

## การวิเคราะห์ความดันน้ำในระหว่างการก่อสร้างเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว

### The Analysis of Water Pressures during Construction Stage on Central Clay Core Rock-Fill Dams

ทิพย์วิมล แตะกระโทก<sup>1</sup> และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

E-mail: <sup>1</sup> tipwimolt\_t@hotmail.com, <sup>2</sup> soralump\_s@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

ในช่วงเวลาก่อสร้างตัวเขื่อนเป็นช่วงที่ต้องการการตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างและความปลอดภัยมากช่วงหนึ่ง โดยทั่วไปเขื่อนจะติดตั้งเครื่องมือวัดความปลอดภัยเพื่อช่วยในการก่อสร้างเสมอสำหรับเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียวที่ศึกษาอาศัยเครื่องมือวัดความดันน้ำเพียงประเภทเดียว (piezometers) พฤติกรรมของความดันน้ำในบริเวณแกนกลางเขื่อนถูกนำมาจำลองด้วยทฤษฎีของไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้การจำลองแบบ 2 มิติ, และสภาวะความไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของวัสดุ โดยจำลองการพัฒนาความดันน้ำภายใต้ขบวนการบดอัด, ขบวนการอัดตัวคายน้ำของวัสดุในบริเวณต่าง, ขบวนการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อน จากการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับขบวนการต่างๆ ดังกล่าวในช่วงนี้คือ หนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุ, พฤติกรรมของสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุ (K), ระดับ Anisotropy ที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อน, ขบวนการขั้นตอนการบดอัด (ระยะเวลาการบดอัด, ตำแหน่งที่บดอัดในตัวเขื่อน, ความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด เป็นต้น) นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังพบว่า อัตราส่วนการตอบสนองของความดันต่อความเค้น (Ru) เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมขนาดความดันน้ำในระหว่างช่วงเวลานี้ รวมถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติวัสดุที่บริเวณต่างๆ ในโครงสร้างตลอดระยะเวลาในการก่อสร้าง

**คำสำคัญ:** เขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว, ความดันน้ำ, การก่อสร้าง

#### Abstract

Dam construction period is the time that requires the dam behavior inspection and a lot of safety issues. Generally dams are always been installed with safety instruments to guide construction process. For the studied central clay core rockfill dam, safety instrument is based on pore water measurement (piezometers). Pore pressure behavior at clay core is simulated by 2 dimension finite element, unsaturated soil behavior which is simulated the development of pore pressure under compaction process, consolidation process at various locations, and seepage through dam body. The study found that the related parameter on those process are unit weight of material, behavior of coefficient of permeability (K), degree of anisotropy on dam body, compaction process (compaction time, location in each zones, compaction water content, etc.) Furthermore, the study found that water response ratio

to stress (Ru) is an important controlling factor on the magnitude of pore pressure during construction period, including to the changing process of material properties in each zones on dam structure during stage construction.

**Keywords** Central clay core rockfill dams, pore pressures, constructions

#### 1. คำนำ

การตรวจสอบความมั่นคงของเขื่อนอาศัยเครื่องมือวัดที่มักจะติดตั้งในตัวเขื่อน เช่น เครื่องมือวัดความดันน้ำ (Piezometers), เครื่องมือวัดการทรุดตัว, เครื่องมือวัดการเอียงตัวและอื่นๆ นอกจากนั้นการจำลองพฤติกรรมเขื่อนในคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมืออีกอย่างหนึ่งในการตรวจสอบที่ปฏิบัติกันเสมอ ซึ่งการจำลองจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติในสนามและในห้องปฏิบัติการ, ประเภทพฤติกรรมของวัสดุ, ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ, และอื่นๆ การจำลองนี้ทำให้สามารถอธิบายสภาวะความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ได้

