



การควบคุมการบดอัดวัสดุหินถมเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต : กรณีศึกษาเขื่อนแควน้อย

Compaction Control of Rockfill Material for Concrete Face Rockfill Dam : Khwae Noi Dam

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (Suttisak Soralump)¹

ภูงค์ สุวรรณปากแพรก (Puchong Suwanpakprak)²

มนตรี เจียมจุฬาลักษณ์ (Montri Jiamjulalak)³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (soralump_s@yahoo.com)

²นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (s.puchong@yahoo.com)

³วิศวกรบริหารโครงการและงานก่อสร้าง บริษัท พี แอนด์ ซี แมเนจเม้นท์ จำกัด (montri_j@panyaconsult.co.th)

บทคัดย่อ : โครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตั้งอยู่จังหวัดพิษณุโลก ประกอบด้วย 3 เขื่อนติดต่อกัน ได้แก่ เขื่อนแควน้อย เขื่อนสันตะเตียน และเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีตเขื่อนที่ 2 ในประเทศไทยมีความสูง 75 เมตร ก่อสร้างโดยใช้หินถมชนิด Sandstone เขื่อนประเภทนี้หากมีการบดอัดไม่ดีอาจเกิดการทรุดตัวหลังการก่อสร้างซึ่งจะทำให้แผ่นคอนกรีตคาน้ำแตกอันจะนำไปสู่การรั่วซึมต่อไป บทความนี้นำเสนอขบวนการการบดอัดหินถม วิธีการควบคุมคุณภาพ พฤติกรรม การก่อสร้างและข้อสังเกตจากประสบการณ์ ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของหินถมพบว่าค่าความหนาแน่นส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทำแปลงทดลอง ค่าความแน่นของหินถมที่มีค่าต่ำพบที่เกิดจากขนาดคละของหินถมโซน3A ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้และพบว่าความแข็งแรงของวัสดุหินถมมีผลต่อขนาดคละของหินถมหลังการบดอัด เนื่องจากวัสดุมีการแตกมากระหว่างการบดอัด ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุหินถมโดยวิธี Point Load Index จะสามารถช่วยลดข้อบกพร่องดังกล่าวได้ นอกจากนี้ผลการทดสอบความแน่นของโซน2C ซึ่งเป็นผิวหน้าของลาดชันด้านเหนือน้ำก่อนก่อสร้างคอนกรีตคาน้ำพบว่าผลการทดสอบความหนาแน่นของการบดอัดในแนวราบให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าผลการทดสอบความหนาแน่นของการบดอัดในแนวเอียง ดังนั้นโดยสรุปพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนาแน่นของการบดอัดหินถมได้แก่ ขนาดคละของวัสดุหลังการบดอัด ความแกร่งหรือระดับความผูกพันของหินถม และขั้นตอนการกองวัสดุ กลั้วและให้น้ำ

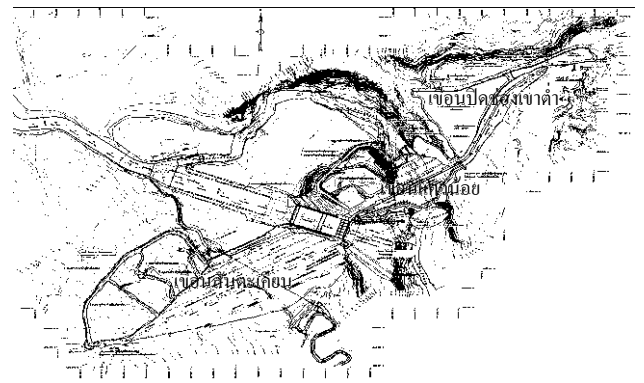
Abstract : Khwae Noi Dam Project is located at Phitsanulok province which consist of 3 dams, Khwae Noi, Santakian and Saddle Dam. Khwae Noi Dam is a concrete face rockfill dam 2 in Thailand with a height of 75 meters, sandstone was used for rockfill zone, if the dam is not good compression may settlement after construction with will make concrete face slab to crack will lead to leak. This paper prefer the processing of compaction rockfill, The method quality control, Behavior of construction and Observation from experience. The result of testing found almost rockfill density of all test section. The density of rockfill is low found that gradation of rockfill 3A, that does not specification and found that the strength of rockfill materials affect the gradation of rockfill after compression. Because materials are broken between of compression. Therefore the test strength of rockfill materials by Point Load Index can help reduce such defects. In addition the result density test of zone 2C found the result density of horization compression than the result density of Incline. Therefore, the summary important factors affecting density of the rockfill compressed, gradation of rockfill after compression, strength or a decay of rockfill and process of construction.

Keyword : Concrete Face Rockfill Dam, Rockfill Dam, Compaction

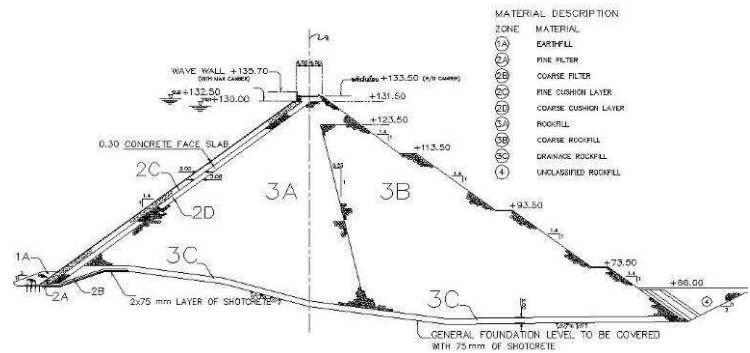
1. บทนำ

โครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นโครงการอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ตั้งอยู่อำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยอยู่ภายใต้การดูแลของกรมชลประทานซึ่งได้จ้างกลุ่มบริษัทที่ปรึกษาในการออกแบบและควบคุมงานประกอบด้วย บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด บริษัท พีแอนด์ซี แมนเนจเม้นท์ จำกัด และ บริษัท ริชอสส์ เอนจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด และได้จ้างผู้รับจ้างในการก่อสร้างเขื่อน ได้แก่ กิจการร่วมค้ายูบีซี เพาเวอร์ ซึ่งประกอบด้วย บริษัท ยูเนี่ยน อินฟาร์เทค จำกัด บริษัท บางกอกมอเตอร์ อีคิวเมนต์ จำกัด และบริษัท เพาเวอร์-พี จำกัด (มหาชน) ตัวเขื่อนในโครงการประกอบด้วย 3 เขื่อนติดต่อกัน ได้แก่ เขื่อนแควน้อย เป็นเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต (Concrete Face Rockfill Dam, CFRD) เขื่อนสันตะเกียงเป็นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว (Earth Core Rockfill Dam) และเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Earth fill Dam) เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว [1] ภาพที่ 1 แสดงรูปเขื่อนห้วงงาน และภาพที่ 2 แสดงรูปตัดเขื่อน

เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดเขื่อนที่ก่อสร้างได้รวดเร็วและสามารถสร้างได้ในช่องเขาที่แคบเนื่องจากทรุดตัวของหินถมมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามเขื่อนประเภทนี้อาจพบปัญหาการรั่วซึมของน้ำ เนื่องจากการควบคุมคุณภาพการบดอัดและเลือกวัสดุหินถม รวมถึงขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามกำหนดอันจะก่อให้เกิดการทรุดตัวของหินถมภายหลังการก่อสร้างซึ่งนำไปสู่การแตกของแผ่นคอนกรีตคาน้ำ นอกจากนั้นการแตกของแผ่นคอนกรีตคาน้ำอาจเกิดได้จากคุณสมบัติของวัสดุหินถมและรูปร่างของพื้นฐานรากเขื่อนซึ่งอาจมีสภาพในความเป็นจริงแตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ออกแบบในกรณีของเขื่อนดินเหตุการณ์เช่นนี้จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมเขื่อนมากนัก แต่ในกรณีของเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีตการทรุดตัวที่ผิดไปจากที่คาดการณ์ย่อมส่งผลให้เกิดการแตกของแผ่นคอนกรีตคาน้ำหรือเกิดความเสียหายระหว่างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตคาน้ำได้ สำหรับในบทความนี้ผู้เขียนขอเสนอการศึกษาวิธีการควบคุมคุณภาพการบดอัดและเลือกวัสดุหินถมทั้งนี้เนื่องจากการบดอัดหินเป็นการก่อสร้างที่มีรายละเอียดที่น่าสนใจและแตกต่างจากวัสดุหินถมทั่วไป



