

“แผ่นดินไหวกับเขื่อน”

ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขื่อนเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ที่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างที่มีโอกาสเกิดการพิบัติต่ำแต่จะก่อให้เกิดความเสียหายสูง ดังนั้น วิศวกรจึงต้องออกแบบให้เขื่อนสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยทั้งในสภาวะปกติ อุทกภัยและแผ่นดินไหว Hoeg (1996) ได้รวบรวมข้อมูลเขื่อนที่เกิดการพิบัติถึงขั้นใช้งานไม่ได้ จำนวน 240 เขื่อน พบว่ามีเขื่อนที่พิบัติถึงขั้นใช้งานไม่ได้จากเหตุแผ่นดินไหวร้อยละ 1 (ตารางที่ 1) โดยจากสถิติที่ผ่านมาในอดีตพบว่าแผ่นดินไหวจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเขื่อนมากกว่าที่จะรุนแรงถึงขั้นเกิดการพิบัติ สุทธิศักดิ์ (2549) ได้สรุปพฤติกรรมของระบบเขื่อนที่อาจนำไปสู่การพิบัติของเขื่อนได้ 8 พฤติกรรม โดยสามารถขยายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 สาเหตุการพิบัติหรือเสียหายเขื่อน (Hoeg, 1996)

Causes of Incident or failure	% of 240 dam
External erosion (overtopping / wave action)	29
Internal erosion (in dam body / foundation)	38
Foundation instability	14
Excessive dam deformations	13
Deterioration (chemical / physical)	2
Malfunction of gate	2
Earthquake effects	1
Construction error	1

1. การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแนวตั้งใกล้ตัวเขื่อน ซึ่งจะก่อให้เกิดการยุบตัวของแผ่นดิน ส่งผลให้ระดับสันเขื่อนลดลงต่ำกว่าระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ กรณีนี้เป็นกรณีที่เกิดได้ยาก

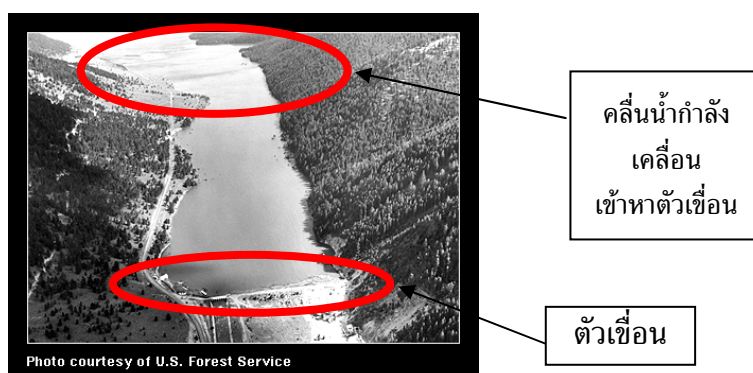
2. การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน ตัวอย่างในกรณีนี้ได้แก่เขื่อน Shi-Kong ในประเทศไต้หวันในครั้งที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ขนาด 7.6 ริกเตอร์สเกล ในปี พ.ศ.2542 (CHI CHI Earthquake) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งผ่านกลางเขื่อนโดยมีความแตกต่างของการเคลื่อนตัวถึง 6 เมตร (รูปที่ 1) อย่างไรก็ตามเขื่อนไม่ได้เกิดการพิบัติเป็นช่องเปิดแต่อย่างใด

สำหรับในเหตุการณ์พิบัตินี้เป็นกรณีที่สามารถป้องกันได้ตั้งแต่ขั้นสำรวจและออกแบบโดยนักธรณีจะทำการศึกษารอยเลื่อนใต้ฐานรากเชื่อว่าเป็นรอยเลื่อนมีพลังหรือไม่และวิศวกรจะทำการออกแบบองค์ประกอบ เชื่อนที่เหมาะสมในการต้านทานการเคลื่อนตัว เช่น การเลือกใช้เชื่อนดินถมแทนเชื่อนคอนกรีตในพื้นที่เสี่ยง หรือการขยายความหนาของชั้นวัสดุกรอง (Filter) ให้มากกว่าปกติเพื่อรองรับการเคลื่อนตัวที่อาจเกิดขึ้นได้



รูปที่ 1 ความเสียหายของเชื่อน Shi-Kong ประเทศไต้หวัน (R.S.Olsen, 1999)

3. การเกิดคลื่นน้ำในอ่างเก็บน้ำ (Seiches) เนื่องจากแรงสั่นสะเทือน คลื่นน้ำจะวิ่งเข้ากระแทกและสั่นเชื่อนก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเชื่อนดังเช่นในกรณีของเชื่อน Hebgen ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ.2502 โดยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.8 ริกเตอร์ ทำให้เกิดคลื่นน้ำสั่นเชื่อนหลายระลอก (รูปที่ 2) โดยเมื่อจบเหตุการณ์พบว่าเชื่อนมีความเสียหายเกิดขึ้นแต่ไม่พิบัติ



