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

2.

2.1 *ลักษณะทั่วไปของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล*

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



1 ภาพถ่ายทางอากาศ เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

3.

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

3.1 *แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณพื้นที่ที่พิจารณา*

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

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] นำเสนอสมการธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโอกาสการเกิดแผ่นดินไหว และความรุนแรงของแผ่นดินไหว แสดงไว้ใน 1

$$\log\gamma_m = a - b*m \qquad (1)$$

โดยที่ γ_m คือ โอกาสการเกิดแผ่นดินไหวที่มีแมกนิจูดมากกว่า m

m คือ ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในหน่วยแมกนิ จูด (Magnitude)

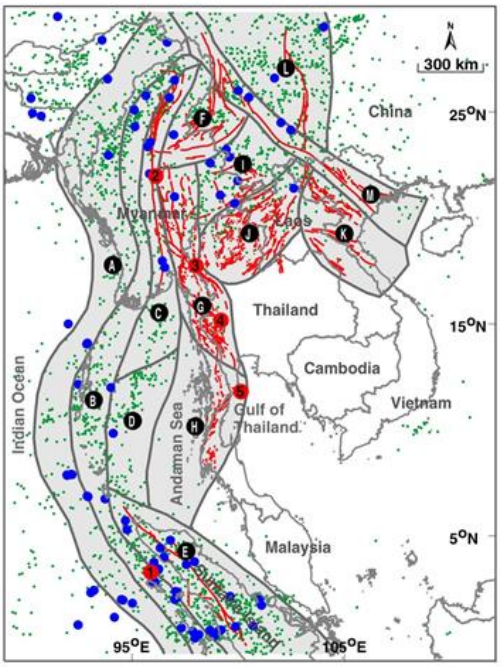
a คือ ค่าคงที่ในสมการ แสดงถึงโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวโดยรวม

b คือ ค่าคงที่ในสมการ แสดงถึงอัตราการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ และเล็ก

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

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



2 แผนที่จำแนกเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [4]

3.3 *แบบจำลองลดทอนพลังงาน* (Attenuation Model)

ผลการสั่นไหวของโครงสร้างลักษณะต่าง ๆ จากแผ่นดินไหวที่ขนาดและตำแหน่งใด ๆ สามารถทำนายได้ด้วยแบบจำลองลดทอนพลังงาน (Attenuation model) ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของโอกาศการเกิดการสั่นไหวที่ 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

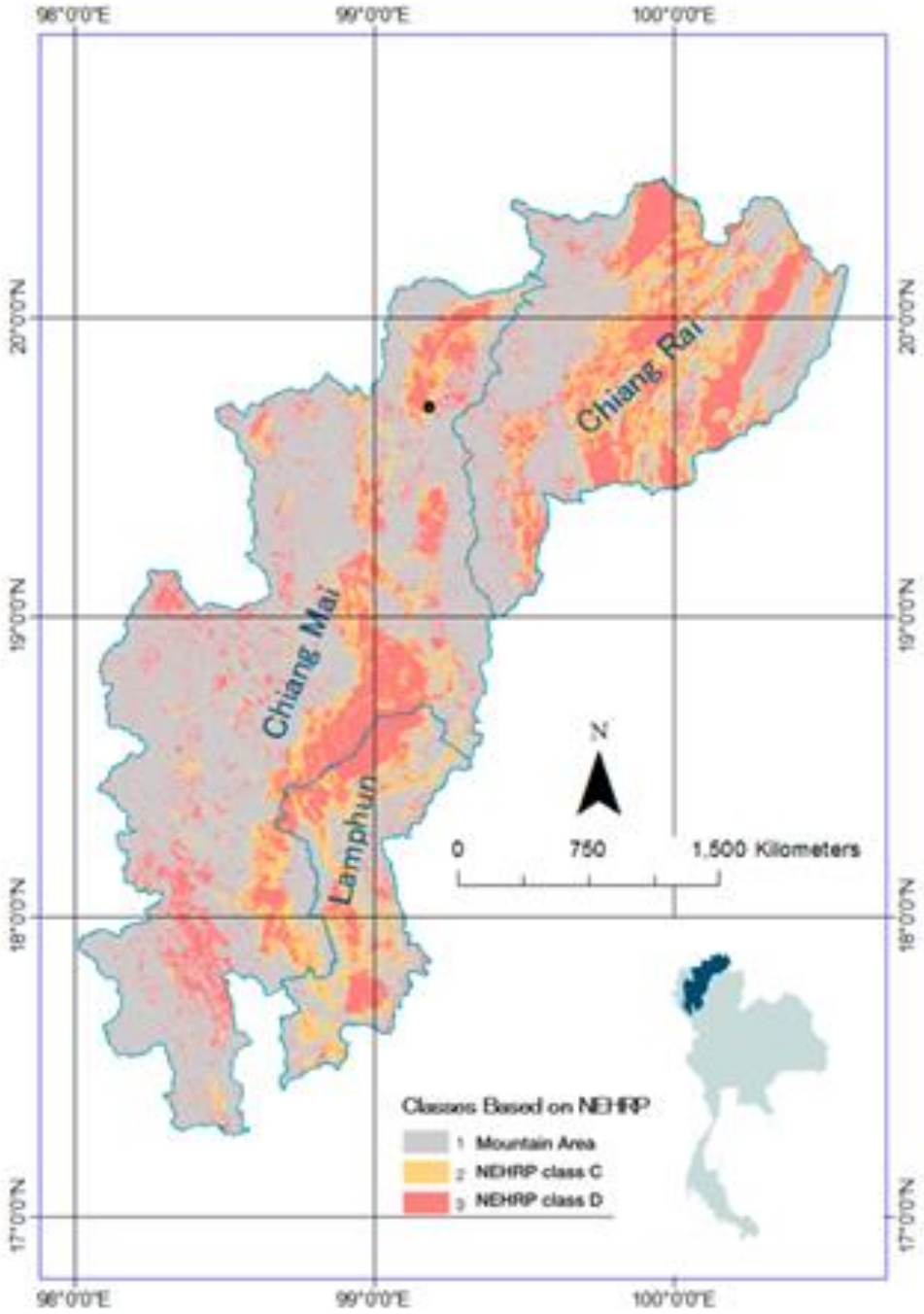
แบบจำลองลดทอนพลังงาน BSSA14 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรง 3-8.5 แมกนิจูด สำหรับแหล่งกำเนิดรอยเลื่อนประเภทระนาบ (Strike-Slip Fault) และประเภทรอยเลื่อนย้อน (Reverse Fault) และความรุนแรง 3-7 แมกนิจูด สำหรับแหล่งกำเนิดรอยเลื่อนประเภทปรกติ (Normal Fault) นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านระยะทางภายในรัศมีระยะ 400 กิโลเมตรรอบบริเวณแหล่งกำเนิด และข้อจำกัดด้านความถี่ธรรมชาติภายในช่วง 0 – 10 วินาที ของความถี่ธรรมชาติสำหรับโครงสร้างที่พิจารณา

