

การศึกษารูปแบบการพิบัติและแนวทางการออกแบบเสริมเสถียรภาพของลาดหิน กรณีศึกษาแนวรางรถไฟสายตะวันออก ช่วงชุมทางฉะเชิงเทรา-ท่าเรือพาณิชย์สัตหีบ จังหวัดชลบุรี

The Study of Rock Slope Failure and Design Approach for Improving the Rock Slope Stability: A Case Study of Eastern Railway, Chachoengsao-Suttahip Port Junction, Chonburi Province

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์¹, สิริศาสตร์ ยังแสนภู² และมนตรี จินากุลวิวัฒน์³

¹ รองศาสตราจารย์ ² นักธรณีวิทยา และ ³ วิศวกรปฐพี

^{1, 2, 3} ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (GERD) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: ¹ fengsus@ku.ac.th, ² Sirisartra_y@hotmail.com, ³ montrice65@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการศึกษารูปแบบและแนวโน้มของการพิบัติของมวลหินบริเวณแนวรางรถไฟสายตะวันออก ช่วงชุมทางฉะเชิงเทรา-ท่าเรือพาณิชย์สัตหีบ หลักกิโลเมตรที่ 110 อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี จากการเดินสำรวจทางธรณีวิทยา พบมวลหินในพื้นที่ศึกษาเป็นหินชนิดไบโอไทต์-มัสโคไวต์ แกรนิต (Biotite-Muscovite Granite) ยุคไทรแอสสิก ที่มีอัตราการผุพังสูงและความหนาแน่นรอยแตกระดับปานกลาง เมื่อนำข้อมูลระนาบความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity Plane) อันได้แก่ ระนาบรอยแตกและระนาบรอยเลื่อน จำนวน 101 ระนาบ มาวิเคราะห์หาทิศทางการเคลื่อนพัง โดยวิธีการวิเคราะห์สเตอริโอเน็ต พบว่ามีรูปแบบการพิบัติของมวลหินที่เด่นชัด 2 รูปแบบ ได้แก่ การพิบัติของมวลหินแบบล้มคว่ำ (Toppling Failure) ผสมผสานกับการพิบัติของมวลหินแบบระนาบ (Planar Failure) ทั้งนี้เมื่อใช้ผลการศึกษาด้านธรณีวิทยาเป็นรูปแบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหิน (Rock Slope Stability) ทางวิศวกรรม พบว่าการพิบัติแบบล้มคว่ำจะเกิดขึ้นเมื่อลาดหินมีความชันประมาณ 66 องศา และจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งแนวลาดหินของขอบเหมืองมีความชันมากกว่า 80 องศา การพิบัติจะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะแบบเลื่อนไถล ดังนั้นผลจากการประเมินซึ่งลาดหินมีความชัน 72 องศา บ่งชี้ว่าคั่นทางรถไฟไม่มีความมั่นคงในสภาพปัจจุบันหากไม่ได้รับการออกแบบป้องกัน ซึ่งแนวทางการแก้ไขทางด้านธรณีวิศวกรรมพิจารณาจากหลายๆ วิธีเข้าด้วยกัน ได้แก่ 1) สร้างระบบการระบายน้ำที่ผิว 2) สร้างระบบป้องกันการพิบัติด้วยการทำ Rock Anchor พร้อมทั้งป้องกันผิวหน้าร่วมกับการติดตั้ง Wire Mesh นอกเหนือจากนี้ อาจพิจารณาติดตั้ง Horizontal Drain ในบริเวณที่พื้นน้ำใต้ดินไหลผ่าน 3) ย้ายแนวรางรถไฟทั้งสองสาย

คำสำคัญ: การพิบัติของมวลหินแบบล้มคว่ำและแบบระนาบ, การวิเคราะห์สเตอริโอเน็ต, การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดหิน

Abstract

This paper presents a study of rock slope failure in case of the Eastern Railway at Chachoengsao-Suttahip Port Junction in Chonburi Province. By the geological survey, it was found Biotite-Muscovite Granite rock with highly weathering and moderately fracture in the study area. The data of hundred discontinuity planes including fracture and

fault planes were analyzed by stereonet method. The result shows two possible modes of failure including toppling failure and planar failure for the considering rock slope. The rock slope stability analysis shows the toppling and the planar failure will occur, if the slope of the rock is steeper than 66 and 80 degrees, respectively. Therefore, the present 72 degrees rock slope is unstable without the mitigation measure. The design approach based on the engineering consideration is a combination between 1) the surface drainage system, and 2) rock anchor with wire mesh, otherwise relocated the new track away from the rock slope.

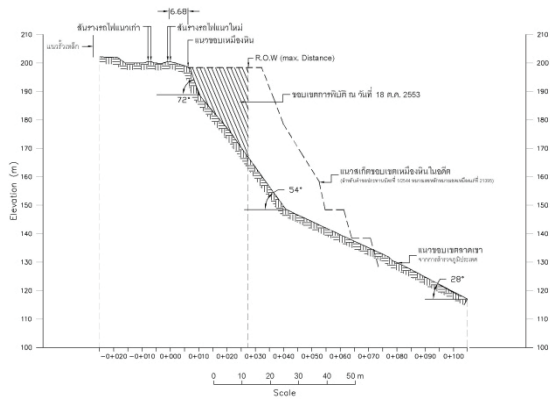
Keywords: Toppling and Planar Failure, Stereonet Method, Rock Slope Stability.

