการพังทลายของหน้าดินตลิ่งลำน้ำเบื้องต้น เสถียรภาพของลาดดินตลิ่งลำน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา ควรสำรวจตรวจสอบเบื้องต้นอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น โดยมีแนวทางในการตรวจสอบเบื้องต้นโดย ตรวจสอบข้อมูลการสำรวจในช่วงเวลาที่ผ่านมา หากตลิ่งลำน้ำที่เคยมีการพังทลายก็สันนิษฐานเบื้องต้นไว้ก่อนว่า ในตลิ่งลำน้ำลักษณะเดียวกัน อาจมีการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำในอนาคตได้ สังเกตระดับน้ำต่ำสุด กรณีที่ระดับน้ำลำน้ำต่ำกว่าทุก ๆ ปี ที่ผ่านมาหรือระดับลดลงต่ำผิดปกติกว่าทุกช่วงเวลา ก็จะมีความเสี่ยงต่อการพังทลายและการหลุดตัวของลาดดินตลิ่งลำน้ำมากขึ้น สังเกตการกัดเซาะของน้ำบริเวณลาดดินตลิ่งลำน้ำ หากมีการกัดเซาะที่ความลาดชันผิดปกติจากสภาพเดิม ก็จะมีแนวโน้มการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำมากขึ้น ช่วงฤดูฝนหรือพายุเข้าปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงดินจะทำให้ความดันน้ำ

ในโพรงดินเพิ่มมากขึ้น จนดินสูญเสียกำลังและถ้ามีกระแสน้ำไหลเชี่ยวยิ่งทำให้หน้าดินถูกกัดเซาะได้เร็วขึ้น ก็จะส่งผลต่อการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำแบบเฉียบพลันได้ ในช่วงที่ระดับน้ำลำน้ำค่อนข้างต่ำกว่าปกติ ควรหลีกเลี่ยงการสัญจรไปมาบริเวณตลิ่งลำน้ำ เพราะจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และตลิ่งจะทรุดตัวได้ง่ายขึ้นช่วงบริเวณตลิ่งลำน้ำฝั่งด้านนอก ผู้ที่อยู่อาศัยบริเวณนั้นควรระมัดระวังอย่างสูงเพราะมีโอกาสที่ตลิ่งลำน้ำจะพังทลายได้ง่าย การทบทวนวัสดุหรือการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนบริเวณริมตลิ่งลำน้ำ เป็นการเพิ่มน้ำหนักกระทำ ทำให้ตลิ่งมีความเสี่ยงต่อการพังทลายของลาดดินมากขึ้นและเสี่ยงต่อชีวิตทรัพย์สินอีกด้วย ตรวจสอบระบบประปาสุขาภิบาล บ่อเกรอะ บ่อซึม ได้ระบายน้ำลงสู่ลำน้ำหรือไม่ เพราะเป็นสาเหตุที่ทำให้ดินเกิดความทรุดตัวง่ายขึ้น กรณีพบรอยแยกหรือรอยร้าวของลาดดินตลิ่งลำน้ำ ให้สันนิษฐานเบื้องต้นไว้ก่อนว่าดินจะเกิดการวิบัติและการพังทลายของลาดดินในบริเวณนั้น

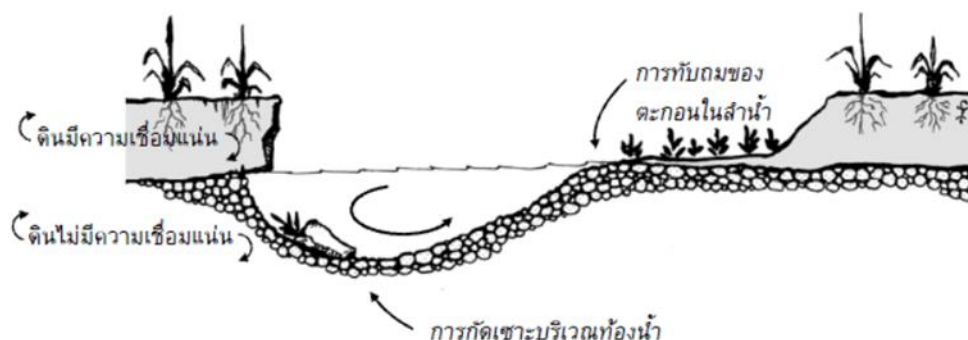
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำ

ปานทิพย์ มีถาวร และอภิรัฐ ปล้องมาก (2553) การพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำผลกระทบนอกเหนือจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักนั้น ยังมีองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำก็คือลักษณะของดินตลิ่งลำน้ำที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของแนวตลิ่งลำน้ำได้ ในรูปแบบของการพังทลายหรือการทรุดตัวของตลิ่งลำน้ำตามลักษณะของดิน จำแนกออกเป็น 3 ประเภท

ตลิ่งที่มีความเชื่อมแน่น เป็นตลิ่งที่มีลักษณะของดินเป็นดินเหนียวโดยส่วนใหญ่ตามคุณสมบัติทั่วไปดินเหนียวเป็นดินที่ประกอบด้วยอนุภาคแร่ที่ละเอียด มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินไม่มาก อนุภาคในดินนี้ถูกอัดแน่นเข้าด้วยกัน การกักเก็บน้ำได้ดี ทำให้ความชื้นและอากาศซึมเข้าไปได้ยาก ดินจะมีความเหนียวมากเมื่อสัมผัสความชื้น ทำให้ตลิ่งที่มีลักษณะดินคุณสมบัติของดินเหนียวต้านทานต่อการกัดเซาะของมวลน้ำได้ค่อนข้างดี

ตลิ่งที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เป็นตลิ่งที่มีลักษณะของดินเป็นดินทรายหรือดินร่วนตามคุณสมบัติทั่วไปของดินทรายและดินร่วน มีการระบายน้ำของมวลดินความสามารถในการกักเก็บน้ำไม่ค่อยดี การยึดเหนี่ยวของมวลดินอาศัยแรงเสียดทานของมวลดิน ทำให้ตลิ่งที่มีลักษณะดินคุณสมบัติของดินทรายหรือดินร่วนต้านทานต่อการกัดเซาะของมวลน้ำได้ค่อนข้างน้อย

ตลิ่งแบบผสม เป็นตลิ่งที่พบได้ทั่วไปลักษณะของดินประกอบด้วยดินที่มีความเชื่อมแน่นและไม่มีความเชื่อมแน่น วางสลับตัวเป็นชั้น ๆ หรืออาจจะสลับกัน ทำให้ตลิ่งที่มีลักษณะประเภทนี้มีความต้านทานต่อการกัดเซาะของมวลน้ำในระดับปานกลางขึ้นอยู่กับลักษณะของดินหรือตะกอนที่ผสม ดังภาพ 8



ภาพ 8 แสดงตัวอย่างรูปตัดของโค้งลำน้ำที่มีตลิ่งเป็นแบบผสม

ที่มา: กรมชลประทาน, 2017

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการพังทลายของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำ ตามกลไกทางธรรมชาติของลำน้ำจะมีการรักษาเสถียรภาพให้เกิดสมดุล ในระบบธรรมชาติมีการแบ่งประเภทของลักษณะการไหลของน้ำตามภูมิประเทศอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบก็มีผลถึงระดับน้ำ การไหลของน้ำและการกัดเซาะของมวลน้ำ รวมไปถึงการสะสมตัวของตะกอนในลำน้ำหรือแม่น้ำนั้น ๆ แตกต่างกันไป

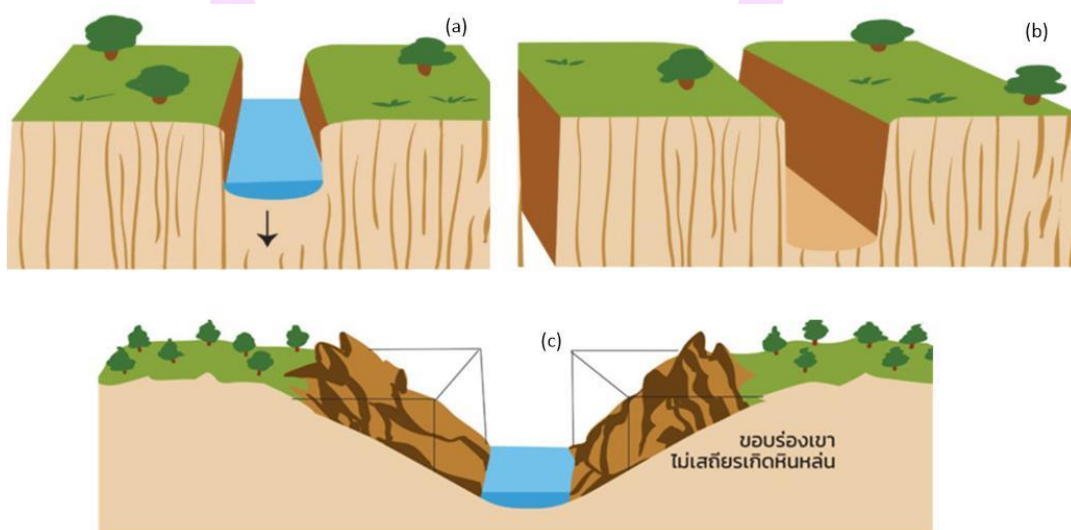
การไหลของลำน้ำในสมดุลของธรรมชาติตามกฎหมายแรงดึงดูดของโลกน้ำจะไหลจากพื้นที่สูงลงสู่พื้นที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ความเร็วของกระแสน้ำก็ขึ้นอยู่กับความลาดเอียง ลักษณะภูมิประเทศ ระดับน้ำและสภาพแวดล้อมภูมิอากาศ ส่วนรูปแบบการไหลของลำน้ำก็แบ่งออกแบ่ง 4 ประเภท

ลำน้ำแบบตรง (straight channels) มีรูปร่างคล้ายแนวเส้นตรง แต่ค่อนข้างหาได้ยากในธรรมชาติ ในงานก่อสร้างลักษณะจะเป็นรางระบายน้ำ และโดยธรรมชาติของลำน้ำที่จะมีระดับใต้ท้องน้ำให้ใกล้เคียงกับระดับน้ำอ้างอิง (base level) ที่ระบบลำน้ำนั้นสิ้นสุดหรือไหลออก ส่วนใหญ่ระดับน้ำอ้างอิงมักจะเทียบได้กับระดับน้ำทะเลปานกลาง (mean sea level) ดังภาพ 9 ดังนั้นกระบวนการกัดกร่อนในบริเวณต้นน้ำจะเป็นการกัดกร่อนในแนวตั้ง (downcutting) เป็นหลัก ทำให้ลำน้ำบริเวณต้นน้ำนั้นโดยส่วนใหญ่จะไหลค่อนข้างตรง และร่องน้ำมีลักษณะเป็นหุบเหวลึก (canyon) ดังภาพ 10



ภาพ 9 รูปบนแสดงรูปตัดขวางลักษณะลำน้ำตรงและรูปล่างแสดงลักษณะลำน้ำตรงในธรรมชาติ

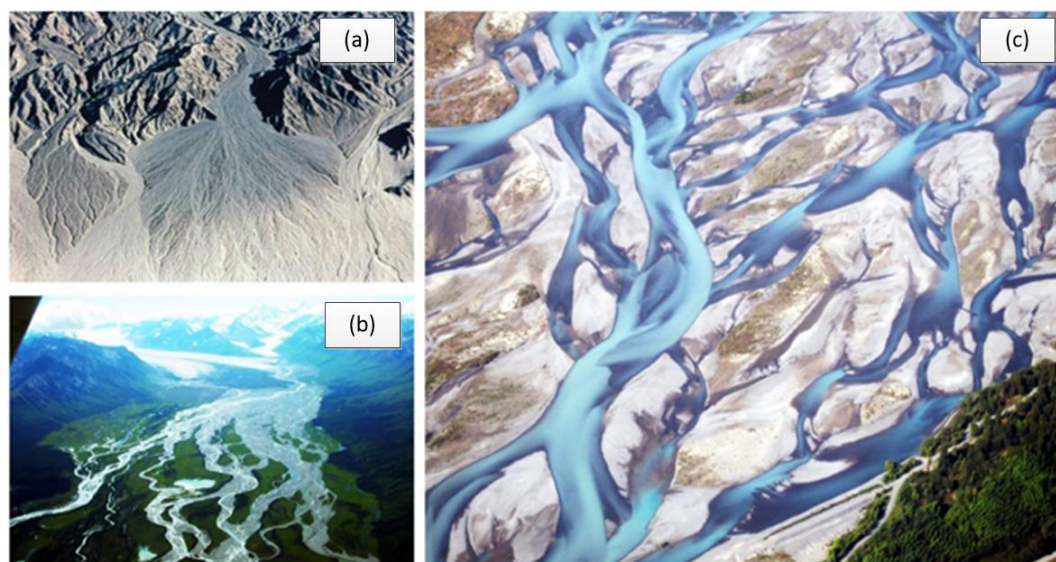
ที่มา: สันติ ภัยหลบลี้, 2021



ภาพ 10 ลักษณะลำน้ำ (a) ลำน้ำกัดกร่อนเขาร่องเขาแนวตั้ง(downcutting), (b) ลำน้ำเปลี่ยนแปลงเป็นร่องหุบเขาลึก(canyon), (c) ลำน้ำเปลี่ยนแปลงเป็นรูปลักษณะตัววี (V-Shaped valley)

ที่มา: สันติ ภัยหลบลี้, 2021

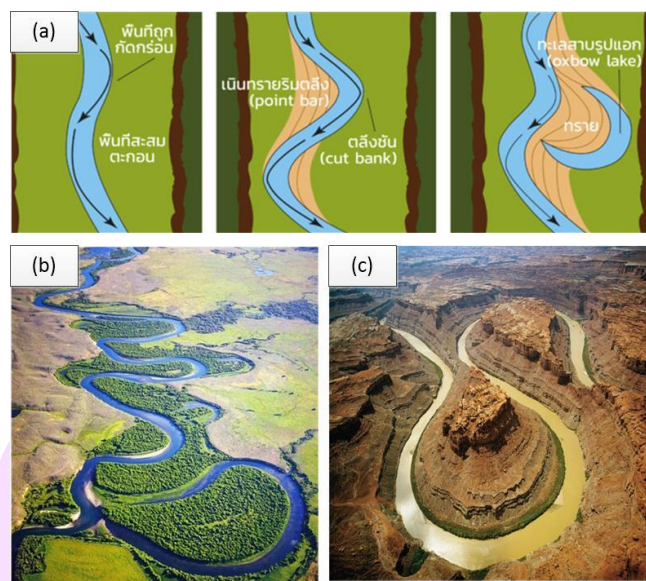
ลำน้ำประสานสาย (anastomosing channels) มีร่องลำน้ำหลายร่องน้ำมีแนวตลิ่งลำน้ำที่มั่นคง คั่นระหว่างกระแสน้ำกับพื้นที่ที่เป็นที่ราบน้ำท่วมถึง และที่ลุ่มหลังคันดิน (backswamp) ทำให้แม่น้ำมีการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยมาก ตะกอนมีลักษณะเกาะติดกันโดยมีรากไม้ช่วยยึดตะกอน ตะกอนที่พบมีขนาดละเอียดมาก และพอกตัวอยู่หนาในร่องลำน้ำเดียว ดังภาพ 11



ภาพ 11 ลักษณะลำน้ำ (a) ธารน้ำประสานสายช่วงต้นทาง เกิดบริเวณเนินตะกอนรูปพัดที่ธารน้ำเพิ่งไหลออกมาจากร่องเขา, (b) ภาพมุมสูงธารน้ำประสานสายที่ต่อมาจากร่องเขา และเนินตะกอนรูปพัด, (c) ธารน้ำประสานสายระยะใกล้

ที่มา: สันติ ภัยหลบลี้, 2021

ลำน้ำโค้งตัว (meandering channels) มีรูปร่างโค้งตัวไปมา มีตลิ่งที่มีความมั่นคงมากกว่าทางน้ำแบบเปี้ยว เพราะมีการสะสมตัวบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง (floodplain) ที่หนากว่ามีต้นไม้หรือพืชขึ้นปกคลุมมากกว่า มีปริมาณตะกอนที่เข้ามาคงที่และเป็นบริเวณที่มีความชันน้อย ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าทางน้ำแบบเปี้ยว ลักษณะตะกอนที่แทรกอยู่มักจะถูกล้อมรอบด้วยตะกอนที่มีขนาดละเอียดกว่า ดังภาพ 12



ภาพ 12 ลักษณะลำน้ำ (a) รูปการณ์กวัดแกว่งของลำน้ำแบบโค้งตัว, (b) ลำน้ำโค้งตัว, (c) ลำน้ำโค้งตัวร่องลึก,

ที่มา: สันติ ภัยหลบลี้, 2021

ลำน้ำแบบเปีย (braided channels) มีร่องน้ำเพียงร่องน้ำเดียว และประกอบด้วยสันทรายกลางแม่น้ำ (braid bar) มีตลิ่งลำน้ำที่ไม่มั่นคง ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและถูกกัดเซาะได้ง่ายกว่าแม่น้ำชนิดอื่น ทางน้ำจะดูเหมือนไขว้กันไปมา มีปริมาณตะกอนที่เข้ามาในพื้นที่สูงโดยพื้นที่ที่เกิดการสะสมตัวแบบนี้มีความชันมาก ทำให้เกิดการกัดกร่อนสูง การเคลื่อนย้ายของตะกอนในแนวระนาบทำให้ได้เป็นชั้นทราย (หรือชั้นกรวด) ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหรือเป็นลิ้ม ดังภาพ 13



ภาพ 13 แม่น้ำไวมาคาริรี (Waimakariri) ในประเทศนิวซีแลนด์ ตัวอย่างทางน้ำแบบเปีย

ที่มา: Wikipedia, 2006

การกัดเซาะที่เกิดขึ้นของลำน้ำ เป็นปัจจัยที่เกิดจากการไหลของมวลน้ำพัดผ่านหน้าลาดดินตลิ่งลำน้ำ การไหลของมวลน้ำมากกว่ากำลังแรงต้านทานของลาดดินตลิ่งลำน้ำก่อให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ หากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ากำลังเกินกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของเสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ ก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของแนวลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ ทั้งนี้ในการกัดเซาะสามารถเกิดขึ้นได้บริเวณผิวลาดดินตลิ่งลำน้ำรวมถึงท้องน้ำบริเวณแนวฐานดินลาดดินตลิ่งลำน้ำ ซึ่งก็ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดินแล้วยังทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวิ่งของมวลน้ำรวมไปถึงการเพิ่มสูงขึ้นของตะกอนในลำน้ำอีกด้วย สาเหตุของการกัดเซาะตลิ่งลำน้ำ ได้แก่

ลักษณะโค้งลำน้ำที่มีความแคบ ตามหลักธรรมชาติ ลำน้ำหรือแม่น้ำที่มีความโค้งแคบไปมา ดังภาพ 14 ทำให้มวลน้ำที่ไหลผ่านต้องโค้งคดเคี้ยวไปตามลักษณะลำน้ำหรือแม่น้ำนั้น ๆ ส่งผลให้บริเวณช่วงลาดดินตลิ่งแนวโค้งด้านนอกถูกการกัดเซาะจากกระแสน้ำที่พัดผ่านมาในลำน้ำค่อนข้างมาก จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ลาดดินตลิ่งลำน้ำหรือแม่น้ำเกิดการพังทลายได้สูง



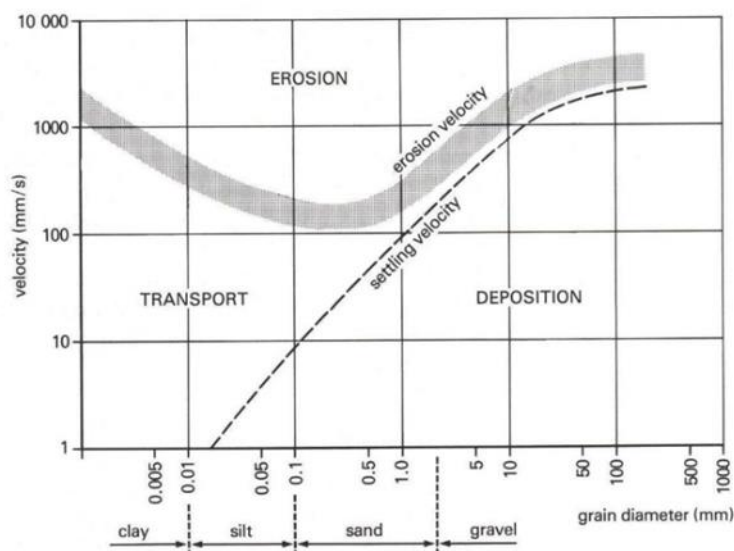
ภาพ 14 ลักษณะการกัดเซาะในโค้งลำน้ำที่คดเคี้ยว

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง

การไหลพัดผ่านของกระแสน้ำที่มีความเร็วและแรง ดังภาพ 15 จะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนบริเวณลาดดินตลิ่งลำน้ำมากขึ้น ทำให้เสถียรภาพดินเกิดการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ ดังภาพ 16 กราฟความเร็วของกระแสน้ำที่ก่อให้เกิดการพังทลายของหน้าดิน



ภาพ 15 ความเร็วกระแสน้ำในลำน้ำแม่ปืม หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา



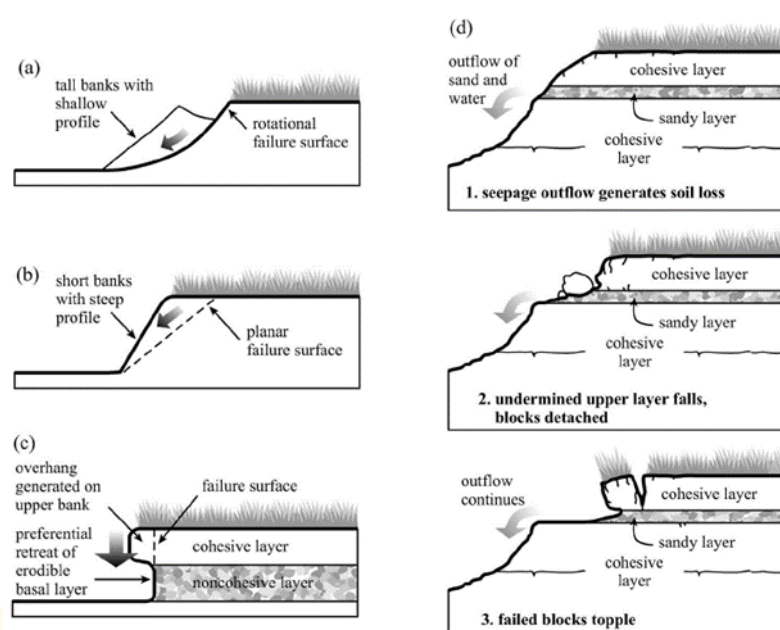
ภาพ 16 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของกระแสน้ำที่ก่อให้เกิดการพังทลายของหน้าดิน
ต่อคุณสมบัติของดิน

ที่มา: Hjulström curve, 2013

การขาดเสถียรภาพทางเทคนิคธรณี เกิดจากเสถียรภาพของลาดดินตลิ่งลำน้ำมีกำลังต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ การขาดเสถียรภาพที่ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ การลดระดับของน้ำกะทันหัน แรงดันน้ำในดินค่อนข้างสูง กำลังต้านทานแรงเฉือนในดินลดลง บริเวณลาดดินตลิ่งลำน้ำที่มีชั้นดินทราย อาจเกิดแรงดันน้ำในดินค่อนข้างสูง จนเกิดการกัดเซาะเป็นโพรง รวมถึงบริเวณหน้าดินที่มีความอ่อนนุ่ม การไหลผ่านแทรกซึมของน้ำลงดิน ทำให้มวลดินมีความหลวมไม่มีความยึดเหนี่ยวของมวลดินที่แข็งแรง มีความเสี่ยงต่อการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ ลาดดินตลิ่งลำน้ำที่เป็นชั้นดินทรายแล้วมีความลาดชันสูงกว่าธรรมชาติไม่ว่าจะเกิดปัจจัยใดก็ตาม ทำให้ขาดเสถียรภาพของแรงตึงผิวลาดดินตลิ่งลำน้ำ ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำได้ น้ำหนักที่มากกระทำบริเวณตลิ่งลำน้ำ เช่น ยานพาหนะที่ใช้ในการสัญจร เครื่องจักรที่ใช้ในงานก่อสร้าง ฯลฯ เป็นการเพิ่มแรงกระทำแรงกดในแนวตั้ง มีผลต่อการเพิ่มการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำได้

ลักษณะรูปแบบการพังทลายการศึกษาลักษณะการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ มีหลายรูปแบบ ซึ่งเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ (Imanshoar, et al., 2012) ได้แบ่งรูปแบบจากการศึกษาเชิงทดลอง การกัดเซาะผิวลาดดินบริเวณตลิ่ง โดยสาเหตุหลักของรูปแบบการพังทลายเกิดจากการกัดเซาะ

เกิดจากการซึมผ่านของมวลน้ำในอนุภาคของมวลดินจนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของลาดดิน ดังภาพ 17 (a)-(d) กรณีในการซึมผ่านของน้ำในชั้นดินทราย ยิ่งถูกกัดเซาะเกิดการยุบตัวแล้วพังทลาย ตามรูปแบบลักษณะดังในภาพ 18 การกัดเซาะที่เกิดขึ้นภายในของชั้นดินทรายตามรูปแบบของการกัดเซาะจึงเรียกว่า “รูปแบบท่อกระซอก” Mears (1968) อธิบายถึงปัจจัยการกัดเซาะตามลักษณะรูปแบบ ดังภาพ 18 ซึ่งในลักษณะการกัดเซาะที่ก่อให้เกิดเป็นโพรงมีปัจจัยที่เกิดจากการซึมผ่านของมวลน้ำ การสูญเสียเสถียรภาพของมวลดินและความชื้นที่สะสมอยู่ในชั้นดินจะเกิดความดันน้ำ รุปรุนได้ต่อเสถียรภาพของความลาดชันของหน้าดิน ดังภาพ 19



ภาพ 17 Bank failure mechanism: (a) Rotational; (b) Planar; (c) Cantilever and (d) Piping or sapping

ที่มา: Imanshoar, Tabatabai, and Hassanzadeh, 2012



ภาพ 18 Collapse of layer undercut by piping/sapping

ที่มา: Imanshoar, Tabatabai, and Hassanzadeh, 2012



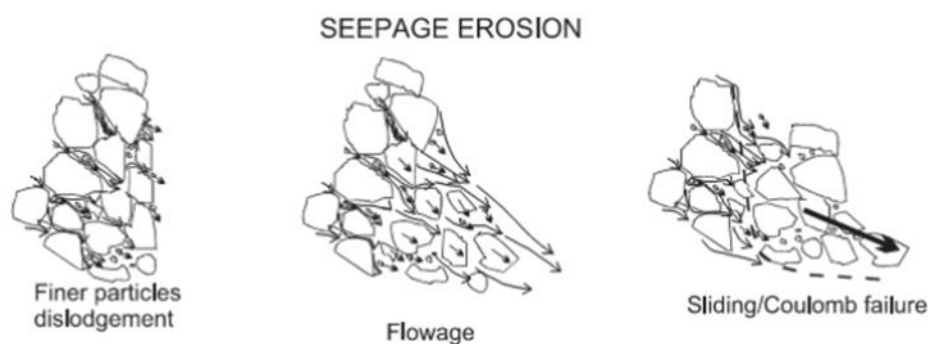
ภาพ 19 Cavities of typical piping/sapping erosion

ที่มา: Imanshoar, Tabatabai, and Hassanzadeh, 2012

การแบ่งลักษณะรูปแบบของการพังทลายหน้าดิน ยังแบ่งได้จากปัจจัยภายนอกที่เกิดจากแรงกระทำที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ลาดดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

การกัดเซาะที่เกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพภายในโครงสร้างของอนุภาคในดิน เนื่องจากมีแรงดันการไหลซึม (Seepage force) ซึ่งมวลดินที่มีอนุภาคเล็ก ถูกแรงจากการไหลซึมของน้ำกระตุ่น

ให้เคลื่อนตัวกับการไหลของน้ำในช่องโพรงของอนุภาคดินจึงมีการขยายตัวของช่องโพรงในอนุภาคดินใหญ่ขึ้น น้ำจึงแทรกซึมพัดผ่านเข้ามาได้อย่างรวดเร็วและปริมาณมากขึ้น (Preferential flow channel) อนุภาคของเม็ดดินที่มีช่องว่างจะค่อนข้างหลวมแล้วถูกมวลน้ำพัดออกมามากขึ้นจนเกิดเป็นโพรง (Piping) ดังภาพ 20 ด้านวิศวกรรมปฐพีเรียกกระบวนการนี้ว่า (Internal erosion) คือ การกัดเซาะภายในหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า (Seepage erosion) การกัดเซาะจากการซึม หากมีโพรงจำนวนมากขึ้นก่อตัวเป็นขนาดใหญ่ ทำให้มีลักษณะคล้ายปล่องอุโมงค์หรือหลุมยุบ (Sinkhole) เสถียรภาพผิวลาดดินก็จะเกิดการพังทลายลงในที่สุด



ภาพ 20 การกัดเซาะภายในโครงสร้างดินจากแรงดันการไหลซึม

ที่มา: Crosta and Di prisco, 1999

การพังทลายของอนุภาคมวลดิน (อติเทพ ศรีคงศรี, 2556) มวลดินที่มีการกระจายขนาดดี (Well-graded soil) มวลดินที่กระจายขนาดเชิงกว้าง (Broadly-graded soil) และลักษณะมวลดินที่เป็นช่อง ๆ (Gap-graded soil) อยู่ในกลุ่มดินที่ไม่มีเสถียรภาพภายในมวลดิน (Seepage-induced internal instability) เมื่ออยู่ในสภาวะที่น้ำมีการไหลซึม ส่งผลให้ลาดดินตลิ่งเกิดการพังทลายหรือวิบัติได้ รูปแบบการพังทลายของลาดดินและลาดหินแบ่งได้ ดังตาราง 3

ตาราง 3 ประเภทรูปแบบการพังทลายของลาดดินและลาดหิน

ประเภทของการเคลื่อนตัว				ประเภทวัสดุ		
				ฐานหิน	ลักษณะดินทางวิศวกรรม	
					มีความหยาบส่วนใหญ่	มีความละเอียดส่วนใหญ่
ลักษณะวิบัติ				หินวิบัติ	เศษหินตก	เศษตะกอนหิน
ลักษณะเสียรูป				หินเสียรูป	เศษหินโคลน	เศษหินโคลน
สไลป์	การหมุน L	หน่วย	หินทรุดตัว	เศษหินทรุดตัว	เศษหินทรุดตัว	
		เล็ก	หินบล็อกร	เศษหินบล็อกร	เศษหินบล็อกร	
	การเปลี่ยนแปลง	หลายหน่วย	หินสไลด์	เศษหินสไลด์	มีการสไลด์	
ความละเอียด				หินละเอียด	เศษหินละเอียด	มีความละเอียด
ความคล่องตัว				หินเคลื่อน	มีความไหล	มีความไหล
				ความลึก	มีความลึก	มีความลึก
ความเชื่อมโยง				การผสมผสานของลักษณะการเคลื่อนตัวทั้ง 2 ประเภท		

ที่มา: Varnes, 1978.

แนวทางป้องกันการพิบัติของลาดริมตลิ่ง

การป้องกันการพิบัติของลาดริมตลิ่ง เป็นการป้องกันผลกระทบที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อสาธารณูปโภค สาธารณูปการ การอยู่อาศัย ตลอดจนชีวิตและทรัพย์สิน ยิ่งที่เกี่ยวข้องกับที่อยู่อาศัย สาธารณประโยชน์ต่าง ๆ ต้องหาแนวทางป้องกันอย่างมั่นคงถาวร แต่ทั้งนี้การพิบัติทรุดตัวของลาดริมตลิ่งก็มีระดับความรุนแรงต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

การประเมินความเสี่ยงเบื้องต้นถึงแนวทางการป้องกันก็สามารถประเมินได้ตั้งจากการเฝ้าระวังสังเกตตรวจตราความเปลี่ยนแปลงของลาดริมตลิ่งอย่างสม่ำเสมอสังเกตเสียงน้ำหนักบรรทุกกระทำบริเวณที่ลาดริมตลิ่งและควรอพยพสิ่งของต่าง ๆ ออกจากบริเวณพื้นที่ลาดริมตลิ่ง ป้องกันโดยโครงสร้างที่ป้องกันการกัดเซาะและเพิ่มเสถียรภาพริมตลิ่ง ในที่นี้ถ้าไม่ได้มีระดับความรุนแรงถึงขั้นลาดดินพังทลายอาจใช้วิธีการชะลอน้ำโดยการทาบฝายชะลอน้ำในเบื้องต้นก่อนก็ได้ กรณีพอลอยรั้วหรือรอยแยกริมตลิ่งที่ค่อนข้างมีความเสี่ยงต่ออนาคตภายภาคหน้า ควรอพยพขนย้ายสิ่งของมีค่าหรือที่สามารถขนย้ายได้ที่อยู่บริเวณรอยรั้วที่เกิดขึ้นออกนอกพื้นที่ทันที แนวทางป้องกันโดยวิธีธรรมชาติสามารถทำได้ โดยการปลูกพืชพันธุ์บริเวณริมตลิ่งลำน้ำช่วยลดการกัดเซาะบริเวณลาดดิน

ตลิ่งลำน้ำ ธรรมชาติเกิดการฟื้นฟูสภาพได้ แนวทางป้องกันโดยโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีความมั่นคงถาวร เบื้องต้นต้องมีการสำรวจพื้นที่ที่เกิดการพิบัติหรือทรุดตัว เพื่อเป็นข้อมูลแนวทางประกอบการพิจารณาโครงสร้าง โดยหลัก ๆ แล้ว การก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งจะสามารถดำเนินการได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ การป้องกันโดยใช้เขื่อนป้องกันตลิ่ง การป้องกันโดยใช้โครงสร้างเบี่ยงเบนการไหลของน้ำ และการป้องกันโดยใช้โครงสร้างรักษาเสถียรภาพของลาดดิน ในแต่ละแนวทางก็มีความเหมาะสมแตกต่างกันไปในสภาพต่าง ๆ ซึ่งปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบในการพิจารณานั้น ประกอบไปด้วยลักษณะของแม่น้ำหรือลำน้ำ เสถียรภาพทางธรณีวัสดุของแม่น้ำหรือลำน้ำ การพิบัติของแนวลาดแม่น้ำหรือลำน้ำ การใช้สอยประโยชน์บนแนวลาดแม่น้ำหรือลำน้ำ การไหลของมวลน้ำจากปัจจัยต่าง ๆ และสิ่งสำคัญงบประมาณการดำเนินงานของโครงสร้างแนวทางการใช้เสาเข็มไม้ตอกกริมตลิ่งลักษณะคล้ายชั้นบันได ขนานไปกับแนวลาดดินจนถึงระดับพื้นท้องน้ำ โดยการใช้ไม้ที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงหรือทั่วไปใช้ไม้ยูคาตอกตามแนวในรูปแบบเป็นกล่องเว้นช่องให้เหมาะสมสอดคล้องกับไม้ที่ใช้ตอก และระดับน้ำลาดริมตลิ่งที่เกิดการพิบัติ แล้วเสริมแนวป้องกันการกัดเซาะของมวลน้ำโดยใช้การเรียงกระสอบทรายหรือกระสอบปูนทรายหรือหินทิ้งก็ได้ ให้เหมาะสมตามแนวการพิบัติของลาดริมตลิ่งนั้น ๆ ทั้งนี้วิธีการนี้มักจะใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวในพื้นที่ต้องการแก้ไขเร่งด่วนหรือมีงบประมาณจำกัด ข้อควรระวังการก่อสร้างโครงสร้างด้วยวิธีนี้ ควรรักษาเสถียรภาพลาดดินโดยการใช้ระบบธรรมชาติ ปลูกพืชคลุมยึดเหนี่ยวหน้าลาดริมตลิ่งและหลีกเลี่ยงการใช้ประโยชน์โดยน้ำหนักบรรทุกกระทำหนักที่เสี่ยงต่อการพิบัติ ทั้งนี้เขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นแนวทางการป้องกันการพังทลายหรือการพิบัติของแนวลาดตลิ่งได้อย่างมีคุณภาพในระดับ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นโครงสร้างที่รักษาเสถียรภาพได้ดีในระดับหนึ่ง ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้เขื่อนป้องกันตลิ่งในรูปแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปรูปแบบของการสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ๆ เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดลาดเอียงหรือแบบเชิงลาด และเขื่อนป้องกันตลิ่งแนวตั้ง

เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดลาดเอียงหรือแบบเชิงลาด เป็นแนวป้องกันตลิ่งที่เกิดจากการกัดเซาะของมวลน้ำที่มีกระแสน้ำกัดเซาะทำให้ลาดริมตลิ่งขาดเสถียรภาพ ดังนั้นวิธีนี้จะต้องพิจารณาวิเคราะห์เสถียรภาพของตลิ่งที่วิบัติก่อน เพราะโครงสร้างวิธีนี้เป็นโครงสร้างที่ปิดทับหน้าลาดริมตลิ่งลำน้ำที่ขาดเสถียรภาพไปแล้ว ดังนั้นโครงสร้างของแนวป้องกันตลิ่งด้วยวิธีนี้จะต้องใช้วัสดุที่คัดเลือกที่มีขนาดน้ำหนัก ความทนทาน และความแข็งแรงของวัสดุโดยทั่วไปจะใช้หินใหญ่คละขนาด เป็นวัสดุคัดเลือก เพื่อที่จะทำให้น้ำโครงสร้างมีความมั่นคงแข็งแรงป้องกันการกัดเซาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดลาดเอียงหรือแบบเชิงลาด จะมีอัตราส่วนแนวตั้งต่อแนวราบหรือที่เรียกว่า สโลปอยู่ที่ 1:2 และ 1:3 ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของวัสดุริมตลิ่งกับวัสดุคัดเลือก หลังจากนั้นจึงนำมาทำการปูทับหน้าหรือใช้ปิดทับหน้าตลิ่ง ส่วนรูปแบบของเขื่อนประเภทนี้สามารถแบ่งได้ตามวัสดุคัดเลือกที่ปิดทับหน้าลาดตลิ่ง ดังนี้ เขื่อนป้องกันตลิ่งแบบลาดหินเรียง เป็นการเรียงหินตามสโลปแนวลาดเขื่อน

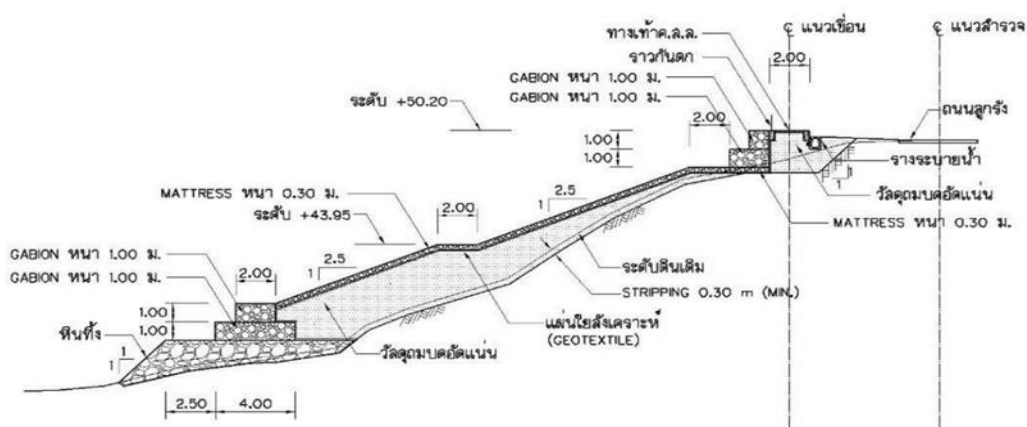
ลักษณะนี้ต้องมีลาดตลิ่งชันดินที่มีความแข็งแรง สภาพพื้นที่ที่มีกระแสน้ำไม่ไหลเชี่ยวมากนัก ดังภาพ 21



ภาพ 21 เชื่อนป้องกันตลิ่งแบบลาดหินเรียง

ที่มา: กรมบัญชีกลาง, ม.ป.ป.; บริษัท ส.ศิริชัยสยามวัสดุ จำกัด, ม.ป.ป.

เชื่อนป้องกันตลิ่งแบบเกเบียน แนวทางเป็นการนำวัสดุคัดเลือกโดยส่วนใหญ่จะใช้ หินคละขนาดบรรจุใส่กล่องลวดตาข่าย(กล่องเกเบียน Gabions) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการนี้ ในการป้องกันสโลลาดดินทั้งลาดดินภูเขาและลาดดินตลิ่งลำน้ำ ดังภาพ 22 และดังภาพ 23



ภาพ 22 การใช้หินและแผ่นใยสังเคราะห์เป็นโครงสร้างปิดทับหน้าลาดตลิ่ง

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ม.ป.ป.



