เอกสารการประชุมเพื่อรับฟังความคิดเห็นทางวิชาการ

เทคนิคพิจารณ์

โครงการจ้างศึกษาการกำหนดเกณฑ์การออกแบบอาคารชลประทานที่สามารถต้านแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

แขวงถนนนครไชยศรี เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

วันศุกร์ ที่ ๖ มิถุนายน ๒๕๖๘ เวลา ๐๘.๓๐-๑๓.๓๐ น.

ณ ห้องพระศิวะ โรงแรมอัศวิน แกรนด์ คอนเวนชั่น
ถนนวิภาวดีรังสิต เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

จัดโดย

กรมชลประทาน ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

EMAIL : GERD.KU@GMAIL.COM

การประชุมเพื่อรับฟังความคิดเห็นทางวิชาการ

เทคนิคพิจารณ์

โครงการจ้างศึกษาการกำหนดเกณฑ์การออกแบบอาคารชลประทาน ที่สามารถต้านแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว แขวงถนนนครไชยศรี เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

วันศุกร์ ที่ ๖ มิถุนายน ๒๕๖๘ เวลา ๐๘.๓๐-๑๓.๓๐ น.

ณ ห้องพระศิวะ โรงแรมอัศวิน แกรนด์ คอนเวนชั่น ถนนวิภาวดีรังสิต เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

โดย หน่วยวิจัยความปลอดภัยเขื่อน ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**
เลขที่ ๕๐ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐
โทรศัพท์/ โทรสาร ๐-๒๕๗๙-๒๒๖๕ Email : gerd.ku@gmail.com

สารบัญ

หน้า

หมวดที่ ๑ บทนำ **๑**
๑. ความเป็นมาและเจตนารมณ์ ๑
๒. ขอบข่าย ๑
๓. มาตรฐานและคู่มืออ้างอิง ๑
๔. นิยามและสัญญลักษณ์ ๓
๕. โครงสร้างของเกณฑ์มาตรฐาน ๓
๖. ข้อพิจารณาเริ่มต้นในการออกแบบเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ๔

หมวดที่ ๒ การวิเคราะห์ค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ **๗**
๑. การกำหนดค่าระดับของแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ ๗
๒. การวิเคราะห์ค่าแรงกระทำแผ่นดินไหว (Seismic hazard analysis) ๘

หมวดที่ ๓ การสำรวจและทดสอบฐานรากและวัสดุตัวเขื่อน **๑๔**

หมวดที่ ๔ การวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนและอาคารประกอบเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว **๑๗**
ส่วนที่ ๑ การออกแบบเขื่อนดินและหินถม (Earth and rockfill dam) ๑๗
ส่วนที่ ๒ การออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (Concrete gravity dam) ๒๖
๒.๑ ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อออกแบบ ๒๘
๒.๒ การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis) ๓๐
๒.๒.๑ การพิจารณาเสถียรภาพ ๓๐
๒.๒.๒ การคิดน้ำหนักรวมในกรณีต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาออกแบบ (Basic Loading Conditions) ๓๐
๒.๒.๓ เกณฑ์ความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก ๓๑
๒.๒.๔ การพลิกคว่ำของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก (Overturning) ๓๒
๒.๒.๕ การวิเคราะห์การเลื่อนตัวของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก (Sliding) ๓๒
๒.๒.๖ การวิเคราะห์แรงดันที่ฐานราก (Base Pressures) ๓๓
๒.๒.๗ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนและฐานราก (Stress Analysis) ๓๓

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ส่วนที่ ๓ การออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบ (Appurtenant structure) ๓๓
๓.๑ การเลือกระดับแรงกระทำแผ่นดินสำหรับการออกแบบอาคารประกอบ ๓๖
๓.๒ การเลือกวิธีการวิเคราะห์ ๓๙
๓.๒.๑ วิธีทางสถิต (Static Base) ๓๙
๓.๒.๒ วิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic analysis) ๓๙
๓.๓ การกำหนดตัวแปร ๔๑
๓.๓.๑ การกำหนดค่าแผ่นดินไหว ๔๑
๓.๓.๒ คุณสมบัติของวัสดุและฐานราก ๔๑
๓.๓.๓ การหน่วง (Damping) (ICOLD, Bulletin ๑๒๓) ๔๑
๓.๓.๔ แรงดันน้ำเนื่องจากแผ่นดินไหว (Hydrodynamic loads) ๔๒
๓.๓.๕ แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Dynamic earth loads) ๔๒
๓.๓.๖ การรวมน้ำหนักบรรทุก, วิธีการออกแบบ, หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ ๔๒
๓.๔ วิธีการออกแบบอาคารประกอบ (Appurtenant Structure) ๔๓
๓.๔.๑ อาคารทางระบายน้ำล้น (Spillways) ๔๓
๓.๔.๒ ประตูระบายน้ำ, flashboards, และอุปกรณ์ (operating equipment) ๔๕
๓.๔.๓ ท่อส่งน้ำ (Water Conduits), ประตูและวาล์ว (Gates and valves) ๔๕
๓.๔.๔ อาคารรับน้ำ ทางชักน้ำหรือคลองชักน้ำ (Intake/outlet towers) ๔๕
๓.๔.๕ ประตูน้ำและอาคารประกอบอื่นๆ
(Navigation locks and other appurtenant structures) ๔๕
๓.๔.๖ สะพาน (Bridges) ๔๕

**หมวดที่ ๕ การดำเนินการเพื่อประเมินความปลอดภัยเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบัน
ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว ๔๖**

Reference ๔๗

หมวดที่ ๑

บทนำ

๑. ความเป็นมาและเจตนารมณ์

อ้างถึงกฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.๒๕๖๔ ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. ๒๕๒๒ ซึ่งกำหนดค่าแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบอาคารควบคุม โดยอาคารควบคุมตามกฎกระทรวงดังกล่าวครอบคลุมถึง “เขื่อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบที่มีความสูงตั้งแต่ ๑๐ ม.” โดยให้อำนาจหน่วยงานผู้รับผิดชอบได้กำหนดหลักเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบให้เหมาะสมกับโครงสร้างดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการรวบรวมและปรับปรุงเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบของเขื่อนเก็บน้ำและอาคารประกอบตามเอกสารฉบับนี้ ทั้งนี้เพื่อให้เขื่อนและอาคารประกอบในทุกขนาดสามารถรับแรงกระทำแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย

๒. ขอบข่าย

๒.๑ กำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบเขื่อนเพื่อรองรับแรงแผ่นดินไหว

๒.๒ กำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการประเมินความปลอดภัยเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบันต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

๒.๓ ครอบคลุมโครงสร้างเขื่อน อาคารประกอบ หรือโครงการอ่างเก็บน้ำ ในทุกขนาด

๒.๔ ครอบคลุมเขื่อนประเภทดินถมเนื้อเดียว เขื่อนดินถมแบ่งส่วน เขื่อนหินถมแกนดินเหนียว เขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนักทั้งเขื่อนคอนกรีตและคอนกรีตบดอัด และอาคารประกอบเขื่อนทุกประเภทในพื้นที่หัวงาน

๒.๕ ไม่ครอบคลุมอาคารสำนักงานและระบบส่งชลประทาน

๓. มาตรฐานและคู่มืออ้างอิง

๓.๑ ICOLD: International Commission on Large Dams

- ICOLD Bulletin ๖๑ Dam design criteria - Philosophy of choice (๑๙๘๘)
- ICOLD Bulletin ๗๒ Selecting seismic parameters for large dams - Guidelines (๑๙๘๙)
- ICOLD Bulletin ๑๒๐ Design features of dams to resist seismic ground motion (๒๐๐๑)
- ICOLD Bulletin ๑๒๓ Seismic design and evaluation of structures appurtenant to dams (๒๐๐๒)

- ICOLD Bulletin ๑๔๘ Selecting seismic parameters for large dams (๒๐๑๖)
- ICOLD Bulletin ๑๕๗ Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation (๒๐๑๖)
- ICOLD Bulletin ๑๕๘ Dam Surveillance Guide (๒๐๑๘)
- ICOLD Bulletin ๑๖๗ Regulation of dam safety: An overview of current practice worldwide (๒๐๒๕)

๓.๒ USBR : United States Bureau of Reclamation

- USBR (๑๙๗๒)
- USBR (๑๙๗๗)
- Design of Gravity Dams (๑๙๗๖)
- Design Standards No. ๑๓ : Seismic Analysis and Design (๒๐๑๕)

๓.๓ USACE : United States Army Corps of Engineers

- EM ๑๑๑๐-๒-๒๒๐๐ Gravity Dam Design (๑๙๙๕)
- EM ๑๑๑๐-๒-๖๐๕๐ Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures (๑๙๙๙)
- EM ๑๑๑๐-๒-๖๐๕๑ Time-history Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures (๒๐๐๓)
- EM ๑๑๑๐-๒-๖๐๕๓ Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures (๒๐๐๗)
- ER ๑๑๑๐-๒-๑๘๐๖ Earthquake Design and Evaluation for Civil Works Projects (๒๐๒๔)

๓.๔ FEMA : Federal Emergency Management Agency

- Earthquake Analyses and Design of Dams (๒๐๐๕)

๓.๕ ASTM : American Society for Testing and Materials

๓.๖ กฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร (๒๕๖๖)

๓.๗ สผ. : สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

- แนวทางการจัดทำรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการพัฒนาแหล่งน้ำ (๒๕๖๖)

๓.๘ กรมชลประทาน :

- แนวทางและหลักเกณฑ์การออกแบบเขื่อนเก็บกักน้ำและอาคารประกอบ (๒๕๔๕)
- แนวทางและหลักเกณฑ์การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยเขื่อน (๒๕๖๕)
- มาตรฐานการปฏิบัติงาน การทดสอบวัสดุด้านวิศวกรรมสำหรับหน่วยงานทดสอบประจำภูมิภาคของกรมชลประทาน, สำนักวิจัยและพัฒนา (๒๕๕๒)

๓.๙ กรมโยธาธิการและผังเมือง

- มยผ.๑๓๐๑-๑๓๐๒-๖๑

๓.๑๐ กรมทางหลวง

- คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว (๒๕๕๙)

๔. นิยามและสัญญลักษณ์

(อยู่ระหว่างดำเนินการ)

๕. โครงสร้างของเกณฑ์มาตรฐาน

รูปที่ ๑ แสดงแผนผังการวิเคราะห์และการดำเนินงานต่างๆที่สัมพันธ์และเกี่ยวข้องกันสำหรับการเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวฉบับนี้ โดยรายละเอียดอยู่ในส่วนต่างๆที่ได้แบ่งโครงสร้างของเนื้อหาดังต่อไปนี้

หมวดที่ ๑ บทนำ

หมวดที่ ๒ การวิเคราะห์ค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ

หมวดที่ ๓ การสำรวจและทดสอบฐานรากและวัสดุตัวเขื่อน

หมวดที่ ๔ การวิเคราะห์และออกแบบ ประกอบด้วย

ส่วนที่ ๑ การออกแบบเขื่อนดินและหินถม (Earth and rockfill dam)

ส่วนที่ ๒ การออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (Concrete gravity dam)

ส่วนที่ ๓ การออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบ (Appurtenant structure)

หมวดที่ ๕ การดำเนินการเพื่อประเมินความปลอดภัยเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบันต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

รูปที่ ๒ แสดงแผนผังการวิเคราะห์และดำเนินการเพื่อประเมินความปลอดภัยเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งจะมีรายละเอียดในหมวดที่ ๕ โดยมีโครงสร้างของการวิเคราะห์ที่ไม่ต่างจากการวิเคราะห์เพื่อออกแบบเขื่อนใหม่ ต่างกันตรงที่เพิ่มข้อมูล As-built drawing, ข้อมูลการตรวจวัดความเร่งแผ่นดินไหวที่พื้นที่หัวงาน, ข้อมูลเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน การสอบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์จากข้อมูลการตรวจวัดและการสำรวจและทดสอบสำหรับเขื่อนที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

๖. ข้อพิจารณาเริ่มต้นในการออกแบบเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ (๒๕๕๓) ได้รวบรวมข้อพิจารณาเบื้องต้นในการออกแบบเขื่อนเพื่อรับรองการตอบสนองจากแรงกระทำแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย เพื่อใช้เป็นการวางแนวคิดเริ่มต้นในการออกแบบ (Conceptual design) โดยมีรายละเอียดดังนี้

๖.๑ เผื่อความหนาของระบบกรองเพื่อป้องกันการสูญเสียความหนาของระบบกรองจากการเลื่อนไถลของลาดเขื่อน, การทรุดตัวแตกต่างกัน หรือ การขยับของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน (ระบบกรองควรเหลือ ๕๐%)

๖.๒ ใช้วัสดุแกนเขื่อนที่สามารถอุดตันได้เองหากเกิดรอยแตกภายใน (Self-healing material) ตามข้อแนะนำของ Sherald (๒๐xx)

๖.๓ ใช้สันเขื่อนที่กว้างกว่าปกติ เช่นเพิ่มจาก ๘ เมตรตามปกติ เป็น ๑๐ เมตร เป็นต้น

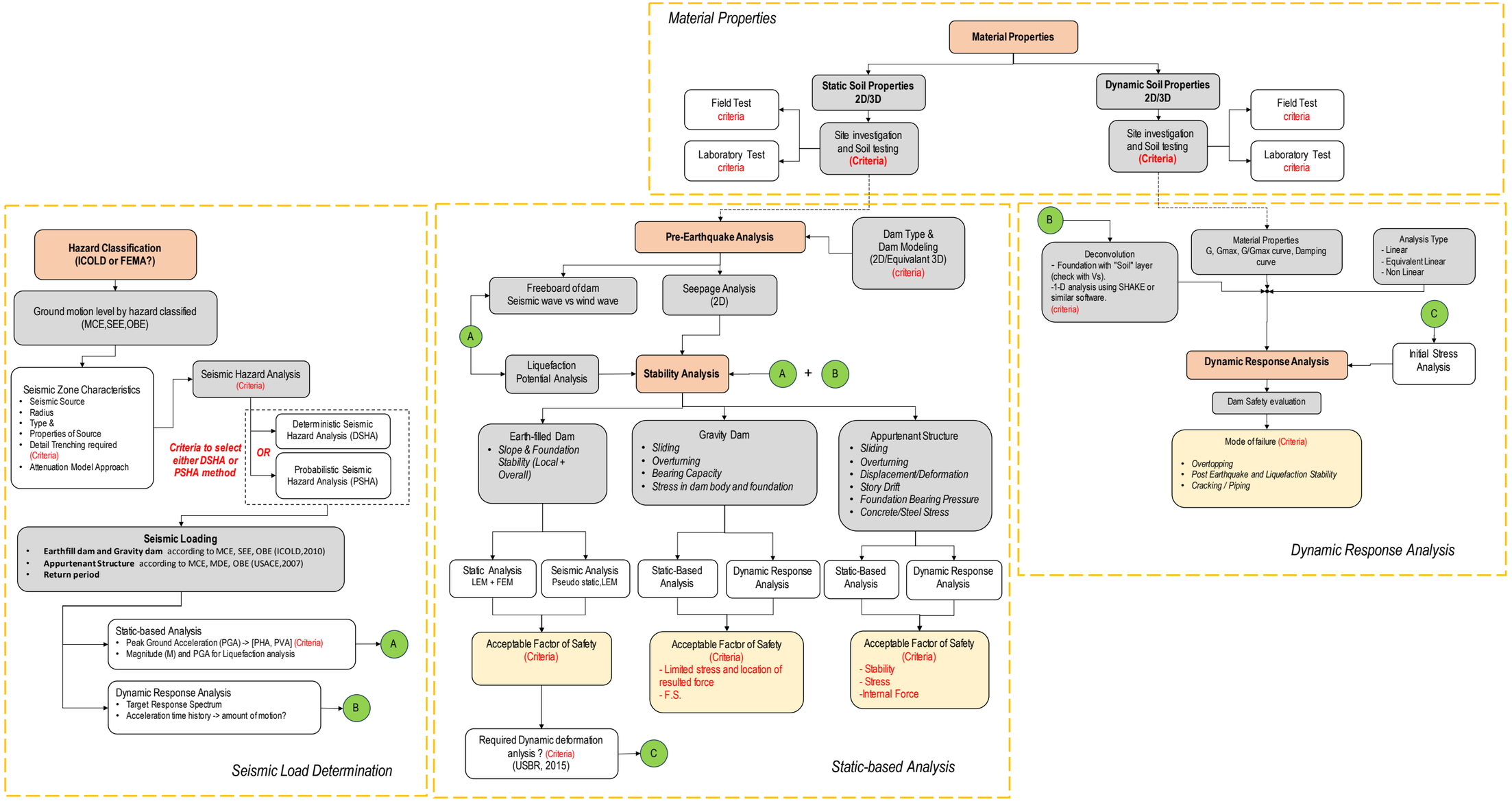
๖.๔ หลีกเลี่ยงวัสดุที่สามารถเกิด Liquefaction ได้มาเป็นวัสดุถม

๖.๕ ตรวจสอบโอกาสเกิด Liquefaction ที่ดินฐานราก และมาตรการในการปรับปรุง หรือพิจารณาในการขุดลอกวัสดุดังกล่าวออก

