

พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีตจากการวิเคราะห์เครื่องมือวัดพฤติกรรมระหว่างการก่อสร้างและเก็บน้ำครั้งแรก : กรณีศึกษาเขื่อนแควน้อย

Instrumentation Deformation Behaviors of Concrete Face Rockfill Dam

During Construction and First filling : Case of Khwae Noi Dam

ภูซงค์ สุวรรณปากแพรก (Puchong Suwanpakprak)¹

สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์ (Suttisak Soralump)²

¹นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (s.puchong@yahoo.com)

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (soralump_s@yahoo.com)

บทคัดย่อ : เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต มีความสูงเขื่อน 75 เมตร เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนแควน้อยแบ่งได้ 3 กลุ่มตามพฤติกรรมทางวิศวกรรมเขื่อนคือ 1. กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวของเขื่อน 2. กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคาน้ำ 3. กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมการไหลซึม จากการศึกษพบว่าพฤติกรรมทรุดตัวของเขื่อนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการก่อสร้างได้แก่ ช่วงเวลาระหว่างการถมบดอัดหิน การผันน้ำระหว่างการก่อสร้าง ก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคาน้ำ ก่อสร้างกำแพงกันคลื่น (Wave wall) และเริ่มเก็บน้ำ ช่วงระหว่างการก่อสร้างหินถมมีการทรุดตัวมากที่สุดที่ตำแหน่ง HS5 (+96.00) เท่ากับ 1.807 เมตร ช่วงเวลาก่อสร้างเขื่อนเสร็จมีการทรุดตัวมากที่สุดที่ตำแหน่ง HS5 เท่ากับ 1.935 เมตร ค่าการทรุดตัวหลังจากก่อสร้างกำแพงกันคลื่นเสร็จมีอัตราการทรุดตัวน้อย และเมื่อเริ่มเก็บน้ำพบว่ามีการทรุดตัว เท่ากับ 1.944 เมตร ข้อมูลจากการทรุดตัวของหินถมนี้นำไปวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของหินถมซึ่งมีค่าประมาณ 3.50-27.21 MPa พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคาน้ำจากผลเครื่องมือวัด 1. Inclinometer มีค่าการโก่งตัวมากที่สุดเท่ากับ 450 มม. ณ บริเวณหน้าตัดลึกที่สุด 2. Joint Meter พบว่า JM2 แนวกลางลำน้ำมีการเคลื่อนตัวเข้าหากันและ JM1, JM3 แนวริม Abutment ทั้งสองข้างมีการเคลื่อนตัวออกจากกัน 3. Perimetric Joint Meter พบว่าการเคลื่อนตัวในแนว Opening, Normal to Perimetric Joint มีค่าการเคลื่อนตัวออกจากกัน ทั้ง 3 แนวโดยมีค่าสูงสุด PM2=4.58 มม., PM5=8.14 มม. และ PM8=2.28 มม. ค่าการเคลื่อนตัวของรอยต่อๆของแผ่นคอนกรีตสูงสุดที่ยอมให้มีค่าไม่เกิน 4 ซม. ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตคาน้ำมีค่าประมาณไม่เกิน 363×10^{-6} ซึ่งปกติความเครียด (Strain) ของคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกิน 0.0033 ดังนั้นแผ่นคอนกรีตคาน้ำไม่มีแนวโน้มที่จะแตกร้าวในขณะที่ตรวจวัด

Abstract : Khwae Noi Dam is concrete face rockfill dam with a height 75 meter. Instrumentation behavior Dam is divided into 3 groups to behavioral engineering of dam. 1. the measure of dam behavior settlement. 2. the measure of displacement behavior of concrete face slab. 3. the measurement behavior seepage. The study found that the behavior of settlement is associated with dam construction, including time Time during . The during construction of rockfill, the diversion during construction , construction of concrete concrete face slab, construction of wave wall and first filling. During the construction have maximum settlement of rockfill positions HS5 (+96.00) equal to 1.807 meters, dam construction period is complete maximum settlement HS5 position value equal to 1.935 meters settlement after construction of wave wall have low settlement rate and first filling found the settlement is equal to 1.944 meter. Data from the settlement of rockfill used to analyze the construction modulus of rockfill estimated 3.50-27.21 MPa. Displacement behavior of concrete face slab of the instrumentation. 1. Inclinometer the value of deflection equal to 450 mm. 2. Joint meter found that most middle river JM2 vertical movement converge and JM1, JM3 vertical abument are moving away from each other 3. Perimetric Joint Meter found that the vertical movement. Opening, Normal to Perimetric Joint value movements from both line 3 with maximum PM2 = 4.58 mm, PM5 = 8.14 mm and PM8 = 2.28 mm, the value of movement of boundaries concrete face slab that allow the maximum value less than 4 cm. The strain occurs in concrete face slab has estimated that up to 363×10^{-6} , normal strain of concrete must be less than 0.0033, the concrete face slab are unlikely to crack.

Keyword : Concrete Face Rockfill Dam, CFRD, Dam Instrumentation, Dam Behavior

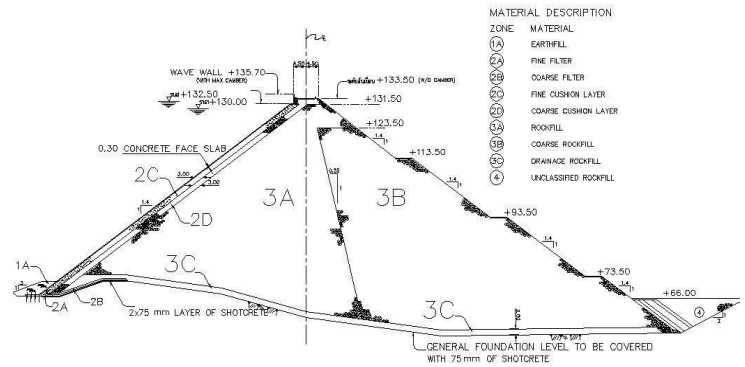
1. บทนำ

โครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นโครงการอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ตั้งอยู่อำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยอยู่ภายใต้การดูแลของกรมชลประทานซึ่งได้ว่าจ้างกลุ่มบริษัทที่ปรึกษาในการออกแบบและควบคุมงาน ประกอบด้วย บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด บริษัท พี แอนด์ ซี แมนเนจเม้นท์ จำกัด และ บริษัท ริชอสส์ เอนจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด และได้ว่าจ้างผู้รับจ้างในการก่อสร้างเขื่อน ได้แก่ กิจการร่วมค้ายูบีซี เพาเวอร์ ซึ่งประกอบด้วย บริษัท ยูเนี่ยน อินฟาร์เทค จำกัด บริษัท บางกอกมอเตอร์ อีควิพเม้นท์ จำกัด และบริษัท เพาเวอร์-พี จำกัด (มหาชน) ตัวเขื่อนในโครงการเขื่อนแควน้อยประกอบด้วย 3 เขื่อนติดต่อกัน ได้แก่ 1. เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคอนกรีตคานหน้า (Concrete Face Rockfill Dam, CFRD) 2. เขื่อนสันตะเคียนเป็นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว (Earth Core Rockfill Dam) และ 3. เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Earth fill Dam) เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว[1] แสดงในภาพที่ 1 แสดงรูปเขื่อนห้วงาน

เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคานหน้าคอนกรีต มีความกว้างสันเขื่อน 9 เมตร มีความยาวสันเขื่อน 570 เมตร ความสูงเขื่อน 75 เมตร ระดับสันตัวหินถมอยู่ที่ระดับ + 133.50 ม.รทก. มีกำแพงคอนกรีตกันคลื่น (Wave Wall) วางอยู่บนสันเขื่อนด้านเหนือน้ำสูง 2 เมตร ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ 1:1.4 (ดิ่ง:ราบ) ลาดท้ายเขื่อนมี Berm ทุกช่วงความสูง 20 เมตร มีความกว้าง 6 เมตร ก่อสร้างโดยใช้หินถมชนิด Sandstone ความหนาของแผ่นคอนกรีตคานหน้า เท่ากับ 0.30-0.56 ม.ภาพที่ 2 [1] แสดงรูปหน้าตัดเขื่อนแควน้อย



ภาพที่ 1 รูปเขื่อนห้วงาน (กรมชลประทาน 2545) [1]



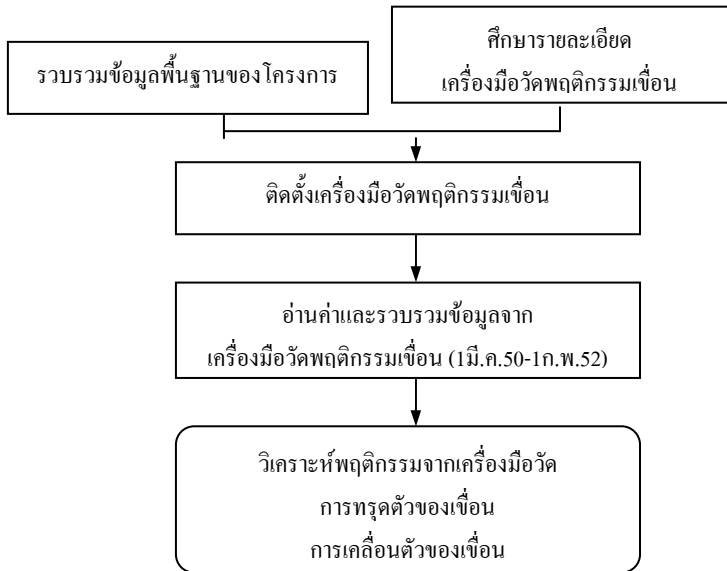
ภาพที่ 2 รายละเอียดส่วนประกอบเขื่อนแควน้อย(กรมชลประทาน 2545) [1]

1. วัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินการ

ในการศึกษาพฤติกรรมเขื่อนแควน้อย(CFRD)จากเครื่องมือวัดมีขั้นตอนการดำเนินดังแสดงในภาพที่ 3 โดยเริ่มจากรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของโครงการซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับขนาดรูปร่าง ตำแหน่งต่างๆของตัวเขื่อนและขั้นตอนวิธีก่อสร้างการถมบดอัดตัวเขื่อนซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลการก่อสร้างจริง ศึกษารายละเอียดเครื่องมือวัด โดยแบ่งกลุ่มเครื่องมือวัดออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะพฤติกรรมที่ตรวจวัด คือ กลุ่มวัดการทรุดตัว กลุ่มวัดการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า และกลุ่มวัดการไหลซึมของน้ำภายในตัวเขื่อน ผู้เขียนได้ติดตามพฤติกรรมเครื่องมือวัดทั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างและเสร็จสิ้นการก่อสร้างเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงภายในตัวเขื่อน ซึ่งเป็นข้อมูลที่แสดงถึงความปลอดภัยของตัวเขื่อน สำหรับเขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคานหน้าคอนกรีต ซึ่งเป็นเขื่อนที่ก่อสร้างได้รวดเร็วแต่เขื่อนประเภทนี้มักพบปัญหาการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยแตกของแผ่นคอนกรีตคานหน้า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่รองรับแผ่นคอนกรีต เช่น เกิดการทรุดตัวของหินถมมากเกินไป ดังนั้นความยืดหยุ่นและค่าความแข็งแรงของหินถมตัวเขื่อนจึงมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเคลื่อนตัวของเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีแรงดันน้ำมากระทำอันจะนำไปสู่การแตกของแผ่นคอนกรีต