ในการศึกษาเป็นการจำลองพฤติกรรมความดันน้ำในตัวเขื่อนในระหว่างการก่อสร้างซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่สำคัญที่โครงสร้างที่สร้างขึ้นในโซนต่างของตัวเขื่อนจะเริ่มทำงานประสานกันเพื่อทำหน้าที่ตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ โดยการศึกษาจะจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง (Stage constructions), จำลองระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ และสภาวะอื่นๆ ให้เหมือนจริง

#### 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

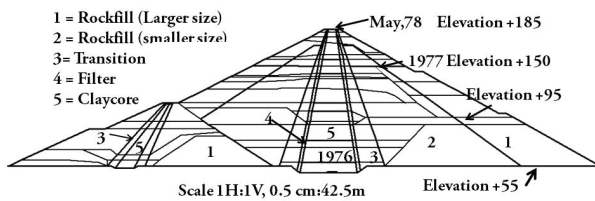
การศึกษาได้นำเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียวที่มีความสูง 140 เมตร มีแกนกลางเขื่อนเป็นดินเหนียวและมีขั้นตอนการก่อสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 รวมทั้งข้อมูลการบดอัด, การทดสอบความหนาแน่นในสนามและในห้องปฏิบัติการ มาประกอบเพื่อช่วยในการจำลองพฤติกรรมความดันน้ำในแกนกลางเขื่อนที่ถูกบันทึกไว้จากเครื่องมือวัดความดันน้ำดังแสดงในรูปที่ 2 การจำลองพิจารณาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) และอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) และการจำลองพฤติกรรมความดันน้ำในการศึกษานี้ได้เกี่ยวข้องกับสมการแม่บทของน้ำหนักและการเคลื่อนที่ (Load-deformation equation) ดังสมการที่ 1, สมการแม่บทการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน (Seepage equation) ดังสมการที่ 2

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - [D]\{m_H\}(u_a - u_w) + \{\Delta u_a\} \quad (1)$$

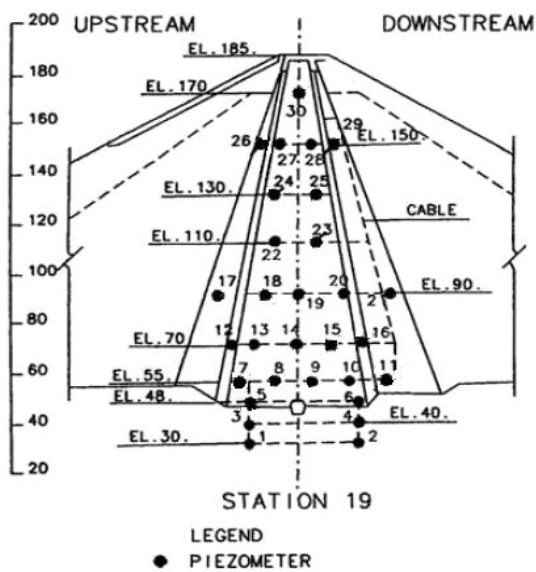
$$\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

เมื่อ [D] = เมตริกซ์ของการระบายน้ำ,  
 $\{m_H\}^T = \left\langle \frac{1}{H} \frac{1}{H} \frac{1}{H} 0 \right\rangle, H = \left( \frac{E}{1-2\nu} \right)$ , E = โมดูลัสของ

ยัง,  $\nu$  = Poisson's ratio,  $k_x, k_y$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำในแนวแกน x และ y ตามลำดับ,  $u_w$  = ความเร็วในการไหลซึม (seepage velocity),  $\gamma_w$  = หนึ่งหน่วยน้ำหนักของน้ำ,  $\theta_w$  = the volumetric water content และ t = เวลา

