

## การประเมินพฤติกรรมแผ่นคอนกรีตคานหน้าของเขื่อนหินถมสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### EVALUATION ON CONCRETE FACE SLAB BEHAVIOR OF HIGH ROCKFILL DAM BY FINITE ELEMENT METHOD

ธนาธิป ศรีสุระ<sup>1</sup>, รักษิณี สุขรักรัช<sup>2\*</sup> และ พรเกษม จงประดิษฐ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ไทย

<sup>2</sup> ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร, ไทย

<sup>3</sup> รศ. ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ไทย

\*Corresponding author address: raksiri.s@fte.kmutnb.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมแผ่นคอนกรีตคานหน้าของเขื่อนหินถมสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประสิทธิภาพในการป้องกันน้ำซึมผ่านตัวเขื่อนขึ้นอยู่กับแผ่นคอนกรีตคานหน้าซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ติดตั้งอยู่บริเวณผิวหน้าของเขื่อนในทิศทางเหนือน้ำ แม้ว่าพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตจะได้รับการศึกษาเป็นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แต่การศึกษาเพียงเล็กน้อยที่ตรวจสอบผลวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่ติดตั้งภายในเขื่อนและส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การสูญเสียของแผ่นคอนกรีต การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตคานหน้าประกอบด้วย การสูญเสียของแผ่นคอนกรีตและความเค้นในแผ่นคอนกรีต ช่วงระหว่างการก่อสร้างและการเติมน้ำเข้าสู่เขื่อนใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลอง 3 มิติของเขื่อนน้ำจืด 2 ถูกจำลองตามข้อมูลเขื่อนจริง ประสิทธิภาพของแบบจำลองได้รับการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในโครงสร้างเขื่อนและผลวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลข การจำลองแผ่นคอนกรีตคานหน้ามีการกำหนดแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสอดคล้องกันระหว่างผลการวิเคราะห์และผลตรวจวัดในสนาม ผลการวิเคราะห์อาจเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบเขื่อนในอนาคต

**คำสำคัญ:** เขื่อนหินถมคอนกรีตคานหน้า, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข, วัสดุหินถม, แบบจำลองรอยต่อ

#### Abstract

This article presents the numerical analysis of concrete face slab behavior of a high rockfill dam by finite element (FE) method. The performance of water barrier system of the concrete face rockfill dam (CFRD) is mainly dependent on the concrete face slab behavior because it acts as the impervious component located at the upstream face. Despite interest in the concrete face slab behavior has received substantial attention during past decade, there are only few studies verify their analysis results with the dam instrument data and most of them mainly focuses on the deformation of the concrete face slab. The purpose of this research is to investigate the behavior of concrete face slab, including movement of joint, deflection and stress of the slab during construction and first impounding stages. A three-dimensional finite element analysis of the Nam Ngum 2 concrete face slab rockfill dam is performed based on monitored data. The performance of the slab – joint concrete face 3D model is assessed based on monitored data and numerical simulation. The study results show The importance of development of interaction model between the dam and face slab is highlighted. Finally, the analysis results could be an effective approach for concrete face rockfill dam designers.

**Keywords:** Concrete face rockfill dams, Numerical analysis, Rockfill materials, Interaction model

#### 1. บทนำ

การก่อสร้างเขื่อนประเภทเขื่อนหินถมสูงคานหน้าคอนกรีตมีจำนวนมากขึ้นด้วยหลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น การอุปโภคบริโภค การป้องกันน้ำท่วมและการผลิตกระแสไฟฟ้า ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาพบว่าเขื่อนหินถมที่สูงกว่า 150 เมตรก่อสร้างได้สำเร็จประกอบด้วย เขื่อน Aguamilpa (187 เมตร) เขื่อน Campos Novos (202 เมตร) และเขื่อนที่สูงที่สุด คือ เขื่อน Shuibuya (233 เมตร) ด้วยประสิทธิภาพของเขื่อนดังกล่าวที่สามารถก่อสร้างได้สูง

