

การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล Seismic Response Analysis of Maengud Somboonchol Dam

ณัฐนนท์ หนูนอนนท์^{1,*} จิรวีตร บุญญะสิทธิ์²

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author; E-mail address: Nathanonwork.oac@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนออิทธิพลของการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางแผ่นดินไหวของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล การวิเคราะห์ถูกกระทำเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์สามมิติและสองมิติโดยอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยในอดีต การวิเคราะห์ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นด้วยโปรแกรม R-CRISIS และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และ PLAXIS 3D ผลการวิจัยที่ได้บ่งชี้ว่า การเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ท้ายน้ำ จากการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ผลการหลุดตัวจากการวิเคราะห์สามมิติมีค่ามากกว่า

คำสำคัญ: ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหว, เขื่อน, อิทธิพลจากการวิเคราะห์แบบสามมิติ

Abstract

In this article, the influence of three-dimensional finite element analysis on the seismic behavior of the Maengud Somboonchol dam is evaluated and compared with that of two-dimensional analysis method. The analysis is based on data obtained from a related study, as well as the results of a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) that was performed using the R-crisis program and Finite element analysis using PLAXIS 2D and 3D programs. The results of this study indicate that while the Upstream-Downstream displacement values obtained through both analysis methods are similar, the three-dimensional finite element analysis method yields more significant difference in terms of settlement values when compared to the two-dimensional analysis method.

Keywords: Seismic Response, Dam, 3D effect

1. คำนำ

เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล เป็นเขื่อนดินถมแบ่งส่วนในอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ เริ่มก่อสร้างในปี พ.ศ. 2520 แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2528 สร้างขึ้นปิดกั้นลำน้ำแม่งัด มีหน้าที่ส่งน้ำให้พื้นที่เพาะปลูกในเขตชลประทานแม่แฝกและแม่ปิง มีความจุเก็บกักถึง 265 ล้านลูกบาศก์เมตร จัดเป็นโครงการชลประทานขนาดใหญ่ นับเป็นเขื่อนที่มีความสำคัญต่อระบบชลประทานของจังหวัดเชียงใหม่ และประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง

ความเสียหายจากการพังทลายของเขื่อนใด ๆ นั้น ย่อมก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของเขื่อนเพื่อตรวจสอบการพังทลายที่อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ จึงถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ โดยในบรรดาสาเหตุการพังทลายต่าง ๆ นั้น ภัยพิบัติแผ่นดินไหว นับเป็นหนึ่งในสาเหตุที่มีความซับซ้อน และก่อให้เกิดอันตรายต่อเสถียรภาพของเขื่อนเป็นอย่างสูง การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับเขื่อนใด ๆ ก็ตาม และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเขื่อนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว โดยจังหวัดเชียงใหม่จัดเป็นจังหวัดที่มีโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงอยู่ในระดับ V – VII เมอร์คัลลีตามการแบ่งตามแผนที่ภัยพิบัติแผ่นดินไหวประเทศไทย [1] ซึ่งจัดอยู่ในระดับความรุนแรงค่อนข้างแรงถึงแรงมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลจึงนับว่ามีความจำเป็น

วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันได้แก่วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำแนกได้เป็นการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิตินั้นมีข้อจำกัดสำหรับโครงสร้างบางประเภท โดยลักษณะของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลนั้นเป็นเขื่อนที่มีการวางตัวในสองแนวด้วยกัน ทำให้การรับแรงแผ่นดินไหวมีความแตกต่างกันในแต่ละส่วน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติได้

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์พิบัติภัยแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Seismic Hazard Analysis: PSHA) ด้วยโปรแกรม R – Crisis และการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์สอง และสามมิติของเขื่อนด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Plaxis 2D และ Plaxis 3D ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์จากการวิเคราะห์สองและสามมิตินำมาเปรียบเทียบเพื่อหาขอบเขตของการใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติสำหรับการวิเคราะห์เขื่อนแห่งนี้

2. ข้อมูลทั่วไปของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

2.1 ลักษณะทั่วไปของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลเป็นเขื่อนดินถมแบ่งส่วน มีความสูง 59 เมตร ยาว 1,950 เมตร ตั้งอยู่ที่ ตำบลช่อแล อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ แสดงไว้ด้วยภาพถ่ายทางอากาศในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพถ่ายทางอากาศ เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

3. การวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

3.1 แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณพื้นที่ที่พิจารณา

อ้างอิงจากแผนที่รอยเลื่อนมีพลัง กรมทรัพยากรธรณี [2] ในบริเวณเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล มีแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในรัศมี 300 กิโลเมตร เป็นรอยเลื่อนแผ่นดินไหวจำนวน 7 รอยเลื่อนด้วยกัน แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

รอยเลื่อน	กลไกรอยเลื่อน	ระยะห่างถึงบริเวณเขื่อน (กม.)
แม่ทา	รอยเลื่อนด้านข้าง	0.2
พะเยา	รอยเลื่อนปกติ	50
แม่ลาว	รอยเลื่อนด้านข้าง	60
แม่จัน	รอยเลื่อนด้านข้าง	83
แม่ฮ่องสอน	รอยเลื่อนปกติ	110
เถิน	รอยเลื่อนด้านข้าง	110
เมย	รอยเลื่อนด้านข้าง	210

3.2 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวและความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 1944 กูเทนเบิร์ก และ ริคเตอร์ (Gutenberg and Richter) [3] นำเสนอสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโอกาสการเกิดแผ่นดินไหว และความรุนแรงของแผ่นดินไหว แสดงไว้ในสมการที่ 1

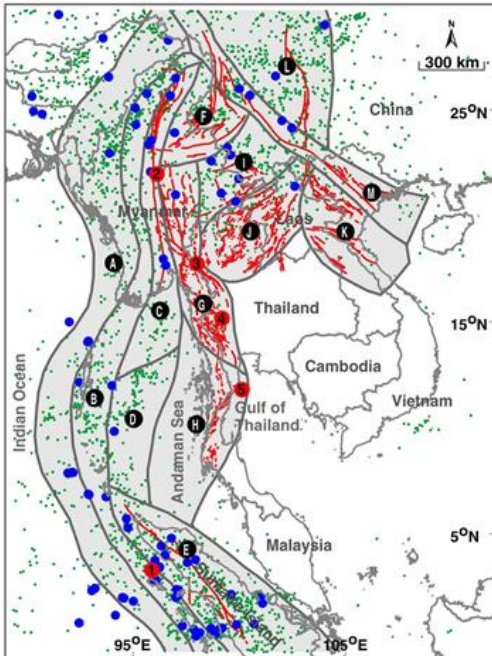
$$\log \gamma_m = a - b \cdot m \quad (1)$$

โดยที่ γ_m คือ โอกาสการเกิดแผ่นดินไหวที่มีแมกนิจูดมากกว่า m
 m คือ ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในหน่วยแมกนิจูด (Magnitude)
 a คือ ค่าคงที่ในสมการ แสดงถึงโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวโดยรวม
 b คือ ค่าคงที่ในสมการ แสดงถึงอัตราการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ และเล็ก

ค่าคงที่ a และ b มีความสำคัญต่อการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวและความรุนแรงของแผ่นดินไหวเป็นอย่างมาก ค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ อ้างอิงจากงานวิจัยของ สันติ ภัยหลบลี้ ในปีค.ศ.2014 [4] ที่ได้ทำการจำแนกเขตพื้นที่ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ดังรูปที่ 2 และทำการประมาณค่าคงที่ a และ b ของแต่ละเขตพื้นที่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ a และ b ตามเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [4]

Zone	a	b
A: Sumatra-Andaman Interplate	5.98	0.768
B: Sumatra-Andaman Intraslab	6.58	0.877
C: Sagaing Fault Zone	5.8	0.864
D: Andaman Basin	4.51	0.611
E: Sumatra Fault Zone	4.75	0.606
F: Hsenwi-Nanting Fault Zones	6.02	1.01
G: Western Thailand	3.98	0.668
H: Southern Thailand	N/A	N/A
I: Jinghong-Mengxing Faults Zones	4.87	0.712
J: Northern Thailand-Dein Bein Phu	4.72	0.732
K: Song Da-Song Ma Fault Zones	N/A	N/A
L: Xianshuihe Fault Zone	6.14	0.915
M: Red River Fault Zone	5.99	1.03



รูปที่ 2 แผนที่จำแนกเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [4]

3.3 แบบจำลองลดทอนพลังงาน (Attenuation Model)

ผลการสั่นไหวของโครงสร้างลักษณะต่าง ๆ จากแผ่นดินไหวที่ขนาดและตำแหน่งใด ๆ สามารถทำนายได้ด้วยแบบจำลองลดทอนพลังงาน (Attenuation model) ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างการ

กระจายตัวของโอกาสการเกิดการสั่นไหวที่ และตัวแปรต่าง ๆ ที่พิจารณา อาทิเช่น ตัวแปรระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ตัวแปรความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น และตัวแปรลักษณะของโครงสร้างที่พิจารณา โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้เลือกใช้แบบจำลอง BSSA14 ในการวิเคราะห์

