

การวิเคราะห์แนวการวิบัติและการประเมินเสถียรภาพของมวลหินโดยรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันภายในสูง

จักรวาล ตันสกุล^{1*}, พรเกษม จงประดิษฐ์²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล 77110

² วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

*E-mail: jukkrawut.tun@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นการประเมินเสถียรภาพของมวลหินภายใต้แรงดันภายในสูงเนื่องจากการเก็บแก๊ส โดยการประเมินจะใช้ระนาบการวิบัติที่สมเหตุสมผลที่เกิดจากการพิจารณาค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการวิบัติซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน (Element free Galerkin method) โดยที่แบบจำลองแบบย่อส่วนถูกใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องโดยการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความเค้นในที่ (In-situ stress ratio, k) 0.5, 1 และ 3 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ที่มีอิทธิพลต่อจุดเริ่มการวิบัติและทิศทางการวิบัติ ซึ่งผลวิเคราะห์ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินมีความน่าเชื่อถือ หลังจากนั้นวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินได้ถูกนำมาวิเคราะห์แบบจำลองขนาดต้นแบบโดยมีการแปรเปลี่ยน ค่าความลึก อัตราส่วนความเค้นในที่ และค่าความต้านทานแรงดึงของหินจากการวิเคราะห์พบว่ากรณีที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 มีความเหมาะสมในการที่จะเลือกเป็นสถานที่ก่อสร้าง สำหรับกรณีที่มีอัตราส่วนความเค้นในที่ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ทำให้เกิดแนวการวิบัติวิ่งขึ้นสู่ผิวดิน ดังนั้นกรณีดังกล่าวจึงถูกนำมาประเมินเสถียรภาพ สำหรับการประเมินเสถียรภาพได้ ประเมินด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีจำกัดสมดุล (Limit equilibrium) กับระนาบการวิบัติที่ได้เสนอ จากการประเมินทำให้ได้แผนผังการออกแบบสำหรับปัญหาอุโมงค์ใต้ดินที่มีแรงดันภายใน โดยการพิจารณาอิทธิพลของ ความลึก รัศมีของอุโมงค์ ระดับของแรงดันและหน่วยแรงในแนวตั้ง สำหรับการประเมินอัตราส่วนความปลอดภัยในครั้งนี้นำมาใช้ในการออกแบบเบื้องต้นของปัญหาอุโมงค์ใต้ดินภายใต้แรงดันภายใน

คำสำคัญ: วิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน, รอยแตกหิน, การประเมินเสถียรภาพ

Abstract

This study focuses on evaluate the stability of rock mass under high internal pressure due to gas storage. The reasonable failure planes from element free Galerkin method (EFG) considered from influenced factors are used to evaluate. The scaled-down model is used to validate by varying the in-situ stress ratio (k) 0.5, 1 and 3. From the analysis, It is found that the in-situ stress ratio has influence on the crack initiation and the direction of failure plane. The results from this study are compared with previous study. Those results are good agreement. Moreover, the EFG is extended to analyze the prototype model by varying depth, in-situ stress ratio and the tensile strength of rock. It reveals that the in-situ stress ratio equal and greater than 1 is suitable for assessing the potential for the site rock to host pressurized underground tunnel at initial stage of design. For case k less than 1, the failure plane move up to ground surface therefore that case will be evaluated stability. Limit equilibrium analysis with proposed failure plane is adapted to evaluate the stability. From evaluation stability, preliminary design chart is obtained for tunnel under internal pressure by considering effect of depth, radius of

tunnel, level of pressure and overburden pressure. The evaluation on the factor of safety can be useful for preliminary design stage for pressurized underground tunnel.

Keywords: Element free-Galerkin method, Rock fracture, Stability evaluation

1. บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของเศรษฐกิจส่งผลให้มีความจำเป็นในการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะการก่อสร้างพวกโครงสร้างใต้ดินหรือหินเพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การก่อสร้างอุโมงค์ รถไฟ รถยนต์ การเก็บแก๊ส เป็นต้น สำหรับปัญหาการเก็บแก๊สธรรมชาติใต้ชั้นหินก็เป็นเทคโนโลยีใหม่ในการสำรองแก๊สธรรมชาติ การก่อสร้างถังแก๊สใต้ดินความดันสูงโดยการก่อสร้างจะอยู่ในชั้นหินใต้ดินที่มีความลึกระดับหนึ่งซึ่งการสำรองแก๊สธรรมชาติแบบนี้เป็นที่นิยมในประเทศแถบสแกนดิเนเวียมากกว่า 10 ปี[4] การก่อสร้างไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษและเงินทุนที่สูงมากนัก ตลอดจนค่าบำรุงรักษายังมีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การสำรองแก๊สธรรมชาติที่ผิวดิน[1] อีกทั้งยังสามารถสร้างให้อยู่ในบริเวณแหล่งอุตสาหกรรมและผู้บริโภคได้โดยแทบจะไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า ซึ่งทำให้ราคาแก๊สต่อหน่วย มีราคาลดลงไปได้มาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเก็บแก๊สไว้ในรูปแบบไอ (Vapor) และเรียกกระบวนการสำรองแก๊สใต้ดินประเภทดังกล่าวนี้ว่า Compressed Gas Energy Storage (CGES)[6] แนวคิดและหลักการของระบบนี้คือการอัดแก๊สให้อยู่ในสภาพไอที่ความหนาแน่นสูงโดยไม่ต้องลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส เหมือนกับระบบ LNG (Liquefied Natural Gas) และมีมวลหินโดยรอบทำหน้าที่ด้านทานความดันขนาดสูงนี้ไว้ (ความดันสูงสุดที่ 12 - 25 เมกะปาสคาล) ระบบโครงสร้างตามอุโมงค์ของถังแก๊สใต้ดินความดันสูงทำหน้าที่เป็นเพียงชั้นหีบแก๊สและช่วยกระจายความดันแก๊สสู่มวลหินเท่านั้น ดังนั้นหนึ่งในเงื่อนไขสำคัญในการออกแบบคือ เสถียรภาพของมวลหินภายใต้ความดันสูง

