

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนดินเมื่อมีแรงแผ่นดินไหว
มากระทำด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
**ANALYSIS OF EARTH DAM BEHAVIOR SUBJECTED
TO EARTHQUAKE BY FINITE ELEMENT METHOD**

ศิริกันยา เลาสุวรรณ* ศุภวิชญ์ อินทร์ทอง และธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์
Sirikanya Laosuwan*, Supawich Inthong, and Tawatchai Tanchaisawat

Faculty of Engineering, Chiang Mai University

*corresponding author e-mail: sirikanyalaosuwan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมของความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ค่าความดันน้ำส่วนเกิน ความเค้นประสิทธิผล และการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อนแม้งัด หลังจากได้รับแรงกระทำจากการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่าง ๆ โดยจะสร้างแบบจำลองเขื่อนแล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระนาบความเครียด 2 มิติ ไร้เชิงเส้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ การบดอัดเป็นชั้น ๆ จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Plaxis ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนดิน เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงที่ต่างกัน โดยมีช่วงความเร่งสูงสุดที่พื้นดินอยู่ระหว่าง 0.025-0.13 เท่าของความโน้มถ่วงของโลก (g) พบว่าค่าความดันน้ำจะมากที่สุดบริเวณส่วนมวลกละและมีการลดน้อยลงเมื่อเข้าสู่แกนกลางเขื่อน ค่าความดันน้ำส่วนเกินบริเวณแกนกลางเขื่อนจะมีค่ามากกว่า บริเวณส่วนมวลกละที่ระดับความลึกเดียวกัน จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าการตอบสนองต่อพฤติกรรมทางด้านความดันน้ำ ความเค้นประสิทธิผล และการเคลื่อนตัวของเขื่อนภายหลังจากได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวไม่มีผลมากเท่าใดนัก

คำสำคัญ: เขื่อนดิน แผ่นดินไหว ไฟไนต์เอลิเมนต์ ความดันน้ำ ความเค้นประสิทธิผล การเคลื่อนตัว

Abstract

This research aims to study the behavior of pore water pressure, excess pore water pressure, effective stress and maximum displacement that occurs within the dam after receiving lateral forces from earthquakes in various sizes. The model will be created and then analyzed by using finite element method in a 2D nonlinear plane strain condition by incremental model. By using the program Plaxis to analyze the behavior of the earth dam that has effected from various sizes of earthquakes (0.025 - 0.13 g) it was found that the water pressure would be the most valuable at the part of random zone and, reduced when entering to the core zone. The excess water pressure at the core zone is greater than the random zone at the same depth. From the

analysis, it reveals that the impact on the behavior of pore water pressure, effective stress and displacement of the dam, after the dam received the lateral forces from the earthquake there was not very much effect.

Keywords: earth dam, earthquake, finite element, pore water pressure, effective stress, displacement

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันทางภาคเหนือของไทยนั้นประกอบไปด้วยรอยเลื่อนที่มีพลังอยู่หลายแห่ง ยกตัวอย่างเช่น รอยเลื่อนพะเยา รอยเลื่อนแม่ทา รอยเลื่อนแม่จัน ทำให้ในอดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยมากมายเกิดขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Sinsuksate, 2010; Soralump et al., 2009; Soralump & Tansupo 2009) และเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่ผ่านมามีเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ขึ้นที่ อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย มีความรุนแรงประมาณ 6.30 ริกเตอร์ โดยนักธรณีวิทยาสันนิษฐานว่าเกิดจากบริเวณรอยเลื่อนพะเยาพาดผ่านอำเภอพาน จังหวัดลำปาง และอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ทางด้านทิศเหนือของรอยเลื่อนท่าสี้ ซึ่งมีความยาวประมาณ 23 กิโลเมตร โดยที่หลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในครั้งนั้นได้สร้างความเสียหายให้แก่สิ่งปลูกสร้าง โบราณสถาน บ้านเรือน รวมถึงทรัพย์สินที่สูญหายไปของผู้คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณเหล่านั้นเป็นอย่างมาก ถ้าหากแรงแผ่นดินไหวนี้มีความถี่ ระยะเวลาและความรุนแรงมากขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อเขื่อนดินขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่บนพื้นดินซึ่งเขื่อนนั้นเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ที่จัดอยู่ในโครงสร้างที่มีโอกาสเกิดการพิบัติต่ำแต่จะก่อให้เกิดความเสียหายสูง ตัวอย่างการวิบัติของเขื่อนดินที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว เช่น การพังทลายของทางลาดเขื่อนทั้งบริเวณหน้าเขื่อนและหลังเขื่อน การทรุดตัวที่ต่างกันทั้งในแนวราบและแนวตั้ง การลดลงของระดับน้ำหน้าเขื่อน การเกิด **liquefaction** ขึ้นกับดินได้ฐานเขื่อน ทำให้มีสภาพคล้ายของเหลวไม่สามารถรับน้ำหนักได้ และแรงดันน้ำในตัวเขื่อนนั้นเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพความปลอดภัยของเขื่อน โดยในอดีตได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองของแรงดันน้ำในลักษณะไดนามิกของดินเหนียวอ่อน อัดตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะ **shock loading** (Meng et al., 2004) และศึกษาแรงดันน้ำในส่วนเกิน (**excess pore water pressure**) เขื่อนดินขนาดใหญ่ภายหลังจากเกิดแรงแผ่นดินไหว (Nasrollahi, 2008) และมีการศึกษาหากลไกการวิบัติและพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของเขื่อน Fujinuma ที่เกิดการวิบัติในปี 2011 จากแรงแผ่นดินไหว Tohoku (Charatpangoon, 2010) แต่บทความหรืองานวิจัยอยู่น้อยที่จะกล่าวถึงพฤติกรรมของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น

