



เกณฑ์ความปลอดภัยสำหรับเครื่องมือวัดพฤติกรรมในเขื่อนดินถม

ต่อการพิบัติเนื่องจากการกัดเซาะภายใน

The Safety Criteria for Geotechnical Instruments

on the Internal Erosion in Embankment Dams

ชิโนรส ทองธรรมชาติ^{1*} และ ดนัย วัฒนาดิลลกุล²

¹ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ
²กองความปลอดภัยเขื่อนฝายบำรุงรักษาโยธาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จ.นนทบุรี

บทคัดย่อ

กลไกของการพิบัติของเขื่อนดินถมเนื่องจากการกัดเซาะภายในได้ถูกศึกษามาอย่างต่อเนื่องในทศวรรษที่ผ่านมา โดยทบทวนข้อมูลทั้งจากประวัติการพิบัติของเขื่อน ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และทฤษฎีการไหลซึมที่พัฒนาไปอย่างมาก ในปี ค.ศ. 2013 ICOLD ได้เสนอ Bulletin ที่สรุปกระบวนการพฤติกรรมกัดเซาะภายในเขื่อนดินถม อันประกอบด้วย การเริ่มต้น การต่อเนื่อง การขยายตัว จนกระทั่งนำไปสู่การพิบัติไว้อย่างน่าสนใจ การศึกษานี้ได้นำกระบวนการเกิดการกัดเซาะภายในมาประยุกต์ใช้กับการแปลผลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ติดตั้งไว้ เพื่อระบุความปลอดภัยของเขื่อนดินถม และจัดทำเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนขึ้น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับปกติ ระดับเฝ้าระวัง และระดับแจ้งเตือน เพื่อใช้อธิบายสถานะความปลอดภัยของเขื่อนตามกระบวนการกัดเซาะภายในที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: การกัดเซาะภายใน, เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อน, เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน

Abstract

Mechanism of failure due to internal erosion in embankment dams has been continuously studied for the last decade. The lesson learned cases, the laboratory testing and the analytical method were reviewed. In 2013, ICOLD launched the bulletin which concludes the process of the internal erosion in the embankment dams. The internal erosion process ICOLD mentioned consists of initiation, continuation, progression and breach formation. This study presents the manner of introducing the

internal erosion process for the dam interpretation by geotechnical instruments in order to evaluate the safety of embankment dam. Three levels of safety criteria, namely normal, alert and alarm are established to indicate the safety status of the dam based on the seepage behavior of the dam.

Keywords: internal erosion, dam safety criteria, dam instruments

1. คำนำ

ในอดีตที่ผ่านมา หน่วยงานที่ดูแลความมั่นคงปลอดภัยเขื่อนของไทย ทั้งราชการและรัฐวิสาหกิจ มีความพยายามในการกำหนดเกณฑ์ของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน สำหรับใช้บ่งบอกความผิดปกติของข้อมูลที่ตรวจวัดได้เพื่อนำไปใช้ประเมินความภัยเขื่อน ซึ่งส่วนใหญ่จะกำหนดโดยอ้างอิงจากค่าที่ใช้ออกแบบเขื่อน หรือกำหนดจากค่าที่ได้จากการลาดการณ์ด้วยหลักสถิติจากค่าการตรวจวัดที่ผ่านมาหรืออาจกำหนดจากค่าที่มีผู้วิจัยที่มีชื่อเสียงได้กำหนดไว้เกณฑ์ดังกล่าวมิได้สะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวเขื่อนที่ผิดปกติ แต่เป็นเพียงการบ่งบอกความผิดปกติของค่าที่ตรวจวัดได้ในทางสถิติเท่านั้น

ปัจจุบันศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับกองความปลอดภัยเขื่อน ฝายบำรุงรักษาโยธาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้พัฒนาเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนสำหรับเขื่อนของ กฟผ. โดยใช้กระบวนการพฤติกรรมกัดเซาะภายในเขื่อนดินถมที่ได้รับการวิจัยจนเกิดองค์ความรู้ที่ก้าวหน้าไปอย่างมากในทศวรรษที่ผ่านมา [1] มาประยุกต์ใช้จัดทำเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อน เพื่อใช้อธิบายสถานะความปลอดภัยของเขื่อนตามกระบวนการกัดเซาะภายในที่เกิดขึ้น

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mailaddress: t_chinoros@yahoo.com

2. ทฤษฎี

2.1 การกัดเซาะภายใน (internal erosion)

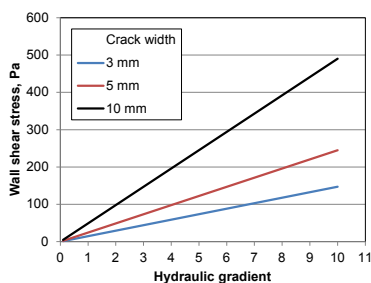
ในปี ค.ศ. 2013 องค์การเขื่อนใหญ่ระหว่างชาติ (International Commission on Large Dams, ICOLD) ได้รวบรวมองค์ความรู้ไว้ใน Bulletin ซึ่งบรรยายถึงกระบวนการเกิดการกัดเซาะภายในเขื่อนวัสดุถม อันประกอบด้วย การเริ่มต้นของการกัดเซาะ (initiation) มีความต่อเนื่องของการกัดเซาะ (continuation) การพัฒนาเป็นเส้นท่อ (progression) และการก่อตัวของ breach opening (breach formation) โดยมีกลไกของการเริ่มต้นของการกัดเซาะภายในตัวเขื่อน เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ concentrated leak, backward erosion, contact erosion และ suffusion [1]

- Concentrated leak เป็นการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำผ่านรอยแตก น้ำที่ไหลผ่านรอยแตกจะทำให้เกิด hydraulic shear stress ขึ้นที่ผนังรอยแตก ผนังของรอยแตกจะเริ่มถูกกัดเซาะได้ หาก critical shear stress ของดินบดอัดซึ่งบ่งชี้ถึงความต้านทานต่อการกัดเซาะของดินบดอัดมีค่าต่ำกว่า hydraulic shear stress โดยทั่วไปดินบดอัดจะมีค่า critical shear stress มากกว่า 150 Pa