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

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

3 เกณฑ์การจำแนกชั้นดินองค์กร NEHRP

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



3 แผนที่แสดงการจำแนกประเภทชั้นดินตามเกณฑ์ NEHRP

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 permability (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 ถูกใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกพัฒนาต่อจากงานวิจัยของศิริกันยา เลาสุวรรณ์ ในปีพ.ศ.2560 [7] และแสดงไว้ใน 4

3.6 *โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์*

การวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์กระทำโดยโปรแกรม Plaxis 2D และ Plaxis 3D โดยมีจำนวนโหนดของแบบจำลองเท่ากับ 19,700 และ 209,299 โนด สำหรับแบบจำลองสองและสามมิติตามลำดับ และรูปแสดงแบบจำลองสองและสามมิติแสดงไว้ใน 4 และ 5 ตามลำดับ

การพิจารณาผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์สามมิติของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลถูกแบ่งเป็นสองบริเวณ ตามลักษณะของเขื่อน ได้แก่

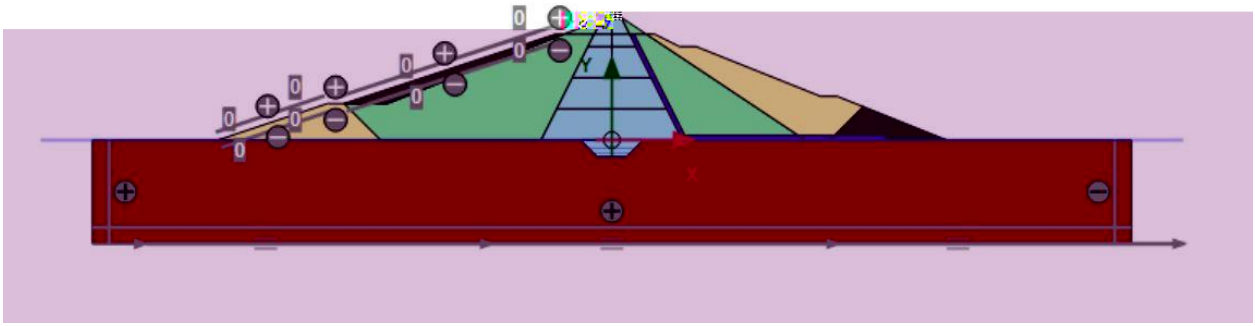
3.6.1 เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลตอนต้น: บริเวณเขื่อนที่วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ มีความยาวสันเขื่อนประมาณ 910 เมตร

3.6.2 เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลตอนปลาย: บริเวณเขื่อนที่วางตัวในแนวทิศใต้-เหนือ มีความยาวสันเขื่อนประมาณ 900 เมตร

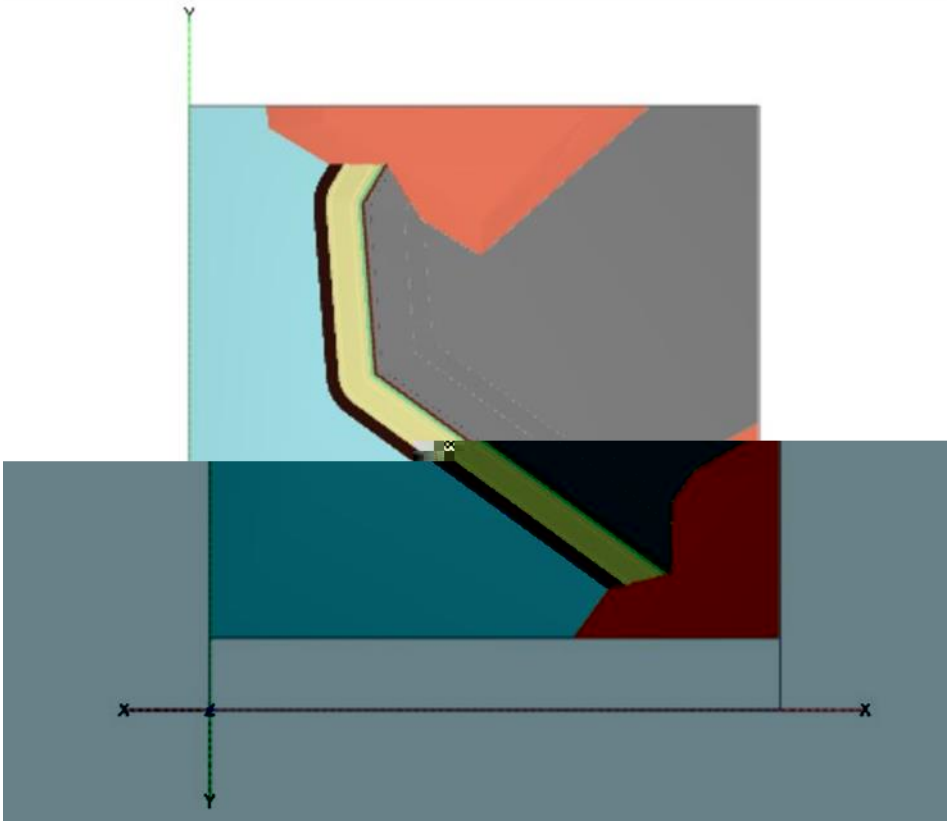
ตำแหน่งต่าง ๆในแนวสันเขื่อนถูกกำหนดไว้ก่อนการคำนวณไฟไนต์อิลิเมนต์ 3 มิติ ด้วยการกำหนดโนด (Node) ในแบบจำลอง ตำแหน่งโนดต่าง ๆ ถูกแทนด้วยชื่อ T1 – T13 และแสดงไว้ใน 5 และแสดงไว้ใน 6

