



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การประเมินพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัวในเขื่อนดิน

Evaluation of hydraulic fracturing phenomena in earth dam

วิภาดา แซ่เจียว¹ บรรพต กุลสุวรรณ^{2*} วรากรณ์ ไม้เรียง² ธวัชชัย เฉลิมพรชัย² ชีโนรส ทองธรรมชาติ³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

³ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Wiphada Saejiaw¹ Bunpoat Kunsuwan^{2*} Warakorn Mairaing² Thawatchai Chalernpornchai² Chinoros Thongthamehart³

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University chatuchak district Bangkok 10900

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Nakhon Pathom 73140

³ Geotechnical Engineering Research and Development center, Kasetsart University chatuchak district Bangkok 10900

* Corresponding author.

E-mail: fengbpbk@ku.ac.th; Telephone: 081-406-5175

วันที่รับบทความ 2 สิงหาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 16 กันยายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 4 ตุลาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 15 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว (Hydraulic fracturing, HF) ในเขื่อนดินเพื่อนำไปสู่การจัดทำฐานความรู้ในระบบผู้เชี่ยวชาญ ศึกษาจากเขื่อนดินช่องเขาขาด (Dike 4) ของเขื่อนสิริกิติ์ ตั้งอยู่บนธรณีวิทยาเป็นหินแปรและหินตะกอนกึ่งแปร มีการแทรกตัวของหินอัคนีทำให้หินส่วนใหญ่เกิดการคดโค้ง (Foliation) ได้จำลองธรณีวิทยาและวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่า รอยคดโค้งมีอิทธิพลต่อ HF เนื่องจากเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนความลาดชันอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิด Arching effect ในกรณีศึกษาพฤติกรรม HF เริ่มเกิดเมื่อน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ระดับ +148 ม.รทก ต่ำและพื้นที่เกิด HF สัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่าง สอดคล้องกับค่าแรงดันน้ำที่วัดได้จาก Piezometer ที่ติดตั้งไว้ในชั้น Phyllite มีการตอบสนองเมื่อความสูงน้ำในอ่าง อยู่ระหว่าง +148 ถึง +149 ม.รทก. แสดงว่าน้ำสามารถแทรกตัวผ่านรอยแตกได้ง่าย เมื่อใช้ Pressure ratio (P_r) ณ ตำแหน่งที่เกิด เป็นค่าบ่งชี้ความรุนแรงของการเปิดรอยแตกขณะเกิด HF อาจจำแนกได้ 4 ระดับ Very likely, likely, unlikely และ very unlikely มีค่าโอกาสเกิด 1.0-0.8, 0.8-0.6, 0.6-0.3 และ 0.3-0.0 ตามลำดับ นอกจากนี้ใช้ข้อมูลรูปร่างทางกายภาพของ Foliation ความสูงเขื่อน ความสูงน้ำที่เก็บกัก และโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุฐานราก สร้าง “ดัชนีการเกิดพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว (HFI)” ได้ 4 ระดับเช่นกัน เท่ากับ 4.0-2.5, 2.5-1.0, 1.0-0.25 และ 0.25-0.0 ตามลำดับ ความถูกต้องของระบบได้ทดสอบและเปรียบเทียบกับเขื่อน Teton พบว่าสามารถระบุแบบที่มีความสอดคล้องกับเหตุการณ์ในอดีตที่ตรวจพบว่ามี HF อย่างชัดเจน เมื่อนำเอาความรู้ดังกล่าวสร้างเป็นแผนผังการวินิจฉัยก็สามารถตรวจสอบได้สามลักษณะคือจากข้อมูลทางธรณีวิทยา ข้อมูลทางอัตราส่วนความดันน้ำ (P_r) และข้อมูลดัชนีการเกิด Hydraulic fracturing (HFI) หากข้อวินิจฉัยทั้งสามสอดคล้องกันก็มีความเสี่ยงในการเกิด Hydraulic fracturing สูงมาก

คำสำคัญ

พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว รอยคดโค้งทางธรณีวิทยา อัตราส่วนแรงดันน้ำ ดัชนีการเกิดพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว

Abstract

Knowledgebase for hydraulic fracturing (HF) in dam is crustal information in expert system for dam internal erosion identification. The saddle dam (Dike 4) of the Sirikit Dam was used in the current case study where is located in the regional geology of metamorphic rock. The intrusion of igneous rock in the area creates foliation by tectonic forces. Consequently, rock foundations have become overturned folds. The case study on dike 4 of geology, field monitoring and Finite Element Method reveals that the foliation of foundation rocks leading to HF phenomena. Hydraulic fracturing shows the initiation when the reservoir water level reaching +148 m. MSL. and progress as RWL. is increased. This behavior was detected by the piezometers installed in the interface of residual soil and phyllite. The pore pressure ratio (P_R) between piezometric pressure and reservoir pressure can indicate the degree of HF. Four levels of HF are very likely, likely, unlikely and very unlikely when P_R are 1.0-0.8, 0.8-0.6, 0.6-0.3 and 0.3-0.0 respectively. The geometry of foliation, depth of HF from dam crest, elevation head of reservoir water level and modulus of foundation soil and rock can formulate the "Hydraulic Fracturing Index, HFI". Four similar levels of HF are indicated by HFI of 4.0-2.5, 2.5-1.0, 1.0-0.25 and 0.25-0.0 respectively. HFI is also confirmed on another dam in the same project. Verification and validation can be done using dam data from Teton dam. The validations are agreed to failure modes caused evidently HF. Compilation of these knowledges into decision flowchart can yield the levels of possible risks of hydraulic fracturing in the dam. Three categories of identification are from 1) geology data, 2) pore pressure ratio (P_R) and 3) hydraulic fracturing index (HFI). If the results from 3 categories are agreed then the confidence of hydraulic fracturing level is very high.

Keywords

hydraulic fracturing, rock foliation, pore pressure ratio, hydraulic fracturing Index

1. คำนำ

พฤติกรรมที่เกิดจากการที่แรงดันน้ำแทรกเข้ามาในรอยแตกของชั้นหินที่มีแรงดันดินหรือหินไม่เพียงพอที่จะปิดรอยแตก หรือในกรณีที่มีรอยแตกอยู่แล้ว เช่น ในดินบดอัด หินชั้น (Sedimentary rocks) หรือหินแปร (Metamorphic rocks) แรงดันน้ำจากการเก็บน้ำในอ่างอาจจะทำให้เกิดขยายตัวของรอยแตกเพิ่มขึ้นได้ พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว (Hydraulic Fracturing, HF) จะเกิดขึ้นทั้งในฐานรากเขื่อนและในตัวเขื่อนเอง ทั้งวัสดุที่เป็นดินหรือหิน เป็นผลทำให้การไหลซึมเพิ่มขึ้นผ่านรอยแตกดังกล่าวจนนำไปสู่การกัดเซาะจนเป็นรูโพรง และอาจเกิดการขยายตัวนำไปสู่การรั่วซึมที่ไม่สามารถควบคุมได้ และเกิดการพิบัติของเขื่อนได้ในที่สุด

ปัจจุบัน HF ในงานเขื่อนดินได้ถูกศึกษาและอธิบายพฤติกรรมไว้ระดับหนึ่งโดย Sherard (1963) [1], Moayed et al. (2012) [2], Wang Jun-Jie. (2014) [3], Xiaoxi Men et al. (2018) [4], Y. Qian et al. (2020) [5] ด้วยการจำลองหรือวิเคราะห์ทางวิศวกรรมบนพื้นฐานของข้อมูลที่มีอยู่และพฤติกรรมของเขื่อนเพื่อการทำนายสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตและหาวิธีการแก้ไขที่เหมาะสม หากแต่ยังขาดการ

วิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองโดยละเอียดที่จะนำไปสู่ดัชนีในการระบุระดับความรุนแรงของการเกิด HF

ผลการประเมินความเสี่ยง ของ Dike 4 ด้วยวิธี Semi-Quantitative Risk Analysis, SQRA พบว่า มีความเสี่ยงกับปัญหาด้านการไหลซึม ในปัจจุบันเขื่อนยังคงมีความมั่นคงและปลอดภัย แต่ยังคงพบน้ำไหลซึมบริเวณด้านท้ายเขื่อน และความดันน้ำใต้ฐานเขื่อนยังคงสูงและตอบสนองต่อระดับน้ำในอ่างฯ โดยเฉพาะเมื่อระดับน้ำในอ่างสูงกว่า +148 ม.รทก. เสมือนว่ามีแรงดันน้ำแทรกตัวอยู่ในรอยแตกและพร้อมที่จะเพิ่มขึ้นตามระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่เสมอ แสดงถึงพฤติกรรม Hydraulic fracturing ซึ่งอาจเกิดการไหลซึมและพัดพาภายในได้ในอนาคต

การศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ที่มีการดำเนินการอย่างเป็นขั้นตอน มีบทสรุปและที่มาขององค์ความรู้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับหลักแนวคิดของระบบผู้เชี่ยวชาญที่อนุมานจากเหตุผลเชิงตรรกะด้วยอัลกอริทึมแบบกฎ (Rule) และสร้างเป็นฐานความรู้ (Knowledge base) จากความรู้ที่เป็นจริงได้รับจากเอกสารทางวิชาการ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง หรือผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์เฉพาะด้านนั้น ๆ C. Curt (2014) [6], Marcos et al (2014) [7]

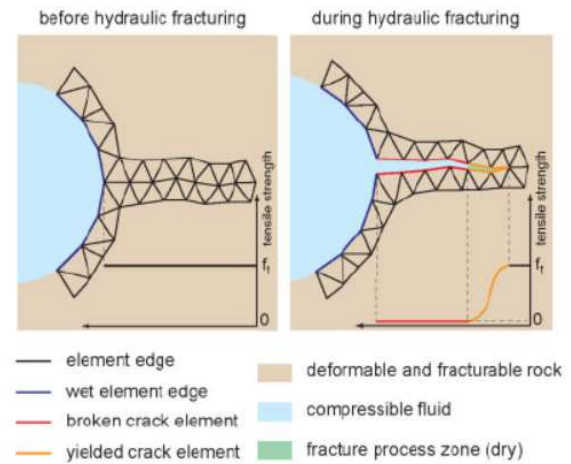
กรณีศึกษาของ dike 4 โดยการจำลองธรณีวิทยาร่วมกับการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ ของการไหลซึมเป็นการศึกษาและลงรายละเอียดมากพอสำหรับสรุปองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นใหม่และใช้วิธีการของ Fell et al (2009) [8] และ RSIE (2021) [9] ได้เสนอวิธีการประเมินความเสี่ยงของการไหลซึมในเขื่อนดินไว้ให้อ้างอิงและปรับปรุงนำไปสู่การสร้างกฎและแผนผังเพื่อการวินิจฉัยการเกิด HF และการเกิด Concentrated Leak ในขั้นฐานรากเขื่อน ซึ่งช่วยวินิจฉัยระดับความปลอดภัยของเขื่อนเบื้องต้นที่เกิดขึ้นได้ ฐานความรู้ถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้เขื่อน Teton ซึ่งพบบัดจาก HF อย่างชัดเจน ผลลัพธ์ของการประเมินช่วยให้ผู้บริหารเขื่อนหรือผู้เกี่ยวข้องนำไปวางแผนการบำรุงรักษาและเป็นตัวแทนความรู้ของผู้เชี่ยวชาญถ่ายทอดสู่หน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง นำไปใช้งานเพื่อประโยชน์ในการบริหารความเสี่ยงของเขื่อนต่อไป

2. ทบทวนวรรณกรรม พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว

การขยายตัวของรอยแตกในเนื้อดินและมวลหินในงานวิศวกรรมเขื่อน เป็นที่รู้จักโดย Sherard (1963) [1] เป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาการไหลซึม เกิดได้ทั้งตัวเขื่อนและฐานราก ถ้าความดันขณะเก็บกักน้ำมากกว่าหน่วยแรงกดในมวลดินหรือหิน จนทำให้น้ำแทรกตัวและดันรอยแตกให้ขยายตัว หากเกิดขึ้นต่อเนื่องบ่อยครั้งเป็นระยะเวลานานก็จะเกิดการกัดเซาะและพัฒนาเป็นการเกิด Concentrated leak ดังรูปที่ 1 ในทางกลับกันหากแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น มีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตก พฤติกรรมการไหลซึมที่จุดนั้นก็จะไม่เกิดพฤติกรรม HF ขึ้น

การศึกษาช่วงแรกของ HF เป็นแรงดันในหลุมเจาะเพื่อใช้ในการขุดเจาะน้ำมัน จึงเป็นลักษณะทรงกระบอกและแรงดันในทิศทางรัศมีของวงกลม ต่อมา มีการศึกษารอยแตกและการขยายรอยแตกจึงปรับเปลี่ยนรอยแตกเป็นทรงวงรี (ellipse) ซึ่งคล้ายกับที่เกิดขึ้นในชั้นหิน ที่เสนอโดย Hoek (1968) [11] ซึ่งมีสมมติฐานว่าชั้นหินได้รับหน่วยแรงกดในแนวตั้งเป็นค่าหน่วยแรงกดหลักสูงสุด (Major principal stress, σ_1) และหน่วยแรงกดด้านข้างเป็นค่าหน่วยแรงกดหลักต่ำสุด (Minor principal stress, σ_3) รวมทั้งพิจารณาการขยายตัวเป็นแบบวงรีต่อเนื่องโดยจุดสัมผัสมีแรงผลิตเกิดขึ้นได้ มีงานวิจัยที่เสนอ

ความสัมพันธ์ของการเกิด HF ในรูปแบบของสมการเชิงประสพการณ์ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการเกิด Hydraulic Fracturing [12]

ตารางที่ 1 สมการเชิงประสพการณ์ HF

สมการเชิงประสพการณ์	ที่มา
$U > \sigma_3 + \sigma_t$	ศึกษาเขื่อน Teton ที่พบบัด สร้างความสัมพันธ์แรงดันน้ำที่ส่งผลให้เกิด HF ด้วยความสัมพันธ์ minimum principle stress (σ_3) และ soil tensile strength (σ_t) Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure (1976) [13], Klinpakdee [14]
$P > 3\sigma_2 + T_0 - \sigma_1$	ใช้ secondary principal stress (σ_2) คำนวณแรงดันที่ทำให้หินเกิดการขยายตัว J. and Cook (1976) [15], Ö. Aydan (2020) [16]
$P_f = m\sigma_h + \sigma_{ta}$	ศึกษาความสัมพันธ์แรงดันน้ำ ตามทฤษฎี circular cavity จากกรณีศึกษาเขื่อน Teton Jaworski, G.W., Duncan, J.M., and Seed, H. B. (1979) [17]
$P_f = \sigma_3 + q_u$	ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันน้ำกับค่า unconfined compression strength Mori, A. and Tamura, M. (1987) [18]
ระนาบพิบัติวางตัวในแนวตั้ง	พิจารณาการบิดการบิดการวางเทียงของชั้นหินที่ก่อให้เกิด HF K.H. Andersen, C.G. Rawlings, T.A. Lunne, T.H. (1994), [19]
ระนาบพิบัติวางตัวแนวราบ	
$P_f = u_0 + \sigma_{v0}' + \Delta p_m$	
$P_f = 1.826\sigma_3 - 0.637(\sigma_2 - \sigma_3) + 5.04$	ศึกษาการเกิด HF โดยใช้ผลการทดสอบ true triaxial stress state tests Zheng, G. H. Sun, and X. R. Ge (2016) [20]
$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + k_T$	คำนวณความดันที่ทำให้เริ่มต้นเกิดรอยแตก ด้วยวิธี conventional injection tests และสร้างความสัมพันธ์ด้วย Confining pressure B. C. Haimson et al. (1967) [21]
$P_b = 16 + 2.8538T$	พัฒนาต่อจาก [21] เสนอแรงอัดที่ทำให้เกิดรอยแตกด้วยสมการเส้นตรง J. Zhang (2019)

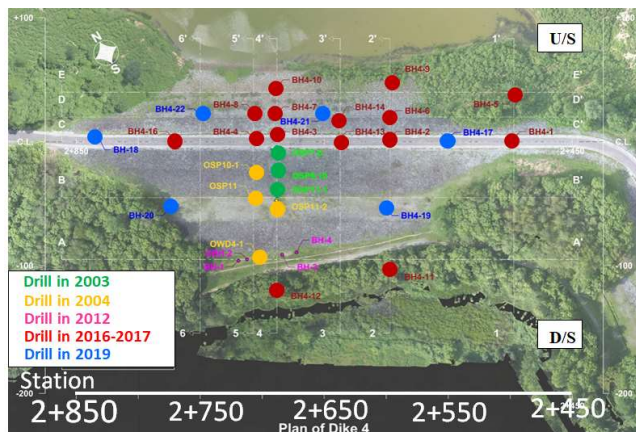
3. วิธีการวิจัย

3.1 การจำลองโครงสร้างธรณีวิทยา

โครงสร้างธรณีวิทยาของเขื่อนได้จากการศึกษาธรณีวิทยาภูมิภาค ข้อมูลการเดินสำรวจแนวหินโผล่ด้านเหนือน้ำของ Dike 2 ที่อยู่ห่างไป 150 เมตร ซึ่งเห็นลักษณะโครงสร้างและการวางตัวได้ชัดเจน (รูปที่ 2) นำมาเทียบเคียงเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีของ Dike 4 และใช้ข้อมูลการเจาะสำรวจ 25 หลุม ดังรูปที่ 3 เพื่อการจำแนกชนิดของดินและหินฐานราก ร่วมกับการวัดมูรอยแตกชั้นหินฐานราก (Core log) และประเมินทิศทางการวางตัวของโครงสร้าง ประมวลผลเป็นภาพตัดขวางตามยาวและตามขวางสำหรับนำไปวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ของพฤติกรรมการเกิดแรงดันน้ำแทรกตัวต่อไป



