



## การพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองการคืบตัวสำหรับร่วมวิเคราะห์การหลุดตัวของเขื่อนหินถม

พรเทพ เปรมทวี ชนา พุทธนานนท์ รัชศิริ สุขรัภย์ และ พรเกษม จงประดิษฐ์\*  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2470- 9305 อีเมล: pornkasem.jon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.003

รับเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2559 ตอรับเมื่อ 9 มีนาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 13 กันยายน 2559

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

การเสีรรูปของเขื่อนหินถมภายใต้สภาวะทั้งขณะก่อสร้างและช่วงของการใช้งาน เป็นประเด็นหลักที่ต้องนำมาประเมินเรื่องความปลอดภัยของเขื่อนหินถมแบบมีตาหน้าคอนกรีต กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินการเสีรรูปของเขื่อนหินถมให้ถูกต้อง องค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งของกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ได้แก่ “แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ” ที่จะต้องสามารถสะท้อนพฤติกรรมหลักของวัสดุให้ครอบคลุมที่สุด งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองที่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลาหรือการคืบตัวของเขื่อนหินถม โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิง ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทอิลาสโตพลาสติกที่มีประสิทธิภาพต่อการวิเคราะห์การเสีรรูปของเขื่อนหินถมที่ยังไม่ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของเวลา จากนั้นนำไปสร้างเป็นโปรแกรมย่อยทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกเรียกว่า UMAT และนำไปทดสอบด้วยการใช้จำลองพฤติกรรมของตัวอย่างเขื่อนหินถมจริงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า ABAQUS เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองนี้โดยเปรียบเทียบกับค่าการหลุดตัวที่ได้จากผลการตรวจวัดจริงในสนาม ซึ่งปรากฏว่าให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณาถึงพฤติกรรมการคืบตัว การประเมินในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการนำพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลามาร่วมในการวิเคราะห์ช่วยปรับปรุงความถูกต้องของการวิเคราะห์การเสีรรูปของเขื่อนหินถมได้อย่างมีนัยยะ และแบบจำลองที่เลือกใช้มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้งานได้

**คำสำคัญ:** เขื่อนหินถม, แบบจำลองฮาร์ดเดนนิง, แบบจำลองการคืบตัว, การคืบตัวของหินถม, ไฟไนต์เอลิเมนต์

การอ้างอิงบทความ: พรเทพ เปรมทวี พรเกษม จงประดิษฐ์ ชนา พุทธนานนท์ และ รัชศิริ สุขรัภย์, “การพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองการคืบตัวสำหรับร่วมวิเคราะห์การหลุดตัวของเขื่อนหินถม,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, หน้า 15–30, ม.ค.-เม.ย. 2560



## Development and Implementation of a Creep Model for Deformation Analysis of a Rockfill Dam

Pornthap Pramthawee, Chana Phutthananon, Raksiri Sukkarak and Pornkasem Jongpradist\*

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-2470- 9305, E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.003

Received 1 February 2016; Accepted 9 March 2016; Published online: 13 September 2016

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Settlement behavior of rockfill dam under constructing and operating conditions is one of the main issues for dam safety assessment. Nowadays, Finite Element Method (FEM) is broadly popular for analysis of rockfill dam. One of the important components for FEM is a suitable constitutive model for reasonably reproducing stress-strain relationship which should cover all dominant behaviors of the material. This study developed a model of creep, which can describe time-dependent deformation, to cooperate with the Hardening Soil model (HS) for deformation analysis of rockfill dams. The model is written as a subroutine, so called UMAT, for implementation into finite element program ABAQUS. The deformation analysis of a rockfill dam at both ends of construction and first impoundment is then carried out. The calculated settlements using the developed model and HS model alone are compared with the monitoring results from dam instrumentations. The compared results show that the developed model (model of creep in conjunction with HS model) gives more accuracy than the HS model. This indicates that the deformation analysis of rockfill dam can be improved by taking the creep behavior into account. In addition the developed model of creep is sufficiently effective to incorporate in deformation analysis of rockfill dam.

**Keywords:** Rockfill Dam, Hardening Soil Model, Model of Creep, Time-dependent Model, Finite Element

## 1. บทนำ

เขื่อนหินถม (Rockfill Dam) เป็นเขื่อนที่ได้รับ ความนิยมก่อสร้างอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจาก สามารถนำวัสดุที่มีอยู่ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างมาใช้เป็น วัสดุก่อสร้างหลัก อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้ใช้เวลา ก่อสร้างที่น้อยกว่าเขื่อนชนิดอื่นได้ จึงส่งผลให้ต้นทุน ในการก่อสร้างต่ำและคุ้มค่าต่อการลงทุน จวบจนทุกวันนี้ เขื่อนหินถมสามารถก่อสร้างได้สูงมากกว่า 200 เมตร เช่น เขื่อน Campos Novos ประเทศบราซิล เขื่อน Bakun ประเทศมาเลเซีย เขื่อน Shuibuya ประเทศจีน เป็นต้น ส่วนในประเทศไทย มีเขื่อนอยู่หลายแห่งที่ใช้วัสดุหินถม เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง เช่น เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนรัชชประภา เขื่อนวชิราลงกรณ์ และเขื่อนแควน้อย บำรุงแดน เป็นต้น

หลักสำคัญสำหรับการออกแบบเขื่อนเหล่านี้คือ ความมั่นใจในความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของ เขื่อน ตั้งแต่เริ่มการก่อสร้าง เริ่มกักเก็บน้ำ และตลอด ช่วงระยะเวลาของการใช้งาน สำหรับเขื่อนที่มีคอนกรีต าดาดหน้า (Concrete Face) การเคลื่อนตัวหรือการทรุดตัว ที่มากเกินไปอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการพิบัติแก่ เขื่อนหินถมได้ การประมาณการเคลื่อนตัวที่เหมาะสม จึงจำเป็นต่อการออกแบบ ด้วยความก้าวหน้าทางด้าน เทคโนโลยีในปัจจุบัน วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย สำหรับใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์การเสียรูปเขื่อน หินถม โดยองค์ประกอบหลักสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำ ในการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าวคือ แบบจำลอง พฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Model) ซึ่งเป็นแบบ จำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ถูกสร้าง จากการนำผลลัพธ์ที่ได้จากห้องทดลองมาสร้างเป็นความ สัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้ใน โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้นแบบจำลองพฤติกรรม ของวัสดุที่นำมาใช้ จะต้องสามารถสะท้อนพฤติกรรมจริง หลัก ๆ ของหินถมได้ครอบคลุมด้วยเช่นกัน

แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ หรือแบบจำลองดิน

(Soil Model) ที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์และออกแบบเขื่อน หินถมในปัจจุบันคือแบบจำลองไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic Elastic Model) ที่ได้เสนอโดย Duncan and Chang [1] ซึ่งอาศัยทฤษฎีอีลาสติค (Elastic Theory) แม้ว่าแบบ จำลองนี้จะง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรมทาง คอมพิวเตอร์และวิศวกรมีประสบการณ์กับการใช้แบบ จำลองนี้เป็นอย่างดี แต่ก็ยังไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรม หลักของหินถมได้อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะพฤติกรรม การขยายตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Dilatancy) ทำให้ ไม่เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์กับเขื่อนหินถมขนาดใหญ่ ที่มีความสูงมากอีกด้วย [2] จนกระทั่งปัจจุบันมีนักวิจัย บางท่านได้นำแบบจำลองดินที่อ้างอิงทฤษฎีอีลาสโต พลาสติค (Elasto-plastic Model) มาใช้ในการวิเคราะห์ และจำลองพฤติกรรมของเขื่อนหินถม [3], [4] และนำผล ที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดจริง ในสนามเพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับ ผลตรวจวัดจริงในสนามมากกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบ จำลองไฮเปอร์โบลิก [5] ทว่าแบบจำลองเหล่านี้ก็ยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent Deformation) ที่เป็นพฤติกรรมหลักอันหนึ่ง [6] ของวัสดุหินถมได้ ส่งผลให้การทำนายค่าการทรุดตัว ยังมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยเฉพาะเขื่อน หินถมขนาดใหญ่ที่มีความสูงมาก ๆ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาใน การก่อสร้างนาน และมีกระบวนการก่อสร้างที่ซับซ้อนมาก ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะความเค้น (Stress State) และทางเดินของความเค้น (Stress Path) ภายใน ตัวเขื่อนหินถมมีความยุ่งยากซับซ้อนตามไปด้วย ส่งผล ให้เกิดความยุ่งยากอย่างมากต่อการสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์สำหรับประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนตัว ที่ขึ้นกับเวลาของเขื่อนหินถม

