

ความมั่นคงของ เขื่อนศรีนครินทร์ ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว

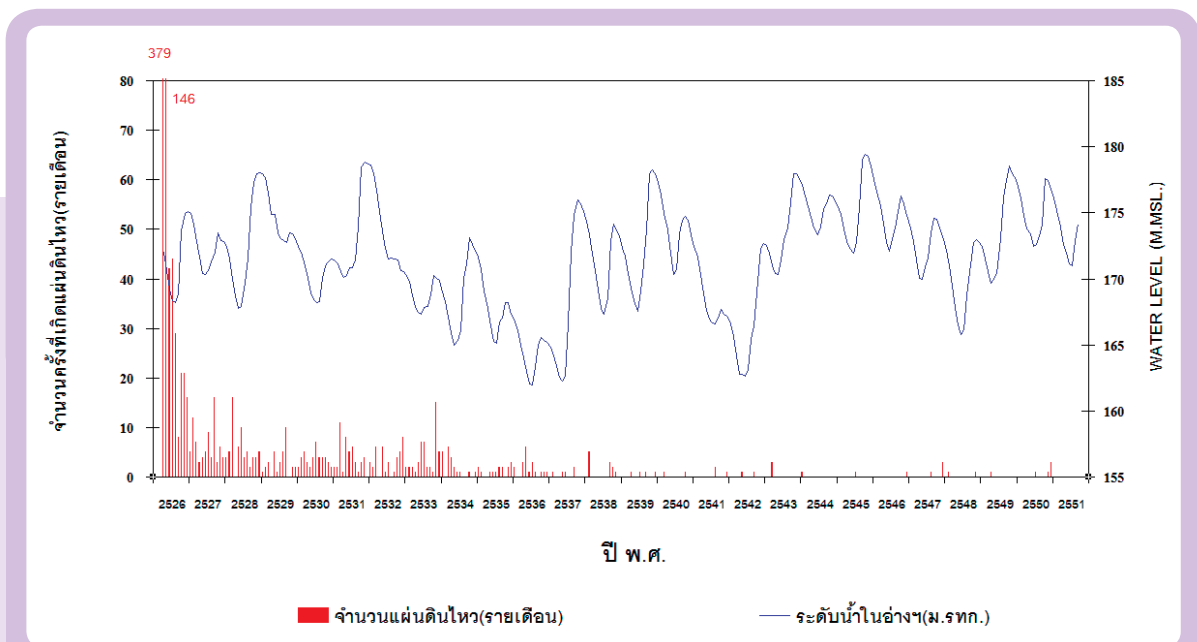


เขื่อนศรีนครินทร์เป็นเขื่อนอเนกประสงค์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย โดยมีความจุของอ่างเก็บน้ำสูงสุดถึง 17,745 ล้าน ลบ.ม. (เปรียบเทียบกับเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่มีความจุ 960 ล้านลบ.ม.) มีความสูง 145 เมตร ปัจจุบันเป็นเขื่อนในความพร้อมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2516-2523 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการชลประทาน การผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาด้านพลังงานของประเทศ การบรรเทาอุทกภัย การประมง และการป้องกันน้ำเค็ม เขื่อนศรีนครินทร์ได้รับออกแบบและควบคุมงานโดย Electric Power Development Company of Japan และดำเนินการก่อสร้างโดย Vianini SPA ประเทศอิตาลี

- 1 หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 2 หัวหน้ากองความปลอดภัยเขื่อน ฝ่ายบำรุงรักษาโยธา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ภายหลังการก่อสร้างเสร็จสิ้นสมบูรณ์ และเริ่มดำเนินการเก็บกักน้ำได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 5.9 ริกเตอร์ ในวันที่ 22 เมษายน พ.ศ.2526 มีจุดศูนย์กลางบริเวณปลายอ่างเก็บน้ำห่างจากตัวเขื่อน 58 กิโลเมตร แผ่นดินไหวในครั้งนั้น นักธรณีวิทยาและผู้เชี่ยวชาญด้านแผ่นดินไหวได้สรุปว่าเป็นแผ่นดินไหวที่เกิดจากการเก็บกักน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักน้ำได้กดทับพื้นดินเพิ่มขึ้น ประกอบกับแรงดันน้ำทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไประหว่างรอยเลื่อนของแผ่นดินทำให้เกิดการขยับตัวของรอยเลื่อนและก่อให้เกิดแผ่นดินไหว โดยโอกาสการเกิด

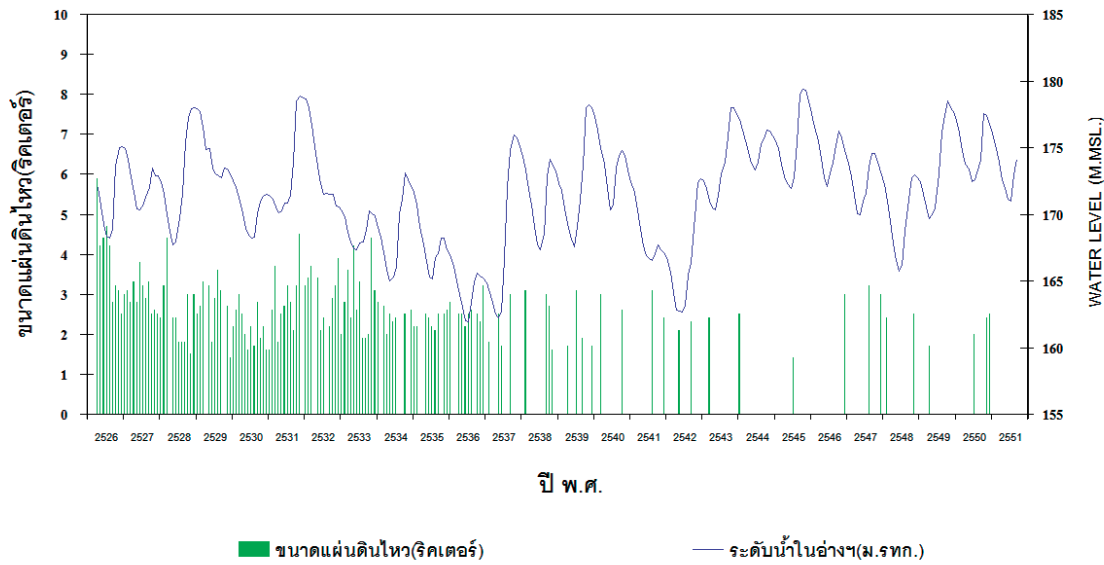
จากเหตุการณ์ดังกล่าว ประกอบกับความตื่นตัวเรื่องแผ่นดินไหวในพื้นที่ ทำให้ประชาชนมีคำถามถึงความปลอดภัยเขื่อนต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว ดังนั้นในปีพ.ศ. 2548 ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงได้ดำเนินงานวิจัย ร่วมกับ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบความมั่นคงของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยการดำเนินการใช้เวลา 1 ปี กับ 6 เดือน ประกอบด้วยการศึกษาข้อมูลในอดีต การวิเคราะห์ความปลอดภัยจากผลของเครื่องมือ



รูปที่ 1 ความถี่ของการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนศรีนครินทร์ ตั้งแต่ พ.ศ.2526-ปัจจุบัน