ค่า hydraulic shear stress, τ ที่ผ่านรอยแตกประมาณได้จากสมการที่ (1) ที่ ρ_w เป็นความหนาแน่นของไหล W_c เป็นความกว้างของรอยแตก H เป็นศักย์น้ำ L เป็นความยาวของรอยแตก

$$\tau \cong \frac{\rho_w g W_c H}{2L} \quad (1)$$

รอยแตกภายในตัวเขื่อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น คุณภาพของการบดอัดดิน สภาพภูมิประเทศบริเวณที่ตั้งเขื่อน ในรูปที่ 1 จะพบว่าหากรอยแตกมีขนาด 3 มม. จะมี hydraulic shear stress ประมาณ 150 Pa ณ การไหลผ่านรอยแตกที่มี hydraulic gradient ประมาณ 10

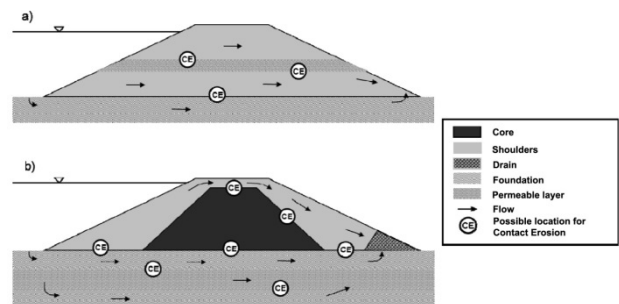


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง hydraulic shear stress ที่เกิดขึ้น ณ ผนังของรอยแตกกับ hydraulic gradient

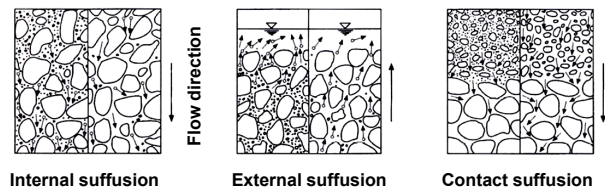
- Backward erosion เกิดขึ้นได้กับดินบดอัดหรือดินฐานรากที่มีค่า plastic index น้อยกว่า 7 เมื่อปรากฏ exit point ขึ้นในมวลดิน ความดันน้ำจากการไหลบริเวณจุดทางออกที่ทำให้ effective stress ภายในมวลดินในบริเวณนั้นเป็นศูนย์ยอมทำให้เม็ดดินเริ่มถูกพัดพาออกไปผลจากการเกิด backward erosion ในทางทฤษฎียอมทำให้มวลดินบริเวณใกล้แนวกัดเซาะมีความดันน้ำลดลง

ทั้งนี้ยังไม่ปรากฏรายงานที่ระบุพฤติกรรมการไหลซึมที่ตรวจวัดจากเครื่องมือวัดว่าเป็นเช่นนี้หรือไม่

- Contact erosion เป็นการกัดเซาะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชั้นของวัสดุ หากชั้นวัสดุที่มีช่องว่างขนาดใหญ่กว่าที่จะเป็นชั้นกรองสำหรับชั้นวัสดุที่เม็ดดินเล็กจะเกิดการพัดพาเม็ดดินนั้น รูปที่ 2 แสดงเส้นทางการไหลซึมที่สามารถเกิด contact erosion
- Suffusion เป็นการกัดเซาะในระยะยาวที่มักเกิดในดินถมที่เป็นเม็ด (granular material) ได้แก่ filter material หรือดินฐานรากจำพวกดินเม็ดหยาบ มีขนาดละเอียดไม่ดี ดินเม็ดขนาดใหญ่ที่มีก่อให้เกิดโครงข่ายของช่องว่างที่ไม่เป็นตัวกรองของดินเม็ดขนาดเล็กกว่า ทำให้เม็ดดินขนาดเล็กสามารถถูกพัดพาออกไปได้ รูปที่ 3 แสดงลักษณะของดินที่สามารถถูกกัดเซาะได้ด้วยกลไกนี้



รูปที่ 2 เส้นทางการไหลที่ก่อให้เกิด contact erosion



รูปที่ 3 ลักษณะการเกิด suffusion [2]

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัดพฤติกรรมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถตรวจสอบการกัดเซาะภายในได้เพียง concentrate leak และ backward erosion ขณะที่กลไกแบบ suffusion และ contact erosion ยังจำเป็นต้องอาศัยงานวิจัยเพื่อหาวิธีการตรวจวัดพฤติกรรมที่เหมาะสมในโครงการนี้จึงไม่พิจารณาให้ระบบสามารถติดตามพฤติกรรมกลไกสองแบบหลังนี้ได้

การกัดเซาะอาจหยุดหรือเกิดขึ้นต่อได้ (continuation) หลังจากการกัดเซาะได้เริ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับการทำงานของกรอง หากขนาดของช่องว่างภายในชั้นกรองเล็กพอที่จะดักเม็ดดิน (base soil) ที่ถูกพัดพาได้ การการกัดเซาะก็จะหยุดลง (no erosion) ในทางตรงกันข้าม ชั้นกรองที่ออกแบบไม่ดียอมไม่ทำให้การกัดเซาะหยุดได้ การกัดเซาะคงดำเนินต่อไปในระดับต่างๆ ขึ้นกับประสิทธิภาพของการกรอง ดังตัวอย่างกรณีการบกร่องของชั้นกรองในระดับต่างๆ ดังนี้

No erosion – ชั้นกรองหยุดการกัดเซาะได้

Some erosion – ชั้นกรองหยุดการกัดเซาะได้หลังจากการเซาะไปแล้ว โดยอาจมีอัตราการไหลซึมเพิ่มขึ้น (อาจสูงไปถึง 100 ลิตร/วินาที)

Excessive erosion – ชั้นกรองหุยกการกัดเซาะได้ แต่หลังจากเกิดการกัดเซาะไปมากแล้ว อัตราการไหลซึมที่ตรวจวัดได้อาจสูงกว่า 100 ถึง 1000 ลิตร/วินาที

