

เทคนิคการปรับแก้ข้อมูลที่อ่านค่าจากเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อนมูลบน

DATA CORRECTION TECHNIQUE FROM MUN BON DAM INSTRUMENTATION

พนารัตน์ ขำวงษ์
อาจารย์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ

ดร.วารากร ไม้เรียง
รองศาสตราจารย์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

PANARAT KAMWONGKHONG
Lecturer
Ramkhamhaeng University, Bangkok

DR.WARAKORN MAIRAING
Associate Professor
Kasetsart University, Bangkok

บทคัดย่อ

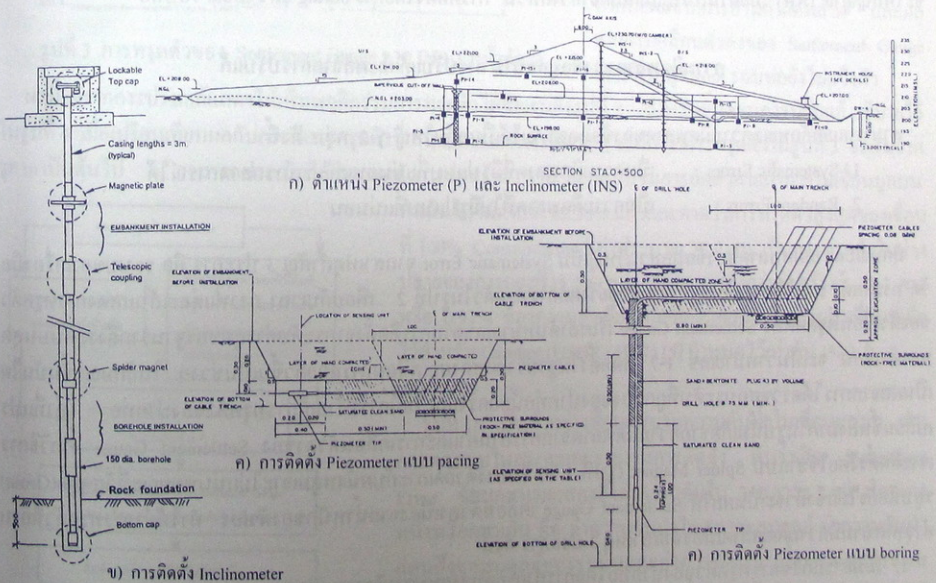
ข้อมูลตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อนในสนามมีความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการได้แก่ คุณภาพและจำนวนของเครื่องมือซึ่งถูกจำกัดโดยงบประมาณ ทักษะ วิธีการ ช่วงเวลาและตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง และการอ่านค่าในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น เทคนิคที่ใช้ปรับแก้ข้อมูลจากเครื่องวัดพฤติกรรมในเขื่อนมูลบน สำหรับกลุ่มพีโซมิเตอร์วัดแรงดันน้ำใช้วิธีปรับแก้ความดันจากการไล่ฟองอากาศในระบอบวัด การพิจารณาถึงช่วงล่า (time lag) ของตำแหน่งติดตั้ง และการทดแทนข้อมูลที่จำเป็นจากผลของเครื่องมือข้างเคียง สำหรับการปรับแก้ในกลุ่มวัดการเคลื่อนตัวต้องใช้หมุดหลักฐานซึ่งอยู่ภายนอกอิทธิพลการเคลื่อนตัว การปรับการเคลื่อนตัวขณะที่วัสดุ Grout ยังไม่แข็งตัว และการปรับความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่า ผลจากการปรับแก้ทำให้ได้ข้อมูลที่แสดงพฤติกรรมที่ถูกต้องขึ้นและสามารถนำไปประเมินความปลอดภัยได้ ทั้งยังใช้เป็นกรณีศึกษาในโครงการอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี

ABSTRACT

The error of dam instrument data usually due to the lack of quality and quantity of the instrument itself. The installation method, technical skills, timing, installed position and reading periods may also create the errors. The correction techniques used in Mun Bon Dam for pore pressure measurement are elimination of airing pressure from the system, considering time lag due to the surrounding soil, supplement data from the adjacent piezometers. For the deformation measurements group, the corrections were done by using the independent benchmark, considering of the movement of grouting material in the bore holes, and adjustment of false readings. The results of the correction shows the reasonable measurements, which can be used for dam safety evaluation. And these methods of data correction can be a case study adopted for the others similar projects as well.

