

การประยุกต์ใช้ Pressure Sensor ติดตามผลการทดสอบการไหลซึมในชั้นหินฐานราก Pressure Sensor Application to Monitoring Flow Test Result in Rock Foundation

คมจักร กลิ่นภักดิ์¹ และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์²

¹ นิสิตปริญญาโท และ ² รองศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก,
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กทม.10900

E-mail: ¹ khomjak@gmail.com, ² soralump_s@yahoo.com

บทคัดย่อ

การทดสอบการไหลซึมโดยวิธี Borehole Packer Test เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับการทดสอบการไหลซึมในชั้นหินฐานราก สำหรับการออกแบบหรือประเมินสภาพความปลอดภัยเขื่อน อย่างไรก็ตามการทดสอบมักประสบปัญหาในการควบคุมแรงดันให้คงที่ซึ่งส่งผลให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน การประยุกต์ใช้ Pressure Sensor ในการควบคุมและติดตามแรงดันน้ำขณะทดสอบจะช่วยให้การวิเคราะห์ค่าความซึมน้ำมีความถูกต้องสูงขึ้นและสามารถระบุพฤติกรรมการไหลซึมในแต่ละวงรอบของการทดสอบได้ การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบการไหลซึมโดยใช้ชุดเครื่องมือที่มีการติดตั้ง Pressure Sensor ซึ่งทำการทดสอบในหิน Schist เทียบกับชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแบบเดิม(มาตรวัดแรงดัน) ซึ่งทำการทดสอบในหิน Sandstone พบว่าการทดสอบโดยใช้ชุดเครื่องมือที่มีการติดตั้ง Pressure Sensor สามารถตั้งค่าและควบคุมแรงดันที่ใช้ในการทดสอบให้มีความละเอียดถึง 0.02 ksc ผลการทดสอบที่ได้จึงมีความถูกต้องสูงและสามารถระบุพฤติกรรมการไหลซึมได้ละเอียดขึ้น แต่เมื่อเทียบกับการทดสอบโดยใช้ชุดเครื่องมือแบบเดิมนั้นพบว่ามีความละเอียดเพียง 0.1 ksc ทำให้การตั้งค่าและควบคุมแรงดันทำได้ยาก

คำสำคัญ: การทดสอบความซึมน้ำในสนาม, พฤติกรรมการไหลซึม, ค่าลูยอง

Abstract

Borehole packer test method is the appropriate one for field permeability test in foundation rock for design or dam safety estimate case. However, it usually causes pressure control problems which effect to precision of test results. Application of pressure sensor for controlling and monitoring water pressure during the test, will help to improve more precise permeability value and can identify seepage behavior. This study has compared test results between using of normal equipment (test in Sandstone layer) and using of pressure sensor equipment (test in Schist layer). It is found that equipment test with installed pressure sensor(accuracy~0.02 ksc) can set and control pressure during the test efficiently, the result shows strong precision and seepage behavior can be identified. While the result from using of normal equipment(accuracy~0.1 ksc) are difficult to set and control pressure during the test.

Keywords: field permeability test, seepage behavior, Lugeon value, pressure sensor

1. คำนำ

Borehole packer test เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาค่าความซึมน้ำในชั้นหิน ชุดเครื่องมือทดสอบที่ใช้กันโดยทั่วไปจะใช้มาตรวัดแรงดันตั้งค่าและควบคุมการทำงานของปั้มน้ำในการอัดแรงดันขณะทดสอบ แต่แรงดันที่ได้มักจะไม่คงที่เนื่องจากคุณภาพของอุปกรณ์และสภาพการหุบ-ขยายของรอยแตก ซึ่งจะส่งผลให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน จนไม่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึมได้ การใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดและความถี่ในการตรวจวัดมากขึ้น จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้มากจนผลการทดสอบมีความละเอียดพอที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึมได้

2. ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

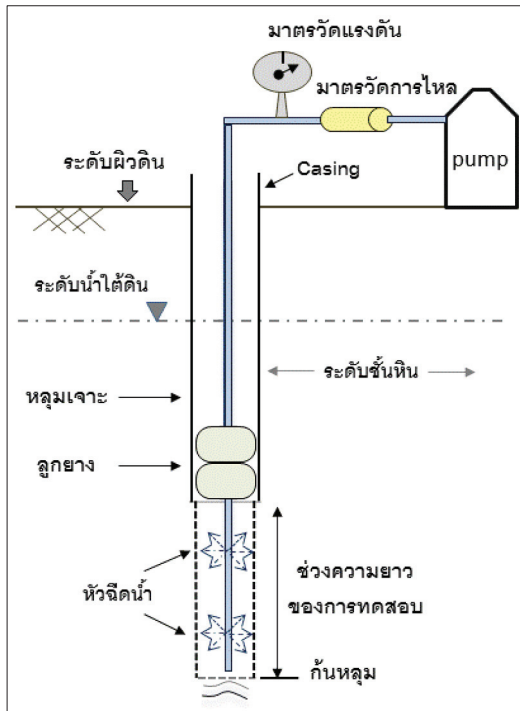
การศึกษาความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Borehole packer test เป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการไหลซึมของเขื่อน 2 แห่ง โดยเขื่อนแห่งแรกทำการทดสอบในชั้นหิน Sandstone ใช้มาตรวัดแรงดัน(pressure gauge)และมาตรวัดอัตราการไหล(แบบเดียวกับที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำประปา)ในควบคุม-ตรวจวัดแรงดันน้ำและอัตราการไหลขณะทำการทดสอบ แต่มีการติดตั้ง Pressure sensor และ digital flow meter ซึ่งสามารถอ่านค่าและบันทึกผลอัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแรงดันขณะทำการทดสอบ ส่วนเขื่อนแห่งที่ 2 ทำการทดสอบในชั้นหิน Schist ใช้ชุดอุปกรณ์ที่มีการติดตั้ง Pressure sensor และ digital flow meter เพื่อทำหน้าที่ควบคุม-ตรวจวัดแรงดันและอัตราการไหลขณะทำการทดสอบ

2.1. ขั้นตอนการทดสอบ

วิธี Borehole packer test เป็นวิธีการทดสอบความซึมน้ำในสนามโดยการตรวจวัดอัตราการไหลซึมของน้ำในหลุมเจาะภายใต้แรงดันการไหลที่กำหนด(ภาพที่ 1) โดยใช้ก้านเจาะกลุยกวาง (packer)ให้เกิดการพองตัวจนอัดกับหินผนังหลุมเจาะ ปลายก้านเจาะซึ่งมีท่อฉีดน้ำจะปล่อยน้ำที่ถูกอัดแรงดันโดยปั้มน้ำจากปากหลุมเจาะ ลูกยางที่พองตัวเต็มที่จะปิดกั้นไม่ให้น้ำไหลล้นขึ้นสู่ปากหลุม ช่วงความยาวจากก้นหลุมถึงลูกยางคือช่วงความยาวที่ทำการทดสอบการไหลซึม อัตราการไหลซึมและแรงดันของน้ำในหลุมจะถูกตรวจวัดจากมาตรวัดการไหลและมาตรวัดแรงดัน

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะทำการทดสอบในลักษณะของวงรอบแรงดัน โดย 1 วงรอบ(ภาพที่ 2)จะมีแรงดัน 3 ขนาด และมีลำดับในการทดสอบ 5 ลำดับ แต่ละขนาดจะมีความสัมพันธ์เป็นอัตราส่วนกับแรงดันสูงสุด(0.5P_{max} , 0.75P_{max} , P_{max})ซึ่งแต่ละลำดับของการทดสอบจะ

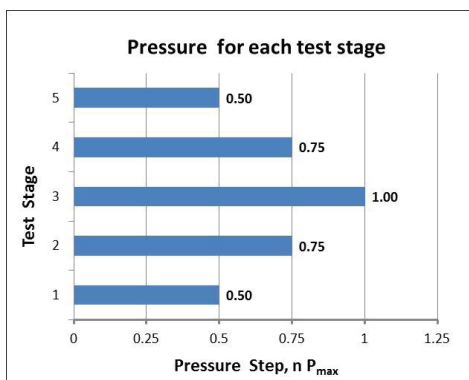
ควบคุมแรงดันไว้ให้คงที่เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้แรงดันที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 1. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ Borehole packer test