Continuing erosion – ชั้นกรองมีเม็ดดินหยาบเกินไปจนไม่สามารถหยุดการกัดเซาะได้ อาจมีการไหลซึมด้วยอัตราที่สูงกว่า 1000 ลิตร/วินาที และอัตราการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าตัวชี้วัดที่สำคัญของ continuation นี้คืออัตราการไหลซึมที่จะเพิ่มขึ้น และระดับความชุ่มชื้นของน้ำที่รั่วซึมออกมา หากมีความชุ่มชื้นมากย่อมแสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคเม็ดดินถูกกัดเซาะออกมามากนั่นเอง ในสนามจึงควรมีการตรวจสอบพื้นที่เป็ยกด้านท้ายเขื่อนและความชุ่มชื้นของน้ำที่ไหลซึมหรือรั่วซึม

สำหรับกระบวนการกัดเซาะชั้น progression และ breach formation ไม่ได้นำเสนอในบทความนี้ เนื่องจากโครงการนี้กำหนดให้เกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้เตือนสถานะความปลอดภัยก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการ progression ซึ่งอันตรายและยากแก่การแก้ไขซ่อมแซม

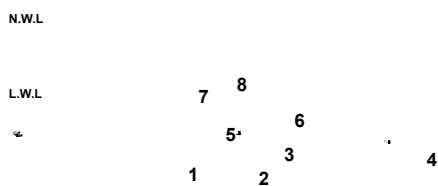
2.2 เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนและข้อจำกัด

เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้ขอกกล่าวถึงเฉพาะเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะภายในเท่านั้น ได้แก่ พิโซมิเตอร์ และฝ่ายวัดอัตราการไหลซึม

2.2.1 พิโซมิเตอร์

ความดันน้ำในตัวเขื่อน ซึ่งสามารถคำนวณเป็น ศักย์น้ำ (piezometric head) ได้นั้นถูกตรวจวัดได้ด้วยพิโซมิเตอร์ ณ แต่ละชั้นตอนของกระบวนการการกัดเซาะ ความดันน้ำอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับกลไกของการกัดเซาะภายใน ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถตรวจวัดพฤติกรรมการกัดเซาะภายใน ได้จึงต้องอาศัยกรณีศึกษาและผลการวิเคราะห์การไหลซึมของเขื่อนนั้นๆ

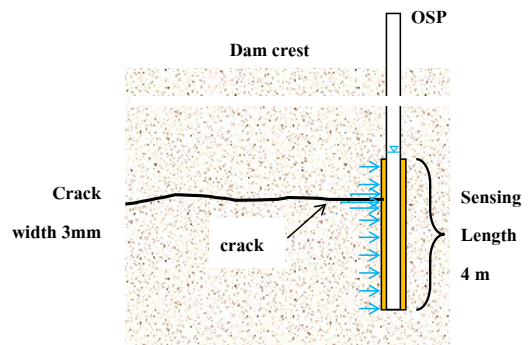
ตัวอย่างหน้าตัดสำหรับการติดตั้งพิโซมิเตอร์แสดงในรูปที่ 4 ที่แม้ว่าตำแหน่งที่กำหนดขึ้นจะครอบคลุมเส้นทางการไหลซึมทั้งการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน และการไหลซึมจากตัวเขื่อนสู่ฐานรากแล้วก็ตาม แต่เส้นทางการไหลซึมที่เกิดขึ้นจริงอาจไม่ผ่านหน้าตัดที่ติดตั้งพิโซมิเตอร์ไว้ หรืออาจผ่านได้เพียงบางตำแหน่งที่ติดตั้งพิโซมิเตอร์ จึงเป็นไปได้ที่เครื่องมือที่ติดตั้งไว้จะไม่สามารถตรวจพบการไหลซึมได้ การตรวจสอบภาพเขื่อนในสนามจึงเป็นมาตรการหนึ่งที่ทดแทนจำนวนเครื่องมือที่จำกัดได้



รูปที่ 4 ตัวอย่างหน้าตัดสำหรับการติดตั้งพิโซมิเตอร์

การไหลซึมในชั้นเริ่มต้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับขนาดที่เล็กมาก เครื่องมือที่ติดตั้งเพื่อตรวจวัดการไหลซึม ได้แก่ พิโซมิเตอร์จะไม่สามารถตรวจวัดพฤติกรรมในระดับขนาดที่เล็กมากได้ พิโซมิเตอร์จะตรวจวัดพฤติกรรมในภาพรวมหรือมีขนาดใหญ่มกกว่านั้นมาก ดังตัวอย่างของการเกิด concentrated leak ในชั้นดินถมเขื่อน เริ่มจากรอยแตกภายในเนื้อดินเหนียวแกนเขื่อนอาจมีขนาดเล็กประมาณ 3 มม. ขณะที่ระยะการตรวจวัด (sensing length) ของ open standpipe piezometer จะยาวถึง 4 เมตร ดังรูปที่ 5 นั่นคือความดันน้ำที่ตรวจวัดจากพิโซมิเตอร์จะเป็นความดันน้ำเฉลี่ยตลอดระยะการตรวจวัด จึงเป็นไปได้ที่พิโซมิเตอร์นี้จะใช้ตรวจวัดความดันน้ำในรอยแตกที่เริ่มเกิด concentrated leak ได้ หากรอยแตกขยายออกจากการกัดเซาะภายในและขยายเป็นโพรงที่ใหญ่ขึ้น ความดันน้ำที่ตรวจวัดได้จากพิโซมิเตอร์ย่อมสูงจากเดิม

นอกจากนี้เครื่องมือวัดความดันน้ำที่มีผลอยู่ในปัจจุบันนี้ มีขนาดใหญ่ไม่สามารถวัดพฤติกรรมการกัดเซาะเริ่มต้นที่เกิดขึ้นในรอยแตกได้ หรือในทางปฏิบัติการติดตั้งให้เครื่องมือวัดอยู่ตรงกับรอยแตกจึงเป็นไปได้ ดังนั้นเกณฑ์ระดับเฝ้าระวังจึงไม่สามารถที่นำ critical shear stress ที่รอยแตกมาใช้เป็นเงื่อนไข นอกจากนี้ค่า critical shear stress จะได้จาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งไม่ได้ดำเนินการไว้ก่อนโครงการนี้ เกณฑ์ระดับเฝ้าระวังจึงควรพิจารณาเป็นพฤติกรรมแทนการใช้ค่า critical shear stress ดังนั้นหากเกิด concentrated leak บริเวณแกนดินเหนียว จะตรวจสอบ initiation ได้จากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำหรือความดันน้ำในบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 5 ความดันน้ำที่ตรวจวัดได้จาก open standpipe piezometer ที่ติดตั้งในแกนดินเหนียว

