



## ผลกระทบของดินบวมต่อความปลอดภัยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ Impact of Swelling Soil to Safety of Pasak Jolasid Dam

สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์<sup>1</sup>, มนตรี จินากุลวิวัฒน์<sup>2\*</sup>, เมฆ เมฆขาว<sup>3</sup> และเอกพงษ์ แม่นอุดร<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ

<sup>4</sup> ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน จ.กรุงเทพฯ

### บทคัดย่อ

จากการตรวจสอบสภาพเขื่อนโดยกรมชลประทาน พบรอยแตกตามยาวในถนนบนสันเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในความปลอดภัยของเขื่อน บทความนี้ ขอเสนอผลการศึกษาเพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผลการขุดเปิดบ่อสำรวจบนสันเขื่อนฯ ตั้งแต่ช่วง กม.4+000 ถึง กม.4+860 พบว่ารอยแตกตามยาวมีความกว้างประมาณ 1-10 ซม. และมีความลึกประมาณ 65-75 ซม. รอยแตกเกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทางเป็นหลัก ผลการวิเคราะห์สาเหตุของรอยแตกตามยาว พบว่าได้รับอิทธิพลจากดินบวมตัว ทั้งนี้เนื่องจากดินถมใต้ชั้นทางตั้งแต่ความลึก 1.0-4.0 ม. จากสันเขื่อน มีแรงดันการบวมตัวสูงกว่าน้ำหนักกดทับ สำหรับกลไกการเกิดรอยแตกตามยาว พบว่าดินบวมตัวไม่สามารถเก็บรักษาความชื้นไว้ได้ ความชื้นที่สูงในหน้าฝน ทำให้ชั้นทางต้องรับแรงดันเนื่องจากการบวมตัว ส่วนความชื้นต่ำในหน้าแล้ง ทำให้เกิดช่องว่างเนื่องจากการหดตัว ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าอิทธิพลจากดินบวมตัวจะส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดรอยแตกตามยาว

**คำสำคัญ:** รอยแตกตามยาว, ดินบวมตัว, เขื่อนดินถม, ความปลอดภัยเขื่อน

### Abstract

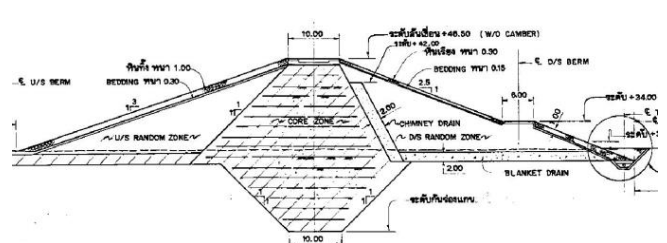
During dam inspection performed by Royal Irrigation Department (RID), some longitudinal cracks were found on the road of dam crest which probably affect to safety of the dam. This paper presents a study to find the solution of this problem. The cause of longitudinal cracks was investigated by field test, laboratory test and geotechnical model. Two test pits were done between Sta.4+000 to Sta.4+860 where the crack is approximately 1.0-10.0 centimeter width and 65-75 centimeter depth. The cracks appeared only in road pavement. The other one test pits (Sta.2+942) is not found the cracks. Longitudinal crack was caused by swelling soil. The 4 meter thick of soil beneath pavements has a swelling pressure higher than the

overburden stress. Moreover, it is found that the change in moisture content of swelling soil in shoulder area is the one cause of longitudinal crack. The results from settlement analysis reveal that the swelling soil is able to induce the longitudinal crack.

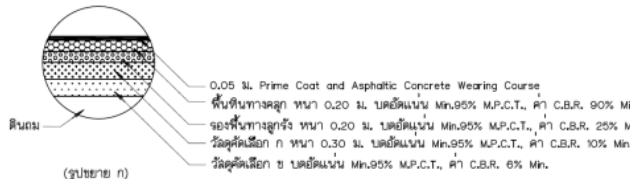
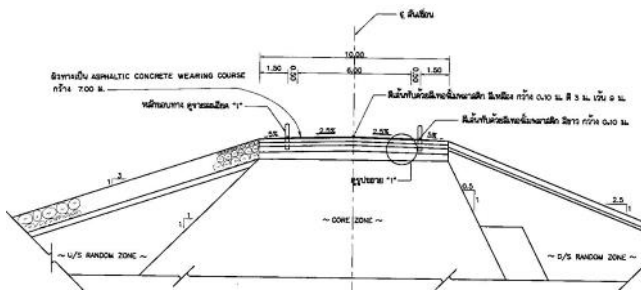
**Keywords:** Longitudinal Crack, Swelling Soil, Earth-fill Dam, Dam Safety

### 1. บทนำ

เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ตั้งอยู่ที่ตำบลหนองบัว อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี และตำบลคำพราณ อำเภอวังม่วง จังหวัดสระบุรี เริ่มก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2537 และเปิดใช้เมื่อปี 30 กันยายน พ.ศ. 2542 ลักษณะตัวเขื่อนออกแบบเป็นเขื่อนดินถมประเภทแบ่งโซนมีความยาวทั้งหมด 4,860 เมตร ความสูง 31.5 เมตร (รูปที่ 1) การออกแบบชั้นทางที่บริเวณจุดต่อกับหินทิ้งจะถูกตัดเป็นแนวตั้ง (รูปที่ 2) ส่วนประกอบของชั้นทาง ประกอบด้วยชั้น Asphaltic concrete และ Prime coat หนา 0.05 เมตร พื้นหินทางคลุกหนา 0.20 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรังหนา 0.20 เมตร วัสดุเลือก “ก” และ “ข” หนา 0.30 เมตร



รูปที่ 1 หน้าตัดทั่วไปเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ [1]

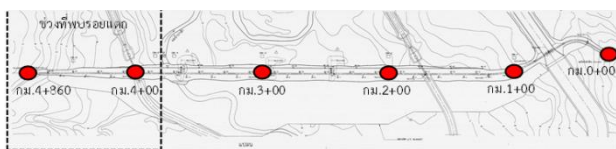


รูปที่ 2 การออกแบบชั้นทางบนสันเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์ [1]