ขึ้นอีก เนื่องจากวัสดุสำหรับก่อสร้างสามารถประยุกต์ใช้วัสดุหินถมที่มีอยู่ในพื้นที่ จึงมีจำนวนเขื่อนประเภทนี้เพิ่มมากขึ้น เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหินถมจำเป็นต้องมีการทดสอบในห้องทดลอง [1] เช่น การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง และการทดสอบหาค่ากำลังอัดของดินแบบสามแกน

การทรุดตัวของหินถมช่วงการก่อสร้างและช่วงการเติมน้ำเข้าสู่เขื่อนครั้งแรกอาจส่งผลให้เกิดการเสีรูปที่บริเวณแผ่นคอนกรีตคานหน้า ดังนั้นประสิทธิภาพของเขื่อนหินถมคานหน้าคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับ

กับแผ่นคอนกรีตคานหน้าซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่โครงสร้างหลักของเขื่อน เมื่อเกิดการซึมผ่านของน้ำผ่านรอยแตกร้าวบริเวณผิวหน้าแผ่นคอนกรีตอาจส่งผลให้โครงสร้างเขื่อนเกิดความเสียหายและอาจนำไปสู่การวิบัติได้ในที่สุด [2] จากข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อเขื่อนหินถมคานหน้าคอนกรีตดังกล่าวที่ 1 พบว่าการซึมผ่านของน้ำสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณรอยแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตและบริเวณรอยต่อของแผ่นคอนกรีต การทำความเข้าใจพฤติกรรมของเขื่อนและการประเมินความปลอดภัยจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบและตรวจสอบความปลอดภัย โดยทั่วไปการออกแบบนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลเชิงประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบเป็นหลัก [3] ในปัจจุบันวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับจำลองขั้นตอนการก่อสร้างและขั้นตอนการเติมน้ำเข้าสู่เขื่อนครั้งแรกเพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ [4-5] งานวิจัยในอดีตมุ่งเน้นการศึกษาไปที่ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุหินถมแม้จะมีการตรวจสอบกับผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งในภาคสนามเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองพฤติกรรมวัสดุหินถม แต่อย่างไรก็ตามการจำลองพฤติกรรมหินถมที่ถูกต้องนั้นอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากการป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างเขื่อนประเภทนี้ขึ้นอยู่กับแผ่นคอนกรีตคานหน้า การจำลองพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ต้องและเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้น

การศึกษานี้ดำเนินการด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นคอนกรีตคานหน้าจากการทรุดตัวของหินถมภายในโครงสร้างเขื่อนโดยเปรียบเทียบระหว่างผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในโครงสร้างเขื่อน

ตารางที่ 1 รายชื่อเขื่อนที่มีการรั่วซึมผ่านบริเวณแผ่นคอนกรีตคานหน้า

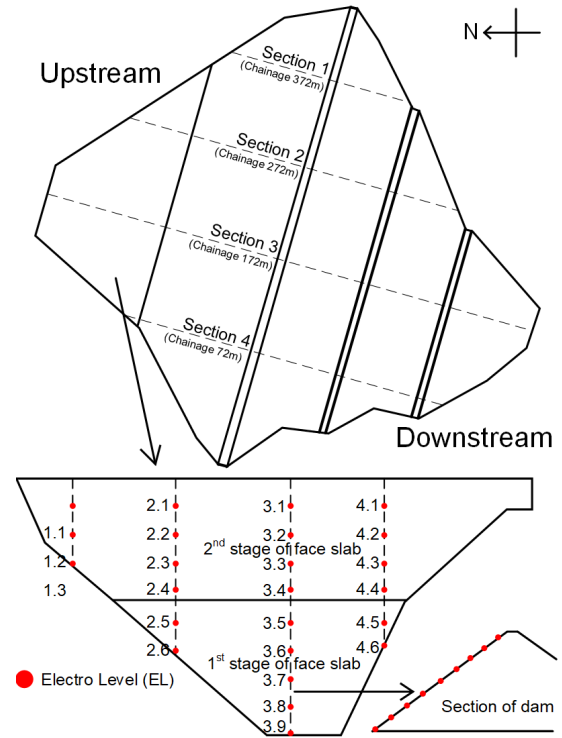
Name	Height (m)	Max leakage (l/sec)
Alto	140	1800
Anchicaya	97	1275
Coutright	84	2700
Dix river	100	565
Shiroro	125	1800
Wishon	90	3120

