

พฤติกรรมทางด้านแรงดันน้ำและการเคลื่อนตัวของเขื่อนดิน PORE PRESSURE AND MOVEMENT BEHAVIORS OF EARTH DAMS

พนารัตน์ ขำวงษ์¹, ดร.วรารกร ไหมเรียง²

¹ อาจารย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ

² รองศาสตราจารย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ: การประเมินพฤติกรรมเขื่อนจากเครื่องมือตรวจวัด เป็นส่วนสำคัญที่จำเป็นต้องกระทำเพื่อความปลอดภัยและประหยัดในการก่อสร้างและใช้งานเขื่อน บทความนี้ได้เสนอผลของการตรวจวัดและวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนในสามจำนวน 3 เขื่อน โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมความดันน้ำใช้ทฤษฎี Pore Pressure Development และ Flow through Porous Media และให้ผลที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมเคลื่อนตัวของเขื่อนโดยใช้ทฤษฎี Consolidation และความยืดหยุ่นของดิน ผลที่ได้นำไปวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนโดยอาศัยวิธี Limit Equilibrium เพื่อประเมินความปลอดภัยโดยหาอัตราส่วนความดันน้ำเฉลี่ย(R_u)จากอัตราส่วนความดันน้ำที่แนวการเคลื่อนพัง พบว่าค่า R_u อยู่ระหว่าง 0.2-0.5 และตัวเขื่อนใช้เวลาปรับการไหลเข้าสู่การไหลแบบคงที่ไม่น้อยกว่า 2-3 ปี การกักเก็บน้ำจากการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากตรวจสอบจาก Hydraulic Gradient, i_c Seepage Velocity, v_c และ Hydraulic Fracturing การเคลื่อนตัวของเขื่อนซึ่งมีอิทธิพลจากลักษณะทางธรณีวิทยาของไหลซึมและจากการเก็บน้ำพบว่าการเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการทรุดตัว ผลจากการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับที่ออกแบบไว้ และเปรียบเทียบกับเขื่อนประเภทเดียวกันจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการออกแบบและการก่อสร้างในอนาคตให้ปลอดภัยและประหยัดยิ่งขึ้น

ABSTRACT: Dam behaviors from measuring devices are major factors for safety and economics in dam construction and operation. This paper present in situ monitoring data and behavior of 3 earth dam. The theories of pore pressure development and flow through porous media are used for analysis. Pore pressure behaviors related to movement behaviors by consolidation and elastic movement theory. The stability analysis of dam requires average pore pressure ratio on failure plane. Observed pore pressure ratio (R_u) was between 0.2-0.5 and not less than 2-3 years for adjusting to steady state flow. The erosion could be checked by Hydraulic Gradient (i_c), Seepage Velocity (v_c) and Hydraulic Fracturing. Horizontal movements influent by topographical condition and reservoir impounding are small comparing to settlements. Comparison between the field data and the prediction of homogeneous dams is useful for designed development and construction in the future.

KEYWORDS: Behaviors, Instrument, Earth Dam

For further details, contact Panarat Khamwongkhong, Faculty of Engineering Ramkhamhaeng University, Huamark, Bangkok 10240

1. บทนำ

เขื่อนในประเทศไทยปัจจุบันมีอยู่ประมาณ 4750 เขื่อน [1] โดยส่วนใหญ่เป็นเขื่อนดิน สามารถประเมิณพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งจะถูกติดตั้งในจุดวิกฤตและจุดที่ต้องการทราบค่าตามวัตถุประสงค์ต่างๆคือ การออกแบบ การก่อสร้าง การตรวจสอบ การใช้งานในระยะยาว ด้านกฎหมาย การวิจัย ความปลอดภัยและประหยัดในการก่อสร้างหรือใช้งานเขื่อน บทความนี้ได้เสนอผลของการตรวจวัดและวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนในสามจำนวน 3 เขื่อนได้แก่ เขื่อนมูลบน เขื่อนหนองปลาไหล เขื่อนแม่งัดเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามกับที่ออกแบบไว้และเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในต่างประเทศ

