



ฐานความรู้เพื่อการประเมินการกัดเซาะภายในเขื่อนดินถม

วิภาดา แซ่เจี๊ยว และ วรากร ไม้เรียง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรพต กุลสุวรรณ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ชินโรส ทองธรรมชาติ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สิริพร ทองแจ่ม

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1406 5175 อีเมล: fengbpk@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.009

รับเมื่อ 30 มีนาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 6 สิงหาคม 2564 ตอรับเมื่อ 26 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 12 กรกฎาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้รวบรวมองค์ความรู้การไหลซึมที่มีในปัจจุบัน สร้างฐานความรู้ในระดับการคัดกรอง (Screening Level) วินิจฉัยเสมือนเป็นผู้เชี่ยวชาญที่จะบ่งชี้ถึงรูปแบบหรือเส้นทางการไหลซึม โดยเฉพาะกรณีที่เกิดจากการหลุดตัวไม่เท่ากัน และการไหลซึมผ่านในชั้นทราย นำข้อมูลหรือคุณสมบัติพื้นฐานมาจำแนกและจัดประเภท ได้แก่ ข้อมูลฐานราก ข้อมูลภาพถ่ายเขื่อน ข้อมูลคุณสมบัติดินฐานราก และข้อมูลความลาดชันระดับน้ำ โดยจัดทำเป็นเกณฑ์ประเมิน 5 ระดับ คือ No Internal Erosion, Very Unlikely, Unlikely, Likely, Very Likely ความถูกต้องของระบบได้ทดสอบและเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในอดีตของเขื่อนมรสว เขื่อนแม่งัด และเขื่อนมูลบน (ก่อนและหลังปรับปรุงแก้ไข) ซึ่งพบว่า สามารถระบุรูปแบบการพิบัติที่มีความสอดคล้องกับการพิบัติที่ตรวจพบในอดีต อย่างไรก็ตามฐานความรู้นี้เป็นเพียงการระบุกระบวนการความผิดปกติหรือเหตุการณ์ตั้งต้นเท่านั้น การพัฒนาหาความเสี่ยงทั้งหมดต้องให้ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นเหตุการณ์ไปสู่การพิบัติ ซึ่งต้องอาศัยการสร้างฐานข้อมูลเขื่อนควบคู่ไปกับการสร้างฐานความรู้ อนาคตควรจัดทำเป็นโปรแกรมหรือระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) อย่างเต็มรูปแบบ เพื่อเป็นตัวแทนความรู้ของผู้เชี่ยวชาญถ่ายทอดสู่หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง นำไปใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดต่อไป

คำสำคัญ: การไหลซึม กัดเซาะภายใน ฐานความรู้ การพิบัติในเขื่อนดินถม

การอ้างอิงบทความ: วิภาดา แซ่เจี๊ยว, บรรพต กุลสุวรรณ, วรากร ไม้เรียง, ชินโรส ทองธรรมชาติ และ สิริพร ทอง, “ฐานความรู้เพื่อการประเมินการกัดเซาะภายในเขื่อนดินถม,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1-13, เลขที่บทความ 233-264897, ก.ค.-ก.ย. 2566.



Knowledgebase for Evaluation the Internal Erosion on Embankment Dam

Wiphada Saejiaw and Warakorn Mairiang

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Bunpoat Kunsuwan*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Chinoros Thongthamehart

Geotechnical Engineering Research and Development center at Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Siriporn Thongjaeng

Electricity Generating Authority of Thailand, Nonthaburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1406 5175, E-mail: fengbpk@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.009

Received 30 March 2021; Revised 6 August 2021; Accepted 26 August 2021; Published online: 12 July 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper has collected and compiled the knowledge of seepage and internal erosion which can be used for diagnostic screening to identify the seepage direction particularly in the case of different settlement problem and seepage through cohesionless soil foundation. The properties and the information on dam foundation treatment, physical characteristics, soil properties, and hydraulic gradient were compiled and interpreted. Five levels of safety criteria are proposed, i.e. no internal erosion, very unlikely, unlikely, likely, and very likely to show the safety status of the dam. The verification and validation of the criteria were conducted using dam data from Morasuab Dam, Mae Ngad Dam, and Moonbon Dam of both before failure and after remediation. The validation can identify the failure actually occur on those 3 dams. However, the developed knowledge base is only the initial decision criteria to identify flaws or initiation mechanism. However, the overall risk assessment requires complete processes from the initial period to breaching of the dam of which large amount of data is imperative. Thus, the development of dam data base is essential together with the knowledge base creation. In the future, a complete expert system is needed to be set up for sharing and transferring to related organizations for the optimized benefits.

Keywords: Piping, Internal Erosion, Knowledgebase, Failure in Earthdam

Please cite this article as: W. Saejiaw, B. Kunsuwan, W. Mairiang, C. Thongthamehart, and S. Thongjaeng, "Knowledgebase for evaluation the internal erosion on Embankment dam," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–13, ID. 233-264897, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

จากสถิติข้อมูลในอดีต Engineering News Record [1] USCOLD [2] Suttisak และ Warakorn [3] พบว่า เชื้อดินถล่มมีรูปแบบการพิบัติจากการรื้อขี้นมากที่สุดสำหรับประเทศไทย มีเหตุการณ์ความเสียหายและพิบัติของเชื้อดินในอดีต เฉพาะที่เกิดจากการกัดเซาะภายใน (Internal Erosion) เช่น เชื้อนูลอบน [4], [5] เชื้อนลำปาว เชื้อนโคกสำโรง เชื้อนมรสุม ปี 2562 [6] องค์ความรู้จากเหตุการณ์ดังกล่าวถูกนำมาสรุปในรูปแบบของข้อมูล (Data) เสียเป็นส่วนมาก แต่ยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นสารสนเทศ (Information) ได้ หากมีการเก็บรวบรวม ศึกษา และวิเคราะห์อย่างเป็นระบบจะเป็นประโยชน์ยิ่งขึ้นเสมือนกับมีผู้เชี่ยวชาญเป็นที่ปรึกษาวิเคราะห์และประเมินผล

Fell และคณะ [7] ได้แยกพิจารณาโอกาสพิบัติจากการไหลซึมเป็นชั้นๆ ตามลำดับเหตุการณ์ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่ ICOLD [8] ได้สรุปว่ากระบวนการกัดเซาะภายในตั้งแต่เริ่มต้นจนนำไปสู่การพิบัติ ได้แก่ การกัดเซาะในระยะเริ่มต้น (Initiation) นำไปสู่การกัดเซาะต่อเนื่อง (Continuation) การขยายรูโพรง (Progression) และการพิบัติ (Breaching) ในที่สุด FERC [9] ได้แบ่งระดับการวิเคราะห์ความเสี่ยงเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 1) Screening 2) Periodic 3) Semi-Quantitative Risk Analysis (SQRA) และ 4) QRA ซึ่ง 2 ระดับแรก ได้ผลลัพธ์เชิงคุณภาพ วิเคราะห์ด้วยเงื่อนไขที่ไม่ซับซ้อนและข้อมูลจำกัดได้ในวงแคบ การระบุความเสี่ยงเป็นปริมาณจะประเมินในระดับ 3 และ 4 ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์จะต้องมีมากพอในหลายด้าน เช่น ผลวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ผลสำรวจและตรวจเช็มน ร่วมกับข้อมูลการก่อสร้าง และอื่นๆ ที่สรุปออกมาเป็นตัวเลขได้ ในรูปแบบของค่า “Probability of Failure”, P_{fail} การประเมินความเสี่ยงระดับ SQRA ขึ้นไปนั้น ประเทศไทยอาจทำได้ยาก เนื่องจากการเก็บข้อมูลเชื้อ การตรวจสภาพเชื้อในสนาม และอ่านค่าเครื่องมือวัดมิได้เป็นข้อปฏิบัติปกติของหลายหน่วยงาน โดยเฉพาะในเชื้อดินขนาดเล็กๆ ที่แทบจะไม่มีข้อมูลเหล่านี้อยู่เลย

