

ความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เมื่อกักเก็บน้ำสูงกว่าระดับน้ำเก็บกัก (รณก.) เป็นระยะเวลานาน
FACTOR SAFETY OF PASAK JOLASID DAM, WHEN WATER LEVEL IS HIGHER THAN NORMAL WATER LEVEL (NWL)
FOR A LONG TIME

กรรณก ในจิตต์^{1*} และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author address: kornkanok.nai@ku.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นและป้องกันอุทกภัยที่เกิดขึ้นในฤดูน้ำหลาก ทำให้เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ได้มีการกักเก็บน้ำไว้สูงกว่าระดับน้ำเก็บกัก (รณก.) คือ +42 ม.รทก. เป็นประจำทุกปี จากการตรวจสอบสภาพเขื่อนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 โดยกรมชลประทาน ได้พบรอยแตกตามยาวบนถนนสันเขื่อน ต่อมาศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2557) ได้ทำการหาสาเหตุของรอยแตกตามยาว โดยพบว่าเกิดการปัญหาดินบวมตัวของดินถมเขื่อนบางส่วน (เมฆและสุทธิศักดิ์, 2558) เพื่อความปลอดภัยของเขื่อน ทั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของดินบวมตัว ในกรณีที่ดินอยู่สภาวะเปียกสลับแห้ง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงและเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเริ่มคงที่ ซึ่งดินบวมตัวที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งนั้น คล้ายกับพฤติกรรมของดินบวมตัวในตัวเขื่อน บทความนี้ได้สร้างแบบจำลองพฤติกรรมการไหลซึม ให้สอดคล้องกับสภาวะที่มีในประวัติการใช้งานของเขื่อน และวิเคราะห์เสถียรภาพลาดเขื่อน โดยนำคุณสมบัติดินบวมตัว เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนในระยะยาว

คำสำคัญ: เขื่อนดินถม, ดินบวมตัว, รอยแตกตามยาว, ความปลอดภัยเขื่อน

Abstract

Each year, From the statistics of water storage of the Pasak Jolasid dam, the reservoir water level is higher than Normal Water Level (NWL) is +42 m.MSL, due to the demand of water has been increasing and prevent by floods in rainy season. From Pasak Jolasid dam inspection performed by Royal Irrigation Department (RID) since 2014, some longitudinal cracks were still found on the road of dam crest. Later, Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD), Kasetsart University (Soralump et al., 2014), The cause of longitudinal cracks was caused swelling soil by Mekkhao and Soralump (2015). For Factor Safety of Dam, this article is applied a study the swollen soil behavior by the swell-shrink behavior condition, it was found that the shear strength would decrease and when equilibrium state, the shear strength would begin to remain constant, which swollen soil in the wet-dry cyclic similar to the behavior of soil swelling in the dam. Numerical model software GeoStudio was used to predict the behavior of the dam in specific scenario, for instance the case of the high water level within the embankment. This behavior of the dam will use to the analysis of seepage and slope stability, applied properties of swelling soil from wetting-drying cycles test, to result the factor safety of Pasak Jolasid dam.

Keywords: Earth-Zone Dam, Swelling Soil, Longitudinal Crack, Dam Safety

1. บทนำ

เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เป็นเขื่อนดินถมประเภทแบ่งโซน มีความยาว 4,860 เมตรและความสูง 31.5 เมตร ตั้งอยู่ที่ ตำบลหนองบัว อำเภอนาน้อย จังหวัดน่าน และตำบลค้ำพรวน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดสระบุรี จากการตรวจสอบสภาพโดยกรมชลประทานในปัจจุบัน ได้พบรอยแตกตามยาวบนถนนสันเขื่อนในบริเวณตำแหน่งเดิมที่เคยเกิดขึ้น คือ บริเวณหน้าตัด 3+650 ถึง 4+300 ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2557 และ เมฆและสุทธิศักดิ์, 2558) ได้ทำ

