ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา — วิศวกรรมโยธา

สาขา — **ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบและคุณสมบัติวัสดุตัวเขื่อนต่อความมั่นคงของเขื่อนดินถมขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

The Influence of Dam Components and Their Properties of Small and Medium Earth Dams in Thailand on Their Stability during Earthquake

นามผู้วิจัย นางสาวบัญชรี คำมา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวรางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบและคุณสมบัติวัสดุตัวเขื่อนต่อความมั่นคงของเขื่อนดินถมขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

The Influence of Dam Components and Their Properties of Small and Medium Earth Dams in Thailand on Their Stability during Earthquake

โดย

นางสาวบัญชรี คำมา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บัญชรี คำมา 2553: การศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบและคุณสมบัติวัสดุตัวเขื่อนต่อความมั่นคงของเขื่อนดินถมขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์, Ph.D. 327 หน้า

ปัจจุบันแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติที่ประชาชนให้ความสนใจ โดยเฉพาะกับโครงสร้างเขื่อน ทำให้งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากมีจำนวนมากและมีมาตรฐานการก่อสร้างที่ต่ำกว่าเขื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยเริ่มจากการจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อน โดยทำการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเขื่อนจำนวน 478 เขื่อน เพื่อให้ทราบถึงสถานการณ์เขื่อนในเบื้องต้น ทั้งนี้พบว่าเขื่อนขนาดกลาง 3 ลำดับแรกจาก 245 เขื่อน ที่มีความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวได้แก่ เขื่อนท่าทุ่งนา จ.กาญจนบุรี เขื่อนแม่ทะและเขื่อนแม่มอก จ.ลำปาง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบและคุณสมบัติดินถมตัวเขื่อนที่มีผลต่อการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยได้ศึกษารูปแบบเขื่อนที่มีการก่อสร้างในประเทศไทยจำนวน 79 เขื่อน รวมถึงเกณฑ์และมาตรฐานการก่อสร้างเขื่อนทั้งในและต่างประเทศ จึงสามารถจำลองเขื่อนเพื่อเป็นตัวแทนของเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทยได้จำนวน 10 หน้าตัด ควบคู่กับการรวบรวมข้อมูลดินจากบ่อยืมดินจากโครงการก่อสร้างเขื่อน 37 โครงการ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบ่งตามองค์ประกอบได้แก่ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความแปรปรวนพบว่า ค่า %COV ของ Permeability มีค่าสูงสุด ส่วนดัชนีความเหนียวอัตราส่วนช่องว่าง ค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักมี %COV น้อยลงมาตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนพบว่าค่าความเหนียวมีความแปรปรวนมากกว่าค่ามุมเสียดทาน ส่วนสำคัญของงานวิจัยคือการนำคุณสมบัติทางสถิตย์ข้างต้นมาประเมินค่า G_{max} เพื่อเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนในประเทศไทย ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า V_s จากผลการวิจัยกับค่า V_s ที่หาจากวิธีต่างๆ พบว่าค่า V_s จากกงานวิจัยให้ค่าระหว่างค่า V_s จากการทดสอบ SPT และจากการทดสอบในสนามโดยวิธี SASW สำหรับผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าค่า K_y ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีค่าระหว่าง 0.54g ถึง 0.63g และ 0.4g ถึง 0.43g ทั้งนี้ค่า K_y จะลดลงเมื่อเขื่อนสูงมากขึ้น จนถึงความสูงระดับหนึ่ง ค่า K_y ด้านเหนือน้ำจะต่ำกว่าท้ายน้ำ ซึ่งการที่เขื่อนมีค่า FS สูง ส่งผลให้ค่า K_y สูงด้วยเช่นกัน และจากการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์พบว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียวมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าเขื่อนดินถมแบ่งส่วนเมื่อวิเคราะห์ที่ PGA ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การทรุดตัวที่ได้จากสมการของ Swaisgood (1998) เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การทรุดตัวทางพลศาสตร์พบว่า เขื่อนดินถมขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทยมีการเคลื่อนตัวหรือมีความเสียหายไม่มากนักเมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่มี PGA ไม่เกิน 0.5g โดยเขื่อนต้องมีความแปรปรวนของคุณสมบัติทางสถิตย์ไม่เกินผลจากงานวิจัย

_____ / ____ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Buncharee Kumma 2010: The Influence of Dam Components and Their Properties of Small and Medium Earth Dams in Thailand on Their Stability during Earthquake. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suttisak Soralump, Ph.D. 327 pages.

Nowadays earthquake hazard is an issue that everyone is interested in especially when relates with large engineering structure such as dams. However, for large dams the design and construction standard are always specially well taken care. Therefore this thesis purposely focused on the safety of medium and small dams where the engineering standard is lower. The research started by performing the risk prioritization. The result of the top three rank of the dams that vulnerable to earthquake hazard, out of 245 dams are Tha Thung Na dam, Mae Tha dam and Mae Mok dam. The database of 478 dams has been collected during the process. Then the 79 sections of as-built drawing of dams in Thailand then simplify to ten different cross-sectional types. The soil properties of 37 projects were used for statistical analysis and the result presented according to dam zone which are homogeneous, core and shell zone. The result was found that the permeability of dam materials have the largest variability follow by plasticity index, void ratio, specific gravity and unit weight. While the cohesion has the larger uncertainty than the friction angel. The G_{max} functions were analyzed by using the average value of the soil properties by the empirical equation. When compared V_s which converted from G_{max}, it was found that the V_s calculated from SPT values gave the lowest, follow by V_s obtain from this research and from SASW test. For the pseudo-static analysis, found that K_y of upstream slope is higher than the value at down stream slope. The results of dynamic response analysis has shown that the horizontal and vertical displacement of homogeneous are larger than zoned dam. Finally this thesis found that the most of homogeneous and zoned dam in Thailand will be able to withstand horizontal ground accerelation up to 0.50g with minimal damage.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและให้กำลังใจตลอดมา บุญกุศลใดก็ตามจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จงมีผลแด่นายบุญมา คำมา และนางอมรา คำมา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคน

ขอขอบคุณทุกท่านที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ และอาจารย์ปรึกษาร่วม รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง ที่ให้ความเมตตาในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์ ดร.ธนู หาญพัฒนพานิชย์และคุณสุรสิทธิ์ อินทรประชา ผู้ทรงคุณวุฒิ และ รศ. ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล ประธานการสอบ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิประศาสตร์วิชาจนการเรียนสำเร็จดังเป้าหมาย

ขอขอบคุณคุณวสุ ลิขิตวรรณการ บริษัท ฟรอนเทียร์ เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแทนท์ส จำกัด อ.ชยพล เตชะฐิตินันท์ ผู้อำนวยการส่วนปฐพีกลศาสตร์ กรมชลประทาน และฝ่ายบำรุงรักษาโยธา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ Dr. James A. Bay และคุณสุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว ที่ให้ความรู้ในการทดสอบ SASW ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (ห้องเขื่อน) ทุกท่านที่ให้ความเมตตาและคอยช่วยเหลือในขณะที่กำลังศึกษา รวมถึงขอขอบคุณกำลังใจจากชาว GTE ทุกท่าน ที่มีน้ำใจต่อกันตลอดการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ด้วยบุญกุศลที่สร้างไว้ทั้งที่ระลึกได้และระลึกไม่ได้ผู้วิจัยขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลาย จงบันดาลให้ทุกท่านจงมีแต่ความสุข พ้นจากภัยอันตรายทั้งปวงด้วยเทอญ

ปัญชรี คำมา

กุมภาพันธ์ 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(20)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	110
อุปกรณ์	110
วิธีการ	110
ผลและวิจารณ์	134
สรุปและข้อเสนอแนะ	259
สรุป	259
ข้อเสนอแนะ	272
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	274
ภาคผนวก	283
ภาคผนวก ก ฐานข้อมูลเขื่อนในงานวิจัยและผลการจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อน	284
ภาคผนวก ข ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อนที่ใช้ในการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบ	301
ภาคผนวก ค รายชื่อโครงการก่อสร้างที่นำข้อมูลดินมาใช้ในงานวิจัย	305
ภาคผนวก ง Boring log ของเขื่อนที่ใช้วิเคราะห์คลื่นแรงเฉือน	307
ภาคผนวก จ บทความเรื่อง การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทย ต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว	319
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	327

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความลาดชันและประเภทดินของเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากที่มั่นคง	9
2	ความลาดชันและประเภทดินของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนขนาดเล็กวางบนฐานรากที่มั่นคง	11
3	หลักเกณฑ์เกี่ยวกับส่วนประกอบตัวเขื่อนดิน (ขนาดกลางขึ้นไป)	16
4	หลักเกณฑ์เกี่ยวกับการระบายน้ำภายในตัวเขื่อน	17
5	รายละเอียดการแบ่งขนาดของเขื่อนเก็บกักน้ำ	18
6	การจัดขนาดเขื่อนของ USACE	19
7	การจำแนกขนาดเขื่อนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก	20
8	ช่วงความซึมน้ำของดิน	25
9	ค่า K_0 ที่รวบรวมมาจากงานวิจัยต่างๆ	26
10	ค่า Poission ratio และโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชนิดต่างๆ	26
11	การประเมินความสำคัญของปัญหาด้วยวิธีปัจจัยร่วม	31
12	การคำนวณแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ	39
13	อัตราเฉลี่ยของการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ	40
14	การแบ่งพื้นที่เสี่ยงภัยตามความเร่งของพื้นดิน	44
15	ข้อมูลการทรุดตัวของเขื่อนจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว	54
16	ระบบการจำแนกระดับการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว	56
17	Natural Circular Frequency (β_n) สำหรับการสั่น 5 โหมดแรกของเขื่อนดิน	61
18	สรุปลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว	64
19	ความสามารถและลักษณะเด่นเปรียบเทียบของวิธีวิเคราะห์แบบต่างๆ	66
20	อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดของเขื่อนดินและเขื่อนหินในต่างประเทศ กรณีปกติและกรณีเกิดแผ่นดินไหว	67
21	เขื่อนที่ออกแบบโดยวิธี Pseudo static และเกิดการพิบัติ	69
22	ผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด อัตราส่วน-โมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนความหน่วงของวัสดุ	79

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนศรีนครินทร์	84
24	ความสัมพันธ์ของค่า $K_{2, max}$ กับ Void Ratio	88
25	ตัวอย่างค่า $K_{2, max}$ ที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าสำหรับ Granular material	88
26	ตัวอย่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินและวัสดุอื่นๆ (หน่วย m/s)	91
27	การจำแนกความแข็งของชั้นดินโดยมาตรฐาน NEHRP	93
28	การจำแนกความแข็งของชั้นดินโดยมาตรฐาน IBC	94
29	สมการเชิงประสบการณ์ในการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนสำหรับชั้นดินเหนียว	95
30	เปรียบเทียบคุณภาพการทดสอบการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์แบบต่างๆ	109
31	หลักการให้คะแนนเพื่อประเมินน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย	113
32	เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่ชั้นหินที่มี PGA ใกล้เคียงกัน	117
33	เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่ชั้นหินที่มี PGA > 0.5g	117
34	ข้อมูลเบื้องต้นของเหตุการณ์แผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์	117
35	องค์ประกอบของคลื่นที่ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoSignal	119
36	เกณฑ์การแบ่งองค์ประกอบตามชนิดดิน	120
37	จำนวนตัวอย่างแบ่งตามคุณสมบัติดินจากทุกโครงการ	121
38	รายชื่อเขื่อนและองค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT	122
39	สมการที่ใช้ในการหาคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT	123
40	สรุปสมการเชิงประสบการณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์	124
41	ขนาดขององค์ประกอบทั่วไปเพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์	126
42	ค่า Poisson ratio ที่ใช้ในงานวิจัย	130

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
43	สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน	132
44	สรุปคุณสมบัติและความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์	133
45	ความหมายของการให้ระดับคะแนนปัจจัย (R_{rating})	134
46	ระดับคะแนนภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว (R_{eq})	135
47	ระดับคะแนนปัจจัยชนิดของเขื่อน (R_{type})	136
48	การให้ระดับคะแนนปัจจัยอายุเขื่อน (R_{age})	136
49	การให้ระดับคะแนนความสูงของเขื่อน	137
50	การให้ระดับคะแนนปริมาณเก็บกัก	137
51	การให้ระดับคะแนนระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ	138
52	การให้ระดับคะแนนปัจจัยจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ	138
53	ค่าความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณสมบัติตัวเขื่อนของปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติ	147
54	ค่าคะแนนความสำคัญของปัจจัยรองของปัจจัยความสูญเสีย	147
55	ผลการจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว	149
56	องค์ประกอบของข้อมูลแผ่นดินไหวที่สำคัญจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Seismo signal	161
57	สรุปค่าพารามิเตอร์ด้านคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์	179
58	สรุปค่าพารามิเตอร์ด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์	196
59	การเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ	198

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
60	การเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ	199
61	คาบธรรมชาติของตัวเขื่อนดินถมที่ความสูงต่างๆ	220
62	สรุปค่าความปลอดภัยในสภาวะสถิตย์ของเขื่อนดินถม	222
63	ค่า Yield acceleration และค่า Seismic coefficient ของเขื่อน	238
64	การคำนวณการทรุดตัวโดยสมการเชิงประสบการณ์ของ Swaisgood	258
65	สรุปผลการกระจายตัวและคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ได้ในงานวิจัย	261
66	สรุปผลการกระจายตัวและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้ในงานวิจัย	262

ตารางผนวกที่

ก1	ฐานข้อมูลเขื่อนในงานวิจัย	285
ก2	ผลการจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว	295
ข1	ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อนที่ใช้ในการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบ	302
ค1	โครงการก่อสร้างที่นำข้อมูลดินมาใช้ในงานวิจัยจำนวน 37 โครงการ	306

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เขื่อนดินรูปแบบต่างๆ	7
2	เขื่อนดินถมเนื้อเดียว	7
3	เขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่ดัดแปลงเพื่อให้สามารถระบายน้ำในตัวเขื่อน	8
4	เขื่อนดินถมแบ่งส่วน	10
5	จำนวนเขื่อนดิน (%) ทั่วโลก แบ่งตามช่วงเวลาที่ก่อสร้าง	12
6	การพิบัติของเขื่อนตามช่วงอายุหลังก่อสร้างเสร็จ	20
7	Phases of a soils-water system	24
8	Plasticity Chart	24
9	ลักษณะของ Mohr-Coulomb envelopes ของการทดสอบ Triaxial แบบต่างๆ	29
10	รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย	37
11	การเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณโดยวิธีต่างๆ	40
12	แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย	42
13	เส้นชั้นค่าอัตราเร่งของพื้นดิน บริเวณประเทศไทยและใกล้เคียง	43
14	ความเสียหายของเขื่อน Shi-Kang ประเทศไต้หวัน	49
15	รอยแตกตามแนวแกนเขื่อนที่เกิดจากการยุบตัวของสันเขื่อนในแนวดิ่งของเขื่อน Fatehgarh ประเทศอินเดีย	49
16	เขื่อน Lower San Fernando พิบัติจาก Liquefaction ในปี 1971	50
17	รูปแบบการเคลื่อนที่ของเขื่อนดิน	61
18	รูปแบบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น	63
19	แรงที่กระทำบนระนาบการพิบัติโดยการเคราะห์ด้วยวิธี Pseudo-static	68
20	Seismic analysis framework	72
21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแบบจำลอง Elastic-Plastic	73
22	แนวคิดเปรียบเทียบระหว่างการลื่นไถลของลาดชันกับ Rigid block บนลาดชัน	74
23	แรงที่กระทำต่อ Rigid block ในสภาวะสถิตและพลศาสตร์	74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ส่วนประกอบของเส้นทางเดินหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร	76
25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสเฉือน ความเครียดเฉือนและโมดูลัสเฉือนสูงสุด	77
26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัส อัตราส่วนความหน่วงและความเครียด-เฉือน	78
27	อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของหินชนิดต่างๆ	80
28	อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของเขื่อน Makio	81
29	อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินทราย	82
30	ความสัมพันธ์ของดัชนีความเหนียวที่มีผลอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินเหนียว	83
31	ค่า $K_{2,max}$ สำหรับทรายที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ	87
32	ค่า $K_{2,max}$ สำหรับทรายแน่นและกรวดที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ	87
33	Seismic cross-hole test	96
34	การทดสอบ Seismic down-hole และการทดสอบ Seismic up-hole	97
35	วิธีการทดสอบ SASW	97
36	ตำแหน่งทดสอบ SASW (S3)	98
37	ลักษณะความเร็วคลื่นแรงเฉือนของตำแหน่งที่ทดสอบ SASW (S3)	99
38	ลักษณะโมดูลัสเฉือนสูงสุดของตำแหน่งที่ทดสอบ SASW (S3)	99
39	เปรียบเทียบผลการทดสอบโดยวิธี Down-hole และ SASW	100
40	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉือนบริเวณ Ch. 554 และ Ch.530 ของเขื่อน-วชิราลงกรณ โดยวิธี Down-hole และ Cross-hole ในปี 1984 และวิธี SASW ในปี 2006	101
41	ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จากการ-ทดสอบ MASWM	102

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	หลักการทดสอบ Cyclic triaxial	103
43	สภาวะของการให้แรงดันในเครื่องมือ Torsional shear	104
44	เครื่องมือการทดสอบ Resonant Column แบบ Fixed ที่ฐานและบิดด้านบน	105
45	ผลการทดสอบดินเหนียวเปรียบเทียบระหว่างวิธี Resonant column และ Cyclic triaxial	106
46	หลักการทดสอบ Bender element	107
47	อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนที่แรงดันต่างๆ จากการทดสอบโดย Bender element	108
48	แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยส่วนการจัดลำดับความเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว	111
49	ความสัมพันธ์ในฐานข้อมูลเขื่อน	112
50	แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยส่วนการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์	115
51	โปรแกรม SeismoSignal ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหว	118
52	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Horizontal (H1R)	126
53	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Vertical (H2R)	127
54	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Vertical (H2C)วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ	127
55	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3R)	127
56	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-1) วางบนฐานรากหินแข็ง แทรกด้วยชั้นหินผุ	128
57	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-2) วางบนฐานรากหินแข็ง แทรกด้วยชั้นหินผุ	128

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-3) วางบนฐานรากหินแข็ง แทรกด้วยชั้นหินผุ	128
59	หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วนวางบนฐานรากหินแข็ง (Z1R)	129
60	หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วน (Z1C-1) วางบนฐานรากหินแข็ง แทรกด้วยชั้นหินผุ	129
61	หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วน (Z1C-2) วางบนฐานรากหินแข็ง แทรกด้วยชั้นหินผุ	129
62	ตำแหน่งเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กบนแผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย	140
63	การกระจายของเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กตามเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว	141
64	จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามชนิดของเขื่อน	142
65	จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามช่วงอายุ (ข้อมูลปีพ.ศ. 2552)	142
66	จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามความสูง	143
67	จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามปริมาณเก็บกัก	144
68	จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามช่วงระยะทางระหว่างหมู่บ้านกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ	144
69	จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบในแต่ละเขื่อน	145
70	ตำแหน่งเขื่อนที่มีความเสี่ยง 10 อันดับแรก บนแผนที่ขอบเขตบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย	151
71	ชนิดของเขื่อนจากแบบก่อสร้างที่ศึกษา	152
72	จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจำแนกตามความสูงระดับต่างๆ	153
73	จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจำแนกตามความสูงระดับต่างๆ	153
74	จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างสันเขื่อน	154
75	จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของแกนเขื่อนด้านบนที่ติดกับสันเขื่อน	154
76	จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของชั้นกรองในแนวราบ	155
77	จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของชั้นกรองแบบ Chimney	155

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
78	จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านเหนือน้ำ	156
79	จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านท้ายน้ำ	157
80	จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านเหนือน้ำ	157
81	จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านท้ายน้ำ	158
82	สัญลักษณ์แทนกรณีการวิเคราะห์ที่มีองค์ประกอบต่างๆ	159
83	สัญลักษณ์แทนกรณีการวิเคราะห์ที่มีวัสดุต่างๆ	159
84	รูปทรงทั่วไปของหน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่ใช้ในการวิเคราะห์	159
85	รูปทรงทั่วไปของหน้าตัดเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์	160
86	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Northern Calif 1975 (PGA=0.115g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	162
87	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lytle Creek 1970 (PGA=0.162g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน(ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	162
88	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Loma Prieta 1989 (PGA=0.124g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	163
89	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Whitter Narrows 1987 (PGA=0.166g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	163
90	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Superstitn Hills 1987 (PGA=0.682g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	164
91	ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Loma Prieta 1989 (PGA=0.605g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)	164

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Homogeneous zone	166
93	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Core zone	166
94	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Shell zone	167
95	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Homogeneous zone	168
96	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Core zone	168
97	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Shell zone	169
98	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Homogeneous zone	170
99	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Core zone	170
100	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Shell zone	171
101	การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Homogeneous zone	172
102	การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Core zone	172
103	การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Shell zone	173
104	การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Homogeneous zone	174
105	การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Core zone	174
106	การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Shell zone	175
107	การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Homogeneous zone	176
108	การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Core zone	176
109	การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Shell zone	177
110	การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Homogeneous zone	177
111	การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Core zone	178
112	การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Shell zone	178

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
113	ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Direct shear	180
114	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Homogeneous zone)	181
115	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Core zone)	181
116	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Shell zone)	182
117	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Homogeneous zone)	182
118	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Core zone)	183
119	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Shell zone)	183
120	ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial (UU)	184
121	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Homogeneous zone)	185
122	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Core zone)	185
123	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Shell zone)	186
124	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Homogeneous zone)	186
125	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Core zone)	187
126	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Shell zone)	187
127	ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial (CU)	188
128	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Homogeneous zone)	189
129	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Core zone)	189

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
130	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Shell zone)	190
131	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Homogeneous zone)	190
132	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Core zone)	191
133	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Shell zone)	191
134	ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial ($\overline{CU}$)	192
135	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Homogeneous zone)	193
136	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Core zone)	193
137	การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Shell zone)	194
138	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Homogeneous zone)	194
139	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Core zone)	195
140	การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Shell zone)	195
141	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	201
142	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	201
143	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	202
144	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone	203
145	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone	203
146	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone	204

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
147	ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Homogeneous zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)	205
148	ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Core zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)	206
149	ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Shell zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)	206
150	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนลำปาว	208
151	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนบางวาด	208
152	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนแก่งกระจาน	209
153	เปรียบเทียบความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone จากสมการของ Ohta and Goto (1978) กับค่าจากสมการเชิงประสบการณ์	209
154	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนลำปาว	210
155	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนบางวาด	210
156	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนแก่งกระจาน	211
157	เปรียบเทียบคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone จากสมการของ Ohta and Goto (1978) กับค่าจากสมการเชิงประสบการณ์	211
158	คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว	212
159	คลื่นแรงเฉือนของ Core zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย	214
160	คลื่นแรงเฉือนของ Shell zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย	214
161	คลื่นแรงเฉือนของ Homogeneous zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย	215
162	เปรียบเทียบคลื่นแรงเฉือนของ SRK dike4 ระหว่างสมการเชิงประสบการณ์จากค่า SPT และจากการทดสอบ SASW	216

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
163	ความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	217
164	ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ σ'_m ขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	218
165	ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับความสูงเขื่อน	221
166	การกระจายตัวของคาบธรรมชาติของเขื่อนและคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัย	221
167	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H1R	224
168	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H1R	224
169	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H2R	224
170	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H2R	225
171	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H2C	225
172	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H2C	225
173	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3R	226
174	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-1	226
175	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-1	226
176	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-2	227
177	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-2	227
178	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-3	227
179	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-3	227
180	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1R	228
181	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1R	228
182	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-1	228
183	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-1	229
184	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-2	229
185	σ'_m ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-2	229

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
186	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H1R	230
187	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H2R	230
188	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H2C	230
189	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3R	231
190	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-1	231
191	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-2	231
192	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-3	231
193	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1R	232
194	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1C-1	232
195	แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1C-2	232
196	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H1R	233
197	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H2R	234
198	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H2C	234
199	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3R	235
200	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-1	235
201	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-2	236
202	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-3	236
203	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1R	237
204	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1C-1	237
205	ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1C-2	238
206	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M1	239
207	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M2	240
208	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M3	240
209	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M1	241

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
210	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M2	241
211	การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M3	242
212	Mode shape ของการเคลื่อนตัวในแนวราบของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อน-ดินถมแบ่งส่วน	243
213	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H1R	244
214	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H1R	244
215	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H2R	245
216	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H2R	245
217	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3R	245
218	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3R	246
219	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H2C	246
220	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H2C	246
221	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-1	247
222	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-1	247
223	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-2	247
224	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-2	247
225	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-3	248
226	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-3	248
227	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1R	249
228	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1R	249
229	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-1	249
230	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-1	249
231	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-2	250
232	แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-2	250
233	Shear strain ของเขื่อน H1R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	251

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
234	Shear strain ของเขื่อน H2R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	251
235	Shear strain ของเขื่อน H3R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	251
236	Shear strain ของเขื่อน Z1R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	252
237	Shear strain ของเขื่อน H2C จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	253
238	Shear strain ของเขื่อน H3C จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	253
239	Shear strain ของเขื่อน H3C-1 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	254
240	Shear strain ของเขื่อน H3C-2 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	254
241	Shear strain ของเขื่อน Z1C-1 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	255
242	Shear strain ของเขื่อน Z1C-2 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)	255
243	บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน H2R จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว	256
244	บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1R จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว	256
245	บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1C-1 จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว	257
246	บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1C-2 จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว	257
247	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	263
248	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	264
249	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ	264
250	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและ Yield Acceleration	266
251	เส้นชั้นความสูงของ ของเขื่อนก่อนการเก็บน้ำ	267

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

252	เส้นชั้นความสูงของ ของเขื่อนระหว่างการเก็บน้ำ	267
253	การเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันบริเวณสันเขื่อนดินถมแบ่งส่วน	268
254	รูปร่างการสั่นไหวของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวเปรียบเทียบที่ PGA ต่างๆ	269
255	รูปร่างการสั่นไหวของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนเปรียบเทียบที่ PGA ต่างๆ	269
256	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นหินแข็ง	270
257	σ'_m ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ	270
258	ความเครียดเฉือนของเขื่อน H3C-1 จากแผ่นดินไหวที่มี PGA=0.682g	271
259	ความเครียดเฉือนของเขื่อน Z1C-1 จากแผ่นดินไหวที่มี PGA=0.625g	271
260	การทรุดตัวของเขื่อนที่วิเคราะห์ทางพลศาสตร์เปรียบเทียบกับสมการเชิง-ประสบการณ์	272

ภาพผนวกที่

ง1	Boring log ของเขื่อนแก่งกระจาน (SPT1)	308
ง2	Boring log ของเขื่อนแก่งกระจาน (SPT2)	309
ง3	Boring log ของเขื่อนบางวาด (ADH2)	310
ง4	Boring log ของเขื่อนบางวาด (ADH3)	312
ง5	Boring log ของเขื่อนลำปาว (DH2)	314
ง6	Boring log ของเขื่อนลำปาว (DH6-1)	316
ง7	Boring log ของเขื่อนสิริกิติ์ (เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ Dike 4)	317
จ1	บทความเรื่อง การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว	320

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β_n	Natural circular frequency ของเขื่อนดิน
γ	หน่วยน้ำหนัก
γ_c	ความเครียดที่จุดอ้างอิง
γ_s	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง
γ_t	หน่วยน้ำหนักทั้งหมด
ε	ความเครียดในแนวแกน (Axial strain)
$\Delta\sigma_d$	แรงวัฏจักรที่ให้ตัวอย่างดิน
ν	Poission's ratio
ξ	Damping ratio
ρ	ความหนาแน่นของดิน
σ_1	Major principal stress
σ_2	Intermediate principal stress
σ_3	Minor principal stress
σ'_{ij}	ขนาดและสภาวะของหน่วยแรง
σ'_m	Mean effective stress
σ'_{VO}	Effective overburden pressure
τ	แรงเฉือนที่กระทำกับมวลดิน
τ_{CYC}	Cyclic shear stress
τ_f	หน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่มวลดินสามารถรับได้
ϕ	มุมเสียดทานของดิน
A_{loop}	พื้นที่ของ Hysteresis loop
a_h	ความเร่งจากแรงสั่นสะเทือนในแนวราบ
a_v	ความเร่งจากแรงสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง
c	ความเหนียวของดิน
CRR	Cyclic resistance ratio
CSR	Cyclic stress ratio

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

E	Modulus of elasticity
e	อัตราส่วนช่องว่าง
F_h	แรงที่กระทำในแนวราบ
F_v	แรงที่กระทำในแนวดิ่ง
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน่มถ่วงของโลก
G_{max}	ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus)
GS	ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity)
G_{sec}	ค่าโมดูลัสแรงเฉือนจาก Hysteresis loop
H	ความสูงของเขื่อน
k	สัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในดิน (Coefficient of permeability)
K_h	ค่าสัมประสิทธิ์การสั่นสะเทือนในแนวราบ
K_v	ค่าสัมประสิทธิ์การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง
K_y	Yield acceleration
m	Mode shape ของเขื่อนดิน
M	ความลาดชันของเส้นการพิบัติ (Critical state line)
M_D	โมเมนต์ที่ทำให้มวลดินเคลื่อนตัว (Driving moment)
M_R	โมเมนต์ต้านทานของมวลดิน (Resisting moment)
OCR	Over consolidation ratio
PI	ดัชนีความเหนียว
R	ระดับคะแนนของปัจจัย
RF	Resonance factor
	$= 2.0 \cdot D^{-0.35}$ สำหรับเขื่อนดินถม
	$= 8.0 \cdot D^{-0.35}$ สำหรับเขื่อน Hydraulic fill
	$=0.12 \cdot D^{0.61}$ สำหรับเขื่อนหินถม
S	ผลรวมของคะแนนความเสี่ยงทั้งหมด
SEF	Seismic energy factor มีค่า $e^{(0.72M+6.28PGA-9.1)}$
t	Time

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_n	Natural period
T_p	Predominant period
V_t	ปริมาตรทั้งหมดในมวลดิน
V_S	Shear wave velocity
V_v	ปริมาตรของช่องว่างในมวลดิน
V_s	ปริมาตรของดินแห้ง
W	คะแนนความสำคัญของปัจจัย
W_D	พลังงานที่สูญเสียไป
W_S	พลังงานความเครียดสูงสุด (Maximum strain energy)
W_{opt}	ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะที่ทำให้การบดอัดมีความแน่นสูงสุด
W_s	น้ำหนักของดินแห้ง
w	ปริมาณความชื้นในมวลดิน (%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบและคุณสมบัติวัสดุตัวเขื่อนต่อความมั่นคงของเขื่อนดินถมขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

The Influence of Dam Components and Their Properties of Small and Medium Earth Dams in Thailand on Their Stability during Earthquake

คำนำ

เขื่อนเป็นโครงสร้างสำคัญทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์ในด้านการชลประทาน เกษตรกรรม เศรษฐกิจ และด้านพลังงาน ประเทศไทยมีเขื่อนไว้ใช้งานจำนวนมากตั้งอยู่ตามภาคต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กเพื่อการเกษตรกรรมและชลประทาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ก่อสร้างจากดินวัสดุในพื้นที่นั้นๆ สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ เขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วน

เหตุการณ์ Sichuan earthquake ขนาด M_w = 7.9 ในวันที่ 12 พฤษภาคม ปี 2008 สร้างความสูญเสียอย่างมากให้กับประเทศจีน โดยเฉพาะการเสียชีวิตของประชากรอย่างน้อย 68,000 คน และเขื่อนประมาณ 400 เขื่อนได้รับความเสียหาย ในจำนวนนี้เขื่อนดินถมขนาดเล็กได้รับความเสียหายมากที่สุดเนื่องจากไม่มีการออกแบบต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว และในปี 2001 เหตุการณ์ Bhuj earthquake ขนาด M_w = 7.6 ในประเทศอินเดีย ทำให้เขื่อนดินถมประมาณ 240 เขื่อนได้รับความเสียหาย แต่ไม่มีเขื่อนใดพิบัติอย่างสมบูรณ์

ถึงแม้ประเทศไทยจะตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวระดับต่ำ แต่พิบัติภัยนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วสร้างความเสียหายได้มาก เนื่องจากเหตุการณ์จะเกิดแบบทันทีทันใดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยที่ไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า ในอดีตเขื่อนที่ได้รับการออกแบบเพื่อต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวกระทำเฉพาะเขื่อนใหญ่กับเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กบางส่วน จึงมีเขื่อนขนาดกลางและเขื่อนขนาดเล็กที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวจำนวนหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการจัดลำดับความเสี่ยง (Priority) ของเขื่อนเพื่อคัดกรองเขื่อนที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแรงกระทำแผ่นดินไหวจากปัจจัยพื้นฐาน ประโยชน์ที่ได้นอกจากจะทราบเขื่อนที่มีความเสี่ยงสูงเป็นลำดับต้นแล้ว หน่วยงานเจ้าของเขื่อนจะได้เฝ้าระวังและบำรุงรักษาเขื่อนให้มีสภาพสมบูรณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ต่อไป ไม่เพียงเท่านั้นงานวิจัยนี้ยังเล็งเห็นความสำคัญของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการต้านทางแรงกระทำแผ่นดินไหวได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุถมตัวเขื่อนและองค์ประกอบเขื่อน จึงศึกษาคุณสมบัติทางสถิตย์ของวัสดุถมตัวเขื่อนที่มีการก่อสร้างในประเทศไทย เพื่อการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ เพื่อสร้างแนวทางด้านคุณสมบัติของวัสดุทางพลศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองความปลอดภัยเขื่อนเมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ (Dynamic response analysis) โดยใช้สมการเชิงประสบการณ์ จากนั้นจะทำการศึกษาองค์ประกอบของเขื่อนที่ส่งผลต่อความปลอดภัยโดยวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อจัดทำฐานข้อมูลพื้นฐานของเขื่อนในประเทศไทย

2. เพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนขนาดกลางและเล็กในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

3. ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินบดอัดตัวเขื่อน

4. เพื่อสร้างแนวทางด้านคุณสมบัติของวัสดุทางพลศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ สำหรับเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทย

5. เพื่อศึกษาองค์ประกอบของเขื่อนที่ส่งผลต่อความปลอดภัยเมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว

ขอบเขตการวิจัย

1. การจัดลำดับความเสี่ยงทำเฉพาะเขื่อนที่มีข้อมูลเพียงพอ จำนวน 245 เขื่อน

2. การจัดลำดับความเสี่ยงไม่พิจารณาปัจจัยที่เกิดจากอาคารประกอบเขื่อนและความสูญเสียอันเนื่องมาจากการพิบัติของดินรอบอ่างเก็บน้ำ

3. การวิเคราะห์คัดเลือกเขื่อนดินถมเนื้อเดียว สูงไม่เกิน 15 เมตร และ เขื่อนดินถมแบ่งส่วน สูงไม่เกิน 30 เมตร เมื่อรวมระยะเผื่อและไม่รวมร่องแกนเขื่อน ตามมาตรฐานของกรมชลประทาน โดยวิเคราะห์เมื่อเขื่อนมีน้ำอยู่ในระดับเก็บกักปกติ

4. โมดูลัสเฉือนสูงสุดคำนวณจากสมการเชิงประสบการณ์โดย Hardin and Drnevich (1972), Hardin and Black (1966, 1968) และ Xenaki and Athanasopoulos (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเขื่อนทางพลศาสตร์ วิเคราะห์กรณีเขื่อนตั้งอยู่บนฐานรากหินที่มีความมั่นคง

6. การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ซึ่งแบ่งเป็นการวิเคราะห์หน่วยแรงเบื้องต้นใช้ทฤษฎี Linaer elastic และ Elastic-plastic ส่วนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ใช้ทฤษฎี Equivalent linear ทั้งนี้การวิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะสถิตย์ใช้วิธี Limit equilibrium

7. โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยใช้ชุดของ Geo studio 2007 ได้แก่ โปรแกรม Sigma/W สำหรับวิเคราะห์แรงกระทำในเบื้องต้นและวิเคราะห์การเสียรูปทางพลศาสตร์, โปรแกรม Slope/W สำหรับวิเคราะห์ความปลอดภัยในสภาวะสถิตย์ และ โปรแกรม Quake/W สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์

8. การวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ อยู่ภายใต้การวิเคราะห์จากคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินถมตัวเขื่อนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

9. แผ่นดินไหวในงานวิจัยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่วัดในแนวราบ (Horizontal component) จากหน่วยงาน Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) ซึ่งเป็นข้อมูลค่ามากจากแกนในแนวทิศเหนือถึงทิศใต้ หรือทิศตะวันออกถึงทิศตะวันตกของเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือนเท่านั้น โดยคัดเลือกคลื่นที่มี Ground motion parameter คือค่า $\frac{V_{\max}}{A_{\max}}$ ไม่เกิน 0.138 ซึ่งเป็นแผ่นดินไหวที่วัดได้บนชั้นหินหรือ ดินแข็งและมี Predominant period ใกล้เคียงกับ Natural period ของเขื่อน

10. การพิบัติของเขื่อนทางพลศาสตร์ไม่พิจารณารวมถึง Liquefaction

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

วิศวกรรมเขื่อนดิน

เขื่อนดินถม

กรมชลประทาน (2545) กล่าวว่า เขื่อนดินถมเป็นอาคารหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของอาคารหัวงานเขื่อนเก็บกักน้ำ โดยอาคารประเภทนี้จะก่อสร้างปิดลำน้ำเดิม เพื่อทำหน้าที่เก็บกักน้ำที่ไหลในลำน้ำเดิมได้ตามต้องการ ซึ่งจะทำให้ด้านเหนือน้ำมีสภาพเป็นอ่างเก็บน้ำเพื่อกิจการต่างๆ เช่น การเกษตรกรรม และการอุปโภคบริโภค เป็นต้น

วรากร (2546) นิยามว่า เขื่อนดินถม คือ เขื่อนที่ก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นดินหรือหินเป็นส่วนใหญ่ นำมาบดอัดเป็นตัวเขื่อน ซึ่งมักมีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีฐานผายกว้างออกไป และส่วนสันแคบลงโดยมีขนาดกว้างราว 5 ถึง 15 เมตร วัสดุที่ใช้จะพยายามใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ใกล้บริเวณสถานที่ก่อสร้างมากที่สุด เพราะต้องใช้ในปริมาณมาก เพื่อสะดวกในการขนส่งวัสดุ เขื่อนถมเหมาะกับการก่อสร้างในช่องเขาที่ผายกว้าง ไหล่เขาไม่ชันมากนัก ลักษณะของหินฐานรากไม่จำเป็นต้องแข็งแรงมากเหมือนเขื่อนคอนกรีต จึงเป็นแบบที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาในประเทศไทยมาก ดังนั้นเขื่อนส่วนใหญ่ในประเทศไทยจึงเป็นเขื่อนถม

เขื่อนดินถมเนื้อเดียว (Homogeneous dam)

เขื่อนดินถมเนื้อเดียวเป็นเขื่อนที่ก่อสร้างจากการบดอัดวัสดุชนิดเดียวกัน ส่วนมากจะเป็นดินในกลุ่มของ GC, SC, ML, CL (Unifined Soil Classification System, USCS) ซึ่งสามารถบดอัดได้ดี มีความแข็งแรงและทึบน้ำพอสมควร เขื่อนชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญได้แก่ ชั้นกรองน้ำ (Filter) หรือระบายน้ำ (Drain) ทางด้านท้ายน้ำที่ตีนเขื่อน หรือภายในตัวเขื่อน เพื่อเป็นทางระบายป้องกันการกัดเซาะที่เกิดจากน้ำไหลผ่านตัวเขื่อนหรือฐานราก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ไม่มีความแข็งแรงมากนัก จึงไม่ควรก่อสร้างเป็นเขื่อนขนาดใหญ่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขื่อนถมแบ่งส่วน (Zoned dam)

เขื่อนถมแบ่งส่วนใช้ในกรณีเขื่อนถมที่ค่อนข้างใหญ่ มักจะใช้วัสดุหลายชนิดมาประกอบกันโดยเลือกใช้วัสดุให้มีประสิทธิภาพสูงสุดตามศักยภาพให้เหมาะสมกับองค์ประกอบเช่น ใช้ดินเหนียวเป็นส่วนที่ทึบน้ำ เรียกว่า “แกนเขื่อน” (Core zone) ดินปนกรวดหรือหินที่มีความแข็งแรงมากกว่ามาใช้ในส่วนตัวเขื่อน เพื่อให้เกิดความมั่นคงเรียกว่า “ส่วนเปลือก” (Shell) ในกรณีที่มีวัสดุมากกว่า 2 ชนิด และอาจแบ่งเป็นส่วนย่อยๆได้

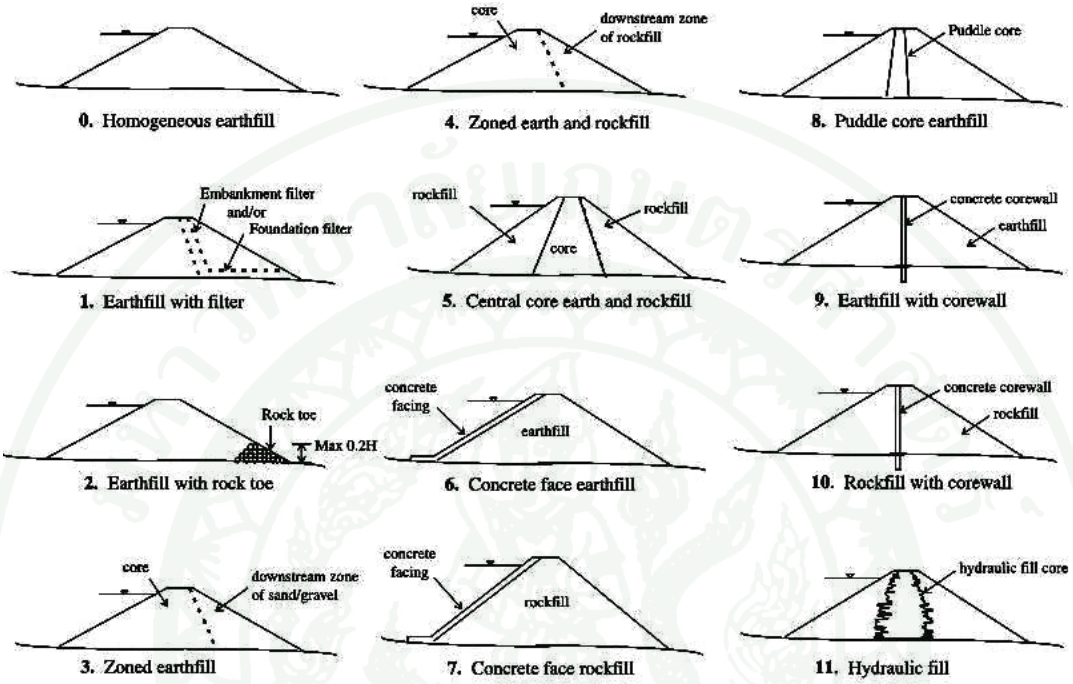
Foster *et al.* (1998, 1999) แบ่งเขื่อนดินถมเป็น 12 ประเภท โดยยึดหลักการแบ่งส่วนดินถม (Zoned), รายละเอียดของชั้นกรอง, ร่องแกนเขื่อน (Foundation cutoff), ธรณีฐานรากและแกนเขื่อน แสดงดังภาพที่ 1 ได้แก่

1) Homogeneous earthfill
2) Earthfill with fillter
3) Earthfill with rock toe
4) Zoned earthfill
5) Zoned earth and rockfill
6) Central core earth and rockfill
7) Concrete face earthfill
8) Concrete face rockfill
9) Puddle core earthfill
10) Earthfill with core wall
11) Rockfill with core wall
12) Hydraulic fill

United State Bureau of Reclamation หรือ USBR (1987) แนะนำการออกแบบความลาดชันและประเภทของดินที่ควรใช้ก่อสร้างเขื่อนดินถมเนื้อเดียวขนาดเล็กสูงไม่เกิน 15 เมตร เก็บน้ำไม่เกิน 0.76 ล้านลูกบาศก์เมตร ที่วางบนฐานรากที่มั่นคง มีหน้าตัดดังภาพที่ 2 ส่วนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีการปรับให้มีการระบายน้ำภายในตัวเขื่อนแบบต่างๆไม่ว่าจะเป็นการระบายน้ำที่มีชั้นกรอง

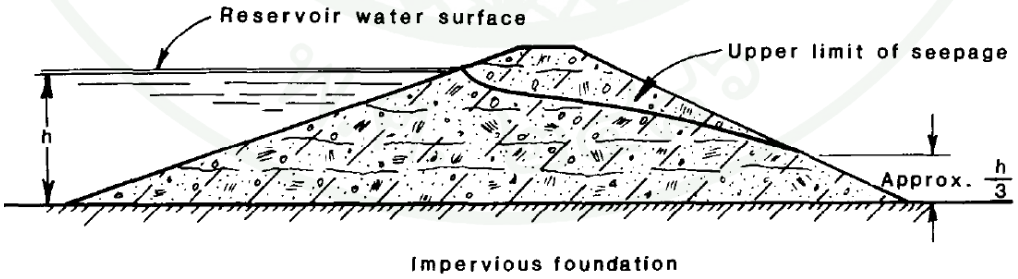
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบ Rock toe, Horizontal drain และ Chimney drain หน้าตัดดังภาพที่ 3 ซึ่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 เขื่อนดินรูปแบบต่างๆ

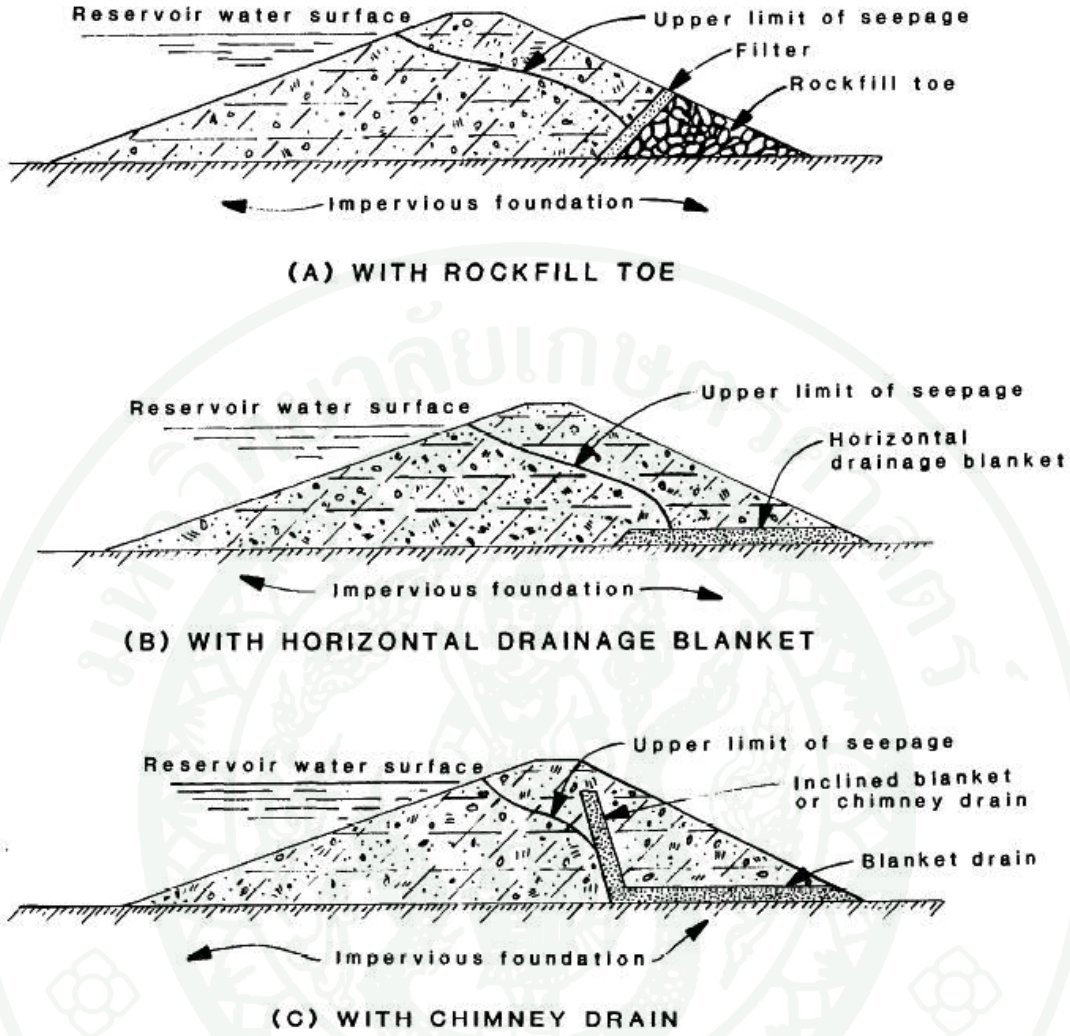
ที่มา: Foster *et al* (1998, 1999)



ภาพที่ 2 เขื่อนดินถมเนื้อเดียว

ที่มา: USBR (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 เขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่ดัดแปลงเพื่อให้สามารถระบายน้ำในตัวเขื่อน

ที่มา: USBR (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ความลาดชันและประเภทดินของเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากที่มั่นคง

Cases	Type	Purpose	Subject to Rapid Drawdown (1)	Soil Classification (2)	Upstream slope	Downstream slope
A	Homogeneous or Modified-Homogeneous	Detention or Storage	No	GW, GP, SW, SP	Pervious, Unsuitable	
				GC, GM, SC, SM	2.5:1	2:1
				CL, ML	3:1	2.5:1
				CH, MH	3.5:1	2.5:1
B	Modified-Homogeneous	Storage	Yes	GW, GP, SW, SP	Pervious, Unsuitable	
				GC, GM, SC, SM	3:1	2:1
				CL, ML	3.5:1	2.5:1
				CH, MH	4:1	2.5:1

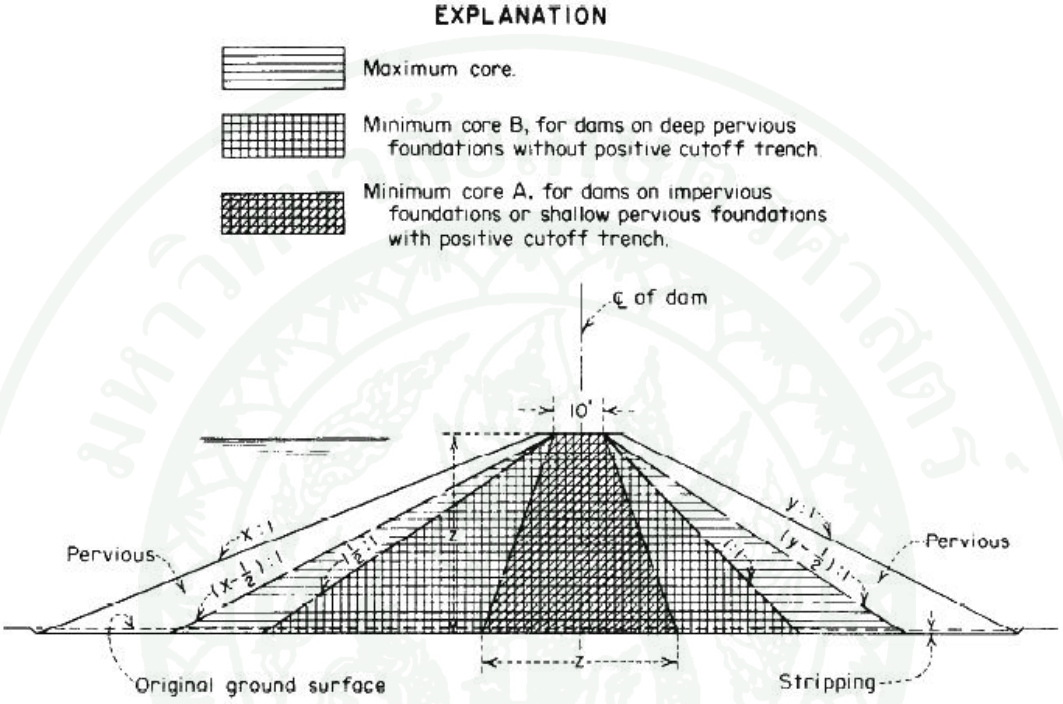
(1) Draw down rates of 6 inches or more per day after prolonged storage at high reserviour levels

(2) OL and OH soils are not recommended for major portions of homogenous earthfill dams. Pt soils are unsuitable

ที่มา: USBR (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับเขื่อนดินถมแบ่งส่วนขนาดเล็กที่มีแกนเขื่อนกว้างดังภาพที่ 4 USBR (1987) แนะนำความลาดชันและประเภทของดินที่ใช้ก่อสร้างดังตารางที่ 2



ภาพที่ 4 เขื่อนดินถมแบ่งส่วน

ที่มา: USBR (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 ความลาดชันและประเภทดินของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนขนาดเล็กวางบนฐานรากที่มั่นคง

Type	Purpose	Subject to rapid drawdown [2]	Shell material classification	Core material classification [3]	Upstream slope	Downstream slope
Zoned with minimum core A [1]	Any	Not critical 4	Rockfill, GW, GP, SW or SP	GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH or MH	2:1	2:1
Zoned with minimum core [1]	Detention or Storage	No	Rockfill, GW, GP, SW or SP	GC,GM	2:1	2:1
				SC, SM	2.25:1	2.25:1
				CL, ML	2.5:1	2.5:1
				CH, MH	3:1	3:1
Zoned with minimum core [1]	Storage	Yes	Rockfill, GW, GP, SW or SP	GC,GM	2.5:1	2:1
				SC, SM	2.5:1	2.25:1
				CL, ML	3:1	2.5:1
				CH, MH	3.5:1	3:1

หมายเหตุ (1) Mimimum and maximum size cores aer as shown on figure 3

(2) Draw down rates of 6 inches or more per day after prolonged storage at high reserviour levels

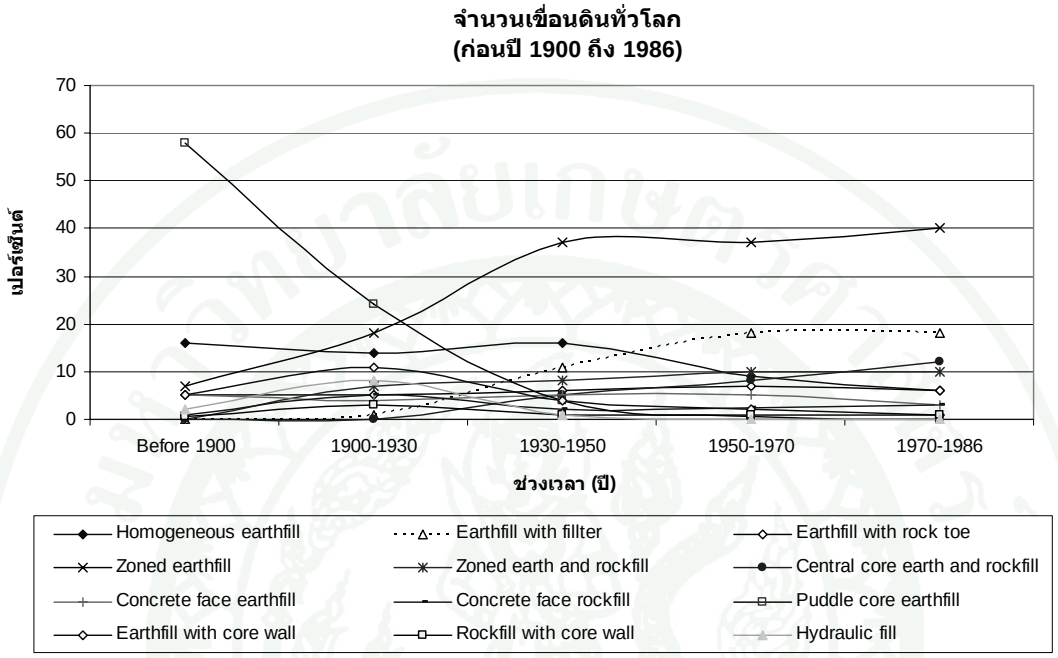
(3) OL and OH soils are not recommended for major portions of homogenous earthfill dams. Pt soils are unsuitable

(4) Rapid drawdawn will not affect the upstream slope of a zoned embankment that has a large upstream pervious shell

ที่มา: USBR (1987)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Foster (2000) ได้รวบรวมข้อมูลการก่อสร้างรูปแบบเขื่อนดินจากหน่วยงานต่างๆทั่วโลก แบ่งตามช่วงปีที่ทำการก่อสร้าง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 จำนวนประเภทเขื่อนดิน (%) ทั่วโลก แบ่งตามช่วงเวลาที่ก่อสร้าง

ที่มา: ข้อมูลการเขียนกราฟจาก Foster (2000)

องค์ประกอบทั่วไปของเขื่อนดิน

Pare and Verma (1987) อธิบายว่าการเลือกรายละเอียดของเขื่อนดินจะพิจารณาตามเศรษฐกิจและการเงิน องค์ประกอบภายในเขื่อนขึ้นอยู่กับลักษณะฐานรากและปริมาณของวัสดุถมตัวเขื่อน ดังนี้

ดินถมตัวเขื่อน

กระทรวงมหาดไทย (2548) อธิบายว่าตัวเขื่อนทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่ปิดกันลำน้ำและเก็บกักน้ำ วัสดุถมตัวเขื่อนมักเป็นวัสดุที่หาได้ในบริเวณที่ตั้งเขื่อน มีคุณสมบัติทางกายภาพและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี มีปริมาณมากเพียงพอกับความต้องการ อยู่ในตำแหน่งที่ขนส่งวัสดุได้สะดวก

ชั้นกรอง

วรากร (2546) อธิบายว่า ชั้นกรองหรือชั้นระบายน้ำ (Drainage) ทำหน้าที่รับน้ำที่ซึมจากตัวเขื่อนและฐานรากให้ไหลออกมารวมกันในบริเวณที่เตรียมไว้โดยไม่ให้เกิดอันตรายจากการกัดเซาะหรือเกิดความดันน้ำสูงจนเกิดการกัดเซาะ กรมชลประทาน (2545) แนะนำให้เขื่อนดินถมเนื้อเดียวขนาดเล็ก ประกอบด้วย Rockfill toe พร้อมด้วย Blanket drain หรือ Chimney drain ส่วนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจะออกแบบระบบระบายน้ำให้มี Rockfill toe, Blanket drain, Chimney drain และ Toe drain ประกอบร่วมกัน Pare and Verma (1987) แนะนำว่าเขื่อนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวเหมาะกับชั้นกรองที่มีหลายชั้น เนื่องจากสามารถระบายน้ำออกจากเขื่อนได้เร็ว

ฐานรากเขื่อน

วรากร (2546) อธิบายว่า ฐานรากคือส่วนที่อยู่ใต้ระดับผิวดินลงไป อาจประกอบด้วยดินในช่วงบน และหินในส่วนที่ลึกลงไป ลักษณะของฐานรากเขื่อนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ฐานรากดินเหนียว ฐานรากชั้นกรวดทราย และฐานรากหิน ICOLD (2005) อธิบายเพิ่มเติมว่าฐานรากมีความสำคัญ 3 ประการได้แก่ ด้านเสถียรภาพความมั่นคงของเขื่อน ด้านการรับน้ำหนักตัวเขื่อนเนื่องจากแรงกระทำต่างๆรวมทั้งน้ำหนักของตัวเขื่อนเอง และด้านการควบคุมการไหลซึมผ่านฐานรากของเขื่อน

ร่องแกนเขื่อน

เพื่อการศึกษาข้อมูลเขื่อนที่พิบัติจากการรั่วซึม (Piping) และสูญเสียเสถียรภาพความมั่นคง (Instability) ทั่วโลก Foster (2000) ได้แบ่งฐานรากเขื่อนออกเป็น 2 ประเภท ประกอบด้วย ร่องแกนเขื่อนที่ขุดไม่ถึงระดับหินฐานรากและร่องแกนเขื่อนที่วางตัวบนหินฐานราก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แกนเขื่อน

แกนเขื่อนเป็นองค์ประกอบที่ทึบน้ำมากที่สุด ทำหน้าที่ลดแรงดันน้ำและป้องกันการพัดพาเม็ดดินในตัวเขื่อน โดยทั่วไปแกนเขื่อนจะควบคุมการไหลผ่านของน้ำไว้น้อยกว่า 10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที Kollgaard *et al.* (1988) กล่าวว่าแกนเขื่อนมีทั้งแบบที่อยู่ตรงกลางตัวเขื่อน แกนเขื่อนแบบเอียง และแกนเขื่อนแบบบาง น้ำที่ผ่านจากแกนเขื่อนจะไหลสู่ชั้นกรอง เพื่อระบายออกด้านท้ายน้ำ Pare and Verma (1987) กล่าวว่า แกนเขื่อนของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนควรมีความลาดเอียงไปทางเหนือน้ำ และส่วนบนควรสูงกว่าระดับน้ำสูงสุดอย่างน้อย 1 เมตร เพื่อรับน้ำเมื่อเกิดคลื่นสูงขณะที่เก็บน้ำเต็มเขื่อน Sherard *et al.* (1963) แนะนำว่าแกนเขื่อนชนิดบางจะมีการระบายน้ำดีกว่าชนิดหนาเพราะสามารถมีพื้นที่ระบายน้ำได้มากกว่า

Freeboard

ระยะเผื่อเป็นระยะที่อยู่เหนือระดับน้ำเก็บกักปกติ ซึ่งพิจารณาจากคาบการเกิดน้ำหลาก ความสูงของคลื่นเนื่องจากกระแสลมในแต่ละพื้นที่ ความสูงของคลื่นเนื่องจากแผ่นดินไหว และความสูงของน้ำเนื่องจากความผิดพลาดในการเปิดบานระบาย โดยทั่วไประยะเผื่อของเขื่อนดินหรือหินถมเท่ากับ 1 เมตร

ความกว้างของสันเขื่อน

Pare and Verma (1987) แนะนำว่าความกว้างของสันเขื่อนขึ้นอยู่กับความสูงและประเภทของเขื่อน นอกจากนี้อาจขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของอุปกรณ์ในการก่อสร้างและความต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องมือติดตามพฤติกรรมจากแรงกระทำแผ่นดินไหว หากเขื่อนตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย

External slopes

ความลาดเอียงด้านนอกตัวเขื่อนควบคุมโดยเสถียรภาพความมั่นคงของตัวเขื่อนและการเคลื่อนตัวที่ออกแบบไว้ ซึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของวัสดุดินถมและลักษณะฐานราก การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำมีส่วนสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของลาดชันเขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนื่องจากในตัวเขื่อนมีการเพิ่มขึ้นของความดันน้ำส่วนเกิน ความลาดชันด้านเหนือน้ำที่ราบกว่าด้านท้ายน้ำจะดีต่อการเพิ่มและลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วในวัสดุทึบน้ำ ตัวอย่างการใช้ความลาดเอียงเช่น 1.8:1 และ 1.6:1 (เขื่อนหิน) 2.25:1 และ 2.:1 (เขื่อนที่ก่อสร้างโดยกรวดและทราย) 2.5:1 และ 2.25:1 (เขื่อนดินเหนียว)

วิธีการบดอัดตัวเขื่อน กรมชลประทาน (2545) แนะนำว่า การบดอัดดินถมตัวเขื่อนจะต้องใช้น้ำเป็นตัวช่วยให้บดอัดได้ง่ายและใช้พลังงานในการบดอัดน้อยลง และเพื่อให้ดินมีความชื้นสูงสุด ที่จะทำให้ดินบดอัดแล้วมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งจะทำให้ดินมีน้ำหนักมากและเสถียรภาพสูงสุดเช่นกัน นอกจากนั้นควรกำหนดให้ดินที่นำมาบดอัดมีความชื้นไปทางด้านเปียกเล็กน้อย คือมีค่าความชื้นที่การบดอัดสูงกว่าความชื้นสูงสุดประมาณร้อนละ 1 ถึง 2 เพื่อให้มีผลดีมากยิ่งขึ้นในเรื่องการทึบน้ำและป้องกันการแตกร้าวของตัวเขื่อน ตลอดจนการใช้พลังงานในการบดอัดลดลง นอกจากนี้กรมชลประทาน (2545) ยังได้แนะนำหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนดินที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของตัวเขื่อนที่เกี่ยวกับความมั่นคงและการระบายน้ำดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 หลักเกณฑ์เกี่ยวกับส่วนประกอบตัวเขื่อนดิน (ขนาดกลางขึ้นไป)

ส่วนประกอบ	เกณฑ์กำหนด	ปัจจัยการพิจารณา
ความกว้างสันเขื่อน	ไม่น้อยกว่า 6 เมตร แต่ไม่มากกว่า 10 เมตร	1 เพื่อความสะดวกในการก่อสร้าง 2 เพื่อเสถียรภาพของลาดเขื่อน 3 เพื่อให้เครื่องมือเข้าถึงจุดการบำรุงรักษาได้
ระยะพ้นน้ำ (Freeboard)	2 เมตร จากรนส. 3.5 เมตร จากรนก.	1 เพื่อป้องกันคลื่นกระโจนข้ามสันเขื่อน 2 ป้องกันน้ำล้นข้ามสันเขื่อน
ความกว้างร่องแกน	ไม่น้อยกว่า 6 เมตร	1 สามารถก่อสร้างได้สะดวก 2 ให้มีระยะทึบน้ำในชั้นฐานรากที่พอเพียง
ความลึกร่องแกน	ถึงระดับชั้นหิน แต่ไม่น้อยกว่า 2.50 เมตร	1 ชั้นหินลึก 0-10.00 เมตร 2 มีชั้นดินไม่ทึบน้ำตั้งแต่ผิวดินถึงชั้นหิน 3. ชั้นดินส่วนบนไม่แน่น รับน้ำหนักตัวเขื่อนไม่ได้ โดยมีค่า Standard Penetration Test (N) น้อยกว่า 10 4. ต้องการปรับปรุงฐานรากในชั้นหินด้วยการอัดฉีดน้ำปูน (Cement Grouting)
	ไม่น้อยกว่า 2.00 เมตร	1 ชั้นหินลึกมากกว่า 10.00 เมตร 2 มีชั้นดินทึบน้ำตั้งแต่ผิวดินลงไปหนามากกว่า 2 เมตร 3. มีชั้นดินไม่ทึบน้ำตั้งแต่ผิวดินถึงชั้นหิน
ความกว้างชานพัก	ไม่น้อยกว่า 4 เมตร	1 สามารถก่อสร้างได้สะดวก 2 เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของตัวเขื่อน
	ไม่น้อยกว่า 6 เมตร	เพื่อเป็นถนนด้านท้ายเขื่อนหรือเป็นทำนบชั่วคราวที่ออกแบบให้เป็นส่วนหนึ่งของตัวเขื่อนภายหลัง
ระยะเผื่อการทรุดตัวของสันเขื่อน	ไม่น้อยกว่า 1% ของความสูง แต่ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร	สำหรับเขื่อนดินสูงตั้งแต่ 10 ถึง 50 เมตร

ที่มา: กรมชลประทาน (2545)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 หลักเกณฑ์เกี่ยวกับการระบายน้ำภายในตัวเขื่อน

ส่วนประกอบ	เกณฑ์กำหนด	ปัจจัยการพิจารณา
Chimney	ความหนาไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร	1 เพื่อความสะดวกในการก่อสร้าง 2 เผื่อการอุดตันบางส่วน
Drain	ระดับความสูงไม่น้อยกว่าระดับน้ำเก็บกัก	1 เผื่อการทรุดตัวและเผื่อการรั่วในระหว่างรอยต่อการบดอัดชั้นดิน
Toe Drain	1 ขนาดท่อไม่น้อยกว่า 0.20 เมตร 2 ต่ำกว่าระดับขุดลอกหน้าดินไม่น้อยกว่า 0.50 เมตร 3 มีระดับสูงกว่าท้องลำน้ำเดิม	1 ให้ระบายน้ำออกได้โดยสะดวก 2 ให้สามารถลดระดับน้ำภายในตัวเขื่อนได้ต่ำที่สุด

ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมชลประทาน (2545)

การจัดขนาดเขื่อน

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยเขื่อน มีเกณฑ์การจัดขนาดเขื่อนเพื่อประโยชน์ทั้งในด้านการก่อสร้างและบำรุงรักษาดังนี้

กรมชลประทาน

กรมชลประทาน (2545) กำหนดขนาดเขื่อนเก็บกักน้ำเป็น 3 ขนาด โดยพิจารณาจากความสูงเขื่อน ความจุอ่างเก็บน้ำ การจัดหาที่ดินเพื่อการก่อสร้าง งบประมาณและระยะเวลาในการก่อสร้าง เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 รายละเอียดการแบ่งขนาดของเขื่อนเก็บกักน้ำ

ลำดับ	ขนาดเขื่อนเก็บกักน้ำ	ปัจจัยการพิจารณาโดยสังเขป											
		ความสูง	ความจุ	ระยะเวลา	งบประมาณ	การจัดหาที่ดิน		การศึกษาโครงการ		สิ่งแวดล้อม		การปรับปรุงฐานราก	
		(เมตร)	(เมตร)	การก่อสร้าง (ปี)	(ล้านบาท)	จัดหา	ไม่จัดหา	ศึกษา	ไม่ศึกษา	ศึกษา	ไม่ศึกษา	ยุ่งยาก	ไม่ยุ่งยาก
1	ขนาดเล็ก	< 15	< 1.00	< 1	< 15.00	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓
2	ขนาดกลาง	15 - 40	1 - 100	1-3	15 - 500	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
3	ขนาดใหญ่	> 15	> 100	> 3	> 500	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-

หมายเหตุ 1) ICOLD กำหนดให้เขื่อนที่สูงมากกว่า 15.00 เมตร ขึ้นไป เป็นเขื่อนขนาดใหญ่

2) ความสูงเขื่อนพิจารณาจากท้องลำน้ำที่จุดลึกสุดถึงระดับสันเขื่อนที่ยังไม่เผื่อการทรุดตัว

3) การพิจารณาแบ่งขนาดเขื่อน จะพิจารณาหลายปัจจัยร่วมกัน หากมีจำนวนปัจจัยการพิจารณาเข้าเกณฑ์ของเขื่อนขนาดใดมากกว่า ก็จัดเป็นเขื่อนขนาดนั้น เช่น เขื่อนบางแห่งมีความสูงมากกว่า 10.00 เมตร แต่หากมีความจุอ่างเก็บน้ำน้อยกว่า 1 ล้าน ลูกบาศก์เมตร และมีปัจจัยอื่นอยู่ในเกณฑ์ที่แสดงไว้ ก็สามารถจัดเข้าเป็นเขื่อนขนาดเล็กได้เช่นกัน

ที่มา: กรมชลประทาน (2545)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรมชลประทาน (2535) อธิบายว่า USACE จำแนกขนาดของเขื่อนดินตามความสูงและความจุ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การจัดขนาดเขื่อนของ USACE

ขนาดเขื่อน	ความสูง (เมตร)	ปริมาณเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
เล็ก	7.5 ถึงน้อยกว่า 12	0.1 ถึงน้อยกว่า 1.2
กลาง	12 ถึงน้อยกว่า 30	1.2 ถึงน้อยกว่า 60
ใหญ่	ตั้งแต่ 30 ขึ้นไป	ตั้งแต่ 60 ขึ้นไป

ที่มา: USACE อ้างโดยกรมชลประทาน (2535)

คณะกรรมาธิการเขื่อนใหญ่ระหว่างประเทศ (International Commission on Large Dam, ICOLD)

Thomus (1976) อธิบายว่า ICOLD ให้คำจำกัดความของเขื่อนขนาดใหญ่ตามความสูงว่าเขื่อนต้องสูงกว่า 15 เมตร วัดจากระดับต่ำสุดของฐานราก ส่วนเขื่อนที่สูงระหว่าง 10-15 เมตร อาจเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ได้ถ้ามีความยาวสันเขื่อนมากกว่า 500 เมตร มีปริมาณเก็บกักมากกว่า 1 ล้านลูกบาศก์เมตร Maximum flood discharge มากกว่า 2000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีปัญหาเกี่ยวกับฐานรากที่ซับซ้อน

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

โครงการฐานข้อมูลเขื่อนดินเพื่อประเมินความปลอดภัยและบำรุงรักษาของสำนักชลประทานที่ 9 (2540) โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก อ้างโดย อนุสรณ์ (2542) ได้จำแนกขนาดเขื่อนโดยพิจารณาเกณฑ์จาก 3 หน่วยงานข้างต้น ดังตารางที่7

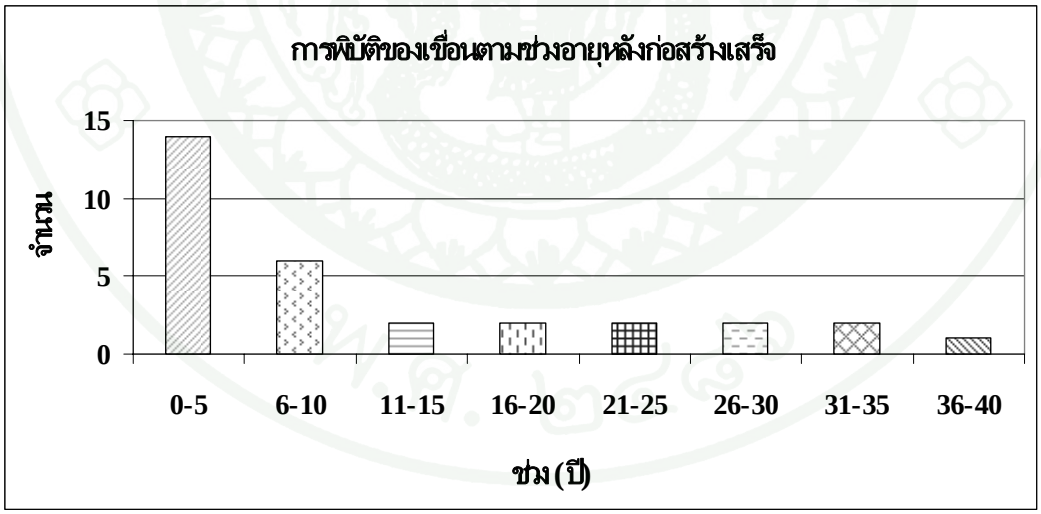
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 การจำแนกขนาดเขื่อนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

ขนาดเขื่อน	ความสูง (เมตร)	ปริมาณเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
เล็ก	5 ถึงน้อยกว่า 15	0.5 ถึงน้อยกว่า 2
กลาง	15 ถึงน้อยกว่า 30	0.5 ถึงน้อยกว่า 100
	10 ถึงน้อยกว่า 30	2 ถึงน้อยกว่า 100
ใหญ่	ตั้งแต่ 30 ขึ้นไป	ตั้งแต่ 60 ขึ้นไป

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2540)

สุทธิศักดิ์และคณะ (2549) ศึกษาความสัมพันธ์ของการพิบัติของเขื่อนดินกับอายุของเขื่อน จากบันทึกการพิบัติของเขื่อนที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 10 คน ตั้งแต่ปี ค.ศ.1860 ที่รวบรวมโดย Jauhari (1999) ได้ดังภาพที่ 6 พบว่าเขื่อนโดยทั่วไปมีสถิติการพิบัติในช่วง 10 ปีแรกค่อนข้างสูง โดยเฉพาะช่วงอายุ 5 ปีแรก จากนั้นสถิติการพิบัติจะลดลง แต่ยังคงพบสถิติการพิบัติอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 6 การพิบัติของเขื่อนตามช่วงอายุหลังก่อสร้างเสร็จ

ที่มา: สุทธิศักดิ์และคณะ (2549) ดัดแปลงจาก Jauhari (1999)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างเขื่อนดิน

คุณสมบัติทางสถิตของวัสดุก่อสร้างเขื่อนที่เป็นพื้นฐานในการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยใช้สมการสำเร็จรูป ประกอบด้วยคุณสมบัติขั้นพื้นฐานบางประการได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักทั้งหมด ดัชนีความเหนียว อัตราส่วนช่องว่างและค่าความซึมน้ำของดิน รวมถึงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนเพื่อการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และมุมเสียดทาน (Friction angle, ϕ) วรากร (2546) อธิบายว่า การวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการบรรทุกน้ำหนัก อัตราการเพิ่มหน่วยแรงในมวลดิน ความอิ่มตัวและสภาพความดันน้ำ

คุณสมบัติขั้นพื้นฐาน

ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติที่สัมพันธ์กับทั้งมวลและน้ำหนักของดิน USBR (1998) อธิบายว่าความถ่วงจำเพาะของดินโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 2.8 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและแร่ธาตุประกอบ และความถ่วงจำเพาะที่ได้จากห้องปฏิบัติการเป็นการประเมินค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย เนื่องจากเม็ดดินแต่ละเม็ดจะมีมวลไม่เท่ากัน

หน่วยน้ำหนัก

หน่วยน้ำหนักของดินคือน้ำหนักของดินต่อหน่วยปริมาตร เป็นคุณสมบัติพื้นฐานแสดงความแน่นของดินที่ใช้กับการออกแบบและวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ดังสมการที่ 1

$$\gamma = \frac{W}{V} \tag{1}$$

URBR (1998) อธิบายว่าหน่วยน้ำหนักมี 2 ประเภทคือ หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (Dry unit weight) และหน่วยน้ำหนักดินเปียก (Wet unit weight) ในการทดสอบทั่วไปหน่วยน้ำหนักจะได้ผลการทดสอบแบบเปียก แต่สามารถแปลงให้หน่วยน้ำหนักแห้ง ได้ดังสมการที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+\frac{w}{100}} \quad (2)$$

ดัชนีความเหนียว

ดัชนีความเหนียวเป็นคุณสมบัติหนึ่งใน Consistency limits ประกอบด้วย 4 สถานะภาพ ได้แก่ สภาพเหลว สภาพเหนียว สภาพกึ่งแข็งและสภาพแข็ง ดังภาพที่ 7 การทดสอบถูกค้นพบในปี 1911 โดย A. Atterberg นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีดิช เดชาวุธ (2537) อธิบายว่า ดัชนีความเหนียวคือ ช่วงค่าความแตกต่างระหว่างสภาพเหลวกับสภาพเหนียว หรือหมายถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลดิน โดยที่มวลดินนั้นยังรักษาความเป็นวัสดุเหนียว (Plastic material) อยู่ได้ นอกจากนี้ Consistency limits ยังมีประโยชน์ในการจำแนกชนิดของดินตาม USCS ดัง Plasticity chart ภาพที่ 8

อัตราส่วนช่องว่าง

USBR (1998) ช่องว่างในมวลดินเป็นคุณสมบัติที่เป็นอัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างในมวลดินต่อปริมาตรของดิน ดังสมการที่ 3

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

นอกจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ช่องว่างในมวลดินเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอื่นๆด้วยเช่น ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินคือ เมื่อช่องว่างในมวลดินลดลง น้ำจะซึมผ่านได้ยากขึ้น และแปรผันโดยตรงกับกำลังของดินคือ เมื่อช่องว่างในมวลดินลดลงดินจะแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังของดินดีขึ้น อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่นประกอบด้วย

ความสามารถในการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน

คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้ในมวลดิน เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนช่องว่างในมวลดินและการเพิ่มขึ้นของกำลัง เดชาวุธ (2537) อธิบายว่าขนาดของเม็ดดินและทางเดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของน้ำที่ต่อเนื่องภายในช่องว่างในมวลดินมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในดิน (Coefficient of permeability, k)

วรากร (2546) กล่าวว่า อิทธิพลที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้แก่ ขนาดและช่องว่างในเม็ดดิน แร่ธาตุในดิน รูปร่างและการจัดเรียงตัวของเม็ดดินและความอิ่มตัวด้วยน้ำ Terzaghi and Peck (1967) แสดงช่วงค่าการซึมน้ำดังตารางที่ 8

คุณสมบัติด้านกำลังแรงเฉือน

United States Society on Dams หรือ USSD (2007) แนะนำว่าช่วงเวลาที่ควรมีการวิเคราะห์ความมั่นคงได้แก่

1. สิ้นสุดการก่อสร้าง คือเมื่อต้องการทราบความมั่นคงขณะที่ยังมีแรงดันน้ำในตัวเขื่อนเนื่องจากการบดอัด

2. ต้องการทราบความมั่นคงในระยะยาว ควรวิเคราะห์ความมั่นคงเมื่อมีการไหลของน้ำผ่านดินคงที่ (Steady stage seepage)

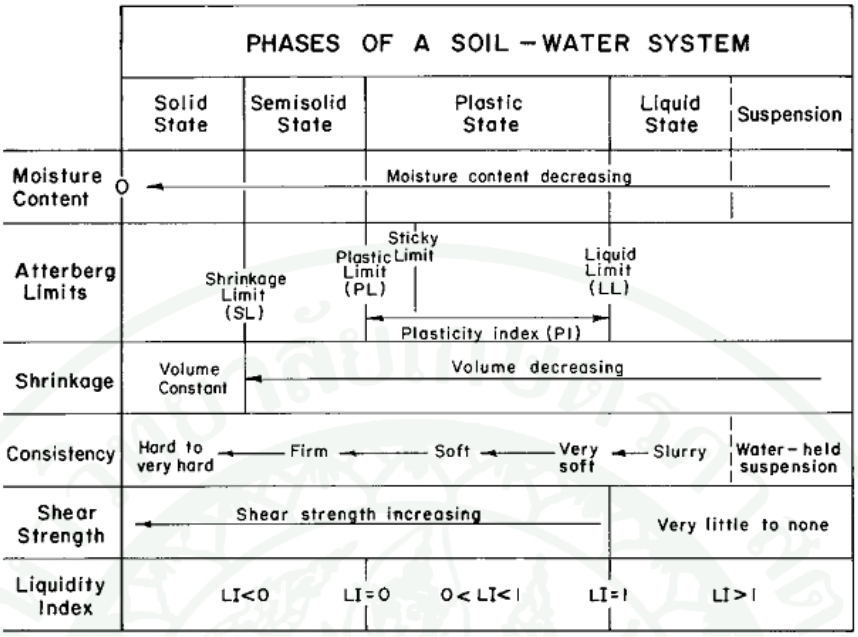
3. เมื่อมีระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแรงดันน้ำในตัวเขื่อน

4. เมื่อเขื่อนรับแรงกระทำแผ่นดินไหว

จากสมการของ Mohr-Coulomb สมการที่ 4

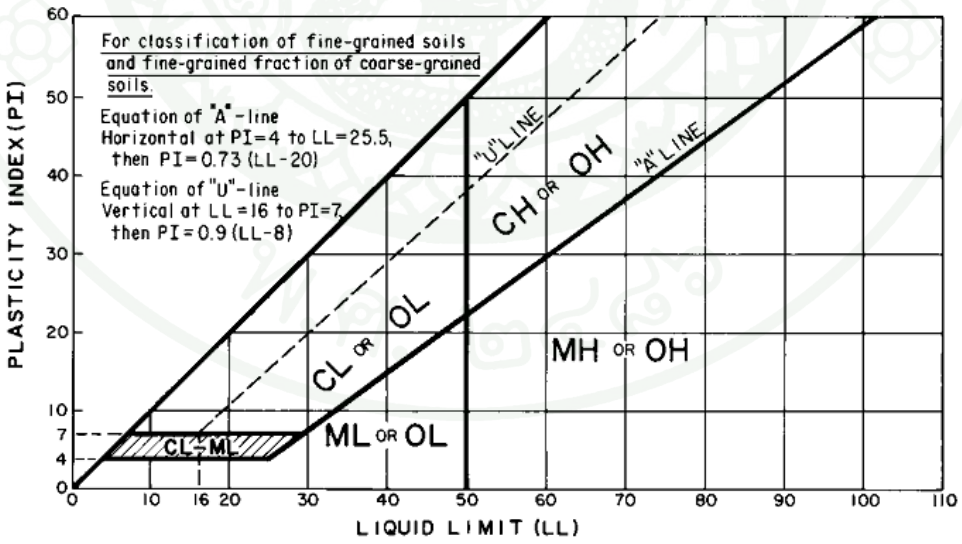
$$\tau = c + \sigma \tan\phi \qquad (4)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 Phases of a soils-water system

ที่มา: USBR (1998)



ภาพที่ 8 Plasticity Chart

ที่มา: USBR (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ช่วงความซึมน้ำของดิน

Permeability (cm/sec)	Permeable
< 1.00E-07	Impervious
1.00E-05 - 1.00E-07	very Low
1.00E-03 - 1.00E-05	Low
1.00E-01 - 1.00E-03	Medium
> 1.00E-01	High

ที่มา: Terzaghi and Peck (1967)

สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน

สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน (Coefficeint of earth pressure at rest, K_0) เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวกับแรงดันดินทางด้านข้างที่ใช้ประมาณค่า Intermediate และ Minor principal stress โดย Mayne and Kulhawy (1990) เสนอความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับค่า OCR และมุมเสียดทานดังสมการที่ 5 นอกจากนี้ Head (1986) ยังรวบรวม K_0 จากกงานวิจัยต่างๆ ดังตารางที่ 9

$$K_0 = (1-\sin\theta') \times OCR^{\sin\theta'} \tag{5}$$

Poisson ratio

Bowles (1974) กล่าวว่า Poission ratio เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความเครียดด้านยาว (ε_1)ต่อความเครียดทางขวาง (ε_3) ดังสมการที่ 6 โดย Das (1993) ประมาณค่า Poission ratio ของดินชนิดต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดังตารางที่ 10

$$\upsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \tag{6}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ค่า K_0 ที่รวบรวมมาจากงานวิจัยต่างๆ

Soil type	K_0
Saturate sand -loose	0.5
Saturate sand -dense	0.35
Sandy clay	0.43
Normally consolidated clay	0.4-0.7
Lightly overconsolidated clay	0.8-1.2
Heavily overconsolidated clay	1.2-2.8
Remoulded clay	0.7
Boulder clay compacted	0.56

หมายเหตุ รวบรวมจาก Bishop and Henkel (1962) และ Lambe and Whitman (1979)

ที่มา: รวบรวมโดย Head (1978)

ตารางที่ 10 ค่า Poission ratio และโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชนิดต่างๆ

Type of soil	Modulus of elasticity, E (MPa)	Poisson ratio
Loose sand	10.35-24.15	0.2-0.4
Medium dense sand	17.25-27.60	0.25-0.4
Dense sand	34.50-55.20	0.3-0.45
Silty sand	10.35-17.25	0.2-0.4
Sand and gravel	69-172.5	0.15-0.35
Soft clay	4.1-20.7	0.2-0.5
Medium clay	20.7-41.4	
Stiff clay	41.4-96.6	

ที่มา: Das (1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติด้านกำลังแรงเฉือน

United States Society on Dams หรือ USSD (2007) แนะนำว่าช่วงเวลาที่ควรมีการวิเคราะห์ความมั่นคงได้แก่

1) สิ้นสุดการก่อสร้าง คือเมื่อต้องการทราบความมั่นคงขณะที่ยังมีแรงดันน้ำในตัวเขื่อนเนื่องจากการบดอัด

2) ต้องการทราบความมั่นคงในระยะยาว ควรวิเคราะห์ความมั่นคงเมื่อมีการไหลของน้ำผ่านดินคงที่ (Steady stage seepage)

3) เมื่อมีระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแรงดันน้ำในตัวเขื่อน

4) เมื่อเขื่อนรับแรงกระทำแผ่นดินไหว

จากสมการของ Mohr-Coulomb สมการที่ 7

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \qquad (7)$$

พารามิเตอร์ c และ ϕ ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการทดสอบสามารถทำได้ 2 สภาวะได้แก่ Undrained condition คือไม่มีการระบายน้ำออกจากมวลดินระหว่างการทดสอบ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำในมวลดินและ Drained condition คือระหว่างการทดสอบมีการระบายน้ำอย่างช้าๆ ทำให้ไม่มีแรงดันน้ำในมวลดินเหลืออยู่ ทำให้การวิเคราะห์มี 2 แบบได้แก่ Total stress analysis (TSA) และ Effective stress analysis (ESA) ดังสมการที่ 8 และสมการที่ 9

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \qquad (8)$$

$$\bar{\tau} = (c' + \sigma' \tan\phi') \qquad (9)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ความมั่นคงได้จากการทดสอบต่างๆ โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 9

Direct shear test

การทดสอบแรงเฉือนด้วยวิธีนี้จะเป็นแบบ Consolidated undrianed คือ ตัวอย่างดินมีการรับแรงในแนวดิ่งและไม่มีการระบายน้ำ สามารถเฉือนตัวอย่างบนระนาบที่กำหนดได้ เป็นการทดสอบอย่างง่าย เดชาวุธ (2537) อธิบายว่า การทดสอบจะอยู่ในลักษณะ Undrained condition เมื่อเฉือนด้วยความเร็วสูง และเมื่อเฉือนอย่างช้าๆจะอยู่ในลักษณะ Drained condition พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้จะสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย

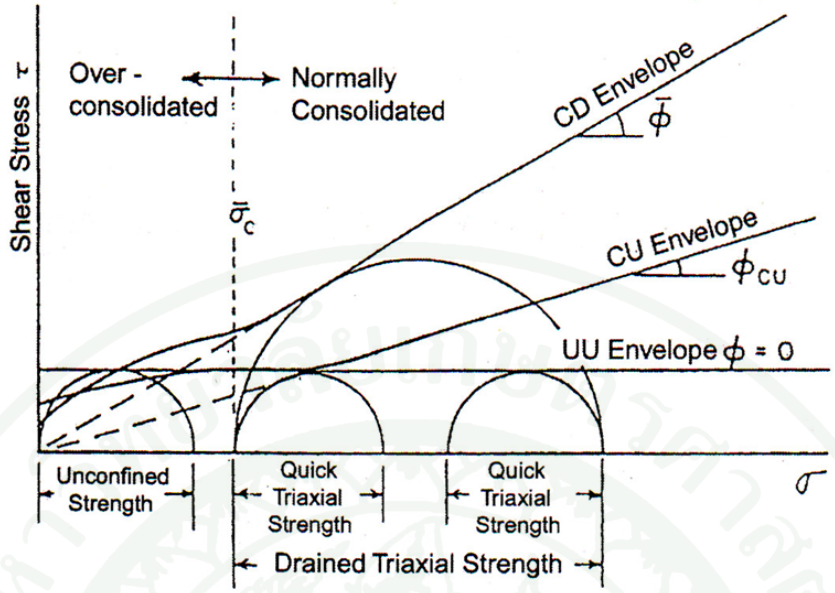
Triaxial test

Unconsolidated undrained test (UU test) เป็นการทดสอบที่ตัวอย่างไม่มีการ Consolidated และไม่มีการระบายน้ำ ที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรืออิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน USACE (1970) แนะนำให้ใช้การทดสอบนี้ในช่วงสิ้นสุดการก่อสร้างกับวัสดุทึบน้ำ

Consolidated undrained Test (CU test, $\overline{CU}$ test) เมื่อตัวอย่างทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำและ Consolidated ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำระหว่างการทดสอบถ้ามีการวัดแรงดันน้ำจะเป็นการทดสอบแบบ CU test และถ้าไม่มีการวัดแรงดันน้ำจะเป็นการทดสอบแบบ $\overline{CU}$ test ซึ่งมักทดสอบกับดินกึ่งทึบน้ำถึงทึบน้ำในช่วงเวลาที่ต้องการวิเคราะห์ความมั่นคงในระยะยาว

Consolidated drained test (CD test) เมื่อตัวอย่างทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ มีการConsolidated ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำและระบายน้ำระหว่างการทดสอบ ใช้ทดสอบในดินที่สามารถระบายน้ำได้ดี (Free drained) หรือดินภายในตัวเขื่อนส่วนทึบน้ำที่อยู่เหนือเส้นแรงดันน้ำ (Phreatic)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 ลักษณะของ Mohr-Coulomb envelopes ของการทดสอบ Triaxial แบบต่างๆ

ที่มา: Lambe and Whitman (1969)

การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อน

ความเป็นมาของการวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อน

อนุสรณ์ (2542) กล่าวว่า มาตรการความปลอดภัยเขื่อน (Dam safety program) ถูกกำหนดขึ้นเมื่อ 20 ปี มานี้ เนื่องจากการพิบัติของเขื่อนต่างๆทั่วโลก ในแต่ละประเทศจะมีการจัดตั้งหน่วยงานด้านความปลอดภัยเขื่อนขึ้น โดยมีแนวทางการปฏิบัติที่แตกต่างกันไปเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา มี 2 หน่วยงานหลักที่ดูแลงานด้านความปลอดภัยของเขื่อน และสิ่งก่อสร้างประเภทอื่นๆ ได้แก่ USBR และ USACE (US. Army Corps of Engineers) สำหรับในประเทศญี่ปุ่นไม่มีการจัดตั้งหน่วยงานที่ดูแลความปลอดภัยเขื่อนโดยตรง แต่มีการกำหนดมาตรการความปลอดภัยในทุกขั้นตอน ตลอดอายุการใช้งานเขื่อน (International and Local Consultants, 1996) ในระดับชาติได้มีการจัดตั้งคณะกรรมาธิการเขื่อนใหญ่ระหว่างประเทศหรือ ICOLD เพื่อเป็นศูนย์กลางในการรวบรวมข้อมูล การกระจายความรู้ และกำหนดมาตรการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยเขื่อน เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bowles et al. (1998) กล่าวว่า การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) และการจัดการความเสี่ยง (Risk management) เป็นความรู้ที่มาจากการจัดการความเสี่ยงที่มีต่อสิ่งแวดล้อม (Risk environmental) ของเขื่อน การประเมินความเสี่ยงถูกประยุกต์ใช้กับเขื่อนในหลายด้านเช่น การพิจารณาความเสี่ยงในด้านวิศวกรรม สังคม และเศรษฐศาสตร์ระดับประเทศ

ในปี 1973 American Society of Civil Engineers (ASCE) ได้เริ่มพิจารณาคุณค่าของชีวิตประชากรด้านท้ายน้ำ ร่วมกับขนาดอาคารระบายน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความสูญเสียทางเศรษฐกิจ (Economic cost) ในโครงการ “Reevaluation of the adequacy of spillways of existing dams”

ในปี 1976 การพิบัติของเขื่อน Teton และ เขื่อน Taccoa Falls ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้ประธานาธิบดีจิมมี่ คาร์เตอร์ แนะนำให้ Federal Emergency Management Agency (FEMA) คำนึงถึงการวิเคราะห์โอกาสเกิดหรือระดับความเสี่ยง ในกระบวนการคัดเลือกพื้นที่ (Site Selection) ออกแบบ (Design) ก่อสร้าง (Construction) และการใช้งาน (Operation)

ในปี 1990 British Columbia's Hydro (BC. Hydro) และ Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) ได้พัฒนาเกณฑ์ความเสี่ยงเกี่ยวกับความสูญเสียชีวิต (Life Loss) อย่างกว้างๆ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเกณฑ์ความเสี่ยงทางวิศวกรรมอุตสาหการและพลังงานนิวเคลียร์

ในปี 1995 USBR เริ่มพัฒนาขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment Procedure) และแนวทางการป้องกันความเสี่ยงของหน่วยงาน จากนั้นมา USBR ก็เป็นหน่วยงานที่ใช้ความรู้ด้านการประเมินปลอดภัยของเขื่อนมากที่สุด นอกจากนี้ยังนำผลการประเมินความเสี่ยงมาใช้ในมาตรการจัดการความปลอดภัยเขื่อนอีกด้วย

ความหมายของความเสี่ยง

Cee (2005) นิยามว่า ความเสี่ยง (Risk) คือ โอกาสในการสูญเสียจากเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่ง เช่น ความสูญเสียต่อเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สิ่งปลูกสร้าง และสังคม โอกาสในการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรง(Vulnerability) และมูลค่าความเสียหายนั้น (Amount) จากนิยามของความเสี่ยง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความเสี่ยง (Risk)=โอกาสเกิดการพิบัติ (Probability of event) × [ระดับความรุนแรง (Vulnerability) × ปริมาณความเสียหาย (Amount)] (10)

การประเมินความเสี่ยงโดยวิธีดัชนีปัจจัยร่วม

สุทธิศักดิ์และคณะ (2549) อธิบายถึงวิธีดัชนีปัจจัยร่วม (Weighting factor method) ใช้ในประเมินในเชิงสมการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา ซึ่งอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจะถูกกำหนดค่าคะแนนน้ำหนักตามลำดับความสำคัญต่อการพิบัติเขื่อน และแต่ละปัจจัยจะมีการกำหนดค่าคะแนนน้ำหนักตามความสำคัญของปัจจัยย่อยอีกครั้งหนึ่ง การกำหนดระดับความสำคัญโดยการใช้ดัชนีปัจจัยร่วม สามารถประยุกต์เพื่อเปรียบเทียบคะแนนได้ดังตารางที่ 11 และมีการกำหนดตามผลรวมของคะแนนความสำคัญของปัจจัยคูณกับระดับคะแนนของปัจจัยดังสมการที่ 11

ตารางที่ 11 การประเมินความสำคัญของปัญหาด้วยวิธีปัจจัยร่วม

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์						ผลรวมของ
		W_1	W_2	W_3	W_4	…	W_n	คะแนน
1	เขื่อนที่ 1	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$	$R_{1,4}$	...	$R_{1,n}$	RI_1
2	เขื่อนที่ 2	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$	$R_{2,4}$	...	$R_{2,n}$	RI_2
3	เขื่อนที่ 3	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{3,3}$	$R_{3,4}$	...	$R_{3,n}$	RI_3
4	เขื่อนที่ 4	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$	$R_{4,4}$	...	$R_{4,n}$	RI_4
...	...	...	...	...	...	...	...	
n	เขื่อนที่ n							RI_n

หมายเหตุ $RI_x = W_1R_{x,1} + W_2R_{x,2} + W_3R_{x,3} + W_4R_{x,4} + \ldots + W_nR_{x,n}$

เมื่อ RI_x ดัชนีความเสี่ยงภัย

W_x คะแนนความสำคัญของปัจจัยหนึ่ง

R_x ระดับคะแนนของปัจจัย

ที่มา: สุทธิศักดิ์และคณะ (2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$S = W_1R_1+W_2R_2+W_3R_3+ ..+W_nR_n \quad (11)$$

การให้น้ำหนักความสำคัญสำหรับปัจจัย ทำโดยวิธีการเปรียบเทียบความสำคัญในแต่ละปัจจัย ซึ่งเป็นการเทียบความสำคัญของปัจจัยหนึ่งต่อปัจจัยอื่นเป็นคู่ๆ จนครบทุกคู่ เป็นตัวเลขภายใต้การตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญในตารางเมตริกซ์ ซึ่งสามารถแบ่งปัจจัยหลักหนึ่งปัจจัยออกเป็นปัจจัยรองได้ และให้ความสำคัญของปัจจัยรองนี้ด้วยวิธีเดียวกัน

ธรณีวิทยาแผ่นดินไหว

รอยเลื่อน

คณะอนุกรรมการจัดทำพจนานุกรมธรณีวิทยา (2530) นิยามว่า รอยเลื่อน (Fault) คือ รอยแตกหรือแนวรอยแตกของหินสองฟากซึ่งเคลื่อนที่สัมพันธ์กันและขนานไปกับรอยแตกนั้น ซึ่งการเลื่อนนี้เกิดจากความเค้นและความเครียดในเนื้อหินเปลือกโลก อาจเกิดภายใต้ผิวโลกโดยปรากฏบนพื้นดินหรือไม่ก็ได้ ซึ่งการเลื่อนนี้เป็นไปได้ทุกทิศทาง

รอยเลื่อนมีพลัง

USGS (2007) นิยามว่า รอยเลื่อนมีพลัง (Active fault) หมายถึง รอยเลื่อนที่มีโอกาสทำให้เกิดแผ่นดินไหวอีกในอนาคต โดยรอยเลื่อนที่จัดว่าเป็นรอยเลื่อนมีพลังต้องมีการเคลื่อนที่อย่างน้อยหนึ่งครั้งภายในระยะเวลา 10,000 ปี

G.Z. *et al.* (1994) นิยามของรอยเลื่อนมีพลัง แบ่งเป็น 2 แนวทาง คือ ในทางธรณีวิทยา รอยเลื่อนนั้นจะต้องมีการสั่นไหว (Shake) การคืบ (Creep) หรือการเคลื่อนตัว (Displacement) อย่างใดอย่างหนึ่ง ตั้งแต่ยุคควอเทอร์นารี และในทางวิศวกรรม รอยเลื่อนนั้นจะต้องแสดงลักษณะข้างต้นตั้งแต่สมัยโฮโลซีนหรือเมื่อ 100 ถึง 10,000 ปี ที่ผ่านมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กลุ่มรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มศึกษากลุ่มรอยเลื่อนมีพลังโดย Nuttalaya *et al*. (1985) ต่อมาในปี 1990 Shrestha พบว่ามีกลุ่มรอยเลื่อนทั้งหมด 9 รอยเลื่อน ต่อมากรมทรัพยากรธรณีได้ใช้เทคโนโลยีเกี่ยวกับ Geodetic survey ร่วมกับการขุดร่องสำรวจตามพื้นที่ศึกษา โดย Kosuwan *et al.* (2006) พบว่า ประเทศไทยมีกลุ่มรอยเลื่อนมีพลัง 15 รอยเลื่อน ดังภาพที่ 10 ได้แก่

กลุ่มรอยเลื่อนแม่จัน

กลุ่มรอยเลื่อนแม่จัน มีความยาว 155 กิโลเมตร มีลักษณะเด่นคือ พบน้ำพุร้อนเกิดขึ้นตลอดความยาวของรอยเลื่อน เคยเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรงระดับ VII หรือมากกว่า ประมาณปี พ.ศ. 460, 534 และ 1715 ในสมัยโยนกนคร วันที่ 1 กันยายน 1978 สามารถวัดแผ่นดินไหวขนาด 4 M_B ตั้งแต่ปี 1978 มีแผ่นดินไหวขนาด 3 M_B มากกว่า 10 ครั้ง โดย 3 ใน 10 ครั้งมีขนาดมากกว่า 4.5 M_B

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ทา

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ทา วางตัวในแนวเหนือ-ตะวันตก เป็นรอยเลื่อนขวา โค้งตามแนวลำน้ำแม่กวงและแนวลำน้ำแม่ทาในเขตจังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ มีความยาว 140 กิโลเมตร สามารถวัดขนาดของแผ่นดินไหวในอดีตได้น้อยกว่า 3 M_B เป็นแผ่นดินไหวแบบตื้น (Shallow earthquake) และมีน้ำพุร้อนเกิดขึ้นบริเวณทางใต้ของรอยเลื่อน

กลุ่มรอยเลื่อนเถิน

กลุ่มรอยเลื่อนเถินวางตัวในแนวเหนือ-ตะวันออก เป็นรอยเลื่อนซ้าย มีความยาวประมาณ 140 กิโลเมตร ในรอบ 20 ปี กลุ่มรอยเลื่อนนี้เป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวมากกว่า 24 ครั้ง ขนาดประมาณ 3 ถึง 5 M_B ในวันที่ 22 และ 23 ธันวาคม 1980 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 4 และ 3.7 M_B ในทิศตะวันตกของรอยเลื่อน พบน้ำพุร้อนเกิดขึ้นบริเวณทางใต้ของรอยเลื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กลุ่มรอยเลื่อนอุตรดิตถ์

กลุ่มรอยเลื่อนอุตรดิตถ์ ยาวประมาณ 115 กิโลเมตร แสดงลักษณะรอยเลื่อนเป็นแนวภูเขาตามความยาวของแม่น้ำน่าน ใกล้กับอำเภอน้ำปาด จากภาพถ่ายดาวเทียมพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับแนวรอยเลื่อนจากภาคเหนือของสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ในอดีตเคยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 3 M_w รูปแบบของรอยเลื่อนมีรอยตัดกันในแนวเหนือ-ตะวันตก ซึ่งมีการตกตะกอนของดินใหม่ ตัดกันตามแนวรอยต่อชั้นหินเก่า Fenton *et al.* (1997) ประมาณขนาดจากสมการของ Well and Coppersmith (1994) ไว้ประมาณ 7 M_w

กลุ่มรอยเลื่อนปัว

กลุ่มรอยเลื่อนปัว มีความยาวประมาณ 85 กิโลเมตร เป็นรอยเลื่อนชนิดธรรมดา (Normal fault) ส่วนต้นของรอยเลื่อนเป็นภูเขาที่มีความชันสูง ส่วนกลางมีการโค้งลงคล้ายรูปแก้วไวน์ บริเวณหมู่บ้านสันติสุข ในปี 1934 และ 1935 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 7 M_B ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ซึ่งอยู่ใกล้กับแนวรอยเลื่อน Fenton *et al.* (1997) ประมาณขนาดที่เคยเกิดแผ่นดินไหวมากที่สุดคือ 7.25 M_w

กลุ่มรอยเลื่อนพะเยา

กลุ่มรอยเลื่อนพะเยามีการเคลื่อนตัวไปในทิศตะวันตก เป็นไปได้ว่าการเคลื่อนตัวนี้ทำให้เกิด “กว๊านพะเยา” ซึ่งมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่คล้ายทะเลสาบ โดยก้นทะเลสาบแตกเป็นรอย แสดงถึงการเคลื่อนตัวไปทางขวา และปี 1994 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6 M_B ในบริเวณจังหวัดพะเยา

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ยม

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ยมมีความลาดชันวางตัวในแนวเหนือ-ตะวันตก ห่างจากแม่น้ำยมประมาณ 70 กิโลเมตร เป็นรอยเลื่อนแนวระดับแบบเลื่อนซ้าย ยาวประมาณ 25 กิโลเมตร ในอดีตเคยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.5 ตามมาตราริกเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กลุ่มรอยเลื่อนแม่อิง

กลุ่มรอยเลื่อนแม่อิงวางตัวในแนวเหนือ-ตะวันตก เกิดแผ่นดินไหวในบริเวณนี้หลายครั้ง วัดได้ขนาดตั้งแต่ 2.8 ถึง 4 M_L เมื่อวันที่ 23 สิงหาคม 1999 และ 7 กรกฎาคม 1990 สามารถวัดแผ่นดินไหวได้ขนาด 4 และ 3.8 M_L

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน

กลุ่มรอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน มีความยาว 215 กิโลเมตร เป็นรอยเลื่อนแบบธรรมดา เนื่องจากรอยเลื่อนนี้เป็นรอยเลื่อนที่ต่อมาจากแนวทางตอนเหนือของประเทศเมียนมาร์ ซึ่งเคยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 5.1 M_w ในวันที่ 1 มีนาคม 1989 ถือเป็นรอยเลื่อนสำคัญ ถึงแม้ว่าจะไม่มีแผ่นดินไหวรุนแรงเกิดขึ้นในประเทศไทย

กลุ่มรอยเลื่อนเมยหรือแม่ปิง

กลุ่มรอยเลื่อนเมยเป็นรอยเลื่อนแบบไม่ต่อเนื่อง ยาวประมาณ 250 กิโลเมตร ประกอบด้วยแนวรอยเลื่อนเล็กๆหลายแนว พาดผ่านตอนเหนือของลุ่มน้ำเจ้าพระยา ไปทางกัมพูชาประชาธิปไตย โดยรอยเลื่อนหลักวางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันตกเฉียงเหนือ พาดผ่านจังหวัดตากบางส่วน ส่วนใหญ่เป็นรอยเลื่อนขวา ในวันที่ 23 กันยายน 1933 เกิดแผ่นดินไหวที่ไม่สามารถวัดขนาดได้ สั่นไหวประมาณ 1 นาที และในวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 1975 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 5.6 M_B

กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์

กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ ยาวประมาณ 215 กิโลเมตร ประกอบด้วยแนวรอยเลื่อนเล็กๆหลายแนว มีรายงานการสั่นไหวแบบตื้น (Shallow quake) กว่าร้อยครั้งบริเวณกลุ่มรอยเลื่อนนี้ พื้นดินเกิดรอยแยกและเกิดดินถล่มในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และกลุ่มรอยเลื่อนนี้ยังเป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวเนื่องจากการเก็บน้ำ (Reservoir-induced earthquake) ในวันที่ 15 และ 22 เมษายน 1983 ขนาด 5.3 และ 5.9 M_b เกิดอาฟเตอร์ช็อคมากกว่า 140 ครั้ง ในปีนั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์

กลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์นี้เป็นกลุ่มรอยเลื่อนที่ต่อมาจากรอยเลื่อนสะเกียงในประเทศเมียนมาร์ มีความยาวในประเทศไทยประมาณ 200 กิโลเมตร ตามแม่น้ำแควน้อยและแม่น้ำแม่กลอง สามารถวัดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้ 3 ครั้งในวันที่ 11 มกราคม 1960 วันที่ 22 มกราคม และวันที่ 11 กรกฎาคม 1985 ขนาด 5.8, 4.5 และ 3.9 M_B

กลุ่มรอยเลื่อนท่าแขก

กลุ่มรอยเลื่อนท่าแขกวางตัวตามแนวลำน้ำโขง เป็นรอยเลื่อนระดับ วางตัวตามทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ยาวประมาณ 140 กิโลเมตร ต่อมาจากแนวรอยเลื่อนทางตอนกลางของสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว แผ่นดินไหวที่สามารถวัดได้เกิดในวันที่ 22 มกราคม 1997 และ 11 มิถุนายน 1988 ขนาด 4.2 และ 4.1 M_L

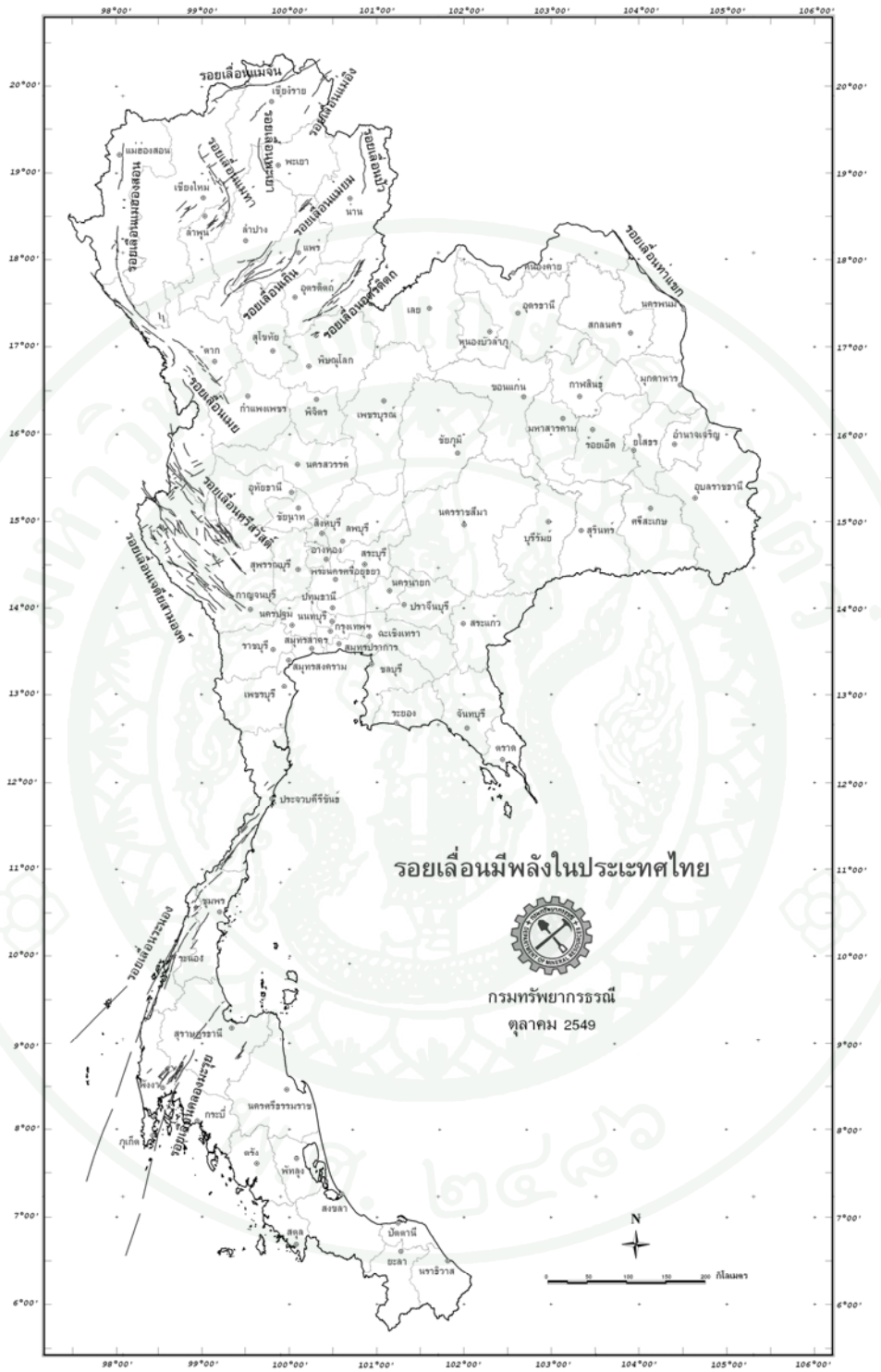
กลุ่มรอยเลื่อนระนอง

กลุ่มรอยเลื่อนระนองเป็นรอยเลื่อนที่ต่อมาจากรอยการมุดตัว (Subduction zone) บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน ความยาวสิ้นสุดที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ทางฝั่งทะเลอ่าวไทย รวม 220 กิโลเมตร รอยเลื่อนวางตัวตามแนวร่องน้ำกุยบุรี มีน้ำพุร้อนเกิดขึ้นทางใต้ของรอยเลื่อน ซึ่งพื้นที่บางส่วนอยู่ในเขตประเทศเมียรมาร์และเวียดนาม โดยวันที่ 30 กันยายน 1978 เกิดแผ่นดินไหววัดขนาดได้ 5.6 M_B