5 ตำแหน่งโหนดที่ต้องการตรวจสอบบนแบบจำลอง

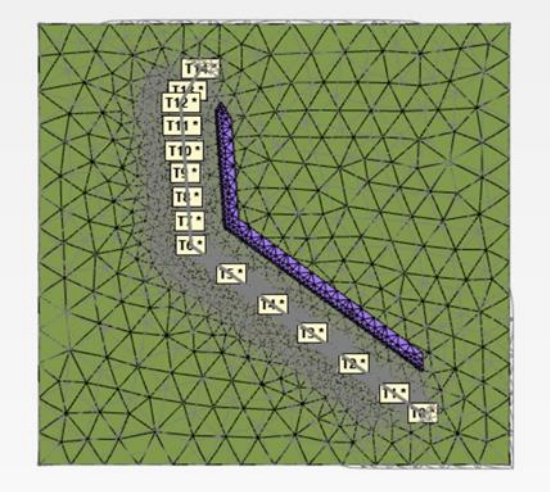
บริเวณ	ตำแหน่ง	ระยะบนสันเขื่อน (เมตร)
ตอนต้น	T1	135
	T2	328
	T3	523
	T4	714
	T5	910
รอยต่อ	T6	1100
ตอนปลาย	T7	1192
	T8	1286
	T9	1376
	T10	1464
	T11	1560
	T12	1650
	T13	1702



4 แบบจำลอง 2 มิติ (Plaxis 2D)



5 แบบจำลอง 3 มิติ (Plaxis 3D)



6

4.

4.1 *ผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น*

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

Ground motion hazard curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปกตรัมผลตอบสนองของค่าความเร่งที่คาบเวลาต่าง ๆ และความน่าจะเป็นที่มีค่าเกินกว่าความเร่งนั้น โดยในงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอผลตอบสนองของค่าความเร่งตัวอย่างที่คาบ 0.2 และ 1 วินาที โดยแสดงไว้ใน 7 และ 8 ตามลำดับ โดยผลตอบสนองที่คาบอื่น ๆถูกนำไปสร้างเป็น 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 แสดงไว้ใน 10 และรูปแสดงคลื่นแผ่นดินไหวตัวแทน แสดงไว้ใน 11

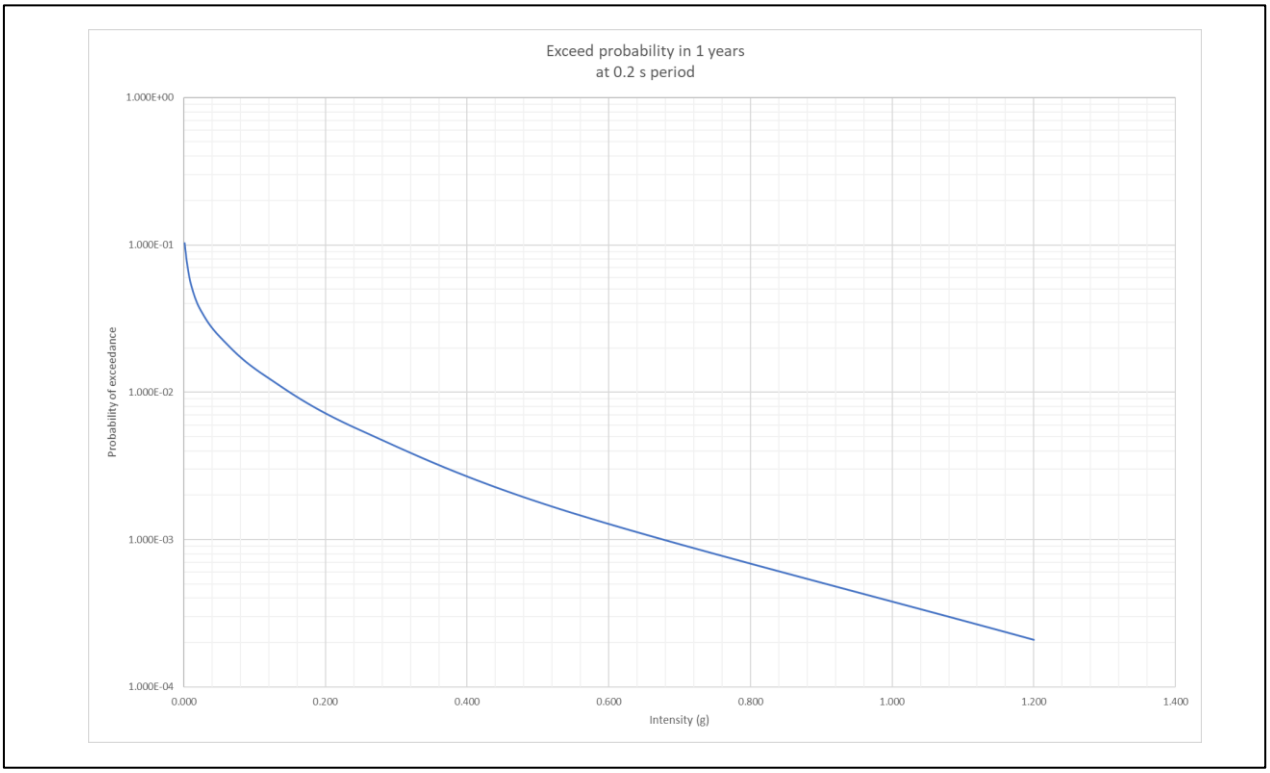
4.3 *ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ*

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ถูกแสดงออกมาในรูปแบบของ ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ - ท้ายน้ำ และผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ (Relative settlement) ในแนวสันเขื่อนตามระยะเวลาแผ่นดินไหว และผลการกระจายตัวของค่าความเครียดเฉือน (Shear strain)