เขื่อนมูลบน จ. นครราชสีมา เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว สูง 33 ม. ยาว 880 ม. เขื่อนเดิมสร้างเสร็จ มกราคม 2532 ในช่วงตุลาคม 2533 มีฝนตกหนักจากพายุได้พุน้ำไหลเข้าอ่างมากในช่วงเวลาสั้น ทำให้เกิดการรั่วขึ้น 2 แห่ง โดยน้ำไหลลอดผ่านดินฐานรากซึ่งประกอบด้วยทรายตะกอนทรายแทรกอยู่ในชั้นดินเหนียว มีการใช้ Slurry Wall ปิดกั้นการไหลซึมในเขื่อนที่ทำการซ่อมแซม และติดตั้งเครื่องมือตรวจสอบความดันน้ำและการไหลซึมประกอบด้วย Hydraulic Piezometer 42 หัว Observation Well 8 บ่อ Seepage Flowmeter 7 จุด เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของประกอบด้วย Inclinator พร้อม Settlement Gage 4 จุด Surface Monument 36 จุด ตัวเขื่อนบดอัดทางด้านแ่งด้วยดิน CL เป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีสภาพเป็นพลาสติก

เขื่อนหนองปลาไหล จ.ระยองเป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว สูง 24 ม. ยาว 4060 ม. ติดตั้งเครื่องมือวัดความดันน้ำและการไหลซึมประกอบด้วย Hydraulic Piezometer 78 หัว Observation Well 6 บ่อ Seepage Flowmeter 3 จุด เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Inclinator พร้อม Settlement Gage 8 จุด Extensometer 17 จุด Surface Monument 19 จุด ตัวเขื่อนประกอบด้วยดิน CL เป็นส่วนใหญ่

เขื่อนแม่งัด จ.เชียงใหม่ เป็นเขื่อนดินถมแบ่งส่วน(Zoned Dam) สูง 59 ม. ยาว 1950 ม. หินฐานรากเป็นแอนดิไซต์และออร์โทควอร์ต ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันน้ำ Electrical Strain Gage Piezometer 18 หัว Observation Well 12 บ่อ เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว U.S.B.R. Crossarm 4 จุด Inclinator 4 จุด ในทางปฏิบัติดินถมตัวเขื่อนส่วนแกนและส่วนเปลือกนอกค่อนข้างเหมือนกัน คือเป็นกลุ่ม CL และ ML เป็นส่วนใหญ่

2. พฤติกรรมโดยทั่วไปของเขื่อน

พฤติกรรมโดยทั่วไปของเขื่อนแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ[2]

1. แรงดันดิน(earth pressure) มี 2 ลักษณะคือ แรงดันสถิตย์(geostatic stress) และแรงดันดินอันเกิดจากน้ำหนักหรือแรงกระทำภายนอก (induced stress)
2. ความดันน้ำและการไหลซึมในตัวเขื่อนและฐานราก แบ่งเป็น 3 ระยะคือ ระหว่างการก่อสร้าง ระหว่างเริ่มเก็บกักน้ำ และระหว่างเก็บกักน้ำ
3. การเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของเขื่อนมี 3 ทิศทางคือ การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง การเคลื่อนตัวในแนวเหนือหน้าท้ายน้ำ และการเคลื่อนตัวในแนวแกนเขื่อน

2.1 ความดันน้ำในตัวเขื่อนและฐานรากระหว่างการก่อสร้าง

ความดันน้ำเกิดจากอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดิน ระดับน้ำในอ่าง น้ำหนักกดทับของตัวเขื่อน พลังงานในการบดอัด ความตื้นสะเทือนหรือแผ่นดินไหวค่าความชื้นน้ำและลักษณะทางธรณีของเขื่อนและฐานราก[2] Li [3] กล่าวว่ามิมีขนาดขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยสำคัญคือ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดิน เช่น compressibility permeability และปริมาตรของอากาศหรือน้ำในช่องว่างของมวลดิน เป็นต้น ระยะเวลาที่ใช้ก่อสร้าง(construction rate) และระบบระบายน้ำ(drainage)ที่ออกแบบไว้ในเขื่อนดิน ทำให้ความดันน้ำมี

