

การจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเขื่อนดินขณะการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ

Displacement Modeling of Earth Dams During the Construction of a Cutoff Wall

จตุพร บัวหลวง^{1,*} วรากร ไม้เรียง² กมล อมรฟ้า³ และบรรพต กุลสุวรรณ⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยมหาวชิราลงกูฏราชบุรี จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: Chatupon.b@ku.th

บทคัดย่อ

กำแพงทึบน้ำมีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณการไหลซึมผ่านชั้นฐานรากและเพิ่มเสถียรภาพเขื่อน อย่างไรก็ตามผลกระทบจากปัจจัยอื่นเช่น การเคลื่อนตัวของดินบริเวณกำแพงทึบน้ำในระหว่างการก่อสร้าง โดยงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเขื่อนดินช่องเขาขาดความสูง 33 เมตร ที่มีกำแพงทึบน้ำยาว 408 เมตร ลึกสูงสุด 67 เมตร และมีฐานรากหินผุสลายซับซ้อน ซึ่งในอดีตเคยประสบปัญหาแรงดันน้ำสูงและการทรุดตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม SIGMA/W ภายใต้กรณีศึกษาต่างๆ เพื่อประเมินผลกระทบจากกระบวนการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำและการแทรกปนของน้ำโคลนเบนโทไนท์ในโครงการพัง โดยจากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนการขุดร่องกำแพงพบว่ามีการเคลื่อนตัวสูงสุดในชั้นดินตัวเชื่อมและชั้นดินเดิมในระหว่างการขุดร่องกำแพงประมาณ 1-8 เซนติเมตร ทางด้านเหนือน้ำ และ 1-6 เซนติเมตร ทางด้านท้ายน้ำ และเมื่อถมวัสดุกลับกำแพงมีแนวโน้มเคลื่อนตัวไปด้านท้ายน้ำประมาณ 1-2 เซนติเมตร และการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลเครื่องมือวัดแนวราบในสนาม พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของชั้นดินเดิมในสนามมีปริมาณน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างด้านค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิมและดินตัวเชื่อม การศึกษาผลกระทบจากการแทรกปนของน้ำโคลนในโครงการพังแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำโคลนมีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดอาจสูงถึง 0.6 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง ลักษณะโพรง และรูปแบบการพังที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางสำคัญสำหรับการควบคุมการก่อสร้าง การประเมินและซ่อมแซมข้อบกพร่องของเขื่อน รวมถึงการติดตามพฤติกรรมเขื่อนในระยะยาว

คำสำคัญ: กำแพงทึบน้ำ, เขื่อนดิน, การเคลื่อนตัว, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Cutoff walls play a crucial role in reducing seepage through the foundation and increasing dam stability. However, impacts from other factors, such as soil movement around the cutoff wall during construction, must also be considered. Hence, this study

investigated the movement behavior of a 33-meter-high earth saddle dam with a 408-meter-long, up to 67-meter-deep cutoff wall and a complex weathered rock foundation, which previously faced issues related to high pore pressure and settlement. The objective was to simulate the movement behavior using a 2D Finite Element model (SIGMA/W) under various cases to evaluate the impacts from the cutoff wall construction process and the intrusion of bentonite slurry in collapse voids. Analysis results during the trench excavation stage showed maximum movement in the embankment and residual soil, approximately 1-8 centimeters upstream and 1-6 centimeters downstream. In the backfilling stage, the cutoff wall showed a tendency to move downstream approximately 1-2 centimeters. Comparison with field lateral movement data revealed that the magnitude of movement in the original soil in the field was less than that predicted by the analysis, which may be a result of the difference in elastic modulus between the original soil and the embankment soil. Investigation into the effect of bentonite slurry intrusion in collapse voids demonstrated that slurry quantity has a direct and significant impact on movement, with maximum associated movement potentially reaching 0.6 centimeters, depending on the location, void characteristics, and failure pattern. These findings provide important guidance for construction control, dam defect assessment and repair, as well as long-term dam behavior monitoring.

Keywords: Cutoff Wall, Dam, Deformation, Finite Element

1. คำนำ

กำแพงทึบน้ำ (Cutoff Wall) มีบทบาทสำคัญในการลดการไหลซึมของน้ำที่ผ่านชั้นฐานรากของเขื่อนดิน ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงสร้างเขื่อน และลดปริมาณการไหลซึม อย่างไรก็ตาม กระบวนการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของตัวเขื่อนและฐานรากได้ ปัญหาที่

อาจเกิดขึ้น เช่น การเคลื่อนตัวของดินบริเวณโดยรอบกำแพงทึบน้ำ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงภายในเขื่อน เป็นต้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาพฤติกรรมของเขื่อนดินเนื้อเดียวที่ทำหน้าที่ปิดกั้นช่องเขาขาด (Saddle Dam) ซึ่งในอดีตมีเหตุการณ์ที่เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวจากการที่ระดับน้ำในอ่างสูงเกินระดับเก็บกัก [1] ดังนั้นการปรับปรุงเสถียรภาพของเขื่อนด้วยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำใต้ดินจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ เช่น ความลึกของการขุดร่อง การทำงานของเครื่องจักร การแทรกตัวของชั้นดินเหนียวภายในตัวกำแพง การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลการเคลื่อนตัวจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เช่น หมดวัดการทรุดตัวและเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ข้อมูลทั่วไปของเขื่อนดินช่องเขาขาด

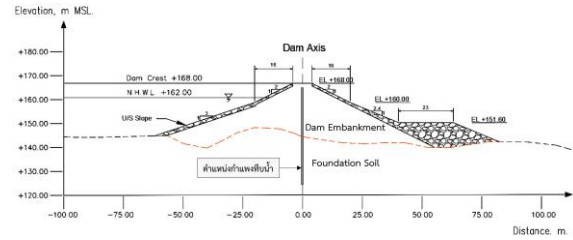
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเขื่อนดินช่องเขาขาด