กรมชลประทาน [2] สำรวจพบรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน ซึ่งเกิดขึ้นด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ ตั้งแต่ช่วง กม.3+500 ถึง กม.4+860 (รูปที่ 3 และรูปที่ 4) ถึงแม้ว่าจะมีการซ่อมแซมชั้นทางด้วยการหยอดยางมะตอยเหลวหรือการบดอัดใหม่ แต่จากการสำรวจด้วยสายตา ก็ยังพบรอยแตกตามยาวเกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานเขื่อน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาดังกล่าว



รูปที่ 3 รอยแตกตามยาวที่พบบนสันเขื่อนทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ [2]



รูปที่ 4 บริเวณที่พบรอยแตกตามยาว ตั้งแต่ กม.3+500 ถึง กม.4+860

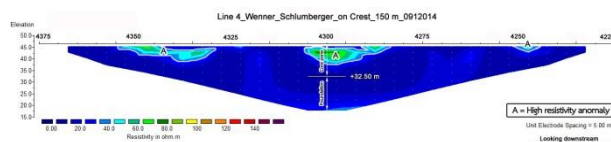
การประเมินเบื้องต้นจากการสำรวจ Resistivity (รูปที่ 5) [3] พบว่าบริเวณที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงและมีลักษณะเป็นกระเปาะ จะสอดคล้องกับตำแหน่งของการเกิดรอยแตกตามยาว ทั้งนี้ทำการสำรวจในช่วงหน้าแล้ง ส่วนบริเวณที่ยังไม่มีรอยแตก ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำ ดังนั้น ณ สภาพปัจจุบันรอยแตกตามยาวยังไม่ได้ลุกลามต่อเนื่องกัน

\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

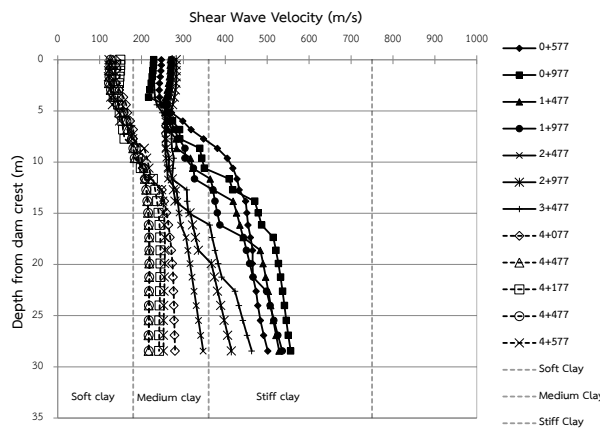
E-mail address: montrice65@hotmail.com, Tel. 02-579-2265

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือน (รูปที่ 6) [4] ในบริเวณที่พบรอยแตกตามยาว (ตั้งแต่ กม.4+000 ถึงไหล่เขื่อนฝั่งซ้าย) ดินถมส่วนบนมีค่า

ความเร็วคลื่นแรงเฉือนน้อยกว่า 180 เมตรต่อวินาที ดังนั้น ดินในบริเวณนี้จึงเป็นดินมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณที่ไม่พบรอยแตกตามยาว



รูปที่ 5 ผลการสำรวจ Resistivity Survey ณ ช่วง กม.4+300 [3]



รูปที่ 6 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยวิธี MASW [4]

USBR [5] และ BLM Manual Handbook [6] ได้สรุปสาเหตุทั่วไปของการเกิดรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน ยกตัวอย่างเช่น การทรุดตัวแตกต่างระหว่างแกนดินเหนียวกับเปลือกเขื่อน การทรุดตัวระหว่างตัวเขื่อนกับฐานราก การสูญเสียเสถียรภาพของลาดชัน การทรุดตัวเนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว และชนิดของดิน เช่น Collapsible Soil, Swelling Soil หรือ Dispersive soil เป็นต้น

ยงยุทธ และคณะ [7] สรุปสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรอยแตกตามยาวบนผิวถนน เกิดจากคุณสมบัติดินใต้คันทางเป็นดินเหนียวอ่อน มีกำลังรับน้ำหนักต่ำ หรือเป็นดินที่มีการหดตัวหรือบวม หรืออาจเกิดจากการกำหนดความสูงคันทาง ความลาดของคันทางที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

Chen [8] พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินที่สามารถบวมตัวและหดตัวได้ จะมีผลทำให้ถนนเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ซึ่งManosuthikij [9] ได้อธิบายลักษณะของดินบวมตัว ว่าเป็นดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด Montmorillonite เป็นส่วนประกอบ ในหน้าผาดินชนิดนี้จะดูดน้ำ ทำให้ดินขยายตัวขึ้น และเมื่อน้ำระเหยออกมวลดิน จะทำให้เกิดการหดตัวและเกิดเป็นช่องว่าง

Puppala et al. [10] พบว่า รอยแตกตามยาวเนื่องจากดินบวมตัว มักจะเกิดในหน้าแล้งและมีความลึกอยู่ระหว่าง 1.0-4.5 เมตร เนื่องจากความชื้นเปลี่ยนแปลงได้ง่าย นอกจากนี้ วัฏจักรการบวมตัวและหดตัว (Shrink-Swell Behavior) เป็นปัจจัยกระตุ้นให้รอยแตกเกิดรุนแรงมากขึ้น

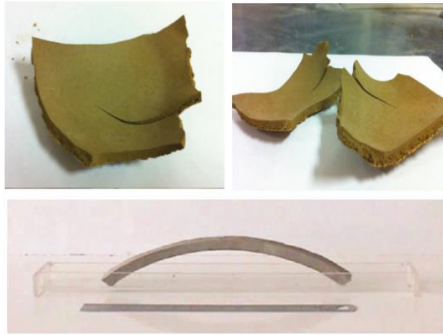
Kodikara et al. [11] พบว่าในกระบวนการที่ดินบวมตัวคายความชื้นออกจากมวลดิน ดินจะมีพฤติกรรมการโก่งงอตัวและเกิดแรงดัดด้วย (Curling behavior) ดังแสดงในรูปที่ 7

