

“แผ่นดินไหวกับเขื่อน”

ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขื่อนเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ที่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างที่มีโอกาสเกิดการพิบัติต่ำแต่จะก่อให้เกิดความเสียหายสูง ดังนั้น วิศวกรจึงต้องออกแบบให้เขื่อนสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยทั้งในสภาวะปกติ อุทกภัยและแผ่นดินไหว Hoeg (1996) ได้รวบรวมข้อมูลเขื่อนที่เกิดการพิบัติถึงขั้นใช้งานไม่ได้ จำนวน 240 เขื่อน พบว่ามีเขื่อนที่พิบัติถึงขั้นใช้งานไม่ได้จากเหตุแผ่นดินไหวร้อยละ 1 (ตารางที่ 1) โดยจากสถิติที่ผ่านมาในอดีตพบว่าแผ่นดินไหวจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเขื่อนที่ไม่รุนแรงถึงขั้นที่จะทำให้เขื่อนพิบัติ 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

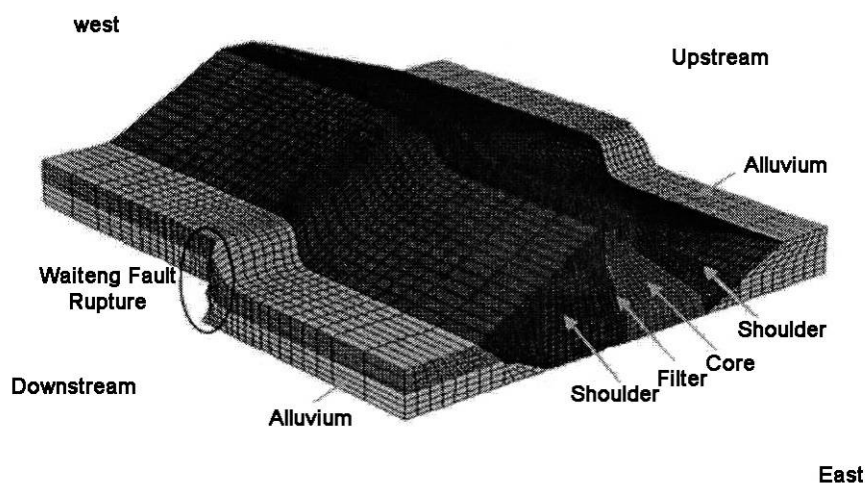
1. การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแนวตั้งใกล้ตัวเขื่อน ซึ่งจะก่อให้เกิดการยุบตัวของแผ่นดินส่งผลให้ระดับสันเขื่อนลดลงต่ำกว่าระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ กรณีนี้เป็นกรณีที่เกิดได้ยาก

2. การเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน ตัวอย่างในกรณีนี้ได้แก่เขื่อน Shi-Kong ในประเทศไต้หวันในครั้งที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ขนาด 7.6 ริกเตอร์แอสกล ในปี พ.ศ.2542 (Chi Chi Earthquake) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งผ่านกลางเขื่อนโดยมีความแตกต่างของการเคลื่อนตัวถึง 6 เมตร (รูปที่ 1) อย่างไรก็ตามเขื่อนไม่ได้เกิดการพิบัติเป็นช่องเปิดแต่อย่างใด สำหรับในสาเหตุการพิบัตินี้เป็นกรณีที่ป้องกันได้ตั้งแต่ขั้นสำรวจและออกแบบโดยนักธรณีจะทำการ ศึกษารอยเลื่อนใต้ฐานรากเขื่อนว่าเป็นรอยเลื่อนมีพลังหรือไม่และวิศวกรจะทำการออกแบบองค์ประกอบ เขื่อนที่เหมาะสมในการต้านทานการ

เคลื่อนตัว เช่น การเลือกใช้เขื่อนดินถมแทนเขื่อนคอนกรีตในพื้นที่เสี่ยง หรือการขยายความหนาของชั้นวัสดุกรอง (Filter) ให้มากกว่าปกติเพื่อรองรับการเคลื่อนตัวที่อาจเกิดขึ้นได้ สำหรับเขื่อนที่มีแนวโน้มที่อาจก่อสร้างอยู่บนรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault) อาจจำเป็นต้องวิเคราะห์เพื่อจำลองแรงกระทำในตัวเขื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเพื่อประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2 (Mejia et al., 2006)

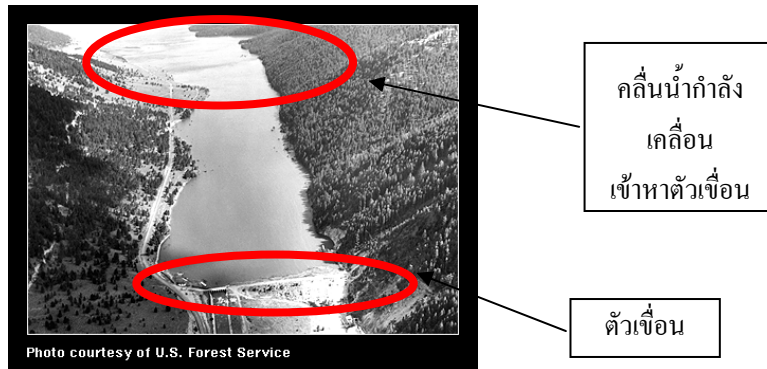


รูปที่ 1 ความเสียหายของเขื่อน Shi-Kong ประเทศไต้หวัน (R.S.Olsen, 1999)



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ 3 มิติของเขื่อน Aviemore ในกรณีที่เกิดการเลื่อนของรอยเลื่อนในฐานเขื่อน (Mejia et al., 2006)

