

การประยุกต์วิธีการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนเพื่อประเมินสภาพเขื่อนกระเสียว
อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี

An Application of Seismic Reflection Survey with Kra-Seaw Dam, Dan Chang District,
Suphanburi Province

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง^{1*} ชนาระบ วิชาลัย¹ อรวรรณ จันทสุทโธ¹ และ ณรงค์เดช ยังสุขเกษม²

Narongchai Wiwattanachang^{1*} Chanarop Vichalai¹ Orawan Jantasuto¹ and Narongdet Youngsukasem²

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุพรรณภูมิ

ศูนย์สุพรรณบุรี อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

¹Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology,
Suphanburi Campus, Sam Chuk, Suphanburi,

²Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University,

*E-mail: narongchaiwivatt@gmail.com

Received: Feb 21, 2018

Revised: Jun 15, 2019

Accepted: Jul 29, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคคลื่นสั้นสะท้อนในการสำรวจประเมินสภาพธรณีวิทยาและโครงสร้าง เขื่อนกระเสียว อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งเป็นเขื่อนแกนดินเหนียวที่ถูกสร้างขึ้นจากการบดอัดดินให้มีความหนาแน่นสูง มีอายุการใช้งานนานกว่า 30 ปี ขั้นตอนการศึกษา เริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง การออกแบบการสำรวจ การสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลภาคสนาม และการประมวลผลการสำรวจ การบันทึกข้อมูลภาคสนามด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่น Geode24 และอุปกรณ์รับคลื่นสั้นสะท้อนความถี่ 28 Hz ที่เชื่อมต่อกับชุดสายรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ได้ ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจถูกนำมาประมวลผลด้วยวิธี Pre-Stack Time Migration (PSTM) จากผลการศึกษาพบว่าคลื่นสั้นสะท้อนที่ได้จากข้อมูลสามารถให้ความลึกในการสำรวจประมาณ 60-70 เมตร และเป็นช่วงความถี่ต่ำ ดังนั้นสามารถจัดแบ่งชั้นวัสดุทางธรณีวิทยาออกเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นแรกคือชั้นวัสดุระดับตื้น พบว่าความเร็วคลื่นสั้นสะท้อนอยู่ระหว่าง 400-800 เมตร/วินาที แสดงให้เห็นถึงชั้นดินบดอัดที่ใช้เป็นโครงสร้างเขื่อน และชั้นที่สองคือชั้นวัสดุระดับลึก พบว่ามีความเร็วคลื่นสั้นสะท้อนอยู่ระหว่าง 900-1,200 เมตร/วินาที แสดงถึงชั้นดินหรือหินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยการอัดฉีดน้ำปูน ตลอดจนชั้นหินฐาน ซึ่งเป็นส่วนฐานรากของเขื่อน

คำสำคัญ: คลื่นสั้นสะท้อน เขื่อนแกนดินเหนียว ความเร็วคลื่น

Abstract

This study aims to apply the seismic reflection technique's for the geological surveying and engineering inspection of the Kra-Seaw dam, Dan-Chang District, Suphanburi Province that was constructed over 30 years ago. This study began with the primary functions of collecting concerning information data, survey design, field surveying and data processing. In the field, seismic data were collected by Geode 24 and the Geophones frequency of 28 Hz that had been installed via land streamer cable. Pre-Stack Time Migration (PSTM) data processing techniques were used to process the survey data. This study found that the speed of the reflected waves that were generated by a sledgehammer gave data that suggests a depth of investigation around 60-70 meters, which is in the low-frequency band. Two groups of geological classes can be identified from the seismic section. The first group is a shallow ground layer, the reflected wave speed is between 400-800 meters/second. This group is the compacted soil layer formed into earth dam body. The second group

is the deep layer, the reflected wave speed is between 900-1,200 meters/second, this group is a ground improved layer and basement layer and is the foundation of this dam.

Keywords: Seismic reflection, Earth dam, Wave Speed

บทนำ

โดยปกติแล้วน้ำต้นทุนในแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าหรือเพื่อประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม สูญเสียไปในรูปแบบของน้ำที่ไหลออกจากแหล่งกักเก็บด้วยการระเหยกลายเป็นไอและการไหลซึมผ่านใต้เขื่อน ดังนั้นหากเกิดการสูญเสียน้ำในแหล่งกักเก็บไปในรูปแบบของน้ำที่ไหลผ่านใต้เขื่อนในปริมาณที่มากเกินไปย่อมส่งผลถึงการสูญเสียน้ำโดยเปล่าประโยชน์และส่งผลถึงความปลอดภัยของโครงสร้างเขื่อนได้

การตรวจสอบรอยรั่วซึมที่ผิดปกติสามารถทำได้ด้วยวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ โดยใช้ควบคู่กับการตรวจสอบทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค [1] โดยแสดงผลการสำรวจเป็นแผนที่รวมของผลการสำรวจและทดสอบทั้งหมด การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนเป็นการสำรวจลักษณะสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนของคลื่น เมื่อคลื่นสัญญาณถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดลงสู่ใต้ดินและกระทบกับรอยต่อของวัสดุจะเกิดการหักเหของคลื่นวิ่งเข้าสู่ตัวรับคลื่นที่วางอยู่บนผิวดินจากค่าความแตกต่างของเวลาและแอมพลิจูด (amplitude) สามารถแปลความหมายหาความลึกของชั้นดิน-หินจากผลการสะท้อนกลับของคลื่น[2]

การสำรวจด้วยคลื่นสะท้อนแบบหักเห (Seismic Refraction) ในมลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา [3] พบว่าสามารถตรวจสอบชั้นฐานรากของเขื่อนตลอดจนถึงชั้นตะกอนและชั้นหินฐาน (Bedrock) ได้ การสำรวจด้วยวิธีนี้นอกจากไม่เป็นการทำลายโครงสร้างเขื่อนแล้วยังเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณอีกด้วย

ในประเทศไทยได้มีการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนในการสำรวจทางธรณีวิทยาของตัวเขื่อนมาบ้างแล้ว โดยทำการศึกษาที่เขื่อนแม่จอกหลวง บ.พระนอน ต.ดอนแก้ว อ.แมริม จ.เชียงใหม่ ซึ่งมีอายุการใช้งานมานานกว่า 30 ปี โดยการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าสามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเพื่อประเมินสภาพของเขื่อนได้ [4]

