

การวิบัติลาดไหล่เขาแบบระนาบบริเวณฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน  
จังหวัดพิษณุโลก

Plane failure on right abutment slope of Kwai Noi Bamrung Dan dam,  
Phitsanulok

ธีรวุฒิ ณ ลำปาง

Mr. Tirawut Na Lampang

ฝ่ายวิศวกรรม ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน

Geology division, Office of topographical and geotechnical survey,

Royal Irrigation Department

E-mail address: jernridman@gmail.com

### บทคัดย่อ

การเลื่อนตัวลาดไหล่เขาบริเวณฐานยันฝั่งขวาโครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน ทำให้เกิดความเสียหายปรากฏบนลาดไหล่เขา และมีความจำเป็นต้องทำการออกแบบป้องกันการการเลื่อนตัวบริเวณลาดไหล่เขา เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบปรับปรุงลาดไหล่เขา จึงได้มีการสำรวจขอบเขตความเสียหายที่เกิดขึ้น การสำรวจธรณีวิทยาและธรณีเทคนิค โดยการศึกษาลำดับชั้นหินธรณีโครงสร้าง แ่งหินตัวอย่างจากหลุมเจาะ 11 หลุม และการวิเคราะห์การเลื่อนตัวและเสถียรภาพลาดไหล่เขาโดยวิธีการ Kinematic, RMR และ SMR ผลการสำรวจบริเวณลาดไหล่เขาที่มีความเสียหายที่เกิดจากการเลื่อนตัวมีพื้นที่ประมาณ 28,000 ตารางเมตร การเลื่อนตัวยังทำให้ Shotcrete และท่อระบายน้ำที่ป้องกันลาดไหล่เขาเกิดการปริแตกและหลุดออกมา พบน้ำซึมออกมาตามรอยปริแตกและเกิด Traverse crack บริเวณบนหน้าลาดไหล่เขาที่เป็นหน้าดินที่ไม่ถูกป้องกันลาดไหล่เขา ชั้นดินเลื่อนเหลื่อมออกจากกันประมาณ 1 เมตร รางระบายน้ำคอนกรีตที่อยู่ระหว่างฐานยันฝั่งขวาและตัวเขื่อนตีบเข้าหากัน ลักษณะธรณีวิทยา หินในพื้นที่โครงการเป็นหินตะกอนอายุ Jurassic ชุดหินเสาขัว กลุ่มหินโคราช ประกอบด้วยหินทรายสลับกับหินทรายแป้ง หินทรายแป้งแสดงการแตกแบบ Slaking และแสดงลักษณะชั้นหินคดโค้ง ระบายการวางตัวมีมุมเอียงเตี้ยต่ำ แ่งหินตัวอย่างจากหลุมเจาะบนหน้าลาดไหล่เขาพบชั้นดินแทรกระหว่างหน้าหินในภาพตัด 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่ามีความต่อเนื่อง มวลหินที่เลื่อนตัวมีมุมเอียงเทน้อยเข้าหาสันเขื่อน ชั้นดินที่แทรกระหว่างหน้าหินนี้ทำให้ค่ามุมเสียดทานระหว่างหน้าหินลดลงมีศักยภาพการเลื่อนตัว เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานไฟฟ้าพบว่า บริเวณที่มีศักยภาพการเลื่อนตัวที่พบในหลุมมีค่า Low ถึง Very low resistivity ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความชื้นสูงหรือเป็นระดับน้ำที่ไหลผ่านชั้นหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจ



ความเสียหายที่มีน้ำปรากฏตามรอยแตกของ Shotcrete แบบจำลอง 3 มิติ และผลการวิเคราะห์ Kinematic แสดงการวิบัติแบบ Plane failure ผลการวิเคราะห์ RMR เป็น IV - Poor rock และ SMR เป็น Class Va ลักษณะลาดไหล่เขาไม่เสถียร ควรพิจารณาชุดเปิดใหม่ ติดตั้งและทำระบบระบายน้ำใหม่ ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวบริเวณลาดไหล่เขา และอุปกรณ์ป้องกันลาดไหล่เขา อาทิ shotcrete, dental concrete, ribs and/or beam toe wall ตามความเหมาะสม

**คำสำคัญ:** *Plane failure, Rock slaking, Kinematic analysis, Rock mass rating (RMR), Slope mass rating (SMR)*

### **Abstract**

Slope failure appeared at the right abutment slope of Kwai Noi Bamrung Dan dam. The slope damaged have to repair and reconstruction. Geological and geotechnical data are essential to slope protection and repair procedure. Therefore, investigations are composed of study regional rock stratigraphy, rock structure, study core samples from drill 11 holes and slope stability analysis include Kinematic, RMR and SMR methods. Thus, preliminary investigations have found slope failure occurred between rock strata which illustrated slope displacement. Slope face appears extensive damage area approximately 28,000 square meters. Moreover, slip depleted mass caused to shotcrete rupture. Partial slope, drain pipes and rock bolts separated from slope face. Horizontal drain holes break down. Underground water has been leaked from shotcrete rapture. Traverse crack appeared on partially top soil adjacent to highest parts of main scarp which have overlap spacing approximately 1 meter. Lined slope surface drain to collect run-off between slope face and dam crest was constricted from depleted mass. Furthermore, rocks in study area is Jurassic sedimentary rocks of the Sao Khua formation which is member of the Khorat group. Consequently, this formation is composed of sandstone interbedded with siltstone which shows the slaking phenomenon. Also, rock structure reveal folding and bedding present low dipping angles. In addition, core samples unveil clay material between rock strata which can be correlated in each other drill holes on slope face in 2D geological profiles and 3D modeling. These result presents continuum of clay material layers. Therefore, these evidences are estimated cause to loss friction angle between rock strata which has potential of slip planes. Depleted mass exhibit low tilt angle incline to dam. Besides, resistivity profiles illustrate low to very low resistivity

under slip planes that indicates moisture or ground water level. Kinematic analysis result demonstrates daylight envelop plane failure. Not only RMR result is categorized into class IV - poor rock but also SMR result is classified into Class Va. These results are indicated that slope unstable of plane failure. Consequently, recommendation concerning the reconstruction slope, installing drain system, movement monitoring tools, and consider protection instruments such as shotcrete, dental concrete, ribs and/or beam toe wall.

**Key words:** Plane failure, Rock slaking, Kinematic analysis, Rock mass rating (RMR), Slope mass rating (SMR)

## 1. บทนำ

ปัญหาการเลื่อนตัวลาดไหล่เขาบริเวณฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก ทำให้โครงสร้างเพื่อป้องกันการพังทลายลาดไหล่เขาเกิดความเสียหายขึ้น เพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาการเลื่อนตัวและการออกแบบปรับปรุงลาดไหล่เขาจึงต้องทราบถึงลักษณะการเลื่อนตัวของชั้นหินที่รองรับลาดไหล่เขาสาเหตุที่ทำให้ค่ามุมเสียดทานระหว่างชั้นหินลดลง ลักษณะและทิศทางการวางตัวของมวลหินที่เกิดการเลื่อนตัว ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้กำหนดวิธีการศึกษาแบ่งออกเป็น ศึกษาสำรวจความเสียหายที่เกิดการเลื่อนตัว ศึกษาธรณีวิทยาและธรณีเทคนิคเพื่อศึกษาลำดับชั้นหิน ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง ศึกษาแห่งหินตัวอย่างที่ได้จากการเจาะสำรวจ 11 หลุม ครอบคลุมบริเวณลาดหน้าลาดไหล่เขา และการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขาโดยวิธี Kinematic (Markland, 1972) บริเวณหน้าลาดไหล่เขาที่เกิดการเลื่อนตัวเพื่อหาลักษณะและทิศทางการเลื่อนตัว การวิเคราะห์ Rock Mass Rating; RMR (Bieniawski, 1976, 1989) และ Slope Mass Rating; SMR (M. Romana, 1985; M. Romana, Serón, & Montalar, 2003; Manuel Romana, Tomás, & Serón, 2015) เพื่อจัดสภาพหินหน้าลาดไหล่เขา ลักษณะการเกิดการวิบัติ เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบปรับปรุงลาดไหล่เขา

## 2. วัตถุประสงค์การศึกษาการวิบัติลาดไหล่เขา

1. ศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณลาดไหล่เขาจากการเลื่อนตัวของระนาบหิน
2. ศึกษาลักษณะธรณีวิทยาของหินบริเวณพื้น
3. ศึกษาสาเหตุการเกิดการเลื่อนตัวในชั้นหิน
4. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการเลื่อนตัวและเสถียรภาพของลาดไหล่เขาโดยใช้วิธี Kinematic, RMR และ SMR เบื้องต้นเพื่อเป็นข้อเสนอแนะในการออกแบบปรับปรุงลาดไหล่เขา

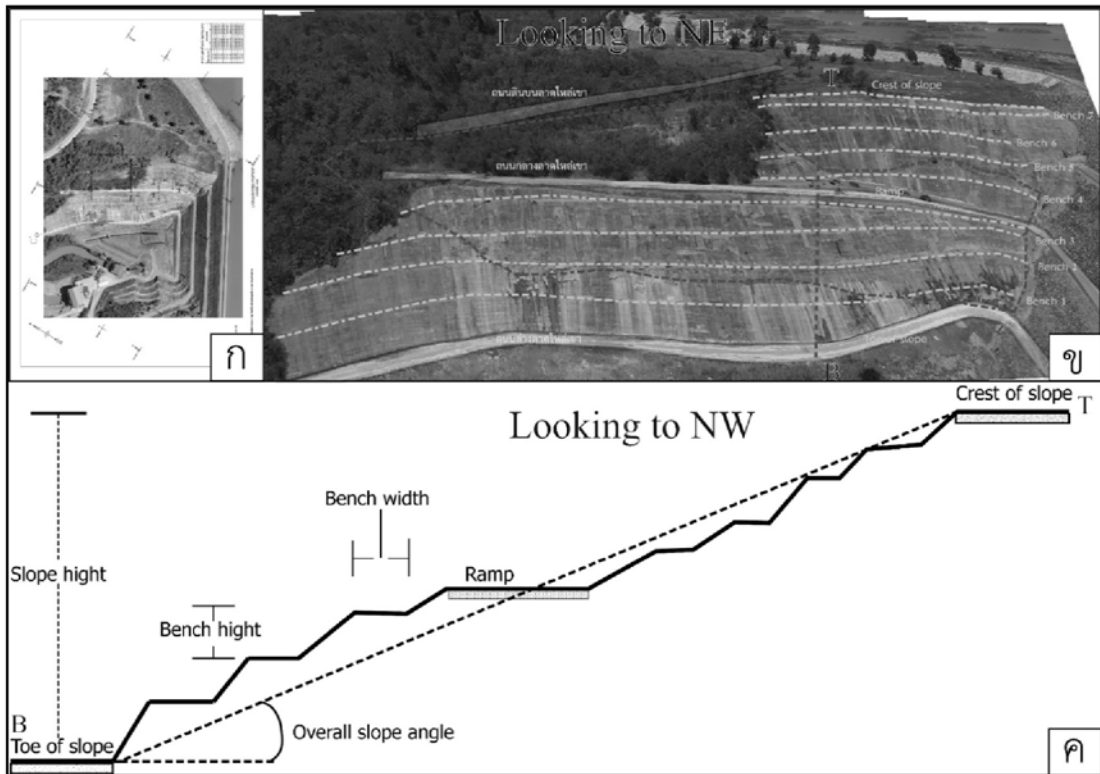


### 3. วิธีการศึกษา

1. การใช้ภาพถ่ายทางอากาศและการเดินสำรวจความเสียหายนำมาประเมินความเสียหายที่ปรากฏ
2. สำรวจหินโพล์และเจาะสำรวจหน้าลาดไหล่เขา
3. ศึกษาแท่งหินตัวอย่างเพื่อหาชั้นวัสดุที่เป็นสาเหตุการเกิดการเลื่อนตัวและการเชื่อมโยงในเชิงของระนาบพื้นที่ ความต่อเนื่องในระนาบหน้าหินที่เกิดการเลื่อนตัว และลักษณะการเลื่อนตัว
4. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการเลื่อนตัวและเสถียรภาพของลาดไหล่เขาโดยใช้วิธี Kinematic (ลักษณะและทิศทางการเลื่อนตัว) RMR และ SMR (ลักษณะหินหน้าลาดไหล่เขาและข้อเสนอแนะการออกแบบป้องกัน)