2.2. การทดสอบในชั้นหิน sandstone

ทำการทดสอบในช่วงความลึก 46-50 เมตร RQD 16-18% ในลักษณะของวงรอบแรงดันโดยให้วงรอบที่ 2 มีแรงดันสูงสุดภายในวงรอบมากกว่าแรงดันในวงรอบที่ 1 การตั้งค่าและควบคุมแรงดันขณะทำการทดสอบใช้มาตรวัดแรงดัน (pressure gauge ภาพที่ 3) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่หลายๆหน่วยงานนิยมใช้ในการทดสอบการไหลซึมในสนาม แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ต้องการที่จะทราบถึงความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ถูกควบคุมโดยมาตรวัดแรงดัน จึงมีการติดตั้ง pressure sensor เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดและติดตามความคลาดเคลื่อนของแรงดันขณะทำการทดสอบอย่างละเอียด โดย pressure sensor จะตรวจวัดและบันทึกค่าแรงดันที่วัดได้ลงในกล่องข้อมูล (data logger) ทุกๆ 2 วินาที สำหรับการตรวจวัดอัตราการไหลใช้มาตรวัดอัตราการไหลร่วมกับ digital flow meter ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจวัดและบันทึกผลการตรวจวัดโดยอัตโนมัติ ทุกๆ 2 วินาที



ภาพที่ 2. อัตราส่วนของแรงดันในแต่ละลำดับ

2.3. การทดสอบในชั้นหิน Schist

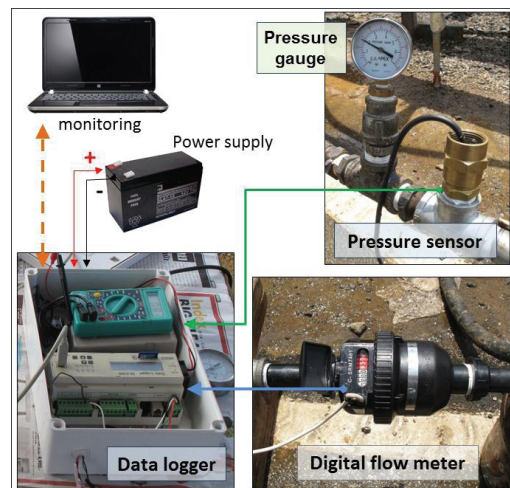
ทดสอบในชั้นหินผุช่วงความลึก 8.5-10.0 เมตร ระดับการผุพังและความหนาแน่นของรอยแตกจำแนกตามเกณฑ์ของ [1] จัดอยู่ในระดับ Highly weathered - Moderately weathered และ Moderately fracture ตามลำดับ ทำการทดสอบจำนวน 2 วงรอบแรงดัน เช่นเดียวกับการทดสอบในหิน Sandstone การควบคุมแรงดันและตรวจวัดอัตราการไหลใช้ pressure sensor และ digital flow meter (ภาพที่ 3) ในการควบคุมแรงดันและตรวจวัดอัตราการไหล แทนที่การใช้มาตรวัดแรงดันซึ่งมีความละเอียดในการตรวจวัดต่ำ

2.4. การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึม

การพิจารณาผลการทดสอบการไหลซึมจะคำนึงถึงอัตราการไหลซึมต่อแรงดัน และรูปแบบของการไหลซึมใน 1 วงรอบ ซึ่งค่าความซึมที่พิจารณาจะอยู่ในรูปของค่า Lugeon โดย 1 Lugeon จะมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำ 1 ลิตรที่ซึมหายไปชั้นหินในเวลา 1 นาทีต่อความยาวของหลุมเจาะ 1 เมตรและภายใต้แรงดัน 981 kPa (10 bar, 10.197 ksc) [2] หรือเทียบเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำได้ว่า 1 Lugeon = 1×10^{-5} cm/sec [3] การคำนวณค่าความซึมในหน่วย Lugeon แสดงในสมการที่ 1 พฤติกรรมการไหลซึมรูปแบบต่างๆสามารถจำแนกได้จากการแปรผลการทดสอบให้อยู่ในหน่วย Lugeon ได้ 5 พฤติกรรมตามภาพที่ 4

$$k = \frac{10Q}{LP} \quad (1)$$

โดยที่ k = ค่าความซึมน้ำ (Lugeon) Q = ปริมาณการไหลซึม (ลิตร/นาที) L = ช่วงความยาวการทดสอบ (เมตร) P = ความดันที่ใช้ในการทดสอบ (bar)