เขื่อนส่วนใหญ่ในประเทศเป็นเขื่อนดิน ซึ่งมีอยู่ทั่วประเทศประมาณ 4,050 เขื่อน [7] ภายหลังจากพิบัติของเขื่อนมูลบนในปี.ศ. 2533 ได้มีการตื่นตัวและให้ความสำคัญต่อการประเมินความปลอดภัยและการศึกษาพฤติกรรมของตัวเขื่อน ทั้งนี้ เพื่อความมั่นคงปลอดภัยของตัวเขื่อน ผู้คนและทรัพย์สินบริเวณท้ายน้ำที่จะได้รับผลกระทบ ถึงแม้ว่าการศึกษาของเขื่อนมูลบนจะไม่เกิดความเสียหายร้ายแรงต่อชีวิตก็ตามแต่รัฐบาลต้องใช้งบประมาณกว่า 300 ล้านบาท เพื่อแก้ไขปรับปรุงให้เขื่อนใช้ประโยชน์ได้ตามวัตถุประสงค์เดิม เมื่อเทียบกับราคาก่อสร้างครั้งแรกประมาณ 145 ล้านบาท

เครื่องมือวัดพฤติกรรมสามารถแสดงพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นกับตัวเขื่อนในระหว่างก่อสร้างและใช้งาน จึงเป็นเสมือนเครื่องเตือนภัยในกรณีที่มีสิ่งผิดปกติขึ้นและแก้ไขได้ทันทั่วทั้งก่อนที่จะเกิดมหันตภัย เมื่อนำพฤติกรรมที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับที่คาดคะเนไว้ในช่วงออกแบบ จะทราบถึงความแตกต่างและสามารถปรับปรุงมาตรฐานการของเขื่อนเพื่อตรวจควบคุมผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ ในการตรวจวัดการไหลซึมของเขื่อนมูลบนที่ซ่อมแซมภายหลังการพิบัติ ประกอบไปด้วย Hydraulic Piezometer จำนวน 42 หัว ใช้วัดแรงดันที่เกิดขึ้น Observation Well จำนวน 8 บ่อ ใช้วัดระดับน้ำใต้ดินบริเวณท้ายเขื่อน Seepage Flowmeter จำนวน 7 จุด ใช้วัดปริมาณที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเขื่อนมูลบนประกอบไปด้วย Inclinator หรือ Settlement Gauges จำนวน 4 จุด ใช้วัดการเคลื่อนตัวและทรุดตัวของในตัวเขื่อน และ Surface Monument จำนวน 36 จุด ใช้วัดการเคลื่อนตัวบริเวณผิวของลาดเขื่อน ตัวอย่างตำแหน่งและวิธีการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันน้ำและวัดการเคลื่อนตัว แสดงไว้ในรูปที่ 1 [6] โดยปกติในขณะที่ทำการติดตั้งและตรวจวัดมักจะเกิดข้อมูลที่เบี่ยงเบนไปจากข้อมูลที่แสดงพฤติกรรมจริง เนื่องจากสาเหตุหลายประการ จึงมีความจำเป็นต้องปรับแก้ข้อมูลเพื่อให้แสดงถึงพฤติกรรมจริงมากที่สุด ก่อนที่จะแปลผลและนำผลไปใช้



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งและวิธีการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันน้ำและวัดการเคลื่อนตัว หน้าตัด A

ลักษณะของเครื่องมือวัดและการใช้ประโยชน์

USBR(1987) [5] กล่าวถึงเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมไว้ 5 ประเภทคือ วัดความดันในมวลดิน (pressure measuring devices) วัดการเคลื่อนตัวภายในตัวเขื่อน (internal movement measuring devices) วัดอัตราการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (seepage measuring devices) วัดการเคลื่อนตัวบริเวณผิวพื้น (surface movement measuring devices) และวัดความถี่สั่นเขื่อนในตัวเขื่อน (vibration measuring devices) บทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องมือวัด 2 ประเภทแรกเท่านั้น