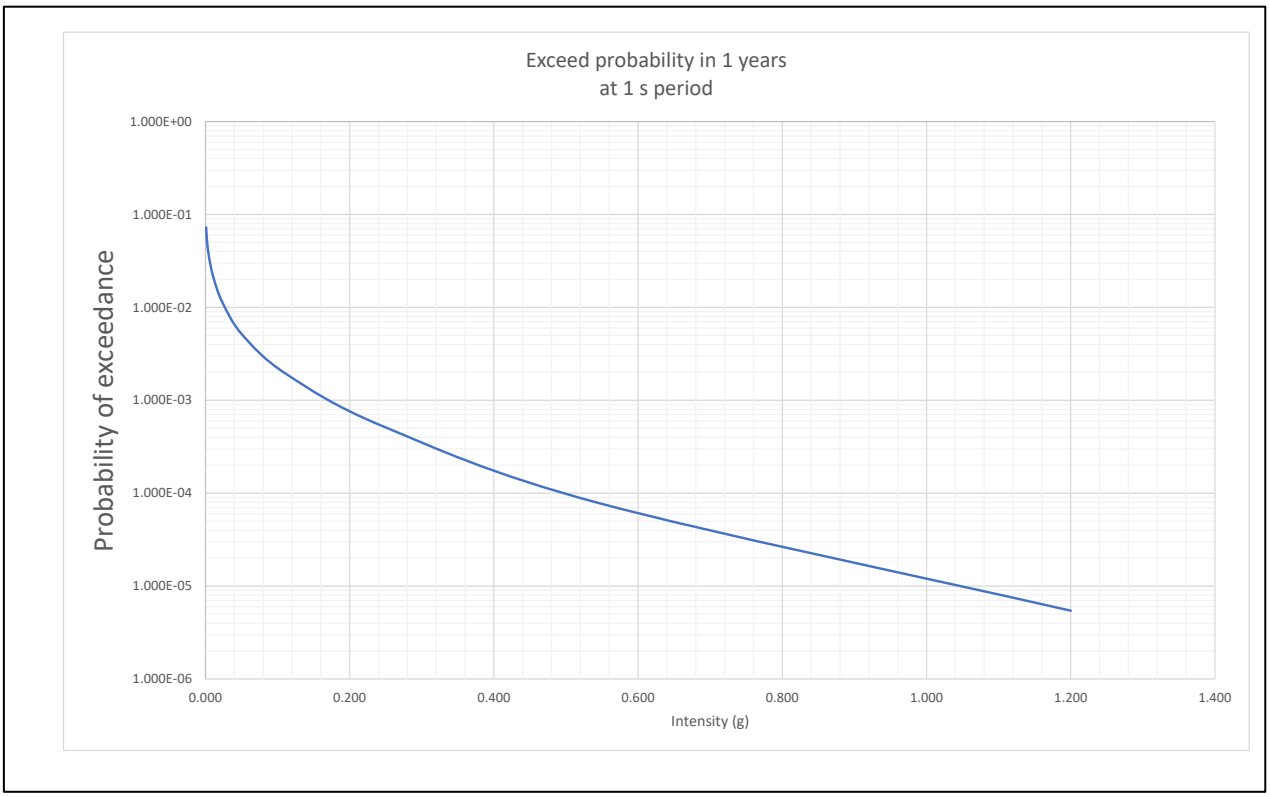
ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของแบบจำลองสองมิติที่บริเวณกลางสันเขื่อน แสดงไว้ใน โดยพบการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่เกิดในด้านท้ายน้ำ และพบการเคลื่อนตัวสูงสุดในวินาทีที่ 10 – 15 ของคลื่นแผ่นดินไหว และมีค่าลดลงเมื่อสิ้นสุดแผ่นดินไหวจากทั้งสองแบบจำลอง

ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์น้ำตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของแบบจำลองสองมิติบริเวณกลางสันเขื่อน แสดงไว้ใน พบการทรุดตัวสูงสุดประมาณวินาทีที่ 20 ของคลื่นแผ่นดินไหว และมีค่าคงที่จนสิ้นสุดการสั่นไหวจากทั้งสองแบบจำลอง

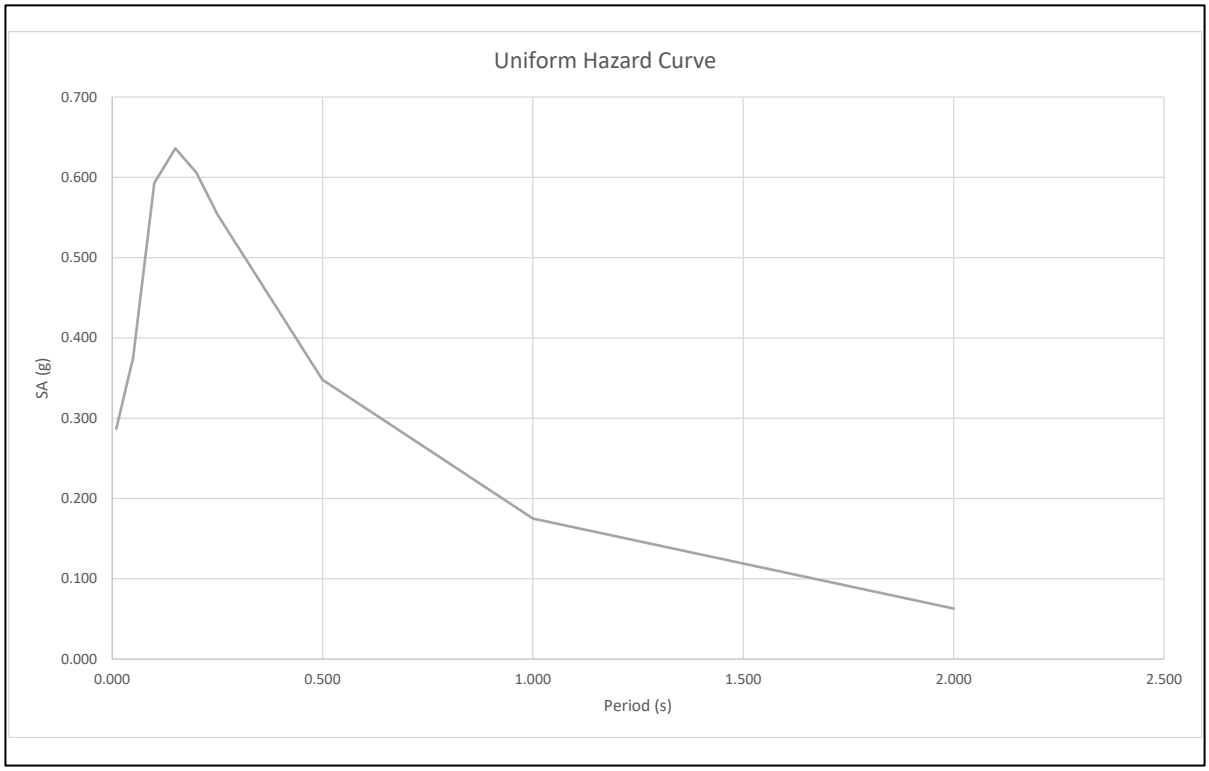
การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ถูกแสดงไว้ใน และโดยแสดงในช่วงระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว และระยะหลังแผ่นดินไหวเสร็จสิ้น โดยพบค่าความเครียดเฉือนมีค่าสูงบริเวณชั้นหินทิ้งหน้าเขื่อน และชั้นกรองบางส่วน