BSSA14 เป็นแบบจำลองลดทอนพลังงานที่ถูกพัฒนาโดย David M. Boore และคณะในปี ค.ศ.2014 [5] ภายใต้โครงการ Next Generation Attenuation Model West 2 หรือ NGA West2 ซึ่งเป็นโครงการพัฒนาแบบจำลองลดทอนพลังงานที่ทำการพัฒนาแบบจำลองจากแหล่งข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 21,332 คลื่นจากแหล่งข้อมูลขององค์กร Pacific Earthquake Engineering Research Center หรือ PEER

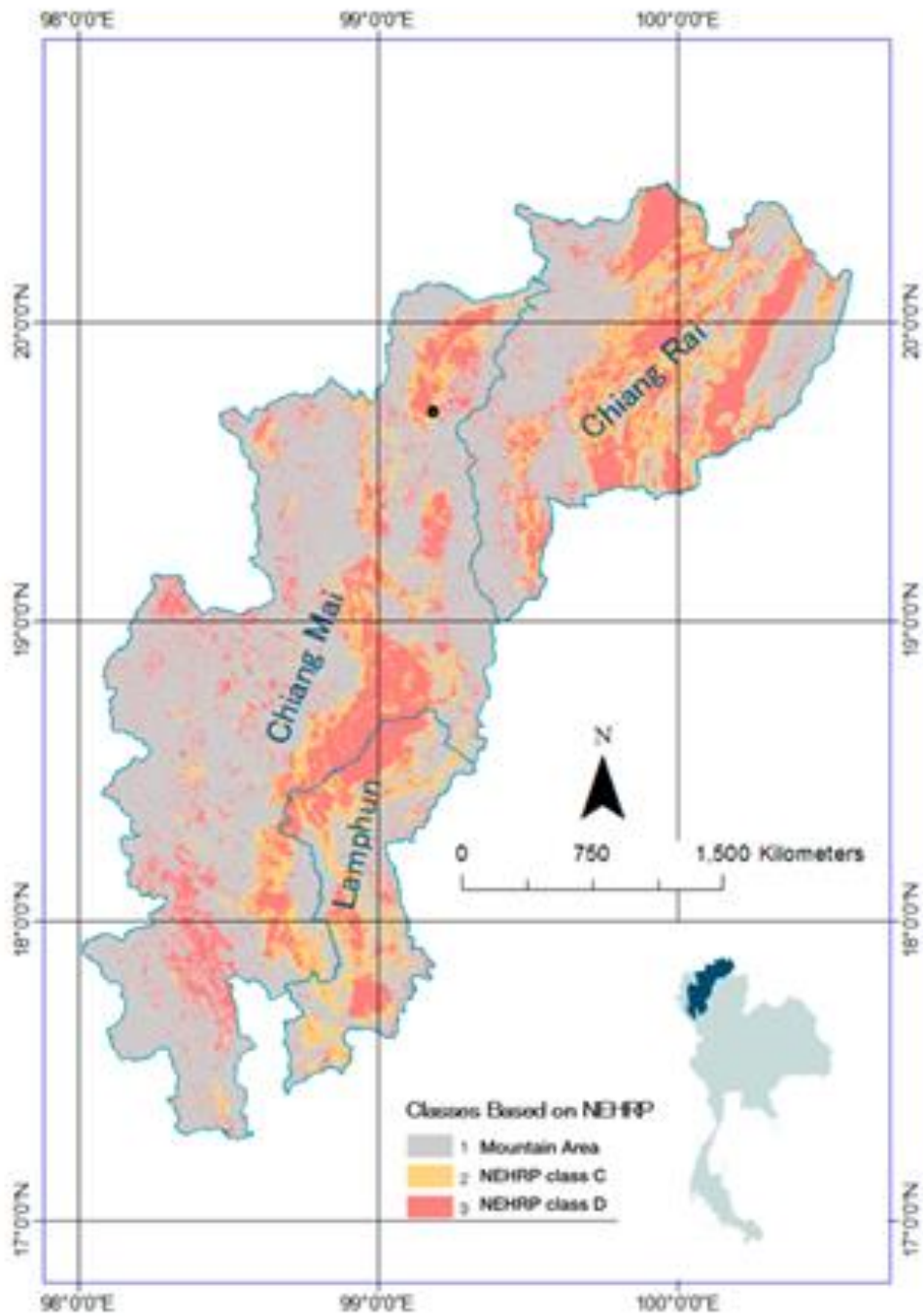
แบบจำลองลดทอนพลังงาน BSSA14 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรง 3-8.5 แมกนิจูด สำหรับแหล่งกำเนิดรอยเลื่อนประเภทแนบ (Strike-Slip Fault) และประเภทรอยเลื่อนย้อน (Reverse Fault) และความรุนแรง 3-7 แมกนิจูด สำหรับแหล่งกำเนิดรอยเลื่อนประเภทปกติ (Normal Fault) นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดด้านระยะทางภายในรัศมีระยะ 400 กิโลเมตร รอบบริเวณแหล่งกำเนิด และข้อกำหนดด้านความถี่ธรรมชาติในช่วง 0 – 10 วินาที ของความถี่ธรรมชาติสำหรับโครงสร้างที่พิจารณา

ความเร็วคลื่นเฉือนเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการพิจารณาปัญหาการสั่นไหวผิวดิน โดยองค์กร National Earthquake Hazards Reduction Program หรือ NEHRP ได้ทำการจำแนกชั้นดินโดยใช้เกณฑ์ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในระดับความลึก 30 เมตร โดยเกณฑ์ดังกล่าวถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3

ในปีค.ศ. 2019 Patcharavadee Thamarux [6] และคณะ ทำการจำแนกประเภทชั้นดินตามเกณฑ์ของ NEHRP ในพื้นที่บริเวณจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และบางส่วนของจังหวัดลำพูน จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่าบริเวณที่ตั้งของเขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชลถูกจำแนกอยู่ในเกณฑ์ชั้นดินประเภท C หรือบริเวณชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในระดับ 30 เมตร V_{s30} อยู่ที่ 360 – 750 เมตรต่อวินาที โดยแผนที่แสดงการจำแนกชั้นดินถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์การจำแนกชั้นดินองค์กร NEHRP

ประเภทชั้นดิน	V_{s30} (m/s)
A	>1500
B	750 - 1500
C	360 - 750
D	180 - 360
E	< 180



รูปที่ 3 แผนที่แสดงการจำแนกประเภทชั้นดินตามเกณฑ์ NEHRP

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง

Zone/Parameter	Core	Random and Miscellaneous	Filter	Rock Fill	Foundation
Unit weight (kN/m ³)	21	26.2	21.4	23	23
Coefficient of permeability (m/day)	0.00006	0.00022	0.0233	0.0233	0.00086
E _{50_ref} (kN/m ²)	5200	5200	13000	90000	90000
E _{oed_ref} (kN/m ²)	5200	5200	13000	90000	60000
E _{ur_ref} (kN/m ²)	15600	15600	39000	270000	270000
Cohesion (kN/m ²)	93.2	90	0.1	0.1	15
Friction angle	17.9	21.5	35	41	45
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
Shear Modulus (kN/m ²)	6000	6000	15000	112500	112500
Shear strain 0.7	0.000365	0.000029	0.000029	0.000029	0.000365

3.4 Ground motion hazard curve และ Uniform hazard curve

Ground motion hazard curve และ Uniform hazard curve ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม R-crisis

3.5 แบบจำลองพฤติกรรมดิน

แบบจำลอง Hardening with small strain ถูกใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของเขื่อนแม่จันทสมบูรณชล โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกพัฒนาต่อจากงานวิจัยของศิริกันยา เลาสุวรรณ ในปีพ.ศ.2560 [7] และแสดงไว้ในตารางที่ 4

3.6 โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กระทำโดยโปรแกรม Plaxis 2D และ Plaxis 3D โดยมีจำนวนโหนดของแบบจำลองเท่ากับ 19,700 และ 209,299 โหนด สำหรับแบบจำลองสองและสามมิติตามลำดับ และรูปแสดงแบบจำลองสองและสามมิติแสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

การพิจารณาผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติของเขื่อนแม่จันทสมบูรณชลถูกแบ่งเป็นสองบริเวณ ตามลักษณะของเขื่อน ได้แก่