รูปที่ 2 หินโผล่ บริเวณ Dike 2



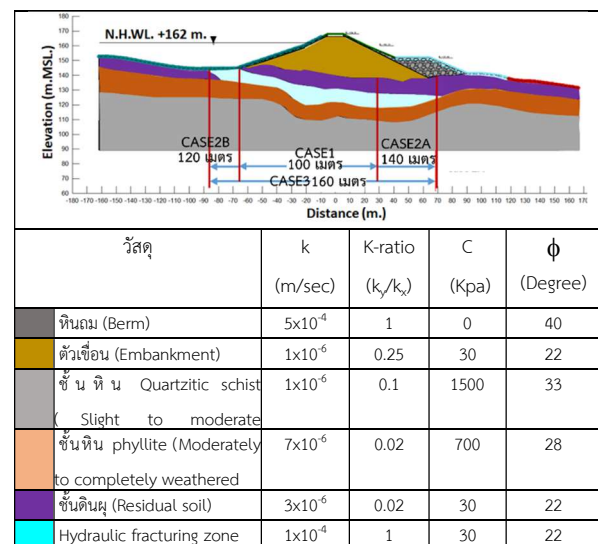
รูปที่ 3 ตำแหน่งหลุมเจาะและหน้าตัดการวิเคราะห์

3.2 การประเมินตำแหน่งของการเกิด HF

ทำการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวตามยาวบริเวณแกนเขื่อนด้วยโปรแกรม Sigma W จากชุด Geostudio 2018 เพื่อประเมินบริเวณที่หน่วยแรง σ_3 น้อยที่สุด สำหรับนำไปวิเคราะห์ตำแหน่งเกิด HF ใช้สมการ

$U > \sigma_3 + \sigma_t$ ของ [13] แรงดันน้ำ (U) สูงกว่าหน่วยแรงหลักต่ำสุด (σ_3) บวกด้วยหน่วยแรงดึงในชั้นดินหรือชั้นหิน (Tensile Stress, σ_t) เนื่องจากหน่วยแรงดึงในดิน Residual soil มีค่าน้อยมากในบทความนี้จึงถือว่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจุดที่เกิด HF ได้จึงเป็นจุดที่ผลต่าง $\sigma_3 - U > 0$

จากตำแหน่ง HF พิจารณา σ_3 ที่ได้จากแบบจำลอง นำมาเปรียบเทียบกับแรงดันน้ำ pore pressure (u) ที่ระดับต่างๆ ในอ่างเก็บน้ำซึ่งได้จากการวัดค่าด้วย Standpipe Piezometers และ Observation wells ณ จุดนั้นๆ นำไปคำนวณผลความแตกต่างของ σ_3 และ u หากมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันดินสามารถต้านทานการแตกได้ แต่หากเป็นลบแสดงว่าแรงดันน้ำสามารถเอาชนะแรงดันดินได้ทำให้เกิดรอยแตกขยายและการไหลซึมของน้ำผ่านง่ายขึ้นแสดงถึงพฤติกรรมของ Hydraulic Fracturing นั่นเอง



รูปที่ 4 ข้อมูลวิเคราะห์การไหลซึมและหน้าตัดตามขวาง

3.3 ความสัมพันธ์ HF กับเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ

ใช้อัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pressure ratio, PR) จาก Piezometric head และความสูงน้ำในอ่างฯ ที่เกิดขึ้นเฉพาะชั้น Residual Soil และ Phyllite เปรียบเทียบกับผลการประเมิน HF ที่ระดับน้ำเก็บกักปกติที่ +166 ม.รทก. ในแต่ละ Station ต่าง ๆ ประเมินขอบเขต PR และสร้างความสัมพันธ์

ของโอกาสเกิด 4 ระดับ คือ Very unlikely, unlikely, likely และ Very likely

ประเมินพื้นที่ระดับการเกิด HF ในชั้น Phyllite จากด้านเหนือน้ำจนถึงท้ายน้ำ โดยนำค่าเฉลี่ยของ P_R ที่ระดับตั้งแต่ +148 ม.รทก. ขึ้นไป (Trigger level) แล้วสร้างเส้นชั้นความสูงและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้รับโดยวิเคราะห์การไหลซึมในแนวตั้งฉาก โดยพิจารณาหน้าตัดตามขวางซึ่งตั้งฉากกับแกนเขื่อน คุณสมบัติวัสดุที่ใช้การวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 โดยมีสมมติฐานของการขยายตัวของชั้น Hydraulic Fracturing ไปทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำจะส่งอย่างไรกับพฤติกรรมของการไหลซึม แบ่งเป็น 4 กรณีคือ

Case 1 : ชั้น HF อยู่กึ่งกลางเขื่อนค่อนไปทางเหนือน้ำ

Case 2A : ชั้น HF ขยายตัวไปทางด้านท้ายน้ำประมาณ 40 เมตร โดยจำลองการเปิดอ้าในชั้นดินเพิ่มขึ้นและมีการกัดเซาะต่อเนื่องไปทางด้านท้ายน้ำ

Case 2B : ชั้น HF ขยายตัวไปทางด้านเหนือน้ำจนบรรจบกับกันของอ่างเก็บน้ำด้านหน้าเขื่อนทำให้น้ำไหลซึมโดยตรงจากอ่างเก็บน้ำเข้าสู่ชั้นที่เกิด Hydraulic Fracturing ใน Case 1 ได้

Case 3 : เมื่อมีการกัดเซาะใน Case 1, 2A และ 2B เกิดร่วมกันในสภาพวิกฤตและนำไปสู่การพังทลายจากการกัดเซาะภายในได้ (Worse case)

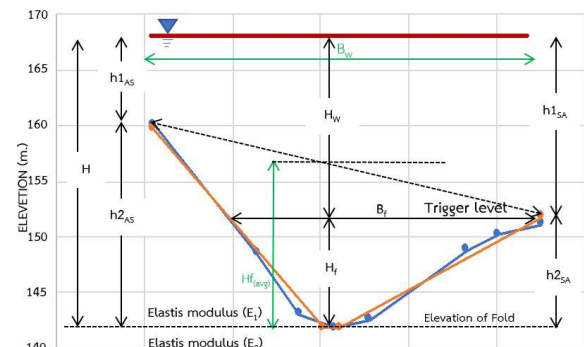
3.4 การประเมินดัชนีการเกิดแรงดันน้ำแทรกตัว

ดัชนีการเกิด HF (Hydraulic fracturing index, HFI) ใช้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5 จาก 1) พฤติกรรม Arching effect บริเวณกันร่องแกนของรอยต่อชั้น residual soil และชั้น Phyllite พิจารณาอัตราส่วนการส่งผ่านหน่วยแรงคั่นบริเวณนั้น ด้วยหน่วยแรงกดบริเวณผิวสัมผัสต่อหน่วยแรงตั้งฉาก ($\sigma_v/\gamma \cdot z$) โดยพิจารณาจากความสูงน้ำขณะเกิด HF หรือ H_w ซึ่งเป็นความสูงน้ำเหนือจุดกระตุ้นที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเป็นตัวแทนของน้ำหนักกดทับและ ความสูงเขื่อน (H) แทนหน่วยแรงตั้งฉาก ทั้งสองบ่งชี้แรงกระทำในฐานรากและแรงดันน้ำที่เกี่ยวข้องกับการแทรกตัวในรอยแตก 2) ความสัมพันธ์ของรูปร่างทางกายภาพซึ่งเสนอโดย Fell 2010 ระหว่างความกว้างของร่องแกน (B_w) และความสูงเฉลี่ยของร่องแกน ($H_{f(avg)}$) และ 3) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุฐานรากเกี่ยวข้องกับการ

เคลื่อนตัวที่จะก่อให้เกิด HF จึงได้พิจารณา 5 สมการ ดังตารางที่ 2 จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าดัชนี และหาสมการที่สอดคล้องกับแบบจำลองการประเมินการเกิดและตำแหน่ง HF มากที่สุด