1. บทนำ

แนวรางรถไฟสายตะวันออกช่วงชุมทางฉะเชิงเทรา-ท่าเรือพาณิชย์สัตหีบ เป็นแนวรถไฟรางคู่ที่มีความสำคัญต่อการขนส่งสินค้าและการโดยสารของภาคตะวันออก ทั้งนี้แนวรางรถไฟในช่วงหลักกิโลเมตรที่ 110 (+375 ถึง +625) ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ได้ตั้งผ่านใกล้พื้นที่ที่เกิดการพิบัติของขอบบ่อเหมืองหินปูนดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ ระยะห่างจากขอบบ่อเหมืองถึงแนวรางรถไฟก่อนการพิบัติใกล้สุดในแนวราบ 28 เมตร ความสูงจากฐานเหมืองถึงระดับคั่นทางรถไฟประมาณ 100 เมตร ความลาดชันเฉลี่ย 66 องศา และไม่มีโครงสร้างเสริมความแข็งแรงของลาดชัน ขอบบ่อดังกล่าวได้เริ่มเกิดการพิบัติครั้งแรกเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2553 โดยขอบการพิบัติลามเข้ามาใกล้กับแนวรางรถไฟ 15 เมตร และพิบัติครั้งที่สองเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 เหลือระยะห่าง 9.5 เมตร และจนถึงขณะนี้ (18 ตุลาคม 2553) มีระยะห่างจากแนวรางรถไฟเพียง 6.68 เมตร ผลดังกล่าวนี้อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพความมั่นคงของคั่นทางรถไฟ รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อการเดินทาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างไร้ใน การศึกษาหาสาเหตุและรูปแบบการพิบัติของมวลหิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบเพื่อป้องกันการพิบัติและสามารถเดินรถไฟได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 1 การพังทลายของขอบบ่อเหมืองหินปูนบริเวณพื้นที่ศึกษาใกล้แนวรางรถไฟ



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางลักษณะภูมิประเทศพื้นที่ที่เกิดการพังทลายของขอบบ่อเหมืองหินปูน

2. พื้นที่ศึกษา

ตั้งอยู่ในบริเวณไหล่ทางของรางรถไฟคู่ สถานีชลบุรี หลักกิโลเมตรที่ 110 (+375 ถึง +625) ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี (รูปที่ 3) ซึ่งปรากฏอยู่ในแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร มาตราส่วน 1:50,000 ราว 5135 I จังหวัดชลบุรี [1] ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 12,500 ตารางเมตร โดยมีระยะทางขนานตามแนวรางรถไฟประมาณ 250 เมตร และมีขอบเขตความกว้างประมาณ 50 เมตร มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบเนินเขา



รูปที่ 3 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา (<http://maps.google.com>)

3. วิธีการศึกษา

การดำเนินการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การสำรวจและวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา และ 2) การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อออกแบบเสริมเสถียรภาพ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การสำรวจและวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา

ประกอบไปด้วย 1) การเดินสำรวจเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาที่อาจส่งผลต่อการพังทลายของมวลหิน เช่น ชนิดหิน การผุพัง และระนาบรอยความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน ทั้งในบริเวณพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียงที่ปลอดภัยจากการพังทลาย 2) การวิเคราะห์ข้อมูลระนาบรอยความไม่ต่อเนื่องในมวลหินที่ได้โดยวิธีสเตอริโอเน็ต ได้แก่ การวิเคราะห์รูปแบบการพังทลายของมวลหินจากการพล็อตโพล [2] และการวิเคราะห์แนวโน้มการเคลื่อนตัวของมวลหิน [3] ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ 3) การวิเคราะห์ทางธรณีฟิสิกส์โดยวิธี Resistivity และ Seismic Refraction 4) การเจาะสำรวจ 1 หลุมเจาะความลึก 43 เมตร พร้อมเก็บตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ 5) การตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากการเดินรถไฟและการทำเหมือง ทั้งนี้ในส่วนนี้พบว่ามีความคุ้มค่า จึงไม่นำเสนอในบทความนี้

3.2 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อออกแบบ

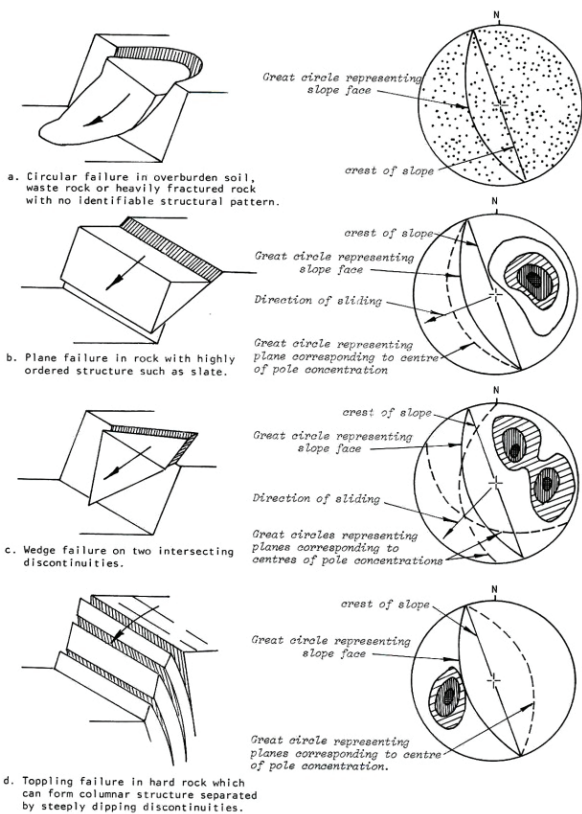
เสริมเสถียรภาพ

ดำเนินการเลือกระนาบ (Plan) การวางตัวของลาดหินที่มีแนวโน้มการพังทลายหลักสูงสุดจากผลการศึกษาทางธรณีวิทยา จากนั้นใช้ระนาบดังกล่าววิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยทั้งในสภาวะปกติและสภาวะรับแรงสั่นสะเทือน ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์ตามหลัก Limit Equilibrium โดยโปรแกรม Rock Pack ดังแสดงในรูปที่ 6 สุดท้ายเมื่อทราบสาเหตุการพังทลายจากการประเมินทางธรณีวิทยาร่วมกับทางวิศวกรรมแล้วก็จะวิเคราะห์และออกแบบเพื่อเสริมความมั่นคงของลาดหินขอบเหมือง