ภาพ 23 การเรียงกล่องบรรจุหิน (Gabion)

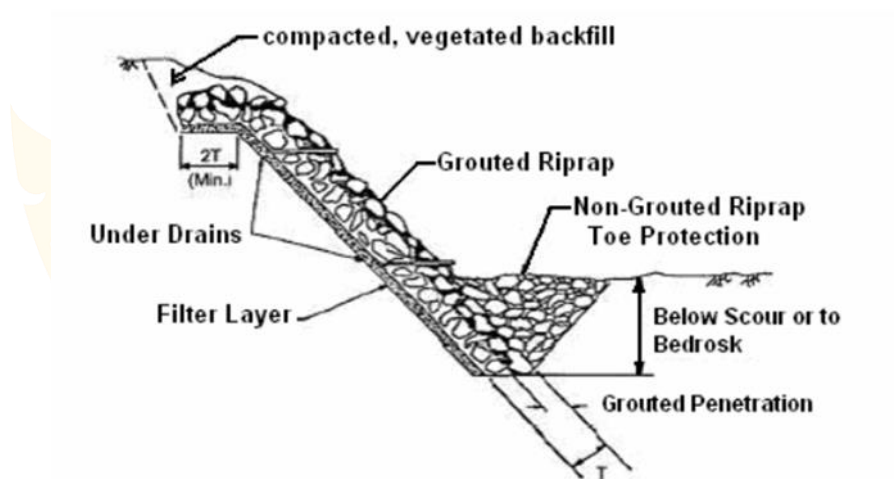
ที่มา: แขวงทางหลวงชนบทพะเยา, 2020

เขื่อนป้องกันตลิ่งแบบเรียงหินยาว (Grouted Riprap) ลักษณะเป็นการใช้วัสดุคัดเลือกหินใหญ่คละขนาดโรยบริเวณลาดตลิ่งแล้วเกร้าน้ำปูนช่องว่างของหินใหญ่คละขนาด เพื่อป้องกันการซึมผ่านของมวลน้ำ ดังภาพ 24 และดังภาพ 25 ที่จะเข้ามากัดเซาะลาดตลิ่งได้ วิธีดังกล่าวยังไม่ค่อยนิยมก่อสร้างเท่าไร เพราะจะเหมาะสมกับลาดตลิ่งที่มีลักษณะดินแข็ง เนื่องจากถ้าเขื่อนป้องกันทรุดตัวจะปรับปรุงแก้ไขซ่อมแซมค่อนข้างยากจึงไม่เป็นที่นิยม



ภาพ 24 เชื่อนป้องกันตลิ่งแบบเรียงหินยาว (Grouted Riprap)

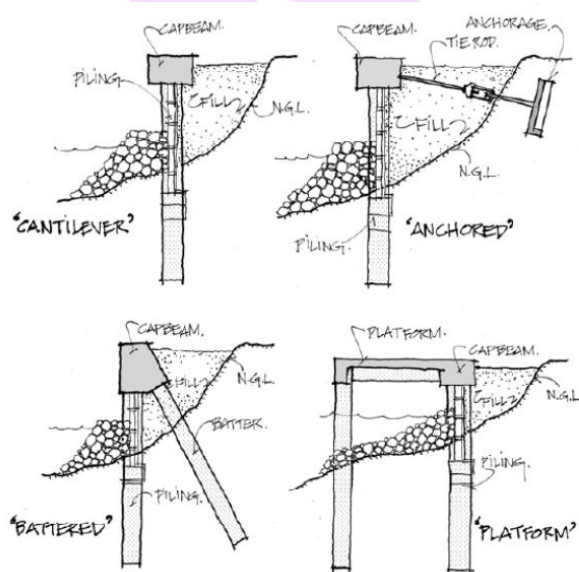
ที่มา: Bowen Collins and Associates



ภาพ 25 เชื่อนป้องกันตลิ่งแบบ Grouted Riprap

ที่มา: Arizona, 2006

เขื่อนป้องกันตลิ่งแบบตั้ง (Vertical Bank Protection) ในรูปแบบนี้เป็นการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งที่มีความลาดชันของลาดริมตลิ่งสูงแล้วมีพื้นที่ของลำน้ำที่จำกัด เพื่อป้องกันเสถียรภาพของลาดตลิ่งได้อย่างเหมาะสมกับพื้นที่ การก่อสร้างแนวป้องกันเขื่อนตลิ่งแบบเชิงลาด โครงสร้างจะยื่นเข้าไปในแม่น้ำหรือลำน้ำค่อนข้างมาก ทำให้พื้นที่แม่น้ำหรือลำน้ำที่ค่อนข้างแคบเกิดปัญหาการไหลผ่านของมวลน้ำ การใช้สอยสาธารณะประโยชน์ต่าง ๆ ได้ ดังนั้นรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งแบบตั้งจึงมีความเหมาะสมที่จะดำเนินการได้ในสภาพพื้นที่ขนาดเล็กของแม่น้ำหรือลำน้ำ ดังภาพ 26



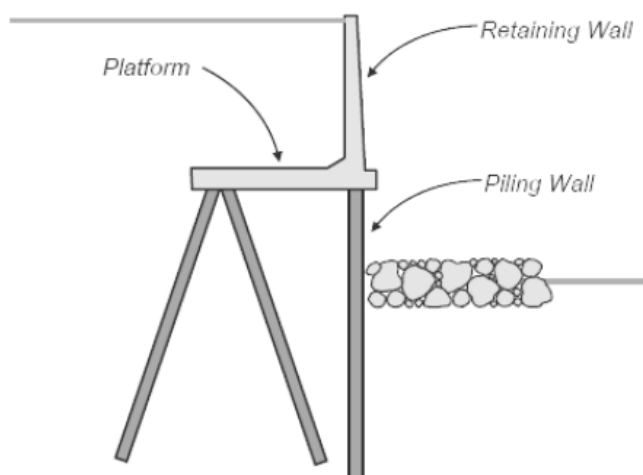
ภาพ 26 เขื่อนป้องกันตลิ่งแบบ Sheet-Piling Wall รูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2006

แนวป้องกันตลิ่งแบบกำแพงกันดิน (Retaining Wall) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้กำแพงเป็นแนวป้องกันตลิ่ง โดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งรูปแบบหล่อในที่และแบบขึ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง รูปแบบนี้มีความเหมาะสมในพื้นที่จำกัดคล้ายกับเขื่อนป้องกันตลิ่งแบบตั้ง ในส่วนของการดำเนินงานของโครงสร้างส่วนใหญ่จะไม่ได้มีโครงสร้างใหญ่ขนาดเขื่อนยกเว้นบางกรณีที่พิจารณาออกแบบโดยใช้แนวป้องกันตลิ่งแบบกำแพงกันดิน เพราะการดำเนินงานก่อสร้างจะมีกระบวนการก่อสร้างในสภาพพื้นที่ไม่มีมวลน้ำเข้ามาในพื้นที่ก่อสร้าง ต้องมีการปิดกั้นน้ำหรือบริหารจัดการสภาพพื้นที่ให้ดีจึงจะดำเนินงานก่อสร้างได้

เขื่อนป้องกันตลิ่งแบบ Relieving Platform ลักษณะคล้ายกำแพงกันดิน มีระบบฐานรากโดยใช้เสาเข็มเป็นฐานรองรับน้ำหนักและรับแรงดันดินด้านข้าง ตัวฐานรองรับ (Platform) จะเป็น

ส่วนรับน้ำหนักของดินถมในตัวกำแพงแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่เสาเข็ม ดังภาพ 27 รูปแบบนี้เหมาะสำหรับชั้นดินอ่อนหรือต้องการรับน้ำหนักบรรทุกทุกค่อนข้างหนัก

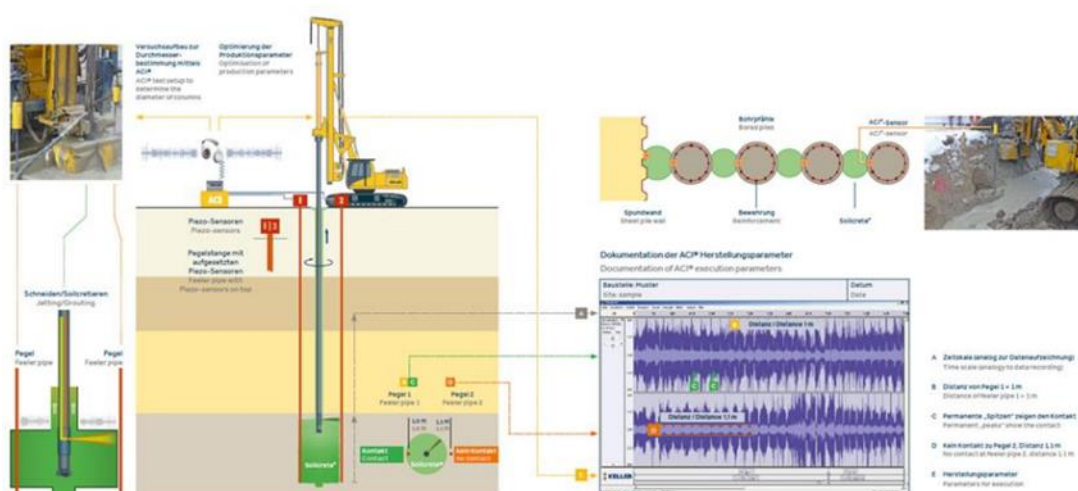


ภาพ 27 เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบ Relieving Platform

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2006

เชื้อนป้องกันตลิ่งแบบผสม เป็นการก่อสร้างในรูปแบบผสมผสานในลักษณะเชื้อนหรือแนวป้องกันตลิ่งต่าง ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ การดำเนินงานที่สะดวกมากขึ้น ตลอดจนงบประมาณที่ใช้ดำเนินการก่อสร้างในลักษณะทั่วไปจะเป็นเชื้อนป้องกันตลิ่งผสมผสานระหว่างเชื้อนป้องกันตลิ่งแบบเชิงลาดกับเชื้อนป้องกันตลิ่งแบบตั้ง ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพ 28 รูปแบบอื่นก็จะมี การประยุกต์การเรียงกระสอบป้องกันลาดริมตลิ่งกับแนวกำแพงป้องกันการกัดเซาะของน้ำโดยใช้ หินเรียง (เดชา มณีนัย, 2556) ดังภาพ 29

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะทำให้คุณสมบัติของดินมีกำลังสูงมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและวัสดุปูนที่ผสม ส่วนขั้นตอนการก่อสร้างในเบื้องต้น ใช้วิธีแบบปั่นผสม (Rotary Mixed) แล้วเกร้าท์น้ำปูนแรงดันสูง (Jet Grouting) เหมาะที่จะใช้在地ดินประเภท ดินไม่มีความยึดแน่นหรือพวกดินปนกรวด การปรับปรุงดินด้วยวิธี Jet Grouting Technique ยังช่วยควบคุมการดำเนินงานก่อสร้างไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง วิธีการปรับปรุงสามารถแบ่งประเภทได้หลากหลายรูปแบบ จากการศึกษาของ Mitchell (1981) เทคโนโลยีในการปรับปรุงดินสามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภทตามหลัก การบดอัดดินในที่ระดับลึก (In situ deep compaction) การปรับปรุงดินโดยให้น้ำหนักกดทับก่อน (Preloading) การปรับปรุงดินโดยการอัดฉีดคอนกรีต (Injection and grouting) การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Admixtures) การปรับปรุงดินโดยใช้อุณหภูมิ (Thermal treatment) และการปรับปรุงดินโดยการเสริมกำลัง (Reinforcement)



ภาพ 30 การตรวจสอบและควบคุมการสร้างเสาเข็มด้วยวิธี Jet grouting ด้วย Acoustic column inspector

ที่มา: Keller Group plc

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสวต ประกายรุ่งรวัศมี และคณะ (2554) การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำมืองค์ประกอบหลายปัจจัยทางด้านปฐพี เช่น การชะล้างลาดดินพังทลายของฝน ความคงทนเสถียรภาพของมวลดินต่อการถูกชะล้างหรือกัดเซาะและความชันของความลาดดิน การอุปโภคบริโภคโดยก่อให้เกิดวัชพืชปกคลุมและการรักษาสภาพลำน้ำเสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์การหลุดตัวพังทลายของดิน ดังตัวอย่างการใช้สมการการสูญเสียดินสากล (Universal Soil Loss Equation, USLE) เป็นสมการเพื่อประเมินจากองค์ประกอบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการพังทลายของหน้าดิน เช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำปละลาย ลักษณะภูมิประเทศ การอยู่อาศัยที่ดินบริเวณตลิ่งริมน้ำ ไปคำนวณเทียบกับธาตุที่มีในดิน มีวิธีการดังต่อไปนี้ (ไพฑูรย์ ปะยะปรภณ, 1981)

คำนวณปริมาณการชะล้างพังทลายของดินตามสมการการสูญเสียดินสากล (USLE) ดังสมการที่ 8 ตามวิธีของ Wischmeier and Smith (1978)

$$A = RKLSCP \quad (8)$$

เมื่อ

A คือ ปริมาณการสูญเสียดิน ที่คำนวณได้ต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น ตัน/เฮกแตร์/ปี

R คือ ปัจจัยเกี่ยวกับความสามารถในการทำให้เกิดการพังทลายของฝน เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของฝนในการกัดเซาะ มีหน่วยเป็น เมตร-ตัน/เฮกแตร์/ปี

K คือ ปัจจัยเกี่ยวกับความยากง่ายในการเกิดพังทลายของดิน เป็นค่าดินที่สูญเสียต่อหน่วยของกัดเซาะของฝน ในแปลงทดลองที่มีขนาด ยาว 72.6 ฟุต บนพื้นที่ลาดชัน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการไถพรวนดินและทิ้งไว้ให้ว่างเปล่า

L คือ ปัจจัยเกี่ยวกับความยาวของความลาด เป็นค่าที่ได้จากอัตราส่วนการสูญเสียดินจากแปลงที่เกิดจากสภาพความยาว ความลาดเทในสนาม กับแปลงที่เกิดจากความยาวความลาดเท

S คือ ปัจจัยเกี่ยวกับความชันลาดเท เป็นค่าที่ได้จากอัตราส่วนของการสูญเสียดินจากแปลงที่เกิดจากสภาพความลาดเทในสนาม กับแปลงที่เกิดจากความลาดชัน 9 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาพเงื่อนไขเดียวกัน

C คือ ปัจจัยเกี่ยวกับการจัดการพืช เป็นค่าที่ได้จากอัตราส่วนการสูญเสียดิน จากพื้นที่ในสนามที่เกิดขึ้น มีการจัดอย่างหนึ่งอย่างใดโดยเฉพาะและพื้นที่ที่มีการไถพรวนตามความลาดเทปล่อยทิ้งไว้ให้ว่างเปล่าภายใต้สภาพเงื่อนไขเดียวกัน

P คือ ปัจจัยเกี่ยวกับปฏิบัติการอนุรักษ์ดิน เป็นค่าที่ได้จากอัตราส่วนของการสูญเสียดินจากแปลงอนุรักษ์ ปลูกพืชเป็นขั้นบันได และแปลงที่มีการปลูกพืชตามความยาวความลาดเทภายใต้สภาพเงื่อนไขเดียวกัน

คำนวณค่าความสามารถในการทำให้เกิดการพังทลายของฝน (R factor) โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลปริมาณน้ำฝน สถานี 73052 อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา คำนวณหาปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) นำมาวิเคราะห์คำนวณหาปริมาณน้ำฝน โดยวิธี Kriging และนำมาคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ค่า R สามารถประมาณได้จากค่าปริมาณน้ำฝน

$$Y = 0.163X - 0.0375 \quad (9)$$

เมื่อ

Y คือ ปัจจัยของฝนต่อการชะล้างพังทลายของดิน (เมตร-ตัน/เฮกแตร์/ชั่วโมง)

X คือ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดทั้งปี (มิลลิเมตร)

คำนวณค่าความยากง่ายในการเกิดการพังทลายของดิน (K factor) โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจำแนกค่า K ตามชุดข้อมูลดินค่าปัจจัยเกี่ยวกับความยากง่ายในการเกิดการพังทลายของดิน

คำนวณค่าความยาวความลาดชันลาดเท (LS factor) เส้นชั้นความสูงและจุดความสูงบนแผนที่ภูมิประเทศ 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหารและทำการคำนวณความยาวของความลาดเทจากแผนที่เส้นชั้นความสูง นำเข้าสมการเพื่อหาค่า LS Factor ตามวิธีของวิซิโมเออร์และสมิธปรับปรุงค่าปัจจัยในสมการโดยใช้การคำนวณตามสมการของแม็คคูล (Liu, et al., 2000; 1759 อ้างถึงใน McCool, et al., 1978) ดังสมการ 10 คำนวณค่าปัจจัยความยาวของความลาดเทคือ

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right]^m \quad (10)$$

L คือ ค่าปัจจัยความยาวความลาดเท ในสมการการสูญเสียดินสากล

λ คือ ระยะทางตามแนวราบของพื้นที่ลาดชัน นับจากจุดเริ่มมีน้ำไหลเอ่อผิวดินถึงจุดที่ความลาดชันเปลี่ยนแปลงลงจนเกิดการหักมุมของตะกอน หรือจุดที่มีการรวมตัวของน้ำเป็นร่อง มีหน่วยเป็นเมตร

m คือ ตัวเลขยกกำลังซึ่งผันแปรตามความลาดชัน โดยค่า m หาได้จากสมการ 11

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (11)$$

β คือ ความสัมพันธ์สัดส่วนระหว่าง การชะล้างพังทลายแบบร่องรื้อ (Rill Erosion) : ซึ่งเกิดจากผลกระทบของข้อมูลปริมาณน้ำไหล กับการชะล้างพังทลายระหว่างร่องรื้อ (Interill Erosion) ซึ่งเกิดจากการกระทำของเม็ดฝน โดย β คำนวณจากสมการ 12

$$\beta = \frac{(\sin \phi / 0.0896)}{3.0 \sin \phi^{0.8} + 0.56} \quad (12)$$

เมื่อ

β คือ ความสัมพันธ์สัดส่วนระหว่าง การชะล้างพังทลายแบบร่องรื้อ (Rill Erosion) : ซึ่งเกิดจากผลกระทบของข้อมูลปริมาณน้ำไหล กับการชะล้างพังทลายระหว่างร่องรื้อ (Interill Erosion) ซึ่งเกิดจากการกระทำของเม็ดฝน

ϕ คือ ค่าความลาดชันในหน่วยองศา

สมการคำนวณค่า (S factor) จากสมการที่ 13 และสมการที่ 14

สำหรับพื้นที่ลาดชัน น้อยกว่า 9 % คือ

$$S = 10.8 \sin \phi + 0.03 \quad (13)$$

สำหรับพื้นที่ลาดชันเท่ากับหรือมากกว่า 9 %

$$S = 16.8 \sin \phi + 0.50 \quad (14)$$

เมื่อ

S คือ ปัจจัยความชัน

ϕ คือ ความชันในหน่วยองศา

Thongchart, et al. (2550) ปัจจัยของพารามิเตอร์ในดินที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินริมตลิ่ง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินค่าความปลอดภัยจะแปรผันตามคุณสมบัติของมวลดิน ในหลักการเบื้องต้นที่จะทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของดิน วิเคราะห์เสริมความลาดชันโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน การเจาะสำรวจเพิ่มหลุมทดสอบมากขึ้นเพื่อที่จะลดสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในคุณสมบัติของ

ทางธรณีเทคนิคมีความแปรปรวนมาจากความไม่แน่นอนในสภาพแวดล้อม ทั้งนี้การเสนอเกี่ยวกับความแปรปรวนทางธรณีเทคนิค (Tang, et al., 1976; Spry, et al., 1988; Orchant, et al., 1988; Kulhawy, 1992; Christian, et al., 1992; Phoon, et al., 1995; Phoon and Kulhawy, 1999a, b) โดยในหลักการจะแบ่งความแปรปรวนออกเป็นสามประเภท ได้แก่ ประการที่หนึ่ง ความแปรปรวนโดยสภาพต้นกำเนิด ประการที่สอง ความแปรปรวนจากข้อผิดพลาดในการสำรวจและประการที่สาม ความแปรปรวนจากความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Russelli and Vermeer, 2005) ความไม่แน่นอนที่สาม (Kulhawy, 1992) นิยามความไม่แน่นอนนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบจำลอง ความแปรปรวนทางธรณีเทคนิค ในการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคโดยทั่วไป จะสามารถช่วยในเรื่องการประมาณค่าคุณสมบัติของดินได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ดังตาราง 4

ตาราง 4 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในดิน

พารามิเตอร์		ค่าสัมประสิทธิ์การ เปลี่ยนแปลง %	แหล่งที่มา
หน่วยน้ำหนัก		3	Hammitt (1966)
มุมแรงเสียด	ทราย	12	Schultze (1972)
ทวน		5-15	Lumb (1974); Hoeg and Murarka (1974); Schultze (1975)
		2-5	Lacasse and Nadim (1996)
กรวด		12	Schultze (1972)
พารามิเตอร์ความแข็งแรง		40	Fredlund and Dahlman (1972)
ไม่มีการระบาย (ดินเหนียว)		20-50	LUMB (1974)
จำนวนการทดสอบเจาะ		15-45	Orehant, et al. (1988); Schultze (1975)
มาตรฐาน		27-85	Schultze (1975); Stamatopoulos and Kotzias (1975)

ที่มา: Phoon and Kulhawy, 1999

การปรับค่าความแปรปรวนทางธรณีเทคนิคของ Phoon and Kulhawy (1999) ประเมินความไม่แน่นอนเป็นฟังก์ชันของความแปรปรวนของดินตามธรรมชาติ ความแปรปรวนในการสำรวจ และความไม่แน่นอนของการเปลี่ยนแปลงแบบจำลอง ได้ความแปรปรวนโดยธรรมชาติสรุปไว้ในตาราง 5

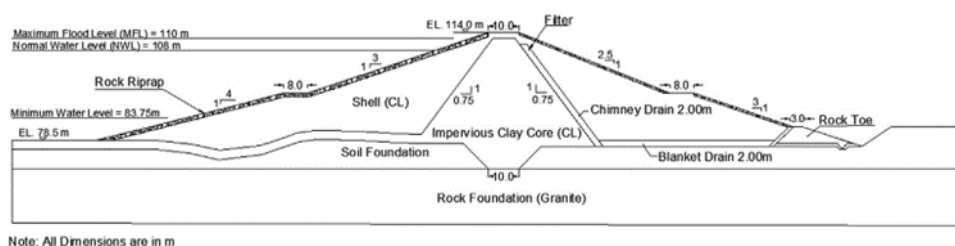
ตาราง 5 ค่าโดยประมาณสำหรับความแปรปรวนของดินตามธรรมชาติ

การทดสอบ	คุณสมบัติ	ประเภทของดิน	ค่าโดยประมาณ	ความแปรปรวน %
ห้องปฏิบัติการทดสอบ ความแข็งแรง	$S_u = (UC)$	ดินเหนียว	$10-400 \text{KN} / \text{m}^2$	20-55
	$S_u = (UU)$	ดินเหนียว	$10-350 \text{KN} / \text{m}^2$	10-30
	$S_u = (CIUC)$	ดินเหนียว	$10-700 \text{KN} / \text{m}^2$	20-40
	ϕ	ดินเหนียวและ ทราย	$20-40^\circ$	5-15
CPT	q_r	ดินเหนียว	$0.5-2.5 \text{MN} / \text{m}^2$	< 20
	q_c	ดินเหนียว	$0.5-2.0 \text{MN} / \text{m}^2$	20-40
	q_c	ทราย	$0.5-30.0 \text{MN} / \text{m}^2$	20-60
VST	$S_u = (VST)$	ดินเหนียว	$5-400 \text{KN} / \text{m}^2$	10-40
SPT	N	ดินเหนียวและ ทราย	$10-70 \text{blows} / \text{ft}$	25-50
DMT	A	ดินเหนียว	$100-450 \text{KN} / \text{m}^2$	10-35
	A	ทราย	$60-1,300 \text{KN} / \text{m}^2$	20-50
	B	ดินเหนียว	$500-880 \text{KN} / \text{m}^2$	10-35
	B	ทราย	$350-2,400 \text{KN} / \text{m}^2$	20-50
	I_D	ทราย	1-8	20-60
	K_D	ทราย	2-30	20-60
	E_D	ทราย	$10-50 \text{MN} / \text{m}^2$	15-65
	P_L	ดินเหนียว	$400-2,800 \text{KN} / \text{m}^2$	10-35
	P_L	ทราย	$1,600-3,500 \text{KN} / \text{m}^2$	20-50
	E_{PMT}	ทราย	$5-15 \text{MN} / \text{m}^2$	15-65
PMT ห้องปฏิบัติการทดสอบ ดัชนี	W_n	ดินเหนียวและ ตะกอน	13-100%	8-30
	W_L	ดินเหนียวและ ตะกอน	30-90%	6-30
	W_P	ดินเหนียวและ ตะกอน	15-25%	6-30
	PI	ดินเหนียวและ ตะกอน	10-40%	— ^a
	LI	ดินเหนียวและ ตะกอน	10%	— ^a
	γ, γ_d	ดินเหนียวและ ตะกอน	$13-20 \text{KN} / \text{m}^3$	<10
	Dr	ทราย	30-70%	10-40 ^b ; 10-40 ^c

ที่มา: Phoon, et al., 1995

Soralump, et al. (2021) ประเมินเสถียรภาพความลาดเอียง ระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ความลาดเอียงขาดเสถียรภาพ แรงดันน้ำที่อยู่ในช่องรูพรุนในวัสดุค่อนข้างเยอะ ความยืดหยุ่นของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านของวัสดุนั้น ๆ (USBR 2011) ศึกษาสาเหตุการเคลื่อนตัวของคลองปาดอนบริเวณต้นน้ำ โดยใช้การวิเคราะห์ RDD คือ การกำจัดน้ำออกอย่างรวดเร็ว หลังจากระดับของน้ำมีความสูงระยะหนึ่ง จนพื้นที่ลาดชันไม่มีเวลาเพียงพอในการระบายน้ำ เป็นการจำลองเชิงตัวเลขของเสถียรภาพความเครียดในวัฏจักรน้ำ เมื่อความเครียดในวัสดุลาดเอียงมีเพิ่มมากขึ้นทำให้เสถียรภาพต้านทานแรงเฉือนลดลง (Chai and Carter, 2009; Griffiths and Lane, 1999; Potts, Kovacevic, and Vaughan, 1997; Sterpi, 1999; Troncone, 2006).

เขื่อนคลองปาดอน เป็นโครงสร้างที่มีทันทันสูง 45 เมตร ยาว 750 เมตร ความจุของเขื่อนเก็บน้ำ 20 ล้าน ลูกบาศก์เมตร (Soralump, et al., 2019). ตัวเขื่อนวางบนฐานหินแกรนิตซึ่งมีดินที่รับภาระมาก น้ำซึมผ่านไม่ได้ ตัวเขื่อนประกอบด้วยดินเหนียวที่ซึมผ่านไม่ได้ และวัสดุรองแกนดินเหนียว ที่ซึมผ่านไม่ได้ประกอบด้วยดินเหนียวต่ำ (CL) ในขณะที่บริเวณเปลือกประกอบด้วยดินเหนียวปนทราย แป้ง และกรวด ดินเหนียวและดินทรายจะอยู่ในรากฐานของดิน มีการรวมปล่องระบายและท่อระบายน้ำแบบครอบคลุมเพื่อให้สามารถระบายน้ำออกจากแกนดินเหนียวและป้องกันความลาดเอียงด้านท้ายน้ำไม่ให้ล้มตัว ดังแสดงในภาพ 31

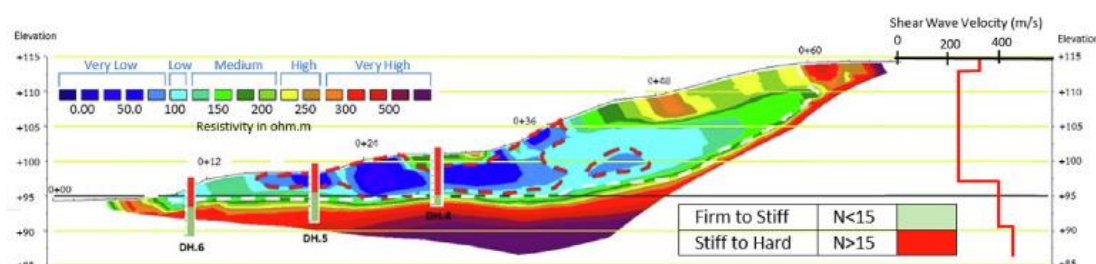


ภาพ 31 ภาพตัดขวางของเขื่อนคลองปาดอน (0 + 297 ม.)

ที่มา: Soralump, et al., 2019

ในการทดสอบความต้านทานไฟฟ้า แรงดันน้ำในรูพรุนบ่งชี้ว่าความลาดชันไม่ได้รับระบายน้ำออกในบางส่วน การมีน้ำอยู่ภายในความลาดชันทำให้ทราบถึงการแทรกซึมของน้ำในการพิบัติ หลังจากการเคลื่อนตัวของความลาดชันทางต้นน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจหลุมเจาะ นอกจากการทดสอบเหล่านี้แล้ว

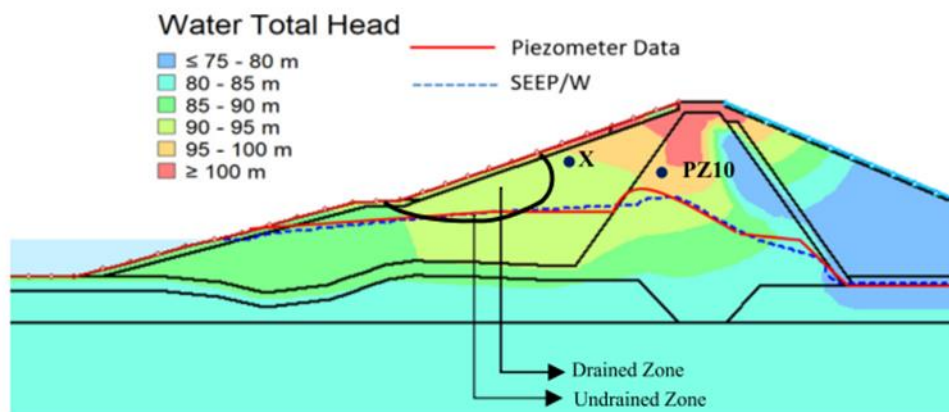
การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นพื้นผิว (SASW) ยังดำเนินการตามแนวสันเขาอีกด้วย ในตำแหน่งทดสอบส่วนใหญ่ ความเร็วของคลื่นเกิดเดือนในช่วงความลึก 20 เมตร ดังภาพ 32



ภาพ 32 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทาน, SASW และการตรวจสอบหลุมเจาะ (0 + 297 ม.)

ที่มา: Panthi and Soralump, 2020

การวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำชั่วคราว ช่วยในการประเมินแรงดันน้ำรูพรุนในเขื่อน (Brahma and Harr, 1963; Desai, 1972; Browzin, 1961) และในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ SEEP/W ใช้การวิเคราะห์การซึมผ่านชั่วคราวแบบแยกอิสระ (Stark, et al, 2560). วิเคราะห์การไหลซึมชั่วคราวเพื่อหาปริมาณการไหลของน้ำในพื้นที่ลาดตลิ่งของเขื่อนคลองป่าบอน นำผลการวิเคราะห์การซึมผ่านชั่วคราวมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องวัดความดันพิโซมิเตอร์ (standpipe piezometers) 14 อัน ซึ่งอยู่ที่ระดับ 0 + 130 เมตร. ผลการตรวจวัดสำหรับเขตทั้งหมด จากพิโซมิเตอร์หมายเลข 10 (PZ10) และ SEEP/W ความสามารถในการซึมผ่านของแกนดินเหนียว ต่ำมาก ระดับน้ำจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังภาพ 33 สังเกตได้จากเครื่องวัดความดันพิโซมิเตอร์ ที่มีความผันผวนของระดับน้ำ พฤติกรรมนี้ถูกสังเกตสำหรับเครื่องวัดพายโซมิเตอร์ทั้งหมดที่ติดตั้งในแกน ดินเหนียว (Panthi and Soralump, 2020)



ภาพ 33 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากข้อมูล piezometer และ SEEP/W

ที่มา: Panthi and Soralump, 2020

ความลาดเอียงหลังการระบายออกน้ำอย่างรวดเร็ว พารามิเตอร์ที่กำลังรับแรงเฉือนที่ไม่ได้ระบายจากการทดสอบ CU ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อกำหนดการกระจายของน้ำในรูพรุนส่วนเกินจากความลาดชัน ดังสมการที่ 15 (Duncan, Wright and Brandon, 2014) ดังนี้

$$T = \left[\frac{C_v t}{d^2} \right] \quad (15)$$

โดยที่ c_v คือค่าสัมประสิทธิ์ของการควบแน่น (m^2 / y)

t คือ เวลาสำหรับการระบายน้ำ

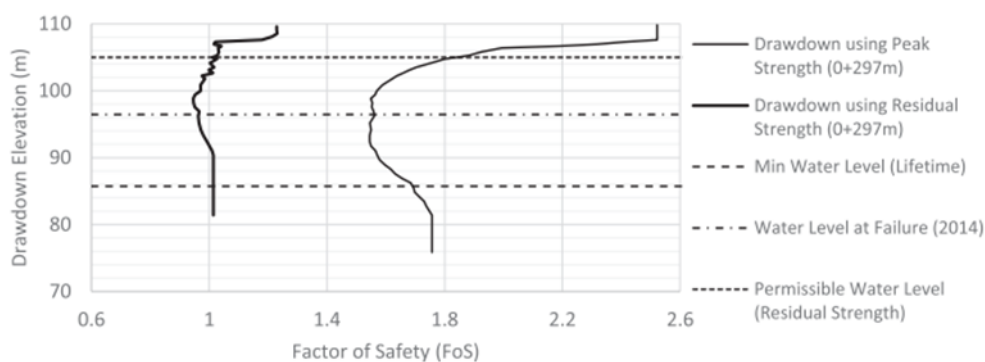
d คือ ความยาวของทางระบายน้ำ

T เป็นปัจจัยทางด้านเวลา

ถ้า $T < 3$ การกระจายของแรงดันน้ำในรูพรุนจะน้อยกว่า 90% และดินจะถือว่าเป็นดินที่ไม่มีการระบายน้ำ (Duncan, Wright and Brandon, 2014)

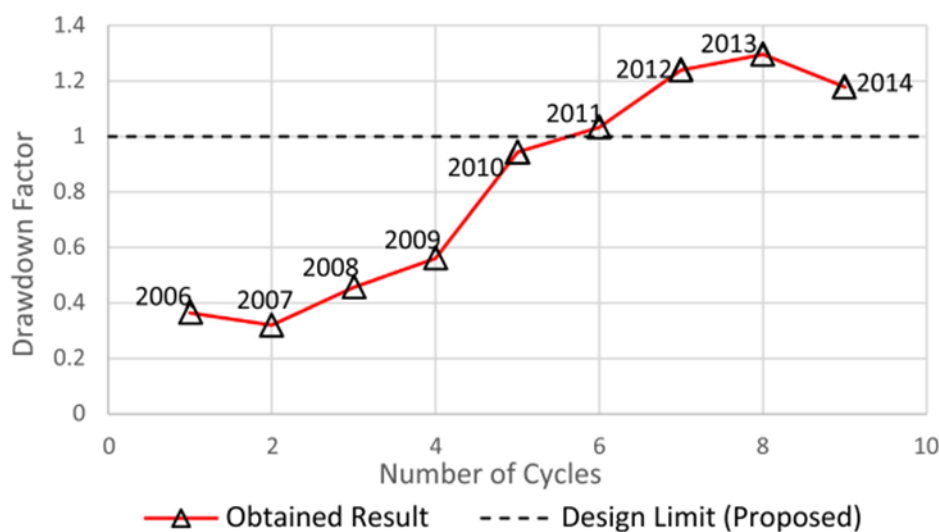
ปัจจัยด้านความปลอดภัยเมื่อระดับน้ำลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของระดับน้ำและ FoS ในช่วงแรก FoS จะลดลงตามระดับน้ำที่ลดลง จากนั้นจะคงที่หลังจากระดับน้ำลดลงมาระดับหนึ่งแล้ว และในที่สุดก็เริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของการลดลง และ FoS นั้นสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้รับในการวิจัยก่อนหน้านี้ (Zheng, et al., 2009) ที่โซนความล้มเหลว FoS มีค่าต่ำสุดเมื่อระดับน้ำอยู่ระหว่าง 92 ถึง 98 เมตร. เรียกว่า ช่วงวิกฤตของน้ำ การสังเกตการเคลื่อนตัวของดินน้ำ เมื่อระดับน้ำอยู่ในช่วงวิกฤตนี้ แสดงให้เห็นว่าความลาดชันดินน้ำเริ่มเคลื่อนตัว เมื่อระดับน้ำลดลง ในการวิเคราะห์ความเสถียรเชิงลาดโดยใช้พารามิเตอร์

ความแข็งแรงยังแสดงให้เห็นว่า FoS น้อยกว่า 1 เมื่อระดับความสูงของน้ำน้อยกว่า 105 เมตร (ในกรณีของเขื่อนคลองปาดอน) ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องวัดความลาดเอียงและการวิเคราะห์ความเสถียรของลาดเอียงจึงตั้งสมมติฐาน ว่ากำลังรับแรงเฉือนของเนินลาดนั้นมาจากจุดสูงสุดจนถึงค่าคงเหลือหลังจากการเคลื่อนตัวของเนินลาดเอียง แนวคิดของปัจจัยการลดลงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อแยกโซนยึดหยุ่นและโซนพลาสติก ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการลดลง แสดงให้เห็นว่า ดินเกินสถานะยึดหยุ่นเมื่อปัจจัยการลดลงมากกว่าหนึ่งการเปลี่ยนแปลงปัจจัย ดังภาพ 34 ข้อจำกัดที่สำคัญของการวิเคราะห์ คือ ไม่สามารถระบุโซนพื้นที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยจำนวนการวนซ้ำ ดังภาพที่ 35 เมื่อดินเกินค่าความแข็งแรงสูงสุดแต่ยังไม่ถึงค่าความแข็งแรงตกค้าง ดังนั้น การออกแบบที่คำนึงถึงปัจจัยการลดลงจึงค่อนข้างเป็นที่นิยม



ภาพ 34 การเปลี่ยนแปลงในปัจจัยความปลอดภัยกับระดับการลดลงตามจุดสูงสุด
และกำลังคงเหลือ

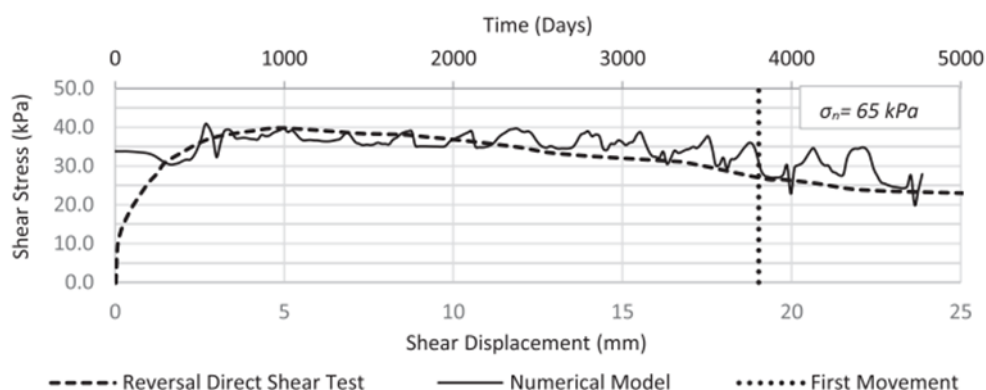
ที่มา: Sorallump, 2020



ภาพ 35 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยกับจำนวนรอบของเขื่อนคลองป่าบอน

ที่มา: Soralump, 2020

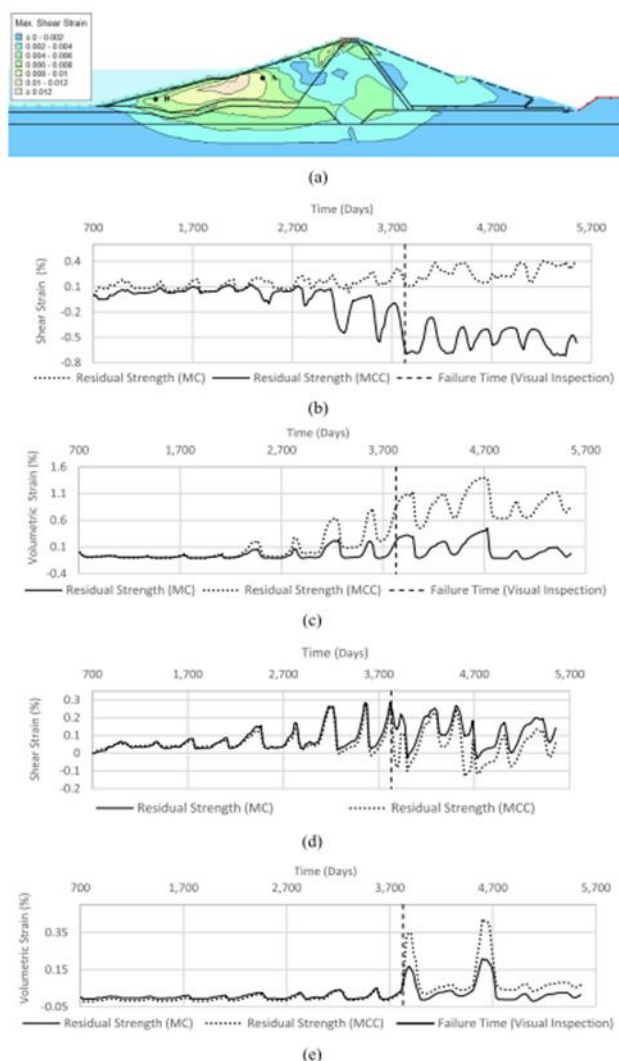
การวิเคราะห์ภายใต้วัฏจักรของน้ำ เขื่อนคลองป่าบอนผ่านการขนถ่ายน้ำเป็นวัฏจักรทุกปี อัตราส่วนการรวมตัวมากเกินไป (OCR) สำหรับดินที่อิ่มตัวของเนินต้นน้ำคือ 3.75 ตามหลักการของแบบจำลองสถานะวิกฤต (CSM) ดินเหนียวที่มีการรวมตัวมากเกินไป ($OCR > 2$) ในระหว่างสภาวะที่มีการระบายออกและไม่มีการระบายน้ำจะเกิดการอ่อนตัวของความเครียด และค่าของความเค้นเฉือนจะลดลงเมื่อความเครียดสูงขึ้น (Budhu, 2013) ดังนั้นการวิเคราะห์นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าความลาดชันของต้นน้ำได้รับความเครียดที่อ่อนลงเนื่องจากการไหลของน้ำเป็นวัฏจักร ความเค้นเฉือนที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงแบบกลับด้านถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเพื่อกำหนดกำลังรับแรงเฉือน จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่มีความเค้นปกติ 65 kPa และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ดังภาพ 36 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความเค้นเฉือนที่ลดลง ทั้งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข แนวโน้มของเส้นโค้งที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน ผลลัพธ์นี้ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขและยืนยันว่า ความเค้นเฉือนลดลงเนื่องจากความผันผวนของระดับน้ำ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาพฤติกรรมการอ่อนตัวของความลาดชันต้นน้ำ



ภาพ 36 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

ที่มา: Soralump, 2020

การวิเคราะห์หองค์ประกอบความลาดชันของเขื่อนแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่ผิดปกติบางอย่างที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยมาตรฐานการออกแบบปัจจุบัน ดังนั้น แบบจำลอง MCC จึงถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดพฤติกรรมการลดความเครียดของความลาดชัน และผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลอง MC ทั่วไป แบบจำลอง MC กำหนดความเครียดสูงสุด แต่สถานะความเครียดจากความล้มเหลวอาจไม่เพียงพอที่จะรับประกันความล้มเหลว เส้นโครงร่างความเครียดเฉือนสูงสุดของส่วนเขื่อนที่ 0 + 297 ม. แสดงในภาพ 37(a) โดยที่จุด A ตั้งอยู่ในเขตการเคลื่อนที่ และจุด B ตั้งอยู่ในเขตที่ไม่มี การเคลื่อนไหวใด ๆ ค่าของแรงเฉือนและความเครียดปริมาตรถูกทำให้เป็นมาตรฐาน ในโซนความล้มเหลว แบบจำลอง MC แสดงการเพิ่มขึ้นของทั้งแรงเฉือนและความเครียดเชิงปริมาตรด้วยการระบายน้ำออก (ภาพ 37(b) และ 37(d)) ในทางตรงกันข้าม การสะสมของทั้งความเครียดเชิงปริมาตร (1%) และความเครียดเฉือน (0.7%) ถูกสังเกตพบในแบบจำลอง MCC (ภาพ 37(b) และ 37(d)) ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองนี้สอดคล้องกับการทดลองที่ดำเนินการโดย (Chen, Zhang, and Chan, 2018) ในทำนองเดียวกัน ไม่พบการสะสมของแรงเฉือนหรือความเครียดเชิงปริมาตรที่สำคัญที่จุด B (ภาพ 37(c) และ 37(e)) ด้วยแบบจำลองใดแบบจำลองหนึ่งเนื่องจากโซนนั้นอิ่มตัวอยู่เสมอ และได้รับผลกระทบจากความผันผวนของระดับน้ำน้อยกว่า พบว่าความผันผวนของระดับน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการสะสมของแรงเฉือนและความเครียดเชิงปริมาตร ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง MCC ไม่สามารถระบุพฤติกรรมการอ่อนตัวของความชันได้ ดังนั้นมาตรฐานการออกแบบของประเทศไทยในปัจจุบันจึงไม่สามารถรับรองความปลอดภัยของเขื่อนป้องกันตลิ่งได้



ภาพ 37 (a) ความเค้นเฉือนสูงสุดของส่วนเขื่อนที่ 0 + 297 เมตร; (b) เส้นโค้งที่มาเวลาความเค้นเฉือนที่โซนความล้มเหลว (จุด A); (c) เส้นโค้งเวลาความเครียดเชิงปริมาตรที่โซนความล้มเหลว (จุด A); (d) เส้นกราฟเวลาความเค้นเฉือนที่โซนไม่เกิดความผิดพลาด (จุด B); (e) เส้นโค้งเวลาความเครียดเชิงปริมาตรที่โซนไม่ขัดข้อง (จุด B)

ที่มา: Sorlump, 2020

Keawsawasvong (2021) การประเมินเสถียรภาพที่เกิดจากความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์วัสดุทางธรณี ในทางด้านวิศวกรรมปฐพี คือการผสมผสานคาดการณ์เข้ากับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด เป็นการศึกษาข้อมูลเพื่อใช้อธิบายเชิงตัวเลข สำหรับการวิเคราะห์หาความลาดชันการสร้างแบบจำลองในการแก้ไขปัญหาเป็นการคำนวณให้ออกมาในเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าโดยประมาณ

ในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาดีรภาพของลาดดิน การวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงของเชิงลาดริมตลิ่ง โดยการสร้างแบบจำลองด้วย PLAXIS ในการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์เป็นการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ด้วยชุดของสมการทางพีชคณิต วิเคราะห์เชิงตัวเลข FINITE ELEMENT เพื่อที่จะลดความผิดพลาดในการประมาณค่าให้น้อยที่สุด

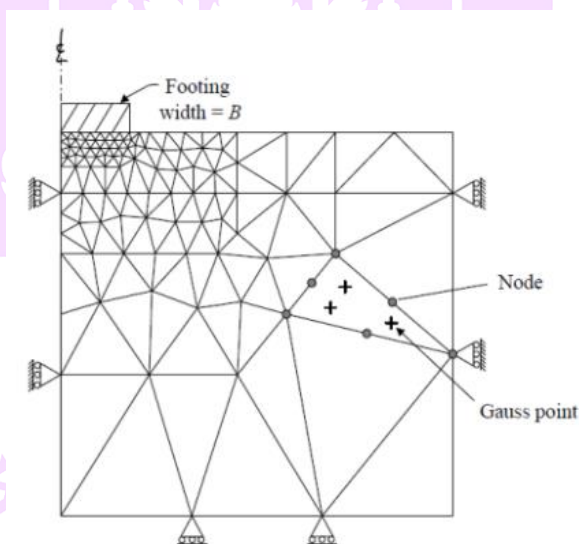
สมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 16

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = b_x \quad (16)$$

สมการพีชคณิต ดังสมการที่ 17

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = c_1 \quad (17)$$

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีกระบวนการในการโมเดลออกแบบสร้างแบบจำลองเรขาคณิตภายใต้การตรวจสอบในพื้นที่ขนาดเล็กโดยมีโหนดใช้กำหนดขอบเขตขององค์ประกอบ ดังภาพ 38



ภาพ 38 โหนดในการกำหนดขอบเขตของโมเดลที่ออกแบบ

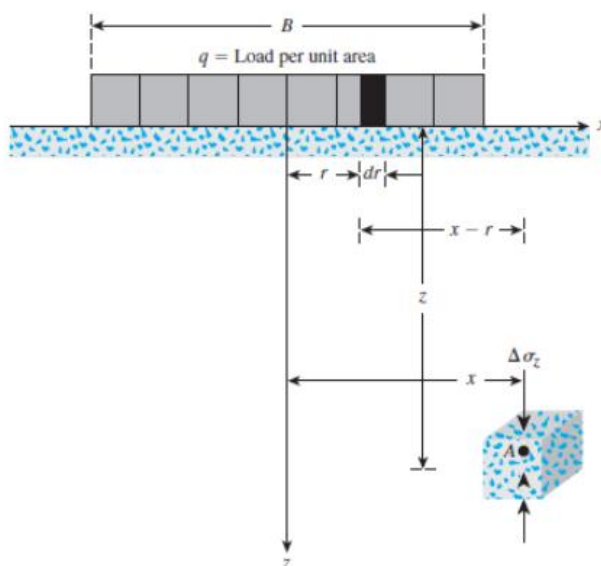
ที่มา: Suraparb, 2021

การวิเคราะห์ความต่อเนื่องในระบบ 2 มิติขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโหนดต่าง ๆ ในลักษณะที่แสดงเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ส่วนค่าการกระจัดในองค์ประกอบจะแสดงในรูปค่าพหุนาม ดังสมการที่ 18

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) U_i, N_i \quad (18)$$

Shape function of node i

ในสมการพื้นฐานในระบบเชิงเส้นที่สมมติโหลดต่อหน่วยพื้นที่ที่แสดงดังรูปภาพ 39 ต้องพิจารณาความกว้าง (B) ของโหนดในระบบเชิงเส้นในการโมเดลออกแบบ



ภาพ 39 ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดจากการให้น้ำหนักบนแถบโหนด

ที่มา: Suraparb, 2021

ในการโมเดลโหลดต่อพื้นที่ที่กำหนดความกว้าง(B)มีการกำหนดสมการเพื่อควบคุมค่าของ โหลดกระทำที่ประกอบการวิเคราะห์ได้ ดังสมการที่ 19

$$\Delta(\sigma_z) = \int d\sigma_z = \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} \left(\frac{2q}{\pi} \right) \left\{ \frac{Z^3}{[(x-r)^2 + Z^2]^2} \right\} dr$$

$$\Delta = \frac{q}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{Z}{x - (B^2/4)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{Z^3}{x + B/2} \right] - \frac{Bz \left[x^2 - z^2 \left(\frac{B^2}{4} \right) \right]}{\left[x^2 + z^2 \left(\frac{B^2}{4} \right) \right]^2 + B^2 Z^2} \right\} \quad (19)$$

Suhail, et al. (2018) ใน PLAXIS 2D จะศึกษาความแปรผันของแรงดันในรูปทรงของเสา ในดินที่มีความสูงอยู่ที่ 1 เมตร และที่ความกว้าง 0.1 เมตร ภายใต้การกระทำของโหนดน้ำหนักที่ กระทำบนผิวบนของเสาในดิน ในส่วนของขอบเขตสถานะน้ำใต้ดินจะอยู่บริเวณผิวล่างของโมเดล

ในขณะที่ขอบเขตด้านบนมีการซึมผ่านของน้ำ ด้วยวิธีการดำเนินการนี้จะจำลองสภาวะการระบายน้ำแบบปิด

วัสดุที่ใช้จำลองในคอมพิวเตอร์ในรูปแบบการระบายน้ำแบบเชิงเส้น การระบายน้ำตั้งค่าไม่มีการระบายน้ำ(Undrained) A อัตราส่วนที่เลือก = 0.0 เพื่อลดความตึงเครียด การซึมผ่าน = 0.01 เมตรต่อวัน วัสดุดินที่นำมาใช้พารามิเตอร์ $E' = 1000 \text{ KN/m}^2$, $V' = 0.0$, $k = 0.01 \text{ m/day}$ การตรวจสอบปัญหา โดยสมการอนุพันธ์ที่ 20 ความดันรูพรุนส่วนเกินดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (20)$$

เมื่อความลึกของดินด้านล่างในโปรแกรม PLAXIS 2D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ C_v แสดงดังสมการอนุพันธ์ที่ 21 ดังนี้

$$c_v = \frac{kE_{oed}}{\gamma_w} \quad (21)$$

โดย E_{oed} หาได้จากสมการอนุพันธ์ที่ 22

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu')E'}{(1-\nu')(1-2\nu')} \quad (22)$$