ตารางที่ 2 สมการดัชนีการประเมิน HFI

ลำดับที่	สมการ	หน่วย
HFI ₁	$\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \times H$	m.
HFI ₂	$\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \times H^2$	m ²
HFI ₃	$\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \times H \times \left(\frac{E_2}{E_1}\right)$	m.
HFI ₄	$\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \times \frac{H_w}{H}$	ไม่มีหน่วย
HFI ₅	$\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \times \frac{H_w}{H} \times \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$	ไม่มีหน่วย



รูปที่ 5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการประเมินดัชนี HF

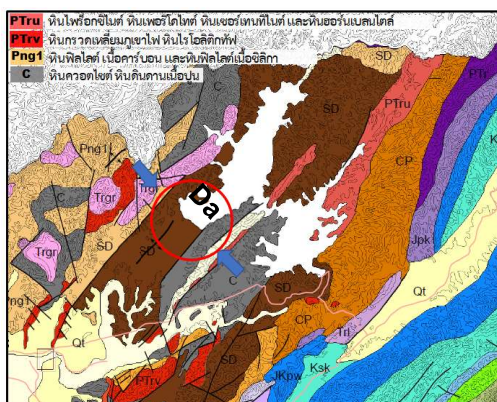
3.5 การสร้างฐานความรู้พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว

การสร้างฐานความรู้ใช้วิธีการของ Fell et al (2009) [8] และ RSIE (2021) [9] โดยการวินิจฉัยแบ่งระดับการไหลซึมเมื่อเกิดพฤติกรรม HF เป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1) No HF: ไม่เกิดการไหลซึมจาก HF 2) Very unlikely: แรงดันน้ำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้รอยแตกไม่เกิดการขยายตัว การไหลซึมเนื่องจาก HF จึงน้อยมาก 2) Unlikely: แรงดันน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย รอยแตกอาจอ้าตัวและปิดกลับได้ทันทีโอกาสน้อยที่จะเกิด HF และเกิดการไหลซึม 3) Likely: แรงดันน้ำเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้รอยแตกในชั้นฐานรากขยายตัว มี

โอกาสมากที่จะเกิด HF และอาจเกิดการไหลซึมผ่านรอยแตก และ 4) Very likely: แรงดันน้ำเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความสูงน้ำในอ่าง รอยแตกในชั้นฐานรากขยายตัวและมีน้ำแทรกไหลซึมผ่านรอยแตกนั้นและมีโอกาสกัดเซาะจากน้ำที่ไหลผ่าน โดยใช้ข้อมูล 4 กลุ่ม คือ 1) เอกสารทางวิชาการ 2) ข้อมูลธรณีวิทยาและแบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยา 3) แบบจำลองวิเคราะห์พฤติกรรม HF และ 4) ข้อมูลจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำและพฤติกรรมตรวจสอบสภาพในสนาม และใช้หลักการของ If-Then ร่วมกับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ อนุมานแบบเดินหน้า (Forward chaining) สร้างเป็นฐานความรู้ในรูปแบบของแผนผังเพื่อการวินิจฉัย และใช้กรณีศึกษาจากเขื่อน Teton dam นำมาเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของระบบ

3.6 พื้นที่ศึกษา

เขื่อนดินช่องเขาขาด (Dike 4) ของเขื่อนสิริกิติ์ ตั้งอยู่ในอำเภอลำปาง จ.อุตรดิตถ์ เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว สูง 30 เมตร อยู่ในบริเวณที่มีอิทธิพลของธรณีวิทยาเป็นหินแปรและหินตะกอนกึ่งแปร สภาพ ได้แก่ หิน Phyllitic Shale, Slaty Shale, Schist และ Phyllite โดยได้รับอิทธิพลการเปื่อยแทรกตัวของหินแกรนิตทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือและแนวการแทรกตัวทำมุมโดยรวมตั้งฉากกับแกนเขื่อนดิน อีกทั้งด้านตะวันออกเฉียงใต้ของเขื่อนดินก็มีหินกลุ่ม หินไฟรอกซิไนต์ หินเพอร์โดไทต์ หินเซอร์เพนไทน์ และหินฮอร์น-เบลนด์แทรกตัวขึ้นมาเป็นแนวยาว ทำให้หิน Phyllite, Shale, Schist ในบริเวณเขื่อนดินเกิดการคดโค้ง (Foliation) เป็นลอนคลื่นดังแสดงในรูปที่ 6

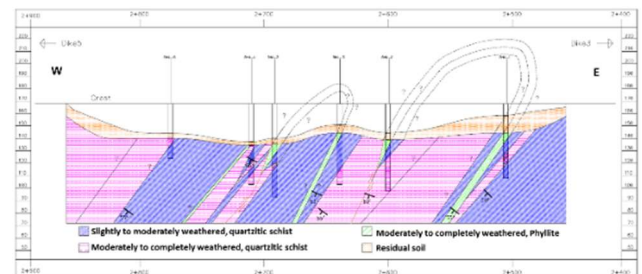


รูปที่ 6 แผนที่ธรณีวิทยบริเวณเขื่อนดินช่องเขาขาด [10]

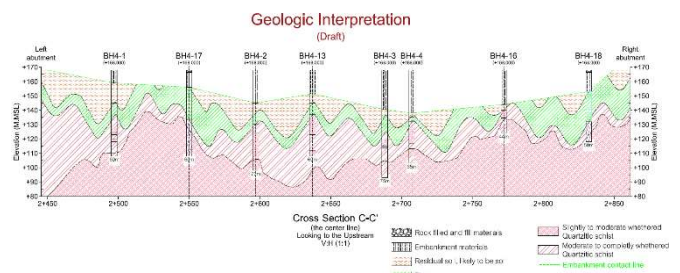
4. ผลการศึกษา

4.1 แบบจำลองลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง Dike 4

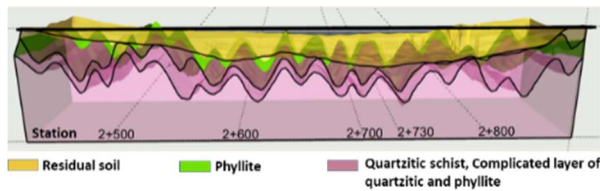
จากข้อมูล 25 หลุมเจาะ (รูปที่ 3) ร่วมพิจารณาข้อมูลอื่นๆ ประกอบ เช่น การศึกษาธรณีวิทยาภูมิภาค การเดินสำรวจแนวหินโผล่ การประเมินมุมรอยแตกหินจาก core log เป็นต้น สามารถร่างหน้าตัดตามยาว ดังรูปที่ 7 การประเมินความคดโค้งของหินแต่ละชนิด มีแนวคิดและสมมติฐานว่าการแทรกตัวของแนวหินอัคนีทำให้เกิดแรงดันขึ้นหินเดิมเท่ากันจึงทำให้ชั้นหินชั้นแรก เกิดการคดโค้งเป็นลอนคลื่น (Foliation) ที่ความยาวคลื่น (Wave length) โดยประมาณเท่า ๆ กัน เช่นเดียวกับชั้นถัดมา ที่ความคดโค้งของลอนคลื่นจะโค้งตามชั้นก่อนหน้า จึงประเมินโครงสร้างธรณีวิทยา Dike 4 ได้ดังรูปที่ 8 โดยมีจำนวนประทุนหาย (Syncline) ทั้งหมด 15 ลอน และเมื่อประมวลภาพตัดตามยาวได้ทุกหน้าตัด จึงนำไปจำลองวิเคราะห์การไหลซึมในแนวตั้งฉากต่อไป



รูปที่ 7 การจัดเรียงหลุมเจาะและการจำลองรอยแตก



รูปที่ 8 การจำลองภาพตัดตามยาว (บริเวณแกนเขื่อน)



รูปที่ 9 การจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาสามมิติ

จากการประมวลผลพบว่าลักษณะธรณีวิทยาที่สำคัญ Dike 4 ตั้งอยู่บนธรณีวิทยาหินแปร แบ่งชั้นฐานรากเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ด้านบนสุดเป็นชั้นดินจากหินผุพังอยู่กับที่ (Residual soil) ความหนา 3-36 เมตร ถัดมาคือชั้นหินฟิลไลต์ (Phyllite) ความหนา 5-20 เมตร และชั้นล่างสุดเป็นมวลหินควอร์ตซิติกชีสต์ (Quartzitic Schist) แนวรีวชันวางตัวส่วนใหญ่อยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ หรือเกือบตั้งฉากกับแนวแกนเขื่อน โครงสร้างธรณีวิทยาพบมีลักษณะคล้ายรอยคดโค้งแบบตลบทับ (Overturned Fold) แกนเขื่อนดินช่องเขาขาดแต่ละเขื่อนเอียงทำมุมกันแกนของการคดโค้งในมุม 60-90 องศา จากแนวระดับ