3. การเกิดคลื่นน้ำในอ่างเก็บน้ำ (Seiches) เนื่องจากแรงสั่นสะเทือน คลื่นน้ำจะวิ่งเข้ากระแทกและล้นสันเขื่อนก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเขื่อนดังเช่นในกรณีของเขื่อน Hebgen ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ.2502 โดยเกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.8 ริกเตอร์ ทำให้เกิดคลื่นน้ำล้นสันเขื่อนหลายระลอก (รูปที่ 3) โดยเมื่อจบเหตุการณ์พบว่าเขื่อนมีความเสียหายเกิดขึ้นแต่ไม่พิบัติ



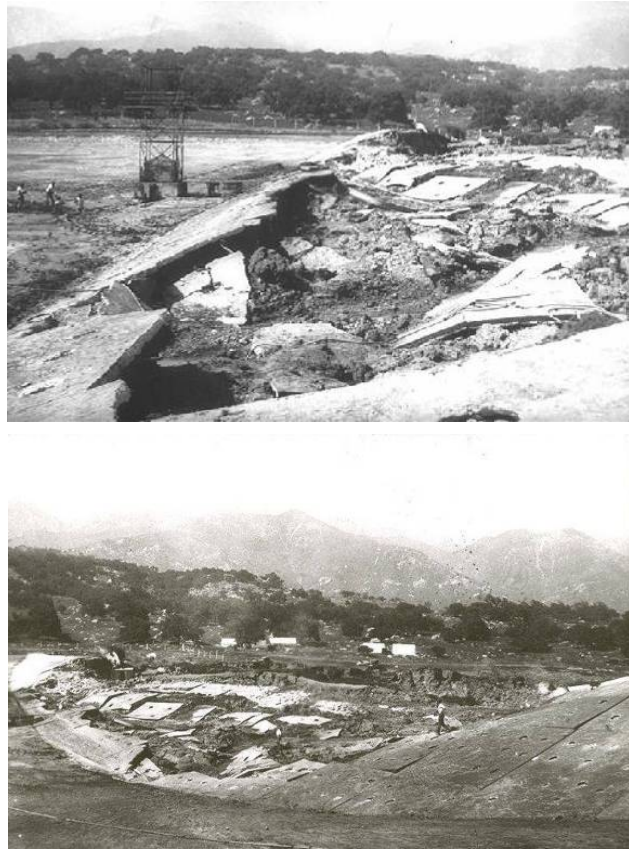
รูปที่ 3 คลื่นในอ่างเก็บน้ำเนื่องมาจากแผ่นดินไหว (Seiches)
เขื่อน Hebgen ประเทศสหรัฐอเมริกา

4. การเกิดดินถล่มรอบอ่างเก็บน้ำจากแรงแผ่นดินไหวทำให้เกิดน้ำล้นข้ามสันเขื่อน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณดินไหลลงมาแทนที่น้ำในอ่างพร้อม ๆ กัน เหตุการณ์ใกล้เคียงที่เคยเกิดขึ้นในอดีตคือเหตุการณ์ของเขื่อน Vaiont ในประเทศอิตาลี ถึงแม้สาเหตุไม่ได้เกิดจากแผ่นดินไหวแต่เกิดจากฝนตกหนักและสภาพโครงสร้างธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวย อย่างไรก็ตามแผ่นดินไหวอาจเป็นตัวกระตุ้นที่ดีที่จะก่อให้เกิดเหตุการณ์ใกล้เคียงเช่นนี้ได้

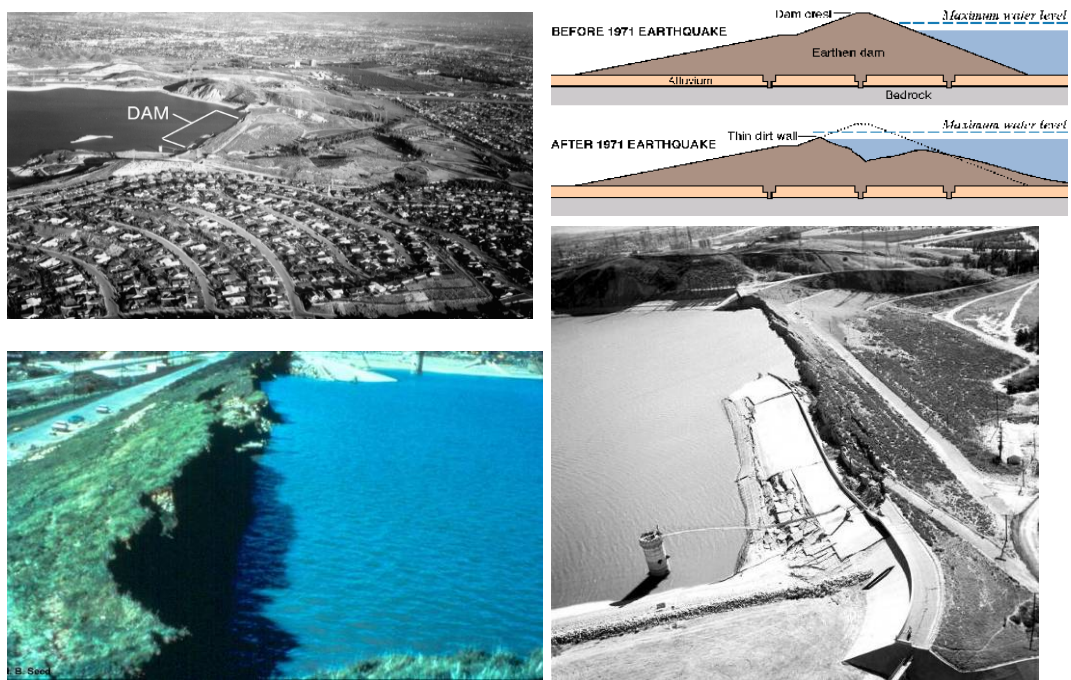
5. การพิบัติของอาคารบังคับน้ำ ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำได้ เหตุการณ์ดังกล่าวจะมีผลมากในช่วงที่มีน้ำหลากเข้าเขื่อนในช่วงฤดูฝนหรือช่วงอุทกภัย แผ่นดินไหวอาจทำให้ระบบการบังคับบานเกิดการติดขัดไม่สามารถเปิดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความบกพร่องของอาคารระบายน้ำล้นฉุกเฉิน ดังนั้นผู้ดูแลเขื่อนจำเป็นต้องเตรียมมาตรการป้องกันฉุกเฉินได้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

