

การวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ ของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์¹
เกรียงไกร แทนสุโพธิ์²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Soralump_S@yahoo.com

²นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Kriengkrai2000@hotmail.com

บทคัดย่อ : เขื่อนศรีนครินทร์อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ในอดีตเขื่อนได้ถูกออกแบบโดยวิธี Pseudostatic ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสั่นสะเทือนในแนวราบเท่ากับ 0.10 โดยหากเกิดแผ่นดินไหวที่ให้ค่าความเร่งในแนวราบมากกว่า 0.1g เขื่อนอาจจะพิบัติหรือไม่พิบัติขึ้นอยู่กับปัจจัยประกอบอื่นๆ เนื่องจากสมมุติฐานการวิเคราะห์โดยวิธี Pseudostatic ไม่ครอบคลุมพฤติกรรมจริงของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์ความมั่นคงปลอดภัยของเขื่อนโดยวิธีการตอบสนองจากแรงพลศาสตร์ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริง โดยพบว่าส่วนต่างๆ ในตัวเขื่อนจะมีพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์แตกต่างกันและอัตราเร่งในแนวราบของวัสดุตัวเขื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเขื่อน โดยเริ่มเพิ่มมากขึ้นเมื่อถึงระดับความสูงประมาณ 2 ใน 3 ของความสูงเขื่อนและมีค่ามากที่สุดที่ระดับความสูง +180 ม.รทก. สำหรับค่าการทรุดตัวถาวรของสันเขื่อนจากแรงแผ่นดินไหวมีปัจจัยหลักขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวเขื่อน คุณสมบัติของวัสดุถมเขื่อน ระดับเก็บกักน้ำในเขื่อนและองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหว โดยพบว่าผลการวิเคราะห์โดยวิธี Newmark's Deformation (1965)) มีค่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากข้อมูลสถิติโดยวิธี Swaisgood (1998) ทำให้มั่นใจได้ถึงความต้องการของแบบจำลองโดยการทรุดตัวถาวรของสันเขื่อนกรณีระดับเก็บกักน้ำปกติพบว่ามีความมากที่สุด 3.40 เมตร จากแผ่นดินไหวที่มีค่าอัตราเร่งของพื้นดินสูงสุดกระทำที่ฐานเขื่อน 1.17g ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระยะเผื่อพื้นน้ำของเขื่อนคือ 5 เมตร ดังนั้นเขื่อนจึงจะไม่เกิดการพิบัติอย่างทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามเขื่อนอาจเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงได้หากเกิดการไหลซึมผ่านรอยแตกหลังการเกิดแผ่นดินไหวและอาจทำให้เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนที่ติดตั้งไว้บริเวณสันเขื่อนได้รับความเสียหายได้

ABSTRACT : Srinagarind dam is located in the seismic risk area. In the past, the stability of Srinagarind dam was designed with 0.10g seismic coefficient (k_h) by Pseudostatic method. Therefore, the dam has to be analyzed by dynamic response analysis method to be more realistic of dynamic behavior of dam materials. The dynamic response behaviors of dam are different in each of dam zone. The displacement and acceleration in the horizontal direction of dam significantly increases with dam height by rapidly increase at 2 to 3 of dam height and reach the maximum values at elevation of +180 m.MSL. The permanent slope displacement is found to be depended on dam geometry, material properties, reservoir water level, and ground motion parameters. The permanent slope displacement calculated by Swaisgood method (1998) is closed to Newmark's deformation method (1965). The dam crest settlement at normal high water level has a maximum value of 3.4 m from 1.17g earthquake. The results show that Srinagarind dam will not breach under strong earthquake. However, the dam crest and some instruments in the dam crest might be damaged significantly.

KEYWORDS : Dam engineering, Earthquake, Peak ground acceleration, Dynamic response analysis, Seismic deformation analysis

1. บทนำ

เขื่อนศรีนครินทร์เป็นเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว ตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณรอยเลื่อนมีพลังศรีสวัสดิ์และเจดีย์สามองค์ ในอดีตการออกแบบเขื่อนด้านความมั่นคงต่อแรงแผ่นดินไหวใช้วิธี Pseudostatic ให้สามารถรับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวโดยใช้ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินตามแนวระนาบเท่ากับ 0.10g หรือมีความสามารถต้านทานต่อแผ่นดินไหวขนาด 7.5 ริคเตอร์ ที่ระยะห่างจากเขื่อนถึงจุดกำเนิดแผ่นดินไหวประมาณ 200 กิโลเมตร ซึ่งการออกแบบโดยวิธี Pseudostatic อาจมีผลที่ต่างจากความเป็นจริง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีสมมุติฐานว่ามวลการพิบัติเป็น Rigid Block ไถลลงตามระนาบในขณะที่ความเป็นจริงวัสดุตัวเขื่อนไม่ใช่ Rigid Material แต่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้าน Stiffness ตามความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นจากสมมุติฐานที่ต่างกันนี้ทำให้ในอดีตมีเขื่อนที่ออกแบบโดยวิธี Pseudostatic บางเขื่อนมีความเสียหายเกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว ถึงแม้ค่าความเร่งในแนวราบหรืออัตราส่วนความปลอดภัยจะยังอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 เขื่อนที่ออกแบบโดยวิธี Pseudostatic เสียหายจากแผ่นดินไหว

Dam	K_h	F.S.	Effect of Earthquake
Sheffield Dam	0.10g	1.2	Complete failure.
Lower San Fernando Dam	0.15g	1.3	Upstream slope failure.
Upper San Fernando Dam	0.15g	~2-	Downstream shell including crest slipped about 6 ft downstream.
Tailing Dam (Japan)	0.20g	~1.3	Failure of dam with release of tailings.