Puppala et al. [10] กล่าวอีกว่า บริเวณขอบของไหล่ทางจะเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ง่าย เมื่อความชื้นในดินบวมตัวระเหยออก จะ

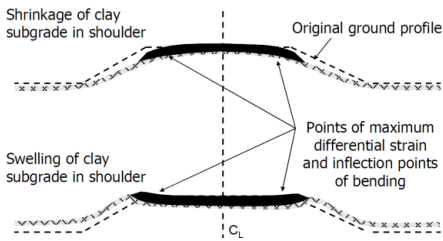
ทำให้ดินหดตัวและเกิดแรงดัน (Shrinkage induced pressure, SIP) และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรอยแตกตามยาวในชั้นทาง

Gupta et al. [12] พบว่าทั้งพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวของดินบวมตัวนั้น จะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนและแรงดัดบริเวณขอบของไหล่ทาง ดังแสดงในรูปที่ 8

Manosuthikij [9] กล่าวว่าเมื่อเริ่มมีรอยแตกบนชั้นทาง ความชื้นหรือน้ำจะสามารถมีช่องทางเข้าสู่เนื้อดินบวมตัวเพิ่มขึ้น ทำให้การแตกของไหล่ทางมีโอกาสลามไปยังตำแหน่งอื่นๆ ได้



รูปที่ 7 ลักษณะการโค้งตัวเมื่อดินเกิดการหดตัว [11]



รูปที่ 8 ผลกระทบของดินบวมตัว ณ บริเวณขอบของไหล่ทาง [12]

## 2. วิธีการศึกษา

จากการรวบรวมข้อมูลที่กล่าวมา ผู้ศึกษาได้ประเมินสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกตามบนสันเขื่อนนอกได้เป็น 2 ประเภท คือ รอยแตกที่เกิดจากกลไกทางด้านวิศวกรรม เช่น การทรุดตัว เคลื่อนตัว หรือการสูญเสียเสถียรภาพของลาดชัน เป็นต้น และรอยแตกที่เกิดจากคุณสมบัติดินเหนียวหรือชั้นทาง เช่น การใช้ดินที่เป็นปัญหา เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์และตรวจสอบหาสาเหตุการเกิดรอยแตกตามยาว จึงดำเนินการตามหลักการดังกล่าว

## 3. การสำรวจลักษณะรอยแตกตามยาว

ชุดเปิดบ่อสำรวจลึก 1.5 เมตร ณ บริเวณรอยแตก โดยกำหนดให้ชุดออกเป็นชั้นๆ ละ 0.20 เมตร จากนั้นทำการตรวจวัดขนาดและทิศทางของรอยแตก (รูปที่ 9) การชุดเปิดบ่อจำนวน 3 บ่อ ประกอบด้วย ตำแหน่งที่ปรากฏรอยแตกตามยาว TP-1 (ด้านเหนือน้ำของ Sta.4+300) และ TP-2 (ด้านท้ายน้ำของ Sta.4+789) อีกบ่อเป็นตำแหน่งที่ไม่ปรากฏรอยแตกตามยาว TP-3 (ด้านท้ายน้ำของ Sta.2+942) และสามารถสรุปลักษณะของรอยแตกได้ดังนี้

- รูปแบบของรอยแตก เป็นรอยแตกแนวตั้ง ไม่มีการเอียงตัวเข้าหาแนวแกนกลางเขื่อน

- ขนาดความกว้างรอยแตกไม่เกิน 10 เซนติเมตร ความลึกของรอยแตกไม่เกิน 80 เซนติเมตร (เกิดในชั้นทางเป็นหลัก)
- ดินถมเขื่อนใต้ชั้นทางเป็นดินเหนียวสีเทาดำ (CH) สภาพดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก
- ส่วนดินถมเขื่อนใต้ชั้นทาง TP-3 เป็นดินเหนียวสีน้ำตาล มีเม็ดกรวดและทรายผสม ดินมีสภาพค่อนข้างแข็งแตกต่างจากบริเวณที่พบรอยแตกอย่างชัดเจน



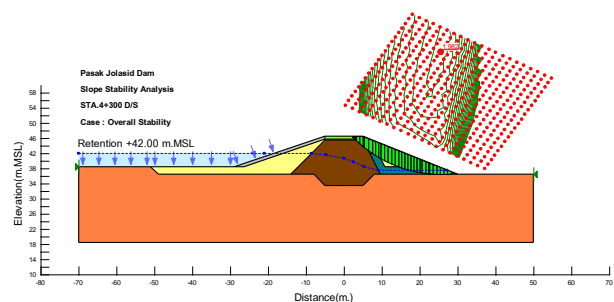
รูปที่ 9 การชุดเปิดบ่อทดสอบและ Mapping ทิศทางรอยแตก

## 4. การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดรอยแตกตามยาว

### 4.1 การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันเขื่อน

รอยแตกดังกล่าวอาจเป็นผลจากการเสถียรภาพของลาดชัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบ สำหรับการวิเคราะห์ฯ ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Slope/W 2007 ใช้หลักสมมูลจำกัดของแรง ส่วนคุณสมบัติดินเหนียวได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Triaxial Test) ผลการวิเคราะห์ในลักษณะ Overall slope stability (รูปที่ 10) พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ มีค่าสูงกว่าเกณฑ์การใช้งานและออกแบบ ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวเขื่อนส่วนบน (Local slope stability) จากสมมติฐานแรงประคองของหินทิ้งไม่เพียงพอ พบว่า มีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงกว่าเกณฑ์เช่นกัน