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

6. การสูญเสียกำลังของดินตัวเชื่อมหรือฐานรากเนื่องจากการเกิด Liquefaction โดย Liquefaction เป็นปรากฏการณ์ที่ดินทรายหรือกรวดที่อิ่มตัวด้วยน้ำเกิดการสูญเสียกำลัง เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เหตุดังกล่าวเกิดจากมีความสั่นสะเทือนของคลื่นแผ่นดินไหวที่แรงพอที่จะทำให้แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดดินอยู่ห่างกันมากขึ้นกำลังรับน้ำหนักของดินจึงลดต่ำลงจนถึงจุดพิบัติ เหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดเฉพาะดินทรายหลวมหรือกรวดที่มีความแน่นต่ำเท่านั้น Liquefaction สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งดินตัวเชื่อมหรือดินฐานราก และสามารถทำให้เชื่อมเกิดการพิบัติได้อย่างรวดเร็ว เชื่อมที่ก่อสร้างด้วยเทคนิคการก่อสร้างในปัจจุบันมีโอกาสเกิด Liquefaction ต่ำเพราะได้รับการก่อสร้างโดยระบบการบดอัดดินให้มีความแน่น เชื่อมที่มีโอกาสเกิด Liquefaction ได้ง่ายที่สุดได้แก่เชื่อมที่ก่อสร้างโดยเทคนิค Hydraulic Fill หรือการบดอัดดินโดยใช้น้ำฉีด ซึ่งดินตัวเชื่อมจะมีความหลวมและมีปริมาณน้ำอยู่มาก ปี พ.ศ. 2468 เกิดแผ่นดินไหวที่เมือง Santa Barbara ขนาดความรุนแรง 9 Rossi-Forsel แสกล ทำให้เกิดการพิบัติอย่างสมบูรณ์ของเชื่อม Sheffield ซึ่งเป็นเชื่อมดินคาน้ำคอนกรีต (รูปที่ 4) เชื่อมดังกล่าวเปิดใช้งานในปี พ.ศ. 2461 และก่อสร้างโดยขาดการบดอัดที่ดีทำให้ดินอยู่ในสภาพหลวมผู้เชี่ยวชาญคาดว่าสาเหตุการพิบัติของเชื่อมเกิดจากการเกิด Liquefaction ที่บริเวณดินฐานรากด้านบนหรือดินถมส่วนล่างของตัวเชื่อม อย่างไรก็ตามในขณะนั้นวิศวกรปฐพียังไม่คุ้นเคยและรู้จักปรากฏการณ์ Liquefaction ดีพอ 46 ปีต่อมาในปี พ.ศ. 2514 ได้เกิดแผ่นดินไหวที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ขนาดความรุนแรง 6.6 ริคเตอร์ แสกล แผ่นดินไหวดังกล่าวทำให้เชื่อม Lower San Fernando เกิดความเสียหายแต่ไม่ถึงกับพิบัติอย่างสมบูรณ์ เชื่อมดังกล่าวตั้งอยู่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 20 กม. แผ่นดินไหวทำให้เกิด Liquefaction ของดินภายในตัวเชื่อม ทำให้ลาดเชื่อมไถลลงไปตามด้านเหนือน้ำหรือไถลลงในอ่างเก็บน้ำ ส่งผลให้ระดับสันเชื่อมลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 5 ในเวลานั้นเหลืออีกเพียง 1 เมตร ที่น้ำจะสามารถข้ามสันเชื่อมได้ ถ้าเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจะก่อให้เกิดสูญเสียอย่างใหญ่หลวงตามมา หลังจากเหตุการณ์เกือบพิบัติของเชื่อม Lower San Fernando ได้เกิดการศึกษารื่อง Liquefaction อย่างจริงจัง ส่งผลให้เกิดการพัฒนาทฤษฎีในการวิเคราะห์และเทคนิคการก่อสร้างเพื่อป้องกันการเกิด Liquefaction ที่ค่อนข้างจะดีในปัจจุบัน โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหากค่า Standard Penetration Number ของดินทรายหรือกรวดอิ่มตัวที่มีค่าสูงกว่า 35 จะมีโอกาสการเกิด Liquefaction ต่ำมากหรือแทบจะไม่มี (Seed (1985), Liao (1988), Youd and Noble (1997)) ทั้งนี้พิจารณาที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวเท่ากับ 7.5 ริคเตอร์ แสกล ดังนั้นเชื่อมที่ออกแบบและก่อสร้างโดยวิธีการบดอัดตามมาตรฐานจึงมีโอกาสเกิดการพิบัติเนื่องจากการเกิด Liquefaction ต่ำ