การแก้ปัญหสมการอนุพันธ์เชิงวิเคราะห์ เป็นฟังก์ชันของเวลา ความลึก แสดงดังสมการที่ 23 ดังนี้

$$\frac{p}{p_o}(z,t) = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1}}{2j-1} \cos\left((2j-1)\frac{\pi}{2} \frac{y}{H}\right) \exp\left(-(2j-1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{c_v t}{H^2}\right) \quad (23)$$

Arun, et al. (2020) การศึกษาเปรียบเทียบเสถียรภาพของลาดดินโดยใช้ โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO 5 และ PLAXIS 2D เป็นกรณีที่ศึกษาพื้นที่เนินเขาหรือทางลาดดินที่ขาดเสถียรภาพของดินเกิดการวิบัติพังทลายของลาดดิน ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการวิบัติการพังทลายของลาดดิน ได้แก่ ปริมาณฝนตกในพื้นที่ การทำการเกษตรในพื้นที่ลาดดิน รวมไปถึงการเคลื่อนตัวของลาดดิน ความแข็งแรงมั่นคงของมวลลาดเอียงหน้าลาดดินคือความต้านทานของลาดดินต่อปัจจัยต่างๆ

กรณีศึกษานำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO 5 และ PLAXIS 2D เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในการจำลองโมเดลเปรียบเทียบเพื่อแก้ปัญหาทางธรณีเทคนิคโดยอาศัยวิธีการของไฟต์ไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทั่วไปเป็นแนวทางการใช้มาตรฐานซึ่งทำให้การทำงานของนักออกแบบโครงสร้างวิเคราะห์ง่ายขึ้นเป็นเครื่องมือทางซอฟต์แวร์ที่ค่อนข้างมีความถูกต้องเหมาะสมแก่การนำไปใช้แก้ปัญหาทางธรณีเทคนิค ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ทั้ง 2 เป็นปัจจัยด้านความปลอดภัยสามารถกำหนดอัตราส่วน

ความต้านทานของกำลังรับแรงเฉือนได้ ส่วนปัจจัยด้านความปลอดภัยนำมาพิจารณาในความลาดชันของลาดดินพื้นที่ต่าง ๆ หากค่าความปลอดภัยน้อยกว่า 1.5 แสดงว่าความลาดชันในลาดดินพื้นที่นั้น ๆ ขาดเสถียรภาพของลาดดิน ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ทั้ง 2 เป็นการสนับสนุนการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพลาดดินของนักออกแบบในพื้นที่ที่ต้องการหาแนวทางป้องกันลาดดินนั้น ๆ ได้

การศึกษาโดยใช้ซอฟต์แวร์ทั้ง 2 โปรแกรม เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของทางลาดในเฉพาะพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการวิบัติพังทลายของลาดดินที่นำมาวิเคราะห์ ดังนั้นต้องดำเนินการสำรวจตรวจสอบเพื่อหาคุณสมบัติของพารามิเตอร์ในลาดดิน ด้วยเหตุผลการสำรวจข้อมูลนี้จึงต้องใช้ โปรแกรมซอฟต์แวร์ทั้ง 2 โปรแกรม มาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์เพื่อทราบค่าแนวโน้มความปลอดภัย เพราะฉะนั้นในการศึกษาจะมีขอบเขตจำกัดอยู่ที่การศึกษาเสถียรภาพทางลาดแล้วเสนอแนะมาตรการแก้ไขที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์เพื่อให้มั่นใจถึงความปลอดภัยในอนาคตและเป็นอีกส่วนหนึ่งส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืนเป็นมิตรกับสภาพสิ่งแวดล้อมมากขึ้นอีกด้วย

ในการศึกษานี้ดินที่ใช้พิจารณาเป็นดินลูกรัง ที่ได้จากการสำรวจรวบรวมข้อมูลที่ได้ในพื้นที่เลือกสำรวจกุนรันชี เมืองตฤศศูร รัฐเกรละ ประเทศอินเดีย มีน้ำท่วมรุนแรงทางตอนใต้ของอินเดีย เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม เสถียรภาพความลาดชันของลาดดินที่ศึกษาลาดชันที่ 1 ดังภาพ 40 และหลังเกิดการวิบัติที่ศึกษาลาดชันที่ 2 ดังภาพ 41 คุณสมบัติของดินในพื้นที่ศึกษามีคุณสมบัติดังแสดงในตาราง 6



ภาพ 40 ลาดดินถล่มที่มีผลกระทบจาก ความลาดชัน 1



ภาพ 41 ลาดดินถล่มที่มีผลกระทบจาก ความลาดชัน 2

ที่มา: Simon, 2020

ตาราง 6 คุณสมบัติของดินที่ทำการสำรวจ

คุณสมบัติของดิน	ความลาดชัน 1	ความลาดชัน 2
แรงดึงดูดแนวดิ่ง	2.708	2.679
ค่าจำกัดของเหลว	36	38
ค่าพลาสติกกลิมิต	21	23
ดัชนีพลาสติกกลิมิต	15	15
หมวดหมู่	SC	SC
ความหนาแน่น	18.4	19
กลุ่มความหนาแน่น	17	17
ความยืดหยุ่น	15.7	13.2
มุมเสียดทานภายใน	21	18

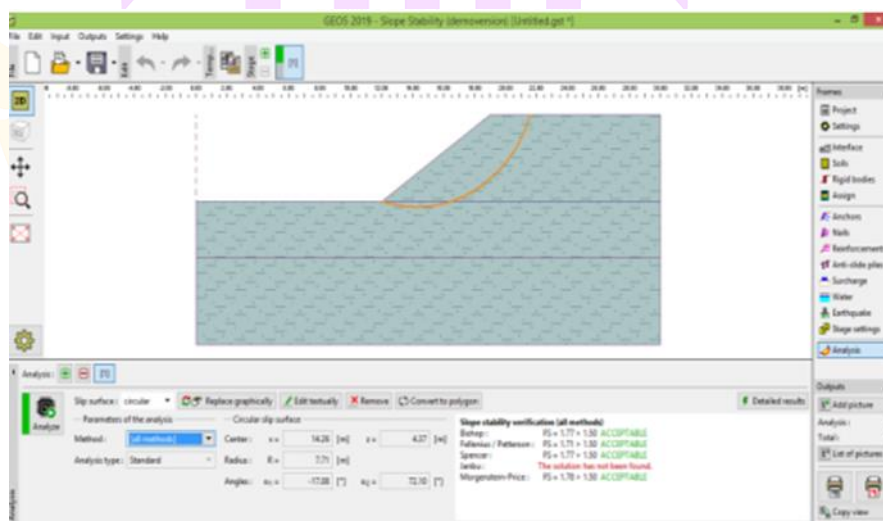
ที่มา: Simon, 2020

การดำเนินการรวบรวมข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมรุนแรง เก็บตัวอย่างลาดดินที่ทำการสำรวจ จากนั้นกำหนดคุณสมบัติ โดยมีการทดสอบ ความถ่วงจำเพาะ วิเคราะห์ผ่านตะแกรงร่อน หาค่า Atterberg การทดสอบการบดอัดและการทดสอบใช้แรงเฉือนโดยตรง นำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 และ PLAXIS 2D กำหนดพารามิเตอร์ตามการสำรวจข้อมูลดินที่วิเคราะห์ นำมาเปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของทั้ง 2 โปรแกรม เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบและเสนอแนะวิธีการป้องกันแก้ไขที่เหมาะสมในพื้นที่

โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ GEO5 และ PLAXIS 2D พารามิเตอร์ที่อินพุตข้อมูลเสถียรภาพทางลาด ประกอบด้วย เรขาคณิต ความลาดชันและความสูง นำมาแบ่งเขตกำหนดโซนต่าง ๆ รวมถึงคุณสมบัติพารามิเตอร์ในดินในแต่ละโซนกับระดับน้ำในแต่ละพื้นที่

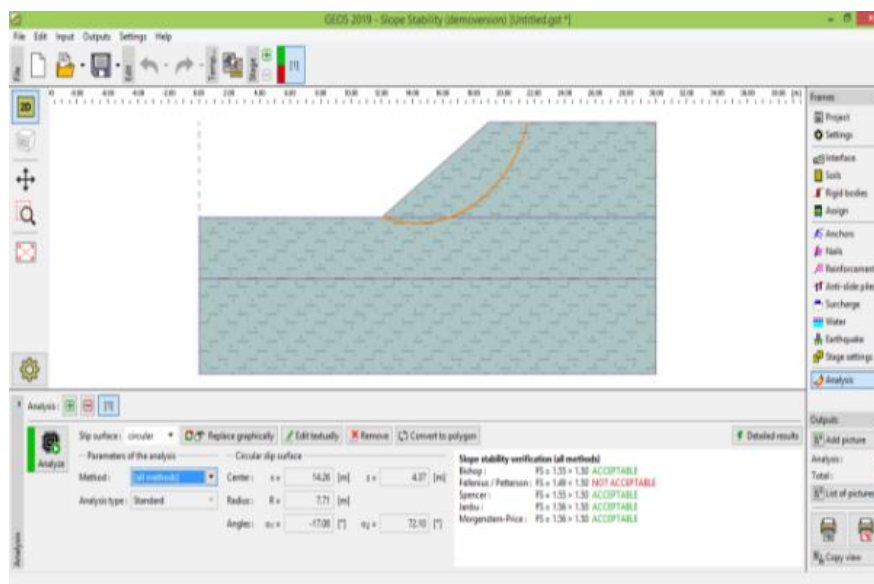
โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคพื้นฐาน โดยทั่วไปซอฟต์แวร์ GEO5 จะนำเสนอผลลัพธ์ออกมาในใช้กับมาตรฐาน โมเดลที่หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยความลาดชันที่ 1 ดังภาพ 42 โมเดลที่หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยความลาดชันที่ 2 ดังภาพ 43

โปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทั่วไปจะใช้วิเคราะห์การเสียรูปทางเสถียรภาพและการไหลซึมผ่านของน้ำทางธรณีเทคนิค สามารถวิเคราะห์ไปถึงขั้นตอนการขุดเจาะเขื่อน ฐานรากอุโมงค์ และกลศาสตร์ภูมิศาสตร์อ่างเก็บน้ำ (Zewdu, 2020)



ภาพ 42 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรม GEO5 มีค่าความปลอดภัย
= 1.71

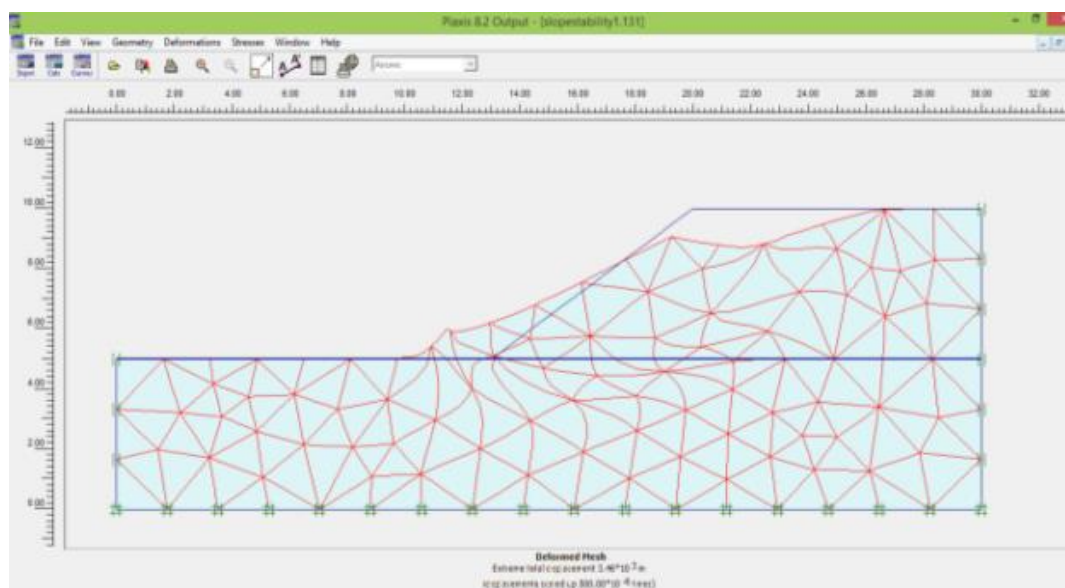
ที่มา: Simon, 2020



ภาพ 43 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ความลาดชัน 2 โดยใช้โปรแกรม GEO5 มีค่าความปลอดภัย = 1.49

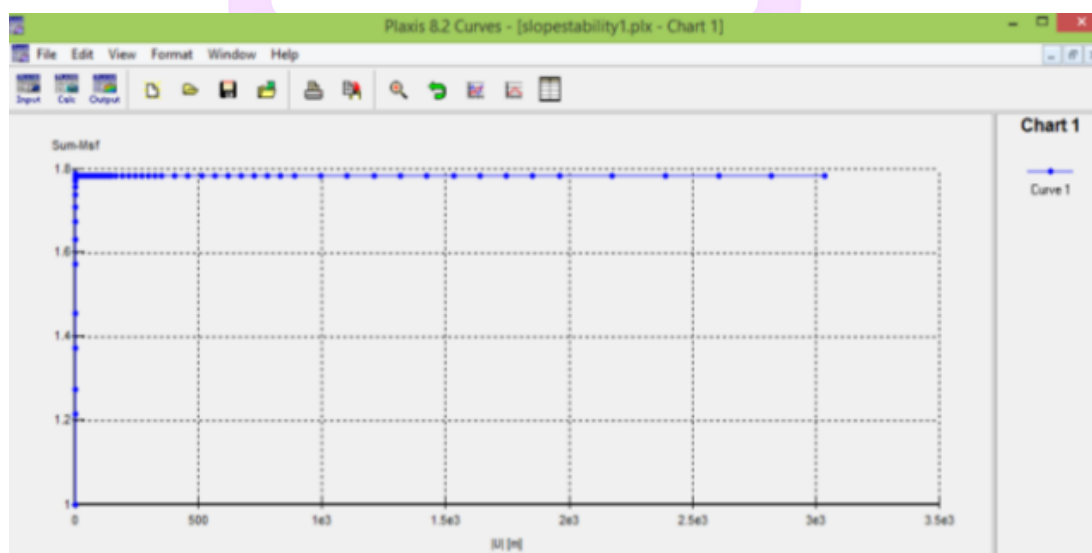
ที่มา: Simon, 2020

โปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ชูดข้อมูลในแบบจำลอง Mohr-Columb เป็นแบบจำลองวัสดุและใช้คุณสมบัติของดินที่ได้จากการทดสอบเป็นพารามิเตอร์ ตัวอย่างโมเดลวิเคราะห์แบ่งพื้นที่ (Mesh) ความลาดชัน 1 ดังภาพ 44 กราฟค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการโมเดล ดังภาพ 45 โมเดลวิเคราะห์แบ่งพื้นที่ (Mesh)



ภาพ 44 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ (Mesh)ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรมPLAXIS 2D

ที่มา: Simon, 2020



ภาพ 45 รูปภาพการโมเดลวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย ความลาดชัน 1 โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D มีค่าความปลอดภัย = 1.78

ที่มา: Simon, 2020

ในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 และ PLAXIS 2D ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สรุปได้ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 และ PLAXIS 2D

โปรแกรมซอฟต์แวร์	ค่าความปลอดภัย	
	ความลาดชัน 1	ความลาดชัน 2
GEO5	1.71	1.49
Plaxis 2D	1.78	1.56

ที่มา: Simon, 2020

ผลลัพธ์ที่ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ โปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ให้ค่าความแม่นยำมากกว่าโปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 จากผลการวิเคราะห์ที่สังเกตได้ชัดเจน ความลาดชัน 2 ในผลลัพธ์สามารถสรุปได้จากโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ให้ค่าความปลอดภัยในความลาดชัน 1 = 1.78 ความลาดชัน 2 ค่าความปลอดภัย = 1.56 ส่วนโปรแกรมซอฟต์แวร์ GEO5 ให้ค่าความปลอดภัยในความลาดชัน 1 = 1.71 ความลาดชัน 2 ค่าความปลอดภัย = 1.49 ทำให้สันนิษฐานได้ว่าจากระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความปลอดภัยที่ลดลง จึงทำให้ประเมินลาดดินบริเวณใกล้เคียงในเบื้องต้นได้ด้วย ในส่วนค่าความปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้ลดความเสี่ยงหลักเสี่ยงการวิบัติพังทลายของลาดดินได้รวมไปถึงการบำรุงรักษาเสถียรภาพลาดดินนั้น ๆ ให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความมั่นคงแข็งแรง และสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติเข้าสู่ระบบนิเวศได้

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม เป็นการวิเคราะห์ที่ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าเชิงตัวเลข ซึ่งใช้หลักการทฤษฎีการวิเคราะห์รูปแบบ Finite Element เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินมีความสอดคล้องใกล้เคียงการวิบัติพังทลายที่สำรวจได้ และตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนั้นได้นำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เป็นที่ยอมรับในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี จึงเหมาะสมที่จะใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์มาวิเคราะห์เสถียรภาพของดินมากกว่าการวิเคราะห์การวิบัติพังทลายของดินโดยใช้สมการการสูญเสียดินสากล Universal Soil Loss Equation (USLE) และการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยใช้วิธี Resilient Distributed Datasets (RDD) ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์รูปแบบ Finite Element เหมาะสมที่จะนำมาดำเนินการวิจัยประยุกต์ใช้ให้ตรงตามวัตถุประสงค์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

1. แผนที่แสดงขอบเขตอำเภอแม่ใจ ที่ศึกษา ย่อขยายแผนที่มาตราส่วน 1:50000 กรมทางหลวงชนบท แขวงทางหลวงชนบทพะเยา จังหวัดพะเยา (สำนักงานแขวงทางหลวงชนบทพะเยา, 2564)
 2. แผนที่ภูมิประเทศบอกพิกัดตำแหน่งแนวเส้นทางการไหลของลำน้ำแม่ปืมในเขตพื้นที่การศึกษา Google Earth Pro
 3. แผนที่ทางธรณีวิทยาจังหวัดพะเยา ปี พ.ศ. 2550 และปรับปรุง พ.ศ. 2551 มาตราส่วน 1:250,000 ที่เผยแพร่ของสำนักธรณีวิทยา (กรมทรัพยากรธรณี, 2551)
 4. ข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณพื้นที่ศึกษา ของเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนาโดยเก็บรวบรวมข้อมูลชั้นดินจากโครงการขยายประปาหมู่บ้าน ในบริเวณพื้นที่ตลิ่งลำน้ำ (Boring Log) (เทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา, 7 มกราคม 2551)
 5. ข้อมูลปริมาณน้ำของอ่างเก็บน้ำแม่ปืมที่ปล่อยผ่านลำน้ำแม่ปืมเก็บรวบรวมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 - พ.ศ. 2565 ระบบฐานข้อมูลน้ำในอ่างเก็บน้ำ (กรมชลประทาน ส่วนระบบสารสนเทศและภูมิสารสนเทศ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมชลประทาน, 2565)
 6. ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมง เก็บรวบรวมข้อมูลระดับน้ำรายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 - 2565 (สถานีวัดระดับน้ำ I17 ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา กรมชลประทาน, 2565)
 7. ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเก็บรวบรวมปริมาณน้ำฝนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 - 2565 (สถานีตรวจอากาศพะเยา ส่วนสารสนเทศอุตุนิยมวิทยา ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2565)
 8. สรุปรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเสถียรภาพลาดดิน ตลอดจนข้อมูลลักษณะการพังทลายของลาดดินบริเวณริมตลิ่งในภาพรวมส่วนใหญ่ จากแผนที่บัญญัติประจำปีงบประมาณ ของเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 - 2565
 9. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดริมตลิ่ง โดยใช้โปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W และ PLAXIS 2D วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินหาค่าความปลอดภัย
 10. อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยภาคสนาม ได้แก่ กล้องส่องระดับ (ชุดอุปกรณ์สำรวจค่าระดับ) กล้องบันทึกภาพ GPS จัปตำแหน่งพิกัดที่ตั้ง ตลับเมตรและเทปวัดระยะ
- การเก็บรวบรวมข้อมูลในการดำเนินงานวิจัยนี้ จะเก็บข้อมูลเชิงลึกจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเป็นข้อมูลจากพื้นที่ใกล้เคียงภาพรวมขนาดใหญ่ เนื่องด้วยลำน้ำพื้นที่ที่ดำเนินงานวิจัยเป็นลำน้ำ

ในชุมชนไม่ได้เป็นแม่น้ำลำคลองสายหลักจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเผยแพร่ข้อมูลเป็นหลัก ส่วนในข้อมูลเบื้องต้นอาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากสำรวจเข้าทำแผนงบประมาณประจำปี

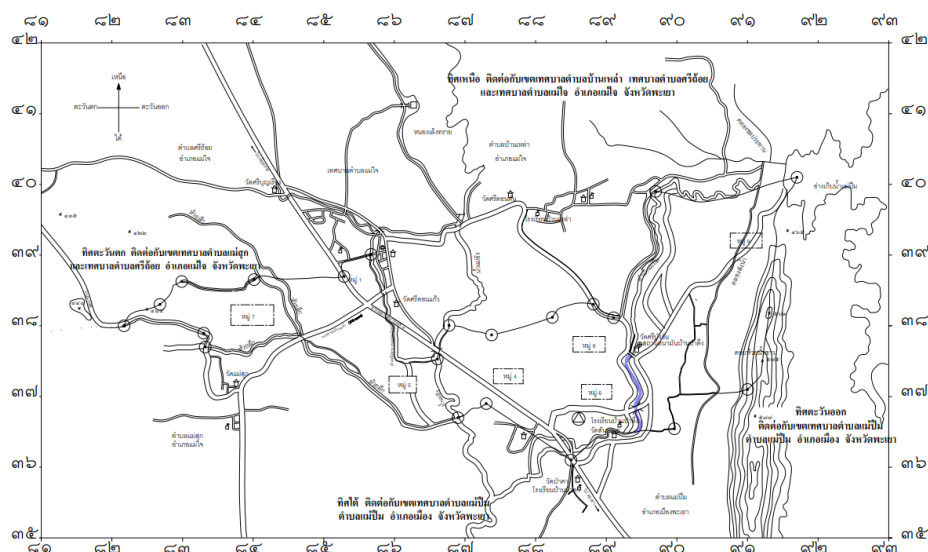
ขอบเขตพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูล

การสำรวจพื้นที่ขอบเขตศึกษา ซึ่งสำรวจขอบเขตพื้นที่ศึกษาที่มีหมู่บ้านชุมชน ที่ลำน้ำแม่ปืม ไหลผ่าน ประกอบด้วย หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้ ตำบลแม่ใจ และ หมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา บริเวณทำการสำรวจเก็บข้อมูลลักษณะลาดดินในพื้นที่ศึกษา มีทั้งหมด 7 จุดพื้นที่วัดในแนวเขตตำบลแม่ใจ โดยจุดเริ่มต้นพิกัด E 0588981 N 2137062 สิ้นสุดเขตหมู่ที่ 6 ถึง พิกัดจุดสิ้นสุด E 0588987 N 2137892 สิ้นสุดเขตหมู่ที่ 8 ดังภาพ 46 ซึ่งเป็นช่วงที่มีครัวเรือนอาศัยอยู่บริเวณตลิ่งลำน้ำแม่ปืมใช้สอยประโยชน์ทั้งอุปโภคบริโภคและใช้ประโยชน์ทางภาคเกษตรกรรมในการดำเนินชีวิตทั้งนี้อยู่ในขอบเขตทางน้ำไหลผ่าน ดังภาพ 47 แสดงเส้นทางน้ำไหลผ่านพอสังเขป



ภาพ 46 รูปแสดงแนวสำรวจข้อมูลในขอบเขตที่จะดำเนินการศึกษา พิกัดจุดเริ่มต้น E 0588981 N 2137062 พิกัดจุดสิ้นสุด E 0588987 N 2137892 และตำแหน่งทั้ง 7 จุดวัด

ที่มา: Google Earth Pro, n.d.



ภาพ 47 รูปแสดงแนวขอบเขตเส้นทางลำน้ำไหลที่จะดำเนินการศึกษาพอสังเขป

ที่มา: แขวงทางหลวงชนบทพะเยา จังหวัดพะเยา, 2563

ข้อมูลลักษณะลาดดินจากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดิน

ข้อมูลลักษณะลาดดินจะดำเนินงานจากการสำรวจเก็บข้อมูลบริเวณพื้นที่ที่เกิดการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ ในช่วงปี พ.ศ. 2564 - 2565 ในกรอบเขตพื้นที่ศึกษาและบริเวณที่เกิดการพังทลายนอกกรอบเขตพื้นที่ศึกษาแต่อยู่ในความรับผิดชอบของเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา ซึ่งแยกออกเป็น 2 หมู่บ้าน คือ หมู่ที่ 6 บ้านป่าตึงใต้ และหมู่ที่ 8 บ้านป่าตึงเหนือ ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ซึ่งมีบริเวณที่จะทำการเก็บข้อมูลลักษณะลาดดินจากการสำรวจ 7 จุดวิบัติ ดังนี้

จุดวิบัติที่ 1 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (ตอกเข็มไม้ยูคาลิปตัสเรียงกระสอบปูนทราย) หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณหลังบ้านนายผาพยาบาล

จุดวิบัติที่ 2 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (เรียงหินใหญ่ใส่กล่อง Gabions) หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณศาลเจ้าพ่อขุนคำ

จุดวิบัติที่ 3 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (เรียงหินใหญ่ใส่กล่อง Gabions) หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณบ้านนายปัน ยาสุมุท

จุดวิบัติที่ 4 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (เรียงหินใหญ่ใส่กล่อง Gabions) หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณบ้านนายกำธร คำไพโรจน์

จุดวิบัติที่ 5 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (เรียงหินใหญ่ใส่กล่อง Gabions) หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณบ้านนายสมาน สุปิน

จุดวิบัติที่ 6 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (เรียงหินใหญ่ใส่กล่อง Gabions) หมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณหน้าวัดศรีบังวัน

จุดวิบัติที่ 7 โครงการก่อสร้างแนวป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม (ตอกเข็มไม้ยูคาลิปตัสเรียงกระสอบปูนทราย) หมู่ที่ 6 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ณ บริเวณหน้าบ้านนายมา อุตตะมา

ลักษณะรูปแบบการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำ มีหลายรูปแบบซึ่งเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ (Imanshoar, et al., 2012) ได้แบ่งรูปแบบจากการศึกษาเชิงทดลองการกัดเซาะผิวลาดดินบริเวณตลิ่ง โดยสาเหตุหลักของรูปแบบการพังทลายเกิดจากการกัดเซาะ และการซึมผ่านของมวลน้ำในอนุภาคของมวลดินจนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของลาดดิน กรณีในการซึมผ่านของน้ำในชั้นดินทราย ยิ่งถูกกัดเซาะก็จะเกิดการยุบตัวแล้วพังทลาย การสูญเสียเสถียรภาพของมวลดินและความชื้นที่สะสมอยู่ในชั้นดินจะเกิดความดันน้ำรูพรุนต่อเสถียรภาพของความลาดชันของหน้าดิน รูปแบบของการกัดเซาะลักษณะนี้จึงเรียกว่า “รูปแบบท่อกระซอก”

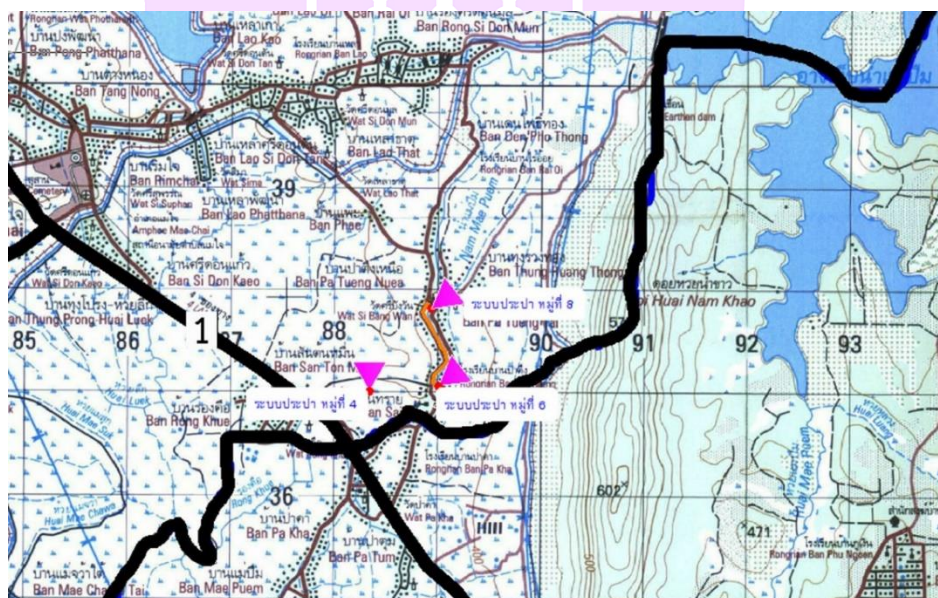
รวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดิน ในขอบเขตที่จะดำเนินการศึกษา พิกัดจุดเริ่มต้น E 0588981 N 2137062 พิกัดจุดสิ้นสุดโครงการ E 0588987 N 2137892 ซึ่งในขั้นตอนดำเนินงานจะใช้ข้อมูลสำรวจดินจากการเจาะทดสอบดินของโครงการขยายระบบประปาหมู่บ้าน หมู่ที่ 6 และหมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ดังภาพ 48 แสดงตำแหน่งเจาะทดสอบดิน

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน พิกัด E 0588981 N 2137062 ที่ทำการเจาะระบบประปาหมู่บ้าน ตั้งอยู่ในที่สาธารณะประโยชน์หมู่บ้านใกล้บริเวณตลิ่งลำน้ำ โดยได้ทำการเจาะสำรวจได้ความลึกสูงสุดอยู่ที่ 9.45 เมตร ตั้งแต่ผิวดิน ลงไปถึงความลึกเฉลี่ย 2.50 เมตร ดินชั้นนี้ประกอบด้วยดิน ชนิด ทรายละเอียดมาก (Silty very fine sand) โดยมีสีน้ำตาล มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (RELATIVE DENSITY) ซึ่งตรวจวัดโดยการแบ่งตัวอย่าง (SPLIT SPOON SAMPLE) มีค่าอยู่ในช่วงหลวมมากถึงปานกลาง (VERY LOOSE TO MEDIUM) ดินชนิดนี้จำแนกอยู่ในกลุ่ม SM-SP จากระดับความลึกเฉลี่ย 2.50 เมตร ลงไปจนถึงก้นหลุมเจาะทดสอบ ที่ระดับความลึกเฉลี่ยประมาณ 9.45 เมตร ดินชั้นนี้ประกอบด้วย ดินชนิดดินเหนียว (SILTY CLAY) โดยมีดินแดง (LATERITES) แทรกปนอยู่ในชั้นล่าง ๆ มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ซึ่งตรวจวัดโดยการแยกตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วงแข็งถึงแข็งมาก (VERY STIF TO HARD) ดินชนิดนี้จำแนกอยู่ในกลุ่ม CL - ML, CL - SM

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน พิกัด E 0588987 N 2137892 ชั้นดินที่ระดับ 2.00 เมตร จากผิวดิน เป็นดินเหนียวปนตะกอน มีความแน่นพอสมควร มีสีน้ำตาลแดงปนเทา (REDDISH-BROWN & GREY SILTY CLAY) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง STIFF และเหมาะสมที่จะทำการก่อสร้าง

ความต้านทานประลัยของดินทั้งในแง่เสถียรภาพและการทรุดตัวมีค่ามากกว่า 26.43 ตันต่อตารางเมตร โดยทั่วไปเมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในมวลดิน อันเนื่องจากผิวน้ำหรือการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีผลต่อความชื้นและการทรุดตัวของดินผู้ที่นำข้อมูลไปใช้ควรเผื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากข้อมูลในเบื้องต้นด้วย

ปัจจัยของพารามิเตอร์ในดินที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินริมตลิ่ง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินค่าความปลอดภัยจะแปรผันตามคุณสมบัติของมวลดิน ในหลักการเบื้องต้นที่จะทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของดิน วิเคราะห์เสริมความลาดชันโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน การเจาะสำรวจเพิ่มหลุมทดสอบมากขึ้นเพื่อที่จะลดสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนในคุณสมบัติของดิน (Thongchart, et al., 2550)

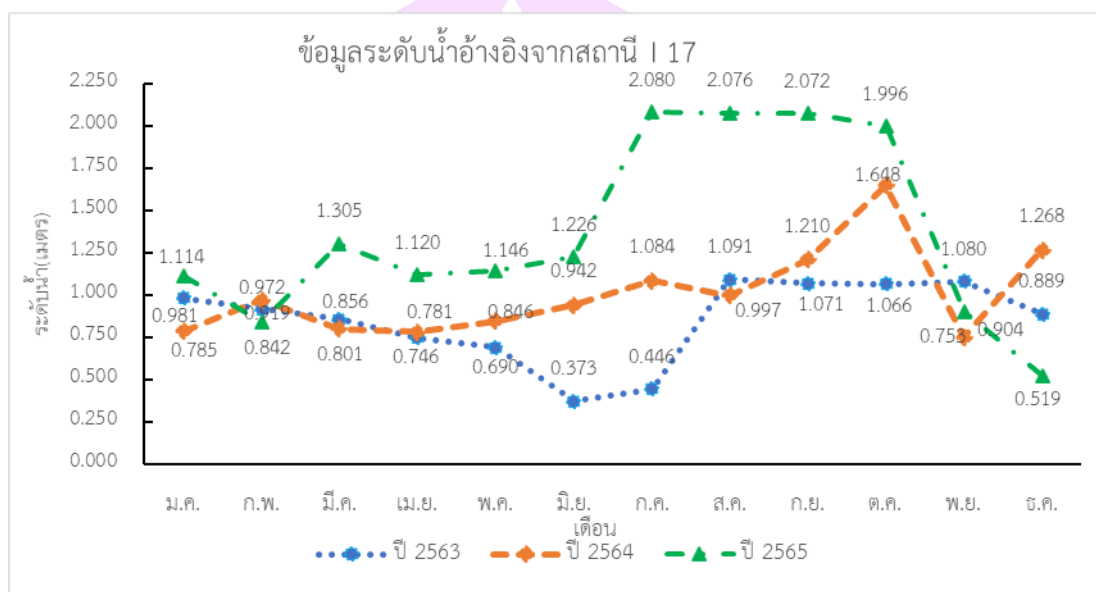


ภาพ 48 แผนที่แสดงตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6 และหมู่ที่ 8 ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

ที่มา: กรมทางหลวงชนบท แขวงทางหลวงชนบทพะเยา จังหวัดพะเยา, 2564

ข้อมูลระดับน้ำในลำน้ำแม่ปืม

ข้อมูลระดับน้ำอ้างอิงจากสถานี I 17 เจดีย์งาม (แม่น้ำอิง) ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ซึ่งเป็นข้อมูลระดับน้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงลำน้ำแม่ปืมเทียบจากการสำรวจลาดดินริมตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ข้อมูลที่นำมาใช้เทียบวัดระดับน้ำ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 - 2565 ซึ่งการขึ้นลงของระดับน้ำ มีช่วงระดับน้ำที่แตกต่างกันไม่มากในแต่ละปี ดังภาพ 49



ภาพ 49 กราฟแสดงระดับน้ำขึ้นลงรายเดือน ในปี พ.ศ. 2563 - พ.ศ. 2565 จากสถานี I 17 เจดีย์งาม (แม่น้ำอิง) ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา

ทั้งนี้ในงานวิจัยยังทำการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำที่เกิดจากฝนตกตามฤดูกาล ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝน จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ สถานีตรวจอากาศ จังหวัดพะเยา ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 - 2565 เป็นข้อมูล 5 ปีย้อนหลัง โดยการนำสถิติข้อมูลน้ำฝนรายปีมาเฉลี่ยในเขตพื้นที่อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา การวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากแหล่งข้อมูลอ่างเก็บน้ำแม่ปืมและข้อมูลปริมาณน้ำฝนจังหวัดพะเยาจะนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำไหลลงสู่ลำน้ำปืมระดับน้ำที่ขึ้นลงของน้ำในลำน้ำปืม โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำหลากผ่านลำน้ำ โดยวิธี Muskingum เป็นกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำหลาก (Flood Routing) วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำหลาก ใช้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นน้ำโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตามเวลาและบริบทสภาพพื้นที่ ซึ่งเป็นวิธีที่แสดงให้เห็นถึงระดับขึ้นลงของน้ำและเวลาที่ปริมาณน้ำสูงสุดใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง วิธีการเคลื่อนตัวของน้ำหลาก (Flood Routing) สามารถ

แบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ การคำนวณเส้นทางอ่างเก็บน้ำ (reservoir routing) และการคำนวณกระแสน้ำ (streamflow routing) สำหรับการคำนวณเส้นทางอ่างเก็บน้ำ (reservoir routing) นั้น เป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาตรการเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ ต่อรูปร่างของ กราฟน้ำท่าที่ไหลเข้ามาสู่อ่าง และไหลออกจากอ่างเก็บน้ำในเวลาต่อมา สามารถหาอัตราการไหลออก สูงสุด และระดับน้ำสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบฝายน้ำล้น ท่อระบายน้ำ อาคารสลายพลังงาน และ โครงสร้างทางชลศาสตร์ต่าง ๆ ได้ควบคุม ป้องกัน หรือบรรเทาอุทกภัยที่เกิดจากพายุฝน ซึ่งสามารถ คำนวณการน้ำล้นหน้าได้ ส่วนการคำนวณกระแสน้ำนั้น เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลง รูปร่างกราฟน้ำท่าของการเคลื่อนตัวของน้ำหลากเมื่อเคลื่อนตัวไปด้านท้ายน้ำ

ในส่วนงานวิจัยนี้ใช้หลักการการคิดการเคลื่อนตัวของน้ำหลากในลำน้ำ (Channel Routing) เป็นวิธีการหาระดับน้ำและอัตราการไหลที่หน้าตัดต่าง ๆ ทางด้านท้ายน้ำของลำน้ำ สามารถ ช่วยคาดการณ์ปริมาณน้ำท่วมได้ นำไปสู่การออกแบบคันป้องกันน้ำท่วมได้ (Levee) การหาปริมาตร เก็บกักในลำน้ำโดยวิธีของ Muskingum

ข้อดีวิธี Muskingum สามารถหาระดับน้ำและอัตราการไหลที่หน้าตัดต่าง ๆ ทางด้าน ท้ายลำน้ำได้ สามารถออกแบบคันป้องกันน้ำท่วมได้และสามารถคาดการณ์ เตือนภัยน้ำท่วมได้

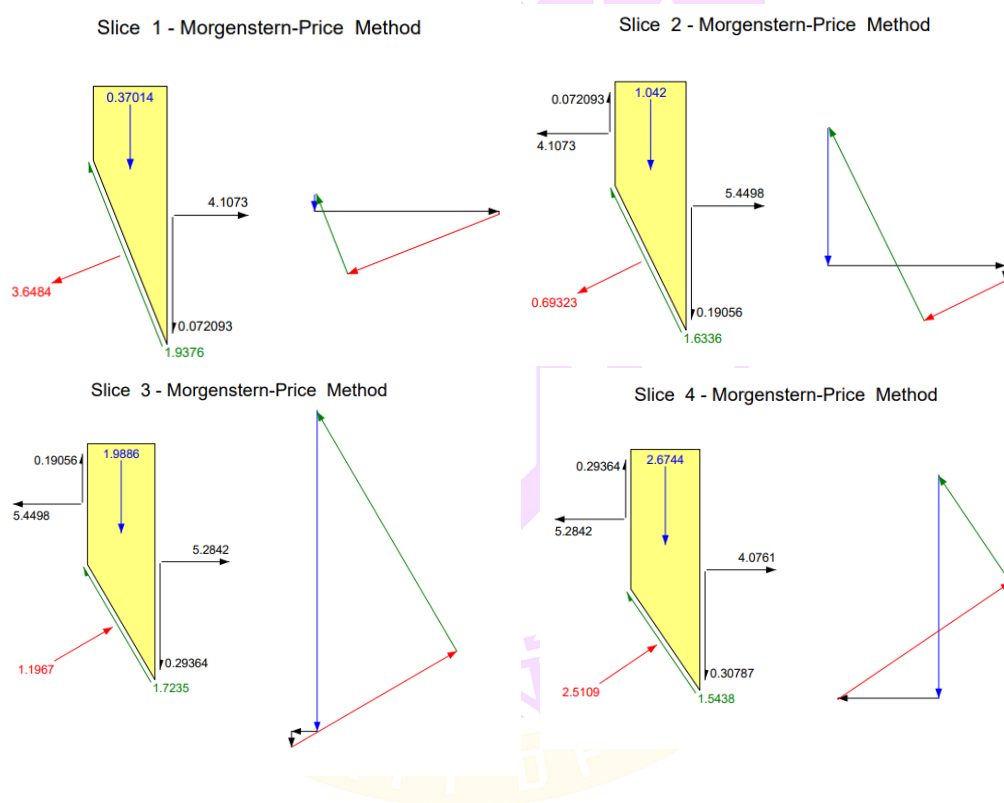
ข้อเสียวิธี Muskingum ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมน้ำหลากที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว ไม่ได้คำนึงถึงการระเหยของน้ำระหว่างการไหลและไม่เหมาะกับการไหลที่มี backwater หรือ reverse flow

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และ PLAXIS 2D

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เกิดการวิบัติโดยผ่านโปรแกรม ซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W กับ PLAXIS 2D เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์พื้นฐานทั่วไปที่ใช้ กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในการจำลองโมเดล โดยทั่วไปเป็นแนวทางในการตัดสินใจ ของนักออกแบบในการวิเคราะห์โครงสร้างให้ง่ายขึ้นเป็นเครื่องมือทางซอฟต์แวร์ที่ค่อนข้างมีความ ถูกต้องเหมาะสมแก่การนำไปใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและธรณีเทคนิค

การศึกษานี้จะนำโปรแกรมซอฟต์แวร์มาประเมินเสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ วิเคราะห์ เสถียรภาพของพื้นที่ลาดดินที่สำรวจข้อมูล โดยในโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W ใช้หลักการ ในการโมเดลแบบจำลอง Mohr - Coulomb อาศัยหลักการวิเคราะห์แบบ มอร์เกนสเตรน ไพร์ส (Morgenstern Price) แบ่งขั้นตอน (Method) ดังภาพ 50 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W ใช้หลักการในการโมเดลแบบจำลอง Mohr - Coulomb อาศัยหลักการวิเคราะห์แบบมอร์เกนสเตรน ไพร์ส (Morgenstern Price) การวิเคราะห์ด้วยหลักการ Morgenstern - Price เป็นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณความเสถียรของดินในพื้นที่ที่มีหลายชั้นดิน

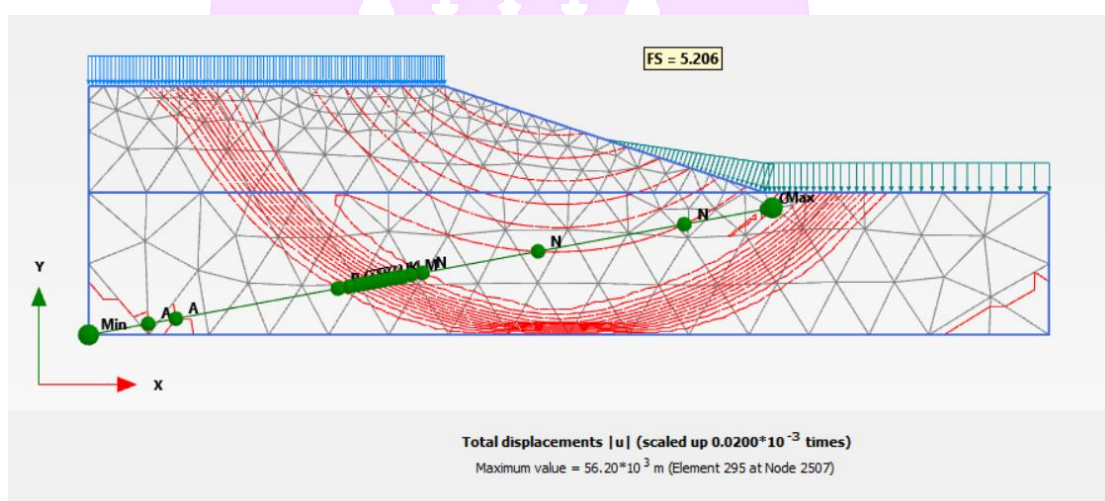
มีการเลื่อนไถลของดินหรือความลาดเอียงที่ไม่สม่ำเสมอ วิธีนี้ใช้หลักการของการหาสมดุลของแรงในระบบที่มีหลายจุด ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้แม่นยำขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่มีความซับซ้อนหรือมีการเคลื่อนที่หลายทิศทาง ทั้งนี้ยังให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety), ค่าปริมาตรรวม (Total Volume) ค่าน้ำหนักรวม (Total Weight) ค่าความต้านทานรวม (Total Resisting Moment) ค่าน้ำหนักกระทำรวม (Total Activating Moment) แรงต้านทานรวม (Total Resisting Force) และแรงกระทำรวม (Total Activating Force) โปรแกรม GEOSLOPE 2012 SLOPE/W จึงมีความเหมาะสมสำหรับการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินในการโมเดลขึ้นรูปและมีความสอดคล้องใกล้เคียงสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติจากการสำรวจข้อมูลลาดดินอีกด้วย



ภาพ 50 แสดง Slice 1- Slice 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

ในโปรแกรม PLAXIS 2D ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงสร้างตาข่าย (Finite Element) เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้กระบวนการสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตภายใต้การตรวจสอบในพื้นที่ไหนก็ตาม ๑ ใช้กำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ความต่อเนื่องในระบบ 2 มิติ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ

ของโหนดต่าง ๆ ในลักษณะที่แสดงเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ดังภาพ 51 ผลลัพธ์สามารถนำไปใช้งานได้ เช่น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ซึ่งบ่งบอกถึงเสถียรภาพของลาดดิน การกระจายของแรงที่กระทำต่อชั้นดิน การเคลื่อนที่ของดินในแต่ละจุดเพื่อหาความเสี่ยงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ให้ผลการกระจายน้ำและการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินในพื้นที่ได้สามารถมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบโครงสร้างฐานราก คันทาง กำแพงกันดินหรืองานถนนสาธารณะนำมาวิเคราะห์และออกแบบง่ายขึ้นอีกด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D จึงเป็นซอฟต์แวร์ประเภทหนึ่ง ที่มีความเหมาะสมมาช่วยในการวิเคราะห์รวมทั้งใช้ในการออกแบบและแก้ไขงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 51 โมเดลวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ในโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D แล้วนำมาเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 2 ซอฟต์แวร์ ใช้คาดการณ์เสถียรภาพของลาดดินที่เกิดการวิบัติพังทลาย และในตัวโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D จะนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบวิเคราะห์โครงสร้างตามหลักวิศวกรรมปฐพี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จัดทำแบบรูปรายงานเสนอแนวทางวิธีป้องกันการวิบัติพังทลายของลาดดินต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของลาดดิน (Slope Failure Analysis) เปรียบเทียบจากการพังทลายของตลิ่งแม่น้ำ (River Bank Failure) ในทางวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering) ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ๆ ซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะของกระบวนการพังทลายและธรณีสัณฐานที่แตกต่างกัน ดังนี้