เครื่องมือวัดความดันน้ำโดยทั่วไปเรียกว่า พิโซมิเตอร์ ซึ่งจะบอกถึงพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก การกัดเซาะ การปีคั่น การระบาย และความมั่นคงของตัวเขื่อนได้ เครื่องมือวัดความดันน้ำที่ใช้ในเขื่อนมูบลินเป็นแบบ Bishop ใช้วัดความดันน้ำจากมาตรวัดความดันอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง มีการติดตั้ง 2 วิธี โดยการควางลงในชั้นดิน (placing) กรณีระดับดินถมบดอัดเขื่อนมีระดับสูงกว่าตำแหน่งติดตั้งเล็กน้อย และโดยการติดตั้งในหลุมเจาะ (boring) กรณีระดับดินถมมีระดับสูงกว่าตำแหน่งติดตั้งมากเช่นในฐานรากและในตัวเขื่อนเดิม

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวภายในตัวเขื่อน ใช้หาอัตราและค่ารวมของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) ของมวลดินฐานรากหรือวัสดุบดอัดเป็นตัวเขื่อน และการเคลื่อนตัวแนวราบเนื่องจากแรงดันน้ำในอ่างหรือจากแรงดันดินจากฐานราก หรือความแตกต่างของกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินต่างชนิดกัน สามารถนำมาวิเคราะห์การหมุน (rotational movements) ซึ่งเกิดจากมวลดินบริเวณฐานรากหรือตัวเขื่อนมีค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ค่าเกินไป หรือฐานรากรับน้ำหนักไม่ได้ ในเขื่อนมูบลินใช้ Inclinator พร้อม Settlement Gauge วัดการเคลื่อนตัวแนวราบจากหัววัด (inclinator probe หรือ torpedo) เป็นความเอียงที่ทำมุมกับแนวตั้ง การวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง โดยฝังแหวนแม่เหล็กไว้บนอกหน้าของ Inclinator และหาตำแหน่งแหวนแม่เหล็กโดยหย่อนหัววัดซึ่งเป็นขลวดหนึ่มยามาจะให้สัญญาณไฟฟ้า เมื่อผ่านสนามแม่เหล็กจากวงแหวน การติดตั้งโดยการ boring แล้ว Grout รอบท่อ

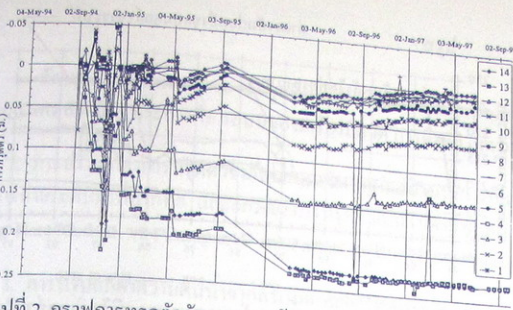
ความผิดพลาดของข้อมูลสนาม การปรับแก้และผลจากการปรับแก้

สามารถแยกลักษณะความผิดพลาดของข้อมูลสนามได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ 2 กลุ่ม ดังนี้

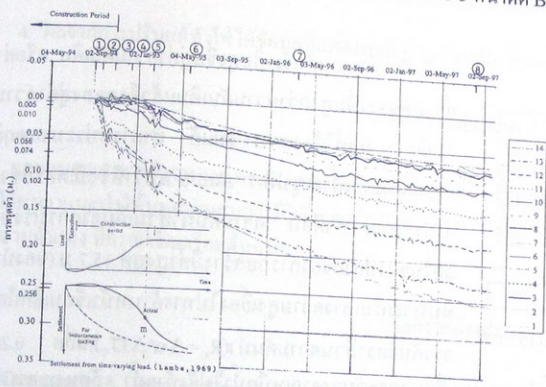
1. Systematic Errors เป็นความผิดพลาดที่มีรูปแบบที่แน่นอนและสามารถคาดการณ์ได้
2. Random Errors เป็นความผิดพลาดที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