ปัจจุบันประเทศไทยมีเชื้อที่ปิดกั้นลำน้ำรวมกว่า

4,500 แห่ง ซึ่งส่วนใหญ่มีหน่วยงานราชการ และรัฐวิสาหกิจเป็นผู้ดูแล เช่น กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมทรัพยากรน้ำ เป็นต้น เชื้อในจำนวนนี้บางส่วนได้ทยอยถ่ายโอนให้องค์กรปกครองท้องถิ่นซึ่งบุคลากรที่เข้ามาดูแลเชื่อนั้น ปัจจุบันยังขาดความรู้และประสบการณ์ที่จะดูแลเชื่อน ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลบำรุงรักษา จึงควรสร้างเครื่องมือช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถตัดสินใจดำเนินการได้ถูกต้องคล้ายกับมีผู้เชี่ยวชาญให้คำปรึกษา และในการวินิจฉัยนั้นต้องการข้อมูลของเชื้อและอ่างเก็บน้ำต่างๆ จึงเป็นโอกาสที่หน่วยงานผู้รับผิดชอบจะได้สร้างฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บและรวบรวมข้อมูลสำหรับการประเมินการไหลซึมเพื่อเป็นประโยชน์แก่องค์กรต่างๆ ต่อไป

การวินิจฉัยโอกาสเกิดความผิดปกติของเชื้อที่เหมาะสมในสภาวะปัจจุบันต้องสามารถให้คำตอบที่ดีและชัดเจน ไม่น้อยกว่าระดับการคัดกรอง (Screening Level) แต่อาจตอบคำถามที่เฉพาะเจาะจงในรายละเอียดไม่ได้เท่ากับระดับ SQRA และ QRA ที่ต้องการข้อมูลและการวิเคราะห์ปริมาณมาก ดังนั้นการระบุข้อมูลที่มีความเฉพาะในระดับเดียวกับ Periodic น่าจะเป็นระดับที่อยู่ในวิสัยที่ปฏิบัติได้สำหรับเชื้อขนาดเล็กขนาดกลางทั่วไปในประเทศไทย บทความนี้จึงได้สร้างฐานความรู้การประเมินการไหลซึมเบื้องต้น ประยุกต์ใช้ข้อมูลต่างๆ เพื่อพัฒนาเป็นแผนภูมิในการประเมินการไหลซึมเสมือนระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยการวินิจฉัยนั้นจะระบุสถานภาพเชื้อที่ระดับความเสี่ยงต่อการไหลซึม เพื่อให้ความเห็นกับวิศวกรที่เกี่ยวข้องหรือผู้บริหารเชื้อนใช้ประกอบการตัดสินใจแก้ไขหรือซ่อมแซมเชื้อนให้มีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้

2. วิธีการวิจัย

2.1 การกัดเซาะภายใน (Internal Erosion)

การกัดเซาะที่เกิดขึ้นภายในตัวเชื้อนไม่สามารถตรวจพบได้โดยง่าย จึงอาจจะเกิดการกัดเซาะต่อเนื่องภายในตัวเชื้อนหรือฐานรากเป็นเวลานานโดยไม่ปรากฏอาการให้เห็น เมื่อสภาพปรากฏขึ้นก็อาจช้าไปสำหรับการแก้ไข ตำแหน่งสำคัญ



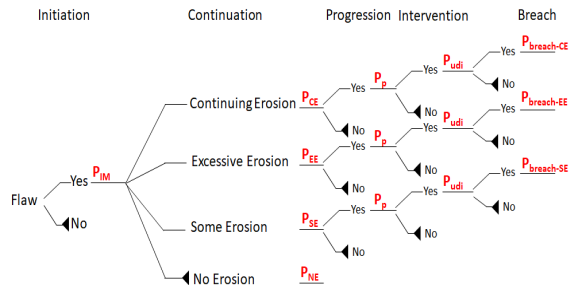
ในตัวเขื่อนที่เกิดการกัดเซาะได้โดยง่าย

ICOLD [8] ระบุเส้นทางการไหลซึมที่นำไปสู่การกัดเซาะภายใน เกิดขึ้นได้ทั้งการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อนและการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน โดยมีกลไกของการเริ่มต้นของการกัดเซาะภายในได้จาก Concentrated Leak, Backward Erosion, Contact Erosion และ Suffusion

2.2 วิธีการประเมินการไหลซึม

Fell และคณะ [7] เสนอ Flowchart ของความน่าจะเป็นของการพิบัติจากเหตุการณ์ของการกัดเซาะภายในตัวเขื่อนฐานรากและการกัดเซาะจากตัวเขื่อนสู่ฐานราก แยกตามกลไกตั้งต้น (Initiation Mechanism; IM) ที่นำไปสู่การไหลซึมแต่ละเส้นทางการพิบัติ (Failure Path) จะถูกพิจารณาบนพื้นฐานของการประเมินระดับความเป็นไปได้ (More Likely และ Less Likely) บนพื้นฐานของการประเมินความเสี่ยงโดยใช้ข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจในหลายกลุ่ม เช่น ข้อมูลทางกายภาพของตัวเขื่อน ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรม ข้อมูลการออกแบบเขื่อนหรือการบดอัดในระหว่างก่อสร้างเขื่อน ข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม ข้อมูลจากการสำรวจด้วยสายตาในสนาม (Visual Inspection) เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเกิดตำหนิ (รอยแตก) ในตัวเขื่อนหรือเป็นช่องทางให้น้ำไหลผ่านในฐานราก เป็นต้น ตัวอย่างการประเมิน ดังรูปที่ 1

Curt [10], [11] ใช้ผลการเดินสำรวจด้วยสายตาในสนาม ข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม และข้อมูลจากแบบจำลอง ประกอบการตัดสินใจให้คะแนน โดยสร้างเกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละกลุ่มข้อมูล แบ่งคะแนนออกเป็น 0-10 คะแนน (Excellent to Unacceptable) สำหรับใช้ประเมินสถานภาพของเขื่อนในรูปแบบเมื่อเกิดการกัดเซาะภายใน (ตามเวลา) จากผลการตรวจสอบสภาพเขื่อน และ ICOLD [8] ได้รวบรวมข้อมูลและปรับปรุงแนวคิดของ [7] ซึ่งใช้วิธีประเมินทางวิศวกรรม (Engineering Assessment) ในการคัดกรองเพื่อประเมิน Internal Erosion ได้เสนอกรอบการวิเคราะห์และประเด็นที่ต้องพิจารณาที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 1 Event Tree การพิบัติจากเหตุการณ์ของการกัดเซาะภายใน [7]