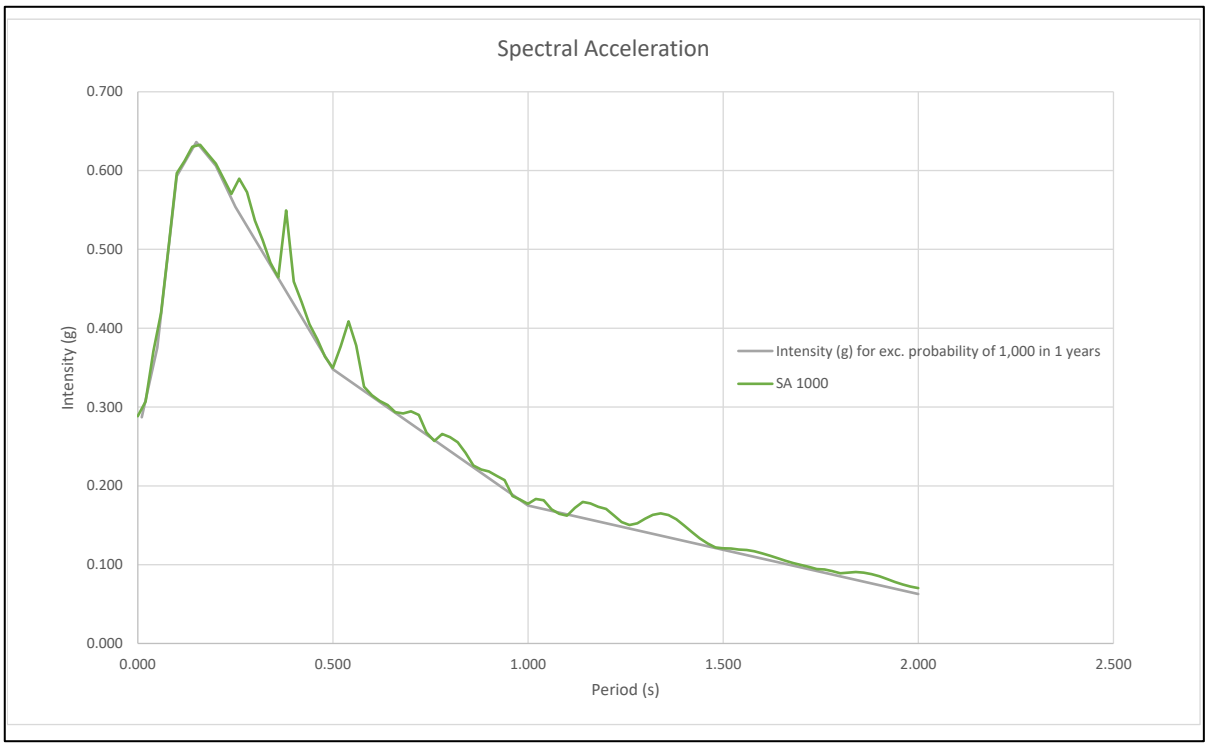
7 Ground motion hazard curve ที่คาบเวลา 0.2 วินาที



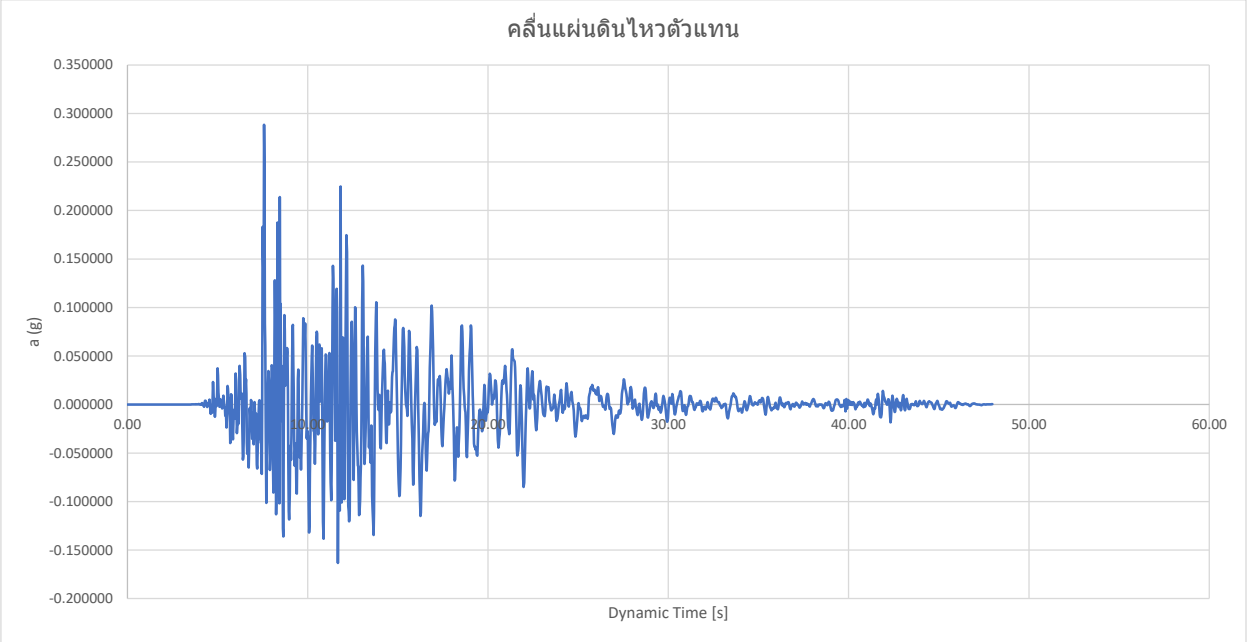
8 Ground motion hazard curve ที่คาบเวลา 1 วินาที