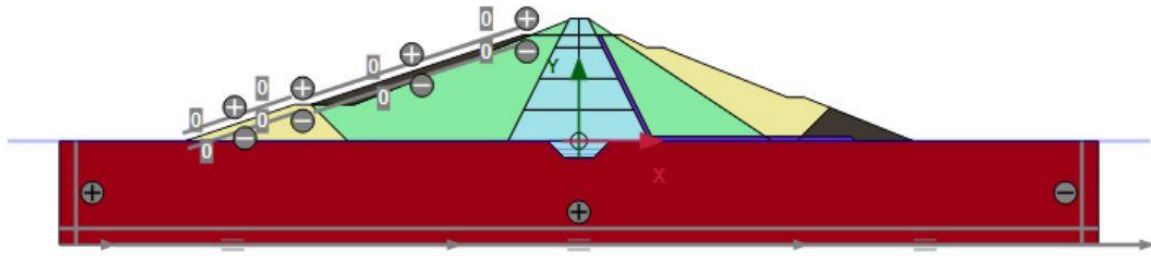
3.6.1 เขื่อนแม่จันทสมบูรณชลตอนต้น: บริเวณเขื่อนที่วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ มีความยาวสันเขื่อนประมาณ 910 เมตร

3.6.2 เขื่อนแม่จันทสมบูรณชลตอนปลาย: บริเวณเขื่อนที่วางตัวในแนวทิศใต้-เหนือ มีความยาวสันเขื่อนประมาณ 900 เมตร

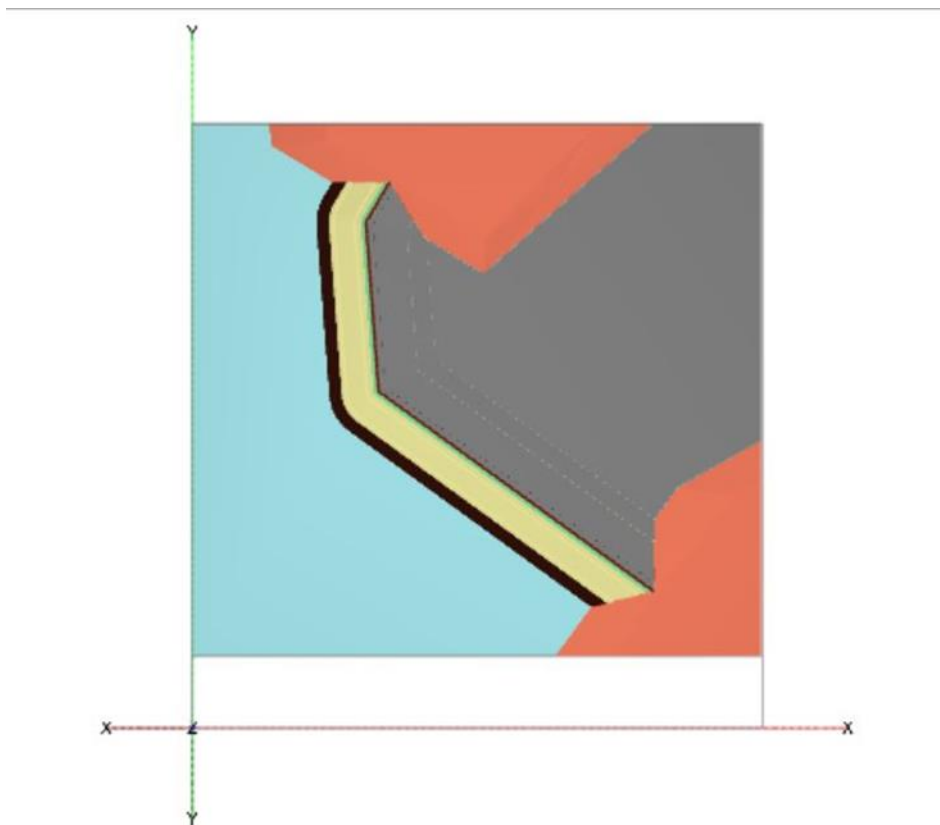
ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวสันเขื่อนถูกกำหนดไว้ก่อนการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ด้วยการกำหนดโหนด (Node) ในแบบจำลอง ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ ถูกแทนด้วยชื่อ T1 – T13 และแสดงไว้ในตารางที่ 5 และแสดงไว้ในรูปที่ 6

ตารางที่ 5 ตำแหน่งโหนดที่ต้องการตรวจสอบบนแบบจำลอง

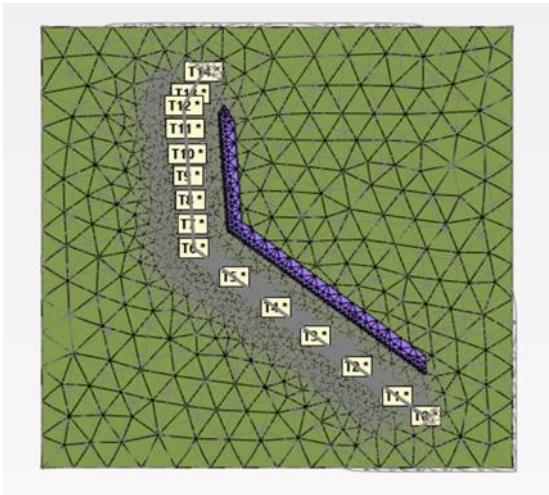
บริเวณ	ตำแหน่ง	ระยะบนสันเขื่อน (เมตร)
ตอนต้น	T1	135
	T2	328
	T3	523
	T4	714
	T5	910
รอยต่อ	T6	1100
ตอนปลาย	T7	1192
	T8	1286
	T9	1376
	T10	1464
	T11	1560
	T12	1650
	T13	1702



รูปที่ 4 แบบจำลอง 2 มิติ (Plaxis 2D)



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติ (Plaxis 3D)



รูปที่ 6 ตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบบนแบบจำลอง

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น

ผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นจากโปรแกรม R-Crisis ถูกแสดงออกมาในลักษณะของ Ground Motion Hazard Curve และ Uniform Hazard Curve ของพื้นที่บริเวณเขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชล

Ground motion hazard curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปกตรัมผลตอบสนองของค่าความเร่งที่คาบเวลาต่าง ๆ และความน่าจะเป็นที่มีค่าเกินกว่าความเร่งนั้น โดยในงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอผลตอบสนองของค่าความเร่งตัวอย่างที่คาบ 0.2 และ 1 วินาที โดยแสดงไว้ในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ โดยผลตอบสนองที่คาบอื่น ๆ ถูกนำไปสร้างเป็น Uniform hazard curve ต่อไป

Uniform hazard curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปกตรัมผลตอบสนอง และคาบธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาแผ่นดินไหวประเภท Operating Basis Earthquake (OBE) หรือแผ่นดินไหวที่มีคาบอุบัติซ้ำ 1,000 ปี ตามคำแนะนำของ Australian National Committee on Large Dams Incorporated (ANCOLD[8])

4.2 การคัดเลือกแผ่นดินไหวตัวแทน

ผลการคัดเลือกแผ่นดินไหวตัวแทนจากการปรับค่าสเปกตรัมผลตอบสนองให้มีความสอดคล้องกับสเปกตรัมจากผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นด้วยโปรแกรม Seismomatch พบว่าค่าความเร่งสูงสุดพื้นดิน (Peak ground acceleration, PGA) มีค่าเท่ากับ 0.29 g โดยรูปแสดงผลตอบสนองสเปกตรัมหลังการปรับโดยโปรแกรม Seismomatch แสดงไว้ในรูปที่ 10 และรูปแสดงคลื่นแผ่นดินไหวตัวแทน แสดงไว้ในรูปที่ 11

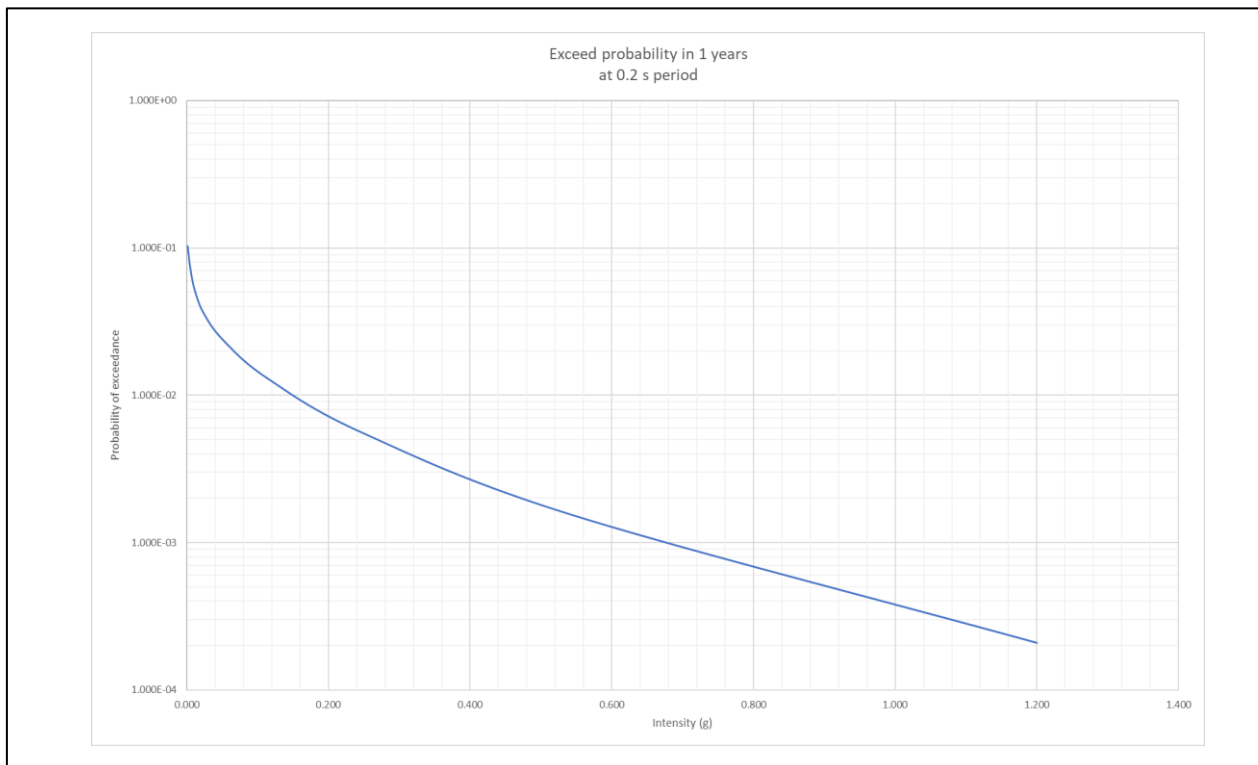
4.3 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกแสดงออกมาในรูปแบบของ ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-น้ำ - ท้ายน้ำ และผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ (Relative settlement) ในแนวสันเขื่อนตามระยะเวลาแผ่นดินไหว และผลการกระจายตัวของค่าความเครียดเฉือน (Shear strain)