รูปที่ 2 คลื่นในอ่างเก็บน้ำเนื่องมาจากแผ่นดินไหว (Seiches) เชื่อน Hebgen ประเทศสหรัฐอเมริกา

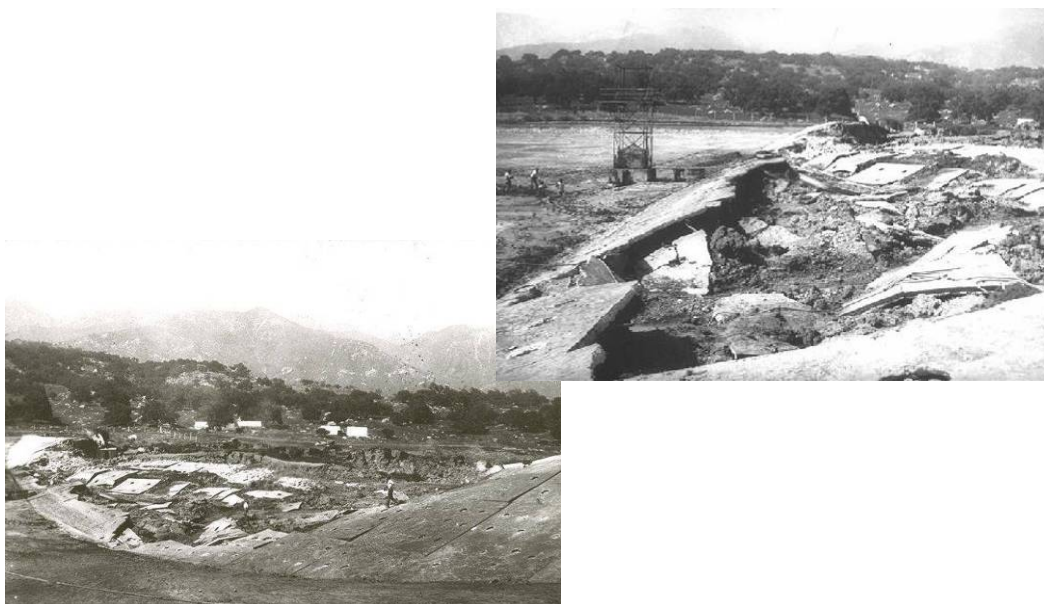
4. การเกิดดินถล่มรอบอ่างเก็บน้ำจากแรงแผ่นดินไหวทำให้เกิดน้ำสั่นข้ามสันเขื่อน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณดินไหลลงมาแทนที่น้ำในอ่างพร้อม ๆ กัน เหตุการณ์ใกล้เคียงที่เคยเกิดขึ้นในอดีตคือเหตุการณ์ของเขื่อน Vaiont ในประเทศอิตาลี ถึงแม้สาเหตุไม่ได้เกิดจากแผ่นดินไหวแต่เกิดจากฝนตกหนักและสภาพโครงสร้างธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวย อย่างไรก็ตามแผ่นดินไหวอาจเป็นตัวกระตุ้นที่ดีที่จะก่อให้เกิดเหตุการณ์ใกล้เคียงเช่นนี้ได้

5. การพิบัติของอาคารบังคับน้ำ ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำได้ เหตุการณ์ดังกล่าวจะมีผลมากในช่วงที่มีน้ำหลากเข้าเขื่อนในช่วงฤดูฝนหรือช่วงอุทกภัย แผ่นดินไหวอาจทำให้ระบบการบังคับบานเกิดการติดขัดไม่สามารถเปิดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความบกพร่องของอาคารระบายน้ำล้นฉุกเฉิน ดังนั้นผู้ดูแลเขื่อนจำเป็นต้องเตรียมมาตรการป้องกันฉุกเฉินได้ เช่น การปรับบานระบายโดยระบบ Manual หรือ การเตรียมพื้นที่เจาะเขื่อนในระดับสูง

