

การประเมินสถานะการดินถล่มและแนวทางการป้องกันเชิงวิศวกรรมในพื้นที่โครงการพัฒนาโดยตุง

Evaluation of Landslide Hazard Area and Engineering Guidelines of Protection in

Doi Tung Development Project

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์¹ วิสุทธิ์ โชติกเสถียร² ปรีชา สายทอง²

บรรพต กุลสุวรรณ³ และ มั่นยา จันทศรี³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

fengsus@ku.ac.th, soralump_s@yahoo.com

²กรมทรัพยากรธรณี กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

³นักวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ : การประเมินสถานะการดินถล่มในพื้นที่โครงการพัฒนาโดยตุง ดำเนินการโดยศึกษาข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและสภาพธรณีวิทยา สำรวจในพื้นที่พร้อมทั้งดำเนินการทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ อันประกอบด้วย การสำรวจชั้นดินด้วยการเจาะสว่านมือ (Hand Auger) การขุดบ่อสำรวจ (Test Pits) การเจาะชั้นดินระดับลึก การสำรวจการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ การทดสอบค่าความชื้นน้ำและความแข็งแรงของดิน จากนั้นวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันโดยใช้วิธี Limit Equilibrium เพื่อประเมินพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม ตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สัมพันธ์กับองศาความลาดชันเพื่อกระจายข้อมูลออกในเชิงพื้นที่ ทำให้ทราบถึงพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มตามลักษณะทางธรรมชาติ สำหรับปัจจัยสิ่งปกคลุมดินได้นำมาร่วมพิจารณาด้วย ดำเนินการโดยการจัดลำดับความสำคัญของสิ่งปกคลุมดินเป็น 5 ระดับโดยกำหนดตามความสามารถในการป้องกันการไหลผ่านของน้ำลงสู่ชั้นดิน ทำให้ได้แผนที่โอกาสเกิดดินถล่มที่ได้พิจารณาสิ่งปกคลุมดินร่วมกับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพี จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับข้อมูลการพิบัติจริงในพื้นที่ พบว่ามีความสอดคล้องกัน ยกเว้นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงลาดชันธรรมชาติ เช่น การตัดถนน เป็นต้น เมื่อทราบพื้นที่โอกาสเกิดดังกล่าวจึงได้กำหนดวิธีการป้องกันการพิบัติเชิงวิศวกรรมที่เหมาะสมกับความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่

ABSTRACT : Landslide Hazard area was analyzed in Doi Tung Development Project. Field and Laboratory investigations were done including hand augers, test pits, drilling, landslide investigation permeability test and shear strength test. Stability analysis has been done using limit equilibrium concept. The landslide hazard area was assigned based on the slope degree which corresponds to slope factor of safety. As for land cover, considerations were made to include this factor in the analysis. Finally, verification was done and found good correlation between hazard area from the analysis and actual location of slope failure. The obtained landslide hazard areas were assigned the suitable protection based on the risk of each area.

KEYWORDS : Landslide Hazard Map, Landslide, Stability Analysis

1. บทนำ

ดินถล่มเป็นภัยพิบัติตามธรรมชาติในประเทศไทยที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น และส่งผลกระทบอย่างต่อเนื่อง โดยภัยดินถล่มมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ฉับพลันและก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน วิธีการป้องกันหรือลดความสูญเสีย

เนื่องจากการเกิดดินถล่ม มีอยู่หลายวิธี เช่น การกำหนดพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม (Landslide Hazard Area) การกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม (Landslide Risk Area) และการกำหนดเกณฑ์ในการเตือนภัย เป็นต้น ในประเทศไทยมีหลายหน่วยงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการกำหนดพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม โดยอาศัยวิธีดัชนี

การประชุมวิชาการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 1 วันที่ 3-5 กันยายน 2551 ณ.ห้องประชุมใหญ่ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กทม. ปัจจุบันร่วม เช่น กรมพัฒนาที่ดิน และกรมทรัพยากรธรณี และวิธีการทางวิศวกรรมปฐพี เช่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยทั่วไปวิธีดัชนีปัจจุบันเหมาะสมกับการวิเคราะห์พื้นที่กว้างที่ทำให้เห็นภาพรวมได้ดี แต่มีความแม่นยำจำกัดในพื้นที่ขนาดเล็ก ในขณะที่วิธีการทางวิศวกรรมปฐพีมีความแม่นยำสูงกว่าแต่ดำเนินการได้ในเฉพาะพื้นที่จำกัด เนื่องจากต้องการข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ที่ละเอียดกว่า บทความนี้ขอเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม โดยวิธีการทางวิศวกรรมปฐพี ในพื้นที่ที่มีความละเอียดขนาด 1:1,000 โดยใช้กรณีศึกษาโครงการพัฒนาออยตุงฯ

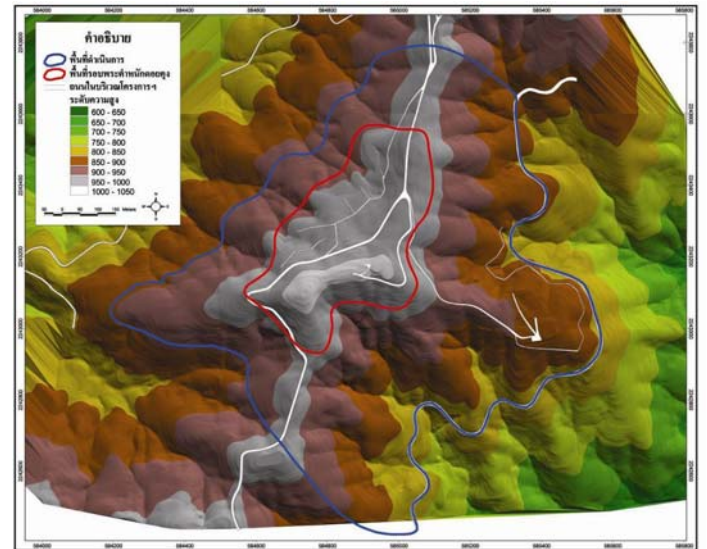
โครงการพัฒนาออยตุงฯ ต.แม่ฟ้าหลวง อ.แม่ฟ้าหลวง จ. เชียงราย เป็นสถานที่ที่มีความสำคัญของประเทศ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นพื้นที่สูงชันทำให้เกิดเหตุการณ์ดินถล่มอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะเมื่อเกิดเหตุไฟป่าในพื้นที่หลายครั้งตลอดช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา และล่าสุดเมื่อวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2550 ซึ่งไฟป่าอาจทำให้สิ่งปกคลุมดินเปลี่ยนแปลงและกระตุ้นให้เกิดดินถล่มได้ ดังนั้นกรมทรัพยากรธรณี จึงได้ดำเนินการศึกษาร่วมกับศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อศึกษาพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่มในบริเวณรอบพระตำหนักออยตุงฯ

กระบวนการศึกษาเริ่มที่การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำรวจพื้นที่ สำรวจและเก็บตัวอย่างดิน ทดสอบคุณสมบัติของดิน และสำรวจสภาพบ่งชี้ของพื้นที่ด้านดินถล่ม แล้วนำผลการสำรวจและทดสอบดังกล่าว มาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเขา เพื่อวิเคราะห์พื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม และตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ จากตำแหน่งการพิบัติ และสภาพบ่งชี้การเคลื่อนตัวของดิน