รูปที่ 4 การพังทลายของเขื่อน Sheffield ปี พ.ศ.2461 (Sherard et al.,1963)



รูปที่ 5 ความเสียหายของเขื่อน Lower San Fernando ปี พ.ศ. 2514 (USGS,1995)

7. การยุบตัวและเคลื่อนด้านข้างเนื่องมาจากแรงสั่นสะเทือนก่อให้เกิดรอยแตกในแนวขนานกับสันเขื่อน (รูปที่ 6) ลักษณะความเสียหายในข้อนี้เป็นความเสียหายที่พบได้บ่อยที่สุด ดังพิสูจน์ได้จากข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 (Swaisgood, 1998) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเขื่อนส่วนใหญ่จะเกิดรอยแยกหรือยุบตัวเมื่อเกิดแผ่นดินไหวมากกว่าที่จะพิบัติลงทันทีโดยที่ผู้คนที่เข้าไปเข้าใจพฤติกรรม การเกิดเปรียบเสมือนการทุบโต๊ะที่มีกองทรายกองอยู่เป็นรูปกรวยแต่ละครั้งที่ทุบลงไปจะส่งผลให้ทรายไหลตัวลงด้านข้าง จนถึงความชันของกองทรายระดับหนึ่ง ทรายจะไม่มีเคลื่อนตัวเพิ่มหรือมีการเคลื่อนตัวน้อยมาก ดังนั้นลักษณะความเสียหายจากการเคลื่อนตัวดังกล่าวมักจะไม่รุนแรงถึงขั้นเกิดการพังทลายของลาดชันอย่างทันทีทันใด การไหลตัวของลาดชันเขื่อนดังกล่าว นอกจากก่อให้เกิดรอยแตกในแนวขนานกับแกนเขื่อนแล้วในบางกรณีอาจเกิดรอยแตกในแนวขวางได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ติดกับอาคารระบายน้ำหรือฐานยันเขื่อน สำหรับการวิเคราะห์ขนาดการทรุดตัวสามารถกระทำได้โดยการวิเคราะห์ความเร่งเฉลี่ยของมวลดินที่จะพิบัติ เมื่อความเร่งเฉลี่ยของมวลดินมากกว่าค่าความเร่งที่จะทำให้มวลดินมีอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 1.0 (Yield Accereration) มวลดินจะเคลื่อนตัวและจะเริ่มหยุดเมื่อความเร่งเฉลี่ยลดต่ำลง และแรงกระทำจากแผ่นดินไหวมีทิศทางตรงข้าม (รูปที่ 7)



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 6 แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวก่อให้เกิดรอยแตกขนานกับแกนเขื่อน (S.K.Jain)

โครงการอบรม ความปลอดภัยเขื่อนในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย
ระหว่างวันที่ 20-21 กันยายน 2550 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น

ตารางที่ 2 ข้อมูลความเสียหายของเขื่อนจากแผ่นดินไหว (Swaisgood, 1998)

Table 1. Earthquake induced deformation of embankment dams

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

ตารางที่ 2 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายของเขื่อนจากแผ่นดินไหว (Swaisgood, 1998)

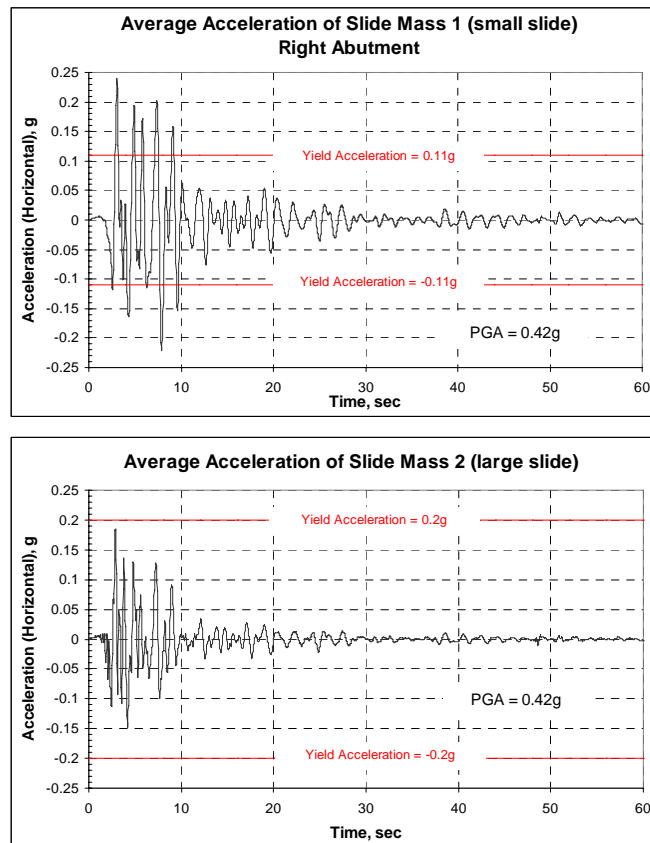
Table 1 continued. Earthquake induced deformation of embankment dams