สำหรับ backward erosion ในตัวเขื่อนต้องติดตั้งเครื่องมือวัด ณ บริเวณรอยต่อระหว่างแกนดินเหนียวและชั้นกรอง ที่คาดว่าจะเกิดการเคลื่อนตัวจนทำให้เกิด exit point ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะคาดการณ์ได้ ดังนั้นพิโซมิเตอร์ที่ติดตั้งในแกนดินเหนียวที่ตรวจวัดพฤติกรรมในระดับใหญ่ จะไม่สามารถตรวจวัดได้ในทันทีที่ backward erosion เริ่มต้นขึ้น แต่จะเป็นการตรวจวัดเมื่อการกัดเซาะนี้ได้ถูกลามขยายตัวจนทำให้ความดันน้ำลดลงจนในบริเวณนั้นมีความดันเท่ากับพื้นที่ด้านท้ายน้ำ

2.2.2 ฝ่ายวัดอัตราการไหล

สำหรับพฤติกรรมการกัดเซาะต่อเนื่อง (continuation) สามารถถูกตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ ที่เชื่อมั่นได้ว่าสามารถ

รับน้ำที่ไหลซึมผ่านมาได้เกือบทั้งหมด กล่าวคือปริมาณน้ำไหลซึมที่ตรวจวัดต้องสามารถสะท้อนหรือเป็นตัวแทนของการไหลซึมที่เกิดขึ้น รวมทั้งสามารถแยกแยะหรือประเมินได้ว่ามีพื้นที่รับน้ำเข้าสู่เครื่องมือวัดนั้นได้ สิ่งที่เป็นข้อจำกัดของการตรวจวัดอัตราการไหลซึมคือ ฝ่ายวัดอัตราการไหลที่ติดตั้งจะไม่สามารถรับน้ำที่ไหลซึมได้ทั้งหมด โดยทั่วไปฝ่ายวัดอัตราการไหลของน้ำจะตั้งอยู่ด้านท้ายน้ำของส่วนการระบายน้ำ แต่สำหรับเขื่อนบางแห่ง ฝ่ายวัดอัตราการไหลของน้ำจะไม่ได้รับน้ำโดยตรงจากระบบระบายน้ำ ดังนั้นอัตราการไหลที่ตรวจวัดได้จึงอาจเป็นเพียงบางส่วนและบางตำแหน่งอาจไม่รับน้ำที่ระบายออกจากตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อน

ด้วยข้อจำกัดที่กล่าวมา การติดตามพฤติกรรมเขื่อนจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ การตรวจสอบสภาพเขื่อนทางสายตา (visual inspection) ควรถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันพฤติกรรมของเขื่อนที่ผิดปกติด้วย

2.3 เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อน

ICOLD แนะนำเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนสำหรับการตรวจตราความปลอดภัยเขื่อน (dam surveillance) ควรระบุถึงพฤติกรรมของตัวเขื่อนด้วย [3] โดยกล่าวไว้ระดับที่บ่งชี้พฤติกรรมเขื่อนที่ไม่เป็นปกติ ดังนี้

ระดับเฝ้าระวัง (alert) เมื่อเขื่อนมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปจากพฤติกรรมปกติ ค่าอ่านมีค่าอยู่นอกช่วงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำแล้ว

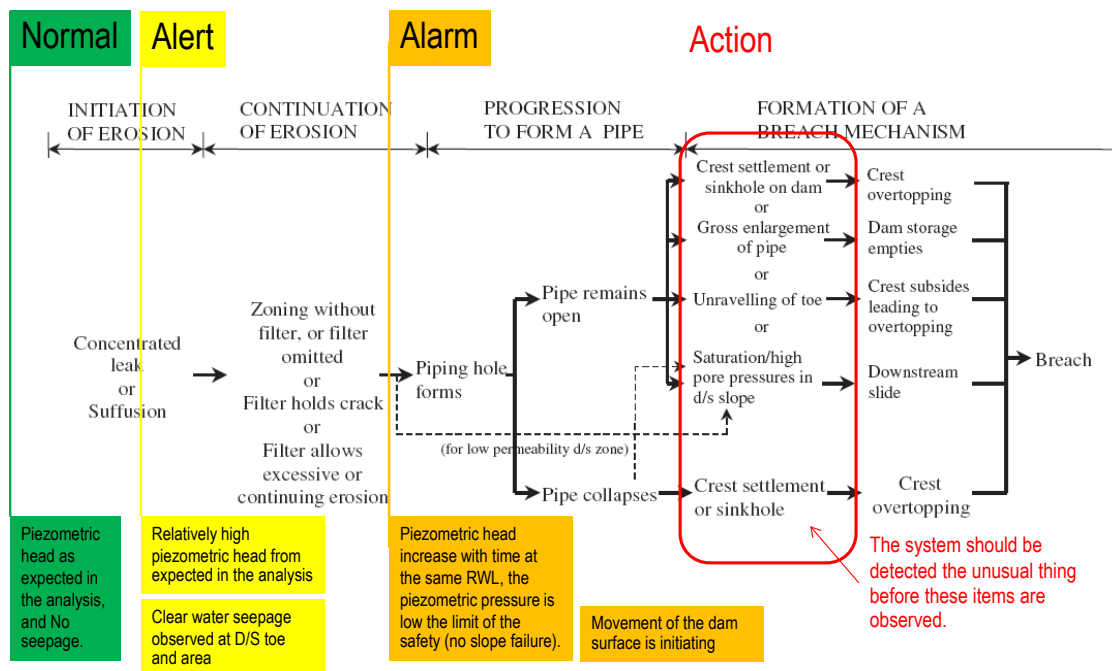
ระดับแจ้งเตือน (alarm) เมื่อเขื่อนมีพฤติกรรมที่ผิดปกติยิ่งขึ้น จนทำให้เขื่อนมีความมั่นคงลดลงแต่ยังคงปลอดภัย เช่น ค่าความดันน้ำในตัวเขื่อนสูงจนทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยจากการเคลื่อนพัง เท่ากับ 1