(ปรับปรุงจาก Seed, 1979)

K_h = Seismic Coefficient ที่ใช้ออกแบบ

F.S. = ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันจากการออกแบบ

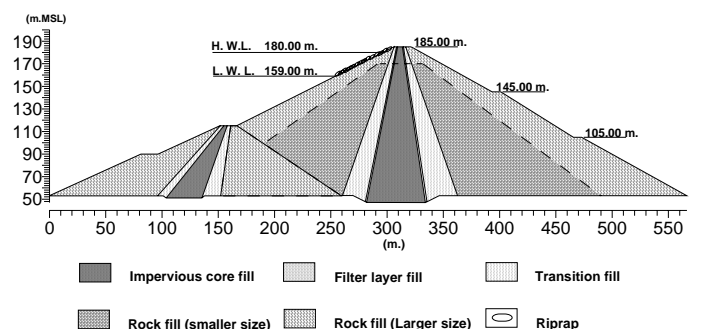
และมีอีกหลายเขื่อนที่เมื่อถูกแรงกระทำแผ่นดินไหวทำให้เกิดค่าความเร่งในแนวราบมากกว่าที่ใช้ออกแบบแต่ไม่เกิดการพิบัติ ดังเช่นกรณีของเขื่อน Zipingpu ในประเทศจีนที่ถูกกระทำโดยแผ่นดินไหว Wenchuan เมื่อวันที่ 12 เม.ย. 2551 พบว่าเกิดความเร่งในแนวราบที่สันเขื่อนถึง 2.0g มากกว่าที่ออกแบบโดยวิธี Pseudostatic ไว้มากคือ 0.26g แต่เขื่อนยังมีความปลอดภัย

โดยมีการหลุดตัวสูงสุดของสันเขื่อนประมาณ 0.73 เมตร ปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนได้ถูกพัฒนาให้มีสมมุติฐานตรงตามความเป็นจริง คือพิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุทางพลศาสตร์เมื่อค่า Shear Strain เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับสภาพจริงเมื่อเกิดแผ่นดินไหวกว่าวิธี Pseudostatic

2. ข้อมูลทั่วไปของเขื่อนศรีนครินทร์

เขื่อนศรีนครินทร์ เป็นเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว สูง 140 เมตร มีสันเขื่อนกว้าง 15 เมตรและยาว 610 เมตร มีปริมาตรความจุอ่าง 17,745 ล้านลูกบาศก์เมตรที่ระดับเก็บน้ำปกติ +180 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง เขื่อนมีรูปหน้าตัดโดยทั่วไปบริเวณกลางเขื่อนดังภาพที่ 1 ก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ.2519 ถึง พ.ศ.2521 กั้นแม่น้ำแควใหญ่ บริเวณ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี มีน้ำเต็มปริมาตรกักเก็บสูงสุดในปี พ.ศ.2524

U.S. Geological Survey (2008) ได้บันทึกเหตุการณ์แผ่นดินไหว ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 ถึงปี พ.ศ. 2551 ที่มีตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากสันเขื่อนในรัศมีไม่เกิน 100 กิโลเมตร พบว่าเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดสูงสุด 5.9 ริคเตอร์ ในวันที่ 22 เมษายน พ.ศ.2526 โดยห่างจากสันเขื่อนประมาณ 58 กิโลเมตร มีค่าอัตราเร่งของพื้นดินสูงสุดบริเวณสันเขื่อนเท่ากับ 0.051g ในแนวดิ่งและ 0.027g ในแนวราบตามขวาง นอกจากนั้นยังพบว่าจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณปลายอ่างเก็บน้ำ โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการกักเก็บน้ำของเขื่อน (reservoir induced) ซึ่งความถี่และความรุนแรงของแผ่นดินไหวค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและระบบได้ปรับสมดุล



ภาพที่ 1 หน้าตัดทั่วไปเขื่อนศรีนครินทร์

3. คุณสมบัติของวัสดุถมเขื่อนศรีนครินทร์

คุณสมบัติทางสถิติและพลศาสตร์ต่างๆ ของวัสดุตัวเขื่อนได้มาจากผลการทดสอบในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการรวมทั้งได้จากการอ้างอิงข้อมูลระหว่างก่อสร้างและงานวิจัยต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมได้นำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของวัสดุในสภาพปัจจุบัน

3.1 คุณสมบัติของวัสดุทางสถิติ

Champa and Mahatharadol (1982) สรุปคุณสมบัติของวัสดุทางสถิติที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนศรีนครินทร์ โดยชั้นวัสดุแกนเขื่อนส่วนใหญ่ประกอบด้วยดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand: SC) มีกรวดและเศษหินปน ส่วนชั้นวัสดุกรอง (Filter zone) ประกอบด้วยหินปูน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 15 เซนติเมตร วัสดุตัวกลาง (Transition zone) ประกอบด้วยหินควอร์ตไซต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 30 เซนติเมตร วัสดุถมเขื่อน ประกอบด้วยหินปูน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 70 และ 150 เซนติเมตร สำหรับโซน 4 และ 5 ตามลำดับ คุณสมบัติวัสดุถมเขื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนในขั้นตอนออกแบบก่อสร้าง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางสถิติของวัสดุถมเขื่อน

Zone	Description	Unit Weight t/m ³			Cohesion (t/m ²)	Coefficient of Internal Friction
		Dry	Wet	Sat.		
1	Impervious	1.80	2.03	2.13	4	0.30
2	Filter	2.00	2.04	2.25	-	0.70
3	Transition	2.00	2.04	2.25	-	0.70
4	Rockfill Zone 4 (Smaller)	1.80	1.82	2.13	-	0.65
5	Rockfill Zone 5 (Larger)	1.75	1.77	2.09	-	0.80