ผลต่อตัวเขื่อนและฐานรากใน 4 ลักษณะคือ [2] ความมั่นคงของลาดเขื่อนและฐานราก (stability) การทรุดตัว (settlement) การกัดเซาะภายในตัวเขื่อนและฐานราก (piping or erosion) และการรั่วซึมของน้ำที่เก็บกักออกจากตัวเขื่อน (seepage)

ความดันน้ำที่เกิดจากการบดอัดก่อสร้างตัวเขื่อนมูลบน หนองปลาไหล แม้จัด พบว่าความดันน้ำมีค่าสูงจากการบดอัดบริเวณใกล้เขื่อนซึ่งต่ำกว่าภายหลังการเสร็จสิ้นการก่อสร้าง และจะมีการลดระดับลงจากการกระจายความดันออกไปยังน้ำการระบายความดันน้ำพบว่ามีการระบายความดันน้ำจากดินตัวเขื่อนและฐานรากเข้าไปยังชั้นกรอง

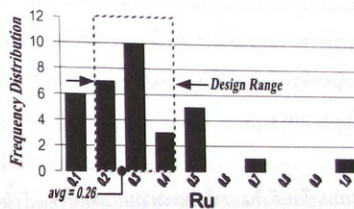
Type of material	Pore pressure ratio, R_u					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
CL Mun Bon Dam	Rang=0.13-1.00 avg $R_u=0.26$					
CL-ML Mae Gnad Dam	0.07-0.31					
CL Nong Pla Lai Dam	0.0-0.6					
Design [2]	0.2-0.4					

รูปที่ 1 อัตราส่วนความดัน R_u จากการบดอัดก่อสร้างตัวเขื่อน

เมื่อนำความดันน้ำส่วนเกินไปวิเคราะห์หา R_u ในระหว่างการก่อสร้างพบว่า มีค่าตั้งแต่ 0.07-1 ดังแสดงในรูปที่ 1 และ มีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางตัวเขื่อน มีค่าน้อยบริเวณใกล้ Filter หินเขื่อน และชั้นฐานรากที่ระบายความดันน้ำส่วนเกินได้ จากรูปจะเห็นว่าค่า R_u ของทั้งสามเขื่อนมีช่วงกว้างเมื่อนำมาเขียนกราฟความถี่ของค่า R_u ที่เกิดในเครื่องมือวัดซึ่งติดตั้งกระจายในตำแหน่งต่างๆของเขื่อนดังแสดงในรูปที่ 2 จะพบว่า ค่าเกิดขึ้นส่วนใหญ่ภายในขอบเขตที่ผู้ออกแบบมักเลือกใช้คือ 0.2-0.4 [2] การวิเคราะห์ความมั่นคงย้อนกลับในเขื่อนมูลบนเพื่อตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ R_u ในกรณี Total Strength และ Effective Strength ได้ค่า R_u เล็กๆตามแนวการเคลื่อนพังมีค่าเท่ากับ 0.26 และได้ค่า F.S. ที่เกิดขึ้นเมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้าง เท่ากับ 1.17 ต่ำกว่า F.S. ที่ออกแบบไว้ซึ่งเท่ากับ 1.31 และค่า F.S. จะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับภายหลังการก่อสร้าง จากการศึกษาพบว่าความดันน้ำส่วนเกินระบายออกไป

การศึกษ้อัตราส่วนความดันน้ำ (Pore Pressure Ratio, R_u) ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้ควบคุมอัตราการก่อสร้างในสนามนั้น Skempton เป็นคนแรกที่กล่าวถึง Pore Pressure Parameters และนำมาใช้งาน โดยอัตราส่วนความดันน้ำคือสัดส่วนระหว่างความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดิน (Δu) ต่อหน่วยแรงหลักที่เพิ่มขึ้น (major principal stress, $\Delta \sigma_v$) เพื่อให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น Bishop [4] เปลี่ยนรูปสมการเป็น