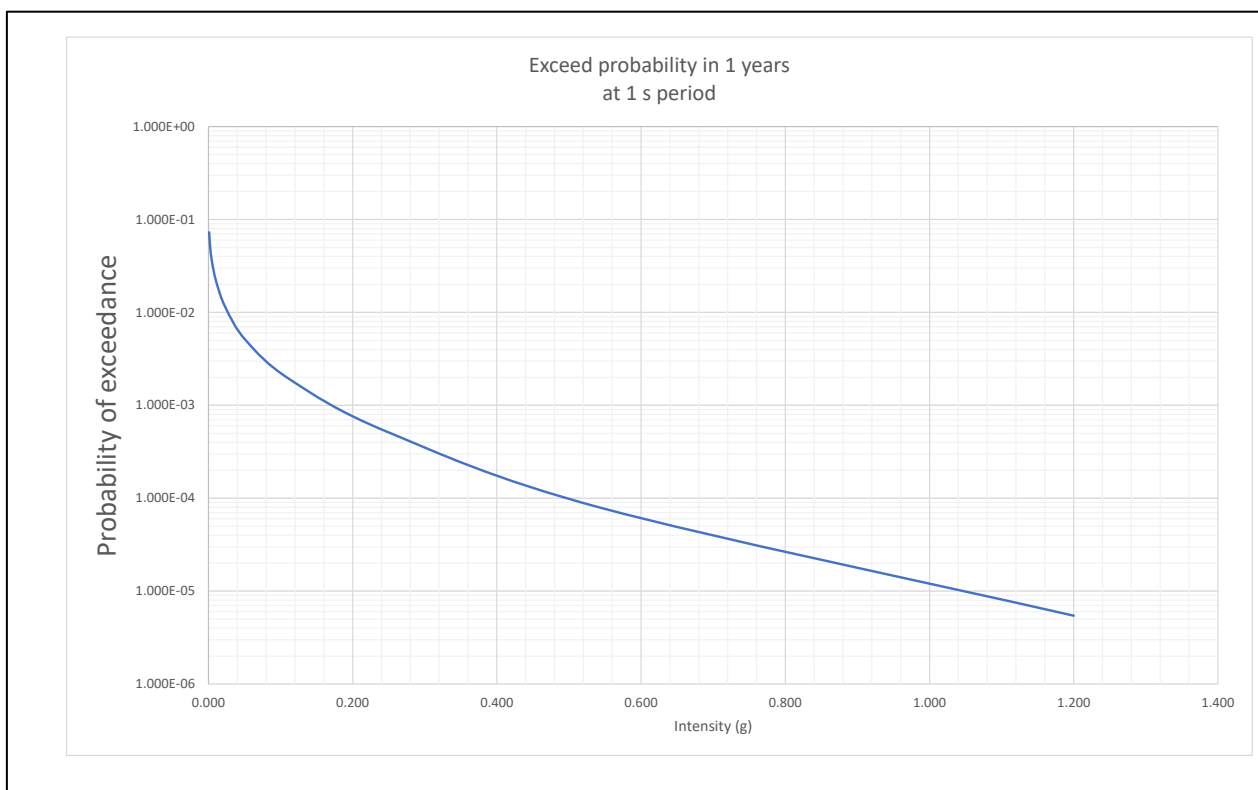
ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-น้ำ-ท้ายน้ำตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของแบบจำลองสองมิติที่บริเวณกลางสันเขื่อน แสดงไว้ในรูปที่ 12 โดยพบการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่เกิดในด้านท้ายน้ำ และพบการเคลื่อนที่ตัวสูงสุด ในวินาทีที่ 10 - 15 ของคลื่นแผ่นดินไหว และมีค่าลดลงเมื่อสิ้นสุดแผ่นดินไหวจากทั้งสองแบบจำลอง

ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์น้ำตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของแบบจำลองสองมิติบริเวณกลางสันเขื่อน แสดงไว้ในรูปที่ 13 พบการทรุดตัวสูงสุดประมาณวินาทีที่ 20 ของคลื่นแผ่นดินไหว และมีค่าคงที่จนสิ้นสุดการสั่นไหวจากทั้งสองแบบจำลอง

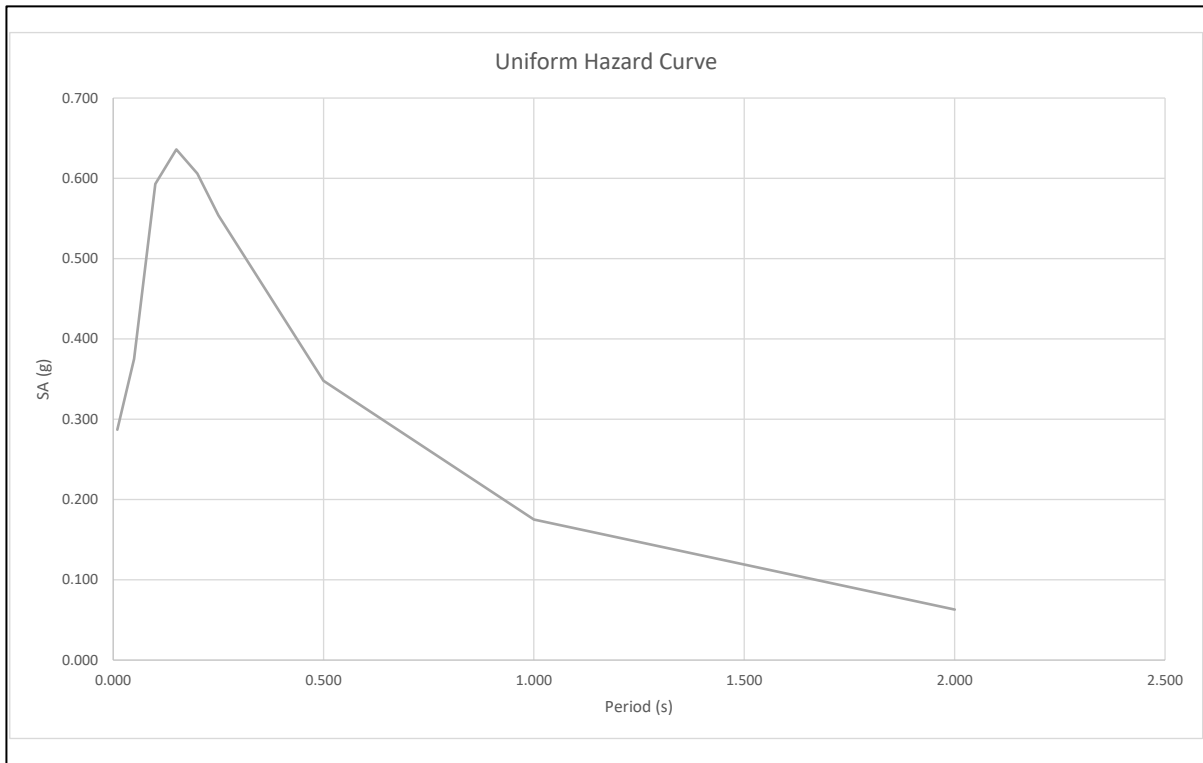
การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 14 และ 15 โดยแสดงในช่วงระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว และระยะหลังแผ่นดินไหวเสร็จสิ้น โดยพบค่าความเครียดเฉือนมีค่าสูงบริเวณชั้นหินที่หน้าเขื่อน และชั้นกรองบางส่วน