(Champa and Mahatharadol, 1982)

3.2 คุณสมบัติวัสดุทางพลศาสตร์

3.2.1 โมดูลัสเฉือนสูงสุดของวัสดุตัวเขื่อน

โมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus, G_{max}) ของวัสดุตัวเขื่อนเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมด้านพลศาสตร์ของตัวเขื่อนเป็นอย่างมาก การได้มาของค่าดังกล่าว

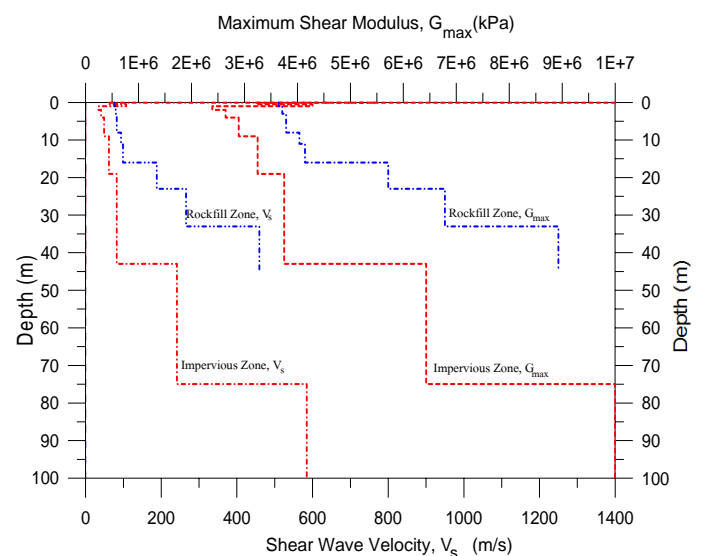
สำหรับเขื่อนที่มีวัสดุถมตัวเขื่อนขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ดังนั้นค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดของวัสดุตัวเขื่อนจึงต้องพิจารณาทั้งจากการทดสอบในสนามและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยต่างๆ ค่าที่ได้จะได้นำมาวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อผลลัพธ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ดังนี้

สมการ Empirical

สำหรับชั้นหินถมและวัสดุกรอง ค่า G_{max} สามารถหาได้จากสมการที่ได้จากการทดสอบ Cyclic Triaxial Test ของ Kokusho and Esashi (1982) วัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อนค่า G_{max} ได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Hardin and Black (1968) นอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบค่า G_{max} สำหรับชั้นหินถมที่ได้จากสมการ ของ Seed and Idriss (1970)

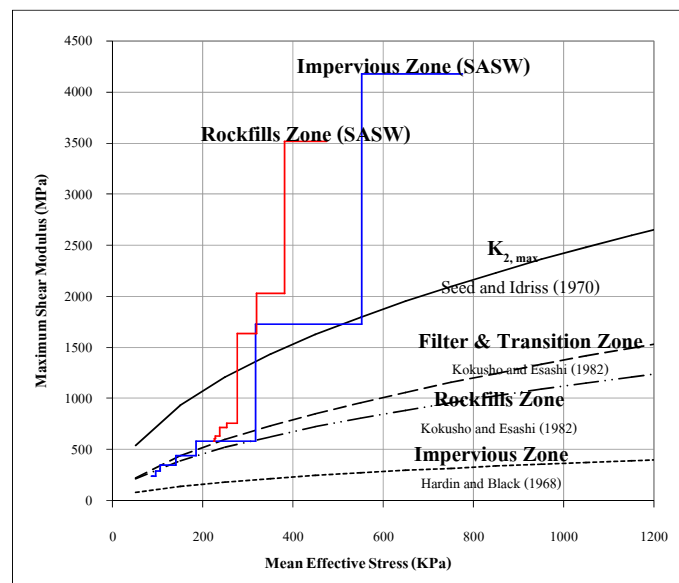
การทดสอบ Spectrum Analysis of Surface Wave (SASW)

การทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ในสนามดำเนินการโดยวิธี SASW โดย Bay and Chaiprakaikeow (2006) จาก Utah State University ร่วมกับศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์โดยการว่าจ้างจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บริเวณตัวเขื่อน ฐานรากและฐานยันเขื่อนศรีนครินทร์ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นวัสดุที่บ้น้ำและหินถม ได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความเร็วคลื่นเฉือนและโมดูลัสเฉือนสูงสุดของชั้นวัสดุถมเขื่อน (Bay and Chaiprakaikeow, 2006)

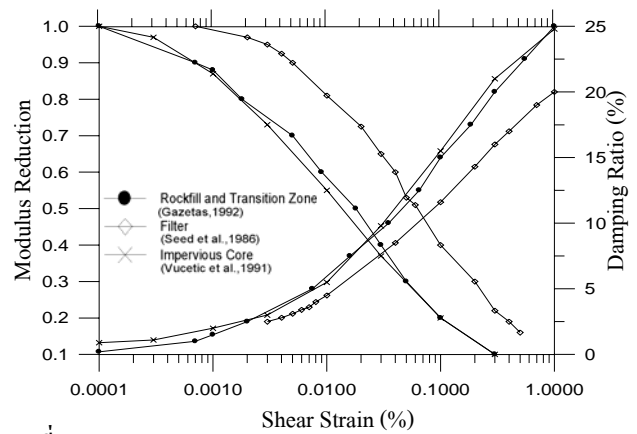
ผลการวิเคราะห์แต่ละวิธีมีค่าแตกต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อแรงดันประสิทธิผลในตัวเชื่อมมีค่าสูง ดังภาพที่ 4 โดยค่า G_{max} ที่ได้จากการทดสอบ SASW จะมีค่าที่สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เมื่อ Mean effective stress มีค่าสูงเกินกว่า 300 KPa ทั้งนี้เนื่องจากการได้มาซึ่งสมการ Empirical มีการทดสอบตัวอย่างภายใต้ข้อจำกัดหลายอย่างเช่นขนาดของตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กกว่าขนาดของวัสดุเชื่อมมาก และการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่สามารถจำลองสภาพความเค้นปัจจุบันได้เหมือนกับสภาพจริงเนื่องจากแรงกระทำกับตัวเชื่อมมีค่าสูงมาก