แผ่นดินไหวจากสาเหตุนี้ขึ้นอยู่กัหลายปัจจัยประกอบกัน ได้แก่ ความลึกของอ่างเก็บน้ำ ความจุ สภาพความเค้นของฐานราก ความมีพลังของรอยเลื่อนและสภาพธรณีวิทยาของรอยเลื่อน ภายหลังจากเหตุการณ์ครั้งนั้นในปีต่อไปได้เกิดแผ่นดินไหวตามมาอย่างต่อเนื่อง ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางใกล้เคียงกัน แต่ค่อย ๆ มีความถี่และความรุนแรงที่ลดลง (รูปที่ 1 และ 2) ทั้งนี้เนื่องจากรอยเลื่อนบริเวณดังกล่าวได้ปรับสมดุลกับสภาพแรงกระทำของน้ำในอ่างเก็บน้ำ

วัตถุประสงค์เขื่อน การสร้างแบบจำลองสภาพของความเค้นและความเครียดภายในวัสดุตัวเขื่อนในสภาวะสถิตย์ การสร้างแบบจำลองการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก การตรวจสอบความมั่นคงของลาดชัน การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวและการยุบตัวของสันเขื่อนภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวและการตรวจสอบการเกิด Liquefaction ในตัวเขื่อนและฐานราก

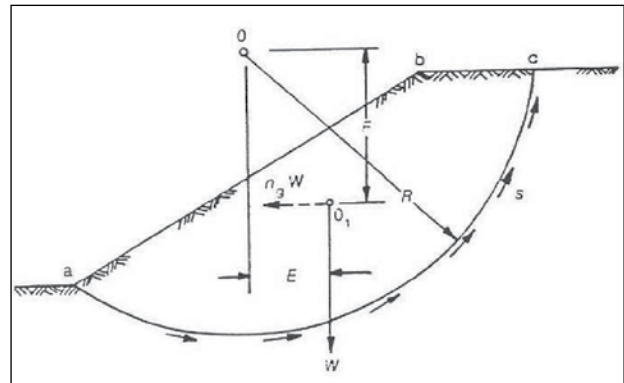


รูปที่ 2 ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนครีนครินทร์

การวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนในอดีต

การออกแบบเขื่อนในส่วนองงานความมั่นคงของตัวเขื่อน จะต้องออกแบบให้เขื่อนปลอดภัยต่อการไหลซึมผ่านโดยไม่เกิดการไหลทะลุ (Piping) ไม่เกิดการทรุดตัวที่มากกว่าระยะเผื่อล้น (Freeboard) และไม่เกิดการพิบัติของลาดชันทั้งในสภาวะปกติและแผ่นดินไหว จากข้อมูลการวัดพฤติกรรมตัวเขื่อน ไม่พบสิ่งผิดปกติต่อความปลอดภัย 2 ประการแรก โดยปัจจุบัน เขื่อนได้ทรุดตัวไป 1.220 เมตร (สันเขื่อน) ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีต่าง ๆ พบว่าการทรุดตัวในลักษณะการยุบตัวคายนานี้ในขั้นแรกได้สิ้นสุดลงแล้ว สำหรับการตรวจสอบความปลอดภัยของลาดชันต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว จากการศึกษาข้อมูลพบว่า การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันเขื่อนครีนครินทร์จากแรงกระทำแผ่นดินไหว ในอดีตใช้วิธี Pseudostatic (Terzaghi, 1950) โดยวิธี Pseudostatic เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบลาดชันเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว และยังคงใช้ได้ดีอยู่ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ดำเนินการเหมือนการวิเคราะห์ความมั่นคง

ของลาดชันปกติ เพียงแต่เพิ่มแรงในแนวราบ ($n_g \cdot W$) ที่เกิดจากความเร่งของแผ่นดินไหวเข้าไปในสมการดังแสดงในรูปที่ 3 การกำหนดความเร่งในแนวราบจะประเมินจากความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration, PGA) ที่เป็นไปได้ในพื้นที่ นั้น ๆ

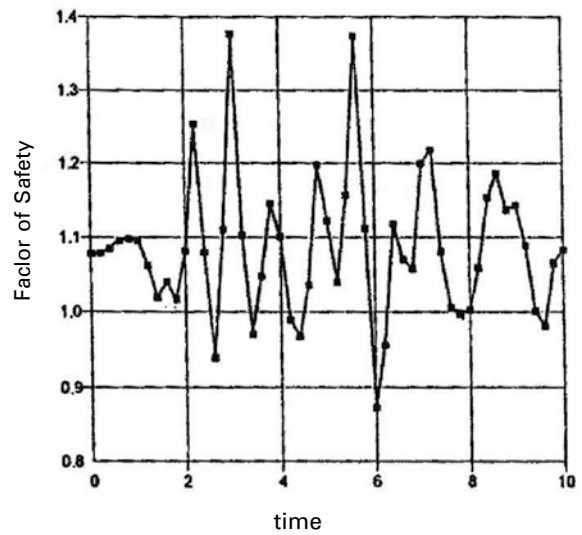


รูปที่ 3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันด้วยวิธี Pseudostatic (Seed, 1979)

อย่างไรก็ตาม จากสถิติพบว่ายังมีเขื่อนที่ออกแบบโดยวิธีนี้ได้เกิดความเสียหายเมื่อถูกแรงกระทำแผ่นดินไหว ทั้งนี้เนื่องจากสมมุติฐานในการวิเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวไม่ครอบคลุมพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุจากแรงพลศาสตร์ ปัจจุบันจึงมีการวิเคราะห์โดยวิธี Dynamic Response Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุรวมทั้งเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับความเค้นและความเครียดของวัสดุในสภาวะพลศาสตร์เพื่อจำลองการตอบสนองของเขื่อน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ได้รับการแนะนำโดย International Commission on Large Dams (ICOLD) ให้เป็นวิธีที่เหมาะสมในการออกแบบเขื่อนเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวนอกเหนือจากวิธี Pseudostatic อย่างไรก็ตามมิได้หมายความว่าเขื่อนที่วิเคราะห์ออกแบบโดยใช้วิธี Pseudostatic จะไม่มีความปลอดภัยเสมอไป ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการตอบสนองของเขื่อนภายใต้แรงแผ่นดินไหวมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อมากมายนอกเหนือจากเรื่องพฤติกรรมของวัสดุถมตัวเขื่อน

ความเข้าใจถึงการใช่วิธี Pseudostatic ในการออกแบบโครงสร้างดินกม

หากเขื่อนก่อออกแบบด้วยค่าความเร่งในแนวราบเท่ากับ 0.1 g ถ้าปัจจุบันเกิดแผ่นดินไหวแล้วส่งให้ความเร่งเฉลี่ยของลาดชันมากกว่า 0.1 g เขื่อนอาจจะพิบัติหรือไม่พิบัตก็ได้ ไม่จำเป็นต้องพิบัติเสมอไป ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวอาจมีความเร่งเกินค่าที่ออกแบบไว้เพียงช่วงเสี้ยววินาทีแล้วจึงกลับทิศของความเร่งไปในทิศตรงกันข้าม ดังนั้นมวลดินบนลาดชันอาจเกิดการขยับไหลลงเพราะค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าต่ำกว่า 1.0 ในช่วงเสี้ยววินาทีนั้น แต่หลังจากนั้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากทิศทางของแรงกระทำแผ่นดินไหวกระทำในทิศตรงกันข้าม มวลดินจะหยุดเคลื่อนและจะเคลื่อนอีกครั้งหากค่าความเร่งทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันต่ำกว่า 1.0 อีก (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันเปรียบเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว (Slope/W)