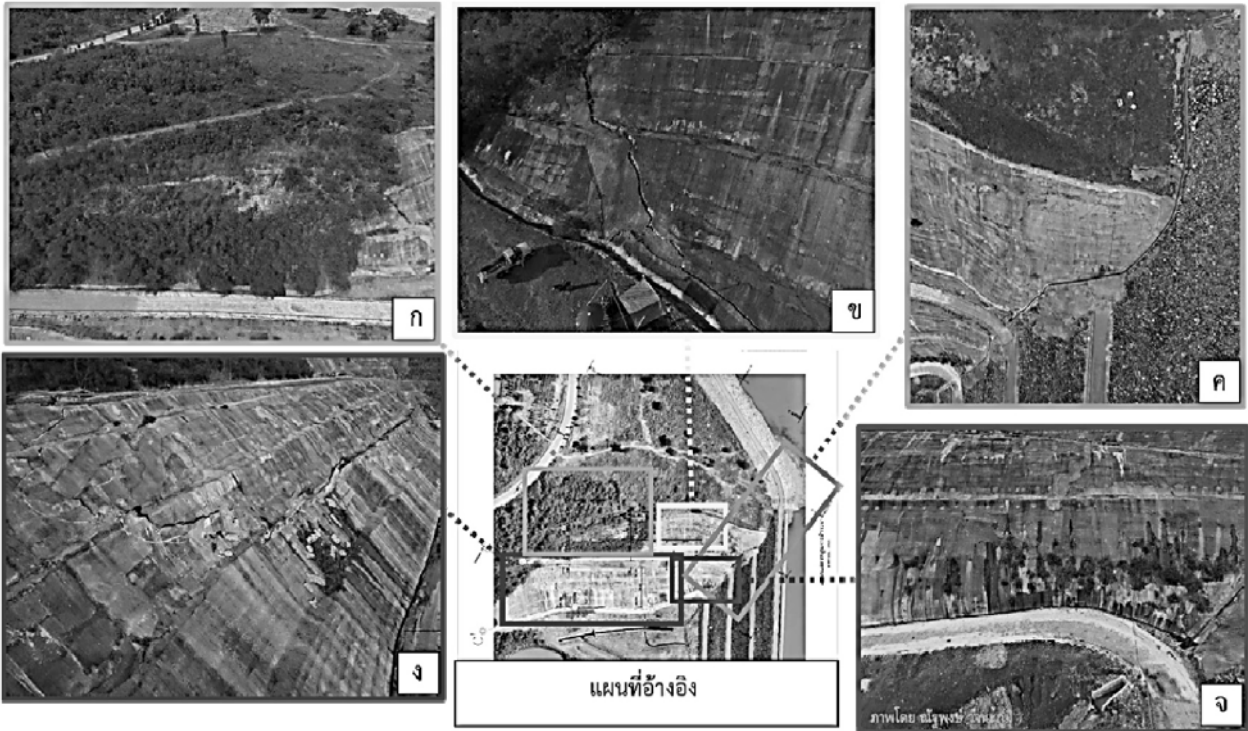
### 4. การสำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณลาดไหล่เขา

กระบวนการสำรวจความเสียหายบริเวณลาดไหล่เขามีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อนำมาประกอบการประเมินการปรับปรุง โดยการสำรวจความเสียหายโดยรวมจากภาพถ่ายทางอากาศ และการเดินสำรวจความเสียหาย เพื่อนำผลที่ได้มาสรุปความเสียหายที่ปรากฏบนหน้าลาดไหล่เขาขอบเขตความเสียหาย มีการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศโดย ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน (2561) นำผลที่ได้มาคำนวณพื้นที่ความเสียหาย แสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการบินสำรวจ (รูปที่ 1ก) ความเสียหายจากการเลื่อนตัวกินพื้นที่ ประมาณ 28,000 ตารางเมตร (พื้นที่สีแดงในรูปที่ 1ข) และได้ทำการจำลองหน้าลาดไหล่เขาเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Wyllie & Mah, 2004) โดยรวมตามแนวตัดขวาง T-B (รูปที่ 1ข และรูปที่ 1ค) ลาดไหล่เขาปรากฏถนนทั้งหมด 3 เส้นตัดผ่านเรียงลำดับจากล่างขึ้นบน ประกอบด้วยถนนเส้นล่างลาดไหล่เขาเป็นโครงสร้าง Toe of slope และมี Bench 1-3 ระดับจนถึงถนนส่วนกลางลาดไหล่เขาเป็น Ramp ถัดมาเป็น Bench 4-7 และถนนดินด้านบนลาดไหล่เขาเป็น Crest of slope บริเวณที่ปรากฏปัญหาจากการเลื่อนตัวของฐานยันฝังขาวอยู่ระหว่าง Toe of slope ถึง Bench 6 และบริเวณชั้นดินด้านบนลาดไหล่เขาที่ไม่ถูกออกแบบป้องกัน โดยมีมุมชันในแต่ละ Bench แตกต่างกันไปอยู่ในช่วง rise: run คิดมุมเฉลี่ยรวม (Overall slope angle) ลาดไหล่เขาประมาณ  $22.9^\circ$  คิดเป็น rise: run ประมาณ 1: 2.36



- รูปที่ 1** ภาพถ่ายการเคลื่อนตัวของฐานยันฝั่งขวา ก) ภาพถ่ายทางอากาศ (ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน, 2561)
- ข) ภาพถ่ายความเสียหายที่เกิดขึ้นบนลาดไหล่เขา แสดงพื้นที่เกิดการเคลื่อนตัว (พื้นที่ภายในเส้นประสีแดงประมาณ 28,000 ตารางเมตร) (คัดลอกและดัดแปลงจาก ญัฐพงษ์ วัจนะภูมิ, 2561)
- ค) รูปตัดลาดไหล่เขาฐานยันฝั่งขวาที่เกิดการเคลื่อนตัวแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ถนนล่างลาดไหล่เขา (Toe of slope) คั่นระหว่างถนนกลางลาดไหล่เขา (Ramp) จนถึงถนนบนลาดไหล่เขา (Crest of slope)

การใช้อากาศยานไร้คนขับบินถ่ายภาพความเสียหายบนลาดไหล่เขา พบว่าบริเวณพื้นที่ด้านเหนือของลาดไหล่เขา (รูปที่ 2ก) เกิด Transverse cracks และบริเวณ Bench 4 - Bench 6 เกิดรอยแตกเฉียงตัด Shotcrete บริเวณหน้าลาดไหล่เขา (รูปที่ 2ข) บริเวณรางระบายน้ำที่อยู่ระหว่างฐานยันฝั่งขวาและสันเขื่อนเกิดการตีบเข้าหากันจากการเกิดการเคลื่อนตัว (รูปที่ 2ค) เมื่อบินสำรวจจากด้านท้ายน้ำเข้าหาเขื่อนพบรอยแตกบน Shotcrete บริเวณ Bench 2 - Ramp มีน้ำซึมออกมาตามรอยแตก และบริเวณ Bench 1 - Bench 3 (รูปที่ 2จ) มีน้ำไหลออกจากรอยแตกและมีวัชพืชขึ้นปกคลุมบริเวณรอยแตก



**รูปที่ 2** รายละเอียดการบิ่นสำรวจรอยแตกบริเวณลาดไหล่เขาฐานยันฝั่งขวา

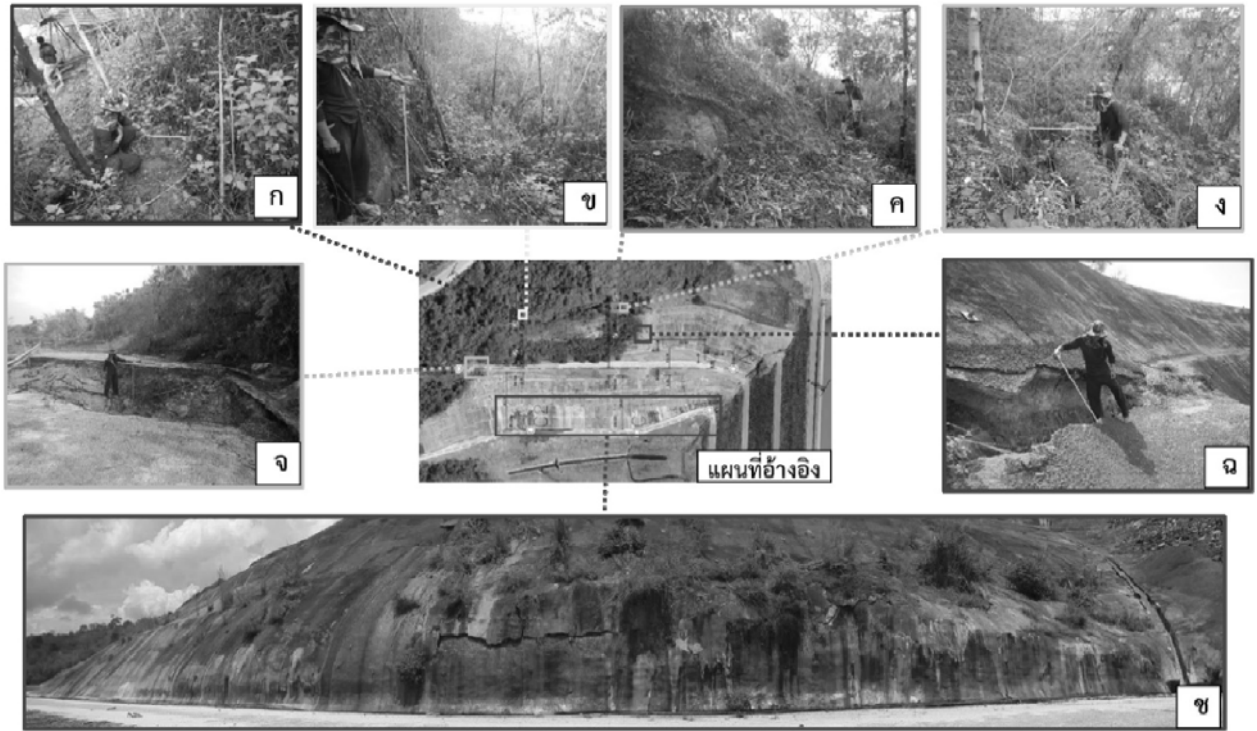
ก) การเกิด Traverse crack บริเวณชั้นดิน ข) รอยแตกเฉียงบน Shotcrete

บริเวณ Bench 4 - Bench 6 ค) รางระบายน้ำที่อยู่ระหว่างฐานยันฝั่งขวาและสันเขื่อนเกิดการตีบ

เข้าหากัน รูป ง Shotcrete บริเวณ Bench 2 - Ramp มีน้ำซึมออกมาตามรอยแตก จ) น้ำไหลออก

จากรอยแตกและมีวัชพืชขึ้นปกคลุมบริเวณรอยแตกบริเวณ Bench 1 - Bench 3

การเดินสำรวจความเสียหายบริเวณชั้นดินที่ไม่มีการออกแบบป้องกันลาดไหล่เขาเกิด Transverse crack แยกออกจากกันวัดได้ ประมาณ 0.3 เมตร ยาวประมาณ 5 เมตร (รูปที่ 3ก) และพบชั้นดินทรุดลงจากชั้นดินเดิมประมาณ 1 เมตร เป็นแนวยาวต่อเนื่องบนหน้าลาดไหล่เขาที่เป็นชั้นดิน (รูปที่ 3ข และรูปที่ 3ค) บริเวณใกล้กับลาดไหล่เขาที่ถูกออกแบบป้องกัน เกิด Traverse crack กว้างประมาณ 0.3 เมตร (รูปที่ 3ง) เมื่อทำการเดินสำรวจถนนกลางลาดไหล่เขาในส่วนโครงสร้าง Ramp เกิดการทรุดตัวลงห่างกันประมาณ 1 เมตร ยาวต่อเนื่องจากขอบลาดไหล่เขาลงไปยังล่างลาดไหล่เขา (รูปที่ 3จ) และเกิดรอยแยกบริเวณ Bench 5 ฉีก Shotcrete ออกจากกันประมาณ 1 เมตร (รูปที่ 3ฉ) บริเวณถนนล่างลาดไหล่เขาระหว่างส่วน Toe of slope และ Bench 1 (รูปที่ 3ช) เกิดการแตกออกมีน้ำซึมออกมาและมีวัชพืชปกคลุมตามรอยแตก และมีคราบสนิมเหล็กซึมออกมา มีปริมาณการไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้แนวสันเขื่อน น้ำไหลออกมาจากท่อระบายน้ำ