ภาพที่ 1 รูปเขื่อนห้วงงาน [1]



ภาพที่ 2 รูปหน้าตัดเขื่อนแควน้อย [1]

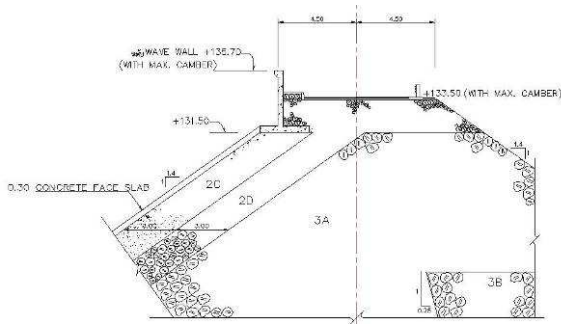
2. วัตถุประสงค์

เพื่อนำเสนอขบวนการบดอัดหินถม วิธีการควบคุมการบดอัด พฤติกรรมการก่อสร้างและข้อสังเกตจากประสบการณ์จากการบดอัดเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต โดยอาศัยกรณีศึกษาโครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ และเพื่อเชื่อมโยงปัจจัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมเขื่อน

3. รายละเอียดส่วนประกอบเขื่อนแควน้อย

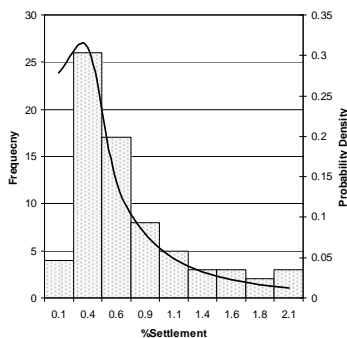
เขื่อนแควน้อยเป็นเขื่อนหินถมคาน้ำคอนกรีต มีความกว้างสันเขื่อน 9 เมตร มีความยาวสันเขื่อน 570 เมตร ความสูงเขื่อน 75 เมตร ระดับสันของหินถมอยู่ที่ระดับ + 133.50 ม.รทก. มีกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กกันคลื่น (Wave Wall) ดังแสดงภาพที่ 3 วางอยู่บนสันเขื่อนด้านเหนือน้ำสูง 2 เมตร เพื่อที่จะลดปริมาตรหินถมในตัวเขื่อน และทำหน้าที่เป็นกำแพงกันคลื่นโดยมีสัน Wave Wall อยู่ที่ระดับ +135.5 ม.รทก.ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำมีความชัน 1:1.4 (ตั้งราบ) ลาดท้ายเขื่อนมี Berm ทุกช่วงความสูง 20 เมตร มีความกว้าง 6 เมตร ก่อสร้างโดยใช้หินถมชนิด Sandstone ความหนาของแผ่นคอนกรีตคาน้ำเท่ากับ 0.30 ม. การถมบดอัดเขื่อนได้แบ่งวัสดุ

เป็นโซนต่างๆ ดังแสดงภาพที่ 2 โดยมีหน้าที่และรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 รายละเอียดกำแพงกันคลื่น (Wave Wall) [1]

3.1 Zone 1A เป็นโซนที่บดอัดอยู่บนหลัง Plinth และ Perimetric Joint เป็นดินที่มีคุณสมบัติที่บดอัดได้ยาก มีค่า Plasticity Index 10-30% และค่า Liquid Limit 20-50% ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการรั่วซึมผ่าน Perimetric Joint หรือรอยแตกโดยจะทำหน้าที่ชะลอการไหลโดยการเข้าไปอุดตันวัสดุ 2A ประสพการณ์จากหลายเขื่อนพบว่าโซน 1A สามารถช่วยรักษาการรั่วซึมได้ หากการรั่วซึมไม่มากเกินไป ภาพที่ 4 แสดงสถิติการทรุดตัวของเขื่อน CFRD สรุปจากข้อมูลของ [4] ซึ่งพบว่าเขื่อนประเภทนี้มีการทรุดตัวโดยเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ของความสูงเขื่อนและอาจเกิดการแตกร้าวและมีการไหลซึมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากเกิดจากการทรุดตัวมากกว่าร้อยละ 1 ของความสูง และมีการรั่วซึมด้วยอัตราการไหลซึมมากกว่า 1,000 ลิตร/วินาที ในทางกลับกันหากพบการรั่วซึมที่สูงในช่วงแรกแต่ลดลงด้วยตัวเองเมื่อเวลาผ่านไปส่วนใหญ่การทรุดตัวจะต่ำกว่าร้อยละ 1 ของความสูงและมีการรั่วซึมด้วยอัตราการไหลซึมน้อยกว่า 100 ลิตร/วินาที (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2551) [2] พฤติกรรมดังกล่าวอาจแสดงถึงการอุดตันของวัสดุภายในตัวเขื่อนหรือพฤติกรรม Self Healing ตามที่ได้กล่าวมา

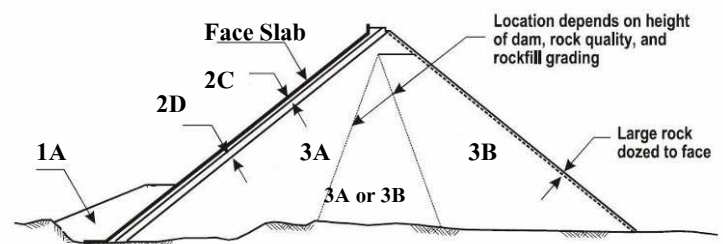


ภาพที่ 4 การกระจายตัวของร้อยละการทรุดตัวเขื่อน CFRD (สุทธิศักดิ์และคณะ, 2551) [2]

3.2 Zone 2A และ 2B เป็นชั้นระบายน้ำละเอียดและหยาบ โดย Zone 2A (Fine Filter) จะต้องป้องกันเม็ดดินจาก Zone 1A ไม่ให้ไหลผ่านไปได้ และ Zone 2B (Coarse Filter) จะต้องป้องกันเม็ดดินจาก Zone 2A ไม่ให้ไหลผ่านออกไปได้ นอกจากนั้นโซน 2A ยังทำหน้าที่รับแรงคล้ายจุดหมุนที่รับแรงกดจากการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตคานหน้าบริเวณ Perimetric Joint

3.3 Zone 2C และ 2D (Cushion Layer) เป็นวัสดุรองรับแผ่นคอนกรีตคานหน้าเพื่อให้มีการกระจายน้ำหนัก จาก Face Slab คู่อินทรม Zone 2C จะต้องมีความหนาที่บดอัดได้ยากกว่าวัสดุ 2A เพื่อลดการรั่วซึมในกรณีที่เกิด Face Slab แตกหรือ Waterstop ที่ Joint ต่างๆเกิดความเสียหาย ขนาดหินก้อนใหญ่สุดในโซน 2C มีขนาดไม่เกิน 0.075 เมตร และในโซน 2D ไม่เกิน 0.5 เมตร โซน 2C และ 2D ต้องมีความแน่นสม่ำเสมอและยุบตัวน้อยเพราะต้องรองรับแผ่นคอนกรีตคานหน้าโดยตรง