ภาพที่ 3. ชุดเครื่องมือตรวจวัดแรงดันและการไหลซึม

3. ผลการศึกษา

3.1. ผลการทดสอบในชั้นหิน Sandstone

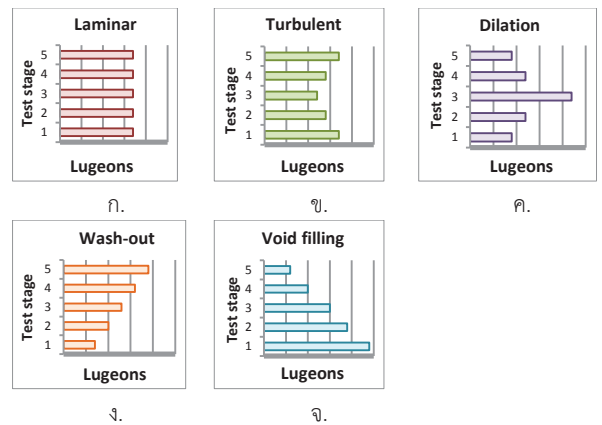
ผลการทดสอบที่ได้จากการใช้มาตรวัดแรงดันในการควบคุมแรงดันขณะทำการทดสอบ โดยมี pressure sensor ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขณะทำการทดสอบ พบว่าแรงดันที่ควบคุมโดยมาตรวัดแรงดันมีความคลาดเคลื่อนไปจากแรงดันเป้าหมาย (แรงดันที่ต้องการใช้ในการทดสอบ) 1.18-24.42 % (ตารางที่ 1) และอัตราส่วนของแรงดัน

ในแต่ละลำดับการทดสอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการทดสอบ การจำแนกพฤติกรรมการไหลซึมจึงไม่สามารถทำได้ชัดเจน(ภาพที่ 5ก. และ 5ข.) เนื่องจากในแต่ละลำดับการทดสอบจะมีอัตราการไหลซึมที่ขึ้นอยู่กับแรงดันการไหลซึมในลำดับนั้นๆ ความคลาดเคลื่อนของแรงดันขณะทำการทดสอบเพียงแค่ 5-10 % จะส่งผลให้ค่า Lugeon ที่คำนวณได้ตามสมการที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนสูงแต่อาจส่งผลให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักในกรณีที่ทำกรทดสอบในหินที่มีความซึมน้ำต่ำเนื่องจากค่าอัตราการไหลมักจะใกล้เคียงกันแม้จะเพิ่มแรงดันขึ้นจากเดิมเป็น 2 เท่า สำหรับในกรณีของการทดสอบในหินที่มีค่าความซึมน้ำสูงความคลาดเคลื่อนของแรงดันตั้งแต่ 15% ขึ้นไปจะส่งผลให้อัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงได้มาก ในกรณีนี้ผลการทดสอบทั้ง 2 วงรอบมีค่า Lugeon ที่ใกล้เคียงกัน(1.01 - 1.33 lugeon ในวงรอบที่1 และ (1.44-1.72 lugeon ในวงรอบที่2) หากพิจารณาค่า Lugeon จากเกณฑ์[4] หิน Sandstone ที่ทำการทดสอบจัดอยู่ในระดับที่มีค่าความซึมน้ำต่ำ

3.2. ผลการทดสอบในชั้นหิน Schist

ผลการทดสอบที่ได้จากการใช้ pressure sensor ในการควบคุมและติดตามแรงดันขณะทำการทดสอบ พบว่าแรงดันที่ใช้ขณะทำการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากแรงดันเป้าหมาย 0.36 – 6.87 % ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนต่ำเมื่อเทียบกับแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยมาตรวัดแรงดัน (ตารางที่ 1) เนื่องจาก pressure sensor สามารถอ่านค่าแรงดันได้ละเอียดถึง 0.02 ksc และขณะทดสอบสามารถติดตามแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีกล่องบันทึกข้อมูลทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลแรงดันน้ำขณะทำการทดสอบทุกๆ 2วินาที ในขณะที่ทดสอบเมื่อแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงก็จะสามารถทำการเพิ่ม-ลดแรงดันให้ตรงตามแรงดันเป้าหมายได้ อัตราส่วนของแรงดันในแต่ละลำดับการทดสอบมีค่าใกล้เคียงตามข้อกำหนดของการทดสอบ ทำให้สามารถจำแนกพฤติกรรมการไหลซึมที่เกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น(ภาพที่ 5ค. และ 5ง.) พฤติกรรมการไหลซึมในวงรอบที่ 1 มีพฤติกรรมการไหลแบบ dilation ที่มีค่า Lugeon ในแต่ละลำดับแตกต่างกันไม่มากนัก(52.4-60.1 lugeon) แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า Lugeon เป็นไปใน