2.3 วิวัฒนาการฐานความรู้และการพัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญงานเขื่อน

ในช่วงทศวรรษ 1990 ฐานความรู้และระบบผู้เชี่ยวชาญงานความปลอดภัยเขื่อน (Dam Safety) เริ่มมีการดำเนินการกับเขื่อนคอนกรีตในอิตาลีและสหรัฐอเมริกา และในหลายประเทศสร้างระบบผู้เชี่ยวชาญทั้งทางด้านฐานข้อมูลและระบบการอนุมาน เพื่อการช่วยตัดสินใจทางด้านความปลอดภัยของเขื่อนให้เกิดประสิทธิภาพและรวดเร็ว ดังตารางที่ 1 ปัจจุบันได้เริ่มพัฒนาระบบการคิดสำหรับปัญหาการไหลซึมในเขื่อนถมบ้างแล้ว

ตารางที่ 1 การประยุกต์ใช้ฐานความรู้และระบบผู้เชี่ยวชาญในงานเขื่อน

ลำดับ	การใช้งาน	ที่มา
1	สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำให้เพียงพอ เพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมและการนำไปใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า	Matlabie [xx]
2	ใช้ข้อมูลผลการตรวจสอบสภาพเขื่อนคอนกรีต โดยนำความรู้ทางวิศวกรรมและเหตุผลที่เกี่ยวข้องสร้างเป็นฐานความรู้และพัฒนาเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญ	Franck [12]
3	เสนอเครื่องมือ “Toolbox” ประเมินการไหลซึมในงานเขื่อนดินถม วิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนทั้งระบบ ตั้งแต่จุดตำหนิ (Flaw) จนเขื่อนเกิดการพิบัติ (Breaching) วิธีการนี้หากเปรียบเทียบกับประเมินความเสี่ยงอยู่ในระดับ SORA หรือ QRA	Fell และคณะ [7]

ตารางที่ 1 การประยุกต์ใช้ฐานความรู้และระบบผู้เชี่ยวชาญในงานเขื่อน (ต่อ)

ลำดับ	การใช้งาน	ที่มา
4	พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญ KBES แทนระบบเดิมที่ตอบสนองไม่ทัน เมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยรวมการอนุมาณ และการแก้ปัญหาที่รวดเร็ว ทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานได้ทันทีผ่านอินเทอร์เน็ต โดยไม่ต้องรอการเขียนรายงาน เช่นที่เคยเป็นมา	Chou และคณะ [13]
5	รวบรวมข้อมูล ได้แก่ เอกสารวิชาการ การประชุมด้านเขื่อน นักวิชาการ ผู้เชี่ยวชาญด้านเขื่อน รายชื่อเขื่อนที่ใช้งานแล้ว กำลังก่อสร้าง และระหว่างการออกแบบ สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญในการเลือกชนิดของเขื่อนให้เหมาะสมกับฐานราก	Emiroglu และคณะ [14]
6	จัดทำฐานข้อมูลและสรุปความรู้ของการตรวจประเมินสภาพเขื่อนด้วยวิธีดัชนีสภาพ ค่าดัชนีสภาพของเขื่อน เพื่อจัดลำดับความสำคัญในการซ่อมบำรุง และการตรวจสภาพเขื่อนในสนาม	Mairiang [19]
7	พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญวินิจฉัยอาการผิดปกติเขื่อนคอนกรีตในประเทศจีน ด้วย Artificial Neural network ร่วมกับ Expert Fuzzy โดยพิจารณาความผิดปกติของค่าอ่านจากเครื่องมือวัด และใช้ Rough Sets Theory สรุปสาเหตุของความผิดปกติ	Zhiping และคณะ [15], [16]
8	พัฒนาระบบความรู้การกัดเซาะภายในของเขื่อนในประเทศฝรั่งเศส จากการทำงานของระบบเขื่อน โดยใช้ผลการตรวจวัด ผลตรวจสภาพเขื่อน และผลจากแบบจำลองเขื่อน เพื่อระบุความเสื่อม (Degradation) ด้วย Fuzzy Rule โดยสร้างเกณฑ์ของคะแนนซึ่งเป็นการเห็นของผู้เชี่ยวชาญเป็นตัวชี้วัด สร้างเป็นฐานความรู้ แบบ Fault tree	Curt [10], [11], [17]
9	สร้างระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าเขื่อน แรงดันน้ำในตัวเขื่อน การตรวจเขื่อน และข้อมูลอื่นๆ สร้างเป็นฐานความรู้ ด้วย Fuzzy logic วินิจฉัยสถานภาพเขื่อนและโอกาสพิบัติ ใน 4 ระดับ คือ 1) สีเขียว-ไม่น่าเกิดการพิบัติอย่างยิ่ง 2) สีเหลือง-ไม่น่าเกิดการพิบัติ 3) สีส้ม-มีโอกาสเกิดการพิบัติ และ 4) สีแดง-มีโอกาสเกิดการพิบัติอย่างยิ่ง	Marcos และคณะ [18]

ตารางที่ 1 การประยุกต์ใช้ฐานความรู้และระบบผู้เชี่ยวชาญในงานเขื่อน (ต่อ)

ลำดับ	การใช้งาน	ที่มา
10	พัฒนาระบบ (เสมือน) ผู้เชี่ยวชาญเขื่อน ติดตามตรวจวัดข้อมูลระยะไกลด้านความปลอดภัยเขื่อน (Dam Safety Remote Monitoring System; DSRMS) และระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของเขื่อน โดยสร้างเกณฑ์ของระบบตรวจวัด ด้วยการแปลผลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม	GERD [20] Wattanadilokkul [21]

3. ผลการทดลอง

3.1 ระบบการวินิจฉัยเพื่อประเมินการไหลซึม

บทความนี้ใช้องค์ความรู้ที่ Fell และคณะ [7] รวบรวมและสังเคราะห์ไว้อย่างละเอียด ทั้งจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์จากผลการทดสอบหรือการสำรวจ และองค์ความรู้จากแหล่งอื่นๆ ที่มีการเผยแพร่ ร่วมกับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ สร้างการวินิจฉัยจุดบกพร่อง (Flaw) ที่อาจนำไปสู่การไหลซึมในตัวเขื่อนและฐานราก การประเมิน แบ่งเป็น 5 รูปแบบ ตามที่ [7] ได้ศึกษาไว้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบการประเมินสำหรับสร้างฐานความรู้

IM	คำอธิบาย
IM 5	การไหลซึมผ่านตามรอยแตกตามขวางในบริเวณที่การทรุดตัวไม่เท่ากัน เนื่องจาก Cross Valley Arching
IM 11	การไหลซึมผ่านรอยแตกจากการทรุดตัวไม่เท่ากันในดินฐานราก
IM 26	การกัดเซาะที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำผ่านรอยแตก (Concentrated Leak)
IM 24	การไหลซึมผ่านฐานรากในชั้นทรายและเกิดการกัดเซาะผ่านฐานรากจากด้านท้ายน้ำมายังเหนือน้ำ (Backward Erosion)
IM 25	การไหลซึมผ่านฐานรากและพัดพาดินเม็ดละเอียดผ่านโพรงของวัสดุเม็ดหยาบ (Suffusion)