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

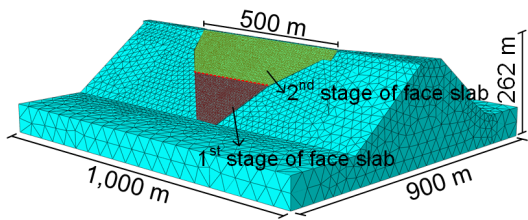
การศึกษานี้ใช้เขื่อนน้ำจิม 2 เป็นกรณีศึกษา ซึ่งจัดเป็นเขื่อนหินถมสูงคานหน้าคอนกรีตที่ดำเนินการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการบด

อัดวัสดุถมที่ทันสมัยและมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุหินถมสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมก่อนการก่อสร้างจริง นอกจากนี้เขื่อนน้ำจิม 2 ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบพฤติกรรมที่เกิดขึ้น เช่น การทรุดตัวของวัสดุหินถม การเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้า อุปกรณ์ตรวจวัดการซึมผ่านของน้ำภายในโครงสร้างและอื่น ๆ ที่หน้าตัดของเขื่อนดังรูปที่ 1

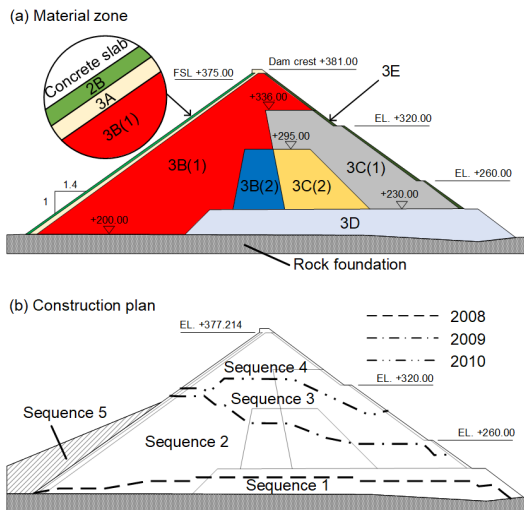


รูปที่ 1 หน้าตัดตรวจวัดและการติดตั้งอุปกรณ์บริเวณแผ่นคอนกรีตคานหน้า

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้หลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element, FE) แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยมีขนาดของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2 และมีการแบ่งการโซนของวัสดุหินถมดังแสดงในรูปที่ 3(a) การจำลองขั้นตอนช่วงเริ่มต้นการก่อสร้างจนกระทั่งสิ้นสุดการก่อสร้างถูกแบ่งออกเป็น 37 ขั้นตอนย่อยโดยกำหนดแรงกระทำของการก่อสร้างและการเติมน้ำเข้าสู่เขื่อนอีก 27 ขั้นตอนย่อยโดยอ้างอิงจากข้อมูลระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นจากเครื่องมือตรวจวัด การเพิ่มระดับน้ำแต่ละขั้นตอนกำหนดเป็นแรงดันที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีตคานหน้าดังรูปที่ 3(b)



