

การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนในประเทศไทย

Risk Analysis for Dams in Thailand

ดร.สุทธิสศักดิ์ สรลัมพ์

Suttisak Soralump (Ph.D.)

หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง

Warakorn Mairaing (Ph.D.)

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. บทนำ

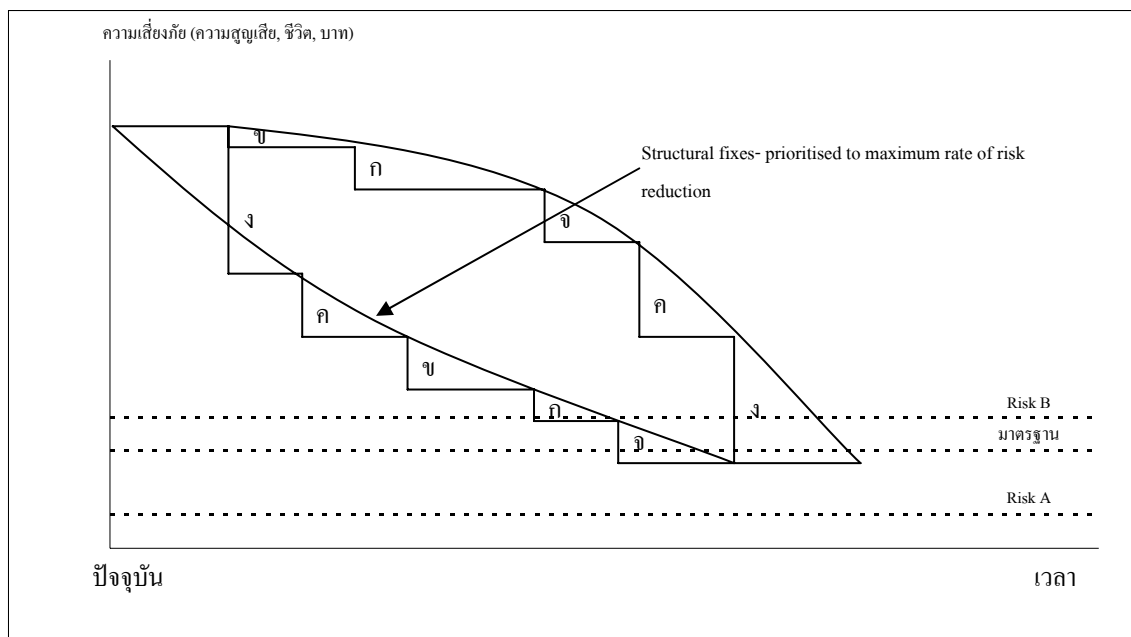
การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงเป็นหลักการที่นำมาใช้เป็นประโยชน์หลายด้าน ทั้งในวงการธุรกิจ การเงิน การแพทย์และวิศวกรรม การวิเคราะห์ความเสี่ยง ถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการจัดการด้านธรณีพิบัติภัย อาทิเช่น แผ่นดินถล่ม แผ่นดินไหว การกักเซาะของตลิ่ง ฯลฯ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเสี่ยงจึงเป็นวิทยาการที่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือบริหารจัดการด้านความปลอดภัยเขื่อน ทั้งเขื่อนที่กำลังก่อสร้างและเขื่อนที่เปิดใช้งานไปแล้ว พื้นฐานของการวิเคราะห์ความเสี่ยงคือการนำความน่าจะเป็นและความสูญเสียมาประกอบการพิจารณา ร่วมกับการพิจารณาความคุ้มค่าในเชิงกำไร-ขาดทุน การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ในการบริหารงบประมาณให้สามารถเกิดความปลอดภัยสูงสุดจากการลงทุนก่อสร้างหรือบำรุงรักษาเขื่อน ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงมีเป้าหมายในการปรับองค์ประกอบต่างๆ เพื่อให้ความเสี่ยงต่อการสูญเสียอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การวิเคราะห์ความเสี่ยงนั้นจึงให้ความสำคัญต่อความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากเขื่อนทั้งในกรณีที่เขื่อนเกิดการพิบัติหรือในกรณีที่เขื่อนใช้งานในสภาพปกติ