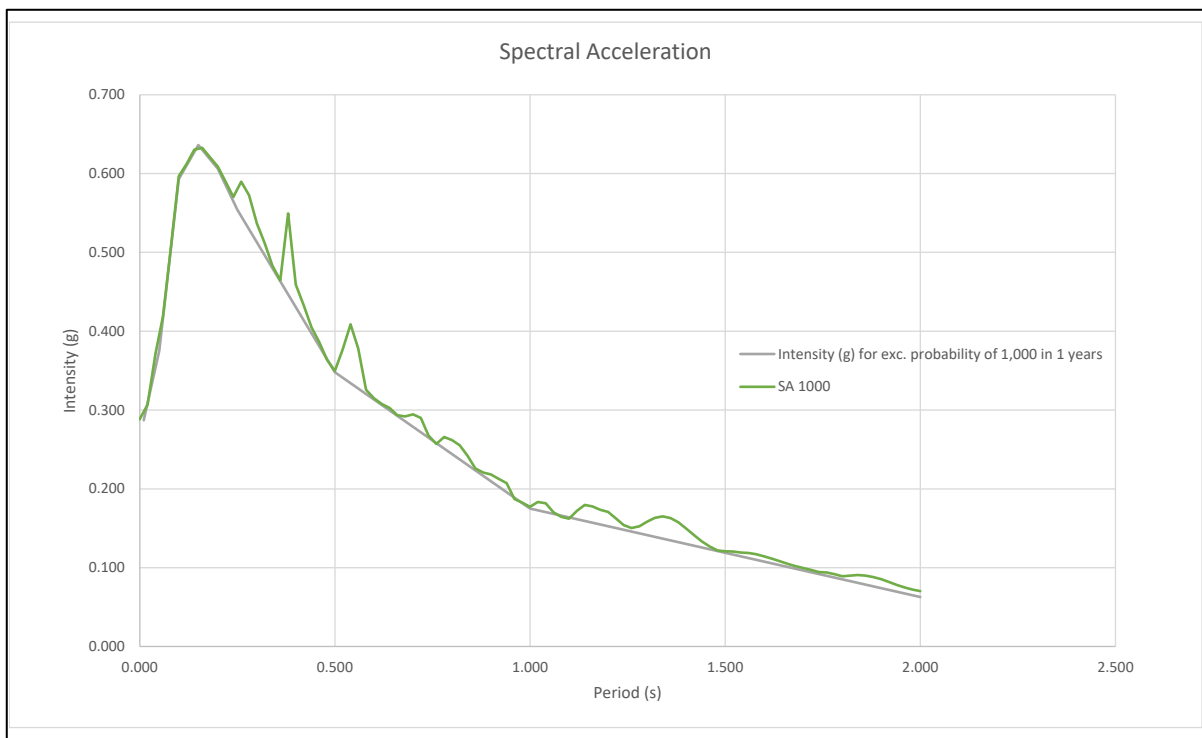
รูปที่ 7 Ground motion hazard curve ที่คาบเวลา 0.2 วินาที



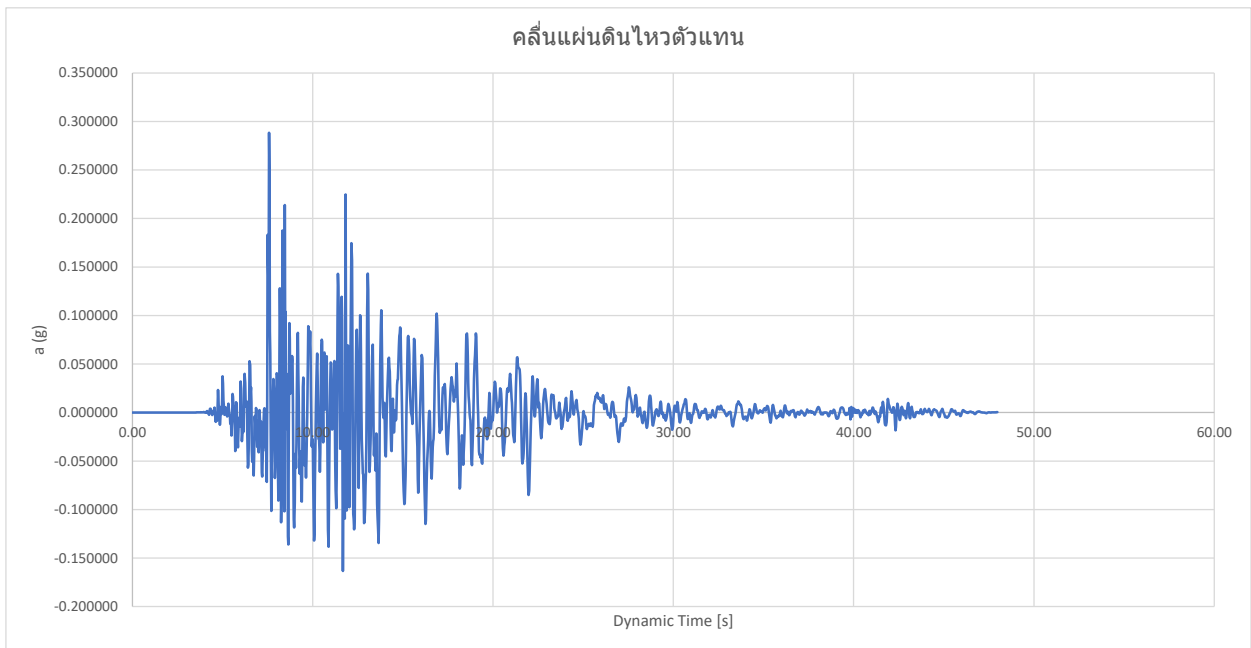
รูปที่ 8 Ground motion hazard curve ที่คาบเวลา 1 วินาที