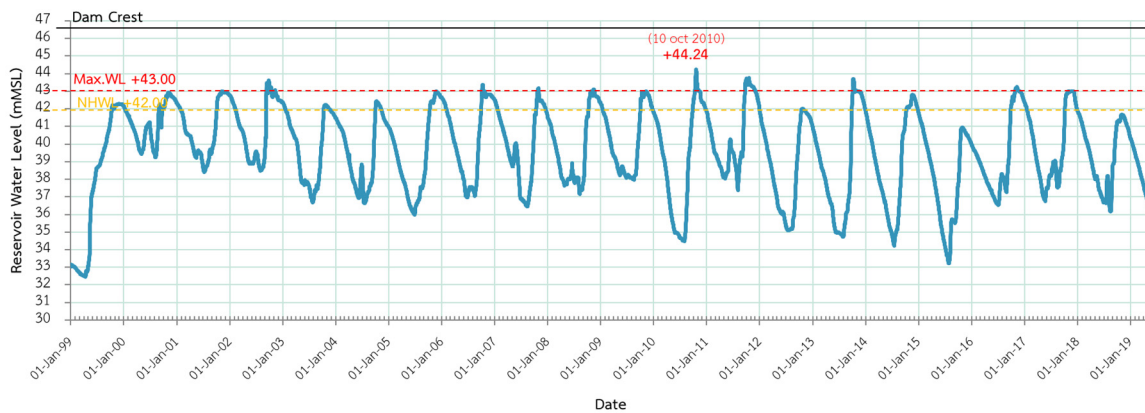
การหาสาเหตุของรอยแตกตามยาว โดยการประเมินศักยภาพการบวมตัวของดินถมตัวเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ พบว่าดินถมเขื่อนเป็นดินเหนียวสีเทาดำ (CH) ความแข็งของดินเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก ปริมาณเม็ดดินเหนียวค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 25–50% มีโอกาสเกิดทรุดตัวได้ง่าย ค่าขีดจำกัดความเหลว (LL) อยู่ในช่วง 50–60% ค่าดัชนีความเหนียว (PI) อยู่ในช่วง 25–45% ปริมาณน้ำในมวลดินอยู่ที่ 15–30% ดังนั้นแร่ประกอบในมวลดินจึงเป็นมีแร่ Montmorillonites และ Illites เป็นส่วนประกอบ จากงานวิจัยของสุทธิศักดิ์และคณะ [2] และเมฆ [1] ได้ตรวจสอบการทดสอบ Swelling Potential โดยวิธี Consolidation-Method B (ASTM D

4659-96) ได้สรุปผลการทดสอบว่าค่าแรงดันการบวม (Swelling Pressure) อยู่ในช่วง 60–90 kPa และการประเมินระดับการบวมตัวของดินถมขึ้นอยู่กับระดับปานกลางถึงระดับสูง

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ โดยศึกษาพฤติกรรมของดินบวมตัว ในกรณีที่ดินอยู่สภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการไหลซึมและการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดเขื่อน นำไปสู่ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน

2. ข้อมูลระดับน้ำในอ่างฯ

ศึกษาข้อมูลของระดับน้ำในอ่างฯ เป็นระยะเวลา 20 ปี คือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 ถึง พ.ศ. 2561 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อมูลระดับน้ำในอ่างฯ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 ถึง พ.ศ. 2561

จะเห็นได้ว่า ในวันที่ 10 ต.ค. 2553 (2010) ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ มีระดับอยู่ที่ +44.24 ม.รทก. ซึ่งสูงกว่า รนท (+42 ม.รทก.) ตรงเส้นสีเหลือง จากภาพรวมของระดับน้ำสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลสถิติระดับน้ำในอ่างฯ ตั้งแต่ปี 2542 ถึง 2561

ระดับน้ำที่พิจารณา	จำนวน (ปี)	ปี
ระดับน้ำที่สูงกว่าระดับน้ำกักเก็บ (รณก.)	18	2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2559 และ 2560
ระดับน้ำที่สูงกว่าระดับน้ำสูงสุด (รณส.)	12	2544, 2545, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2556, 2559 และ 2560
มีน้ำท่วมด้านท้ายน้ำ	5	2545, 2549, 2553, 2554, 2556