3.4 Zone 3A และ 3B (Rockfill) เป็นโซนที่ให้ความมั่นคงของเขื่อนโดยเฉพาะโซน 3A ที่มีขนาดเล็กกว่าโซน 3B เพราะต้องการความแน่นและยุบตัวต่ำเนื่องจากรับแรงกดจากน้ำ โดยทั่วไปโซนนี้จะขยายตามความสูงเขื่อน ดังภาพที่ 5 และจะก่อสร้างก่อนเพื่อให้เกิดการทรุดตัวไปล่วงหน้า สำหรับโซน 3B เป็นส่วนที่สร้างเสถียรภาพของลาดชันเขื่อนด้านท้ายน้ำ หินถมทั้งสองโซนเมื่อบดอัดแล้วจะต้องมีความแข็งแรง น้ำซึมผ่านได้ดี และมีค่า Deformation Modulus สูง ขนาดหินก้อนใหญ่สุดในโซน 3A ไม่เกิน 1.00 เมตร และในโซน 3B ไม่เกิน 1.5 เมตร

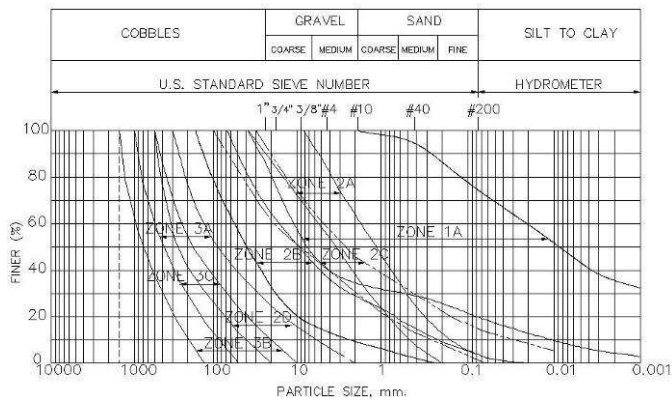


ภาพที่ 5 ส่วนของวัสดุหินถมตัวเขื่อนในโซนต่างๆ

3.5 Zone 3C (Rockfill Drainage Layer) เป็นชั้นระบายน้ำใต้ตัวเขื่อน โดยใช้หินที่มันใจได้ว่าเมื่อบดอัดแล้วจะต้องระบายน้ำได้เป็นอย่างดี กำหนดขนาดหินก้อนใหญ่สุดในโซน 3C ไม่เกิน 1.00 เมตร โซนนี้จะรองไว้ได้ฐานเขื่อนหากเกิดการรั่วซึมจะทำหน้าที่ระบายน้ำออกจากตัวเขื่อนได้เร็วและไม่

เกิดการสะสมของน้ำในหินถมซึ่งอาจนำไปสู่การเกิด Wetting Collapse ได้

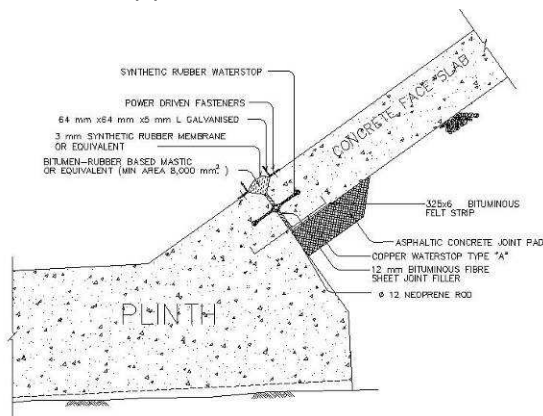
วัสดุถมตัวเชื่อมแต่ละ โชนต้องมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดขนาดผลของวัสดุ (Gradation) ดังแสดงในภาพที่ 6 และจะต้องมีค่าความสึกกร่อน(Los Angeles Abrasion) ของวัสดุหินถม Zone 2A,2B,2C,2D,3A,3B และ 3C ไม่เกิน 50% และค่าความแกร่งทนต่อสภาพอากาศ (Soundness) จะต้องมิต่ำไม่เกิน 14% เมื่อทดสอบโดยวิธี Sodium Sulphate



ภาพที่ 6 ข้อกำหนดขนาดผลของวัสดุถมแต่ละ โชน

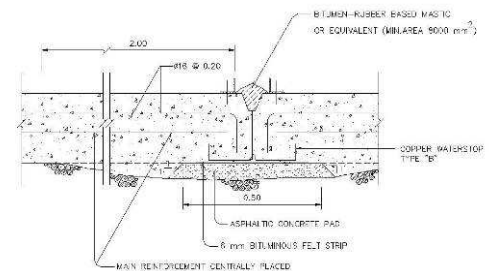
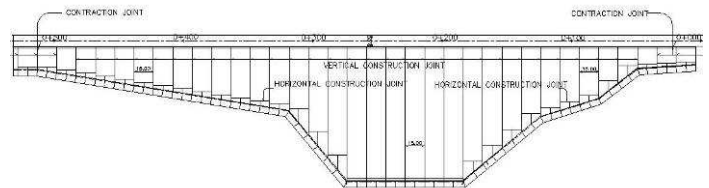
3.6 คอนกรีตฐานยันและแผ่นคอนกรีตคานหน้า

คอนกรีตฐานยัน(Plinth) เป็น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทำหน้าที่รับแรงจากแผ่นคอนกรีตคานหน้าลงสู่ฐานราก บริเวณระหว่าง Plinth กับ Face Slab จะมีรอยต่อ (Perimetric Joint) ดังแสดงภาพที่ 7 ทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึมประกอบด้วย แผ่นกั้นน้ำทองแดง (Copper water stop) แผ่นยางกั้นน้ำ (Rubber water stop) และวัสดุหุ้มผิว

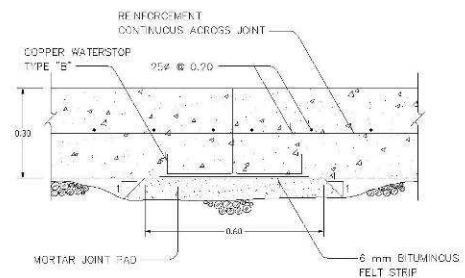


ภาพที่ 7 รายละเอียดของ Perimetric Joint[1]

แผ่นคอนกรีตคานหน้า(Concrete Face Slab) เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำหน้าที่กั้นน้ำไม่ให้ไหลผ่านชั้นหินถมรอยต่อต่างๆระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้าแบ่งเป็น 2ประเภท ดังแสดงภาพที่ 8 ได้แก่รอยต่อที่ยึดตัวได้ (Contraction Joint) เป็นรอยต่อแนวตั้งระหว่างแผ่น Concrete Face Slab โดยไม่มีการเสริมเหล็กข้ามรอยตอดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายแรงและโมเมนต์ระหว่างแผ่นคอนกรีต รอยต่อประเภทนี้จะถูกกำหนดไว้ในบริเวณที่คาดว่าจะมีการขยับตัวในลักษณะยืดอกระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้า เช่น บริเวณใกล้ฐานยันเขื่อนหรือบริเวณที่มีแนวโน้มจะเกิดการทรุดตัวต่างกัน สำหรับรอยต่อการก่อสร้าง (Construction Joint) เป็นรอยต่อแนวตั้งระหว่างแผ่น Concrete Face Slab โดยการเสริมเหล็กจะต่อเนื่องกันทำให้สามารถถ่ายแรงและโมเมนต์ระหว่างแผ่นคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามหลักการในการเสริมเหล็กในแผ่นคอนกรีตคานหน้านั้น จะพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมอนุกรมเท่านั้น



(Vertical Contraction Joint)