นอกจากนั้น วัสดุถมตัวเขื่อนซึ่งเป็นดินและหินถมบดอัด มีพฤติกรรมการวิบัติต่างจากเหล็กหรือคอนกรีต โดยเมื่อดินหรือหินรับแรงเกินกำลังรับแรงเฉือนที่สามารถรับได้ กำลังรับแรงเฉือนจะลดลงแต่ดินจะยังคงเหลือกำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Shear Strength) ซึ่งอาจยังมากพอในการต้านทานการพิบัติของลาดชันหรือมากพอที่จะต้านไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มเติมได้ ดังนั้น แรงแผ่นดินไหวจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้เขื่อนเกิดรอยแตกตามแนวแกนเขื่อนเนื่องจากการขยับตัวเมื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 1.0 มากกว่าที่เขื่อนจะเกิดการพิบัติอย่างทันทีทันใด การพิบัติอย่างทันทีทันใดของเขื่อนจากแผ่นดินไหวมีโอกาสเกิดได้มากที่สุดเฉพาะในกรณีที่มีการเกิด Liquefaction ในตัวเขื่อนหรือฐานราก จากเหตุผลดังกล่าว ในปัจจุบันการออกแบบความชันของลาดชันเขื่อน โดยวิธี Pseudostatic จึงใช้ค่าความเร่งในแนวราบจากค่า PGA ที่ลดลงครึ่งหนึ่งหรือ 0.5 PGA (Macuson, 1981 และ Hynes-Griffin and Franklin, 1984) ในกรณีของเขื่อนศรีนครินทร์ ค่าความเร่งในแนวราบที่ใช้ออกแบบความชันของลาดชันมีค่าเท่ากับ 0.1 g การเคลื่อนตัวของลาดชันหรือยุบตัว

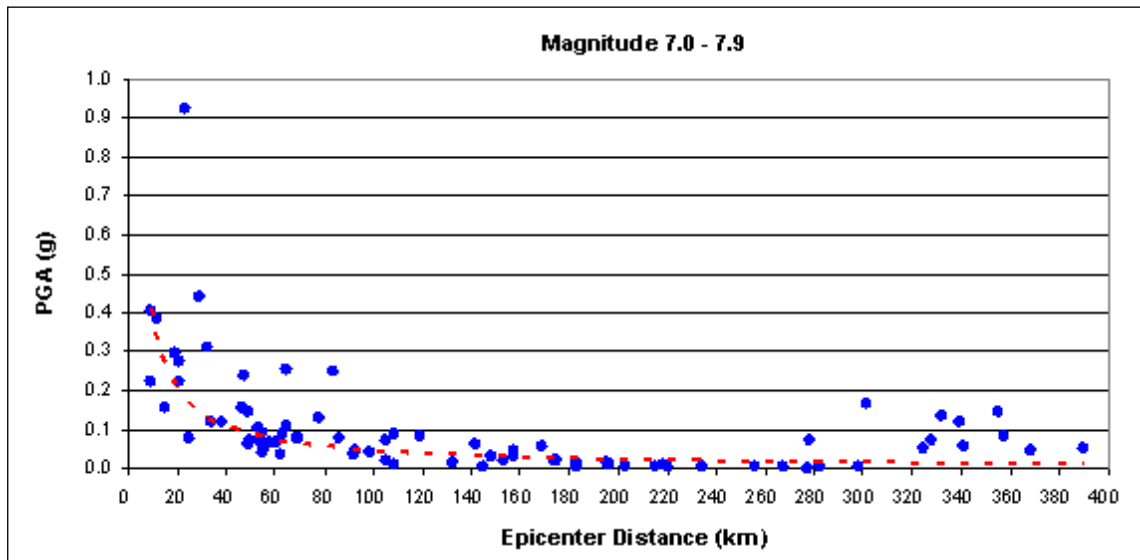
ของสันเขื่อนจึงอาจเกิดขึ้นได้เมื่อค่า PGA ได้ฐานเขื่อนมีค่ามากกว่า 0.2 g อย่างไรก็ตามอย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความมั่นใจ จึงควรวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าว โดยพิจารณาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุตัวเขื่อนโดยวิธีการตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamic Response Analysis)

พฤติกรรมทางพลศาสตร์

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของเขื่อนศรีนครินทร์นี้ ใช้ข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดินจากแผ่นดินไหวที่บันทึกได้จากแหล่งต่างๆ ในโลกมาวิเคราะห์ โดยพยายามคัดเลือกเฉพาะข้อมูลที่บ้านทักได้จากเครื่องวัดแผ่นดินไหวที่ติดตั้งตัวรับสัญญาณบนชั้นหินเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ ของข้อมูล

วิเคราะห์มีค่า PGA สูงสุดเท่ากับ 1.17g จนถึงต่ำกว่า 0.05g ส่วนใหญ่ PGA มีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว โดยมีค่าต่ำกว่า 0.1g ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 100 กิโลเมตรขึ้นไป (รูปที่ 5 และ 6)

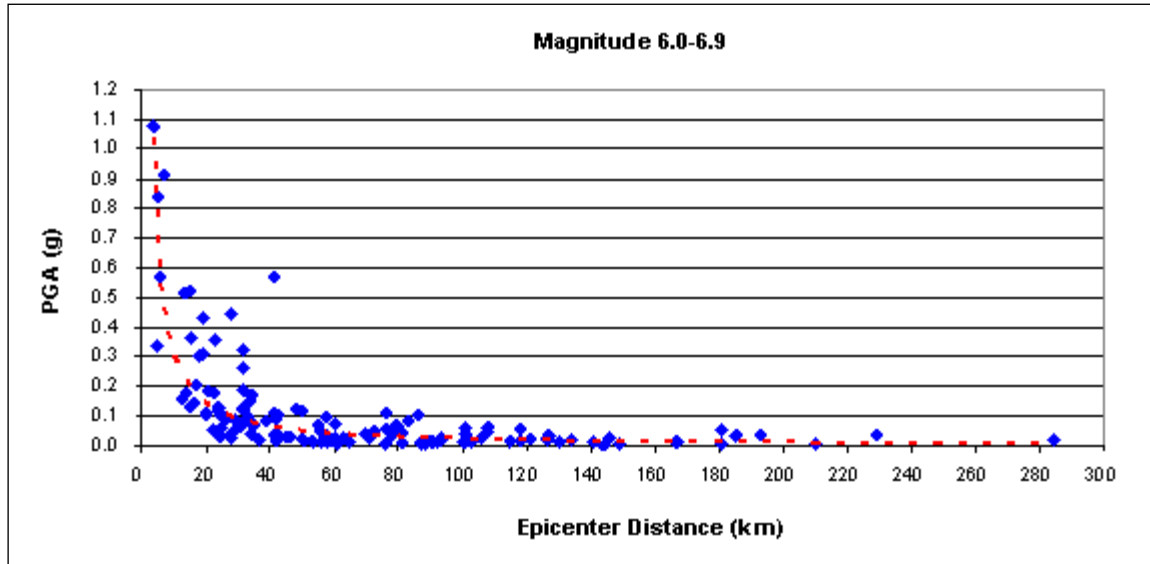
สำหรับคุณสมบัติทางสถิติของตัวเขื่อนได้จากการเจาะสำรวจผ่านแกนกลางเขื่อน และประเมินการเสื่อมสภาพของหินถมตัวเขื่อนบริเวณลาดชันด้านท้ายน้ำ (รูปที่ 7) ซึ่งพบว่าคุณสมบัติของวัสดุตัวเขื่อนตรงตามรายงานการก่อสร้างและสภาพของหินถมและความแน่นอยู่ในสภาพที่ใกล้เคียงกับข้อมูลการก่อสร้าง ในส่วนของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ผู้ศึกษาได้ใช้ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity,