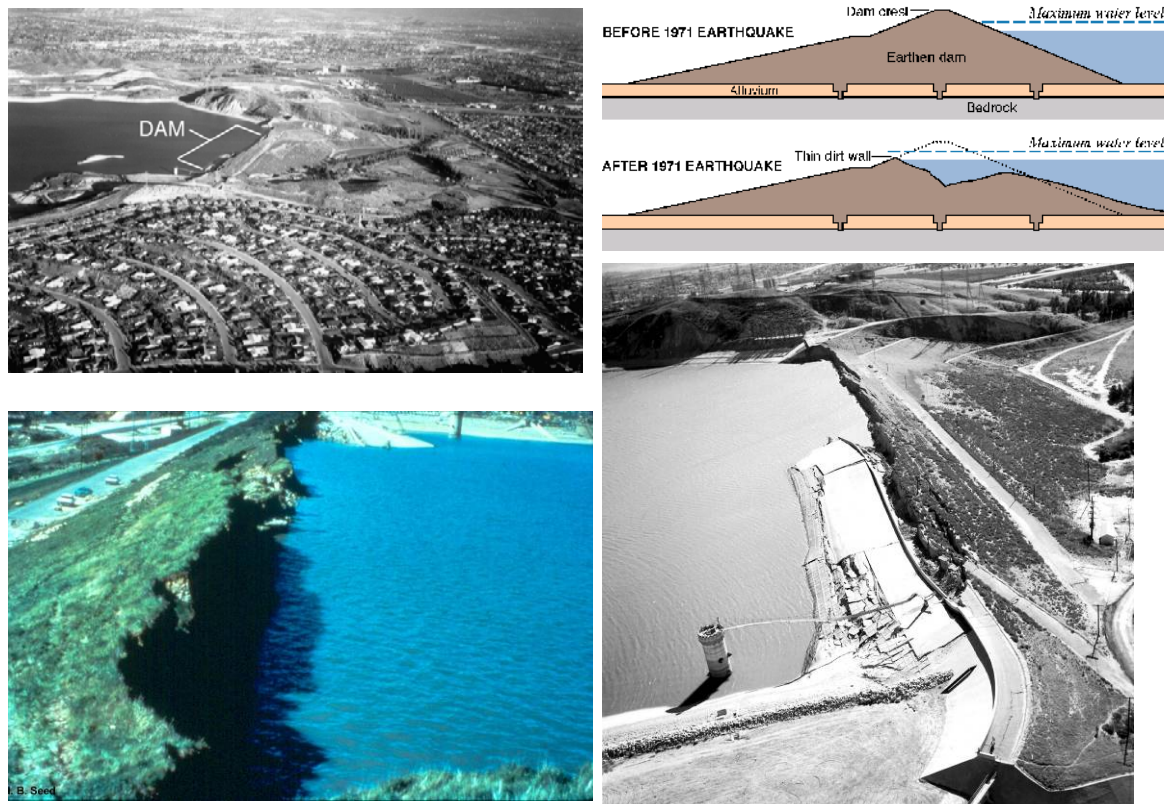
พฤติกรรมที่นำไปสู่การพิบัติของเขื่อนดังที่ได้กล่าวมาได้เรียงลำดับตามโอกาสของความน่าจะเป็น โดยลำดับที่ 1, 2 และ 3 ดำเนินการวิเคราะห์คาดการณ์ได้ยากและมีโอกาสเกิดต่ำลำดับที่ 4 และ 5 มีโอกาสเกิดมากกว่าแต่สามารถลดความเสี่ยงได้โดยการสำรวจและออกแบบที่เหมาะสม สำหรับพฤติกรรมของระบบเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดมาก แต่สามารถที่จะออกแบบป้องกันหรือวิเคราะห์แก้ไขได้ประกอบด้วย

6. การสูญเสียกำลังของดินตัวเขื่อนหรือฐานรากเนื่องจากการเกิด LIQUEFACTION โดย Liquefaction เป็นปรากฏการณ์ที่ดินทรายหรือกรวดที่อิ่มตัวด้วยน้ำเกิดการสูญเสียกำลังเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เหตุดังกล่าวเกิดจากความสั่นสะเทือนของคลื่นแผ่นดินไหวที่แรงพอที่จะทำให้แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดดินอยู่ห่างกันมากขึ้นกำลังรับน้ำหนักของดินจึงลดต่ำลงจนถึงจุดพิบัติ เหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดเฉพาะดินทรายหลวมหรือกรวดที่มีความแน่นต่ำเท่านั้น Liquefaction สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งดินตัวเขื่อนหรือดินฐานราก และสามารถทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้อย่างรวดเร็ว เขื่อนที่ก่อสร้างด้วยเทคนิคการก่อสร้างในปัจจุบันมีโอกาสเกิด Liquefaction ต่ำเพราะได้รับการก่อสร้างโดยระบบการบดอัดดินให้มีความแน่น เขื่อนที่มีโอกาสเกิด Liquefaction ได้ง่ายที่สุดได้แก่เขื่อนที่ก่อสร้างโดยเทคนิค Hydraulic Fill หรือการบดอัดดินโดยใช้น้ำฉีด ซึ่งดินตัวเขื่อนจะมีความหลวมและมีปริมาณน้ำอยู่มาก ปี พ.ศ. 2468 เกิดแผ่นดินไหวที่เมือง Santa Barbara ขนาดความรุนแรง 9 Rossi-Forsell แสกล ทำให้เกิดการพิบัติอย่างสมบูรณ์ของเขื่อน Sheffield ซึ่งเป็นเขื่อนดินคาน้ำคอนกรีต (รูปที่ 3) เขื่อนดังกล่าวเปิดใช้งานในปี พ.ศ. 2461 และก่อสร้างโดยขาดการบดอัดที่ดีทำให้ดินอยู่ในสภาพหลวม ผู้เชี่ยวชาญคาดว่าสาเหตุการพิบัติของเขื่อนเกิดจากการเกิด Liquefaction ที่บริเวณดินฐานรากด้านบนหรือดินถมส่วนล่างของตัวเขื่อน อย่างไรก็ตามในขณะนั้นวิศวกรปฏิยังไม่คุ้นเคยและรู้จักปรากฏการณ์ Liquefaction ดีพอ 46 ปีต่อมาในปี พ.ศ. 2514 ได้เกิดแผ่นดินไหวที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ขนาดความรุนแรง 6.6 ริกเตอร์ แสกล แผ่นดินไหว