เขื่อนดินช่องเขาขาด (Saddle Dam) เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียวที่ปิดช่องเขาเพื่อกั้นไม่ให้น้ำในอ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อนไหลออกมาตามช่องเขาขาด โดยเขื่อนที่ศึกษาได้มีการประเมินความเสี่ยงต่อความมั่นคงปลอดภัยของเขื่อนด้วยวิธี Semi-Quantitative Risk Analysis (SQRA) โดยพบว่าเขื่อนดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อพิบัติจากปัญหาการไหลซึม จึงต้องทำการออกแบบและแก้ไขเพื่อเสริมความมั่นคงให้เขื่อนดินด้วยกำแพงทึบน้ำใต้ดินจากระดับสันเขื่อนถึงชั้นทึบน้ำ [1]

เขื่อนดินที่ศึกษามีสันเขื่อนตั้งอยู่ที่ระดับ +168.00 ม.รทก. ระดับ Berm ด้านท้ายน้ำ +151.9 ม.รทก. สันเขื่อนกว้าง 8.00 เมตร มีความสูง 33 เมตร และความยาวสันเขื่อน 428.23 เมตร ด้านเหนือน้ำความลาดเขื่อนมีความชัน 1:2 จากสันเขื่อนถึงระดับ 160.00 ม.รทก. และ 1:2.4 ในส่วนของเขื่อนที่ระดับต่ำกว่า +160.00 ม.รทก. ด้านท้ายน้ำ ลาดเขื่อนมีความชัน 1:2 มีความยาวของกำแพงทึบน้ำ 408 เมตร และมีความลึกประมาณ 22-67 เมตร หน้าตัดทั่วไปของเขื่อนดินแสดงดังรูปที่ 1-3

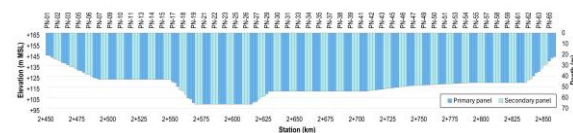


รูปที่ 1 ลักษณะเขื่อนดินช่องเขาขาด



Cross Section and Foundation

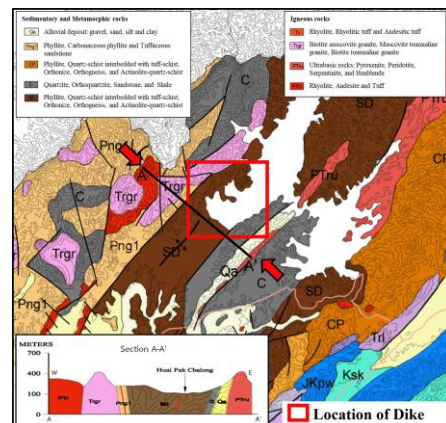
รูปที่ 2 หน้าตัดทั่วไปของเขื่อนดิน



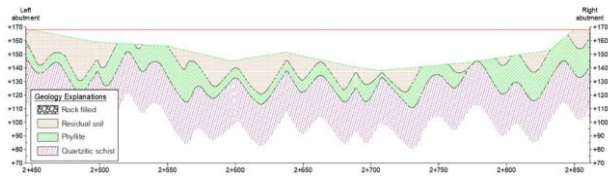
รูปที่ 3 หน้าตัดของกำแพงทึบน้ำใต้ดิน

2.2.2 ธรณีวิทยาและฐานรากของเขื่อนดินช่องเขาขาด

จากข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี [2] แสดงดังรูปที่ 4 ลักษณะของพื้นที่เขื่อนดินช่องเขาขาดมีลักษณะธรณีวิทยาเป็นหินแปร ส่วนบนของชั้นหินถูกปกคลุมด้วยชั้นดินที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ (Residual soil) ถัดไปเป็นชั้นหินผุที่มีระดับการผุพัง (Completely to slightly weathered rock) และชั้นหินสด (fresh rock) ประกอบด้วยหิน Slaty Shale, Phyllite และ Quartzite Schist โดย Phyllite เป็นหินกึ่งแปรสภาพในระดับต่ำทำให้เนื้อหินไม่จับยึดกันแน่นซึ่งมีลักษณะต่างกับหิน Quartzite Schist ที่มีระดับการแปรสภาพสูง ดังนั้นเมื่อระดับน้ำสูงขึ้นหินฐานรากที่เป็น Phyllite จะโปร่งน้ำขึ้นจากการขยายของรอยแยกในเนื้อหินทั้งนี้บริเวณหินตอนบนและตอนล่างบางส่วนมีการแทรกตัวของหินอัคนีจนเกิดหินแปรสภาพ ทำให้เกิดการเบียดเบียนรอยร้าวคดโค้งแบบตลบพับ (Overturned fold) และมีมุมเทเอียงของรื้อขนาคอนไปทางแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 5 โดยภาพรวมแล้วโครงสร้างดังกล่าวยังมีผลให้เกิดพฤติกรรมของรอยแยกขยายออกเป็นเส้นทางการไหลซึมของน้ำ คือ หากเกิดแรงดันน้ำจากการไหลซึมสูงมากกว่าหน่วยแรงกดที่กระทำตั้งฉากกับรอยแยกจะทำให้รอยแยกขยายออกเป็นผลให้เกิดน้ำไหลซึมผ่านได้มากขึ้น



รูปที่ 4 ลักษณะธรณีวิทยารอบพื้นที่ศึกษาเขื่อนดิน



รูปที่ 5 รอยคดโค้งที่ได้จากการแปลความหมายจากมุมมองของรื้อขนา

2.2 คุณสมบัติของกำแพงกั้นน้ำใต้ดิน

การก่อสร้างกำแพงกั้นน้ำใต้ดิน (Cutoff wall) เพื่อควบคุมการไหลซึมผ่านของน้ำตามความลึกที่กำหนด โดยการใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง และมีค่าความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) มากเพียงพอที่จะไม่ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันจนเกิดรอยแตกที่ตัวกำแพงหรือผิวสัมผัสระหว่างกำแพงกับวัสดุโดยรอบจนเป็นเกิดเป็นช่องว่างให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้ ดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้ก่อสร้างกำแพงกั้นน้ำจึงใช้เป็น Plastic concrete หรือคอนกรีตยืดหยุ่นเนื่องจากมีความเหนียว ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นตามที่ต้องการ

คุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวต้องมีค่าความแข็งแรง (น้อยกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที) และค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength, UCS) อยู่ระหว่าง 10–20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงของวัสดุอาจมีความไม่แน่นอนสูง ขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณสมบัติของส่วนประกอบและระยะเวลาในการพัฒนากำแพง

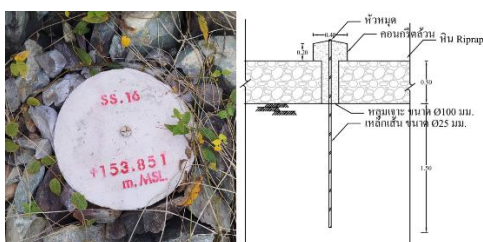
โดยทั่วไป ในช่วง 14–21 วันแรก วัสดุจะมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 50% ของค่าที่จะได้เมื่อครบ 28 วัน และกระบวนการพัฒนากำลังจะยังคงดำเนินต่อไปหลังจากครบ 28 วัน

2.3 เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน

เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน ทำหน้าที่ในการตรวจวัดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการตรวจสอบหรือสอบเทียบแบบจำลอง การเคลื่อนตัวของเขื่อน

2.3.1 หมุดวัดการทรุดตัว (Surface settlement point)

หมุดวัดการทรุดตัวเป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบและเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความสูงของพื้นผิวเขื่อนดินโดยหลักการการทำงานของหมุดวัดการทรุดตัว โดยทั่วไปจะเป็นหมุดโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความทนทาน ติดตั้งอยู่บนพื้นผิวของเขื่อนดินในตำแหน่งที่กำหนด เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับความสูงเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ซึ่งแสดงถึงปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น [3]



รูปที่ 6 หมุดวัดการทรุดตัว

2.3.2 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (SAA-Inclinometers)

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ เป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวราบของดินตามระดับความลึก โดยสามารถอ่านข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะและปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อนหรือชั้นฐานราก ซึ่งหลักการการทำงาน คือ การเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเอียง ซึ่งจะถูกหย่อนลงไปใ้ในท่อและทำการวัดค่าความเอียงที่ระดับความลึกต่างๆ การวัดจะวัดค่าความเอียงในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อคำนวณหาปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบสะสมตามความลึก [4]



รูปที่ 7 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลของแบบจำลอง ทั้งข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง และแนวราบที่ได้จากโปรแกรม SIGMA/W ณ ตำแหน่งที่ตรงกันบนแบบจำลอง หากผลการจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดได้ จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

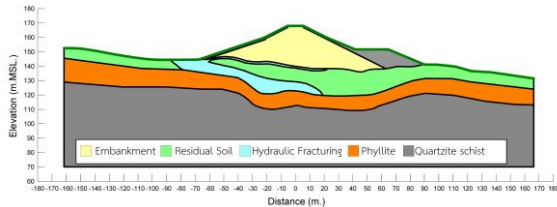
การศึกษานี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Geostudio (SIGMA/W) สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมหน่วยแรงและการเคลื่อนตัว โดยโปรแกรม SIGMA/W จะอาศัยหลักการของกลศาสตร์ต่อเนื่อง (Continuum Mechanics) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการคำนวณการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยการแก้สมการสมดุล และพิจารณาแรงภายนอกที่กระทำและคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งโปรแกรมสามารถแสดงผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวตามแนวแกนหลักในรูปแบบของเวกเตอร์ (Displacement Vectors) หรือคอนทัวร์ (Displacement Contours) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าการทรุดตัว (Settlement) หรือการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Lateral Displacement) หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกับหน่วยแรง ความเครียดภายในวัสดุ ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ [5]

3. วิธีการศึกษา

3.1 หน้าตัดดินและฐานรากของเขื่อนดินช่องเขาขาด

หน้าตัดของเขื่อนดินช่องเขาขาดสำหรับการวิเคราะห์กำหนดโดยอ้างอิงข้อมูลผลการสำรวจทางธรณีวิศวกรรม ข้อมูลเดิมของเขื่อน และการตรวจวัดจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เพื่อสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SIGMA/W โดยกำหนดขอบเขตชั้นดิน รูปทรงเขื่อนและกำแพงกั้นน้ำ โดยมี

สมมติที่หน้าตัดเชื่อมเท่ากันตลอดแนวระนาบเพื่อทำการวิเคราะห์ใน 2 มิติ ดังรูปที่ 8 และกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของชั้นดินและชั้นหินฐานรากโดยการอ้างอิงข้อมูลค่าความซึมจากศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน [7] และข้อมูลลักษณะพฤติกรรมการขยายตัวเนื่องจากแรงดันน้ำ (Hydraulic Fracturing, HF) ตามข้อมูลการวิจัยของธวัชชัย [6] ดังตารางที่ 1



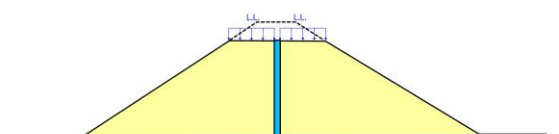
รูปที่ 8 หน้าตัดเชื่อมเพื่อการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตัวเชื่อมและชั้นหินฐานราก

Color	Material	Modulus (kPa)	Cohesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Poisson's Ratio	Unit Weight (kN/m ³)
Yellow	1. Embankment	22,000	30	22	0.4	21
Grey	2. Berm/Riprap	50,000	0	40	0.2	26
Green	3. Residual Soil	25,000	30	22	0.4	21
Blue	4. Hydraulic Fracturing	25,000	30	22	0.4	21
Orange	5. Phyllite	500,000	700	28	0.32	23
Dark Grey	6. Quartzite schist	500000	1500	33	0.25	25
Light Blue	7. Plastic Concrete Cutoff Wall	1,000,000	1500	30	0.3	21
Light Green	8. Bentonite Slurry	1	0	0	0.05	10.8