กลุ่มรอยเลื่อนคลองมะลุ่ย

กลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยวางตัวตัดกับแนวหาดพังงาและหาดบ้านดอน ตามแนวของคลองมะรุ่ย ยาวประมาณ 150 กิโลเมตร มีน้ำพุร้อนอยู่บริเวณทางใต้ของแนวรอยเลื่อน ส่วนเหนือของรอยเลื่อนยื่นเข้าไปในชายฝั่งทะเลอ่าวไทย เป็นรอยเลื่อนแบบธรรมดาบริเวณคลองมะรุ่ย ส่วนแนวรอยเลื่อนหลักเป็นแบบรอยเลื่อนระดับ ปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานสำคัญแสดงการเคลื่อนตัวในยุคควอเทอร์นารี แต่สามารถรู้สึกได้ถึงการสั่นสะเทือนบริเวณจังหวัดพังงาและทางตอนใต้ของจังหวัดภูเก็ต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หน่วยการวัดแผ่นดินไหว

ขนาด

บุรินทร์และสุมาลี (2544) สรุปขนาดของแผ่นดินไหว ว่าเป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่พื้นโลกปลดปล่อยออกมาในรูปของการสั่นสะเทือน คำนวณได้จากการตรวจวัดค่าความสูง (Peak) ของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจได้โดยเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว เป็นปริมาณที่บ่งชี้ขนาด ณ บริเวณจุดศูนย์กลาง ขนาดที่นิยมใช้ได้แก่

Richter local magnitude (M_L)

หน่วยวัดขนาดนี้นำเสนอโดย C.F Richter นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา เป็นการบอกขนาดแผ่นดินไหวในยุคเริ่มแรก บ่งบอกถึงปริมาณแผ่นดินไหวท้องถิ่นหรือแผ่นดินไหวระยะใกล้ที่น้อยกว่า 1000 กิโลเมตร การคำนวณใช้คลื่น S ซึ่งมีช่วงคลื่นระหว่าง 0.1-1.0 วินาที

Body-wave Magnitude (M_B)

M_B แสดงขนาดของแผ่นดินไหวทั้งระยะใกล้และระยะไกล คำนวณใช้คลื่น P ซึ่งมีช่วงคลื่นระหว่าง 0.1-1.0 วินาที

Surface-wave Magnitude (M_s)

เป็น M_L ที่แสดงขนาดของแผ่นดินไหวทั้งระยะใกล้และระยะไกลที่มีขนาดใหญ่ คำนวณใช้คลื่น S ซึ่งมีช่วงคลื่นประมาณ 18-22 วินาที

Moment Magnitude (M_W)

ขนาดโมเมนต์เป็นปริมาณที่แสดงถึงปริมาณพลังงานของคลื่นแผ่นดินไหวได้ดีกว่าชนิดอื่น สามารถวิเคราะห์ได้จากโมเมนต์แผ่นดินไหว (Seismic moment, M_O) ซึ่งสามารถคำนวณได้หลายวิธีเช่น จากการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวซึ่งค่อนข้างซับซ้อนหรือจากการสำรวจ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทางธรณีวิทยาเพื่อหาผลคูณของการขจัดของรอยเลื่อนเมื่อเกิดแผ่นดินไหว (Fault displacement) และปริมาณพื้นที่ของรอยเลื่อน (Fault surface area) ส่วนใหญ่ M_w ใช้สำหรับกรณีแผ่นดินไหวระยะไกลที่มีขนาดใหญ่ แผ่นดินไหวประเภทต่างๆสามารถคำนวณอย่างง่ายตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การคำนวณแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ

ขนาด	สูตร	คลื่นแผ่นดินไหว	ความยาวช่วงคลื่น (วินาที)	การตรวจวัด
M_L	$\text{Log } A - \text{Log } A_O$	S	0.1 - 1.0	Displacement
M_B	$\text{Log } A - \text{Log } T + 0.01\Delta + 5.9$	P	1.0 – 5.0	Velocity
M_S	$\text{Log } A + 1.66 \text{ Log } \Delta + 2.0$	Surface	20	Velocity
M_W	$(2/3\text{Log } M_o) - 10.7$	Surface	>200	Velocity

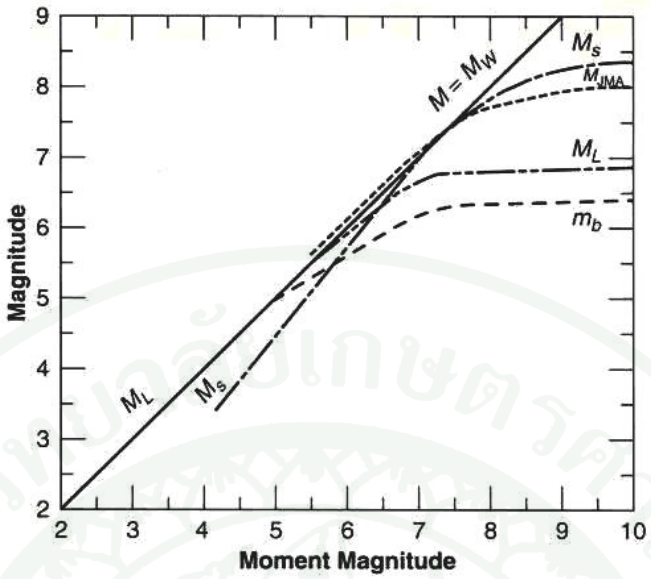
หมายเหตุ A คือ ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน (μ m)
A_O คือ ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัด
T คือ คาบการเคลื่อนตัวของคลื่น P
Δ คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวของเครื่องตรวจวัด โดยวัดเป็นมุมตามแกนของโลก

ที่มา: บุรินทร์และสุมาลี (2544)

Bolt (1989) ได้เสนอแนะการตรวจวัดแผ่นดินไหวระดับตื้น (Shallow earthquake) ไว้ดังนี้ M_B และ M_L ใช้สำหรับแผ่นดินไหวที่มีขนาดประมาณ 3-7 โดย M_S เหมาะกับแผ่นดินไหวขนาด 5-7.5 และ M_W ใช้กับแผ่นดินไหวที่มีขนาดสูงกว่า 7.5 ขึ้นไป การเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณโดยวิธีต่างๆแสดงดังภาพที่ 11

สุพจน์ (2549) ได้รวบรวมความถี่ของการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นแต่ละปีดังตารางที่ 13 โดยแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาก (Great earthquake) มีอัตราการเกิดเฉลี่ย 1 ปีต่อครั้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณโดยวิธีต่างๆ

ที่มา: สุพจน์ (2549)

ตารางที่ 13 อัตราเฉลี่ยของการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ

Description	Magnitude	Average annually occurrence
Great	>8	1[(1)]
Major	7-7.9	17[(2)]
Strong	6-6.9	134[(2)]
Moderate	5-5.9	1319[(2)]
Light	4-4.9	≈13,000
Minor	3-3.9	≈130,000
Very minor	2-2.9	≈1,300,000

หมายเหตุ 1) ข้อมูลตั้งแต่ปี 1900

2) ข้อมูลตั้งแต่ปี 1990 จาก USGS

ที่มา: สุพจน์ (2549)

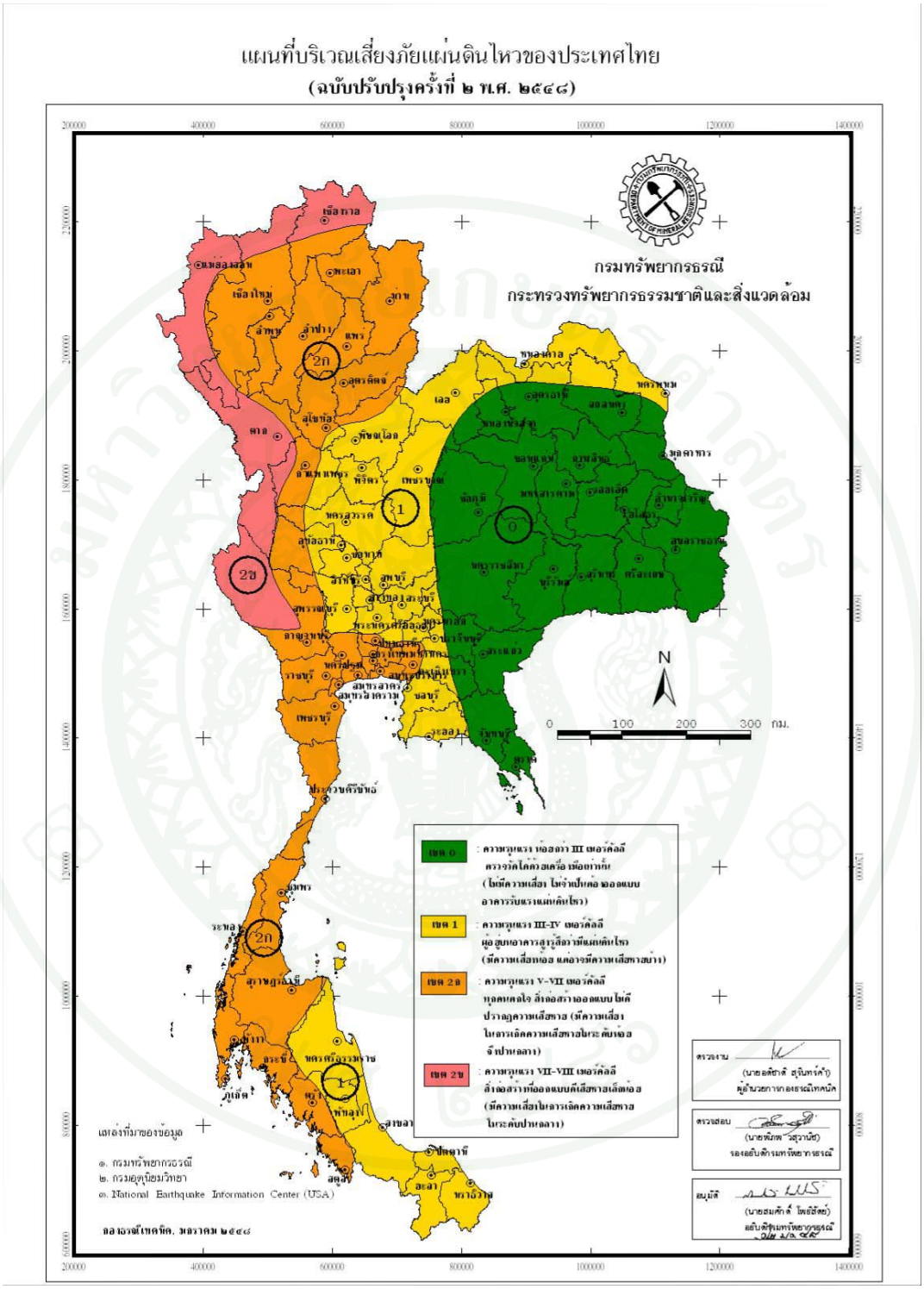
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรมทรัพยากรธรณี (2548) สร้างแผนที่แสดงขอบเขตความรุนแรงจากการค้นพบรอยเลื่อนมีพลังและการรวบรวมสถิติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย ดังภาพที่ 12

Warnitchai and Lisantono (1996) สร้างแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบ่งตามเขตเส้นชั้นค่าอัตราเร่งของพื้นดิน บริเวณประเทศไทยและใกล้เคียง ดังภาพที่ 13 โดยใช้หลักเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับ Uniform building code (UBC) ฉบับปี 2534 โดยภาคเหนือและภาคตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศไทย เทียบได้กับเขต 2B และ 3 ของมาตรฐาน UBC

ICOLD (1989) เสนอในรายงานแนะนำตัวแปรที่ควรใช้วิเคราะห์แรงกระทำทางพลศาสตร์เพื่อออกแบบเขื่อนขนาดใหญ่ถึงการแบ่งพื้นที่เสี่ยงภัยตามความเร่งของพื้นดิน (Peak ground acceleration, PGA) ซึ่งแบ่งเป็น 4 ระดับ ดังตารางที่ 14

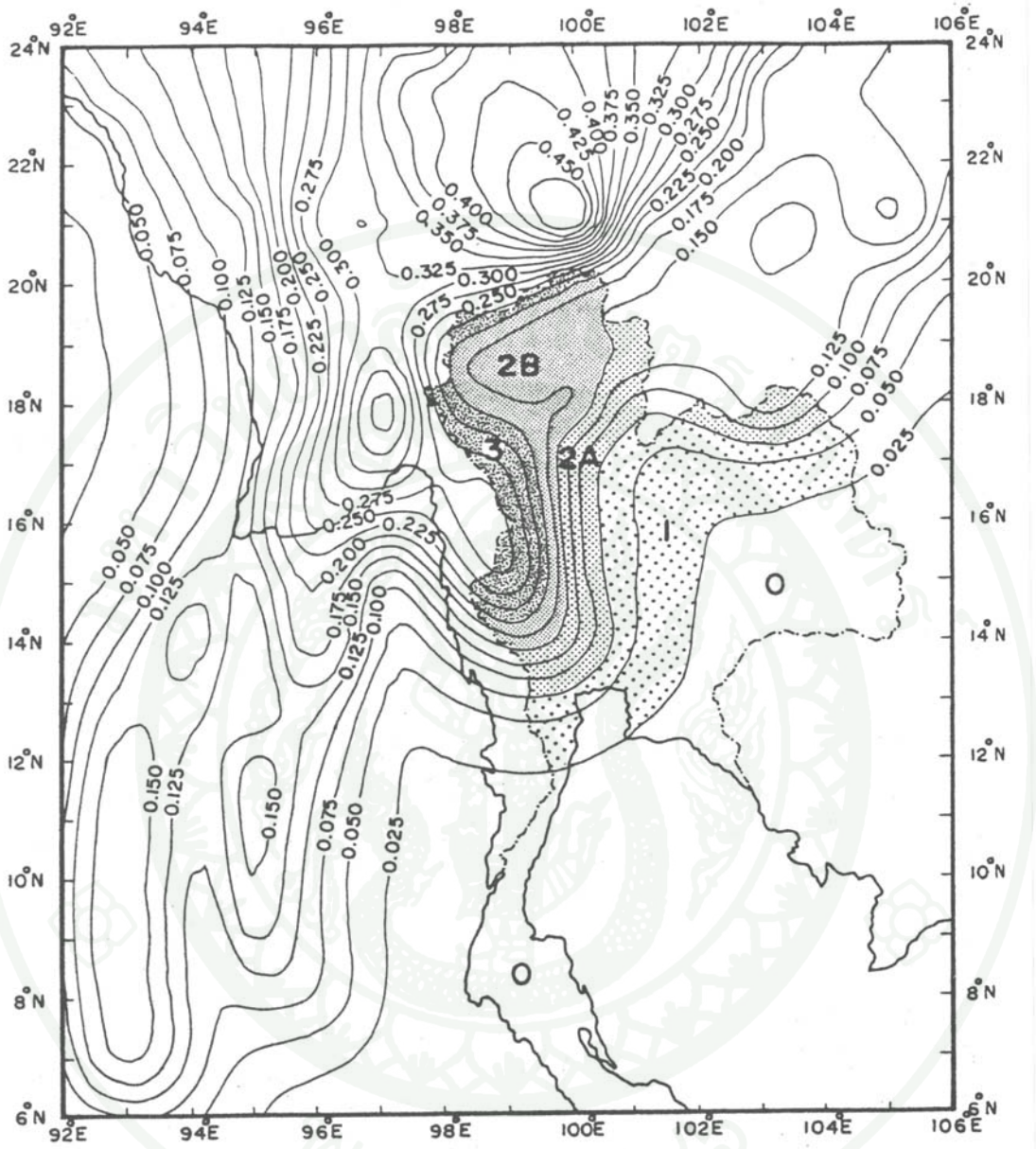
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13_ เส้นชั้นค่าอัตราเร่งของพื้นดิน บริเวณประเทศไทยและใกล้เคียง

ที่มา: Warnitchai and Lisantono (1996)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 การแบ่งพื้นที่เสี่ยงภัยตามความเร่งของพื้นดิน

Condition	Hazard class (Hazard rating)
PGA< 0.1 g	I (Low)
0.1 g $\leq$ PGA $\leq$ 0.25g	II (Moderate)
PGA > 0.25 g ไม่มีรอยเลื่อนมีพลังอยู่ในรัศมี 10 กิโลเมตร จากที่ตั้งเขื่อน	III (High)
PGA > 0.25 g มีรอยเลื่อนมีพลังอยู่ในรัศมี 10 กิโลเมตร จากที่ตั้งเขื่อน	IV (Extreme)

ที่มา: ICOLD (1989)

การออกแบบหรือประเมินความปลอดภัย ICOLD (1989) แนะนำให้ใช้พารามิเตอร์ 2 แบบ ได้แก่ Maximum design earthquake (MDE) และ Operating basis earthquake (OBE) ซึ่งค่าทั้งสองขึ้นอยู่กับระดับการสั่นไหวของแรงกระทำในแต่ละเหตุการณ์ ส่วน USACE (1995) แนะนำว่าการออกแบบในระดับ Maximum credible earthquake (MCE) จะวิเคราะห์แบบ Deterministic กับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงภัยสูง หากเป็นโครงสร้างที่มีความเสี่ยงน้อยกว่าให้ออกแบบโดย MDE

Maximum credible earthquake (MCE)

Krinitzsky (2002) กล่าวว่า MCE เป็นการออกแบบเพื่อรองรับแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่อาจเกิดกับเขื่อน วิเคราะห์ได้โดยวิธี Deterministic โดยพิจารณาจากลักษณะธรณีวิทยาในพื้นที่แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในอดีตและการสำรวจในสนาม โดยส่วนใหญ่จะรวบรวมขนาดแผ่นดินไหวในช่วงหนึ่งเท่าของความแปรปรวน (+1SD) ของขนาดแผ่นดินไหวทั้งหมดหรือความรุนแรงที่รู้สึกได้ที่เคยเกิดในพื้นที่ ใช้กับพื้นที่มีรอบการเกิดยาวนาน ตั้งแต่ 100 ถึง 10,000 ปี (Hull *et al*., 2002) เช่น โรงไฟฟ้า Ellword ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ MCE = 7.5 M_w

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Maximum Design Earthquake (MDE)

MDE ได้จากค่าขนาดความสั่นไหวมากที่สุดที่อาจเกิดขึ้นกับเขื่อนซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบหรือวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนที่เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นจะมีผลกระทบทางสังคมมาก สามารถวิเคราะห์โดยวิธี Probabilistic มีโอกาสเกิดมากกว่า 50% ในช่วงอายุการใช้งานโครงสร้าง (Service life) และมีรอบการเกิดไม่มาก Canadian Emergency Ultrasound Society, CEUS (2005) แนะนำให้ใช้รอบการเกิด1,000 ปี ของการเกิดแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง

Operating basis earthquake (OBE)

OBE เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงน้อยกว่า MDE เหมาะกับการวิเคราะห์สำหรับเขื่อนที่มีโอกาสเกิดมากกว่า 50% ในช่วงอายุการใช้งานโครงสร้าง 100 ปี หรือหากเกิดแผ่นดินไหวขึ้นในระดับกลาง ผลกระทบที่ขึ้นจะทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจในระดับปานกลาง อนึ่งการคิดรอบการเกิดแผ่นดินไหวอาจแตกต่างกันในแต่ละประเทศ ตัวอย่างเช่น Yule (2005) กล่าวว่าเขื่อน Coffee ville ออกแบบให้มีอายุการใช้งาน 100 ปี และใช้รอบการเกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ที่มีโอกาสเกิด 50% ประมาณ 144 ปี

Reservoir-induced earthquake (RIE)

RIE เป็นแผ่นดินไหวเนื่องจากน้ำหนักของน้ำในอ่างเก็บน้ำ อาจเกิดได้ทั้งในกรณีที่ระดับน้ำสูงขึ้น ลดต่ำลง หรืออยู่ในระดับน้ำปกติ โดยเขื่อนนั้นต้องเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ สูงมากกว่า 100 เมตร ที่มีบริเวณอ่างเก็บน้ำกว้างขวาง และตั้งอยู่บริเวณที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหว โดยน้ำหนักของน้ำจะไปกระตุ้น Active fault ที่ตั้งอยู่บริเวณอ่างเก็บน้ำให้มีการเคลื่อนตัว อย่างไรก็ตามเมื่อการเก็บน้ำมีเสถียรภาพดีแล้ว RIE จะไม่เกิดอีก ถึงแม้ว่ารอยเลื่อนในบริเวณเขื่อนจะเป็นรอยเลื่อนหมดพลัง (Inactive fault) ก็ไม่ควรงดเว้นประเมินความเป็นไปได้ในการเกิด RIE ซึ่งเมื่อเกิดแล้วอาจมีความรุนแรงน้อยกว่า เท่ากัน หรือมากกว่า OBE ได้ อย่างไรก็ตาม RIE จะเกิดไม่รุนแรงกว่า MDE ไปได้ ดังนั้นในกรณีที่เป็นเขื่อนขนาดใหญ่ดังกล่าว จึงควรมีการติดตามพฤติกรรมในระหว่างที่มีการเก็บน้ำระยะแรกอย่างใกล้ชิด และควรออกแบบเพื่อป้องกันการสั่นไหวเนื่องจาก RIE ไว้ด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

การพิบัติของเขื่อน

วรากร (2546) ได้แบ่งระดับการพิบัติของเขื่อนไว้เป็น 2 ระดับ ดังนี้

1. การพิบัติที่รุนแรง (Catastrophic Failure) เป็นการพิบัติที่เกิดขึ้นฉับพลัน มีความรุนแรงมาก มักทำความเสียหายอย่างกว้างขวาง มักเกิดจากน้ำล้นสันเขื่อน การกัดเซาะภายในและฐานรากเขื่อน การเคลื่อนพังของลาดดิน เป็นต้น

2. การพิบัติเพียงเล็กน้อย (Minor damage) เป็นการพิบัติที่มีความเสียหายปรากฏการณ์ให้เห็นล่วงหน้า เมื่อตรวจพบถึงสาเหตุก็สามารถซ่อมแซมแก้ไขให้อยู่ในสภาพปกติ แต่หากปล่อยปละละเลยก็อาจขยายตัวเป็นการพิบัติที่รุนแรงได้

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน

ในทางวิศวกรรม Harrald *et al*. (2004) จำแนกการพิบัติของเขื่อนเป็น 4 สาเหตุหลัก คือ

1. น้ำล้นสันเขื่อน (Overtopping) เนื่องมาจากการออกแบบทางชลศาสตร์ไม่เพียงพอ เช่น การออกแบบอาคารระบายน้ำล้นมีขนาดทางระบายน้ำกว้างไม่เพียงพอ

2. การกัดเซาะภายนอก (External erosion) เนื่องมาจากดินวัสดุทำตัวเขื่อนไม่ได้มาตรฐาน

3. การไหลซึม (Piping) เนื่องจากการไหลซึมของน้ำผ่านรอยแยกต่างๆ เป็นรูโพรงภายในตัวเขื่อนจนทำให้เขื่อนเกิดการวิบัติ

4. เสถียรภาพความลาดชัน (Slope stability) เนื่องมาจากการวิเคราะห์ไม่เพียงพอ ก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน หรือลักษณะภูมิประเทศและทางธรณีวิทยาไม่เหมาะสมกับการก่อสร้าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

Fell *et al.* (2005) กล่าวว่า เมื่อเขื่อนรับแรงแผ่นดินไหว (Additional load) ซึ่งเป็นแรงที่อยู่นอกเหนือจากแรงสถิตย์ (Static load) ที่ได้ออกแบบไว้ เวลาไม่กี่วินาทีจากแรงกระทำจากแผ่นดินไหว เขื่อนต้องรับแรงในหลายทิศทางทั้งแรงในแนวราบและแนวดิ่ง และเขื่อนอาจเกิดการพิบัติเนื่องจากสาเหตุดังนี้

1. เกิดการทรุดตัวและเกิดรอยแตกบริเวณตัวเขื่อน โดยเฉพาะบริเวณใกล้สันเขื่อน

2. สูญเสียเสถียรภาพความลาดชัน บริเวณด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ

3. เกิดการทรุดตัวของระยะเผื่อ (Freeboard) และน้ำอาจล้นสันเขื่อนได้ หากระยะเผื่อนี้ทรุดตัวมากกว่าค่าที่ยอมให้ได้

4. เกิดการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างตัวเขื่อน ฐานยันเขื่อน และอาคารประกอบเขื่อน ซึ่งก่อให้เกิดรอยแตกรอบๆบริเวณที่ทรุดตัว

5. เมื่อเกิดรอยแตก อาจเกิดการกัดเซาะและการไหลซึมภายในขึ้น

6. เกิด Liquefaction หรือ ดินสูญเสียกำลังรับแรงเฉือน เมื่อแรงดันน้ำในดินเพิ่มขึ้น ในระหว่างที่เกิดการสั่นไหวที่ตัวเขื่อนและฐานราก

7. เกิดการเคลื่อนตัวที่ต่างกันของรอยเลื่อนที่อยู่ใต้ฐานรากเขื่อน

8. เกิดน้ำล้นสันเขื่อน จากการเคลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนใต้อ่างเก็บน้ำ ทำให้เกิดคลื่นน้ำภายในอ่างเก็บน้ำ (Seiches)

9. คลื่นน้ำในอ่างเก็บน้ำสูงล้นสันเขื่อน เนื่องจากแผ่นดินไหวทำให้เกิดดินถล่มบริเวณอ่างเก็บน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10 ท่อส่งน้ำที่ผ่านใต้ตัวเขื่อนเสียหาย ทำให้เกิดการกัดเซาะและน้ำไหลซึมภายใน

ซึ่งปัญหาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ

1. ความรุนแรงของแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้งเขื่อนและความสามารถรับแรงแผ่นดินไหวของเขื่อน

2. วัสดุฐานราก ลักษณะภูมิประเทศ และลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณที่ตั้งเขื่อน

3. วิธีและความประณีตในการก่อสร้าง

4. ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำขณะเกิดแผ่นดินไหว

สุทธิศักดิ์ (2549) ได้สรุปพฤติกรรมที่อาจนำไปสู่การพิบัติของเขื่อนได้ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนในแนวดิ่งใกล้ตัวเขื่อน

2. การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน (ภาพที่ 14)

3. การเกิดคลื่นน้ำภายในอ่างเก็บน้ำ (Seiches) เนื่องจากความสั่นสะเทือน

4. การเกิดแผ่นดินถล่มรอบอ่างเก็บน้ำจากแรงแผ่นดินไหวทำให้เกิดน้ำข้ามสันเขื่อน

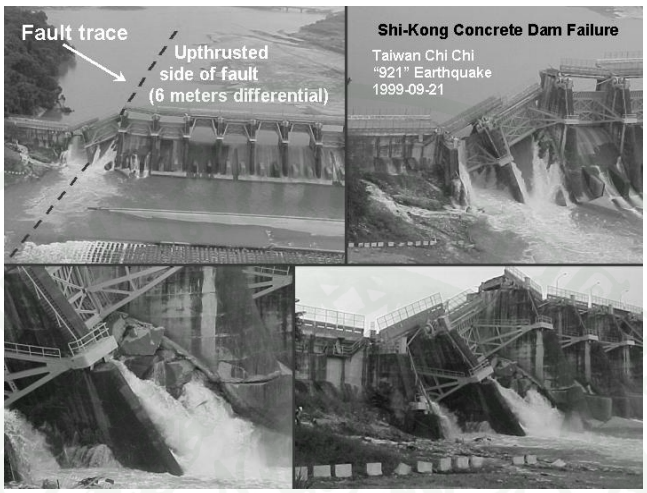
5. เกิดการพิบัติของอาคารบังคับน้ำ ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำได้

6. การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนตามรอยแตกในแนวขวางกับสันเขื่อน

7. การยุบตัวของสันเขื่อนในแนวดิ่งเนื่องมาจากแรงสั่นสะเทือน ทำให้เกิดรอยแตกตามแนวแกนเขื่อน (ภาพที่ 15)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. การสูญเสียกำลังของดินตัวเขื่อนหรือฐานรากเนื่องจากการเกิด Liquefaction ทำให้เกิดการเลื่อนไถลหรือยุบตัวของเขื่อน (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 14 ความเสียหายของเขื่อน Shi-Kang ประเทศไต้หวัน

ที่มา: Olsen (1999)



ภาพที่ 15 รอยแตกตามแนวแกนเขื่อนที่เกิดจากการยุบตัวของสันเขื่อนในแนวดิ่งของเขื่อน Fatehgarh ประเทศอินเดีย

ที่มา: Martin (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 เขื่อน Lower San Fernando พิบัติจาก Liquefaction ในปี 1971

ที่มา: USGS (1995)

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลหลังจากเขื่อนรับแรงแผ่นดินไหวมี 4 ประการ ได้แก่

1. การออกแบบเขื่อนอย่างเหมาะสม มีชั้นกรองที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะภายใน สามารถระบายน้ำออกจากตัวเขื่อนและฐานรากด้วยปริมาณที่เหมาะสม

2. เสถียรภาพความลาดชันทั้งระหว่างรับแรงและหลังจากรับแรงแล้วในช่วงต้น

3. การเสียรูป (Deformation) ที่เพิ่มขึ้นหลังจากรับแรงแผ่นดินไหว ทั้งเรื่องการทรุดตัวและรอยแตกที่เพิ่มขึ้นบริเวณตัวเขื่อนและระยะเผื่อ

4. การเกิด Liquefaction ของชั้นทราย บริเวณฐานรากเขื่อนและตัวเขื่อน กลไกที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพความลาดชัน ในช่วงระหว่างรับแรงและหลังจากรับแรงแล้วในช่วงต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2549) รวบรวมเหตุการณ์ความเสียหายต่อตัวเขื่อนจากแผ่นดินไหวในโลก โดยเรียงลำดับจากปัจจุบันไปหาอดีต ดังนี้

1. ปี 2004 เกิดแผ่นดินไหว Sumatra Andaman earthquake ขนาด 9.0 Mw ที่ประเทศอินโดนีเซียทำให้เกิดความเสียแก่เขื่อน เช่น เขื่อน Kalpong ในหมู่เกาะ Andaman & Nicobar ซึ่งเป็นเขื่อนหินทิ้งสูง 27 เมตร ยาว 146 เมตร เกิดรอยแตกตามยาวกว้างประมาณ 5 เซนติเมตรและทรุดตัวไปทางด้านเหนือน้ำ ส่วนเขื่อนอีก 2 แห่งในประเทศอินเดียเกิดความเสียหายเล็กน้อย

2. ปี 2001 เกิดแผ่นดินไหว Bhuj earthquake ประเทศอินเดีย ขนาด 7.4 M_w ความเสียหายที่เกิดกับเขื่อนเช่น เกิด Liquefaction เกิดการทรุดตัวขนาดใหญ่บนสันเขื่อน เกิดรอยแตกตามยาวบริเวณด้านเหนือน้ำและสันเขื่อน เกิดการอูดตัวส่วนล่างด้านเหนือน้ำ และเกิด Sand boils บริเวณอ่างเก็บน้ำ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการพังทลายของเขื่อนเพราะเก็บน้ำอยู่ในระดับต่ำ และเขื่อน Fatchgadh เป็นเขื่อนดินที่รอยแตกตามยาวทำให้ลาดชันเขื่อนด้านเหนือน้ำพิบัติ

3. ปี 1999 Chi-Chi earthquake ในประเทศไต้หวัน ขนาด 6.7 M_w ก่อให้เกิดความเสียหายแก่เขื่อนต่างๆ เช่นเขื่อน Shi-Kang เป็นเขื่อนคอนกรีตซึ่งมีการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนผ่านฐานรากเขื่อนทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างสันเขื่อนถึง 6 เมตร และเขื่อน Shuishin เป็นเขื่อนดินที่มีการทรุดตัวของสันเขื่อนประมาณ 5 เซนติเมตรทำให้เกิดรอยแตกตามยาวบริเวณสันเขื่อน เป็นต้น

4. ปี 1995 Kobe earthquake ในประเทศญี่ปุ่น ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเขื่อนดินขนาดเล็ก 3 เขื่อนได้แก่เขื่อน Upper middle และ Lower niteko โดยแผ่นดินไหวมีอัตราเร่งที่ผิวดินประมาณ 0.3 ถึง 0.5g โดยเขื่อน Lower niteko เกิดรอยแตกทำให้เกิดการทรุดตัวประมาณ 2 เมตร บริเวณแกนเขื่อน และอีกสองเขื่อนเกิด Liquefaction ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปประมาณ 70 เมตรด้านท้ายน้ำ

5. ปี 1994 Northridge earthquake ในรัฐเคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งเขื่อนดินและเขื่อนหินจำนวน 11 เขื่อนเกิดรอยแตกและเกิดการเคลื่อนที่ของลาดชันเขื่อน โดยเขื่อน Lower van norman สูง 38 เมตร ซึ่งเป็นเขื่อนที่สร้างด้วยระบบ Hydraulic fill ตรวจพบรอยแตก และต่อมาในปี 1971 หลังเกิด San Fernando earthquake ตรวจพบรอยแตกกว้าง 5-9 เซนติเมตร เป็นระยะทาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลายร้อยเมตร รอยแตกนี้ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านเหนือน้ำ และทำให้ Outlet pipe เกิดความเสียหายทำตัวเขื่อนเกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานสำหรับเก็บกักน้ำได้

6. ปี 1989 Loma Prieta earthquake ในรัฐเคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา เขื่อน Austrian เป็นเขื่อนดินสูง 60 เมตร พบรอยแตกบริเวณฐานยันเขื่อน (Abutment) และการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อนมากที่สุดประมาณ 1 เมตร

7. ปี 1971 San Fernando earthquake ขนาด 6.6 ริคเตอร์ ในรัฐเคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้เขื่อน Lower San Fernando ซึ่งเป็นเขื่อน Hydraulic fill สูง 44 เมตรยาว 663 เมตร เสียหายจากการเกิด Liquefaction ตัวเขื่อนถล่มลงในอ่างเป็นระยะ 550 เมตร

8. ปี 1925 Santa Barbara earthquake ขนาดในรัฐเคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา พบความเสียหายต่อเขื่อน Sheffield dam ซึ่งเป็นเขื่อน Tailing dam มีความสูง 25 ฟุต ยาว 720 ฟุต เกิด Liquefaction ทำให้เขื่อนพังทลายโดยสมบูรณ์

9. ปี 1923 Kanto earthquake ในประเทศญี่ปุ่น พบความเสียหายต่อเขื่อน Ono ที่มีความสูง 40 เมตร พบรอยแตกความยาว 21 เมตรและมีการทรุดตัว 30 เซนติเมตรบริเวณชั้นดินเหนียวแกนกลางเขื่อน นอกจากนั้นยังเกิดรอยแตกขนาดเล็กและการเคลื่อนตัวเฉพาะที่ (Local slide)

10. ปี 1906 San Francisco earthquake ในรัฐเคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ส่งผลกระทบต่อเขื่อนดินขนาดกลางประมาณ 30 เขื่อนที่ตั้งอยู่ภายในรัศมี 50 กิโลเมตรจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว โดยส่วนใหญ่ได้รับความเสียหายเพียงเล็กน้อย

Wieland (2001) สรุปจากประสบการณ์ว่า เขื่อนที่ใช้วิธีบดอัดดินเหนียวและตั้งอยู่บนดินเหนียวแข็งหรือหินฐานรากสามารถทนต่อระดับการสั่นสะเทือนแบบรุนแรงได้ดี แม้ว่าการบดอัดจะล้าสมัยหรือบดอัดไม่ได้มาตรฐาน ส่วนเขื่อนหินทิ้ง (Rockfill dams) และ เขื่อนหินดาดคอนกรีต (Concrete faced rockfill dams, CFRD) ถือเป็นประเภทเขื่อนที่มีความทนทานต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Swaisgood (1998) แสดงข้อมูลการทรุดตัวของเขื่อนจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลายๆ เหตุการณ์ ดังแสดงในตารางที่ 15

Pell and Fell (2002, 2003) อ้างโดย Fell *et al*. (2005) จำแนกระดับการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว จากการพิบัติของเขื่อนดินจำนวน 305 เขื่อน ในจำนวนนี้มี 95 เขื่อนที่เกิดรอยแยกบริเวณสันเขื่อน การจำแนกระดับการพิบัติแสดงดังตารางที่ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ข้อมูลการทรุดตัวของเขื่อนจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ID No	GENERAL INFORMATION							EARTHQUAKE DATA				CREST SETTLEMENT		RELATIVE DEGREE OF	REFERENCES	ID No
	NAME OF DAM	LOCATION	YEAR BUILT	DAM TYPE	DH m	CL m	AT m	DATE	M	D,km	PGA, g	m (a)	% (b)	DAMAGE (e)		
1	UPPER MURAYAMA	Japan	1923	E-HF	24	320	3	1 Sep 23	8.2	18	0.32 e	0.20	0.74	Moderate	1, 20, 27, 32	1
2	ONO	Japan	1914	E	41	309	11	1 Sep 23	8.2	98.2	0.30 e	0.27	0.53	Serious	1, 15, 20, 27, 32	2
3	CHATSWORTH NO.2	California	1918	HF	12	610	?(c)	30 Aug 30	5.3	1	0.40 e	0.08	0.63	Moderate	1, 27, 32	3
4	MALPASSO	Peru	1936	ECRD	78	152	30	10 Oct 38	VI+	n/a	0.10 e	0.08	0.07	Minor	1, 4	4
5	COGOTI	Chile	1939	CFRD	85	159	0	6 Apr 43	7.9	88.6	0.20 e	0.38	0.44	Minor	1, 2, 4, 5, 24, 32	5
6	SOUTH HAIWEE	California	1912	HF	25	457	38	21 Jul 52	7.7	151	0.05 e	0.02	0.04	Minor	1, 27, 32	6
7	HEBGEN	Montana	1914	E	25	213	10	17 Aug 59	7.6	0.21	0.71 e	1.69	4.82	Serious	24, 25, 27, 32	7
8	MIBORO	Japan	1961	ECRD	130	444	0	19 Aug 61	7.0	20	0.15 e	0.03	0.02	Minor	16, 20, 24, 32	8
9	MINASE	Japan	1961	CFRD	67	210	?	16 Jun 64	7.5	145	0.08 e	0.06	0.09	Minor	4, 32	9
10	U. SAN FERNANDO	California	1921	HF	25	390	18	9 Feb 71	6.6	1.61	0.55 e	0.91	2.11	Serious	3, 24, 32	10
11	OROVILLE	California	1967	ECRD	235	1707	0	1 Aug 75	5.9	6.9	0.10 r	0.01	0.004	None	4, 32, 34	11
12	LA VILLITA	Mexico	1966	ECRD	60	427	75	15 Nov 75	7.2	20	0.04 r	0.02	0.02	None	5, 11, 16, 32	12
13	EL INFIERNILLO	Mexico	1964	ECRD	146	340	0	15 Nov 75	7.2	22.9	0.09 r	0.02	0.02	None	5, 32	13
14	EL INFIERNILLO	Mexico	1964	ECRD	146	340	0	11 Oct 75	5.9	78.9	0.08 r	0.04	0.03	None	5, 32	14
15	TSENGWEN	Taiwan	1973	ECRD	131	n/a	?	14 Apr 76	5.3	7.99	0.16 e	0.04	0.03	n / a	16	15
16	EL INFIERNILLO	Mexico	1964	ECRD	146	340	0	14 Mar 79	7.6	95	0.12 r	0.13	0.09	Minor	5, 32	16
17	LA VILLITA	Mexico	1966	ECRD	60	427	75	14 Mar 79	7.6	108	0.02 r	0.05	0.03	Minor	5, 11, 32	17
18	LA VILLITA	Mexico	1966	ECRD	60	427	75	25 Oct 81	7.3	30.6	0.09 r	0.14	0.11	None	5, 11, 32	18
19	EL INFIERNILLO	Mexico	1964	ECRD	146	340	0	25 Oct 81	7.3	54.7	0.05 e	0.06	0.04	None	5, 32	19
20	NAMIOKA	Japan	1983	ECRD	52	265	0	26 May 83	7.7	145	0.08 r	0.06	0.11	None (f)	16	20
21	COYOTE	California	1936	E	43	299	0	24 Apr 84	6.2	0.02	0.63 e(d)	0.08	0.18	Minor (f)	30, 32	21
22	LEROY ANDERSON	California	1950	ECRD	72	427	0	24 Apr 84	6.2	2.42	0.41 r	0.02	0.02	Minor	30, 32	22
23	MAKIO	Japan	1961	ECRD	77	264	29	14 Sep 84	6.8	5.15	0.57 e	0.50	0.47	Minor	16, 20, 32	23
24	EL INFIERNILLO	Mexico	1964	ECRD	146	340	0	19 Sep 85	8.1	75.7	0.13 r	0.11	0.08	Minor	5, 16, 32	24
25	LA VILLITA	Mexico	1966	ECRD	60	427	75	19 Sep 85	8.1	43.5	0.13 r	0.33	0.24	Minor	5, 11, 16, 32	25
26	LA VILLITA	Mexico	1966	ECRD	60	427	75	21 Sep 85	7.5	61.2	0.04 r	0.12	0.09	None	5, 11, 16, 32	26
27	MATAHINA	New Zealand	1967	ECRD	86	400	?	2 Mar 87	6.3	8.53	0.33 r	0.12	0.14	Moderate	13, 16, 21, 32	27
28	NAGARA	Japan	1985	ECRD	52	n/a	?	17 Dec 87	6.9	28.8	0.27 r	0.02	0.04	n / a	29	28
29	AUSTRIAN	California	1950	E	56	213	0	17 Oct 89	7.1	1.61	0.57 e	0.85	1.51	Serious	6, 14, 23, 32	29
30	LEXINGTON	California	1953	E	63	253	0	17 Oct 89	7.1	3.22	0.45 r	0.26	0.41	Minor	6, 14, 32, 33	30
31	GUADALUPE	California	1935	E	43	204	0	17 Oct 89	7.1	9.66	0.42 e	0.20	0.45	Minor	6, 14, 32	31
32	ELMER J. CHESBRO	California	1955	E	29	220	0	17 Oct 89	7.1	12.9	0.42 e	0.11	0.39	Moderate	6, 14, 32	32
33	VASONA	California	1935	E	10	149	8	17 Oct 89	7.1	8.86	0.37 e	0.05	0.27	Minor	6, 14, 32	33
34	LEROY ANDERSON	California	1950	ECRD	72	427	0	17 Oct 89	7.1	20.9	0.26 r	0.04	0.06	Minor	6, 14, 32	34
35	SAN JUSTO	California	1987	ECRD	40	340	14	17 Oct 89	7.1	27.4	0.26 r	0.04	0.07	None	14, 32	35
36	MASIWAY	Philippines	1977	E	25	427	3	16 Jul 90	7.7	2.74	0.68 e	1.06	3.79	Serious (f)	19, 28	36
37	PANTABANGAN	Philippines	1975	ECRD	114	732	0	16 Jul 90	7.7	5.64	0.58 e	0.28	0.24	Moderate (f)	19, 28	37
38	AYA	Philippines	1975	ECRD	102	427	0	16 Jul 90	7.7	5.96	0.58 e	0.20	0.20	Minor (f)	19, 28	38
39	DIAYO	Philippines	1976	ECRD	60	201	0	16 Jul 90	7.7	17.5	0.38 e	0.07	0.11	Minor (f)	19, 28	39

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 (ต่อ) ข้อมูลการทรุดตัวของเขื่อนจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ID No	GENERAL INFORMATION							EARTHQUAKE DATA				CREST SETTLEMENT		RELATIVE DEGREE OF DAMAGE (e)	REFERENCES	ID No
	NAME OF DAM	LOCATION	YEAR BUILT	DAM TYPE	DH m	CL m	AT m	DATE	M	D,km	PGA, g.	m (a)	% (b)			
40	CANILI	Philippines	1976	ECRD	70	351	0	16 Jul 90	7.7	17.5	0.38 e	0.04	0.06	Minor (f)	19, 28	40
41	MAGAT	Philippines	1985	ECRD	100	1296	0	16 Jul 90	7.7	80.5	0.05 e	0.01	0.006	None (f)	19	41
42	COGSWELL	California	1934	CFRD	81	200	0	28 Jun 91	5.8	4.03	0.46 e	0.04	0.051	Minor	17	42
43	ROBERT MATTHEWS	California	1962	E	46	192	0	25 Apr 92	6.9	64.4	0.07 e	0.00	0.007	None (f)	35	43
44	WIDE CANYON	California	1967	E	26	678	?	28 Jun 92	7.5	29.8	0.2 e	0.01	0.048	Minor (f)	10, 35	44
45	YUCAIPA No. 1	California	1977	E	13	128	9	28 Jun 92	6.6	28.3	0.15 e	0.01	0.028	Minor (f)	10, 35	45
46	YUCAIPA No. 2	California	1977	E	15	146	9	28 Jun 92	6.6	28.3	0.15 e	0.00	0.019	Minor (f)	10, 35	46
47	UPPER LAKE MARY	Arizona	1941	E	13	247	1	29 Apr 93	5.5	77.3	0.02 e	0.00	0.004	None (f)	7	47
48	U. SAN FERNANDO	California	1921	HF	25	390	18	17 Jan 94	6.7	10.3	0.42 e	0.44	1.021	Serious (f)	8, 22, 26, 31	48
49	L. SAN FERNANDO	California	1915	E-HF	38	537	6	17 Jan 94	6.7	9.5	0.44 e	0.20	0.460	Serious (f)	8, 22, 26, 31	49
50	LOS ANGELES	California	1977	E	47	671	0	17 Jan 94	6.7	9.82	0.43 r	0.09	0.188	Moderate (f)	8, 22, 26, 31	50
51	NORTH DIKE [LA]	California	1977	E	36	427	0	17 Jan 94	6.7	10.1	0.43 e	0.03	0.089	Moderate (f)	8, 22, 26, 31	51
52	LOWER FRANKLIN	California	1922	HF	31	152	?	17 Jan 94	6.7	18.2	0.30 e	0.05	0.146	Moderate (f)	12, 22, 26, 31	52
53	SANTA FELICIA	California	1955	E	65	389	0	17 Jan 94	6.7	33.3	0.18 e	0.02	0.030	Minor (f)	22, 26, 31	53
54	COGSWELL	California	1934	CFRD	81	200	0	17 Jan 94	6.7	52.6	0.10 e	0.02	0.026	Minor (f)	18, 26, 31	54
	DAMS SUBJECTED TO LIQUEFACTION															
	SHEFFIELD	California	1917	E	8	220	2	29 Jun 25	6.3	11.3	0.15 e	??	>65	Failure	25, 27, 32	
	L. SAN FERNANDO	California	1915	E-HF	43	537	6	9 Feb 71	6.6	1.61	0.55 e	15.24	31	Serious (f)	25, 32	
	LA PALMA	Chile	1930	E	8	140	0	3 Mar 85	7.8	77.3	0.46 e	0.79	10	Serious (f)	9	
	LA MARQUESA	Chile	1943	E	10	220	0	3 Mar 85	7.8	43.5	0.60 e	2.29	23	Serious (f)	9	

LEGEND

DH = dam height AT = alluvium thickness CL = Crest Length
M = earthquake magnitude, ML or mb for less than 6.5, and MS above 6.5.
D = distance from nearest ground rupture or epicenter, whichever is closest
PGA = peak horizontal ground acceleration; e = estimated from attenuation curves by Seed and Idriss (1982), r - recorded nearby

DAM TYPES

HF - Hydraulic Fill
E - Earthfill
ECRD - Earth Core Rockfill Dam
CFRD - Concrete Faced Rockfill Dam

NOTES:

(a) - Settlement shown is the single maximum reported or is an average from upstream, downstream and centerline readings
(b) - Determined as a percentage of combined dam height and alluvium thickness
(c) - If alluvium thickness unknown (?), it is considered to be 0 for % settlement calculations
(d) - Recorded nearby at 1.29g; estimated value from attenuation curves for M = 6.2 at 0.1 mi. distance.
(e) - Description from Ref No.32 unless otherwise noted
(f) - See references cited.

ที่มา: Swaisgood (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ระบบการจำแนกระดับการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

Damage classed		Maximum longitudinal crack width[(1)] (mm)	Maximum relative crest settlement[(2)] (%)
Number	Description		
0	No or Slight	<10	<0.03
1	Minor	10-30	0.03-0.2
2	Moderated	30-80	0.2-0.5
3	Major	80-150	0.5-1.5
4	Severe	150-500	1.5-5
5	Collapse	>500	>5

หมายเหตุ 1) วัดจากรอยแตกที่กว้างที่สุด หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2) การทรุดตัวของเขื่อนเทียบจากความสูง (จากฐานรากถึงสันเขื่อน) หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

ที่มา: Pell and Fell (2002, 2003)

องค์ประกอบของเขื่อนที่มีผลต่อแผ่นดินไหว

Seed (1979) ให้รายละเอียดเพื่อป้องกันความเสียหายของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว 10 ข้อ ดังนี้

1. ระยะเผื่อ (Freeboard) ต้องสูงมากเพียงพอต่อการทรุดตัว และยุบตัว (Slump) ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

2. ชั้นกรองด้านเหนือน้ำ (Transition zones) ต้องมีความกว้างเพียงพอ สามารถลดความรุนแรงจากรอยร้าวในแกนเขื่อนได้

3. ชั้นกรองประเภท Chimney ต้องอยู่ใกล้กึ่งกลางสันเขื่อนให้มากที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. พื้นที่การระบายน้ำ (Drainage zones) ควรมีเพียงพอสำหรับระบายน้ำเมื่อเกิดรอยร้าวภายในตัวเขื่อน

5. แกนเขื่อนมีความกว้างเพียงพอและก่อสร้างจากดินวัสดุที่มีค่าดัชนีความเหนียวสูง ไม่เสี่ยงต่อการเกิดรอยร้าว

6. ชั้นกรองด้านเหนือน้ำมีขนาดคละดี สามารถปิดรอยร้าวได้

7. สันเขื่อนสามารถป้องกันการกัดเซาะจากการเกิดน้ำล้นสันเขื่อนได้

8. รอยต่อระหว่างฐานยันเขื่อนและแกนเขื่อนควรมีรูปร่างผายออก

9. วัสดุแกนเขื่อนควรมีความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบเขื่อนส่วนอื่นๆ

10. มีการป้องกันการเลื่อนไถลของดินรอบอ่างเก็บน้ำ

ICOLD (1986c, 1990) และ ANCOLD (1998) เสนอแนวทางการออกแบบเพื่อป้องกันการพิบัติจากแรงแผ่นดินไหวเพื่อป้องกันรอยร้าว การทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของเขื่อนดินดังนี้

1. ระยะเผื่อต้องมีความสูงมากพอที่จะทรุดตัว ทั้งสภาวะการเก็บน้ำปกติและเมื่อรอยเลื่อนเคลื่อนตัว

2. ชั้นกรองด้านท้ายน้ำควรได้รับการออกแบบและก่อสร้างอย่างดี เมื่อแกนเขื่อนแตกร้าวระหว่างรับแรงสั่นสะเทือน ชั้นกรองสามารถควบคุมการกัดเซาะจากภายในตัวเขื่อน และยังสามารถทำงานได้เมื่อสันเขื่อนทรุดตัวมาก ชั้นกรองหนา 2.5 ถึง 3 เมตร ในเขื่อนขนาดใหญ่ เมื่อรับแรงแผ่นดินไหวแล้วยังทำงานได้จริง 1.5 เมตร ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยอย่างมาก

3. พื้นที่การระบายน้ำต้องมีมากพอเพื่อทำงานร่วมกับชั้นกรองเมื่อแกนเขื่อนแตกร้าว อย่างน้อยด้านท้ายน้ำต้องมีการไหลได้อย่างอิสระทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การลดโอกาสเกิด Liquefaction โดยการทำให้ฐานรากแน่นขึ้น การขุดรื้อและแทนที่วัสดุใหม่ และการเพิ่มน้ำหนักถ่วง

5. เม็ดดินที่เกิดจากการผุกร่อนของหินทั้งหินถมตัวเขื่อนและหินฐานราก ทำให้เกิดพื้นที่อ่อนแอ เมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนอาจเกิดการเคลื่อนตัวบริเวณนี้

Sherard (1967), Seed (1979a) และ Finn (1993) เสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

1. ชั้นกรองควรใช้วัสดุที่มีขนาดคละดี เมื่อเกิดการกัดเซาะภายในตัวเขื่อนที่เกิดจากรอยร้าวภายในหลังจากรับแรงสั่นสะเทือน ชั้นกรองสามารถอุดวัสดุเพื่อป้องกันการสูญเสียดินเนื้อเขื่อน แต่ยังยอมให้น้ำไหลผ่านได้ การทำหน้าที่นี้ชั้นกรองด้านท้ายน้ำมีความสำคัญมากกว่าด้านเหนือน้ำ

2. เมื่อน้ำไหลล้นข้ามสันเขื่อนจะเกิดการกัดเซาะ ควรออกแบบสันเขื่อนให้มีความกว้างที่เหมาะสมและออกแบบระยะเผื่อการทรุดตัวให้เพียงพอ โดยทั่วไปจะก่อสร้างกำแพงกันคลื่นเพื่อป้องกันการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

3. บริเวณรอยต่อระหว่างแกนเขื่อนและฐานยันเขื่อนที่มีรูปร่างผายออก มักเกิดปัญหาการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน ควรแก้ปัญหาโดยทำผนังคอนกรีตที่ฐานยันเขื่อนร่วมกับดูแลการออกแบบและก่อสร้างชั้นกรองด้านท้ายน้ำบริเวณรอยต่อนี้อย่างดี

4. Fin (1993) แนะนำให้ออกแบบชั้นกรองประเภท Chimney ให้ติดกับแกนเขื่อนด้านเหนือน้ำ เพื่อลดพื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เป็นปัญหาต่อกำลังของดินเมื่อเขื่อนรับแรงสั่นสะเทือน และการใช้ดินเม็ดหยาบในตัวเขื่อนควรมีการบดอัดอย่างดี เพื่อลดโอกาสเกิด Liquefaction

5. ปรับปรุงลาดชันบริเวณอ่างเก็บน้ำให้แข็งแรงขึ้น เพื่อป้องกันการเลื่อนไถลของดินในอ่างเก็บน้ำเมื่อเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงดูแลอาคารประกอบต่างๆให้อยู่ในสภาพดี

6. ให้ความสนใจการปรับปรุงฐานรากบริเวณรอยเลื่อนเป็นพิเศษ เพื่อป้องกันผลกระทบเมื่อรอยเลื่อนเกิดการเคลื่อนตัวบริเวณฐานราก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ควรก่อสร้างเขื่อนบนฐานรากหินมากกว่าฐานรากดิน เพื่อป้องกันการเกิด Liquefaction

8. ในการเลือกวัสดุก่อสร้างเขื่อน ควรใช้ดินเม็ดหยาบที่มีขนาดคละดีและใช้ดินเหนียวที่มีดัชนีความเหนียวสูง

เขื่อนที่มีการออกแบบและก่อสร้างชั้นกรองอย่างดี นอกจากในสภาวะปกติสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้แล้ว เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ก็จะรับแรงได้โดยไม่เกิด Liquefaction หรือพื้นที่อ่อนแอทั้งในตัวเขื่อนและฐานราก

การแก้ไขปรับปรุงองค์ประกอบเขื่อนเพื่อต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว

Marcuson *et al*. (1996) ได้สำรวจเขื่อนดินในภาคเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวน 52 เขื่อน เพื่อแนะนำและก่อสร้างปรับปรุงองค์ประกอบเขื่อนเพื่อช่วยการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวและ Liquefaction การป้องกันการลดกำลังของดินระหว่างการสั่นสะเทือนและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระยะเผื่อ (Freeboard) ที่สันเขื่อน วิธีการต่างๆที่มีส่วนช่วยให้เขื่อนมีความมั่นคงเมื่อรับแรงสั่นสะเทือนได้แก่

Berms และ Buttresses

น้ำหนักจากคันดินหรือ Berms ที่เพิ่มขึ้นทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ จะช่วยให้เขื่อนมีโอกาสเกิด Liquefaction น้อยลง เนื่องจากดินมีค่า σ'_m เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มน้ำหนักถ่วงให้ตัวเขื่อนเพื่อต้านทานการเคลื่อนตัวและทำให้ความยาวของวงการพิบัติลดลงจากที่ควรเกิดขึ้นจริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การขุดรื้อเพื่อเปลี่ยนวัสดุถมและฐานราก

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องขุดวัสดุส่วนที่อาจทำให้เกิด Liquefaction ออกแล้วแทนที่ด้วยวัสดุที่ดีกว่า โดยทั่วไปเป็นการซ่อมแซมเขื่อนดินที่ปรากฏรอยร้าวในตัวเขื่อนหลังจากรับแรงแผ่นดินไหวแบบตื้น และหลังจากการปรับปรุงต้องมีการทดสอบความแน่นและกำลังของดินในสนาม

การเพิ่มระยะเผื่อที่สันเขื่อน

การเพิ่มระยะเผื่อที่สันเขื่อนเป็นวิธีทั่วไปที่แก้ไขง่าย ใช้กับเขื่อนในบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวขนาดเล็กที่ต้องการป้องกันการไหลล้นข้ามสันเขื่อนจากการทรุดตัวของสันเขื่อน

การระบายน้ำ

การเพิ่มมาตรการระบายน้ำทั้งในแนวราบและแนวดิ่งเช่น Strip drains, Stone column และ Gravel trench จะช่วยลดแรงดันน้ำและลดระยะการเดินทางของน้ำ เมื่อมีการเร่งระบายน้ำจากวัสดุกรองในตัวเขื่อน

พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนดิน

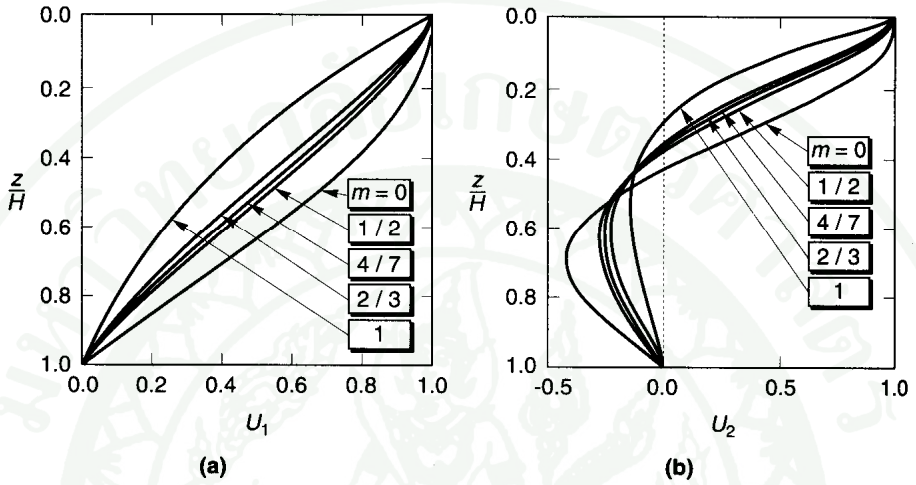
Das (1993) ให้รายละเอียดว่าการสั่นสะเทือนทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Free vibration คือ การสั่นในระบบด้วยน้ำหนักและความแข็งแรงของตัวมันเองตามความถี่ธรรมชาติ และ Force vibration คือ การสั่นของระบบที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก เมื่อใดที่ความถี่ในการสั่นของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากัน จะเรียกว่าปรากฏการณ์สั่นพ้อง (Resonant)

Gazetas (1987) ประยุกต์วิธี Shear Beam Approach ในการหาคาบธรรมชาติ (Natural period, T_n) ของการตอบสนองของเขื่อนดิน ดังสมการที่ 12

$$T_n = \frac{16\pi}{(4+m)(2-m)\beta_n}\frac{H}{\bar{v}_{ss}} \qquad (12)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดย Mode shape (m) พิจารณาดังภาพที่ 17 และ Natural circular frequency (β_n) หาได้จากตารางที่ 17 นอกจากนี้ยังมีสมการเชิงประสบการณ์อื่นๆที่เสนอโดย Okamoto (1970) Gazetas and Dakoulas (1992) และ Matsumoto *et al.* (2005) ดังสมการที่ 13 ถึงสมการที่ 15 คือ



ภาพที่ 17 รูปแบบการเคลื่อนที่ของเขื่อนดิน เมื่อ (a) Mode ที่ 1 และ (b) Mode ที่ 2

ที่มา: Gazetas and Dakoulas (1992)

ตารางที่ 17 Natural Circular Frequency (βn) สำหรับการสั่น 5 โหมดแรกของเขื่อนดิน

m	n				
	1	2	3	4	5
0	2.404	5.520	8.654	11.792	14.931
1/2	2.903	6.033	9.171	12.31	15.451
4/7	2.999	6.133	9.273	12.413	15.544
2/3	3.142	6.283	9.525	12.566	15.708
1	3.382	7.106	10.174	13.324	16.471

ที่มา: Kramer (1996)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$T_n = 0.011xH \tag{13}$$

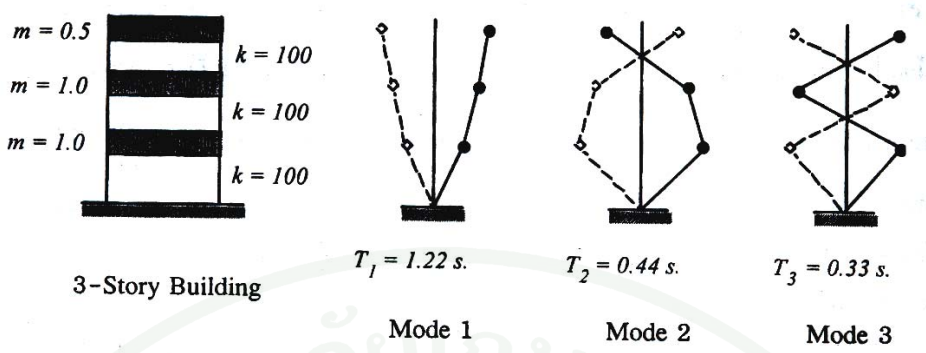
$$T_n = \frac{(2.61xH)}{V_S} \tag{14}$$

$$T_n = (\frac{0.9}{100} xH) \pm 0.13 \tag{15}$$

เกรียงไกร (2551) ใช้หลักการคัดเลือกข้อมูลให้อยู่ในช่วงคาบธรรมชาติของตัวเขื่อน เพื่อจำลองการตอบสนองของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยใช้หลักการว่าเมื่อคาบเด่น (Predominant period, T_p) ของข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดินมีค่าตรงกับค่าธรรมชาติของตัวเขื่อน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์สั่นพ้อง คือมีการขยายคลื่นแผ่นดินไหวอย่างมาก ทำให้อัตราเร่งของวัสดุเขื่อนมีค่ามากขึ้น

นคร (2544) กล่าวว่าลักษณะการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสามารถอธิบายได้ด้วยดีกรีแห่งความอิสระ Kramer (1996) อธิบายว่าโครงสร้างใดๆเช่น อาคาร สะพานและโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีรูปร่าง มวลและความแข็งแรง จะเป็นระบบโครงสร้างที่มีดีกรีความอิสระมากกว่าหนึ่ง (Multi degree of freedom, MDOF) จะมีการเคลื่อนตัวอย่างอิสระได้หลายรูปแบบ (Mode of vibration) เมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือน แสดงดังภาพที่ 18 ทั้งนี้แต่ละ Mode จะมีความถี่ธรรมชาติและรูปร่างของการสั่นไหว (Mode shape) โดยคาบธรรมชาติที่ยาวที่สุดคือ Mode ที่หนึ่งหรือ Mode พื้นฐานของการสั่น สำหรับ Mode ที่สูงขึ้นจะประกอบด้วยคาบสั้นลงหรือมีความถี่สูงขึ้น โดยคาบธรรมชาติประจำ Mode เป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของระบบต่อแรงกระทำภายนอก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 รูปแบบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น

ที่มา: นคร (2544)

สรุปลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนภายนอกที่บ่งบอกถึงการพิบัติภายในตัวเขื่อน สามารถสรุปตามองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ สันเขื่อนและตัวเขื่อน มีรายละเอียดดังตารางที่ 18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 สรุปลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

องค์ประกอบ	ตัวเขื่อน	สันเขื่อนและ Freeboard	ฐานยันเขื่อน
ลักษณะการพิบัติ	-เกิดการเคลื่อนตัวด้านเหนือน้ำ หรือ/และ ท้ายน้ำ	-เกิดรอยแตกตามยาวด้านเหนือน้ำ หรือ/และท้ายน้ำ เนื่องจากการทรุดตัวและยุบตัว	-เกิดรอยแตกบริเวณฐานยันเขื่อน
สาเหตุ	-เขื่อนไม่สามารถต้านทานแรง จากแผ่นดินไหวที่กระทำในแนวราบ	-เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างฐานรากเขื่อน และ/หรือรอยต่อระหว่างระบบระบายน้ำ กับดินตัวเขื่อนในเขื่อนดินเนื้อเดียว ส่วนในเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจะมีการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ระหว่างแกนเขื่อนและดินถมตัวเขื่อนร่วมด้วย	-ตัวเขื่อนโดยรวมเกิดการยุบตัว -เกิดการทรุดตัวบริเวณฐานยันเขื่อน เนื่องจากคุณภาพการบดอัด หรือมีแนวรอยเลื่อนอยู่ใกล้เคียง
ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น	-เกิดการอูดตัวในด้านตรงข้ามที่รับแรง ระบบระบายน้ำภายในเคลื่อนตัว เขื่อนมีความมั่นคงโดยรวมลดลง -การสั่นสะเทือนของเขื่อนเกิด ในแนวเดียวกับการบดอัด ทำให้เสี่ยงต่อการรั่วซึมภายใน	-เสี่ยงต่อน้ำล้นสันเขื่อน หากระดับน้ำในเขื่อนสูง -เกิดรอยแตกภายในตัวเขื่อน ประสิทธิภาพการระบายน้ำภายในตัวเขื่อนลดลง เสี่ยงต่อการรั่วซึมภายใน	-มีน้ำไหลซึมผ่านบริเวณฐานยันเขื่อน เสี่ยงต่อการกัดเซาะภายในจนเกิดรูรั่วขนาดใหญ่ -เขื่อนมีความเสี่ยงต่อการพิบัติมากขึ้น เมื่อไม่มีการป้องกันดินถล่มรอบอ่างเก็บน้ำ
การป้องกันหรือแก้ไข	-เพิ่มคันดินด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ -ควรก่อสร้างระบบระบายน้ำในแนวดิ่ง ให้อยู่กึ่งกลางสันเขื่อนมากที่สุด	-เขื่อนมี Freeboard ที่สูงเพียงพอต่อการทรุดตัวและยุบตัว จากการออกแบบตามหลักวิชาการ -แกนเขื่อนทำจากวัสดุที่มี PI สูง ช่วยให้การเกิดรอยแตกภายในตัวเขื่อนเกิดยากขึ้น -มีระบบระบายน้ำด้านท้ายน้ำเพียงพอ ต่อการรับน้ำจากรอยแตกในตัวเขื่อน -มี Transition Zone ด้านเหนือน้ำมีความกว้างเพียงพอ ในการช่วยรับน้ำและอุดรอยรั่วภายในแกนเขื่อน	-บดอัดรอยต่อระหว่างตัวเขื่อนและฐานยันเขื่อน อย่างประณีต -ฐานยันเขื่อนทั้งสองด้านควรมีรูปร่างผายออก -ทำผนังคอนกรีตที่ฐานยันเขื่อน และออกแบบชั้นกรองบริเวณนี้ให้กว้าง -มีการป้องกันดินถล่มรอบอ่างเก็บน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

หลักการทั่วไปของการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินโดยวิธี Limit equilibrium

วรากร (2546) กล่าวถึงวิธี Limit equilibrium ว่าเป็นวิธีที่พิจารณาว่ามีการเกิดผิวเคลื่อนพัง (Failure plane) รูปร่างต่างๆซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล และดินมีแรงต้านที่ผิวเคลื่อนตามทฤษฎีของ Mohr coulomb โดยปกติแล้วการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน จะใช้วิธีการพิจารณาสมดุลจำกัดของมวลดิน (Limit equilibrium) เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวเปรียบเทียบกับแรงต้านทานที่เกิดจากกำลังของดิน จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of safety, F.S.) จากอัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวการเคลื่อนตัวต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นผิวเดียวกัน เขียนเป็นสมการที่ 16 ดังนี้

$$\text{F.S.} = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear stress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \tag{16}$$

สำหรับการพิบัติในลักษณะจำเพาะต่างๆเช่น ผิวเคลื่อนเป็นส่วนโค้งวงกลม อัตราส่วนความปลอดภัยอาจหมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางก็ได้เช่นสมการที่ 17

$$\text{F.S.} = \frac{M_R}{M_D} \tag{17}$$

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบความสามารถและลักษณะเด่นเปรียบเทียบของวิธีวิเคราะห์แบบต่างๆ โดย USACE (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ความสามารถและลักษณะเด่นเปรียบเทียบของวิธีวิเคราะห์แบบต่างๆ

Feature	Ordinary method of slide	Simplified Bishop	Spencer	Modified swedish	Wedge	Infinite slope
Accuracy		X	X			X
Plane slip surface parallel to slope face						X
Circular slip surfaces	X	X	X	X		
Wedge failure Mechanism			X	X	X	
Non-circular slip surface (Any shape)			X	X		
Suitable for hand calculations	X	X		X	X	X

ที่มา: USACE (2003)

วรากร (2546) ได้รวบรวมอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดของหน่วยงานในต่างประเทศดังตารางที่ 20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดของเขื่อนดินและเขื่อนหินในต่างประเทศ กรณีปกติและกรณีเกิดแผ่นดินไหว

กรณี	เงื่อนไขการใช้งาน	การรับแรง	หน่วยงานในต่างประเทศ					
			Japan[1]	ICOLD[2]	Corp. of Eng.[3]	SCDWR[4]	US. Federal Register[5]	CANADA[6]
1	สิ้นสุดการก่อสร้าง	ปกติ	-	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
		แผ่นดินไหว	1.2	1	1	-	-	-
2	ระดับน้ำสูงสุด	ปกติ	1.2	1.5	1.4	-	-	-
		แผ่นดินไหว	-	1	-	-	-	-
3	ระดับเก็บกักปกติ	ปกติ	-	-	1.5	1.5	1.5	1.5
		แผ่นดินไหว	1.2	-	-	1.1	1	1.1
4	ระดับน้ำลดอย่างรวดเร็ว	ปกติ	-	1.2	1.2	1.2	-	1.3
		แผ่นดินไหว	1.2	-	-	-	-	1.3
5	ระดับน้ำปานกลาง	ปกติ	-	1.5	1.5	1.5	1.5	-
		แผ่นดินไหว	1.2	1	1	1.1	1	-

หมายเหตุ

1) Design Criteria of Ministry of Construction

2) International Commission on Large Dams

3) Corp of Engineers (America)

4) State of California Department of Water Resources

5) United State Federal Register (1977)

6) Geotechnical Practice in Hydro Electric Projects in Canada (1987)

ที่มา : วรากร (2546)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะการรับแรงสั่นสะเทือน

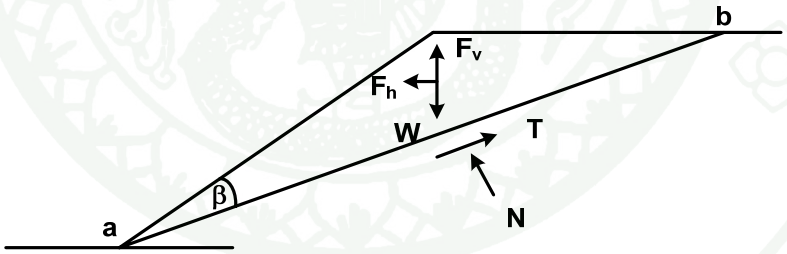
สุทธิศักดิ์ (2550) กล่าวว่า ทฤษฎีการออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อความมั่นคงของตัวเขื่อนในปัจจุบันที่ใช้อย่างแพร่หลายมีสองรูปแบบ คือ

วิธี Pseudo-static

วิธี Dynamic Response Analysis

การวิเคราะห์ความมั่นคงจากแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยวิธี Pseudo static

วิธี Pseudo-static เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว และยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ดำเนินการเหมือนการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันปกติ เพียงแต่เพิ่มแรงในแนวราบที่เกิดจากความเร่งของแผ่นดินไหวเข้าไปดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แรงที่กระทำบนระนาบการพิบัติโดยการเคราะห์ด้วยวิธี Pseudo-static

สมการเพื่อหาแรงที่กระทำในแนวราบและแนวดิ่งโดยการเคราะห์ด้วยวิธี Pseudo-static (Kramer, 1996) ได้แก่สมการที่ 18 และสมการที่ 19

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \tag{18}$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \tag{19}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความปลอดภัยของวิธี Pseudo static ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านกำลังของดิน (c,ϕ) ได้แก่สมการที่ 20 ดังนี้

$$FS = \frac{cl_{ab} + [(W - F_v)\cos\beta - F_h \sin\beta]\tan\phi}{(W - F_v)\sin\beta + F_h \cos\beta} \quad (20)$$

ในอดีตที่ผ่านมามีเขื่อนที่ออกแบบโดยวิธี Pseudo-static ใช้อัตราส่วนความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 1 ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัย จากตารางที่ 21 แสดงถึงเขื่อนที่พิบัติเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่ออกแบบโดยวิธีนี้ Kramer (1996) กล่าวถึงข้อจำกัดว่าอาจไม่น่าเชื่อถือเมื่อแรงสั่นสะเทือนทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในดินเพิ่มขึ้นและกำลังของดินลดลงมากกว่า 15% ขณะรับแรง

สุทธิศักดิ์ (2550) อธิบายว่าวิธี Pseudo-static จะประเมินจากความเร่งสูงสุดของที่เป็นไปได้ในพื้นที่นั้น ๆ แต่พฤติกรรมจริงลาดชันเขื่อนอาจมีความเร่งเฉลี่ยสูงกว่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการขยายสัญญาณของดินถมตัวเขื่อน ดังนั้นในปัจจุบันจึงเริ่มมีการนำวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนมาใช้ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้พิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุตัวเขื่อนที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเครียด การวิเคราะห์ดังกล่าวกระทำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 21 เขื่อนที่ออกแบบโดยวิธี Pseudo static และเกิดการพิบัติ

Dam	k_h	FS	Effect of earthquake
Sheffield dam	0.10	1.2	Complete failure
Lower San Fernando dam	0.15	1.3	Upstream slope failure
Upper San Fernando dam	0.15	~2-2.5	Downstream shell, including crest slipped about 6 ft downstream
Tailings dam (Japan)	0.20	~1.3	Failure of dam with release of tailings

ที่มา: After Seed (1979)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ความมั่นคงจากแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีการตอบสนองทางพลศาสตร์

Finn (2000) กล่าวถึงเทคโนโลยีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ที่ใช้ในงานปฐพีกลศาสตร์ว่าเริ่มในปี 1970 จากการอธิบายพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear analysis) ด้วยพฤติกรรมแบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์หาการกระจายตัวของหน่วยแรงและความเร่ง แต่ยังไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนตัวถาวรในเขื่อนได้ จึงต้องใช้ร่วมกับสมการหาการเคลื่อนตัวถาวร (Semi-empirical) เช่น วิธีของ Seed *et al.* (1989) และวิธีของ Newmark (1965)

การวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ Kramer (1996) เสนอว่าการประมาณพฤติกรรมของวัสดุไม่เชิงเส้นในชั้นดิน (Soil layers) มีขั้นตอนดังนี้

1. ประมาณค่าโมดูลัสแรงเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงในแต่ละชั้นดินโดยให้อยู่ในความเครียดเฉือนเดียวกัน

2. วิเคราห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ในแต่ละชั้นดินเพื่อหาความเครียดเฉือนประสิทธิผล จากความเครียดเฉือนที่วิเคราะห์ได้

3. หาค่าโมดูลัสแรงเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงใหม่จากความเครียดเฉือนประสิทธิผลที่วิเคราะห์ได้

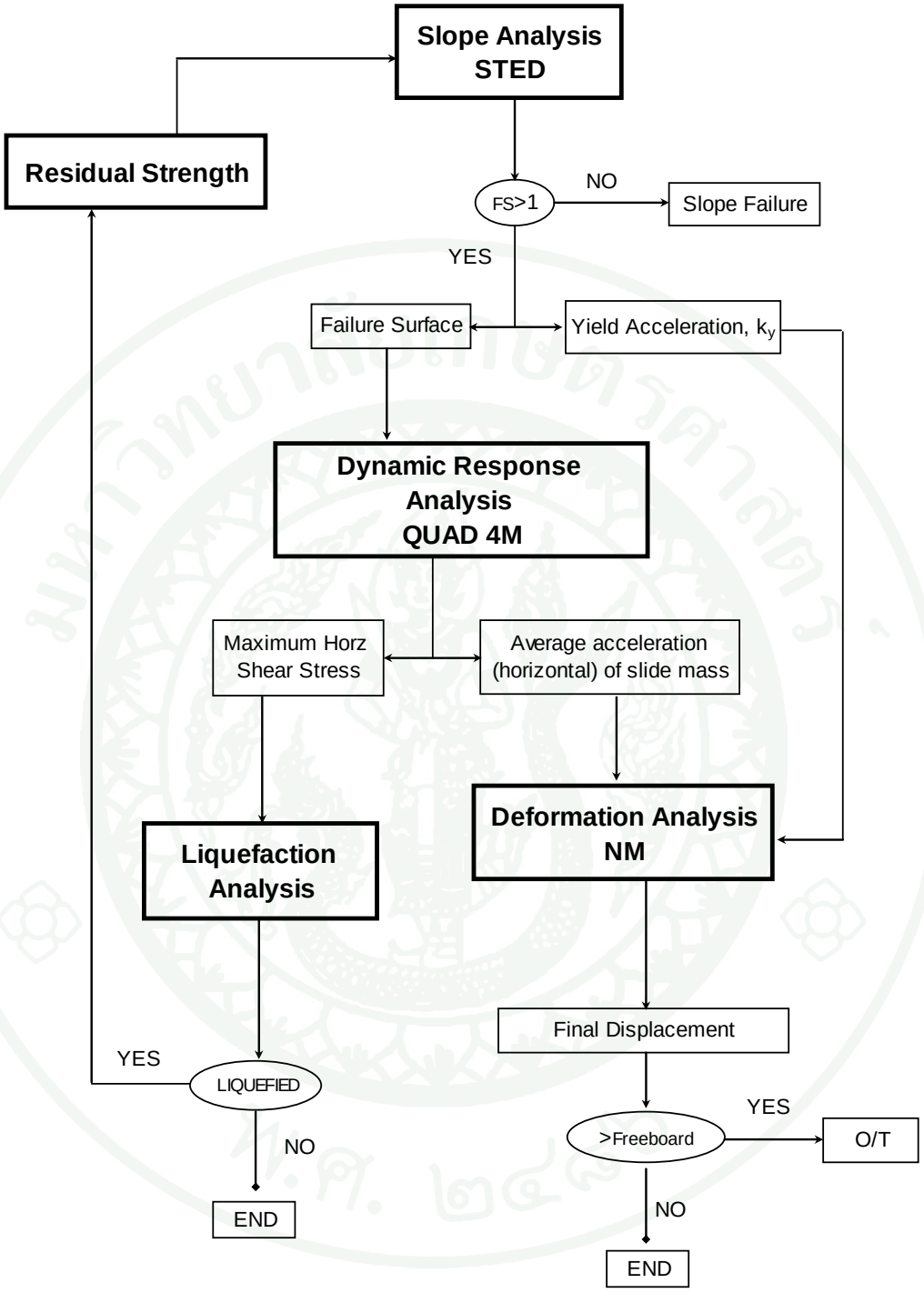
4. ทำซ้ำตามข้อที่ 2 และ 3 จนกระทั่งค่าโมดูลัสแรงเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยปกติมีความแตกต่างประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใน 3 ถึง 5 รอบ

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 2 มิติจะกระทำเมื่อลักษณะปัญหาไม่เป็นชั้นดินเช่น กำแพงกันดิน คันดิน เขื่อนและอุโมงค์ โดยต้องการทราบพฤติกรรมที่ละเอียดกว่าจะวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยหน้าตัดที่ใช้จะเป็นแบบ Plane strain โดยเกณฑ์อัตราส่วนความสูงต่อความยาวเขื่อนมีข้อแนะนำหลายเกณฑ์ได้แก่ Lefebure and Duncan (1971) แนะนำให้ใช้ตั้งแต่ 1:1.2 ส่วน Belyakov (1988) แนะนำให้ใช้ตั้งแต่ 1:2 และเกณฑ์ของ Hunter and Fell (2003) แนะนำให้ใช้ตั้งแต่ 1:1.0 นอกจากนี้ Soralump (2002) ยังอธิบายว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จุดประสงค์โดยทั่วไปของวิธีวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์แบบ 2 มิติ แบ่งเป็น 2 ข้อ ได้แก่ การคำนวณแรงที่กระทำในสภาวะสถิตย์โดยนำเข้าข้อมูลตัวแปรต่างๆกับรูปทรงและประเภทเขื่อนที่ต้องการ และการหาความเร่งระหว่างที่เขื่อนและฐานรากเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งค่าความเร่งที่เกิดขึ้นจะนำมาใช้วิเคราะห์การเคลื่อนตัวถาวร (Seismic deformation) โดยการลื่นไถลของลาดชันเขื่อน ตามทฤษฎี Newmark's deformation ต่อไป ตัวอย่างเช่นภาพที่ 20 เป็นการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Finite element เช่น QUAD4, QUAD4M หรือ Flush

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



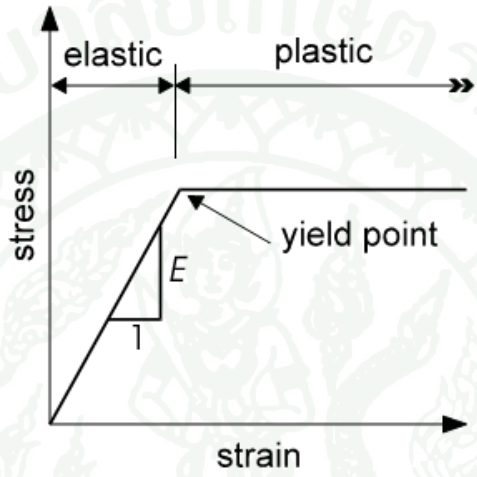
ภาพที่ 20 Seismic analysis framework

ที่มา: Soralump (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบจำลองพฤติกรรม Elastic-Plastic

Geo-studio (2007) อธิบายความสัมพันธ์ห่างแรงกระทำกับความเครียดตามแบบจำลองพฤติกรรมแบบ Elastic-Plastic ว่าแรงกระทำและความเครียดในช่วง Elastic เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกัน แต่เมื่อถึงจุดล้า (Yield point) ความเค้นจะคงที่เมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 21



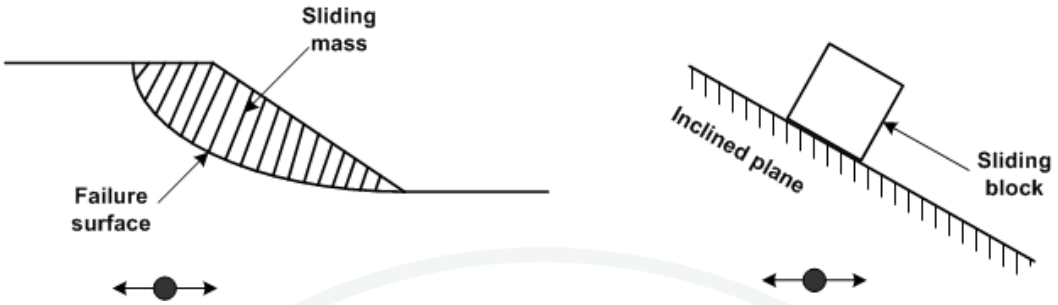
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแบบจำลอง Elastic-Plastic

ที่มา: Geo-studio (2007)

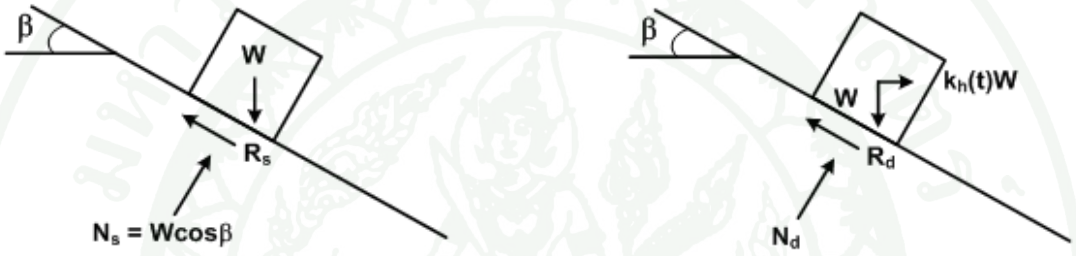
การเคลื่อนตัวถาวรจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

Newmark (1965) เสนอวิธีการวิเคราะห์การเสียรูปถาวรของลาดชันเขื่อนในกรณีไม่เกิด Liquefaction โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของ Rigid block บนลาดชันดังภาพที่ 22 ว่าหากแรงเริ่มต้นที่กระทำต่อมวลดินใดๆมีค่ามากจนส่งผลให้กำลังของดินไม่สามารถต้านไว้ได้ ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1 ดังภาพที่ 23 และการเคลื่อนตัวเนื่องจากการสั่นสะเทือนจะลดลงจนหยุดเมื่อแรงเริ่มต้นมีค่าลดลง จนอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่ามากกว่า 1 อัตราส่วนความปลอดภัยแสดงดังสมการที่ 21

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 แนวคิดเปรียบเทียบระหว่างการลื่นไถลของลาดชันกับ Rigid block บนลาดชัน



(a) Static conditions (b) Dynamic conditions

ภาพที่ 23 แรงที่กระทำต่อ Rigid block ในสภาวะสถิตและพลศาสตร์

สมการการหาอัตราส่วนความปลอดภัยในทางพลศาสตร์

$$FS_d(t) = \frac{[\cos\beta - k_h(t)\sin\beta]\tan\phi}{\sin\beta + k_h(t)\cos\beta} \qquad (21)$$

Soralump (2002) กล่าวถึงวิธี Newmark's deformation ว่าการคำนวณต้องอาศัย 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่า Yield acceleration หาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Pseudo-static และค่าเฉลี่ยของ Acceleration time history ของวงการพิบัติวิกฤต หาได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี Dynamic response analysis

Swaisgood (1998) ใช้วิธีทางสถิติจากข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงที่สันเขื่อนดินและเขื่อนหินถมจำนวน 58 เขื่อน พบว่าปัจจัยที่มีผลกับการทรุดตัวได้แก่ ขนาดและอัตราเร่งสูงสุดใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แนวราบ ขนาดของแผ่นดินไหว ระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว และชนิดของรอยเลื่อน ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 22

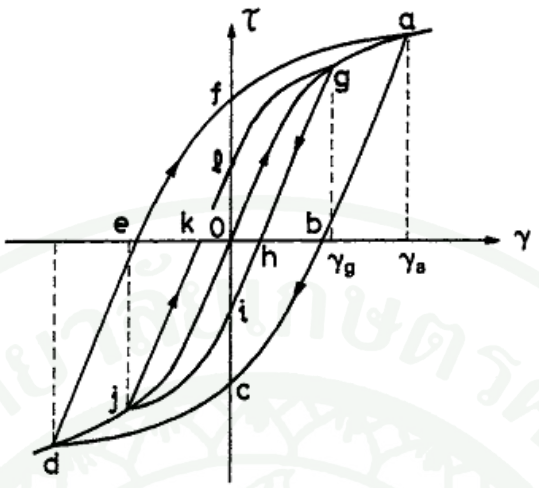
$$CS = SEF \times RF \quad (22)$$

Ozkan *et al* (1990) วิเคราะห์การเสียรูปของเขื่อน Surgu ประเทศตุรกี สูง 57 เมตร รับแรงแผ่นดินไหวขนาด 5.8 ริกเตอร์ ในปี 1986 ซึ่งเกิดรอยร้าวหนา 10-20 เซนติเมตร และสันเขื่อนด้านเหนือน้ำเกิดการทรุดตัวประมาณ 15 เซนติเมตร ส่วนผลการวิเคราะห์การเสียรูปถาวรตามวิธีของ Newmark สันเขื่อนด้านเหนือน้ำมีการทรุดตัวประมาณ 13 เซนติเมตร

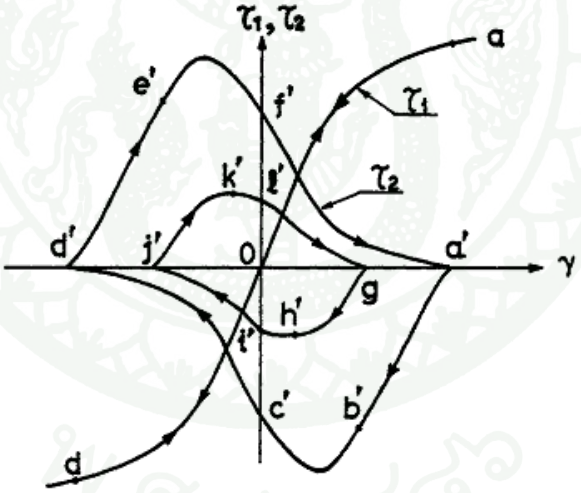
คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุถมเขื่อน

Kramer (1996) อธิบายถึงพฤติกรรมไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ของดินเมื่อได้รับแรงแบบวัฏจักรว่าสามารถประมาณได้จากการจำลองพฤติกรรมเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent-Linear) ไม่ว่าจะเป็นโมดูลัสแรงเฉือนเทียบเท่า (Secant shear modulus) อัตราส่วนโมดูลัสเฉือน (Modulus reduction) และอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) Ishihara (1996) แสดงทางเดินของหน่วยแรงภาพที่ 24 (a) พร้อมทั้งอธิบายว่า การเพิ่มแรงสั่นสะเทือนจะทำให้ดินมีพฤติกรรมเริ่มจากจุด b-c-d-f-a เมื่อลดแรงกระทำ (Unloaded) เส้นทางเดินของหน่วยแรงจะไปหยุดที่จุด d เมื่อให้แรงกระทำซ้ำเส้นทางเดินของหน่วยแรงจะสมมาตรกับจุด a ซึ่งรูปแบบของเส้นจะมี 2 รูปแบบได้แก่ เส้นแสดงพฤติกรรมของดินโดยตรงคือ เส้น d-o-a (Backbone curve) และ เส้นแสดงการสูญเสียพลังงานของดินคือเส้น a-c-d-e-f (Hysteretic loop) ทั้งนี้ผลต่างของเส้นทางเดินของหน่วยแรงที่เป็นผลต่างของเส้นพฤติกรรมของดินและเส้นแสดงการสูญเสียพลังงานแสดงดังภาพที่ 24 (b)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(a) เส้นทางเดินของหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงกระทำซ้ำ



(b) เส้นทางเดินของหน่วยแรงเมื่อมีการสลายพลังงาน

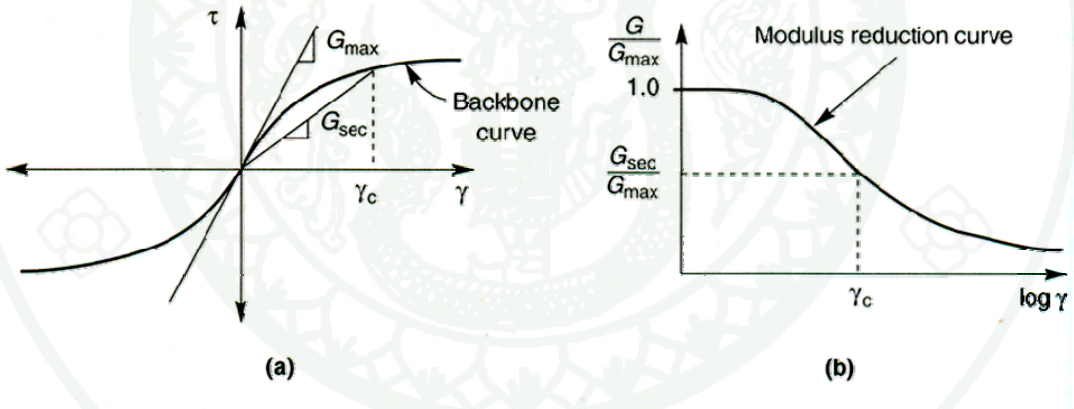
ภาพที่ 24 ส่วนประกอบของเส้นทางเดินหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

ที่มา: Ishihara (1996)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราส่วนโมดูลัสเฉือน

ในปีแรกๆของการทดสอบคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์ Seed and Idriss (1970) กล่าวไว้ว่าการทดสอบพฤติกรรมของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนในปัจจุบันมีการทดสอบละเอียดถึงขั้นทดสอบแยกกันระหว่างดินเม็ดหยาบที่ไม่มีความเหนียวและทดสอบดินเม็ดละเอียดที่มีความเหนียว งานวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับอิทธิพลของค่าดัชนีความเหนียวที่มีต่อความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนทำโดย Zen *et al.* (1978) และ Kokushu *et al.* (1982) จึงพบว่าดินที่มีดัชนีความเหนียวสูง จะมีค่าอัตราส่วนโมดูลัสแรงเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้โมดูลัสแรงเฉือนสูงสุดมีค่าน้อยลง และค่าดัชนีความเหนียวจะมีผลต่อรูปร่างของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนมากกว่าอัตราส่วนช่องว่าง ภาพที่ 25 (a) แสดงค่าโมดุลัสแรงเฉือนจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่แปรไปตามความเครียดเฉือนขนาดต่างๆ (Backbone curve) และภาพที่ 25 (b) เมื่อความเครียดเฉือนมีค่าน้อยลงอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสเฉือน ความเครียดเฉือนและโมดูลัสเฉือนสูงสุด

ที่มา: Kramer (1996)

ความหน่วง

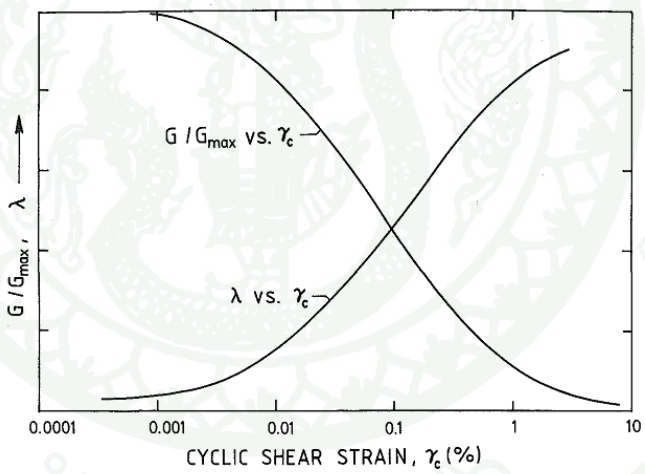
Kramer (1996) กล่าวว่า พลังงานที่ส่งผ่านตัวกลางไม่ว่าจะเป็นชั้นดินหรือโครงสร้างใดๆ จะมีการสลายพลังงานจากหลายปัจจัยเช่น แรงเสียดทาน อุณหภูมิและคุณสมบัติเฉพาะของตัวกลาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสลายพลังงานนี้เป็นการหน่วงที่เรียกว่าความหน่วง (Damping) ซึ่งหาค่าได้จาก Hysteresis loop โดยใช้อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วนความหน่วง

ค่าดัชนีความเหนียวที่มีผลต่อพฤติกรรมของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนก็ส่งผลอัตราส่วนความหน่วงด้วย โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของดินที่มีดัชนีความเหนียวสูงจะมีค่ามากกว่าดินที่มีดัชนีความเหนียวต่ำที่ระดับความเครียดเดียวกัน Vucetic and Dobry (1991) แสดงให้เห็นว่าเมื่อการสูญเสียพลังงานมีน้อย อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามากที่ระดับความเครียดเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงแสดงดังภาพที่ 26 และสมการของความหน่วงได้แก่สมการที่ 23



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัส อัตราส่วนความหน่วงและความเครียดเฉือน

ที่มา: Vucetic and Dobry (1991)

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi\Delta W_S} = \frac{A_{Loop}}{G_{\sec}\gamma^2{}_c} \tag{23}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Dobry and Vucetic (1987) แนะนำว่ามีตัวแปรอื่นๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินในการทดสอบที่ระดับความเครียดต่ำกว่า 0.001% ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด อัตราส่วนโมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนความหน่วงของวัสดุ ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด อัตราส่วนโมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนความหน่วงของวัสดุ

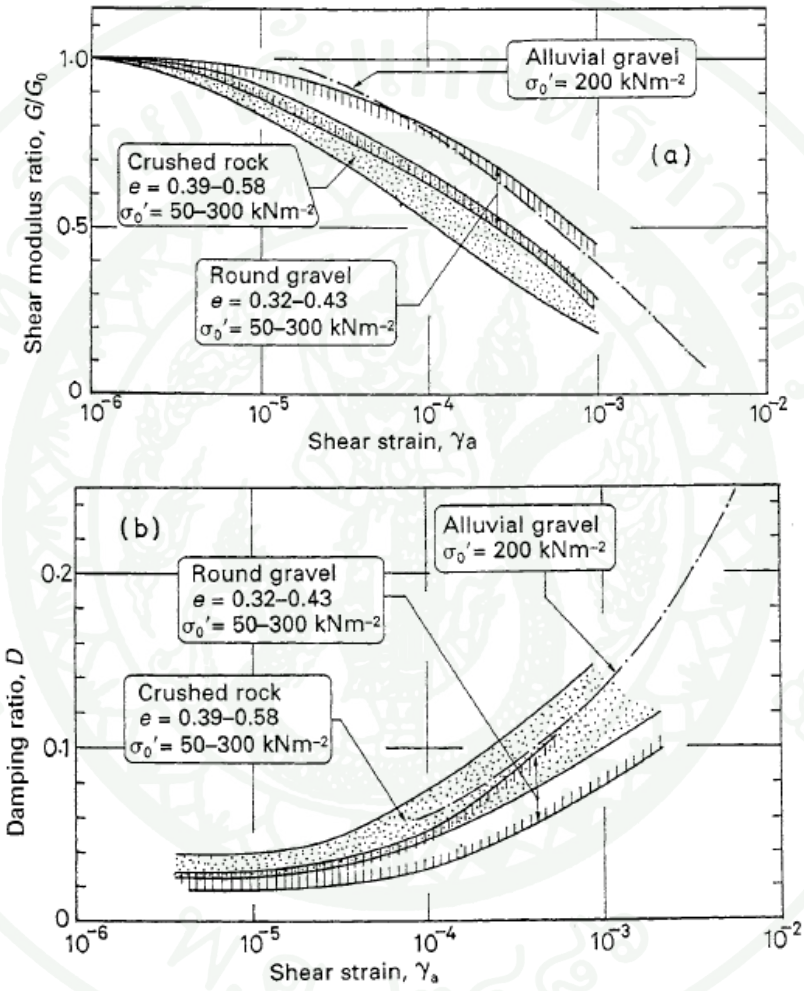
Increasing factor	G_{max}	G/G_{max}	λ
Confining Pressure, σ'_m	Increases with σ'_m	Stay constant or Increases with σ'_m	Stay constant or Decreases with σ'_m
Void ratio, *e*	Decreases with *e*	Increases with *e*	Decreases with *e*
Geologic age, t_g	Increases with t_g	May increases with t_g	Decreases with t_g
Cementation, c	Increases with c	May increases with c	May decreases with c
Overconsolidation, OCR	Increases with OCR	Not effected	Not effected
Plastic index, PI	Increases with PI if OCR>1; Stay about constant if OCR=1	Decreases with PI	Increases with PI
Cyclic Strain,	-	Decreases with γ_c	Increases with γ_c
Strain rate, γ* (frequency of Cyclic loading)	Increases with γ*	G Increases with γ* ; G/G_{max} probably not effect if G and G_{max} are measured at the same γ*	Increases constant or may increases with γ*
Number of loading cycles, N	Decreases after N cycles of large γ_c but recover later with time	Decreases after N cycles of large γ_c (G_{max} measured before N cycles)	Not significant for moderate γ_c and N

ที่มา: Dobry and Vucetic (1978)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของหิน

Kokusho (1980) ทดสอบ Cyclic triaxial กับหินบดอัดชนิดต่างๆ ด้วยระดับความเครียดต่ำ ได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงดังภาพที่ 27



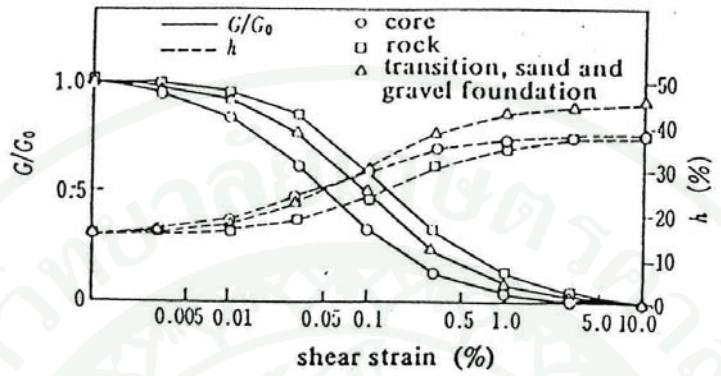
ภาพที่ 27 อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของหินชนิดต่างๆ

ที่มา: Kokusho (1980)

Yonezawa *et al.* (1986) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเขื่อน Makio ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นเขื่อนหินทิ้งมีแกนทึบน้ำอยู่ตรงกลาง จากแรงกระทำแผ่นดินไหวในปี 1984 โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของหินทิ้ง จากการวิเคราะห์ย้อนกลับด้วยโปรแกรม QUAD-4 โดย Professor I.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Muramatsu จากมหาวิทยาลัย Gifu ได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของวัสดุหินถมดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของเขื่อน Makio

ที่มา: Yonezawa *et al.* (1986)

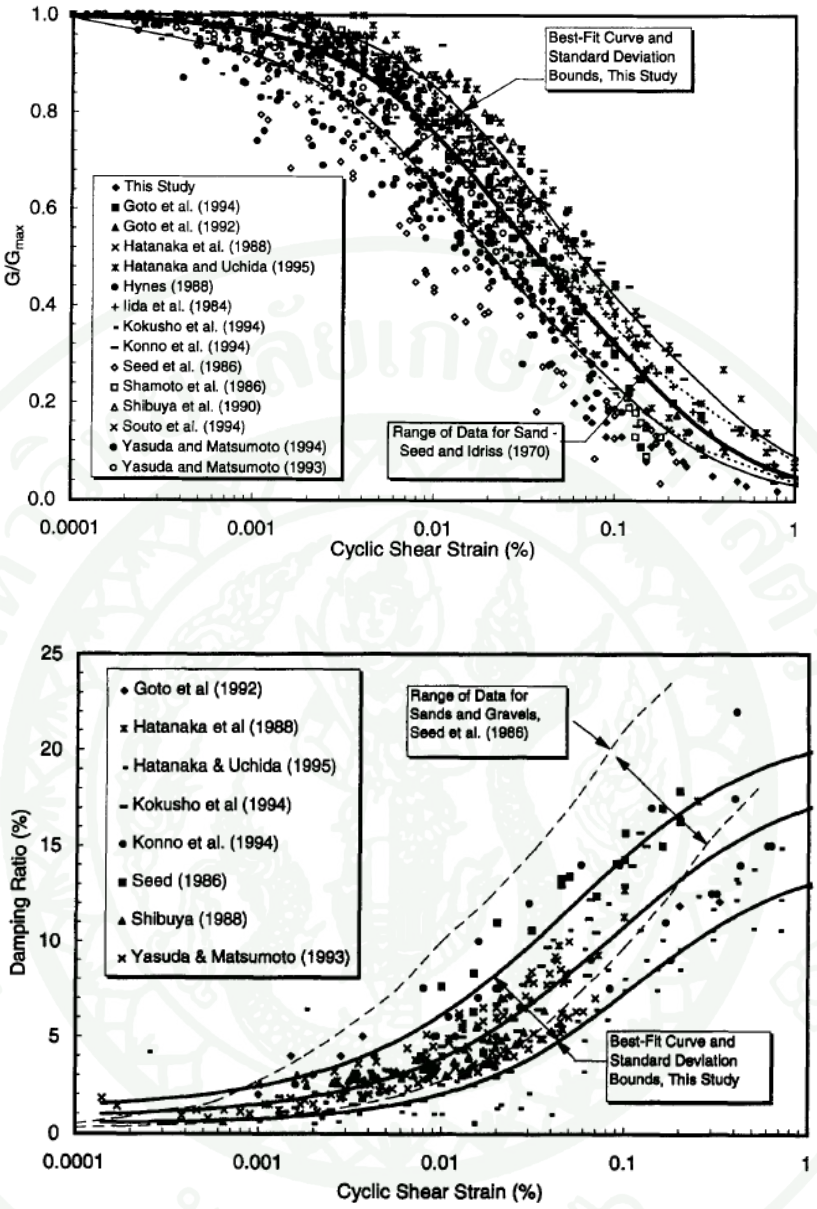
อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินทราย

Rollins *et al* (1998) รวบรวมการทดสอบจาก 15 การทดสอบ จากประมาณ 980 ตัวอย่าง โดยใช้ของเขตข้อมูลของ Seed and Idriss (1970) ได้อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงดังภาพที่ 29

อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินเหนียว

Vucentic and Dobry (1991) วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ของดินโดยจำแนกประเภทโดยใช้ดัชนีความเหนียวดังภาพที่ 30 ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินไม่เพียงแต่ขึ้นกับค่า σ'_m อัตราส่วนช่องว่างหรืออัตราส่วนการคายน้ำเกินปกติ (OCR) เท่านั้น ค่าดัชนีความเหนียวก็มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานของ Zen *et al.* (1978) และ Kokushu *et al.* (1982)

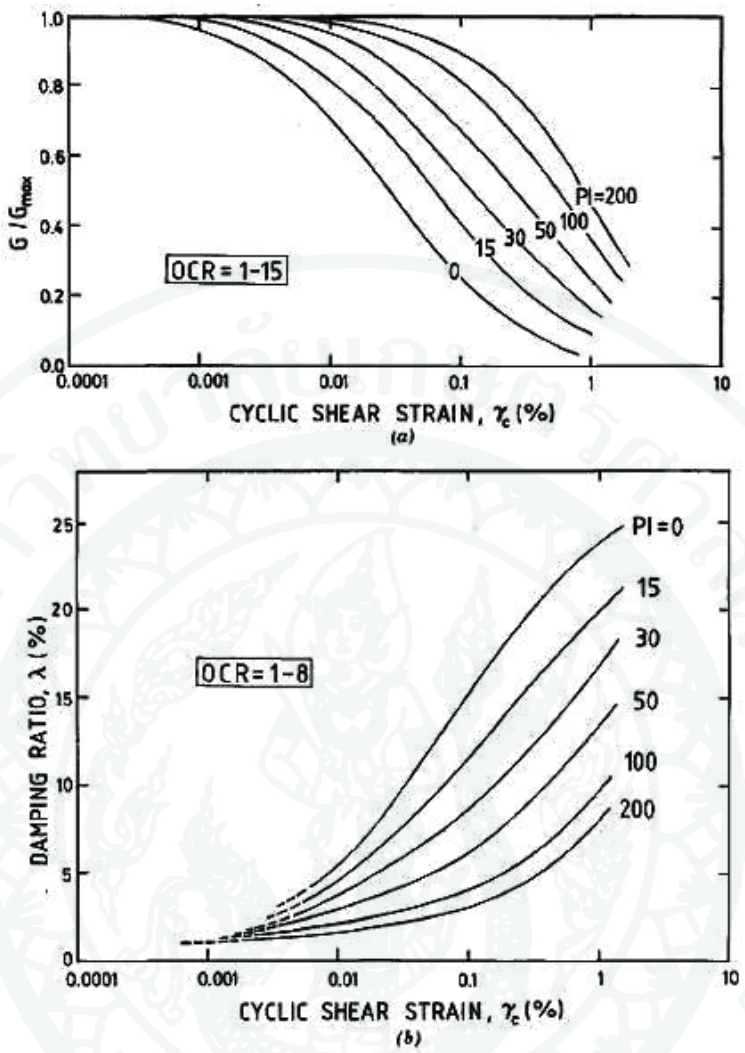
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินทราย

ที่มา: Rollins *et al.* (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของดัชนีความเหนียวที่มีผลอัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงของดินเหนียว

ที่มา: Vucentic and Dobry (1991)

Soralump and Tansupo (2009) วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยใช้อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงดังตารางที่ 23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 23 อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนศรีนครินทร์

แหล่งที่มา	องค์ประกอบ	ประเภทดิน
Gazetus (1992)	หินถมและ Transition Zone	หินและดินทราย
Seed *et al* (1986)	วัสดุกรอง	ดินทราย
Vucetic *et al* (1991)	แกนเขื่อน	ดินเหนียว (PI=15)

ที่มา: Soralump and Tansupo (2009)

โมดูลัสเฉือนสูงสุด

Kramer (1996) อธิบายว่า โมดุลลัสเฉือนของดินจะแปรไปตามระดับความเครียดเฉือน จากการทดสอบที่ระดับความเครียดเฉือนต่ำ จะให้ค่าโมดุลัสแรงเฉือนสูงสุด (G_{max}) สมการทั่วไปแสดงดังสมการที่ 24 คือ

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \tag{24}$$

Tatsuoka and Shibuya (1992) พบว่าปัจจัยภายนอกที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแรงเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของดินที่เป็นวัสดุธรรมชาติ ความสมบูรณ์ของตัวอย่างดิน อัตราส่วนช่องว่างโดยดินที่มีอัตราส่วนช่องว่างน้อยจะให้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนสูง ขนาดของหน่วยแรงโดยทั่วไปใช้ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยและสภาวะของหน่วยแรง โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 25 ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนสูงสุดและโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงดังสมการที่ 26 และสมการที่ 27

$$G_o = A \cdot f(e) \cdot g(\sigma'_{ij}) \cdot h(OCR,PI,t) \tag{25}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{26}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$E = 2G(1+\upsilon) \tag{27}$$

สมการเชิงประสบการณ์ของโมดูลัสเฉือนสูงสุดมีที่มาทั้งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม องค์ประกอบส่วนต่างๆของเขื่อนเช่น ดินถมตัวเขื่อน หินถมตัวเขื่อน แกนเขื่อนและชั้นกรอง ต้องเลือกใช้ชนิดดินให้เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยหิน ดิน ทราย และดินเหนียว ดังนี้

โมดูลัสเฉือนสูงสุดของหินพืดและหินถม

Prange (1981) ทดสอบ Large resonant column กับหินรางรถไฟ โดยใช้เครื่องมือที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 2 เมตร ที่ระดับความเครียดต่ำ (10^{-6}) โมดูลัสเฉือนสูงสุดหาได้จากสมการที่ 28

$$G_{\max} = 7230\frac{(2.97-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.38} \qquad \text{(kPa)} \tag{28}$$

Kokusho and Esashi (1981) สรุปการทดสอบหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุประเภท Coarse-grained โดย Large cyclic triaxial ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ที่ระดับความเครียดต่ำ (10^{-6}) โมดูลัสเฉือนสูงสุดของหินกรวดมนหาได้จากสมการที่ 29 และโมดูลัสเฉือนสูงสุดของหินโม่ (Crush rock) หาได้จากสมการที่ 30

$$G_{\max} = 8400\frac{(2.17-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.50} \qquad \text{(kPa)} \tag{29}$$

$$G_{\max} = 13000\frac{(2.17-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.55} \qquad \text{(kPa)} \tag{30}$$

Ozkan *et al.* (1995) วิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน Surgu ซึ่งเป็นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว โดยส่วนที่เป็นหินถม อ้างอิงสมการของ Baba (1982) ดังสมการที่ 31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$G_{\max} = 440\frac{(297-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.55} \qquad (\text{kg/cm}^2) \qquad (31)$$

Xenaki and Athanasopoulos (2007) ยังหาโมดูลัสเฉือนสูงสุดของกรวดผสมทรายที่จะนำไปสร้างตัวเขื่อน (Shell) ด้วยการทดสอบ Cyclic triaxial ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 32

$$G_{\max} = 1.888\times10^4\sqrt{\sigma'_o} \qquad (\text{kPa}) \qquad (32)$$

โมดูลัสเฉือนสูงสุดของดินทราย

Hardin and Black (1966, 1968) เสนอความสัมพันธ์ของโมดูลัสเฉือนสูงสุดของทรายควอทซ์ (Quartz Sands) จากการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Low amplitude) จาก Hardin and Richard (1963) ที่ทดสอบทรายควอทซ์ (Quartz sands) สำหรับทรายเม็ดกลมที่มีอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่า 0.8 ดังสมการที่ 33 และสำหรับทรายที่มีเหลี่ยมมุมดังสมการที่ 34

$$G_{\max} = \frac{6931(2.17-e)^2}{1+e}\sigma'^{1/2}_m \qquad (\text{kPa}) \qquad (33)$$

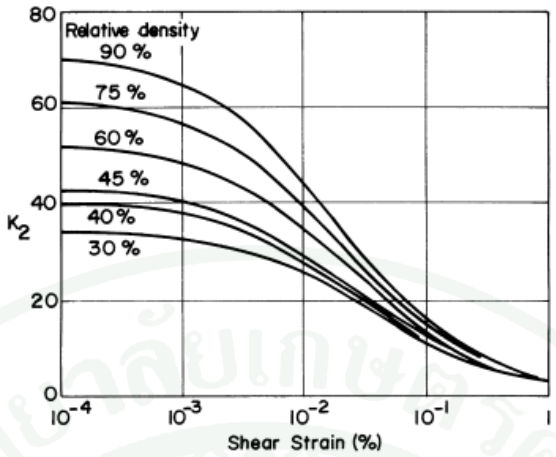
$$G_{\max} = 3230\frac{(2.973-e)^2}{1+e}\ \sigma'^{1/2}_m \qquad (\text{kPa}) \qquad (34)$$

Seed and Idriss (1970) เสนอสมการเพื่อหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ใช้กับกรวดและทราย ที่ระดับความเครียด 10^{-4} ในเครื่องมือทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ดังสมการที่ 35

$$G_{\max} = 1000K_{2,\max}(\sigma'_m)^{1/2} \qquad (\text{psf}) \qquad (35)$$

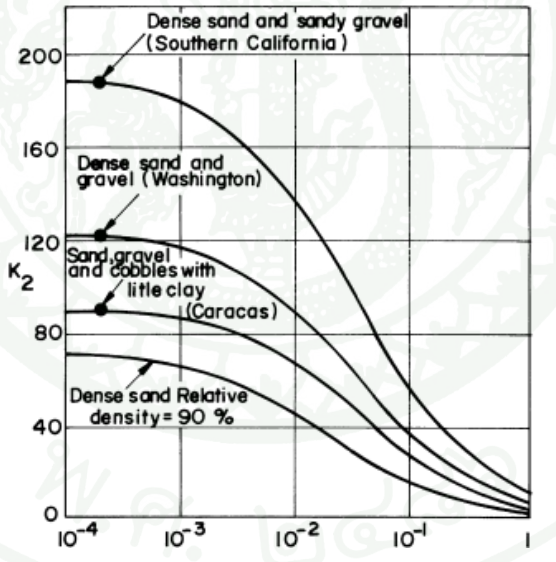
โดยค่า $K_{2,\max}$ แปรผันตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังภาพที่ 31 และภาพที่ 32 และสัมพันธ์กับค่า Void Ratio ดังตารางที่ 24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 ค่า $K_{2,max}$ สำหรับทรายที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ

ที่มา: Seed and Idriss (1970)



ภาพที่ 32 ค่า $K_{2,max}$ สำหรับทรายแน่นและกรวดที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ

ที่มา: Seed and Idriss (1970)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 24 ความสัมพันธ์ของค่า $K_{2, max}$ กับ Void Ratio

Void ratio	$K_{2, max}$
0.4	70
0.5	60
0.6	51
0.7	44
0.8	39
0.9	34

ที่มา: Seed and Idriss (1970)

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2549) ภายใต้โครงการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อน SNR ต่อแรงกระทำจากแผ่นดินไหว สรุปตัวอย่างค่า $K_{2, max}$ ที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าสำหรับ Granular material ใช้ในเขื่อนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ตัวอย่างค่า $K_{2, max}$ ที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าสำหรับ Granular material

Dam	Zone	Method of Determination	$K_{2,max}$
Oroville	Shell	Laboratory testing	130
		Response back-calculating	205
Teton	Zone 2	In-situ testing	245
Balsam Meadows	-	estimated	250

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โมดูลัสเฉือนสูงสุดของดินเหนียว

Kokusho *et al.* (1982) รวบรวมการศึกษาโมดูลัสแรงเฉือนสูงสุดในดินเหนียวอ่อนว่ามีการศึกษา 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ศึกษาโดยใช้ระดับความเครียดเป็นหลักและกลุ่มที่ใช้วิธีการทดสอบเป็นหลัก โดย Hardin and Black (1968) ทดสอบ Resonant column กับดิน Kaolinite ที่มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่าง 0.6 ถึง1.5 ได้สมการที่ 36

$$G_{\max} = 3270\frac{(2.79-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{1/2} \quad \text{(kPa)} \tag{36}$$

Hardin and Drnevich (1972) เสนอสมการเพื่อหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ใช้ได้ทั้งกับดินเหนียวและทราย โดยประยุกต์จากการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก Hardin and Richard (1963) ที่ทดสอบทรายควอทซ์ (Quartz sands) ดังสมการที่ 37

$$G_{\max} = 3230\frac{(2.973-e)^2}{1+e}(OCR)^k(\sigma'_m)^{1/2} \quad \text{(kPa)} \tag{37}$$

เมื่อ Geo-Studio (2007) กำหนดค่า $k = \dfrac{PI^{0.72}}{50}$

Macuson and Wahls (1975) ทดสอบดิน Bentonite ที่มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 สรุปการหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดได้ดังสมการที่ 38

$$G_{\max} = 445\frac{(4.4-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.5} \quad \text{(kPa)} \tag{38}$$

Ozkan *et al.* (1995) วิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน Surgu ซึ่งเป็นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว โดยส่วนทึบน้ำเป็น Sandy-silty clay อ้างอิงสมการของ Baba (1982) ดังสมการที่ 39

$$G_{\max} = 395\frac{(297-e)^2}{1+e}(\sigma'_m)^{0.69} \quad \text{(kg/cm}^2\text{)} \tag{39}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Xenaki and Athanasopoulos (2007) ทดสอบ Resonant column เพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินเหนียวบดอัดเพื่อจำลองสภาพเขื่อนดิน พบว่าดินเหนียวบดอัดมีค่าโมดูลัสแรงเฉือนสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดัน (Confining pressure) และลดค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 4 เท่าของดินเหนียวธรรมชาติ จากการทดสอบนี้โมดูลัสเฉือนหาได้จากสมการที่ 40 ถึงสมการที่ 42

$$G_{\max} = 24.6\sigma_o'^{0.38} \qquad \text{สำหรับ } W = W_{opt}\text{-}1\% \tag{40}$$

$$G_{\max} = 11.6\sigma_o'^{0.48} \qquad \text{สำหรับ } W = W_{opt} \tag{41}$$

$$G_{\max} = 14.6\sigma_o'^{0.43} \qquad \text{สำหรับ } W = W_{opt}\text{+}2\% \tag{42}$$

เมื่อ G_{max} วัดในหน่วย MPa และ σ' วัดในหน่วย kPa

การใช้สมการจากการทดสอบ (Empirical) ของโมดูลัสแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุถมเขื่อนที่ผ่านมา Sampaco (1988) รวบรวมสมการเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของเขื่อนแยกตามองค์ประกอบของเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว โดยกรวดและทรายในส่วนของวัสดุกรอง (Filter) และ Transition fill ใช้ความสัมพันธ์ของ Kokusho *et al. (*1981) หินถม (Shell material) ใช้ความสัมพันธ์ของ Kokusho *et al.* (1981) ส่วนของวัสดุทึบน้ำแกนเขื่อน (Impervious core, SC) ใช้ความสัมพันธ์ของ Hardin and Black (1968)

Soralump and Tansupo (2009) ใช้สมการสมการจากการทดสอบหาโมดูลัสแรงเฉือนส่วนหินถมและวัสดุกรองของ Kokusho and Esashi (1982) และวัสดุทึบน้ำแกนเขื่อน ใช้สมการของ Hardin and Black (1968)

ความเร็วคลื่นแรงเฉือน

การความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity, Vs) ที่เดินทางผ่านวัสดุ สามารถทำได้โดยการทดสอบในสนามเช่น การทดสอบ Down-hole, การทดสอบ Cross-hole และการทดสอบ Spectral analysis of surface waves (SASW) เพื่อให้ได้ค่าตามความลึกที่คลื่นเดินทางจริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนใช้ประมาณค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดของดินโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 43 และสมการที่ 44

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\max} * g}{\gamma}} \tag{43}$$

$$G_{\max} = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \tag{44}$$

ตัวอย่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของดินที่ตกตะกอนตามธรรมชาติในประเทศญี่ปุ่น รวบรวมโดย Sukimura (1984) แสดงดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ตัวอย่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินและวัสดุอื่นๆ (หน่วย m/s)

Material	Depth of deposit		
	3-20m	21-50m	>50m
Loose sand saturated	60		-
Fluvail sand	60	100	125
Clay	60	200	300
Silt	60	-	-
Silty clay	60	240	-
Marshland	80	-	-
Reclaimed land, recent	50	100	-
Sandy clay	100	250	-
Gravel, loose	100	300	600
Fine sand ,saturated	110	-	-
Medium sand, uniform grading	100	140	-
Teriary moist clay	130	-	-
Clay mixed with sand	140	-	-
Loam	150	200	-
Dense sand	160	-	-
Saturated medium sand	160	-	-
Argillaceose sand	170	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 26 (ต่อ) ตัวอย่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินและวัสดุอื่นๆ (หน่วย m/s)

Material	Depth of deposit		
	3-20m	21-50m	>50m
Gravel with stones	180	-	-
Clay, saturated	190	-	-
Medium sand with fines	190	-	-
Clayey sand with gravel	200	-	-
Medium sand in *situ*	220	220	-
Marl	220	-	-
Dry clay	220	-	-
Compacted clay fill	240	-	-
Gravel with stones	180	-	-
Clay, saturated	190	-	-
Medium sand with fines	190	-	-
Clayey sand with gravel	200	-	-
Medium sand in *situ*	220	220	-
Marl	220	-	-
Dry clay	220	-	-
Compacted clay fill	240	-	-
Dry loess	260	-	-
Puddled clay heavily compacted	-	320	-
Coarse gravel tightly packed	420	-	-
Medium gravel	-	330	-
Quartz sandstone	-	-	780
Atlantic muck, ooze	-	-	1000-1500
Hard sandstones (mesozoic)	-	-	1200
Ice, glaciers	-	-	1600
Tuffaceous sandstone	-	-	2000
Concrete	-	-	2200
Mesozoic shales	-	-	2350
Granite (intact)	-	-	2700

ที่มา: Sukimura (1984)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ค่าจากคลื่นแรงเฉือนยังสามารถจำแนกความแข็งและลักษณะชั้นดิน ซึ่งเสนอดังมาตรฐานต่างๆได้แก่ NEHRP (2000) และ IBC (2006) แสดงดังตารางที่ 27 และตารางที่ 28

ตารางที่ 27 การจำแนกความแข็งของชั้นดินโดยมาตรฐาน NEHRP

Site class	Description	Shear wave velocity, Vs Top 30 m (m/sec)	SPT (N) (blows/30cm)	Undrained shear strength, Su (kPa)
A	Hard rock	>1500		
B	Rock	760-1500		
C	Very dense soil and soft rock	360-760	>50	>100
D	Stiff soil	180-360	15-50	50-100
E	Soft soil	<180	<15	<50
F	1. Soil vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils. Quick and highly sensitive clays, and collapsible weakly cemented			
	2. Peat and/or highly organic clays (H > 3 m of peat and/or highly organic clays where H =			
	3. Very high plasticity clays (H > 8 m with PI > 75)			
	4. Very thick soft/medium stiff clays (H > 36 m)			

ที่มา: NEHRP (2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 28 การจำแนกความแข็งของชั้นดินโดยมาตรฐาน IBC

Site class	Soil profile name	Average properties in top 100 feet (30 meter)		
		Soil shear wave velocity, V_S (ft/s)	SPT , $\overline{N}$	Undrained shear strength (psf)
A	Hard rock	Vs > 5000	N/A	N/A
B	Rock	2500 < Vs $\leq$2500	N/A	N/A
C	Very dense soil and soft rock	1200 < Vs $\leq$ 2500	$\overline{N}$ > 15	$\overline{S_n}$ >1200
D	Stiff soil profile	600 $\leq$ Vs $\leq$ 1200	15 $\leq\overline{N}\leq$ 50	1000 $\leq\overline{S_n}\leq$2000
E	Soft soil profile	Vs < 600	$\overline{N}$ < 15	$\overline{S_n}$ < 1000
E	-	Any profile with more than 10 feet of soil having the following 1.Plasticity index PI > 20 2. Moisture content w $\geq$ 40 Sa and 3. Undrained shear strength $\overline{S_n}$ <500 psf		
F	-	Any profile concerning soils having one or more of the following 1. Soil vulneable to potential failure or collapes under scismic loading such as liquefiable soils. Quick and highly sensitive clays. Collapesible weakly cemented soil. 2. Peate and/or highly organic clays (H > 10 feet of peat and/or highly organic clays where H = thickness of soil) 3. Very high plasticity clays (H> 25 feet with plasticity index PI > 75) 4. Very thick soft/medium stiff clays (H > 120 feet)		

ที่มา: IBC (2006)

นอกจากนี้อำนาจ (2552) สรุปสมการสำหรับหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางโดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ค่า SPT และค่าปริมาณน้ำในมวลดิน (%W_n) ดังตารางที่ 29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 29 สมการเชิงประสบการณ์ในการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนสำหรับชั้นดินเหนียว

Parameter	Soil type	Empirical equation for Vs
Su	Soft to medium clay	$84.18 \cdot S_u^{0.23}$
SPT (N-value)	Medium to stiff clay	$75.55 \cdot N^{0.23}$
$\%W_n$		$632.32 \cdot W_n^{-0.45}$

ที่มา: อำนาจ (2552)

การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

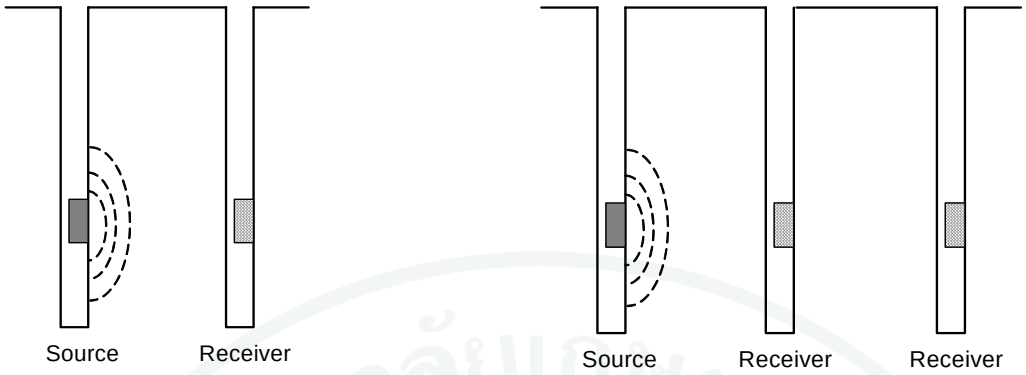
การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน สามารถทำได้ทั้งการทดสอบในสนามและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนี้

การทดสอบในสนาม

Seismic cross-hole test

Seismic cross-hole test เป็นการทดสอบในสนามแบบเจาะหลุมสำรวจเพื่อวัดคลื่น P และ S ที่เดินทางในแนวราบขนานกับชั้นดิน Kramer (1996) กล่าวว่าวิธีการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะใช้หลุมสำรวจตั้งแต่ 2 หลุมขึ้นไป ประกอบด้วยหลุมที่ติดตั้งเครื่องมือกำเนิดคลื่นและเครื่องมือรับสัญญาณคลื่นที่ความลึกระดับเดียวกัน โดยหลุมเจาะสำรวจที่บรรจุเครื่องมือรับสัญญาณคลื่นอาจมีมากกว่า 1 หลุมดังภาพที่ 33 เพื่อความถูกต้องของค่าที่วัดได้ เนื่องจากสามารถนำมาเปรียบเทียบเวลาเดินทางของคลื่นในพื้นที่ทดสอบที่มีความแปรปรวนของชั้นดินในระดับความลึกต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(a) การทดสอบแบบรับสัญญาณตรง (b) การทดสอบแบบรับสัญญาณเป็นช่วง

ภาพที่ 33 Seismic cross-hole test

Seismic down-hole Test

การทดสอบในลักษณะนี้สามารถวางตำแหน่งเครื่องมือกำเนิดคลื่นไว้ที่ผิวดินหรือในหลุมทดสอบก็ได้ สุพจน์ (2549) กล่าวว่า แบบ Up-hole คือการให้คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นจากหลุมทดสอบมายังจุดรับสัญญาณที่ผิวดิน ส่วนแบบ Down-hole คือการให้คลื่นเคลื่อนที่ลงจากแหล่งกำเนิดที่ผิวดินไปสู่ตัวรับสัญญาณที่อยู่ในหลุมเจาะสำรวจที่มีความลึกต่างๆกัน ดังภาพที่ 34

Kramer (1996) กล่าวว่าการทดสอบ Seismic down-hole สามารถวัดคลื่น S ได้ง่ายกว่าแบบ Up-hole จึงเป็นที่นิยมทดสอบมากกว่า แต่การทดสอบนี้มีความยากในเมื่อเจาะหลุมทดสอบแล้วทำให้ดินในบริเวณนั้นถูกรบกวน (Disturbed) มีผลกระทบจากคลื่นเสียงขณะทดสอบและปัญหาน้ำใต้ดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

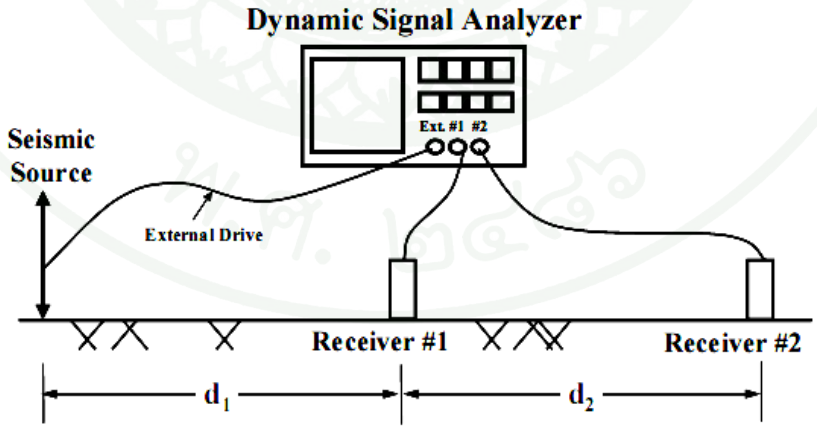


a) Seismic down-hole test (b) Seismic up-hole Test

ภาพที่ 34 การทดสอบ Seismic down-hole และการทดสอบ Seismic up-hole

Spectral analysis of surface waves (SASW)

Bay and Chaiprakaikeow (2006) อธิบายว่า SASW เป็นการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนตามความลึกของดินและหินโดยการสร้างความสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดคลื่นในพื้นที่ที่ต้องการ แล้ววัดคลื่น Rayleigh ที่เดินทางในชั้นดินจากตัวรับคลื่น ดังภาพที่ 35 การทดสอบชั้นดินระดับความลึกต่างๆทำได้โดยลดความถี่จากแหล่งกำเนิดลง ซึ่งจะได้ความยาวคลื่นมากขึ้น

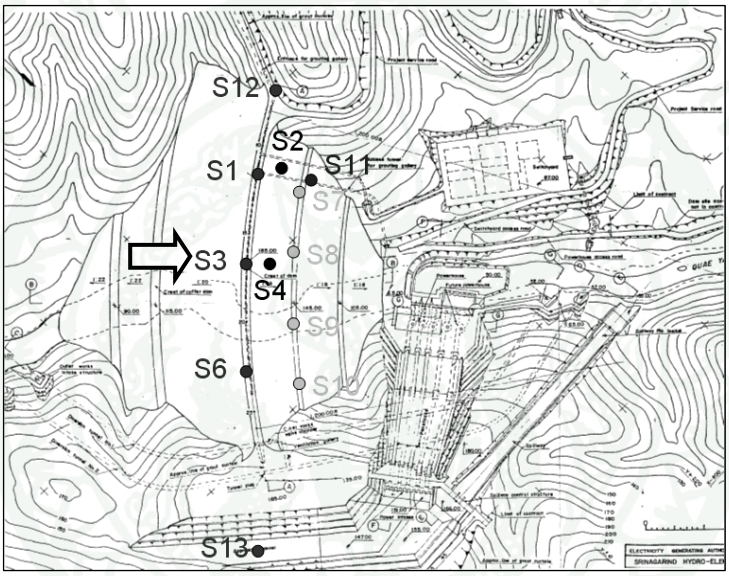


ภาพที่ 35 วิธีการทดสอบ SASW

ที่มา: Lin (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

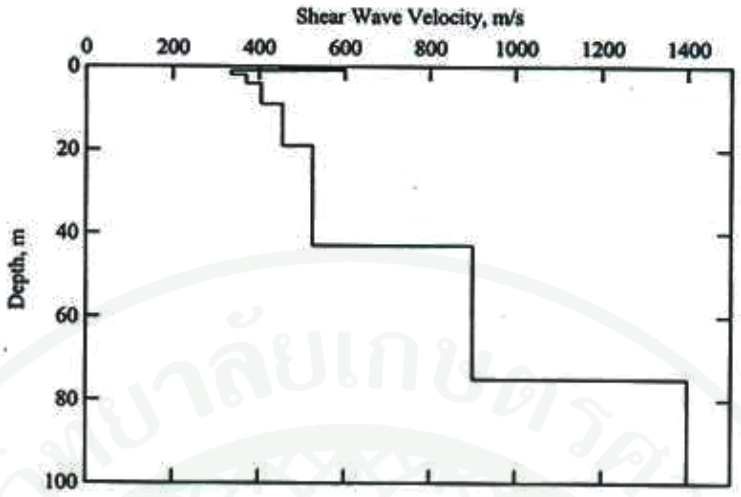
ในปี 2006 เขื่อนศรีนครินทร์ทำการทดสอบ SASW โดยใช้คลื่นที่เกิดจากรถบูโดเซอร์และฆ้อนขนาดใหญ่ และแยกคลื่นความถี่ต่างๆ โดยเครื่องมือ Spectrum analyzer รับสัญญาณจาก Geophones เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละความลึก ตัวอย่างผลการทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางสันเขื่อน (S3) ดังภาพที่ 36 ประกอบด้วยดินเหนียวบดอัดแกนกลางเขื่อนและชั้นกรอง กราฟระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับความลึก แสดงดังภาพที่ 37 และกราฟระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดกับความลึก แสดงดังภาพที่ 38 ความแตกต่างของผลการทดสอบโดยวิธี Down-hole และ SASW แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 36 ตำแหน่งทดสอบ SASW (S3)

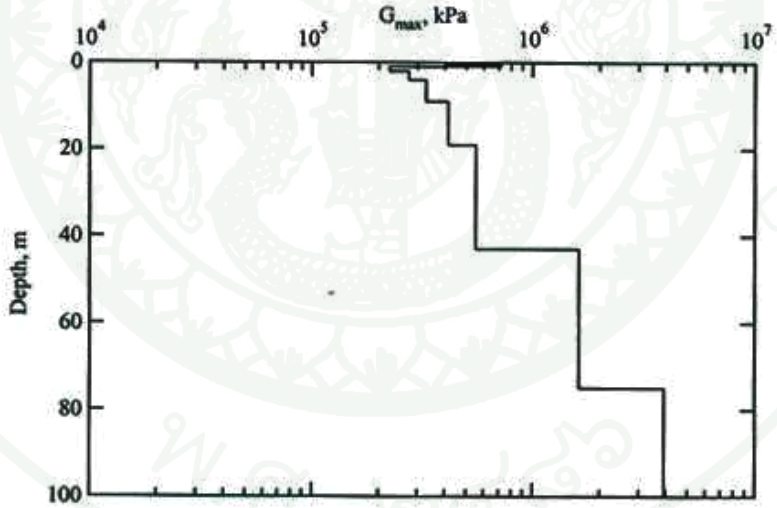
ที่มา: Bay and Chaiprakaikeow (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 37 ลักษณะความเร็วคลื่นแรงเฉือนของตำแหน่งที่ทดสอบ SASW (S3)

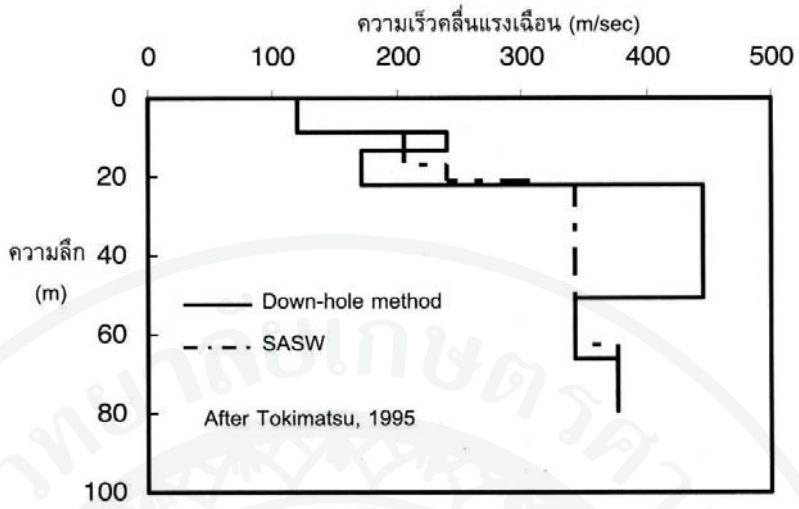
ที่มา: Bay and Chaiprakaikeow (2006)



ภาพที่ 38 ลักษณะโมดูลัสเฉือนสูงสุดของตำแหน่งที่ทดสอบ SASW (S3)

ที่มา: Bay and Chaiprakaikeow (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

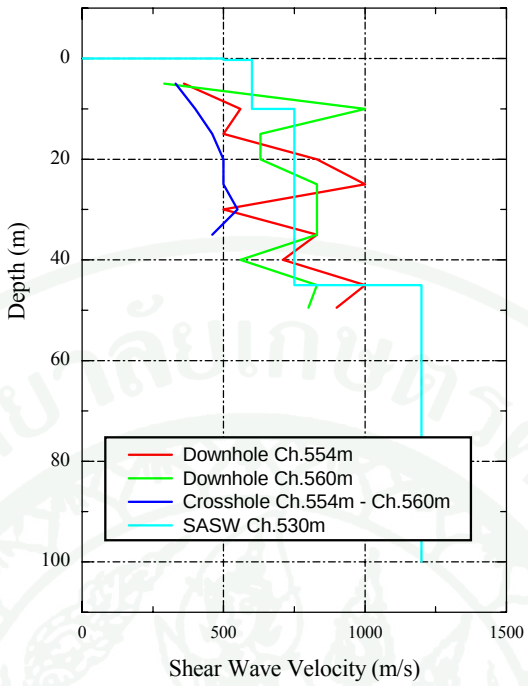


ภาพที่ 39 เปรียบเทียบผลการทดสอบโดยวิธี Down-hole และ SASW

ที่มา: Tokimatsu (1995) อ้างโดย สุพจน์ (2549)

ผลการทดสอบต่างๆจาก Bay and Chaiprakaikeow (2006) ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2549) แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉือนบริเวณ Ch. 554 และ Ch.530 ของเขื่อนวชิราลงกรณ โดยวิธี Down-hole และ Cross-hole ในปี 1984 และวิธี SASW ในปี 2006 ดังภาพที่ 40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

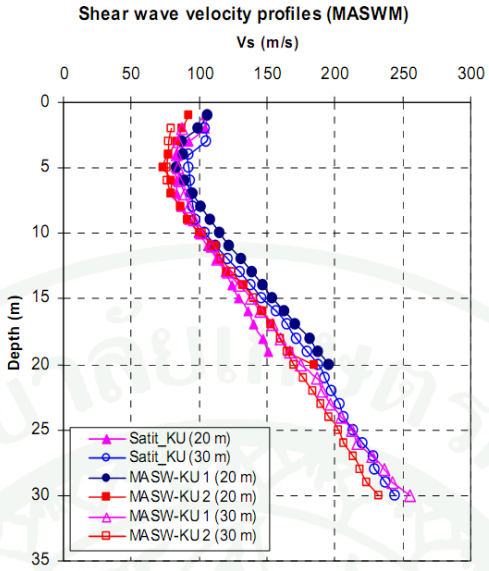


ภาพที่ 40 การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉือนบริเวณ Ch. 554 และ Ch.530 ของเขื่อนวชิราลงกรณ โดยวิธี Down-hole และ Cross-hole ในปี 1984 และวิธี SASW ในปี 2006

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bay and Chaiprakaikeow (2006)

อำนาจ (2552) ทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดยวิธี MASWM บริเวณสนามรักบี้ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ช่วงความลึก 30 เมตร ได้ผลอยู่ในช่วงระหว่าง 75-260 เมตรต่อวินาที ดังภาพที่ 41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จากการทดสอบ MASWM

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

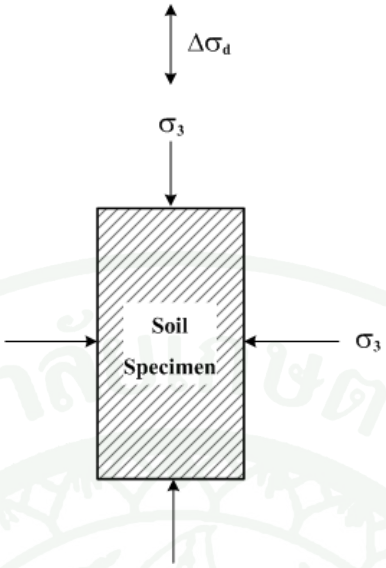
Cyclic triaxial test

การทดสอบ Triaxial เป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถจำลองสภาวะการทดสอบได้หลายๆสภาวะตามต้องการทั้งการให้แรงและการระบายน้ำ อีกทั้งมีการพัฒนาเครื่องมืออย่างต่อเนื่อง Das (1992) อธิบายว่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ได้คือค่า Modulus of elasticity (E) และอัตราส่วนความหน่วง จากสมการที่ 45 ดังนั้นโมดูลัสเฉือนจึงหาได้จากสมการที่ 46 โดยทดสอบแบบควบคุมความเครียด (Strain controlled) และนอกจากจะให้แรงดัน (Confining pressure) แล้วจะเพิ่มแรงแบบวัฏจักร ($\Delta\sigma_d$) ในแนวดิ่ง ดังภาพที่ 42

$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon} \tag{45}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{46}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

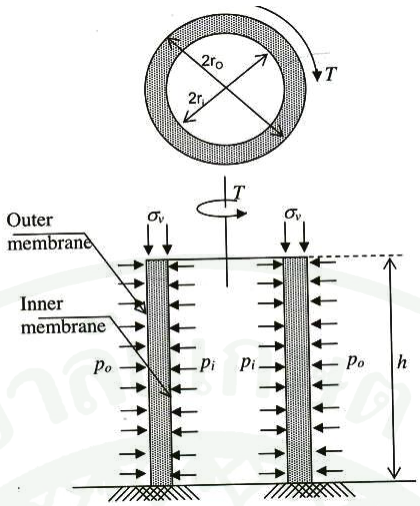


ภาพที่ 42 หลักการทดสอบ Cyclic triaxial

Cyclic Torsional Shear Test

การทดสอบนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อจำลองการสั่นสะเทือนทางราบ ทำให้สามารถวัดคลื่นแนวเฉือนได้ใกล้เคียงกับสภาพการเกิดแผ่นดินไหวจริง โดยเครื่องมือนี้เรียกว่า Hollow cylinder torsional shear ซึ่งตัวอย่างดินจะถูกบรรจุในกระบอกกลวงที่มีผนังหนาน้อยที่สุด แรงดันจะให้ผ่านช่องกลวงด้านในและด้านนอก พร้อมกับการให้แรงทางแนวดิ่ง จึงมีทั้งการเฉือนและบิดตัวอย่างดิน ข้อดีของเครื่องมือชนิดนี้คือมีความยืดหยุ่นมาก สามารถควบคุมสภาพของแรงได้หลายรูปแบบและหลายอัตราส่วน ข้อเสียคือเตรียมตัวอย่างดินยากและมักเป็นตัวอย่างที่ถูกรบกวนสภาพแล้วเหมือนการทดสอบในห้องปฏิบัติการอื่นๆ สภาวะของการให้แรงดันในเครื่องมือ Torsional shear แสดงดังภาพที่ 43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 43 สภาวะของการให้แรงดันในเครื่องมือ Torsional shear

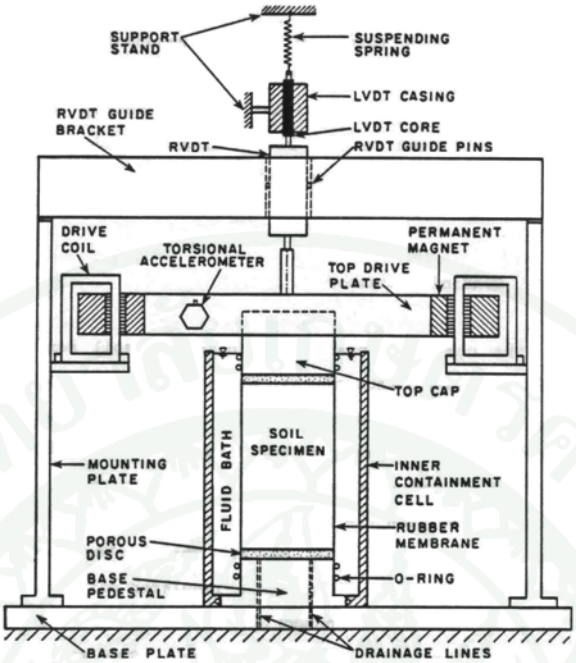
ที่มา: สุพจน์ (2549)

Resonant column test

สุพจน์ (2549) กล่าวว่า การทดสอบ Resonant column อาศัยการตอบสนองของแท่งดินต่อการกระตุ้น (แรงกระทำ) ที่ความถี่ต่างๆ แล้วอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนตัวของคลื่น ผนวกกับสภาพขอบเขตของการทดสอบในการคำนวณค่าของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแท่งดินตัวอย่าง โดยการทดสอบที่ได้รับการนิยมคือแบบ Fixed-Free ซึ่งสามารถกระตุ้นตัวอย่างทั้งที่ฐานและส่วนบนของตัวอย่างดิน

Kramer (1996) กล่าวว่า การทดสอบ Resonant column จะควบคุมความถี่ (Frequency) และขนาดของคลื่น (Amplitude) ดินตัวอย่างที่อยู่ในเครื่องมือดังภาพที่ 44 จะได้รับแรงบิดในแนวแกนตั้ง เพื่อหาความถี่จากความถี่ต่ำถึงความถี่สูงสุดที่ดินสามารถรับได้ค่าหนึ่ง นั่นคือความถี่ธรรมชาติหรือคาบธรรมชาติ (Fundamental frequency หรือ Natural frequency) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของดิน (Stiffness)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

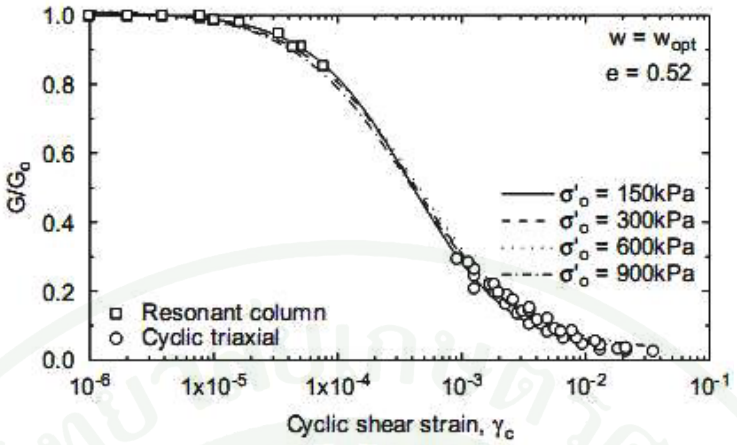


ภาพที่ 44 เครื่องมือการทดสอบ Resonant column แบบ Fixed ที่ฐานและบิดด้านบน

ที่มา: www.civil.ubc.ca (2008)

การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินในห้องปฏิบัติการมีหลากหลายแนวทาง จึงมีผู้ทำการทดสอบคุณสมบัติของดินเปรียบเทียบกันเช่น Xenaki and Athanasopoulos (2007) แสดงผลการทดสอบดินเหนียวเปรียบเทียบระหว่างวิธี Resonant column และ Cyclic triaxial ดังภาพที่ 45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



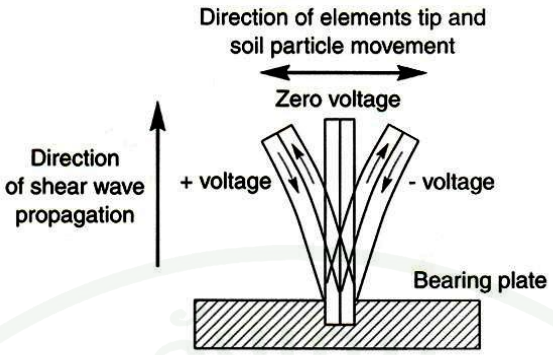
ภาพที่ 45 ผลการทดสอบดินเหนียวเปรียบเทียบระหว่างวิธี Resonant column และ Cyclic triaxial

ที่มา: Xenaki and Athanasopoulos (2007)

Bender element test

Bender Element ใช้หาคลื่นแรงเฉือนโดยหลักการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender element จะมีการเปลี่ยนรูป เกิดการยืดตัวทางด้านบวกและหดตัวในด้านลบ ดังนั้นเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าแบบวัฏ-จักร Bender element จึงเกิดการสะบัดตัวตามความถี่ของกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดคลื่นแรงเฉือนผ่านตัวอย่างดิน ดินที่เคลื่อนตัวผลัก จะเกอดการบิดกับ Bender element กระแสไฟฟ้าก็จะไหลออกจากระบบ ถ้าทำการตรวจวัดเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender element ตัวที่ 1 ไปยัง Bender element ตัวที่ 2 ก็สามารถคำนวณเวลาที่คลื่นแรงเฉือนเดินทางได้ และในปี 1985 Madshus ได้พัฒนาเครื่องมือ Piezoeletric bender element โดยใช้หลักการทดสอบ Bender element ดังภาพที่ 46

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



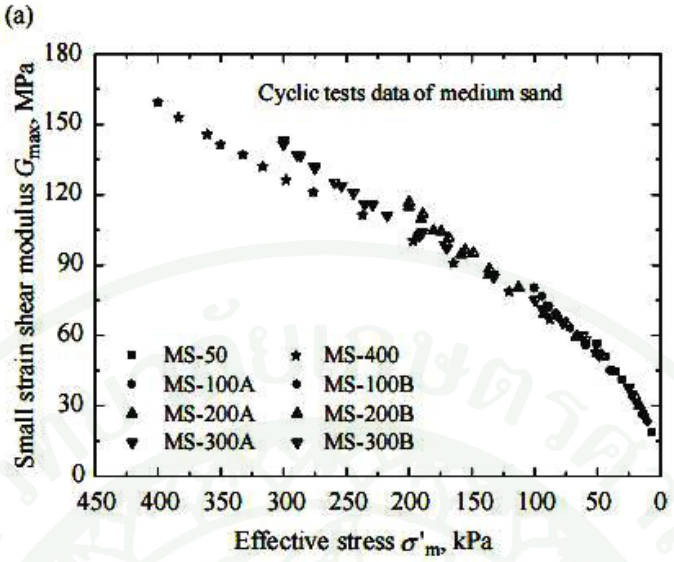
ภาพที่ 46 หลักการทดสอบ Bender element

ที่มา: Kramer (1996)

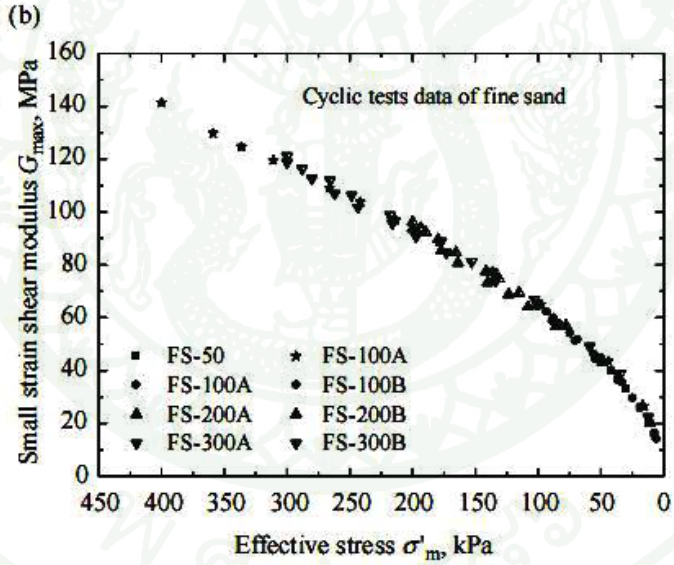
Zhou and Chen (2005) ทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของทรายหยาบปานกลาง (Medium sand) และทรายละเอียด (Fine sand) ต่อการเกิด Liquefaction ด้วยวิธี Bender element ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 47

ตารางที่ 30 เป็นการเปรียบเทียบคุณภาพผลการทดสอบที่ได้โดยการทดสอบแบบต่างๆ ซึ่งการทดสอบ Cyclic simple shear เป็นการทดสอบที่นิยมใช้กับดินเม็ดหยาบที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อหาพฤติกรรมของดินเมื่อเกิด Liquefaction จะเห็นได้ว่าการทดสอบ Resonant column สามารถหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ได้หลายพารามิเตอร์และมีความน่าเชื่อถือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(a) ผลการทดสอบของ Medium sand



(b) ผลการทดสอบของ Fine sand

ภาพที่ 47 อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนที่แรงดันต่างๆ จากการทดสอบโดยเครื่องมือ Bender element

ที่มา: Zhou and Chen (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 30 เปรียบเทียบคุณภาพการทดสอบการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์แบบต่างๆ

Relative quality of test results					
Laboratory testing	Shear modulus	Young's modulus	Material damping	Effect of number of cycles	Attenuation
Resonant column	Good	Good	Good	Good	-
Cyclic triaxial	-	Good	Good	Good	-
Cyclic simple shear	Good	-	Good	Good	-
Cyclic torsion shear	Good	-	Good	Good	-

ที่มา: ดัดแปลงจาก Das (1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การจัดลำดับความเสี่ยงใช้อุปกรณ์การทำวิจัยดังนี้

1. แผนที่ภูมิประเทศ 1: 50,000

2. แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย จัดทำโดยกรมทรัพยากรธรณี พ.ศ. 2548

3. โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

การวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ของเขื่อนใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังนี้

1. โปรแกรม SeismoSignal (SeismoSoft Ltd, 2009) เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดินจากคลื่นแผ่นดินไหว

2. โปรแกรม Slope/W เวอร์ชั่น 2007 เพื่อวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนในสภาวะสถิตย์

3. โปรแกรม Sigma/W เวอร์ชั่น 2007 เพื่อวิเคราะห์หน่วยแรงที่กระทำในเบื้องต้น (Initial stress) และโปรแกรม Quake/W เวอร์ชั่น 2007 เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ (Dynamic response analysis) โดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ

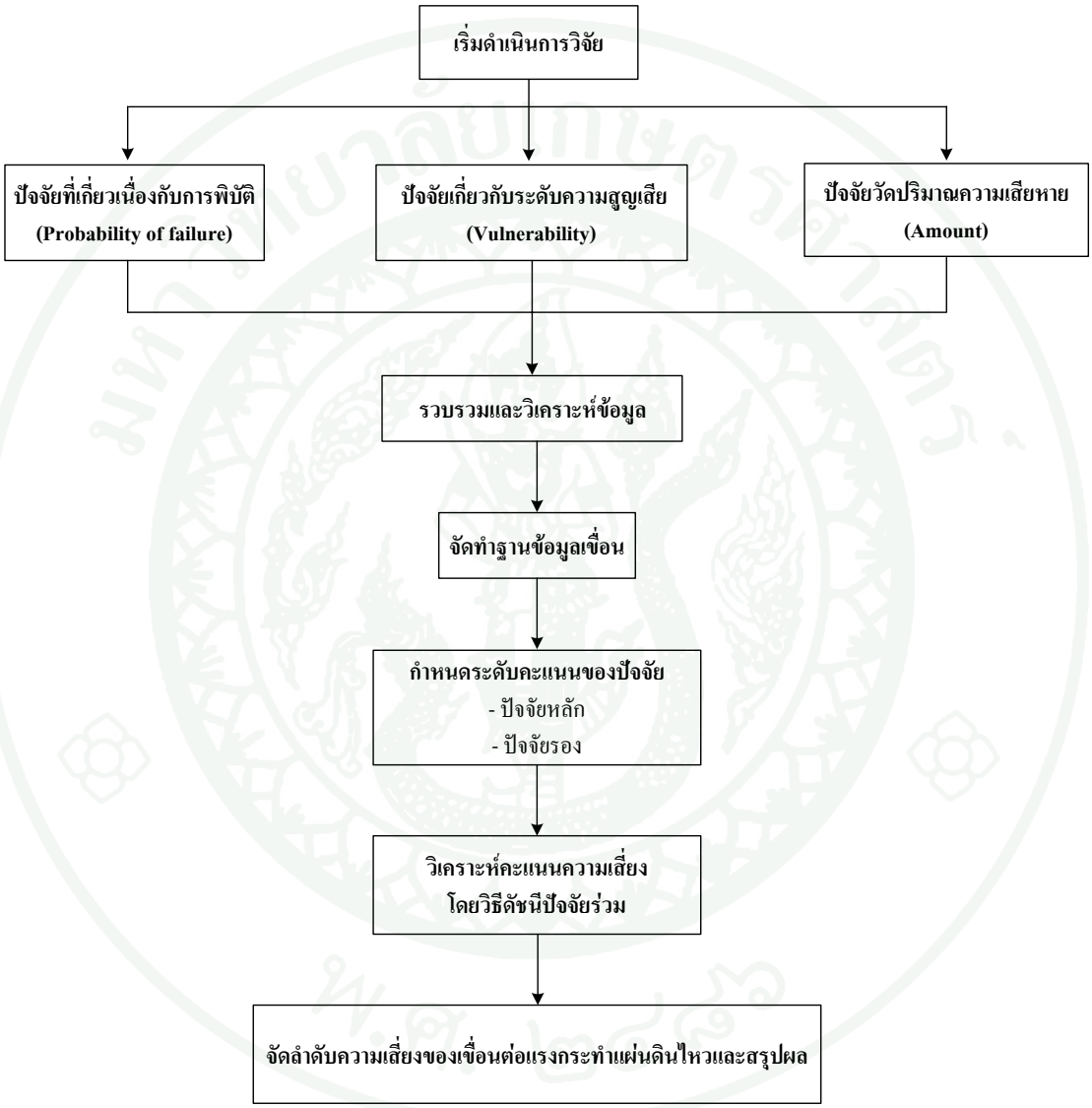
วิธีการ

แนวทางการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ การจัดลำดับความเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว และการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การจัดลำดับความเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

แนวทางการวิจัยเป็นไปตามภาพที่ 48 มีรายละเอียดตามขั้นตอนต่อไปนี้



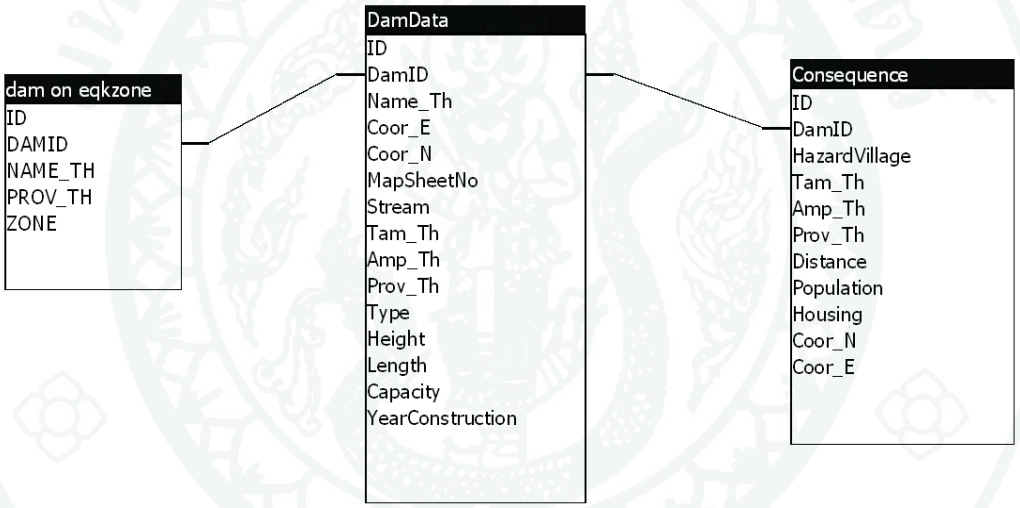
ภาพที่ 48 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยส่วนการจัดลำดับความเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

1. จากนิยามของความเสี่ยง ดังสมการที่ 10 พิจารณาปัจจัยที่ทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งประกอบด้วยโอกาสเกิดการพิบัติและคะแนนจากปัจจัยด้านความสูญเสีย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเขื่อนเบื้องต้นทั่วประเทศ ประกอบด้วย ชื่อเขื่อน ประเภท ที่ตั้ง ความสูง ปริมาณเก็บกักและปีที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ จากนั้นหาข้อมูลเพื่อการจัดลำดับความเสี่ยง เพิ่มเติมประกอบด้วย ที่ตั้งในบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว จำนวนประชากรที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำ และระยะห่างระหว่างเขื่อนกับชุมชนท้ายน้ำ

3. จัดทำฐานข้อมูลเขื่อนโดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังภาพที่ 49 ได้แก่ ส่วนข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อน (Dam data) ส่วนข้อมูลที่เกี่ยวกับผลกระทบ (Consequence) และส่วนการวิเคราะห์โอกาสเกิดแผ่นดินไหวจากที่ตั้งเขื่อน (Rate earthquake) โดยใช้เทคนิคทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ซึ่งเขื่อนที่อยู่ในฐานข้อมูลแสดงดังตารางผนวกที่ ก1



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ในฐานข้อมูลเขื่อน

4. กำหนดระดับคะแนนและค่าความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง จากการประเมินน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย โดยเทียบความสำคัญของปัจจัยหนึ่งต่อปัจจัยอื่นเป็นคู่ๆ จนครบทุกคู่ ซึ่งสามารถแบ่งปัจจัยหลักหนึ่งออกเป็นปัจจัยรองย่อย ๆ ได้ และให้ความสำคัญของปัจจัยย่อยนี้ด้วยวิธีเดียวกันตามแนวคิดดังตารางที่ 31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 31 หลักการให้คะแนนเพื่อประเมินน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย

		ปัจจัยเปรียบเทียบ		
	ปัจจัยรอง	ก	ข	ค
ปัจจัยตัวตั้ง	ก		3	2
	ข	1		1
	ค	2	3	

ที่มา: สุทธิศักดิ์และคณะ 2549

5. การจัดลำดับความเสี่ยงของการพิบัติจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ($Risk_{eq}$) วิเคราะห์คะแนนความเสี่ยงเป็นไปตามหลักการแสดงดังสมการที่ 10 ประกอบด้วยรายละเอียดดังสมการที่ 47 ถึงสมการที่ 51 ดังนี้

ความเสี่ยงจากภัยแผ่นดินไหว

$$Risk_{eq} = F_{eq} \times N \quad (47)$$

คะแนนโอกาสเกิดการพิบัติจากภัยแผ่นดินไหว

$$F_{eq} = R_{eq} x\ (W_{age}\ R_{age} + W_{type}\ R_{type}) \quad (48)$$

คะแนนความสูญเสียรวมจากความรุนแรงจากการพิบัติและปริมาณความสูญเสีย

$$N = N_{vul} x\ N_{amount} \quad (49)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คะแนนความรุนแรงจากการพิบัติ

$$N_{vul} = (W_{ht}R_{ht} + W_{vol}R_{vol} + W_{dist}R_{dist}) \quad (50)$$

คะแนนปริมาณความสูญเสีย

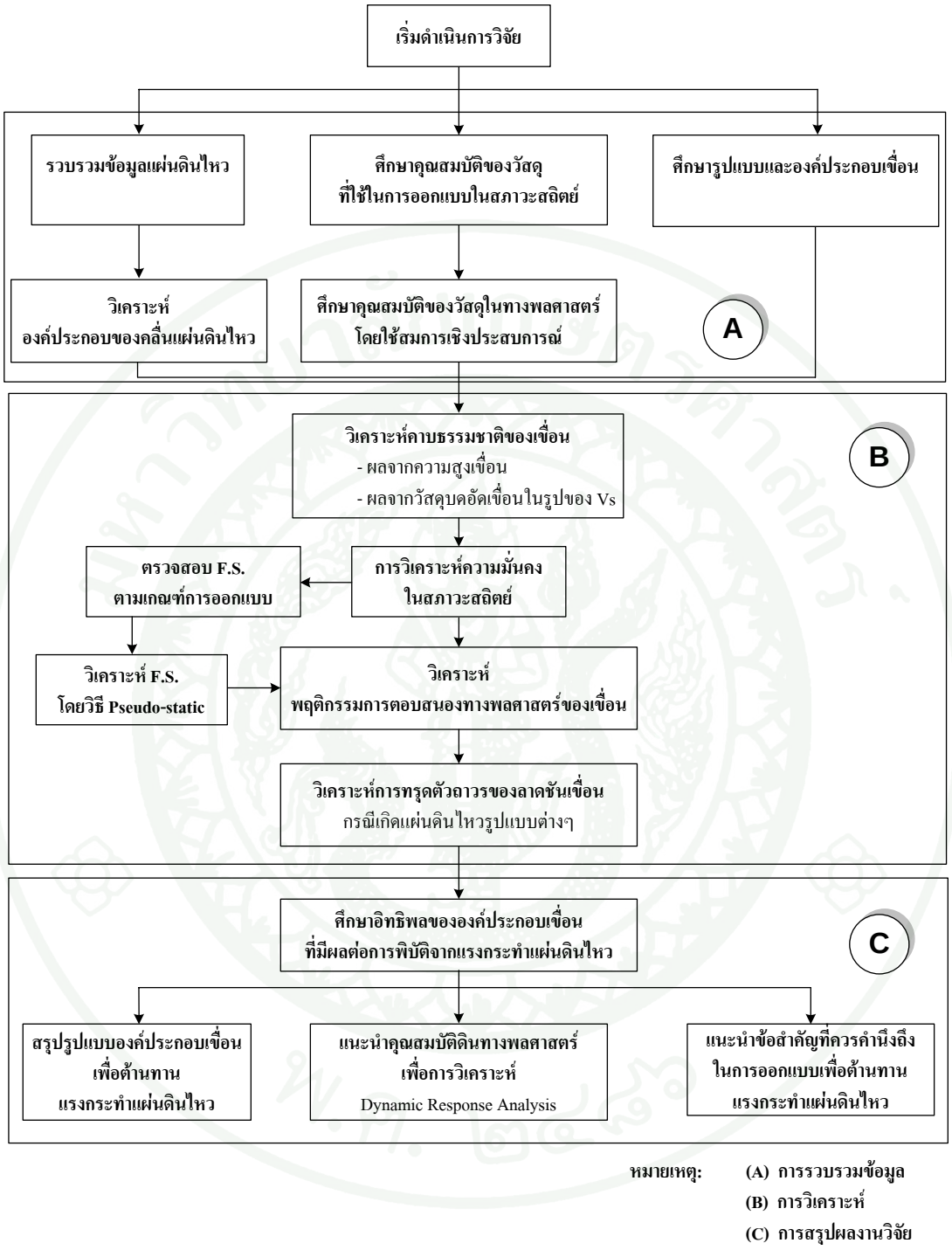
$$N_{amount} = R_{pop} \quad (51)$$

6. พิจารณาจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนตามคะแนนความเสี่ยงและสรุปผล

การวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

แนวทางการวิจัยด้านการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ เป็นไปตามภาพที่ 50 มีรายละเอียดดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 50 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยส่วนการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การรวบรวมข้อมูล

1. ศึกษารูปแบบและองค์ประกอบเขื่อนดินจากแนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบของกรมชลประทานร่วมกับแบบก่อสร้าง 79 เขื่อน (ตารางผนวกที่ ข 1) ประกอบด้วยเขื่อนดินถมเนื้อเดียว 21 เขื่อน เขื่อนดินถมแบ่งส่วน 52 เขื่อน และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนแบบมี Random 6 เขื่อน ในจำนวน 79 เขื่อนนี้ มีเขื่อนตั้งอยู่ในภาคเหนือ 25 เขื่อน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 25 เขื่อน ภาคตะวันออก 15 เขื่อน และภาคกลาง 14 เขื่อน เมื่อศึกษาแนวทางการออกแบบเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทย รวมถึงข้อจำกัดในการออกแบบของกรมชลประทานแล้ว จึงจำลองรูปแบบเขื่อนที่มีองค์ประกอบและขนาดต่างๆ เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ในลำดับถัดไป

2. คัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหว เริ่มจากแนวคิดด้านขนาดของแผ่นดินไหวและระยะทางที่เกิดแผ่นดินไหว ซึ่งจะเปรียบเทียบพฤติกรรมของเขื่อนที่ต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ขนาด 5-6 ริกเตอร์ กับ 6-7 ริกเตอร์ โดยกำหนดให้มีความเร่งสูงสุดในแนวราบใกล้เคียงกันดังตารางที่ 32 เนื่องจากต้องการทราบผลกระทบของขนาด (Magnitude) แผ่นดินไหวที่มีต่อเขื่อน และยังสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของเขื่อนทั้งสองประเภทได้อีกด้วย นอกจากนี้จะวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่เกิดจากความเร่งสูงสุดในแนวราบ (PGA) โดยใช้แผ่นดินไหวเท่ากันคือ 6-7 ริกเตอร์ ดังตารางที่ 33 ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมดมีข้อมูลเบื้องต้นดังตารางที่ 34 ทั้งนี้ข้อมูลเบื้องต้นของแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์จำเป็นต้องสัมพันธ์กับการจำลองสภาพเขื่อนและฐานราก ด้วยเหตุนี้การคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวที่มี $\frac{V_{max}}{A_{max}}$ ไม่เกิน 0.138 ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้ในชั้นดินแข็งถึงชั้นหิน นอกจากยังได้พิจารณา Predominant period (T_p) ของคลื่นให้อยู่ในช่วงเดียวกับ Natural period (T_n) ของเขื่อน ที่ได้จากวิธี Shear beam และจากสมการเชิงประสบการณ์ที่มีผู้วิจัยไว้ดังสมการที่ 12 ถึงสมการที่ 15 โดยจะกล่าวถึงวิธีการในลำดับถัดไป ทั้งนี้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัยได้จากฐานข้อมูลของ Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) ซึ่งเป็นข้อมูลค่ามากจากแกนในแนวทิศเหนือถึงทิศใต้ หรือทิศตะวันออกถึงทิศตะวันตกของเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 32 เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่ชั้นหินที่มี PGA ใกล้เคียงกัน

Magnitude (Richter)	Dam height (m), Earthquake event	
	H_{15} (T_p: 0.15-0.2 sec)	H_{30} (T_p: 0.27-0.3 sec)
M=5-6 (Distance: 0-30 km)	P0103: Northern Calif 1975	P0051: Lytle Creek 1970
M=6-7 (Distance: 30-60 km)	P0740: Loma Prieta 1989	P0674: Whitter Narrows 1987

ตารางที่ 33 เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่ชั้นหินที่มี PGA > 0.5g

Magnitude (Richter)	Dam height (m), Earthquake event	
	H_{15} (T_p: 0.15-0.2 sec)	H_{30} (T_p: 0.27-0.3 sec)
M=6-7 (Distance: 0-30 km)	P0729: Superstitn Hills 1987	P0770: Loma Prieta 1989

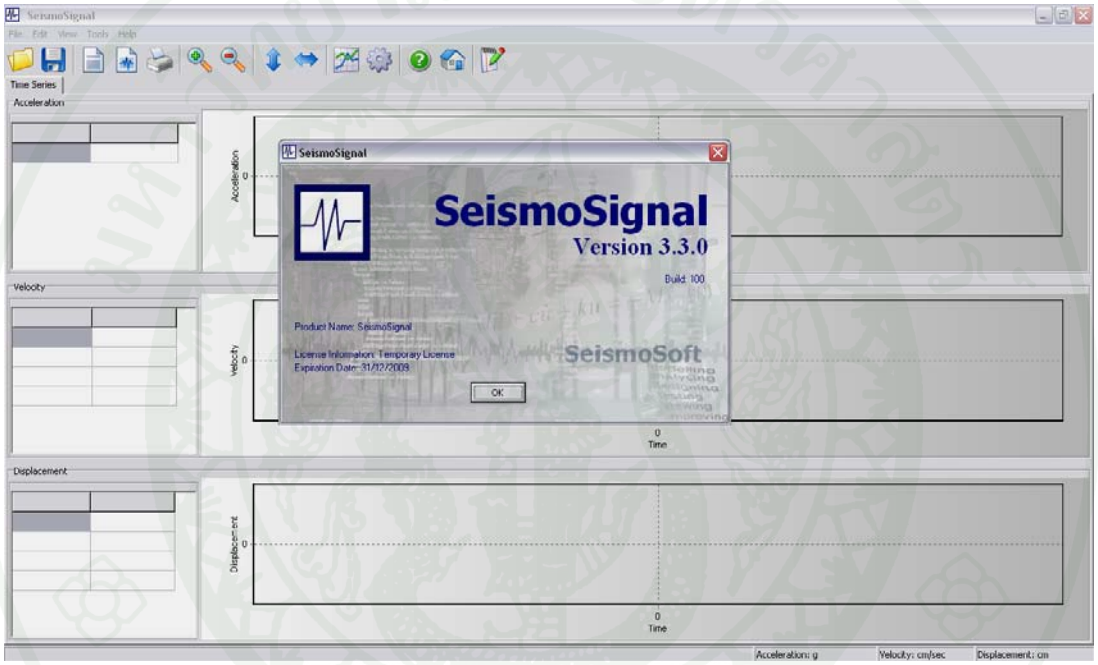
ตารางที่ 34 ข้อมูลเบื้องต้นของเหตุการณ์แผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

Group	Magnitude (Richter)	Event	Distance* (km)	PGA (g)	Duration (sec)
M_1	5-6	Northern Calif 1975	28.9[(b)]	0.115	14.6
		Lytle Creek 1970	15.4[(b)]	0.162	16.74
M_2	6-7	Loma Prieta 1989	42.0[(a)]	0.124	40
		Whitter Narrows 1987	37.9[(c)]	0.166	40
M_3	6-7	Superstitn Hills 1987	4.3[(c)]	0.682	22.21
		Loma Prieta 1989	6.1[(c)]	0.625	24.97

หมายเหตุ: Distance : (a) Closest to fault rupture, (b) Hypocentral, (c) Closest to surface projection of rupture

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ได้ในข้อ 2 จะนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบของคลื่น (Ground motion parameters) ที่มีความสำคัญทั้งในด้านขนาด ความถี่ และเวลาการสั่นไหวโดยโปรแกรม SeismoSignal ลิขสิทธิ์ของบริษัท SeismoSoft ประเทศอิตาลี ดังภาพที่ 51 องค์ประกอบของคลื่นที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 35 ซึ่งการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบว่าข้อมูลแผ่นดินไหวที่นำมาใช้เป็นข้อมูลที่ดีหรือไม่ คลื่นมีความรุนแรงและมีลักษณะเฉพาะตัวอย่างไร มีความเหมาะสมกับโครงสร้างที่จะวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์หรือไม่



ภาพที่ 51 โปรแกรม SeismoSignal ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหว

ที่มา: SeismoSoft Ltd (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 35 องค์ประกอบของคลื่นที่ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoSignal

No	Ground motion parameters	Abbreviations
1	Peak ground values of acceleration	PGA
2	Peak ground values of velocity	PGV
3	Peak ground values of displacement	PGD
4	Peak velocity and acceleration ratio	$\frac{V_{max}}{A_{max}}$
5	Arias Intensity	I_a
6	Sustained maximum acceleration	SMA
7	Sustained maximum velocity	SMV
8	Predominant period	T_p
9	Bracketed duration	-

4 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ออกแบบในสภาวะสถิตย์ในประเทศไทย ได้จากรวบรวมคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมจากโครงการก่อสร้างเขื่อนหลายโครงการ ซึ่งเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติวัสดุโดยแบ่งชนิดของดินตามองค์ประกอบเขื่อนอันได้แก่ ตัวเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (Homogeneous zone) แกนเขื่อน (Core zone) และเปลือกเขื่อนด้านนอก (Shell zone) ต่อมาจึงศึกษาคุณสมบัติทางสถิตย์ของดินถมตัวเขื่อนได้แก่ หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (γ_t) ดัชนีความเหนียว (PI) และอัตราส่วนช่องว่าง (e) เพื่อการได้มาของค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดสำหรับวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ สำหรับคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ แรงยึดเหนี่ยว (c) และมุมเสียดทาน (ϕ) ซึ่งได้จากการทดสอบ Direct shear และ Triaxial จะถูกนำมาวิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะสถิตย์ และวิเคราะห์หาค่า Yield accerelation (K_y) โดยวิธี Pseudo-static โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์คุณสมบัติที่ใช้ออกแบบในสภาวะสถิตย์กับจำลองการตอบสนองทางพลศาสตร์ตามหน้าตัดเขื่อน แสดงการจำแนกองค์ประกอบเขื่อนตามชนิดดินดังตารางที่ 36 ตามแนวทางของมาตรฐาน USBR (1987) โดยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมารวบรวมได้จากบ่อยืมดิน (Borrow area) ของโครงการก่อสร้างจำนวน 37 โครงการ ดังตารางผนวกที่ 2 มีตัวอย่างดินทั้งหมด 493 ตัวอย่าง สรุปดังตารางที่ 37 โดยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของคุณสมบัติทางสถิตย์ของดินถมตัวเขื่อน เพื่อเลือกค่าเฉลี่ยไปใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 36 เกณฑ์การแบ่งองค์ประกอบตามชนิดดิน

องค์ประกอบ	ชนิดของดินแบ่งตาม USCS
เขื่อนดินถมเนื้อเดียว (Homogeneous)	GC, GM, GM-GC, SC, SM, SC-SM, SM-SC, CL, CL-ML, ML
แกนเขื่อน (Core zone)	GC, SC, CL
เปลือก (Shell zone)	GM, GM-GC, SM, SC-SM, SM-SC, CL-ML, ML

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 37 จำนวนตัวอย่างแบ่งตามคุณสมบัติดินจากทุกโครงการ

No	USCS	No of sample	GS	PI	e	Total unit weight (t/m^3)	Permeability (cm/sec)	Direct shear		Triaxial (UU)		Triaxial (CU)			
								C (t/m^2)	ϕ	C (t/m^2)	ϕ	C (t/m^2)	ϕ	C' (t/m^2)	ϕ'
1	GC	16	16	13	13	13	14	5	5	3	3	1	1	3	3
2	GM	23	20	15	18	15	15	3	3	5	5	4	4	3	3
3	GM-GC	7	7	7	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	SC	110	65	107	70	106	63	45	45	17	17	15	15	6	7
5	SC-SM	11	10	19	10	10	9	9	9	9	9	0	0	9	9
6	SM	62	49	28	47	58	46	34	34	21	21	16	16	13	13
7	SM-SC	16	13	10	15	14	11	8	8	4	0	3	3	2	3
8	CL	120	88	110	106	110	77	74	74	36	36	13	13	23	23
9	CH	8	6	6	6	6	5	6	6	2	2	2	2	1	1
10	MH	36	31	22	32	28	22	7	7	6	6	5	5	2	2
11	ML	73	64	53	63	59	46	18	18	16	16	15	15	10	10
12	CL-ML	9	9	9	9	9	9	10	10	7	7	4	4	5	5
13	ML-OL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	MH-OH	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Total		493	380	401	395	434	319	221	221	127	123	79	79	78	80

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5 การคำนวณคุณสมบัติของวัสดุตัวเขื่อนทางพลศาสตร์ ใช้สมการเชิงประสบการณ์ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนตรวจเอกสาร โดยการวิเคราะห์นี้จะใช้ผลการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติพื้นฐานจากข้อ 2 มาคำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด โดยค่า K_0 จะหาจากสมการของ Mayne and Kulhawy (1994) ดังสมการที่ 5 ในที่นี้กำหนดให้เขื่อนมีสภาพอัดแน่นมากกว่าปกติมาก (Heavily consolidated soil) มีค่า OCR เท่ากับ 8 โดยได้แนวคิดจากที่ Huang (1994) ใช้ค่า OCR ของเขื่อนเท่ากับ 15 จากนั้นจะนำ K_0 ไปคำนวณหา σ_2' และ σ_3' เพื่อหา σ_m' ต่อไป ซึ่ง σ_m' จะนำมาคำนวณโมดูลัสเฉือนสูงสุด ทั้งนี้เพื่อความมั่นใจในผลค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้ จึงทำการแปลงโมดูลัสแรงเฉือนเป็นความเร็วคลื่นแรงเฉือนด้วยสมการที่ 43 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยกับดินบดอัดจากองค์ประกอบเขื่อนจริงได้แก่ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone จากเขื่อนแก่งกระจาน เขื่อนบางวาด เขื่อนลำปาว และเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Dike 4) เขื่อนสิริกิติ์ ดังตารางที่ 38 โดยสมการที่ใช้วิเคราะห์คลื่นแรงเฉือนโดยใช้ค่าจากผลการตอกทดลอง (Standard penetration test, SPT) แสดงดังตารางที่ 39 ทั้งนี้สมการเชิงประสบการณ์ที่ใช้ในวิเคราะห์สรุปเรียงตามปีที่ทดสอบ แสดงตารางที่ 40

ตารางที่ 38 รายชื่อเขื่อนและองค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	Homogeneous	Core	Shell
1	เขื่อนลำปาว	-	✓	✓
2	เขื่อนบางวาด	-	✓	✓
3	เขื่อนแก่งกระจาน	-	✓	✓
4	เขื่อนสิริกิติ์ (เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ#4)	✓	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 39 สมการที่ใช้ในการหาคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT

Equation No	Soil type	Correlation equation (Vs) (m/s)	Reference
1	All	$81.686xN^{0.39}$	Ohsaki and Iwasaki (1973)
2	Clay	$85.344xN^{0.341}$	Ohta and Goto (1978)
3	All	$51.5xN^{0.516}$	Iyisan (1996)

หมายเหตุ N = SPT N-Value

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 40 สรุปสมการ Empirical ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนในทางพลศาสตร์

Equation no	Reference	Experimental	Shear strain	Soil type	Empirical	Unit
1	Hardin and Black (1968)	Resonant column	Small strain	Kaolinite	$G_{max} = 3270 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \sigma'^{0.5}_m$	kPa
2	Hardin and Drdevich (1972)	Modified from Angular sand	-	Clay	$G_{max} = 3230 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} (OCR)^k (\sigma'_m)^{1/2}$	kPa
3	Kokusho and Esashi (1981)	Large cyclic triaxial	1.00E-06	Round grain/Filter and transition fill	$G_{max} = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.50}$	kPa
4	Kokusho and Esashi (1981)	Large cyclic triaxial	1.00E-06	Coarse grain	$G_{max} = 13000 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.55}$	kPa
5	Xenaki and Athanasopoulos (2007)	Resonant column	-	Clay at OMC	$G_{max} = 11.6 \sigma'^{0.48}_o$	σ=kPa, Gmax=MPa
6	Xenaki and Athanasopoulos (2007)	Resonant column	-	Clay at OMC ±2%	$G_{max} = 14.6 \sigma'^{0.43}_o$	σ=kPa, Gmax=MPa

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ในที่นี้จะกล่าวรวมตั้งแต่กระบวนการจำลองสภาพเขื่อนก่อนการรับแรงกระทำแผ่นดินไหว ซึ่งเริ่มจากการวิเคราะห์คาบธรรมชาติของตัวเขื่อนจากสมการเชิงประสบการณ์ต่างๆ จากนั้นวิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะสถิตย์ ในขณะเดียวกันได้วิเคราะห์ค่า K_y จากวิธี Pseudo-static เพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดในแนวราบขั้นต้น จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

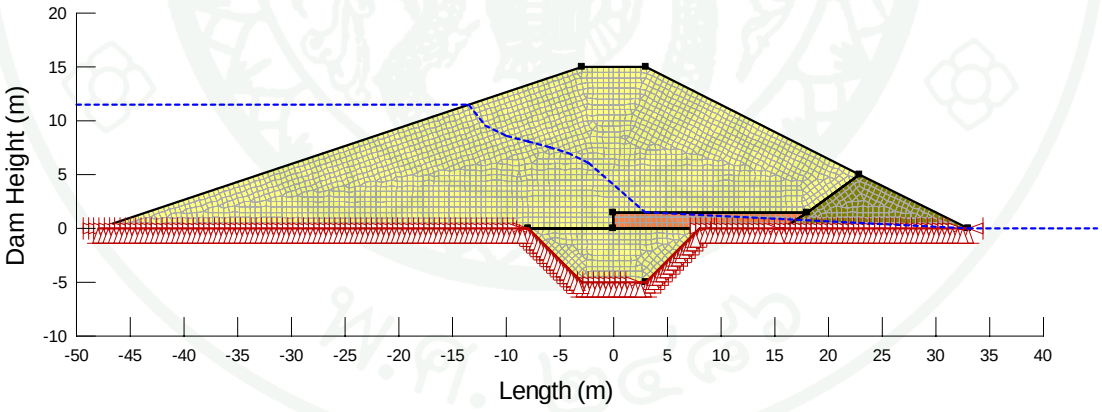
1. วิเคราะห์คาบธรรมชาติของตัวเขื่อน (T_n) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติที่ได้รับอิทธิพลจากความสูงและลักษณะวัสดุบดอัดเขื่อนในรูปของความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดยวิธี Shear beam approach ที่ปรับปรุงโดย Gazetas (1987) และสมการเชิงประสบการณ์อื่นๆที่เสนอโดย Okamoto (1970) Gazetas and Dakoulas (1992) และ Matsumoto *et al.* (2005) ดังสมการที่ 12 ถึงสมการที่ 15 นอกจากนี้ยังนำค่า T_n ไปเป็นแนวทางในการคัดเลือกคลื่นแผ่นดินไหวให้สัมพันธ์กับ T_p อีกด้วย

เมื่อแล้วเสร็จการวิเคราะห์ด้านข้อมูลทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ การพิจารณาเลือกใช้รูปแบบเขื่อนและขนาดขององค์ประกอบต่างๆ การเลือกข้อมูลแผ่นดินไหว และคุณสมบัติวัสดุทั้งทางสถิตย์และทางพลศาสตร์ อีกทั้งทราบช่วงค่าธรรมชาติของรูปแบบเขื่อนที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ จึงดำเนินการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ โดยใช้หน้าตัดเขื่อน คือ เขื่อนดินถมเนื้อเดียว ประกอบด้วยเขื่อนที่มีชั้นกรองแบบ Horizontal (H1R) เขื่อนที่มีชั้นกรองแบบ Vertical (H2R) และเขื่อนที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3R) ที่วางบนฐานรากหินแข็ง ซึ่งจะได้เปรียบเทียบพฤติกรรมกับเขื่อนที่วางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นหินผุแทรกอยู่ (H2C, H3C-1, H3C-2 และ H3C-3) และหน้าตัดเขื่อนดินถมแบ่งส่วน ประกอบด้วยการเขื่อนที่จำลองให้วางบนชั้นหิน (Z1R) และเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นหินที่มีชั้นหินผุแทรกระหว่างฐานราก (Z1C-1, Z1C-2) ซึ่งมีขนาดขององค์ประกอบทั่วไปดังตารางที่ 41 โดยหน้าตัดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวแสดงดังภาพที่ 52 ถึงภาพที่ 58 และหน้าตัดของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนแสดงดังภาพที่ 59 และภาพที่ 61

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

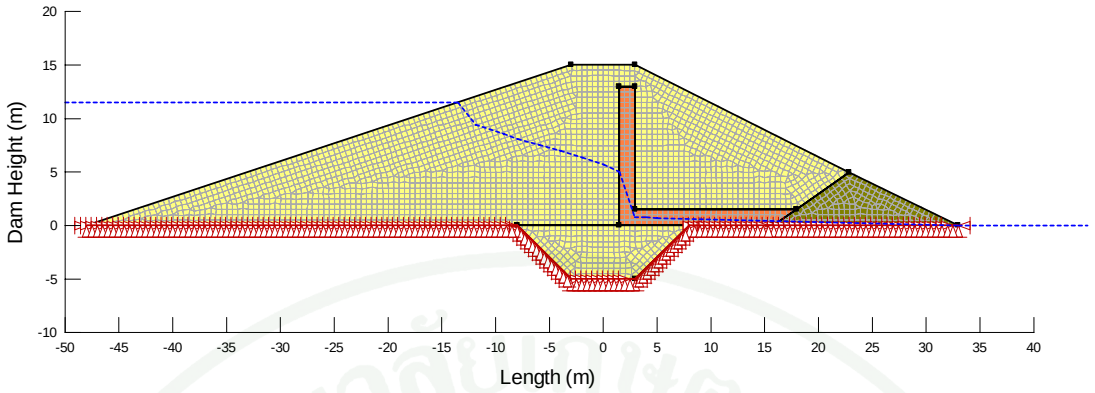
ตารางที่ 41 ขนาดขององค์ประกอบทั่วไปเพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

ลำดับ	องค์ประกอบเขื่อน	ประเภทเขื่อน	
		เขื่อนดินถมเนื้อเดียว	เขื่อนดินถมแบ่งส่วน
1	ความสูงเขื่อน (รวมร่องแกนเขื่อน)	20	35
2	ระดับน้ำปกติ	16.5	31
3	ความกว้างสันเขื่อน	6	8
4	ความกว้างแกนเขื่อน	-	6
5	ความกว้างชั้นกรอง	1.5	1.5
6	ความลาดชันด้านเหนือน้ำ	1:2, 1:2.5, 1:3	1:2, 1:2.5
7	ความลาดชันด้านท้ายน้ำ	1.2	1:2
8	ความลาดชันของแกนเขื่อน	-	0.5:1
9	ความลึกร่องแกนเขื่อน	5	5

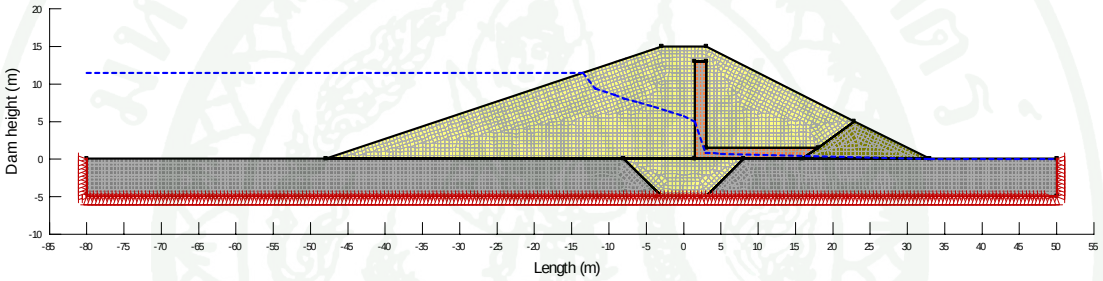


ภาพที่ 52 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Horizontal (H1R)

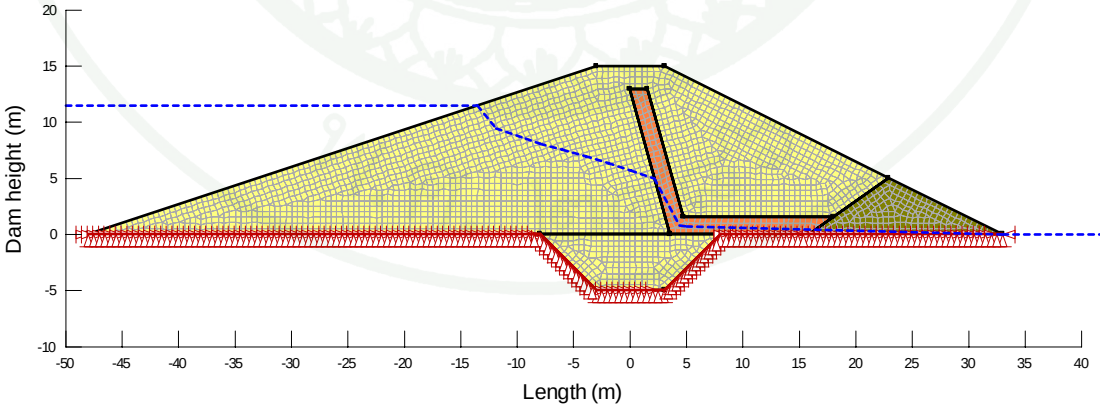
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 53 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Vertical (H2R)

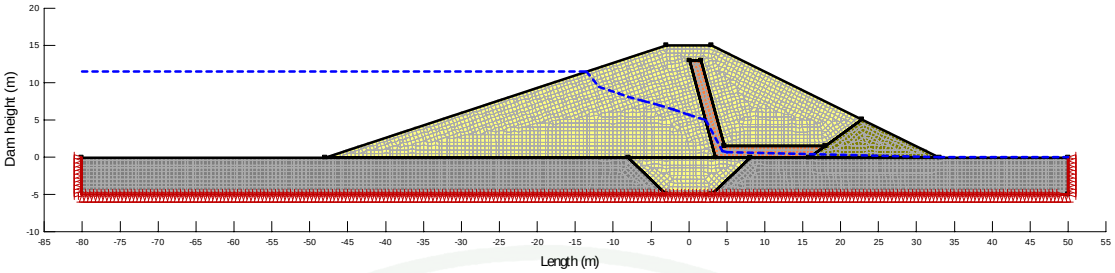


ภาพที่ 54 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Vertical (H2C)วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

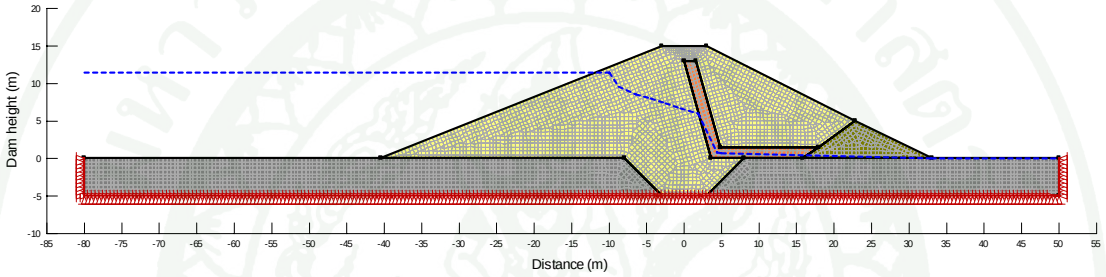


ภาพที่ 55 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียววางบนฐานรากหินแข็งที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3R)

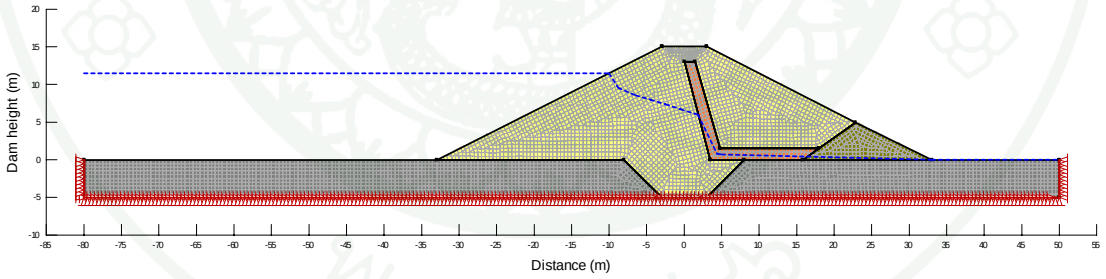
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 56 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-1) วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

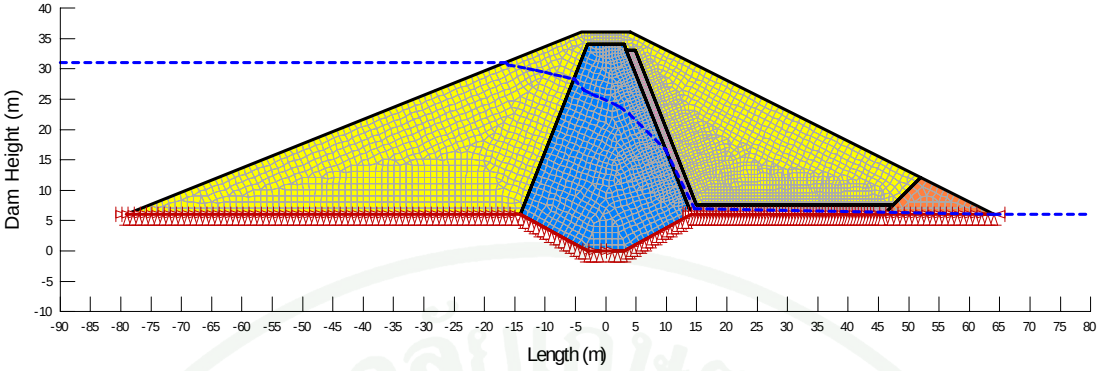


ภาพที่ 57 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-2) วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

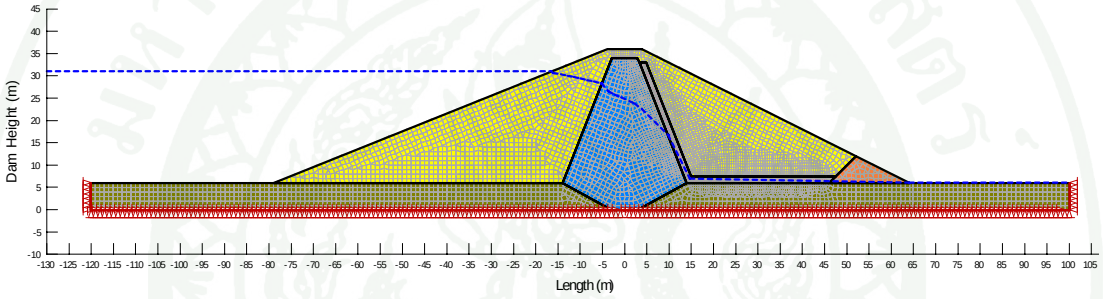


ภาพที่ 58 หน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney (H3C-3) วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

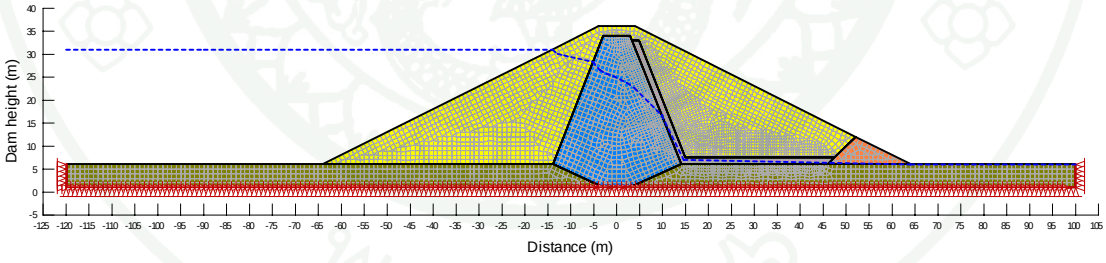
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 59 หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วนวางบนฐานรากหินแข็ง (Z1R)



ภาพที่ 60 หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วน (Z1C-1) วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ



ภาพที่ 61 หน้าตัดเขื่อนถมแบ่งส่วน (Z1C-2) วางบนฐานรากหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

2 วิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะสถิตย์โดยวิธี Limit equilibrium เพื่อตรวจสอบว่าเขื่อนที่จำลองขึ้นมีอัตราส่วนความปลอดภัยในการใช้งานในสภาวะสถิตย์ตามมาตรฐาน จากนั้นวิเคราะห์ค่า K_y เพื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธี Pseudo-static และเป็นตัวช่วยตัดสินใจเลือกใช้อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบของแผ่นดินไหว M_3 อีกด้วย ทั้งนี้การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้ Mesh ขนาด 0.50 เมตร โดยพยายามสร้างให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมากที่สุดเพื่อความถูกต้องในการถ่ายแรงไปใน Element ใกล้เคียงได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามในรูปร่างเขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่มีการเปลี่ยนรูปบางแห่งยังคงเป็น Mesh รูปสามเหลี่ยม เนื่องจากความเหมาะสมของรูปร่างเขื่อนเองแล้ว ยังทำให้ด้านของ Element มีความยาวใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นรูปแบบของ Mesh ที่ดี

3. วิเคราะห์หน่วยแรงที่กระทำเบื้องต้น (Initial stress analysis) ในที่นี้แบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การจำลองให้เขื่อนเกิดการทรุดตัวหลังจากก่อสร้างเสร็จ ก่อนจะจำลองสภาพเขื่อนระหว่างการเก็บน้ำก่อนรับแรงกระทำแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามเขื่อนที่จำลองขึ้นในงานวิจัยกำหนดให้มีการเพิ่มของหน่วยแรงในครั้งเดียว (Single stage) ต่างจากการก่อสร้างจริงที่ถมเป็นชั้น (Stages construction) เนื่องจากการทรุดตัวระหว่างการก่อสร้างของเขื่อนที่มีความสูงน้อย จะมีผลต่อการวิเคราะห์ไม่มากนัก ซึ่งหน่วยแรงเริ่มต้นก่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในสภาวะสถิตย์ที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะถูกวิเคราะห์โดยตรงจากวิธี Initial stress analysis ของโปรแกรม Quake/W โดยการวิเคราะห์หน่วยแรงที่กระทำเบื้องต้นนี้เริ่มจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี Linear elastic เพื่อวิเคราะห์หน่วยแรงในเบื้องต้น จากนั้นจึงใช้ทฤษฎี Elastic-plastic เพื่อวิเคราะห์การกระจายของหน่วยแรง (Stress redistribution analysis) จากนั้นจึงทำการจำลองสภาพเขื่อนระหว่างการเก็บน้ำในระดับเก็บกักปกติ ก่อนรับแรงกระทำแผ่นดินไหว ผลการวิเคราะห์ที่สำคัญในขั้นตอนนี้คือค่า σ'_m ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโมดูลัสเฉือนสูงสุด ซึ่งค่านี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของเขื่อนในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ใช้ค่า Poisson ratio ดังตารางที่ 42 ตามแนวทางดังตารางที่ 10

ตารางที่ 42 ค่า Poisson ratio ที่ใช้ในงานวิจัย

Dam component	Poisson ratio
Homogenoues zone Core zone Shell zone	0.4
Filter	0.35
Rock toe drain Weather rock foundation	0.3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน โดยใช้ทฤษฎี Equivalent linear ผลการตอบสนองที่สำคัญสำหรับเขื่อนดินถมได้แก่ พฤติกรรมด้านความเครียด (XY-strain) และพฤติกรรมการเคลื่อนตัว (Displacement) ออกจากแกนกลางเขื่อนไปทางด้านเหนือน้ำหรือท้ายน้ำด้านใดด้านหนึ่ง

5. วิเคราะห์การเคลื่อนตัวถาวรของลาดชันเขื่อนด้วยทฤษฎี Elastic plastic อีกครั้ง จากหน่วยแรงที่เป็นผลจากการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว ณ เวลาต่างๆในข้อที่ 4 มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในสภาวะสถิตย์ ในข้อ 3 จะทำให้ทราบการเคลื่อนตัวถาวรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงจนเกินจุดคลาก (Overstress) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเคลื่อนตัว

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ สามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ แบบจำลองและวัสดุที่ใช้ดังตารางที่ 43 โดยคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองใช้ตามตารางที่ 44 โดยค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเป็นผลการวิจัยที่ได้จากวิธีการวิจัยส่วนการรวบรวมข้อมูลในข้อ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 43 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน

Step	model	State	Analysis type	Material model
1	Stability	Operation	Limit equilibrium	Mohr-Coulomb
2	Stress and deformation	Finished construction	Insitu	Linear elastic
3	Stress and deformation	Finished construction	Stress redistribution	Elastic plastic
4	Stress and deformation	Operation	Insitu	Linear elastic
5	Dynamic	Shaking	Equivalent linear dynamic	Equivalent linear
6	Stress and deformation	Permanent deformation	Dynamic deformation	Elastic plastic

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 44 สรุปคุณสมบัติและความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์

Dam component	Unit weight (kN/m^3)	ν	C' (kPa)	ϕ' (degree)	Function		
					G/Gmax และ Damping	Gmax (kPa)	E (kPa)
Homogeneous zone	20.20	0.40	29.14	25.97	ภาพที่ 29	(*)	(*)
Core zone	20.40	0.40	22.86	24.63		(*)	(*)
Shell zone	19.62	0.40	42.87	27.58		(*)	(*)
Filter drian	19.62	0.35	0.00	35.00	ภาพที่ 28	(*)	(*)
Rock toe drian	24.00	0.30	0.00	50.00	ภาพที่ 26	(*)	(*)
Weather rock foundation	20.48	0.30	250.00	35.00	ภาพที่ 27	(*)	(*)

หมายเหตุ: (*) ผลจากหัวข้อการรวบรวมข้อมูล ข้อ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผลการวิจัยส่วนการจัดลำดับความเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ความเสี่ยงต่อการพิบัติของเขื่อนจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดจากปัจจัยด้านโอกาสเกิดการพิบัติ (Probability of failure) ปัจจัยด้านความสูญเสีย ซึ่งส่งผลต่อระดับความเสียหาย (Vulnerability) และปัจจัยที่เกี่ยวกับปริมาณความเสียหาย (Amount) ที่เริ่มจากเหตุการณ์เริ่มต้น (Initiating event) ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติ ที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติของเขื่อน โดยปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติเกี่ยวข้องกับ ชนิดของเขื่อน และอายุเขื่อน ส่วนปัจจัยด้านความสูญเสียมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยจากความสูงเขื่อน ปริมาณเก็บกัก และระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับชุมชนท้ายน้ำ ทั้งนี้ปัจจัยที่เกี่ยวกับปริมาณความเสียหาย (Amount) ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาชีวิตของประชากรที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำเป็นหลัก จึงมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยจากจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ

ระดับคะแนนของปัจจัย (Rating)

คะแนนจากปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติและคะแนนจากปัจจัยด้านความสูญเสียสามารถแทนด้วยตัวเลข โดยกำหนดให้ระดับคะแนนสูงจะส่งผลต่อโอกาสเกิดหรือผลกระทบจากการพิบัติสูง แสดงดังตารางที่ 45

ตารางที่ 45 ความหมายของการให้ระดับคะแนนปัจจัย (Rating)

ระดับคะแนน	ความหมาย
1	ส่งผลระดับต่ำ
2	ส่งผลระดับปานกลาง
3	ส่งผลระดับสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แนวคิดการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลให้เขื่อนเสี่ยงต่อการพิบัติจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว นำมาสู่การให้ระดับคะแนน อธิบายโดยเริ่มจากเหตุการณ์เริ่มต้นดังนี้

1. พื้นที่เสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหว ดังภาพที่ 12 ถูกนำมากำหนดระดับคะแนน ตามความเสี่ยงต่อความรุนแรง โดยพื้นที่เสี่ยงภัยระดับ 0 (เขต 0) มีคะแนนเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวน้อยกว่า 3 MMI พื้นที่เสี่ยงภัยระดับ 1 (เขต 0) มีคะแนนเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 3-4 MMI ส่วนพื้นที่เสี่ยงภัยระดับ 2 (เขต 2ก) มีคะแนนเท่ากับ 2 ซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 4-7 MMI และพื้นที่เสี่ยงภัยระดับ 3 (เขต 2ข) มีคะแนนเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงสุดตามแผนที่คือ 7-8 MMI แสดงระดับคะแนนดังตารางที่ 46

ตารางที่ 46 ระดับคะแนนภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว (R_{eq})

ระดับความเสี่ยงภัย	ระดับคะแนน
เสี่ยงภัย ระดับ 0	0
เสี่ยงภัย ระดับ 1	1
เสี่ยงภัย ระดับ 2ก	2
เสี่ยงภัย ระดับ 2ข	3

2. เขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทยเป็นเขื่อนดินถมมากกว่าเขื่อนประเภทอื่น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป สามารถออกแบบและก่อสร้างได้ง่าย ประเภทเขื่อนส่งผลต่อโอกาสเกิดการพิบัติที่แตกต่างกันเช่น การพิบัติจากการล้นข้ามสันเขื่อนในเขื่อนดินหรือเขื่อนหินถมมีโอกาสที่เขื่อนพิบัติได้สูงกว่าเขื่อนคอนกรีต แต่เขื่อนหินถมจะยืดหยุ่นต่อแรงกระทำจากแผ่นไหวหรือต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ดีกว่าเขื่อนคอนกรีต การให้ระดับคะแนนปัจจัยเขื่อนคอนกรีต จึงมีระดับความเสี่ยงภัยสูงสุดดังตารางที่ 47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 47 ระดับคะแนนปัจจัยชนิดของเขื่อน (R_{type})

ชนิดของเขื่อน	ระดับความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหว
เขื่อนดินถม	2
เขื่อนหินถม	1
เขื่อนคอนกรีต	3

3. อายุของเขื่อน เมื่อใช้งาน 5 ปีแรกหลังการเก็บน้ำและช่วงการใช้งานเขื่อนจนถึงอายุ 40 ปี เป็นต้นไปเป็นช่วงที่เขื่อนเกิดเกิดการพิบัติมากที่สุดจากการรวบรวมข้อมูลของ Jauhari (1999) ดังภาพที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากในช่วง 5 ปีแรกหลังการก่อสร้างเขื่อนมีการปรับพฤติกรรมการระบายน้ำให้คงที่ (Steady state flow) อีกทั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างถึงเริ่มใช้งานช่วงแรกเป็นช่วงที่มีแรงดันน้ำส่วนเกินภายในตัวเขื่อนเกิดขึ้นจากการบดอัด ความแข็งแรงของเขื่อนยังเพิ่มขึ้นไม่เต็มที่ ในขณะที่เขื่อนอายุตั้งแต่ 40 ปี เป็นต้นไป ย่อมมีความสามารถในการทำงานลดลงจากหลายสาเหตุเช่น ชั้นกรองอุดตันบางส่วน รูปร่างภายนอกของเขื่อนเปลี่ยนรูปไปจากการกัดเซาะและการทรุดตัว มวลรวมของดินตัวเขื่อนมีความเปราะมากขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกภายในได้ง่าย การให้คะแนนปัจจัยอายุเขื่อนจึงเป็นไปตามตารางที่ 48

ตารางที่ 48 การให้ระดับคะแนนปัจจัยอายุเขื่อน (R_{age})

อายุของเขื่อน (ปี)	ระดับความเสี่ยงภัย
0-5	3
6-35	1
มากกว่า 35	2

ระดับคะแนนปัจจัยด้านความสูญเสีย ได้แก่ ความสูงเขื่อนและปริมาณเก็บกัก จะมีผลต่อความรุนแรงเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น สามารถอธิบายแนวคิดเพื่อการกำหนดระดับคะแนนดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ความสูงเขื่อน ที่เกี่ยวข้องด้านความสูญเสีย ในทางกายภาพเขื่อนยิ่งสูงยิ่งสร้างความสูญเสียได้มาก เนื่องจากแสดงถึงความสามารถในการเก็บกักได้มาก ยิ่งระดับน้ำหน้าเขื่อนอยู่สูงก็ยิ่งสร้างความเสียหายด้านท้ายน้ำได้มาก การให้ระดับคะแนนปัจจัยความสูงของเขื่อนดังตารางที่ 49

ตารางที่ 49 การให้ระดับคะแนนความสูงของเขื่อน

ช่วงความสูง	ระดับคะแนน
5 ถึง 15 เมตร	1
มากกว่า 15 เมตร และน้อยกว่า 30 เมตร	2
ตั้งแต่ 30 เมตรขึ้นไป	3

5. ปริมาณเก็บกัก ที่เกี่ยวข้องด้านความสูญเสียนั้นเขื่อนที่มีปริมาณเก็บกักสูง เมื่อเกิดการพิบัติย่อมสร้างความสูญเสียได้มาก เขื่อนที่มีปริมาณเก็บกักได้ตั้งแต่ 100 ล้าน ลูกบาศก์เมตรขึ้นไป ซึ่งถือว่าเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ที่มีปริมาณเก็บกักมาก จึงเป็นเขื่อนที่มีระดับคะแนนมากที่สุด เขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก มีระดับคะแนนรองลงมาตามลำดับ ดังตารางที่ 50

ตารางที่ 50 การให้ระดับคะแนนปริมาณเก็บกัก

ปริมาณเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)	ระดับคะแนน
0 – 2	1
มากกว่า 2 - 100	2
มากกว่า 100	3

6. ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับชุมชนท้ายน้ำ ระดับคะแนนของปัจจัยนี้ได้กำหนดให้น้ำเคลื่อนที่ถึงแหล่งชุมชนท้ายน้ำด้วยความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยแหล่งชุมชนที่ตั้งอยู่ห่างจากเขื่อน 30 กิโลเมตรหรือมากกว่า ตั้งสมมติฐานให้เวลาหนึ่งชั่วโมงเพียงพอสำหรับหนีภัยน้ำท่วมได้ หมู่บ้านที่ตั้งอยู่ห่างจากตัวเขื่อนจึงความเสี่ยงภัยในระดับต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากแหล่งชุมชนตั้งอยู่ห่างจากเขื่อนเพียง 5 กิโลเมตร น้ำไหลท่วมด้วยความเร็วเท่ากันจะใช้เวลาเดินทางเพียง 10 นาที ซึ่งถือว่ายากต่ออพยพได้หรือมีระดับความรุนแรงสูงมาก จากสมมติฐานดังกล่าวจึงสามารถให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระดับคะแนนดังตารางที่ 51 อย่างไรก็ตาม ความเร็วของน้ำที่แท้จริงควรพิจารณาร่วมกับขนาด ชนิดของเขื่อน และลักษณะภูมิประเทศด้านท้ายน้ำเป็นสำคัญ

ตารางที่ 51 การให้ระดับคะแนนระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ

ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ (กิโลเมตร)	ระดับคะแนน
0.1-5	3
มากกว่า 5-30	2
มากกว่า 30	1

สำหรับปัจจัยด้านปริมาณความเสียหาย (Amount) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาชีวิตของประชากรที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำเป็นหลัก อธิบายได้ดังนี้

7. จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ มีเกณฑ์การให้ระดับคะแนนโดยใช้แนวคิดในกรณีที่จำนวนประชากรที่อาศัยด้านท้ายน้ำมีมากน้อย จำแนกตามขนาดชุมชน ตามพระราชบัญญัติระเบียบบริหารราชการแผ่นดิน พ.ศ. 2534 ซึ่งกำหนดให้เป็นผลกระทบในระดับหมู่บ้าน หากหมู่บ้านนั้นมีจำนวนประชากรไม่เกิน 200 คน ซึ่งมีระดับคะแนนความสูญเสียต่ำที่สุด แต่หากจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบมีมากกว่า 200 คน และ 3,600 คน จะเป็นผลกระทบในระดับตำบลและระดับอำเภอ ตามลำดับ ดังตารางที่ 52

ตารางที่ 52 การให้ระดับคะแนนปัจจัยจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ

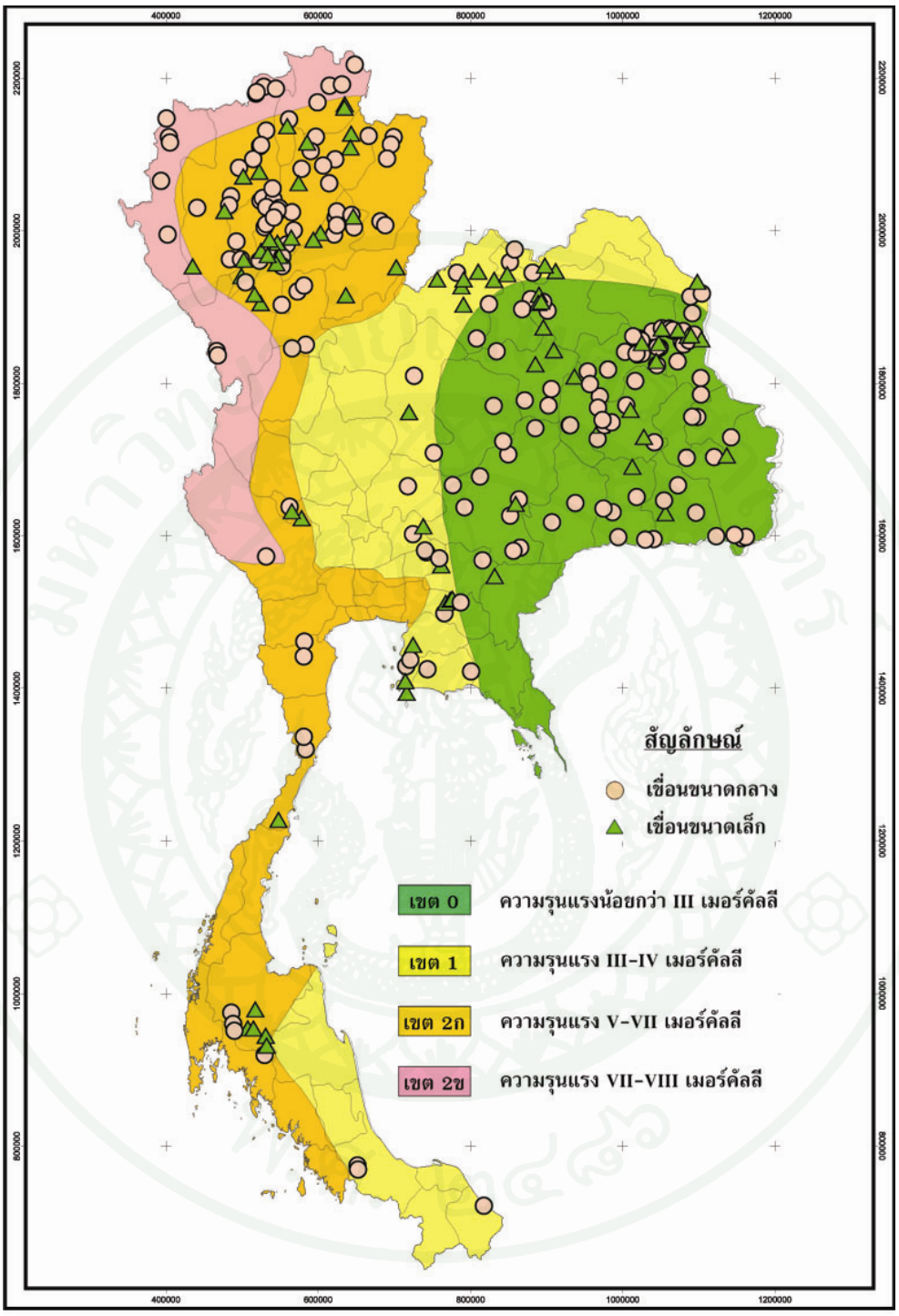
จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ (คน)	ระดับคะแนน
0 – 200	1
201 –3,600	2
มากกว่า 3,600	3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเขื่อนเบื้องต้น

ผลการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลด้านจำนวนเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงต่อการพิบัติของเขื่อนเนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ของเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กจำนวน 245 เขื่อน ที่สัมพันธ์กับการให้ระดับคะแนน จากจำนวนเขื่อนในประเทศไทยกว่า 4000 เขื่อน คิดเป็นประมาณ 6.65% ของเขื่อนทั้งหมด ทั้งด้านโอกาสเกิดการพิบัติ ด้านความสูญเสีย และด้านปริมาณความเสียหาย เริ่มจากการวิเคราะห์ตำแหน่งเขื่อนจำนวน 245 เขื่อน บนบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย จากขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของกรมทรัพยากรธรณี (2548) โดยใช้เทคนิคทางสารสนเทศภูมิศาสตร์ แสดงการกระจายตัวดังภาพที่ 62

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

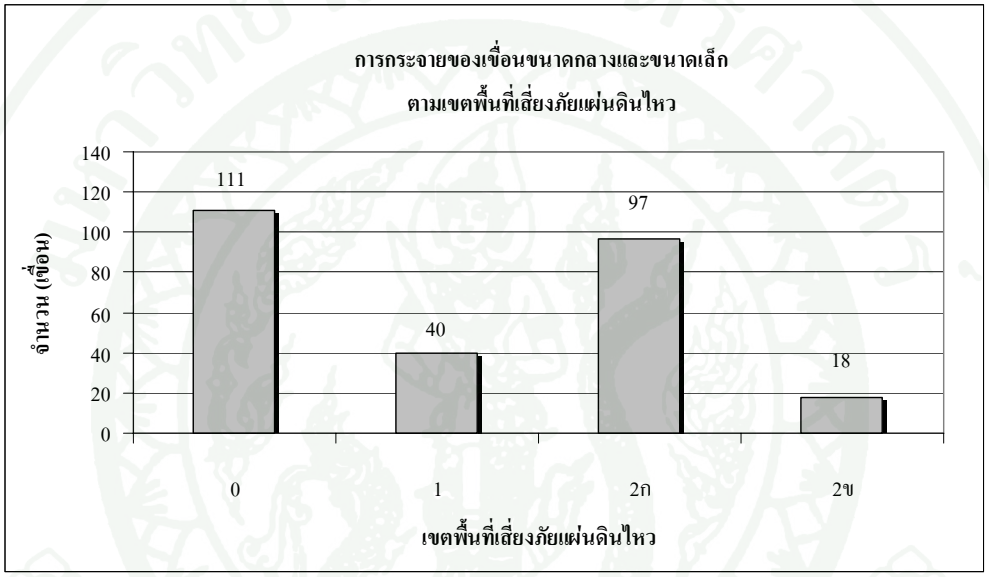


ภาพที่ 62 ตำแหน่งเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กบนแผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย

ที่มา: ขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้จากกรมทรัพยากรธรณี (2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

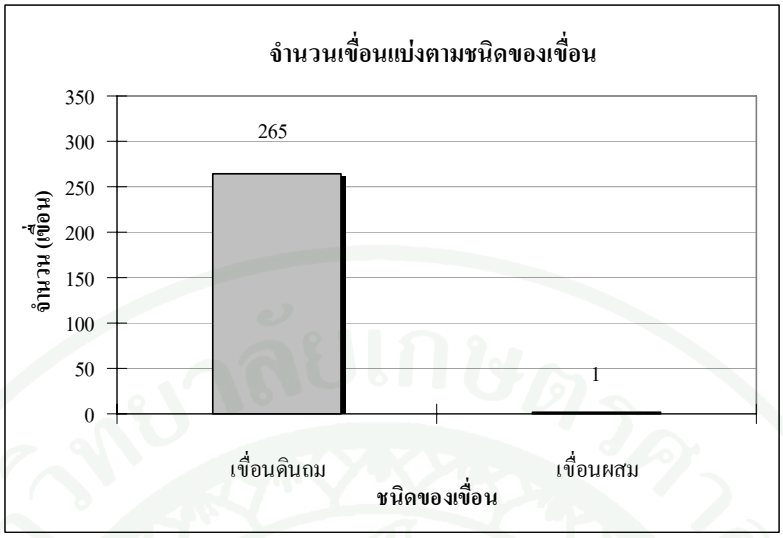
จากภาพที่ 62 สามารถแบ่งเขื่อนที่อยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้ดังภาพที่ 63 โดยเขื่อนที่อยู่ในพื้นที่ไม่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (เขต 0) มีจำนวน 111 เขื่อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเขื่อนที่ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก เขื่อนอยู่ในพื้นที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวน้อย (เขต 1) มีจำนวน 40 เขื่อน เขื่อนที่อยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวในระดับน้อยถึงปานกลาง (เขต 2ก) จำนวน 97 เขื่อน และเขื่อนที่ตั้งอยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันตกบางส่วนมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (เขต 2ข) มีจำนวน 18 เขื่อน



ภาพที่ 63 การกระจายของเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กตามเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

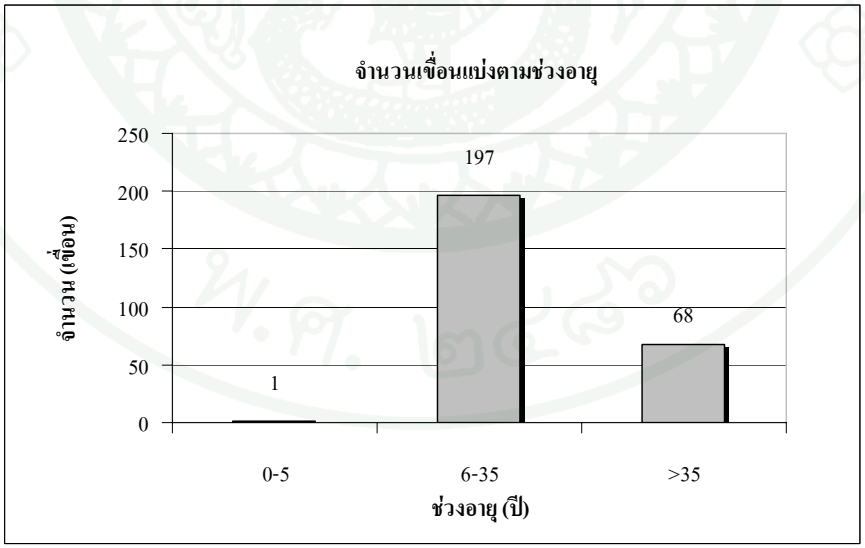
เนื่องจากประเทศไทยมีการก่อสร้างเขื่อนดินถมมากที่สุด ข้อมูลเขื่อนจึงมีเขื่อนดินถม 265 เขื่อน ส่วนที่เหลือแบ่งเป็นเขื่อนผสมระหว่างหินถมกับคอนกรีตจำนวน 1 เขื่อนคือ เขื่อนท่าทุ่งนา ดังภาพที่ 64

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 64 จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามชนิดของเขื่อน

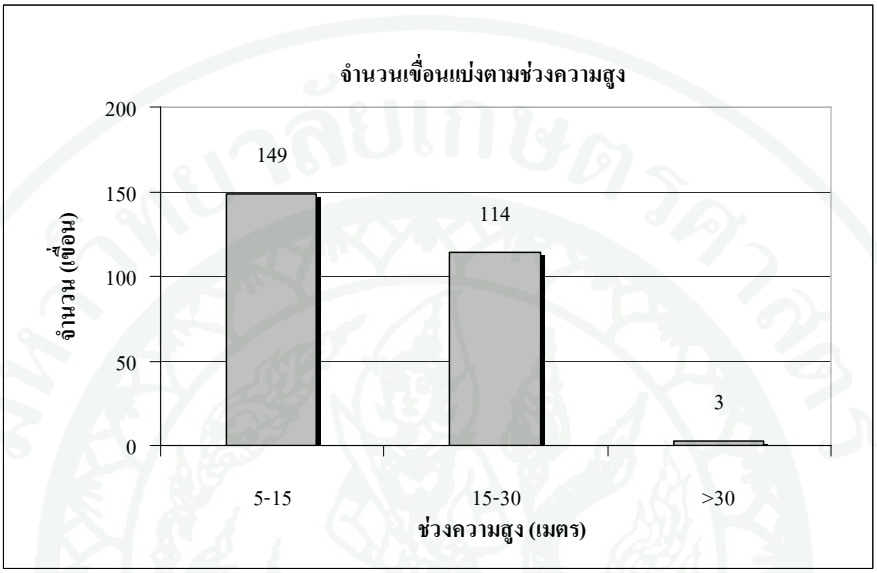
เขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กในฐานข้อมูลมีช่วงอายุ 6 ถึง 35 ปี มากที่สุดจำนวน 197 เขื่อน รองลงมาได้แก่เขื่อนที่มีอายุมากกว่า 35 ปี โดยเขื่อนที่อายุไม่เกิน 5 ปี ซึ่งอยู่ในการใช้งานช่วงต้นมี 1 เขื่อน ดังภาพที่ 65



ภาพที่ 65 จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามช่วงอายุ (ข้อมูลปีพ.ศ. 2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