วิธีการทดสอบแบบขนาดจริง (Full scale) เป็นวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือมาก แต่ไม่ค่อยได้รับความนิยมเพราะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยการใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) จึงมีความจำเป็น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้กันแพร่หลายในการศึกษาพฤติกรรมในงานชุดอุโมงค์อย่างไรก็ตามในการศึกษาพฤติกรรม การวิบัติทั้งจุดเริ่มการวิบัติ (Primary crack) และการแพร่ขยายของการวิบัติ (Crack propagation) ค่อนข้างจะทำได้ยากโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าววิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน (Element free-Galerkin (EFG) method) ที่ถูกเสนอโดย Belytschko, et al. [2] ได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โดยเฉพาะปัญหาที่ไม่มีความต่อเนื่อง (Discontinuous) เช่น รอยแตก (Crack) ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้ จะทำการพัฒนาวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินเพื่อศึกษาการวิบัติของมวลหินโดยรอบอุโมงค์ในการชุดอุโมงค์เพื่อเก็บแก๊ส โดยจะทำการศึกษาถึง ตำแหน่งของการเริ่มของการวิบัติและทิศทางของการวิบัติของหินรวมทั้งเสนอการประเมินเสถียรภาพเบื้องต้น

2. วิธี Element free Galerkin (EFG)

การจำลองการวิบัติที่เกิดขึ้นในวัสดุเปราะ (Brittle material) และกึ่งเปราะ (Semi-brittle material) โดยเฉพาะในมวลหินด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินได้ถูกเสนอโดย Belytschko, et al. [2] การจำลองโดยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กิน จะมีหลักการวิเคราะห์คล้ายกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แต่ในการประมาณค่า Differential equations ด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินจะอาศัยค่าที่ Node ในการประมาณค่า ซึ่งจะแตกต่างกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้ Mesh ในการประมาณค่า ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเกิดปัญหาในการวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่ต่อเนื่องในการสร้าง Shape function ของวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินได้ใช้วิธี Moving Least Square (MLS) [3] และ [7] ซึ่งจะเขียนในเทอมของ Polynomial basis $p(x)$ และ Unknown coefficients $a(x)$ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\Delta\phi(x) = \sum_{j=1}^m p_j(x) a_j(x) = \mathbf{p}^T(x) \mathbf{a}(x), \quad (1)$$

ในการศึกษาในครั้งนี้ Gaussian weight function [3] ได้นำมาใช้ในการสร้าง Weight function และได้แสดงในสมการที่ 2

$$w(d_i) = \begin{cases} \frac{e^{-(d_i/c)^2} - e^{-(d_{mi}/c)^2}}{1 - e^{-(d_{mi}/c)^2}} & d_i \leq d_{mi} \\ 0 & d_i > d_{mi} \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ c คือค่าคงที่, d_{mi} คือรัศมีของโดเมน ซึ่งค่า c และ d_{mi} สามารถอธิบายได้ดังนี้

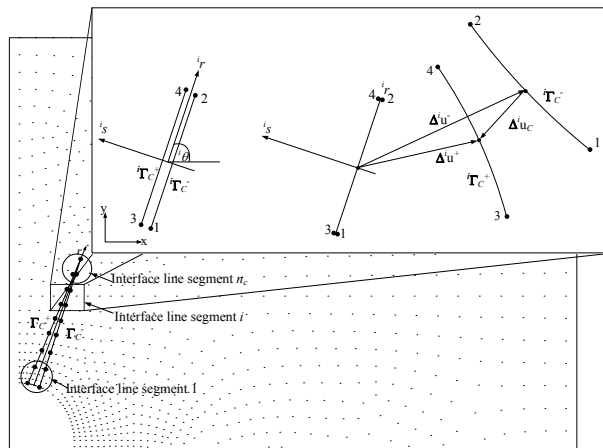
$$d_{mi} = d_{max} c_i, \quad (3)$$

$$c = \alpha c_i, \quad (4)$$

ค่า c_i คือพารามิเตอร์ที่บอกถึงระยะทางระหว่าง Node, d_{max} และ α คือค่าคงที่ ซึ่งถูกกำหนดค่าที่ 2.5 และ 0.625 ตามลำดับ

2.1. การจำลองรอยแตกของปัญหา 2 มิติ

สำหรับการจำลองแนวการวิบัติ (Crack) จะใช้เป็นเส้นตรงหลาย (n เส้น) มาเชื่อมต่อกัน ซึ่งเส้นถูกใช้เป็นตัวแทนของแนวการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 1 หากพิจารณาพิกัดที่จุดกึ่งกลางแต่ละเอลิเมนต์ผิวสัมผัสที่เอลิเมนต์ i^{th} สามารถแยกออกเป็นสองเอลิเมนต์ผิวสัมผัสคือผิวสัมผัสที่เป็นบวก และผิวสัมผัสที่เป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 1 เอลิเมนต์ผิวสัมผัสทั้งสองจะแยกออกจากกันเมื่อรอยแตกเปิดออก