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง 2 มิติ

สำหรับการวิเคราะห์จะแบ่งลักษณะการจำลองตาม 5 ขั้นตอนการก่อสร้าง (Staged Construction) ได้แก่ 1) เชื่อมโดยปกติ 2) ขั้นตอนการขุดตัดสันเชื่อม 3) ขั้นตอนการขุดร่องกำแพงและพองร่องขุดด้วยน้ำโคลนเบนโทไนท์ 4) ขั้นตอนการถมกลับด้วยคอนกรีตยัดหยุ่น และ 5) ขั้นตอนการบดอัดสันเชื่อมดังรูปที่ 9 โดยการขุดร่องกำแพงอาจก่อให้เกิดการคลายตัวของดินแล้วส่งผลให้หน่วยแรงลดลงในบางบริเวณและเกิดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบ ซึ่งสำหรับกำแพงที่น้ำที่มีความแข็งแรงสูงจะช่วยลดการเคลื่อนตัวจากแรงดันน้ำ และการกระจายตัวของหน่วยแรงในดิน



Stage 1 Existing case. Stage 2 Excavation of working berm. Stage 3 Trench excavations with bentonite slurry. Stage 4 Backfill cut-off trench with plastic concrete Stage 5 Reconstruction of Working Berm

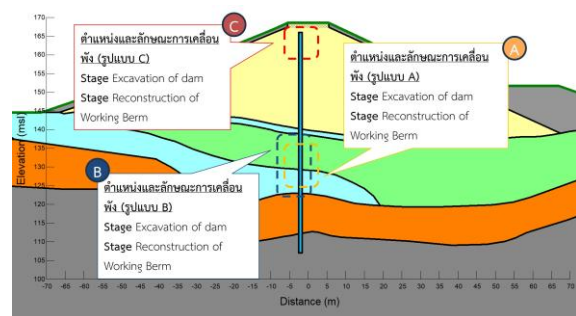
รูปที่ 9 ขั้นตอนการก่อสร้าง (Staged Construction)

3.3 การเคลื่อนตัวของผนังร่องขุด

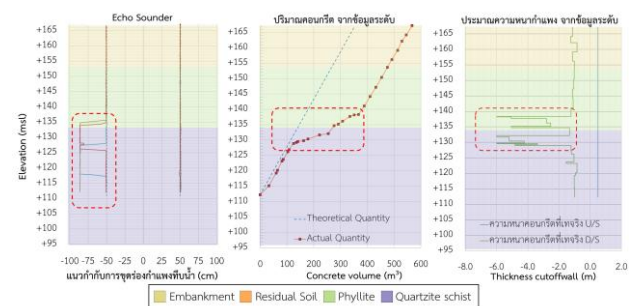
การขุดร่องกำแพงที่น้ำใต้ดินนอกจากจะมีการพองผนังร่องขุดด้วยน้ำโคลนเบนโทไนท์จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเคลื่อนพัง แต่อย่างไรก็ตามการเสถียรภาพจนเคลื่อนพังก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ หากน้ำโคลนพองไม่สามารถต้านทานแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดินได้ หรือเกิดจากกระบวนการขุดร่องกำแพงที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของน้ำโคลน การก่อตัวของชั้นกรอง (Filter Cake) ที่ผนังร่องขุดซึ่งส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำโคลนไหลสู่ชั้นดินส่งผลให้แรงดันพองลดลงอย่างฉับพลัน [7] สำหรับกรณีการศึกษา การเคลื่อนพังที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นการเคลื่อนถล่มเฉพาะส่วน ซึ่งตรวจพบใน 3 ร่องขุด จากทั้งหมด 43 ร่องขุดที่ดำเนินการแล้วเสร็จภายในโครงการ

ตำแหน่งการพังของผนังร่องขุดสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก คือ 1) รูปแบบ A การพังอยู่ทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ 2) รูปแบบ B โชนการเคลื่อนพังอยู่บริเวณเหนือน้ำ 3) รูปแบบ C โชนการเคลื่อนพังเกิดขึ้นด้านบนใกล้สันเชื่อมซึ่งเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยกำหนดตำแหน่งและหน้าตัดการพังโดยพิจารณาจากข้อมูลของเครื่องหยั่งความลึกน้ำหรือ Echo Sounder ที่แสดงตำแหน่งการพังของผนังร่องขุดในแต่ละระดับความลึก ประกอบกับข้อมูลปริมาณคอนกรีตถมกลับในแต่ละระดับความลึกเพื่อนำมาคำนวณหาความหนาของกำแพง

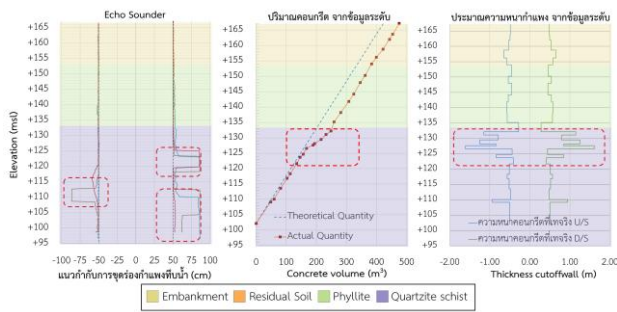
ตำแหน่งและพื้นที่ในการพิจารณาแต่ละรูปแบบแสดงดังรูปที่ 10 รายละเอียดการเคลื่อนพังแต่ละรูปแบบแสดงดังรูปที่ 11-13