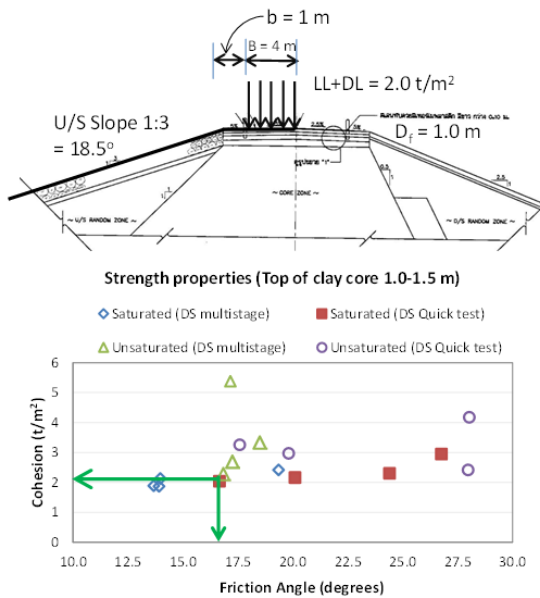
ผลการสำรวจความลาดชันของเขื่อนด้วยกล้อง GPS ความละเอียดสูงพบว่าลาดชันเขื่อนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากแบบเดิม และผลการตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตา ก็ไม่พบลักษณะที่ผิดปกติ เช่น การเคลื่อนตัวหรือหลุดตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน ไม่ได้เกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพของลาดเขื่อนและการสูญเสียแรงประคองของหินทิ้ง



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันเขื่อน

4.2 กำลังรับแรงแบกทานของดินใต้ชั้นทาง (Bearing Capacity)

รอยแตกอาจเกิดจากกำลังรับน้ำหนักของดินแกนเขื่อนไม่เพียงพอกับน้ำหนักถนนบริเวณขอบ ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทาน (รูปที่ 11) โดยใช้วิธีการของ Meyerhof (1957) ส่วนคุณสมบัติดินแกนเขื่อนใต้ชั้นทางได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Direct shear test) ผลการวิเคราะห์ พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้ทั้งทางด้านเหนือน้ำและใต้น้ำ สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แม้จะใช้ค่าความแข็งของดินแกนเขื่อนที่อ่อนตัวเนื่องจากน้ำที่ซึบในรอยแตกก็ตาม ดังนั้น ดินแกนใต้ชั้นทางมีกำลังรับน้ำหนักที่เพียงพอต่อการต้านทานการเคลื่อนตัวของลาดเขื่อนส่วนบนและไม่น่าเป็นสาเหตุหลักของการเกิดรอยแตกตามยาว

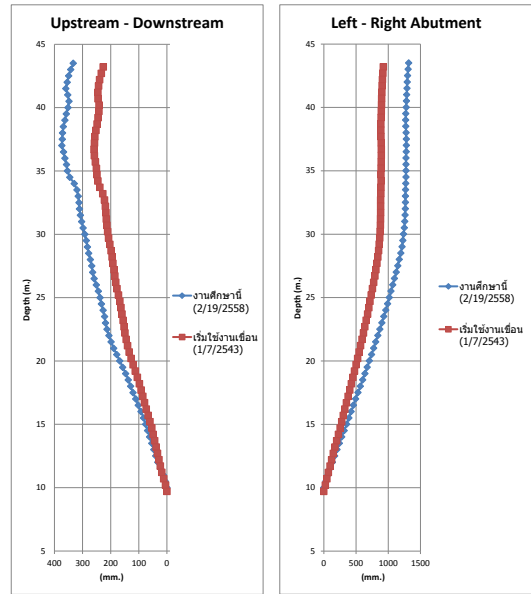


รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพส่วนบนของลาดชันเขื่อน

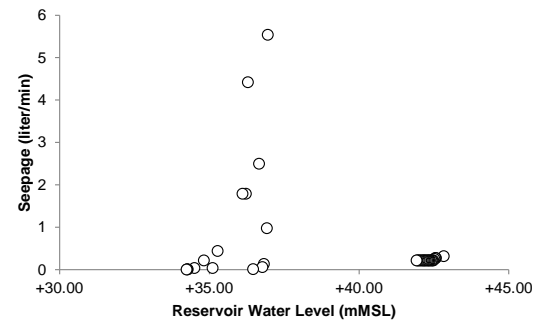
4.3 เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความปลอดภัยเขื่อนจากเครื่องมือวัด ไม่พบพฤติกรรมความผิดปกติของการเคลื่อนตัวของ Inclinometer (รูปที่ 12) ส่วนพฤติกรรมการไหลซึมทั้งจากพิโซมิเตอร์และฝายวัดน้ำ พบว่าความดันน้ำอยู่ในระดับปกติและมีอัตราการรั่วซึมที่ต่ำ (รูปที่ 13) ดังนั้น ในสภาพปัจจุบัน การเสถียรภาพของลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำและปัญหาการไหลซึมจึงไม่เป็นประเด็นที่ต้องกังวล

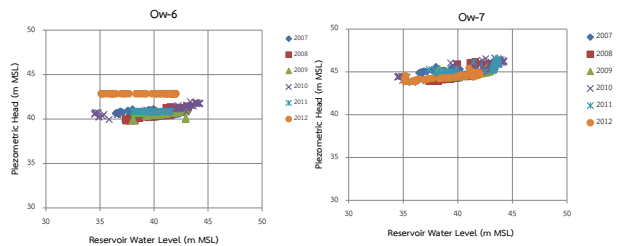
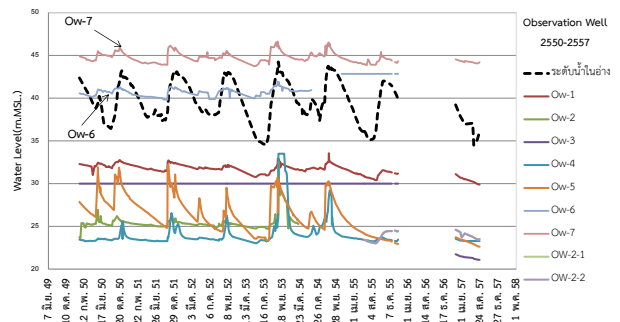
สำหรับระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติ (รูปที่ 14) มีผลกระทบต่อความสูงน้ำในตัวเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเขื่อนที่ติดกับฐานยันเขาฝั่งซ้าย ซึ่งจะช่วยให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำตลอดเวลาแม้ระดับน้ำในอ่างฯ จะต่ำก็ตาม ซึ่งประเด็นนี้พบว่าไม่มีความสอดคล้องกับตำแหน่งรอยแตก