ลักษณะความผิดพลาดของข้อมูลส่วนใหญ่เป็น Systematic Error จากสาเหตุสำคัญ 3 ประการ คือ ระบบของเครื่องมือวัด การติดตั้ง และวิธีการอ่านค่า จากตัวอย่างผลการทรุดตัวในรูปที่ 2 เทียบกับเวลา กราฟแต่ละเส้นแสดงการทรุดตัวของตัวเขื่อนที่จุดติดตั้ง Settlement Gauge เรียงลำดับหมายเลขตามการติดตั้งจากระดับล่างสุดของฐานรากถึงระดับบนสุดของตัวเขื่อน จะเห็นว่าหมายเลข 1-7 ที่ติดตั้งในฐานรากแสดงผลเสมือนการลอยตัวขึ้นเป็นช่วงๆ ในลักษณะขั้นบันไดเป็นผลจากการได้ตรวจสอบระดับที่ถูกต้องของปากท่อน้อยครั้งและไม่มีการปรับแก้การทรุดตัวของปากท่อ ค่าที่แปรเปลี่ยนขึ้นลงมากในรูปนี้เกิดจากความผิดพลาดจากการอ่านค่าและการเคลื่อนตัวลงของ Settlement Gauge จากวิธีการเจาะติดตั้งโดยใช้ขาแบบ Spider Magnet (รูปที่ 1 ข) ในบางตัวติดเกาะกับผนังหลุมเจาะไม่แน่นพอขณะที่วัสดุ (Grout) รอบท่อยังไม่แข็งตัวจะเป็นผลให้ Settlement Gauge เคลื่อนตัวลงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง ทำให้ค่าการทรุดตัวที่อ่านค่าจากสนามมีความผิดพลาดเนื่องจากสาเหตุ 3 ประการ ดังนี้

1. ไม่มีการแก้ไขการทรุดตัวของปากท่อโดยการถ่ายระดับจากหมุดหลักฐาน (BM)
2. เกิดการเคลื่อนตัวของ Settlement Gauge ขณะที่วัสดุ Grout รอบท่อยังไม่แข็งตัว
3. เกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่า

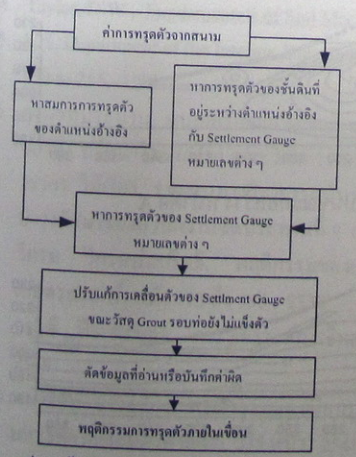


รูปที่ 2 กราฟการทรุดตัวกับเวลาของข้อมูลสนามจาก INS-3 หน้าตัด B



รูปที่ 3 การทรุดตัวของ Settlement Gauge จาก INS-3 หน้าตัด B

ผลที่ได้จากการปรับแก้แสดงให้เห็นพฤติกรรมทรุดตัวได้ชัดเจนดังรูปที่ 3 สำหรับขั้นตอนการปรับแก้ อธิบายไว้ในรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการทรุดตัวที่เสนอโดย Lambe (1969) [3] จะเห็นว่าทรุดตัวในรูปที่ 3 จะเริ่มจากจุด m เป็นต้นไป สามารถประเมินได้ว่าภายหลังการก่อสร้าง 1,116 วัน กระทบการอัดตัวคายน้ำภายในเชื่อมมูลบน



รูปที่ 4 ขั้นตอนการปรับแก้ข้อมูลการทรุดตัว

การปรับแก้ค่าภัยเหตุผลสองประการ ได้แก่ ประการแรก ระดับ Settlement Gauge จะถูกต้องเมื่อวัดในวันที่มีการถ่ายระดับมาที่ปากท่อ และลักษณะการทรุดตัวเป็นไปตามทฤษฎี การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Theory) สามารถปรับแก้ได้ 2 วิธี คือ