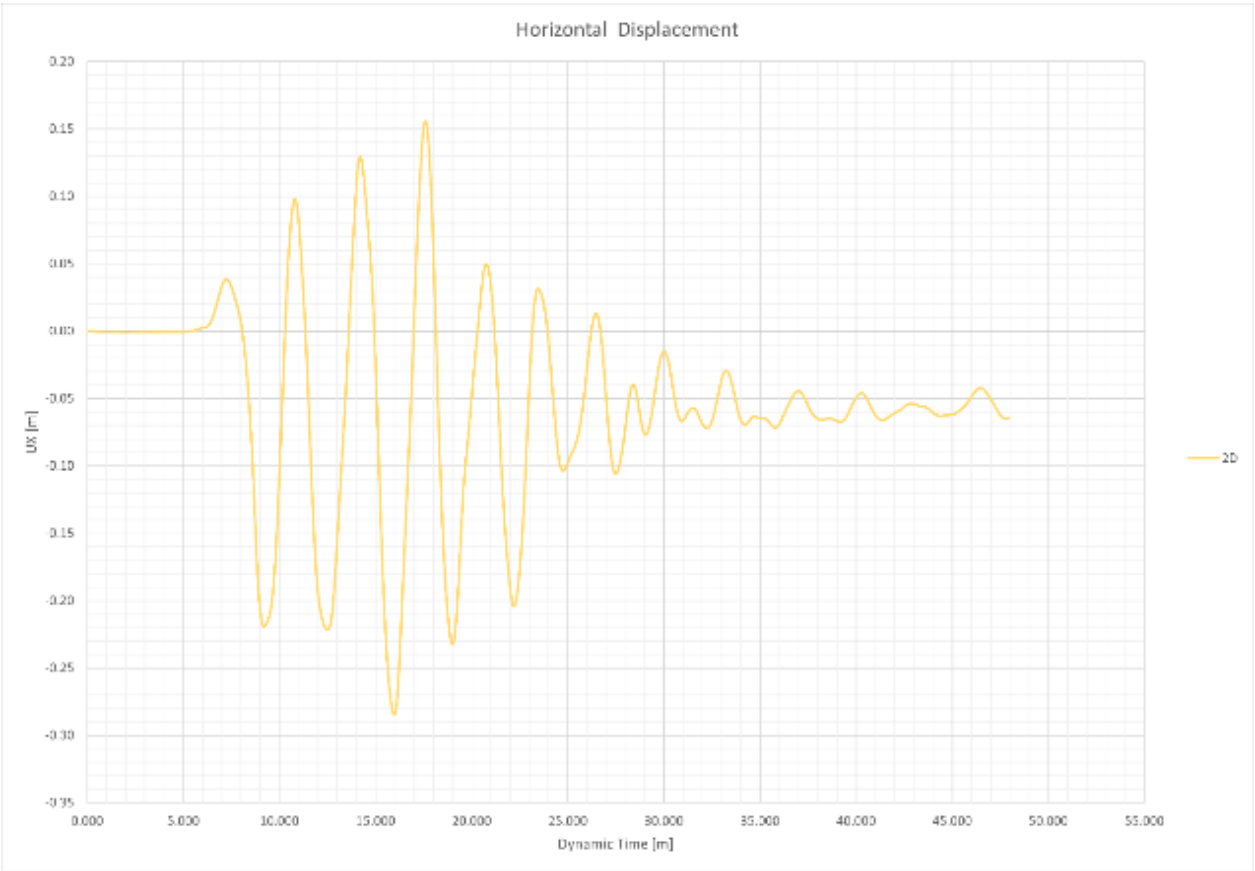
9 Uniform hazard curve



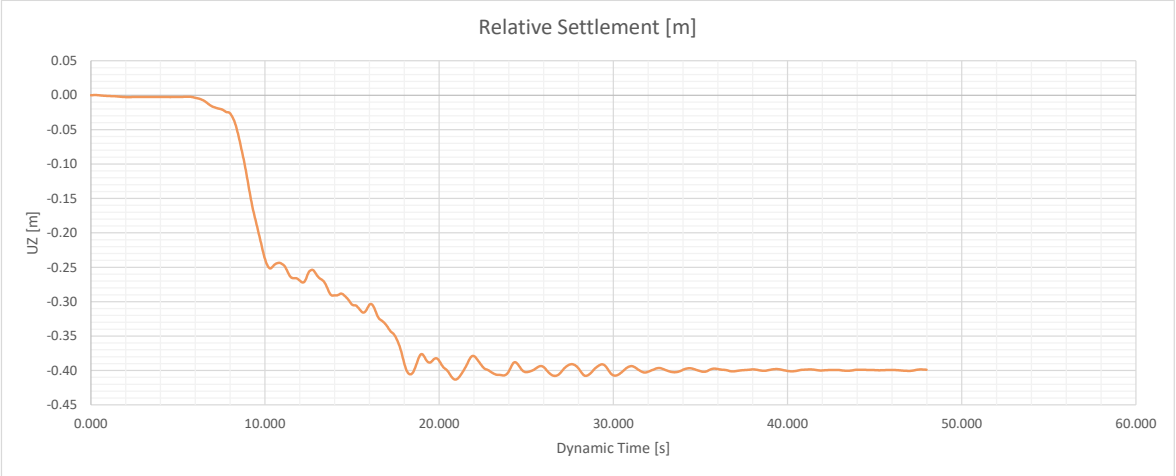
10 ผลตอบสนองสเปกตรัมจากโปรแกรม Seismomatch



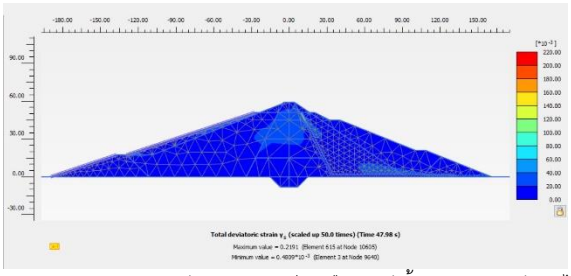
11 คลื่นแผ่นดินไหวตัวแทน คาบอุบัติซ้ำ 1,000 ปี



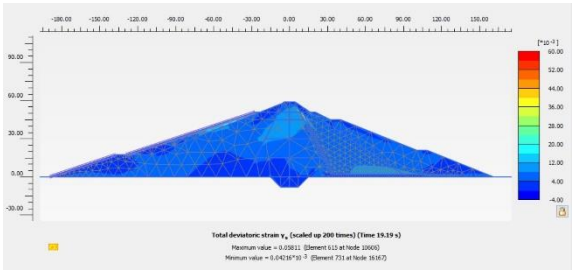
12 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ แบบจำลองสองมิติ



13 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ แบบจำลองสองมิติ



15 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิดแผ่นดินไหว



14 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว

4.4 *ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ 3 มิติ*

ผลการเคลื่อนตัวในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ และผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามระยะเวลาแผ่นดินไหวถูกแสดงแยกตามตำแหน่งของโหนดบนเขื่อน รูปหน้าตัดการกระจายตัวของการเคลื่อนที่ทั้งสองแนวและความเครียดเฉือนถูกแสดงไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณเขื่อนทั้งสองและตำแหน่งรอยต่อของบริเวณ

16 ถึง **18** แสดงผลการเคลื่อนตัวในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของบริเวณเขื่อนตอนต้น รอยต่อเขื่อน และเขื่อนตอนปลายตามลำดับ