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาและประเมินแบบ จำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจำลองพฤติกรรมการ เคลื่อนตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Creep Model) และนำไป

ประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองชนิดอีลาสโตพลาสติก ที่มีชื่อว่าแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening Soil Model) โดยการเขียนเป็นโปรแกรมย่อยทางคอมพิวเตอร์ (Subroutine) ที่เรียกว่า UMAT จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีชื่อว่า ABAQUS เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวของตัวอย่างเขื่อนหินถมที่ถูกคัดเลือกเป็นต้นแบบของการสอบเทียบเพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น

## 2. แบบจำลองพฤติกรรมเขื่อนหินถม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีสำหรับนำมาใช้จำลองพฤติกรรมของเขื่อนหินถม จะต้องสามารถสะท้อนพฤติกรรมหลักของวัสดุหินถม ภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ ได้ใกล้เคียงมากที่สุด เช่น พฤติกรรมความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างค่าความเค้นและความเครียด (Non-linear and Inelastic Stress-strain Relationship) พฤติกรรมความขยายตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Dilatancy) และพฤติกรรมความแข็งที่ขึ้นอยู่กับสถานะความเค้น (Stress-dependency of Stiffness) เป็นต้น ปัจจุบันมีแบบจำลองมากมายได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมเขื่อนหินถม อย่างไรก็ตามแต่ละแบบจำลองที่นำมาใช้ก็มีข้อจำกัดที่ต่างกันไป เช่น ความยุ่งยากในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือมีความยุ่งยากในการนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Implementation) เป็นต้น ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีจะต้องประกอบด้วยคุณสมบัติคือ มีความแม่นยำในระดับที่พอรับได้ มีความง่ายในการหาค่าพารามิเตอร์และมีความง่ายในการนำไปใช้งาน ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ถูกนำมาพิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้

### 2.1 แบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง (Hardening Soil Model)

แบบจำลองนี้ถูกสร้างโดยอาศัยทฤษฎีอีลาสโตพลาสติกทฤษฎี (Elasto-plasticity Theory) ชนิดสองพื้นผิวคราก (Double Yield Surface) ที่สามารถขยายตัวได้เท่ากันทุกทิศทางเนื่องจากความเครียดพลาสติกที่เพิ่มขึ้น (Isotropic

Strain Hardening) ถูกนำเสนอโดย Schanz และคณะ [7] พื้นผิวครากแรกของแบบจำลองนี้คือ พื้นผิวครากเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Yield Surface) ดังแสดงในสมการที่ (1) และมีกฎการขยาย (Hardening Rule) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือนพลาสติก (Plastic Shear Strain) ตามสมการที่ (2)

$$\bar{f} = \frac{1}{E_{s0}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}} \quad (1)$$

$$\gamma^p = (2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p) \approx 2\varepsilon_1^p \quad (2)$$

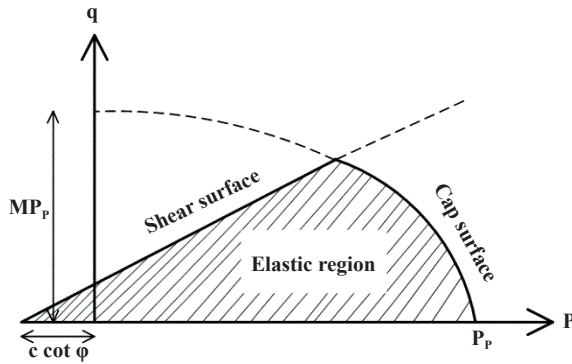
$q$  คือค่าความเค้นประสิทธิผลเบี่ยงเบน (Deviatoric Stress)  $q_a$  คือเส้นกำกับค่าความเค้นเฉือน (Asymptotic Value of Shear Strength)  $E_{s0}$  คือโมดูลัสระยะแรกเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก (Primary Loading Modulus)  $E_{ur}$  คือโมดูลัสเมื่อถอนน้ำหนักและรับน้ำหนักบรรทุกซ้ำ (Unloading and Reloading Modulus) โดยค่าโมดูลัสเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความเค้นโอบล้อม (Confining Stress,  $\sigma'_3$ ) ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$E_{s0} = E_{s0}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (4)$$

$p^{ref}$  คือความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยอ้างอิง  $c$  และ  $\varphi$  คือ พารามิเตอร์ทางด้านกำลังของดิน  $E_{s0}^{ref}$  และ  $E_{ur}^{ref}$  คือค่าโมดูลัสที่ค่าความเค้นโอบล้อมประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยอ้างอิง

พื้นผิวครากส่วนที่สองคือ พื้นผิวครากปิดครอบ (Cap Yield Surface) คือพื้นผิวครากที่ปิดครอบขอบเขตพฤติกรรมอีลาสติกของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 1 และสะท้อนพฤติกรรมความแข็งของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volumetric Hardening) โดยมีฟังก์ชันของพื้นผิวครากและฟังก์ชันการขยายตัวดังแสดงในสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ



รูปที่ 1 พื้นผิวครากของแบบจำลองฮาร์ดเดนิง

$$f^c = \frac{q^2}{M^2} + (p + \cot \phi)^2 - (p_p + c \cot \phi)^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_v^c = \frac{H}{m+1} \left( \frac{p_p}{p^{ref}} \right)^{m+1} \quad (6)$$

ค่า  $M$  และ  $H$  คือพารามิเตอร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสการอัดตัวคายน้ำ ( $E_{50}^{ref}$ ) และสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินแบบอยู่กับที่ ( $K_0^{NC}$ )

ข้อดีของแบบจำลองนี้คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้จากการทดลองพื้นฐานทั่วไปเช่น การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน (Triaxial Test) และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer Test) และสามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุหินถมได้ครอบคลุมมากกว่าแบบจำลองชนิดอีลาสติก [3], [5] แต่ก็ยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา

## 2.2 แบบจำลองการคืบตัว (Creep Model)

แบบจำลองการคืบตัวของหินถมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกคือแบบจำลองพฤติกรรมการคืบตัวเชิงทฤษฎี (Theoretical Constitutive Creep Model) หรือแบบจำลองกลุ่มวิสกอส (Viscous-elastic Constitutive Creep Model, Viscous-elastic-plastic Constitutive Creep Model) ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาแบบจำลองกลุ่มนี้เพื่อนำไปใช้ในการ

จำลองพฤติกรรมเขื่อนหินถม [8]-[10] แต่แบบจำลองกลุ่มนี้มีข้อด้อยในเรื่องความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้งานจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้นิยมหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการคำนวณผลย้อนกลับ (Back Analysis Method) จากค่าการทรุดตัวของเขื่อนที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดที่ได้ถูกติดตั้งภายในสนาม [11]-[14]

