

# การวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนคอนกรีตบดอัดโดยจำลองการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน

## กรณีศึกษา : เขื่อนขุนด่านปราการชล

### Safety Analysis of RCC Dam from Seepage through Dam Model

#### Case Study : Khun Dan Pra Karn Chon Dam

ณัฐวธ อินมาลา (Natthawuth Inmala)<sup>1</sup>

สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์ (Suttisak soralump)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท (geotech\_eng@hotmail.com)

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์และหัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (fengsus@ku.ac.th)

สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**บทคัดย่อ :** เขื่อนขุนด่านปราการชลเป็นเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ในระหว่างการก่อสร้างมีการวิเคราะห์เสถียรภาพเขื่อนโดยพิจารณาแรงกระทำที่ฐานเขื่อนจากการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมผ่านฐานรากเท่านั้น และคาดการณ์ว่าการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนเกิดขึ้นน้อย อย่างไรก็ตามการตรวจสภาพเขื่อนในสนามภายหลังการก่อสร้าง พบว่ามีน้ำไหลซึมออกจากผนัง, เพดานและท่อระบายของอุโมงค์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตบดอัดเป็นวัสดุที่มีความพรุนมาก จึงจำเป็นต้องศึกษาความปลอดภัยของเขื่อนโดยการจำลองการไหลซึมผ่านทั้งเขื่อนและฐานราก การวิเคราะห์ทำในสภาวะการไหลซึมแบบคงที่ตามเวลา และสมมุติให้ระบบระบายน้ำภายในตัวเขื่อนและฐานรากเกิดการอุดตันในหลายรูปแบบ ผลจากการวิเคราะห์หาอัตราการไหลซึมรวมภายในอุโมงค์ได้นำไปสอบเทียบกับผลการตรวจวัดอัตราการไหลซึมจริงในสนาม จากนั้นจึงนำค่าแรงดันน้ำจากผลการวิเคราะห์ไปวิเคราะห์หาเสถียรภาพของตัวเขื่อนเพื่อประเมินความปลอดภัยของเขื่อน ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำพบว่ามีค่า 3.74 และ 2.08 ตามลำดับและระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงลัพธ์จากกลางฐานรากของเขื่อนพบว่ามีค่า 6.14 เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ในการออกแบบที่ยอมรับได้

**ABSTRACT :** Khun Dan Pra Karn Chon Dam is the largest Roller Compacted Concrete Dam (RCCD) in Thailand. The stability analysis of the dam in construction stage was done with only uplift pressure at dam foundation from seepage through foundation model without seepage through dam. However, dam inspection after construction found some leakage of water from wall, floor and drain pipe in gallery. This shows RCC is a porous material, therefore this study review a safety of the RCCD with analyses of seepage through dam and foundation. The seepage analyses were perform under steady state flow and the drainage system within the dam and foundation were defined as clog in many cases . The resulted seepage quantity through gallery from model were compared with the actual seepage from measure by flowmeter to verify appropriate parameters of materials. The uplift pressure was then used in the stability analysis. The minimum of factor of safety of Sliding and Overturning is 3.74 and 2.08 respectively, and eccentric distant resulting of load from center of dam base is 6.14 m. These resulting value conform with basis acceptable design criteria.

**KEYWORDS :** Roller Compacted Concrete, Seepage through Dam Model, Stability

## 1. บทนำ

โดยทั่วไป การออกแบบเพื่อก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด มีการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนในสภาวะต่างๆ โดยพิจารณาหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำที่ระนาบรอยต่อระหว่างตัวเขื่อนและฐานรากหรือระหว่างชั้นบดอัด โดยการวิเคราะห์พิจารณาให้ตัวเขื่อนเป็นวัสดุที่บดน้ำ (Impervious material) เหมือนกับการออกแบบเขื่อนคอนกรีตปกติ ซึ่งอิทธิพลของแรงดันน้ำจะพิจารณาเฉพาะในระนาบรอยต่อที่ฐานรากเท่านั้น อย่างไรก็ตามจากรายงานการวิจัยและบันทึกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของคอนกรีตบดอัดในงานเขื่อนหลายฉบับชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตบดอัดมีค่าความซึมน้ำที่แปรปรวนมากกว่าคอนกรีตปกติ โดยมีค่าระหว่าง  $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-13}$  เมตร/วินาที [1] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารเชื่อมประสานในคอนกรีต, พลังงานการบดอัด, ประเภทรอยต่อระหว่างชั้นบดอัดและการใช้สารเชื่อมประสานรองพื้นระหว่างชั้นบดอัด ดังนั้นจึงเกิดคำถามถึงความปลอดภัยของเขื่อนในกรณีที่น้ำสามารถซึมผ่านเขื่อนได้ ซึ่งต่างจากสมมุติฐานเดิมที่ได้ตั้งไว้

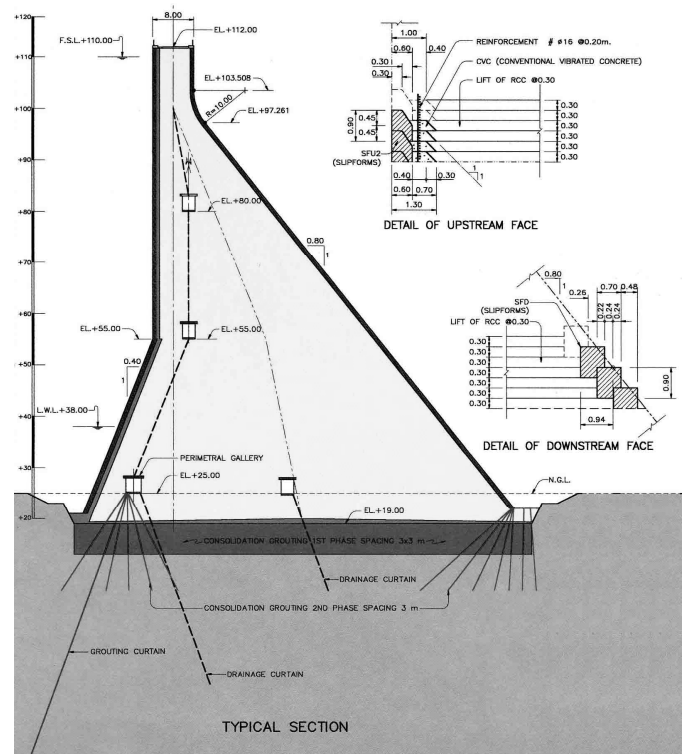
บทความนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลซึมในตัวเขื่อนและผลกระทบของแรงดันน้ำต่อเสถียรภาพและความเสี่ยงของเขื่อน โดยสร้างแบบจำลองการไหลซึมและกำหนดกรณีการระบายต่างๆ ไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อศึกษาพฤติกรรมความปลอดภัยของเขื่อนคอนกรีตบดอัดต่อการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำ

## 2. เขื่อนขุนด่านปราการชล

เขื่อนขุนด่านปราการชลตั้งอยู่ที่บ้านท่าด่าน ตำบลหินตั้ง อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก ทางด้านทิศเหนือของที่ตั้งเขื่อนเป็นพื้นที่ทางการเกษตรและที่อยู่อาศัย ทางด้านทิศตะวันตกติดกับอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีลักษณะเป็นเทือกเขาสูงชัน ทางด้านทิศใต้และทิศตะวันตกเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำนครนายกที่ไหลจากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตก

กรมชลประทานเป็นเจ้าของโครงการ ซึ่งได้ให้มีการออกแบบและควบคุมงานก่อสร้างโดย บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด, บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง จำกัดและ บริษัท COYNE ET BELLIER ตัวเขื่อนก่อสร้างด้วยคอนกรีตบดอัดแบ่งเป็น 3 เขื่อนย่อย คือ RCC-B, RCC-S และ RCC-VS มีความ

สูง 92 เมตร 85 เมตร และ 24 เมตร และมีความยาว 1,420 เมตร 830 เมตร และ 330 เมตร ตามลำดับ สันเขื่อนมีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางที่ +112 เมตร.รทก. กว้าง 8 เมตร ฐานเขื่อนกว้าง 86 เมตร ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำที่ระดับเหนือ 55 เมตร.รทก. ขึ้นไปเป็นผนังคอนกรีตแนวตั้ง จนถึงที่ระดับต่ำกว่า 55 เมตร.รทก. เป็นลาดชันมีความชันตั้ง : ราบ เป็น 1 : 0.4 ส่วนลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำมีความชันตั้ง : ราบ เป็น 1 : 0.8 ตลอดแนวลาดชัน ผิวลาดด้านหน้าเขื่อนเป็น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่บดน้ำก่อสร้างโดยแบบหล่อเลื่อน (slip-formed) และมีการปิดกั้นการไหลซึมระหว่างรอยต่อแนวตั้งหรือรอยต่อเพื่อการหดตัว (contraction joint) ที่มีทุกระยะ 40 เมตรของตัวเขื่อน ใช้แผ่นยางกันซึม (rubber waterstop) ร่วมกับท่อระบายน้ำ Joint Drain Pipe ส่วนระบบปิดกั้นการไหลซึมได้ฐานเขื่อนได้ทำการอัดฉีดปูน (grouting curtain) ลึกลงไปในฐานราก 60 เมตร วางตัวทำมุม 20 องศา กับแนวตั้งไปทางด้านเหนือน้ำ และใช้มันระบายน้ำ (drainage curtain) ซึ่งเป็นการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทุกๆ 5 เมตร ลึกลงไปในฐานราก 40 เมตร วางตัวทำมุม 20 องศา กับแนวตั้งไปทางด้านท้ายน้ำ เพื่อลดแรงดันน้ำ (uplift force) ได้ฐานเขื่อน ดังภาพที่ 1