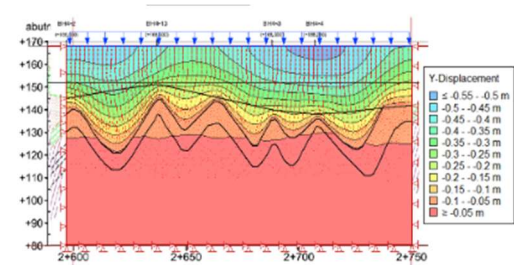
4.2 พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว

ความโค้งงอของชั้นหิน (Foliation) เป็นบริเวณที่เปลี่ยนความลาดชันอย่างรวดเร็ว และประกอบกับการเปลี่ยนโมดูลัสของความยืดหยุ่นจากน้อยไปมากจึงเกิดลักษณะที่เรียกว่า “Arching effect” ซึ่งเกิดแรงกดน้อยหรือ Low stress zone และมีโอกาสที่แรงดันน้ำจะมีค่าสูงกว่าทำให้เกิดรอยแตกหรือเกิด HF ในพื้นที่ดังกล่าวได้

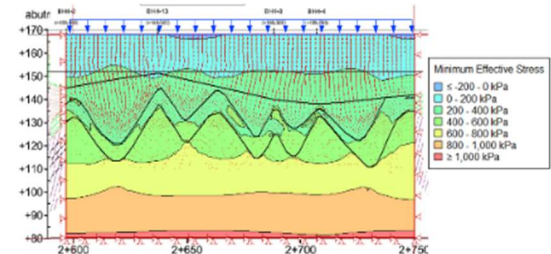
4.2.1 การประเมินตำแหน่งการเกิดแรงดันน้ำแทรกตัว

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์การทรุดตัวที่หน้าตัดบริเวณแกนเขื่อน พบว่าเกิดมากในดินตัวเขื่อนและดินฐานรากที่เป็น Residual soil และเกิดในจุดลึกที่สุดของประทุนหาง (Syncline) ดังรูปที่ 10 แต่เมื่อเข้าสู่ชั้นหิน Phyllite และ Quartzitic Schist จะลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินตัวเขื่อนและดินฐานรากที่ค่าน้อยกว่าหิน Phyllite บริเวณรอยเชื่อมต่อของผิวหน้าทำให้เกิด Arching ที่กันของ Syncline เป็นผลให้เกิด Low stress zone ทำให้แรงดันน้ำสามารถเอาชนะหน่วยแรงนำไปสู่การเกิด HF ที่จุดต่ำสุดของ Syncline ดังนั้นการประเมินพฤติกรรม HF จึงเน้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น

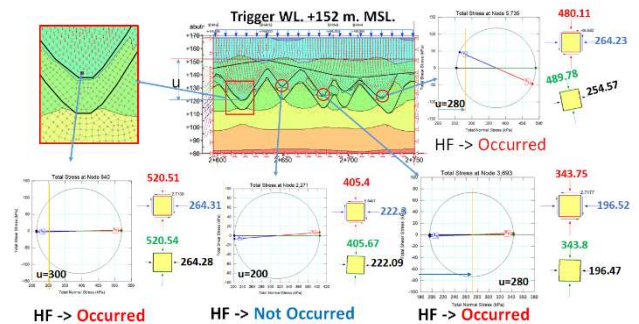
Phyllite และ residual soil ช่วงความลึกประมาณ 35-40 เมตร จากระดับสันเขื่อน



ก) การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง



ข) หน่วยแรงหลักต่ำที่สุด σ_3 (Minor principle stress)

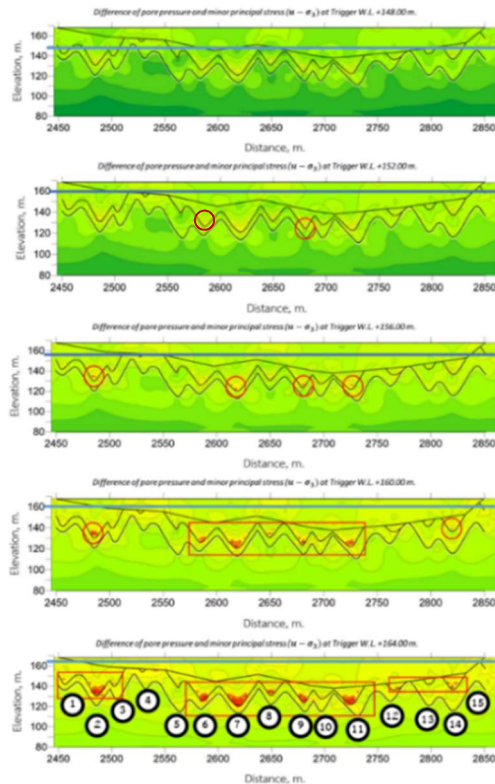


ค) ตำแหน่งที่เกิด HF พิจารณาที่ระดับน้ำ +ม.รทก 152

รูปที่ 10 การวิเคราะห์การทรุดตัว บริเวณแกนเขื่อน

ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งและพื้นที่ที่เกิด HF ดังรูปที่ 11 พบว่า HF สัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเริ่มเกิดเพียงจุดเดียว ตั้งแต่ที่ระดับน้ำ +148 ม.รทก. และเพิ่มขึ้นทั้งจำนวนจุดและพื้นที่เกิด ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันน้ำจาก Piezometer ที่ติดตั้งในชั้น Phyllite ซึ่งใช้พิจารณาตำแหน่งที่เกิด HF มากที่สุดไปจนถึงน้อยที่สุด ได้แก่ Sta. 2+600 ถึง 2+691, Sta. 2+710 และ Sta. 2+500 ถึง 2+600 ตามลำดับ พบว่าจุดที่แรงดันน้ำเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง (Trigger level) และมีค่าใกล้เคียงกับความสูงน้ำในอ่างฯ อยู่ระหว่าง +148 ถึง +149 ม.รทก. แสดงว่าน้ำสามารถแทรกตัวผ่านรอยแตกได้ง่าย เนื่องจากการเสียดสีของน้ำจากด้านเหนือน้ำถึงบริเวณแกน

เขื่อนน้อยมาก เมื่อทราบตำแหน่งและพื้นที่ของการเกิด Hydraulic Fracturing พบว่า อัตราการเพิ่มความสูงของ HF จะมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างอย่างชัดเจน โดย Syncline ที่มีความลึกมาก มีการเพิ่มความสูงของโอกาสเกิด HF ได้แก่ Syncline ที่ 7, 11 และ 2 ในรูปที่ 11



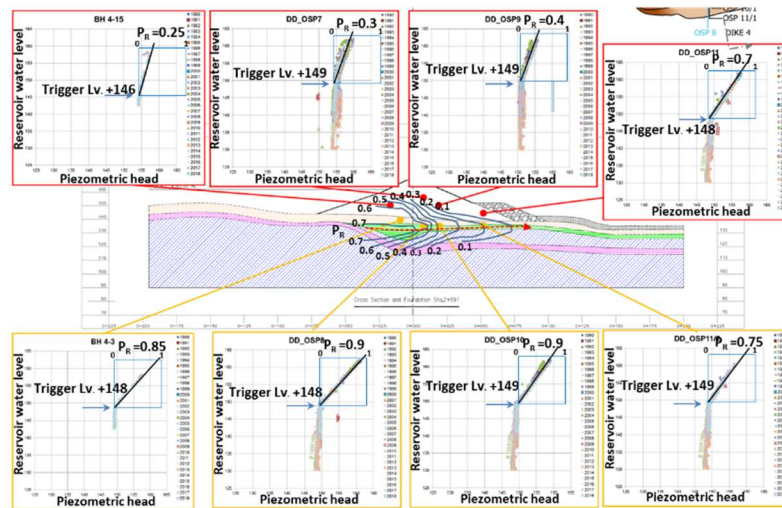
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ที่มีโอกาสเกิด Hydraulic Fracturing ที่ระดับน้ำในอ่าง