ส่วนกลุ่มที่สองคือแบบจำลองพฤติกรรมการคืบตัวเชิงประสบการณ์ (Empirical Constitutive Creep Model) เป็นการนำฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์มาใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับผลการทดสอบการคืบตัว (Creep Test) ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เช่น ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponent Function) ฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic Function) ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Function) และฟังก์ชันเลขยกกำลัง (Power Function) เป็นต้น ซึ่งได้ศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [15]-[17] และนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าการคืบตัวของเขื่อนหินถม [18] Cheng และ Ding [19] ได้นำเสนอแบบจำลองพฤติกรรมการคืบตัวเชิงประสบการณ์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันเลขยกกำลัง ถูกสร้างจากผลการทดสอบการคืบตัวของหินถมที่ได้จากห้องปฏิบัติการ แบบจำลองนี้มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ความเครียดการคืบตัวแนวแกน (Axial Creep Strain) และความเครียดการคืบตัวปริมาตร (Volume Creep Strain) แม้แบบจำลองนี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แต่ก็จำกัดอยู่เฉพาะกับผลทดสอบการคืบตัวของ Cheng และ Ding

## 3. การพัฒนาแบบจำลองและการประยุกต์ใช้

### 3.1 การพัฒนาแบบจำลองการคืบตัว

สมมุติฐานของการพัฒนาแบบจำลองการคืบตัวสำหรับงานวิจัยนี้คือ เนื่องจากวัสดุหินถมเป็นวัสดุที่ไม่มี ความเชื่อมแน่นจนถึงมีความเชื่อมแน่นต่ำ (Cohesionless Soil) จึงมีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุจำพวกเม็ดหยาบ (Granular Material) ซึ่งพฤติกรรมการคืบตัวจะเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดวัสดุ (Rearrangement) หรือ

เกิดจากการแตกสลายของเม็ดวัสดุ (Particle Break) และจัดเรียงตัวใหม่ โดยที่ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมเคลื่อนตัวของหินถม ได้แก่ ความเค้นโอบล้อม (Confining Stress) และระดับของความเค้น (Stress Level)

แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ได้พัฒนาจากฟังก์ชันเลขยกกำลัง ดังแสดงในสมการที่ (7) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเครียดการคืบตัวแนวแกน ( $\epsilon_a^c$ ) และความเครียดการคืบตัวปริมาตร ( $\epsilon_v^c$ )

$$\epsilon^c(t) = A(t)^n \quad (7)$$

$A$ ,  $n$  คือค่าประมาณการคืบตัวเริ่มต้น และอัตราเร่งการคืบตัวตามลำดับ ส่วน  $t$  คือเวลาใดๆ ดังนั้นค่าความเครียดการคืบตัวแนวแกนและความเครียดการคืบตัวปริมาตรสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$\epsilon_a^c(t) = A_a(t)^{n_a} \quad (8)$$

$$\epsilon_v^c(t) = A_v(t)^{n_v} \quad (9)$$

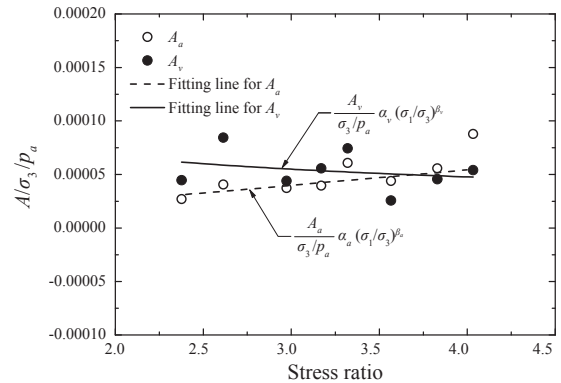
$$\frac{A_a}{\sigma_3/p_a} = \alpha_a(\sigma_1/\sigma_3)^{\beta_a} \quad (10)$$

$$\frac{A_v}{\sigma_3/p_a} = \alpha_v(\sigma_1/\sigma_3)^{\beta_v} \quad (11)$$

$$n_a = \eta_a \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p_a} \right)^{m_a} \quad (12)$$

$$n_v = \eta_v \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p_a} \right)^{m_v} \quad (13)$$

เมื่อ  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $n_a$  และ  $n_v$  (ตัวห้อยท้าย  $a$  และ  $v$  แสดงถึงในแนวแกนและเชิงปริมาตร) สามารถหาได้จากสมการที่ (10), (11), (12) และ (13) ตามลำดับ โดยการสร้างเส้นฟังก์ชันเลขยกกำลังดังสมการที่ (8) และ (9) ให้มีความเหมาะสมที่สุด (Best Fit) กับเส้นโค้งการคืบตัวจากผลการทดสอบ นำไปสู่การได้มาของค่าคงที่พารามิเตอร์

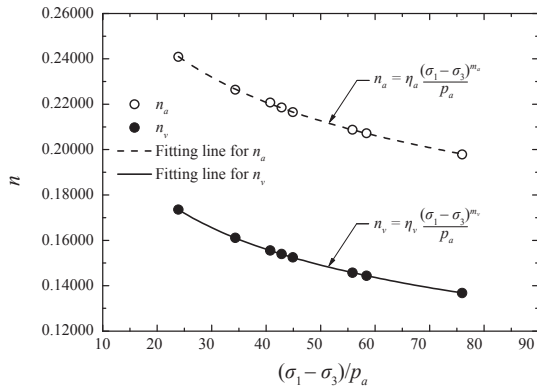


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของค่าประมาณการคืบตัวเริ่มต้นและค่าอัตราส่วนความเค้น

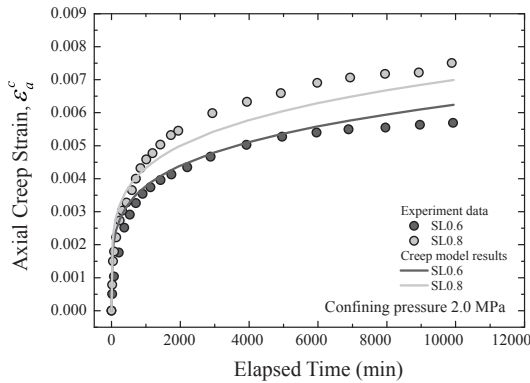
การคืบตัว ( $A$  และ  $n$ ) จากนั้น พารามิเตอร์  $A$  จะถูกนอร์มัลไลซ์ด้วยค่า  $\sigma_3/p_a$  และนำไปสร้างเป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังที่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การคืบตัว  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ ,  $\alpha_v$  และ  $\beta_v$  ดังแสดงในรูปที่ 2

จากงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมาในอดีตส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าระดับของค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress Level) มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราเร่งการคืบตัว (Creep Rate) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พบว่าฟังก์ชันเลขยกกำลังเหมาะสมที่จะนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งการคืบตัวและความเค้นเฉือนที่นอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความดันบรรยากาศดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อนำไปหาค่าคงที่พารามิเตอร์การคืบตัว  $\eta_a$ ,  $m_a$ ,  $\eta_v$  และ  $m_v$  สำหรับใช้คำนวณหาค่าอัตราเร่งการคืบตัวที่ระดับของค่าความเค้นเฉือนใดๆ

ดังนั้นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมดจำนวน 8 ตัว ซึ่งแบบจำลองการคืบตัวที่ถูกพัฒนาขึ้นมาข้างต้นนี้ได้เคยถูกประเมินศักยภาพว่ามีเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนตัวของวัสดุหินถมมาแล้ว ดังแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดสอบในรูปที่ 4 รายละเอียดสามารถดูได้ใน [20]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งการคืบตัวและค่าออร์มัลไลซ์ของความเค้นเฉือน