2. ลักษณะภูมิประเทศและธรณีวิทยา

พื้นที่โครงการพัฒนาออยตุงฯ อยู่บนพื้นที่ที่มีระดับความสูง 798 - 1,014 ม.รทก. และความลาดชันมาก (Mean 33.25° และ

SD 13.155°) ภาพที่ 1 แสดงเส้นชั้นความสูงในบริเวณพื้นที่โครงการพัฒนาออยตุง จากแผนที่ กรมชลประทาน (2531) [1]

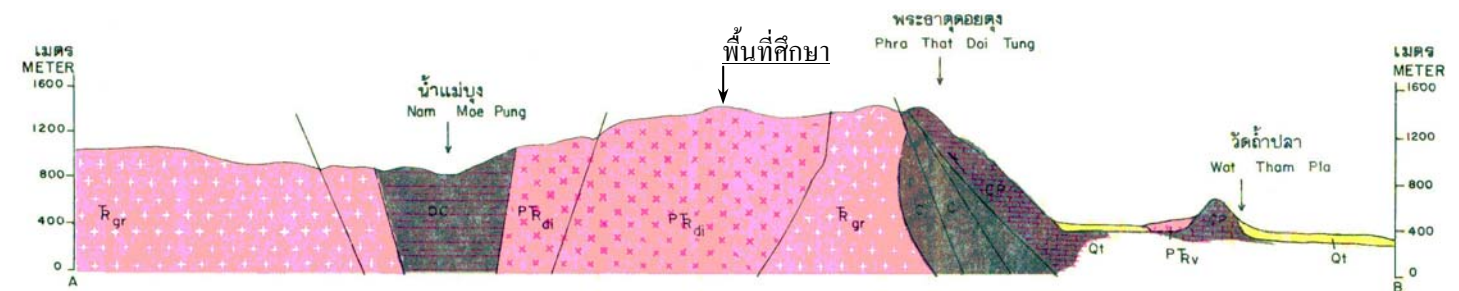


ภาพที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศบริเวณพระตำหนักออยตุงฯ

จากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี (2533) [2] และข้อมูลธรณีวิทยาบริเวณโครงการฯ จากการศึกษาของ ปริญญา พุทธาภิบาล และคณะ (2532) [3] พบว่าหินที่ปกคลุม คือ หินอัคนีแทรกซอน (Intrusive Rocks) ชุดออยช้างมูบ อยู่ในยุค Permo-Triassic ประกอบด้วยหินโทนาไลต์ (Tonalite) และหินไดออไรต์ (Diorite) มีหินแปรกลบ ลอมของแกบโบร (Gabbro) หรือหินแกบโบรอิกไดออไรต์ (Gabbroic Diorite) ภาพที่ 2 แสดงหน้าตัดลักษณะธรณีวิทยา (Tr_g) ของพื้นที่โดยรอบพื้นที่ศึกษา

3. การสำรวจและทดสอบในสนาม

การสำรวจและทดสอบในสนามมีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นดินในพื้นที่โครงการ และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของชั้นดินเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน



ภาพที่ 2 หน้าตัดลักษณะธรณีวิทยา (กรมทรัพยากรธรณี, 2533) [2]

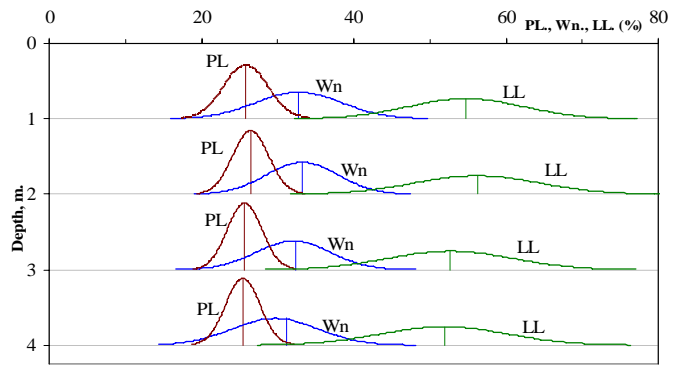
3.1 สภาพธรณีวิทยาและการสำรวจธรณีฟิสิกส์

การสำรวจสภาพธรณีวิทยาพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ปกคลุมด้วยดินที่ผุพังจากหินไดโอไรต์ (Diorite-fine to medium grained) ประกอบด้วยดินเหนียวปนทรายแป้ง และดินเหนียวปนทรายละเอียด สีน้ำตาลแดง สีแดงอมชมพู ลักษณะดินดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับข้อมูลจาก QAP diagram (Streckeisen, 1976) [4] ที่พบว่าหินดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์แร่พลอกซิโอเคลสเฟลด์สปาร์ (Plagioclase Feldspar) ที่สามารถผุพังกลายเป็นแร่ดินเหนียวสูงถึงสูงมาก หากมวลหินมีความหนาแน่นของรอยแตกและรอยแยกสูง อัตราการการผุพังก็จะสูงเพิ่มขึ้นตาม และจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ของกรมทรัพยากรธรณี (2550) [5] ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity Survey) พบว่าสภาพธรณีวิทยาในพื้นที่ดังกล่าวประกอบด้วยชั้นดินหนาตั้งแต่ 10-100 เมตร ปกคลุมหินฐานราก บางบริเวณพบลักษณะของหินลอยแทรกปนอยู่ ซึ่งจากการสำรวจสามารถสรุปได้ว่าการสะสมตัวของชั้นดินหนา เนื่องจากการผุพังอยู่กับที่จากหินต้นกำเนิด และดินที่ผุพังมีลักษณะเป็นดินเหนียว

3.2 การสำรวจชั้นดินด้วยการเจาะสว่านมือ (Hand Auger)

เพื่อตรวจสอบข้อมูลตาม 3.1 จึงได้ทำการประเมินความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นดินในพื้นที่โครงการฯ โดยการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือกระจายทั่วพื้นที่ศึกษาโดยกำหนดแนวการเจาะตามลาดชันที่มีความลาดชันสูง หรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง โดยแต่ละแนวเจาะสำรวจ 2-3 หลุม (ความลึก 4 เมตร/หลุม) จำนวน 22 แนว รวมหลุมเจาะสำรวจทั้งสิ้น 57 หลุม

จากการเจาะสำรวจโดยสว่านมือ พบชั้นดินหนาตลอดความลึกของหลุมสำรวจในเกือบทุกหลุมสำรวจ และพบลักษณะของหินผุในบริเวณร่อนน้ำ ผลทดสอบทางกายภาพของชั้นดินจากหลุมเจาะตามความลึก (จำนวน 207 ตัวอย่าง) แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าค่า W_n , LL , PL และ PI มีแนวโน้มลดลงตามความลึก รวมทั้งการกระจายขนาดของเม็ดดินในบริเวณพื้นที่ศึกษามีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเม็ดดินส่วนใหญ่เป็นดินเม็ดละเอียด และเมื่อจำแนกดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินเหนียวชนิด CL และ CH และมีค่า PI เฉลี่ยอยู่ในช่วง 26.45 – 29.26%