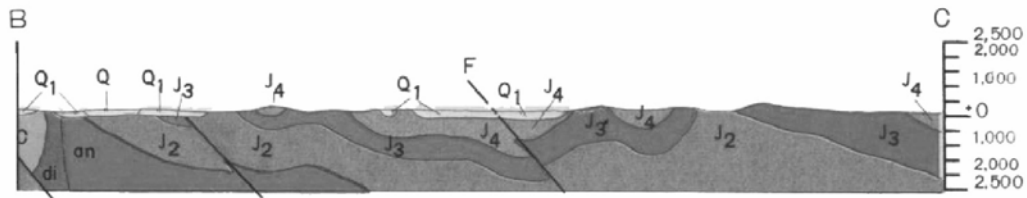
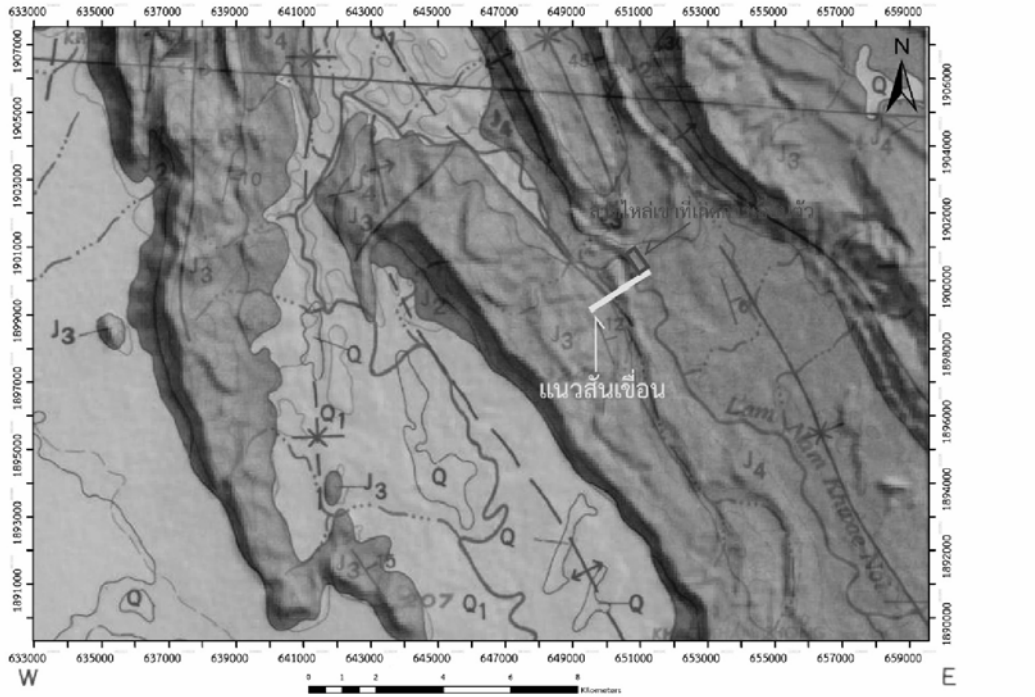
**รูปที่ 3** ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณที่ป้องกันลาดไหล่เขา ก) เกิด Transverse cracks ประมาณ 0.3 เมตร ข) รอยเหลี่ยมของผิวลาดไหล่เขาประมาณ 1 เมตร ค) รอยเหลี่ยมกันระหว่างหน้าลาดไหล่เขาประมาณ 1 เมตร ง) เกิด Transverse cracks ประมาณ 0.3 เมตร จ) ผิวถนนกลางลาดไหล่เขา เลื่อมออกจากกันประมาณ 1 เมตร ฉ) การเลื่อมกันหน้า Shotcrete บริเวณ Bench 5 ประมาณ 1 เมตร ช) น้ำใต้ดินไหลออกจากหน้า shotcrete ที่แตกระหว่าง Bench 1 และถนนเส้นล่างลาดไหล่เขา (แผนที่อ้างอิงจัดทำโดย ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน, 2561)

## 5. การสำรวจทางธรณีวิทยา

การสำรวจธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษามีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อทราบลักษณะชุดหินในพื้นที่โครงการที่เกิดการเลื่อนตัว ลักษณะโครงสร้างของชุดหิน ตลอดจนการจะศึกษาแบ่งหินตัวอย่างเพื่อหาชั้นที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเลื่อนตัว โดยการสำรวจธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการสำรวจธรณีวิทยาพื้นผิว และการสำรวจธรณีวิทยาโดยการเจาะสำรวจเพื่อศึกษาแบ่งหินตัวอย่าง

### 5.1 การสำรวจธรณีวิทยาพื้นผิว

การศึกษาลักษณะธรณีวิทยาที่ปรากฏในพื้นที่โครงการที่มีผลต่อการเลื่อนตัว เพื่อหาชุดหินที่ทำให้เกิดการเลื่อนตัว โครงสร้างการวางตัวในพื้นที่ โดยเมื่อศึกษาจากแผนที่ธรณีวิทยา (Department of mineral resources, 1974) ในพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 4) บริเวณที่เกิดปัญหาการเลื่อนตัวตั้งอยู่บนหมวดหินเสาขัว (Sao Khua) จัดอยู่ใน กลุ่มหินโคราช (Khorat group)



LEGEND	DISCRIPTION	FORMATION	GROUP	AGE
Q	= River Gravel, Sand, Silt, Clay and Mud			Holocene
Q <sub>1</sub>	= Terrace Gravel, Sand, Silt and Clay		MAE TANG	Pleistocene
— UNCONFORMITY —				
J <sub>4</sub>	= Sandstone; Siltstone; Shale, fine grained, well-bedded, reddish brown, Cross-laminated.	SAO KHUA		
J <sub>3</sub>	= Conglomerate; Sandstone, fine to coarse grained; Shale; reddish brown to pinkish white, cross-bedded and ripple marked.	PHRA WIHAN	KHORAT	Jurassic
J <sub>2</sub>	= Sandstone; fine grained; Siltstone; Shale; well-bedded reddish brown, fissile.	PHU KRADUNG		
— UNCONFORMITY —				
an	= Andesite			
di	= Diorite			Triassic
— UNCONFORMITY —				
C	= Rhyolite, Andesite, tuff, agglomerate; Conglomerate, Sandstone, Shale, Slate, Chert beds; limestone, massive to well bedded, recrystallized, light grey to pinkish		MEA THA	Carboniferous

**รูปที่ 4** แผนที่ธรณีวิทยาในพื้นที่โครงการ

(คัดลอกและดัดแปลงจาก Department of mineral resources, 1974)



### 5.1.1 หมวดหินเสาขัว

หมวดหินเสาขัว (Ward & Bunnag, 1964) เป็นหมวดหินที่จัดอยู่ในกลุ่มหินโคราช ประกอบด้วยหินทรายแบ่งประมาณร้อยละ 60 - 70 มีสีน้ำตาลแกมแดง และบั้งสีเทา ที่เหลือประมาณ ร้อยละ 30 - 40 เป็นหินทราย สีแดงอ่อน เม็ดขนาดเล็กถึงละเอียดมากมีชั้นกรวดปน และหินชนิดอื่นที่พบในหมวดหินเสาขัวคือ หินโคลน หินกรวดมนกระเปาะปูน สีน้ำตาลแกมแดง สีเทาแกมเขียว หมวดหินเสาขัวแบ่งออกเป็น 3 หน่วย ดังนี้ หน่วย A อยู่บนสุดประกอบด้วย หินดินดานกับหินทรายแบ่งสีแดงถึงสีม่วง และหินทรายสีม่วงแกมเทา เนื้อเม็ดขนาดละเอียดถึงปานกลาง หน่วยหิน B ประกอบด้วย หินทรายเป็นส่วนใหญ่มีหินกรวดมนกับหินดินดานบ้างเล็กน้อย หินทรายมีเนื้อเม็ดขนาดละเอียดถึงปานกลาง สีเทาแกมขาว สีเทา พบเศษซากต้นไม้ แร่ทองแดง และยูเรเนียม หน่วยหิน C ประกอบด้วย หินดินดานและหินทรายแบ่ง สีแดงถึงม่วง สลับกับหินทราย สีแดงม่วง ชมพู และสีแดงแกมเทา (Hahn, 1982) ชั้นหินสลับกันแบบ cycles มีความหนาอยู่ระหว่าง 200 - 760 เมตร (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

### 5.1.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างในพื้นที่โครงการ

การสำรวจหินโพล์ที่พบในพื้นที่โครงการทั้งหมด 10 จุดสำรวจ (10 Station) แสดงในรูปที่ 5 หมวดหินเสาขัวในพื้นที่โครงการปรากฏเป็นหินทรายสีเทา เนื้อเม็ดขนาดละเอียดถึงปานกลาง และพบหินทรายแบ่งสีน้ำตาลแดง แสดงชั้นหินคดโค้งแบบ Open folds มีแกนการวางตัวแนวเหนือ - ใต้ และทิศทางการวางตัวของแกนชั้นหินคดโค้งบิดออกไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือเล็กน้อย มีรูปแบบแนวแตก 4 แบบ แนวแตกที่มีระนาบเอียงเทไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ และทิศตะวันตกเฉียงใต้พบ Overturn folds แสดงการ Thrust จะด้านตะวันตกไปยังด้านตะวันออก และชั้นหินคดโค้งแบบ Chevron folds มีแกนวางตัวตามแนวตะวันตกเฉียงเหนือตะวันออกเฉียงใต้ปรากฏการวางตัวระนาบหินในพื้นที่วางตัวตามแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ เอียงเทไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือทำมุม  $5^{\circ}$  -  $12^{\circ}$  พบการแตกแบบ Slaking ของหินทรายแบ่งสีน้ำตาลแดง