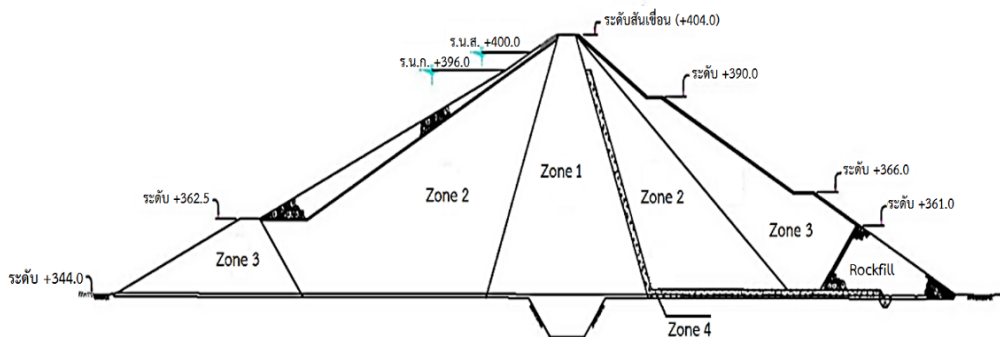
บทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมของเขื่อนดินเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อน (**pore water pressure**) ค่าความดันน้ำส่วนเกิน ค่าความเค้นประสิทธิผล (**effective stress**) และการเคลื่อนตัวสูงสุด (**total displacement**) ของตัวเขื่อนดินในขณะที่เกิดแรงกระทำกับแผ่นดินไหวขนาดต่าง ๆ กระทำกับตัวเขื่อนภายใต้เงื่อนไขแบบจำลองดินแน่นแข็ง (**hardening soil model**) ที่อยู่ในโปรแกรม **Plaxis Analysis** สำหรับสร้างแบบจำลอง 2 มิติของเขื่อนดิน กรณี **Non-homogenous soil**

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

1.1 รายละเอียดของตัวเชื่อม

เขื่อนแม่งัดเป็นเขื่อนดินถมแบ่งส่วน สูง 59 เมตร ยาว 1,950 เมตร สันเขื่อนกว้าง 9 เมตร อ่างเก็บน้ำมีพื้นที่ 16 ตารางกิโลเมตร สามารถกักเก็บน้ำได้สูงสุด 26.50 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำไหลเข้าตัวเขื่อนเฉลี่ยปีละ 332 ล้านลูกบาศก์เมตร ในตัวเขื่อนแม่งัดประกอบไปด้วย 5 ส่วน ส่วนที่ 1 แกนกลางของเขื่อน (core zone) เป็น impervious zone ส่วนที่ 2 ส่วนมวลตะกอน (random zone) เป็น pervious zone ใช้ดินถมบดอัดให้มีความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 standard proctor compaction test (SPCT) ส่วนที่ 3 โซน miscellaneous เป็น pervious zone เหมือนกันกับส่วนมวลตะกอนแต่อาจจะมีดินหลายชนิด ที่ใช้ถมบดอัดให้มีความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 standard proctor compaction test (SPCT) ส่วนที่ 4 เป็นชั้นกรวดวัสดุเป็นกรวดทรายกรวดแบบเอียง (chimney drain) คือ filter zone ใส่กรวดปนทรายถมบดอัดแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 standard proctor compaction test (SPCT) และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของ transition กับ rock fill toe ด้านท้ายเขื่อนโดยตัวเขื่อนตั้งอยู่บนชั้นหินแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 1 (กรมชลประทาน, 2556) ความชื้นของดินอยู่ระหว่างร้อยละ ± 2 ของความชื้นอยู่จุด optimum ของดินชนิดนั้น ๆ ตามมาตรฐานของ proctor โดยที่แกนดินเหนียวเป็นดินกลุ่ม CL และส่วนมวลตะกอนจะเป็นดินกลุ่ม ML เป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 1 รายละเอียดส่วนประกอบของเขื่อน

1.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเขื่อนแม่งัดและฐานราก

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเขื่อนดินถมแกนดินเหนียวและหินฐานรากที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติของดินทั้งภาคสนามและในห้องปฏิบัติการรวมทั้งได้จากการอ้างอิงข้อมูลระหว่างก่อสร้าง (วิกกรม, 2530) และข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งได้รวบรวมนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้อุณหภูมิเป็นตัวแทนของวัสดุในสภาพปัจจุบัน จึงทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติในการสร้างแบบจำลองให้เป็นไปตามพารามิเตอร์แต่ละชนิดของดินที่นำมาถมตัวเขื่อนดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุประกอบตัวเชื่อมที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Parameter	Core Zone	Random Zone	Miscellaneous	Filter	Rock Fill	Foundation
γ_{sat} (kN/m ³)	21.00	26.20	26.20	21.40	23.00	23.00
k (m/day)	6.00E-05	2.24E-04	2.24E-04	2.333	2.333	8.60E-04
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	5,200	5,200	5,200	13,000	90,000	90,000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	4,530	4,530	4,530	8,700	60,000	60,000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	15,600	15,600	15,600	39,000	270,000	270,000
c (kN/m ²)	93.20	90.00	90.00	0.10	0.10	15.00
ϕ (deg.)	17.90	21.50	21.50	35.00	41.00	45.00
ν	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

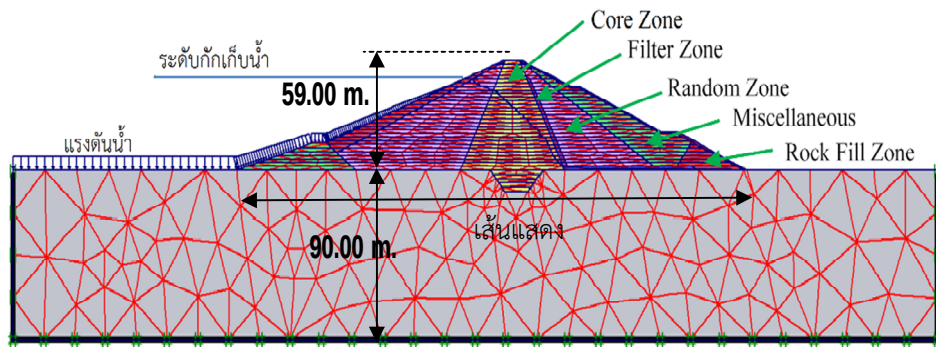
หมายเหตุ E_{50}^{ref} = Stiffness modulus for primary loading in triaxial test, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ = Stiffness modulus for primary loading in oedometer test, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ = Stiffness modulus for unloading/reloading, ϕ = Friction angle, C = Cohesion, ν = Poisson's ratio and γ = Unit weight

2. การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

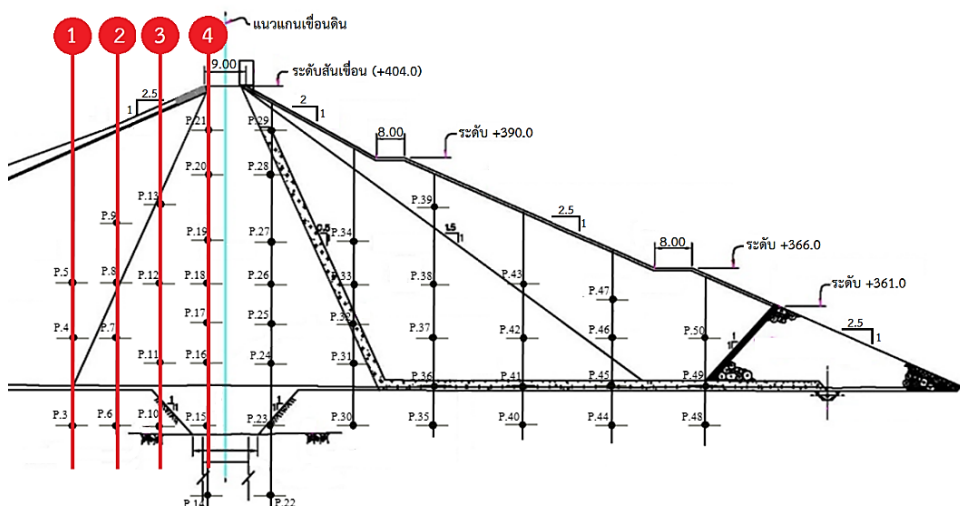
สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนดินเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำ สามารถทำได้การนำแบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา (Woodward & Griffiths, 1995; Uddin, 1999; Moayed et al., 2009) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาวัสดุที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น (nonlinear behavior) จะทำโดยใช้โปรแกรม Plaxis (PLAXIS software 2D-Version 8.2, 2002) โดยจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไข plane strain condition จะใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 15 โหนด 12 จุดความเค้น ดังภาพที่ 2 แสดงรูปแบบจำลองทั่วไปของเขื่อนโดยพื้นที่หน้าตัดสูงสุดของตัวเขื่อนมีความสูง 59 เมตร และกว้าง 342.50 เมตร ฐานเขื่อนมีความยาวทั้งหมด 622.50 เมตร จากกึ่งกลางเขื่อนถึงขอบทั้งสองด้าน โดยฐานรากตัวเขื่อนได้วางบนชั้นดินที่มีคุณสมบัติเป็นหินแข็ง กำหนดขอบเขตความลึกของหินฐานรากประมาณกับ 1.50 เท่าของความสูงเขื่อน (90 เมตร) และขอบเขตฐานเขื่อน (boundary condition) มีสภาพยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ แบบจำลองเป็นแบบ incremental model (ปัญญา, 2553) ให้วัสดุตัวเชื่อมเป็นชั้น ๆ ติดต่อกัน (multilayer) และมีการถ่ายน้ำหนักบรรทุกตัวเองในแต่ละชั้นต่อเนื่องกันไป เหมือนวิธีก่อสร้างที่ใช้ดินถมบดอัดเป็นชั้น ๆ โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดเลือกใช้ข้อมูลตามตารางที่ 1

หลังจากทำการสร้างแบบจำลองเขื่อนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างแบบจำลองจากการวิเคราะห์ FEM กับข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดความดันน้ำ Electric Piezometer ที่ติดตั้งในตัวเชื่อมแมงกานีสที่บริเวณ Sta. 0+180 ตามตำแหน่งความลึกต่าง ๆ จำนวน 4 หลุม คือ 1, 2, 3, 4 ในบริเวณ ส่วนมวลคละ (random zone) และแกนกลางเขื่อน (core zone) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นภายในตัวเชื่อมในสภาวะสถิตศาสตร์ที่ระดับกักเก็บน้ำ +396 ม. (รทก) โดยเลือกวิเคราะห์เฉพาะตำแหน่งที่อยู่ใต้เส้นระดับน้ำภายในตัวเชื่อม (phreatic line) ค่าแรงดันน้ำที่ได้จากการเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

(FEM) กับค่าที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากสันเขื่อนกับแรงดันน้ำดังภาพที่ 4



ภาพที่ 2 แบบจำลองของเขื่อนแม่งัดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์



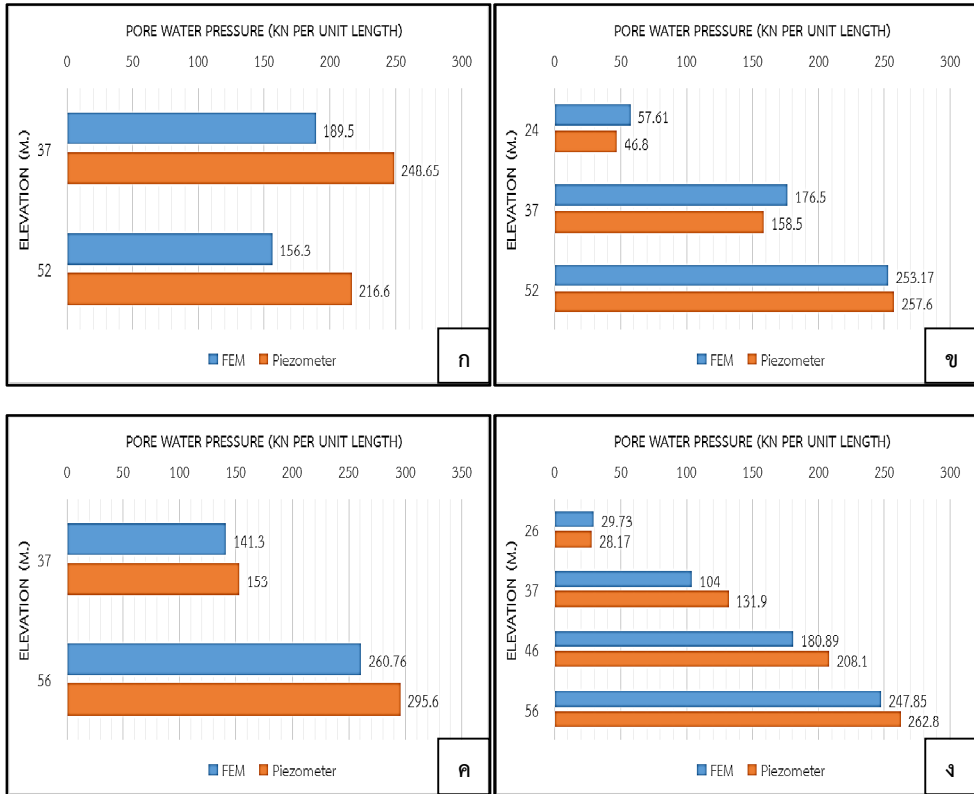
ภาพที่ 3 รูปตัดตามขวางของตัวเขื่อนที่ กม.0+180 แสดงการติดตั้ง Electric Piezometer (กรมชลประทาน, 2556)