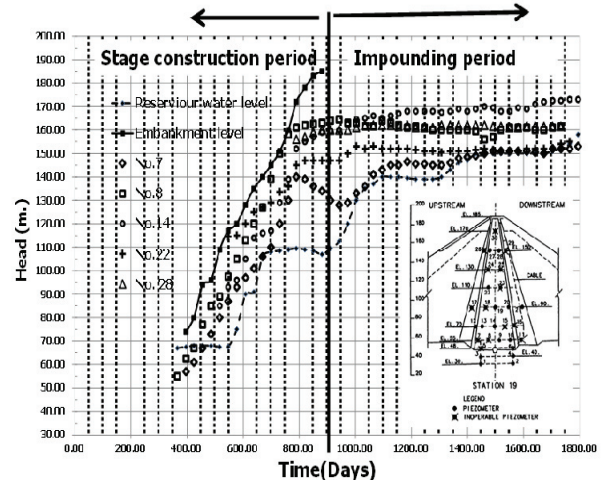


รูปที่ 1 ชั้นตอนการก่อสร้างเขื่อน



รูปที่ 2 ตำแหน่งเครื่องมือวัดความดันน้ำ

การจำลองความดันน้ำเริ่มมาจากการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความดันน้ำในช่องว่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแกนกลางเขื่อนดินเหนียว ต่อมาได้ใช้การทดลองผิดถูก (Trial & Error method) ในการเลือกพารามิเตอร์เหล่านั้น โดยมีข้อมูลที่บันทึกในสนามแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความดันน้ำที่บันทึกในระหว่างการก่อสร้างและช่วงเก็บกักน้ำ

ตัดแปลงมาจาก : Champa S, Mahatharadol B. Construction of Srinagarind dam. Commission Internationale, 1982 Q.55 R.15

เนื่องจากเครื่องมือวัดความดันน้ำที่ถูกบันทึกไว้ในตำแหน่งแกนกลางเขื่อนมีทั้งหมด 5 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง ณ. บริเวณความสูง +55 มีทั้งหมด 2 เครื่องคือ no. 7 และ no. 8 ซึ่งการจำลองเริ่มมาจากการเลือกจำลองความดันน้ำในตำแหน่ง no. 8 ที่อยู่ใกล้แกนกลางของเขื่อนมากกว่า no. 7 ส่วนเครื่องมือวัดความดันน้ำในบริเวณ Transition และ บริเวณหิน ไม่สามารถบันทึกไว้ตลอดระยะเวลาในการก่อสร้าง ทางผู้วิจัยจึงจำลองพฤติกรรมของวัสดุบริเวณ shell เป็นวัสดุระบายน้ำได้เต็มประสิทธิภาพหรือมีความดันน้ำในช่องว่างเป็นศูนย์ซึ่งหมายความว่าไม่เกิดความดันน้ำส่วนเกินในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งในทางปฏิบัติความดันน้ำในบริเวณ shell นี้สามารถตรวจวัดได้แต่มีขนาดเล็ก

### 3. พฤติกรรมของวัสดุ

เขื่อนหินแกนดินเหนียวที่ใช้ศึกษามีการเก็บบันทึกข้อมูลอย่างละเอียดตลอดระยะเวลาในการก่อสร้างทำให้คณะผู้วิจัยสามารถกำหนดคุณสมบัติในแบบจำลองได้แต่พารามิเตอร์บางชนิดให้ช่วงขนาดค่อนข้างแปรผันตามตำแหน่งความลึกของเขื่อนจึงทำให้การจำลองต้องกำหนดพารามิเตอร์ในรูปของฟังก์ชันดังแสดงในตารางที่ 1

### 4. ผลการศึกษา

ข้อมูลความดันน้ำที่บันทึกได้มาจากเครื่องมือวัดความดันน้ำที่ระดับความสูง +55, +70, +110, และ +150 เมตรสูงกว่าน้ำทะเลปานกลางรวมจำนวนเครื่องมือทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ เครื่องมือวัด no. 7 (elevation +55), no. 8 (elevation +55), no.14 (elevation +70), no. 22 (elevation +110), และ no. 28 (elevation +150) ซึ่งเครื่องมือแต่ตำแหน่งถูกวางอยู่ในแกนกลางเขื่อน (รายละเอียดของตำแหน่งเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2) พร้อมกับการก่อสร้างโครงสร้างเขื่อน เวลาเริ่มต้นที่เครื่องมือเหล่านี้เริ่มวัดความดันน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ผลการจำลองความดันน้ำดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุประกอบสันเขื่อน