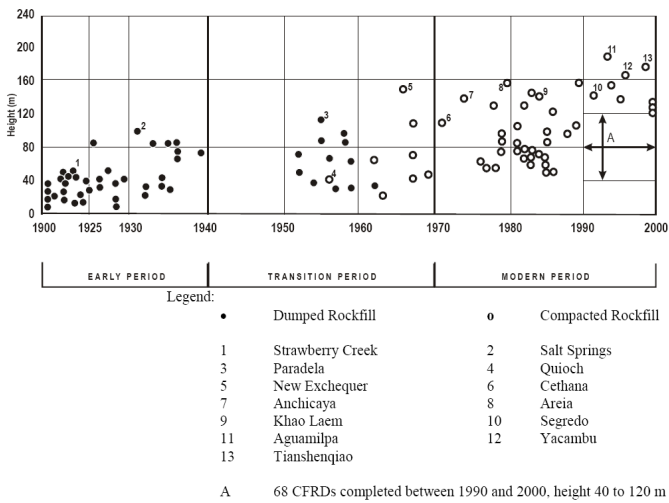


(Vertical Construction Joint)

ภาพที่ 8 ชนิดของรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตคานหน้า[1]

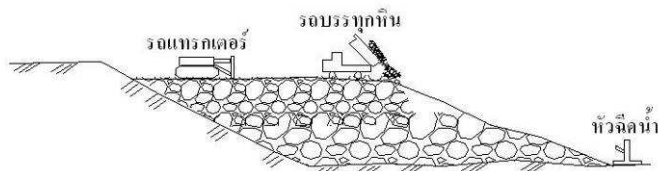
4. วิธีการถมบดอัดหิน

ในอดีตการก่อสร้างเขื่อนหินถมนั้นใช้วิธีถมหินโดยไม่ได้บดอัด (Dumped Rockfill) ซึ่งทำให้ตัวเขื่อนเกิดการทรุดตัวมากและนำไปสู่การแตกของแผ่นคอนกรีตคาน้ำทำให้เขื่อนประเภทนี้ไม่ได้รับความนิยม อย่างไรก็ตามวิธีการก่อสร้างเขื่อน Concrete Face Rockfill Dam ได้เปลี่ยนแปลงจากที่ก่อสร้างเป็นเขื่อนหินถมแบบ Dumped Rockfill มาเป็นเขื่อนหินบดอัด (Compacted Rockfill) [3] ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งเป็นผลให้การทรุดตัวของเขื่อนลดลงอย่างมากและทำให้สามารถก่อสร้างเขื่อนได้สูงขึ้น



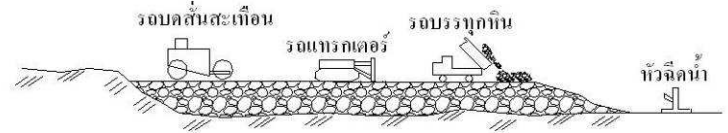
ภาพที่ 9 วิวัฒนาการของการก่อสร้างเขื่อน CFRD [3]

วิธีการก่อสร้างแบบเดิมดำเนินการโดยใช้การบรรทุกหินในกะบะรถแล้วยกกะบะเทให้หินหล่นลงไปตามความลาดชันของกองหินแล้วก็ฉีดน้ำ (Sluice) เพื่อให้เกิดความหล่อลื่นและใช้แรงน้ำในการจัดเรียงหิน ดังแสดงภาพที่ 10



ภาพที่ 10 วิธีการถมหินโดยการปล่อยให้หินตกลงจากกอง

สำหรับการบดอัดหินในการก่อสร้างเขื่อนแควน้อยดำเนินการโดยใช้รถบรรทุกหินมาปล่อยหินลงเป็นกองๆ ด้านบนชั้นบดอัด แล้วใช้รถแทรกเตอร์ไถวัสดุลงสู่ชั้นด้านล่าง ความหนาของชั้นหินถมจะขึ้นกับขนาดของหินที่จะนำมาถม ในขณะที่ Dump หินลงจากท้ายรถบรรทุกและขณะเกลี่ยหินด้วยรถแทรกเตอร์จะฉีดน้ำด้วยหัวฉีดน้ำเพื่อให้วัสดุขนาดเล็กออกจากผิวของหินใหญ่ หลังจากนั้นก็ทำการบดอัดโดยใช้รถบดล้อเหล็กเรียบแบบสั่นสะเทือน (Vibrating Roller) ขนาด 10 ตัน ดังแสดงภาพที่ 11 ทั้งนี้การบดอัดโดยวิธีนี้จะให้คุณภาพการบดอัดที่ดีและยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักร เนื่องจากวัสดุขนาดเล็กจะปกคลุมวัสดุขนาดใหญ่ วัสดุขนาดเล็กนี้จะทำหน้าที่เสมือนชั้นรองการบดอัดทำให้การบดอัดทำได้โดยง่ายและยังรักษาคือของเครื่องจักรบดอัด นอกจากนี้การใช้รถแทรกเตอร์ไถวัสดุลงชั้นบดอัดส่วนใหญ่ไม่สามารถไถวัสดุขนาดเล็กลงไปได้มากส่งผลให้ผิวสัมผัสของวัสดุขนาดใหญ่สะอาดและจะทำให้พลังงานการบดอัดจากการสั่นสะเทือนถูกส่งถ่ายได้ดีทำให้มวลหินด้านล่างแน่นตัวขึ้นได้



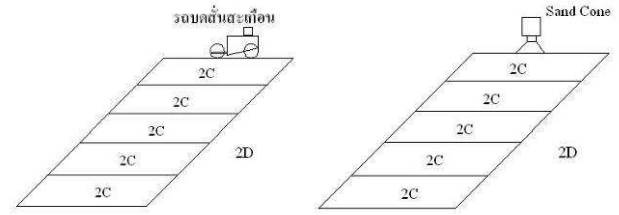
ภาพที่ 11 วิธีการถมหินแล้วบดอัดเป็นชั้นๆ

การถมบดอัดหิน Zone 3A,3B,3C และ 2D สำหรับการก่อสร้างเขื่อนแควน้อยได้เลือกใช้วิธีการถมหินแล้วบดอัดเป็นชั้นๆ (Compacted in Layers) ดังแสดงภาพที่ 12



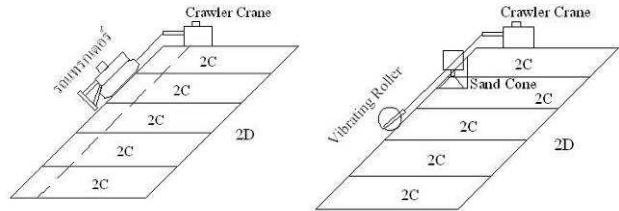
ภาพที่ 12 ขั้นตอนถมบดอัดหินการก่อสร้างเขื่อนแควน้อย

สำหรับการถมบดอัดวัสดุ Cushion Layer Zone 2C ที่มีความลาดเอียง 1:1.4 (ตั้ง:ราบ) และวัสดุ Zone 2C เป็นส่วนที่สัมผัสติดกับแผ่นคอนกรีตาดหน้า ดังแสดงภาพที่ 13 วิธีการบดอัด Zone 2C เริ่มโดยการบดอัดในแนวราบเป็นชั้นๆตามปกติโดยใช้รถแทรกเตอร์ปรับแต่งผิวลาดเอียง (Trimming) ให้ได้ความชันตามกำหนดแล้วจึงบดอัดในแนวลาดเอียงโดยใช้ Vibrating Roller แบบลากขึ้น-ลงในแนวลาดชันโดยใช้ Crawler Crane ขนาด 50 ตันเป็นตัวควบคุมดังแสดงภาพที่ 14 พร้อมควบคุมความแน่นให้ใกล้เคียงกับความแน่นที่ได้จากการทำแปลงทดสอบในแนวราบภาพที่ 15 แสดงขั้นตอนการบดอัดและทดสอบความแน่นของวัสดุโซน 2C สำหรับส่วนที่อยู่ใกล้ Plinth จะใช้ Vibrating Plate ติดกับรถ Backhoe ดำเนินการบดอัดจากด้านล่าง ดังแสดงภาพที่ 16