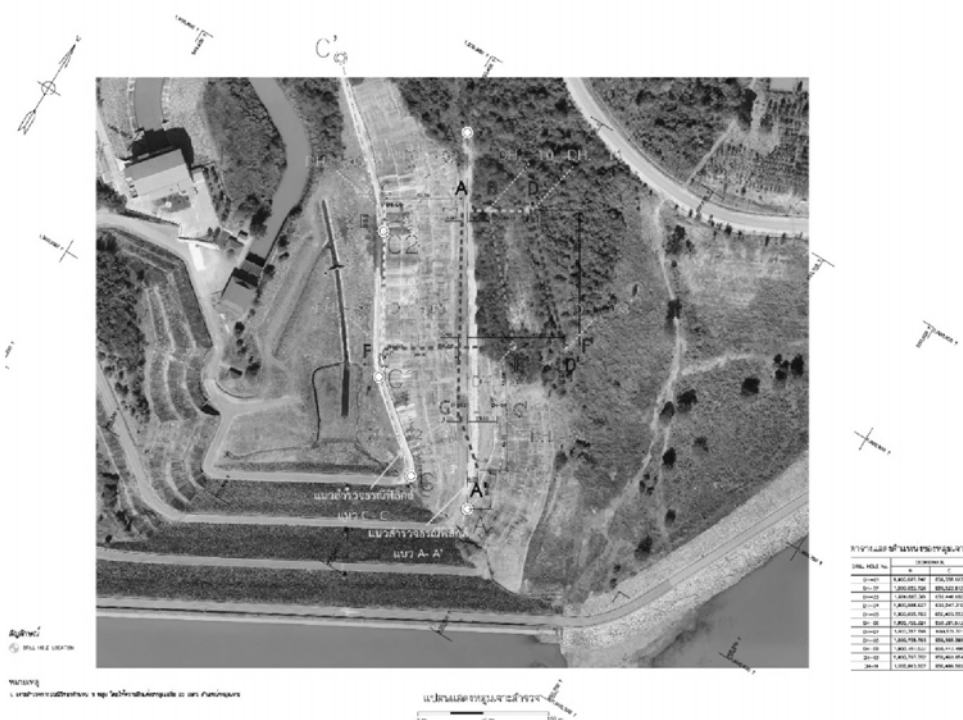


รูปที่ 5 จุดสำรวจหินโพล์ในบริเวณโครงการ 10 จุดสำรวจ Station 1 - Station 10



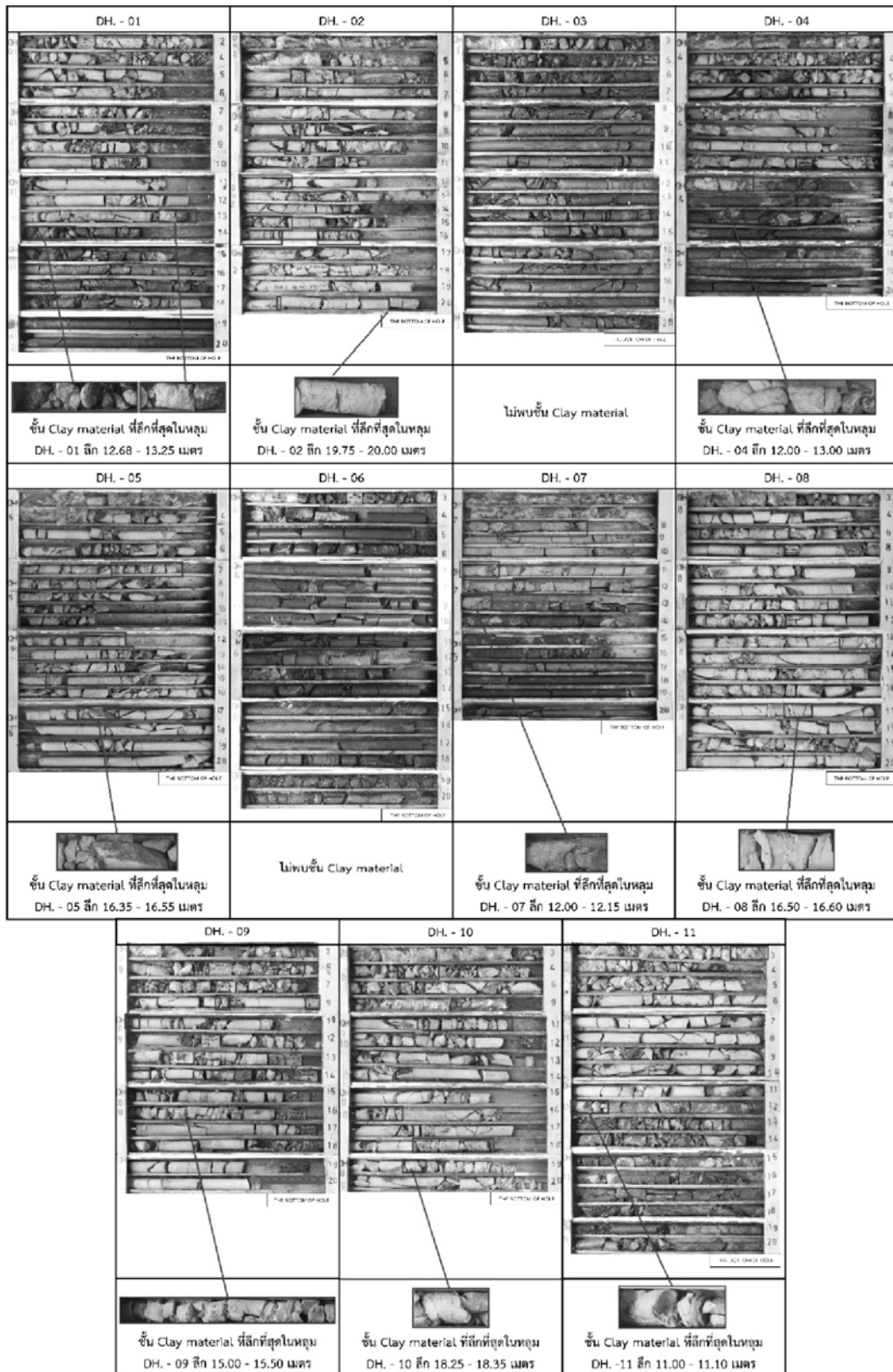
### 5.2 ผลการสำรวจธรณีวิทยาและการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า

การเจาะสำรวจทางธรณีวิทยา (กองวิทยาการธรณี, 2558) เป็นการสำรวจใต้ผิวดินโดยใช้เครื่องเจาะ (Rotary drilling machine) เจาะเก็บตัวอย่างแท่งหิน และสำหรับการสำรวจและเก็บตัวอย่างในชั้นดิน (ASTM D1586, 2011) รวมทั้งการทดสอบการรั่วซึมของน้ำในชั้นหิน (Houlsby, 1992; Lugeon, 1933; U.S. Bureau of Reclamation, 1960) โดยได้กำหนดตำแหน่งหลุมเจาะไว้ทั้งหมด 11 หลุม (DH.01 - DH.11) เพื่อศึกษาตัวอย่างแท่งหิน (Association of Professional Geological Scientists, 1977) ที่ปรากฏชั้นวัสดุที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเลื่อนตัวบริเวณลาดไหล่เขา ในการเจาะสำรวจได้วางหลุมเจาะไว้ทั้งหมด 11 หลุม (รูปที่ 6) มีความลึกหลุมละ 20 เมตร ทำการศึกษาแท่งหินตัวอย่างที่เจาะเก็บได้ในแต่ละหลุมเพื่อนำมาทำรูปตัดขวางธรณีวิทยาฐานราก 2 มิติ

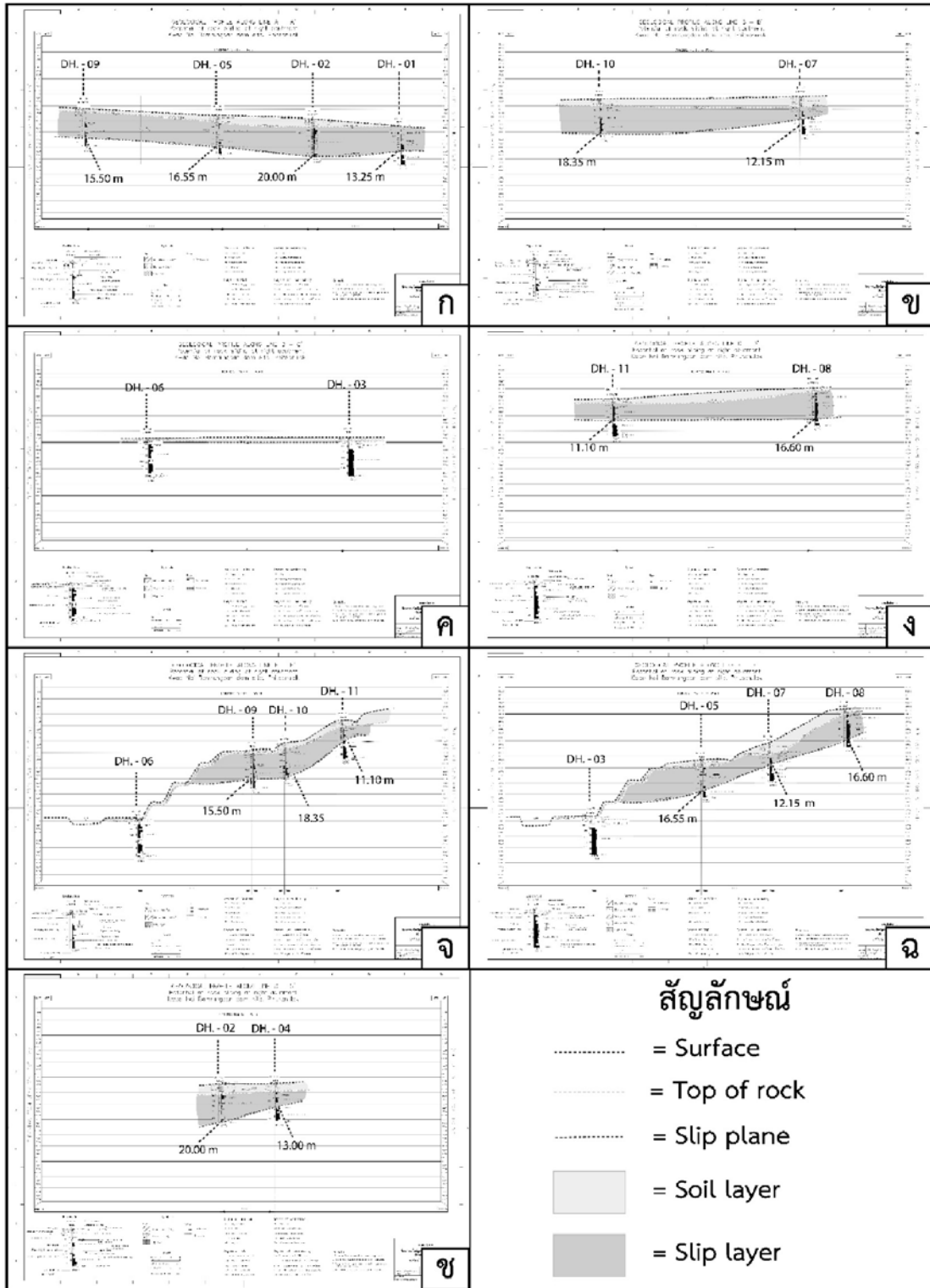


**รูปที่ 6** แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจธรณีวิทยาจำนวน 11 หลุม (DH. - 01 ถึง DH. - 11) และรูปตัดธรณีวิทยาลาดไหล่เขาแนว A - A', B - B', C - C', D - D', E - E', F - F' และแนว G - G' (แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศตัดลอกและดัดแปลงจาก ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน, 2561)

แท่งหินตัวอย่างที่เจาะเก็บได้ทั้งหมด 11 หลุม (รูปที่ 7) ยกเว้นหลุมเจาะสำรวจ DH. - 03 และ หลุมเจาะ DH. - 06 ทุกหลุมปรากฏชั้นดิน (Clay material) แทรกอยู่ระหว่างชั้นหิน ชั้นดินที่พบในแท่งหินตัวอย่างที่เจาะได้แทรกอยู่ระหว่างหน้าหินและส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมเสียดทานระหว่างหน้าหินทำให้เกิดการเลื่อนตัวบนหน้าลาดไหล่เขา เพื่อการศึกษาลักษณะการเลื่อนตัวจึงทำการทำรูปตัดธรณีวิทยา 2 มิติ ตามแนวหลุมเจาะทั้งหมด 7 แนว (รูปที่ 8) ประกอบด้วยแนว A - A' (รูปที่ 8ก), B - B' (รูปที่ 8ข), C - C' (รูปที่ 8ค), D - D' (รูปที่ 8ง), E - E' (รูปที่ 8จ), F - F' (รูปที่ 8ฉ) และแนว G - G? (รูปที่ 8ซ)