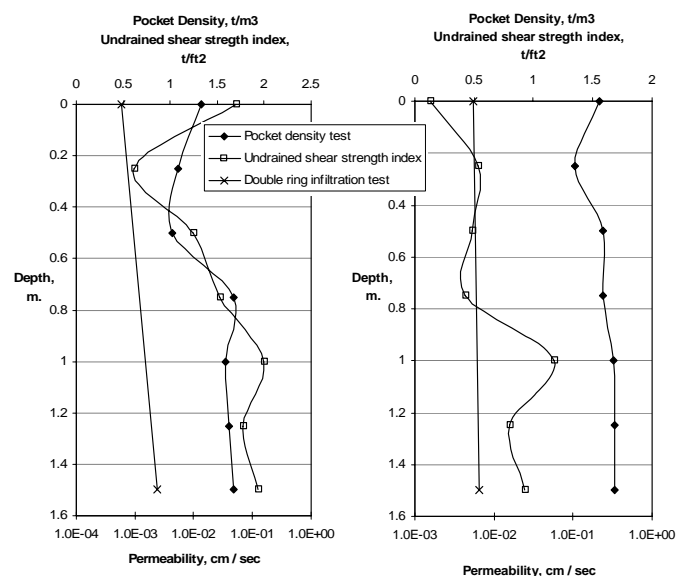


ภาพที่ 3 การกระจายตัวผลทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดิน

3.3 การขุดบ่อสำรวจ (Test Pits)

บ่อสำรวจจำนวน 2 บ่อ ได้ถูกเปิดในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มสูง โดยทำการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ โดยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างสำหรับงานวิจัยดินถล่ม KU-Miniature Sampler (วรากร และนงลักษณ์, 2546 และวรากร และบรรพต, 2548) เพื่อนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของชั้นดินในสนาม ทดสอบโดยวิธี Double Ring Infiltration Test (ASTM D 3385) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ นอกจากนี้ยังได้เก็บข้อมูล หน่วยน้ำหนักของดินในสนาม (Pocket Density Test) และค่าดัชนีแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength Index) โดยใช้อุปกรณ์ Pocket Penetrometer

ผลการทดสอบดังภาพที่ 4 พบว่าดินมีความสามารถในการซึมผ่านสูงตลอดความลึกของการสำรวจ และมีค่าความหนาแน่นต่ำ โดยเฉพาะบริเวณความลึกช่วง 0.2-0.5 เมตรจากผิวดิน



ก.) บ่อสำรวจที่ 1

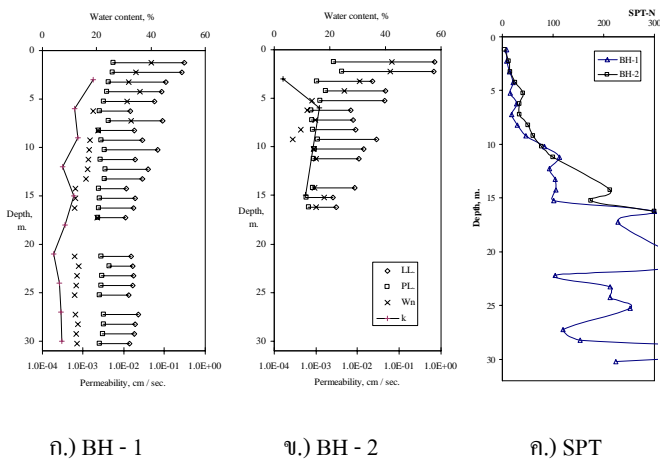
ข.) บ่อสำรวจที่ 2

ภาพที่ 4 ผลการทดสอบในบ่อสำรวจ

3.4 การสำรวจชั้นดินระดับลึก

หลุมสำรวจระดับลึก 2 หลุม ได้ดำเนินการในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มดินถล่มสูง คือมีโอกาสเกิดและผลกระทบสูงเพื่อทดสอบความแข็งแรงและความชื้นน้ำของชั้นดิน ด้วยวิธีการเจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) พร้อมทั้งทดสอบ SPT และทดสอบความชื้นน้ำตลอดความลึก พบว่าลักษณะของชั้นดินประกอบด้วยดินในกลุ่ม CH, CL และ SC แทรกสลับชั้นกันอยู่ โดยมีหินฐานเป็น Diorite

ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5 โดยผลการทดสอบ (SPT, N) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความลึก โดยที่ความลึก 8 เมตร ลงไปค่า SPT จะเพิ่มสูงขึ้นมากสอดคล้องค่าสภาพของดินที่อยู่เริ่มเปลี่ยนสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง ชั้นดินมีความหนาและมีค่าความชื้นน้ำสูงตลอดความลึก



ภาพที่ 5 ผลการทดสอบชั้นดินระดับลึก

4. ลักษณะการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ศึกษา

Varnes (1978) [9] จำแนกรูปแบบของการพิบัติออกเป็น 6 ประเภทหลักๆ จากการสำรวจพบลักษณะการพิบัติจำแนกได้ตาม Varnes (1978) เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การพิบัติแบบเลื่อนไถล (Slides) ในพื้นที่ที่มีความลาดชันมากกว่า 35 องศา โดยเฉพาะบริเวณที่มีการตัดถนน ทั้งในส่วนงานตัดและงานถมและพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งปกคลุมดิน ขนาดของดินถล่ม มีขนาดไม่เกิน 20 ลบ.ม.

2. การคืบของดิน (Soil Creep) ส่วนใหญ่เกิดบริเวณริมถนนทางขึ้นโครงการฯ โดยดินจะมีการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ไม่ปรากฏรอยแตกหรือรอยแยกบนผิวดินชัดเจน แต่สามารถสังเกตได้จากการเอียงตัวของต้นไม้

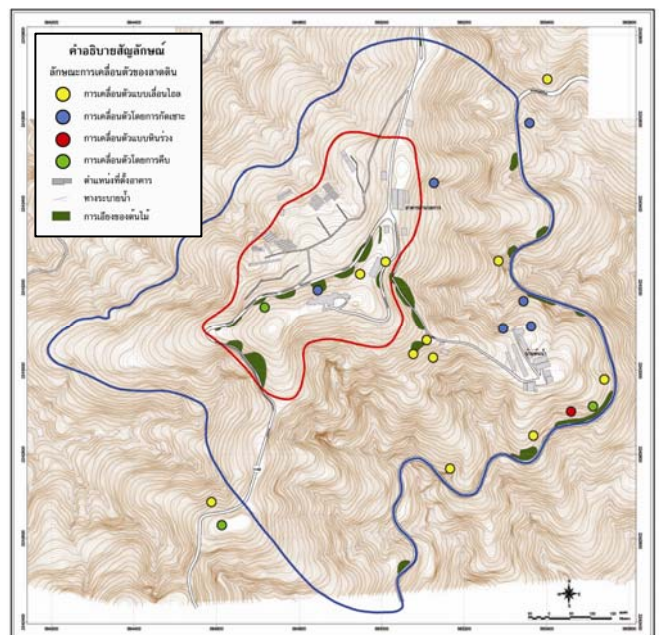
นอกจากนั้นยังมีลาดดินบางส่วนที่มีการกัดเซาะของน้ำ (Erosion) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการพิบัติแบบเลื่อนไถลได้ในอนาคต (สำหรับบริเวณที่มีความลาดชันสูง) ตำแหน่งผลการสำรวจแสดงดังภาพที่ 6

5. การสำรวจสภาพบ่งชี้ลักษณะดินถล่ม

ลักษณะบ่งชี้ถึงการเคลื่อนตัวของมวลดินในพื้นที่ดำเนินการ โดยการสำรวจและเก็บข้อมูลอันประกอบด้วย