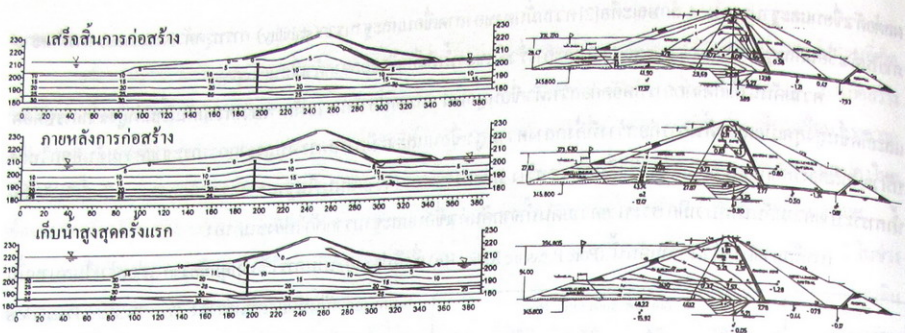
$$R_u = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \quad (1)$$



รูปที่ 2 ความถี่ของค่า R_u ที่วัดได้ในเขื่อนมูลบน

2.2 ความดันน้ำและปริมาณน้ำซึมผ่านเขื่อนในระหว่างเก็บกักน้ำ

การศึกษาระดับความดันน้ำที่เท่ากัน (Pore Pressure Contours) พบว่าเส้นระดับความดันน้ำบริเวณหน้าเขื่อนได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากระดับน้ำในอ่าง บริเวณตัวเขื่อนจะได้รับอิทธิพลจากการบดอัดตัวเขื่อนและลดลงมาใกล้เขื่อนกับระดับน้ำได้เส้นทางด้านท้ายเขื่อนและอิทธิพลจากการบดอัดตัวเขื่อนลดลงภายหลังการก่อสร้าง ลักษณะการเกิดความดันน้ำในช่วงเวลาต่างๆในเขื่อนมูลบน เขื่อนแม่งัด และเขื่อนหนองปลาไหลมีลักษณะคล้ายกัน เมื่อเปรียบเทียบเส้นความดันน้ำที่ตรวจวัดได้กับการคำนวณโดยวิธี Cassagrande [5] แสดงถึงการไหลของน้ำในเขื่อนมีการปรับเปลี่ยน ไปสู่การไหลแบบคงที่ของความดันน้ำในตัวเขื่อนและใช้เวลา



ก) เชื้อนมูลบน

ข) เชื้อนแมงคัง [9]

รูปที่ 3 เส้นระดับความดันน้ำที่เท่ากันในตัวเขื่อนที่เวลาต่างๆ

ไม่น้อยกว่า 2-3 ปี การกักเก็บจากการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากตรวจสอบจาก Hydraulic Gradient (i) พบว่ามีค่าลดลงตามลำดับจากเหนือน้ำไปท้ายน้ำและลดลงมากเมื่อไหลผ่านชั้นกรอง สำหรับในเชื้อนมูลบนเทียบกับกรณีวิเคราะห์ของรวูดี [6] แล้วความลาดระดับน้ำมีค่าน้อยกว่าที่คาดไว้มาก น้ำไหลจากท่อรับน้ำจากชั้นกรองวัดได้ปริมาณสูงสุด 1.44 ลบ.ม/วัน คิดเป็น 0.09-0.22% ของเกณฑ์ความปลอดภัยที่วิเคราะห์ไว้ เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำในอ่างมีเปอร์เซ็นต์การรั่วซึมเท่ากับ 0.000001% น้อยกว่าที่ยอมให้ซึ่งกำหนดไว้ 0.01-0.05 % [2]