3.2 การรวบรวมองค์ความรู้การประเมินการไหลซึม

ตามการศึกษา Fell และคณะ [7] พิจารณา 5 IM เป็น 2 กลุ่ม คือ



1) การไหลซึมผ่านบริเวณที่การทรุดตัวไม่เท่ากัน ประกอบด้วย IM 5, IM 11 และ IM 26 ทั้ง 3 รูปแบบ พิจารณาความน่าจะเป็นดังสมการที่ (1)

$$Probability\ of\ initiation = P_c \times M_{OU} \times P_{ic} \quad (1)$$

P_c คือ Probability of Initiation of Erosion พิจารณาผลคูณของ Relative Factors ซึ่งแบ่งน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย คุณกับผลคะแนนตามปัจจัยความน่าจะเป็นของสภาพเพื่อน (Likelihood Factor) ดังรูปที่ 2

M_{OU} คือ Multiplication Factors for Observation and Measure Settlement ใช้ข้อมูลการทรุดตัวจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งไว้ตั้งแต่ระหว่างและหลังการก่อสร้าง

P_{ic} คือ Probability of Initiation in a Crack ปัจจัยทำให้เกิดรอยแตก ได้แก่ การประเมินความเป็นไปได้ของรอยแตก ซึ่งพิจารณาข้อมูลจาก ปริมาณการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้ ค่าความลาดระดับน้ำ (Hydraulic Gradient) ชนิดของดิน และปริมาณดินเม็ดละเอียด (Fine Content)

2) การไหลซึมผ่านฐานรากที่เป็นชั้นทราย ได้แก่ IM 24: Backward Erosion ความน่าจะเป็นพิจารณาจากความต่อเนื่องของชั้นทรายในชั้นฐานรากและการเกิด Heave ดังสมการที่ (2) และ IM 25: Suffusion ดังสมการที่ (3)

$$P = P_{cl} \times P_H \quad (2)$$

$$P = P_{cl} \times P_{IUS} \quad (3)$$

P_{cl} คือ Probability of Continuous Layer from Upstream to Downstream คือ ความต่อเนื่องในชั้นทรายหรือดินฐานรากที่มีค่า $PI < 7$ ตั้งแต่ด้านเหนือน้ำไปท้ายน้ำ โดยความน่าจะเป็นพิจารณาในรูปแบบความเห็นของผู้เชี่ยวชาญตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 ตามข้อมูลคุณสมบัติดินชั้นฐานราก ($P_{cl} = 0$ เมื่อชั้นดินฐานรากไม่มีความต่อเนื่อง)

P_H คือ Probability of Heave ในบริเวณที่ตื้นเขินจุดที่ Effective Stress = 0 พิจารณาข้อมูลจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Piezometer) หรือจากการแบบจำลอง Seepage

Factor	Relative Importance Factor (RF)	Likelihood Factor (LF)			
		Less Likely (1)	Neutral (2)	More Likely (3)	Much More Likely (4)
Foundation geology and geometry	(3)	Rock foundations or uniform soil foundation	Shallow soils or soils with gradual variation in depth and compressibility sufficient to cause differential settlement of less than 0.2% of the embankment height	Moderate depth of compressible soil in the foundation sufficient to cause differential settlement of 0.2% to 0.5% of the embankment height	Deep compressible soil in the foundation sufficient to cause differential settlement of >0.5% of the embankment height
Slope of the side of compressible zones	(2)	Gentle $\alpha < 30^\circ$	Moderate $30^\circ < \alpha < 45^\circ$	Steep $45^\circ < \alpha < 60^\circ$	Very steep $\alpha > 60^\circ$
Height of embankment	(1)	Dams less than 50 ft (15m) high	Dams 50 ft to 100 ft (15m to 30m) high	High dams 100 ft to 200 ft (30m to 60m) high	Very high dams >200 ft (60m) high

รูปที่ 2 ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาใน IM5, 11 และ 26 [7]

flow Net ของ Maniam [22]

P_{IUS} คือ พิจารณาจาก Grain Size Distribution ที่ d_{15} , d_{60} และ d_{90} และคาดคะเนความน่าจะเป็นจาก Empirical Chart เสนอโดย Wan และคณะ [23], [24]

องค์ความรู้ที่รวบรวมได้จาก [7] พบว่า วิธีการประเมินมีความละเอียดสูง รูปแบบของการประเมิน Fully Event Tree วิเคราะห์ตั้งแต่เหตุการณ์ตั้งต้น (Initiation) จนเกิดการพิบัติ (Breaching) ผลลัพธ์ได้เชิงปริมาณที่สามารถระบุตัวเลขความน่าจะเป็นได้ (Probability) โดยข้อมูลที่นำเข้ามาความหลากหลาย ตั้งแต่ ข้อมูลการก่อสร้าง ข้อมูลคุณสมบัติดิน ภายภาพเขื่อน ธรณีวิทยา ข้อมูลระดับน้ำในอ่าง เป็นต้น สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันหากไม่ใช่เขื่อนขนาดใหญ่ การวิเคราะห์ในระดับนี้ อาจจะยังไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากขาดแคลนข้อมูล อีกทั้งยังต้องใช้ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะเป็นผู้ประเมิน วิธีปฏิบัติที่ทำได้ คือ การประเมินในระดับคัดกรอง (Screening Level) หรือ Periodic ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีและมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นฐานความรู้การประเมินการไหลซึมในบทความนี้จะพิจารณาในระดับคัดกรองเท่านั้น

3.3 การจัดการความรู้เพื่อวินิจัยการไหลซึม

จากองค์ความรู้ที่รวบรวม ถูกสังเคราะห์และสกัดออกมาเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องในหลากหลายด้าน นำมาสรุปดังตารางที่ 3 จะเห็นว่า มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก

และแต่ละตัวต้องลงรายละเอียด โดยเฉพาะกลุ่มข้อมูลที่ต้องมีการแปลผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ ได้แก่ กลุ่มเครื่องมือวัดพฤติกรรม ซึ่งต้องประมวลผลเพื่อสร้างเกณฑ์ประเมินพฤติกรรมก่อน หรือกลุ่มของข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ได้แก่ Seepage Flow Net การประเมิน Crack Width เป็นต้น

ตารางที่ 3 ตัวแปรและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการประเมินการไหลซึม ใน IM 5, 11, 26 และ IM 24, 25