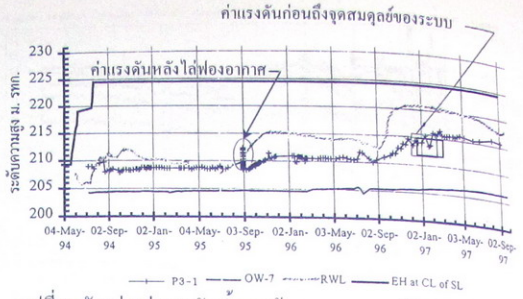
1. สมมติให้ฐานรากเชื่อมไม่มีทรุดตัว
2. การทรุดตัวของเชื่อมและฐานราก เป็นไปตามทฤษฎี Log Time Method ของ Casagrande and Fadum(1940) [2] และทฤษฎี Square root Time Method ของ Taylor(1948) [4]

การปรับแก้วิธีที่ 1 จะได้ผลที่ถูกต้องสำหรับกรณีชั้นฐานรากเชื่อมเป็นชั้นหินที่ไม่มีทรุดตัว แต่เนื่องจากในฐานรากของเชื่อมมูลบนมีลักษณะเป็นชั้นทราย ตะกอนทรายแทรกด้วยชั้นดินเหนียว ซึ่งมีการทรุดตัว ดังนั้นวิธีนี้จึงยังไม่ถูกต้องและไม่ได้นำมาใช้ การปรับแก้วิธีที่ 2 สามารถปรับแก้ได้ทั้งผลจากการไม่ทำการถ่ายระดับจาก BM มาสู่ปากท่อผลจากการอ่านค่าผิดพลาด และผลจากการเคลื่อนตัวลงของ Settlement Gauge ขณะที่วัด GROUT รอบท่อยังไม่แข็งตัว

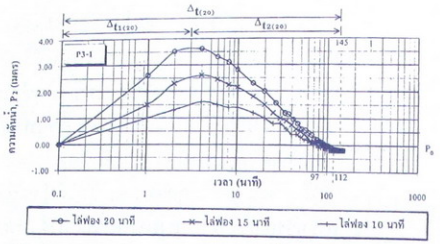
ค่าการทรุดตัวที่ปรับแก้แล้วสำหรับขั้นตอนการปรับแก้ อธิบายไว้ในรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการทรุดตัวที่เสนอโดย Lambe (1969) [3] จะเห็นว่าทรุดตัวในรูปที่ 3 จะเริ่มจากจุด m เป็นต้นไป สามารถประเมินได้ว่าภายหลังการก่อสร้าง 1,116 วัน กระทบการอัดตัวคายน้ำภายในเชื่อมมูลบน คำนึงไปไม่ต่ำกว่า 82.56% แล้วและค่าการทรุดตัวสูงสุดของเชื่อมที่ 100% Consolidation มีค่าประมาณ 28.9 ซม. เป็นการทรุดตัวในช่วงปลายของการก่อสร้าง 5.6 ซม. และภายหลังการก่อสร้าง 23.3 ซม. หรือ 0.91% ของความสูงเชื่อมและมีค่าน้อยกว่าค่าความสูงเชื่อมที่ถือว่าสำหรับ Camber (USBR (1987) [5] กำหนดไว้เท่ากับ 1%)

รูปที่ 5 เป็นตัวอย่างข้อมูลสนามความดันน้ำในเชื่อมมูลบน จากการทดสอบในสนามและรายงานการติดตั้ง พบว่าเกิด Systematic Error ข้อมูลสนามแสดงถึงค่าความดันใน 3 สภาวะ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมกัน คือ ค่าความดันน้ำในสภาวะสมดุล ค่าความดันน้ำก่อนถึงจุดสมดุลย์ของระบบและค่าความดันน้ำเนื่องจากผลกระทบจากการไล่ฟองอากาศ การปรับแก้เพื่อให้ได้ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ของการติดตั้งทำโดยตัดค่าความดันน้ำก่อนถึงจุดสมดุลย์ของระบบ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับความดันน้ำขึ้นลงอย่างมาก จากการ