19 ถึง **20** แสดงผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามระยะเวลาแผ่นดินไหวของบริเวณเขื่อนตอนต้น รอยต่อเขื่อน และเขื่อนตอนปลายตามลำดับ

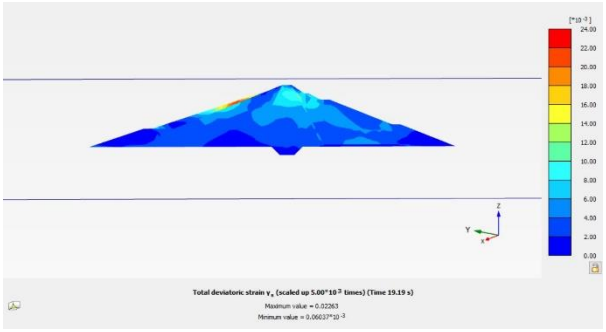
รูปหน้าตัดการกระจายตัวของความเครียดเฉือนของหน้าตัดกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น (T3) รอยต่อบริเวณ (T6) และกึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย (T9) แสดงไว้ใน **21** ถึง **26**

19 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ บริเวณเขื่อนตอนต้น

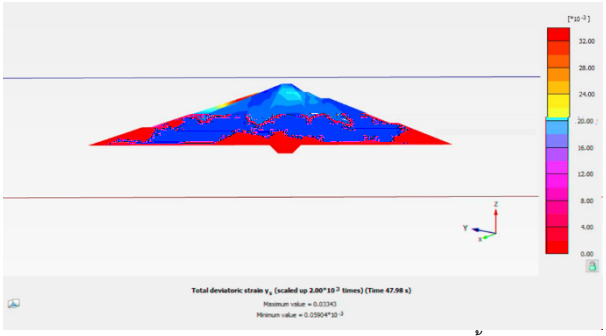
16 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ บริเวณเขื่อนตอนต้น

17 ผลการเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ บริเวณรอยต่อเขื่อน

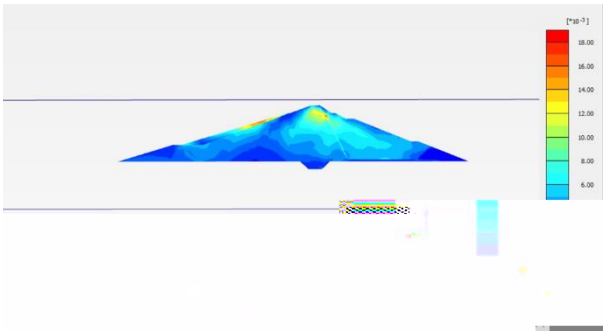
18 การเคลื่อนที่ในแนวเหนือน้ำ-ท้ายน้ำ บริเวณเขื่อนตอนปลาย



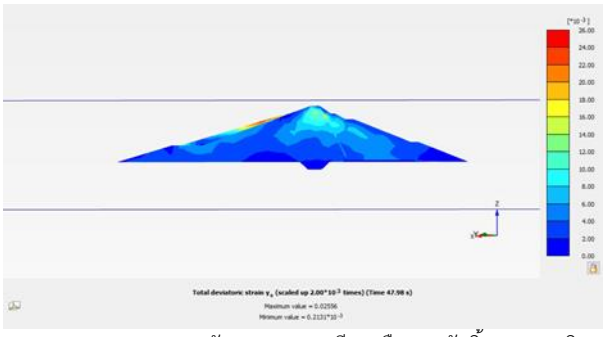
21 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น



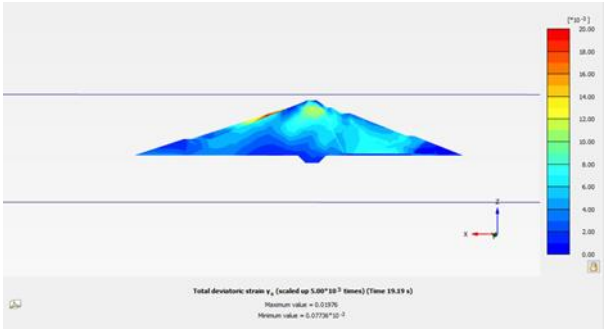
22 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิดแผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนต้น



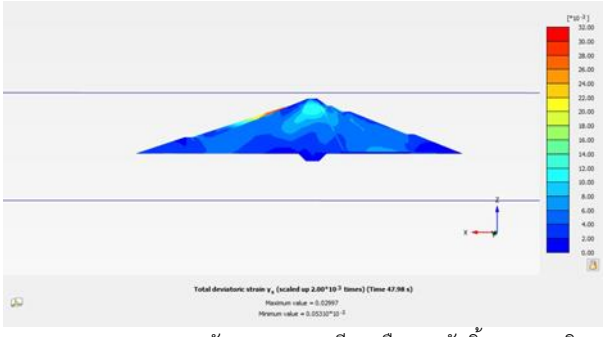
23 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว บริเวณรอยต่อเขื่อน



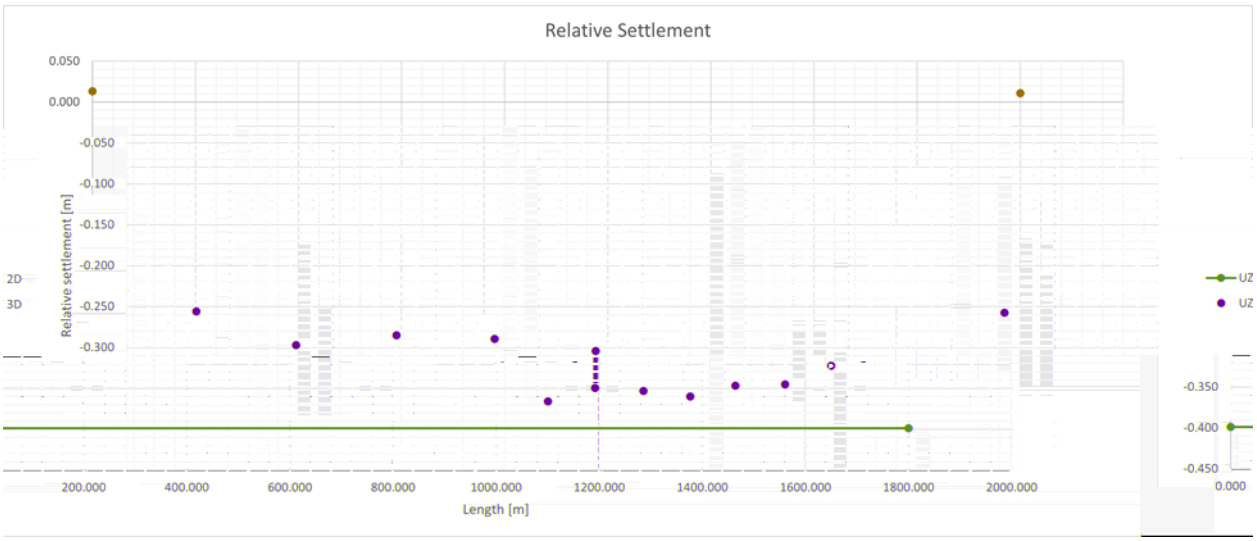
24 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิดแผ่นดินไหว บริเวณรอยต่อเขื่อน