รูปที่ 2 แบบจำลอง 3 มิติของเขื่อนน้ำจี้ม 2



รูปที่ 3 การก่อสร้างเขื่อนระยะแรกจนถึงขั้นสุดท้าย

## 2.2. แบบจำลองวัสดุ

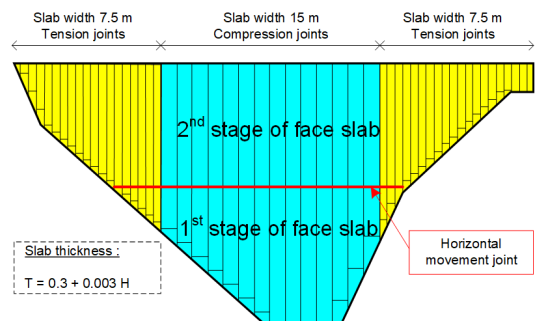
พารามิเตอร์ของวัสดุหินฉิมที่ได้จากผลทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งการใช้งานโปรแกรมย่อยทางคอมพิวเตอร์สำหรับโปรแกรม ABAQUS ที่เรียกว่า UMAT โดยรูปแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบจำลองฮาร์ดเนิ่งประเภทอีลาสโตพลาสติก [6] โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาทดสอบจะมีการย่อขนาดจากวัสดุที่ใช้ก่อสร้างซึ่งมีอยู่หลายวิธี โดยพิจารณาจากการกระจายตัวกราฟการกระจายของขนาดเม็ดวัสดุ การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์โดยตรงจากการสอบเทียบกับผลทดสอบวัสดุอาจไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงในสนาม เนื่องจากผลกระทบของค่าขนาดอิทธิพล (scaling effect)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองวัสดุจากการทดสอบและการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ

Parameter		Zone					
		2B	3A	3B1&3D	3B2	3C1&3E	3C2
$\phi_0$ (°)	Test	42.23	46.08	47.09	42.60	42.00	43.30
$\Delta\phi$	Test	1.16	2.59	2.99	2.55	2.45	3.95
$\psi_0$ (°)	Test	3.2	3.2	3.2	0.5	-5	-5
$E_{50}^{ref}$ (MPa)	Test	65.0	65.0	80.0	32.0	20.0	12.0
	Back-analysis	50.0	50.0	52.0	30.0	19.0	11.0
$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	Test	$0.769 E_{50}^{ref}$	$0.8 E_{50}^{ref}$	$0.688 E_{50}^{ref}$	$0.75 E_{50}^{ref}$	$0.85 E_{50}^{ref}$	$0.833 E_{50}^{ref}$
$m$	Test	0.45	0.34	0.29	0.69	0.64	0.70
$n$	Test	0.25	0.22	0.15	0.35	0.25	0.22
$R_f$	Test	0.74	0.75	0.78	0.82	0.68	0.65
Other		$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ , $p^{ref} = 100kPa$ , $C = 1kPa$ , $OCR = 1$ , $K_0^{NC} = 1 - \sin\phi$ , $\nu_{ur} = 0.3$					

การศึกษานี้จึงมีการปรับแก้พารามิเตอร์วัสดุหินฉิมโดยเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลตรวจวัดจากเครื่องมือที่ติดตั้งภายในโครงสร้างเขื่อนหินฉิม [7-8] พารามิเตอร์ของวัสดุหินฉิมที่ใช้สำหรับการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2

สำหรับแผ่นคอนกรีตคาดหน้าจำลองเป็น Shell elements ที่มีความหนา 0.3 เมตรบริเวณสันเขื่อนและมีความหนา 0.843 เมตรที่บริเวณฐานรองรับแผ่นคอนกรีตตามระดับความสูง แบบจำลองแผ่นคอนกรีตสำหรับการศึกษานี้กำหนดพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติคที่มีค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเท่ากับ 20,000 MPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.2 โดยที่แบบจำลองแบ่งตามลักษณะการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคาดหน้าจริงของเขื่อนน้ำจี้ม 2 ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างแผ่นคอนกรีตและวัสดุหินฉิมชั้นรองรับเป็นแบบ Weld contact [9] ที่ไม่ยอมให้เกิดการแยกออกของแผ่นคอนกรีตและวัสดุหินฉิมชั้นรองรับ ภายหลังจากเริ่มมีการพิจารณาค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแผ่นคอนกรีตและตัวเขื่อน โดยกำหนดค่าคุณสมบัติเป็นแบบอีลาสโตพลาสติก [11] ซึ่งในการจำลองแผ่นคอนกรีตจากการศึกษาก่อนหน้านี้มีการพิจารณาให้แผ่นคอนกรีตเป็นแบบแผ่นเดียว [10] เพื่อลดความซับซ้อนในการจำลอง เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ การศึกษานี้แบ่งแผ่นคอนกรีตออกเป็นหลายชั้นส่วนย่อยตามการก่อสร้างจริง สำหรับรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตคาดหน้ากำหนดให้เชื่อมต่อกันอย่างดี โดยมีการเคลื่อนตัวและสถานะความเค้นเดียวกันที่รอยต่อ [11]