2.3 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งในระหว่างการก่อสร้าง

การเคลื่อนตัวของดินตัวเขื่อนมีอิทธิพลจาก อัตราและปริมาณแรงที่บดอัด และความสามารถในการระบายน้ำออกจากมวลดิน Wilson [8] กล่าวว่า การเคลื่อนตัวในเขื่อนดินเกิดจากสาเหตุดังนี้ คือ ความยืดหยุ่นของมวลดิน (elastic deformation) กระบวนการ consolidation การถ่ายเทน้ำหนักระหว่างโซนต่างๆ ในเขื่อนดิน ความแตกต่างของลักษณะภูมิประเทศการเริ่มเก็บกักน้ำและจาก Creep แต่ในการศึกษานี้ยังตรวจไม่พบการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Creep

การเคลื่อนตัวในแนวตั้งในระหว่างการก่อสร้าง เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การบดอัดตัวที่หน่วยความดันดินของดินถมบดอัด 100 psi ดังรูปที่ 4 เปรียบเทียบกับของ Gould [8] ซึ่งศึกษาเปอร์เซ็นต์การบดอัดตัวเฉลี่ยที่วัดจากเขื่อนดินขนาดใหญ่กว่า 20 เมตร ที่ก่อสร้างในฝั่งตะวันตกของอเมริกา ในเชื้อนแมงคังใช้ดินประเภท CL-MH มีการบดอัดตัว 2.3-5.9 % มีช่วงกว้างกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินประเภทใดก็ตาม CL-ML ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.8-4.2 % สำหรับในเชื้อนมูลบนซึ่งสูง 30 เมตร น้ำหนักกดทับที่ตำแหน่งเครื่องมือประมาณ 80 psi โดยพิจารณาที่ระดับฐานรากประกอบด้วยดิน SP และ SM แทรกอยู่ในชั้น CL และ ML ปรากฏว่าการบดอัดตัวอยู่ในช่วง 0.6-3.3 % สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gould [8] ในดินประเภท SM-ML เชื้อน Muddy Run และ CL-ML

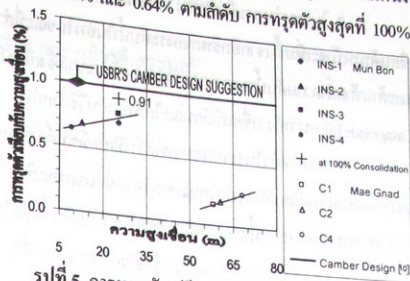
Type of material	Compression @ 100 psi (%)
GM-SM-GP	0.9-1.4
SM-ML Muddy Run Mammoth Pool	1.3-2.1
SC-GC	1.9-3.3
CL-ML Netzahualcoyotl	2.8-4.2
CH Akosombo Infiernillo Rockfill	
Akosombo Infiernillo Netzahualcoyotl Muddy Run	
CL-MH Mee Gnad [9] C1 C2 C4	2.8-5.7 2.4-5.9 2.3-5.9
CL-ML-SP-SM Mun Bon INS-2 INS-3 INS-4	0.6-3.3

รูปที่ 4 การบดอัดตัวที่หน่วยความดันดินถม 100 psi เทียบกับผลของ Gould [8]

2.4 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งภายหลังการก่อสร้าง

ในข้อมูลบนและเขื่อนแม่งัดพบว่าภายหลังการก่อสร้างประมาณ 3 ปี และ 2 ปี ตามลำดับกระบวนการอัดตัวคายน้ำต้นเนิน USBR [10] กำหนดไว้เท่ากับ 1% ของความสูงเขื่อน ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่ามีความน้อยกว่าการออกแบบ Camber ซึ่ง Consolidation มีค่า 0.91% ในเขื่อนแม่งัดการทรุดตัวสูงสุดที่ C1, C2 และ C4 เกิดขึ้น 0.16%, 0.19% และ 0.25% ตามลำดับ