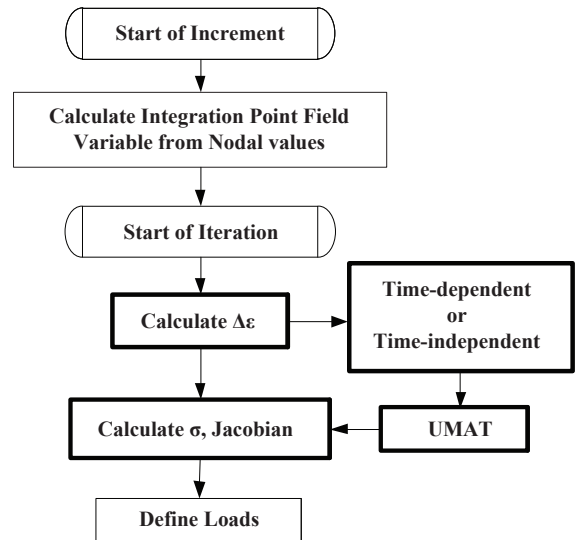


รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดสอบ

### 3.2 การประยุกต์ใช้กับโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

แบบจำลองการคืบตัวที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ และแบบจำลองฮาร์ดเดนนิง ได้ถูกนำไปเขียนเป็นโปรแกรมย่อยทางคอมพิวเตอร์ (Subroutine) ที่ถูกเรียกว่า UMAT สำหรับใช้ร่วมกับโปรแกรม ABAQUS ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมขั้นสูง โดย UMAT นี้จะเป็นส่วนที่ใช้คำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain) ของวัสดุในแต่ละเอลิเมนต์ ดังรูปที่ 5

หลักการทำงานร่วมกันระหว่างสองแบบจำลองที่นำมาใช้นี้คือ ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Strain Increment,  $\Delta\varepsilon$ ) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ ค่าความเครียดอีลาสติก



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการทำงานของ UMAT [21]

(Elastic Strain,  $\Delta\varepsilon^e$ ) และค่าความเครียดพลาสติก (Plastic Strain,  $\Delta\varepsilon^p$ ) ดังแสดงในสมการที่ 14 โดยค่าความเครียดพลาสติกนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ประเภทที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-independent Strain) จำนวนได้จากฟังก์ชันศักย์พลาสติก (Plastic Potential Function,  $g(\sigma, \varepsilon^p)$ ) ของแบบจำลองฮาร์ดเดนนิง และประเภทที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองการคืบตัวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ซึ่งค่าความเครียดพลาสติกจะถูกคำนวณโดยตรงจากการสอบเทียบค่าพารามิเตอร์กับผลการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1 ซึ่งต้องทำให้อยู่ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาดังสมการที่ (15) และ (16) และนำคุณสมบัติการไหลของพลาสติก (Flow Rule) ของ Prandtl-reuss Flow Law ดังสมการที่ (18) นำมาใช้เพื่อคำนวณหาเทนเซอร์ของค่าความเครียด (Strain Tensor) จากนั้นค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นหาได้จากสมการที่ (19)

$$\{\Delta\varepsilon'\} = \{\Delta\varepsilon^e\} + \{\Delta\varepsilon^p\} \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon}_a^c = \frac{d\epsilon_a^c}{dt} = n_a A_a(t)^{n_a-1} \quad (15)$$

$$\dot{\epsilon}_v^c = \frac{d\epsilon_v^c}{dt} = n_v A_v(t)^{n_v-1} \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon}_s^c = \frac{1}{3}(3\dot{\epsilon}_a^c - \dot{\epsilon}_v^c) \quad (17)$$

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_v^c [I] + \frac{1}{2q}\dot{\epsilon}_s^c [S] \quad (18)$$

$$\{\Delta\epsilon\} = \{\dot{\epsilon}^c\} \times \Delta t \quad (19)$$

เมื่อ  $[I]$  = Unit Tensor

$[S]$  = Deviatoric Stress Tensor

$\dot{\epsilon}_s^c$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน

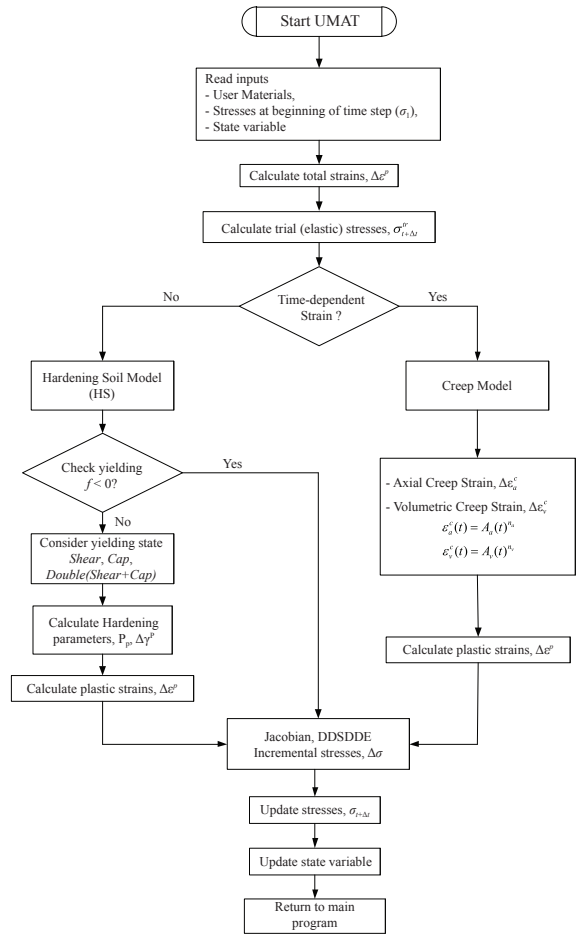
สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับแบบจำลองการคืบตัว

คือ การแบ่งช่วงระยะเวลาย่อยของการเกิดการคืบตัว  $\Delta t$  ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการคำนวณ โดยที่หากค่า  $\Delta t$  มีขนาดใหญ่เกินไปก็จะส่งผลต่อความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นมาก แต่ถ้าหาก  $\Delta t$  มีค่าน้อยเกินไปก็จะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น นอกจากนี้ค่าสถานะความเค้นที่เกิดการคืบตัวจะถูกสมมุติว่ามีค่าคงที่ตลอดการช่วงเวลาที่เกิดการคืบตัวทั้งหมด ซึ่งค่าความเครียดพลาสติกที่คำนวณได้นี้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น  $\{\sigma\}$  และสถานะค่าความเค้น  $\{\sigma^{i+1}\}$  เพื่อส่งไปยังโปรแกรมหลัก ABAQUS ต่อไปดังสมการที่ (20) และ (21)

$$\{\sigma^{i+1}\} = \{\sigma^i\} + \{\Delta\sigma\} \quad (20)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\epsilon^c\} \quad (21)$$

ลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมย่อย UMAT สำหรับแบบจำลองดินที่ทั้งสองชนิดในโปรแกรม ABAQUS ถูกแสดงในรูปที่ 6



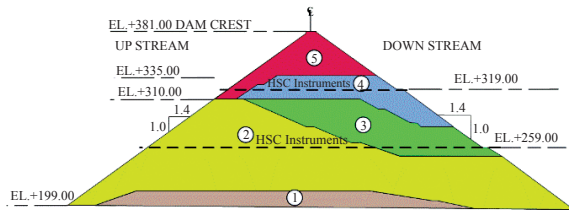
รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองดินใน UMAT

## 4. ข้อมูลเขื่อนหินถมตัวอย่างและการหาค่าพารามิเตอร์

### 4.1 ข้อมูลเขื่อนหินถมที่ใช้เป็นตัวอย่างศึกษา

เขื่อนหินถมที่นำมาเป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้คือ เขื่อนน้ำจิม 2 (Nam Ngum 2 Dam) ซึ่งเป็นเขื่อนหินถมแบบมีคอนกรีตาดหน้า (Concrete Face Rockfill Dam) ลักษณะทางกายภาพ มีความสูง 182 เมตร ความยาวสันเขื่อน 500 เมตร เก็บกักน้ำได้ 2,440 ล้านลูกบาศก์เมตร เขื่อนนี้ถูกจัดเป็นประเภทเขื่อนสูงที่ตั้งอยู่ในช่องเขาแคบ หินถมตัวเขื่อนถูกแบ่งออกเป็นส่วนตัว (Dam Zoning) ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ วัสดุหินถมหลักที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นพวกหินทราย (Sandstone) ที่มีขนาดคละ





รูปที่ 7 ลำดับการก่อสร้างและตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้