บทความนี้จึงเน้นพฤติกรรมทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของเขื่อนจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมในช่วงระหว่างการก่อสร้างและเริ่มเก็บน้ำ โดยข้อมูลจากการทรุดตัวของหินถมนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของหินถมเพื่อนำไปวิเคราะห์การทรุดตัวของหินถมที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ผู้เขียนจะได้ดำเนินการวิจัยต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมทรุดตัวของหินถมมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคานหน้าและมี

ความสัมพันธ์กับขบวนการก่อสร้างเขื่อน เช่น การให้น้ำขณะบดอัด ความสูงของการบดอัดและการผันน้ำระหว่างการก่อสร้าง การเข้าใจพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเขื่อน CFRD ย่อมจะทำให้การก่อสร้างเขื่อนมีความถูกต้องและส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในอนาคต



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ

2. เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนแควน้อย

เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดประสิทธิภาพและพฤติกรรมของฐานรากและตัวเขื่อนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งหากทำการติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่เหมาะสมร่วมกับการแปลผลที่ถูกต้องจะช่วยให้สามารถบ่งชี้ถึงสถานะความปลอดภัยเขื่อนหรือแสดงสิ่งผิดปกติที่พฤติกรรมบางอย่างไม่สามารถประเมินได้ด้วยตาเปล่า เช่น ค่าแรงดันน้ำ ค่าการเคลื่อนตัวที่ผิดปกติ ฯลฯ [2]

เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนแควน้อยแบ่งได้ 3 กลุ่มตามพฤติกรรมทางวิศวกรรมเขื่อนคือ

1.กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวของเขื่อน ได้แก่ Hydrostatic Settlement Gauge, Crest Settlement point และ Surface Settlement point

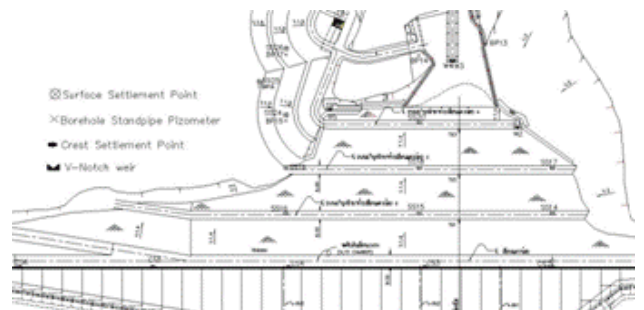
2.กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า ได้แก่ Inclinator, Permetric Joint Meter Joint Meter, Strain Meter และ Non-Stress Strain Meter

3.กลุ่มตรวจวัดพฤติกรรมการไหลซึม ได้แก่ V-Notch weir และ Borehole Standpipe Piezometer

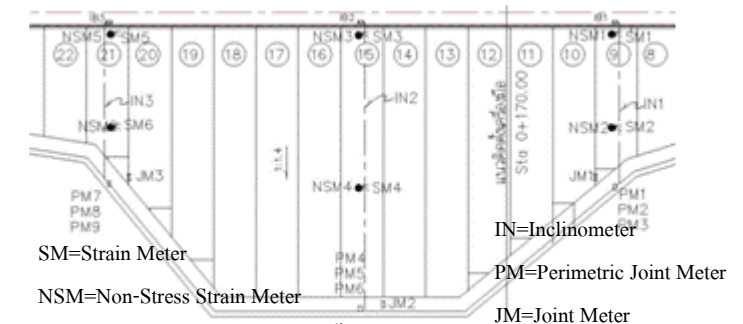
จำนวนเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนแควน้อยที่ติดตั้งทั้งหมดมี 10 ชนิด จำนวน 68 ตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 1 และตำแหน่งเครื่องมือวัดพฤติกรรม แสดงดังในภาพที่ 4-6

ตารางที่ 1 จำนวนเครื่องมือวัดเขื่อนแควน้อย

กลุ่มพฤติกรรม	เครื่องมือวัดพฤติกรรม	จำนวน	ตำแหน่งติดตั้ง	วัตถุประสงค์การวัด
การทรุดตัวเขื่อน	Hydrostatic Settlement Gauge	9	หินถมตัวเขื่อน	วัดการทรุดตัวของหินถม
	Crest Settlement point	6	บนกำแพงกันคลื่น	วัดการทรุดตัวของสันเขื่อน
	Surface Settlement point	13	ถนนที่เขื่อน	วัดการทรุดตัวของลาดเขื่อน
การเคลื่อนตัวของ	Inclinometer	3	บนคอนกรีตคานหน้า	การโค้งตัวของแผ่นคอนกรีต
	Permetric Joint Meter	3	รอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต	การเคลื่อนตัวของรอยต่อ
แผ่นคอนกรีตคานหน้า	Joint Meter	3	รอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต	การเคลื่อนตัวของรอยต่อ
	Strain Meter	6	ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีต	ความเครียดในแผ่นคอนกรีต
	Non-Stress Strain Meter	6	ใต้ชั้นแผ่นคอนกรีต	ความเครียดใต้แผ่นคอนกรีต
	V-Notch weir	4	พื้นที่ด้านหน้า	ปริมาณการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน
การไหลซึม	Borehole Standpipe Piezometer	9	พื้นที่ด้านหน้า	ระดับน้ำใต้ดิน



ภาพที่ 4 ตำแหน่งของเครื่องมือวัดตลอดความยาวเขื่อน [1]



ภาพที่ 5 ตำแหน่งเครื่องมือวัดที่ติดตั้งบนแผ่นคอนกรีตคานหน้า [1]



ภาพที่ 6 หน้าตัดวิกฤตเขื่อนที่ติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัว [1]

4. ผลและการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อนแควน้อย

4.1 เครื่องมือวัดการทรุดตัวของหินถมเขื่อน

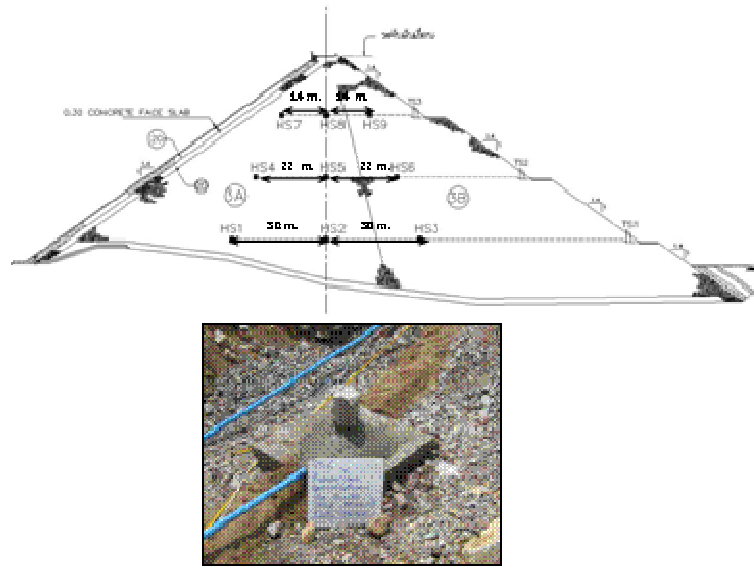
พฤติกรรมการทรุดตัวของเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีตเป็นพฤติกรรมสำคัญซึ่งหากเกิดการทรุดตัวของหินถมมากเกินไปก็ทำให้แผ่นคอนกรีตคาน้ำแตกร้าว รอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตชำรุดหรืออาจทำให้รอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตกับคอนกรีตฐานยัน (Plinth) ชำรุดทำให้เกิดการรั่วซึมผ่านชั้นที่บ้น้ำเข้ามาในตัวเขื่อนได้ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัว ได้แก่ ชนิดของหินถม, ปริมาณน้ำฝน, ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อน (บางกรณี) ความสูงของการบดอัด และหน่วยแรงจากน้ำหนักของตัวเขื่อน

การวิเคราะห์การทรุดตัวประกอบด้วยวิเคราะห์ข้อมูลการทรุดตัวของหินถมภายในตัวเขื่อนวัดได้จาก Hydrostatic Settlement Gauge และการวิเคราะห์ข้อมูลการทรุดตัวบนสันเขื่อนที่วัดได้จาก Crest Settlement Point

4.1.1 Hydrostatic Settlement Gauge (HS)

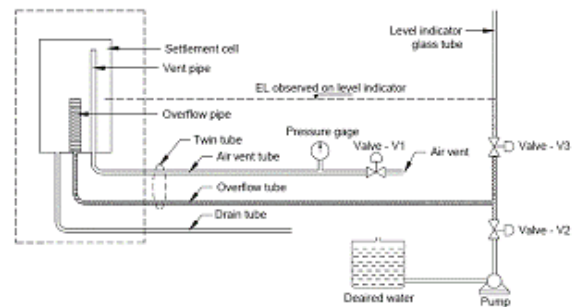
Hydrostatic Settlement Gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าระดับภายในตัวเขื่อนโดยสามารถตรวจวัดได้โดย Settlement Gauge ที่ติดตั้งกระจายภายในตัวเขื่อนที่มีจำนวนทั้งหมด 9 จุด ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยค่าที่ได้จะแสดงการทรุดตัว (Settlement) หรือการยกตัว (Heave) ณ ตำแหน่งนั้นๆ เทียบกับตำแหน่งที่เป็นจุดอ้างอิงภายนอกตัวเขื่อน หลักการทำงานของ Hydrostatic Settlement Gauge ใช้หลักการเหมือนกับงานวัดระดับในงานก่อสร้างโดยใช้สายยางระดับน้ำ Hydrostatic Settlement Gauge ประกอบด้วยก้านวัดระดับน้ำที่ติดตั้งใน Terminal Structures ซึ่งอยู่ด้านนอกตัวเขื่อนจะเชื่อมต่อกับ Gauge ที่อยู่ภายในตัวเขื่อน การอ่านค่าการทรุดตัวนั้นต้องทำการอัดน้ำโดยการปั้มน้ำทุกครั้งก่อนการวัดเพื่อที่จะไล่อากาศในหลอดแก้ว (เปิด Valve 2,3) และอัดน้ำเพื่อไล่อากาศและตะกอนที่อยู่ใน Gauge ภายในตัวเขื่อน (เปิด Valve 2, ปิด Valve 3) จนน้ำไหลออกจากท่อ Drain หลังจากนั้นปิด Valve 2 ปิดปั้มน้ำและเปิด Valve 3 แล้ววัดระดับน้ำในหลอดแก้วก็จะทราบการทรุดตัวของ