รูปที่ 12 การเคลื่อนตัวของเขื่อนจากการวัดโดย Inclinometer



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในอ่างฯ กับอัตราการไหลซึม

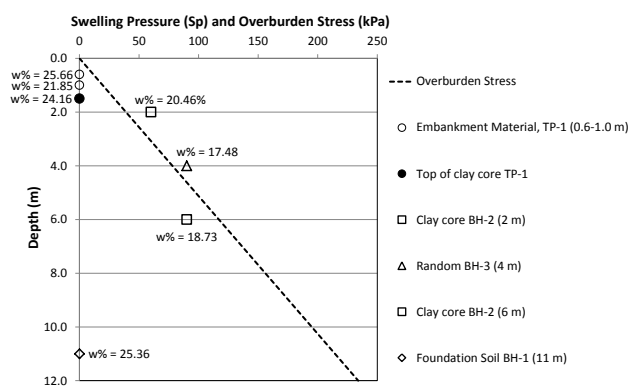


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในอ่างฯ กับความสูงน้ำจาก Ow-6 และ Ow-7

4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติดินแกนเขื่อนและชั้นทาง

ผลการทดสอบดินของเขื่อนป่าสักฯ ทั้งคุณสมบัติพื้นฐาน Swelling Soil Test และ Collapsible Soil Test พบว่าเป็นดินบวม ส่วนชั้นทางและชั้นฐานรากไม่เป็นดินบวมตัว [13]

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าดินถมเขื่อนจะเป็นดินบวมตัว แต่การบวมตัวจะเกิดเฉพาะในส่วนบนที่มีแรงกดทับน้อยกว่าแรงบวมตัว (Swelling Pressure) รูปที่ 15 แสดงผลการเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักกดทับ (Overburden Pressure) กับค่า Swelling pressure จากรูปสรุปได้ว่าดินถมได้ชั้นทางหนา 3.0 เมตร (ตั้งแต่ความลึก 1.0 – 4.0 เมตรจากสันเขื่อน) มีค่า Swelling pressure สูงกว่าน้ำหนักกดทับ ซึ่งด้วยพฤติกรรมเช่นนี้ ชั้นทางด้านบนจึงมีแรงดันดินสูงกว่าการใช้งานในสภาพปกติ และเป็นเหตุให้ชั้นผิวทางเกิดเป็นรอยแตกตามยาว ส่วนที่ระดับความลึก 6.0 เมตร ถึงแม้ดินถมเขื่อนจะมีค่า Swelling Pressure สูง แต่ด้วยน้ำหนักกดทับที่มากกว่า ดังนั้น Swelling Pressure จึงกระจายแรงไม่ไปถึงชั้นทางด้านบน



รูปที่ 15 เปรียบเทียบค่า Swelling Pressure กับน้ำหนักดินกดทับ

#### 4.5 ปริมาณความชื้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรดิน และเส้นอัตราตักซ์

ผลการทดสอบ Shrinkage Volume Change (รูปที่ 16) พบว่าดินถมเขื่อนฯ ช่วงที่มีปัญหาการบวมตัวสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินได้ตั้งแต่ 10.92-71.75% และสามารถหดตัวและขยายตัวได้ตั้งแต่ 31-52%

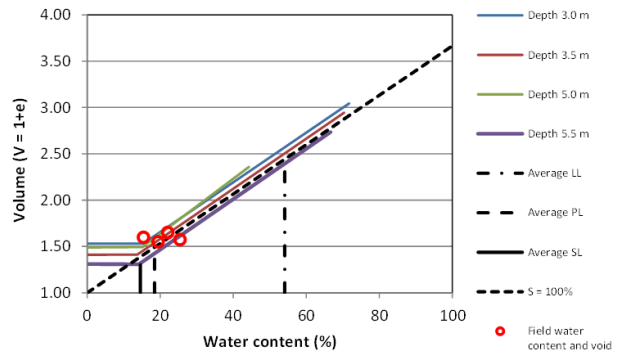
ส่วนปริมาณน้ำในมวลดินที่ได้จากการทดสอบในสนาม พบว่ามีค่าระหว่าง 15-30% และมีค่าใกล้เคียงกับค่า Plastic Limit ดังนั้น ณ ช่วงเวลาที่ทดสอบ ดินถมจึงมีสถานะเป็นกึ่งของแข็ง ซึ่งอาจมีสาเหตุสอดคล้องที่เป็นไปได้ คือ บริเวณไหล่เขื่อนฝั่งซ้ายจะมีการเก็บน้ำไม่สูงถึงดินเขื่อนเป็นเวลานาน แต่ทั้งนี้หากดินในสภาวะแห้งได้รับความชื้นหรือน้ำฝน ก็จะทำให้เกิดการบวมตัวและขยายปริมาตรได้สูง และส่งผลกระทบต่อโครงสร้างชั้นทางที่อยู่ด้านบน นอกจากนี้ รูปที่ 17 แสดงว่าดินถมส่วนบนสามารถดูดหรือสูญเสียน้ำในมวลดินได้ง่ายกว่าดินถมส่วนล่าง เนื่องจากมีอัตราส่วนช่องว่างในมวลดินที่มากกว่า หรืออาจแปลความเป็นอีกนัยหนึ่งที่ต่างกันว่าดินได้บวมตัวอยู่ในช่วงความลึก 4-6 เมตร ซึ่งทำให้ค่า Void Ratio สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมา

เพื่อให้ชัดเจนมากขึ้นจึงได้ทำการทดสอบเส้นอัตราตักซ์ของดินถม (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) โดยใช้วิธี Point-Wise Measurement [14] ซึ่งจะได้คุณสมบัติของเส้นการแห้ง (Drying Curve) และคุณสมบัติของเส้นการเปียก (Wetting Curve) ดังแสดงในรูปที่ 18 จากผลการทดสอบของดินถม ชั้นทาง และฐานรากเขื่อนป่าสักฯ พบว่าเมื่อดิน