การปรับองค์ประกอบต่างๆ เพื่อการลดความเสี่ยงจะต้องทำการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันไป การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นั้นโดยปกติ จะวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบระหว่างราคาก่อสร้างหรือปรับปรุงเขื่อนและผลประโยชน์ที่ได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ดังกล่าวยังขาดแนวคิดที่มองถึงความเสี่ยงต่อภัยพิบัติต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น ความเสี่ยงเหล่านี้สามารถวิเคราะห์และตีค่าออกมาเป็นมูลค่าความสูญเสียที่มีโอกาสเกิดขึ้น เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการตัดสินใจของหน่วยงานของรัฐที่จะอนุมัติงบประมาณเพื่อบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมได้อย่างเหมาะสม โดยสรุปแล้วแนวคิดนี้มองถึงความสูญเสียเป็นตัวตั้ง โดยมีข้อดีคือสามารถที่จะชี้ชัดลงไปว่าความสูญเสียนั้นจะลดลงเท่าใดหลังจากการปรับปรุงหรือจะเกิดความสูญเสียเท่าไร หากไม่ได้รับการปรับปรุงหรือแก้ไข นอกจากนั้นแล้วยังสามารถที่จะนำความสูญเสียที่ลดลงนั้นมาคำนวณเปรียบเทียบความคุ้มค่าจากการลงทุนก่อสร้างหรือปรับปรุง ในท้ายสุดผลจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงจะสามารถนำมาใช้ในการเริ่มต้นการเข้าสู่ระบบการประกันความสูญเสียเนื่องจากการพิบัติของเขื่อน

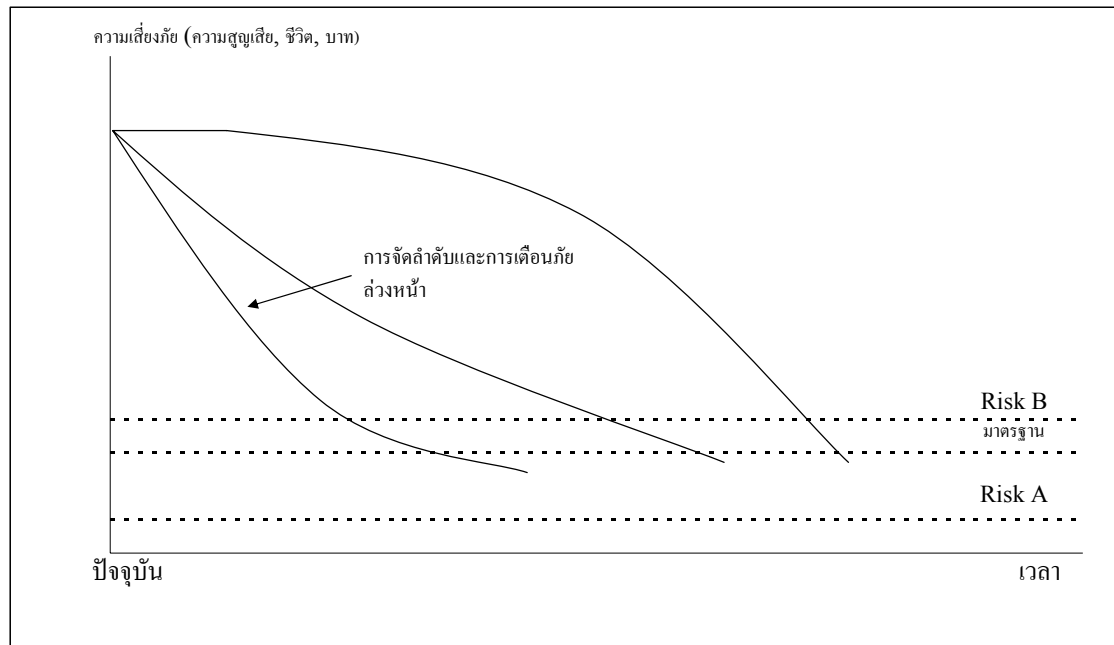
2. ที่มาของความเสียง

ที่มาความเสียงของเขื่อนทั้งเขื่อนปัจจุบันและเขื่อนที่ดำเนินการก่อสร้างสามารถสรุปได้เป็น 3 ที่มาหลัก ๆ อันได้แก่