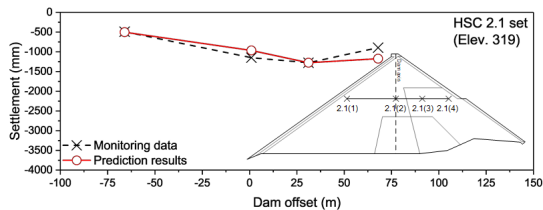


รูปที่ 4 แผนผังการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคาดหน้า

### 3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

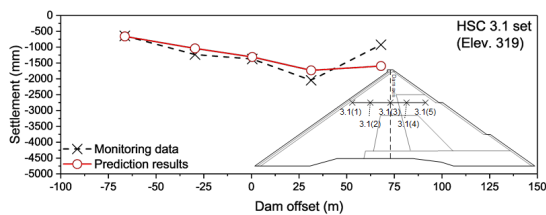
#### 3.1. การทรุดตัวของวัสดุหินถม

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของวัสดุหินถมกับเครื่องมือที่ติดตั้งในโครงสร้างเขื่อนในหน้าตัดที่ 2 ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณไหล่เขาพบว่าค่าการทรุดตัวของวัสดุหินถมตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจากเครื่องมือ แต่ผลการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ 4 มีค่าการทรุดตัวที่มากกว่าผลตรวจวัดเท่ากับ 230 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์

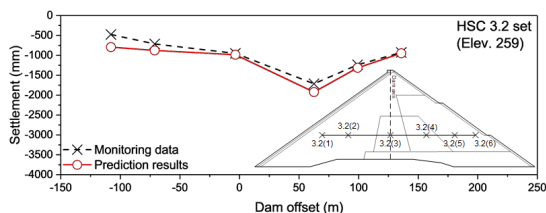


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลวิเคราะห์และผลตรวจวัดจากชุดเครื่องมือ HSC 2.1

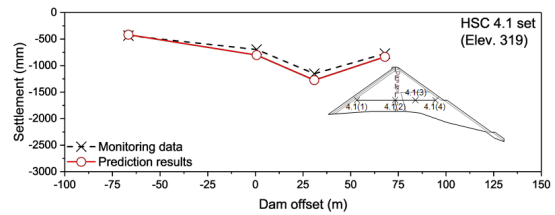
ผลวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของวัสดุหินถมในหน้าตัดที่ 3 ที่เป็นหน้าตัดทั่วไปของเขื่อนน้ำจิม 2 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลตรวจวัดได้จากชุดเครื่องมือ HSC 3.1 และ HSC 3.2 ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลตรวจวัดจากอุปกรณ์พบว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดและแนวโน้มการทรุดตัวสอดคล้องกัน แต่การประเมินพฤติกรรมบริเวณอุปกรณ์ตรวจวัด 3.1(5) เป็นตำแหน่งที่ค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าการทรุดตัวที่มากกว่าผลตรวจวัดจากอุปกรณ์เท่ากับ 671 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลวิเคราะห์และผลตรวจวัดจากชุดเครื่องมือ HSC 3.1