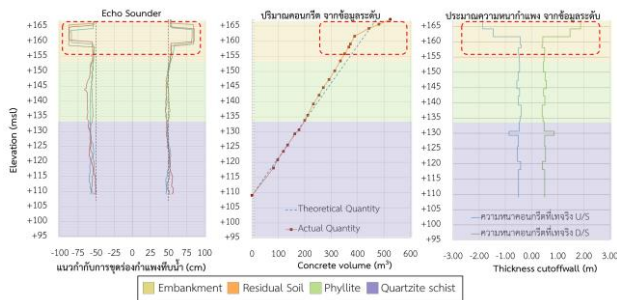
รูปที่ 10 ตำแหน่งและพื้นที่ในการพิจารณาแต่ละโซน



รูปที่ 11 ตำแหน่งและลักษณะการพัง ของรูปแบบ A



รูปที่ 12 ตำแหน่งและลักษณะการพัง ของรูปแบบ B

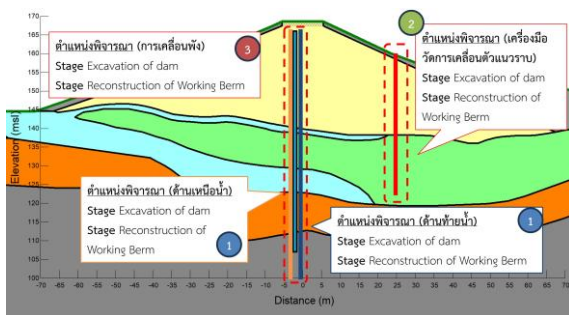


รูปที่ 13 ตำแหน่งและลักษณะการพัง ของรูปแบบ C

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว

การจำลองพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของบริเวณกำแพงตึบน้ำในขณะการก่อสร้างกำแพงตึบน้ำ โดยแบบจำลอง FEM แบบ 2 มิติ กำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ของวัสดุหรือโครงสร้างด้วยโปรแกรม SIGMA/W การพิจารณาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของบริเวณกำแพงตึบน้ำ ตำแหน่งและพื้นที่บริเวณต่างๆ ของเขื่อนแสดงดังรูปที่ 14

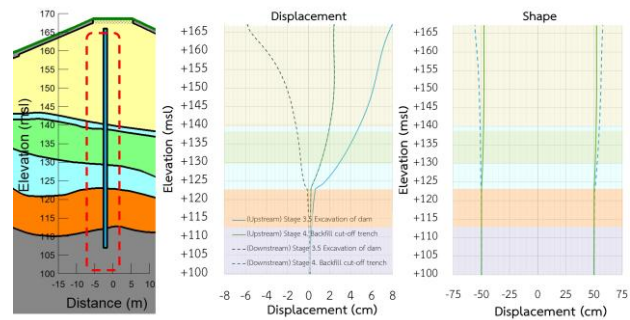


รูปที่ 14 ตำแหน่งและพื้นที่ในการพิจารณา

กรณีการวิเคราะห์ดังนี้

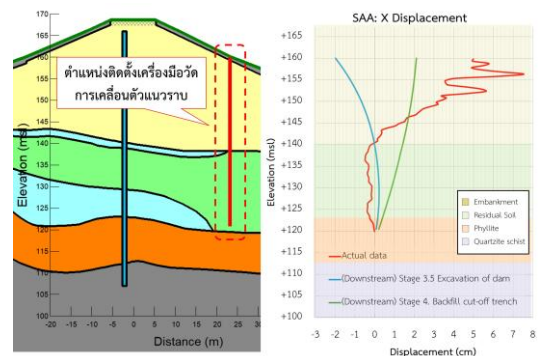
1) การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงตึบน้ำ ได้พิจารณาในสองขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนระหว่างการขุดร่องกำแพงและพยุ่งด้วยน้ำโคลนเบนโทไนท์ และขั้นตอนหลังการถมกลับ จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในช่วงระหว่างการขุดร่องกำแพง พบว่า มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชั้นดินตัวเขื่อน (Embankment) และชั้นดินเดิม (Residual Soil)

โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-6 เซนติเมตร ในบริเวณด้านท้ายน้ำ และ 1-8 เซนติเมตร ในบริเวณด้านเหนือน้ำ และในส่วนของกรณีเคลื่อนตัวในช่วงหลังการถมกลับ พบว่า กำแพงตึบน้ำมีการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำประมาณ 1-2 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 15 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนตัวของร่องกำแพงในช่วงดังกล่าว พบว่ามีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวในลักษณะที่บีบอัดเข้าหาตัวเขื่อน อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการก่อสร้างจริง ผนังร่องกำแพงส่วนที่เกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะบีบอัดนี้จะถูกขุดออกด้วยเครื่องจักร



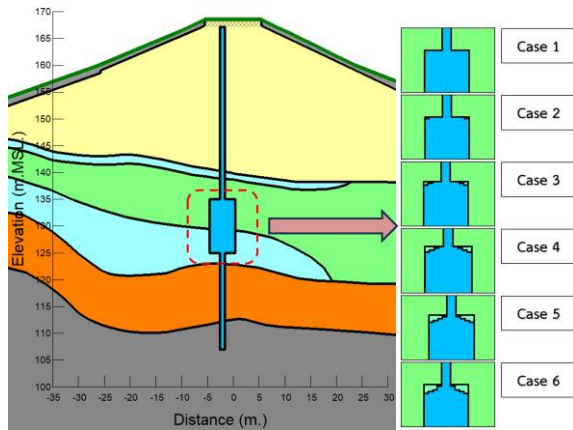
รูปที่ 15 ปริมาณและลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงตึบน้ำ

2) การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตำแหน่งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ในขั้นตอนการขุดร่องกำแพง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ในระหว่างขั้นตอนการขุดร่องกำแพงตึบน้ำ พบการเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำอยู่ในช่วง 1-2 เซนติเมตร และในขั้นตอนการถมวัสดุถมกลับ พบการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำอยู่ในช่วง 1-2 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเปรียบเทียบกับข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (SAA-Inclinometer) ในสนาม พบว่า ลักษณะการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชั้นดินตัวเขื่อน โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของชั้นดินเดิมมีแนวโน้มการเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำน้อยกว่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ข้อแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของชั้นดินเดิมที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชั้นดินตัวเขื่อน ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนตัวหลักเกิดขึ้นในชั้นดินตัวเขื่อน ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบนี้แสดงดังรูปที่ 16

