

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



242236

# ผลของแร่ฟอสเฟตอินทรีย์ที่มีต่อพฤติกรรมของพืชในฝักระบายทรง

บัญชา จันทุบศรณกุล

วิทยากรณศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยากรณโมธา

บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ตุลาคม 2553



# ผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อพฤติกรรมของเขื่อนแม่ทะลบลวง

บัญชา สิ้นสุขเศรษฐ์



วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ตุลาคม 2553

# ผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อพฤติกรรมของเขื่อนแม่ทะลบลวง

บัญชา สิ้นสุขเศรษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

อาจารย์ ดร. อภิวัฒน์ โอพารัตนชัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยานนท์ หารรมภิญโญ



กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยานนท์ หารรมภิญโญ



กรรมการ

อาจารย์ ดร. ปิติวัฒน์ วัฒนชัย



กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิศักดิ์ ศรีถัมพ์

12 ตุลาคม 2553

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตา และความร่วมมือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ หารรรษิณโย ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา รวมทั้งคอยสนับสนุน ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณในความเมตตาของอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ทำให้ข้าพเจ้ามีโอกาส ได้นำความรู้ของอาจารย์มาช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุเทพ นิ่มนวล อ.ดร.อภิวัฒน์ โอพารัตนชัย อ.ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธสิศดิ์ ศรีลัมพ์ ที่กรุณาให้ความเมตตาในการ ถ่ายทอดความรู้ อีกทั้งให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในการศึกษาในระดับปริญญาโททุกท่าน ทำให้ข้าพเจ้าได้มีความรู้เพื่อทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณดุสิต น้อมจิต คุณพิทยา คุณพุทธรักษ์ จรัสพันธุ์กุล เจ้าหน้าที่ภาควิชา วิศวกรรมโยธาทุกท่าน เจ้าหน้าที่บรรณารักษ์ห้องสมุด และรุ่นพี่เพื่อนที่ศึกษาปริญญาโททุกท่าน ที่ ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลซึ่งเป็นประโยชน์ มากต่อการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประจักษ์ศักดิ์ คุณแม่จันทร์พลอย สินสุขเศรษฐ์ และ คุณอายุธนา สินสุขเศรษฐ์ สำหรับพระคุณอันยิ่งใหญ่ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ตลอดจนญาติพี่น้อง ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า และหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงจะมีประโยชน์บ้างไม่มากนักน้อยสำหรับหน่วยงานต่างๆ หรือผู้ที่สนใจศึกษา ค้นคว้าเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บัญชา สินสุขเศรษฐ์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	ผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อพฤติกรรมของเขื่อนแม่ทะลบหลวง
ผู้เขียน	นายบัญชา สิ้นสุขเศรษฐ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชยานนท์ หารรัชญ์ โญ

## บทคัดย่อ

242236

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อพฤติกรรมของเขื่อนแม่ทะลบหลวง ซึ่งเป็นเขื่อนดินถมประเภทแบ่งส่วน 4 ส่วน คือ (1) ส่วนแกนดินเหนียวกลางเขื่อน (2) ส่วนชั้นกรวดทรายกรองเอียง เป็นบริเวณระบายน้ำ (3) ส่วนมวลคละ (4) ส่วนดินเขื่อน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ระนาบความเครียด แบบ 2 มิติ ไร้เชิงเส้น ทำการวิเคราะห์จากแบบจำลอง 2 แบบคือ Gravity Turn-on model และ Incremental model ทั้งกรณีการวิเคราะห์แบบแรงดันน้ำและน้ำหนักตัวเขื่อนสถิตยศาสตร์ และกรณีแรงแผ่นดินไหววิเคราะห์แบบพลศาสตร์ ขณะที่ตัวเขื่อนมีระดับน้ำเก็บกักสูงสุดในตัวเขื่อนเป็นครั้งแรก การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เลือกใช้แผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้น โดยพิจารณาให้ใกล้เคียงกับสภาพภูมิประเทศที่ตั้งของตัวเขื่อน รวมทั้งขนาดความรุนแรงโดยแผ่นดินไหวที่คัดเลือกมีลักษณะที่ต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบระยะสั้นสะเทือนยาวนาน (EQ1) ระยะสั้นสะเทือนสั้น (EQ2) และแรงกระแทกฉับพลัน (EQ3) โดยแต่ละคลื่นมีขนาดความเร่งที่ระดับพื้นดินสูงสุด เท่ากับ 0.212g, 0.302g และ 0.493g ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสองชนิด กรณีภายใต้แรงสถิตยศาสตร์แบบจำลอง Gravity turn-on มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าแบบจำลอง Incremental ส่วนระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง Incremental มีค่ามากกว่าแบบจำลอง Gravity turn-on ในทิศแนวตั้ง ส่วนในแนวราบมีระยะการเคลื่อนตัวใกล้เคียง สำหรับการวิเคราะห์กรณีภายใต้แรงพลศาสตร์ ผลการวิเคราะห์จาก