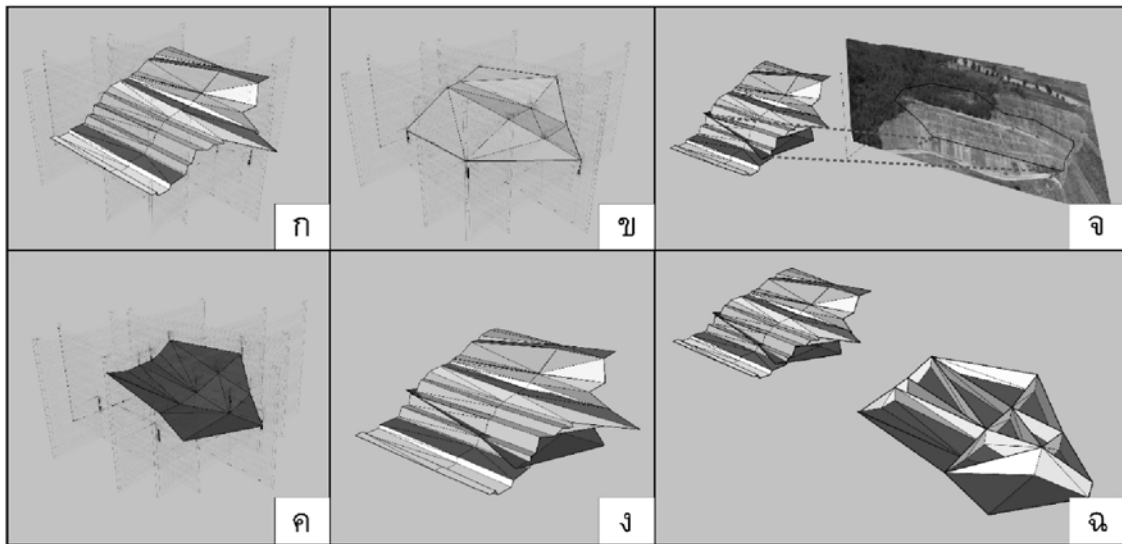


รูปที่ 7 รูปแท่งหินตัวอย่างที่เจาะได้จากหลุมเจาะสำรวจธรณีวิทยาทั้ง 11 หลุม และความลึกที่พบชั้น Clay material ในแต่ละหลุม



**รูปที่ 8** รูปตัดธรณีวิทยาจากผลการเจาะสำรวจแสดงเส้นพื้นผิว (Surface เส้นประสีน้ำเงิน) แสดงเส้นหน้าหิน (เส้นประสีเขียว) และเส้นที่เกิดการเลื่อนตัว (เส้นประสีแดง) ก) รูปตัดธรณีวิทยา แนว A - A' ข) รูปตัดแนว B - B' ค) รูปตัดแนว C - C' ง) รูปตัดแนว D - D' จ) รูปตัดแนว E - E' ฉ) รูปตัดแนว F - F' ช) รูปตัดแนว G - G' (ถิรวุฒิ ฦ ลำปาง, 2561)

ผลที่ได้จากรูปตัดธรณีวิทยา 2 มิติสามารถนำมาหาความต่อเนื่องของชั้น Clay material ในรูปแบบ 3 มิติได้ โดยการนำแนวทั้งหมดในรูปที่ 6 มาจัดวางในรูปแบบระนาบ 3 มิติ (รูปที่ 9) โดยสามารถแบ่งชั้นออกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นหน้าลาดไหล่เขาที่ปรากฏ (รูปที่ 9ก) ชั้นที่สองเป็นความต่อเนื่องชั้นหน้าหินที่ได้จากหลุมเจาะสำรวจ (รูปที่ 9ข) และชั้นที่สามเป็นชั้น Clay material ที่ลึกที่สุดที่พบในแท่งหินตัวอย่าง ทำให้เกิดระนาบเลื่อน (Slip plane) พบว่าความต่อเนื่องกัน (รูปที่ 9ค) แสดงได้ในรูปแบบ 3 มิติ ของการเอียงเทของระนาบที่เกิดการเลื่อนตัว (รูปที่ 9ง) และเมื่อนำมาเทียบเคียงกับภาพถ่ายลาดไหล่เขาพบว่าหน้าที่ปรากฏการเลื่อนตัวมีความสอดคล้องกับระนาบชั้น Clay material ที่ลึกที่สุดในแต่ละหลุมมีทิศทางการเลื่อนตัวเอียงเข้าไปทางสันเขื่อนเล็กน้อย (รูปที่ 9จ) มีรูปร่างแบบระนาบของมวลหินที่เกิดการเลื่อนตัว (รูปที่ 9ฉ)

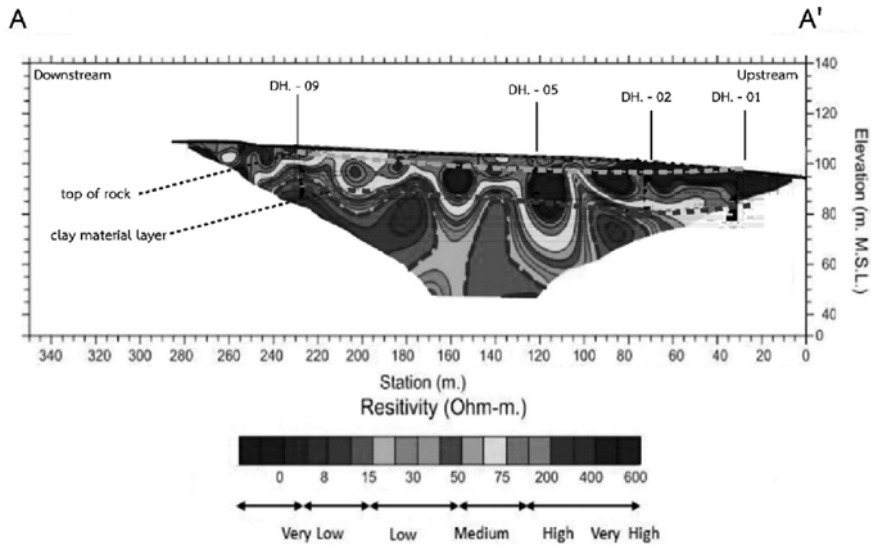


**รูปที่ 9** รูปตัด 3 มิติจากการใช้รูปตัด 2 มิติมาตัดกันตามแนวในรูปที่ 6 ก) รูปตัด 3 มิติลาดไหล่เขา ข) รูปตัด 3 มิติชั้นดิน ค) รูปตัด 3 มิติชั้น Clay material ง) ลักษณะการเลื่อนตัวในรูปแบบ 3 มิติ จ) ทิศทางการเลื่อนตัวเอียงเข้าหาสันเขื่อน ฉ) ชั้นหินด้านบนบน Clay material ที่เกิดการเลื่อนตัวแบบระนาบ และ fence diagram แสดงมวลหินที่เกิดการเคลื่อนตัว (ถิรวุฒิ ธิ น ลำปาง, 2561)

สภาพธรณีวิทยาฐานรากและผลสำรวจความต้านทานไฟฟ้าในบริเวณรูปตัดธรณีวิทยาแนว A - A' วางตัวแนวเดียวกับแนวสำรวจความต้านทานไฟฟ้า แนว A - A' (รูปที่ 10) และบริเวณรูปตัดธรณีวิทยาแนว C - C' วางตัวแนวเดียวกับแนวสำรวจความต้านทานไฟฟ้าแนว C - C' (รูปที่ 11) ทำการสำรวจโดยฝ่ายธรณีฟิสิกส์ ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา การศึกษาความต้านทานไฟฟ้า (Milsom, 2003) รูปตัดแนว A - A' พบว่าแนวเส้นประสีฟ้าเป็นชั้นหน้าหิน (Top of rock) ในรูปตัดธรณีวิทยา มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง Medium ถึง Very high และบริเวณเส้นประสีส้มเป็นบริเวณที่พบชั้นดิน (Clay material layer) ที่ลึกที่สุดแทรกอยู่และแปลความหมายว่าเป็น Assumed

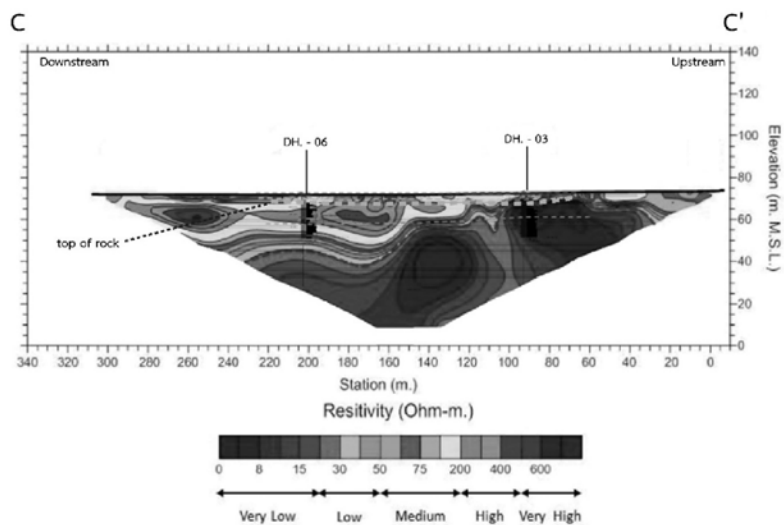


of slip plane บริเวณที่อยู่ใต้เส้น Assumed of slip plane มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง Medium ถึง Very low แปลความหมายว่าที่ใต้เส้น Assumed of slip plane มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ปานกลาง ถึงต่ำ ความชื้นหรือน้ำในบริเวณที่ได้ Assumed of slip plane



รูปที่ 10 รูปตัดการเทียบระหว่างรูปตัดธรณีวิทยาแนว A - A' และผลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าแนว A - A' (คัดลอกและดัดแปลงจากฝ่ายธรณีฟิสิกส์, 2561)

แนว C - C' (รูปที่ 11) พบว่าบริเวณเส้นประสีฟ้า เป็นชั้นหน้าหินในส่วนที่เหนือขึ้นไปจนถึงพื้นผิวเป็นชั้นดิน มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง Very low อยู่ในระดับตื้นในช่วงใกล้กับสันทำนบถึง Very high อยู่ในระดับลึกลงในบริเวณที่ห่างจากสันทำนบ แสดงถึงการลดลงของระดับความชื้นหรือระดับน้ำใต้ดินเมื่อห่างออกไปจากสันเขื่อน



รูปที่ 11 รูปตัดการเทียบระหว่างรูปตัดธรณีวิทยาแนว C - C' และผลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าแนว C - C' (คัดลอกและดัดแปลงจากฝ่ายธรณีฟิสิกส์, 2561)

ผลการเทียบเคียงรูปตัดธรณีวิทยาที่ได้จากหลุมเจาะแนว A - A' และแนว C - C' พบว่าบริเวณชั้น Clay material (ชั้น Assumed of slip plane) เป็นบริเวณที่มีค่าความต้านทานต่ำ (ความชื้นสูง) ซึ่งแปลความหมายว่าเป็นชั้นที่ลึกที่สุดที่เกิดการเคลื่อนตัวโดยสาเหตุน่าจะมาจากความชื้นหรือระดับน้ำใต้ดินที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นหินและในชั้น Clay material ส่งผลให้ชั้น Clay material เปลี่ยนคุณสมบัติและเกิดการเคลื่อนตัวบริเวณหน้าลาดไหล่เขา ดังนั้นระดับน้ำใต้ดินมีผลต่อการเคลื่อนตัวของฐานยื่นฝั่งขวา

## 6. การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขา

การเกิดการวิบัติบนหน้าลาดไหล่เขาสามารถเกิดได้ในธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของหินประกอบด้วยอาทิ ความแข็ง ความแกร่ง แร่ประกอบหิน ทิศทางการวางตัวและความถี่ของ รอยแตก แนวแตก รอยเลื่อน สภาพแวดล้อมอาทิ สภาพอากาศ ปริมาณน้ำใต้ดิน แผ่นดินไหว การออกแบบทิศทางการตัดลาดไหล่เขาและความลาดชันที่ตัดหน้าลาดไหล่เขา ทำให้เกิดรูปแบบการวิบัติแบบต่าง (Raghuvanshi, 2019) รูปแบบการวิบัติสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 4 รูปแบบ (Markland, 1972; Wyllie & Mah, 2004) ประกอบด้วย การวิบัติแบบระนาบ (Plane failure) การวิบัติแบบรูปลิ่ม (Wedge failure) การวิบัติแบบล้มคว่ำ (Toppling failure) การวิบัติรูปโค้ง (Circular failure) โดยการเกิดการวิบัติแบบระนาบเกิดขึ้นจากการวางตัวโครงสร้างไม่ต่อเนื่องระหว่างชั้น หินเช่น ระนาบการวางตัวของชั้นหิน ระนาบรอยเลื่อน ชุดรูปแบบรอยแยกและแนวแตก โดยลักษณะการวางตัวของระนาบมีทิศทางเอียงเทออกจากลาดไหล่เขา และขนาดมุมเอียงเทของระนาบหินน้อยกว่ามุมเอียงเทลาดไหล่เขาทำให้เกิด "Daylight" (Markland, 1972; Rowland, Duebendorfer, & Schiefelbein, 2007; Wyllie & Mah, 2004)