การศึกษานี้เป็นการนำเสนอรูปแบบการประยุกต์ใช้สำรวจทางธรณีฟิสิกส์เพื่องานสำรวจทางธรณีวิศวกรรม ด้วยวิธีการใช้คลื่นสั้นสะท้อนแบบคลื่นสะท้อน (Seismic Reflection Wave) และการประมวลผลด้วยเทคนิค Pre-Stack Time Migration (PSTM) ที่ให้ผลที่ได้ดีกว่าการประมวลผลด้วยรูปแบบ Post-Stack Time Migration ซึ่งเป็นวิธีการหลักในการประมวลผลคลื่นสั้นสะท้อน

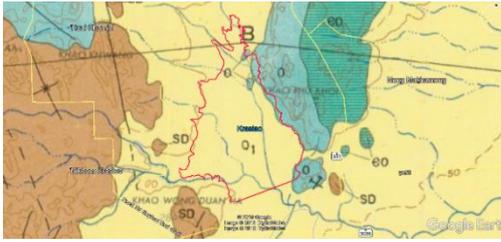
แบบคลื่นสะท้อนในปัจจุบัน นอกเหนือจากนี้แล้วการศึกษานี้ได้มีจุดประสงค์เพื่อการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบหักเหในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างของตัวเขื่อนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุต่างๆ ที่ได้ทำการก่อสร้างขึ้น เช่น วัสดุโครงสร้างเขื่อน ชั้นวัสดุเดิมที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นใหม่ และชั้นหินฐาน เป็นต้น และเพื่อแสดงให้เห็นถึงสภาพตัดขวาง 2 มิติ ด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบสะท้อนเพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบสภาพทางด้านธรณีวิทยาของเขื่อนดิน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวางแผนบำรุงรักษา รวมถึงการเสริมศักยภาพของเจ้าหน้าที่ หรือ วิศวกร ที่เกี่ยวข้องในการตรวจสอบและบำรุงรักษาเขื่อน ได้เข้าใจในวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์แบบบูรณาการเพื่อการตรวจสอบเขื่อน

ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อนกระเสียว

เขื่อนกระเสียว ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้าง 16 ปี เริ่มจากปี 2509 - 2524 (Figure 1) ตั้งอยู่ที่ พิกัด 47 PNS 712397 ละติจูด 14°-49'-25"N ลองจิจูด 99°-39'-41"E บ้านนาตาป็น หมู่ที่ 3 ตำบลด่านช้าง อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี ในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว กรมชลประทาน เป็นเขื่อนดินที่ใช้ในการกักเก็บน้ำโดยสร้างกันลำห้วยกระเสียวมีสันเขื่อนยาว 4,250 เมตร สูง 32.5 เมตร ความกว้างที่สันเขื่อน 8 เมตร พื้นที่ผิวน้ำ 35 ตารางกิโลเมตร ปริมาณน้ำที่สามารถเก็บกักน้ำได้สูงสุด 240 ล้านลูกบาศก์เมตร ที่ระดับ +87.00 เมตร รทก. ปริมาตรสูงสุด 390 ล้านลูกบาศก์เมตร ที่ระดับ +90.64 เมตร รทก. วัตถุประสงค์เพื่อส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูกในฤดูฝน 130,000 ไร่ ฤดูแล้ง 65,000 ไร่ บรรเทาอุทกภัยและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลา ท่อเทียว พักผ่อนหย่อนใจ [5]



a) Site Location



b) Geological of Site [6]

Figure 1 Location of Kra-Saew Dam



Figure 2 Limestone outcrop at the entrance on the East of the dam

1. ลักษณะทางธรณีวิทยา

เขื่อนกระเสียวตั้งอยู่ในพื้นที่ซึ่งเป็นภูเขา (mountainous terrain) มีแกนสันเขื่อนด้านทิศตะวันออกตรงจุดชมวิวจึงลาดเนินเขาของศาลารับเสด็จฯ เป็นหินปูนยุคออร์โดวิเซียน (Ordovician) จัดอยู่ในกลุ่มของหินปูนทุ่งสง เป็นหินปูนที่มีสีเทา มีรอยแตกเป็นส่วนใหญ่และมีความแข็งแรงอยู่ในระดับ 3-4 ตามระดับความแข็งของมอร์ (Mohs's scale) ดัง Figure 2 ถัดจากเนินเขาไปทางด้านตะวันตกจนสุดแนวสันเขื่อน มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นเนินดินตะกอนรูปพัด (Alluvial Fan) อันเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่ถูกพัดพามาจากหุบเขา และถัดออกไปทางด้านทิศตะวันตกของตัวเขื่อนเป็นหินทราย-หินควอร์ตไซต์ยุคดีโวเนียน – ซิลูเรียน (Devonian-Silurian) ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นหินต้นกำเนิดของตะกอนที่สะสมตัวในบริเวณที่ราบลุ่มบริเวณพื้นที่ของเขื่อนกระเสียว [6]

ข้อมูลทางธรณีวิทยาที่ได้จากแบบรายละเอียดทางวิศวกรรมของเขื่อนกระเสียว (Figure 3) พบว่า ลักษณะทางกายภาพของเขื่อนมีความลาดเอียงจากทิศตะวันตก (0+000) ไปสู่ทิศตะวันออก (4+250) ส่วนโครงสร้างทางธรณีวิทยาประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดชนิดแรกเป็นกลุ่มหินปูน หินเชล และหินไฟรท์ (กลุ่ม A-F) โดยกลุ่มหินนี้มีความลาดเอียงจากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกสำหรับชนิดที่ 2 เป็นกลุ่มดินตะกอนและทราย (กลุ่ม 1-20) โดยบางส่วนทับถมบนชั้นหินปูน ดังแสดงไว้ใน Figure 3

2. ลักษณะทางด้านวิศวกรรม

เขื่อนกระเสียวเป็นเขื่อนดิน แกนกลาง (Zone1) ก่อสร้างจากดินเหนียวคอตแน่น [7] โครงสร้างฐานรากด้านใต้ของแกนกลางได้รับการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินและหินด้วยการอัดน้ำปูน (Grouting) โดยรูปตัดของตัวเขื่อนได้แสดงไว้ใน Figure 4