แตกต่างกันไป รูปที่ 7 แสดงลำดับขั้นตอนการก่อสร้างและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดที่ถูกเลือกนำมาพิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้ โดยที่เครื่องมือตรวจวัดที่นำมาใช้คือ เครื่องมือตรวจวัดค่าการทรุดตัว (Hydrostatic Settlement Cells, HSCs) ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ที่ระดับ 259 m.asl และ 319 m.asl

#### 4.2 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่งในงานวิจัยนี้ได้มาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนขนาดใหญ่ (Large Triaxial Test) ทำการทดสอบโดย IWHR [22] และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเคยนำไปใช้จำลองหาค่าการทรุดตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของเขื่อนน้ำจี้ม 2 [5]

ส่วนค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการคืบตัวที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้น เนื่องด้วยแบบจำลองนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของค่าความเค้นโอบล้อมที่ส่งผลต่อการคืบตัว จึงต้องอาศัยข้อมูลจากการทดสอบการคืบตัวภายใต้แรงอัดสามแกนโดยกำหนดให้ความเค้นในแนวตั้งคงที่ (Constant Axial Stress) ทดสอบจนกระทั่งการคืบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจนเกือบคงที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบขนาดใหญ่ (Large Triaxial Creep Test) ซึ่งหินที่ใช้ทำการก่อสร้างเขื่อนน้ำจี้ม 2 นั้น มิได้ถูกทำการทดสอบการคืบตัวโดยวิธีนี้ แต่อย่างไรก็ตาม โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่าภายใต้สภาวะเดียวกันนั้น หินที่ถูกจัดว่าเป็นชนิดเดียวกันให้ค่าอัตราการทรุดตัว (Strain Rate) ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำผล

การทดสอบการคืบตัวภายใต้แรงอัดสามแกนด้วยเครื่องทดสอบขนาดใหญ่จากแหล่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ [23] ดังแสดงในตารางที่ 2 ของชุดหินที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มหรือประเภทเดียวกันกับหินที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนน้ำจี้ม 2 มาทำการเปรียบเทียบโดยใช้สมการที่ (8)-(13) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการคืบตัวนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง

Parameters	Dam Zoning			
	2B	3A	3B&3D	3C&3E
$c$ (kPa)	1	1	1	1
$\phi^\circ$	42	42	42	41
$\psi^\circ$	2	2	2	1
$E_{50}^{ref}$ (kPa)	90000	85000	100000	16000
$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	90000	85000	80000	14000
$m$	0.40	0.30	0.18	0.65
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	270000	255000	300000	48000
$\nu_{ur}$	0.20	0.20	0.20	0.20
$p^{ref}$ (kPa)	100	100	100	100
$K_0$	0.33	0.33	0.33	0.34
$K_f$	0.90	0.90	0.90	0.90

ตารางที่ 2 คุณสมบัติหินถมที่นำมาทำการทดสอบการคืบตัว

Type of Rockfill	Confining Stress (MPa)	Load Condition	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cohesion	Friction Angle (degree)
Sandstone	1.5	Stress level	2.14	0	51.8
	2.0				
	3.0				

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการคืบตัว

Axial Creep	$\alpha_a$	$\beta_a$	$\eta_a$	$m_a$
		1.216E-05	1.08	0.413
Volume Creep	$\alpha_v$	$\beta_v$	$\eta_v$	$m_v$
		9.160E-05	-0.51	0.333

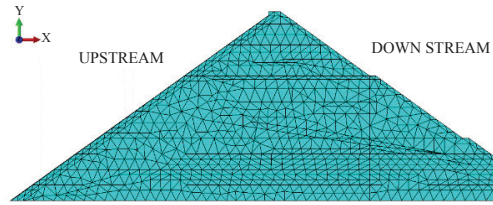
## 5. การอภิปรายผล

### 5.1 สมมุติฐานของการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เขื่อนน้ำจืด 2 ถูกนำมาวิเคราะห์โดยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไข 2 มิติ บนระนาบความเครียดของหน้าตัดเขื่อนที่กว้างที่สุด และพิจารณาให้เขื่อนมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับทรงเรขาคณิตมากที่สุด รวมทั้งไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตสดาดหน้าและฐานรากของเขื่อน ในการวิเคราะห์จะแบ่งการจำลองเขื่อน ออกเป็นสองสถานะคือ 1) สถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง โดยจะทำการจำลองให้สอดคล้องกับขั้นตอนการถมหินก่อสร้างดังรูปที่ 7 ซึ่งแบ่งการถม 21 ชั้น 2) คือสถานะกักเก็บน้ำเต็มเขื่อนครั้งแรก ทั้งนี้การวิเคราะห์จะสมมุติให้วัสดุหินถมมีพฤติกรรมการคืบตัวที่เหมือนกันตลอดทั้งตัวเขื่อน และกำหนดช่วงเวลาของการเกิดการคืบตัว (Elapsed Time) ในแต่ละชั้นของการถมและช่วงของการกักเก็บน้ำเท่ากับ 15 วัน ในส่วนการจำลองตัวเขื่อนนั้นจะถูกจำลองแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (Element) ชนิด 3-node Triangular จำนวน 2,374 ชิ้น 1,263 จุดต่อ (Node) ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการคืบตัวร่วมกับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดเขื่อนหินถมที่ก่อสร้างจริงในสนามโดยมุ่งที่จะพิจารณาถึงพฤติกรรมการคืบตัวของหินถมเป็นหลัก

### 5.2 ผลการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

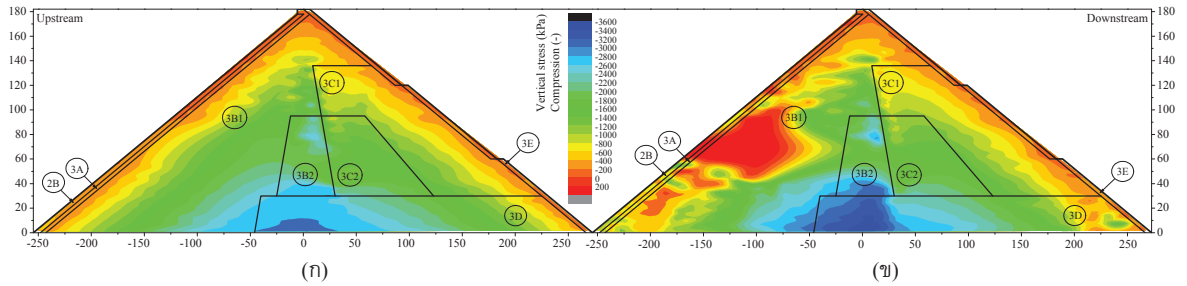
ค่าความเค้นสูงสุดและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบจำลองถูกแสดงในตารางที่ 4 ตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นในแนวตั้ง (Vertical Stress) และค่าความเค้นในแนวราบ (Horizontal Stress) สูงสุดของทั้งสองแบบจำลอง อยู่บริเวณใกล้กับฐานรากที่บริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดเขื่อนทั้งสถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง (EOC) และกักเก็บน้ำครั้งแรก (FI) แตกต่างกันที่แบบจำลองชนิดที่ขึ้นอยู่กัเวลา (HSC Model) จะให้ค่าที่สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา (HS Model) สาเหตุจากค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นของตัวเขื่อนเนื่องจากการ



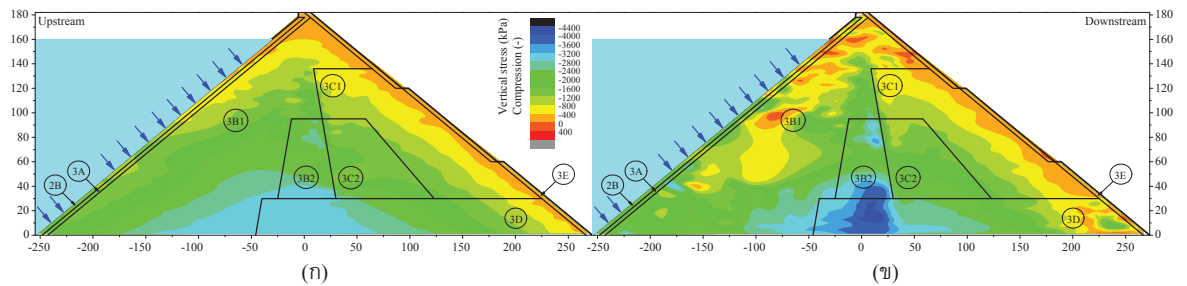
รูปที่ 8 ชิ้นส่วนย่อย (Element) ของเขื่อนหินถมจำลอง