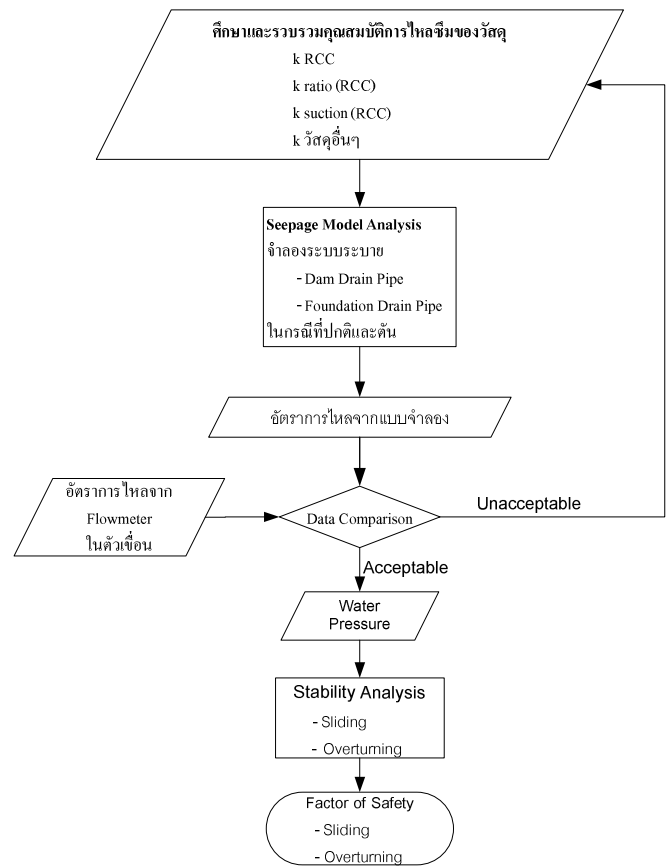
ภาพที่ 1 หน้าตัดเขื่อนขุนด่านปราการชล [2]

### 3. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลซึมผ่านเขื่อนคอนกรีตบดอัด ทั้งทางด้านปริมาณการไหลซึมและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อนที่ใกล้เคียงความเป็นจริง
2. เพื่อศึกษาผลกระทบต่อเสถียรภาพของเขื่อนในการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำจากกรณีดังกล่าว

### 4. ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษา ประกอบไปด้วย การกำหนดลักษณะเขื่อนและองค์ประกอบซึ่งแบ่งเป็น 2 หน้าตัด ได้แก่ หน้าตัดเขื่อน RCC - B และ RCC - S จากนั้นจึงกำหนดสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของน้ำของวัสดุ ได้แก่ คอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete, RCC) , คอนกรีตปกติ (Conventional Concrete, CVC) , ฐานรากระดับตื้น, ฐานรากระดับลึก, Grouting Curtain, Consolidation Grouting, Overburden, ค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำแนวคิ่งต่อแนวราบ (k ratio) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในสภาวะแรงดูด (k suction) ของคอนกรีตบดอัด โดยวิเคราะห์แบบจำลองทดสอบค่า k ratio และ k suction เพื่อพิจารณาลักษณะการไหลซึมที่เหมาะสม ทั้งนี้ค่าดังกล่าวได้จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการศึกษา

เมื่อได้ค่าตัวแปรตามต้องการแล้วจึงทำการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อน นอกจากนั้นได้พิจารณากรณีระบบระบายทั้งในตัวเขื่อนและฐานรากในกรณีที่มีปัญหาไม่สามารถใช้งานได้ ในลักษณะต่างๆ ผลการวิเคราะห์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับปริมาณการไหลจริงจาก flowmeter ที่ติดตั้งภายในอุโมงค์ของเขื่อนทั้ง 3 ระดับ ที่ได้จากการศึกษาโดย ญัฐพล [3] เพื่อปรับคุณสมบัติความซึมน้ำของคอนกรีตบดอัด

เมื่อแบบจำลองที่ได้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสมแล้วจะพิจารณาค่าแรงดันน้ำในตัวเขื่อน ในการคำนวณแรงกระทำต่อตัวเขื่อนที่ระดับต่างๆ เพื่อประเมินความมั่นคงต่อการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำ สรุปขั้นตอนการศึกษา ดังภาพที่ 3

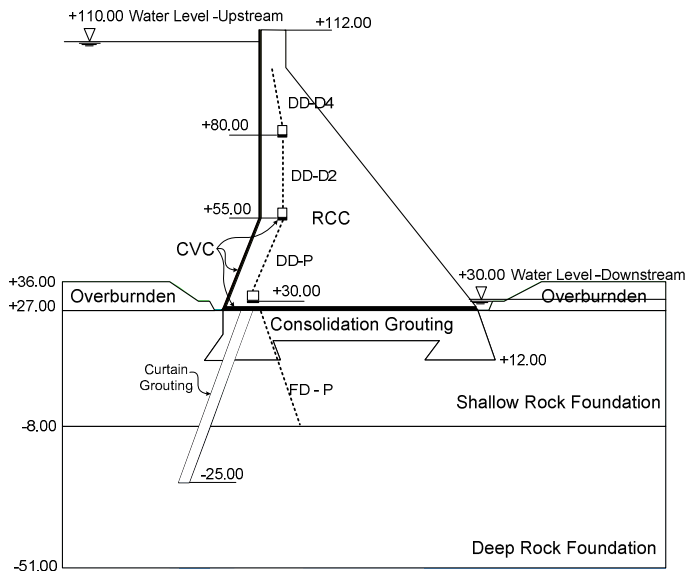
### 5. การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม

ในการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

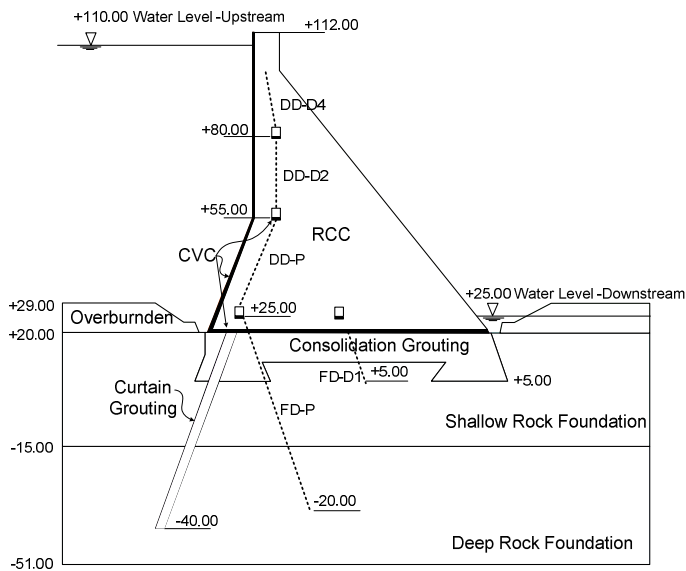
#### 5.1 ลักษณะและองค์ประกอบของเขื่อน

หน้าตัดเขื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมประกอบไปด้วยหน้าตัด ซึ่งเป็นตัวแทนแสดงพฤติกรรมของเขื่อน RCC - S

และ RCC - B มีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ส่วนของตัวเขื่อนที่เป็นวัสดุ RCC ส่วนของคอนกรีตโครงสร้างที่เป็นผนังทึบน้ำปิดด้านหน้าเขื่อน (CVC) ส่วนของ Consolidation และ Curtain Grout ส่วนของอุโมงค์และส่วนของม่านระบายน้ำในตัวเขื่อนและฐานราก ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 หน้าตัด RCC - S และองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์



ภาพที่ 5 หน้าตัด RCC - B และองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์

เกิดการอุดตัน 10 กรณีดังตารางที่ 1 ทั้งนี้การจำลองสภาพดังกล่าวเพื่อให้เป็นไปตามสภาพจริงที่ระบบระบายน้ำนั้นมีทั้งที่ใช้งานได้ปกติและเกิดการอุดตัน

ตารางที่ 1 กรณีการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

Case	DD-D4	DD-D2	DD-D1	FD-P, FD-D1
1	ตัน	ตัน	ตัน	ปกติ
2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	ตัน	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	ปกติ	ตัน	ปกติ	ปกติ
5	ปกติ	ปกติ	ตัน	ปกติ
6	ปกติ	ตัน	ตัน	ปกติ
7	ตัน	ปกติ	ตัน	ปกติ
8	ตัน	ตัน	ปกติ	ปกติ
9	ตัน	ตัน	ตัน	ตัน
10	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ตัน