ลักษณะที่สมมาตร แต่ในลำดับการทดสอบที่ 3 ค่า Lugeon มีค่าสูงกว่าในลำดับอื่นๆเพียงเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของค่า Lugeon เป็นผลมาจากแนวรอยแตกของหินเกิดการอ้าขยายเนื่องจากแรงดันการไหลซึม เป็นผลให้อัตราการไหลซึมเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ และในขณะเดียวกันเมื่อลดแรงดันลงรอยแตกก็จะถูกบีบกลับ ส่งผลให้อัตราการไหลซึมลดลง โดยไม่เกิดการพัดพาเนื้อวัสดุในบางส่วนหลุดหายไป สำหรับผลการทดสอบในวงรอบที่ 2 เมื่อทำการทดสอบการไหลซึมซ้ำในช่วงการทดสอบเดิม แต่เพิ่มแรงดันในการทดสอบให้สูงขึ้นมีค่า Lugeon อยู่ในช่วง 56.8-74.4 แต่ในลำดับทดสอบที่ 4 และ 5 ค่า Lugeon ไม่ได้ลดลงตามแรงดันการทดสอบแต่กลับมีค่าใกล้เคียงกับค่าในลำดับที่ 3 ดังนั้นลักษณะการไหลซึมในวงรอบที่ 2 จึงเป็นการผสมกันของพฤติกรรมแบบ Dilation และ Laminar flow ซึ่งอาจเกิดจากการกัดเซาะเนื้อหินส่วนที่มีระดับการพุ่งสูงหรือวัสดุเม็ดละเอียดที่สุดแทรกอยู่ตามแนวรอยแตกของหินทำให้มวลหินสูญเสียเนื้อวัสดุในบางส่วนเป็นผลให้การบีบตัวกลับของรอยแตกเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ยังคงมีการไหลซึมสูงแม้ว่าจะลดแรงดันลงก็ตาม ค่า Lugeon ที่ได้จากการทดสอบนี้จำแนกตามเกณฑ์ของ[4] จัดอยู่ในเกณฑ์ของความซึมน้ำสูง

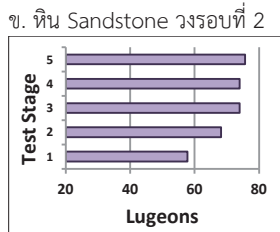
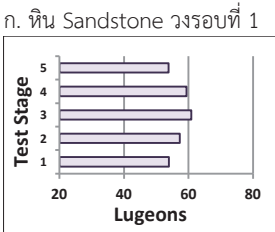
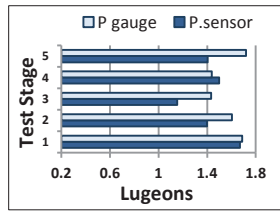
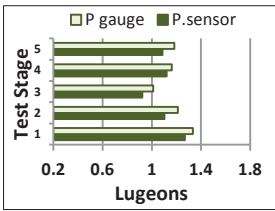


ภาพที่ 4. พฤติกรรมการไหลซึมที่ได้จากการแปรผลการทดสอบ[2]

ตารางที่ 1 ความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

C	Sandstone (P. gauge control)			Schist (P. sensor control)		
	P. testing	P. target	% error	P. testing	P. target	% error
	1	0.809	0.80	1.18	0.484	0.500
	1.376	1.20	14.64	0.804	0.800	0.449
	1.866	1.50	24.42	1.091	1.100	0.843
	1.152	1.20	3.98	0.796	0.800	0.500
	0.979	0.80	22.44	0.481	0.500	3.888
2	1.576	1.50	5.04	0.803	0.800	0.366
	2.201	2.00	10.05	1.264	1.300	2.794
	2.734	2.50	9.37	1.643	1.700	3.378
	2.073	2.00	3.64	1.247	1.300	4.076
	1.632	1.50	8.82	0.855	0.800	6.870

หมายเหตุ: P= Pressure , C= cycle



ภาพที่ 5 ผลการทดสอบในหิน Sandstone และหิน Schist

4. สรุป

(1.) การใช้ Pressure sensor ในการควบคุมและติดตามค่าแรงดันขณะทำการทดสอบ จะส่งผลต่อความถูกต้องของค่าความซึมน้ำที่ได้จากการทดสอบ Borehole packer test มากกว่าการใช้มาตรวัดแรงดันแบบปกติอย่างเห็นได้ชัด