รูปที่ 1: แบบจำลองรอยแตก

สำหรับการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของรอยแตก ตลอดความยาวของเอลิเมนต์ในพิกัดโกลบอลได้อธิบายในสมการที่ 5

$$\Delta^i u_c(i_r) = \begin{Bmatrix} \Delta^i u_c \\ \Delta^i v_c \end{Bmatrix} = \Delta^i u^+(i_r) - \Delta^i u^-(i_r), \quad (5)$$

เมื่อ $\Delta^i u^+$ และ $\Delta^i u^-$ คือการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสที่เป็นบวกและลบตามลำดับ นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสที่เป็นบวกและลบสามารถเขียนในเทอมของการเคลื่อนที่ของ Node (Δu) ได้ดังนี้

$$\Delta^i u^+(i_r) = \mathbf{N}^i x^+(i_r) \Delta u, \quad (6)$$

$$\Delta^i u^-(i_r) = \mathbf{N}^i x^-(i_r) \Delta u, \quad (7)$$

เมื่อ x^+ และ x^- แสดงตำแหน่งที่อยู่ตรงข้ามกันที่ตำแหน่ง i_r บนผิวสัมผัสที่เป็นบวกและลบ โดยที่ค่าทางตัวเลขของ x^+ และ x^- คือค่าเดียวกันแต่จะต่างกันในทิศทาง



$$N(x) = \begin{bmatrix} N_1(x) & 0 & \dots & N_M(x) & 0 \\ 0 & N_1(x) & \dots & 0 & N_M(x) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\Delta U = [\Delta u_1 \quad \Delta v_1 \quad \dots \quad \Delta u_M \quad \Delta v_M]^T. \quad (9)$$

ตัวห้อย 1 ที่ $N_1(x)$, Δu_i และ Δv_i จะเป็นตัวแทนของหมายเลข Node (Node number) ในขณะที M คือจำนวน Node ทั้งหมดในโดเมน $N[x^+(r)]$ และ $N[x^-(r)]$ คือเมทริกซ์ Shape function

2.2. การประยุกต์ใช้ EFG ในคอมพิวเตอร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอลิเมนต์ฟรีกาเลอร์กินและได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งในการวิเคราะห์ได้พิจารณาการกระจายพลังงาน (Energy dissipation) ของเอลิเมนต์ผิวสัมผัส ได้ถูกนำมารวมกับสมการ Weak form สำหรับรูปแบบสุดท้ายของสมการ Weak form ได้แสดงในสมการที่ 10

$$\begin{aligned} & \left[\delta(\Delta U^T) \int_{\Omega} B^T D B d\Omega \Delta U - \delta(\Delta U^T) \int_{\Omega} N^T \Delta b d\Omega - \delta(\Delta U^T) \int_{\Gamma_f} N^T \Delta \bar{f} d\Gamma \right. \\ & \left. - \delta(\Delta \Lambda^T) \int_{\Gamma_u} N_{\lambda}^T N d\Gamma \Delta U + \delta(\Delta \Lambda^T) \int_{\Gamma_u} N_{\lambda}^T \Delta \bar{u} d\Gamma - \delta(\Delta U^T) \int_{\Gamma_u} N^T N_{\lambda} d\Gamma \Delta \Lambda \right] \\ & + \left[\delta(\Delta U^T) \sum_{i=1}^{n_c} \int_{\Gamma_c} ({}^i N_c^T \hat{t}^T \hat{D}_c \hat{t}^i N_c d\Gamma \Delta U) \right] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

หรือจัดอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K & G \\ G^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U \\ \Delta \Lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

เมื่อ

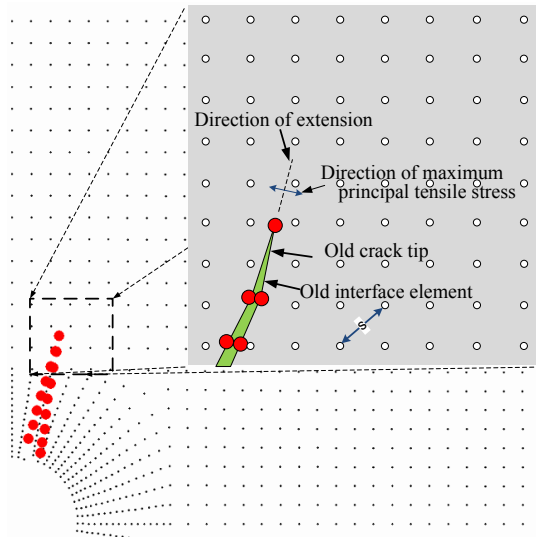
$$K = \int_{\Omega} B^T D B d\Omega + \sum_{i=1}^{n_c} \int_{\Gamma_c} {}^i N_c^T \hat{t}^T \hat{D}_c \hat{t}^i N_c d\Gamma, \quad (12)$$

$$G = - \int_{\Gamma_u} N^T N_{\lambda} d\Gamma, \quad (13)$$

$$\Delta R_1 = \int_{\Omega} N^T \Delta b d\Omega + \int_{\Gamma_f} N^T \Delta \bar{f} d\Gamma, \quad (14)$$

$$\Delta R_2 = \int_{\Gamma_u} N_{\lambda}^T \Delta \bar{u} d\Gamma. \quad (15)$$