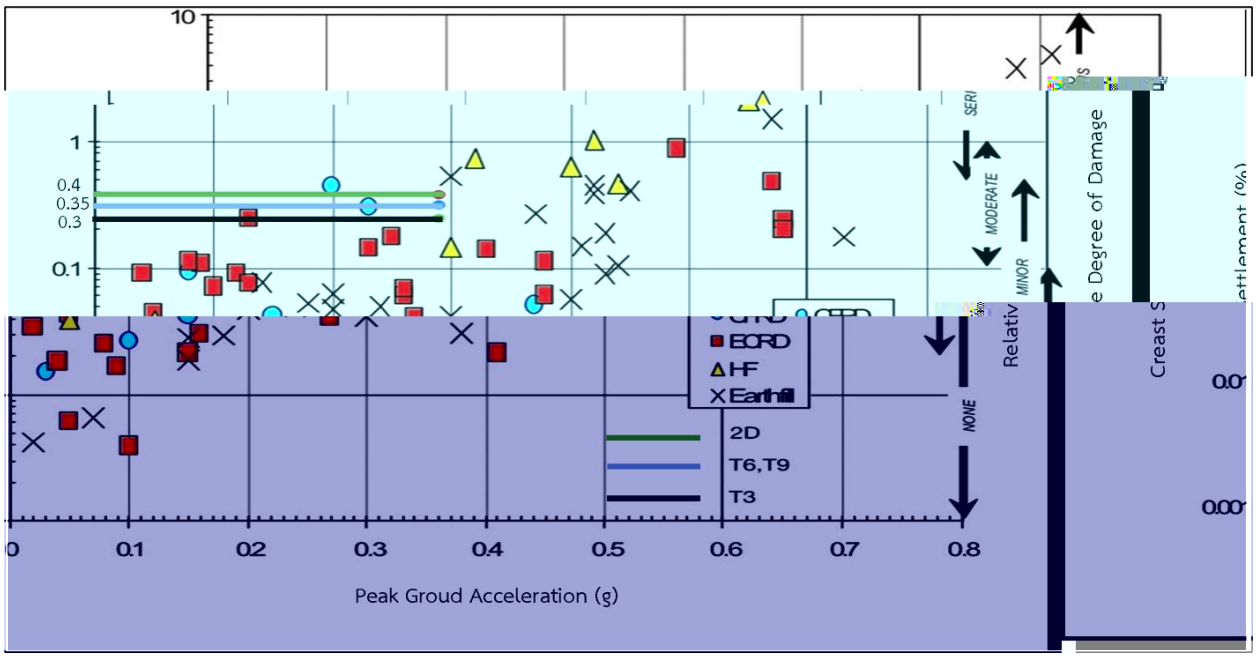
25 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย



26 การกระจายตัวของความเครียดเฉือน หลังสิ้นสุดการเกิดแผ่นดินไหว กึ่งกลางบริเวณเขื่อนตอนปลาย

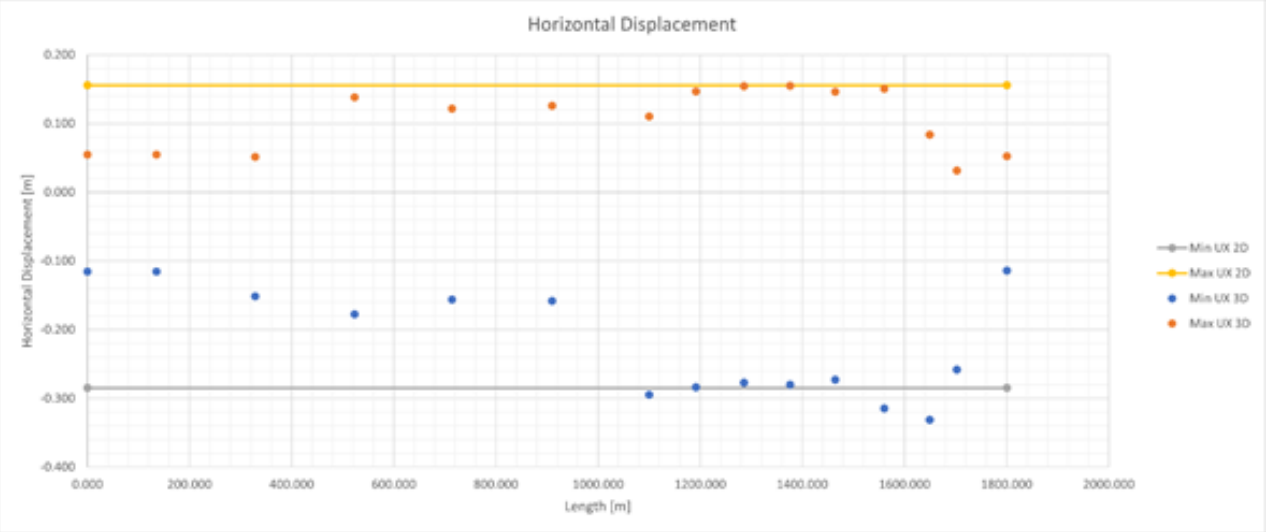


27 ผลการทรุดตัวสัมพัทธ์ตามตำแหน่งบนสันเขื่อน



28 ระดับความเสียหายคาดการณ์ของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

5.



29 ผลการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวเหนือน้ำ - ท้ายน้ำ ตามตำแหน่งบนสันเขื่อน

6 สรุปการเคลื่อนตัว เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล

บริเวณ	ตำแหน่ง	การเคลื่อนตัวแนวเหนือน้ำ - ท้ายน้ำ (เมตร)		การทรุดตัวสัมพัทธ์ (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