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลวิเคราะห์และผลตรวจวัดจากชุดเครื่องมือ HSC 3.2

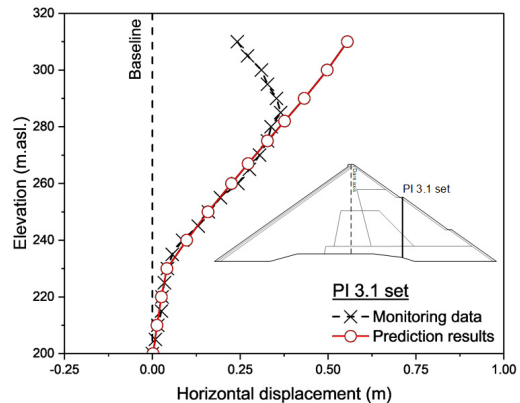


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลวิเคราะห์และผลตรวจวัดจากชุดเครื่องมือ HSC 4.1

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของวัสดุหินถมกับเครื่องมือที่ติดตั้งในโครงสร้างเขื่อนในหน้าตัดที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวแสดงให้เห็นว่าค่าการทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดที่ตำแหน่ง HSC 4.1(1) ในขณะที่ผลการตรวจวัดที่ตำแหน่งอื่นมีผลวิเคราะห์ที่มากกว่าผลตรวจวัด เมื่อตรวจสอบแนวโน้มของพฤติกรรมทรุดตัวที่เกิดขึ้นคือเกิดการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณเครื่องมือตรวจวัดตำแหน่ง HSC 4.1(3) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลตรวจวัดจากภาคสนาม

#### 3.2. การเคลื่อนตัวในแนวนอน

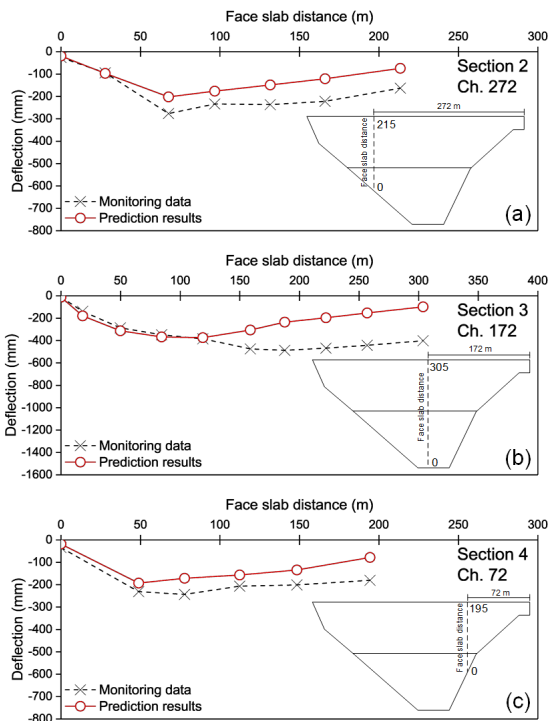
ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวนอนของเขื่อนในหน้าตัดที่ 3 ซึ่งเป็นหน้าตัดทั่วไปของเขื่อนน้ำจิม 2 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 55 เซนติเมตรซึ่งมากกว่าผลตรวจวัดที่มีค่าเท่ากับ 36 เซนติเมตร เมื่อตรวจสอบเชิงพฤติกรรมจะเห็นว่าค่าการเคลื่อนตัวจากระดับฐานของเขื่อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับตรวจวัดสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์ในช่วง 200 – 280 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลมีผลที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ แต่เมื่อระดับสูงขึ้นมากกว่า 280 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลค่าการเคลื่อนตัวจากการจำลองมีค่าที่มากขึ้นซึ่งต่างจากพฤติกรรมของผลตรวจวัดที่มีค่าการเคลื่อนตัวที่น้อยลง