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง PGA และระยะห่างจาก Epicenter ของแผ่นดินไหวขนาด 7.0-7.9 ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์

ใกล้เคียงกับสภาพฐานรากเขื่อนศรีนครินทร์มากที่สุด นอกจากนั้นยังได้เลือกข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีขนาดแผ่นดินไหว (M_w, M_i) ตั้งแต่ 6 ขึ้นไป และมีระยะห่างจากสถานีวัดถึงจุดกำเนิดแผ่นดินไหวภายในระยะ 300 กิโลเมตร จากการคัดเลือกข้อมูลที่มีในปัจจุบัน มีข้อมูล Strong Ground Motion ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ครั้งนี้ทั้งสิ้น 213 ข้อมูล จากแผ่นดินไหวที่รุนแรง 35 เหตุการณ์ ใน 14 ประเทศ ข้อมูลแผ่นดินไหวที่นำมา

V_s) ที่ได้จากการทดสอบ Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) ดำเนินการโดย Utah State University มาใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดของวัสดุตัวเขื่อนและฐานราก (Maximum Shear Modulus) โดยการทดสอบ SASW ได้ดำเนินการตรวจสอบค่า V_s ของทั้งวัสดุตัวเขื่อนและหินฐานราก (รูปที่ 8) การทดสอบดำเนินการทั้งตำแหน่งสันเขื่อน ลาดชันด้านท้ายน้ำ ฐานยันเขื่อน และอุโมงค์ใต้เขื่อนและในฐานยันเขื่อน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง PGA และระยะห่างจาก Epicenter ของแผ่นดินไหวขนาด 6.0-6.9 ที่ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์

การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ ดำเนินการโดยจำลองคุณสมบัติของวัสดุทางพลศาสตร์ในลักษณะเทียบเท่าเส้นตรง (Equivalent Linear Method) ทั้งนี้เนื่องจากค่า Shear Modulus และค่า Damping ของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตาม Shear Strain ขณะเกิดแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งยากต่อการสร้างแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงแรงเฉือนสูงสุดและความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อน ดังแสดงรูปที่ 9 และการขยายขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวในตัวเขื่อน มี

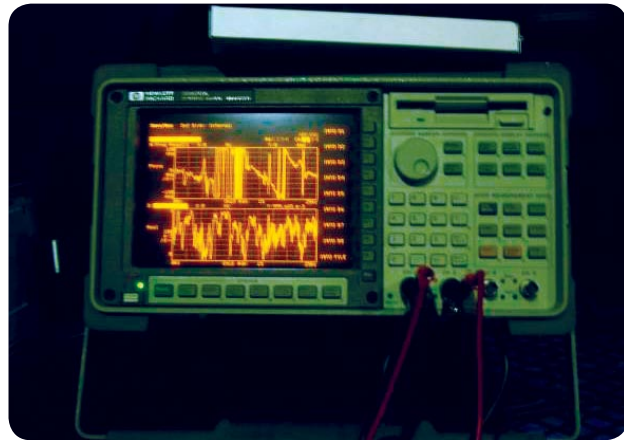
อัตราส่วนขยาย (Amplification Factor) ประมาณ 1-5 เท่าเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวมาถึงสันเขื่อน (ตารางที่ 1) ระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบของตัวเขื่อนและค่า PGA มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะความสูงของเขื่อนแต่โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเขื่อน โดยเฉพาะบริเวณระดับความสูง 145 ม.รทก. หรือที่ความสูง 2/3 ของความสูงเขื่อน เป็นจุดเริ่มที่มีค่า PGA เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด (รูปที่ 11 และ 12) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการเหวี่ยงของสันเขื่อน เนื่องจากบริเวณใกล้สันเขื่อนหรือเลยระยะ 2/3 ของความสูงขึ้นไปมวลเขื่อนลดลง



รูปที่ 7 การเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างแกนกลางเขื่อน

วิศวกรรม : ปฐพี

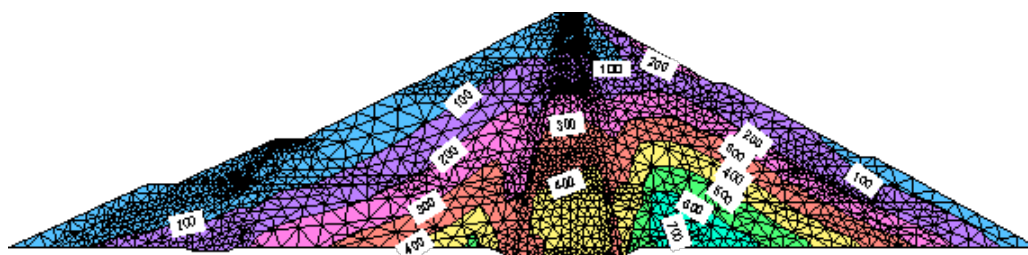
ความมั่นคงของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว



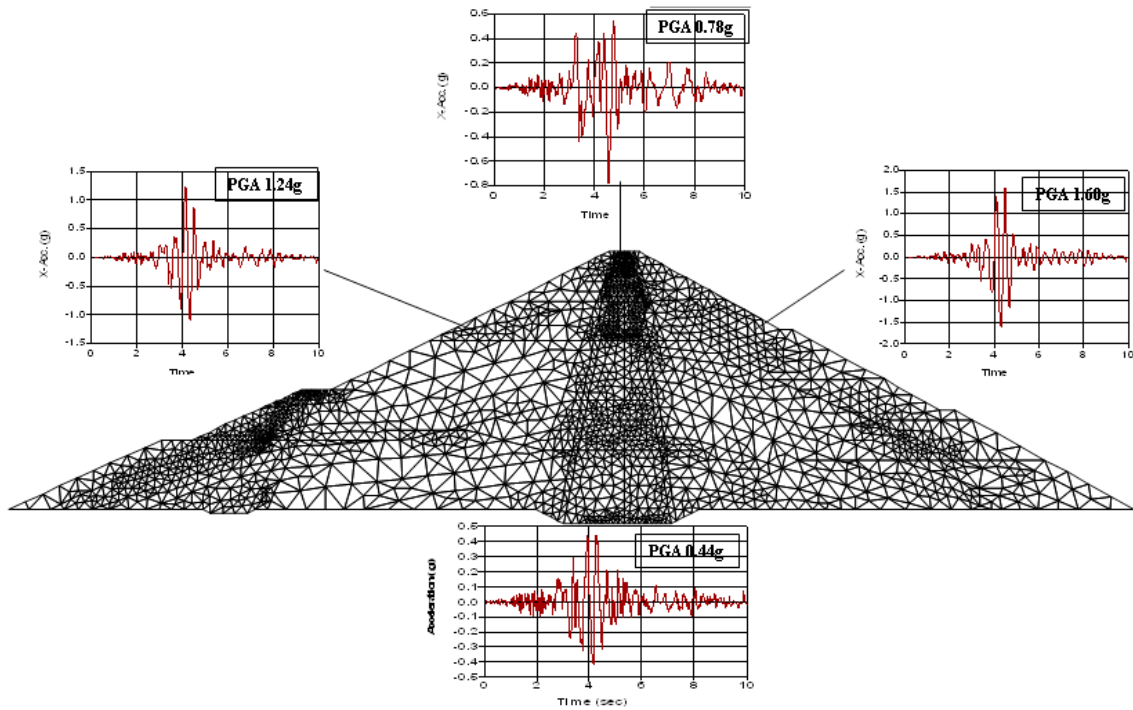
รูปที่ 8 การทดสอบ SASW เพื่อตรวจสอบค่า Vs ของวัสดุตัวเขื่อนและฐานราก