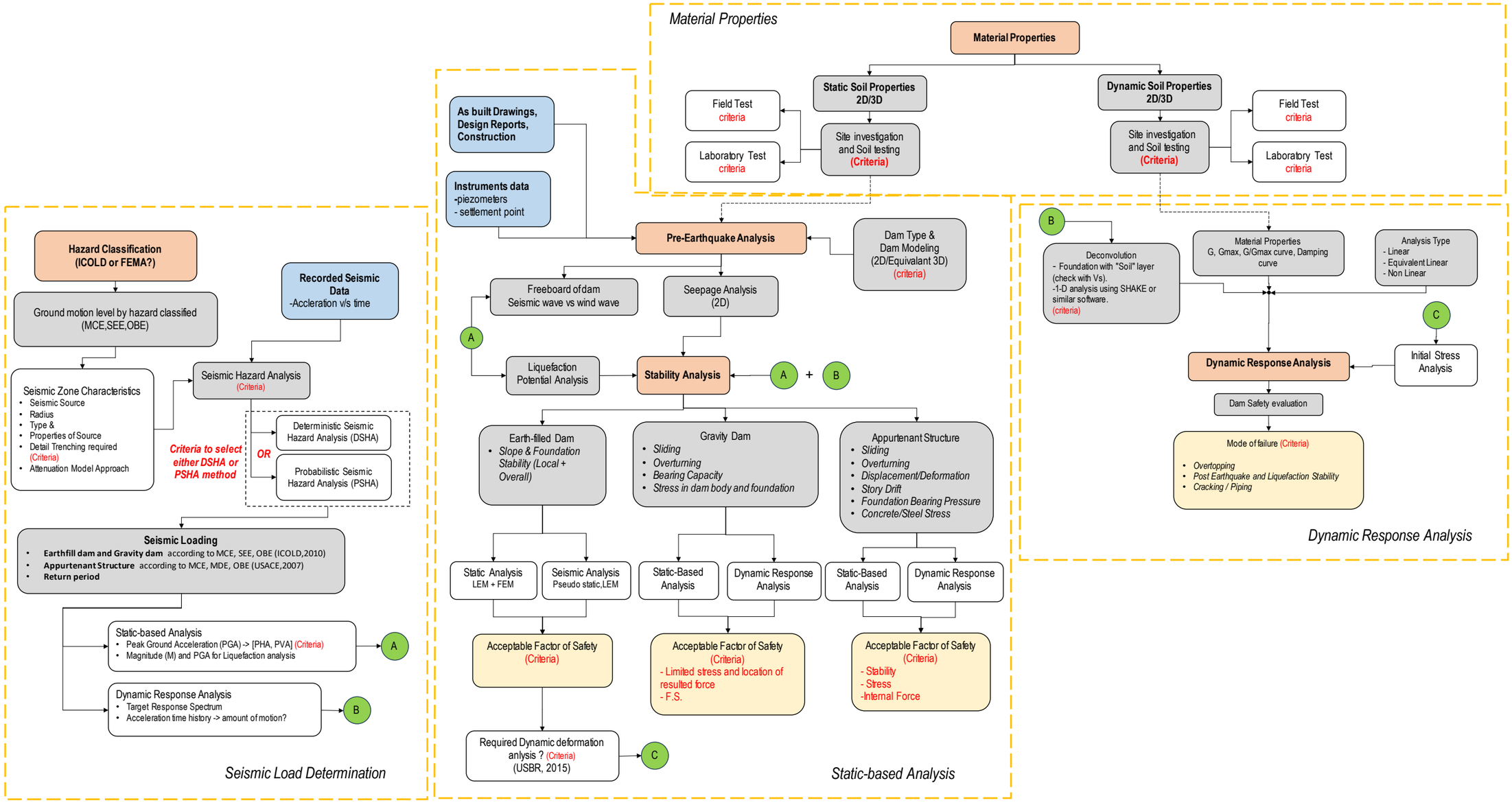
๖.๖ เผื่อความลาดชันโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันโดยวิธี Pseudostatic Analysis เป็นการเริ่มต้น

๖.๗ เผื่อ Free board จากโอกาสที่จะเกิด Seiches และ Seismic Deformation

๖.๘ ในกรณีที่ความเสี่ยงต่อความสูญเสียสูง หรือต้องการประหยัดค่าก่อสร้าง ควรออกแบบโดยพิจารณาพฤติกรรมเขื่อนที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Response Analysis แต่จำเป็นจะต้องมีความพร้อมด้านทรัพยากรการวิเคราะห์ ไม่เช่นนั้นผลที่ได้อาจจะชี้นำได้ไม่ถูกต้อง



รูปที่ ๑ แผนผังการวิเคราะห์และดำเนินการออกแบบเขื่อนเพื่อรองรับแรงกระทำแผ่นดินไหว



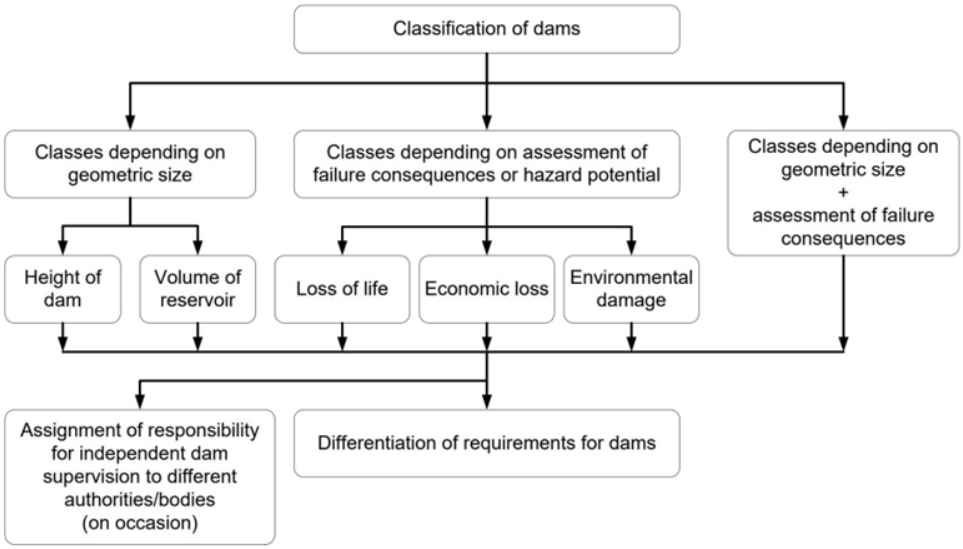
รูปที่ ๒ แผนผังการวิเคราะห์และดำเนินการเพื่อประเมินความปลอดภัยของเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบันต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

หมวดที่ ๒

การวิเคราะห์ค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ

๑. การกำหนดค่าระดับของแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ

การกำหนดระดับของแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนจะถูกกำหนดตามระดับความอันตรายของเขื่อนที่แนะนำโดย ICOLD Bulletin ๑๖๗ (ร่าง ๒๐๒๓, ๒๐๒๕) และนำไปใช้โดยสำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (๒๕๖๖) เพื่อจำแนกระดับความอันตรายของเขื่อนสำหรับการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านธรณีวิทยา รูปที่ ๓ แสดงหลักการของการกำหนดระดับความอันตรายของเขื่อนและ ตารางที่ ๑ แสดงการให้คะแนนและระดับการจำแนกตามคะแนนต่างๆ โดยผลการจำแนกมี ๔ ระดับ ได้แก่ Low, Moderate, High และ Extreme



รูปที่ ๓ หลักการจำแนกระดับความอันตรายของเขื่อน (ICOLD Bulletin ๑๖๗, ๒๐๒๕)

ตารางที่ ๑ ระดับคะแนนของแต่ละปัจจัยและระดับความอันตรายจากคะแนนรวม (ICOLD Bulletin ๑๖๗, ๒๐๒๕)

	Classification Factor			
Capacity (10^6 m^3)	>120 (6)	120-1 (4)	1-0.1 (2)	<0.1 (0)
Height (m)	>45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<15 (0)
Evacuation requirements (No of per	>1000 (12)	1000-100 (8)	100-1 (4)	None (0)
Potential downstream damage	High (12)	Moderate (8)	Low (4)	None (0)

Total Classification	Dam Category
(0-6)	I (Low)
(7-18)	II (Moderate)
(19-30)	III (High)
(31-36)	IV (Extreme)

เมื่อได้จำแนกระดับความอันตรายของเขื่อนแล้วก็จะสามารถเลือกระดับของของขนาดแผ่นดินไหวได้ตามผลการจำแนก โดยอาศัยข้อกำหนดจาก ICOLD Bulletin๑๔๘ (๒๐๑๐) ซึ่งมีขนาดที่ต้องพิจารณา ๓ ประเภท ได้แก่ MCE, SEE และ OBE โดยในแต่ละประเภทจะมีข้อกำหนดในการเลือกใช้ค่าแรงกระทำแผ่นดินไหว ตามระดับความอันตรายของเขื่อนที่ได้จำแนกในขั้นแรก ตารางที่ ๒ ได้แสดงข้อกำหนดของ ICOLD ในประเด็นดังกล่าว ทั้งนี้อ้างถึงกฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.๒๕๖๔ ได้ระบุว่า ค่าแรงที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะต้องไม่ต่ำไปกว่าค่าที่กำหนดในกฎกระทรวงฯดังกล่าว ที่กำหนดใช้ในการควบคุมอาคาร ดังนั้นค่าที่ประเมินได้จากตารางดังกล่าวจะต้องนำไปเทียบกับค่าที่ได้จากกฎกระทรวงฯ พ.ศ. ๒๕๖๔ โดยเลือกค่ามากเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบต่อไป

ตารางที่ ๒ ข้อกำหนดในการเลือกใช้ค่าระดับของแรงกระทำแผ่นดินไหวจาก ICOLD Bulletin๑๔๘ (๒๐๑๐)

ขนาดแผ่นดินไหว	ระดับความเสี่ยงภัยของเขื่อน		
	ระดับสูงหรือสูงสุด (Extreme or High)	ระดับกลาง (Moderate)	ระดับต่ำ (Low)
MCE (Maximum Credible Earthquake)	ต้องพิจารณาที่ระดับนี้	สามารถลดทอนขนาดลงจาก MCE ได้	สามารถลดทอนขนาดลงจาก MCE ได้
SEE* (Safety Evaluation Earthquake)	Deterministic เลือกเปอร์เซ็นไทล์ที่ 84 (84^{th} percentile) ซึ่งเทียบเท่า Mean + 1SD	Deterministic เลือกเปอร์เซ็นไทล์ที่ 50 ถึง 84 (50^{th} to 84^{th} percentile)	Deterministic เลือกเปอร์เซ็นไทล์ที่ 50 (50^{th} percentile)
	Probabilistic เลือกที่ mean AEP ไม่น้อยกว่า 1/10,000	Probabilistic เลือกที่ mean AEP ไม่น้อยกว่า 1/3,000	Probabilistic เลือกที่ mean AEP ไม่น้อยกว่า 1/1,000
OBE* (Operation Basis Earthquake)	คำนวณจากข้อกำหนดการออกแบบ (Seismic Building Code) พิจารณาที่คาบอุบัติซ้ำ (Return Period) 475 ปี		

mean AEP: mean annual exceedance probability

๒. การวิเคราะห์ค่าแรงกระทำแผ่นดินไหว (Seismic hazard analysis)

หลังจากได้ค่าระดับของแรงกระทำแผ่นดินไหว จากนั้นจะได้ทำการวิเคราะห์หาค่าแรงกระทำแผ่นดินไหวในรูปแบบตัวแปรค่าความเร่งของพื้นดินตามระดับดังกล่าว โดยการวิเคราะห์ Seismic hazard analysis ดังมีขั้นตอนดังที่แสดง Flow chart ในรูปที่ ๔ และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

๒.๑ กำหนดตำแหน่งพื้นที่โครงการ

๒.๒ ขยายขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ (ตามหลักเกณฑ์ของ ICOLD Bulletin๑๔๘ (๒๐๑๐) และ สผ., ๒๕๖๖) เพื่อกำหนดขอบเขตพื้นที่ในการศึกษาข้อมูลรอยเลื่อนมีพลังและแผ่นดินไหว

๒.๓ พิจารณาขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการว่าพื้นที่ทั้งหมดตั้งอยู่ภายในประเทศไทยหรือไม่

๒.๓.๑ กรณี “ใช่” สามารถนำขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการไปพิจารณาร่วมกับข้อมูลแผนที่รอยเลื่อนมีพลังและโครงสร้างแนวเส้นของกรมทรัพยากรธรณี (ฉบับที่เป็น

ปัจจุบันมากที่สุด) และข้อมูลแผ่นดินไหวจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ เช่น USGS, กรมอุตุนิยมวิทยา หรือแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถืออื่นๆ เป็นต้น

๒.๓.๒ กรณี “ไม่ใช่” ต้องมีการรวบรวม ค้นคว้า และศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมในพื้นที่ส่วนที่ไม่อยู่ในประเทศไทย เพื่อนำข้อมูลไปใช้พิจารณาร่วมกับข้อมูลที่มีอยู่ในประเทศไทย

๒.๔ พิจารณาข้อมูลรอยเลื่อนมีพลังและแผ่นดินไหวในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ เพื่อจำแนกกลุ่มพื้นที่ ซึ่งแบ่งออกเป็น ๔ กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A, กลุ่ม B, กลุ่ม C และกลุ่ม D ดังนี้

๒.๔.๑ กลุ่ม A คือ กลุ่มที่มีการพาดผ่านของแนวรอยเลื่อนมีพลังและมีข้อมูลตำแหน่งร่องสำรวจ (Trenching) ในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ เป็นกลุ่มที่มีข้อมูลบ่งชี้การเป็นพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบรอยเลื่อนมีพลังและแผ่นดินไหวชัดเจน (ยังอยู่ในการพิจารณากรณีที่พบว่าแนวรอยเลื่อนมีพลังที่อยู่ใกล้ที่สุด ยังไม่มีข้อมูลการขุดร่องสำรวจ จำเป็นต้องมีการดำเนินการขุดร่องสำรวจเพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลังที่พาดผ่านหรือไม่)

๒.๔.๒ กลุ่ม B คือ กลุ่มที่มีการพาดผ่านของแนวรอยเลื่อนมีพลังแต่ยังไม่มีข้อมูลตำแหน่งร่องสำรวจ (No Trenching) ในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ เป็นกลุ่มที่แสดงถึงการเป็นพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบจากรอยเลื่อนมีพลัง แต่ไม่มีข้อมูลที่สามารถบ่งชี้ได้อย่างมั่นใจว่าบริเวณที่มีการพาดผ่านของแนวรอยเลื่อนมีพลังดังกล่าว มีศักยภาพของการเป็นรอยเลื่อนมีพลังเทียบเท่ากับบริเวณที่มีข้อมูลร่องสำรวจ Trench หรือไม่ จำเป็นต้องมีการดำเนินการขุดร่องสำรวจเพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลังที่พาดผ่าน

๒.๔.๓ กลุ่ม C คือ กลุ่มที่ไม่มีการพาดผ่านของแนวรอยเลื่อนมีพลังและ/หรือไม่มีข้อมูลตำแหน่งร่องสำรวจ (No Trenching) แต่มีการปรากฏข้อมูลการพาดผ่านของโครงสร้างแนวเส้นหลัก (Major Lineament) และมีตำแหน่งแผ่นดินไหวที่มีขนาดแผ่นดินไหว ในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ

กรณี C-๑ มีการปรากฏข้อมูลการพาดผ่านของโครงสร้างแนวเส้นหลัก (Major Lineament) และมีรายงานการเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ ๓ (M $\geq$๓) เป็นกลุ่มที่มีศักยภาพที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว จำเป็นต้องมีการสำรวจตามมาตรฐานการสำรวจรอยเลื่อนมีพลัง (ตามหลักเกณฑ์ของกรมทรัพยากรธรณี, ๒๕๖๓) ในการบ่งชี้คุณลักษณะของโครงสร้างแนวเส้นหลักและกิจกรรมแผ่นดินไหวที่ปรากฏ ถ้าจัดเป็น potentially active fault จำเป็นต้องมีการดำเนินการขุดร่องสำรวจเพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของแนวเส้นหลักนี้ แต่ถ้าไม่จัดเป็น potentially active fault ควรดำเนินการติดตั้งสถานีวัดแผ่นดินไหว (เครื่องมือวัดอัตราเร่งของพื้นดิน) อย่างน้อย ๒ สถานี ได้แก่ บริเวณแนวสันเขื่อน และบริเวณพื้นดินส่วนฐานของเขื่อน เพื่อการตรวจวัดพฤติกรรมและเฝ้าระวังแผ่นดินไหว

กรณี C-๒ มีการปรากฏข้อมูลการพาดผ่านของโครงสร้างแนวเส้นหลัก (Major Lineament) และมีรายงานการเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดน้อยกว่า ๓ (M<๓) จัดเป็นกลุ่มที่มีศักภาพในระดับต่ำที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว แต่การปรากฏอยู่ของตำแหน่งแผ่นดินไหวในขอบเขตพื้นที่ ทำให้เกิดข้อสงสัยที่ไม่สามารถระบุสาเหตุของการมีกิจกรรมแผ่นดินไหวที่ปรากฏได้ ควรดำเนินการติดตั้งสถานีวัด

แผ่นดินไหว (เครื่องมือวัดอัตราเร่งของพื้นดิน) อย่างน้อย ๒ สถานี ได้แก่ บริเวณแนวสันเขื่อน และบริเวณพื้นดินส่วนฐานของเขื่อน เพื่อการตรวจวัดพฤติกรรมและเฝ้าระวังแผ่นดินไหว

๒.๔.๔ กลุ่ม D คือ กลุ่มที่ไม่มีการพาดผ่านของแนวรอยเลื่อนมีพลัง (No active fault) ไม่มีข้อมูลตำแหน่งร่องสำรวจ (No Trenching) ไม่มีโครงสร้างแนวเส้นหลัก (No major lineament) และไม่ปรากฏตำแหน่งแผ่นดินไหวในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการ เป็นกลุ่มที่มีศักภาพในระดับต่ำมากที่อาจได้รับผลกระทบจากรอยเลื่อนมีพลังและแผ่นดินไหว ไม่จำเป็นต้องมีการดำเนินการขุดร่องสำรวจเพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง รวมถึงการวิเคราะห์และพิจารณาทางด้านแผ่นดินไหว

๒.๕ การสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง (ตามเกณฑ์มาตรฐานการสำรวจรอยเลื่อนมีพลังของกรมทรัพยากรธรณี, ๒๕๖๓)

๒.๕.๑ การรวบรวมและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (Gathering and study) เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ เช่น ข้อมูลด้านธรณีวิทยาแผ่นดินไหว ข้อมูลศูนย์กลางแผ่นดินไหว ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้น รูปแบบการเกิดแผ่นดินไหว ณ แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวนั้น รวมถึงประวัติเหตุการณ์และผลกระทบที่เคยเกิดแผ่นดินไหว สำหรับนำมาประกอบการพิจารณาถึงความสัมพันธ์กับกลุ่มรอยเลื่อนมีพลังกำหนดตำแหน่งพื้นที่

๒.๕.๒ คัดเลือกพื้นที่สำหรับการวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลโทรสัมผัสหรือการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing data) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมข้อมูลเชิงตัวเลขด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลภาพ (Image Processing) เพื่อทำการวิเคราะห์และจัดทำแผนที่รอยเลื่อนมีพลัง แผนที่โครงสร้างแนวเส้น แผนที่ธรณีวิทยารายละเอียดตามแนวรอยเลื่อน และแผนที่ธรณีสัณฐานบริเวณใกล้แนวรอยเลื่อน

๒.๕.๓ การสำรวจภาคสนาม (Field Investigation) เพื่อวิเคราะห์หาแนวรอยเลื่อนและลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดินสำหรับการกำหนดตำแหน่งในการขุดร่องสำรวจ แบ่งเป็น ๒ ส่วน คือ ส่วนที่ ๑ การสำรวจเพื่อจัดทำแผนที่ภูมิประเทศอย่างละเอียดบริเวณพื้นที่โดยรอบแนวรอยเลื่อน และส่วนที่ ๒ การสำรวจธรณีฟิสิกส์ภาคพื้นดินเพื่อใช้กำหนดตำแหน่งและทิศทางของแนวรอยเลื่อนใต้ผิวดิน