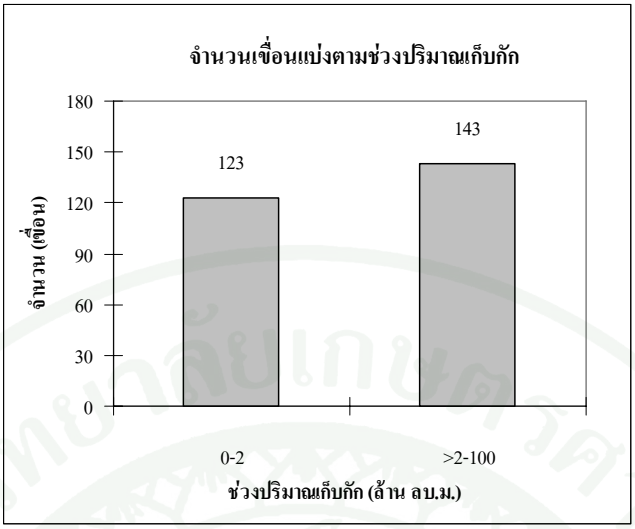
การจำแนกความสูงเขื่อนพบว่า เขื่อนสูงไม่เกิน 15 เมตร มีจำนวนมากที่สุดถึง 149 เขื่อน ส่วนเขื่อนสูงตั้งแต่ 15 ถึง 30 เมตร มี 114 เขื่อน และเขื่อนที่สูงมากกว่า 30 เมตร มี 3 เขื่อน แสดงดังภาพที่ 66



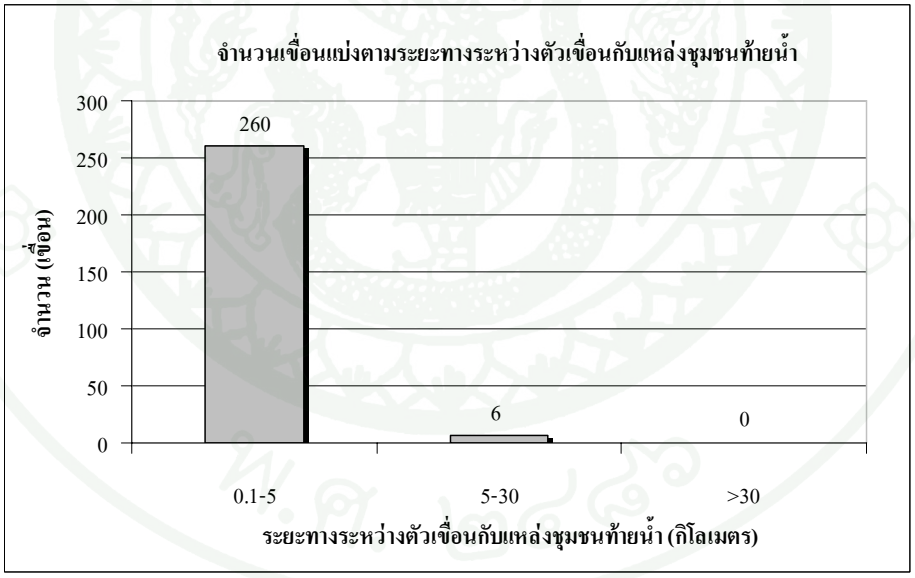
ภาพที่ 66 จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามความสูง

ข้อมูลด้านปริมาณเก็บกักของเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก พบว่ามีเขื่อนที่มีปริมาณเก็บกัก 2.1 ถึง 100 ล้านลูกบาศก์เมตร มากที่สุดจำนวน 143 เขื่อน และเขื่อนที่มีปริมาณเก็บกักไม่เกิน 2 ล้านลูกบาศก์เมตร มีจำนวนรองลงมาคือ 123 เขื่อน แสดงดังภาพที่ 67 ส่วนการจำแนกจำนวนเขื่อนตามช่วงระยะทางระหว่างหมู่บ้านกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ พบว่าประชากรตั้งถิ่นฐานอยู่ด้านท้ายน้ำใกล้เขื่อนไม่เกิน 5 กิโลเมตรจำนวน 260 เขื่อน ส่วนอีก 6 เขื่อน มีแหล่งชุมชนอยู่ด้านท้ายน้ำห่างจากเขื่อนเกิน 5 ถึง 30 กิโลเมตร ดังภาพที่ 68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 67 จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามปริมาณเก็บกัก

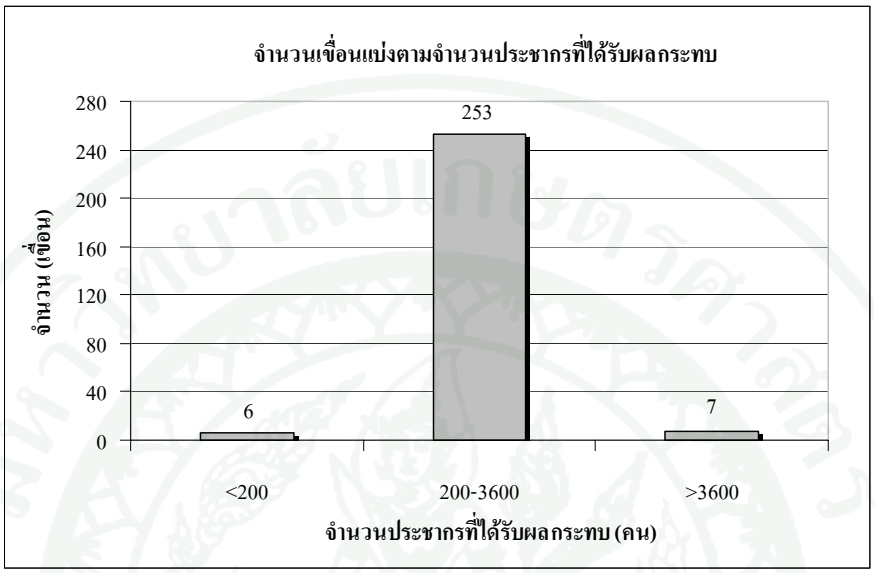


ภาพที่ 68 จำนวนเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กแบ่งตามช่วงระยะทางระหว่างหมู่บ้านกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ

การอาศัยอยู่ของประชากรด้านท้ายน้ำ มีทั้งระดับหมู่บ้าน ตำบลและอำเภอ โดยประชากรที่อาจได้รับผลกระทบเมื่อเขื่อนพิบัติจำนวน 200 ถึง 3600 คน มี 253 เขื่อน ประชากรที่อาจได้รับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลกระทบมากกว่า 3600 คนขึ้นไป มี 7 เขื่อน และประชากรที่อาจได้รับผลกระทบน้อยกว่า 200 คน มีจำนวน 6 เขื่อน แสดงดังภาพที่ 69



ภาพที่ 69 จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบในแต่ละเขื่อน

การวิเคราะห์ตำแหน่งเขื่อนบนแผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวพบว่าเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก จากฐานข้อมูลเขื่อนที่ใช้ในงานวิจัยตั้งอยู่บริเวณเสี่ยงภัยสูง (เขต 2ข) 6.77% ตั้งอยู่บริเวณเสี่ยงภัยปานกลาง (เขต 2ก) 36.47% ตั้งอยู่บริเวณเสี่ยงภัยน้อย (เขต 1) 15.04% และตั้งอยู่ในพื้นที่ไม่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (เขต 0) 41.72% ในจำนวนนี้ส่วนใหญ่เป็นเขื่อนดินถม ที่มีอายุการใช้งานในช่วง 6 ถึง 35 ปี สูงระหว่าง 5 ถึง 15 เมตร มีปริมาณเก็บกักน้ำตั้งแต่ 2.1 ถึง 100 ล้านลูกบาศก์เมตร ด้านท้ายน้ำมีแหล่งชุมชนตั้งอยู่ในรัศมีไม่เกิน 5 กิโลเมตร ในระดับตำบลที่มีประชากรอาศัยอยู่ตั้งแต่ 200 ถึง 3600 คน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐานข้อมูลเขื่อน

ฐานข้อมูลเขื่อนแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังภาพที่ 49 ได้แก่ ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อน (Dam data) ข้อมูลที่เกี่ยวกับผลกระทบ (Consequence) และการวิเคราะห์โอกาสเกิดจากแผ่นดินไหว ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) รายละเอียดของฐานข้อมูลเขื่อน แสดงดังตารางผนวกที่ ก1

การวิเคราะห์ค่าความสำคัญของปัจจัย (Weighting)

การประเมินน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย ที่เปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยหนึ่งต่อปัจจัยอื่นเป็นคู่ๆได้แก่ เมื่อนำชนิดของเขื่อนมาเปรียบเทียบกับอายุของเขื่อนได้ให้คะแนนความสำคัญของชนิดของเขื่อนน้อยกว่าอายุของเขื่อน จากเขื่อนที่อยู่ในช่วงใช้งาน 5 ปีแรกจะมีการพิบัติตามสถิติดังภาพที่ 6 ซึ่งรายละเอียดของค่าความสำคัญแสดงดังตารางที่ 53 เช่นเดียวกับปัจจัยรองด้านความสูยเสียซึ่งระยะทางมีคะแนนมากที่สุดเนื่องจากในงานวิจัยคำนึงถึงชีวิตของประชากรที่อาศัยด้านท้ายน้ำ โดยประชากรที่อาศัยอยู่ใกล้เขื่อนมากจะยิ่งเสี่ยงต่อชีวิต ทั้งนี้ปริมาณเก็บกักมีความสำคัญน้อยกว่า เนื่องจากถึงแม้เขื่อนนั้นจะมีปริมาณเก็บกักสูง แต่ประชากรอาศัยอยู่ไกลเขื่อนมากกว่า ก็จะเกิดความสูญเสียต่อชีวิตน้อยกว่า เพราะน้ำต้องเดินทางไกลกว่า ทั้งนี้คะแนนความเสี่ยงข้อนี้จะยิ่งสูงมากเมื่อปริมาณเก็บกักและความสูงของเขื่อนมีคะแนนสนับสนุนด้วย ซึ่งรายละเอียดของค่าความสำคัญแสดงดังตารางที่ 54 โดยแบ่งปัจจัยรองออกเป็นปัจจัยรองด้านคุณสมบัติตัวเขื่อนของปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติ และปัจจัยรองของปัจจัยความสูญเสีย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 53 ค่าความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณสมบัติตัวเขื่อนของปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติ

ลำดับ	ปัจจัย	1	2	รวม	ความสำคัญ (%)
1	ชนิดของเขื่อน (R_{type})		1	1	25
2	อายุของเขื่อน (R_{age})	3		3	75
	รวม			4	100

ตารางที่ 54 ค่าคะแนนความสำคัญของปัจจัยรองของปัจจัยความสูญเสีย

ลำดับ	ปัจจัย	1	2	3	รวม	ความสำคัญ (%)
1	ความสูง (R_{ht})		1	1	2	16.67
2	ปริมาณกักเก็บ (R_{vol})	3		1	4	33.33
3	ระยะทาง (R_{dist})	3	3		6	50.00
	รวม				12	100

จากผลการวิเคราะห์ค่าความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณสมบัติตัวเขื่อนของปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติสามารถสรุปสมการโอกาสเกิดการพิบัติ (F) และสมการความสูญเสีย (N) ได้ดังสมการที่ 52 และสมการที่ 53

$$F_{eq} = R_{eq}(0.75R_{age} + 0.25R_{type}) \quad (52)$$

$$N = R_{pop}(0.17R_{ht} + 0.33R_{vol} + 0.5R_{diste}) \quad (53)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการจัดลำดับความเสี่ยง

เมื่อให้จัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนดินถมขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยให้คะแนนเขื่อนดังระดับคะแนน (Rating) ที่กำหนดไว้ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ตามปัจจัยความสำคัญ (Weighting) แล้วเรียงลำดับเขื่อนที่มีคะแนนมากที่สุด 10 อันดับแรกได้ผลการจัดลำดับดังตารางที่ 55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 55 ผลการจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
1	1	ท่าทุ่งนา	กาญจนบุรี	30.0	54.80	กลาง	3.00	7.42	22.26
2	2	แม่ทะ	ลำปาง	19.2	2.54	กลาง	4.00	4.95	19.79
3	3	แม่มอก	ลำปาง	25.1	96.00	กลาง	2.50	7.42	18.55
4	3	แม่ปืม	พะเยา	19.3	43.00	กลาง	2.50	7.42	18.55
5	3	ห้วยช้าง	เชียงราย	27.5	6.30	กลาง	3.75	4.95	18.55
6	3	ห้วยลึก	ตาก	26.0	5.70	กลาง	3.75	4.95	18.55
7	4	แม่สะงา	แม่ฮ่องสอน	37.0	0.08	เล็ก	3.75	4.74	17.76
8	5	ห้วยตาควน	เชียงราย	13.7	7.10	กลาง	3.75	4.53	16.97
9	5	ห้วยสัก	เชียงราย	15.0	4.18	กลาง	3.75	4.53	16.97
10	6	ห้วยบอน	เชียงใหม่	22.5	1.70	กลาง	3.75	4.32	16.18
11	6	ห้วยฝายคอ	แม่ฮ่องสอน	21.5	0.95	เล็ก	3.75	4.32	16.18
12	6	ห้วย	แม่ฮ่องสอน	23.0	0.73	เล็ก	3.75	4.32	16.18
13	6	ห้วยม่าน	แม่ฮ่องสอน	20.0	0.52	เล็ก	3.75	4.32	16.18
14	6	ห้วยงู	เชียงใหม่	25.0	0.47	เล็ก	3.75	4.32	16.18
15	7	แม่สอง	แพร่	48.0	65.80	กลาง	2.50	5.37	13.42
16	7	แม่ถาง	แพร่	43.0	30.60	กลาง	2.50	5.37	13.42
17	7	แม่มาน	แพร่	32.0	18.75	กลาง	2.50	5.37	13.42
18	7	แม่สาน	ลำพูน	36.0	18.00	กลาง	2.50	5.37	13.42
19	8	ห้วยแม่ผง	พะเยา	42.0	5.08	กลาง	3.00	4.42	13.26
20	9	ท่าแพ	สุโขทัย	28.0	58.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
21	9	แม่ตูบ	เชียงใหม่	30.0	39.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
22	9	คลองบึง	ประจวบคีรีขันธ์	18.0	22.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
23	9	บางกำปรัด	กระบี่	23.0	16.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
24	9	น้ำแหง	น่าน	30.0	13.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
25	9	ห้วยแม่สูง	สุโขทัย	27.8	12.45	กลาง	2.50	4.95	12.37
26	9	ห้วยเกี๋ยง	ลำปาง	24.0	11.60	กลาง	2.50	4.95	12.37
27	9	แม่ทานและ	ลำปาง	19.0	11.40	กลาง	2.50	4.95	12.37
28	9	แม่ตีบ	ลำพูน	24.0	10.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
29	9	แม่คำปอง	แพร่	25.5	6.72	กลาง	2.50	4.95	12.37
30	9	แม่วะ	ลำปาง	24.0	5.90	กลาง	2.50	4.95	12.37
31	9	แม่โก๋น	เชียงใหม่	28.0	5.53	กลาง	2.50	4.95	12.37
32	9	แม่ธิ	ลำพูน	20.0	4.50	กลาง	2.50	4.95	12.37
33	9	ห้วยมะนาว	เชียงใหม่	21.0	4.30	กลาง	2.50	4.95	12.37
34	9	ห้วยแม่ยาว	ลำปาง	18.0	3.48	กลาง	2.50	4.95	12.37
35	9	ห้วยแม่ไพร	ลำปาง	19.0	3.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
36	9	คลองหยา	กระบี่	17.0	3.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
37	9	ห้วยกาล	แพร่	17.0	3.19	กลาง	2.50	4.95	12.37
38	9	โป่งจ้อ	เชียงใหม่	18.0	2.60	กลาง	2.50	4.95	12.37
39	9	ห้วยลึก	กระบี่	20.0	2.45	กลาง	2.50	4.95	12.37
40	9	ห้วยบอน	เชียงใหม่	18.0	2.10	กลาง	2.50	4.95	12.37

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

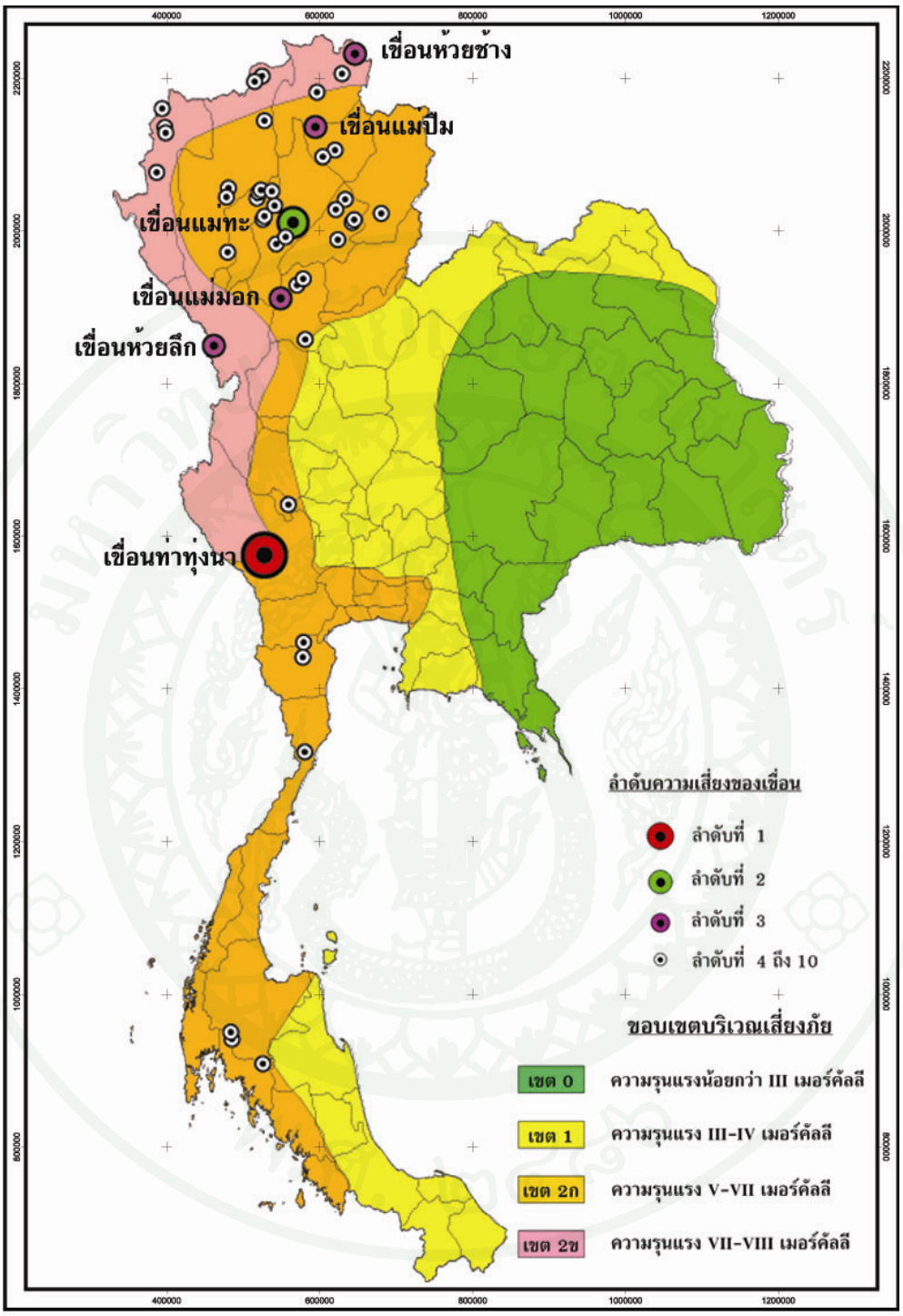
ตารางที่ 55 (ต่อ) ผลการจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
41	10	แม่ต๋ำ	พะเยา	13.5	37.00	กลาง	2.50	4.53	11.32
42	10	คลองข้างใน	สุโขทัย	12.0	9.00	กลาง	2.50	4.53	11.32
43	10	ท่าเดื่อ	สุพรรณบุรี	15.0	2.80	กลาง	2.50	4.53	11.32
44	10	วังหิน	เพชรบุรี	12.5	2.28	กลาง	2.50	4.53	11.32
45	10	เขาบันได	เพชรบุรี	13.0	2.18	กลาง	2.50	4.53	11.32

จากตารางที่ 55 เขื่อนที่มีคะแนนความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวสูงสุด เป็นเขื่อนผสมระหว่างหินทิ้งแกนดินเหนียวและคอนกรีตกราวิตี้ ตั้งอยู่ในภาคตะวันตกที่อยู่ในเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในระดับสูง (เขต 2ข) ก่อสร้างแล้วเสร็จในปีพ.ศ. 2524 จึงมีอายุ 28 ปี อยู่ในช่วงอายุ 6-35 ปี สาเหตุเหล่านี้ทำให้เขื่อนมีคะแนนโอกาสเกิดการพิบัติ 3.00 คะแนน ประกอบกับมีคะแนนความสูญเสียสูงถึง 7.42 คะแนน จากปัจจัยที่ประกอบด้วย ตัวเขื่อนสูง 30 เมตร และมีปริมาณเก็บกักประมาณ 54.8 ล้าน ลูกบาศก์เมตร อีกทั้งมีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นบริเวณด้านท้ายน้ำใกล้กับเขื่อน ดังนั้นจึงมีคะแนนความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหว 22.26 คะแนน จากคะแนนเต็ม 81 คะแนน ซึ่งโอกาสเกิดการพิบัติและความสูญเสียมีคะแนนเต็มอย่างละ 9 คะแนน

เขื่อนลำดับรองลงมาที่มีลำดับความเสี่ยงถึงลำดับที่ 10 ซึ่งทั้งหมดเป็นเขื่อนดินถม โดยที่ตั้งของเขื่อนแสดงดังภาพที่ 70 จะเห็นว่าเขื่อนที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแผ่นดินไหว โดยมากตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยในเขต 2ก และ 2ข ได้แก่ เขื่อนที่ตั้งอยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันตกบางส่วน ทั้งนี้ผลการจัดลำดับเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้งหมดแสดงดังตารางผนวกที่ ก2 นอกจากนี้ยังมีผู้เขียนบทความเรื่อง การจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวของเขื่อนขนาดใหญ่และขนาดกลางไว้ดังภาคผนวก จ อีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 70 ตำแหน่งเขื่อนที่มีความเสี่ยง 10 อันดับแรก บนแผนที่ขอบเขตบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย

ที่มา: ขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้จากกรมทรัพยากรธรณี (2548)

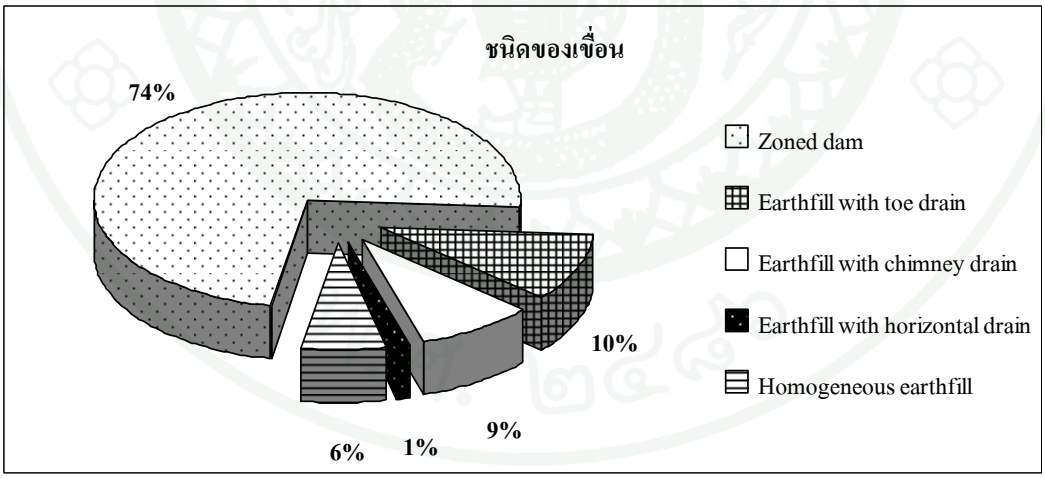
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการวิจัยส่วนการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

ผลการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบเขื่อน

องค์ประกอบตัวเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวที่สำคัญได้แก่ ระยะเผื่อ ต้องสูงมากเพียงพอต่อการทรุดตัวในขณะรับแรงสั่นไหว สันเขื่อนและแกนเขื่อน ต้องไม่เกิดรอยแตกภายใน ชั้นกรองต่างๆ สามารถควบคุมการกัดเซาะภายในและยังทำงานได้เมื่อสันเขื่อนทรุดตัว รวมถึงตัวเขื่อนที่ต้องไม่เกิดการเลื่อนไถลและเคลื่อนตัวมากจนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน ระหว่างและหลังจากต้นทานแรงกระทำแผ่นดินไหว

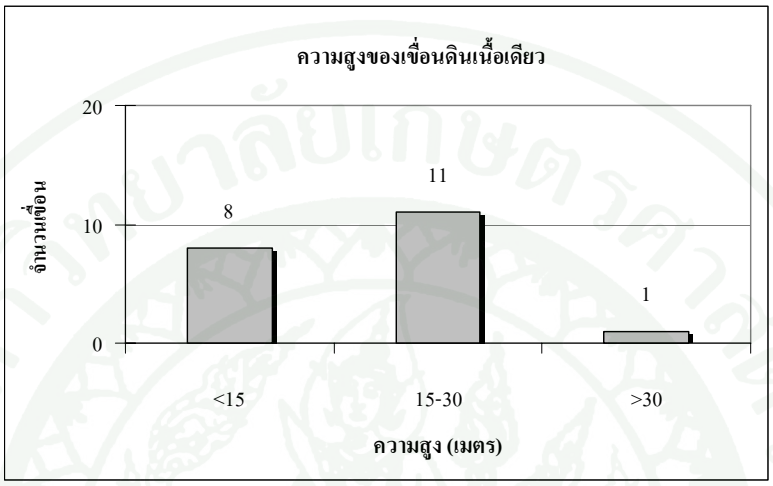
จากแบบก่อสร้าง 79 เขื่อนที่ศึกษาประกอบด้วยเขื่อนดินถมแบ่งส่วน 58 เขื่อน คิดเป็น 74% ที่เหลือเป็นเขื่อนดินถมเนื้อเดียว 21 เขื่อน แบ่งชนิดตามชั้นกรองต่างๆได้แก่ เขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองตีนเขื่อน 8 เขื่อน คิดเป็น 10% เขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney 7 เขื่อน คิดเป็น 9% เขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองในแนวราบ 1 เขื่อน คิดเป็น 1% เขื่อนดินถมเนื้อเดียวมีลักษณะเป็นคันดินขนาดเล็ก 5 เขื่อน คิดเป็น 6% แสดงดังภาพที่ 71



ภาพที่ 71 ชนิดของเขื่อนจากแบบก่อสร้างที่ศึกษา

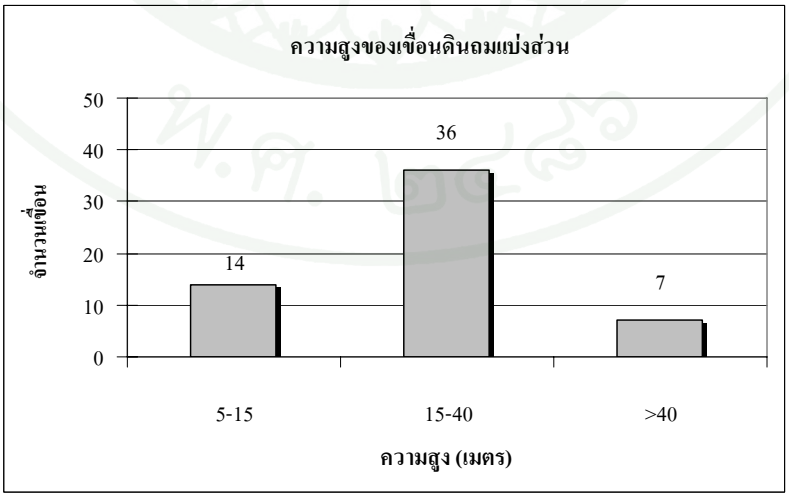
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขื่อนดินถมเนื้อเดียวส่วนใหญ่มีความสูงมากกว่า 15 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร 11 เขื่อน และมีเขื่อนที่สูงน้อยกว่า 15 เมตร 8 เขื่อน ส่วนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่สูงมากกว่า 30 เมตร มี 1 เขื่อน เป็นเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบ Chimney การจำแนกแสดงดังภาพที่ 72



ภาพที่ 72 จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจำแนกตามความสูงระดับต่างๆ

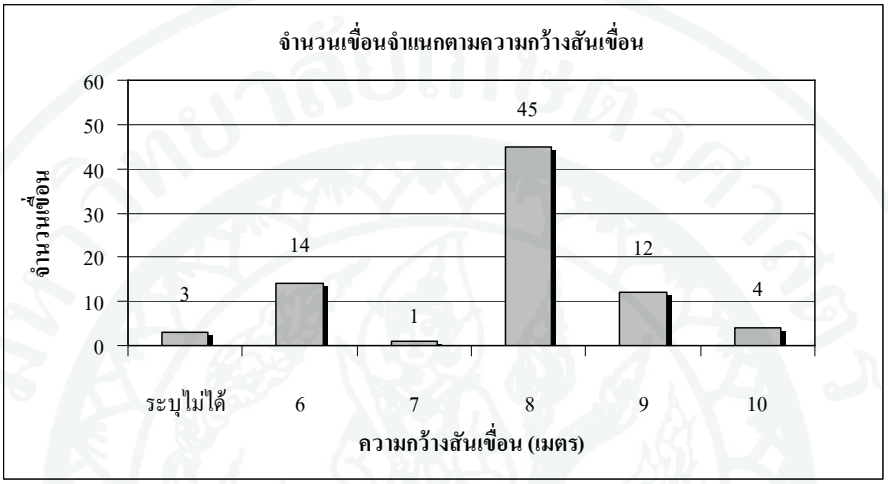
เขื่อนดินถมแบ่งส่วนใหญ่มีความสูงระหว่าง 15 เมตร ถึง 40 เมตร มีจำนวน 36 เขื่อน และมีเขื่อนที่สูงน้อยกว่า 15 เมตร 14 เขื่อน จากภาพที่ 73 จะเห็นว่ามีเขื่อนที่สูงเกิน 40 เมตรอยู่ 7 เขื่อน ถ้าพิจารณาเฉพาะความสูงถือว่าเป็นเขื่อนขนาดใหญ่



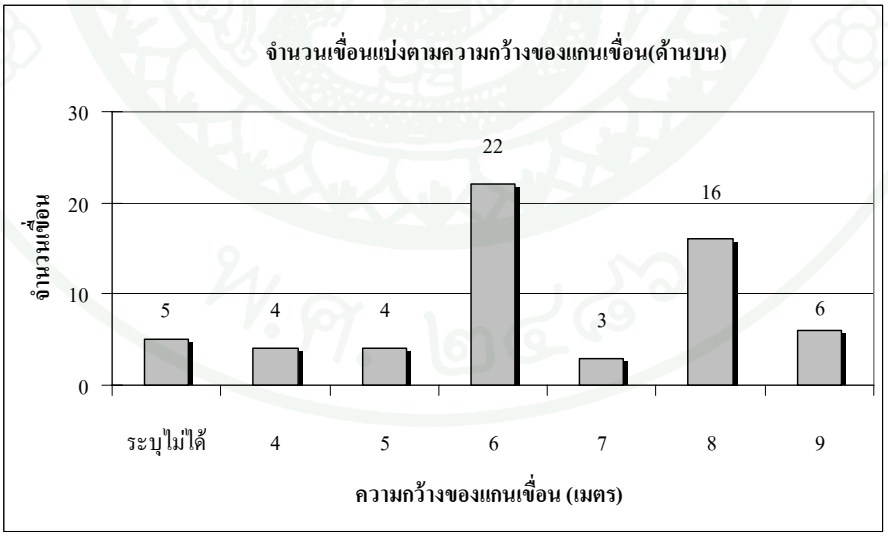
ภาพที่ 73 จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจำแนกตามความสูงระดับต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกณฑ์การออกแบบของกรมชลประทานกำหนดให้ความกว้างสันเขื่อนต้องไม่น้อยกว่า 6 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร จากแบบก่อสร้าง 79 เขื่อน จำแนกความกว้างได้ดังภาพที่ 74 โดยเขื่อนส่วนใหญ่มีสันเขื่อนกว้าง 8 เมตร ในขณะที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีแกนเขื่อนส่วนใหญ่กว้าง 6 เมตร ดังภาพที่ 75



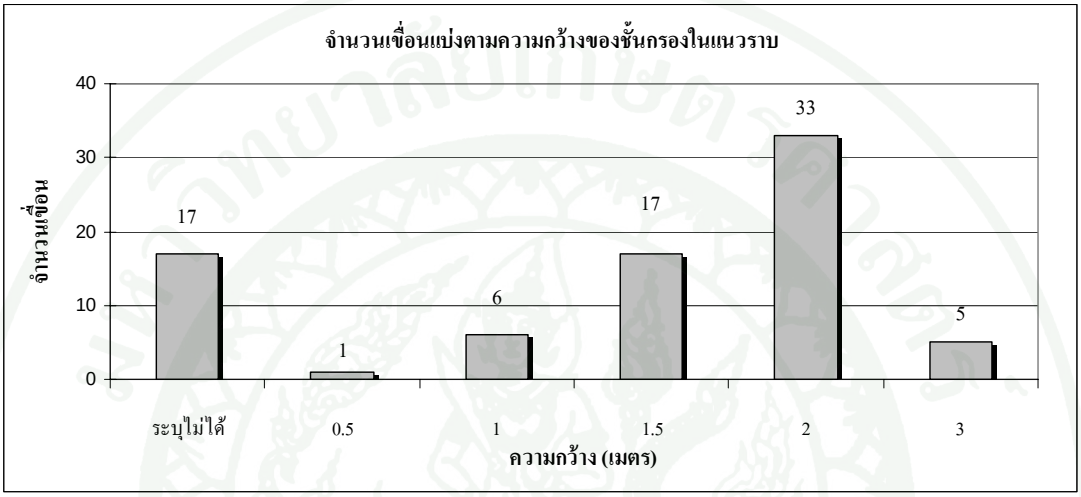
ภาพที่ 74 จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างสันเขื่อน



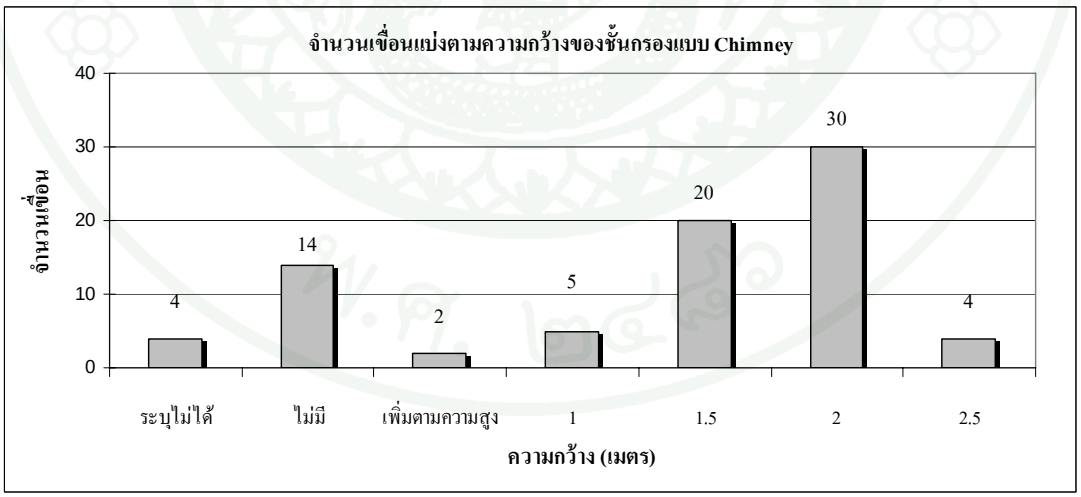
ภาพที่ 75 จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของแกนเขื่อนด้านบนที่ติดกับสันเขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกณฑ์การออกแบบของกรมชลประทานกำหนดให้ชั้นกรองมีความกว้างไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร การจำแนกความกว้างชั้นกรองที่ศึกษาจากแบบก่อสร้างจำแนกดังภาพที่ 76 และภาพที่ 77 พบว่าส่วนใหญ่เขื่อนมีชั้นกรองทั้งในแนวราบและแบบ Chimney กว้าง 2 เมตร โดยชั้นกรองในแนวราบกว้างสูงสุดไม่เกิน 3 เมตร ส่วนชั้นกรองแบบ Chimney กว้างสูงสุดไม่เกิน 2.5 เมตร



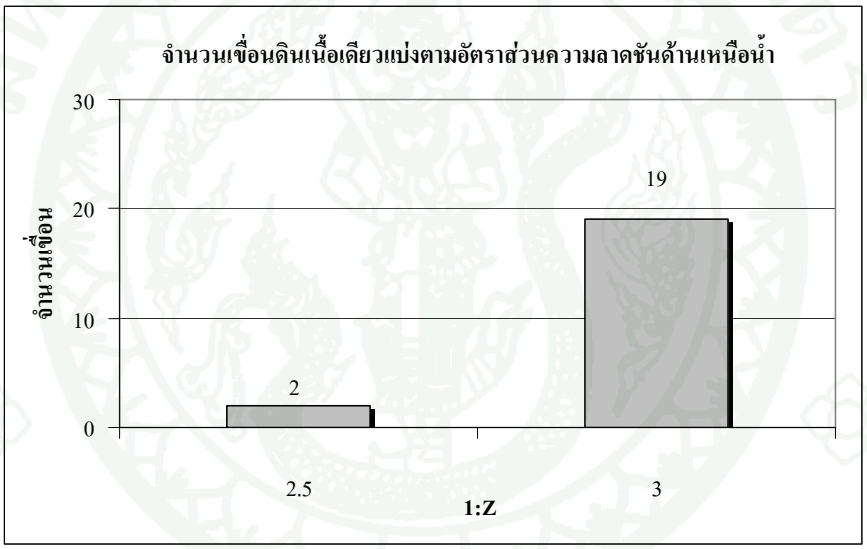
ภาพที่ 76 จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของชั้นกรองในแนวราบ



ภาพที่ 77 จำนวนเขื่อนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามความกว้างของชั้นกรองแบบ Chimney

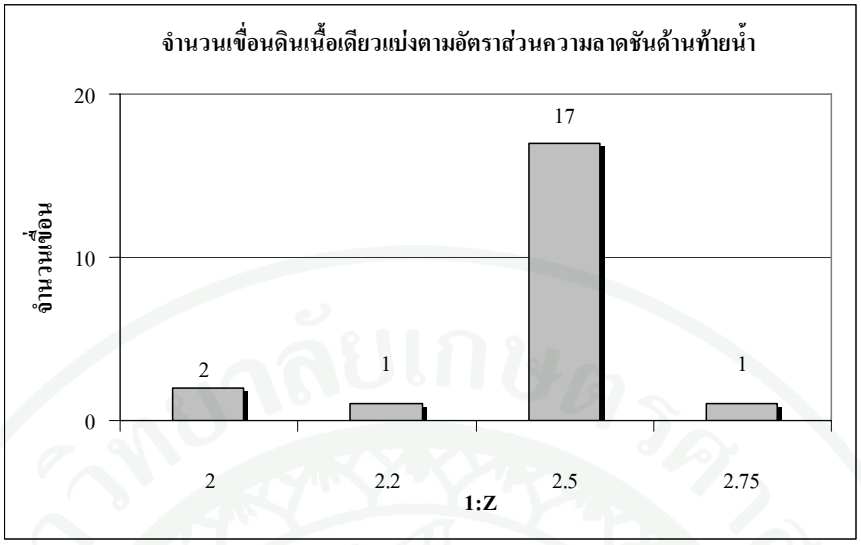
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความลาดชันทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำมีผลต่อตัวเขื่อนในด้านเสถียรภาพความลาดชัน ทั้งนี้ความลาดชันของเขื่อนขึ้นกับเหตุผลหลายประการ โดยเหตุผลประการหนึ่งขึ้นกับชนิดของดินที่นำมาก่อสร้างตัวเขื่อน กรมชลประทานแนะนำลาดชันของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่สร้างโดยดิน GC GM SC และ SM วางบนฐานรากที่มั่นคง ควรมีลาดชันด้านเหนือน้ำ 1:2.5 และด้านท้ายน้ำ 1:2 และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่ใช้ดิน GW GP SW และ SP เป็นเปลือกด้านนอก มีแกนเขื่อนเป็นดิน GC GM SC SM CL ML CH และ MH โดยเขื่อนวางบนฐานรากที่มั่นคง ควรมีลาดชันด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำด้านละ 1:2 ทั้งนี้การจำแนกความลาดชันเขื่อนจากแบบก่อสร้างพบว่า เขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนส่วนใหญ่มีความลาดชันด้านเหนือน้ำ 1:3 และมีความลาดชันด้านท้ายน้ำ 1:2.5 แสดงดังภาพที่ 78 ถึงภาพที่ 81

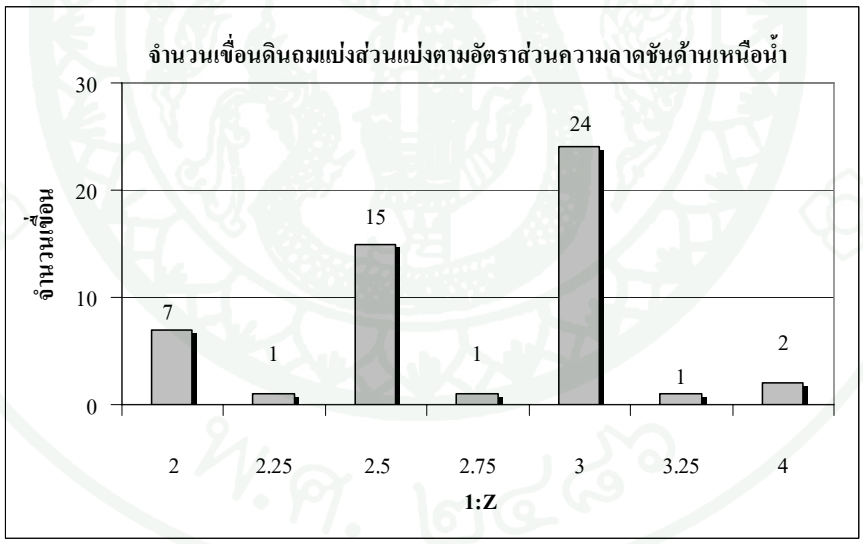


ภาพที่ 78 จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านเหนือน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

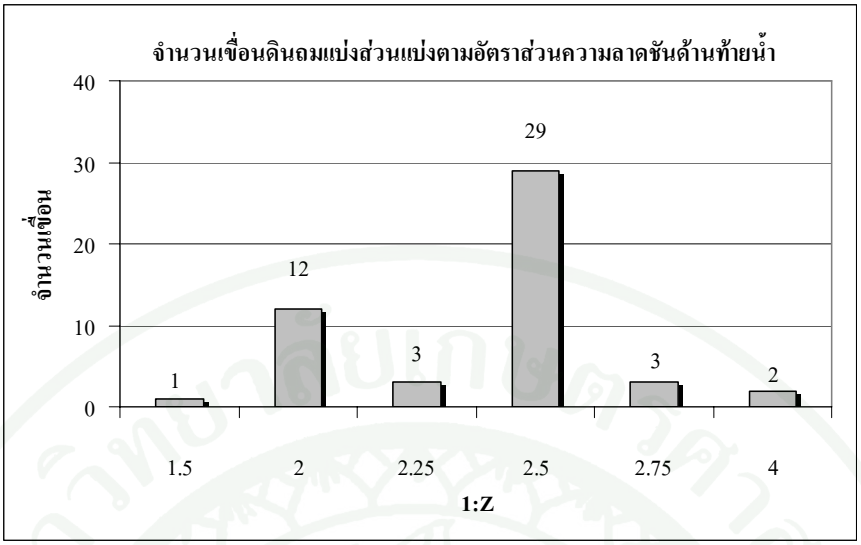


ภาพที่ 79 จำนวนเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านท้ายน้ำ



ภาพที่ 80 จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านเหนือน้ำ

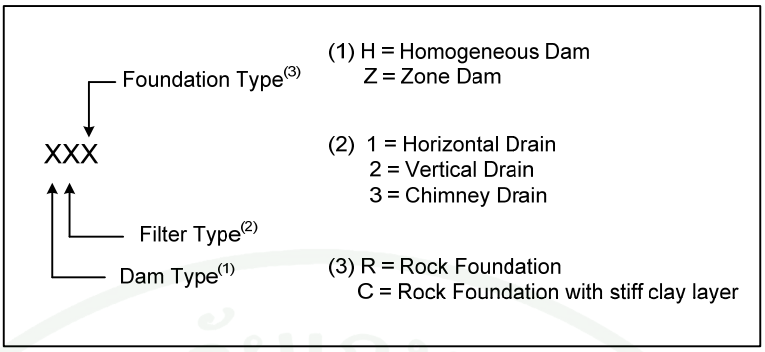
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



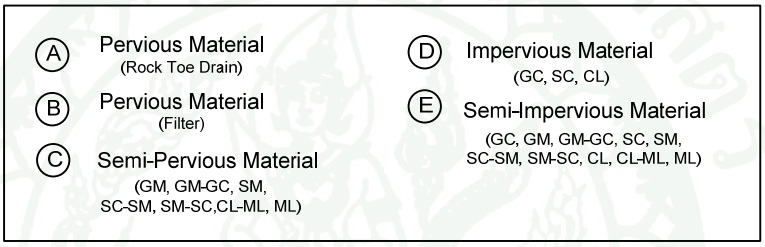
ภาพที่ 81 จำนวนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจากแบบก่อสร้างจำแนกตามอัตราส่วนความลาดชันด้านท้ายน้ำ

ผลการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบเขื่อน จากแบบก่อสร้างนี้มีสิ่งที่ต้องการคือแนวคิดการจำลองรูปแบบเขื่อนในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ให้ครอบคลุมกับรูปแบบเขื่อนที่มีอยู่จริงในประเทศไทย พบว่าเขื่อนที่ศึกษาจากแบบก่อสร้างจำนวน 79 เขื่อน มีทั้งเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีชั้นกรองแบบต่างๆ และเขื่อนดินถมแบ่งส่วน ซึ่งองค์ประกอบของเขื่อนที่สัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างของแบบจำลองที่สำคัญได้แก่ สันเขื่อนกว้าง 8 เมตรและแกนเขื่อนกว้าง 6 เมตร ชั้นกรองในแนวราบและชั้นกรองแบบ Chimney กว้าง 2 เมตร มีลาดชันด้านเหนือน้ำ 1:3 และมีความลาดชันด้านท้ายน้ำ 1:2.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กรมชลประทาน (2545) แนะนำ ทั้งนี้การจำลองรูปแบบเขื่อนเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ในลำดับต่อไป จะนำแนวทางนี้มาพิจารณาร่วมกับขนาดขององค์ประกอบที่ทำให้เขื่อนมีความแข็งแรงน้อยที่สุดเมื่อต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว แต่ไม่น้อยกว่าเกณฑ์ที่กรมชลประทานกำหนดไว้ จึงเลือกหน้าตัดเขื่อนซึ่งรายละเอียดสัญลักษณ์แทนแต่ละกรณีแสดงดังภาพที่ 82 และภาพที่ 83 หน้าตัดมีรูปแบบดังภาพที่ 84 และภาพที่ 85

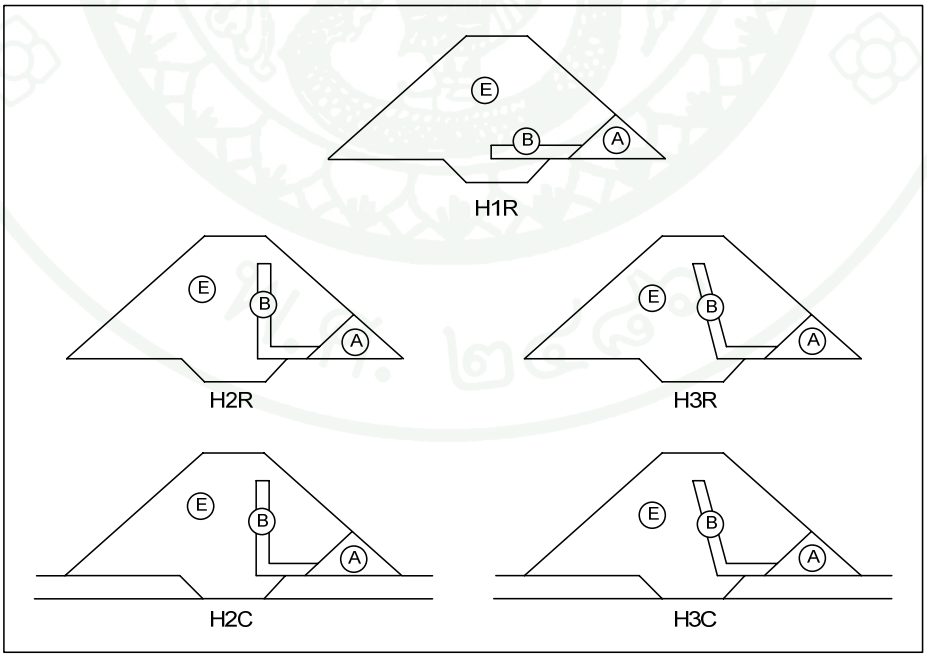
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 82 สัญลักษณ์แทนกรณีการวิเคราะห์ที่มีองค์ประกอบต่างๆ

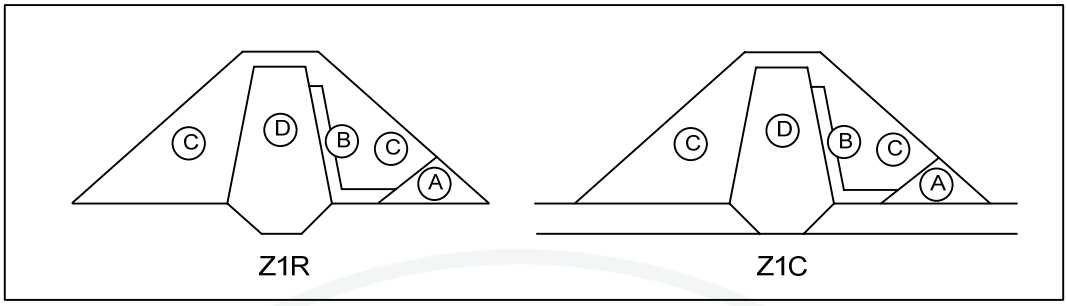


ภาพที่ 83 สัญลักษณ์แทนกรณีการวิเคราะห์ที่มีวัสดุต่างๆ



ภาพที่ 84 รูปทรงทั่วไปของหน้าตัดเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 85 รูปทรงทั่วไปของหน้าตัดเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน

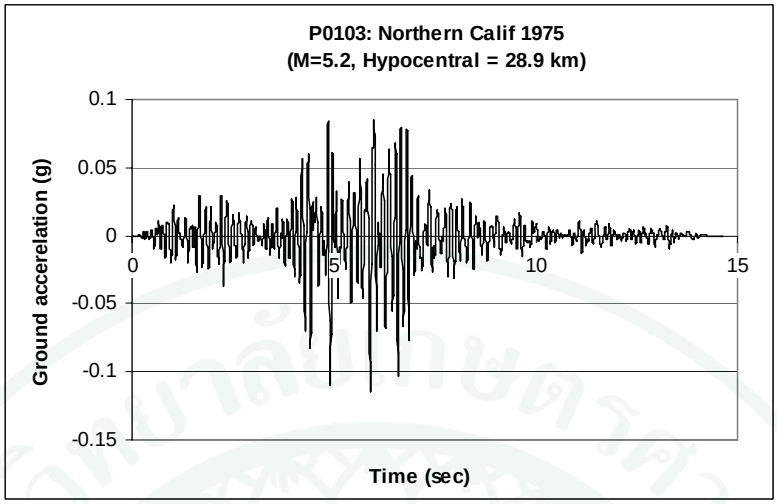
ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยได้มาจากฐานข้อมูลของ PEER ซึ่งทำการคัดเลือกจากขนาด 5-6 และ 6-7 ริกเตอร์ ที่ระยะทางไม่เกิน 30 และ 60 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 56 ซึ่งเป็นคลื่นที่ตรวจวัดได้ในชั้นหิน เมื่อพิจารณาค่า $\frac{V_{max}}{A_{max}}$ ไม่ควรเกิน 0.138 วินาที (เป็นค่าที่วัดได้ในชั้นดินแข็งถึงชั้นหิน) ในที่นี้วิเคราะห์ได้ 0.028-0.094 วินาที มี PGA ใกล้เคียง 0.1g เพราะเป็นค่าการออกแบบเขื่อนที่วิธี Psuedo-static นิยมใช้ ซึ่งเมื่อพิจารณาความรุนแรงจากค่า SMA ซึ่งได้จากความเร่งที่รุนแรงสูงสุด 3 อันดับแรก จึงมีค่า 0.89-0.104g ในขณะที่ T_n ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวอยู่ในช่วง 0.05-0.28 วินาที และค่า T_p ที่วิเคราะห์ได้คือ 0.14 และ 0.18 วินาที ส่วนเขื่อนดินถมแบ่งส่วน มี T_n ในช่วง 0.1-0.44วินาที และค่า T_p ที่วิเคราะห์ได้คือ 0.28, 0.30 และ 0.40 วินาที อย่างไรก็ตามเมื่อเขื่อนเกิดการสั่นจะทำให้คาบธรรมชาติของเขื่อนเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวินาทีระหว่างการสั่น ทั้งนี้ตัวแปรด้านเวลาการสั่นไหวที่มี PGA มากกว่า 0.05g ที่เรียกว่า Bracket duration คลื่นของเหตุการณ์ Loma Prieta มีการสั่นไหวนานที่สุดคือ 9.16 วินาที ทั้งนี้คลื่นแผ่นดินไหวที่คัดเลือกมาถือได้ว่าเป็นคลื่นที่เหมาะสมกับรูปแบบเขื่อนในงานวิจัยตามรายละเอียดดังกล่าว โดยลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ที่มีความเร่งสูงสุดในแนวราบประมาณ 0.1g แบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่ คลื่นขนาด 5-6 (กลุ่ม M1) และ 6-7 ริกเตอร์ (กลุ่ม M2) แสดงดังภาพที่ 86 ถึงภาพที่ 89 และคลื่นที่มีความเร่งสูงสุดในแนวราบประมาณ 0.5g ที่มีขนาด 6-7 ริกเตอร์ (กลุ่ม M3) เป็นกลุ่มที่ได้แนวทางจากผลการวิเคราะห์ Pseudo-static แสดงดังภาพที่ 90 และภาพที่ 91

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

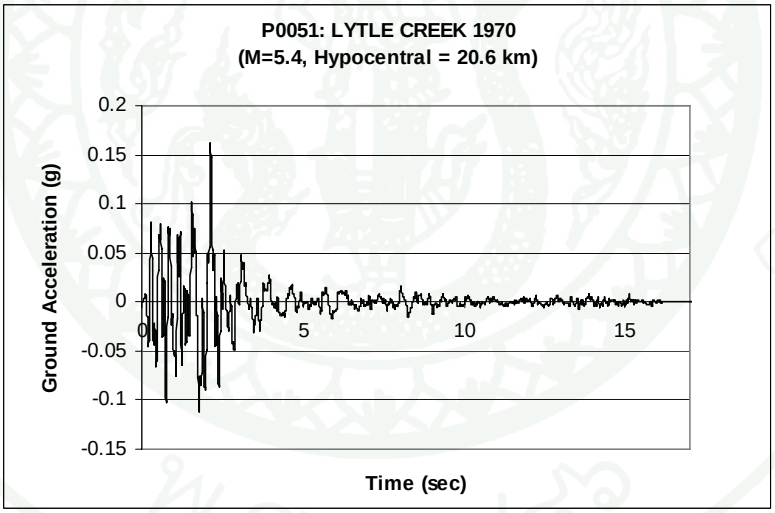
ตารางที่ 56 องค์ประกอบของข้อมูลแผ่นดินไหวที่สำคัญจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Seismo signal

Group No	Magnitude range (Richter)	Station no	Event	Magnitude (Richter)	PGA (g)	Vmax/Amax (sec)	Arias Intensity (m/s)	SMA (g)	Tp (sec)	Bracket duration (sec)
M1	M=5-6	P0103	Northern Calif 1975	5.2	0.115	0.028	0.088	0.104	0.14	5.675
		P0051	Lytle Creek 1970	5.4	0.162	0.064	0.022	0.103	0.28	2.29
M2	M=6-7	P0740	Loma Prieta 1989	6.9	0.124	0.094	0.268	0.099	0.180	9.160
		P0674	Whittier Narrows 1987	6	0.166	0.038	0.137	0.089	0.300	3.870
M3	M=6-7	P0729	Superstitn Hills 1987	6.7	0.682	0.049	3.702	0.458	0.180	19.250
		P0770	Loma Prieta 1989	6.9	0.605	0.086	3.087	0.396	0.40	16.44

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

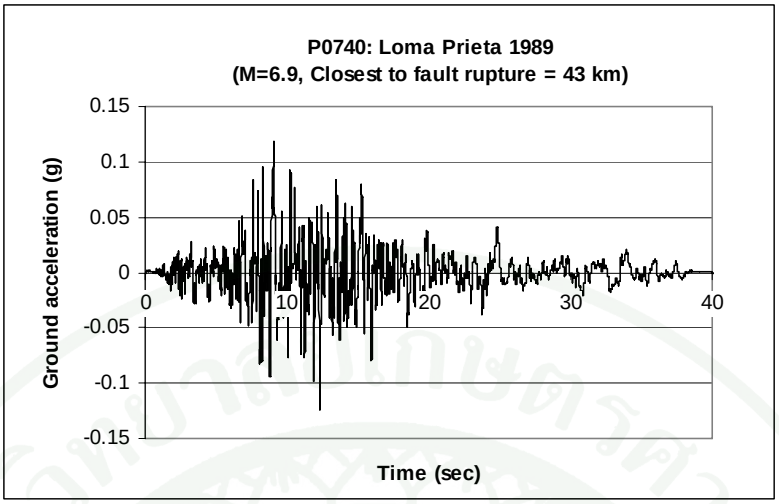


ภาพที่ 86 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Northern Calif 1975 (PGA=0.115g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)

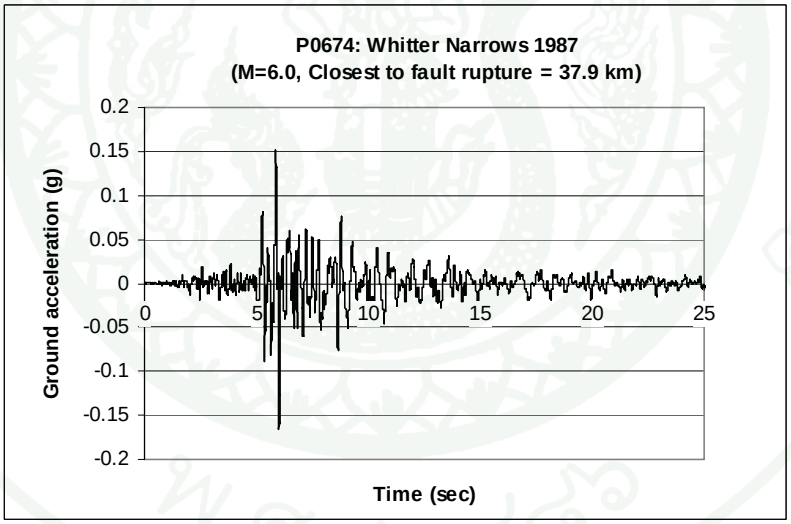


ภาพที่ 87 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lytle Creek 1970 (PGA=0.162g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

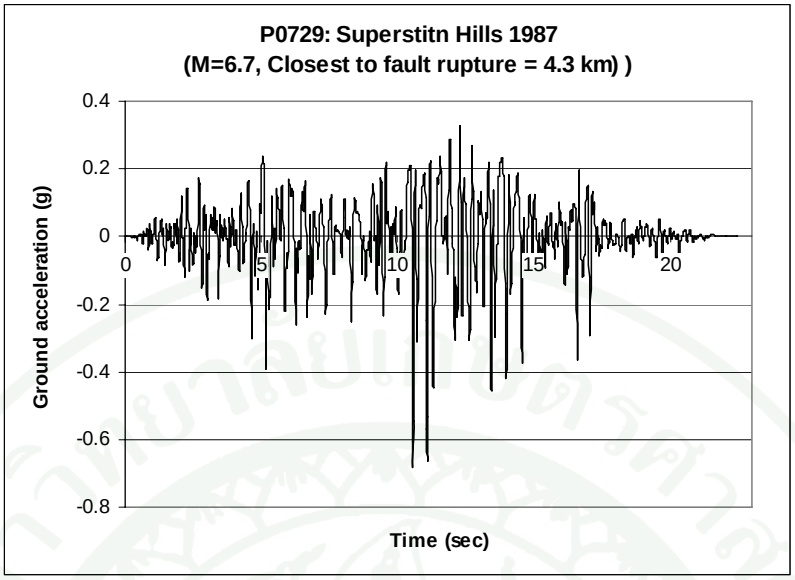


ภาพที่ 88 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Loma Prieta 1989 (PGA=0.124g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)

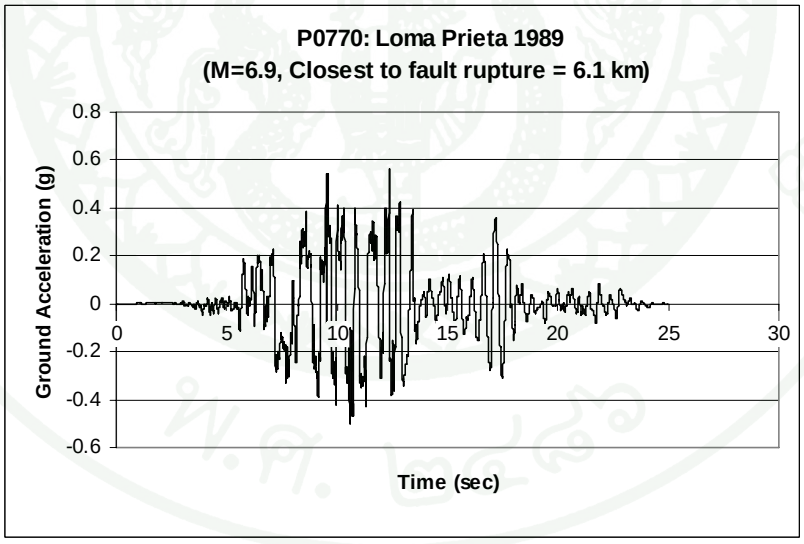


ภาพที่ 89 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Whitter Narrows 1987 (PGA=0.166g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 90 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Superstitn Hills 1987 (PGA=0.682g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมเนื้อเดียว (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)



ภาพที่ 91 ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Loma Prieta 1989 (PGA=0.605g) สำหรับวิเคราะห์กับเขื่อนดินถมแบ่งส่วน (ข้อมูลแผ่นดินไหวได้จาก PEER, 2009)

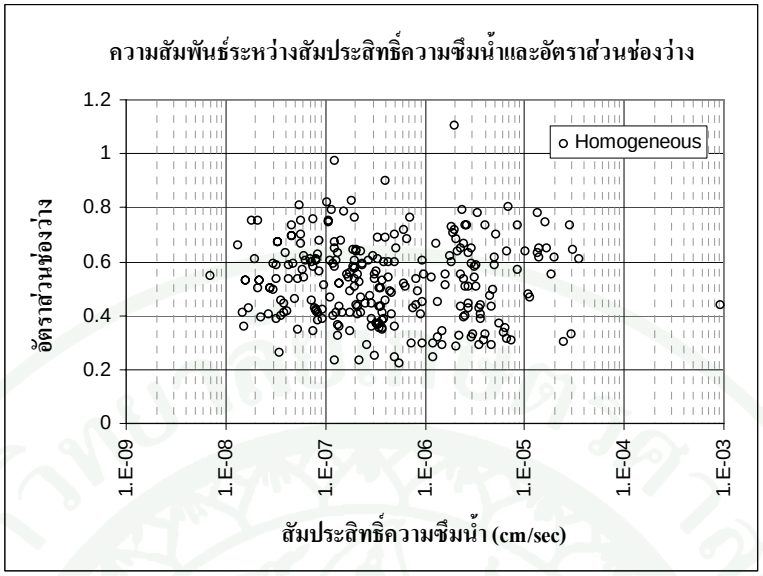
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ออกแบบในสภาวะสถิตย์ในประเทศไทย

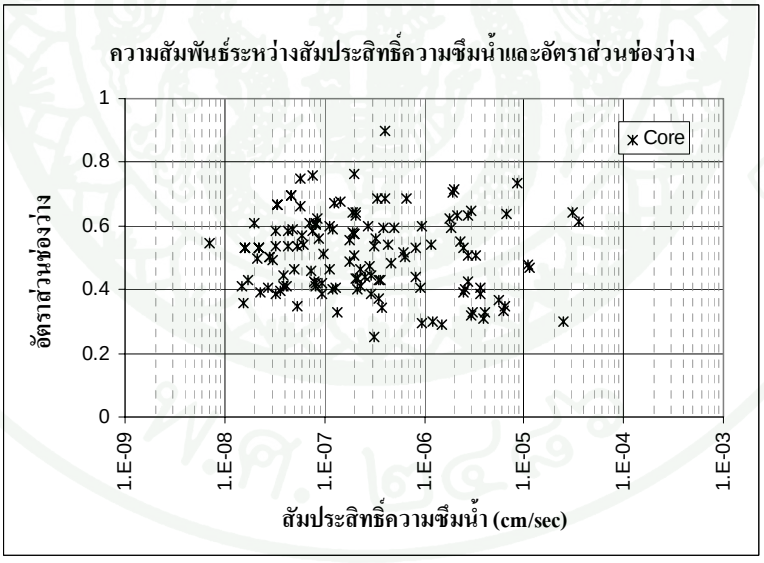
ในด้านการไหลซึมนั้นเขื่อนดินถมเนื้อเดียว ดินถมจะมีคุณสมบัติกึ่งทึบน้ำ ในขณะที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วน เปลือกเขื่อนด้านนอกจะมีคุณสมบัติกึ่งทึบน้ำถึงกึ่งระบายน้ำ เพื่อให้น้ำเดินทางถึงแกนเขื่อนซึ่งมีคุณสมบัติทึบน้ำ เป็นการปิดกั้นเพื่อบังคับให้น้ำเดินทางสู่ชั้นกรองต่อไป ดังนั้นการแบ่งชนิดดินที่เป็นองค์ประกอบเขื่อน จึงพิจารณาคุณสมบัติด้านการไหลซึมร่วมด้วย ซึ่งหลังจากที่แบ่งองค์ประกอบของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification (USCS) ตามตารางที่ 36 ซึ่งเป็นตัวอย่างดินจากบ่อยืมแล้ว นำคุณสมบัติดินของแต่ละองค์ประกอบต่างๆมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยเริ่มจาก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับอัตราส่วนช่องว่าง ซึ่งโดยรวมแล้วดินมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำอยู่ระหว่าง $1x10^{-4}$ cm/sec ถึง $1x10^{-8}$ cm/sec และมีอัตราส่วนช่องว่างระหว่าง 0.2 ถึง 1 มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบกระจัดกระจาย

ดินบริเวณ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง $1x10^{-5}$ cm/sec ถึง $1x10^{-8}$ cm/sec โดยมีดินตัวอย่างบางส่วนที่มีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำน้อยกว่า $1x10^{-5}$ cm/sec ทั้งนี้ Terzaghi and Peck (1967) แนะนำว่า ดินทึบน้ำควรมีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำน้อยกว่า $1x10^{-7}$ cm/sec ดินที่มีความซึมน้ำต่ำมากหรือดินกึ่งทึบน้ำ ควรมีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำอยู่ระหว่าง $1x10^{-5}$ cm/sec ถึง $1x10^{-7}$ cm/sec ดังตารางที่ 8 ในขณะที่อัตราส่วนช่องว่างของ Homogeneous zone และ Shell zone มีค่าส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 1 ส่วน Core zone มีค่าอัตราส่วนช่องว่างส่วนใหญ่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 แสดงดังภาพที่ 92 ถึงภาพที่ 94 การที่อัตราส่วนช่องว่างของ Shell zone มีค่าช่วงบนสูงเนื่องจากดินที่นำมาแบ่งองค์ประกอบส่วนนี้ได้แก่ GM, GM-GC, SM, SC-SM, SM-SC, CL-ML, ML เป็นดินที่มีอัตราส่วนช่องว่างมาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

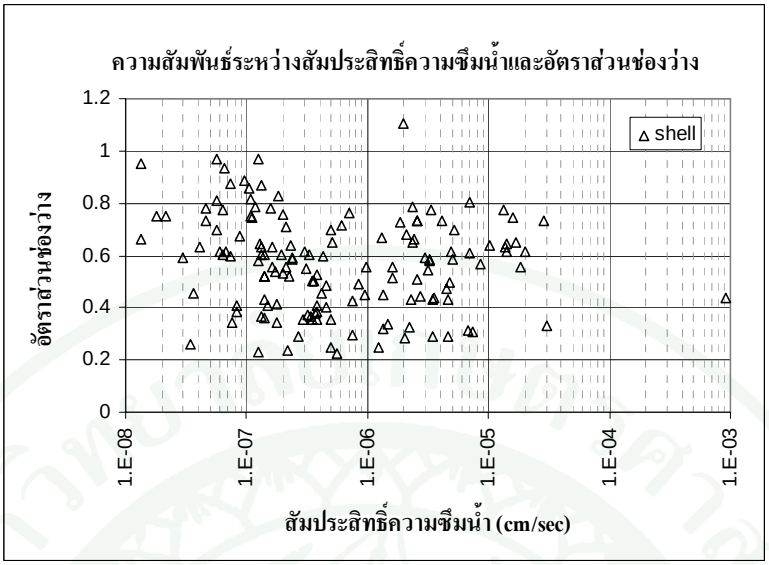


ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Homogeneous zone



ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Core zone

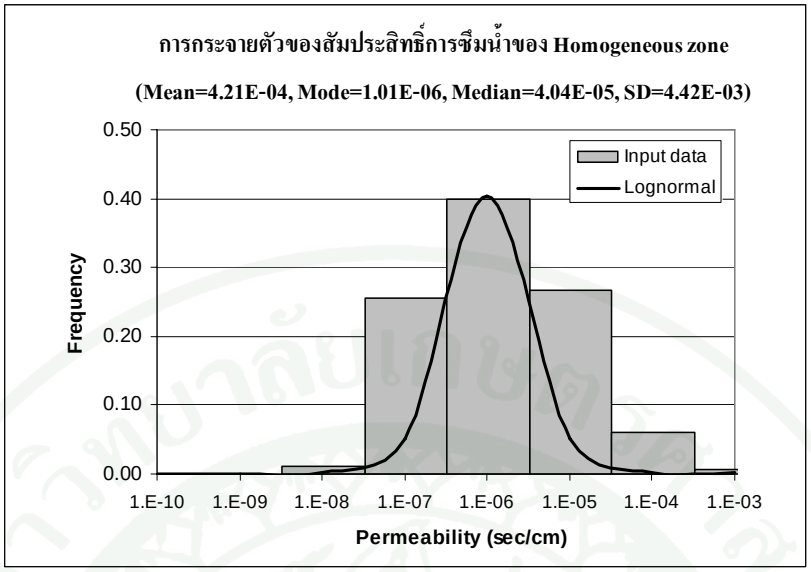
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



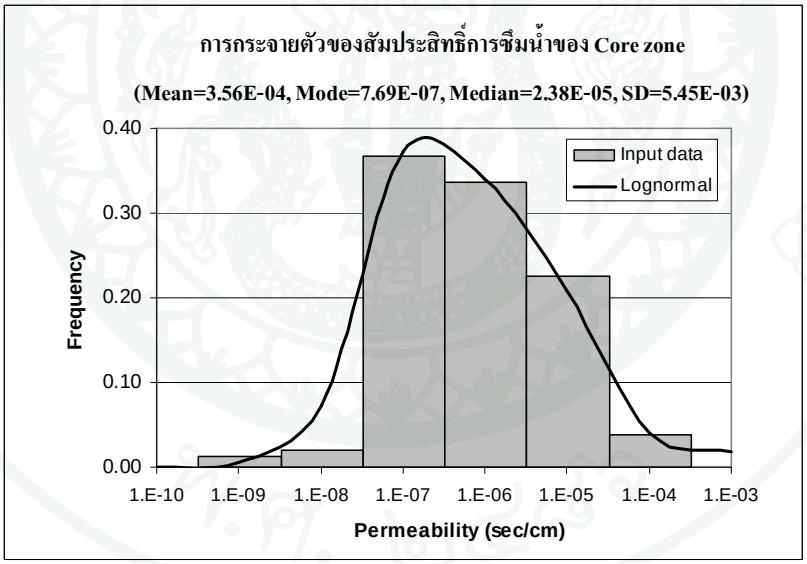
ภาพที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของ Shell zone

เมื่อนำข้อมูลจากภาพที่ 92 ถึงภาพที่ 94 มาวิเคราะห์การกระจายตัว พบว่า Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีการกระจายตัวแบบ Lognormal โดย Homogeneous zone มีค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ $1x10^{-6}$ cm/sec ดังภาพที่ 95 Core zone มีค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ $1x10^{-7}$ cm/sec ดังภาพที่ 96 Core และ Shell zone มีค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ $1x10^{-6}$ cm/sec ดังภาพที่ 97 ถึงแม้ว่าการแบ่งดินในแต่ละองค์ประกอบจะได้ Homogeneous zone และ Shell zone มีค่าส่วนใหญ่เท่ากัน แต่ข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าดินตัวอย่างที่เป็น Homogeneous zone มีการกระจายตัวดีกว่า ในขณะที่ Shell zone มีการกระจายตัวค่อนไปทางด้านทึบน้ำต่ำคือ $1x10^{-3}$ ถึง $1x10^{-5}$ cm/sec ซึ่งการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำที่นำมาแบ่งองค์ประกอบนี้ มีประโยชน์เพื่อช่วยตรวจสอบความถูกต้องในเบื้องต้นของคุณสมบัติดินที่รวบรวม ทำให้เกิดความเชื่อมั่นในผลการวิจัยขั้นนี้มากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

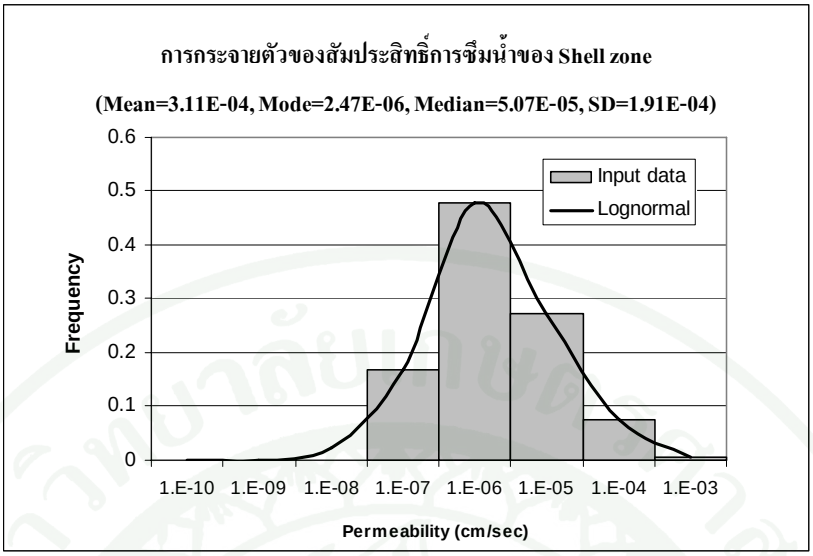


ภาพที่ 95 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Homogeneous zone



ภาพที่ 96 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Core zone

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

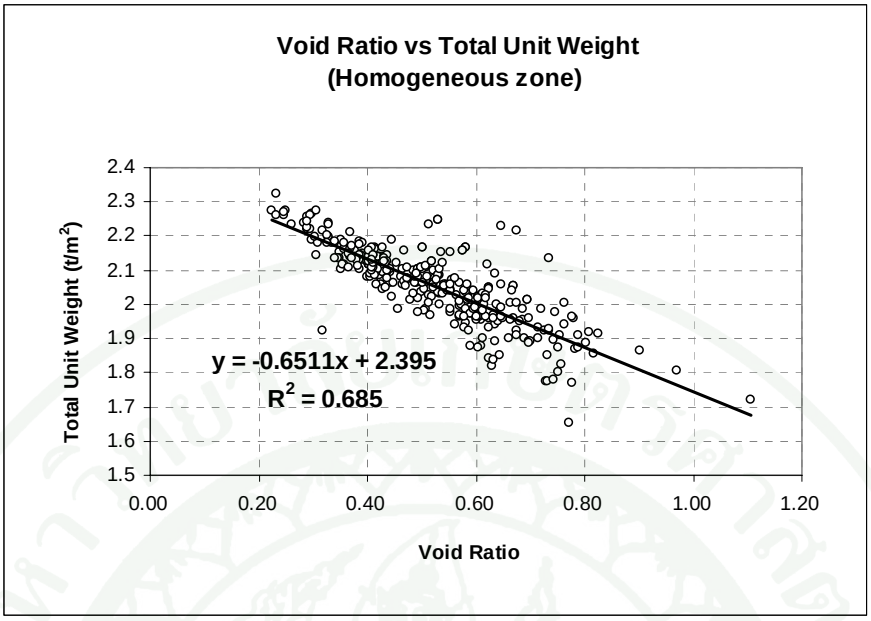


ภาพที่ 97 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของ Shell zone

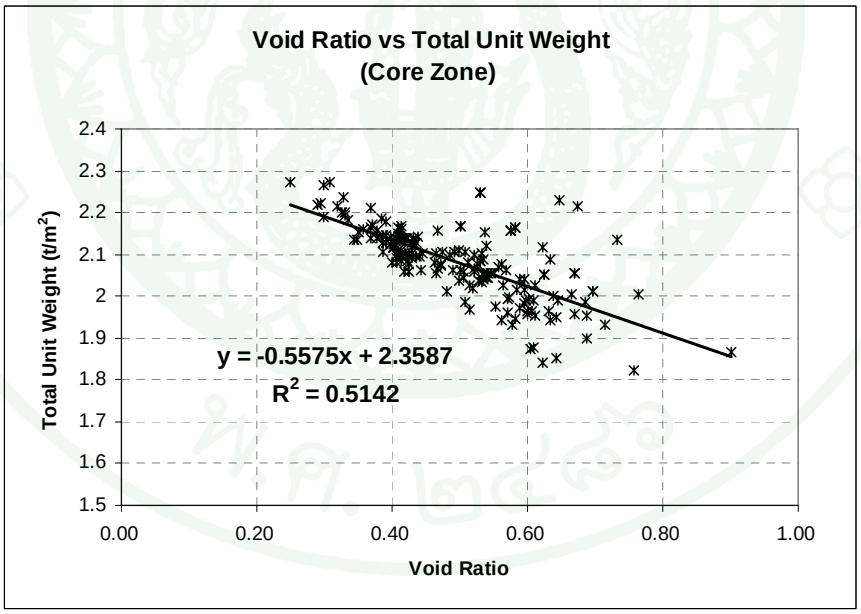
คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินในสภาวะสถิตย์

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ได้ในงานวิจัย เป็นส่วนสำคัญที่ได้มาจากการรวบรวมคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินในสภาวะสถิตย์ที่เกี่ยวข้องกับโมดูลัสเฉือนสูงสุดของดินได้แก่ อัตราส่วนช่องว่าง ดัชนีความเหนียว และหน่วยน้ำหนักของดิน ด้านความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมขององค์ประกอบตัวเชื่อนไม่ว่าจะเป็น Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone พบว่าหน่วยน้ำหนักรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องว่างลดลง ซึ่งจากตัวอย่างดินที่รวบรวมในงานวิจัยพบว่า Shell zone และ Homogeneous zone มีเส้นความสัมพันธ์ชันกว่า Core zone เล็กน้อย โดยความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 98 ถึงภาพที่ 100 ทั้งนี้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้นในมวลดิน สามารถคำนวณหาอัตราส่วนช่องว่างเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของข้อมูลดินในที่นี้ด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

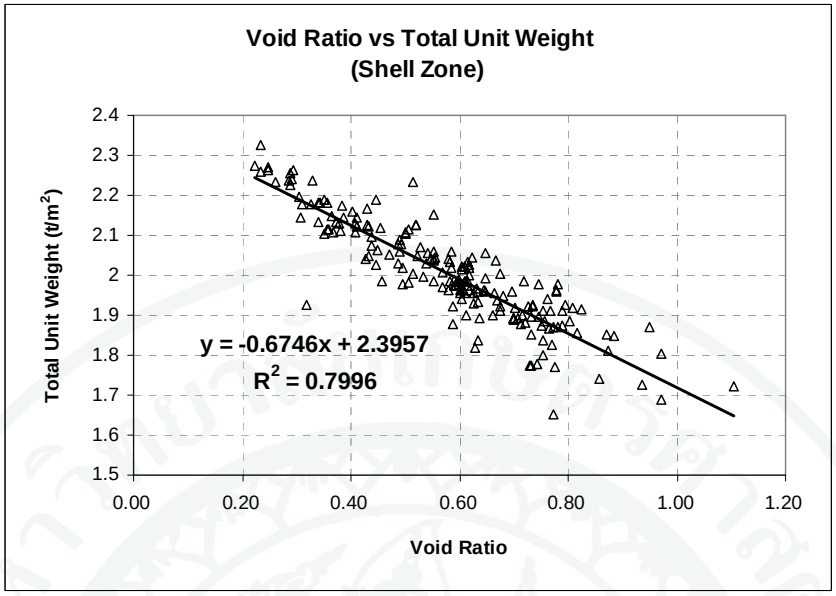


ภาพที่ 98 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Homogeneous zone



ภาพที่ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Core zone

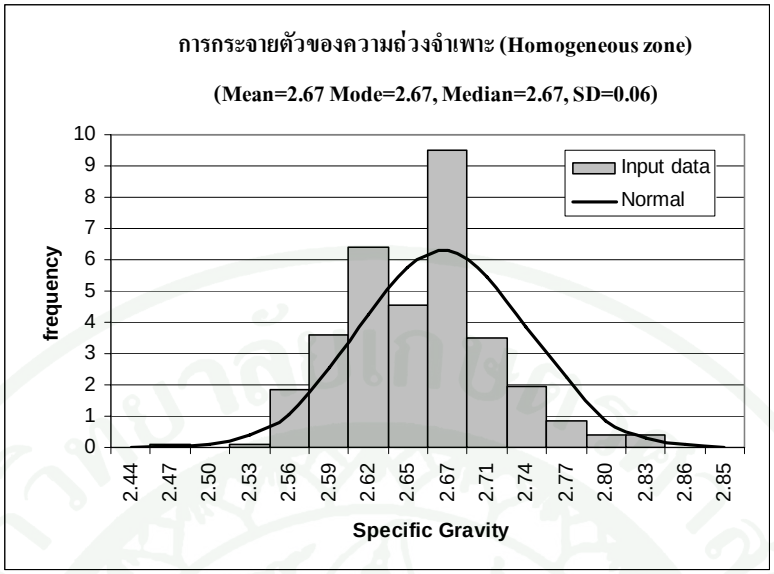
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



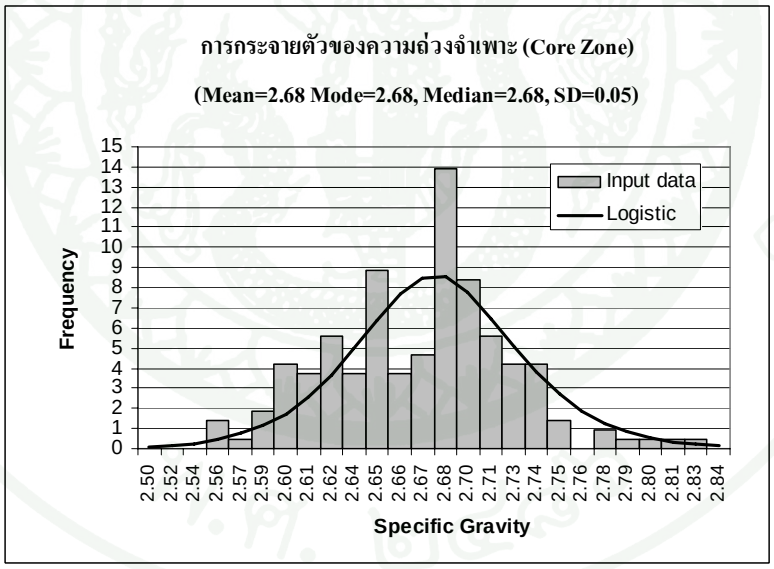
ภาพที่ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยน้ำหนักรวมของ Shell zone

เมื่อพิจารณาด้านการกระจายตัวของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน โดยเริ่มจากการกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะ จะเห็นว่าการกระจายตัวของ Homogeneous zone เป็นแบบ Normal ซึ่งแตกต่างกับ Core zone และ Shell zone ที่เป็นแบบ Logistic อย่างไรก็ตามรูปแบบของการกระจายตัวยังเป็นแบบสมมาตรซึ่งมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันได้แก่ 2.67, 2.68 และ 2.67 ตามลำดับ ดังภาพที่ 101 ถึงภาพที่ 103 โดยทั่วไปความแปรปรวนของค่าความถ่วงจำเพาะจะมีไม่มากนัก เนื่องจากดินทั่วไปมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงแคบๆประมาณ 2.5 ถึง 2.7 เท่านั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

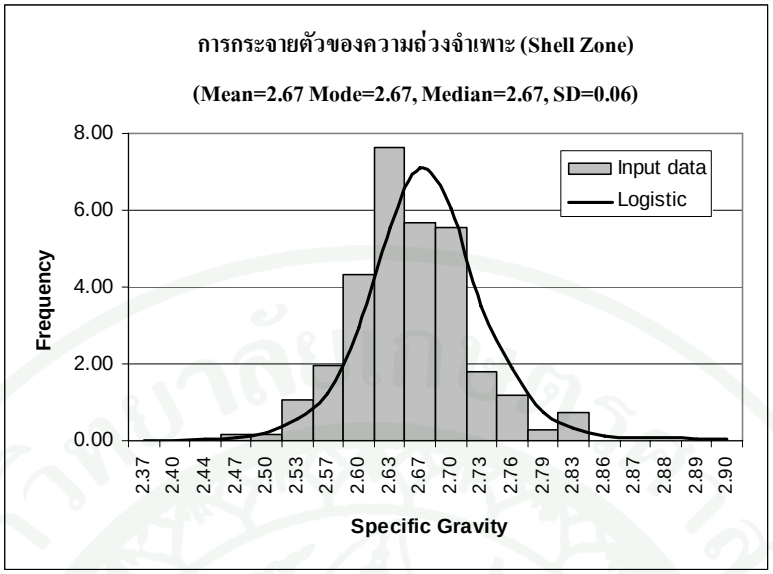


ภาพที่ 101 การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Homogeneous zone



ภาพที่ 102 การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Core zone

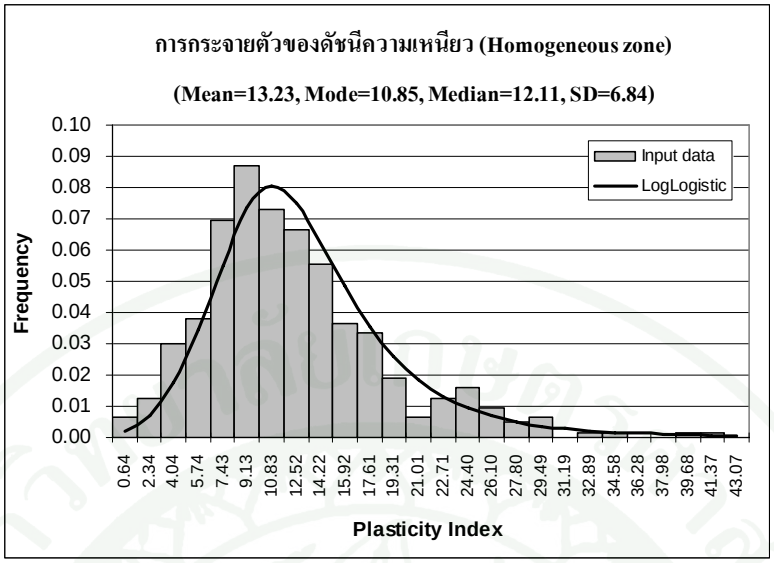
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



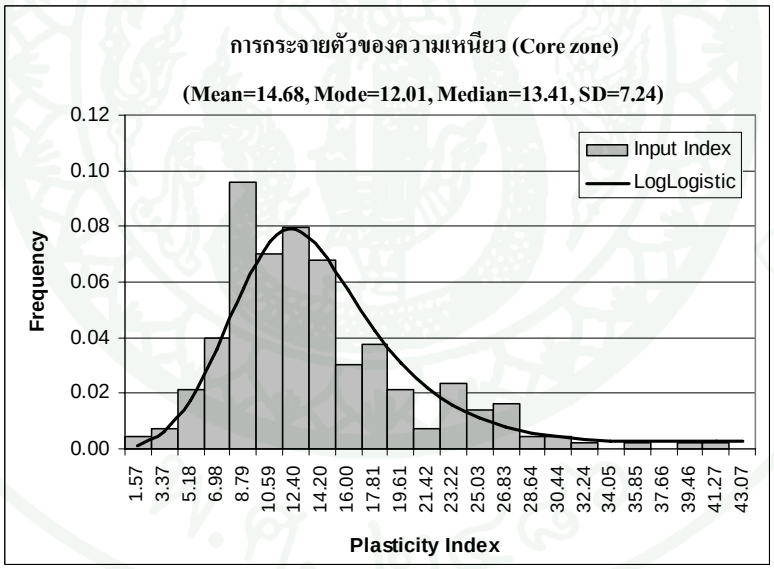
ภาพที่ 103 การกระจายตัวของความถ่วงจำเพาะของ Shell zone

ดินตัวเขื่อนส่วนใหญ่ควรมีค่าดัชนีความเหนียวไม่สูงมากเกินไป เพราะเมื่อบดอัดแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะน้อย ปลอดภัยต่อการเกิดรอยแตกภายในตัวเขื่อน สอดคล้องกับด้านพลศาสตร์ที่เมื่อดัชนีความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนจะมีค่าลดลง ในขณะเดียวกับที่อัตราส่วนความหน่วงจะมีอิทธิพลมากขึ้น การรวบรวมคุณสมบัติที่ใช้ในงานวิจัย จากภาพที่ 104 ถึงภาพที่ 106 พบว่า Homogeneous zone และ Core zone มีรูปแบบการกระจายตัวแบบ Log-Logistic ในขณะที่ Shell zone มีการกระจายตัวแบบ Inverse Gaussian ในที่นี้ Core zone มีค่าความแปรปรวนสูงกว่า Homogeneous zone และ Shell zone เล็กน้อย โดยรวมแล้วแต่ละองค์ประกอบมีค่าดัชนีความเหนียวแตกต่างกันไม่มากนัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

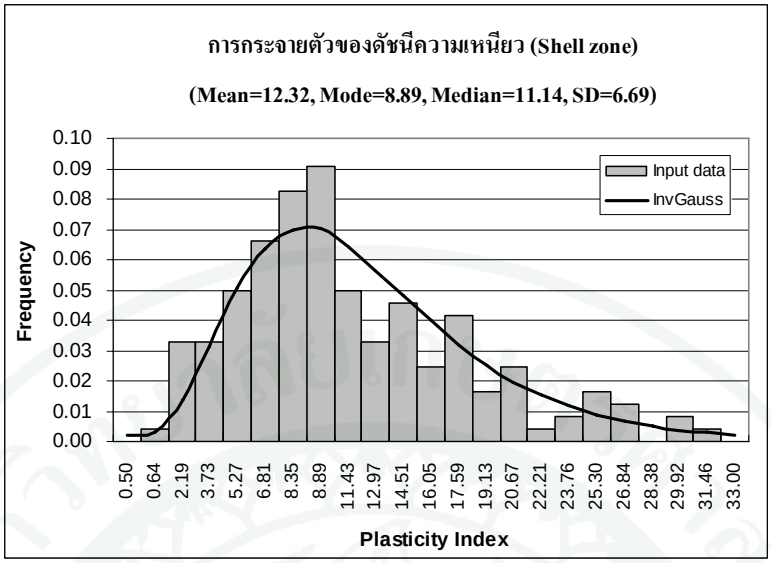


ภาพที่ 104 การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Homogeneous zone



ภาพที่ 105 การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Core zone

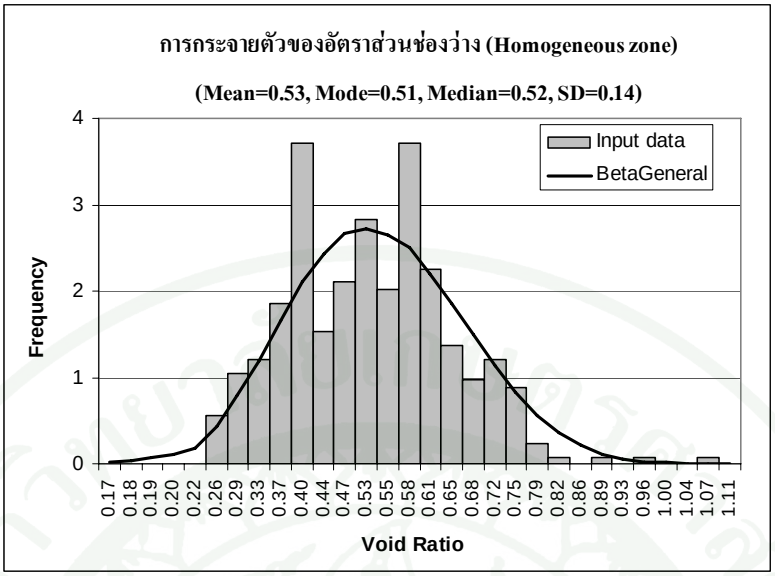
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



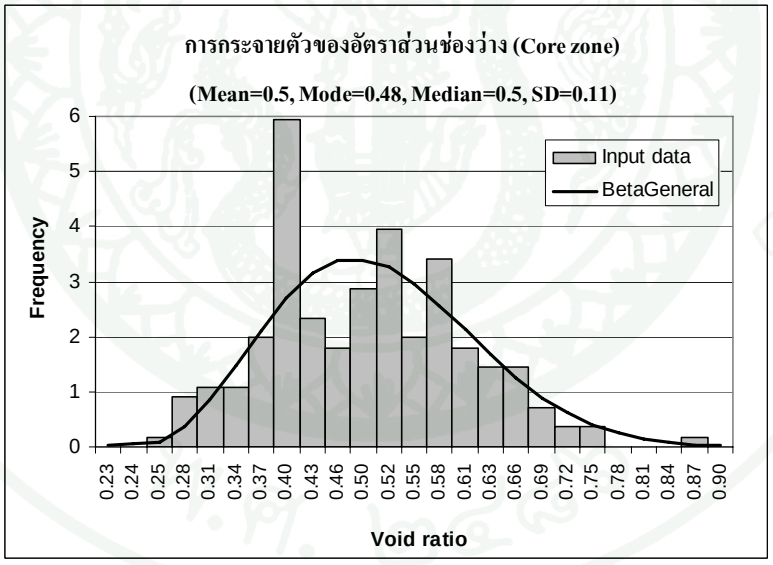
ภาพที่ 106 การกระจายตัวของดัชนีความเหนียวของ Shell zone

อัตราส่วนช่องว่างเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่เกี่ยวข้องทั้งด้านกำลังและการไหลซึม ซึ่งในสภาวะสถิตย์องค์ประกอบที่มีคุณสมบัติทึบน้ำเช่นแกนเขื่อนควรมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด ส่วนในทางพลศาสตร์นั้นยิ่งอัตราส่วนช่องว่างมีค่าต่ำก็จะมีผลให้อัตราส่วนความหน่วงต่ำลง อ้างตาม Dobry and Vucetic (1978) ดังตารางที่ 10 ทั้งนี้จากการกระจายตัวดังภาพที่ 107 ถึงภาพที่ 109 จะเห็นว่าองค์ประกอบทั้ง Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีรูปแบบการกระจายตัวเหมือนกันคือ Beta-General นอกจากนี้ยังมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนใกล้เคียงกันด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

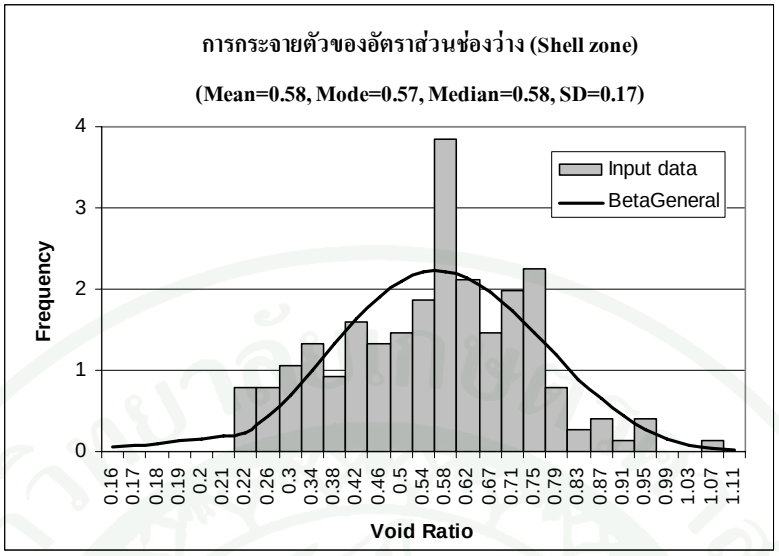


ภาพที่ 107 การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Homogeneous zone



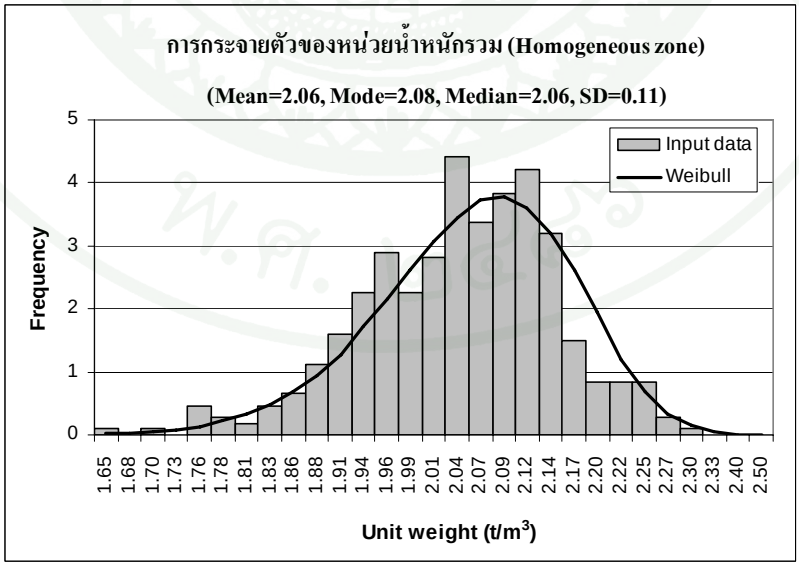
ภาพที่ 108 การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Core zone

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



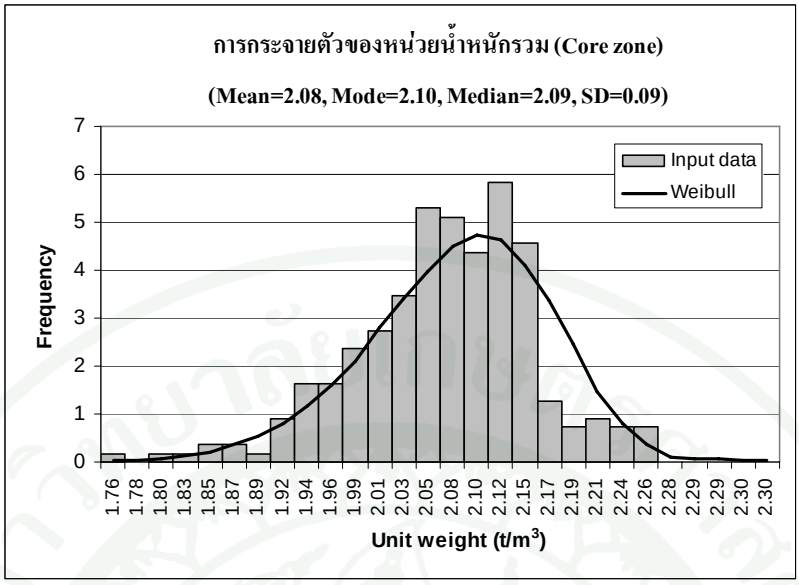
ภาพที่ 109 การกระจายตัวของอัตราส่วนช่องว่างของ Shell zone

หน่วยน้ำหนักมีผลต่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อน ซึ่งในทางพลศาสตร์ Mean effective stress มีผลอย่างมากต่อค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด จากภาพที่ 110 และภาพที่ 111 Homogeneous zone และ Core zone มีการกระจายตัวแบบ Weibull โดยเบ้ไปทางซ้ายเล็กน้อย ในขณะที่ Shell zone มีรูปแบบการกระจายตัวแบบ Log-Normal ดังภาพที่ 112

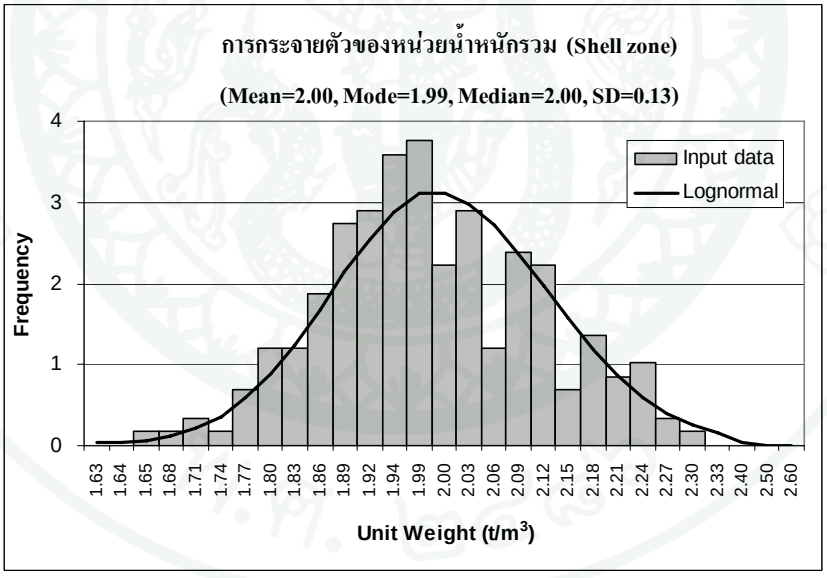


ภาพที่ 110 การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Homogeneous zone

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 111 การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Core zone



ภาพที่ 112 การกระจายตัวของหน่วยน้ำหนักรวมของ Shell zone

คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินตัวเขื่อนจากบ่อยืม อาจมีคุณสมบัติด้านการกระจายตัวแตกต่างกัน นำมาสู่การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลดินที่มีอยู่ ดังผลการวิเคราะห์ที่ได้เสนอไปแล้ว และตารางที่ 57 เป็นการสรุปค่าต่างๆที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติที่สัมพันธ์กับการกระจายตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของข้อมูลคุณสมบัติ ในขณะเดียวกันก็เป็นค่าสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน รวมถึงการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์อีกด้วย

ตารางที่ 57 สรุปค่าพารามิเตอร์ด้านคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์

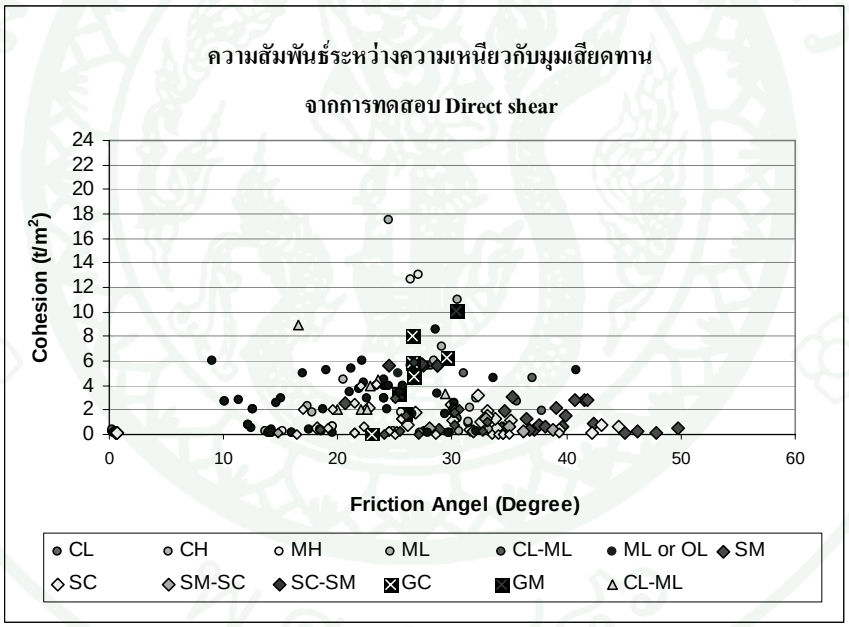
No	Component	Value List	Permeability (cm/sec)	G_S	PI (%)	e	γ_t (t/m^3)
1	Homogeneous	Average of all values	4.21E-04	2.67	13.23	0.53	2.06
		Standard deviation	4.42E-03	0.06	6.84	0.14	0.11
		Minimum value	หาค่าไม่ได้	2.11	6.39	0.39	1.95
		Maximum value	4.84E-03	2.86	20.07	0.67	2.17
		%COV	868.80	2.25	48.02	26.42	5.34
		Total number of tests	293	341	372	351	412
		Curve fitting	Lognormal	Normal	Loglogistic	Beta General	Weibull
2	Core	Average of all values	3.11E-04	2.68	14.68	0.5	2.08
		Standard deviation	5.43E-03	0.05	7.24	0.11	0.09
		Minimum value	หาค่าไม่ได้	2.56	7.44	0.39	1.99
		Maximum value	5.74E-03	2.84	21.92	0.61	2.17
		%COV	748.36	1.87	45.26	22.00	4.33
		Total number of tests	154	169	237	188	240
		Curve fitting	Lognormal	Logistic	Loglogistic	Beta General	Weibull
3	Shell	Average of all values	3.11E-04	2.67	12.32	0.58	2
		Standard deviation	1.91E-04	0.06	6.69	0.17	0.13
		Minimum value	1.20E-04	2.11	5.63	0.41	1.87
		Maximum value	5.02E-04	2.86	19.01	0.75	2.13
		%COV	891.33	2.25	53.73	29.31	6.50
		Total number of tests	161	172	157	188	200
		Curve fitting	Lognormal	Logistic	Invgauss	Beta General	Lognormal

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบชนิดต่างๆ

ผลการวิจัยด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินคือ ความเหนียวและมุมเสียดทาน นำเสนอตามประเภทของการทดสอบคือ การทดสอบ Direct shear และการทดสอบ Triaxial แบบ UU, CU และ $\overline{CU}$ มีรายละเอียดดังนี้

การทดสอบ Direct shear มีการกระจายของค่าความเหนียวอยู่ในช่วงแคบๆ ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 6 ตันต่อตารางเมตร ทั้งนี้เพราะการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวอย่างแท้จริงก่อนการทดสอบเป็นไปได้ยาก ส่วนการกระจายตัวของมุมเสียดทานอยู่ในช่วงกว้างๆ ตั้งแต่ 10 ถึง 50 องศา แสดงดังภาพที่ 113

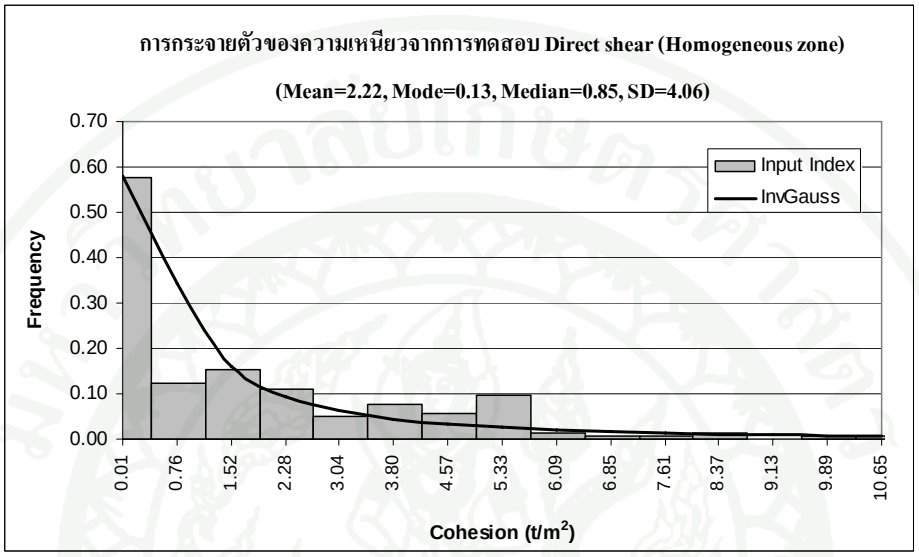


ภาพที่ 113 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Direct shear

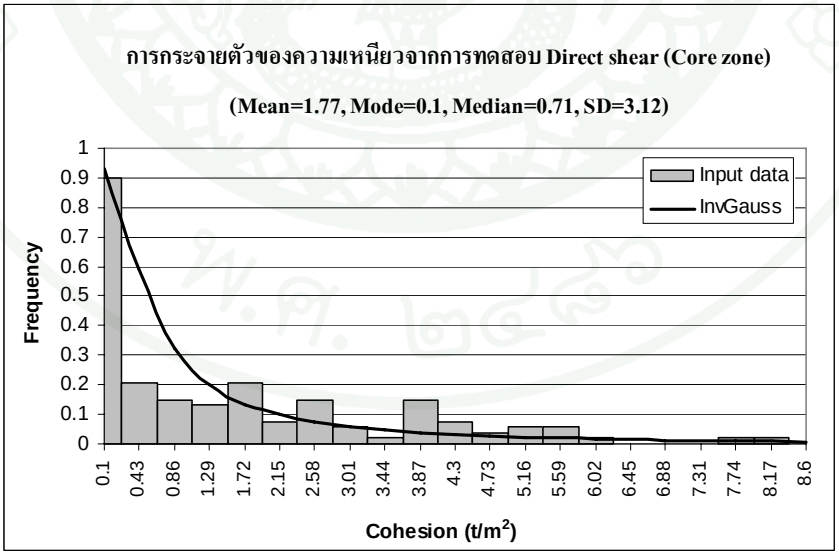
การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear ของ Homogeneous zone และ Core zone เป็นแบบ Inverse Gaussian มีลักษณะเบ้ขวา ดังภาพที่ 114 และภาพที่ 115 ในขณะเดียวกัน Shell zone ก็มีลักษณะเบ้ขวาในรูปแบบการกระจายตัวของ Beta General ดังภาพที่ 116 ซึ่งความเหนียวที่ได้จากการทดสอบนี้ความแปรปรวนในส่วนของดินตัวอย่างที่ไม่อิ่มตัว ทำให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีช่วงการกระจายตัวกว้าง ส่วนค่ามุมเสียดทานที่ได้จากการทดสอบเดียวกัน พบว่ามีการกระจายตัวแบบสมมาตร โดย Homogeneous zone และ Core zone มีการกระจายตัวแบบ Logistic ดังภาพที่ 117 และภาพที่ 118 และ Shell zone มีการกระจายตัวแบบ Normal ดังภาพที่ 119

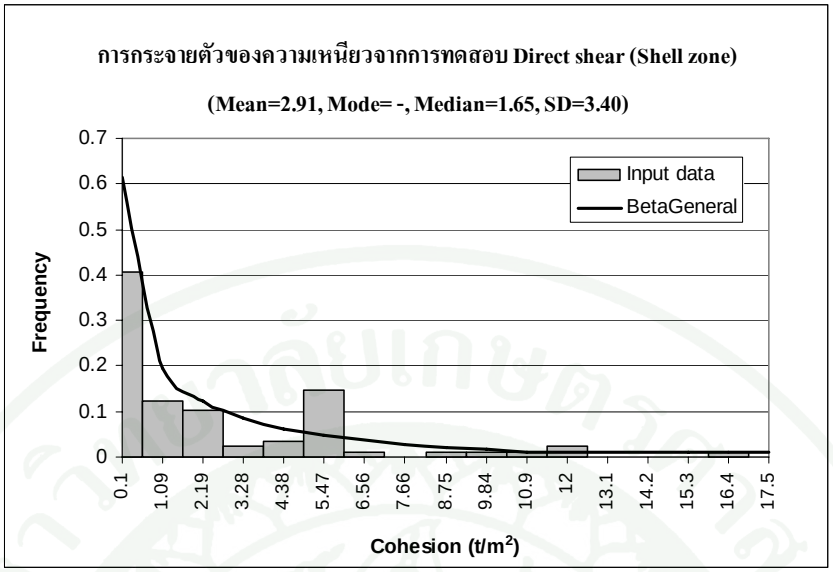


ภาพที่ 114 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Homogeneous zone)

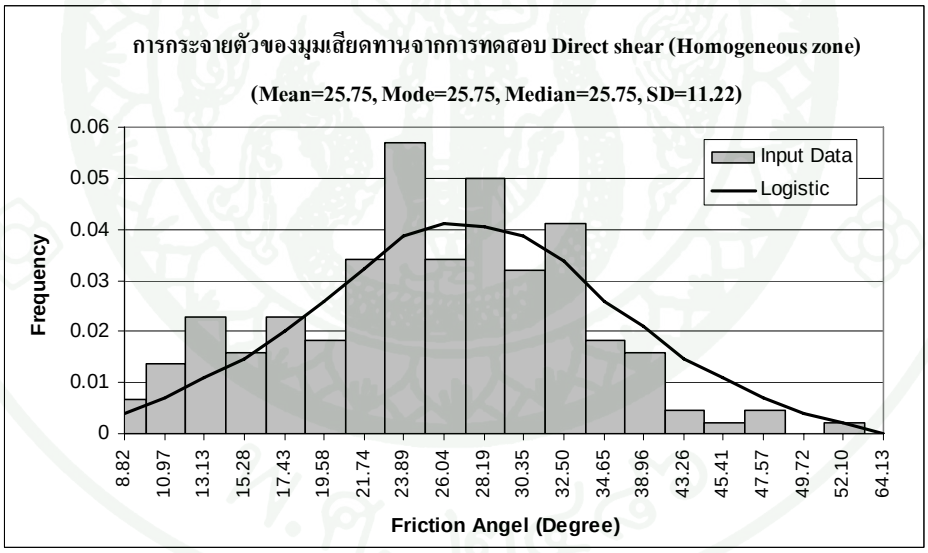


ภาพที่ 115 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Core zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