Zone	odel	E (kPa)	C (kPa)	$\phi$	$\mu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Psi$	K <sub>unsat</sub> ( $\sigma'$ )
Central clay cores	EP	f ( $\sigma'$ )	43	20	0.35	19-20	0	รูปที่ 4*
Filters	EP	f ( $\sigma'$ )	0	35	0.3	20	5	รูปที่ 4*
Tran sitions	EM	f ( $\sigma'$ )	0	45	0.3	22	5	รูปที่ 4*
Rock-fills	EM	f ( $\sigma'$ )	0	45	0.25	20-23	5	รูปที่ 4*

หมายเหตุ: EP = Elastic-Plastic behavior, EM = Elastic behavior with fully drain,  $f(\sigma')$  = function of effective stress.,  $\phi$  = Friction angle,  $\mu$  = poisson's ratio, and  $\gamma$  = unit weight,  $\Psi$  = dilation angle, C = cohesion, และ รูปที่ 4\* = Soil water characteristic curve แสดงในรูปที่ 4 โดยวิธีปรับค่า Ksat (saturated permeability coefficient)

### 5. ความดันน้ำในระหว่างการก่อสร้าง

ข้อมูลความดันน้ำที่บันทึกได้มาจากเครื่องมือวัดความดันน้ำที่ระดับความสูง +55, +70, +110, และ +150 เมตรสูงกว่าน้ำทะเลปานกลาง รวมจำนวนเครื่องมือทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ เครื่องมือวัด no. 7 (elevation +55), no. 8 (elevation +55), no.14 (elevation +70), no. 22 (elevation +110), และ no. 28 (elevation +150) ซึ่งเครื่องมือแต่ตำแหน่งถูกวางอยู่ภายในแกนกลางเขื่อน (รายละเอียดของตำแหน่งเครื่องมือแสดงได้ดังรูปที่ 2) พร้อมกับการก่อสร้างโครงสร้างเขื่อน เวลาเริ่มต้นที่เครื่องมือเหล่านี้เริ่มวัดความดันน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ผลการจำลองความดันน้ำดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

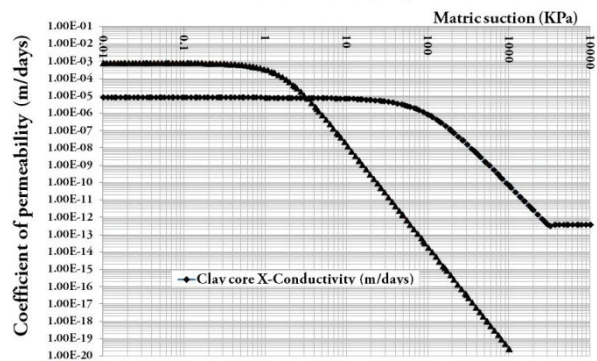
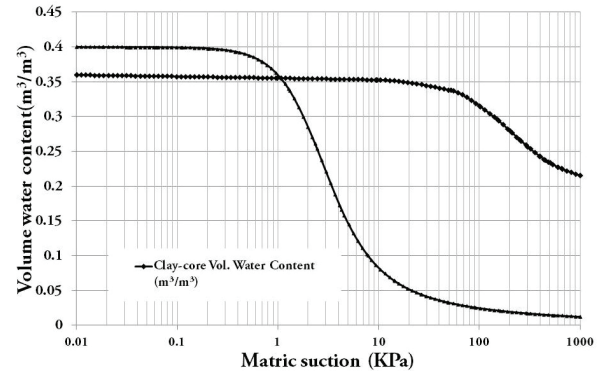
การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความดันน้ำพบว่า พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (Ksat), ระดับ Anisotropy (Ky/Kx), หนึ่งหน่วยน้ำหนัก, อัตราการตอบสนองของความดันน้ำต่อน้ำหนักกระทำ ( $R_u = \Delta u / \Delta \sigma$ ), และ Soil water characteristic curve (SWCC) แต่การจำลองพบว่าความดันน้ำในช่องว่างในแบบจำลองมีค่าเป็นบวกและพบว่าความดันน้ำเฉพาะบริเวณผิวบนของแต่ละชั้นที่บดอัดมีค่าเป็นลบ ถึงอย่างไรก็ดีขนาดของ