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจด้วยคลื่นสั่นสะเทือนแบบสะท้อนเป็นการสำรวจลักษณะสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินโดยอาศัยคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเคลื่อนผ่านผิวรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกันนั่นคือตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สองโดยที่เมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านตัวกลางที่หนึ่งเข้าไปยังตัวกลางที่สองและตัวกลางที่สองมีความเร็วคลื่นสูงกว่าตัวกลางที่หนึ่งคลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเดินคลื่นเมื่อเคลื่อนเข้าสู่ตัวกลางที่สองซึ่งเรียกรวมการเปลี่ยนทางเดินของคลื่นว่า "การหักเห" และ "การสะท้อน" ตามกฎของสเนลล์ ดัง Figure 5

กล่าวคืออัตราส่วนของค่าไซน์ของมุมตกกระทบกับค่าไซน์ของมุมหักเห มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเร็วคลื่นในตัวกลางที่คลื่นตกกระทบกับความเร็วคลื่นในตัวกลางที่คลื่นหักเห

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกัน ดังนั้นค่าตัวแปรที่สำคัญของการสำรวจด้วยคลื่นสะท้อนคือ ความเร็ว (v) และความหนาแน่น (ρ) ของวัสดุนั้นๆ หรือเรียกอีกอย่างว่า ค่า Acoustic Impedance (z)

เมื่อคลื่นสั่นสะเทือนตกกระทบกับรอยต่อของชั้นดิน-หินที่มีค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์ต่างกันเกิดการสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวรับคลื่นที่วางอยู่บนผิวดินคลื่นจะถูกบันทึกอยู่ในรูปค่าของเวลา (Time, t) และแอมพลิจูด (Amplitude, A) ซึ่งค่าของเวลาในการเดินทางของคลื่นบ่งบอกถึงระยะทางที่คลื่นใช้ในการเดินทางมายังตัวรับคลื่นและค่าของแอมพลิจูดบ่งบอกถึงค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient, R) ที่บริเวณรอยต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (R) คำนวณจากสมการ

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

เมื่อ ρ_1 และ ρ_2 คือค่าความหนาแน่นของตัวกลางชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง V_1 และ V_2 คือค่าความเร็วคลื่นของตัวกลางชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง

ความเร็วช่วง (Interval Velocity) เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่น ในแต่ละช่วงของชั้นดิน/หิน สามารถคำนวณจากสมการ

$$V = \frac{Z_2 - Z_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta Z}{\Delta t}$$

เมื่อ $t_2 - t_1$ เป็นช่วงเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นดิน/หินที่มีความหนา $Z_2 - Z_1$

ความเร็วเฉลี่ย (Average Velocity) เป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกในแนวดิ่งกับเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง จากพื้นดินถึงความลึกที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{V} = \frac{\sum_{j=1}^n V_j \Delta t_j}{\sum_{j=1}^n \Delta t_j}$$

เมื่อ $\sum_{j=1}^n V_j \Delta t_j$ ความลึกในแนวดิ่งและ $\sum_{j=1}^n \Delta t_j$ เวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง

ความเร็วการรวมสัญญาณคลื่น (Stacking Velocity) เป็นค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณสำหรับชั้นหินหลายชั้นวางซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นถึงตัวรับสัญญาณ และเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปตกกระทบยังตัวสะท้อนกลับขึ้นมายังตัวรับสัญญาณ

$$v = \frac{x}{(2t_0(t_x - t_0))^{1/2}}$$

เมื่อ t_x เวลาที่คลื่นเดินทางจากแหล่งกำเนิดตกกระทบยังรอยต่อของชั้นหินและเดินทางกลับมายังตัวรับสัญญาณใดๆ ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเท่ากับ x และ t_0 คือ เวลาที่คลื่นเดินทางจากแหล่งกำเนิดตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อของชั้นหินและสะท้อนกลับมายังตำแหน่งของแหล่งกำเนิด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษารวบรวมข้อมูล

การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษารวบรวมข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ธรณีวิทยา และ วิศวกรรม [8] ที่จำเป็นในการวางแผนการปฏิบัติการสำรวจภาคสนาม และการวิเคราะห์ผล ตลอดจนถึงการวางแผนการรับมือนักปัญหาและผลกระทบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในภาคสนาม

2. การวางแผนการสำรวจ

การวางแผนการสำรวจเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการศึกษารวบรวมข้อมูลแล้วเพื่อทำการวางแผนการสำรวจในภาคสนาม ตลอดจนกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสำรวจ โดยอ้างอิงจากรายละเอียดข้อมูลต่างๆ ที่ได้ศึกษาในขั้นต้น

จากทิศทาง (Figure 6a) และตำแหน่งของแนวการสำรวจที่อยู่บนสันเขื่อน (Figure 6b) ถูกสร้างขึ้นจากการבודัดดินที่กำหนดให้แกนกลางของสันเขื่อน (Dam Axis) รวมทั้งปีกทั้งสองข้าง (Embankment) ทั้งหมดตั้งอยู่บนชั้นหินฐานซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่เหมาะสมในการก่อสร้างตามหลักวิศวกรรม [9], [10] โดยการสำรวจในครั้งนี้ใช้แหล่งกำเนิดคลื่น (Seismic Source) ด้วยการใช้หมอนน้ำหนัก 20 ปอนด์ ทบลงบนแผ่นเหล็กตามระยะที่กำหนด คือ ทุกๆ 5 เมตรตลอดแนวการสำรวจ (Figure 7)

ชุดอุปกรณ์บันทึกสัญญาณคลื่นประกอบด้วย Geode24 (Figure 8) และอุปกรณ์รับคลื่นสั่นสะเทือน (Geophone) ความถี่ 28 Hz พร้อมสายสัญญาณพร้อมสวิทช์แตะกระทบ (Trigger switch)