หลังจากที่เปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ค่าแรงดันน้ำพบว่าแบบจำลองเขื่อนที่สร้างขึ้นนั้นมีความใกล้เคียงกับเครื่องมือตรวจวัด Electric Piezometer โดยมีร้อยละความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 85

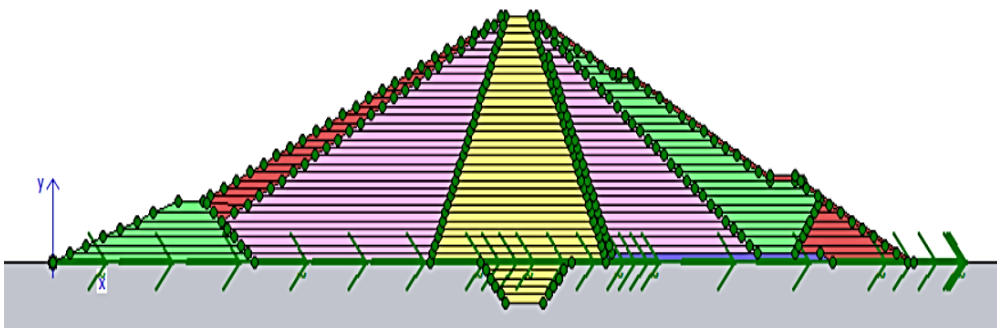
3. วิเคราะห์พฤติกรรมดินในตัวเขื่อนด้วยแรงพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมดินในตัวเขื่อนด้วยแรงพลศาสตร์นี้ จะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีความแรงจากแรงแผ่นดินไหวขนาดต่างกันมากระทำเข้าที่บริเวณฐานเขื่อน (ภาพที่ 5) โดยไม่พิจารณาแรงกระเพื่อมจากน้ำหน้าเขื่อนขณะสั่นไหว คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นแสดงดังตารางที่ 2 และตัวอย่างคลื่น EQ1 (chalfant valley) ในภาพที่ 6 ซึ่งเป็นข้อมูลเป็นค่าความเร่งกับเวลา (acceleration-time) โดยจะอาศัยข้อมูลแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้นในอดีตและเปรียบเทียบให้มีสภาพใกล้เคียงกับแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้นจริงในประเทศไทยตามข้อมูลใน

ตารางที่ 2 โดยทำการกำหนดให้ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ต่างกันในขณะที่ระยะเวลาที่เกิดใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าความดันน้ำค่าความดันน้ำส่วนเกิน ความเค้นประสิทธิผล และการเคลื่อนตัวสูงสุดของเขื่อน



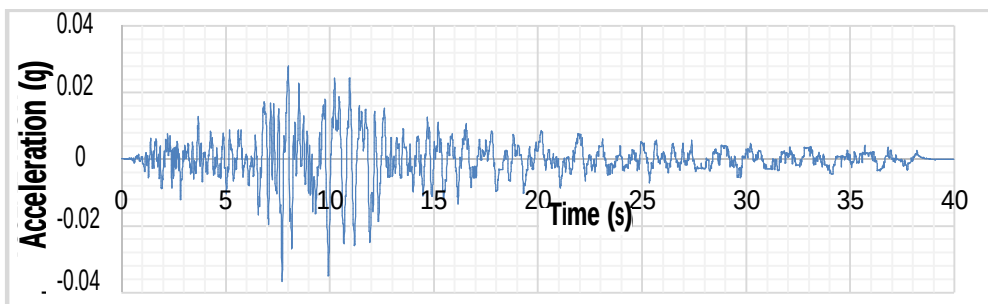
ภาพที่ 4 ค่าความดันน้ำระหว่างแบบจำลองวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ Electric Piezometer ก) หลุมที่ 1 ข) หลุมที่ 2 ค) หลุมที่ 3 ง) หลุมที่ 4



ภาพที่ 5 เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งที่ใส่แรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 2 ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

สัญลักษณ์	คลื่นแผ่นดินไหว	Richter Scale	PGA	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ระยะเวลา (วินาที)
EQ1	Chalfant Valley	6.19	0.036g	57.12	39.98
EQ2	Berrego1942	6.50	0.070g	57.79	40.00
EQ3	Northridge 03	6.69	0.072g	71.08	36.88
EQ4	San Fernando	6.61	0.082g	57.12	40.00
EQ5	Northridge 04	6.69	0.090g	61.26	40.00
EQ6	Borrego Mth.	6.63	0.130g	70.75	40.00



ภาพที่ 6 คลื่นแผ่นดินไหว EQ1 (Chalfant Valley) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ผลการวิจัย

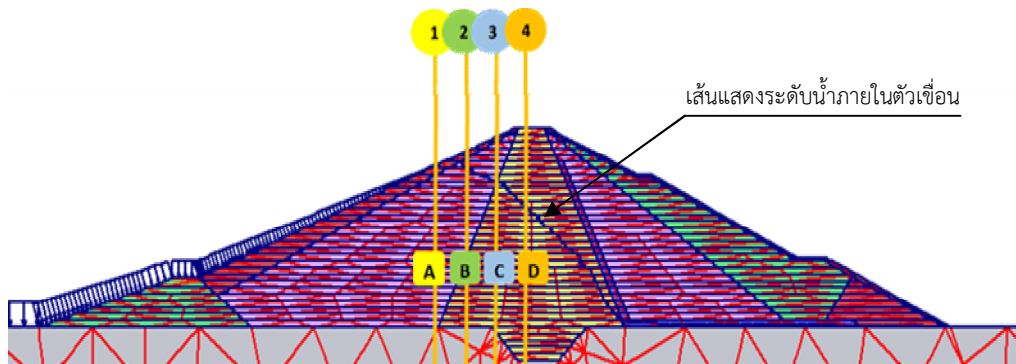
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมดินในตัวเชื่อมในกรณีภายใต้แรงพลศาสตร์โดยการนำคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดของความรุนแรงแตกต่างกัน มาศึกษาพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ (แรงดันน้ำ ความเค้น และการเคลื่อนตัว) ที่เกิดขึ้นในตัวเชื่อมหลังจากที่ได้รับแรงกระทำจากการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่าง ๆ มากระทำ และกำหนดตำแหน่งที่พิจารณาทั้งหมด 4 จุด (A, B, C และ D) โดยเลือกระดับที่พิจารณาตามตำแหน่งของหลุมวางเครื่องตรวจวัดแรงดันน้ำทั้ง 4 หลุม คือ 1, 2, 3, 4 ซึ่งระดับที่ใช้พิจารณาจะกำหนดให้อยู่ใต้เส้นระดับน้ำที่ไหลในตัวเชื่อม (ณ ที่นี้เลือกใช้ที่ระยะ 37 เมตรจากสันเขื่อน) ดังภาพที่ 7

เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามากระทำกับตัวเชื่อมจนเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในตัวเชื่อม ในบทความนี้จึงทำการวิเคราะห์พฤติกรรมเหล่านี้โดยจะแยกพิจารณาออกเป็น 4 กรณี คือ วิเคราะห์ความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน วิเคราะห์ค่าความดันน้ำส่วนเกิน วิเคราะห์ความเค้นประสิทธิผล และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสูงสุด โดยทำการพิจารณาการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทั้งแนวตั้งและแนวนอน

1. ความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ความสัมพันธ์ของค่าความเร่งกับความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่เกิดขึ้นสูงสุดเมื่อให้แรงแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ที่ขนาดต่าง ๆ แล้วพิจารณาพฤติกรรมของค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นพบว่า คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมากกว่า จะทำให้ค่าของแรงดันน้ำสูงกว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความเร่งสูงสุดที่พื้นดินต่ำกว่าในช่วงเวลาการสั่นใกล้เคียงกัน และ

ค่าความดันน้ำจะยิ่งมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งแกนกลางเขื่อน เนื่องจากระดับเส้นผิวน้ำในตัวเขื่อนมีระดับที่ต่ำลง ดังแสดงผลในภาพที่ 8



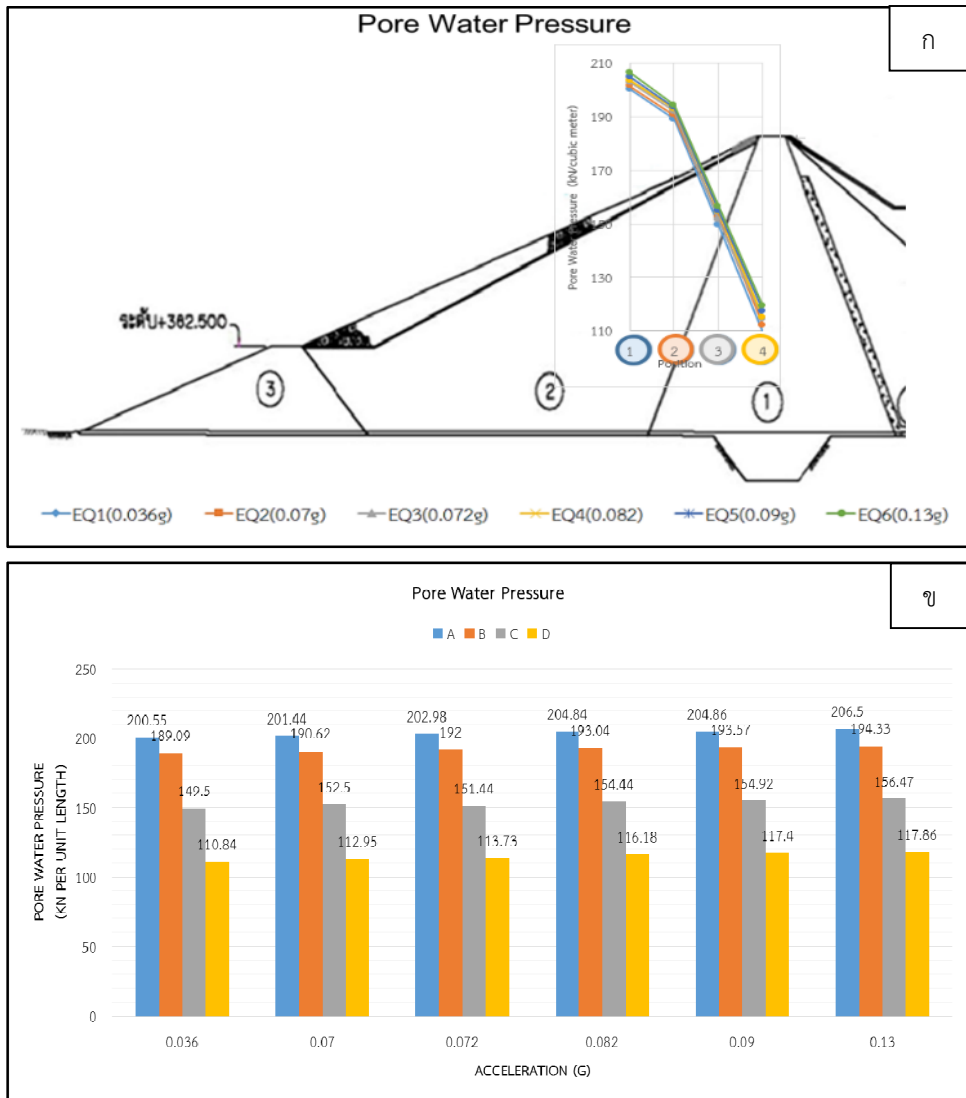
ภาพที่ 7 ภาพตัดตามขวางของตัวเขื่อนที่ กม.0+180 แสดงจุด A, B, C และ D ที่ระยะ 37 เมตร จากสันเขื่อน