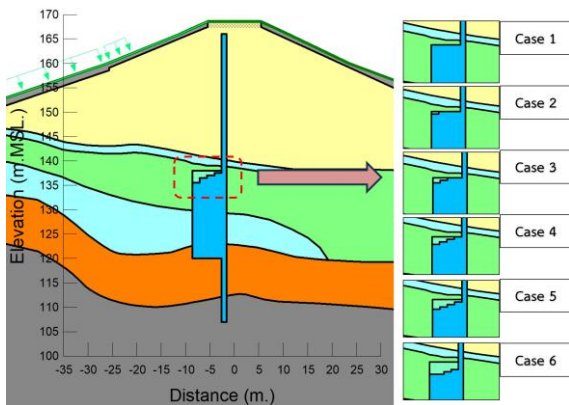


รูปที่ 16 ปริมาณการเคลื่อนตัวของเครื่องมือวัดในแนวราบระหว่างการขุดร่องกำแพงและหลังการถมวัสดุถมกลับ

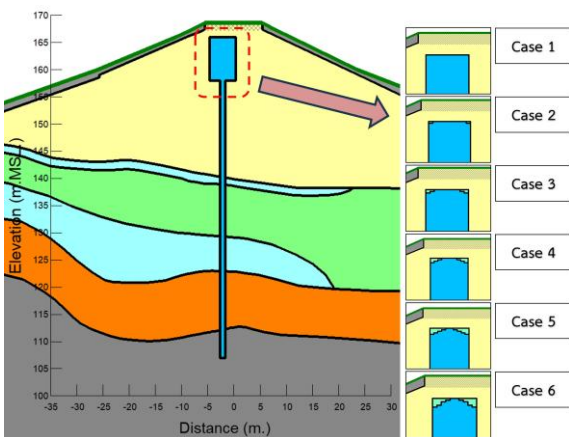
3) การวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของผนังรังกำแพงที่เกิดการพังทลายใต้สมมติฐานที่ว่าในระหว่างกระบวนการม้วนกลับ เนื้อวัสดุคอนกรีตอาจไม่สามารถไหลเข้าไปแทรกภายในโพรงที่เกิดการพังได้เต็มสมบูรณ์ อาจมีน้ำโคลนเบนโทไนท์บางส่วนแทรกปนอยู่ในเนื้อวัสดุคอนกรีตม้วนกลับ โดยเป็นการศึกษาผลกระทบของน้ำโคลนที่แทรกปนดังกล่าว ซึ่งกำหนดปริมาณน้ำโคลนที่แทรกในแต่ละกรณีเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบให้ครอบคลุมตั้งแต่กรณีที่ไม่มีน้ำโคลนแทรกไปจนถึงกรณีที่มีน้ำโคลนแทรกปนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 17



ก. กรณีของพื้นที่การพังรูปแบบ A



ข. กรณีของพื้นที่การพังรูปแบบ B



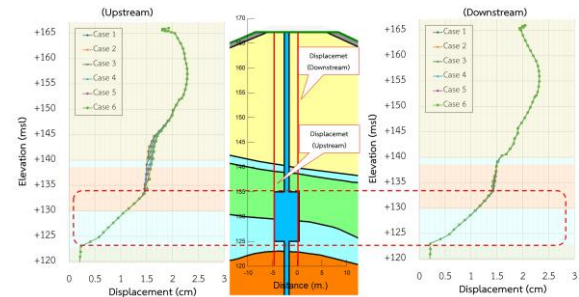
ค. กรณีของพื้นที่การพังรูปแบบ C

รูปที่ 17 กรณีการพิจารณาการเคลื่อนตัว

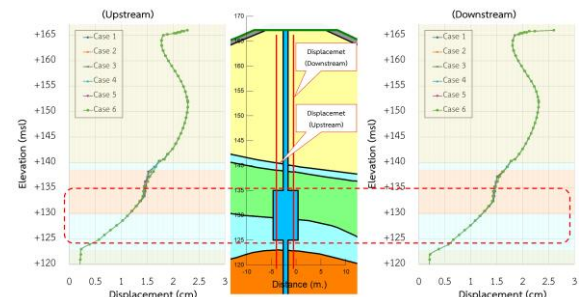
3.1) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวกำแพงรูปแบบ A (ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการพิจารณาและนำเสนอผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ณ 3 ตำแหน่งหลัก ได้แก่ บริเวณตำแหน่งขอบนอกสุดของพื้นที่การพัง บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่การพัง และบริเวณที่ชิดกับกำแพงที่บ้น้ำ จากการวิเคราะห์ พฤติกรรมการเคลื่อนตัว พบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เหนือระดับที่มีการแทรกปนของน้ำโคลนเบนโทไนท์เข้าสู่เนื้อวัสดุคอนกรีต การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากกรณีต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำโคลนเบนโทไนท์ที่แทรกปนอยู่ในเนื้อวัสดุคอนกรีต มีผลโดยตรงต่อปริมาณการเคลื่อนตัว โดยปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังรังกำแพงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณน้ำโคลนแทรกปนในปริมาณมาก ส่วนค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณเหนือพื้นที่การแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +141.5 ม.รทก.) พบว่าหากมีการแทรกของน้ำโคลนในปริมาณมากค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มือน้ำโคลนแทรกสูงสุด 0.12 เซนติเมตร

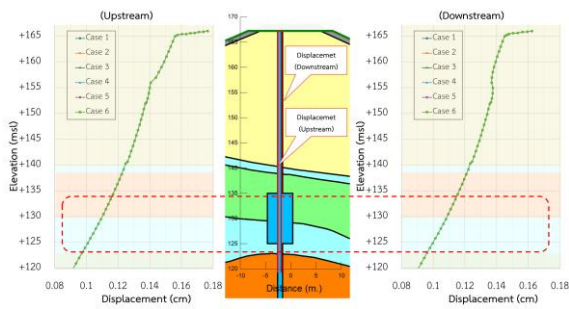
ผลการวิเคราะห์และตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเหล่านี้ แสดงดังรูปที่ 18-20