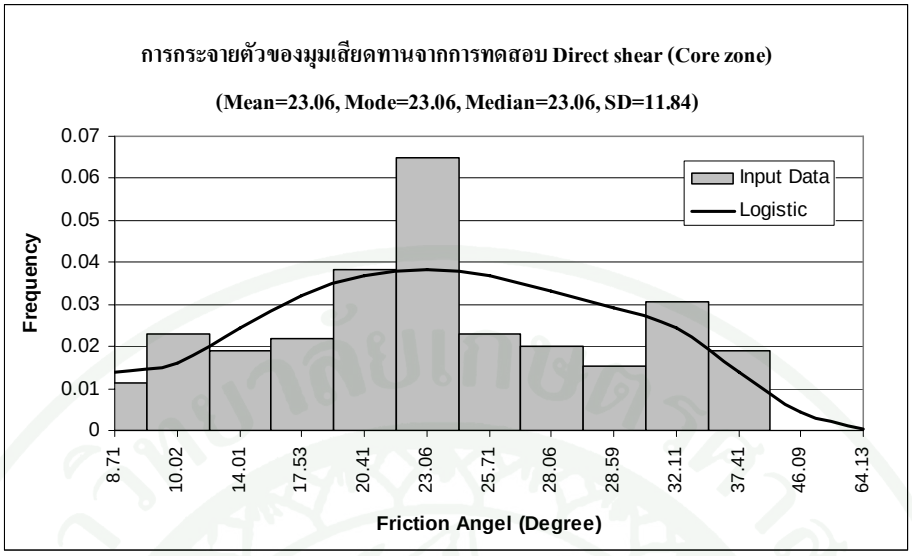


ภาพที่ 116 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Direct shear (Shell zone)

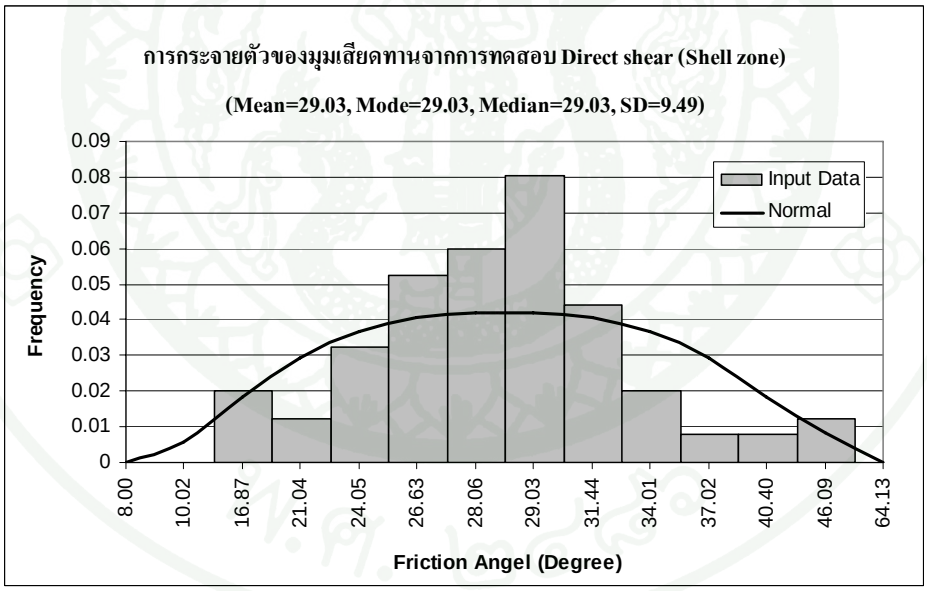


ภาพที่ 117 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Homogeneous zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



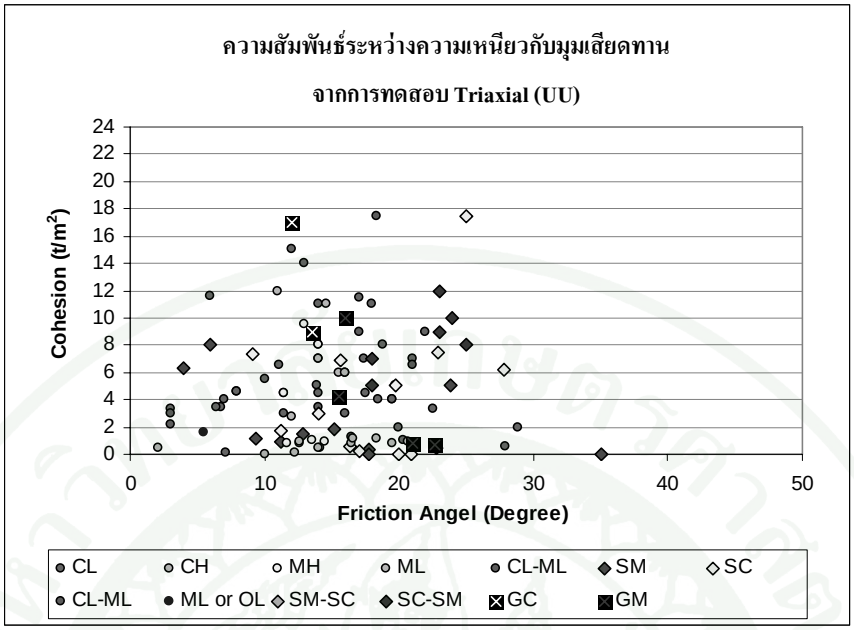
ภาพที่ 118 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Core zone)



ภาพที่ 119 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Direct shear (Shell zone)

การทดสอบ Triaxial แบบ Unconsolidated undrian (UU) มีการกระจายตัวของความเหนียวตั้งแต่ 0 ถึง 18 ตันต่อตารางเมตร ส่วนการกระจายตัวของมุมเสียดทานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 30 องศา แสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 120

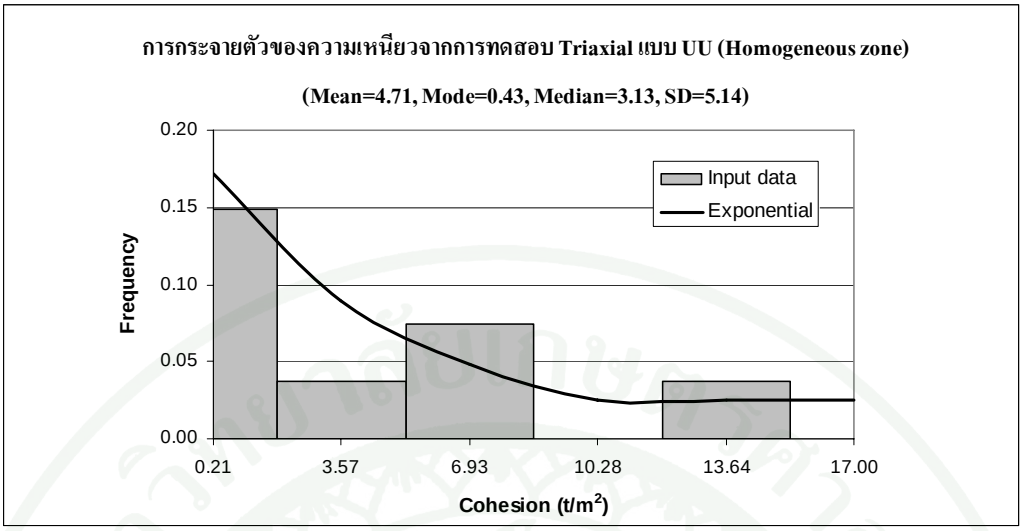
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



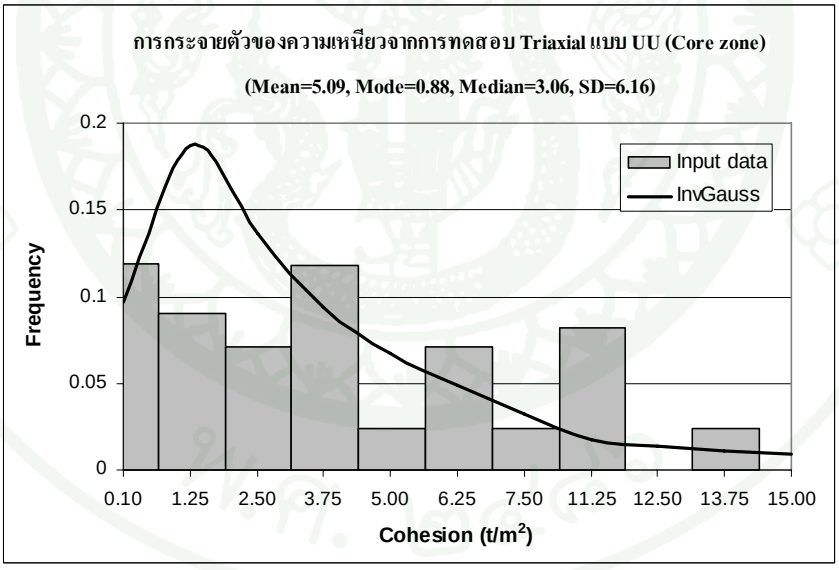
ภาพที่ 120 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial (UU)

องค์ประกอบ Homogeneous zone และ Shell zone ของการทดสอบ Triaxial แบบ Unconsolidated undrian (UU) มีการกระจายตัวแบบ Exponential ซึ่งเป็นรูปแบบการกระจายตัวที่แสดงความเบ้ขวาเนื่องจากความไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของดินตัวอย่าง ดังภาพที่ 121 และภาพที่ 122 ลักษณะเดียวกับ Core zone ที่มีการกระจายตัวแบบ Inverse Gaussian ดังภาพที่ 123 ส่วนมุมเสียดทานของ Homogeneous zone และ Shell zone มีการกระจายอย่างสมมาตร ในรูปแบบ Logistic ดังภาพที่ 124 และภาพที่ 125 และ Core zone มีการกระจายตัวแบบ Normal ดังภาพที่ 126 อย่างไรก็ตามความแปรปรวนของค่าความเหนียวและมุมเสียดทานยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

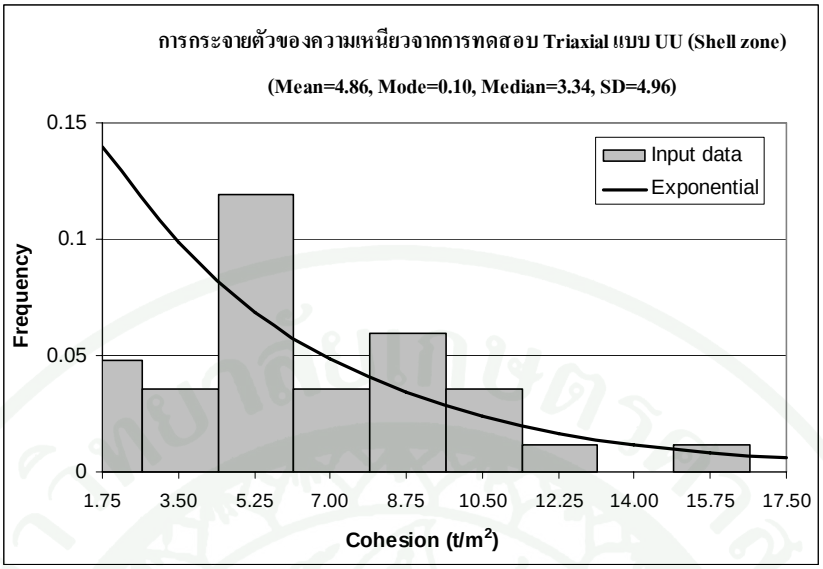


ภาพที่ 121 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Homogeneous zone)

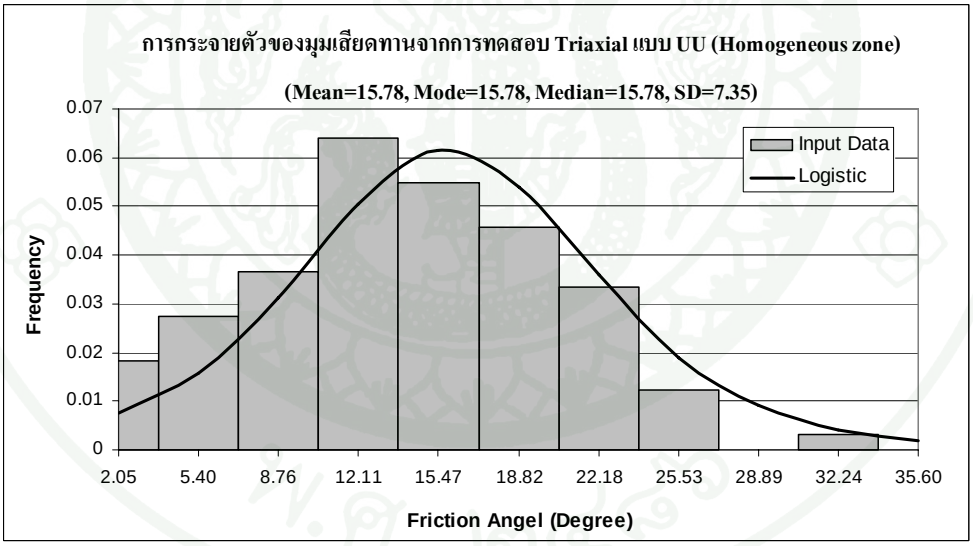


ภาพที่ 122 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Core zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

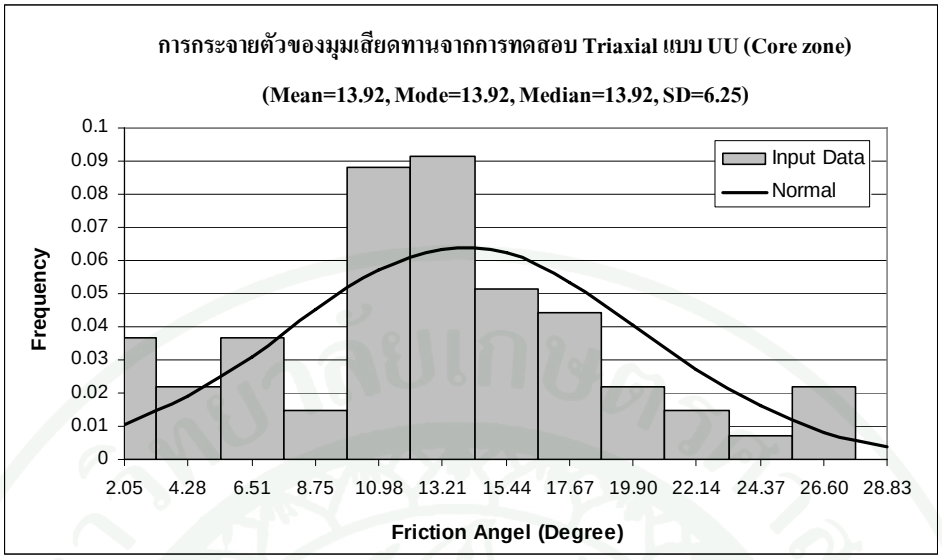


ภาพที่ 123 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Shell zone)

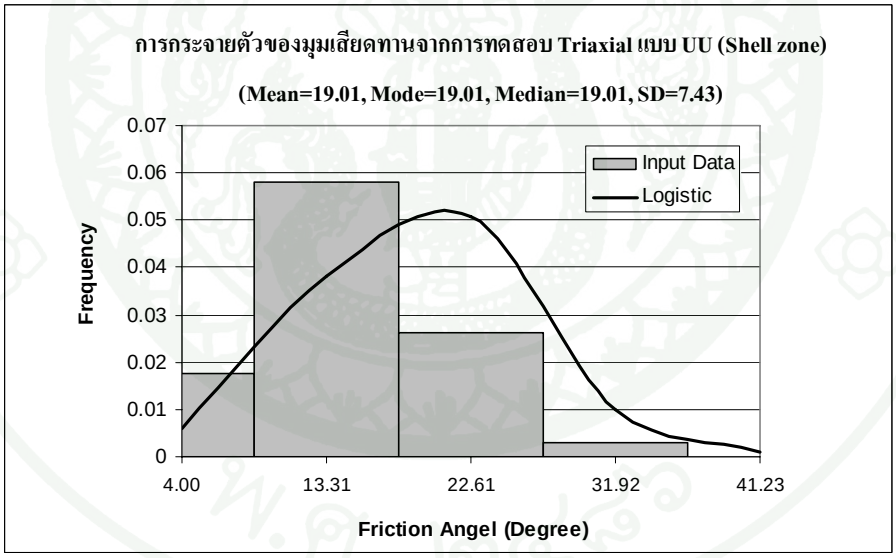


ภาพที่ 124 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Homogeneous zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



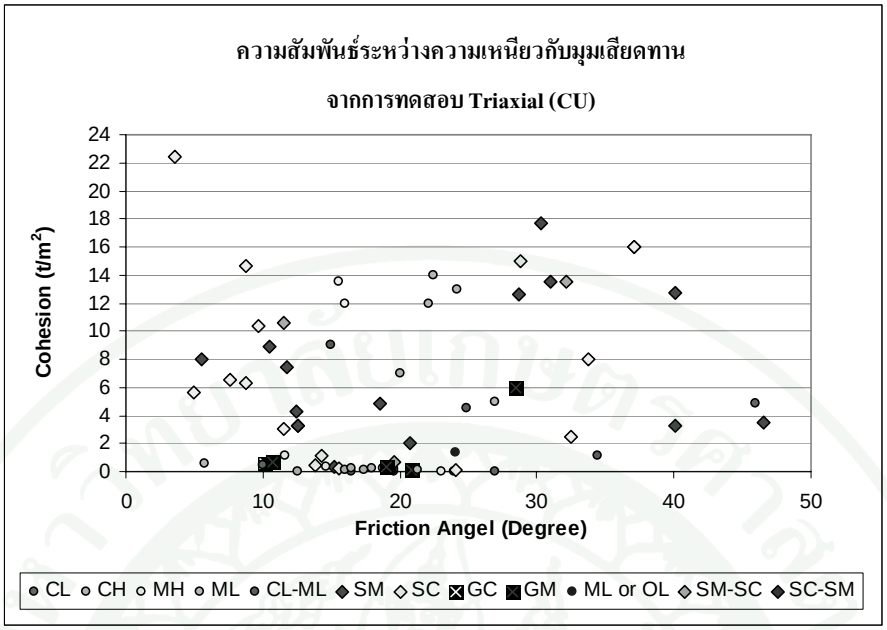
ภาพที่ 125 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Core zone)



ภาพที่ 126 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ UU (Shell zone)

การทดสอบ Triaxial แบบ Consolidated undrained ซึ่งไม่มีการวัดแรงดันน้ำ (CU) มีการกระจายตัวของความเหนียว และมุมเสียดทานมากที่สุด โดยค่าความเหนียวอยู่ในช่วง 0 ถึง 23 ตันต่อตารางเมตร และมุมเสียดทานอยู่ในช่วง 0 ถึง 50 องศา แสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 127

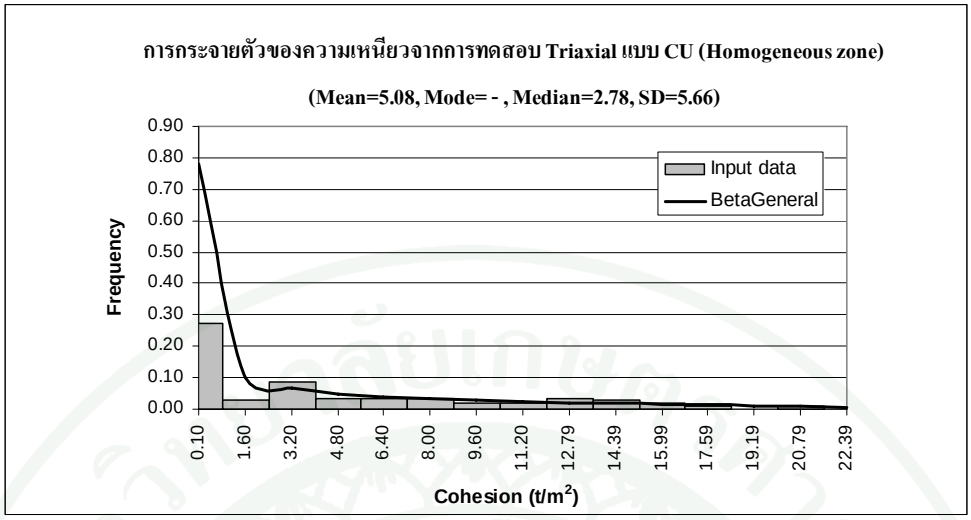
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



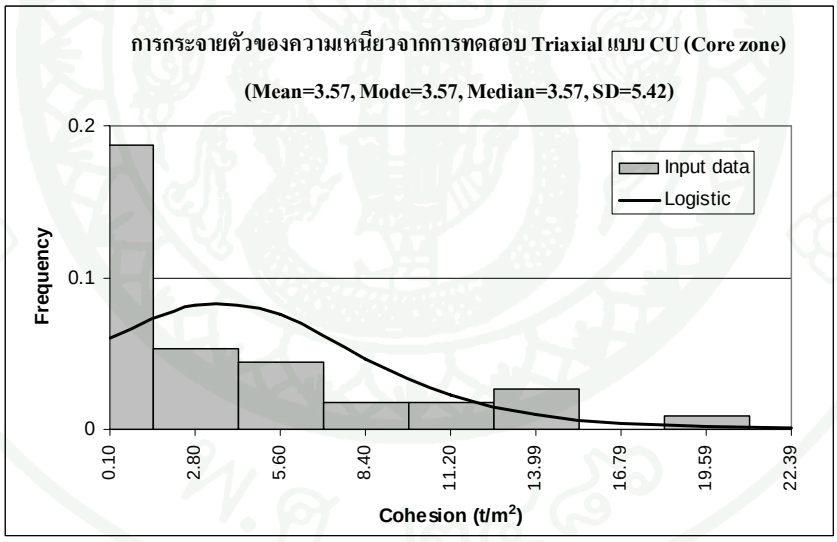
ภาพที่ 127 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial (CU)

องค์ประกอบ Homogeneous zone และ Shell zone ของการทดสอบ Triaxial แบบ Consolidated undrained ซึ่งไม่มีการวัดแรงดันน้ำ (CU) มีการกระจายตัวแบบ Beta general โดยเบ้ขวาอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 128 และภาพที่ 129 ในขณะที่ Core zone มีการกระจายตัวแบบ Logistic ดังภาพที่ 130 ซึ่งมีความเบ้น้อยกว่า ในขณะที่มุมเสียดทานของ Homogeneous zone และ Core zone มีการกระจายตัวในแบบ Gamma ดังภาพที่ 131 และภาพที่ 132 และ Shell zone มีการกระจายตัวแบบ Weibull ดังภาพที่ 133 ทั้งนี้รูปแบบการกระจายตัวของมุมเสียดทานของทุกองค์ประกอบเป็นแบบเบ้ขวาเล็กน้อย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

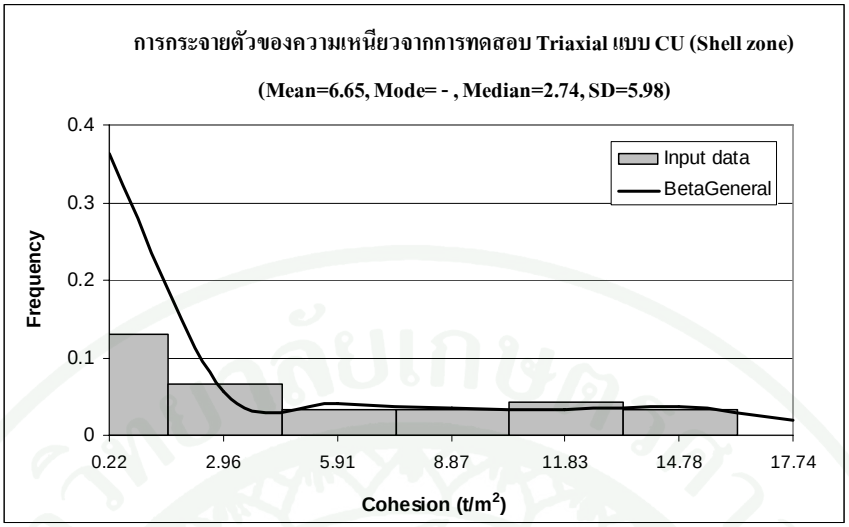


ภาพที่ 128 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Homogeneous zone)

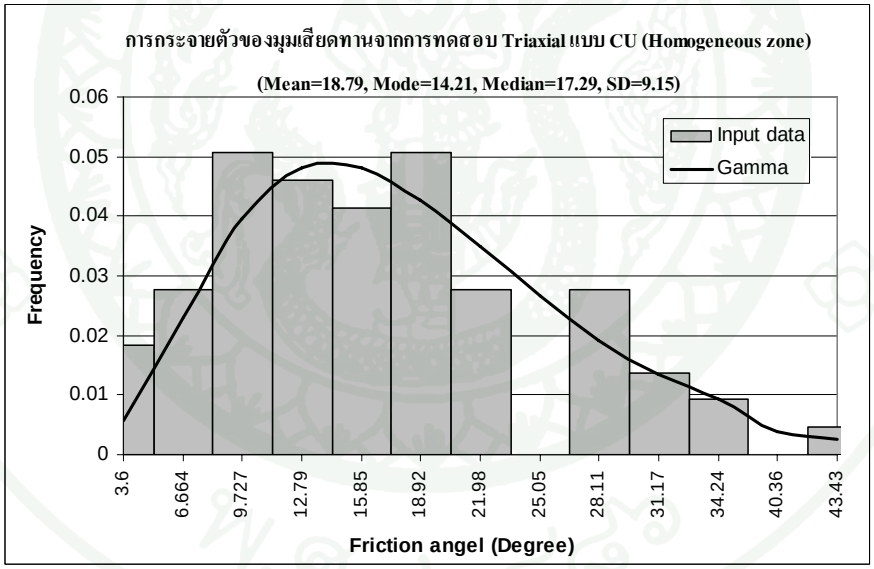


ภาพที่ 129 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Core zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

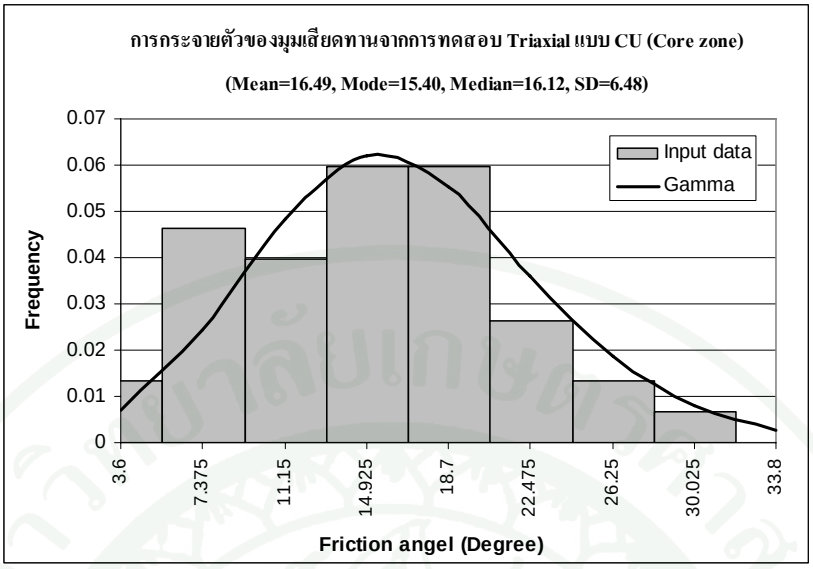


ภาพที่ 130 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Shell zone)

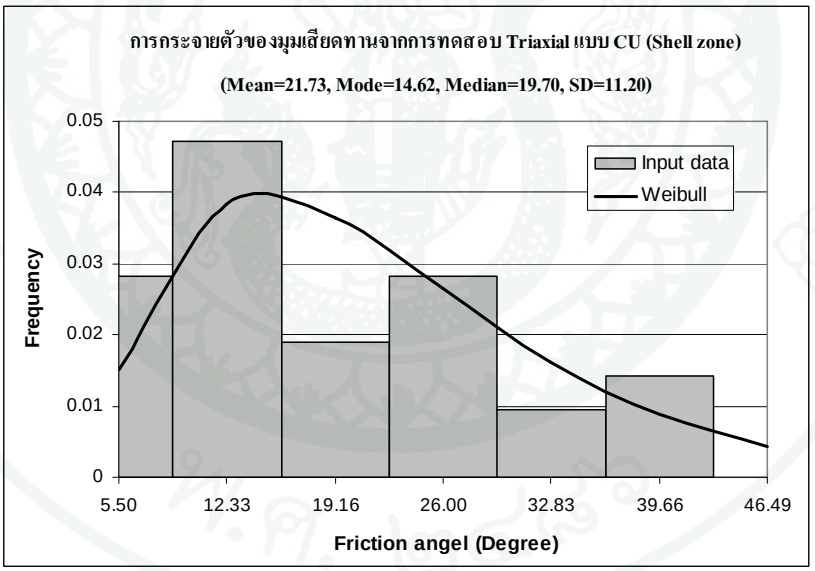


ภาพที่ 131 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Homogeneous zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



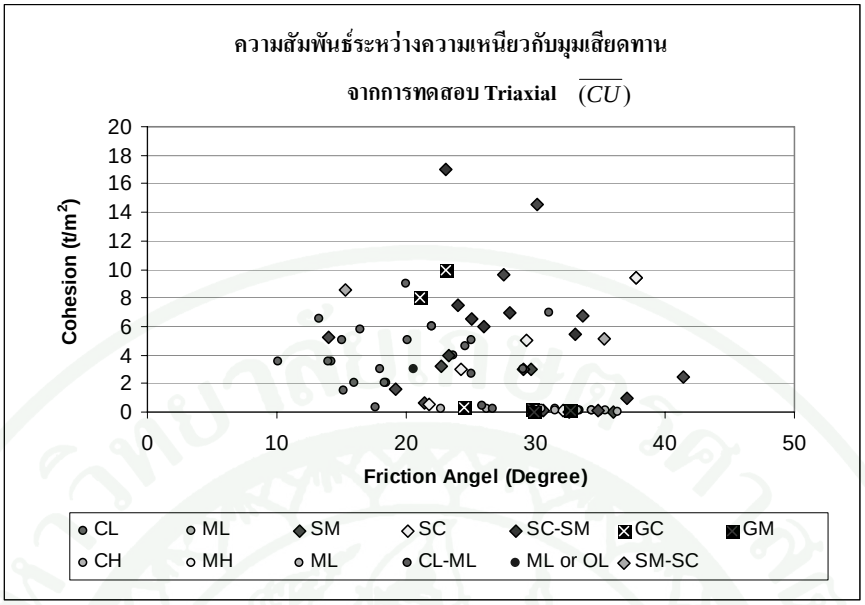
ภาพที่ 132 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Core zone)



ภาพที่ 133 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ CU (Shell zone)

เมื่อพิจารณาการทดสอบที่มีการวัดแรงดันน้ำ ($\overline{CU}$) มีการกระจายตัวของความเหนียวตั้งแต่ 0 ถึง 10 ตันต่อตารางเมตร ส่วนการกระจายตัวของมุมเสียดทานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 40 องศา แสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 134

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

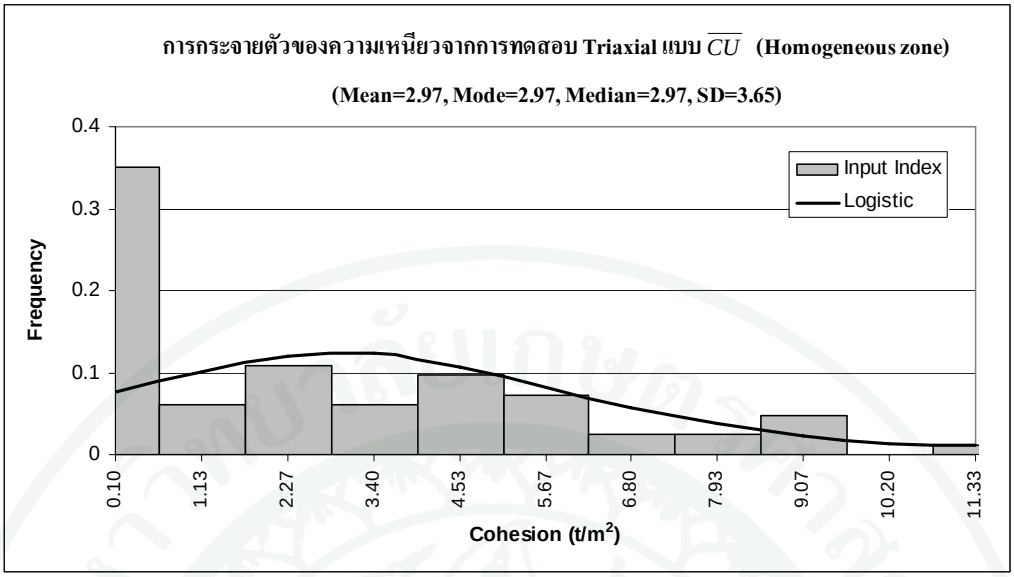


ภาพที่ 134 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับมุมเสียดทานของดินที่จำแนกตาม USCS จากการทดสอบ Triaxial ($\overline{CU}$)

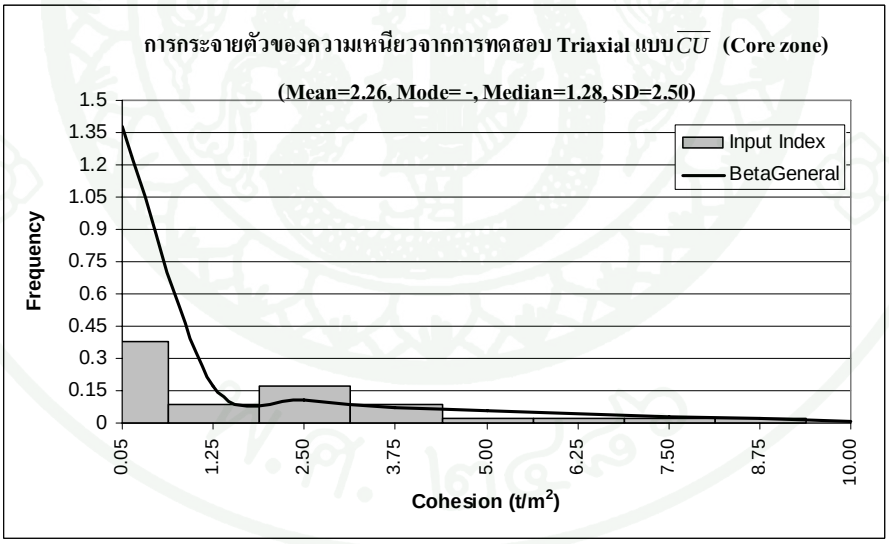
การทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ มีรูปแบบการกระจายตัวแตกต่างกันทั้งค่าความเหนียวและมุมเสียดทาน โดยองค์ประกอบ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีการกระจายตัวแบบ Logistic Beta general และ Normal ดังภาพที่ 135 ถึงภาพที่ 137 ในขณะที่มุมเสียดทานของ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีการกระจายตัวในแบบ Normal, Logistic และ Weibull ดังภาพที่ 138 ถึงภาพที่ 140

ตารางที่ 58 เป็นการสรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สัมพันธ์กับการกระจายตัวรูปแบบต่างๆ และเนื่องจากการกระจายตัวของค่าความเหนียวเป็นแบบเบ้ขวาทำให้เมื่อคำนวณค่าด้านน้อยออกมาเป็นค่าลบ จึงแนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของค่าด้านน้อย ทั้งนี้การทดสอบด้านกำลังของดินที่ใช้ในงานวิจัยมีจำนวนตัวอย่างน้อย โดยเฉพาะการทดสอบ $\overline{CU}$ ทำให้ผลการวิจัยที่ได้มีความแปรปรวนในด้านรูปแบบของการกระจายตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

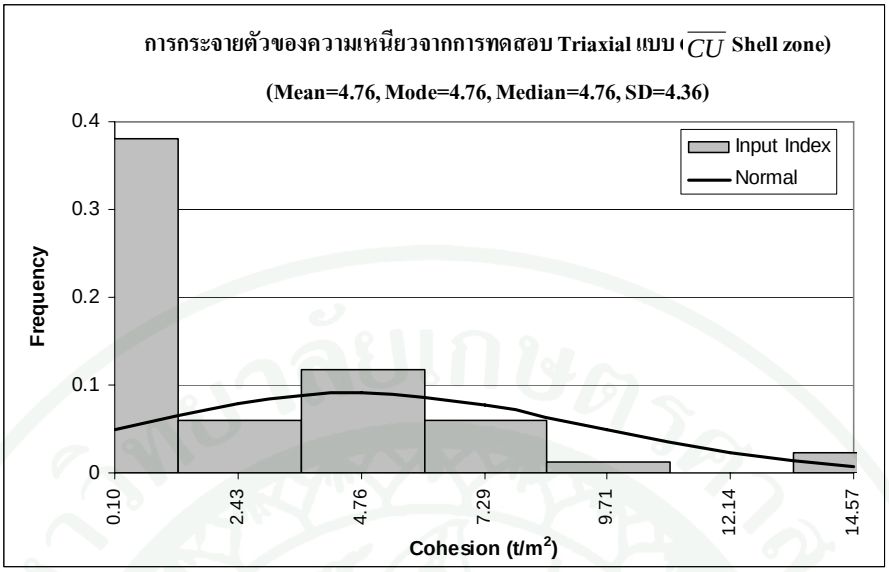


ภาพที่ 135 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Homogeneous zone)

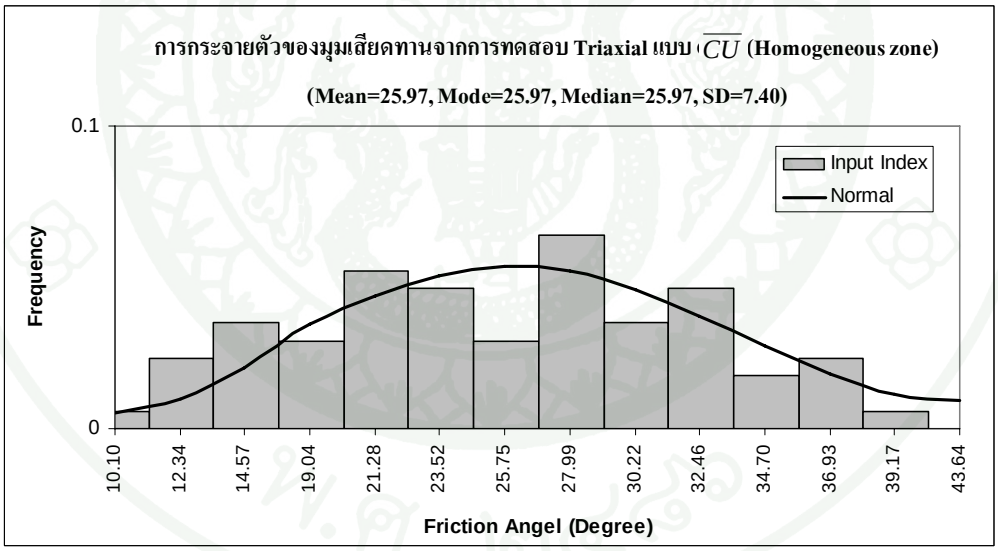


ภาพที่ 136 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Core zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

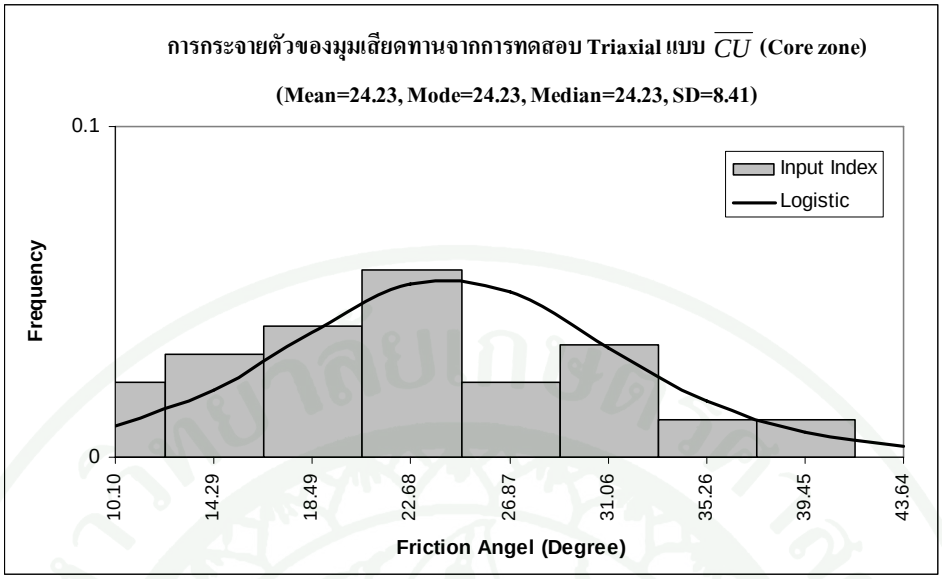


ภาพที่ 137 การกระจายตัวของความเหนียวจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Shell zone)

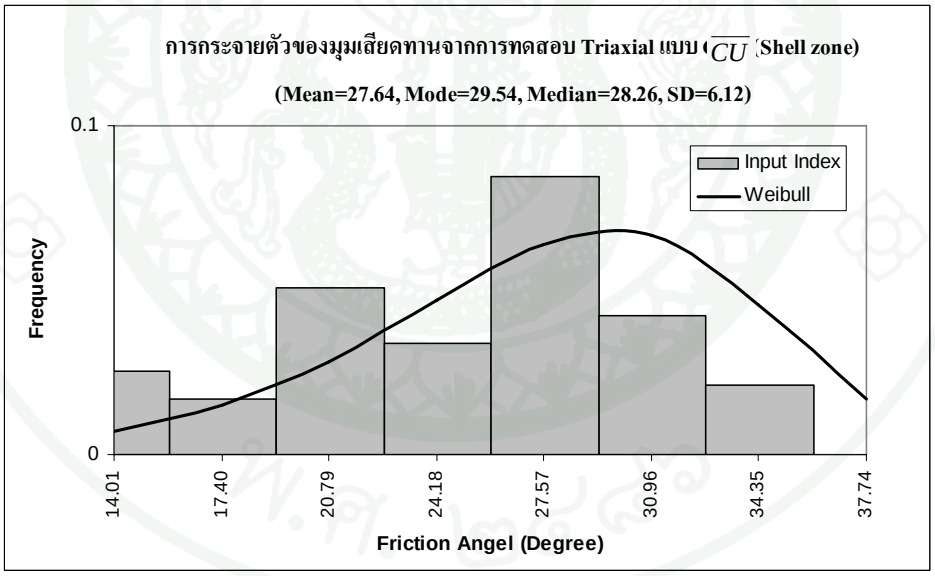


ภาพที่ 138 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Homogeneous zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 139 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Core zone)



ภาพที่ 140 การกระจายตัวของมุมเสียดทานจากการทดสอบ Triaxial แบบ $\overline{CU}$ (Shell zone)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 58 สรุปค่าพารามิเตอร์ด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์

No	Component	Value List	Direct Shear (CU)		Triaxial (UU)		Triaxial ($\overline{CU}$)			
			C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C'(t/m^2)	ϕ' (Degree)
1	Homogeneous	Average of all values	2.22	25.75	4.71	15.78	5.08	18.79	2.97	25.97
		Standard deviation	4.06	11.22	5.14	7.35	5.66	9.15	3.65	7.40
		Minimum value	หาค่าไม่ได้	14.53	หาค่าไม่ได้	8.43	หาค่าไม่ได้	9.64	หาค่าไม่ได้	18.57
		Maximum value	6.28	36.97	9.85	23.13	10.74	27.94	6.62	33.37
		%COV	120.72	44.46	89.48	52.07	110.37	48.80	108.43	28.49
		Total number of tests	205	204	116	98	71	71	73	77
		Curve fitting	Inverse gauss	Logistic	Exponential	Logistic	Beta General	Gamma	Logistic	Normal
2	Core	Average of all values	1.77	23.06	5.09	13.92	3.57	16.49	2.26	24.23
		Standard deviation	3.12	11.84	6.16	6.25	5.42	6.48	2.50	8.41
		Minimum value	หาค่าไม่ได้	11.22	หาค่าไม่ได้	7.67	หาค่าไม่ได้	10.01	หาค่าไม่ได้	15.82
		Maximum value	4.89	34.9	11.25	20.17	8.99	22.97	4.76	32.64
		%COV	108.47	50.81	93.32	44.90	125.39	39.75	113.00	32.68
		Total number of tests	124	123	68	61	40	40	38	42
		Curve fitting	Inverse gauss	Logistic	Inverse gauss	Normal	Logistic	Gamma	Beta General	Logistic
3	Shell	Average of all values	2.91	29.03	4.86	19.01	6.65	21.73	4.76	21.64
		Standard deviation	3.4	9.49	4.96	7.43	5.98	11.20	4.36	6.12
		Minimum value	หาค่าไม่ได้	19.54	หาค่าไม่ได้	11.58	0.67	10.53	0.40	15.52
		Maximum value	6.31	38.52	9.82	26.44	12.63	32.93	9.12	27.76
		%COV	118.56	32.69	87.90	50.98	95.44	51.17	91.81	22.81
		Total number of tests	81	81	48	37	31	31	35	35
		Curve fitting	Beta General	Normal	Exponential	Logistic	Beta General	Weibull	Normal	Weibull

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังนั้นจากกราฟการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆได้แก่ สัมประสิทธิ์การไหลซึม อัตราส่วนช่องว่าง และดัชนีความเหนียวมีการกระจายตัวไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนหน่วยน้ำหนักมีการกระจายตัวของ Shell zone แตกต่างจาก Homogeneous zone และ Core zone ความถ่วงจำเพาะมีการกระจายตัวของ Homogeneous zone แตกต่างจาก Core zone และ Shell zone ทั้งนี้รูปแบบการกระจายตัวของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานมีความใกล้เคียงกันมาก โดยผลการวิเคราะห์ได้เลือกรูปแบบการกระจายตัวที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุดมาสร้างกราฟ นอกจากนี้การกระจายตัวของคุณสมบัติด้านวิศวกรรมที่ประกอบด้วย ความเหนียวและมุมเสียดทานของดิน จากการทดสอบ Direct shear และการทดสอบ Triaxial ดังได้กล่าวมาข้างต้น ผลการกระจายตัวของความเหนียวส่วนใหญ่เป็นชนิดเบ้ขวา เนื่องจากมีค่าส่วนใหญ่เข้าใกล้ศูนย์ โดยเฉพาะการทดสอบ Direct shear ซึ่งมีการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำได้ไม่ดีพอ อาจมีส่วนให้วัดค่าความเหนียวได้น้อย ยกเว้นการทดสอบแบบ $\overline{CU}$ ที่ค่าความเหนียวมีการกระจายตัวแบบ Normal ซึ่งเมื่อพิจารณาด้วยสายตาแล้วพบว่าความถี่มีแนวโน้มเบ้ขวา แต่จากจำนวนตัวอย่างมีน้อยจึงทำให้ผลไม่ชัดเจน เนื่องจากการทดสอบนี้ทำได้ยากทั้งปัจจัยด้านงบประมาณ บุคคลากรและความพร้อมของเครื่องมือทดสอบ ส่วนมุมเสียดทานมีการกระจายตัวแบบสมมาตร

ค่าความแปรปรวนของข้อมูลดินสามารถดูได้จากค่า Coefficient of variation (COV) ในแต่ละองค์ประกอบได้แก่ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone ซึ่งในที่นี้จะเปรียบเทียบค่า COV ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับค่า COV ที่มีผู้ศึกษาไว้ เริ่มจากความถ่วงจำเพาะที่ COV มีค่า 2.25% 1.87%, 2.25% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ Nwaiwu *et al.* (2005) ซึ่งศึกษา COV ของดินในประเทศไนจีเรียพบว่ามีค่าประมาณ 2.74% เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเหนียวในงานวิจัยมี COV สูงถึง 48.25%, 45.13% และ 53.49% Nwaiwu *et al.* (2005) ได้ศึกษาพบอีกเช่นกันว่าค่าดัชนีความเหนียวของดินมี COV ประมาณ 48.53% จากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วนช่องว่างซึ่งมีค่า COV คือ 26.42%, 22.00% และ 29.31% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ Kulhawy (1991) ศึกษาได้ 30.3% และหน่วยน้ำหนักซึ่งมีค่า COV 5.34%, 4.33% และ 6.5% เปรียบเทียบกับที่ Hammitt (1966) เคยศึกษาว่าหน่วยน้ำหนักมี COV ประมาณ 3% โดยการเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆสรุปได้ดังตารางที่ 59 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินพบว่าไม่มีผู้ศึกษาละเอียดถึงค่า COV ของวิธีการทดสอบที่ได้มา โดยรวมแล้ว Kulhawy (1991) พบว่ามีค่าความเหนียวและมุมเสียดทานมี COV เท่ากับ 57.36% และ 17.57% ซึ่งจากคุณสมบัติที่วิเคราะห์ได้ก็พบว่าค่าความเหนียวมีความแปรปรวนมากกว่ามุมเสียดทานประมาณ 3-4 เท่า แต่ในงานวิจัยนี้แบ่งชนิดดินตามองค์ประกอบ ดินหลายชนิดที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างกันทั้งด้าน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การยึดเกาะและมุมเสียดทาน ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกัน อาจเป็นสาเหตุทำให้มีค่าความแปรปรวนสูง โดยการเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ สรุปได้ดังตารางที่ 60

ตารางที่ 59 การเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

Soil parameters	%COV ที่ได้ในงานวิจัย			%COV จากงานวิจัยอื่น
	$H^{(1)}$	$C^{(2)}$	$S^{(3)}$	
Specific gravity	2.25%	1.87%	2.25%	2.74% (Nwaiwu et al, 2005)
Plasticity index	48.25%	45.13%	53.49%	48.53% (Nwaiwu et al, 2005)
Void ratio	26.42%	22.00%	29.31%	30.30% (Kulhawy, 1991)
Unit weight	5.34%	4.33%	6.50%	3% (Hammitt, 1966)

หมายเหตุ (1) Homogeneous zone

(2) Core zone

(3) Shell zone

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 60 การเปรียบเทียบค่า COV ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

Soil parameters		%COV ที่ได้ในงานวิจัย			%COV จากงานวิจัยอื่น
		$H^{(1)}$	$C^{(2)}$	$S^{(3)}$	
Cohesion	Direct shear test	120.72%	108.47%	118.56%	57.36% (Kulhawy, 1991)
	Triaxial: UU	89.48%	93.32%	87.90%	
	Triaxial: CU	110.37%	125.39%	95.44%	
	Triaxial: $\overline{CU}$	108.43%	113.00%	91.81%	
Friction angel	Direct shear test	44.46%	50.81%	32.69%	17.57% (Kulhawy, 1991)
	Triaxial: UU	52.07%	44.90%	50.98%	
	Triaxial: CU	48.80%	39.75%	51.17%	
	Triaxial: $\overline{CU}$	28.49%	32.68%	22.81%	

หมายเหตุ (1) Homogeneous zone

(2) Core zone

(3) Shell zone

อนึ่งการวิเคราะห์นี้ได้ใช้ค่าจากการรวบรวมข้อมูลมาจากบ่อยืมดิน จำนวน 37 โครงการ ดังตารางผนวกที่ ค1 เท่านั้น

ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุทางพลศาสตร์โดยใช้สมการเชิงประสบการณ์

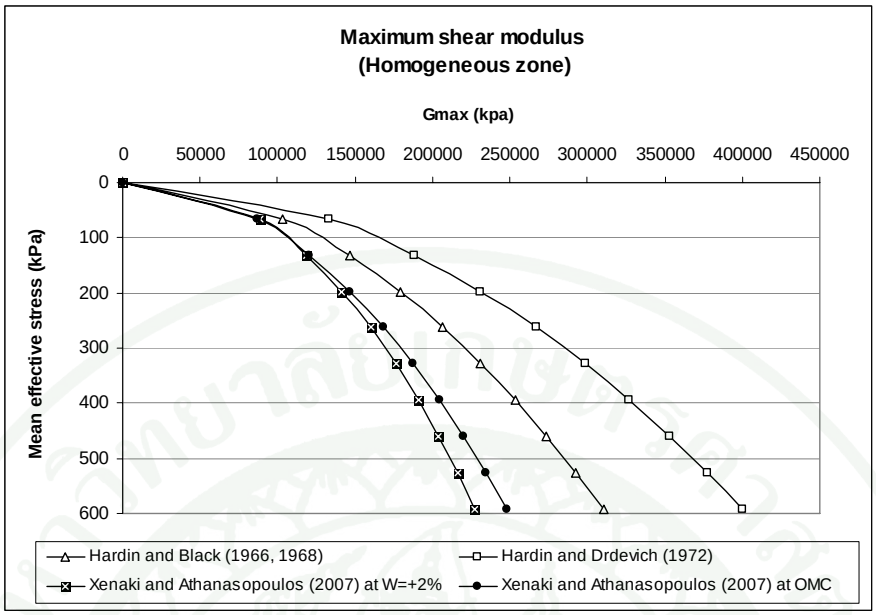
คุณสมบัติของวัสดุทางพลศาสตร์ ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ประกอบด้วย โมดูลัสเฉือนสูงสุด อัตราส่วนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งโมดูลัสเฉือนสูงสุดได้จากคุณสมบัติขั้นพื้นฐานจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ผ่านมา นำค่ามาคำนวณในสมการที่เหมาะสมกับดินเหนียวดังตารางที่ 40 ได้แก่สมการของ Hardin and Black (1966, 1968) Hardin and Drnevich (1972) และสมการของ Xenaki and Athanasopoulos (2007) ที่ใช้กับดินที่มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดและดินที่มีการบดอัดทางด้านเปียก +2% จาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

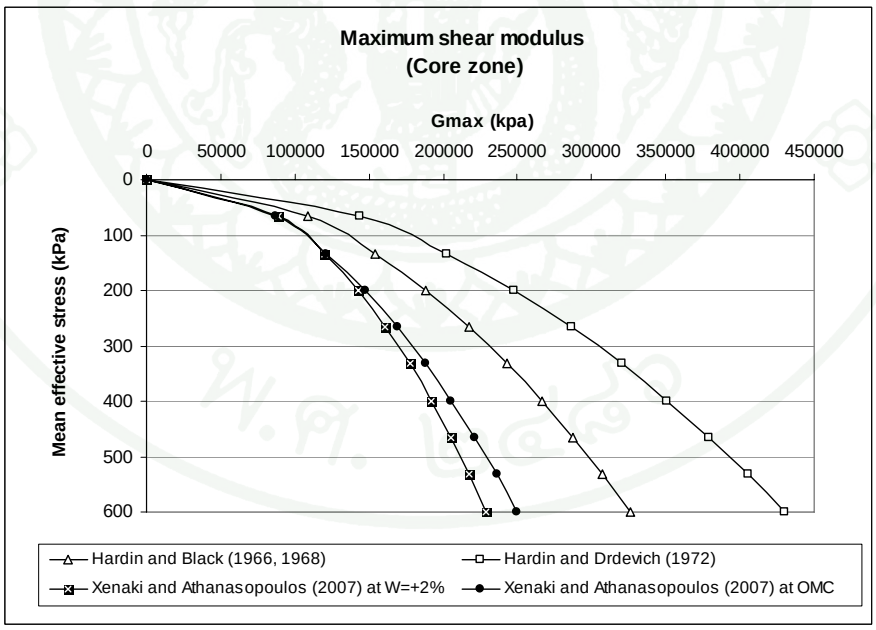
OMC นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนสูงสุดกับค่าความเครียดประสิทธิผลเฉลี่ยขององค์ประกอบต่างๆโดยใช้ค่าจากตารางที่ 57 ได้ผลดังภาพที่ 141 ถึงภาพที่ 143 พบว่าไม่ว่าจะเป็น Homogeneous zone Core zone หรือ Shell zone สมการของ Hardin and Drnevich (1972) จะมีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดมากที่สุดแปรผันตามความลึก ในขณะที่ Hardin and Black (1966, 1968) มีค่าสูงรองลงมา ส่วน Xenaki and Athanasopoulos (2007) +2% จาก OMC มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสมการของ Xenaki and Athanasopoulos (2007) ขึ้นอยู่กับตัวแปร σ'_m เพียงค่าเดียว ในขณะที่ Hardin and Black (1966, 1968) ใช้ความสัมพันธ์ของ Void ratio ร่วมกับ σ'_m จากนั้น Hardin and Drnevich (1972) ยังพบว่านอกจากสองตัวแปรดังกล่าวแล้ว ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับโมดูลัสเฉือนที่สำคัญยังมีค่า PI และ OCR ดังนั้นในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์จึงเลือกใช้สมการของ Hardin and Drnevich (1972) เป็นหลัก

เมื่อพิจารณาตามองค์ประกอบเขื่อนต่างๆ พบว่า Core zone มีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบที่ σ'_m เดียวกัน และ Shell zone มีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดต่ำกว่า Homogeneous zone เล็กน้อย ทั้งนี้ในแง่ของคุณสมบัติของดิน Shell zone ประกอบด้วยดินที่มี Void ratio สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากเป็นส่วนที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้าง นอกจากนี้หน่วยน้ำหนักของดินยังมีค่าน้อยกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ในความเป็นจริง ส่วนของ Core zone คัดเลือกจากดิน GC, SC, CL ซึ่งเป็นดินที่บดอัดให้มีความทึบน้ำ ทำให้ Void ratio มีค่าต่ำลง คาดว่าเป็นผลให้ σ'_m สูง เนื่องจากมี σ_2 และ σ_3 สูง เมื่อเขื่อนดินถมแบ่งส่วนอยู่ในระยะใช้งานและมีการยุบตัวตามเวลา ยิ่งจะทำให้องค์ประกอบส่วนนี้มีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

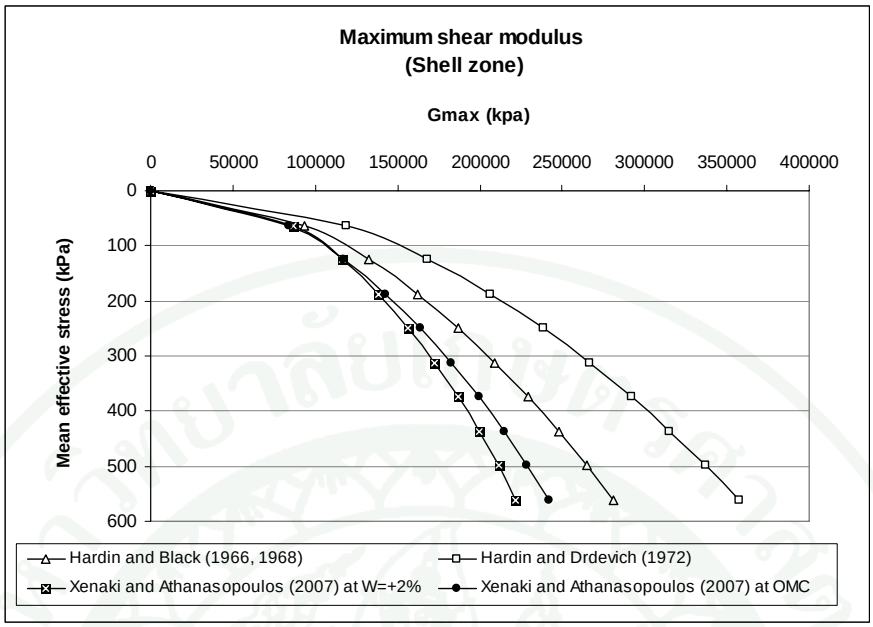


ภาพที่ 141 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ



ภาพที่ 142 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ

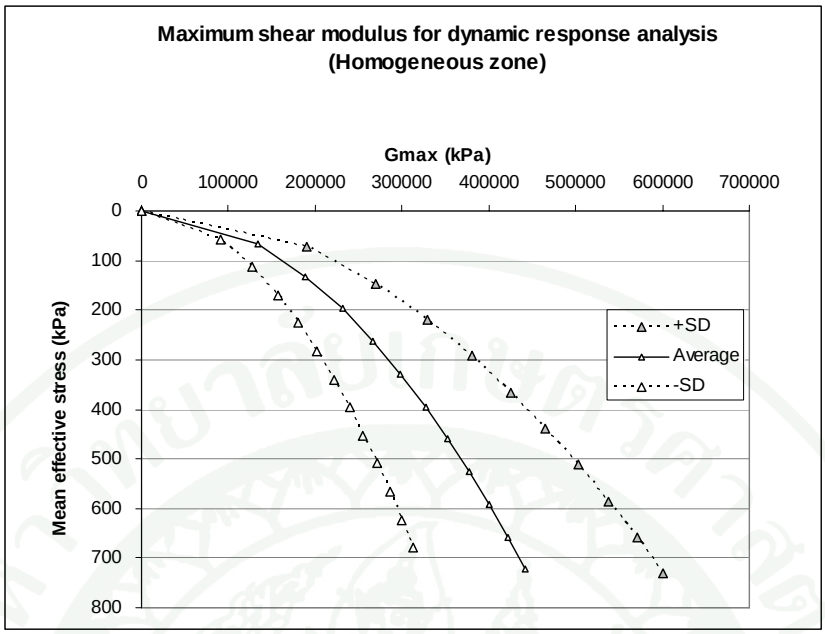
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



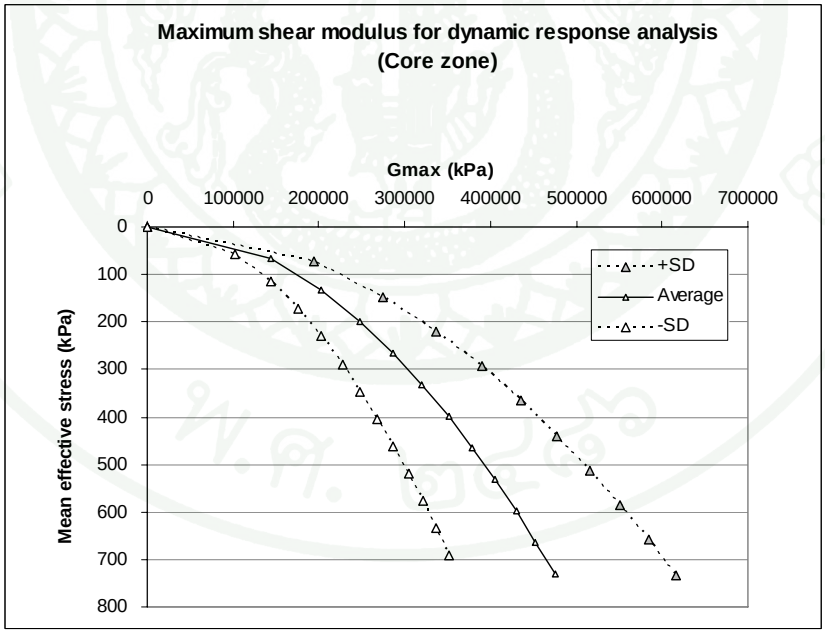
ภาพที่ 143 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ

ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ จะใช้ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดตามสมการของ Hardin and Drnevich (1972) โดยเลือกวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ โดยกราฟความสัมพันธ์ของโมดูลัสเฉือนสูงสุดทั้งค่า Mean, Mean-SD และ Mean+SD แสดงดังภาพที่ 144 ถึงภาพที่ 146

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

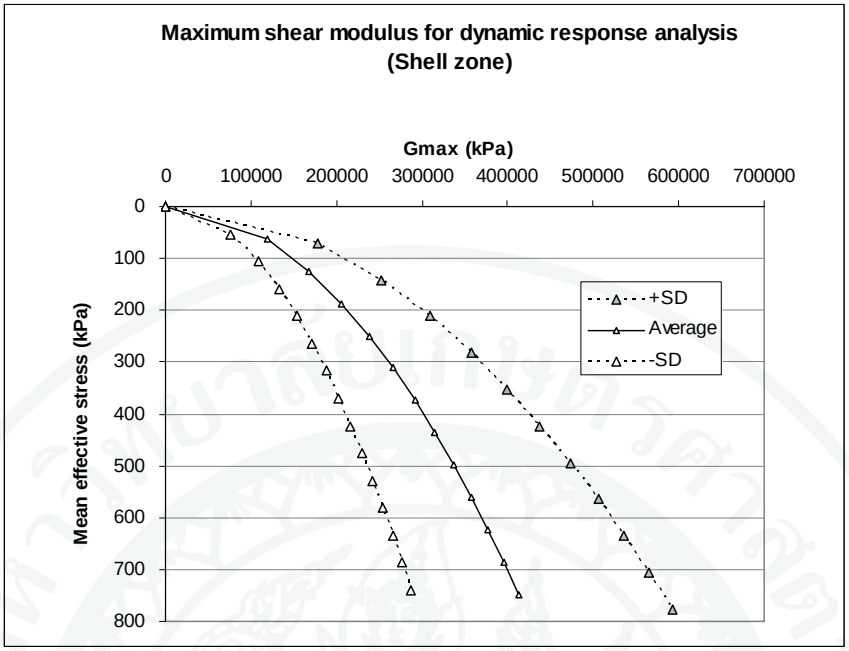


ภาพที่ 144 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone



ภาพที่ 145 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 146 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone

นอกจากความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะสามารถจำแนกความแข็งของดินได้แล้ว ในด้านพลศาสตร์ยังสามารถนำคลื่นแรงเฉือนไปแปลงเป็นโมดูลัสเฉือน เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีได้ด้วย โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากสมการการทดลองที่แปลงมาจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดในแต่ละองค์ประกอบเทียบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณมาจากผลการตอกทดลอง (Standard penetration test, SPT) และความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบในสนามโดยวิธี Spectral analysis of surface wave (SASW) เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของผลที่ได้กับค่าจริงในสนาม ซึ่งผลการวิจัยส่วนนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

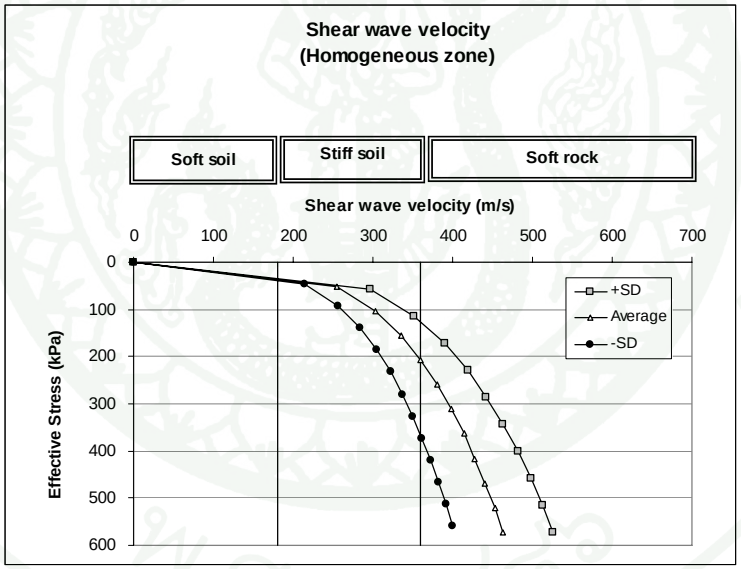
ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากสมการเชิงประสบการณ์

ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในผลการวิจัยนี้มาจากค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่ได้จากสมการของ Hardin and Drnevich (1972) โดยนำเสนอเป็นช่วงคลื่นแรงเฉือนที่ใช้จำแนกความแข็งของดินตามมาตรฐาน NEHRP (2000) กำหนดให้ดินที่มีความเร็วคลื่นแรงเฉือนน้อยกว่า 180 m/s เป็น Soft soil ส่วนดินที่มีความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่าง 180-360 m/s เป็น Stiff soil และดินที่มีความเร็วคลื่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

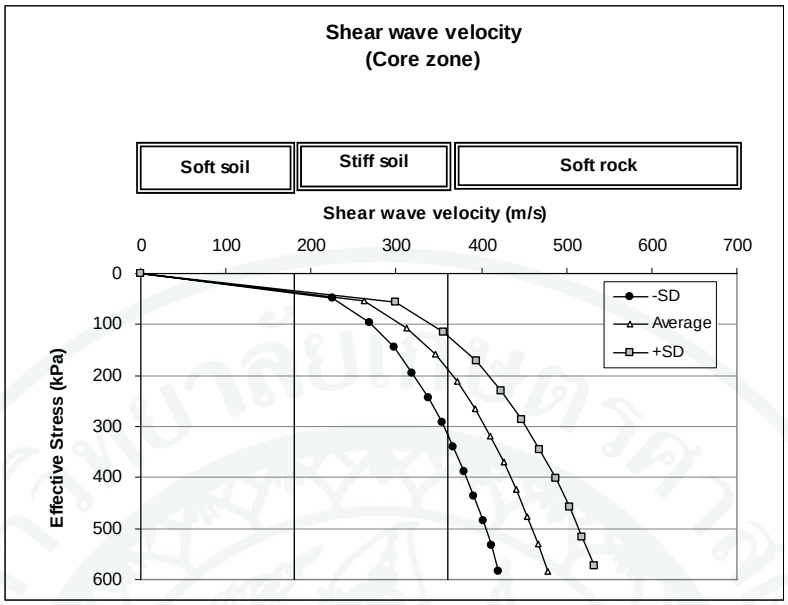
แรงเฉือนระหว่าง 360-760 m/s เป็น Very dense soil หรือ Soft rock ดังตารางที่ 27 ผลการวิจัยแบ่งตามองค์ประกอบของเขื่อนดังต่อไปนี้

ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone ที่แปลงมาจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดแสดงดังภาพที่ 147 ถึงภาพที่ 149 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จะเห็นว่าช่วงความเครียดประสิทธิผล 100 kPa หรือช่วงความลึกประมาณ 10-15 เมตรแรก คลื่นแรงเฉือนมีค่าประมาณ 200-350 m/s เป็นช่วงของ Stiff clay ซึ่ง ดินมีการทรุดตัวมากจนช่องว่างเหลือน้อยลงและมีความเชื่อมแน่นกันมากขึ้น และช่วงความเครียดประสิทธิผลที่มากกว่า 400 kPa ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีค่าเกิน 360 m/s ซึ่งมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ของ Soft rock โดย Core zone จะมีความเร็วคลื่นแรงเฉือนสูงกว่า Homogeneous zone เล็กน้อย ส่วน Shell zone มีความเร็วคลื่นแรงเฉือนต่ำที่สุด แต่ยังอยู่ในช่วง Stiff clay ถึง Soft rock

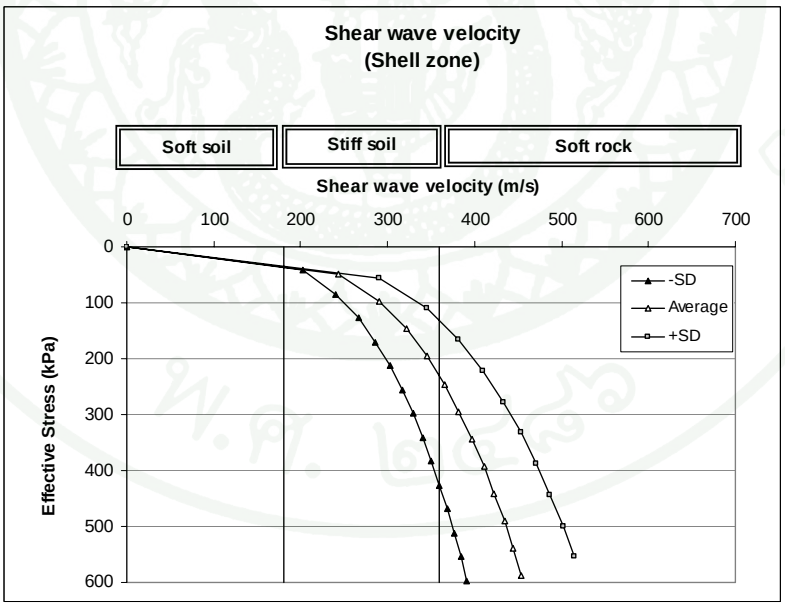


ภาพที่ 147 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Homogeneous zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 148 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Core zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)



ภาพที่ 149 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Shell zone คำนวณจากโมดูลัสเฉือนสูงสุดของสมการ Hardin and Drnevich (1972)

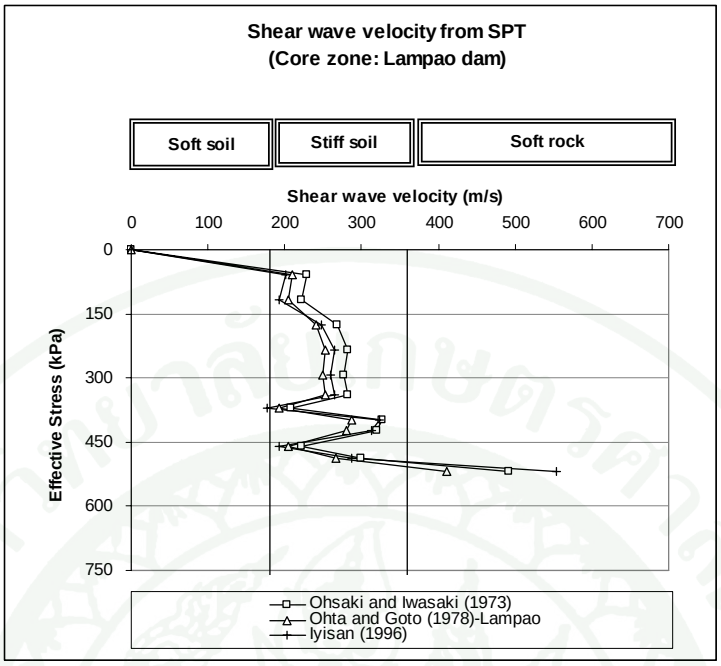
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณจากการตอกทดลอง

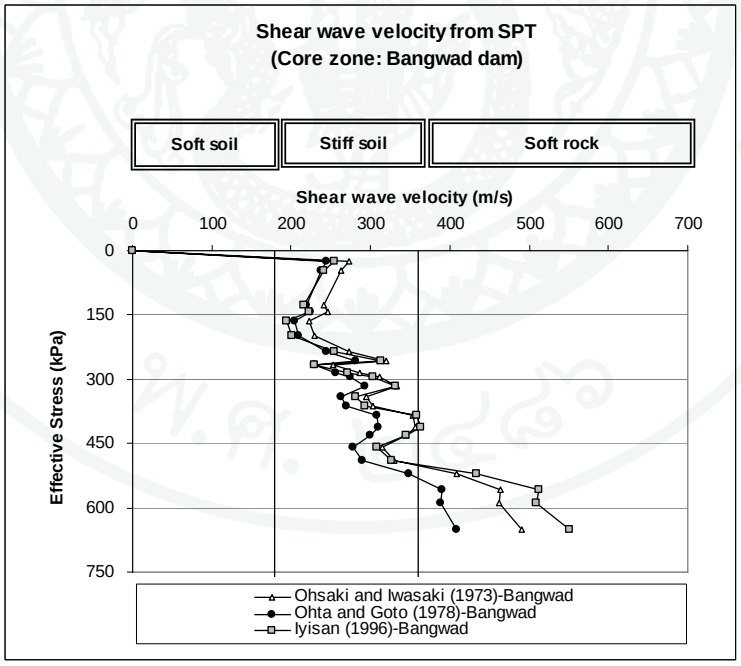
คลื่นแรงเฉือนมีความสัมพันธ์กับค่าการตอกทดลอง (Standard penetration test, SPT) ดังที่ได้กล่าวมา ผลการวิจัยนี้ได้จากสมการความสัมพันธ์ที่ใช้หาคลื่นแรงเฉือนแสดงดังตารางที่ 39 โดยใช้ค่า SPT จาก เขื่อนแก่งกระจาน เขื่อนบางวาด เขื่อนลำปาว ซึ่งค่า SPT สามารถเป็นตัวแทนของวัสดุบดอัดของ Core zone และ Shell zone ได้ ในขณะที่เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Dike 4) ของเขื่อนสิริกิติ์ สามารถเป็นตัวแทนของวัสดุบดอัด Homogeneous zone ได้ โดยค่าความเค้นสถิตย์ได้จากการคำนวณโดยกำหนดหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 19.62 kPa โดยใช้ระดับน้ำตามภาคผนวก ง ซึ่งจะเห็นว่าในความเป็นจริงทั้งการทดสอบโดยการตอกทดลองและความแข็งของชั้นดินแต่ละชั้นจะมีความแปรปรวนอยู่บ้างตามความลึก จากผลการวิจัยของ Core zone แสดงดังภาพที่ 150 ถึงภาพที่ 152 จะเห็นว่าค่าอยู่ในช่วงของ Stiff soil และเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Core zone ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัย ดังภาพที่ 153 พบว่าในระดับความเครียดประสิทธิผลน้อยกว่า 150 kPa ค่าที่ได้จากสมการของ Ohta and Goto (1978) ซึ่งใช้ค่า SPT ในการคำนวณ อยู่ในเกณฑ์ของ Stiff soil เช่นเดียวกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากสมการของ Hardin and Drnevich (1972) และเมื่อความเครียดประสิทธิผลมีค่ามากกว่า 150 kPa ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่แปลงมาจากสมการเชิงประสบการณ์จะให้ค่าที่สูงอยู่ในเกณฑ์ของ Soft rock ทั้งนี้จากการสังเกตพบว่า ที่ความเครียดประสิทธิผลตั้งแต่ 450 kPa ขึ้นไป ตามความลึก สำหรับเขื่อนบางวาดและเขื่อนลำปาว ความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความลึกระดับนี้อาจเป็นจุดเริ่มต้นการเกิดสภาวะที่ดินแน่นตัวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้ดินระดับลึกลงไปมีความแข็งขึ้นเรื่อยๆ

จากภาพที่ 154 ถึงภาพที่ 156 แสดงค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของ Shell zone ของเขื่อนลำปาว เขื่อนบางวาด และเขื่อนแก่งกระจาน จากค่า SPT พบว่าค่าอยู่ในเกณฑ์ของ Stiff clay และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก ในขณะที่ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่แปลงจากสมการเชิงประสบการณ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก SPT ดังภาพที่ 157

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

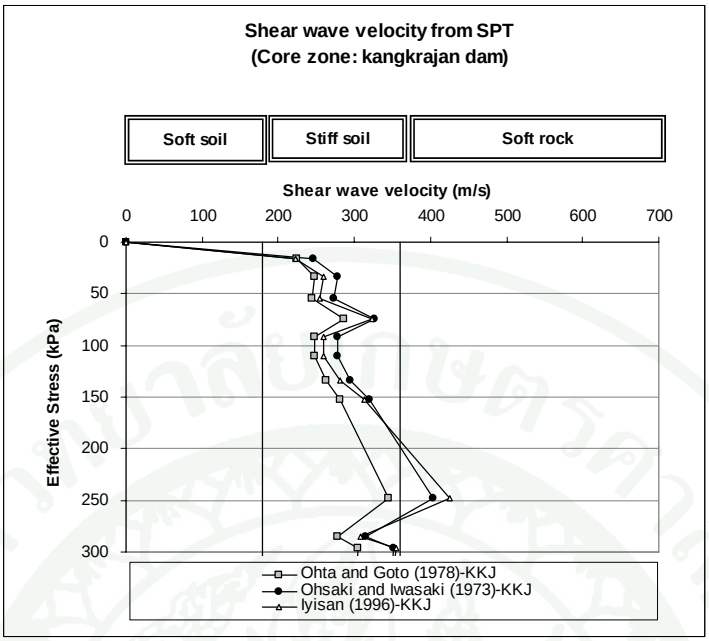


ภาพที่ 150 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนลำปาว

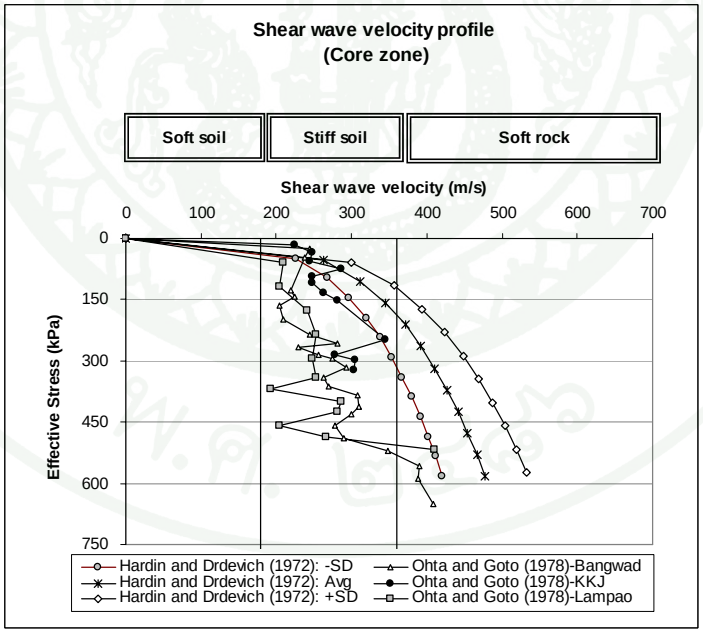


ภาพที่ 151 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนบางวาด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

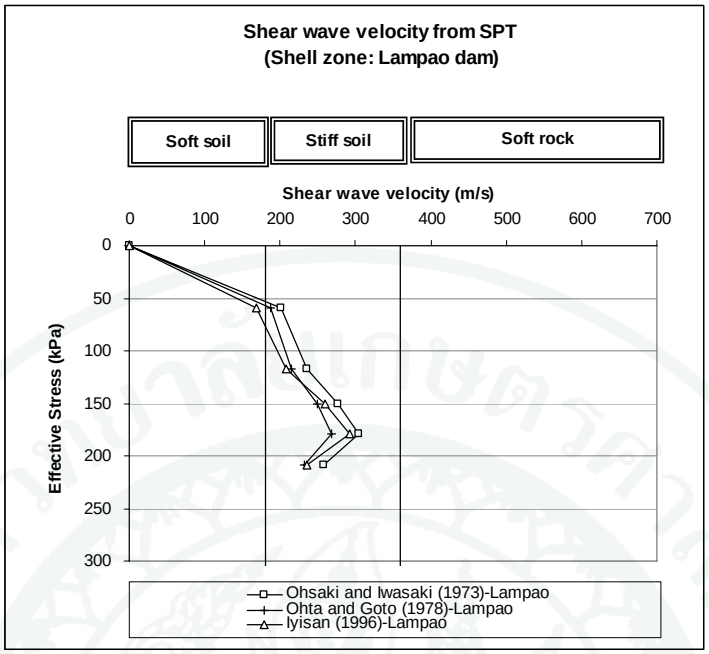


ภาพที่ 152 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone เขื่อนแก่งกระจาน

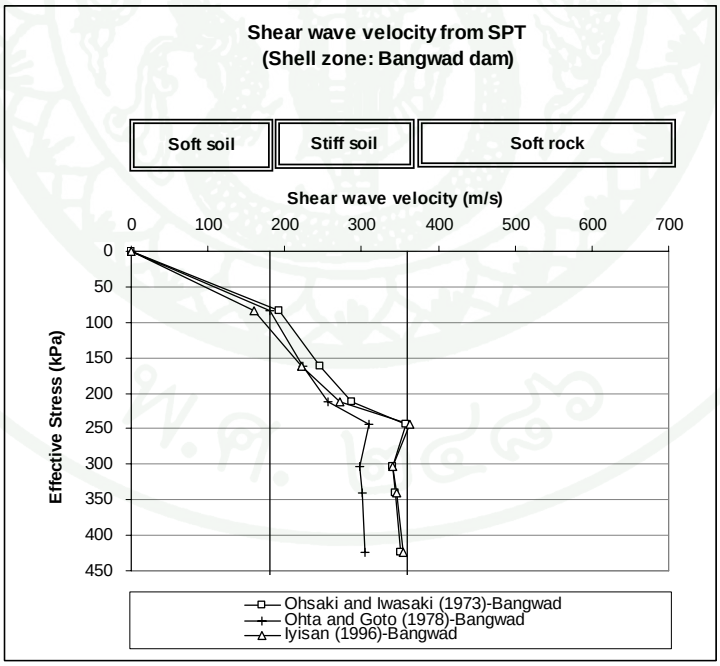


ภาพที่ 153 เปรียบเทียบความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Core zone จากสมการของ Ohta and Goto (1978) กับค่าจากสมการเชิงประสบการณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

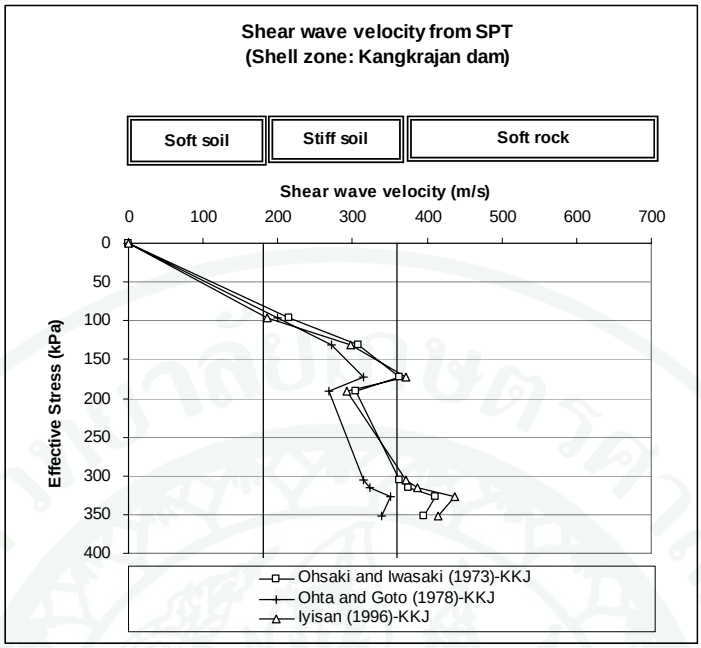


ภาพที่ 154 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนลำปาว

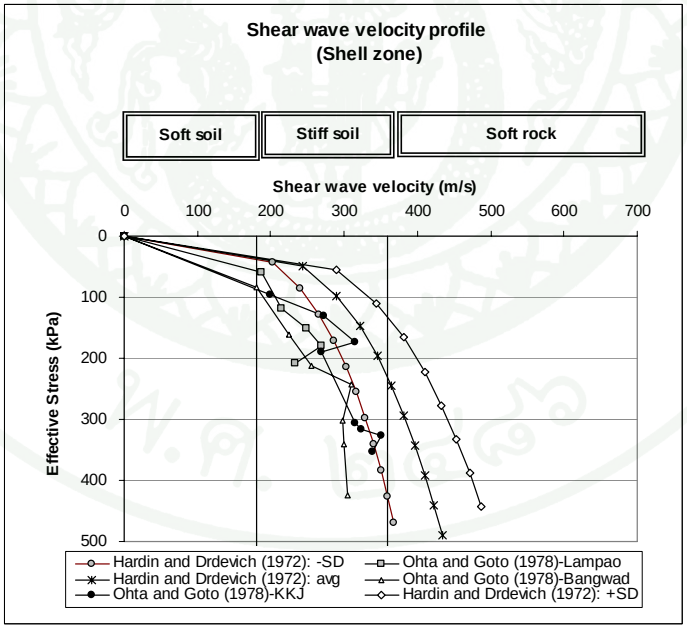


ภาพที่ 155 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนบางวาด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



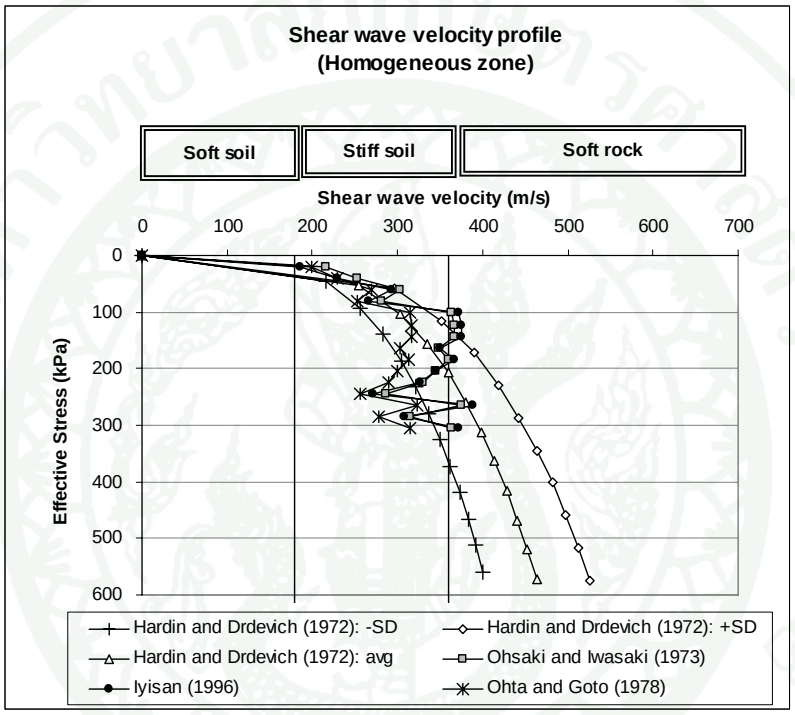
ภาพที่ 156 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone เขื่อนแก่งกระจาน



ภาพที่ 157 เปรียบเทียบคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของ Shell zone จากสมการของ Ohta and Goto (1978) กับค่าจากสมการเชิงประสบการณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 158 เป็นความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากค่า SPT เขื่อนสิริกิติ์ (Dike 4) ซึ่งเป็นตัวแทนของHomogeneous zone ในการเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่แปลงจากสมการสำเร็จรูป พบว่า ค่ามีความใกล้เคียงกันอย่างมากในช่วงความเครียดประสิทธิผลน้อยกว่า 300 kPa แต่ในระดับลึกไม่สามารถหาค่าได้ อย่างไรก็ตามแนวโน้มของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จาก SPT มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกตามความเครียดประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 158 คลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว

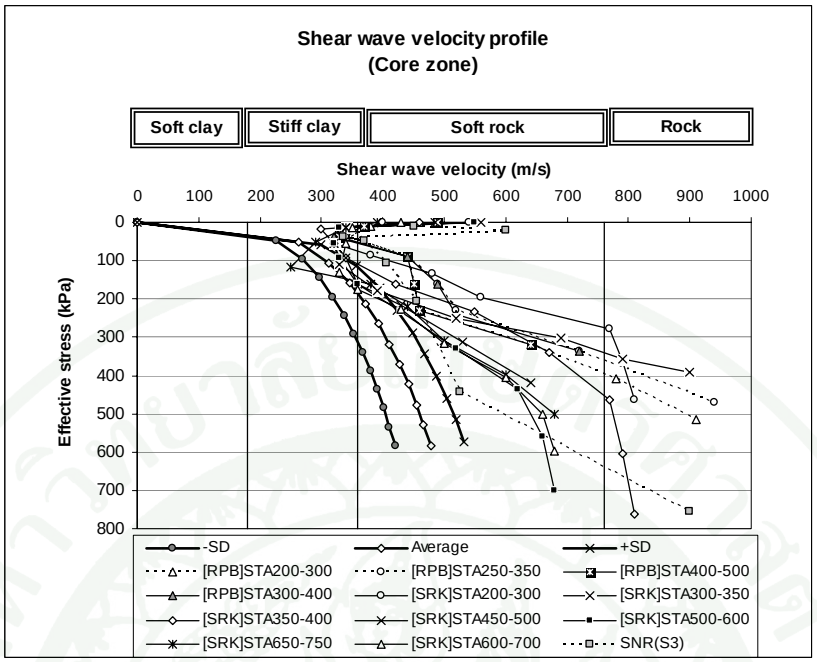
ในการเปรียบเทียบครั้งนี้ ต้องการเห็นการเปรียบเทียบค่าอย่างหยาบๆ เนื่องจากตัวแปรที่สำคัญได้แก่ σ'_m, Void ratio, OCR และ PI ของเขื่อนมีความแตกต่างกันในแต่ละความลึก รวมถึงค่า SPT ที่มีความแปรปรวนในการทดสอบ ทั้งนี้ความเร็วคลื่นแรงเฉือน Homoheneous zone, Core zone และ Shell zone มีแนวโน้มเข้ากันได้กับความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ซึ่งได้จาก Boring Log ตามองค์ประกอบต่างๆ โดยเฉพาะในระดับที่มีความเครียดประสิทธิผลไม่เกิน 300 kPa หรือที่ความลึกไม่เกิน 15 เมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

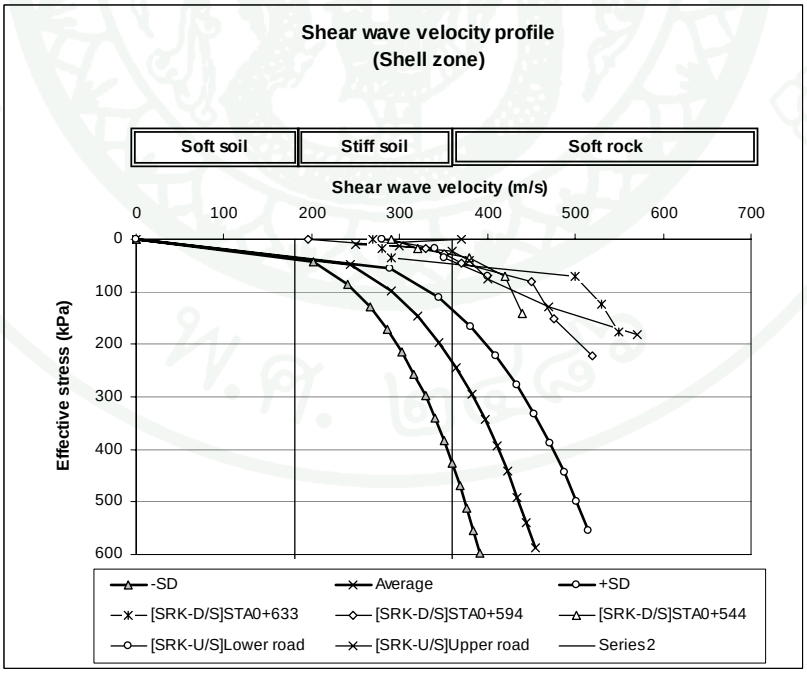
ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากผลการทดสอบคลื่นแรงเฉือน

การทดสอบคลื่นแรงเฉือนด้วยวิธี SASW เป็นการทดสอบในสนามวิธีหนึ่งที่ทำให้ทราบความเร็วคลื่นแรงเฉือนของวัสดุบดอัด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากกองความปลอดภัยเขื่อน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในการนำผลการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนของเขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนรัชชประภา มาเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยซึ่งแบ่งองค์ประกอบตาม Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone พบว่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก SASW มีค่าสูงกว่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วิเคราะห์ได้เช่น ภาพที่ 159 เป็นผลการทดสอบที่ได้จากแกนเขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนรัชชประภา พบว่าค่าน้อยสุดจาก SASW โดยส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกับขีดจำกัดสูงสุดของค่าที่ได้ในงานวิจัย ซึ่งผลการทดสอบมีความเร็วคลื่นแรงเฉือนมากกว่า 360 m/s อยู่ในเกณฑ์ของ Soft rock ในขณะที่องค์ประกอบ Shell zone ดังภาพที่ 160 เป็นค่าที่ได้จาก SASW ของเขื่อนสิริกิติ์ พบว่าคลื่นแรงเฉือนมีค่าสูงกว่าที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัย ในระดับที่ความเค้นประสิทธิผลมากกว่า 100 kPa ค่าความแข็งของดินอยู่ในช่วงของ Soft rock ในขณะที่ผลการทดสอบของ Homogeneous zone ที่ทดสอบกับเขื่อนดินปิดช่องเขาขาดของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนรัชชประภา ได้ผลดังภาพที่ 161 ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในระดับตื้นที่มีความเครียดประสิทธิผลน้อยกว่า 200 kPa อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ SASW จะมีค่าสูงในช่วงตื้นๆในส่วนที่เป็นดินถนนบนสันเขื่อน และมีค่าลดลงระดับหนึ่ง จากนั้นความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าสูงขึ้นตามความเครียดประสิทธิผลที่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากว่าถนนบนสันเขื่อนอาจจะใช้วัสดุรองพื้นทางที่มีความแข็งแรง หรืออาจเกิดจากระดับน้ำหน้าเขื่อนที่ทำให้ความแน่นของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

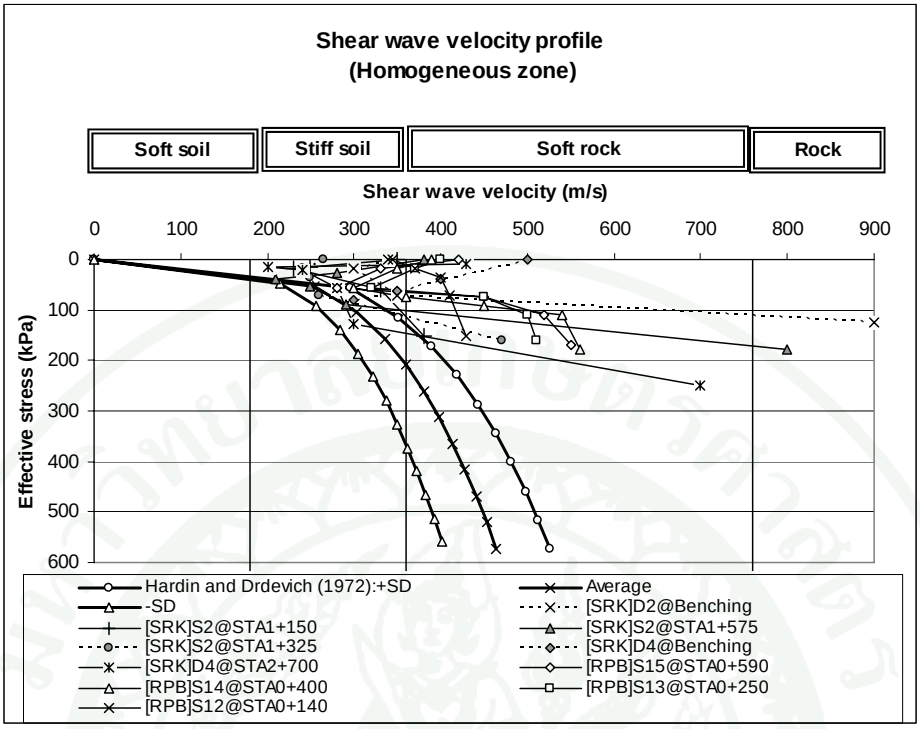


ภาพที่ 159 คลื่นแรงเฉือนของ Core zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย



ภาพที่ 160 คลื่นแรงเฉือนของ Shell zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย

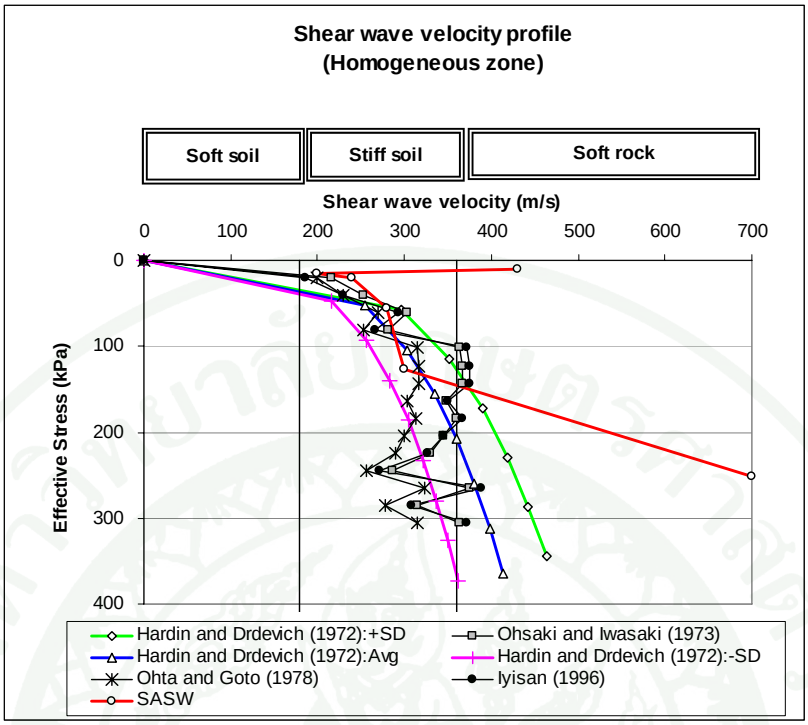
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 161 คลื่นแรงเฉือนของ Homogeneous zone จากการทดสอบ SASW เปรียบเทียบกับคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในงานวิจัย

เขื่อนสิริกิติ์ (Dike 4) สามารถเปรียบเทียบการทดสอบได้ทั้งความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากสมการเชิงประสบการณ์ จากค่า SPT และจากการทดสอบ SASW ได้ผลดังภาพที่ 162 พบว่าที่ความเครียดประสิทธิผลน้อยกว่า 200 kPa แนวโน้มของผลการทดสอบทั้งสามวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก SPT และค่าวิเคราะห์ได้ในงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความลึกดังที่ได้กล่าวในหัวข้อข้างต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

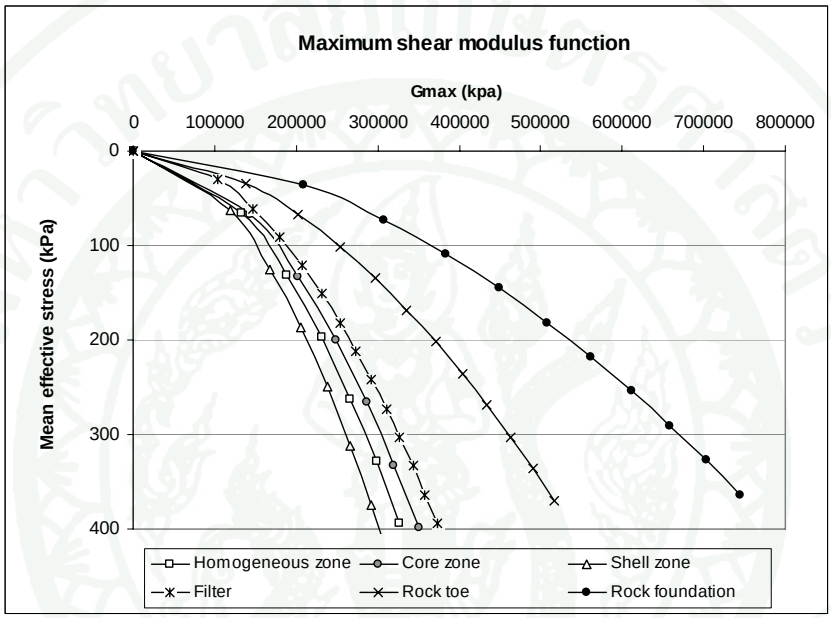


ภาพที่ 162 เปรียบเทียบคลื่นแรงเฉือนของ SRK dike4 ระหว่างสมการเชิงประสบการณ์ จากค่า SPT และจากการทดสอบ SASW

ความสัมพันธ์ที่นำไปวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ในผลการวิจัยขั้นนี้ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนสูงสุดกับ σ'_m แสดงดังภาพที่ 163 และโมดูลัสยืดหยุ่นกับ σ'_m แสดงดังภาพที่ 164 ซึ่งค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดของฐานรากหินผุมีค่ามากที่สุด เนื่องจากหินมีค่า σ'_m สูง จากค่าหน่วยน้ำหนักที่มาก ส่วนองค์ประกอบของดินถมที่มีโมดูลัสเฉือนน้อยที่สุดคือ Shell zone เนื่องจากมีหน่วยน้ำหนักน้อยและมีอัตราส่วนช่องว่างมาก ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของทั้งโมดูลัสเฉือนสูงสุดและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นตาม σ'_m ที่เพิ่มขึ้นตามความลึก และจากสมการที่ 27 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเรียงตามองค์ประกอบที่มีค่าน้อยถึงองค์ประกอบที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากได้แก่ Shell zone, Homogeneous zone, Core zone, Filter, Rock toe และ Rock foundation ซึ่งจะเห็นว่า Core zone และ Filter มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เพราะโมดูลัสเฉือนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อคูณด้วยค่า Poisson ratio ซึ่ง Core zone เท่ากับ 0.4 และ Filter เท่ากับ 0.35 แล้วทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน

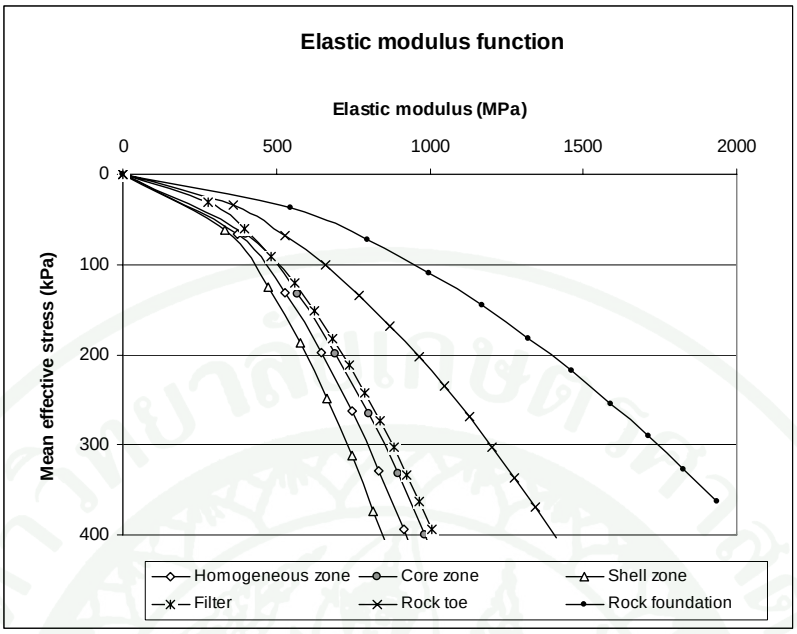
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ σ'_m เท่ากับ 100 kPa กับตารางที่ 10 พบว่า Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าแหล่งอ้างอิงประมาณ 4.5, 4.8 และ 4.1 ทั้งนี้เป็นเพราะผลจาก OCR ที่กำหนดให้ดินถมในแต่ละองค์ประกอบเป็น Heavily consolidated soil โดย Filter drain zone มีโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าแหล่งอ้างอิงประมาณ 3 เท่า ส่วน Weathered rock foundation ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ได้ประมาณ 1 MPa ที่ σ'_m เท่ากับ 100 kPa



ภาพที่ 163 ความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 164 ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ σ'_m ขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์

ผลการวิเคราะห์คาบธรรมชาติของตัวเขื่อน

เมื่อคาบธรรมชาติของข้อมูลอัตราเร่งบนพื้นดินมีค่าตรงกับคาบธรรมชาติของตัวเขื่อนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์สั่นพ้อง ซึ่งอาจทำให้เกิดการขยายคลื่นแผ่นดินไหว การหาคาบธรรมชาติของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่มีความสูง (รวมร่องแกนเขื่อน) 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เมตร จากสมการในการหาคาบธรรมชาติของตัวเขื่อนดังสมการที่ 12 ถึงสมการที่ 15 แสดงผลดังตารางที่ 61 โดยสมการของ Gazetas (1982) และ Dakoulas and Gazetas (1986) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรความเร็วคลื่นแรงเฉือนร่วมกับความสูงเขื่อน จะเห็นว่าคาบธรรมชาติของ Gazetas (1982) และ Dakoulas and Gazetas (1986) มีค่าเท่ากัน เนื่องจากสมการของ Dakoulas and Gazetas (1986) เป็นการลดรูปสมการ Shear beam approrch ที่ตัวแปรด้านการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอยู่ในโหมดที่ 1 ถ้าพิจารณาร่วมกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนพบว่า เมื่อความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีค่าสูง คาบธรรมชาติของเขื่อนจะมีค่าลดลง เนื่องจากดินมีการยึดเกาะกันมากขึ้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงจากการพยายามให้ตัวระหว่างมวลดิน นอกจากนี้จะเห็นว่าสมการที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันจะมีค่าอยู่ระหว่างคาบธรรมชาติที่คำนวณจากความเร็วคลื่นแรงเฉือน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

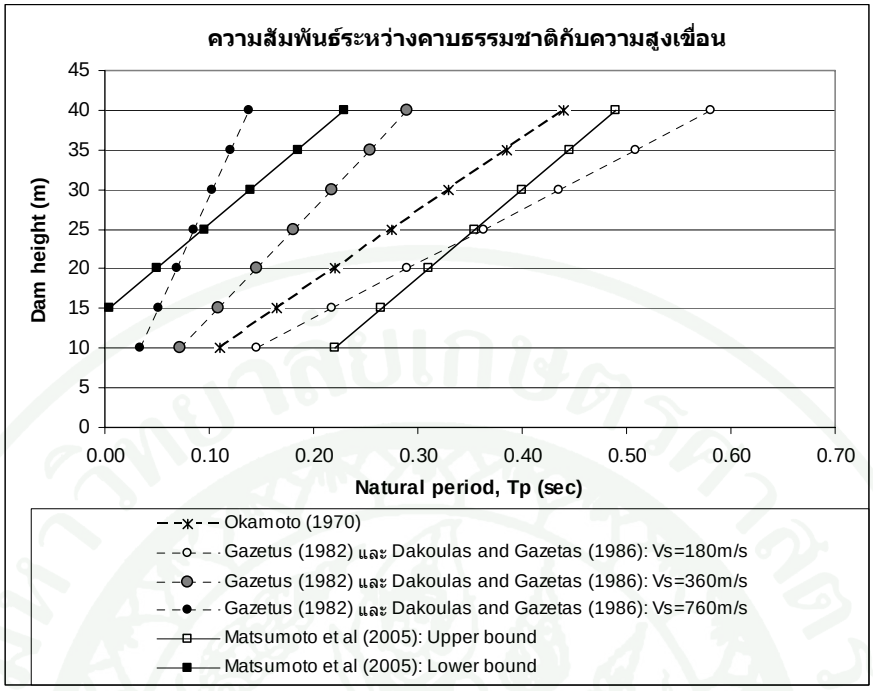
180-760 เมตรต่อวินาที ตามสมการของGazetas (1982) และ Dakoulas and Gazetas (1986) ทั้งนี้เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 165 จะเห็นว่า เขื่อนที่สูงน้อยกว่า 24 เมตร จะมี Lower bound เป็นค่าจากสมการของ Matsumoto *et al.* (2005) ในขณะที่เขื่อนที่สูงกว่า 24 เมตรจะมี Lower bound เป็นค่าจากสมการของ Gazetus (1982) และ Dakoulas and Gazetas (1986) เช่นเดียวกับ Upper bound ที่เขื่อนสูงน้อยกว่า 24 เมตรมีค่าขอบเขตตามสมการของ Matsumoto *et al.* (2005) ส่วนเขื่อนที่สูงกว่านั้น มีขอบเขตตามสมการของ Gazetas (1982) และ Dakoulas and Gazetas (1986) ซึ่งเป็นสมการที่งานวิจัยนี้ได้ประมาณคาบธรรมชาติของเขื่อนสูง 15 เมตรและ 30 เมตร เพื่อเป็นแนวทางการคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวมาใช้ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในลำดับถัดไป โดยภาพที่ 166 แสดงการกระจายตัวของคาบธรรมชาติของเขื่อนและคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัยที่มีข้อมูลอยู่ในช่วงเดียวกับคาบธรรมชาติที่คำนวณได้จากสมการเชิงประสบการณ์ดังกล่าว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

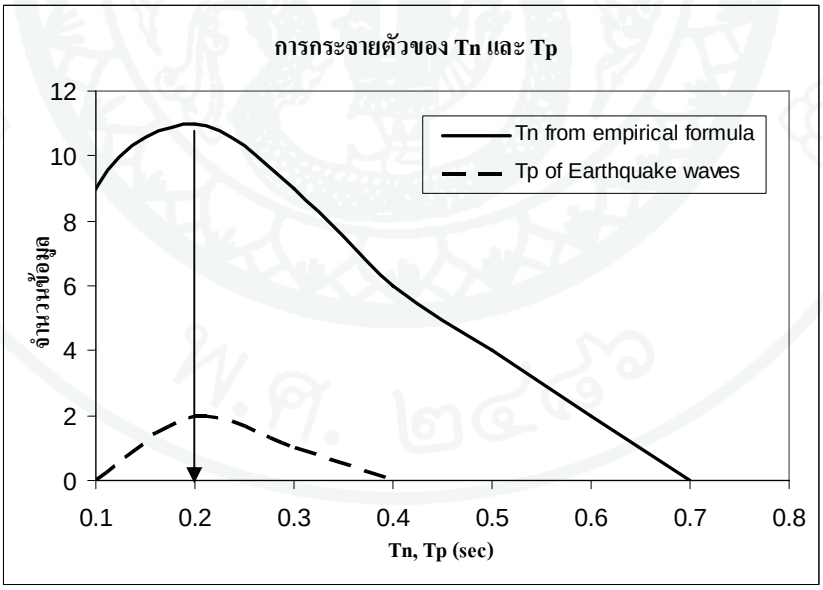
ตารางที่ 61 คาบธรรมชาติของตัวเขื่อนดินถมที่ความสูงต่างๆ

Dam height (m)	Vs (m/s)	Natural period (sec)				
		Okamoto (1970)	Gazetus (1982)	Dakoulas and Gazetas (1986)	Matsumoto et al (2005) (Lower bound)	Matsumoto et al (2005) (Upper bound)
10	180	0.11	0.15	0.15	หาค่าไม่ได้	0.22
	360		0.07	0.07		
	760		0.03	0.03		
15	180	0.17	0.22	0.22	0.01	0.27
	360		0.11	0.11		
	760		0.05	0.05		
20	180	0.22	0.29	0.29	0.05	0.31
	360		0.15	0.15		
	760		0.07	0.07		
25	180	0.28	0.36	0.36	0.10	0.36
	360		0.18	0.18		
	760		0.09	0.09		
30	180	0.33	0.44	0.44	0.14	0.40
	360		0.22	0.22		
	760		0.10	0.10		
35	180	0.39	0.51	0.51	0.19	0.45
	360		0.25	0.25		
	760		0.12	0.12		
40	180	0.44	0.58	0.58	0.23	0.49
	360		0.29	0.29		
	760		0.14	0.14		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 165 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับความสูงเขื่อน