4.2.2 ความสัมพันธ์ HF กับเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ

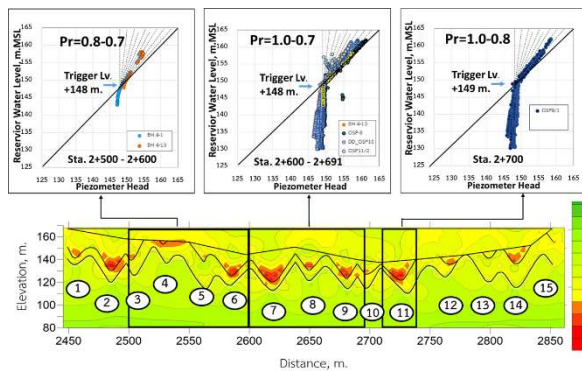
แรงดันน้ำยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจนเมื่อระดับน้ำในอ่างสูงขึ้นถึงจุดกระตุ้น (Trigger level) ช่วง +148 ถึง +149 ม.รทก. ดังในรูปที่ 12 แรงดันน้ำจะสูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับระดับน้ำในอ่างฯ ได้สร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วย “อัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pressure ratio, PR)” ระหว่าง Piezometric head ต่อความสูงน้ำในอ่างฯ โดย $PR = 1$ หมายถึง น้ำสามารถไหลซึมผ่านรอยแตกได้สะดวกเป็นร้อยละ 100 ของระดับน้ำในอ่างฯ สัดส่วนการไหลซึมดังกล่าว จะเปลี่ยนแปลงตามความรุนแรง

ของการเกิด HF การวิเคราะห์ค่า PR เปรียบเทียบแต่ละ Sta. กับตำแหน่งพื้นที่การเกิด HF ที่ระดับน้ำ +166 ม.รทก. ดังรูปที่ 13 สามารถประเมินขอบเขต PR กับโอกาสเกิด HF จากมากที่สุดไปจนน้อยที่สุด และบริเวณที่ไม่เกิด HF (ด้านท้ายน้ำ) มีค่า PR ระหว่าง 1-0.8, 0.8-0.6, 0.6-0.3 และ 0.3-0.0 ตามลำดับ ดังรูปที่ 14

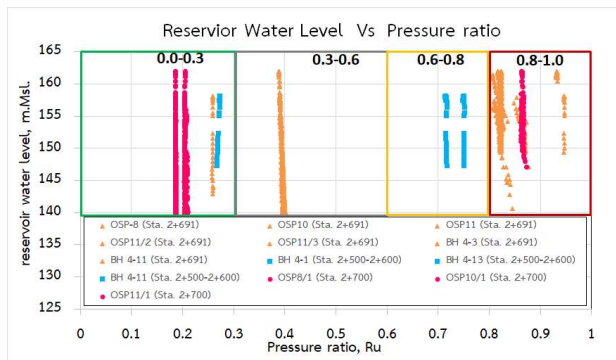
จากตำแหน่งเครื่องมือวัดและ PR ในชั้น Phyllite ประเมินพื้นที่ระดับการเกิด HF จากด้านเหนือน้ำจนถึงท้ายน้ำ ได้ดังรูปที่ 15 พบว่า Sta. 2+690 เกิด HF ในระดับ Very Likely มีพื้นที่ครอบคลุมตั้งแต่เหนือน้ำถึงด้านท้ายน้ำ ซึ่งแสดงถึงการเสียศักยภาพบริเวณนี้น้อยมาก ทำให้แรงดันน้ำที่เหลือส่วนใหญ่จะต้องอาศัยพื้นที่ท้ายน้ำเป็นส่วนปิดกั้นและทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการ Boiling หรือ Piping บริเวณท้ายน้ำซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การไหลซึมในแนวตั้งฉาก ดังรูปที่ 16 ที่เส้นศักย์รวมที่เท่ากัน (Equipotential lines) เลื่อนไปทางท้ายน้ำมากขึ้น แสดงว่าน้ำไหลจากอ่างซึมเข้าในตัวเขื่อนได้ง่ายขึ้น จากด้านเหนือน้ำถึงกึ่งกลางเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Case 2B และ 3 จะสูญเสียศักย์น้ำน้อยมากเมื่อผ่านชั้น HF และรูปที่ 17 แสดงการกระจายของ Hydraulic gradient (i) ซึ่งปรากฏเป็นเส้นที่อยู่ทางด้านท้ายน้ำแสดงถึงความเร็วในการไหลซึมและแรงดันลอยตัวของน้ำบริเวณนั้นสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ รวมถึงสอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้และการเกิดพื้นที่ชุ่มน้ำ (wet area) ที่พบในสนามเช่นกัน



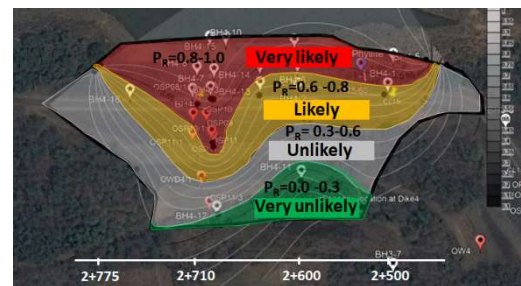
รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำในตัวอย่างเมื่อเทียบกับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ แสดงเป็นอัตราส่วนแรงดันน้ำ (P_R)



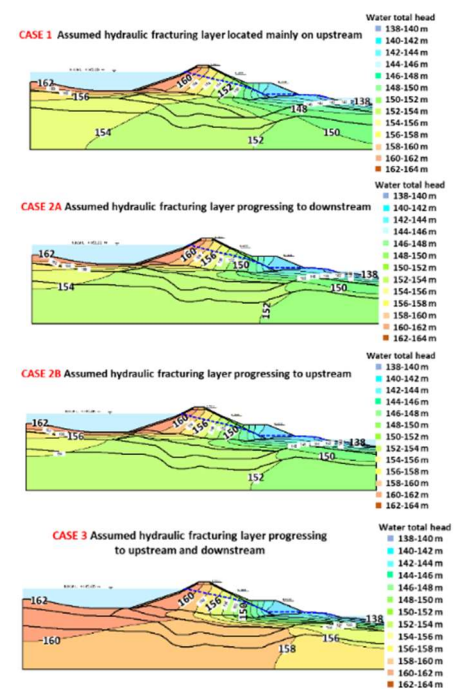
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์แรงดันน้ำกับพื้นที่เกิด HF



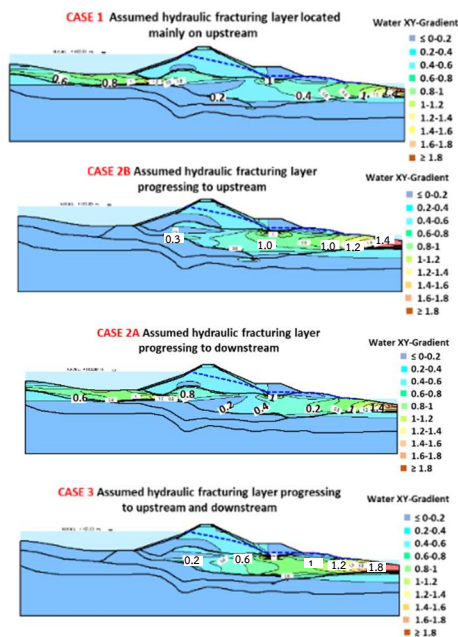
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ Pore pressure ratio, P_R



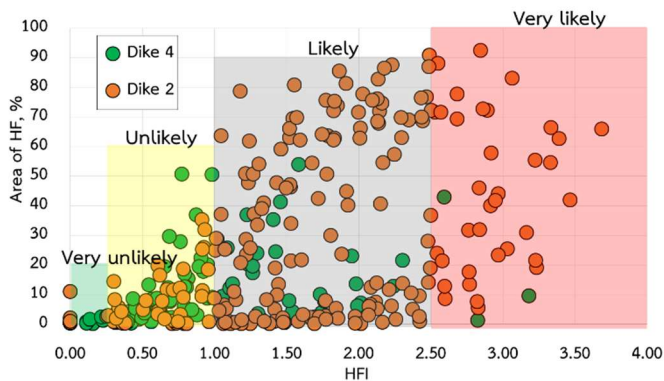
รูปที่ 15 พื้นที่และลำดับโอกาสเกิด HF



รูปที่ 16 รูปแบบการไหลซึมของหน้าตัดเขื่อน Sta. 2+700



รูปที่ 17 เส้นการกระจายของ Hydraulic gradient (i) ของหน้าตัด Section ที่ Sta. 2+700



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ของ HFI

4.2.3 การประเมินดัชนีพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว (Hydraulic fracturing index, HFI)