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

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

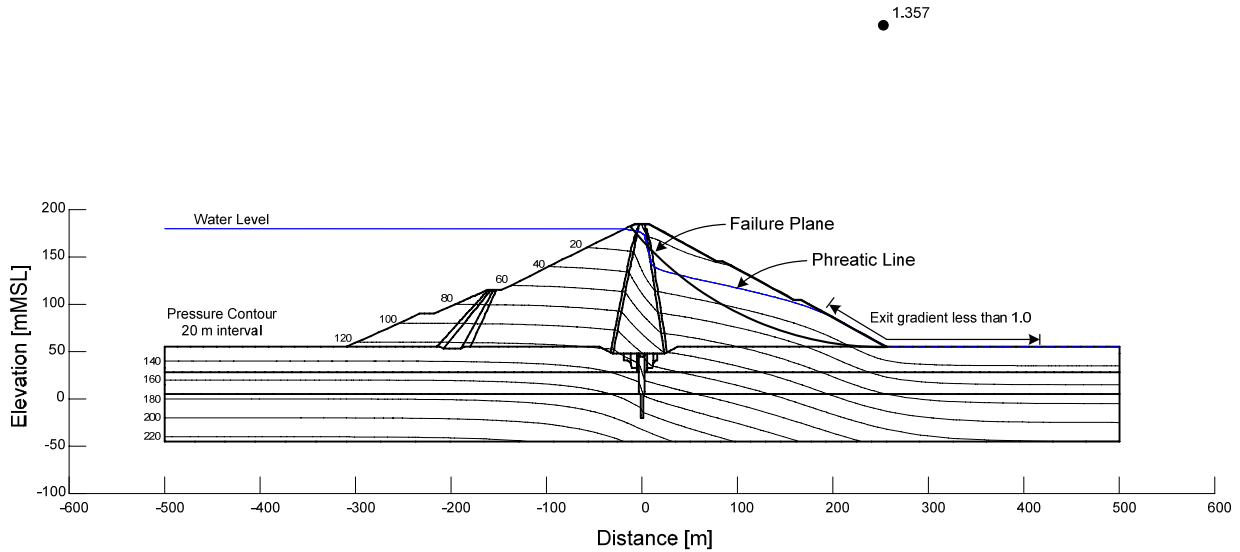
DAM TYPES
 HF - Hydraulic Fill
 E - Earthfill
 ECRD - Earth Core Rockfill Dam
 CFRD - Concrete Faced Rockfill Dam

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



รูปที่ 7 ค่าความเร่งเฉลี่ยของมวลดินลาดชันและขีดจำกัดที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว
(Soralump,2002)

8. การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนตามรอยแตกตามขวาง เมื่อเกิดรอยแตกจากการสั่นสะเทือน ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น น้ำจะสามารถไหลซึมผ่านรอยแตกทำให้แรงดันน้ำขยายรอยแตกหรือกัดเซาะเม็ดดินภายในตัวเขื่อนและก่อให้เกิดการรื้อพังทลายในที่สุด การออกแบบ Filter ที่มีความหนาเป็นพิเศษจะช่วยลดความเสี่ยงที่น้ำจะไหลทะลุตัวเขื่อนได้ นอกจากนั้นหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวผู้ดูแลเขื่อนควรเร่งดำเนินการตรวจสอบรอยแตกต่าง ๆ ในเขื่อนโดยทันที การลดระดับน้ำหากพบรอยแตกสำคัญจะช่วยป้องกันการพังทลายได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยในกรณีน้ำรั่วไหลผ่านตัวเขื่อนอาจจะทำได้ สุทธิศักดิ์และชินโรส (2550) ได้จำลองสภาพการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนเมื่อเกิดรอยแตกตามขวางจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความมั่นคงของลาดชันที่ลดลงจากการเพิ่มแรงดันน้ำ



รูปที่ 8 การวิเคราะห์การไหลซึมเมื่อเกิดการรั่วผ่านแนวแตกตามขวาง (สุทธิศักดิ์ และ ชีโนรส, 2550)

การวิเคราะห์และออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

ทฤษฎีการออกแบบลาดชันเขื่อนสำหรับแรงแผ่นดินไหวในปัจจุบันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีสองรูปแบบ คือ

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

วิธี Pseudo Static เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว และยังคงใช้ได้ดังอยู่ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ดำเนินการเหมือนการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันปกติ เพียงแต่เพิ่มแรงในแนวราบสำหรับการคำนวณแรงในแนวราบที่เกิดจากความเร่งของแผ่นดินไหวเข้าไปในสมการดังแสดงในรูปที่ 9 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) การลดทอนค่า PGA ลงดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ออกแบบลาดชันเขื่อนได้ตรงตามพฤติกรรมจริงระหว่างเกิดการเกิดแผ่นดินไหว ดังจะได้อีกต่อไป รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Pseudo Static อย่างไรก็ตามในพฤติกรรมจริงลาดชันเขื่อนอาจมีความเร่งเฉลี่ยสูงกว่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการขยายสัญญาณของดินถมตัวเขื่อน ดังนั้นในปัจจุบันจึงเริ่มมีการนำวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนมาใช้ (Dynamic Response Analysis) ซึ่งวิธีดังกล่าวได้พิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุตัวเขื่อนที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Shear Strain การวิเคราะห์ดังกล่าวกระทำโดยวิธี Finite Element ดังแสดงในรูปที่ 11