แบบจำลอง Gravity turn-on ได้แก่ ค่าความเร่ง, ระยะเคลื่อนตัว และแรงดันน้ำ มีค่ามากกว่าแบบจำลอง Incremental เช่นกัน

จากกรณีการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Gravity turn-on กรณีแรงสถิตยศาสตร์ พบว่า การทรุดตัวของเขื่อนเกิดมากที่สุดบริเวณสันเขื่อน และการเคลื่อนตัวที่แนวราบเกิดบริเวณลาดชันด้านท้ายน้ำ ประมาณ 1 ซม. เกิดความเค้นหลักประสิทธิผลที่เป็นหน่วยแรงอัดมากที่สุดอยู่เหนือระดับฐานเขื่อนเล็กน้อย การกระจายของหน่วยแรงเป็นลักษณะไม่สมมาตร อัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.587 เทียบกับหลักเกณฑ์ขั้นต่ำของอัตราส่วนความปลอดภัยเขื่อนของกรมชลประทาน 1.50 แล้วมีค่ามากกว่า ดังนั้นภายใต้แรงสถิตยศาสตร์ถือว่าเขื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

กรณีการวิเคราะห์พลศาสตร์ จากผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ พบว่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกับความถี่จากแผ่นดินไหว จึงส่งผลให้ลักษณะการตอบสนองการเคลื่อนตัวของเขื่อนคล้ายโหมดดังกล่าว ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ลักษณะความเร่งของตัวเขื่อนจากแผ่นดินไหวทั้ง 3 แบบจะมีความเร่งมากที่สุดที่ระดับ 1/7 ของความสูงเขื่อนจากฐาน อาจเนื่องจากรูปทรงของเขื่อนที่มีการกระจายของมวลมีขนาดลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น โดยแผ่นดินไหวที่มีลักษณะแรงกระแทกฉับพลันจะเกิดค่าความเร่งมากที่สุดที่สันเขื่อนขนาด 0.9g ส่วนผลการเคลื่อนตัวของเขื่อน แผ่นดินไหวที่มีระยะเวลาการสั่นยาวนานจะเกิดระยะการเคลื่อนตัวแนวราบมากที่สุดประมาณ 36 ซม. และทรุดตัวมากที่สุดประมาณ 47 ซม. ส่วนค่าความเค้นหลักประสิทธิผลหลังแผ่นดินไหว เกิดที่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดที่เกิดสูงสุดภายใต้แรงสถิตย แต่มีค่ามากกว่าเล็กน้อยเทียบกับกรณีสถิตยศาสตร์ ดังนั้นผลจากแรงแผ่นดินไหวไม่ได้มีต่อความเค้นประสิทธิผล

ผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อน จากแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณี พบว่าแรงแผ่นดินไหวมีผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงเล็กน้อยเทียบกับกรณีสถิตยศาสตร์ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหลังแผ่นดินไหวเฉลี่ยมีเท่ากับ 1.557 จากแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณีโดยลักษณะการวิบัติของเขื่อนจะเกิดที่บริเวณส่วนมวลลดทางลาดชันท้ายเขื่อน ซึ่งระนาบการเคลื่อนตัวจะอยู่เหนือชั้นกรองจนไปถึงสันเขื่อน ดังนั้น จากระยะทรุดตัวที่มีค่าน้อยโดยน้ำไม่ล้นข้ามเขื่อนและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่วิเคราะห์มีค่ามากกว่า 1.25 จากหลักเกณฑ์ขั้นต่ำของอัตราส่วนความปลอดภัยเขื่อนของกรมชลประทานหลังแผ่นดินไหว สามารถกล่าวได้ว่า เขื่อนยังอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย หลังเกิดแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้ง 3 แบบ

<b>Thesis Title</b>	Effects of Seismic Force on Behavior of Mae Thalop Luang Dam
<b>Author</b>	Mr.Bancha Sinsuksate
<b>Degree</b>	Master of Engineering (Civil Engineering)
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chayanon Hansapinyo