๒.๕.๔ การขุดร่องสำรวจ (Trenching) เพื่อทำการบันทึกข้อมูลลำดับชั้นดินและการตัดผ่านของแนวรอยเลื่อนในผนังร่องสำรวจ (Trench logging) ประกอบด้วย การถ่ายภาพต่อเนื่อง การวัดระยะการเลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อน การเก็บตัวอย่างอินทรีย์วัตถุและตะกอนมาทำการวัดหาอายุ (Sampling for Age Dating) เพื่อให้มีความปลอดภัยในการขุดร่องสำรวจให้พิจารณาตามหลักเกณฑ์ “การป้องกันการพังทลายสำหรับงานขุดดินถมดิน มยผ. ๑๙๑๒-๕๒”

๒.๕.๕ การวัดหาอายุอินทรีย์วัตถุและตะกอน (Age Dating) ในห้องปฏิบัติการ มีวิธีการหาอายุที่นิยมในปัจจุบัน ประกอบด้วย วิธีการเรืองแสงความร้อน (TL) วิธีการกระตุ้นด้วยแสง (OSL) วิธีวัดแบบสปินของอิเล็กตรอน (ESR) และวิธีคาร์บอน-๑๔ (C-๑๔ AMS) สำหรับหัวข้อนี้กำลังพิจารณามาตรฐานของห้องปฏิบัติการว่าควรยึดตามหลักเกณฑ์ของ ISO หรือไม่

๒.๖ ผลลัพธ์สำคัญ (Main Outputs) ที่ได้จากการสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง ประกอบด้วย

ก) Surface of rupture length

ข) Active fault characteristics

ค) The latest movement/history

ง) Slip rate

จ) Magnitude

ฉ) Recurrence interval

๒.๗ การตรวจสอบและพิจารณาข้อมูลผลลัพธ์สำคัญ (Main Outputs) ที่ได้จากการสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ได้ และพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลที่อยู่นอกขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการหรือไม่

๒.๗.๑ กรณี “ใช่” แสดงถึงการมีข้อมูลสมบูรณ์และเพียงพอต่อการดำเนินการ (Data Adequacy) สามารถนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่ขั้นตอน Seismic Hazard Analysis ต่อไป

๒.๗.๒ กรณี “ไม่ใช่” แสดงถึงการยังมีข้อมูลไม่สมบูรณ์ (Inadequated data) หรือเป็นพื้นที่มีศักภาพในระดับต่ำมากที่อาจได้รับผลกระทบจากรอยเลื่อนมีพลังและแผ่นดินไหว หรือเป็นพื้นที่ยังมีข้อสงสัยที่ไม่สามารถระบุสาเหตุของการมีกิจกรรมแผ่นดินไหวที่ปรากฏได้ เพื่อการตรวจวัดพฤติกรรมและเฝ้าระวังแผ่นดินไหว ควรดำเนินการตรวจสอบว่ามีตำแหน่งติดตั้งสถานีวัดแผ่นดินไหวในขอบเขตพื้นที่ตามแนวรัศมี ๑๕๐ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการอยู่หรือไม่ กรณี “ไม่มี” ควรดำเนินการติดตั้งสถานีวัดแผ่นดินไหว (เครื่องมือวัดอัตราเร่งของพื้นดิน) ในพื้นที่โครงการอย่างน้อย ๒ สถานี ได้แก่ บริเวณแนวสันเขื่อน และบริเวณพื้นดินส่วนฐานของเขื่อน

๒.๘ การพิจารณาเลือกแนวทางการวิเคราะห์ในขั้นตอน Seismic Hazard Analysis ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการวิเคราะห์ย่อย Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) และ Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) ว่าควรเลือกกระบวนการวิเคราะห์แบบใด โดยใช้ข้อมูลผลลัพธ์สำคัญ (Main Outputs) ที่ได้จากการสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง โดยให้พิจารณาระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากพื้นที่โครงการ ภายในแนวรัศมี ๑๕ กิโลเมตร (Pending for more reference and suggestion)

๒.๘.๑ กรณี “ใช่” หมายถึง เมื่อพิจารณาจากข้อมูลผลลัพธ์สำคัญ (Main Outputs) ที่ได้จากการสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง พบว่าภายในแนวรัศมี ๑๕ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการมีการพาดผ่านใกล้ของแนวรอยเลื่อนมีพลัง ให้เลือกใช้กระบวนการ Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)

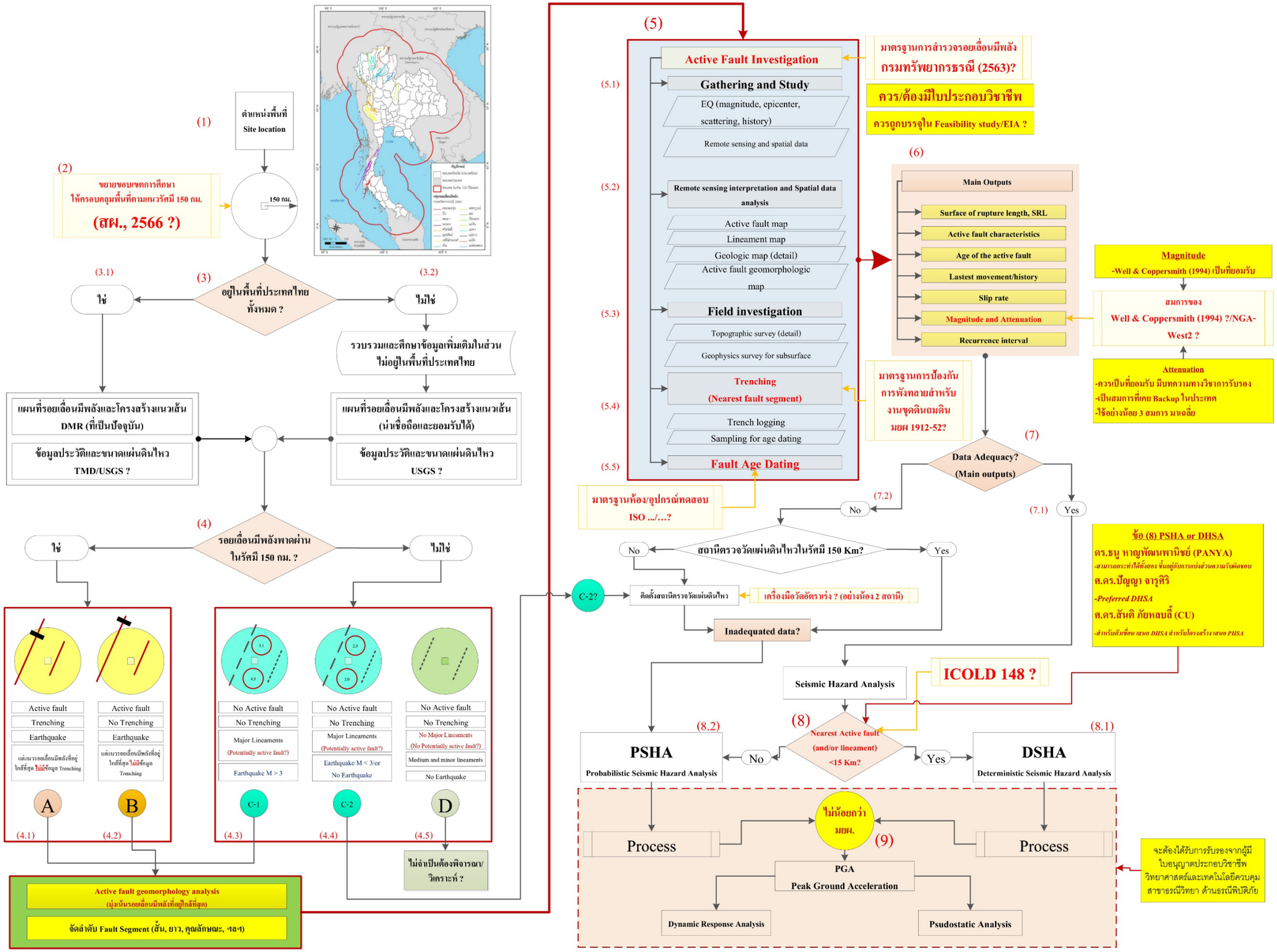
๒.๘.๒ กรณี “ไม่ใช่” หมายถึง เมื่อพิจารณาจากข้อมูลผลลัพธ์สำคัญ (Main Outputs) ที่ได้จากการสำรวจคุณลักษณะของรอยเลื่อนมีพลัง พบว่าภายในแนวรัศมี ๑๕ กิโลเมตร จากพื้นที่โครงการไม่มีการ

พาดผ่านใกล้ของแนวรอยเลื่อนมีพลัง ให้เลือกใช้กระบวนการ Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

๒.๙ นำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอน Seismic Hazard Analysis เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องต่อไป

๒.๑๐ การเลือกสมการลดทอนการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (Attenuation model) จะต้องพิจารณาจากสมการที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ระหว่างแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวและหัวงาน ทั้งในด้านสภาพธรณีสัณฐาน ภูมิประเทศ โครงสร้างทางธรณีวิทยา เป็นต้น รวมทั้งจะต้องมีเอกสารวิชาการที่เป็นปัจจุบันที่น่าเชื่อถือได้อ้างอิง

๒.๑๑ การดำเนินการในขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมา จะต้องได้รับการรับรองจากผู้มีใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีควบคุม สาขาธรณีวิทยา ด้านธรณีพิบัติภัย



รูปที่ ๔ แผนผังการวิเคราะห์ค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ

หมวดที่ ๓

การสำรวจและทดสอบฐานรากและวัสดุตัวเขื่อน

การดำเนินการสำรวจภูมิประเทศ และการสำรวจทางธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ ธรณีวิศวกรรม และธรณีเทคนิค ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการให้ดำเนินการตามข้อกำหนดของกรมชลประทานในการออกแบบเขื่อนและอาคารประกอบรวมไปถึงในการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยเขื่อน พ.ศ. ๒๕๔๕ และ ๒๕๖๕ (รูปที่ ๕) อย่างไรก็ตาม ทั้งนี้มีข้อพิจารณาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

๓.๑ ดำเนินการสำรวจรายละเอียดทั้งวิธีการ และปริมาณความถี่ให้เป็นไปโดยละเอียดตั้งแต่ขั้นวางโครงการ ทั้งการสำรวจภูมิประเทศ ธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ ธรณีวิศวกรรม และ ธรณีเทคนิค รวมถึงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งการดำเนินการที่บริเวณหัวงาน รอบขอบเปียกอ่างเก็บน้ำ และ บ่อยืมดิน ซึ่งจะแตกต่างจากเกณฑ์การปฏิบัติเดิมที่จะดำเนินการสำรวจเบื้องต้นในขั้นวางโครงการและสำรวจรายละเอียดในขั้นออกแบบรายละเอียด

๓.๒ การขุดร่องสำรวจรอยเลื่อน (Trenching) ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขที่จะต้องดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ค่าแรงกระทำแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ จะต้องดำเนินตั้งแต่ในขั้นวางโครงการเช่นเดียวกัน

๓.๓ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและค่าความซึมน้ำของดินถมตัวเขื่อน จะต้องเตรียมตัวอย่างดินบดอัดสำหรับการทดสอบในสภาวะที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับค่าร้อยละการบดอัดที่ยอมให้ต่ำสุดในสนาม (Lowest percent compaction) และมีค่าความชื้นที่ยอมให้มากที่สุด

๓.๔ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดตัวเขื่อน เพื่อนำค่าไปใช้ในการออกแบบเขื่อนจะต้องทดสอบด้วยวิธี Triaxial เท่านั้น และดำเนินการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมชลประทานและมาตรฐาน ASTM จำนวนการทดสอบในแต่ละโซนของวัสดุตัวเขื่อนประเภทเดียวกันจะต้องไม่น้อยกว่า ๕ ชุดการทดสอบ ของแต่ละบ่อยืมดินที่จะนำมาใช้ในโซนดังกล่าว เช่น แกนดินเหนียวทึบน้ำ ใช้ดินจาก ๓ บ่อยืมดิน ดังนั้นจะต้องมีผลการทดสอบ Triaxial ๑๕ ชุดการทดสอบ เป็นต้น นอกจากนั้น ค่า Cohesion และ ค่า Friction angle ทั้ง Total และ Effective จะต้องมีความแปรปรวนไม่มากไปกว่าค่าที่กำหนด <u>(ซึ่งมาจากงานวิจัย-จะกำหนดในภายหลัง) ทั้งนี้หากค่าตัวแปรที่ได้มีความแปรปรวนสูงเกินค่าที่กำหนดจะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติม หรือ ควรพิจารณาในการปรับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ให้มากขึ้น ทั้งนี้ให้เป็นข้อพิจารณาของวิศวกรผู้ออกแบบ</u>

๓.๔.๑ ค่า Total cohesion และ Friction angle สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันในช่วงระหว่างก่อสร้างการถมตัวเขื่อนและหลังเสร็จสิ้นการก่อสร้างก่อนการเก็บกับน้ำให้เตรียมตัวอย่างตามข้อ ๓ และทดสอบด้วยวิธี Unconsolidated Undrained Triaxial Compression test โดยไม่ต้องทำการ Saturate ตัวอย่าง (UU-unsat)

๓.๔.๒ ค่า Total และ Effective ของ cohesion และ friction angle สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีการเก็บน้ำในระดับต่างๆรวมถึงกรณีการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ให้ดำเนินการทดสอบโดยวิธี Consolidated Undrained Triaxial Compression test (CU) โดยจะต้องทำการ Saturate ตัวอย่างให้ได้ตามที่มาตรฐาน ASTM กำหนด

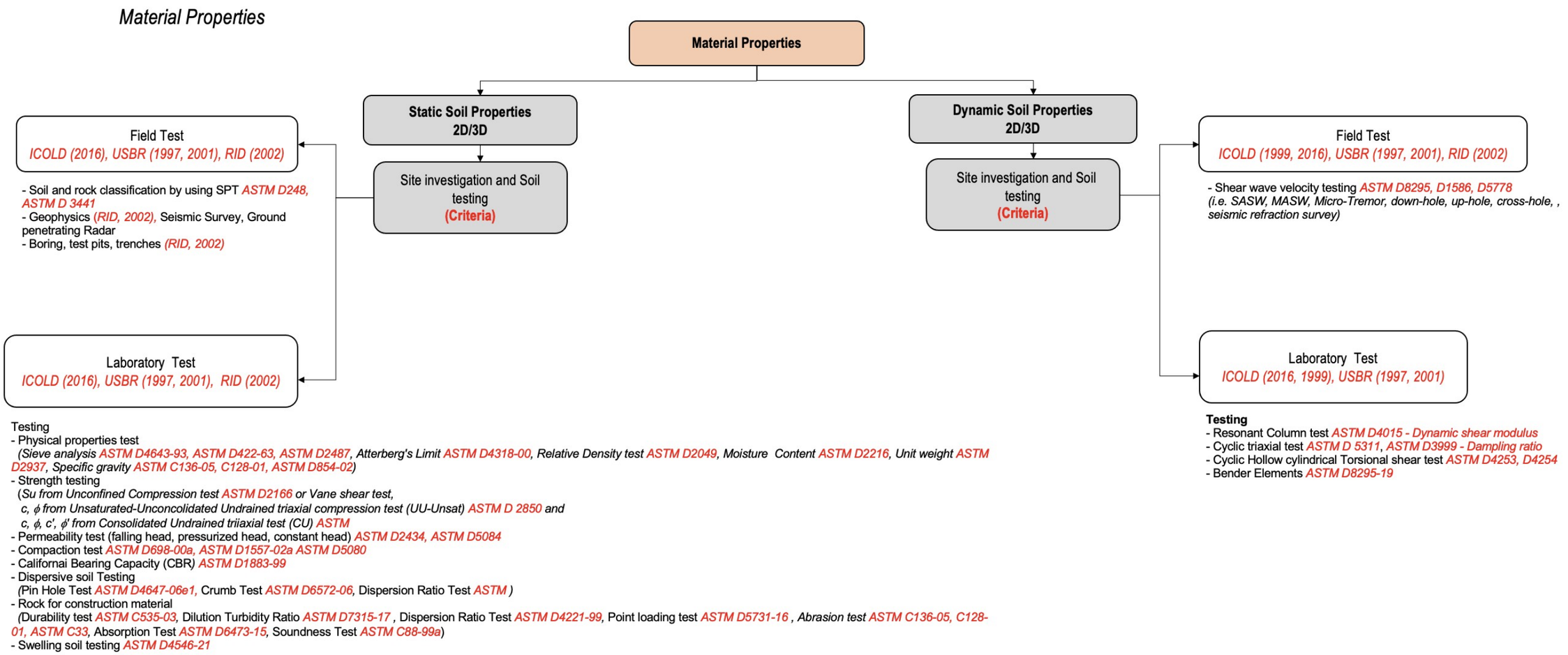
๓.๕ การทดสอบค่าความซึมน้ำของดิน ให้ดำเนินการด้วยวิธี Falling head หรือ Pressurized head test สำหรับดินทึบน้ำและ Constant head test สำหรับดินโปร่งน้ำ ตามมาตรฐานกรมชลประทาน และมาตรฐาน ASTM ด้วยจำนวนเช่นเดียวกับการทดสอบ Triaxial

๓.๖ สำหรับเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบัน สามารถดำเนินการทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นของตัวเขื่อนหรืออาคารประกอบเพื่อนำไปใช้พิจารณาในการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ โดยทำการทดสอบด้วยการวัดค่า Ambient vibration หรือ Active vibration เช่นทดสอบ Micro-tremor, Resonance test โดยใช้ active noise หรือ SASW (แต่ต้องได้ความลึกตลอดความสูงเขื่อน) เป็นต้น รวมถึงการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ในวัสดุตัวเขื่อนและฐานรากด้วยวิธี SASW หรือ MASW เป็นต้น

๓.๗ สำหรับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของดินที่ซับซ้อนอาจจะจำเป็นที่จะต้องทดสอบ Cyclic triaxial test, Cyclic direct simple shear หรือ Cyclic hollow cylinder tortional shear ของดินถมบดอัดเขื่อน เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับจากสร้างแบบจำลองที่ถูกต้อง รวมถึงการทดสอบเพื่อให้ได้ค่า Shear modulus at small strain ของวัสดุดินถมตัวเขื่อนด้วยวิธี Resonance column หรือ Bender element เป็นต้น

๓.๘ การกำหนดวิธีและรายละเอียดการทดสอบในข้อที่ ๓.๖ และ ๓.๗ จะต้องดำเนินการโดยผู้ออกแบบที่เชี่ยวชาญในด้านการวิเคราะห์แบบจำลองทางธรณีเทคนิคทางพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพท์ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้จริง