2. ค่าความดันน้ำส่วนเกิน

เมื่อพิจารณากรณีของชนิดดินที่ต่างกันแต่อยู่ระดับความลึกเท่ากัน (ภาพที่ 7) โดยที่จุด A ที่มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณส่วนมวลคละซึ่งเป็นดินชนิด MH เป็นส่วนใหญ่และจุด B ที่มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณแกนกลางเขื่อนซึ่งเป็นดินชนิด CL เป็นส่วนใหญ่พบว่า เมื่อนำค่าความดันน้ำมาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาตามภาพที่ 9 ค่าความดันน้ำส่วนเกินสูงสุดของจุด B จะมีค่ามากกว่าจุด A เนื่องจากความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติของดิน จุด B จะอยู่ในบริเวณที่เป็นแกนกลางเขื่อนซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีค่าความซึมได้ (permeability, k) ต่ำและน้อยกว่าจุด A ที่อยู่บริเวณส่วนมวลคละ และเมื่อพิจารณาเพิ่มเติมบริเวณแกนกลางเขื่อนซึ่งเป็นดินชนิดเดียวกัน แต่ตำแหน่งต่างกันในระดับเดียวกัน คือจุด B, C, และ D ค่าความดันน้ำส่วนเกินสูงสุดจะมีค่ามากที่สุดที่ จุด B ที่อยู่บริเวณขอบของแกนกลางเขื่อน และน้อยลง ตามลำดับ จนถึงจุด D ซึ่งอยู่ตรงกลางแกนกลางเขื่อน เนื่องจากเมื่อมีแรงกระทำจากแผ่นดินไหวส่วนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ ด้านนอกของตัวเขื่อน และลดน้อยลงเมื่อเข้าสู่แกนกลางเขื่อนไปทางด้านชั้นทรายกรอง (filter) เพราะฉะนั้นจุด B ที่อยู่ส่วนด้านนอกของเขื่อนมากกว่าจึงมีค่าความดันน้ำส่วนเกินสูงสุดของเขื่อนมากกว่าจุด C และจุด D

3. ความเค้นประสิทธิผล

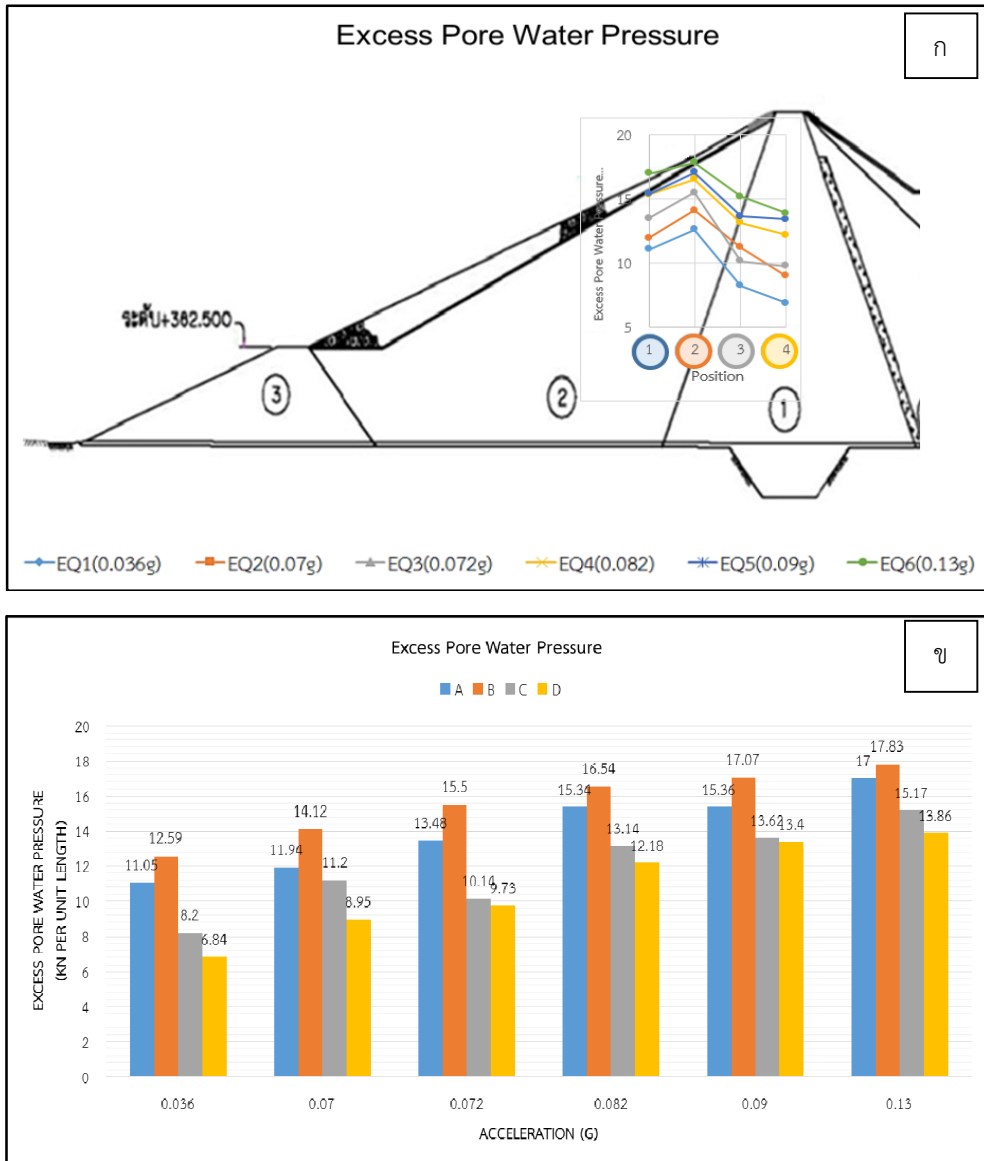
เมื่อมีแรงจากแผ่นดินไหวมากระทำต่อตัวเขื่อน จะทำให้ค่าความดันน้ำในมวลดินเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ เนื่องจากแรงภายนอกกระทำทำให้เม็ดดินเกิดการเคลื่อนตัว จนทำให้ปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง ถ้าน้ำไม่สามารถระบายออกได้หรือถูกกักไว้จะเป็นผลทำให้ค่าความเค้นประสิทธิผลและค่าความเค้นรวมของดินมีค่าลดลง (ภาพที่ 10) เมื่อพิจารณาค้นแผ่นดินไหวที่มีความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ต่างกัน คลื่นแผ่นดินไหวที่มีความเร่งสูงสุดของพื้นดินมากจะทำให้ค่าความเค้นประสิทธิผลของดินลดลงมากกว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความเร่งสูงสุดของพื้นดินน้อยกว่า เนื่องจากเมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นจะเป็นผลทำให้ค่าความเค้นประสิทธิผลลดลง (Terzaghi, 1925)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กับการสั่นไหว

ก) ค่าความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่เกิดขึ้นสูงสุดแต่ละตำแหน่ง