ประเภทที่ 1 การทรุดตัวตื้น (Shallow Sloughing) ลักษณะเกิดการพังทลายในระดับผิวดินหรือความลึกเล็กน้อย ไกล่ผิวตลิ่ง สาเหตุเกิดจากการกัดเซาะที่ฐานตลิ่งโดยน้ำ ทำให้ดินสูญเสียการยึดเหนี่ยว มีการทรุดตัวเป็นแผ่นบาง ๆ ตามแนวลาดของตลิ่ง พบรอยแยกเล็ก ๆ ไกล่ผิวดินตลิ่งมีเศษดินสะสมอยู่บริเวณฐานของตลิ่ง

ประเภทที่ 2 การพังทลายแบบตื้น (Shallow Failure) ลักษณะการพังทลายของดินชั้นบนของตลิ่งในรูปแบบของมวลดินหลุดลื่น สาเหตุดินด้านบนอ่อนตัวลง เช่น จากน้ำฝนหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้น มักเห็นเป็นหลุมหรือร่องลึกไม่มากบนตลิ่ง พื้นผิวพังทลายมักมีความชันไม่มาก อาจเห็นมวลดินเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของตลิ่งเป็นแผ่นบาง ๆ

ประเภทที่ 3 การพังทลายแบบหมุนตัว (Rotational Failure) ลักษณะการพังทลายแบบการเลื่อนตัวของมวลดินโดยหมุนรอบจุดศูนย์กลาง คล้ายแผ่นวงกลม สาเหตุดินมีความชื้นสูง จนเกิดแรงดันน้ำในดินมาก ทำให้แรงต้านทานไม่เพียงพอ พบรอยร้าวโค้งเว้า หรือหลุมยุบคล้ายรูปชาม มักพบในตลิ่งที่สูง ตลิ่งจะถอยร่นเป็นช่วง ๆ อย่างชัดเจน

ประเภทที่ 4 การพังทลายแบบเลื่อนตัวในแนวราบ (Translational Failure) ลักษณะมวลดินเลื่อนตัวออกไปในแนวราบหรือความชันคงที่ ไม่มีการหมุน สาเหตุการลื่นไถลของชั้นดินบนที่มีความชุ่มน้ำ บนชั้นดินที่มีความแข็งแรงต่ำ เช่น ชั้นดินเหนียวอ่อน พบรอยร้าวยาวขนานไปกับแม่น้ำ ดินที่เลื่อนจะยังคงรูปร่างเดิมในระดับหนึ่ง พบการแยกตัวของชั้นดินที่ค่อนข้างราบเรียบ

ประเภทที่ 5 การพังทลายแบบยื่น (Cantilever Failure) ลักษณะตลิ่งด้านล่างถูกน้ำกัดเซาะจนกลายเป็นโพรง ส่วนด้านบนยังคงอยู่จนกระทั่งพังทลายลงมา สาเหตุการกัดเซาะใต้ดินโดยมวลน้ำทำให้ดินด้านบนไม่มีฐานรองรับ เห็นโพรงหรือช่องว่างใต้ตลิ่ง ส่วนบนของตลิ่งยื่นออกมาเหมือนแขนงอก เมื่อตลิ่งพังจะเห็นเศษดินกองที่โคนตลิ่งแบบเฉียบพลัน

จากการสำรวจลักษณะลาดดินที่เกิดการวิบัติในพื้นที่ศึกษา ทั้งหมด 7 จุดบริเวณวิบัติในกรอบแนวเขตพื้นที่ศึกษาซึ่งได้เลือกจุดวิบัติที่ส่งผลกระทบมากที่สุด โดยเฉพาะในบริเวณที่มีถนนหรือสิ่งปลูกสร้างอยู่ใกล้กับขอบตลิ่งลำน้ำ ลักษณะของการพังทลาย (Failure Mode)

เป็นการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำแบบการถล่มตัว (Slump Failure) ที่แสดงรอยเฉือนเป็นแนวโค้ง (Rotational Slip Surface) ซึ่งถ้าจำแนกตามการวิบัติพังทลายของตลิ่งลำน้ำ (River Bank Failure) เข้าข่ายประเภทที่ 3 การพังทลายแบบหมุนตัว (Rotational Failure) ลักษณะการพัง มีลักษณะของ Mass Movement คือ ดินส่วนหนึ่งถล่มลงไปพร้อมกันเป็นมวลก้อนใหญ่ ดินที่ถล่มลงไปมีลักษณะ Plastic Flow อาจเกิดจากปริมาณน้ำใต้ผิวดินที่สูงมากในช่วงเวลานั้น

สาเหตุที่เป็นไปได้ของการวิบัติ (Possible Causes) แรงดันน้ำรูพรุน (Pore Water Pressure) เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน ทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินลดลง การกัดเซาะดินลาด (Toe Erosion) จากการไหลของน้ำในลำน้ำ ทำให้ฐานลาดดินสูญเสียการพยุงมวลดินส่วนบน โครงสร้างดินอ่อน (Soft Soil Profile) ไม่สามารถรับน้ำหนักได้เมื่ออิมตัวน้ำ การขาดระบบระบายน้ำ (Drainage System) ทำให้น้ำซึมสะสมในดินบริเวณลาด น้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างหรือถนนใกล้เคียง อาจเพิ่มแรงเฉือนเกินความสามารถของดินในการรับแรง พฤติกรรมของดินที่เกี่ยวข้อง (Soil Behavior) ดินมีลักษณะเป็น ดินเหนียวหรือดินร่วนเหนียว (CL หรือ CH) ซึ่งเมื่ออิมตัวน้ำจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงเฉือน (Shear Strength) เกิดการพังทลายแบบ Undrained Shear Failure เมื่อแรงเฉือนภายใน (Shear Stress) เกินแรงต้าน (Shear Strength) อาจมีพฤติกรรม Time dependent Deformation คือเกิดการทรุดตัวสะสมก่อนเกิดการพังทลายเฉียบพลัน

ลักษณะการวิบัติพังทลายของลาดดินในจุดวิบัติต่าง ๆ

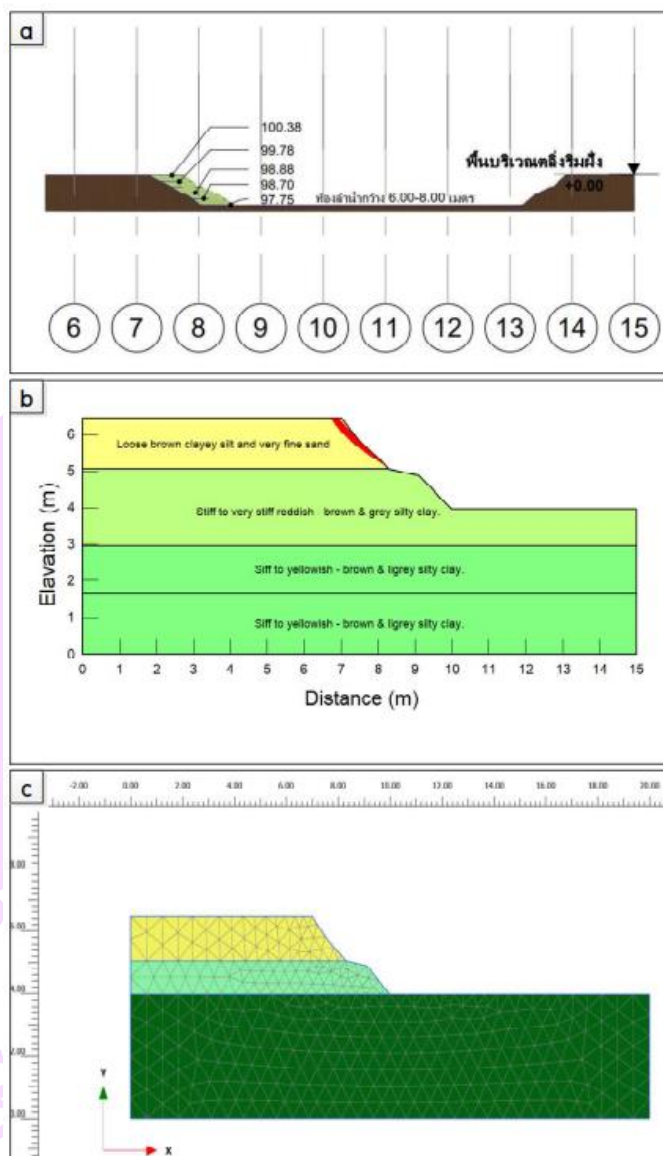
ลักษณะของการวิบัติพังทลายของจุดวิบัติที่ได้ทำการสำรวจทั้ง 7 จุดวิบัติ จากการสำรวจประกอบกับข้อมูลชั้นดิน พบว่า เกิดในรูปแบบการเลื่อนไถล (Slip Failure) โดยคาดว่าเกิดจากการสะสมของน้ำในดินจากฝนตกต่อเนื่อง แล้วลักษณะของลำน้ำที่ไหลผ่านหน้าตัดลาดดินที่วิบัติมีรูปร่างโค้งตัวไปมา โดยที่ลำน้ำตัวแบบโค้งนอก การเปลี่ยนทิศทางการไหลก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ส่งผลให้กระแสน้ำเบนไปยังด้านนอกของโค้งน้ำ (outer bend) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วของกระแสน้ำสูงกว่าด้านในของโค้งน้ำ (inner bend) ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าว จึงเกิดกระแสน้ำวนรอง (secondary flow) และแรงเฉือน (shear stress) บริเวณตลิ่งด้านโค้งนอกมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้เกิด การกัดเซาะตลิ่ง (bank erosion) อย่างต่อเนื่องและยังมีระดับที่สูงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดแรงกระทำก่อให้เกิดการวิบัติของลาดดิน (slope failure) การพังทลายแบบเฉือน (shear failure) หรือการพังทลายแบบไถลของมวลดิน (slump failure) ซึ่งปรากฏให้เห็นชัดเจนในฤดูน้ำหลาก หรือในช่วงที่ระดับน้ำเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ชั้นดินมีลักษณะเป็นดินตะกอนทราย มีการจัดเรียงตัวของเม็ดดินอย่างหลวม (loosely packed) และมีค่าความหนาแน่นจำเพาะค่อนข้างต่ำ การวิบัติของลาดดินที่ประกอบด้วยดินตะกอน

ทราย สาเหตุสำคัญมักเกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำสูง แต่มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ทำให้เมื่อเกิดฝนตกหนัก หรือมีการซึมของน้ำใต้ดิน ดินสามารถอุ้มน้ำได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าแรงต้านทานการเฉือน (shear strength) ลดลง อีกทั้ง ดินตะกอนทรายยังไวต่อการเกิดแรงดันน้ำรูพรุน (pore water pressure) เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นรวดเร็ว เป็นปัจจัยที่นำไปสู่การพังทลายของลาดดินได้ ลักษณะทางกายภาพ ดินตะกอนทรายที่พบในพื้นที่ลาดมักไม่มีการจัดเรียงชั้นตะกอนอย่างชัดเจนและมักจะมีการแทรกตัวของตะกอนละเอียด เช่น ดินร่วนหรือดินเหนียว ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นชั้นอุ้มน้ำ เพิ่มความซับซ้อนในการคาดการณ์พฤติกรรมทรุดหรือการพังทลายของลาดดินในสภาพจริง

กลไกดังกล่าวถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความไม่เสถียรของตลิ่งลำน้ำ การเปลี่ยนแปลงทางธรณีสัณฐาน (fluvial geomorphology) ของลำน้ำในระยะยาว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินริมตลิ่ง ความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐาน และระบบนิเวศของแม่น้ำโดยรวม ส่งผลให้ความต้านทานแรงเฉือนของดินลดลง จนไม่สามารถรับแรงเฉือนจากน้ำหนักตัวเองได้

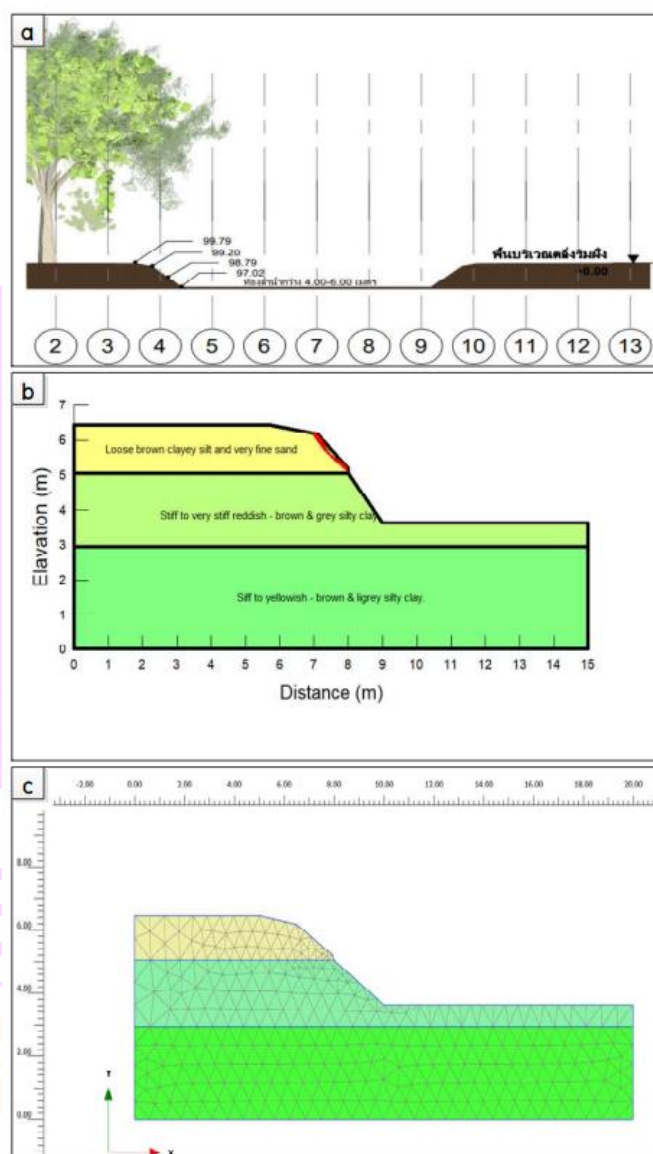




ภาพ 52 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณอุบัติเหตุที่ 1 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

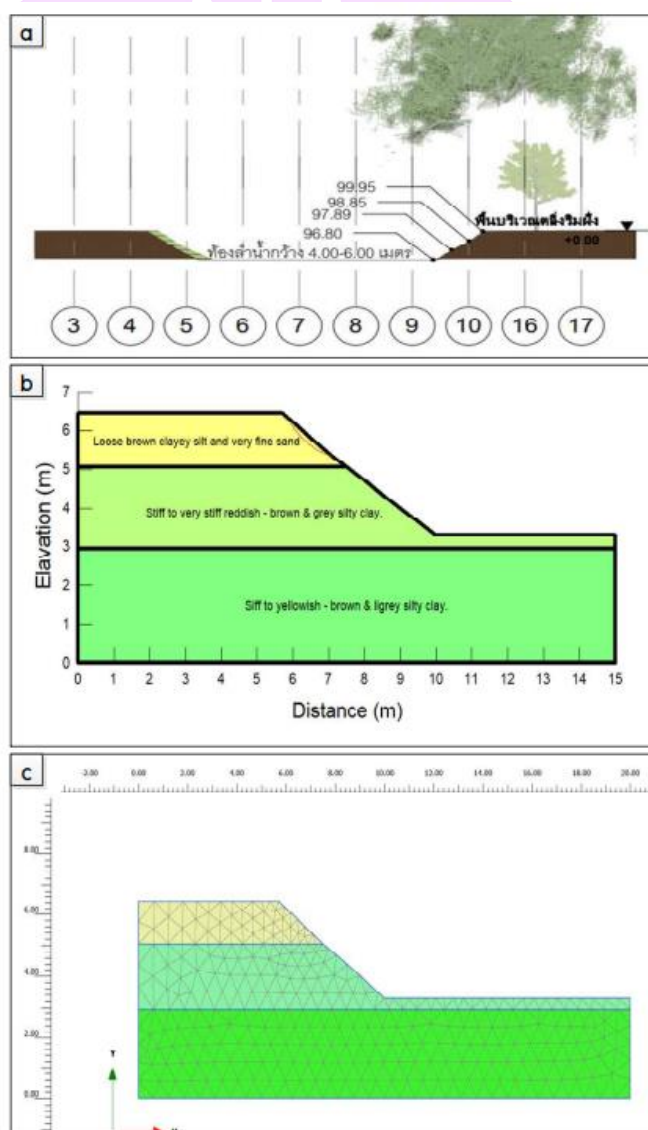
จุดอุบัติเหตุที่ 1 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 20.00 เมตร สำรวจ 5 Station ความกว้าง ประมาณ 4.30 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 1.94 เมตร พบว่า พื้นที่สำรวจบริเวณลาดดินที่เกิดการอุบัติเหตุ การพังทลายเกิดในรูปแบบการเลื่อนไถลแบบโค้ง (Rotational Slip Failure) จากการสำรวจคาดว่าเกิดจากการสะสมของน้ำในดินจากฝนตกต่อเนื่องปริมาณน้ำหลากที่เพิ่มขึ้น

อย่างฉับพลัน ส่งผลให้ความต้านทานแรงเฉือนของดินลดลงจนไม่สามารถรับแรงเฉือนจากน้ำหนักตัวเองได้



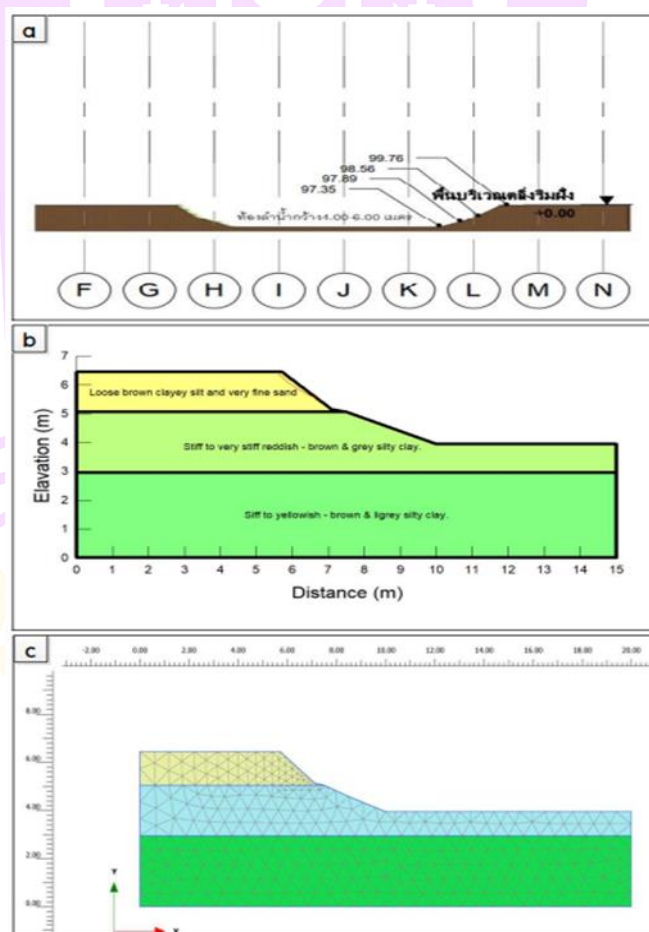
ภาพ 53 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิถีที่ 2 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 2 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 20.00 เมตร สํารวจ 5 Station ความกว้าง ประมาณ 4.10 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 2.61 เมตร พบว่าลาดดินได้เกิดการวิบัติในลักษณะของการพังทลายของลาด (Slope Failure) โดยลักษณะของการพังทลายที่พบเป็นแบบการถล่มของดินบริเวณผิวหน้า ซึ่งเกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพของมวลดินในช่วงต้นใกล้ผิวนอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณดังกล่าวมีต้นไม้ขนาดใหญ่ที่มีรากแผ่ลึกและอาจส่งแรงกระทำต่อโครงสร้างของดิน อีกทั้งอาจมีการกระทำปรับหน้าดินใกล้บริเวณลาดดินวิบัติที่อาจเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Surcharge) และเร่งให้เกิดการพังทลายได้



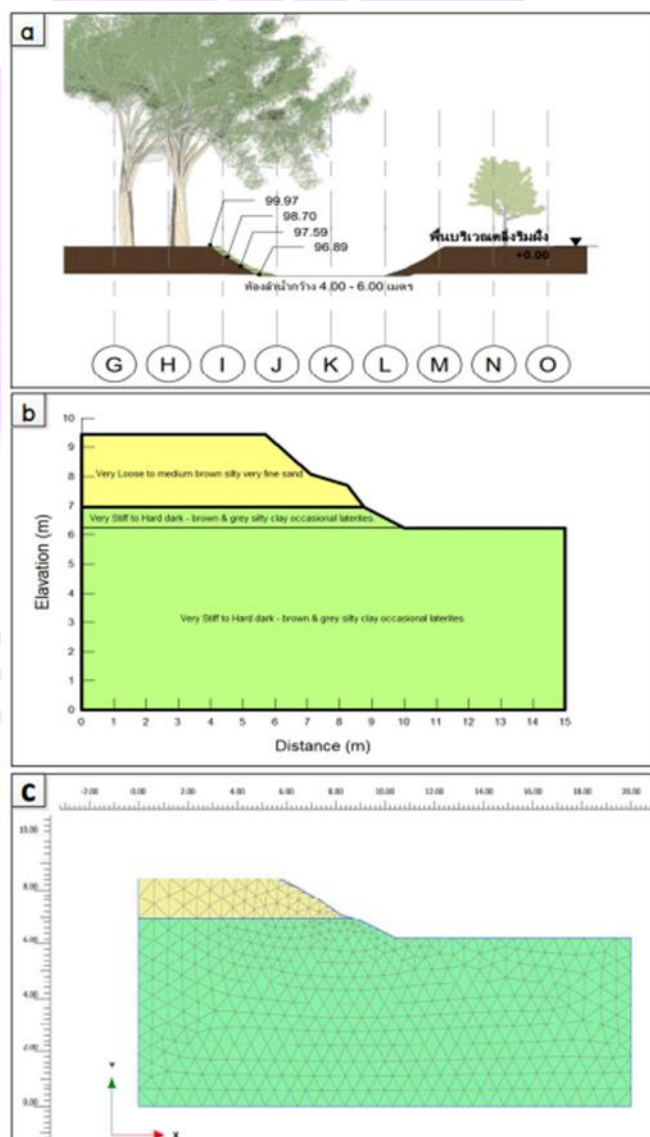
ภาพ 54 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิบัติที่ 3 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 3 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 32.00 เมตร สำรวจ 7 Station ความกว้าง ประมาณ 4.30 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 2.97 เมตร จากการสำรวจ พบว่า ถนนคอนกรีต บริเวณขอบทางเกิดการทรุดตัว โดยมีรอยแยกระหว่างขอบถนนกับแนวพื้นที่ดินด้านข้างอย่างชัดเจน ลักษณะรอยแยกยาวต่อเนื่องตลอดแนวขอบถนน สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการวิบัติของลาดดินบริเวณด้านข้างที่ขาดความมั่นคงของมวลดิน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยด้านการระบายน้ำไม่เพียงพอ ทำให้น้ำฝนไหลชะล้างดินรองรับได้ขอบถนน ส่งผลให้โครงสร้างถนนสูญเสียการรองรับและเกิดการทรุดตัวในที่สุด จากลักษณะการทรุดตัวดังกล่าวสามารถจัดเป็นการวิบัติของลาดดินประเภท การทรุดและแยกตัวจากการสูญเสียฐานรองรับ (loss of support) ซึ่งมักเกิดกับถนนหรือทางเท้าที่สร้างชิดขอบลาดหรือพื้นที่ที่มีการเติมดินถมที่ไม่มีการบดอัดอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะหากบริเวณนั้นไม่มีระบบระบายน้ำที่ดีพอ ดินจะเกิดการอึดตัวเมื่อฝนตกและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายใน



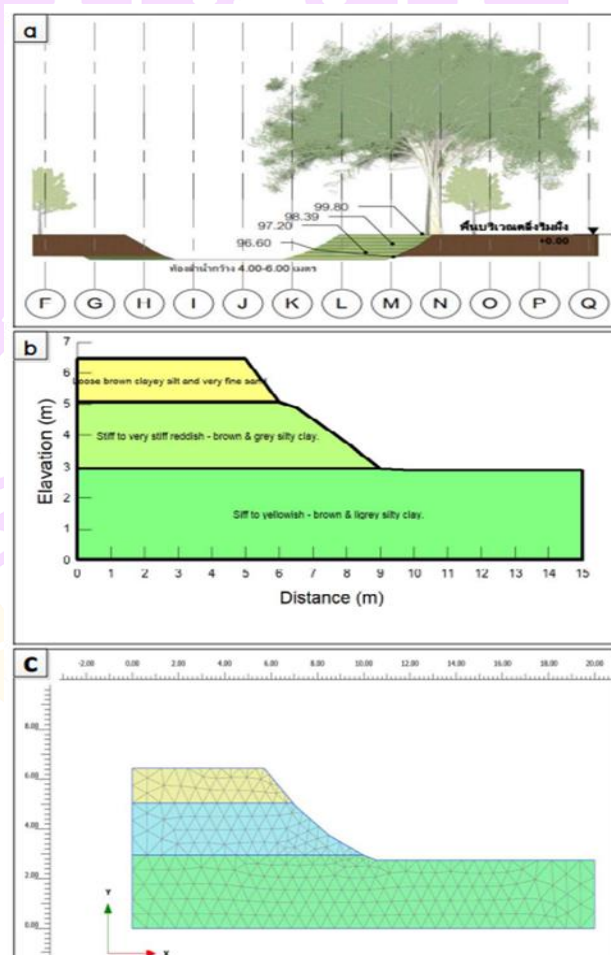
ภาพ 55 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิบัติที่ 4 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวัดที่ 4 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 32.00 เมตร สํารวจ 7 Station ความกว้าง ประมาณ 4.15 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 2.42 เมตร พบว่าการพังทลายของลาดตลิ่งในบริเวณนี้สามารถจัดอยู่ในกลุ่ม การวัดเชิงตลิ่งริมแม่น้ำหรือคลอง (Riverbank Failure) ซึ่งมีสาเหตุหลักจากแรงกัดเซาะของน้ำที่ไหลผ่านได้สะพาน โดยเฉพาะในฤดูฝนที่มีอัตราการไหลสูง ประกอบกับคุณสมบัติของดินบริเวณนี้ที่มีความสามารถรับแรงเฉือนต่ำ หรืออาจเป็นดินเหนียวที่มีค่าความสามารถรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำต่ำ (undrained shear strength) ซึ่งเมื่ออิ่มตัวจากน้ำใต้ดินหรือฝนตกสะสม จะส่งผลให้ความมั่นคงของมวลดินลดลงอย่างรวดเร็ว



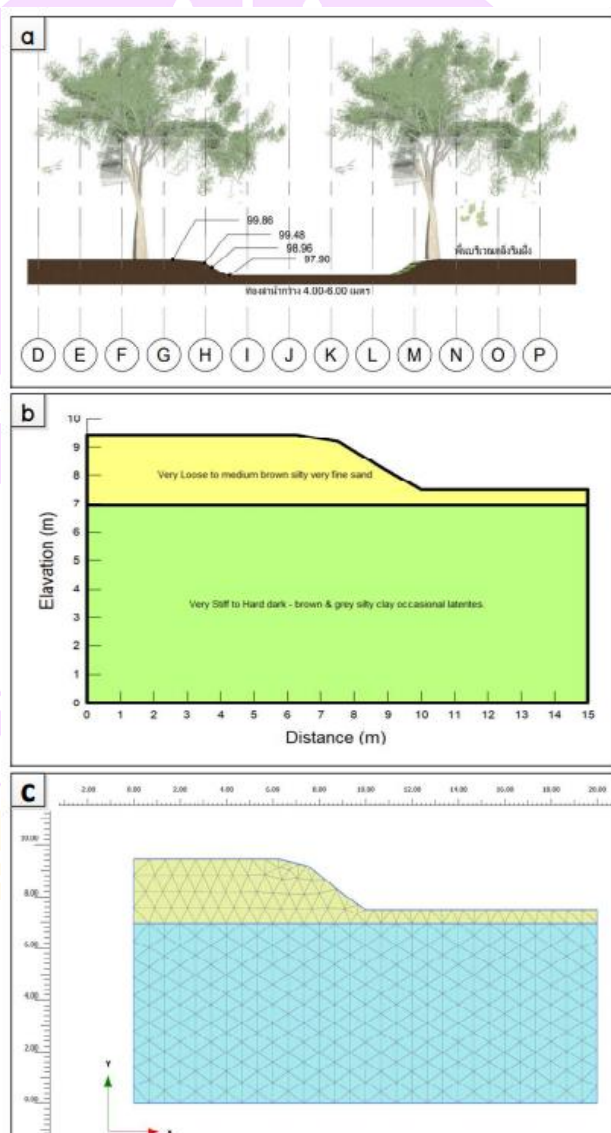
ภาพ 56 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวัดที่ 5 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 5 ลักษณะจากการสำรวจลาดดินความยาวสำรวจ 52.00 เมตร สสำรวจ 11 Station ความกว้าง ประมาณ 4.30 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 3.05 เมตร พบว่าการวิบัติของลาดดินบริเวณริมทางคอนกรีตใกล้ลำน้ำในพื้นที่ชุมชน ซึ่งเกิดการทรุดตัวและพังทลายของถนนอย่างรุนแรง โดยสามารถสังเกตได้ว่าการเคลื่อนตัวของมวลดินจากแนวตลิ่งลงสู่ลำน้ำ ส่งผลให้ผิวจราจรเกิดรอยร้าวแยกตัวเป็นช่วงกว้างและบางส่วนของแผ่นพื้นคอนกรีตทรุดตัวหายไป โดยเฉพาะบริเวณขอบทางที่อยู่ติดลำน้ำ ลักษณะการวิบัติดังกล่าวเป็นผลมาจากกระบวนการพังทลายของลาดตลิ่ง ซึ่งมีสาเหตุหลักจากการกัดเซาะฐานรากของลาดดินโดยน้ำจากลำคลอง รวมถึงผลกระทบจากการอิ่มตัวของน้ำภายในดิน (saturation) หลังเกิดฝนตกอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความมั่นคงของลาดลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อความต้านทานภายในของดินไม่สามารถรับน้ำหนักของมวลดินและโครงสร้างด้านบนได้ จึงเกิดการพังทลายแบบ (progressive failure)



ภาพ 57 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิบัติที่ 6 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 6 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 32.00 เมตร สสำรวจ 9 Station ความกว้าง ประมาณ 4.30 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 3.17 เมตร พบว่าการทรุดตัวและพังทลายของคันทางริมลำน้ำซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชน โดยสามารถสังเกตเห็นร่องรอยของการเคลื่อนตัวของมวลดิน ลักษณะการพังทลายมีลักษณะเป็นร่องลึกและยาวตามแนวนานกับลำคลอง สันนิษฐานว่าเกิดจากการกัดเซาะของน้ำบริเวณฐานลาดตลิ่ง (toe erosion) ซึ่งลดเสถียรภาพของมวลดินบริเวณดังกล่าว ประกอบกับมีฝนตกหนักอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มวลดินมีความอิ่มตัวของน้ำเพิ่มขึ้น จนสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวในดิน ส่งผลให้เกิดการพังทลายของลาดได้ง่ายยิ่งขึ้น



ภาพ 58 ลักษณะลาดดิน ณ จุดบริเวณวิบัติที่ 7 (a) โมเดลจากโปรแกรม Revit 2022, (b) โมเดลจากโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W, (c) โมเดลจากโปรแกรม PLAXIS 2D

จุดวัดที่ 7 ลักษณะจากการสำรวจลาดดิน ความยาวสำรวจ 28.00 เมตร สำรวจ 6 Station ความกว้าง ประมาณ 4.90 เมตร ความสูงเฉลี่ย ประมาณ 2.06 เมตร พบว่ามีร่องรอยการทรุดตัวของดินริมขอบถนน ซึ่งอาจเป็นผลจากการกัดเซาะของน้ำฝนหรือการระบายน้ำที่ไม่เหมาะสม โดยลักษณะของดินในพื้นที่มีพีชคลุมดินหนาแน่น โดยเฉพาะบริเวณที่ลาดเอียงใกล้ลำน้ำ ซึ่งอาจช่วยป้องกันการพังทลายของหน้าดินในระดับหนึ่ง บริเวณที่ไม่มีการป้องกันหรือควบคุมการระบายน้ำอย่างเป็นระบบ มีแนวโน้มที่จะเกิดการชะล้างหน้าดิน และการพังทลายตามแนวลาดริมทางได้ง่าย

จากการสำรวจลักษณะการพังทลายของลาดดินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีการเจาะสำรวจหาข้อมูลคุณสมบัติของดินในแนวเขตที่ดำเนินการสำรวจอยู่แล้ว โดยแบ่งข้อมูลคุณสมบัติของดินตามแนวเขตบริเวณที่มีการเจาะสำรวจเป็น 2 โซน

ในส่วนข้อมูลดินตามข้อมูลเจาะสำรวจดิน BORING LOG จะอยู่ในบริเวณแนวเขตพื้นที่ศึกษาพิกัดจุดเริ่มต้น E 0588981 N 2137062 ข้อมูลดินในโซนที่ 1 จะมีอยู่ 2 ชั้นดิน โดยชั้นดินที่ 1 มีความลึกลงไปจากผิวดินเดิม 2.50 เมตร ลักษณะเป็นตะกอนดินทรายสีน้ำตาลมีความยึดเหนี่ยวปานกลาง ส่วนชั้นดินที่ 2 มีความลึกลงไปจากระดับผิวดินที่ลึกกว่า 2.50 เมตร ถึง 9.45 เมตร ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้มมีความยึดเหนี่ยวมาก ที่ใช้ในโมเดลจุดวัดที่ 2 กับจุดวัดที่ 6 ซึ่งจากข้อมูลคุณสมบัติของดินจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตาราง 8 และตาราง 9

วิเคราะห์หาคุณสมบัติชั้นดินที่ 1 ลักษณะตะกอนดินทรายสีน้ำตาลมีความยึดเหนี่ยวปานกลาง (Very Loose to medium brown silty very fine sand)

$$h_w(m) = \text{ระดับชั้นดินที่พิจารณา} - \text{ระดับน้ำสูงสุด} = 2.50 - 1 = 1.50 \text{ เมตร}$$

$$\sigma_{vo}'(t/m^2) \text{ Effective Overburden Pressure} = [\sum \gamma_i h_i] - \gamma_w h_w$$

$$\gamma_i(t/m^3) \text{ หน่วยน้ำหนักดินจาก BORING LOG}$$

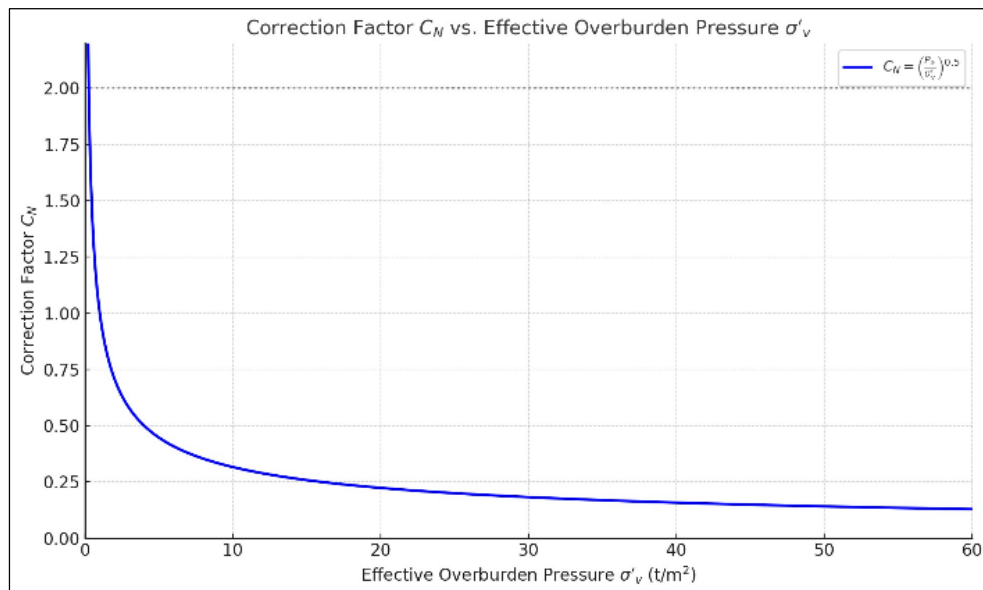
$$h_i(m) \text{ ระดับความลึกชั้นดิน}$$

$$\gamma_w(t/m^3) \text{ หน่วยน้ำหนักของน้ำ}$$

$$\sigma_{vo}'(t/m^2) = [\sum \gamma_i h_i] - \gamma_w h_w = [1.80 \times 2.50] - [1.00 \times 2.00] = 2.00$$

$$C_N \text{ (Correction Factor) ค่าได้จากกราฟ (H.B. Seed และ I.M. Idriss, 1971) ใช้ประเมิน}$$

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากผลการทดสอบ SPT (Standard Penetration Test) = 1.25



ภาพ 59 กราฟความสัมพันธ์ความดันจากน้ำหนักดินที่มีผลต่อชั้นดิน Effective Overburden Pressure σ'_v (t/m²) กับ Correction Factor, C_N

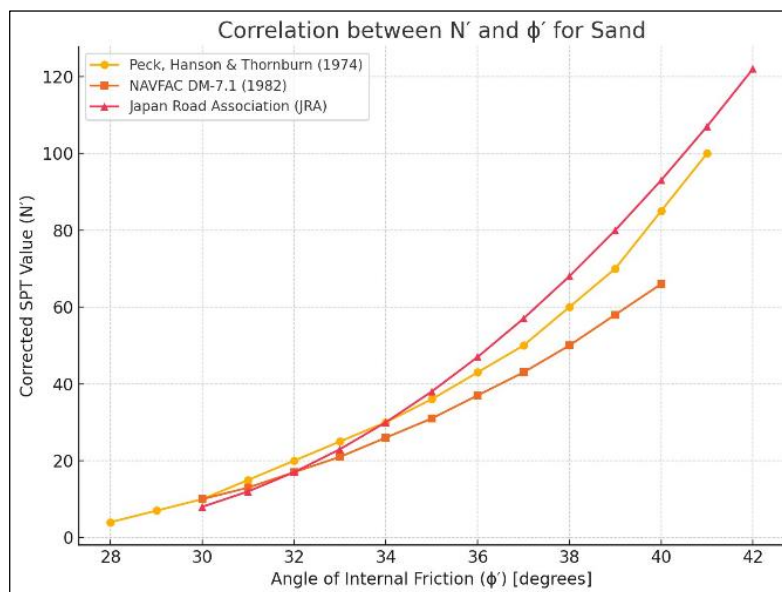
ที่มา: Seed & Idriss, 1971

φ มุมเสียดทานภายในของดินทราย ค่าได้จากกราฟ (Peck, Hanson, & Thornburn, 1974) ซึ่งใช้การปรับค่า N (blows / ft.) ด้วย Correction Factor, C_N เพื่อหาค่า N'

$$N(\text{blows / ft.}) \text{ Standard penetration test.} = [(12+8+5)/3] = 8.33$$

$$\text{ดังนั้น } N' = C_N \times N = 1.85 \times 8.33 = 10.41$$

φ (มุมเสียดทานภายในของดินทราย) ประมาณ 30



ภาพ 60 กราฟความสัมพันธ์ มุมแรงเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction), ϕ' กับค่า N' หรือค่า SPT ที่ถูกปรับแล้ว (Corrected SPT Value)

ที่มา: Peck, Hanson, & Thornburn, 1974

วิเคราะห์หาคูณสมบัติชั้นดินที่ 2 (Very Stiff to Hard dark – brown & grey silty clay occasional laterites.)

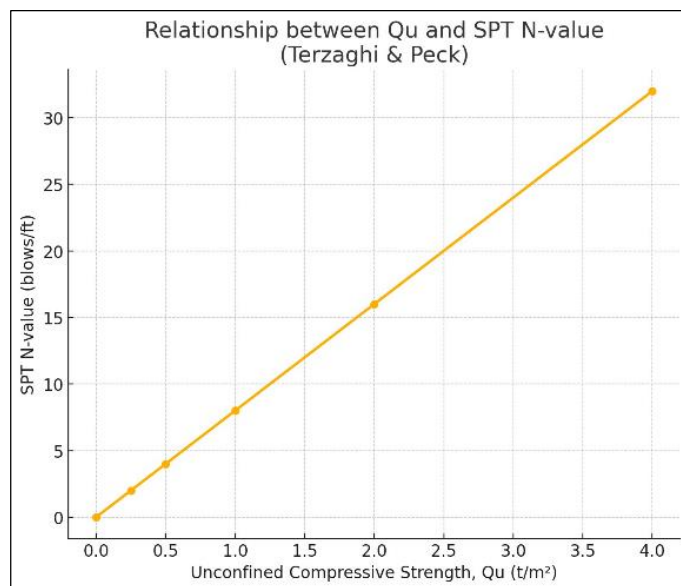
คำนวณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน (Bearing Capacity) โดยคำนวณหา Undrained Shear Strength, s_u ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับ Unconfined Compressive Strength Q_u โดยมีความสัมพันธ์ $s_u = \frac{Q_u}{2}$

หาค่า Q_u ได้จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า N (blows / ft.) กับ Q_u สำหรับดินเหนียว (Terzaghi & Peck, 1967)

$$N(\text{blows / ft.}) = [(31+30+28+41+80+95)/6] = 50.83$$

$$Q_u = 70$$

$$\text{ดังนั้น } s_u = 35(t/m^2)$$



ภาพ 61 กราฟความสัมพันธ์ ค่าความแข็งแรงแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength, Q_u) หน่วย t/m^2 กับค่าผลการตอก SPT (Standard Penetration Test, N) หน่วย blow/ft

ที่มา: Terzaghi & Peck, 1967

ตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 1 (ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6)

ชุดข้อมูลลำดับชั้นที่ 1 ลักษณะตะกอนดินทรายสีน้ำตาลมีความยืดหยุ่นปานกลาง			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
โมเดลคุณสมบัติวัสดุ	-	-	มอคูลอม (Mohr-Coulomp)
การระบายน้ำ	-	-	ระบายน้ำ (Drained)
คุณสมบัติทั่วไป			
หน่วยน้ำหนัก	γ_{unsat}	KN/m^3	18
หน่วยน้ำหนัก	γ_{sat}	KN/m^3	20
อัตราส่วนร่วน			
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{init}	-	0.5
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{max}	-	1000

ตาราง 8 (ต่อ)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 1 ลักษณะตะกอนดินทรายสีน้ำตาลมีความยึดเหนี่ยวปานกลาง (ต่อ)			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
พารามิเตอร์			
ค่าความยืดหยุ่นวัสดุ	E'	KN / m^2	35000
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนวัสดุ	$\nu'_{(nu)}$	-	0.35
ค่าแรงเฉือนวัสดุ	G	KN / m^2	12960
ค่าการอัดตัววัสดุ	E_{oed}	KN / m^2	56170
ค่าความยึดเหนี่ยว	$c'_{(ref)}$	KN / m^2	-
ค่ามุมแรงเสียดทาน	$\phi'_{(phi)}$	o	31
ค่ามุมขยายตัว	$\psi_{(psi)}$	o	-
พฤติกรรมกรรมการไม่ระบายน้ำ	$\nu_{(u)}$	-	0.495
พฤติกรรมกรรมการไม่ระบายน้ำ	$K_{w,ref} / n$	KN / m^2	1253000

ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 1
(ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 6)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 2 ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้มมีความยึดเหนี่ยวมาก			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
โมเดลคุณสมบัติวัสดุ	-	-	มอคูลอม (Mohr-Coulomp)
การระบายน้ำ	-	-	ไม่ระบายน้ำ (Undrained©)
คุณสมบัติทั่วไป			
หน่วยน้ำหนัก	γ_{unsat}	KN / m^3	18.8
หน่วยน้ำหนัก	γ_{sat}	KN / m^3	18.8
อัตราส่วนร่วน			
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{init}	-	1
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{max}	-	1000

ตาราง 9 (ต่อ)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 2 ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้มมีความยึดเหนี่ยวมาก (ต่อ)			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
พารามิเตอร์			
ค่าความยืดหยุ่นวัสดุ	E_u	KN / m^2	6500
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนวัสดุ	$V_{(nu)}$	-	0.495
ค่าแรงเฉือนวัสดุ	G	KN / m^2	2174
ค่าการอัดตัววัสดุ	$E_{oed,u}$	KN / m^2	219600
ค่าความยึดเหนี่ยว	$S_{u,ref}$	KN / m^2	343
ค่ามุมแรงเสียดทาน	$\phi'_{(phi)}$	o	-
ค่ามุมขยายตัว	$\psi_{(psi)}$	o	-

ในส่วนของโซนที่ 2 จะอยู่ในช่วงพิกัดจุดสิ้นสุด E 0588987 N 2137892 ข้อมูลเจาะสำรวจดิน BORING LOG ข้อมูลดินในโซนที่ 2 จะมีอยู่ 3 ชั้นดิน โดยชั้นดินที่ 1 มีความลึกลงไปจากผิวดินเดิม 1.40 เมตร ลักษณะตะกอนดินทรายสีน้ำตาลมีความยึดเหนี่ยวปานกลาง ส่วนชั้นดินที่ 2 มีความลึกลงไปจากระดับผิวดินที่ลึกกว่า 1.40 เมตร ถึง 3.50 เมตร ลักษณะดินเหนียวสีน้ำตาลเข้มมีความยึดเหนี่ยวมาก ส่วนชั้นดินที่ 3 มีความลึกลงไปจากระดับผิวดินที่ลึกกว่า 3.50 เมตร ถึง 6.45 เมตร ลักษณะดินเหนียวปนทรายมีความหนาแน่นปานกลางสีเหลืองแกมน้ำตาล ใช้เป็นข้อมูลคุณสมบัติของดินใน จุดวิบัติที่ 1, จุดวิบัติที่ 3, จุดวิบัติที่ 4, จุดวิบัติที่ 5 และจุดวิบัติที่ 7 ของแนวเขตพื้นที่ศึกษาในงานวิจัย แสดงคุณสมบัติชั้นดินดังแสดงในตาราง 10, 11 และ 12 ซึ่งจะมีคุณสมบัติของดินอยู่ 3 ชั้นดิน ตามข้อมูลเจาะสำรวจดิน BORING LOG