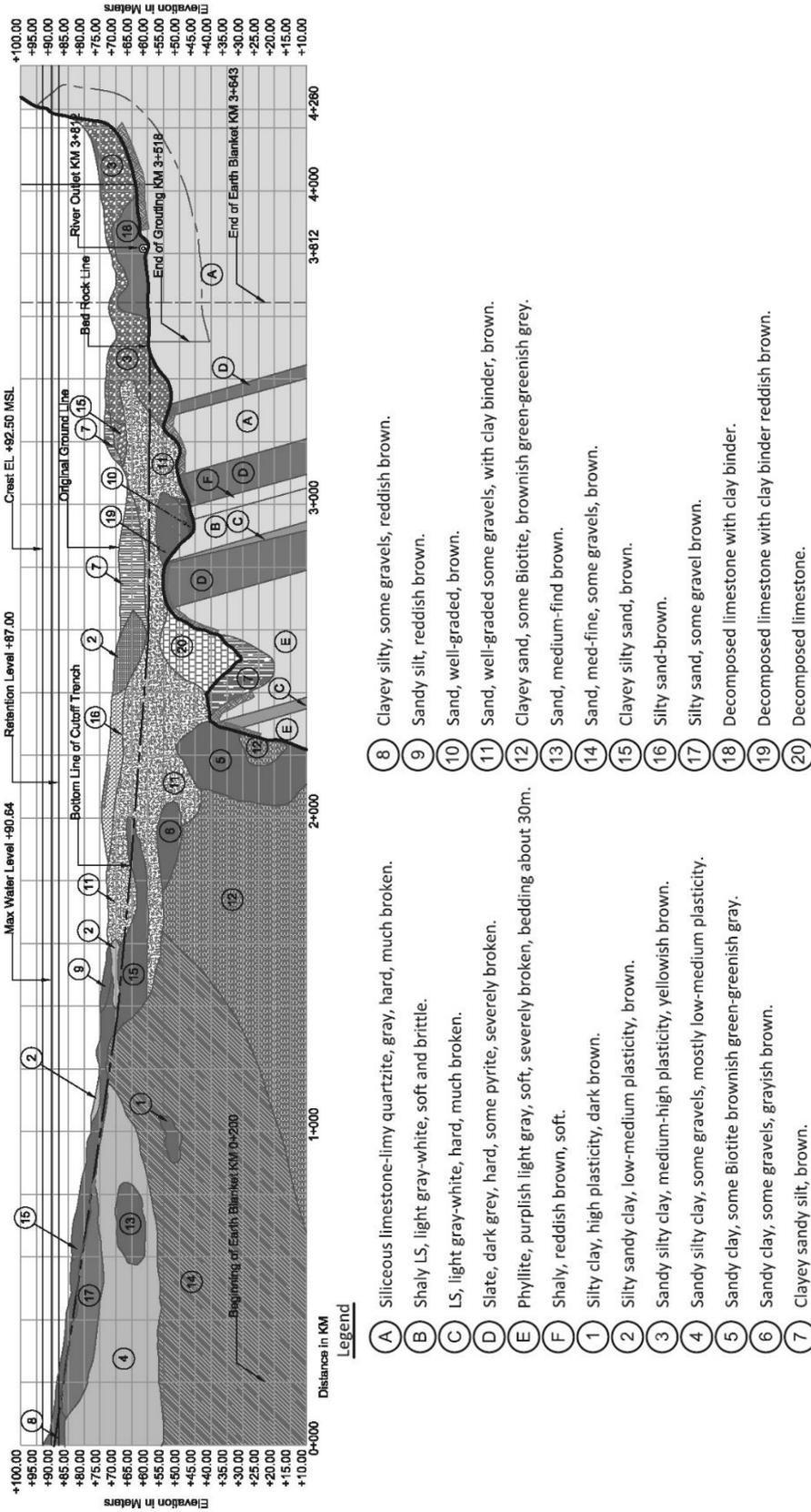
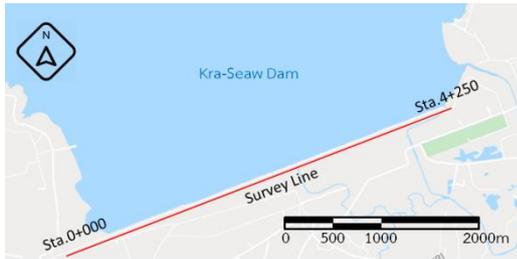


Figure 3 Geological cross section of Kra-Saew dam from West (STA.0+000) to East (STA.4+250) [7]

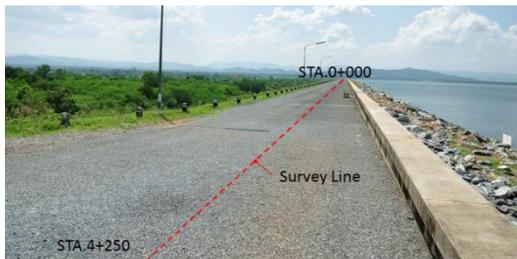
การแปลความหมายของผลการสำรวจเป็นขั้นตอนที่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรม ข้อมูลทางธรณีวิทยาตลอดจนความรู้ทางด้านธรณีวิทยาประกอบเข้าด้วยกัน

ผลการศึกษา

จากข้อมูลดิบที่ได้จากการสำรวจ (Figure 11a) พบว่าการสำรวจโดยใช้แรงทุบเขื่อนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสามารถให้ข้อมูลคลื่นสั้นสะท้อนที่ระดับความลึกราว 500 มิลลิวินาที สามารถจำแนกได้ถึงคลื่นตรง (direct wave) คลื่นหักเห (refracted wave) คลื่นสะท้อน (reflected wave) และ คลื่นผิว (surface wave)



a) Map of the survey line



b) View of survey line

Figure 6 Seismic survey line on the top of embankment



Figure 7 Generation of seismic wave using 20 Lbs sledgehammer

จาก Figure 11b พบว่าในบางจุดของการสำรวจมีสัญญาณในบางตำแหน่งที่ผิดปกติ (ในกรอบเส้นประ) หากไม่กำจัดออกแล้วจะมีผลต่อความคมชัดของผลการสำรวจ โดยขั้นต้นของการสำรวจข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลเป็นรูปตัดขวางของข้อมูลดิบ (brute

stack) เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าผลการสำรวจสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ระดับความลึกที่มุ่งหวังได้



Figure 8 Seismic recorder



Figure 9 Seismic land streamer

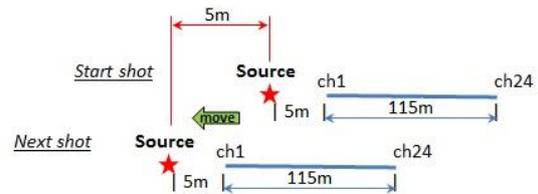


Figure 10 Seismic short pattern

Figure 12 แสดงภาพตัดขวาง 2 มิติของข้อมูลดิบโดยการใช้ความเร็วคลื่นที่ 1000 เมตรต่อวินาที โดยอ้างอิงจาก Table 2 [17] พบว่าโครงสร้างของเขื่อนสามารถพบได้ในข้อมูลดิบแต่ไม่ค่อยชัดเจน แต่หากเมื่อประมวลผลแล้วจะสามารถแสดงโครงสร้างของเขื่อนและธรณีวิทยาได้