ภาพที่ 166 การกระจายตัวของคาบธรรมชาติของเขื่อนและคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราส่วนความปลอดภัยในสภาวะสถิตย์

เขื่อนรูปแบบต่างๆที่จำลองขึ้น มีอัตราส่วนควมปลอดภัยในสภาวะสถิตย์ ในระหว่างเก็บน้ำ เมื่อวิเคราะห์โดยทฤษฎี Limit equilibrium ดังตารางที่ 62 ทั้งเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีอัตราส่วนความปลอดภัยด้านเหนือน้ำมากกว่าด้านท้ายน้ำ เนื่องจากด้านท้ายน้ำของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวมีความชันมากกว่าด้านเหนือน้ำทำให้เกิดความมั่นคงน้อยกว่า ในขณะเดียวกันคุณสมบัติวัสดุก็มีความแตกต่างกันด้วย ซึ่งด้านท้ายน้ำส่วนหนึ่งจะประกอบด้วยชั้นกรองที่เป็นดินเม็ดหยาบ ทั้งนี้เขื่อนที่จำลองรูปแบบขึ้นนี้มีอัตราส่วนความปลอดภัยผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐานต่างๆ ตามตารางที่ 20

ตารางที่ 62 สรุปค่าความปลอดภัยในสภาวะสถิตย์ของเขื่อนดินถม

Dam code	Factor of safety	
	U/S	D/S
H1R	3.89	2.47
H2R	3.76	2.29
H2C	3.86	2.26
H3R	3.87	2.39
H3C-1	3.79	2.65
H3C-2	3.65	2.65
H3C-3	3.58	2.65
Z1R	2.88	2.12
Z1C-1	2.97	2.16
Z1C-2	2.71	2.21

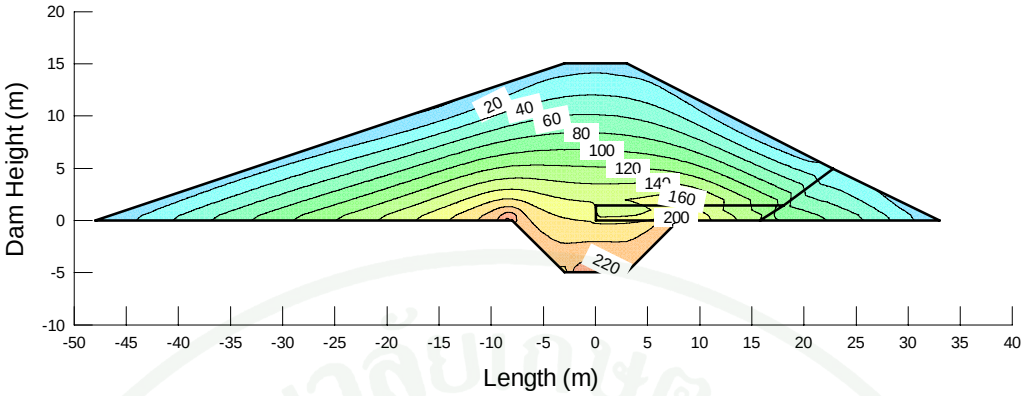
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการวิเคราะห์หาแรงกระทำในเบื้องต้น

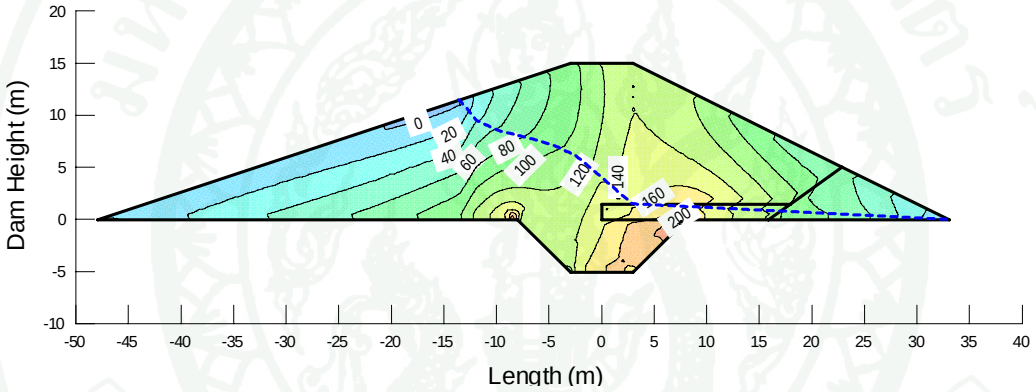
ก่อนการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ จำเป็นต้องทราบค่า $\sigma_m^{'}$ ในทางสถิตย์ของโครงสร้างเขื่อนเสียก่อน เนื่องจากเป็นค่ามีความสัมพันธ์กับโมดูลัสเฉือนสูงสุดในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ โดยรูปแบบของ $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำและระหว่างเก็บน้ำจะมีลักษณะต่างกัน แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

ค่า $\sigma_m^{'}$ มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ดังที่ได้กล่าวมาคือเป็นค่าที่นำไปประมาณค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ นอกจากนี้การวิเคราะห์ขั้นตอนนี้ยังทำให้ทราบหน่วยแรงเฉือนเริ่มต้นที่เกิดขึ้นในระหว่างเก็บน้ำ (Initial shear stress) โดยทั่วไปแล้วส่วนที่อยู่ใกล้ฐานรากของเขื่อนจะมีค่า $\sigma_m^{'}$ สูง โดยเฉพาะร่องแกนเขื่อน โดยค่า $\sigma_m^{'}$ จะมีค่าน้อยลงจนถึงสันเขื่อน ซึ่งมีน้ำหนักกดทับน้อย สำหรับเขื่อนดินถมเนื้อเดียวสูง 15 เมตร คือเขื่อน H1R, H2R และ H3R มีค่า $\sigma_m^{'}$ มากที่สุดประมาณ 220 kPa เขื่อน H2C และ H3C มีค่า $\sigma_m^{'}$ มากที่สุดประมาณ 270 kPa เขื่อน Z1R มีค่า $\sigma_m^{'}$ มากที่สุดประมาณ 400 kPa และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนสูง 30 เมตรคือ เขื่อน Z1C มีค่า $\sigma_m^{'}$ มากที่สุดประมาณ 450 kPa ซึ่งภาพที่ 167 ถึงภาพที่ 185 เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่าง $\sigma_m^{'}$ ของเขื่อนก่อนการเก็บน้ำและในระหว่างเก็บน้ำ ทั้งนี้จะเห็นว่า เขื่อนที่อยู่ในช่วงใช้งาน ซึ่งชั้นกรองมีการทำงานและมีความแตกต่างกันของแรงดันน้ำในมวลดินด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ เป็นผลให้ด้านท้ายน้ำมี $\sigma_m^{'}$ ค่อนข้างสูง นอกจากนี้จะเห็นว่าเขื่อนที่มี Boundary condition ที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง จะมีการสะสมแรงไว้ที่จุดเปลี่ยนรูปร่องแกนเขื่อน ต่างจากเขื่อนที่มีชั้นหินผุแทรกอยู่ ซึ่งแรงจะถูกถ่ายไปยังฐานราก

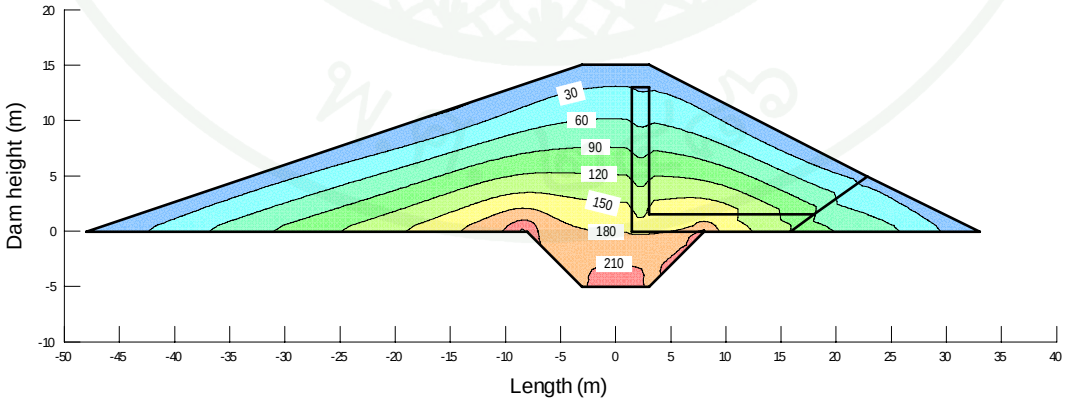
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 167 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H1R

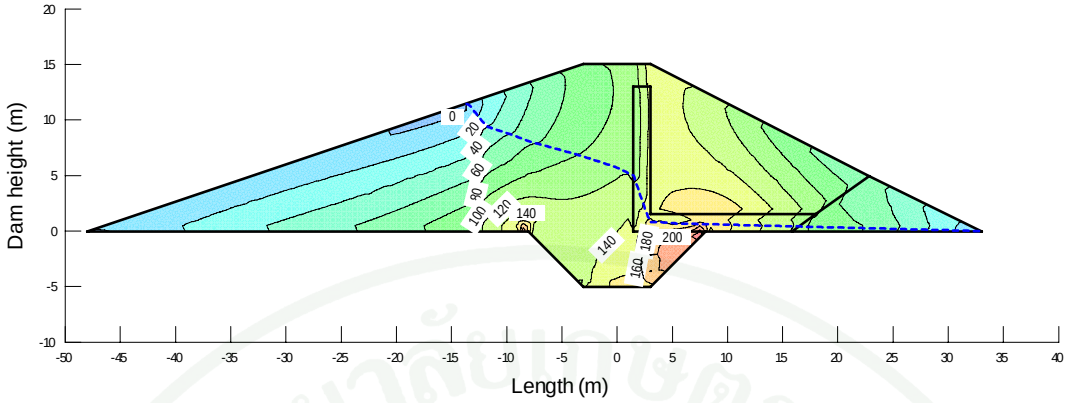


ภาพที่ 168 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H1R

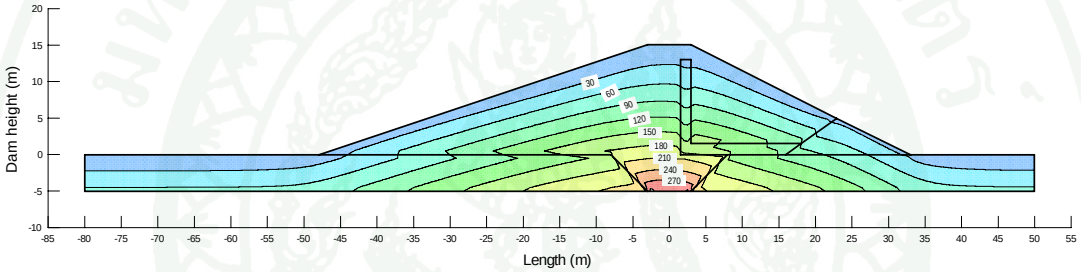


ภาพที่ 169 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H2R

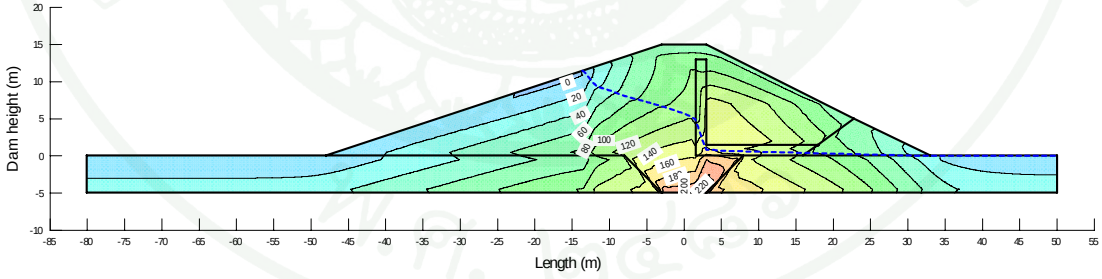
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 170 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H2R

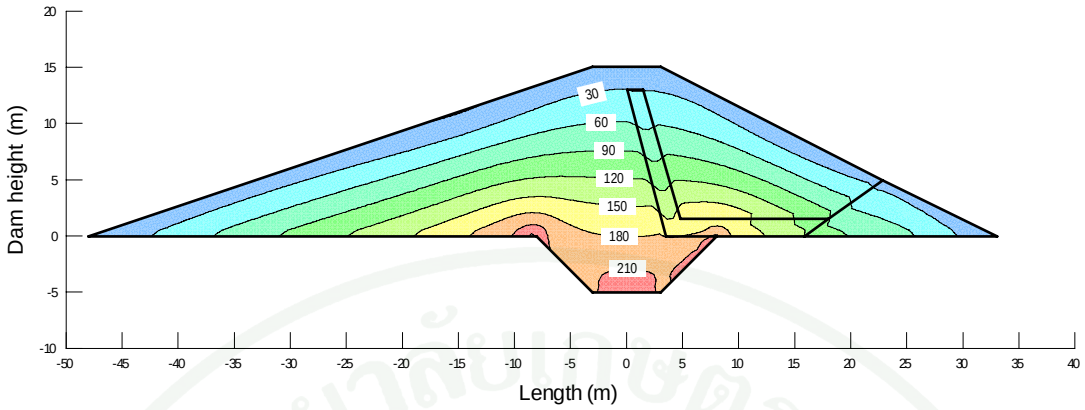


ภาพที่ 171 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H2C

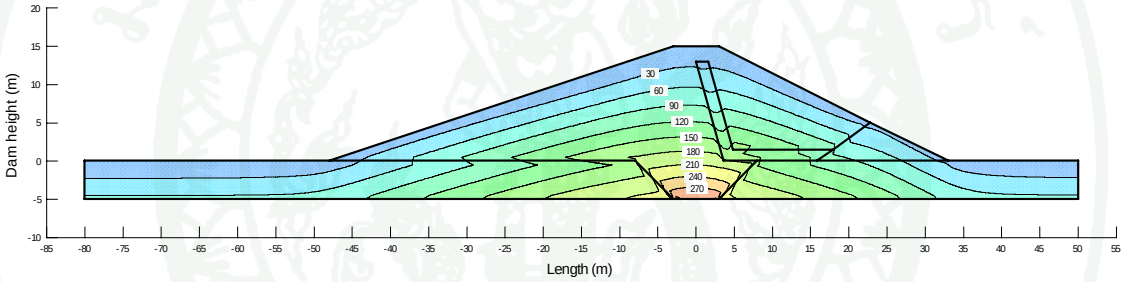


ภาพที่ 172 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H2C

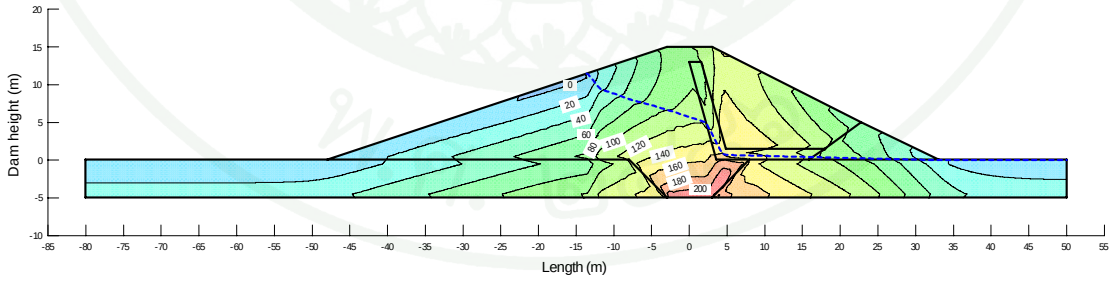
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 173 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3R

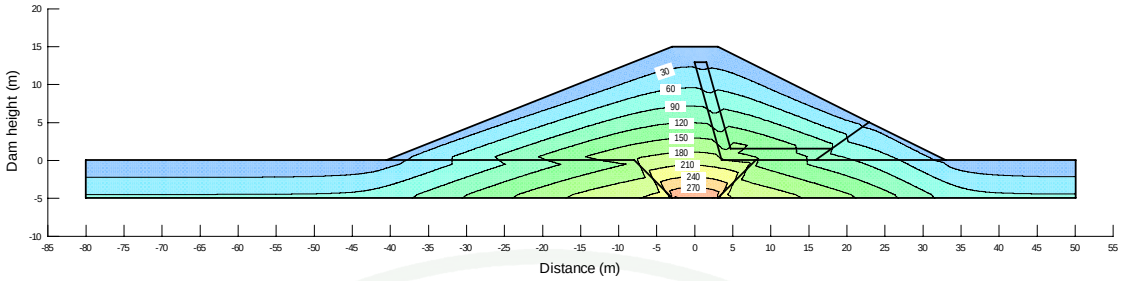


ภาพที่ 174 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-1

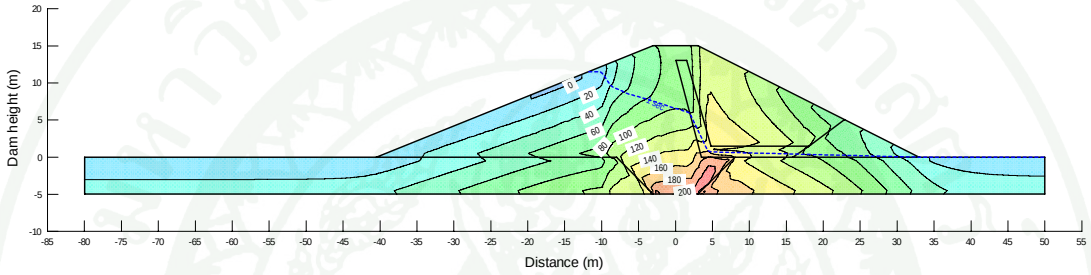


ภาพที่ 175 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-1

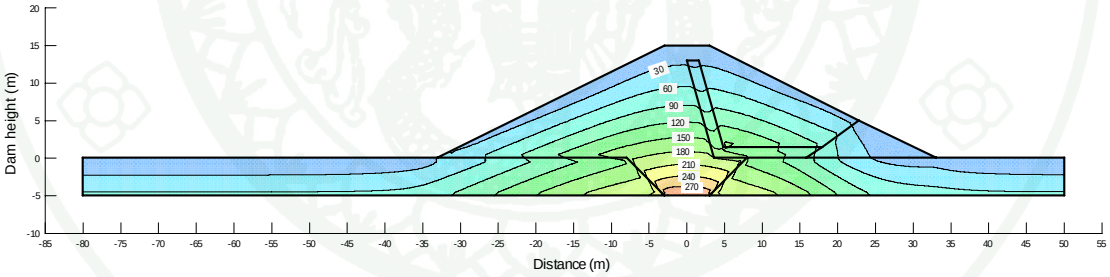
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



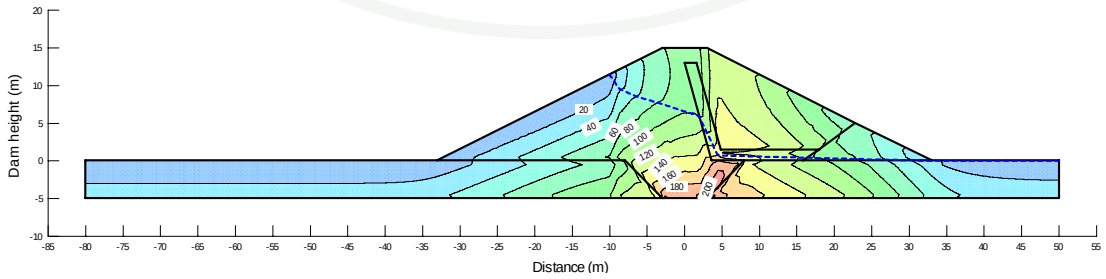
ภาพที่ 176 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-2



ภาพที่ 177 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-2

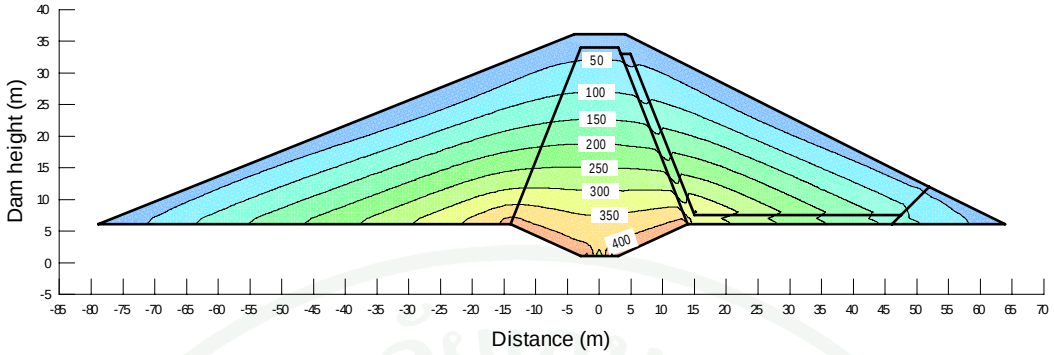


ภาพที่ 178 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน H3C-3

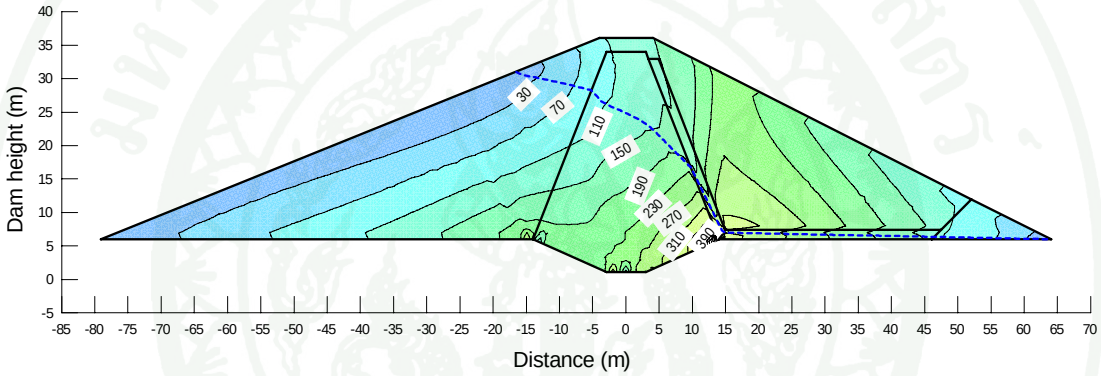


ภาพที่ 179 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน H3C-3

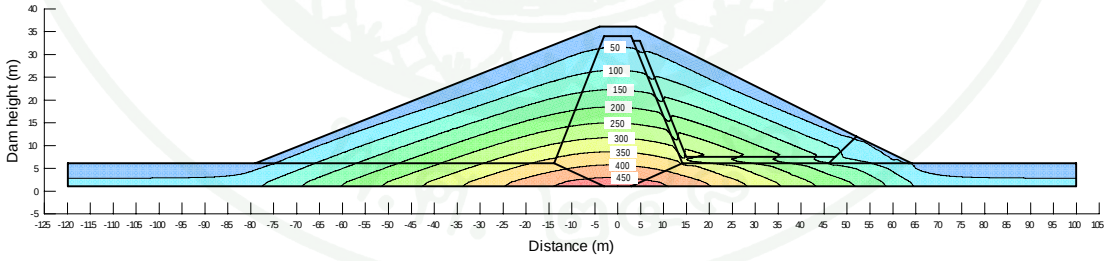
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 180 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1R

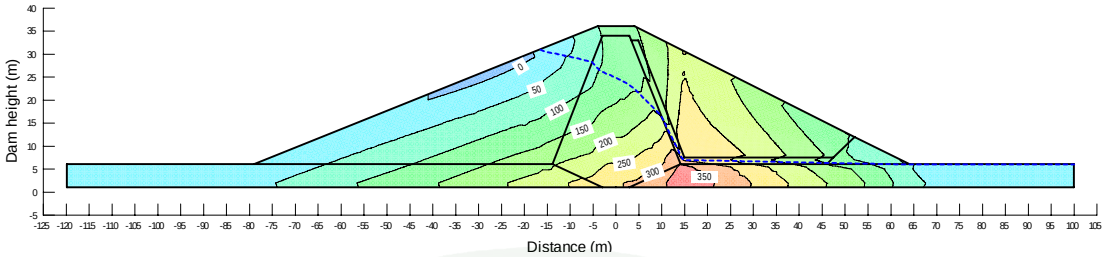


ภาพที่ 181 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1R

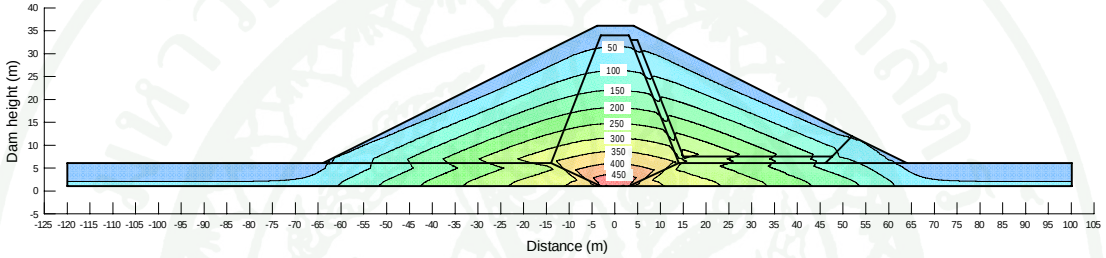


ภาพที่ 182 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-1

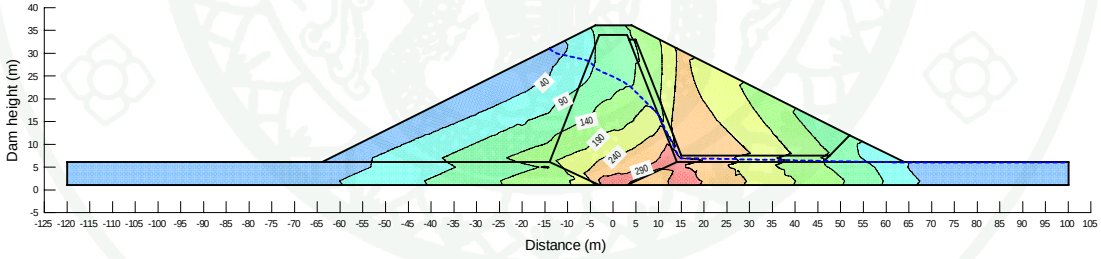
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 183 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-1



ภาพที่ 184 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-2

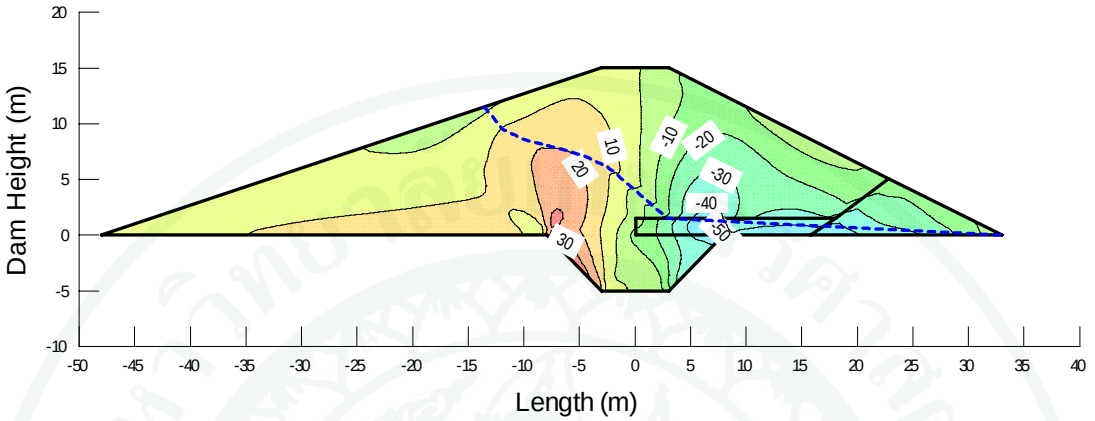


ภาพที่ 185 $\sigma_m^{'}$ ระหว่างเก็บน้ำของเขื่อน Z1C-2

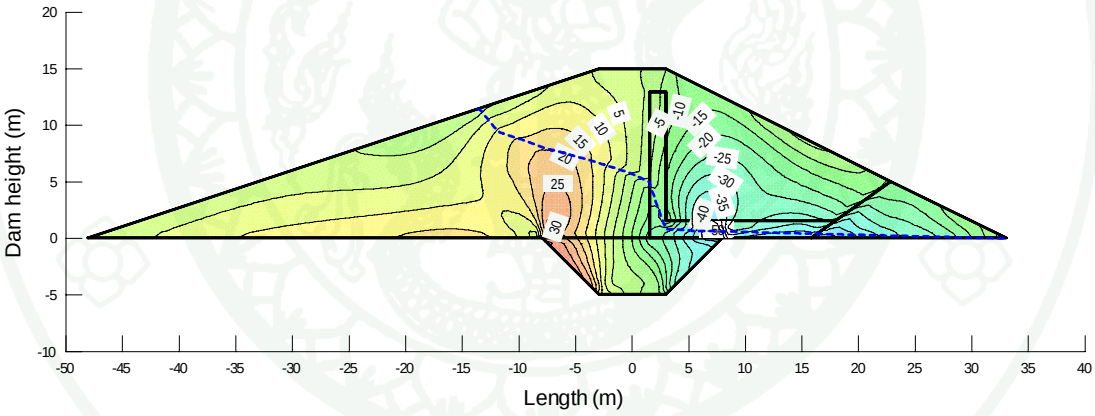
แรงเฉือนเริ่มต้นที่กระทำในตัวเขื่อน ระหว่างการเก็บน้ำของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว แสดงดังภาพที่ 186 ถึงภาพที่ 192 และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนแสดงดังภาพที่ 193 ถึงภาพที่ 195 โดยจะเห็นว่าลักษณะของแรงเฉือนการวิเคราะห์แรงกระทำในเบื้องต้นจะมีความแตกต่างกันระหว่างการจำลองสภาพฐานราก 2 รูปแบบดังที่ได้กล่าวมา โดยเขื่อนที่มีชั้นหินผุแทรกอยู่ หน่วยแรงเฉือนจะกระทำเป็นบริเวณกว้าง ทำให้เส้นชั้นความสูงมีลักษณะเป็นชั้น ในกรณีของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว ด้านท้าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

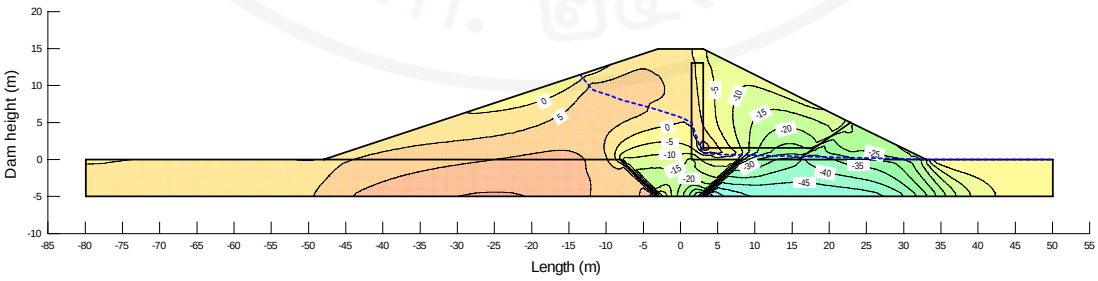
น้ำจะมีแรงเฉือนกระทำมากกว่าเหนือน้ำ และมีทิศทางการเฉือนตรงข้ามกัน ส่วนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนจะมีแรงเฉือนกระทำมากที่แกนเขื่อนและเปลือกเขื่อนด้านท้ายน้ำ



ภาพที่ 186 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H1R

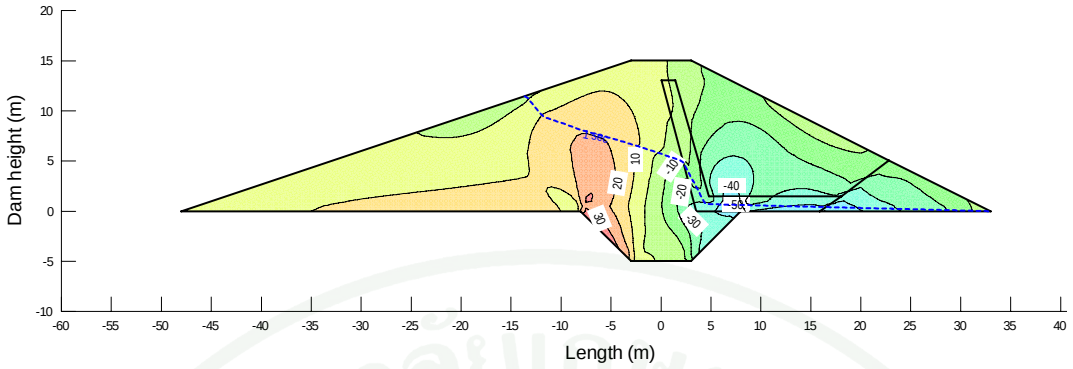


ภาพที่ 187 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H2R

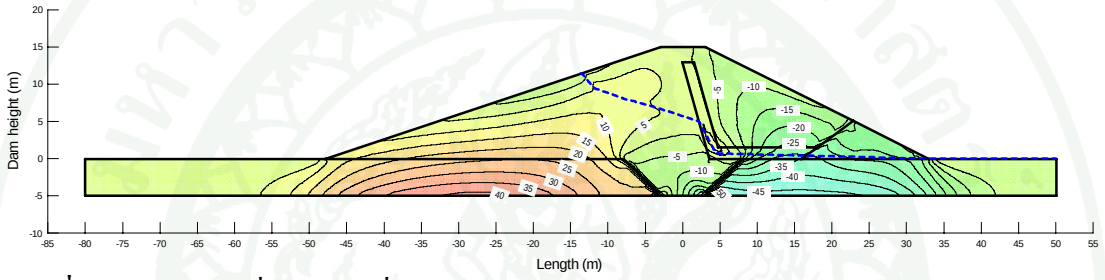


ภาพที่ 188 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H2C

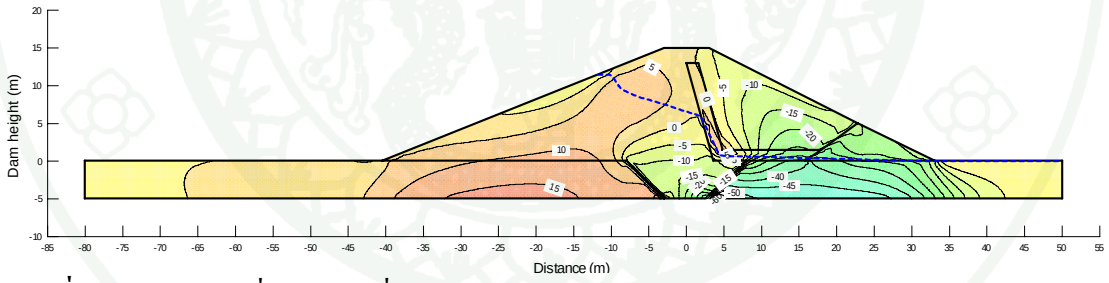
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



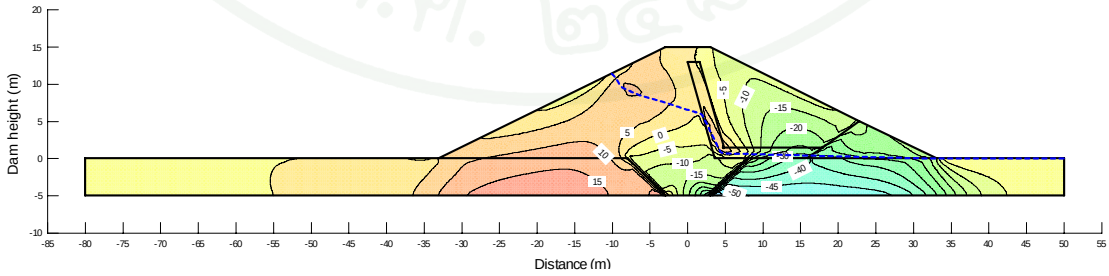
ภาพที่ 189 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3R



ภาพที่ 190 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-1

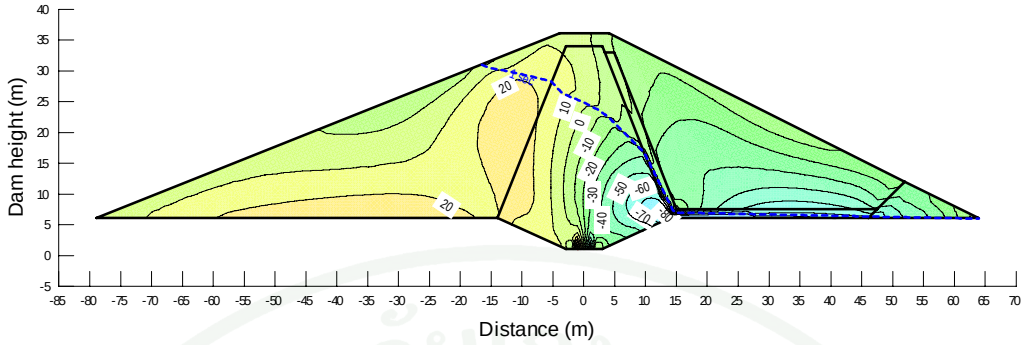


ภาพที่ 191 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-2

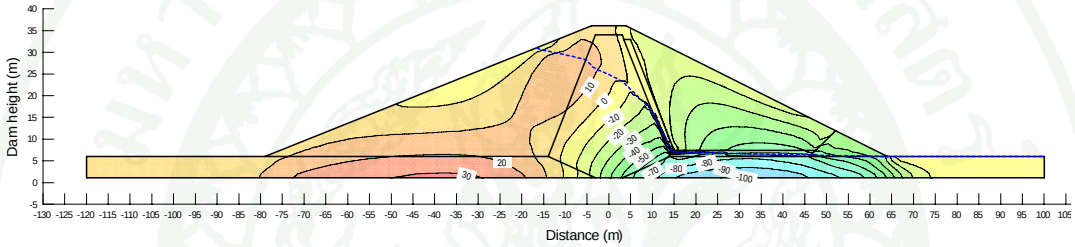


ภาพที่ 192 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน H3C-3

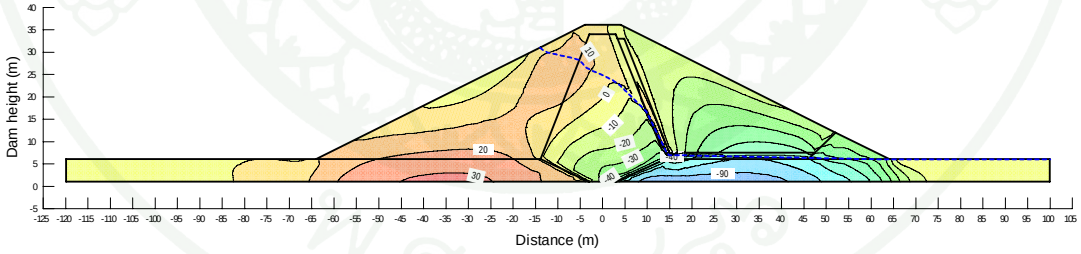
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 193 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1R



ภาพที่ 194 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1C-1

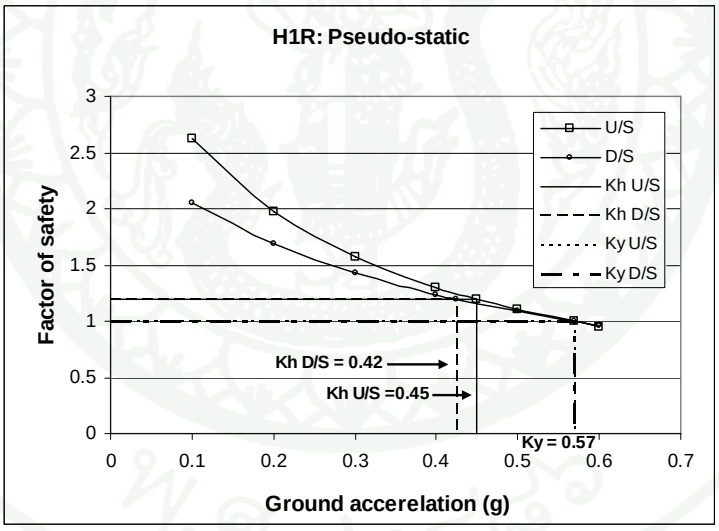


ภาพที่ 195 แรงเฉือนเริ่มต้นของเขื่อน Z1C-2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

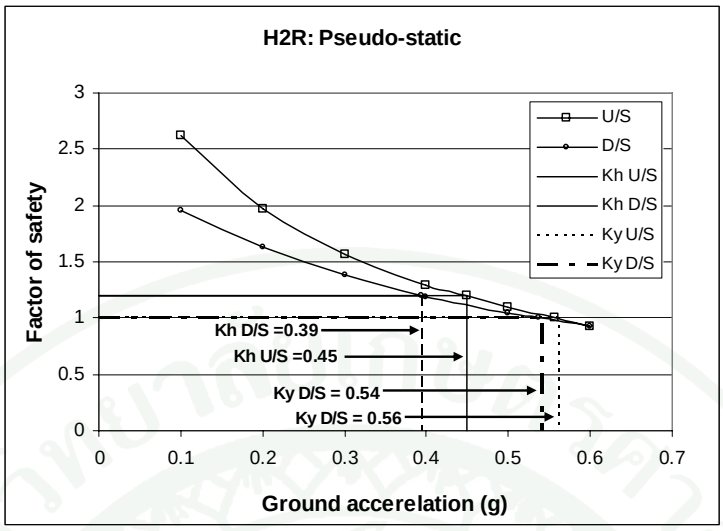
ค่า Yield acceleration (K_y) ของเขื่อนในแบบจำลอง

การออกแบบเขื่อนเพื่อต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยวิธี Pseudo-static เป็นการวิเคราะห์ที่ละเอียดน้อยว่าการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ เนื่องจากความสามารถในการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวของเขื่อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ทั้งด้านหน่วยแรงในตัวเขื่อน คลื่นแผ่นดินไหว ขนาดและระยะเวลาการสั่นไหวที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังขึ้นกับที่ตั้งของเขื่อนอีกด้วย งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่า K_y ของรูปแบบเขื่อนที่จำลองขึ้น แสดงดังภาพที่ 196 ถึงภาพที่ 205 โดยค่า K_y ของด้านเหนือน้ำมีมากกว่าด้านท้ายน้ำ เหตุผลเนื่องจากอิทธิพลของแรงดันน้ำที่ช่วยพยุงมวลดินไว้ ดังนั้นแรงในแนวราบที่มากระทำต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลงจนต่ำกว่าเกณฑ์ ทั้งนี้เขื่อนดินถมเนื้อเดียวมี K_y ระหว่าง 0.54g ถึง 0.6g และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมี K_y 0.4g ถึง 0.42g สรุปดังตารางที่ 63

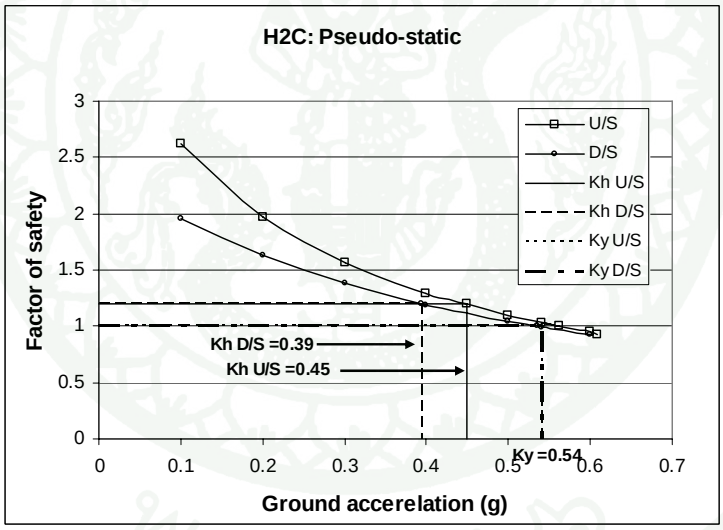


ภาพที่ 196 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H1R

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

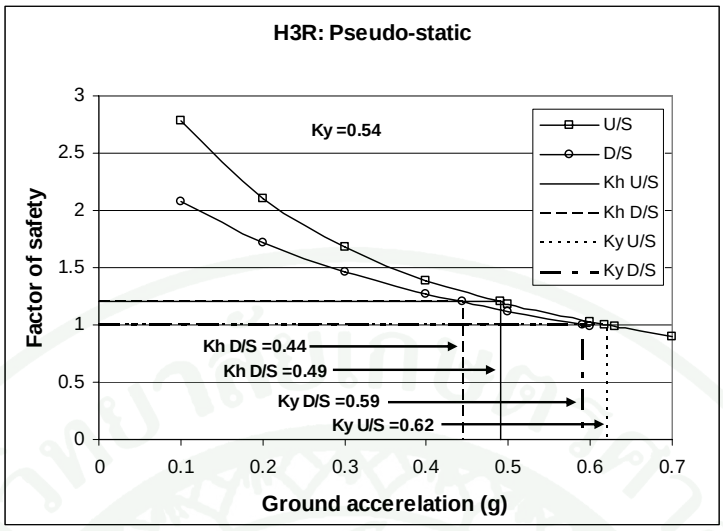


ภาพที่ 197 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H2R

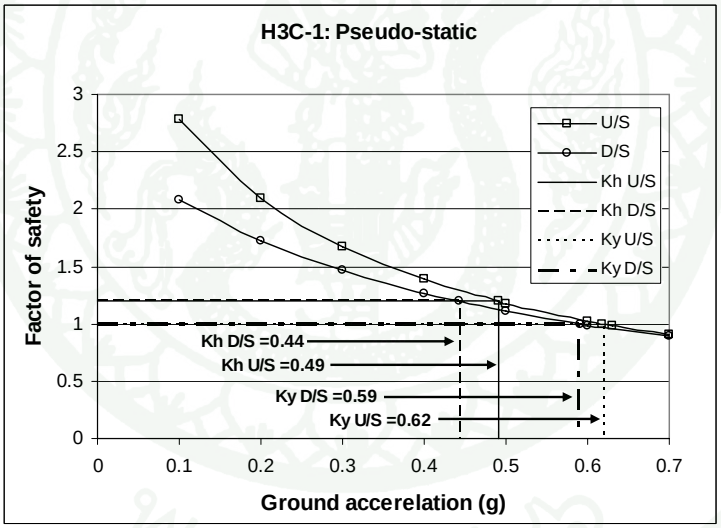


ภาพที่ 198 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H2C

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

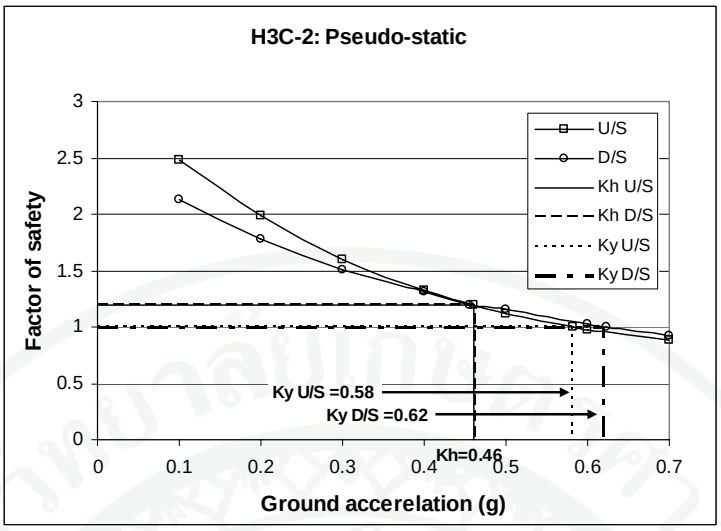


ภาพที่ 199 ค่า ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3R

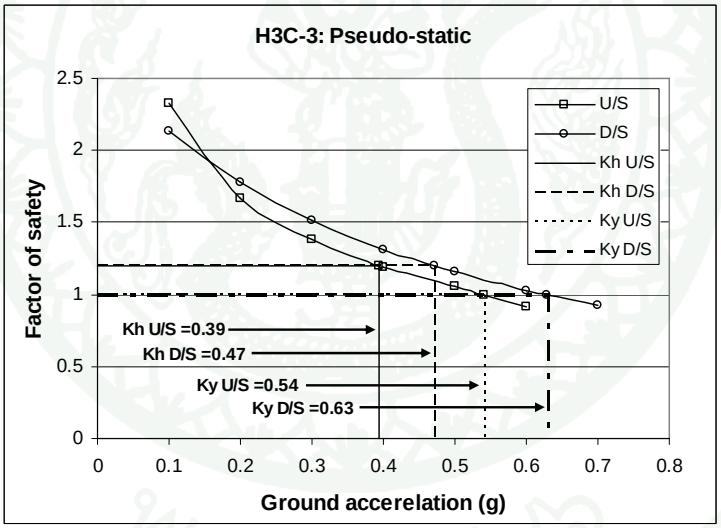


ภาพที่ 200 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

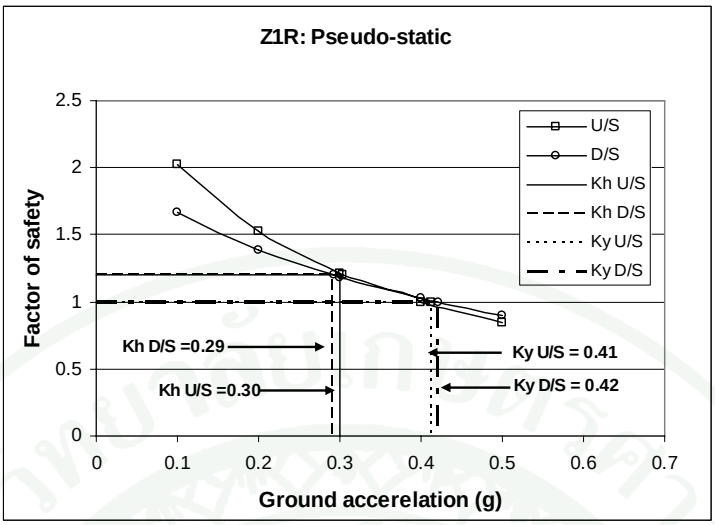


ภาพที่ 201 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-2

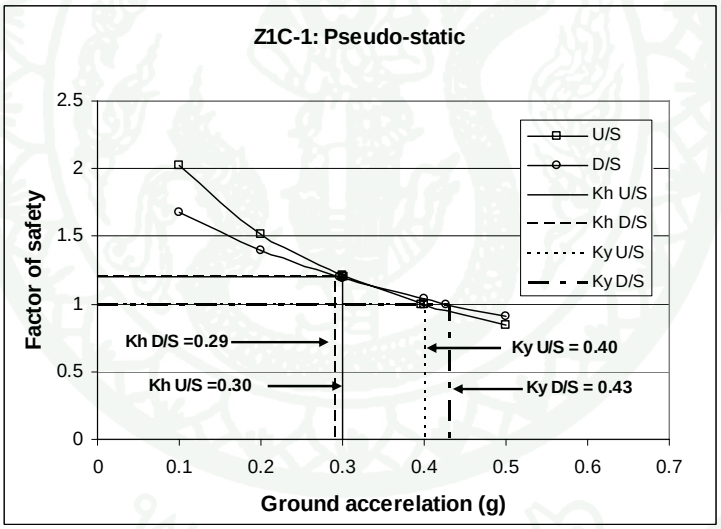


ภาพที่ 202 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน H3C-3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

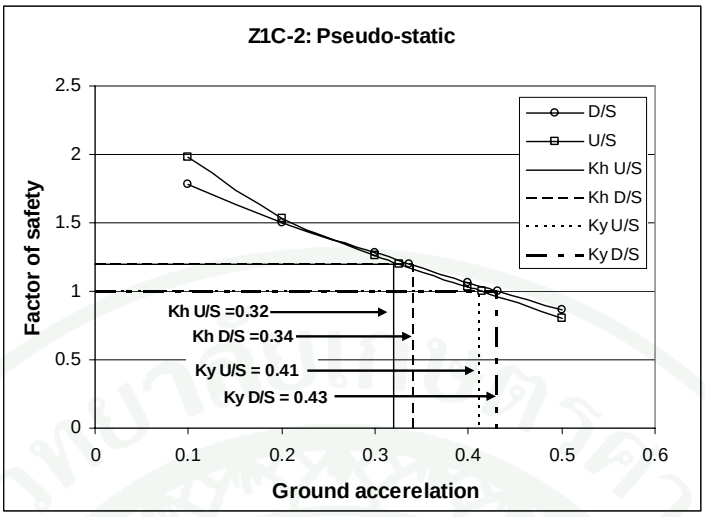


ภาพที่ 203 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1R



ภาพที่ 204 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1C-1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 205 ค่า K_h และ K_y ของเขื่อน Z1C-2

ตารางที่ 63 ค่า Yield acceleration และค่า Seismic coefficient ของเขื่อน

Dam code	Yield accerelation, Ky		Seismic coefficient, K_h	
	U/S	D/S	U/S	D/S
H1R	0.57	0.57	0.45	0.42
H2R	0.56	0.54	0.45	0.39
H2C	0.54	0.54	0.45	0.39
H3R	0.62	0.59	0.49	0.44
H3C-1	0.62	0.59	0.49	0.44
H3C-2	0.58	0.62	0.46	0.46
H3C-3	0.54	0.63	0.39	0.47
Z1R	0.41	0.42	0.30	0.29
Z1C-1	0.40	0.43	0.30	0.29
Z1C-2	0.41	0.43	0.32	0.34

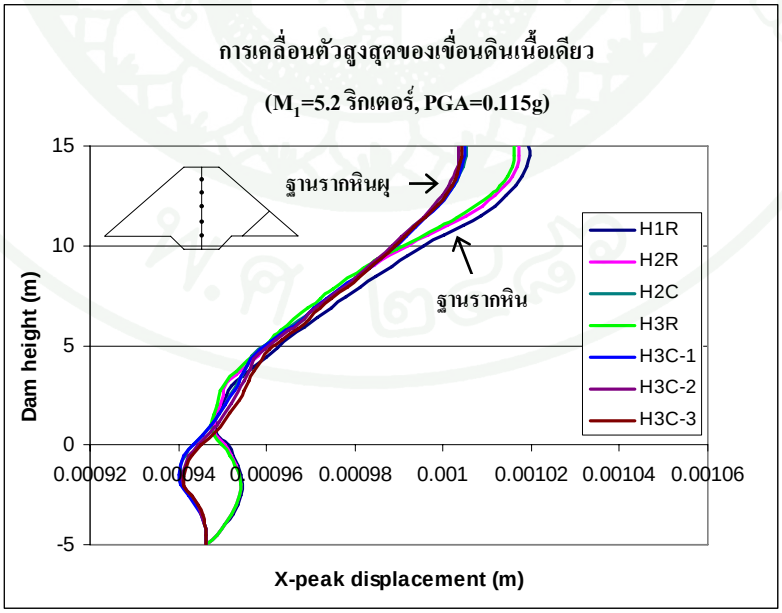
ผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนที่สำคัญได้แก่ การเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวดิ่ง ความเครียดเฉือน ความเค้นเฉือนซึ่งเป็นแรงกระทำที่เกิดในตัวเขื่อน และผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงถึงลักษณะการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของเขื่อน จากการวิเคราะห์โดยวิธี Stress redistribution ซึ่งรายละเอียดของผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้

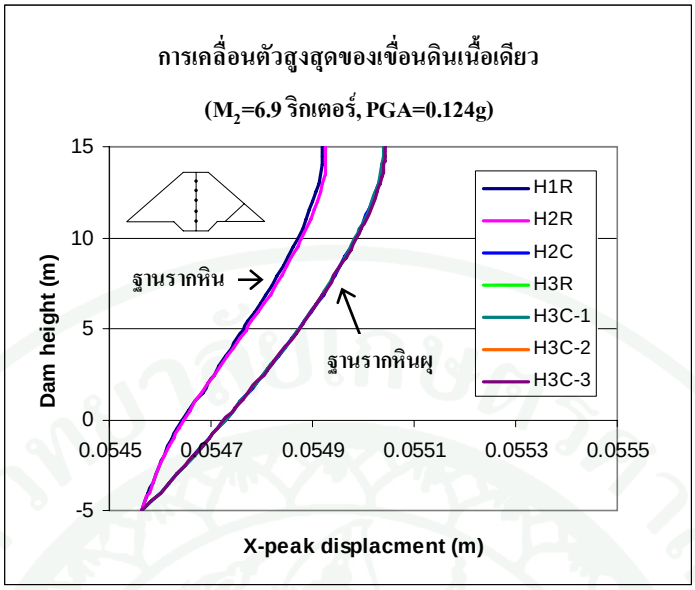
ผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ด้านการเคลื่อนตัวในแนวราบของเขื่อน

การเคลื่อนตัวของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหวขนาด 5.2 ริกเตอร์ (PGA=0.115g) ทำให้เขื่อนเคลื่อนตัวในแนวราบไม่มากนักดังภาพที่ 206 ซึ่งจะเห็นว่าการเคลื่อนตัว ณ เวลาที่มีความเร่งในแนวราบสูงสุด (Peak time) ซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวออกจากแกนเขื่อน โดยเขื่อน H1R, H2R และ H3R จะมีการเคลื่อนตัวแตกต่างกันในชั้นร่องแกนเขื่อน ในขณะที่ H2C, H3C-1, H3C-2 และ H3C-3 มีการเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียว เมื่อวิเคราะห์กับแผ่นดินไหวขนาด 6.9 ริกเตอร์ (PGA=0.124g) พบว่าเขื่อนเคลื่อนที่ไปประมาณ 5.5 เซนติเมตร โดย H2C, H3C-1, H3C-2 และ H3C-3 มีการเคลื่อนตัวมากกว่า H1R, H2R และ H3R เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวรุนแรงขึ้น อาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในชั้นฐานรากอย่างอิสระมากกว่าเขื่อนที่จำลองให้วางบนชั้นหินแข็ง และเมื่อวิเคราะห์กับแผ่นดินไหวขนาด 6.7 ริกเตอร์ (PGA=0.682g) กลับพบว่าเขื่อนเคลื่อนไปในแนวราบไม่ต่างจากแผ่นดินไหวขนาด 6.9 ริกเตอร์ (PGA=0.124g) มากนัก แต่ยังคงมีรูปแบบการเคลื่อนตัวคล้ายกันดังภาพที่ 207 และภาพที่ 208

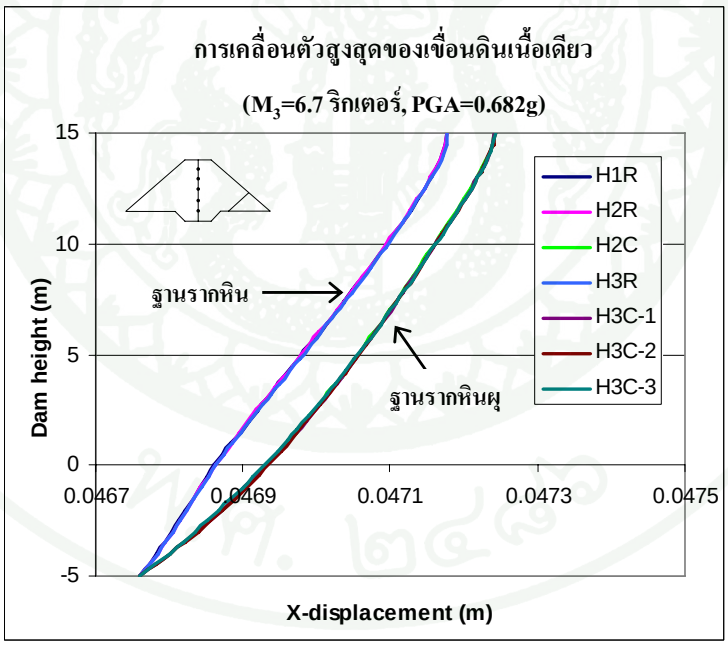


ภาพที่ 206 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 207 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M2

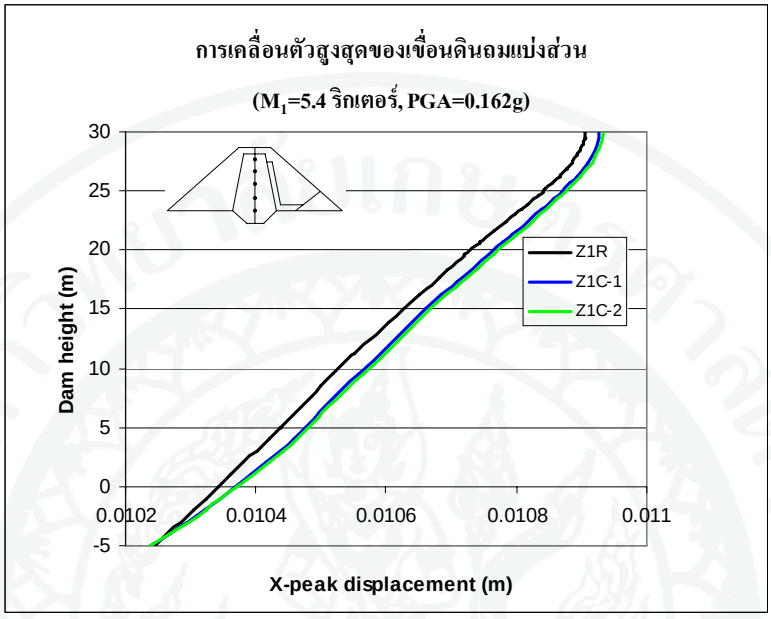


ภาพที่ 208 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากแผ่นดินไหว M3

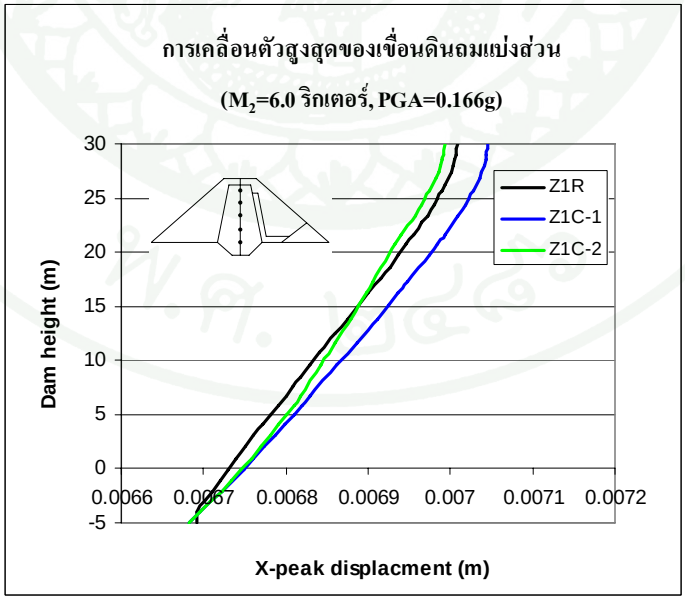
เขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด เมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวขนาด 6.9 ริกเตอร์ (PGA=0.625g) ประมาณ 42 เซนติเมตร โดย Z1R จะมีการเคลื่อนตัวได้น้อยเมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวขนาด 5.4 ริกเตอร์ (PGA=0.162g) และแผ่นดินไหวขนาด 6.0 ริกเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(PGA=0.166g) แสดงดังภาพที่ 209 ถึงภาพที่ 211 ในขณะที่ความลาดชันเขื่อนที่แตกต่างกันไม่มีผลทำให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบแตกต่างกันมากนัก

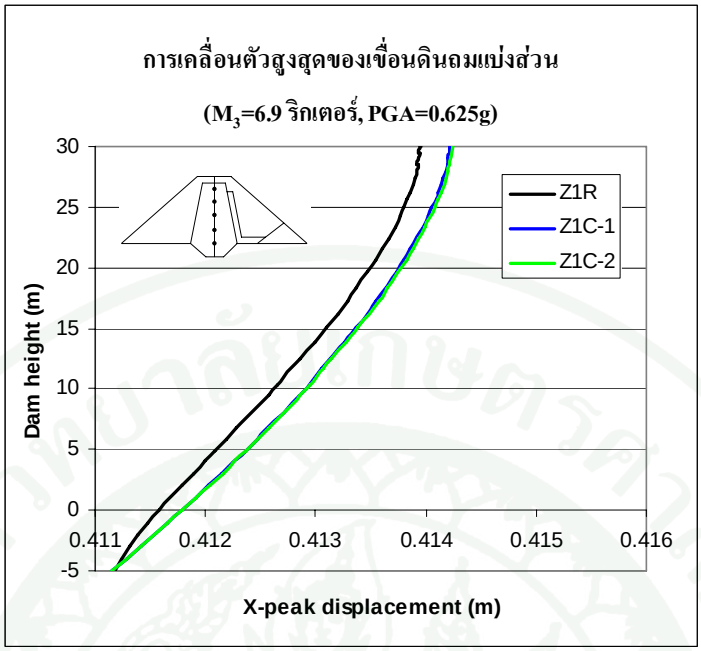


ภาพที่ 209 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M_1



ภาพที่ 210 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M_2

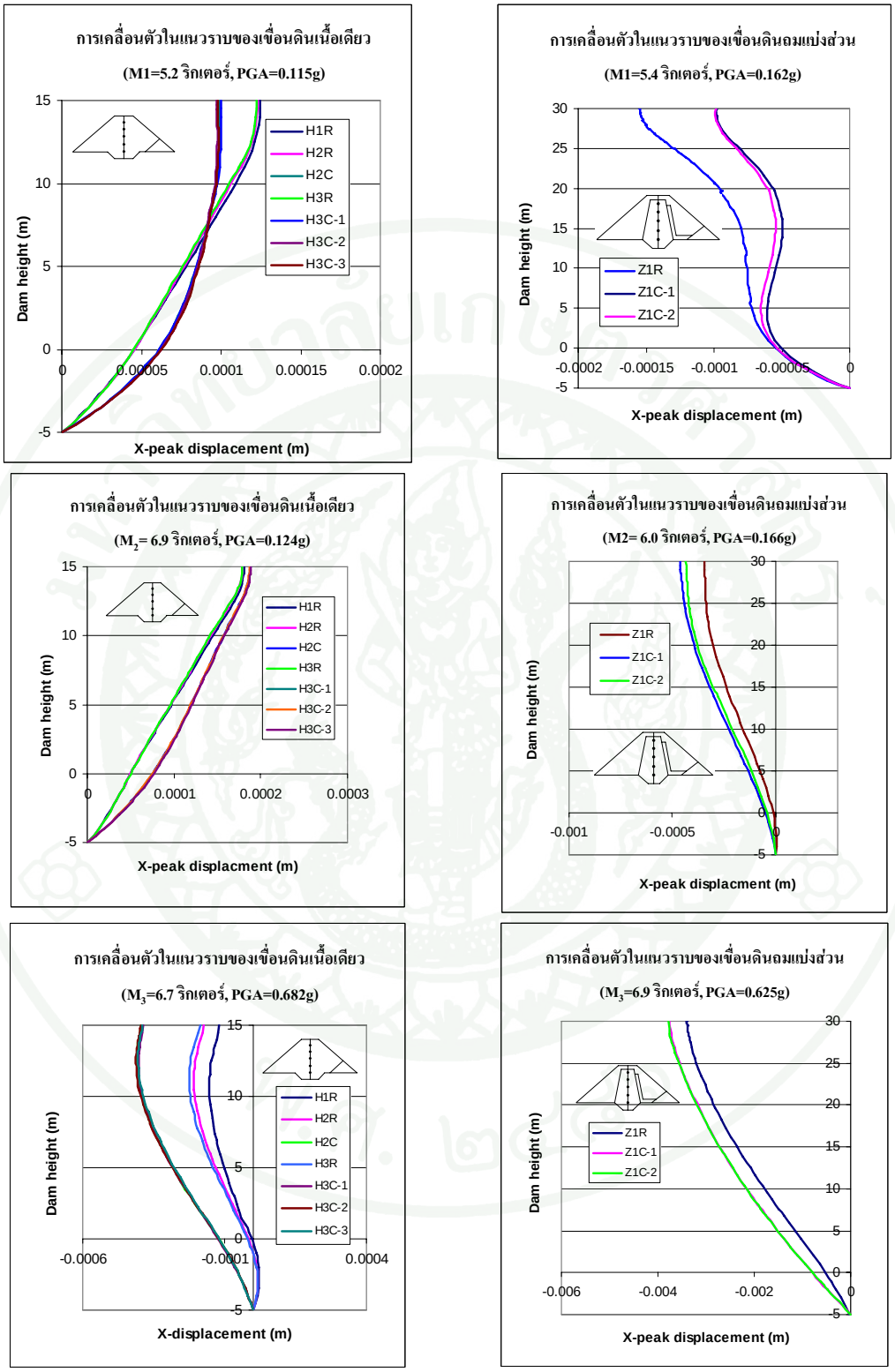
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 211 การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของเขื่อนถมแบ่งส่วนจากแผ่นดินไหว M_3

รูปร่างการสั่นไหวหรือ Mode shape ของเขื่อน มีความสำคัญด้านพฤติกรรมการตอบสนองของระบบต่อแรงกระทำภายนอก รูปร่างการสั่นไหว Mode ที่ 1 มักเป็นรูปแบบการตอบสนองสำหรับเขื่อนที่มีความสูงไม่มากและใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหวด้วย จากภาพที่ 212 จะเห็นว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียวมีการตอบสนองต่อแผ่นดินไหว M3 รุนแรงมากกว่าแบบอื่น โดยเขื่อน H1R, H2R และ H3R มีการพยายามเคลื่อนตัวเป็น Mode ที่ 2 ในส่วนที่เป็นร่องแกนเขื่อน โดยพลังงานที่สะสมตัวอยู่จะส่งผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นที่สันเขื่อนได้มาก ในขณะที่แผ่นดินไหว M1 ซึ่งมีขนาดรุนแรงน้อยที่สุดกลับทำให้เขื่อนดินถมแบ่งส่วนซึ่งมีความสูงเป็นสองเท่าของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว พยายามตอบสนองต่อแผ่นดินไหวใน Mode ที่ 2 แต่ยังไม่สมบูรณ์

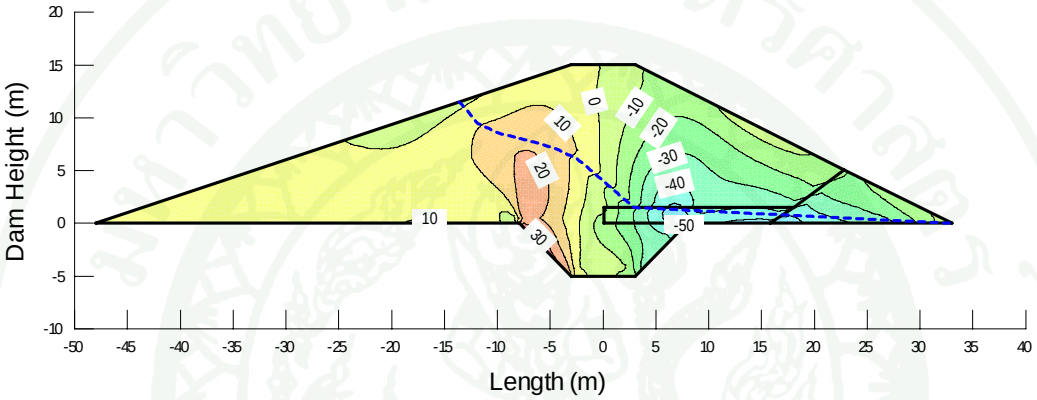
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



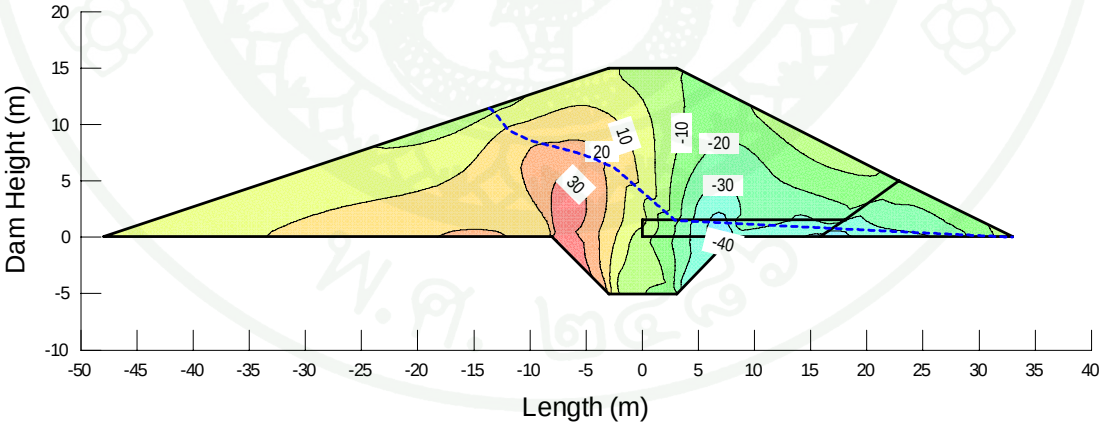
ภาพที่ 212 Mode shape ของการเคลื่อนตัวในแนวราบของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนดินถมเนื้อเดียว ณ เวลาที่มีความเร่งในแนวราบกระทำสูงสุด เปรียบเทียบระหว่างแผ่นดินไหว M2 ซึ่งมีขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.124g) กับแผ่นดินไหว M2 ซึ่งมีขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.166g) แสดงดังภาพที่ 213 ถึงภาพที่ 226 พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแผ่นดินไหว M3 มีค่ามากกว่าแผ่นดินไหว M2 ซึ่งแรงเฉือนกระทำด้านเหนือน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นจากเส้นชั้นความสูงที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง ในขณะที่แรงเฉือนที่กระทำด้านท้ายน้ำกลับมีค่าลดลงจากแรงเฉือนที่กระทำในเบื้องต้น

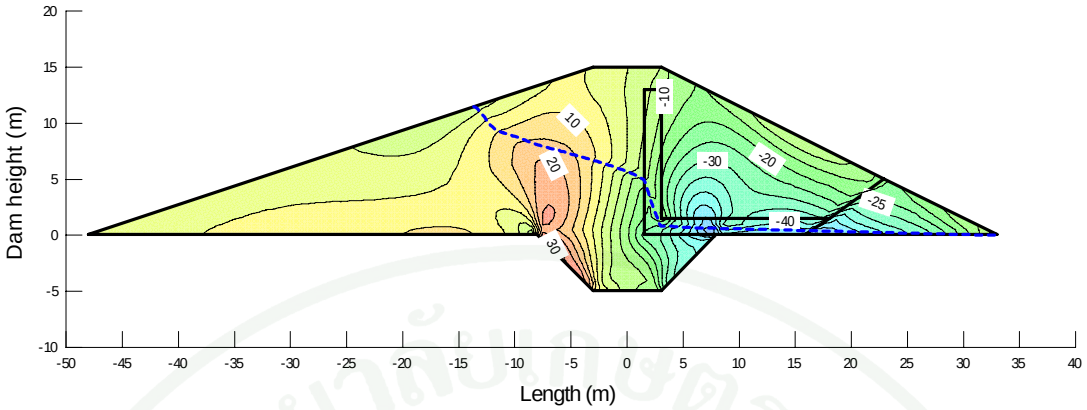


ภาพที่ 213 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H1R

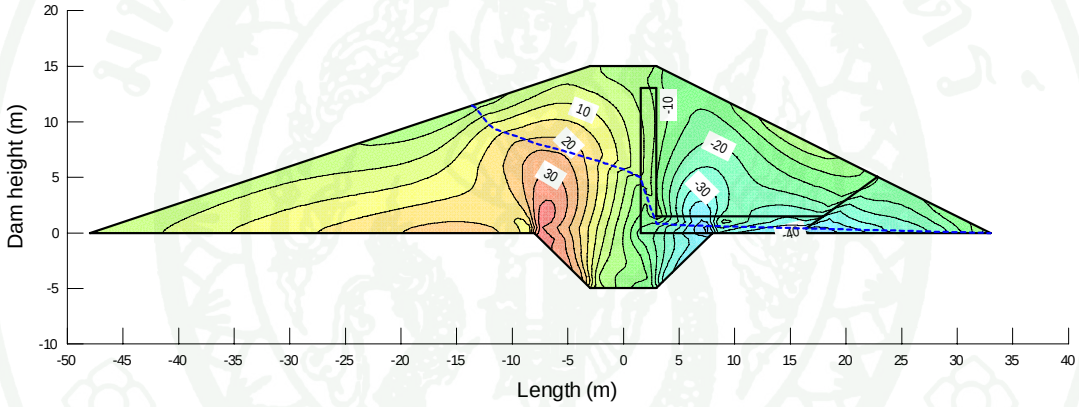


ภาพที่ 214 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H1R

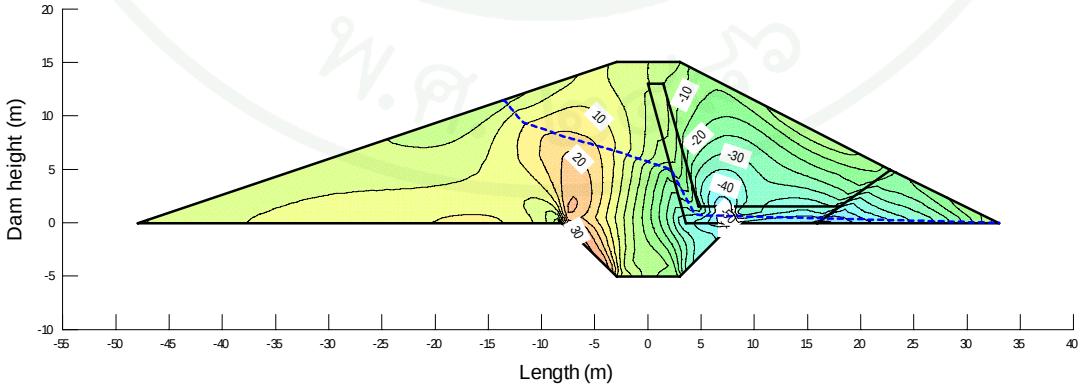
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 215 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H2R

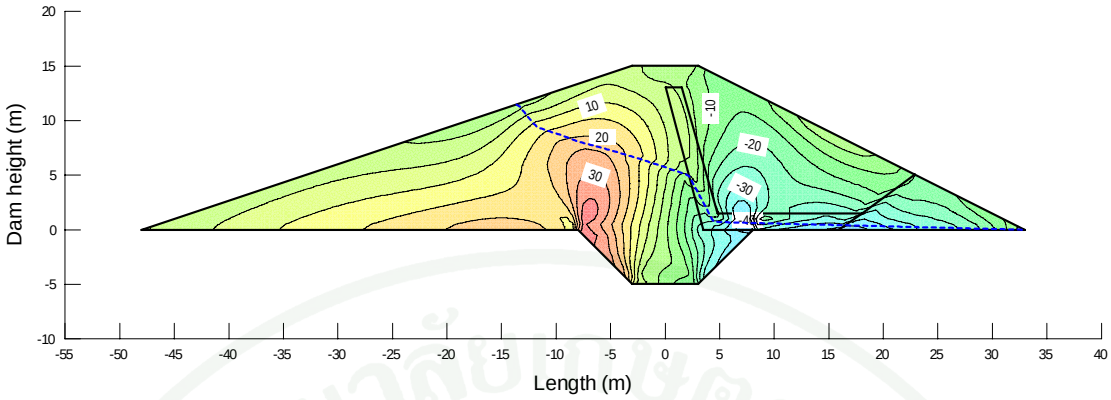


ภาพที่ 216 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H2R

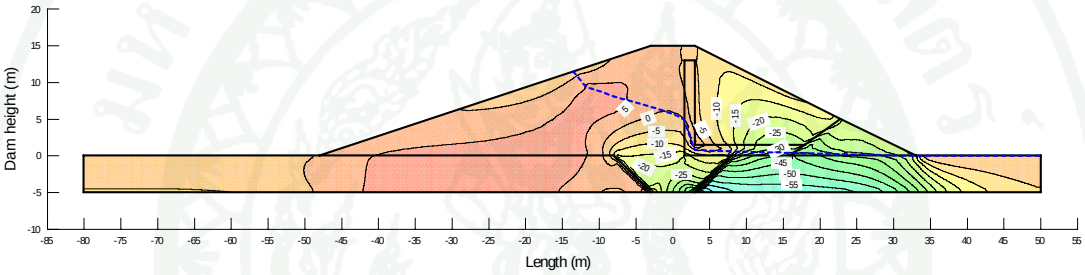


ภาพที่ 217 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3R

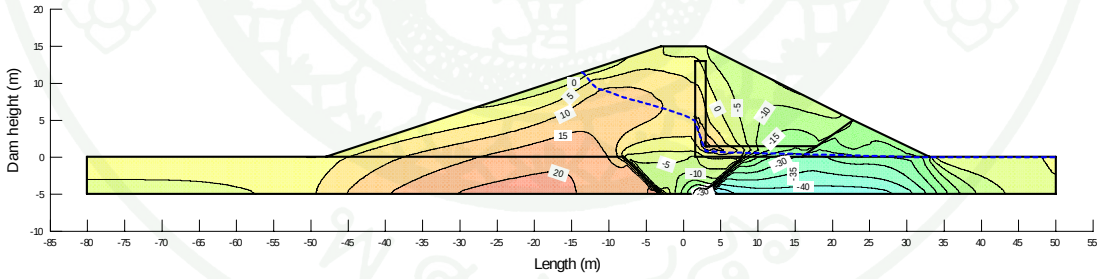
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 218 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3R

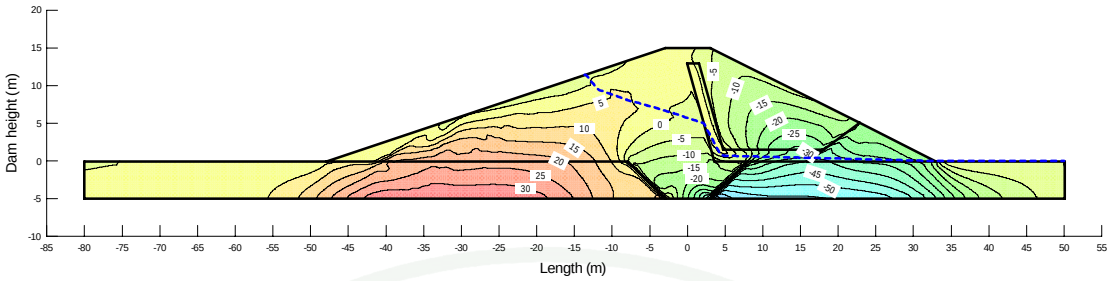


ภาพที่ 219 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H2C

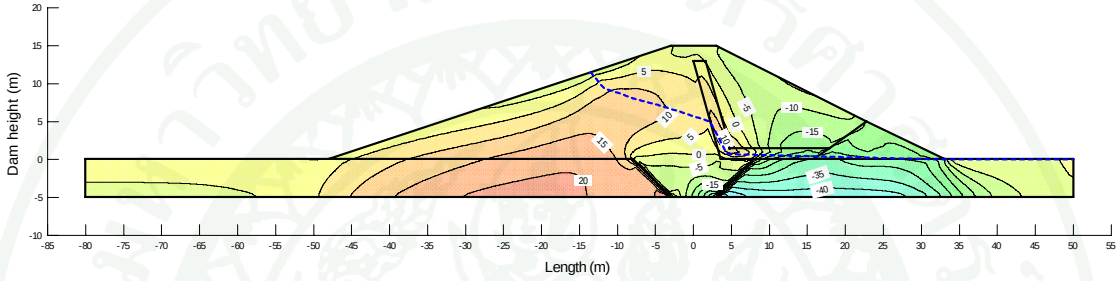


ภาพที่ 220 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H2C

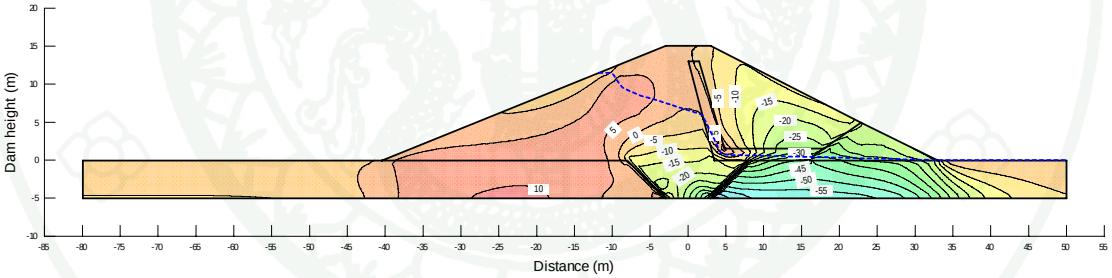
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



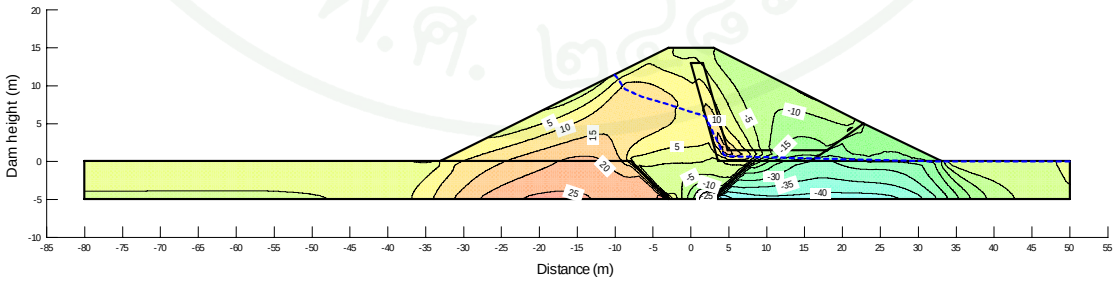
ภาพที่ 221 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-1



ภาพที่ 222 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-1

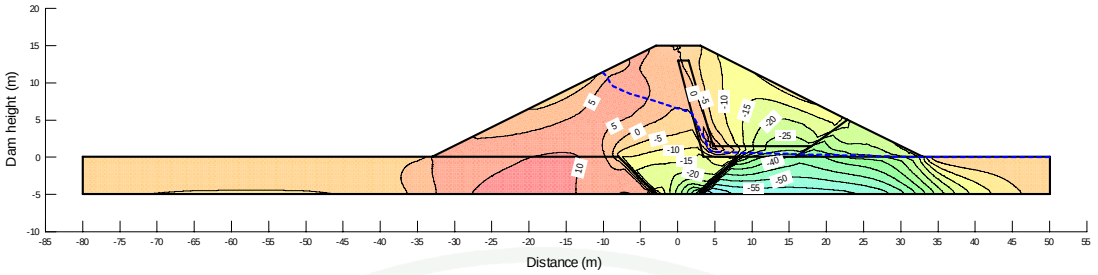


ภาพที่ 223 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-2

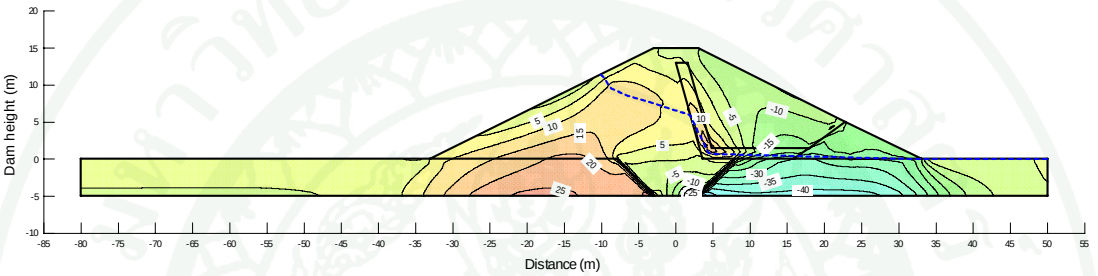


ภาพที่ 224 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

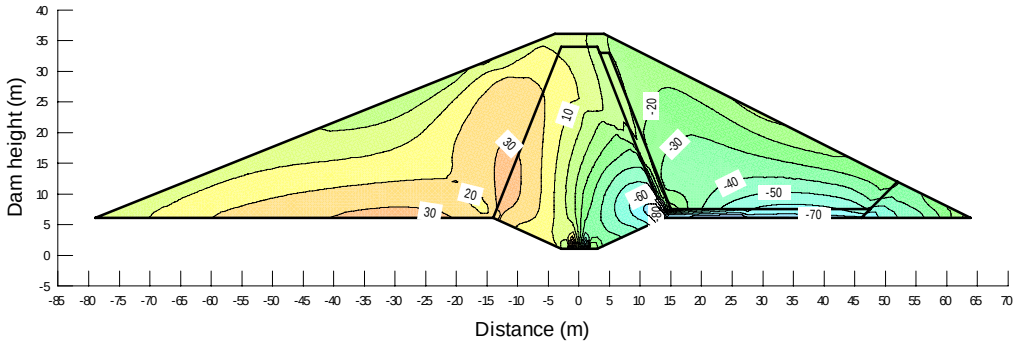


ภาพที่ 225 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-3



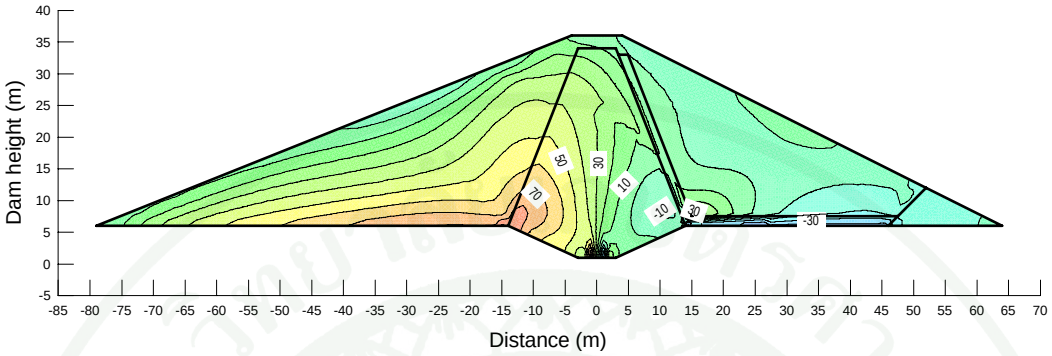
ภาพที่ 226 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน H3C-3

แรงเฉือนเกิดขึ้นในตัวเขื่อนดินถมแบ่งส่วน ณ เวลาที่มีความเร่งในแนวราบกระทำสูงสุด เปรียบเทียบระหว่างแผ่นดินไหว M2 ซึ่งมีขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.682g) กับแผ่นดินไหว M2 ซึ่งมีขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.625g) แสดงดังภาพที่ 227 ถึงภาพที่ 232 พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อน Z1C-1 จากแผ่นดินไหว M2 มีค่ามากกว่าแผ่นดินไหว M3 โดยเฉพาะด้านเหนือน้ำ ซึ่งต่างจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อน Z1C-2 ซึ่งแผ่นดินไหว M3 มีค่ามากกว่าแผ่นดินไหว M2 แต่ด้านเหนือน้ำยังเป็นด้านที่มีแรงเฉือนกระทำสูงสุด ทั้งนี้การที่แกนเขื่อนมีแรงเฉือนกระทำในทิศทางตรงข้ามกัน จะมีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตก ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาเรื่องการกัดเซาะภายใน

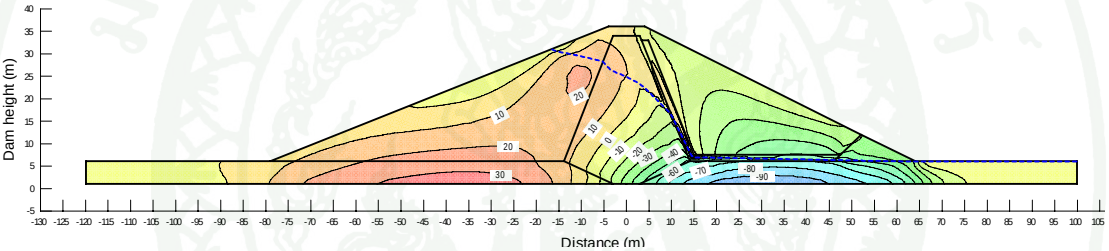


ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

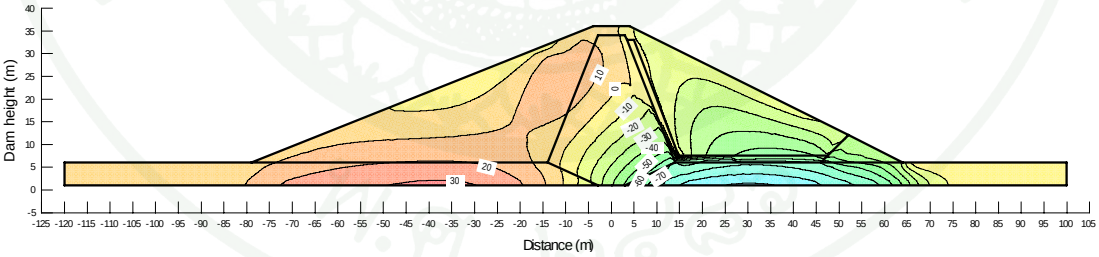
ภาพที่ 227 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1R



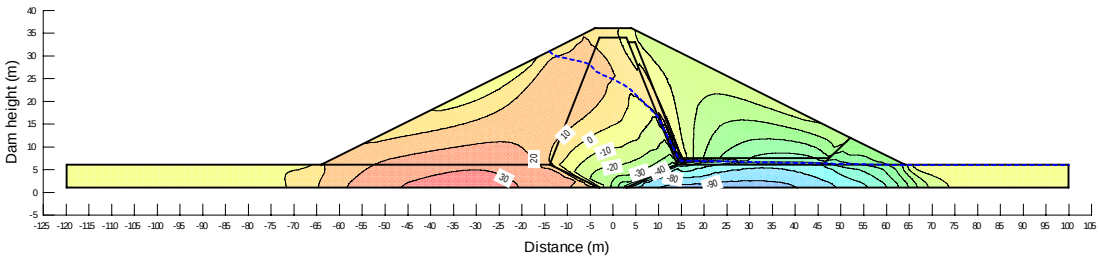
ภาพที่ 228 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1R



ภาพที่ 229 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-1

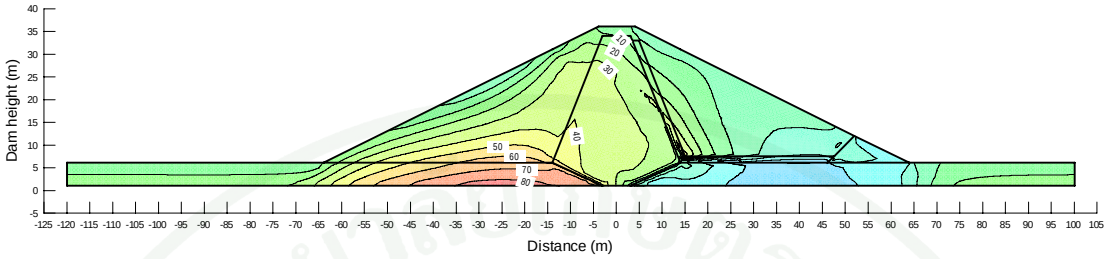


ภาพที่ 230 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-1



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

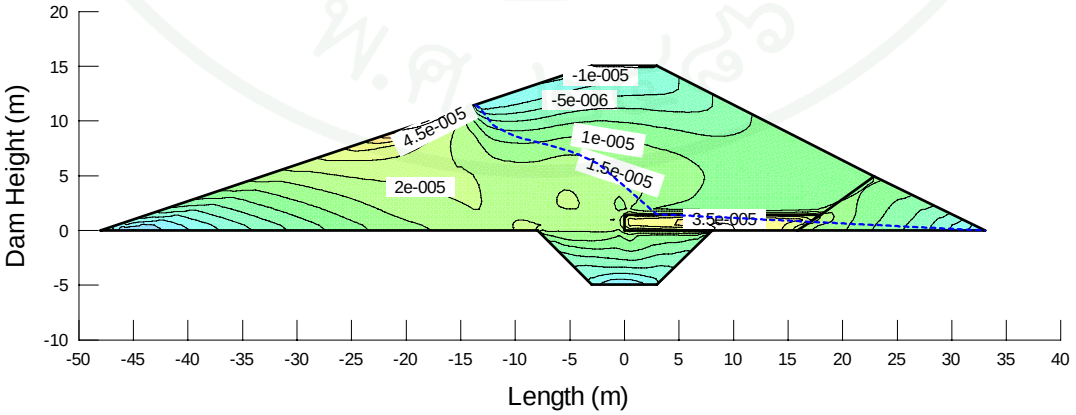
ภาพที่ 231 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M2 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-2



ภาพที่ 232 แรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำแผ่นดินไหว M3 ที่ Peak time ของเขื่อน Z1C-2

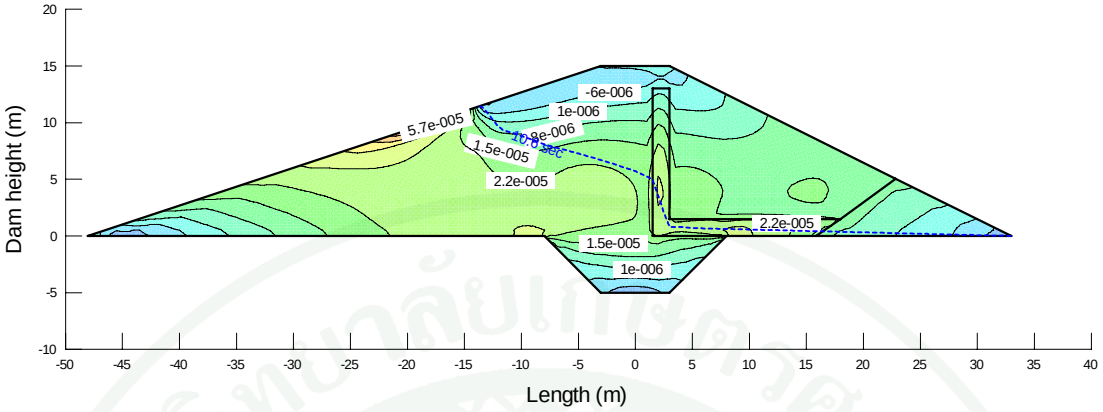
พฤติกรรมด้านความเครียดเฉือน

พฤติกรรมด้านความเครียดเฉือน (Shear strain) ที่ตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนแสดงดังภาพที่ 233 ถึงภาพที่ 242 จะเห็นว่าในชั้นกรองในแนวราบจะมี Shear strain เกิดมาก ถึงแม้ว่าจะมีน้ำหนักดินด้านบนกดทับอยู่ แต่เป็นส่วนที่อยู่ใกล้จุดกำเนิดแผ่นดินไหว อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าที่ร่องแกนเขื่อนของเขื่อนที่มีชั้นหินผุแทรกอยู่ การถ่ายแรงเป็นไปได้ดีกว่า ทำให้ Shear strain ที่เกิดขึ้นมีลักษณะกระจายตัวออกทางด้านข้างต่างกับเขื่อนที่จำลองให้วางอยู่บนชั้นหิน ซึ่ง Shear strain จะเกิดมากบริเวณการเปลี่ยนรูปของร่องแกนเขื่อน ซึ่งผลที่ได้จะต่างกับเขื่อนในความเป็นจริงในด้านการกระจายแรง

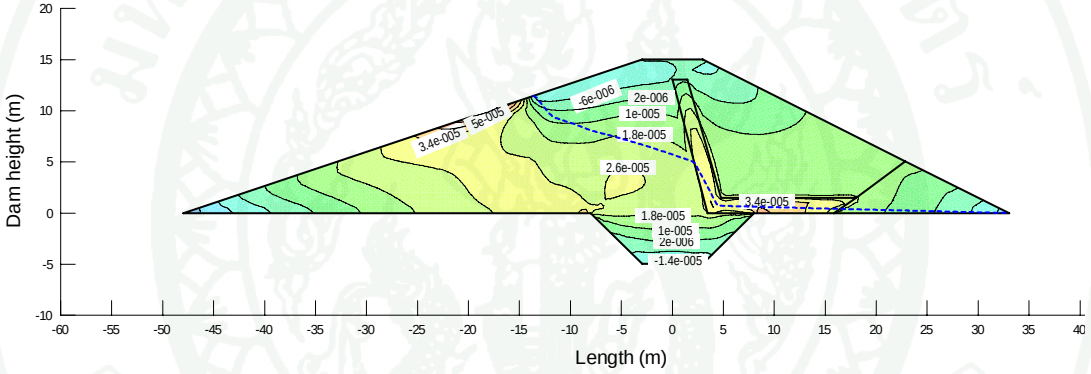


ภาพที่ 233 Shear strain ของเขื่อน H1R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

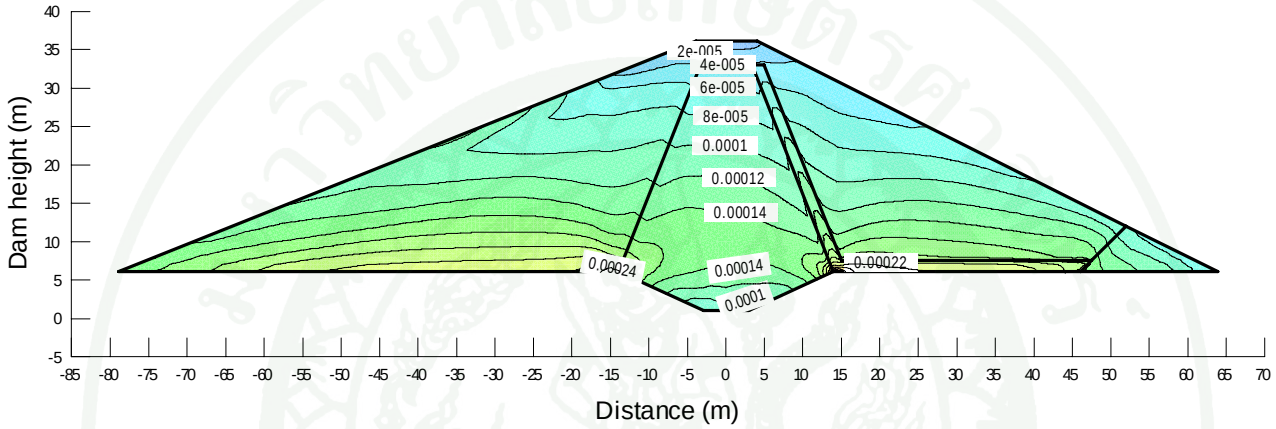


ภาพที่ 234 Shear strain ของเขื่อน H2R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

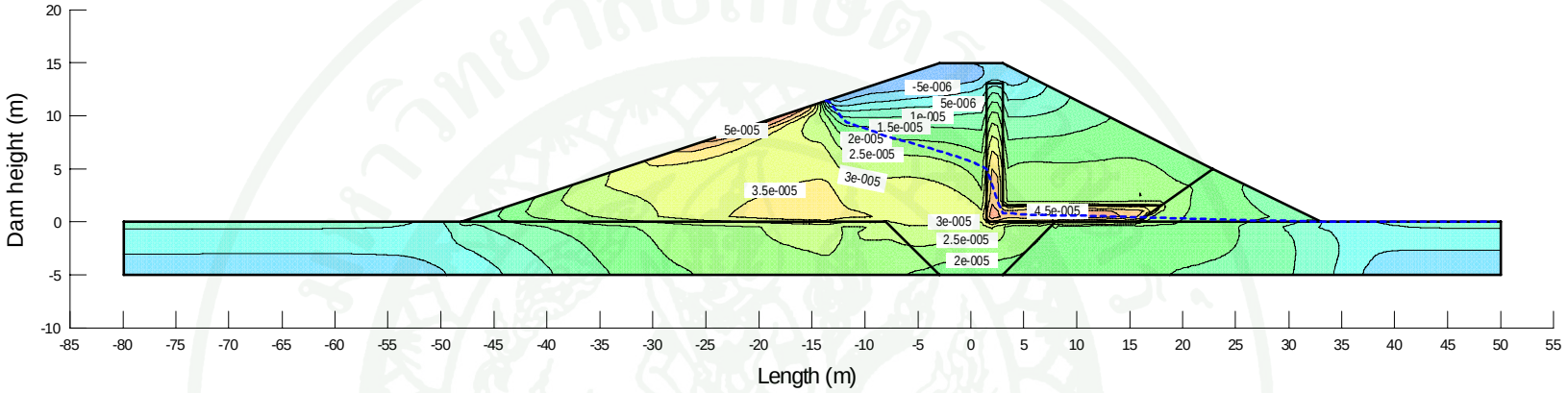


ภาพที่ 235 Shear strain ของเขื่อน H3R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

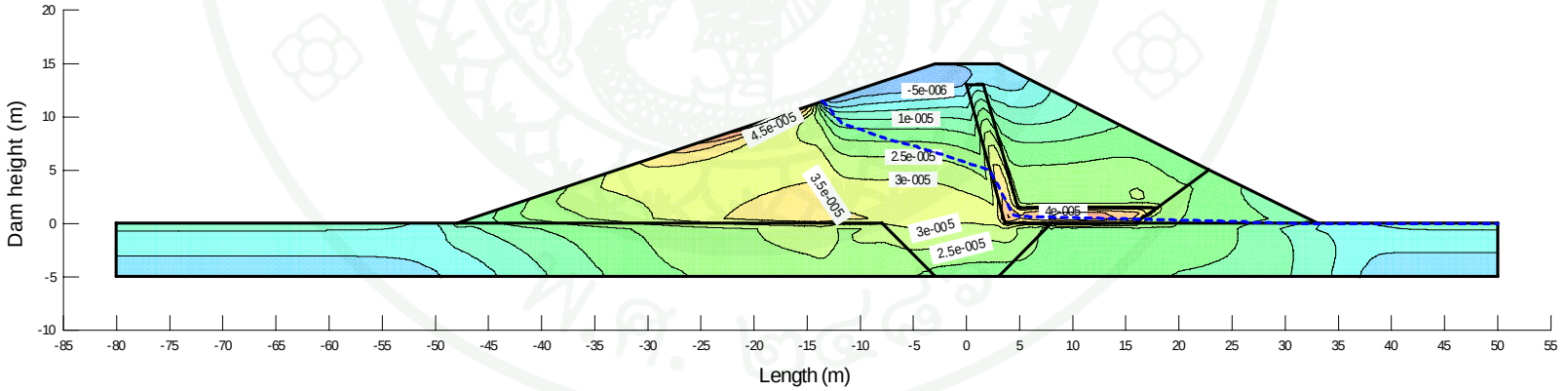
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



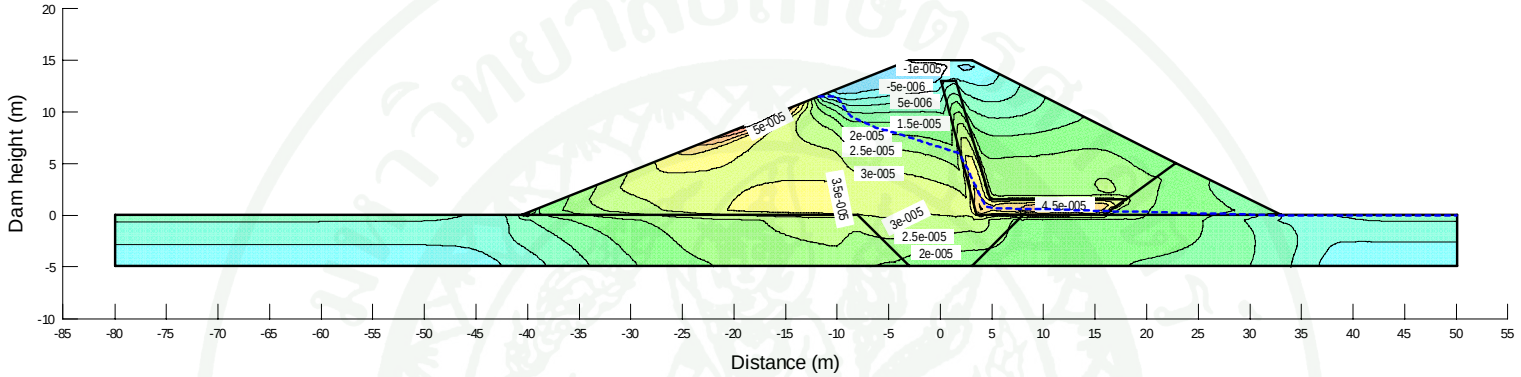
ภาพที่ 236 Shear strain ของเขื่อน Z1R จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)



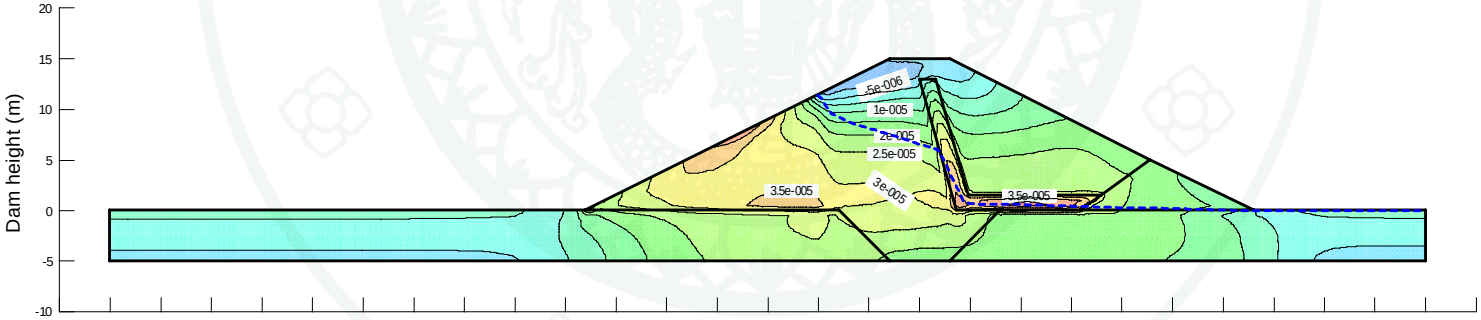
ภาพที่ 237 Shear strain ของเขื่อน H2C จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)



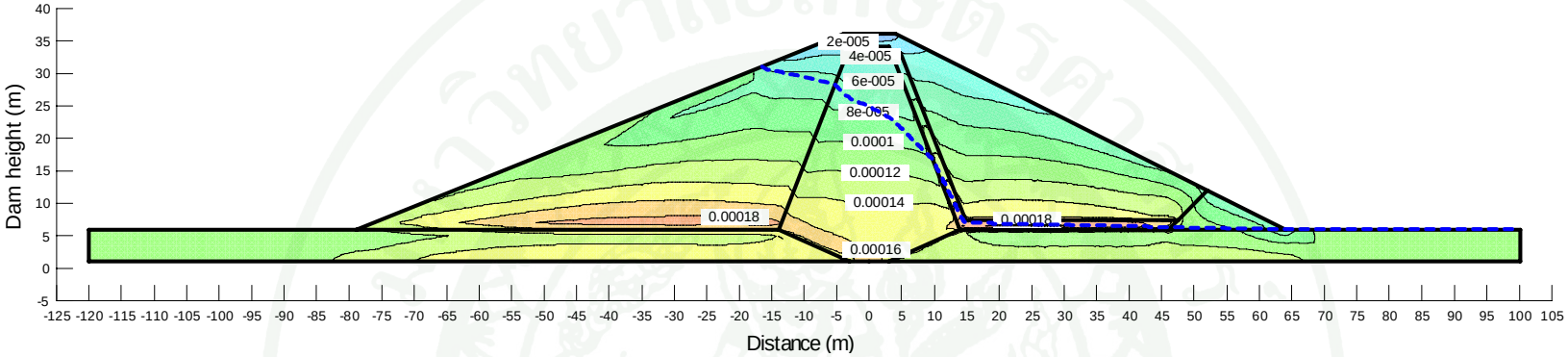
ภาพที่ 238 Shear strain ของเขื่อน H3C จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)



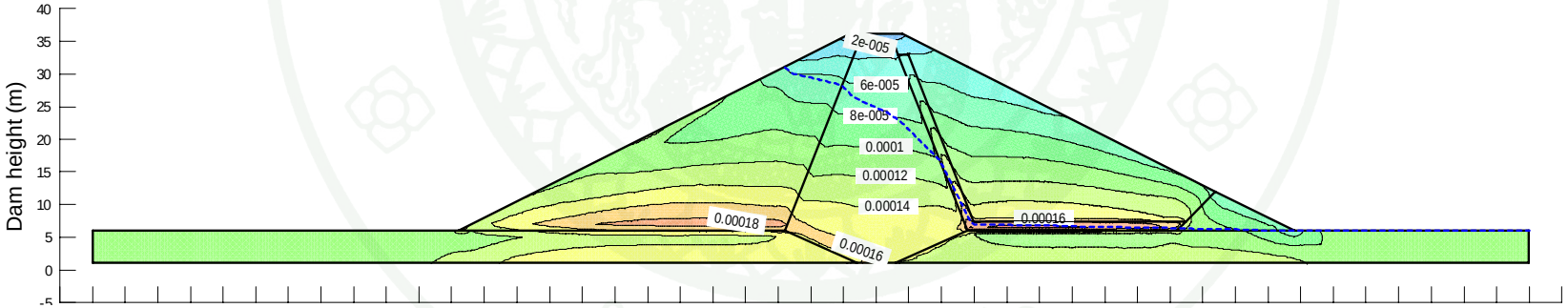
ภาพที่ 239 Shear strain ของเขื่อน H3C-2 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)



ภาพที่ 240 Shear strain ของเขื่อน H3C-3 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

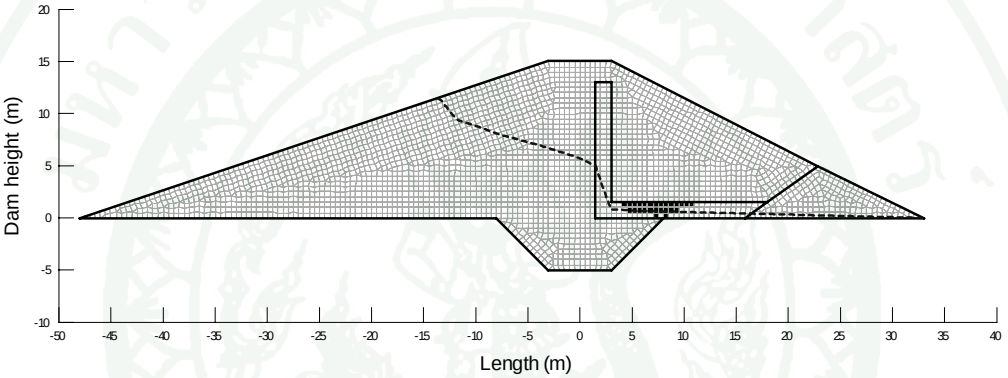


ภาพที่ 241 Shear strain ของเขื่อน Z1C-1 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