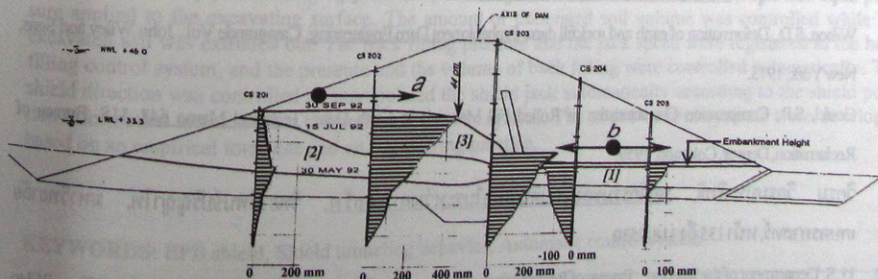
การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมากภายหลังการก่อสร้างนั้น เป็นผลจากความสูงเขื่อนและชนิดของดินด้วย ดังจะเห็นจากรูปที่ 5 ว่าในเขื่อนเดียวกัน INS-1 และ INS-3 คิดทั้งที่ความสูงเขื่อนเท่ากัน มีเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวที่เกี่ยวกับความสูงเขื่อนใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความสูงเขื่อนมากขึ้น



รูปที่ 5 การทรุดตัวเปรียบเทียบกับความสูงเขื่อนที่เพื่อไว้สำหรับการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้าง

2.5 การเคลื่อนตัวแนวราบของตัวเขื่อน

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวแนวราบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความมั่นคงของลาดเขื่อน จากการศึกษาทั้ง 3 เขื่อนไม่พบความผิดปกติแต่อย่างใด ในระหว่างก่อสร้างลำดับขั้นตอนการบดมีผลต่อการเคลื่อนตัวแนวราบของดินตัวเขื่อน ดังตัวอย่างรูปที่ 6 โดยถูกแสดงทิศทางการบดอัดชั้นดินที่บดอัดเพิ่มขึ้นเรียงลำดับจาก 1, 2 และ 3 การบดอัดชั้นดินหมายเลข 3 ในลักษณะ a มีทิศทางการบดอัดเดิมเพิ่มจากซ้ายไปขวาเป็นผลให้เกิดการเคลื่อนตัวไปท้ายน้ำ เครื่องมือ CS202 และ CS203 วัดได้สูงสุดที่ระดับความมากถึง 44 ซม. และ 35 ซม. ตามลำดับ ลักษณะการบดอัดชั้นดินที่ 1 จะบดอัดจากบริเวณกึ่งกลางไปซ้ายและขวาในลักษณะ b ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของ CS204 และ CS205 ไปตามทิศทางการบดอัดดังกล่าว ในระหว่างเก็บน้ำโดยส่วนใหญ่มีการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำ การเคลื่อนตัวของหินทั้งที่ผิวเขื่อนทำให้เกิดการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณส่วนบนของหอคอยการเคลื่อนตัว แต่การเคลื่อนตัวของดินภายในตัวเขื่อนขณะเก็บน้ำมีการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำเพียงเล็กน้อยไม่ถึง 1 ซม. อาจเป็นเพราะเขื่อนมูลบนมีความสูงปานกลาง 32.7 ม. เมื่อเทียบกับการเคลื่อนตัวจากการเก็บน้ำในผลการศึกษาของ Wilson [7] ในเขื่อน EL Imfiemillo Dam ความสูงประมาณ 125 ม. มีการเคลื่อนตัวเนื่องจากเก็บน้ำภายหลังการก่อสร้าง 4 ปี ไปยังท้ายน้ำสูงสุดมากถึง 45 ซม.