อ่านค่าเร็วบ้างช้าบ้าง ความดันน้ำจะต่ำกว่าความดันน้ำภายในตัวเขื่อน สาเหตุจากระบบวัดความดันใช้น้ำมาตรวัด 1 มาตรต่อพีโซมิเตอร์ทั้งหน้าตัด(11-16หัว) การอ่านค่าต้องเปิดวาล์วอ่านค่าทีละหัวและต้องรอให้มาตรวัดแสดงค่าที่คงที่ก่อนจึงบันทึกค่า แล้วเปลี่ยนไปอ่านหัวอื่นต่อไป การปรับแก้พิจารณารูปที่ 6 โดยตัดค่าความดันน้ำที่อ่านในช่วงเวลา Δt จากกราฟทดสอบในสนามดังรูปตัวอย่าง พบว่าค่าความดันจะลดลงทันทีหลังไหลฟองอากาศด้วยความดันจากปัมแล้วหลังจากนั้นเป็นไปไดโน 2



รูปที่ 5 ตัวอย่างค่าแรงดันน้ำจากข้อมูลสนามของพีโซมิเตอร์ P3-1

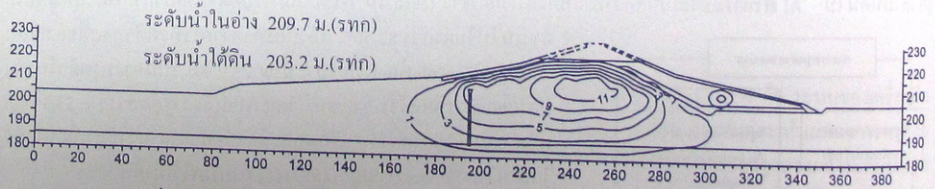


รูปที่ 6 ความเปลี่ยนแปลงความดันน้ำหลังไหลฟองอากาศ

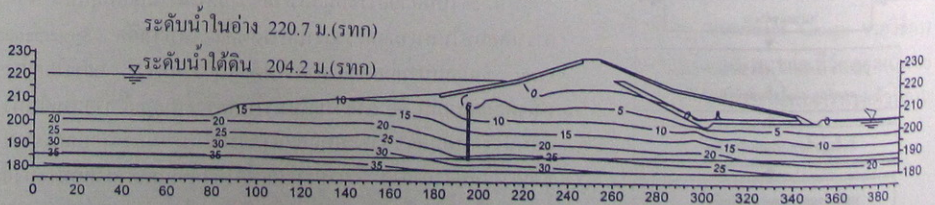
กำแพงที่บ้น้ำแสดงการปิดกั้นน้ำ ความดันน้ำในฐานรากเขื่อนลดระดับลงจากเหนือน้ำไปยังท้ายน้ำ ลักษณะเกิดความดันน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ คล้ายกับเส้นชั้นความดันน้ำของเขื่อนแมงคืด ซึ่งเสนอโดยวิกรม (2530) [8] เมื่อเปรียบเทียบเส้นความน้ำที่วัดได้ กับการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SEEP/G ซึ่งวิเคราะห์โดยวรวิฑูริ(2538) [9] และคำนวณโดยวิธี Cassagrande (1937) [1] แสดงให้เห็นว่าการไหลของน้ำในเขื่อนอยู่ในช่วงของการปรับเปลี่ยนไปสู่การไหลแบบคงที่

กรณี คือ ค่าความดันจะเพิ่มสูงขึ้นสู่ค่าความดันเดิม หรือค่าความดันจะเพิ่มสูงกว่าความดันเดิมแล้วจึงลดลงสู่ค่าความดันเดิม ผลที่ได้จากการปรับแก้ สามารถประมวลพฤติกรรมความดันน้ำดังรูปที่ 7 และ 8 พบว่าพีโซมิเตอร์มีช่วงล่าช้าประมาณ 1.5 เดือน ความดันน้ำส่วนเกินจากการเร่งรัดอัดในช่วงปลายของการก่อสร้างมีค่าสูงสุด 15.7 ม.(ของน้ำ) ที่บริเวณกึ่งกลางความสูงเชิงไปทางด้านหน้าเขื่อนเล็กน้อย