Figure 13 เป็นผลความเร็วคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นแบบ ความเร็วช่วง (Interval Velocity) ทุกๆ 250 เมตร หรือ 25 จุดกำเนิดคลื่น ในการศึกษาพบว่าค่าความเร็วที่ได้จากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นในขั้นตอนการปรับแก้ความเร็ว

(Refraction Static Correction) ทุกๆ 50 เมตร หรือ 10 จุดกำเนิดคลื่น ซึ่งอยู่ในขั้นตอนที่ 6 ใน Table 1 มีค่าไม่แตกต่างกัน อันเป็นผลเนื่องจากข้อมูลของคลื่นสะท้อนอยู่ระดับความลึกไม่มาก และ

ด้วยความเร็วช่วง ต่างจากการวิเคราะห์ผลการสำรวจคลื่นสั้นสะท้อนที่ออกแบบเพื่อการสำรวจในระดับลึกเมื่อทำการประมวลผลคลื่นจนถึงขั้นตอนที่ 19 ตาม Table 1 แล้วได้ผลการสำรวจดัง Figure 14 ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของตัวเชื่อมได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Figure 12 และเมื่อทำการประมวลผลจนจบกระบวนการจะพบว่าผลการสำรวจยังมีความชัดเจนขึ้นดังที่ได้แสดงใน Figure 15

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการสำรวจและข้อมูลทางวิศวกรรมของตัวเชื่อมตลอดจนข้อมูลทางธรณีวิทยาประกอบกันแล้ว สามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วนตามระดับความลึก คือ ส่วนตื้นและส่วนลึก โดยส่วนตื้นมีความเร็วระหว่าง 400-800 เมตร/วินาที และส่วนลึกระหว่าง 900-1,200 เมตร/วินาที ตามลำดับ โดยหากพิจารณาตาม Table 2 แล้วจะพบว่าค่าความเร็วของส่วนตื้นซึ่งเป็นวัสดุดินบดอัดมีค่าน้อยกว่าใน Table แต่หากพิจารณาถึงในระดับลึกแล้วชั้นดินบดอัดมีค่าอยู่ในช่วงความเร็ว 1000-1600 เมตร/วินาที และในระดับลึกลงไปที่เป็นชั้นของการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรวดน้ำปูน และชั้นหินฐานมีความเร็ว มากกว่า 1,400 เมตร/วินาทีซึ่งเป็นค่าน้อยกว่าใน Table 2

กลุ่มของข้อมูลความเร็วจากระนาบตกกระทบ (Reflector) มีเพียง 1-2 ระนาบ จึงเป็นการยากที่ทำการวิเคราะห์ความเร็วคลื่น

Figure 15 แสดงผลความเร็วคลื่นแบบความเร็วช่วง (Interval Velocity) ประกอบกับข้อมูลผลการสำรวจสามารถพบว่าโครงสร้างของเขื่อนส่วนตื้นที่ก่อสร้างด้วยดินบดอัดและและส่วนลึกคือชั้นที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีอัดฉีดน้ำปูนถึงชั้นหินสามารถจำแนกได้ชัดเจนและพบว่าค่าความเร็วคลื่นที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างทางธรณีวิทยาของเขื่อน (Figure 13)

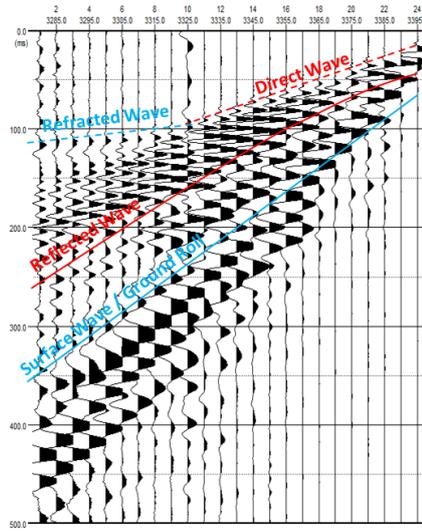
เมื่อทำการแปลผลตามข้อมูลทางวิศวกรรมและข้อมูลทางธรณีวิทยาแล้วพบว่า การสำรวจในครั้งนี้สามารถจำแนกได้ถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาบางส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการเจาะสำรวจดัง Figure 3 แต่ไม่สามารถจำแนกได้ถึงโครงสร้างธรณีวิทยาที่มีชั้นดิน/หินที่ไม่หนาได้เนื่องจากการสำรวจในครั้งนี้เป็นคลื่นความถี่ต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความถี่แล้วการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนจะสามารถตรวจพบวัตถุที่มีขนาดหรือความหนาที่มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น[18] แต่อย่างไรก็ตามผลการสำรวจในครั้งนี้ได้ให้ข้อมูลแนวรอยต่อหลักๆ ที่มีความหนาของโครงสร้างทางธรณีวิทยาในแนวเอียงในช่วงระยะ 0+750 ถึง 1+250 และระยะ 2+500 ถึง 3+250 ได้

Table 1 Seismic data processing sequences using Pre-stack Time Migration (PSTM) technique

