สำนักงานชลประทานที่ 2
รับที่ 2981
วันที่ - 7 เม.ย. 2566
เวลา 08.48 น.

13/337

# บันทึกข้อความ

**ส่วนราชการ** ห้องผู้เชี่ยวชาญด้านจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา โทร. ๐ ๒๒๔๑ ๓๓๔๘ ภายใน ๒๕๘๓

**ที่** ผชช.จษ.๖/ ๖ /๒๕๖๖ **วันที่** ๔ เมษายน ๒๕๖๖

**เรื่อง** ขอความอนุเคราะห์เผยแพร่เอกสารเผยแพร่ทางเว็ปไซต์ประกอบการประเมินเข้าสู่ตำแหน่ง ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมชลประทาน(ด้านจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา) (นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล)

เรียน ผส.ชป.๑, ๒,๓ และ ๔

ตามบันทึกสำนักบริหารทรัพยากรบุคคลที่ สบค ๓๕๓๓ ลงวันที่ ๒๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๖ แจ้งว่า ก.พ.ได้พิจารณาคุณสมบัติและประเมินผลงานของ นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล ที่ส่งประเมิน แล้ว มีมติให้จัดทำเอกสารเผยแพร่อีกเรื่องหนึ่ง นั้น

บัดนี้ กระผมได้จัดทำเอกสารเผยแพร่ผลงาน เสร็จเรียบร้อยแล้ว จำนวน ๑ เรื่องคือ การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน และฐานรากเขื่อนดิน กรณีศึกษาเขื่อนแม่ทาน จังหวัดลำปาง

ดังนั้น จึงขอความอนุเคราะห์ในการนำเอกสารเผยแพร่ผลงานดังกล่าว เผยแพร่และบันทึกลง ในเว็ปไซต์ในส่วนคลังความรู้ของหน่วยงานของท่าน เพื่อให้ผู้สนใจศึกษา นำไปใช้เพื่อประกอบการปฏิบัติงาน หากได้ดำเนินการเผยแพร่ผลงานดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว ขอความกรุณาตอบหนังสือกลับเพื่อทราบ เพื่อจะได้ดำเนินการต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

(นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล)
ผชช.จษ.๖

เรียน ผอ.ส่วน และ ผอ.โครงการ
เพื่อโปรดทราบและเผยแพร่เอกสารดังกล่าว

(นายพิชัย นรเดชานันท์)
ผคก.ชป.๒ รักษาราชการแทน
ผส.ชป.๒
- 7 เม.ย. 2566

ปท.

...........................................................................................................................................................................

**แบบฟอร์มแนบท้ายเพื่อแจ้งผลการดำเนินการ**

**ผลงานเพื่อเผยแพร่ทางเว็ปไซต์ ของนายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล**

(กรุณาทำเครื่องหมาย ✓ หน้าหัวข้อเพื่อแสดงความคิดเห็น)

☐ ได้ดำเนินการเผยแพร่ผลงานดังกล่าวข้างต้นแล้วเมื่อ ..........................................................................

☐ ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจาก...........................................................................................................

...........................................................................................................................................................................

ลงชื่อ.................................................

(.........................................................)

ตำแหน่ง............................................

เลขที่เอกสารในระบบ E สบค 02/172/2566
กษ. ๖/๖๕/๖๖

ส่วนวิชาการและประเมินบุคคล
สำนักบริหารทรัพยากรบุคคล
โทร. 0 2669 5057 ภายใน 2802 , 2804

# บันทึกข้อความ

**ส่วนราชการ** สำนักบริหารทรัพยากรบุคคล ส่วนวิชาการและประเมินบุคคล โทร. ๒๘๐๒ ๒๘๐๔

**ที่** สบค ๓๕๑๓ **วันที่** ๒๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๖

**เรื่อง** การประเมินบุคคลของ นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล

เรียน นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล

ตามที่ท่านได้ส่งผลงานเพื่อประเมินเข้าสู่ตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมชลประทาน (ด้านจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา) วิศวกรชลประทานเชี่ยวชาญ (ตำแหน่งเลขที่ ๒๐) กรมชลประทาน นั้น

บัดนี้ ก.พ. ได้มีหนังสือ ที่ นร ๑๐๐๖.๔/๗๒ ลงวันที่ ๒ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๖ แจ้งว่า ก.พ. ได้พิจารณาคุณสมบัติและประเมินผลงานของ นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล ที่ส่งประเมินทั้ง ๓ เรื่อง และเอกสารเผยแพร่ แล้ว มีมติให้แก้ไขเพิ่มเติมผลงาน และให้จัดส่งผลงานที่แก้ไขเพิ่มเติมแล้ว จำนวน ๖ ชุด ผ่านกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ไปยังสำนักงาน ก.พ. ภายในกำหนดเวลา ๓ เดือน นับตั้งแต่วันที่กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้รับหนังสือ รายละเอียดปรากฏดังเอกสารที่แนบ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และดำเนินการตามมติของ ก.พ. ดังกล่าวข้างต้น และส่งให้สำนักบริหารทรัพยากรบุคคลดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

(นายณัฐพล วุฒิจันทร์)
ผส.บค.

กรมชลประทาน

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

# เอกสารเผยแพร่ผลงาน

เรื่อง

การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน กรณีศึกษาเขื่อนแม่ทาน จังหวัดลำปาง

โดย

นายสมจิตฐิพงศ์ อำนาจศาล
ตำแหน่งวิศวกรชลประทานชำนาญการพิเศษ
(ตำแหน่งเลขที่ 20)
กรมชลประทาน

เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมชลประทาน
(ด้านจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา)
วิศวกรชลประทานเชี่ยวชาญ (ตำแหน่งเลขที่ 20)
กรมชลประทาน

# สารบัญ

**หน้า**


| | |
|---|---|
| สารบัญ | ก |
| สารบัญตาราง | ข |
| สารบัญรูป | ค |
| บทคัดย่อ | ง |
| Abstract | จ |
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. วัตถุประสงค์ | 1 |
| 3. ประโยชน์ของผลงาน | 2 |
| 4. ข้อมูลพื้นฐานและสภาพปัญหาของเขื่อนแม่ทาน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ | 2 |
| 5. การตรวจสอบสภาพเขื่อนแม่ทาน | 3 |
| 6. การปรับปรุงเขื่อนแม่ทานและสภาพปัญหาที่พบหลังการปรับปรุง | 3 |
| 7. การสำรวจธรณีฟิสิกส์ของเขื่อนแม่ทาน | 5 |
| 8. การเทียบเคียงผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ากับสภาพปัญหาโครงการ | 6 |
| 9. การเทียบเคียงผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบคลื่นเฉือนด้วยเทคนิค MASW กับสภาพปัญหาโครงการ | 9 |
| 10. การเทียบเคียงผลการวิธีสำรวจเรดาร์หยั่งลึก กับสภาพปัญหาโครงการ | 10 |
| 11. การวิเคราะห์เส้นทางและปริมาณน้ำซึมผ่านตัวเครื่องและฐานรากของเขื่อนแม่ทาน | 11 |
| 12. การวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขปัญหา | 13 |
| 13. สรุปและข้อเสนอแนะ | 16 |
| บรรณานุกรม | 17 |

# สารบัญตาราง

**หน้า**

**ตารางที่ 1** บริเวณที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าผิดปรกติตามแนวตัดขวางตัวเขื่อน (แนว C-C’) 8
**ตารางที่ 2** บริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง 10
**ตารางที่ 3** บริเวณที่มีความผิดปกติ (anomalous zones) ของสัญญาณเรดาร์หยั่งลึกตามแนวศูนย์กลางเขื่อน 10
**ตารางที่ 4** ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก 15
**ตารางที่ 5** ผลการวิเคราะห์ค่า Hydralic Gradient และค่า Velocity ณ จุด A (บริเวณท้ายเขื่อน) ที่มีโอกาสเกิด Piping 15

# สารบัญรูป

**หน้า**

| | | |
|---|---|---|
| **รูปที่ 1** | รูปตัดทำนบดินของเขื่อนแม่ทาน | 4 |
| **รูปที่ 2** | ผังบริเวณที่พบการรั่วซึม | 4 |
| **รูปที่ 3** | การตรวจสภาพเขื่อนทางสายตาบริเวณลาดด้านท้ายทำนบดินหลักที่พบการรั่วซึม | 5 |
| **รูปที่ 4** | เส้นการซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน (A flow line for seepage through an earth dam) ที่สันนิษฐานว่ามีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มความจุระดับเก็บกัก | 5 |
| **รูปที่ 5** | แนวสำรวจธรณีฟิสิกส์ | 6 |
| **รูปที่ 6** | การแปลผลการสำรวจสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนว A-A’ และ B-B’ | 7 |
| **รูปที่ 7** | การแปลผลการสำรวจสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนว C-C’ | 8 |
| **รูปที่ 8** | การแปลผลการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบคลื่นเฉือนด้วยเทคนิค MASW | 9 |
| **รูปที่ 9** | การแปลผลสำรวจเรดาร์หยั่งลึก | 11 |
| **รูปที่ 10** | ความสัมพันธ์ของการรั่วซึม | 12 |
| **รูปที่ 11** | ผลการวิเคราะห์ กรณีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ | 12 |
| **รูปที่ 12** | ผลการวิเคราะห์ กรณีไม่มีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ (เขื่อนเดิม) | 13 |