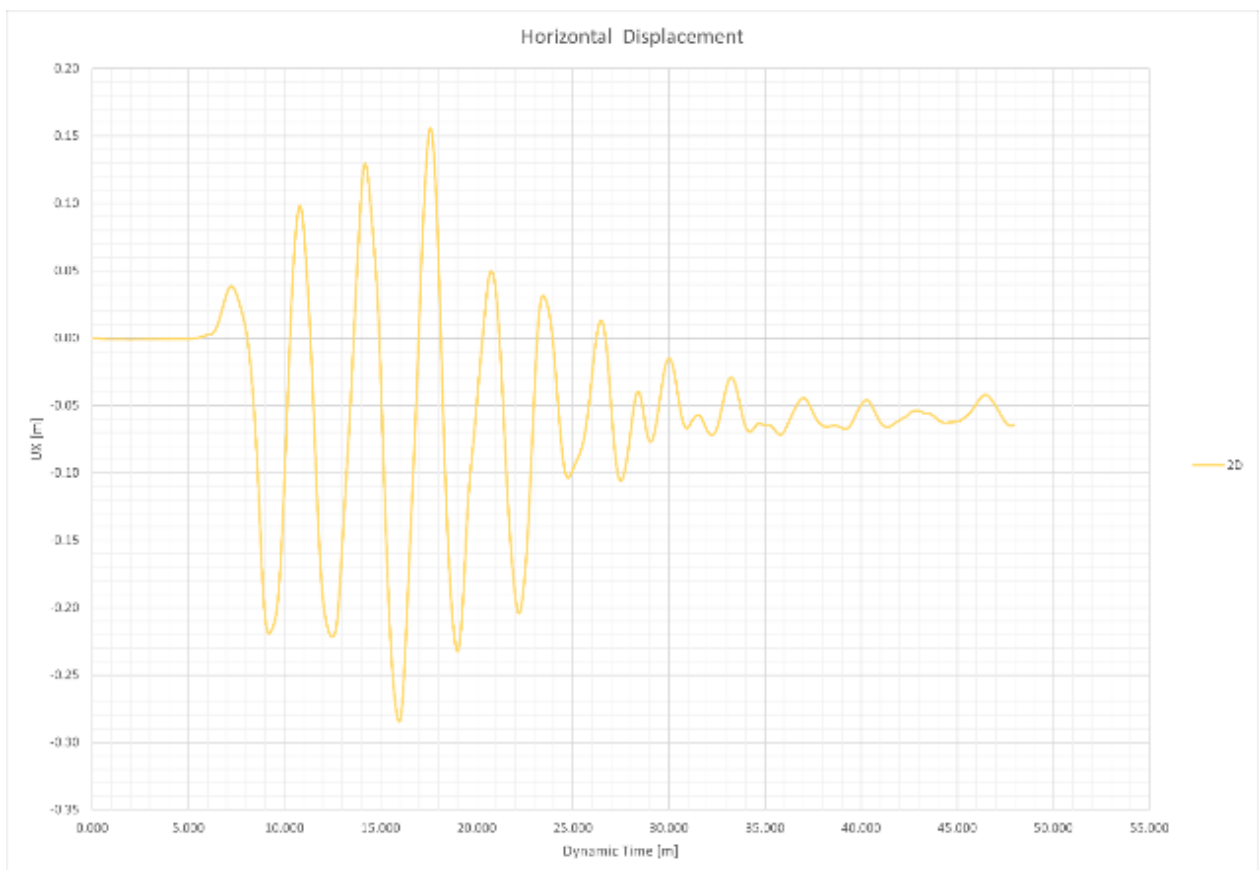
รูปที่ 9 Uniform hazard curve



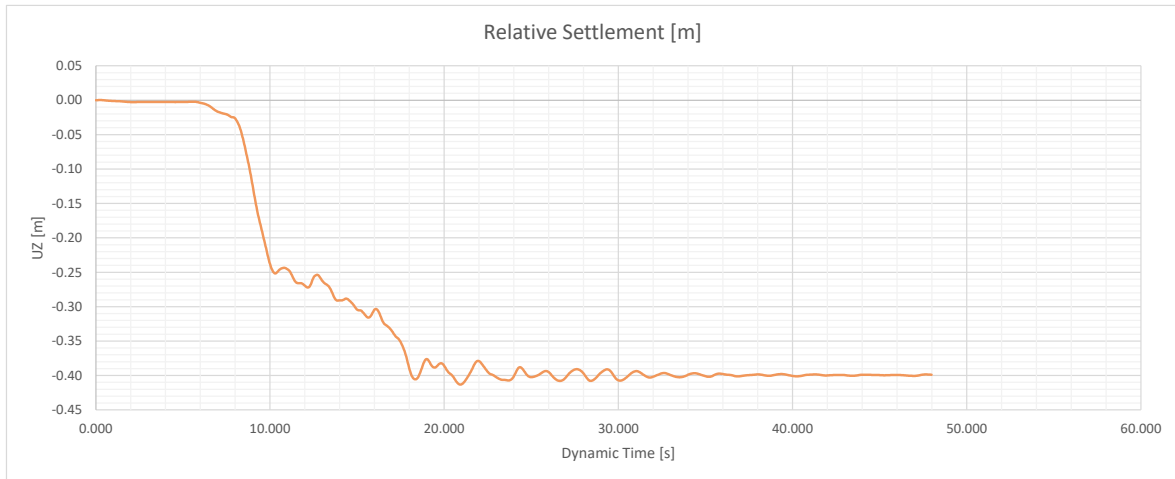
รูปที่ 10 ผลตอบสนองสเปกตรัมจากโปรแกรม Seismomatch



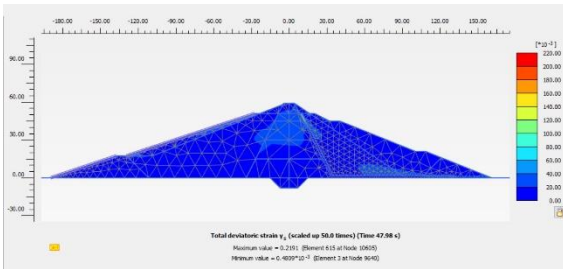
รูปที่ 11 คลื่นแผ่นดินไหวตัวแทน คาบอุบัติซ้ำ 1,000 ปี



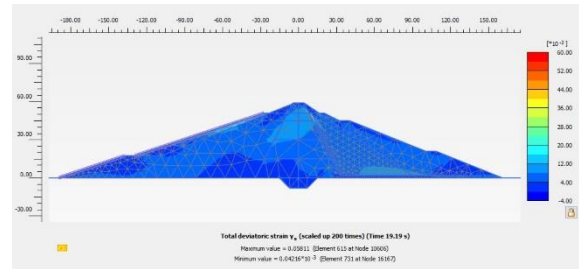
รูปที่ 12 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ทำynnน้ำ แบบจำลองสองมิติ



รูปที่ 13 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ แบบจำลองสองมิติ



รูปที่ 15 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิดแผ่นดินไหว



รูปที่ 14 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว

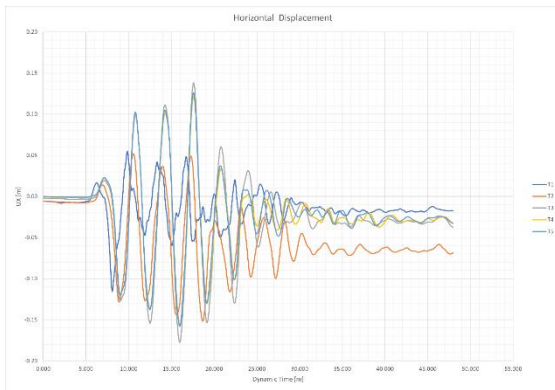
4.4 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ

ผลการเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ใต้ และผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามระยะเวลาแผ่นดินไหวถูกแสดงแยกตามตำแหน่งของโหนดบนเขื่อน รูปหน้าตัดการกระจายตัวของ การเคลื่อนที่ทั้งสองแนวและความเครียดเฉือนถูกแสดงไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณเขื่อนทั้งสองและตำแหน่งรอยต่อของบริเวณ

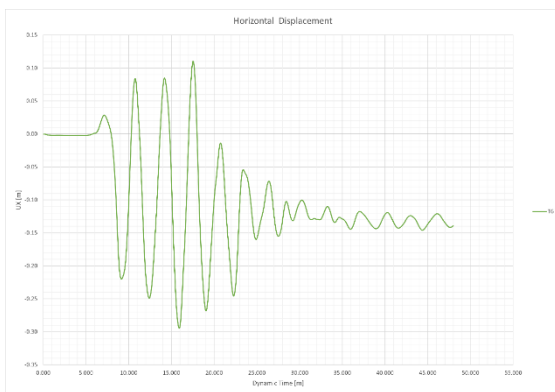
รูปที่ 16 ถึง 18 แสดงผลการเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ใต้ตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของบริเวณเขื่อนตอนต้น รอยต่อเขื่อน และเขื่อนตอนปลายตามลำดับ

รูปที่ 19 ถึง 20 แสดงผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของบริเวณ เขื่อนตอนต้น รอยต่อเขื่อน และเขื่อนตอนปลายตามลำดับ

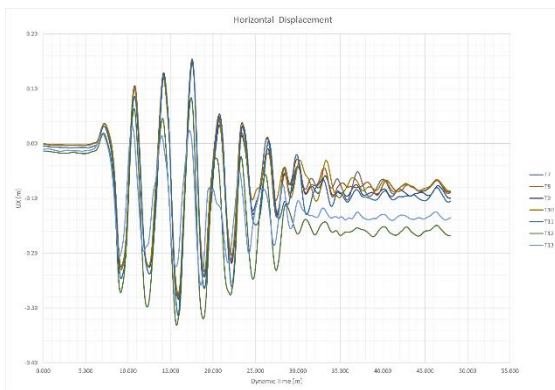
รูปหน้าตัดการกระจายตัวของความเครียดเฉือนของหน้าตัดกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น (T3) รอยต่อบริเวณ (T6) และกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย (T9) แสดงไว้ในรูปที่ 21 ถึง 26



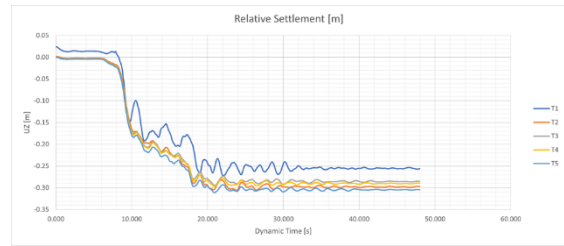
รูปที่ 16 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-ท้ายน้ำ บริเวณเขื่อนตอนต้น



รูปที่ 17 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-ท้ายน้ำ บริเวณรอยต่อเขื่อน



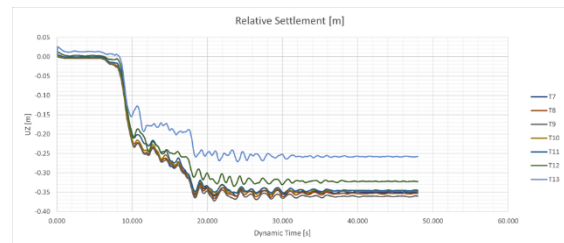
รูปที่ 18 การเคลื่อนที่ในแนวเหนือ-ท้ายน้ำ บริเวณเขื่อนตอนปลาย



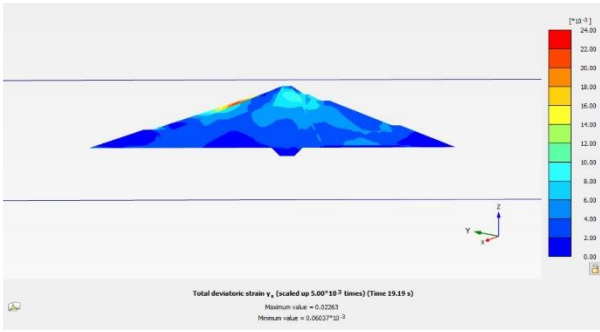
รูปที่ 19 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ บริเวณเขื่อนตอนต้น



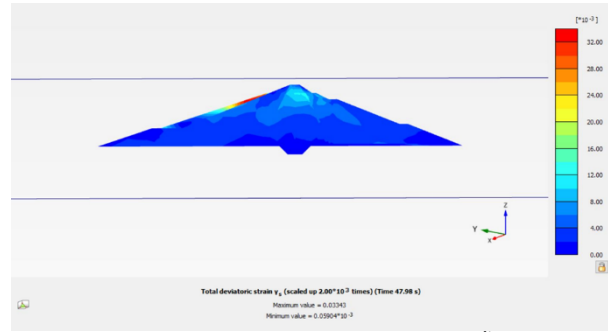
รูปที่ 20 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ บริเวณรอยต่อเขื่อน