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง	รายละเอียดเพิ่มเติม
กลุ่มการไหลซึมผ่านบริเวณที่เกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน IM 5, 11, 26	
- ดินที่ยุบตัวได้ (Compressible Soil)	แบ่งระดับโอกาสเกิดตามลักษณะชั้นฐานราก - ดินที่มีความสม่ำเสมอ หรือเป็นฐานรากหิน - เป็นชั้นดินตื้นๆ - เป็นชั้นดินมีความหนาปานกลาง - เป็นชั้นดินหนามาก
- มุมความลาดชันของฐานยื่นเขื่อน (Slope of Abutment)	แบ่งระดับโอกาสเกิดตามมุมความลาดชันลาด (Gentle) หรือ <math><30^{\circ}</math> ความชันปานกลาง หรือ $30-45^{\circ}$ ค่อนข้างชัน (Steep) หรือ $45-60^{\circ}$ ชันมาก (Very Steep) หรือ $>60^{\circ}$
- ความสูงเขื่อน (Dam Height)	เตี้ย หรือ <math><15</math> เมตร ปานกลาง หรือ $15-30$ เมตร ค่อนข้างสูง หรือ $30-300$ เมตร สูงมาก หรือ >300 เมตร
ข้อมูลการทรุดตัวจากเครื่องมือวัด - การทรุดตัวช่วงก่อสร้าง	ทรุดตัวน้อยมาก หรือ <math><1.5\%</math> ทรุดตัวน้อย หรือ $1.5-3\%$ ทรุดตัวมาก หรือ $3-4\%$ ทรุดตัวมากที่สุด หรือ $>4\%$
- การทรุดตัว 10 ปี หลังก่อสร้าง	ทรุดตัวน้อยมาก หรือ <math><0.15\%</math> ทรุดตัวน้อย หรือ $0.15-0.4\%$ ทรุดตัวมาก หรือ $0.4-0.7\%$ ทรุดตัวมากที่สุด หรือ $>0.7\%$
- ความกว้างมากที่สุดของรอยแตก	0-20 มม.
- ค่าเฉลี่ยความลาดระดับน้ำ (Avg. Hydraulic Gradient)	เป็นข้อมูลใช้ประเมิน Probability of Initiation of Erosion
- ประเภทของดินที่จำแนกด้วยวิธี USCS และ %ผ่านตะแกรง (%Fine Content)	ดินแต่ละประเภทมีผลต่อการพัดพา และความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกัดเซาะสูง ถ้ามีค่า Fine Content > 40% [8], [24]

ตารางที่ 3 ตัวแปรและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการประเมินการไหลซึม ใน IM 5, 11, 26 และ IM 24, 25 (ต่อ)

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง	รายละเอียดเพิ่มเติม
กลุ่มการไหลซึมผ่านชั้นทราย IM 24 25	
- ความต่อเนื่องชั้นดินฐานรากจากเหนือน้ำไปท้ายน้ำ และ ดัชนีความเหนียว (PI)	PI < 7 มีโอกาสเกิด BEP PI > 7 เป็นไปได้น้อยที่จะเกิด (Backward Erosion Piping; BEP)
- เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ	แสดงการไหลซึมและความดันน้ำสูง
- การจำลอง Flow Net	แสดงการไหลซึมและความดันน้ำสูง [47]
- Grain Size Distribution Curve ที่ d_{15} , d_{60} และ d_{90}	ใช้คาดคะเนความน่าจะเป็นของการกัดเซาะพัดพาอนุภาคจาก Empirical Chart ของ Wan และคณะ [23], [24] และ Schmertmann [33]

ในการสร้างฐานความรู้ให้นำข้อมูลหรือคุณสมบัติพื้นฐานมาจำแนกจัดประเภทของข้อมูล (ซึ่งไม่พิจารณาข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมและจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน) และประยุกต์ใช้การสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไข If-then และใช้การอนุมานแบบเดินหน้า (Forward Chaining) ซึ่งถูกสกัดและสังเคราะห์แล้วในตารางที่ 3 โดยเป็นข้อมูลจากข้อเท็จจริงต่างๆ จากการศึกษาการปฏิบัติในอดีตจากข้อค้นพบจาก FEM หรือจากข้อมูลในสนาม ข้อมูลทั้งหมดที่รวบรวมได้นำมาจัดเรียงในรูปแบบ Even Tree ร่วมกับใช้ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการลำดับและพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย จนได้ข้อสรุปของฐานความรู้ มีการพิจารณา ดังนี้

กลุ่มการไหลซึมผ่านในบริเวณที่เกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน ได้แก่ IM 5, 11, 26: ปัจจัยที่นำมาพิจารณา คือ

ชั้นฐานรากเป็นดิน แสดงถึงโอกาสที่ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันจนอาจเกิดรอยแตกนำไปสู่การกัดเซาะภายนอก ความหนาของชั้นดินฐานรากแบ่งระดับโอกาสเกิดรอยแตก คือ สำหรับชั้นดินที่มีความสม่ำเสมอ ระดับโอกาสเกิดรอยแตกน้อยมาก และไปจนถึงชั้นดินที่มีความหนาและสามารถยุบตัวได้ จะเป็นไปได้ที่จะเกิดรอยแตกมากที่สุด

มุมความลาดชันของดิน ทั้งหมดในชั้นดินฐานราก หรือบริเวณฐานยื่นเขื่อน ความรู้ในปัจจุบันโดย Fell และคณะ [7]



และ Zhang [25] จำแนกความลาดชันได้เท่ากับ $<30^\circ$ คือระดับโอกาสเกิดรอยแยกน้อยมาก มุมความลาด $>60^\circ$ เป็นไปได้ที่จะเกิดรอยแยกมากที่สุด

กลุ่มการไหลซึมผ่านชั้นทราย IM 24, 25:

การไหลซึมผ่านฐานราก เนื่องจาก Backward Erosion และ Suffusion จะไม่มีโอกาสเกิดหากมีการปรับปรุงฐานรากที่มีประสิทธิภาพ เช่น การมีร่องแกนเขื่อน (Core trench หรือ Cutoff trench)

Sherard [26] และ Sherard [27] เสนอว่าชั้นฐานรากเป็นทรายหรือดินที่ค่า $PI < 7$ แต่ชั้นเหล่านี้ไม่มีความต่อเนื่องกันจากเหนือน้ำถึงท้ายน้ำ รูปแบบ IM 24 และ 25 จะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นเช่นกัน แต่หากมีความต่อเนื่อง การพิจารณาต่อมาจะนำไปปัจจัยเรื่องข้อมูลลาดระดับน้ำ (i) และขนาดของเม็ดดินมีความสำคัญต่อการกัดเซาะพัดพาของอนุภาค โดย Sherard [26], Sherard [27], Yousif และคณะ [28] และ Li และคณะ [29] พิจารณาสัมประสิทธิ์รูปร่างของเม็ดดิน (Coefficient of Uniformity; C_u) ที่พบว่า อนุภาคเม็ดดินขาดเสถียรภาพเมื่อ $C_u < 2$ ร่วมกับประเมินด้วย Factor of Safety; FS จากทฤษฎีของ Terzaghi และ Peck [30] สำหรับ Suffusion ที่เป็นการกัดเซาะในระยะยาวมักเกิดในดินถมหรือดินฐานรากที่เป็นเม็ดหยาบ (Granular Materials) จำพวกชั้นดินทรายที่มีขนาดละเอียด ที่ก่อให้เกิดช่องว่างที่ไม่เป็นตัวกรองของดินเม็ดขนาดเล็กกว่า ดินเม็ดละเอียดจึงถูกพัดพาออกไปได้ โดยคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องสำหรับการวินิจฉัยรูปแบบนี้ คือ อนุภาคของดินเม็ดละเอียด (Fine Particle) พบว่า ถ้าดินเม็ดละเอียด $> 40\%$ มีโอกาสที่เม็ดดินที่แทรกตัวในช่องว่างหลุดออกและลอยตัวขึ้นด้านท้ายน้ำ (Boiling) สภาพเขื่อนจึงไม่มั่นคง Hans และคณะ [31] และ Wan [32]