หินถมในตัวเขื่อน ดังแสดงภาพที่ 8 อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงมีการตัดแปลงเครื่องมือเพื่อให้อ่านค่าได้ตามรูปแบบที่กำหนด



ภาพที่ 7 ตำแหน่งและลักษณะเครื่องมือ Hydrostatic Settlement Gauge

SCHEMATIC DIAGRAM



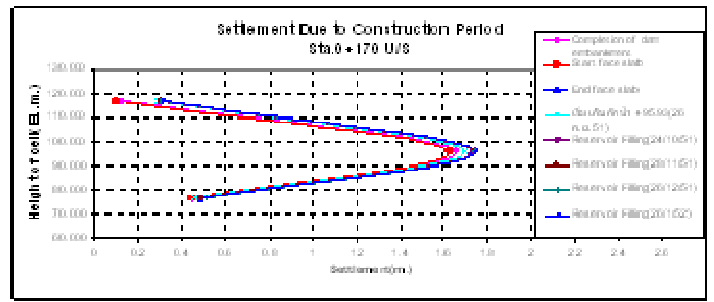
ภาพที่ 8 หลักการทำงานของ Hydrostatic Settlement Gauge

4.1.1.1 ผลการทรุดตัวของหินถม

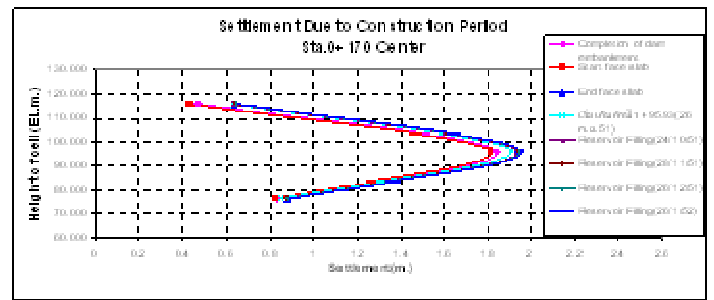
การติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวภายในตัวเขื่อนจะดำเนินการเมื่อการบดอัดหินถมถึงระดับที่ติดตั้ง Hydrostatic Settlement Gauge จากนั้นจึงสามารถเริ่มการตรวจวัดการทรุดตัวของชั้นหินที่อยู่ใต้เครื่องมือนี้ได้ โดยชั้นหินถมนี้ได้เกิดการทรุดตัวเกิดขึ้นแล้วบางส่วนก่อนการติดตั้งเครื่องมือ การถมวัสดุเหนือระดับที่ติดตั้งเครื่องมือวัดนี้เสมือนเป็นน้ำหนักกดทับส่งผลให้หินถมด้านล่างเกิดการทรุดตัว ในช่วงระหว่างการก่อสร้างและเก็บน้ำครั้งแรกจะพบว่าเกิดการทรุดตัวสูง ดังแสดงในภาพที่ 9-11 ซึ่งสังเกตได้ว่าการทรุดตัวในด้านเหนือน้ำเกิดขึ้นน้อยกว่าบริเวณแกนกลางเขื่อนและด้านท้ายน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะระดับหิน

ฐานรากของเขื่อนบริเวณด้านเหนือน้ำสูงบริเวณแกนกลางเขื่อนและด้านท้ายน้ำ

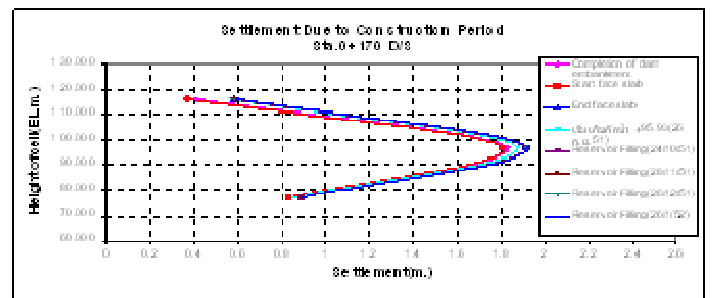
ผลการทรุดตัวของหินถมเขื่อนแกว่น้อยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การทรุดตัวของหินถมกับระยะเวลาระหว่างการก่อสร้างและช่วงเก็บกักน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 12-14 และสรุปค่าการทรุดตัวของหินถมที่เกิดขึ้นจริงเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวจากการคาดการณ์โดยการออกแบบในช่วงภายหลังการก่อสร้างเขื่อนเสร็จและเริ่มเก็บน้ำ ดังแสดงตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงกับค่าจากการคาดการณ์การออกแบบมีค่าแตกต่างกันมากและสังเกตได้ว่าช่วงเวลาระหว่างการก่อสร้างหินถมเสร็จกับช่วงเวลาก่อสร้าง Concrete Face Slab เสร็จยังมีอัตราการทรุดตัวอยู่



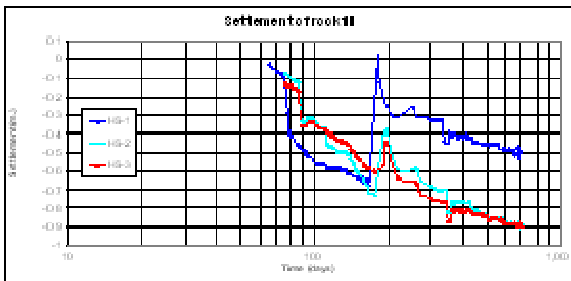
ภาพที่ 12 การทรุดตัวของหินถมกับช่วงเวลาต่างๆ (HS1,4,7)



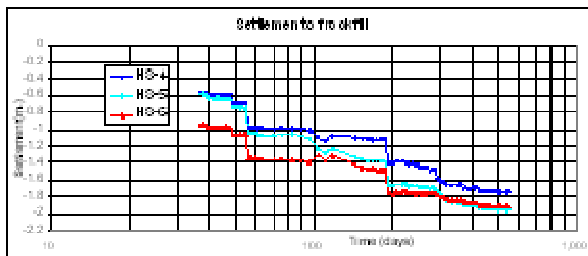
ภาพที่ 13 การทรุดตัวของหินถมกับช่วงเวลาต่างๆ (HS2,5,8)



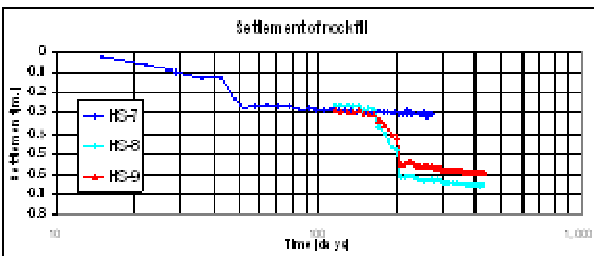
ภาพที่ 14 การทรุดตัวของหินถมกับช่วงเวลาต่างๆ (HS3,6,9)



ภาพที่ 9 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +76.00 ของ HS 1,2,3



ภาพที่ 10 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +96.00 ของ HS 4,5,6

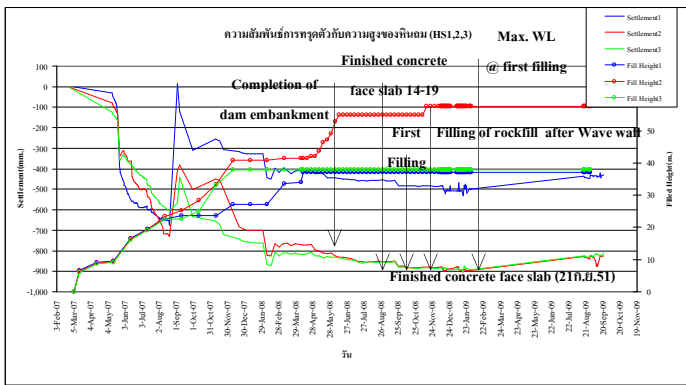


ภาพที่ 11 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +116.00 ของ HS 7,8,9

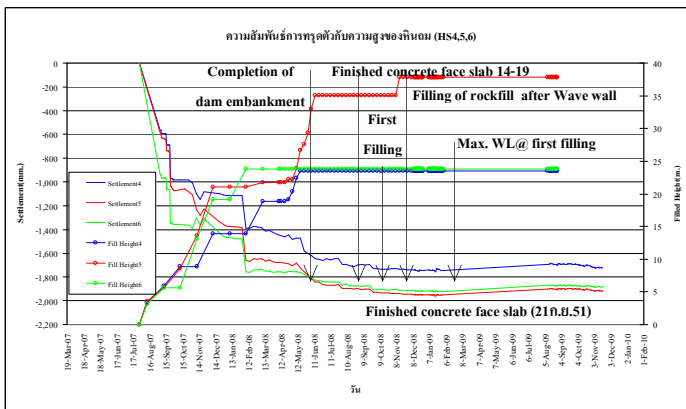
ตารางที่ 2 ค่าการทรุดตัวของหินถมที่เกิดขึ้นจริงเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวจากการคาดการณ์โดยการออกแบบ

ช่วงเวลาที่พิจารณา	ค่าการทรุดตัวของหินถมจากการออกแบบ(ม.)	ค่าการทรุดตัวของหินถมที่เกิดขึ้นจริง(ม.)
ภายหลังการก่อสร้างเขื่อนเสร็จ	0.43	1.935
เริ่มเก็บน้ำ	0.45	1.944

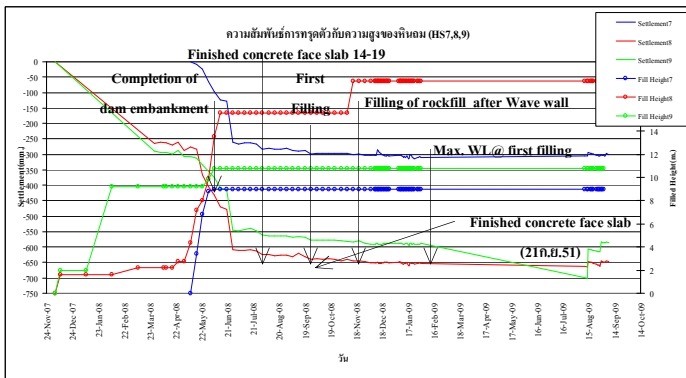
ผลการทรุดตัวของหินถมในช่วงระหว่างการก่อสร้างและเริ่มเก็บน้ำแสดงดังภาพที่ 15-17 จะเห็นได้ว่าการทรุดตัวของหินถมเกิดขึ้นใน อย่างไรก็ตามหลังการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคานหน้า (Concrete Face Slab) พบว่ามีการทรุดตัวของหินถมอยู่บ้าง โดยเฉพาะที่ระดับ+96.00 ถึงสันเขื่อน(HS7,8,9) ดังภาพที่ 17 สำหรับค่าการทรุดตัวของหินถมหลังจากก่อสร้างกำแพงกันคลื่นเสร็จ (Wave wall) และเริ่มเก็บน้ำครั้งแรกพบว่ามีค่าอัตราการทรุดตัวของหินถมน้อย