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เงื่อนไขวิบัติแบบแรงดึง เมื่อค่าแรงเค้นดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับค่ากำลังต้านแรงดึงสูงสุดของหินก็จะเกิดจุดวิบัติ ส่วนทิศทางการขยายของรอยแตกจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงเค้นดึงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2

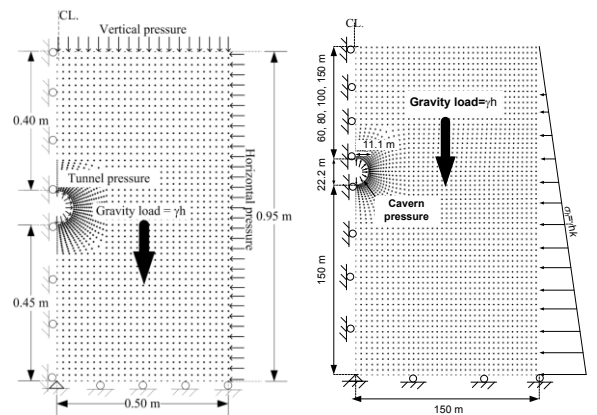


รูปที่ 2: การขยายรอยแตก

3. การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองย่อส่วน

3.1. ลักษณะของแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองถึงแก่ใต้ดินความดันสูงในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการจำลองแบบลดขนาด 200 เท่า แบบ 1g [10] เพื่อการเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกจำลองให้เหมือนกันทุกประการโดยลักษณะปัญหาจะเป็นอุโมงค์รูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร อยู่ลึกจากผิวดิน 0.40 เมตร ในการวิเคราะห์ครั้งนี้จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบครึ่งเดียวและเงื่อนไขการวิเคราะห์แบบระนาบความเครียด (Plane strain) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ โดยลักษณะของปัญหาจะเป็นรูปแบบของอุโมงค์ดังแสดงในภาพที่ 3 นอกจากนั้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ทั้งในแง่ของความเค้นและการเสียรูปไม่ถูกจำกัดด้วยปัจจัยเชิงขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary condition, BC) จึงได้ขยายขอบเขตตามแนวรัศมีออกไปจากแกนสมมาตรเป็นระยะทางเท่ากับ 0.50 เมตร ในขณะที่ขอบเขตตามแนวตั้งจะขยายขอบเขตออกไปเป็นระยะทางเท่ากับ 0.95 เมตร ดังได้แสดงในรูปที่ 3ก พร้อมกับ ลักษณะการให้แรงกระทำด้วยการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ได้คำนึงถึงส่วนประกอบที่เป็น Shaft tunnel, Upper access tunnel และ Lower access tunnel สำหรับค่าคุณสมบัติของหินในการวิเคราะห์จะใช้คุณสมบัติเดียวกันกับงานวิจัยของ Tunsakul, et al. [9] ดังแสดงในตารางที่ 1



ก) แบบจำลองลดขนาด

ข) แบบจำลองขนาดจริง

รูปที่ 3: ลักษณะการให้แรงและเงื่อนไขขอบเขต

ตารางที่ 1: คุณสมบัติของหินในงานวิจัยในครั้งนี้ [9]

	ปริมาณ	แบบจำลอง	ต้นแบบ	หน่วย	ปัจจัยขนาด (1g)*
หน่วยน้ำหนัก	γ	20	20	kN/m ³	1
ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	σ_c	0.18	36	MPa	200
ค่ากำลังต้านทานแรงดึง	σ_t	0.013	2.6	MPa	200
มอดูลัสของยัง	E	25	5000	MPa	200
อัตราส่วนปัวซอง	ν	0.2	0.2	-	1
Fracture energy	G_f	0.5	100	N/m	200

* : ต้นแบบ/แบบจำลอง = 200

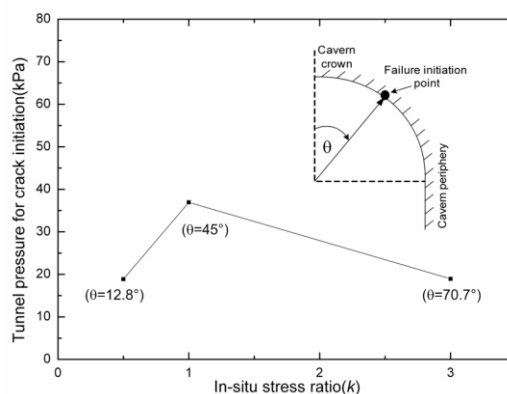
3.2. แผนการทดสอบและผลวิเคราะห์

ในการตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้า กรณีที่ใช้วิเคราะห์จะใช้แค่กรณีที่มีแรงดันกักตัก = 12.5 kPa ซึ่งจะวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วนแรงเค้นใน (k = σ_r / σ_v) สามค่า คือ 0.5, 1 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: กรณีที่ใช้วิเคราะห์