วิเคราะห์หาคุณสมบัติชั้นดินที่ 1 (Loose brown clayey silt and very fine sand)

$$h_w(m) = 1.40 - 0.50 = 0.90 \text{ เมตร}$$

$$\sigma'_{vo} (t/m^2) = [\sum \gamma_i h_i] - \gamma_w h_w = [1.82 \times 1.40] - [1 \times 0.90] = 1.648$$

$$C_N = 1.575$$

$$N(\text{blows} / \text{ft.}) = 9$$

$$N' = C_N \times N = 1.575 \times 9 = 14.17$$

ดังนั้น ϕ' มุมเสียดทานภายในของดินทราย ประมาณ 31

วิเคราะห์หาคูณสมบัติชั้นดินที่ 2 (Stiff to very stiff reddish-brown&grey silty clay)

$$N(\text{blows} / \text{ft.}) = [(9+14+21)/3] = 14.66$$

$$Q_u = 20$$

$$\text{ดังนั้น } S_u = 10(t/m^2)$$

วิเคราะห์หาคูณสมบัติชั้นดินที่ 3 (Stiff to yellowish-brown&ligrey silty clay)

$$N(\text{blows} / \text{ft.}) = [(17+18+35)/3] = 23.33$$

$$Q_u = 30$$

$$\text{ดังนั้น } S_u = 15(t/m^2)$$

ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2
(ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 1 ลักษณะดินเหนียวปนทรายสีน้ำตาลความยึดเหนี่ยวน้อย			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
โมเดลคุณสมบัติวัสดุ	-	-	มอคูลอม (Mohr-Coulomp)
การระบายน้ำ	-	-	ระบายน้ำ (Drained)
คุณสมบัติทั่วไป			
หน่วยน้ำหนัก	γ_{unsat}	KN / m^3	18.2
หน่วยน้ำหนัก	γ_{sat}	KN / m^3	20
อัตราส่วนรพูน			
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{init}	-	0.5
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{max}	-	1000
พารามิเตอร์			
ค่าความยึดหยุ่นวัสดุ	E'	KN / m^2	35000
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนวัสดุ	$\nu'_{(nu)}$	-	0.35
ค่าแรงเฉือนวัสดุ	G	KN / m^2	12960
ค่าการอัดตัววัสดุ	E_{oed}	KN / m^2	56170
ค่าความยึดเหนี่ยว	$c'_{(ref)}$	KN / m^2	-
ค่ามุมแรงเสียดทาน	$\phi'_{(phi)}$	o	31
ค่ามุมขยายตัว	$\psi_{(psi)}$	o	-
พฤติกรรมที่ไม่ระบายน้ำ	$V_{(u)}$	-	0.495
พฤติกรรมที่ไม่ระบายน้ำ	$K_{w,ref} / n$	KN / m^2	1253000

ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2
(ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 2 ลักษณะดินเหนียวแข็งสีน้ำตาลแดงปนสีเทา			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
โมเดลคุณสมบัติวัสดุ	-	-	มอคูลอม (Mohr-Coulomp)
การระบายน้ำ	-	-	ไม่ระบายน้ำ (Undrained©)
คุณสมบัติทั่วไป			
หน่วยน้ำหนัก	γ_{unsat}	KN / m^3	18.4
หน่วยน้ำหนัก	γ_{sat}	KN / m^3	18.4
อัตราส่วนรุกรุ่น			
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{init}	-	1
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{max}	-	1000
พารามิเตอร์			
ค่าความยืดหยุ่นวัสดุ	E_u	KN / m^2	6500
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนวัสดุ	$V_{(nu)}$	-	0.495
ค่าแรงเฉือนวัสดุ	G	KN / m^2	2174
ค่าการอัดตัววัสดุ	$E_{oed,u}$	KN / m^2	219600
ค่าความยึดเหนี่ยว	$S_{u,ref}$	KN / m^2	100
ค่ามุมแรงเสียดทาน	$\phi'_{(phi)}$	o	-
ค่ามุมขยายตัว	$\psi_{(psi)}$	o	-

ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลคุณสมบัติดินใช้ในการวิเคราะห์โซนที่ 2
(ตำแหน่งเจาะสำรวจดินของโครงการขยายเขตประปา หมู่ที่ 8)

ชุดข้อมูลวัสดุชั้นที่ 3 ลักษณะดินเหนียวแข็งสีเหลืองน้ำตาล			
คุณสมบัติ (Property)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย (Unit)	ค่าคุณสมบัติ (Value Property)
โมเดลคุณสมบัติวัสดุ	-	-	มอคูลอม (Mohr-Coulomp)
การระบายน้ำ	-	-	ไม่ระบายน้ำ (Undrained©)
คุณสมบัติทั่วไป			
หน่วยน้ำหนัก	γ_{unsat}	KN / m^3	18.5
หน่วยน้ำหนัก	γ_{sat}	KN / m^3	18.5
อัตราส่วนรุกรุ่น			
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{init}	-	1
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	e_{max}	-	1000
พารามิเตอร์			
ค่าความยืดหยุ่นวัสดุ	E_u	KN / m^2	6500
ค่าความเร็วคลื่นเฉือนวัสดุ	$V_{(nu)}$	-	0.495
ค่าแรงเฉือนวัสดุ	G	KN / m^2	2174
ค่าการอัดตัววัสดุ	$E_{oed,u}$	KN / m^2	219600
ค่าความยึดเหนี่ยว	$S_{u,ref}$	KN / m^2	125
ค่ามุมแรงเสียดทาน	$\phi'_{(phi)}$	o	-
ค่ามุมขยายตัว	$\psi_{(psi)}$	o	-

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจำเป็นต้องพิจารณาทั้งกรณีการระบายน้ำ(Drained) และไม่ระบายน้ำ (Undrained) เพราะมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของดินและค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety: FS) เนื่องจากสภาพความเป็นจริงของเหตุการณ์หรือการก่อสร้าง พฤติกรรมของดินขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกระทำกับความสามารถในการระบายน้ำ

กรณีมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นฉับพลัน เช่นการเกิดพิบัติพื้นที่ การถมดินด้วยความรวดเร็ว หรือขุดดินอย่างรวดเร็วแล้วมีลักษณะดินจัดอยู่ในประเภทดินเหนียวความสามารถในการระบายน้ำช้า ก็จะพิจารณาแบบ ไม่ระบายน้ำ(Undrained) ซึ่งจะใช้ค่า Undrained Shear Strength, S_u

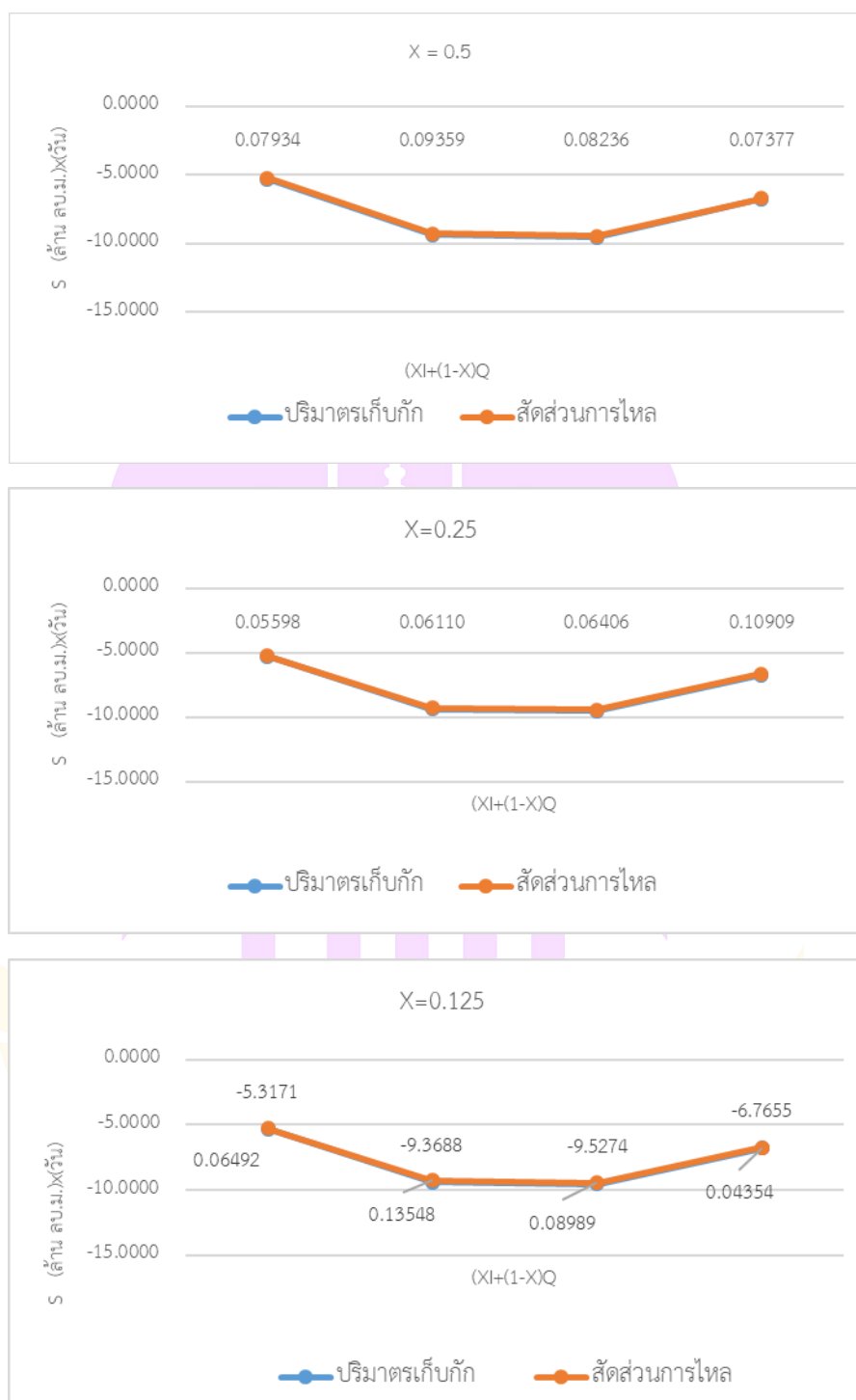
กรณีกระบวนการที่ค่อนข้างใช้เวลา นานพอที่น้ำสามารถละลายได้แล้วมีลักษณะดินจัดอยู่ในประเภทดินทรายหรือกรวดซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้เร็ว ก็จะพิจารณาแบบระบายน้ำ (Drained) ซึ่งจะใช้ค่า C_N, ϕ' (effective stress parameters)

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ของระดับน้ำขึ้นลงที่กระทำต่อน้ำตลลาดดิน ณ จุดวิบัติต่าง ๆ

หลักการการคิดการเคลื่อนตัวของน้ำหลากในลำน้ำ (Channel Routing) เป็นวิธีการหา ระดับน้ำและอัตราการไหลที่หน้าตัดต่างๆทางด้านท้ายน้ำของลำน้ำ สามารถช่วยคาดการณ์ปริมาณ น้ำท่วมได้ นำไปสู่การออกแบบคันป้องกันน้ำท่วมได้ (Levee) การหาปริมาตรเก็บกักในลำน้ำโดยวิธี ของ Muskingum วิเคราะห์หาอัตราการไหลของน้ำ ปี 2563

ตาราง 13 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2563

เวลา (วัน)	ปริมาณ น้ำไหล ลงอ่าง (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำ ระบาย (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล เข้า I (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล ออก Q (ล้าน ลบ.ม.)	ΔS (ล้าน ลบ.ม.) x (วัน)	S (ล้าน ลบ.ม.) x(วัน)	(XI+(1-X)Q		
							X=0.5	X=0.25	X=0.125
30	0.0000	0.0373	0.0000	0.0373	-1.1117	-1.1177	0.0186	0.0093	0.0326
58	0.0000	0.0411	0.0000	0.0392	-1.0966	-2.2143	0.0205	0.0102	0.0342
89	0.0000	0.0332	0.0000	0.0371	-1.1516	-3.3659	0.0166	0.0083	0.0325
119	0.0297	0.0501	0.0148	0.0417	-0.8045	-4.1704	0.0398	0.0236	0.0383
150	0.0315	0.0162	0.0306	0.0331	-0.0793	-4.2498	0.0238	0.0269	0.0328
180	0.0361	0.1226	0.0338	0.0694	-1.0673	-5.3171	0.0793	0.0559	0.0649
211	0.0061	0.1811	0.0211	0.1518	-4.0517	-9.3688	0.0935	0.0611	0.1354
242	0.1647	0.0000	0.0854	0.0905	-0.1586	-9.5274	0.0823	0.0640	0.0898
272	0.0835	0.0641	0.1241	0.0320	2.7619	-6.7655	0.0737	0.1090	0.0435
303	0.0202	0.0857	0.0518	0.0749	-0.7146	-7.4801	0.0529	0.0603	0.0720
333	0.0894	0.0947	0.0548	0.0902	-1.0628	-8.5430	0.0920	0.0647	0.0857
364	0.0000	0.0205	0.0447	0.0576	-0.4014	-8.9444	0.0102	0.0386	0.0560



ภาพ 62 กราฟความสัมพันธ์ปริมาณเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.50, 0.25 และ 0.125

เลือกใช้ความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหล $X=0.125$, $\Delta t=30$ วัน

$$K = (0.08989 - 0.13548) / (-9.5274 - (-9.3688)) = 9.3736 \text{ วัน หรือ } 224.96 \text{ ชั่วโมง}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.696999$$

$$C_2 = \frac{Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.595999$$

$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = -0.293$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

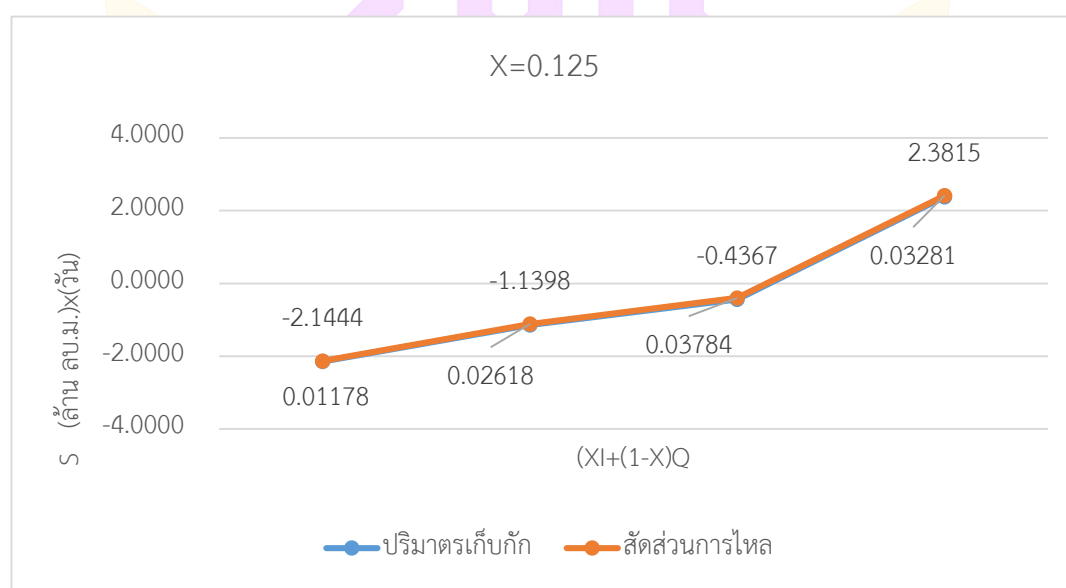
ตาราง 14 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2563

เวลา (วัน)	ปริมาณน้ำ ระบายสู่ลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	C1lj (ล้าน ลบ.ม.)	C2lj+1 (ล้าน ลบ.ม.)	C3Qj (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำไหล ออกลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)
30	0.037				0.037
58	0.041	0.026	0.024	-0.011	0.040
89	0.033	0.029	0.020	-0.012	0.037
119	0.050	0.023	0.030	-0.011	0.042
150	0.016	0.035	0.010	-0.012	0.032
180	0.123	0.011	0.073	-0.009	0.075
211	0.181	0.085	0.108	-0.022	0.171
242	0.000	0.126	0.000	-0.050	0.076
272	0.064	0.000	0.038	-0.022	0.016
303	0.086	0.045	0.051	-0.005	0.091
333	0.095	0.060	0.056	-0.027	0.090
364	0.021	0.066	0.012	-0.026	0.052

วิเคราะห์หาอัตราการไหลของน้ำ ปี 2564

ตาราง 15 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2564

เวลา (วัน)	ปริมาณ น้ำไหล ลงอ่าง (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำ ระบาย (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล เข้า I (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล ออก Q (ล้าน ลบ.ม.)	ΔS (ล้าน ลบ.ม.) x(วัน)	S (ล้าน ลบ.ม.) x(วัน)	$(XI+(1-X)Q)$		
							X=0.5	X=0.25	X=0.125
30	0.0002	0.0462	0.0002	0.0462	-1.3815	-1.3815	0.02320	0.01169	0.04047
58	0.0068	0.0306	0.0035	0.0384	-0.9770	-2.3585	0.01870	0.01027	0.03404
89	0.0000	0.0362	0.0034	0.0334	-0.9288	-3.2874	0.01810	0.01161	0.02964
119	0.0171	0.0084	0.0085	0.0223	-0.4135	-3.7008	0.01274	0.00851	0.02059
150	0.0185	0.0105	0.0178	0.0095	0.2586	-3.4422	0.01452	0.01597	0.01050
180	0.0807	0.0023	0.0496	0.0064	1.2978	-2.1444	0.04149	0.03779	0.01178
211	0.0284	0.0420	0.0545	0.0221	1.0046	-1.1398	0.03518	0.05141	0.02618
242	0.0870	0.0280	0.0577	0.0350	0.7031	0.4367	0.05750	0.05026	0.03784
272	0.1430	0.0141	0.1150	0.0211	2.8182	2.3815	0.07857	0.08979	0.03281
303	0.4069	0.0000	0.2750	0.0071	8.3046	10.6861	0.20345	0.20622	0.04055
333	0.0883	0.0021	0.2476	0.0011	7.3973	18.0834	0.04522	0.18625	0.03187
364	0.0005	0.0250	0.0444	0.0136	0.9562	19.0396	0.01275	0.03957	0.01742



ภาพ 63 กราฟความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.125 พ.ศ. 2564

เลือกใช้ความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหล $X = 0.125$, $\Delta t = 30$ วัน

$$K = (0.03784 - 0.02618) / (-0.4367 - (-1.1398)) = 1.1091 \text{ วัน หรือ } 26.61 \text{ ชั่วโมง}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.947917$$

$$C_2 = \frac{Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.930556$$

$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = -0.87847$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

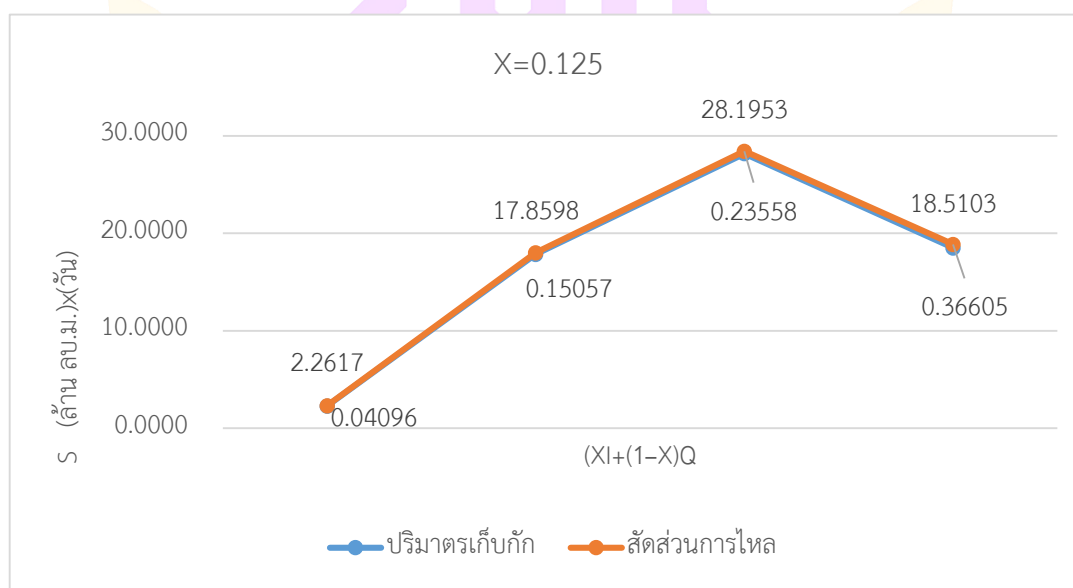
ตาราง 16 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2564

เวลา (วัน)	ปริมาณน้ำ ระบายสู่ลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	C1Ij (ล้าน ลบ.ม.)	C2Ij+1 (ล้าน ลบ.ม.)	C3Qj (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำไหล ออกลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)
30	0.046				0.046
58	0.031	0.044	0.028	-0.041	0.032
89	0.036	0.029	0.034	-0.028	0.035
119	0.008	0.034	0.008	-0.031	0.012
150	0.010	0.008	0.010	-0.010	0.008
180	0.002	0.010	0.002	-0.007	0.005
211	0.042	0.002	0.039	-0.005	0.037
242	0.028	0.040	0.026	-0.032	0.034
272	0.014	0.027	0.013	-0.030	0.010
303	0.000	0.013	0.000	-0.009	0.005
333	0.002	0.000	0.002	-0.004	-0.002
364	0.025	0.002	0.023	0.002	0.027

วิเคราะห์หาอัตราการไหลของน้ำ ปี 2565

ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืม พ.ศ. 2565

เวลา (วัน)	ปริมาณ น้ำไหล ลงอ่าง (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำ ระบาย (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล เข้า I (ล้าน ลบ.ม.)	อัตรา การไหล ออก Q (ล้าน ลบ.ม.)	ΔS (ล้าน ลบ.ม.) x (วัน)	S (ล้าน ลบ.ม.) x (วัน)	$(XI+(1-X)Q)$		
							$X = 0.5$		
							X = 0.25	X = 0.125	
30	0.0142	0.0548	0.0142	0.0548	-1.2184	-1.2184	0.03449	0.04464	0.04972
58	0.0329	0.0441	0.0236	0.0495	-0.7251	-1.9435	0.03854	0.04133	0.04273
89	0.0079	0.0402	0.0204	0.0421	-0.6733	-2.6167	0.02402	0.03209	0.03612
119	0.0253	0.0170	0.0166	0.0286	-0.3594	-2.9761	0.02113	0.01906	0.01802
150	0.1426	0.0157	0.0839	0.0163	2.0958	-0.8805	0.07915	0.04743	0.03158
180	0.1132	0.0306	0.1279	0.0232	3.1422	2.2617	0.07193	0.05129	0.04096
211	0.9588	0.0351	0.5360	0.0329	15.5981	17.8598	0.49697	0.26604	0.15057
242	0.0108	0.2677	0.4848	0.1514	10.3356	28.1953	0.13923	0.20347	0.23558
272	0.0259	0.4146	0.0183	0.3412	-9.6850	18.5103	0.22027	0.31746	0.36605
303	0.0000	0.0000	0.0130	0.2073	-6.0254	12.4849	0.0000	0.0000	0.0000
333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.4849	0.0000	0.0000	0.0000
364	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.4849	0.0000	0.0000	0.0000



ภาพ 64 กราฟความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหลเท่ากับ 0.125 พ.ศ. 2565

เลือกใช้ความสัมพันธ์ปริมาตรเก็บกักน้ำ ที่สัดส่วนการไหล $X = 0.125$, $\Delta t = 30$ วัน

$$K = (0.0606 - 0.07732) / 34.9644 - 19.9353 = 17.85 \text{ วัน หรือ } 428.56 \text{ ชั่วโมง}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.562687$$

$$C_2 = \frac{Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.416915$$

$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} = 0.020398$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

ตาราง 18 ปริมาณน้ำระบายลงสู่ลงน้ำแม่ปืมกับปริมาณน้ำไหลออกลำน้ำแม่ปืม ปี พ.ศ. 2565

เวลา (วัน)	ปริมาณน้ำ ระบายสู่ลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	C1lj (ล้าน ลบ.ม.)	C2lj+1 (ล้าน ลบ.ม.)	C3Qj (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำ ไหลออกลำน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)
30	0.055				0.055
58	0.044	0.031	0.018	0.001	0.050
89	0.040	0.025	0.017	0.001	0.043
119	0.017	0.023	0.007	0.001	0.031
150	0.016	0.010	0.007	0.001	0.017
180	0.031	0.009	0.013	0.000	0.022
211	0.035	0.017	0.015	0.000	0.032
242	0.268	0.020	0.112	0.001	0.132
272	0.415	0.151	0.173	0.003	0.326
303	0.000	0.233	0.000	0.007	0.240
333	0.000	0.000	0.000	0.005	0.005
364	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

จากข้อมูลระดับน้ำอ้างอิงจากสถานี I 17 เจดีย์งาม (แม่น้ำอิง) มาเปรียบเทียบกับอัตรา
การไหลน้ำเข้าน้ำออกที่คำนวณได้จากวิธี Muskingum ในปี พ.ศ. 2563-พ.ศ. 2565 สามารถแบ่งช่วง
ของระดับน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

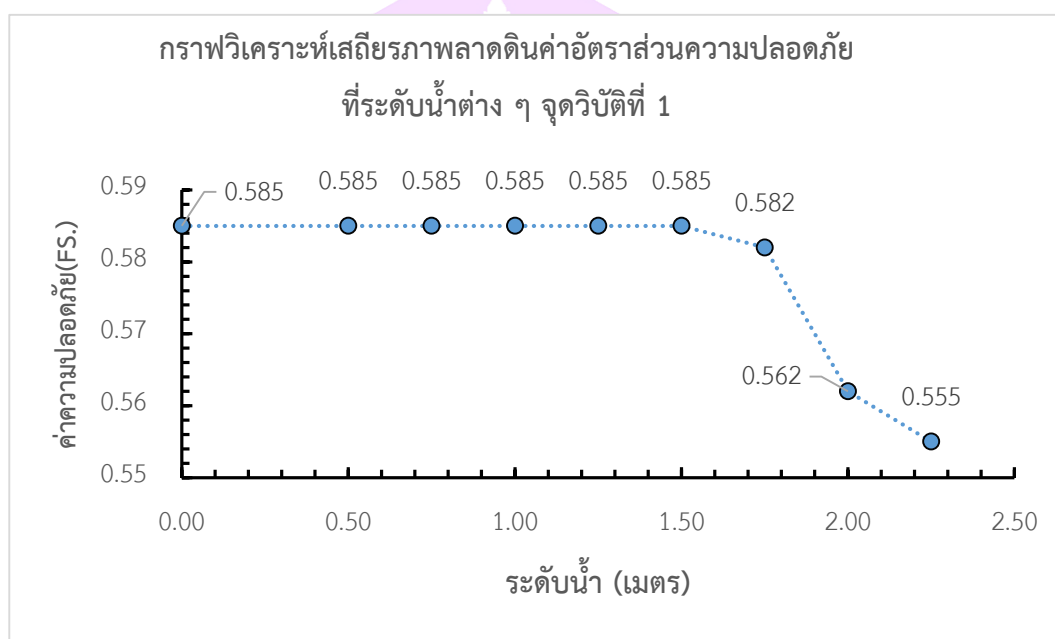
1. ระดับน้ำ (H_w) มากกว่า 0 เมตร ไม่เกิน 0.50 เมตร: ($0 < H_w \leq 0.50$) พิจารณาระดับน้ำ
เฉลี่ยที่ 0.25 เมตร
2. ระดับน้ำ (H_w) มากกว่า 0.50 เมตร ไม่เกิน 1.00 เมตร: ($0.50 < H_w \leq 1.00$) พิจารณา
ระดับน้ำเฉลี่ยที่ 0.75 เมตร
3. ระดับน้ำ (H_w) มากกว่า 1.00 เมตร ไม่เกิน 1.50 เมตร: ($1.00 < H_w \leq 1.50$) พิจารณา
ระดับน้ำเฉลี่ยที่ 1.25 เมตร
4. ระดับน้ำ (H_w) มากกว่า 1.50 เมตร ไม่เกิน 2.00 เมตร: ($1.50 < H_w \leq 2.00$) พิจารณา
ระดับน้ำเฉลี่ยที่ 1.75 เมตร
5. ระดับน้ำ (H_w) มากกว่า 2.00 เมตร ไม่เกิน 2.50 เมตร: ($2.00 < H_w \leq 2.50$) พิจารณา
ระดับน้ำเฉลี่ยที่ 2.25 เมตร



ภาพ 65 ภาพเสมือนแสดงระดับน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืม

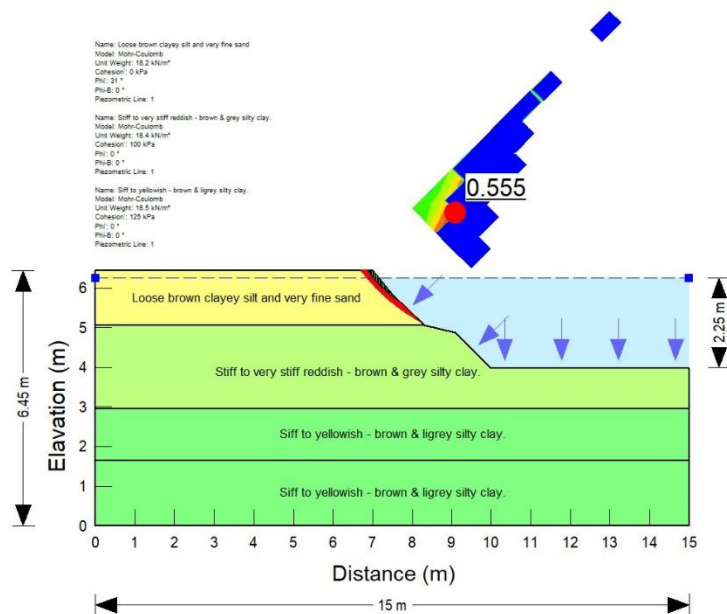
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยโมเดลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W มีผลการวิเคราะห์ทั้ง 7 จุดวิบัติ ดังนี้

จุดวิบัติที่ 1 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 66



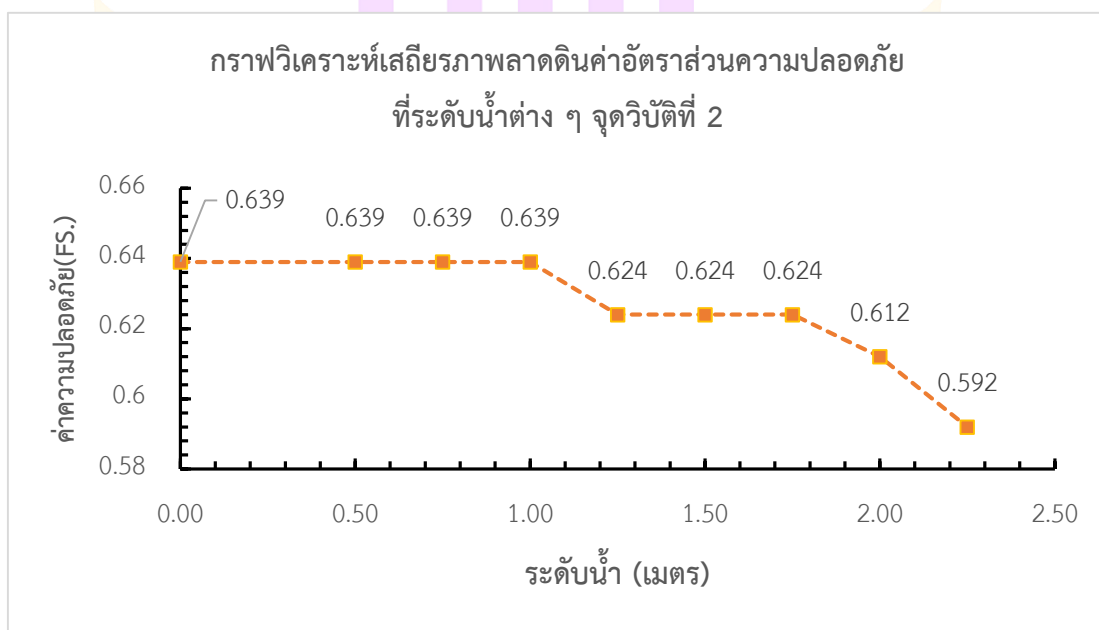
ภาพ 66 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 1

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 1 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.585 ในช่วงที่มีระดับน้ำมากกว่า 1.50 เมตร ถึงช่วงที่มีระดับน้ำ 2.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.582 ถึง 0.562 และในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.25 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.555



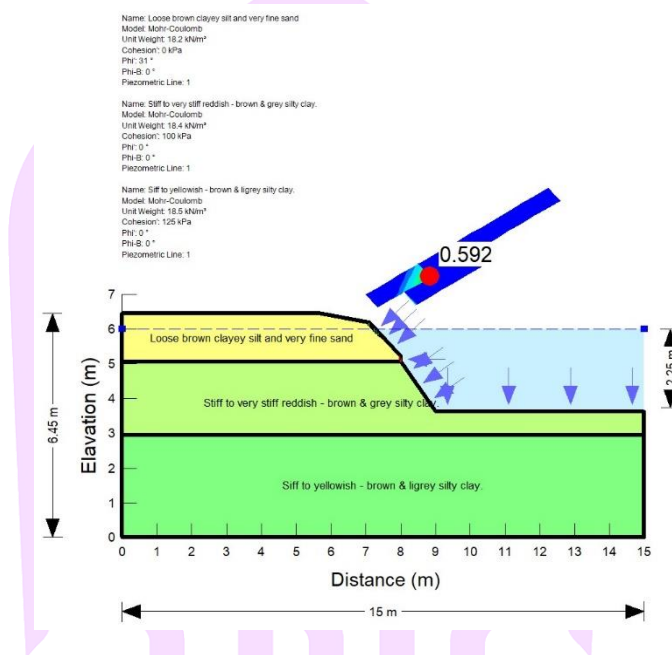
ภาพ 67 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 ที่ระดับน้ำ 2.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 2 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 68



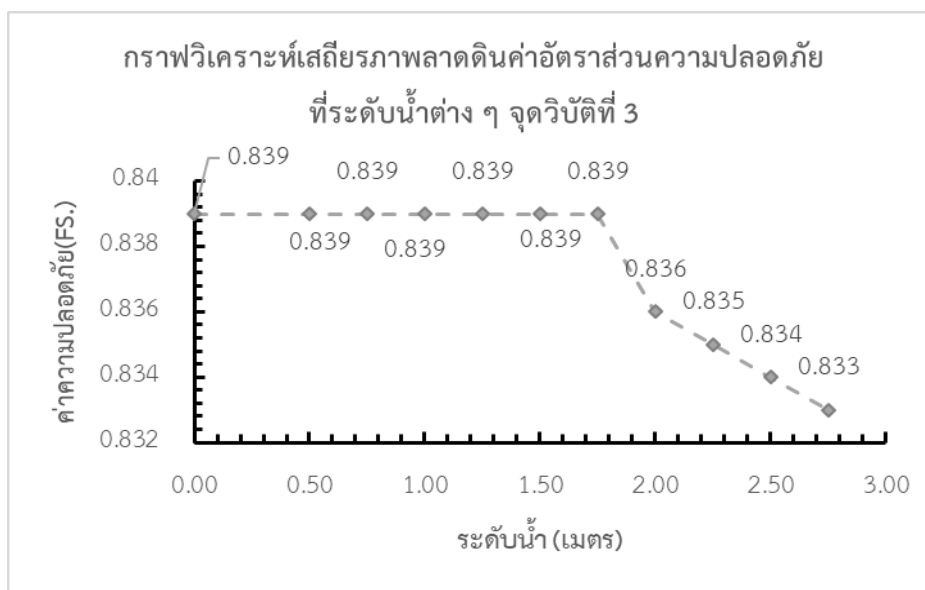
ภาพ 68 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 2

จากการวิเคราะห์จุดวิกฤติที่ 2 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.639 ในช่วงที่มีระดับน้ำมากกว่า 1.00 เมตร ถึงช่วงที่มีระดับน้ำ 1.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.624 ในช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ถึงช่วงที่ระดับน้ำ 2.25 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.612 กับ 0.592



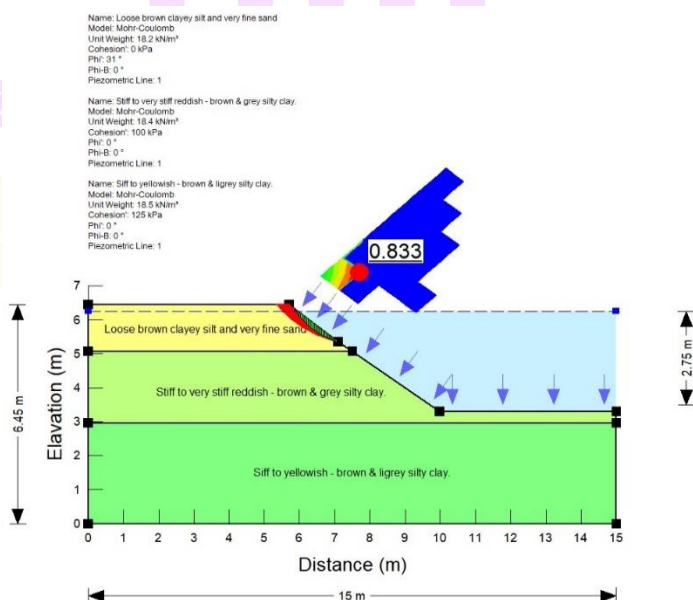
ภาพ 69 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิกฤติที่ 2 ที่ระดับน้ำ 2.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิกฤติที่ 3 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 70



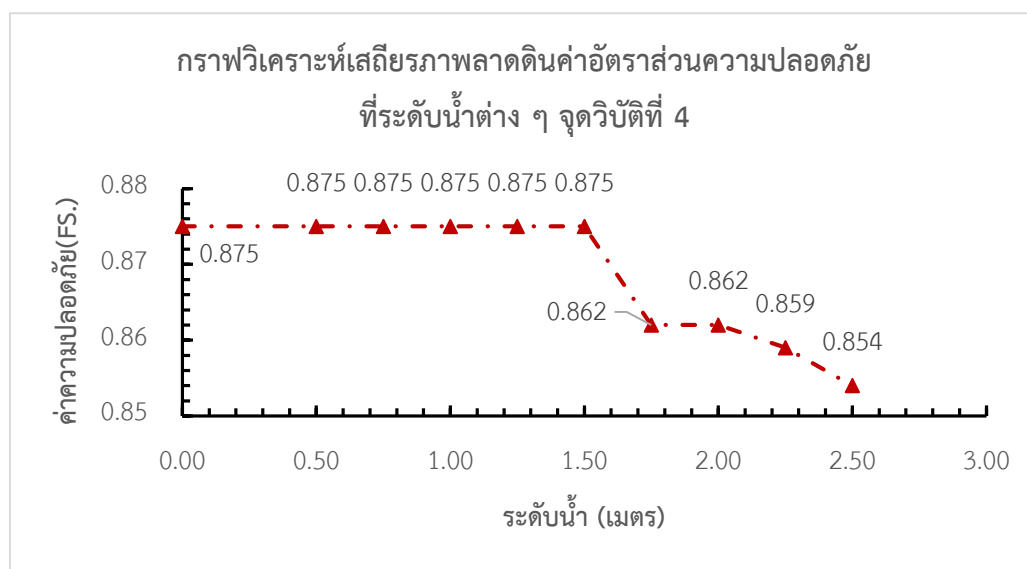
ภาพ 70 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 3

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 3 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.839 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 2.00 เมตร, 2.25 เมตร, 2.50 เมตร และระดับน้ำ 2.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.836, 0.835, 0.834 และ 0.833 ตามลำดับ



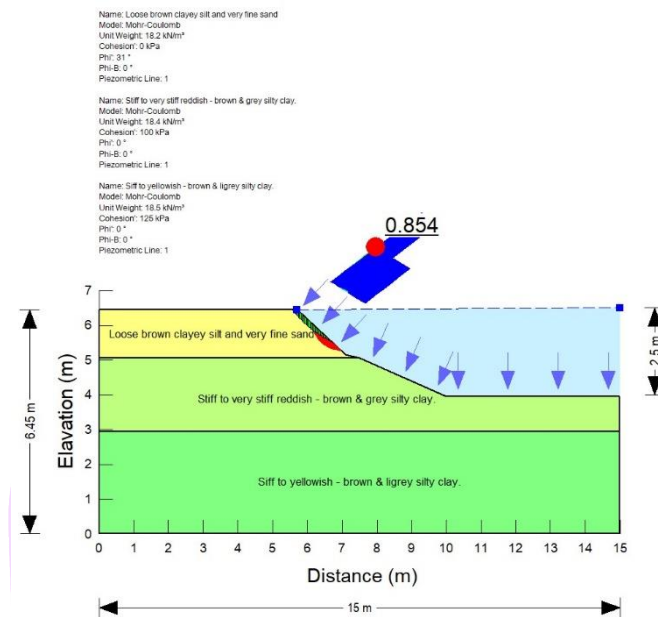
ภาพ 71 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 3 ที่ระดับน้ำ 2.75 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 4 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 72



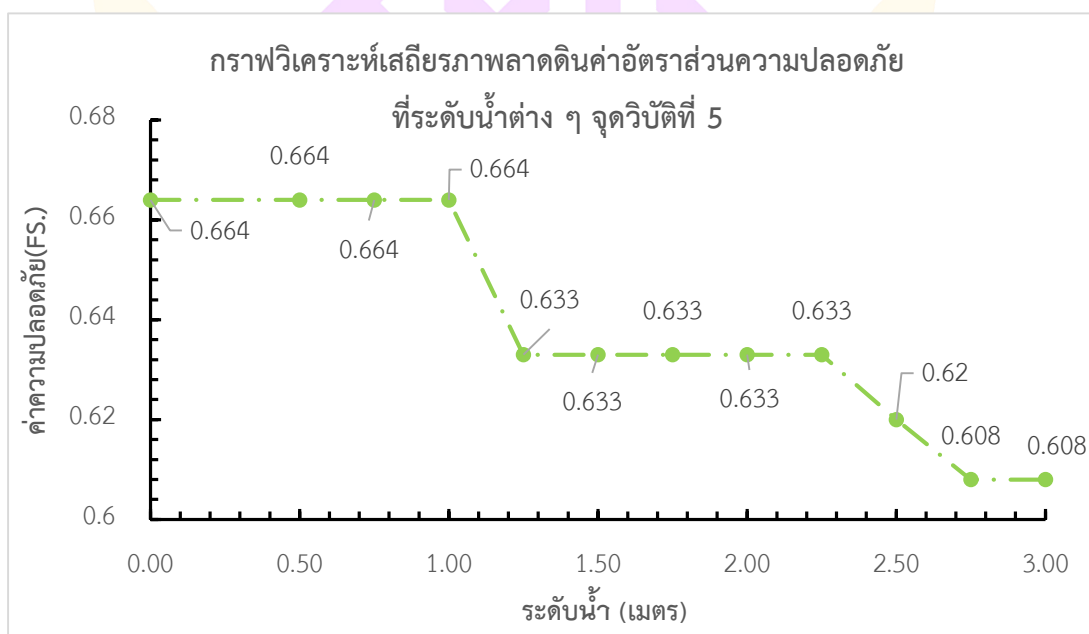
ภาพ 72 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 4

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 4 ในช่วงที่ไม่มีระดับน้ำ ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.875 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 1.75 เมตร, 2.00 เมตร, 2.25 เมตร, 2.50 เมตร และระดับน้ำ 2.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.862, 0.862, 0.859 และ 0.854 ตามลำดับ



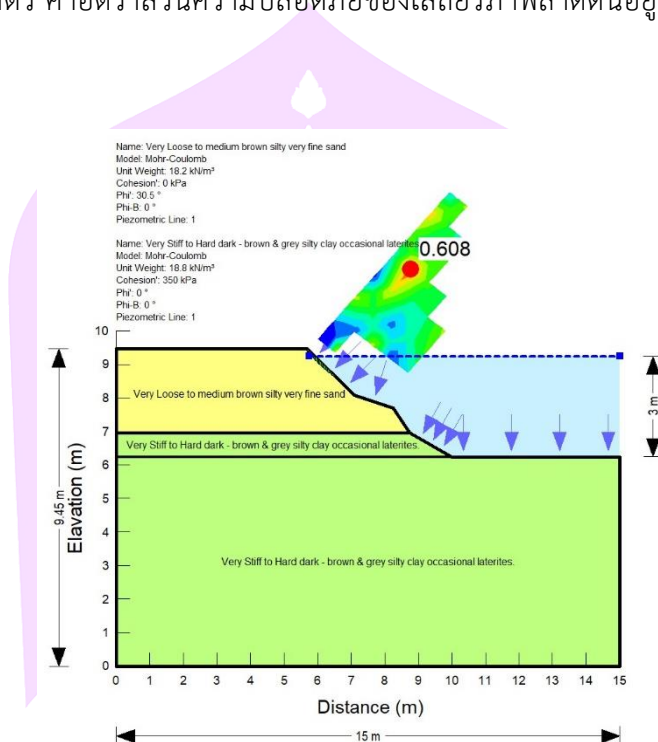
ภาพ 73 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 4 ที่ระดับน้ำ 2.50 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 5 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 74



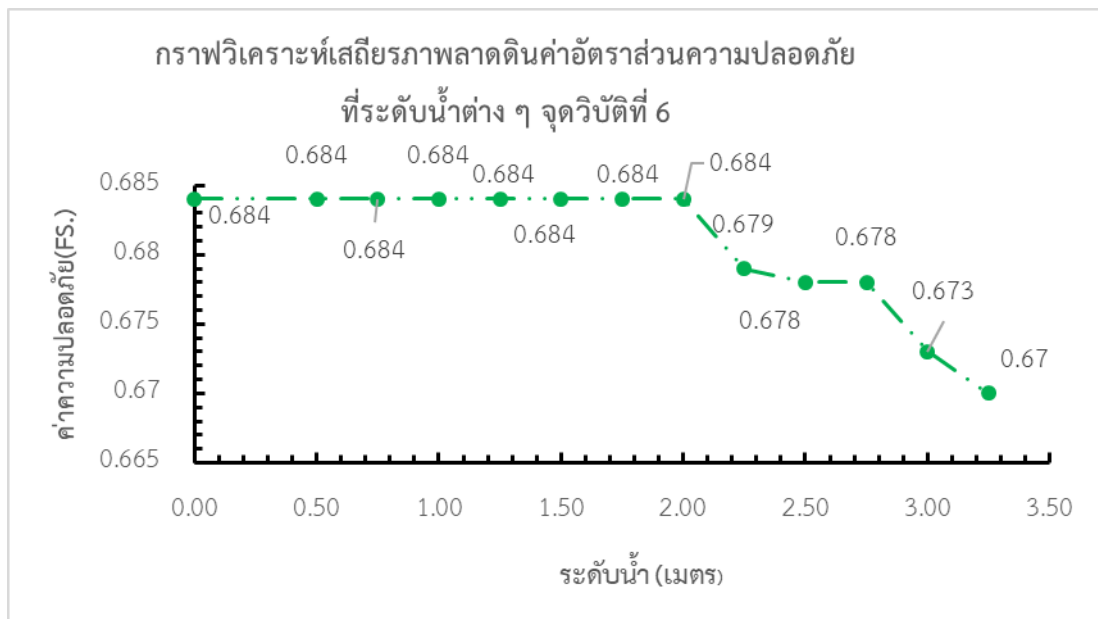
ภาพ 74 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 5

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 5 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.664 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 1.25 เมตร, 1.50 เมตร, 1.75 เมตร, 2.00 เมตร และระดับน้ำ 2.25 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.633 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 2.50 เมตร, 2.75 เมตร และระดับน้ำ 3.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.620, 0.608 และ 0.608 ตามลำดับ