พบว่าเขื่อนนี้มีระดับน้ำที่สูงกว่าระดับน้ำกักเก็บ (รณก.) จำนวน 18 ปี และระดับน้ำที่สูงกว่าระดับน้ำสูงสุด (รณส.) จำนวน 12 ปี

3. ดินบวมตัว

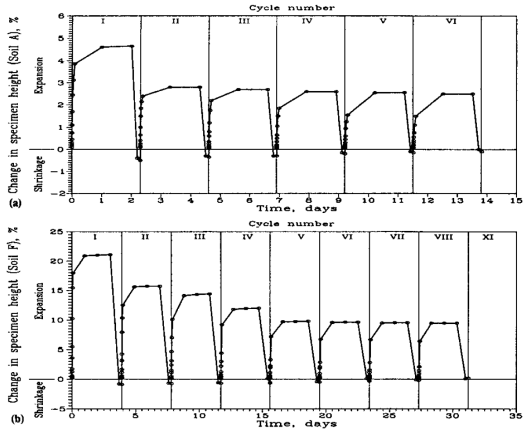
3.1. พฤติกรรมของดินบวมตัว

ดินบวมตัวสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมได้ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับฤดูกาลหรือสภาพความชื้นในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา โดยที่พฤติกรรมการบวมตัว (Swell) จะเกิดขึ้น เมื่อได้รับความชื้นหรือในช่วงฤดูฝน และพฤติกรรมการหดตัว (Shrinkage) จะเกิดในฤดูแล้ง เนื่องจากดินบวมตัวจะคายความชื้น ซึ่งทำให้ดินเกิดโพรง เกิดการทรุดตัวหรือรอยแตก

3.2. การทดสอบของดินบวมตัว

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบดินบวมตัวในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet – Dry Cycle) นั้น ได้จะอาศัยการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct Shear Test), การทดสอบการอัดคายน้ำ (Consolidation Test) หรือการทดสอบอัด 3 แกน (Triaxial Test) ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ต้องการ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 กำหนดให้หดตัวบางส่วน และบวมตัวเต็มที่ (Full Swelling – Partial Shrinkage) แบบที่ 2 กำหนดให้หดตัวและบวมตัวเต็มที่ (Full Swelling – Full Shrinkage)

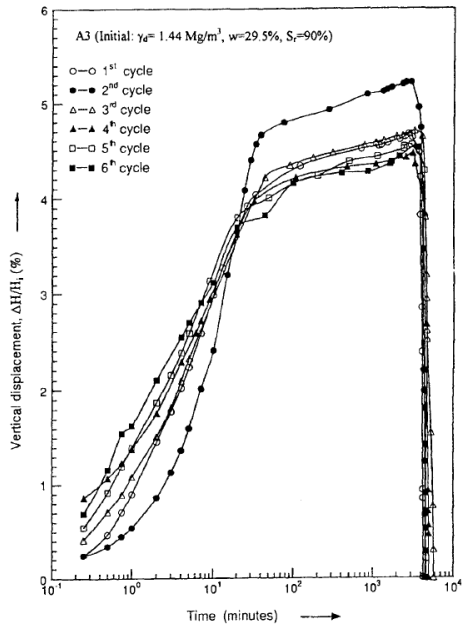
Al-Homoud et al. [4] ใช้วิธีการอัดคายน้ำในการทดสอบ ซึ่งจะทดสอบแบบหดตัวบางส่วน-บวมตัวเต็มที่ ในการทดสอบรอบที่ 1 มีผลต่อการบวมมากที่สุดแล้วค่อยๆ ลดลงจนถึงสภาวะสมดุล จากการทดสอบประมาณ 4-5 รอบ ดังรูปที่ 2 เมื่อทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง ซ้ำไปซ้ำมา ดินจะเกิดความล้าทำให้ความสามารถในการบวมตัวลดลง



รูปที่ 2 กราฟแสดงการบวมตัวและหดตัวในแนวตั้งตามเวลา สำหรับ (a) ดิน A หรือ CL ; (b) ดิน F หรือ MH