#### ABSTRACT

**242236**

This study is aimed to investigate the effects of earthquake on the behavior of Mae Thalop Luang Dam. The dam is an earth filled, zoned type consisting of 4 parts: (1) Clay core middle zone (2) the level gravel filtering tilt (3) Random zone (4) downstream toe. The study adopted plane strain non-linear finite element analysis with use of 2 modeling techniques, i.e. the Gravity Turn-on model and the Incremental model for (1) static analysis under hydrostatic pressure and self - weight and (2) time history dynamic analysis under earthquake loading. The analytical stage was assumed at full level of reservoir occur first time after the complete of construction. For the dynamic analysis, three selected time history records with different wave characteristics as: long duration (EQ1), short duration (EQ2) and impulsive (EQ3). The peak ground acceleration of the three earthquakes is 0.212g, 0.302g and 0.493g, respectively.

From both numerical models, in the static case, gravity turn-on model gives a lower value of the factor of safety than the incremental model. In the displacement field, the vertical displacement obtained from the incremental model gives greater values than the gravity turn-on model. For the horizontal displacement, the two models give similar results. In the case of the

dynamic analysis, the results obtained from the Gravity turn-on model such as acceleration, displacement and pore pressure are also greater than those in the Incremental model.

Based on the analysis using the Gravity turn-on model, in the static analysis case, it is found that the maximum settlement at the dam crest and the maximum horizontal movement at downstream slope are about 1 cm. Maximum effective compressive stress occurs at dam base and the distribution of the stress is not symmetrical. For safety analysis, the factor is equal to 1.587 which is greater than the minimum criteria of Royal Irrigation Department of Thailand of 1.50. Hence, it can be said that the dam is safe enough under full water retention service.

For the dynamic analysis case, the natural frequency of the fifth mode shape is close to predominant period of earthquake which results in the high response in this mode. Under earthquake acceleration, maximum acceleration presents at about 1/7 of the dam height from base. It may be due to the shape of the dam that mass decreases with the height increases. The dam is highly accelerated under the impulse earthquake with the maximum acceleration of 0.9g. The long duration earthquake highly affects the dam movement in which the displacements are about 36 cm and 47 cm in horizontal and vertical directions, respectively. The effective principle stress after earthquake are increased slightly compared with the static case. Hence, the earthquakes do not affect much on the effective principal stress.

For safety evaluation, the factors of safety from the three input earthquakes are slightly changed compared with the static case. The averaged safety factor under the three earthquakes is about 1.557. The failure plane of the dam occurs at crest of random zone to above of filter zone at downstream side. From the settlement which is less than designed free board range and the safety ratio which is higher than 1.25 of the minimum criteria after earthquake of Royal Irrigation Department of Thailand, it can be concluded that the dam is safe under the three earthquakes.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการ	1
1.2 การตรวจสอบผลงานวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	13
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	13
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	13
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	15
2.1 หลักการออกแบบเขื่อน	15
2.1.1 ชนิดของเขื่อน	15
2.1.2 การแบ่งขนาดของเขื่อนเก็บกักน้ำ	16
2.1.3 วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนดินถม	17
2.2 เสถียรภาพความมั่นคงลาดชัน	21
2.2.1 หลักการพื้นฐานวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงลาดชัน แบบ “สมมูลจำกัดของมวลดิน”	22
2.2.2 ความแข็งแรงของดินและหินที่จะใช้วิเคราะห์ความมั่นคง	24
2.2.3 พฤติกรรมของดินจากมุมไคเลชัน	26
2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงลาดชัน โดยวิธีสมมูลจำกัดของมวลดิน	26