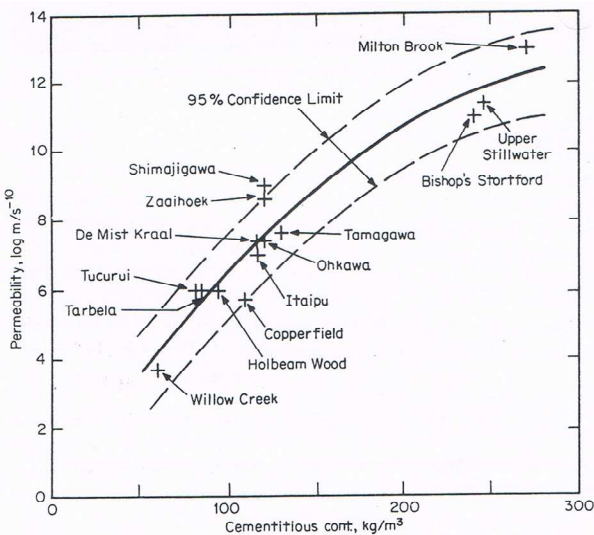
## 5.2 คุณสมบัติความซึมผ่านได้ของน้ำ (permeability, k)

### • คอนกรีตบดอัด

สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเขื่อนคอนกรีตบดอัดมีช่วงกว้างตั้งแต่  $10^{-4}$  -  $10^{-13}$  เมตร/วินาที [1] ขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมประสานในคอนกรีต, พลังงานการบดอัด, ประเภทรอยต่อระหว่างชั้นบดอัดและการใช้สารเชื่อมประสานรองพื้นที่ระหว่างชั้นบดอัด Hansen และ Reinhardt [4] ได้รวบรวมและสรุปช่วงข้อมูลของค่า k ของคอนกรีตบดอัดจากการเจาะทดสอบเขื่อนต่างๆ เป็นกราฟความสัมพันธ์ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 6

## 5.2 กรณีการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานรากได้จำลองความบกพร่องของระบบระบาย ซึ่งติดตั้งในตัวเขื่อนและฐานรากซึ่งประกอบไปด้วย Dam Drain Pipe 3 ระดับ (DD-D4, DD-D2, DD-P) และ Foundation Drain Pipe (FD-P, FD-D1) โดยกำหนดให้การใช้งานระบบระบายทำงานได้ในลักษณะปกติและ



ภาพที่ 6 ค่า k ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานต่างๆ ของเขื่อนคอนกรีตบดอัด [4]

อย่างไรก็ตามจากการทดสอบค่าความซึมผ่านวัสดุของเขื่อนขุนด่านปราการชลในระหว่างการก่อสร้าง บริเวณระดับอุโมงค์ระดับล่าง ( $\approx +25.00$  ม.รทก.) ของ RCC - B โดยการทดสอบ Lugeon Test [2] เมื่อนำมาสรุป พบว่าค่าเฉลี่ยเป็นค่าความซึมผ่านในแนวราบ ( $k_x$ ) มีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-6}$  เมตร/วินาที

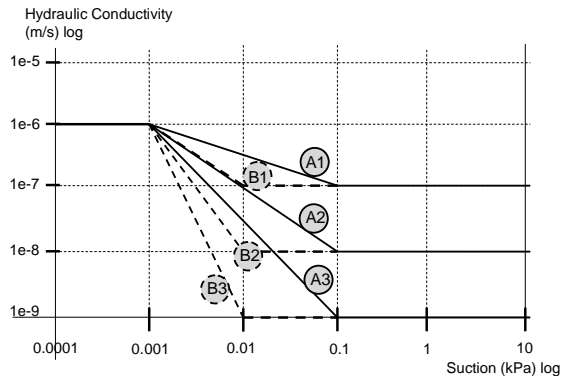
ในส่วนโครงสร้างคอนกรีตบดอัดที่ใช้ในแบบจำลองการไหลซึม ซึ่งประกอบไปด้วย ผนังที่น้ำปิดด้านหน้าเขื่อนหนา 0.5 เมตร, ส่วนของชั้นคอนกรีตปรับระดับที่ฐานเขื่อนหนา 1 เมตร และส่วนของพื้นอุโมงค์หนา 0.6 เมตร เนื่องจากไม่มีข้อมูลทดสอบในการก่อสร้าง จึงพิจารณากำหนดค่า k ในการวิเคราะห์แบบจำลองเบื้องต้นเท่ากับ  $1 \times 10^{-8}$  เมตร/วินาที

• k-ratio และ k-suction

อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านแนวตั้งต่อแนวราบ (k ratio) และ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในสภาวะแรงดูด (k-suction) เป็นค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึม เนื่องจากไม่มีการเก็บข้อมูลคุณสมบัติดังกล่าวของเขื่อนขุนด่านปราการชล จึงพิจารณาใช้การสุ่มค่าวิเคราะห์ในแบบจำลองและพิจารณาแนวทางในการไหลที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ค่า k-ratio ของคอนกรีตบดอัด โดยพิจารณาใช้หน้าตัดแบบจำลองเขื่อน RCC - S สมมุติค่า k suction 3 ค่าได้แก่ 0.5, 0.2 และ 0.1

นอกจากนั้นในสภาวะเกิดแรงดูด (Suction) บริเวณเหนือระดับการไหลของน้ำในวัสดุหรือบริเวณที่วัสดุไม่อิ่มตัว จะมีผลต่ออัตราการไหลซึมของน้ำผ่านวัสดุ ดังนั้นในการศึกษาจึงได้

กำหนดสมมุติค่าและทดลองวิเคราะห์ในแบบจำลอง 6 ค่า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ค่า k ของคอนกรีตบดอัดเมื่อพิจารณาต้านแรงดูด

• วัสดุอื่นๆ

สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลซึม ในส่วนฐานรากทั้งหมดได้จากการทดสอบในสนามในระหว่างการก่อสร้างซึ่งรวบรวมโดย ชิโนรส [5] ดังสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์ความซึมของน้ำผ่านวัสดุฐานราก [5]

วัสดุ	Permeability, k (m/s)	k-ratio
ShallowFoundation RCC-S	$1.2 \times 10^{-7}$	3
DeepFoundation RCC-S	$4.9 \times 10^{-8}$	3
ShallowFoundation RCC-B	$4.6 \times 10^{-6}$	3
DeepFoundation RCC-B	$4.9 \times 10^{-8}$	3
Consolidation Grouting	$9.2 \times 10^{-8}$	1
Grouting Curtain	$4.6 \times 10^{-8}$	1
Soil	$4.0 \times 10^{-5}$	1

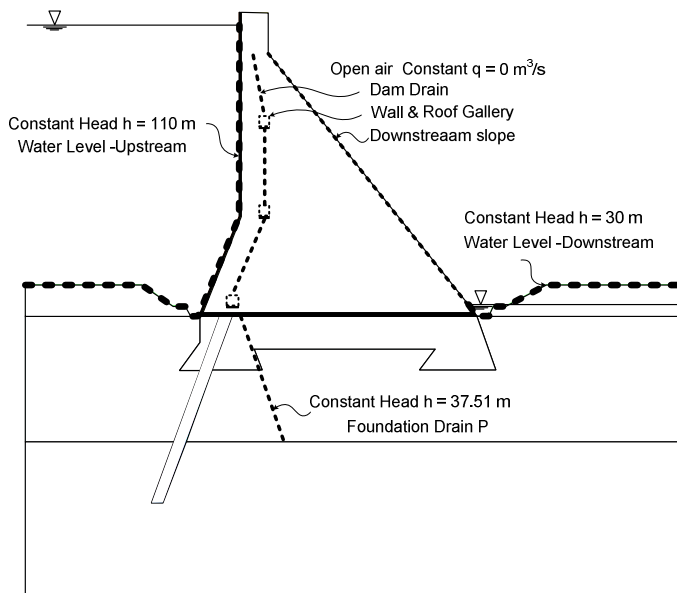
5.3 ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition)

ขอบเขตเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมในตัวเขื่อนและฐานราก ประกอบไปด้วย การกำหนดด้วยค่าศักย์ความดัน (Pressure Head) และการกำหนดปริมาณการไหลซึม (Quantity) ทั้งหน้าตัด RCC - S และ RCC - B

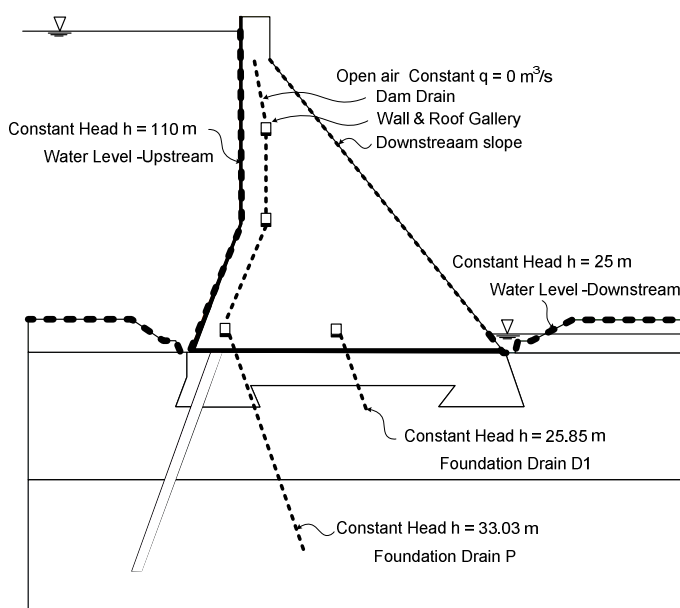
การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขด้วยศักย์แรงดันทางด้านเหนือน้ำ กำหนดตามค่าระดับน้ำเก็บกักปกติเหนือเขื่อนที่ระดับ +110.00 ม.รทก. และศักย์แรงดันทางด้านท้ายน้ำของเขื่อน RCC - S และ RCC - B จาก Observation well มีค่า +30.00 และ +25.00 ม.รทก. ตามลำดับ ขอบเขตเงื่อนไขของอุโมงค์, Dam Drain (DD) และลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำกำหนดให้มีปริมาณการ