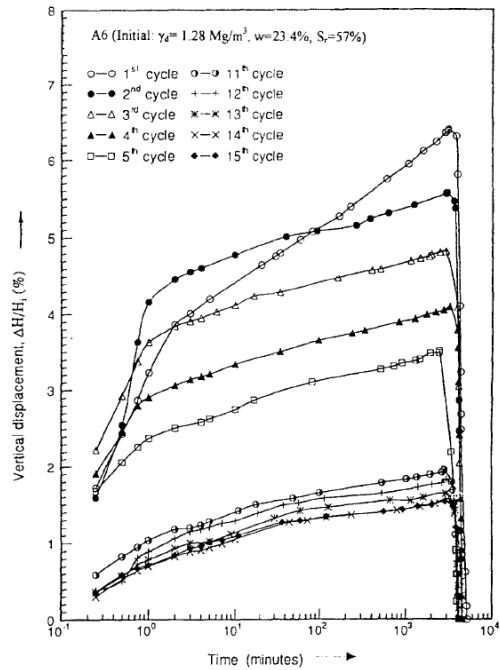
ที่มา : Al-Homoud et al. (1995)

Rao [5] ได้ทำดัดแปลงจากการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง ซึ่งทดสอบแบบหดตัว-บวมตัวเต็มที่ จากรูปที่ 3 และ 4 นั้นจะทำการบดอัดดินที่ใช้ความหนาแน่นและปริมาณน้ำแตกต่างกัน แสดงว่าค่าของความหนาแน่นและปริมาณน้ำมีผลต่อการจำนวนรอบของการทดสอบแบบหดตัว-บวมตัวที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัว-หดตัว และเวลา (Swell-Shrink-Time Curves) ของตัวอย่าง A3

ที่มา : Rao (2000)



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัว-หดตัว และเวลา (Swell-Shrink-Time Curves) ของตัวอย่าง A6

ที่มา : Rao (2000)

จากผลการทดสอบพบว่าศักยภาพการบวมตัวจะมีค่าคงที่เมื่อผ่านไป 3-5 รอบการทดสอบ แต่ก็ขึ้นอยู่กับดินแต่ละชนิดด้วยการทดสอบในสภาวะเปียกกลับแห้ง ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดินบวมตัวที่ถูกจำลองขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ซึ่งจะบันทึกค่าในรอบของการทดสอบแบบหดตัวเต็มที่

ตารางที่ 2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง A3 ที่การหดตัว 100%

จำนวนรอบ	ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน, c (kN/m ²)	ค่ามุมเสียดทาน, ϕ (°)
1	960	15.7
2	610	14.0
3	445	14.4
4	435	10.8
5	435	11.5
6	435	11.2

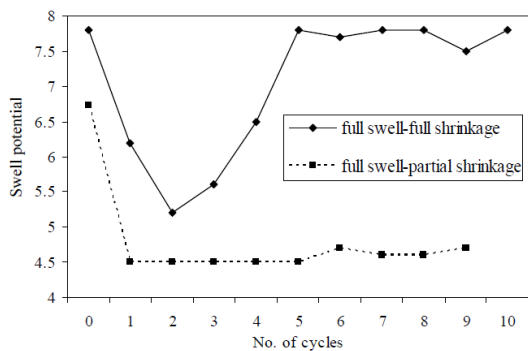
ที่มา : Rao (2000)

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง A6 ที่การหดตัว 100%

จำนวนรอบ	ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน, c (kN/m ²)	ค่าค่ามุมเสียดทาน, ϕ (°)
1	440	25.5
2	375	25.0
3	350	22.5
4	290	26.5
5	260	26.0
6	240	28.5
7	215	27.0
9	195	27.0
11	190	25.5
12	187	25.0
15	185	25.5

ที่มา : Rao (2000)

Tawfiq และ Nalbantoglu [6] ใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง และทำการทดสอบทั้ง 2 แบบ คือ แบบหดตัวบางส่วน-บวมตัวเต็มที่ และ แบบหดตัว-บวมตัวเต็มที่ ดังรูปที่ 5 ในรอบที่ 1 และ 2 การบวมตัวของดินจะลดลง แต่พอรอบที่ 3 ดินมีการบวมตัวขึ้นเรื่อยๆ พอเข้ารอบที่ 5 การบวมตัวจะคงที่ นักวิจัยอธิบายว่าดินที่ใช้ทดสอบนั้นเกิดรอยแตกเล็กๆ (Macro Crack) ขึ้นภายใน ทำให้รอบต่อไป มีน้ำเข้ามาแทนในช่องว่าง จึงเกิดการบวมตัวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 กราฟแสดงศักยภาพการบวมตัวภายใต้การทดสอบแบบหดตัวบางส่วน-บวมเต็มที่ และ แบบหดตัว-บวมตัวเต็มที่ ตามจำนวนรอบทดสอบ