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์บางส่วนแสดงการตอบสนองของเขื่อน

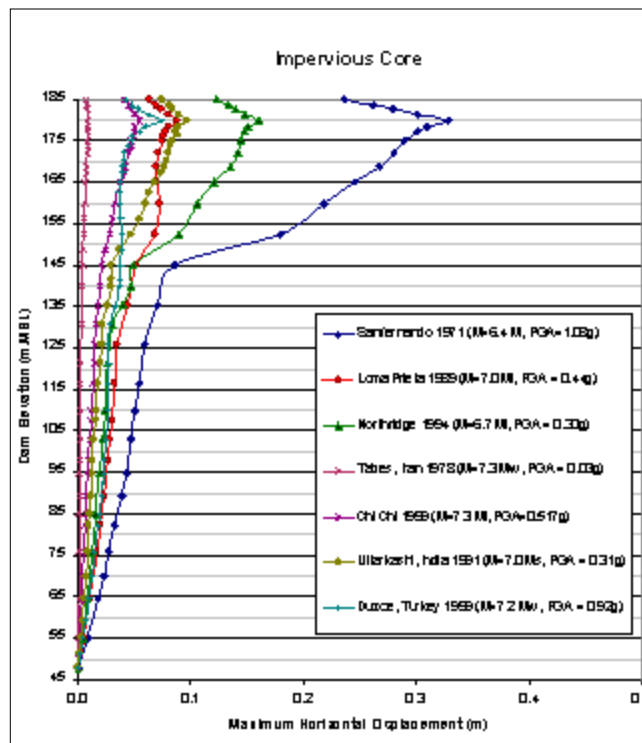
คลื่นแผ่นดินไหว	ฐานเขื่อน	สันเขื่อน ระดับความสูง 185 ม.รทก		วัสดุหินถม ด้านเหนือน้ำที่ระดับ ความสูง 145 ม.รทก.	
		PGA (g)	PGA (g)	อัตราส่วน ขยาย	PGA (g)
San Fernando, USA	1.171	1.25	1.07	1.25	1.07
Duzce, Turkey	0.920	1.25	1.36	1.30	1.41
Chi Chi, Taiwan	0.517	0.86	1.67	0.70	1.35
Loma Prieta, USA	0.442	0.78	1.77	1.24	2.82
Tabas, Iran	0.386	0.60	1.58	0.90	2.37
Campano Lucano, Italy	0.323	0.56	1.73	0.57	1.76
Northridge, USA	0.301	0.88	2.92	0.88	2.92
Uttarkashi, India	0.295	0.77	2.61	0.70	2.37
Izmit, Turkey	0.238	0.60	2.52	0.45	1.89
Southern Sumatra, Indonesia	0.041	0.21	5.12	0.17	4.15



รูปที่ 9 ความเค้นเขื่อนสูงสุด



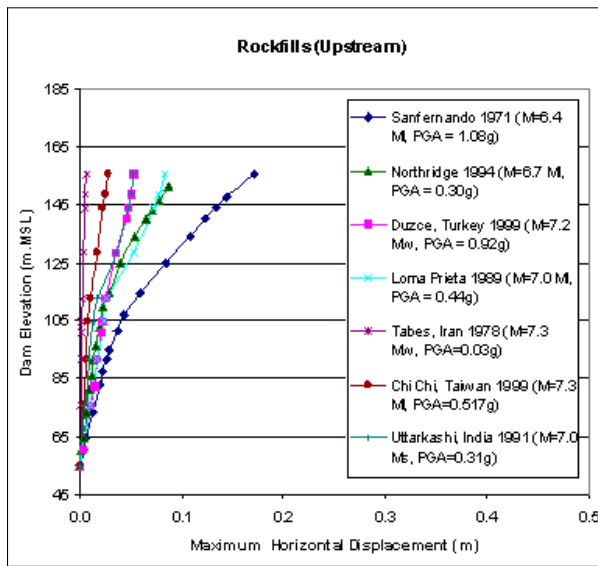
รูปที่ 10 ความเร่งกับเวลา ณ จุดต่างๆ ภายในตัวเขื่อน เมื่อใช้แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA = 0.44 g กระทำที่ฐานเขื่อน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบและระดับความสูงเขื่อนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่สำคัญบริเวณชั้นวัสดุที่บ้น้ำแกนเขื่อน

การเคลื่อนตัวและยุบตัวของตัวเขื่อน

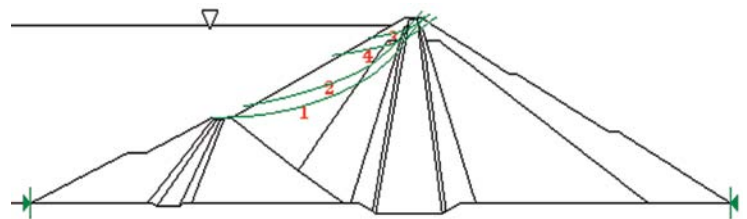
การเคลื่อนตัวและยุบตัวของตัวเขื่อนเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งกับเขื่อนดินที่ถูกแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยเปรียบเทียบเหมือนการทุบโต๊ะ ที่มีทรายกองอยู่ ทรายจะไหลลงเมื่อทุบแรงพอและหยุดไหลเมื่อหยุดทุบหรือทุบไม่แรงพอ พฤติกรรมลักษณะดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินบริเวณลาดชันในระดับการเคลื่อนตัวที่ไม่มากแต่อาจก่อให้เกิดรอยแตกตามยาวขนานกับสันเขื่อน การวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวดำเนินการโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Dynamic Response Analysis ร่วมกับ วิธี Newmark's Deformation (Newmark, 1965) จากการวิเคราะห์พบว่าเหตุการณ์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบและระดับความสูงเขื่อนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่สำคัญบริเวณชั้นวัสดุหินถมด้านเหนือน้ำ

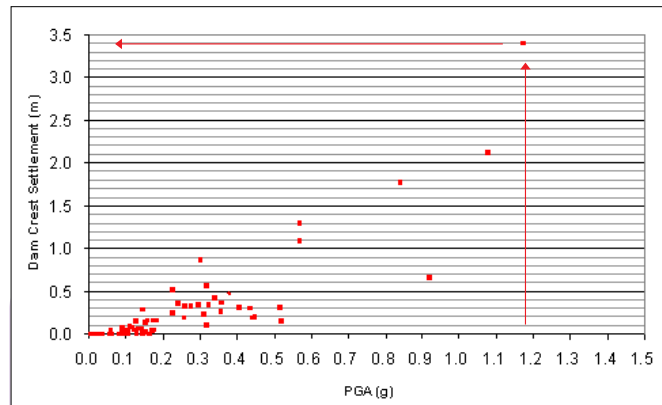
แผ่นดินไหวที่มีผลต่อเขื่อนครีนครินทร์สูงสุด คือเหตุการณ์แผ่นดินไหว San Fernando ปี ค.ศ.1971 ซึ่งมีขนาด 6.4 ริกเตอร์ จำลองให้ห่างจากตัวเขื่อน 3.5 กม. โดยมีค่า PGA กระทำที่ฐานเขื่อนเท่ากับ 1.17g และขยายเป็น 1.25g ที่สันเขื่อน เป็นผลให้ลาดชันเขื่อนด้านเหนือน้ำ (เมื่อระดับน้ำอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ)