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{max} และแรงดันประสิทธิผลเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมที่ได้จากวิธีต่างๆ

3.2.2 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลง G/G_{max} และ Damping Ratio

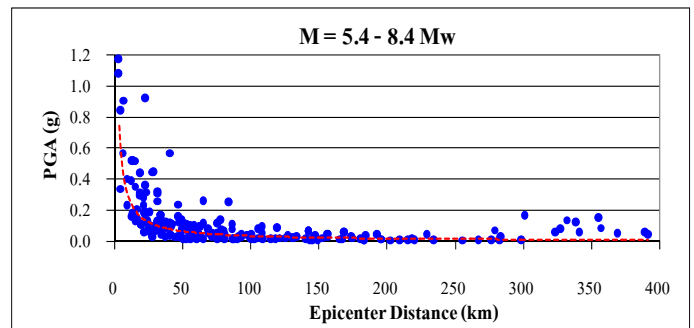
การวิเคราะห์การตอบสนองของแรงกระทำแผ่นดินไหวดำเนินการโดยวิธี Equivalent Linear เพื่อจำลองสภาพ Non Linear ของตัวแปรทางพลศาสตร์ของวัสดุ ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน โมดูลัสเฉือนและระดับความเครียดเฉือนของวัสดุ ดังภาพที่ 5 ซึ่งค่าอัตราส่วน โมดูลัสเฉือนจะมีค่าลดลงตามขนาดของความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับค่าอัตราส่วน Damping ในการศึกษานี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวจากการศึกษาของ Gazetas (1992) Seed et al. (1986) และ Vucetic et al. (1991) สำหรับวัสดุหินถม วัสดุกรองและวัสดุที่บ้น้ำแกนเชื่อมตามลำดับ



ภาพที่ 5 Modulus reduction and damping ratio curves

4. คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

เนื่องจากขาดแคลนข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดิน ที่บันทึกได้บริเวณเขื่อน จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลก จำนวน 213 ข้อมูล จากแผ่นดินไหว 35 เหตุการณ์ที่มี PGA สูงสุด 1.17g โดยพิจารณาเลือกข้อมูลที่ตรวจวัดได้เฉพาะในชั้นหิน เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ ของข้อมูลใกล้เคียงกับสภาพฐานรากเขื่อน และมีสถานีตรวจวัดอยู่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวในระยะต่างๆ จนถึง 400 กิโลเมตร (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งพื้นดินสูงสุดและระยะห่างจากศูนย์กลางเกิดแผ่นดินไหว

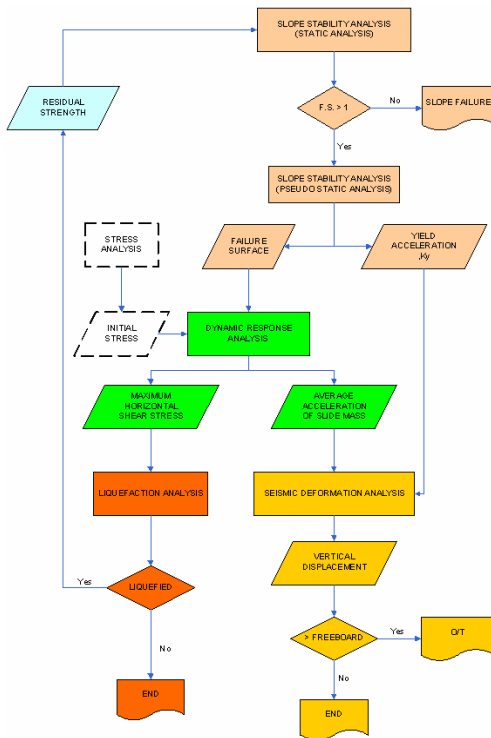
5. ขั้นตอนการวิเคราะห์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วย 7 ส่วนหลัก ได้แก่

- การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดชันเขื่อนโดยวิธี Pseudostatic
- การวิเคราะห์สภาพความเค้นปัจจุบันของวัสดุตัวเชื่อม
- การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของตัวเชื่อม
- การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปถาวรของลาดชันเขื่อน
- การวิเคราะห์ Liquefaction และความมั่นคงหลังการเกิด Liquefaction

- การวิเคราะห์ผลการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน
- การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการพิบัติ

ทั้งนี้ในบทความนี้จะขอแนะนำเสนอเฉพาะการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์และการเปลี่ยนรูปถาวรของลาดชันเขื่อนเท่านั้น (ภาพที่ 7)



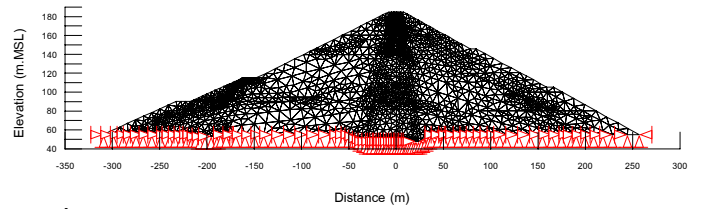
ภาพที่ 7 แผนภูมิการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนดินและหินถมต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยวิธีการตอบสนองทางพลศาสตร์ (ดัดแปลงจาก Soralump, 2002)