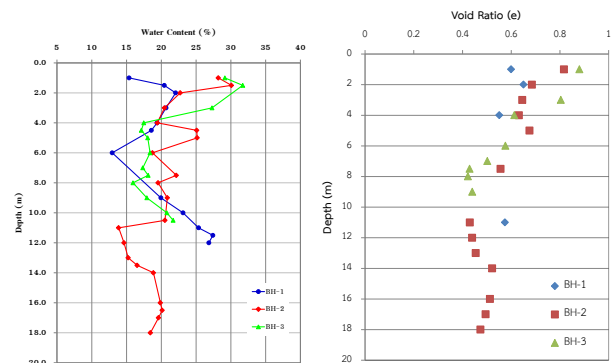
ถมอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความพรุนอยู่ระหว่าง 0.33-0.43 และดินถมเขื่อนกับฐานรากมีความพรุนมากกว่าชั้นทาง

เมื่อพิจารณาที่ค่าแรงดูดของน้ำในดินตั้งแต่ 0.1-100 kPa ตามระดับความลึกที่ทำการทดสอบ พบว่า ดินถมตัวเขื่อนมีปริมาณน้ำค่อนข้างคงที่เมื่อค่าแรงดูดเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าดินถมมีคุณสมบัติการอุ้มน้ำ

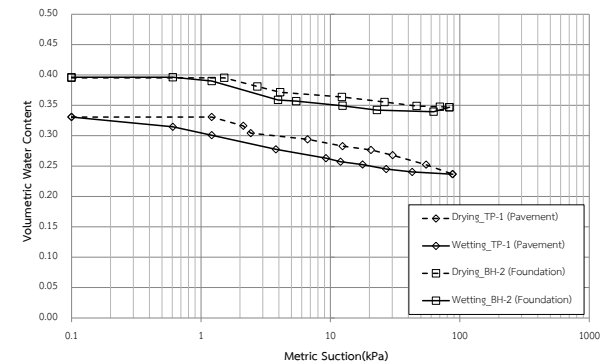
นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าดินถมเขื่อนมีพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอรีซิส กล่าวคือ ช่วงที่น้ำระเหยออกจากมวลดิน ดินจะมีปริมาณน้ำในมวลดินลดลง แต่เมื่อดินได้รับความชื้น ปริมาณน้ำในมวลดินจะกลับสู่สภาพเดิม ผลการทดสอบเส้นอัตราตักซ์นี้ สามารถยืนยันได้ว่าดินถมเขื่อนซึ่งเป็นดินบวมตัว ได้รับอิทธิพลจากการที่ดินได้รับและสูญเสียความชื้น

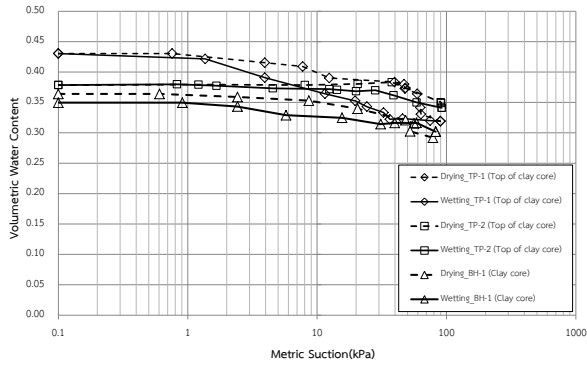


รูปที่ 16 ปริมาณน้ำในมวลดินและคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดิน



รูปที่ 17 อัตราส่วนช่องว่างในมวลดินและปริมาณน้ำในมวลดินในสนาม





รูปที่ 18 เส้นอัตราลักษณะของดินถมเขื่อนป่าสักฯ

## 5. แบบจำลองวิเคราะห์การทรุดตัว

เพื่อตรวจสอบสาเหตุของรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อน เนื่องจากจากสาเหตุที่มีดินถมใต้ชั้นทางเป็นดินบวมตัว แบบจำลองของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัว จึงพิจารณาคุณสมบัติดินถมเขื่อน ณ สภาพปัจจุบันที่ได้ทำการทดสอบ เทียบกับสภาพเดิมจากการออกแบบและก่อสร้าง ทั้งนี้ มีข้อจำกัดสำคัญ คือ ไม่ได้จำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพความชื้นของดิน ที่มีผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินบวมตัว ซึ่งจะเป็นการศึกษาของผู้เขียนต่อไป

แบบจำลองการวิเคราะห์ของเขื่อนฯ ใช้โปรแกรม SIGMA/W 2007 และวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ร่วมกับแบบจำลองดินแบบ Elastic Plastic Model โดยแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 คุณสมบัติดินถมเขื่อนส่วนบนและส่วนล่างเหมือนกัน และกรณีที่ 2 คุณสมบัติส่วนบนของแกนดินเหนียวและเปลือกต่างจากดินถมส่วนล่าง สำหรับคุณสมบัติดินแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติของดินถมเขื่อนป่าสักฯ

Dam Zone / Properties	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Degree)	$E_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Clay core (Top)	18.75	20	15	5,000	0.35
Clay core (Bottom)	19.50	22	15	20,000	0.35
Random (Top)	18.50	33	9	3,000	0.35
Random (Bottom)	19.50	27	10	15,000	0.35
Rockfill (assume)	22.00	0	45	50,000	0.25
Asphalt and aggregate	21.50	29	25	25,000	0.30
Base	21.00	29	25	30,000	0.30
Subbase	21.00	29	25	30,000	0.30
Random material A&B	21.00	29	25	40,000	0.30