มีการเคลื่อนตัวตามแนวลาดชันมากที่สุดเท่ากับ 6.82 เมตร หรือมีค่าการทรุดตัวในแนวตั้งสูงสุด 3.40 เมตร ระบายการเคลื่อนตัวแสดงในรูปที่ 13 การเคลื่อนตัวเมื่อจำลองคลื่นแผ่นดินไหวจากแผ่นดินไหวเหตุการณ์สำคัญต่าง ๆ ไปที่ฐานเขื่อนแสดงใน ตารางที่ 2 รูปที่ 14 แสดงค่าการทรุดตัว ณ ค่า PGA ต่าง ๆ ผลจากแบบจำลองดังกล่าวได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธีของ Swaisgood (1998) ซึ่งเป็นวิธีประมาณการทรุดตัวของเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่เป็นวิธีทางสถิติจากข้อมูลการเกิดจริงในอดีตพบว่าค่าจากแบบจำลองและค่าจากวิธี Swaisgood (1998) มีความสอดคล้องกัน สำหรับความปลอดภัยของเขื่อนครีนครินทร์ผลจากการทรุดตัวสูงสุดพบว่ามีความน้อยกว่าระยะ Freeboard ของเขื่อน 5 เมตร เป็นผลให้โอกาสเกิดการล้นของน้ำผ่านสันเขื่อนเนื่องจากการยุบตัวของเขื่อนจากแผ่นดินไหวเป็นไปได้ยาก นอกจากนั้นเนื่องจากเขื่อนครีนครินทร์เป็นเขื่อนที่มีความจุมาก ดังนั้นตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบัน เขื่อนยังไม่สามารถเก็บน้ำได้ถึงระดับน้ำสูงสุดในฤดูน้ำหลาก ทำให้โอกาสการไหลล้นข้ามจากการทรุดตัว เนื่องจากแผ่นดินไหวนั้นน้อยลงไปอีก อย่างไรก็ตามผลของแผ่นดินไหวแม้จะไม่ทำให้เขื่อนพังทลายลงแต่จะทำให้สันเขื่อนมีความเสียหายจากการทรุดตัวโดยเฉพาะระยะเกิน 2 ใน 3 ของความสูงเขื่อนและอาจก่อให้เกิดการไหลซึมของน้ำผ่านรอยแตก ดังนั้นภายหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวผู้ดูแลเขื่อนจึงจำเป็นต้องเตรียมมาตรการตรวจสอบและป้องกัน



รูปที่ 13 ระบายการเคลื่อนตัวด้านเหนือน้ำซึ่งมีการเคลื่อนตัวสูงสุด

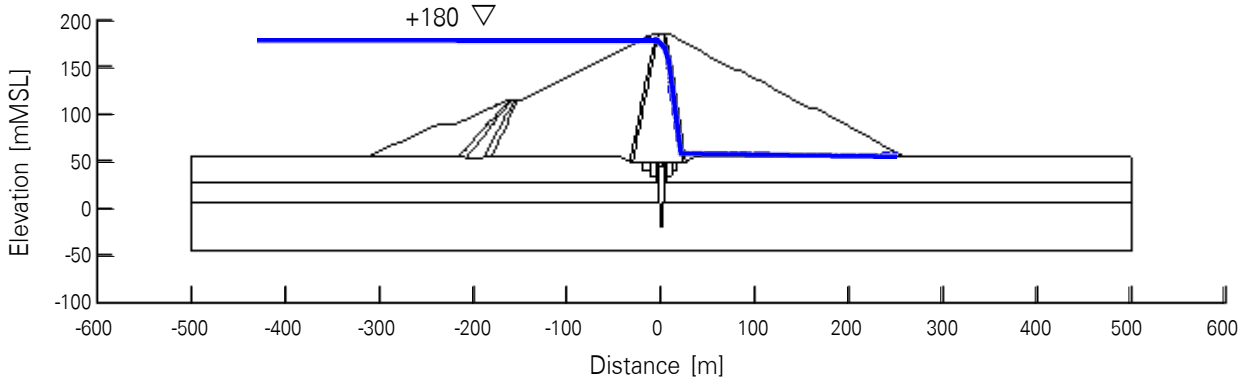
ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวจากแรงกระทำแผ่นดินไหวได้วิเคราะห์โดยคลื่นแผ่นดินไหวหลากหลายคลื่นซึ่งแสดงให้เห็นได้โดยชัดเจนว่าขนาดแผ่นดินไหวอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงความรุนแรงที่มีผลต่อเขื่อนได้ โดยจะสังเกตได้ว่าแผ่นดินไหวที่ส่งผลต่อการทรุดตัวสูงสุดกลับเป็นแผ่นดินไหวที่มีขนาดไม่ถึง 7.0 ริกเตอร์ การกล่าวเช่นนั้นไม่ได้หมายความว่าเขื่อนจะปลอดภัยหากแผ่นดินไหวสูงเกิน 7.0 ริกเตอร์ ทั้งนี้คุณสมบัติของคลื่นแผ่นดินไหวที่แสดงถึงความรุนแรงต่อโครงสร้างดินถมล้วนมีอิทธิพลหลากหลายประกอบกัน เช่นค่า PGA, Sustained Maximum Acceleration, Effective Design Acceleration, Arias Intensity และ Effective Duration เป็นต้น



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวสูงสุดของสันเขื่อนกับ PGA ต่างๆ ได้ฐานเขื่อน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์การทรุดตัวถาวรในแนวตั้งของสันเขื่อนจำแนกตามวงการพิบัติที่เป็นไปได้ของลาดชันเขื่อนด้านเหนือหน้า กรณีระดับน้ำอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ

แผ่นดินไหว	Deformation (m)			
	Slip No.			
	1	2	3	4
Duzce, Turkey 1999 M=7.2 Mw, PGA=0.92g	0.003	0.004	0.427	0.239
Uttarkashi, INDIA 1988 M=7.0 Ms, PGA=0.295g	0.015	0.032	0.343	0.283
Loma Prieta, USA 1989 M=7.0 MI, PGA=0.275g	0.005	0.016	0.337	0.277
Northridge, USA 1994 M=6.7 MI, PGA=0.568g	0.092	0.116	1.083	0.721
San Fernando, USA 1971 M=6.4 MI, PGA=1.171g	0.408	0.434	3.400	2.429
Chi Chi, Taiwan 1999 M=7.3 MI, PGA=0.517g	0.001	0.004	0.148	0.138
Tabes, Iran 1978 M= 7.3 Mw, PGA=0.381g	0.019	0.026	0.374	0.332