ก) บดอัดในแนวราบ

ข) ทดสอบความแน่น

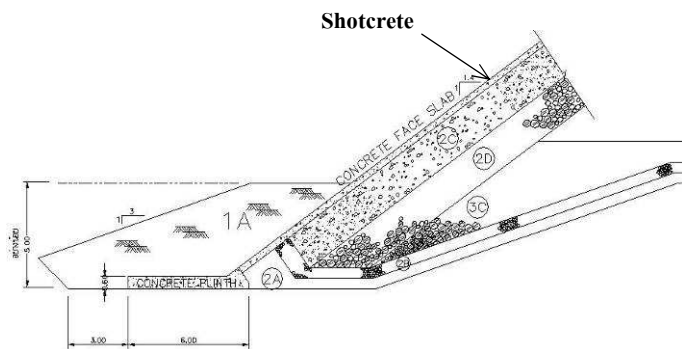


ค) ใช้รถแทรกเตอร์ปรับแต่ง

ง) บดอัดแนวเอียงและทดสอบ

ความแน่น

ภาพที่ 15 การบดอัดและทดสอบความแน่นของวัสดุโซน 2C



ภาพที่ 13 วัสดุรองแผ่นคอนกรีต [1]



ภาพที่ 16 การบดอัดวัสดุโซน 2C ในแนวลาดเอียงโดยใช้ Vibrating Plate ติดกับรถ Backhoe



ภาพที่ 14 การบดอัดวัสดุโซน 2C ในแนวลาดเอียงโดยใช้ Vibrating Roller

5. สภาพธรณีวิทยาของหินฐานรากและหินถม

ชั้นหินที่พบในพื้นที่โครงการฯ สามารถแบ่งแยกชั้นหินออกเป็น 4 หน่วยย่อยได้แก่ 1. หน่วยหินทรายชั้นบนประกอบด้วยหินทรายเม็ดละเอียดถึงปานกลาง 2. หน่วยหินทรายชั้นกลางประกอบด้วยหินทรายเม็ดละเอียดถึงปานกลางแทรกสลับกับหินทรายปนทรายแป้งและหินทรายแป้ง 3. หน่วยหินทรายแป้งประกอบด้วยหินทรายแป้งสลับกับหินทรายแป้งปนทรายและมีหินดินดานกับหินกรวดมนปนอยู่บ้างไม่มาก 4. หน่วยหินทรายชั้นล่างประกอบด้วยหินทรายเม็ดละเอียดถึงปานกลางแทรกสลับกับหินทรายแป้งและหินทรายแป้งปนทราย ชั้นหินมีการผุกร่อนในระดับที่ลึกมาก ชั้นหินหน่วยหินทรายแป้งและหน่วยหินทรายชั้น

กลางมีการแตกตัว (Slaking) ชั้นหินมีอัตราการรั่วซึมปานกลาง ในชั้นหินผุและมีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น [1]

สำหรับสภาพธรณีวิทยาของฐานรากเขื่อนแควน้อย ภายหลังจากที่ได้ทำการขุดเปิดชั้นดินและชั้นหินแล้ว ประกอบด้วยชั้นหินทราย (Sandstone) สีน้ำตาลแกมเหลือง สีน้ำตาลอ่อน มีความแข็งมาก การแตกหักของชั้นหินสูง ความหนาของชั้นหินประมาณ 0.3 ถึง 1.5 เมตร ชั้นหินมีการแทรกสลับด้วยหินโคลน (Mudstone) สีเทาความหนาของชั้นหินประมาณ 0.3 ถึง 0.7 เมตร โดยมีหินทรายแป้ง (Siltstone) เป็นชั้นหินฐานรากที่รองรับตัวเขื่อนแควน้อยเกือบทั้งหมด ชั้นหินมีสีแดงแกมม่วง มีความแข็งถึงแข็งปานกลาง มีการแตกหักของชั้นหินสูง พบโครงสร้างทางธรณีวิทยามีการโค้งงอของชั้นหิน [1]

6. การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของการบดอัดหิน

การควบคุมคุณภาพของการบดอัดหินประกอบด้วย การควบคุมความหนาแน่น, ขนาดคละ, ความสึกกร่อนและค่าความแกร่งทนต่อสภาพอากาศ

6.1 การทำแปลงทดสอบ (Test Section)

การก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพของหินถมในสนาม จำเป็นต้องมีการทดสอบการบดอัดหินในแปลงทดลองก่อน (Test Section) เพื่อกำหนดขบวนการของการบดอัดคือ ความหนาของหินถม จำนวนเที่ยวการบดอัด ปริมาณน้ำที่ใช้ ผลิตขณะบดอัด ชนิดเครื่องมือบดอัด และชนิดของหินถม

ขั้นตอนและวิธีการทำแปลงทดสอบงานถมบดอัดหิน มีขั้นตอน ดังแสดงภาพที่ 17 โดยเตรียมหินถมให้มีความหนาตามข้อกำหนดในแต่ละ Zone ที่จะทดสอบ เช่น Zone 3A เท่ากับ 1 เมตร, Zone 3B เท่ากับ 1.5 เมตร และ Zone 3C เท่ากับ 1 เมตรแล้วแบ่งพื้นที่แปลงทดสอบเป็นแปลงๆ ความกว้างประมาณใกล้เคียงกับความกว้างล้อรถบดสันสะเทือน กำหนดปริมาณน้ำที่จะใช้ผลิตขณะบดอัดหินถมในแต่ละแปลง และกำหนดจำนวนเที่ยวของการบดอัด (Pass) ทำการสำรวจระดับพื้นที่ในแต่ละแปลงเป็นตาราง Grid ก่อนและหลังการบดอัดในแต่ละเที่ยว ทำให้สามารถคำนวณการทรุดตัว เนื่องจากการบดอัดเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับจำนวนเที่ยวที่ใช้บดอัดในแต่ละแปลงการทดสอบ (ภาพที่ 18) โดยจะสามารถเลือกปริมาณน้ำที่ใช้ ต่อปริมาตร

หินและจำนวนเที่ยวการบดอัดที่เหมาะสม โดยสังเกตจากกราฟเมื่อมีการทรุดตัวที่คงที่ จากนั้นจะทำการหาความหนาแน่นของหินถมบดอัด ณ แปลงที่มีการบดอัดที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมของแน่นของการถมบดอัดหินในสนาม หากมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุหินถมหรือมีการเปลี่ยนเครื่องบดสันสะเทือนต้องมีการทำแปลงทดสอบใหม่

แปลงที่ 1	แปลงที่ 2	แปลงที่ 3
Water 30% Pass	Water 35% Pass	Water 40% Pass
6,8,10,12	6,8,10,12	6,8,10,12

(กำหนดพื้นที่แปลงทดสอบเป็นแปลงๆ)



(เตรียมหินถมให้มีความหนาตามข้อกำหนด)



(การนิรนํ้าขณะบดอัด)

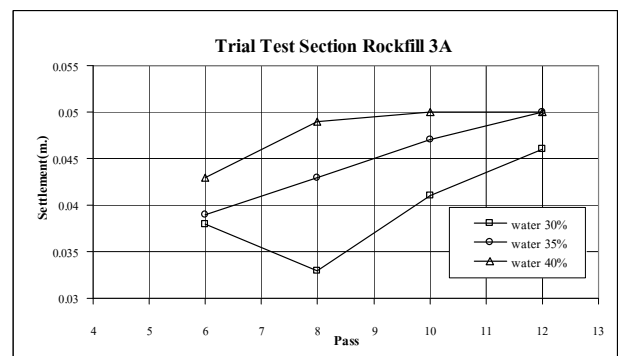


(การบดอัด)



(การสำรวจระดับการทรุดตัว)

ภาพที่ 17 วิธีการทำแปลงทดสอบงานถมบดอัดหิน



ภาพที่ 18 ค่าระหว่างระยะการทรุดตัวกับจำนวนเที่ยวที่ใช้บดอัดแต่ละแปลงการทดสอบ

ผลจากการทำแปลงทดสอบงานหินถมบดอัดแต่ละโซนของเขื่อนแควน้อยทำให้ได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดเทียบกับปริมาตรหิน จำนวนเที่ยวของการบดอัดและค่าความแน่นซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1[4]