คืบตัวของหินถม รูปที่ 9 และ 10 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นในแนวตั้งของทั้งสองแบบจำลอง ซึ่งชี้ให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าพฤติกรรมการคืบตัวของหินถมส่งผลกระทบต่อตรงต่อการวิบัติของแผ่นคอนกรีตสดาดหน้า (Concrete Face Slab) เนื่องจากเกิดค่าความเค้นดึง (Tension Stress) ที่เพิ่มขึ้นในบริเวณดังกล่าว สอดคล้องกับผลการทรุดตัวของตัวเขื่อน (Vertical Displacement) ทั้งชนิดที่ขึ้นอยู่กัเวลาและไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ที่สถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง และกักเก็บน้ำเต็มเขื่อนครั้งแรกดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ จากภาพจะเห็นได้ว่าทั้งสถานะสิ้นสุดการก่อสร้างและกักเก็บน้ำครั้งแรก แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวมากที่สุดที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบจำลองนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันและอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันนั้นคือบริเวณโซน 3C ซึ่งเป็นโซนที่อยู่ทางด้านท้ายน้ำ (Downstream) และมีค่าความแข็ง (Stiffness) ต่ำที่สุด แต่แตกต่างกันที่ขนาดของค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้จากแบบจำลองการคืบตัว จะมีค่ามากกว่าแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง โดยที่สถานะกักเก็บน้ำครั้งแรกจะมีค่าการทรุดตัวสูงที่สุดคือคิดเป็น 1.4% ของความสูงเขื่อน ในทำนองเดียวกันกับค่าการทรุดตัวตำแหน่งการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบ (Horizontal Displacement) เกิดขึ้นที่ด้านท้ายน้ำในบริเวณโซน 3C แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองการคืบตัวจะให้ค่าที่น้อยกว่าแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง สาเหตุเกิดจากค่าทรุดตัวที่มากกว่าในบริเวณเดียวกันของแบบจำลองการคืบตัว

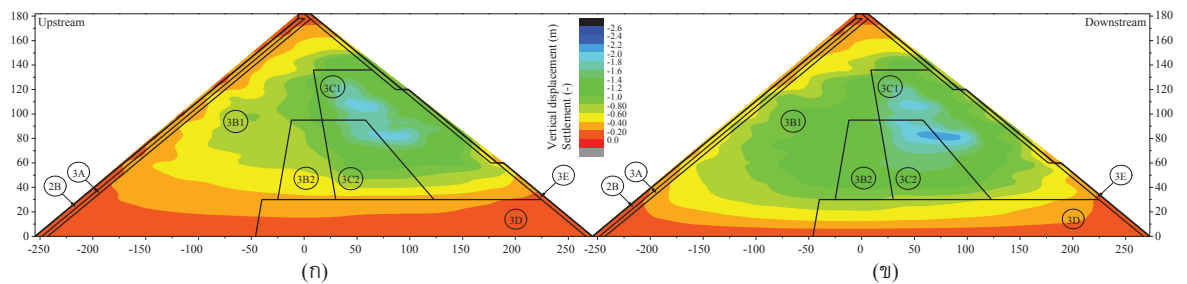
จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการคืบตัวที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถนำไปทำงานร่วมกับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่งเพื่อสะท้อนพฤติกรรมทรุดตัว



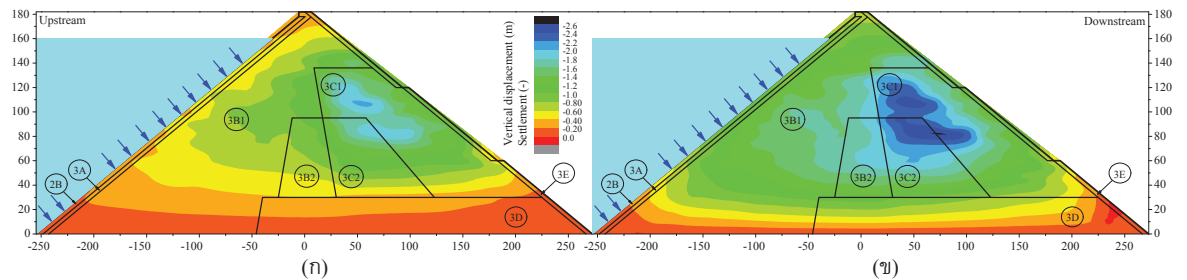
รูปที่ 9 ค่าความเค้นในแนวตั้งที่สถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง (ก) ไม่พิจารณาการคืบตัว และ (ข) พิจารณาการคืบตัว



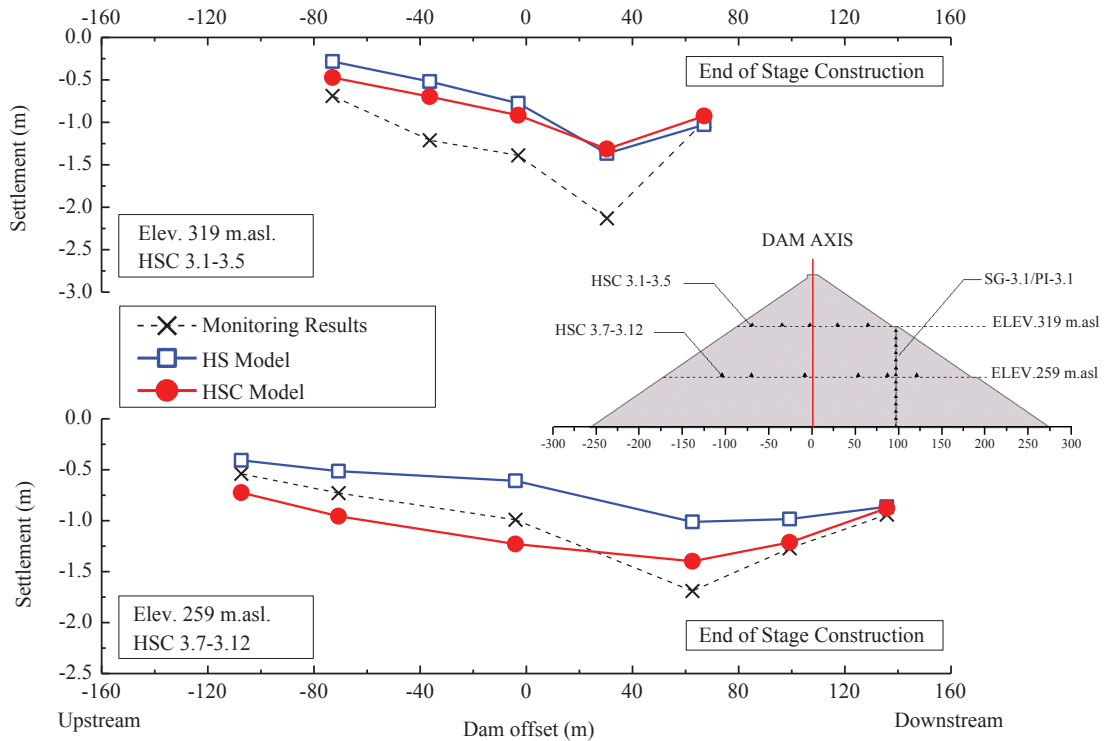
รูปที่ 10 ค่าความเค้นในแนวตั้งที่สถานะกักเก็บน้ำครั้งแรก (ก) ไม่พิจารณาการคืบตัว และ (ข) พิจารณาการคืบตัว