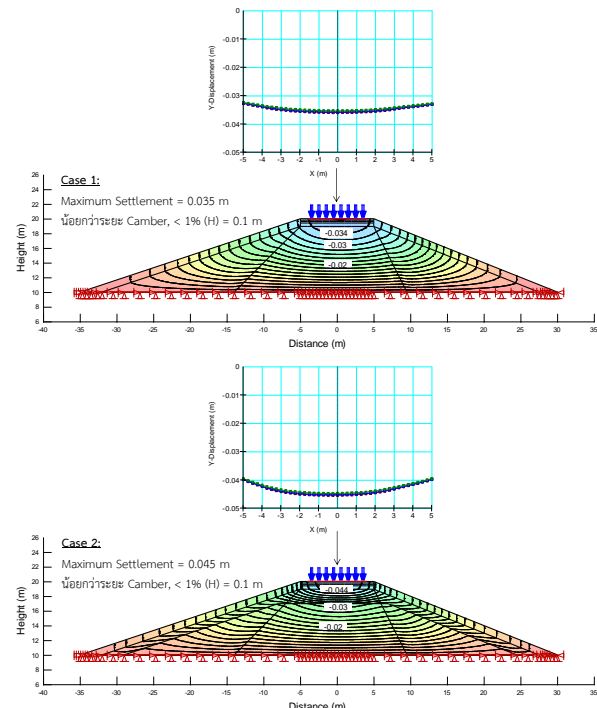
ผลการวิเคราะห์พบว่าทรุดตัวสูงสุด (รูปที่ 19) ในกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.035 เมตร ส่วนในกรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.045 เมตร ดังนั้นแม้ว่าคุณสมบัติดินถมเขื่อนส่วนบนที่เป็นดินบวมตัวและมีแรงดันสูงกว่าน้ำหนักกดทับ แต่ก็จะไม่มีการทรุดตัวที่จะนำไปสู่การพิบัติในลักษณะการไหลล้นข้ามสันเขื่อนได้ เนื่องจากค่าการทรุดตัวของทั้งสองกรณีมีค่าน้อยกว่าระยะ

การออกแบบเผื่อการทรุดตัว (Camber) ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 1% ของความสูงเขื่อนหรือประมาณ 0.1 เมตร (พิจารณาที่หน้าตัดฝั่งซ้ายของเขื่อน)

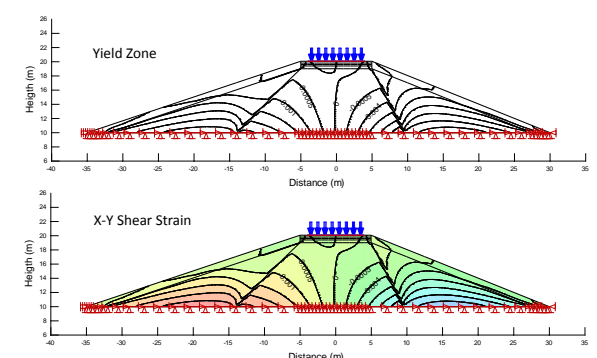
ผล X-Y shear strain (รูปที่ 20) บริเวณส่วนบนของดินถมเขื่อนในกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.0005 ส่วนในกรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.002 จากการวิเคราะห์ พบว่ากรณีที่ดินถมส่วนบนเป็นดินบวมตัว (กรณีที่ 2) จะมี X-Y shear strain และ Yielding point มากกว่ากรณีที่ 1 ดังนั้นคุณสมบัติใต้ชั้นทางที่เป็นดินบวมตัว (ส่วนบน clay core) ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าคุณสมบัติดินถมส่วนล่าง เมื่อต้องรับน้ำหนักกระทำเพิ่มหรือแรงกระทำซ้ำ จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้มากกว่า

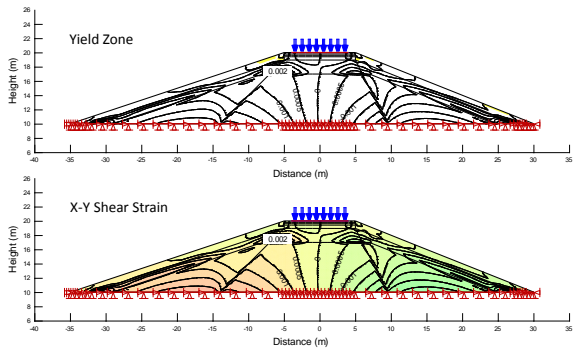
ผลการวิเคราะห์แรงคัตที่เกิดเนื่องจากแรงกระทำจากดินบวมตัว ซึ่งสมมุติให้กระทำแบบสม่ำเสมอใต้ชั้นทาง (รูปที่ 21) พบว่า บริเวณขอบของชั้นทางทั้งสองฝั่งจะเป็นจุดที่มีการรับแรงกระทำมากกว่าส่วนอื่นๆ จุดคัตและเลื่อนก็อยู่ในบริเวณนี้เช่นกัน

ทั้งนี้ แรงคัตที่เกิดขึ้นไม่ได้มีค่าสูงมากเกินกว่ากำลังรับแรงของชั้นทางจนทำให้เกิดรอยแตกแบบทันทีทันใด แต่จะเป็นพฤติกรรมที่ค่อยๆ สะสมตัวเมื่อวัฏจักรการรับแรงนี้ ถูกสะสมตัวเป็นเวลานานๆ จึงจะปรากฏรอยแตกให้เห็น สอดคล้องกับกรณีเขื่อนป่าสักฯ ซึ่งใช้งานเขื่อนมาแล้ว 10-15 ปี ถึงจะเริ่มแสดงผลให้เห็นรอยแตกตามยาว