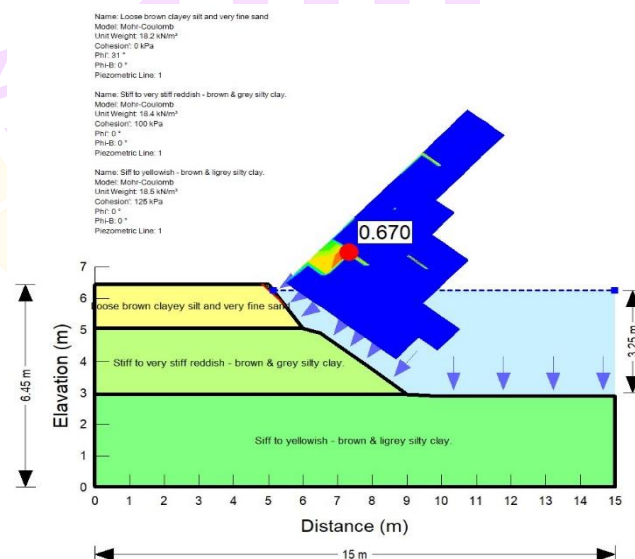
ภาพ 75 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 5 ที่ระดับน้ำ 3.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 6 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 76



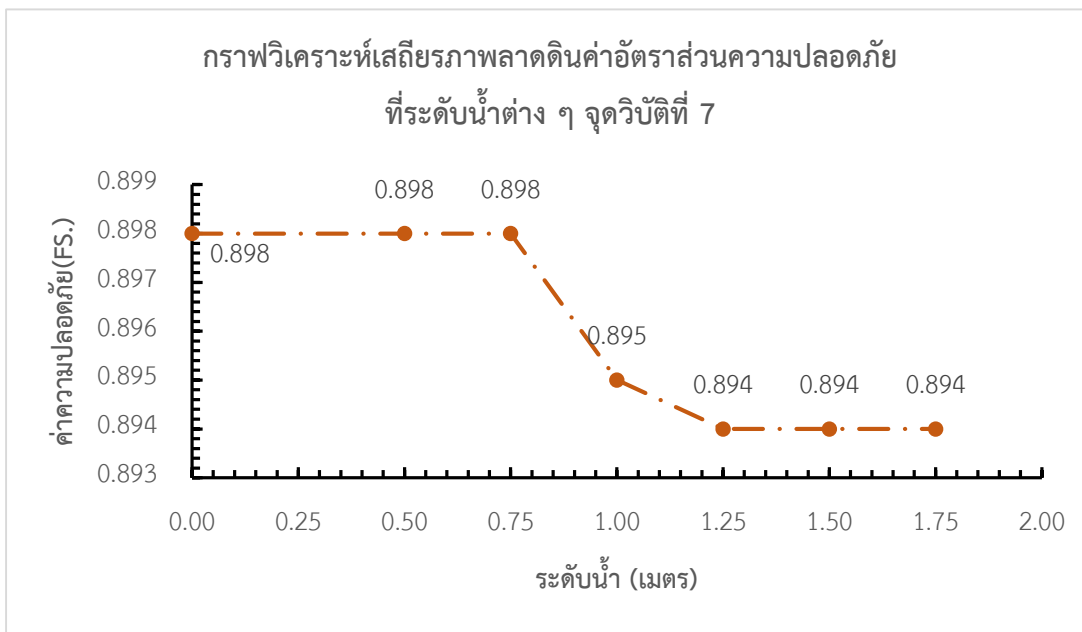
ภาพ 76 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 6

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 6 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 2.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.684 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 2.25 เมตร, 2.50 เมตร, 2.75 เมตร, 3.00 เมตร และระดับน้ำ 3.25 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.679, 0.678, 0.678, 0.673 และ 0.670 ตามลำดับ



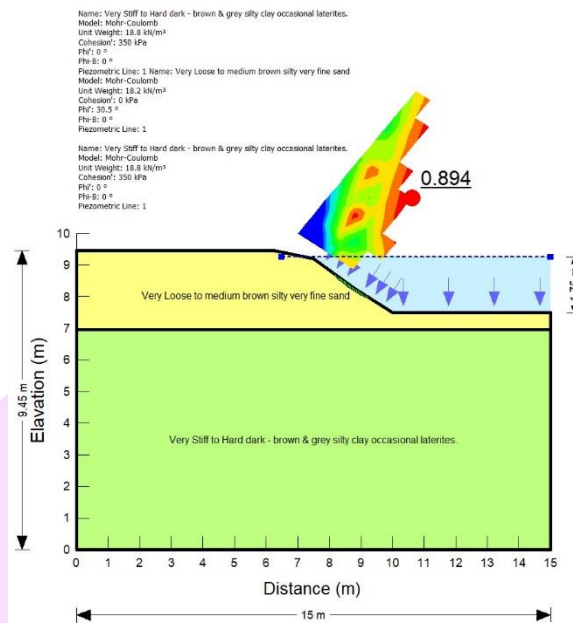
ภาพ 77 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 ที่ระดับน้ำ 3.25 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 7 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 78

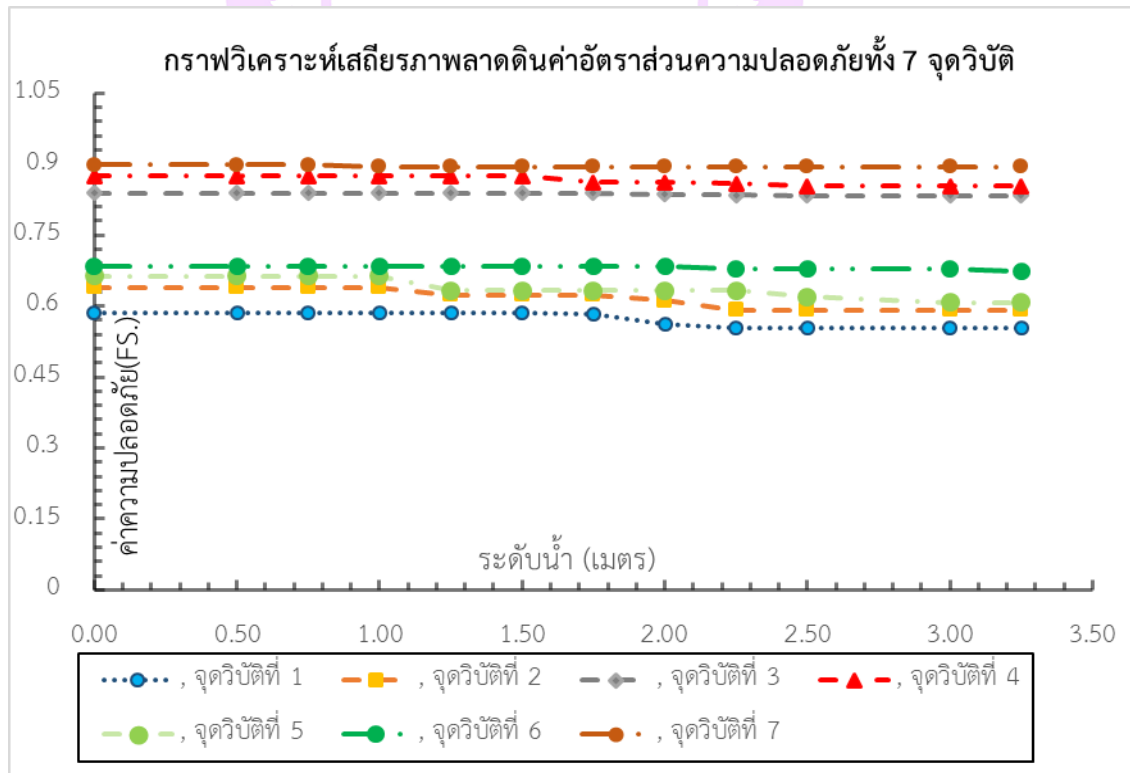


ภาพ 78 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ ณ จุดวิบัติที่ 7

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 7 ในช่วงที่มีระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 0.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.898 ในช่วงที่มีระดับน้ำ 1.00 เมตร, 1.25 เมตร, 1.50 เมตร และระดับน้ำ 1.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.895, 0.894, 0.894 และ 0.894 ตามลำดับ



ภาพ 79 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 7 ที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

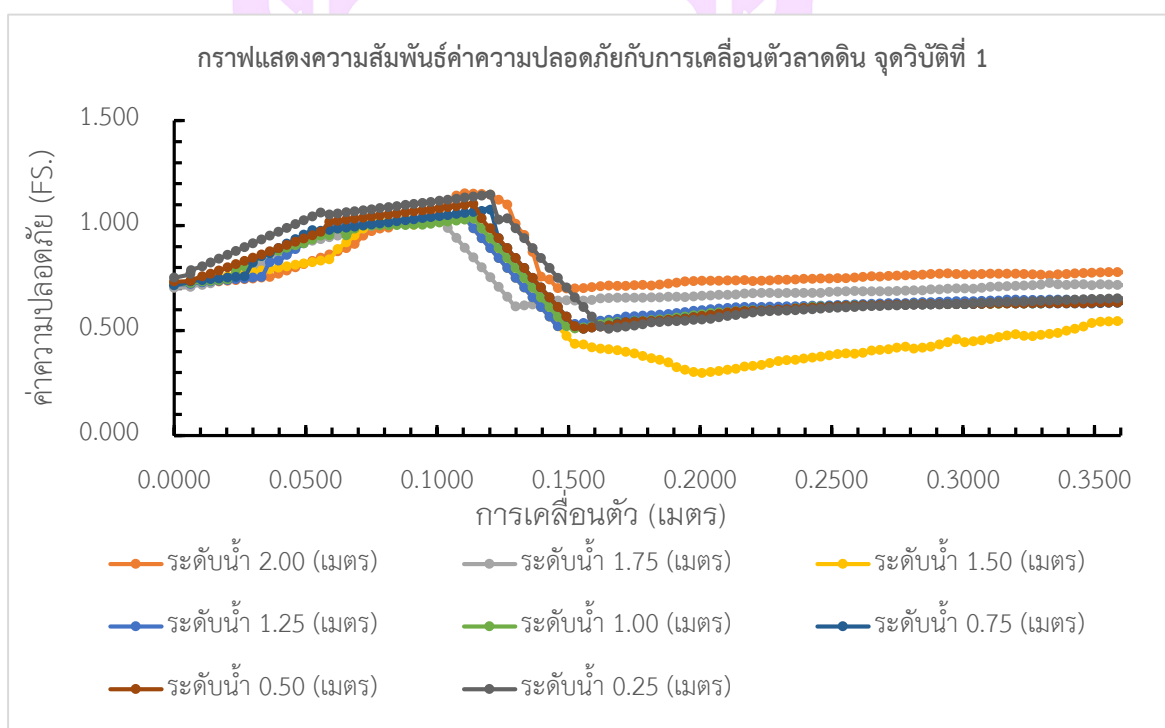


ภาพ 80 กราฟแสดงแนวโน้มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยทั้ง 7 จุดวิบัติ โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยโมเดลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D มีผลการวิเคราะห์ทั้ง 7 จุดวิบัติดังนี้

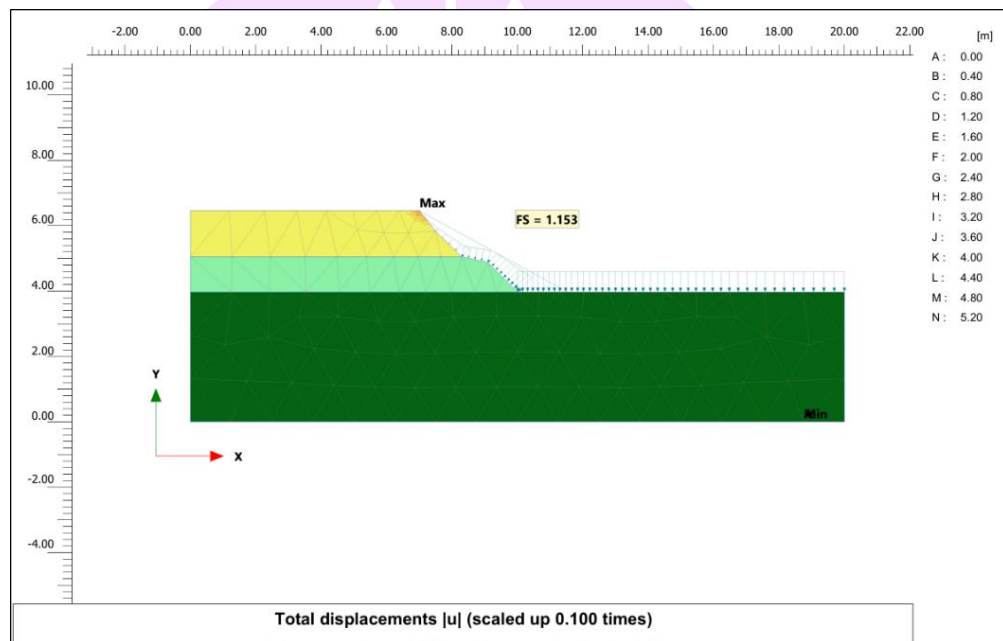
ในการวิเคราะห์เลือกใช้การวิเคราะห์แบบ Undrained© โดยใช้พารามิเตอร์ของดินในรูปของค่าความต้านทานแรงเฉือนรวม (Total Shear Strength Parameters) ได้แก่ ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (Undrained Shear Strength) มุมเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก ซึ่งเหมาะสมสำหรับสถานะที่แรงน้ำในรูพรุนยังไม่สามารถกระจายหรือระบายออกได้ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความเค้น มีผลกระทบโดยตรงต่อแรงเฉือนของดินในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยไม่ต้องพิจารณาความดันน้ำในรูพรุน (Pore Water Pressure) นอกจากนี้ การใช้การวิเคราะห์แบบ Undrained ยังสามารถให้ความปลอดภัยในเชิงอนุรักษ์ (Conservative) โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อมูลแรงเฉือนของดินจากการทดสอบไม่ระบาย (Undrained Triaxial Test หรือ Vane Shear Test) ซึ่งสอดคล้องกับสภาพดินในสนามจริง

จุดวิบัติที่ 1 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 81



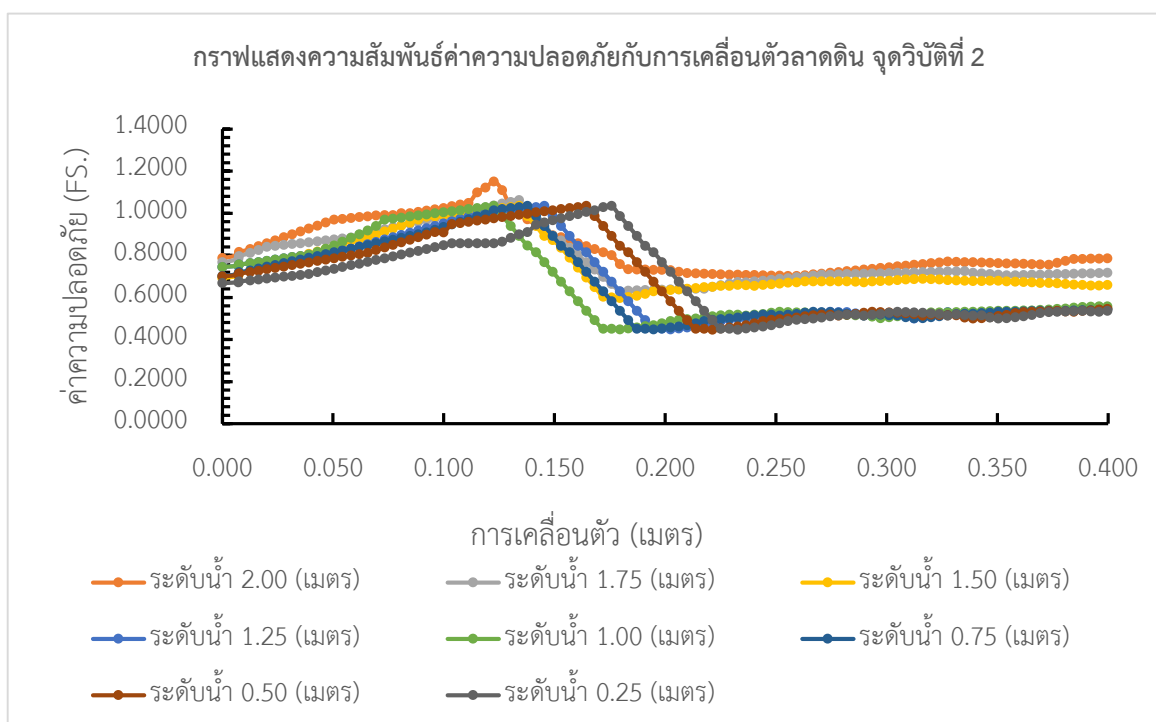
ภาพ 81 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 1 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.50 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.297 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.153 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 ในช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร, 1.25 เมตร, 1.00 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.639, 0.582, 0.581, 0.610, 0.597 และ 0.573 ตามลำดับ



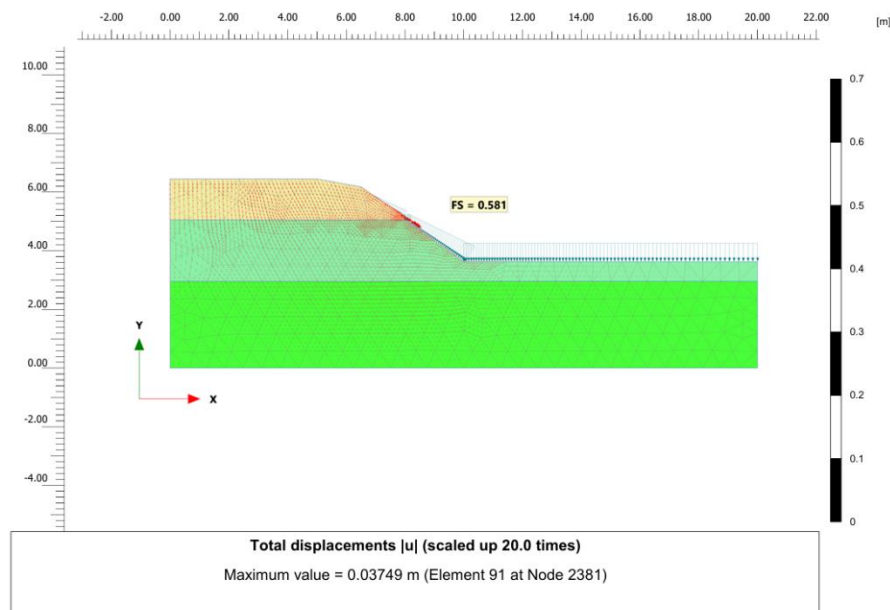
ภาพ 82 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 1 ที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 2 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 83



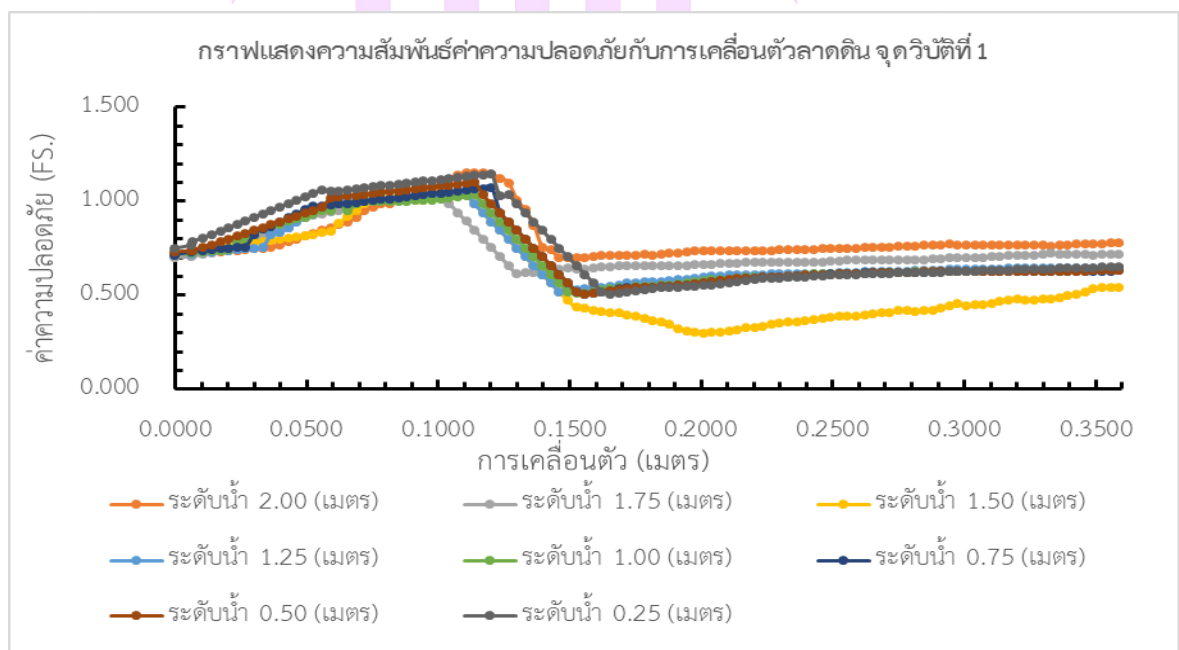
ภาพ 83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 2 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 2 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือช่วงที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.581 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 1.149 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 2 ในช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และช่วงระดับน้ำ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 1.143, 0.661, 0.579, 0.557, 0.583 และ 0.582 ตามลำดับ



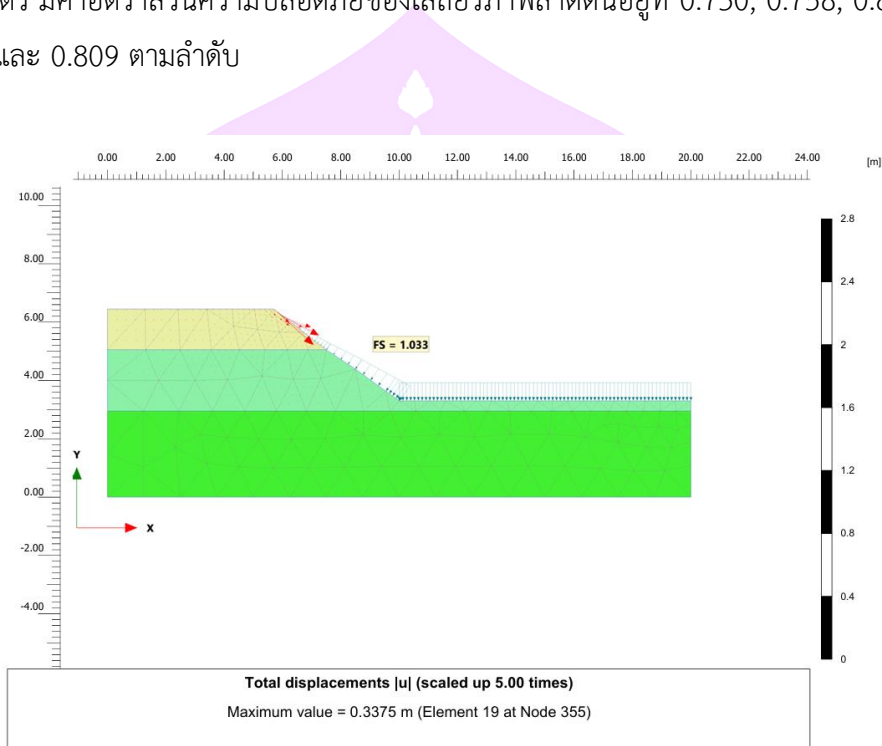
ภาพ 84 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 2 ที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 3 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 85



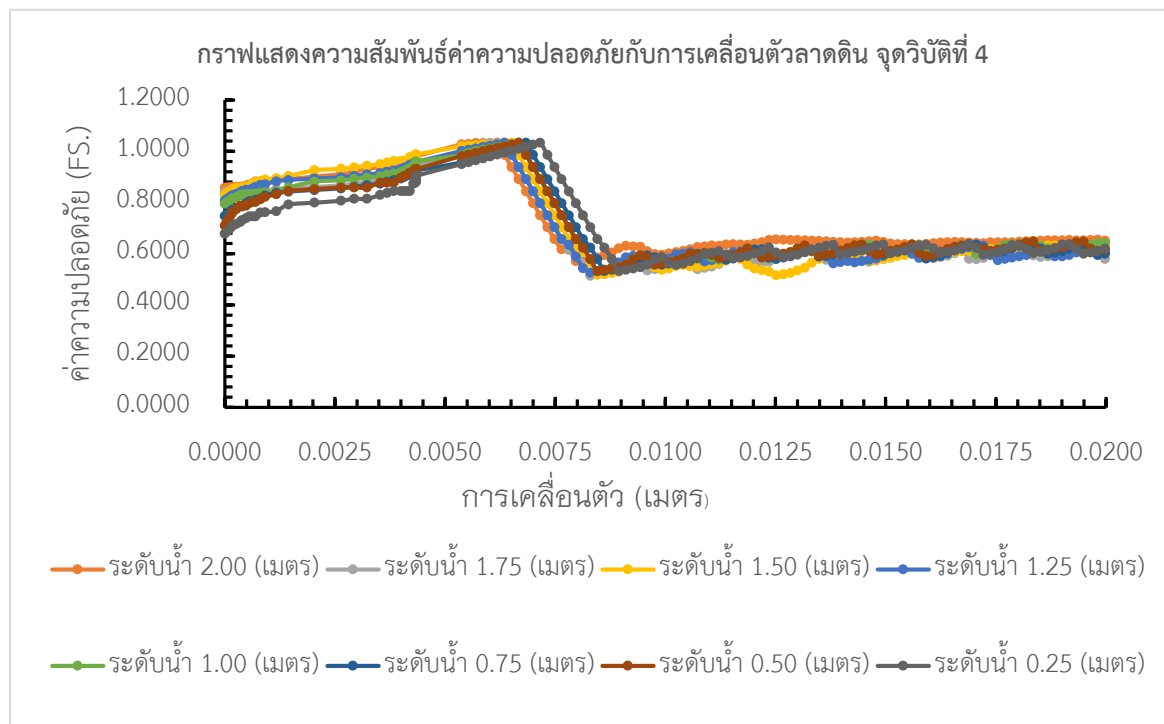
ภาพ 85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 3 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 3 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.50 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.699 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือช่วงที่ระดับน้ำ 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.033 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 3 ในช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 1.00 เมตร, 0.75 เมตร และ 0.50 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.730, 0.758, 0.811, 0.811, 0.809, และ 0.809 ตามลำดับ



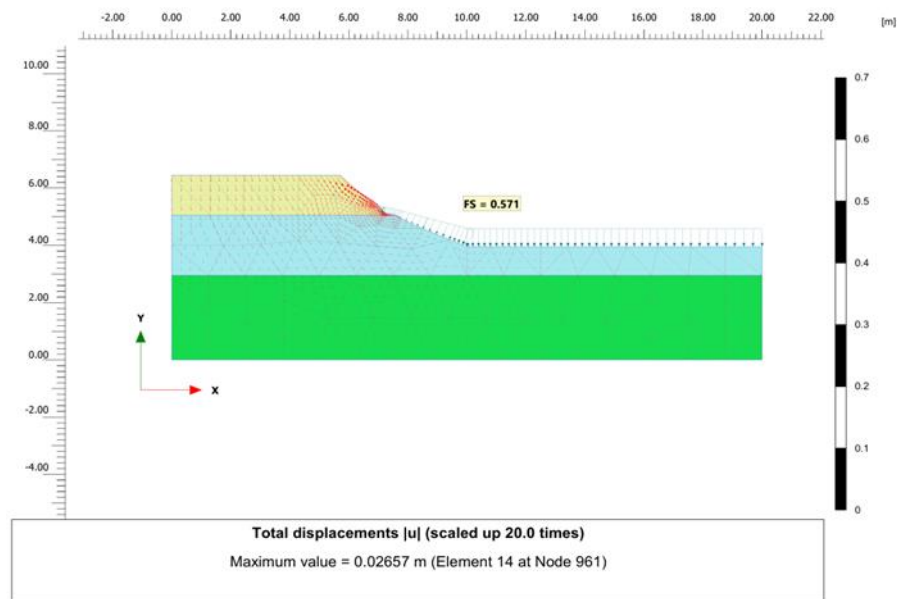
ภาพ 86 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 3 ที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 4 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 87



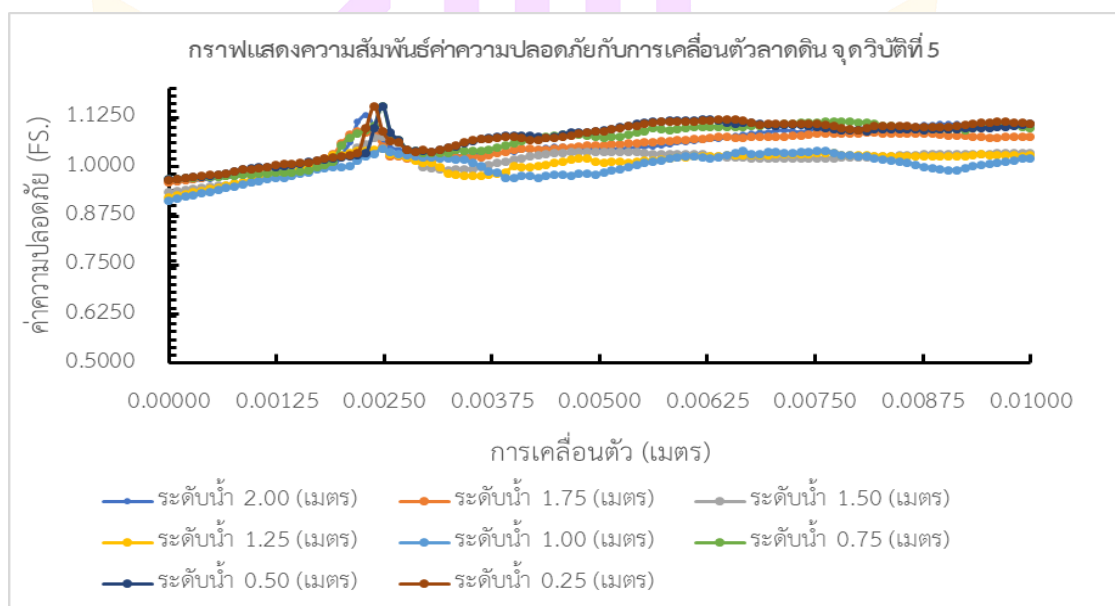
ภาพ 87 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 4 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 4 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.571 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.034 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 4 ในช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.652, 0.896, 0.996, 1.030, 1.012 และ 1.001 ตามลำดับ



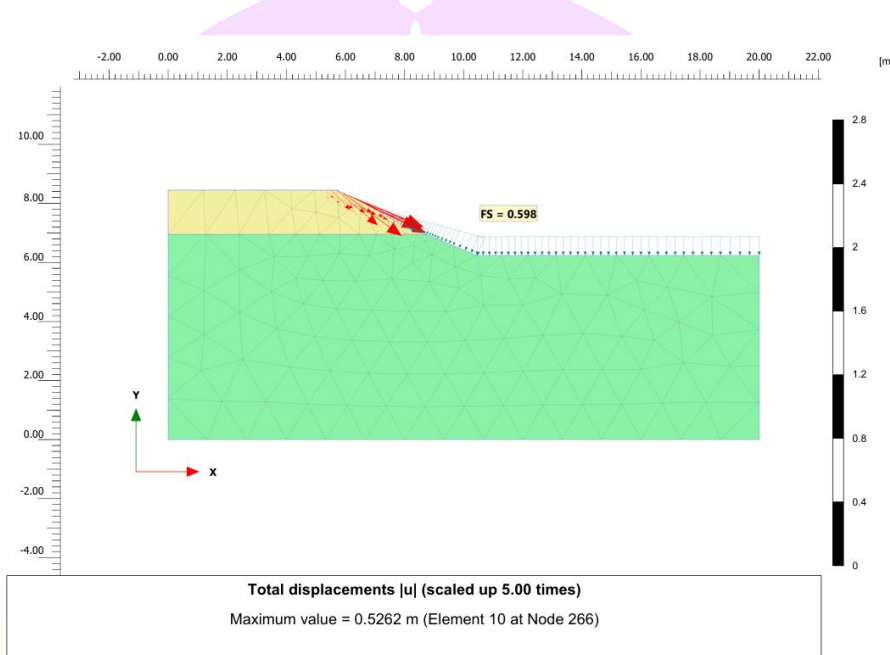
ภาพ 88 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 4 ที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 5 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 89



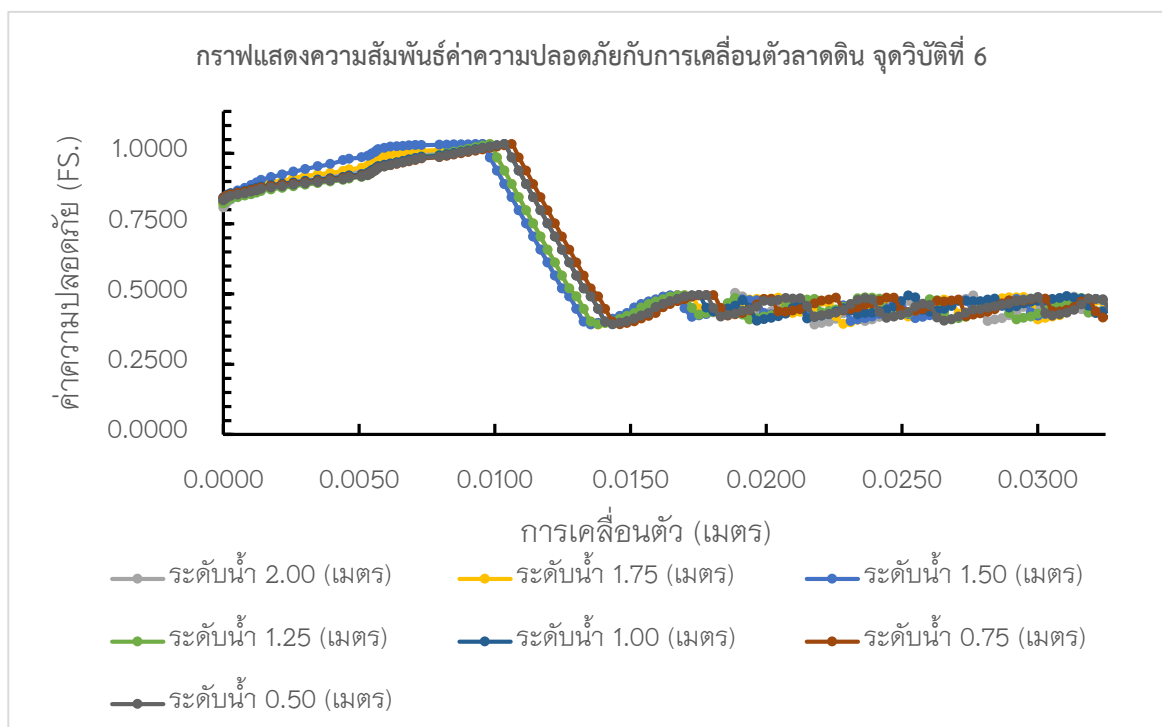
ภาพ 89 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 5 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 5 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.598 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.121 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 5 ในช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร, 1.75 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และช่วงระดับน้ำ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 1.103, 1.088, 1.035, 1.016, 1.101, 1.108 และ 1.107 ตามลำดับ



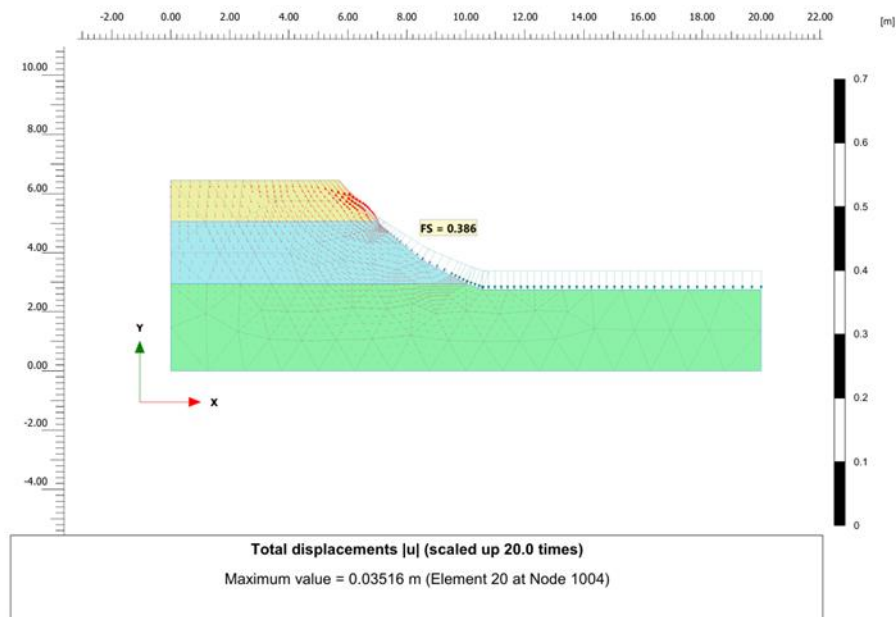
ภาพ 90 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 5 ที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 6 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 91



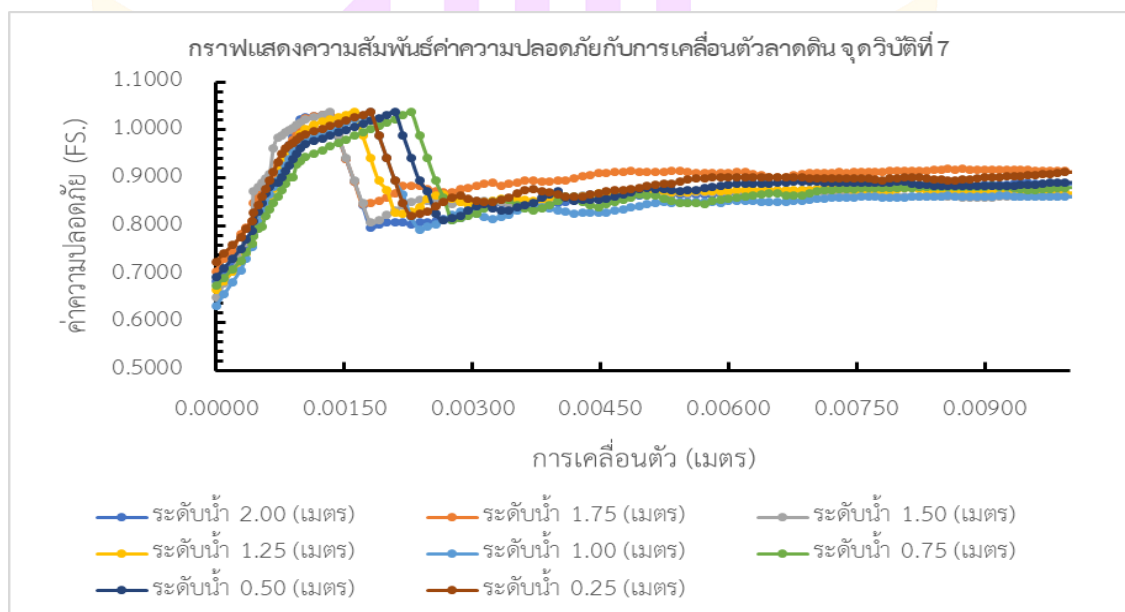
ภาพ 91 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 6 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.386 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.029 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 ในช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และช่วงระดับน้ำ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.4620, 0.5680, 0.8875, 0.9510, 0.9872 และ 0.9957 ตามลำดับ



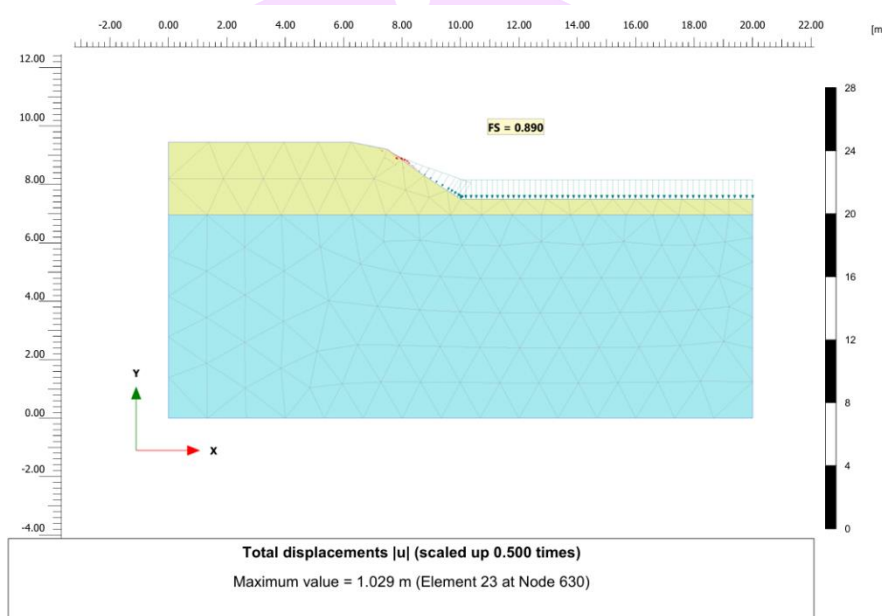
ภาพ 92 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 ที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวิบัติที่ 7 ค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพ 93



ภาพ 93 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 6 โดยผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์จุดวิบัติที่ 7 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.890 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.037 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 7 ในช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร, 1.50 เมตร, 1.25 เมตร, 1.00 เมตร, 0.75 เมตร, 0.50 เมตร และช่วงระดับน้ำ 0.25 เมตร มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินอยู่ที่ 0.9100, 0.8633, 0.8693, 0.8606, 0.8763, 0.8972 และ 0.9104 ตามลำดับ



ภาพ 94 ตัวอย่างโมเดลการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน ณ จุดวิบัติที่ 7 ที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ทั้ง 7 จุดวิบัติ โดยผ่านโปรแกรม ซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินทั้งหมด 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W

จุดวิบัติที่ 1 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.585 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.555 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.25 เมตร

จุดวัดที่ 2 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.639 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.592 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.25 เมตร

จุดวัดที่ 3 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.839 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.833 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.75 เมตร

จุดวัดที่ 4 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.875 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.854 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.75 เมตร

จุดวัดที่ 5 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.664 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 1.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.608 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 2.75 เมตร

จุดวัดที่ 6 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.684 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 2.00 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.670 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 3.25 เมตร

จุดวัดที่ 7 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด 0.898 อยู่ในช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.50 เมตร ถึง ช่วงที่มีระดับน้ำ 0.75 เมตร ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยสุดอยู่ที่ 0.894 ในช่วงที่ระดับน้ำมากกว่า 1.25 เมตร

จากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินทั้งหมด 7 จุดวิบัติ
ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

จุดวัดปีที่ 1 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.50 เมตร
มีค่าความปลอดภัย 0.540 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ
2.00 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.153

จุดวิกฤติที่ 2 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.581 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.149

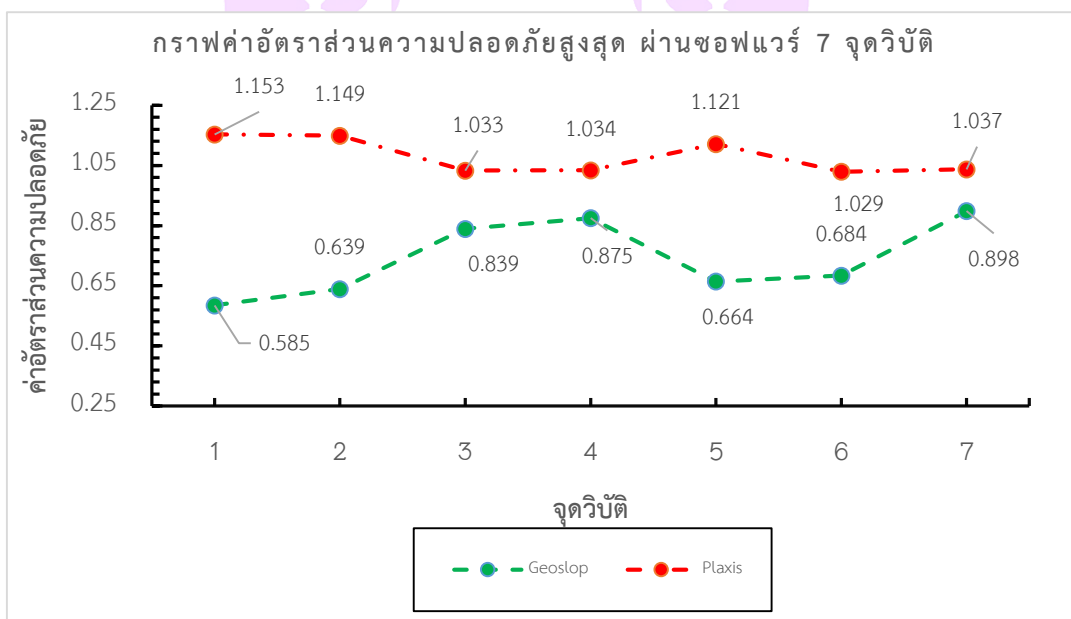
จุดวิกฤติที่ 3 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.699 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 0.25 เมตร ซึ่งมีความปลอดภัย 1.033

จุดวิบัติที่ 4 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.75 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.571 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.034

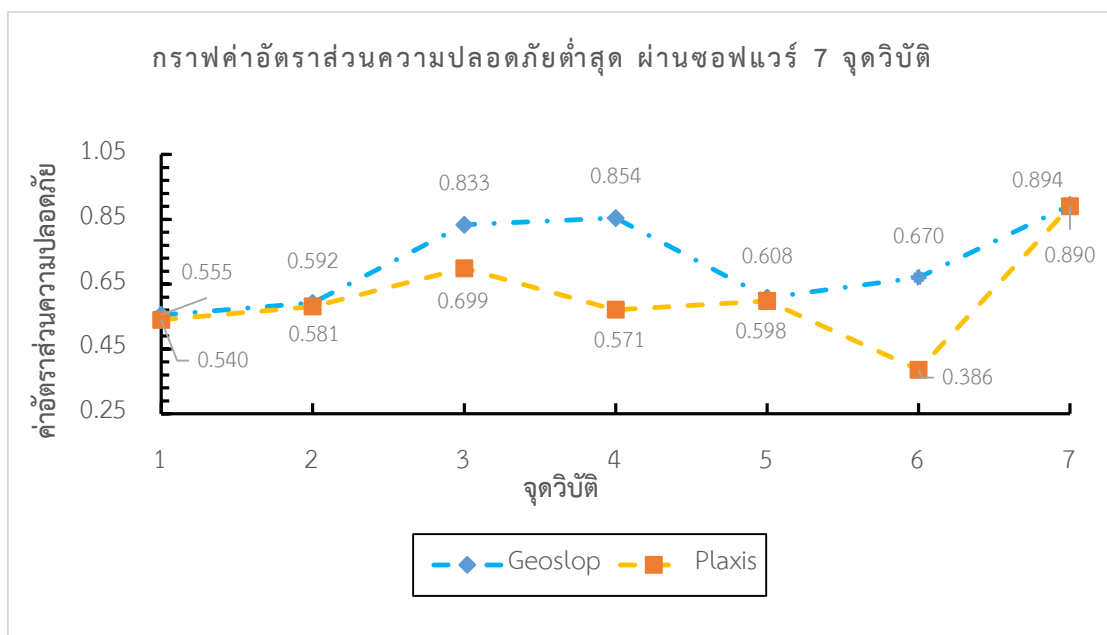
จุดวิบัติที่ 5 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.598 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.121

จุดวิบัติที่ 6 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด คือ ช่วงที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.386 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด ที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.029

จุดวิบัติที่ 7 กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุด ที่ระดับน้ำ 2.00 เมตร มีค่าความปลอดภัย 0.890 ส่วนกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากที่สุด ที่ระดับน้ำต่ำกว่า 0.25 เมตร ซึ่งมีค่าความปลอดภัย 1.037



ภาพ 95 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุด ใน 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D



ภาพ 96 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด ใน 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์
GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

ในส่วนของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าค่อนข้างต่ำกว่ามาตรฐาน จากการวิเคราะห์ทั้งหมด 7 จุดวิบัติ พบว่าในการประเมินปริมาณการไหลของน้ำในแต่ละช่วงเวลา โดยเฉพาะในช่วงฤดูน้ำหลากที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำ อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของตลิ่งหรือลาดดินโดยตรง

การศึกษานี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมการพื้นฐานทางชลศาสตร์ซึ่งใช้ในการประเมินอัตราการไหลของน้ำในลำน้ำ คือ

$$Q = V \times A$$

โดยที่

Q คือ อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, m^3/s)

V คือ ความเร็วของน้ำ (เมตรต่อวินาที, m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล (ตารางเมตร, m^2)

จากข้อมูลอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านหน้าตัดลำน้ำแม่ปืมที่มากที่สุด ในช่วงเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2565 มีค่ามากถึง 0.415 ล้านลูกบาศก์เมตร

ปริมาณน้ำ 0.415 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน จะเท่ากับ ประมาณ 1.51 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยแปลง 0.415 ล้านลูกบาศก์เมตรเป็นลูกบาศก์เมตรก่อน (415,000 ลบ.ม.) แล้วหารด้วยจำนวนวินาทีในหนึ่งเดือน (ประมาณ 2,629,800 วินาที).