ภาพที่ 15 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +76.00 (HS1,2,3)



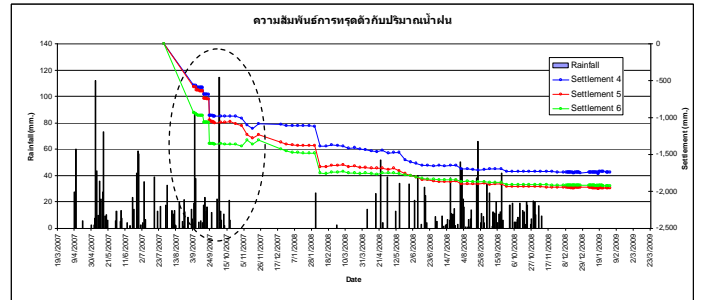
ภาพที่ 16 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +96.00 (HS4,5,6)



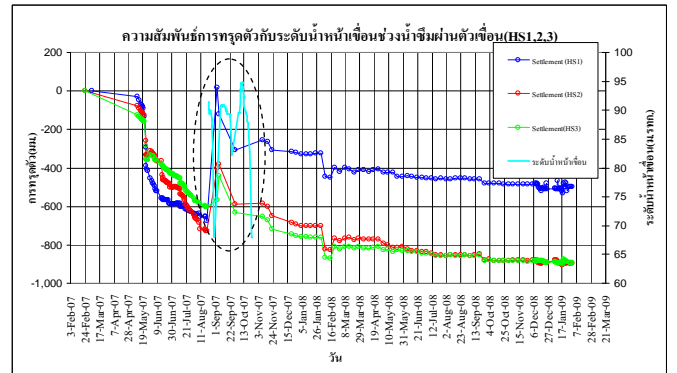
ภาพที่ 17 การทรุดตัวของหินถมที่ระดับ +116.00 (HS7,8,9)

การทรุดตัวของเขื่อนมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนที่ตกบริเวณตัวเขื่อน โดยระยะแรกที่ทำการศึกษาวัดความหนาของหินถมบน Settlement Gauge ยังไม่สูงมากเมื่อมีฝนตกสะสมมากได้เกิดการทรุดตัวทั้งที่ไม่ได้มีการถมเขื่อนเพิ่ม (ภาพที่ 18) สำหรับกรณีที่เกิดน้ำไหลผ่านตัวเขื่อนโดยมีระดับน้ำอยู่สูงกว่าระดับ Settlement Gauge ที่ระดับ +76.00 ดังนั้นเครื่องมือ Hydrostatic Settlement Gauge ที่ติดตั้งภายในตัวเขื่อนจึงวัดระดับน้ำที่อยู่ด้านบน Settlement Gauge ดังแสดงในภาพที่ 19 และ 20 อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทรุดตัวของหินถมยังคง

เกี่ยวข้องกับความสูงของการบดอัดคงแสดงในภาพที่ 21 กล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มความสูงของการถมบดอัดการทรุดตัวของหินถมก็จะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อการทรุดตัวถึงระดับหนึ่งแล้วหินเริ่มเกิดการแน่นตัวมาก น้ำหนักของหินถมที่เพิ่มขึ้นจึงเริ่มมีผลน้อยลงต่อการทรุดตัว



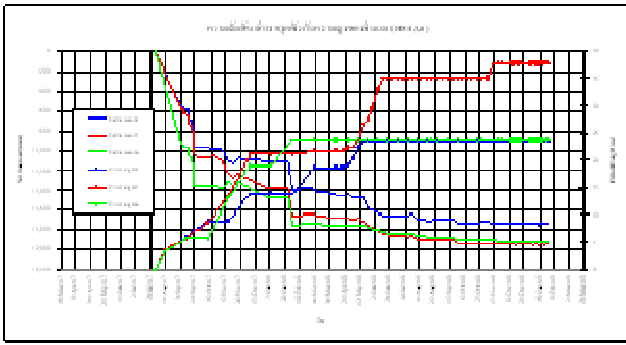
ภาพที่ 18 การทรุดตัวของหินถมสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน



ภาพที่ 19 ความผิดพลาดในการอ่านค่าการทรุดตัวของ HS1,2,3



ภาพที่ 20 ไหลผ่านตัวเขื่อนแควน้อย (Flow Through)



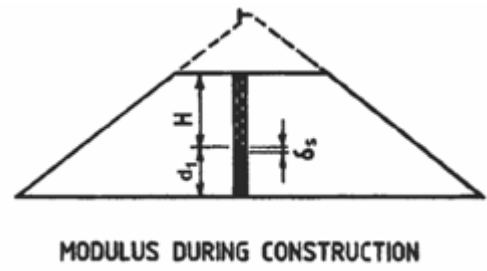
ภาพที่ 21 การทรุดตัวของหินถมสัมพันธ์กับความสูงการบดอัด

4.1.1.2 การวิเคราะห์โมดูลัสของหินถมเขื่อน

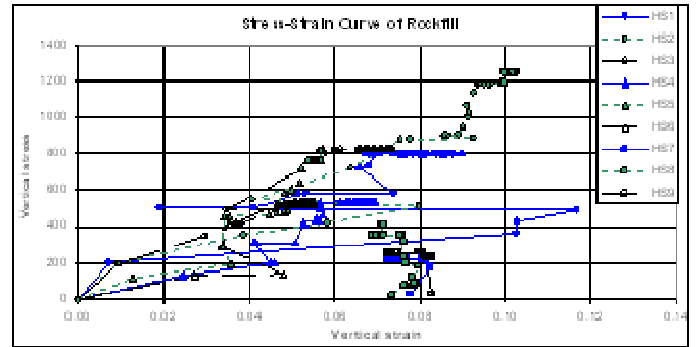
ค่าโมดูลัสของหินถม (Rockfill vertical deformation modulus) เป็นค่าโมดูลัสในระหว่างการก่อสร้างสามารถหาได้โดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติก Fitzpatrick et al (1985) [3] ได้เสนอการประมาณหาค่าโมดูลัสของหินถมตามสมการที่ 1 และแสดงในภาพที่ 22 โดยในกรณีของเขื่อนแควน้อยสามารถวิเคราะห์ได้ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยหน่วยแรงแทนน้ำหนักหินถมเหนือเซลล์และ strain แทนการทรุดตัวที่เทียบกับความสูงหินถมได้เซลล์ ความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และหากหยุดหรือพักการถมเขื่อนจะมี strain เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าไม่เพิ่ม stress ผลการประมาณหาค่าโมดูลัสของหินถมเขื่อนแควน้อยแสดงในภาพที่ 24 โมดูลัสของหินถมด้านเหนือน้ำมีค่า 3.50-27.21 MPa แนวแกนเขื่อนมีค่า 5.52-21.71 MPa และด้านท้ายน้ำมีค่า 3.56-20.264 MPa ซึ่งจะเห็นว่าด้านเหนือน้ำมีโมดูลัสสูงกว่าด้านท้ายน้ำตามลำดับแต่ค่าโมดูลัสของหินถมมีค่าน้อยกว่าเขื่อนลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 [8] ค่าโมดูลัสที่วิเคราะห์ได้นี้สามารถนำไปวิเคราะห์ในแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของเขื่อนในช่วงระหว่างการก่อสร้างและเมื่อมีแรงดันน้ำมากระทำที่ระดับเก็บกักต่างๆรวมทั้งการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า

$$E_{rc} = \gamma H d_1 / \delta_s \quad (1)$$

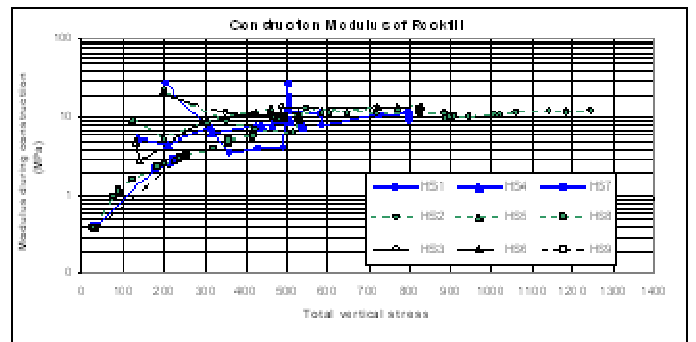
- เมื่อ
- E_{rc} = โมดูลัสของหินถมระหว่างการก่อสร้าง
 - γ = ความหนาแน่นของมวลหินถม
 - H = ความสูงของหินถมเหนือเครื่องมือวัด (รูปที่ 19)
 - d_1 = ความสูงของหินถมใต้เครื่องมือวัด
 - δ_s = ค่าการทรุดตัว



ภาพที่ 22 การวิเคราะห์โมดูลัสระหว่างการก่อสร้าง [3]



ภาพที่ 23 Stress-strain relationship ของหินถมเขื่อน



ภาพที่ 24 ค่าโมดูลัสยึดหยุ่นในแนวตั้งของหินถมเขื่อน

ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสของหินถมที่มีคุณภาพต่ำ (Weak Rock) [8]

เขื่อน	วัสดุ	ความชื้นที่เหมาะสม (%)	ความหนาแน่นแห้ง (ตัน/ม.3)	Modulus of compressibility (MPa)
Da'ao	Weathered sandstone	-	-	21-62
Yuitao	Mudstone	6	2.28	6.5-54.8
Panshitou	Shale	3	2.06	13.8-40.1
Shuibuya	Shale	8.4	2	-
Shisanling	Weathered basalt	-	-	16.5-52.1