จากการศึกษาเปรียบเทียบทั้งตำแหน่งและพื้นที่การเกิด HF ที่วิเคราะห์ได้พบว่าสมการที่ 5 หรือ HFI5 ที่ระดับน้ำในอ่างฯ + 146 ม. รทก. Syncline ที่ 6 และ 9 จะเกิด HF ขึ้นก่อน (รูปที่ 11) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการประเมินตำแหน่ง HF มากที่สุด จึงนำสมการที่ 5 โดยใช้ข้อมูล Dike 4 สร้างความสัมพันธ์กับพื้นที่การเกิด HF ในแต่ละพื้นที่ของ Foliation และใช้ข้อมูล Dike 2 (ที่อยู่ห่างไป 150 เมตร) นำมาตรวจสอบความสัมพันธ์ และเมื่อตัดข้อมูลที่ไม่ได้เกิด HF คือ

ค่าที่ HFI ต่ำกว่าศูนย์ออกก็จะความสัมพันธ์ที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 18 จึงสามารถจัดช่วงลำดับความรุนแรงได้คือ 0.0-0.25, 0.25-1.0, 1.0-2.5 และ 2.5-4.0 โอกาสเกิด HF คือ Very unlikely, Unlikely, likely และ Very likely ตามลำดับ

4.3 ฐานความรู้พฤติกรรม HF

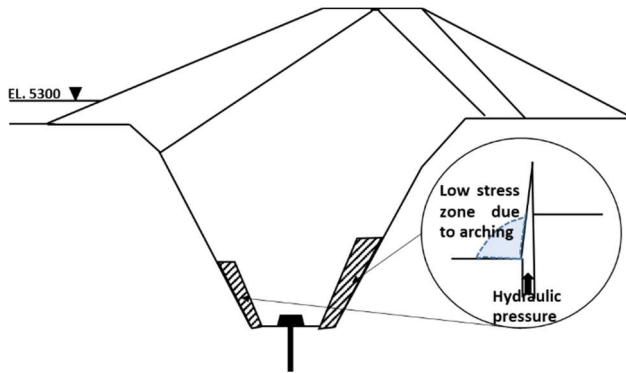
ความรู้ที่ได้รับทั้งหมดถูกสรุปเป็นฐานความรู้การเกิด HF ในรูปแบบของแผนผังเหตุการณ์ ใช้ข้อมูลจากข้อค้นพบจากแบบจำลองพฤติกรรม ข้อมูลจากการรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น Fell et al (2009) [8] และ RSIE (2021) [9] และใช้ความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญร่วมสร้างฐานความรู้ดังรูปที่ 20 ฐานความรู้ที่สร้างขึ้นใช้ข้อมูลตั้งแต่การปิดกั้นฐานราก ข้อมูลลักษณะดินและหินฐานราก ข้อมูลเฉพาะทาง เช่น ข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลเครื่องมือวัด และ HFI เมื่อแบ่งข้อมูลประเมินเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) ประเมินจากลักษณะและการวางตัวของดินและหินฐานราก ซึ่งเป็นตัวที่มีอิทธิพลต่อขนาดและทิศทางของหน่วยแรง ไปสู่ arching และ HF และ/หรือ 2) ใช้ข้อมูลแรงดันน้ำ กรณีที่เขื่อนมีการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำในสนาม การแปลผลจาก PR สามารถช่วยประเมินระดับของการเกิดได้ระดับหนึ่ง และ/หรือ 3) ข้อมูลจากแบบจำลอง กรณีที่มีผลการวิเคราะห์ HFI ช่วยการประเมินและตัดสินใจ

หลักในการประเมินการเกิด HF ใช้ข้อมูลกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งในการตัดสินใจ แต่ถ้ากรณีที่มีองค์ประกอบการตัดสินใจครบทั้ง 3 กลุ่ม คำตอบการประเมินจะเลือกกรณีที่มีความเสี่ยงที่สุด (Worse case) และหากได้ทั้ง 3 กลุ่ม คำตอบที่ตรงกัน จะบ่งบอกถึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์นั้น ๆ มากที่สุด

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลเขื่อนจริงในอดีต

ใช้กรณีพิบัติจากเขื่อน Teton ประเทศสหรัฐอเมริกา Independent Panel [13] พบว่า ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แสดงพฤติกรรมการไหลซึมก่อนพิบัติ (ขณะที่เขื่อนเก็บน้ำครั้งแรก) เกิด Arching หรือ HF ที่บริเวณรอยต่อของชั้นดินฐานรากกับร่องแกนที่มีความลึกและชันมาก จนเกิดรอยแตกภายในให้น้ำซึมตามร่องแกนในแนวยาวของเขื่อน ดังรูปที่ 19 และเกิดการกัดเซาะและพัดพาตะกอนไปตามแนวตัดขวางของเขื่อนจากท้ายน้ำไปเหนือหน้าน้ำไปสู่การสูญเสียวัสดุและพิบัติ จากเส้นทางการไหลซึมและลักษณะพิบัติจาก HF ที่ชัดเจน จึงนำข้อมูลดินและข้อมูลเครื่องมือวัด แสดงดัง

ตารางที่ 3 มาตรวจสอบและเปรียบเทียบความถูกต้องของฐานความรู้ที่พัฒนาขึ้น พบว่าเงื่อนไขและคำตอบสามารถระบุรูปแบบการพิบัติที่สอดคล้องกับข้อเท็จจริงในอดีต คือ เป็นไปได้มากที่สุด ที่จะพิบัติจาก HF (Very likely)



รูปที่ 19 ตำแหน่งเริ่มต้นไหลซึมบริเวณร่องแกนของเขื่อน Teton [13]

5. สรุปผลการศึกษา

พฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัวในรอยแตก เป็นผลทำให้การไหลซึม อาจเกิดการกัดเซาะและขยายตัวสู่การรั่วซึม ได้ข้อสรุปและเป็นที่มาของความรู้ที่ชัดเจน พบว่า ลักษณะธรณีวิทยาที่มีอิทธิพลต่อการเกิด HF เกิดในบริเวณรอยคดโค้งของชั้นหิน (Foliation) ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนความลาดชันอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกันร่อง เกิด Low stress zone มากที่สุด

การวิเคราะห์การเกิด HF ใช้สมการ $U > \sigma_3 + \sigma_t$ โดยนำหน้าตัดตามยาว วิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อพิจารณาพื้นที่และจำนวนจุด HF พบว่า HF สัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดขึ้นเมื่อถึงจุดกระตุ้น (Trigger level) +148 ม.รทก. และเพิ่มจำนวนจุดและพื้นที่เกิดตามระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุดลึกที่สุดของร่องโค้งที่มีการเพิ่มความสูงของ HF มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าจาก Piezometer ที่แรงดันน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้น การสร้างความสัมพันธ์ด้วย “อัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pressure ratio, P_R)” ระหว่าง Piezometric head ต่อความสูงน้ำในอ่างฯ เปรียบเทียบตำแหน่งพื้นที่การเกิด HF สามารถประเมินขอบเขต P_R เพื่อช่วยการวินิจฉัยโอกาสเกิด HF จากมากที่สุดไปจนน้อยที่สุด และบริเวณที่ไม่เกิด HF (ด้านท้ายน้ำ) มีค่า P_R ระหว่าง 1-0.8, 0.8-0.6, 0.6-0.3 และ 0.3-0.0 ตามลำดับ

จากข้อมูลรูปร่างกายภาพและโมดูลัสความยืดหยุ่น เสนอดัชนีการประเมินเป็น “HFI” ด้วยสมการ $\frac{H_{f(avg)}}{B_w} \cdot \frac{H_w}{H} \cdot \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$ นำมาจัดลำดับความรุนแรง 4 ระดับ คือ Very likely, likely, unlikely และ Very unlikely เท่ากับ 0.0-0.25, 0.25-1.0, 1.0-2.5 และ 2.5-4.0 ตามลำดับ