ไหลเป็นค่าคงที่ที่ 0 ลบ.ม./วินาที ขอบเขตเงื่อนไขของ Foundation Drain (FD) กำหนดเป็นแรงดันที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในระนาบแนวราบผ่านแนวรูระบาย FD ที่ฐานรากของเขื่อนและคำนวณเปรียบเทียบจาก Piezometer ที่ติดตั้งที่ฐานรากเขื่อน โดย ซิโนรส [5] โดยในเขื่อน RCC - S กำหนดศักย์น้ำคงที่ของ FD - P มีค่าเท่ากับ 37.51 ม. ในเขื่อน RCC - B กำหนดศักย์แรงดันน้ำคงที่ของ FD-P และ FD-D1 มีค่าเท่ากับ 33.03 และ 25.85 ม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9



ภาพที่ 8 ขอบเขตเงื่อนไขสำหรับหน้าตัด RCC - S

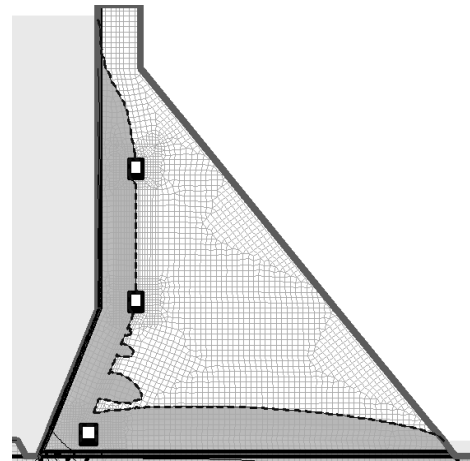


ภาพที่ 9 ขอบเขตเงื่อนไขสำหรับหน้าตัด RCC - B

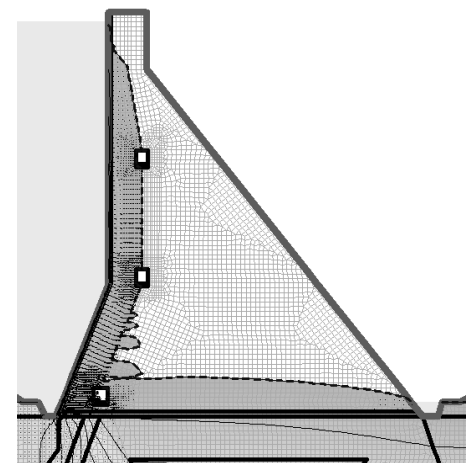
#### 5.4 ผลการวิเคราะห์การไหลซึม

- ลักษณะการไหล จาก ค่า k ratio และ k suction การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม เมื่อกำหนดค่า k suction คงที่ในช่วงข้อมูลการไหลซึมด้านแรงดันระหว่าง  $1.2 \times 10^{-6}$  เมตร/วินาที ที่ค่า Suction 0.001 kPa และ  $12 \times 10^{-7}$  เมตร/วินาที ที่ค่า suction 0.1 kPa (A1) เพื่อศึกษาผลการวิเคราะห์ที่ k ratio ต่างๆ ได้แก่ 0.5, 0.2 และ 0.1

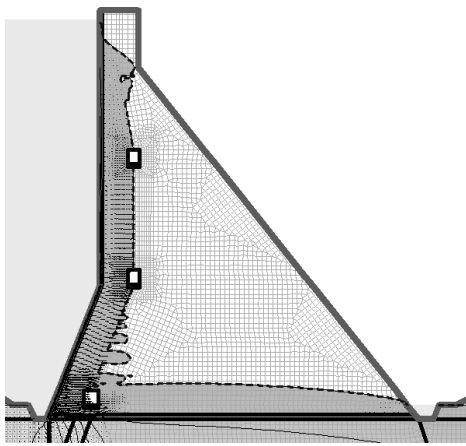
จากผลการวิเคราะห์ พบว่าลักษณะการไหลซึมเมื่อค่า k ratio เท่ากับ 0.5, 0.2 และ 0.1 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อ ค่า k ratio ยิ่งน้อย แนวการไหล มีแนวโน้มไปทางแนวราบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากศักย์แรงดันที่กระทำต่อตัวเขื่อนและฐานรากพบว่าค่า k ratio ที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 10, 11 และ 12 ซึ่งพิจารณาเห็นว่าไม่มีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่า k ratio ที่ 0.5



ภาพที่ 10 ลักษณะการไหลซึมผ่านเขื่อนเมื่อค่า k ratio = 0.5



ภาพที่ 11 ลักษณะการไหลซึมผ่านเขื่อนเมื่อค่า k ratio = 0.2

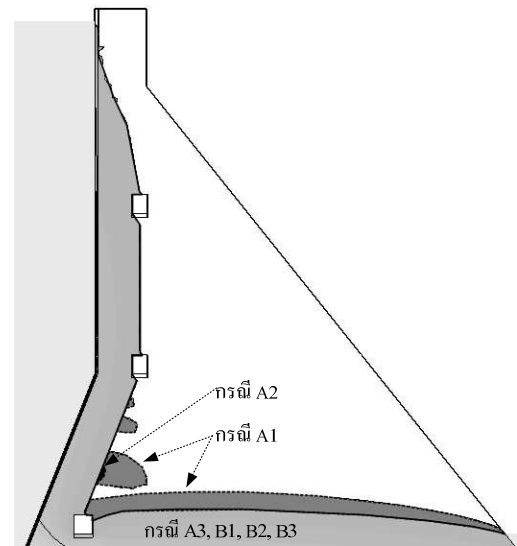


ภาพที่ 12 ลักษณะการไหลซึมผ่านเขื่อนเมื่อค่า k ratio = 0.1

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดค่า k suction ในกรณี A1 และ A2 ซึ่งเป็นกรณีที่ ค่า suction มีช่วงการเปลี่ยนแปลง 100 เท่า (0.001 – 0.1) และ ค่า k มีช่วงการเปลี่ยนแปลง 10 เท่าและ 100 เท่า ตามลำดับ พบว่ามีผลต่อลักษณะการไหลผ่านระบบระบาย โดยมีการไหลบางส่วน เกินจากระบบระบายน้ำในตัวเขื่อนที่ระดับ อุโมงค์ชั้นล่าง (DD-P) เนื่องจากค่า suction มีช่วงกว้างมากเกินไป อย่างไรก็ตาม ลักษณะการไหลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงระบบระบายที่อาจไม่เพียงพอในการไหลผ่านระบบระบายที่ระดับนี้

ส่วนผลการวิเคราะห์ในกรณี A3, B1, B2 และ B3 พบว่ามีลักษณะการไหลและปริมาณการไหลใกล้เคียงกัน ไม่มีการไหลส่วนเกินผ่านระบบระบายในตัวเขื่อน ดังแสดงในภาพที่ 13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กรณีดังกล่าว ทั้ง 4 กรณีข้างต้นมีความเหมาะสมสำหรับวัดปริมาณการไหลซึมผ่าน Dam Drain

เมื่อพิจารณาค่าศักย์แรงดันที่กระทำต่อตัวเขื่อนและฐานรากในทุกกรณี เห็นว่าไม่มีผลกระทบต่อวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่า k suction ในกรณี B2



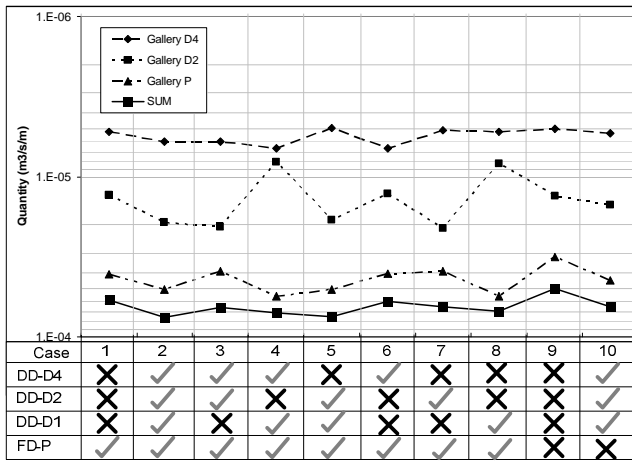
ภาพที่ 13 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนที่ k suction ต่างๆ

- ปริมาณการไหลซึมภายในอุโมงค์

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม พบว่าในแต่ละกรณีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่ากราฟในทุกกรณีการวิเคราะห์เป็นไปในทางเดียวกันทั้ง เขื่อน RCC- S และ RCC- B กล่าวคือเมื่อระบบระบายปกติ การไหลซึมรวมจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่หากระบบระบายใดๆ ต้น ปริมาณการไหลซึมรวมก็จะลดลงเนื่องจากการกระจายการไหลผ่านเข้าไปในตัวเขื่อน โดยเฉพาะ Dam Drain ระดับ 2 (DD-D2) พบมีการตอบสนองมากต่อปริมาณการไหลรวมในอุโมงค์ระดับ 2 (Gallery-D2) อย่างเห็นได้ชัด

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการไหลภายในอุโมงค์แต่ละระดับของเขื่อน RCC- S ในทุกกรณีพบว่าอุโมงค์ ชั้น P มากกว่า G2 และ G4 ตามลำดับ เช่นเดียวกับเขื่อน RCC- B ส่วนอุโมงค์ชั้น D1 ที่ระดับล่างด้านท้ายของเขื่อน RCC – B ปริมาณการไหลซึม น้อยที่สุดกว่าทุกอุโมงค์ แสดง ดังภาพที่ 14 (ก) และ (ข)