2.3.1	วิธีวิเคราะห์ลาตอแนนต์	27
2.3.2	วิธีวิเคราะห์ Taylor Method	28
2.3.3	วิธีโมเมนต์	31
2.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงของเขื่อนดินภายใต้แรงแผ่นดินไหว	32
2.4.1	วิธีสถิตย์เสมือน แบบ ส.ป.ส.ความเร่งคงที่	33
2.4.2	วิธีสถิตย์เสมือน แบบ ส.ป.ส.ความเร่งไม่คงที่	34
2.4.3	วิธี Equivalent Linear	35
2.4.4	วิธี Pure Nonlinear	37
2.5	การวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงลาดชัน โดยใช้วิธีไฟในทอิลเมนต์	40
2.6	การวิเคราะห์เสถียรภาพความมั่นคงลาดชันโดยวิธีลดกำลัง	44
2.7	แบบจำลองพฤติกรรมดินของ Mohr – Coulomb	50
2.8	แรงแผ่นดินไหว	52
2.8.1	การเกิดแผ่นดินไหว	52
2.8.2	การวัดขนาดของแผ่นดินไหว	52
2.8.3	ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร	55
2.8.4	ทฤษฎีการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์	62
2.8.5	ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อเขื่อนดิน	71
2.9	รอยเลื่อนที่มีพลังในภาคเหนือของประเทศไทย	71
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	74
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	74
3.2	ลักษณะของเขื่อนที่ศึกษา	74
3.3	แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา	79
3.4	วิธีการวิจัย	81
3.4.1	การวิเคราะห์แบบสถิตย์ศาสตร์	81
3.4.2	การวิเคราะห์โหมค	81
3.4.3	การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์	81
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์เขื่อนแม่ทะลบหลวง	88
4.1	กรณีภายใต้แรงสถิตย์ศาสตร์	88
4.1.1	ระยะเคลื่อนตัว	89

## ญ

4.1.2	ความเค้นและความเครียด	93
4.1.3	อัตราส่วนความปลอดภัย	96
4.2	กรณีภายใต้แรงแผ่นดินไหว	98
4.2.1	การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ	98
4.2.2	การวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวตามประวัติเวลา	101
4.3	เปรียบเทียบแบบจำลอง	134
4.4	ผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์	135
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย	137
5.1	กรณีภายใต้แรงสถิตยศาสตร์	137
5.2	กรณีภายใต้แรงพลศาสตร์	138
5.3	ผลของแรงแผ่นดินไหว	140
	บรรณานุกรม	141
	ภาคผนวก แบบก่อสร้างโครงการอ่างเก็บน้ำแม่ทะลบหลวง	147
	ประวัติผู้เขียน	158

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	เขื่อนที่ได้รับความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว	2
1.2	แผ่นดินไหวขนาดตั้งแต่ 5 ริกเตอร์ขึ้นไปที่เคยตรวจวัดได้ในประเทศไทย	10
2.1	กลุ่มดินที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างตัวเขื่อน	18
2.2	ค่า Elastic Modulus ของดินตามประเภทของดิน (ดินตามธรรมชาติ)	19
2.3	ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของดินประเภทต่างๆ	19
2.4	ตัวอย่างของค่า $k_c$ และ $k'_{smin}$ ที่ใช้จริง	34
2.5	มาตรวัดปรับปรุงใหม่ Modified Mercalli Intensity Scale (MMI) สำหรับปี ค.ศ. 1931	53
2.6	ค่า Damping Ratio สำหรับ โครงสร้างอาคาร	62
3.1	ลักษณะทางกายภาพของเขื่อนแม่ทะลบหลวง	75
3.2	คุณสมบัติของดินที่บริเวณต่างๆ	75
3.3	แผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์	83
3.4	สรุปกรณีการวิเคราะห์เขื่อนแม่ทะลบหลวง	87
4.1	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งสองแบบ ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์	97
4.2	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งสองแบบ ภายใต้แรงพลศาสตร์	107
4.3	เปรียบเทียบอัตราส่วนความปลอดภัยจากแบบจำลองทั้งสองแบบ ก่อนและหลังแผ่นดินไหว	134

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า	
1.1	แบบจำลองทางเลขาคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	4
1.2	รูปร่าง และระดับน้ำของเขื่อนดินถม	5
1.3	เขื่อนดินถม กรณีไม่มีน้ำในเขื่อน	5
1.4	เขื่อนดินถม กรณีมีน้ำในเขื่อน	6
1.5	ผลจากการทดสอบการไหลของแบบจำลองเขื่อนย่อขนาดในห้องทดลอง	7
1.6	การไหลของน้ำผ่านเขื่อนจากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์	7
1.7	แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเขื่อน Mamloo จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์	8
1.8	รูปตัดของเขื่อน Tehri	9
1.9	อัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อน Tehri	9
1.10	การวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัย ของโปรแกรม DYNPROG	10
1.11	แผนที่แสดงตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่ตรวจสอบได้ในประเทศไทย และประเทศข้างเคียงตั้งแต่ปี 2453 ถึง 2542	11
1.12	แผนที่แสดงระดับความเสี่ยงแผ่นดินไหวและโซนเสี่ยงภัยตามเกณฑ์ของ UBC	12
2.1	รูปตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียว	16
2.2	รูปตัดเขื่อนดินถมแบ่งส่วน	16
2.3	แปลนส่วนประกอบของเขื่อนดินถม	21
2.4	รูปแบบการเคลื่อนตัวของดิน	23
2.5	ผลของมุมไคเลชันต่อขอบเขตวิบัติของแบบจำลองกลมมบ์	26
2.6	แผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหว	27
2.7	รูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะแผ่นบางๆ	28
2.8	การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Taylor	29
2.9	Stability Chart สำหรับการวิเคราะห์ลาดดินเนื้อเดียวด้วยวิธีของ Taylor	30
2.10	Stability Chart สำหรับดินกรณี $\phi = 0$ ด้วยวิธีของ Taylor	31
2.11	การวิเคราะห์ความมั่นคงด้วยวิธีโมเมนต์	32