5.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของตัวเขื่อน

การตอบสนองทางพลศาสตร์ของตัวเขื่อน วิเคราะห์โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยให้แผ่นดินไหวกระทำ ณ ฐานเขื่อน ซึ่งการวิเคราะห์มีกรณีต่างๆ ที่วิเคราะห์ดังนี้

- กรณีแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆ กระทำบริเวณฐานเขื่อน
- กรณีระดับเก็บกักน้ำอยู่ที่ระดับต่างๆ

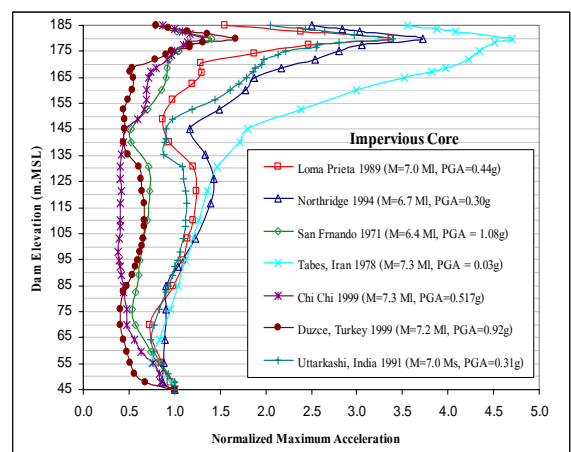
การวิเคราะห์ไม่จำลองสภาพหินฐานรากที่รองรับตัวเขื่อน เนื่องจากค่าโมดูลัสของหินฐานรากมีค่าสูงกว่าวัสดุหินถมเกิน 50 เท่า (Chopra, 1971) โดยได้จำลองสภาพขอบเขต (Boundary Condition) ของบริเวณดังกล่าวเป็นลักษณะฐานรากหินแข็ง (Rigid Foundation) ซึ่งสมมุติให้ฐานรากไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวตั้งและแนวราบดังภาพที่ 8



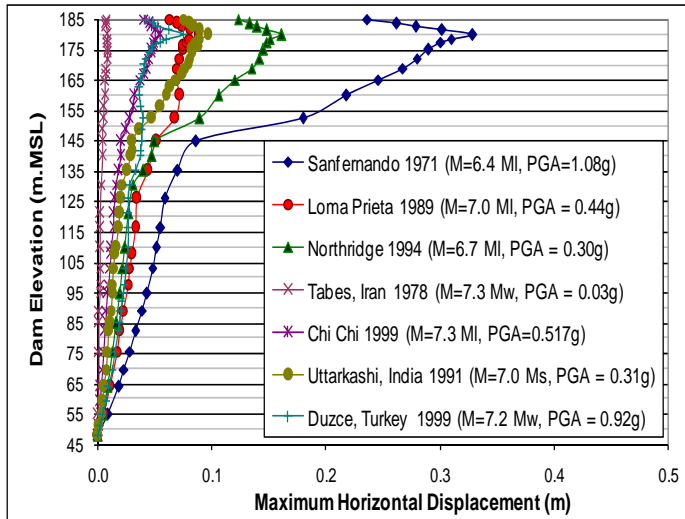
ภาพที่ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

5.1.1 พฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนต่อคลื่นแผ่นดินไหว

ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวเขื่อนมีรูปแบบหรือพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวต่างๆ คล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันขนาดของผลการตอบสนอง ภาพที่ 9 แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุดสัมพัทธ์ในแนวราบที่ระดับความสูงต่างๆ บริเวณชั้นวัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อนกระทำโดยแรงแผ่นดินไหวต่างๆ พบว่าอัตราเร่งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเขื่อน โดยเฉพาะบริเวณระดับความสูงที่มากกว่า +145 ม.รทก. เป็นจุดเริ่มต้นที่อัตราเร่งสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนจนถึงระดับความสูง +180 ม.รทก. ซึ่งเป็นระดับที่มีค่ามากที่สุดและเป็นจุดเปลี่ยนค่า PGA ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากเขื่อนเป็นโครงสร้างที่มีคิรีแห่งความอิสระมากกว่า 1 จึงมีรูปแบบการสั่นไหวหลายรูปแบบตามจำนวนคิรีแห่งความอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ohmachi (1994) พบว่าอัตราเร่งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ระยะความสูง 2 ใน 3 ของความสูงเขื่อนสำหรับเขื่อนศรีนครินทร์เท่ากับระดับ +140 ม.รทก. เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเคลื่อนตัวในแนวราบตามระดับความสูงของตัวเขื่อนพบว่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่งในตัวเขื่อน ดังภาพที่ 10



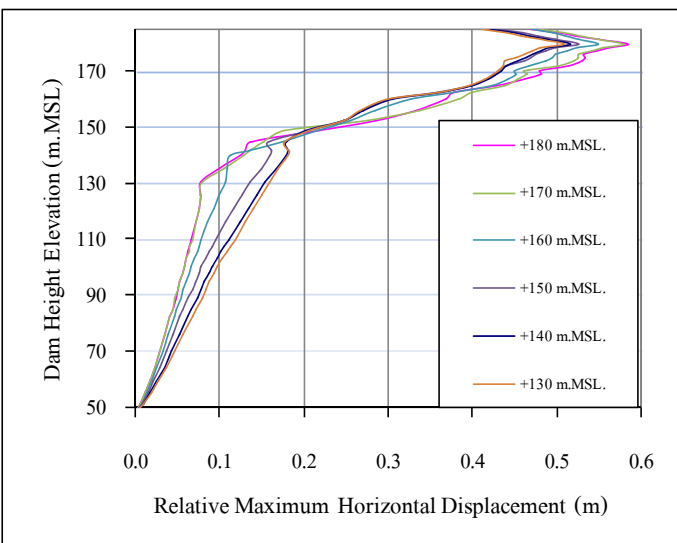
ภาพที่ 9 อัตราเร่งสูงสุดสัมพัทธ์ในแนวราบตามระดับความสูงเขื่อนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวต่างๆ ที่สำคัญบริเวณชั้นวัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อน