ก. ความปลอดภัยหรือความมั่นคงของเขื่อนมีค่าลดลงตามเวลาได้แก่ ความจริงที่สภาพเขื่อนหลังจากใช้งานจะทรุดโทรมลงทำให้ความเสียงต่อความสูญเสียมีค่ามากขึ้น การติดตั้งระบบตรวจสอบพฤติกรรมและการบำรุงรักษาเขื่อนที่ถูกจุดจะสามารถยืดอายุการใช้งานรวมทั้งเพิ่มความปลอดภัยหรือความมั่นคงของเขื่อนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การวิเคราะห์และประเมินความเสียงสามารถวิเคราะห์ถึงการบำรุงรักษาที่เหมาะสมและตรงจุดได้ อีกทั้งยังสามารถลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมให้ความเสี่ยงลดลงเร็วกว่าการบำรุงรักษาปกติ ดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่ามาตรการบำรุงรักษา ก-จ สามารถนำมาลำดับใหม่เพื่อให้อัตราการลดลงของความเสียงหรือความสูญเสียมีอัตราการลดลงที่เร็วขึ้น นอกจากนั้นรูปที่ 2 แสดงถึงการลดความเสียงของการสูญเสียโดยใช้ระบบการเตือนภัยที่มีราคาไม่มากนักแต่สามารถที่จะลดความเสียงต่อความสูญเสียได้รวดเร็วเช่นเดียวกัน