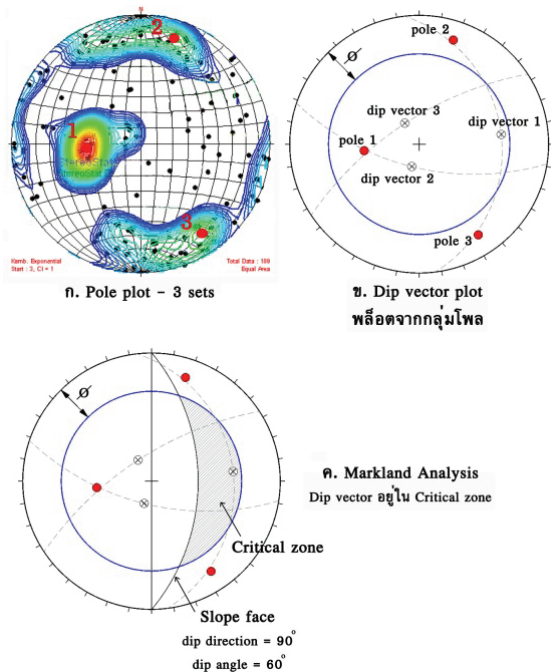
4. ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะธรณีวิทยาชนิดหิน

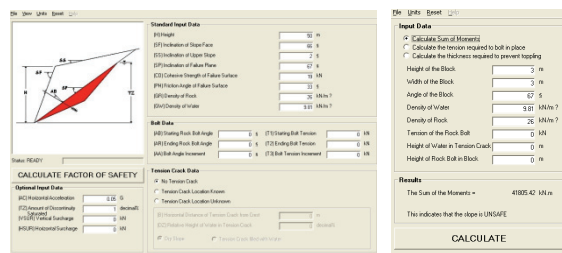
จากการเดินสำรวจเก็บข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาในบริเวณที่มีหินโผล่ (Outcrop) โดยไม่รวมจุดสำรวจที่เป็นดินปกคลุม กระจายรอบพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียงทั้งหมด 21 จุด (101 ระนาบ) พบว่าพื้นที่ศึกษาจากผิวถึงระดับความลึกอย่างน้อยประมาณ 10 เมตร ประกอบด้วยลักษณะธรณีวิทยาของมวลหินอัคนีชนิดเพียงชนิดเดียวคือ หินไปโอไทต์-มัสโคไวต์ แกรนิต (Biotite-Muscovite Granite, Trgr) แสดงดังรูปที่ 7 มีอายุอยู่ในยุคไทรแอสสิก เนื้อหินมีขนาดผลึกปานกลาง (1-5 mm.) ประกอบด้วยเม็ดผลึกแร่ควอร์ตซ์ แพลจิโอเคลส เฟลด์สปาร์ (ปริมาณสูง) และอัลคาไลเฟลด์สปาร์ แสดงดังรูปที่ 8 มีอัตราการผุพังของมวลหินสูงถึงสูงมาก (High-Highly Weathered) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่เกิดการพังทลาย มวลหินสามารถใช้มีอับแตกร่วนได้ ทั้งนี้เกิดจากการผุพังของแร่เฟลด์สปาร์ที่ถูกขูดเปิดให้สัมผัสกับอากาศและความชื้น



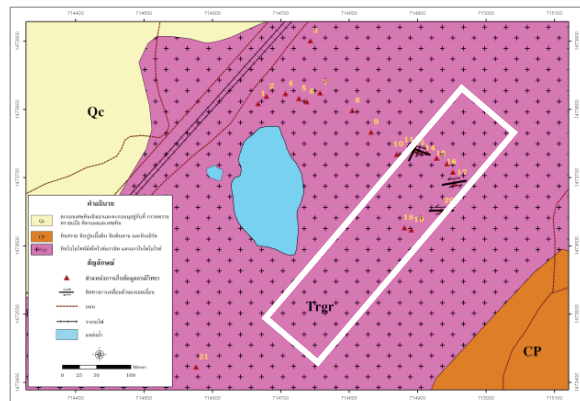
รูปที่ 4 การวิเคราะห์รูปแบบการพังตัวของมวลหินจากการเคลื่อนที่โพล [2]



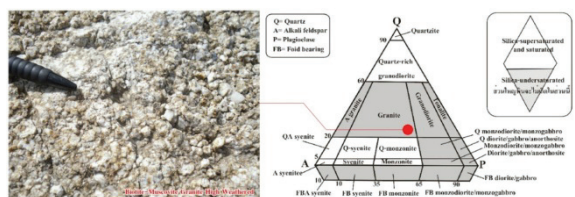
รูปที่ 5 การวิเคราะห์แนวโน้มนำการเคลื่อนตัวของมวลหิน [3]



รูปที่ 6 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหินโดยหลัก Limit Equilibrium