รูปที่ 18 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังรังกำแพง บริเวณ Zone A (ขอบนอกสุด)



รูปที่ 19 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังรังกำแพง บริเวณ Zone A (บริเวณกึ่งกลาง)



รูปที่ 20 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone A (บริเวณที่ติดกับกำแพงที่บ้น้ำ)

3.2) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวกำแพงรูปแบบ B (ด้านท้ายน้ำ)

การวิเคราะห์พฤติกรรมพิจารณาและนำเสนอผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ณ 3 ตำแหน่งหลัก ได้แก่ บริเวณตำแหน่งขอบนอกสุดของพื้นที่การพัง บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่การพัง และบริเวณที่ติดกับกำแพงที่บ้น้ำ

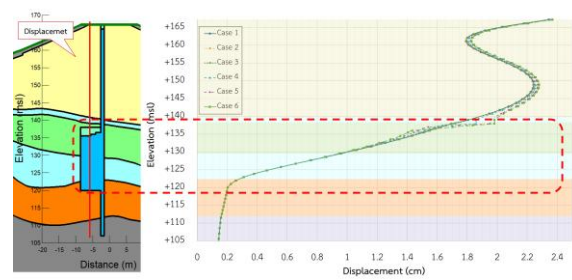
จากการวิเคราะห์ พฤติกรรมการเคลื่อนตัว พบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เหนือระดับที่มีการแทรกปนของน้ำโคลนเบนโทไนท์เข้าสู่เนื้อวัสดุถมกลับ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากกรณีต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำโคลนเบนโทไนท์ที่แทรกปนอยู่ในเนื้อวัสดุถมกลับ มีผลโดยตรงต่อปริมาณการเคลื่อนตัว โดยปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณน้ำโคลนแทรกปนในปริมาณมาก ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่บริเวณพื้นที่การแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +137.5 ม.รทก.) พบว่าหากมีการแทรกของน้ำโคลนในปริมาณมากค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีน้ำโคลนแทรกสูงสุด 0.3 เซนติเมตร เช่นเดียวกับรูปแบบ A แต่ลักษณะการเคลื่อนตัวรูปแบบนี้มีค่าสูงกว่าที่พบในรูปแบบ A ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างด้านความหนาของการพังในรูปแบบ B

ผลการวิเคราะห์และตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเหล่านี้ แสดงดัง

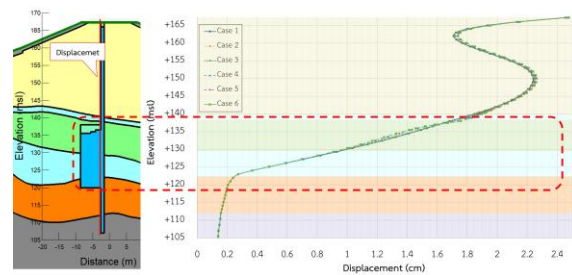
รูปที่ 21-23



รูปที่ 21 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone B (ขอบนอกสุด)



รูปที่ 22 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone B (บริเวณกึ่งกลาง)



รูปที่ 23 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone B (บริเวณที่ติดกับกำแพงที่บ้น้ำ)

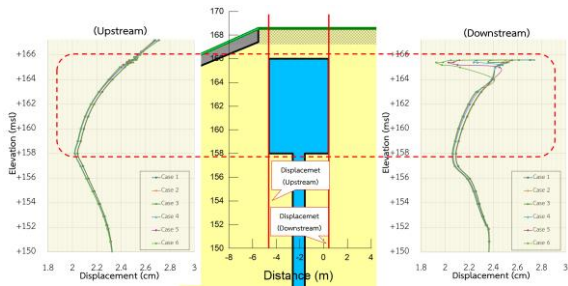
3.3) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวกำแพงรูปแบบ C (บริเวณใกล้สันเขื่อน)

การวิเคราะห์พฤติกรรมพิจารณาและนำเสนอผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ณ 3 ตำแหน่งหลัก ได้แก่ บริเวณตำแหน่งขอบนอกสุดของพื้นที่การพัง บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่การพัง และบริเวณที่ติดกับกำแพงที่บ้น้ำ

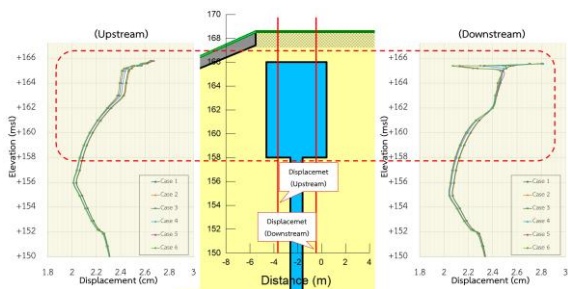
โดยสำหรับรูปแบบการพังรูปแบบนี้เกิดมีสาเหตุจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดการเคลื่อนพัง โดยจากการวิเคราะห์ พฤติกรรมการเคลื่อนตัว พบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เหนือระดับที่มีการแทรกปนของน้ำโคลนเบนโทไนท์เข้าสู่เนื้อวัสดุถมกลับ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากกรณีต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำโคลนเบนโทไนท์ที่แทรกปนอยู่ในเนื้อวัสดุถมกลับ มีผลโดยตรงต่อปริมาณการเคลื่อนตัว โดยปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณน้ำโคลนแทรกปนในปริมาณมาก ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่บริเวณพื้นที่การแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +163.5 ม.รทก.) พบว่าหากมีการแทรกของน้ำโคลนในปริมาณมากค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีน้ำโคลนแทรกสูงสุด 0.6 เซนติเมตร

ผลการวิเคราะห์และตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเหล่านี้ แสดงดัง