3.4 การสร้างฐานความรู้

ข้อมูลทั้งหมดที่รวบรวมจะถูกนำมาจัดลำดับ เพื่อสร้างฐานความรู้ ระบบแบ่งระดับของการประเมินการไหลซึมเป็น 5 ระดับ ได้แก่ 1) No Internal Erosion; ไม่เกิดการไหลซึม 2) Very Unlikely; โอกาสเกิดการไหลซึมน้อยมากหรือยังไม่

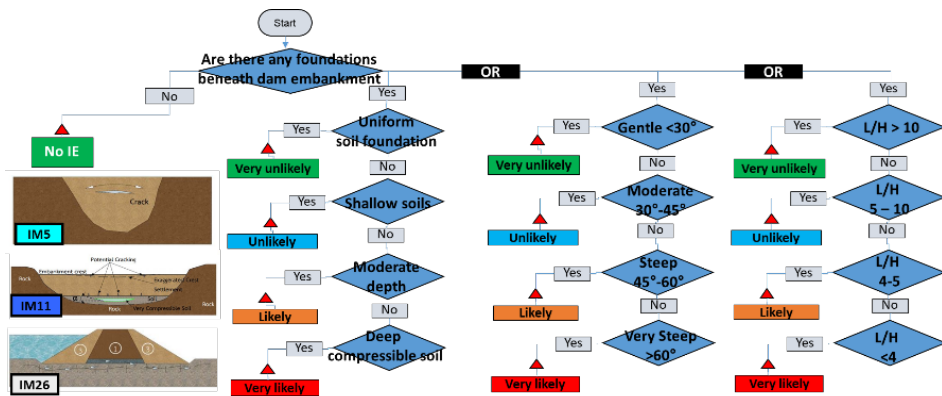
พบหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่ามีตำหนิ (Flaw) 3) Unlikely; โอกาสเกิดการไหลซึมและอาจเริ่มพบหลักฐานที่นำไปสู่การเกิดตำหนิได้ 4) Likely; โอกาสเกิดการไหลซึมมากและมีหลักฐานบ่งชี้ว่ามีตำหนิที่ชัดเจนในตัวเขื่อนหรือฐานราก ไปจนถึงระดับ 5) Very Likely; เป็นไปได้มากที่จะเกิดการไหลซึม โดยพบตำหนิที่ต้องดำเนินการแก้ไขในทันที ระดับการประเมินเทียบเป็นความน่าจะเป็นจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญดังตารางที่ 4 โดยจากองค์ความรู้ที่รวบรวมร่วมกับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ สรุปข้อมูลที่ใช้ประเมินได้ 4 กลุ่มที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 5 ได้แก่ ข้อมูลฐานราก ข้อมูลกายภาพเขื่อน ข้อมูลคุณสมบัติดินฐานราก และข้อมูลลาดระดับน้ำข้อมูลเหล่านี้จะไปสร้างฐานความรู้ประเมินการไหลซึมด้วยแผนผังเหตุการณ์ ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ผลสุดท้ายระบบจะเลือกจากปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่เกิดการไหลซึมมากที่สุด (Worse Case) เป็นคำตอบของระบบ

ตารางที่ 4 ความเห็นของระบบผู้เชี่ยวชาญ

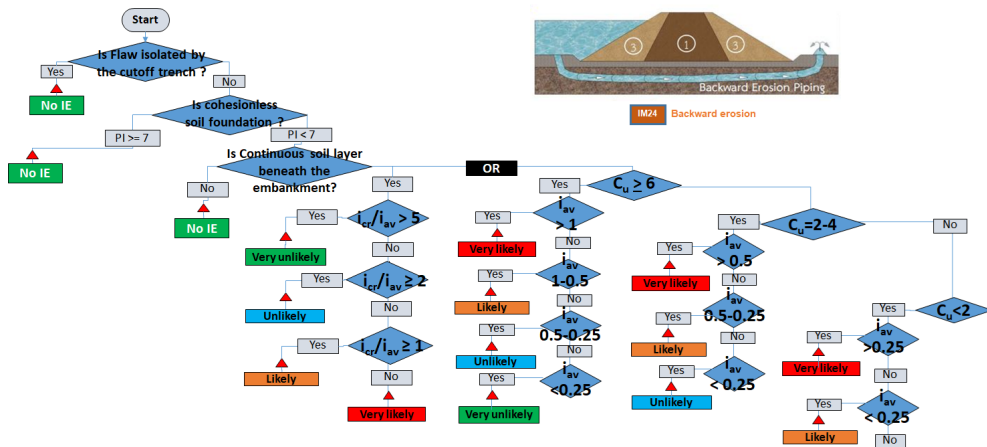
คำนิยาม	ความน่าจะเป็น
Very Unlikely	0.009
Unlikely	0.09
Likely	0.9
Very Unlikely	1

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของระบบวินิจฉัยกับข้อมูลเขื่อนจริงในอดีต

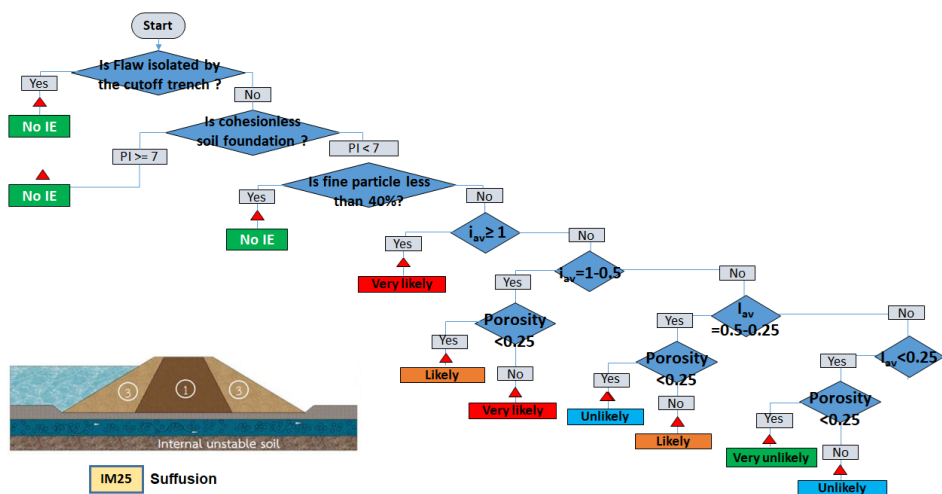
ความถูกต้องจะถูกทดสอบโดยพิจารณาจากสถานการณ์หรือข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง โดยนำเงื่อนไขต่างๆ ในระบบมาทดสอบ และเปรียบเทียบความสอดคล้องกับสิ่งที่ตรวจพบในอดีต โดยใช้กรณีเขื่อนมรสว เขื่อนแม่จิด และเขื่อนมูลบน (ก่อนและหลังปรับปรุงแก้ไข) ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการวินิจฉัยในระบบ และการพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลผลทดสอบของระบบกับข้อเท็จจริงเขื่อน แสดงดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7 พบว่า เงื่อนไขและคำตอบของระบบสอดคล้องกับข้อมูลการพิบัติหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในอดีต



รูปที่ 3 แผนผังการประเมินการไหลซึม IM 5, IM 11 และ IM 26



(ก) IM 24 การประเมินการกัดเซาะย้อนกลับ (Backward Erosion)