ดังกล่าวทำให้เขื่อน Lower San Fernando เกิดความเสียหายแต่ไม่ถึงกับพิบัติอย่างสมบูรณ์ เขื่อนดังกล่าวตั้งอยู่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 20 กม. แผ่นดินไหวทำให้เกิด Liquefaction ของดินภายในตัวเขื่อน ทำให้ลาดเขื่อนไถลลงไปทางด้านเหนือหรือไถลลงในอ่างเก็บน้ำ ส่งผลให้ระดับสันเขื่อนลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 4 ในเวลานั้นเหลืออีกเพียง 1 เมตร ที่น้ำจะสามารถข้ามสันเขื่อนได้ ถ้าเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจะก่อให้เกิดสูญเสียอย่างใหญ่หลวงตามมา หลังจากเหตุการณ์เกือบพิบัติของเขื่อน Lower San Fernando ได้เกิดการศึกษารื่อง Liquefaction อย่างจริงจัง ส่งผลให้เกิดการพัฒนาทฤษฎีในการวิเคราะห์และเทคนิคการก่อสร้างเพื่อป้องกันการเกิด Liquefaction ที่ค่อนข้างจะดีในปัจจุบัน โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหากค่า Standard Penetration Number ของดินทรายหรือกรวดอิมมัตว์ที่มีค่าสูงกว่า 35 จะมีโอกาสการเกิด Liquefaction ต่ำมากหรือแทบจะไม่มี (Seed (1985), Liao (1988), Youd and Noble (1997)) ทั้งนี้พิจารณาที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวเท่ากับ 7.5 ริกเตอร์แอสกล ดังนั้นเขื่อนที่ออกแบบและก่อสร้างโดยวิธีการบดอัดตามมาตรฐานจึงมีโอกาสเกิดการพิบัติเนื่องจากการเกิด Liquefaction ต่ำ



รูปที่ 3 การพิบัติของเขื่อน Sheffield ปี พ.ศ.2461 (Sherard et al.,1963)



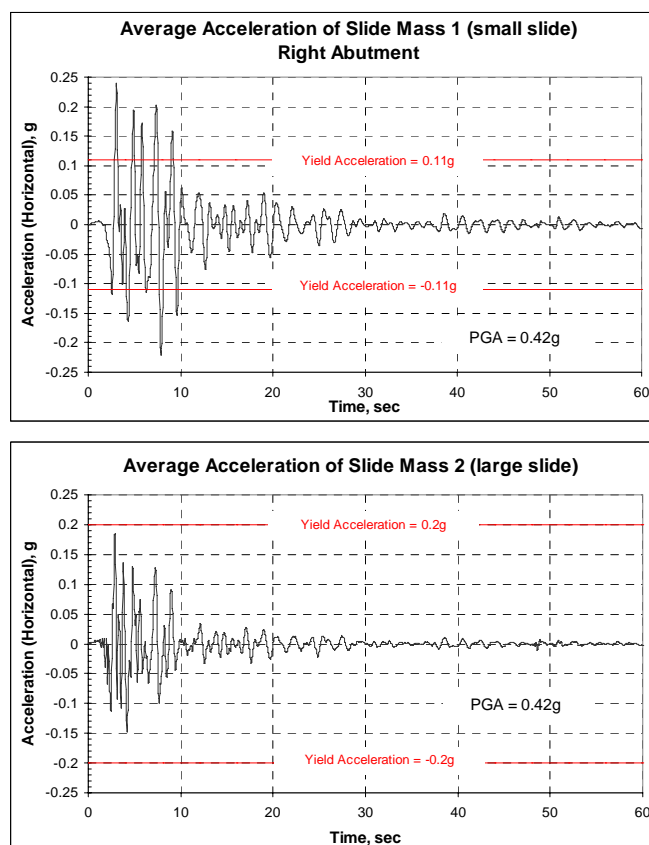
รูปที่ 4 ความเสียหายของเขื่อน Lower San Fernando ปี พ.ศ. 2514 (Usgs,1995)

7. การยุบตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างเนื่องมาจากแรงสั่นสะเทือนก่อให้เกิดรอยแตกในแนวขนานกับสันเขื่อน ลักษณะความเสียหายในข้อนี้เป็นการเสียหายที่พบได้บ่อยที่สุด (รูปที่ 5) พฤติกรรมการเกิดเปรียบเสมือนการทุบโต๊ะที่มีกองทรายกองอยู่เป็นรูปกรวยแต่ละครั้งที่ทุบลงไปจะส่งผลให้ทรายไหลตัวลงด้านข้าง จนถึงความชันของกองทรายระดับหนึ่ง ทรายจะไม่มีการเคลื่อนตัวเพิ่มหรือมีการเคลื่อนตัวน้อยมาก ดังนั้นลักษณะความเสียหายจากการเคลื่อนตัวดังกล่าวมักจะไม่รุนแรงถึงขั้นเกิดการพังทลายของลาดชันอย่างทันทีทันใด การไหลตัวของลาดชันเขื่อนดังกล่าว นอกจากก่อให้เกิดรอยแตกในแนวขนานกับแกนเขื่อนแล้วในบางกรณีอาจเกิดรอยแตกในแนวขวางได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ติดกับอาคารระบายน้ำหรือฐานยันเขื่อน สำหรับการวิเคราะห์ขนาดการทรุดตัวสามารถกระทำได้โดยการวิเคราะห์ความเร่งเฉลี่ยของมวลดินที่จะพิบัติ เมื่อความเร่งเฉลี่ยของมวลดินมากกว่าค่าความเร่งที่จะทำให้มวลดินมีอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 1.0 (Yield Accereration) มวลดินจะเคลื่อนตัวและจะเริ่มหยุดเมื่อความเร่งเฉลี่ยลดต่ำลงและแรงกระทำจากแผ่นดินไหวมีทิศทางตรงข้าม (รูปที่ 6)



Fig. 2: Longitudinal cracks due to failure of the upstream crest of the Fatehghadh dam caused by the 2001 Bhuj earthquake in India (courtesy Prof. S. K. Jain)

รูปที่ 5 แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวก่อให้เกิดรอยแตกขนานกับแกนเขื่อน (S.K.Jain)



รูปที่ 6 ค่าความเร่งเฉลี่ยของมวลดินลาดชันและขีดจำกัดที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว (Soralump,2002)

8. การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเชื่อมตามรอยแตกตามขวาง เมื่อเกิดรอยแตกจากการสั่นสะเทือนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น น้ำจะสามารถไหลซึมผ่านรอยแตกทำให้แรงดันน้ำขยายรอยแตกหรือกัดเซาะเม็ดดินภายในตัวเชื่อมและก่อให้เกิดการรั่วพิบัติในที่สุด การออกแบบ Filter ที่มีความหนาเป็นพิเศษจะช่วยลดความเสี่ยงที่น้ำจะไหลทะลุตัวเชื่อมได้ นอกจากนี้หลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวผู้ดูแลเชื่อมควรเร่งดำเนินการตรวจสอบรอยแตกต่าง ๆ ในเขื่อนโดยทันที การลดระดับน้ำหากพบรอยแตกสำคัญจะช่วยป้องกันการพิบัติได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์และออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

ทฤษฎีการออกแบบลาดชันเขื่อนสำหรับแรงแผ่นดินไหวในปัจจุบันที่ใช้อย่างแพร่หลายมีสองรูปแบบ คือ