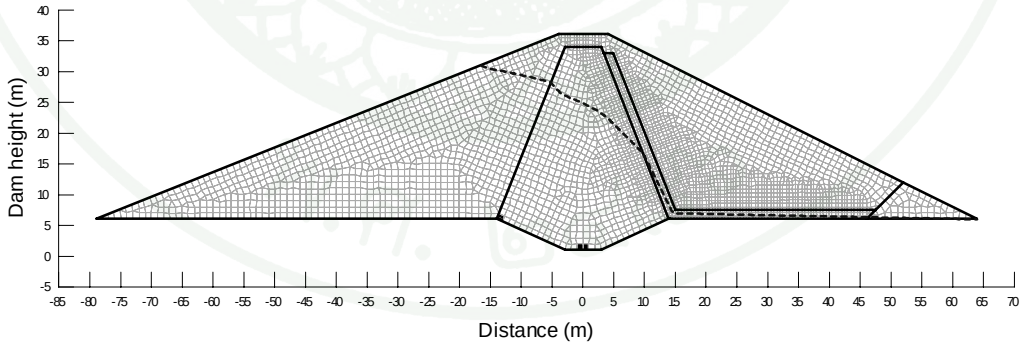


ภาพที่ 242 Shear strain ของเขื่อน Z1C-2 จากแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3)

บริเวณที่เกิดการคลากในตัวเขื่อนจากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ Dynamic deformation ของแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (M3) ในเขื่อนดินถมเนื้อเดียว เกิดขึ้นเฉพาะเขื่อน H2R ซึ่งมีชั้นกรองแบบ Vertical เป็นเขื่อนหน้าตัดเดียวที่เกิดจุดคลาก แสดงดังภาพที่ 243 ซึ่งจะเห็นว่า เป็นบริเวณเดียวกับที่เกิด Shear strain สูงสุดในชั้นกรอง ในขณะที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วนจะมีบริเวณที่เกิดการคลากในแกนเขื่อน โดยเขื่อน Z1R มีบริเวณที่เกิดการคลากเพียงเล็กน้อยที่ร่องแกนเขื่อนดังภาพที่ 244 ในขณะที่เขื่อน Z1C-1 มีบริเวณที่เกิดการคลากในแกนเขื่อนใกล้กับเส้นระดับน้ำดังภาพที่ 245 และเมื่อเขื่อนมีความลาดชันมากขึ้นดังหน้าตัดเขื่อน Z1C-2 บริเวณการคลากมีการขยายใหญ่ขึ้นดังภาพที่ 246

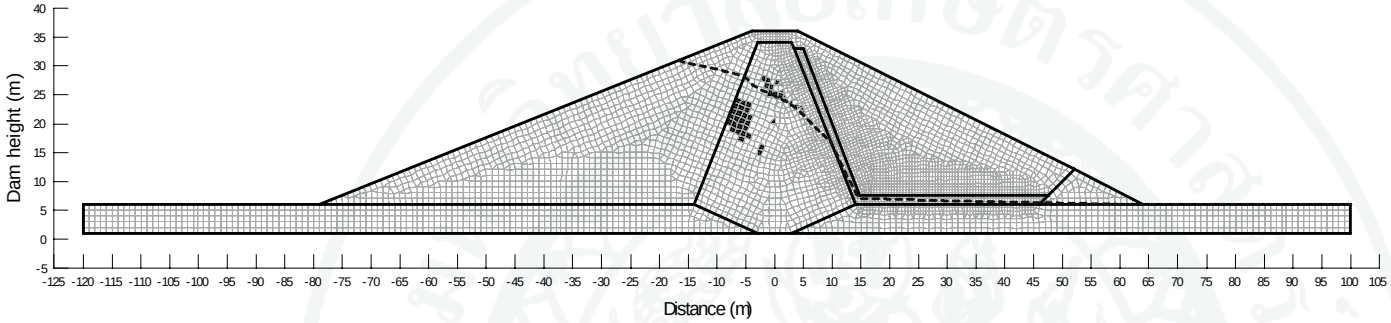


ภาพที่ 243 บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน H2R จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

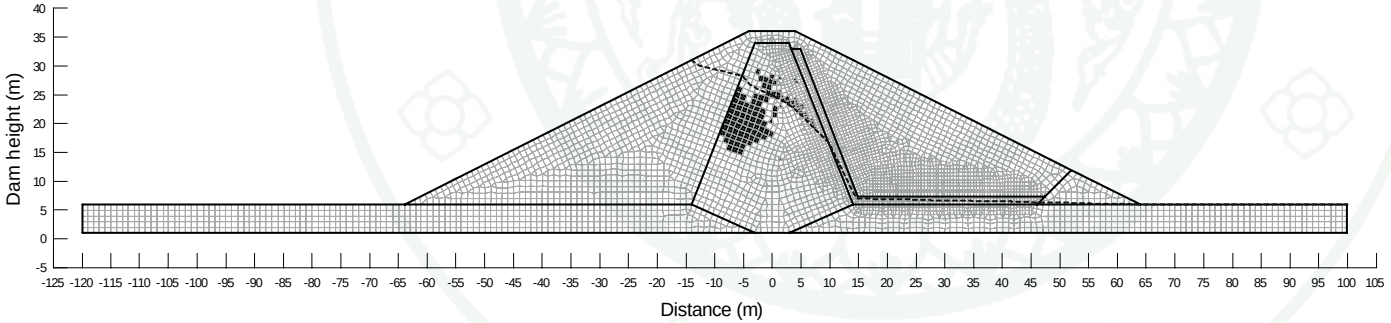


ภาพที่ 244 บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1R จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 245 บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1C-1 จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว



ภาพที่ 246 บริเวณที่เกิดการคลากของเขื่อน Z1C-2 จากการตอบสนองต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อน มีผลการทรุดตัวน้อยมาก อย่างไรก็ตามจากสมการที่ 20 สามารถคำนวณการทรุดตัวของเขื่อนที่จำลองขึ้น โดยพิจารณาด้านความสูงและวัสดุถมตัวเขื่อนซึ่งเป็นเขื่อนดิน ได้ผลดังตารางที่ 64 พบว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่รับแรงกระทำแผ่นดินไหว PGA 0.682g มีการทรุดตัวสูงสุด 1.2 m เนื่องจากแผ่นดินไหวมีความเร่งในแนวราบสูงและเกิดในระยะใกล้ ส่วนการทรุดตัวที่คำนวณได้ต่ำสุดคือเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่รับแรงกระทำแผ่นดินไหว PGA 0.124g ซึ่งทรุดตัวเพียง 0.14 เมตร เนื่องจากเกิดในระยะไกลจากโครงสร้างเขื่อน 42 กิโลเมตร

ตารางที่ 64 การคำนวณการทรุดตัวโดยสมการเชิงประสบการณ์ของ Swaisgood

Dam height (m)	Magnitude (Richter)	PGA (g)	Distance (m)	Resonance Factor	Seismic Energy Factor	Crest settlement (%)	(m)
20	5.2	0.115	28.9	0.62	4.63	0.94	0.19
35	5.4	0.162	15.4	0.77	4.19	1.10	0.39
20	6.9	0.124	42.0	0.54	3.35	0.65	0.14
35	6	0.166	37.9	0.56	3.74	0.74	0.26
20	6.7	0.682	4.3	1.20	0.01	5.96	1.2
35	6.9	0.605	6.1	1.06	0.33	1.17	0.41

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำฐานข้อมูลเขื่อน สามารถเก็บข้อมูลได้จำนวน 478 เขื่อน ทั้งเขื่อนขนาดใหญ่ ขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยข้อมูลประกอบด้วยรหัสเขื่อน ชื่อเขื่อน ละติจูดและลองติจูดที่ตั้ง พิกัดแผนที่ ชื่อตำบล อำเภอและจังหวัดที่ตั้งเขื่อน ประเภทของเขื่อน ความสูง ความยาว ความจุของอ่างเก็บน้ำ และปีที่ก่อสร้างเสร็จ ระยะห่างที่น้อยที่สุดจากเขื่อนถึงชุมชนท้ายน้ำและจำนวนประชากรที่อาศัยในแหล่งชุมชน ทั้งนี้ข้อมูลเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก 245 เขื่อน ที่มีข้อมูลครบ ได้ถูกใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยง ในจำนวนนี้พบว่ามีเขื่อนที่ตั้งอยู่เขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (2ข) จำนวน 18 เขื่อน ตั้งอยู่บริเวณเสี่ยงภัยปานกลาง (เขต 2ก) จำนวน 97 เขื่อน ตั้งอยู่บริเวณเสี่ยงภัยน้อย (เขต 1) จำนวน 40 เขื่อน และมีเขื่อนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ไม่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (เขต 0) จำนวน 111 เขื่อน โดยส่วนใหญ่เป็นเขื่อนดินถมจำนวน 262 เขื่อน เป็นเขื่อนอายุตั้งแต่ 6-35 ปี (นับถึง พ.ศ. 2549) จำนวน 197 เขื่อน โดยเขื่อนส่วนใหญ่มีความสูง 5-15 เมตร จำนวน 149 เขื่อน มีปริมาณเก็บกัก 2.1-100 ล้านลูกบาศก์เมตร จำนวน 142 เขื่อน มี 260 เขื่อนที่มีหมู่บ้านตั้งอยู่ใกล้เขื่อนภายใน 5 กิโลเมตร โดยส่วนใหญ่แต่ละเขื่อนมีประชากรอาศัยอยู่ในแหล่งชุมชนประมาณ 260-3600 คน

2. จากการจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อน พบว่าเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็กที่มีความเสี่ยงต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว 3 ลำดับแรกได้แก่ ลำดับที่ 1 เขื่อนท่าทุ่งนา จ.กาญจนบุรี ตั้งอยู่ในเขต 2ข มีคะแนนความเสี่ยง 22.26 คะแนน ลำดับที่ 2 คือเขื่อนแม่ทะ จ.ลำปาง ตั้งอยู่ในเขต 2ก มีคะแนนความเสี่ยง 19.79 คะแนน และเขื่อนลำดับที่ 3 มีจำนวน 4 เขื่อน คือเขื่อนแม่มอก จ.ลำปาง เขื่อนแม่ปืม จ.พะเยา เขื่อนห้วยช้าง จ.เชียงราย และเขื่อนห้วยลึก จ.ตาก มีคะแนนความเสี่ยง 18.55 คะแนน โดยเขื่อนห้วยช้างและเขื่อนห้วยลึก ตั้งอยู่ในเขต 2ข ส่วนเขื่อนแม่มอกและเขื่อนแม่ปืม ตั้งอยู่ในเขต 2ก ทั้งนี้ผลการจัดลำดับความเสี่ยงกระทำเฉพาะ 245 เขื่อนที่มีข้อมูลปัจจัยด้านต่างๆ ครบถ้วนได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้งเขื่อน ประเภทของเขื่อน อายุ ความสูง ปริมาณเก็บกัก ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชน และจำนวนประชากรที่อาศัยอยู่ในแหล่งชุมชน

3. จากการศึกษาหน้าตัดเขื่อนที่ได้ดำเนินการก่อสร้างจริงจากแบบหน้าตัด 79 เขื่อน ของกรมชลประทาน พบว่า 74% ของข้อมูลเป็นเขื่อนดินถมแบ่งส่วนสูง 15-40 เมตร อีก 26% เป็นเขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดินถมเนื้อเดียวสูง 15-30 เมตร โดยแต่ละองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่มีขนาดดังนี้คือ มีสันเขื่อนกว้าง 8 เมตร มีชั้นกรองทั้งแบบ Horizontal, Vertical และ Chimney กว้าง 2 เมตร ทั้งเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีความลาดชันด้านเหนือน้ำ 1:3 และความลาดชันด้านท้ายน้ำ 1:2.5 ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีความสำคัญต่อการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยทั้งหมดมีขนาดตามเกณฑ์ของกรมชลประทาน (2545)

4. การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุถมตัวเขื่อน ดำเนินการโดยการรวบรวมผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ที่ทดสอบดินจากบ่อยืมดินของโครงการก่อสร้างต่างๆ จำนวน 37 โครงการ ทั้งนี้ทำการแบ่งชนิดของดินในแต่ละองค์ประกอบได้แก่ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone ตามตารางที่ 36 จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำมีการกระจายตัวแบบ Lognormal ความถ่วงจำเพาะส่วนใหญ่มีการกระจายตัวแบบ Logistic ดัชนีความเหนียวส่วนใหญ่มีการกระจายตัวแบบ Log logistic อัตราส่วนช่องว่างมีการกระจายตัวแบบ Beta general และหน่วยน้ำหนักส่วนใหญ่มีการกระจายตัวแบบ Weibull ซึ่งค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ค่า %COV และการกระจายตัวของคุณสมบัติทางสถิตย์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 65 ทั้งนี้พบว่าค่า %COV ของค่า Permeability มีค่าสูงที่สุด ค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักมี %COV น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่า %COV ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาดินบดอัดของ Nwaiwu *et al* (2005) และคุณสมบัติของดินธรรมชาติจาก Kulhawy (1991) และ Hammitt (1966) ดังตารางที่ 59

ส่วนคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินประกอบด้วยค่าความเหนียวและมุมเสียดทาน พบว่าค่าความเหนียวมีการกระจายตัวแบบเบ้ขวาอันเนื่องมาจากความไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบทำให้ดินบางส่วนมีค่าความเหนียวสูง เนื่องจากเกิดค่าความเหนียวจากแรงดูด (Suction) ในขณะที่มุมเสียดทานมีการกระจายตัวแบบสมมาตร แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 66 ซึ่งค่าความเหนียวและมุมเสียดทานมีความแปรปรวนมากกว่า Kulhawy (1991) ดังตารางที่ 60 โดยอาจเป็นเพราะการจัดกลุ่มของค่าความเหนียวและมุมเสียดทานได้จัดตามลักษณะองค์ประกอบของเขื่อนได้แก่ Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone ซึ่งแต่ละองค์ประกอบเขื่อนประกอบด้วยดินหลายประเภทตามตารางที่ 36 ทำให้เกิดความแปรปรวนขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 65 สรุปผลการกระจายตัวและคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ได้ในงานวิจัย

No	Component	Value List	Permeability (cm/sec)	G_S	PI (%)	e	γ_t (t/m^3)
1	Homogeneous	Average of all values	4.21E-04	2.67	13.23	0.53	2.06
		Standard deviation	4.42E-03	0.06	6.84	0.14	0.11
		%COV	868.80	2.25	48.02	26.42	5.34
		Curve fitting	Lognormal	Normal	Loglogistic	Beta General	Weibull
2	Core	Average of all values	3.11E-04	2.68	14.68	0.5	2.08
		Standard deviation	5.43E-03	0.05	7.24	0.11	0.09
		%COV	748.36	1.87	45.26	22.00	4.33
		Curve fitting	Lognormal	Logistic	Loglogistic	Beta General	Weibull
3	Shell	Average of all values	3.11E-04	2.67	12.32	0.58	2
		Standard deviation	1.91E-04	0.06	6.69	0.17	0.13
		%COV	891.33	2.25	53.73	29.31	6.50
		Curve fitting	Lognormal	Logistic	Invgauss	Beta General	Lognormal

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

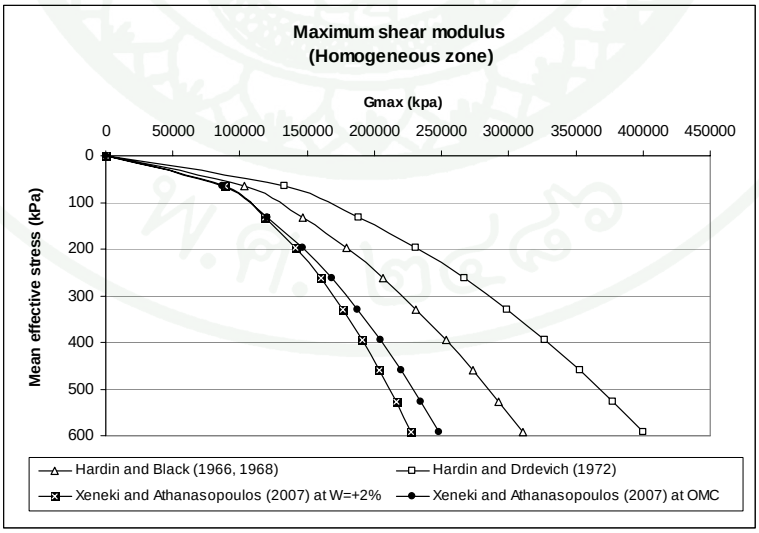
ตารางที่ 66 สรุปผลการกระจายตัวและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้ในงานวิจัย

No	Component	Value List	Direct Shear (CU)		Triaxial (UU)		Triaxia $\overline{CU}$ ')			
			C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C (t/m^2)	ϕ (Degree)	C'(t/m^2)	ϕ' (Degree)
1	Homogeneous	Average of all values	2.22	25.75	4.71	15.78	5.08	18.79	2.97	25.97
		Standard deviation	4.06	11.22	5.14	7.35	5.66	9.15	3.65	7.40
		%COV	120.72	44.46	89.48	52.07	110.37	48.80	108.43	28.49
		Curve fitting	Inverse gauss	Logistic	Exponential	Logistic	Beta General	Gamma	Logistic	Normal
2	Core	Average of all values	1.77	23.06	5.09	13.92	3.57	16.49	2.26	24.23
		Standard deviation	3.12	11.84	6.16	6.25	5.42	6.48	2.50	8.41
		%COV	108.47	50.81	93.32	44.90	125.39	39.75	113.00	32.68
		Curve fitting	Inverse gauss	Logistic	Inverse gauss	Normal	Logistic	Gamma	Beta General	Logistic
3	Shell	Average of all values	2.91	29.03	4.86	19.01	6.65	21.73	4.76	21.64
		Standard deviation	3.4	9.49	4.96	7.43	5.98	11.20	4.36	6.12
		%COV	118.56	32.69	87.90	50.98	95.44	51.17	91.81	22.81
		Curve fitting	Beta General	Normal	Exponential	Logistic	Beta General	Weibull	Normal	Weibull

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

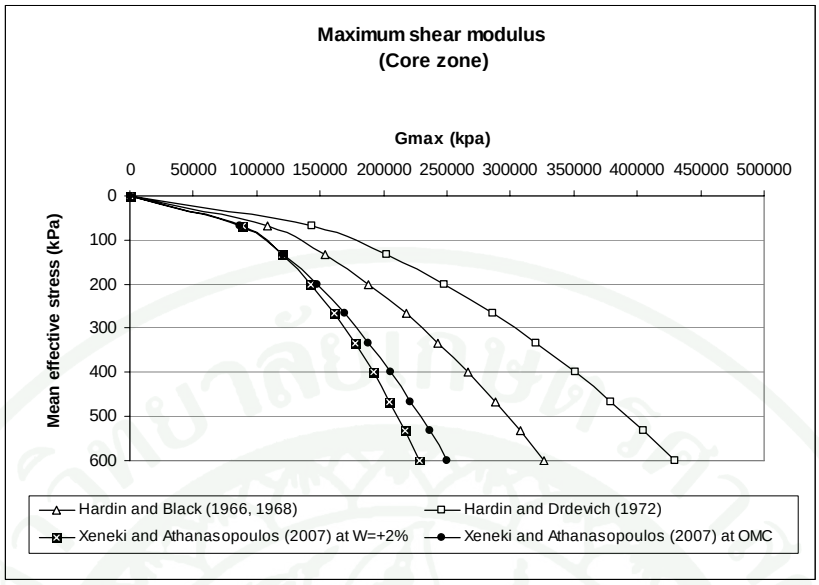
5. การศึกษาคุณสมบัติของโมดูลัสเฉือนสูงสุดของดินถมบดอัดตัวเขื่อน ดำเนินการโดยใช้คุณสมบัติทางสถิตย์ที่ได้รวบรวมมาจากการออกแบบ 37 โครงการ (ข้อ 4) และนำมาคำนวณค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดมีค่าเรียงตามขอบเขตสูงสุด ถึงขอบเขตต่ำสุดตามสมการของ Hardin and Drnevich (1972), Hardin and Black (1966, 1968) และ Xenaki and Athanasopoulos (2007) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางสถิตย์ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก, อัตราส่วนช่องว่าง และดัชนีความเหนียว มาวิเคราะห์ตามสมการดังกล่าวจะได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนสูงสุดกับ σ'_m แบ่งตามองค์ประกอบต่างๆดังภาพที่ 247 ถึงภาพที่ 249

เมื่อนำความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่วิเคราะห์จาก Hardin and Drnevich (1972) มาตรวจสอบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากข้อมูลจริงในสนามโดยคำนวณความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากค่า SPT ของเขื่อนที่ใช้งานอยู่จริงจาก เขื่อนลำปาว เขื่อนบางวาด เขื่อนแก่งกระจาน และเขื่อนปิดช่องเขาต่ำของเขื่อนสิริกิติ์ และผลการทดสอบในสนามเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดยตรงจากวิธี SASW ของเขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนรัชชประภาและเขื่อนศรีนครินทร์ พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้ในงานวิจัยมีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของเขื่อนอื่นต่อไป เพราะจากการคำนวณค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนสูงสุดแสดงให้เห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับเขื่อนที่ใช้งานอยู่จริงเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากการทดสอบ SPT และการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยตรงจากวิธี SASW

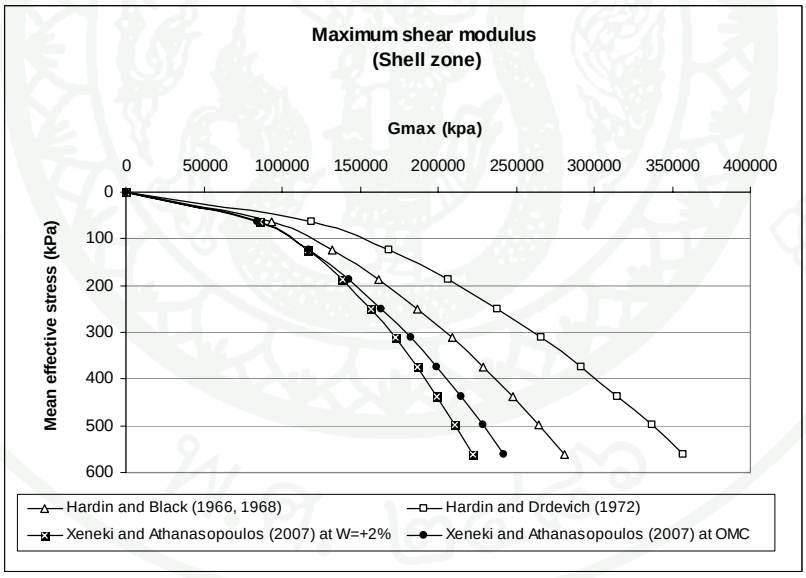


ภาพที่ 247 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Homogeneous zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 248 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Core zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ



ภาพที่ 249 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ σ'_m ของ Shell zone จากแหล่งอ้างอิงต่างๆ

6. เมื่อเขื่อนมีความสูงเพิ่มขึ้นคาบธรรมชาติของเขื่อนโดยรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบเขื่อนที่สูงเท่ากันแต่มีความเร็วคลื่นแรงเฉือนต่างกัน พบว่าเขื่อนที่มี

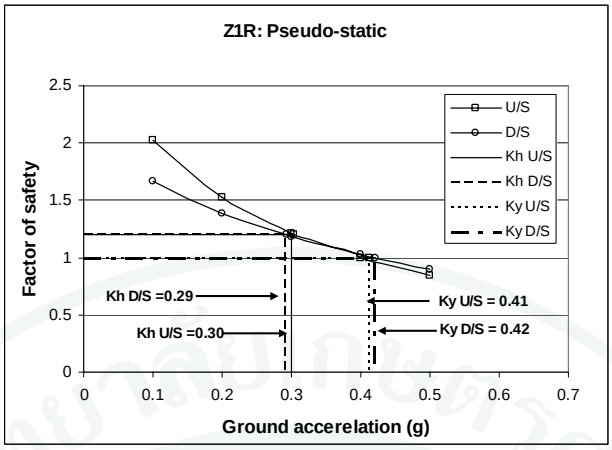
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมากกว่าจะมีคาบธรรมชาติน้อยกว่า โดยการหาคาบธรรมชาติของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวสูง 15 เมตร จากสมการเชิงประสบการณ์ต่างๆพบว่า เขื่อนมีคาบธรรมชาติประมาณ 0.05-0.28 วินาที ส่วนเขื่อนดินถมแบ่งส่วนสูง 30 เมตร มีคาบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.1-0.44 วินาที โดยคาบธรรมชาตินี้อยู่ในขอบเขตของวิธี Shear beam approach และ Gazetas and Dakoulas (1992) ซึ่งวิเคราะห์จากความสูงของเขื่อนและความเร็วคลื่นแรงเฉือน

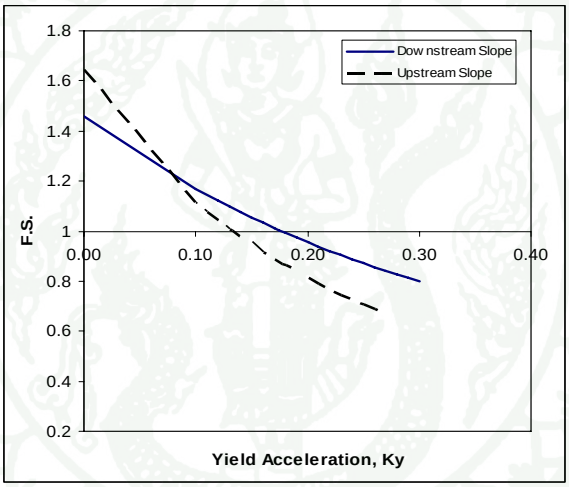
7. อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนในสภาวะสถิตย์ที่วิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติของดินที่รวบรวมจากโครงการก่อสร้างจริงพบว่า ในช่วงระหว่างการเก็บน้ำ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยด้านเหนือน้ำมีค่ามากกว่าด้านท้ายน้ำ ซึ่งอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุดด้านท้ายน้ำของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวมีค่าเท่ากับ 2.26 ส่วนด้านเหนือน้ำมีอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุดเท่ากับ 3.58 ในขณะที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วน มีอัตราส่วนความปลอดภัยด้านท้ายน้ำและเหนือน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 2.12 และ 2.71 ตามลำดับ ทั้งนี้จากผลการศึกษาพบว่ารูปแบบชั้นกรองไม่มีผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อน นอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตได้ว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนที่ตรงตามเกณฑ์กำหนดของกรมชลประทาน (2535) มีค่าค่อนข้างสูงกว่าที่ต้องการอย่างชัดเจน

8. จากตารางที่ 63 จะเห็นว่าค่า K_y ของเขื่อนมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับค่า K_h ที่ใช้ในการออกแบบในประเทศไทย โดยค่า K_y ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีค่าเท่ากับ 0.54 ถึง 0.63g และ 0.4 ถึง 0.43g ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าส่วนใหญ่ด้านเหนือน้ำจะมี K_y สูงกว่าท้ายน้ำ โดยค่า K_y จะลดต่ำลงเมื่อเขื่อนมีความสูงมากขึ้น จนเมื่อถึงความสูงระดับหนึ่ง ค่า K_y ด้านเหนือน้ำจะต่ำกว่าท้ายน้ำ กรณีดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของเขื่อนศรี-นครินทร์ (เกรียงไกร, 2551) ดังแสดงในภาพที่ 250 ซึ่งด้านเหนือน้ำของเขื่อนจะมี K_y สูงกว่าด้านท้ายน้ำเมื่อต้องต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวระดับต่ำ แต่เมื่อความเร่งในแนวราบมีค่ามากกว่า 0.08g ด้านเหนือน้ำจะเริ่มมีอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า โดยเขื่อนศรีนครินทร์มีค่า K_y ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำเท่ากับ 0.132g และ 0.175g ดังนั้นจะเห็นว่าการพิบัติของด้านเหนือน้ำหรือท้ายน้ำมีความเกี่ยวข้องกับความสูงเขื่อนด้วยเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) กราฟ K_y ของเขื่อน Z1R ที่ได้ในงานวิจัย



(ข) กราฟ K_y ของเขื่อนศรีนครินทร์ (เกรียงไกร, 2551)

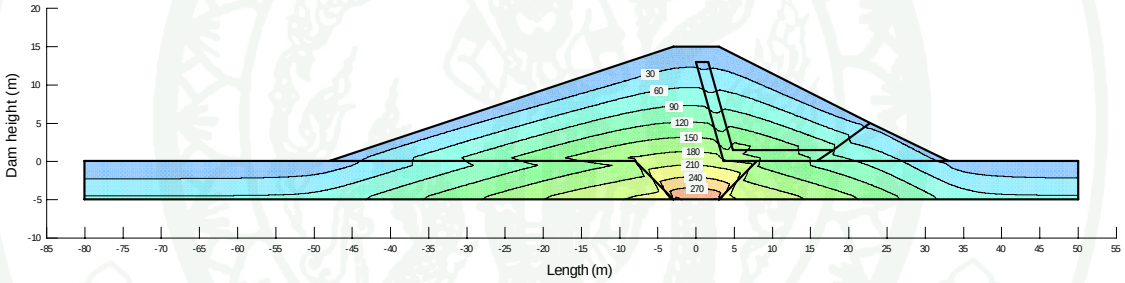
ภาพที่ 250 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและ Yield Acceleration

9. เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณจากค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ σ'_m เท่ากับ 100 kPa กับตารางที่ 10 พบว่า Homogeneous zone, Core zone และ Shell zone มีโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าค่าที่อ้างอิงจาก Franklin and Dusseault (1989) ประมาณ 4.5, 4.8 และ 4.1 เท่าทั้งนี้เป็นเพราะผลจาก OCR ที่กำหนดให้ดินถมในแต่ละองค์ประกอบเป็น Heavily consolidated soil ทำให้มีค่า K_0 สูง ส่งผลให้ σ'_m สูง อีกทั้งคุณสมบัติทางสถิตย์ยังมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำ ทำให้

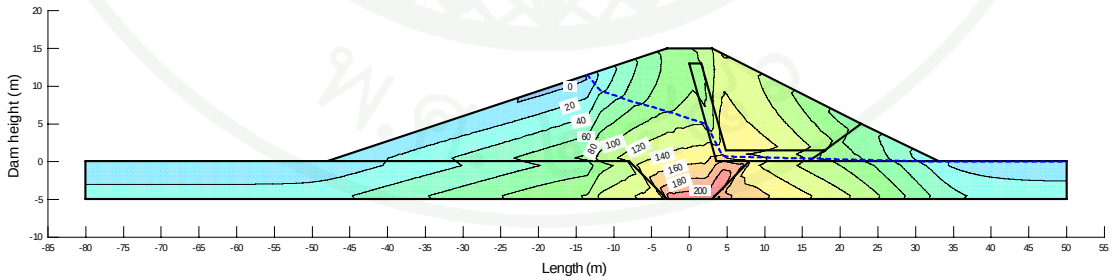
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โมดูลัสเฉือนสูงสุดที่ได้จากสมการเชิงประสบการณ์มีค่าสูง และโมดูลัสยืดหยุ่นจึงมีค่าสูงตามไปด้วย

10. ระหว่างการเก็บน้ำ ชั้นกรองภายในตัวเขื่อนจะทำหน้าที่ระบายน้ำ ทำให้ดินด้านเหนือน้ำใต้เส้นระดับน้ำ เปลี่ยนสภาพเป็นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นผลให้หลังการก่อสร้าง เขื่อนจะมีรูปแบบหน่วยแรงเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่าง σ_m' ของเขื่อนก่อนการเก็บน้ำดังภาพที่ 251 และในระหว่างเก็บน้ำ ซึ่งโดยรวมแล้วแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นมีส่วนทำให้ σ_m' ด้านเหนือน้ำใต้เส้นระดับน้ำมีค่าลดลง และได้ส่งผลให้ค่า σ_m' เหนือเส้นระดับน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 252 ซึ่งอาจเป็นผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยด้านเหนือน้ำมีค่าสูงขึ้น สัมพันธ์กับการที่ด้านเหนือน้ำของเขื่อนค่า K_y สูง เป็นผลให้เขื่อนมีการทรุดตัวน้อย เมื่อต้องต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวที่มีค่าไม่เกิน K_y



ภาพที่ 251 เส้นชั้นความสูงของ σ_m' ของเขื่อนก่อนการเก็บน้ำ

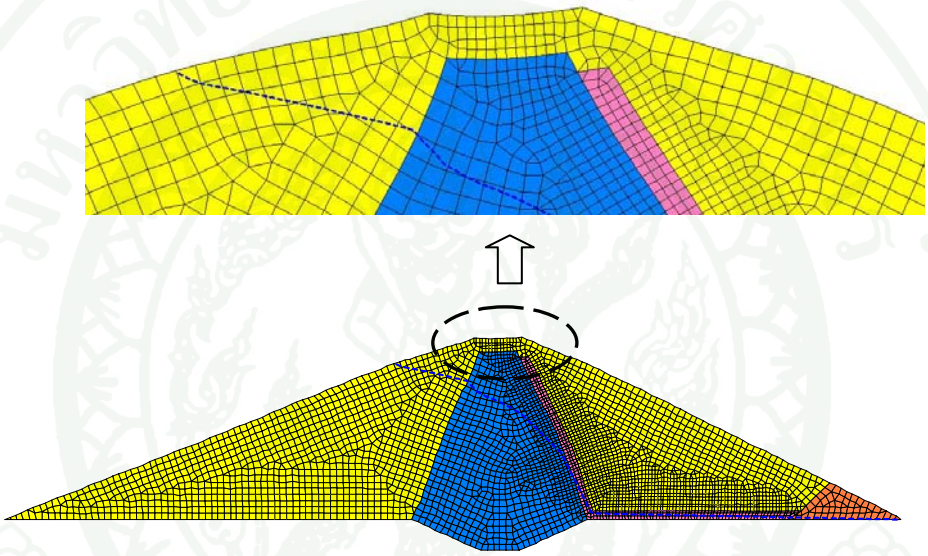


ภาพที่ 252 เส้นชั้นความสูงของ σ_m' ของเขื่อนระหว่างการเก็บน้ำ

11. ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ พบว่าการเคลื่อนตัวของเขื่อนดินถมเนื้อเดียว ณ เวลาที่มีความเร่งในแนวราบสูงสุด มีการเคลื่อนตัวมากที่สุดเท่ากับ 5.5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

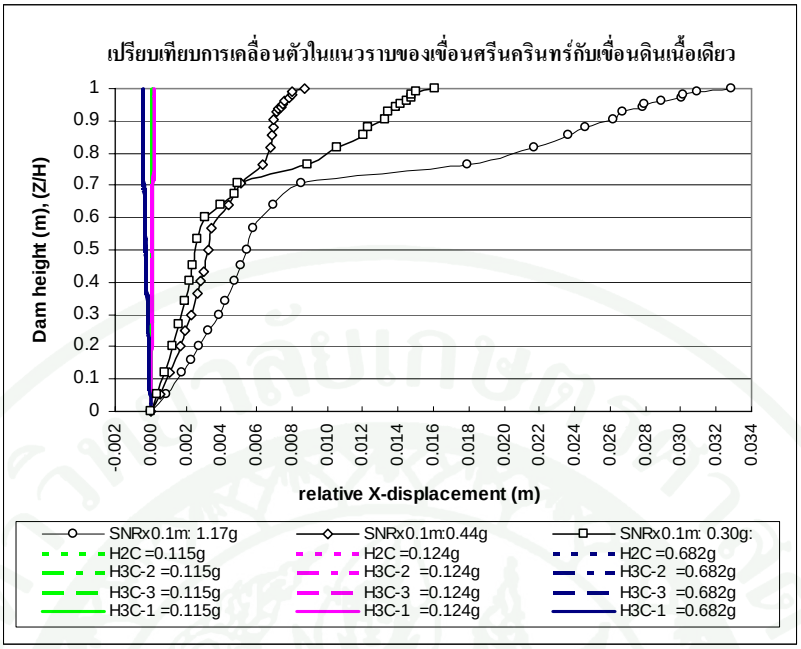
เซนติเมตร เมื่อถูกกระทำโดยแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.682g) และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีการเคลื่อนตัวในแนวราบมากที่สุด 41 เซนติเมตร เมื่อถูกกระทำโดยแผ่นดินไหวขนาด 6-7 ริกเตอร์ (PGA=0.625g) ซึ่งการที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีการเคลื่อนตัวมากกว่าอย่างชัดเจน เป็นเพราะเขื่อนดินถมแบ่งส่วนมีความสูงและชันกว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียว ทำให้มีมวลในการเลื่อนไถลมากกว่า โดยภาพที่ 253 แสดงถึงการเคลื่อนตัวแตกต่างกันระหว่างวัสดุถมเขื่อนที่แตกต่างกันเมื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว



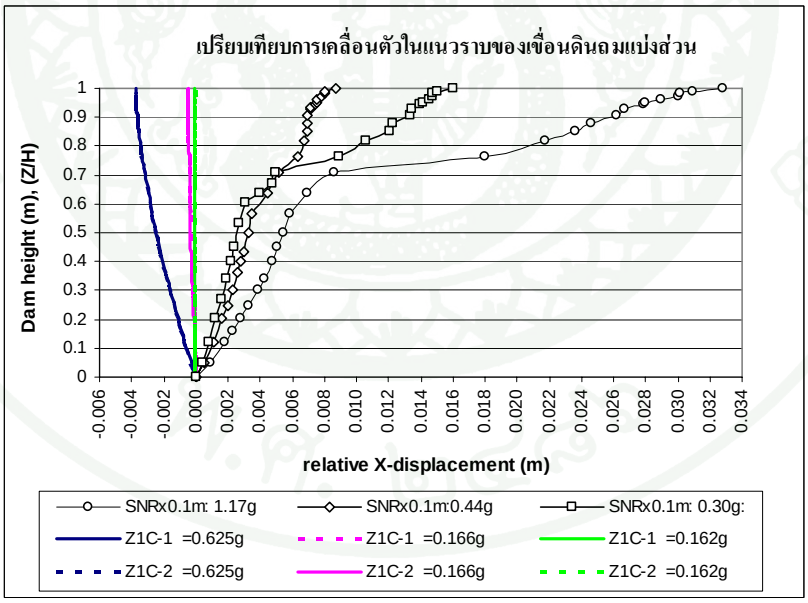
ภาพที่ 253 การเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันบริเวณสันเขื่อนดินถมแบ่งส่วน

12. เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างการสั่นไหว(Mode shape) ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวสูง 15 เมตร เขื่อนดินถมแบ่งส่วนสูง 30 เมตร กับรูปร่างการสั่นไหวของเขื่อนศรีนครินทร์สูง 140 เมตร ที่ศึกษาโดย Soralump and Tansupo (2009) เมื่อเขื่อนต้านทานแรงกระทำของความเร่งสูงสุดในแนวราบ 3 ขนาด ดังภาพที่ 254 และภาพที่ 255 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแต่ละวินาที (Relative displacement) แผ่นดินไหวที่มีความเร่งในแนวราบสูงกว่าจะเคลื่อนตัวมากกว่า ทั้งนี้เขื่อนทั้ง 3 ประเภท มีการเคลื่อนตัวอยู่ใน Mode ที่ 1 อย่างชัดเจน แต่เขื่อนศรีนครินทร์จะมีการผายออกด้านบนเนื่องมาจากเป็นเขื่อนสูง ทำให้มวลด้านบนมีการเคลื่อนที่มากขณะสั่นไหว ดังจะเห็นได้ว่าเมื่อ ค่า Z/H มีค่าเกิน 2/3 ของความสูง การเคลื่อนที่ในแนวราบจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่เขื่อนขนาดเล็กและกลางในการศึกษานี้ไม่พบพฤติกรรมดังกล่าว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



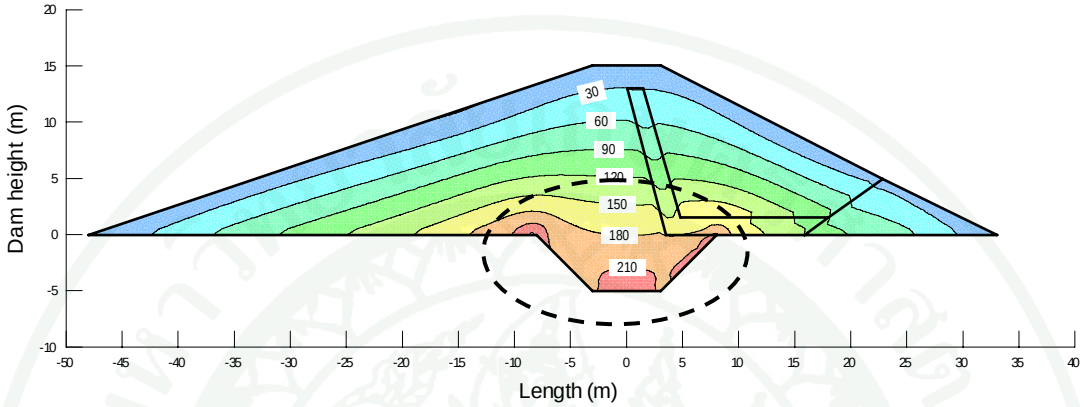
ภาพที่ 254 รูปร่างการสั่นไหวของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวเปรียบเทียบที่ PGA ต่างๆ



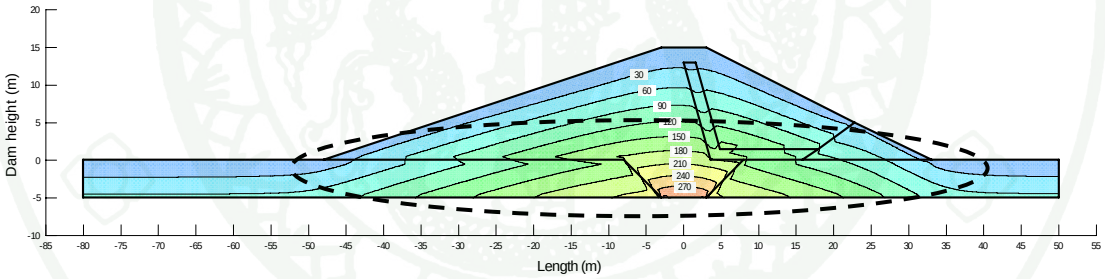
ภาพที่ 255 รูปร่างการสั่นไหวของเขื่อนดินถมแบ่งส่วนเปรียบเทียบที่ PGA ต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

13. การจำลองสภาพฐานรากเขื่อนโดยการเปรียบเทียบ 2 รูปแบบระหว่างภาพที่ 256 กับภาพที่ 257 จะเห็นว่าการจำลองสภาพฐานรากมีผลต่อการวิเคราะห์แรงกระทำเริ่มต้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์



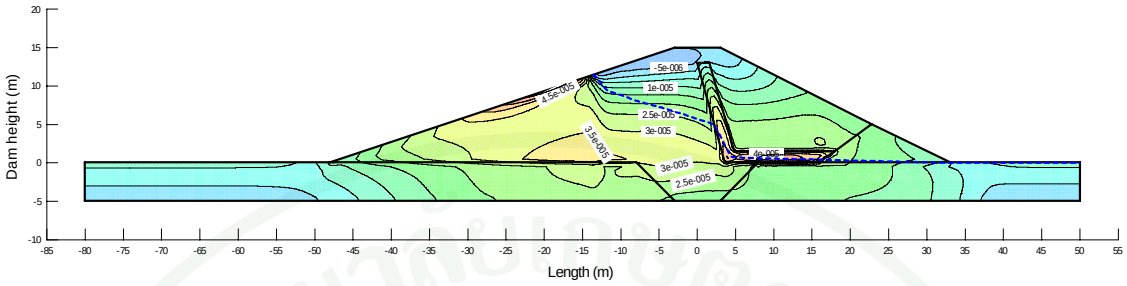
ภาพที่ 256 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นหินแข็ง



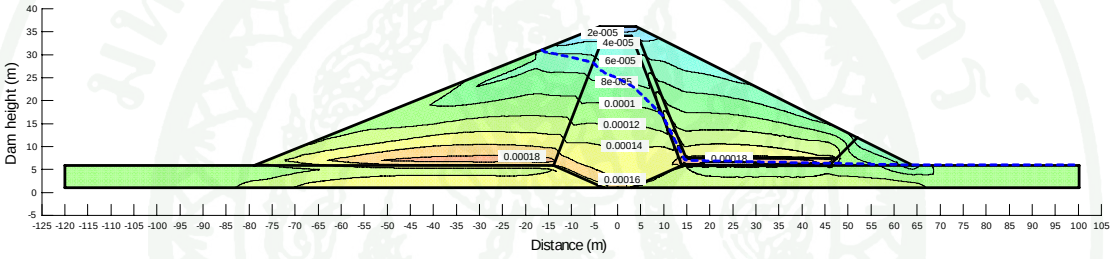
ภาพที่ 257 $\sigma_m^{'}$ ก่อนการเก็บน้ำของเขื่อนที่วางอยู่บนชั้นหินแข็งแทรกด้วยชั้นหินผุ

14. การวางตัวของชั้นกรองมีความสำคัญทั้งในระหว่างและหลังรับแรงสั่นสะเทือน เนื่องจากมีความเครียดเฉือนเกิดขึ้นมากบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นกรองในแนวดิ่งและแนวราบดังตัวอย่างภาพที่ 258 ซึ่งส่งผลให้ความหนาของชั้นกรองเปลี่ยนไป ทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของชั้นกรอง ในขณะที่เขื่อนดินถมแบ่งส่วน ถึงแม้จะมีการเคลื่อนตัวของชั้นกรอง แต่แกนเขื่อนจะช่วยลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นกรองทำให้เกิดปัญหาที่ชั้นกรองน้อยกว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียวดังภาพที่ 259

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 258 ความเครียดเฉือนของเขื่อน H3C-1 จากแผ่นดินไหวที่มี PGA=0.682g

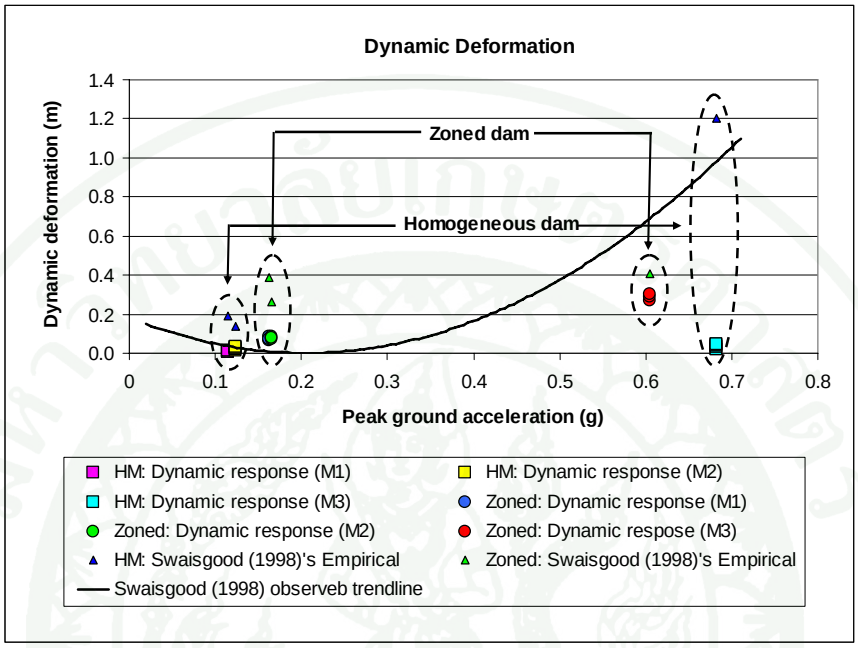


ภาพที่ 259 ความเครียดเฉือนของเขื่อน Z1C-1 จากแผ่นดินไหวที่มี PGA=0.625g

15. ผลการทรุดตัวที่ได้จากสมการเชิงประสบการณ์ของ Swaisgood (1998) ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA = 0.682g กระทำกับเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและค่า PGA = 0.625g กระทำกับเขื่อนดินถมแบ่งส่วนโดยเลือกคลื่นแผ่นดินไหวให้มี T_p ใกล้เคียงกับ T_n พบว่ามีการทรุดตัวสูงสุด 120 และ 41 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ โดยผลการทรุดตัวสูงสุดของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวและเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่ PGA ขนาดเดียวกันคือเขื่อน H3C-3 มีการทรุดตัวเท่ากับ 5 เซนติเมตร และเขื่อน Z1C-2 มีการทรุดตัวเท่ากับ 30 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับความเร่งในแนวราบแสดงดังภาพที่ 260 จะเห็นว่าเขื่อนดินถมเนื้อเดียวที่มีความเร่งในแนวราบ 0.115g และ 0.124g และเขื่อนดินถมแบ่งส่วนที่มีความเร่งในแนวราบ 0.162g และ 0.166g มีการทรุดตัวอยู่ในกลุ่มเดียวกับค่าที่รวบรวมจาก Swaisgood (1998) ในขณะที่ความเร่งในแนวราบที่มีค่า 0.625g ของเขื่อนดินถมเนื้อเดียวจากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์กลับมีการทรุดตัวน้อย ซึ่งเป็นเพราะเขื่อนมีค่า K_y สูง ดังนั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จึงสรุปได้ว่าสมการเชิงประสบการณ์ของ Swaisgood (1998) สำหรับเขื่อนดินถมให้ค่าการทรุดตัวมากกว่าวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความลาดชันที่ใช้ด้วย



ภาพที่ 260 การทรุดตัวของเขื่อนที่วิเคราะห์ทางพลศาสตร์เปรียบเทียบกับสมการเชิงประสบการณ์ของ Swaisgood (1998)

ข้อเสนอแนะ

1. การประเมินความสำคัญของปัจจัยโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญจะมีคะแนนความสำคัญของปัจจัยในลักษณะอื่นได้อีกเช่น การให้ความสำคัญกับปัจจัยปริมาณเก็บกักหรือปัจจัยความสูงเขื่อน เป็นต้น

2. ประเทศไทยมีเขื่อนขนาดใหญ่และกลางกระจายอยู่ทั่วประเทศมากกว่า 400 เขื่อน ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เพียง 245 เขื่อน แต่อาจมีเขื่อนอื่นที่เมื่อนำมาวิเคราะห์ความเสี่ยงและจัดอันดับแล้วมีคะแนนอยู่ในระดับสูง ทำให้ผลการจัดลำดับนี้มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับข้อมูลเขื่อนเท่าที่มี แต่อาจไม่ถูกต้องเมื่อมองภาพรวมของเขื่อนขนาดใหญ่และกลางทั้งประเทศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ควรมีการศึกษาเพื่อออกแบบแผนภูมิสำหรับแนะนำการออกแบบองค์ประกอบเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยใช้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ $\overline{X} \pm SD$ ในการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์เพิ่มเติม และควรศึกษาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดของแหล่งอ้างอิงอื่นเพิ่มเติมนอกจากแหล่งอ้างอิงที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อทราบสมการเชิงประสบการณ์ที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์เพิ่มขึ้น

4. ควรมีการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์โดยใช้คลื่นแรงลัพท์ (Maximum resultant) ที่ได้จากทั้งคลื่นในแนวราบและคลื่นในแนวดิ่ง ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

5. คาบธรรมชาติของเขื่อนจะมีแปรผันตามความสูงของเขื่อน แต่แปรผกผันกับความเร็วคลื่นแรงเฉือน อย่างไรก็ตามเขื่อนจะมีความเร็วคลื่นแรงเฉือนได้หลายค่า ทำให้คาบธรรมชาติที่ได้จากสมการเชิงประสบการณ์เป็นค่าโดยค่าประมาณเท่านั้น

6. การวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ ควรใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวในแนวดิ่งร่วมด้วย นอกจากนี้ควรศึกษาลักษณะการเก็บข้อมูลแผ่นดินไหวจากแหล่งที่อ้างอิงด้วย เพราะอาจต้องมีการแปลงข้อมูลก่อนนำมาใช้เพื่อให้ตรงกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น นอกจากนี้ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดและทิศทางของคลื่นก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความรุนแรงแตกต่างกัน

7. ควรมีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนเพิ่มในกรณีที่เขื่อนมีระดับน้ำหน้าเขื่อนต่ำ และกรณีที่เขื่อนมีการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว

8. การวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนทางพลศาสตร์ จำเป็นต้องวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางและทิศทางจากแหล่งกำเนิดมายังเขื่อน รวมถึงองค์ประกอบเขื่อน ลักษณะฐานราก และคุณสมบัติทางสถิตย์และทางพลศาสตร์ของตัวเขื่อนนั้นๆ ตามแนวทางของ ICOLD หรือ USACE หรือหน่วยงานอื่นที่มีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวในระหว่างการก่อสร้างควรวิเคราะห์แบบ Stage construction

9. ควรมีการศึกษาผลของคุณสมบัติของชั้นกรอง ทั้งในด้านคุณสมบัติของวัสดุ ขนาดและรูปแบบการใช้งาน ถึงพฤติกรรมระหว่างการสั่นซึ่งทำให้เขื่อนมีความเสี่ยงต่อการเกิด Liquefaction ในเขื่อนดินถมขนาดกลางและขนาดเล็ก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2545. **แนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบ**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี. 2548. **แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย**.

กรมทรัพยากรธรณี. 2549. **แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย**.

กระทรวงมหาดไทย. 2548. **มาตรฐานอ่างเก็บน้ำและเขื่อนขนาดเล็ก**. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ.

เกรียงไกร แทนสุโพธิ์. 2551. **การวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนดินและหินลมต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยวิธีการตอบสนองจากแรงพลศาสตร์ กรณีศึกษาเขื่อนศรีนครินทร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะอนุกรรมการจัดทำพจนานุกรมธรณีวิทยา. 2530. **พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา (อังกฤษ-ไทย).** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เดชาวุธ จารุตามระ. 2537. **ปฐพีวิศวกรรมเบื้องต้น**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

นคร ภู่วโรดม. 2544. พลศาสตร์โครงสร้างเบื้องต้นสำหรับวิศวกรรมแผ่นดินไหว, น. 63-99. ใน **การสัมมนาเรื่อง การออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหว ครั้งที่ 4**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยร่วมกับคณะกรรมการแผ่นดินไหวแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

บุรินทร์ เวชบันเทิง และ สุมาลี ประจวบ. 2544. กลไกการกำเนิดแผ่นดินไหวและความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว, น. 16-34. ใน **การสัมมนาเรื่อง การออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหว ครั้งที่ 4**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยร่วมกับคณะกรรมการแผ่นดินไหวแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรากร ไม้เรียง. 2546. **วิศวกรรมเขื่อนดิน**. ไลบรารี่ นาย, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก. 2550. **วิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อน SNR ต่อแรงกระทำจากแผ่นดินไหว.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุพจน์ เตชวรสินสกุล. 2549. **พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์, วรากร ไม้เรียง, ชิโนรส ทองธรรมชาติ, มนันยา จันทศร, ธวัชชัย ปันสุข, วิษณุพงศ์ พ่อลิละ, ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์, ณัฐวุธ อินมาลา และบัญชรี คำมา. 2549. **การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนเพื่อการชลประทานในประเทศไทย.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อนุสรณ์ ทองสร้อย. 2542. **การประเมินความปลอดภัยและวางแผนบำรุงรักษาเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีสภาพ.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อำนาจ ยานุวิริยะกุล. 2552. **การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเนื่องจากแผ่นดินไหว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Andersen, G.R, W.C. Chad, E.C. Luc and H.H. William. 2001. Prioritization of Ten Embankment Dams According to Physical Deficiencies. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 127 (4): 335-345.

Das, B.M. 1995. **Principles of Foundation Engineering.** 3rd. PWS Publishing Company, Massachusetts.

Bay, J.A.,S. Chaiprakaikeow. 2006. **Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Testing of Srinakarind (SNR) and Vajiralongkorn (VRK) Dams.** Utah State University, Utah.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Belyakov, A.A. 1988. Three-dimensional behavior of an earth dam at wide site. **Power Technology and Engineering** 22 (12): 718-725.

Bowles, J.E. 1974. **Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering.** McGraw-Hill, United States of America.

Bowles, D.S. 1998. **The Practice of Dam Safety Risk Assessment and Management: its Roots, its Branches, and its Fruit**. Proceedings of USCOLD 1998 Annual Lecture, Buffalo, New York.

Braja, M.D. 1993. **Principles of Soil Dynamic**. PWS-KENT Publishing Company. USA.

Cascone, E. and S. Rampello. 2003. Decouple Seismic Analysis of an Earth Dam. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 23 (5): 349-365

Cee, V.W. 2005. **Introduction to Risk Assessment**. Refresher Course of International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Makerere University, Africa.

David, J.D. 1987. **Earthquake Resistant Design: for engineers and architects**. 2nd ed. John Wiley&Sons, Singapore.

Fell, R., P. MacGragor, D. Stapledon and G.Bell. 2005. **Geotechnical Engineering of Dams**. AA Balkema, United Kingdom.

Finn, W.D.L. 2000. State-of-the-art of Geotechnical Earthquake Engineering Practice. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** (20): 1-15.

Foster, M., R. Fell and M. Spannagle. 2000. **The statistics of embankment dam failures and accidents**. Canada Geotechnical Journal 37 (5): 1000–1024.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Franklin, J.A. and M. Dusseault. 1989. **Rock Engineering.** McGraw-Hill, Singapore.

Gazetas, G. 1987. Seismic Response of Earth Dams; Some Recent Developments. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 6 (1): 3-47.

Geo-Slope International Ltd. 2008. **Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007 an Engineering Methodology**. 3rd ed. Alberta, Canada.

Geo-Slope International Ltd. 2008. **Stress-Deformation Modeling with QUAKE/W 2007 an Engineering Methodology**. 3rd ed. Alberta, Canada.

Hall, L. and A. Bodare. 2000. Analyses of cross-hole method for determining shear wave velocities and damping ratios. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 20 (1-4): 167-175.

Hammitt, G.M. 1966. **Statistical Analysis of Data from a Comparative Laboratory Test Program Sponsored by ACIL.** U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, United States of America.

Hardin, B.O. and W.L. Black. 1968. Vibration Modulus for Normally Consolidated Clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division** 94 (SM2): 353-369.

Hardin, B.O. and V.P. Drnevich. 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division** 98 (SM7): 667-692.

Harrald, J.R., I. Renda-Tanali, G.L. Shaw, C.B. Rubin and S. Yeletaysi. 2004. **Review of Risk Based Prioritization/Decision Making Methodologies for Dams.** The George Washington University, Washington.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Head, K.H. 1986. **Manual of Soil Laboratory Testing.** Pentech Press, London.

ICOLD. 1989. **Selecting seismic parameters for large dams**, Bulletin 72, International Commission on Large Dams, USA.

Ishihara, K. 1996. **Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics**. Oxford University Press. USA.

Iyisan, R. 1996. Correlations Between Shear Wave Velocity and In-Situ Penetration Test Results. **Tekni Dergi** 1996 (2): 1187-1189.

J.T.,Sherard, R.J. Woodward, S.F. Gizienski and W.A. Clevenger. 1963. **Earth and Earth-rock dams.** John Wiley and Sons, New York.

Kokusho, T. 1980. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. **Soils and Foundations** 20 (2): 45-60.

Kokusho, T., Y. Yoshida and Y. Esashi. 1982. Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range. **Soils and Foundations** 22 (4): 1-18.

Kosuwan, S., T. Isao and P. Charusiri. 2006. **Active Fault Zones in Thailand**. Bangkok: Department of Mineral Resources. Thailand.

Kramer, S.L. 1996. **Geotechnical earthquake engineering**. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, N.J.

Kulhaway, F.H. and P.W. Mayne. 1990. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design.** Electric Power Research Institute, United State.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Lamb, T.W. and R.V. Whitman. 1979. **Soil Mechanics**. Wiley. New York.

Marcuson, W. F. III, P. F. Hadala and R. H. Ledbetter. 1996. Seismic Rehabilitation of Earth Dams. **Journal of Geotechnical Engineering** 122 (1): 7-20.

Martin, S. 2009. **Locations**. Available Source: http://pasadena.wr.usgs.gov/office/hough/bhuj/fatehgarh_1.jpg, October 22, 2008.

Matsumoto, N., T. Ohmachi, Y. Yamaguchi, T. Sasaki and H. Kurahashi. 2005. Analysis of Strong Motions Recorded at Dams During Earthquakes. **73rd Annual Meeting of ICOLD.**

Newmark N.M. 1965. Effect of earthquakes on dams and embankments. **Geotechnique** 15 (2). 139–160.

Ohsaki, Y. and R. Iwasaki. 1973. On Dynamic Shear Moduli and Poission's Ratio of Soil Deposits. **Soil and Foundations** 13 (4): 61-73.

Okamoto,S. 1973. **Introduction to Earthquake Engineering.** Wiley, New York.

Ohta, Y and N. Goto. 1978. Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics** (6): 167-187.

Ozkan, M.Y. 1998. A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 17 (7-8): 439-458.

_____, M. Erdix, C. Yilmaz and S. Bakir. 1990. Damage at Surgu Dam during May 5 1986 earthquake. **Earthquake Spectra** 6 (4): 779-796.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Paré, J.J. and N.S Verma. 1987. **Design Criteria for Dams**. Geotechnical practice in hydroelectric projects in Canada, Montreal.

Prange, B. 1981. Resonant column testing of railroad ballast, pp. 273-278. *In* **International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering 10. ed.** Stocholm.

Rollins, K.M., M.D. Evans, N.B. Diehl and W.D. Daily. 1998. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** (5): 396-405.

Seed, H.B. and I.M. Idriss. 1970. **Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis.** Earthquake Engineering Research Center, California.

Seed, H.B. 1979. Consideration in the earthquake resistant design of earth and rockfill dams. **Geotechnique** (29): 215-263.

Snowy Mountains Engineering Corporation. 1984. **Dynamic Analysis of Khao Laem Dam**.

Soralump S. 2002. **Estimating Probability of Earthquake-induced Failure of Earth Dams.** Ph.D. Thesis, Utah State University.

Soralump, S. and K. Tansupo. 2009. Safety analyses of Srinagarind dam induced by earthquakes using dynamic response analysis method, *In* **Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design.** CRC Press/Balkema, Netherlands.

Swaisgood, J.R. 1998. Seismically-induced deformation of embankment dams, pp. 200-250. *In* **U.S. National Conference on Earthquake Engineering 6. ed.**Washington.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Terzaghi, K. and R.B. Peck. 1948. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New York.

The University of British Columbia. 2008. **Resonant Column Device.** Available Source: http://www.civil.ubc.ca/research/geotech/gradlab/resdevice.htm, November 22, 2008.

USACE. 2003. **Slope Stability.** USACE Publications, Washington DC.

USBR. 1987. **Design of small dams.** 3 ed. Washington DC.

USBR. 1998. **Earth manual Part 1**. United States Government Printing Office, Denver, Colorado.

USGS. 1995. **ID. California EARTHQUAKE 14 cal00014**. Available Source: http://libraryphoto.cr.usgs.gov/cgi-bin/show_picture.cgi?ID=ID. California EARTHQUAKE 14, October 22, 2008.

USSD. 2007. **Strength of Materials for Embankment Dams**. U.S. Society on Dams. USA.

Vucetic, M. and R. Dobry. 1987. Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits. **the Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils** (2): 51-87.

Vucetic, M. and R. Dobry. 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. **Journal of Geotechnical Engineering** 117 (1): 89-107.

Wanitchai, P and A. Lisantono. 1996. Probabilistic Seismic Risk Mapping for Thailand. **Proceeding of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering**, Acapulco, Mexico.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Xenaki, V.C. and G.A. Athanasopoulos. 2008. Dynamic Properties and Liquefaction Resistance of Two Soil Materials in an Earthfill Dam (Laboratory Test Results). **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 28 (8): 605-620.

Yin-Cheng Lin. 2007. **Characterizing Vs Profiles by the SASW Method and Comparison with Other Seismic Methods**. Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.

Zhou, Y.G., Y.M. Chen. 2005. Influence of Seismic Cyclic Loading History on Small Strain Shear Modulus of Saturated Sands. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering** 25: 341-353.

•

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ฐานข้อมูลเชื่อนในงานวิจัยและผลการจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ฐานข้อมูลเขื่อนในงานวิจัย

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
1	กระเสียว	570390	1639952	4938 IV	ด่านช้าง	สุพรรณบุรี	32.5	4250	240.0	2524
2	กิวลม	565935	2048204	4946 III	เมืองลำปาง	ลำปาง	26.5	135	112.0	2524
4	กุดลิงง้อ	896742	1919079	5543 IV	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	9.0	1230	6.44	2505
5	แก่งกระจาน	568375	1427950	4934 IV	แก่งกระจาน	เพชรบุรี	58.0	759	570.0	2509
6	แก่งเลิงจาน	957246	1793956	5641 II	เมืองมหาสารคาม	มหาสารคาม	7.0	1600	6.063	2500
7	โกรกกระโดน	859751	1648494	5438 I	จักราช	นครราชสีมา	9.4	750	1.469	2529
8	โกรกไม้แดง	863838	1654019	5438 I	จักราช	นครราชสีมา	13.0	870	2.8	2529
9	ไกลบ้าน	817067	706580	5321 I	เมืองนราธิวาส	นราธิวาส	5.0	663	2.85	2513
11	เขาบันได	575267	1463215	4935 III	หนองหญ้าปล้อง	เพชรบุรี	13.0	462	2.18	2533
13	เขาระกำ	872340	1358270	5433 I	เมืองตราด	ตราด	22.5		23.5	2515
15	เขาสิเสียด	572181	1629316	4938 III	เลาขวัญ	กาญจนบุรี	10.0	569	0.55	2537
16	เขาอีโต้ 1	759740	1565650	5237 II	เมืองปราจีนบุรี	ปราจีนบุรี	16.5	740	2.4	2521
17	เขาอีโต้ 2	759841	1566187	5237 II	เมืองปราจีนบุรี	ปราจีนบุรี	14.4	500	0.9	2540
18	คลองกลาง	754598	1574999	5237 II	ปากพลี	นครนายก	36.1	380	3.1	2548
19	คลองข้างใน	577516	1861521	4942 IV	ศิริมาศ	สุโขทัย	12.0	770	9.0	2531
21	คลองจะกระ	553909	1276094	4832 II	ทับสะแก	ประจวบคีรีขันธ์	26.0	520	10.4	2541
22	คลองจำไหร	647411	755139	5022 I	คลองหอยโข่ง	สงขลา	12.5	1360	6.0	2528
23	คลองเฉลียงลับ	743999	1815817	5241 I	เมืองเพชรบูรณ์	เพชรบูรณ์	34.0	1309	7.85	2539
24	คลองทรายทอง	737644	1585680	5237 IV	เมืองนครนายก	นครนายก	17.0	45	2.0	2526
25	คลองท่าด่าน	750325	1583121	5237 I	เมืองนครนายก	นครนายก	93.0	2720	224.0	2548
26	คลองบึง	577167	1318830	4932 IV	เมืองประจวบคีรีขันธ์	ประจวบคีรีขันธ์	18.0	1200	22.2	2534
27	คลองโบด	736415	1580880	5237 IV	เมืองนครนายก	นครนายก	17.6	670	3.91	2527
28	คลองพันโป่	831765	1551595	5437 III	เมืองสระแก้ว	สระแก้ว	6.8	355	0.3	2531
29	คลองมะนาว	882255	1396138	5534 III	บ่อไร่	ตราด	3.0	63.5	2.35	2528
32	คลองระบม	785500	1515850	5336 III	สนามชัยเขต	ฉะเชิงเทรา	18.5	420	40.0	2533
33	คลองระโอก	799407	1423377	5334 I	แกลง	ระยอง	20.0	220	17.5	2535
34	คลองสวนหนัง	499404	944882	4726 II	พระแสง	สุราษฎร์ธานี	10.0	940	1.29	2528
35	คลองหยา	481395	941157	4726 II	ปลายพระยา	กระบี่	17.0	275	3.2	2536
36	คลองหลา	646695	760543	5022 I	คลองหอยโข่ง	สงขลา	20.0	2470	25.0	2539
37	ค่ายเสนาณรงค์	667091	776573	5123 III	หาดใหญ่	สงขลา	21.0	360	0.75	2528
38	ค่าตะเกียน	735415	1618394	5238 III	มวกเหล็ก	สระบุรี	8.0	315	0.639	2504
40	จัดหาแหล่งน้ำสำรองลุ่ม	771904	1519811	5336 III	พนมสารคาม	ฉะเชิงเทรา	11.0	550	0.605	2525
42	ชากนอก	710016	1424725	5134 I	บางละมุง	ชลบุรี	13.0	1910	7.03	2536
43	ห้วยซับตะเคียน	714665	1671710	5139 II	ชัยบาดาล	ลพบุรี	29.0	29	8.42	2535
44	ดงหมู	1109588	1869298	5942 IV	ธาตุพนม	นครพนม	7.2		0.45	2529
45	ดอกกราย	740899	1426109	5234 IV	ปลวกแดง	ระยอง	26.5	1500	71.4	2518
46	ด่านชุมพล	895848	1380589	5533 IV	บ่อไร่	ตราด	13.4		5.6	2528
48	ต้นต้อง	699675	2137150	5147 I	เชียงกลาง	น่าน	21.5	345	0.539	2534
49	ตะแปด	596600	1406250	4934 II	ชะอำ	เพชรบุรี	11.0	830	4.0	2529
50	ดาเกาว์	997786	1603562	5737 IV	กาบเชิง	สุรินทร์	13.0	600	8.65	2525

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
51	ตำน้อย	539116	2042134	4845 I	เมืองลำปาง	ลำปาง	18.0	174	1.09	2532
52	ท่อก๊อ	552630	2155301	4947 IV	แม่สรวย	เชียงราย	13.0	136	1.08	2523
53	ทับลาน	815000	1572350	5337 II	นาดี	ปราจีนบุรี	11.6	840	2.4	2527
54	ทับเสลา	547967	1718525	4840 II	ลานสัก	อุทัยธานี	26.8	3375	160.0	2531
55	ท่ากรวย	542799	1675417	4839 II	บ้านไร่	อุทัยธานี	10.5	125	0.82	2526
56	ท่าเดื่อ	555591	1644331	4938 IV	ด่านช้าง	สุพรรณบุรี	15.0	500	2.8	2526
57	ท่าแพ	566561	1932919	4943 IV	ศรีสัชนาลัย	สุโขทัย	28.0	834	58.0	2536
58	ท่านบดินบ้านคลองยาง	716488	1771471	5241 III	หนองไผ่	เพชรบูรณ์	13.0	116	0.5	2529
59	ทุ่งขาม	583137	1397145	4934 II	ชะอำ	เพชรบุรี	11.5	1230	8.0	2526
60	ทุ่งโห้ง	629625	2180000	5048 III	เทิง	เชียงราย	11.0	330	1.16	2528
61	ไทรงาม	572159	1463175	4935 III	หนองหญ้าปล้อง	เพชรบุรี	13.0	285	0.87	2532
62	ธวัชชัย	1008457	1780231	5741 III	ธวัชบุรี	ร้อยเอ็ด	3.0	2300	3.01	2495
63	ธารอโศก	749891	1621769	5238 II	ปากช่อง	นครราชสีมา	10.3	473	3.6	2503
64	น่าง้ม	661775	2141775	5147 IV	เชียงกลาง	น่าน	16.0	110	1.222	2531
65	น่าจุน	620725	2132250	5047 IV	จุน	พะเยา	23.0	385	9.604	2535
67	น่าปิง	633978	2009062	5045 II	เมืองแพร่	แพร่	13.0	13	0.63	2527
68	น่าแหง	677647	2027156	5145 IV	นาน้อย	น่าน	30.0	220	13.0	2535
69	บางกำปัด	522144	908803	4825 III	เขาพนม	กระบี่	23.0	680	16.0	2533
70	บางทรายนวล	477037	965503	4726 II	พนม	สุราษฎร์ธานี	32.0	162.5	2.2	2530
71	บางพระ	712765	1461722	5135 II	ศรีราชา	ชลบุรี	24.0	1720	117.0	2518
73	บ้านควนกลิง	509455	970257	4826 IV	เคียนซา	สุราษฎร์ธานี	5.0	1321	0.6	2527
74	บ้านคอกช้าง	494177	1975908	4744 I	ลี	ลำพูน	11.5	297	0.5	2536
78	บ้านจรัส	1034001	1599995	5737 I		สุรินทร์	26.0	630	15.0	2536
79	บ้านช้างแรก	540751	1224757	4831 II	บางสะพานน้อย	ประจวบคีรีขันธ์	12.5	361	1.0	2531
80	บ้านชุมนุมมะละกอ	571960	1310349	4932 IV	เมืองประจวบคีรีขันธ์	ประจวบคีรีขันธ์	11.0	526	0.69	2535
81	บ้านซ่อง	579344	1431690	4934 IV	วังจันทร์	เพชรบุรี	15.0	221	1.39	2534
82	บ้านดง	721481	1607563	5238 III	แก่งคอย	สระบุรี	19.4	375.79	3.2	2546
83	บ้านดงน้อย	1099653	1875427	5942 IV	นาแก	นครพนม	11.5	838	5.2	2528
84	บ้านดอนพัฒนา	1091156	1873962	5942 IV	นาแก	นครพนม	12.0		0.54	2522
86	บ้านต้นปราง	689400	725725	5122 III	นาทวี	สงขลา	10.0	62	0.7	2536
87	บ้านท่านบ	1033840	1599990	5737 I		สุรินทร์	19.5	820	12.0	2534
88	บ้านบึง	730639	1465484	5235 III	บ้านบึง	ชลบุรี	9.0	1500	2.0	2500
91	บ้านโป่งดินดำ	721775	1459357	5235 III	ศรีราชา	ชลบุรี	10.4	360	0.57	2529
93	บ้านพุระกำ	547986	1234498	4831 II	บางสะพาน	ประจวบคีรีขันธ์	12.0	470	0.55	2528
95	บ้านแม่เชียงราย	516872	1917843	4843 IV	แม่พริก	ลำปาง	12.0	788	0.792	2535
100	บ้านหินปวน	523730	934892	4825 IV	พระแสง	สุราษฎร์ธานี	9.0	454	0.505	2525
101	บ้านหินฮาง	848605	1956630	5444 II	สุวรรณคูหา	หนองบัวลำภู	11.8	512	0.956	2534
103	บึงอร่าม	956397	1825652	5641 I	ยางตลาด	กาฬสินธุ์	6.0	1500	3.6	2495
105	ปราณบุรี	586241	1377857	4933 IV	ปราณบุรี	ประจวบคีรีขันธ์	42.0	1500	445.0	2521
108	ป่าสักชลสิทธิ	724027	1643084	5238 IV	พัฒนานิคม	ลพบุรี	36.5	4860	785.0	2542

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height	Length	Capacity	YearConstruction
109	โป่งกระทิง	550249	1474145	4835 I	สวนผึ้ง	ราชบุรี	10.0	460	0.23	2521
110	โป่งจ้อ	474266	2048816	4746 II	ดอยหล่อ	เชียงใหม่	18.0	400	2.6	2525
111	โป่งทะลุ	595000	1420100	4934 I	ชะอำ	เพชรบุรี	13.0	180	0.8	2521
113	พุทธอุทยาน	1103977	1764633	5940 IV	เมืองอำนาจเจริญ	อำนาจเจริญ	13.5	1.3	15.339	2506
114	พุปลาก้าง	558837	1638591	4938 IV	ด่านช้าง	สุพรรณบุรี	11.0	286	0.63	2527
115	พุสวรรค์	573415	1439000	4935 III	วังจันทร์	เพชรบุรี	14.0	193	0.871	2528
116	มาบประชัน	712368	1430414	5134 I	บางละมุง	ชลบุรี	17.0	2060	16.6	2523
117	มาบฟักทอง 2	713485	1416820	5134 I	บางละมุง	ชลบุรี	11.2	1000	1.56	2528
118	มูลบน	842037	1603625	5437 IV	ครบุรี	นครราชสีมา	32.7	880	141.0	2538
119	แม่กวงอุดมธารา	513201	2092757	4846 IV	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	68.0	610	263.0	2536
120	แม่กำลัง	646725	2111500	5047 II	ปง	พะเยา	25.0	150	1.488	2527
121	แม่กิด	528958	2002989	4845 II	เสริมงาม	ลำปาง	12.0	296	1.3	2527
122	แม่โก๋น	524019	2148794	4847 IV	พร้าว	เชียงใหม่	28.0	432	5.53	2537
123	แม่คำปอง	642080	2019049	5045 I	ร้องกวาง	แพร่	25.5	325	6.72	2535
124	แม่งัดสมบูรณ์ชล	503813	2118922	4847 III	แม่แดง	เชียงใหม่	59.0	1950	265.0	2528
125	แม่จอก	487509	2099135	4746 I	แม่ริม	เชียงใหม่	20.3	187	0.175	2532
126	แม่จอกหลวง	495260	2083079	4746 I	แม่ริม	เชียงใหม่	17.5	555	1.1	2528
127	แม่จ้วะ	616197	1986207	5044 IV	เด่นชัย	แพร่	17.0	95	2.16	2526
128	แม่จาง	557802	2005663	4945 III	แม่ทะ	ลำปาง	10.0	100	1.2	2531
129	แม่ต๋อม	584292	2121496	4947 II	เมืองพะเยา	พะเยา	21.0	290	0.75	2528
130	แม่ตะไคร้	532636	2071331	4846 II	แม่ออน	เชียงใหม่	22.0	200	0.85	2525
132	แม่ตากเหนือ	571669	2097502	4946 IV	แจ้ห่ม	ลำปาง	16.0	210	1.98	2533
133	แม่ตาแมว	554751	2163763	4948 III	แม่สรวย	เชียงราย	16.0		1.09	2526
134	แม่ต๋ำ	600588	2101894	4947 II	เมืองพะเยา	พะเยา	13.5	1820	37.0	2528
135	แม่ตืบ	516355	2054835	4846 III	เมืองลำพูน	ลำพูน	24.0	530	10.0	2531
136	แม่ตูบ	475437	1976281	4744 I	ดอยเต่า	เชียงใหม่	30.0	120	39.0	2530
138	แม่ทก	537803	1971085	4844 I	สบปราบ	ลำปาง	12.0	488	1.114	2531
139	แม่ทะ	561443	2015072	4945 III	เมืองลำปาง	ลำปาง	19.2	240	2.54	2514
140	แม่ทานและระบบฯ	539722	1986918	4844 I	สบปราบ	ลำปาง	19.0	615	11.4	2529
141	แม่ธิ	542391	2004514	4845 II	เกาะคา	ลำปาง	10.0	410	1.59	2530
142	แม่ธิ	519308	2058156	4846 III	บ้านธิ	ลำพูน	20.0	437	4.5	2529
143	แม่ปราบ	526109	1982091	4844 IV	สบปราบ	ลำปาง	11.0	306	0.634	2526
144	แม่ป๊อก	483884	2000197	4745 II	ลี้	ลำพูน	17.5	322	1.0	2534
145	แม่ปืม	591161	2140577	4947 I	แม่ใจ	พะเยา	19.3	450	43.0	2526
146	แม่พริก	496260	1945199	4744 II	แม่พริก	ลำปาง	21.3	180	4.2	2534
147	แม่แพง	515563	2127887	4847 III	พร้าว	เชียงใหม่	29.0	593	7.0	2526
148	แม่ฟอก	517564	1988017	4844 IV	เสริมงาม	ลำปาง	14.0	250	0.96	2531
149	แม่เฟือง	541763	2044901	4845 I	เมืองลำปาง	ลำปาง	20.0	136	0.82	2529
150	แม่มอก	544972	1915167	4843 I	เถิน	ลำปาง	25.1	1925	96.0	2543
151	แม่มาน	620264	1992358	5045 III	เด่นชัย	แพร่	32.0	1039	18.75	2538

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
152	แม่เมือง	608950	2078150	5046 IV	งาว	ลำปาง	15.0	165	3.26	2525
153	แม่แมะ	567789	2078910	4946 IV	แจ้ห่ม	ลำปาง	13.0	154	0.527	2522
154	แม่ยางหลวง	638570	2035802	5045 I	ร้องกวาง	แพร่	18.0	162	2.0	2524
155	แม่ลองและระบบฯ	490123	1958606	4744 II	ลี้	ลำพูน	16.0	336	1.1	2523
156	แม่ล้อหัก	508588	1929580	4843 IV	แม่พริก	ลำปาง	10.0	347	1.336	2523
157	แม่วะ	551904	1996061	4845 II	แม่ทะ	ลำปาง	24.0	134	5.9	2533
159	แม่สกึน	632800	2071050	5046 II	สอง	แพร่	17.0	135	1.09	2533
160	แม่สอง	630007	2045618	5045 IV	สอง	แพร่	48.0	645	65.8	2539
161	แม่สอด	459089	1847451	4742 III	แม่สอด	ตาก	22.5	440	5.46	2521
162	แม่สาน	514046	2046950	4846 III	เมืองลำพูน	ลำพูน	36.0	165	18.0	2528
163	แม่สูนหลวง	510279	2198460	4848 IV	ฝาง	เชียงใหม่	25.0	185	0.4	2534
164	แม่แหลงหลวง	527615	2216328	4849 II	แม่อาย	เชียงใหม่	29.7	265	3.641	2539
165	แม่ออน	527881	2079775	4846 I	แม่ออน	เชียงใหม่	23.0	880	4.53	2530
166	แม่อิบ	555616	1995820	4945 III	แม่ทะ	ลำปาง	20.0	145	1.11	2528
167	แม่เฮียว	561642	2122890	4947 III	วังเหนือ	ลำปาง	17.0	88	1.114	2527
168	แม่ไฮ	539248	1998748	4845 II	เกาะคา	ลำปาง	13.0	480	1.225	2530
170	ยางชุม	574699	1335572	4933 III	กุยบุรี	ประจวบคีรีขันธ์	23.0	1500	32.0	2520
171	ย่านซื่อ	567825	1332899	4933 III	กุยบุรี	ประจวบคีรีขันธ์	15.0	435	1.58	2535
172	ยายไพร	572849	1429150	4934 IV	แก่งกระจาน	เพชรบุรี	10.0	70	0.7	2524
174	ร่องน้ำซับ	1101917	1763425	5940 IV	เมืองอำนาจเจริญ	อำนาจเจริญ	6.0	0.78	0.421	2499
175	ร่องปอ	598770	2137297	4947 I	เมืองพะเยา	พะเยา	10.0	486	1.62	2529
176	ละเลิงหวาย	886285	1749500	5540 IV	พล	ขอนแก่น	3.6	2340	3.738	2501
177	ลาดกระทิง	763547	1501449	5236 II	สนามชัยเขต	ฉะเชิงเทรา	10.5	495	4.2	2527
178	ลำเชียงไกร	811450	1684850	5339 II	โนนไทย	นครราชสีมา	8.5	3200	20.25	2516
179	ลำแชะ	852513	1596857	5437 I	ครบุรี	นครราชสีมา	29.5	2400	275.0	2541
180	ลำตะคอง	775500	1645000	5338 IV	สีคิ้ว	นครราชสีมา	40.3	521	323.95	2512
181	ลำปลายมาศ	870861	1584122	5437 I	เสิงสาง	นครราชสีมา	32.0	1100	98.0	2529
182	ลำปำคำว	890115	1917991	5543 IV	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	7.0	385	0.393	2500
183	ลำปาว	974008	1840808	5642 II	เมืองกาฬสินธุ์	กาฬสินธุ์	33.0	7800	1340.0	2512
184	ลำพระเพลิง	805950	1615450	5338 II	ปักธงชัย	นครราชสีมา	49.0	575	108.0	2513
185	ลำพอก	1022438	1657397	5738 I	ศีขรภูมิ	สุรินทร์	6.0	2500	11.19	2504
186	ลำพะยัง	1049366	1834232	5842 III	เขาวง	กาฬสินธุ์	16.0	725	3.5	2541
188	วังบอน	757101	1574930	5237 II	ปากพลี	นครนายก	19.0	450	6.9	2542
189	วังยาว	593356	1421830	4934 I	ท่ายาง	เพชรบุรี	7.5	405	0.265	2524
190	วังหิน	574631	1443325	4935 III	หนองหญ้าปล้อง	เพชรบุรี	12.5	800	2.277	2534
192	สระสมิง	1143591	1713415	5939 I	เหล่าเสือโก้ก	อุบลราชธานี	7.0	250	1.01	2497
194	สันหนอง	431212	2045352	4645 I	แม่แจ่ม	เชียงใหม่	18.0	600	1.45	2525
195	สุ่งยายใจ	765840	1515903	5236 II	พนมสารคาม	ฉะเชิงเทรา	11.0	345	0.56	2533
196	สุวรรณาภา	974193	1623501	5638 II	ปราสาท	สุรินทร์	3.0	1700	1.07	2494
197	โสกน้ำขาว	894063	1919847	5543 IV	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	6.0	485	0.466	2494

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
198	โสกรัง	913464	1880474	5542 I	โนนสะอาด	อุดรธานี	6.5	532	0.43	2500
199	หนองกระทุ่ม	970450	1777075	5641 II	เมืองมหาสารคาม	มหาสารคาม	3.5	2275	2.528	2496
200	หนองกลางดง	718779	1442675	5235 III	ศรีราชา	ชลบุรี	18.5	1485	7.65	2533
202	หนองกา	1016799	1698386	5739 I	รัตนบุรี	สุรินทร์	4.0	388	1.05	2499
203	หนองแกดำ	976894	1786999	5641 II	แกดำ	มหาสารคาม	4.5	900	1.275	2502
204	หนองค้อ	721099	1451899	5235 III	ศรีราชา	ชลบุรี	17.0	2000	21.4	2526
206	หนองช้างใหญ่	1126619	1710931	5939 I	เมือง	อุบลราชธานี	5.5	640	7.673	2497
207	หนองญาติ	1110215	1930325	5943 IV	เมือง	นครพนม	2.8	450	6.8	2498
208	หนองตาไก้	908326	1926654	5543 I	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	3.0	1320	0.514	2495
209	หนองท่าจอก	1032152	1738209	5740 II	สุวรรณภูมิ	ร้อยเอ็ด	4.5	1450	0.99	2499
210	หนองเทวราช	938946	1819451	5641 IV	เชียงยืน	มหาสารคาม	6.0	900	1.46	2507
211	หนองบัว	959544	1808799	5641 I	กันทรวิชัย	มหาสารคาม	3.5	800	2.549	2499
212	หนองปลาไหล	747760	1430600	5234 I	ปลวกแดง	ระยอง	24.0	4060	163.75	2536
214	หนองผือ	1046103	1730824	5840 III	พนมไพร	ร้อยเอ็ด	3.5	1300	4.17	2495
215	หนองสองห้อง	899162	1968171	5544 I	เมืองหนองคาย	หนองคาย	6.0	850	0.577	2499
216	หนองสอางค์	1061163	1635851	5838 III	ขุขันธ์	ศรีสะเกษ	4.0	830	0.88	2495
217	หนองหญ้าม้า	956559	1825657	5641 I	ยางตลาด	กาฬสินธุ์	5.0	590	2.558	2499
218	หนองหญ้าม้า	1008297	1780226	5741 III	เมือง	ร้อยเอ็ด	5.0	1220	2.117	2495
219	หนองหมาจอก	959393	1808724	5641 I	ยางตลาด	กาฬสินธุ์	2.8	935	0.725	2494
220	หนองเหล่าหิน	1089872	1709958	5839 I	เขื่องใน	อุบลราชธานี	3.0	1170	2.34	2494
221	หนองโอน	891416	1929230	5543 IV	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	8.0	340	0.308	2499
222	หนองไฮ	979083	1753578	5640 I	วาปีปทุม	มหาสารคาม	4.5	1600	2.022	2499
223	หมากนัด	828644	1553895	5437 III	เมืองสระแก้ว	สระแก้ว	7.0		0.29	2530
224	ห้วยกกคูณ	1072155	1880344	5842 I	นาแก	นครพนม	19.0	1000	2.0	2537
225	ห้วยกะลอก	908355	1623408	5538 II	นางรอง	บุรีรัมย์	3.5	3800	3.5	2495
228	ห้วยก้านเหลือง	1066845	1882999	5842 I	สว่างแดนดิน	สกลนคร	15.5	965	5.9	2510
229	ห้วยกาล	617521	2032328	5045 IV	สอง	แพร่	17.0	260	3.19	2532
230	ห้วยก่า	597524	2011906	4945 II	ลอง	แพร่	14.5	130	0.6	2529
231	ห้วยกุดแคน	1014387	1774714	5741 II	จตุรพักตรพิมาน	ร้อยเอ็ด	6.0	1600	1.99	2496
232	ห้วยกุดแดง	988730	1757401	5740 IV	จตุรพักตรพิมาน	ร้อยเอ็ด	6.5	1450	2.8	2496
233	ห้วยเกี๋ยง	522150	2019137	4845 IV	ห้างฉัตร	ลำปาง	24.0	175	11.6	2529
234	ห้วยแกง	1006454	1851908	5742 III	เมือง	กาฬสินธุ์	13.0	600	23.32	2509
235	ห้วยแก่น	637375	2126825	5047 II	ปง	พะเยา	12.5	310	1.012	2531
236	ห้วยขนุน	1129274	1604648	5937 I	กันทรลักษณ์	ศรีสะเกษ	19.0	855	10.0	2536
237	ห้วยขอนแก่น	751531	1861520	5242 I	หล่มสัก	เพชรบูรณ์	51.0	1023.5	33.22	2537
238	ห้วยขี้หนู	913220	1664211	5539 II	ลำปลายมาศ	บุรีรัมย์	6.5	1450	1.6	2504
239	ห้วยขี้หิน	1025698	1870061	5742 I	กุดบาก	สกลนคร	16.5	700	4.0	2528
240	ห้วยขี้เหล็ก	1108644	1816938	5941 IV	นิคมคำสร้อย	มุกดาหาร	15.0	800	23.7	2508
241	ห้วยขุนจิต	717751	1439001	5235 III	บางละมุง	ชลบุรี	17.5	1825	4.8	2536
242	ห้วยแข้	1028798	1867144	5742 I	ภูพาน	สกลนคร	16.0	760	3.8	2523

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
243	ห้วยค้อ	1056246	1883631	5842 IV	เต่างอย	สกลนคร	16.0	700	3.2	2525
244	ห้วยค้อ	932781	1753668	5640 IV	นาเชือก	มหาสารคาม	14.0	2480	31.5	2520
245	ห้วยคะคาง	972537	1792237	5641 II	เมืองมหาสารคาม	มหาสารคาม	7.5	555	4.126	2502
247	ห้วยแคน	1097271	1903893	5943 III	ปลาปาก	นครพนม	11.0	1600	11.0	2512
248	ห้วยโค้งแม่แพม	514831	1974324	4844 IV	ทุ่งหัวช้าง	ลำพูน	20.8		1.1	2533
249	ห้วยโคร้	629875	2184575	5048 IV	เทิง	เชียงราย	12.4	395	0.73	2535
250	ห้วยโคร้	524017	2046310	4846 III	แม่ทา	ลำพูน	20.0	101.1	0.34	2533
251	ห้วยงู	517271	2129572	4847 IV	พร้าว	เชียงใหม่	17.0	185	1.163	2532
252	ห้วยงู	511302	2200363	4848 IV	ฝาง	เชียงใหม่	25.0	145	0.47	2533
254	ห้วยจอกขวาง	974507	1753573	5640 I	วาปีปทุม	มหาสารคาม	5.0	1787	1.284	2499
255	ห้วยจันทร์	430089	2110161	4647 II	แม่แจ่ม	เชียงใหม่	15.0	230	1.56	2526
256	ห้วยจันลา	1163830	1601997	6037 IV	น้ำยืน	อุบลราชธานี	20.0	3850	16.9	2532
258	ห้วยจาน	1029647	1864364	5742 I	นาคู	กาฬสินธุ์	8.0	475	0.25	2525
259	ห้วยจานใต้	969682	1735042	5640 II	ปทุมรัตต์	ร้อยเอ็ด	6.0	1800	5.79	2508
260	ห้วยจุมจัง	1049627	1834022	5842 III	กุฉินารายณ์	กาฬสินธุ์	8.0	816	7.381	2516
262	ห้วยชม	810450	1964261	5344 II	ปากชม	เลย	13.1	102	0.48	2525
263	ห้วยชะโนด	1092917	1867284	5942 IV	ดงหลวง	มุกดาหาร	12.5	3420	18.0	2528
264	ห้วยชัน	1077877	1672959	5839 II	เมือง	ศรีสะเกษ	8.5	1420	2.7	2495
265	ห้วยช้าง	643000	2237225	5049 II	เชียงของ	เชียงราย	27.5	453	6.3	2534
267	ห้วยเชียงเคียน	605525	2170950	5048 III	ป่าแดด	เชียงราย	16.0	130	1.25	2537
268	ห้วยเชียงยืน	1104243	1946406	5944 III	ท่าอุเทน	นครพนม	5.0	380	0.344	2496
270	ห้วยซับประดู่	790870	1643600	5338 IV	สีคิ้ว	นครราชสีมา	16.0	1133	27.66	2516
271	ห้วยซับหวาย	770089	1626111	5338 III	ปากช่อง	นครราชสีมา	8.0	150	0.08	2503
273	ห้วยเชียงค่า	932098	1753664	5640 IV	บรบือ	มหาสารคาม	8.0	1060	5.06	2496
274	ห้วยโซ่	830659	1948967	5444 III	สุวรรณคูหา	หนองบัวลำภู	13.0	260	1.6	2534
276	ห้วยด่าน	997623	1603558	5737 IV	กาบเชิง	สุรินทร์	18.0	850	9.4	2531
277	ห้วยด่านสามัคคี	1020238	1813090	5741 I	โพนทอง	ร้อยเอ็ด	15.0	650	0.44	2525
278	ห้วยดุมมุม	897238	1885237	5543 III	เขาสวนกวาง	ขอนแก่น	11.8	454	1.12	2535
279	ห้วยเดื่อ	525026	2184962	4848 IV	ฝาง	เชียงใหม่	20.0	180	4.276	2536
280	ห้วยเดื่อ	831583	1930210	5443 IV	นากลาง	หนองบัวลำภู	10.3	157	0.67	2534
281	ห้วยตลาด	939925	1649151	5638 IV	เมือง	บุรีรัมย์	4.8	2300	27.82	2498
282	ห้วยตะคร้อ	849588	1714500	5439 I	คง	นครราชสีมา	6.0	3635	9.5	2530
283	ห้วยตะควน	626000	2210725	5048 IV	พญาเม็งราย	เชียงราย	23.0	95	7.1	2534
284	ห้วยตะไถ	1052370	1864296	5842 IV	ดงหลวง	มุกดาหาร	14.4	235	0.75	2537
285	ห้วยตาควน	626000	2210725	5048 IV	พญาเม็งราย	เชียงราย	13.7	164	7.1	2536
287	ห้วยตามาย	1102228	1636194	5938 III	กันทรลักษณ์	ศรีสะเกษ	11.0	2235	38.23	2525
289	ห้วยตู้ 1	711340	1410727	5134 I		ชลบุรี	8.0	590	1.5	2531
290	ห้วยตู้ 2	709682	1411109	5134 I	สัตหีบ	ชลบุรี	11.0	185	2.58	2529
291	ห้วยเดย	907844	1802259	5541 I	เมืองขอนแก่น	ขอนแก่น	10.8	1029	5.34	2511
292	ห้วยถ้ำแข้	1149273	1737344	6040 III	ตระการพืชผล	อุบลราชธานี	18.5	1826	13.7	2529

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
294	ห้วยทราย	903536	1779994	5541 II	บ้านไผ่	ขอนแก่น	9.0	920	2.335	2536
295	ห้วยทราย	852006	1972320	5444 I	น่าโสม	อุดรธานี	19.0	135	2.14	2535
297	ห้วยทรายใต้	710495	1864573	5142 I	นครไทย	พิษณุโลก	13.0	116.3	0.67	2531
298	ห้วยทอน(ดอนบน)	858462	1989155	5444 I	ศรีเชียงใหม่	หนองคาย	18.0	666	7.8	2537
300	ห้วยทา	1053385	1857548	5842 III	ดงหลวง	มุกดาหาร	16.8	885	2.3	2532
301	ห้วยเทียน	566278	1617480	4938 III	เลาขวัญ	กาญจนบุรี	13.0	1674	10.65	2531
302	ห้วยโท-ยาง	1066108	1883473	5842 I		สกลนคร	18.4	1115	9.1	2535
303	ห้วยน้อย	789786	1949487	5344 III	เมืองเลย	เลย	9.2	140	0.354	2494
305	ห้วยนา	1056102	1883739	5842 IV	เต่างอย	สกลนคร	13.6	800	1.82	2528
306	ห้วยนางยอด	1095762	1874505	5942 IV	นาแก	นครพนม	10.9	610	0.85	2530
307	ห้วยนางออ	1068987	1881589	5842 I	นาแก	นครพนม	22.7	350	3.3	2535
308	ห้วยน่าเขียว	519675	879945	4824 IV	คลองท่อม	กระบี่	25.0	2830	7.3	2536
309	ห้วยน่าค่า	1073766	1676362	5839 II	เมือง	ศรีสะเกษ	6.0	840	1.01	2495
310	ห้วยน่าช่า	631494	1928417	5043 IV	ตรอน	อุตรดิตถ์	14.0	183	0.874	2533
311	ห้วยน่าเทียง	913563	1960686	5544 II	เพ็ญ	อุดรธานี	6.8	490	0.189	2494
312	ห้วยน่าพาว	786888	1940282	5344 III	เมืองเลย	เลย	10.5	220	1.364	2499
313	ห้วยน่ามัน	635850	2099300	5046 I	เชียงม่วน	พะเยา	12.0	308	0.515	2528
314	ห้วยน่าวัก	754025	1949611	5244 II	ท่าลี่	เลย	10.2	100	0.164	2494
315	ห้วยน่าหมาน	778571	1937350	5344 III	เมืองเลย	เลย	33.0	668	26.5	2533
316	ห้วยน่าอ้อ	695500	2139925	5147 I	เชียงกลาง	น่าน	18.0	156	1.65	2536
318	ห้วยบง	852379	1632283	5539 IV	ชุมพวง	นครราชสีมา	13.5	1815	14.14	2530
319	ห้วยบอน	533951	2056429	4846 II	สันกำแพง	เชียงใหม่	18.0	245	2.1	2526
320	ห้วยบอน	520746	2207637	4848 IV	ฝาง	เชียงใหม่	22.5	242	1.7	2528
322	ห้วยบังพวน	882290	1958087	5544 III	ท่าบ่อ	หนองคาย	10.5	1700	10.07	2506
323	ห้วยประดู่	749200	1713640	5239 I	ล่าสนธิ	ลพบุรี	21.0		0.98	2535
324	ห้วยปราสาทใหญ่	775050	1673350	5339 III	ด่านขุนทด	นครราชสีมา	18.5	1220	8.7	2538
325	ห้วยปรือ	739301	1583130	5237 IV	เมืองนครนายก	นครนายก	16.6	1150	8.3	2530
326	ห้วยปลาก้าง	475262	2084807	4746 I	สะเมิง	เชียงใหม่	20.0	205	0.46	2526
328	ห้วยป่าแดง	723121	1819894	5241 IV	เมืองเพชรบูรณ์	เพชรบูรณ์	26.0	1360	20.7	2521
329	ห้วยป่าบง	559124	1856613	4942 IV	พรานกระต่าย	กำแพงเพชร	15.0	198	1.38	2537
330	ห้วยป่าไผ่	490171	1976183	4744 I	ลี้	ลำพูน	22.0	213	0.7	2536
331	ห้วยปุก	686775	2111425	5147 II	ท่าวังผา	น่าน	15.0	129	1.05	2527
332	ห้วยเป๊าะ	530792	2005133	4845 II	เกาะคา	ลำปาง	11.0	126	0.962	2523
333	ห้วยเป๊าะ	618978	2040303	5045 IV	สอง	แพร่	20.5	160	0.19	2524
335	ห้วยโป่ง	698998	1965948	5144 I	น่าปาด	อุตรดิตถ์	14.0	115	0.575	2527
336	ห้วยโป่ง	809318	1960059	5344 II	ปากชม	เลย	13.2	118.9	0.29	2525
337	ห้วยผักดอก	1084990	1880094	5842 I	นาแก	นครพนม	14.9	560	2.8	2528
338	ห้วยผาค่า	615561	2009368	5045 III	เมืองแพร่	แพร่	17.0	107	1.07	2524
339	ห้วยผาลาด	587868	2002704	4945 II	ลอง	แพร่	12.0	107.92	0.28	2530
340	ห้วยผาวัง	823579	1916218	5443 IV	กิ่งอ.ผาวัง	หนองบัวลำภู	13.6	838.81	2.122	2534

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
341	ห้วยผึ้ง	1021899	1849671	5742 II	ห้วยผึ้ง	กาฬสินธุ์	12.9	900	4.15	2509
342	ห้วยผึ้ง	1170186	1604060	6037 IV	น้ำยืน	อุบลราชธานี	13.5	1100	5.816	2536
343	ห้วยฝ้า	1029387	1849677	5742 II	ห้วยผึ้ง	กาฬสินธุ์	13.2	640	6.422	2509
344	ห้วยฝายคอ	393250	2140000	4547 I	เมืองแม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน	21.5	290	0.95	2532
345	ห้วยพลาญเสือตอนบน	1170822	1597036	6037 IV	น้ำยืน	อุบลราชธานี	16.0	282	5.0	2531
346	ห้วยพลาญเสือตอนล่าง	1169136	1603832	6037 IV		อุบลราชธานี	13.1	1070	33.5	2536
347	ห้วยพุ(ห้วยแข้)	1050336	1858761	5842 III	ดงหลวง	มุกดาหาร	26.0	585	4.5	2538
348	ห้วยเพลียก	856571	1585153	5437 I	ครบุรี	นครราชสีมา	23.0	300	1.5	2530
349	ห้วยแพะ	633250	2122075	5047 II	ปง	พะเยา	13.0	280	1.65	2533
350	ห้วยโพธิ	1096795	1764852	5940 IV	เมืองอำนาจเจริญ	อำนาจเจริญ	11.6	0.51	5.4	2499
351	ห้วยโพธิ	983810	1828313	5741 IV	เมืองกาฬสินธุ์	กาฬสินธุ์	5.5	325	2.44	2496
352	ห้วยแฟน	680914	1644127	5138 IV	เมืองลพบุรี	ลพบุรี	16.7	960	1.9	2526
353	ห้วยม่วง	537347	2205007	4848 I	แม่อาย	เชียงใหม่	18.0	97	1.6	2527
355	ห้วยมะนาว	476802	2060720	4746 II	แม่วาง	เชียงใหม่	21.0	540	4.3	2526
356	ห้วยมะโน	1038335	1860042	5842 IV	นาคู	กาฬสินธุ์	10.0	2540	5.815	2513
357	ห้วยมะหาด	549840	1487612	4835 I	สวนผึ้ง	ราชบุรี	14.8	366	4.3	2531
358	ห้วยม่าน	382500	2081250	4546 I	ขุนยวม	แม่ฮ่องสอน	20.0	184	0.52	2525
359	ห้วยมุก	1077495	1839192	5842 II	คำชะอี	มุกดาหาร	20.6	860	4.25	2527
360	ห้วยแม่งอน	612550	2072550	5046 III	งาว	ลำปาง	15.0	266	1.28	2536
361	ห้วยแม่ตา	567553	2071545	4946 III	แจ้ห่ม	ลำปาง	19.0	167	1.71	2534
362	ห้วยแม่ตำ	618450	2046600	5046 III	สอง	แพร่	20.0	95	0.88	2527
363	ห้วยแม่ทรายคำ	555304	2038115	4945 IV	เมืองลำปาง	ลำปาง	16.0	470	1.248	2527
364	ห้วยแม่ปอน	506740	2110585	4847 III	แม่แตง	เชียงใหม่	21.0	105	1.2	2538
365	ห้วยแม่ไพร	537400	2037277	4845 I	ห้างฉัตร	ลำปาง	19.0	341	3.2	2528
366	ห้วยแม่ยาก	591327	2004174	4945 II	ลอง	แพร่	16.0	165	2.2	2532
367	ห้วยแม่ยาว	524231	2023418	4845 IV	ห้างฉัตร	ลำปาง	18.0	238	3.48	2534
368	ห้วยแม่เย็น	493679	2087647	4746 I	แม่ริม	เชียงใหม่	13.8	279	0.6	2532
370	ห้วยแม่สูง	575065	1940882	4944 III	ศรีสัชนาลัย	สุโขทัย	27.8	596	12.45	2539
371	ห้วยแม่หยวก	641367	2033983	5045 I	ร้องกวาง	แพร่	14.5	61	0.82	2523
372	ห้วยแม่หละ	545426	1966931	4844 I	วังชิ้น	แพร่	17.0	200	1.87	2535
373	ห้วยแม่ฮ่องสอน	394550	2132900	4547 I	เมืองแม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน	23.0	223	0.734	2532
374	ห้วยยาง	807139	1869871	5342 I	ภูกระดึง	เลย	12.9	970	3.712	2509
375	ห้วยยาง	871817	1786933	5441 II	มัญจาคีรี	ขอนแก่น	7.2	770	3.02	2494
376	ห้วยยาง	1066265	1883479	5842 I	โคกศรีสุพรรณ	สกลนคร		965	3.7	2529
377	ห้วยยางพะไล	842884	1732000	5440 III	แก้งสนามนาง	นครราชสีมา	13.0	1217	11.2	2536
380	ห้วยไร่	569159	2014849	4945 III	แม่ทะ	ลำปาง	6.0	245	0.059	2524
381	ห้วยไร่	1082804	1865696	5842 I	ดงหลวง	มุกดาหาร	15.5	400	2.8	2525
382	ห้วยล้อมไผ่	834251	1852733	5442 III	สีชมพู	ขอนแก่น	11.5	1610	5.6	2532
384	ห้วยลาด	534642	2032271	4845 I	ห้างฉัตร	ลำปาง	17.0	137	1.018	2527
386	ห้วยลึก	479675	950244	4726 II	ปลายพระยา	กระบี่	20.0	250	2.45	2537

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
387	ห้วยลึก	457705	1852872	4742 IV	แม่สอด	ตาก	26.0	703	5.7	2531
388	ห้วยลึก	714126	1836310	5242 III	เขาค้อ	เพชรบูรณ์	13.5	353	1.38	2528
389	ห้วยแล้ง	976631	1760656	5640 I	จตุรพักตรพิมาน	ร้อยเอ็ด	6.5	1620	4.41	2503
390	ห้วยวังกล้วย	524764	921987	4825 IV	พระแสง	สุราษฎร์ธานี	6.0	645	0.8	2527
391	ห้วยวังธาร	515245	2094127	4846 IV	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	14.0	145	0.8	2534
392	ห้วยวังนอง	1059781	1823598	5841 IV	หนองพอก	ร้อยเอ็ด	18.2	900	11.49	2530
394	ห้วยวังม่วง	1070985	1881115	5842 I	นาแก	นครพนม	19.0	1000	1.5	2537
395	ห้วยวังใหญ่	1153919	1606342	6037 IV	น้ำยืน	อุบลราชธานี	18.3	975	8.0	2536
396	ห้วยแวนโค้ง	638500	2145150	5047 I	เชียงคำ	พะเยา	13.0	255	0.64	2536
397	ห้วยศรีคุณ	1077988	1881659	5842 I	นาแก	นครพนม	9.3	510	1.8	2502
398	ห้วยศาลา	1059205	1652668	5838 III	ภูสิงห์	ศรีสะเกษ	22.0	1950	31.0	2534
400	ห้วยส้มโฮง	1094669	1926120	5943 IV	เมือง	นครพนม	8.5	875	2.24	2501
401	ห้วยสมัย	545593	1979567	4844 I	สบปราบ	ลำปาง	24.5	330	1.2	2527
402	ห้วยสอดือ	384250	2079200	4546 I	ยวม	แม่ฮ่องสอน	18.0	121.5	1.88	2533
403	ห้วยสะทด	1023668	1848430	5742 II	ห้วยผึ้ง	กาฬสินธุ์	14.0	920	11.66	2512
404	ห้วยสะแบก	1108800	1794804	5941 III	เลิงนกทา	ยโสธร	19.0	1932	26.8	2536
405	ห้วยสะพาน	721016	1446489	5235 III	ศรีราชา	ชลบุรี	14.2	1400	3.84	2536
406	ห้วยสัก	592992	2186626	4948 I	เมืองเชียงราย	เชียงราย	15.0	158	4.18	2528
407	ห้วยสังเคียบ	1017889	1872828	5742 I	สมเด็จ	กาฬสินธุ์	14.9		7.5	2540
408	ห้วยสามพาด	902677	1907343	5543 II	หนองแสง	อุดรธานี	15.5	1050	15.0	2535
409	ห้วยสายนาเวียง	1049033	1840347	5842 III	เขาวง	กาฬสินธุ์	6.9	620	0.961	2511
410	ห้วยสำราญ	1045022	1600785	5837 IV	ภูสิงห์	ศรีสะเกษ	19.0	330	12.35	2538
412	ห้วยสีดา	749550	1716350	5240 II	ลำสนธิ	ลพบุรี	18.0	18	0.99	2535
413	ห้วยสีทน	983970	1828318	5741 IV	เมืองกาฬสินธุ์	กาฬสินธุ์	9.0	635	3.55	2502
414	ห้วยสีโท	1115651	1764864	5940 IV	เมือง	อำนาจเจริญ	16.8	0.52	10.6	2538
415	ห้วยสีพัน	655150	2086450	5046 I	ก.บ้านหลวง	น่าน	17.0	257	1.18	2533
416	ห้วยเสนง	977802	1641793	5638 I	เมืองสุรินทร์	สุรินทร์	5.5	4400	20.02	2521
417	ห้วยเสียว	911293	1854659	5542 II	น้ำพอง	ขอนแก่น	6.6	1200	0.53	2494
418	ห้วยเสียว	485193	2072250	4746 II	หางดง	เชียงใหม่	16.0	165	1.3	2522
419	ห้วยหนองสิ	1085121	1622428	5838 II	ขุนหาญ	ศรีสะเกษ	5.5	2685	3.89	2517
420	ห้วยหลวง	541648	1981070	4844 I	สบปราบ	ลำปาง	13.0	663	1.26	2527
421	ห้วยหลวง	880149	1922817	5543 IV	เมืองอุดรธานี	อุดรธานี	12.5	4900	113.25	2521
422	ห้วยหลวงวังวัว	558776	2039283	4945 IV	เมืองลำปาง	ลำปาง	18.0	370	1.617	2528
423	ห้วยหละ	490904	1954155	4744 II	ลี้	ลำพูน	10.0	359	1.04	2527
424	ห้วยหละ	684148	2021899	5145 IV	นาน้อย	น่าน	18.0	300.43	0.88	2534
425	ห้วยหวด	1043289	1879377	5842 IV	เต่างอย	สกลนคร	25.5	395	21.0	2530
426	ห้วยหวาย	638075	2227500	5049 II	เชียงของ	เชียงราย	13.2	708	1.09	2537
427	ห้วยหอย	1050589	1858515	5842 III	ดงหลวง	มุกดาหาร	15.0	365	2.0	2538
428	ห้วยหิน	865522	1589289	5437 I	เสิงสาง	นครราชสีมา	15.3	530	1.95	2522
429	ห้วยหินลับ	1085679	1861790	5842 I	ดงหลวง	มุกดาหาร	15.2	440	4.0	2525

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

DamID	Name_Th	Coor_E	Coor_N	MapSheetNo	Amp_Th	Prov_Th	Height (m)	Length (m)	Capacity (m^3)	YearConstruction
430	ห้วยเหยียน	579482	2133151	4947 I	เมืองพะเยา	พะเยา	12.0	645	0.75	2528
431	ห้วยเหล่ายาง	868225	1909130	5443 II	เมืองหนองบัวลำภู	หนองบัวลำภู	20.0	316	2.0	2534
432	ห้วยเหิง	634575	2112475	5047 II	ปง	พะเยา	12.0	638	0.84	2536
433	ห้วยแหน	629450	2095550	5046 IV	เชียงม่วน	พะเยา	12.0	292	2.625	2537
434	ห้วยแห้ว	780512	1958201	5344 III	เมืองเลย	เลย	14.9	710	2.73	2493
436	ห้วยใหญ่	886466	1835832	5542 III	บ้านฝาง	ขอนแก่น	9.3	1025	1.4	2496
437	ห้วยอ่างหิน	864258	1655823	5438 I	จักราช	นครราชสีมา	7.0	760	0.35	2529
438	ห้วยอีเลิศ	789484	1915723	5343 IV	วังสะพุง	เลย	10.4	240	1.431	2496
439	ห้วยแอ่ง	976793	1787520	5641 II	ศรีสมเด็จ	ร้อยเอ็ด	12.0	1560	22.29	2507
440	ห้วยฮวก	468269	2041255	4745 IV	จอมทอง	เชียงใหม่	14.0	352	0.52	2529
441	ห้วยฮ่อมดินดำ	607850	2204350	5048 IV	เวียงชัย	เชียงราย	18.7		1.13	2533
442	ห้วยแฮด	619005	2021849	5045 IV	หนองม่วงไข่	แพร่	16.0	136	3.7	2534
444	หุบกะพง	596448	1412556	4934 I	ชะอำ	เพชรบุรี	13.0	180	0.26	2521
447	อำปึล	989881	1636956	5738 IV	เมืองสุรินทร์	สุรินทร์	8.6	2800	27.67	2521
448	ห้วยดินดำ	609125	2208975	5048 IV	เวียงเชียงรุ้ง	เชียงราย	18.7		1.13	2533
449	น่าอ้อ	691675	2130150	5147 I	เชียงกลาง	น่าน	18.0	156	1.65	2536
450	ศรีนครินทร์	514119	1592613	4837 IV	ศรีสวัสดิ	กาญจนบุรี	140.0	610	17745.0	2523
451	วชิราลงกรณ	441824	1637856	4638 I	ทองผาภูมิ	กาญจนบุรี	92.0	1019	8860.0	2527
452	รัชชประภา	463528	998370	4726 I	บ้านตาขุนุน	สุราษฎร์ธานี	94.0	761	5638.8	2530
453	บางลาง	754141	674807	5221 II	บันนังสตา	ยะลา	85.0	430	1420.0	2524
455	ห้วยกุ่ม	798860	1817493	5341 I	เกษตรสมบูรณ์	ชัยภูมิ	35.5	0	22.8	2523
456	ภูมิพล	485797	1915340	4843 III	สามเงา	ตาก	154.0	486	13462.0	2507
457	จุฬาภรณ์	783002	1829759	5341 IV	คอนสาร	ชัยภูมิ	70.0	700	188.0	2523
458	อุบลรัตน์	882434	1856356	5542 IV	อุบลรัตน์	ขอนแก่น	32.0	885	2263.0	2509
459	สิรินธร	1175261	1685835	6039 I	พิบูลมังสาหาร	อุบลราชธานี	42.0	940	1966.5	2514
460	สิริกิติ์	655246	1978250	5044 I	ท่าปลา	อุตรดิษถ์	133.6	810	9510.0	2515
461	น่าพุง	1030844	1883017	5743 II	ภูพาน	สกลนคร	41.0	1720	165.0	2508
462	ท่าทุ่งนา	524099	1577441	4837 III	เมือง	กาญจนบุรี	30.0	840	54.8	2524
463	คิรีธาร	860198	1412701	5434 I	ขลุง	จันทบุรี	33.0		76.0	2529
464	ห้วยประทาวตอนบน	829943	1779490	5441 III	แก้งคร้อ	ชัยภูมิ	24.5		41.0	2535
465	ห้วยประทาวตอนล่าง	829943	1779350	5441 III	แก้งคร้อ	ชัยภูมิ	37.5		14.0	2535
467	แม่สะงา	389865	2165145	4548 II	เมือง	แม่ฮ่องสอน	37.0		0.08	2531
468	แม่มาว	510480	2209525	4848 IV	ฝาง	เชียงใหม่	73.0		20.6	2529
469	แม่ฮ่องสอน	394921	2120139	4647 III	เมือง	แม่ฮ่องสอน	10.0		0.02	2515
470	แม่กึมหลวง	523366	2217822	4849 III	แม่อาย	เชียงใหม่	11.4		0.04	2524
471	ห้วยแม่ผง	616924	2110208	5047 III	ดอกคำใต้	พะเยา	42.0		5.08	2525
472	แม่สะเรียง	391446	2009304	4545 II	แม่สะเรียง	แม่ฮ่องสอน	22.5		0.05	2528
473	แม่สาบ	470651	2079970	4746 IV	สะเมิง	เชียงใหม่	30.0		1.15	2531
479	แม่ตืน	425188	1967233	4644 I	อมก๋อย	เชียงใหม่	7.0		0.02	2533

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
1	1	ท่าทุ่งนา	กาญจนบุรี	30.0	54.80	กลาง	3.00	7.42	22.26
2	2	แม่ทะ	ลำปาง	19.2	2.54	กลาง	4.00	4.95	19.79
3	3	แม่มอก	ลำปาง	25.1	96.00	กลาง	2.50	7.42	18.55
4	3	แม่ปืม	พะเยา	19.3	43.00	กลาง	2.50	7.42	18.55
5	3	ห้วยช้าง	เชียงราย	27.5	6.30	กลาง	3.75	4.95	18.55
6	3	ห้วยลึก	ตาก	26.0	5.70	กลาง	3.75	4.95	18.55
7	4	แม่สะงา	แม่ฮ่องสอน	37.0	0.08	เล็ก	3.75	4.74	17.76
8	5	ห้วยตาควน	เชียงราย	13.7	7.10	กลาง	3.75	4.53	16.97
9	5	ห้วยสัก	เชียงราย	15.0	4.18	กลาง	3.75	4.53	16.97
10	6	ห้วยบอน	เชียงใหม่	22.5	1.70	กลาง	3.75	4.32	16.18
11	6	ห้วยฝายคอ	แม่ฮ่องสอน	21.5	0.95	เล็ก	3.75	4.32	16.18
12	6	ห้วย	แม่ฮ่องสอน	23.0	0.73	เล็ก	3.75	4.32	16.18
13	6	ห้วยม่าน	แม่ฮ่องสอน	20.0	0.52	เล็ก	3.75	4.32	16.18
14	6	ห้วยงู	เชียงใหม่	25.0	0.47	เล็ก	3.75	4.32	16.18
15	7	แม่สอง	แพร่	48.0	65.80	กลาง	2.50	5.37	13.42
16	7	แม่ถาง	แพร่	43.0	30.60	กลาง	2.50	5.37	13.42
17	7	แม่มาน	แพร่	32.0	18.75	กลาง	2.50	5.37	13.42
18	7	แม่สาน	ลำพูน	36.0	18.00	กลาง	2.50	5.37	13.42
19	8	ห้วยแม่ผง	พะเยา	42.0	5.08	กลาง	3.00	4.42	13.26
20	9	ท่าแพ	สุโขทัย	28.0	58.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
21	9	แม่ตูบ	เชียงใหม่	30.0	39.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
22	9	คลองบึง	ประจวบคีรีขันธ์	18.0	22.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
23	9	บางกำปรัด	กระบี่	23.0	16.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
24	9	น้ำแหง	น่าน	30.0	13.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
25	9	ห้วยแม่สูง	สุโขทัย	27.8	12.45	กลาง	2.50	4.95	12.37
26	9	ห้วยเกี๋ยง	ลำปาง	24.0	11.60	กลาง	2.50	4.95	12.37
27	9	แม่ทานและ	ลำปาง	19.0	11.40	กลาง	2.50	4.95	12.37
28	9	แม่ตืบ	ลำพูน	24.0	10.00	กลาง	2.50	4.95	12.37
29	9	แม่คำปอง	แพร่	25.5	6.72	กลาง	2.50	4.95	12.37
30	9	แม่วะ	ลำปาง	24.0	5.90	กลาง	2.50	4.95	12.37
31	9	แม่ใก๋น	เชียงใหม่	28.0	5.53	กลาง	2.50	4.95	12.37
32	9	แม่ธิ	ลำพูน	20.0	4.50	กลาง	2.50	4.95	12.37
33	9	ห้วยมะนาว	เชียงใหม่	21.0	4.30	กลาง	2.50	4.95	12.37
34	9	ห้วยแม่ยาว	ลำปาง	18.0	3.48	กลาง	2.50	4.95	12.37
35	9	ห้วยแม่ไพร	ลำปาง	19.0	3.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
36	9	คลองหยา	กระบี่	17.0	3.20	กลาง	2.50	4.95	12.37
37	9	ห้วยกาล	แพร่	17.0	3.19	กลาง	2.50	4.95	12.37
38	9	โป่งจ้อ	เชียงใหม่	18.0	2.60	กลาง	2.50	4.95	12.37
39	9	ห้วยลึก	กระบี่	20.0	2.45	กลาง	2.50	4.95	12.37
40	9	ห้วยบอน	เชียงใหม่	18.0	2.10	กลาง	2.50	4.95	12.37
41	10	แม่ตำ	พะเยา	13.5	37.00	กลาง	2.50	4.53	11.32
42	10	คลองข้างใน	สุโขทัย	12.0	9.00	กลาง	2.50	4.53	11.32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
43	10	ท่าเดื่อ	สุพรรณบุรี	15.0	2.80	กลาง	2.50	4.53	11.32
44	10	วังหิน	เพชรบุรี	12.5	2.28	กลาง	2.50	4.53	11.32
45	10	เขาบันได	เพชรบุรี	13.0	2.18	กลาง	2.50	4.53	11.32
46	11	แม่ยางหลวง	แพร่	18.0	2.00	กลาง	2.50	4.32	10.79
47	11	แม่ตากเหนือ	ลำปาง	16.0	1.98	กลาง	2.50	4.32	10.79
48	11	ห้วยแม่หละ	แพร่	17.0	1.87	กลาง	2.50	4.32	10.79
49	11	ห้วยน้ำอ้อ	น่าน	18.0	1.65	กลาง	2.50	4.32	10.79
50	11	น้ำอ้อ	น่าน	18.0	1.65	กลาง	2.50	4.32	10.79
51	11	สันหนอง	เชียงใหม่	18.0	1.45	กลาง	2.50	4.32	10.79
52	11	น้ำงึม	น่าน	16.0	1.22	กลาง	2.50	4.32	10.79
53	11	ห้วยสมัย	ลำปาง	24.5	1.20	กลาง	2.50	4.32	10.79
54	11	ห้วยแม่ปอน	เชียงใหม่	21.0	1.20	กลาง	2.50	4.32	10.79
55	11	ห้วยงู	เชียงใหม่	17.0	1.16	กลาง	2.50	4.32	10.79
56	11	ห้วยโค้งแม่	ลำพูน	20.8	1.10	กลาง	2.50	4.32	10.79
57	11	ต๋ำน้อย	ลำปาง	18.0	1.09	กลาง	2.50	4.32	10.79
58	11	แม่ตาแมว	เชียงราย	16.0	1.09	กลาง	2.50	4.32	10.79
59	11	ห้วยผาคำ	แพร่	17.0	1.07	กลาง	2.50	4.32	10.79
60	11	ห้วยลาด	ลำปาง	17.0	1.02	กลาง	2.50	4.32	10.79
61	11	แม่ป๊อก	ลำพูน	17.5	1.00	กลาง	2.50	4.32	10.79
62	11	ห้วยหละ	น่าน	18.0	0.88	เล็ก	2.50	4.32	10.79
63	11	แม่ตะไคร้	เชียงใหม่	22.0	0.85	เล็ก	2.50	4.32	10.79
64	11	แม่เฟือง	ลำปาง	20.0	0.82	เล็ก	2.50	4.32	10.79
65	11	แม่ต๋อม	พะเยา	21.0	0.75	เล็ก	2.50	4.32	10.79
66	11	ห้วยป่าไผ่	ลำพูน	22.0	0.70	เล็ก	2.50	4.32	10.79
67	11	ห้วยไคร้	ลำพูน	20.0	0.34	เล็ก	2.50	4.32	10.79
68	11	ห้วยเป๊าะ	แพร่	20.5	0.19	เล็ก	2.50	4.32	10.79
69	11	แม่จอก	เชียงใหม่	20.3	0.17	เล็ก	2.50	4.32	10.79
71	12	ยางชุม	ประจวบคีรีขันธ์	23.0	32.00	กลาง	2.50	4.00	10.00
72	12	ห้วยแฮต	แพร่	16.0	3.70	กลาง	2.50	4.00	10.00
73	13	ห้วยป่าบง	กำแพงเพชร	15.0	1.38	กลาง	2.50	3.89	9.74
74	13	แม่ล้อหัก	ลำปาง	10.0	1.34	กลาง	2.50	3.89	9.74
75	13	แม่กิ๊ด	ลำปาง	12.0	1.30	กลาง	2.50	3.89	9.74
76	13	คลองสวน	สุราษฎร์ธานี	10.0	1.29	กลาง	2.50	3.89	9.74
77	13	ห้วยหลวง	ลำปาง	13.0	1.26	กลาง	2.50	3.89	9.74
78	13	แม่ไฮ	ลำปาง	13.0	1.23	กลาง	2.50	3.89	9.74
79	13	แม่จาง	ลำปาง	10.0	1.20	กลาง	2.50	3.89	9.74
80	13	ทุ่งโห้ง	เชียงราย	11.0	1.16	กลาง	2.50	3.89	9.74
81	13	แม่ทก	ลำปาง	12.0	1.11	เล็ก	2.50	3.89	9.74
82	13	ท่อก๊อ	เชียงราย	13.0	1.08	เล็ก	2.50	3.89	9.74
83	13	ห้วยปุก	น่าน	15.0	1.05	เล็ก	2.50	3.89	9.74
84	13	ห้วยหละ	ลำพูน	10.0	1.04	เล็ก	2.50	3.89	9.74
85	13	ห้วยแก่น	พะเยา	12.5	1.01	เล็ก	2.50	3.89	9.74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
86	13	บ้านช้างแรก	ประจวบคีรีขันธ์	12.5	1.00	เล็ก	2.50	3.89	9.74
87	13	แม่ฟอก	ลำปาง	14.0	0.96	เล็ก	2.50	3.89	9.74
88	13	ห้วยน้ำช้า	อุตรดิตถ์	14.0	0.87	เล็ก	2.50	3.89	9.74
89	13	ห้วยแม่หยวก	แพร่	14.5	0.82	เล็ก	2.50	3.89	9.74
90	13	ห้วยวังธาร	เชียงใหม่	14.0	0.80	เล็ก	2.50	3.89	9.74
91	13	ห้วยวังกล้วย	สุราษฎร์ธานี	6.0	0.80	เล็ก	2.50	3.89	9.74
92	13	บ้านแม่	ลำปาง	12.0	0.79	เล็ก	2.50	3.89	9.74
93	13	ห้วยไคร้	เชียงราย	12.4	0.73	เล็ก	2.50	3.89	9.74
94	13	ห้วยแวนโค้ง	พะเยา	13.0	0.64	เล็ก	2.50	3.89	9.74
95	13	แม่ปราบ	ลำปาง	11.0	0.63	เล็ก	2.50	3.89	9.74
96	13	พุปลาก้าง	สุพรรณบุรี	11.0	0.63	เล็ก	2.50	3.89	9.74
97	13	ห้วยกำ	แพร่	14.5	0.60	เล็ก	2.50	3.89	9.74
98	13	ห้วยแม่เย็น	เชียงใหม่	13.8	0.60	เล็ก	2.50	3.89	9.74
99	13	บ้านควนกลิ้ง	สุราษฎร์ธานี	5.0	0.60	เล็ก	2.50	3.89	9.74
100	13	ห้วยโป่ง	อุตรดิตถ์	14.0	0.57	เล็ก	2.50	3.89	9.74
101	13	แม่แมะ	ลำปาง	13.0	0.53	เล็ก	2.50	3.89	9.74
102	13	ห้วยฮวก	เชียงใหม่	14.0	0.52	เล็ก	2.50	3.89	9.74
103	13	บ้านหินปวน	สุราษฎร์ธานี	9.0	0.50	เล็ก	2.50	3.89	9.74
104	13	บ้านดอกช้าง	ลำพูน	11.5	0.50	เล็ก	2.50	3.89	9.74
105	13	ห้วยผาลาด	แพร่	12.0	0.28	เล็ก	2.50	3.89	9.74
106	13	บางลอ	สุราษฎร์ธานี	6.0	0.22	เล็ก	2.50	3.89	9.74
107	14	ห้วยขุนจิต	ชลบุรี	17.5	4.80	กลาง	1.25	7.42	9.28
108	15	ห้วยบังพวน	หนองคาย	10.5	10.07	กลาง	2.00	4.53	9.05
109	15	หนองญาติ	นครพนม	2.8	6.80	กลาง	2.00	4.53	9.05
110	15	ใกล้บ้าน	นราธิวาส	5.0	2.85	กลาง	2.00	4.53	9.05
111	15	ห้วยแห้ว	เลย	14.9	2.73	กลาง	2.00	4.53	9.05
112	15	ห้วยส้มโฮง	นครพนม	8.5	2.24	กลาง	2.00	4.53	9.05
113	16	ห้วยอีเลิศ	เลย	10.4	1.43	กลาง	2.00	3.89	7.79
114	16	ห้วยน้ำพาว	เลย	10.5	1.36	กลาง	2.00	3.89	7.79
115	16	คำตะเกียน	สระบุรี	8.0	0.64	เล็ก	2.00	3.89	7.79
116	16	หนองสอง	หนองคาย	6.0	0.58	เล็ก	2.00	3.89	7.79
117	16	ห้วยน้อย	เลย	9.2	0.35	กลาง	2.00	3.89	7.79
118	16	ห้วยเชียงยืน	นครพนม	5.0	0.34	เล็ก	2.00	3.89	7.79
119	16	ห้วยน้ำเที่ยง	อุดรธานี	6.8	0.19	เล็ก	2.00	3.89	7.79
120	17	ห้วยเหยี่ยน	พะเยา	12.0	0.75	เล็ก	2.50	2.95	7.37
121	18	ห้วย	เพชรบูรณ์	51.0	33.22	กลาง	1.25	5.37	6.71
122	18	ห้วยน้ำ	เลย	33.0	26.50	กลาง	1.25	5.37	6.71
123	19	ดอกกราย	ระยอง	26.5	71.40	กลาง	1.25	4.95	6.18
124	19	คลองระโอก	ระยอง	20.0	17.50	กลาง	1.25	4.95	6.18
125	19	มาบประชัน	ชลบุรี	17.0	16.60	กลาง	1.25	4.95	6.18
126	19	ห้วยซับ	ลพบุรี	29.0	8.42	กลาง	1.25	4.95	6.18
127	19	ห้วยปรือ	นครนายก	16.6	8.30	กลาง	1.25	4.95	6.18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
128	19	ห้วยทอน	หนองคาย	18.0	7.80	กลาง	1.25	4.95	6.18
129	19	วังบอน	นครนายก	19.0	6.90	กลาง	1.25	4.95	6.18
130	19	แม่พริก	ลำปาง	21.3	4.20	กลาง	2.50	2.47	6.18
131	19	ห้วยทราย	อุดรธานี	19.0	2.14	กลาง	1.25	4.95	6.18
132	20	คลองจำไหร	สงขลา	12.5	6.00	กลาง	1.25	4.53	5.66
133	20	ลาดกระทิง	ฉะเชิงเทรา	10.5	4.20	กลาง	1.25	4.53	5.66
134	21	คลองทราย	นครนายก	17.0	2.00	กลาง	1.25	4.32	5.39
135	21	ห้วยสีดา	ลพบุรี	18.0	0.99	เล็ก	1.25	4.32	5.39
136	22	จัดหาแหล่ง	ฉะเชิงเทรา	10.0	1.74	กลาง	1.25	3.89	4.87
137	22	ห้วยโซ่	หนองบัวลำภู	13.0	1.60	กลาง	1.25	3.89	4.87
138	22	ห้วยตู้ 1	ชลบุรี	8.0	1.50	กลาง	1.25	3.89	4.87
139	22	บ้านหินฮาง	หนองบัวลำภู	11.8	0.96	เล็ก	1.25	3.89	4.87
140	22	เขาอีโต้ 2	ปราจีนบุรี	14.4	0.90	เล็ก	1.25	3.89	4.87
141	22	จัดหาแหล่ง	ฉะเชิงเทรา	11.0	0.61	เล็ก	1.25	3.89	4.87
142	22	บ้านโป่ง	ชลบุรี	10.4	0.57	เล็ก	1.25	3.89	4.87
143	22	สุ่งยายใจ	ฉะเชิงเทรา	11.0	0.56	เล็ก	1.25	3.89	4.87
144	22	ทำนบดิน	เพชรบูรณ์	13.0	0.50	เล็ก	1.25	3.89	4.87
145	22	ห้วยโป่ง	เลย	13.2	0.29	เล็ก	1.25	3.89	4.87
146	22	ช่องแสมสาร	ชลบุรี	11.0	0.14	เล็ก	1.25	3.89	4.87
147	23	ห้วยน้ำวัก	เลย	10.2	0.16	เล็ก	2.00	1.95	3.89
148	24	ห้วยประ	ชัยภูมิ	24.5	41.00	กลาง	0.00	7.42	0.00
149	24	คลองระบม	ฉะเชิงเทรา	18.5	40.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
150	24	ห้วยตามาย	ศรีสะเกษ	11.0	38.23	กลาง	0.00	4.53	0.00
151	24	ห้วยศาลา	ศรีสะเกษ	22.0	31.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
152	24	ห้วยตลาด	บุรีรัมย์	4.8	27.82	กลาง	0.00	4.53	0.00
153	24	ห้วยซับ	นครราชสีมา	16.0	27.66	กลาง	0.00	4.95	0.00
154	24	ห้วยสะแบก	ยโสธร	19.0	26.80	กลาง	0.00	4.95	0.00
155	24	ห้วยขี้เหล็ก	มุกดาหาร	15.0	23.70	กลาง	0.00	4.53	0.00
156	24	ห้วยแกง	กาฬสินธุ์	13.0	23.32	กลาง	0.00	4.53	0.00
157	24	ห้วยกุ่ม	ชัยภูมิ	35.5	22.80	กลาง	0.00	5.37	0.00
158	24	ห้วยหวด	สกลนคร	25.5	21.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
159	24	ลำเชียงไกร	นครราชสีมา	8.5	20.25	กลาง	0.00	4.53	0.00
160	24	ห้วยเสนง	สุรินทร์	5.5	20.02	กลาง	0.00	4.53	0.00
161	24	ห้วยชะโนด	มุกดาหาร	12.5	18.00	กลาง	0.00	4.53	0.00
162	24	ห้วยจันลา	อุบลราชธานี	20.0	16.90	กลาง	0.00	4.95	0.00
163	24	พุทธอุทยาน	อำนาจเจริญ	13.5	15.34	กลาง	0.00	4.53	0.00
164	24	บ้านจรัส	สุรินทร์	26.0	15.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
165	24	ห้วยสามพาด	อุดรธานี	15.5	15.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
166	24	ห้วยประ	ชัยภูมิ	37.5	14.00	กลาง	0.00	4.42	0.00
167	24	ห้วยถ้ำแข้	อุบลราชธานี	18.5	13.70	กลาง	0.00	4.95	0.00
168	24	ห้วยสำราญ	ศรีสะเกษ	19.0	12.35	กลาง	0.00	4.95	0.00
169	24	บ้านทำนบ	สุรินทร์	19.5	12.00	กลาง	0.00	2.47	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
170	24	ห้วยสะทด	กาฬสินธุ์	14.0	11.66	กลาง	0.00	4.53	0.00
171	24	ห้วยยาง	นครราชสีมา	13.0	11.20	กลาง	0.00	4.53	0.00
172	24	ลำพอก	สุรินทร์	6.0	11.19	กลาง	0.00	4.53	0.00
173	24	ห้วยแคน	นครพนม	11.0	11.00	กลาง	0.00	4.53	0.00
174	24	ห้วยขนุน	ศรีสะเกษ	19.0	10.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
175	24	ห้วยด่าน	สุรินทร์	18.0	9.40	กลาง	0.00	4.95	0.00
176	24	ห้วยโท-ยาง	สกลนคร	18.4	9.10	กลาง	0.00	4.95	0.00
177	24	ตาเกาว์	สุรินทร์	13.0	8.65	กลาง	0.00	4.53	0.00
178	24	ห้วยวังใหญ่	อุบลราชธานี	18.3	8.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
179	24	หนองช้าง	อุบลราชธานี	5.5	7.67	กลาง	0.00	4.53	0.00
180	24	ห้วยสังเคียบ	กาฬสินธุ์	14.9	7.50	กลาง	0.00	4.53	0.00
181	24	ห้วยจุมจัง	กาฬสินธุ์	8.0	7.38	กลาง	0.00	3.58	0.00
182	24	กุดลิงง้อ	อุดรธานี	9.0	6.44	กลาง	0.00	4.53	0.00
183	24	ห้วยฝา	กาฬสินธุ์	13.2	6.42	กลาง	0.00	4.53	0.00
184	24	ห้วย	สกลนคร	15.5	5.90	กลาง	0.00	4.95	0.00
185	24	ห้วยจานใต้	ร้อยเอ็ด	6.0	5.79	กลาง	0.00	4.53	0.00
186	24	ห้วยล้อมไผ่	ขอนแก่น	11.5	5.60	กลาง	0.00	4.53	0.00
187	24	ห้วยโพธิ์	อำนาจเจริญ	11.6	5.40	กลาง	0.00	4.53	0.00
188	24	ห้วยเตย	ขอนแก่น	10.8	5.34	กลาง	0.00	4.53	0.00
189	24	ห้วยเชียงคำ	มหาสารคาม	8.0	5.06	กลาง	0.00	4.53	0.00
190	24	ห้วยพุ(ห้วย	มุกดาหาร	26.0	4.50	กลาง	0.00	4.95	0.00
191	24	ห้วยแล้ง	ร้อยเอ็ด	6.5	4.41	กลาง	0.00	2.26	0.00
192	24	ห้วยมุก	มุกดาหาร	20.6	4.25	กลาง	0.00	4.95	0.00
193	24	หนองผือ	ร้อยเอ็ด	3.5	4.17	กลาง	0.00	4.53	0.00
194	24	ห้วยผึ้ง	กาฬสินธุ์	12.9	4.15	กลาง	0.00	4.53	0.00
195	24	ห้วยคะคาง	มหาสารคาม	7.5	4.13	กลาง	0.00	4.53	0.00
196	24	ห้วยขี้หิน	สกลนคร	16.5	4.00	กลาง	0.00	4.95	0.00
197	24	ห้วยแข้	สกลนคร	16.0	3.80	กลาง	0.00	4.95	0.00
198	24	ละเลิงหวาย	ขอนแก่น	3.6	3.74	กลาง	0.00	4.53	0.00
199	24	ห้วยยาง	เลย	12.9	3.71	กลาง	0.00	4.53	0.00
200	24	ห้วยสีทน	กาฬสินธุ์	9.0	3.55	กลาง	0.00	4.53	0.00
201	24	ลำพะยัง	กาฬสินธุ์	16.0	3.50	กลาง	0.00	4.95	0.00
202	24	ห้วยกะลอก	บุรีรัมย์	3.5	3.50	กลาง	0.00	4.53	0.00
203	24	ห้วยค้อ	สกลนคร	16.0	3.20	กลาง	0.00	4.95	0.00
204	24	ห้วยยาง	ขอนแก่น	7.2	3.02	กลาง	0.00	4.53	0.00
205	24	ห้วยไร่	มุกดาหาร	15.5	2.80	กลาง	0.00	4.95	0.00
206	24	ห้วยผักดอก	นครพนม	14.9	2.80	กลาง	0.00	4.53	0.00
207	24	ห้วยกุดแดง	ร้อยเอ็ด	6.5	2.80	กลาง	0.00	2.26	0.00
208	24	ห้วยชัน	ศรีสะเกษ	8.5	2.70	กลาง	0.00	4.53	0.00
209	24	หนองหญ้า	กาฬสินธุ์	5.0	2.56	กลาง	0.00	4.53	0.00
210	24	หนองบัว	มหาสารคาม	3.5	2.55	กลาง	0.00	4.53	0.00
211	24	หนอง	มหาสารคาม	3.5	2.53	กลาง	0.00	4.53	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ลำดับ		ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ความสูง	ปริมาณเก็บกัก	ขนาดเขื่อน	คะแนน	คะแนน	ความเสี่ยง
เขื่อน	ความเสี่ยง			(เมตร)	(ล้าน ลบ.ม.)		โอกาสเกิดการพิบัติ	ความสูญเสีย	ต่อแผ่นดินไหว
212	24	ห้วยโพธิ์	กาฬสินธุ์	5.5	2.44	กลาง	0.00	4.53	0.00
213	24	หนองเหล่า	อุบลราชธานี	3.0	2.34	กลาง	0.00	4.53	0.00
214	24	ห้วยทา	มุกดาหาร	16.8	2.30	กลาง	0.00	4.95	0.00
215	24	ห้วยผาวัง	หนองบัวลำภู	13.6	2.12	กลาง	0.00	4.53	0.00
216	24	หนองหญ้า	ร้อยเอ็ด	5.0	2.12	กลาง	0.00	6.79	0.00
217	24	หนองไฮ	มหาสารคาม	4.5	2.02	กลาง	0.00	4.53	0.00
218	24	ห้วยเหล่ายาง	หนองบัวลำภู	20.0	2.00	กลาง	0.00	4.32	0.00
219	24	ห้วยกกคูณ	นครพนม	19.0	2.00	กลาง	0.00	4.32	0.00
220	24	ห้วยหอย	มุกดาหาร	15.0	2.00	กลาง	0.00	3.89	0.00
221	24	ห้วยกุดแคน	ร้อยเอ็ด	6.0	1.99	กลาง	0.00	3.89	0.00
222	24	ห้วยหิน	นครราชสีมา	15.3	1.95	กลาง	0.00	4.32	0.00
223	24	ห้วยนา	สกลนคร	13.6	1.82	กลาง	0.00	2.95	0.00
224	24	ห้วยศรีคุณ	นครพนม	9.3	1.80	กลาง	0.00	3.89	0.00
225	24	ห้วยเพลียก	นครราชสีมา	23.0	1.50	กลาง	0.00	4.32	0.00
226	24	ห้วยวังม่วง	นครพนม	19.0	1.50	กลาง	0.00	4.32	0.00
227	24	โกรก	นครราชสีมา	9.4	1.47	กลาง	0.00	3.89	0.00
228	24	หนอง	มหาสารคาม	6.0	1.46	กลาง	0.00	3.89	0.00
229	24	ห้วยใหญ่	ขอนแก่น	9.3	1.40	กลาง	0.00	3.89	0.00
230	24	ห้วยจอก	มหาสารคาม	5.0	1.28	กลาง	0.00	3.89	0.00
231	24	ห้วยคุมมุม	ขอนแก่น	11.8	1.12	กลาง	0.00	3.89	0.00
232	24	หนองกา	สุรินทร์	4.0	1.05	กลาง	0.00	3.89	0.00
233	24	สระสมิง	อุบลราชธานี	7.0	1.01	กลาง	0.00	3.89	0.00
234	24	ห้วยสายนา	กาฬสินธุ์	6.9	0.96	เล็ก	0.00	3.89	0.00
235	24	ห้วยนางยอด	นครพนม	10.9	0.85	เล็ก	0.00	1.95	0.00
236	24	ห้วยตะไถ	มุกดาหาร	14.4	0.75	เล็ก	0.00	3.89	0.00
237	24	บ้านดอน	นครพนม	12.0	0.54	เล็ก	0.00	3.89	0.00
238	24	ห้วยเสียว	ขอนแก่น	6.6	0.53	เล็ก	0.00	3.89	0.00
239	24	โสกน้ำขาว	อุดรธานี	6.0	0.47	เล็ก	0.00	3.89	0.00
240	24	ดงหมู	นครพนม	7.2	0.45	เล็ก	0.00	3.89	0.00
241	24	ห้วยด่าน	ร้อยเอ็ด	15.0	0.44	เล็ก	0.00	3.89	0.00
242	24	ลำป่าค้าว	อุดรธานี	7.0	0.39	เล็ก	0.00	3.89	0.00
243	24	หนองโอน	อุดรธานี	8.0	0.31	เล็ก	0.00	3.89	0.00
244	24	คลองพันโป้	สระแก้ว	6.8	0.30	เล็ก	0.00	3.89	0.00
245	24	ห้วยจาน	กาฬสินธุ์	8.0	0.25	เล็ก	0.00	3.89	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อนที่ใช้ในการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวก ข1 ข้อมูลเบื้องต้นของเขื่อนที่ใช้ในการศึกษารูปแบบและองค์ประกอบ

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ภาคที่ตั้ง	ชนิดเขื่อน[1]	ความสูง (เมตร)	ขนาดเขื่อน[2]
1	ห้วยแม่ถาง	แพร่	เหนือ	A	40.4	ใหญ่
2	แม่แลง	แพร่	เหนือ	A	27.5	กลาง
3	ห้วยแม่ประจันต์	เพชรบุรี	กลาง	A	21.6	กลาง
4	ห้วยหลวง	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	10.5	เล็ก
5	แม่งัด	เชียงใหม่	เหนือ	A	50	ใหญ่
6	แม่จอกหลวง	เชียงใหม่	เหนือ	C	16.3	กลาง
7	แม่มาน	แพร่	เหนือ	A	33	กลาง
8	แม่อาบ	ลำปาง	เหนือ	A	33.2	กลาง
9	ห้วยแม่ตูบ	เชียงใหม่	เหนือ	A	22	กลาง
10	ประแสร์	ระยอง	ตะวันออก	A	39	กลาง
11	ห้วยซับประดู่	นครราชสีมา	ต.อ.เฉียงเหนือ	E	16.5	กลาง
12	แม่ทะลบหลวง	เชียงใหม่	เหนือ	A	32.75	กลาง
13	แม่ขาน	เชียงใหม่	เหนือ	A	60	ใหญ่
14	ห้วยน้ำโสม	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	16.6	กลาง
15	แม่อ้อน 2	ลำปาง	เหนือ	A	38.7	กลาง
16	แม่เลียงพัฒนา	ลำปาง	เหนือ	A	36.5	กลาง
17	ประแสร์	ระยอง	ตะวันออก	A	18	กลาง
18	ห้วยทราย	เชียงใหม่	เหนือ	C	15.2	กลาง
19	ลำพระเพลิง (1)	นครราชสีมา	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	9.9	เล็ก
20	แม่สอง	แพร่	เหนือ	A	36.25	กลาง
21	แม่ต๊าก	เชียงราย	เหนือ	D	18.5	กลาง
22	แม่ข้อน	เชียงใหม่	เหนือ	A	36	กลาง
23	ห้วยวังใหญ่	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	11.3	เล็ก
24	ลำพันชาด	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	30.5	กลาง
25	ห้วยไทรงาม	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	A	20	กลาง
26	คลองจะกระ	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	A	27	กลาง
27	ห้วยวังเต็น	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	A	21.3	กลาง
28	กิ่วคอหมา	ลำปาง	เหนือ	A	40.5	ใหญ่
29	แม่สูน	เชียงใหม่	เหนือ	C	23.8	กลาง
30	ห้วยน้ำม้า	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	11.5	เล็ก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวก ข1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ภาคที่ตั้ง	ชนิดเขื่อน[1]	ความสูง (เมตร)	ขนาดเขื่อน[2]
31	แม่แคม	แพร่	เหนือ	A	34	กลาง
32	ห้วยอีเลิศ	เลย	ต.อ.เฉียงเหนือ	F	7.2	เล็ก
33	ลำนางรอง	บุรีรัมย์	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	24	กลาง
34	ห้วยผาก	เพชรบุรี	กลาง	B	22.5	กลาง
35	ปราณบุรี	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	B	29	กลาง
36	ห้วยบอน	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	D	30	กลาง
37	ห้วยบง	เชียงใหม่	เหนือ	C	17	กลาง
38	แก่งละว้า	ขอนแก่น	ต.อ.เฉียงเหนือ	C	9.5	เล็ก
39	ห้วยสามเขา	เพชรบุรี	กลาง	A	16.5	กลาง
40	ห้วยอ่างหิน	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	C	23	กลาง
41	คลองบึง	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	B	17	กลาง
42	ห้วยสามยอด (1)	เพชรบุรี	กลาง	B	23.75	กลาง
43	กระหร่างสาม	เพชรบุรี	กลาง	F	15	กลาง
44	ห้วยน้ำหมาน	เลย	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	26.5	กลาง
45	แม่พริก	ลำปาง	เหนือ	A	38.5	กลาง
46	ห้วยสามพาด	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	10.5	เล็ก
47	ห้วยลอมไผ่	ขอนแก่น	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	11	เล็ก
48	ห้วยลิ่นควาย	เลย	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	23	กลาง
49	ลำปลายมาศ	นครราชสีมา	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	25.5	กลาง
50	ห้วยจันลา	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	11	เล็ก
51	ห้วยพลาญเสือ	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	12.5	เล็ก
52	ห้วยเหล่ายาง	อุดรธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	18	กลาง
53	คลองช่องลม	ประจวบคีรีขันธ์	กลาง	A	21	กลาง
54	น้ำเลย	เลย	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	14.5	เล็ก
55	หนองปลาไหล	ระยอง	ตะวันออก	D	20.5	กลาง
56	ห้วยเดื่อซับ	เชียงใหม่	เหนือ	A	19	กลาง
57	ห้วยบอน	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	D	33	กลาง
58	แก่งกระจาน	เพชรบุรี	กลาง	A	54	ใหญ่
59	แม่กวง	เชียงใหม่	เหนือ	B	50	ใหญ่
60	MAE KHAM PONG SUB	แพร่	เหนือ	A	25.5	กลาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวก ข1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	จังหวัด	ภาคที่ตั้ง	ชนิดเขื่อน[1]	ความสูง (เมตร)	ขนาดเขื่อน[2]
61	NAM MAE KON SUB	เชียงใหม่	เหนือ	A	31.5	กลาง
62	ห้วยเดือนห้า	อุบลราชธานี	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	17.2	กลาง
63	แม่มอก	ลำปาง	เหนือ	D	23.5	กลาง
64	LAM PRA PLERNG	นครราชสีมา	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	45	ใหญ่
65	ห้วยสังเคียบ	กาฬสินธุ์	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	14	เล็ก
66	แม่ฟ้า	ลำปาง	เหนือ	A	33.75	กลาง
67	ห้วยขุนจิต	ชลบุรี	ตะวันออก	B	10.5	เล็ก
68	ห้วยสะพาน	ชลบุรี	ตะวันออก	A	0	เล็ก
69	คลองมะนาว	ตราด	ตะวันออก	G	5.5	เล็ก
70	บ้านลาดกระทิง	ฉะเชิงเทรา	ตะวันออก	C	9	เล็ก
71	คลองวังโตนด	จันทบุรี	ตะวันออก	D	0	เล็ก
72	หนองกลางดง	ชลบุรี	ตะวันออก	A	13	เล็ก
73	คลองทรายทอง	นครนายก	กลาง	D	16	กลาง
74	ห้วยยาง	ปราจีนบุรี	กลาง	A	10	เล็ก
75	บ้านด่านชุมพล (คลองพืด)	ตราด	ตะวันออก	G	10	เล็ก
76	ห้วยทา	ศรีสะเกษ	ต.อ.เฉียงเหนือ	A	33.5	กลาง
77	ห้วยมะนาว	ตราด	ตะวันออก	G	7	เล็ก
78	มาบประชัน	ชลบุรี	ตะวันออก	A	15	กลาง
79	เขาระกำ	ตราด	ตะวันออก	C	10.24	เล็ก

หมายเหตุ: (1) A = Zoned, B = Random, C = Homogeneous + Toe Drained, E = Homogeneous + Chimney Drained, F = Homogeneous +Horizontal Drained, G = Homogenous และ H = Homogenous + D/S Riprap

(2) ขนาดเขื่อนพิจารณาเฉพาะความสูงโดย เขื่อนขนาดเล็กมีความสูงน้อยกว่า 15 เมตร เขื่อนขนาดกลางมีความสูง 15 ถึง 40 เมตร และเขื่อนขนาดใหญ่มีความสูงตั้งแต่ 40 เมตรขึ้นไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

รายชื่อโครงการก่อสร้างที่นำข้อมูลดินมาใช้ในงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 โครงการก่อสร้างที่นำข้อมูลดินมาใช้ในงานวิจัยจำนวน 37 โครงการ

ลำดับ	โครงการ	จังหวัด	จำนวนตัวอย่าง
1	โครงการอ่างเก็บน้ำแม่แคม	แพร่	6
2	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยมะกอก	นครนายก	2
3	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยแม่สาย	แพร่	8
4	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองโพล้	ระยอง	1
5	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองส้มป่อย	สระแก้ว	2
6	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองสีสุก	สุราษฎร์ธานี	2
7	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองหัวช้าง	พัทลุง	2
8	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองแห้ง	กระบี่	2
9	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยทม	ยโสธร	1
10	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยท่าเคย	ราชบุรี	2
11	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำบอง	อุดรธานี	1
12	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำม้า	อุดรธานี	1
13	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยผาก	เพชรบุรี	2
14	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยแม่สอดตอนบน	ตาก	1
15	โครงการอ่างเก็บน้ำ ห้วยไฮ	หนองคาย	1
16	โครงการอ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก	อุตรดิตถ์	34
17	โครงการอ่างเก็บน้ำ ใน อ.เขาค้อ	เพชรบูรณ์	9
18	โครงการอ่างเก็บน้ำ อ.ท่าปลา	อุตรดิตถ์	15
19	โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ฟ้า	ลำปาง	20
20	โครงการอ่างเก็บน้ำสมุน	น่าน	20
21	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยไร่	สุโขทัย	11
22	โครงการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนลำตะคอง	นครราชสีมา	3
23	โครงการการสำรวจและออกแบบอ่างเก็บน้ำมาบหวายโสม-ห้วยไข่เน่า	ชลบุรี	30
24	โครงการสูบน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา-เขื่อนวังร่มเกล้า	อุทัยธานี	10
25	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองใหญ่	พัทลุง	17
26	โครงการเขื่อนแม่ขาน	เชียงใหม่	14
27	โครงการเขื่อนแม่เลียงพัฒนา	ลำปาง	26
28	โครงการเขื่อนแม่ทะลบหลวง	เชียงใหม่	40
29	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนด	จันทบุรี	20
30	โครงการเขื่อนกิ่วคอหมา	ลำปาง	12
31	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยมงคล	ประจวบคีรีขันธ์	8
32	โครงการอ่างเก็บน้ำคลองดินแดง	นครศรีธรรมราช	14
33	โครงการอ่างเก็บน้ำประแสร์	ระยอง	20
34	โครงการเขื่อนลำแชะ	นครราชสีมา	69
35	โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบ้านพุ่ม	สกลนคร	13
36	โครงการอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก	สระบุรี	15
37	ไม่ทราบที่มา		38
	รวม		492

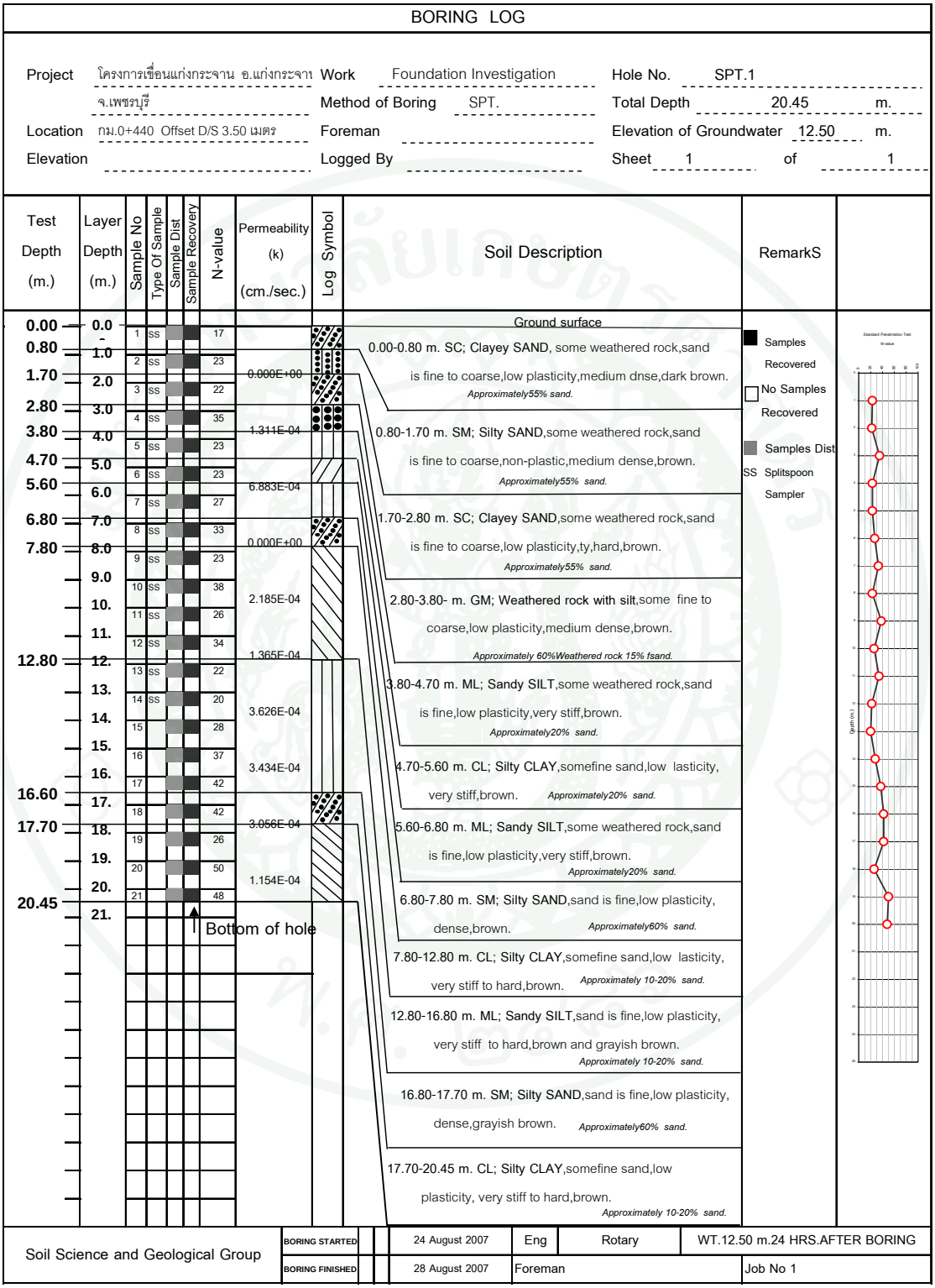
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

Boring log ของเขื่อนที่ใช้วิเคราะห์คลื่นแรงเฉือน

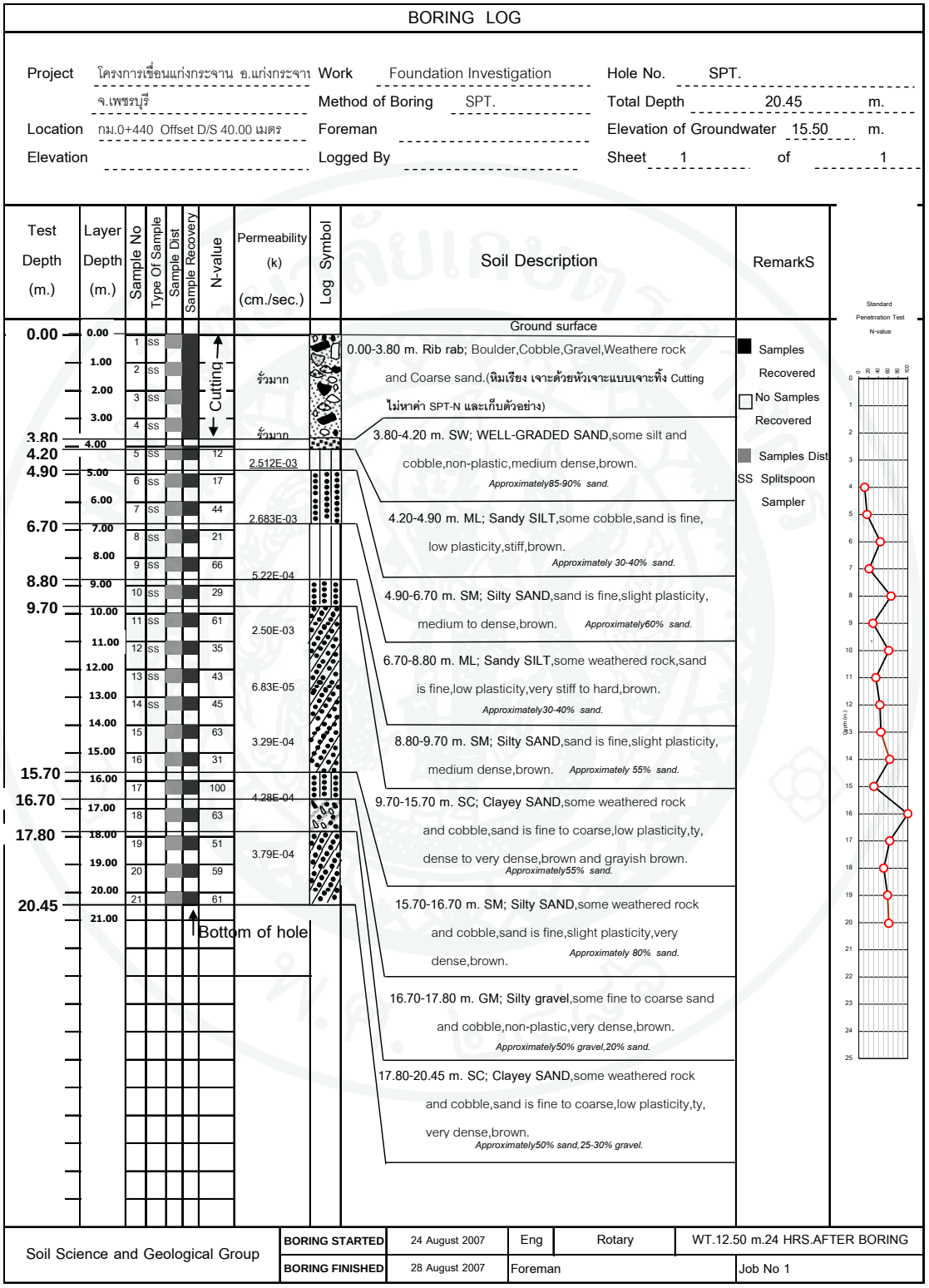
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง1 Boring log ของเขื่อนแก่งกระจาน (SPT 1)



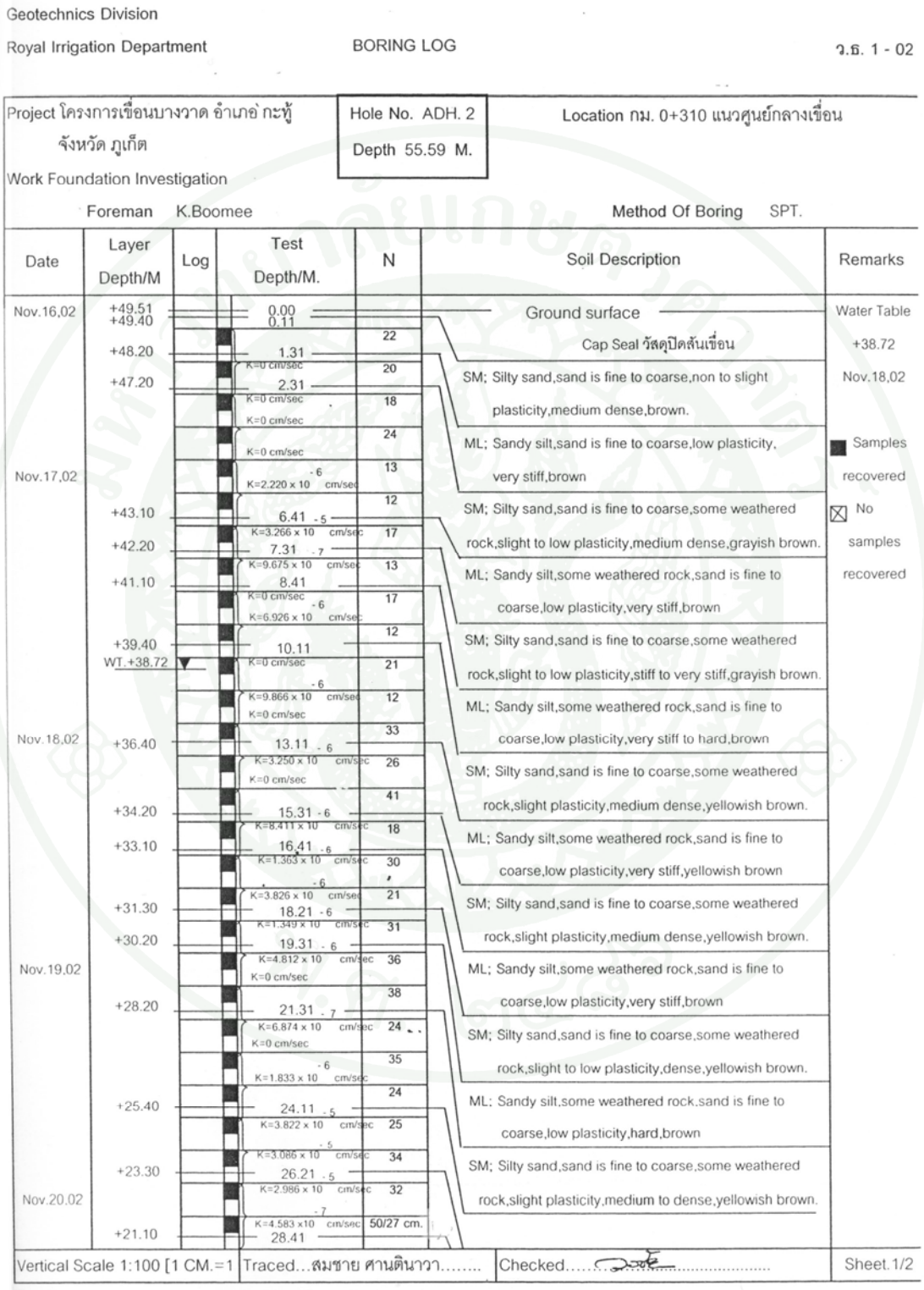
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง2 Boring log ของเขื่อนแก่งกระจาน (SPT 2)



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง3 Boring log ของเขื่อนบางวาด (ADH2)



Geotechnics Division

Royal Irrigation Department — BORING LOG — ว.ธ. 1 - 02

Project โครงการเขื่อนบางวาด อำเภอ กะทู้ จังหวัด ภูเก็ต

Work Foundation Investigation

Hole No. ADH. 2

Depth 55.59 M.

Location กม. 0+310 แนวศูนย์กลางเขื่อน

Foreman K.Boomee

Method Of Boring SPT.

Date	Layer Depth/M	Log	Test Depth/M.	N	Soil Description	Remarks
Nov.16,02	+49.51		0.00		Ground surface	Water Table
	+49.40		0.11	22	Cap Seal วัสดุปิดล้นเขื่อน	+38.72
	+48.20		1.31	20	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,non to slight plasticity,medium dense,brown.	Nov.18,02
	+47.20		2.31	18		
			K=0 cm/sec	24	ML; Sandy silt,sand is fine to coarse,low plasticity, very stiff,brown	■ Samples recovered
Nov.17,02			K=0 cm/sec	13		
			K=2.220 x 10 -6 cm/sec	12	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight to low plasticity,medium dense,grayish brown.	☒ No samples recovered
	+43.10		6.41	17		
	+42.20		K=3.266 x 10 -5 cm/sec 7.31	13	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,very stiff,brown	
	+41.10		K=9.675 x 10 -7 cm/sec 8.41	17		
			K=0 cm/sec	12	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight to low plasticity,stiff to very stiff,grayish brown.	
			K=6.926 x 10 -6 cm/sec	21		
	+39.40		10.11	12	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,very stiff to hard,brown	
	WT.+38.72		K=0 cm/sec	33		
			K=9.866 x 10 -6 cm/sec	26	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight plasticity,medium dense,yellowish brown.	
Nov.18,02	+36.40		K=0 cm/sec 13.11	41		
			K=3.250 x 10 -6 cm/sec	18	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,very stiff,yellowish brown	
	+34.20		15.31	30		
			K=8.411 x 10 -6 cm/sec	21	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight plasticity,medium dense,yellowish brown.	
	+33.10		16.41	31		
			K=1.363 x 10 -6 cm/sec	36	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,very stiff,brown	
	+31.30		K=3.826 x 10 -6 cm/sec 18.21	38		
			K=1.349 x 10 -6 cm/sec	24	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight to low plasticity,dense,yellowish brown.	
	+30.20		19.31	35		
Nov.19,02			K=4.812 x 10 -6 cm/sec	24	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,hard,brown	
			K=0 cm/sec	25		
	+28.20		21.31	34		
			K=6.874 x 10 -7 cm/sec	32	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight plasticity,medium to dense,yellowish brown.	
			K=0 cm/sec	50/27 cm.		
			K=1.833 x 10 -6 cm/sec			
	+25.40		24.11			
			K=3.822 x 10 -5 cm/sec			
	+23.30		K=3.086 x 10 -5 cm/sec 26.21			
Nov.20,02			K=2.986 x 10 -5 cm/sec			
			K=4.583 x10 -7 cm/sec			
	+21.10		28.41			

Vertical Scale 1:100 [1 CM.=1 — Traced...สมชาย ศานตินาวา..... — Checked..... — Sheet.1/2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง3 (ต่อ)

Geotechnics Division

Royal Irrigation Department — BORING LOG — ว.ธ. 1 - 02

Project โครงการเขื่อนบางวาด อำเภอ กะทู้ จังหวัด ภูเก็ต

Work Foundation Investigation

Hole No. ADH. 2

Depth 55.59 M.

Location กม. 0+310 แนวศูนย์กลางเขื่อน

Foreman K.Boomee

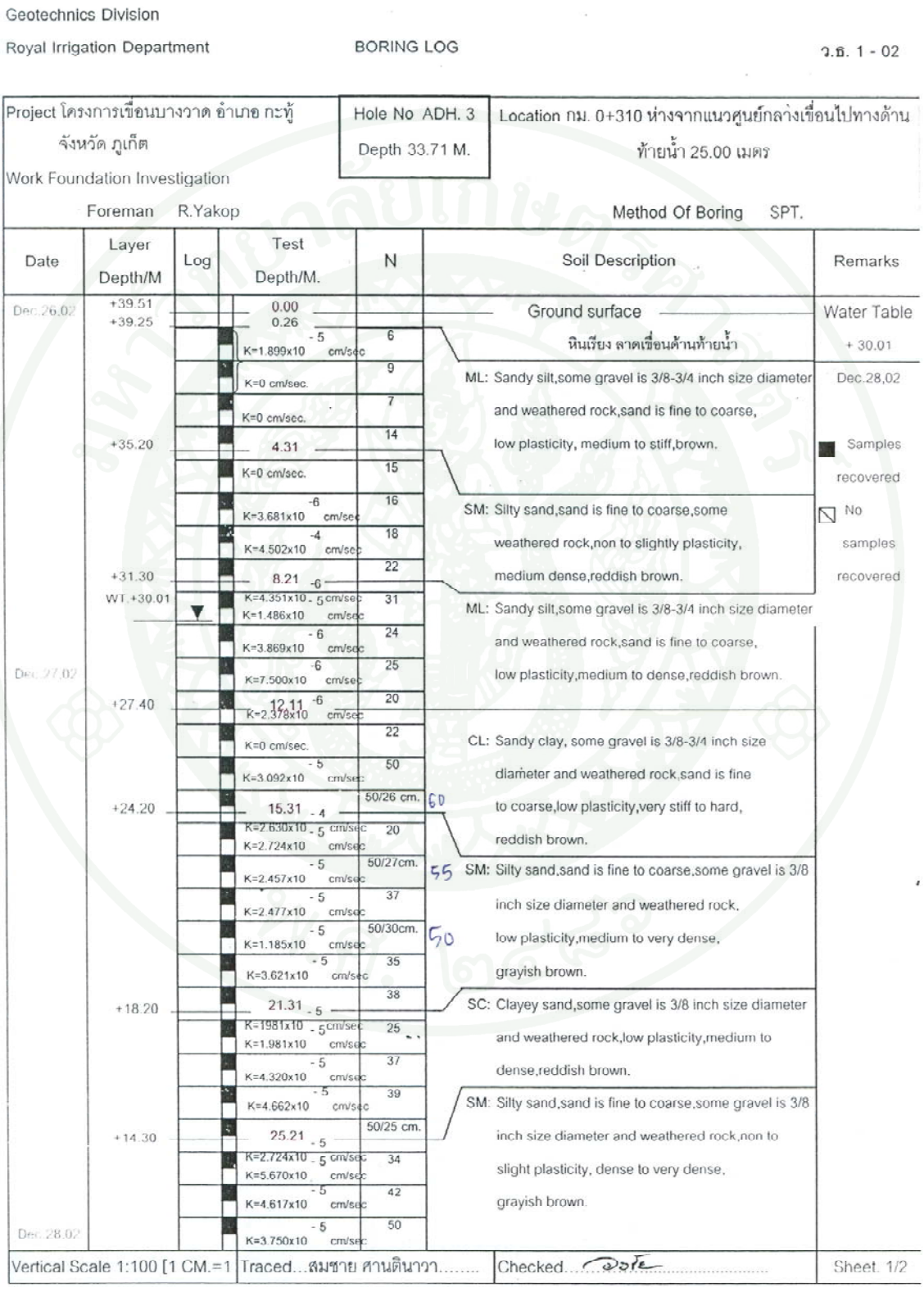
Method Of Boring SPT.

Date	Layer Depth/M	Log	Test Depth/M.	N	Soil Description	Remarks
			K=0cm/sec	50	CL: Silty clay,some fine to coarse sand,low plasticity, very stiff to hard,reddish brown.	■ Samples recovered
			K=2.139 x 10^{-6} cm/sec	29		
	+18.30		K=0cm/sec 31.21	50	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,hard,brown	
			K=2.372 x 10^{-5} cm/sec	39		
			K=2.488 x 10^{-5} cm/sec	41	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock,slight plasticity,medium to dense,yellowish brown.	☒ No samples recovered
	+16.40		33.11			
Nov.21,02			K=3.819 x 10^{-6} cm/sec	30	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,low plasticity,hard,brown	
			K=2.986 x 10^{-5} cm/sec	24		
			K=2.675 x 10^{-5} cm/sec	43	CL: Silty clay,some fine to coarse sand,low plasticity, very stiff to hard,reddish brown.	
	+13.40		36.11			
			K=6.086 x 10^{-6} cm/sec	41	SM; Silty sand,sand is fine to coarse,some weathered rock and gravel is 3/8 inch size diameter,slight to low plasticity,dense,yellowish brown.	
			K=4.257 x 10^{-5} cm/sec	38		
			K=3.567 x 10^{-5} cm/sec	30		
	+10.50		39.01			
			K=1.497 x 10^{-5} cm/sec	50		
Nov.22.02			K=5.988 x10^{-5} cm/sec	50/23cm.		
			K=3.567 x10^{-5} cm/sec	50/21 cm.	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,non-plastic,very dense,white and light gray.	
	+7.30		42.21			
			K=2.291 x 10^{-5} cm/sec	50/25 cm.		
			K=8.062 x10^{-6} cm/sec	50/25 cm.		
			K=3.804 x10^{-6} cm/sec	50/9 cm.	SM; Silty sand,some weathered rock and gravel is 3/8 inch size diameter,non plastic,very dense, gray.	
Nov.23.02	+3.30		K=0 cm/sec 46.21	50/24 cm.		
			K=0 cm/sec	50/29 cm.		
			K=0 cm/sec	50/25 cm.	ML; Sandy silt,some weathered rock,sand is fine to coarse,non-plastic,very dense,light gray.	
	+0.40		49.11	50/25 cm.		
Nov.24.02			K=7.133 x 10^{-6} cm/sec	50/22 cm.		
				50/17 cm.	SM; Silty sand,some weathered rock and gravel is 3/8 inch size diameter,non plastic,very dense, light gray and gray.	
			K=5.833 x 10^{-6} cm/sec	50/18 cm.		
				50/24 cm.		
Nov.25.02			K=0 cm/sec	50/18 cm.		
				50/13 cm.		
	- 6.08		55.59	50/8 cm.	Bottom of hole	

Vertical Scale 1:100 [1 CM.=1 | Traced...สมชาย ศานตินาวา..... | Checked..... | Sheet 2/2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง4 Boring log ของเขื่อนบางวาด (ADH3)



Geotechnics Division

Royal Irrigation Department

BORING LOG

ว.ธ. 1 - 02

Project โครงการเขื่อนบางวาด อำเภอ กะทู้ จังหวัด ภูเก็ต

Work Foundation Investigation

Hole No ADH. 3

Depth 33.71 M.

Location กม. 0+310 ห่างจากแนวศูนย์กลางเขื่อนไปทางด้านท้ายน้ำ 25.00 เมตร

Foreman R.Yakop

Method Of Boring SPT.

Date	Layer Depth/M	Log	Test Depth/M.	N	Soil Description	Remarks
Dec.26,02	+39.51		0.00		Ground surface	Water Table
	+39.25		0.26		หินเรียง ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	+ 30.01
			- 5 K=1.899x10 cm/sec	6	ML: Sandy silt,some gravel is 3/8-3/4 inch size diameter	Dec.28,02
			K=0 cm/sec.	9	and weathered rock,sand is fine to coarse,	
			K=0 cm/sec.	7	low plasticity, medium to stiff,brown.	■ Samples recovered
	+35.20		4.31	14		
			K=0 cm/sec.	15		☒ No samples recovered
			-6 K=3.681x10 cm/sec	16	SM: Silty sand,sand is fine to coarse,some	
			-4 K=4.502x10 cm/sec	18	weathered rock,non to slightly plasticity,	
				22	medium dense,reddish brown.	
	+31.30		8.21 -6			
	WT.+30.01	▼	K=4.351x10 - 5 cm/sec K=1.486x10 cm/sec	31	ML: Sandy silt,some gravel is 3/8-3/4 inch size diameter	
			- 6 K=3.869x10 cm/sec	24	and weathered rock,sand is fine to coarse,	
Dec.27,02			-6 K=7.500x10 cm/sec	25	low plasticity,medium to dense,reddish brown.	
	+27.40		12.11 -6 K=2.378x10 cm/sec	20		
			K=0 cm/sec.	22	CL: Sandy clay, some gravel is 3/8-3/4 inch size	
			- 5 K=3.092x10 cm/sec	50	diameter and weathered rock,sand is fine	
				50/26 cm.	60	
	+24.20		15.31 - 4		to coarse,low plasticity,very stiff to hard,	
			K=2.630x10 - 5 cm/sec K=2.724x10 cm/sec	20	reddish brown.	
			- 5 K=2.457x10 cm/sec	50/27cm.	55 SM: Silty sand,sand is fine to coarse,some gravel is 3/8	
			- 5 K=2.477x10 cm/sec	37	inch size diameter and weathered rock,	
			- 5 K=1.185x10 cm/sec	50/30cm.	50 low plasticity,medium to very dense,	
			- 5 K=3.621x10 cm/sec	35	grayish brown.	
	+18.20		21.31 - 5	38	SC: Clayey sand,some gravel is 3/8 inch size diameter	
			K=1981x10 - 5 cm/sec K=1.981x10 cm/sec	25	and weathered rock,low plasticity,medium to	
			- 5 K=4.320x10 cm/sec	37	dense,reddish brown.	
			- 5 K=4.662x10 cm/sec	39	SM: Silty sand,sand is fine to coarse,some gravel is 3/8	
	+14.30		25.21 - 5	50/25 cm.	inch size diameter and weathered rock,non to	
			K=2.724x10 - 5 cm/sec K=5.670x10 cm/sec	34	slight plasticity, dense to very dense,	
			- 5 K=4.617x10 cm/sec	42	grayish brown.	
Dec.28,02			- 5 K=3.750x10 cm/sec	50		

Vertical Scale 1:100 [1 CM.=1

Traced...สมชาย ศานตินาวา.....

Checked.....

Sheet 1/2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง4 (ต่อ)

Geotechnics Division

Royal Irrigation Department

BORING LOG

ว.ธ. 1 - 02

Project โครงการเขื่อนบางวาด อำเภอ กะทู้ จังหวัด ภูเก็ต

Work Foundation Investigation

Hole No ADH. 3

Depth 33.71 M.

Location กม. 0+310 ห่างจากแนวศูนย์กลางเขื่อนไปทางด้านท้ายน้ำ 25.00 เมตร

Foreman R.Yakop

Method Of Boring SPT.

Date	Layer Depth/M	Log	Test Depth/M.	N	Soil Description	Remarks
				50/18 cm.		
			- 5			
			K=4.651x10 cm/sec	50/24 cm.	(SM)	
			K=0 cm/sec			
			- 5	50/22 cm.		
			K=1.017x10 cm/sec			
				50/26		
			K=0 cm/sec	50/24		
			K=0 cm/sec			
	+5.80		33.71	50/20	Bottom of hole	

Vertical Scale 1:100 [1 CM = 1

Traced...สมชาย ศานตินาวา.....

Checked.....

Sheet 2/2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง5 Boring log ของเขื่อนลำปาว (DH5)

SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING SECTION
GEOLOGY AND SOIL ENGINEERING DEPARTMENT

LOG OF BORING

BORING NO. DH.5

HYDRO POWER SURVEY AND LAND DIVISION
EGAT

PROJECT : โครงการปรับปรุง
เขื่อนลำปาว

LOCATION : 5+992

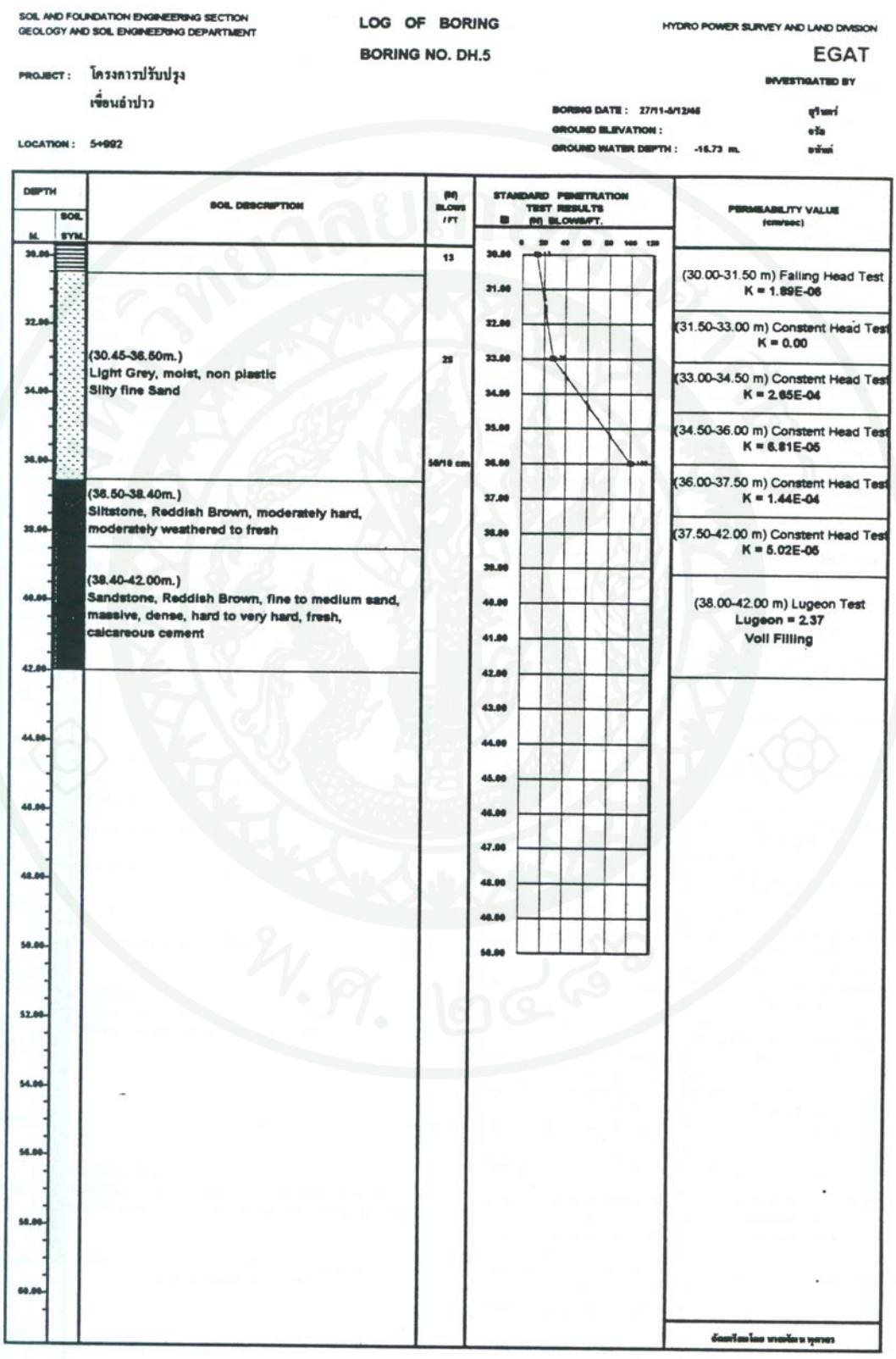
BORING DATE : 27/11-6/12/48
GROUND ELEVATION :
GROUND WATER DEPTH : -16.73 m.

INVESTIGATED BY
ชุวิทพร์
อรัล
ณโมห์

DEPTH M.	SOIL SYM.	SOIL DESCRIPTION	(ø) BLOWS / FT	STANDARD PENETRATION TEST RESULTS (ø) BLOWS/FT.	PERMEABILITY VALUE (cm/sec)
0.00					
2.00		(0.00-3.45m.) Brown, moist, medium plastic Clayey Silt trace Gravel	14		(0.00-1.50 m) Falling Head Test K = 7.23E-06
					(1.50-3.00 m) Constent Head Test K = 2.28E-03
4.00					(3.00-4.50 m) Constent Head Test K = 7.21E-03
6.00			13		(4.50-6.00 m) Falling Head Test K = 2.31E-06
					(6.00-7.50 m) Constent Head Test K = 1.81E-03
8.00		(3.45-12.45m.) Brownish Grey, moist, medium plastic Clayey Silt	21		(7.50-9.00 m) Constent Head Test K = 6.70E-04
10.00					(9.00-10.50 m) Constent Head Test K = 1.44E-03
12.00			24		(10.50-12.00 m) Constent Head Tes K = 2.54E-04
		(12.45-13.50m.)Brownish Grey,moist,medium plastic Clayey Silt trace Gravel			(12.00-13.50 m) Falling Head Test K = 1.54E-06
14.00					(13.50-15.00 m) Constent Head Tes K = 1.42E-03
		Core loss at 15.50-16.00 m.	23		(15.00-16.50 m) Constent Head Tes K = 6.12E-04
16.00					(16.50-18.00 m) Constent Head Tes K = 1.87E-03
18.00			24		(18.00-19.50 m) Falling Head Test K = 2.13E-06
		(13.50-26.50m.) Brownish Grey, moist, medium plastic Clayey Silt			(19.50-21.00 m) Constent Head Tes K = 2.74E-04
20.00			11		(21.00-22.50 m) Falling Head Test K = 1.01E-06
22.00					(22.50-24.00 m) Constent Head Tes K = 3.68E-04
24.00			35		(24.00-25.50 m) Falling Head Test K = 1.01E-06
		Core loss at 25.50-26.00 m.			(25.50-27.00 m) Constent Head Tes K = 2.35E-04
26.00					(27.00-28.50 m) Constent Head Tes K = 9.44E-05
		(26.50-27.00m.) Brown, moist, low plastic Clayey Silt trace fine sand	33		(28.50-30.00 m) Falling Head Test K = 1.71E-06
28.00					
		(27.00-30.45m.) Grey, moist, high plastic, Silty Clay			
30.00			13		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง5 (ต่อ)



SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING SECTION
GEOLOGY AND SOIL ENGINEERING DEPARTMENT

LOG OF BORING

BORING NO. DH.5

HYDRO POWER SURVEY AND LAND DIVISION

EGAT

INVESTIGATED BY

PROJECT : โครงการปรับปรุง
เขื่อนอำปาว

LOCATION : 5+992

BORING DATE : 27/11-5/12/46 สุริยะ
GROUND ELEVATION : อรัล
GROUND WATER DEPTH : -16.73 m. อรัญ

DEPTH M.	SOIL SYM.	SOIL DESCRIPTION	(N) BLOWS / FT	STANDARD PENETRATION TEST RESULTS (N) BLOWS/FT.	PERMEABILITY VALUE (cm/sec)
30.00			13		(30.00-31.50 m) Falling Head Test K = 1.89E-06
32.00		(30.45-36.50m.) Light Grey, moist, non plastic Silty fine Sand	25		(31.50-33.00 m) Constent Head Test K = 0.00
34.00					(33.00-34.50 m) Constent Head Test K = 2.65E-04
36.00			50/10 cm.		(34.50-36.00 m) Constent Head Test K = 6.81E-05
38.00		(36.50-38.40m.) Siltstone, Reddish Brown, moderately hard, moderately weathered to fresh			(36.00-37.50 m) Constent Head Test K = 1.44E-04
40.00		(38.40-42.00m.) Sandstone, Reddish Brown, fine to medium sand, massive, dense, hard to very hard, fresh, calcareous cement			(37.50-42.00 m) Constent Head Test K = 5.02E-05
42.00					(38.00-42.00 m) Lugeon Test Lugeon = 2.37 Voil Filling
44.00					
46.00					
48.00					
50.00					
52.00					
54.00					
56.00					
58.00					
60.00					

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง6 Boring log ของเขื่อนลำปาว (DH6-1)

SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING SECTION
GEOLOGY AND SOIL ENGINEERING DEPARTMENT

LOG OF BORING

BORING NO. DH.6-1

HYDRO POWER SURVEY AND LAND DIVISION

EGAT

INVESTIGATED BY

PROJECT : โครงการปรับปรุง
เขื่อนลำปาว

LOCATION : 6+365

BORING DATE : 19-21/12/48

GROUND ELEVATION :

GROUND WATER DEPTH : - m.

DEPTH M.	SOIL SYM.	SOIL DESCRIPTION	(N) BLOWS / FT	STANDARD PENETRATION TEST RESULTS (N) BLOWS/FT.	PERMEABILITY VALUE (cm/sec)
0.00		Core loss at 0.00-0.70 m.			(0.00-1.50 m) Falling Head Test K = 3.49E-06
2.00					(1.50-3.00 m) Constent Head Test K = 4.33E-05
4.00		(0.00-8.70m.) Brownish Grey, moist, low to medium plastic, Clayey Silt trace fine Sand and Gravel	18		(3.00-4.50 m) Falling Head Test K = 1.78E-06
6.00			15		(4.50-6.00 m) Constent Head Test K = 4.33E-05
8.00		Core loss at 7.00-7.30 m.			(6.00-7.50 m) Constent Head Test K = 1.30E-04
10.00		(8.70-12.00m.) Brownish Grey, moist, medium plastic, Clayey Silt	23		(7.50-9.00 m) Constent Head Test K = 1.95E-04
12.00			29		(9.00-10.50 m) Constent Head Test K = 1.08E-04
14.00		(12.00-16.00m.) Brownish Grey, moist, low to medium plastic, Clayey Silt trace fine Sand and Gravel	19		(10.50-12.00 m) Falling Head Test K = 3.08E-06
16.00		End of Boring at 16.00 m.			(12.00-13.50 m) Constent Head Test K = 1.60E-04
18.00					(13.50-15.00 m) Constent Head Test K = 1.47E-03
20.00					(14.50-16.00 m) Constent Head Test K = 1.02E-04
22.00					
24.00					
26.00					
28.00					
30.00					

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง7 เขื่อนดินช่องเขาขาด (Dike 4) เขื่อนสิริกิติ์

LOG OF BORING

EGAT

Project งานเจาะติดตั้ง Piezometer **Location** เขื่อนดินช่องเขาขาด **BORING NO.** OSP 12 **Log No.** 1 **of** 2

Co-ordinates _____ **Elevation** _____ **m.MSL** **Depth of Hole** 40.00 **m.** **Commenced** 24-ก.ย.-50

Angle from Horizontal 90° **Total Core Recovery** _____ **%** **Depth of Overburden** _____ **m.** **Completed** 29-ก.ย.-50

Boring of Angle Hole - **Company** EGAT **Total Length of Core** _____ **m.** **Logged by** Anupol Mahayotee

Depth	Description	R.Q.D. %	Weathering (1→5)	Hardness (1→5)	Average length of core (1→5)	Discontinuities Features (joint,fault,etc.)	Remark	Permeability Test (cm./sec)	Drilling Time(min.) (0 30 60)
1	0.00-1.00 m. Asphalt and rock filled.								
2	1.00-8.00 m. Clay, reddish brown, high plastic, very stiff.						12/12"	0.00-2.00 K = 1.05E-04	
3							18/12"	2.00-4.00 K = 4.54E-04	
4									
5							29/12"	4.00-6.00 K = 4.50E-04	
6									
7							24/12"	6.00-8.00 K = 7.19E-05	
8	8.00-10.00 m. Sandy clay, brown, medium to high plastic, hard.								
9							46/12"	8.00-10.00 K = 2.87E-05	
10	10.00-31.00 m. Clay, reddish brown, high plastic, hard.						47/12"	10.00-12.00 K = 1.55E-05	
11									
12							47/12"	12.00-14.00 K = 1.31E-05	
13									
14							41/12"	14.00-16.00 K = 1.17E-05	
15									
16							45/12"	16.00-18.00 K = 1.56E-04	
17									
18							40/12"	18.00-20.00 K = 1.05E-05	
19									
20							36/12"	20.00-22.00 K = 1.05E-05	
21									
22							25/12"	22.00-24.00 K = 9.55E-06	
23									
24							50/12"	24.00-26.00 K = 8.98E-06	
25									
26							32/12"	26.00-28.00 K = 5.25E-05	
27									
28							46/12"	28.00-30.00 K = 1.17E-05	
29									
30									

Core loss ⊠

Weathering 1(fresh) - 5(decomposed)

Hardness 1(hard) - 5(soft)

Average length of core 1 2 3 4 5 (Grained) 100 50 20 5 0 (cm.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง7 (ต่อ)

LOG OF BORING

EGAT

Project งานเจาะติดตั้ง Piezometer **Location** เขื่อนดินช่องเขาขาด **BORING NO.** OSP 12 **Log No.** 2 **of** 2

Co-ordinates _____ **Elevation** _____ **m.MSL** **Depth of Hole** 40.00 **m.** **Commenced** 24-ก.ย.-50

Angle from Horizontal 90° **Total Core Recovery** _____ **%** **Depth of Overburden** _____ **m.** **Completed** 29-ก.ย.-50

Boring of Angle Hole - **Company** EGAT **Total Length of Core** _____ **m.** **Logged by** Anupol Mahayotee

Depth	Geology	Symbol of geology	Kind of bit / ∅of core(mm.) / Casing / Cementation	Core recovery %	Color of rock	Description	R.Q.D. %	Weathering (1→5)	Hardness	Average length of core	Discontinuities Features (joint,fault,etc.)	Remark	Permeability Test (cm./sec)	Drilling Time(min.) (0 30 60)	Depth
31–35						31.00-35.00 m. Highly weathered metramorphose Limestone, brown to brownish brown, moderately hard.							30.00-32.00 K = 7.78E-06 32.00-34.00 K = 6.55E-05		
35–40						35.00-40.00 m. metramorphose Limestone, grey to light grey, fresh, highly fracture, hard, shear zone at 35.70-37.00 m., 37.80-38.00 m. and 39.00-40.00 m.							34.00-36.00 K = 1.55E-04 36.00-38.00 K = 2.28E-04 38.00-40.00 K = 3.75E-04		
40						**End of hole at 40.00 m.**									

Core loss ⊠

Weathering 1(fresh) - 5(decomposed)

Hardness 1(hard) - 5(soft)

Average length of core 1 2 3 4 5 (Grained) 100 50 20 5 0 (cm.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก จ

บทความเรื่อง การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 บทความเรื่อง การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

การจัดลำดับความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว

Earthquake risk ranking of dams in Thailand

บัญชรี คำมา (Buncharee Kumma)[1]
สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ (Suttisak Soralump)[2]

[1]นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ : เขื่อนเป็นโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมที่สำคัญ ทำหน้าที่เก็บกักน้ำไว้ใช้ยามขาดแคลน และป้องกันน้ำท่วมในฤดูน้ำหลาก หากเขื่อนเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว นอกจากความสูญเสียทางเศรษฐกิจและประชาชนในชาติจะสูญเสียกำลังใจแล้ว ความเชื่อมั่นในความปลอดภัยของเขื่อนต่างๆในประเทศอาจลดลง การจัดลำดับความเสี่ยงนี้จึงเป็นแนวทางการสร้างเครื่องมือช่วยตัดสินใจคัดเลือกเขื่อน เมื่อทราบสถานการณ์ความเสี่ยงในเบื้องต้น เพื่อการวางแผนลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากเหตุการณ์เริ่มต้นต่างๆ งานวิจัยนี้ได้จัดลำดับความเสี่ยงเฉพาะเขื่อนขนาดใหญ่และกลางที่มีข้อมูลเพียงพอในการวิจัยจำนวน 224 เขื่อน โดยวิธีดัชนีปัจจัยร่วม โดยปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสเกิดการพิบัติ ปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับความเสียหาย และปัจจัยที่เกี่ยวกับปริมาณความเสียหาย ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ในเชิงปริมาณ ผลการจัดลำดับพบว่า เขื่อนแม่มาว มีคะแนนความเสี่ยงสูงสุดคือ 37.13 คะแนน และเขื่อนภูมิพล 34.88 คะแนน เขื่อนศรีนครินทร์ 23.25 คะแนน เขื่อนท่าทุ่งนา 21.38 คะแนน และเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล 20.94 คะแนน มีความเสี่ยงรองลงมาตามลำดับ นอกจากปัจจัยที่กล่าวมา โอกาสเกิดการพิบัติของเขื่อนยังขึ้นอยู่กับการสำรวจที่ตั้งทางธรณีวิทยา การใช้วัสดุถมเขื่อนและกำหนดวัสดุฐานรากที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด การออกแบบถูกต้องเหมาะสม การก่อสร้างที่ได้มาตรฐาน และการดูแลบำรุงรักษาที่ถูกวิธี

ABSTRACT : Thailand is the agricultural country. The dam is the infrastructure that obligation to reservoir in the drought for supply to villages or agricultural area and flood protection during the rainy season. Many Fatalities appeared such as the losses of economics and life which make some unreliability to the public after earthquake incident. Weighting factor method is the guideline technique to rank 224 dams which have complete information for consideration. All of factors about probability of failure, vulnerability and amount used in assessment. Risk reduction plans to be actions with some dams from this decision methodology. The first five scores of preliminary earthquake risk approximated in according to 37.13 (Mae Mao dam), 34.88 (Bhumibol dam), 23.25 (Sri Nakarind. dam), 21.38 (Tha Thungna dam) and 19.88 (Mae-Ngad Somboonchon dam) However, the dam failure depended on many factors: the geological site surveying, used of materials as same as properties specification, suitable design, the standard of construction and the routine operation inspection and maintenance.

KEYWORDS: Dam safety, Priority ranking, Earthquake, Risk assessment, Weighting factor method

สาขาของบทความ : วิศวกรรมปฐพี (GTE)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เขื่อนจึงเป็นโครงสร้างสำคัญ ทำหน้าที่เก็บกักน้ำไว้ใช้ยามขาดแคลน และป้องกันน้ำท่วมในฤดูน้ำหลาก การดูแลบำรุงรักษาเขื่อนจึงเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ละเลยไม่ได้ หากตัวเขื่อนเกิดความเสียหาย ชีวิตของประชากรที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรก นอกเหนือจากความสูญเสียทางเศรษฐกิจ

เขื่อนในประเทศไทยมีการก่อสร้างมากว่า 50 ปี โดยเขื่อนที่มีอายุมากที่สุดในข้อมูลงานวิจัยคือเขื่อนห้วยแห้ว ตั้งอยู่ในจังหวัดเลย ก่อสร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2493 เขื่อนเป็นโครงสร้างที่ถูกใช้งานโดยไม่มีวันหยุดและมีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปตามอายุ เมื่อเขื่อนยังถูกใช้งานอยู่ตลอดเวลา จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสำคัญกับการดูแลรักษาเขื่อนให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ตามปกติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับงบประมาณและบุคคลากรที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญ ดังนั้นเขื่อนในประเทศไทยจึงควร มีแนวทางในการจัดลำดับตามความเสี่ยงต่อการพิบัติ เพื่อ ประโยชน์ในการใช้งบประมาณในการบำรุงรักษาได้อย่างถูกต้องและนำไปสู่การลดความเสี่ยงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2. กรณีศึกษาการพิบัติของเขื่อน

ปี 1967 เขื่อน Koyna ประเทศอินเดีย เป็นเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (Concrete gravity dam) สูง 103 เมตร ปริมาณเก็บกักประมาณ 3100 ล้าน ลูกบาศก์เมตร เกิดการพิบัติเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.5 ริกเตอร์ ทำให้สันเขื่อนเกิดรอยแตกในแนวราบขนานกับความยาวเขื่อน (Longitudinal crack) แต่ไม่ส่งผลให้เกิดการกัดเซาะภายใน หลังจากการตรวจสภาพความเสียหาย เขื่อนได้รับการซ่อมแซมโดยการอัดฉีดด้วยน้ำปูนและอีพอกซีเรซิน [2]

ปี 1976 เขื่อน Teton มลรัฐไอดาโฮ ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเขื่อนถมแบ่งส่วน (Zoned dam) สูง 90 เมตร ปริมาณเก็บกักประมาณ 360 ล้าน ลูกบาศก์เมตร เกิดการพิบัติเนื่องจากรั่วซึมและกัดเซาะภายใน (Seepage and internal erosion) เป็นผลให้ประชากรเสียชีวิต 14 คน ความเสียหายคิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจประมาณ 1,000 ล้านเหรียญสหรัฐ [6]

ปี 2533 เขื่อนมูลบน จ.นครราชสีมา เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว (Homogenous dam) สูง 32 เมตร เกิดการพิบัติเนื่องจากระดับน้ำสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดรอยรั่ว (Leakage) 2 แห่งที่ลาดท้ายเขื่อน เหตุการณ์ครั้งนี้แก้ปัญหาโดยการอุดรอยรั่ว และลดระดับน้ำในอ่างให้อัตราการรั่วซึมอยู่ในระดับปลอดภัย [6]

3. เขื่อนในประเทศไทย

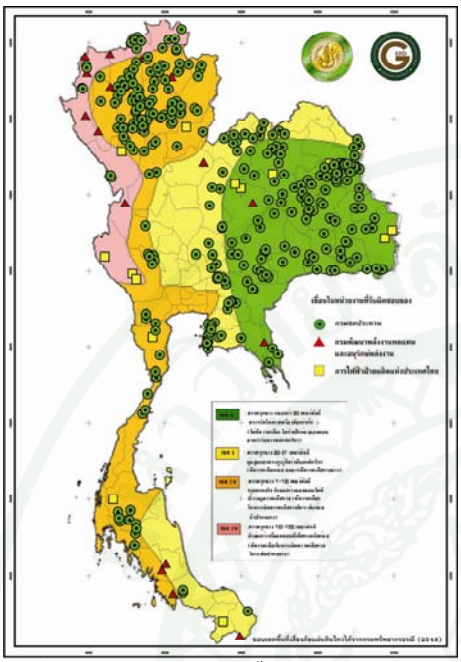
ปัจจุบันประเทศไทยมีเขื่อนกระจายอยู่ทั่วประเทศกว่า 5 ,000 เขื่อน ในจำนวนนี้มีเขื่อนขนาดใหญ่และกลางอยู่มากกว่า 400 เขื่อน ซึ่งเป็นเขื่อนที่ให้ความสนใจ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่นำมาประกอบการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ ไม่ใช่ข้อมูลเขื่อนขนาดใหญ่และขนาดกลางที่มีทั้งหมด แต่เป็นเขื่อนที่มีข้อมูลครบถ้วนเพียงพอทุกปัจจัยที่พอจะวิเคราะห์ได้ ในที่นี้มีข้อมูลเขื่อนทั้งหมด 224 เขื่อน จาก 3 หน่วยงาน คือ เขื่อนในความรับผิดชอบของกรมชลประทาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [7]

4. ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของเขื่อนในประเทศไทย

จากเทคนิคการซ้อนทับภาพโดยโปรแกรมทางเทคโนโลยี - สารสนเทศภูมิศาสตร์ ระหว่างแผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2 พ.ศ. 2548 [5] กับข้อมูลตำแหน่งเขื่อนต่างๆจำนวน 397 เขื่อน พบว่าในเขต 0 หรือเขตที่เคยเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรงน้อยกว่า 3 เมอร์คัลลี ครอบคลุมพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกบางส่วน มีเขื่อนตั้งอยู่ 149 เขื่อน เขต 1 หรือเขตที่เคยเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรง 3-4 เมอร์คัลลี ครอบคลุมพื้นที่ภาคกลาง บางส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกมีเขื่อนตั้งอยู่ 67 เขื่อน เขต 2ก หรือเขตที่เคยเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรง 5-7 เมอร์คัลลี ครอบคลุมบางส่วนของภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคใต้ มีเขื่อนตั้งอยู่ 159 เขื่อน และเขต 2ข หรือเขตที่เคยเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรง 7-8 เมอร์คัลลี บริเวณบางส่วนของภาคเหนือ ภาคกลางและภาคตะวันตก มีเขื่อนตั้งอยู่ 29 เขื่อน แสดงดังภาพที่ 1 โดยเขื่อนที่อยู่ในเขต 2ข คิดเป็น 7.3% จาก 397 เขื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)



ภาพที่ 1 ตำแหน่งเขื่อนบนแผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย (ขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้จากกรมทรัพยากรธรณี, 2548)

5. คำนิยามของ Risk

International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (2005) นิยามว่า ความเสี่ยง (Risk) คือ โอกาสในการสูญเสียจากเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่ง เช่น ความสูญเสียต่อเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สิ่งปลูกสร้าง และสังคม โอกาสในการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเสียหาย (Vulnerability) และมูลค่าความเสียหายนั้น (Amount) [1] ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจต่อชีวิตของประชากรที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำเป็นสำคัญ ความเสียหายในที่นี้จึงเป็นความเสียหายต่อชีวิต ดังนั้นหากใช้หลักการของการประเมินความเสี่ยง ความเสี่ยงของเขื่อนใดๆ จะมีค่าเท่ากับความสัมพันธ์ ดังนี้

ความเสี่ยง (Risk) = โอกาสเกิดการพิบัติ (Probability of event) x ระดับความเสียหาย (Vulnerability) x ปริมาณความเสียหาย (Amount) (1)

คะแนนความเสี่ยง = คะแนนจากปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับโอกาสการพิบัติ (F) x คะแนนจากปัจจัยด้านความสูญเสีย (N) (2)

โดย F = โอกาสเกิดการพิบัติ (Probability of event)

N = ระดับความเสียหาย (Vulnerability) x ปริมาณความเสียหาย (Amount)

6. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสี่ยงของเขื่อน

6.1 ปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับการพิบัติ (Probability of failure)

6.1.1 เหตุการณ์เริ่มต้น อันตรายของภัยพิบัติทางธรรมชาติโดยเฉพาะแผ่นดินไหวคือ การไม่สามารถทำนายเวลา สถานที่ และความรุนแรงได้ เขื่อนจะมีความเสี่ยงการพิบัติจากแผ่นดินไหวมากเท่าใดขึ้นอยู่กับประเภทของเขื่อน ลักษณะที่ตั้ง ได้แก่หลักฐานทางธรณีวิทยาที่บ่งชี้ถึงการเกิดแผ่นดินไหวในอดีต ระยะทางระหว่างเขื่อนกับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ความลึกของจุดกำเนิด ความรุนแรงของแผ่นดินไหว และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแรงแผ่นดินไหวเช่น Peak ground motion และ Acceleration time histories ซึ่งปริมาณความเสียหายขึ้นอยู่กับความสูงและปริมาณเก็บกักของเขื่อนในขณะนั้น นอกจากนี้ลักษณะทางภูมิศาสตร์ก็มีส่วนเอื้อต่อการเพิ่มปริมาณความเสียหายด้านท้ายน้ำ [3]

6.1.2 ชนิดของเขื่อน โอกาสเกิดความเสียหายขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ของวัสดุถมตัวเขื่อน ตามลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณนั้น วัสดุที่ใช้อาจสัมพันธ์กับระดับความสูงที่ต้องการและเป็นไปตามเหตุผลด้านการรับแรง

6.1.3 อายุของเขื่อน บ่งบอกถึงระยะเวลาการใช้งานเขื่อน อาจกล่าวได้ว่า ความแข็งแรงของเขื่อนอาจมีค่าลดลงตามเวลา หากไม่ได้รับการดูแลบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นความเสียหายเล็กๆน้อยๆ ที่สามารถพบได้ด้วยการตรวจสภาพ (Visual inspection)

6.2 ปัจจัยเกี่ยวกับความสูญเสีย (Vulnerability)

6.2.1 ความสูงของเขื่อน มีความสัมพันธ์กับปริมาณเก็บกักและความสูญเสีย เขื่อนที่สูงย่อมมีปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำมาก ซึ่งหากเกิดการพิบัติ แรงดันน้ำหน้าเขื่อนจะส่งผลต่อความเร็วในการไหลท่วมท้ายน้ำ

6.2.2 ปริมาณเก็บกัก หากเขื่อนมีความสูงและพื้นที่รับน้ำมาก อีกทั้งภูมิประเทศเอื้อต่อการไหลของน้ำ ปริมาณความสูญเสียด้านท้ายน้ำอาจมีความสัมพันธ์กับปริมาณเก็บกัก ในที่นี้พิจารณาการเก็บกักที่ระดับน้ำปกติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

6.3 ปัจจัยวัดปริมาณความเสียหาย (Amount)

6.3.1 เวลาในการขยายช่องเปิด (Breach formation time) คือ เวลาที่เขื่อนเริ่มถูกกัดเซาะให้เป็นโพรง ทำให้น้ำเริ่มไหลออกจากอ่างเก็บน้ำ โพรงนั้นจึงขยายใหญ่ขึ้นจนน้ำไหลออกได้สะดวกจนขนาดของโพรงไม่ขยายเพิ่มขึ้นอีก เรียกว่า การถูกกัดเซาะอย่างสมบูรณ์ (Fully Breached) Froehlich (1995) ศึกษาเวลาในการพิบัติ (t_f) ในหน่วยชั่วโมง โดยวิเคราะห์จากข้อมูลเขื่อนพิบัติ 63 กรณี และเสนอสมการดังต่อไปนี้ [4]

$$t_f = 0.00254 V_w^{0.53} H_b^{-0.19} \quad (3)$$

เมื่อ t_f = เวลาในการพิบัติ (ชั่วโมง)

V_w = ปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ขณะเขื่อนพิบัติ (ลูกบาศก์เมตร)

H_b = ความสูงของน้ำจากระดับท้อง Breach (เมตร)

6.3.2 ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ วัดจากตัวเขื่อนไปตามลำน้ำจนถึงแหล่งชุมชนแรกด้านท้ายน้ำ เป็นระยะทางจริง แสดงตัวอย่างการวัดระยะทางดังภาพที่ 2 ซึ่งจะคัดเลือกเฉพาะเขื่อนที่มีแหล่งชุมชนอยู่ใกล้ไม่เกิน 15 กิโลเมตร เนื่องจากสมมติให้ประชากรสามารถอพยพหนีภัยได้ภายใน 30 นาที เมื่อน้ำเดินทางด้วยความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

6.3.3 จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ เป็นจำนวนประชากรบริเวณแหล่งชุมชนแรก ที่มีความเสี่ยงจากน้ำไหลท่วมที่อยู่อาศัยจนถึงขั้นสูญเสียชีวิต ภาพที่ 2 แสดงแนวคิดในการหาจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบในแต่ละหมู่บ้าน



ภาพที่ 2 แผนที่ภูมิประเทศของพื้นที่ท้ายน้ำ แสดงการวิเคราะห์ระยะทางที่น้ำเดินทางถึงหมู่บ้านและแนวทางการหาจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ

7. หลักการจัดลำดับความเสี่ยง

7.1 วิธีดัชนีปัจจัยร่วม (Weighting Factor Method)

เป็นการประเมินเชิงสมการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจะถูกกำหนดค่าคะแนนน้ำหนักตามลำดับความสำคัญ โดยแต่ละปัจจัยจะมีการกำหนดค่าคะแนนน้ำหนักตามความสำคัญของปัจจัยย่อย มีประโยชน์เมื่อต้องการมองเห็นภาพรวมของสถานการณ์โดยเร็ว ดังสมการต่อไปนี้ [7]

$$S = W_1R_1 + W_2R_2 + W_3R_3 + \ldots + W_nR_n \quad (4)$$

เมื่อ S = คะแนนปัจจัยหลัก

W = น้ำหนักของปัจจัยรอง

R = ระดับคะแนนของปัจจัย

สมการดังกล่าวได้นำมาใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงเขื่อนโดยพิจารณาปัจจัยรองต่างๆ โดยแสดงดังตารางที่ 1 และการคำนวณคะแนนความเสี่ยงของแต่ละเขื่อนสามารถดำเนินการได้ดังสมการต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การให้คะแนนปัจจัยหลัก

ลำดับ	เขื่อน	ปัจจัยรอง					ผลรวมคะแนนปัจจัยหลัก
		W_1	W_2	W_3	…	W_n	
1	เขื่อนที่ 1	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$		$R_{1,n}$	S_1
2	เขื่อนที่ 2	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$		$R_{2,n}$	S_2
3	เขื่อนที่ 3	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{3,3}$		$R_{3,n}$	S_3
…							
n	เขื่อนที่ n	$R_{n,1}$	$R_{n,2}$	$R_{n,3}$		$R_{n,n}$	S_n

$$Risk_{eq} = F_{eq} \times N \quad (5)$$

$$F_{eq} = R_{eq} \times [(W_{age} \times R_{age}) + (W_{type} \times R_{type})] \quad (6)$$

$$N = N_{vul} \times N_{amount} \quad (7)$$

$$N_{vul} = [(W_{ht} \times R_{ht}) + (W_{vol} \times R_{vo}) + (W_{dist} \times R_{dis}) + (W_{time} \times R_{time})] \quad (8)$$

$$N_{amount} = R_{pop} \quad (9)$$

โดย $Risk_{eq}$ = ความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแรงแผ่นดินไหว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

F_{eq} = คะแนนโอกาสเกิดการพิบัติจากแผ่นดินไหว

N = คะแนนความสูญเสียรวมจากความรุนแรงจากการพิบัติและปริมาณความสูญเสีย

N_{vul} = คะแนนความรุนแรงจากการพิบัติ

N_{amount} = คะแนนปริมาณความสูญเสีย

W_{age} = น้ำหนักปัจจัยอายุเขื่อน

W_{type} = น้ำหนักปัจจัยชนิดเขื่อน

W_{ht} = น้ำหนักปัจจัยความสูงเขื่อน

W_{vol} = น้ำหนักปัจจัยปริมาณเก็บกัก

W_{dist} = น้ำหนักปัจจัยระยะทาง

W_{time} = น้ำหนักปัจจัยเวลาการพิบัติ

R_{age} = ระดับคะแนนอายุเขื่อน

R_{type} = ระดับคะแนนชนิดเขื่อน

R_{ht} = ระดับคะแนนความสูงเขื่อน

R_{vol} = ระดับคะแนนปริมาณเก็บกัก

R_{dist} = ระดับคะแนนระยะทาง

R_{time} = ระดับคะแนนเวลาการพิบัติ

R_{pop} = ระดับคะแนนจำนวนประชากรในพื้นที่เสี่ยงภัย

จากสมการที่ (6) และ (7) เมื่อให้คะแนน ความสำคัญของปัจจัยโอกาสเกิดการพิบัติจากแผ่นดินไหว (F_{eq}) และปัจจัยด้านความสูญเสีย (N) จะได้

$$F_{eq} = R_{eq}x[(0.25xR_{age})+(0.75xR_{type})] \quad (10)$$

$$N = R_{pop}x[(0.1667xR_{ht})+(0.25xR_{vol}+(0.375xR_{dist})+(0.2083xR_{time})] \quad (11)$$

7.2 ระดับคะแนนของปัจจัย (Rating)

การให้ระดับคะแนนของปัจจัย แทนด้วยตัวเลขเป็นระดับคะแนน โดยกำหนดให้ระดับคะแนนสูงจะส่งผลต่อโอกาสเกิดหรือผลกระทบจากการพิบัติสูง แสดงดังตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 9

ตารางที่ 2 ระดับคะแนนภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว (R_{eq})

ระดับความเสี่ยงภัย	ระดับคะแนน
เสี่ยงภัย ระดับ 0	0
เสี่ยงภัย ระดับ 1	1
เสี่ยงภัย ระดับ 2ก	2
เสี่ยงภัย ระดับ 2ข	3

ตารางที่ 3 ระดับคะแนนปัจจัยชนิดเขื่อน (R_{type})

ชนิดของเขื่อน	ระดับคะแนน
เขื่อนดินถม	2
เขื่อนหินถม	1
เขื่อนคอนกรีต	3

ตารางที่ 4 ระดับคะแนนปัจจัยอายุเขื่อน (R_{age})

อายุของเขื่อน (ปี)	ระดับคะแนน
0 ถึง 5	3
มากกว่า 5 ถึง 35	1
มากกว่า 35	2

ตารางที่ 5 ระดับคะแนนความสูงของเขื่อน (R_{ht})

ช่วงความสูง (เมตร)	ระดับคะแนน
5 ถึง 15 เมตร	1
มากกว่า 15 เมตร และน้อยกว่า 30 เมตร	2
มากกว่า 30 เมตร	3

ตารางที่ 6 ระดับคะแนนปริมาณเก็บกัก (R_{vol})

ปริมาณเก็บกัก (ล้าน ลูกบาศก์เมตร)	ระดับคะแนน
0 ถึง 2	1
มากกว่า 2 ถึง 100	2
มากกว่า 100	3

ตารางที่ 7 ระดับคะแนนระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ (R_{dist})

ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ (กิโลเมตร)	ระดับคะแนน
0.1 ถึง 5	3
มากกว่า 5 ถึง 30	2
มากกว่า 30	1

ตารางที่ 8 ระดับคะแนนปัจจัยเวลาในการขยายช่องเปิด (R_{time})

เวลาในการขยายช่องเปิด (ชั่วโมง)	ระดับคะแนน
0 ถึง 1	3
มากกว่า 1 ถึง 2	2
มากกว่า 2	1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ตารางที่ 9 ระดับคะแนนปัจจัยจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ (R_{pop})

จำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบ (คน)	ระดับคะแนน
0 ถึง 200	1
มากกว่า 200 ถึง 3,600	2
มากกว่า 3,600	3

8. ผลการวิจัย

ผลการจัดลำดับเขื่อนที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติเมื่อเกิดแผ่นดินไหว 30 อันดับแรก แสดงดังตารางที่ 10 โดยโอกาสเกิดการพิบัติจากแผ่นดินไหว (F) มีคะแนนเต็ม 9 คะแนน ความสูญเสีย (N) มีคะแนนเต็ม 9 คะแนน ความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแรงแผ่นดินไหว ($Risk_{eq}$) มีคะแนนเต็ม 81 คะแนน โดยเขื่อน 7 ลำดับแรกเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ เขื่อน 4 ลำดับแรกตั้งอยู่ในบริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวเขต 2ข และเขื่อน 3 ลำดับถัดมาเป็นเขื่อนที่ตั้งอยู่ในบริเวณเขต 2ก ผลคะแนนความเสี่ยงเป็นดังนี้ เขื่อนแม่มาว 37.13 คะแนน เขื่อนภูมิพล 34.88 คะแนน เขื่อนศรีนครินทร์ 23.25 คะแนน เขื่อนท่าทุ่งนา 21.38 คะแนน เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล 20.94 คะแนน เขื่อนวชิราลงกรณ 19.88 คะแนน และเขื่อนกระเสียว 19.38 คะแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 10 เขื่อนที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหว 30 อันดับแรก จาก 224 เขื่อน

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	F[1]	N[2]	Risk[3]
1	แม่มาว	4.50	8.25	37.13
2	ภูมิพล	4.50	7.75	34.88
3	ศรีนครินทร์	3.00	7.75	23.25
4	ท่าทุ่งนา	3.00	7.13	21.38
5	แม่งัดสมบูรณ์ชล	2.50	8.38	20.94
6	วชิราลงกรณ	3.00	6.63	19.88
7	กระเสียว	2.50	7.75	19.38
8	ห้วยตะควน	3.75	5.17	19.38
9	ห้วยช้าง	3.75	5.17	19.38
10	ห้วยลึก	3.75	5.17	19.38
11	แม่สอด	3.75	5.17	19.38
12	แม่สะงา	3.75	5.00	18.75
13	ห้วยสัก	3.75	4.83	18.13
14	แม่ปืม	2.50	7.13	17.81
15	ห้วยบอน	3.75	4.67	17.50

ตารางที่ 10 (ต่อ) เขื่อนที่มีความเสี่ยงเบื้องต้น จาก 224 เขื่อน

ลำดับ	ชื่อเขื่อน	F[1]	N[2]	Risk[3]
16	ห้วยม่วง	3.75	4.67	17.50
17	ห้วยดินดำ	3.75	4.67	17.50
18	ห้วยฝายคอ	3.75	4.67	17.50
19	ห้วยแม่ฮ่องสอน	3.75	4.67	17.50
20	ห้วยม่าน	3.75	4.67	17.50
21	ห้วยงู	3.75	4.67	17.50
22	แม่สูนหลวง	3.75	4.67	17.50
23	คลองท่าด่าน	3.00	5.58	16.75
24	ห้วยตาควน	3.75	4.42	16.56
25	แม่มอก	2.50	6.50	16.25
26	แก่งกระจาน	2.00	7.75	15.50
27	กิ่วลม	3.00	4.83	14.50
28	ห้วยแม่ผง	3.00	4.75	14.25
29	บ้านดง	2.75	5.17	14.21
30	แม่กวงอุดมธารา	2.50	5.58	13.96

[1] คะแนนโอกาสเกิดการพิบัติจากแผ่นดินไหว (คะแนนเต็ม 9 คะแนน)

[2] คะแนนความสูญเสีย (คะแนนเต็ม 9 คะแนน)

[3] คะแนนความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแรงแผ่นดินไหว (คะแนนเต็ม 81 คะแนน)

9. อภิปรายผล

เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้ ได้วิจัยเฉพาะเขื่อนที่มีข้อมูลครบทุกปัจจัยจำนวน 224 เขื่อน ผลการจัดลำดับที่ได้จึงไม่ใช่ผลของเขื่อนทั้งหมดของประเทศ ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยในการวิเคราะห์เพื่อการจัดลำดับความเสี่ยงที่มีแผ่นดินไหวเป็นเหตุการณ์เริ่มต้น ปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับการพิบัติได้แก่ ชนิดและอายุของเขื่อน มีผลต่อคะแนนโอกาสเกิดการพิบัติเนื่องจากเขื่อนที่มีความแข็งแรงมากแต่ไม่ยืดหยุ่น ประกอบกับเป็นเขื่อนที่มีอายุมากอาจมีความเสื่อมสภาพของวัสดุ จะมีคะแนนโอกาสเกิดการพิบัติเนื่องจากตัวเขื่อนสูง เมื่อตั้งอยู่บริเวณเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวระดับ 2ข จึงทำให้เขื่อนแม่มาวและเขื่อนภูมิพลซึ่งเป็นเขื่อนคอนกรีต มีคะแนนโอกาสเกิดการพิบัติ 4.5 คะแนน ส่วนปัจจัยเกี่ยวกับความสูญเสียได้แก่ ความสูง ปริมาณเก็บกัก เวลาในการขยายช่องเปิด ระยะทางระหว่างตัวเขื่อนกับแหล่งชุมชนท้ายน้ำ และจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบซึ่งเป็นปัจจัยที่มีคะแนนความสำคัญสูงสุด เป็นผลให้เขื่อนที่มีประชากรอาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำมากมีคะแนนความสูญเสียสูง อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาคิดเป็นคะแนน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ความเสี่ยงต่อการพิบัติจากแรงแผ่นดินไหว เขื่อนที่มีทั้งคะแนนโอกาสเกิดการพิบัติและคะแนนความสูญเสียสูง ทั้งสองปัจจัย ย่อมเป็นเขื่อนที่มีความเสี่ยงต่อการพิบัติมากกว่าเขื่อนอื่นๆ

10. สรุปผลการวิจัย

ประเทศไทยมีเขื่อนตั้งอยู่ทั่วทุกภาคกว่า 5000 เขื่อน เมื่องบประมาณและบุคคลากรในการจัดการด้านเขื่อนมีจำกัด เขื่อนที่มีความสำคัญมากกว่า จึงควรได้รับการดูแลเป็นลำดับต้น โดยวิธีการพิจารณาความสำคัญของเขื่อนมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ได้นำเสนอเป็นแนวทางครั้งนี้ เป็นวิธีที่วิเคราะห์ได้ง่าย โดย วิธีดัชนีปัจจัยร่วม ร่วมกับการให้ระดับคะแนนของแต่ละปัจจัย ซึ่งให้ความสำคัญกับความเสียหายที่เกิดกับชีวิตของประชาชนเป็นหลัก ดังนั้นจากการวิจัยตามปัจจัยที่กล่าวข้างต้น โดยใช้เหตุการณ์เริ่มต้นที่นำไปสู่ความเสี่ยงต่อชีวิตของประชาชนด้านท้ายน้ำคือ เหตุการณ์แผ่นดินไหว พบว่าเขื่อนที่อยู่ในบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวเขต 2ข เป็นเขื่อนคอนกรีต มีอายุระหว่าง 0 ถึง 5 ปี และมีอายุมากกว่า 35 ปี สูงตั้งแต่ 30 เมตร ประกอบกับมีปริมาณเก็บกักตั้งแต่ 100 ล้าน ลูกบาศเมตร มีแหล่งชุมชนท้ายน้ำอยู่ไม่เกิน 5 กิโลเมตร วัดจากสันเขื่อน หากเกิดการพิบัติน้ำจะใช้เวลาเดินทางมาถึงแหล่งชุมชนไม่เกิน 1 ชั่วโมง และชุมชนนั้นมีประชาชนอาศัยอยู่มากกว่า 3600 คนขึ้นไป เป็นเขื่อนที่มีความจำเป็นต้องได้รับงบประมาณ เพื่อการจัดการดูแลบำรุงรักษาเขื่อนให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ตามปกติ นอกจากการลดความเสี่ยงโดยการบำรุงรักษาเขื่อนอย่าสม่ำเสมอแล้ว หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านความปลอดภัยเขื่อน ควรมีมาตรการในการจัดการความเสี่ยงรูปแบบอื่นเช่น การวางแผนการอพยพประชาชนที่อาศัยอยู่ด้านท้ายน้ำไปยังที่ปลอดภัยอย่างทันเวลา หลังจากที่มีการประกาศเตือนภัย หรือประกาศภาวะฉุกเฉิน เมื่อเขื่อนเกิดความเสียหายระดับรุนแรงและหน่วยงานไม่อาจควบคุมสถานการณ์ไว้ได้

11. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ “การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเขื่อนเพื่อการชลประทานในประเทศไทย ” ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจาก สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (GERD) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัย

12. บรรณานุกรม

[1] Cees Van Westen,. 2005. Introduction to risk assessment. Refresher course on Geo-Information for Natural Disaster Reduction in Eastern Africa, Makerere University.

[2] Chuck Anderson et al. 1998. Concrete dams case histories of failures and nonfailures with back calculation. US : United States Bureau of Reclamation.

[3] ICOLD, 1989. Selecting seismic parameters for large dams guidelines. International Commission on Large Dam.

[4] Tony L. Wahl, 1998. Prediction of Embankment dam breach parameters : A literature review and needs assessment. US : United States Bureau of Reclamation.

[5] กรมทรัพยากรธรณี, 2548. แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยของประเทศไทย ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.

[6] วรากร ไม้เรียง , 2546. วิศวกรรมเขื่อนดิน. กรุงเทพมหานคร : ไลบรารี่นาย.

[7] สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์และคณะ, 2549. การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเขื่อนเพื่อการชลประทานในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวบัญชรี คำมา
เกิดวันที่	วันที่ 22 เมษายน 2525
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์