บทที่ 4

แบบจำลอง 3 มิติ ของผนังบ่อเหมืองแม่เมาะ

4.1 ธรณีโครงสร้างผนังบ่อเหมืองแม่เมาะพื้นที่ C1 West-wall

C1 West-wall ส่วนบริเวณที่ทำการศึกษาวิเกราะห์เสถียรภาพ ตั้งอยู่ในพื้นที่ช่วงพิกัด N 15 – N 30, W 20 – W 35 ตามผังและระบบพิกัดเหมือง (Mine grid) ซึ่งเอียงทำมุมทวนเข็มนาฬิกากับทิศเหนือ 24° 31' 41.37" แสดงดังรูปที่ 4.1

ข้อมูลหลุมเจาะ และการแปลความหมายโดยนักธรณีวิศวกรรมเป็นภาพคัดขวาง (Cross sections) ตาม แนว N 15 ถึง N 30 (ภาคผนวก ก) ลักษณะเด่นของธรณีโครงสร้างหลักของพื้นที่ คือ มีกลุ่มแนวรอย เลื่อนปกติ (Normal fault) คัดกันซับซ้อน โดยมีรอยเลื่อน 2 แนวใหญ่ ทิศทาง Strike วางตัวกึ่งขนาน แนวเหนือ-ใต้ มีมุมเอียงเทไปทางตะวันออก (East dipping faults) ความชันประมาณ 35 – 60 องศา ตัด และดึงชั้นดินชั้นถ่านหินให้มีความต่างระดับกันเป็น 3 ระดับ มีระยะ Vertical throw แต่ละช่วง ประมาณ 100 – 150 เมตร แสดงดัง Cross section รูปที่ 4.2

ชั้นดินประกอบไปด้วย Material หลักคือ Underburden (UB) Claystone จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม (รูปที่ 4.3 และ 4.4) และจัดทำแผนที่ธรณีโครงสร้าง (Pit mapping) พบว่าทิสทางการเอียงเทของชั้นดิน (Bedding dip direction) บริเวณพื้นที่ด้านเหนือ N 25 ชั้นดินเอียงเทไปทางทิสใต้ ด้วยมุมชันประมาณ 4 – 16 องสา ส่วนบริเวณด้านใต้ N 20 ลงไป ชั้นดินเริ่มบิดทิสทางเอียงเทไปทางทิสตะ วันออกเฉียงใต้ โดยบริเวณใกล้แนวรอยเลื่อนมีแนวโน้มเอียงเทไปทางตะ วันออกตามการคดโค้งของแนวรอยเลื่อน (Fault drag) ด้วยมุมเอียงเทชันมากกว่า 20 องสา แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งหากพิจารณาในภาพรวมแบบ 3 มิติ แนวโน้มการเคลื่อนตัวพังทลายของ UB rock mass ที่หากเกิดขึ้น คาดว่าจะมีทิสทางออกไปทาง ตะ วันออกเฉียงใต้ตาม Bedding dip direction มากกว่าจะเคลื่อนตัวไปในทิสตะ วันออกโดยตรง (กอง วิสวกรรมธรณี, 2556)

การวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานข้อมูลธรณี โครงสร้างจากงาน Pit mapping ดังกล่าว ประกอบกับข้อมูล Cross section และแบบขุดขน นำมาประมวล และใช้ในการขึ้นรูป Surfaces และ Solid model 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม *Rhinoceros 3D*



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งพื้นที่ C1 West-wall ตามระบบพิกัดเหมืองแม่เมาะ (ปรับปรุงจาก เหมืองแม่เมาะ, 2560; Google, 2017)



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางแนว N 25 แสดงข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างหลักของ C1 West-wall (กองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ, 2556)



รูปที่ 4.3 งานติดตามเก็บข้อมูลธรณี โครงสร้างภาคสนาม (Pit mapping) พื้นที่ C1 West-wall (กองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ, 2556)



รูปที่ 4.4 การวัคทิศทางการเอียงตัวของชั้นคิน บริเวณรอยต่อ (Contact) ระหว่างชั้นถ่าน Q กับ UB rock mass (กองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ, 2556)



รูปที่ 4.5 แผนที่ธรณีโครงสร้าง (Pit map) แสดงลักษณะธรณีโครงสร้างของ C1 West-wall (กองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ, 2559)

4.2 ขั้นตอนการทำงานสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ผนังบ่อเหมืองแม่เมาะพื้นที่ C1 West-wall

4.2.1 การประมวลข้อมูลธรณีโครงสร้างเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

นำข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้าง ทั้งจากหลุมเจาะ Cross sections การสำรวจภาคสนาม หรือ Pit mapping มาประมวลร่วมกัน เพื่อพิจารณาคัดแยกข้อมูลที่จำเป็นในการสร้าง แบบจำลอง 3 มิติของพื้นที่ศึกษา หรือ การ "ขึ้นรูป" โดยใช้ซอฟต์แวร์ช่วย ได้แก่

- ชอฟแวร์ช่วยออกแบบ CAD ประเภท Non-uniform Rational Basis Spline (NURBS) modelling – *Rhinoceros 3D* (Robert McNeel & Associates, 2014) ซึ่ง ต่อไปจะเรียกโดยย่อว่า *Rhino*
- ซอฟต์แวร์ช่วยในการประมวลสร้างโครงตาข่าย 3 มิติ (Automesher software)
 ได้แก่ KUBRIX Geo และ Griddle (Itasca Consulting Group, 2015 และ 2016)
- Three-dimensional Distinct Element Code 3DEC (Itasca Consulting Group, 2007 ແລະ 2016)

ธรณีวิทยาโครงสร้าง และพื้นผิว (Surfaces) หน้างานขุดตามแบบที่นำมาประมวล เตรียมการขึ้นรูป ได้แก่

- พื้นผิวหน้างานขุดตามแบบ Master Plan ของเหมืองแม่เมาะ โครงการ 40 ปี เดิม (พ.ศ. 2538 – 2578) เป็นแบบฐานในการปรับแบบทิ้งมวลหิน UB ปริมาณ 43 MBCM. ไว้ แสดงดังรูปที่ 4.5
- พื้นผิวหน้างานขุดตามแบบที่มีมวลถ่านหิน และดินระหว่างชั้นถ่าน (Interburden, IB) ประมาณ 2.5 ล้านตันและ 2.5 MBCM. ตามลำดับ ค้ำยันอยู่ด้านถ่างมวลหิน UB แสดงดังรูปที่ 4.6
- 3) พื้นผิวธรณีโครงสร้างแนวรอยเถื่อนหลัก (Major faults)
- พื้นผิวธรณีโครงสร้างระนาบความไม่ต่อเนื่องรอยเฉือนในชั้นหิน (Bedding shears plane)



รูปที่ 4.6 แบบขุดเหมืองแม่เมาะ โครงการ 40 ปี เดิม (พ.ศ. 2538 – 2578)



รูปที่ 4.7 แบบขุดเหมืองแม่เมาะแสดงตำแหน่งมวลก้ำยันด้านล่างพื้นที่ C1 West-wall

้สำหรับข้อมูลธรณีโครงสร้าง เนื่องจากความซับซ้อนของระบบแนวรอยเลื่อน ในขั้น แรกนี้จึงต้องพิจารณากัดกรอง เพื่อลดความยุ่งยากต่อการขึ้นรูปในลำดับถัดไป เลือก เฉพาะแนวรอยเลื่อนหลักที่มีความต่อเนื่อง ปรากฏชัดจากข้อมูล Pit map และ Cross sections ตั้งแต่ N 15 ถึง N 30 และทำการต่อเชื่อมสร้างเป็น Surfaces แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

ธรณีโครงสร้าง Bedding shears plane จะอ้างอิงตามหลักฐานเชิงประจักษ์จากเหตุการณ์ พังทลายตามแนวระนาบรอยเฉือนต่าง ๆ ที่เหมืองแม่เมาะ และมักตรวจพบรอยเฉือน ปรากฏตามข้อมูลหลุมเจาะ (Bore log, ภาคผนวก ข) อย่างชัคเจน ได้แก่ ระนาบรอย เฉือน G1/G1A, G2 และ G3 ทั้งนี้ เมื่อพิจารณารูปทรงของ C1 West-wall แล้ว ระนาบ รอยเฉือน G3 ถือเป็น Potential slip plane ระนาบล่างสุดที่จะกระทบต่อเสถียรภาพของ มวลหิน UB ปริมาณ 43 MBCM. ในสเกลใหญ่ได้



พื้นผิวระนาบรอยเฉือนจากการต่อเชื่อมข้อมูล Cross sections แสดงคังรูปที่ 4.10

รูปที่ 4.8 ธรณีโครงสร้างแนวรอยเลื่อนจากข้อมูล Pit map และ Cross sections แนว N 15 ถึง N 30 ตามระบบพิกัดการ์ทีเซียน

Model boundary

Cross sections



รูปที่ 4.10 พื้นผิวธรณีโครงสร้าง Bedding shears plane G3 จากการพิจารณาต่อเชื่อมข้อมูล

Cross sections

4.2.2 การขึ้นรูปแบบจำลอง 3 มิติ

การขึ้นรูป เป็นกระบวนการ Trial and Error ที่เริ่มต้นอาจดูไม่ยุ่งยาก แต่ความซับซ้อนจะ เพิ่มมากขึ้นเป็นลำคับ และจะเต็มไปด้วยปัญหาที่ต้องแก้ไข ต้องใช้ความอดทน เวลา การ สร้างสรรก์ ไม่ได้ใช้ทักษะและความรู้ในงานวิศวกรรมโดยตรงแต่เพียงอย่างเดียว

สาเหตุที่ทาง Itasca ผู้พัฒนา 3DEC ประยุกต์ใช้ Rhino เป็นเครื่องมือหลักในการขึ้นรูป แบบจำลอง เนื่องจากซอฟต์แวร์มีความละเอียด (Precision) และยืดหยุ่นสูงในการสร้าง พื้นผิวอิสระและรูปปิด หรือ Solid model เหมาะกับลักษณะปัญหาทางธรณีเทคนิคที่ สัณฐานรูปร่าง และขอบเขตปัญหามีลักษณะคคโค้งไม่สม่ำเสมอ โดยเส้นโค้ง (Curves) พื้นผิว (Surfaces) โครงตาข่าย (Mesh) ที่สร้างขึ้น เป็นผลจากการคำนวณโดยสมการทาง เรขาคณิ ตขั้น สูง เรียกว่า NURBS objects ทั้งนี้ หากผู้สร้างยังไม่ชำนาญ หรือ ไม่เข้าใจลำดับขั้นตอนการสร้างดีพอ จะเสียเวลาเป็นอย่างมากไปกับการปรับแก้พื้นผิว โครงตาข่ายปิด (Watertight surface mesh)

้ ลำคับขั้นตอนการทำงานขึ้นรูปแบบจำลองแสคงคังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลำคับขั้นตอนการทำงานขึ้นรูปแบบจำลองเพื่อนำเข้าวิเคราะห์ใน 3DEC

ในขั้นแรก a) ผลลัพธ์ที่ต้องการคือ Surface mesh ที่สร้างจากการรวมพื้นผิวที่เกี่ยวข้อง ทั้งหมดเข้าด้วยกัน เป็นพื้นผิว NURBS object ปิดหน่วยเดียว เรียกว่า Non-manifold surfaces แล้วจึงสร้างโครงตาข่ายซ้อนขึ้นบนพื้นผิวนั้น (Meshing)

ก่อนทำการสร้าง และรวมพื้นผิวต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็น Non-manifold ต้องทำการย้าย แบบจำลองให้เข้าใกล้จุด Origin (x 0, y 0, z 0 ตามระบบพิกัดการ์ทีเซียน) ให้มากที่สุด เพื่อให้การกำนวณจุดตัดระหว่างพื้นผิวและโครงตาข่ายมีกวามแม่นยำ ไม่เกิด ข้อผิดพลาดระหว่างการตัดแต่ง (Boolean operations i.e., mesh intersecting, mesh trimming) ในที่นี้จึงทำการย้ายระบบพิกัดของแบบจำลอง จากระบบพิกัดเหมือง N 15, W 15, Elev. +400 m.MSL. (x -1500, y + 1500, z + 400) ไปยังจุด Origin โดยที่ ไม่ จำเป็นต้องหมุนแบบจำลอง

ขอบเขตของแบบจำลองกำหนดให้อยู่ในช่วงพิกัด x (-2000, 0) y (0, 1500) และ z (-800, 0) แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ระบบพิกัดของแบบจำลอง

การรวมพื้นผิวทั้งหมด (รูปที่ 4.13) เข้าด้วยกันให้เป็น Non-manifold surfaces คือ ขั้นตอนที่เรียกว่า Non-manifold merge โดยใช้กำสั่ง _NonmanifoldMerge ใน *Rhino* แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 พื้นผิวทั้งหมดที่ใช้รวมกัน และตัดแต่งเป็น Non-manifold surfaces



รูปที่ 4.14 Non-manifold surfaces จากการทำ Non-manifold merge

จากนั้นทำการตัดแต่ง ลบพื้นผิวส่วนเกินที่อยู่นอกขอบเขตพื้นที่แบบจำลองออก ด้วย

จากนั้นทำการตัดแต่ง ลบพื้นผิวส่วนเกินที่อยู่นอกขอบเขตพื้นที่แบบจำลองออก ด้วย กระบวนการ Surfaces extract ใน *Rhino* โดยใช้กำสั่ง _ExtractSrf จะได้ Non-manifold surfaces ในรูปลักษณะที่พร้อมใช้สร้างเป็นพื้นผิวโครงตาข่ายในลำดับถัดไป แสดงดัง รูปที่ 4.15

รูปลักษณ์ภายนอกของ Non-manifold surfaces อาจดูคล้ายกับพื้นผิวโครงตาข่าย (Surface mesh) แต่ในความเป็นจริงแล้วยังไม่มีคุณลักษณะสำคัญของ Mesh ที่ต้อง ประกอบขึ้นจากโครงข่ายของจุดต่อ หรือ Mesh vertices



การสร้าง Surface mesh ใช้คำสั่ง _Mesh ใน Rhino จะได้พื้นผิวโครงตาข่ายตั้งต้น แสดง ดังรูปที่ 4.16

ทั้งนี้ในลำดับถัดไป ขั้นตอน b) บ่อยครั้งที่จำเป็นต้องทำการปรับแก้พื้นผิวโครงตาข่าย หรือ Remeshing เพื่อให้ได้ Surface mesh ที่ถูกต้อง ปิดสนิท ก่อนส่งไปประมวลต่อด้วย ซอฟต์แวร์ช่วยในการสร้าง Grid file หรือ Volume meshing

สาเหตุหนึ่งที่ต้องมีการ Remeshing เนื่องมาจากความละเอียดในการคำนวณรูปร่าง เรขาคณิตของ *Rhino* เอง ซึ่งหากแบบจำลองประกอบขึ้นจากพื้นผิวที่มีความคดโค้งมาก บริเวณที่ระนาบพื้นผิวตาข่ายตัดกันใน *Rhino* เกิดเป็นมุมแหลมองสาน้อย ๆ เมื่อนำมา ผ่านเข้ากระบวนการ Volume meshing ด้วยซอฟต์แวร์ Automesher จะมีโอกาสพบ ปัญหาการเหลื่อมทับและตัดกันเองของ Mesh (Mesh self-intersection) มากขึ้นตามไป ด้วย



รูปที่ 4.16 การสร้างพื้นผิวโครงตาข่าย (Surface meshing)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้ซอฟต์แวร์ *KUBRIX Geo* มักจะพบปัญหา Mesh selfintersection บ่อยครั้ง และถ้าหากซอฟต์แวร์ไม่สามารถกำนวณแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ด้วยอัลกอรึทึมของตัวซอฟต์แวร์เอง ซอฟต์แวร์จะหยุดการทำงาน และรายงานผลเป็น Error message แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 Error message ในขั้นตอน Volume meshing ด้วย KUBRIX Geo Automesher

การปรับแก้โครงตาข่าย ต้องทำการค้นหา Mesh vertices ในจุดที่มีการตัดกันเองตาม รายงานจาก Error message ไปทีละจุดที่พบปัญหา (ตัวอย่างรูปที่ 4.18) แล้วทำการ "ซ่อม" โดยการลบหน้าตาข่าย (Mesh face) อุด เชื่อม หรือ ปรับยุบ Mesh vertices ด้วย วิธีการใดวิธีการหนึ่ง เช่น การใช้กำสั่ง _AlignMeshVertices ใน *Rhino* จนกว่าจะได้ พื้นผิวโครงตาข่ายปิด ที่มีความถูกต้องเพียงพอใช้งานต่อไปได้

ghts reserved

ภายหลัง Itasca ได้ปรับปรุงและพัฒนาซอฟต์แวร์ *Griddle* Automesher ver.1.00, (Itasca Consulting Group, 2016) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งจากการนำมาทคสอบใช้งาน แทบ ไม่พบปัญหาจากกรณี Mesh self-intersection อีก แต่ในบางจุดจะพบเจอข้อผิดพลาดของ การ Remeshing อยู่บ้าง ทั้งนี้มักเกิดจากขั้นตอน Surface extract ซึ่งสามารถตรวจสอบ และซ่อมให้เป็นโครงตาข่ายปิดได้ง่ายขึ้นกว่าเดิมมาก



รูปที่ 4.18 Mesh vertices ที่ปิดไม่สนิท

เมื่อได้พื้นผิวโครงตาข่ายที่ปิดถูกต้องสมบูรณ์เป็น Watertight surface mesh (รูปที่ 4.19) ลำดับถัดไปในขั้นตอน c) ทำการ Volume meshing ด้วย Automesher ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็น Grid file หรือ ชุดกำสั่งสร้าง Tetrahedral blocks (รูปที่ 4.20) ให้ประกอบกันขึ้นเป็น รูปร่าง และขอบเขตของแบบจำลองที่ต้องการ เมื่อนำเข้า *3DEC* code เพื่อเตรียมทำการ กำนวณวิเคราะห์ต่อไปในขั้นตอน d)



รูปที่ 4.20 ชุดคำสั่ง Grid file เพื่อนำเข้าแบบจำลอง 3DEC

4.3 แบบจำลอง 3 มิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพผนังบ่อเหมือง

4.3.1 การนำเข้าแบบจำลอง (Model import) เข้าสู่ Numerical code - 3DEC

นำเข้า Grid file หรือ ชุดคำสั่งสร้าง Tetrahedral blocks ประกอบขึ้นเป็นรูปร่างและ ขอบเขตของแบบจำลองผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall ใน *3DEC* code ver.5.20 โดยจำลองเป็น 2 กรณี คือ 1) แบบจำลองของ Blocks มวลหิน UB ปริมาณ 43 MBCM ที่ ทิ้งไว้ตามแนวคิดการปรับแบบของเหมืองแม่เมาะ และ 2) แบบจำลองที่มีมวลค้ำยันอยู่ ด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 แบบจำลอง 3DEC พื้นที่ C1 West-wall ตามแบบงานขุด โครงการ 40 ปี



รูปที่ 4.22 แบบจำลอง *3DEC* พื้นที่ C1 West-wall ที่มีมวลค้ำยันค้านล่าง

4.3.2 การตัดธรณีโครงสร้างและเตรียมแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ (Joints cutting and Model setup)

ตามสมมติฐานในการศึกษาวิจัย กำหนดให้มวลหินเป็น Rigid blocks ซึ่งแนวโน้มทิศ ทางการเกลื่อนตัวขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของธรณีโครงสร้างเทียบกับหน้าเปิด

นำข้อมูลทิศทางการวางตัวของธรณีโครงสร้างผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall จาก Pit mapping (ภาคผนวก ค) มาประเมินทางสถิติ เพื่อกำหนดค่าพิสัยในการตัดธรณี โครงสร้าง หรือ Joints cutting ของแบบจำลอง สรุปค่าดังตารางที่ 4.1 โดยมีหลักการ กำหนดทิศทางการวางตัวของธรณีโครงสร้างในแบบจำลอง *3DEC* แสดงดังรูปที่ 4.23

|--|

Structure	Minimum*	Average, x	Maximum *
Bedding strike	16 ⁰	95 ⁰	173°
Bedding dip direction ** (Strike + 90 [°])	106°	185°	263°
Bedding dip	6°	13 ⁰	21 [°]

* Maximum and minimum = $\overline{x \pm 2} \cdot SD$, where SD estimated from "the 3σ Rule".

** Minimum dip direction is the orientation of bedding dip, nearly perpendicular to the open cut, i.e. expected the most adverse condition.



รูปที่ 4.23 การกำหนดทิศทางและการเอียงตัวของระนาบธรณี โครงสร้างในแบบจำลอง 3DEC

(Itasca Consulting Group, 2007)

จากรูป มุม α หรือ Dip angle เป็นมุมบวก เมื่อวัดจากระนาบราบ (Horizontal, x-y plane) และ มุม β หรือ Dip direction เป็นมุมบวก เมื่อวัดเทียบกับทิศเหนือไปตามเข็มนาฬิกา (มุม Azimuth) กรณีแบบจำลองผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall ทิศทาง Dip direction จะเป็นค่ามุม วัคเทียบกับแนวNorthing ของแบบจำลอง ซึ่งเอียงทำมุมทวนเข็มนาฬิกากับทิศเหนือ ประมาณ 24.5°

อีกประเด็นที่ต้องพิจารณาในการเตรียมแบบจำลอง *3DEC* เพื่อการวิเคราะห์เสลียรภาพ ให้สมเหตุสมผลกับรูปแบบการเคลื่อนตัวของมวลหินที่น่าจะเกิดขึ้น คือ การตัด โครงสร้างแนวรอยแยกที่วางตัวตั้งฉากหรือกึ่งตั้งฉากกับแนวธรณี โครงสร้างชั้นหิน หรือ Orthogonal cross bedding joints คังปรากฏให้พบเห็นอย่างชัคเจนบ่อยครั้งหลังการ พังทลายของมวลหิน Claystone หรือบริเวณหน้าขุดในเหมืองแม่เมาะ แสดงคังรูปที่ 4.24 ถึง 4.26



รูปที่ 4.24 การเลื่อนตัวพังทลายของบล็อกมวลหิน UB ตามระนาบ พื้นที่ SE East-wall (กองวิศวกรรมธรณี เหมืองแม่เมาะ, 2559)



รูปที่ 4.25 รอยแตกตามแนวรอยแยก Orthogonal joints ในมวลหิน Claystone ที่ปรากฎชัด หลังการพังทลาย



รูปที่ 4.26 ลักษณะรอยแยกเชิงลาคหน้าขุดข้างเกียงพื้นที่ C1 West-wall

ในแบบจำลองจะกำหนดให้แนวรอยแยกเหล่านี้เป็น Random joints cutting ในทิศทาง ตั้งฉากกับระนาบชั้นหินทั้ง 2 ทิศทาง (Orthogonal jointing) แต่ปัญหาสำคัญคือ ไม่ สามารถใช้ค่าระยะห่างระหว่างแนวรอยแยก (Joint spacing) ที่วัดจากภาคสนามมาเป็น พารามิเตอร์ในการตัดบล็อกในแบบจำลองได้โดยตรง

เหตุผลเนื่องมาจาก Joint spacing ที่ได้จากการวัดข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การใช้เทคนิค Photogrammetry (ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่-เหมืองแม่เมาะ, ชันวาคม 2558, ภาคผนวก ง) พบว่า ค่าที่วัดได้มีระยะน้อยมาก ตั้งแต่ระยะประมาณ 10 เซนติเมตร ถึงมากที่สุดประมาณ 1 เมตร เท่านั้น สาเหตุมาจาก Material เนื้อหิน Claystone บริเวณผิวหน้าขุดเกือบทั้งหมดเสื่อมสภาพไปตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพ อากาศอย่างรวดเร็วมาก ทำให้เกิดรอยแยก รอยแตก ซึ่งถึงแม้ส่วนใหญ่จะมีทิศทางขนาน ไปตามแนว Bedding หรือโครงสร้างเดิม แต่รอยแตกย่อยเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นใหม่ ภายหลัง ซึ่งจะไม่สื่อถึงสภาพจริงดั้งเดิมก่อนการเปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างการเสื่อมสภาพของเนื้อหิน Claystone ในเหมืองแม่เมาะ แสดงคังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเสื่อมสภาพของเนื้อหิน Claystone ในเหมืองแม่เมาะ ตามการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ความชื้น

เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแบบจำลองผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall ซึ่งมีขนาด ถึง 1,500×2,000 m² การตัด Joints ด้วยระยะเพียงไม่กี่เซนติเมตร ถึงระยะไม่เกิน 1 เมตร จะทำให้มีบล็อกย่อยขนาดเล็ก ๆ มากมายเป็นจำนวนหลายแสนบล็อก ไม่เหมาะกับการ พิจารณาสเกลงานขนาดใหญ่ในทางปฏิบัติ (การจำลองโดยใช้แบบจำลองอนุภาค Particle code เช่น PFC จะเหมาะสมมากกว่า) ซึ่งในการทดลองตัด สามารถทำขนาด Block size ได้เล็กสุดขนาด 10×10×10 m³ หากเล็กย่อยลงมากกว่านี้ จะไม่สามารถตัดได้ เนื่องจากพื้นที่ Memory ในการเก็บข้อมูล Blocks, Faces และ Contacts ของแบบจำลอง มีไม่เพียงพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทรัพยากร Hardware ที่มีใช้งานอยู่ด้วย

เพื่อให้การจำลองเหมาะสมกับสเกลของปัญหา จึงต้องพิจารณาขนาค Block size ให้ สอคกล้องกับ Geometry ผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall ซึ่งสัคส่วนของ Block size จากข้อมูล Photogrammetry คือระยะห่างระหว่าง Orthogonal cross bedding joints มี สัดส่วนรูปร่าง ในอัตราส่วน กว้าง : ยาว เท่ากับ 1 : 1 โดยในสเกลใหญ่ขึ้นจะพิจารณา ขยายขนาค Block size ตามสัคส่วนคังกล่าวขึ้นเป็นลำคับ และทคสอบจำลองในขั้น ต่อไป

4.3.3 การทดสอบจำลองเพื่อหาขนาด Block size ที่เหมาะสม

การทดสอบใช้แบบจำลองตามรูปที่ 4.1 ของมวลหิน UB ปริมาณ 43 MBCM ที่ทิ้งไว้ ตามแนวกิดการปรับแบบของเหมืองแม่เมาะ เป็นฐานในการทดสอบ

แบบจำลองประกอบขึ้นจาก Tetrahedra จำนวน 316 blocks แสดงดังรูปที่ 4.28 จากนั้น ทำการตัด Joint cutting ตามค่าเฉลี่ยของ Bedding orientation (Dip direction ตาม Northing ของแบบจำลองเท่ากับ 160.5 องศา และ Dip 13 องศา)



รูปที่ 4.28 แบบจำลองมวลหิน UB ปริมาณ 43 MBCM. ก่อนตัด Joint cutting

ตัด Joint cutting โดยกำหนดให้ Spacing ระหว่าง Bedding shears plane หรือ Potential slip planes แต่ละชั้นคงที่ ๆ ระยะ 20 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างประมาณการ โดยคิดจาก ระยะตั้งแต่ Bottom Q ลงไปถึง Bedding shears plane สำคัญในมวลหิน UB คือ ระนาบ G1/G1A (ใน UB มักจะตรวจพบแนวรอยเฉือนลักษณะเดียวกันนี้เป็นช่วงๆ ในระยะห่าง ตั้งแต่ 10 ถึง 60 เมตร)

ขนาด Block size จะแปรตาม Joint spacing ระยะต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.2 เริ่มตั้งแต่ Block size ขนาดหยาบ ใหญ่ประมาณ 20×300×300 m³ จนกระทั่งย่อยเล็กลงไปถึง

20×20×20 m³ ซึ่งเป็นขนาดที่ยังพอตัดได้ด้วยทรัพยากร Hardware ที่มีใช้งาน โดยจะ เท่ากับขนาดของ Bench height หน้างานขุดประมาณ 2 ชั้น ณ เหมืองแม่เมาะ

No.	Slab thickness, m.	Joint spacing, m.	Block size (Slab thickness × Orthogonal jointing), m.×m.×m.
1	20	300	20×300×300
2	20	200	20×200×200
3	20	100	20×100×100
4	20	50	20×50×50
5	20	45	20×45×45
6	20	40	20×40×40
7	20	35	20×35×35
800		30	20×30×30
9	20	25 e S	20×25×25
10	20	20	20×20×20

ตารางที่ 4.2 แบบจำลองเพื่อทคสอบหาขนาค Block size ที่เหมาะสม

แบบจำลองหลังจากตัด Joint cutting แล้วแสดงดังรูปที่ 4.29 โดยกำหนดสมบัติกำลัง ของ Joints แสดงดังตารางที่ 4.3 แล้วจึง Run แบบจำลองให้ระบบเข้าสู่สมดุลตั้งต้น (Initial equilibrium) ก่อนด้วยกำสั่ง SOLVE



รูปที่ 4.29 Joints plot แสดงการตัด Joint cutting บนาด Block size 20×20×20 m³

เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว ในขั้นต่อไป กำหนดสมบัติกำลังของ Joints ให้ลดลงมาอยู่ ในช่วงค่าปกติ (Joints cohesion, c และ Tensile strength เท่ากับ 0 Pa) แล้ว Run แบบจำลองไปข้างหน้าอีก 2,000 steps โดยติดตามสังเกตเปรียบเทียบผล จากข้อมูล รูปแบบและขนาดการเคลื่อนตัว

ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนตัว (Deformation pattern) แสคงเป็น Contour ลำดับชั้นสี ดังรูปตัวอย่างที่ 4.30 และ 4.31 ซึ่งพบว่า รูปแบบการเคลื่อนตัวสอดคล้อง และคล้ายคลึงกัน คือ บริเวณที่มีการเคลื่อนตัวสูงจะครอบคลุมช่วง Northing (y) 200 ถึง 500 และบริเวณที่การเคลื่อนตัวน้อยกว่าครอบคลุมช่วง y 700 ถึง 1100

Il rights reserved

Joints type	Joints name	Joints IDs	Joint material no.	* Shear strength parameter, c (Pa)	* Shear strength parameter, φ (degree)	Tensile strength, (Pa)
1	Major faults	6, 8, 9, 10	181340	1e20	17	1e20
2	Cross-cut bedding joints	88,99	2	1e20	20	1e20
3	Bedding shears G3	3	3	1e20	12	1e20
4	Potential slip planes	77	4	1e20	12	1e20
5	Imported blocks contacts	241	บทพ	1e20	33.5	1e20

ตารางที่ 4.3 สมบัติกำลังของ Joints ในแบบจำลองทคสอบหา Block size ที่เหมาะสม

*Assumed high strength joints for the 1st equilibrium.



รูปที่ 4.31 Displacement magnitude contour plot ขนาด Block size 20×50×50 m³

ผลการเปรียบเทียบขนาดการเคลื่อนตัว (Deformation magnitude) จากการกำหนด Monitoring point ในแบบจำลอง (ใช้คำสั่ง HISTORY ติดตามเก็บข้อมูลผลการ ตอบสนองของแบบจำลองต่าง ๆ เช่น แรงลัพธ์ส่วนเกิน การเคลื่อนตัว เป็นต้น) แสดงดัง กราฟรูปที่ 4.32 พบว่า ขนาดการเคลื่อนตัวขึ้นอยู่กับขนาด Block size โดยแบบจำลองที่ มี Block size ขนาดเล็ก จะมีขนาดการเคลื่อนตัวสูงกว่าแบบจำลองที่มี Block size ขนาด ใหญ่กว่า นอกเหนือไปจากปัจจัยเรื่อง Contacts stiffness หรือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดการเคลื่อนตัว ซึ่งแปรผันตรงกับหน่วยแรง โดยในที่นี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ ทั้งใน



ทิศทางตั้งฉากกับ Contacts คือ Normal stiffness, $k_n = 10e9 Pa/m$, และทิศทางขนานไป กับ Contacts คือ Shear stiffness, $k_s = 5e9 Pa/m$ (ลีลาสุขเสรี และคณะ, 2555)

รูปที่ 4.32 กราฟ Displacement magnitude ตาม Calculation steps ของ Block size ขนาดต่าง ๆ

จากผลการทดสอบดังกล่าว เนื่องจากรูปแบบการเคลื่อนตัวมีลักษณะคล้ายคลึงกันใน ทุกๆ ขนาด Block size ดังนั้น การเลือก Block size สำหรับการจำลอง Blocks มวลหิน UB จึงพิจารณาจากขนาดที่พอเหมาะ ที่จะทำให้แบบจำลองไม่หยาบจนเกินไปนัก มี ความละเอียดเพียงพอต่อการพิจารณาปัญหาเสลียรภาพของพื้นที่ และไม่กระทบกับเวลา การกำนวณแต่ละรอบมากจนเกินไป

ขนาดของการเคลื่อนตัวที่แปร ไปตามความละเอียด หรือ Block size ที่มีขนาดเล็กลงเป็น ปัจจัยที่พิจารณารองลงมา เนื่องจากการศึกษาวิเคราะห์ครั้งนี้ต้องการทราบรูปแบบการ เคลื่อนตัว บริเวณพื้นที่ ๆ มีแนวโน้มจะเกิดปัญหามากที่สุดเป็นหลัก การพิจารณาใน ประเด็นขนาดการเคลื่อนตัวที่แปรผันกับ Block size จะเป็นประโยชน์สามารถนำไปใช้ ภายหลัง เมื่อต้องการปรับแบบจำลองเทียบกับข้อมูลการติดตามตรวจวัดการเคลื่อนตัว ของผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall ในอนาคต

การตั้งต้นแบบจำลอง (Model setup) และเลือกใช้พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิง ความน่าจะเป็นของเสถียรภาพผนังบ่อเหมืองพื้นที่ C1 West-wall สรุปดังตารางที่ 4.4

Parameters, unit	Values, unit	Remarks	
Block size (m ³)	20×20×20	Approximated smallest block size, would be varied during the <i>Approximate Monte Carlo</i> simulation, due to joints spacing and orientation variation.	
Block material density (kg/m ³)	1,950	Claystone material density	
Contacts normal stiffness* (Pa/m)	10e9	967 -	
Contacts shear stiffness* (Pa/m)	5e9 BRS		
Orthogonal cross bedding joints spacing (m)	As random variable	HCV=100 LCV=20 Mean=60 SD=13.33	
Potential slip planes spacing (m)	As random variable	HCV=60 LCV=10 Mean=35 SD=8.33	

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ตั้งต้นแบบจำลอง (Model setup parameters)

Parameters, unit	Values, unit	Remarks
Potential slip planes dip direction (deg) (rotated counter clockwise 24.5 deg to conform the model)	As random variable	HCV=238.5 LCV=81.5 Mean=160.5 SD=26.2
Potential slip planes dip (deg)	As random variable	HCV=21 LCV=6 Mean=13 SD=2.5
Orthogonal cross bedding joints shear strength parameter,** cohesion c (Pa)	As random variable	HCV=100e3 LCV=0 Mean=50e3 SD=16.67e3
Orthogonal cross bedding joints shear strength parameter,** friction angle, ϕ (deg)	As random variable	HCV=26 LCV=21 Mean=23.5 SD=0.83

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) พารามิเตอร์ตั้งต้นแบบจำลอง (Model setup parameters)

Parameters, unit	Values, unit	Remarks
Major faults shear strength parameter,***	0	
Conesion, c (Pa) Major faults shear strength parameter,*** friction angle, ϕ (deg)	As random variable	HCV=23 LCV=12 Mean=17.5 SD=1.83
Potential slip planes shear strength parameter,*** cohesion c (Pa)		·魏 25
Potential slip planes shear strength parameter,*** friction angle, ϕ (deg)	As random variable	HCV=23 LCV=12 Mean=17.5 SD=1.83

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) พารามิเตอร์ตั้งต้นแบบจำลอง (Model setup parameters)

* ลลาสุขเสรี และคณะ, 2555 ** Longworth, 1981 referred by Aursirisuk, 1985 *** Mae Moh Geotechnical Report, 1985 และ มุ่งพยาบาล, 2548

4.3.4 การ Run แบบจำลองเพื่อหาค่า Factor of Safety (FS)

จากการทดสอบ ฯ พบอีกหนึ่งปัญหาสำคัญคือ เมื่อต้องการหาค่า FS จากการใช้คำสั่ง SOLVE fos โดยใช้เทคนิค Shear Strength Reduction (SSR) พบว่า ทุกแบบจำลองให้ค่า FS ต่ำกว่า 1 (Less than unity) ทั้งหมด จนทำให้ Probability of Failure (PoF) เท่ากับ 100% ซึ่งถือว่าผลลัพธ์ที่ได้ไม่สมเหตุสมผลเป็นอย่างยิ่ง และเมื่อพิจารณารูปแบบการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง แสคงเป็น Contour ลำคับชั้นสี คังรูปตัวอย่างที่ 4.33 มีความสอคคล้องกับรูปแบบการเคลื่อนตัวในขั้นตอนการทคสอบ หาขนาค Block size ที่เหมาะสม โคยพบว่า บริเวณที่มีการเคลื่อนตัวสูงจะครอบคลุมช่วง Northing (y) 200 ถึง 500 และบริเวณที่การเคลื่อนตัวน้อยกว่าอยู่ในช่วง y 700 ถึง 1100



รูปที่ 4.33 Displacement magnitude contour plot แสดงบริเวณที่มีการเกลื่อนตัวของมวลหินมากกว่า พื้นที่อื่น ๆ ในแบบจำลองเดียวกัน

ขนาดการเกลื่อนตัว มีหน่วยเล็กมากในระดับไม่กี่ มิลลิเมตร หรือ น้อยกว่านั้น สังเกตได้ จากการ Run เพื่อวิเคราะห์หาค่า FS จะแล้วเสร็จด้วยรอบการคำนวณ (Step / Cycle) ไม่ เกิน 1,000 steps ทั้งนี้ หากเทียบกับการ Run แบบจำลองโดยทั่วไปที่ประกอบขึ้นด้วย Rigid blocks จำนวนมากถึงกว่า 20,000 blocks เช่นนี้ จะใช้รอบการคำนวณมากกว่า ประมาณ 2,000 ถึง 4,000 steps

และเมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะการเคลื่อนตัว หรือ Mode of Failure ตัวอย่างแสดงดัง รูปที่ 4.34 และ 4.35 พอที่จะสันนิษฐานได้ว่า การที่แบบจำลองให้ค่า FS < 1 นั้น สืบเนื่องจากเกิดการเลื่อนไถล (Slipping) และแยกตัวออกจากกันระหว่าง Blocks เนื่องจากแรงดึง (Tensile failure)



รูปที่ 4.34 Displacement magnitude contour plot กับสัญลักษณ์สีแสดงการเลื่อน และแขกออกระหว่าง Blocks

ซึ่งในแบบจำลองที่สร้างจากการตัดกันของ Joint set จำนวนมากนี้ การขยับเลื่อน และ แขกออกระหว่างรอยต่อ สาเหตุหลักมาจากพารามิเตอร์สมบัติกำลังรับแรงเฉือน และแรง ดึงของแนว Joints ถูกกำหนดให้เป็นก่าประมาณการที่ใกล้เกียงกับสภาพจริง ณ ขณะ พังทลาย ด้วยกำลังต่ำ (The most likely low strength parameters) โดยให้มีก่าแรงยึด เหนี่ยวของ Claystone intact cohesion = 500 kPa และลดกำลังลงเป็น 100 kPa สำหรับ Rock mass (Longworth, 1981) โดยไม่มีกำลังรับแรงดึง (Tensile strength negligible)

Copyright[©] by Chiang Mai University All rights reserved



รูปที่ 4.35 Displacement magnitude contour plot แสดงบนภาพตัด Northing (y) 300

ทั้งนี้ เมื่อวิเคราะห์ข้อนกลับโดยใช้ Shear Strength Reduction Factor จากแต่ละกรณีเป็น ฐาน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์สมบัติกำลังรับแรงเลือนสำหรับ Orthogonal cross bedding joint ในมวลหิน Claystone ที่จะทำให้ค่า FS = 1 โดยไม่คิดกำลังรับแรงดึงเช่นเดิม ต้องมี ค่า Cohesion สูงขึ้นเท่ากับ 250 kPa และค่า Friction angle ของทุก ๆ Contacts อยู่ ระหว่าง 54 ถึง 66 องศา ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินจริงไปมาก

จากปัญหาดังกล่าว เมื่อแบบจำลอง *3DEC* ให้ค่า FS < 1 โดยใช้คำสั่ง SOLVE fos ด้วย เทคนิค SSR ซึ่งเป็นคำสั่งอัตโนมัติของตัว Numerical code เอง ไม่สามารถตอบปัญหา การเคลื่อนตัวที่เป็นไปได้ของระบบ Blocks มวลหินทั้งระบบที่ต้องการได้ เนื่องจากค่า FS แสดงถึงการเลื่อนและแยกออกระหว่างบล็อกเท่านั้น ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัว พังทลายของมวลรวม หรือ กลุ่มบล็อก

แนวทางเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น จึงต้องทำการ Run แบบจำลองทั้งหมด ด้วยการลดทอน พารามิเตอร์สมบัติกำลังด้วย Strength Reduction Factor (SRF) ด้วยตนเอง (Manual SSR) เพื่อหา Factor ที่จะทำให้แบบจำลองเกิดการพังทลายของระบบ Blocks ใน ภาพรวม ด้วยการเฝ้าติดตามสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนตัวของกลุ่มบล็อก ระหว่างที่ Run แบบจำลองไปด้วย อีกประการหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือ เกณฑ์การหยุดคำนวณ (Stopping criteria) ที่จะถือว่า แบบจำลองได้แสดงถึงสภาวะของการพังทลายแล้ว ในที่นี้ จะพิจารณาจากแรงลัพธ์ ส่วนเกิน (Unbalanced force) ซึ่งเป็นผลจากความเร่งของการเคลื่อนที่ของมวลบล็อกใน ระบบ (F=m×a) เป็นเกณฑ์ตามขนาดของ Block size ที่ในงานวิศวกรรมธรณีของเหมือง แม่เมาะถือเป็นขนาดการพังทลายระดับ Bench scale คือ บล็อกที่มีขนาดเล็กกว่า 10×10×10 m³ (1,000 cu.m.) ซึ่งคิดเป็นแรงส่วนเกินเท่ากับ 1.91e+7 N (มวล×ความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วง=Volume×Density×g) จะถูกใช้เป็น Stopping criteria ในการ Run แบบจำลองจากกำสั่ง SOLVE เพื่อหาก่า FS ด้วยเทคนิค Manual SSR

ลักษณะกราฟ Unbalanced force ในแบบจำลอง เมื่อระบบเข้าสู่สมคุล (ยังไม่เกิดการ พังทลาย) และเมื่อระบบไม่เข้าสู่ภาวะสมคุล (เกิดการเคลื่อนที่ของกลุ่มบล็อกมวลหิน ขนาดใหญ่) แสดงคังรูปที่ 4.36



a) ระบบเข้าสู่ภาวะสมคุล, b) ระบบมีการเคลื่อนที่ของบล็อกขนาคใหญ่กว่า Stopping criteria