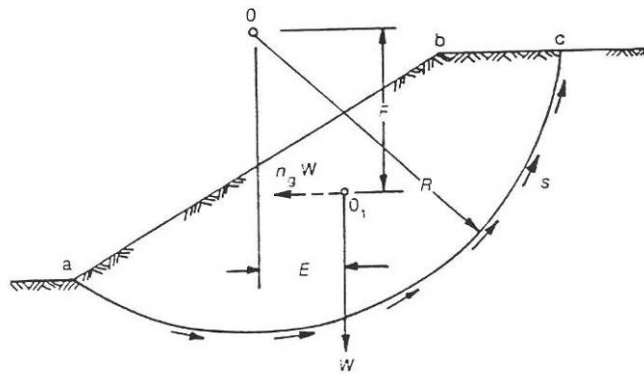
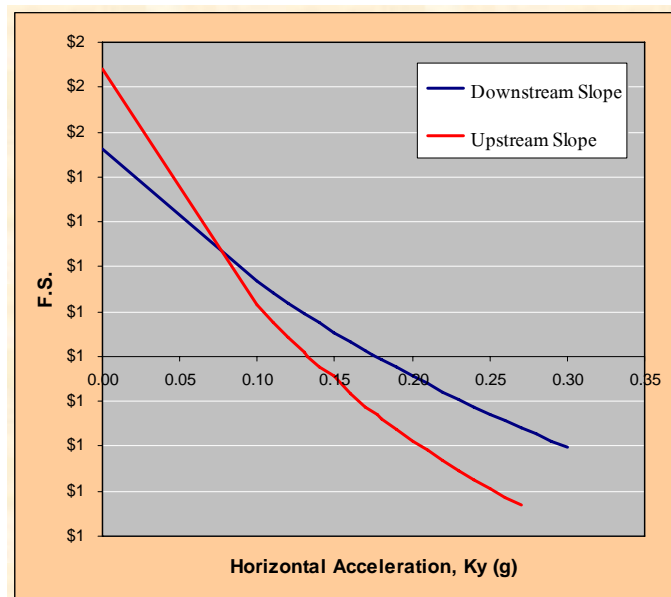
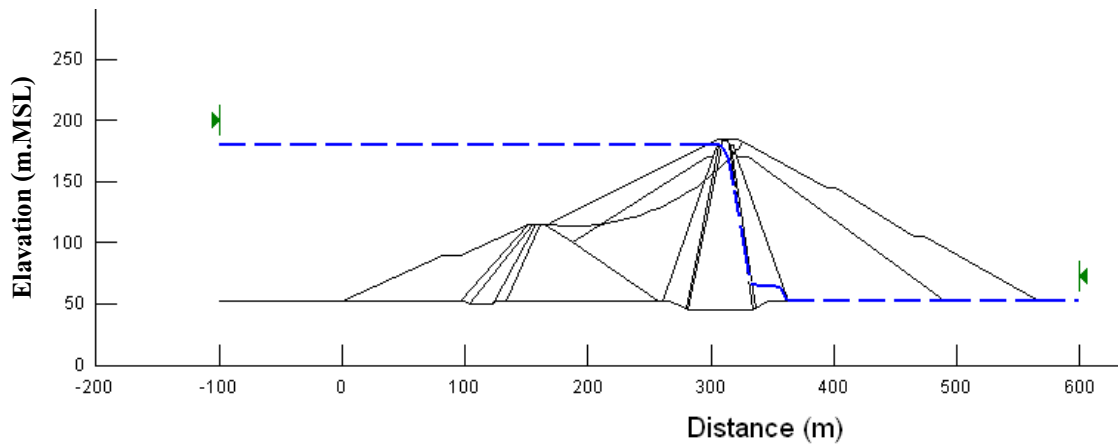
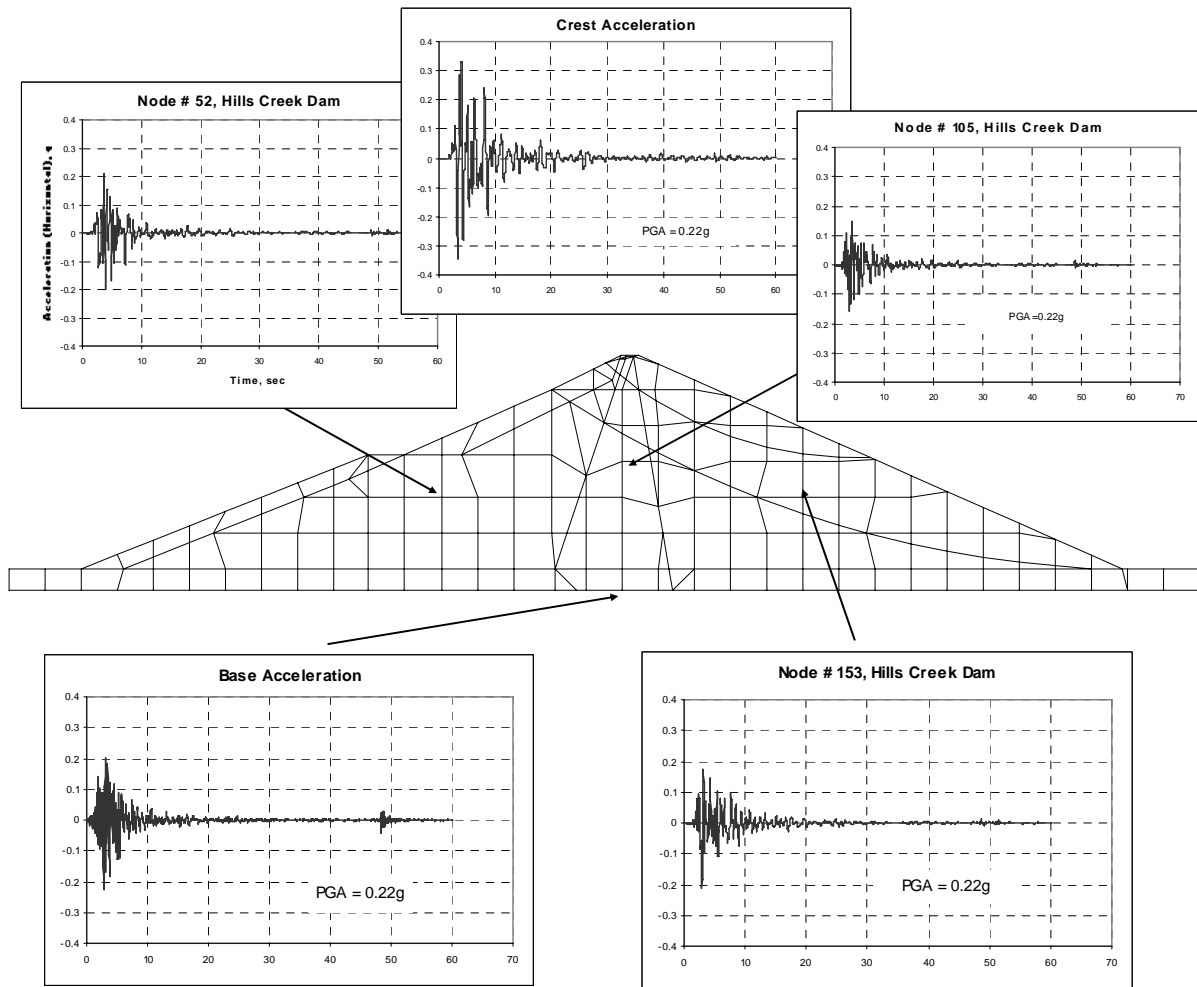