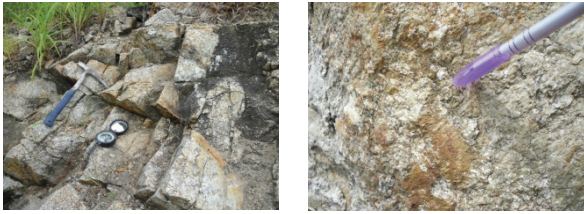
รูปที่ 7 ลักษณะธรณีวิทยาริเวณพื้นที่ศึกษาจากการเดินสำรวจ



รูปที่ 8 เนื้อหินไปโอโทต์-มัสโคไวต์ (อ้างอิงการจำแนกจาก Streckeisen, 1976)

4.2 ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยา

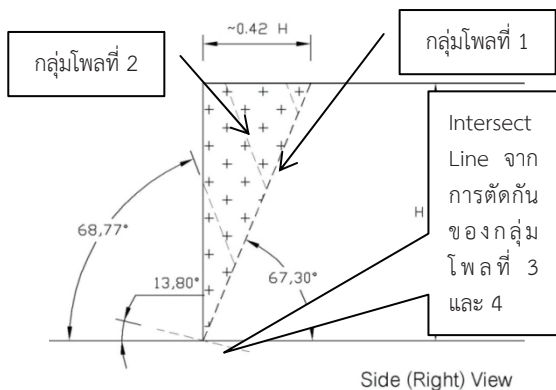
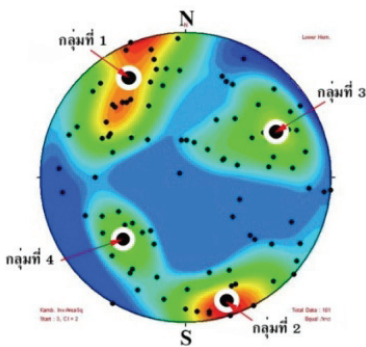
ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาที่ปรากฏชัดเจน ประกอบด้วยรอยแตกและรอยเลื่อน (รูปที่ 9) มีรายละเอียดดังนี้คือ 1) รอยแตก (Fracture) เนื่องจากพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นมวลหินอัคนีที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง (Homogeneous) เมื่อได้รับแรงจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกในอดีต รอยแตกที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งพื้นที่ กล่าวคือ มีลักษณะของการแตกเรียบและมีความยาวที่ต่อเนื่องอย่างน้อย 10 เมตร มีระยะห่างของรอยแตกประมาณ 30 เซนติเมตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับ Moderately Spacing [4] และบางบริเวณมักพบการแทรกตัดเข้ามาของสายแร่แคลไซต์ (Calcite Veins) ตามรอยแตกเดิมในอดีต 2) รอยเลื่อน (Fault) สำหรับหลักฐานที่ใช้บ่งชี้ว่ามีรอยเลื่อนปรากฏในบริเวณพื้นที่ศึกษาครั้งนี้คือ ธรณาคูรด (Slicken Side) ซึ่งปรากฏชัดเจนหลายจุด โดยแนวการเคลื่อนตัวส่วนใหญ่วางตัวอยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ หรือเกือบขนานกับแนววางรถไฟ มีลักษณะการเคลื่อนตัวในแนวระดับ (Strike-Slip Fault) และรอยเลื่อนที่สำรวจพบครั้งนี้เป็นรอยเลื่อนที่เคยเกิดขึ้นในอดีต ไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault) หรือไม่



รูปที่ 9 รอยแตกที่ปรากฏในมวลหินและพื้นที่ศึกษาขนาดครูด (Slickenside) ที่ปรากฏในเนื้อหิน

4.3 รูปแบบการพิบัติของมวลหิน

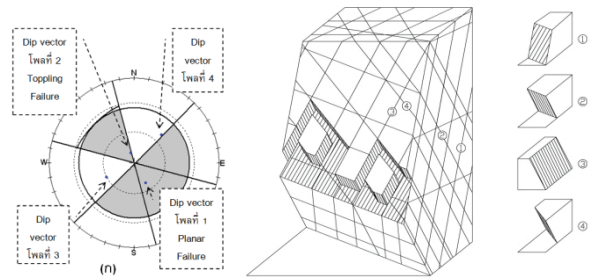
จากการพล็อตโพลของระนาบรอยความไม่ต่อเนื่อง (รอยแตกและรอยเลื่อน) ที่ได้จากการสำรวจ จำนวน 101 ระนาบ ด้วยโปรแกรม StereoStat (Demo Version) แสดงดังรูปที่ 10 ปรากฏกลุ่มโพลทั้งหมด 4 กลุ่ม เมื่อพิจารณาร่วมกับทิศทางการวางตัวของลาดชันสามารถประเมินได้ว่า โพลกลุ่มที่ 1 วางตัวอยู่ด้านหลังและมีทิศทางการเอียงเทตามลาดชัน สามารถทำให้เกิดรูปแบบการพิบัติแบบระนาบ (Planar Failure) โพลกลุ่มที่ 2 วางตัวอยู่ด้านหน้าและมีทิศทางการเอียงเทย้อนทางกับลาดชัน สามารถทำให้เกิดรูปแบบการพิบัติแบบล้มคว่ำ (Toppling Failure) โพลกลุ่มที่ 3 และ 4 วางตัวอยู่ด้านข้างและมีทิศทางการเอียงเทเข้ากัน โดยมีทิศทางการเอียงเทตั้งฉากกับลาดชัน เมื่อพิจารณาทิศทางการเอียงเทจากการตัดกันของกลุ่มระนาบทั้งสอง (Intersect Line) พบว่ามีทิศทางการเคลื่อนตัวสวนทางกับลาดชัน ไม่สอดคล้องกับรูปแบบการพิบัติแบบลิ้ม (Wedge Failure) ที่ควรมีทิศทางการเอียงเทตามลาดชัน