๓.๙ การสำรวจและทดสอบทั้งหมดในเกณฑ์มาตรฐานนี้จะต้องดำเนินการโดยกรมชลประทาน หน่วยงานราชการ มหาวิทยาลัย หรือบริษัทสำรวจและทดสอบ โดยทั้งหมดจะต้องมีศักยภาพที่เข้าเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมชลประทาน (จะเสนอข้อกำหนดในภายหลัง)



รูปที่ ๕ แสดงมาตรฐานการสำรวจและทดสอบที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุทางด้านสถิตย์ศาสตร์และพลศาสตร์

หมวดที่ ๔

การวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนและอาคารประกอบ เพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว

เกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบเขื่อนและอาคารประกอบเพื่อให้รองรับแรงกระทำแผ่นดินไหวจะได้อธิบายในส่วนนี้ ทั้งนี้การวิเคราะห์และออกแบบโดยพิจารณาแรงกระทำแผ่นดินไหวจะต้องเกี่ยวเนื่องกับการวิเคราะห์ในสภาวะการรับแรงปกติหรือในสภาวะสถิตย์ (Static condition) ดังนั้นเกณฑ์บางส่วนที่เกี่ยวเนื่องกันจะได้อธิบายไปพร้อมกัน โดยรายละเอียดจะแบ่งเป็น ๓ ส่วนดังนี้

๑. การออกแบบเขื่อนดินและหินถม (Earth and rockfill dam)

๒. การออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (Concrete gravity dam)

๓. การออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบ (Appurtenant structure)

ส่วนที่ ๑ การออกแบบเขื่อนดินและหินถม (Earth and rockfill dam)

รูปที่ ๖ แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเขื่อนดินและหินถม ได้แก่ เขื่อนดินถมเนื้อเดียว เขื่อนดินถมแบ่งส่วน และ เขื่อนหินถมแกนดินเหนียว เพื่อให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังต่อไปนี้

๑. การเลือกมิติของแบบจำลอง ได้แก่แบบจำลอง ๒ มิติ หรือ ๓ มิติ มีข้อพิจารณาที่เกี่ยวกับลักษณะของร่องเขา (Valley shape factors) ความชันของฐานยัน (Steepness of abutments) และ ความไม่สม่ำเสมอของสภาพธรณีวิทยาของฐานเขื่อน (Heterogeneous of dam foundation) โดยมีแนะนำไว้ใน ICOLD ฉบับที่ ๑๒๐ หรือ ๑๕๘ ซึ่ง ICOLD ได้ระบุว่าโดยทั่วไปการวิเคราะห์ในลักษณะ ๒ มิติ มีความเพียงพออยู่แล้ว เว้นแต่สภาพร่องเขาและหรือสภาพทางธรณีวิทยาของฐานรากและฐานยันเขื่อนจะเอื้อให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันและนำไปสู่การรั่วซึม กรณีนี้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ๓ มิติ ก็จะทำให้เห็นภาพได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามกรณีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลอง ๓ มิติเสมอไป แต่สามารถใช้แบบจำลองเทียบเท่า ๓ มิติได้ โดยการใช้แบบจำลอง ๒ มิติ หลายๆหน้าตัดก็สามารถดำเนินการได้ (Equivalent ๓D) (ICOLD, XXXX)

ส่วนการเลือกประเภทเขื่อนที่เกี่ยวเนื่องด้วยกับโดยการเลือกประเภทเขื่อนจากค่า Valley shape factor สามารถใช้ตามที่ข้อแนะนำของ วรากร (๒๕๔๖) เพื่อพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่นๆเช่นข้อมูลแหล่งยืมดิน สภาพธรณีวิทยาฐานราก ซึ่งมีข้อแนะนำอยู่ในมาตรฐานต่างๆของกรมชลประทาน (จะระบุต่อไป) อย่างไรก็ตาม ICOLD มีข้อแนะนำสำหรับเขื่อนที่จะต้องสร้างในพื้นที่แผ่นดินไหว เขื่อนหินถม เช่นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียว เขื่อน Concrete-faced rockfill (CFRD) รวมถึงเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก เป็นประเภทเขื่อนที่มีสถิติความปลอดภัยและมีพฤติกรรมที่ยอมรับได้เมื่อได้รับแรงกระทำแผ่นดินไหว

๒. การกำหนดระยะเผื่อล้น (Freeboard) ซึ่งต้องพิจารณาความสูงคลื่นน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ยกตัวขึ้นเหนือลาดชันด้านเหนือน้ำจากลมหอบ (Wind fetch) หรือจากแผ่นดินไหว (Seiches) โดยเลือกค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่งหรือพิจารณาใช้ค่าทั้งสองร่วมกันตามแนวทางปฏิบัติของกรมชลประทานที่ผ่านมา ทั้งนี้การคำนวณความสูงของคลื่นน้ำเนื่องจากแผ่นดินไหวอาจใช้สมการที่เหมาะสม เช่น สมการของ Seiichi Sato

(๑๙xx) หรือ Demirel and Aydin (๒๐๑๖) เป็นต้น ทั้งนี้ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินจากแผ่นดินไหว (Peak ground acceleration, PGA) ที่ใช้ในสมการดังกล่าวเป็นผลจากการวิเคราะห์ Seismic hazard analysis ในขั้นตอนที่ผ่านมา

๓. การวิเคราะห์การไหลซึม (Seepage analysis) ดำเนินการในลักษณะ ๒ หรือ ๓ มิติ ตามข้อพิจารณาในข้อที่ ๑. ทั้งนี้การวิเคราะห์จะเกี่ยวข้องทั้งตัวเขื่อน ฐานราก และ ฐานยัน ของเขื่อนดินถม หินถม หรือเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก รวมถึงอาคารประกอบเขื่อนที่เกี่ยวข้องเช่น อาคารระบายน้ำล้น เป็นต้น

๔. การวิเคราะห์ความมั่นของของลาดชันเขื่อนและฐานราก (Slope and foundation stability) ดำเนินการวิเคราะห์ความมั่นคงในสภาวะแรงกระทำสถิตย์ (Static analysis) ได้ทั้ง ๒ มิติและ ๓ มิติ ด้วยแบบจำลองสมดุลจำกัด (Limit equilibrium method, LEM) หรือ วิธีไฟไนอิลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยตรวจสอบระนาบการพิบัติของลาดชันแบบ Local และ Global และ ระนาบการพิบัติที่ผ่านสันเขื่อนที่จะทำให้เขื่อนแตกได้ (Dam breach) ตรวจสอบทั้งลาดชันด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ การดำเนินการวิเคราะห์ดำเนินการใน ๓ สภาวะได้แก่ หลังเสร็จสิ้นการก่อสร้าง (End of construction) ระดับน้ำเก็บกัก (Normal operation) หรือ Normal active pool และ ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid drawdown) ทั้งสภาวะปกติและสภาวะแผ่นดินไหว กรณีการวิเคราะห์แรงกระทำแผ่นดินไหวสามารถดำเนินการได้โดยวิธีเสมือนสถิตย์ (Pseudostatic analysis) ภายใต้แบบจำลองสมดุลจำกัด (LEM) ทั้งนี้ค่าความเร่งแผ่นดินไหวของพื้นดิน (PGA) ที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากผลของการวิเคราะห์ Seismic hazard analysis

ทั้งนี้การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันจะต้องพิจารณาองค์ประกอบของความเร่งแผ่นดินไหวใน ๒ รูปแบบได้แก่ การพิจารณาค่าความเร่งแผ่นดินไหวสูงสุดในแนวราบอย่างเดียว (Peak horizontal acceleration, PHA) และ การพิจารณาค่าความเร่งแผ่นดินไหวสูงสุดทั้งแนวดิ่งและแนวราบ (Peak vertical and horizontal acceleration, PHV และ PHA) โดยเลือกค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำที่สุดจากทั้งสองกรณีมาใช้ (Lower factor of safety) ทั้งนี้ค่าความเร่งของพื้นดินในแนวดิ่งสามารถใช้เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความเร่งในแนวราบ เว้นแต่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวอยู่ใกล้กับหัวงาน อาจจะพิจารณาใช้เท่ากัน ทั้งนี้ควรอ้างอิงงานศึกษาในเรื่องดังกล่าวที่ได้รับการยอมรับล่าสุด และพิจารณาใช้โดยผู้ออกแบบ

ค่า Seismic coefficient ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง (kh และ kv) สำหรับการวิเคราะห์ Pseudostatic ดังกล่าว จะใช้เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความเร่งสูงสุดหารด้วยค่าแรงโน้มถ่วง (kh = PHA/๒g) (kv = PHV/๒g) (Seed, ๑๙๗๙) ตารางที่ ๓ แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันและฐานรากด้วยวิธีสมดุลจำกัดดังที่ได้กล่าวมา โดยปรับปรุงจากมาตรฐานกรมชลประทาน (๒๕๔๕) และ ICOLD (๒๐๑๐)

๕. โดยทั่วไปการวิคราะห์ด้วยวิธีเสมือนสถิตย์ภายใต้เกณฑ์อัตราส่วนความปลอดภัยที่กำหนดนั้นเพียงพอต่อการออกแบบลาดตัวเขื่อนและระบบระบายน้ำภายในตัวเขื่อนเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยจะสามารถควบคุมการเกิดรอยแตกที่ไม่ปลอดภัยได้ (Seed, ๑๙๗๙) ทั้งนี้หากการที่ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเสมือนสถิตย์ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไม่ได้หมายความว่าเขื่อนจะไม่ปลอดภัยเสมอไปเนื่องด้วยสมมุติฐานในการวิเคราะห์เริ่มต้นเป็นไปโดย Conservative (สุทธิศักดิ์, ๒๕๕๐) หรือการออกแบบเพื่อที่จะให้ผ่านเกณฑ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่กำหนดเริ่มจะเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติทั้งด้านราคาและแหล่งวัสดุ ผู้ออกแบบ

สามารถใช้ทางเลือกในการวิเคราะห์ Dynamic response analysis เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความปลอดภัยขณะเกิดแผ่นดินไหวให้ชัดเจนขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลพฤติกรรมการเคลื่อนตัว ความเค้น ความเครียด และแรงดันน้ำขององค์ประกอบเขื่อนขณะและหลังการเกิดแผ่นดินไหว หรือการเสียรูปขององค์ประกอบต่างๆของเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหว (Seismic deformation analysis) ซึ่งอาจทำให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนมากขึ้นสำหรับการออกแบบองค์ประกอบต่างๆของตัวเขื่อนให้เกิดความปลอดภัย โดยจะไม่ได้พิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเป็นหลักอีกต่อไป แต่จะพิจารณาจากพฤติกรรมความปลอดภัยในรูปแบบการพิบัติต่างๆซึ่งจะได้กล่าวในส่วนถัดไป

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ดังกล่าวจะมีความซับซ้อนมากขึ้นและใช้ทรัพยากรมากกว่าการวิเคราะห์ปกติมาก และต้องดำเนินการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญที่มีองค์ความรู้ทั้งด้านแบบจำลองทางพลศาสตร์และด้านความปลอดภัยเขื่อนร่วมกัน อีกทั้งบางกรณีหากตัวแปรนำเข้า (Input parameters) ไม่ได้ได้มาอย่างถูกต้อง ก็จะทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้โดยยากที่จะตรวจสอบ (Verify) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ประเทศไทยที่แผ่นดินไหวไม่ได้เกิดถี่และแรงพอที่จะทำให้ได้ข้อมูลพฤติกรรมเขื่อนมาใช้เพื่อทำการตรวจสอบแบบจำลองดังกล่าว ดังนั้น USBR (๒๐๑๕) จึงได้ให้ข้อแนะนำถึงกรณีที่ไม่จำเป็นต้องดำเนินการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์ดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

๑. วัสดุของเขื่อนและฐานรากไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาพเหลว (Liquefaction) และไม่มีดินเหนียวที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitive Clays)

๒. เขื่อนถูกสร้างขึ้นโดยเป็นไปตามมาตรฐานและบดอัดจนมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดไม่น้อยกว่า ๙๕ เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรือมีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่า ๗๕ เปอร์เซ็นต์

๓. ความลาดชันของเขื่อนไม่ชันเกินกว่า ๒.๕:๑ (แนวราบ:แนวดิ่ง) และ/หรือมีเส้นระดับน้ำ (Phreatic Line) อยู่ต่ำกว่าลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

๔. ค่าความเร่งแนวราบสูงสุด (Peak Horizontal Acceleration, PHA) ที่ฐานของเขื่อนไม่เกิน ๐.๓๕g

๕. ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (FS) ในสภาวะสถิตสำหรับทุกวงพิบัติที่อาจทำให้ระดับสันเขื่อนลดลง ต้องมากกว่า ๑.๕ โดยใช้ค่าความดันน้ำในตัวเขื่อนที่กรณีก่อนเกิดแผ่นดินไหวที่คาดการณ์ (โดยทั่วไปคือระดับน้ำอ่างเก็บน้ำอยู่ในระดับสูงสุด รนส. หรือ ระดับน้ำสูงสุดที่เคยเก็บกัก)

๖. ระยะเผื่อล้นขั้นต่ำ (Minimum Freeboard) ต้องไม่น้อยกว่า ๓ ถึง ๕ เปอร์เซ็นต์ของความสูงของเขื่อน และต้องไม่น้อยกว่า ๓ ฟุต (ระยะเผื่อล้นที่จำเป็นเพื่อรองรับคลื่นในอ่างเก็บน้ำจากแรงแผ่นดินไหวหรือการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่ตัวเขื่อนหรือภายในอ่างเก็บน้ำ เป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาแยกต่างหาก)

๗. ไม่มีโครงสร้างประกอบที่อาจได้รับความเสียหายจากการเคลื่อนตัวของตัวเขื่อน รวมถึงโครงสร้างที่อาจก่อให้เกิดการกัดเซาะภายในหรือรูปแบบการพิบัติแบบอื่น ๆ

ทั้งนี้หากมีความจำเป็นและมีความพร้อมเพียงพอและไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ USBR (๒๐๑๕) ก็สามารถดำเนินการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์หรือการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทาง

พลศาสตร์ดังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ในรูปที่ ๗ ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังต่อไปนี้

๑. หากเขื่อนไม่ได้เป็นไปตามข้อแนะนำของ USBR (๒๐๑๕) จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การเสียรูปจากแรงกระทำแผ่นดินไหว (Seismic deformation analysis) โดยใช้วิธี การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (Dynamic analysis) การวิเคราะห์นี้จะเริ่มต้นด้วยการ จำลองหน่วยแรงในสภาวะสถิต (Initial Stress Analysis) ซึ่งจะพิจารณา ข้อมูลลำดับขั้นของการก่อสร้างเขื่อน (Staged construction data) นอกจากนี้การปรับเทียบผลการวิเคราะห์เขื่อน จะต้องดำเนินการตาม ประวัติการก่อสร้างที่ได้มีการบันทึกไว้ (Instrumentations data) เช่น เครื่องมือตรวจวัดความดันน้ำ (Piezometer) เครื่องมือตรวจวัดการทรุดตัว (Hydrostatic settlement) เป็นต้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของเขื่อนมากที่สุด

๒. การเลือกใช้ แบบจำลอง ๒ มิติ (๒D) หรือ แบบจำลอง ๓ มิติ (๓D) ในการวิเคราะห์แผ่นดินไหวสำหรับเขื่อนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของร่องเขา และ/หรือ สภาพธรณีวิทยาของฐานรากและฐานยันเขื่อนเป็นสำคัญ เนื่องจาก แรงกระทำจากแผ่นดินไหว สามารถส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการรั่วซึม หรือการล้นข้ามสันเขื่อนได้ ในกรณีที่ต้องการผลลัพธ์ที่แสดงภาพรวมของการเสียรูปและการทรุดตัว แบบจำลอง ๓ มิติจะให้ความแม่นยำและรายละเอียดที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วย แบบจำลอง ๒ มิติหลายหน้าตัด (Equivalent ๓D) ก็สามารถดำเนินการได้เช่นกัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถเห็นภาพของการทรุดตัวที่แตกต่างกันและการเคลื่อนตัวตามแนวสันเขื่อนได้

๓. สำหรับการวิเคราะห์สภาวะสถิตย์เริ่มต้น (Initial stress analysis) ของเขื่อนและฐานราก เราจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุหลัก ๆ ๒ ส่วน ได้แก่ ๑) คุณสมบัติด้านการไหลซึม (Permeability characteristics) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงความสามารถของดินในการให้น้ำซึมผ่าน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมการรั่วซึมของน้ำในเขื่อน ๒) คุณสมบัติด้านกำลัง (Strength characteristics) เป็นการบ่งชี้ถึงความสามารถของดินในการรับน้ำหนักและแรงเฉือน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้าง คุณสมบัติเหล่านี้สามารถหาได้จากการ ทดสอบในสนาม (In-situ testing) หรือ ทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory testing) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ สิ่งสำคัญคือ จำนวนผลการทดสอบที่ได้มานั้นจะต้องมากเพียงพอ เพื่อให้สามารถเป็นตัวแทนของคุณสมบัติของดินในแบบจำลองได้อย่างเหมาะสมและน่าเชื่อถือ การมีข้อมูลที่เพียงพอจะช่วยให้ลดความไม่แน่นอนในการออกแบบ

๔. เมื่อได้ คุณสมบัติของวัสดุจากการทดสอบ แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเลือก แบบจำลองวัสดุ (Material model) ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สภาวะสถิตย์เริ่มต้น (Initial stress analysis) ของเขื่อนและฐานราก การเลือกแบบจำลองควรคำนึงถึงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-strain ที่เป็นตัวแทนของวัสดุชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแล้ว แบบจำลอง Mohr-Coulomb ซึ่งเป็นแบบจำลองพฤติกรรมดิน (Soil constitutive model) แบบ Elastic-perfectly plastic มักถูกนำมาใช้กับตัวเขื่อนและชั้นหินฐานราก เนื่องจากสามารถอธิบายพฤติกรรมของดินและหินได้อย่างเหมาะสมในสภาวะสถิตย์เริ่มต้น

๕. ในการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์ สามารถเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นแบบ เชิงเส้น (Linear), เชิงเส้นสมมูล (Equivalent linear), หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งล้วนสามารถทำได้ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-element) หรือ ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