### 6.2 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขา

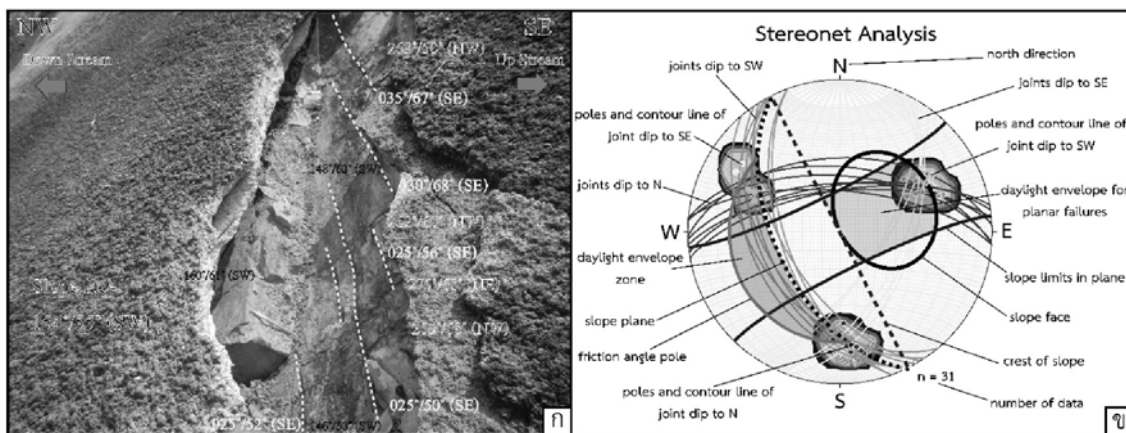
การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขาเพื่อประเมินสภาพความมั่นคงลาดไหล่เขา โครงการนี้ใช้วิธีการ Conventional approach (Raghuvanshi, 2019) ในเบื้องต้นจะใช้ 3 วิธีการ ประกอบด้วย วิธีการ Kinematic method (Goodman, 1989; Hocking, 1976; Hoek & Bray, 1981; Karaman, Ercikdi, & Kesimal, 2013; Markland, 1972; Wyllie & Mah, 2004) วิธีการ Rock Mass Rating; RMR (Bieniawski, 1976, 1989) วิธีการ Slope Mass Rating; SMR (M. Romana, 1985; M. Romana et al., 2003; Manuel Romana et al., 2015)

#### 6.2.1 วิธีการ Kinematic method

กระบวนการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวใช้ Stereonet projection เพื่อศึกษาทิศทางการวางตัวของระนาบโครงสร้างหิน ทิศทางและมุมการวางตัวของหน้าลาดไหล่เขา โดยจะพล็อตบน Great circle ข้อมูลที่พล็อตประกอบด้วย ค่าการวางตัวและมุมเอียงเทของระนาบหิน ค่าการวางตัว ค่ามุมเอียงเทของ



หน้าลาดไหล่เขา และค่ามุมเสียดทาน (Friction angle) ข้อมูลการศึกษาหินโพล์บริเวณจุดสำรวจ (รูปที่ 12ก) ปรากฏแนวแตก 3 รูปแบบแบ่งเป็น แนวแตกที่มีมุมเอียงเทไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (เส้นโค้งสีส้มในรูปที่ 11ข) แนวแตกที่มีการเอียงเทเอียงเทไปทางทิศเหนือ (เส้นโค้งสีแดงรูปที่ 12ข) และแนวแตกที่เอียงเทไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ (เส้นโค้งสีเหลืองในรูปที่ 12ข) และการเอียงเทของหน้าลาดไหล่เขา (เส้นประโค้งสีดำในรูปที่ 12ข) วัดค่าการวางตัวของลาดไหล่เขา ได้ดังนี้ ค่า Dip direction of joint ประมาณ  $242^{\circ}$  ค่า Dip direction of slope ประมาณ  $245^{\circ}$  ค่า Dip of joint ประมาณ  $55^{\circ}$  ค่า Dip of slope ประมาณ  $55^{\circ}$  ค่ามุมเสียดทานประมาณ  $28.2^{\circ}$  (RocLab, 2002) แสดงในรูปที่ 12ข จากการเดินสำรวจลักษณะการเคลื่อนตัวพบว่า Daylight envelope ตามหน้าลาดไหล่เขา เมื่อได้ข้อมูลการวางตัวของโครงสร้างชั้นหินที่ปรากฏบริเวณหินโพล์และนำมาวิเคราะห์แบบ Kinematic method พบว่าเมื่อพิจารณาการวางตัวของลาดไหล่เขา (เส้นประสีดำในรูปที่ 12ข) มีการวางตัวตามแนวแตกที่มีการเอียงเทระนาบเอียงเทไปทางตะวันตกเฉียงใต้ (เส้นโค้งสีส้มในรูปที่ 12ข) เมื่อพล็อต Slope face (วงรีเส้นทึบในรูปที่ 12ข) ขั้วของระนาบที่เอียงเทไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (กลุ่มจุดสีส้มในรูปที่ 12ข) ตกในพื้นที่ Slope face ทำให้เกิด Daylight envelope และทำให้หน้าลาดไหล่เขาเคลื่อนตัวและมีการวิบัติแบบระนาบในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ( $244^{\circ}$ ) ตามรูปแบบการวิเคราะห์ Kinematic Analysis ในรูปที่ 12ข



**รูปที่ 12** การวิเคราะห์ Kinematic ก) แนวแตกหินโพล์หน้าลาดไหล่เขา  
ข. ผลการวิเคราะห์ Kinematic แบบ Plane failure

### 6.2.2 วิธีการ Rock Mass Rating (RMR)

วิธีการ RMR (Bieniawski, 1989) เป็นวิธีการวิเคราะห์และจัดกลุ่มหินจากการพิจารณา 6 ปัจจัยประกอบด้วย 1. Uniaxial compressive strength of rock material 2. Rock Quality Designation (RQD) 3. Spacing of discontinuities 4. Condition of discontinuities 5. Groundwater conditions 6. Orientation of discontinuities (ตารางที่ 1)



**ผลการวิเคราะห์ RMR (ตารางที่ 1)**

A.1 Intact uniaxial compressive strength 175 Mpa	=	12
A.2 RQD (%) เฉลี่ย คือ 36.25	=	8
A.3 Spacing of discontinuities ประมาณ ตั้งแต่ 1 เซนติเมตร ถึง 2 เมตร	=	5
A.4 Condition of discontinuities น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร ผิวผุ	=	20
A.5 Groundwater conditions บางพื้นที่มีการไหลซึมออกมา	=	4
B. Orientation of discontinuities ประมาณ Fair ใน slope	=	-25
<b>ผลรวม RMR</b>	<b>=</b>	<b>24</b>

**ตารางที่ 1** Rock Mass Rating System (After Bieniawski 1989).

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS							
Parameter		Range of values					
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred
		Uniaxial comp. Strength	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	
	Rating		15	12	7	4	2 1 0
2	Drill core Quality RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%
	Rating		20	17	13	8	3
3	Spacing of		> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Rating		20	15	10	8	5
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
	Rating		30	25	20	10	0
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125
		(Joint water press)/ (Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5
	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing	
	Rating		15	10	7	4	0
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)							
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25
	Slopes		0	-5	-25	-50	
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS							
Rating		100 ← - 81	80 ← - 61	60 ← - 41	40 ← - 21	< 21	
Class number		I	II	III	IV	V	
Description		Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock	
D. MEANING OF ROCK CLASSES							
Class number		I	II	III	IV	V	
Average stand-up time		20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span	
Cohesion of rock mass (kPa)		> 400	300-400	200-300	100-200	< 100	
Friction angle of rock mass (deg)		> 45	35-45	25-35	15-25	< 15	
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions							
Discontinuity length (persistence)		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m	
Rating		6	4	2	1	0	
Separation (aperture)		None	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm	
Rating		6	5	4	1	0	
Roughness		Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided	
Rating		6	5	3	1	0	
Infilling (gouge)		None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm	
Rating		6	4	2	2	0	
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed	
Ratings		6	5	3	1	0	



F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**			
Strike perpendicular to tunnel axis		Strike parallel to tunnel axis	
Drive with dip - Dip 45-90°	Drive with dip - Dip 20-45°	Dip 45-90°	Dip 20-45°
Very favourable	Favourable	Very unfavourable	Fair
Drive against dip - Dip 45-90°	Drive against dip - Dip 20-45°	Dip 0-20° - Irrespective of strike	
Fair	Unfavourable	Fair	

\*Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

\*\* Modified after (Wickham, Tiedemann, & Skinner, 1972)

ผลการวิเคราะห์ RMR ได้ผลรวม 24 จัดอยู่ใน Class IV - Poor rock มีการแนะนำออกแบบการป้องกันการพังทลายของหิน (Bieniawski, 1989) โดยพิจารณาจากลักษณะหน้างานเป็นกรณีไป ดังนี้ ทำ Rock bolt ทำเป็นระบบ โดยใช้ Bolts ยาว 4-5 เมตร ระยะห่าง 1.0 - 1.5 เมตร คลุมด้วย Wire mesh ทำ Shotcrete หนาประมาณ 100 - 150 มิลลิเมตร

### 6.2.3 วิธีการ Slope Mass Rating (SMR)

วิธีการวิเคราะห์ลาดไหล่เขาโดย SMR (M. Romana, 1985; M. Romana, Serón, & Montalar, 2003; Manuel Romana, Tomós, & Ser n, 2015) พัฒนาจากวิธีการ RMR (Bieniawski, 1976) ได้มีผู้นำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุโมงค์และงานแบ่งจำแนกมวลหิน (M. Romana et al., 2003) และนำมาใช้กับงานลาดไหล่เขาได้ แต่ยังมีปัญหาข้อจำกัดด้านข้อจำกัดของมุมและทิศทางการวางตัวของแนวแตกที่ปรากฏบนหน้าลาดไหล่เขา M. Romana (1985) ได้เพิ่มเติมปัจจัยการวางตัวและมุมเอียงของแนวแตกบริเวณหน้าลาดไหล่เขา การวางตัวและมุมเอียงของลาดไหล่เขาในวิธีการ RMR ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ลาดไหล่เขา โดยเรียกวิธีการนี้ว่า "Slope Mass Rating" (SMR) เป็นการเพิ่มวิธีการปรับแก้ค่าการวางตัวของแนวแตกและหน้าลาดไหล่เขา (ตารางที่ 2 และตารางที่ 3) มีสมการดังนี้

$$SMR = RMR_B + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

โดย  $RMR_B$  = คำนวนโดยใช้ปัจจัย 5 ปัจจัยตาม Bieniawski (1976) ประกอบด้วย  
 1) strength of intact rock; 2) RQD; 3) spacing of discontinuities; 4) condition of discontinuities; and 5) water inflow through discontinuities and/or pore pressure ratio

$F_1$  = ค่าความสัมพันธ์การขนานของแนวการวางตัว (Strike) ระหว่างแนวแตก (Joint) และหน้าลาด ไหล่เขา (Slope) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.00 - 0.15 คำนี้นหาได้จากความสัมพันธ์  $F_1 = (1 - \sin A)^2$  โดย A = ค่ามุมระหว่างแนวการวางตัวและแนวแตก

$F_2$  = ค่ามุมเอียงของแนวแตก มีค่าอยู่ระหว่าง 1.00 - 0.15 ในการวิบัติแบบระนาบ หากความสัมพันธ์ได้จากตารางที่ 3 ในกรณีการวิบัติแบบล้มคว่ำ  $F_2$  มีค่า 1.00

$F_3$  = ค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงเทของแนวแตก และมุมเอียงเทของลาดไหล่เขาหาความสัมพันธ์ได้จากตารางที่ 3

$F_4$  = ค่าคะแนนการขุดเปิดหาความสัมพันธ์ได้จากตารางที่ 3

โดยค่า  $F_1$ ,  $F_2$  และ  $F_3$  ได้จากการวัดค่าการวางตัวของหินโพล์บนหน้าลาดไหล่เขาในสนาม นำค่าที่ได้มาเทียบในตารางเพื่อหาค่าที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนค่า  $F_4$  เกิดจากสภาพการขุดเปิดและวิธีการที่ใช้ของหินโพล์บนหน้าลาดไหล่เขา