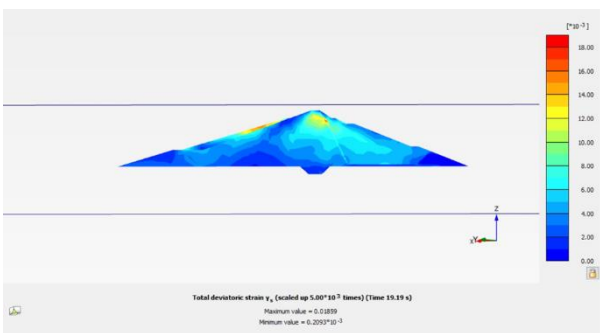
รูปที่ 21 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ บริเวณเขื่อนตอนปลาย



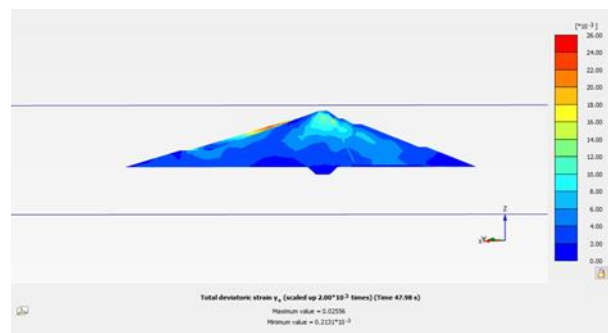
รูปที่ 21 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว
 กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น



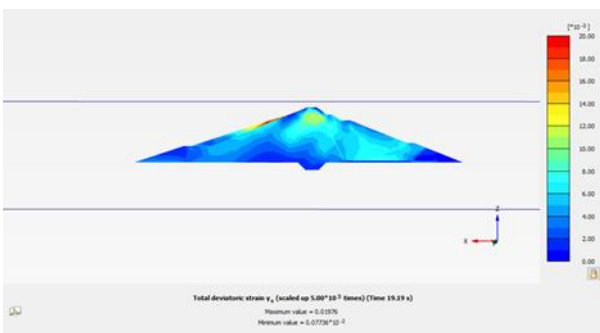
รูปที่ 22 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิด
 แผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น



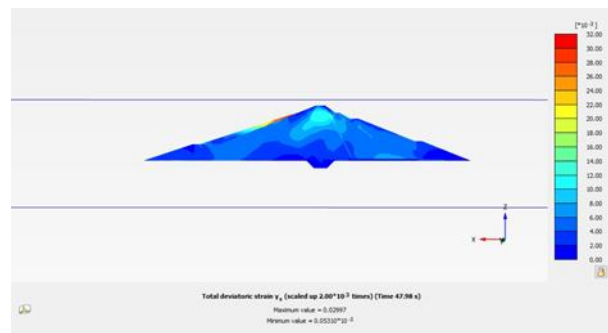
รูปที่ 23 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว
 บริเวณรอยต่อเขื่อน



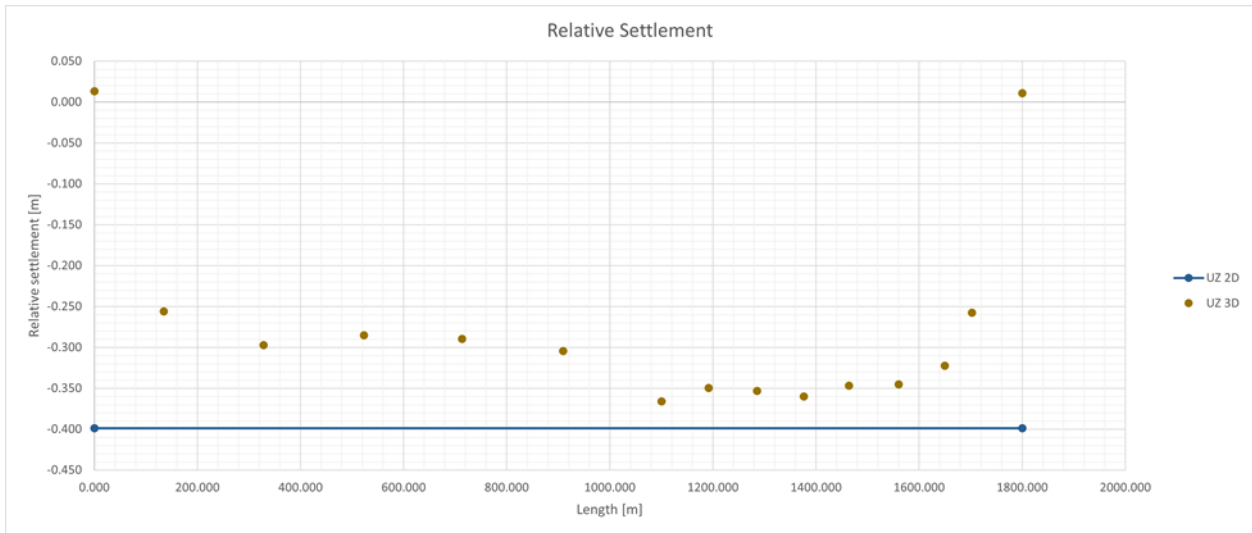
รูปที่ 24 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิด
 แผ่นดินไหว บริเวณรอยต่อเขื่อน



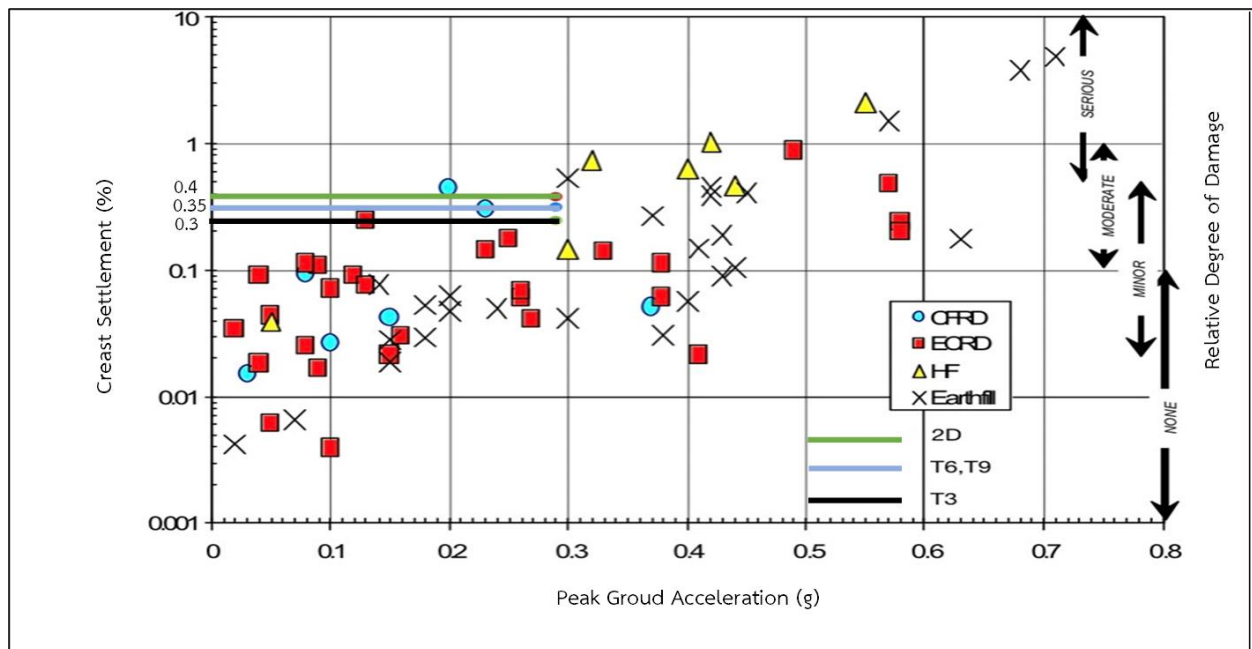
รูปที่ 25 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว
 กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย



รูปที่ 26 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิด
 แผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย



รูปที่ 27 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามตำแหน่งบนสันเขื่อน



รูปที่ 28 ระดับความเสียหายคาดการณ์ของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

5. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 21 – 26 แสดงผลการกระจายตัวของความเครียดเฉือนที่ระยะเวลาระหว่างเกิดแผ่นดินไหว และหลังสิ้นสุดแผ่นดินไหว จากผลการวิเคราะห์พบว่า ระดับความเครียดเฉือนที่ระยะเวลาระหว่างเกิดแผ่นดินไหวมีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาหลังสิ้นสุดแผ่นดินไหว โดยพบค่าความเครียดเฉือนสูงสุดที่บริเวณหินทิ้งหน้าเขื่อนของทั้งสอง