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบ Test Section แต่ละ โซน [4]

Material	Zone	Max.thickness after compaction (mm.)	Compaction Requirements(Test Section)			
			Compaction Equipment	Number of Passes	% water	Dry Density (t/m3)
Cushion	2C	500	10t Vibratory	8	35	2.10
Cushion	2D	500	10t Vibratory	10	30	2.05
Rockfill	3A	1000	10t Vibratory	10	40	2.10
Rockfill	3B	1500	10t Vibratory	9	30	2.20
Rockfill	3C	1000	10t Vibratory	10	30	2.05

6.2 การทดสอบความแน่น (Density Test) ของหินถม

การทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพความแน่นของงานหินถมบดอัดใช้วิธีแทนที่ด้วยน้ำ (Water Replacement) ดังแสดงภาพที่ 19 หลังจากนั้นนำหินที่ซึ่งเสร็จแล้วทดสอบ Gradation Test ทั้งนี้การชั่งน้ำหนักหินดำเนินการโดยเครื่องชั่งรถบรรทุกที่ใช้สำหรับควบคุมน้ำหนักกรวดโดย Load Cell ที่ใช้ต้องมีการปรับเทียบให้เที่ยงตรงเสมอ



ภาพที่ 19 ทดสอบความแน่น(Density Test) โดยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ

สำหรับการควบคุมคุณภาพการทดสอบความแน่น (Density Test) ของงานหินถมของโซน 2C มีการควบคุมการบดอัด 2 ชั้นตอน ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่นของชั้นบดอัดเมื่อบดอัดในแนวราบตามชั้นการบดอัดและการทดสอบความหนาแน่นเมื่อเสร็จสิ้นการบดอัดในแนวลาดเอียงได้ใช้วิธี Sand Cone ดังแสดงภาพที่ 20



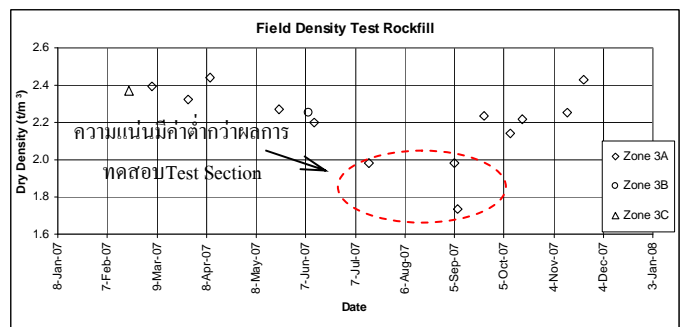
ภาพที่ 20 การทดสอบความแน่น (Density Test) โดยวิธี Sand Cone สำหรับวัสดุ 2C

6.3 การควบคุมคุณภาพขนาดคละของวัสดุหินถมแต่ละโซน (Gradation) จะทำการทดสอบบริเวณกองวัสดุ (Stockpile) ก่อนที่จะนำไปถมบดอัดและจะทำการทดสอบหลังจากบดอัดเสร็จแล้ว การควบคุมคุณภาพขนาดคละนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับความหนาแน่นดังจะได้อธิบายข้อมูลต่อไป

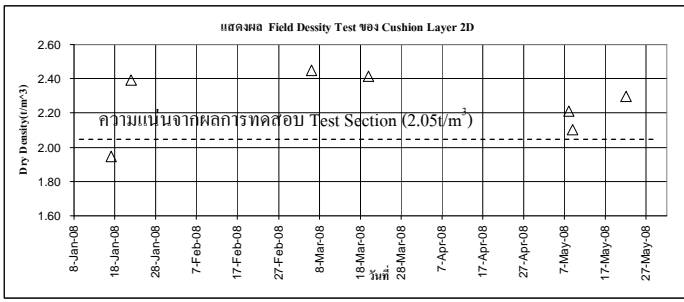
7. ผลการทดสอบคุณภาพของการบดอัดหิน

ผลการทดสอบคุณภาพการถมบดอัดหินในสนามของเขื่อนแควน้อย มีรายละเอียดดังนี้

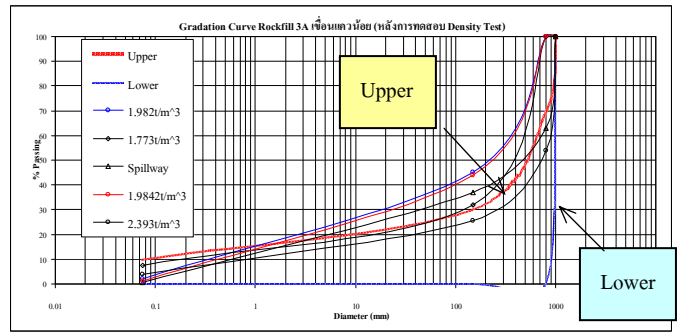
7.1 ความหนาแน่นของหินถมในสนามแต่ละโซนแสดงดังภาพที่ 21-23



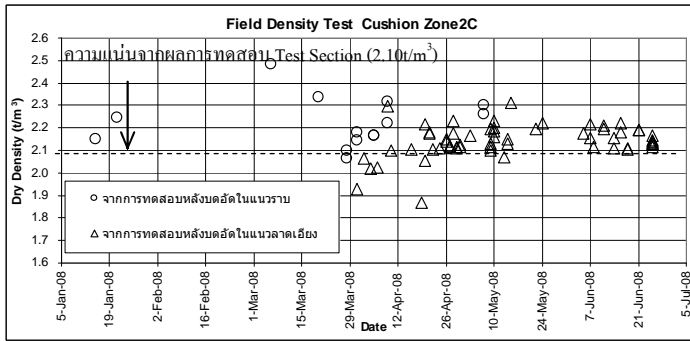
ภาพที่ 21 ความหนาแน่นของหินถม Zone3A,3B,3C



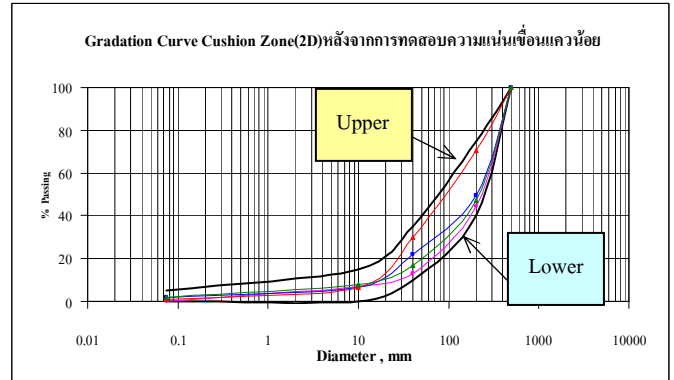
ภาพที่ 22 ความหนาแน่นของหินถม Zone2D



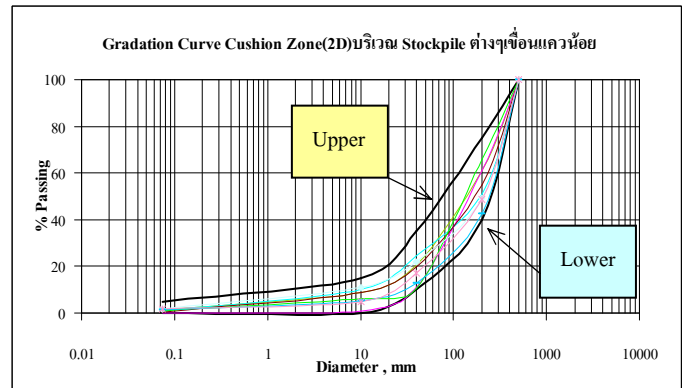
ภาพที่ 24 ขนาดผลของวัสดุหินถมโซน3Aหลังจากการบดอัด