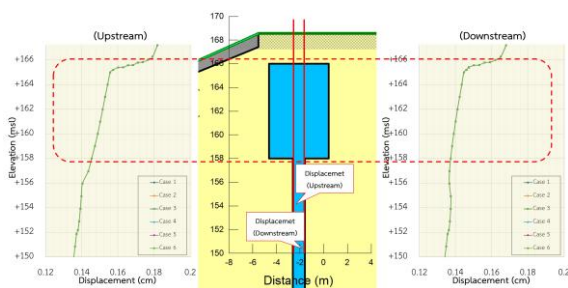
รูปที่ 24-26



รูปที่ 24 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone C (ขอบนอกสุด)



รูปที่ 25 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone C (บริเวณกึ่งกลาง)



รูปที่ 26 ปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพง บริเวณ Zone C (บริเวณที่ติดกับกำแพงที่บ้น้ำ)

5. สรุปผลการศึกษา

- 1) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงที่บ้น้ำในช่วงระหว่างการขุดร่องและพยุ่งด้วยน้ำโคลน พบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชั้นดินตัวเชื่อม (Embankment) และชั้นดินเดิม (Residual Soil) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-6 เซนติเมตร ในบริเวณด้านท้ายน้ำ และ 1-8 เซนติเมตร ในบริเวณด้านเหนือน้ำ และในขั้นตอนหลังการถมกลับกำแพงที่บ้น้ำมีการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำประมาณ 1-2 เซนติเมตร โดยที่ร่องกำแพงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวในลักษณะที่บีบอัดเข้าหาตัวเชื่อม อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวจะถูกขุดออกในระหว่างกระบวนการก่อสร้างจริง
- 2) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตำแหน่งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบจากแบบจำลอง พบว่าในขั้นตอนการขุดร่องกำแพงมีการเคลื่อนตัวไปทางด้านเหนือน้ำอยู่ในช่วง 1-2 เซนติเมตร และในขั้นตอนการถมกลับเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในสนาม พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชั้นดินตัวเชื่อม โดยมีค่าสูงสุด

เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของชั้นดินเดิมมีแนวโน้มการเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำน้อยกว่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นผลจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิมที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชั้นดินตัวเชื่อม ส่งผลให้การเคลื่อนตัวหลักเกิดขึ้นในชั้นดินตัวเชื่อม

3) ผลการวิเคราะห์การแทรกปนของน้ำโคลนบนโพไนท์ในวัสดุถมกลับภายใต้สมมติฐานว่าคอนกรีตไม่สามารถเติมเต็มโพรงการพังได้อย่างสมบูรณ์พบว่าปริมาณน้ำโคลนที่แทรกปนมีผลโดยตรงต่อปริมาณการเคลื่อนตัว โดยปริมาณการเคลื่อนตัวของผนังร่องกำแพงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณน้ำโคลนแทรกปนในปริมาณมาก

กรณีพื้นที่การพังรูปแบบ A (ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ) ปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เหนือระดับที่มีการแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +141.5 ม.รทก.) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.12 เซนติเมตร เมื่อมีการแทรกปนของน้ำโคลนในปริมาณมาก

กรณีพื้นที่การพังรูปแบบ B (ด้านท้ายน้ำ) ปริมาณการเคลื่อนตัวที่บริเวณพื้นที่การแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +137.5 ม.รทก.) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วง 0.1-0.3 เซนติเมตร เมื่อมีการแทรกปนของน้ำโคลนในปริมาณมาก ลักษณะการเคลื่อนตัวของรูปแบบ B มีค่าสูงกว่าที่พบในรูปแบบ A ซึ่งอาจมีสาเหตุจากความแตกต่างด้านความหนาของการพัง

กรณีพื้นที่การพังรูปแบบ C (บริเวณใกล้สันเขื่อน) รูปแบบการเคลื่อนพังน้อยภายใต้สมมติฐานว่ามีสาเหตุจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดการเคลื่อนพัง ปริมาณการเคลื่อนตัวที่บริเวณพื้นที่การแทรกปนของน้ำโคลน (ที่ระดับ +163.5 ม.รทก.) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.6 เซนติเมตร เมื่อมีการแทรกปนของน้ำโคลนในปริมาณมาก

4) ผลการศึกษาทั้งหมด สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลแนวทางสำหรับการควบคุมการก่อสร้าง เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินและกำหนดแนวทางการซ่อมแซมข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษา รวมถึงสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบและติดตามพฤติกรรมของเขื่อนในระยะยาวต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน. (2563). รายงานฉบับสมบูรณ์การศึกษาความเหมาะสมการเสริมความมั่นคงเขื่อนดินช่องเขาขาด Dike 4
- [2] กรมทรัพยากรธรณี. (2542). แผนที่ยธรณีวิทยาจังหวัดอุดรธานี. งานเผยแพร่ สำนักงานเลขานุการกรม กรมทรัพยากรธรณี.
- [3] กรมชลประทาน. (2557). แนวทางการสำรวจและตรวจสอบความปลอดภัยของเขื่อนดิน. สำนักบริหารจัดการโครงการก่อสร้าง กรมชลประทาน. เข้าถึงจาก <http://www.rid.go.th>
- [4] Fell, R., et al. (2015). *Geotechnical engineering of dams*. CRC Press.
- [5] GEO-SLOPE International Ltd. (2008). *Stress-deformation modeling with SIGMA/W 2007: An engineering methodology (3rd ed.)*. GEO-SLOPE International Ltd.

[6] รัชชัย เกลิมพรชัย. (2564). แบบจำลองการไหลซึมสำหรับ
พฤติกรรมของการขยายตัวเนื่องจากแรงดันน้ำในชั้นหินฐานราก
กรณีศึกษา เขื่อนดินช่องเขาขาด เขื่อนสิริกิติ์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[7] Qin, S., Xu, T., Zhou, W.-H., & Bezuijen, A. (2023).
*Infiltration behaviour and microstructure of filter cake
from sand-modified bentonite slurry. Transportation
Geotechnics, 39, 100944.*