# บทคัดย่อ

น้ำ เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์ สัตว์และพืช รวมถึงสิ่งมีชีวิตอื่นๆ การเพิ่มของจำนวนประชากรมนุษย์ กิจกรรมการใช้น้ำที่หลากหลายมากขึ้น รวมถึงภาวะโลกร้อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก เป็นตัวแปรที่ทำให้มีความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น กรมชลประทานซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในด้านการพัฒนาแหล่งน้ำและบริหารจัดการน้ำของประเทศไทย จึงมีความจำเป็นต้องหาแนวทางในการบริหารจัดการให้เกิดความสมดุลระหว่างความต้องการใช้น้ำกับปริมาณน้ำที่สามารถจัดสรรให้ได้ เช่น การลดความต้องการใช้น้ำโดยการรณรงค์ให้มีการปลูกพืชใช้น้ำน้อยแทนการปลูกข้าวซึ่งเป็นพืชที่ใช้น้ำมาก การจัดหาแหล่งน้ำเพิ่มเติมเพื่อรองรับความต้องการที่สูงขึ้น เป็นต้น แนวทางหนึ่งที่เป็นนโยบายของกรมชลประทานในการเพิ่มน้ำต้นทุน ก็คือ การเพิ่มระดับเก็บกักน้ำของอ่างเก็บน้ำเดิมที่มีอยู่ให้สามารถเก็บกักน้ำได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสำนักงานชลประทานและโครงการชลประทานต่างๆ ได้ขานรับนโยบายนี้ และได้ทำการออกแบบ ปรับปรุงอ่างเก็บน้ำที่มีศักยภาพของปริมาณน้ำท่า และศักยภาพของพื้นที่ที่จะรองรับขอบเขตน้ำท่วมที่เพิ่มขึ้น โดยการปรับปรุงยกระดับสันทำนบดินของอ่างเก็บน้ำให้สูงขึ้น พร้อมปรับปรุงยกระดับสันอาคารระบายน้ำล้น เพื่อให้สามารถเก็บกักน้ำได้มากขึ้น ซึ่งการดำเนินการได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทำให้ได้ปริมาณน้ำต้นทุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในหลายๆ พื้นที่พบว่าการเพิ่มระดับเก็บกักของอ่างเก็บน้ำส่งผลกระทบทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนเพิ่มมากขึ้นจนอาจกระทบกับความมั่นคงแข็งแรงของตัวเขื่อนได้

การศึกษาฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน โดยเลือกเขื่อนแม่ทาน จ.ลำปาง เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเขื่อนแห่งนี้ได้รับการปรับปรุงยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งหลังจากทำการเก็บกักน้ำที่ระดับเก็บกักใหม่ พบการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน โดยจากการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาพบจุดน้ำขังบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์พบว่า ผลการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกับผลสำรวจธรณีฟิสิกส์และผลการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาที่บ่งชี้ว่า การยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำทำให้เกิดการยกระดับเส้นทางการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อน ส่งผลให้มีน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนในจุดที่นอกเหนือจากการออกแบบที่ปกติจะให้น้ำที่ซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากไหลผ่านวัสดุกรองน้ำที่ลาดท้ายเขื่อน แล้วมีท่อรวบรวมน้ำเพื่อระบายลงด้านท้ายเขื่อนต่อไป จากผลการศึกษาวิเคราะห์นี้ จึงมีข้อแนะนำว่าผู้ออกแบบเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำหรืออาคารชลประทานในลักษณะอื่นๆ เช่น ประตูระบายน้ำ โดยการยกระดับเก็บกัก ต้องมีการวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มระดับเก็บกักต่อความมั่นคงของอาคารในด้านต่างๆ ก่อนทุกครั้ง เช่น ความมั่นคงต่อการพลิกตัว (Overturning) ความมั่นคงต่อการเลื่อนไถล (Sliding) ความมั่นคงต่อการต้านทานแรงยกตัว (Uplift Pressure) ของพื้นอาคาร และผลกระทบต่อเส้นทางของน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก เป็นต้น หากพบว่าการยกระดับเก็บกักน้ำส่งผลต่อความมั่นคงของตัวเขื่อนหรืออาคารชลประทานจะต้องทำการออกแบบรองรับ เพื่อให้อาคารชลประทานมีความมั่นคงแข็งแรง สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการปรับปรุง

# Abstract

Water is an element of life and all living. As global climate change intensifies, people's demand for water increases, as does their demand for a variety of uses such as irrigation. Royal Irrigation Department (RID) has taken initiative to manage the balance between water supply and water demand, such as promoting less water-intensive crops instead of paddy. RID also made efforts to increase the storage capacity of reservoir through the installation of flap-gate, rubber weir or structure redesign. However, the additional storage volume which enables the level of surface water resources to be increased can also weaken the dams' stability caused by excessive storage head pressure.

This study investigated the effect from dam structure redesign to increasing storage capacity causing water seepage through dams and their earthen foundations. The Mae Tan Dam managed by the Lampang provincial irrigation office was chosen as the case study since the dam was undergone the redesign construction in 2017. A visual examination of the dam showed waterlogging at the end of dam slope. Further analysis using computer models also indicates the aligned results altogether with geophysical surveys and the outcomes of the visual inspection of the dam, supporting the hypothesis that increasing reservoir capacity can cause excessive head pressure and leakage flow which seepage out of the designed filters system and drainage pipe which then formed the mentioned waterlogging at the end slope of dam. Based on the results of this analysis, it is recommended that design engineers involving with any dam structural redesign to increase reservoir capacity including regulation gates alteration, must first analyze and investigate for all possible impacts caused by irrigation structure redesign including overall structural stability from various aspects such as overturning, sliding, foundation uplift pressure, and impact on the designed drainage path for water seepage through the dam and foundation, etc. If it is found that the dam redesign affects the stability of the dam or irrigation structure, additional designs or approaches must be carried out in order to eliminate the mentioned affects which in conclusion support RID mission to develop water resources and to increase irrigation area according to their potential and natural balance with "safety first" engineer mindset.

# การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน กรณีศึกษาเขื่อนแม่ทาน จังหวัดลำปาง

## 1. บทนำ

การศึกษาฉบับนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน โดยเลือกเขื่อนแม่ทาน จังหวัดลำปาง เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเขื่อนแห่งนี้ได้ทำการยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งหลังจากทำการเก็บกักน้ำที่ระดับเก็บกักใหม่ พบการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน โดยจากการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาพบจุดน้ำขังบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า ผลการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกับผลสำรวจธรณีฟิสิกส์และผลการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาที่บ่งชี้ว่า การยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำทำให้เกิดการยกระดับเส้นทางการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อน ส่งผลให้มีน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนในจุดที่นอกเหนือจากการออกแบบที่ปกติจะให้น้ำที่ซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากไหลผ่านวัสดุกรองน้ำที่ลาดท้ายเขื่อน แล้วมีท่อรวบรวมน้ำเพื่อระบายลงด้านท้ายเขื่อนต่อไป จากผลการศึกษาวิเคราะห์นี้ จึงมีข้อแนะนำว่าผู้ออกแบบเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำโดยการยกระดับเก็บกัก ต้องมีการวิเคราะห์เส้นทางของน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากก่อนทุกครั้ง และทำการออกแบบรองรับหากพบว่าเส้นทางการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากมีการเปลี่ยนแปลงไปจนอาจส่งผลต่อความมั่นคงของตัวเขื่อน ผู้เขียนจึงหวังว่าผลงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสำนักงานชลประทาน หรือโครงการชลประทานต่างๆ ที่จะต้องสนองนโยบายของกรมชลประทานในการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนโดยการยกระดับเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะต้องดำเนินการอย่างรอบคอบ มีการวิเคราะห์ผลกระทบ และทำการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อป้องกันผลกระทบดังกล่าว

## 2. วัตถุประสงค์

การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน กรณีศึกษาเขื่อนแม่ทาน จังหวัดลำปาง มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

(1) เพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของการยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ วิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลจากการสำรวจด้านต่างๆ ทั้งด้านการวิเคราะห์สภาพเขื่อนโดยการตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตา (Visual inspection) การสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์และด้านวิศวกรรมธรณี

(2) เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อน โดยคำนวณปริมาณการรั่วซึมของน้ำผ่านทำนบดินและฐานราก ค่าความเร็ววิกฤตและค่าลาดชลศาสตร์ วิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินถมตามแบบจำลองการปรับปรุงเขื่อนและฐานรากในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำการออกแบบกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาการไหลซึมของน้ำ และเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยของตัวเขื่อน

**3. ประโยชน์ของผลงาน**

(1) ทำให้ทราบผลกระทบของการยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนดิน

(2) ได้แนวทางการปรับปรุงความแข็งแรงทำนบดินจากการเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำ

(3) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นกรณีศึกษาของเขื่อนอื่นๆ ที่มีแผนในการยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำ ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวเขื่อนอย่างรอบคอบเพื่อออกแบบปรับปรุงให้เหมาะสม ไม่ให้เกิดผลกระทบตามที่วิเคราะห์ได้

**4. ข้อมูลพื้นฐานและสภาพปัญหาของเขื่อนแม่ทาน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ**

(1) ที่ตั้ง หมู่ 4 ตำบลแม่กัวะ อำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง

ตามแผนที่ มาตราส่วน 1 : 50000 ระวาง 4845 III

พิกัด 47 NQV 136-980 ละติจูด19°-47°-52° ลองติจูด100°-00°-50°

(2) ข้อมูลทั่วไปเขื่อน เป็นเขื่อนชนิดเขื่อนดิน ปิดกั้นลำน้ำแม่ทาน

| | | |
|---|---|---|
| เริ่มการก่อสร้าง | พ.ศ. 2528 | |
| แล้วเสร็จ | พ.ศ. 2528 | |
| ปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักน้ำ | พ.ศ. 2560 | |
| พื้นที่อ่างเก็บน้ำ | 2,304,000 | ตร.ม. |
| ปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำ | 19,709,000 | ลบ.ม./ปี |
| พื้นที่รับน้ำ | 88.00 | ตร.กม. |
| ปริมาณฝนเฉลี่ย | 1,069.50 | มม./ปี |
| ช่วยเหลือพื้นที่เพาะปลูกในฤดูฝน | 12,000 | ไร่ |

(3) ลักษณะหัวงานเขื่อน

| | | |
|---|---|---|
| สันเขื่อนยาว | 630.00 | เมตร |
| สันเขื่อนสูง | 17.00 | เมตร |
| สันเขื่อนกว้าง | 8.00 | เมตร |
| ระดับสันเขื่อน (เดิม) | +238.00 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับสันเขื่อน (ใหม่) | +238.50 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับน้ำสูงสุด (เดิม) | +237.00 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับน้ำสูงสุด (ใหม่) | +238.50 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับน้ำเก็บกัก (เดิม) | +236.00 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับน้ำเก็บกัก (ใหม่) | +237.00 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ระดับน้ำต่ำสุด | +228.00 | เมตร (ร.ส.ม.) |
| ปริมาตรน้ำสูงสุด (ใหม่) | 17,000,000 | ลบ.ม. |
| ปริมาตรน้ำเก็บกัก (ใหม่) | 13,600,000 | ลบ.ม |
| ปริมาตรน้ำต่ำสุด | 306,000 | ลบ.ม. |