- การเอียงของต้นไม้
- ตำแหน่งการเคลื่อนของมวลดิน
- รอยแตกของถนน

ผลการสำรวจพบว่าสิ่งปกคลุมดิน การกัดเซาะและการเกิดดินไหล มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน โดยพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งปกคลุมดิน หรือสิ่งปกคลุมดินมีความหนาแน่นไม่เพียงพอ หน้าที่ดินจะถูกกัดเซาะได้ง่าย และส่งผลให้น้ำฝนไหลซึมลงสู่ชั้นดินที่ลึกกว่าได้โดยง่าย ทำให้กำลังของดินลดลงและเกิดการไหลตัวในที่สุด พื้นที่ตามแนวการตัดถนนพบการเอียงตัวของต้นไม้และพบรอยแตกบนผิวถนน ผลการสำรวจดังภาพที่ 6



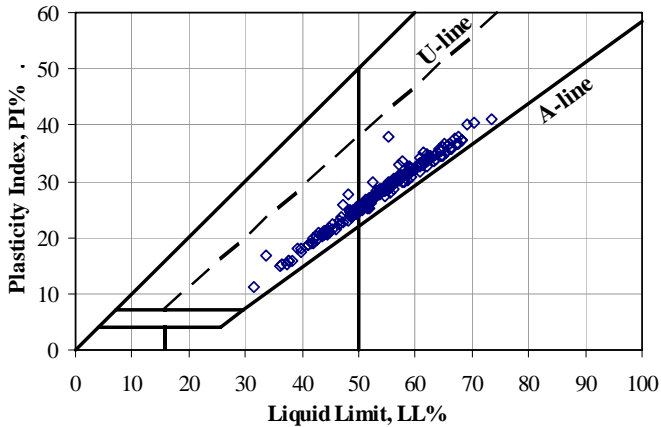
ภาพที่ 6 แผนที่สัญญาณการเคลื่อนตัวของลาดดิน

6. การประเมินพฤติกรรมดินถล่มจากคุณสมบัติดิน

จากข้อมูลผลการสำรวจทั้งหมดที่ได้กล่าวมา สามารถประเมินพฤติกรรมดินถล่มได้ดังต่อไปนี้

- การเจาะสำรวจด้วยส่วนมือ (Hand Auger) ผลการสำรวจไม่พบชั้นหิน ซึ่งสอดคล้องกับ Resistivity Survey ที่พบชั้นหิน

การประชุมวิชาการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 1 วันที่ 3-5 กันยายน 2551 ณ ห้องประชุมใหญ่ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กทม. ในระดับลึก โดยชั้นดินมีความสม่ำเสมอและสามารถจำแนกประเภทดิน (USCS) ได้เป็น CH, CL, MH หรือ OH มีปริมาณเม็ดละเอียดมาก และดินมีความเป็น Plastic หรือมีความเหนียว เมื่อตรวจสอบจาก Plasticity Chart พบว่าแร่ดินเหนียวที่พบส่วนมากเป็นแร่ Illite ดังภาพที่ 7 ซึ่งบ่งบอกว่าดินผุพังมาจากหินต้นกำเนิดชนิดเดียวกัน



ภาพที่ 7 ผลการสำรวจแสดงใน Plasticity Chart

ข. การเปิดบ่อสำรวจ (Test Pit) และการทดสอบในสนาม: พบว่าชั้นดินระดับต้น (ไม่เกิน 20 ซม.) ประกอบด้วยหน้าดินที่มีการผุพังของซากพืชและรากไม้ จากนั้นเป็นชั้นดินที่ค่อนข้างจะมีชนิดเดียวกันสม่ำเสมอ เป็นดินเหนียวที่มีค่าความชื้นน้ำค่อนข้างสูงและมีความหนาแน่นต่ำ

ค. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์โดยวิธี Strength Reduction Index (SRI) (Suttisak and Bunpoat, 2006) [8] พบว่าเมื่อดินอิ่มตัวจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของดินลดลงจากสภาวะธรรมชาติกว่าร้อยละ 50 ($SRI = 1.581$) ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบ Direct Shear Test ที่พบว่าดินเมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว กำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าลดลงจากสภาวะธรรมชาติ

จากผลการสำรวจและทดสอบทางวิศวกรรมปฐพีข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า สิ่งปกคลุมดินเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากในการป้องกันการเคลื่อนตัวของมวลดิน เนื่องจากดินที่ผุพังจากหินต้นกำเนิดมีความหนาแน่นต่ำและมีค่าความชื้นน้ำสูง ทำให้น้ำไหลซึมได้ไต่ในมวลดิน ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามถึงแม้ดินจะสูญเสียกำลังได้ง่ายเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากดินมีช่วงความเป็น Plastic หรือมีความเหนียวในช่วงปริมาณความชื้นที่กว้าง ทำให้การเคลื่อนตัวจำกัด

จึงอยู่ในลักษณะการคืบ (Creep) แทนที่จะพิบัติแบบทันทีทันใด ดังหลักฐานการเอียงของต้นไม้จากการขุดตัดถนน

7. การประเมินพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม

การประเมินพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่ม ดำเนินการโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยวิธี Limit Equilibrium ตามคำแนะนำของ วรากร (2542) [10] ร่วมกับเทคนิคของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อกำหนดพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่มในแผนที่ความละเอียด 1:1,000

7.1 คุณสมบัติดินสำหรับการวิเคราะห์

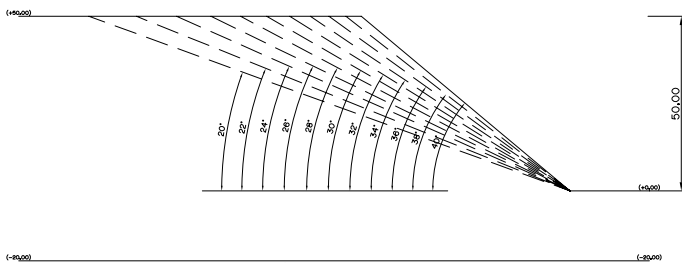
จากผลการสำรวจภาคสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถประเมินสภาพชั้นดินในพื้นที่ได้ว่าชั้นดินเป็นดินที่มีเนื้อสม่ำเสมอ (Homogeneous Soil) มีความหนาแน่นกว่า 15-30 เมตร ด้านล่างเป็นชั้นหินแข็ง (Bed Rock) ลักษณะดินดังกล่าวจึงเป็นลักษณะที่สามารถสร้างแบบจำลองลาดชันที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเหมือนกัน นอกจากนี้การวิเคราะห์การพิบัติในรูปแบบส่วนโค้งของวงกลม (Circular failure) จึงเป็นไปได้มากกว่าการใช้รูปแบบการพิบัติในลักษณะ Infinite slope ที่เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่ที่มีชั้นดินไม่หนาหรือชั้นหินอยู่ตื้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินดำเนินการทดสอบโดยใช้การทดสอบแบบเฉือนตรง (Direct shear test) โดยทดสอบในสภาวะ Undrained กับดิน Undisturbed ที่มีความชื้นตามสภาพธรรมชาติ และสภาพแช่น้ำ นอกจากนี้ยังได้นำค่า Residual strength จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสภาพแช่น้ำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินค่า C และ ϕ ของดินในสภาวะ Residual เนื่องจากในพื้นที่พบพฤติกรรม Creep ของดินอย่างชัดเจน ซึ่งอาจทำให้กำลังรับแรงเฉือนอยู่ในสภาวะ Residual เนื่องจากเกิด Strain มากจากการ Creep คุณสมบัติดินทั้ง 3 สภาวะ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะ Undrained