**RMRb หาได้จาก (ตารางที่ 2)**

A.1 Intact uniaxial compressive strength 175 Mpa	=	12
A.2 RQD (%) เฉลี่ย คือ 36.25	=	8
A.3 Spacing of discontinuities ประมาณ ตั้งแต่ 1 เซนติเมตร ถึง 2 เมตร	=	5
A.4 Condition of discontinuities น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร ผิวหยาบ	=	20
A.5 Groundwater conditions บางพื้นที่มีการไหลซึมออกมา	=	4
<b>RMR<sub>b</sub></b>	<b>=</b>	<b>49</b>

**ตารางที่ 2** การคำนวณค่า RMRB (Bieniawski, 1979)

RMR <sub>B</sub> -BASIC RMR - Σ RATINGS (Bieniawski, 1979)						
PARAMETER	INTERVALS					
UCS (MPa) UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF INTACT ROCK MATERIAL	< 250	250-100	100-50	50-25	< 25	
	15	12	7	4	25-5 2	5-1 1
RQD (%)	100-90	90-75	75-50	50-25	< 25	
ROCK QUALITY DESIGNATION	20	17	13	8	3	
SPACING (mm) BETWEEN DISCONTINUITIES	> 2000	2000-600	600-200	200-60	< 60	
	20	15	10	8	5	
CONDITION OF DISCONTINUITIES ROUGHNESS, PERSISTENCE, SEPARATION, WEATHERING OF WALLS AND GOUGE	VERY ROUGH SURFACES NO SEPARATION UNWEATHERED WALL ROCK NOT CONTINUOUS	SLIGHTLY ROUGH SEPARATION < 1 mm SLIGHTLY WEATH WALLS NOT CONTINUOUS	SLIGHTLY ROUGH SEPARATION < 1 mm HIGHLY WEATH. WALLS	SLICKENSIDED WALLS Or GOUGE < 5 mm Or SEPARATION 1.5 mm	SOFT GOUGE >5 mm or SEPARATION >5 mm CONTINUOUS	
	30	25	20	10	0	
GROUNDWATER IN JOINTS (PORE PRESSURE RATIO)	COMPLETELY DRY (0)	DAMP (0-0.1)	WET (0.1-0.2)	DRIPPING (0.2-0.5)	FLOWING (0.5)	
	15	10	7	4	0	

**SMR หาได้จาก (ตารางที่ 3)**

ค่าที่วัดจากหินโพล์จุดสำรวจที่ 9 ค่า dip direction of joint ( $\alpha_j$ ) ประมาณ 230° ค่า dip direction of slope ( $\alpha_s$ ) ประมาณ 244° ค่า dip of joint ( $\beta_j$ ) ประมาณ 45° ค่า dip of slope ( $\beta_s$ ) ประมาณ 55°

จากผลการวัดค่าการวางตัวของหินโพล์เมื่อนำไปแทนค่าในตารางที่ 3 พบว่า  $F_1 = 0.7$  (มุมต่างกัน 14°),  $F_2 = 0.85$  (มุมเอียงเท 45°),  $F_3 = -50$  (ผลต่างมุมเอียงเท = -5) และ  $F_4 = 0$  (ควรทำการขุดเปิดเนื่องจากอยู่ใกล้สันเขื่อน) เมื่อนำมาแทนค่าตามสมการได้

**SMR = 19.25**



**ตารางที่ 3** การคำนวณค่า SMR (Bieniawski, 1976; M. Romana, 1985)

SMR = RMR <sub>B</sub> + (F <sub>1</sub> × F <sub>2</sub> × F <sub>3</sub> ) + F <sub>4</sub> (M. Romana, 1985)						
ADJUSTING FACTORS FOR JOINTS (F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> )	$\alpha_j$ = DIP DIRECTION OF JOINT $\beta_j$ = DIP OF JOINT					
	$\alpha_s$ = DIP DIRECTION OF SLOPE $\beta_s$ = DIP OF SLOPE					
	VERY FAVOURABLE	FAVOURABLE	FAIR	UNFAVOURABLE	VERY UNFAVOURABLE	
PLANE FAILURE $ \alpha_j - \alpha_s  =$	> 30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	< 5°	
TOPPLING $ \alpha_j - \alpha_s - 180°  =$						
F <sub>1</sub> VALUE	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
RELATIONSHIP	$F_1 = (1 - \sin  \alpha_j - \alpha_s )^2$					
F <sub>2</sub> VALUE	$ \beta_j  =$	< 20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	> 45°
	PLANE FAILURE	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
TOPPLING	1.00					
RELATIONSHIP	$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
PLANE FAILURE $\beta_j \cdot \beta_s =$	> 10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	< (-10°)	
TOPPLING $\beta_j \cdot \beta_s =$	< 110°	110°-120°	> 120°	-	-	
F <sub>3</sub> VALUE	0	-6	-25	-50	-60	
RELATIONSHIP	F <sub>3</sub> (BIENIAWSKI ADJUSTMENT RATINGS FOR JOINTS ORIENTATION, 1976)					
F <sub>4</sub> ADJUSTING FACTOR FOR EXCAVATION METHOD	F <sub>4</sub> - EMPIRICAL VALUES FOR METHOD OF EXCAVATION					
	NATURAL SLOPE	PRESPLITTING	SMOOTH BLASTING	BLASTING or MECHANICAL	DEFICIENT BLASTING	
F <sub>4</sub> VALUE	+15	+10	+8	0	-8	

เมื่อนำค่า SMR = 19.25 ที่ได้ไปเทียบกับ Description of SMR class เป็น Class Va ในตารางที่ 3 พบว่าลักษณะลาดไหล่เขามีลักษณะแย่มาก หน้าลาดไหล่เขาไม่เสถียร ลักษณะการเลื่อนตัวเป็นแบบระนาบที่ใหญ่มาก การออกแบบป้องกันลาดไหล่เขา (ตารางที่ 4) ควรพิจารณาทำการขุดเปิดหน้าออกใหม่ ทำระบบระบายน้ำบริเวณหน้าลาดไหล่เขาและลึกเข้าไปในลาดไหล่เขา และพิจารณาทำ Shotcrete, Dental Concrete, Ribs และ/หรือ Beam toe wall เพิ่มเติม (ตารางที่ 5)

**ตารางที่ 4** การจัดจำแนก SMR Classes (Manuel Romana et al., 2015)

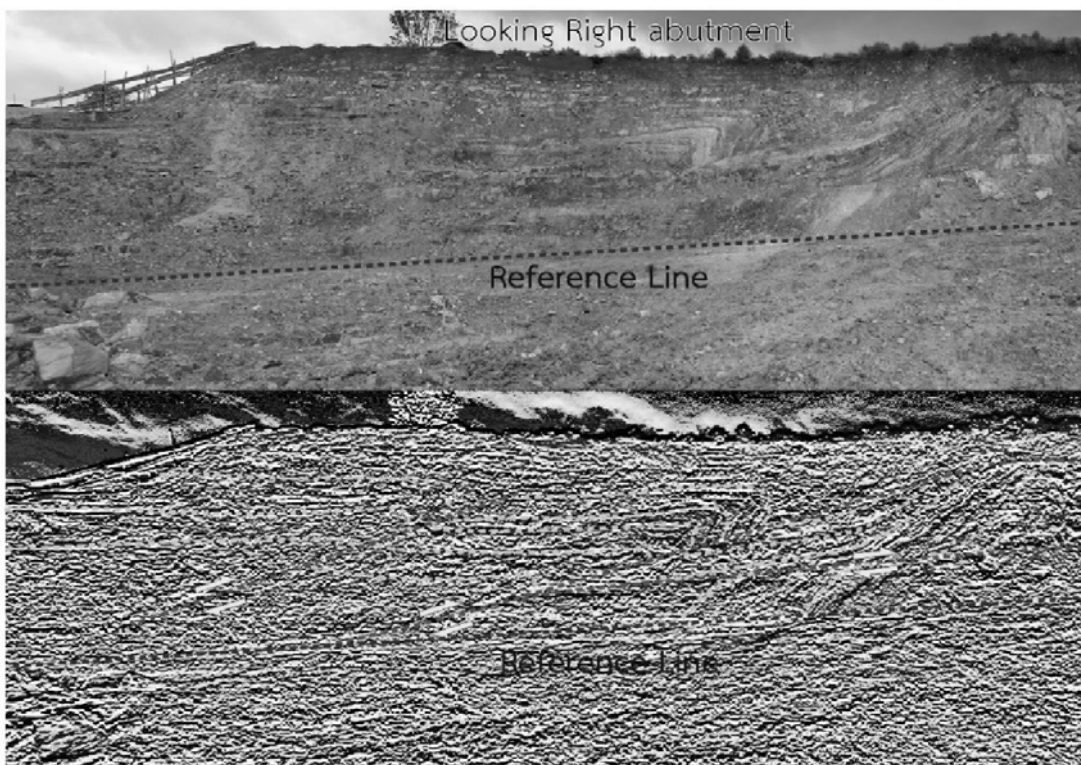
DESCRIPTION OF SMR CLASSES										
CLASS N°	Vb	Va	IVb	IVa	IIIB	IIa	IIB	IIa	Ib	Ia
DESCRIPTION	VERY BAD 0-20		BAD 21-40		FAIR 41-60		GOOD 61-80		VERY GOOD 81-100	
STABILITY	COMPLETELY UNSTABLE		UNSTABLE		PARTIALLY STABLE		STABLE		COMPLETELY UNSTABLE	
FAILURES	BIG PLANAR or SOIL LIKE		PLANAR or BIG WEDGES		SOME JOINTS or MANY WEDGES		SOME BLOCKS		NONE	
SUPPORT	REEXCAVATION		IMPORTANT / CORRECTIVE		SYSTEMATIC		OCCASIONAL		NONE	

**ตารางที่ 5** ตารางแสดงลักษณะการวิบัติตามค่า SMR และข้อเสนอแนะวิธีการป้องกันลาดไหล่เขา (Manuel Romana et al., 2015)

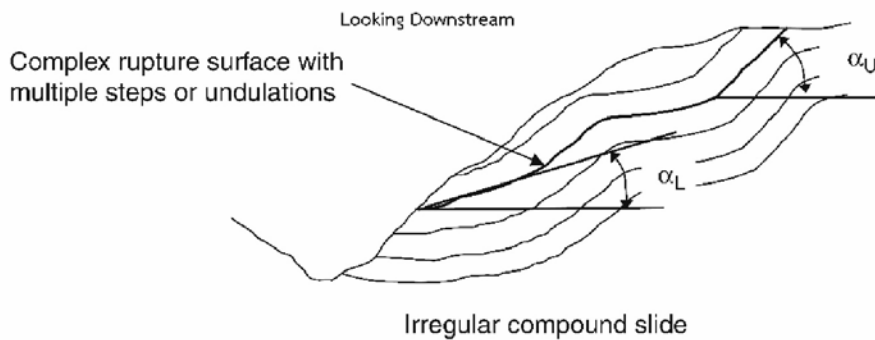
PROBABLE FAILURES ACCORDING SMR VALUES																
PLANE FAILURE	VERY BIG					MAJOR					NONE					
WEDGE FAILURE						MANY					SOME					
TOPPLING						MINOR					NONE					
MASS FAILURE	POSSIBLE										NONE					
SMR →	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
REEXCAVATION	REEXCAVATION WALLS															
DRAINAGE	SURFACE DRAINAGE DEEP DRAINAGE															
CONCRETE	SHOTCRETE DENTAL CONCRETE RIBS and/or BEAMS TOE WALLS															
REINFORCEMENT	BOLTS ANCHORS															
PROTECTION	TOE DITCH TOE or SLOPE FENCES NETS															
NO SUPPORT	SCALING NONE															
<b>SUGGESTED SUPPORT METHODS</b>																