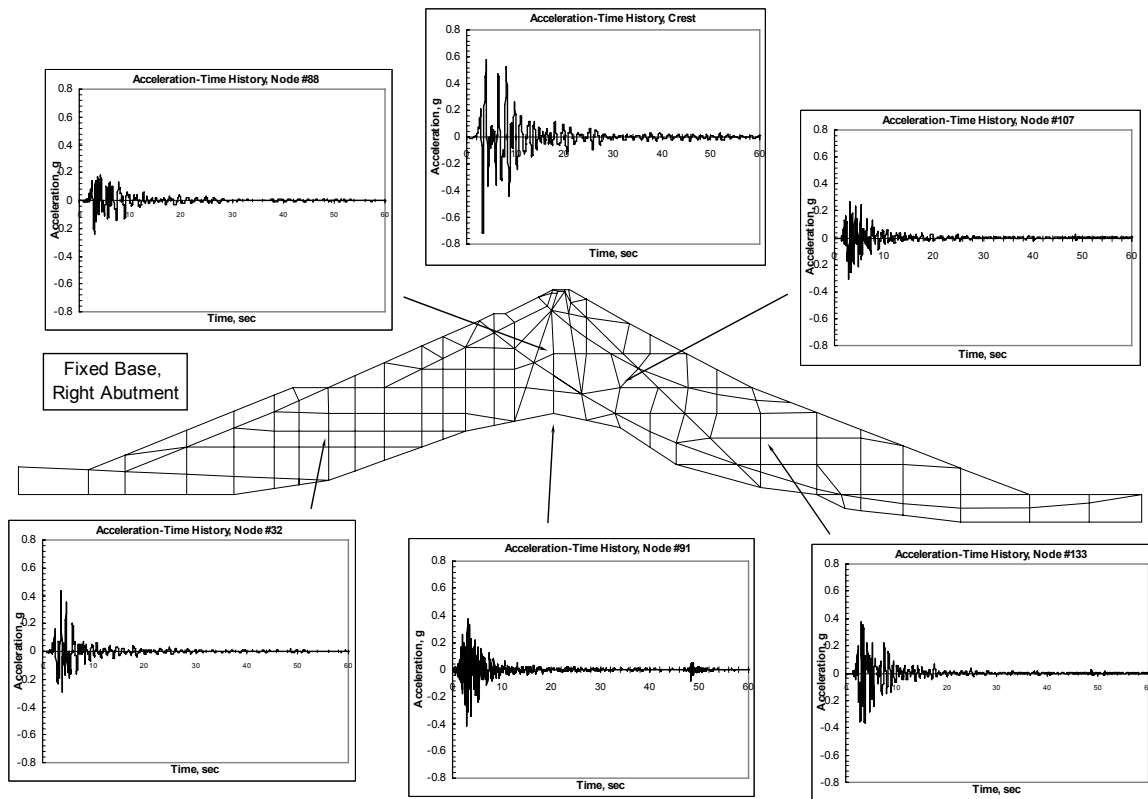


รูปที่ 1 การจัดลำดับการบำรุงรักษาที่เหมาะสม (สุทธิศักดิ์, 2547)



รูปที่ 2 อิทธิพลของระบบเตือนภัยต่อการลดลงของความเสี่ยง (สุทธิศักดิ์, 2547)

ข. การวิเคราะห์หรือหลักทฤษฎีที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ในกรณีที่มีการพบความรู้ใหม่ที่ส่งผลต่อผลการวิเคราะห์ความมั่นคงในอดีต ดังเช่นกรณีที่มีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันของเขื่อนในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวมีวิวัฒนาการในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมมากขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์โดยวิธี Dynamic Response Analysis (รูปที่ 3) แทนที่วิธี Psuedostatic ที่มีความผิดพลาดสูงตารางที่ 1 หรือในกรณีที่เขื่อน Teton เกิดการพิบัติเนื่องจากการนำดินที่มีการกระจายตัวมาใช้เป็นวัสดุภายในตัวเขื่อน หรือแม้กระทั่งการพังทลายของลาดชันของเขื่อน Lower San Fernando ที่ใกล้พิบัติเนื่องจากเกิด Liquefaction การพิบัติของเขื่อน Teton และ Lower San Fernando ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ส่งผลให้เกิดการวิจัยและการศึกษาอย่างกว้างขวางทำให้เกิดทฤษฎีใหม่ๆ อีกมากมายที่ได้นำมาใช้ในการออกแบบให้เขื่อนปลอดภัยขึ้น ทฤษฎีและการวิเคราะห์ใหม่จำเป็นต้องถูกนำมาวิเคราะห์เขื่อนปัจจุบันเพื่อความมั่นใจด้านความมั่นคง และเพื่อให้ทราบปริมาณความเสี่ยงจากเขื่อนที่ออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีเก่า ทำให้สามารถลดความเสี่ยงได้ตรงจุดและให้ปริมาณความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