ความดันน้ำที่เป็นลบมีขนาดต่ำ หรือในบางช่วงเวลาไม่เกิดความดันน้ำที่ติดลบในการจำลอง, ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระดับ Anisotropic ใช้ขนาดอัตราส่วนระหว่าง  $K_y/K_x$  เท่ากับ 0.25 โดยขนาดดังกล่าวได้มาจากการ Trial&Error ตลอดช่วงเวลาที่ก่อสร้าง

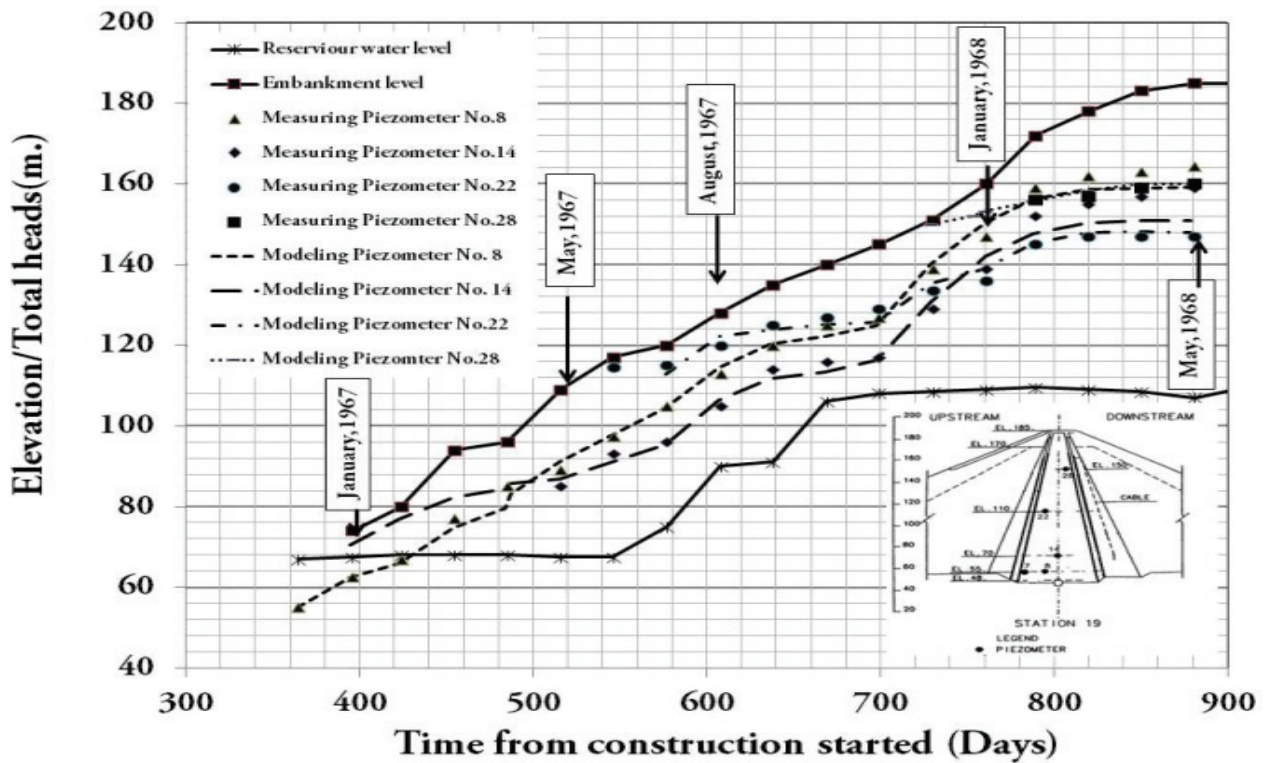
### 5.1 การดำเนินการจำลอง

ลักษณะโดยรวมของความดันน้ำในแบบจำลองและเครื่องมือวัดสอดคล้องกันหรือในบางเวลาการจำลองความดันน้ำได้ค่าเดียวกับเครื่องมือวัดในสนามแต่มีบางช่วงเวลาเครื่องมือวัดและผลการจำลองมีขนาดแตกต่างกันมากถึง 5 เมตร ในช่วงที่เกิดความแตกต่างของความดันน้ำจะเกิดขึ้นบริเวณเครื่องมือตรวจวัด ณ. ระดับ +55 และ ระดับ +70 ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถทำให้ระดับความดันน้ำในแบบจำลองและเครื่องมือวัดเท่ากันได้

#### Soil water characteristic curve



รูปที่ 4 Soil water characteristic curve (SWCC) (a) แกนกลางเขื่อน (b) ชั้นกรอง ที่มา : Gao et al., (2008)