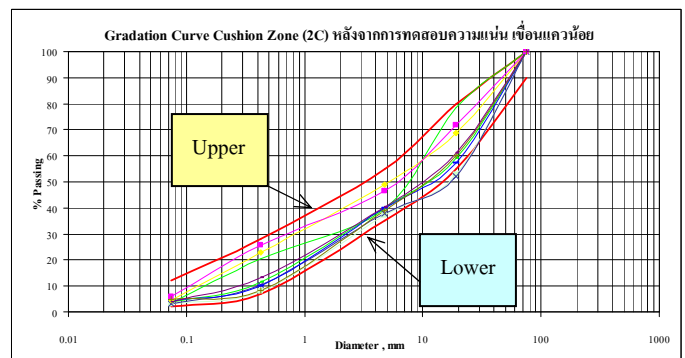
ภาพที่ 23 ความหนาแน่นของหินถม Zone2C



ภาพที่ 25 ขนาดผลของวัสดุหินถมโซน2D หลังจากการบดอัด



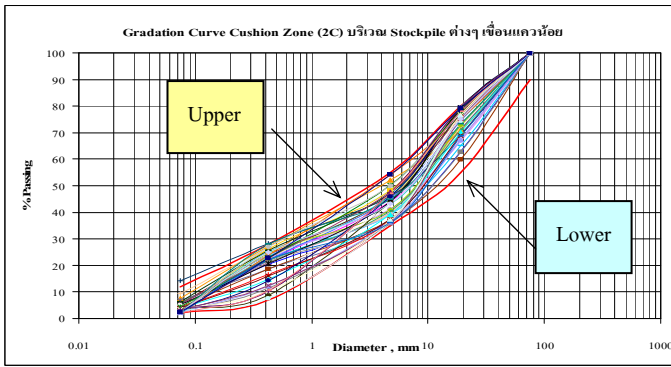
ภาพที่ 26 ขนาดผลของวัสดุหินถมโซน 2D ก่อนการบดอัด



ภาพที่ 27 ผลการทดสอบขนาดผลวัสดุหินถมโซน2Cหลังจากการบดอัด

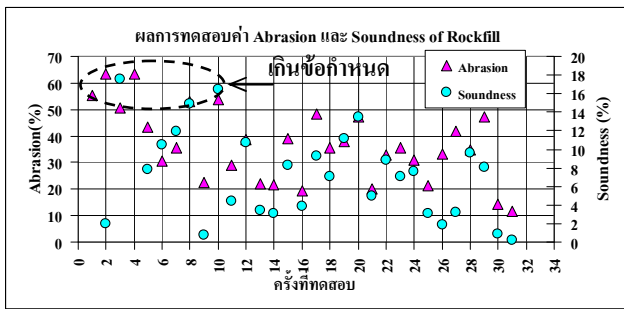
ผลจากการทดสอบค่าความหนาแน่นของหินถมเขื่อนแควน้อยโซน 3A, 3B และ 3C พบว่าค่าความหนาแน่นส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทำแปลงทดลองแต่บางตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าจึงต้องมีการบดอัดใหม่ในชั้นนั้นๆ ค่าความหนาแน่นของหินถมที่มีค่าต่ำอาจเกิดจากหินถมแหล่งใหม่มีค่า Density ของเนื้อหินต่ำ หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดจากเครื่องชั่งน้ำหนักหินที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักหินจากการทดสอบ Field Density นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อขนาดผลของหินถมโซน 3A เบี่ยงเบนจากที่ข้อกำหนดระบุไว้ (ภาพที่ 24) ค่าความหนาแน่นของหินถมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับผลการทดสอบความหนาแน่นของ Zone 2C (ภาพที่ 23) จะเห็นถึงความลำบากในการบดอัดในแนวเอียงให้ได้ความหนาแน่นที่ดีซึ่งเห็นได้ว่าผลการทดสอบหลังการบดอัดในแนวราบส่วนใหญ่จะผ่านเกณฑ์การทดสอบมากกว่าการทดสอบหลังการบดอัดในแนวเอียง

7.2 ผลการทดสอบขนาดผลของวัสดุหินถมแต่ละโซน (Gradation) แสดงดังภาพที่ 24-28 ซึ่งพบว่าขนาดผลส่วนใหญ่เป็นไปตามข้อกำหนดยกเว้นหินถมโซน 3A ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างชัดเจน โดยหินที่มีขนาดผลผิดจากข้อกำหนดจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าเกณฑ์ (2.10 t/m^3)

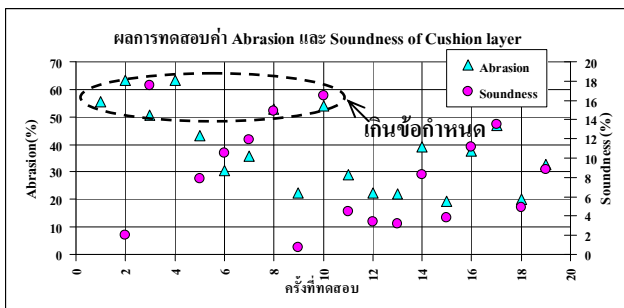


ภาพที่ 28 ขนาดคละของวัสดุหินถม โซน 2C ก่อนการบดอัด

7.3 ผลการทดสอบค่าการสึกกร่อนของวัสดุหินถม (Los Angeles Abrasion) และค่าความมั่นคงของวัสดุหินถม (Soundness) แสดงดังภาพที่ 29-30



ภาพที่ 29 ค่าการสึกกร่อนของและค่าความมั่นคงของวัสดุหินถม Zone 3A,3B



ภาพที่ 30 ค่าการสึกกร่อนของและค่าความมั่นคงของวัสดุหินถม Zone 2C,2D

ผลการทดสอบค่าการสึกกร่อนและค่าความแกร่งทนต่อสภาพอากาศของวัสดุหินถมพบว่าวัสดุบางตัวอย่างมีค่า Abrasion เกิน 50% และค่า Soundness เกิน 14% ดังรูปที่ 29 และ 30 ดังนั้น ในการถมบดอัดหินจะไม่นำวัสดุที่อยู่ในเหมือนหินที่มีค่า คุณสมบัติเกินข้อกำหนดมาใช้งาน

8. ข้อสังเกตจากการก่อสร้าง

การถมบดอัดหินเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อความมั่นคงของเขื่อน ข้อสังเกตทางวิชาการในระหว่างก่อสร้างการถมบดอัดมีดังนี้

8.1 การบดอัดหินถมที่ใช้หินขนาดใหญ่ (Oversize) หรือมีความหนาของชั้นหินถมก่อนบดอัดที่มีความหนามากเกินกำหนด (ภาพที่ 31) จะทำให้การบดอัดไม่มีประสิทธิภาพเพราะแรงกระทำและการสั่นสะเทือนจากการบดอัดจะไม่สามารถส่งถ่ายไปถึงด้านล่างของชั้นหินถม



ภาพที่ 31 หินขนาดใหญ่เกินขนาดกำหนด (Oversize)

8.2 เนื่องจากแหล่งกำเนิดหินสำหรับหินถมเป็นหินตะกอนที่มีชั้นหินทรายแทรกด้วยหินโคลน (Mudstone) โดยหินโคลนสามารถเกิดการ Slaking ได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 32 หินที่สลายตัวได้ง่ายนี้ไม่เหมาะในการใช้เป็นวัสดุหินถม อย่างไรก็ตามในขบวนการก่อสร้างไม่สามารถคัดแยกหินโคลนออกได้โดยง่ายเนื่องจากบางครั้งเป็นชั้นแทรกสลับที่มีความหนาไม่มาก ทำให้จำเป็นต้องใช้หินดังกล่าวในการก่อสร้างแต่เราสามารถใช้ในการควบคุมความหนาแน่นในสนามมาใช้ในการควบคุมคุณภาพการบดอัดได้