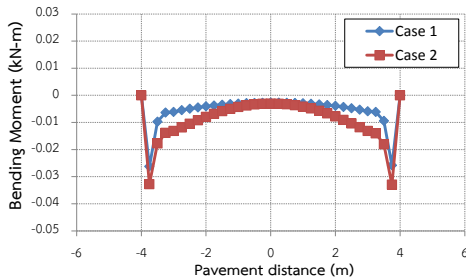


รูปที่ 19 ผลวิเคราะห์การทรุดตัวสูงสุดบนสันเขื่อนฯ





รูปที่ 20 ผลวิเคราะห์ X-Y Shear Strain และ Yield zone



รูปที่ 21 Bending moment บนชั้นทางเนื่องจากดินบวมตัว

## 6. บทสรุป

1. สาเหตุของรอยแตกตามยาวบนสันเขื่อนป่าสักฯ ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการทรุดตัวหรือการเคลื่อนตัวของลาดชันเขื่อน แต่มีสาเหตุมาจากดินถมได้ชั้นทางเป็นดินบวมตัวและส่งผลต่อชั้นทาง เนื่องจากมีค่า Swelling pressure มากกว่าน้ำหนักกดทับ อิทธิพลของดินบวมตัวอยู่ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 4 เมตร ขึ้นมาถึงสันเขื่อน

2. การเปลี่ยนแปลงความชื้นหรือปริมาณน้ำในมวลดินเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้เกิดรอยแตกตามยาว เพราะว่าดินบวมตัวจะแสดงพฤติกรรมตามฤดูกาล โดยดินจะบวมตัวเมื่อได้รับความชื้นและดินจะหดตัวในฤดูแล้ง (Shrink-Swell behavior) ซึ่งพฤติกรรมนี้เอง ทำให้ชั้นทางเกิดแรงดันสะสมตัวไว้ เมื่อเวลานานผ่านไปและใช้งานเขื่อน 10-15 ปี จึงจะปรากฏรอยแตกตามยาวให้เห็น

3. รอยแตกตามยาวที่เกิดขึ้นบนสันเขื่อนป่าสักฯ เป็นรอยแตกระดับตื้นและเกิดเฉพาะในชั้นโครงสร้างทาง ดังนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยเขื่อน โดยเฉพาะในลักษณะของการสูญเสียเสถียรภาพของลาดชันจนนำไปสู่ไหลล้นข้ามสันเขื่อน แต่ทั้งนี้ ก็มีความจำเป็นในการปรับปรุงแก้ไขเนื่องจากรอยแตกอาจมีโอกาslugกลมทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในลักษณะอื่นได้ เพราะความชื้นหรือน้ำฝนสามารถเข้าสู่ตัวเขื่อนได้จากรอยแตกตามยาว

4. แนวทางการซ่อมแซมรอยแตกตามยาว สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การขุดลอกดินบวมตัวออกแล้วบดอัดใหม่ การปรับปรุงคุณภาพดิน การเสริมแรงให้ชั้นทางโดยใช้ Geo-grid หรือการป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้น เช่น การปูแผ่นพีบีเอ เป็นต้น

5. ในการออกแบบหรือก่อสร้างถนนในอนาคต ทั้งถนนโดยทั่วไปหรือถนนบนสันเขื่อน ควรหลีกเลี่ยงการใช้ดินที่มีศักยภาพการบวมตัว หากมีความจำเป็นต้องใช้ ควรมีการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีกำลังดีขึ้นและลดการบวมตัวลงก่อน

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักออกแบบวิศวกรรม และสถาปัตยกรรม กรมชลประทาน, “การศึกษาความมั่นคงของเขื่อนดิน กรณีมีระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำเกินกว่าระดับน้ำสูงสุด(ร.น.ส.) กรณีศึกษา: เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จ.ลพบุรี”, ตุลาคม พ.ศ.2542.
- [2] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน, “รายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยเขื่อน การตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตาและประเมินสภาพเขื่อนโดยวิธีดัชนีสภาพ เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี”, 30 กรกฎาคม – 2 สิงหาคม พ.ศ.2556 และ 5-9 ตุลาคม พ.ศ.2556.
- [3] หน่วยงานวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, “รายงานฉบับสมบูรณ์: โครงการวิเคราะห์และออกแบบซ่อมแซมเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี” พฤศจิกายน พ.ศ. 2557.
- [4] กลุ่มงานธรณีฟิสิกส์ ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน. “โครงการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินถม โดยวิธีธรณีฟิสิกส์ เขื่อนป่าสัก จ.ลพบุรี เขื่อนประแสร์ จ.ระยอง” พ.ศ. 2556.
- [5] U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation (USBR). “Training Aids for Dam Safety Module: Inspection of Embankment Dams” 1988.
- [6] Bureau of Land Management. “Dam Condition Assessment Guidelines for Embankment Dams.” BLM Manual Handbook H-9177-1. Denver, Colorado. 2006.
- [7] ยงยุทธ แต่ศิริ, ปรนิก จิตตอารีกุล และจิรัฐกุล บุญคำ. “การแก้ไขความเสียหายบริเวณไหล่ทาง” การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์ วิจัยสำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง. 2547.
- [8] F.H. Chen. Foundation on expansive soils. American Elsevier Science Public., New York, 1988.
- [9] T. Manosuthikij. “Studies on Volume Change Movements in High PI Clays for Better Design of Low Volume Pavements” Doctor of Philosophy Dissertation, 2008.
- [10] A.J. Puppala, T. Wejrungsikul, V. Puljan and T. Manosuthikij. “Shrinkage induced pressure measurements in unsaturated expansive clays”, PROCEEDINGS OF THE 5<sup>TH</sup> ASIA PACIFIC CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, PATTAYA, THAILAND, 14-16 NOVEMBER 2011, pp.93-102.
- [11] J.K. Kodikara, H. Nahlawi, and A. Bouazza. “Modelling of curling in desiccating clay.” Canadian Geotechnical Journal, 41(3): 560–566. doi:10.1139/t04-01. 2004.

- [12] R. Gupta, J. S. McCartney, C. L. Nogueira and J. G. Zornberg. "Moisture Migration in Geogrid Reinforced Expansive Subgrades" The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico
- [13] เมฆ เมฆขาว, มนตรี จินากุลวิวัฒน์ และสุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. "การประเมินศักยภาพการบวมตัวของดินถมตัวเชื่อม กรณีศึกษาเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 จ. ชลบุรี.
- [14] อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ. "การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน." การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46. กรุงเทพฯ, พ.ศ.2550.