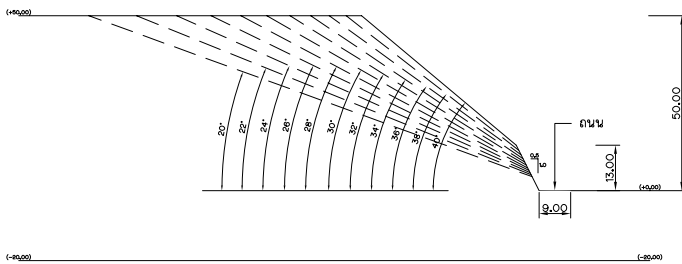
สภาวะ	$C, (t/m^2)$	$\phi, (deg.)$	$\gamma_t, (t/m^3)$
กำลังของดินในสภาวะความชื้นธรรมชาติ (Unsaturated)	1.00	36.0	1.60
กำลังของดินในสภาพแช่น้ำ (Soaked)	1.00	30.0	1.70
กำลังของดินในสภาวะคงค้าง (Residual Shear Strength)	0.10	30.0	1.55

7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเชิงพื้นที่

พื้นที่ของโครงการมีความลาดชันที่แตกต่างกัน ไม่สามารถที่จะแบ่งแนวตัด (Section) เพื่อทำการวิเคราะห์ได้ทุกแนว ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ทั้งหมดจึงทำโดยการกำหนดความสูงของลาดดินประมาณ 50 เมตร ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความสูงบริเวณด้านบนพระตำหนักฯ ถึงถนนด้านล่างแล้วปรับเปลี่ยนค่าความลาดเอียงตั้งแต่ 20 ถึง 40 องศา เพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันในมุมเอียงต่างๆ โดยแบ่งลักษณะของลาดเอียงเป็น 2 กรณี คือ กรณีพื้นที่เป็นพื้นที่ลาดต่อเนื่อง และกรณีมีการตัดลาดเชิงเขาเพื่อการก่อสร้างถนน ดังภาพที่ 8 และภาพที่ 9 ตามลำดับ

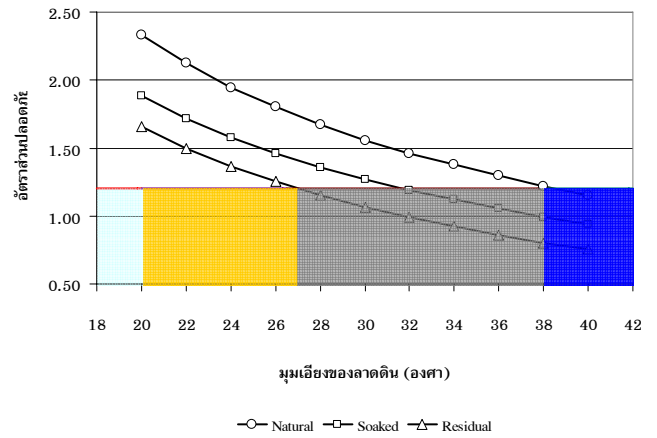


ภาพที่ 8 การวิเคราะห์ กรณีพื้นที่เป็นลาดชันต่อเนื่อง

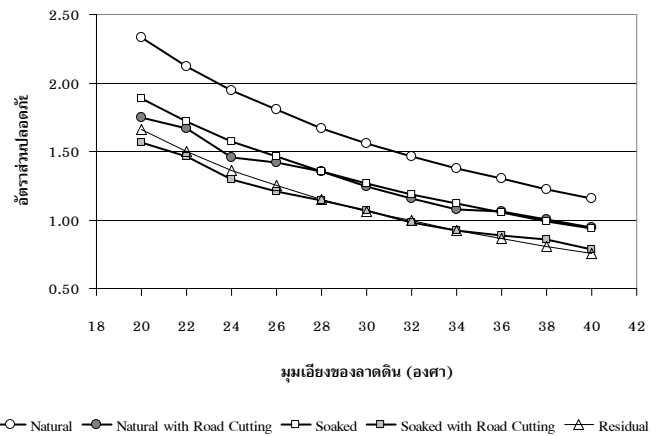


ภาพที่ 9 การวิเคราะห์กรณีมีการตัดลาดเชิงเขาเพื่อการก่อสร้างถนน

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 ลักษณะ แสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าลดลงเมื่อความลาดเอียงที่เพิ่มขึ้น โดยดินในสภาวะแห้งน้ำ จะมีค่าความปลอดภัยที่ต่ำกว่าดินในสภาวะธรรมชาติ และกรณีการตัดลาดเชิงเขาเพื่อการก่อสร้างถนนพบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีพื้นที่เป็นพื้นที่ลาดต่อเนื่องอย่างชัดเจน และแนวการบีบอัดเกิดขึ้นบริเวณตีนลาดชันด้านดินตัด ซึ่งตรงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง

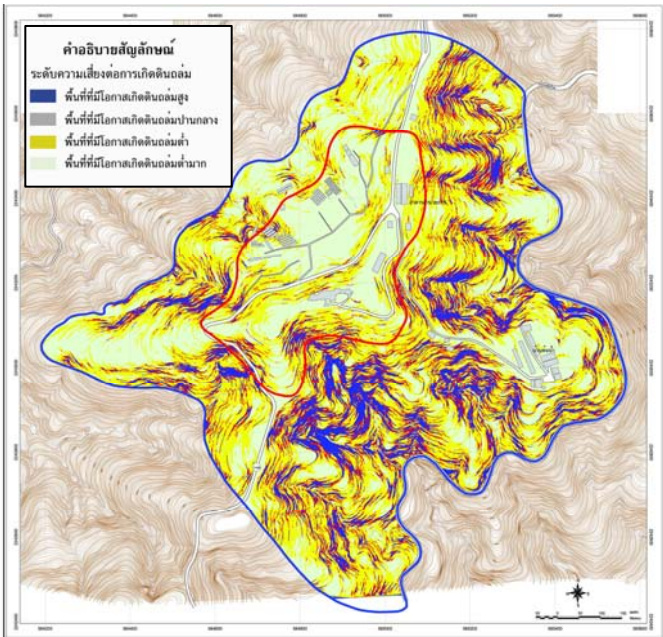


ภาพที่ 10 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยกรณีการวิเคราะห์ลาดชันต่อเนื่อง