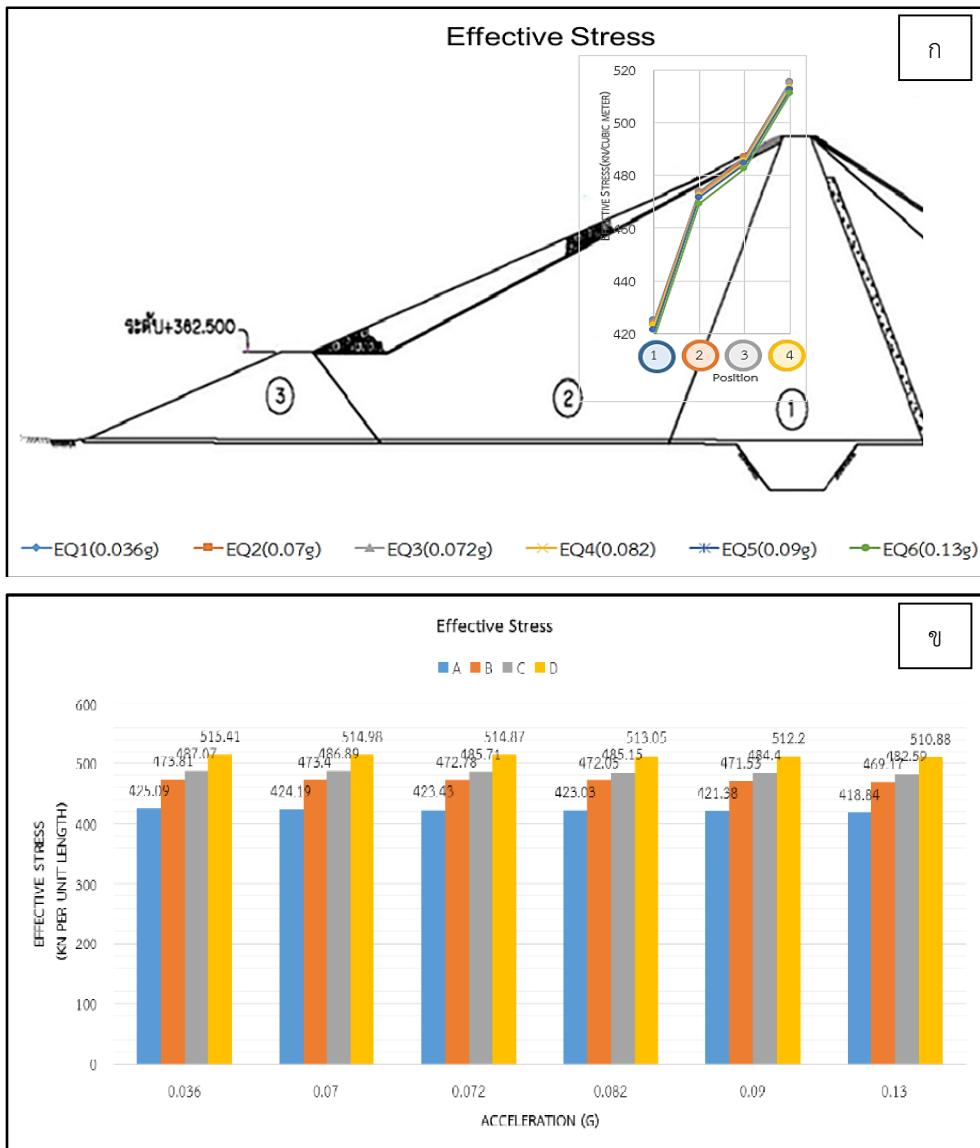
ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเมื่อความเร่งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นกับความเร่ง

ก) ค่าความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดแต่ละตำแหน่ง

ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันน้ำส่วนเกินเมื่อความเร่งเพิ่มขึ้น

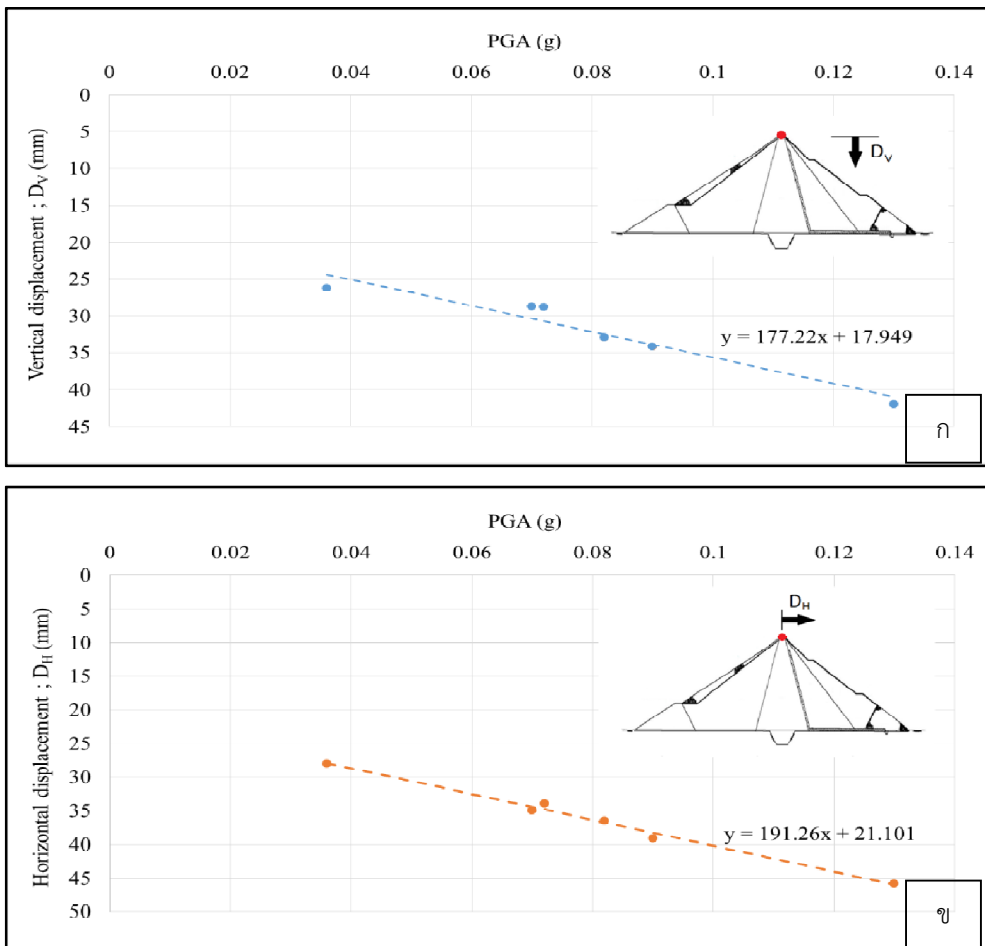


ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กับความเร่ง
 ก) ค่าความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นสูงสุดแต่ละตำแหน่ง
 ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นประสิทธิผลเมื่อความเร่งเพิ่มขึ้น