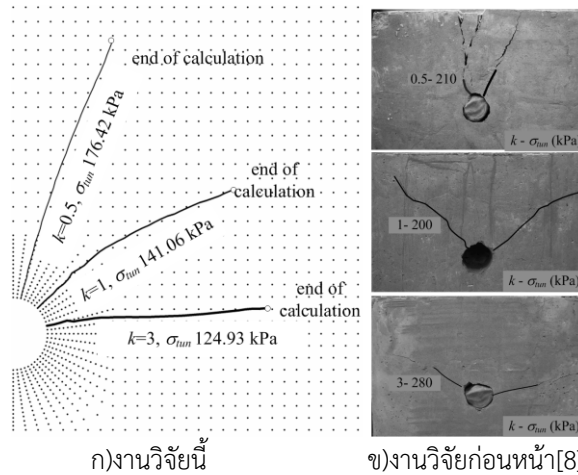
ชนิดอุโมงค์	อัตราส่วนแรงเค้นใน	แรงดัน (kPa)	
	k	ทิศทางแนวราบ	ทิศทางแนวตั้ง
อุโมงค์วงกลม	0.5	6.25	12.5
	1	12.5	12.5
	3	37.5	12.5

ผลการวิเคราะห์การวิบัติของอุโมงค์รูปวงกลมที่มีค่าหน่วยแรงกักตักในแนวตั้ง (σ_v) เท่ากับ 12.5 kPa และค่าอัตราส่วนความเค้นใน (k) 0.5, 1 และ 3 ได้ถูกแสดงในรูปแบบของจุดเริ่มการวิบัติและการวิบัติแบบต่อเนื่อง จากผลการวิเคราะห์พบว่า การวิบัติในแต่ละกรณีของ k = 0.5, 1 และ 3 มีลักษณะแตกต่างกันทั้งจุดเริ่มการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่สัญลักษณ์ θ ถูกใช้แทนมุมของตำแหน่งการเริ่มการวิบัติ จะเห็นได้ว่ากรณี k = 0.5 ตำแหน่งการเริ่มการวิบัติจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของอุโมงค์ที่มุม 12.8° และใช้แรงดันภายในเพื่อให้เกิดการวิบัติที่ 18.88 kPa สำหรับกรณี k=1 จะพบว่าจุดเริ่มการวิบัติจะเกิดขึ้นที่ θ เท่ากับ 45° ด้วยแรงดันภายในกับ 36.93 kPa ในขณะที่กรณี k=3 ตำแหน่งการเกิดการวิบัติจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่มุม θ เท่ากับ 70.7° ด้วยแรงดันภายในกับ 18.95 kPa



รูปที่ 4: แรงดันภายในและตำแหน่งจุดเริ่มการวิบัติของอุโมงค์ที่มีแรงกักตักแนวตั้ง 12.5 kPa

สำหรับทิศทางของการร้าวที่เกิดขึ้นของกรณี $k = 0.5, 1$ และ 3 จากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5ก กรณีที่ k เท่ากับ 0.5 พบว่าการขยายตัวของรอยแตกมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ผิวดิน สำหรับกรณี k เท่ากับ 1 หลังจากเกิดจุดเริ่มการร้าวที่มุม 45° แล้ว ทิศทางการขยายของรอยแตกมีทิศทางขยายออกตามแนวรัศมีของวงกลม ซึ่งจะแตกต่างกับกรณี k เท่ากับ 3 ซึ่งหลังจากเกิดการร้าวบริเวณด้านข้างของอุโมงค์ ทิศทางของการขยายของรอยแตกมีทิศทางขยายออกด้านข้าง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่ได้เมื่อมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบด้วยวิธีแบบจำลองแบบย่อส่วน [8] (รูปที่ 5ข) พบว่ารูปแบบการร้าวมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยที่ทั้งจุดเริ่มการร้าวและทิศทางการร้าวได้รับผลกระทบโดยตรงกับค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ตั้งนั้นจากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือที่จะใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองต้นแบบขนาดจริงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5: ลักษณะการร้าว

4. การประเมินเสถียรภาพ

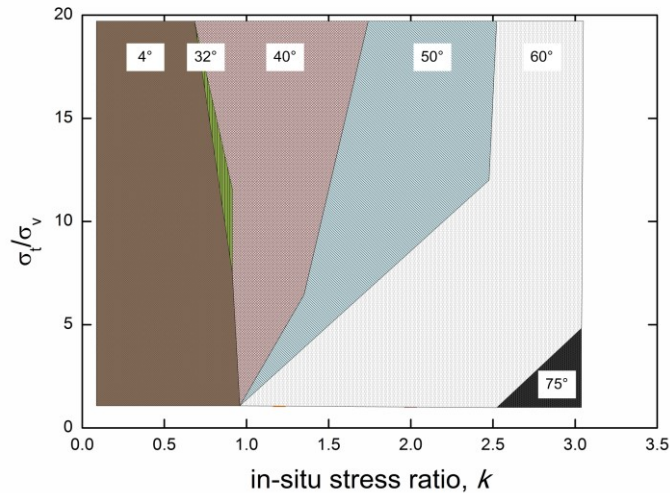
ก่อนการประเมินเสถียรภาพ วิธีเอลิเมนต์ฟิไนต์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์การร้าวที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองต้นแบบ โดยถูกนำมาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อจุดเริ่มการร้าว ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความลึก อัตราส่วนความเค้นในที่ตั้ง และค่าความต้านทานแรงดึงของหิน โดยที่ความลึกที่ใช้ในการศึกษาคือ 60, 80, 100 และ 150 เมตร ค่า k เท่ากับ 0.3, 0.6, 0.8, 0.9, 1, 1.2, 1.5, 2 และ 3 โดยใช้ค่าค่าความต้านทานแรงดึงของหิน 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์จะใช้แบบจำลองที่มีขนาดเท่าต้นแบบและมีค่าแรงดันด้านข้างเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 3ข