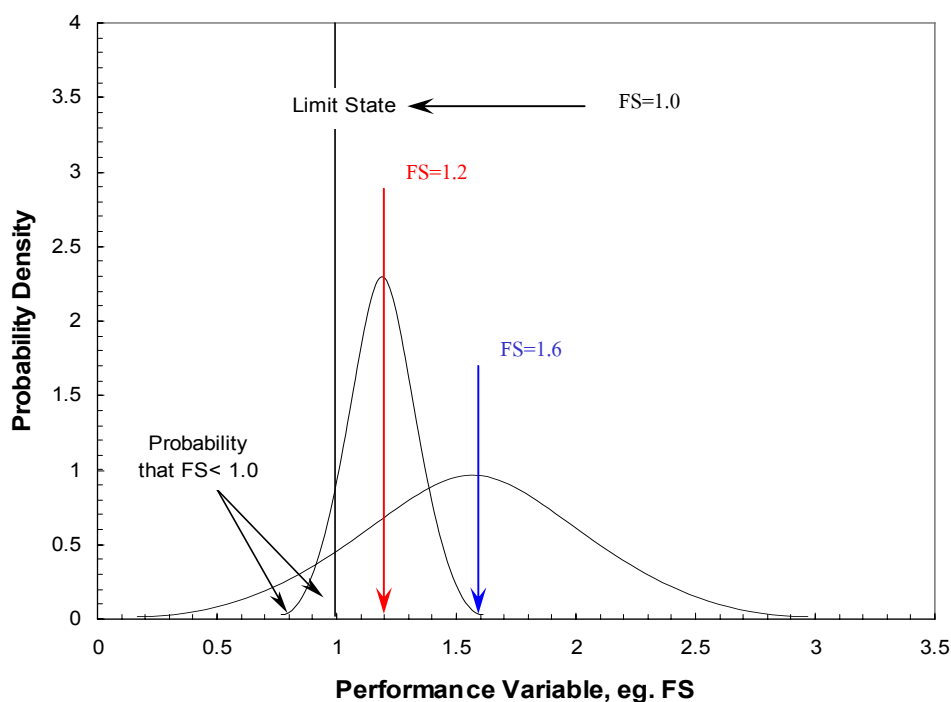


รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความเสี่ยงพฤติกรรมตอบสนองของเขื่อน Hills Creek เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวโดยวิธี Dynamic Response Analysis (Soralump, 2002)

ตารางที่ 1 เขื่อนที่ถูกวิเคราะห์โดยวิธี Pseudo-Static และเกิดการพิบัติ (Seed , 1979)

<i>Dam</i>	<i>Seismic coefficient</i>	<i>Computed factor of safety</i>	<i>Effect of earthquake</i>
Sheffield Dam	0.1	1.2	Complete failure
Lower San Fernando Dam	0.15	1.3	Upstream slope failure
Upper San Fernando Dam	0.15	2 to 2.5	Downstream shell including crest slipped about 6 ft downstream
Tailings Dam (Japan)	0.2	1.3	Failure of dam with release of tailings

ก. ความแปรปรวนของตัวแปรและแบบจำลองของการวิเคราะห์ เหตุผลในข้อนี้มิได้เกิดขึ้นเฉพาะเขื่อนปัจจุบัน แต่หากยังเป็นเหตุผลสำหรับเขื่อนที่กำลังดำเนินการออกแบบและก่อสร้างอยู่ด้วย การวิเคราะห์ความเสี่ยงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมอย่างยิ่งในการจัดการกับความแปรปรวนของตัวแปรและแบบจำลอง เนื่องจากสามารถนำหลักการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น, หลักสถิติประยุกต์ และหลักการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน มาบริหารความแปรปรวนให้อยู่ในระดับที่ควบคุมได้ ตัวอย่างของความแปรปรวนที่ส่งผลต่อค่าความปลอดภัยจากการออกแบบได้แสดงในรูปที่ 4