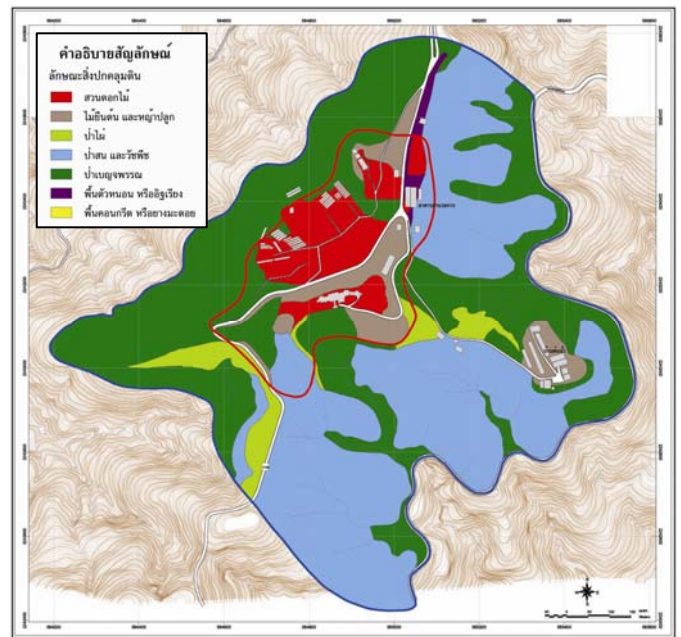


ภาพที่ 11 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยระหว่างกรณีการวิเคราะห์ลาดชันต่อเนื่องกับกรณีมีการตัดลาดเชิงเขาเพื่อการก่อสร้างถนน

เมื่อนำข้อมูลความลาดชัน จากแผนที่มาตราส่วน 1:1,000 มาวิเคราะห์ร่วมกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชัน โดยจำแนกระดับโอกาสเกิดดินถล่มตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและองศาความลาดชันดังแสดงในภาพที่ 10 โดยพิจารณาช่วงของความลาดชันที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า 1.2 ถือว่ามีโอกาสเกิดต่ำ (Brand 1984 [11] และ Trenter 2001 [12]) หากเท่ากับ 1.2 ถือว่าปานกลาง และหากต่ำกว่า 1.0 ถือว่ามีโอกาสเกิดดินถล่มสูง โดยการวิเคราะห์ได้พิจารณาช่วงกำลังรับน้ำหนักของดินทั้งจากสภาพธรรมชาติ (Natural) สภาพแห้งน้ำ (Soaked) และสภาพกำลังที่คงเหลือหลังการเคลื่อนตัว (Residual) และดำเนินการในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ในเชิงพื้นที่ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนที่พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มในพื้นที่โครงการฯ



ภาพที่ 13 ผลการสำรวจสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่โครงการพัฒนาออยดุงฯ

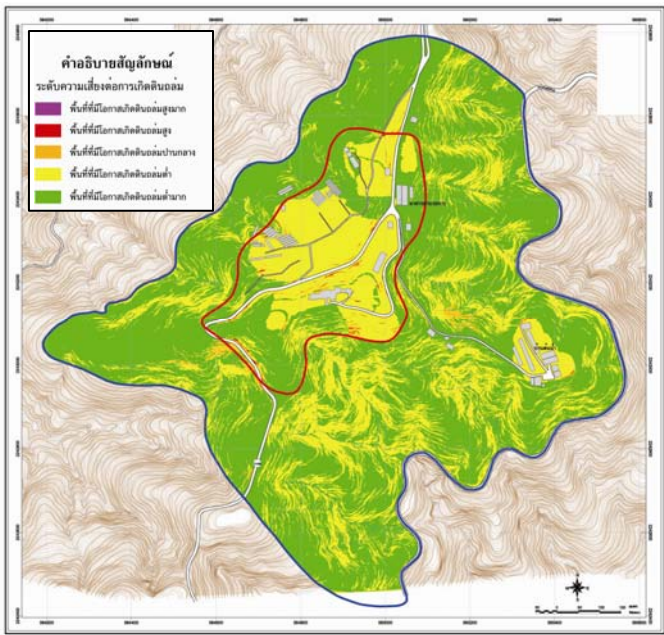
การวิเคราะห์ดังกล่าวไม่ได้พิจารณาปัจจัยของสิ่งปกคลุมดินประกอบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่บริเวณร่องน้ำมีโอกาสเกิดดินถล่มสูงเนื่องจากมีความลาดชันมาก จึงเข้าสำรวจพื้นที่ดังกล่าว และพบว่าบริเวณดังกล่าวไม่ปรากฏร่องรอยการพิบัติหรือลักษณะที่บ่งบอกถึงการเคลื่อนตัวตามผลการวิเคราะห์แต่อย่างใด แต่พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นร่องน้ำที่มีฐานเป็นหินและมีการสะสมตัวของหินลอยในบริเวณดังกล่าว พื้นที่ดังกล่าวควรมีความมั่นคงกว่าผลการวิเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังรับแรงของมวลรวมหินมีค่ามากกว่าดิน จึงทำให้ลาดชันในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงกว่าลาดชันดินธรรมชาติและไม่เกิดการพิบัติ

7.3 ปัจจัยสิ่งปกคลุมดินต่อโอกาสเกิดดินถล่ม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรมปฐพีที่ตั้งที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าสิ่งปกคลุมดินเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความมั่นคงของลาดชัน เนื่องจากมีผลต่อการไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นดินเบื้องล่าง ดังนั้นจึงทำการสำรวจลักษณะสิ่งปกคลุมดิน โดยพิจารณาถึงความสามารถในการลดการไหลซึมของน้ำลงสู่ดิน โดยแบ่งประเภทของสิ่งปกคลุมดินเป็น 9 ชนิด ดังภาพที่ 13 ตามลำดับความสามารถในการไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นดิน ได้แก่

1. ไม่มีพืชคลุมดิน
2. ทุ่งหญ้าหรือวัชพืช
3. ไม้ดอกไม้ประดับหรือสวนดอกไม้
4. ไม้ยืนต้นและหญ้าปลูก
5. ป่าไผ่
6. ป่าสนและวัชพืช
7. ป่าเบญจพรรณและวัชพืช
8. พื้นตัวหนอนหรืออิฐเรียง
9. พื้นคอนกรีตหรือยางมะตอย

จากผลการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันเชิงพื้นที่ทำให้ทราบถึงพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มดังภาพที่ 12 ซึ่งไม่ได้นำลักษณะสิ่งปกคลุมดินเข้ามาพิจารณา ดังนั้นหากนำปัจจัยลักษณะสิ่งปกคลุมดินในปัจจุบันมาพิจารณาร่วม โดยแบ่งระดับสิ่งปกคลุมดินเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 (คะแนนความเสี่ยงสูงสุด) : ไม่มีพืชปกคลุมดินและทุ่งหญ้าหรือวัชพืช ระดับที่ 2 : ไม้ดอกไม้ประดับหรือสวนดอกไม้และไม้ยืนต้นและวัชพืช ระดับที่ 3 : ป่าสนและใบสนคลุมและป่าไผ่ ระดับที่ 4 : ป่าสนและทุ่งหญ้าและป่าเบญจพรรณและวัชพืช ระดับที่ 5 (คะแนนความเสี่ยงต่ำสุด) : พื้นตัวหนอนหรืออิฐเรียงและพื้นคอนกรีตหรือยางมะตอย ดังภาพที่ 14 การวิเคราะห์เพื่อรวมปัจจัยสิ่งปกคลุมดินเข้ามาพิจารณาร่วมกับผลการวิเคราะห์ความลาดชัน ใช้หลักว่าสิ่งปกคลุมดินต่างชนิดกันมีโอกาสในการลดการไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นดินด้านล่างต่างกัน โดยเปรียบเสมือนการเพิ่มหรือลดโอกาสการเกิดการพิบัติจากการวิเคราะห์ความลาดชัน การวิเคราะห์โดยใช้หลักการดังกล่าวทำให้ระดับของพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่มเปลี่ยนจาก 3 ระดับเป็น 5 ระดับ