ตารางที่ 3: คุณสมบัติเชิงกลของหินสำหรับการประเมินจุดเริ่มการร้าว

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
หน่วยน้ำหนัก	γ	26	kN/m^3
ความลึก	d	60, 80, 100, 150	m
ค่ากำลังต้านทานแรงดึง	σ_t	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	MPa
มอดูลัสของยัง	E	36	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	ν	0.2	—
อัตราส่วนแรงเค้นในที่ตั้ง	k	0.3, 0.6, 0.8, 0.9, 1, 1.2, 1.5, 2, 3	—
Fracture energy	G_f	100	N/m

4.1. การประเมินจุดเริ่มการวิบัติ

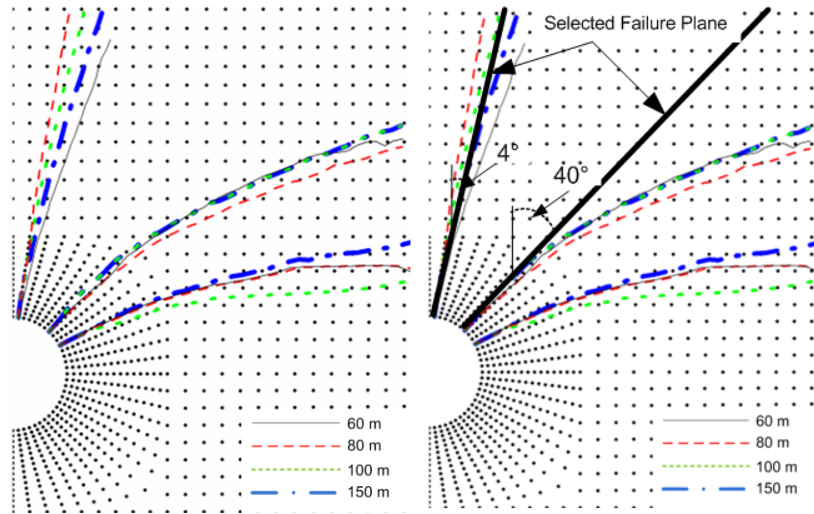
หลังจากการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งเริ่มการวิบัติเนื่องจากการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์แล้ว ข้อมูลดังกล่าวได้ถูกนำมาสร้างแผนภาพในการระบุตำแหน่งจุดเริ่มการวิบัติที่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 6 กลุ่ม ได้แก่มุมการวิบัติที่ 4°, 32°, 40°, 50° และ 60° and 75° ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6: แผนภาพจุดเริ่มการวิบัติ

4.2. การสร้างระนาบการวิบัติ

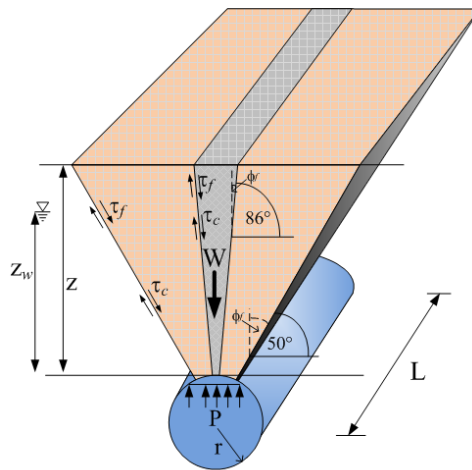
หลังจากจุดเริ่มการวิบัติได้ระบุแล้วในรูปที่ 6 ตัวแทนของมุมการวิบัติที่ 4°, 40° และ 60° ซึ่งเป็นโซนหลัก ได้ถูกนำมาวิเคราะห์การขยายของแรงแตกด้วยค่า k เท่ากับ 0.5, 1 และ 3 ตามลำดับ ด้วยความลึกของอุโมงค์ที่ 60, 80, 100 และ 150 เมตร ซึ่งได้แสดงผลในรูปที่ 7 จากการวิเคราะห์ทิศทางการวิบัติพบว่ากรณีจุดเริ่มการวิบัติที่ 4° และ $k=0.5$ การขยายตัวของรอยแตกในทุกๆ ความลึกมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ผิวดิน สำหรับกรณีจุดเริ่มการวิบัติที่ 40° และ $k=1$ ทิศทางการวิบัติที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกับอุโมงค์ในช่วงแรก หลังจากนั้นเริ่มมีการเปลี่ยนทิศทางเบนเข้าด้านข้างของแบบจำลองในทุกๆ ความลึกที่ทำการวิเคราะห์ ในกรณีที่จุดเริ่มการวิบัติเกิดขึ้นที่มุมการวิบัติ 60° และ $k=3$ จะเห็นได้ว่าทิศทางการวิบัติก็จะมีทิศทางออกไปด้านข้างของแบบจำลอง จะสังเกตสรุปได้ว่า ในกรณีที่ $k>1$ พบว่าทิศทางการวิบัติมีทิศทางที่พุ่งออกไปด้านข้างถึงแม้ว่าจะเกิดการวิบัติขึ้นแล้วก็ตามก็มีความปลอดภัยอยู่ในกรณีที่จะเลือกสถานที่ก่อสร้างควรที่จะเลือกก่อสร้างในที่ที่หินมีค่าอัตราส่วนความเค้นในหินมากกว่า 1 แต่ในกรณีที่มีความจำเป็นที่จะก่อสร้างในที่ที่ $k\leq 1$ พบว่าทิศทางการวิบัติที่เกิดขึ้นมีโอกาสที่ทิศทางการวิบัติพุ่งขึ้นสู่ผิวดิน ดังนั้นการประเมินเสถียรภาพจึงมีความจำเป็น ซึ่งในกรณีที่ $k\leq 1$ ที่จุดเริ่มการวิบัติอยู่ที่ 4° และ 40° จะถูกสร้างเป็นแบบจำลองในการประเมินเสถียรภาพดังแสดงในรูปที่ 8