4.1.2 Crest Settlement Point (CS)

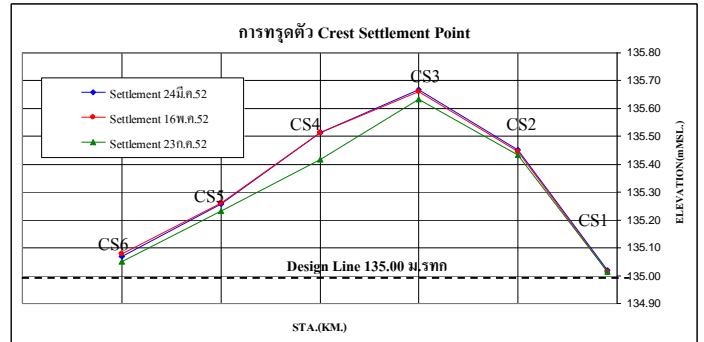
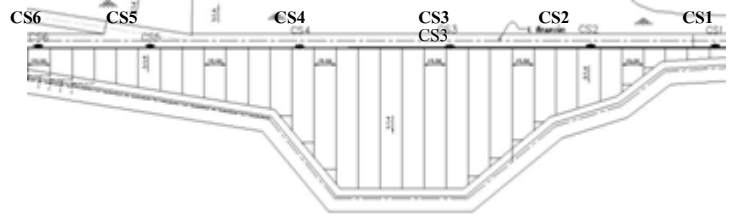
Crest Settlement Point เป็นเครื่องมือวัดตรวจสอบการทรุดตัวของเขื่อนติดตั้งบน Wave Wall ทุกๆ 100 เมตรมีจำนวนทั้งหมด 6 ตำแหน่ง มีลักษณะเป็นแท่ง Stainless Steel $\varnothing 12$ mm. ยาว 20cm. โดยทำการฝังบนสันของ Wave Wall ที่มีการเตรียมเจาะรูขนาด $\varnothing 50$ mm. ลึก 20 cm. ลักษณะเครื่องมือดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ลักษณะเครื่องมือ Crest Settlement Point

Crest Settlement Point วัดการทรุดตัวที่ระดับสันเขื่อนเมื่อเขื่อนได้ก่อสร้างเสร็จแล้วหรือไม่มีน้ำหนักกระทำต่อตัวเขื่อนอีก การตรวจวัดดำเนินการหลังการก่อสร้างจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับสันเขื่อนเมื่อเริ่มเก็บกักน้ำในครั้งแรกและเมื่อใช้งานเขื่อน

ในช่วงแรกของการตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวที่กำแพงกันคลื่นหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้างและเก็บน้ำปีแรกมีการทรุดตัวรวมมากที่สุด ณ STA. 0+400 ประมาณ 0.094 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 26 แต่ค่าการทรุดตัวยังไม่เกินค่า Design Line (+135.00ม.รทก.) จะเห็นว่าค่าอัตราการทรุดตัวยังไม่คงที่ซึ่งมีอัตราการทรุดตัวบนสันเขื่อน 0.25 มม./เดือนโดยปกติจากการออกแบบค่าอัตราการทรุดตัวที่สันเขื่อนไม่เกิน 0.5 มม./เดือน [1] ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดหน่วยแรงในคอนกรีตคานหน้าจนทำให้เกิดการแตกร้าวได้ และการทรุดตัวที่สันเขื่อนรวมเท่ากับ 0.094 เมตร ในการออกแบบค่าการทรุดตัวต้องไม่เกินร้อยละ 1 ของความสูงเขื่อนมีค่าเท่ากับ 0.75 เมตร[1] จะเห็นได้ว่าอัตราการทรุดตัวบนสันเขื่อนมีค่าน้อยกว่าจากการออกแบบซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย



ภาพที่ 26 ผลการทรุดตัวที่กำแพงกันคลื่น CS1-CS6

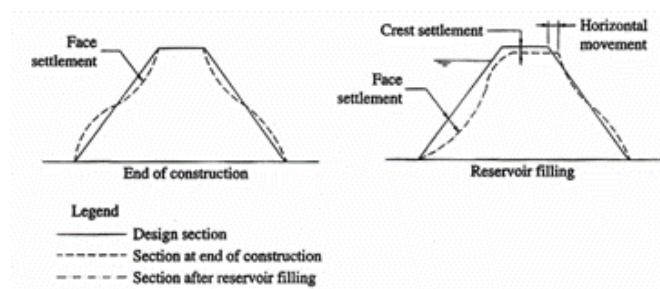
4.2 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า

การเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้า เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำต่อตัวเขื่อนทั้งแรงดันน้ำทางด้านเหนือหน้า, แรงดันลอยตัวใต้ฐานเขื่อน, แรงจากน้ำหนักของตัวเขื่อนการทรุดตัวที่แตกต่างกันของวัสดุหินถมอาจทำให้เกิดการแตกของแผ่นคอนกรีตคานหน้า บริเวณที่สามารถทำให้เกิดการแตกหรือเกิดการเคลื่อนตัวได้ คือ บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตกับแผ่นคอนกรีตและบริเวณระหว่างแผ่นคอนกรีตกับคอนกรีตฐานยัน (Plinth) ตรงบริเวณ Permetric Joint เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดพฤติกรรมเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนรูปของแผ่นคอนกรีตคานหน้า ประกอบด้วย 1.มาตรวัดการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีต(Inclinometer) 2. มาตรวัดการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อ (Joint Meter) 3. มาตรวัดการเคลื่อนตัวระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้ากับคอนกรีตฐานยัน(Permetric Joint Meter) 4.มาตรวัดการยืดหดตัวของผิวคอนกรีต (Strain Meter) 5.มาตรวัดการยืดหดตัวของมวลคอนกรีตได้ชั้นผิวคอนกรีตคานหน้า (Non – Stress Strain Meter)

4.2.1 มาตรการป้องกันตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า

(Inclinometer, IN)

การทรุดตัวหรือยุบตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าเกิดจากวัสดุที่รองรับแผ่นคอนกรีตคานหน้าเกิดการทรุดตัวเนื่องจากแรงกระทำของน้ำ คุณภาพการบดอัดหินถม รวมไปถึงรูปร่างของหน้าตัดและสภาพฐานรากเขื่อน ภาพที่ 27 [4] แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการก่อสร้างลาดเขื่อนทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำจะเกิดการยุบตัว และเมื่อได้เก็บน้ำลาดชันทางด้านเหนือน้ำจะทรุดตัวและเคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายน้ำ การเคลื่อนตัวนี้อาจก่อให้เกิดการแตกของแผ่นคอนกรีตคานหน้าและนำไปสู่การไหลซึมของน้ำผ่านรอยแตก



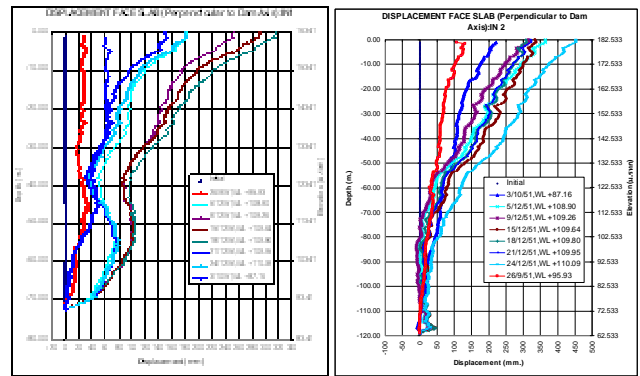
ภาพที่ 27 การทรุดตัวของเขื่อน CFRD หลังการก่อสร้างและเก็บน้ำ [4]

Inclinometer เป็นเครื่องมือตรวจวัดการโก่งตัวของ Concrete Face Slab ติดตั้งตามลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำมีจำนวนทั้งหมด 3 ตำแหน่ง อุปกรณ์นี้มีลักษณะเป็นท่ออลูมิเนียม (Aluminium Tube) ยาวท่อนละ 3 เมตรโดยลักษณะของท่อจะมีร่องแกน 4 ร่องในแนว 90° เพื่อเป็นทางบังคับการเคลื่อนที่ของท่อวัดให้เป็นไปตามทิศทางที่ต้องการดังแสดงในภาพที่ 28



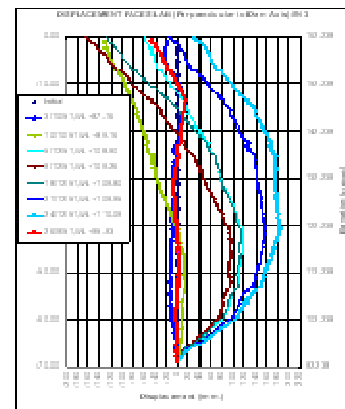
ภาพที่ 28 ลักษณะเครื่องมือ Inclinometer ติดตั้งตามลาดเขื่อน

ค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าได้เริ่มอ่านค่าตั้งแต่ก่อสร้างเขื่อนเสร็จจนกระทั่งเริ่มเก็บน้ำครั้งแรก ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าทั้ง 3 หน้าตัดแสดงดังภาพที่ 29 แกนตั้งเป็นความยาวตามความลาดเอียงของคอนกรีตคานหน้าและแกนนอนแสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับความลาดเขื่อน ค่าการโก่งตัวมากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดลึกที่สุด IN2 มีค่าการโก่งตัวประมาณ 450 มม. ซึ่งไม่ได้อยู่ในขอบเขตการทรุดตัวของเขื่อน CFRD อื่นๆ [4] (Marques et al, 1985) ดังแสดงภาพที่ 30 และเมื่อเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าจากการคาดการณ์ออกแบบในช่วงเก็บกักน้ำมีค่าเท่ากับ 0.22 ม.[2] พบว่าค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากกว่าค่าจากการออกแบบ



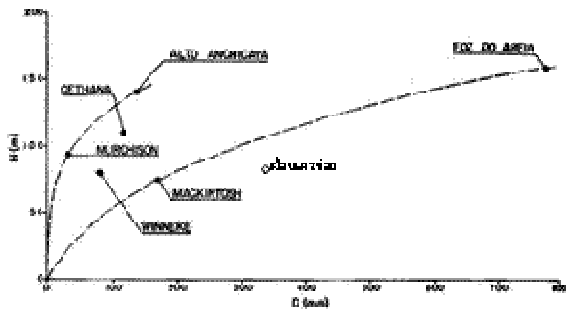
(IN 1)

(IN 2)



(IN 3)

ภาพที่ 29 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต IN 1,2,3



ภาพที่ 30 การโค้งตัวของแผ่นคอนกรีตของเขื่อน CFRD (Marques et al, 1985) [4]

4.2.2 มาตรการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อ (Joint Meter)

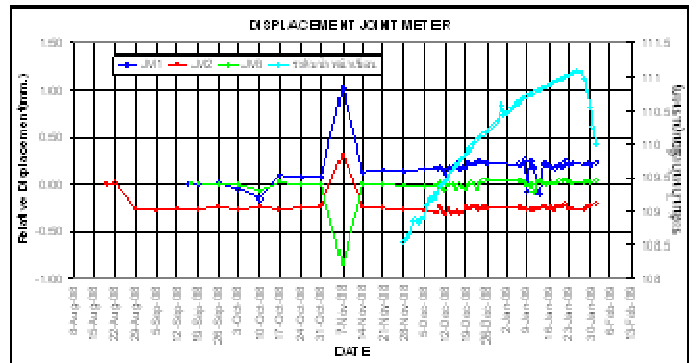
Joint Meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบรอยแยกระหว่างแผ่นคอนกรีตคาดหน้าของแต่ละแผงมีจำนวน 3 จุด โดยลักษณะของอุปกรณ์จะเป็นแบบ Embedment Joint Meter จะทำการติดตั้งโดยยึดติดกับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตบริเวณรอยต่อแนวตั้ง (Vertical Joint) ของแต่ละแผง แสดงในภาพที่ 31