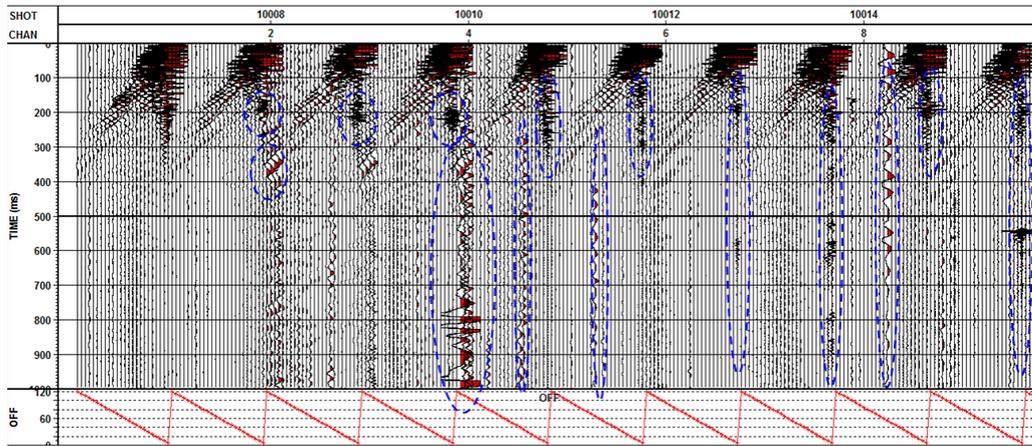
Data processing sequences	
1) Reformat from SEG-2 format to seismic unix format (*.su)	14) 2 nd pass of surface consistent amplitude correction.
2) Navigation and geometry update	15) 2 nd pass of velocity analysis
3) Low cut filter	16) 2 nd pass of residual static computation and correction
4) Spherical divergence compensation	17) 3 rd pass of surface consistent amplitude correction
5) Spikes editing and Noise Burst suppression	18) Residual noise attenuation in offset and CDP domain
6) Static and Datum correction to floating datum	19) Trace regularization and interpolation
7) Linear noise attenuation	20) Pre-migration for 3 rd velocity analysis
8) 1 st pass of surface consistent amplitude correction	21) 3 rd pass of velocity analysis
9) Residual noise attenuation in shot point domain	22) Pre-stack time migration
10) Deconvolution	23) Final mute and stacking
11) Q compensation	24) Post stack processing
12) 1 st pass of velocity analysis	25) Data output in SEG-Y format
13) 1 st pass of residual static computation and correction	

Table 2 Seismic wave velocity of geological materials [17]

Type of formation	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Densit	Density of constituent crystal
			y (g/cm ³)	(g/cm ³)
Scree, vegetal soil	300-700	100-300	1.7-2.4	-
Compacted soil	1000-1600	200-700	1.8-2.6	-
Dry sand	400-1200	100-500	1.5-1.7	2.65 quartz
Wet sand	1500-2000	400-600	1.9-2.1	2.65 quartz
Saturated shale and clay	1100-2500	200-800	2.0-2.4	-
Saturated shale and sand	1500-2200	500-750	2.1-2.4	-
Porous and saturated sandstone	2000-3500	800-1800	2.1-2.4	2.65 quartz
Limestone	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7	2.71 calcite
Dolomite	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9	(Ca, Mg) CO ₃ 2.8-2.9
Granite	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7	-
Water	1450-1500	-	1	-