ที่มา : Tawfiq และ Nalbantoglu (2009)

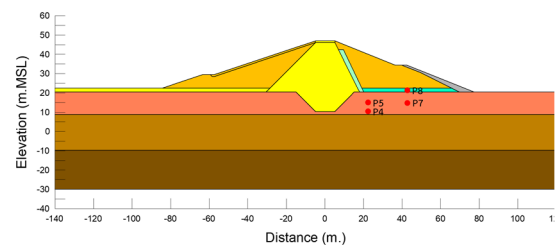
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อน จะพิจารณารวมกับการวิเคราะห์การไหลซึม ด้วยโปรแกรม GeoStudio ซึ่งได้รวบรวมและสรุปคุณสมบัติของวัสดุไว้ดังแสดงในตารางที่ 4 จาก สุทธิศักดิ์และคณะ (2563)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

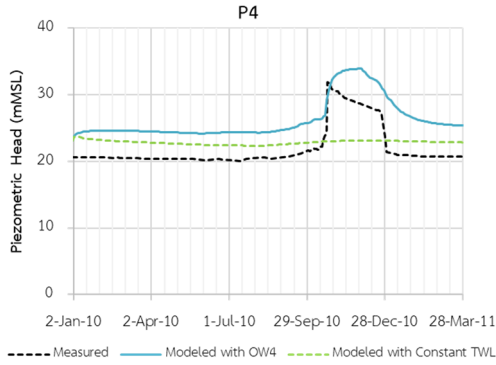
วัสดุ	γ_{sat} (kN/m ³)	k (cm/s)	c (kPa)	ϕ (°)
แกนดินเหนียว	19.40	1.11×10^{-5}	25.88	14.38
เปลือกเขื่อน	19.00	3.67×10^{-4}	30.42	9.15
ชั้นวัสดุกรอง	17.93	2.63×10^{-3}	0	35.00
ดินฐานราก	16.68	1×10^{-5}	11.00	36.70
ชั้นดินฐานรากโปร่งน้ำ	22.00	1×10^{-4}	0	30.00

บริเวณลำน้ำเดิมมีมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ติดตั้งอยู่ภายในตัวเขื่อนที่หน้าตัด 3+650 และด้านท้ายมีบ่อวัดระดับน้ำใต้ดิน (Observation Well, OW) หมายเลข OW4 แสดงระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำในอ่างฯ ในช่วงเวลาที่มีน้ำท่วมด้านท้ายเขื่อน และมาตรวัดความดันน้ำที่ติดตั้งไว้ภายในตัวเขื่อน ในบริเวณด้านท้ายน้ำมีระดับน้ำสูงซึ่งตามระดับน้ำในอ่างและระดับน้ำท่วม โดยเฉพาะในปีพ.ศ. 2553 ที่ระดับน้ำในอ่างฯ ขึ้นสูงสุดที่ +44.24 ม.รทก. คือมาตรวัดความดันน้ำ P4, P5, P7 และ P8 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณใกล้ชั้นกรองน้ำ (Filter) ดังรูปที่ 6 แสดงค่าระดับน้ำยกตัวสูงซึ่งผิดปกติ ที่อาจมีสาเหตุจากอิทธิพลของระดับน้ำท่วมสูงด้านท้ายเขื่อน



รูปที่ 6 ตำแหน่งมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ของ P4, P5, P7 และ P8