ก)ทิศทางการวิบัติ

ข)การเลือกระนาบการวิบัติ

รูปที่ 7: ก) ทิศทางการวิบัติ ข) การเลือกระนาบการวิบัติ



รูปที่ 8: แบบจำลองสำหรับการประเมินเสถียรภาพ

4.3. การประเมินเสถียรภาพด้วยวิธีจำกัดสมดุล

การใช้หลักการจำกัดสมดุล (Limit equilibrium) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ โดยหลักการประเมินจะใช้ อัตราส่วนของแรงต้านทานการลื่นขึ้น (Total downward force) กับแรงพยายามลื่นตัวของอุโมงค์ (Total upward force) ซึ่งตารางที่ 4 แสดงรายการสรุปตัวแปรที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพ การยกตัวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงยกตัว (F_u) มีค่าเกินกว่าน้ำหนักหินที่อยู่บนอุโมงค์ (W) และความสามารถต้านทานแรงเฉือน (τ_f) ดังนั้นในการประเมินเสถียรภาพจะทำการประเมินด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.)



ตารางที่ 4: การประเมินเสถียรภาพ (ประยุกต์จาก Kim, et al. [5])

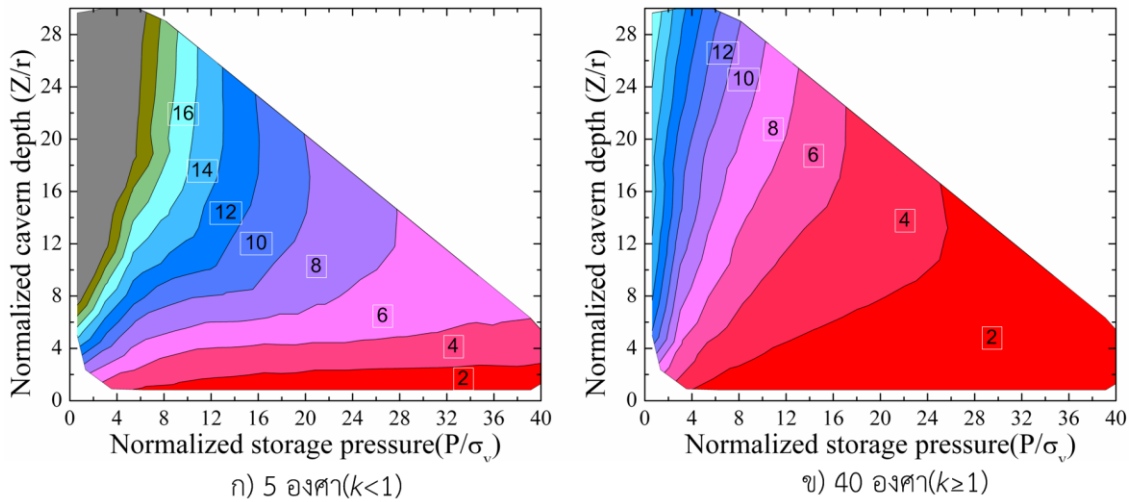
Input variable	Unit	
Max. storage pressure (P)	MPa	
Radius of storage cavern (r)	m	
Length of storage cavern (L)	m	
Thickness of rock (z)	m	
Unit weight of groundwater (γ_w)	kN/m ³	
Ground water table above cavern (z_w)	m	
Cohesion of fresh rock (C)	MPa	
Friction angle of fresh rock (ϕ)	°	
In-situ stress ratio (k)	-	
Failure direction from vertical axis (ϕ_f)	°	
Intermediate variable	Unit	tunnel type
Volume of storage cavern (V_c)	m ³	$\pi r^2 \cdot L$
Volume over the center of arch (V_{total})	m ³	$((z+r) \cdot \tan \phi_f) \cdot (z+r) \cdot L$
Volume in storage area of top of cavern (V_{tc})	m ³	$r \cdot \tan \phi_f \cdot r \cdot L$
Volume of rock mass over the cavern (V_{rock})	m ³	$V_{total} - V_{tc}$
Projected area of storage cavern (A_c)	m ²	$2 \cdot (r \cdot \tan \phi_f) \cdot L$
Surface area of rock against ground uplift ($A_{surface}$)	m ²	$(z+r) \cdot \tan \phi_f \cdot z \cdot L - r \cdot \tan \phi_f \cdot z \cdot L$
Lifting force due to storage pressure (F_l)	MN	$P \cdot A_c$
Buoyant force against storage cavern (F_{bc})	MN	$V_c \cdot \gamma_w$
Vertical stress at z (σ_z)	MPa	$\gamma \cdot z$
Weight of overburden rock (W_r)	MN	$V_{rock} \cdot \gamma$
Buoyant force of overburden rock (F_{br})	MN	$V_{rock} \cdot \gamma_w$
Horizontal stress of fresh rock (σ_h)	MN	$A_{surface} \cdot k \cdot \sigma_z \cos \phi_f$
Shear resistance by cohesion of fresh rock (T_c)	MN	$A_{surface} \cdot C$
Shear resistance by friction angel of fresh rock (T_f)	MN	$\sigma_h \cdot \tan(\phi)$
Total shear resistant force (T_r)	MN	$T_c + T_f$
Total upward force (T_u)	MN	$F_l + F_{bc} + F_{br}$
Cohesion+ friction + weight resistance	-	$(W_r + T_r) / T_u$