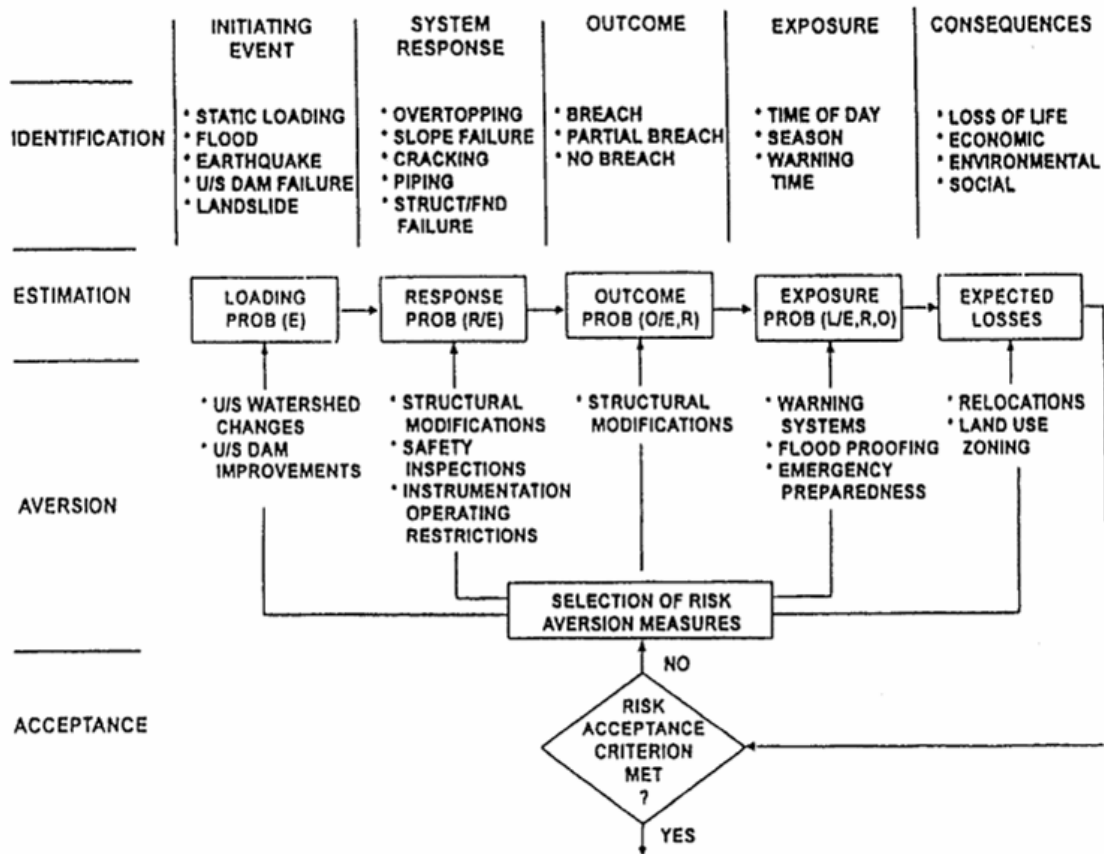


รูปที่ 4 ความแปรปรวนของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Soralump,2002)

3. หลักการวิเคราะห์ความเสี่ยง

Bowles, Anderson and Glover (1997) ได้เสนอหลักการในการวิเคราะห์เขื่อนซึ่งเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความน่าจะเป็นในการพิบัติต่ำแต่สร้างความเสียหายสูง การวิเคราะห์นี้เรียกว่าการประเมินความเสี่ยงภัยของเขื่อน (Risk Assessment of Dams) การประเมินความเสี่ยงภัยมีขั้นตอนที่เป็นระบบ ดังแสดงในแผนภูมิการวิเคราะห์ความเสี่ยงในรูปที่ 5 นอกจากนั้นยังต้องอาศัยความรู้และข้อคิดเห็นจากวิศวกรผู้มีประสบการณ์ในงานเขื่อนรวมถึงผู้เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ในการประเมินพฤติกรรมตอบสนองของเขื่อน (System Response) ขณะใช้งานทั้งในสภาพปกติและเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ เช่น ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีปริมาณเกินกว่าที่เขื่อนจะรับได้, แผ่นดินไหว หรือเกิดการชำรุดของตัวเขื่อนในสภาวะการใช้งานปกติ ขั้นตอนที่สำคัญของ

การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนคือการประเมินค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์เหล่านั้นจะเกิดขึ้นโดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นและสถิติประยุกต์ หรือใช้ข้อคิดเห็นจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ (Whitman, 2000) Soralump (2002) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของพฤติกรรมต่างๆ ที่เขื่อนตอบสนองเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยใช้หลักสถิติประยุกต์และทฤษฎีความน่าจะเป็นรวมทั้งการวิเคราะห์การตอบสนองของเขื่อนโดยใช้วิธี Dynamic Finite Element Analysis



รูปที่ 5 แผนภูมิการประเมินความเสี่ยงของเขื่อน (Bowles et al. , 1997)

ขั้นตอนของการประเมินความเสี่ยงสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยหลักการเบื้องต้นดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์เหตุการณ์เริ่มต้น ได้แก่การวิเคราะห์ถึงสาเหตุเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการพิบัติของเขื่อน เช่น แผ่นดินไหว, น้ำท่วม หรือการรั่วซึมภายในเนื่องจาก Piping สิ่งที่แตกต่างกันของการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมทั่วไป คือการวิเคราะห์ความเสี่ยงได้วิเคราะห์โดยพิจารณาถึงความรุนแรงของเหตุการณ์เริ่มต้นทั้งหมด โดยมีได้คำนึงถึงสถานการณ์แย่ที่สุดอย่างเดียวมเหมือนการวิเคราะห์ทั่วไป