รูปที่ 10 รูปแบบการพิบัติแบบระนาบ (จากโพลกลุ่มที่ 1) และแบบล้มคว่ำ (จากโพลกลุ่มที่ 2)

4.4 แนวโน้มการเคลื่อนตัวของมวลหิน

จากการพิจารณา Critical Zone [3] ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดจากการตัดกันของค้ำมูเสียดทานภายใน (ϕ) ของหิน ที่มีค่าน้อยกว่าค้ำมูเสียดทานของลาดชันในสเตรียอเน็ต หากพบว่ามี Dip vector ของกลุ่มระนาบความไม่ต่อเนื่องปรากฏอยู่ในบริเวณดังกล่าว ก็แสดงว่าลาดชันที่มีมุมการเอียงเทดังกล่าวมีแนวโน้มเสี่ยงต่อการเคลื่อนตัวของมวลหิน จากการพิจารณา Dip vector ของระนาบรอยความไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏอยู่ในบริเวณ Critical Zone พื้นที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 11 โดยใช้ค้ำมูเสียดทานภายในของหิน (ϕ') ที่น้อยที่สุดจากการทดสอบ Joint Strength ในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 33 องศา (ผลการทดสอบมีค้ำมูเสียดทานภายใน 33-45 องศา) พบว่าในพื้นที่ศึกษาปรากฏ Dip vector หนาแน่นในบริเวณ Critical Zone หรือมีบริเวณที่มีแนวโน้มเคลื่อนตัวสูงของมวลหินทั้งในรูปแบบการพิบัติแบบล้มคว่ำและแบบระนาบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะการพิบัติที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 11 แนวโน้มการเคลื่อนตัวสูงของมวลหินจากการพิจารณา Dip Vector ใน Critical Zone และรูปแบบการพิบัติของมวลหินจากระนาบกลุ่มโพล 4 กลุ่ม (Not to scale)

4.5 การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดหิน

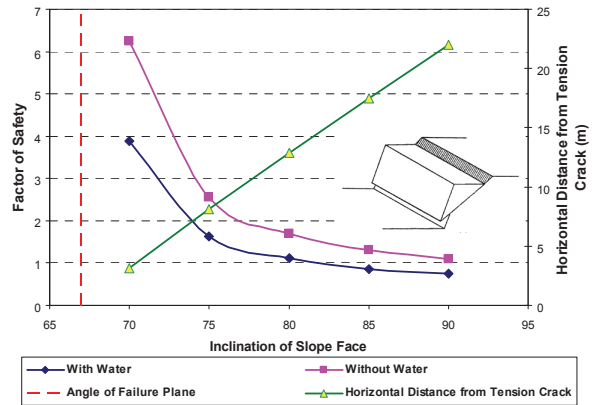
การวิเคราะห์ความมั่นคงของขอบเหมืองหินได้พิจารณาสาเหตุของการพิบัติไว้หลายประการ ได้แก่ 1) ปัญหาของน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน 2) ลักษณะโครงสร้างหินเอื้อต่อการพิบัติและอาจมีการพิบัติต่อเนื่องได้ 3) การสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิดหินหรือรถไฟ 4) น้ำหนักของคันทางรถไฟอาจทำให้เกิดแรงกระทำด้านบนของบ่อชุดทำให้เกิดการพิบัติ และ 5) การพิบัติอาจเกิดจากทุกๆ สาเหตุหรือบางสาเหตุร่วมกันตามที่กล่าวมาในข้อ 1 ถึง 4

สมมติฐานของการวิเคราะห์ที่กำหนดให้ขอบเหมืองหินมีการพิบัติแบบเลื่อนไกล (Planar Failure) โดยคุณสมบัติของหินได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [5] (Density 26 kN/m³, Cohesion 19 kN/m², Friction Angle 30°, Joint / Saw Cut Strength) นอกจากนี้กำหนดให้ลาดชันของขอบเหมือง (Inclination of Slope Face) ทำมุม 66 องศา กับแนวราบจากรูปร่างการขออนุญาตประทานบัตร [6] และกำหนดความลาดเอียงของระนาบพิบัติ (Inclination of Failure Plane) ทำมุม 67 องศา กับแนวราบตามผลการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยโดยพิจารณาแรงดันน้ำและไม่มีแรงดันน้ำ ร่วมกับน้ำหนักคันทางรถไฟ สัมประสิทธิ์การสั่นสะเทือนในแนวราบจากการเดินรถไฟ 0.05g (เนื่องจากไม่สามารถตรวจค่าสัมประสิทธิ์ได้ จึงต้องอ้างอิงจากแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว [7]) และจำลองให้มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชันของขอบเหมืองจาก 66 องศาจนถึงมุม 90 องศา กับแนวราบ แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจากผลการ

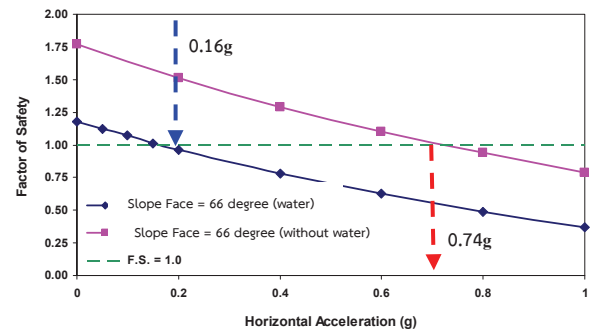
วิเคราะห์พบว่าเมื่อความลาดชันของขอบเหมืองเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยของการพิบัติแบบระนาบจะมีค่าลดลง และเมื่อความลาดชันของขอบเหมืองทำมุม 80 องศา กับแนวราบไปจนถึง 90 องศา กับแนวราบ อัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าเข้าใกล้ 1.0 ซึ่งแสดงถึงโอกาสในการพิบัติของขอบเหมือง นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าเมื่อไม่พิจารณาแรงดันน้ำกระทำ จะพบว่าการพิบัติแบบระนาบจะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ จึงสรุปได้ว่าการพิบัติที่ปรากฏจริงจะต้องมีเหตุจากการเพิ่มแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานข้างต้นและพฤติกรรมจริงที่การพิบัติเกิดขึ้นในช่วงหน้าฝน สำหรับแรงกระทำจากการสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.05g (Pseudostatic Analysis) พบว่าผลการวิเคราะห์ไม่มีผลต่อความมั่นคงในลักษณะการพิบัติแบบระนาบ ถ้าจะทำให้เกิดการพิบัติแบบระนาบ เมื่อลาดชันมีความชัน 66 องศา จะต้องเกิดค่าความเร่งในแนวราบ 0.74g และ 0.16g ในกรณีที่ไม่พิจารณาแรงดันน้ำและพิจารณาแรงดันน้ำตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งการสั่นสะเทือนดังกล่าวเป็นไปได้ยากถ้าเกิดจากการระเบิดระยะไกลหรือการสั่นสะเทือนจากการเดินรถไฟ เมื่อพิจารณาร่วมกับการตรวจวัดการสั่นสะเทือนในสนาม จึงสรุปได้ว่าการพิบัติไม่น่าจะเกิดจากการสั่นสะเทือน

เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ในสมมติฐานการพิบัติแบบเลื่อนไกล ขอบเหมืองหินจะพิบัติได้ก็ต่อเมื่อลาดชันของขอบเหมืองทำมุม 81 องศา กับแนวราบ (รูปที่ 12) ดังนั้นก่อนการพิบัติของเหมืองหินในสมมติฐานแบบเลื่อนไกล จะต้องมีส่วนมาจากการพิบัติในรูปแบบอื่นก่อน ทั้งนี้ลักษณะที่สำคัญของขอบเหมืองหินก่อนการพิบัติจะมีลักษณะคล้ายกับการพิบัติในรูปแบบ Toppling เนื่องจากระนาบที่ 2 (Pole 2) และ Toppling เนื่องจากระนาบที่ 1 (Pole 1) สำหรับลักษณะของการพิบัติในแบบ Toppling ก็คือระนาบของการพิบัติจะขนานหรือมีความชันมากกว่าระนาบของผิวลาดชัน ซึ่งผลจากการวางตัวของชั้นหินทั้งสองระนาบดังกล่าว จะทำให้เกิดการ Overstress บริเวณตีนของลาดชัน เมื่อเวลาผ่านไปบริเวณดังกล่าวจะเกิดการ Crushing และหินถูกดันตัวออกมา ทำให้เกิดการเสียสมดุลของมวลหินและพิบัติลงมาตามลำดับ (รูปที่ 14)

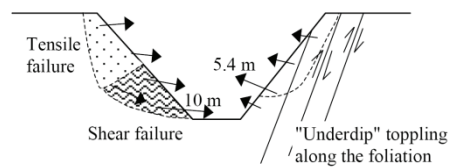
รูปที่ 15 (ก) แสดงลักษณะของขอบเหมืองหิน ที่พิบัติแบบล้มคว่ำ ดังนั้นในอดีตที่ขอบเหมืองหินมีลาดชันเดิมก่อนการพิบัติ (Inclination of Slope Face) ทำมุม 66 องศา กับแนวราบ และมีความลาดเอียงของระนาบพิบัติ (Inclination of Failure Plane) ทำมุม 67 องศา กับแนวราบ มีความเป็นไปได้ที่จะมีการพิบัติแบบ Toppling ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในการพิบัติแบบ Toppling โดยมีสมมติฐานว่าดินของลาดชันเกิด Overstress และสูญเสียการค้ำยันซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าลาดชันของขอบเหมืองหินอยู่ในสถานะที่ไม่ปลอดภัยดังแสดงในรูปที่ 15 (ข) ดังนั้นในเบื้องต้นจึงสรุปได้ว่าโอกาสในการพิบัติของขอบเหมืองหินเป็นไปได้ใน 2 รูปแบบผสมกัน ได้แก่ การพิบัติแบบล้มคว่ำ (Toppling) และการพิบัติแบบเลื่อนไกล (Planar Failure) โดยเกิดต่างเวลากันในลักษณะการพิบัติแบบต่อเนื่อง



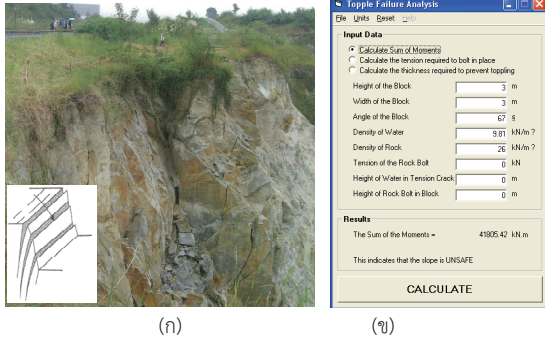
รูปที่ 12 อัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อเปลี่ยนแปลงความลาดชันของขอบเหมืองและใช้ความเร่งในแนวราบกระทำ = 0.05g และพิจารณาการพิบัติแบบระนาบ (Planar Failure)



รูปที่ 13 ความเร่งในแนวราบที่มีผลต่อความไม่มั่นคงของขอบเหมือง (การพิบัติแบบระนาบ)



รูปที่ 14 ลักษณะการพิบัติของหินแบบ Underdip Toppling [8]



รูปที่ 15 ลักษณะของขอบเหมืองหิน ณ เวลาการวิเคราะห์ และการวิเคราะห์ความมั่นคงของขอบเหมืองในสมมติฐานการพังทลายแบบ Toppling

5. สรุปผลการศึกษา

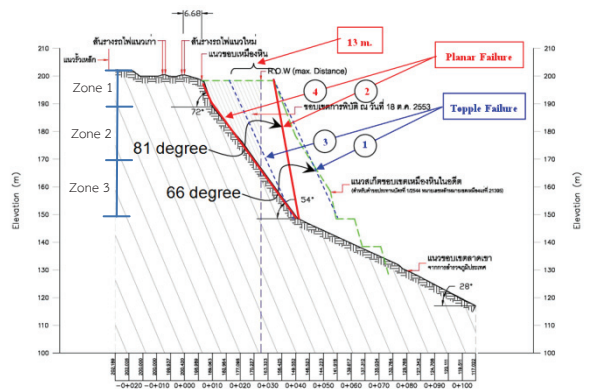
5.1 สรุปลักษณะทางธรณีวิทยา

พื้นที่ศึกษาประกอบด้วยมวลหินไปโอโตต์-มัสโคไวต์ แกรนิต มีอายุยุคไทรแอสสิก เนื้อหินมีอัตราการผุพังของมวลหินสูงถึงสูงมาก (High-Highly Weathered) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่เกิดการพังทลาย มวลหินสามารถใช้มือบีบแตกร่วนได้ เกิดการผุพังเนื่องจากถูกขุดเปิดให้สัมผัสกับอากาศและความชื้น รอยแตกมีลักษณะแตกเรียบและมีความยาวที่ต่อเนื่องอย่างน้อย 10 เมตร ระยะห่างของรอยแตกประมาณ 30 เซนติเมตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับ Moderately Spacing [4] และบางบริเวณมักพบการแทรกตัดเข้ามาของสายแร่แคลไซต์ตามรอยแตกเดิมในอดีต นอกจากนี้ยังพบระนาบครูด (Slickenside) ที่มีการเลื่อนตัวส่วนใหญ่วางตัวอยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ หรือเกือบขนานกับแนวรางรถไฟ มีลักษณะการเลื่อนตัวในแนวระดับ (Strike-Slip Fault) และไม่สามารถงัดขึ้นได้ว่าเป็นรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault) หรือไม่ เมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบการพังทลายของมวลหินจากระนาบรอยความไม่ต่อเนื่อง (รอยแตกและรอยเลื่อน) จำนวน 101 ระนาบ โดยวิธีสเตอริโอเน็ต พบว่าพื้นที่ศึกษามีรูปแบบการพังทลายแบบล้มคว่ำ (Toppling Failure) ผสมผสานกับการพังทลายแบบระนาบ (Planar Failure) โดยมีบริเวณที่มีแนวโน้มเคลื่อนตัวของมวลหิน ผลดังกล่าวนี้สามารถส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพความมั่นคงโดยตรงต่อคันทางรถไฟ จึงควรดำเนินการซ่อมแซมแก้ไขทางด้านธรณีวิศวกรรมที่เหมาะสมในอนาคต โดยพิจารณาจากรูปแบบการพังทลายดังกล่าว

5.2 สรุปลักษณะการพังทลาย

ผลการประเมินพฤติกรรมการพังทลายของขอบเหมืองโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Rock Slope Failure มีผลออกมาว่าลาดชันของขอบเหมืองมีความไม่มั่นคง ทั้งนี้โอกาสที่เป็นไปได้มากที่สุด คือการพังทลายจากสาเหตุของ Rock Slope Failure 2 รูปแบบ คือ การพังทลายแบบล้มคว่ำ (Toppling Failure) และการพังทลายแบบเลื่อนไกล (Planar Failure) โดยการพังทลายทั้ง 2 รูปแบบนี้ จะเกิดขึ้นต่อไปมา ดังขั้นตอนการพังทลายจากอดีตมาถึงปัจจุบันแสดงในรูปที่ 16 สำหรับลำดับของการพังทลายเริ่มต้นด้วยการพังทลายแบบล้มคว่ำ เนื่องจากขอบเหมืองและระนาบการพังทลายมีความชันที่ใกล้เคียงกันโดยประมาณ 66 องศา (รูปที่ 16 วงกลมที่ 1) การพังทลายแบบล้มคว่ำจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งแนวลาดเอียงของขอบเหมืองมีความชันมากกว่า 80 องศา การพังทลายของขอบเหมืองจะมีลักษณะแบบเลื่อนไกล (รูปที่ 16 วงกลมที่ 2) เมื่อเข้าสู่การพังทลายแบบ