Figure 2. Pseudo-static analysis for computing effect of earthquake on stability of a slope (after Terzaghi 1950) (Seed 1979)

รูปที่ 9 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันด้วยวิธี Pseudo-Static (Seed, 1979)



รูปที่ 10 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Pseudo Static โดยให้ความเร่งในแนวราบกระทำตามขนาดต่าง ๆ กัน (สุทธิศักดิ์และเกรียงไกร, 2550)

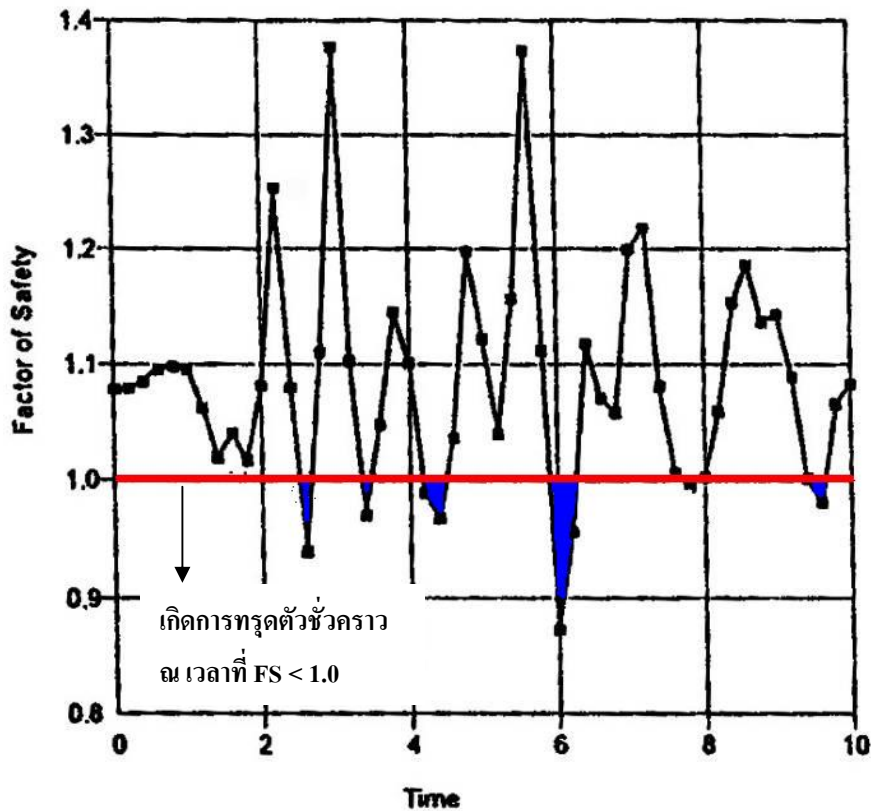


รูปที่ 11 การวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนต่อแรงพลศาสตร์ (Soralump, 2002)

ถ้าเกิดแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA สูงกว่าที่ออกแบบไว้เขื่อนต้องพิบัติใช่หรือไม่ ?