- ก. วิธี Pseudo Static
- ข. วิธี Dynamic Response Analysis

วิธี Pseudo Static เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว และยังคงใช้ได้ดีอยู่ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ดำเนินการเหมือนการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันปกติ เพียงแต่เพิ่มแรงในแนวราบสำหรับการคำนวณแรงในแนวราบที่เกิดจากความเร่งของแผ่นดินไหวเข้าไปในสมการดังแสดงในรูปที่ 7 การกำหนดความเร่งในแนวราบจะประเมินจากความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration, PGA) ที่เป็นไปได้ในพื้นที่นั้น ๆ แต่เนื่องจากแรงกระทำจากแผ่นดินไหวเป็นแรงกระทำที่ไม่คงที่ (Transient Loading) จึงต้องทำการลดทอนค่า PGA ลง 1 ใน 3 ถึง 1 ใน 2 เท่าของค่า PGA (Marcuson,1981, Franklin,1984) อย่างไรก็ตามในพฤติกรรมจริงลาดชันเขื่อนอาจมีความเร่งเฉลี่ยสูงกว่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการขยายสัญญาณของดินถมตัวเชื่อม ดังนั้นในปัจจุบันจึงเริ่มมีการนำวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนมาใช้ (Dynamic Response Analysis) ซึ่งวิธีดังกล่าวได้พิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุตัวเชื่อมที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Shear Strain การวิเคราะห์ดังกล่าวกระทำโดยวิธี Finite Element ดังแสดงในรูปที่ 8

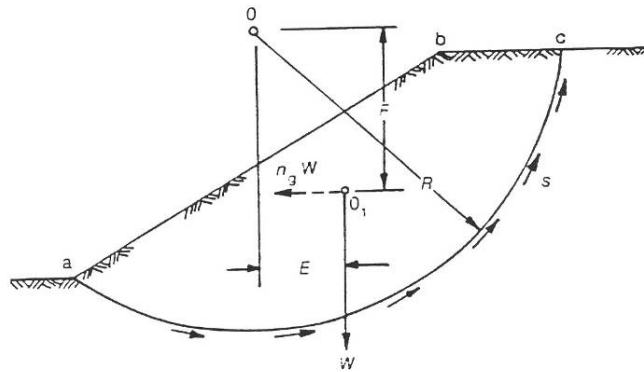
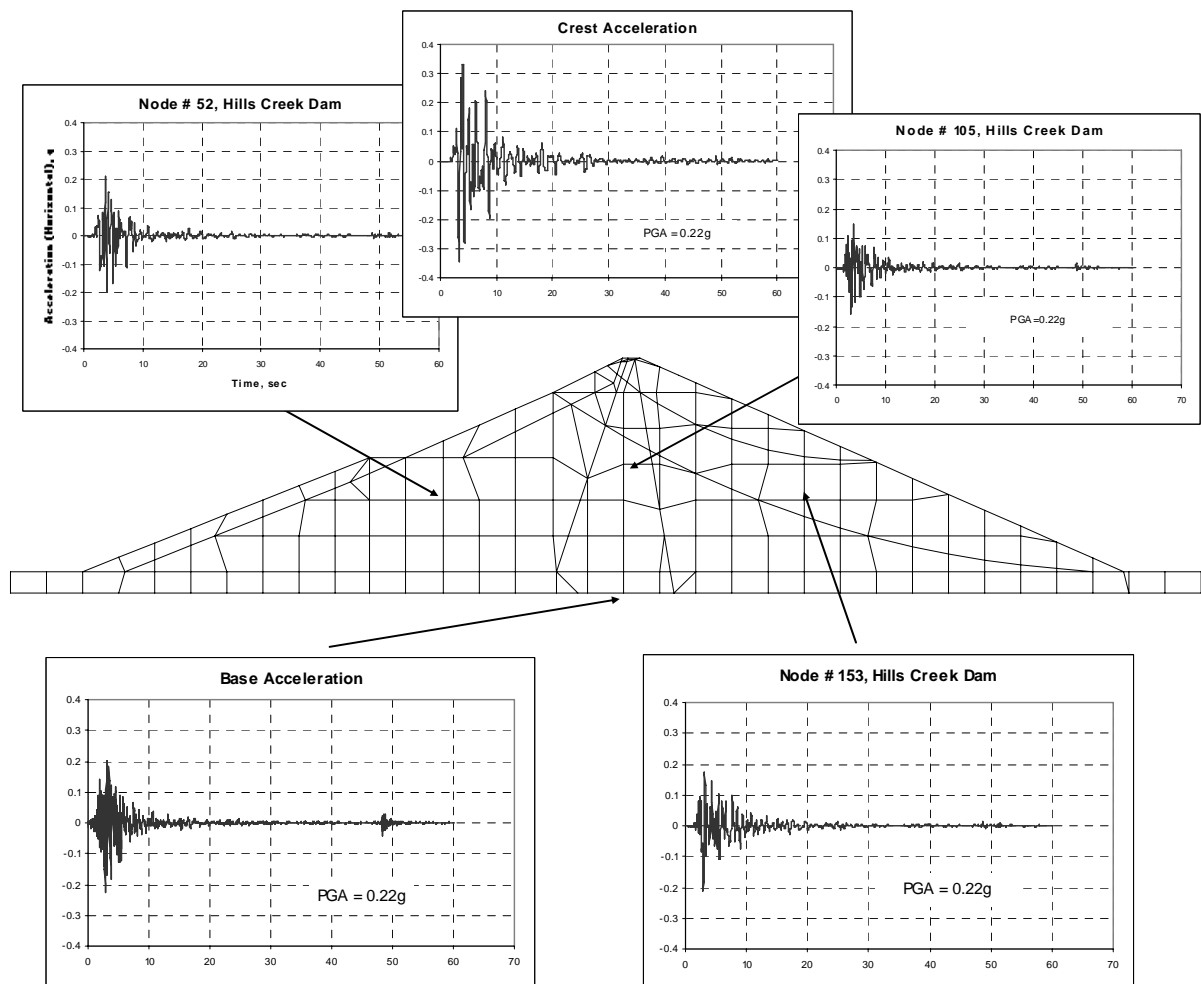