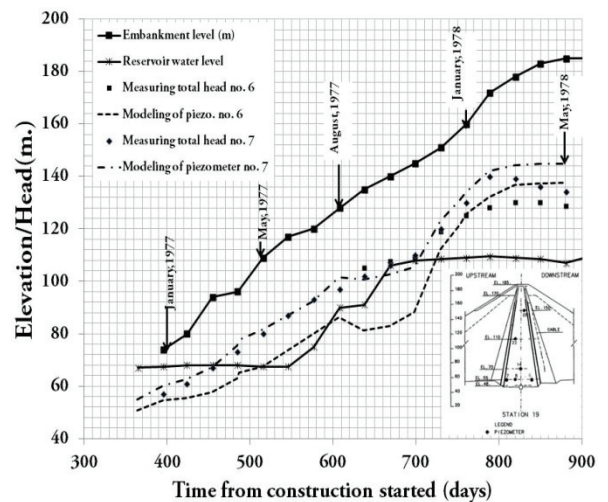


รูปที่ 5 การพัฒนาความดันน้ำในระหว่างการก่อสร้างจากเครื่องมือวัดความดันน้ำและแบบจำลอง

คัดแปลงมาจาก : Champa S, Mahatharadol B. Construction of Srinagarind dam. Commission Internationale, 1982 Q.55 R.15

ตั้งได้กล่าวมาแล้วว่าเครื่องมือวัดความดันน้ำ ณ ตำแหน่ง no. 7 (Ele.+55) ไม่ได้ถูกเลือกเพื่อใช้ในการจำลองเมื่อน้ำผลของความดันน้ำ ณ ตำแหน่งของ no. 7 มาตรวจสอบกับค่าที่วัดได้สนามพบว่าในช่วงตั้งแต่เริ่มวัดค่าจนกระทั่งถึงช่วงเดือนมกราคม 2521 ซึ่งในบางช่วงค่าขนาดความดันน้ำมีขนาดเท่ากับค่าที่วัดได้ในสนาม ซึ่งลักษณะการจำลองแบบนี้สามารถตรวจสอบพฤติกรรมของเขื่อนได้ดังแสดงในรูปที่ 6 ส่วนในช่วงปลายของการก่อสร้าง (มกราคม 2521 ถึง มิถุนายน 2521) พฤติกรรมของความดันน้ำในแบบจำลองแตกต่างจากความดันน้ำที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 6