รูปที่ 11 ค่าการทรุดตัวที่สถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง (ก) ไม่พิจารณาการคืบตัว และ (ข) พิจารณาการคืบตัว



รูปที่ 12 ค่าการทรุดตัวที่สถานะกักเก็บน้ำครั้งแรก (ก) ไม่พิจารณาการคืบตัว และ (ข) พิจารณาการคืบตัว



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการตรวจวัดที่สถานะสิ้นสุดการก่อสร้าง

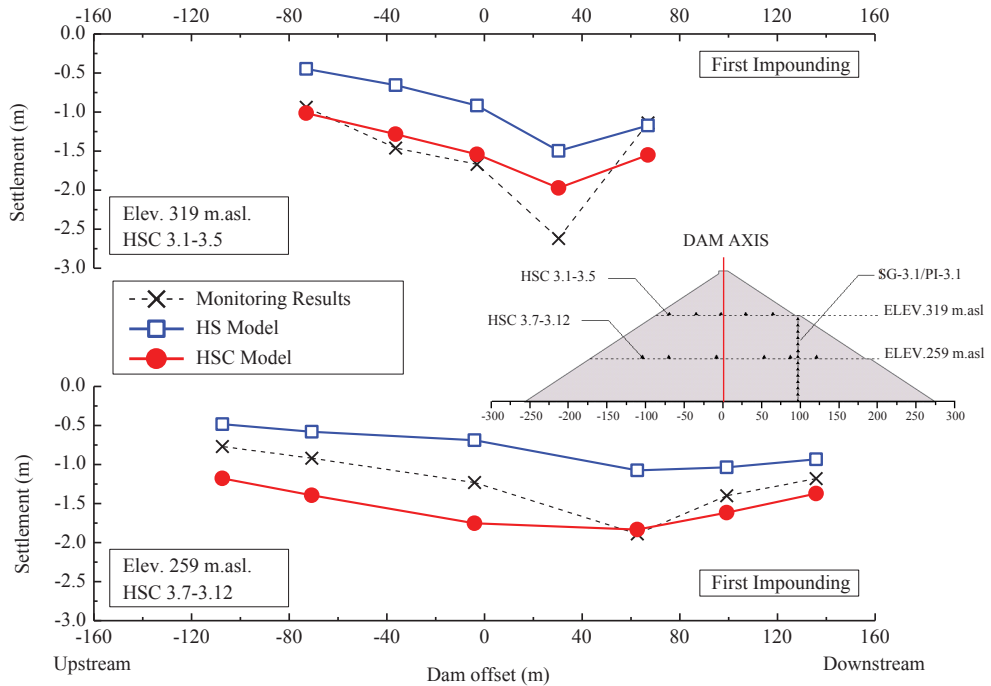
ที่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ ซึ่งโดยภาพรวมแบบจำลองการคืบตัวนี้จะส่งผลกระทบต่อขนาดของค่าความเค้นและค่าการเคลื่อนตัวที่สูงขึ้นตามระยะเวลาของการคืบตัว

ตารางที่ 4 สรุปค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์

Items	EOC		FI	
	HS Model	HSC Model	HS Model	HSC Model
Vertical Stress, (MPa)	3.147	3.511	3.488	4.299
Horizontal Stress, (MPa)	1.846	1.917	2.084	2.236
Vertical Displacement (mm)	1,922	2,086	2,027	2,598
Horizontal Displacement Towards Upstream (mm)	274	305	158	268
Horizontal Displacement Towards Downstream (mm)	1,577	634	1,719	1,055

### 5.3 การประเมินผลแบบจำลอง

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดในสนามเพื่อประเมินผลแบบจำลองปรากฏว่า แบบจำลองการคืบตัวนี้ให้ค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดจริงในสนามมากกว่าแบบจำลองฮาร์ดเดนนิงอย่างเห็นได้ชัดแสดงในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวจากผลการวิเคราะห์และการตรวจวัดจริงในสนามกับเวลา พบว่าผลจากแบบจำลองการคืบตัวมีลักษณะการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจริงมากกว่าผลจากแบบจำลองฮาร์ดเดนนิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการทรุดตัวที่ระดับ 259 m.asl จากผลการเปรียบเทียบที่ได้กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการทำงานร่วมกันที่ดีของแบบจำลองทั้งสองนี้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการทรุดตัวที่ระดับ 259 m.asl (ซึ่งอยู่ต่ำกว่า) จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดมากกว่า ค่าการทรุดตัวที่ระดับ 319 m.asl เป็นผลเนื่องจากช่วงเวลาสะสมที่ต้อง



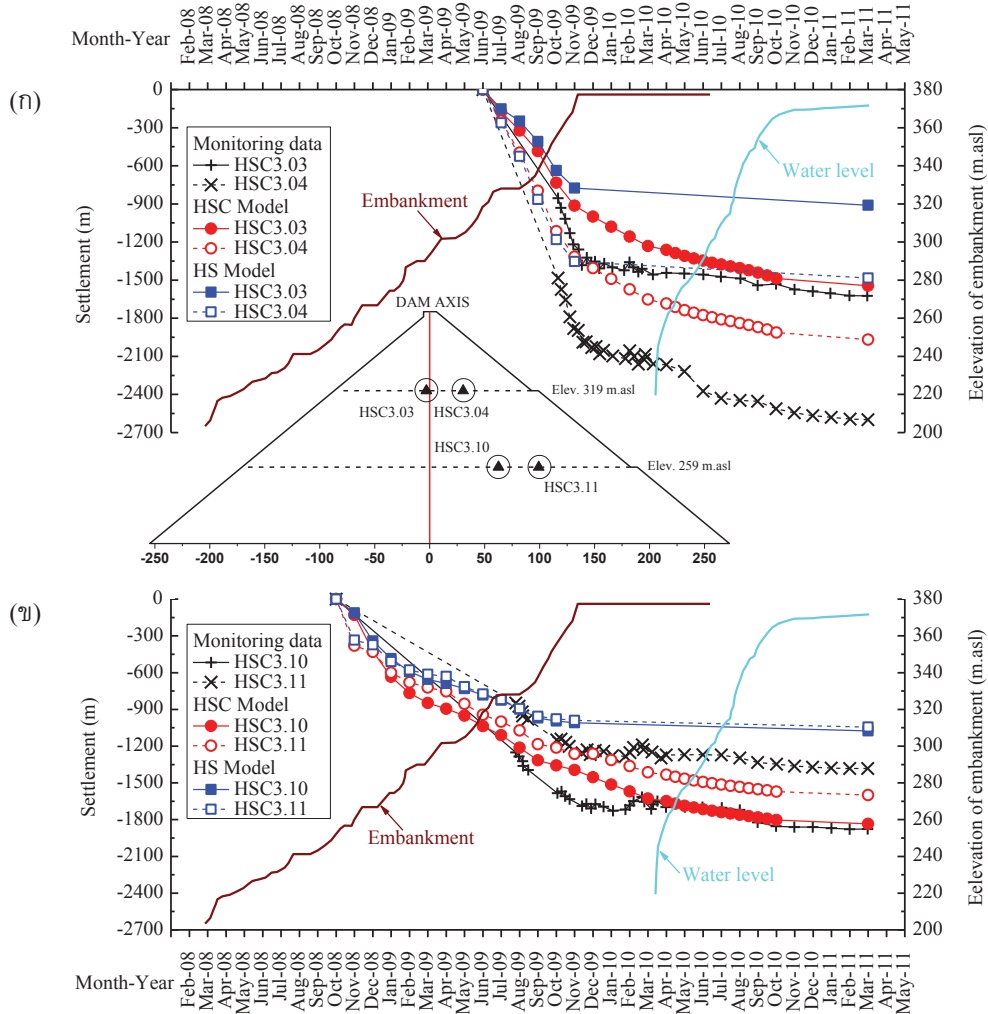
รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการตรวจวัดที่สถานะกักเก็บน้ำครั้งแรก