Figure 2. Pseudo-static analysis for computing effect of earthquake on stability of a slope (after Terzaghi 1950) (Seed 1979)

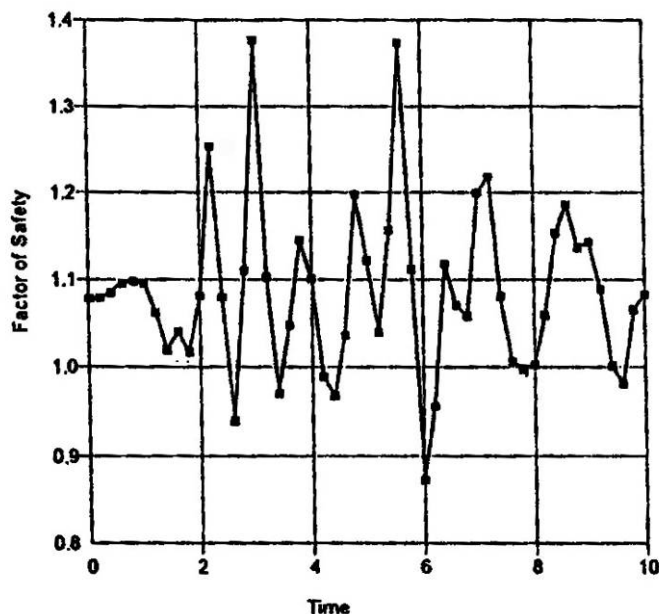
รูปที่ 7 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันด้วยวิธี Pseudo-Static (Seed, 1979)



รูปที่ 8 การวิเคราะห์การตอบสนองของเชื่อมต่อแรงพลศาสตร์ (Soralump, 2002)

ถ้าเกิดแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA สูงกว่าที่ออกแบบไว้จะต้องพิบัติใช้หรือไม่ ?