4. การเคลื่อนตัวสูงสุด

ผลจากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเขื่อนเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำ สามารถแสดงค่าออกมาในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดกับการการเคลื่อนตัวในแต่ละแนวแกนที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 11ก, ข) เป็นกราฟแสดงการเคลื่อนตัวสูงสุดทั้งแนวดิ่ง และแนวราบของเขื่อนตามลำดับ โดยตำแหน่งที่พิจารณาการเกิดการเคลื่อนตัวอยู่ที่จุดสีแดงบริเวณสันเขื่อน โดยแรง

แผ่นดินไหวที่เข้ามากระทำจะมีระยะเวลาในการสั่นใกล้เคียงกันแต่มีค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ที่ต่างกันคืออยู่ในช่วงระหว่าง 0.036–0.13 g พบว่า การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเขื่อนจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของเขื่อน (Prabir et al., 2010) และยิ่งแรงแผ่นดินไหวที่เข้ามากระทำมีค่าความเร่งสูงสุดมาก การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่มากกระทำจะมากขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อเขื่อนได้รับกระทำจากแผ่นดินไหว จะมีแรงเข้าไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเกิดการเคลื่อนตัว ยิ่งแรงกระทำมีมาก ยิ่งส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้นตาม



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสูงสุด
ก) ในแนวดิ่งกับความเร่ง ข) ในแนวราบกับความเร่ง

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเขื่อนดินเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวขนาดต่าง ๆ มากระทำ โดยเมื่อพิจารณาตำแหน่ง A, B, C และ D พบว่า ยิ่งเข้าใกล้ตำแหน่งกึ่งกลางเขื่อน ยิ่งทำให้ค่าความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง ค่าความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่จุด A จึงมีค่ามาก

ที่สุด และจะมีค่าน้อยที่สุดที่จุด D ที่ตำแหน่งกลางแกนเขื่อน แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความดันน้ำส่วนเกินจุดที่มีค่าสูงสุดคือจุด B เนื่องจากความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติของดิน และเมื่อพิจารณาที่ค่าความเค้นประสิทธิผล จุดที่มีค่ามากที่สุดคือจุด D และจะมีค่าน้อยลงเมื่อตำแหน่งห่างออกจากแกนเขื่อน จึงทำให้มีค่าแปรผกผันกับค่าความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ด จากผลที่ได้ทำให้สามารถสรุปถึงความสัมพันธ์ทั้งหมดได้ว่า ค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินนั้นจะมีผลต่อค่าแรงเฉือน (shear strength) ของดินเมื่อเกิดความดันน้ำในมวลดินสูงขึ้น ค่าความเค้นประสิทธิผลของดินจะมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าแรงเฉือนของดินลดลง และเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวกระทำกับตัวเขื่อน ซึ่งมีมวลมากจึงเกิดแรงกระทำทั้งทางด้านแนวตั้งและด้านข้างในลักษณะไดนามิก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งแนวตั้งและแนวราบของเขื่อน โดยความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงที่เข้ามากระทำกับตัวเขื่อน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่สอนองค์ความรู้พร้อมปูพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมปฐพีและขอขอบพระคุณกรมชลประทานโครงการเขื่อนแม่งัด จังหวัดเชียงใหม่ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กลุ่มออกแบบ ส่วนวิศวกรรมบริหารสำนักชลประทานที่ 1 จังหวัดเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- กรมชลประทาน. (2556). **รูปตัดขวางตัวเขื่อน**. กรุงเทพฯ: กลุ่มออกแบบส่วนวิศวกรรมบริหาร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- บัญชา สิมสุเศรษฐ์. (2553). **ผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อพฤติกรรมของเขื่อนแม่ทะลหลวง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิกรม วิกรมประสิทธิ์. (2530). **พฤติกรรมของเขื่อนแม่งัดในระหว่างการก่อสร้าง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Charatpangoon, B. (2010). **Seismic Safety Evaluation of Earth Dams in Northern Thailand**. Thesis Masters M.S. degrees, Asian Institute of Technology, school of Engineering and Technology, Thailand.
- Meng, Q.S., Wang, R. & Chen, Z. (2004). Pore water pressure mode of oozy soft clay under impact loading. **Rock and Soil Mechanics**, 25(7), 1017-1022.
- Moayed, R.Z., Formashee, M.R. & Kamalzare, M. (2009). Impact of elasticity, core zone and accelerogram on embankment dam under earthquake load. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 14, 2009.
- Nasrollahi, S.M. (2008). **Determination of Excess Pore Pressure in Earth Dam after Earthquake**. China: World Conference on Earthquake Engineering.
- Prabir K.B., Kameswara N.S.V., Bhokya M. & Arindam D. (2010). **2D FEM Analysis of Earth and Rockfill Dams Under Seismic Condition**. Fifth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics and symposium in honor of professor I.M. Idriss, 2010.
- Sinsuksate, B. (2010). **Effects of seismic force on behavior of Mae Thalop Luang Dam**. Master M.S. thesis degree. Chiang Mai University.

- Software 2D- Version 8.2. (2002). **Delft University of Technology & PLAXIS b.v.**, Netherlands.
- Soralump S. & Tansupo, K. (2009). **Safety Analyses of Srinagarind Dam Induced by Earthquakes Using Dynamic Response Analysis Method**. Proceeding of international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering (IS-Tokyo 2009), London: Taylor & Francis.
- Soralump, S., Thongthamchart C. & Chaisakaew, V. (2009). **30 Years Instrumentation Behavior of Srinagarind Dam and Analysis of Warning Criteria**. 2nd International Conference Long Term Behaviour of Dams (LTBD09), 899-904.
- Terzaghi, C. (1925). Principles of Soil Mechanics. **Engineering News-Record**, 95, 19-27.
- Uddin, N. (1999). A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation. **Computers and Structures**, 72, 409-421.
- Woodward, P.K. & Griffiths, D.V. (1995). Influence of Viscous Damping in the Dynamic Analysis of an Earth dam using simple Constitutive Models. **Computers and Geotechnics**, 19(3), 245-263.