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่หน้าตัดที่ 3

### 3.3. การเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้า

รูปที่ 11 แสดงการเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นจริงในสนามหน้าตัดที่ 2, 3 และ 4 พบว่าผลการวิเคราะห์การเสียรูปในเชิงพฤติกรรมมีแนวโน้มเดียวกับผลตรวจวัดจากเครื่องมือคือแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 จะเกิดค่าการเสียรูปที่มากขึ้นตั้งแต่บริเวณฐานจนกระทั่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงการเสียรูปที่น้อยลงในบริเวณแผ่นคอนกรีตที่อยู่ใกล้เคียงรอยต่อของการก่อสร้าง เมื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ก่อสร้างในช่วงที่ 2 พบว่าลักษณะการเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าจะเริ่มมีการเสียรูปที่น้อยลงหรือเริ่มมีการเสียรูปที่คงที่

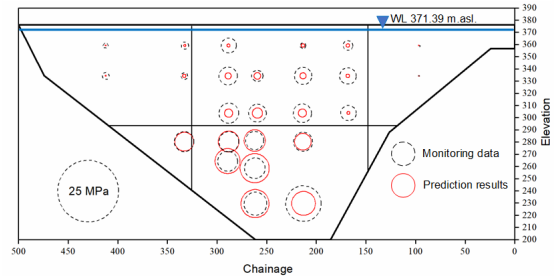


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าการเสียรูปของแผ่นคอนกรีตจากผลวิเคราะห์และผลตรวจวัดในสนามหน้าตัดที่ 2, 3 และ 4

ผลวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 มีค่าการเสียรูปที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัด โดยที่ผลการวิเคราะห์ค่าการเสียรูปในหน้าตัดที่ 2 และ 4 ซึ่งเป็นหน้าตัดตรวจวัดที่โครงสร้างเชื่อมอยู่ใกล้บริเวณไหล่เขาพบว่าค่าการเสียรูปที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าผลตรวจวัดจากเครื่องมือประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นคอนกรีตในหน้าตัดที่ 3 มีค่าการเสียรูปที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับผลตรวจวัดในภาคสนาม

ผลการวิเคราะห์ค่าการเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ก่อสร้างในช่วงที่ 2 พบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าต่ำกว่าผลตรวจวัดจากเครื่องมือในทุกกรณี เมื่อเปรียบเทียบค่าการเสียรูปที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดแล้วพบว่ามีค่าเท่ากับ 45, 25 และ 40 เปอร์เซ็นต์ในหน้าตัดที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

### 3.4. ความเค้นบริเวณแผ่นคอนกรีตคานหน้า



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบการกระจายค่าความเค้นบนแผ่นคอนกรีตคานหน้า

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ค่าความเค้นจากแบบจำลองกับค่าความเค้นจากอุปกรณ์พบว่าค่าความเค้นอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์เท่ากับ 12.02 เมกะปาสคาลขณะที่ค่าความเค้นอัดสูงสุดจากผลตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 14.4 เมกะปาสคาลที่ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นในเชิงพฤติกรรมสามารถแบ่งพฤติกรรมการตรวจสอบค่าความเค้นอัดบนแผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นอัดส่วนใหญ่ที่ระดับความสูงประมาณ 280 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลมีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดทั้งในพื้นที่รับความเค้นอัดและพื้นที่รับความเค้นดึง ในขณะที่ผลการวิเคราะห์แผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 2 มีค่าน้อยกว่าผลจากการตรวจวัดในทุกกรณีความสูง ทั้งนี้เมื่อตรวจสอบร่วมกับผลวิเคราะห์ค่าการเสียรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าพบว่าแผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 ที่เป็นส่วนที่มีผลการวิเคราะห์การเสียรูปใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจะมีการประเมินค่าความเค้นอัดที่ใกล้เคียงเช่นกัน แต่ในส่วนของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ก่อสร้างในช่วงที่ 2 ที่เป็นส่วนที่มีผลวิเคราะห์การเสียรูปที่ต่ำกว่าผลตรวจวัดจะมีผลการประเมินค่าความเค้นอัดที่ต่ำกว่าผลตรวจวัดด้วย