ดังนั้นเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนที่ระบุจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดและการตรวจสอบสภาพเขื่อนควรจัดทำขึ้น โดยพิจารณาให้สะท้อนพฤติกรรมตามกระบวนการไหลซึมที่เกิดขึ้นตัวอย่างเช่น การกำหนดเกณฑ์ในรูปที่ 6 ที่แสดงเส้นทางการพิบัติเนื่องจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนที่มีกลไกเริ่มต้นจาก concentrated leak และระบุเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนตามพฤติกรรมที่คาดว่าจะตรวจวัดได้เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนที่จัดทำขึ้นนี้ กฟผ. ประสงค์ที่จัดทำสำหรับใช้งานภายในหน่วยงานของกฟผ. เพื่อให้ระบบติดตามความปลอดภัยเขื่อนระยะไกล (dam safety remote monitoring system) ใช้ระบุสถานะของเขื่อนที่ไม่เป็นปกติสาเหตุของความผิดปกตินั้น ซึ่งเจ้าหน้าที่จะนำไปสนับสนุนการตรวจสอบความมั่นคงของเขื่อน เพื่อยืนยันความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การปรับปรุงซ่อมแซมเขื่อน ที่จะเป็นการป้องกันมิให้เกิดเหตุการณ์ที่นำไปสู่การพิบัติของเขื่อน

3. พฤติกรรมที่ได้จากการตรวจวัด

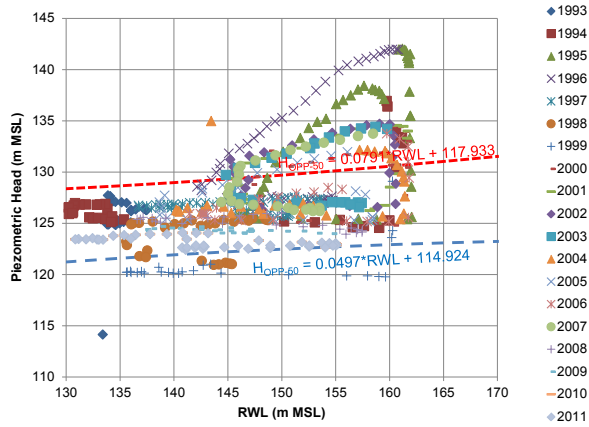
ข้อมูลจากการตรวจวัดศักย์น้ำจากพิโซมิเตอร์และอัตราการไหลซึมจากฝ่ายวัดอัตราการไหล ได้ถูกนำไปศึกษาและสรุปเป็นพฤติกรรมทั่วไปจากการตรวจวัด การศึกษาใช้ cause and effect plot นอกเหนือไปจาก time history plot ที่ดำเนินการอยู่แล้ว โดยพฤติกรรมที่สรุปได้จาก cause and effect plot มีดังนี้

ศักย์น้ำ (piezometric head) มีผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากการวัดระหว่างการอ่านขาขึ้นกับขาลงที่ระดับน้ำเดียวกัน (Hysteresis) มีปัจจัยสำคัญคือเวลาที่ระดับน้ำจะค้างไว้ ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8

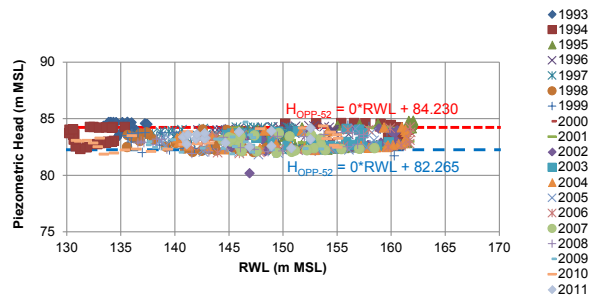


รูปที่ 6 ระดับการแจ้งเตือนเมื่อเขื่อนเกิดการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน

ทั้งนี้ที่ตั้งของพีโซมิเตอร์เป็นอีกปัจจัย ที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์น้ำกับระดับน้ำในอ่างฯ ต่างกัน ในบริเวณฐานยื่นเขื่อน (abutment) ระดับน้ำใต้ดินในบริเวณดังกล่าวสามารถทำให้ศักย์น้ำที่ตรวจวัดได้สูงกว่าระดับน้ำในอ่างฯ ขณะที่บริเวณที่มีการควบคุมการไหลซึม เช่น หลังม่านอัดฉีดน้ำปูน แกนดินเหนียวด้านท้ายน้ำ และ ใกล้เคียงชั้นกรองแนวตั้งหรือแนวราบ ศักย์น้ำจะถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการตรวจวัดทั้งอุปกรณ์และบุคลากร

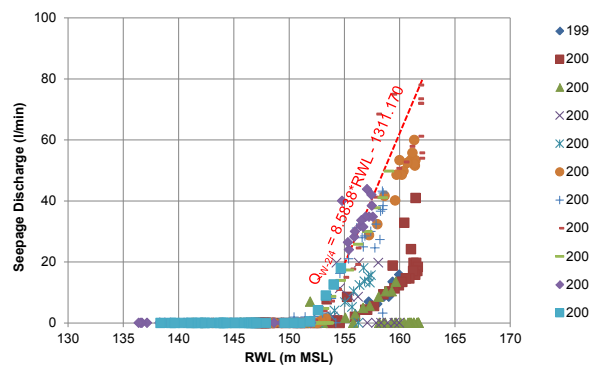


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์น้ำกับระดับน้ำในอ่างฯ บริเวณใกล้ฐานยื่นเขา



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์น้ำกับระดับน้ำในอ่างฯ บริเวณตัวเขื่อน