2.12	การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธี Pseudo – Static	33
2.13	เส้นชั้นระดับความเร่งแนวราบที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนดิน Gradec Dam จากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM)	35
2.14	กราฟความเร่งและความเร็วได้จากการอินทิเกรตกราฟระยะเคลื่อนตัว	36
2.15	ความสัมพันธ์ค่า $\frac{k_{max}}{u_{max}}$ กับระยะห้องมวลดินเคลื่อนพังต่อความสูงของเขื่อนดิน	36
2.16	รูปตัดแบ่งชิ้นส่วนอีลิเมนต์ของเขื่อนหินถม Conwap	37
2.17	ความเร่งมากที่สุดที่เป็นไปได้จากแผ่นดินไหว (Maximum Credible Earthquake, MCE) ของเขื่อนหินถม Conwap	37
2.18	ระยะการเคลื่อนตัวที่เคยเกิดขึ้นของเขื่อนหินถม Conwap ที่จุด A และ B	38
2.19	ความเค้นและแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นที่จุด C	39
2.20	เส้นชั้นการทรุดตัวแนวตั้งของเขื่อนหินถม Conwap	39
2.21	เส้นชั้นระดับแรงดันน้ำใต้ดินจากความเร่ง MCE2	40
2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $m$ และ $\beta$ ของ Taylor (1937)	46
2.23	แรงที่กระทำต่อคันดินถล่ม ขณะเกิดแผ่นดินไหว และตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อการวิเคราะห์	46
2.24	ความสัมพันธ์ $M$ , มุมเสียดทาน $\phi$ และสัมประสิทธิ์ความเร่งแนวราบ $k_h$ ที่มุม $\beta = 15^\circ, 30^\circ$	47
2.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $m$ และ $\beta$ ปรับปรุงจาก Taylor (1937)	48
2.26	กราฟระหว่าง $F_\phi - F_c$ วิธี C-Phi reduction	49
2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดแบบ Elastic Perfectly Plastic	49
2.28	The Mohr – Coulomb yield surface ในเทอมของ Principle stress ( $C = 0$ )	51
2.29	แผนที่แผ่นเปลือกโลกและการเกิดแผ่นดินไหวที่กระจายอยู่ทั่วโลก	52
2.30	กราฟอัตราเร่งและเวลาของคลื่นแผ่นดินไหว ที่เคยบันทึกไว้ได้	56
2.31	แผนที่แสดงระดับความเสี่ยงแผ่นดินไหวและโซนเสี่ยงภัยตามเกณฑ์ของ UBC	57
2.32	คาบการสั่นไหวและค่าความถี่	60
2.33	คาบการสั่นไหวและค่าความถี่ตามธรรมชาติของโครงสร้าง	61
2.34	แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายเมื่อมีแรงกระทำ	63
2.35	แบบจำลองโครงสร้างชั้นเดียว	64
2.36	แบบจำลองโครงสร้างสองชั้น	65