ตรงกับอัตราส่วนความดันน้ำ ($R_u = \Delta u / \Delta \sigma_v$) เฉลี่ย 0.26



รูปที่ 7 การกระจายของความดันน้ำส่วนเกินภายในเขื่อนมูลบนขณะก่อสร้าง หน้าตัด A



รูปที่ 8 เส้นระดับความดันน้ำที่เท่ากันภายในตัวเขื่อนและฐานราก ณ เวลาเริ่มจัดสรรน้ำปีที่สาม หน้าตัด A

สรุป

1. ลักษณะความผิดพลาดของข้อมูลที่อ่านค่าจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนมูลบนส่วนใหญ่เป็น Systematic Error จากสาเหตุสำคัญ 3 ประการคือ ระบบของเครื่องมือวัด การติดตั้ง และวิธีการอ่านค่า
2. การปรับแก้ค่าการทรุดตัวจากสนามอาศัยเหตุผลสองประการคือ ระดับ Settlement Gauge จะถูกต้องเมื่อวัดในวันที่มีการถ่ายระดับมาที่ปากท่อ และลักษณะการทรุดตัวเป็นไปตามทฤษฎี การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Theory) ได้แก่ Log Time Method ของ Casagrande and Fadum (1940) [2] และ Square root Time Method ของ Taylor (1948) [4]
3. การปรับแก้ค่าความดันน้ำจากสนามอาศัยการทดสอบในสนามและรายงานการติดตั้ง ปรับแก้โดยการตัดค่าความดันน้ำก่อนถึงจุดสมดุลของระบบ และความดันเนื่องจากผลกระทบจากการไหลของอากาศ [10]
4. ผลจากการปรับแก้ทำให้ได้ข้อมูลที่แสดงพฤติกรรมที่ถูกต้องขึ้นและสามารถนำไปประเมินความปลอดภัยได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์วรานนท์ กงสง, อาจารย์อัญญวิทย์ สุจริตพงศ์, อาจารย์เสรีย์ ผู้ประกาศ และอาจารย์นรินทร์ อินอัม ที่ได้กรุณาแนะนำให้บทความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น คุณวราภรณ์ อมรรวพัตร์ และเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่กรุณาจัดเตรียมต้นฉบับ

เอกสารอ้างอิง

1. Casagrande, A., Seepage through dam. Cited by D. G. Fredlund and H. Rahardjo., Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, Inc., 171 to 175, 1937.
2. Casagrande, A and R.E. Fadum, The structure of clay and its importance in foundation engineering, In Contribution to Soil Mechanics 1941-1953, Boston Soc. Civ. Eng., pp.72-125, 1940
3. Lambe, T.W. and R.V. Whitman, Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 553 p., 1979.
4. Taylor, D.W., Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948
5. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design of small Dams, U.S. Government Printing Office, 253 to 255, 1987.
6. กรมชลประทาน, แบบเครื่องมือวัดพฤติกรรมของเขื่อนมูลบน, กองออกแบบ กรมชลประทาน โดยความเห็นชอบของที่ปรึกษาโครงการฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2536
7. วราภรณ์ ไม้เรียง, รายงานทางวิชาการฉบับที่ 1, งานที่ปรึกษาโครงการฐานข้อมูลเขื่อนเพื่อประเมินความปลอดภัยและบำรุงรักษาของสำนักงานชลประทานที่ 9 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 1-4, 2540
8. วิกรม วิกรมประสิทธิ์, พฤติกรรมของเขื่อนดินแม่จัดในระหว่างการก่อสร้างวิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 135 ถึง 138, 2530
9. วรวิมล ปิยะบุตร, การวิเคราะห์การไหลซึมของเขื่อนมูลบน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538
10. พนารัตน์ ขำวงษ์, พฤติกรรมของเขื่อนมูลบนในระหว่างการก่อสร้างและเก็บน้ำในช่วงต้น, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 235 หน้า, 2541