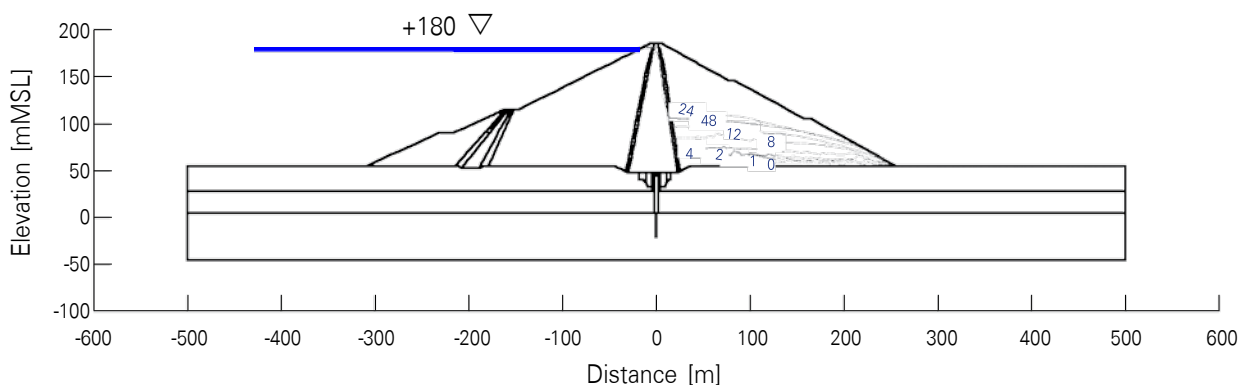


รูปที่ 15 เส้นระดับน้ำจากการไหลซึมในลักษณะที่ตัวเขื่อนไม่เกิดการเคลื่อนตัวตามขวาง

การจำลองการเลื่อนของรอยเลื่อนใต้ฐานเขื่อน

การวิเคราะห์ในครั้งนี้ได้ตรวจสอบความมั่นคงของเขื่อนในกรณีสมมุติว่ารอยเลื่อนใต้ตัวเขื่อนเกิดการเคลื่อนตัว ทำให้แกนเขื่อนและหน้าตัดอื่น ๆ แคบลง 2 เมตร และเกิดแนวแตกร้าวกับสันเขื่อน ในขั้นต้นหากตรวจสอบจากโอกาสการเกิดการพัดพาของดินบริเวณผนังรอยแตก (Suffusion) โดยใช้ข้อมูลการออกแบบและก่อสร้างของวัสดุตัวเขื่อนพบว่า ดินเหนียวแกนกลางเขื่อนจะไม่ถูกพัดพาออกจากรอยแตก ทำให้รอยแตกไม่เกิดการขยายตัว แต่หากเกิดการขยายตัวของรอยแตกการพัดพาวัสดุออกจากตัวเขื่อนอาจเกิดขึ้น ดังนั้นต้องตรวจสอบเงื่อนไขการกรอง (Filter Criteria) ตามทฤษฎีของ Terzaghi (1922) พบว่าชั้นวัสดุกรองจะมีประสิทธิภาพเพียงพอในการกรองวัสดุละเอียดไม่ให้ไหลออกจากตัวเขื่อนได้ จึงทำให้มั่นใจได้ว่าหากเกิด

ความเสียหายในลักษณะการแตกตามขวาง การพิบัติเนื่องจากน้ำไหลซึมและพัดพาวัสดุออกจากตัวเขื่อนจนก่อให้เกิดโพรงภายในตัวเขื่อน (Piping) จะไม่เกิดขึ้นโดยง่าย อย่างไรก็ตามหลังจากเกิดรอยแตกตามขวางแล้วน้ำอาจไหลซึมผ่านรอยแยกทำให้ระดับน้ำในลาดท้ายเขื่อนสูงขึ้น โดยจากแบบจำลองการไหลซึมในกรณีดังกล่าว พบว่าระดับน้ำจะสูงสุดที่ระดับ 119 ม.รทก. เมื่อเวลาผ่านไป 26 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ของลาดท้ายเขื่อนลดลงเท่ากับ 1.10 ซึ่งเขื่อนยังมั่นคงอยู่ จากนั้นระดับน้ำจะค่อย ๆ ลดระดับลง (รูปที่ 15 และ 16) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรตรวจสอบ Observation Well ด้านลาดท้ายเขื่อนเพื่อติดตามพฤติกรรมกรไหลซึมหลังเกิดแผ่นดินไหวและเตรียมมาตรการแก้ไขต่อไป

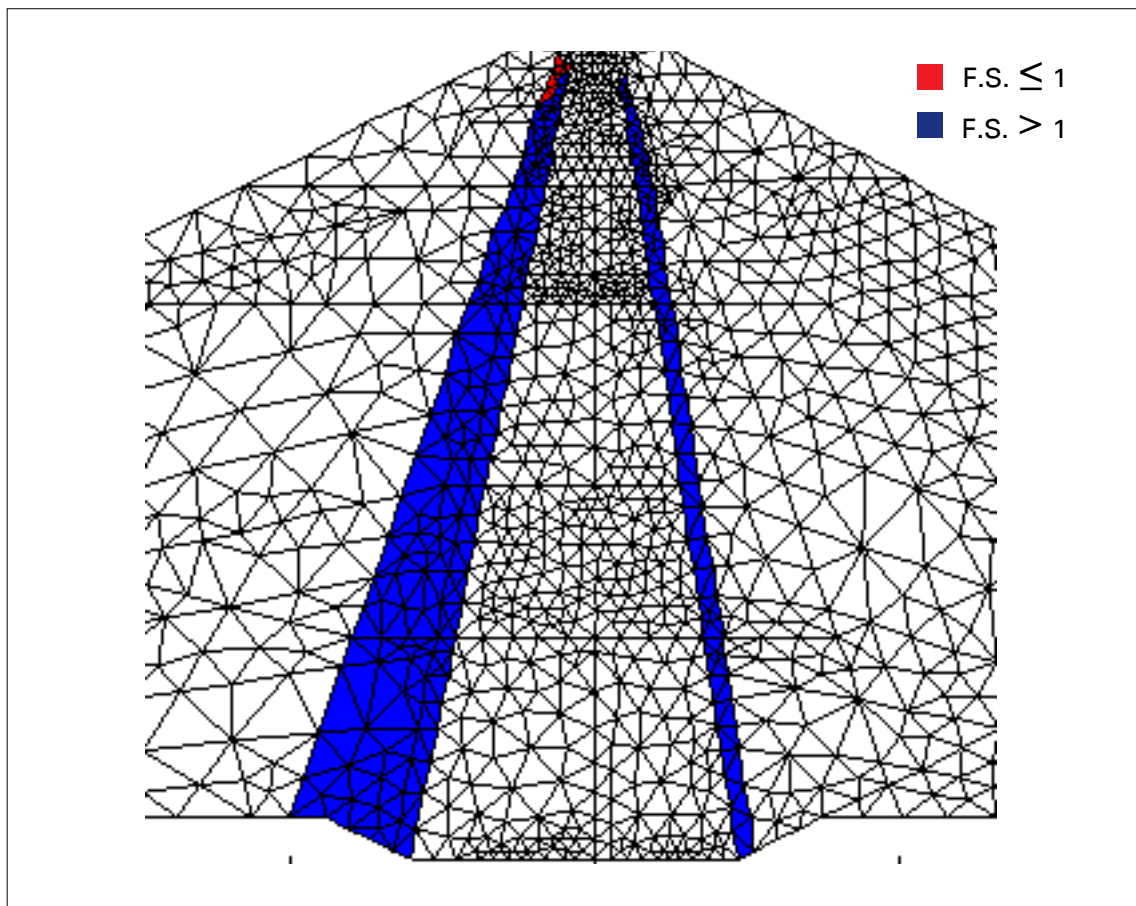


รูปที่ 16 เส้นระดับน้ำจากการไหลซึมในลักษณะที่ตัวเขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวตามขวาง

กรณีศึกษา Liquefaction

Liquefaction เป็นพฤติกรรมของการสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนของดินทรายหลวม และกรวดปนทรายหลวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว โดยเมื่อดินดังกล่าวถูกแรงกระทำจากแผ่นดินไหว เมื่อดินจะเกิดการขยับตัวและยุบตัวลง ในที่สุด โดยการยุบตัวดังกล่าวเกิดขึ้นในสภาวะไม่ระบายน้ำ จึงทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ทำให้แรงเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ระหว่างเม็ดดินลดลง และในที่สุดกำลังรับแรงเฉือนจะลดลง ตามสถิติในอดีต เชื่อนที่มีประวัติในการเกิด Liquefaction มากที่สุดได้แก่ เชื่อนประเภท Hydraulic Fill หรือ Tailing Dam ซึ่งเป็นเชื่อนที่ถูกสร้างโดยใช้วัสดุประเภทตะกอนจากการทำเหมือง มีขนาดเท่ากับทรายหรือทรายแป้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ พร้อมทั้งไม่มี Cohesion จากสถิติเช่นเดียวกัน พบว่าดินทรายหรือกรวดที่มีค่า Standard Penetration

Number (N-SPT) สูงกว่า 35 ครั้ง/ฟุต โอกาสการเกิด Liquefaction จะน้อยมาก สำหรับเชื่อนครีนครินทร์ วัสดุตัวเชื่อนที่ไม่มีโอกาสในการเกิด Liquefaction ได้แก่ ดินถมแกนกลางเชื่อนเนื่องจากเป็นดินเหนียว และ หินถมตัวเชื่อนไม่มีโอกาสเกิดเช่นกัน เนื่องจากเป็นมวลขนาดใหญ่กว่าทรายมาก การสูญเสีย Effective Stress เป็นไปได้ยาก ส่วนวัสดุตัวเชื่อนที่อาจมีโอกาสเกิด Liquefaction คือ Filter และ Transition จากการวิเคราะห์ การกระจายขนาดคละของวัสดุถมสำหรับเชื่อน ครีนครินทร์พบว่าส่วนของ Filter และ Transition มีขนาดคละบางส่วนที่อยู่ในช่วงของการเกิด Liquefaction ถึงแม้ว่าจะไม่เข้าข่ายการมีโอกาสเกิดเต็มที่ ทั้งนี้เพื่อให้การประเมิน Liquefaction ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการ วิเคราะห์เพื่อประเมินการเกิด Liquefaction โดยวิธี



รูปที่ 17 บริเวณที่เกิด Liquefaction ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA 1.17 g

Cyclic Stress Approach (Seed et al., 1975) ในลักษณะ Finite Element ผลการวิเคราะห์ Liquefaction จากแรงกระทำจากแผ่นดินไหว San Fernando ในปี ค.ศ. 1971 โดยมีค่า PGA เท่ากับ 1.17g พบว่าจะเกิด Liquefaction ขนาดเล็กในชั้น Transition Zone บริเวณส่วนบนของตัวเขื่อน หลังจากทำการตรวจสอบเสถียรภาพของลาดชันพบว่า ยังมีความมั่นคง และวงการพิบัติไม่มีผลกระทบต่อ Impervious Core จึงไม่ทำให้เกิดการพิบัติอย่างทันทีทันใดแต่อย่างใด (รูปที่ 17)

ความเป็นไปได้ของความเสียหายของเขื่อนศรีนครินทร์ต่อแรงแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์มีค่า PGA สูงสุดที่ฐานเขื่อนประมาณ 1.17g เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการลดทอนพลังงาน (Attenuation Model) ของคลื่นแผ่นดินไหวที่เสนอโดย Esteva and Villaverde (1973) และ Esteva (1974) พบว่าแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดค่า PGA ได้ฐานเขื่อนมากกว่าหรือเท่ากับ 1.0g จะต้องมีขนาดมากกว่า 7.0 ริกเตอร์ขึ้นไป และ

ถ้าสมมุติว่าเกิดแผ่นดินไหวสูงสุดประมาณ 7.5 ริกเตอร์ แผ่นดินไหวดังกล่าวจะต้องมีระยะห่างจากเขื่อนไม่เกิน 7 กิโลเมตร จึงจะทำให้มี PGA ที่ฐานเขื่อนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.0g

เมื่อพิจารณาข้อมูลสถิติจากสถานีวัดแผ่นดินไหวต่างๆ ในโลก ที่ติดตั้งเครื่องมือวัดอยู่บนชั้นหินพบว่าในอดีตให้ค่า PGA โดยส่วนใหญ่ต่ำกว่า 0.6g ซึ่งเท่ากับค่า Maximum Credible Earthquake (MCE) ที่ใช้ออกแบบเขื่อนโดยทั่วไปที่ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรง (Wieland, 2003) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของเขื่อนศรีนครินทร์พบว่าค่า PGA เท่ากับ 0.6g จะทำให้ลาดชันเขื่อนด้านเหนือน้ำเคลื่อนตัวประมาณ 2.6 เมตรหรือทรุดตัวประมาณ 1.29 เมตร (ตารางที่ 3) สำหรับค่า PGA สูงสุด (1.17g) ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นถือว่ามากกว่าเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นจริงในโลกนี้มาก โดยคลื่นแผ่นดินไหวดังกล่าวน่าจะเป็นสถานีวัดที่อยู่เหนือชั้นดินและถูกขยายสัญญาณมาระดับหนึ่งแล้ว

ตารางที่ 3 การทรุดตัวสูงสุดของสันเขื่อนจากแรงกระทำแผ่นดินไหวที่มี PGA ต่างๆ

PGA ใต้ฐานเขื่อน (g)	ระยะการทรุดตัวสูงสุดของสันเขื่อน (เมตร)	หมายเหตุ
0.10	0.10	PGA ที่ใช้ในการออกแบบเขื่อนศรีนครินทร์
0.15	0.29	PGA บริเวณพื้นที่เขื่อนศรีนครินทร์ตามแผนที่โดย Warnitchai and Lisantono(1996)
0.60	1.29	PGA ที่ใช้ในการออกแบบในบริเวณพื้นที่ Highly Seismic Region (Wieland, 2003)
1.17	3.40	PGA สูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้



จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปว่าเขื่อนศรีนครินทร์ มีความมั่นคงและปลอดภัยและไม่พิบัติทันทีทันใด เมื่อถูกแรงกระทำแผ่นดินไหวโดยพิสัยจกแรงกระทำแผ่นดินไหวที่รุนแรง 35 เหตุการณ์ ใน 14 ประเทศที่เคยเกิดขึ้นในโลก อย่างไรก็ตามเขื่อนอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนบริเวณสันเขื่อน โดยหากมีแผ่นดินไหวรุนแรงมากดังข้อมูลที่ไว้วิเคราะห์สันเขื่อนจะมีการทรุดตัวประมาณ 3.4 เมตร ซึ่งยังน้อยกว่าระยะเพื่อล้น (Free Board) ของเขื่อน (5 เมตร) โดยความเสียหายดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดและระยะทางจากตัวเขื่อนของจุดกำเนิดแผ่นดินไหวหรืออีกนัยหนึ่งคือขึ้นอยู่กับค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินที่กระทำใต้ฐานเขื่อน (Peak Ground Acceleration, PGA) รวมถึงลักษณะความถี่และระยะเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำ