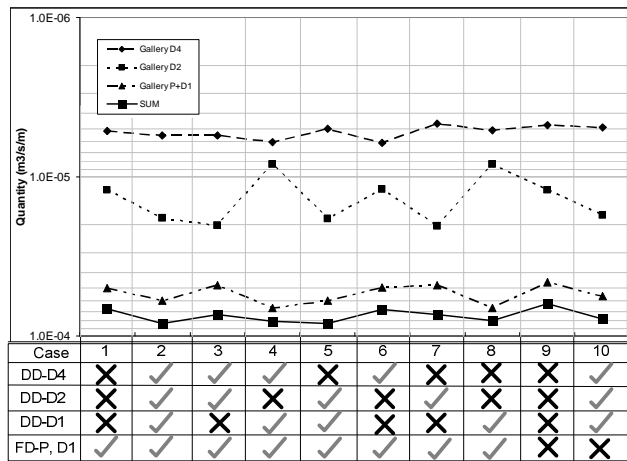
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการไหลซึมในกรณีที่ระบบการระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานรากปกติ (Case 2) ซึ่งเป็นการไหลซึมภายในอุโมงค์มากที่สุดกว่ากรณีอื่นๆ ระหว่างเขื่อน RCC –S และ RCC- B พบว่าปริมาณการไหลซึมใกล้เคียงกัน อุโมงค์ Gallery ระดับ D4 ปริมาณการไหลซึมรวมจากตัวอุโมงค์และระบบระบาย เขื่อน RCC – S มากกว่า RCC- B เล็กน้อย ส่วนที่อุโมงค์ Gallery – P ปริมาณการไหลซึมรวมจากอุโมงค์, ระบบระบายน้ำทั้งตัวเขื่อนและฐานราก เขื่อน RCC – S น้อยกว่า RCC – B เล็กน้อย ดังแสดงในภาพ ที่ 15



✓ ปกติ ✗ ขุดดิน

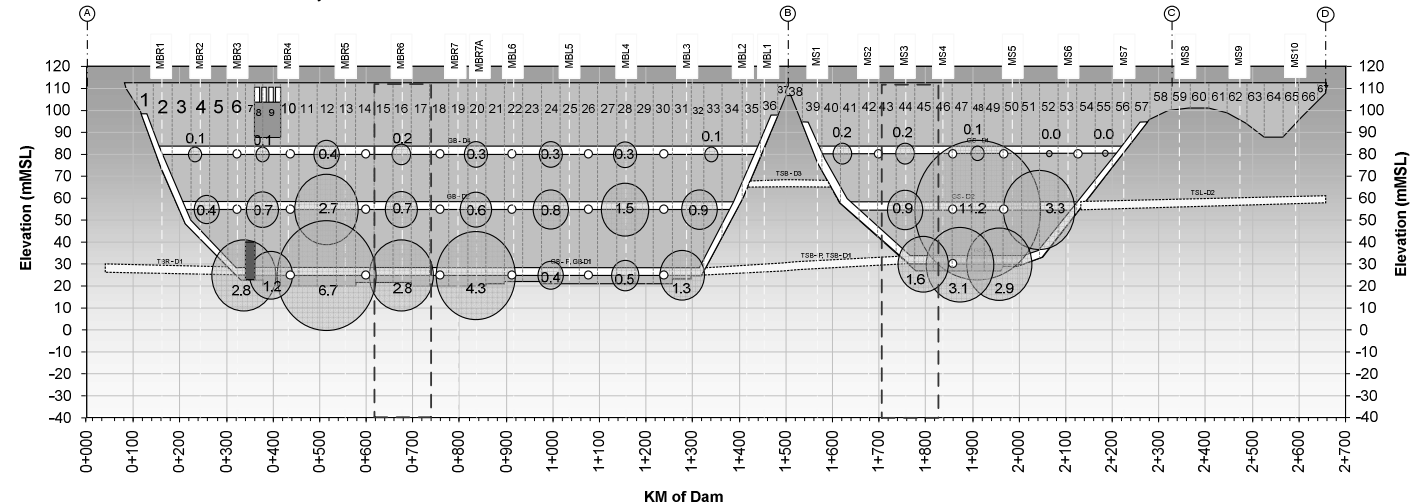
◆ Gallery D4 ■ Gallery D2 ▲ Gallery P ■ Total

(ก) RCC - S



✓ ปกติ ✗ ขุดดิน

◆ Gallery D4 ■ Gallery D2 ▲ Gallery P+D1 ■ Total



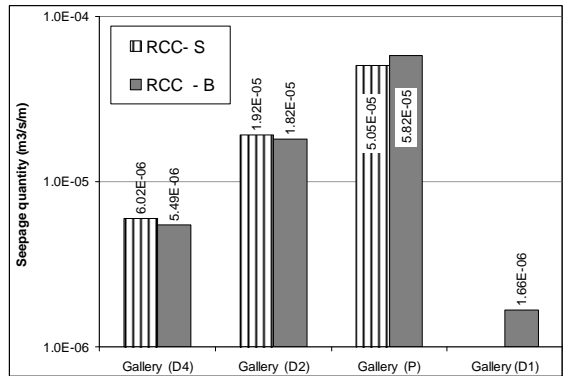
○ Jointmeter ● Seepage Quantity,  $m^3 / day / m$  [หน้าตัดคัดเลือก]

ภาพที่ 16 ปริมาณการไหลซึมผ่านภายในอุโมงค์จาก Flow meter และหน้าตัดที่คัดเลือกสำหรับเปรียบเทียบของ เซียน RCC - B และ RCC - S [3]

● การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับเครื่องมือวัดการไหลซึม

(ข) RCC - B

ภาพที่ 14 ปริมาณการไหลซึมผ่านภายในอุโมงค์ทั้ง 3 ระดับ จากการวิเคราะห์กรณีต่างๆ



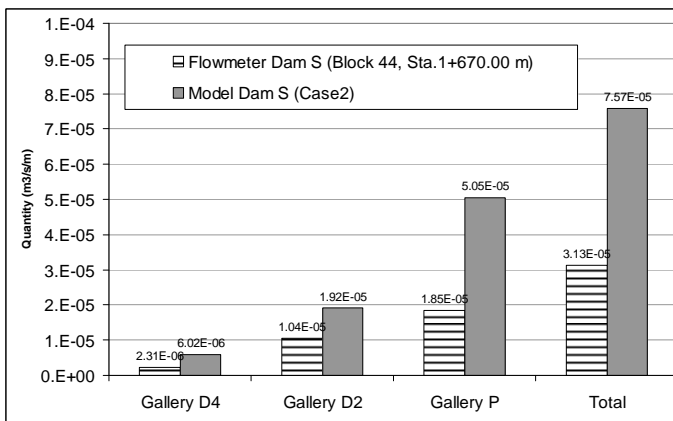
ภาพที่ 15 ปริมาณการไหลซึมผ่านภายในอุโมงค์เทียบทั้ง 3 ระดับ กรณีการวิเคราะห์ที่ระบบระบายปกติ (Case 2) ของ RCC - S และ RCC - B

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมจากแบบจำลองในแต่ละอุโมงค์ จะนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณการไหลซึมผ่านอุโมงค์แต่ละชั้น ที่วัดจาก Flowmeter ที่ติดตั้งในตัวเขื่อน ซึ่งได้เก็บข้อมูลและ

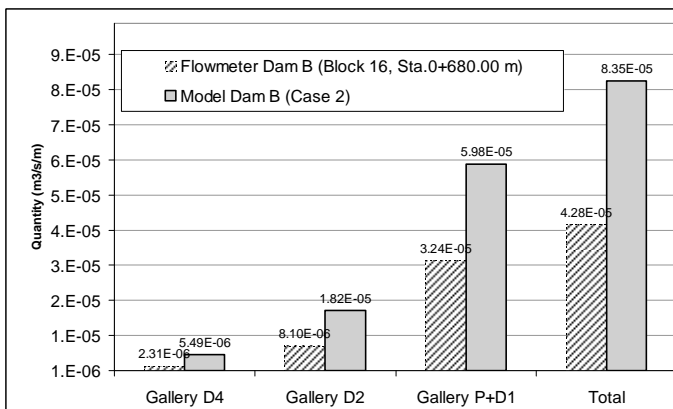


เฉลี่ยค่า เป็น Unit Seepage เป็น ลบ.เมตร/วัน/เมตร โดย ผนังพล [3] โดยพิจารณาช่วงหน้าตัดที่ค่อนข้างมีสภาพการไหลซึมปกติ หน้าตัดที่คัดเลือกจากทั้ง เชื้อน RCC – S และ RCC –B ได้แก่ Block 44 และ Block 16 ตามลำดับ ดังสรุปในภาพที่ 16

ผลการเปรียบเทียบปริมาณการไหลซึมระหว่างการวิเคราะห์แบบจำลองในกรณีระบบระบายปกติ (Case 2) ทั้ง 2 เชื้อนกับ flowmeter จากหน้าตัดที่คัดเลือก ช่วง Block 16 ของ RCC – B และ Block 44 ของ RCC – S พบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยปริมาณการไหลซึมซึ่งรวบรวมจากผลการวิเคราะห์แบบจำลอง จะมีปริมาณสูงกว่าในทุกชั้นอุโมงค์เล็กน้อย แสดงดังภาพที่ 17 และ 18



ภาพที่ 17 ปริมาณการไหลซึมผ่านภายในอุโมงค์เทียบระหว่างแบบจำลองกับ Flowmeter ในเชื้อน RCC - S



ภาพที่ 18 ปริมาณการไหลซึมผ่านภายในอุโมงค์เทียบระหว่างแบบจำลองกับ Flowmeter ในเชื้อน RCC - B

## 6. การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวเขื่อน

ความปลอดภัยต่อการเลื่อน ไถล เป็นอัตราส่วนระหว่างความสามารถของตัวเขื่อนในการต้านทานการเลื่อนไถลต่อแรงที่กระทำกับตัวเขื่อนดังความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 [7] และแสดง

แรงกระทำในภาพที่ 19 โดยมีเงื่อนไขให้ค่าต่ำสุดของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อตัวเขื่อน (Factor of Safety against Sliding, FSS) กรณีแรงกระทำปกติกำหนดให้ FSS = 3

$$FSS = \frac{cA + (W - U)\tan\phi}{H} \quad (1)$$

เมื่อ FSS = อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนตัว

c = แรงยึดเหนี่ยว ( $T/m^2$ )

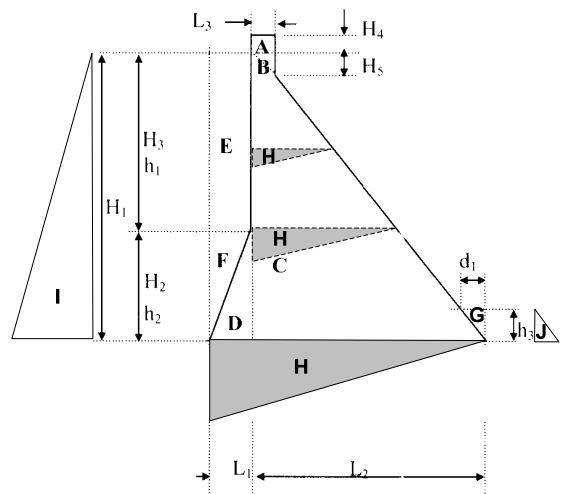
A = พื้นที่ผิวที่พิจารณา ( $m^2$ )

W = แรงลัพธ์ในแนวดิ่ง ( $T$ )

U = แรงดันน้ำ ( $T$ )

H = แรงลัพธ์ในแนวราบ ( $T$ )

$\tan\phi$  = สัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายใน



ภาพที่ 19 หน้าตัดแสดงแรงกระทำที่ใช้ในการคำนวณเสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำของเขื่อน

ความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ เป็นความสามารถของตัวเขื่อนในการต้านทานการพลิกคว่ำจากผลของแรงที่กระทำกับตัวเขื่อน ดังสมการที่ 2 [7] โดยมีเงื่อนไขความปลอดภัยในกรณีวิเคราะห์แรงกระทำปกติ กำหนดให้แรงลัพธ์อยู่ในหนึ่งในหกของความกว้างฐานเขื่อน (Middle L/3)

$$e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \quad (2)$$

เมื่อ e = ตำแหน่งแรงลัพธ์ (m)

$\Sigma M$  = โมเมนต์ลัพธ์รอบกึ่งกลางฐานเขื่อน (T.m)

$\Sigma V$  = แรงลัพธ์ในแนวดิ่ง (T)

นอกจากนั้นการตรวจสอบด้วยค่าความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำโดยใช้สมการสำหรับอาคารกั้นดินดังสมการที่ 3 [7]

$$FSO = \frac{M_{Resisting}}{M_{Driving}} \quad (3)$$

เมื่อ FSO = อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ  
(Factor of Safety for Overturning)

$M_{Resisting}$  = โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ (T.m)

$M_{Driving}$  = โมเมนต์ทำให้เกิดการพลิกคว่ำ (T.m)

Bowles [6] ได้แนะนำว่าสำหรับการออกแบบอาคารกั้นดินให้คำนวณค่าความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำจากสมการข้างต้นควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0

## 6.1 รูปแบบการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพพิจารณาแนวการพิบัติเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนฐานรากที่ระหว่างรอยต่อตัวเขื่อนและฐานราก อีกส่วนคือระหว่างชั้นบดอัด (Lift Joint RCC) ดังนี้

- Contact ระหว่างตัวเขื่อนกับฐานรากใช้กับกรณีหน้าตัดที่ระนาบการวิเคราะห์ +27.00 และ +20.00 (Foundation) ของเขื่อน RCC - S และ RCC - B ตามลำดับ พิจารณาใช้ข้อมูลในการออกแบบโดย กรมชลประทาน [2] ดังนี้

$$\text{Cohesion} = 60 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Friction Angle} = 45$$

- Contact ระหว่าง คอนกรีตบดอัด (RCC Lift Joint) ใช้กับกรณีหน้าตัดที่ระนาบการวิเคราะห์ +30.00 และ +25.00 ของเขื่อน Dam S และ Dam B ตามลำดับ และที่ระนาบ + 55.00 +80.00 พิจารณาใช้ข้อมูลซึ่งรวบรวมและสรุปโดย Hansen และ Reinhardt [4] ประเภท RCC Lift Joint ชนิด unbonded Joints ดังนี้

$$\text{Cohesion} = 21 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Friction Angle} = 45$$

- ความหนาแน่นของ RCC

ผลการทดสอบ ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัดในสนามด้วยเครื่อง Nuclear Density ระหว่างการก่อสร้างเขื่อน

พบว่ามีความอยู่ระหว่าง  $2,185 - 2,590 \text{ kg/m}^3$  มีค่าเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ  $2,395 \text{ kg/m}^3$  [2] จึงกำหนดใช้ที่  $2,400 \text{ kg/m}^3$  ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

นอกจากนั้น การไหลซึมผ่านเขื่อนคอนกรีตบดอัดในระยะยาว อาจจะมีผลทำให้เกิดการชะล้าง ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตบดอัดลดลง ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยลดค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัด ดังค่าต่างๆ ตั้งแต่ 2.4 ถึง 1.5 t/m<sup>3</sup> เพื่อศึกษาผลกระทบต่อเสถียรภาพเขื่อนจากการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัด

## 6.2 ผลการวิเคราะห์ Sliding และ Overturning

- กรณี Dam Drain และ Foundation Drain ตัน

พิจารณาเลือกใช้กรณี วิเคราะห์การไหลซึมใน 4 กรณี ได้แก่ Case 1 Dam Drain ตัน Foundation Drain ปกติ, Case 2 ทั้ง Dam Drain และ Foundation Drain ปกติ, Case 9 ทั้ง Dam Drain และ Foundation Drain ตัน, Case 10 Dam Drain ปกติ Foundation Drain ตัน ของทั้งเขื่อน RCC - S และ RCC - B

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเลื่อนไถล, พลิกคว่ำและระยะเยื้องจากกลางฐานรากของเขื่อนจากแรงกระทำ แสดงดังภาพที่ 20, 21 และ 22 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลของเขื่อน RCC - S จากภาพที่ 20 (ก) พบว่า ระบบระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานรากไม่มีผลต่อที่ระนาบระดับอุโมงค์ชั้น +55.00 และ +80.00 ม.รทก.

เมื่อพิจารณาที่ระดับ (+27.00 ม.รทก.) พบว่า Foundation Drain (FD) มีผลต่อความปลอดภัยในการเลื่อนไถลมากกว่า Dam Drain (DD)

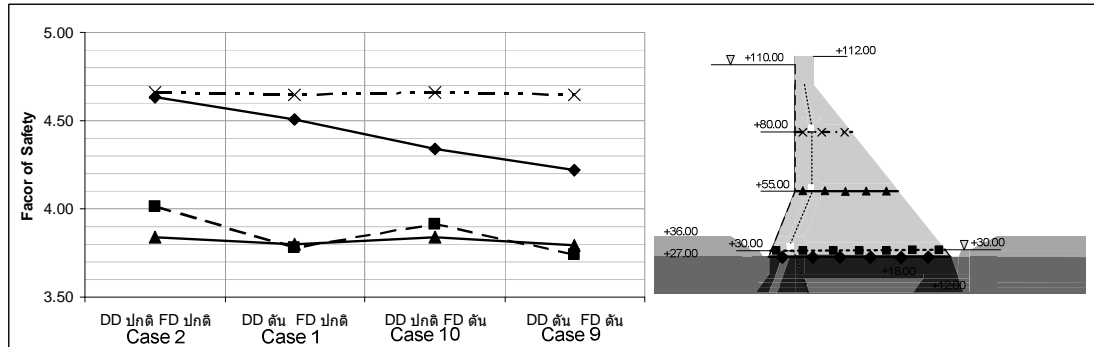
ส่วนระนาบการพิบัติที่อุโมงค์ระดับล่าง (+30.00 ม.รทก.) พบว่า DD มีผลกระทบต่ออัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลมากกว่า FD และเป็นระดับที่อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงต่ำที่สุด 3.74 ในกรณีที่ทั้ง FD และ DD ตัน (Case 9) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเป็นระดับระนาบที่ปลอดภัยน้อยที่สุดของเขื่อน RCC - S

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในเขื่อน RCC - B จากภาพที่ 20 (ข) พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับ RCC - S กล่าวคือ

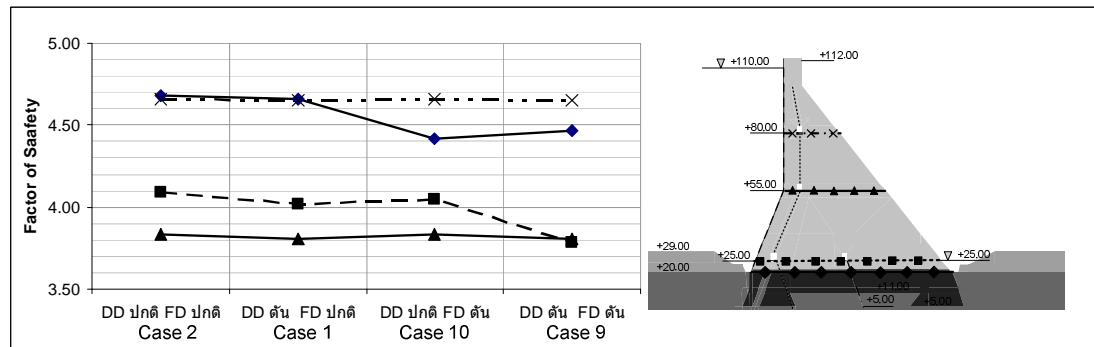
ระบบระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานราก ไม่มีผลต่อที่ระนาบระดับอุโมงค์ชั้นบน ชั้น +55.00 และ +80.00 ม.รทก.

เมื่อพิจารณาระนาบการพิบัติที่ระดับฐานเขื่อน (+20.00 ม.รทก.) พบว่า FD มีผลต่อความปลอดภัยในการเลื่อนไถลมากกว่า

ส่วนระนาบการพิบัติที่อุโมงค์ระดับล่าง (+25.00 ม.รทก.) พบว่าในกรณีที่ระบบระบายทั้ง FD และ DD ดัน (Case 9) อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงต่ำที่สุด 3.79 สรุปได้ว่าเป็นระดับระนาบที่ปลอดภัยน้อยที่สุดของเขื่อน RCC - B



(ก) RCC - S



(ข) RCC - B

ภาพที่ 20 ผลการวิเคราะห์ Sliding Factor of Safety

ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของเขื่อน RCC - S จากภาพที่ 21 (ก) พบว่า ระบบระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานรากไม่มีผลต่อระนาบการพิบัติที่ระดับ +80.00 ม.รทก.

เมื่อพิจารณาที่ระนาบการพิบัติระดับ +30.00 พบว่า DD มีผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำมากกว่า FD เช่นเดียวกับระนาบการพิบัติที่ระดับ +55.00 ม.รทก.

ส่วนที่ระนาบการพิบัติระดับฐานราก +27.00 ม.รทก. พบว่าเขื่อน RCC - S มีค่าต่ำสุด 2.08 เมื่อระบบระบาย FD และ DD ดัน (Case 9) และเป็นระนาบที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุดในทุกกรณี และ พบว่า FD มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า DD อย่างเห็นได้ชัด

ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของเขื่อน RCC - B จากภาพที่ 21 (ข) พบว่า โดยทั่วไปมีผลกระทบจากระบบระบายมีน้อยกว่าเขื่อน RCC - S แต่เป็นไปในลักษณะ

เดียวกัน กล่าวคือ ระบบระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานรากไม่มีผลต่อระนาบการพิบัติที่ระดับ +80.00 ม.รทก.

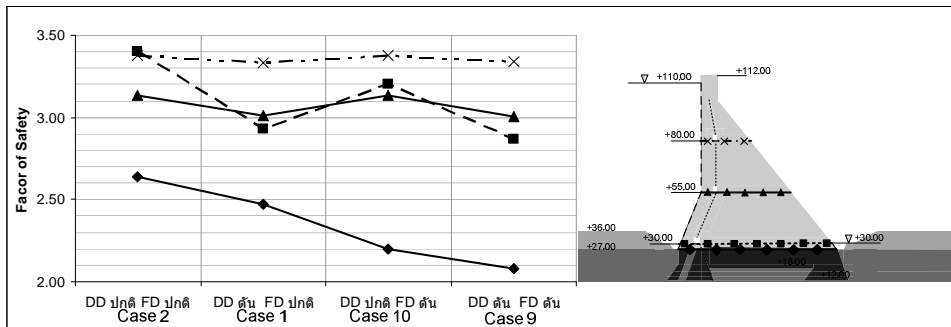
เมื่อพิจารณาที่ระนาบการพิบัติระดับ +25.00 ม.รทก. พบว่า DD มีผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำมากกว่า FD และเมื่อเปรียบเทียบกับระนาบการพิบัติอื่นๆ พบว่ากลับมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า อาจจะเป็นเนื่องจากเขื่อน RCC - B ที่ระนาบนี้ประกอบด้วยอุโมงค์ซึ่งมีระบบระบายน้ำจากฐานราก (FD - P , FD - D1) ทั้ง 2 อุโมงค์ช่วยลดแรงดันจากฐานรากได้มาก แต่เมื่อระบบระบายทั้ง FD และ DD ดัน อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนระนาบที่ระดับ +55.00 ม.รทก. พบว่า DD และ FD ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อความปลอดภัย

เมื่อพิจารณาที่ระนาบการพิบัติระดับ +20.00 ซึ่งเป็นระนาบที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุดในทุกกรณี

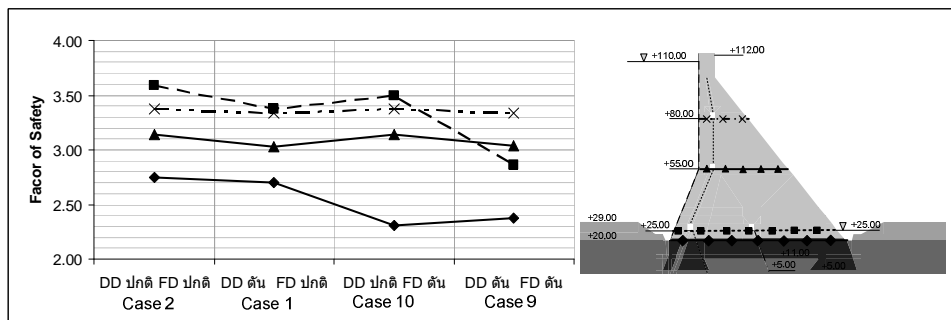
พบว่า FD มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า DD อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อระบบระบาย FD ต้น DD ปกติ (Case 10) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.30

เมื่อพิจารณาระบบการพิบัติวิกฤติเปรียบเทียบระหว่างการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ พบว่า ระบายวิกฤติเป็นคนละระบบกัน โดยที่ระบายวิกฤติความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลของทั้ง RCC - S อยู่ที่ระดับ +30.00 และ +55.00 ม.รทก. และ

RCC - B อยู่ที่ ระนาบระดับ +25.00 ม.รทก. และ +55.00 ม.รทก. แต่วิกฤติความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของทั้งเขื่อน RCC - S และ RCC - B อยู่ที่ระดับฐานราก +27.00 และ +20.00 ม.รทก. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามทั้งค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลในทุกกรณีและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำของทั้ง RCC - S และ RCC - B ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ 3.00 และ 1.50 ตามลำดับ



(ก) RCC - S



(ข) RCC - B

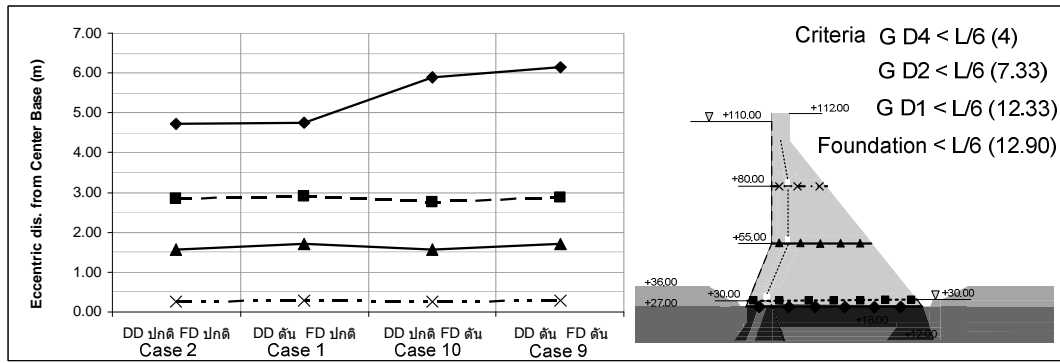
**ภาพที่ 21** ผลการวิเคราะห์ Overturning Factor of Safety

ผลการวิเคราะห์ระยะเอียงจากศูนย์กลางฐานของเขื่อน RCC - S พบว่า ประสิทธิภาพของระบบระบายทั้งตัวเขื่อนและฐานมีผลกระทบที่กรณีวิเคราะห์ที่ระนาบระดับฐานราก (+27.00 ม.รทก.) เท่านั้น และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 6.15 ในกรณีที่ทั้ง FD และ DD ต้น (Case 9)