จากการประเมินเสถียรภาพโดยใช้อัตราส่วนแรงต้านการยกตัว (Resistance force) ต่อแรงยกขึ้น (Uplift force) โดยการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งกรณีนี้ที่ระนาบการวิบัติที่ 4 องศาและ 40 องศาถูกใช้เป็นตัวแทนของอัตราส่วนความเค้นในที่ $k < 1$ และ $k \geq 1$ ตามลำดับ จากผลการประเมินแสดงในรูปของแผนภาพในรูปที่ 9 จากภาพแสดงอัตราส่วนความปลอดภัยในรูปแบบของเส้นแสดง

ข้อมูล บริเวณที่อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 2 อาจเกิดการทรุดตัวขึ้นบริเวณผิวดิน ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้เป็นประโยชน์ต่อการเลือกสถานที่ที่จะก่อสร้างอุโมงค์สำหรับการเก็บแก๊สใต้ดิน

ตารางที่ 5: พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแผนภาพอัตราส่วนความปลอดภัย

ปริมาณ	ค่า	หน่วย
ช่วงแรงดัน	5 - 45	MPa
รัศมีอุโมงค์	10 - 60	m
ความยาวอุโมงค์	60	m
ความลึกอุโมงค์	50 - 300	m
หน่วยน้ำหนักหิน	22 and 26.5	kN/m ³
แรงยึดเกาะหิน	2.3	MPa
มุมแรงเสียดทานหิน	35	degrees
แรงเค้นในที่	0.5 and 1	-



รูปที่ 9 แผนภาพแสดงอัตราส่วนความปลอดภัย

5. บทสรุป

ในงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการพัฒนาการวิเคราะห์การวิบัติของหินรอบอุโมงค์ภายใต้แรงดันสูง รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อรูปแบบการวิบัติทั้งจุดเริ่มการวิบัติและการขยายแนวการวิบัติ รูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นโดยวิธีเอลิเมนต์ฟริกาเลอร์กิน(EFG) ซึ่งก่อนการนำวิธีเอลิเมนต์ฟริกาเลอร์กินไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาขนาดจริงเอลิเมนต์ฟริกาเลอร์กิน ได้ถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องกับผลทดสอบจากงานวิจัยก่อนหน้า จากการวิเคราะห์พอจะสรุปว่าทั้งตำแหน่งจุดเริ่มการวิบัติและการขยายแนวการวิบัติมีรูปแบบที่คล้ายกันกับงานวิจัยก่อนหน้า ดังนั้นจึงนำเอาวิธีเอลิเมนต์ฟริกาเลอร์กิน ไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาขนาดจริง จากการศึกษาพอที่จะสรุปได้ดังนี้

- อัตราส่วนความเค้นในที่ (k) มีอิทธิพลต่อตำแหน่งจุดเริ่มการวิบัติและการขยายแนวการวิบัติ
- อิทธิพลของความลึกและค่าความต้านทานแรงดึงไม่ผลกระทบต่อทิศทางการวิบัติ
- กรณีที่สถานที่ก่อสร้างมีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ (k) มากกว่า 1 เหมาะสมต่อการเลือกเป็นสถานที่ก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้เพราะการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บรรณานุกรม

- [1] Bell, F.Y., 1992, Engineering in rock masses, Great Britain, Thomson Litho.
- [2] Belytschko, T., Lu, Y. and Gu, L., 1994, "Element-Free Galerkin Methods", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, No. 2, 229-256.
- [3] Belytschko, T., Fleming, M., 1999, "Smoothing, Enrichment and Contact in the Element-Free Galerkin Method", Computers and Structures, Vol. 71, No. 2, 173-195.
- [4] Brandshaug, T., Christianson, M. and Damjanac, B., 2001, "Technical Review of the Lined Rock Cavern (Lrc) Concept and Design Methodology: Mechanical Response of Rock Mass", Itasca Consulting Group Inc.
- [5] Kim, H.M., Rutqvist, J., Ryu, D.W., Choi, B.H., Sunwoo, C. and Song, W.K., 2012b, "Exploring the Concept of Compressed Air Energy Storage (Caes) in Lined Rock Caverns at Shallow Depth: A Modeling Study of Air Tightness and Energy Balance", Applied Energy, Vol. 92, 653-667.
- [6] Kovári, K., 1993, "Basic Consideration on Storage of Compressed Natural Gas in Rock Chambers", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 26 No. 1, 1-27.
- [7] Soparat, P., Nanakorn, P., 2008, "Analysis of Cohesive Crack Growth by the Element-Free Galerkin Method", Journal of Mechanics, Vol. 24, No. 1, 45-54.
- [8] Tongraksa, A., Tunsakul, J., Arangjelovski, G., and Jongpradist, P., 2014, "Simulation of failure behavior of rock mass around circular tunnel by EFG method", Advance in Civil Engineering For Sustainable Development, August 27-29, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [9] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Kongkitkul, W., Wonglert, A. and Youwai, S., 2013, "Investigation of Failure Behavior of Continuous Rock Mass around Cavern under High Internal Pressure", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 34, 110-123.
- [10] Wood, D.M., 2004, Geotechnical Modeling, Spon Press, London and New York.