a) Single seismic shot data



b) Noise in seismic data

Figure 11 Sample of raw seismic data

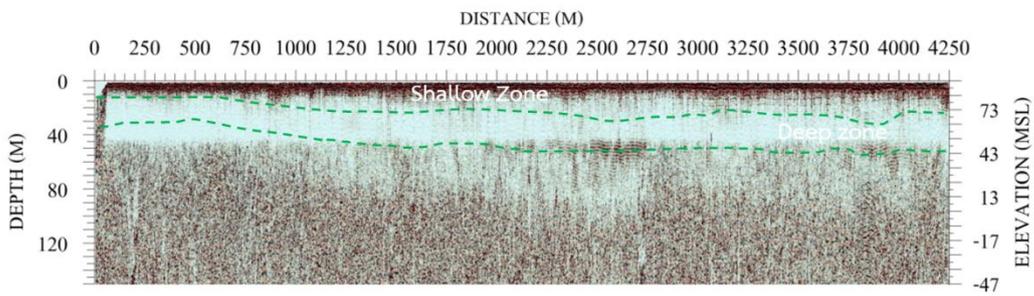


Figure 12 Brute stack

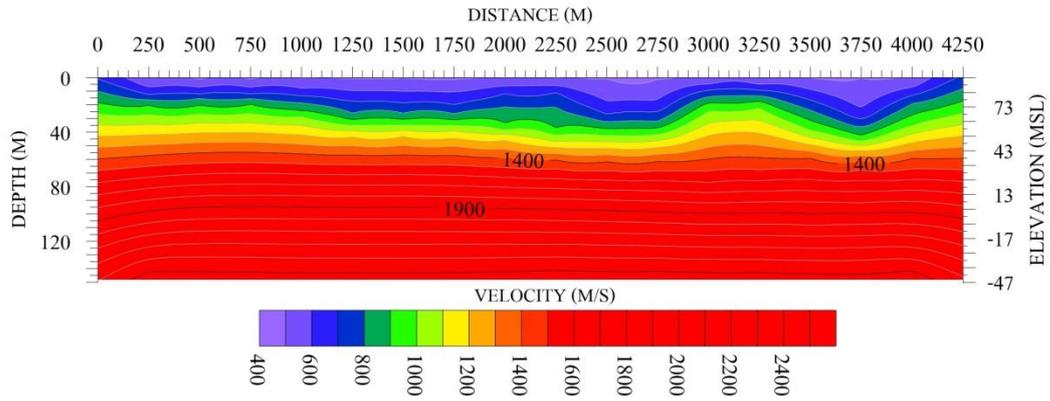


Figure 13 Seismic velocity section

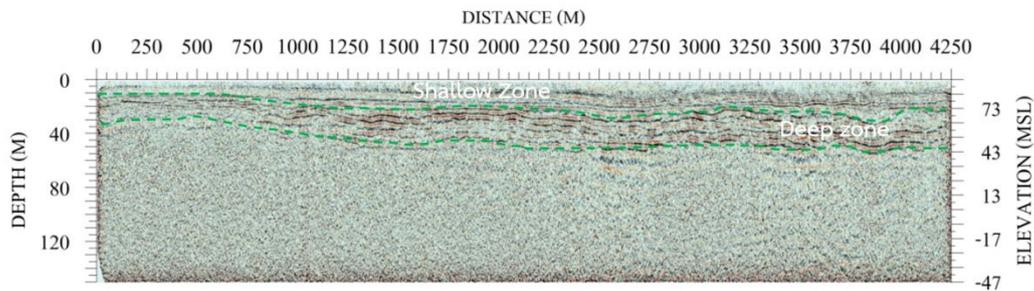


Figure 14 Pre-migration stack

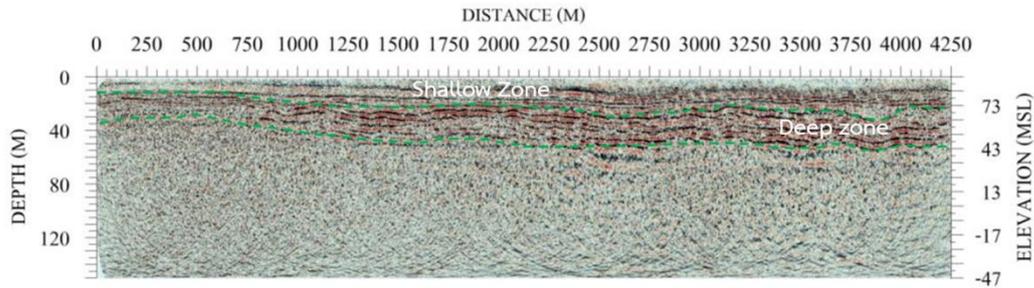


Figure 15 Full processed PSTM stack

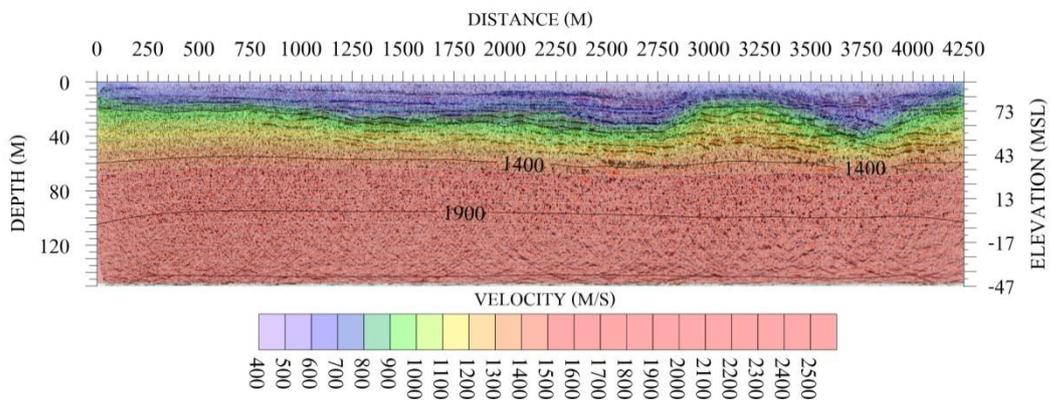


Figure 16 Full processed PSTM stack overlaid with velocity section (Figure12)

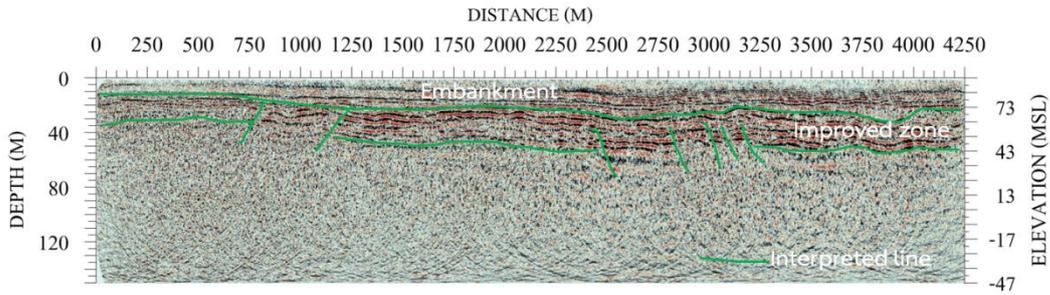


Figure 17 Interpreted stack

อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้พบว่าสัญญาณที่บันทึกมีความถี่หลักอยู่ในช่วง 30-45 เฮิร์ตซ์ (Figure 18) และความเร็วของคลื่นในชั้นหินฐานคือในส่วนของชั้นลึก (Figure 15) เท่ากับราว 1,200 เมตร/วินาที ดังนั้นคลื่นสั้นสะเทือนที่ได้จากการกำเนิดโดยใช้ฮอนมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 40-26.7 เมตร จะพบได้ว่าผลการสำรวจในครั้งนี้สามารถตรวจพบชั้นวัสดุที่มีความหนาตั้งแต่ 13-20 เมตรขึ้นไป

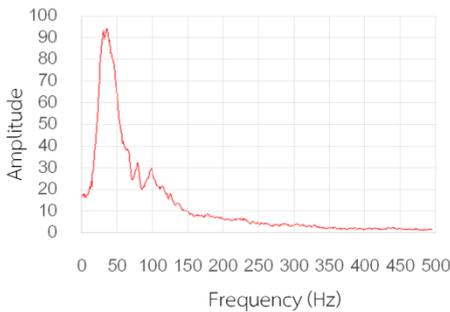


Figure 18 สเปกตรัมของคลื่นสั้นสะเทือนของข้อมูลการสำรวจ

ด้วยเหตุนี้ผลการสำรวจในครั้งนี้จึงไม่สามารถตรวจสอบโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่มีขนาดความหนาน้อยกว่า 13 เมตรได้ ดังนั้นนอกจากการออกแบบทางเรขาคณิตของรูปแบบและระยะห่างต่างๆ ของการติดตั้งเครื่องมือการสำรวจแล้ว ความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ก็เป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางธรณีวิทยาหรือโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดเล็ก กล่าวคือเมื่อความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นเพิ่มขึ้นก็จะได้รับรายละเอียดความคมชัดที่สูงขึ้น

แหล่งกำเนิดคลื่นสั้นสะเทือนความถี่สูงที่ใช้ในการสำรวจบนพื้นดินนั้นมีเพียงไม่กี่ประเภท เครื่องสั้นสะเทือน (Vibrator) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอีก 1 ชนิด ที่สามารถนำมาใช้ในการสำรวจเพื่อให้ผลการสำรวจความละเอียดสูง แต่จะต้องออกแบบและควบคุมรูปแบบลักษณะการสั้นสะเทือน (Sweep) เพื่อให้ได้คลื่นความถี่สูงตามที่ต้องการด้วยเช่นกัน [19]

สรุปผล

จากผลการศึกษา (Figure 12 และ 14) และ Table 1 สามารถแบ่งสภาพชั้นดินทางธรณีวิทยาออกเป็นสองกลุ่มตามความเร็วคลื่น คือ กลุ่มที่หนึ่งชั้นดินในระดับตื้น (ความลึกไม่เกิน 30 เมตร) มีความเร็วอยู่ระหว่าง 400-800 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นชั้นดินบดอัดก่อสร้างเป็นโครงสร้างเชื่อมดินแกนดินเหนียว