2.37	การแบ่งช่วงเวลาสำหรับแก๊สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลข	70
2.38	รอยเลื่อนที่มีพลังบริเวณประเทศไทย	73
3.1	ภาพถ่ายทางอากาศโครงการอ่างเก็บน้ำแม่ทะลบลวง	76
3.2	รูปตัดตัวเขื่อนแม่ทะลบลวง ที่ระยะ กม. 300	77
3.3	ผลสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดความเร็วคลื่นไหวสะเทือนตามแนวเขื่อนหลัก	78
3.4	อิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้ในการวิเคราะห์ 15-Node และ 12 Stress Points	80
3.5	แบบจำลองเขื่อนแม่ทะลบลวง	80
3.6	แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์เขื่อนแม่ทะลบลวง	81
3.7	ที่ตั้งของเขื่อนแม่ทะลบลวง และรอยเลื่อนที่มีในภาคเหนือ	82
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pre dominant period กับ ระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว	83
3.9	แผนที่ค่าอัตราเร่งสูงสุดของแผ่นดินไหวในรอบ 2,475 ปี	84
3.10	แผนที่ประเภทของดินในประเทศไทยจากการวิเคราะห์ข้อมูล SRTM 30 โดยปรับปรุงข้อมูลประเภทดินในเขตกรุงเทพและปริมณฑลตามข้อมูลหลุมเจาะ	85
3.11	แรงแผ่นดินไหวที่นำมาใช้วิเคราะห์	86
4.1	แบบจำลองเขื่อนแม่ทะลบลวงที่ใช้วิเคราะห์ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์	88
4.2	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่สรวมจากแรงสถิตยศาสตร์	90
4.3	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่สรวมจากแรงสถิตยศาสตร์	90
4.4	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่สรวมจากแรงสถิตยศาสตร์	91
4.5	ตำแหน่งจุดระดับอ้างอิงแนวกลางเขื่อนของแบบจำลองทั้งสองชนิด	91
4.6	การเคลื่อนตัวที่ระดับความสูงต่างๆ จากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเขื่อน	92
4.7	เส้นชั้นระดับความเค้นเฉือนสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์	93
4.8	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักรวมที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์	95
4.9	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์	95
4.10	เส้นชั้นระดับแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์	96
4.11	เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์	97
4.12	ระนาบพิบัติของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองแบบภายใต้แรงสถิตยศาสตร์	98
4.13	แบบจำลองเขื่อนแม่ทะลบลวงจากโปรแกรมทางไฟไนท์อิลิเมนต์	99
4.14	ห้าโหมดแรกของการเคลื่อนตัวของเขื่อนแม่ทะลบลวง	100

4.15	เส้นชั้นระดับความเร่งเขื่อนภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน ที่เวลา 6.84 วินาที	103
4.16	เส้นชั้นระดับความเร่งเขื่อนภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน ที่เวลา 7.18 วินาที	103
4.17	เส้นชั้นระดับความเร่ง เขื่อนภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน ที่เวลา 16.55 วินาที	104
4.18	ความเร่งสูงสุดของแนวกลางเขื่อนที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเขื่อน ของแบบจำลอง Gravity turn-on	104
4.19	ความเร่งสูงสุดของแนวกลางเขื่อนที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเขื่อน ของแบบจำลอง Incremental	105
4.20	อัตราส่วนความเร่งสูงสุดของแนวกลางเขื่อนต่ออัตราเร่งสูงสุดที่ฐาน ที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเขื่อนของแบบจำลอง Gravity turn-on	106
4.21	อัตราส่วนความเร่งสูงสุดของแนวกลางเขื่อนต่ออัตราเร่งสูงสุดที่ฐาน ที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเขื่อนของแบบจำลอง Incremental	106
4.22	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1	108
4.23	รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1	108
4.24	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2	109
4.25	รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2	109
4.26	เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3	110
4.27	รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3	110
4.28	ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1	112
4.29	ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2	113
4.30	ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3	114
4.31	ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1	116
4.32	ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2	117
4.33	ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3	118
4.34	ระยะเคลื่อนตัวแนวราบที่ระดับความสูงเขื่อนหลังจากแผ่นดินไหว	120
4.35	ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งที่ระดับความสูงเขื่อนหลังจากแผ่นดินไหว	121
4.36	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลเขื่อนภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน ที่เวลา 6.84 วินาที	123

4.37	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สั้นเขื่อน ที่เวลา 7.18 วินาที	123
4.38	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่ยอดเขื่อน ที่เวลา 16.55 วินาที	124
4.39	ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหว	124
4.40	ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหว	125
4.41	ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหว	125
4.42	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหวหยุด	127
4.43	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหวหยุด	128
4.44	เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหวหยุด	129
4.45	แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1	130
4.46	แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2	130
4.47	แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3	131
4.48	เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนเชื่อมภายหลังแผ่นดินไหว EQ1	132
4.49	เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนเชื่อมภายหลังแผ่นดินไหว EQ2	133
4.50	เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนเชื่อมภายหลังแผ่นดินไหว EQ3	133
4.51	ระนาบพิบัติของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหว EQ1	135