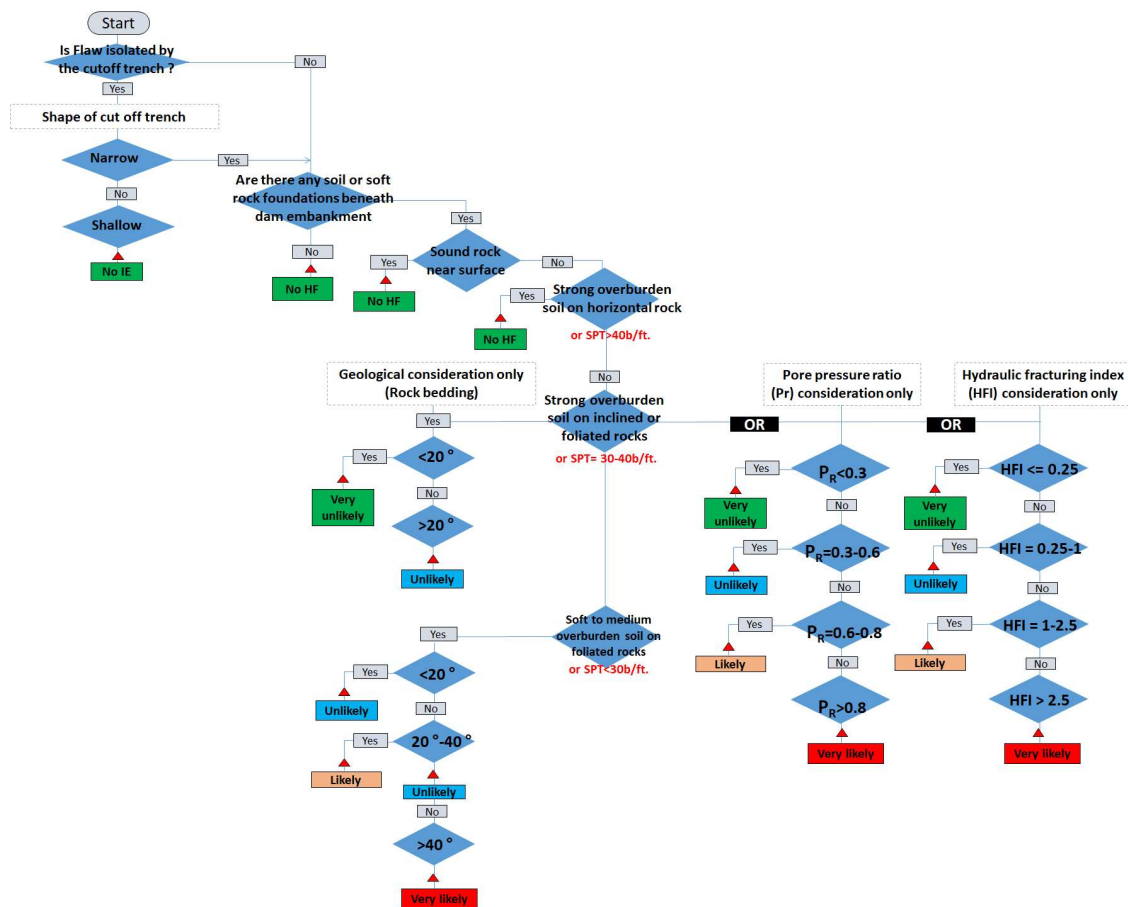
ตารางที่ 3 ข้อมูลเขื่อน Teton เพื่อทดสอบระบบการประเมิน [13]

ลำดับ	คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง	เขื่อน Teton
ข้อมูลฐานราก		
1	การปรับปรุงฐานราก	มีการขุดร่องแกนที่ลึกและชัน
2	ประเภทฐานราก	เป็นดินที่ผุสลายจากหิน Rhyolite Tuff ปะปนกับ Lapilli Tuff,
3	มุมการวางตัวของรอยแตก	มุมรอยแตกด้านเหนือน้ำ $\approx 30-0$ มุมรอยแตกด้านท้ายน้ำ > 60
ข้อมูลกายภาพเขื่อน		
4	ความสูง ณ จุดที่พิบัติ	H= 90 ft เมตร B =
5	ความสูงและความกว้างร่องแกน	$H_{f(avg)} = 50$ ft $B_w = 100$ ft
ข้อมูลการทดสอบดินในสนาม		
6	คุณสมบัติดินและหิน	
7	PI	6-14
8	โมดูลัสของชั้นดินผุ (E_1)	5118 psi (UU Test)
9	โมดูลัสของชั้นหิน Rhyolite (E_2)	1.5×10^6 psi [22]
	โมดูลัสของชั้นหิน Basalt (E_2)	9.4×10^6 psi [22]
ข้อมูลระดับน้ำและพิโซมิเตอร์		
10	ระดับน้ำในอ่างฯ	5300feet (ณ วันที่ 5 มิย 2519)
11	ระดับพิโซมิเตอร์	5285feet (ณ วันที่ (2519 มิย 5
		5265feet (ณ วันที่ (2519 มิย 5
12	ระดับน้ำที่เป็นจุดกระตุ้น HF	$H_w \approx 40$ ft
	ผลการประเมิน อัตราส่วนความดันน้ำ (PR) และดัชนีการเกิด ci'fyohecmid9y;	
13	P_R	0.99
14	HFI	3.8-9.5
ผลการประเมินความเสี่ยงของเขื่อน Teton ต่อการเกิดพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว		Very likely

ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาสร้างเป็นฐานความรู้โดยใช้ข้อมูล 4 กลุ่ม คือ 1) เอกสารทางวิชาการ 2) ข้อมูลธรณีวิทยาและแบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยา 3) แบบจำลองวิเคราะห์พฤติกรรม HF และ 4) ข้อมูลจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำและ

พฤติกรรมตรวจสอบสภาพในสนาม ร่วมกับการความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญสร้างเป็นแผนผังเพื่อการวินิจฉัย แสดงระดับของโอกาสเกิด HF ด้วย Very likely, likely, unlikely, very unlikely และตรวจสอบความถูกต้องโดยนำข้อมูลของเขื่อน Teton ซึ่งพบได้จาก HF อย่างชัดเจน ผลการเปรียบเทียบสามารถวินิจฉัยสอดคล้องกับรูปแบบพบในอดีต จึงเป็น

ฐานความรู้ที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถนำไประบุความเสี่ยงต่อการรั่วซึมของเขื่อนที่เกิดจากขบวนการแรงดันน้ำแทรก (HF) ที่เกิดขึ้นในเขื่อนมีข้อพิจารณาที่ชัดเจนและสามารถคัดกรองเขื่อนที่มีโอกาสเกิดการรั่วซึม เพื่อการติดตามพฤติกรรมและตรวจสอบแก้ไขได้อย่างมีระบบและนำไปสู่การวินิจฉัยความเสี่ยงของเขื่อนด้วยระบบผู้เชี่ยวชาญต่อไป



รูปที่ 20 แผนผังการวินิจฉัยการเกิดพฤติกรรมแรงดันน้ำแทรกตัว (Hydraulic fracturing)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลการศึกษาและวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลการศึกษา

ขอบคุณศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้โอกาสในการร่วมงานเป็นผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sherard JL, Woodward RJ, Gizienski SF, Cleavenger WA. *Earth and Earth- Rock Dams*. John Wiley and Sons, Inc; 1963.
- [2] Moayed RZ, Izadi E, Fazlavi M. In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method at

- Gotvand Dam site, Iran. *Journal of Engineering and Environment sciences*. 2012;36: 179 -194.
- [3] Jun-Jie W. *Hydraulic Fracturing in Earth-Rock Fill Dams*. John Wiley & Sons; 2014.
- [4] Men X, Jiren Li J, Han Z. Fracture propagation behavior of jointed Rocks in hydraulic fracturing. *Advances in Materials Science and Engineering*. [Online]. 2018. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/9461284>
- [5] Qian Y, Guo P, Wang Y, Liu Y. Advances in laboratory- scale hydraulic fracturing experiments. *Advances in Civil Engineering*. [Online]. 2020. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/1386581>
- [6] Curt C, Gervais R. Approach to improving the quality of data used to analyse dams Illustrations by two methods. *Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014;18(1): 87-105.
- [7] Filho ML, Diego B, Toscano AE, Barbosa PSF, Salgado RM, Vianna LFV, Barreto MN. Expert system for dam assessment and emergency detection. In *6th International conference on flood management*; 2014 Sep 16-19; Sao Paulo, Brazil; 2014.
- [8] The university of new south wales. *Risk Analysis for Dam Safety: A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal erosion and Piping*. Australia. 2009; 446 p.
- [9] Kasetsart University. *Development of Diagnosis Expert System for Seepage through Medium Scale Dam Foundation*. Research center of Infrastructure and sustainable Engineering; 2021. p. 354.
- [17] Jaworski GW. *An Experimental Study of Hydraulic Fracturing Report*. 1979, University of California; 1979.
- [18] Tamura MA. Hydrofracturing pressure of cohesive soils. *Soils and Foundations*. 1987;27(1): 3208-3210.
- [19] Andersen KH, Rawlings CG. Estimation of hydraulic fracture pressure in clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994;31(6).
- [20] Yan C, Zheng H, Sun G, Ge X. Combined finite-discrete element method for simulation of hydraulic fracturing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(4).
- [21] Haimson BC, Fairhurst C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1967;7(3).
- [22] Bauer SJ, Barrow P, Robbins A, Hileman M. Mechanical and fluid flow properties of basaltic andesite and rhyolite analogue rocks. Engineering Stanford University. *Proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*; 2017 Feb 13-15; Stanford, California; 2017.