กลุ่มที่สองคือชั้นที่อยู่ลึกลงไปจากชั้นแรก มีความเร็วคลื่น อยู่ระหว่าง 900-1,200 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นชั้นดินหรือหินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน ตลอดจนชั้นหินฐานที่อยู่ลึกลงไปดังที่ได้แสดงใน Figure 17 พบได้ว่า ผลการสำรวจด้วยคลื่นสะท้อนสามารถทำให้ทราบถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาหลักของเขื่อนได้เป็นอย่างดี

แต่อย่างไรก็ตามผลการสำรวจยังไม่สามารถให้รายละเอียดของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กหรือมีขนาดความหนาไม่มากได้เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่ให้ความถี่ต่ำ อีกทั้งในระดับความลึกมากกว่า 60 เมตร นั้นยังไม่ชัดเจนเนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ในการสำรวจนั้นมีขนาดเล็กและให้พลังงานคลื่นไม่เพียงพอต่อการสำรวจในระดับลึก ตลอดจนสัญญาณรบกวนจากการก่อสร้างด้านข้าง ทำให้ข้อมูลในระดับตื้นถูกบดบังและยากต่อการกำจัด

ดังนั้นการศึกษานี้ จึงสามารถพบได้ถึงโครงสร้างหลักของตัวเขื่อนและลักษณะโครงสร้างทางธรณีหลักได้ตัวเขื่อนเท่านั้น แต่ผลการสำรวจยังไม่สามารถแสดงได้ถึงโครงสร้างขนาดเล็กได้ อันเนื่องจากพลังงานและความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่น จึงไม่สามารถแสดงโครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับลึกได้

ในส่วนของความสมบูรณ์ของโครงสร้างเขื่อน เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางวิศวกรรมของเขื่อนและข้อมูลการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือน พบว่าโครงสร้างหลักของตัวเขื่อนดินบดอัดที่มีแกนกลางเป็นดินเหนียวและฐานรากของเขื่อนมีความต่อเนื่องกันตลอดแนวเขื่อน และเมื่อวิเคราะห์โดยละเอียดแล้วไม่สามารถพบได้ถึงตำแหน่งที่ไม่สมบูรณ์ของตัวเขื่อน จากผลการศึกษาพบว่าเขื่อนนี้มีเสถียรภาพและความสมบูรณ์ที่ติดตามข้อมูลทางวิศวกรรมที่ได้ออกแบบไว้

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการสำรวจด้วยคลื่นสั่นสะเทือนนี้เป็นการสำรวจและทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบโดยทางอ้อม (indirect method) ดังนั้นการสำรวจตรวจสอบด้วยวิธีการอื่นๆ จึงมีความจำเป็นในการยืนยันความถูกต้องของผลการสำรวจนี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานวิจัย เรื่อง “การบูรณาการวิธีตรวจสอบเสถียรภาพแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำ” ขอขอบคุณ ผู้บริหาร วิศวกร และเจ้าหน้าที่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว กรมชลประทาน ที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านวิศวกรรมและสถานที่ในการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 และขอขอบคุณผู้ตรวจอ่าน (reviewer) ที่ช่วยแก้ไขและข้อคิดเห็นแก่ผู้เขียนเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dwain, K. B., Jose, L. L., and Charles, M. D. 1989. “Comprehensive geophysical investigation of an existing dam foundation”. Part 1. **Society of Exploration Geophysicists**. 8(8): 10-18.
- [2] Satarugsa, P. 2550. **Exploration Geophysics**. Khon Kaen University Publishing. Khon Kaen. 663 : 623-626. (in Thai)
- [3] Ted, A. and et al. 2007. “Electrical characterization of Success Dam in Porterville”. California, **Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. 21-30.
- [4] Poomvises N., and et al. 2010. “ Multichannel Analysis of Surface Wave – An Application to Diagnose Dam Bodies”. **Proceeding of the 5th International Conference on Applied Geophysics**, 11 - 13 November 2010, Phuket, Thailand.
- [5] Royal Irrigation Department. 2017. **Kra-Saew dam**. www.rid.go.th. Accessed 30 July 2015. (in Thai)
- [6] Department of Mineral Resources (DMR). 2004. **Geological information of Suphanburi province**. www.dmr.go.th. 25 July 2015. (in Thai)
- [7] Royal Irrigation Department. 1981. **As-build drawing of Kra-Saew dam**. Water supply and maintenance office, Royal Irrigation Department Thailand. (in Thai)
- [8] Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. 2013. **An introduction to geophysical exploration**. 3rd ed. Blackwell Publishing. 43-45.
- [9] Sherer, S.G. 1996. **Geotechnical investigations for safety of dams study**. Success Dam: Department of Interior. Bureau of Reclamation report for the U.S. Army Corps of Engineers. Sacramento District, 116 p.
- [10] URS Corporation, 2003. **Success Dam Geophysical Investigation**. Geophysical Investigation, Prepared for U.S. Army Corps of Engineers. 205: 68 p.
- [11] Van der Veen, M., and Green, A.G. 1987. Land streamer for shallow data acquisition: evaluation of gimbal-mounted geophones. **Geophysics**. 63: 1408-1413.
- [12] Van der Veen, M., Spitzer, R., Green, A.G., and Wild, P. 2001. Design and application of a towed land-streamer for cost-effective 2D and pseudo-3D shallow seismic data acquisition. **Geophysics**. 66: 482-500.
- [13] Dorbin, M.B., and Savit, C.H. 1988. **Introduction to geophysical prospecting**. 4th ed. New York. McGraw-Hill.
- [14] Wahl, R.E., and Llopis, J.L. 1982. **In situ seismic investigation of Success Dam**. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 71 p.
- [15] Brian, J.E., and William, H.D. 1997. A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration. **Society of Exploration Geophysicists**. 305.
- [16] Yilmaz, O. 1987. Seismic data processing. **Society of Exploration of Geophysics**. 2: 526.
- [17] Thierry, B., Olivier, C., and Bernard, Z. 1987. **Acoustics of Porous Media**. Gulf Publishing Company. Book Division. 334p.

[18] Binzhong, Z. and Peter, H. 2012. "Fault and dyke detectability in high resolution seismic surveys for coal: a view from numerical modelling". Presented at the **22nd ASEG Geophysical Conference and Exhibition**, February 2012.

[19] Brian J. E., and et al. 1997. **A handbook for seismic data acquisition in exploration**. Society of Exploration Geophysicists.305.