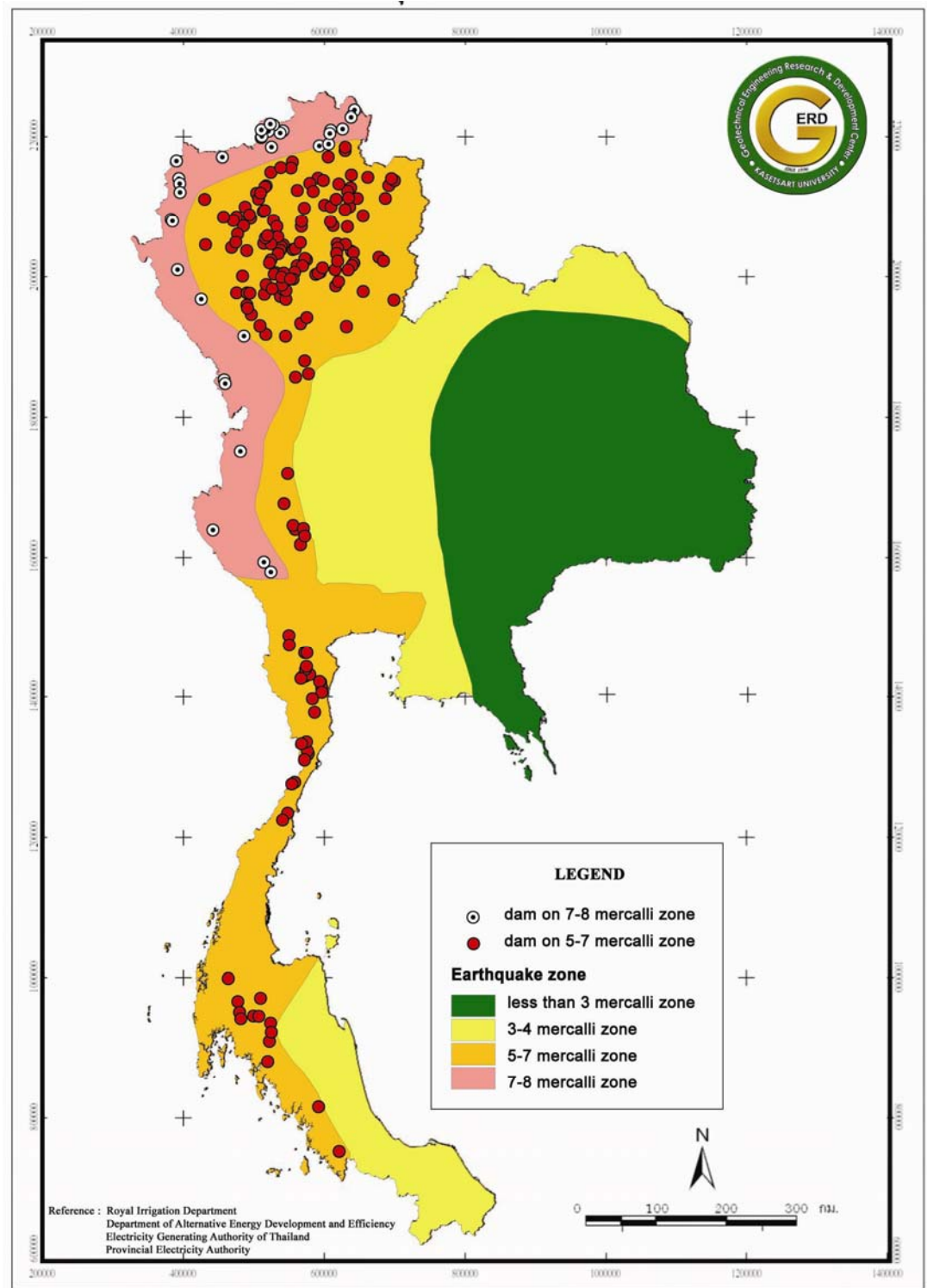
หากเขื่อนเก่าออกแบบด้วยค่าความเร่งในแนวราบเท่ากับ 0.1 g ถ้าปัจจุบันเกิดแผ่นดินไหวแล้วส่งให้ความเร่งเฉลี่ยของลาดชันมากกว่า 0.1 g เขื่อนอาจจะพิบัติหรือไม่พิบัตก็ได้ ไม่จำเป็นต้องพิบัติเสมอไป ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวอาจมีค่าความเร่งเกินค่าที่ออกแบบไว้เพียงช่วงเสี้ยววินาที แล้วจึงกลับทิศของความเร่งไปในทิศตรงกันข้าม ดังนั้นมวลดินบนลาดชันอาจเกิดการขยับไหลลงเพราะค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำกว่า 1.0 ในช่วงเสี้ยววินาทีนั้น แต่หลังจากนั้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากทิศทางของแรงกระทำแผ่นดินไหวกระทำในทิศกันข้าม มวลดินจะหยุดเคลื่อนและจะเคลื่อนอีกครั้งหากค่าความเร่งทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันต่ำกว่า 1.0 อีก (รูปที่ 9) ดังนั้น แผ่นดินไหวจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้เขื่อนเกิดรอยแตกตามแนวแกนเขื่อนมากกว่าที่จะเกิดการพิบัติอย่างทันทีทันใด การพิบัติอย่างทันทีทันใดของเขื่อนจากแผ่นดินไหวมีโอกาสเกิดได้มากที่สุดในกรณีที่มีการเกิด Liquefaction ในตัวเขื่อนหรือฐานรากเขื่อนเท่านั้น



รูปที่ 9 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเปรียบเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว (Slope/W)

สำหรับในประเทศไทยนั้น พิจารณาตามแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวตามประกาศกรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2548 พื้นที่ 2ก และ 2ข หรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายในระดับน้อยถึงปานกลางและในระดับปานกลางตามลำดับ มีเขื่อนที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงดังกล่าวแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีจำนวน 37 เขื่อน อยู่ในพื้นที่ 2ข และ 178 เขื่อน อยู่ในพื้นที่ 2ก (จากข้อมูลทั้งหมด 488 เขื่อน) เขื่อนที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าว อาจจำเป็นต้องมีมาตรการในการป้องกันภัยจาก

แผ่นดินไหวไม่ว่าเป็นทางการบริหารจัดการหรือทางวิศวกรรม ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัย ทางด้านชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน เหนืออื่นใดเชื่อว่าที่ปลอดภัยย่อมยังประโยชน์แก่ประชาชนตลอดไป



รูปที่ 10 ตำแหน่งเขื่อนในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว
(ขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้จาก กรมทรัพยากรธรณี (2548))