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของหน้าตัด 3+650 นั้น พบว่าค่าศักย์น้ำรวม (Piezometric Head) ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าจริงเพียงเล็กน้อย แต่ก็มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับ P4, P5, P7 และ P8 แต่เมื่อจำลองให้ระดับน้ำด้านท้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลับพบว่าค่าศักย์น้ำรวมไม่มีการยกตัวขึ้น จึงสรุปได้ว่าตัวเขื่อนด้านท้ายน้ำถูกรบกวนจากน้ำท่วม ดังรูปที่ 7

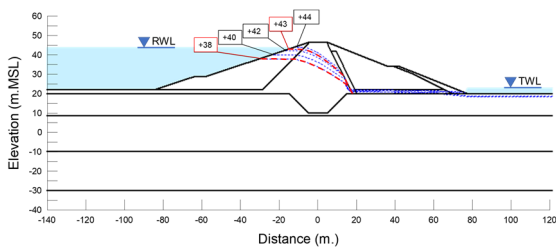


รูปที่ 7 กราฟแสดงศักย์น้ำจาก P4 และจากผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

จากงานวิจัยของ Rao [5] พบว่าหลังจากการทดสอบแบบในสถานะเปียกสลับแห้ง เมื่อผ่านไปจุดหนึ่งแล้วค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเริ่มคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 นั้น รอบที่ 1 เปรียบเทียบกับรอบที่มีค่าคงที่แล้ว ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ค่าจะลดลงประมาณ 40-50 % ส่วนค่ามุมเสียดทาน (Friction Angle) ของตัวอย่าง A3 ลดประมาณ 30% และตัวอย่าง A6 ค่าแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมแบบ Transient โดยใช้ข้อมูลของระดับน้ำปี 2553 แล้วจึงนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันต่อ ซึ่งในกรณีที่ 1 คือใช้ค่า c' และ ϕ' จากตารางที่ 4 โดยกำหนดให้เป็น 100%, กรณีที่ 2 ใช้ค่า c' ที่ 50% และ ϕ' ที่ 100% และในกรณีที่ 3 ใช้ c' ที่ 50% และ ϕ' ที่ 30% ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จะนำไปใช้ในแบบจำลอง

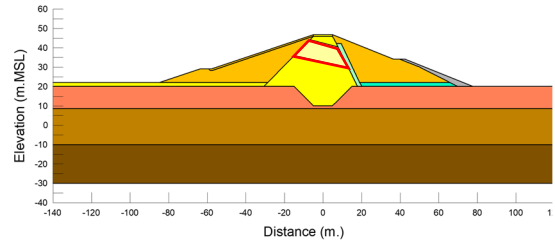
กรณี	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
1	25.88	14.38
2	12.94	14.38
3	12.94	10.07



รูปที่ 8 พื้นที่เปียกสลับแห้งของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

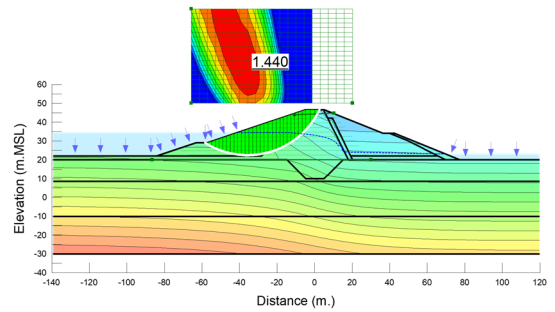
ในการปรับค่ากำลังรับแรงเฉือนในแบบจำลองนั้น จะทำการปรับค่าเฉพาะช่วงที่อยู่ในพื้นที่เปียกสลับแห้งในแกนเขื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลซึม เนื่องจากแกนเขื่อนเป็นดินบวมตัว เมื่อโดน

น้ำจะทำให้ดินบวมตัวและเมื่อแห้งจะทำให้เกิดรอยแตกได้ ดังรูปที่ 8 เมื่อนำมาช่วงพื้นที่นั้นมาปรับใส่แบบจำลองจะได้ดังรูปที่ 9 เพื่อนำไปวิเคราะห์แบบจำลองต่อ