(Finite-difference) เพื่อจำลองการเสียรูปถาวรของโครงสร้างดิน การวิเคราะห์เหล่านี้ยังรวมถึงการพิจารณาผลกระทบจากการเกิดแรงดันน้ำในช่องว่างดินส่วนเกิน (Excess pore pressure) ในดินอิ่มตัวด้วย โดยส่วนใหญ่แล้ว การวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์จะดำเนินการในรูปแบบของ โดเมนเวลา (Time domain) ซึ่งช่วยให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มากมายที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการวิเคราะห์ประเภทนี้ เช่น OPENSEES, PLAXIS, MIDAS และ FLAC เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เหล่านี้มักถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมย้อนกลับ (Back analysis) เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของเขื่อนที่เคยได้รับแรงแผ่นดินไหวมาแล้วเท่านั้น ดังนั้น ไม่ควรถือว่าการวิเคราะห์เหล่านี้เป็นการคาดการณ์ผลที่แน่นอน แต่มีประโยชน์ในการแสดง แนวโน้มของการเสียรูปและพฤติกรรมอื่นๆ ของโครงสร้างดิน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพิจารณาในการสร้างเขื่อนใหม่หรือการปรับปรุงเขื่อนที่มีอยู่

๖. คุณสมบัติวัสดุทางพลศาสตร์ (Dynamic material properties) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหว เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะ Stress-Strain ที่เกิดขึ้น การเลือกวิธีการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นแบบ เชิงเส้น (Linear), เชิงเส้นสมมูล (Equivalent linear), หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) จะส่งผลต่อการพิจารณาคุณสมบัติเหล่านี้ โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติวัสดุทางพลศาสตร์ที่มักถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย: ค่า Shear Modulus Reduction (G/Gmax) เป็นค่าที่แสดงถึงการลดลงของโมดูลัสเฉือนของวัสดุเมื่อความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น; Shear Modulus (Gmax) คือโมดูลัสเฉือนสูงสุดของวัสดุที่ความเครียดต่ำมาก; Damping Ratio (อัตราส่วนการหน่วง) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการลดทอนพลังงานจากการสั่นสะเทือน การเลือกใช้คุณสมบัติเหล่านี้อย่างถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้การการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์มีความแม่นยำ ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์ได้ระบุไว้ในหมวดที่ ๒ ในเกณฑ์มาตรฐานนี้ นอกจากนั้นการกำหนดวิธีการทดสอบจะต้องดำเนินการโดยผู้วิเคราะห์และออกแบบทางพลศาสตร์

๗. คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Input ground motion) สำหรับการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีทางพลศาสตร์นั้น ตามคำแนะนำของ USBR (๒๐๑๕) ควรเตรียมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว (Input ground motion) อย่างน้อย ๕ ชุด สำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้ง (แต่ละชุดประกอบด้วยองค์ประกอบในแนวราบ ๒ ชุด และแนวดิ่ง ๑ ชุด) สำหรับการวิเคราะห์แบบ สองมิติ (Two-dimensional analysis) วิธีการนี้จะสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ของพื้นดินได้ถึง ๒๐ รูปแบบ โดยแต่ละแบบจะมาจากองค์ประกอบในแนวราบ ๒ ชุด จากแผ่นดินไหว ๕ ครั้ง และองค์ประกอบในแนวราบแต่ละชุดควรถูกนำมาใช้ทั้งในทิศทาง เหนือน้ำ-ท้ายน้ำ และ ท้ายน้ำ-เหนือน้ำ ของเขื่อน (การเปลี่ยนขั้วของคลื่น) จาก ๒๐ รูปแบบการรวมกันนี้ สามารถคัดเลือกบันทึกข้อมูล ๒ ถึง ๔ ชุด ที่สามารถแสดงช่วงผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากการวิเคราะห์ได้อย่างเหมาะสมที่สุด

๘. การนำคลื่นแผ่นดินไหว (Input ground motions) ไปใช้ในแบบจำลอง นั้นจำเป็นที่จะต้องมั่นใจว่า ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวดังกล่าว เหมาะสมกับตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของการสั่นไหวที่ฐานแบบจำลอง โดยปกติแล้ว บันทึกของแผ่นดินไหวในอดีตมักจะให้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว ณ ตำแหน่งชั้นหินแข็ง (Bedrock outcroppings) หรือที่ผิวดินแข็ง ซึ่งในการวิเคราะห์การตอบสนองและการเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-element method) การเคลื่อนที่ของพื้นดินมักจะถูกป้อนที่ฐานของแบบจำลอง ทำให้ต้องมีการปรับแก้หรือเรียกว่า “Deconvolution” เพื่อให้ได้ ประวัติเวลาความเร่ง (Acceleration time history) ที่คาด

ว่าจะเกิดขึ้น ณ ความลึกที่ต้องการวิเคราะห์ โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการนี้จะเริ่มต้นจากบันทึกที่ได้จากผิวชั้นหิน แล้วจึงใช้ซอฟแวร์วิเคราะห์การตอบสนองอย่างง่าย เช่น SHAKE เพื่อปรับแก้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวให้เหมาะสมกับความลึกของฐานแบบจำลอง

FEMA (๒๐๐๕) นิยามของชั้นหินแข็งสำหรับเป็นฐานแบบจำลอง คือ ชั้นหินแข็ง (Bedrock outcroppings) ที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_S) ≥ ๗๖๐ เมตร/วินาที ซึ่งอยู่ใต้ชั้นดิน หากชั้นหินแข็ง ณ บริเวณนั้นอยู่ลึกลงไปมากเกินไปจากฐานเขื่อน อาจกำหนดใช้ “ชั้นดินแข็ง” เป็นฐานของแบบจำลอง ซึ่งต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้:

- ค่า V_{S30} ของดินหรือหินที่อยู่ใต้ระดับ “ชั้นดินแข็ง” ต้องมีค่า ≥ ๔๔๐ เมตร/วินาที

- ค่าเฉลี่ย V_S สำหรับชั้นดินใดๆ ที่มีความหนา > ๑.๕ เมตร ซึ่งอยู่ใต้ระดับ “ชั้นดินแข็ง” จะต้องไม่น้อยกว่า ๓๖๐ เมตร/วินาที และ

- “ชั้นดินแข็ง” ต้องมีความลึกมากกว่า ๓๐ เมตร จากระดับผิวดิน

๙. หลังจากการวิเคราะห์ การเสียรูปทางพลศาสตร์ของเขื่อน แล้ว ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการประเมิน ความมั่นคงของเขื่อน ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้:

• ศักยภาพการเกิดการล้นข้ามสันเขื่อน (Overtopping): การทรุดตัวของสันเขื่อน (Crest settlement) ไม่ควรเกิน ๕๐% ของ ระยะ Freeboard ที่ออกแบบไว้ (ICOLD, ๒๐๑๖) และค่าการทรุดตัวของสันเขื่อนจากแบบจำลองควรจะต้องนำไปเทียบกับฐานข้อมูลการทรุดตัวของเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ได้รับการเผยแพร่และเป็นที่ยอมรับ เช่น Swaisgood (๒๐๐๓)

- เสถียรภาพของลาดเขื่อนหลังเกิดแผ่นดินไหว (Post-earthquake sliding stability) อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพเชิงลาดเขื่อน (Factors of safety) ควรมีค่าเกิน ๑.๐ ซึ่งคำนวณโดยใช้กำลังรับแรงเฉือนของดินหลังเกิดแผ่นดินไหว หรือ Residual Shear Strengths สำหรับดินมีโอกาสเกิด Liquefaction (FEMA, ๒๐๐๕)

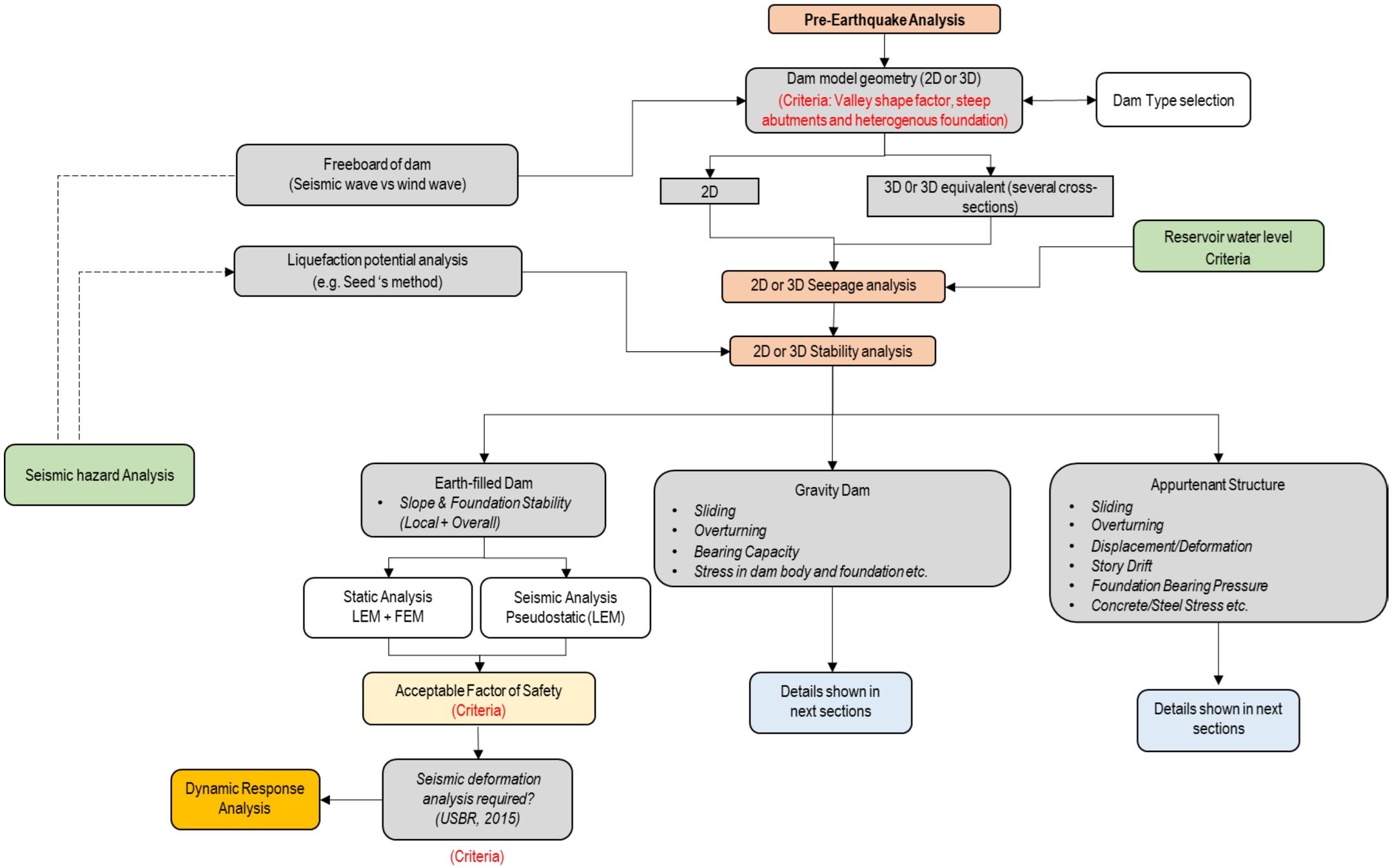
- การเสียรูปของวัสดุชั้นกรอง (Filter) จะต้องยังเหลือความกว้างของชั้นกรองที่ใช้งานได้ไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้างเดิม (Wieland, ๒๐๑๔) อย่างไรก็ตาม ในกรณีจะต้องทำการวิเคราะห์การไหลซึมด้วยความหนาของชั้นกรองที่เหลือและยังจะต้องได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเขื่อนไม่น้อยกว่า ๑.๓

ตารางที่ ๓ เกณฑ์การกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ใช้สำหรับออกแบบเขื่อน

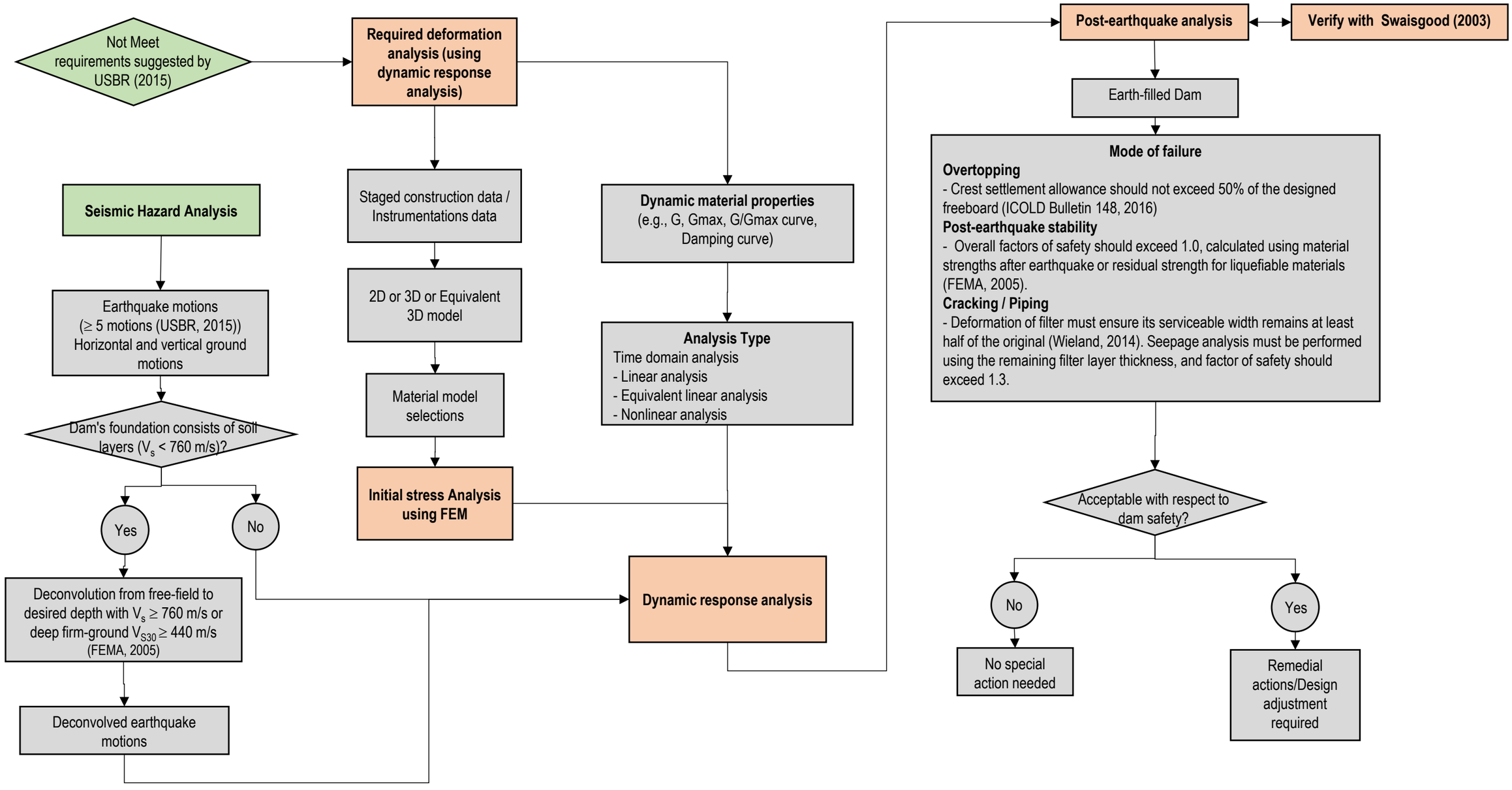
Operation Condition	Shear Test	Analysis	Min. Allowable F.S.	
			Statics	Seismic
เขื่อนเพิ่งสร้างเสร็จ (End of Construction)	UU (Unsat)	Total Stress	1.30[B]	1.10[B]
ระหว่างเก็บกักน้ำ (Normal Operation)	CU	Effective Stress	1.50[A]	1.10[B]
ระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown)	CU	Total/Effective Stress	1.25[A]	1.00[A]

ที่มา : ดัดแปลงจาก (A) เกณฑ์กำหนดของกรมชลประทาน, 2545

(B) ICOLD,2010 Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation



รูปที่ ๖ ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเขื่อนดินและหินถมเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหว



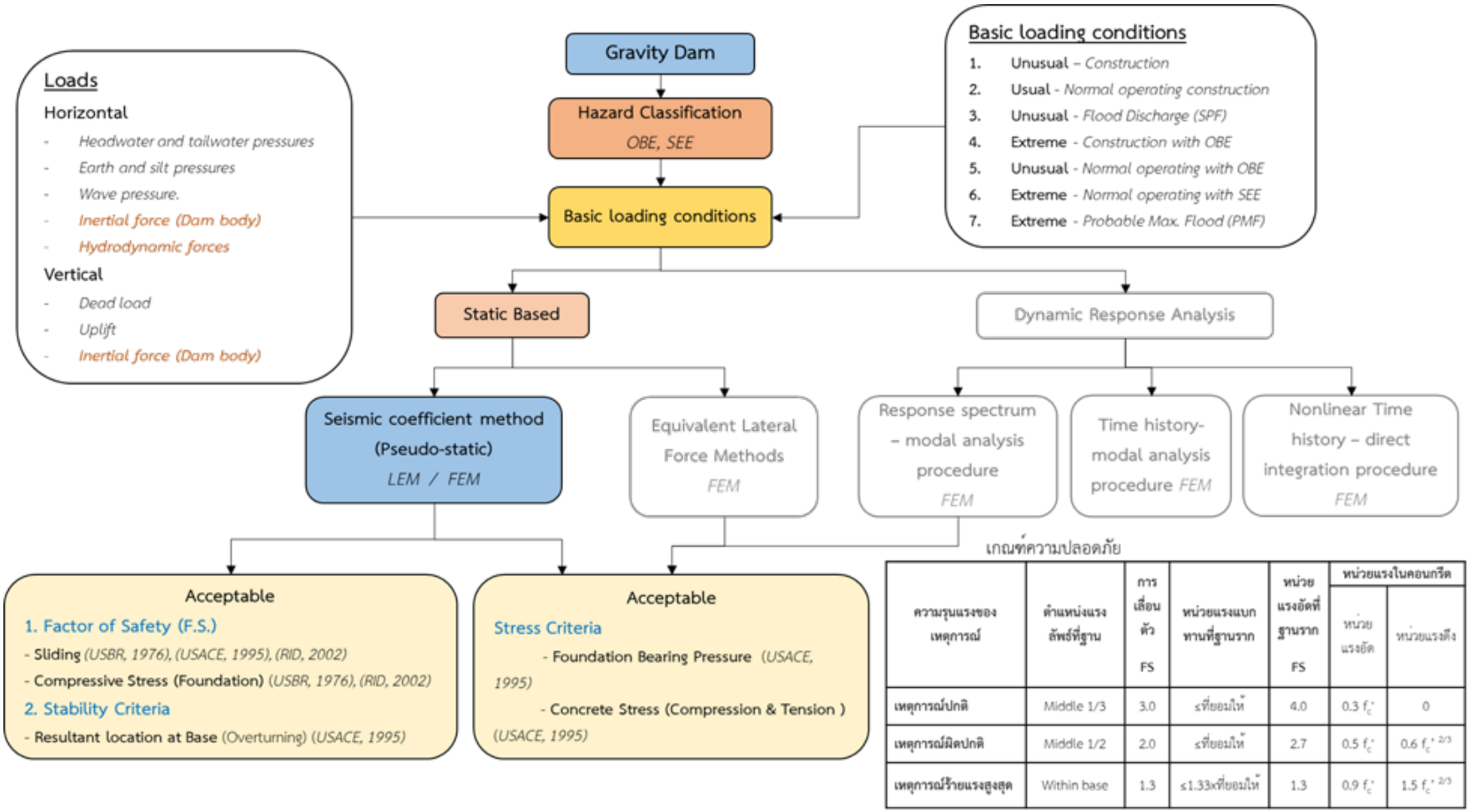
รูปที่ ๗ ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเขื่อนดินและหินถมเพื่อรับแรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยวิธีทางพลศาสตร์

ส่วนที่ ๒ การออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนัก (Concrete gravity dam)

รูปที่ ๘ แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนักให้รับแรงแผ่นดินไหว ทั้งนี้ชนิดและรูปแบบของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักประกอบด้วย

- เขื่อนคอนกรีต (Conventional concrete dams)
- เขื่อนคอนกรีตบดอัด (Roller-compacted concrete (RCC) gravity dams)
    - High - paste Content RCC. (Cementitious Content $\geq$๑๕๐ kg/m.๓)
    - Medium - paste RCC dams (Cementitious Content ๑๐๐ - ๑๔๙ kg/m.๓)
    - RCD dams (Low - Cementitious Content)
    - Lean RDD dam (Cementitious Content $\leq$ ๙๙ kg/m.๓)
    - Hard - fill dams

ทั้งนี้รายละเอียดของการวิเคราะห์เพื่อออกแบบมีดังนี้



เกณฑ์ความปลอดภัย

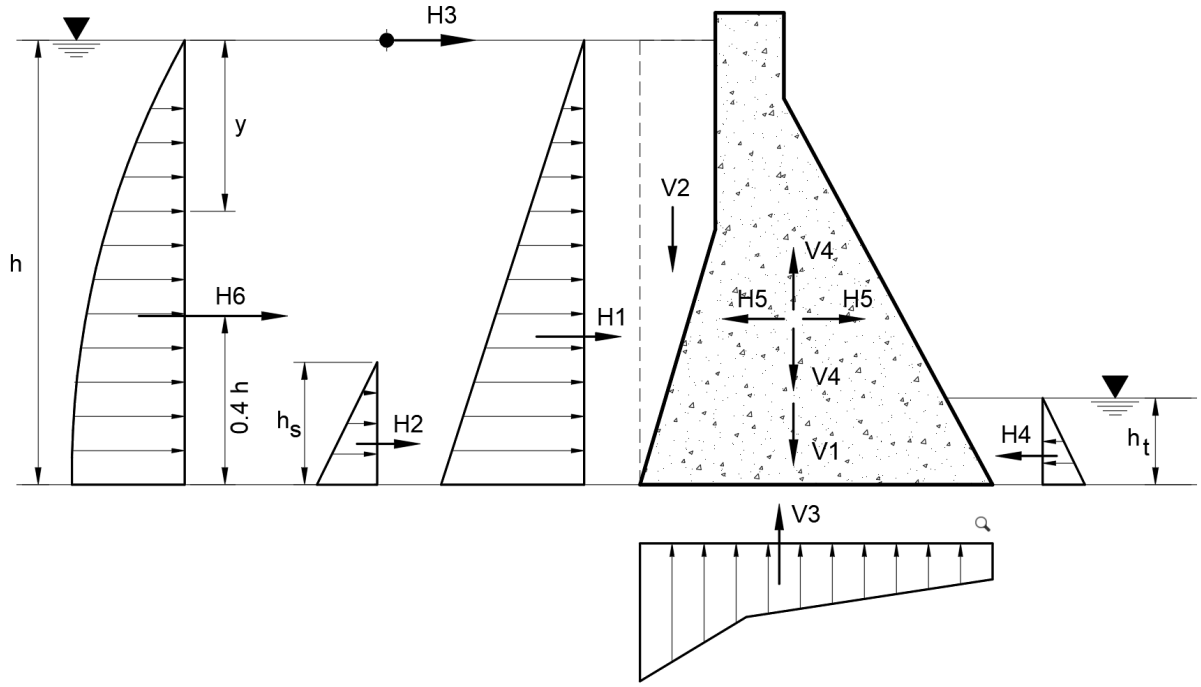
ความรุนแรงของเหตุการณ์	ตำแหน่งแรงลัพธ์ที่ฐาน	การเลื่อนตัว FS	หน่วยแรงแบกทานที่ฐานราก	หน่วยแรงอัดที่ฐานราก FS	หน่วยแรงในคอนกรีต	
					หน่วยแรงอัด	หน่วยแรงดึง
เหตุการณ์ปกติ	Middle 1/3	3.0	≤ที่ยอมให้	4.0	0.3 f_c'	0
เหตุการณ์ผิดปกติ	Middle 1/2	2.0	≤ที่ยอมให้	2.7	0.5 f_c'	0.6 $f_c'^{2/3}$
เหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด	Within base	1.3	≤1.33xที่ยอมให้	1.3	0.9 f_c'	1.5 $f_c'^{2/3}$

รูปที่ ๘ ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อออกแบบเขื่อนคอนกรีตถ่วงน้ำหนักให้รับแรงแผ่นดินไหว

๒.๑ ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อออกแบบ

๒.๑.๑ ข้อมูลแรงกระทำแผ่นดินไหวแผ่นดินไหว ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ Seismic hazard analysis

๒.๑.๒ น้ำหนักและแรงกระทำต่อตัวเขื่อน แรงกระทำที่กระทำกับตัวเขื่อน มีทั้งแรงภายนอกและแรงเนื่องจากน้ำหนักตัวเขื่อนเอง สามารถแบ่งออกได้เป็น ๒ แบบ คือแรงกระทำในแนวราบ และแรงกระทำในแนวดิ่ง โดยแรงกระทำที่เกิดจากแผ่นดินไหวใช้วิธีค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว (Seismic coefficient method, USACE ๑๙๙๕) แสดงในรูปที่ ๙



รูปที่ ๙ น้ำหนักและแรงที่กระทำต่อตัวเขื่อนคอนกรีต

ก) แรงกระทำในแนวราบ

H1 แรงดันน้ำด้านรวมหน้าเขื่อน จะผันแปรตามความลึกของระดับน้ำ

$$H_1 = \frac{1}{2}\gamma_w h^2$$

โดย gw = หน่วยน้ำหนักของน้ำ
h = ความลึกของน้ำด้านเหนือน้ำ (ม.)

H2 แรงดันรวมเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

H3 แรงกระแทกที่เกิดจากคลื่นกระทำด้านหน้าเขื่อนรวมทั้งแรงที่เกิดจากแผ่นดินถล่มลงอ่างเก็บน้ำทำให้เกิดคลื่น

H4 แรงดันน้ำรวมด้านท้ายเขื่อน

H5 Inertial force ในแนวราบของมวลคอนกรีตของเขื่อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหว (USACE, ๑๙๙๕)

$$H_5 = Ma_x = \frac{W}{g} k_h g = Wk_h$$

โดย M = มวลของเขื่อน
a_x = ความเร่งในแนวราบที่เกิดจากแผ่นดินไหว (Horizontal earthquake acceleration)
W = น้ำหนักของเขื่อน
g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
k_h = สัมประสิทธิ์แรงกระทำแผ่นดินไหวในแนวราบ (Horizontal seismic coefficient)

H6 แรงดันน้ำรวมเนื่องจากแผ่นดินไหว (hydrodynamic forces)

$$H_6 = \frac{2}{3} Ce\ (k_h)\ y\ (\sqrt{hy})$$

โดย Ce = สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำและคาบการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (USACE, ๑๙๙๕)
y = ระยะจากผิวน้ำด้านเหนือน้ำจนถึงระดับที่พิจารณา

ข) แรงกระทำในแนวดิ่ง

V1 น้ำหนักของเขื่อนคอนกรีตรวมทั้งอาคารประกอบบนตัวเขื่อน

V2 น้ำหนักกระทำที่อยู่บนลาดหน้าเขื่อน ได้แก่น้ำหนักน้ำและน้ำหนักของตะกอนที่ทับถม

V3 แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน (USACE, ๑๙๙๕)

V4 Inertial force ในแนวดิ่งของมวลคอนกรีตของเขื่อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหว (USACE, ๑๙๙๕)

๒.๒ การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)

๒.๒.๑ การพิจารณาเสถียรภาพ

ข้อกำหนดพื้นฐานด้านเสถียรภาพของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับทุกสภาวะของแรงกระทำ ได้แก่

ก) ตัวเขื่อนจะต้องสามารถต้านทานการเลื่อนตัว (Sliding) ได้อย่างปลอดภัย ทุกๆ ระดับตามแนวราบหรือใกล้เคียงกับแนวราบ ทั้งในตัวโครงสร้างเขื่อน ตามแนวรอยต่อตามแนวฐานราก หรือชั้นฐานรากที่รองรับตัวเขื่อน

ข) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนและฐานรากจะต้องไม่เกินเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้

ค) ตัวเขื่อนจะต้องสามารถต้านทานการพลิกคว่ำ (Overturning) ได้อย่างปลอดภัย ทุกๆระดับตามแนวราบ ทั้งในตัวโครงสร้างเขื่อน ตามแนวรอยต่อตามแนวฐานราก หรือชั้นฐานรากที่รองรับตัวเขื่อน

ตำแหน่งภายในตัวเขื่อนที่ควรตรวจสอบเสถียรภาพได้แก่ ตำแหน่งที่หน้าตัดเขื่อนมีการเปลี่ยนแปลงความสูง บริเวณที่มีการกระจุกตัวของแรงกระทำ (High concentrated loads) บริเวณอุโมงค์ทางเดินหรือช่องเปิดขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างเขื่อน และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงลาดชันที่ด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ

๒.๒.๒ การคิดน้ำหนักรวมในกรณีต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาออกแบบ (Basic Loading Conditions)

เนื่องจากแรงกระทำที่กล่าวถึงทั้งหมดในข้างต้นไม่ได้กระทำกับตัวเขื่อนพร้อมกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ความมั่นคงของตัวเขื่อน จึงจำเป็นต้องแยกกรณีที่แรงกระทำจะสามารถกระทำร่วมกันได้ตามระดับความรุนแรงของเหตุการณ์การที่เป็นจริง ระดับความรุนแรงของเหตุการณ์สามารถแบ่งออกได้เป็น ๓ ระดับ คือ เหตุการณ์ปกติ (Usual) เหตุการณ์ผิดปกติ (Unusual) และเหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด (Extreme) การคิดน้ำหนักรวมในกรณีต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาออกแบบสามารถแบ่งออกได้ ๗ กรณี (USACE, ๑๙๙๕) ดังนี้

ก) *เหตุการณ์ผิดปกติ* เมื่อเขื่อนสร้างเสร็จ (Construction)
- เขื่อนสร้างเสร็จ ยังไม่มีการกักเก็บน้ำ
- ไม่มีแรงดันน้ำด้านหน้าเขื่อนและด้านท้ายเขื่อน

ข) *เหตุการณ์ปกติ* เขื่อนดำเนินงานปกติ (normal operating)
- ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนอยู่ที่ระดับน้ำเก็บกัก
- ระดับน้ำด้านท้ายเขื่อนอยู่ที่ระดับต่ำสุด
- แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน
- แรงดันเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

ค) *เหตุการณ์ผิดปกติ* (Flood Discharge)
- ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนอยู่ที่ระดับน้ำสูงสุด (Pool at standard project flood (SPF))
- ระดับน้ำด้านท้ายเขื่อนอยู่ที่ระดับสูงสุด

- แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน
- แรงดันเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

ง) *เหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด* เขื่อนสร้างเสร็จยังไม่มีการกักเก็บน้ำ และรับแรงแผ่นดินไหว OBE

- Operating basis earthquake (OBE)
- ไม่มีแรงดันน้ำด้านหน้าเขื่อนและด้านท้ายเขื่อน

จ) *เหตุการณ์ผิดปกติ* เขื่อนดำเนินงานปกติ และรับแรงแผ่นดินไหว OBE

- Operating basis earthquake (OBE)
- ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนอยู่ที่ระดับน้ำเก็บกัก
- ระดับน้ำด้านท้ายเขื่อนอยู่ที่ระดับต่ำสุด
- แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน
- แรงดันเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

ฉ) *เหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด* เขื่อนดำเนินงานปกติ และรับแรงแผ่นดินไหว SEE / MCE

- Safety Evaluation Earthquake (SEE) / Maximum credible earthquake (MCE)
- ระดับน้ำด้านหน้าเขื่อนอยู่ที่ระดับน้ำเก็บกัก
- ระดับน้ำด้านท้ายเขื่อนอยู่ที่ระดับต่ำสุด
- แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน
- แรงดันเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

ข) *เหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด* probable maximum flood

- Pool at probable maximum flood (PMF)
- ระดับน้ำด้านท้ายเขื่อนอยู่ที่ระดับสูงสุด (flood)
- แรงดันขึ้นของน้ำใต้ฐานเขื่อน
- แรงดันเนื่องจากการทับถมของตะกอนบริเวณหน้าเขื่อน

๒.๒.๓ เกณฑ์ความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก

เกณฑ์ความมปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักแสดงในตารางที่ ๔ โดยแบ่งตามระดับความรุนแรงของเหตุการณ์และเงื่อนไขการรวมแรงกระทำต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งแรงลัพธ์ที่ฐานและเสถียรภาพการเลื่อนตัวของเขื่อนในกรณีที่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวควรใช้วิธีค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว (Seismic coefficient method, USACE ๑๙๙๕) ทั้งนี้เกณฑ์ดังกล่าวได้พิจารณาจากเกณฑ์ข้อกำหนดจาก USBR (๑๙๗๖), USACE (๑๙๙๕) และ กรมชลประทาน (๒๕๔๕)

ตารางที่ ๔ เกณฑ์ความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก

ความรุนแรงของเหตุการณ์	ตำแหน่งแรงลัพธ์ที่ฐาน	การเลื่อนตัว FS	หน่วยแรงแบกทานที่ฐานราก	หน่วยแรงอัดที่ฐานราก FS	หน่วยแรงในคอนกรีต	
					หน่วยแรงอัด	หน่วยแรงดึง
เหตุการณ์ปกติ	Middle ๑/๓	๓.๐	≤ที่ยอมให้	๔.๐	๐.๓ f_c'	๐
เหตุการณ์ผิดปกติ	Middle ๑/๒	๒.๐	≤ที่ยอมให้	๒.๗	๐.๕ f_c'	๐.๖ $f_c'^{\,๒/๓}$
เหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด	Within base	๑.๓	≤๑.๓๓x ที่ยอมให้	๑.๓	๐.๙ f_c'	๑.๕ $f_c'^{\,๒/๓}$

๒.๒.๔ การพลิกคว่ำของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก (Overturning)

การพิจารณาการพลิกคว่ำของตัวเขื่อน สามารถตรวจสอบได้จากตำแหน่งของแรงลัพธ์ (Resultant location) บนระนาบที่พิจารณา (USACE, ๑๙๙๕) ตำแหน่งของแรงลัพธ์สามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น จากผลรวมของโมเมนต์รอบจุดหมุนด้านท้ายเขื่อนหารด้วยผลรวมของแรงในแนวตั้งทั้งหมด จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method) หรือจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\text{Resultant location} = \frac{\sum \text{M}}{\sum \text{V}}$$

หากตำแหน่งของแรงลัพธ์บนระนาบแนวนอนใดๆ อยู่ภายนอก Middle third จะทำให้มีแรงดึงเกิดขึ้นบนระนาบที่พิจารณา สำหรับสภาวะที่แรงกระทำเป็นเหตุการณ์ปกติ ตำแหน่งของแรงลัพธ์จะต้องอยู่ภายใน Middle third ของฐาน เพื่อไม่ให้มีแรงดึงเกิดขึ้น สำหรับสภาวะที่แรงกระทำเป็นเหตุการณ์ผิดปกติ ตำแหน่งของแรงลัพธ์จะต้องอยู่ภายใน Middle half ของฐาน และสำหรับสภาวะที่แรงกระทำเป็นเหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด ตำแหน่งของแรงลัพธ์จะต้องอยู่ภายในฐาน

๒.๒.๕ การวิเคราะห์การเลื่อนตัวของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก (Sliding)

เกณฑ์ความปลอดภัย (FS) ต่อการเลื่อนตัว เป็นเกณฑ์กำหนดความมั่นคงของตัวเขื่อนต่อการเลื่อนตัว ค่าของแรงต้านทานการเลื่อนตัวต่อแรงกระทำที่ทำให้เกิดการเลื่อนตัวต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ระนาบของการเลื่อนตัวที่ต้องพิจารณาได้แก่ ระนาบรอยต่อระหว่างตัวเขื่อนกับฐานราก ระนาบในชั้นฐานราก ระนาบรอยต่อทุกระนาบภายในโครงสร้างเขื่อน การตรวจสอบความมั่นคงต่อการเลื่อนตัวของเขื่อน สามารถหาได้จากสมการที่อ้างอิงจาก USACE (๑๙๙๕) ดังนี้

$$FS = \frac{\text{T}_F}{\text{T}} = \frac{(N \tan\emptyset + CA)}{T}$$

โดย FS = อัตราส่วนความปลอดภัย
TF = ความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด
T = แรงกระทำตามแนวระนาบการเลื่อนตัวที่พิจารณา
N = ผลรวมของแรงในแนวดิ่งที่กระทำในทิศตั้งฉากกับระนาบการเลื่อนตัวที่พิจารณา โดยรวมผลจากแรงดันขึ้นของน้ำ (Uplift)
Ø = มุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)
C = แรงเชื่อมแน่น (Cohesion intercept)
A = พื้นที่ของระนาบต้านทานการเลื่อนตัว

๒.๒.๖ การวิเคราะห์แรงดันที่ฐานราก (Base Pressures)