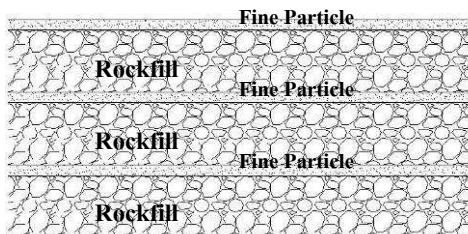
ภาพที่ 32 การสลายตัวของหิน Mudstone

8.3 กรณีหินถมที่ใช้บดอัดมีความแข็งแรงไม่พอ เมื่อบดอัดหินจะแตกที่ผิวการบดอัด ทำให้มีดินเม็ดละเอียดปะปนอยู่มาก เกิดน้ำขังเป็นจุดๆ ดังแสดงภาพที่ 33 ดินเม็ดละเอียดนี้สามารถจะทำให้ไม่สามารถระบายน้ำออกจากเขื่อนได้ดีตามออกแบบ การทดสอบ Point Load Index เพื่อเลือกหินสามารถช่วยคัดแยกหินที่มีความแข็งแรงต่ำออกไปได้



ภาพที่ 33 น้ำขังที่บริเวณผิวหน้าของการบดอัด

8.4 ลักษณะของหินหลังการบดอัดแสดงดังภาพที่ 34 โดยจะประกอบด้วยชั้นหินบดอัดสลับกับชั้นดินเม็ดละเอียดที่เกิดจากการแตกของผิววัสดุระหว่างการบดอัดดังแสดงภาพที่ 35 หรือวัสดุละเอียดที่ได้จากแหล่งหิน ชั้นดินเม็ดละเอียดดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นวัสดุทรายละเอียดหรือทรายแป้งมีความหนา 10-15 ซม. และได้ถูกใช้เป็นชั้นที่รองรับล้อรถบดอัดซึ่งได้กล่าวมาข้างต้น

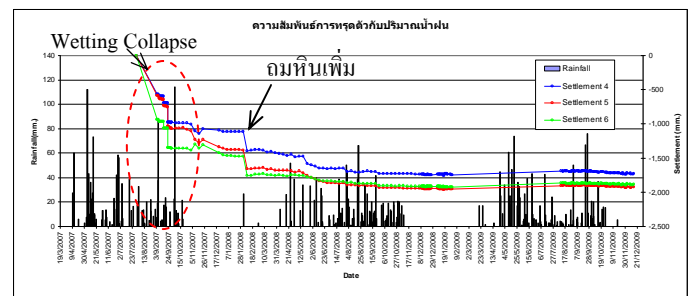


ภาพที่ 34 ลักษณะชั้นบดอัดหลังการก่อสร้าง



ภาพที่ 35 การแตกของวัสดุหินถมหลังการบดอัด

8.5 จากผลการตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวของเขื่อนขณะดำเนินการก่อสร้างดังแสดงในภาพที่ 36 พบว่าการทรุดตัวเกิดมากในช่วงแรกของการก่อสร้างและพฤติกรรมทรุดตัวนั้นปรากฏการยุบตัวที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน โดยพฤติกรรมทรุดตัวจากฝนดังกล่าวจะเกิดเฉพาะในช่วงแรกของการก่อสร้าง ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมที่สามารถพบได้ในเขื่อนหินถมเรียกว่าพฤติกรรม Wetting Collapse พฤติกรรมดังกล่าวจะไม่มีผลต่อการแตกของแผ่นคอนกรีตคานหน้าเพราะส่วนใหญ่เกิดก่อนการเริ่มก่อสร้างแผ่นคอนกรีตคานหน้า



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของหินถมกับปริมาณน้ำฝน

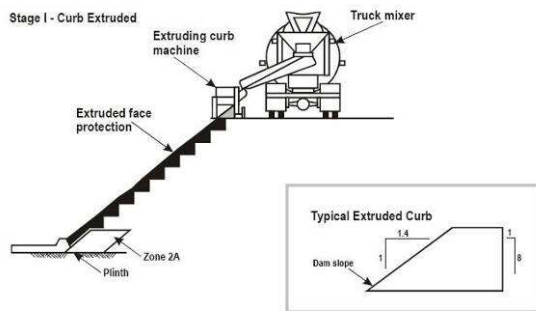
8.6 เนื่องจากเขื่อนหินถมมักมีความชันมาก การบดอัดให้เกิดความแน่นบริเวณลาดชันอาจทำได้ยากและอาจเกิดการไหลของวัสดุในลักษณะการพิบัติแบบลาดอนันต์ (ภาพที่ 37) การใช้ Extruded Curb จะทำให้การบดอัดมีประสิทธิภาพและรวดเร็วมากขึ้น (ภาพที่ 38) เนื่องจากจะเป็นการรองรับแรงดันด้านข้างจากการขยายตัวของวัสดุขณะบดอัด



ภาพที่ 37 การไหลของหิน Zone 3A บริเวณด้านเหนือน้ำ



ภาพที่ 40 คอนกรีตฉีคพื้น(Shotcrete) เกิดการเลื่อนไหล



ภาพที่ 38 Extruded Curb [3]

8.7 วัสดุ Cushion Layer Zone 2C จำเป็นต้องพ่น Shotcrete ปิดทับหลังการบดอัดเพื่อป้องกันการกัดเซาะจากน้ำฝน (ภาพที่ 39) ทั้งนี้ Shotcrete อาจเกิดการเลื่อนไหลได้บ้าง แต่จะไม่ส่งผลต่อหน้าที่ของ Cushion Layer (ภาพที่ 40)



ภาพที่ 39 ความเสียหายจากการกัดเซาะของน้ำผิวดินและน้ำฝนของวัสดุ โชน 2C

9. สรุปผลการศึกษา

การสังเกตและตรวจวัดผลจากการควบคุมการก่อสร้าง ตัวเขื่อนแควน้อยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. การควบคุมการก่อสร้างจะได้ประสิทธิผลดีหากเข้าใจถึงหลักการการออกแบบองค์ประกอบต่างๆของเขื่อน

2. ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนาแน่นของการบดอัด หินถมได้แก่ ขนาดผลของวัสดุหลังการบดอัด ความแรงหรือระดับความผูกของหินถม และขั้นตอนการกองวัสดุ เกือบและให้น้ำ

3. ความแรงของวัสดุมีความสัมพันธ์กับขนาดผลของวัสดุหลังการบดอัดเนื่องจากขนาดผลอาจเปลี่ยนแปลงไปหากวัสดุแตกมากระหว่างการบดอัดอันจะส่งผลให้ความแน่นของการบดอัดลดลง

4. การบดอัดชั้น Cushion Zone ที่มีความลาดชันสูงสามารถดำเนินการได้อย่างระมัดระวังภายใต้การควบคุมวิธีการและการทดสอบที่เหมาะสมอย่างไรก็ตามการใช้ Extruded Curb อาจช่วยลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพการบดอัดได้



10. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กรมชลประทาน โครงการเขื่อนแควน้อย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ กลุ่มบริษัทที่ปรึกษาและผู้รับจ้างที่ได้กล่าวถึงในช่วงต้นของบทความสำหรับข้อมูลต่างๆที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการวิจัย

บรรณานุกรม

- [1] กรมชลประทาน (2545). การคำนวณเพื่อการออกแบบและอาคารประกอบ โครงการแควน้อย จังหวัดพิษณุโลก. โดยบริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, บริษัท พี แอนด์ ซี และบริษัท กรีเอทีฟ เทคโนโลยี จำกัด.
- [2] สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, ชีโนรส ทองธรรมชาติ, มนตรี จินากุลวิวัฒน์ และวรุฒ พจน์ศิลป์ชัย.(2551).พฤติกรรมเขื่อนหินถมคอนกรีตคาน้ำ : สภาวะปกติและแผ่นดินไหว. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] ICOLD, (2004). Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction. Committee on Materials for Fill Dams.
- [4] กรมชลประทาน (2552). รายงานสรุปสุดท้ายผลการทดสอบวัสดุโครงการเขื่อนแควน้อย จังหวัดพิษณุโลก. โดยบริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, บริษัท พี แอนด์ ซี และบริษัท กรีเอทีฟ เทคโนโลยี จำกัด.