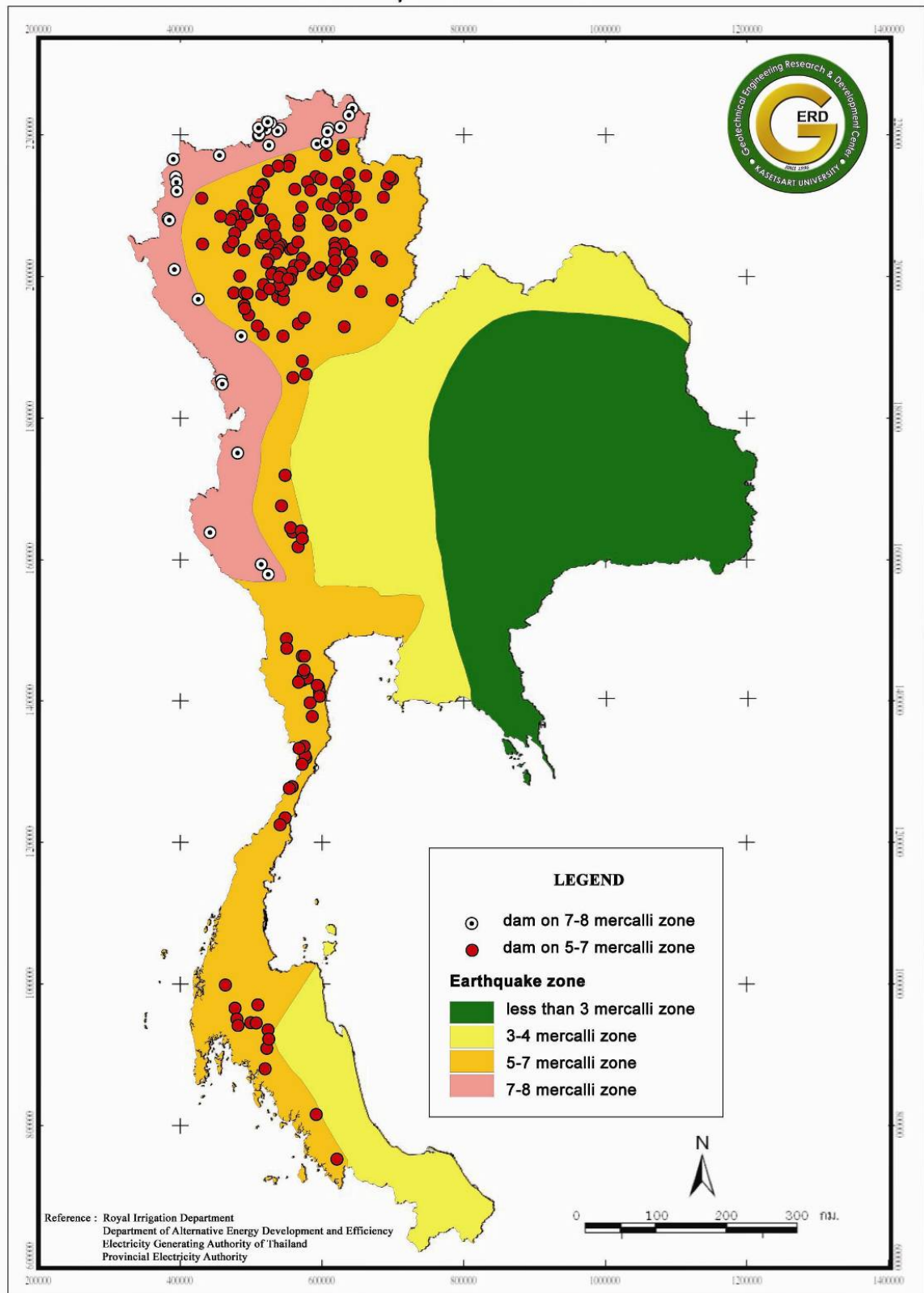
หากเขื่อนก่อออกแบบด้วยค่าความเร่งในแนวราบเท่ากับ 0.1 g ถ้าปัจจุบันเกิดแผ่นดินไหวแล้วส่งให้ความเร่งเฉลี่ยของลาดชันมากกว่า 0.1 g เขื่อนอาจจะพิบัติหรือไม่พิบัติก็ได้ ไม่จำเป็นต้องพิบัติเสมอไป ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวอาจมีค่าความเร่งเกินค่าที่ออกแบบไว้เพียงช่วงเสี้ยววินาที แล้วจึงกลับทิศของความเร่งไปในทิศตรงกันข้าม ดังนั้นมวลดินบนลาดชันอาจเกิดการขยับไหลลงเพราะค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำกว่า 1.0 ในช่วงเสี้ยววินาทีนั้น แต่หลังจากนั้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากทิศทางของแรงกระทำแผ่นดินไหวกระทำในทิศกันข้าม มวลดินจะหยุดเคลื่อนและจะเคลื่อนอีกครั้งหากค่าความเร่งทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันต่ำกว่า 1.0 อีก (รูปที่ 12) ดังนั้นแผ่นดินไหวจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้เขื่อนเกิดรอยแตกตามแนวแกนเขื่อนมากกว่าที่จะเกิดการพิบัติอย่างทันที

ทันใด การพิบัติอย่างทันทีทันใดของเขื่อนจากแผ่นดินไหวมีโอกาสเกิดได้มากที่สุดในกรณีที่มีการเกิด Liquefaction ในตัวเขื่อนหรือฐานรากเขื่อนเท่านั้น



รูปที่ 12 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเปรียบเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว
(ดัดแปลงจาก Slope/W)

สำหรับในประเทศไทยนั้น พิจารณาตามแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวตามประกาศกรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2548 พื้นที่ 2ก และ 2ข หรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายในระดับน้อยถึงปานกลางและในระดับปานกลางตามลำดับ มีเขื่อนที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งมีจำนวน 37 เขื่อน อยู่ในพื้นที่ 2ข และ 178 เขื่อน อยู่ในพื้นที่ 2ก (จากข้อมูลที่มีทั้งหมด 488 เขื่อน) เขื่อนที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าว อาจจำเป็นต้องมีมาตรการในการป้องกันภัยจากแผ่นดินไหวไม่ว่าเป็นทางด้านการบริหารจัดการหรือทางวิศวกรรม ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัย ทางด้านชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเหนืออื่นใดเขื่อนที่ปลอดภัยย่อมยังประโยชน์แก่ประชาชนตลอดไป



รูปที่ 13 ตำแหน่งเขื่อนในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (สุทธิศักดิ์, 2550)
(ขอบเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้จาก กรมทรัพยากรธรณี (2548))