ภาพที่ 10 การเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบตามระดับความสูงเขื่อนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวต่างๆ ที่สำคัญบริเวณชั้นวัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อน

5.1.2 อิทธิพลของระดับน้ำต่อการตอบสนองของเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหว

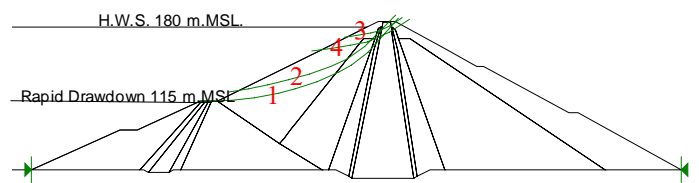
เมื่อระดับกักเก็บน้ำในอ่างลดลง โมดูลัสเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันประสิทธิผลในมวลวัสดุจะเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของตัวเขื่อนที่ระดับกักเก็บน้ำต่างๆ พบว่าการเคลื่อนตัวสูงสุดตามแนวระนาบมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นและมีรูปแบบการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันมีค่ามากที่สุดที่ระดับ +180 ม.รทก. ตามภาพที่ 11 อย่างไรก็ตามค่าการเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก



ภาพที่ 11 การเคลื่อนตัวสูงสุดสัมพัทธ์ตามแนวระนาบกรณีกักเก็บน้ำที่ระดับต่างๆ บริเวณชั้นวัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหว San Fernando ค.ศ.1971

5.2 พฤติกรรมการทรุดตัวของลาดชันเขื่อน

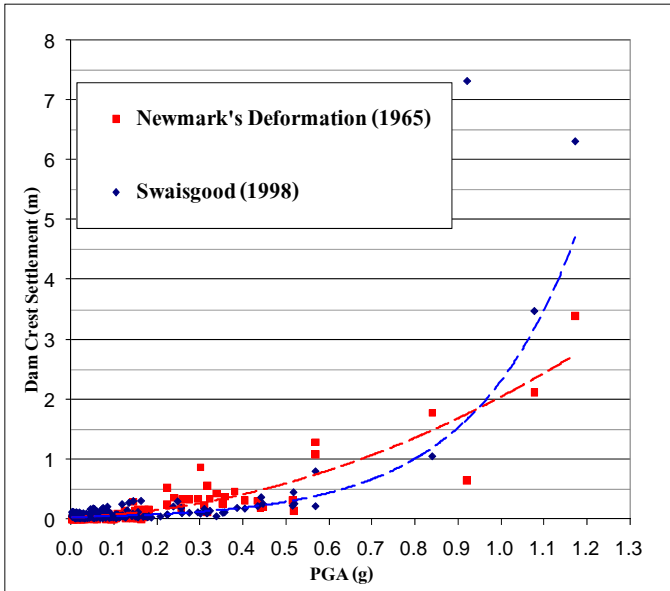
การทรุดตัวของลาดชันจากแรงพลศาสตร์เป็นพฤติกรรมที่มีโอกาสเกิดได้มากที่สุดขณะเกิดแผ่นดินไหว การทรุดตัวดังกล่าวเกิดจาก 2 สาเหตุได้แก่ Lateral Spreading และการเคลื่อนตัวตามระนาบพิบัติ ในกรณีแรกเกิดจากการลดลงของ Stiffness ของมวลดินหรือหินขณะเกิดแผ่นดินไหวซึ่งจะวิเคราะห์โดยทฤษฎี Gravity turn on (Lee, 1974) สำหรับกรณีหลังนั้นการทรุดตัวจะก่อให้เกิดรอยแยกที่ผิวเขื่อนหรือเกิดการเคลื่อนตัวตามแนวลาดชันของวงการพิบัติ ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้วิธี Newmark's Deformation (1965) สำหรับเขื่อนที่ก่อสร้างมานาน การทรุดตัวจากแรงแผ่นดินไหวมีโอกาสเกิดจากสาเหตุในกรณีหลังได้มากกว่า การศึกษานี้ถึงได้ดำเนินการวิเคราะห์ในกรณีดังกล่าวโดยใช้ค่าความเร่งเฉลี่ยของมวลการพิบัติ จากการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์วิเคราะห์ร่วมกับค่าความเร่งคลาก (Yield Acceleration) ที่ได้จากการวิเคราะห์ Pseudostatic ทั้งผลการวิเคราะห์การทรุดตัวได้นำมาเปรียบเทียบกับผลจากวิธีทางสถิติของ Swaisgood (1998) ที่สร้างจากฐานข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA สูงสุด 0.71g สำหรับวงการพิบัติของลาดชันเขื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งด้านเหนือและท้ายน้ำพิจารณาเลือกจากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของลาดชันเขื่อนอย่างละเอียดจากหลายๆ วงการพิบัติที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ โดยจะเลือกวงการพิบัติที่มีค่าการทรุดตัวมากกว่าวงการพิบัติอื่นๆ และมีผลกระทบต่อความมั่นคงของเขื่อนเป็นหลัก ดังภาพที่ 12