(2.) การทดสอบการไหลซึมในลักษณะเป็นวงรอบแล้วแปรผลการทดสอบให้อยู่ในรูปของค่า lugeon เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึมจะไม่สามารถจำแนกพฤติกรรมการไหลซึมได้อย่างชัดเจน หากใช้มาตรวัดแรงดันแบบปกติในการควบคุมแรงดันขณะทำการทดสอบ เนื่องจากอัตราส่วนของแรงดันในแต่ละลำดับจะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการทดสอบ โดยเฉพาะการทดสอบในระดับแรงดันต่ำๆ การใช้ Pressure sensor นอกจากจะสามารถตั้งค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้ละเอียดถึง 0.02 ksc แล้ว การบันทึกค่าแรงดันขณะทำการทดสอบทุกๆ 2 วินาทีทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกิดขึ้นภายใน 10 นาที(ช่วงเวลาในการทดสอบ 1 ลำดับ) ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณค่า lugeon มีความถูกต้องมากกว่าการใช้ค่าแรงดันเฉลี่ยจากการบันทึกค่าแรงดันทุก 1 นาที

(3.) พฤติกรรมการไหลซึมแบบ dilation ที่ระบุในหิน Schist เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการขยายตัว-การหุบกลับของรอยแตก และการกักเซาะเนื้อวัสดุตามแนวรอยแตกเนื่องจากแรงดันการไหลซึม(ในกรณีของวงรอบที่ 2 ที่เป็นลักษณะผสมระหว่าง dilation และ laminar) พฤติกรรมดังกล่าวเป็นลักษณะของการอำขยาย-การบีบกลับ และการกักเซาะที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเห็นได้จากแนวโน้มของค่า lugeon ทั้ง 2 วงรอบแสดงแนวโน้มของพฤติกรรมการไหลซึมแบบ dilation ที่มีค่า lugeon ในแต่ละลำดับแตกต่างกันไม่มากนัก

(4.) การใช้ digital flow meter ในการตรวจวัดอัตราการไหลมีผลการตรวจวัดที่ตรงกันกับมาตรวัดการไหลแบบปกติ มาตรวัดการไหลแบบปกติจึงไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ระบบการอ่านและบันทึกค่าการไหลซึมแบบอัตโนมัติมีความจำเป็นน้อยมากเนื่องจากอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก และอุปกรณ์ตรวจวัดทั้ง 2 ระบบมีความละเอียดในการตรวจวัดที่เท่ากัน ดังนั้นการตรวจวัดอัตราการไหลโดยใช้มาตรวัดอัตราการไหลแบบปกติซึ่งอ่านและบันทึกค่าการไหลซึมโดยผู้ตรวจวัดทุกๆ 1 นาทีไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ

(5.) ความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบนอกจากจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือในการตรวจวัดแล้ว ยังคงมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ อาทิเช่น ประสิทธิภาพในการอัดแรงดันของปั๊ม ความสมบูรณ์ของระบบท่อส่งและข้อต่อ หรือแม้กระทั่งลักษณะของหินฐานราก โดยเฉพาะการทดสอบในชั้นหินที่มีความซึมน้ำต่ำมากๆ จะเกิดการไหลย้อนกลับของน้ำจากภายในหลุมเจาะ ดังนั้นมาตรวัดอัตราการไหลที่ใช้ควรมีระบบการอ่านค่าอัตราการไหลแบบทิศทางเดียวเพื่อป้องกันการอ่านค่าการไหลย้อนกลับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ความช่วยเหลือด้านต่างๆจาก กองธรณีและวิศวกรรมปฐพี ฝ่ายสำรวจ และ กองความปลอดภัยเขื่อน ฝ่ายบำรุงรักษาโยธา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] New York State Department of Transportation. 2007. Rock core evaluation manual, Revision 1.
- [2] Houlsby, A. 1976. Routine interpretation of Lugeon Water-Test. Quarterly Journal of Engineering Geology Vol 9: 303-313
- [3] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation(USBR). 1998. Engineering Geology Field Manual, Vol 1
- [4] Camilo, Q. R. 2010. Lugeon test interpretation, Revisited, pp.405-414. In Collaborative Management of Integrated Watersheds 30th Annual USSD Conference. 12-16 April 2010, U.S. Society on Dams, Sacramento, California