ภาพที่ 14 พื้นที่โอกาสเกิดดินถล่มในพื้นที่โครงการฯ พิจารณาปัจจัยสิ่งปกคลุมดินร่วมกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชัน

7.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ที่ได้เสนอข้างต้นจึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่โอกาสเกิดดินถล่ม (ภาพที่ 14) กับข้อมูลเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นในอดีต และสภาพบังชี้ของดินถล่มในพื้นที่ (ภาพที่ 6) ซึ่งพบว่าตำแหน่งการเกิดดินถล่มภายในขอบเขตพื้นที่ศึกษาจำนวน 21 ตำแหน่ง และตำแหน่งการเอียงตัวของต้นไม้ทั้งหมด อยู่ในพื้นที่โอกาสเกิดดินถล่มระดับปานกลางเกือบทั้งหมด ซึ่งขัดกับความเป็นจริง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตำแหน่งการเกิดดินถล่มและการเอียงตัวของต้นไม้ดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีตำแหน่งอยู่บริเวณแนวการตัดถนนหรือการตัดลาดชันธรรมชาติทั้งหมด จึงได้นำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันในกรณีการตัดถนนมาพิจารณา (ภาพที่ 9 และภาพที่ 11) ทำให้พบว่าระดับโอกาสเกิดดินถล่มเปลี่ยนจากระดับปานกลางเป็นระดับสูงถึงสูงมาก จึงได้ข้อสรุปว่าโอกาสเกิดดินถล่มในสภาพธรรมชาติของพื้นที่โครงการมีระดับตั้งแต่ปานกลางลงไป แต่เมื่อมีการตัดถนนหรือตัดลาดชันธรรมชาติ จะส่งผลทำให้โอกาสเกิดดินถล่มในพื้นที่ดังกล่าวสูงขึ้นในระดับสูงถึงสูงมากในทันที

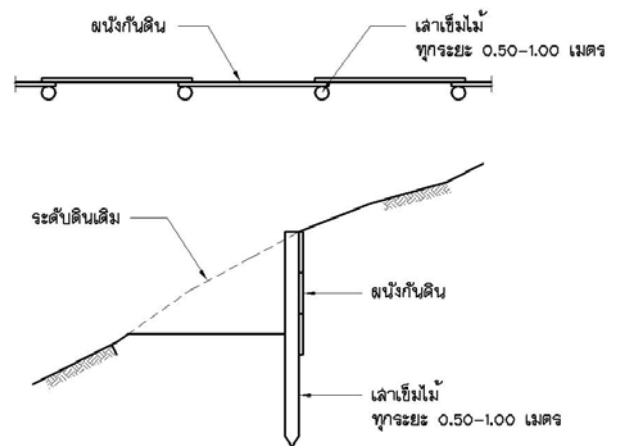
8. แนวทางการป้องกันเชิงวิศวกรรม

ลักษณะการพิบัติของลาดชันในพื้นที่ศึกษาสามารถพบได้ในบริเวณที่มีการตัดถนนหรือปรับเปลี่ยนลาดเขาให้ชันขึ้น ดังนั้นแนวทางการป้องกันและแก้ไขมี 2 หลักการ คือ การรักษา

เสถียรภาพของลาดดิน และการลดการกัดเซาะที่ตีนลาดชัน ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. การรักษาเสถียรภาพของลาดดิน ด้วยการทดแทนแรงดันจากมวลดินที่หายไปโดยการตัดดินลาดชัน ทำให้เสถียรภาพของลาดชันธรรมชาติ

1.1 สำหรับการป้องกันลาดชันที่มีการตัดดินไม่สูงมากใช้ผนังกันดิน เป็นโครงสร้างที่รับแรงดันทางด้านข้าง (Lateral Pressure) สามารถใช้ได้ทั้งไม้และคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้เสาเข็มตอกเว้นระยะห่างกันประมาณ 0.5-1.00 เมตร แล้วใช้แผ่นกันดิน (Panel) วางระหว่างเสาเข็มดังรูปที่ 15 ต่อกันไปตามแนวยาว ข้อดีของวิธีนี้คือใช้พื้นที่ของโครงสร้างไม่มาก แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้กับดินตัดหรือถมที่มีความสูงเกิน 1.5 เมตร

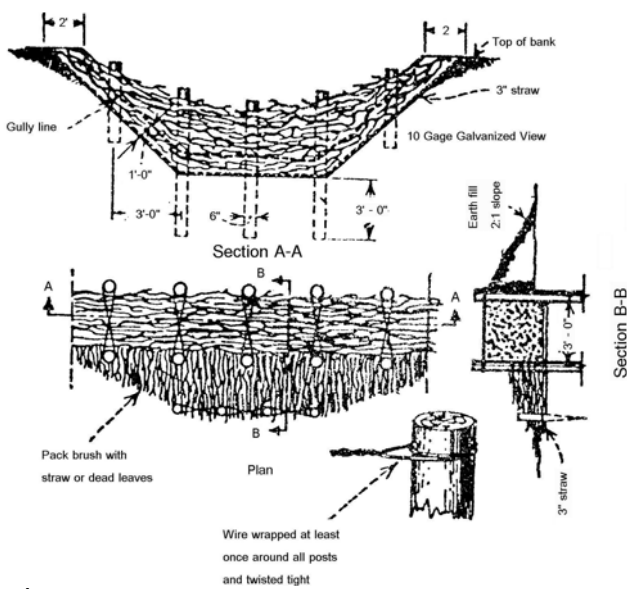


ภาพที่ 15 ตัวอย่างผนังกันดิน

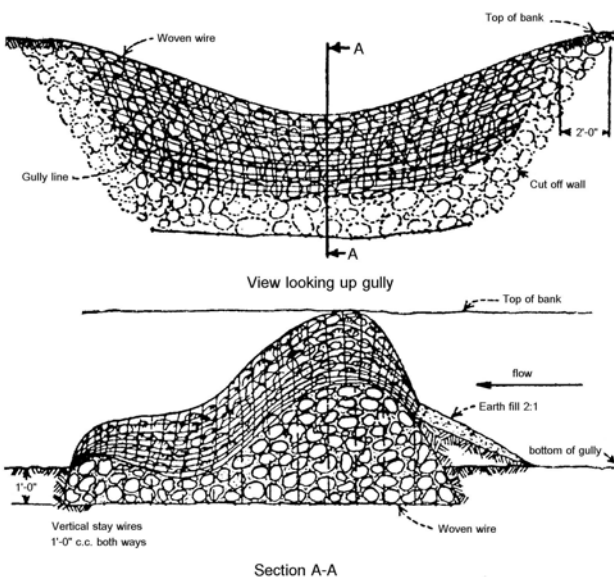
1.2 สำหรับลาดชันที่มีความสูงหรือมีมวลดินไถลมากจำเป็นต้องใช้น้ำหนักด้านการไหลของดิน โดยการเสริมความแข็งแรงของมวลดิน เพื่อให้เป็นน้ำหนักด้านการพิบัติ วิธีดังกล่าวได้แก่ การใช้ Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall) ซึ่งเป็นการแก้ไขการพิบัติของลาดดินด้วยการผสมผสานวิธี Retaining Wall, Buttressing และ Reinforcement โดยใช้วัสดุสำเร็จรูป หรือวัสดุธรรมชาติมาทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดิน เพื่อเพิ่มแรงต้านการพิบัติด้านหน้าลาดดิน แล้วเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุภายในโดยใช้วัสดุเสริมกำลังต่างๆ เช่น Geotextile หรือ Geogrid เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือ ก่อสร้างได้สูงครบที่ Bearing Capacity และ Slope Stability ผ่านเกณฑ์การออกแบบตัวอย่างดังรูปที่ 16 การออกแบบกำแพงกันดินดังกล่าวควรดำเนินการโดยวิศวกรปฐพีผู้มีความชำนาญ