เพื่อให้เขื่อนอยู่ในภาวะสมดุล แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในฐานรากจะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำในแนวดิ่งและแนวนอนทั้งหมดซึ่งรวมถึงแรงดันขึ้นของน้ำ และมีทิศทางตรงข้ามกับแรงที่กระทำประกอบด้วยแรงปฏิกิริยาในทิศตั้งฉาก (Total normal reaction) และการเฉือนเชิงสัมผัสทั้งหมด (Total tangential shear) สำหรับสภาวะที่แรงกระทำเป็นเหตุการณ์ปกติและเหตุการณ์ผิดปกติ แรงดันที่ฐานสูงสุดที่คำนวณได้จะต้องมีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่าหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของฐานราก และสำหรับสภาวะที่แรงกระทำเป็นเหตุการณ์ร้ายแรงสูงสุด แรงดันที่ฐานสูงสุดจะต้องมีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า ๑.๓๓ เท่าของหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของฐานราก (USACE, ๑๙๙๕)

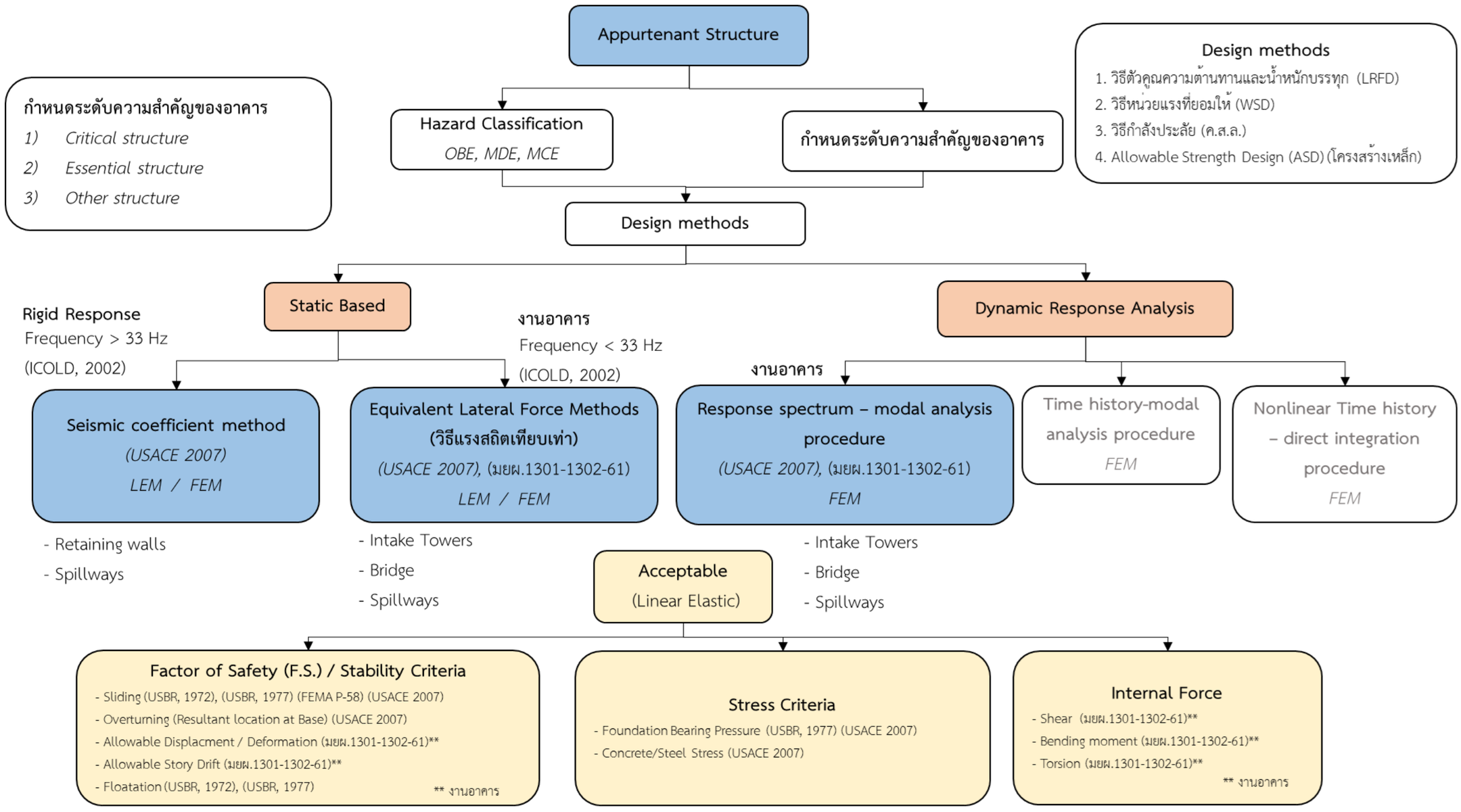
๒.๒.๗ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนและฐานราก (Stress Analysis)

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนและฐานราก มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของหน่วยแรงภายในตัวเขื่อนและฐานรากที่เกิดจากแรงกระทำจากสภาวะต่างๆ ตามที่แสดงข้างต้น รวมถึงกรณีการเกิดแผ่นดินไหว เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปร่างตัวเขื่อนและคุณสมบัติของฐานรากรองรับตัวเขื่อน โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินเกณฑ์ของหน่วยแรงที่ยอมให้ในคอนกรีตและฐานรากที่กำหนดตามตารางที่ ๔ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนและฐานราก ควรใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเชิงเส้น (linear elastic static and dynamic analyses) หรือการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear analyses) ทั้งในรูปแบบ ๒ มิติ และ ๓ มิติ โดยผลการวิเคราะห์ยังสามารถแสดงถึงการโก่งตัวและการเคลื่อนตัวของเขื่อนได้

ส่วนที่ ๓ การออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบ (Appurtenant structure)

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหว คือการป้องกันการวิบัติของโครงสร้างที่จะนำไปสู่การสูญเสียการควบคุมน้ำในอ่างเก็บน้ำหลังเกิดแผ่นดินไหว เกณฑ์มาตรฐานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้วิศวกรเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ เกณฑ์หน่วยแรงที่ยอมให้ และกำหนดระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากตำแหน่งและความสำคัญของโครงสร้าง รูปที่ ๑๐ แสดงแผนผังการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบให้ปลอดภัยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

ทั้งนี้การประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้าง มีหลักการวิเคราะห์มีอยู่ ๒ ประการ คือการเลือกระดับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่เหมาะสม และการเลือกวิธีการวิเคราะห์ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ ๑๐ แผนผังการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบให้ปลอดภัยจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

๓.๑ การเลือกระดับแรงกระทำแผ่นดินสำหรับการออกแบบอาคารประกอบ

ตารางที่ ๕ แสดงถึงข้อพิจารณาในการประเมินความวิกฤติของโครงการอ่างเก็บน้ำต่อความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นหากเกิดการพิบัติ ทั้งความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ความสูญเสียต่อการให้บริการของโครงการ ความสูญเสียต่อโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวกับสาธาณูปโภคที่วิกฤติสำหรับการดำรงชีวิต (ไฟฟ้า, น้ำประปา เส้นทางคมนาคมในการส่งความช่วยเหลือ เป็นต้น) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ข้อพิจารณาตามตารางดังกล่าวจะได้นำไปสู่การพิจารณาเลือกระดับของแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำแผ่นดินไหวที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาคารประกอบทั้งกรณี OBE และ MDE ซึ่งแสดงข้อกำหนดตามระดับความวิกฤติของโครงการตารางที่ ๖ ทั้งนี้การพิจารณาแรงกระทำแผ่นดินไหวตามระดับความวิกฤติของโครงการอ้างอิงตาม USACE (๒๐๒๔) ซึ่งจะต่างจากการระบุระดับแรงกระทำที่จะต้องใช้กับการออกแบบตัวเขื่อน ซึ่งกำหนดตามความอันตรายของเขื่อนตามข้อแนะนำของ ICOLD Bulletin ๑๖๗ และ ๑๔๘ ซึ่งจะมีค่าระดับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่สูงกว่า

ตารางที่ ๕ ข้อพิจารณาในการกำหนดความวิกฤติหรือความสำคัญของอาคารประกอบ (USACE, ๒๐๒๔)

Project Feature Type[1]	Direct Loss of Life[2]	Disruption or Loss of Project Feature Service or Functionality; Loss of Service or Access for Lifeline Facilities[3]	Property Losses[4]	Adverse Environmental Impacts[5]
Non-Critical	None expected	None or damages are cosmetic or rapidly repairable	Minimal	Minimal damage
Critical	None expected to probable or likely (one or more)	Probable or likely	Major to extensive	Major to extensive damage[6]

[๑] Categories are based on project feature performance. Project performance could be impacted by performance of a single or multiple individual project feature within a project or system.

[๒] Loss of life potential is based on failure or inundation mapping of the area downstream of the dam or within the leveed area. In some cases, inundation mapping may also include upstream areas.

[๓] Indirect threats to life caused by the interruption of lifeline or other facility services because of project
failure or operation loss (such as direct loss of [or access to] critical medical facilities, safe water supply).

[๔] Direct economic impact of property damages, project facilities, downstream property, and property within the leveed or upstream area, and indirect economic impact because of loss of project services (such as inundation impact on navigation industry because of the loss of a dam and navigation pool, impact on a community of the loss of water or power supply).

[๕] Adverse environmental impacts caused by the project feature failure or loss of water supply for environmental purpose, beyond what would normally be expected for the magnitude flood event if the project did not exist.

[๖] In some cases, major to extensive damage may require extensive mitigation and, in some cases, it may be difficult or impossible to mitigate the environmental damage.

ตารางที่ ๖ Criteria for seismic design ground motions (USACE, ๒๐๒๔)

Project Feature Type	Minimum Earthquake Return Period for OBE-GM[1]	Earthquake Return Period for MDE-GM
Non-Critical	145-year return period[2]	975-year return period
Critical	475-year return period[3]	Greater[4] of the following: 1) 2,475-year return period[5,6] 2) MCE-GM (84th percentile values from ground motion models for source slip rate, SR ≥ 0.9 mm/year, median or 50th percentile values for SR ≤ 0.3 mm/year, and interpolation for SR values between 0.3 mm/year and 0.9 mm/year (see paragraph 9c(4))

[๑] Earthquake return periods are based on ๕๐ years of new project feature service life or additional ๕๐ years of service life for an existing project feature.

[๒] A higher earthquake return period for OBE-GM, such as a ๒๒๕-year return period, can be used for a Non-Critical project feature based on the consequences, project feature functionality, project feature service life, and/or post-earthquake response and repair.

[๓] A higher earthquake return period for OBE-GM, such as a ๙๗๕-year return period, can be used for a Critical project feature based on the consequences, project feature functionality, project feature service life, and/or post-earthquake response and repair.

[๔] If the ๘๔th percentile MCE-GM (irrespective of slip rates) is lower than the ๒,๔๗๕-year return period GM in a low seismic ground motion hazard region (paragraph ๙d), the ๘๔th percentile MCE-GM can be considered for MDE-GM of the Critical project feature based on the significance of the consequences, project feature functionality, project feature service life, and/or post-earthquake response and repair. However, the selected MCE-GM value cannot be lowered below ๙๐ percent of the ๒,๔๗๕-year return period GM.

[๕] A higher earthquake return period for MDE-GM (such as ๕,๐๐๐ or ๑๐,๐๐๐ years) can be used for a Critical project feature based on the consequences, project feature functionality, project feature service life, and/or post-earthquake response and repair.

[๖] In regions where mapped seismic sources are not available for MCE-GM determination, a minimum earthquake return period of ๒,๔๗๕ years will be used for MDE-GM.

ทั้งนี้ก่อนอื่นจะต้องทำการพิจารณาความสำคัญของอาคารประกอบว่าภายหลังจากแผ่นดินไหว อาคารประกอบใดจะต้องสามารถที่จะใช้ระบายน้ำได้ และ/หรือ อาคารประกอบใดที่หากเกิดการวิบัติ จะนำไปสู่ความเสี่ยงที่จะทำให้เขื่อนพิบัติแบบสมบูรณ์ (Fully breached) ทั้งจากการที่ไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำได้อีกต่อไป หรือการพิบัติที่นำไปสู่การกัดเซาะย้อนกลับจนทำให้สูญเสียเนื้อเขื่อน ตัวอย่างเช่น หากอาคารระบายน้ำ (Spillway) พังทลาย อาจจะทำให้โครงสร้างส่วนอื่นๆพิบัติตาม (เช่น inlet structures, chute, and terminal structures) และนำไปสู่การพิบัติของตัวเขื่อนในที่สุด ซึ่งความสำคัญของ

โครงสร้างอาคารประกอบดังกล่าวจะถูกประเมินเพื่อระบุโครงสร้างอาคารประกอบออกเป็นโครงสร้างที่สำคัญวิกฤติ (Critical) และโครงสร้างที่ไม่ได้สำคัญวิกฤติ (Non-critical) โดยมีคำจำกัดความดังต่อไปนี้

– *โครงสร้างสำคัญวิกฤติ (Critical structures)* คือโครงสร้างที่หากเกิดการวิบัติหรือได้รับความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวจะส่งผลกระทบต่อการสูญเสียการทำงานซึ่งจะนำไปสู่การวิบัติของเขื่อนหลัก และ/หรือโครงสร้างที่เกี่ยวข้องที่สำคัญอื่นๆ การวิบัติอาจส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำได้ และ/หรือสร้างอันตรายที่ยอมรับไม่ได้ต่อพื้นที่ท้ายน้ำ การออกแบบควรให้โครงสร้างสามารถต้านทานต่อ MDE ได้อย่างปลอดภัย ซึ่งหมายถึงโครงสร้างสามารถที่จะทำงานและระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้เขื่อนเกิดการวิบัติภายหลังเกิดแผ่นดินไหวในระดับนี้ โดยในหมายเหตุของ USACE (๒๐๒๔) ได้ระบุสามารถใช้ระดับแรงกระทำแผ่นดินไหวของอาคารประกอบที่วิกฤตินี้ขึ้นไปได้ถึงค่า Return period ๑๐,๐๐๐ ปี หรือเท่ากับการออกแบบตัวเขื่อน

– *โครงสร้างไม่สำคัญวิกฤติ (Non-critical structures)* คือ โครงสร้างที่หากเกิดการวิบัติหรือได้รับความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวจะไม่ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียการทำงานซึ่งจะนำไปสู่การวิบัติของเขื่อนหลัก และไม่เป็นอุปสรรคต่อการระบายน้ำที่จำเป็นเพื่อปกป้องเขื่อนอีกด้วย การออกแบบควรให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้หลังจากเกิดแผ่นดินไหว OBE

ข้อควรพิจารณาอีกประการหนึ่งในการกำหนดการออกแบบการรับแรงแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างอาคารประกอบ นอกเหนือจากความสำคัญของโครงสร้างก็คือ การเข้าถึงโครงสร้างหรือระบบควบคุมการทำงานของโครงสร้างเหล่านั้น ทั้งทางด้านบุคลากรและอุปกรณ์ก่อสร้าง สิ่งอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงโครงสร้างอาจรวมถึง ถนน จุดลงจอดเฮลิคอปเตอร์ สะพาน บันได และลิฟต์ หากอาคารระบายน้ำ (Spillway) มีประตูระบายน้ำอยู่ด้านบน ความสามารถในการเข้าถึงระบบควบคุมประตูและการใช้งานประตูระบายน้ำหลังเกิดแผ่นดินไหวนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยอาจต้องใช้อาคารระบายน้ำในทันทีเพื่อช่วยระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำหากเขื่อนได้รับความเสียหายด้านโครงสร้าง หรืออาจต้องใช้ในช่วงหลายสัปดาห์หรือหลายเดือนหลังจากเกิดแผ่นดินไหวเพื่อการระบายน้ำ สิ่งอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงโครงสร้างทั้งหมดควรได้รับการออกแบบให้ทนต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เลือกได้อย่างเหมาะสม

ตัวอย่างเช่น Radial gate controlled crest structure การวิบัติของโครงสร้าง Crest structure อาจส่งผลให้ไม่สามารถเข้าไปควบคุมการระบายน้ำของ Radial gate ในกรณีฉุกเฉินได้ สถานการณ์ดังกล่าวอาจนำไปสู่การล้นข้ามสันเขื่อนและการพังทลายของเขื่อนได้ในภายหลัง กรณีเช่นนี้การเลือกใช้การออกแบบในระดับ MDE ก็จะมีความจำเป็น

ข้อพิจารณาอีกประการหนึ่งคือหากโครงสร้างอาคารประกอบนั้นเป็นส่วนหนึ่งของตัวเขื่อน เช่น Spillway ที่อยู่บนตัวเขื่อนคอนกรีตถ่วง การวิเคราะห์จำเป็นจะต้องดำเนินการไปพร้อมกันด้วยระดับแรงกระทำแผ่นดินไหวเท่ากับตัวเขื่อน

๓.๒ การเลือกวิธีการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของอาคารประกอบเพื่อรองรับแผ่นดินไหว โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น ๒ วิธี คือวิธีทางสถิต (Static base) และวิธีทางพลศาสตร์ (Dynamic)

๓.๒.๑ วิธีทางสถิต (Static Base)

การวิเคราะห์ทางสถิต โครงสร้างจะอยู่ภายใต้แรงเฉื่อยซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของมวลของระบบคูณด้วยความเร่งสูงสุดที่ฐาน โดยกระทำในทิศทางที่กำหนดและคูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

สำหรับโครงสร้างที่มีความถี่พื้นฐานมากกว่า ๓๓ Hz (ICOLD, Bulletin ๑๒๓) จะมีการตอบสนองแบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid response) ในกรณีนี้สามารถใช้ "การเร่งความเร็วสูงสุดจากพื้นดิน Peak ground acceleration (PGA)" สำหรับการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว (Seismic coefficient method) (USACE, 1995) และหากโครงสร้างที่มีความถี่พื้นฐานน้อยกว่า ๓๓ เฮิรตซ์ จะต้องใช้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่สอดคล้องกับความถี่พื้นฐานของโครงสร้าง โดยใช้วิธีสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Methods) (USACE, 1995)

- *วิธีค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดิน*ไหว (Seismic coefficient method) (USACE (๑๙๙๕) “Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures”) เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างจากแผ่นดินไหว แรงแผ่นดินไหวจะถูกแปลงเป็นแรงคงที่อย่างง่าย (simply as static forces) และจะรวมเข้ากับแรงดันน้ำแบบสถิต (hydrostatic pressures) แรงดันน้ำลอยตัว (uplift) แรงดันดิน (backfill soil pressures) และแรงโน้มถ่วง (gravity loads) การวิเคราะห์ในเบื้องต้นจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการหมุน (rotational) และการเลื่อนของโครงสร้าง (sliding) ที่ถือว่าโครงสร้างเป็นวัตถุแข็ง (rigid body) แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะคำนวณได้จากมวลของโครงสร้าง มวลที่เพิ่มขึ้นของน้ำและผลกระทบของแรงดันดินแบบพลศาสตร์ แล้วคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว มักใช้เป็นเศษส่วนของความเร่งสูงสุดของพื้นดินที่แสดงเป็นเศษส่วนทศนิยม (decimal fraction) ของความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก ผลกระทบของการเคลื่อนที่ของพื้นดินโดยแรงด้านข้างคงที่ วิธีค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวจะไม่ได้คำนึงถึงลักษณะพลวัตของระบบโครงสร้างกับน้ำและดิน (structure-water-soil interaction) รวมไปถึงลักษณะของการเคลื่อนที่ของพื้นดิน อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวยังสามารถให้ผลลัพธ์ที่สมเหตุสมผลได้เมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นวัตถุแข็ง

- วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Methods) (USACE, ๑๙๙๕) วิธีแรงสถิตเทียบเท่า มักใช้สำหรับการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว โดยถือว่าการตอบสนองของโครงสร้างส่วนใหญ่จะอยู่ในโหมดแรก โหมดการสั่นสะเทือนแรกอาจมีส่วนสำคัญในการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของโครงสร้างได้มากถึง ๘๐ เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่านั้น ดังนั้นคาบการสั่นและการเสียรูปโดยทั่วไปของโหมดแรกจึงเพียงพอสำหรับการประมาณแรงกระทำหรือแรงด้านข้างที่เทียบเท่าที่จำเป็นสำหรับการออกแบบหรือการประเมินแผ่นดินไหว

๓.๒.๒ วิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์แบ่งได้เป็น ๒ ประเภท คือ (๑) วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Response spectrum method) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิง

เส้นและ (๒) วิธีแบบประวัติเวลา (Acceleration time-history method) ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear time-history method) และแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear time-history method) การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์จะใช้เมื่อ (๑) โครงสร้างมีความถี่พื้นฐานน้อยกว่า ๓๓ Hz หรือ (๒) ต้องการประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง

- *วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Response spectrum method)* (USACE (1999) “Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures”) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ โดยกำหนดจุดสูงสุดของการตอบสนองของโครงสร้างแบบเชิงเส้นต่อการเคลื่อนที่ของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยสเปกตรัมการตอบสนอง จำนวนโหมดที่จำเป็นจะแตกต่างกันไปในแต่ละการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามควรจะรวมโหมดทั้งหมดที่มีส่วนร่วมสำคัญต่อการตอบสนองทั้งหมดของโครงสร้างไว้ด้วย โดยปกติแล้วจำนวนโหมดที่มีส่วนร่วมสำคัญจะเพียงพอหากผลรวมของแต่ละโหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์อย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ของมวลทั้งหมดของโครงสร้าง การวิเคราะห์โหมด (Modal analysis) โดยปกติจะดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการหาคาบการสั่นสะเทือนและรูปร่างของโหมด (mode shapes) ที่มีส่วนร่วมสำคัญทั้งหมด ในปัจจุบันนี้โปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างส่วนใหญ่มีศักยภาพดังกล่าว

- วิธีการตอบสนองแบบเชิงเส้นตามประวัติเวลา (Linear time-history method) (USACE (๒๐๐๓) “Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures”) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์คล้ายกับการวิเคราะห์สเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด แต่ความแรงแผ่นดินไหวจะอยู่ในรูปแบบของประวัติเวลาและความเร่ง ผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของประวัติการเคลื่อนตัวและความเครียด (หรือแรง) ค่าสูงสุดของการตอบสนองต่างๆ จะได้มาจากประวัติการตอบสนอง ซึ่งไม่สามารถทำได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด

- วิธีการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นตามประวัติเวลา (Nonlinear time-history method) (USACE (๒๐๐๓) “Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures”) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ โดยใช้สมการการเคลื่อนที่โดยตรง ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่สมเหตุสมผลมากที่สุดที่มีอยู่สำหรับการประเมินการตอบสนองของโครงสร้างต่อการเคลื่อนตัวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว เป็นขั้นตอนใช้กระบวนการเชิงตัวเลขแบบทีละขั้นตอน โดยกำหนดความเค้น (หรือแรง) และการเคลื่อนตัวในช่วงเวลาสั้นๆ นับตั้งแต่เริ่มจนถึงเวลาที่ต้องการ โดยปกติการเพิ่มขึ้นของเวลาจะกำหนดให้เพิ่มขึ้นแบบสม่ำเสมอเพื่อความสะดวกในการคำนวณ เงื่อนไขของความสมดุลทางพลศาสตร์จะถูกกำหนดขึ้นในตอนเริ่มต้นและตอนสิ้นสุดของการเพิ่มเวลาในแต่ละครั้ง การเคลื่อนไหวของระบบในแต่ละช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นจะได้รับการประเมินบนพื้นฐานของกลไกการตอบสนองที่สันนิษฐานไว้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถใช้กับการวิเคราะห์ทั้งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้ ในกรณีของการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น คุณสมบัติของโครงสร้าง (รวมถึงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น) สามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นแต่ละครั้ง เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการตอบสนองที่เหมาะสมกับสถานะที่เกิดการเสียรูปนั้น การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นกับโครงสร้างอาคารประกอบจะจำกัดอยู่เฉพาะกรณีที่มีหลักฐานจากการทดสองหรือการสังเกตที่บ่งชี้พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นและมีการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขแล้ว ซึ่งรวมถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางประการ

เช่น การแตกร้าวจากแรงดึงของ Gravity dam เสถียรภาพในการเลื่อนและการหมุนของบล็อกที่แยกจากข้อต่อ และการแตกร้าว รวมไปถึงการแตกร้าวของ intake tower ที่ตั้งโดยอิสระ (free standing)

๓.๓ การกำหนดตัวแปร

สำหรับการวิเคราะห์ การออกแบบ หรือการประเมินความปลอดภัยเพื่อรองรับแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่สำคัญวิกฤติ (Critical Structure) หรือโครงสร้างที่ไม่สำคัญวิกฤติ (Non-critical Structure) จะต้องมีการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้:

๓.๓.๑ การกำหนดค่าแผ่นดินไหว

สามารถเลือกวิธีการกำหนดค่าแผ่นดินไหวได้โดยใช้ ICOLD bulletin ๗๒ “ Guidelines for selecting seismic parameters for dam projects ” หากโครงสร้างวางไว้บนชั้นหินแข็ง การจำลองการเคลื่อนตัวของพื้นดินจากแผ่นดินไหวแบบ Free-field earthquake ground motion สามารถทำได้ และหากโครงสร้างอาคารประกอบวางอยู่บนชั้นฐานรากยืดหยุ่นหรือไม่ได้วางอยู่บนชั้นหิน มีวิธีดำเนินการได้ ๓ วิธี ดังนี้

(๑) ใส่จุดรองรับอย่างง่าย (structure/soil column) แบบ ๑D ในโครงสร้างของอาคารประกอบและใส่แรงแผ่นดินไหวหรือค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ฐานของจุดรองรับนั้น (ที่ระดับชั้นหิน) หรือ

(๒) หาค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ขยายค่าแล้ว (Amplified earthquake motion) ที่บริเวณบนสุดของจุดรองรับ (soil/support) หรือของเขื่อน แล้วทำการวิเคราะห์อาคารประกอบภายใต้ค่าการเคลื่อนตัวนั้นๆ

(๓) จำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง (Soil-structure interaction) ทั้งหมดแบบ ๒D (รวมถึงพิจารณา Water-support interaction และ Radiation damping ร่วมด้วย)

๓.๓.๒ คุณสมบัติของวัสดุและฐานราก (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างเช่น dynamic Young's Modulus และ shear modulus of elasticity, Poisson's ratio, และ ultimate compressive, tensile, และ shear strengths ควรได้มาจากข้อกำหนดการออกแบบและการทดสอบ ถ้ามีข้อมูลไม่เพียงพออาจต้องทำการทดสอบใหม่

๓.๓.๓ การหน่วง (Damping) (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

การหน่วง (Damping) เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุและการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว การหน่วงอาจหมายถึงความต้านทานซึ่งช่วยลดการสั่นสะเทือนโดยการดูดซับพลังงาน โดยทั่วไปจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของการหน่วงวิกฤต (Critical damping) โดยกำหนดให้เป็นปริมาณการหน่วงที่น้อยที่สุดที่จะป้องกันการสั่นสะเทือนแบบแกว่งอิสระ โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตจะมีค่าการหน่วงอยู่ระหว่าง ๓ ถึง ๕% ซึ่งถือเป็นค่าการตอบสนองที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น และอาจเพิ่มถึง ๑๐% ในโครงสร้างคอนกรีตที่มีการแตกร้าวอย่างมาก สำหรับโครงสร้างเหล็ก แนะนำให้ใช้ค่าการหน่วง ๓% สำหรับ OBE และ ๕% สำหรับ MDE สามารถหาข้อมูล

อ้างอิงเพิ่มเติมสำหรับการเลือกค่าการหน่วงที่เหมาะสมจาก (Newmark and Hall, ๑๙๘๒ ; U.S.A.E.C. (NRC) Regulatory Guide ๑.๖๑) ค่าการหน่วงดังกล่าวไม่รวมการหน่วง Radiation damping หรือ hydrodynamic damping หากมีความสำคัญในแบบจำลอง ควรอ้างอิงตามข้อมูลการทดสอบ

๓.๓.๔ แรงดันน้ำเนื่องจากแผ่นดินไหว (Hydrodynamic loads) (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของเหลวกับโครงสร้าง (Fluid-structure interaction) เป็นสิ่งสำคัญเมื่อโครงสร้างมีการสัมผัสกับของเหลว เช่น น้ำ ในขณะที่โครงสร้างมีการตอบสนองต่อการกระตุ้นจากแผ่นดินไหว แรงดันน้ำแบบพลศาสตร์ (hydrodynamic pressures) จะกระทำในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวที่น้ำสัมผัสกับโครงสร้าง โดยจะถือว่าของไหลที่ไม่สามารถบีบอัดได้ในอุดมคติ แรงดัน hydrodynamic กระทำเสมือนการเพิ่มมวลบางส่วนเข้ากับมวลของโครงสร้าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยประมาณ (การอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง Blevins, ๑๙๗๙ ; Kolkman P.A., ๑๙๘๘ ; Goyal and Chopra, ๑๙๘๙) อีกวิธีการที่ใช้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างของเหลวกับโครงสร้าง คือการเพิ่มแรงดันที่กระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากการเคลื่อนไหวแบบสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่ต้านกับของเหลวที่สัมผัสกัน ในการวิเคราะห์โครงสร้าง แรงดัน hydrodynamic ที่เกิดจากแผ่นดินไหว จะต้องรวมเข้ากับแรงดัน hydrostatic

๓.๓.๕ แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Dynamic earth loads) (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงดันดินแนวนอนเพิ่มเติม เช่น ในกรณีของผนัง Spillway หรือหอรับน้ำ (Intake tower) ที่ฝังอยู่ในเขื่อน แรงดันไดนามิกเพิ่มเติมดังกล่าวที่เกินกว่าแรงดันสถิตจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างด้วย (Sinha, ๑๙๘๙ and USBR, ๑๙๗๗)

๓.๓.๖ การรวมน้ำหนักบรรทุก, วิธีการออกแบบ, หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้

ก) การรวมน้ำหนักบรรทุก Load combinations

เหตุการณ์แผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงกระทำเป็นภาวะที่รุนแรงสูงสุด (Extreme) และควรพิจารณาร่วมกับแรงกระทำปกติของอ่างเก็บน้ำและจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมถึงแรงดันของดิน (การรวมน้ำหนักบรรทุกอ้างอิงได้จาก ICOLD, Bulletin ๖๑) ไม่ควรรวมแรงกระทำจากน้ำท่วมเข้ากับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว

ข) วิธีการออกแบบ Design methods

อ้างอิงตามกฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”

- วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Working stress method) วิธีการนี้ ความเค้นในโครงสร้างที่เกิดจากการรับน้ำหนักที่เกิดจากแผ่นดินไหวจะนำมารวมกับความเค้นอื่น ๆ ทั้งหมดที่เกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกตามปกติ และเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมให้ การออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ที่ใช้กับโครงสร้างอาคารประกอบจะต้องคำนึงถึงการควบคุมรอยแตกร้าวและการเสียรูปที่จำกัด

- วิธีกำลัง (Ultimate strength design method) วิธีการนี้ น้ำหนักบรรทุกจะถูกคูณด้วยตัวคูณน้ำหนัก (Load factors) และความเค้นที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับความเค้นสูงสุดของวัสดุ

ค) หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้

หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ อ้างอิงตามกฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”

๓.๔ วิธีการออกแบบอาคารประกอบ (Appurtenant Structure)

๓.๔.๑ อาคารทางระบายน้ำล้น (Spillways)

โดยทั่วไปอาคารระบายน้ำจะสร้างขึ้นจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงจากแผ่นดินไหวมักจะเป็นแรงที่ควบคุมการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว ส่วนประกอบของโครงสร้างทางระบายน้ำล้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) inlet structures (inlet and/or crest structures) 2) chutes (conveyance structures such as a floor slab with walls connecting the inlet structures to the terminal structure), and 3) the terminal structure (hydraulic-jump stilling basin, flip bucket, impact structure, etc.).

ก) Seismic Analysis

เลือกระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบจากการวิเคราะห์ Hazard classification (OBE, MDE, MCE)

ข) การหน่วง (Damping)

โดยส่วนใหญ่ค่าการหน่วงที่เหมาะสมของโครงสร้างอาคารระบายน้ำ อยู่ระหว่าง ๒ ถึง ๕ เปอร์เซ็นต์ (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

ค) การรวมน้ำหนักบรรทุก

อ้างอิงตามกฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร” น้ำหนักบรรทุกที่ควรพิจารณาใช้ร่วมกันได้แก่

- แรงกระทำจากแผ่นดินไหว
- แรงกระทำจากน้ำในอ่างเก็บน้ำ
- แรงที่เกิดจากการยืดหดตัวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบปกติของสิ่งที่สัมผัสกับโครงสร้าง เช่น น้ำและอากาศ
- แรงดันดินที่เกิดจากแผ่นดินไหว (USBR, ๑๙๗๗).

ง) หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ และอัตราส่วนความปลอดภัย

- หน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ อ้างอิงตามกฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”
- อัตราส่วนความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลและการพลิกคว่ำ เมื่อโครงสร้างวงบนหินฐานรากและรับน้ำหนักจากแผ่นดินไหว อัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ในช่วง ๑.๐ ถึง ๑.๑๕ (Scherich, ๑๙๘๘ ; USBR, ๑๙๗๗)

จ) วิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของโครงสร้าง

โดยทั่วไปแล้ว Inlets ที่ควบคุมไม่ได้ จะจัดเป็นโครงสร้างสำคัญ (Critical Structure) และควรออกแบบให้ต้านทานต่อ MDE แต่อาจใช้ OBE ได้หาก Inlets อยู่เหนือระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ สำหรับโครงสร้างที่มีรูปทรงที่ซับซ้อน เช่น morning glory inlet structure หรือ labyrinth ควรใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสามมิติ รายละเอียดแสดงในตารางที่ ๗

ตารางที่ ๗ วิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของอาคารระบายน้ำล้น (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

Spillway structures	Components	Usual approaches	Recommended models
inlet and crest structures	morning glory drop inlet structures	pseudo-static response spectrum	3D
	overflow structures : straight ogee crests, labyrinth	pseudo-static using elastic foundation	2D plane-strain or plane-stress or 3D
	siphon structures	response spectrum	2D or 3D
	fuse plug structures : zoned embankment	deformation analysis Newmark method or liquefaction potential	2D
chutes	conveyance structures : floor slab and connecting walls	pseudo-static using elastic foundation	2D plane-strain or plane-stress
terminal structures	hydraulic jump stilling basin flip bucket impact structures	pseudo-static using elastic foundation	2D

**หมายเหตุ pseudo-static แก้ไขเป็น static based

๓.๔.๒ ประตูระบายน้ำ, flashboards, และอุปกรณ์ (operating equipment)

อัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของโครงสร้างเหล็กจะเท่ากับ ความเค้นยอมให้/ความเค้นสูงสุดที่คำนวณได้ภายใต้สภาวะการรับแรงแผ่นดินไหว ค่า FS ที่เหมาะสมสำหรับ MDE คือ ๑.๑ และสำหรับ OBE คือ ๑.๕ บานประตูควรออกแบบให้มีการจำกัดการเสียรูปที่อาจส่งผลให้ประตูติดขัดและไม่สามารถใช้งานได้ (ICOLD, Bulletin ๑๒๓)

๓.๔.๓ ท่อส่งน้ำ (Water Conduits), ประตูและวาล์ว (Gates and valves)

อ้างอิงตามมาตรฐาน

- ICOLD, Bulletin ๑๒๓ “Seismic design and evaluation of structure appurtenant to dams”

- กฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”

๓.๔.๔ อาคารรับน้ำ ทางชักน้ำหรือคลองชักน้ำ (Intake/outlet towers)

อ้างอิงตามมาตรฐาน

- ICOLD, Bulletin ๑๒๓ “Seismic design and evaluation of structure appurtenant to dams”

- กฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”

๓.๔.๕ ประตูน้ำและอาคารประกอบอื่นๆ (Navigation locks and other appurtenant structures)

อ้างอิงตามมาตรฐาน

- ICOLD, Bulletin ๑๒๓ “Seismic design and evaluation of structure appurtenant to dams”

- กฎกระทรวง (๒๕๖๖) “กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร”

๓.๔.๖ สะพาน (Bridges)

- วิธีการวิเคราะห์และออกแบบอ้างอิงตาม “คู่มือการออกแบบสะพานและถนนเพื่อต้านแผ่นดินไหว” กรมทางหลวง (๒๕๕๙)

หมวดที่ ๕

การดำเนินการเพื่อประเมินความปลอดภัยเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบันต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

(อยู่ระหว่างดำเนินการ แต่จะสอดคล้องกับการดำเนินงานในหมวดที่ ๑-๔)

Reference

ICOLD. (2016). Selecting Seismic Parameters for Large Dams-Guidelines. ICOLD, Bulletin 148.

FEMA (2005). Federal guidelines for dam safety: Earthquake analyses and design of dams.

Wieland, M. (2014). Seismic hazard and seismic design and safety aspects of large dam projects. Perspectives on European Earthquake engineering and seismology, 1, 627-650.

USBR (2015). Dam Failure and Flood Event Case History Compilation. RECM-Reclamation Consequence Estimating Methodology.

Swaisgood, J.R., 2003, February. Embankment dam deformations caused by earthquakes. In Pacific conference on earthquake engineering (Vol. 14).