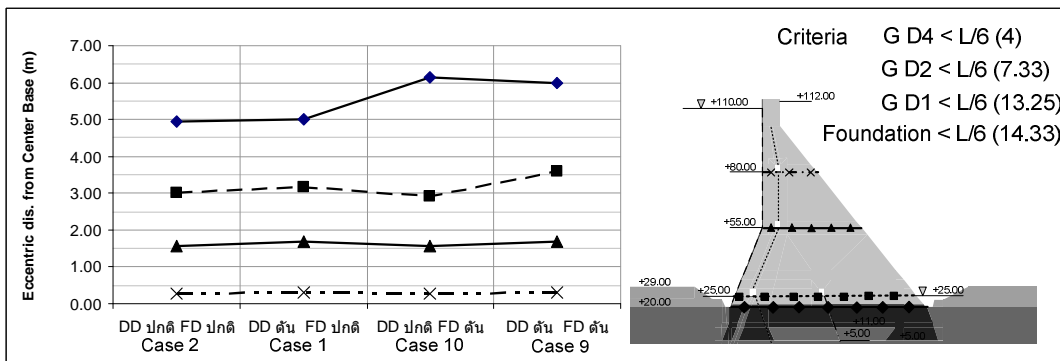
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ระยะเอียงของเขื่อน RCC -B พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับ เขื่อน RCC - S มีผลกระทบที่

กรณีวิเคราะห์ที่ระดับฐานราก (+20.00 ม.รทก.) เท่านั้นและมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 6.14 ในกรณีที่ทั้ง FD ต้นและ DD ปกติ (Case 10)

อย่างไรก็ตามระยะเอียงจากศูนย์กลางฐานเขื่อนในทุกกรณีที่ทั้ง RCC - S และ RCC - B ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ L/6 ดังแสดงในภาพที่ 22



(ก) RCC - S



(ข) RCC - B

ภาพที่ 22 ผลการวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์กลางจากกลางฐานราก

● ผลกระทบจากค่า Unit Weight ต่อค่า Factor of Safety

พิจารณาเลือกใช้ผลการวิเคราะห์การไหลซึมที่กรณีระบบระบาย ต้นทั้งหมด (Case 9) เนื่องจากเป็นกรณีที่มีแรงดันภายในตัวเขื่อนมาก ของทั้ง 2 เขื่อนมาลดค่าความหนาแน่นเพื่อวิเคราะห์พิจารณาเสถียรภาพต่อการเลื่อน ไถลและพลิกคว่ำทั้งเขื่อน RCC - S และ RCC - B ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อน ไถลและของเขื่อน RCC - S ที่ระนาบต่างๆ เมื่อกำหนดความหนาแน่นที่ลดลงตั้งแต่ 2.4 ถึง 1.5 t/m<sup>3</sup> ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อน ไถลมีค่าต่ำกว่า 3 ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1.8 t/m<sup>3</sup> ในระนาบระดับ +30.00 และ +55.00 ม.รทก.

ส่วนค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ ของเขื่อน RCC - S พบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การออกแบบ (1.50) เมื่อความหนาแน่นของเขื่อนลดลงเหลือ 1.6 t/m<sup>3</sup> ที่ระนาบระดับฐานราก +27.00 ม.รทก.

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อน ไถลและของเขื่อน RCC - B ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ค่า

อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อน ไถลมีค่าต่ำกว่า 3 ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1.8 t/m<sup>3</sup> ในระนาบระดับ +25.00 และ +55.00 ม.รทก.

ส่วนค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ ของเขื่อน RCC - B แม้ลดความหนาแน่นลงเหลือ 1.5 t/m<sup>3</sup> ก็ไม่พบค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์การออกแบบ (1.50)

ดังนั้นจึงสรุปว่าความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัดของทั้งเขื่อน RCC - S และ RCC - B ที่ถูกชะล้างในระยะยาวจะต้องมีความหนาแน่นลดลงเหลือ 1.8 t/m<sup>3</sup> ถึงจะมีผลต่อความปลอดภัย



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำทั้ง 3 ระบายของเขื่อน RCC - S เมื่อความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตบดอัดลดลง

$\gamma$ ( $t/m^3$ )	FS-Sliding				FS-Overturning			
	+27	+30	+55	เกณฑ์	+27	+30	+55	เกณฑ์
2.4	4.22	3.74	3.80	3.00	2.08	2.87	3.00	1.50
2.3	4.08	3.60	3.66	3.00	2.01	2.76	2.88	1.50
2.2	3.94	3.47	3.52	3.00	1.93	2.66	2.75	1.50
2.1	3.80	3.33	3.39	3.00	1.86	2.56	2.63	1.50
2.0	3.66	3.19	3.25	3.00	1.78	2.46	2.50	1.50
1.9	3.52	3.05	3.12	3.00	1.71	2.35	2.38	1.50
1.8	3.38	2.91	2.98	3.00	1.63	2.25	2.25	1.50
1.7	3.24	2.77	2.85	3.00	1.56	2.15	2.13	1.50
1.6	3.10	2.63	2.71	3.00	1.49	2.04	2.00	1.50
1.5	2.96	2.49	2.58	3.00	2.96	2.49	2.58	1.50

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำทั้ง 3 ระบายของเขื่อน RCC - B เมื่อความหนาแน่นของวัสดุคอนกรีตบดอัดลดลง

$\gamma$ ( $t/m^3$ )	FS-Sliding				FS-Overturning			
	+20	+25	+55	เกณฑ์	+20	+25	+55	เกณฑ์
2.4	4.47	3.79	3.81	3.00	2.38	2.86	3.03	1.50
2.3	4.33	3.65	3.67	3.00	2.29	2.76	2.91	1.50
2.2	4.18	3.51	3.54	3.00	2.21	2.65	2.78	1.50
2.1	4.04	3.37	3.40	3.00	2.13	2.55	2.65	1.50
2.0	3.90	3.23	3.26	3.00	2.04	2.45	2.53	1.50
1.9	3.76	3.09	3.13	3.00	1.96	2.35	2.40	1.50
1.8	3.62	2.95	2.99	3.00	1.88	2.25	2.28	1.50
1.7	3.47	2.81	2.86	3.00	1.79	2.14	2.15	1.50
1.6	3.33	2.67	2.72	3.00	1.71	2.04	2.02	1.50
1.5	3.19	2.53	2.59	3.00	1.63	1.94	1.90	1.50

## 7. สรุป

1. ปริมาณการไหลซึมที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือวัด flowmeter ทั้งเขื่อน RCC - S และ RCC - B และปริมาณการไหลซึมใน RCC - B มากกว่า RCC - S เล็กน้อย ทั้งในแบบจำลองและ flowmeter

2. แรงดันน้ำในสภาวะที่มีน้ำไหลผ่านตัวเขื่อนจากแบบจำลองในทุกกรณี ไม่มีผลต่อเสถียรภาพให้เกิดการพิบัติการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำของเขื่อน RCC- S และ RCC -B ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดย RCC - B มีความปลอดภัยกว่า RCC - S เล็กน้อย

3. การไหลซึมผ่านเขื่อนคอนกรีตบดอัดในระยะยาว แม้จะเกิดการชะล้างวัสดุ มีผลทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัดลดลง แต่ผลการศึกษา พบว่า ความหนาแน่นที่มีผลต่อความปลอดภัยของเขื่อนจะต้องมีค่าลดลงถึง  $1.8 t/m^3$  ซึ่งเป็นไปได้ยาก จึงถือว่ายังคงมีความปลอดภัยมาก

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมธรณีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และโครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จ.นครนายก กรมชลประทาน

## 9. บรรณานุกรม

- [1] Mehrotra, V.K. 2004. Roller Compacted Concrete Dams. 1 ed. Standard Publishers Distributors, Delhi.
- [2] กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2541ก. การสำรวจและวิเคราะห์ธรณีวิทยาเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ (ฉบับสมบูรณ์) โครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก เล่มที่ 1. 254.
- ..... 2541ข. รายงานการคำนวณเพื่อการออกแบบ (Design Note) เขื่อนคลองท่าด่าน. 358.
- ..... 2542. รายงานวิชาการ Roller compacted Concrete การควบคุมงานก่อสร้าง เขื่อนหัวงานและอาคารประกอบ พร้อมส่วนประกอบอื่น. 31.
- ..... 2544. เอกสารการอบรมวิชาการครั้งที่ 3 เรื่อง การปรับปรุงฐานรากเขื่อนคลองท่าด่านโครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมืองจังหวัดนครนายก. 108.
- ..... 2547ก. อภิธานศัพท์ชลประทาน. RID Opinion. แหล่งที่มา: <http://www.kromchol.com/opinion/index.php?id=1>, 5 พฤษภาคม 2550.
- ..... 2547ข. รายงานวิชาการ Roller Compacted Concrete โครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก. 32.



- ..... 2548. รายงานสรุป  
สุดท้าย โครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอ  
เมือง จังหวัดนครนายก. 90.
- [3] ธีรพล ไชยสีวามงคล, 2551. พฤติกรรมเขื่อนขุนด่านปราการชลใน  
ระหว่างการก่อสร้างและเก็บน้ำช่วงต้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] Hansen, K.D. and W.G. Reinhardt. 1991. Roller-Compacted  
Concrete Dams. 1 ed. McGrawHill, Inc., United States of America.
- [5] ชีโนรส ทองธรรมชาติ, 2546. การวิเคราะห์การไหลซึมผ่านฐานราก  
ของเขื่อนคลองท่าด่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] Bowles, J.E. 1996. Foundation Analysis and Design. 5 ed. The  
McGraw-Hills Companies, Inc., Singapore.
- [7] U.S. Army Corps of Engineers. 1995. Gravity Dam Design. 2 ed.  
Engineer Manual, EM 1110-2-2200, Department of The Army, USA.