รูปที่ 27 แสดงผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามตำแหน่งบนสันเขื่อนที่ระยะเวลาสิ้นสุดแผ่นดินไหว จากผลการวิเคราะห์พบว่าทรุดตัวสัมพัทธ์ในบริเวณเขื่อนตอนต้นมีค่าน้อยกว่าตอนปลาย และพบค่าการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณรอยต่อของเขื่อน และพบค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์จากการวิเคราะห์สองมิติมีค่าสูงกว่าจากการวิเคราะห์สามมิติทุกกรณี

รูปที่ 28 แสดงระดับความเสียหายคาดการณ์ของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลที่คำนวณจากอัตราส่วนทรุดตัวจากการวิเคราะห์ของ J.R. Swaisgood [9] ของตำแหน่งกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น (T3) รอยต่อเขื่อน (T6) กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย (T9) และ จากการวิเคราะห์สองมิติ โดยพบค่าอัตราส่วนทรุดตัวสูงสุดใกล้เคียงกันสองบริเวณ ได้แก่ บริเวณรอยต่อเขื่อน และกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย มีค่าเท่ากับ 0.35% และในกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้นมีค่าเท่ากับ 0.3% ในขณะที่ค่าจากการวิเคราะห์สองมิติให้ค่าอัตราส่วนทรุดตัวมากที่สุดเท่ากับ 0.4% โดยค่าระดับความเสียหายคาดการณ์ที่คำนวณได้อยู่ในระดับ น้อย – ปานกลาง สำหรับทุกกรณี

รูปที่ 29 แสดงค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ใต้ – ท้ายน้ำตามตำแหน่งบนสันเขื่อน จากผลการวิเคราะห์พบการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในด้านท้ายน้ำมากกว่าเหนือน้ำ และการเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณเขื่อนตอนปลายของการวิเคราะห์สามมิติมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์สองมิติ และมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์สองมิติในบริเวณเขื่อนตอนต้น และตารางที่ 6 แสดงผลสรุปการเคลื่อนตัวของการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี

6. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ที่บังคับภัยแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น (PSHA) พบว่าความเร่งสูงสุดผิวดินของแผ่นดินไหวที่มีคาบอุบัติซ้ำ 1,000 ปี ในบริเวณเขื่อนมีค่าเท่ากับ 0.29 g

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์สอง และสามมิติด้วยข้อมูลดินจากงานวิจัยในอดีต พบค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวเหนือ-ใต้ – ท้ายน้ำที่เกิดขึ้นในด้านท้ายน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.28 เมตร สำหรับการวิเคราะห์สองมิติ และ 0.33 เมตร สำหรับการวิเคราะห์สามมิติ โดยผลการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ทั้งสองกรณี มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

สำหรับผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ พบค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์จากการวิเคราะห์สองมิติมีค่าเท่ากับ 0.41 เมตร และ 0.38 เมตร จากการวิเคราะห์สามมิติ และพบระดับความเสียหายคาดการณ์อยู่ในระดับน้อย

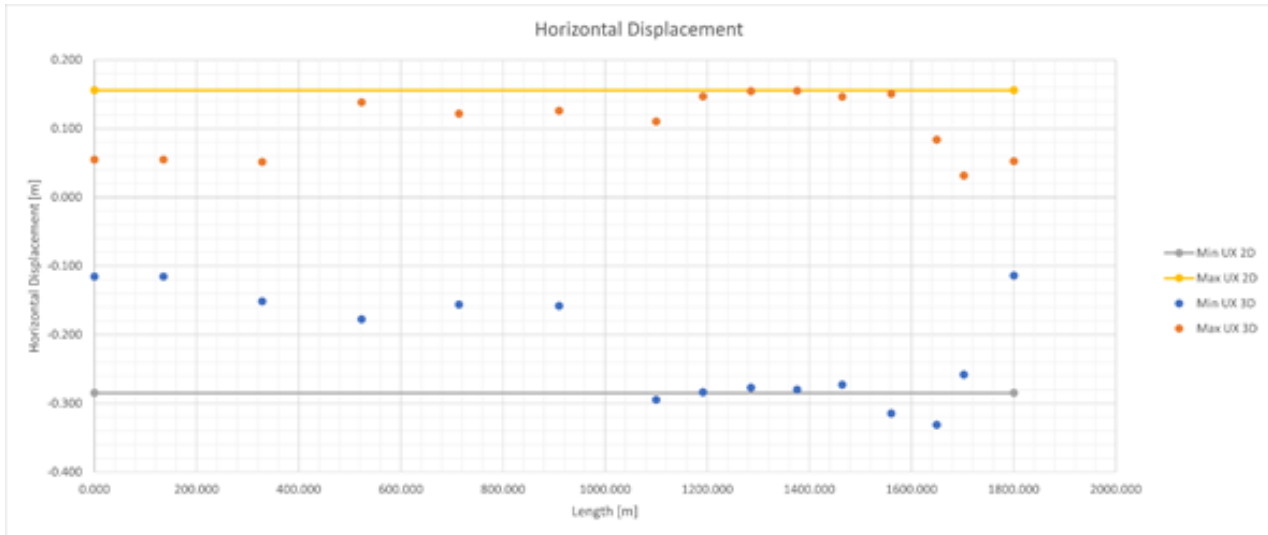
– ปานกลางตามเกณฑ์การวัดของ J.R. Swaisgood [9] ดังแสดงในรูปที่ 28

ผลการกระจายตัวของความเครียดเฉือน (Shear Strain) พบค่าความเครียดเฉือนสูงสุดบริเวณชั้นหินทิ้งหน้าเขื่อน และชั้นกรอง และมีค่าสูงสุดประมาณ 3% เมื่อพิจารณาร่วมกับระดับความเสียหายคาดการณ์จึงพบว่า เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลไม่เกิดการพังทลายในขณะเกิดแผ่นดินไหว

สำหรับการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์สอง และสามมิติ พบว่าการเคลื่อนที่ในด้านเหนือ-ใต้-ท้ายน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์สองมิติมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สามมิติ และค่าการทรุดตัวจากการวิเคราะห์สองมิติมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการวิเคราะห์สามมิติ

บรรณานุกรม

1. กรมทรัพยากรธรณี, แผนที่ภัยพิบัติแผ่นดินไหวประเทศไทย. 2016.
2. กรมทรัพยากรธรณี, แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย. 2019.
3. Gutenberg, B.a.R., C. F., *Frequency of earthquakes in California*. Bulletin of the Seismological Society of America., 1944: p. 185-188.
4. Pailoplee, S. and M. Choowong, *Earthquake frequency-magnitude distribution and fractal dimension in mainland Southeast Asia*. Earth, Planets and Space, 2014. 66(1): p. 8.
5. Boore, D.M., et al., *NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes*. Earthquake Spectra, 2014. 30(3): p. 1057-1085.
6. Thamarux, P., et al., *VS30 Seismic Microzoning Based on a Geomorphology Map: Experimental Case Study of Chiang Mai, Chiang Rai, and Lamphun, Thailand*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019. 8(7): p. 309.
7. Laosuwan, S., *Analysis of earth dam behaviour subjected to earthquake by finite element method*. Rajabhat J.sci Humanit. Soc. Sci, 2017. 18(1): p. 103-116.
8. Incorporated, A.N.C.o.L.D., *ANCOLD Guidelines for Design of Dams and Appurtenant Structures for Earthquakes*. 2019. 11.
9. Swaisgood, J.R. *Embankment dam deformations caused by earthquakes*. 2003.



รูปที่ 29 ผลการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวเหนือ-ใต้ - ท้ายน้ำ ตามตำแหน่งบนสันเขื่อน

ตารางที่ 6 สรุปการเคลื่อนตัว เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

บริเวณ	ตำแหน่ง	การเคลื่อนตัวแนวเหนือ-ใต้ - ท้ายน้ำ (เมตร)		การทรุดตัวสัมพันธ์ (เมตร)	
		ขณะเกิดแผ่นดินไหว	หลังการเกิดแผ่นดินไหว	ขณะเกิดแผ่นดินไหว	หลังการเกิดแผ่นดินไหว
ตอนต้น	T1	-0.12	-0.02	-0.27	-0.26
	T2	-0.15	-0.07	-0.31	-0.30
	T3	-0.18	-0.04	-0.29	-0.29
	T4	-0.16	-0.03	-0.30	-0.29
	T5	-0.16	-0.03	-0.31	-0.30
รอยต่อ	T6	-0.29	-0.14	-0.38	-0.37
ตอนปลาย	T7	-0.28	-0.10	-0.36	-0.35
	T8	-0.28	-0.09	-0.37	-0.35
	T9	-0.28	-0.09	-0.37	-0.36
	T10	-0.27	-0.09	-0.36	-0.35
	T11	-0.31	-0.10	-0.35	-0.35
	T12	-0.33	-0.17	-0.33	-0.32
	T13	-0.26	-0.14	-0.27	-0.26
	2D	-0.28	-0.06	-0.41	-0.39