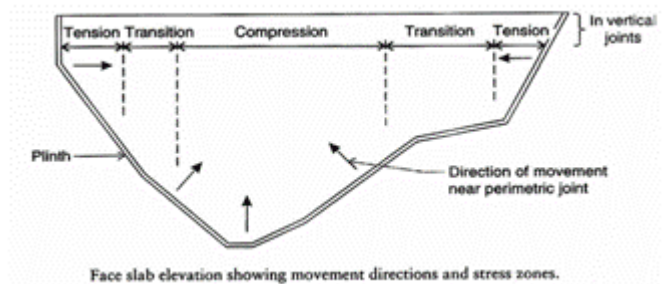
ภาพที่ 31 ลักษณะเครื่องมือ Joint Meter ติดตั้งระหว่างแผ่นคอนกรีต

การเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคาดหน้าบริเวณรอยต่อแต่ละแผง (Vertical Construction Joint) พบว่า JM2 แนวกลางลำน้ำมีการเคลื่อนตัวเข้าหากันมีค่าสูงสุด 0.31 มม. แสดงว่าเกิดแรงอัดในแผ่นคอนกรีต และ JM1, JM3 แนวริม Abutment ทั้งสองข้างมีการเคลื่อนตัวแยกออกจากกันมีค่าสูงสุด 0.263 มม. และ 0.056 มม. ตามลำดับ แสดงว่าเกิดแรงดึงในแผ่นคอนกรีต แสดงในภาพที่ 32, 33 แสดงทิศทางแรงที่เกิดขึ้นของแผ่นคอนกรีต [4] เมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวกับระดับน้ำหน้าเขื่อนแสดงให้เห็นว่าแรงดันน้ำมีอิทธิพลน้อยต่อการเคลื่อนตัว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวกับเขื่อน CFRD อื่นๆ [4] (Marques et al, 1985) ดังภาพที่ 34 พบว่าอยู่ในขอบเขตการเคลื่อนตัวของรอยต่อแผ่นคอนกรีต และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของรอยต่อของแผ่นคอนกรีตคาดหน้าจากการคาดการณ์ออกแบบในขณะเก็บน้ำปีแรกซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน 4 ซม. [1] พบว่ามีค่าไม่

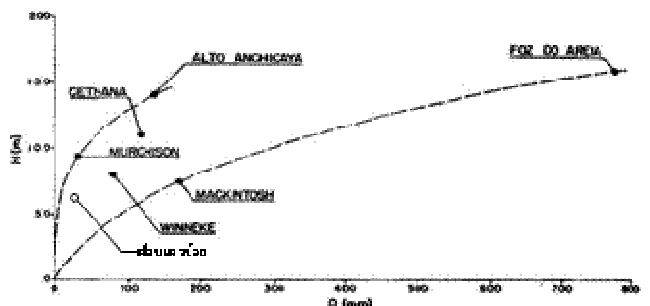
เกินที่ประเมินไว้เช่นเดียวกันดังนั้นปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงมีค่าน้อยกว่าค่าจากการออกแบบอย่างชัดเจน



ภาพที่ 32 การเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีต JM1, JM2 และ JM3



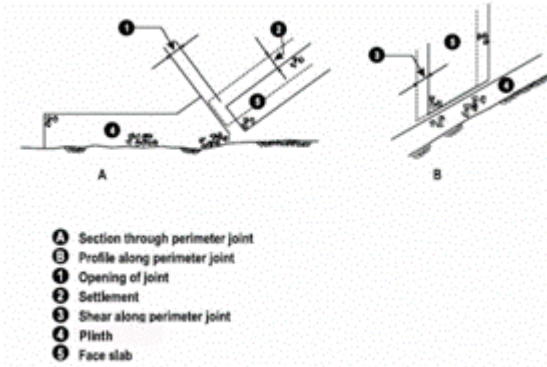
ภาพที่ 33 ลักษณะของแรงกระทำของแผ่นคอนกรีตคาดหน้า [4]



ภาพที่ 34 การเคลื่อนตัวของรอยต่อแผ่นคอนกรีตของเขื่อน CFRD (Marques et al, 1985)

4.2.3 มาตรการเคลื่อนตัวระหว่างแผ่นคอนกรีตคาดหน้ากับคอนกรีตฐานยัน (Perimetric Joint Meter, PM)

บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตคาดหน้ากับ Plinth ได้ติดตั้ง Perimetric Joint Meter เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของรอยต่อ โดยจะมีการติดตั้งเพื่อตรวจวัดรอยต่อ 3 ทิศทาง คือ ตั้งฉากกับรอยต่อ (Opening, Normal to Perimetric Joint) แนวขนานกับรอยต่อ (Shear, Parallel to Perimetric Joint) และแนวตั้ง (Settlement, Normal to concrete face slab) แสดงในภาพที่ 35

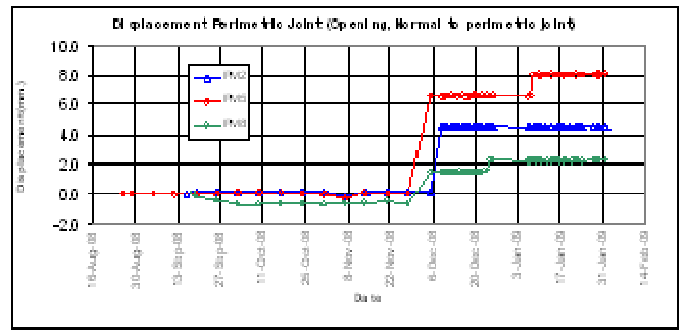


ภาพที่ 35 Perimetric Joint Meter และทิศทางการเคลื่อนตัว

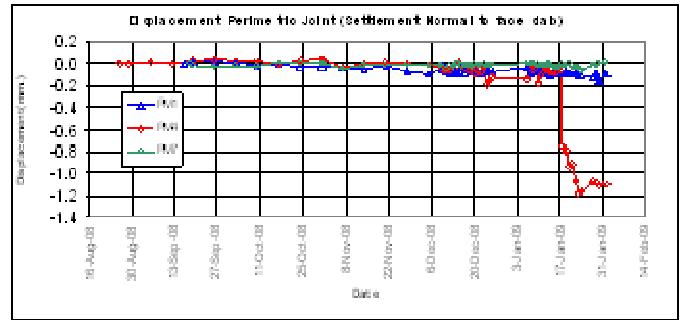
การเคลื่อนตัวของรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้ากับ Plinth พบว่าค่าการเคลื่อนตัวมีค่าน้อยกว่า 10 มม. แสดงในภาพที่ 36-38 โดยที่ PM2,5,8 แสดงการเคลื่อนตัวในแนว Opening, Normal to Perimetric Joint พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวออกจากกันทั้ง 3 แนวโดยมีค่าสูงสุด PM2 = 4.58 มม. PM5 = 8.14 มม. และ PM8 = 2.28 มม. โดยมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มระดับน้ำอย่างชัดเจน PM1,4,7 แสดงการเคลื่อนตัวในแนว Settlement, Normal to concrete face slab พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวน้อยแต่ PM4 แนวกลางลำน้ำมีการทรุดตัวมากมีค่า 1.17 มม. และมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน ดังภาพที่ 39 PM3,6,9 แสดงการเคลื่อนตัวในแนว Shear, Parallel to Perimetric Joint พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวน้อยโดยมีค่าสูงสุด 0.291 มม.

การเคลื่อนตัวบริเวณกลางลำน้ำ (PM4,5,6) สังเกตได้ว่า PM4 แสดงการเคลื่อนตัวในแนว Settlement, Normal to concrete face slab มีการทรุดตัวของแผ่นคอนกรีต และ PM5 มีการเคลื่อนตัวออกกระหว่างรอยต่อแผ่นคอนกรีตกับ Plinth

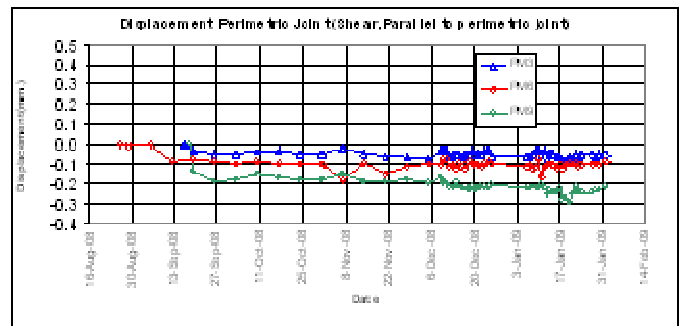
เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของรอยต่อกับเขื่อน CFRD อื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 40 (Marques, 1985)[4] พบว่าอยู่ในขอบเขตการเคลื่อนตัวของรอยต่อแผ่นคอนกรีต และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของรอยต่อต่างๆของแผ่นคอนกรีตคานหน้าที่เกิดขึ้นจริงมีค่าน้อยกว่าค่าจากการคาดการณ์ออกแบบในขณะเก็บน้ำปีแรกจะต้องมีค่าไม่เกิน 4 ซม.[1]



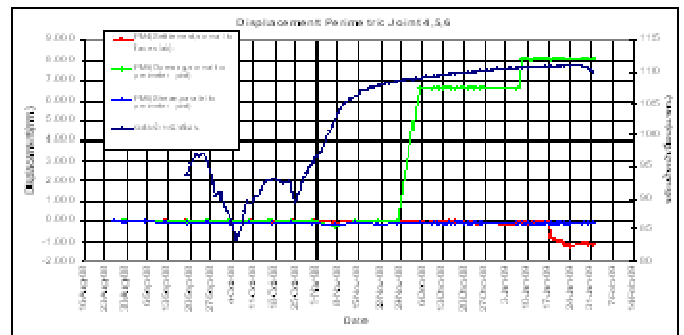
ภาพที่ 36 การเคลื่อนตัวแนว Opening, Normal to Perimetric Joint