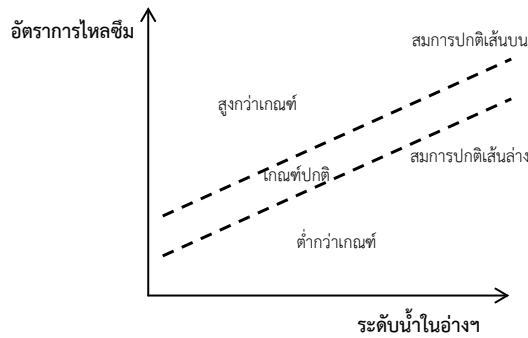
โดยปกติอัตราการไหลซึมจะไม่มีความสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างฯ เพราะกำแพงทึบน้ำหรือม่านอัดฉีดน้ำปูนที่มีประสิทธิภาพจะควบคุมให้อัตราการไหลซึมไม่ขึ้นกับระดับน้ำในอ่างฯ แต่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณน้ำฝน ซึ่งทำให้เกิดการไหลซึมบริเวณเขื่อน อาจทำให้อัตราการไหลซึมแปรปรวนได้ แต่หากเขื่อนไม่มีการปิดกั้น อัตราการไหลซึมอาจมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างฯ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลซึมกับระดับน้ำในอ่างฯ

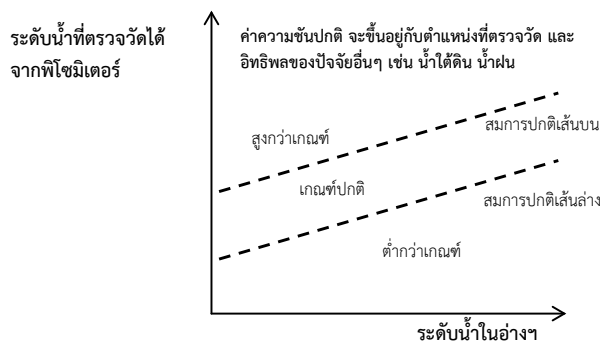
ดังที่กล่าวมาแล้วว่า อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของการกัดเซาะภายในที่ก่อให้เกิดปัญหาหรือไม่ ระบบที่ออกแบบไว้จึงทำการตรวจสอบอัตราการไหลซึมก่อน โดยอัตราการไหลซึมอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ สูงกว่าเกณฑ์ปกติ อยู่ในเกณฑ์ปกติ ต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ ซึ่งอัตราการไหลซึมมักมีค่าสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างฯ จึงอาจแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล กับระดับน้ำในอ่างฯ ได้ดังรูปที่ 10 สมการปกติทั้งเส้นบนและเส้นล่างจะแสดงถึงช่วงค่าอัตราการไหลซึมที่เป็นไปได้ หากไม่มีความผิดปกติในระบบการควบคุมการไหลซึม (ทั้งระบบปิดกั้นและระบบการระบายน้ำ) ซึ่งยังขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อน ได้จากเครื่องมือวัดและจากการอ่านอีกด้วย

พึงระลึกไว้ว่า อัตราการไหลซึมที่ตรวจวัดได้อาจไม่ใช่อัตราการไหลซึมที่แท้จริง เนื่องจากเส้นทางการไหลซึมไม่ผ่านเข้าสู่ฝายวัดอัตราการไหลทั้งหมด และอาจพบว่าอัตราการไหลซึมไม่เพิ่มขึ้นแต่ความดันน้ำเพิ่มสูงขึ้น หรือตรวจพบพื้นที่ชุ่มน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับเครื่องมือชนิดอื่นๆ และการตรวจสอบสภาพในสนามด้วย

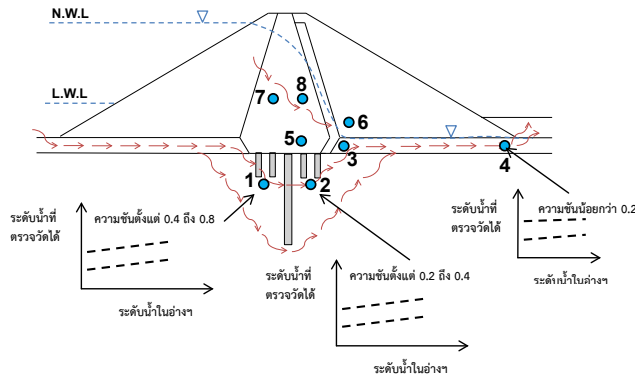


รูปที่ 10 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลซึม

สำหรับพฤติกรรมความดันน้ำที่ตรวจวัดได้จากพิโซมิเตอร์นั้น ในทางปฏิบัติพิโซมิเตอร์อาจไม่สามารถติดตั้งเป็นคู่ได้ หรือในระยะยาวพิโซมิเตอร์หัวใดหัวหนึ่งอาจจะชำรุด ย่อมทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่า hydraulic gradient ได้ จึงได้ปรับให้เกณฑ์ความปลอดภัยขึ้นจากความดันน้ำ ใช้วิธีพิจารณาพฤติกรรมความสูงน้ำจากพิโซมิเตอร์เพียงหัววัดเดียวเปรียบเทียบกับระดับน้ำในอ่างฯ ในทำนองเดียวกันกับอัตราการไหลซึม ช่วงค่าความดันน้ำหรือระดับน้ำที่เป็นปกติจะได้ออกจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ซึ่งแสดงด้วยความสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างฯ กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จากพิโซมิเตอร์ดังรูปที่ 11 โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำจากพิโซมิเตอร์กับระดับน้ำในอ่างฯ ควรลดลงจากด้านเหนือน้ำไปด้านท้ายน้ำ ดังรูปที่ 12 โดยพิโซมิเตอร์ที่ตรวจวัดระดับน้ำด้านเหนือน้ำของการปิดกั้น เช่น แกนดินเหนียว หรือม่านอัดฉีดน้ำปูน หรือบริเวณฐานรากของฐานยันเขามิมีความชันระหว่างระดับน้ำที่ตรวจวัดได้กับระดับน้ำในอ่างฯควรมีค่าประมาณ 0.4 ถึง 0.8 ซึ่งขึ้นอยู่กับความตึบแน่นของหินฐานรากด้านเหนือน้ำ พิโซมิเตอร์ที่ตรวจวัดระดับน้ำด้านท้ายน้ำของการปิดกั้น มีความชันระหว่างระดับน้ำที่ตรวจวัดได้กับระดับน้ำในอ่างฯควรมีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.4 ซึ่งขึ้นอยู่กับความตึบแน่นของม่านอัดฉีดน้ำปูน และพิโซมิเตอร์ที่ตรวจวัดระดับน้ำด้านท้ายน้ำ มีความชันระหว่างระดับน้ำที่ตรวจวัดได้กับระดับน้ำในอ่างฯควรมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่หากระบบการควบคุมการไหลซึมมีประสิทธิภาพไม่มีความชันนี้จะไม่ใกล้เคียงกับศูนย์