(4) อาคารท่อระบายน้ำ/ส่งน้ำ (Outlet)

4.1) อาคารท่อส่งน้ำฝั่งซ้าย (Left Canal Outlet)

| | | |
|---|---|---|
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | 0.80 | เมตร |
| ความยาว | 70.00 | เมตร |

4.2) อาคารท่อส่งน้ำฝั่งขวา (Right Canal Outlet)

| | | |
|---|---|---|
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | 0.50 | เมตร |
| ความยาว | 70.00 | เมตร |

(5) อาคารระบายน้ำล้น แบบไม่มีบาน (Ungated Spillway) ลักษณะ Chute Spillway

| | | |
|---|---|---|
| กว้าง | 30.00 | เมตร |
| ระบายน้ำได้ | 115.00 | ลบ.ม./วินาที |

## 5. การตรวจสอบสภาพเขื่อนแม่ทาน

เขื่อนแม่ทานก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2528 มีอายุการใช้งาน 38 ปี (นับถึงปี พ.ศ. 2566) มีการตรวจสอบสภาพเขื่อนทางสายตาและประเมินสภาพเขื่อนด้วยวิธีดัชนีสภาพ ในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งค่าดัชนีสภาพเขื่อนแม่ทานจากการตรวจสอบ มีค่าเท่ากับ 79.74 % ซึ่งหมายถึง ในภาพรวมเขื่อนอยู่ในสภาพดี สามารถทำงานได้ สมควรซ่อมแซม แต่รอได้ โดยมีรายละเอียดของค่าดัชนีสภาพแบ่งแยกย่อยตามองค์ประกอบหลักดังนี้

(1) ตัวเขื่อน มีค่าดัชนีสภาพ เท่ากับ 90.40 % หมายถึง สภาพเขื่อนดีมาก สามารถทำงานได้ไม่ต้องซ่อมแซม

(2) อาคารส่งน้ำ/ระบายน้ำ มีค่าดัชนีสภาพ เท่ากับ 93.00 % หมายถึง อาคารส่งน้ำ/ระบายน้ำมีสภาพดีมาก สามารถทำงานได้ตามปกติ ไม่ต้องซ่อมแซม

(3) อาคารระบายน้ำล้น ค่าดัชนีสภาพ เท่ากับ 52.20 % หมายถึง อาคารระบายน้ำมีสภาพปานกลาง สามารถทำงานได้ ซ่อมแซมบางส่วน

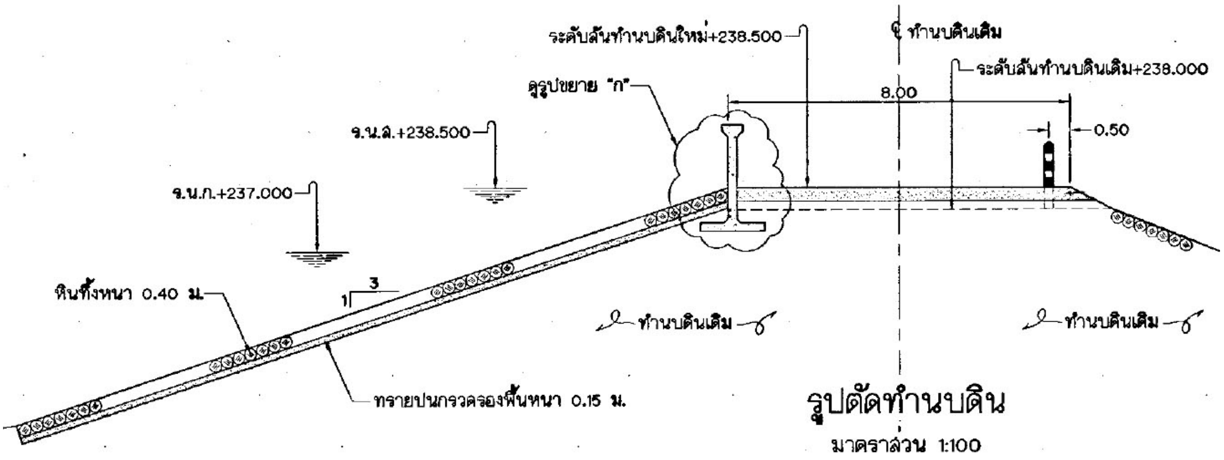
ซึ่งการตรวจสอบสภาพเขื่อนทางสายตาในปี พ.ศ. 2556 ไม่พบการรั่วซึมของทำนบดินด้านท้ายน้ำ

## 6. การปรับปรุงเขื่อนแม่ทานและสภาพปัญหาที่พบหลังการปรับปรุง

ในปี พ.ศ. 2560 เขื่อนแม่ทานได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำโดยการยกระดับเก็บกักขึ้นจากเดิม 1.0 เมตร ปรับปรุงยกระดับสันทำนบดินขึ้นมาจากเดิม 0.5 เมตร พร้อมก่อสร้างกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก parapet wall บนสันทำนบดินด้านเหนือน้ำ โดยมีระดับสันกำแพงอยู่ที่ +240.00 เมตร (รสม.) รายละเอียดดังแสดงใน**รูปที่ 1**

หลังจากการปรับปรุงและเริ่มเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักใหม่ในปี พ.ศ. 2560 พบการรั่วซึมของน้ำบริเวณด้านท้ายทำนบดินของอ่างเก็บน้ำแม่ทาน ฝ่ายจัดการความปลอดภัยเขื่อนและอาคารชลประทาน ได้เข้าตรวจสภาพเขื่อนทางสายตา (Visual Inspection) ร่วมกับผู้อำนวยการส่วนบริหารจัดการน้ำและบำรุงรักษาและหัวหน้าฝ่ายออกแบบ ในวันที่ 2 มีนาคม 2561 จากการตรวจสภาพเขื่อนทางสายตา พบว่าบริเวณลาดด้านท้ายน้ำทำนบดินหลัก และทำนบดินปิดช่องเขาต่ำ มีการรั่วซึมที่ระดับประมาณ +225.000 เมตร (ร.ส.ม.) ยาวตลอดทั้งแนวลาดท้ายน้ำดังแสดงใน**รูปที่ 2** และ**รูปที่ 3** ลักษณะน้ำที่ไหลซึมใสไม่มีสี จากการสอบถามกลุ่มผู้ใช้น้ำ

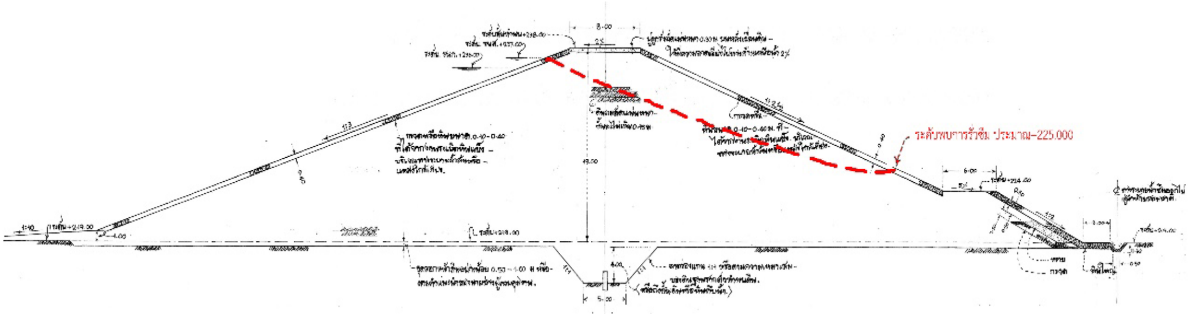
ทราบว่าก่อนปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพความจุอ่างเก็บน้ำในปี พ.ศ. 2560 บริเวณดังกล่าวไม่พบน้ำรั่วซึม สันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจาก เส้นการซึมของน้ำผ่านทำนบดิน (A flow line for seepage through an earth dam) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มความจุระดับเก็บกัก ดังแสดงใน**รูปที่ 4**




**รูปที่** 1 รูปตัดทำนบดินของเขื่อนแม่ทาน

**รูปที่ 2** ผังบริเวณที่พบการรั่วซึม

**รูปที่ 3** การตรวจสภาพเขื่อนทางสายตาบริเวณลาดด้านท้ายทำนบดินหลักที่พบการรั่วซึม




**รูปที่ 4** เส้นการซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน (A flow line for seepage through an earth dam) ที่สันนิษฐานว่ามีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มความจุระดับเก็บกัก

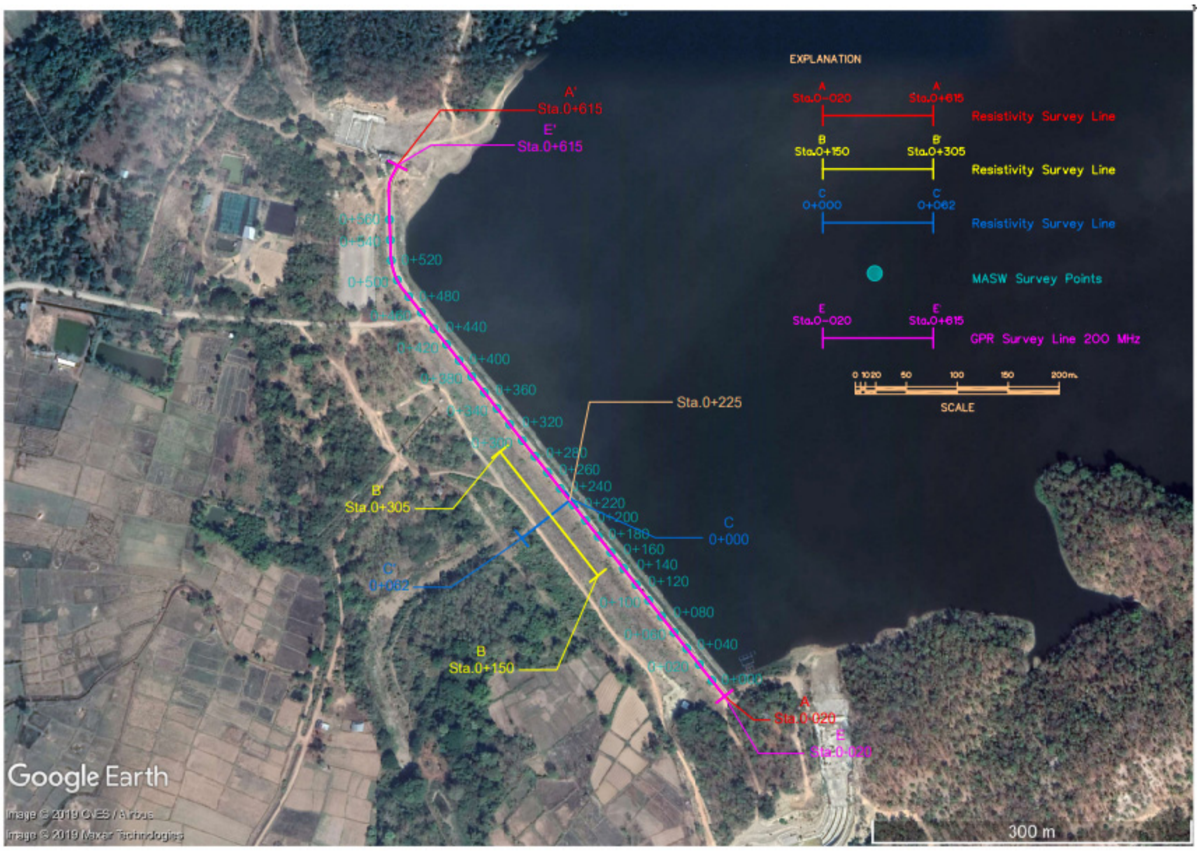
## 7. การสำรวจธรณีฟิสิกส์ของเขื่อนแม่ทาน

เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานจากการตรวจสภาพเขื่อนทางสายตาที่ว่าการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนที่ระดับประมาณ 225.0 เมตร (ร.ส.ม.) บริเวณลาดด้านท้ายน้ำเขื่อนดินยาวตลอดทั้งแนวลาดท้ายน้ำ เกิดจากเส้นการซึมของน้ำผ่านทำนบดิน (a flow line for seepage through an earth dam) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพความจุอ่างเก็บน้ำในปี พ.ศ.2560 สำนักงานชลประทานที่ 2 จึงได้ดำเนินการสำรวจธรณีฟิสิกส์ 3 วิธี คือ วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบคลื่นเสียงด้วยเทคนิค MASW และวิธีเรดาห์หยั่งลึก โดยจัดวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพล ตามแนวศูนย์กลางเขื่อน แนวขนานเขื่อนด้านท้ายน้ำและแนวตัดขวางตัวเขื่อน ดังแสดงใน**รูปที่ 5** มีรายละเอียดดังนี้

(1) แนวศูนย์กลางเขื่อน (A-A') อ้างอิงตำแหน่งจากแนวท่อส่งน้ำด้านฐานยันฝั่งซ้ายและฝั่งขวา ตัดตัวเขื่อนที่ กม.0+012.5 และกม.0+385.5 จากแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ โดยแนวสำรวจเริ่มตั้งแต่ กม.0-020 ถึง กม.0+615 รวมระยะทาง 635 เมตร

(2) แนวขนานเขื่อนด้านท้ายน้ำ (B-B') วางตัวที่ระดับประมาณ 234 เมตร (ร.ส.ม.) ห่างจากแนว A-A’ ลงตามลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำประมาณ 24 เมตร วางขนานไปกับแนวศูนย์กลางเขื่อนโดยใช้ตำแหน่งเดียวกับแนว A-A’ โดยแนวสำรวจเริ่มตั้งแต่ กม.0+150 ถึง กม.0+305 รวมระยะทาง 155 เมตร

(3) แนวตัดขวางตัวเขื่อน (C-C') วางแนวสำรวจตัดตั้งฉากกับแนว A-A’ ที่ กม.0+225 ลงไปยังด้านท้ายน้ำจนถึงตีนเขื่อน โดยแนวสำรวจเริ่มตั้งแต่ระยะ 0+000 ถึง ระยะ 0+062 เมตร รวมระยะทาง 62 เมตร โดยแนว A-A’ ตัดกับแนวนี้ที่ระยะ 0+002 เมตร และแนว B-B’ ตัดกับแนวนี้ที่ระยะ 0+016 เมตร




**รูปที่ 5** แนวสำรวจธรณีฟิสิกส์

## 8. การเทียบเคียงผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ากับสภาพปัญหาโครงการ

ผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนว A-A’, B-B’ และ แนว C-C’ แสดงไว้ดัง**รูปที่ 6** และ **รูปที่ 7** ตามลำดับ ซึ่งสามารถแปลผลการสำรวจได้ดังนี้

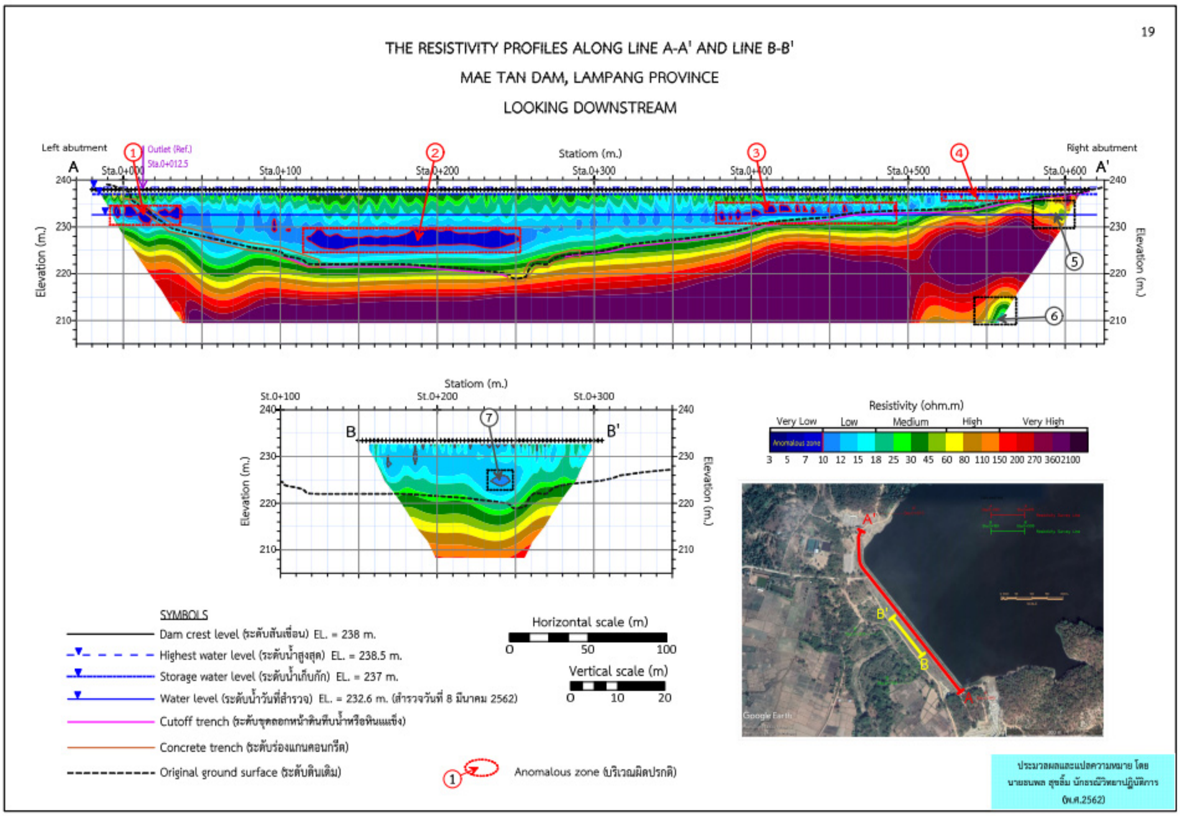
(1) ดินถมเขื่อนและดินถมลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ เหนือเส้นระดับดินเดิมโดยประมาณจากแบบ (above assume original ground surface from site plan, เส้นประสีดำ) พบว่า ดินถมแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6 ถึง 1308 โอห์ม.เมตร ส่วนใหญ่ของดินถมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.89 โอห์ม.เมตร จัดอยู่ในกลุ่มสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (low resistivity) หรือโทนสีฟ้า แปลความหมายว่า ดินถมส่วนใหญ่มีความชื้นสูง และเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงผลคล้ายคลึงกับแนว A-A’ และ B-B’ (ค่าเฉลี่ย 15.06 และ 14.82 โอห์ม.เมตร ตามลำดับ)

(2) บริเวณที่ต่ำกว่าเส้นระดับดินเดิมโดยประมาณจากแบบ (below assume original ground surface from site plan, เส้นประสีดำ) คาดว่าเป็นดินเดิม แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6 ถึง 687 โอห์ม.เมตร ส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.04 โอห์ม.เมตร จัดอยู่ในกลุ่มสภาพต้านทานไฟฟ้าปานกลาง (medium resistivity) หรือโทนสีเขียว แปลความหมายว่า ฐานรากส่วนใหญ่มีความชื้นปานกลาง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความทึบน้ำเป็นปกติ