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวเนื่องจากการบดอัดดินก่อสร้างตัวเขื่อนหนองปลาไหล

3. สรุป

1. ในระหว่างการก่อสร้าง ความดันน้ำในตัวเชื่อมมีค่าสูงขึ้นจากการบดอัดและสูงสุดเมื่อการก่อสร้างใกล้แล้วเสร็จซึ่งเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางตัวเชื่อม โดยมีอัตราส่วนความดันน้ำ R_u เฉลี่ย 0.26 ในเขื่อนมูลบน และ 0.07-0.31 ในเขื่อนแม่งัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้ในการออกแบบประมาณ 0.2 ถึง 0.4 นับว่าใกล้เคียงกัน
2. ในระหว่างการเก็บน้ำช่วง 2-3 ปีแรกมีการปรับตัวของความดันน้ำเข้าสู่สภาพการไหลคงที่ โดยความดันน้ำในตัวเชื่อมด้านหน้าจะเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของระดับน้ำในอ่างในขณะที่ส่วนกลางตัวเชื่อมความดันน้ำจากอิทธิพลของการบดอัดลดลง และด้านท้ายน้ำความดันน้ำลดลงมาจากผลของชั้นระบาย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นผิวน้ำที่สำรวจกับการคำนวณ โดยวิธี Casagrande [6] พบว่าทั้ง 3 เขื่อนมีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีดังกล่าว
3. การทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างมีเปอร์เซ็นต์การขยุ้มตัวที่หน่วยความดันดิน 100 psi ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Gould [8] ในเขื่อนดินขนาดใหญ่มากกว่า 20 เขื่อนของอเมริกา ในเขื่อนมูลบนมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-3.3% ในเขื่อนแม่งัด [9] มีค่า 2.3-5.9% การทรุดตัวส่วนนี้จะถูกทดแทนด้วยดินถมใหม่ในชั้นถัดไปจึงไม่ปรากฏผลเสียที่เกิดขึ้นในเขื่อน
4. การทรุดตัวภายหลังการก่อสร้างเทียบกับความสูงที่วัดได้ทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าความสูงเขื่อนที่เพื่อไว้สำหรับการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้าง (Camber) ซึ่ง USBR [10] กำหนดไว้เท่ากับ 1% ของความสูงเขื่อนและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความสูงเขื่อน
5. การเคลื่อนตัวแนวราบพบว่าการเคลื่อนที่น้อยมาก ในระหว่างการก่อสร้างพบว่ามีลักษณะการบดอัดมีผลต่อการเคลื่อนตัวแนวราบของดินตัวเชื่อม ในระหว่างใช้งานพบว่าการเก็บกักน้ำมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนตัวเนื่องจากการไหลซึมและแรงดันน้ำ

เอกสารอ้างอิง

1. วรากร ไม้เรียง, รายงานทางวิชาการฉบับที่ 1, งานที่ปรึกษาโครงการฐานข้อมูลเขื่อนเพื่อประเมินความปลอดภัยและบำรุงรักษาของสำนักงานชลประทานที่ 9 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 1-4, 2540
2. วรากร ไม้เรียง, คู่มือการวัดพฤติกรรมเขื่อนดิน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 230 หน้า, 2538
3. Li, C.Y. Construction pore pressure in an earth dam, *JSMFD, ASCE*, 85(5), p.43-59, 1959.
4. Bishop, A.W., The use of pore pressure coefficients in practice, *Geotechnique* 4, p.148-152, 1954.
5. Casagrande, A., Seepage through dam. Cited by D.G.Fredlund and H.Rahardjo., *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*, John Wiley & Sons, Inc., 171 to 175, 1937.
6. รวูฉิปัญจะบุตร, การวิเคราะห์การไหลซึมของเขื่อนมูลบน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538
7. Wilson, S.D., Deformation of earth and rockfill dam, *Embankment Dam Engineering*, Casagrande Vol., John Wiley and Sons, New York, 1973.
8. Gould, S.P., Compression Characteristics of Rolled Fill Materials in Earth Dam, *Technical Memo 648*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1959.
9. วิกรม วิกรมประสิทธิ์, พฤติกรรมของเขื่อนดินแม่งัดในระหว่างการก่อสร้าง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 135 ถึง 138, 2530
10. U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of small Dams*, U.S. Government Printing Office, 253 to 255, 1987.