ใช้เพื่อคำนวณค่าการทรุดตัวในแบบจำลองการคืบตัวที่ระดับ 259 m.asl นั้นมีจำนวนมากกว่าที่ระดับ 319 m.asl ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาที่ว่าพฤติกรรมการคืบตัวของวัสดุหินถมนั้นมีอิทธิพลต่อค่าการทรุดตัวของเขื่อนหินถม

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอยู่บางประการที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ เช่น การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ซึ่งมีสมมุติฐานว่าไม่เกิดการเคลื่อนตัวในทิศทางตามแนวแกนเขื่อน แต่เขื่อนน้ำจิ่ง 2 นี้ เป็นเขื่อนที่มีรูปร่างคล้ายกับตัววี (V-Shape) จึงเป็นการเหมาะสมมากกว่าหากทำการวิเคราะห์ปัญหาเป็นแบบสามมิติ (3-Dimension) แต่ที่ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์ปัญหาเพิ่มมากขึ้นอีกหลายเท่า นอกจากนี้การแบ่งจำนวนชั้นของการถมตัวเขื่อนและการกำหนดช่วงเวลาของการคืบตัวของหินถมคืออีกตัวแปรหนึ่งซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน

## 6. สรุป

พฤติกรรมการคืบตัวของวัสดุหินถมคือปัจจัยหนึ่งของการทรุดตัวในตัวเขื่อนหินถม ที่อาจเป็นสาเหตุของการวิบัติสำหรับเขื่อนหินถมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการคืบตัวสำหรับเขื่อนหินถม โดยมีข้อสมมุติฐานว่าความความเค้นโอบล้อม (Confining Stress) และระดับของความเค้น (Stress Level) คือตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการคืบตัวของหินถม จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่งในโปรแกรม ABAQUS ด้วยการเขียนเป็นโปรแกรมย่อยทางคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า UMAT เพื่อการทำนายพฤติกรรมการทรุดตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลาของหินถม และทำการประเมินศักยภาพของการทำงานร่วมกันของแบบจำลองทั้งสองนี้โดยนำไปจำลองพฤติกรรมการทรุดตัวของเขื่อนน้ำจิ่ง 2 ที่สถานะทั้งสิ้นสุดการก่อสร้างและกักเก็บน้ำครั้งแรก จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดจริงในสนาม จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดในสนาม



รูปที่ 15 ค่าการทรุดตัวจากผลการคำนวณและผลการตรวจวัดเทียบกับเวลา

แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถทำนายค่าการทรุดตัวของเขื่อนหินถมตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากผลการตรวจวัดจริงในสนามมากกว่าผลจากแบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมการคืบตัวของหินถมนั้น ส่งผลกระทบต่อการทำนายพฤติกรรมทรุดตัวของเขื่อนหินถมอย่างมีนัยยะ ซึ่งแบบจำลองการคืบตัวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถสะท้อนพฤติกรรมเหล่านั้นได้

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยและข้อจำกัดอยู่บางประการในงาน

วิจัยนี้ที่ต้องคำนึงถึง และทำการศึกษาเพิ่มเติมได้แก่

- 1) การกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณการคืบตัว
- 2) การใช้ค่าพารามิเตอร์จากผลการทดสอบการคืบตัวของหินที่ใช้ก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม สำหรับการประเมินเชิงคุณภาพในการศึกษานี้ เพียงพอที่จะแสดงให้เห็นว่าการนำพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลามาร่วมในการวิเคราะห์ช่วยปรับปรุงความถูกต้องของการวิเคราะห์การเสียรูปของเขื่อนหินถมได้อย่างมีนัยยะ และแบบจำลองที่เลือกใช้มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้งานได้



## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (คปท.) ภายใต้สัญญาเลขที่ PHD/0006/2556 และจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Duncan and C. Y. Chang, "Nonlinear analysis of stress and strain in soils," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, vol. 96, no. 5, pp. 1629–1653, 1970.
- [2] A. Szostak-Chrzanowski, N. Deng, and M. Massiera, "Monitoring and deformation aspects of large concrete face rockfill dams," in *Proceedings 13<sup>th</sup> International Federation of Surveyors (FIG) Symposium on Deformation Measurement and Analysis*, pp. 1–10, 2008.
- [3] S. Özkuzukiran, M. Y. Özkan, M. Özyaziciođlu, and G. S. Yildiz, "Settlement behavior of a concrete faced rockfill dam," *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 24, pp. 1665–1678, 2006.
- [4] C. J. Loupasakis, B. G. Chararas, and G. C. Dimopoulos, "Evaluation of plasticity models' ability to analyze typical earth dams' soil materials," *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 27, pp. 71–80, 2009.
- [5] P. Pramthawee, P. Jongpradist, and W. Kongkitkul, "Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams," *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 325–334, 2011.
- [6] M. Jinagoolwipat, S. Soralump, and S. Prayongpun, "Modeling of settlement behaviours for concrete face rockfill dam: A case study of vajiralongkorn dam," in *The 15<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, May 12–14, Ubon Ratchathani, 2010 (in Thai).
- [7] T. Schanz, P. A. Vermeer, and P. G. Bonnier, "The hardening soil model: Formulation and verification," *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, pp. 281–96, 1999.
- [8] F. S. Shen, H. Y. Chen, and J. Z. Pan, "Deformation analysis of CFRD in water storage period," *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 73–81, 1990.
- [9] Z. K. Mi, Z. J. Shen, and G. Y. Li, "Creep model for high concrete face rockfill dams," *Hydro-Science and Engineering*, vol. 2, pp. 35–41, 2002.
- [10] X. Cai, F. Cheng, and J. G. Yang, "Rheological analysis of earth-rock dams," *Journal of Hohai University*, vol. 11, pp. 19–24, 1999.
- [11] W. Zhou, J. J. Hua, K. L. Chang, and C. B. Zhou, "Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam," *Computers and Geotechnics*, vol. 38, pp. 269–280, 2011.
- [12] B. Y. Zhang, J. G. Wang, and R. F. Shi, "Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer," *Computers and Geotechnics*, vol. 31, pp. 559–573, 2004.
- [13] Y. L. Arici, "Investigation of the cracking of CFRD face plates," *Computers and Geotechnics*, vol. 38, pp. 905–916, 2011.
- [14] L. Gan, Z. Z. Shen, and L. Q. Xu, "Long-Term deformation analysis of the judianxia concrete-



- faced rockfill dam,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 1589–1598, 2013.
- [15] Z. J. Shen and K. Z. Zhao, “Back analysis of creep deformation of rockfill dams,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 6, pp. 1–6, 1998.
- [16] A. Soriano, F. Sánchez, and J. M. Macías, “Presa Rivera de la Gata: Primer llenado,” *Revista de Obras Públicas*, vol. 139, no. 3309, pp. 169–184, 1992.
- [17] C. Athanasiu, A. S. Simonsen, O. K. Soereide, and J. Tistel, “Elastic and creep settlements of rock fills,” in *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, pp. 1837–1843, 2005.
- [18] W. Zhou, J. J. Hua, X. L. Chang, and C. B. Zhou, “Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam,” *Computers and Geotechnics*, vol. 38, pp. 26–280, 2011.
- [19] Z. L. Cheng and H. S. Ding, “Creep test for rockfill,” *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 473–476, 2004.
- [20] P. Pramthawee, C. Phutthananon, R. Sukkarak, and P. Jongpradist, “Evaluation creep models for deformation analysis of CFRD,” in *Fifth Thailand Symposium on Rock Mechanics*, January 22–23, Nakhonratchasima, Thailand, 2015.
- [21] K. Hibbit and I. Sorensen, *ABAQUS/Standard User’s Manual*, Version 6.5, USA: Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 2005.
- [22] IWHR, “Report on laboratory tests of the rockfill materials of nam ngum 2 CFRD in laos,” Department of Geotechnical Engineering, Institute of Water Resource and Hydropower Research (IWHR), China, May, pp. 1–36, 2007.
- [23] B. Cheng, “Triaxial test research on rock filling creep behavior of rock fill dam,” M.S. thesis, Beijing University of Technology, 2012.