เลื่อนไกลแนวขอบเหมืองจะพิงติดกันเข้าไปในแนวรถไฟ 13 เมตร ณ เวลาที่อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (รูปที่ 16 วงกลมที่ 3) ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมการพังทลายจริง ณ วันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2553 ที่มีการพังทลายเข้ามาจากเขตทาง 13 เมตร โดย ณ ช่วงที่เกิดการพังทลายเข้าไป 13 เมตรนี้เองจะทำให้ความชันของขอบเหมืองกลับมามีค่าใกล้เคียงกับระนาบการพังทลายอีกครั้ง (ประมาณ 68 องศา) ซึ่งก็คือการพังทลายแบบล้มคว่ำจะเกิดขึ้นครั้งอีกครั้งหนึ่ง จากขั้นนี้จะเห็นได้ว่า ณ ปัจจุบัน ขอบเหมืองเกิดการพังทลายในรูปแบบล้มคว่ำและกำลังพยายามเปลี่ยนรูปแบบการพังทลายเป็นแบบเลื่อนไกล (รูปที่ 16 วงกลมที่ 4) ซึ่งความชันของขอบเหมืองทำมุม 54 องศา



รูปที่ 16 สรุปลักษณะการพังทลายของขอบเหมืองตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบัน

5.3 การออกแบบแก้ไข

ผลการวิเคราะห์สาเหตุการพังทลายดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบแก้ไข ซึ่งปัจจุบันได้ดำเนินการก่อสร้างเสร็จสิ้นแล้ว ทั้งนี้จากผลการเจาะสำรวจสามารถจำแนก zone การแก้ไขออกเป็น 3 zone ตามลักษณะของชนิดหิน (รูปที่ 16) และมีการดำเนินการแก้ไข Zone ต่างๆ ดังนี้

5.3.1 สร้างระบบการระบายน้ำผิวดิน (Surface Drainage System) เพื่อป้องกันน้ำผิวดินไหลลงสู่หินขอบเหมือง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มแรงดันน้ำในระนาบพังทลาย

5.3.2 ย้ายแนวรางรถไฟทั้งสองสาย พร้อมกับขุดหรือสกัดส่วนที่ไม่มั่นคงออกในบริเวณด้านบนของหิน Zone 1 โดยการตัดมวลดินและหินด้านบนลาดชันในลักษณะขั้นบันได (Benching) วิธีนี้สามารถใช้ได้กับมวลดินและหินที่มีอัตราการผุสลายสูง

5.3.3 สร้างระบบป้องกันการพังทลายของหิน Zone 1 ด้วยการทำ Rock Anchor พร้อมทั้งป้องกันผิวดินหน้าและกระจายแรงโดยใช้ Concrete/Wooden Plank

5.3.4 เสริมความแข็งแรงของหิน Zone 2 ด้วยการทำ Rock Anchor ร่วมกับการติดตั้ง Wire Mesh เพื่อสร้างแรงกดสำหรับเพิ่มแรงเสียดทานบริเวณรอยแตกหลักที่ส่งผลการพังทลายและเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในระนาบการพังทลาย

5.3.5 เสริมความแข็งแรงของหิน Zone 3 ด้วยการทำ Rock Anchor เพื่อเสริมกำลังของหินในส่วนที่หน่วยแรงสูง

5.3.6 ติดตั้ง Horizontal Drain ในบริเวณที่พบน้ำใต้ดินไหล โดยอาศัยผลจากการทำสำรวจความต้านทานไฟฟ้า

5.3.7 ทั้งนี้จากผลการศึกษาในบทความนี้จะเห็นได้ว่าการสำรวจทางธรณีวิทยาและธรณีวิศวกรรมที่ดี จะทำให้เข้าใจสาเหตุการพิบัติได้ชัดเจน ทำให้การแก้ไขสามารถกระทำได้ตรงตำแหน่งและประหยัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการรถไฟแห่งประเทศไทยและกลุ่มบริษัท PPA (PCBK International Co.,Ltd., Pacific Consultants International (PCI) และ Asian Engineering Consultants., Ltd (AEC)) ภายใต้โครงการประเมินความอันตรายจากการถล่มของขอบบ่อเหมืองต่อแนวรางรถไฟสายตะวันออกช่วงชุมทางฉะเชิงเทรา-ท่าเรือพาณิชย์สัตหีบ กม. 110 อ.เมือง จ.ชลบุรี ซึ่งดำเนินงานโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (GERD) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมแผนที่ทหาร, 2541. แผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1: 50,000 WGS 84 ระวัง 5135 I จังหวัดชลบุรี, กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด.
- [2] Hoek E. and Bray J. W., 1981. Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy.
- [3] Markland, J.T. 1972. A Useful Technique for Estimating the Stability of Rock Slope when the Rigid Wedge Sliding Type of Failure Is Expected. Imperial Collage Rock Mechanics Research Report No.19. London: Imperial College Press.
- [4] Anon, 1977Anon. (1977). "The description of rock masses for engineering purposes". Report by the Geological Society Engineering Group Working Party. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 10(4), pp. 355-388.
- [5] Geotechnical & Earth Resources Engineering Laboratory School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology. 2010. Direct Shear Strength Test (Rock Discontinuity).
- [6] บริษัทโรงโม่หินศิลามหานคร หมู่ที่ 7 ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี. แผนผังโครงการการทำเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินปูนเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้างโดยวิธีเหมืองหาบ สำหรับคำขอประทานบัตรที่ 1/2544 หมายเลขหลักหมายเขตเหมืองแร่ที่ 21395.
- [7] Warnitchai, P. and Lisantono, A. 1996. Probabilistic seismic risk mapping for Thailand. Proceeding 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Paper No. 1271.
- [8] Sjoberg, 1999. Analysis of large Scale Rock Slopes. Doctoral Thesis, Division of Rock Mechanics, Lulea University of Technology.