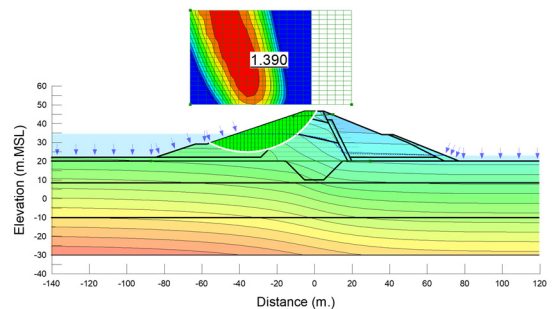


รูปที่ 9 พื้นที่เปียกสลับแห้งที่ใช้ในแบบจำลอง

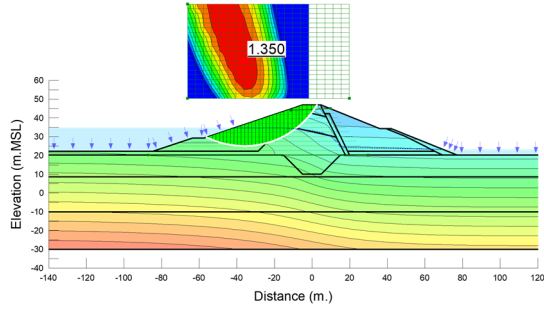
เนื่องจากแบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อนนั้น จะวิเคราะห์รวมกับการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมแบบ Transient เพื่อให้เห็นถึงการขึ้น-ลงของระดับน้ำในอ่างฯ ซึ่งในบทความนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อน ดังรูปที่ 10 ถึง 12 จะเห็นได้ว่าในเมื่อระดับน้ำในอ่างฯ เท่ากัน กรณีที่ 3 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุด ต่อมาในรูปที่ 13 ถึง 15 เมื่อระดับน้ำในอ่างฯ มาแสดงเป็นกราฟร่วมกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเห็นว่าที่ระดับน้ำเดียวกันจะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่างกัน ซึ่งในกรณีที่ระดับน้ำในอ่างฯ ลดลงจะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่าในกรณีที่ระดับน้ำในอ่างฯ เพิ่มขึ้น ดังนั้นได้สรุปค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของแต่ละกรณีไว้ในตารางที่ 6



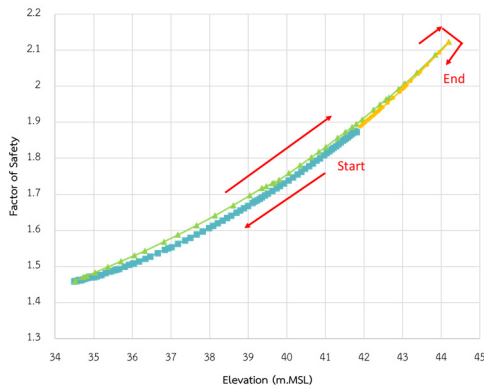
รูปที่ 10 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน ที่ระดับน้ำ +34.49 ม.รทก. ของกรณีที่ 1



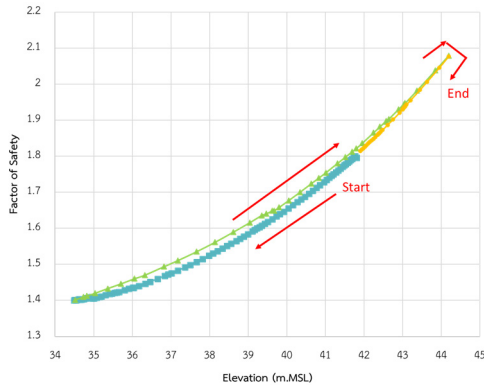
รูปที่ 11 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน ที่ระดับน้ำ +34.49 ม.รทก. ของกรณีที่ 2



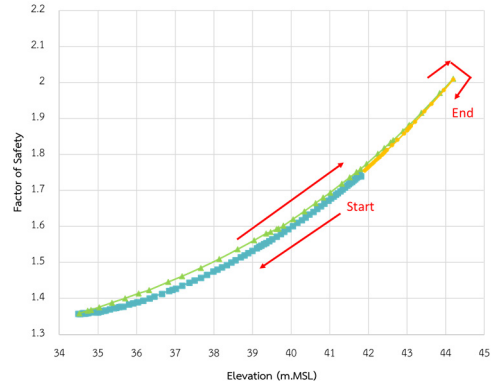
รูปที่ 12 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน ที่ระดับน้ำ +34.49 ม.รทก. ของกรณีที่ 3