แปลงล้านลูกบาศก์เมตรเป็นลูกบาศก์เมตร 0.415 ล้านลูกบาศก์เมตร = $0.415 \times 1,000,000$ ลูกบาศก์เมตร = 415,000 ลูกบาศก์เมตร

คำนวณจำนวนวินาทีในหนึ่งเดือน

จำนวนวันในเดือน: โดยเฉลี่ยใช้ 30 วันต่อเดือน

จำนวนชั่วโมงในวัน: 24 ชั่วโมง

จำนวนนาทีก่อนชั่วโมง: 60 นาที

จำนวนวินาทีในนาทีก่อน: 60 วินาที

ดังนั้น 1 เดือน ≈ 30 วัน/เดือน $\times 24$ ชม./วัน $\times 60$ นาที/ชม. $\times 60$ วินาที/นาที $\approx 2,592,000$ วินาทีต่อเดือน

คำนวณปริมาตรต่อวินาที:

$415,000$ ลูกบาศก์เมตร / $2,592,000$ วินาที ≈ 0.160 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ปริมาณน้ำ 0.415 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน (Q) ประมาณ 0.160 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จุดวิบัติที่ 1 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 1.94 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 15.52 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$V = 0.010$ เมตรต่อวินาที

จุดวิบัติที่ 2 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 2.61 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 20.88 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$V = 0.007$ เมตรต่อวินาที

จุดวิบัติที่ 3 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 2.97 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 23.76 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$V = 0.006$ เมตรต่อวินาที

จุดวิบัติที่ 4 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 2.42 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 19.36 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$$V = 0.008 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

จุดวิบัติที่ 5 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 3.05 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 24.40 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$$V = 0.006 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

จุดวิบัติที่ 6 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 3.17 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 25.36 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$$V = 0.006 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

จุดวิบัติที่ 7 พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ ท้องลำน้ำกว้างประมาณ 6.00 เมตร สูงประมาณ 2.06 เมตร ปากลำน้ำกว้างประมาณ 10.00 เมตร พื้นที่หน้าตัด A ประมาณ 16.48 ตารางเมตร เพราะฉะนั้นความเร็วของน้ำที่กระทำ $V = \frac{Q}{A}$

$$V = 0.009 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ตาราง 19 ความสัมพันธ์จากการหาอัตราการไหลของน้ำกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ที่วิเคราะห์ผ่าน GeoStudio 2012 SLOP/W และผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ที่วิกฤต

จุดวิบัติ	$Q(\max)$ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, m^3/s)	V (เมตรต่อวินาที, m/s)	A (ตารางเมตร, m^2)	GEOSLOP 2012 SLOP/W (FS.) min	PLAXIS 2D (FS.) min
1	0.160	0.010	15.52	0.555	0.573
2	0.160	0.007	20.88	0.592	0.582
3	0.160	0.006	23.76	0.833	0.730
4	0.160	0.008	19.36	0.731	0.652
5	0.160	0.006	24.40	0.633	0.782
6	0.160	0.006	25.36	0.679	0.797
7	0.160	0.009	16.48	0.833	0.621

ความสัมพันธ์พื้นฐานในการไหลของของไหล โดยที่ Q แทนอัตราการไหล (Discharge), V แทนความเร็วของการไหล (Velocity) และ A แทนพื้นที่หน้าตัดของการไหล (Cross-sectional Area) มีบทบาทสำคัญในการประเมินพฤติกรรมของน้ำใต้ดินภายในมวลดิน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope Stability) โดยเฉพาะในการพิจารณาแรงดันน้ำรูพรุน (Pore Water Pressure)

เมื่อความเร็วของการไหล V เพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหล Q คงที่ พื้นที่หน้าตัดของการไหล A คงที่หรือลดลงส่งผลให้การไหลสูงขึ้นเฉพาะจุด ความเร็วของการไหลที่สูงขึ้นในบริเวณพื้นที่หน้าตัดแคบ อาจทำให้เกิดการกัดเซาะ (Erosion) หรือพังทลายเฉพาะจุด ส่งผลให้เกิดการกัดเซาะที่เชิงลาดดิน ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน (FS) ลดลงได้

กรณีพื้นที่หน้าตัดของการไหล A เพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหล Q คงที่ ความเร็วของการไหล V ลดลง ส่งผลต่อความดันอาจกระจายตัวกว้างขึ้น ถ้าน้ำไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ความเร็วจะลดลง ซึ่งอาจลดแรงกัดเซาะแต่หากพื้นที่หน้าตัดของการไหล A เพิ่มจากการอิ่มตัวของดิน (saturation) จะทำให้มวลรวมของน้ำในดินมากขึ้น น้ำหนักดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงเฉือนเพิ่มส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน (FS) ลดลงได้เช่นกัน

กรณีอัตราการไหลของน้ำ (Q) ภายในมวลดินเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงดันน้ำรูพรุนเพิ่มตาม ซึ่งนำไปสู่การลดลงของแรงเสียดทานภายในดิน ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนลดลง และอาจก่อให้เกิดความล้มเหลวของลาดได้ กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) จะลดลงเมื่อ อัตราการไหลของน้ำ (Q) เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน หากความเร็วของการไหล (V) เพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัด (A) คงที่หรือมีค่าลดลงจะทำให้มีพลังงานมากขึ้นในบริเวณเฉพาะจุด ซึ่งอาจก่อให้เกิดการกัดเซาะของดินบริเวณเชิงลาดหรือใต้ฐานลาดได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะดังกล่าวอาจลดความมั่นคงของลาดและลดค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของเสถียรภาพลาดดินได้ในทางอ้อม

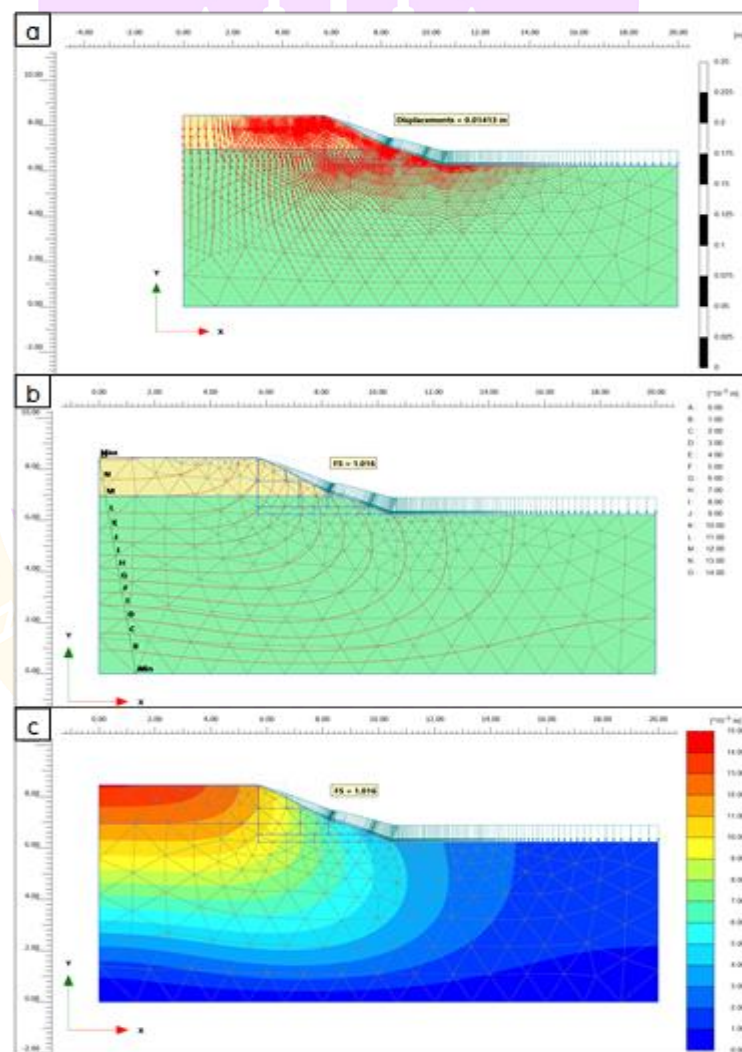
สำหรับกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของการไหล (A) เพิ่มขึ้น อาจแปลความได้ว่าเกิดการสะสมของน้ำในชั้นดิน เช่น จากการอิ่มตัวของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะส่งผลให้มวลดินมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และอาจเพิ่มแรงเฉือนที่กระทำต่อลาด ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของเสถียรภาพลาดดินลดลงเช่นเดียวกัน

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าสมการ $Q = VA$ สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการทำ ความเข้าใจพฤติกรรมของน้ำใต้ดินที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยเฉพาะในด้านการประเมินแรงดันน้ำรูพรุนและผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยของลาด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมปฐพีและการออกแบบระบบป้องกันดินพังทลายอย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิเคราะห์การเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (GABIONS)

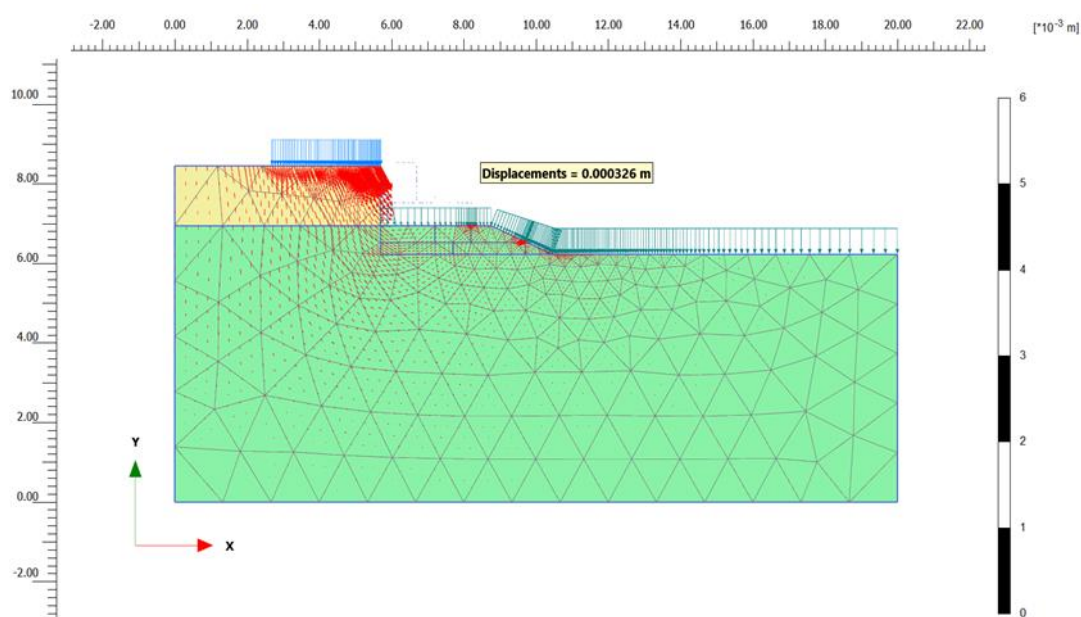
จากการวิเคราะห์การเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินโดยเลือกวิเคราะห์ จุดวิกฤติที่ 5 ซึ่งเป็นจุดวิกฤติที่ส่งผลกระทบจากความเสียหายมากที่สุด ในขั้นตอนการวิเคราะห์จะดำเนินการตามลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง จำลองตามลักษณะงานก่อสร้างจริง ซึ่งการวิเคราะห์นี้แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินก่อนการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน ผลการวิเคราะห์กรณีวิกฤติที่สุด ค่าความปลอดภัย 1.016 ที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร อัตราแรงกระทำจากน้ำต่อเสถียรภาพลาดดิน 1,411.00 กิโลกรัมต่อเมตร น้ำหนักกระทำจากคุณสมบัติ 3,968.80 กิโลกรัมต่อเมตร ค่าการเคลื่อนตัว 0.01413 เมตร



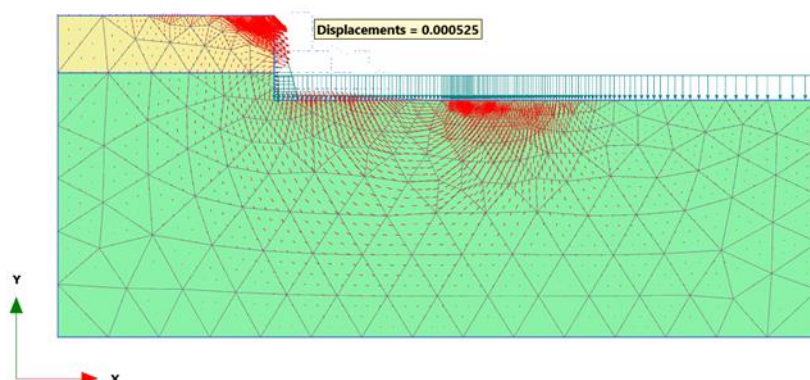
ภาพ 97 ผลการวิเคราะห์ก่อนการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (a) ทิศทางการเคลื่อนตัว เสถียรภาพลาดดิน (b) เส้นชั้นเสถียรภาพลาดดิน (c) ชาร์ตสีเสถียรภาพลาดดิน

ขั้นตอนที่ 2 ขุดดินในช่วงที่ 1 มีความลึกที่ขุดประมาณ 1.50 เมตร กว้างประมาณ 2.00 เมตร โดยมีน้ำหนักกระทำจากเครื่องจักร 2,039 กิโลกรัมต่อเมตร ผลการวิเคราะห์ขณะขุดดินในช่วงที่ 1 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดินขณะขุด 0.000326 เมตร



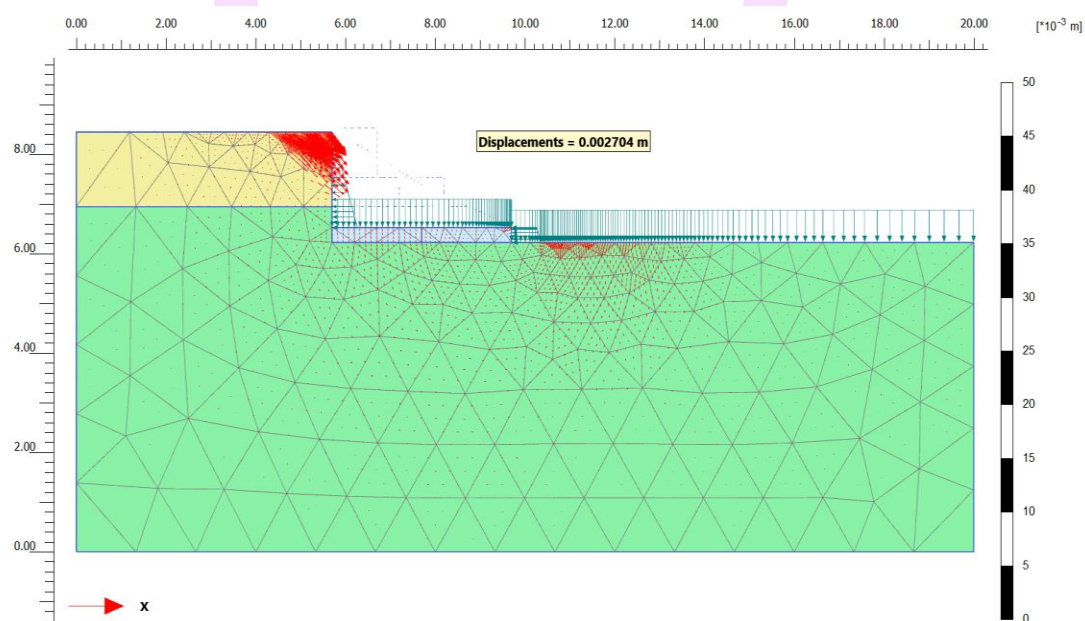
ภาพ 98 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะขุดดินในช่วงที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 ขุดดินในช่วงที่ 2 มีความลึกที่ขุดประมาณ 0.80 เมตร กว้างตามฐานที่จะทำการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน 4.00 เมตร โดยมีน้ำหนักกระทำจากเครื่องจักร 2,039 กิโลกรัมต่อเมตร ผลการวิเคราะห์ขณะขุดดินในช่วงที่ 2 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดินขณะขุด 0.000525 เมตร

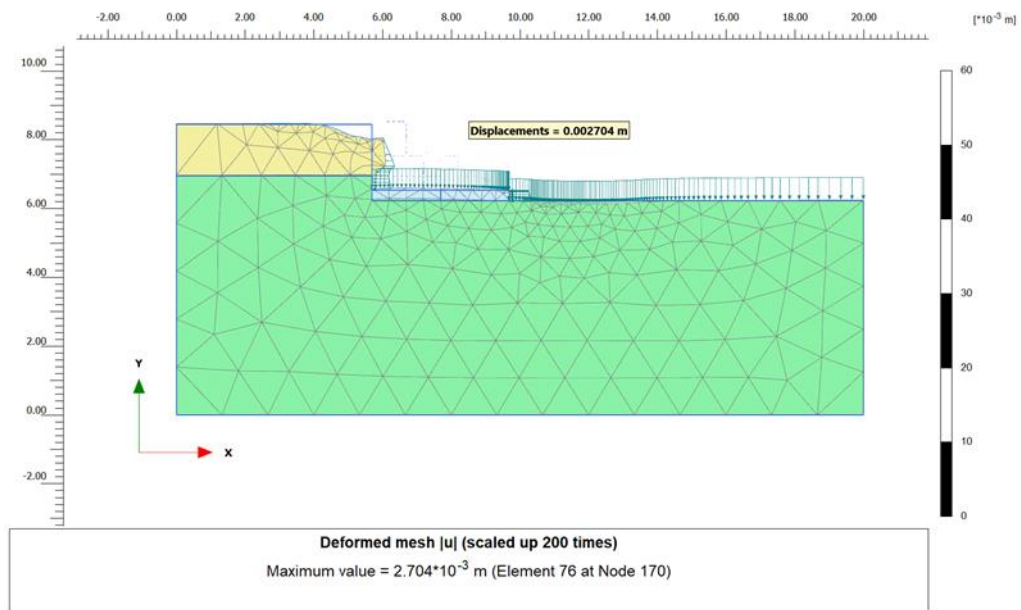


ภาพ 99 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะขุดดินในช่วงที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 เสริมกล่องเกเบียนเรียงหินในชั้นแรกฐานล่างสุด โดยมีขนาด กว้าง 4.00 เมตร เรียงหินสูง 0.30 เมตร ความยาวคิดต่อเมตร น้ำหนักกระทำจากเครื่องจักร 2,039 กิโลกรัมต่อเมตร ขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบียน ผลการวิเคราะห์ มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบียน 0.002704 เมตร

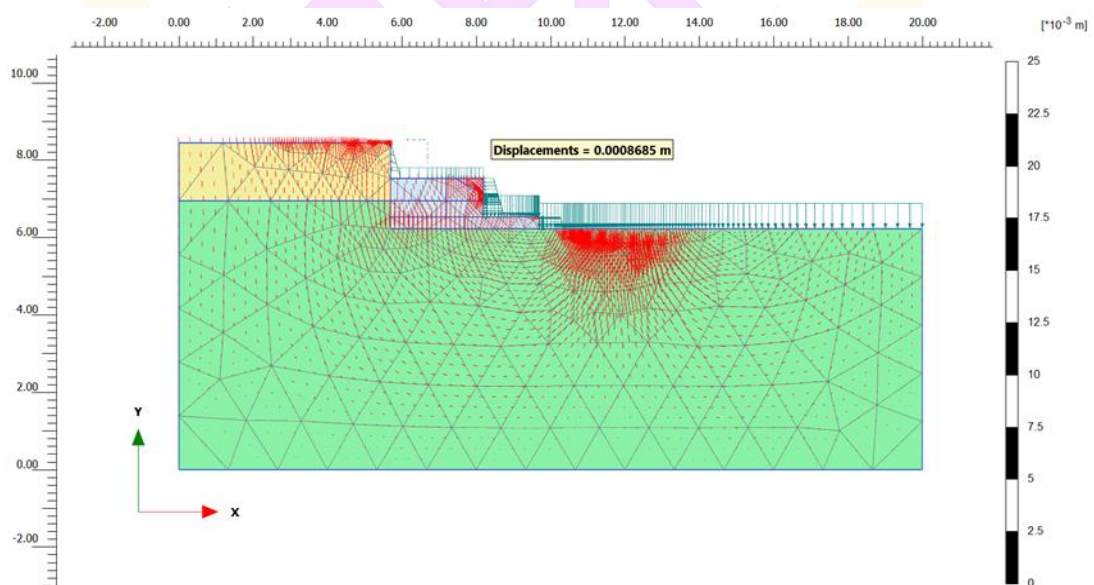


ภาพ 100 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินในชั้นฐานล่าง

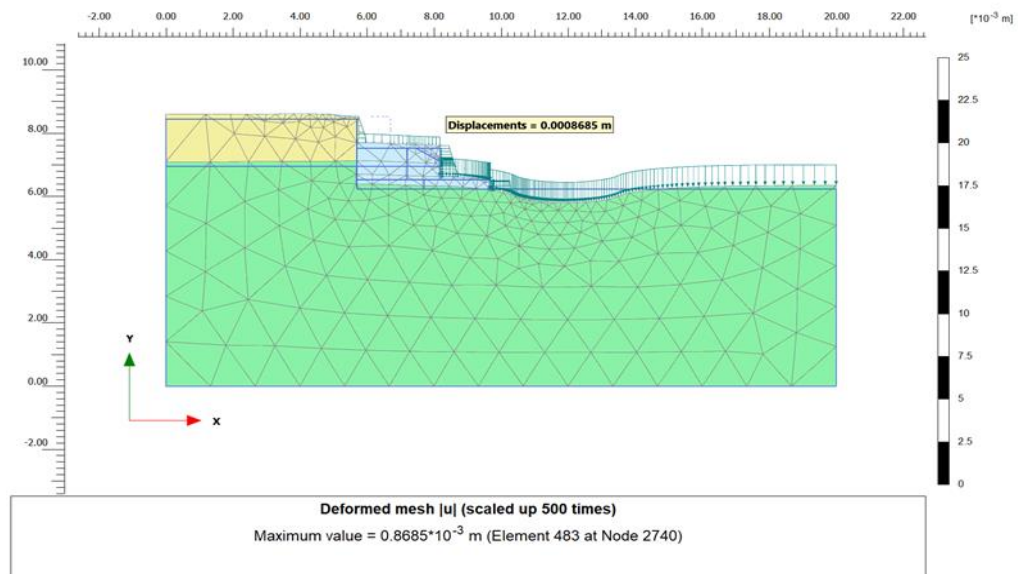


ภาพ 101 ลักษณะการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินชั้นฐานล่าง

ขั้นตอนที่ 5 เสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินในชั้นที่สองถัดจากชั้นฐานล่าง โดยมีขนาดความกว้าง 2.50 เมตร เรียงหินสูง 1.00 เมตร ความยาวคิดต่อเมตรหน้าหน้ากระทำจากเครื่องจักร 2,039 กิโลกรัมต่อเมตร ขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบี้ยน ผลการวิเคราะห์ มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดินขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบี้ยน 0.0008685 เมตร

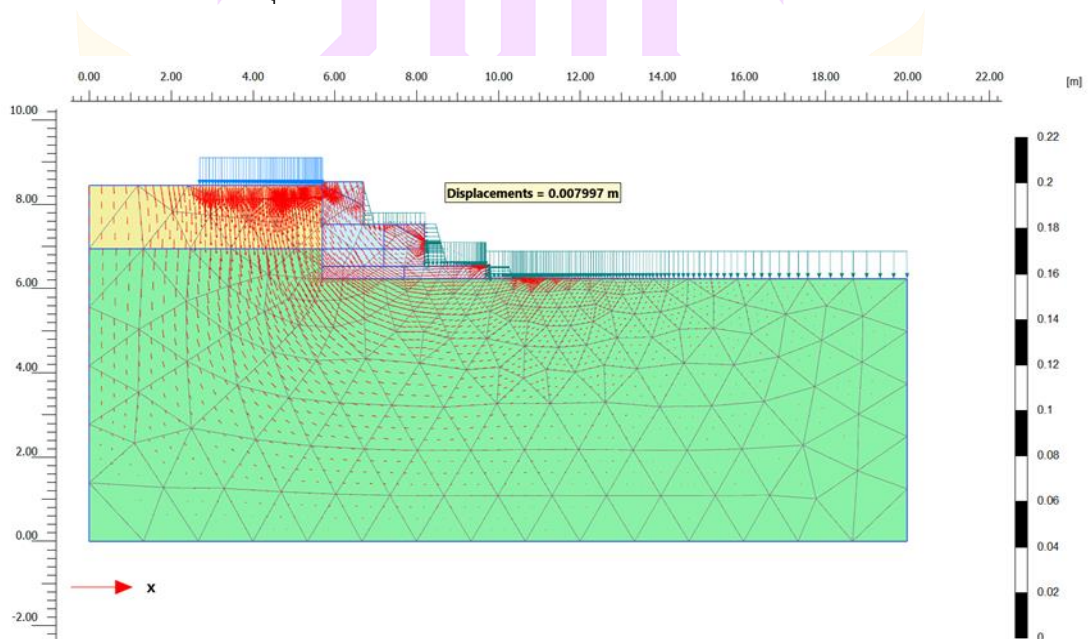


ภาพ 102 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินในชั้นที่สองถัดจากฐานล่าง

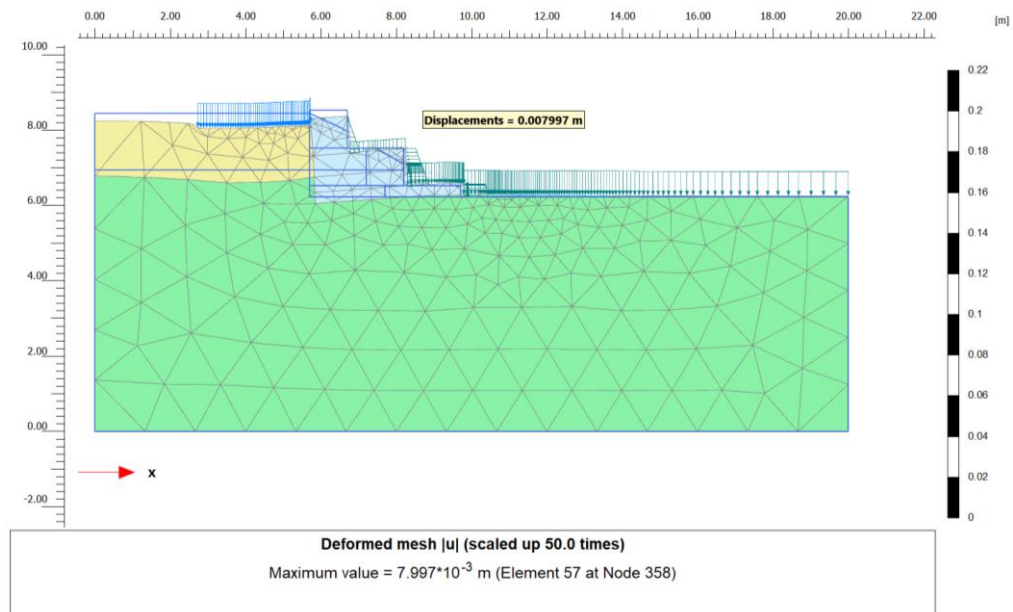


ภาพ 103 ลักษณะการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินชั้นที่สอง

ขั้นตอนที่ 6 เสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินในชั้นบนสุดถัดจากชั้นที่สอง โดยมีขนาดความกว้าง 1.00 เมตร เรียงหินสูง 1.00 เมตร ความยาวคิดต่อเมตรน้ำหนักระทำจากเครื่องจักร 2,039 กิโลกรัม ต่อเมตร ขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบี้ยน ผลการวิเคราะห์ มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดินขณะเรียงหินบรรจุในกล่องเกเบี้ยน 0.007997 เมตร

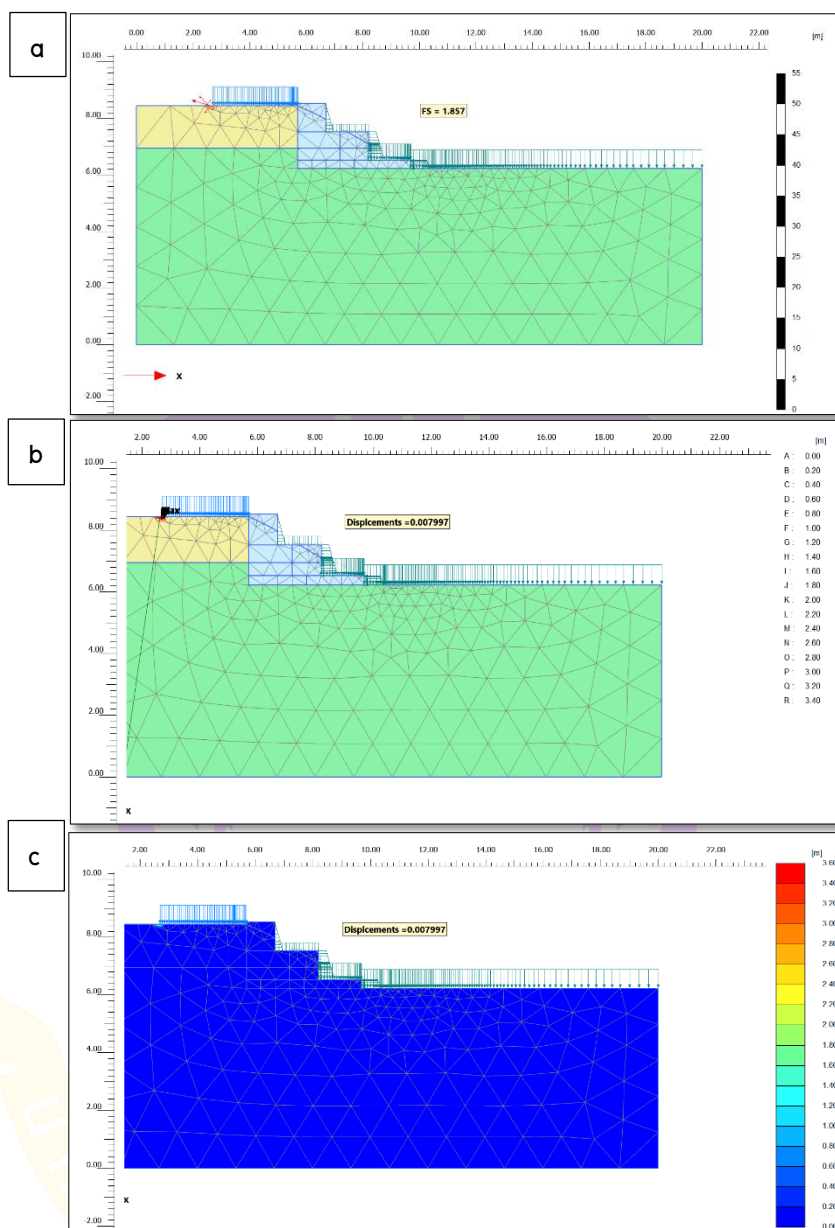


ภาพ 104 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ขณะทำการเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินในชั้นบนสุด



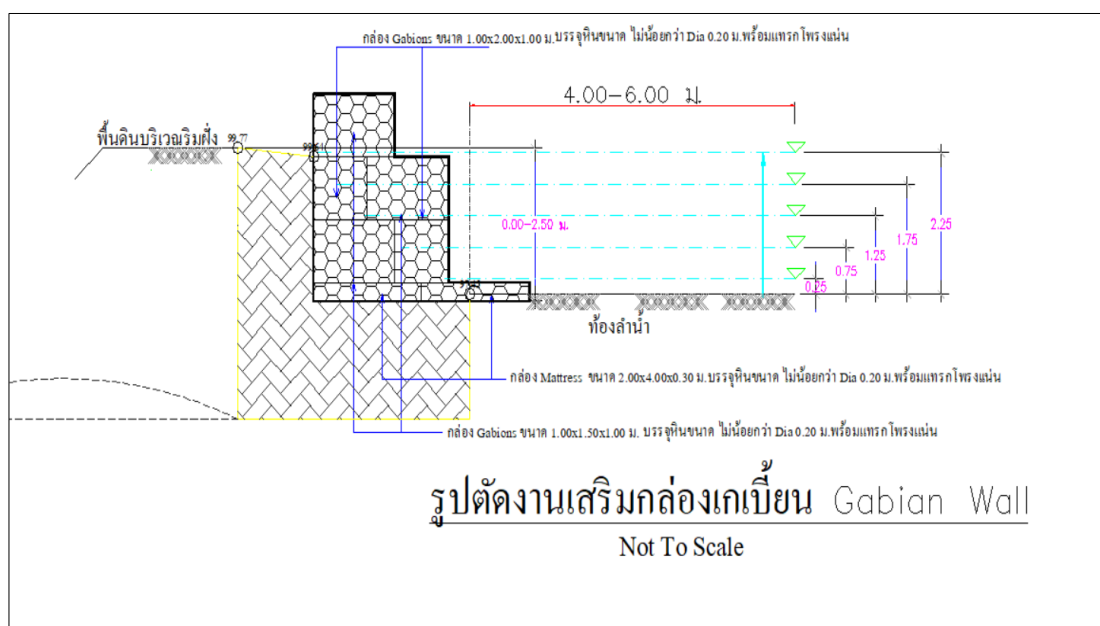
ภาพ 105 ลักษณะการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน ขณะเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหินชั้นบนสุด

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจุดวิกฤติที่ 5 กรณีที่วิกฤตที่สุด อัตราแรงกระทำจากน้ำต่อเสถียรภาพลาดดิน 1,411.00 กิโลกรัมต่อเมตร น้ำหนักกระทำจากคุณสมบัติ 3,968.80 กิโลกรัมต่อเมตร ค่าการเคลื่อนตัว 0.007997 เมตร ซึ่งก็ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัวที่พังทลายแต่เป็นการเคลื่อนตัวจากน้ำหนักไหลตกระทำ หลังจากการเสริมกล่องเกเบี้ยนบรรจุเรียงหิน มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.857 ซึ่งมีค่าความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน



ภาพ 106 ผลการวิเคราะห์หลังการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (a) ทิศทางการเคลื่อนตัว
เสถียรภาพลาดดิน (b) เส้นชั้นเสถียรภาพลาดดิน (c) ชาร์ตสีเสถียรภาพลาดดิน

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ในจุดวิบัติ ที่ 5 โดยเสริมกล่องเกเบียนบรรจุเรียงหินที่มีค่าความปลอดภัย ค่าความปลอดภัย 1.857 อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงนำมาจัดทำแบบรูปรายการก่อสร้าง เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างให้เกิดประโยชน์สูงสุด

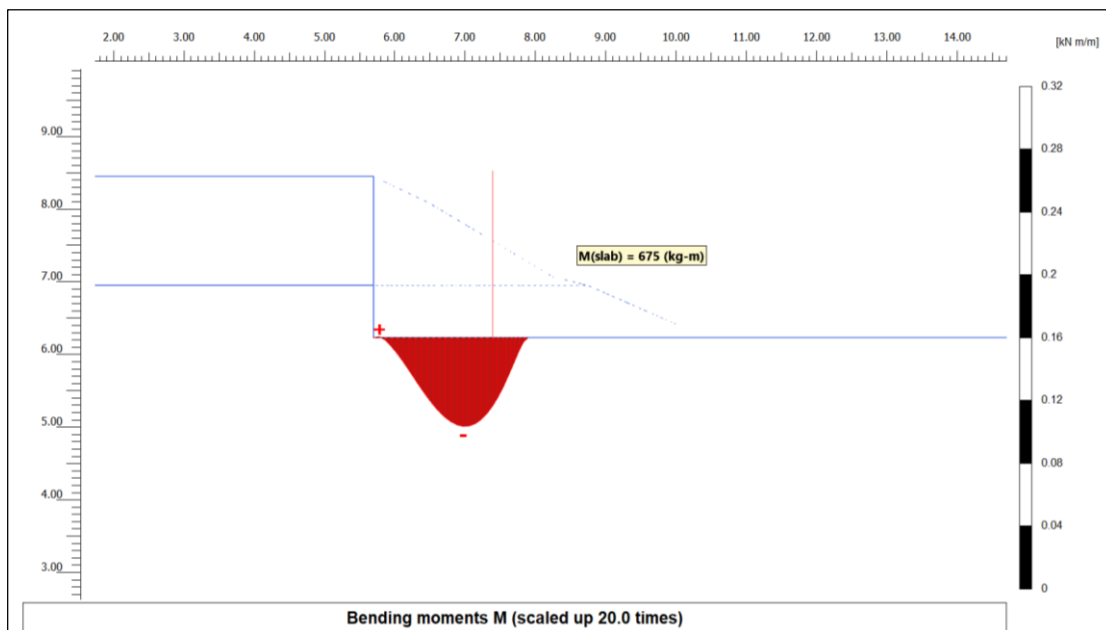


ภาพ 107 แบบรูปรายการก่อสร้าง รูปตัดการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน

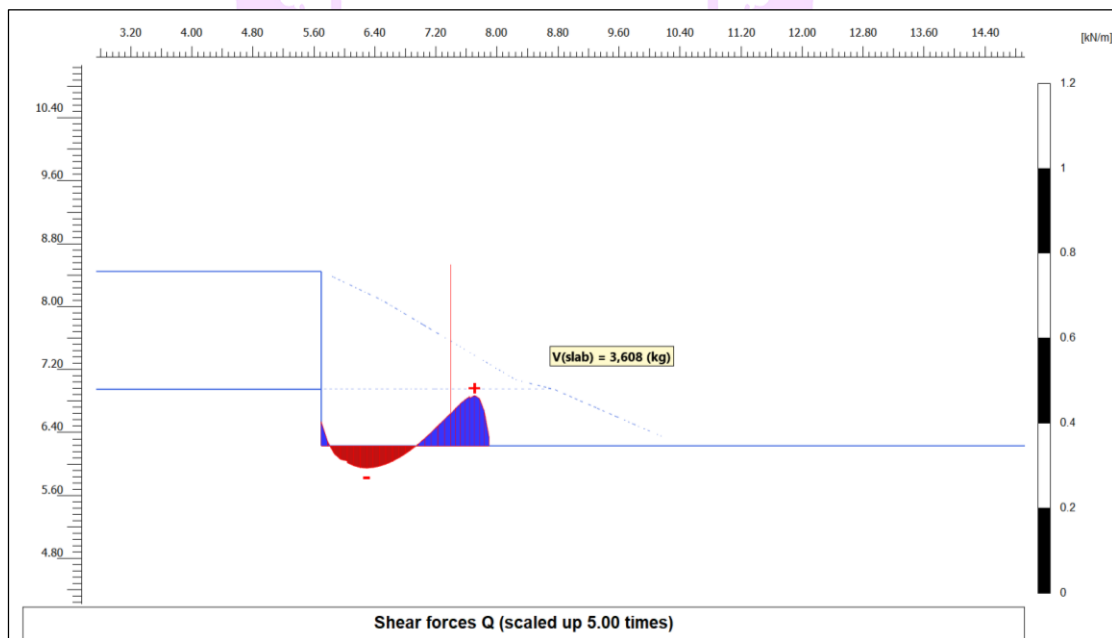
ผลการวิเคราะห์การเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก (CONCRETE RETAINING WALL)

จากการวิเคราะห์การเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กในจุดวิบัติที่ 5 ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D โดยมีส่วนของโครงสร้างฐานกำแพงกันดินความยาว 2.20 เมตร ตัวผนังกำแพงกันดิน มีความสูงจากฐาน 2.30 เมตร แล้วมีน้ำหนักจากปริมาณดินถมในช่วงของฐานกำแพงกันดินถึงผนังกำแพงกันดิน ในส่วนของโครงสร้างกำแพงกันดิน ผลการวิเคราะห์สามารถแยกส่วนของโครงสร้างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กเสริม จากโมเมนต์กระทำ และแรงเฉือนในโครงสร้างได้

จากการวิเคราะห์ในส่วนของฐานกำแพงกันดินโมเมนต์ที่เกิดขึ้น 675.00 กิโลกรัมต่อเมตร แรงเฉือนที่เกิดขึ้น 3,608.00 กิโลกรัม

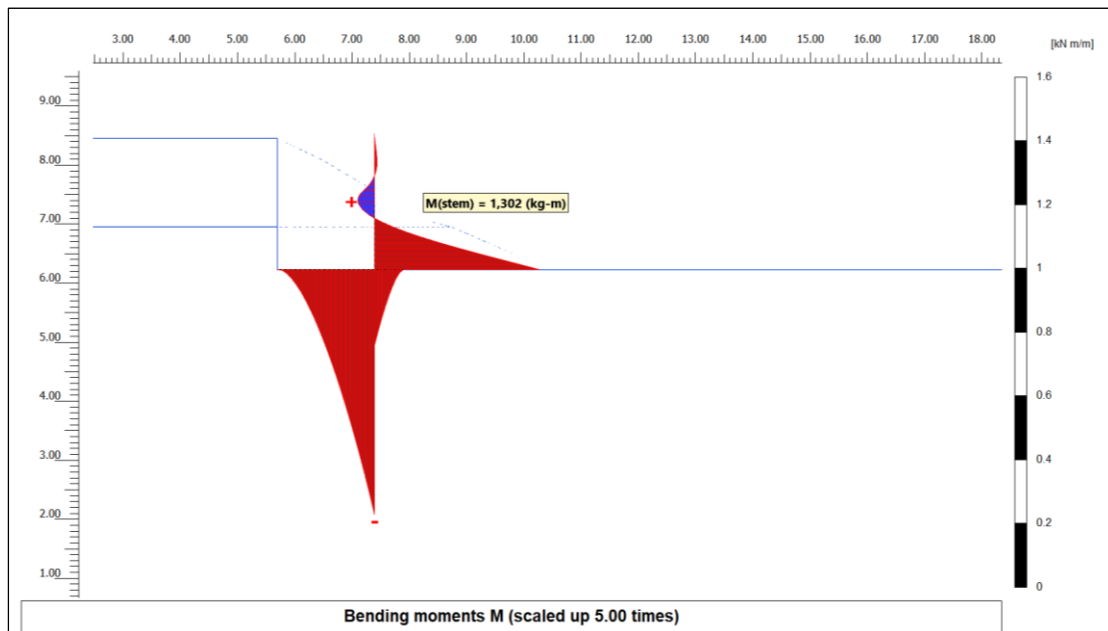


ภาพ 108 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างฐานกำแพงกันดิน

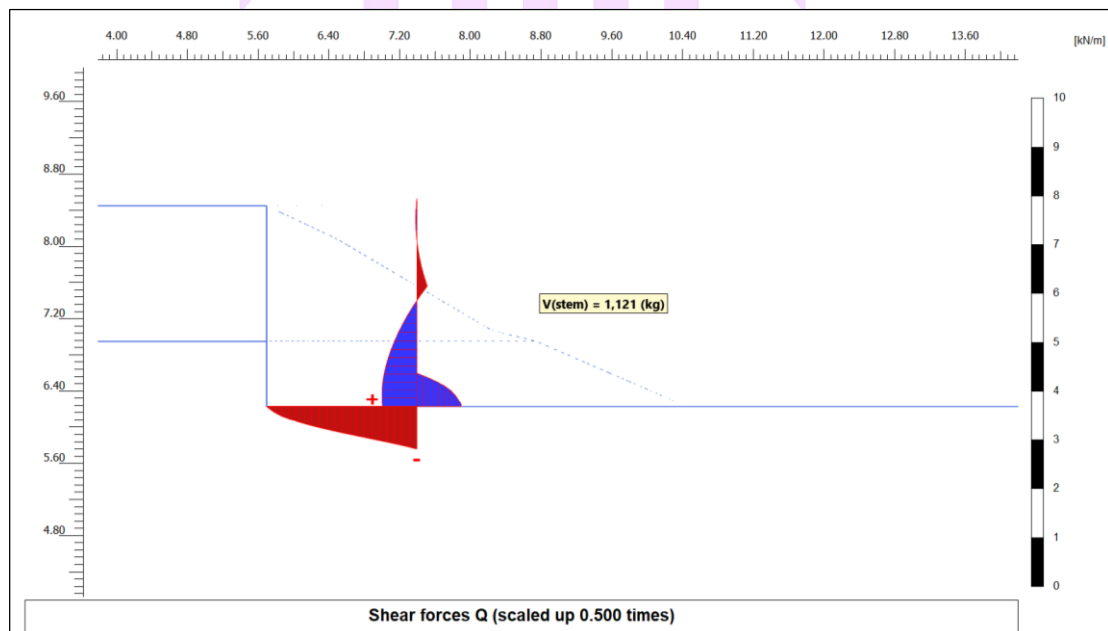


ภาพ 109 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างฐานกำแพงกันดิน

จากการวิเคราะห์ในส่วนของผนังกำแพงกันดินโมเมนต์ที่เกิดขึ้น 1,302.00 กิโลกรัมต่อเมตร
แรงเฉือนที่เกิดขึ้น 1,121.00 กิโลกรัม