รูปที่ 11 การตรวจสอบอิทธิพลของระดับน้ำในอ่างฯ ต่อระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จากพิโซมิเตอร์



รูปที่ 12 การตรวจสอบอิทธิพลของระดับน้ำในอ่างฯ ต่อระดับน้ำที่ตรวจวัดด้านท้ายน้ำ

4. การจัดทำเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อน

เกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนดแบ่งเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับปกติ ระดับฝ้าระวัง และระดับแจ้งเตือน โดยแต่ละระดับจะสัมพันธ์กับขั้นตอนของกระบวนการพิบัติจากการไหลซึม กล่าวคือ ระดับปกติแสดงว่ายังไม่พบหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่ามี initiation เกิดขึ้น ระดับฝ้าระวังแสดงว่าได้เกิด initiation แต่การกักเซาะอาจจะถูกควบคุมได้หรือไม่ก็ได้ ระดับแจ้งเตือนแสดงว่าได้เกิด continuation หรือการกักเซาะไม่สามารถควบคุมได้ แต่เพราะข้อจำกัดของพีโซมิเตอร์อาจไม่สามารถบ่งชี้ถึง initiation ที่อยู่ในระดับอนุภาคได้ ดังนั้นเกณฑ์ความปลอดภัยที่ใช้ควรระบุเป็นการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเขื่อนที่ตอบสนอง หลังเกิด initiation ไประยะหนึ่งแล้ว โดยที่ initiation สำหรับกลไกแบบ concentrated leak ซึ่งมี critical hydraulic gradient เป็นเงื่อนไข ในทางปฏิบัติไม่สามารถประเมิน hydraulic shear stress ที่รอยแตกได้หากไม่ทราบขนาดของรอยแตก แต่สามารถประมาณได้จากผลกระทบจากการเกิด initiation เช่น ความดันน้ำภายในแกนดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นหลังจากที่การกักเซาะเริ่มเกิดขึ้น นอกจากนี้เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนที่สร้างขึ้น ไม่เพียงระบุความปลอดภัยด้วยเครื่องมือวัดเท่านั้น แต่ยังได้พิจารณาผลการตรวจสอบสภาพในสนามร่วมด้วย เนื่องจากจำนวนเครื่องมือตรวจวัดที่มีจำกัด จึงจำเป็นต้องยืนยันด้วยการตรวจสอบสภาพ

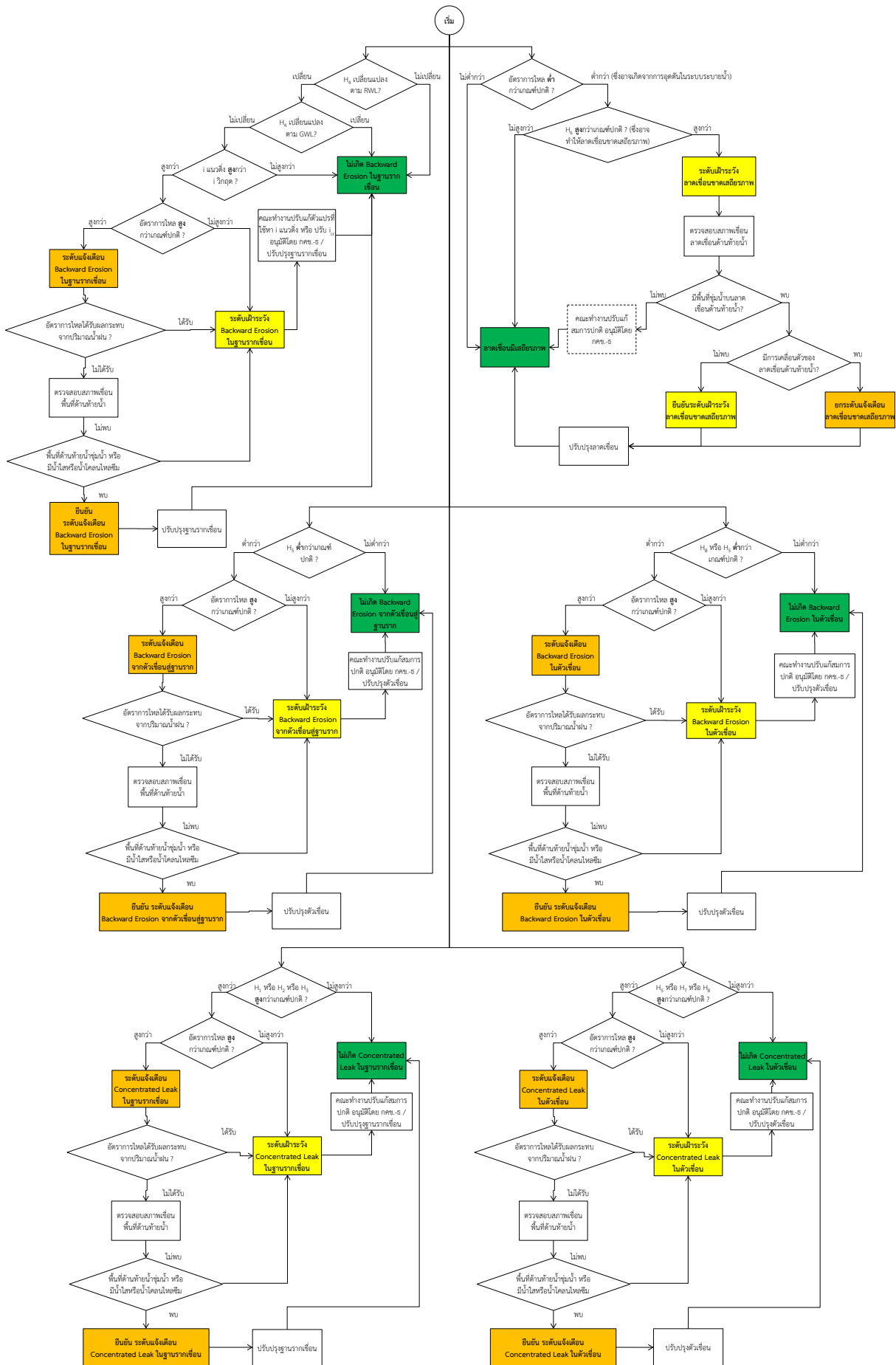
เนื่องจากพฤติกรรมความดันน้ำจากพีโซมิเตอร์ในแต่ละตำแหน่ง พฤติกรรมอัตราการไหล และพฤติกรรมของตัวเขื่อนที่ได้จากการตรวจสอบสภาพเขื่อน ที่แตกต่างกัน ย่อมสามารถระบุถึงรูปแบบการไหลซึมที่เกิดขึ้นได้ หลักการนี้ได้นำไปใช้สร้างระบบเสมือนผู้เชี่ยวชาญเพื่อบ่งชี้เส้นทางการไหลซึมและรูปแบบการไหลซึมที่อาจจะเกิดขึ้นกับเขื่อนได้รูปที่ 13 แสดงผังการวิเคราะห์ปัญหาการไหลซึมของเขื่อนวัสดุถม ระบบจะตรวจสอบความดันน้ำ ณ จุดต่างๆของตัวเขื่อนว่าเกิดการไหลซึมเส้นทางใดและมีกลไกแบบใด โดยอาศัยตำแหน่งของเครื่องมือที่ตรวจพบความผิดปกติระบุเส้นทางของการไหลซึมที่เป็นไปได้ เมื่ออัตราการไหลซึมไม่สูงกว่าเกณฑ์แต่มีความดันน้ำที่ผิดปกติ จะถือว่า เข้าสู่ระดับฝ้าระวัง แต่หากมีอัตราการไหลซึมสูงกว่าเกณฑ์ปกติจะถือว่า เข้าสู่ระดับแจ้งเตือน ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการยืนยันจากการตรวจสอบสภาพเขื่อนบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ

รูปแบบการไหลซึมที่สามารถระบุได้มี 5 รูปแบบ ดังนี้

1. การไหลซึมผ่านตัวเขื่อน จาก concentrated leak โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 5, 7 และ 8 ที่มีศักย์น้ำสูงกว่าเกณฑ์ปกติ
2. การไหลซึมผ่านตัวเขื่อน จาก backward erosion โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 5 และ 8 ที่มีศักย์น้ำต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ
3. การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อนที่มีการปิดกั้น จาก concentrated leak โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 1, 2 และ 3 ที่มีศักย์น้ำสูงกว่าเกณฑ์ปกติ
4. การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน จาก backward erosion โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 4 ที่มีศักย์น้ำจะทำให้ exit gradient สูงกว่าค่าวิกฤต
5. การไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน จาก backward erosion โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 5 ที่มีศักย์น้ำต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ

นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการขาดเสถียรภาพของลาดเขื่อนเนื่องจากความดันน้ำในตัวเขื่อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอุดตันของระบบระบายน้ำ โดยพิจารณาจากพีโซมิเตอร์ตำแหน่ง 6 ที่มีศักย์น้ำต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ

การยกเลิกการแจ้งทั้งระดับฝ้าระวังและระดับแจ้งเตือนจะทำได้หากมีรายงานยืนยันการไม่พบความเสียหายจากการตรวจสอบสภาพเขื่อนหรือมีการแก้ไขให้เขื่อนกลับมาไม่มีพฤติกรรมที่เป็นปกติแล้ว



รูปที่ 13 แผนภูมิเพื่อระบุความปลอดภัยเชื่อมและรูปแบบการไหลซึม

5. สรุปและวิจารณ์

เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนเพื่อติดตามพฤติกรรมการไหลซึม ได้ถูกจัดทำขึ้นบนพื้นฐานการตอบสนองของเขื่อนจากผลของกระบวนการกัดเซาะภายใน ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถระบุรูปแบบของความคิดปกติของการตรวจวัดได้ และช่วยสนับสนุนเจ้าหน้าที่ในการตรวจสอบสภาพเขื่อนเพื่อยืนยันสถานะความปลอดภัยเขื่อนโดยสอดคล้องกับพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้น แต่เกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนนี้ สามารถระบุได้เฉพาะการกัดเซาะภายในที่เริ่มจากกลไกแบบconcentrated leak และแบบbackward erosion เท่านั้น ด้วยข้อจำกัดทางวิชาการและเทคโนโลยีของเครื่องวัดพฤติกรรมเขื่อนในปัจจุบัน

นอกจากนี้ด้วยเทคนิคทางสถิติทำให้สามารถระบุพฤติกรรมของความดันน้ำและอัตราการไหลจากปัจจัยของระดับน้ำในอ่างฯ ที่ถือว่าเป็นพฤติกรรมปกติได้เพื่อทำให้สามารถแยกแยะความแปรปรวนของข้อมูลอันเกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ความปลอดภัยนี้ยังจำเป็นต้องถูกสอบเทียบซึ่งในขณะนี้กฟผ. ได้เริ่มการพัฒนาระบบการตรวจวัดและระบบการประเมินความปลอดภัย ดังนั้นเมื่อกฟผ. ได้ดำเนินการพัฒนาระบบข้างต้นแล้วเสร็จจึงจะสามารถนำผลการตรวจวัดมาสอบเทียบเกณฑ์ความปลอดภัยนี้ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอพระขอบคุณ คณะผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้คำแนะนำในการสร้างเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนในครั้งนี้ อันประกอบด้วย รศ.ดร. วรากร ไม้เรียง , รศ.ดร.นพดล เพียรเวช, รศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดากร, ดร. ธนู หาญพัฒนาพานิชย์ และรศ.ดร. สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อนุญาตนำผลการศึกษานในงานวิเคราะห์ คัดเลือก และจัดทำเกณฑ์ด้านความปลอดภัยเขื่อนจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนของ กฟผ. มาเผยแพร่ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Commission on Large Dam. *Bulletin 164 Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations.*2013, pp. 151.
- [2] K.F.Busch, L.Luckner andK.Tiemer.*Geohydraulik.* GebrüderBorotraeger, Berlin, Stuttgart, 1993, pp.497.
- [3] International Commission on Large Dam. *Bulletin 158Dam Surveillance Guide.* 2010, pp. 100.