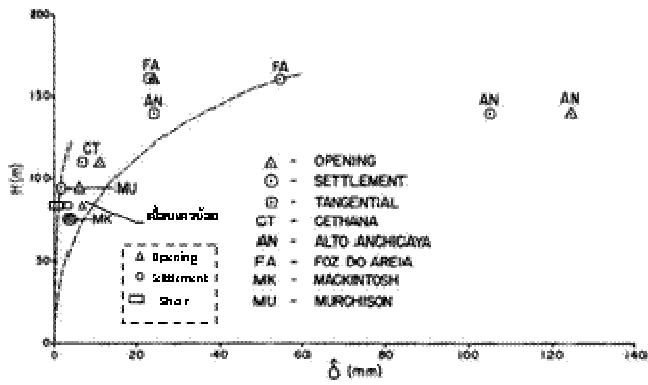
ภาพที่ 37 การเคลื่อนตัวแนว Settlement, Normal to concrete face slab



ภาพที่ 38 การเคลื่อนตัวแนว Shear, Parallel to Perimetric Joint



ภาพที่ 39 การเคลื่อนตัวแนว Opening มีความสัมพันธ์กับระดับน้ำหน้าเขื่อน



ภาพที่ 40 การเคลื่อนตัวรอยต่อเชื่อม CFRD (Marques et al., 1985) [4]

4.2.4 มาตรการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นคอนกรีต

(Strain Meter, SM)

Strain Meter เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้าง ณ จุดต่างๆ โดยติดตั้งตรวจวัดบริเวณผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตมีจำนวนทั้งหมด 6 จุด การติดตั้ง Strain Meter เป็นแบบ Rosette 45 องศา แสดงในภาพที่ 41 ประกอบด้วย ความเครียดใน 3 ทิศทาง คือ ทิศทางตั้งฉากกับแกนเขื่อน ทิศทางตามแนวแกนเขื่อน และทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวแกนเขื่อน



ภาพที่ 41 ลักษณะเครื่องมือ Strain Meter และการติดตั้ง

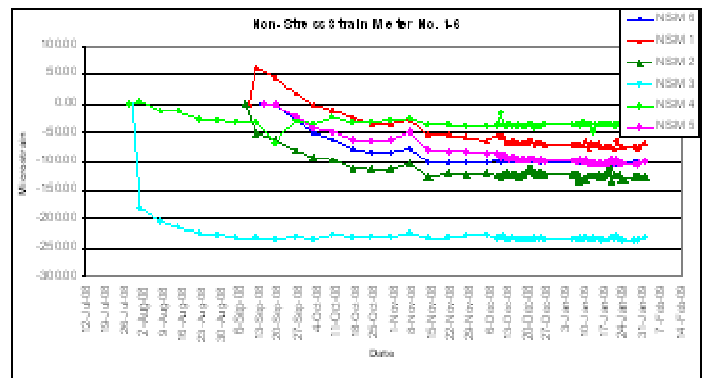
4.2.4 มาตรการเปลี่ยนรูปร่างของมวลคอนกรีตได้ชั้นของแผ่นคอนกรีตคานหน้า (Non - Stress Strain Meter, NSM)

Non - Stress Strain Meter เป็นเครื่องมือตรวจวัดการเปลี่ยนรูปของมวลคอนกรีตบริเวณลาดเขื่อนได้ชั้นแผ่นคอนกรีตคานหน้า มีจำนวนทั้งหมด 6 ตำแหน่งมีลักษณะเช่นเดียวกับอุปกรณ์ Strain Meter แต่จะต่างที่การติดตั้งอุปกรณ์ชนิดนี้ Meter จะฝังอยู่ใน Steel Case แสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ลักษณะเครื่องมือ Non-Stress Strain Meter และการติดตั้ง

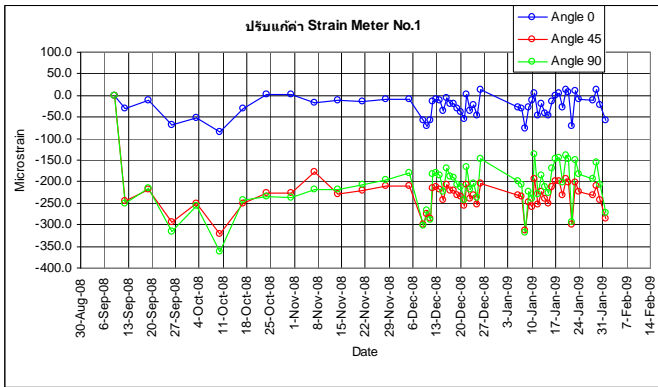
ผลการเปลี่ยนรูปร่างของมวลคอนกรีตได้ชั้นแผ่นคอนกรีตคานหน้า แสดงในภาพที่ 43 พบว่า NSM1-6 ช่วงแรกจะมีค่าการเปลี่ยนรูปของมวลคอนกรีตค่อนข้างมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลง Temperature , Chemical Change และ Shrinkage and Expansion แต่ช่วงหลังการเปลี่ยนแปลงเริ่มคงที่



ภาพที่ 43 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของมวลคอนกรีตได้ชั้นแผ่นคอนกรีต

ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำอย่างเดียวยังคงตั้งแต่เสร็จการก่อสร้างจนเริ่มเก็บน้ำ การเปลี่ยนแปลงความเครียดทั้ง 3 ทิศทาง ต้องมีการปรับแก้ค่าจากเครื่องมือวัด Strain Meter และ Non-Stress Strain Meter โดยค่าที่อ่านได้จาก Strain Meter เป็นค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดจากอิทธิพล Load , Temperature Chemical Change และ Shrinkage and Expansion ส่วนค่าที่อ่านได้จาก Non-Stress Strain Meter เป็นค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดจาก Temperature , Chemical Change และ Shrinkage and Expansion ดังนั้นการพิจารณาหาค่าความเครียดที่เกิดจากแรงกระทำนั้นจะต้องนำค่าความเครียดที่อ่านจาก Non-Stress Strain Meter มาหักออกจากค่าที่อ่านได้จาก Strain Meter ดังภาพที่ 44 พบว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตมีค่าประมาณ 363×10^{-6} ซึ่งตามปกติความเครียดของคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.00333 ดังนั้นในขณะที่เก็บข้อมูลแผ่นคอนกรีตคานหน้าไม่มี

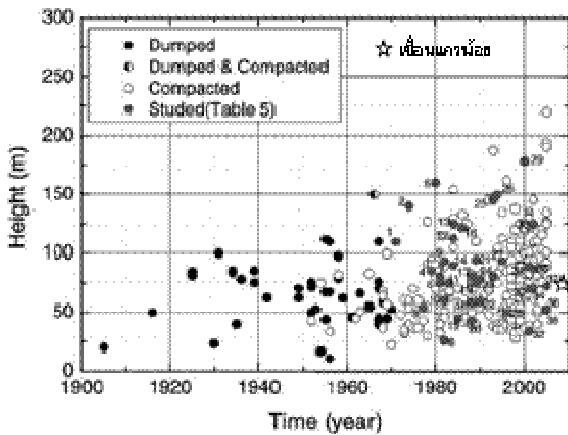
แนวโน้มที่จะแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักน้ำมากระทำหรือการเคลื่อนตัวมากปกติ



ภาพที่ 44 ความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ (SM1)

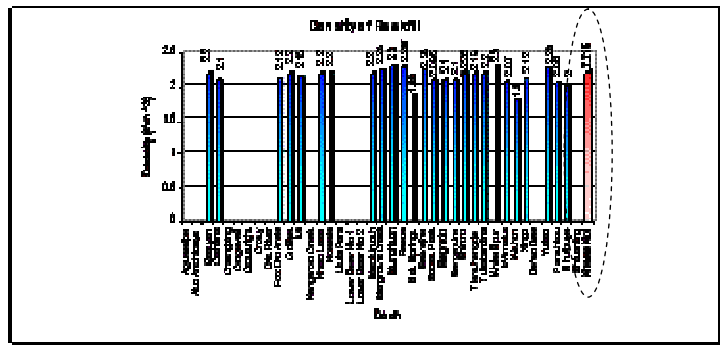
5. การเปรียบเทียบพฤติกรรมเขื่อนแควน้อยกับเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam อื่นๆ

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการก่อสร้างเขื่อนหินถม ความสูงของเขื่อนและช่วงเวลาในการก่อสร้าง [5] แสดงในภาพที่ 45



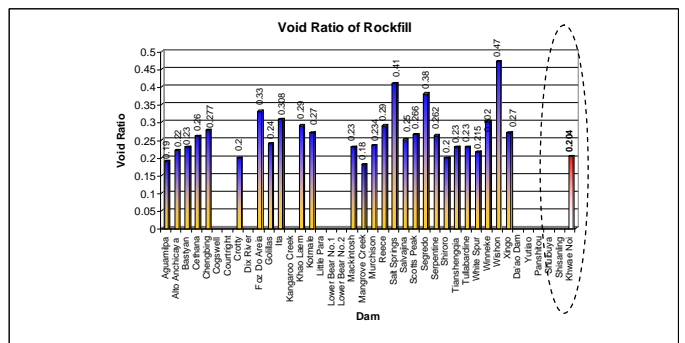
ภาพที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการก่อสร้าง ความสูงและช่วงเวลาก่อสร้างเขื่อน

5.2 ความสัมพันธ์ค่า Density ของหินถมเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam [6,7] ดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ค่าความแน่นของหินถมเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam

5.3 ความสัมพันธ์ของค่า Void Ratio ของหินถมเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam [6,7] แสดงในภาพที่ 47

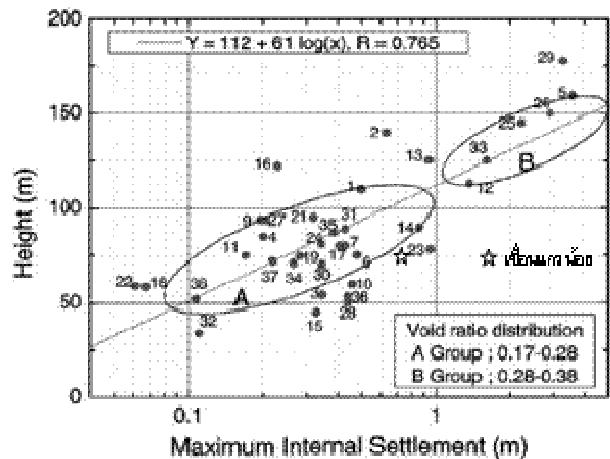


ภาพที่ 47 ค่า Void Ratioของหินถมเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเขื่อนกับค่า Maximum internal settlement [5] แสดงในภาพที่ 48 โดยที่ค่า Maximum internal settlement คำนวณได้จากสมการ 2