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนกับระดับน้ำในอ่างฯ ของกรณีที่ 1



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนกับระดับน้ำในอ่างฯ ของกรณีที่ 2



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนกับระดับน้ำในอ่างฯ ของกรณีที่ 3

ตารางที่ 6 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน ที่ระดับน้ำต่างๆ

วันที่	ระดับน้ำ (ม.รทก.)	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย		
		1	2	3
1 ม.ค. 2553	+42	1.876	1.800	1.742
21 ก.พ. 2553	+40	1.724	1.654	1.601
2 เม.ย. 2553	+38	1.590	1.527	1.479
2 พ.ค. 2553	+36	1.486	1.428	1.385
31 ก.ค. 2553	+34.49	1.440	1.390	1.350
14 ส.ค. 2553	+36	1.510	1.452	1.409
22 ส.ค. 2553	+38	1.593	1.532	1.483
9 ก.ย. 2553	+40	1.747	1.676	1.620
27 ก.ย. 2553	+42	1.908	1.836	1.774
21 ต.ค. 2553	+44.19	2.117	2.035	1.978
24 ธ.ค. 2553	+42	1.899	1.826	1.767

สำหรับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อน ในกรณีที่ 1 ที่ระดับน้ำต่ำสุด +34.49 ม.รทก. มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.440 กรณีที่ 2 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.390 และกรณีที่ 3 มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.350 ซึ่งทั้ง 3 กรณีไม่ผ่านเกณฑ์ของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ คือ 1.5 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ ในสภาวะปกติ

ที่	กรณี	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้
1	หลังก่อสร้างแล้วเสร็จ	1.3
2	ระดับน้ำสูงสุด	1.5
3	ระดับน้ำปกติ	1.5
4	ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	1.3
5	ระดับน้ำปานกลาง	1.5

ที่มา : วรากร ไม้เรียง (2542)

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อนนั้น ในกรณีที่ 1 คือใช้ค่า c' เท่ากับ 25.88 kN/m² และค่า ϕ' เท่ากับ 14.38° และกรณีที่ 2 คือใช้ค่า c' เท่ากับ 12.94 kN/m² และค่า ϕ' เท่ากับ 14.38° เมื่อระดับน้ำในอ่างฯ ลดต่ำลงน้อยกว่า +38 ม.รทก. ค่าของอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนในกรณีที่ 3 คือใช้ค่า c' เท่ากับ 12.94 kN/m² และค่า ϕ' เท่ากับ 10.07° เมื่อระดับน้ำในอ่างฯ ลดต่ำลงน้อยกว่า +40 ม.รทก. ค่าของอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีการพิจารณาอีกหลายประเด็น เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินบวมตัวที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก และกรมชลประทาน ที่สนับสนุนข้อมูลสำหรับบทความฉบับนี้

7. การอ้างอิง

- [1] เมฆ เมฆขาว (2558). การวิเคราะห์หาสาเหตุของรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อนและความมั่นคงของเขื่อนดินแบบแบ่งส่วน “กรณีศึกษาเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [2] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์และคณะ (2557). “รายงานฉบับสมบูรณ์: โครงการวิเคราะห์และออกแบบซ่อมแซมเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี”, หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์และคณะ (2563). “รายงานฉบับสมบูรณ์: โครงการศึกษาเกณฑ์ความปลอดภัยจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จ. ลพบุรี”, หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] A. S. Al-Homoud, A. A. Basma, A. I. Husein Malkawi and M. A. Al Bashabsheh (1995). Cyclic Swelling Behaviour of Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), 562-565.
- [5] K.S. Subba Rao (2000). Swell-Shrink Behaviour of Expansive Soils - Geotechnical Challenges. *Indian Geotechnical Journal*, 30(1)
- [6] Salma Tawfiq and Zalihe Nalbantoglu (2009). Swell-shrink behavior of expansive clays. *2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, May 28-30, Near East University, Nicosia, North Cyprus