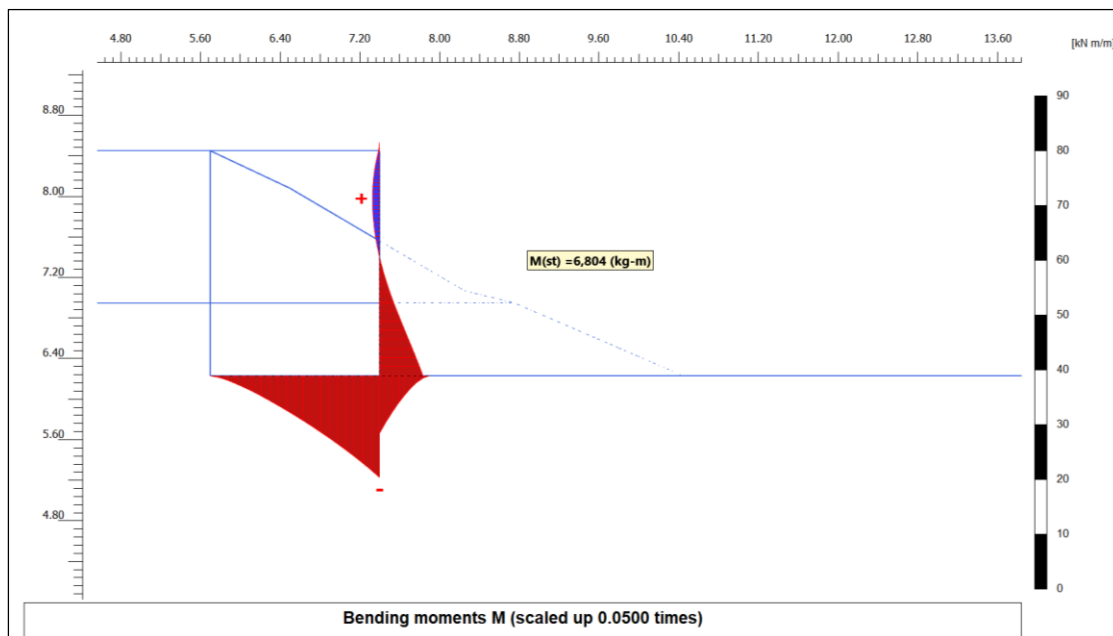


ภาพ 110 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างผนังกำแพงกันดิน

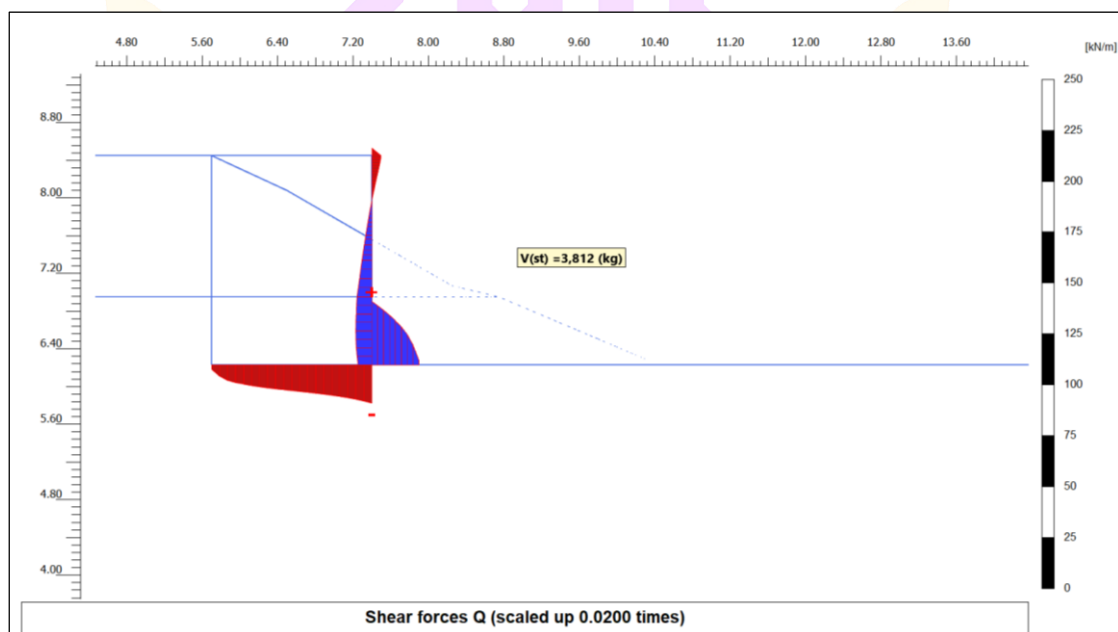


ภาพ 111 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างผนังกำแพงกันดิน

จากการวิเคราะห์ห้วงคร่อมทั้งหมดของโครงสร้างกำแพงกันดินโมเมนต์ที่เกิดขึ้น 6,804.00 กิโลกรัมต่อเมตร แรงเฉือนที่เกิดขึ้น 3,812.00 กิโลกรัม

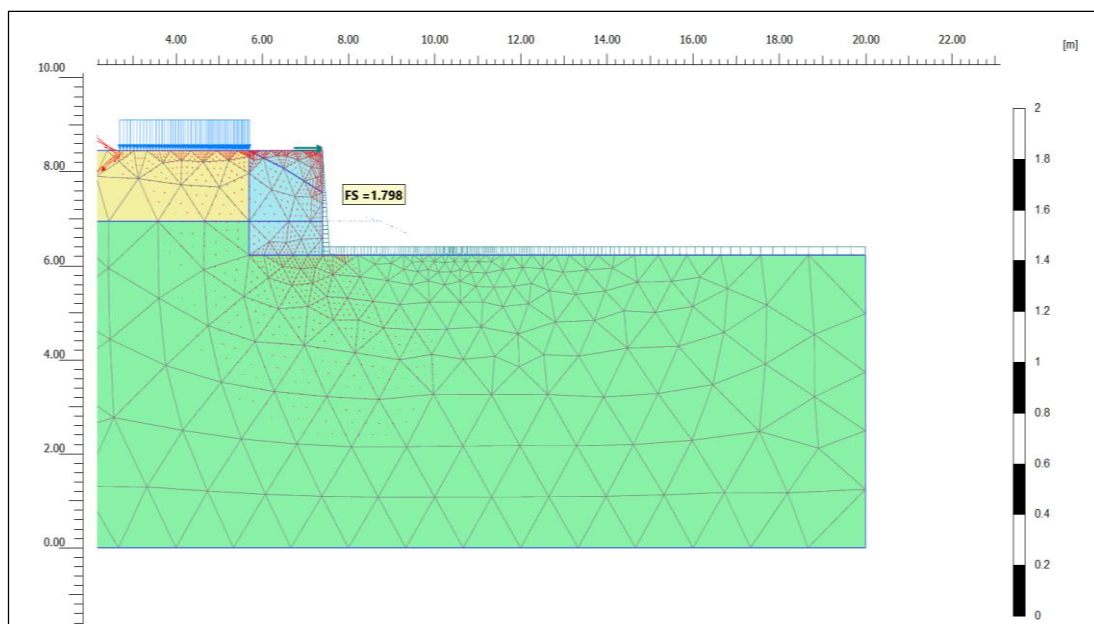


ภาพ 112 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดขึ้นโครงสร้างกำแพงกันดิน

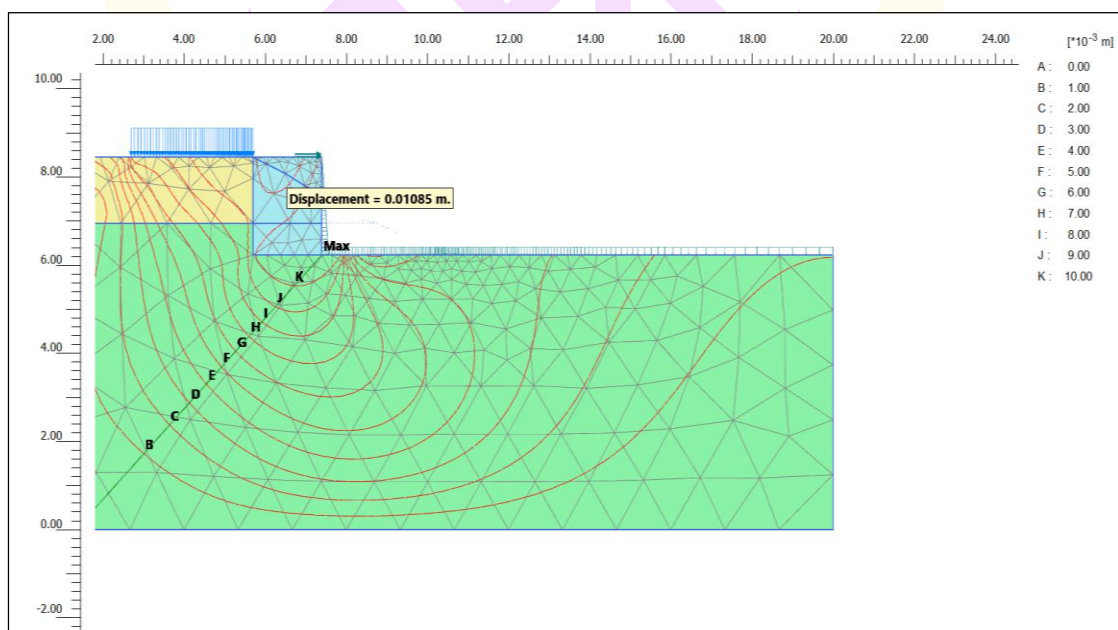


ภาพ 113 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นโครงสร้างกำแพงกันดิน

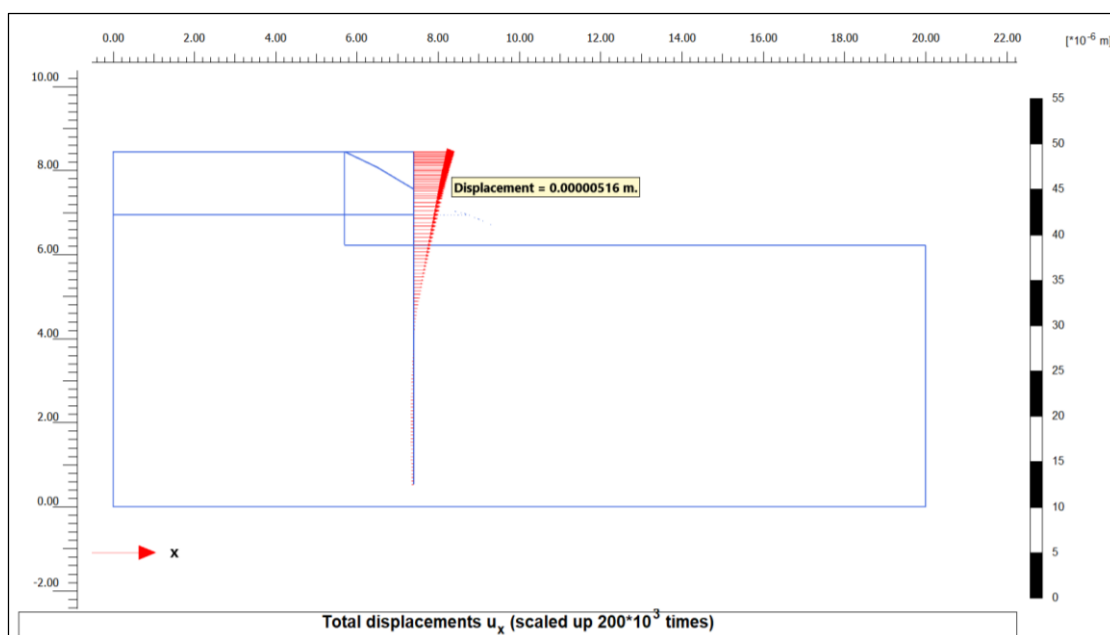
จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ในจุดวิบัติ ที่ 5 โดยเสริมกำแพงกันดินวิเคราะห์ผล มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.798 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.01085 เมตร แล้วนำมาจัดทำแบบรูปรายการก่อสร้างที่ได้คำนวณเสริมเหล็กกำแพงกันดิน ดังแสดงในภาพ 114



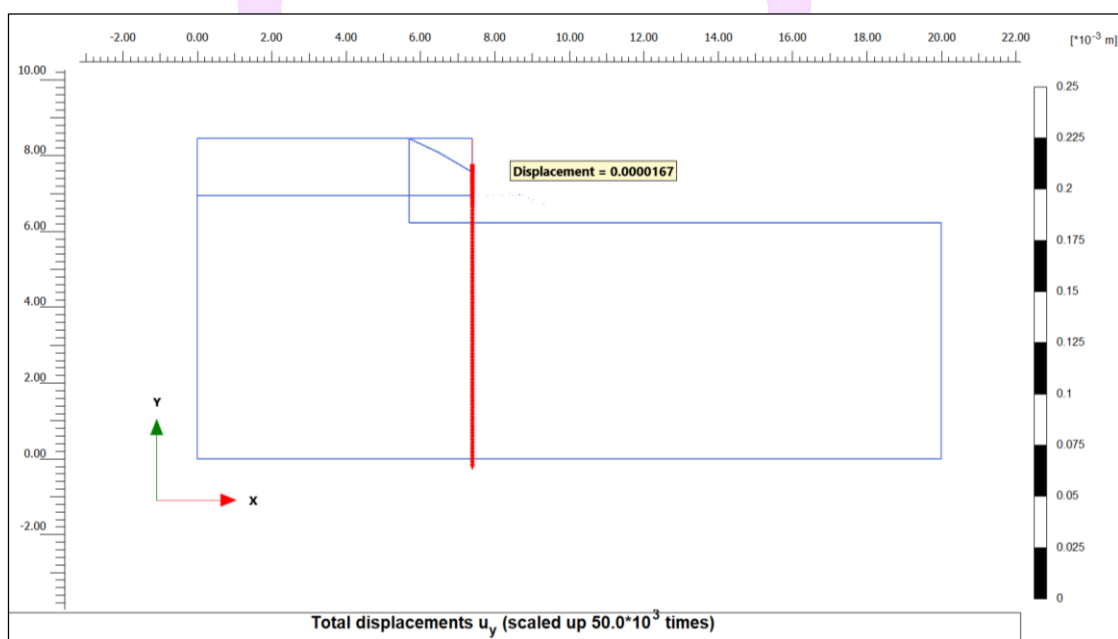
ภาพ 114 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังเสริมกำแพงกันดิน



ภาพ 115 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของหลังเสริมกำแพงกันดิน

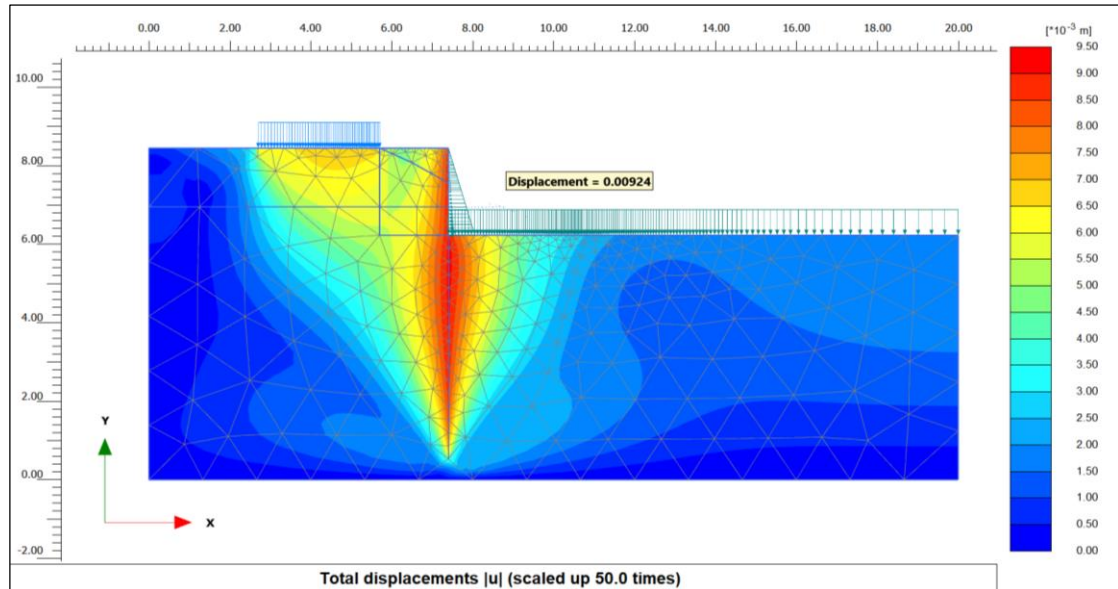


ภาพ 117 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ในแนวแกน x ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D



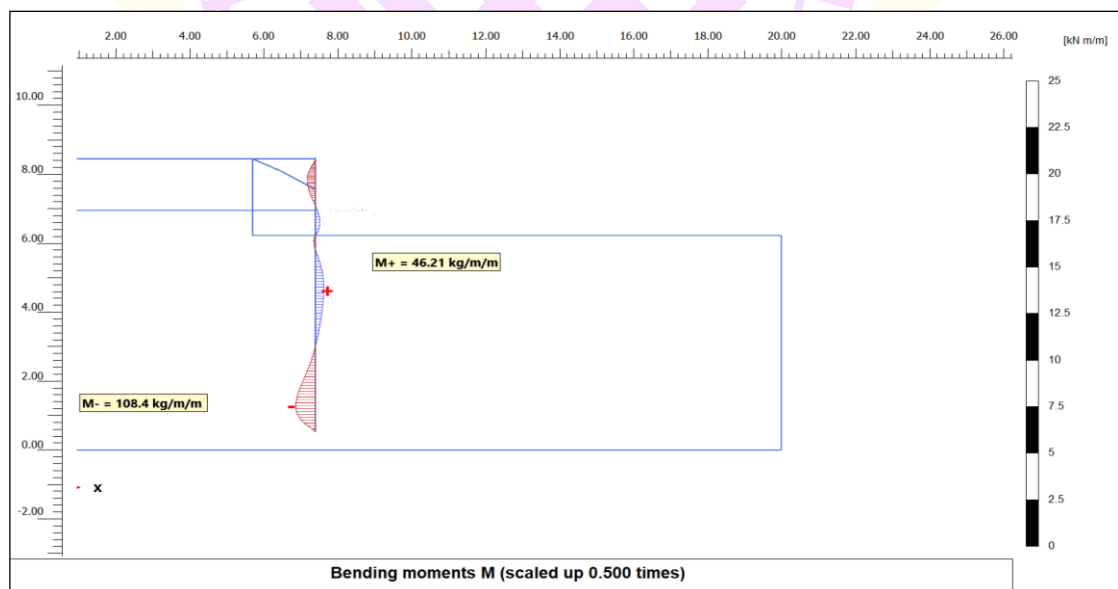
ภาพ 118 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ในแนวแกน Y ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D

องค์ประกอบรวมโครงสร้างมีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.00924 เมตร



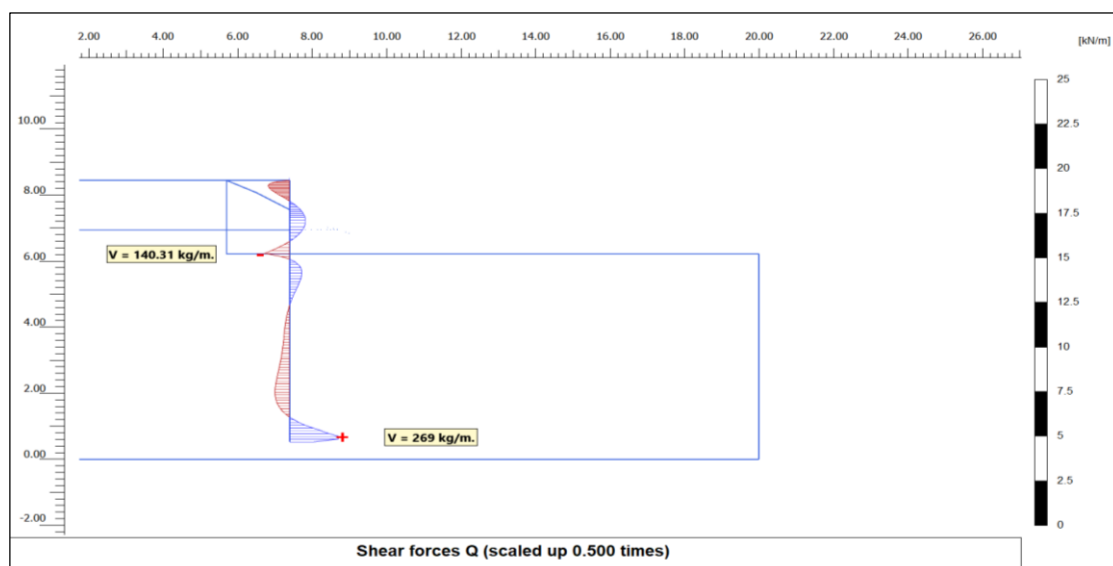
ภาพ 119 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D

วิเคราะห์ในส่วนของโครงสร้างเสาเข็มกันดิน โมเมนต์ที่เกิดขึ้น โมเมนต์บวก 46.21 กิโลกรัมต่อเมตร และโมเมนต์ลบ 108.40 กิโลกรัมต่อเมตร



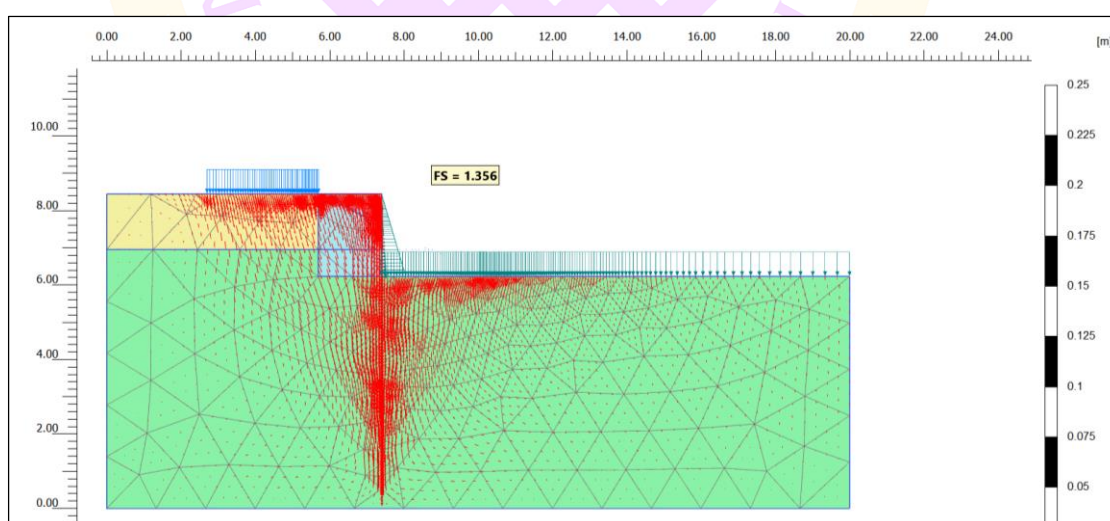
ภาพ 120 ผลการวิเคราะห์ เสาเข็มกันดิน โมเมนต์ที่เกิดขึ้น ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D

วิเคราะห์โครงสร้างเสาเข็มกันดิน จากการวิเคราะห์ในส่วน of โครงสร้างเสาเข็มกันดิน แรงเฉือนที่เกิดขึ้น แรงเฉือนที่บริเวณปลายเสาเข็ม 269.00 กิโลกรัมต่อเมตร

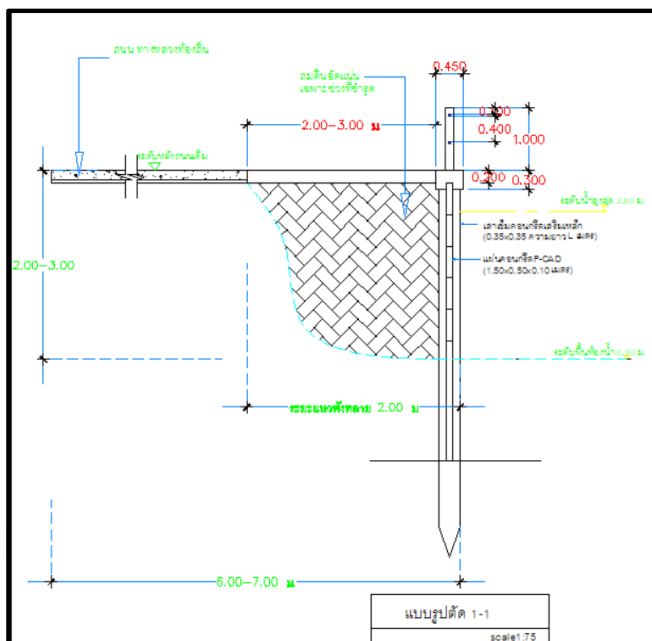


ภาพ 121 ผลการวิเคราะห์ เสาเข็มกันดิน แรงเฉือนที่เกิดขึ้น ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ในจุดวิบัติ ที่ 5 โดยเสริมเสาเข็มต่อกันดิน วิเคราะห์ผลมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.356 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.00924 เมตร นำมาจัดทำแบบรูปการก่อสร้างเสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก)



ภาพ 122 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของการเสริมเสาเข็มกันดิน ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D



ภาพ 123 แบบรูปฉายการก่อสร้างเสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก) รูปตัดการเสริมเสาเข็มกันดิน

ในส่วนของโครงสร้างที่นำมาใช้เป็นแนวทางในการป้องกันการพังทลายของเสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ ทั้ง 3 รูปแบบนี้ มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

วิธีการเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหิน (Gabion Wall) ข้อดีระบายน้ำได้ดีมีช่องว่างระหว่างหิน ช่วยให้ระบายน้ำได้ ลดแรงดันน้ำด้านหลัง ก่อสร้างง่ายรวดเร็วไม่ต้องใช้อุปกรณ์หนักมาก สามารถใช้แรงงานกับเครื่องจักรทั่วไปได้ เหมาะกับพื้นที่มีการเคลื่อนตัวของดินหรือดินทรุด สามารถปลูกหญ้าหรือไม้คลุมดินบนกล่องหินได้ ข้อเสียไม่เหมาะกับพื้นที่สูงหรือแรงดันดินมาก ความมั่นคงจำกัดที่ระดับความสูง อายุการใช้งานต่ำกว่าคอนกรีตเหล็กตะแกรงอาจเป็นสนิมเมื่อเวลาผ่านไปใช้โครงสร้างใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก

วิธีการเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Retaining Wall) ข้อดีรับแรงได้สูงเหมาะกับลาดชันและแรงดันดินสูงทนทาน อายุการใช้งานยาวนานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง ทนต่อสภาพอากาศ ข้อเสียต้องมีระบบระบายน้ำที่ดี หากไม่มีท่อระบาย อาจเกิดแรงดันน้ำสะสมด้านหลังต้นทุนการก่อสร้างสูงต้องใช้วัสดุและแรงงานที่มีทักษะ โครงสร้างแข็งไม่ยืดหยุ่นอาจเกิดการแตกร้าวเมื่อดินเคลื่อนตัว

วิธีการตอกเสาเข็มกันดิน (เสาเข็มตอก) ข้อดีเหมาะกับพื้นที่ลาดดินสูงแรงดันดินมาก มีความมั่นคงและรับแรงได้ดีช่วยต้านการเคลื่อนที่ของดินแนวราบป้องกันการทรุดหรือเลื่อนได้ดีมาก ใช้งานได้กับดินอ่อน ช่วยถ่ายแรงลงชั้นดินแข็งลึกลงไป ข้อเสียต้นทุนสูง ค่าวัสดุและเครื่องจักร

ในการตอกเสาเข็มสูงก่อสร้างยากในพื้นที่จำกัด ต้องใช้พื้นที่เพียงพอสำหรับเครื่องจักรตอกเสา
เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงดังอาจรบกวนอาคารหรือชุมชนใกล้เคียง



บทที่ 5

บทสรุป

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เกิดการพังทลายของลาดดินตลิ่งลำน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา โดยสำรวจเก็บข้อมูลลักษณะลาดดินในพื้นที่ศึกษา มีทั้งหมด 7 จุดพื้นที่วิบัติ ในแนวเขตตำบลแม่ใจ ลักษณะการวิบัติพังทลายของตลิ่งลำน้ำ (River Bank Failure) ทั้ง 7 จุดวิบัติ เป็นการพังทลายแบบหมุนตัว (Rotational Failure) ลักษณะการพังมีลักษณะของ Mass Movement คือ ดินส่วนหนึ่งถล่มลงไปพร้อมกันเป็นมวลก้อนใหญ่ ดินที่ถล่มลงไปมีลักษณะ Plastic Flow อาจเกิดจากปริมาณน้ำใต้ผิวดินที่สูงมากในช่วงเวลานั้น วิเคราะห์ประเมินเสถียรภาพลาดดิน หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยภายหลังที่เกิดการวิบัติ โดยผ่านโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W ใช้หลักการในการโมเดลแบบจำลอง Mohr-Coulomb อาศัยหลักการวิเคราะห์แบบมอร์เกนสเตรน ไพรส์ (Morgenstern Price) เป็นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณความเสถียรของดินในพื้นที่ที่มีหลายชั้นดิน มีการเลื่อนไถลของดินหรือความลาดเอียงที่ไม่สม่ำเสมอ แล้วเงื่อนไขพารามิเตอร์ไม่ค่อยมีความซับซ้อน เหมาะกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบในการศึกษา ส่วนโปรแกรม PLAXIS 2D โมเดลแบบจำลอง Mohr-Coulomb ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงสร้างตาข่าย (Finite Element) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้กระบวนการสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตภายใต้การตรวจสอบในพื้นที่ไหนต่าง ๆ สามารถบ่งบอกถึงเสถียรภาพของลาดดิน การกระจายของแรงที่กระทำต่อชั้นดิน การเคลื่อนที่ของดินในแต่ละจุดเพื่อหาความเสี่ยงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงให้ผลการกระจายน้ำและการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินในพื้นที่ได้

ผลการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินทั้ง 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุด 0.555 ณ จุดวิบัติที่ 1 ส่วนค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงที่สุด 0.898 ณ จุดวิบัติที่ 7 และในการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินทั้ง 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุด 0.386 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.0345 เมตร ณ จุดวิบัติที่ 6 ส่วนค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงที่สุด 1.153 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.430 เมตร ณ จุดวิบัติที่ 1

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินทั้งหมด 7 จุดวิบัติ ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W กับโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D ในการวิเคราะห์ผลค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) สูงสุดกับต่ำสุดในแต่ละ 7 จุดวิบัติ แนวโน้มทั่วไปค่าที่วิเคราะห์ได้ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D มีค่าค่อนข้างคงที่และสูงกว่าค่าจาก โปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W ในทุกจุด ดังนั้นในการประเมินผ่าน โปรแกรม PLAXIS 2D เป็นแบบ Finite Element Method (FEM)

ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมดินที่ซับซ้อนได้มากกว่า อาจให้ค่าความปลอดภัยสูงกว่า เพราะคำนวณความเค้นเสียรูปได้ละเอียด ส่วนโปรแกรม GeoStudio 2012 SLOP/W ใช้วิธีจำลองแบบ Limit Equilibrium Method (LEM) ซึ่งแม้จะใช้กันแพร่หลาย แต่มีข้อจำกัดในการพิจารณาความเค้นจริงในมวลดิน

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินทั้ง 7 จุดวิบัติ ภายหลังสภาวะที่ตลิ่งลำนน้ำเกิดการวิบัติไปแล้ว อาจส่งให้การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินตลิ่งภายหลังเกิดการวิบัติ พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety: FS) อยู่ในระดับต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงบริเวณแนวเฉือนที่มีความต้านทานลดลงจากค่าสูงสุด (Peak Strength) ไปสู่ค่าคงเหลือ (Residual Strength) ประกอบกับแรงดันน้ำรูพรุนที่เพิ่มขึ้นในช่วงก่อนการวิบัติ ส่งผลให้พฤติกรรมของมวลดินเปลี่ยนแปลงไป การวิเคราะห์แบบย้อนหลัง (Back Analysis) แสดงให้เห็นว่าแนวระนาบเฉือนที่เกิดขึ้นจริงเป็นแนวที่มีความต้านทานต่ำ ทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ที่คำนวณได้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 1.0

จากการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินผ่านโปรแกรมทั้ง 2 ซอฟต์แวร์ มีแนวโน้มในการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไปในทิศทางเดียวกันที่ระดับน้ำต่าง ๆ ในส่วนโปรแกรมซอฟต์แวร์ GeoStudio 2012 SLOP/W เหมาะกับการใช้งานทั่วไปหรือต้องการผลลัพธ์เบื้องต้นไปวิเคราะห์อย่างรวดเร็ว เช่น เชื่อนดิน ถนน และประเมินเสถียรภาพลาดดินได้ ในโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D สามารถวิเคราะห์แรงกระทำในกรณีที่ถูกกัดได้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์พลศาสตร์ การเปลี่ยนรูป และพฤติกรรมดินอย่างละเอียด โดยเฉพาะในกรณีซับซ้อน เช่น การวิเคราะห์ชั้นดินหลายชั้นพร้อม groundwater flow, consolidation, และแรงกระทำจากโครงสร้าง แล้วพบว่า PLAXIS 2D สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันเสถียรภาพลาดดินที่เกิดการพังทลายได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อใช้ป้องกันเสถียรภาพลาดดิน 2 วิธีผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ PLAXIS 2D โดยเลือกวิเคราะห์ จุดวิบัติที่ 5 กรณีที่ถูกกัดที่สุดก่อนการเสริมโครงสร้าง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.121 ที่ระดับน้ำ 1.00 เมตร ค่าการเคลื่อนตัว 0.01413 เมตร วิธีที่ 1 วิเคราะห์การเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหิน ภายหลังการเสริมโครงสร้าง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.857 ค่าการเคลื่อนตัวเสถียรภาพลาดดิน 0.007997 เมตร วิธีที่ 2 การเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายหลังการเสริมโครงสร้าง มีค่าความปลอดภัย 1.798 ค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.01085 เมตร และวิธีที่ 3 การเสริมเสาเข็มกันดิน(เสาเข็มตอก) ผลการวิเคราะห์มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.356 มีค่าการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพลาดดิน 0.00924 เมตร

จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้ง 3 รูปแบบ ในจุดวิบัติที่ 5 โดยการเสริมกล่องเกเบี้ยนเรียงหิน มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.857 มากที่สุด ส่วนการเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.798 และการเสริม

เสาเข็มกันดิน มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.356 ปัจจุบันได้ดำเนินการก่อสร้างในจุดวิบัติที่ 5 โดยการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินซึ่งช่วยป้องกันเสถียรลาดดินตลิ่งโดยลดการกัดเซาะของน้ำ สามารถรับแรงกระทำจากปริมาณน้ำปล่อยได้ดีและป้องกันการพังทลายของตลิ่งลำน้ำได้ดี

ส่วนในเรื่องการใช้งานเพื่อเป็นแนวทางป้องกันการพังทลายของเสถียรภาพลาดดินตลิ่งลำน้ำ วิธีการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน เป็นวิธีที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กและวิธีการตอกเสาเข็มกันดิน เนื่องด้วยวิธีการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหินเป็นลักษณะคล้ายโครงสร้างที่เป็นธรรมชาติเพราะใช้หินในการใช้งานความสามารถในการระบายน้ำในช่องว่างระหว่างโพรงหินค่อนข้างระบายน้ำได้ดี ส่วนวิธีการเสริมกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กปัญหาที่จะเกิดการวิบัติของตัวโครงสร้าง คือ การระบายน้ำถึงแม้จะมีการเจาะเสริมท่อระบายน้ำในตัวกำแพง ก็ไม่สามารถระบายน้ำได้ทัน จึงทำให้โครงสร้างเกิดความอ่อนแอ และวิธีการตอกเสาเข็มกันดิน เนื่องด้วยตัวโครงสร้างมีความหนาแน่นน้อยกว่าโครงสร้างอื่น ความแข็งแรงในตัวโครงสร้างจึงต่ำ แล้วไม่สามารถระบายน้ำออกจากตัวเสาเข็มได้ถึงระบายได้ก็ไม่ทันต่อการเกิดโพรงด้านในของโครงสร้างทำให้เกิดการวิบัติได้ง่าย ส่วนใหญ่เมื่อโครงสร้างเสาเข็มกันดินถูกแรงกระทำจากน้ำหลากในวิถีของลำน้ำแบบโค้งนอกเข้ามากระทำจะเกิดการวิบัติของโครงสร้างได้ง่าย ดังนั้นวิธีการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการป้องกันการพังทลายของเสถียรภาพลาดดินทั้งนี้ในการเลือกใช้โครงสร้างเป็นแนวป้องกันเสถียรภาพลาดดินขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ ความเหมาะสมในการก่อสร้างที่ใช้ประกอบในการตัดสินใจเลือกแนวป้องกันเสถียรภาพลาดดิน ในส่วนจุดวิบัติต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ ถ้าจะต้องเลือกใช้โครงสร้างควรจะเป็นการเสริมกล่องเกเบียนเรียงหิน (Gabion Wall) ตามผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อเสนอแนะในการศึกษางานวิจัยนี้ ข้อมูลดินที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์เสถียรภาพดินยังมีน้อยเมื่อเทียบกับจุดพื้นที่บริเวณวิบัติที่ศึกษาทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ยังไม่ครอบคลุม และเป็นการอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลเดิมไม่ได้มีการเจาะสำรวจดินใหม่ ในข้อมูลของการสำรวจเสถียรภาพลาดดิน เป็นการสำรวจจากรูปแบบการพังทลายอย่างเดียว ซึ่งเลยไม่ได้สำรวจเก็บข้อมูลเสถียรภาพลาดดินจากกรณีอื่น ๆ เปรียบเทียบเพื่อความหลากหลายของข้อมูล เช่น กรณีลาดดินที่ยังไม่เกิดการวิบัติ, กรณีลาดดินที่มีรอยร้าว, กรณีที่มีการกัดเซาะในระยะช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์หาเสถียรภาพที่ยังคงอยู่ในปัจจุบันได้อย่างครบถ้วน ข้อมูลปริมาณน้ำเป็นการใช้ข้อมูลจากแหล่งอื่น ทำให้องค์ประกอบในการคิดแรงกระทำจากน้ำแต่ละระดับเป็นการคาดการณ์จากแหล่งอื่นในการวิเคราะห์ผ่านซอฟต์แวร์ทั้ง 2 โปรแกรม เป็นการคิดเพียง 2 มิติ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์อาจยังไม่สมบูรณ์เหมือนสภาพการวิบัติจริง

บรรณานุกรม

กรมชลประทาน ส่วนระบบสารสนเทศและภูมิสารสนเทศ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
กรมชลประทาน. (2565). ระบบฐานข้อมูลน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่ปืม.

<https://swocdoc.rid.go.th/?m=stations&i=2022stationse60d8c6787f04dcc3a462db126eea49d>

กรมทรัพยากรธรณี. (2551). แผนที่ทางธรณีวิทยาจังหวัดพะเยา ปี พ.ศ. 2550 และปรับปรุง ปี พ.ศ.
2551 ย่อขยายแผนที่มาตราส่วน 1:250,000.

<https://www.dmr.go.th/%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%98%E0%B8%A3%E0%B8%93%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B8%B2/>

เดชา มณีนัย. (2556). พิบัติภัยตลิ่งทรุดตัว ตำบลโพสะ อำเภอเมือง จังหวัดอ่างทอง (พิมพ์ครั้งที่ 1).

สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 (ปทุมธานี). <http://library.dmr.go.th/elib/cgi-bin/opacexe.exe?op=dsp&opt=mrc&bid=37145&ref=C:@37145&ri=0&kid=0&lang=0&db=Main&pat=&cat=cal&skin=u&lpp=16&catop=&ofld=0&odesc=0>

เทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา. (7 มกราคม 2551). โครงการก่อสร้างระบบประปาหมู่บ้านแบบบาดาล
ขนาดใหญ่ มาตรฐานการประปานครหลวง. สำนักงานเทศบาลตำบลรวมใจพัฒนา.

<http://rjp.go.th/>

ปานทิพย์ มีถาวร และอภิรัฐ ปล้องมาก. (2553). การศึกษาการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งในเขตพื้นที่
ตำบลบางระกำ อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม [การศึกษาอิสระ ปริญญาโทบริหาร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน].

สถานีตรวจอากาศพะเยา ส่วนสารสนเทศอุตุนิยมวิทยา ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ กรมอุตุนิยมวิทยา.
(2565). ปริมาณน้ำฝน ปี พ.ศ. 2559-ปี พ.ศ. 2565 จังหวัดพะเยา.

<http://www.cmmet.tmd.go.th/station/phayao/>

สถานีวัดระดับน้ำ I17 ตำบลท่าวังทอง อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา กรมชลประทาน. (2565). ระดับน้ำ
รายชั่วโมง จากสถานี I17 เจดีย์งาม. [http://www.hydro-1.net/Data/HD-](http://www.hydro-1.net/Data/HD-04/houly/water_today_search.php?station01=I.17&datestart=2024-10-29&dateend=2024-10-29)

[04/houly/water_today_search.php?station01=I.17&datestart=2024-10-29&dateend=2024-10-29](http://www.hydro-1.net/Data/HD-04/houly/water_today_search.php?station01=I.17&datestart=2024-10-29&dateend=2024-10-29)

สำนักงานแขวงทางหลวงชนบทพะเยา. (2564). *แผนที่แนวเขตอำเภอมะเอยี จังหวัดพะเยา ย่อขยายแผนที่มาตราส่วน 1:50000*.

https://drr.go.th/?internal_department=%E0%B9%81%E0%B8%82%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%9E%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A2%E0%B8%B2

เสวต ประกายรุ่งรวัศมี, วิชัย พันธนะหิรัญ และชาลี นาวานุเคราะห์. (2554). การวิเคราะห์การชะล้างพังทลายของดิน โดยใช้สมการสูญเสียดินสากล (USLE) เพื่อประเมินการสูญเสียธาตุอาหารพืชในลุ่มน้ำห้วยแม่ประจัน. *วารสารสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 14.

<https://ejournals.swu.ac.th/index.php/JOS/article/view/2137>

อติเทพ ศรีคงศรี. (2556). เสถียรภาพต่อการกัดเซาะภายในโครงสร้างมวลดิน. *วิศวกรรมสารเกษม*

บัณฑิต, 3(2), 119-129. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kbej/article/view/74520>

Arun, K. U., Jisna, P., Simon, R., Mathews, O. A. & Anju, E. M. (2020). A Comparison Study on Stability of Kuranchery Slopes Using GEO5 and PLAXIS 2D Software. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 3(3), 323-326.

https://www.ijresm.com/Vol.3_2020/Vol3_Iss3_March20/IJRESM_V3_I3_85.pdf

Imanshoar, F., Tabatabai, M. R. M., Hassanzade, Y. และ Rostamipoor, M. (2012).

Experimental Study of Subsurface Erosion in River Banks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6, 664-668.

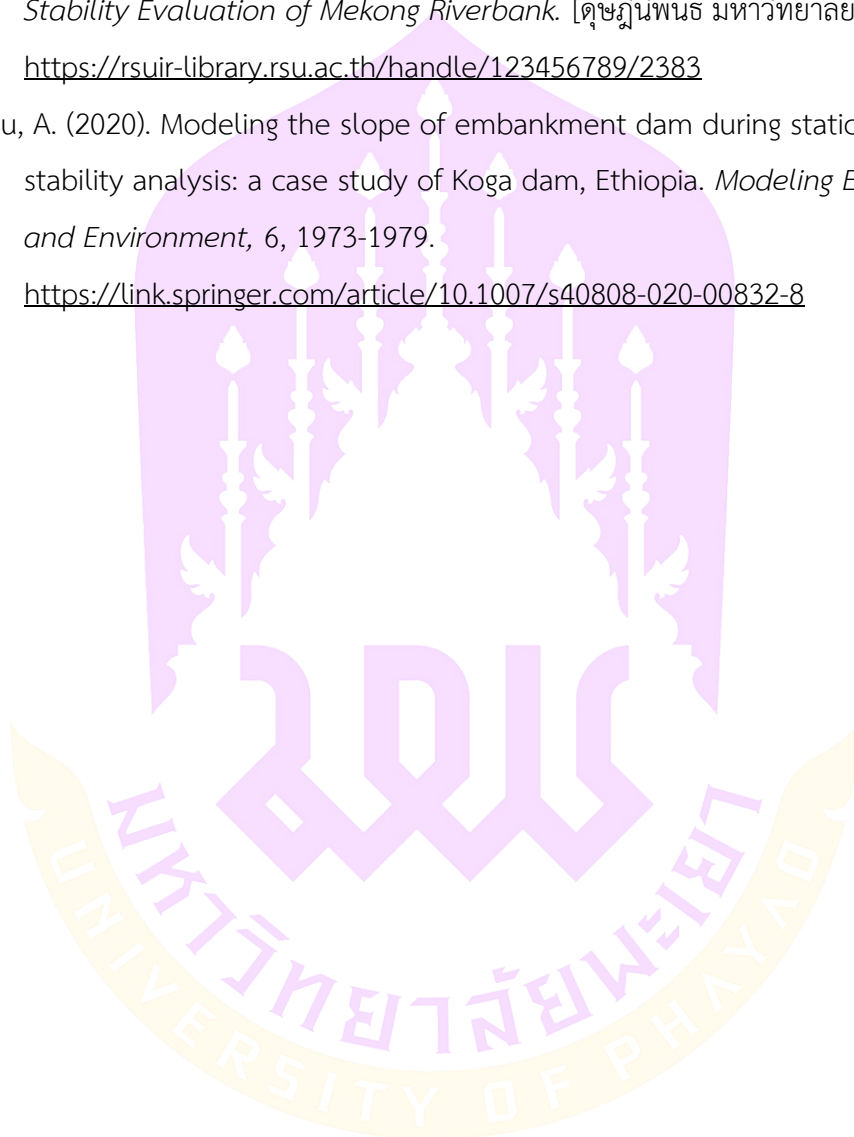
https://www.researchgate.net/publication/283338287_Experimental_Study_of_Subsurface_Erosion_in_River_Banks

Suhail A. A., Khattab, B., Al-Sulaifanie, J. & Mahmmod alarna, A. M. (2018). Stability of unsaturated soil slopes subjected to external load and rainfall. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(11), 1-9.

doi:10.1080/19386362.2018.1426206.

https://www.researchgate.net/publication/323372354_Stability_of_unsaturated_soil_slopes_subjected_to_external_load_and_rainfall

- Suttisak, S., Kobid, P., & Suriyon, Pe. (2021). Assessment of the upstream slope failure of a dam due to repeated cyclic drawdown. *Soils and Foundations*, 61(5), 1386-1398. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080621001189>
- Thongchart, S., Sooksatra V. & Soralump, S. (2550). *Probabilistic Approach for Slope Stability Evaluation of Mekong Riverbank*. [ตุษฏีนิพนธ์ มหาวิทยาลัยรังสิต]. <https://rsuir-library.rsu.ac.th/handle/123456789/2383>
- Zewdu, A. (2020). Modeling the slope of embankment dam during static and dynamic stability analysis: a case study of Koga dam, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1973-1979. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-020-00832-8>



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ปัญญาพล ปลั่งมาก
วัน เดือน ปี เกิด	27 มิถุนายน 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดลพบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 วศ.ม. (วิศวกรรมศาสตร์), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	642/4 ถนนสิงห์ไคล ตำบลเวียง อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย 57000
ผลงานตีพิมพ์	ปัญญาพล ปลั่งมาก และธนกร ชมภูรัตน์ (ผู้บรรยาย). (28-30 พฤษภาคม 2568). การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแนวทางป้องกันตลิ่งลำน้ำแม่ปืม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 (หน้า GTE-10 (1-15). ประจวบคีรีขันธ์: โรงแรมเดอะ เกษตร หัวหิน.
รางวัลที่ได้รับ	-