### 4. สรุป

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของวัสดุหินถมและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นคอนกรีตซึ่งสามารถตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งในโครงสร้างเชื่อม จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้



1. การปรับแก้พารามิเตอร์ของวัสดุหินถมด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับสามารถจำลองพฤติกรรมการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวในแนวนอนของเขื่อนหินถมที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้างและกระบวนการเติมน้ำเข้าสู่เขื่อนครั้งแรกให้มีผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งในภาคสนาม

2. การประเมินค่าการเสีรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสีรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าคือการเสีรูปของแผ่นคอนกรีตเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ฐานรองรับจะเกิดการเสีรูปอย่างมากเนื่องจากเป็นระดับที่รับแรงกระทำจากแรงดันน้ำมากที่สุดและเมื่อระดับสูงมากขึ้นจะเห็นว่า การเสีรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้ามีการเสีรูปที่น้อยลงตามแรงดันน้ำที่ลดลงตามระดับความสูง

3. การวิเคราะห์ค่าความเค้นอัดที่กระจายเกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีตคานหน้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 และ 2 พบว่าการประเมินค่าความเค้นอัดของแผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 1 มีผลการประเมินที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจากอุปกรณ์ในภาคสนาม แต่ผลการประเมินค่าความเค้นอัดของแผ่นคอนกรีตที่ก่อสร้างในช่วงที่ 2 มีค่าการประเมินค่าความเค้นอัดต่ำกว่าค่าจากผลตรวจวัดซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินค่าการเสีรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่ประเมินได้ต่ำกว่าผลตรวจวัด จึงมีการประเมินค่าความเค้นอัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับผลตรวจวัดค่าความเค้นอัดที่กระจายบนแผ่นคอนกรีต

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิศวกรรมการโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุน เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

## 6. การอ้างอิง

[1] Cooke J.B. (1984). Progress in rock-fill dams : (18th Terzaghi Lecture). *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* **110**(10), 1384-1414. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:10(1381)

[2] Hunter G., Glastonbury J., And D., Fell R. (2003). Performance of Concrete Face Rockfill Dams. UNICIV REPORT R-413, The University of New South Wales Sydney, Australia, pp. 47.

[3] Cruz P.T., Materón B., Freita M. (2010). *Concrete Face Rockfill Dams*. CRC Press, Brasilia, Brazil

[4] Xu B., Zou D., Liu, H. (2012). Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model. *Computer and Geotechnics* **43**, 143-154. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.03.002

[5] Zhu Y., Lu L. (2016). Nonlinear Static Analysis of Shuibuya Dam in China-World's Highest CFRD. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* **21**(4), 1527-1537.

[6] Sukkarak R., Jongpradist P., Pramthawee P. (2019). A modified valley shape factor for the estimation of rockfill dam settlement. *Computer and Geotechnics* **108**, 244-256. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.001

[7] Sukkarak R., Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W., Jamsawan P. (2018). Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects. *Geomechanics and Engineering* **14**(3), 211-224. DOI: 10.12989/gae.2018.14.3.211

[8] Jia Y., Chi S. (2015). Back-analysis of soil parameters of the Malutang II concrete face rockfill dam using parallel mutation particle swarm optimization. *Geomechanics and Engineering* **65**, 87-96. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.11.013

[9] Uddin N. (1999). A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation. *Computers and Structures* **72**, 409-421. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00011-5

[10] Mahabad N.M., Imam R., Javanmardi Y., Jalali H. (2012). Three-dimensional analysis of a concrete-face rockfill dam. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering* **167**(4), 323-343. DOI: 10.1680/geng.11.00027

[11] Zhang B., Wang J.G., Shi R. (2004). Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer. *Computers and Geotechnics* **31**, 559-573. DOI: 10.1016/j.compgeo.2004.07.004