## 7. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนลาดไหล่เขา พบน้ำไหลซึมออกมา Shotcrete ที่ฉีกออกจากกัน ท่อที่ระบายน้ำออกจากหน้าลาดไหล่เขาไม่พบการไหลของน้ำ แต่ไหลออกมาทาง Shotcrete อาจเกิดการอุดตันทำให้น้ำไหลลงไปสะสมระหว่างชั้นหิน หินที่พบในชั้นหินตัวอย่างที่มีลักษณะเป็น Clay material ส่วนประกอบเป็นหินโคลน หิน และหินโคลปนทราย ซึ่งในตัวอย่างที่ได้หินโคลน และหินโคลนปนทรายมีน้ำและความชื้นสูงสอดคล้องกับผลการศึกษาคความต้านทานไฟฟ้าบริเวณใต้ชั้น Clay material ที่ทำให้เกิด Slip plane มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำถึงต่ำมากซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มีความชื้นสูง โคลนที่แทรกระหว่างชั้นหินทรายทำให้มุมเสียดทานลดลง เนื่องจากน้ำที่ไหลภายในลาดไหล่เขาไม่สามารถไหลออกได้ในระบบท่อระบายที่ติดตั้งในลาดไหล่เขา น้ำและความชื้นในลาดไหล่เขาเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดไหล่เขา (Wyllie & Mah, 2004) นอกจากนี้ผลการศึกษารณีวิทยาโครงสร้างในบริเวณพื้นที่โครงการเพื่อศึกษาลักษณะการวางตัวของชั้นหินโดยรวมในบริเวณโครงการพบว่าในพื้นที่โครงการหินแสดงลักษณะชั้นหินคดโค้ง แกนชั้นหินวางตัวประมาณแนวเหนือ - ใต้ มุมเอียงเทชั้นหินอยู่ระหว่าง  $13^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  สอดคล้องกับรูปถ่ายบริเวณฐานยันฝั่งขวาในช่วงระหว่างการก่อสร้างโครงการ (รูปที่ 13) โครงสร้างชั้นหินคดโค้งทำให้เกิด Complex rupture surface with multiple steps (รูปที่ 14)



รูปที่ 13 รูปถ่ายบริเวณฐานยันฝั่งขวาในช่วงระหว่างการก่อสร้างโครงการแสดงการเกิดชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (คัดลอกและดัดแปลงจาก ธวัชชัย บรรเทา, 2548)



**รูปที่ 14** รูปตัดโครงสร้างการวางตัวชั้นหินคดโค้งบริเวณลาดไหล่เขา  
(คัดลอกและดัดแปลงจาก Wyllie and Mah, 2004)

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขาโดยวิธี Kinematic หินบริเวณลาดไหล่เขาเป็นบริเวณที่มีศักยภาพการเกิด Daylight envelope for plane failure zone เลื่อนลงไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ทิศทางสอดคล้องกับแบบจำลอง 3 มิติ จากรูปตัดธรณีวิทยา ผลการวิเคราะห์ RMR จัดอยู่ใน IV - Poor rock และผลการวิเคราะห์ SMR อยู่ใน Class Va พบว่าลักษณะลาดไหล่เขามีลักษณะแย่มาก หน้าลาดไหล่เขาไม่เสถียร ลักษณะการเลื่อนตัวเป็นแบบระนาบที่ใหญ่มาก การวิเคราะห์ RMR และ SMR เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ RMR บ่งชี้คุณภาพของหินและผลการวิเคราะห์ SMR มีการประเมินทิศทางการวางตัวของหน้าลาดไหล่เขา มุมเอียงเทเทียบกับทิศทางและมุมเอียงเทของแนวแยกประกอบซึ่งได้พัฒนามาจากวิธีการ RMR เนื่องจาก RMR ถูกออกแบบมาใช้ในงานอุโมงค์ (Romana et al., 2015) ผลแบบจำลอง 3 มิติ ผลการวิเคราะห์ Kinematic และ ผลการวิเคราะห์ SMR บ่งชี้ว่าเกิดการเลื่อนแบบระนาบบริเวณฐานยันฝั่งขวาที่ลาดไหลลงมายังทิศตะวันตกเฉียงใต้ตามหน้าลาดไหล่เขา สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) ความเสียหายจากการเลื่อนตัวทำให้ดินเดิมเกิดการเลื่อนลงหลวมกันประมาณ 1 เมตร shotcrete เกิดการฉีกขาดออกจากกัน และมีน้ำไหลออกมาจากรอยฉีก พื้นที่ที่เกิดการเลื่อนตัวประมาณ 28,000 ตารางเมตร

2) หินบริเวณฐานยันฝั่งขวาเป็นหมวดหินเสาขัว อยู่ในกลุ่มหินโคราช ประกอบด้วยหินตะกอนพวกหินทรายแป้ง สีน้ำตาลแกมแดง และบั้งสีเทา หินทราย สีแดงอ่อน เม็ดขนาดเล็กถึงละเอียดมากมีชั้นกรวดปน หินโคลน หินดินดาน และหินทรายแป้ง สีแดงถึงม่วง สลับกับหินทราย สีแดงม่วง ชมพู และสีแดงแกมเทา โดยหมวดหินเสาขัว มีลักษณะทางกายภาพของหิน ประกอบด้วยชั้นหินสลับกันแบบ cycles มีความหนาอยู่ระหว่าง 200 - 760 เมตรในพื้นที่โครงการ ชั้นหินในพื้นที่โครงการแสดงลักษณะชั้นหินคดโค้ง

3) การเคลื่อนตัวของบริเวณลาดไหล่เขาเกิดจากชั้น Clay material มีความต่อเนื่องในแต่ละหลุมเจาะบนหน้าลาดไหล่เขา ชั้น Clay material มีความชื้นหรือน้ำสูงทำให้ค่ามุมเสียดทานระหว่างหน้าหินลดลง

4) รูปแบบจำลอง 3 มิติ และการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดไหล่เขาแสดงให้เห็นว่า เกิดการวิบัติลาดไหล่เขาแบบระนาบบริเวณฐานยันฝั่งขวา มีทิศทางการเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้

5) ผลการวิเคราะห์ RMR จัดอยู่ใน IV - Poor rock และผลการวิเคราะห์ SMR อยู่ใน Class Va ลักษณะลาดไหล่เขามีลักษณะแย่มาก หน้าลาดไหล่เขาไม่เสถียร ลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นแบบระนาบที่ใหญ่มาก

6) ข้อเสนอแนะที่ได้จากการปรับปรุงลาดไหล่เขา วิธีการ RMR มีการแนะนำออกแบบการป้องกันการพังทลายของหิน (Bieniawski, 1989) (พิจารณาจากลักษณะหน้างานเป็นกรณีไป) ดังนี้ ทำ Rock bolt ทำเป็นระบบ โดยใช้ bolts wire mesh, Shotcrete เพื่อป้องกันลาดไหล่เขา ในขณะที่วิธีการ SMR ให้การขุดเปิดหน้าออกใหม่ ทำระบบระบายน้ำบริเวณหน้าลาดไหล่เขา ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของบริเวณลาดไหล่เขา เนื่องจากค่า SMR ที่ได้อยู่ระหว่าง Class Va และ IVb พิจารณาทำ Shotcrete, Dental Concrete, Ribs และ/หรือ Beam toe wall เพิ่มเติมตามลักษณะหน้างาน

## 8. กิติกรรมประกาศ

การศึกษาปัญหาการเคลื่อนตัวของฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนประสบผลสำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากคณะและบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องดังนี้ คุณนิพนธ์ วัจนะภูมิ หัวหน้าฝ่ายธรณีที่ 1 ที่ให้โอกาสผู้ศึกษาได้สำรวจจัดทำรายงาน คุณธวัชชัย บรรเทา ให้ข้อมูลรูปภาพในช่วงระหว่างการก่อสร้างเขื่อนเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการแปลความหมาย ทีมเจาะสำรวจธรณีวิทยา ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน ฝ่ายธรณีฟิสิกส์ ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลผลการสำรวจ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการนี้

## 9. บรรณานุกรม

Association of Professional Geological Scientists. (1977). Geologic Logging and Sampling of Rock Core for Engineering Purposes (tentative): APGS Guide.

ASTM D1586. (2011). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

Bieniawski, Z. T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, 97-106.

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: New York: Wiley.



- Department of mineral resources (Cartographer). (1974). Geologic map of CHANGWAT UTTARADIT scale 1: 250,000, sheet NE47-11.
- Goodman, R. E. (1989). Introduction to Rock Mechanics (2nd ed.): ohn Wiley & Sons Ltd., New York.
- Hahn, I. (1982). Stratigraphy and marine ingressions of the Mesozoic Khorat Group in Northeastern Thailand.
- Hocking, G. (1976). A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci*, 13, 225-226.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering: Third Edition*: Taylor & Francis.
- Houlsby, A. C. (1992). 17 - Grouting in rock masses A2 - Bell, F G *Engineering in Rock Masses* (pp. 334-350): Butterworth-Heinemann.
- Karaman, K., Ercikdi, B., & Kesimal, A. (2013). The assessment of slope stability and rock excavatability in a limestone quarry (Vol. 17).
- Lugeon, M. (1933). *Barrage et Geologie*. Dunod, Paris.
- Markland, J. T. (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected (Vol. 19, pp. 1-10). *Imperial College Rock Mechanics Research Report*. pp. 1-10.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics* (3rd ed.): John Wiley & Sons.
- Raghuvanshi, T. K. (2019). Plane failure in rock slopes - A review on stability analysis techniques. *Journal of King Saud University - Science*, 31(1), 101-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.06.004>
- RocLab. (2002). *Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure criterion*. Rocscience Inc.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope. *Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas*, pp 49-53.
- Romana, M., Ser?n, J., & Montalar, E. (2003). *SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation*.



- Romana, M., Tom?s, R., & Ser?n, J. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., & Schiefelbein, I. M. (2007). Structural Analysis and Synthesis: A laboratory Course in Structural Geology (Vol. 3): Blackwell Publishing Ltd.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1960). E-18, Field Permeability Tests in Boreholes Earth manual; a guide to the use of soils as foundations and as construction materials for hydrolic structures (1 ed., pp. 541-546). United States Government Printing office washington.
- Ward, D. E., & Bunnag, D. (1964). Stratigraphy of the Mesozoic Khorat Group in Northeast Thailand: Department of Mineral Resources, Bangkok, Report of Investigation, v.6, 95 p.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H., 1972. Support determination based on geologic predictions. In Proc. North American rapid excav. tunneling conf., Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield), 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2004). Rock Slope Engineering: Fourth Edition (E. Hoek & J. Bray Eds. 4 ed.): Taylor & Francis.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2550). ธรณีวิทยาประเทศไทย สำนักธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400.
- กองวิทยาการธรณี. (2558). มาตรฐานการสำรวจทางวิทยาการธรณี เชื้อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบ: ส่วนการพิมพ์ สำนักงานเลขานุการกรม กรมชลประทาน ดุสิต กรุงเทพฯ.
- ณัฐพงษ์ วัจนะภูมิ. (2561). ภาพถ่ายทางอากาศลาดไหล่เขาฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก: ฝ่ายธรณีวิทยาที่ 1 ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน.
- ถิรวุฒิ ณ ลำปาง. (2561). รายงานการสำรวจธรณีวิทยาโครงการแก้ไขปัญหาการเลื่อนตัวของฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก. ฝ่ายธรณีวิทยาที่ 1 ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน. 51 หน้า



ธวัชชัย บรรเทา. (2548). ภาพถ่ายบริเวณฐานยันฝั่งขวาโครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก: ฝ่ายปฐพีและธรณีวิทยา ส่วนวิศวกรรม สำนักชลประทานที่ 3.

ฝ่ายธรณีฟิสิกส์. (2561). รูปตัดผลสำรวจธรณีฟิสิกส์โครงการแก้ไขปัญหาการเลื่อนตัวของฐานยันฝั่งขวาโครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก แนว A - A' และแนว C - C': ฝ่ายธรณีฟิสิกส์ ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน.

ส่วนสำรวจทำแผนที่ภาคพื้นดิน. (2561). แผนที่ภาพถ่ายโครงการแก้ไขปัญหาการเลื่อนตัวของฐานยันฝั่งขวาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก.