



การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหิน
โดยใช้การจำแนกมวลหิน
Android Application Development for Estimating Rock Mass Stability
Using Rock Mass Classification

พันทวี พันทวีศักดิ์
Pantawee Pantaweesak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mining and Materials Engineering
Prince of Songkla University
2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหิน
โดยใช้การจำแนกมวลหิน
Android Application Development for Estimating Rock Mass Stability
Using Rock Mass Classification

พันทวี พันทวีศักดิ์

Pantawee Pantaweesak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mining and Materials Engineering
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยใช้การจำแนกมวลหิน
ผู้เขียน	นายพันทวี พันทวีศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร.พงศ์พัฒน์ สันทะมิโน)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูญ มาศนิยม)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.دنุพล ตันนโยภาส)

.....กรรมการ
(ดร.พงศ์พัฒน์ สันทะมิโน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.دنุพล ตันนโยภาส)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.พงศ์พัฒน์ สนทะมิโน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.دنุพล ตันนโยภาส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายพันทวี พันทวีศักดิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายพันทวี พันทวีศักดิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยใช้การจำแนกมวลหิน
ผู้เขียน	นายพันทวี พันทวีศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นงานที่ต้องดำเนินการอยู่ในสภาพที่แวดล้อมไปด้วยมวลหิน ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดการพิบัติจนสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ปฏิบัติงานได้ หลักการจำแนกมวลหินเป็นวิธีการประเมินเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้นที่รวดเร็วและมีนัยสำคัญ ประกอบกับในปัจจุบันเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนเป็นสิ่งที่แพร่หลายอย่างกว้างขวาง งานวิจัยนี้จึงพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยใช้การจำแนกมวลหิน เพื่อให้ผู้ใช้ติดตั้งบนสมาร์ทโฟนและประเมินเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว โปรแกรมประยุกต์นี้เสนอแนะเสถียรภาพมวลหินและการค้ำยันเบื้องต้นซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยในงานวิศวกรรม ภายในโปรแกรมประยุกต์ประกอบด้วยหลักการจำแนกมวลหิน 4 หลักการ ได้แก่ การประเมินมวลหิน (RMR) สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินของงานอุโมงค์และฐานรากเขื่อน การประเมินลาดหิน (SMR) สำหรับการประเมินเสถียรภาพลาดหิน การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Q-system) สำหรับประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นสำหรับอุโมงค์ที่สร้างขึ้นจากการระเบิด และดัชนีกำลังธรณี (GSI) สำหรับประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าอัตราส่วนแรงยึดเกาะต่อกำลังอัดแกนเดียวของมวลหิน และค่าแรงเสียดทานภายในของมวลหิน ตระการการคำนวณทั้งหมดในโปรแกรมประยุกต์ได้ถูกตรวจสอบเทียบกับการคำนวณแบบดั้งเดิมแล้วพบว่ามีความถูกต้องตามหลักการเดิมทุกประการ โปรแกรมประยุกต์ PSU-RMC นี้ได้ใช้งานกับ 5 กรณีศึกษา ได้แก่ ลาดหินทรายแทรกสลัหินดินดาน ผนังบ่อเหมืองลาดหินฮอว์นเพลส ผนังบ่อเหมืองลาดหินเคลย์ที่มีชั้นถ่านหินแทรกอุโมงค์ขนส่งทางเดียวรูปเกือกม้าในเขตหินปูนวางชั้น และผนังบ่อเหมืองลาดหินปูนที่เกิดร่วมกับหินโดโลไมต์ เพื่อทดสอบการใช้งานจริงและเทียบผลการประเมินกับงานวิจัยอื่น พบว่าผลประเมินให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

คำหลัก: โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์ การจำแนกมวลหิน เสถียรภาพมวลหิน

Thesis Title	Android Application Development for Estimating Rock Mass Stability Using Rock Mass Classification
Author	Mr.Pantawee Pantaweesak
Major Program	Mining and Materials Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

Mining industries are often operated in rock mass conditions which can be caused rock mass failures prone to risking life and property of operators. Rock mass classification methods are preliminary rock mass stability estimation that obtained rapid and significant results. Nowadays, smartphone is the most popular digital devices in the world. The objective of this research is to develop an Android application for estimating preliminary rock mass stability using rock mass classification methods. The users can perform this application to estimate rock mass stability instantly by their Android smartphone. This introducing application makes engineering work more safety and suggests preliminary support. Four rock mass classification methods have been programmed in the application, consisted of Rock Mass Rating (RMR) for estimating rock mass stability of tunnel and dam foundation, Slope Mass Rating (SMR) for estimating rock slope stability, Rock Mass Quality (Q-system) for estimating preliminary support methods for tunnel that constructed from drilling and blasting and Geological Strength Index (GSI) for estimating preliminary rock mass properties, especially cohesion and uniaxial compressive strength ratio and internal friction angle of rock mass. Comparison between calculation logics of this application and traditional calculation is acceptable. The PSU-RMC was applied with case studies in 5 conditions: the sandstone intercalated shale slope, the hornfels slope of quarry, the claystone with coal seam slope of open pit mine, the horseshoe adit in bedded limestone area and the limestone with dolomite slope of quarry. The results of case studies of the application were compared with some literature reviews. All of the case study results are consistent.

Keywords: Android application, Rock mass classification, Rock mass stability

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เพราะได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาค้นคว้าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.พงศ์พัฒน์ สนทะมิโน และ รองศาสตราจารย์ ดร.ตฤพล ตันนโยภาส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติ การจัดการเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการปรับปรุงโปรแกรมประยุกต์ให้ถูกต้องเหมาะสมมากยิ่งขึ้นจนเสร็จสมบูรณ์ได้ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทำการวิจัย ช่วยเหลือจัดการด้านงานเอกสารและประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณบริษัท เขابันไดนางศิลา จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลโครงสร้างมวลหินในพื้นที่เหมืองแร่ที่ยังดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกและแนะนำบริเวณเก็บข้อมูลที่เหมาะสมให้

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทำการวิจัยและให้งบประมาณสนับสนุนค่าเดินทางเพื่อไปเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนการศึกษาและงบประมาณสนับสนุนค่าเดินทางเพื่อไปเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยให้คำปรึกษาเรื่องวิทยานิพนธ์ และให้โอกาสทำงาน One Stop Service ระหว่างการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจซึ่งกันและกันตลอดการศึกษาวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วศ.จิรายุส วิวัฒนานุกูล ที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามเพื่อทำกรณีศึกษา และ วศ.จุฑารัตน์ กวักแก้ว ผู้เป็นแรงใจเสมอมา

ประโยชน์และคุณค่าจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่บิดา-มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ เป็นกำลังใจ และหล่อหลอมข้าพเจ้าจนถึงปัจจุบัน

พันทวี พันทวีศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating, RMR)	2
การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating, SMR)	8
การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality, Q)	11
ดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index, GSI)	18
ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	21
โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหิน	23
วัตถุประสงค์	25
วิธีการดำเนินงาน	26
ผลและการวิเคราะห์	27
โมดูลการจำแนกมวลหิน	27
โมดูลจัดการข้อมูล	34
การใช้งานโปรแกรมประยุกต์กับกรณีศึกษา	35
สรุปผล	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก ก	44
ภาคผนวก ข	53
ภาคผนวก ค	66

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เกณฑ์ประเมินกำลังของหินทดสอบ (R_1)	2
ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยจากตัวอย่างหินขนาด 50 มิลลิเมตร	3
ตารางที่ 3 เกณฑ์ประเมินดัชนีคุณภาพหิน (R_2)	4
ตารางที่ 4 เกณฑ์ประเมินระยะห่างของความไม่ต่อเนื่อง (R_3)	4
ตารางที่ 5 เกณฑ์ประเมินสภาพของความไม่ต่อเนื่องโดยละเอียด (R_4)	5
ตารางที่ 6 เกณฑ์ประเมินสภาพของความไม่ต่อเนื่องอย่างง่าย (R_4)	5
ตารางที่ 7 เกณฑ์ประเมินสภาพน้ำใต้ดิน (R_5)	6
ตารางที่ 8 การประเมินผลกระทบของการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องที่มีผลต่ออุโมงค์	6
ตารางที่ 9 การประเมินผลกระทบของการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องที่มีผลต่อฐานเขื่อน	6
ตารางที่ 10 เกณฑ์ประเมินการวางตัวของความไม่ต่อเนื่อง (R_6)	6
ตารางที่ 11 เกณฑ์ประเมินระดับชั้นเสถียรภาพมวลหินจากค่า RMR	7
ตารางที่ 12 เกณฑ์ประเมินการค้ำยันที่เหมาะสมสำหรับอุโมงค์หิน	7
ตารางที่ 13 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบปรับแก้จากการวางตัวของแนวแตก (F_1, F_2, F_3)	8
ตารางที่ 14 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบปรับแก้จากวิธีการขุดเจาะ (F_4)	9
ตารางที่ 15 เกณฑ์ประเมินระดับชั้นเสถียรภาพลาดหินจากค่า SMR	9
ตารางที่ 16 เกณฑ์ประเมินวิธีปรับปรุงเสถียรภาพที่เหมาะสมจากค่า SMR สำหรับลาดหิน	10
ตารางที่ 17 การคำนวณค่าตัวประกอบปรับแก้ F_1 , F_2 และ F_3 (Tomas et al., 2007)	10
ตารางที่ 18 การคำนวณค่าตัวประกอบปรับแก้ F_1 และ F_3 (Zheng et al., 2016)	11
ตารางที่ 19 เกณฑ์ประเมินจำนวนชุดแนวแตก (J_n)	12
ตารางที่ 20 เกณฑ์ประเมินระดับความขรุขระของแนวแตก (J_r)	12
ตารางที่ 21 เกณฑ์ประเมินระดับการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (J_a)	13
ตารางที่ 22 การประมาณค่ามุมเสียดทานภายใน (องศา) จากการคำนวณด้วย J_r และ J_a	13
ตารางที่ 23 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบลดลงจากน้ำในแนวแตก (J_w)	14
ตารางที่ 24 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบลดลงจากความเค้น (SRF)	14
ตารางที่ 25 เกณฑ์จำแนกระดับชั้นมวลหินจากค่า Q	15
ตารางที่ 26 เงื่อนไขการคำนวณค่าตัวประกอบผนัง (Q_w)	15
ตารางที่ 27 ค่าอัตราส่วนค้ำยันการเปิดหน้างาน (ESR)	16
ตารางที่ 28 เงื่อนไขอุโมงค์ที่ไม่ต้องค้ำยันตามเกณฑ์จำแนกระบบ Q	17
ตารางที่ 29 ตัวประกอบความเป็นลอนของแนวแตก (J_w)	18
ตารางที่ 30 ตัวประกอบความเรียบของแนวแตก (J_s)	19
ตารางที่ 31 ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (J_a)	19
ตารางที่ 32 ค่าคงที่ของวัสดุหิน (m_r)	20
ตารางที่ 33 ส่วนแบ่งทางการตลาดของสมาร์ตโฟนแบ่งตามระบบปฏิบัติการ	21

รายการตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 34 รุ่นและสัดส่วนการใช้งานของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	22
ตารางที่ 35 ข้อมูลจำเพาะขั้นต่ำของคอมพิวเตอร์ที่โปรแกรม Android Studio ต้องการ	22
ตารางที่ 36 โปรแกรมประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับการจำหน่ายบน Google Play Store	23
ตารางที่ 37 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการประเมินมลพิษ	29
ตารางที่ 38 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการประเมินลาดหิน	30
ตารางที่ 39 เงื่อนไขสำหรับตรวจสอบการทำงานของโมดูลการจำแนกคุณภาพมลพิษ	32
ตารางที่ 40 ผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการจำแนกคุณภาพมลพิษ	33
ตารางที่ 41 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลดัชนีกำลังธรณี	34

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 แผนภูมิแยกประเภทการค้ำยันของระบบ Q	17
รูปที่ 2 (ก) กราฟเทียบประเมินอัตราส่วนการยึดเกาะของมวลหินต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว (ข) กราฟเทียบประเมินค่ามุมเสียดทานภายในของมวลหิน	20
รูปที่ 3 (ก) โปรแกรมประยุกต์ Rock Mass Classification (ข) โปรแกรมประยุกต์ RMR Calc free	23
รูปที่ 4 (ก) โปรแกรมประยุกต์ RMR & GRC (ข) โปรแกรมประยุกต์ Slope Mass Rating (SMR)	24
รูปที่ 5 ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์	26
รูปที่ 6 แถบเมนูของโปรแกรมประยุกต์สำหรับเรียกใช้งานโมดูลต่างๆ	27
รูปที่ 7 กล่องตัวเลือกสำหรับเลือกประเภทข้อมูลและแถบตัวเลือกสำหรับเลือกค่าประเมิน	27
รูปที่ 8 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าปัจจัยมวลหิน (ข) การป้อนค่าละเอียดของสภาพความไม่ต่อเนื่อง (ค) ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินของโมดูลการประเมินมวลหิน	28
รูปที่ 9 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าตัวประกอบปรับแก้ทั้ง 4 สำหรับการประเมินลาดหิน (ข) ผลการประเมินเสถียรภาพลาดหินของโมดูลการประเมินลาดหิน	30
รูปที่ 10 (ก) ตัวเลือกป้อนค่าปัจจัยมวลหินเพื่อประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นที่เหมาะสม (ข) ผลการประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นของโมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน	32
รูปที่ 11 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าปัจจัยมวลหินเพื่อประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้น (ข) ผลการประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้นของโมดูลดัชนีกำลังธรณี	34
รูปที่ 12 (ก) ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหิน/ลาดหินที่บันทึกไว้ (ข) รายละเอียดผลการประเมิน (ค) คำแนะนำการเก็บข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานใหม่	35
รูปที่ 13 หน้างานลาดหินทรายแทรกสลัหินดินดานหลังโรงเรียน มอ. วิทยานุสรณ์	36
รูปที่ 14 หน้างานลาดหินฮอร์นเฟลส์ฝั่งทิศตะวันออกของเหมืองหินเขายันไดนางศิลา	37

รายการผลงานตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ

- Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D.; Vattanasak, H. PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability. *Proceedings of Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference*, Lampang, Thailand, November 23-24, 2017, 155-162.
- Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Android Application Development for Estimating Properties and Preliminary Stability of Rock Mass using Rock Mass Rating and Geological Strength Index. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*. **2019**, 19(1), xxx-xxx. (Accepted: 27 August 2018)
- Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Alternative Software for Evaluating Preliminary Rock Stability of Tunnel using Rock Mass Rating (RMR) and Rock Mass Quality (Q) on Android Smartphone. *Engineering Journal*. **2019**, 23(1), xxx-xxx. (Accepted: 24 October 2018)

สำเนาต้นฉบับที่ได้รับการยินยอมจากผู้พิมพ์ผลงาน

Notification of Review Outcome

IT-CMUSD 2017 <950240@egat.co.th>

พ.ศ. 9/11/2017 9:56

ถึง:recipient1 <mpantawee@hotmail.com>;

We are pleased to inform you that your manuscript has been accepted for oral presentation at CM&USD 2017. The schedule of presentation will be informed later. We are looking forward to seeing you at Mae Moh.

=====
File Subject: PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Stability
Webpage: https://maemohmine.egat.co.th/register_cmusd/login.php
=====

Contact: 950240@egat.co.th



Certificate of Participation

Presented to

Mr. Pantawee Pantaweesak

In recognition and appreciation of valuable contribution as

Speaker

of the International Conference on Coal Mining and Utilization for Sustainable Development (CM&USD 2017)
23rd - 24th November 2017
Lampang, Thailand

 Assoc. Prof. Dr. Pirat Jaroonpattanapong Representative of our Coal-Host from The 3 Universities	 Mr. Ampon Kitichotkul Representative of Electricity Generating Authority of Thailand
--	--

สำเนาต้นฉบับที่ได้รับการยินยอมจากผู้พิมพ์ผลงาน



ที่ ศธ 0514.10/ 3489

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

๒๗ สิงหาคม 2561

เรื่อง ตอบรับการส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)

เรียน นายพันวิ พันวิศักดิ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง “Android Application Development for Estimating Properties and Preliminary Stability of Rock Mass using Rock Mass Rating and Geological Strength Index (การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินสมบัติและเสถียรภาพเบื้องต้นของมวลหินด้วยหลักการจำแนกมวลหินและดัชนีกำลังธรณี)” เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) ISSN 1906-201X นั้น บัดนี้บทความวิจัยต้นฉบับของท่านผ่านการตรวจความถูกต้องทางวิชาการโดยกองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว และกองบรรณาธิการยินดีที่จะตีพิมพ์บทความของท่านลงใน วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2562

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์พงศกร พรพรรณรัตนศิลป์)
บรรณาธิการ วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทร. 0-4320-2420 ต่อ 42421

โทรสาร 0-4320-2421

<http://journal.gs.kku.ac.th/>

สำเนาต้นฉบับที่ได้รับการยินยอมจากผู้พิมพ์ผลงาน

[EJ] Editor Decision on Manuscript EJ-2585

Dr. Yan Zhao <yan.z@chula.ac.th>

พ. 24/10/2018 7:31

ถึง: Pantawee Pantaweesak <mpantawee@hotmail.com>; Phongpat Sontamino <phongpat.s@psu.ac.th>; Danupon Tonnayopas <danupon.t@psu.ac.th>; Editorial Office <ed.office@engj.org>;

Dear Pantawee Pantaweesak, Phongpat Sontamino, Danupon Tonnayopas,

We are pleased to inform you that your recent submission titled, "Alternative Software for Evaluating Preliminary Rock Stability of Tunnel using Rock Mass Rating (RMR) and Rock Mass Quality (Q) on Android Smartphone", has been accepted for publication in Engineering Journal.

Your article is scheduled to be included in our January 2019 issue (vol. 23, no. 1). We will contact you again when your proof is ready for you to check before its publication. Thank you for your interest in Engineering Journal. We look forward to publishing your article.

Yan Zhao, PhD
Associate Editor

Engineering Journal (Eng. J.)
Web: <http://engj.org/>
ISSN: 0125-8281

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นการนำทรัพยากรธรรมชาติจำพวกหินและแร่มาใช้ประโยชน์ โดยต้องดำเนินการอยู่ในสภาพที่แวดล้อมไปด้วยมวลหิน ซึ่งอาจถูกรบกวนเสถียรภาพจากกระบวนการผลิตทั้งทางตรงและทางอ้อม การเฝ้าติดตามเสถียรภาพมวลหินอย่างสม่ำเสมอเพื่อความปลอดภัยในการดำเนินงานจึงเป็นสิ่งสำคัญ การจำแนกมวลหิน (rock mass classification) เป็นหนึ่งในหลักการประเมินเสถียรภาพมวลหินที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรม (Singh and Goel, 2011) จุดเด่นของหลักการนี้ คือ มีความซับซ้อนของขั้นตอนการประเมินน้อย ใช้ข้อมูลตั้งต้นไม่มาก และให้ผลประเมินที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามผู้ประเมินต้องอาศัยประสบการณ์ในการพิจารณาเงื่อนไขเพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีนัยสำคัญ และควรเก็บข้อมูลร่วมกับอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น เซ็มติคอร์ดและอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส การจำแนกมวลหินแบ่งย่อยออกเป็นหลายหลักการที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating) สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินของงานอุโมงค์และฐานรากเขื่อน การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating) สำหรับการประเมินเสถียรภาพลาดหิน การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality) สำหรับประเมินรูปแบบการค้ำยันเบื้องต้นสำหรับงานอุโมงค์ และดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index) สำหรับประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้น นอกจากนี้ขั้นตอนการประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยทั่วไปพบว่ามีความซับซ้อนและไม่คล่องตัวหลายจุด ทั้งจากการใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลมากขึ้น การจัดบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมที่มีความไม่เป็นระบบและอาจเกิดความผิดพลาดจากมนุษย์ (Weng et al., 2012) ซึ่งระบบการประมวลผลและฐานข้อมูลทางดิจิทัลสามารถจัดการข้อมูลเหล่านี้ได้ดียิ่งกว่า

โลกปัจจุบันเป็นยุคแห่งดิจิทัลที่เทคโนโลยีมีบทบาทอย่างมากต่อการดำเนินชีวิต อุปกรณ์ดิจิทัลที่มีอิทธิพลต่อมนุษย์มากที่สุดคือสมาร์ทโฟน (Byrne, 2014) ซึ่งมีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 85 ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ในการประมวลผล (Chau et al., 2018) ทำให้มีผู้สนใจพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (application) สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินบนสมาร์ทโฟนแอนดรอยด์ขึ้นมาหลายโปรแกรม เช่น Rock Mass Classification (Sarangi, 2013) RMR Calc (Geomecanica Apps, 2014) และ RMR & GRC (Saricam, 2015) อย่างไรก็ตามโปรแกรมประยุกต์เหล่านี้ไม่สามารถแสดงผลการประเมินโดยละเอียดได้ จึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริงเท่าที่ควร ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงต้องการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินที่ทำงานเบ็ดเสร็จในตัวเอง สามารถแสดงผลการประเมินโดยละเอียดได้ และเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนาม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้ทราบถึงเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้นได้ทันทีที่หน้างาน และสามารถวางแผนดำเนินงานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย หลักการจำแนกมวลหินที่ผู้วิจัยสนใจพัฒนาในโปรแกรมประยุกต์นี้ประกอบ 4 หลักการ ได้แก่ การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating) การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating) การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality) และดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index)

การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating, RMR)

การประเมินมวลหินเป็นระบบการจำแนกมวลหินที่เกิดขึ้นจากองค์ความรู้เชิงปฏิบัติที่เก็บรวบรวมแล้วนำมาประมวลร่วมกันให้อยู่ในรูปแบบของการจัดอันดับ (rating and ranking) โดยพิจารณาจากเงื่อนไขของมวลหินในภาคสนาม ซึ่งได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรม (Singh and Goel, 2011) โดยอาศัยหลักการทางธรณีกลศาสตร์ (geomechanics) ของ Bieniawski (1979, 1984, 1993) ที่ประกอบด้วยปัจจัยสำคัญ 6 ประการ ได้แก่

1. กำลังของหินทดสอบ (strength of intact rock)

กำลังของตัวอย่างหินเป็นดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของหินในการแบกทานแรงก่อนที่จะเกิดการพิบัติ โดยอยู่บนพื้นฐานค่ากำลังอัดแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength, UCS) และค่าดัชนีกำลังแรงกดจุด (Point Load Strength Index, PLSI) ของตัวอย่างหินทดสอบที่มีสถานะเช่นเดียวกับที่พบในภาคสนาม มีเกณฑ์การประเมินกำลังของหินทดสอบให้เป็นค่าปัจจัย R_1 ดังตารางที่ 1 โดยส่วนมากปัจจัยนี้มักมีค่าใกล้เคียงเดิมในแหล่งหินเดียวกันที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดเล็ก จึงอาจทำการทดสอบตัวอย่างหินอย่างน้อย 5 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วใช้สำหรับการประเมินมวลหินข้างเคียงในแหล่งเดียวกันได้ ในบางกรณีที่ผู้ประเมินไม่สะดวกในการเก็บตัวอย่างหินหรือเป็นการประเมินนำร่อง อาจสามารถใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยของตัวอย่างหินที่ทดสอบโดย Palmstrom (2000) ดังตารางที่ 2 เพื่อประเมินปัจจัยนี้ทดแทนได้ อย่างไรก็ตามผู้ประเมินต้องคำนึงอยู่เสมอว่าหินต่างสถานที่กันย่อมมีสมบัติที่ต่างกันแม้จะเป็นหินชนิดเดียวกันก็ตาม การทดสอบตัวอย่างหินจากแหล่งที่ประเมินเองจึงให้ผลการประเมินที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

ตารางที่ 1 เกณฑ์ประเมินกำลังของหินทดสอบ (R_1)

Qualitative description	Compressive strength (MPa)	Point load strength (MPa)	Rating
Extremely strong	>250	8	15
Very strong	100-250	4-8	12
Strong	50-100	2-4	7
Medium strong	25-50	1-2	4
Weak	5-25	Use of UCS is preferred	2
Very weak	1-5	-	1
Extremely weak	<1	-	0

หมายเหตุ: หากมีค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 1.0 MPa วัสดุหินจะจัดว่าเป็นพวกดิน

ที่มา: Bieniawski (1979, 1984)

ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยจากตัวอย่างหินขนาด 50 มิลลิเมตร

Type of Rock	UCS (MPa)	Type of Rock	UCS (MPa)	Type of Rock	UCS (MPa)
Andesite (I)	150	Gneiss (M)	130	Sandstone (S, M)	<100>
Amphibolite (M)	<160>	Greenschist (M)	<75>	Serpentine (M)	135
Augen Gneiss (M)	160	Greenstone (M)	110	Shale (S, M)	95
Basalt (I)	160	Greywacke (M)	80	Siltstone (S, M)	<80>
Clay Schist (S, M)	55	Limestone (S)	90	Slate (M)	<190>
Diorite (I)	140	Marble (M)	<100>	Syenite (I)	150
Dolerite (I)	200	Micagneiss (M)	90	Tuff (S)	<25>
Dolomite (S)	<100>	Micaquartzite (M)	85	Ultrabasic (I)	160
Gabbro (I)	240	Micaschist (M)	<80>	Clay (hard)	0.7
Granite (I)	160	Phyllite (M)	<50>	Clay (stiff)	0.2
Granitic Gneiss (M)	100	Quartzite (M)	<190>	Clay (soft)	0.03
Granodiorite (I)	160	Quartzitic Phyllite (M)	100	Silt, Sand	0.0005
Granulite (M)	<90>	Rhyolite (I)	85		

หมายเหตุ: (I)=หินอัคนี, (M)=หินแปร, (S)=หินตะกอน, < >=ค่ากระจายตัวช่วงกว้าง

ที่มา: Palmstrom (2000) และ Singh and Goel (2011)

2. ดัชนีคุณภาพหิน (Rock Quality Designation, RQD)

ดัชนีคุณภาพหินบ่งชี้ถึงความถี่ของความไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏบนมวลหินซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของคร่อม สามารถคำนวณได้โดยตรงจากการประเมินแท่งตัวอย่างทรงกระบอกจากหลุมเจาะ (core) ซึ่งเป็นร้อยละของความยาวรวมขึ้นส่วนที่มีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 10 เซนติเมตรต่อระยะเก็บตัวอย่าง 1 เมตร โดยนับเฉพาะรอยไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและไม่นับรอยแตกที่เกิดขึ้นในภายหลังดังสมการที่ 1 (Deere and Deere, 1989)

$$RQD = \frac{\sum \text{Core piece} \geq 10 \text{ cm}}{\text{total drill run}} \times 100\% \quad (\text{สมการที่ 1})$$

นอกจากนี้อาจประเมินค่า RQD ทางอ้อมได้จากการนับแนวแตกเชิงปริมาตร (Volumetric Joint Count) เพื่อคำนวณหาค่า J_v ตามหลักการของ Palmstrom (1982) และ Sen and Eissa (1992) ด้วยสมการที่ 2 จากนั้นคำนวณค่า RQD โดยใช้สมการที่ 3 (Palmstrom, 2005) มีเกณฑ์การประเมินดัชนีคุณภาพหินให้เป็นค่าปัจจัย R_2 ดังตารางที่ 3

$$J_v = \sum_{i=1}^J \frac{1}{S_i} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

โดยที่ S_i คือค่าระยะห่าง (spacing) เฉลี่ยระหว่างความไม่ต่อเนื่องของชุดที่ i ในหน่วยเมตร

$$RQD=110-2.5J_v$$

โดยที่ J_v คือค่าแนวแตกเชิงปริมาตร

(สมการที่ 3)

ตารางที่ 3 เกณฑ์ประเมินดัชนีคุณภาพหิน (R_2)

Qualitative description	Rock Quality Designation (%)	Rating
Excellent	90-100	20
Good	75-90	17
Fair	50-75	13
Poor	25-50	8
Very Poor	<25	3

ที่มา: Bieniawski (1979)

3. ระยะห่างของความไม่ต่อเนื่อง (spacing of discontinuities)

ความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) มีความหมายถึง แนวแตก (joint) การวางชั้น (bedding) ระนาบเฉือน (shear plane) รอยเลื่อน (fault) และเขตพังง่าย (weakness zone) โดยทั่วไปความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้มักจะเกิดร่วมกันเป็นชุด ความไม่ต่อเนื่องชุดเดียวกันมักจะมีระยะห่าง (spacing) ระหว่างความไม่ต่อเนื่องแต่ละแนวใกล้เคียงกัน หรือมีค่ากระจายตัวในช่วงแคบ เนื่องจากเป็นความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาลักษณะเดียวกัน (เช่น แรงเค้นจากการเกิดธรณีแปรสัณฐาน) มีเกณฑ์การประเมินระยะห่างของความไม่ต่อเนื่องให้เป็นค่าปัจจัย R_3 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์ประเมินระยะห่างของความไม่ต่อเนื่อง (R_3)

Description	Spacing (m)	Rating
Very wide	>2	20
Wide	0.6-2	15
Moderate	0.2-0.6	10
Close	0.06-0.2	8
Very close	<0.06	5

ที่มา: Bieniawski (1979)

4. สภาพของความไม่ต่อเนื่อง (condition of discontinuities)

ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นบนมวลหินมักเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยหลายประการ ทั้งจากบรรยากาศแวดล้อมและปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยา สภาพความไม่ต่อเนื่องที่พบจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพในปัจจุบัน ซึ่งครอบคลุมถึงความขรุขระ (roughness) การแยกห่าง (separation or aperture) การคงอยู่ (length or persistence) การผุพัง (weathering) และผงอูด (gouge) ที่ปรากฏบนความไม่ต่อเนื่อง สามารถประเมินสภาพของความไม่ต่อเนื่องให้เป็นค่าปัจจัย R_4 ได้ 2

รูปแบบ คือ การประเมินสภาพที่ละเอียด (การประเมินโดยละเอียด) ดังตารางที่ 5 และการประเมินแบบหยาบ (การประเมินอย่างง่าย) ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 เกณฑ์ประเมินสภาพของความไม่ต่อเนื่องโดยละเอียด (R_d)

Parameter	Ratings				
	Discontinuity length (persistence/continuity)	<1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m
	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Roughness of discontinuity surface	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
	6	5	3	1	0
Infillings (gouge)	None	Hard filling		Soft filling	
	6	<5mm	>5mm	<5mm	>5mm
Weathering discontinuity surface	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
	6	5	3	1	0

ที่มา: Bieniawski (1993)

ตารางที่ 6 เกณฑ์ประเมินสภาพของความไม่ต่อเนื่องอย่างง่าย (R_d)

Description	Rating
Very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation	30
Rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm	25
Slightly rough and moderately/highly weathered, wall rock surface separation <1 mm	20
Slickensided surface or 1-5 mm thick gouge, or 1-5 mm wide continuous discontinuity	10
5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity	0

ที่มา: Bieniawski (1979)

5. สภาพน้ำใต้ดิน (groundwater condition)

น้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อการผุพังของความไม่ต่อเนื่อง ทำให้แรงเสียดทานภายในมวลหินลดลง และมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของคร่อมของมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานประเภทอุโมงค์ จึงจัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อประเมินเสถียรภาพมวลหิน สามารถประเมินสภาพน้ำใต้ดินให้เป็นค่าปัจจัย R₅ ได้ 3 รูปแบบคือ การวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน การหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำต่อความเค้นหลัก และสภาพทั่วไปที่พบเห็นจากหน้างาน ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์ประเมินสภาพน้ำใต้ดิน (R_5)

Inflow per 10 m tunnel length (L/min)	None	<10	10-25	25-125	>125
Ratio of joint water pressure to major principal stress	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
General description	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
Rating	15	10	7	4	0

ที่มา: Bieniawski (1979)

6. การวางตัวของความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities orientation)

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องและมวลหินบ่งชี้ถึงโอกาสที่เอื้อต่อการเกิดการพิบัติ การประเมินปัจจัยนี้สำหรับงานอุโมงค์ ทิศทางการเดินหน้างานเป็นสิ่งสำคัญ จึงต้องพิจารณาแนวแกนอุโมงค์ร่วมกับมุมเทและแนวเทของมวลหิน ดังตารางที่ 8 ขณะที่งานฐานรากจะพิจารณามุมเทของมวลหินเป็นหลักดังตารางที่ 9 การดำเนินงานในเงื่อนไขที่ไม่เอื้ออำนวยทำให้มีโอกาสเกิดการพิบัติของมวลหินมาก มีเกณฑ์การประเมินการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องให้เป็นค่าปัจจัย R_6 ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 8 การประเมินผลกระทบของการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องที่มีผลต่ออุโมงค์

Condition	Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Irrespective of strike
	Drive with dip		Drive against dip				
Dip (degree)	45-90	20-45	45-90	20-45	20-45	45-90	0-20
Description	Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Fair	Very unfavorable	Fair

ที่มา: Bieniawski (1979)

ตารางที่ 9 การประเมินผลกระทบของการวางตัวของความไม่ต่อเนื่องที่มีผลต่อฐานรากเขื่อน

Dip (degree)	0- 10	10-30 (Upstream)	10-30 (Downstream)	30-60	60-90
Description	Very favorable	Unfavorable	Fair	Favorable	Very unfavorable

ที่มา: Bieniawski (1979)

ตารางที่ 10 เกณฑ์ประเมินการวางตัวของความไม่ต่อเนื่อง (R_6)

Joint orientation	Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
Dam foundation	0	-2	-7	-15	-25
Slopes	0	-5	-25	-50	-60

ที่มา: Bieniawski (1979)

เมื่อประเมินค่าปัจจัย R_1 ถึง R_6 เสร็จสิ้น สามารถคำนวณค่า RMR ได้โดยการหาผลรวมของทุกปัจจัยซึ่งมีค่าผลรวมสูงสุดคือ 100 และต่ำสุดคือ 0 ด้วยสมการที่ 4 (Bieniawski, 1979) จากนั้นเปรียบเทียบค่า RMR ที่คำนวณได้กับเกณฑ์ประเมินระดับชั้นเสถียรภาพมวลหินดังตารางที่ 11 และนำระดับชั้นเสถียรภาพมาประเมินวิธีการค้ำยันที่เหมาะสมสำหรับงานอุโมงค์ดังตารางที่ 12

$$RMR_{89} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (\text{สมการที่ 4})$$

โดยที่ R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 และ R_6 คือค่าที่ประเมินจากปัจจัยที่ 1 ถึง 6

ตารางที่ 11 เกณฑ์ประเมินระดับชั้นเสถียรภาพมวลหินจากค่า RMR

RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Classification of rock	I (Very good)	II (Good)	III (Fair)	IV (Poor)	V (Very poor)
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock (MPa)	>0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	<0.1
Friction angle (degree)	>45	35-45	25-35	15-25	<15
Allowable pressure (T/m ²)	600-440	440-280	280-135	135-45	45-30
Safe cut slope (degree)	>70	65	55	45	<40

ที่มา: Bieniawski (1993) และ Waltham (2002)

ตารางที่ 12 เกณฑ์ประเมินการค้ำยันที่เหมาะสมสำหรับอุโมงค์หิน

Class	Support
I	No support required except for occasional spot bolting
II	20 mm diameter rock bolts with fully grouted in crown 3 m long spaced 2.5 m with wire mesh, shotcrete 50 mm in crown
III	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 4 m long spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown, shotcrete 50-100 mm in crown and 30 mm in sides
IV	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 4-5 m long spaced 1-1.5 m in crown and wall with wire mesh, shotcrete 100-150 mm in crown and 100 mm in sides, Light-medium ribs spaced 1.5 m
V	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 5-6 m long spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh, shotcrete 150-200 mm in crown 150 mm in sides and 50 mm on face, Medium to heavy steel ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling

หมายเหตุ: อุโมงค์รูปเปลือกม้าที่สร้างจากการเจาะระเบิดขนาดไม่เกิน 10 เมตร และรับความเค้นไม่เกิน 25 MPa

ที่มา: Bieniawski (1984)

การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating, SMR)

การประเมินลาดหินถูกพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานของการประเมินมวลหิน โดยการเพิ่มตัวประกอบปรับแก้เข้ามาร่วมประเมินเพื่อให้เหมาะสมกับการประเมินลาดหิน (Romana, 1985) ซึ่งตัวประกอบปรับแก้สามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ตัวประกอบปรับแก้ความสัมพันธ์การวางตัวระหว่างแนวแตกหรือเส้นตัดขวาง และหน้าลาดหิน

ตัวประกอบกลุ่มนี้แบ่งพิจารณาเป็น 3 ค่าคือ ตัวประกอบค่าความสัมพันธ์ของแนววางตัวระหว่างแนวแตกกับหน้าลาด (F_1), ตัวประกอบค่ามุมเทของแนวแตก (F_2) และตัวประกอบค่าความสัมพันธ์ของมุมเทระหว่างแนวแตกกับหน้าลาด (F_3) โดยตัวประกอบปรับแก้กลุ่มนี้จะพิจารณาเงื่อนไขตามรูปแบบการพิบัติที่พบบริเวณหน้างาน สามารถประเมินค่าได้จากตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบปรับแก้จากการวางตัวของแนวแตกและหน้าลาดหิน (F_1, F_2, F_3)

Case of slope failure		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30	30-20	20-10	10-5	<5
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W	$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/W/T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	<20	20-30	30-35	35-45	>45
W	$ \beta_i $					
P/W	F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F_2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	$ \beta_j - \beta_s $	>10	10-0	0	0-(-10)	<-10
W	$ \beta_i - \beta_s $					
T	$ \beta_j + \beta_s $	<110	110-120	>120	-	-
P/W/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60

หมายเหตุ: P คือการพิบัติแบบระนาบ, T คือการพิบัติแบบค้มา, W คือการพิบัติแบบลิ้ม

α_s คือแนววางตัวหน้าลาด, α_j คือแนววางตัวของแนวแตก และ α_i คือแนววางตัวของแนวเส้นตัดขวาง

β_s คือมุมเทหน้าลาด, β_j คือมุมเทของแนวแตกและ β_i คือมุมเทของแนวเส้นตัดขวาง

ที่มา: Romana (1985) และ Anbalagan et al. (1992)

2. ตัวประกอบปรับแก้วิธีการขุดเจาะ

กิจกรรมต่างๆ ที่กระทำต่อมวลหินมีผลต่อเสถียรภาพในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการระเบิดในงานเหมืองแร่ที่จะทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อของหินบริเวณข้างเคียง ทำให้มีเงื่อนไขทางเสถียรภาพด้อยกว่าลาดหินธรรมชาติที่ไม่ถูกรบกวนด้วยกิจกรรมดังกล่าว ปัจจุบันสามารถประเมินเป็นค่าตัวประกอบปรับแก้ F_4 ได้จากตารางที่ 14

ตารางที่ 14 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบปรับแก้จากวิธีการขุดเจาะ (F_4)

Method of excavation	F_4
Natural slope	+15
Pre-splitting	+10
Smooth blasting	+8
Normal blasting or mechanical excavation	0
Poor blasting	-8

ที่มา: Romana (1985)

ค่าตัวประกอบปรับแก้เหล่านี้เมื่อคำนวณร่วมกับค่าปัจจัยที่ 1 ถึง 5 ของการประเมินมวลหิน (R_1 ถึง R_5) หรือค่า RMR พื้นฐาน (RMR_{basic}) จะสามารถหาค่า SMR ได้โดยใช้สมการที่ 5

$$SMR = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (\text{สมการที่ 5})$$

โดยที่ R_1, R_2, R_3, R_4 และ R_5 คือค่าประเมินปัจจัยที่ 1 ถึง 5 ของ RMR

F_1, F_2, F_3 และ F_4 คือค่าตัวประกอบปรับแก้จากการวางตัวของแนวแตกและหน้าลาดหิน และวิธีการขุดเจาะ

ในกรณีที่ลาดหินบริเวณจุดประเมินเป็นลาดหินโผล่ตามธรรมชาติ อาจสามารถคำนวณค่า RMR พื้นฐาน (RMR_{basic}) ในเบื้องต้นได้โดยใช้สมการที่ 6 (Banks, 2005) อย่างไรก็ตามค่านี้เป็นเพียงค่ากลางทางสถิติที่ผลคำนวณอาจไม่สะท้อนถึงสภาพมวลหินที่พบจริง จึงควรหาค่า RMR ตามวิธีการปกติทุกครั้งหากสภาพแวดล้อมเอื้ออำนวย

$$RMR_{basic} = 0.4S + 52 \quad (\text{สมการที่ 6})$$

โดยที่ S คือมุมเทของลาดหินโผล่ธรรมชาติ (องศา)

เมื่อคำนวณค่า SMR เสร็จสิ้น จะสามารถประเมินระดับชั้นเสถียรภาพลาดหินได้โดยใช้ตารางที่ 15 และประเมินวิธีปรับปรุงเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับงานลาดหินได้จากตารางที่ 16

ตารางที่ 15 เกณฑ์ประเมินระดับชั้นเสถียรภาพลาดหินจากค่า SMR

Class No.	V	IV	III	II	I
SMR Value	0-20	21-40	41-60	61-80	80-100
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very Good
Stability	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
Failures	Big planar or soil-like or circular	Planar or big wedges	Planar along some joints and many wedges	Some block failure	No failure
Probability	0.9	0.6	0.4	0.2	0

ที่มา: Romana (1985)

ตารางที่ 16 เกณฑ์ประเมินวิธีปรับปรุงเสถียรภาพที่เหมาะสมจากค่า SMR สำหรับลาดหิน

Class	SMR	Suggested supports
Ia	91-100	None
Ib	81-90	None, scaling is required
IIa	71-80	(None, toe ditch, or fence), spot bolting
IIb	61-70	(Toe ditch or fence nets), spot or systematic bolting
IIIa	51-60	(Toe ditch and/or nets), spot or systematic bolting, spot shotcrete
IIIb	41-50	(Toe ditch/ nets), systematic bolting/ anchors, systematic shotcrete, toe wall/ dental concrete
IVa	31-40	Anchors, systematic shotcrete, toe wall and/or concrete (or re-excavation), drainage
IVb	21-30	Systematic reinforced shotcrete, toe wall and/or concrete, re-excavation, deep drainage
Va	11-20	Gravity or anchored wall, re-excavation

หมายเหตุ: วิธีการเพิ่มเสถียรภาพที่อยู่ในวงเล็บคือวิธีที่ไม่นิยมในทางปฏิบัติ

ที่มา: Singh and Goel (2011)

ทฤษฎีของ Romana (1985) มีตัวประกอบปรับแก้ F_1 , F_2 และ F_3 เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องซึ่งทำให้ค่าประเมินเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อผลการประเมินอยู่บริเวณขอบของช่วงประเมิน เช่น หากค่าประเมินมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะทำให้ระดับชั้นเสถียรภาพเปลี่ยนช่วงอย่างฉับพลัน ด้วยเหตุนี้ Tomas et al. (2007) และ Zheng et al. (2016) จึงเสนอสมการฟังก์ชันต่อเนื่องสำหรับประเมินค่าตัวประกอบปรับแก้ดังตารางที่ 17 และ 18 ตามลำดับ

ตารางที่ 17 การคำนวณค่าตัวประกอบปรับแก้ F_1 , F_2 และ F_3 ของ Tomas et al. (2007)

ตัวประกอบ	สมการคำนวณ	หมายเหตุ
F_1	$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3 \tan^{-1}\left(\frac{ A -17}{10}\right)}{500}$	$A = \alpha_j - \alpha_s $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบระนาบ $A = \alpha_i - \alpha_s $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบลิ่ม $A = \alpha_j - \alpha_s - 180 $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบคมะ
F_2	$F_2 = \frac{9}{16} - \frac{\tan^{-1}\left(\frac{17B}{100} - 5\right)}{195}$	ถ้า $B < 45$ $B = \beta_j $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบระนาบและแบบคมะ $B = \beta_i $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบลิ่ม ถ้า $B > 45$ จะให้ค่า $F_2 = 1$
F_3	เมื่อเป็นการพิบัติแบบระนาบและลิ่ม $F_3 = 30 + \left(\frac{\tan^{-1}C}{3}\right)$ เมื่อเป็นการพิบัติแบบคมะ $F_3 = 13 - \left(\frac{\tan^{-1}(C-120)}{7}\right)$	$C = \beta_j - \beta_s $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบระนาบ $C = \beta_i - \beta_s $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบลิ่ม $C = \beta_j + \beta_s $ เมื่อเป็นการพิบัติแบบคมะ

หมายเหตุ: α_s คือแนววางตัวของหน้าลาด, α_j คือแนววางตัวของแนวแตก และ α_i คือแนววางตัวของเส้นตัดขวาง

β_s คือมุมเทของหน้าลาด, β_j คือมุมเทของแนวแตก และ β_i คือมุมเทของเส้นตัดขวาง

ที่มา: Tomas et al. (2007)

ตารางที่ 18 การคำนวณค่าตัวประกอบปรับแก้ F_1 และ F_3 ของ Zheng et al. (2016)

การปรับ	ตัวประกอบ	Romana (1985)	Zheng et al. (2016)	หมายเหตุ
ระนาบ	F_1	$ \alpha_j - \alpha_s $	$ \alpha_j - \alpha_s $ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s \leq 180$ $360 - \alpha_j - \alpha_s $ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s > 180$	$\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos \alpha_j - \alpha_s)$ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s \leq 180$ $\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos (360 - \alpha_j - \alpha_s))$ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s > 180$
	F_3	$ \beta_j - \beta_s $	$\beta_j - \beta_{sa}$	
ลิ่ม	F_1	$ \alpha_i - \alpha_s $	$ \alpha_i - \alpha_s $ เมื่อ $ \alpha_i - \alpha_s \leq 180$ $360 - \alpha_i - \alpha_s $ เมื่อ $ \alpha_i - \alpha_s > 180$	$\alpha_i = \tan^{-1}(x'_{12}/y'_{12})$ $\beta_i = \sin^{-1}(z'_{12} /\sqrt{x'_{12}{}^2 + y'_{12}{}^2 + z'_{12}{}^2})$ $\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos \alpha_i - \alpha_s)$ เมื่อ $ \alpha_i - \alpha_s \leq 180$ $\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos (360 - \alpha_i - \alpha_s))$ เมื่อ $ \alpha_i - \alpha_s > 180$
	F_3	$ \beta_i - \beta_s $	$\beta_i - \beta_{sa}$	
ค้ำ	F_1	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$180 - \alpha_j - \alpha_s $ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s \leq 180$ $ \alpha_j - \alpha_s - 180$ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s > 180$	$\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos (180 - \alpha_j - \alpha_s))$ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s \leq 180$ $\beta_{sa} = \tan^{-1}(\tan \beta_s \cos (\alpha_j - \alpha_s - 180))$ เมื่อ $ \alpha_j - \alpha_s > 180$
	F_3	$ \beta_j + \beta_s $	$\beta_j + \beta_{sa}$	

หมายเหตุ: α_s คือแนววางตัวของหน้าลาด, α_j คือแนววางตัวของแนวแตก และ α_i คือแนววางตัวของเส้นตัดขวาง

β_s คือมุมเทของหน้าลาด, β_j คือมุมเทของแนวแตก และ β_i คือมุมเทของเส้นตัดขวาง

$l_{12} = n_1 \times n_2$ โดยที่ n_1 และ n_2 คือเวกเตอร์ตั้งฉากทิศพุ่งขึ้นของความไม่ต่อเนื่อง 2 รอย ที่ทำให้เกิดลิ่ม

และ l_{12} คือเวกเตอร์ของเส้นตัดขวางระหว่างความไม่ต่อเนื่อง 2 รอย โดยที่ $l'_{12} = l_{12}$ เมื่อ $z_{12} < 0$ และ

$l'_{12} = -l_{12}$ เมื่อ $z_{12} > 0$ ในขณะที่ x'_{12}, y'_{12} และ z'_{12} เป็นองค์ประกอบ 3 ทิศทางตามพิกัดฉากของ l'_{12}

ที่มา: Zheng et al. (2016) และ Romana (1985)

การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality, Q)

การจำแนกคุณภาพมวลหินพัฒนาขึ้นจากกรณีศึกษางานอุโมงค์และโรงไฟฟ้า (Barton et al., 1974) โดยเน้นที่การประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นสำหรับโรงไฟฟ้าและอุโมงค์ที่ก่อสร้างจากการระเบิด โดยคำนวณค่าคุณภาพมวลหิน (Q) จากค่าดัชนีคุณภาพหิน (RQD) ดังที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อการประเมินมวลหิน (สมการที่ 1, 2 และ 3) และปัจจัยอีก 5 ประการดังนี้

1. จำนวนชุดแนวแตก (Joint Set Number, J_n)

ค่าจำนวนชุดแนวแตกครอบคลุมถึงการวางชั้น (bedding) และการแตกเป็นแผ่น (foliation) ที่เกิดร่วมกันเป็นชุด ซึ่งหากแนวแตกใดไม่สามารถจัดกลุ่มได้ ให้ตีความว่าเป็นแนวแตกแบบสุ่ม (random joint) มีเกณฑ์การประเมินจำนวนชุดแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_n ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 เกณฑ์ประเมินจำนวนชุดแนวแตก (J_n)

Condition	J_n
Massive, no or few joints	0.5 - 1
One joint set	2
One joint set plus random	3
Two joint sets	4
Two joint sets plus random	6
Three joint sets	9
Three joint sets plus random	12
Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cube," etc.	15
Crushed rock, earth-like	20

ที่มา: Barton et al. (1974) และ Barton (2002)

2. ระดับความขรุขระของแนวแตก (Joint Roughness Number, J_r)

ความขรุขระของพื้นผิวแนวแตกในสเกลเล็กและความเป็นคลื่นของแนวแตกในสเกลใหญ่จะถูกพิจารณาในปัจจุบันนี้ มีเกณฑ์การประเมินระดับความขรุขระของแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_r ดังตารางที่ 20 และสามารถคำนวณร่วมกับระดับการแปรเปลี่ยนของแนวแตกเพื่อประมาณค่ามุมเสียดทานภายในได้ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 20 เกณฑ์ประเมินระดับความขรุขระของแนวแตก (J_r)

Condition	J_r
Discontinuous joint	4.0
Rough or irregular, undulating	3.0
Smooth, undulating	2.0
Slickensided, undulating	1.5
Rough or irregular, planar	1.5
Smooth, planar	1.0
Slickensided, planar	0.5
Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0
Sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	-

ที่มา: Barton (2002)

3. ระดับการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (Joint Alteration Number, J_a)

การแปรเปลี่ยนของแนวแตกจะพิจารณาทั้งลักษณะภายนอกบริเวณผนังแนวแตก และวัสดุที่อุดอยู่ในแนวแตก มีเกณฑ์การประเมินระดับการแปรเปลี่ยนของแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_a ดังตารางที่ 21 และสามารถคำนวณร่วมกับ J_r เพื่อประเมินค่ามุมเสียดทานภายในได้ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 21 เกณฑ์ประเมินระดับการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (J_a)

Condition	Friction (degree)	J_a
Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz, epidote	-	0.75
Unaltered joint walls, surface staining only	25-35	1.0
Slightly altered joint walls; non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30	2.0
Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening)	20-25	3.0
Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite, mica, chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays (discontinuous coatings, 1–2 mm or less in thickness)	8-16	4.0
Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30	4.0
Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)	16-24	6.0
Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)	12-16	8.0
Swelling clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, <5 mm in thickness); value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles, and access to water, etc.	6-12	8-12
Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay	6-24	6, 8 or 8-12
Zones or bands of silty or sandy clay, small clay fraction (non-softening)	-	5.0
Thick, continuous zones or bands of clay	6-24	10, 13 or 13-20

ที่มา: Barton (2002)

ตารางที่ 22 การประมาณค่ามุมเสียดทานภายในหน่วยองศาจากการคำนวณด้วย J_r และ J_a

$\tan^{-1}(J_r/J_a)$		J_a							
		0.75	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	12.0
J_r	4.0	79	76	63	53	45	34	27	18
	3.0	76	72	56	45	37	27	21	14
	2.0	69	63	45	34	27	18	14	9.5
	1.5	63	56	37	27	21	14	11	7.1
	1.0	53	45	27	18	14	9.5	7.1	4.7
	0.5	34	27	14	9.5	7.1	4.7	3.6	2.4

ที่มา: Barton (2002)

4. ตัวประกอบลดลงจากน้ำในแนวแตก (Joint Water Reduction Factor, J_w)

แรงดันน้ำมีอิทธิพลต่อกำลังเฉือนของแนวแตก ทำให้เกิดการชะล้างวัสดุออกจากแนวแตก และทำให้แร่ดินเกิดการพองตัว ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของแนวแตกลดลง มีเกณฑ์การประเมินอิทธิพลของน้ำที่มีต่อแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_w ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบลดลงจากน้ำในแนวแตก (J_w)

Condition	Pressure (MPa)	J_w
Dry excavation or minor inflow, i.e., 5 lt./min locally	<0.1	1
Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.1-0.25	0.66
Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.25-1.0	0.5
Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	0.25-1.0	0.33
Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time	>1.0	0.2-0.1
Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	>1.0	0.1-0.05

ที่มา: Barton (2002)

5. ตัวประกอบลดลงจากความเค้น (Stress Reduction Factor, SRF)

กิจกรรมบางประเภทมีอิทธิพลต่อความเค้นที่มวลหินต้องแบกรับ เช่น การขุดบริเวณเขตรอยเลื่อนหรือบริเวณที่เป็นดินเหนียว จึงต้องประเมินปัจจัยนี้เพื่อป้องกันสภาพความเค้นที่เกิดขึ้นกับมวลหิน มีเกณฑ์การประเมินอิทธิพลของความเค้นให้เป็นค่าปัจจัย SRF ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 เกณฑ์ประเมินตัวประกอบลดลงจากความเค้น (SRF)

Condition	UCS / Stress	SRF
Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)		10.0
Single-weakness clay zone or chemically disintegrated rock (excavation depth ≤ 50 m)		5.0
Single-weakness clay zone or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5
Multiple-shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)		7.5
Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation ≤ 50 m)		5.0
Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation > 50 m)		2.5
Competent rock, rock stress problems	UCS / Stress	SRF
Low stress, near surface, open joints	>200	2.5
Medium stress, favorable stress condition	200-10	1.0
High stress, very tight structure; usually favorable to stability, may be unfavorable to wall stability	10-5	0.5-2.0
Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	5-3	5-50
Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3-2	50-200
Heavy rock burst (strain-burst) and immediate dynamic deformations in massive rock	<2	200-400
Mild squeezing rock pressure		5-10
Heavy squeezing rock pressure		10-20
Mild swelling rock pressure		5-10
Heavy swelling rock pressure		10-15

ที่มา: Barton (2002)

เมื่อประเมินปัจจัยเสริมจลัน สามารถคำนวณค่า Q ได้โดยใช้สมการที่ 7 (Barton et al., 1974) เพื่อประเมินระดับชั้นมวลหินเทียบกับตารางที่ 25 จากนั้นคำนวณค่าตัวประกอบผนัง (Wall Factor, Q_w) ตามเงื่อนไขในตารางที่ 26 (Singh and Goel, 2011) และคำนวณค่าแรงที่ต้องใช้ในการค้ำยันเพดานและผนังอุโมงค์โดยใช้สมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ แต่หาก J_n มีค่าน้อยกว่า 3 ให้ใช้สมการที่ 10 และ 11 และในกรณีที่ Q มีค่าต่ำกว่า 4 ซึ่งจัดเป็นหินไม่แข็งแรง แนะนำให้คำนวณแรงค้ำยันเพดานโดยคำนึงถึงขนาดอุโมงค์ด้วยสมการที่ 12 (Bhasin and Grimstad, 1996)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{สมการที่ 7})$$

โดยที่ RQD, J_n , J_r , J_a , J_w และ SRF คือค่าที่ประเมินได้จากปัจจัยที่ 1 ถึง 6

ตารางที่ 25 เกณฑ์จำแนกระดับชั้นมวลหินจากค่า Q

Classification	Q
Exceptionally poor	0.001-0.01
Extremely poor	0.01-0.1
Very poor	0.1-1
Poor	1-4
Fair	4-10
Good	10-40
Very good	40-100
Extremely good	100-400
Exceptionally good	400-1000

ที่มา: Singh and Goel (2011)

ตารางที่ 26 เงื่อนไขการคำนวณค่าตัวประกอบผนัง (Q_w)

Range of Q	Wall Factor (Q_w)
>10	5.0Q
0.1-10	2.5Q
<0.1	1.0Q

ที่มา: Singh and Goel (2011)

$$P_v = \frac{0.2}{J_r} Q^{-1/3} \quad (\text{สมการที่ 8})$$

โดยที่ P_v คือแรงดันค้ำยันเพดานที่ทำให้มีเสถียรภาพพอดี หน่วย MPa
 Q คือค่าคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality) และ J_r คือค่าประเมินจากปัจจัยที่ 3

$$P_h = \frac{0.2}{J_r} Q_w^{-1/3} \quad (\text{สมการที่ 9})$$

โดยที่ P_h คือแรงดันค้ำยันผนังที่ทำให้มีเสถียรภาพพอดี หน่วย MPa
 Q_w คือค่าตัวประกอบผนัง (Wall Factor) และ J_r คือค่าประเมินจากปัจจัยที่ 3

$$P_v = \frac{0.2J_n^{1/2}}{3J_r} Q^{-1/3} \quad (\text{สมการที่ 10})$$

โดยที่ P_v คือแรงดันค้ำยันเพดานที่ทำให้มีเสถียรภาพพอดี หน่วย MPa (เมื่อ $J_n < 3$)
 Q คือค่าคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality), J_n และ J_r คือค่าประเมินจากปัจจัยที่ 1 และ 3

$$P_h = \frac{0.2J_n^{1/2}}{3J_r} Q_w^{-1/3} \quad (\text{สมการที่ 11})$$

โดยที่ P_h คือแรงดันค้ำยันผนังที่ทำให้มีเสถียรภาพพอดี หน่วย MPa (เมื่อ $J_n < 3$)
 Q_w คือค่าตัวประกอบผนัง (Wall Factor), J_n และ J_r คือค่าประเมินจากปัจจัยที่ 1 และ 3

$$P_v = \frac{40B}{J_r} Q^{-1/3} \quad (\text{สมการที่ 12})$$

โดยที่ P_v คือแรงดันค้ำยันเพดานที่ทำให้มีเสถียรภาพพอดีหน่วย kPa (เมื่อ $Q < 4$)
 B คือความกว้างโครงหลังคาหน่วยเมตร, Q คือค่าคุณภาพมวลหิน และ J_r คือค่าประเมินจากปัจจัยที่ 3

ค่ามิติเทียบเท่า (Equivalent Dimension, D_e) สำหรับการประเมินเสถียรภาพสามารถคำนวณตามนิยามได้โดยใช้สมการที่ 13 ร่วมกับค่าอัตราส่วนค้ำยันการเปิดหน้างาน (Excavation Support Ratio, ESR) ดังตารางที่ 27 หรือคำนวณจากค่า Q ได้โดยใช้สมการที่ 14 จากนั้นประเมินวิธีการค้ำยันชั้นต่ำโดยการพล็อตค่า Q และ D_e ลงบนกราฟในรูปที่ 1 แต่หากค่าประเมินแต่ละปัจจัยเข้าเงื่อนไขตามตารางที่ 28 ให้ตีความว่าอุโมงค์นั้นสามารถค้ำยันตัวเองได้ (self-supporting) ไม่จำเป็นต้องเสริมค้ำยันเพิ่มเติม

$$D_e = \frac{B_s}{\text{ESR}} \quad (\text{สมการที่ 13})$$

โดยที่ D_e คือค่ามิติเทียบเท่าหน่วยเมตร, B_s คือความกว้างโครงหลังคาหรือความสูงอุโมงค์หน่วยเมตร
 ESR คือค่าประเมินอัตราส่วนค้ำยันการเปิดหน้างาน (Excavation Support Ratio)

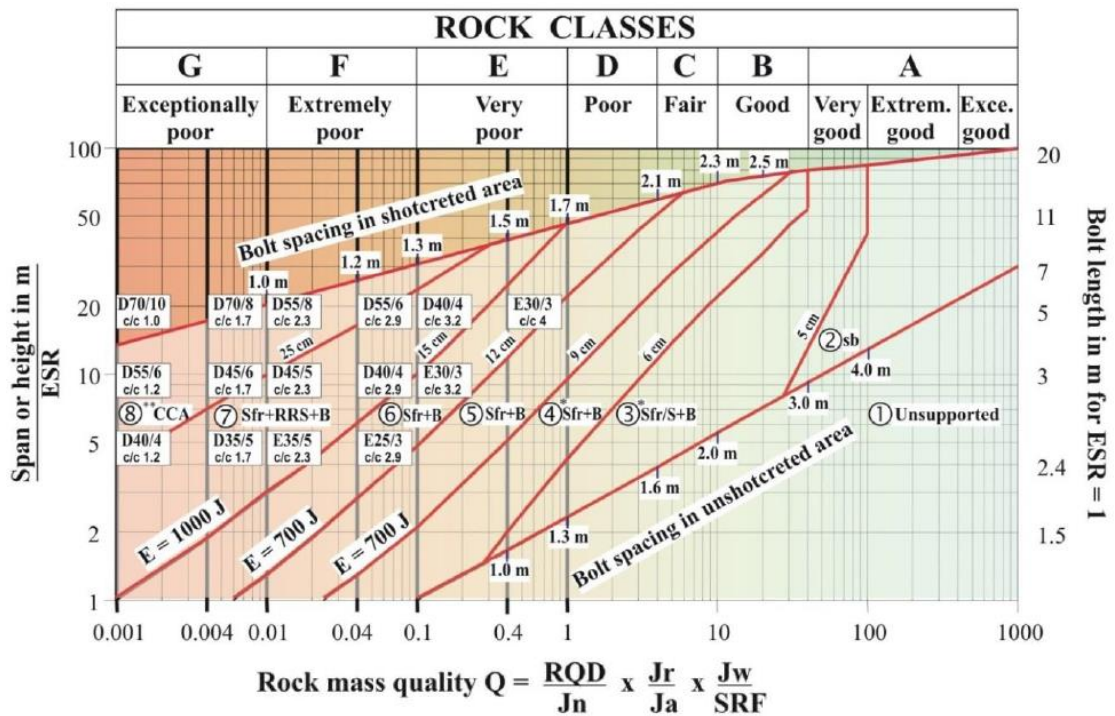
ตารางที่ 27 ค่าอัตราส่วนค้ำยันการเปิดหน้างาน (ESR)

Type of Excavation	ESR
Temporary mine openings, etc.	2.0-5.0
Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large openings, surge chambers	1.6-2.0
Storage caverns, water treatment plants, minor road and railway tunnels, access tunnels	1.2-1.3
Power stations, major road and railway tunnels, civil defense chambers, portals, intersections	0.9-1.1
Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories, major gas pipeline tunnels	0.5-0.8

ที่มา: Barton (2008)

$$D_e = 2Q^{0.4} \quad (\text{สมการที่ 14})$$

โดยที่ D_e คือค่ามิติเทียบเท่าหน่วยเมตร และ Q คือค่า Rock Mass Quality



REINFORCEMENT CATEGORIES

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting, sb 3) Systematic bolting, and unreinforced or fibre reinforced shotcrete, 5-6 cm), Sfr/B+S | <ul style="list-style-type: none"> 4) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 6-9 cm, Sfr+B 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12 cm, Sfr (E700) +B 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15 cm, Sfr (E700) +B 7) Fibre reinforced shotcrete > 15 cm + reinforced ribs of shotcrete and bolting, Sfr (E1000) +RRS+B 8) Cast concrete lining, CCA or Sfr (E1000) +RRS+B |
|--|--|

The bolts are 20 or 25 mm in diameter

E) Energy absorption in fibre reinforced shotcrete at 25 mm bending during plate testing

D45/6 = RRS with totally 6 reinforcement bars in double layer in 45 cm thick ribs with centre to centre (c/c) spacing 1.7 m. Each box corresponds to Q-values on the left hand side of the box

- *) Up to 10 cm in large spans
- **) Or **Sfr+RRS+B**

รูปที่ 1 แผนภูมิแยกประเภทการค้ำยันของระบบ Q
ที่มา: Grimstad (2007)

ตารางที่ 28 เงื่อนไขของโมเมนต์ที่ไม่ต้องค้ำยันตามเกณฑ์จำแนกระบบ Q

Unsupported Tunnel Conditions
$J_n < 9, J_r > 1.0, J_a < 1.0, J_w = 1.0$ and $SRF < 2.5$
$RQD < 40$ and $J_n < 2$
$J_n = 9, J_r > 1.5$ and $RQD > 90$
$J_r = 1.0$ and $J_w < 4$
$SRF > 1$ and $J_r > 1.5$
If span > 10 m need $J_n < 9$
If span > 20 m need $J_n < 4$ and $SRF < 1$

ที่มา: Barton et al. (1974)

ดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index, GSI)

ดัชนีกำลังธรณีเป็นระบบการจำแนกมวลหินในภาคสนามที่อาศัยการตรวจสอบสภาพทางธรณีวิทยาที่พบเห็นภายนอกของมวลหิน (Hoek and Brown, 1997) หรือประเมินค่าตัวประกอบ 3 ค่า เพื่อคำนวณค่าตัวประกอบเงื่อนไขแนวแตก (Joint Condition Factor, J_C) โดยใช้สมการที่ 15 แล้วคำนวณหาค่าดัชนี GSI โดยใช้สมการที่ 16 (Cai and Kaiser, 2006)

$$J_C = \frac{J_w J_s}{J_A} \quad (\text{สมการที่ 15})$$

โดยที่ J_w คือตัวประกอบความเป็นลอนของแนวแตก, J_s คือตัวประกอบความเรียบของแนวแตก
 J_A คือตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของแนวแตก

$$GSI = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_C + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_C - 0.0253 \ln V_b} \quad (\text{สมการที่ 16})$$

โดยที่ J_C คือค่าเงื่อนไขแนวแตกและ V_b คือปริมาตรของบล็อกหินหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

ปัจจัยทั้ง 3 ของดัชนีกำลังธรณีมีดังนี้

1. ตัวประกอบความเป็นลอนของแนวแตก (Joint Waviness Factor, J_w)

ความเป็นลอนของแนวแตกคือ ร้อยละของความสูงยอดแนวแตกถึงท้องร่องแนวแตกเดียวกันต่อช่วงกว้างของร่องแนวแตกนั้น (Singh and Goel, 2011) หรืออธิบายจากลักษณะที่พบบนมวลหิน มีเกณฑ์ประเมินความเป็นลอนของแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_w ดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ตัวประกอบความเป็นลอนของแนวแตก (J_w)

Terms	Undulation	J_w
Interlocking (large-scale)		3
Stepped		2.5
Large undulation	>3%	2
Small to moderate undulation	0.3–3%	1.5
Planar	<0.3%	1

ที่มา: Cai et al. (2004) และ Palmstrom (1995)

2. ตัวประกอบความเรียบของแนวแตก (Joint Smoothness Factor, J_s)

ความเรียบของแนวแตกเป็นอีกแง่มุมหนึ่งที่สื่อความหมายถึงความขรุขระของพื้นผิวแนวแตก ซึ่งมีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานและความสามารถในการรับแรง มีเกณฑ์ประเมินตัวประกอบความเรียบของแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_s ดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ตัวประกอบความเรียบของแนวแตก (J_s)

Terms	Description	J_s
Very rough	Near vertical steps and ridges occur with interlocking effect on the joint surface	3
Rough	Some ridges and side-angles are evident; asperities are clearly visible; discontinuity surface feels very abrasive (rougher than sandpaper grade 30)	2
Slightly rough	Asperities on the discontinuity surfaces are distinguishable and can be felt (like sandpaper grade 30–300)	1.5
Smooth	Surface appears smooth and feels so to the touch (smoother than sandpaper grade 300)	1
Polished	Visual evidence of polishing exists; this is often seen in coating of chlorite and especially talc	0.75
Slickensided	Polished and striated surface that results from sliding along a fault surface or other movement surface	0.6-1.5

ที่มา: Cai et al. (2004) และ Palmstrom (1995)

3. ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (Joint Alteration Factor, J_A)

การแปรเปลี่ยนของแนวแตกในปัจจุบันนี้ครอบคลุมทั้งสภาพของแนวแตกและวัสดุที่อุดอยู่ในแนวแตก แร่บางชนิดอาจเกิดการก่อผลึกและเคลือบอยู่บนพื้นผิวของแนวแตกได้ มีเกณฑ์ประเมินตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของแนวแตกให้เป็นค่าปัจจัย J_A ดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของแนวแตก (J_A)

Term	Description	J_A
Healed or “welded” joints (unweathered)	Softening, impermeable filling (quartz, epidote, etc.)	0.75
Fresh rock walls (unweathered)	No coating or filling on joint surface, except for staining	1
Alteration of joint wall: slightly to moderately weathered	The joint surface exhibits one class higher alteration than the rock	2
Alteration of joint wall: highly weathered	The joint surface exhibits two classes higher alteration than the rock	4
Sand, silt, calcite, talc, etc.	Coating of frictional material without clay	3
Clay, chlorite, talc, etc.	Coating of softening and cohesive minerals	4
Sand, silt, calcite, etc.	Filling of frictional material without clay	4
Compacted clay materials	“Hard” filling of softening and cohesive materials	6
Soft clay materials	Medium to low overconsolidation of filling	8
Swelling clay materials	Filling material exhibits swelling properties	8-12

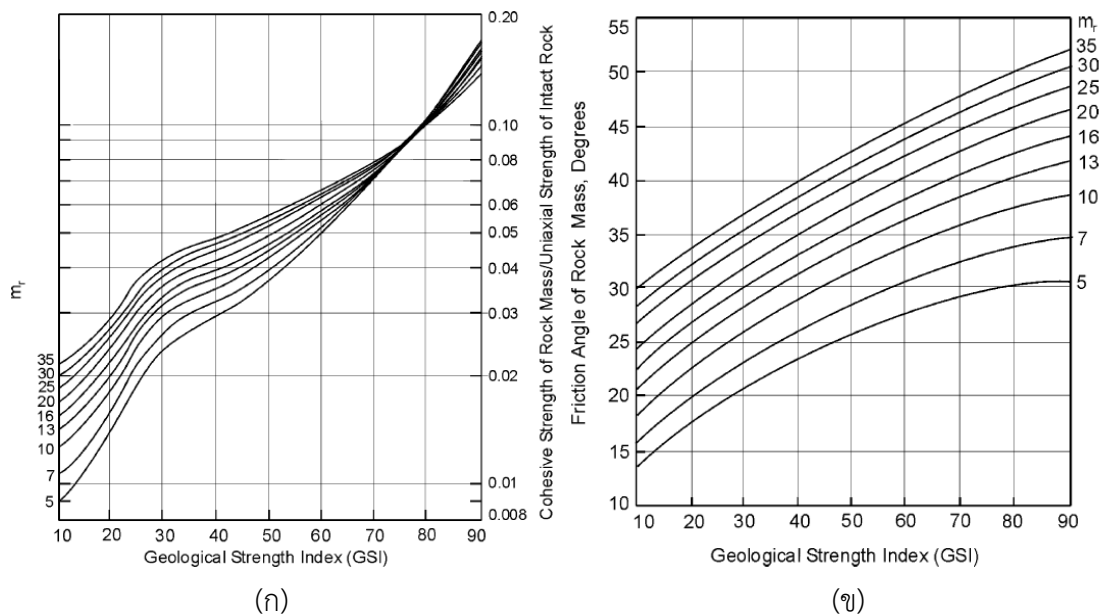
ที่มา: Cai et al. (2004) และ Palmstrom (1995)

ค่าดัชนี GSI ที่คำนวณได้จะใช้ร่วมกับค่าคงที่ของวัสดุหิน (m_r) ที่ประเมินโดยใช้ตารางที่ 32 เพื่อพล็อตลงบนกราฟในรูปที่ 2(ก) สำหรับประเมินอัตราส่วนการยึดเกาะของมวลหินต่อกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ และรูปที่ 2(ข) สำหรับประเมินค่ามุมเสียดทานภายในของหิน (Hoek et al., 1998)

ตารางที่ 32 ค่าคงที่ของวัสดุหิน (m_r)

Rock Type	m_r	Rock Type	m_r	Rock Type	m_r
Conglomerate	22	Marble	9	Obsidian	19
Sandstone	19	Hornfels	19	Granodiorite	30
Siltstone	9	Quartzite	24	Dacite	17
Claystone	4	Migmatite	30	Diorite	28
Greywacke	18	Amphibolite	25-31	Andesite	19
Chalk	7	Mylonites	6	Gabbro	27
Coal	8-21	Gneiss	33	Dolerite	19
Breccia	20	Schists	4-8	Basalt	17
Sparitic limestone	10	Phyllites	10	Norite	22
Micritic limestone	8	Slates	9	Agglomerate	20
Gypstone	16	Granite	33	Breccia	18
Anhydrite	13	Rhyolite	16	Tuff	15

ที่มา: Hoek et al. (1998)



รูปที่ 2 (ก) กราฟเทียบประเมินอัตราส่วนการยึดเกาะของมวลหินต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว

(ข) กราฟเทียบประเมินค่ามุมเสียดทานภายในของมวลหิน

ที่มา: Hoek and Brown (1997)

ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

แอนดรอยด์เป็นระบบปฏิบัติการเปิดของอุปกรณ์พกพาที่ไม่มีผู้ครอบครองกรรมสิทธิ์ (non-proprietary) และเป็นหนึ่งเดียว (unified) คือ โปรแกรมประยุกต์หนึ่งสามารถใช้กับอุปกรณ์แอนดรอยด์ได้ทุกเครื่อง (Lovichit, 2015) จากสถิติส่วนแบ่งทางการตลาดตามระบบปฏิบัติการของสมาร์ทโฟน พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 จนถึงปัจจุบัน แอนดรอยด์มีส่วนแบ่งทางการตลาดเกือบร้อยละ 85 และมีแนวโน้มในอนาคตว่าแอนดรอยด์จะยังคงครองตลาดผู้ใช้งานสมาร์ทโฟนส่วนใหญ่ดังตารางที่ 33 (Chau et al., 2018)

ตารางที่ 33 ส่วนแบ่งทางการตลาดของสมาร์ทโฟนแบ่งตามระบบปฏิบัติการ

Year	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Android	84.6%	85.1%	84.8%	85.2%	85.3%	85.4%	85.5%
iOS	14.7%	14.7%	15.1%	14.8%	14.6%	14.6%	14.5%
Others	0.7%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

หมายเหตุ: ข้อมูลปี 2018-2022 เป็นผลการทำนายแนวโน้มเชิงสถิติ

ที่มา: Chau et al. (2018)

หมายเลขรุ่นที่บ่งบอกลำดับขั้นการพัฒนาเค้าโครงระบบและขีดความสามารถ เรียกว่า API Level (Application Programming Interface) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 34 ซึ่งในปัจจุบันพบว่าผู้ใช้งานอุปกรณ์แอนดรอยด์ตั้งแต่ API level 16 เป็นต้นไปคิดเป็นร้อยละ 99.4 ของทั้งหมด (Google and Open Handset Alliance, 2018) ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์จึงมุ่งเน้นที่ API level 16 เป็นต้นไป

การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์ใช้โปรแกรม Android Studio ซึ่งเป็นโปรแกรมประสานงานสภาพแวดล้อมในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Integrated Development Environment, IDE) ซึ่งเป็นเครื่องมือสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface, UI), เขียนชุดคำสั่ง (programming), แก้ไขจุดบกพร่อง (debug), ดำเนินงาน (run) และส่งออกโปรแกรมประยุกต์เป็นไฟล์นามสกุล .APK (Android application Package file) สำหรับติดตั้งบนอุปกรณ์แอนดรอยด์เสร็จสิ้นในโปรแกรมเดียว โดยคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้งานโปรแกรมนี้ได้ต้องมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ 35 และต้องติดตั้ง Java Development Kit (JDK) เพื่อใช้เป็นตัวแปลโปรแกรม (compiler) ทั้งนี้การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์ต้องใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกันในการวางโครงสร้างข้อมูล, การประมวลผล และการแสดงผลทั้งสิ้น 4 ภาษาคือ

1. ภาษาจาวา (Java Language) สำหรับเขียนโครงสร้างและตรรกะของโปรแกรมประยุกต์
2. ภาษาเอกซ์เอ็มแอล (Extensible Markup Language, XML) สำหรับสร้างการแสดงผล
3. ภาษาเอสคิวแอล (Standard Query Language, SQL) สำหรับนิยามข้อมูลและฐานข้อมูล
4. ภาษากรูวี (Groovy) เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงวากสัมพันธ์ (syntax) ของแต่ละภาษา

ตารางที่ 34 รุ่นและสัดส่วนการใช้งานของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

Code Name	Version	Release Date	Distribution (%)	API level
Pie	9.0	6 August 2018	<0.1	API 28
Oreo	8.1	18 December 2017	5.8	API 27
Oreo	8.0	21 August 2017	13.4	API 26
Nougat	7.1	19 October 2016	10.3	API 25
Nougat	7.0	22 August 2016	19.0	API 24
Marshmallow	6.0	5 October 2015	21.6	API 23
Lollipop	5.1	9 March 2015	14.7	API 22
Lollipop	5.0	12 November 2014	3.6	API 21
KitKat	4.4	31 October 2013	7.8	API 19
Jelly Bean	4.3	24 July 2013	0.5	API 18
Jelly Bean	4.2.x	13 November 2012	1.6	API 17
Jelly Bean	4.1.x	27 June 2012	1.1	API 16
Ice Cream Sandwich	4.0.3 – 4.0.4	16 December 2011	0.3	API 15, NDK 8
Ice Cream Sandwich	4.0.1 – 4.0.2	19 October 2011	<0.1	API 14, NDK 7
Honeycomb	3.2.x	15 July 2011	<0.1	API 13
Honeycomb	3.1	10 May 2011	<0.1	API 12, NDK 6
Honeycomb	3.0	22 February 2011	<0.1	API 11
Gingerbread	2.3.3 – 2.3.7	9 February 2011	0.3	API 10
Gingerbread	2.3 – 2.3.2	6 December 2010	<0.1	API 9, NDK 5
Froyo	2.2.x	20 May 2010	<0.1	API 8, NDK 4
Éclair	2.1	12 January 2010	<0.1	API 7, NDK 3
Éclair	2.0.1	3 December 2009	<0.1	API 6
Éclair	2.0	26 October 2009	<0.1	API 5
Donut	1.6	15 August 2009	<0.1	API 4, NDK 2
Cupcake	1.5	30 April 2009	<0.1	API 3, NDK 1
(no code name)	1.1	9 February 2009	<0.1	API 2
(no code name)	1.0	23 August 2008	<0.1	API 1

หมายเหตุ: NDK (Native Development Kit) คือชุดเครื่องมือที่นักพัฒนาสามารถใช้ภาษา C/C++ ในการพัฒนาได้
ที่มา: Google and Open Handset Alliance (2018)

ตารางที่ 35 ข้อมูลจำเพาะขั้นต่ำของคอมพิวเตอร์ที่โปรแกรม Android Studio ต้องการ

Windows	Mac	Linux
Microsoft Windows 7/8/10	Mac OS X 10.10 - 10.13	GNOME หรือ KDE Desktop
RAM ขั้นต่ำ 3 GB แนะนำที่ 8 GB	RAM ขั้นต่ำ 3 GB แนะนำที่ 8 GB	RAM ขั้นต่ำ 3 GB แนะนำที่ 8 GB
พื้นที่ว่างขั้นต่ำ 2 GB แนะนำ 4 GB	พื้นที่ว่างขั้นต่ำ 2 GB แนะนำ 4 GB	พื้นที่ว่างขั้นต่ำ 2 GB แนะนำ 4 GB
ความละเอียดหน้าจอ 1280 x 800	ความละเอียดหน้าจอ 1280 x 800	ความละเอียดหน้าจอ 1280 x 800
		GNU C Library (glibc) 2.11

ที่มา: Google and Open Handset Alliance (2018)

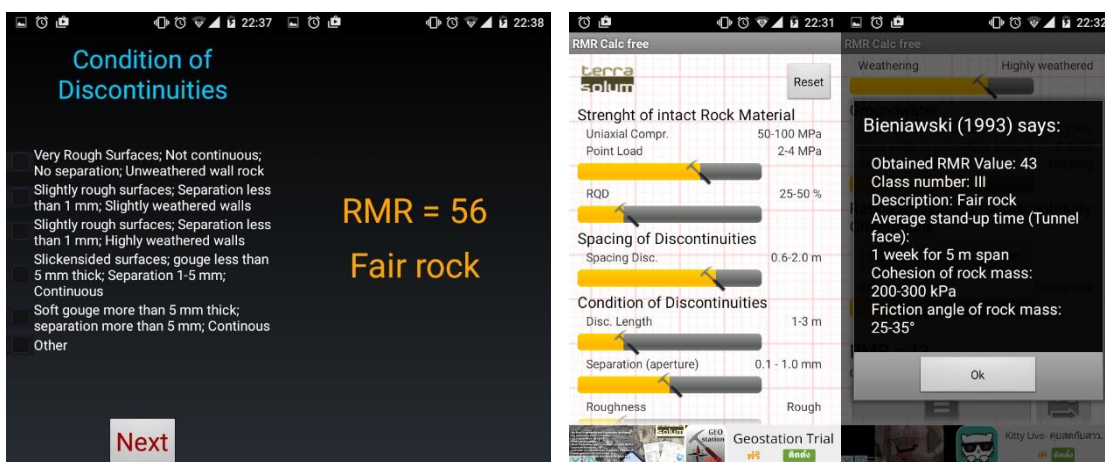
โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหิน

โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินได้ถูกพัฒนาอย่างแพร่หลายบน Google Play Store ทั้งแบบทดลองใช้และแบบซื้อถาวร แต่ละโปรแกรมประยุกต์มีจุดเด่น จุดด้อย และฟังก์ชันที่แตกต่างกันดังตารางที่ 36

ตารางที่ 36 โปรแกรมประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกมวลหินบน Google Play Store

ชื่อ	ฟังก์ชัน				ผู้พัฒนา
	RMR	SMR	Q	GSI	
Rock Mass Classification	X		X	X	Sarangı (2013)
GeoToolbox	X		X		Filipponi (2013)
RMR Calc	X				Geomecanica Apps (2014)
Geostation	X		X		Geomecanica Apps (2014)
RMR & GRC	X				Saricam (2015)
Slope Mass Rating (SMR)	X	X			Assis (2016)
Q-system			X		Norges Geotekniske Institutt (2016)
Q-slope			X		Sator (2016)
Q-system (tunnelling)			X		Sator (2016)

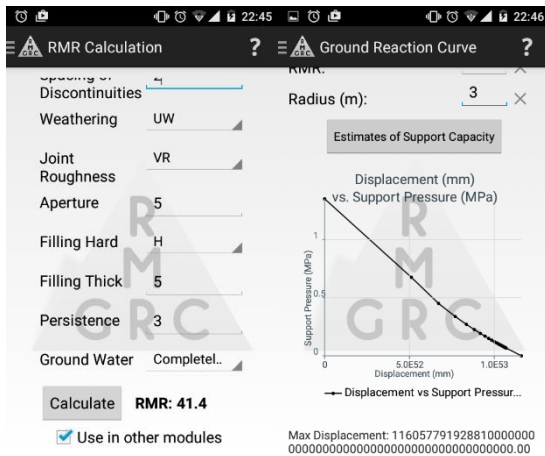
โปรแกรมประยุกต์ข้างต้นมีราคาขายตั้งแต่ 60 จนถึง 3,200 บาท ต่อการใช้งานบนสมาร์ทโฟน 1 เครื่อง โดยส่วนมากมักมีรุ่นทดลอง (trial version) ให้ผู้สนใจทดลองใช้งานในฟังก์ชันที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินที่ประกอบด้วยหลักการ RMR, SMR, Q และ GSI เพื่อใช้งานในเชิงวิชาการ ซึ่งเปิดให้ดาวน์โหลดไปใช้งานฟรี โดยไม่มีค่าใช้จ่ายใดๆ ตัวอย่างโปรแกรมประยุกต์รุ่นทดลองบน Google Play Store มีการแสดงผลดังรูปที่ 3 และ 4



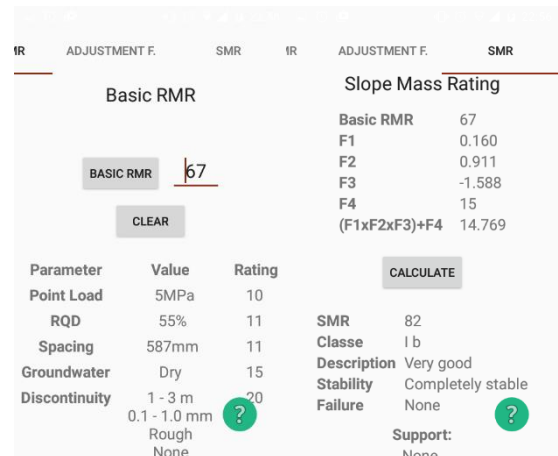
(ก)

(ข)

รูปที่ 3 (ก) โปรแกรมประยุกต์ Rock Mass Classification (ข) โปรแกรมประยุกต์ RMR Calc free



(ก)



(ข)

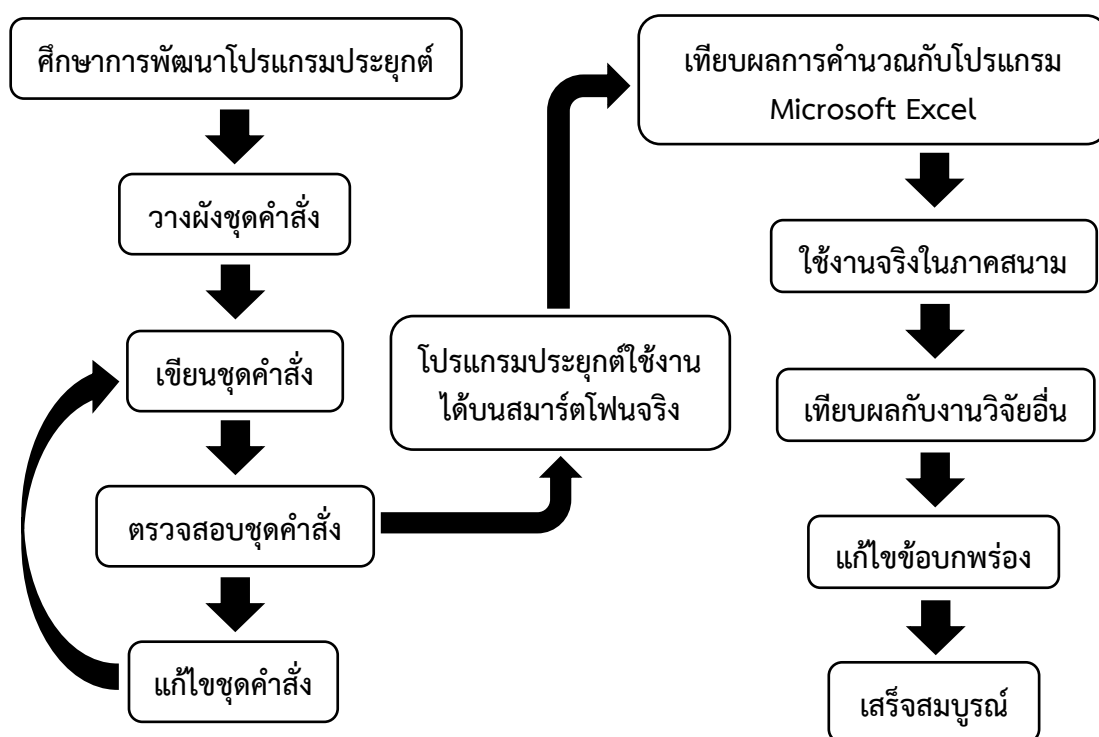
รูปที่ 4 (ก) โปรแกรมประยุกต์ RMR & GRC (ข) โปรแกรมประยุกต์ Slope Mass Rating (SMR)

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยใช้การจำแนกมวลหิน 4 หลักการ คือ 1. การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating) 2. การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating) 3. การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality) และ 4. ดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index) สำหรับสมาร์ตโฟนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ช่วยให้สามารถประเมินเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้นได้ทันทีที่หน้างาน มีความรวดเร็วและถูกต้องตามหลักวิชาการ ส่งเสริมให้วิศวกรตระหนักถึงความสำคัญด้านความปลอดภัยเชิงเสถียรภาพมวลหินมากยิ่งขึ้น

วิธีการดำเนินงาน

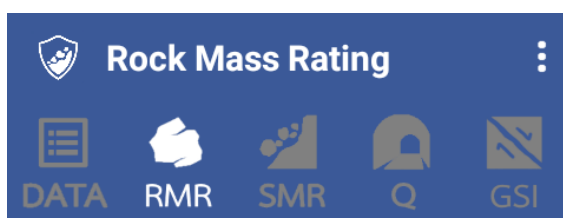
การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์เริ่มจากการศึกษาภาษาจาวา ภาษาเอกซ์เอ็มแอล ภาษาเอสคิวแอล และภาษากรูวีที่จำเป็นต้องใช้ในการเขียนชุดคำสั่ง จากนั้นวางแผนชุดคำสั่งให้เชื่อมโยงและทำงานประสานกันได้พร้อมทั้งติดตั้งโปรแกรม Android Studio สำหรับใช้เขียนชุดคำสั่ง แล้วจึงเขียนชุดคำสั่ง ทดสอบชุดคำสั่ง และแก้ไขชุดคำสั่ง จนกระทั่งโปรแกรมประยุกต์สามารถใช้งานได้บนสมาร์ตโฟนจริง จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณจากโปรแกรมประยุกต์โดยเทียบกับผลการคำนวณแบบดั้งเดิมจากโปรแกรม Microsoft Excel และแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นบนโปรแกรมประยุกต์ทั้งหมด สุดท้ายทดสอบการใช้งานจริงในภาคสนาม ลาดหินทรายสลับหินดินดาน หลังโรงเรียน มอ. วิทยานุสรณ์ และลาดหินฮอร์นเฟลส์ของผนังบ่อเหมืองบริษัท เขابันไดนางศิลา จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และเทียบผลกับกรณีศึกษาจากงานวิจัยอื่น มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยสังเขปดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์

ผลและการวิเคราะห์

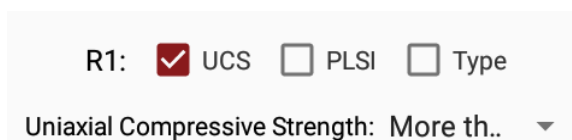
โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์ประเภทเนทีฟ (native android application) ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ชื่อโปรแกรมว่า “Prince of Songkla University – Rock Mass Classification” หรือ “PSU-RMC” สามารถทำงานได้เบ็ดเสร็จในตัวเองโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเซิร์ฟเวอร์ เหมาะสำหรับสมาร์ทโฟนและแท็บเล็ตแอนดรอยด์ที่มีระบบปฏิบัติการใหม่กว่าเวอร์ชัน API 16: Android 4.1 (Jelly Bean) แถบเมนูของโปรแกรมประยุกต์สำหรับการเลือกใช้งานโมดูลต่างๆ ดังรูปที่ 6 ประกอบด้วยโลโก้ของโปรแกรมประยุกต์ ชื่อโมดูลปัจจุบันที่กำลังใช้งาน ปุ่มแสดงรายละเอียดของโปรแกรมประยุกต์ โมดูลจัดการข้อมูล โมดูลการประเมินมวลหิน โมดูลการประเมินลาดหิน โมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน และโมดูลดัชนีกำลังธรณี ตามลำดับ



รูปที่ 6 แถบเมนูของโปรแกรมประยุกต์สำหรับเรียกใช้งานโมดูลต่างๆ

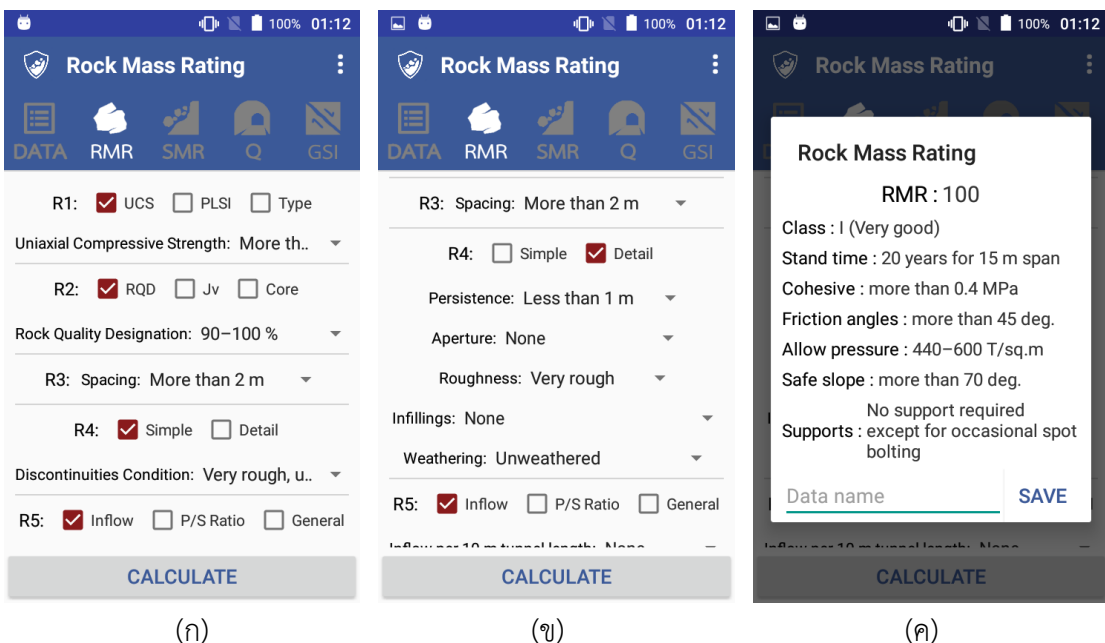
โมดูลการจำแนกมวลหิน

โมดูลการจำแนกมวลหินแบ่งย่อยออกเป็น 4 หลักการดังที่กล่าวไปข้างต้น การแสดงผลของแต่ละโมดูลย่อยถูกออกแบบให้มีลักษณะเดียวกัน เพื่อลดความซับซ้อนของเงื่อนไขการประเมินเสถียรภาพมวลหินและทำให้เป็นมิตรต่อผู้ใช้งานมากที่สุด ปัจจัยมวลหินส่วนมากที่ผู้ใช้ต้องป้อนเข้าสู่โปรแกรมประยุกต์มีหลายแนวทางให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม โปรแกรมประยุกต์จึงมีกล่องตัวเลือก (checkbox) ให้ผู้ใช้เลือกประเภทของข้อมูลป้อนเข้า แล้วจึงใช้แถบตัวเลือก (spinner) ที่มีเครื่องหมายสามเหลี่ยมหัวคว่ำในการเลือกค่าประเมินดังรูปที่ 7 ปัจจัยมวลหินที่ผู้ใช้ต้องป้อนเข้าสู่โปรแกรมประยุกต์ถูกเรียงตามลำดับดังหลักการดั้งเดิม ทำให้สามารถป้อนข้อมูลได้ง่ายและไม่เกิดความซ้ำซ้อนหรือดกหล่นสำหรับผู้ใช้งานรายใหม่ ทั้งนี้ผู้ใช้งานมากประสบการณ์สามารถลำดับการป้อนข้อมูลได้ด้วยตนเองเพื่อประเมินมวลหินในเงื่อนไขที่พลิกแพลงมากขึ้น



รูปที่ 7 กล่องตัวเลือกสำหรับเลือกประเภทข้อมูลป้อนเข้าและแถบตัวเลือกสำหรับเลือกค่าประเมิน

โมดูลการประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating) ผู้ใช้ต้องป้อนปัจจัยทั้ง 6 ประการ เพื่อประเมินเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้น โมดูลนี้เหมาะสำหรับการใช้งานกับมวลหินที่เกี่ยวข้องกับงาน อุโมงค์และฐานรากเขื่อน แต่ไม่เหมาะกับมวลหินที่เกี่ยวข้องกับความลาดแม้ว่าภายในโมดูลจะสามารถประเมินได้ก็ตาม การป้อนค่าปัจจัยบางชนิด เช่น ปัจจัยที่ 4 (สภาพของความไม่ต่อเนื่อง, R_d) ของโมดูลนี้อำนวยให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกได้ว่าจะป้อนค่าเป็นชุดข้อมูลอย่างง่าย (simple) เพื่อความรวดเร็วดังรูปที่ 8(ก) หรือป้อนค่าอย่างละเอียด (detail) ดังรูปที่ 8(ข) เพื่อผลการประเมินที่แม่นยำกว่า ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินของโมดูลนี้ประกอบด้วยระดับชั้นมวลหิน ระยะเวลายืนหยัด แรงยึดเกาะ มุมเสียดทานภายใน แรงแบกทานที่รับได้ มุมชันที่ปลอดภัย และข้อแนะนำการค้ำยันเพื่อเสริมเสถียรภาพมวลหินดังรูปที่ 8(ค) ซึ่งผลการประเมินเหล่านี้สามารถบันทึกไว้ใช้งานภายหลังได้ในโมดูลจัดการข้อมูล



รูปที่ 8 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าปัจจัยมวลหิน (ข) การป้อนค่าละเอียดของสภาพความไม่ต่อเนื่อง (ค) ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินของโมดูลการประเมินมวลหิน

ตรรกะการคำนวณของโปรแกรมประยุกต์นี้ได้ถูกเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยวิธีปกติโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อยืนยันว่าโปรแกรมประยุกต์ทำงานได้ถูกต้องตามที่เขียนคำสั่งไว้ ชุดเงื่อนไขมวลหินแบบสุ่มที่ครอบคลุมทุกค่าปัจจัยและทุกตัวเลือกได้ถูกสร้างขึ้น 10 กรณี และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับโปรแกรมประยุกต์กรณีดังกล่าวที่ 37 ผลการเปรียบเทียบพบว่าโปรแกรมประยุกต์สามารถทำงานได้ถูกต้องตรงตามหลักการเดิมทุกประการและข้อผิดพลาดส่วนมากของโปรแกรมประยุกต์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ถูกตรวจสอบแล้ว

ตารางที่ 37 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการประเมินมวลหิน

Conditions	Microsoft Excel							PSU
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	RMR	RMC
UCS >250 MPa, RQD 90-100 %, spacing <0.06 m, slickensided wall rock surface, or 1–5 mm thick gouge, or 1–5 mm wide continuous discontinuity, damp surface, tunnel irrespective of strike with dip 0-20 degrees	15	20	5	10	10	-5	55	55
UCS 50-100 MPa, RQD 75-90 %, spacing 0.2-0.6 m, 5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity, water dripping surface, strike parallel to tunnel axis with dip 45-90 degrees	7	17	10	0	4	-12	26	26
UCS 5-25 MPa, RQD 50-75 %, spacing >2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water flowing surface, strike parallel to tunnel axis with dip 20-45 degrees	2	13	20	20	0	-5	50	50
UCS <1 MPa, RQD 25-50 %, spacing 0.06-0.2 m, rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm, completely dry surface, tunnel drive against dip at 20-45 degrees	0	8	8	25	15	-10	46	46
UCS 100-250 MPa, RQD <25 %, spacing 0.6-2 m, very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation, wet surface, tunnel drive against dip at 45-90 degrees	12	3	15	30	7	-5	62	62
UCS 25-50 MPa, RQD 90-100 %, spacing >2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water dripping surface, tunnel drive with dip at 20-45 degrees	4	20	20	20	4	-2	66	66
UCS 1-5 MPa, RQD 75-90 %, spacing 0.2-0.6 m, 5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity, damp surface, tunnel axis perpendicular to strike and drive with dip at 40-90 degrees	1	17	10	0	10	0	38	38
UCS >250 MPa, RQD 50-75 %, spacing <0.06 m, rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water flowing surface, tunnel drive against dip at 45-90 degrees	15	13	5	25	0	-5	53	53
UCS 25-50 MPa, RQD 25-50 %, spacing 0.6-2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, completely dry surface, strike parallel to tunnel axis with dip 45-90 degrees	4	8	15	20	15	-12	50	50
UCS <1 MPa, RQD <25 %, spacing 0.06-0.2 m, very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation, wet surface, strike parallel to tunnel axis with dip 45-90 degrees	0	3	8	30	7	-12	36	36

โมดูลการประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating) มีพื้นฐานมาจาก 5 ปัจจัยแรกของ โมดูลการประเมินมวลหิน และเพิ่มตัวประกอบปรับแก้ 4 ค่าเพื่อให้เหมาะสำหรับการประเมิน เสถียรภาพลาดหินเบื้องต้นดังรูปที่ 9(ก) ผลการประเมินเสถียรภาพลาดหินของโมดูลนี้ประกอบด้วย ระดับชั้นลาดหิน เสถียรภาพของลาดหิน การพิบัติที่อาจจะเกิดขึ้น ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการพิบัติ และข้อเสนอแนะการค้ำยันเพื่อเสริมเสถียรภาพลาดหินดังรูปที่ 9(ข) ซึ่งผลการประเมินเหล่านี้สามารถ บันทึกไว้ใช้งานภายหลังได้ในโมดูลจัดการข้อมูล ผลคำนวณของโมดูลได้ถูกเปรียบเทียบกับลักษณะ เดียวกับโมดูลการประเมินมวลหินดังตารางที่ 38 พบว่าผลการคำนวณทั้งหมดถูกต้องและเชื่อถือได้

(ก)

(ข)

รูปที่ 9 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าตัวประกอบปรับแก้ทั้ง 4 สำหรับการประเมินลาดหิน
(ข) ผลการประเมินเสถียรภาพลาดหินของโมดูลการประเมินลาดหิน

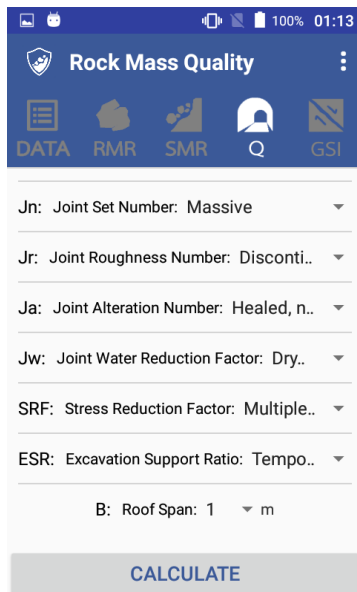
ตารางที่ 38 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการประเมินลาดหิน

Conditions	Microsoft Excel										PSU
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	SMR	RMC
UCS >250 MPa, RQD <25 %, spacing >2 m, slightly rough, highly weathered, aperture <1 mm, water dripping, planar failure, parallelism is >30 degrees, failure dip angle >45 degrees, dips relationship is 0 degrees, poor blasting	15	3	20	20	4	0.15	1.00	-25	-8	50.2	50.2
UCS 100-250 MPa, RQD 25-50 %, spacing 0.2-0.6 m, rough and slightly weathered, aperture <1 mm, completely dry surface, planar failure, parallelism is 20-30 degrees, failure dip angle 35-45 degrees, planar dips relationship is -5 degrees, normal blasting	12	8	10	25	15	0.40	0.85	-50	0	53.0	53.0

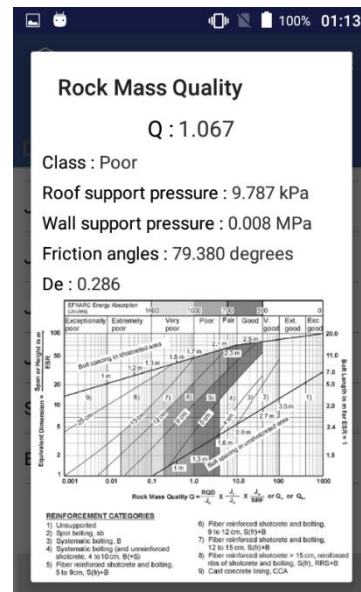
ตารางที่ 38 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการประเมินลาดหิน (ต่อ)

Conditions	Microsoft Excel										PSU
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	SMR	RMC
UCS 75 MPa, RQD 50 %, spacing <0.06 m, slickenside, aperture 3 mm, damp surface, planar failure, parallelism is 15 degrees, failure dip angle 30-35 degrees, dips relationship is -15 degrees, natural slope	7	13	5	10	10	0.70	0.70	-60	15	30.6	30.6
UCS 25-50 MPa, RQD 75-90 %, spacing 0.6-2 m, very rough and unweathered, no separation, water flowing, planar failure, parallelism is 5-10 degrees, failure dip angle 20-30 degrees, dips relationship is >10 degrees, pre-splitting	4	17	15	30	0	0.85	0.40	0	10	76.0	76.0
UCS 5-25 MPa, RQD 90-100 %, spacing 0.06-0.2 m, 5 mm thick soft gouge, wet surface, planar failure, parallelism is <5 degrees, failure dip angle <20 degrees, dips relationship is 5 degrees, smooth blasting	2	20	8	0	7	1.00	0.15	-6	8	44.1	44.1
UCS 1-5 MPa, RQD <25 %, spacing <0.06 m, rough and slightly weathered, separation <1 mm, dry surface, planar failure, parallelism is >30 degrees, failure dip angle >45 degrees, dips relationship is 0 degrees, poor blasting	1	3	5	25	15	0.15	1.00	-25	-8	37.2	37.2
UCS <1 MPa, RQD 25-50 %, spacing 0.5 m, very rough, unweathered, no separation, damp surface, wedge failure, parallelism is 20-30 degrees, failure dip angle 35-45 degrees, dips relationship is -5 degrees, normal blasting or mechanical excavation	0	8	10	30	10	0.40	0.85	-50	0	41.0	41.0
UCS >250 MPa, RQD 50-75 %, spacing >2 m, slickensided surface, aperture 4 mm, water flowing, wedge failure, parallelism is 15 degrees, wedge angle 5 degrees, dips relationship is <-10 degrees, natural slope	15	13	20	10	0	0.70	0.70	-60	15	43.6	43.6
UCS 100-250 MPa, RQD 75-90 %, spacing 0.06-0.2 m, slightly rough and moderately weathered, separation <1 mm, water flowing, wedge failure, parallelism is 5-10 degrees, failure dip angle 25 degrees, dips relationship is >10 degrees, pre-splitting	12	17	8	20	0	0.85	0.40	0	10	67.0	67.0
UCS 75 MPa, RQD 90-100 %, spacing 0.6-2 m, continuous 5 mm thick soft gouge, dry surface, wedge failure, parallelism is <5 degrees, failure dip angle <20 degrees, dips relationship is 0-10 degrees, smooth blasting	7	20	15	0	5	1.00	0.15	-6	8	64.1	64.1

โมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality) เป็นส่วนที่ประกอบด้วย หลักการประเมินที่มีปัจจัยจำนวนมากและมีเงื่อนไขค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าโมดูลอื่น การป้อนข้อมูล ได้ถูกจัดกลุ่มและเรียงลำดับเพื่อลดความซับซ้อนของหลักการประเมิน และใช้การประมวลผลแบบ ตรวจสอบเงื่อนไขของสมาร์ตโฟนเพื่อลดความซับซ้อนของเงื่อนไขลงโดยยังได้ผลลัพธ์ตามหลักการ เดิมดังรูปที่ 10(ก) โมดูลนี้เหมาะสำหรับการประเมินวิธีการค้ำยันมวลหินเบื้องต้นสำหรับงานอุโมงค์ และโถงถ้ำ มีผลการประเมินประกอบด้วยระดับชั้นมวลหิน แรงค้ำยันเพดาน แรงค้ำยันผนัง มุมเสียดทานภายในของมวลหิน และกราฟข้อแนะนำวิธีการค้ำยันเบื้องต้นดังรูปที่ 10(ข) โปรแกรมประยุกต์ นี้อธิให้ผู้ใช้งานสามารถพิจารณากราฟวิธีการค้ำยันด้วยตนเองอย่างอิสระ เช่น การเพิ่มระดับการค้ำยันเพื่อ ความปลอดภัยที่มากขึ้น หรือลดระดับการค้ำยันเพื่อควบคุมค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งต้องพิจารณา ปัจจัยอื่นร่วมด้วยอย่างรอบคอบ ผลคำนวณของโมดูลนี้ได้ถูกเปรียบเทียบกับกรคำนวณด้วย โปรแกรม Microsoft Excel ดังตารางที่ 39 และ 40 พบว่าไม่มีข้อผิดพลาดจากการคำนวณเกิดขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าปัจจัยมวลหินเพื่อประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นที่เหมาะสม
 (ข) ผลการประเมินวิธีการค้ำยันเบื้องต้นของโมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน

ตารางที่ 39 เงื่อนไขมวลหินสำหรับตรวจสอบการทำงานของโมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน

Conditions							
RQD (%)	Joints	Roughness	Alteration	Water	Stress	Purpose	Span (m)
1	Massive	Clay zone	Strongly consolidated	Filling outwash	Multiple weakness zone	Temporary opening	5
10	Few joints	Slickensided, planar	Medium consolidated	Inflow, decaying	Single weakness zone	Water tunnels	10
20	One set	Smooth, planar	Swelling clay filling	Inflow	Single shear zone	Storage caverns	15

ตารางที่ 39 เงื่อนไขมวลหินสำหรับตรวจสอบการทำงานของโมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน (ต่อ)

Conditions							
RQD (%)	Joints	Roughness	Alteration	Water	Stress	Purpose	Span (m)
30	One set, random	Rough, planar	Crushed rock zone	Dry	Open joints	Power stations	20
40	Two sets	Slickensided, undulation	Sandy clay fraction	Medium inflow	Medium stress	Railway stations	25
50	Two sets, random	Smooth, undulation	Thick clay zone	Large inflow	Moderate slabbing	Temporary opening	30
60	Three sets	Rough, undulation	Tightly healed	Filling outwash	Heavy rock burst	Water tunnels	35
70	Three sets, random	Discontinuous	Unaltered joints	Inflow, decaying	Heavy squeezing	Storage caverns	40
80	Four sets	Clay zone	Slightly altered	Inflow	Heavy swelling	Power stations	60
90	Crushed rock	Slickensided, planar	Sandy clay coatings	Dry	High stress	Railway stations	80

ตารางที่ 40 ผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลการจำแนกคุณภาพมวลหิน

Microsoft Excel					PSU-RMC				
Q	Roof Pressure (kPa)	Wall Pressure (MPa)	Friction Angle (degree)	D _e	Q	Roof Pressure (kPa)	Wall Pressure (MPa)	Friction Angle (degree)	D _e
0.011	899.29	0.21	9.46	1	0.011	899.29	0.21	9.46	1
0.038	2390.08	0.40	3.58	5	0.038	2390.08	0.40	3.58	5
0.030	1930.98	0.30	5.71	12	0.030	1930.98	0.30	5.71	12
0.600	632.34	0.12	8.53	20	0.600	632.34	0.12	8.53	20
1.980	530.91	0.08	16.70	38	1.980	530.91	0.08	16.70	38
0.018	2274.14	0.38	6.91	8	0.018	2274.14	0.38	6.91	8
0.029	1513.17	0.22	75.96	19	0.029	1513.17	0.22	75.96	19
0.233	649.73	0.06	75.96	32	0.233	649.73	0.06	75.96	32
0.016	9524.41	0.79	26.57	60	0.016	9524.41	0.79	26.57	60
0.600	7588.04	0.35	9.46	123	0.600	7588.04	0.35	9.46	123

โมดูลดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index) ใช้สำหรับการประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้นจากสภาพทางธรณีวิทยาที่พบ ณ ภาคสนาม โดยไม่อาศัยผลการทดสอบตัวอย่างเพิ่มเติมดังรูปที่ 11(ก) ผลการประเมินประกอบด้วยอัตราส่วนกำลังยึดเกาะของมวลหินต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว และมุมเสียดทานของมวลหิน ซึ่งจะแสดงค่าเป็นกราฟประเมินผลที่ผู้ใช้ต้องอ่านค่า GSI เทียบกราฟด้วยตนเองดังรูปที่ 11(ข) สมบัติมวลหินเหล่านี้เป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพมวลหินและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหลักการอื่นเพื่อศึกษาเสถียรภาพมวลหินในระยะยาวได้ ผล

คำนวณของโมดูลนี้ได้ถูกเปรียบเทียบกับคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ดังตารางที่ 41 พบว่าผลการคำนวณทั้งหมดถูกต้องตามหลักการเดิม

Geological Strength Index

DATA RMR SMR Q GSI

Jw: Joint waviness factor: Interlockin..

Js: Joint smoothness factor: Very rou..

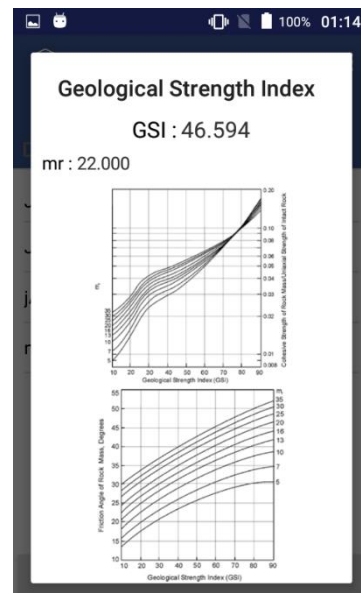
jA: Joint alteration factor: Unweathere..

mr: Rock material constant: Conglom..

Vb: Block volume: 1 Cu.cm

CALCULATE

(ก)



(ข)

รูปที่ 11 (ก) ตัวเลือกสำหรับป้อนค่าปัจจัยมวลหินเพื่อประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้น
(ข) ผลการประเมินสมบัติมวลหินเบื้องต้นของโมดูลดัชนีกำลังธรณี

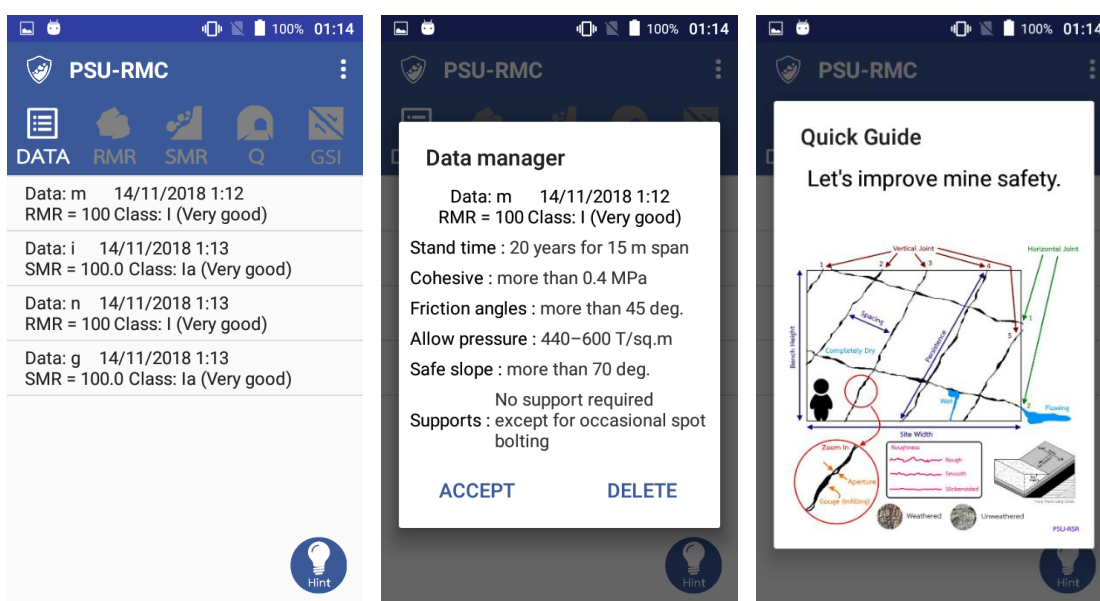
ตารางที่ 41 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโมดูลดัชนีกำลังธรณี

Conditions					MS Excel		PSU-RMC	
Waviness	Smoothness	Alteration	Rock Type	Volume (cm ³)	GSI	m _r	GSI	m _r
Interlocking	Slickensided	Swelling clay	Conglomerate	1	16.6	22	16.6	22
Stepped	Polished	Soft clay	Sandstone	5	16.2	19	16.2	19
>3%	Smooth	Compacted clay	Siltstone	10	20.5	9	20.5	9
0.3-3%	Slightly rough	Sand filling	Anhydrite	50	28.0	13	28.0	13
<0.3%	Rough	Clay coating	Quartzite	100	28.1	24	28.1	24
Interlocking	Very rough	Sand coating	Mylonite	1000	50.3	6	50.3	6
Stepped	Slickensided	High weathered	Schist	10000	40.9	6	40.9	6
>3%	Polished	Low weathered	Slate	100000	52.0	9	52.0	9
0.3-3%	Smooth	Fresh rock	Granite	500000	70.1	33	70.1	33
<0.3%	Slightly rough	Unweathered	Tuff	1000000	68.1	15	68.1	15

โมดูลจัดการข้อมูล

โมดูลจัดการข้อมูล (Data Manager) ใช้สำหรับบันทึกผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินและเสถียรภาพลาดหินจากโมดูลการประเมินมวลหินและโมดูลการประเมินลาดหิน ข้อมูลที่

ต้องการบันทึกสามารถตั้งชื่อกำกับเพื่อบ่งชี้ถึงจุดที่ประเมินเสถียรภาพได้ โดยโปรแกรมประยุกต์จะทำการลงเวลาบันทึก (time stamp) โดยอัตโนมัติเมื่อกดบันทึกข้อมูลดังรูปที่ 12(ก) รายละเอียดการประเมินทุกอย่างจะคงอยู่ครบถ้วนแบบเดียวกับโมดูลต้นทางทุกประการ ฐานข้อมูลที่ใช้ในโมดูลนี้คือฐานข้อมูล SQL ซึ่งใช้พื้นที่ของหน่วยความจำน้อย ไม่ต้องอาศัยเซิร์ฟเวอร์ และสามารถเพิ่ม-ลบข้อมูลได้อย่างอิสระดังรูปที่ 12(ข) คำแนะนำการเก็บข้อมูลโครงสร้างมวลหินพื้นฐานได้ถูกบรรจุไว้ในโมดูลนี้เพื่อเป็นแนวทางให้แก่ผู้ใช้รายใหม่ดังรูปที่ 12(ค)



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 12 (ก) ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหิน/ลาดหินที่บันทึกไว้ (ข) รายละเอียดผลการประเมิน (ค) คำแนะนำการเก็บข้อมูลสำหรับผู้ใช้รายใหม่

การใช้งานโปรแกรมประยุกต์กับกรณีศึกษา

โปรแกรมประยุกต์ได้ถูกทดสอบกับเงื่อนไขทางธรณีวิทยาจริงและเปรียบเทียบผลการประเมินกับงานวิจัยอื่น เพื่อศึกษาความถูกต้องและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงทั้งสิ้น 5 กรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลมวลหินโดยผู้วิจัย 2 กรณีศึกษา และอ้างอิงสภาพมวลหินจากงานวิจัยอื่น 3 กรณีศึกษา ครอบคลุมการจำแนกมวลหินทั้ง 4 หลักการที่อยู่ในโปรแกรมประยุกต์

กรณีศึกษาที่ 1 ลาดหินทรายสีน้ำตาลแทรกสลับหินดินดานสีเทาหลังโรงเรียน มอ. วิทยานุสรณ์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พบความไม่ต่อเนื่อง 41 ระบาย ประกอบด้วยแนวแตก 36 ระบาย และการวางชั้น 5 ระบาย หน้าลาดมีแนวเท 215 องศา มุมเท 78 องศา ความสูง 6 เมตร กว้าง 12 เมตร จากตัวอย่างหินทดสอบทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง พบว่าดัชนีกำลังแรงกดจุดของหินทรายมีค่าเฉลี่ย 5.52 MPa จากการวิเคราะห์แนวแตกพบว่าระยะห่างระหว่างแนวแตก (spacing) ส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 เมตร มวลหินแห้งสนิท พื้นผิวขรุขระเล็กน้อย พบร่องรอยการฟุ้งและมีระยะอ้า (aperture) เฉลี่ยประมาณ 1 มิลลิเมตร แนวเทของแนวแตกมีค่าเฉลี่ย 344 องศา มุมเทเฉลี่ย 81

องศา ขณะที่การวางชั้นมีแนวเท 1 องศา มุมเท 22 องศา มีลักษณะหน้างานดังรูปที่ 13 ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินด้วยโมดูลการประเมินมวลหิน ในกรณีที่ต้องการเจาะอุโมงค์แนวอนต้งฉากกับหน้าลาดหิน พบว่ามีค่า RMR เท่ากับ 65 จัดเป็นมวลหินระดับที่ 2 (Good) เสถียรภาพอยู่ในขั้นดี สามารถยืนหยัดโดยไม่เสริมค้ำยันได้อย่างต่ำ 1 ปี หากอุโมงค์มีขนาดไม่เกิน 10 เมตร มีค่าการยึดเกาะ 0.3-0.4 MPa มุมเสียดทานระหว่าง 35-45 องศา รับแรงกดทับได้ 280-440 ตันต่อตารางเมตร มุมชั้นที่ปลอดภัยคือไม่เกิน 65 องศา ควรเพิ่มเสถียรภาพบริเวณโครงหลังคาด้วยการใส่สลักยึดหินขนาด 20 มิลลิเมตร ความยาว 3 ระยะห่าง 2.5 เมตรอัดฉีดน้ำปูนใส่แนวแตกทั้งหมดบนเพดานใส่ตะแกรงลาด และเสริมคอนกรีตพ่นหนา 50 มิลลิเมตร ขณะที่ประเมินเสถียรภาพลาดหินด้วยโมดูลการประเมินลาดหิน พบว่ามีค่า SMR เท่ากับ 76 จัดเป็นลาดหินระดับที่ 2 (Good) เสถียรภาพอยู่ในขั้นดี มีโอกาสรื้อยละ 20 ที่อาจเกิดการพิบัติขนาดเล็กได้ในบางจุด ไม่จำเป็นต้องเสริมค้ำยันแต่ควรทำแนวกันบริเวณฐานลาดหินเพื่อป้องกันหินหล่น สำหรับผลการประเมินสมบัติมวลหินด้วยโมดูลดัชนีกำลังธรณีพบว่า GSI มีค่าเท่ากับ 40.5 และ m_r มีค่าเท่ากับ 19 ทำให้ประเมินได้ว่ามวลหินนี้มีค่ามุมเสียดทานภายในประมาณ 35 องศา และแรงยึดเกาะ 4.75 MPa



รูปที่ 13 หน้างานลาดหินทรายแทรกสลับหินดินดานหลังโรงเรียน มอ. วิทยานุสรณ์

กรณีศึกษาที่ 2 ลาดหินฮอร์นเฟลส์เนื้อแข็งสีเทาถึงเทาเข้ม ณ ผนังบ่อเหมืองด้านทิศตะวันออกของ บริษัท เขابันไดนางศิลา จำกัด ประทานบัตรเลขที่ 27667/16228 จังหวัดสงขลา หน้าลาดมีความสูง 8 เมตร กว้าง 30 เมตร แนวเท 232 องศา มุมเท 70 องศา พบแนวแตก 53 ระนาบ จากการวิเคราะห์แนวแตกพบว่าระยะห่างระหว่างแนวแตกส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.2-1 เมตร ความยาวแนวแตกมากกว่า 3 เมตร มวลหินแห้งสนิท พื้นผิวขรุขระเล็กน้อยถึงปานกลาง มีร่องรอย

การผุพังเล็กน้อย ระยะอำประมาณ 1-5 มิลลิเมตร แนวเทของแนวแตกหลักมีค่าเฉลี่ย 56 องศา มุมเทเฉลี่ย 59 องศา มีลักษณะหน้างานดังรูปที่ 14 ผลประเมินเสถียรภาพลาดหินด้วยโปรแกรมประยุกต์พบว่า มีค่า SMR เท่ากับ 70 จัดเป็นลาดหินระดับที่ 2 (Good) เสถียรภาพอยู่ในขั้นดี มีโอกาสร้อยละ 20 ที่อาจเกิดการพิบัติในบางบริเวณ ควรใส่สลักยึดหิน (rock bolt) จุดที่มีความเสี่ยงหรือใส่อย่างเป็นระบบ และสร้างแนวกันฐานลาดหินเพื่อป้องกันหินหล่น



รูปที่ 14 หน้างานลาดหินฮอว์นเฟลส์ฟิงท์ที่ศตวรรษออกของเหมืองหินเขابันไดนางศิลา

กรณีศึกษาที่ 3 จากการวิจัยของ Khawngam and Trakoolngam (2017) ลาดหินเคลย์สีเทาปานกลางแกมน้ำตาลเนื้อละเอียดถึงละเอียดมากและมีชั้นถ่านหินแทรกอยู่ ณ ผังบ่อเหมืองโซนตะวันตก C1 หน้างานที่ 5 เหมืองแม่เกาะ จังหวัดลำปาง แนวแตกหลักมีแนวเทเฉลี่ย 334 องศา มุมเท 69 องศา ลาดหินมีความสูง 5.5 เมตร กว้าง 50 เมตร พบก้อนหินขนาดใหญ่ผุพังปานกลางขนาด 0.2-8 ลูกบาศก์เมตร อยู่รอบบริเวณลาดหิน ระยะห่างระหว่างแนวแตกคือ 10-50 เซนติเมตร ระยะอำน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ความต่อเนื่องของแนวแตกยาวมากกว่า 3 เมตร พื้นผิวขรุขระมากและแห้งสนิท ตัวอย่างหินทดสอบมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ย 6.25 MPa และมีค่าดัชนีคุณภาพหินประมาณร้อยละ 64 ผลการประเมินเสถียรภาพลาดหินโดยโปรแกรมประยุกต์พบว่า ลาดหินนี้มีค่า SMR เท่ากับ 57 จัดเป็นลาดหินระดับที่ 3 (Normal) มีเสถียรภาพบางส่วน มีโอกาสร้อยละ 40 ที่จะเกิดการพิบัติแบบระนาบจากบางแนวแตกและการพิบัติแบบลิมจำนวนมาก สอดคล้องกับผลการสำรวจก่อนหน้าที่พบก้อนหินขนาดใหญ่ที่บริเวณฐานของลาดหิน ทั้งนี้หากภายหลังจะปล่อยทิ้งไว้หลังการทำเหมือง ควรเพิ่มเสถียรภาพโดยการใส่สลักยึดหินอย่างเป็นระบบ เสริมคอนกรีตพ่น (shotcrete) บางบริเวณ และทำแนวกันหรือตาข่ายบริเวณฐานของลาดหิน

กรณีศึกษาที่ 4 จากการวิจัยของ Boonbatr and Fuenkajorn (2012) งานอุโมงค์ขนส่งทางเดียว (adit) รูปเกือกม้าขนาด 5 เมตร ของเหมืองหินปูน บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด จังหวัดสระบุรี มวลหินจำแนกได้เป็น 3 เขตคือ เขตหินปูนวางชั้น เขตรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ และเขตหินปูนสปาทิก ทางเข้าของอุโมงค์ถูกออกแบบให้อยู่ในเขตหินปูนวางชั้นสีเทาเข้มแทรกสลับกับหินชั้นหินเชิร์ตและหินทรายแป้งเนื้อปูน ค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยของตัวอย่างหินเท่ากับ 93.6 MPa ค่าดัชนีคุณภาพหินเท่ากับร้อยละ 51 แกนอุโมงค์มุ่งไปทางทิศ 8 องศา แนวแตกหลักมีค่าแนวเท 130 องศา และมุมเท 60 องศา หินบางชั้นถูกแทนที่ด้วยซิลิกา (silicified) และมีความแข็งมาก ระยะอามีค่าระหว่าง 2.5-10 มิลลิเมตร ไม่มีวัสดุอุดในแนวแตก ระยะห่างระหว่างแนวแตกคือ 30-50 เซนติเมตร พื้นผิวแนวแตกแน่น ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยโปรแกรมประยุกต์พบว่า มวลหินนี้มีค่า RMR เท่ากับ 62 จัดเป็นมวลหินระดับที่ 2 (Good) เสถียรภาพอยู่ในขั้นดี สามารถยื่นหยัดโดยไม่เสริมค้ำยันได้อย่างต่ำ 1 ปี หากอุโมงค์มีขนาดไม่เกิน 10 เมตร มีค่าการยึดเกาะ 0.3-0.4 MPa มุมเสียดทานระหว่าง 35-45 องศา รับแรงกดทับได้ 280-440 ตันต่อตารางเมตร มุมชั้นที่ปลอดภัยคือไม่เกิน 65 องศา ควรเพิ่มเสถียรภาพบริเวณโครงหลังคาด้วยการใส่สลักยึดหินขนาด 20 มิลลิเมตร ความยาว 3 เมตร ระยะห่าง 2.5 เมตร อัดฉีดน้ำปูนใส่แนวแตกทั้งหมดบนเพดาน ใส่ตะแกรงลวดและเสริมคอนกรีตพื้นหนา 50 มิลลิเมตร โดยผลประเมินนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ค่า RMR เท่ากับ 66 จัดเป็นมวลหินระดับที่ 2 (Good) ที่มีแนวทางการเพิ่มเสถียรภาพใกล้เคียงกันแต่แนะนำให้ใส่สลักยึดหินและตะแกรงลวดเฉพาะบางบริเวณทั้งเพดานและผนัง สำหรับผลการประเมินวิธีการค้ำยัน (Q) โดยโปรแกรมประยุกต์ได้ค่าเท่ากับ 20.4 (มวลหินดี) แรงที่ต้องใช้ค้ำยันเพดานและผนังเท่ากับ 0.009 และ 0.005 MPa ตามลำดับ มีมุมเสียดทานภายในมวลหิน 63.435 องศา จัดอยู่ในกลุ่มมวลหินที่ไม่จำเป็นต้องค้ำยัน เช่นเดียวกับผลวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ค่า Q เท่ากับ 21.25 (มวลหินดี) และไม่ต้องเสริมค้ำยัน

กรณีศึกษาที่ 5 จากการวิจัยของ Tonnayopas (2014) ลาดหินปูนของเหมืองหินเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง จังหวัดพังงา หินในพื้นที่เป็นหินปูนสีเทาอ่อนถึงเทาเข้มและเทาแกมน้ำตาล-แดงที่เกิดร่วมกับสายแร่แคลไซต์และหินโดโลไมต์สีเทาแกมน้ำตาล (กลุ่มหินราชบุรี ยุคเพอร์เมียน) ตัวอย่างหินมีค่าดัชนีกำลังแรงกดจุดเท่ากับ 3.52 MPa มีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 66 MPa และมีค่าดัชนีคุณภาพหินจากการคำนวณด้วยการนับแนวแตกเชิงปริมาตรเท่ากับร้อยละ 70 แนวแตกมีระยะห่างจากกันระหว่าง 0.1-0.8 เมตร ไม่พบร่องรอยของน้ำใต้ดิน ความไม่ต่อเนื่องขรุขระมาก มีการผุพังมาก มีวัสดุอุดหนา ระยะอามีค่าระหว่าง 5-10 มิลลิเมตร หน้าลาดมีแนวเท 73 องศา มุมเท 64 องศา สูง 15 เมตร กว้าง 10 เมตร พบแนวแตก 2 ชุด และการวางชั้น 1 ชุด มีมุมเท/แนวเท เท่ากับ 62/305 40/130 14/296 องศา ตามลำดับ ผลการประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยโปรแกรมประยุกต์พบว่า มวลหินนี้มีค่า RMR เท่ากับ 60 จัดเป็นมวลหินระดับที่ 3 (Fair) มีเสถียรภาพปานกลาง แรงยึดเกาะของมวลหินมีค่าประมาณ 0.2-0.3 MPa มุมเสียดทานภายใน 25-35 องศา แรงที่แบกทานได้ 135-280 ตันต่อตารางเมตร และมีมุมชั้นที่ปลอดภัยคือไม่เกิน 55 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ค่า RMR เท่ากับ 63 สำหรับผลการประเมินสมบัติมวลหินด้วยโมดูลดัชนีกำลังธรณีพบว่า GSI มีค่าเท่ากับ 54.5 และ m , มีค่าเท่ากับ 8 ทำให้ประเมินได้ว่ามวลหินนี้มีมุมเสียดทานภายในประมาณ 30 องศา และแรงยึดเกาะ 2.97 MPa

สรุปผล

โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินโดยใช้การจำแนกมวลหิน PSU-Rock Mass Classification (PSU-RMC) ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยประกอบด้วยหลักการจำแนกมวลหิน 4 หลักการ คือ (1) การประเมินมวลหิน (Rock Mass Rating, RMR) ใช้สำหรับการประเมินเสถียรภาพเบื้องต้นของมวลหินที่เกี่ยวข้องกับงานอุโมงค์และฐานรากเขื่อน สมบัติเบื้องต้นของมวลหิน เช่น แรงเสียดทานภายในและการยึดเกาะ และวิธีการค้ำยันที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์ (2) การประเมินลาดหิน (Slope Mass Rating, SMR) ใช้สำหรับการประเมินเสถียรภาพลาดหิน โอกาสและรูปแบบการพิบัติที่อาจเกิดขึ้นกับลาดหิน และวิธีการเพิ่มเสถียรภาพลาดหินที่เหมาะสม (3) การจำแนกคุณภาพมวลหิน (Rock Mass Quality, Q) ใช้สำหรับการประเมินแรงที่ต้องใช้ในการค้ำยันผนังและเพดานของอุโมงค์และโถงถ้ำ และแผนภาพสำหรับพิจารณาวิธีการค้ำยันโดยละเอียด และ (4) ดัชนีกำลังธรณี (Geological Strength Index, GSI) ใช้สำหรับประเมินค่าอัตราส่วนแรงยึดเกาะต่อกำลังอัดแกนเดียวของหิน และค่ามุมเสียดทานภายในของมวลหิน ซึ่งเป็นสมบัติมวลหินพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการศึกษาเสถียรภาพมวลหินระยะยาว นอกจากนี้โปรแกรมประยุกต์ยังประกอบด้วยระบบฐานข้อมูล SQL ใช้สำหรับบันทึกการประเมินเสถียรภาพมวลหินและลาดหินจากหลักการ RMR และ SMR ไว้ใช้งานในภายหลัง หลักการมวลหินทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นได้ถูกตรวจสอบการคำนวณโดยการเช็คเงื่อนไขแบบสุ่มเทียบกับการคำนวณแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า โปรแกรมประยุกต์สามารถทำงานได้ถูกต้องตามหลักการเดิมและไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคสนามเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการประเมินเสถียรภาพมวลหินที่หน้างาน จากการทำการศึกษาคำถามที่ใช้โปรแกรมประยุกต์กับสภาพมวลหินจริงพบว่าค่าที่โปรแกรมประยุกต์ประเมินได้ทั้งหมดใกล้เคียงกันกับงานวิจัยอื่นที่ใช้ข้อมูลตั้งต้นเดียวกัน แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อยเนื่องจากมีรายละเอียดมวลหินที่อาจไม่ปรากฏในการทำการศึกษาคำถามนี้ ปัญหาส่วนมากที่พบจากการศึกษามวลหินเบื้องต้นคือการเก็บข้อมูลภาคสนามที่ต้องอาศัยประสบการณ์และการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนเพื่อตีความสภาพมวลหินที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพ และพบว่าการเข้าเก็บข้อมูลมวลหินในระยะใกล้กับมวลหินหรือลาดหิน อาจมีอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ประเมินได้จึงต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต คือ (1) โปรแกรมประยุกต์สามารถพัฒนาต่อให้มีหลักการจำแนกมวลหินที่หลากหลายยิ่งขึ้นเพื่อขอบเขตการใช้งานที่กว้างขึ้นได้ (2) พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ให้ใช้งานได้หลายภาษาเพื่อให้ผู้ใช้งานท้องถิ่นเข้าถึงได้ง่ายยิ่งขึ้น (3) พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ร่วมกับเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเพื่อใช้ทดแทนอุปกรณ์เก็บข้อมูลสำคัญบางชนิด เช่น เซ็นสิตรถยนต์และอุปกรณ์จีพีเอส และ (4) พัฒนาระบบวิเคราะห์ภาพถ่าย 3 มิติ เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ห่มวลหินจากระยะไกลและลดความเสี่ยงจากการเข้าเก็บข้อมูลโครงสร้างมวลหิน

เอกสารอ้างอิง

- Anbalagan, R.; Sharma, S.; Raghuvanshi, T. K. Rock mass stability evaluation using modified SMR approach. *Proceedings of 6th National Symposium on Rock Mechanics*, Bangalore, India, 1992.
- Assis, D. Slope Mass Rating (SMR). <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.projecto.diogoassis.smr> (accessed November 2, 2018), 2016.
- Banks, D. Rock mass ratings (RMRs) predicted from slope angles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **2005**, 42(3), 440-449.
- Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **2002**, 39(2), 185-216.
- Barton, N. *Training course on rock engineering*; ISRM/IT & CSMRS: New Dehli, India, December 10-12, 2008.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. **1974**, 6(4), 189-236.
- Bhasin, R.; Grimstad, E. The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **1996**, 11(1), 93-98.
- Bieniawski, Z. T. The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proceedings of the 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Montreux, Switzerland, September 2-8, 1979.
- Bieniawski, Z. T. *Rock mechanics design in mining and tunneling*; A. A. Balkema: Rotterdam, 1984.
- Bieniawski, Z. T. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends. In *Comprehensive Rock Engineering*; Hudson, J. A., Eds.; Pergamon Press: Oxford, 1993; Vol. 22, pp 553-574.
- Boonbatr, A.; Fuenkajorn, K. Design and analysis of adit for limestone quarry of Siam City Cement Public Company Limited. *Proceedings of Thailand Rock Mechanics Symposium*, Phetchaburi, Thailand, 2012.
- Byrne, S. Survey results: Devices we use daily in 2014. <https://www.cnet.com/au/news/survey-results-devices-we-use-daily-in-2014/> (accessed September 30, 2017), 2014.
- Cai, M.; Kaiser, P. K. Visualization of rock mass classification systems. *Geotechnical and Geological Engineering*. **2006**, 24(4), 1089-1102.
- Cai, M.; Kaiser, P. K.; Uno, H.; Tasaka, Y.; Minami, M. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **2004**, 41(1), 3-19.

- Chau, M.; Reith, R.; Nagamine, K. Smartphone OS Market Share. <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/os> (accessed October 29, 2018), 2018.
- Deere, D. U.; Deere, D. W. *Rock quality designation (RQD) after twenty years*; Contract report for Department of the Army, US Army Corps of Engineers: Gainesville, FL, February 1989.
- Filipponi. GeoToolbox. https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_marco_filipponi.GeoToolbox (accessed August 29, 2017), 2013.
- Geomecanica Apps. Geostation. <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terra.solum.geostation> (accessed November 2, 2018), 2014.
- Geomecanica Apps. RMR Calc. <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terra.solum.rockmassratingcalc2> (accessed November 2, 2018), 2014.
- Google and Open Handset Alliance. Android Studio. <https://developer.android.com/studio/> (accessed November 2, 2018), 2018.
- Google and Open Handset Alliance. Codenames, Tags, and Build Numbers. <https://source.android.com/setup/start/build-numbers> (accessed November 2, 2018), 2018.
- Grimstad, E. The Norwegian method of tunnelling – a challenge for support design. *Proceedings of the XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid, Spain, 2007.
- Hoek, E.; Brown, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **1997**, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E.; Marinos, P.; Benissi, M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - the case of Athens schist formation. *Engineering Geology and Environment*. **1998**, 57(2), 151-160.
- Khawngam, R.; Trakoolngam, K. *Mae Moh pit wall slope stability assessment using the Q-system rock mass classification*; Special project report for the Department of Geotechnology, Khon Kaen University: Thailand, 2017.
- Lovichit, P. *Android application development guide by Android Studio*; ProVision: Bangkok, 2015.
- Norges Geotekniske Institutt. Q-system. <https://play.google.com/store/apps/details?id=jacob.ngi.q.system> (accessed November 2, 2018), 2016.
- Palmstrom, A. The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. *Proceedings of the 4th Congress International Association of Engineering Geology*, New Delhi, India, 1982.
- Palmstrom, A. RMI - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*. **1995**, 1(2), 1-40.

- Palmstrom, A. Recent developments in rock support estimates by the RMI. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*. **2000**, 6(1), 1-19.
- Palmstrom, A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*. **2005**, 20(4), 362-377.
- Romana, M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, Salzburg, Austria, 1985.
- Sarang, R. Rock Mass Classification. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rakeshsarang.rockmassclassification> (accessed August 28, 2017), 2013.
- Saricam, T. RMR & GRC. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.turgut.saricam.basarir> (accessed August 28, 2017), 2015.
- Sator. Q-slope. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.geckogeotech.q_slope (accessed November 2, 2018), 2016.
- Sator. Q-System (tunnelling). https://play.google.com/store/apps/details?id=com.geckogeotech.Q_System (accessed November 2, 2018), 2016.
- Sen, Z.; Eissa, E. A. Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences-Geomechanics*. **1992**, 29(1), 1-12.
- Singh, B.; Goel, R. K. *Engineering Rock Mass Classification: tunneling, foundations, and landslides*; Elsevier: New York, 2011.
- Tomas, R.; Delgado, J.; Seron, J. B. Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. **2007**, 44(7), 1062-1069.
- Tonnayopas, D. Rock Slope Assessment of Carbonate Rock Quarries Using Stereo-net Projection Method and Rock Mass Classification. *University of the Thai Chamber of Commerce Journal Science and Technology*. **2014**, 1(2), 1-17.
- Waltham, T. *Foundations of engineering geology*; Taylor & Francis: Abingdon, 2002.
- Weng, Y. H.; Sun, F. S.; Grigsby, J. D. GeoTools: An android phone application in geology. *Computers and Geosciences*. **2012**, 44, 24-30.
- Zheng, J.; Zhao, Y.; Lu, Q.; Deng, J.; Pan, X.; Li, Y. A discussion on the adjustment parameters of the Slope Mass Rating (SMR) system for rock slopes. *Engineering Geology*. **2016**, 206, 42-49.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานวิชาการที่ได้นำเสนอต่องานประชุมวิชาการด้านงานเหมืองแร่ระดับนานาชาติ

Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonayopas, D.; Vattanasak, H. PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability. *Proceedings of Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference*, Lampang, Thailand, November 23-24, 2017, 155-162.

PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability

P. Pantaweesak^{1,2*}, P. Sontamino¹, D. Tonnayopas¹, H. Vattanasak¹

¹Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Thailand

²Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Prince of Songkla University, Thailand

*E-mail address: mpantawee@hotmail.com

ABSTRACT:

PSU Rock Slope Rating (PSU-RSR v.1) is an initial android application for estimating preliminary rock mass stability. It is performed on Rock Mass Rating (RMR) and Slope Mass Rating (SMR) classifications. PSU-RSR v.1 is a handy tool which run on android smartphone devices that easily occupied. It has been provided users a chance to estimating preliminary rock stability as routine works and allow them to track the change of rock mass stability daily, according to plan to handle it properly and make them work more safely and sustainably. The application was used to analyze rock mass stability on cut slope rear PSU Wittayanusorn School, Songkhla and analyze a secondary data of open pit Mae Moh mine at Lampang as a testing example. The testing result of the application on a condition of all cases found the similarly result comparing with the conventional method and other report. Therefore, the PSU-RSR v.1 can be an alternatively application for estimating rock mass stability.

KEY WORDS: Android Application/ Rock Mass Stability/ Rock Mass Rating/ Slope Mass Rating.

1. INTRODUCTION

Nowadays, most of mines in Thailand are open pit mine. The design of mine is safety bench design that rock slope face is always appeared. Mine workers must work at the base of the slope which they cannot know the recent slope stability of the site. Although, it is one of the causes of danger, but some mining operators do not pay attention because it has no direct effect on production efficiency. One of the theories for estimating preliminary rock mass stability is Rock Mass Rating (RMR) and Slope Mass Rating (SMR) classifications. The RMR is practice for evaluating rock mass stability in tunnel and dam foundation, while SMR is suitable for estimating rock slope stability both in mining and natural [1]. Although both theory is estimated stability in the term of ratings, but some operators considered it is too consumed time to receive result and complicated.

Technology is an importance thing that make our life easier. Smartphone is the most popular digital devices. Android operating system is the most popular operating system in the world because it is affordable, easy to use, and versatile [2]. Current android app store has few RMR application [3,4,5,6] and SMR application [7] which some applications are not detailed and insufficient to apply with rock failure protection plan.

This research presents an Android application for estimating preliminary rock mass stability using Rock Mass Rating and Slope Mass Rating which

rarely has in the android market. This application makes an estimation of rock mass stability easier, which helps mine workers to access the initial stability of the site investigating and plan to handle it in time. This action can be developed as a routine, which makes the work safer. In addition, it can be applied to use in civil work such as the cut slopes of the road construction on the hillsides mountains.

2. BACKGROUND THEORY

Rock Mass Classifications was developed from practical knowledge in the form of rating and ranking. The objective of this theory is for evaluation civil and mining works stability from the characteristics of rock mass [1].

2.1 Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating system is a geomechanics classification. It was initially developed by the South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR). This system constituents the geological structure into 6 parameters including strength of intact rock, rock quality designation (RQD), joint or discontinuities spacing, discontinuities condition, groundwater condition and joint orientation. The ratings of RMR parameters are given in Table 1. when completing the six parameters evaluation, sum of each rating to provide a RMR value. Then compare RMR value with Table 2. to estimating rock mass stability and suggested supports for less than 10 meters in diameter of tunnel [8,9,10,11].

2.2 Slope Mass Rating (SMR)

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

The SMR was developed for estimating rock slope stability based on basic Rock Mass Rating (first five parameters of RMR). This system consists of four factors added include: three adjustment factors related to correlation of joint orientation and slope orientation with one correction factor for method of excavation. The ratings of SMR parameters are given in Table 3. After evaluated the four factors, then calculated SMR by following equation:

where *SMR* is Slope Mass Rating value, *RMR_{basic}* is sum of the five parameters of RMR, *F₁* *F₂* *F₃* are adjustment factors related to orientation of rock and *F₄* is correction factor for method of excavation. Comparison SMR value via Table 4. for estimating rock slope stability and suggested supports for each class of SMR [1,12,13].

Table 1. The ratings of six parameters of RMR system.

Strength of Intact Rock							
Uniaxial compressive strength (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Point load strength (MPa)	8	4-8	2-4	1-2	-	-	-
Rating 1	15	12	7	4	2	1	0
Rock Quality Designation							
Rock quality designation (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Rating 2	20	17	13	8	3		
Spacing of Discontinuities							
Spacing of discontinuities (m)	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
Rating 3	20	15	10	8	5		
Condition of Discontinuities							
Persistence (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
Rating 4.1	6	4	2	1	0		
Separation (mm)	None	<0.1	0.1-1	1-5	>5		
Rating 4.2	6	5	4	1	0		
Roughness of discontinuity surface	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating 4.3	6	5	3	1	0		
Infillings (mm)	None	Hard filling		Soft filling			
		<5	>5	<5	>5		
Rating 4.4	6	4	2	2	0		
Weathering discontinuity surface	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Rating 4.5	6	5	3	1	0		
Groundwater Condition							
Inflow per 10 m tunnel length (L/min)	None	<10	10-25	25-125	>125		
Ratio of joint water pressure to major principal stress	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
General description	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
Rating 5	15	10	7	4	0		
Joint Orientation							
Assessment of Joint Orientation Effect on Tunnels							
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Irrespective of strike	
Drive with dip		Drive against dip		Dip 20-45°	Dip 45-90°		
Dip 45-90°	Dip 20-45°	Dip 45-90°	Dip 20-45°			Dip 0-20°	
Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Fair	Very unfavorable	Fair	
Assessment of Joint Orientation Effect on Stability of Dam Foundation							
Dip 0-10°	Dip 10-30° and Dip direction to			Dip 30-60°	Dip 60-90°		
	Upstream	Downstream					
Very favorable	Unfavorable	Fair		Favorable	Very unfavorable		
Rating 6							
Assessment for	Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable		
Tunnels	0	-2	-5	-10	-12		
Dam foundation	0	-2	-7	-15	-25		
Slope*	0	-5	-25	-50	-60		

Notes: *It is recommended to use slope mass rating.

Sources: [8,9,10]

Table 2. Design parameters and engineering properties of rock mass.

Properties of rock mass	RMR				
	100–81 (class I)	80–61 (class II)	60–41 (class III)	40–21 (class IV)	<20 (class V)
Classification of rock mass	Very good	Good	Fair	Poor	Very poor
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock mass (MPa)	>0.4	0.3–0.4	0.2–0.3	0.1–0.2	<0.1
Internal friction angle of rock mass	>45°	35–45°	25–35°	15–25°	<15°
Allowable bearing pressure (T/m ²)	600–440	440–280	280–135	135–45	45–30
Safe cut slope	>70°	65°	55°	45°	<40°
Suggested supports for less than 10 meters tunnel					
Class	Support				
I	No support required except for occasional spot bolting.				
II	20 mm diameter rock bolts with fully grouted in crown 3 m long spaced 2.5 m with wire mesh, shotcrete 50 mm in crown.				
III	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 4 m long spaced 1.5–2 m in crown and walls with wire mesh in crown, shotcrete 50–100 mm in crown and 30 mm in sides.				
IV	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 4–5 m long spaced 1–1.5 m in crown and wall with wire mesh, shotcrete 100–150 mm in crown and 100 mm in sides, Light-medium ribs spaced 1.5 m.				
V	20 mm diameter systematic rock bolts with fully grouted 5–6 m long spaced 1–1.5 m in crown and walls with wire mesh, shotcrete 150–200 mm in crown 150 mm in sides and 50 mm on face, Medium to heavy steel ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling.				

Sources: [9,10,11]

Table 3. The adjustment factors and correction factor of SMR system.

Case of slope failure		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
Planar failure	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30–20°	20–10°	10–5°	<5°
Toppling failure	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
Wedge failure	$ \alpha_i - \alpha_s $					
Factor 1 for planar, toppling and wedge failure	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Planar failure	$ \beta_j $	<20°	20–30°	30–35°	35–45°	>45°
Wedge failure	$ \beta_i $					
Factor 2 for planar and wedge failure	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Factor 2 for toppling failure	F2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Planar failure	$ \beta_j - \beta_s $	>10°	10–0°	0°	0–(-10)°	<-10°
Wedge failure	$ \beta_i - \beta_s $					
Toppling failure	$ \beta_j + \beta_s $	<110°	110–120°	>120°	-	-
Factor 3 for planar, toppling and wedge failure	F3	0	-6	-25	-50	-60
Correction factor for method of excavation (F4)						
Natural slope	Pre-splitting	Smooth blasting	Normal blasting or mechanical excavation		Poor blasting	
+15	+10	+8	0		-8	

Notes: α_s is slope strike, α_j is joint strike, α_i is plunge direction of line of intersection β_s is slope dip, β_j is joint dip and β_i is plunge of line of intersection

Sources: [12,13]

Table 4. Slope stability classes in term of SMR values.

Classes	SMR				
	0–20 (Class V)	21–40 (Class IV)	41–60 (Class III)	61–80 (Class II)	80–100 (Class I)
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very Good
Stability	Completely unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely stable
Failures	Big planar or soil-like or circular	Planar or big wedges	Planar along some joints and many wedges	Some block failure	No failure
Probability	0.9	0.6	0.4	0.2	0
Suggested supports for each class of SMR					
Classes	SMR	Suggested supports			
Ia	91–100	None			
Ib	81–90	None, scaling is required			
IIa	71–80	(None, toe ditch, or fence), spot bolting			
IIb	61–70	(Toe ditch or fence nets), spot or systematic bolting			
IIIa	51–60	(Toe ditch and/or nets), spot or systematic bolting, spot shotcrete			
IIIb	41–50	(Toe ditch and/or nets), systematic bolting/ anchors, systematic shotcrete, toe wall and/or dental concrete			
IVa	31–40	Anchors, systematic shotcrete, toe wall and/or concrete (or re-excavation), drainage			
IVb	21–30	Systematic reinforced shotcrete, toe wall and/or concrete, re-excavation, deep drainage			
Va	11–20	Gravity or anchored wall, re-excavation			

Notes: less popular support measures are given in brackets.

Sources: [1,12]

3. APPLICATION DEVELOPMENT

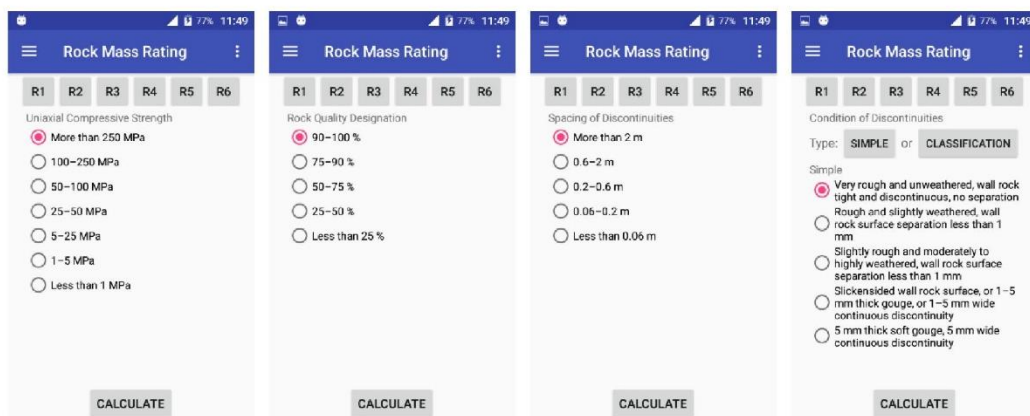
Android application developers use the official integrated development environment program such as Android Studio with Java development kit for developing an android application [14] . In this research we use Android Studio 2. 2. 2 to develop PSU-RSR version 1. Target of the application is for smartphone which newer than 4. 1. x (Jelly Beans) . The programming language used in this program are Java language for creates the logic of the application and XML language for creates user interface. Wiko Sunny smartphone was selected for running and testing the application. Major hardware and software specifications include: Android 6.0 (Marshmallow) , CPU Quad-core 1. 3 GHz Cortex-A7, Mediatek MT6580M Chipset, 512 MB RAM and Resolution 480x800 pixels on 4 inches screen.

4. FEATURES OF THE PSU-RSR V.1

When used in site, it can be estimating rock mass stability of tunnels and dam foundation and estimating slope mass stability of cut slope. However, the basic geological knowledge is required.

4.1 RMR module

RMR module (Fig. 1) consist of six parameters. Each parameter was separated individually to simplify the user interface. The user can choose only one choice per parameter. Some parameters such as condition of discontinuities, ground water condition and joint orientation assessment are several options to estimating, user can select only one as appropriate condition. Result of this module lead the potentially vulnerable sites were identified the situation of site immediately. This is benefit in deep rock tunnel and rock foundation that difficult to access.

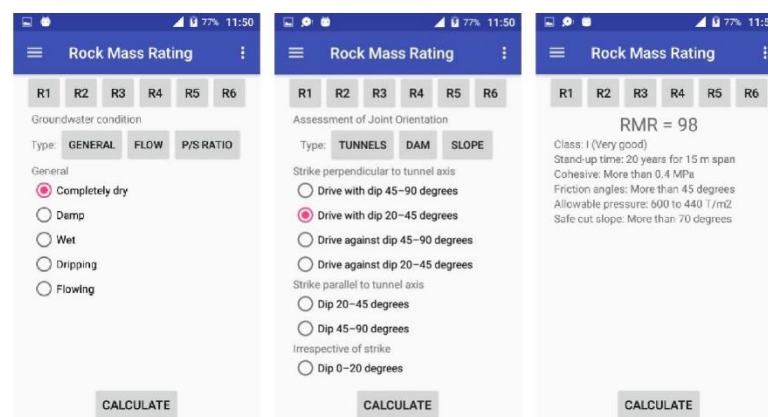


(a) Calculation of R1

(b) Calculation of R2

(c) Calculation of R3

(d) Calculation of R4



(e) Calculation of R5

(f) Calculation of R6

(g) RMR result

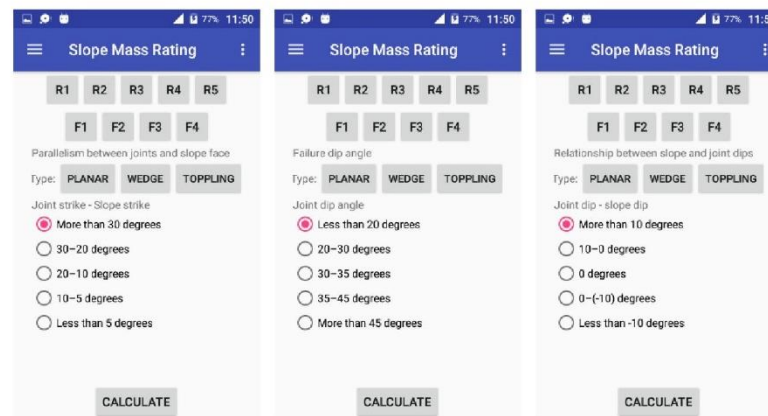
Fig. 1. User interface of each parameter of RMR Module. (a) Uniaxial compressive strength, (b) Rock quality designation, (c) Spacing of discontinuities, (d) Simple condition of discontinuities (e) General groundwater condition, (f) Assessment of joint orientation on tunnel and (g) Result of rock mass class and suggestion.

4.2 SMR module

This module is continuous from RMR module. SMR module added four adjustment and correction factor to combine with first five parameters of RMR or RMR_{basic} (Fig. 2.). In this module is cooperated with geological compass to gathering data of discontinuities and slope face orientation. This feature is suitable for operating bench and reclaimable bench.

4.3 Calculation verification

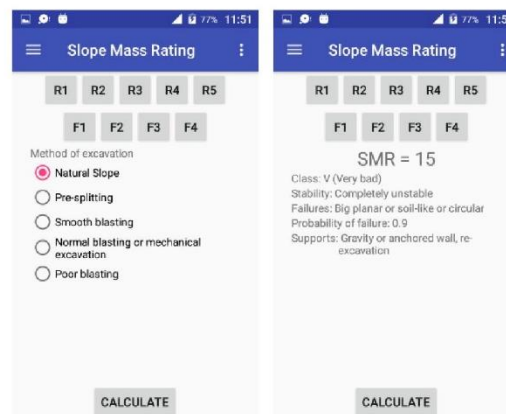
The application was verification by compare random calculated result with manual calculation by Microsoft Excel both RMR module (Table 5.) and SMR module (Table 6.). The result displayed that the application calculation completely matched with the manual calculation.



(a) Calculation of F1

(b) Calculation of F2

(c) Calculation of F3



(d) Calculation of F4

(e) SMR result

Fig. 2. User interface of adjustment factor and correction factor of SMR Module. (a) Parallelism between joints and slope face, (b) Failure dip angle, (c) Relationship between slope and joint dips, (d) Method of excavation and (e) Slope mass classification and suggestion.

4.4 Field test

Application tests were conducted in the most upper cut slope of jointed sandstone intercalated shale at rear PSU Wittayanusorn School area, Prince of Songkla University, Hat Yai campus, southern of Thailand [15]. Discontinuities were measured 41 orientations composed of 36 joints and 5 bedding planes. This slope is wide 12 meters and 6 meters in height (Fig. 3.). Average point load strength index is

5.18 MPa. Mostly, joints have spacing between 0.2-0.6 meters. Joints condition is completely dry, slightly rough, weathered with aperture around 1 millimeters. Dip direction of joint are about 336-352° and dip are approximately 72-90° while dip direction of slope face is 215° and dip angle are 78°. The result of estimating revealed that this slope has RMR value about 65 classified in class II (Good) while SMR value of this slope is 76 classified in class II (Good) too.

Table 5. RMR manual calculation compare with PSU-RSR calculation.

No	Conditions	Manual Calculation						App	
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	RMR	
1	UCS >250 MPa, RQD 90-100% , spacing <0.06 m, slickensided wall rock surface, or 1–5 mm thick gouge, or 1–5 mm wide continuous discontinuity, damp surface, tunnel irrespective of strike with dip 0-20°	15	20	5	10	10	-5	55	55
2	UCS 50-100 MPa, RQD 75-90% , spacing 0.2-0.6 m, 5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity, water dripping surface, strike parallel to tunnel axis with dip 45-90°	7	17	10	0	4	-12	26	26
3	UCS 5-25 MPa, RQD 50-75% , spacing >2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water flowing surface, strike parallel to tunnel axis with dip 20-45°	2	13	20	20	0	-5	50	50
4	UCS <1 MPa, RQD 25-50% , spacing 0.06-0.2 m, rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm, completely dry surface, tunnel drive against dip at 20-45°	0	8	8	25	15	-10	46	46
5	UCS 100-250 MPa, RQD <25% , spacing 0.6-2 m, very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation, wet surface, tunnel drive against dip at 45-90°	12	3	15	30	7	-5	62	62
6	UCS 25-50 MPa, RQD 90-100% , spacing >2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water dripping surface, tunnel drive with dip at 20-45°	4	20	20	20	4	-2	66	66

Table 6. SMR manual calculation compare with PSU-RSR calculation.

No	Conditions	Manual Calculation										App
		R1	R2	R3	R4	R5	F1	F2	F3	F4	SMR	
1	UCS >250 MPa, RQD <25% , spacing >2 m, slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation <1 mm, water dripping surface, planar parallelism between joints and slope face is >30°, planar failure dip angle >45°, planar relationship between slope and joint dips is 0°, poor blasting	15	3	20	20	4	0.15	1.00	-25	-8	50	50
2	UCS 100-250 MPa, RQD 25-50% , spacing 0.2-0.6 m, rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm, completely dry surface, planar parallelism between joints and slope face is 20-30°, planar failure dip angle 35-45°, planar relationship between slope and joint dips is (-10)-0°, normal blasting or mechanical excavation	12	8	10	25	15	0.40	0.85	-50	0	53	53
3	UCS 50-100 MPa, RQD 50-75% , spacing <0.06 m, slickensided wall rock surface, or 1–5 mm thick gouge, or 1–5 mm wide continuous discontinuity, damp surface, planar parallelism between joints and slope face is 10-20°, planar failure dip angle 30-35°, planar relationship between slope and joint dips is <-10°, natural slope	7	13	5	10	10	0.70	0.70	-60	15	30	30
4	UCS 25-50 MPa, RQD 75-90% , spacing 0.6-2 m, very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation, water flowing surface, planar parallelism between joints and slope face is 5-10°, planar failure dip angle 20-30°, planar relationship between slope and joint dips is >10°, pre-splitting	4	17	15	30	0	0.85	0.40	0	10	76	76
5	UCS 5-25 MPa, RQD 90-100% , spacing 0.06-0.2 m, 5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity, wet surface, planar parallelism between joints and slope face is <5°, planar failure dip angle <20°, planar relationship between slope and joint dips is 0-10°, smooth blasting	2	20	8	0	7	1.00	0.15	-6	8	44	44
6	UCS 1-5 MPa, RQD <25% , spacing <0.06 m, rough and slightly weathered, wall rock surface separation <1 mm, completely dry surface, planar parallelism between joints and slope face is >30°, planar failure dip angle >45°, planar relationship between slope and joint dips is 0°, poor blasting	1	3	5	25	15	0.15	1.00	-25	-8	37	37



Fig. 3. Cut slope of sandstone intercalated shale rear PSU Wittayanusorn School area, Hat Yai campus, Thailand.

4.5 Verification in a coal mines case

Previous research showed that C1 west wall of Mae Moh Mine has coal seam with fine to very fine medium brownish grey claystone. One of the slope in this zone has three joint sets with dip direction about $325-344^\circ$ and dip angle about $55-80^\circ$. This slope is 5.5 meters in height and 50 meters in wide. Conditions of this slope is large blocky rock around 0.2-8 cubic meters with moderately weathered. Spacing is about 10-50 centimeters, aperture less than 2 millimeters and persistence is more than 3 meters. Discontinuities surface is very rough and dry [16]. Rock sample of this site has average uniaxial compressive strength of

6.25 MPa and average RQD around 64%. The result from PSU-RSR showed that this slope has SMR value about 57 classified in class III (Normal). So, this slope is partial stable, it can occur planar failure along some joints same as previous research [16] found rock pile at the toe of the slope (Fig. 4.).

Using the PSU-RSR application with geological compass will assist coal mine workers to evaluate preliminary rock slope stability and get instant results. This can be developed into routine works which can be planned appropriately. Mine workers will be safer from slope failure, and the mining operation are more sustainable.



Fig. 4. Cut slope of C1 West wall section fifth in Mae Moh coal mine, Lampang, Thailand.

Source: [16]

5. CONCLUSIONS

PSU-RSR version 1 (Fig. 5.) is an alternatively application for estimating preliminary rock mass stability and slope stability. It can be installed on most android phone, so it can be used easily and obtained result as fast as connecting mobile phone. The result of the application is accurate, reliable and fast. PSU-RSR may make mining operators pay more attention to safety. This application will be developed into safety culture and routine work cause sustainable of mining safety. However, rock mass stability and slope mass stability still need long-terms site investigation and monitoring to improve the pit wall stability. This application will be continually developed with sensors which more comfortable used in the future.



Fig. 5. QR Code of PSU-RSR version 1.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Department of Mining and Materials Engineering and Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

REFERENCES

- [1] Singh, B., and Goel, R. K. 2011. *Engineering Rock Mass Classification*. Oxford: Elsevier.
- [2] International Data Corporation. 2017. Smartphone OS Market Share, 2017 Q1. <http://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/os>. (accessed August 28, 2017).
- [3] Sarangi, R. 2013. Rock Mass Classification. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rakeshsarangi.rockmassclassification>. (accessed August 28, 2017).
- [4] Geomecanica Apps. 2014. RMR Calc Free. <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.rockmassratingcalc>. (accessed August 28, 2017).
- [5] Geomecanica Apps. 2014. Geostation Trial. https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.geostation_trial. (accessed August 29, 2017).
- [6] Saricam, T. 2015. RMR & GRC. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.turgutsaricam.basarir>. (accessed August 28, 2017).
- [7] Assis, D. 2016. Slope Mass Rating (SMR). <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.projecto.diogoassis.smr>. (accessed August 28, 2017).
- [8] Bieniawski, Z. T. 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications. The 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics. 41-48.
- [9] Bieniawski, Z. T. 1984. Rock mechanics design in mining and tunnelling. Rotterdam: Balkema.
- [10] Bieniawski, Z. T. 1993. Comprehensive rock engineering: principles, practice, and project. New York: Pergamon Press.
- [11] Waltham, T. 2002. Foundations of engineering geology. London: Spon Press.
- [12] Romana, M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. International Symposium on the Role of Rock Mechanics. 49-53.
- [13] Anbalagan, R., Sharma, S., and Raghuvanshi, T. K. 1992. Rock mass stability evaluation using modified SMR approach. The 6th National Symposium on Rock Mechanics. 258-268.
- [14] International Business Machines. 2017. Android Studio the Official IDE for Android. <https://developer.android.com/studio/index.html>. (accessed September 11, 2017).
- [15] Tonnyayopas D., Watcharasuthakorn U. and Lertsukwanit, P. 2005. Jointed and faulted rock slope stability rear PSU Wittayanusorn School area, The 4th PSU Engineering Conference, 8-9 December 2005, Songkhla, pp. CE-37 – CE-42. (in Thai)
- [16] Khawngam, R., and Trakoolngam, K. 2017. Mae Moh pit wall slope stability assessment using the Q-system rock mass classification. *Special Project Report for the Bachelor of Science in Geotechnology*, Department of Geotechnology, Khon Kaen University.

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์จากวารสารวิชาการระดับ TCI ฐาน 1
Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Android Application Development for
Estimating Properties and Preliminary Stability of Rock Mass using Rock Mass
Rating and Geological Strength Index. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*.
2019, 19(1), xxx-xxx. (Accepted: 27 August 2018)

Android Application Development for Estimating Properties and Preliminary Stability of Rock

Mass using Rock Mass Rating and Geological Strength Index

การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์สำหรับประเมินสมบัติและเสถียรภาพเบื้องต้นของมวลหินด้วย
หลักการจำแนกมวลหินและดัชนีกำลังธรณี

Pantawee Pantaweesak (พันทวี พันทวีศักดิ์)* Dr.Phongpat Sontamino (ดร.พงศ์พัฒน์ สันทะมิโน)**

Dr.Danupon Tonnayopas (ดร.คุณพล ตันน โยภาส)***

ABSTRACT

Rock mass stability is one of the key factors which influence mining and civil engineering operations. Rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI) are very useful classification theories for estimating preliminary rock mass properties and stability with discontinuities analysis. Engineers can plan their work properly and safely if they know the stability of the rock mass. Android smartphone are portable devices that have a microprocessor. PSU-RG Android application was developed for estimating the stability of rock mass using rock mass rating and geological strength index. The application allows users to evaluate rock mass stability instantly in the field. PSU-RG application was verified for reliable and accurate estimations. The application was tested with geological data from other researches (case studies), the results are satisfied.

บทคัดย่อ

เสถียรภาพมวลหินเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการดำเนินงานทางวิศวกรรมเหมืองแร่และวิศวกรรมโยธา หลักการจำแนกมวลหิน เช่น การประเมินมวลหิน และดัชนีกำลังธรณี เป็นหลักการที่ทำให้ทราบถึงสมบัติและเสถียรภาพมวลหินเบื้องต้นได้จากการเก็บข้อมูลรอยไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้สามารถวางแผนดำเนินงานได้อย่างเหมาะสมและมีความปลอดภัย ในปัจจุบันสมาร์ตโฟนแอนดรอยด์เป็นอุปกรณ์พกพาที่มีประสิทธิภาพในการประมวลผลและได้รับความนิยม งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ชื่อ PSU-RG สำหรับประเมินเสถียรภาพมวลหินด้วยหลักการประเมินมวลหินและดัชนีกำลังธรณี ช่วยให้ผู้ใช้สามารถประเมินมวลหินได้ทันทีบริเวณหน้างาน โปรแกรมประยุกต์ได้ถูกตรวจสอบเบื้องต้นแล้วว่ามีผลการประเมินที่ถูกต้องเชื่อถือได้ และเมื่อทำกรณีศึกษาร่วมกับข้อมูลจากงานวิจัยในอดีตพบว่าได้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจ

Keywords: Android application, Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI)

คำสำคัญ: โปรแกรมประยุกต์แอนดรอยด์ การประเมินมวลหิน ดัชนีกำลังธรณี

¹ Correspondent author: phongpat.s@psu.ac.th

* Student, Master of Engineering Program in Mining and Materials, Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

** Lecturer, Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*** Associate Professor, Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*, **, *** Researcher, Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Introduction

Rock mass stability is one of the most important factors in mining and civil engineering operations. The stability affects safety, cost and operation progress. Information of the stability of rock mass helps engineers plan their work safely. The rock mass data can be applied to a wide range of planning and design. Engineering rock mass classification called Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) are basic principles for evaluating preliminary rock mass stability. Rock mass estimations with these principles is based on visual inspection of geological conditions, compass is required in some cases. In this way, the experts can know the stability of rock mass without any equipment. These principles are widely accepted and attracted, both in the development of principles to use for specialized purposes such as tunnel excavation with TBM and rock bolting [1-4], combination with technology such as image processing [5], and practical applications such as tunneling and quarrying on the Earth [6-7], including concepts to be used on the Mars [8]. Rock mass classifications are not complicated calculation but classifications are principles that encompass many conditions and possibilities. It is difficult for a person to remember the combination of many conditions and it hard to review the theories during site investigation. Microprocessors can solve this problem. Desktop and laptop are useful devices for computation and logical processing, but these devices are suitable for indoor use. These things are large and requires a lot of electricity, so it is not easy to use outdoor, such as mine or geological field. The smartphone is more attractive choice in a situation like this. From many smartphone systems, Android is the most popular system in the world [9]. Android operating system is open source and free, developers can develop the application freely.

Android smartphone was selected in this research. We plan to develop an application for estimating preliminary rock mass properties and stability using rock mass rating and geological strength index. At present, there are many commercial applications that applied with rock mass rating from Google Play Store [10-13] and applications with research purposes [14-15], but there is only one application that applied to geological strength index [16]. The applications mentioned earlier, there have no applications that can estimate in detail and save the results. Some applications from Google Play Store are expensive. This research is an alternative rock mass classification application which can assist geologists and students in the field. Whenever android smartphone is available, the application allows users to estimate initial rock mass stability.

Background theories

The principles used for this research are rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). These principles are summarized in the following.

Rock mass rating

Geomechanics classification, also known as Bieniawski's Rock Mass Rating, developed from practical knowledge of tunneling in sedimentary rocks [17]. This theory consists of six important parameters used in the assessment of rock mass stability. The rock mass rating is suitable for tunnel and dam foundation design. First parameter is the strength of intact rock measured from uniaxial compressive strength (UCS) or point load strength index (PLSI) in the same conditions as the original [18-19]. Normally, this value is already known from the exploration phase. If the engineer does not want to test the rock samples, strength of rock can be indirect evaluated from average uniaxial compressive

strength of rock from previous research [20]. The schmidt rebound hardness test is another way that researchers try to determine the strength of rock mass [21], but this method is infrequent. Experienced geologists and engineers can measure the strength of rock from geological hammer's reaction force [8], this method requires a lot of experience, it is not recommended. Indirect estimation may fail in some cases, these methods should not be used if it is not necessary. Second parameter is the rock quality designation (RQD) which determined from the percentage of 100 millimeters and longer core pieces per 1-meter core length [22]. The volumetric joint count is another way to evaluate RQD that does not require core sampling, it is the ratio of the number of main joints that appear on the rock mass to the total distance [23]. Third parameter is spacing of discontinuities. Discontinuities including joints, faults, beddings, shear zones, and weakness planes. Rock mass assessors must be able to distinguish the type of discontinuities before measuring its spacing. Forth parameter is discontinuities conditions consists of roughness, aperture, persistence, weathering and gouge materials [24]. Rock mass conditions of each are unique, especially the roughness and weathering which requires the experience of assessors. Significant conditions from experienced assessors are necessary. The fifth parameter is groundwater condition, measured by the flow rate of groundwater around the rock mass, or described in simple; dry, damp, wet, dripping, flowing. For tunneling project, this parameter can be measured from the ratio of seepage pressure per major principle stress [25]. The last parameter is the orientation of discontinuities, relation between rock mass face and discontinuities, both dip directions and dip angles. Orientation has a significant effect on the failure mechanism of natural rock and project appropriateness. Finally, RMR value can be calculated from the sum of six values, each parameter can be converted from the conditions into a value by Bieniawski's principle. Rock mass rating value can indicate the stability of rock mass in the form of tunnel stand up time, rock cohesion, internal friction angle, allowable bearing pressure [26] and safe cut slope [27]. The principle mentioned above is compatible with dam and tunnel.

Geological strength index

Geological strength index is the rock mass classification which based on visual inspection. The original GSI is the comparison between discovering rock mass conditions and geological quantitative chart [28]. This principle is more suitable to field application than rock mass rating but difficult to convert into the application. Over two centuries, researchers try to convert the geological quantitative chart into an equation. This research uses GSI calculation techniques of Cai and Kaiser [29] as following equation,

$$GSI = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b} \quad (1)$$

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_A} \quad (2)$$

where J_c is joint conditions factor, V_b is block volume in cm^3 , J_w is large scale waviness of discontinuities factor, J_s is small scale smoothness factor and J_A is joint alteration factor [30-31]. Each factor is converted from the conditions into a value with rating table. Waviness is the undulation percentage of discontinuities or amplitude of rock surface per length of full cycle in large scale. This factor indicates the overall strength of the discontinuities structure. Smoothness is small scale surface roughness

examine by touchandsight. Alteration is governed by the laws ofthermodynamics related to environmental conditions, consists of joint conditions and coating materials. Smoothness and alteration indicate the strength of discontinuities surface includes the friction of joints. Block of rock, caused by multiple joint sets, indicates the frequency of discontinuities that appear on rock mass. Rock materials constant (m_r) is another factor that depends on the type of rock [32], this constant assume that rock mass is isotropic and do not disturbed by heavy breakage activities such as blasting. When plotting m_r constant against GSI value in the results graph, you can estimate the ratio of rock mass cohesive strength per uniaxial compressive strength and internal friction angle [28]. Cohesive strength and internal friction angle are important parameters in the assessment of rock mass stability, the values derived from this principle are only approximations.

Internal friction angle and cohesion

Angle of internal friction and cohesion are the values that indicate some properties of rock mass, especially related to stability. These two values are the components of rock shear strength. In the laboratory, relationships between normal stress and shear strength can be estimated by triaxial compressive strength test with Mohr-Coulomb criteria or direct shear test. This failure envelope is divided into two types: peak shear strength and residual shear strength. Peak type is the maximum shear strength of rock mass before collapse and residual type is the maximum shear strength of rock mass after collapse. Residual strength is commonly used in rock mass stability assessment. Many rock slope stability estimations, such as the factor of safety calculation by limit equilibrium analysis and stereographic projection, are required cohesion and friction angle.

Methodology

The research is divided into two parts; application development and application verification with the case studies.

Application development

Android Studio 2.2.2, official integrated development environment program, was used to develop this application [33]. Java language, Extensible Markup Language (XML), and Standard Query Language (SQL) has been coded together to create calculation logic, user interface, and database, respectively. Android 4.1 (Jelly Beans) has been selected as minimum requirement and Android 6.0 (Marshmallow) is target operation. Quad-core 1.3 GHz Cortex-A7 with 512 MB random access memory on 4 inches screen (resolution 480x800) was used as a real tester during application development.

Verification

After the development ended, application was verified by comparing the results between the application's display and Microsoft Excel calculation. Random rock mass conditions are generated to cover all parameters. The results have been compared case by case to ensure that no extra errors are made from the application. Finally, put the real rock mass conditions from previous researches into the application to illustrate the actual use.

Results

PSU-RG is the name of this application. Developers want the application to suit everyone. The most important part of the application is the correct calculation and user friendliness. Simple usage reduces the complexity of the rock

mass theory. However, users have to know basic geological structure of rock mass. This application is divided into three parts; rock mass rating module, geological strength index module, and data manager module. Each module is clearly separated and designed to prevent duplicate rock mass conditions entry. This application requires a geological compass to measure the discontinuities orientation. Simple guideline was attached in this application to help users understand the basic geological factors.

Rock mass rating module

Preliminary rock mass stability estimation is one of the first steps that geologists should do. This may help to make the work decision more confident, safety is the most important factor. Just entering a few basic values of rock mass as mentioned above, the application calculates immediately. This module was programmed to cover all 41,015,625 possible cases. The simplest factors set is rock type, joint counting, spacing, rock conditions, water condition and activity of the rock mass. Each parameter was separated clearly and sequentially. Users do not need to enter values in sequence, they can design their own input sequences. The display of this module is shown in figure 1. The fourth parameter part is divided into two modes; simplicity and detail. Simple mode is a set of rock mass conditions created by the application, suitable for initial assessment. Detail mode allows the users to enter detailed condition values, suitable for re-assessment to improve the stability as shown in figure 2. The results of this module consist of rock mass properties, cohesion and friction angle of rock mass, safety suggestion, tunnel stand up time, safe cut slope angle and support suggestion as shown in figure 3. The results of rock mass can be saved in data manager module for future use.

Geological strength index module

This module is suitable for assessing of the stability of rock mass at inaccessible points. Only data from visual inspection can be used to evaluate the stability of rock mass. Although detailed gathering is better but sometimes it may be risky. Geological strength index allows users to evaluate the rock mass stability from a distance. This module was programmed to cover all 140,400 possible cases. Figure 4 is the user interface of this module, conditions are categorized easily but still computable like original theory. This module is applicable to rock masses that partly flooded, blocked, or located in a risk area. The results of this module is only simple rock mass properties, cohesion to uniaxial compressive strength ratio and friction angle as shown in figure 5. These values are important properties of rock mass as mentioned above. The user interface design of this module is similar to previous module.

Data manager module

This module is a useful add-on for saving data. The database is created in the form of SQL table and designed to save memory space of smartphone. The data manager module allows users to save the estimated results from rock mass rating module. The saved results are sorted by chronological sequence with data names and time stamps as shown in figure 6. Users can name the data in rock mass rating module before saving to the database. The database of this module is private, for the privacy of users. Sometimes the rock mass covers a large area, this module can be divided into smaller sections. Users will be able to gather more details if they work in small areas, the results are more accurate. Segmentation allows users to estimate the rock mass in different cases. The saved results in this module are the same as the rock mass rating module as shown in figure 7. This module eliminates mistakes from handwriting, reduce the error caused by the large amount of data. The application has a simple geological guide for beginners in this module.

Calculation verification

Random rock conditions were generated to verify the calculation of rock mass rating module and geological strength index module. This is a very important step to make sure that the application is reliable. The generated conditions were calculated for the RMR value and GSI value by Microsoft Excel. These results were compared with calculations by the application. Some comparison results of RMR and GSI are shown in table 1 and table 2, respectively. All comparisons reveal that the calculation of the application are the same as Microsoft Excel calculations. Now the application is ready to use in the field.

Application of PSU-RG with case studies

The application was tested with real rock mass conditions from previous research as using example. Carbonate rock quarry case in Phang Nga province of Thailand [7] was selected this time. This rock mass was excavated to be slope face in open pit mining. The nature of rock in this area is light-dark grey and brownish-reddish grey limestone with calcite vein and brownish grey calcitic dolomite, known as Ratburi Group in Permian period. Point load strength of rock sample is 3.52 MPa, uniaxial compressive strength is 66 MPa, and rock quality designation from the volumetric joint count calculation is 70%. Spacings are between 0.1 and 0.8 meters without trace of groundwater. Discontinuities surfaces are slickensides with thick infilling and highly weathered. The aperture of joints is between 5 and 10 millimeters. Slope face is oriented at $64^\circ/073^\circ$ (dip angle/ dip directions) with 15 meters in height and 10 meters in width. Two joint sets and one bedding were found on this slope at $62^\circ/305^\circ$, $40^\circ/130^\circ$, and $14^\circ/296^\circ$, respectively. The RMR result of this rock mass is 60 classifieds in class III (Fair), a little bit less than the previous research (63). The GSI value and m_r value are 54.5 and 8, respectively.

Another case study is excavated sandstone slope, we used the conditions of jointed sandstone intercalated shale, the cut slope at rear PSU Wittayanusorn School in Songkhla province of Thailand [14]. The height of slope is 12 meters, the width is 6 meters. There are 41 discontinuities divided into 36 joints and 5 beddings plane. The direction of these joints is between 336° and 352° , the dips are between 72° and 90° . Joints surface is weathered, completely dry and slightly rough. The average aperture is 1 millimeter and the spacings are between 0.2 and 0.6 meters. Slope face is oriented at $78^\circ/215^\circ$. The average point load strength of rock samples is 5.18 MPa, equal to 113 MPa of uniaxial compressive strength. The RMR result is 65 classified in class II (Good), the same as previous research (65). The GSI value and m_r value are 40.5 and 19, respectively.

The results of these two case studies using PSU-RG are summarized in table 3. In both cases, the RMR value is close to the previous research. Some value is not equal because of the rock mass conditions details. The Phang Nga case study may have some details that we do not know. However, significant stability was assessed. The GSI values of both cases give the same friction angle as RMR classification. The calculated cohesion from GSI value is about 10 times higher than the RMR estimation. These case studies show that PSU-RG can be used to estimate the preliminary rock mass stability in the field. The application saves time in assessing rock mass stability and provide useful details to increase stability. The results of PSU-RG are only preliminary assessments, it has theoretical inconsistencies in some case. However, the multi-theories application will bring more choices to engineers.

Discussion and conclusions

PSU-RG is a useful tool for estimating preliminary rock mass properties and stability. This application is exclusively for Android phone users. The rock mass rating is used to estimate the stability and properties of rock mass that can be directly gathered. The application consists of several theories that give users a variety of assessment approaches. Stability recommendations from this module are the guideline for increasing the stability of rock mass in the future. The geological strength index can assess the rock mass properties by visual inspection, suitable for partly flooded, blocked, or located in a risk area. Estimated results can be saved in data manager module, use a little memory space by using SQL database. The application respects the privacy of users, so it can be used by private parties. The application has been verified that the estimation is correct and reliable. The simple rock structure guide is included in PSU-RG, students can learn how to use the application by themselves. The case studies show that the application actually works, although Phang Nga case study (limestone) is slightly different. Detailed inputs are important to make accurate calculations as found in the Songkhla case study (sandstone). Rock mass classification in this research is only preliminary assessment. Users should be aware if the assessment results are not consistent with reality in special case. Cohesion and friction angle results can be applied to more complex stability assessments such as safety factor calculation by limit equilibrium analysis and stereographic projection. The application saves time in estimating rock mass stability, makes you have more time to do other works. Sometimes, the application requires a geological compass. If you do not have a compass, you can use a digital compass application from both Google Play Store or digital compass application for research [34]. However, users should use the digital compass carefully because some research has shown that digital compass is inaccurate [35-36]. This application is not recommended as the primary rock mass stability estimation, long-term stability studies are needed. In future, this application will add other stability estimation theories to serve a variety of purposes. If you want to save your working hours on preliminary rock mass study, you can download PSU-RG from QR code as shown in figure 8.

Acknowledgements

This research was funded by 5-Year Bachelor's-Master's Degree Program Scholarship from Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, and PSU.GS. Financial Support for Thesis from Graduate School, Prince of Songkla University, Thailand. The authors would like to acknowledge Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand, for support of this research.

References

1. Osgoui RR, Unal E. An empirical method for design of grouted bolts in rock tunnels based on the Geological Strength Index (GSI). *Engineering Geology*. 2009; 107(3-4): 154-166.
2. Hamidi JK, Shahriar K, Rezai B, Rostami J. Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2010; 25(4): 333-345.
3. Bertuzzi R, Douglas K, Mostyn G. Comparison of quantified and chart GSI for four rock masses. *Engineering Geology*. 2016; 202: 24-35.

4. Bertuzzi R, Douglas K, Mostyn G. Improving the GSIHoek-Brown criterion relationships. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016; 89: 185-199.
5. Hong K, Han E, Kang K. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017; 9(4): 702-708.
6. Boonbatr A, Fuenkajorn K. Design and analysis of adit for limestone quarry of Siam City Cement Public Company Limited. *Proceedings of Thailand Rock Mechanics Symposium; 2011 Mar 10-11; Phetchaburi, Thailand*.
7. Tonnyopas D. Rock Slope Assessment of Carbonate Rock Quarries Using Stereo-net Projection Method and Rock Mass Classification. *University of the Thai Chamber of Commerce Journal Science and Technology*. 2014; 1(2): 1-17. Thai.
8. Beemer HD, Worrells DS. Conducting Rock Mass Rating for tunnel construction on Mars. *Acta Astronautica*. 2017; 139: 176-180.
9. Smartphone OS Market Share, 2017 Q1 [Internet] 2017 [cited 2018 Feb 25]. Available from: <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/os>
10. GeoToolbox [Internet] 2013 [cited 2018 Feb 27]. Available from: https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_marco_filipponi.GeoToolbox
11. RMR Calc [Internet] 2014 [cited 2018 Feb 27]. Available from: <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.rockmassratingcalc2>
12. Geostation [Internet] 2014 [cited 2018 Feb 27]. Available from: <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.geostation>
13. Assis D. Slope Mass Rating (SMR) [Internet] 2016 [cited 2018 Feb 27]. Available from: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.projecto.diogoassis.smr>
14. Pantaweesak P, Sontamino P, Tonnyopas D. Android Application Development for Estimating Rock Slope Stability using Slope Mass Rating (SMR). *Proceedings of the 6th Science, Engineering and Resources Undergraduate Conference; 2017 Apr 29; Songkhla, Thailand*.
15. Pantaweesak P, Sontamino P, Tonnyopas D, Vattanasak H. PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability. *Proceedings of Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference; 2017 Nov 23-24; Lampang, Thailand*.
16. Sarangi R. Rock Mass Classification [Internet] 2013 [cited 2018 Feb 27]. Available from: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rakeshsarangi.rockmassclassification>
17. Singh B, Goel RK. *Engineering Rock Mass Classification: tunneling, foundations, and landslides*. New York: Elsevier; 2011.
18. Bieniawski ZT. Determining rock mass deformability, experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978; 15(5): 237-247.
19. Bieniawski ZT. *Rock mechanics design in mining and tunneling*. Rotterdam: Balkema AA; 1984.

20. Palmstrom A. Recent developments in rock support estimates by the RMI. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*. 2000; 6(1): 1-19.
21. Nogkeaw W, Tonayopas D, Rachpech V. Estimation of rock mass strength using GSI System and rock slope stability by stereographic projection. *Proceedings of the 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology*; 2011 May 2-3; Phuket, Thailand.
22. Deere DU, Deere DW. Rock quality designation (RQD) after twenty years. Contract report. Gainesville (FL): Department of the Army, US Army Corps of Engineers; 1989 Feb. Report No.: GL-89-1.
23. Palmstrom A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2005; 20(4): 362-377.
24. Bieniawski ZT. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends. In: Hudson JA, editor. *Comprehensive Rock Engineering*. Oxford: Pergamon Press; 1993. p. 553-574.
25. Bieniawski ZT. The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proceedings of the 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics*; 1979 Sep 2-8; Montreux, Switzerland.
26. Bieniawski ZT. Engineering classification of jointed rock masses. *The Civil Engineer in South Africa*. 1973; 15(12): 335-343.
27. Waltham T. *Foundations of Engineering Geology*. 2nd ed. Abingdon: Taylor & Francis; 2002.
28. Hoek E, Brown ET. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997; 34(8): 1165-1186.
29. Cai M, Kaiser PK. Visualization of rock mass classification systems. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2006; 24(4): 1089-1102.
30. Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004; 41(1): 3-19.
31. Palmstrom A. RMI – a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*. 1995; 1(2): 1-40.
32. Hoek E, Marinos P, Benissi M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - the case of Athens schist formation. *Engineering Geology and Environment*. 1998; 57(2): 151-160.
33. Android Studio [Internet] 2017 [cited 2018 Feb 27]. Available from: <https://developer.android.com/studio/index.html>
34. Weng YH, Sun FS, Grigsby JD. GeoTools: An android phone application in geology. *Computers & Geosciences*. 2012; 44: 24-30.
35. Novakova L, Pavlis TL. Assessment of the precision of smart phones and tablets for measurement of planar orientations: A case study. *Journal of Structural Geology*. 2017; 97: 93-103.
36. Allmendinger RW, Siron CR, Scott CP. Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices. *Journal of Structural Geology*. 2017; 102: 98-112.

Table 1 Comparison results of RMR between Microsoft Excel calculation and PSU-RG application.

Rock Mass Conditions						Excel	PSU-RG
UCS (MPa)	RQD (%)	Spacing (m)	Joints Conditions	Inflow (L/min)	Orientation	RMR	RMR
<1	<25	0.06-0.2	Tight, discontinuous, rough	10-25	Fair	36	36
>250	90-100	<0.06	Slickensided, continuous	<10	Fair	55	55
1-5	75-90	0.2-0.6	>5 mm wide continuous	<10	V.favorable	38	38
25-50	25-50	0.6-2	<1 mm highly weathered	-	Fair	50	50
>250	50-75	<0.06	Rough, slightly weathered	>125	Fair	53	53
25-50	90-100	>3	Slightly rough, <1 mm	25-125	Favorable	66	66
100-250	<25	0.6-2	Very rough, no separation	10-25	Fair	62	62
<1	25-50	0.06-0.2	Rough, separation <1 mm	-	Unfavorable	46	46
5-25	50-75	>2	Slightly rough, weathered	>125	Fair	50	50
50-100	75-90	0.2-0.6	Soft gouge, continuous	25-125	V.unfavorable	26	26

Table 2 Comparison results of GSI between Microsoft Excel calculation and PSU-RG application.

Rock Mass Conditions					Excel	PSU-RG		
Waviness	Smoothness	Alteration	Rock Type	Block V. (cm ³)	GSI	m_r	GSI	m_r
Interlocking	Slickensided	Swelling clay	Conglomerate	1	16.6	22	16.6	22
Stepped	Polished	Soft clay	Sandstone	5	16.2	19	16.2	19
>3%	Smooth	Compacted clay	Siltstone	10	20.5	9	20.5	9
0.3-3%	Slightly rough	Sand filling	Anhydrite	50	28.0	13	28.0	13
<0.3%	Rough	Clay coating	Quartzite	100	28.1	24	28.1	24
Interlocking	Very rough	Sand coating	Mylonite	1000	50.3	6	50.3	6
Stepped	Slickensided	High weathered	Schist	10000	40.9	6	40.9	6
>3%	Polished	Low weathered	Slate	100000	52.0	9	52.0	9
0.3-3%	Smooth	Fresh rock	Granite	500000	70.1	33	70.1	33
<0.3%	Slightly rough	Unweathered	Tuff	1000000	68.1	15	68.1	15

Table 3 Estimated rock mass properties of Phang Nga limestone quarry and Songkhla sandstone slope by PSU-RG.

Case Study	Rock Mass Rating			Geological Strength Index		
	RMR	Friction	Cohesion	GSI	Friction	Cohesion
		Angle	Angle		Angle	
Phang Nga limestone	60 (III, Fair)	25-35°	0.2-0.3 MPa	54.5	30°	2.97 MPa
Songkhla sandstone	65 (II, Good)	35-45°	0.3-0.4 MPa	40.5	35°	4.75 MPa

PSU-RG (RMR)

DATA RMR GSI

R1: UCS PLSI Type

Point Load Strength Index: 4–8 MPa

R2: RQD Jv Core

Rock Quality Designation: 75–90 %

R3: Spacing: 0.6–2 m

R4: Simple Detail

Discontinuities Condition: Very rough, u..

R5: Inflow P/S Ratio General

CALCULATE

Figure 1 User interface of rock mass rating module.

PSU-RG (RMR)

DATA RMR GSI

Rock Mass Rating

RMR : 89

Class : I (Very good)

Stand time : 20 years for 15 m span

Cohesive : more than 0.4 MPa

Friction angles : more than 45 deg.

Allow pressure : 440–600 T/sq.m

Safe slope : more than 70 deg.

No support required

Supports : except for occasional spot bolting

DS01 SAVE

CALCULATE

Figure 3 Estimation results from rock mass rating module.

PSU-RG (RMR)

DATA RMR GSI

R4: Simple Detail

Persistence: Less than 1 m

Aperture: Less than 0.1 mm

Roughness: Very rough

Infillings: Hard filling more than 5 mm

Weathering: Unweathered

R5: Inflow P/S Ratio General

General description: Completely dry

R6: Tunnel Dam Slope

CALCULATE

Figure 2 Detail mode of the fourth parameters in rock mass rating module.

PSU-RG (GSI)

DATA RMR GSI

Jw: Joint waviness factor: Interlockin..

Js: Joint smoothness factor: Very rou..

jA: Joint alteration factor: Unweathere..

mr: Rock material constant: Conglom..

Vb: Block volume: 1 Cu.cm

CALCULATE

Figure 4 User interface of geological strength index module.

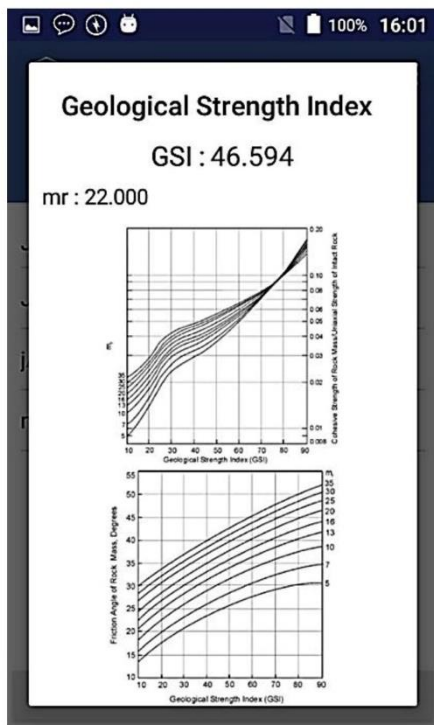


Figure 5 Estimation results from geological strength index module.

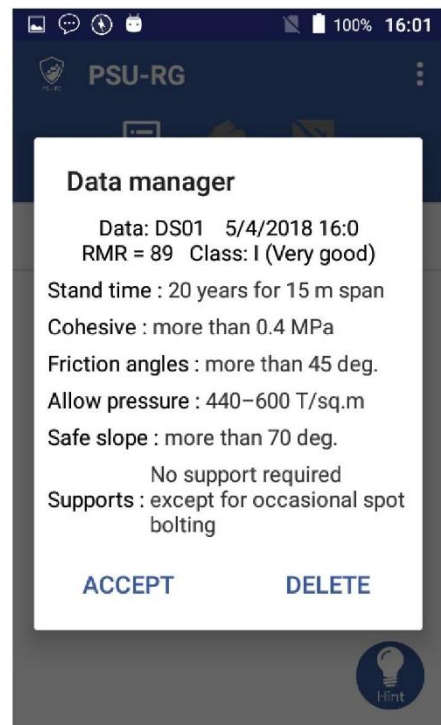


Figure 7 Details of estimated RMR results.

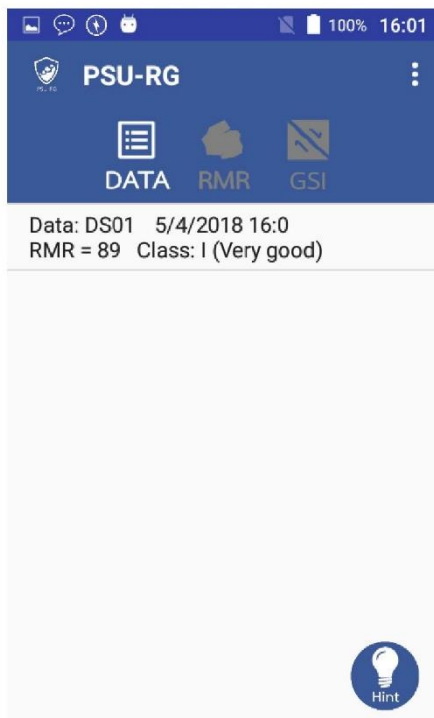


Figure 6 List of saved results in data manager module.



Figure 8 Android package download link of PSU-RG.

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์จากวารสารวิชาการระดับ ISI (ESCI)
Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Alternative Software for Evaluating
Preliminary Rock Stability of Tunnel using Rock Mass Rating (RMR) and Rock
Mass Quality (Q) on Android Smartphone. *Engineering Journal*. **2019**, 23(1), xxx-
xxx. (Accepted: 24 October 2018)



Article

Alternative Software for Evaluating Preliminary Rock Stability of Tunnel using Rock Mass Rating (RMR) and Rock Mass Quality (Q) on Android Smartphone

Pantawee Pantaweesak^a, Phongpat Sontamino^{b,*}, and Danupon Tonnayopas^c

Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Thailand
 Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Prince of Songkla University, Thailand
 E-mail: ^ampantawee@hotmail.com, ^bphongpat.s@psu.ac.th (Corresponding author), ^cdanupon.t@psu.ac.th

Abstract. Nowadays, tunneling is applied to a variety of constructions such as subway station, water supply tunnel and underground mine. Tunnel safety is one of the most important factors of construction. Most tunneling is operated in remote area that is difficult to reach. This research aims to develop an alternative software for Android smartphone, which use for estimating preliminary rock mass stability and suggesting support method for the early state tunnel. Suitable rock mass classifications for tunnel are rock mass rating (RMR) and rock mass quality (Q system). They are applied to the application. Android operating system is chosen because it is the most popular operating system in the world. The application is programmed by the official programming software from Google, the Android Studio. PSU-RQ is the name of this application. PSU-RQ is easy to use because it reduced the complexity of the theories by numerical logic. The application results are verified by comparing with Excel standard worksheet. PSU-RQ is reliable and accurate. The application is tested in a tunneling case study as an example. Whenever a smartphone is available, the user can estimate preliminary rock mass stability and support method of tunnel instantly. However, long-term stability investigation is necessary.

Keywords: Android application, rock mass rating, rock mass quality, tunnel stability.

ENGINEERING JOURNAL Volume # Issue #

Received Date Month Year

Accepted Date Month Year

Published Date Month Year

Online at <http://www.engj.org/>

DOI:10.4186/ei.20xx.xx.x.xx

1. Introduction

The rock mass rating (RMR) was initiated at the South African Council of Scientific and Industrial Research [1]. This principle has been developing by adjusting the parameters and equations for applying a variety of purposes such as rock slope stability estimation by slope mass rating (SMR) [2], hard rock TBM performance prediction [3] and strong-weak interbedding rock layers stability estimation [4]. RMR system is a simple geomechanics classification for estimating preliminary rock mass stability in mining and civil engineering. This geological rating is suitable for tunneling and foundation construction. The rock mass rating is popular not only with geological study on the Earth [5-7], but also with tunnel construction on the Mars [8].

Another suitable rock mass classification for estimating the rock mass stability of tunnel is the rock mass quality [9]. This principle is otherwise known as the Q system. This classification is used for evaluating ultimate support pressure and reinforcement method for tunnel. Q system was chosen in many studies such as cement grouted rock mass evaluation [10] and blast induced rock mass investigation [11]. Sometimes, the rock mass rating and the rock mass quality were studied together [12-14]. As mentioned above, the RMR and Q system have been using by many researchers. These two principles are chosen for this research.

Nowadays, technology is widespread in most areas of the world. The smartphone is one of the most popular digital devices. It makes our life easier to manage a lot of tasks by reducing the steps of many processes, especially communication and calculation. The Android is the most popular operating system in the world [15]. It is easy to use, diverse, affordable and compatible with a variety of devices. Non-official developer can develop the Android application free of charge. Smartphone unlocking is not required to install the non-official Android package. However, the android smartphone should meet the minimum requirements to run the application without bugs and errors.

The objective of this research is to develop an alternative Android application for estimating preliminary rock mass stability and suggesting support method for tunnel using rock mass rating and rock mass quality. Many researchers have been interesting in the geological application on smartphone for a decade. The application for investigating geological site were developed on both operating systems, Android [16] and iOS [17]. However, some errors may occur when discontinuity orientation is gathered by the smartphone [18-19]. The user must be careful with this function. In 2013, the first commercial rock mass classification application appeared on Google Play Store then it was followed by other applications as shown in Table 1. Some applications only have the rock mass rating or the rock mass quality function while some applications have both. However, the Rock Mass Classification [20] and the Geotoolbox [21] cannot reveal the detail of estimated results. The Geostation [22] is the only application that can reveal detailed results, although the price is quite expensive. Very few of the applications are suitable for use in remote areas like tunnels. An application that can save the result for future use makes the estimation easier, but most applications do not support this function. This application is an option for the user to assess preliminary rock mass stability. However, long-term stability investigation is important, the user should use this application with other studies such as stereographic projection analysis and safety factor calculation.

Table 1. List of the rock mass rating and rock mass quality applications which operate on the Android smartphone, this list grouped main application, extension parts and free version of each application together.

Application Name	Classifications		Price (THB)	Developers
	RMR	Q		
Rock Mass Classification	X	X	-	Sarangi (2013) [20]
GeoToolbox	X	X	-	Filipponi (2013) [21]
Geostation	X	X	3,320	Geomecanica Apps (2014) [22]
RMR Calc	X	-	60	Geomecanica Apps (2014) [23]
Slope Mass Rating (SMR)	X	-	-	Assis (2016) [24]
Q-system	-	X	-	Norges Geotekniske Institutt (2016) [25]
Q-system (tunneling)	-	X	-	Sator (2016) [26]
PSU Rock Slope Rating	X	-	-	Pantaweesak et al. (2017) [27-28]

*Updated 27 February 2018.

2. Background Theories

2.1. Rock Mass Rating (RMR)

The rock mass rating (RMR) is one of the effective rock mass classifications which based on practical knowledge of shallow tunneling [29]. The six parameters of RMR (R_1 - R_6) were defined to determine rock conditions. These parameters can be simplified for using in the tunnel by applying to other theories. The sum of rating values is the RMR value which can be calculated by Eq. (1):

$$RMR=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6 \quad (1)$$

where R_1 =rating of strength of intact rock, R_2 =rating of rock quality designation, R_3 =rating of spacing of discontinuities, R_4 =rating of discontinuity conditions, R_5 =rating of groundwater condition and R_6 =rating of discontinuity orientation. Each rating is compared from Bieniawski's charts. The RMR value relates to rock mass stability. Estimated results from RMR charts consist of average stand-up time of the tunnel, cohesion of rock masses, internal friction angle of rock masses, allowable bearing pressure [1] and safe cut slope angle [30]. Each RMR parameter is described in the following sections.

2.1.1. Strength of intact rock (R_1)

This parameter can be obtained from the uniaxial compressive strength or unconfined compressive strength test (UCS). Rock sample is compressed according to natural conditions. The compressive strength is the compression force per compressed area of rock sample. Another method to obtain the strength is point load strength index test (PLSI) [31-32]. In general, the strength has been tested during the exploration, rock mass in the same area is similar. However, the new test will estimate the most accurate results. In some cases, the user cannot test the rock sample at that moment, but need to know preliminary tunnel stability, the user can use the average uniaxial compressive strength of Palmstrom [33]. In the worst case, the experienced geologist can roughly recognize the strength of rock by striking the geological hammer to the rock surface [8]. The reaction force of the hammer and experience is the strength indicator.

2.1.2. Rock quality designation (R_2)

The rock quality designation (RQD) is the percentage of core recovery along coring axis. It is the sum of length of core pieces that are greater or equal to 100 mm per meter [34]. Normally, core logging is operated before tunneling, most tunnels already have this value. At the earliest stage that core is not available, RQD value can be calculated from the volumetric joint count (J_v). Assessors must identify and count the appeared discontinuities along the tunnel to find the number and type of them. The sum of number of horizontal discontinuities (such as beddings) divided by the tunnel height and number of vertical discontinuities (such as normal joints and faults) divided by the tunnel length is the volumetric joint count. If the tunnel is very long or discover the structural change of rock formation, engineers should zone the tunnel into smaller areas. Rock quality designation value can be calculated from J_v using Eq. (2) [35].

$$RQD=110-2.5J_v \quad (2)$$

2.1.3. Spacing of discontinuities (R_3)

Discontinuity is divided into several types such as joint, bedding, shear zone, fault and weakness surface. Discontinuities usually occur in sets, the same set has similar type, orientation and pattern. Spacing is the distance between discontinuities in the same set. This value represents the frequency of discontinuities which occurred from geological force. Normally, the spacing can be measured by distance tape, ruler, laser distance meter and rough estimating by sight. The spacing is very important because this value relates to the strength of the rock mass.

2.1.4. Discontinuity conditions (R_4)

Discontinuity conditions include roughness, separation (aperture), persistence, weathering and infilling materials (gouge) that exposed on the surface. Discontinuity evaluation requires a lot of judgment and experience because some conditions are not numerical values. Descriptive conditions (roughness and weathering) make the different interpretation of each person, the user must carefully evaluate these conditions. The roughness of discontinuity surface is divided into five levels from slickensided to very rough. The weathering is the degree of decay of discontinuity surface that is divided into five levels from unweathered to decomposed. The aperture is the width of discontinuity that stretched out and the persistence is the continuous of discontinuity length. Infilling materials are the substance in the discontinuity gap, normally it is clay or soil. These conditions can be individually evaluated before combined to create the condition value. The simplest way to obtain this value is the series estimation, which discontinuity conditions are grouped into the series [36].

2.1.5. Groundwater condition (R_5)

Groundwater condition is very important parameter of the tunnel. Water pressure affects the strength of the rock mass. Generally, this condition is divided into five levels: completely dry, damp, wet, dripping and flowing. This parameter can be numerically measured by measuring the flow rate of groundwater in liters per ten meters (length of the tunnel) or the ratio of seepage water pressure per major principle stress [37]. Based on our experience, water flow measurement is difficult in the field and not required. Any areas that can measure the flow rate indicate that the groundwater condition is flowing.

2.1.6. Discontinuity orientation (R_6)

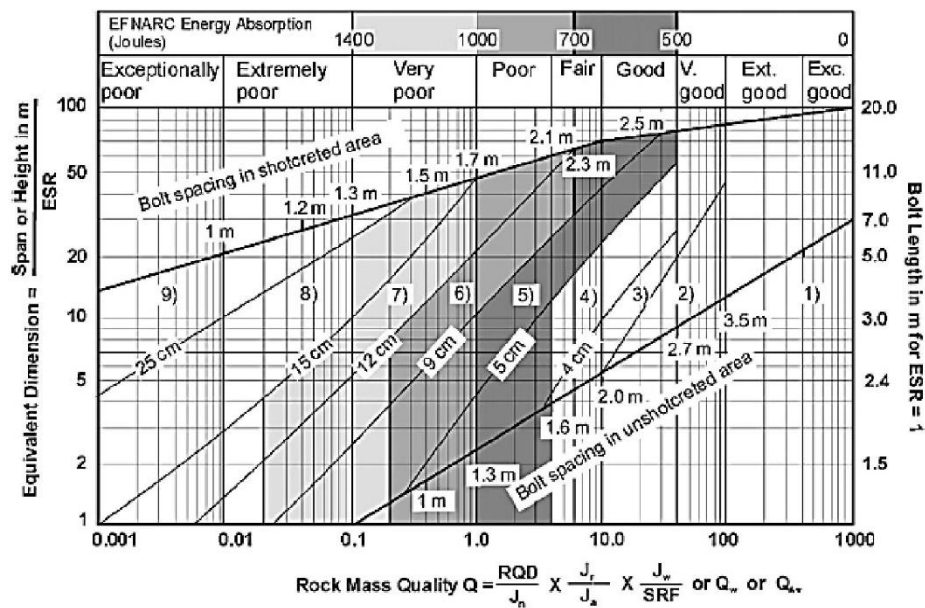
The relation between discontinuity orientation and tunnel axis is a very influential factor in stability of the tunnel. The orientation is dip direction and dip angle of discontinuity plane. Dip direction is the direction that water on the discontinuity plane directly flows to the ground. Strike is another value instead of dip direction. The strike is the discontinuity alignment refer to the magnetic north (azimuth), perpendicular to dip direction. Dip angle is the angle between horizontal level and discontinuity plane, it can be measured in the same direction as the dip direction. This angle is between 0 and 90 degrees. The relation between tunnel axis and discontinuity orientation indicates the suitability of drive direction of the tunnel. Unfavorable drive caused unstable tunnel. This parameter can be used to assess the rock mass stability for other constructions such as dam foundation and slope. However, this principle is not suitable for estimating rock slope stability.

2.2. Rock Mass Quality (Q System)

Rock mass quality was introduced at the Norwegian Geotechnical Institute. This classification based on the knowledge of 200 case studies of tunnel and cavern [9]. Over the last 3 decades, 1,260 case studies have been proven that the Q system is the effective design of tunnel support assessment [38]. The Q parameters are like RMR parameters, but they are compared from Barton's charts. Q value is calculated from six parameters using Eq. (3):

$$Q=(RQD/J_n)(J_r/J_a)(J_w/SRF) \quad (3)$$

where RQD=rock quality designation, J_n =joint set number, J_r =joint roughness number, J_a =joint alteration number, J_w =joint water reduction factor and SRF=stress reduction factor. The estimated results of Q system are internal friction angle of rock mass [39], ultimate roof support pressure and ultimate wall support pressure [40]. The equivalent dimension (D_e) is calculated from tunnel span or height and the excavation support ratio (ESR) of Q system. The excavation support ratio is the indicator of tunnel construction purpose. Type of utilization affects the stability requirement and tunnel size. The Q value and D_e value can plot on the reinforcement categories chart (Fig. 1) to estimate reinforcement method [41]. Each Q parameter is described in the following sections except the rock quality designation (RQD) which already described in the rock mass rating section.



REINFORCEMENT CATEGORIES

- | | |
|---|---|
| 1) Unsupported | 6) Fiber reinforced shotcrete and bolting, 9 to 12 cm, S(fr)+B |
| 2) Spot bolting, sb | 7) Fiber reinforced shotcrete and bolting, 12 to 15 cm, S(fr)+B |
| 3) Systematic bolting, B | 8) Fiber reinforced shotcrete > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, S(fr), RRS+B |
| 4) Systematic bolting (and unreinforced shotcrete, 4 to 10 cm, B(+S)) | 9) Cast concrete lining, CCA |
| 5) Fiber reinforced shotcrete and bolting, 5 to 9 cm, S(fr)+B | |

Fig. 1. Design chart of reinforcement conditions and supports [41].

2.2.1. Joint set number (J_n)

Joints are usually formed in sets which can be identified by its orientation (strike or dip direction and dip angle). Rock mass without joints is called “massive rock mass”, this is the strongest rock mass in the same conditions as other rock masses. Some joints that individually appeared are called “random joint”, which commonly found with joint sets. The worst condition is heavily jointed rock mass or “sugar cube rock mass” and earth-like rock mass, if this condition is found, the engineer must proceed with extreme caution.

2.2.2. Joint roughness number (J_r)

Roughness of joint surface is mainly classified into three levels: rough, smooth and slickensided. This factor indicates the remaining friction force between joint surfaces in small-scale. Formation pattern of the rock mass face is the large-scale roughness indicator, it is mainly classified into two levels: undulating and planar. The Q roughness factor can be estimated from both roughness and formation pattern of the rock mass. Internal friction angle of rock mass can be calculated from this value and joint alteration number.

2.2.3. Joint alteration number (J_a)

Natural rock joints always altered by the atmosphere, joint surface is decayed into crushed rock fracture and sandy surface. Sometime, hydrological activities and geological activities can cause mineral precipitation, which coated on the surface of joints. The minerals, dirt, clay or other materials that fill in the joint gap are called infilling materials or gouge. The gouge may heal the joint if the coated materials are non-softening mineral such as quartz or epidote. If gouge is clay mineral, it can swell and cause joint expansion. Internal friction angle of rock mass can be calculated from this value and joint roughness number.

2.2.4. Joint water reduction factor (J_w)

Water pressure influence on shear strength of joints. When water flows through the joints, it will wash out infilling materials and soften clay gouge. Sometimes, the clay minerals can swell in joints and cause the decrease of shear strength of joints. In long run, groundwater may change the rock mass structure and discontinuity conditions.

2.2.5. Stress reduction factor (SRF)

Stress reduction factor can be determined from rock mass pressure loosening when excavated through shear zones or weakness zones. This factor can be calculated from the uniaxial compressive strength per major principle stress (the ratio of strength and stress). Another way to estimate this value is appeared tunnel conditions such as depth of the tunnel and rock mass structure.

3. Android Application Development

3.1. Device

The application is programmed and compiled on a laptop computer with processor AMD A8-4500AM 1.9 GHz, installed memory (RAM) 4 GB, operated on Windows 10 Pro. The first run proceeded on Android 6.0 (Marshmallow) smartphone with processor Quad core 1.3 GHz Cortex-A7, 512 MB installed memory, resolution 480x800 pixels on 4 inches screen.

3.2. Methodology

This Android application is developed by the official integrated development environment program, Android Studio version 2.2.2 and the Java development kit [42]. The application is suitable for Android smartphone, which operating system later than Android 4.1 (Jelly Beans) while the target operating system is Android 6.0 (Marshmallow). The calculation is verified by comparing the calculated results from this application with Microsoft Excel worksheet case by case. Finally, the application is tested with geological data from previous tunneling research to confirm the application results.

4. Results

4.1. PSU-RQ Application

PSU-RQ is the name of this application. The application consist of three main modules (1) rock mass rating module for estimating preliminary rock mass stability of the tunnel which can use with other construction, (2) rock mass quality module for estimating support pressure of roof and wall of the tunnel and finding a suitable reinforcement method and (3) data manager module for saving the calculation results. The user-friendly interface is designed for beginners, instant module switch is allowed. Rock mass investigation guideline for the newcomer is contained in the application.

4.1.1. Rock mass rating module

Rock mass rating module consists of six geological parameters as mentioned above. The user interface of this module is simplified by separating each parameter individually to eliminate data input sequence. The rock mass parameters are aligned in order, this way is suitable for the new user that need to follow the guideline of this application. For professional users, Non-sequential input is allowed. Only-a-choice check box is applied to prevent the recount error. Each parameter has several ways to input the raw data. For example, the user can input uniaxial compressive strength, point load strength index, or rock type as the strength of intact rock parameter (R_1). For discontinuity conditions parameter (R_4), user can enter a simple condition set or input each data individually as shown in Fig. 2(a) and Fig. 2(b) respectively. The results of this module are shown in Fig. 2(c).

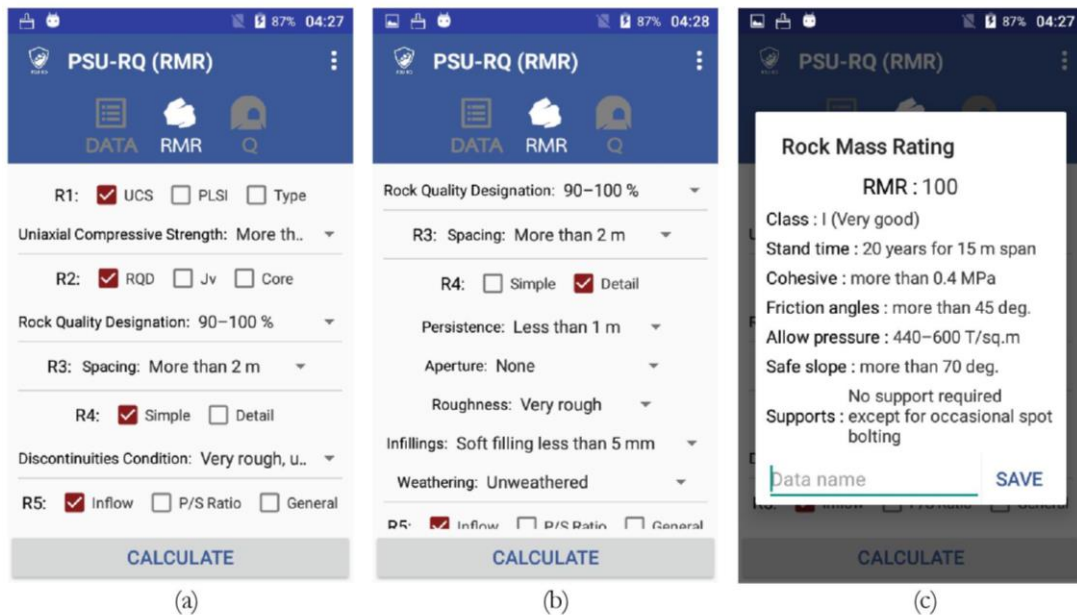


Fig. 2. (a) The user interface of the rock mass rating module which designed user friendly. (b) Several ways to input data set to the fourth parameter of rock mass rating (discontinuity conditions). (c) The results of rock mass stability estimation from rock mass rating module.

4.1.2. Rock mass quality module

Rock mass quality is complicated principle that has many ways of calculating. Each geological condition has their own way to calculate and estimate the Q value and other result. PSU-RQ solved this problem by numerical logic that simplified rock mass quality estimation. The user does not need to worry about many conditions of the rock mass quality system, just input a simple data set then the application report the results. The user interface of this module like the rock mass rating module for the unity of application as shown in Fig. 3(a). The module results reveal the ultimate roof and wall support pressure of tunnel, internal friction angle, rock mass quality value (Q) and equivalent dimension (D_e). The support methods of tunnel (length of rock bolts, shotcrete thickness and liner specification) can be estimated by plotting the Q value against D_e value on the reinforcement chart as shown in Fig. 3(b). The user can apply this suggestion with the tunnel to improve the safety of the early phase tunnel. In this research, the application does not plot the Q and D_e value automatically, so the user can decide the support methods according to the opinion. For example, when the user increases the support level from estimated results user will receive more safety factor of the tunnel. If the user decreases the support level, it may lead to less tunnel stability, but receive more economic value.

4.1.3. Data manager module

Estimated results of the rock mass rating module can save into the data manager module. This module allows users to access the results later. It is a helpful function to index the data from several rock masses. The module is suitable to divide the long-distance tunnel into several parts. Detailed estimation can be obtained by investigating the appropriate areas. Case studies comparison can be attained by this module. It allows the user to compare similar cases, which helps to solve the problems easily from practical knowledge in the past. The user interface of data list is shown in Fig. 3(a) and the detail of each data is shown in Fig. 3(b). In addition, the rock mass study guideline for gathering the geological data is included in this module as shown in Fig. 3(c). PSU-RQ is a good choice to save the rock mass stability estimation hours. The human errors from handwriting to note the results are eliminated by this module.

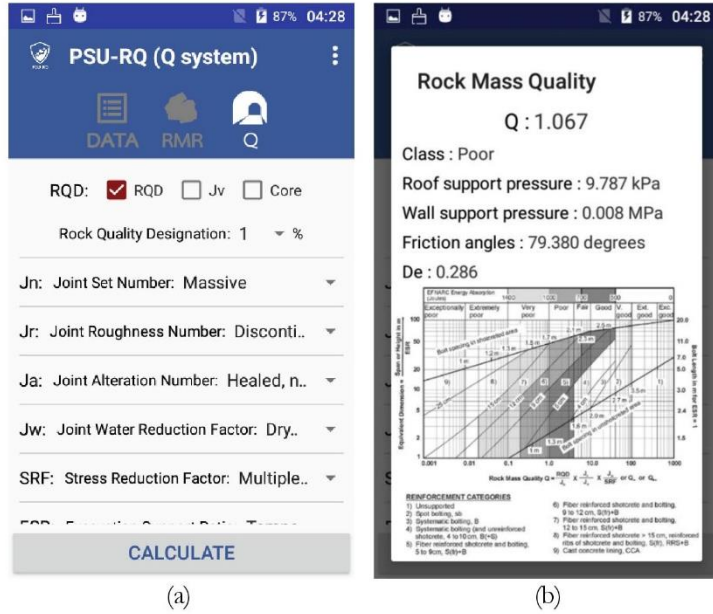


Fig. 3. (a) The rock mass quality user interface for the unity of the application and reducing the complexity. (b) The results of suggested support methods and comparison chart.

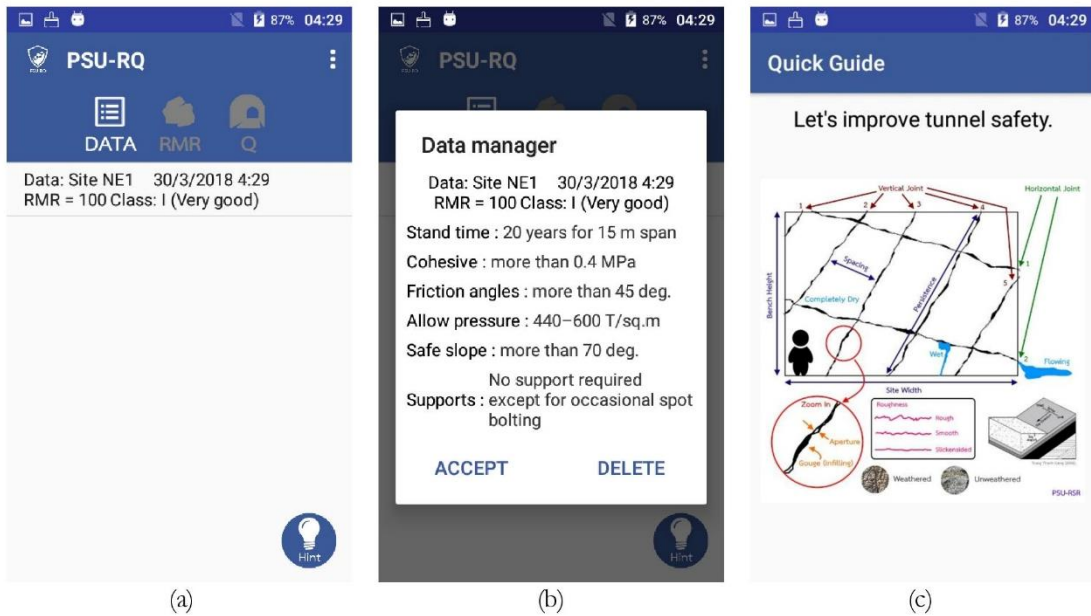


Fig. 4. (a) The data list page which allows user to save estimated results. (b) The saved results include data name and rock mass stability from the rock mass rating module. (c) Rock mass study guideline for new user and who unfamiliar with geological field.

4.2. Application Verification

Verification is a step to confirm that the PSU-RQ has the correct processing logic. The correct results are the most important. Calculated results are verified by comparing the application results with manual calculation from Microsoft Excel worksheet. MS Excel is a calculation program that is recognized around the world. The rock mass standard worksheet is created and reviewed several times to ensure accurate calculations.

The comparison results are significant. Estimated results of PSU-RQ perfectly match the standard worksheet. Non-sequential input, double check box selection and other uncommon usages are tested to eliminate bugs and errors. PSU-RQ application for estimating rock mass stability and suggesting support methods is accurate and reliable refer to the theories. Some random conditions that are used to compare the rock mass rating results are shown in Table 2. The rock mass quality conditions are shown in Table 3 and Table 4 is the results of the rock mass quality module. However, these theories are only preliminary stability estimation, other precise principles should be used in long-term study. In very unusual cases, evaluation results may be faulty.

Table 2. Comparison list of rock mass rating module with random rock mass conditions.

Random Rock Mass Conditions						Excel RMR	PSU RQ
UCS (MPa)	RQD (%)	Spacing (m)	Conditions	Ground water	Orientation		
75	80	0.4	Soft gouge, continuous	Dripping	V.unfavorable	26	26
15	60	3	Slightly rough, weathered	Flowing	Fair	50	50
0.5	35	0.1	Rough, slightly weathered	Dry	Unfavorable	46	46
175	20	1	Unweathered, no aperture	Wet	Fair	62	62
40	95	3	Slightly rough, weathered	Dripping	Favorable	66	66
251	60	0.05	Rough, slightly weathered	Flowing	Fair	53	53
40	35	1	Slightly rough, weathered	Dry	Fair	50	50
3	80	0.4	Soft gouge, wide continuous discontinuities	Damp	V.favorable	38	38
251	95	0.05	Slickensided, gouge, continuous joints	Damp	Fair	55	55
0.5	20	0.1	Very rough, unweathered, no separation	Wet	Fair	36	36

Table 3. Random rock mass conditions for verifying the calculation of the rock mass quality module.

Random Rock Mass Conditions							
RQD (%)	Joints	Roughness	Alteration	Water	Stress	Purpose	Span (m)
1	Massive	Clay zone	Strongly consolidated	Filling outwash	Multiple weakness zone	Temporary opening	5
10	Few joints	Slickensided, planar	Medium consolidated	Inflow, decaying	Single weakness zone	Water tunnels	10
20	One set	Smooth, planar	Swelling clay filling	Inflow	Single shear zone	Storage caverns	15
30	One set, random	Rough, planar	Crushed rock zone	Dry	Open joints	Power stations	20
40	Two sets	Slickensided, undulation	Sandy clay fraction	Medium inflow	Medium stress	Railway stations	25
50	Two sets, random	Smooth, undulation	Thick clay zone	Large inflow	Moderate slabbing	Temporary opening	30
60	Three sets	Rough, undulation	Tightly healed	Filling outwash	Heavy rock burst	Water tunnels	35
70	Three sets, random	Discontinuous	Unaltered joints	Inflow, decaying	Heavy squeezing	Storage caverns	40
80	Four sets	Clay zone	Slightly altered	Inflow	Heavy swelling	Power stations	60
90	Crushed rock	Slickensided, planar	Sandy clay coatings	Dry	High stress	Railway stations	80

Table 4. Comparison results between the standard worksheet and the PSU-RQ.

Standard Worksheet (MS Excel)					PSU-RQ Application				
Q	Roof Pressure (kPa)	Wall Pressure (MPa)	Friction Angle (degree)	D _e	Q	Roof Pressure (kPa)	Wall Pressure (MPa)	Friction Angle (degree)	D _e
0.011	899.29	0.21	9.46	1	0.011	899.29	0.21	9.46	1
0.038	2390.08	0.40	3.58	5	0.038	2390.08	0.40	3.58	5
0.030	1930.98	0.30	5.71	12	0.030	1930.98	0.30	5.71	12
0.600	632.34	0.12	8.53	20	0.600	632.34	0.12	8.53	20
1.980	530.91	0.08	16.70	38	1.980	530.91	0.08	16.70	38
0.018	2274.14	0.38	6.91	8	0.018	2274.14	0.38	6.91	8
0.029	1513.17	0.22	75.96	19	0.029	1513.17	0.22	75.96	19
0.233	649.73	0.06	75.96	32	0.233	649.73	0.06	75.96	32
0.016	9524.41	0.79	26.57	60	0.016	9524.41	0.79	26.57	60
0.600	7588.04	0.35	9.46	123	0.600	7588.04	0.35	9.46	123

5. Application in Tunneling Case

The application is applied with a tunneling case of limestone quarry as an example. The horseshoe adit with 5 meters span of Siam City Cement Public Company Limited (SCCC) was designed to reduce haulages cost in the limestone quarry, Saraburi province of Thailand [43]. The rock mass in this area is divided into three zones: bedded limestone, thrust fault, and spatic limestone. The adit entrance was designed in bedding layer of dark-gray micritic limestone, chert layers, calcareous siltstone, and siltstone. The average strength of rock samples is 93.6 MPa. The rock quality designation is 51%. Tunnel axis was driven to 8 degrees (azimuth). Main joint set strike/dip is 130/60 degrees. Some rock layers are silicified and very hard. The aperture of joints is between 2.5 and 10 millimeters without infilling materials. The spacing is between 30 and 50 centimeters with tight surfaces. Estimated results from the application shown that this rock mass has RMR value equal to 62 classified in class II (Good) and Q value is 20.4 classified in good class as shown in Fig. 5. The results are slightly different from previous research because it may have more detail than this re-estimation. The estimated results both rock mass class and support as shown in Table 5 are consistent. This comparison proves that the PSU-RQ is a reliable application and suitable for actual use in the field.

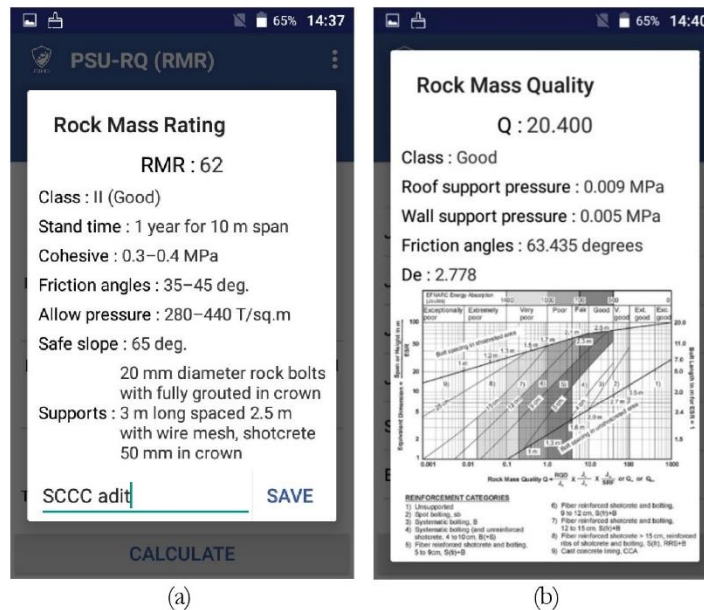


Fig. 5. (a) Rock mass rating and (b) Rock mass quality results of SCCC transportation adit project.

Table 5. Estimated results from PSU-RQ application and the previous research of SCCC bedded limestone.

Value and Support	Boonbatr and Fuenkajorn (2012) [43]	PSU-RQ
RMR (Class)	66 (Good)	62 (Good)
RMR support method	Locally 3 meters bolt length in crown and wall with 2.5 bolt meters spacing and occasional wire mesh. Shotcrete on crown, 50 mm thick.	20 mm diameter rock bolts with fully grouted in crown, 3 meters spaced 2.5 meters with wire mesh. Shotcrete 50 mm thick in crown.
Q (Class)	21.25 (Good)	20.4 (Good)
Q support method	Unsupported	Unsupported

6. Conclusion

PSU-RQ is an accurate and reliable Android application for evaluating preliminary rock mass stability and tunnel support methods using rock mass rating and rock mass quality. This application is designed to use in remote areas. It is an effective tool that assists geologist to assess preliminary rock mass stability faster than ever. The case study re-estimation proves that the results are credible. It saves a lot of working hours whenever the Android smartphone is available. The data manager module is an important part of this application. This module can reduce human error from hand writing and traditional calculation. A lot of data is organized systematically. PSU-RQ is the first rock mass rating and rock mass quality application that has the data manager module. This application will make the operators more interested in safety.

The application needs the effective input for estimating the significant results. If the raw data is biased or inaccurate, it will cause incorrect estimation. The simple input routes in this application (such as the average uniaxial compressive strength of rock type and the volumetric joint count) are only for the restricted cases. Different rock type has different properties. The same rock in different areas may have different properties. If possible, the user should test new rock samples every time to apply with the rock mass stability evaluation. Always test the rock samples at least 5 samples to find the average value. The average makes the data more reliable. If the user found that the samples in nearby area are equally strength, the user may set this strength as a standard. Other parameters must be gathered from estimating area as mentioned in the background theories. Do not use the parameters of the case study in this research with other rock masses, each area is unique.

In addition to rock testing, joint analysis is another method that should be done together. It helps to group joints data and indicate the significant joints. Stereographic projection is the key. Contour diagram is the plotting of joint orientation data on the equal-area stereonet. If the orientation poles on diagram are very dense, then this data set is the important discontinuity. This major discontinuity makes the assessment more relevant. Random discontinuities are low density on the diagram. Sometimes, the minor discontinuity may have dangerous conditions (for example: the persistence is extremely long, and the aperture is extremely large) that make it a major discontinuity. If the geological structure is folded, the user should use the beta diagram (β -diagram). Folded structure makes it difficult to assess the real orientation of discontinuity. Beta diagram is a simple method for defining the orientation of cylindrical fold axis.

However, the geologist and the engineer need to assess the stability and support method in detail. These theories are not suitable to use as the main stability estimation. Monitoring of long-term stability is still needed to improve tunnel safety. Stereographic projection is used to evaluate the suitability of direction and angle that may cause failures. The main failure modes of rock mass are plane failure, wedge failure and toppling failure. Steep rock face has a greater chance of collapse. Factor of safety calculation is another method for evaluating the stability. Limit equilibrium analysis is one of the safety factor calculation theories. It is a volumetric calculation that takes into account the dimensions and properties of the rock mass. The probability analysis is a method should be used with a conventional limit equilibrium method [44]. It confirms the results of the stability assessment and can be applied to many types of work.

This application should be used with a geological compass. We plan to develop the data gathering system by applying the digital sensors with the application in the future. It will replace a geological compass and simplify the steps. These digital sensors still require more detailing research because it has some conflict about using a mobile phone instead of geological compass. PSU-RQ can be applied to your working routine to estimate the preliminary rock mass stability and improve the safety. In the long-run, it will save time and reduces redundancy. Downloadable content of PSU-RQ is shown in Fig. 6.



Fig. 6. QR code to access the Android package of PSU-RQ.

Acknowledgements

This research is funded by 5-Year Bachelor's-Master's Degree Program Scholarship 2017 from Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, and PSU.GS. Financial Support for Thesis 2018 from Graduate School, Prince of Songkla University, Thailand. We would like to acknowledge Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, for supporting this research.

References

- [1] Z. T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *The Civil Engineer in South Africa*, vol. 15, no. 12, pp. 335-343, 1973.
- [2] M. Romana, "New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes," in *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, Zacatecas, 1985, pp. 49-53.
- [3] J. K. Hamidi, K. Shahriar, B. Rezaei and J. Rostami, "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 333-345, Jul, 2010.
- [4] M. Mohammadi and M. F. Hossaini, "Modification of rock mass rating system: Interbedding of strong and weak rock layers," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 1165-1170, Dec, 2017.
- [5] D. Tonnyayopas, "Rock Slope Assessment of Carbonate Rock Quarries Using Stereo-net Projection Method and Rock Mass Classification," (in Thai), *University of the Thai Chamber of Commerce Journal Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 1-17, Jul, 2014.
- [6] H. Basahel and H. Mitri, "Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 993-1009, Dec, 2017.
- [7] F. Ferrari, T. Apuani and G. P. Giani, "Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 70, pp. 162-176, Sep, 2014.
- [8] H. D. Beemer and D. S. Worrells, "Conducting Rock Mass Rating for tunnel construction on Mars," *Acta Astronautica*, vol. 139, pp. 176-180, Oct, 2017.
- [9] N. Barton, R. Lien and J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 189-236, Dec, 1974.
- [10] A. Zolfaghari, A. S. Bidar, M. R. M. Javan, M. Haftani and A. Mehinrad, "Evaluation of rock mass improvement due to cement grouting by Q-system at Bakhtiary dam site," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 74, pp. 38-44, Feb, 2015.
- [11] H. K. Verma, N. K. Samadhiya, M. Singh, R. K. Goel and P. K. Singh, "Blast induced rock mass damage around tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 71, pp. 149-158, Jan, 2018.

- [12] V. M. Khatik and A. K. Nandi, "A generic method for rock mass classification," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 102-116, Feb, 2018.
- [13] A. Palmstrom and E. Broch, "Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 575-593, Nov, 2006.
- [14] S. Y. Choi and H. D. Park, "Comparison among different criteria of RMR and Q-system for rock mass classification for tunnelling in Korea," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 391-401, Oct, 2002.
- [15] International Data Corporation. (2017). *Smartphone OS Market Share 2017 Q1* [Online]. Available: <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/os> [Accessed: 25 February 2018]
- [16] Y. H. Weng, F. S. Sun and J. D. Grigsby, "GeoTools: An android phone application in geology," *Computers and Geosciences*, vol. 44, pp. 24-30, Jul, 2012.
- [17] S. Lee, J. Suh and H. Park, "Smart Compass-Clinometer: A smartphone application for easy and rapid geological site investigation," *Computers and Geosciences*, vol. 61, pp. 32-42, Dec, 2013.
- [18] L. Novakova and T. L. Pavlis, "Assessment of the precision of smart phones and tablets for measurement of planar orientations: A case study," *Journal of Structural Geology*, vol. 97, pp. 93-103, Apr, 2017.
- [19] R. W. Allmendinger, C. R. Siron and C. P. Scott, "Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices," *Journal of Structural Geology*, vol. 102, pp. 98-112, Sep, 2017.
- [20] R. Sarangi. (2013). *Rock Mass Classification* [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rakeshsarangi.rockmassclassification> [Accessed: 27 February 2018]
- [21] Filipponi. (2013). *GeoToolbox* [Online]. Available: https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_marco_filipponi.GeoToolbox [Accessed: 27 February 2018]
- [22] Geomecanica Apps. (2014). *Geostation* [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.geostation> [Accessed: 27 February 2018]
- [23] Geomecanica Apps. (2014). *RMR Calc* [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.terrasolum.rockmassratingcalc2> [Accessed: 27 February 2018]
- [24] D. Assis. (2016). *Slope Mass Rating (SMR)* [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.projecto.diogoassis.smr> [Accessed: 27 February 2018]
- [25] Norges Geotekniske Institutt. (2016). *Q-system* [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=Jacob.ngi.q.system> [Accessed: 27 February 2018]
- [26] Sator. (2016). *Q-System (tunneling)* [Online]. Available: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.geckogeotech.Q_System [Accessed: 27 February 2018]
- [27] P. Pantaweesak, P. Sontamino and D. Tonnyayopas, "Android Application Development for Estimating Rock Slope Stability using Slope Mass Rating (SMR)," (in Thai), in *The 6th Science, Engineering and Resources Undergraduate Conference*, Songkhla, Thailand, 2017, pp. 55.
- [28] P. Pantaweesak, P. Sontamino, D. Tonnyayopas and H. Vattanasak, "PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability," in *Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference*, Lampang, Thailand, 2017, pp. 155-162.
- [29] B. Singh and R. K. Goel, *Engineering Rock Mass Classification: tunneling, foundations, and landslides*, New York: Elsevier, 2011.
- [30] T. Waltham, *Foundations of engineering geology*, 2nd ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2002.
- [31] Z. T. Bieniawski, "Determining rock mass deformability: experience from case histories," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 15, no. 5, pp. 237-247, Oct, 1978.
- [32] Z. T. Bieniawski, *Rock mechanics design in mining and tunneling*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1984.
- [33] A. Palmstrom, "Recent developments in rock support estimates by the Rmi," *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1-19, May, 2000.
- [34] D. U. Deere and D. W. Deere, "Rock quality designation (RQD) after twenty years," Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Gainesville, FL, Rep. GL-89-1, 1989.
- [35] A. Palmstrom, "Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 362-377, Jul, 2005.
- [36] Z. T. Bieniawski, "Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends," in *Comprehensive rock engineering*, Oxford, United Kingdom: Pergamon Press, 1993, ch. 22, pp. 553-574.

- [37] Z. T. Bieniawski, "The geomechanics classification in rock engineering applications," in *The 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Montreux, Switzerland, 1979, pp. 41-48.
- [38] N. Kumur, "Rock mass characterization and evaluation of supports for tunnels in Himalaya," Ph.D. thesis, WRDM, IIT, Roorkee, India, 2002.
- [39] N. Barton, "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 39, no. 2, pp. 185-216, Feb, 2002.
- [40] R. Bhasin and E. Grimstad, "The use of stress-strength relationship in the assessment of tunnel stability," in *The Recent Advances in Tunnelling Technology*, New Delhi, India, 1996, pp. 183-196.
- [41] E. Grimstad and N. Barton, "Updating of the Q-system for NMT," in *The International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Oslo, Norway, 1993.
- [42] International Business Machine. (2017). *Android Studio* [Online]. Available: <https://developer.android.com/studio/index.html> [Accessed: 20 October 2016]
- [43] A. Boonbatr and K. Fuenkajorn, "Design and analysis of adit for limestone quarry of Siam City Cement Public Company Limited," in *Thailand Rock Mechanics Symposium*, Phetchaburi, Thailand, 2012, pp. 229-238.
- [44] S. Tangchawal, "Reliability and Assessment Techniques on Ground Excavation," *Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1-8, Apr, 2009.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพันทวี พันทวีศักดิ์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010120088
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเหมืองแร่)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2560

ทุนการศึกษา

1. ทุนการศึกษาโครงการปริญญาตรี-โท 5 ปี ปีงบประมาณ 2560
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2561

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D.; Vattanasak, H. PSU-RSR v.1: An Initial Android Application for Estimating Rock Mass Stability. *Proceedings of Coal Mining and Utilization for Sustainable Development International Conference*, Lampang, Thailand, November 23-24, 2017, 155-162.

Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Android Application Development for Estimating Properties and Preliminary Stability of Rock Mass using Rock Mass Rating and Geological Strength Index. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*. **2019**, 19(1), xxx-xxx. (Accepted: 27 August 2018)

Pantaweesak, P.; Sontamino, P.; Tonnayopas, D. Alternative Software for Evaluating Preliminary Rock Stability of Tunnel using Rock Mass Rating (RMR) and Rock Mass Quality (Q) on Android Smartphone. *Engineering Journal*. **2019**, 23(1), xxx-xxx. (Accepted: 24 October 2018)