(ข) IM 25 การประเมิน Suffusion

รูปที่ 4 แผนผังการประเมินการไหลซึมผ่านในชั้นทราย



ตารางที่ 5 การเตรียมข้อมูลเพื่อทดสอบระบบการประเมิน

ลำดับ	คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง	เชื่อม มรสวบ	เชื่อม แม้งัด	เชื่อม มูลบน ก่อน ปรับปรุง	เชื่อม มูลบน หลัง ปรับปรุง
ข้อมูลฐานราก					
1	การปรับปรุงฐานราก	ไม่มีการปรับปรุง	มีการปรับปรุง	ไม่มีการปรับปรุง	มีการปรับปรุง
2	ประเภทฐานราก	ดินเหนียวแทรกด้วยชั้นทราย	ดินลูกรัง	เชื่อมวางอยู่ชั้นตะกอนทรายแทรกในชั้นดินเหนียว	
3	ความต่อเนื่องของชั้นดินฐานราก	ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง	ไม่ต่อเนื่อง
ข้อมูลกายภาพเชื่อม					
1	มุมความลาดชันฐานยื่นเชื่อม	30-45°	30-45°	30-45°	30-45°
2	ความสูงเชื่อม	12	12	32.7	32.7
ข้อมูลคุณสมบัติดินฐานราก					
1	ดัชนีความเหนียว	NP	21	<7	10
2	สัมประสิทธิ์รูปร่างเม็ดดิน	3-5	No	2.1-2.5	2.1-2.5
3	ความพรุนของดิน	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
ข้อมูลความลาดชันระดับน้ำ					
1	โอกาสเกิด Boiling (FS of Boiling, i_c/i_{ov})	ไม่มีข้อมูล	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
2	ค่าเฉลี่ยความลาดชันระดับน้ำ (i_{av})	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ

ตารางที่ 6 ผลการวินิจฉัย

รูปแบบการไหลซึม	เชื่อมมรสวบ	เชื่อมแม้งัด	เชื่อมมูลบน (ก่อนปรับปรุง)	เชื่อมมูลบน (หลังปรับปรุง)
การไหลซึมผ่านบริเวณที่การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (IM 5, 11)	Unlikely	Unlikely	Unlikely	Unlikely
การกัดเซาะย้อนกลับ (IM 24)	Very Likely	No IE	Very Likely	No IE
การไหลซึมจากการเกิด Suffusion (IM 25)	No IE	No IE	No IE	No IE
การไหลซึมจาก Concentrated Leak (IM 26)	Unlikely	No IE	Unlikely	No IE

หมายเหตุ: No IE= No internal erosion

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของฐานความรู้การประเมินกับข้อมูลเชื่อมดิน

เชื่อม	ผลลัพธ์ของระบบ	ข้อเท็จจริง (Facts)
เชื่อมมรสวบ	เป็นไปได้มากที่สุดที่จะเกิดการไหลซึม (Very Likely) จาก Backward Erosion	พ.ศ. 2555 พบการยุบตัวของสันเชื่อมบริเวณไหลถนนด้านท้ายน้ำที่ติดกับอาคารระบายน้ำล้นเดิม โดยพบรูโพรงใต้รางอาคารระบายน้ำล้นและพบการยุบตัวของดินบดอัดใต้ถนนบนสันเชื่อม และต่อมา พ.ศ. 2559 พบน้ำรั่วซึมบริเวณแนวอาคารระบายน้ำล้นเดิมอีกครั้ง ซึ่งเป็นหลักฐานของการเกิด Backward Erosion จนเกิดเป็นโพรงใต้ฐานกำแพง [6]
เชื่อมแม้งัด	ไม่เกิดการไหลซึม (No Internal Erosion)	ผลการตรวจวัดพฤติกรรมเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ปกติ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าสภาพเชื่อมในปัจจุบันมีความปลอดภัย [34]
เชื่อมมูลบน (ก่อนปรับปรุง)	เป็นไปได้มากที่สุดที่จะเกิดการไหลซึม (Very likely) จาก Backward Erosion	พ.ศ. 2533 เกิดพิบัติในลักษณะ Backward Erosion โดยพบการรั่วซึมท้ายน้ำ จากการเพิ่มของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว เกิดการกัดย่อนจนเกิดน้ำวนด้านเหนือน้ำ ซึ่งจุดรั่วซึมเป็นลำน้ำเดิม ที่ตั้งร้างจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นทางไหล ทำให้มีชั้นทรายหยาบตกตะกอนอยู่ เป็นเส้นทางให้น้ำไหลใต้ฐานรากได้สะดวก [5]
เชื่อมมูลบน (หลังปรับปรุง)	ไม่เกิดการไหลซึม (No Internal Erosion)	ได้ซ่อมแซมและแก้ไขปรับปรุงเชื่อมมูลบนด้วยการทำกำแพงทับน้ำที่สันเชื่อมเพื่อปิดกั้นการไหลซึม หลังจากแก้ไขปรับปรุงถึงปัจจุบันเชื่อมยังคงมีความมั่นคงและปลอดภัย [5]

4. อภิปรายผลและสรุป

ฐานความรู้การประเมินการไหลซึมและการกัดเซาะ ได้ถูกจัดทำขึ้นบนพื้นฐานที่องค์ความรู้ถูกรวบรวมจาก เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้ดำเนินงานต่อเนื่อง ตั้งแต่ ปี 1999 ถึงปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลได้ถูกสังเคราะห์อย่างเพียง พอร์ระดับหนึ่งแล้ว การประเมินความเสี่ยงของการไหลซึม ในระดับ SQRA หรือ QRA ใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง และประเมิน Fully event tree โดยต้องมีการวิเคราะห์ แบบจำลองร่วมด้วย สำหรับสถานภาพของข้อมูลเชื่อมโยง ในประเทศไทยวิถีปฏิบัติที่สามารถทำได้ คือ การสร้าง ฐานความรู้จากการเรียบเรียงองค์ความรู้การประเมินใน ระดับการกรอง (Screening Level) ใช้ข้อมูลพื้นฐาน 4 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลฐานราก ข้อมูลกายภาพ เชื้อน ข้อมูลคุณสมบัติดินฐานราก ข้อมูลความลาดชัน ระดับน้ำ เรียบเรียงเป็นแผนภูมิของการวินิจฉัยในรูปแบบ ของกฎ

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลพิบัติหรือข้อมูลจริงขึ้นในอดีต กับแผนภูมิของการวินิจฉัย โดยนำข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ ของ เชื้อนมวลดิบ เชื้อนแม่จืด และเชื้อนมวลบน พบว่า การวินิจฉัย สอดคล้องกับรูปแบบการพิบัติในอดีต จึงเป็นฐานความรู้ที่ให้ผู้ใช้งานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบความผิดปกติของการประเมินการไหลซึม โดยเฉพาะกรณีที่เกิดจากการทรุดตัว ไม่เท่ากัน และการไหลซึมผ่านในชั้นทรายได้ ช่วยวินิจฉัยใน การคัดกรองเชื้อนที่อาจไม่ปลอดภัยเพื่อการปรับปรุงแก้ไข และหาสาเหตุของปัญหาเบื้องต้นที่เกิดขึ้นในเชื้อนได้อย่าง รวดเร็วและทันเวลาโดยไม่ต้องมาทำการวิเคราะห์ใหม่เมื่อ เกิดเหตุการณ์ในเชื้อนนั้นๆ นอกจากนั้นยังสามารถนำความรู้ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมาประเมินระดับความปลอดภัย ของเชื้อนอื่นๆ เพื่อการวางแผนในการบำรุงรักษาเชื้อนอย่าง เป็นระบบต่อไป