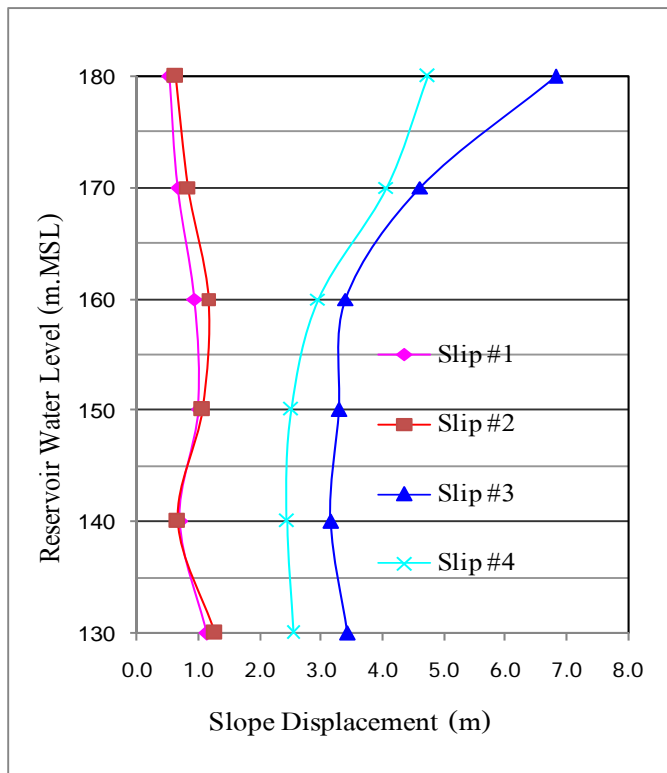
ภาพที่ 12 วงการพิบัติสำหรับการวิเคราะห์การทรุดตัว

ผลการวิเคราะห์พบว่าลาดชันเขื่อนด้านเหนือน้ำมีการทรุดตัวถาวรมากที่สุดในช่วงพิบัติหมายเลข 3 คือ 3.40 เมตร จากแผ่นดินไหว San Fernando ปี ค.ศ. 1971 ขนาด 6.4 ริกเตอร์ ด้วย PGA 1.17g และจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธี Newmark's Deformation (1965) กับวิธี Swaisgood (1998) พบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกันเมื่อแผ่นดินไหวมีขนาดไม่เกิน 0.9g ดังภาพที่ 13 และเมื่อเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของลาด

ชั้นเขื่อนด้านเหนือในกรณีที่ระดับเก็บกักน้ำอยู่ที่ระดับต่างๆ พบว่าระยะการเคลื่อนตัวถาวรของลาดชั้นเขื่อนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับเก็บกักน้ำเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับเก็บกักน้ำในเขื่อนสูงกว่าระดับ +160 ม.รทก. ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทรุดตัวถาวรของสันเขื่อนโดยวิธี Newmark's Deformation (1965) และ Swaisgood (1998) (วงการพิบัติที่ 3 ด้านเหนือ)



ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวถาวรตามแนวลาดชั้นเขื่อนด้านเหนือในกรณีระดับเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อเขื่อนจำลองให้ถูกแรงกระทำแผ่นดินไหว San Fernando ค.ศ.1971

เปรียบเทียบผลการทรุดตัวถาวรของสันเขื่อนกับระยะจากระดับกักเก็บน้ำปกติถึงสันเขื่อน (Freeboard) พบว่าระยะการทรุดตัวสูงสุดของสันเขื่อนที่วิเคราะห์ได้จากแรงกระทำแผ่นดินไหว San Fernando ปี ค.ศ.1971 มีค่าเท่ากับ 3.40 เมตร ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระยะ Freeboard ของเขื่อนคือ 5 เมตร โดย PGA ที่จะทำให้เกิดการทรุดตัวของสันเขื่อนเท่ากับ 5 เมตรต้องมีค่าประมาณ 2.20g กระทำที่ฐานเขื่อน (ใช้การขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ค่าการทรุดตัวสูงสุด) ซึ่งตั้งแต่เริ่มเก็บกักน้ำจนถึงปัจจุบันพบว่าระดับน้ำในอ่างไม่เคยขึ้นถึงระดับเก็บกักปกติแต่อย่างใดโดยระดับเก็บกักน้ำในอ่างสูงสุดที่เคยเก็บได้อยู่ที่ระดับ +179.61 ม.รทก. ในปี พ.ศ.2545 และโดยเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ +175 ม.รทก. ทำให้มีระยะ Freeboard ที่มากขึ้นเป็นผลให้โอกาสเกิดการล้นของน้ำผ่านสันเขื่อนเนื่องจากการยุบตัวของเขื่อนจากแผ่นดินไหวเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้องเกิดเหตุการณ์น้ำหลากมากและแผ่นดินไหวรุนแรงพร้อมๆ กัน

6. สรุปผลงานวิจัย

1. จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปว่าเขื่อนศรีนครินทร์มีความมั่นคงปลอดภัยต่อการพิบัติในลักษณะน้ำไหลล้นข้ามสันเขื่อนหรือเกิดช่องเปิดให้น้ำไหลออก (Breaching Failure) จากแรงกระทำแผ่นดินไหว แต่อย่างไรก็ตามตัวเขื่อนอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะบริเวณสันเขื่อน ซึ่งความเสียหายดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ของตัวเขื่อนและแรงกระทำแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเตรียมมาตรการในการติดตามและซ่อมแซมเพื่อลดโอกาสเกิด Piping ผ่านรอยแตกหลังจากเกิดแผ่นดินไหว
2. ค่า G_{max} ของวัสดุตัวเขื่อนที่ได้จากการหาค่า V_s โดยวิธี SASW และจากสมการ Empirical ต่างๆ ที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุถมเขื่อนพบว่าค่าที่ได้ในแต่ละวิธีแตกต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อแรงดันประสิทธิผลในตัวเขื่อนมีค่าสูง โดยค่าที่ได้จากการทดสอบ SASW จะมีค่าที่สูงกว่าวิธีการอื่นๆ และในชั้นวัสดุหินถมจะมีค่า G_{max} มากกว่าบริเวณอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการได้มาซึ่งวิธีสมการ Empirical มีข้อจำกัดหลายอย่าง จึงใช้ค่า G_{max} ที่ได้จากการหาค่า V_s โดยวิธี SASW ไปวิเคราะห์
3. ระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบและอัตราเร่งของวัสดุตัวเขื่อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเขื่อน โดยเฉพาะบริเวณ

ระดับความสูง +145 ม.รทก. เป็นจุดเริ่มที่ค่าเพิ่มมากขึ้นและมีค่ามากที่สุดที่ระดับความสูง +180 ม.รทก. จากนั้นจะเปลี่ยนค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว และพบว่าผลตอบสนองจากคลื่นแผ่นดินไหวต่างๆ มีค่าสอดคล้องกันแต่จะมีขนาดแตกต่างกันบ้างขึ้นกับองค์ประกอบของแต่ละข้อมูลแผ่นดินไหวนั้นๆ

4.เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำ ทำให้ระดับแรงดันน้ำในตัวเขื่อนเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลให้สภาพความเค้นปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยในชั้นวัสดุที่รับน้ำแกนเขื่อนมีอัตราเร่งของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับน้ำเก็บกักต่ำลง

5.ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวถาวรโดยวิธี Newmark's Deformation พบว่าการทรุดตัวสูงสุดของสันเขื่อนเกิดขึ้นบริเวณลาดชันเขื่อนด้านเหนือน้ำกรณีกักเก็บน้ำที่ระดับปกติ มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 3.40 เมตร จากแรงกระทำจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว San Fernando ปี ค.ศ.1971 ขนาด 6.4 ริกเตอร์ มี PGA กระทำที่ฐานเขื่อนเท่ากับ 1.17g ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระยะ Freeboard ของเขื่อนคือ 5 เมตร ประกอบกับตั้งแต่เริ่มกักเก็บน้ำจนถึงปัจจุบันพบว่าระดับน้ำในอ่างไม่เคยขึ้นถึงระดับเก็บกักปกติแต่อย่างใดโดยระดับเก็บกักน้ำในอ่างสูงสุดที่เคยเก็บได้อยู่ที่ระดับ +179.61 ม.รทก. ในปี พ.ศ.2545 และโดยเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ +175 ม.รทก. ทำให้มีระยะ Freeboard ที่มากขึ้นเป็นผลให้โอกาสเกิดการล้นของน้ำผ่านสันเขื่อนเนื่องจากการยุบตัวของเขื่อนจากแผ่นดินไหวเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้องเกิดเหตุการณ์น้ำหลากมากและแผ่นดินไหวรุนแรงพร้อมๆ กัน

7. กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณกองความปลอดภัยเขื่อน ฝ่ายบำรุงรักษาโยธา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

8. บรรณานุกรม

- [1] Bay, J.A. and Chaiprakaikeow, S., 2006. Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Testing of Srinagarind (SNR) and Vajiralongkorn (VRK) Dams. USA.
- [2] Champa, S. & Mahatharadol, B., 1982. Construction of Srinagarind dam, ICOLD Congress .14ed., Argentina.
- [3] Chopra, A.K. & Chakrabarti, P., 1971. The Koyna earthquake of december 11, 1967 and the performance of Koyna dam. UBC/EERC-71/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 51.

- [4] Gazetas, G., 1982. Shear vibration of vertically inhomogeneous earth dams. International Journal of Numerical and analytical Methods in Geomechanics, (6): 219-241.
- [5] Hardin, B.O. & Black, W.L., 1968. Vibration modulus of normally consolidated clay. Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, 94(SM2): 353-369.
- [6] Kokusho, T and Y Esashi. 1982. Cyclic triaxial test on sands and coarse materials. In International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, (10): 673-676.
- [6] Newmark, N.M., 1965. Effect of earthquake on dams and embankments. Geotechnique, 15 (2): 139-160.
- [8] Lee, K.L., 1974. Seismic permanent deformations in earth dams. Report to National Science Foundation, School of engineering and applied science, University of California, Los Angeles.
- [9] Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. 70.
- [10] Seed, H.B., 1979. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams. Geotechnique, 29(3): 215-263.
- [11] Seed, H.M., Wong, R.T., Idriss, I.M. & Tokimatsu, K., 1986. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Geotechnical Engineering, 111 (12): 1016-1032.
- [12] Soralump, S., 2002. Estimating probability of earthquake-induced failure of earth dams. Ph.D. thesis, Utah State University.
- [13] Swaisgood, J.R., 1998. Seismically-induced deformation of embankment dams, U.S. National Conference on Earthquake Engineering .6ed., pp. 200-250.
- [14] U.S. Geological Survey. 2008. Location of earthquakes in Thailand from 1973 to 2008. available at <http://www.usgs.gov/>.
- [15] Vucetic, M. & Dobry, R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. Geotechnical Engineering ASCE, 117 (1): 89-107
- [16] Wieland, M., 2003. Seismic Aspects of dams, Question 83, ICOLD.