ภาพที่ 21 ตัวอย่างการใช้ Concrete Square Grid ในการป้องกันการกัดเซาะผิวหน้าดิน



ภาพที่ 22 ฝายกักตะกอนดินแบบ Brush dam (วารากร และคณะ, 2549)



ภาพที่ 23 ฝายกักตะกอนดินแบบ Loose-rock dam (วารากร และคณะ, 2549)

9. สรุป

1. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเพื่อประเมินโอกาสเกิดดินถล่มโดยวิธี Limit equilibrium สามารถใช้สมมุติฐานการพิบัติในลักษณะ Circular Failure ได้หากการผุสลายของหินดินกำเนิดทำให้เกิดชั้นดินสะสมตัวหนา ซึ่งในกรณีศึกษานี้พบว่า หินกลุ่ม Diorite มีลักษณะดังกล่าวโดยยืนยันได้ทั้งจากการเจาะสำรวจด้วยสว่านมือจำนวน 57 หลุม การเจาะระดับลึก การเปิดบ่อสำรวจและการทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติดินที่ผุพังจากหินกลุ่ม Diorite พบว่าเป็นดินประเภท CL หรือ CH ที่มีความหนาแน่นต่ำ ($< 1.6 \text{ t/m}^3$) และความชื้นน้ำสูง ($> 10^{-3} \text{ cm/s}$) และนอกจากนั้นยังสามารถสูญเสียความแข็งแรงได้มากเมื่อแช่น้ำ (SRI = 1.581) จึงเป็นดินที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดดินถล่ม หากเกิดฝนตกหนัก นอกจากนั้นสิ่งปกคลุมดินสำหรับดินกลุ่มนี้ ยังมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากสามารถลดการไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นดิน ทำให้ลดโอกาสเกิดดินถล่มได้มาก

3. ถึงแม้ดินที่ผุพังจากหินกลุ่ม Diorite จะมีคุณสมบัติดังที่กล่าวในข้อ 2 แต่เนื่องจากดินมีคุณสมบัติด้านความเป็นพลาสติกที่ดี (PI = 26.45-29.26%) จึงทำให้การพิบัติของลาดชันไม่เกิดขึ้นทันทีทันใด แต่จะมีพฤติกรรมการคืบ (Creep) ดังที่ยืนยันได้จากพฤติกรรมการเอียงตัวของต้นไม้และผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวโดย Inclinomater ในบทความข้างเคียง

4. การประเมินโอกาสเกิดดินถล่มในเชิงพื้นที่โดยวิธีทางวิศวกรรมปฐพี โดยใช้หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันเพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามองศาความลาดชันต่างๆ พบว่าสามารถกระทำได้อย่างเหมาะสมในกรณีศึกษานี้ เนื่องจากใช้ความละเอียดของข้อมูลแผนที่ความลาดชัน 1:1,000 อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับสมมุติฐานของแบบจำลองเสถียรภาพที่ถูกต้องตามลักษณะพื้นที่จริง ดังเช่น ในกรณีการศึกษานี้ พื้นที่ร่องน้ำและพื้นที่การตัดถนนจะได้ค่าโอกาสเกิดดินถล่มไม่ตรงกับผลการวิเคราะห์ เนื่องจากพื้นที่ร่องน้ำมีลักษณะลาดชันเป็นมวลของหิน ในขณะที่แบบจำลองเป็นดิน สำหรับพื้นที่การตัดถนนนั้นเป็นการปรับเปลี่ยนความชันไปจากธรรมชาติ ทำให้ไม่ตรงกับข้อมูลแผนที่ 1:1,000 ที่ใช้ในการวิเคราะห์

5 การป้องกันการพิบัติของลาดดินเชิงวิศวกรรม ควรพิจารณาสาเหตุการพิบัติของลาดชัน จึงเลือกวิธีการป้องกันและ

การประชุมวิชาการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 1 วันที่ 3-5 กันยายน 2551 ณ ห้องประชุมใหญ่ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กทม. แก๊วที่เหมาะสมคือ การรักษาเสถียรภาพของลาดดิน และการลดการกัดเซาะที่ตีนลาดชัน รวมทั้งการลดความสูญเสียวัดหรือผลกระทบที่ดังที่กล่าวมา

9. กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาโดยคองฯ ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานในพื้นที่และร่วมกันดำเนินการศึกษาในครั้งนี้ และขอขอบคุณ กรมชลประทานที่เอื้อเฟื้อแผนที่ลักษณะภูมิประเทศโครงการพัฒนาโดยคองฯ มาตรฐาน 1:1,000

10. บรรณานุกรม

- [1] กรมชลประทาน. 2531, การสำรวจทางธรณีพื้นที่โครงการพัฒนาโดยคองฯ. กองสำรวจภูมิประเทศ กรมชลประทาน.
- [2] กรมทรัพยากรธรณี. 2533, แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย 1:50,000 ราว 4949 I, พื้นที่โครงการพัฒนาโดยคองฯ จังหวัดเชียงราย, กรุงเทพฯ.
- [3] ปริญญา พุทธากิจบาล และ ฉลองรัฐ ชะอนันต์. 2532, ธรณีวิทยาและสิ่งแวดล้อมบริเวณโครงการพัฒนาโดยคองฯ จังหวัดเชียงราย, กองธรณีวิทยา, กรุงเทพฯ.
- [4] Streckeisen. 1976, To each plutonic rock its proper name, Earth and Planetary Science Letters, v.12, p.1-33.
- [5] กรมทรัพยากรธรณี. 2550, รายงานการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พื้นที่โครงการพัฒนาโดยคองฯ จังหวัดเชียงราย, กรมทรัพยากรธรณี, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ
- [6] วรากร และ นงลักษณ์, 2546, คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำน้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
- [7] วรากร และ บรรพต, 2548, การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
- [8] Suttisak and Bunpoat, 2006, Landslide Risk Prioritization of Tsunami Affected Area in Thailand, Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering. 6-9 December 2006, Manila Philippin.
- [9] Varnes, D.J. 1978. Slope Movement Types and Processes, pp. 11-33. Schuster R.L. and Krizek R.J. (eds.). Landslides analysis and control. Transportation Special Report No 176. National Academy of Sciences, Washington D.C.

- [10] วรากร ไม้เรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ไลบรารี นายน์ พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.
- [11] Brand E.W. 1984. Geotechnical manual for slopes. Geotechnical Central Office Empire Centre, 6th floor, East Tsimshatsui, Kowloon, Hong Kong.
- [12] Trenter N.A. 2001. Earthworks: a guide. Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Limited, 1 Heron Quay, London.
- [13] กรมทางหลวง. 2537, STANDARD DRAWINGS FOR HIGHWAY CONSTRUCTION. กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ
- [14] วรากร และคณะ. 2549, ระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการป้องกันและแก้ไขการพิบัติของลาดดิน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2549