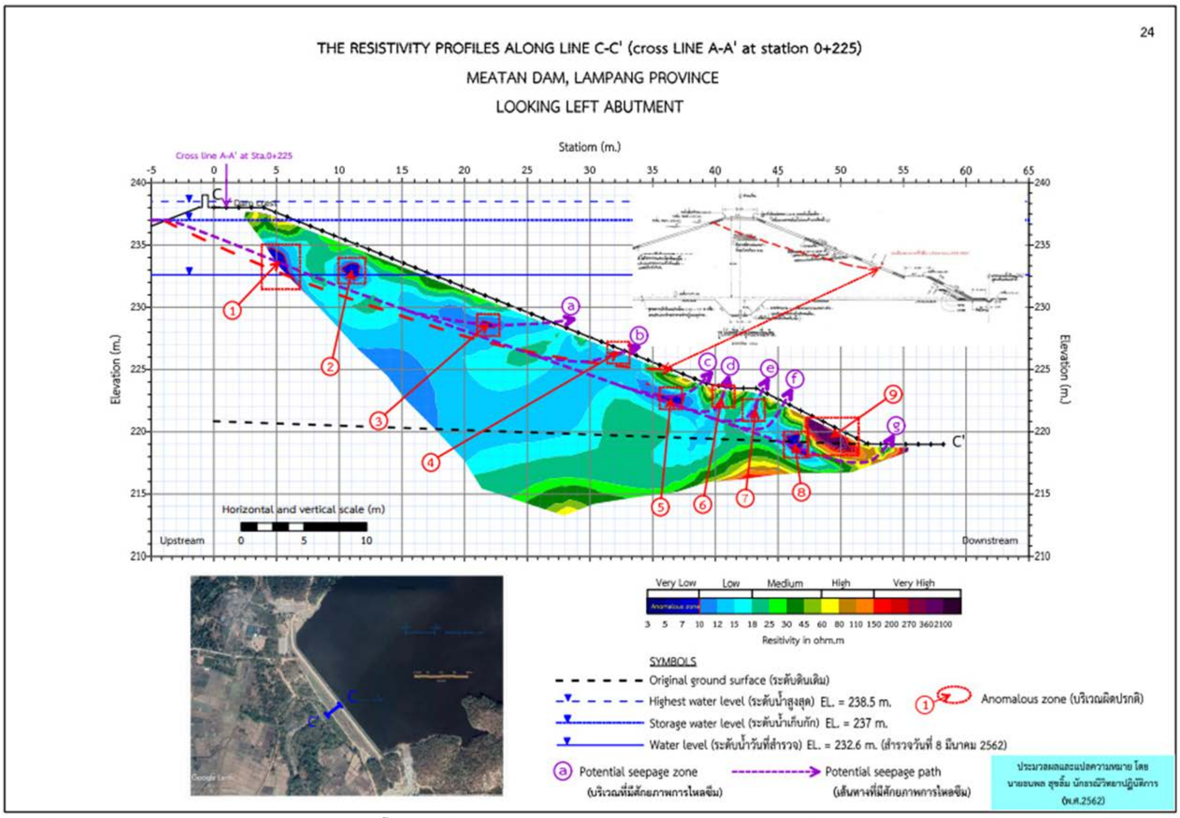
(3) พบบริเวณความผิดปรกติ 2 กลุ่ม คือ ความผิดปรกติด้านต่ำ และความผิดปรกติด้านสูง ดังต่อไปนี้

3.1) ความผิดปรกติด้านต่ำ แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 10 โอห์ม.เมตร จัดอยู่ในกลุ่มสภาพต้านทานฟ้าต่ำมาก (very low resistivity) หรือโทนสีน้ำเงิน แปลความหมายว่า ดินถมบริเวณนี้มีความชื้นสูงมาก และมีความเสี่ยงต่อการไหลซึม พบความผิดปรกติด้านต่ำ จำนวน 8 แห่ง โดยความผิดปรกติ**หมายเลข 1 ถึง 7** พบในตัวดินถม ส่วน**หมายเลข 8** (ตำแหน่งและค่าระดับแสดงไว้ใน**ตารางที่ 1**) พบที่ตีนเขื่อน (dam toe) โดยความผิดปรกติส่วนใหญ่พบอยู่ใต้ผิวลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ที่ความลึกประมาณ 2.5 เมตร หรือเส้นประสีม่วง สามารถคาดคะเนได้ว่าเป็นเส้นแสดงแนวทางของการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนไปยังด้านท้ายน้ำ (a flow line for seepage through an earth dam) และเกิดการไหลซึมขึ้นมาบนผิวลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ที่**บริเวณ a ถึง g** (ตำแหน่งและค่าระดับแสดงไว้ใน**ตารางที่ 1**) โดยที่**บริเวณ a ถึง f** มีความสัมพันธ์กับบริเวณที่พบน้ำขังจากการไหลซึมบริเวณชานพักด้านท้ายน้ำของเขื่อน (berm) : ซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานจากการตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตาในปี พ.ศ. 2561 (**รูปที่ 4**) ส่วน**บริเวณ g** คาดว่าน้ำไหลซึมมาจากความผิดปรกติ**หมายเลข 8** ลอดลงไปใต้ทางระบายน้ำใต้ดินท้ายเขื่อน (toe drain) และขึ้นมาสู่ผิวดินที่**บริเวณ g**

3.2) ความผิดปกติด้านสูง แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 270 โอห์ม.เมตร จัดอยู่ในกลุ่มสภาพต้านทานฟ้าสูงมาก (very high resistivity) หรือโทนม่วงดำ พบที่**หมายเลข 9** ระยะ 0+047 ถึง 0+051 ที่ระดับ 218 ถึง 221 เมตร ร.ส.ม. (ขนาดประมาณ 4x3 เมตร) แปลความหมายว่า บริเวณนี้มีความชื้นต่ำมาก คาดว่าวัสดุในบริเวณดังกล่าวเป็นทราย กรวด และหินใหญ่ หรือทางระบายน้ำใต้ดินท้ายเขื่อน (toe drain)




**รูปที่ 6** การแปลผลการสำรวจสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนว A-A’ และ B-B’




**รูปที่ 7** การแปลผลการสำรวจสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนว C-C’

**ตารางที่ 1** บริเวณที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าผิดปรกติตามแนวตัดขวางตัวเขื่อน (แนว C-C')

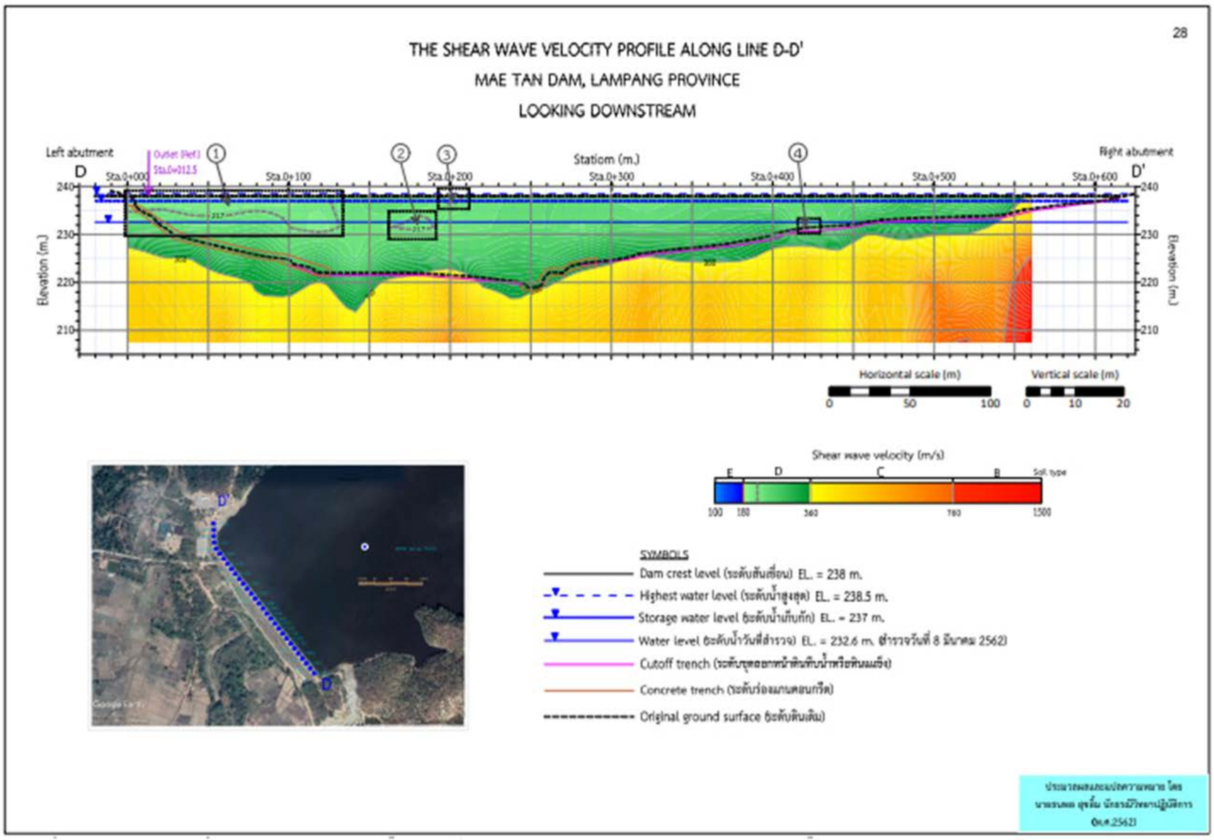
| หมายเลข | บริเวณที่ผิดปรกติ (เมตร) | ค่าระดับ (เมตร ร.ส.ม.) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0+004.0 ถึง 0+007.0 | 231.4 ถึง 234.8 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 2 | 0+010.0 ถึง 0+012.0 | 225.0 ถึง 229.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 3 | 0+021.0 ถึง 0+022.5 | 231.0 ถึง 235.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 4 | 0+031.8 ถึง 0+032.7 | 235.5 ถึง 238.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 5 | 0+035.0 ถึง 0+037.5 | 221.1 ถึง 223.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 6 | 0+040.5 | 222.1 ถึง ผิวลาดเขื่อน | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 7 | 0+043.2 | 221.1 ถึง ผิวลาดเขื่อน | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 8 | 0+046.6 ถึง 0+047.5 | 218.0 ถึง 220.0 | พบที่รอยต่อดินถมกับฐานราก |
| 9 | 0+047.2 ถึง 0+051.5 | 218.1 ถึง ผิวลาดเขื่อน | พบที่ทางระบายน้ำใต้ดินท้ายเขื่อน (toe drain) |

## 9. การเทียบเคียงผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบคลื่นเฉือนด้วยเทคนิค MASW กับสภาพปัญหาโครงการ

เมื่อนำค่าความเร็วคลื่นเฉือน 1 มิติ มาแสดงเป็นภาพตัดขวาง 2 มิติ แสดงดัง**รูปที่ 8** โดยนำระดับขุดลอกหน้าดินทึบน้ำหรือหินแข็ง (cutoff trench) และภาพตัดขวางของเขื่อน (อ้างอิงตามแปลนเลขที่ สชป.2-4-2813) มาประกอบการแปลความหมายผลการสำรวจ ได้ผลดังนี้

(1) ดินถมเขื่อน หรือบริเวณเหนือเส้นระดับขุดลอกหน้าดินทึบน้ำหรือหินแข็ง (above cutoff trench, เส้นสีม่วง) พบว่าส่วนใหญ่ของดินถมแสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 195.34 ถึง 390.13 เมตรต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 237.41 เมตรต่อวินาที หรือโทนสีเขียว จัดอยู่ในกลุ่ม D ซึ่งระบุเป็นดินแน่น (stiff soil) แสดงสภาพดินถมส่วนใหญ่มีความแน่นเป็นปกติตามเกณฑ์มาตราฐาน และเป็นเนื้อเดียวกัน ยกเว้นบริเวณ**หมายเลข 1 ถึง 4** แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง สำหรับตำแหน่งและค่าระดับแสดงดัง**ตารางที่ 2**

(2) ฐานรากเขื่อน หรือบริเวณใต้เส้นระดับขุดลอกหน้าดินทึบน้ำหรือหินแข็ง (below cutoff trench, เส้นสีม่วง) พบว่าส่วนใหญ่ของฐานรากแสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 193.60 ถึง 1,083.85 เมตรต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 461.05 เมตรต่อวินาที หรือโทนสีเหลืองส้ม จัดอยู่ในกลุ่ม C ซึ่งระบุเป็นดินแน่นมากและหินอ่อน (very dense soil and soft rock) แสดงสภาพของฐานรากส่วนใหญ่เป็นหิน มีความแน่นเป็นปรกติและเป็นเนื้อเดียวกัน




**รูปที่ 8** การแปลผลการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบคลื่นเฉือนด้วยเทคนิค MASW

**ตารางที่ 2** บริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง

| หมายเลข | ตำแหน่ง (กม.) | ระดับความลึก (เมตร ร.ส.ม.) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0+000 ถึง 0+131 | 230.5 ถึง 238.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 2 | 0+163 ถึง 0+190 | 231.0 ถึง 234.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 3 | 0+196 ถึง 0+207 | 236.3 ถึง 238.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |
| 4 | 0+418 ถึง 0+425 | 231.3 ถึง 232.0 | พบที่ดินถมเขื่อน |

## 10. การเทียบเคียงผลการวิธีสำรวจเรดาร์หยั่งลึก กับสภาพปัญหาโครงการ

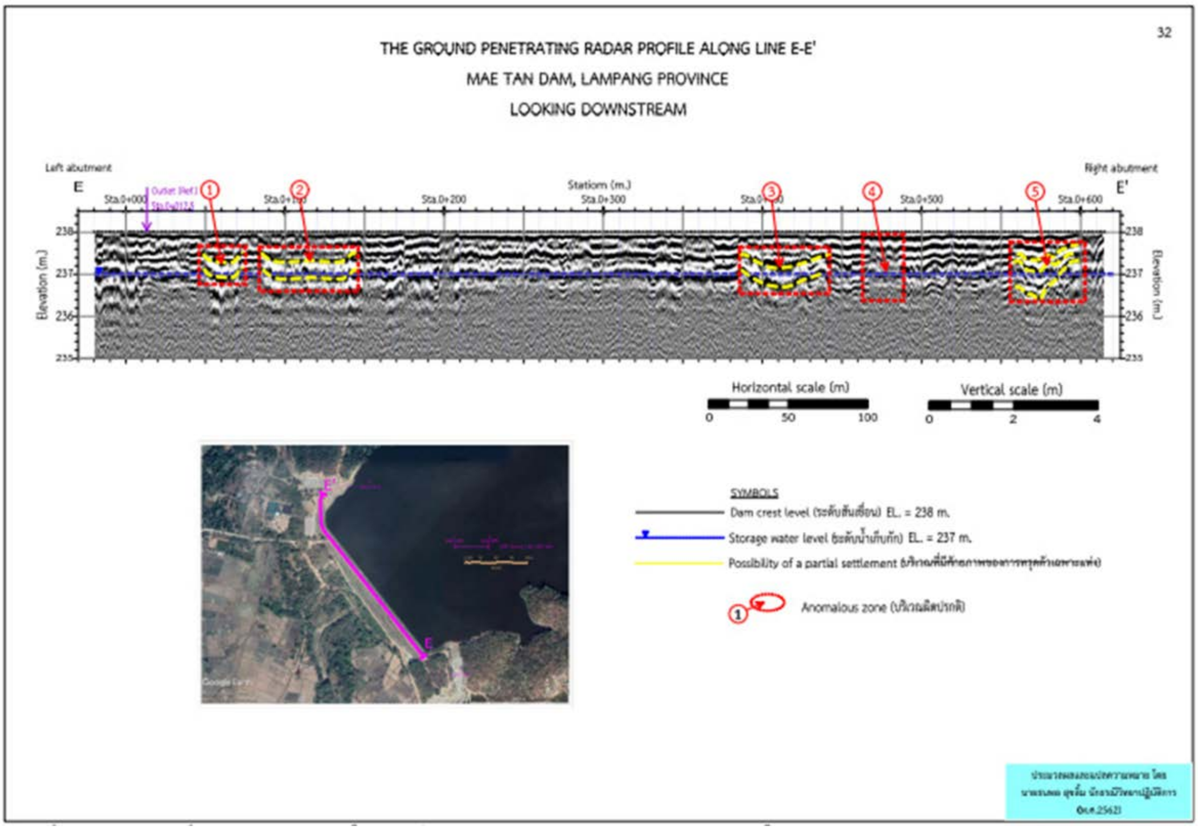
เมื่อนำผลสำรวจเรดาร์หยั่งลึก ตามแนวศูนย์กลางเขื่อน (E-E') ดังแสดงใน**รูปที่ 9** มาพิจารณาร่วมกับระดับน้ำสูงสุด ภาพตัดขวางแสดงระดับชั้นผิวทาง (สชป.2-4-2813) และข้อมูลภาคสนาม สามารถแปลความหมายได้ดังนี้

ชั้นที่ 1 ดินถมเขื่อน ตั้งแต่ระดับพื้นผิวถึง 1.5 เมตร ครอบคลุมชั้นดินลูกรังอัดแน่น และดินถมซึ่งอยู่ในช่วงระยะพ้นน้ำ (freeboard) พบสัญญาณส่วนใหญ่ต่อเนื่องตามแนวยาวคล้ายกัน และความเข้มสัญญาณชัดเจน และสัญญาณกลุ่มไฮเปอร์โบลิกขนาดเล็ก แปลความหมายว่า ดินถมเขื่อนส่วนใหญ่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีเศษหิน ลูกรัง หรือเป็นรอยแตกขนาดเล็กกระจายตัวทั่วไปตลอดแนวเขื่อน ยกเว้นบริเวณแสดงสัญญาณความผิดปกติที่แตกต่างบริเวณด้านข้าง โดยมีลักษณะสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง ไม่ชัดเจน ดังแสดงใน**หมายเลข 4** แปลความหมายว่า ดินถมบริเวณดังกล่าวอาจมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต่างกัน หรือเป็นบริเวณที่ชื้นมากกว่าบริเวณรอบข้าง ส่วน**หมายเลข 1, 2, 3 และ 5** มีลักษณะสัญญาณต่อเนื่องเอียงเทหรือเป็นแอ่ง แปลความหมายว่า ดินถมบริเวณดังกล่าวเกิดการยุบตัวเฉพาะแห่ง (ตำแหน่งและค่าระดับของความผิดปกติแสดงใน**ตารางที่ 3**)

ชั้นที่ 2 ดินถมเขื่อน ตั้งแต่ความลึก 1.5 เมตร ลงไป พบสัญญาณลักษณะปกติแปลความหมายว่า ส่วนใหญ่ดินถมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ตรวจไม่พบความผิดปกติของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมาจาก 3 สาเหตุ คือ สาเหตุที่ 1 สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านลงไปยังดินถมที่มีความชื้นค่อนข้างสูงและนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำให้ได้สัญญาณสะท้อนกลับมาได้น้อย สาเหตุที่ 2 เมื่อส่งคลื่นฯ แล้วไม่พบรอยต่อจึงไม่สะท้อนกลับ สาเหตุที่ 3 ดินถมมีความเนื้อเดียวกัน จึงทำให้ไม่พบความผิดปกติ

**ตารางที่ 3** บริเวณที่มีความผิดปกติ (anomalous zones) ของสัญญาณเรดาร์หยั่งลึกตามแนวศูนย์กลางเขื่อน

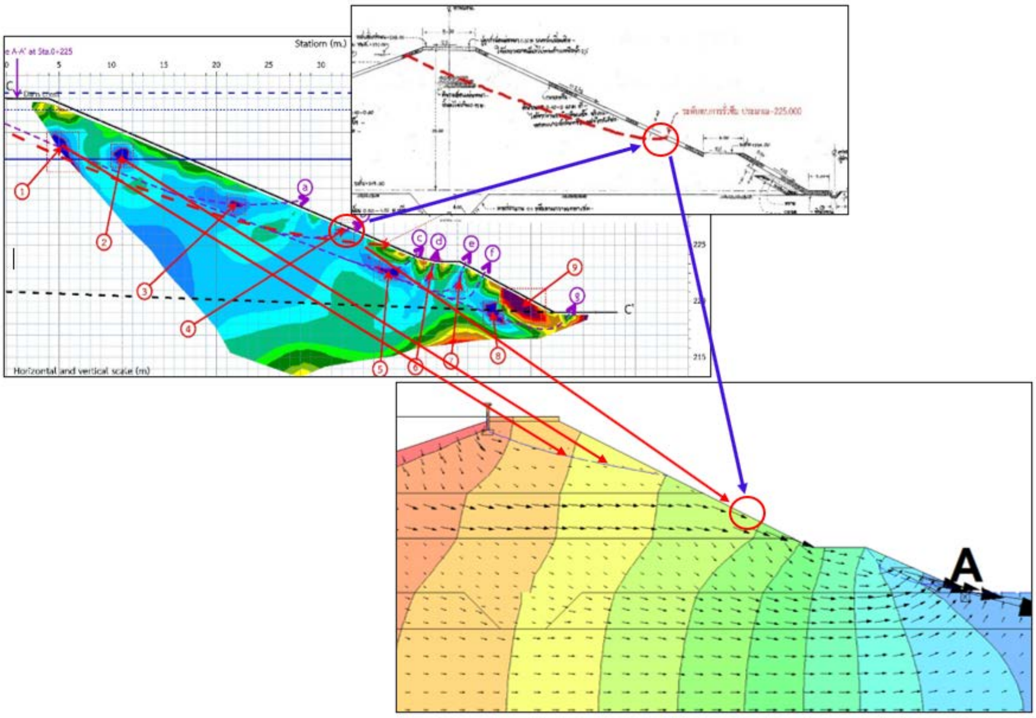
| หมายเลข | บริเวณ (กม.) | ค่าระดับ เมตร ร.ส.ม. | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0+050 ถึง 0+073 | 238.0 ถึง 236.5 | ยุบตัวเฉพาะแห่ง |
| 2 | 0+085 ถึง 0+144 | | ยุบตัวเฉพาะแห่ง |
| 3 | 0+385 ถึง 0+440 | | ยุบตัวเฉพาะแห่ง |
| 4 | 0+466 ถึง 0+487 | | ชื้นสูงกว่าบริเวณรอบข้าง |
| 5 | 0+466 ถึง 0+487 | | ยุบตัวเฉพาะแห่ง |




**รูปที่ 9** การแปลผลสำรวจเรดาร์หยั่งลึก

**11. การวิเคราะห์เส้นทางและปริมาณน้ำซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากของเขื่อนแม่ทาน**

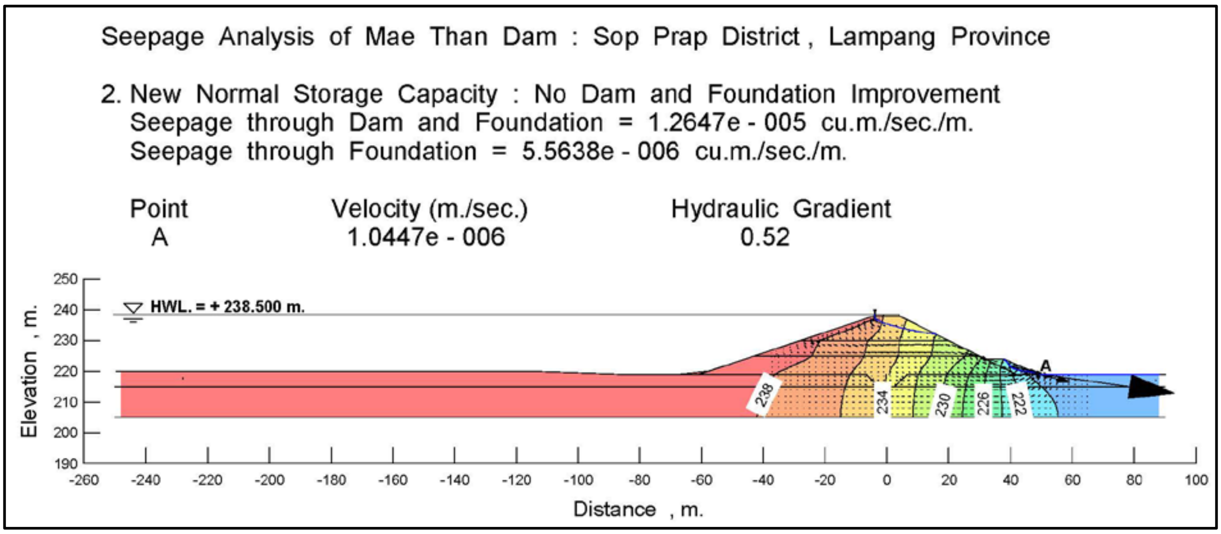
การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์เส้นทางและปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากโดยใช้แบบจำลอง GeoStudio เพื่อเปรียบเทียบเส้นทางและปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากในกรณีไม่มีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ และกรณีมีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ รวมทั้งวิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไขปัญหา การวิเคราะห์จะเริ่มจากการสมมุติค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของตัวเขื่อนและฐานรากจากข้อมูลการเดินสำรวจธรณีวิทยาพื้นผิว และรายงานการตรวจสภาพเขื่อนทางสายตา (Visual Inspection) และทำการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) ในหลายโมเดล เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของตัวเขื่อนและฐานรากที่ใกล้เคียงกับผลการสำรวจการต้านไฟฟ้า และรายงานการตรวจสภาพเขื่อนทางสายตาที่พบจุดรั่วซึมของน้ำดังแสดงใน**รูปที่ 10** ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากพบว่ามีความสอดคล้องสัมพันธ์กันบริเวณวงกลมสีแดง โดยจากการเดินตรวจสอบบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำพบการรั่วซึมที่ระดับประมาณ +225.000 เมตร (ร.ส.ม.) สอดคล้องกับผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่พบเป็นบริเวณที่มีค่าความต้านไฟฟ้าต่ำ และจากวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก พบเส้นทางการไหลซึมของน้ำ (Vector) หนาแน่นในบริเวณนี้



**รูปที่ 10** ความสัมพันธ์ของการรั่วซึม

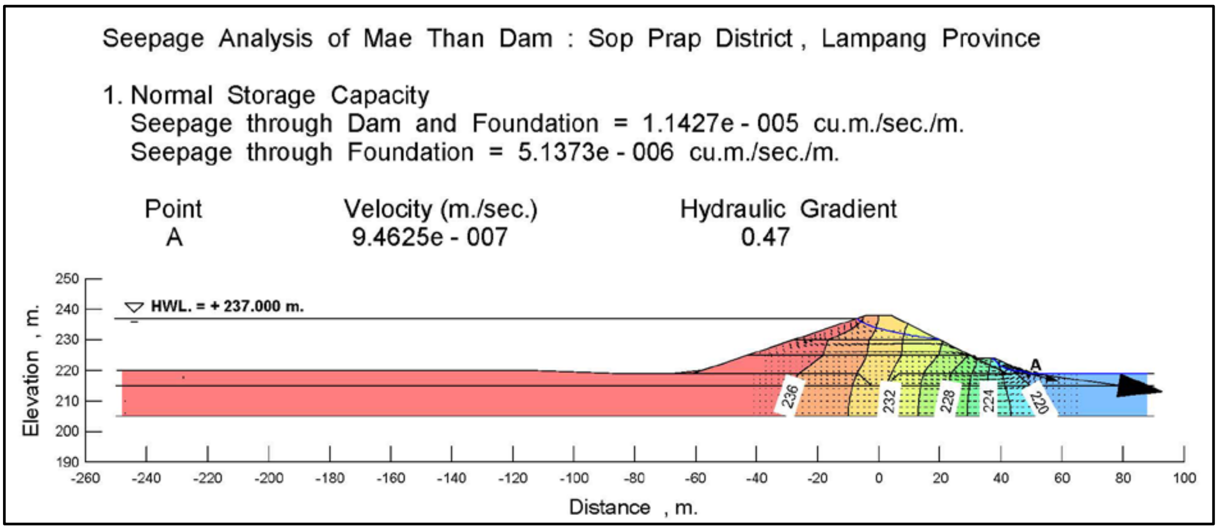
เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของตัวเขื่อนและฐานรากที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นตัวแทนของเขื่อนในปัจจุบันที่ได้ทำการยกระดับเก็บกักแล้ว จึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เส้นทางการซึมของน้ำผ่านเขื่อนเดิมก่อนยกระดับเก็บกัก ซึ่งผลการวิเคราะห์เส้นทางการซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากทั้งหลังและก่อนการยกระดับเก็บกักสรุปได้ ดังนี้

(1) เมื่อทำการเพิ่มระดับเก็บกักขึ้นอีก 1 เมตร โดยสร้างกำแพงคอนกรีต (New Normal Storage Capacity) พบว่า เส้นการไหลบนสุดของมวลดินอิ่มตัวผ่านเขื่อน จะปรากฏในบริเวณลาดด้านท้ายน้ำที่ระดับประมาณ +232 ม. และพบว่าปริมาณการรั่วซึมของน้ำผ่านเขื่อนดินถมและฐานราก มีค่าประมาณ 1.2647e-005 ลูกบาศก์เมตร/วินาที/เมตร และมีค่า Velocity และค่า Hydraulic Gradient บริเวณปลายลาดด้านท้ายเขื่อนที่มีโอกาสเกิด Piping (จุด A) ดังแสดงใน**รูปที่ 11** เท่ากับ 1.0447e-006 m./sec. และ 0.52 ตามลำดับ




**รูปที่ 11** ผลการวิเคราะห์ กรณีมีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ

(2) เมื่อนำผลการวิเคราะห์ในข้อ (1) มาวิเคราะห์เส้นทางการซึมของน้ำผ่านเขื่อนเดิมก่อนยกระดับเก็บกัก (Normal Storage Capacity) พบว่าเส้นการไหลบนสุดของมวลดินอิ่มตัว (Phreatic line) ผ่านเขื่อนเดิม จะปรากฎในบริเวณลาดด้านท้ายน้ำที่ระดับประมาณ +230 ม. ซึ่งต่ำกว่ากรณียกระดับเก็บกักแล้ว 2 เมตร และพบว่าปริมาณการรั่วซึมของน้ำผ่านเขื่อนดินถมและฐานราก มีค่าประมาณ 1.1427e-005 ลูกบาศก์เมตร/วินาที/เมตร และมีค่า Velocity และค่า Hydraulic Gradient บริเวณปลายลาดด้านท้ายเขื่อนที่มีโอกาสเกิด Piping (จุด A) ดังแสดงใน**รูปที่ 12** เท่ากับ 9.4625e-007 m./sec. และ 0.47 ตามลำดับ




**รูปที่ 12** ผลการวิเคราะห์ กรณีไม่มีการเพิ่มศักยภาพในการเก็บกักน้ำ (เขื่อนเดิม)

## 12. การวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขปัญหา

จากผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากดังกล่าวข้างต้น ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไข โดยกำหนดรูปแบบในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ตามแบบจำลองการปรับปรุงตัวเขื่อนและฐานรากในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ ออกเป็น 6 รูปแบบ ได้ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ตาม**ตารางที่ 4** และผลการวิเคราะห์ค่า Hydraulic Gradient และค่า Velocity ณ จุด A (บริเวณท้ายเขื่อน) ที่มีโอกาสเกิด Piping ตาม**ตารางที่ 5** ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

(1) การวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากเขื่อนในครั้งนี้ เป็นการศึกษาเพื่อมุ่งเน้นหาปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ทั้งนี้ก็เพื่อเปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงแบบต่างๆ โดยใช้ Section และข้อกำหนดอย่างเดียวกัน

(2) จากผลการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ใน 6 รูปแบบ 5 วิธีปรับปรุง พบว่า วิธีการปรับปรุงฐานรากที่เหมาะสมที่สามารถลดการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากมี 4 วิธี คือ

วิธีที่ 1 : ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 6 เท่าความสูงของทำนบดิน (114 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST

วิธีที่ 2 : ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 12 เท่าความสูงของทำนบดิน (228 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST

วิธีที่ 3 : ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 6 เท่าความสูงของทำนบดิน (114 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST และปรับปรุงลาดดินท้ายน้ำด้วย Rock Fill Toe

วิธีที่ 4 : ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 6 เท่าความสูงของทำนบดิน (114 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST และปรับปรุงลาดดินท้ายน้ำด้วยระบบระบายน้ำ Chimney - Blanket Drain

ซึ่งสามารถป้องกันการรั่วซึมน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก และทำให้มีประสิทธิภาพป้องกันการไหลซึมของน้ำได้ 44.97 % , 45.97 % , 44.91 % , และ 43.37% ตามลำดับ และทำให้ค่าความเร็ววิกฤตบริเวณจุด A ลดลงจนมีค่าน้อยกว่า 0.01 m./sec. ส่วนค่า Hydraulic Gradient บริเวณจุด A สูงกว่า 0.25 ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่อาจเกิดโอกาสของการกัดพา (Piping) เล็กน้อย

(3) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการปรับปรุงตัวเขื่อนและฐานราก ใน 4 วิธี ที่เหมาะสมข้างต้น และพิจารณาถึงรายละเอียดด้านงบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงตัวเขื่อนและฐานราก รวมถึงขั้นตอนในการดำเนินงานปรับปรุงทั้งทางด้านวิศวกรรม และทางด้านการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำในขณะทำการปรับปรุงเขื่อน วิธีการปรับปรุงฐานรากที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ทำให้ค่าความเร็ววิกฤต และค่า Hydraulic Gradient ลดลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและสามารถควบคุมให้น้ำที่ผ่านตัวเขื่อนไม่ให้ไหลซึมในบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ คือ

วิธีที่ 1 : ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 6 เท่าความสูงของทำนบดิน (114 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST

อย่างไรก็ตาม การประเมินผลนี้เป็นการเปรียบเทียบทางทฤษฎี โดยสมมุติว่าชั้นดินตัวเขื่อนและชั้นหินฐานรากมีความสม่ำเสมอ ซึ่งในธรรมชาติชั้นดินตัวเขื่อนและชั้นหินฐานรากอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินมาจากผลสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่มีเท่านั้น

**ตารางที่ 4** ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก

| Analysis Method (Case) | Seepage through Dam & Foundation ($m.^3$/sec./m.) | Seepage through Foundation ($m.^3$/sec./m.) | % |
|---|---|---|---|
| 1. No Dam and Foundation Improvement | 1.2647e-005 | 5.5638e-006 | - |
| 2. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H (Offset CL-Dam 114 m.) | 6.9594e-006 | 3.8143e-006 | 44.97 |
| 3. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 12H (Offset CL-Dam 228 m.) | 6.8331e-006 | 3.7596e-006 | 45.97 |
| 4. Soil Grouting along CL-Dam (2 Row, 10 Lugeon) | 1.1448e-005 | 5.9199e-006 | 9.48 |
| 5. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H (Offset CL-Dam 114 m.) and Rock Fill Toe | 6.9671e-006 | 4.1971e-006 | 44.91 |
| 6. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H and Chimney-Blanket Drain | 7.1623e-006 | 5.2613e-006 | 43.37 |

% Foundation Improved* = (Seepage through Dam & Foundation Case 1) - (Seepage through Dam & Foundation Case 2-5) x 100
(Seepage through Dam & Foundation Case 1)

**ตารางที่ 5** ผลการวิเคราะห์ค่า Hydraulic Gradient และค่า Velocity ณ จุด A (บริเวณท้ายเขื่อน) ที่มีโอกาสเกิด Piping

| Analysis Method (Case) | Velocity (m./sec.) | Hydraulic Gradient |
|---|---|---|
| | Point A | Point A |
| 1. No Dam and Foundation Improvement | 1.0447e-006 | 0.52 |
| 2. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H (Offset CL-Dam 114 m.) | 5.8505e-007 | 0.29 |
| 3. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 12H (Offset CL-Dam 228 m.) | 5.8134e-007 | 0.28 |
| 4. Soil Grouting along CL-Dam (2 Row, 10 Lugeon) | 9.5699e-007 | 0.47 |
| 5. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H (Offset CL-Dam 114 m.) and Rock Fill Toe | 5.7159e-007 | 0.28 |
| 6. GCL U/S Slope Benching and GCL U/S Blanket 6H and Chimney-Blanket Drain | 6.0659e-007 | 0.30 |

**13. สรุปและข้อเสนอแนะ**

เขื่อนแม่ทาน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตั้งอยู่ที่หมู่ 4 ตำบลแม่กัวะ อำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง เป็นเขื่อนดินความยาว 630.0 เมตร สร้างปิดกั้นลำน้ำแม่ทาน มีความจุของอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักก่อนการปรับปรุง 11.40 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2560 ได้มีการปรับปรุงเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำ โดยยกระดับเก็บกักเพิ่มขึ้นจากเดิม 1 เมตร ทำให้มีความจุของอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักใหม่เท่ากับ 13.6 ล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตาม หลังจากทำการเก็บกักน้ำที่ระดับเก็บกักใหม่ พบการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน โดยจากการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาพบจุดน้ำขังบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ทางเลือกในการปรับปรุงเพื่อแก้ไขการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก สรุปผลได้ดังนี้

(1) ผลการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกับผลสำรวจธรณีฟิสิกส์และผลการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาที่บ่งชี้ว่า การยกระดับเก็บกักเพื่อเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำทำให้เกิดการยกระดับเส้นทางการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อน ส่งผลให้มีน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนในจุดที่นอกเหนือจากการออกแบบที่ปกติจะให้น้ำที่ซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากไหลผ่านวัสดุกรองน้ำที่ลาดท้ายเขื่อน แล้วมีท่อรวบรวมน้ำเพื่อระบายลงด้านท้ายเขื่อนต่อไป โดยจากการเดินตรวจสอบบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ พบการรั่วซึมที่ระดับประมาณ +225.000 เมตร (ร.ส.ม.) ซึ่งผลธรณีฟิสิกส์พบเป็นบริเวณที่มีค่าความต้านไฟฟ้าต่ำ และจากวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก พบเส้นทางการไหลซึมของน้ำ (Vector) หนาแน่นในบริเวณนี้

(2) ในการวิเคราะห์แนวทางแก้ไขปัญหาน้ำรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 6 กรณี เพื่อเปรียบเทียบหาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาถึงรายละเอียดด้านงบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงตัวเขื่อนและฐานราก รวมถึงขั้นตอนในการดำเนินงานปรับปรุงทั้งทางด้านวิศวกรรม และทางด้านการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำในขณะทำการปรับปรุงเขื่อน วิธีการปรับปรุงฐานรากที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดการรั่วซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก ทำให้ค่าความเร็ววิกฤตและค่า Hydraulic Gradient ลดลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย และสามารถควบคุมให้น้ำที่ผ่านตัวเขื่อนไม่ให้ไหลซึมในบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าแนวทางที่เหมาะสมที่สุด คือ ทำการขุดเปิดชั้นดินบริเวณลาดด้านเหนือน้ำเป็นขั้น (Benching) และทำการปูแผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (GCL) บริเวณลาดและพื้นอ่างเก็บน้ำด้านเหนือน้ำ ระยะประมาณ 6 เท่าความสูงของทำนบดิน (114 เมตร) และถมบดอัดกลับด้วยดินถมบดอัดแน่นโดยมีค่าความแน่นไม่น้อยกว่า 85% STANDARD PROCTOR COMPACTION TEST

ข้อเสนอแนะจากผลที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์ในครั้งนี้ก็คือ ผู้ออกแบบเพื่อเพิ่มความจุของอ่างเก็บน้ำโดยการยกระดับเก็บกัก ต้องมีการวิเคราะห์เส้นทางของน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานรากก่อนทุกครั้ง และทำการออกแบบรองรับหากพบว่าเส้นทางการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานรากมีการเปลี่ยนแปลงไปจนอาจส่งผลต่อความมั่นคงของตัวเขื่อน นอกจากนั้นจะต้องพิจารณาวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนในด้านอื่นๆ ตามลักษณะหรือประเภทของเขื่อนที่จะทำการยกระดับเก็บกัก เช่น ความมั่นคงต่อการเลื่อนไถลของเขื่อน (Sliding) ความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning) ความมั่นคงต่อการต้านทานแรงยก (Uplift Pressure) ของพื้นอาคาร เป็นต้น

**บรรณานุกรม**


1. Adamo, N.; Al-Ansari, N.; Sissakian, V.; Laue, J.; Knutsson, S. Dam Safety: General Considerations. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol.10, No.6,* **2020***,* 1-21.
2. International Commission on Large Dams. *https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp*
3. กรมชลประทาน. *ข้อมูลสารสนเทศโครงการชลประทาน 2563.*
4. เศวต ตันพลีรัตน์. *เอกสารเรื่อง การออกแบบเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์*. กรมชลประทาน, **2537**.
5. วงศ์พันธ์ วงศ์สมุทรและคณะ. *โครงการงานวิศวกรรมชลประทาน เรื่องการศึกษาพฤติกรรมของเขื่อนดินแม่กวง*. วิทยาลัยการชลประทาน กรมชลประทาน สถาบันสมทบ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, **2541**.
6. บริษัท แอสดีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด และบริษัท เอ กรุ๊ป คอนซัลแตนท์ จำกัด. *รายงานการตรวจสอบสภาพเขื่อนลำพระเพลิง โครงการศึกษาความเหมาะสม โครงการปรับปรุงโครงการลำพระเพลิงจังหวัดนครราชสีมา*, **2550**.
7. กรมชลประทาน. *แนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนเก็บกักน้ำ และอาคารประกอบ*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, **2545**.
8. กรมทรัพยากรน้ำ. *คู่มือเกณฑ์กำหนดการออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ*. กระทรวงทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม, **2550**.
9. gtz. *เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง เกณฑ์กำหนดในการคำนวณออกแบบเขื่อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบ*, **2544**.