ฐานความรู้การไหลซึมนี้ยังเป็นเพียงการระบุ เหตุการณ์ตั้งต้นเท่านั้น การพัฒนาหาความเสี่ยงทั้งหมด ต้องให้ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นสู่การพิบัติ รวมถึง ครอบคลุมรูปแบบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งต้องอาศัย การสร้างฐานข้อมูลเชื้อนควบคู่ไปกับการสร้างฐานความรู้

และในอนาคตควรจัดทำเป็นโปรแกรมหรือระบบผู้เชี่ยวชาญ อย่างเต็มรูปแบบ เพื่อเป็นตัวแทนความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ ถ่ายทอดสู่องค์กรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง นำไปใช้งานประโยชน์ สูงสุดต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ อนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลการศึกษาและวิจัย ขอขอบคุณ กรมชลประทานและศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ อนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลการศึกษาและทดสอบระบบ และขอบคุณศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อ ความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้โอกาสในการร่วมงาน เป็นผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Engineering News-Record, "Failure of dam in Wales due to washout under foundation," vol. 96, no 1, pp. 12-13, January 1926.
- [2] USCOLD, "Lessons from Dam Incidents," ASCE, New York, 1975.
- [3] S. Soralump and W. Mairaing, "Failure of dam," presented at Failure of Dam safety training project, Bangkok, Sep. 20-21, 2007 (in Thai).
- [4] RID, "Report of visual inspection and soil mechanics analysis of seepage area on MUNBON dam," Royal Irrigation Department, Dusit District, Bangkok, 1975 (in Thai).
- [5] Kasetsart University, "Remediation and improving of MUNBON dam project," Royal Irrigation Department, Dusit District, Bangkok, 1997 (in Thai).
- [6] GERD, "Analysis report and remediation of morasuab dam project," Geotechnical Engineering



- Research and Development Center, Kasetsart University, Bang Khen District, Bangkok, 2017 (in Thai).
- [7] R. Fell, M. Foster, J. Cyganiewicz, G. Sills, N. Vroman, and R. Davidson. (2009, April). Risk Analysis for Dam Safety: A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal erosion and Piping. The university of new south wales, Australia. [Online]. Available: <http://www.civeng.unsw.edu.au>
- [8] ICOLD. (2017, February). Bulletin 164 Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations. International Commission on Large Dams. Paris. [Online]. Available: <http://www.icold-cigb.org>.
- [9] FERC. (2016, November). Risk Informed Decision Making. Federal Energy Regulatory Commission, France. [Online]. Available: <http://www.FonCSI.org>.
- [10] C. Curt, L. Peyras, D. Boissier, “A knowledge formalisation and integration-based method for the assessment of dam performance,” *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 171–183, 2008
- [11] C. Curt, A. Talon และ G. Mauris “Using physical measurements, sensory evaluations and expert judgments in a dam assessment support system,” in *Proceedings 2th Imeko Joint Symposium on Man Science & Measurement*, 2011, pp. 239–245.
- [12] B. M. Franck and T. Krauthammer, “An expert system for field inspection of concrete dams,” *Engineering with Computers*, vol. 5, pp. 23–38, 2008.
- [13] C. Song-An, C. Cheng-Chung, T. J. WANG, and C. Kuo-Ching, “A knowledge-based system for dam safety assessment in Taiwan,” in *Proceedings 2nd Worldwide ECCE Symposium on ICT in the Practice of Building and Civil Engineering*, 2001.
- [14] M. E. Emiroglu, A. Tuna, and A. Arslan, “Development of an expert system for selection of dam type on alluvium foundations,” *Engineering with Computers*, vol. 18, no. 1, pp. 24–37, 2002.
- [15] Z. Wen, Z. Wu, and H. Su, “Safety monitoring system of dam based on bionics Computer Science,” in *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004.
- [16] H. Su, Z. Wen, and Z. Wu, “Study on an intelligent inference engine in Early-warning system of dam health,” *Water Resources Management*, vol. 25, no. 6, pp. 1545–1563, 2011.
- [17] C. Curt and R. Gervais. “Approach to improving the quality of data used to analyse dams Illustrations by two methods,” *Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 87–105, 2014.
- [18] M. L. Filho, Diego A. F. Balbi, A. E. Toscano, P. S. F. Barbosa, R. M. Salgado, Luiz F. V. Vianna, and M. N. Barreto, “Expert system for dam assessment and emergency detection,” presented at the 6th International conference on flood management, Brazil, September 2014.
- [19] W. Mairiang, “Dam safety and maintenance by using Condition Indexing of training project,” Kasetsart University, Bang Khen District, Bangkok, 2007 (in Thai).



- [20] GERD, "Completion report of the safety criteria for geotechnical instruments on the internal erosion in embankment dams," Geotechnical Engineering Research and Development Center, Bang Khen District, Bangkok, 2007 (in Thai).
- [21] D. Wattanadilokkul, "EGAT's current dam safety development," presented at Electricity Generating Authority of Thailand, Bangkok, 2016 (in Thai).
- [22] M. Maniam, "Critical seepage gradients beneath embankment dams," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, School of Civil and Environmental Engineering. The University of New South Wales, Sydney, New South Wales 2004.
- [23] C. F. Wan and R. Fell, "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 373–380, 2004.
- [24] C. Wan and R. Fell, "Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 295–303, 2004.
- [25] L. M. Zhang, "Effects of abutment slopes on the performance of high rockfill dams," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 489–497, 2011.
- [26] J. L. Sherard, R. J. Woodward, S. F. Gizienski, and W. A. Clevenger, *Earth and Earth Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction*, 1st ed., John Wiley and Sons, 1963.
- [27] J. L. Sherard, *Embankment Dam Cracking. Embankment-Dam Engineering*, 1st ed., John Wiley and Sons, 1973, pp. 271–353.
- [28] Y. A. H. Dallo, "Discussion of Influence of particle-size distribution homogeneity on shearing of soils subjected to internal erosion," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 57, no. 11, 2021.
- [29] S. Li and David M. Wood, "Influence of particle-size distribution homogeneity on shearing of soils subjected to internal erosion" *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 57, no. 1, pp. 1684–1694, 2020.
- [30] *Theoretical Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., Wiley, 1948.
- [31] H. Rönqvist and P. Viklander, "On the Kenney-lau approach to internal stability evaluation of soils," *Geomaterials Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 129–140, 2014.
- [32] C. F. Wan and R. Fell, "Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 3, pp. 401–407, 2008.
- [33] J. H. Schmertmann, "The non-filter factor of safety against piping through sands," in *Geo-Congress 1998*, Boston, 1998.
- [34] GERD, "Final Report of Safety Criteria for Geotechnical Instruments on Mae Ngud Dams," Geotechnical Engineering Research and Development Center, Bang Khen District, Bangkok, 2020 (in Thai).