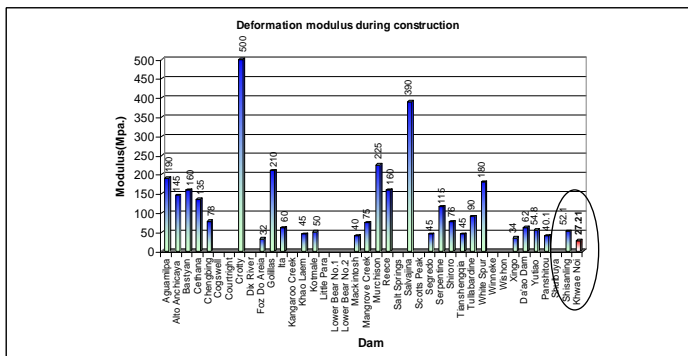
$$\text{Maximum internal settlement} = \infty \times \text{Height} \quad (2)$$

- เมื่อค่า $\infty = 0.01-0.0229$ (High Dam)
 $\infty = 0.005-0.01$ (Medium Dam)
 $\infty = 0.001-0.005$ (Small Dam)



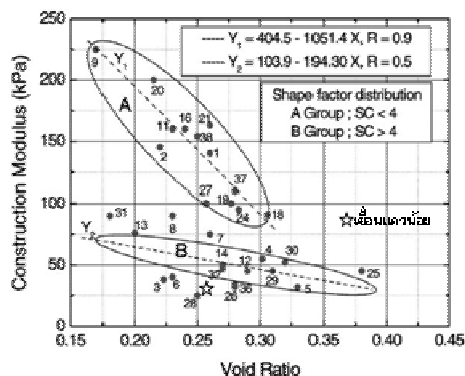
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเขื่อนกับ Maximum internal settlement

5.5 ความสัมพันธ์ของค่า Construction modulus ของหิน
ถมเขื่อนหินถมคานหน้าคอนกรีต [6,7] แสดงในภาพที่ 49



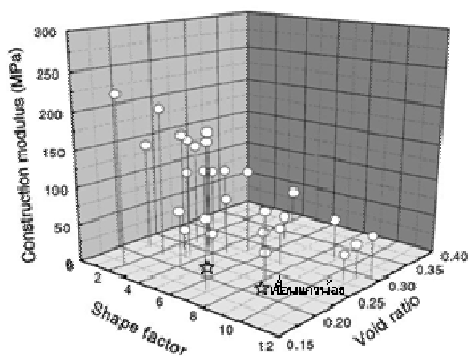
ภาพที่ 49 โมดูลัสหินถม Concrete Face Rockfill Dam

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Construction modulus กับ
Void Ratio[5] แสดงในภาพที่ 50 โดยเขื่อนแควน้อยมีค่า
Construction modulus เท่ากับ 27.21 MPa., Shape factor เท่ากับ
5.79 และ Void ratio เท่ากับ 0.201



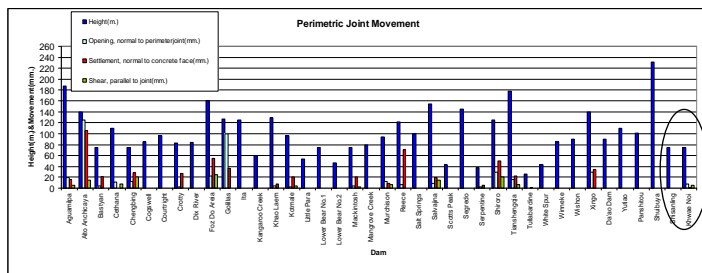
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ค่า Construction modulus หินถมกับ Void Ratio

5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Construction modulus, Void
Ratio และ Shape factor [5] แสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่าง Construction modulus Void Ratio และ Shape factor

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของ
Perimetric Joint แต่ละทิศทางกับความสูงเขื่อนของเขื่อน
Concrete Face Rockfill Dam [6,7] แสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของ Perimetric Joint
ในแต่ละทิศทางกับความสูงเขื่อน

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมจากเครื่องมือวัดสามารถสรุปตามพฤติกรรมทรุดตัวและพฤติกรรมเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีต ได้ดังต่อไปนี้

1. พฤติกรรมทรุดตัว

ผลการทรุดตัวของหินถมเขื่อนแควน้อยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การทรุดตัวของหินถมกับระยะเวลาระหว่างการก่อสร้างและช่วงเก็บกักน้ำ พบว่าช่วงระหว่างการก่อสร้างหินถมมีการทรุดตัวมากที่สุดที่ตำแหน่ง HS5(+96.00) เท่ากับ 1.807 เมตร และมีการทรุดตัวน้อยที่สุดที่ตำแหน่ง HS1(+76.00) เท่ากับ 0.443 เมตรและช่วงเวลาก่อสร้างหินถมเสร็จมีการทรุดตัวรวมมากที่สุดที่ตำแหน่ง HS5 เท่ากับ 1.840 เมตร โดยช่วงเวลาก่อสร้าง Concrete Face Slab เสร็จมีการทรุดตัวรวมมากที่สุดที่ตำแหน่ง HS5 เท่ากับ 1.935 เมตร ซึ่งค่าการทรุดตัวหลังจากก่อสร้างกำแพงกันคลื่นเสร็จมีอัตราการทรุดตัวน้อย นอกจากนั้นเมื่อเริ่มเก็บกักน้ำพบว่าทรุดตัวรวมเพิ่มขึ้นเป็น 1.944 เมตร การทรุดตัวที่สันเขื่อนหลังจากสิ้นสุดการก่อสร้างและเก็บน้ำปีแรกมีค่าการทรุดตัวมากที่สุด ณ STA. 0+400 ประมาณ 0.094 เมตร โดยค่าโมดูลัสของหินถมจากการวิเคราะห์โดยอาศัยข้อมูลการทรุดตัวพบว่ามีค่าประมาณ 3.50-27.21 MPa

2. พฤติกรรมเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้า

2.1 Joint Meter รอยต่อระหว่างก่อก่อสร้างในแนวตั้ง (Vertical Construction Joint) ทั้ง 3 ตำแหน่งพบว่า JM2 แนว

กลางลำน้ำมีการเคลื่อนตัวเข้าหากันโดยมีค่าสูงสุด 0.31 มม. และ JM1, JM3 แนวริม Abutment ทั้งสองข้างมีการเคลื่อนตัวออกจากกันโดยมีค่าสูงสุด 0.263 มม. และ 0.056 มม. ตามลำดับ

2.2 Perimetric Joint การเคลื่อนตัวของรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้ากับ Plinth PM2, 5, 8 เป็นการเคลื่อนตัวในแนว Opening, Normal to Perimetric Joint พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวออกจากกันทั้ง 3 แนวโดยมีค่าสูงสุด PM2=4.58 มม., PM5 = 8.14 มม. และ PM8 = 2.28 มม. เกิดขึ้นในขณะที่ระดับน้ำหน้าเขื่อนเริ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าหากระดับน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆ มีความเป็นไปได้ที่จะมีการเคลื่อนตัวมากยิ่งขึ้น PM1, 4, 7 เป็นการเคลื่อนตัวในแนว Settlement, Normal to concrete face slab พบที่มีการเคลื่อนตัวน้อยแต่ PM4 แนวกลางลำน้ำมีการทรุดตัวมากมีค่า 1.17 มม. และมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำด้านหน้าเขื่อน PM3, 6, 9 เป็นการเคลื่อนตัวในแนว Shear, Parallel to Perimetric Joint พบที่มีการเคลื่อนตัวน้อยโดยมีค่าสูงสุด 0.291 มม. ทั้งนี้ค่าการเคลื่อนตัวของรอยต่อต่างๆ ของแผ่นคอนกรีตสูงสุดจากการออกแบบที่ยอมรับให้มีค่าไม่เกิน 4 ซม.

2.3 Inclinator การโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าแนวตั้งฉากกับแกนเขื่อน โดยตรวจวัดตั้งแต่ก่อสร้างเขื่อนเสร็จจนเริ่มเก็บน้ำครั้งแรกมีค่าการโก่งตัวมากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดลึกที่สุด IN2 มีค่าการโก่งตัวประมาณ 450 มม. ซึ่งมากกว่าที่คาดการณ์จากการออกแบบ

2.4 ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตคานหน้ามีค่าประมาณไม่เกิน 363×10^{-6} ซึ่งปกติความเครียด (Strain) ของคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกิน 0.0033 ดังนั้นแผ่นคอนกรีตคานหน้าไม่มีแนวโน้มที่จะแตกร้าวในขณะที่ตรวจวัดเนื่องจากมีการเคลื่อนตัวมากปกติหรือมีน้ำหนักน้ำมากกระทำ

3. ประโยชน์จากเครื่องมือวัดพฤติกรรมที่ติดตั้งในเขื่อนแควน้อยในระหว่างการก่อสร้างทำให้สามารถประเมินความปลอดภัยเขื่อนและนำผลการประเมินไปใช้ในการควบคุมงานก่อสร้าง ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบเพื่อนำไปปรับปรุงการออกแบบเขื่อนลักษณะเดียวกันให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและถูกต้อง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กรมชลประทาน โครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ กลุ่มบริษัทที่ปรึกษาและผู้รับจ้างที่ได้กล่าวถึงในช่วงต้นของบทความสำหรับข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้งานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการวิจัย

บรรณานุกรม

- [1] กรมชลประทาน (2545). การคำนวณเพื่อการออกแบบและอาคารประกอบ โครงการแควน้อย จังหวัดพิษณุโลก. โดยบริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, บริษัท พี แอนด์ ซี และบริษัท ตรีเอทีพี เทคโนโลยี จำกัด.
- [2] วรากร ไม้เรียง. (2550). คู่มือการวัดพฤติกรรมเขื่อน. พิมพ์ครั้งที่ 3 (ฉบับปรับปรุงแก้ไข). ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] Hunter, G. and Fell, R. (2003). Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 10, pp. 909-917.
- [4] Marques, F.P.L., Maurer, E., and Tuniatli, N.B., 1985. Deformation Characteristics of Fozdo Areia Concrete Face Rockfill Dam, as Revealed by a Simple Instrumentation System. 15th International Congress on Large Dam, Switzerland.
- [5] Park, Han-Gyu., Kim, Young-Seong., Seo, Min-Woo., Lim, Heui-Dae (2005). Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period Case of Daegok Dam. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 91-105
- [6] ICOLD, (2004). Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction. Committee on Materials for Fill Dams.
- [7] J. Barry Cook and Jame L. Sherard. (1985). Concrete Face Rockfill Dam – Design, Construction and Performance.



[8] Xing, H.F. , Gong, X.N., Zhou, X.G. and Fu, H.F. (2006).
Construction of Concrete-Faced Rockfill Dams with Weak Rocks.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.
132, No. 6. pp. 778-785.

[9] สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, ชีโนรส ทองธรรมชาติ, มนต์รี จินากุลวิวัฒน์ และว
รุฒ พจน์ศิลป์ชัย.(2551).พฤติกรรมเขื่อนหินถมคอนกรีตคาน้ำ : สภาวะ
ปกติและแผ่นดินไหว. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.