การจำลองความดันน้ำมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปรดังได้กล่าวมาแล้วดังนั้นการจำลองขนาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำเพื่อให้ได้ตามขนาดและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงจากเครื่องมือวัดจำเป็นต้อง Trail&Error เป็นชุดข้อมูล เช่น สมมติให้  $\gamma$  คือ หน่วยน้ำหนัก,  $K_{sat}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ,  $R_u$  คืออัตราการตอบสนองของความดันน้ำต่อความเค้น จะได้ การทดลองครั้งที่ 1 (Test 1) มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คือ ( $K_{sat1}, R_{u1}, \gamma_1, \dots$ ), การทดลองครั้งที่ 2 มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คือ ( $K_{sat2}, R_{u2}, \gamma_2, \dots$ ) โดยการเลือกพารามิเตอร์ครั้งที่ 2 จะตรวจสอบจากผลของความดันน้ำที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งในการได้มาซึ่งค่าความดันน้ำขนาดหนึ่งๆ ในช่วงเวลานั้นต้องเกิดจากการทดลองผิดถูกมากกว่า 1 ครั้งถึงจะได้ชุดพารามิเตอร์ในแต่ละขั้นตอน จากขบวนการดังกล่าวทำให้ทราบว่าวัสดุในโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



รูปที่ 6 ความดันน้ำ บริเวณ no. 6 และ no. 7 จากเครื่องมือวัดความดันน้ำและแบบจำลอง

การจำลองความดันน้ำยังพบว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการตอบสนองของความดันน้ำต่อความเค้นที่เพิ่มขึ้น ( $R_u$ ) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง เป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมและกำหนดขนาดความดันน้ำเป็นอย่างยิ่ง

## 6. สรุปผลการศึกษา

การจำลองโดยใช้พฤติกรรมวัสดุแบบสภาวะอีลาสติก-พลาสติก พร้อมการกำหนดสภาวะ un-saturated ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการจำลองความดันน้ำในเขื่อนหินแกนดินเหนียวได้ พบความแตกต่างระหว่างความดันน้ำในแบบจำลองและค่าที่วัดได้สูงสุดในช่วงปลาย มกราคม 2521 ถึง มิถุนายน 2521) ของการก่อสร้าง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generation Authority of Thailand, EGAT) และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Geotechnical Engineering Research and Development Center, GERD) ที่สนับสนุนงานวิจัยในด้านเงินทุน และข้อมูลทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H.C. Benson, H. Zhai, and X. Wang. "Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE., pp. 366-387, February, 1994.
- [2] S. Champa. "Foundation treatment and grouting work for Srinagarind dam." *Hydro-Electric Construction Department*, September, 1978.
- [3] S. Champa, and B. Mahatharadol. "Construction of Srinagarind dam" *Commission Internationale*, 1982, pp. 265-278.
- [4] C. Chaovavanich. "Dam measurement information of Srinagarind dam" *Hydro-Electric Construction Department, Electric generation authority of Thailand*, September 23, 1977.
- [5] L.M. Costa, E.E. Alonso. "Predicting the Behavior of an Earth and Rock-fill Dam under Construction" *Jornal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE., July. pp. 862-851. 2009.
- [6] G. Hunter, and R. Fell. "The deformation behaviour of embankment dams", *UNICIV Report No. R-416*, 2003.
- [7] Y. Kohgo, A. Takahashi, and T. Suzuki. "Evaluation method of dam behavior during construction and reservoir filling" *Long term behavior of Dams*, 2009. p. 204-199.
- [8] L. Pagano, S. Sica, and A. Desideri. "Representativeness of measurements in the interpretation of earth dam behaviour." *Canadian Geotechnical Journal*. 43, pp. 99-87. 2006.
- [9] J. Sherard, R.J. Woodward, S.F. Gizienski, and W.A. Clevenger. *Earth-Rock Dams*. John Wiley and Sons, Inc., 1963, pp. 200-243.
- [10] S. Soralump, C. Thongthamchart, and V. Chaisakaew. "30 Years Instrumentation Behavior of Srinagarind Dam and Analysis of Warning Criteria" *Long term behavior of Dam*, 2009. pp. 876-871.