2. การวิเคราะห์เหตุการณ์การตอบสนองและลักษณะการพิบัติ ได้แก่การวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของระบบต่างๆ เช่น การวิเคราะห์พฤติกรรมเมื่อประตูละบายน้ำเกิดติดขัดขณะเกิดน้ำหลาก พฤติกรรมเมื่อน้ำล้นสันเขื่อน, ความมั่นคงของลาดชันเมื่อเกิด Liquefaction ภายในตัวเขื่อนเนื่องจากแผ่นดินไหว ฯลฯ ทั้งนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมจะได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการพิบัติเนื่องจากแรงกระทำต่างๆ

3. การวิเคราะห์ความสูญเสีย ได้แก่ การประเมินความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นจากการพิบัติในรูปแบบต่างๆ หรือแม้แต่ในกรณีที่ไม่เกิดการพิบัติ ความสูญเสียดังกล่าวจะประกอบด้วยความสูญเสียใน 2 ลักษณะ ได้แก่ ความสูญเสียในเชิงเศรษฐกิจอันประกอบด้วยทรัพย์สิน, ผลผลิตทางการเกษตร ฯลฯ และความสูญเสียในชีวิตประชาชน

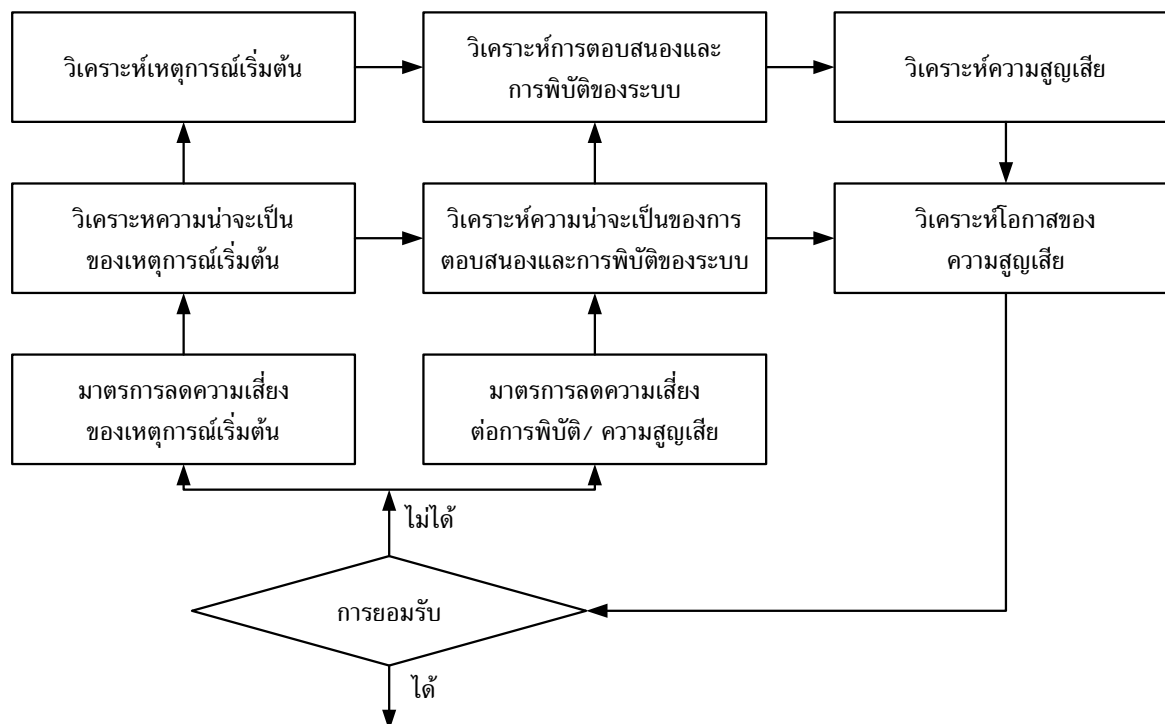
4. การประเมินความน่าจะเป็น ได้แก่ การประเมินความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เริ่มต้น ซึ่งประกอบด้วยวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดเพื่อหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ในแต่ละช่วงที่มีโอกาสเป็นไปได้ทั้งหมด นอกจากการประเมินความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เริ่มต้นแล้วยังต้องทำการประเมินความน่าจะเป็นของการตอบสนองของระบบรวมทั้งความน่าจะเป็นของการพิบัติในสุดท้าย การหาความน่าจะเป็นดังกล่าวสามารถหาได้โดย 3 วิธีหลักๆ ได้แก่ การใช้วิธีสถิติประยุกต์, การวิเคราะห์โดยใช้หลักความน่าจะเป็นและการวิเคราะห์จากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ

5. การประเมินความเป็นไปได้ของการสูญเสีย ใช้หลักของการวิเคราะห์ร่วมจากผลการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น (4) และผลการวิเคราะห์ความสูญเสีย (3) ผลลัพธ์ที่ได้จะได้นำมาเป็นความเป็นไปได้ของการสูญเสียของแต่ละชุดของเหตุการณ์ ซึ่งสามารถรวมเป็นความเป็นไปได้ของการสูญเสียรวมต่อไป

6. การวิเคราะห์การยอมรับความเสี่ยง ต่อการสูญเสีย ได้แก่การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความเป็นไปได้ของความสูญเสียที่ยอมรับได้กับความสูญเสียจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ นอกจากนั้นยังมีการเปรียบเทียบถึงความน่าจะเป็นในการพิบัติกับค่าความน่าจะเป็นมาตรฐานอีกด้วย เกณฑ์การยอมรับความเสี่ยงหรือปริมาณความสูญเสียที่ยอมรับได้จากเขื่อนนั้นยังไม่มีบรรทัดฐานที่ชัดเจนในประเทศไทย

7. การวิเคราะห์และกำหนดมาตรการในการลดความเสี่ยง หากความเสี่ยงหรือปริมาณความสูญเสียมากเกินไปที่จะยอมรับได้ หรือความน่าจะเป็นของการพิบัติของเขื่อนมีค่ามากกว่ามาตรฐาน มาตรการลดความเสี่ยงเช่นการเสริมความแข็งแรงของเขื่อน, เพิ่มความสามารถในการระบายน้ำ ฯลฯ จำเป็นต้องนำมาใช้ในการลดความสูญเสีย มาตรการลดความเสี่ยงนี้ไม่จำเป็นจะต้องเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงโครงสร้างแต่เพียงอย่างเดียว

การจัดการในระบบเตือนภัยที่เหมาะสม, การจัดลำดับขั้นของความรับผิดชอบต่อเหตุการณ์ ฯลฯ เป็นตัวอย่างของมาตรการลดความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพแต่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่มาก



รูปที่ 6 แผนภูมิขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง (สุทธิศักดิ์ , 2547)

4. การวิเคราะห์ที่จำเป็น

การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงเป็นการดำเนินการที่ใช้ความรู้จากหลายด้านมาประกอบกันอันได้แก่ วิศวกรรมชลประทาน, วิศวกรรมแหล่งน้ำ, วิศวกรรมปฐพี, เศรษฐศาสตร์ หรือบางครั้งอาจจะต้องใช้หลักรัฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย การวิเคราะห์ที่จำเป็นในการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงจึงประกอบจากศาสตร์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมา การวิเคราะห์ดังกล่าวได้แก่

1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่า
2. การวิเคราะห์ด้านแผ่นดินไหว
3. การวิเคราะห์ลักษณะการพิบัติทางวิศวกรรมปฐพี
4. การวิเคราะห์ลักษณะการพิบัติทางด้านชลศาสตร์
5. การวิเคราะห์ Dam Break
6. การวิเคราะห์ความสูญเสียทางเศรษฐกิจและชีวิต
7. การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น ได้ดำเนินการจากการวิเคราะห์เหตุการณ์เริ่มต้นที่เป็นสาเหตุของความสูญเสีย ตามด้วยการวิเคราะห์ลักษณะการตอบสนองของระบบเขื่อนตามสาเหตุต่างๆ ต่อด้วยการวิเคราะห์ถึงลักษณะการพิบัติและการไหลของน้ำโดยการวิเคราะห์ Dam Break เพื่อนำมาประเมินและวิเคราะห์ความสูญเสีย

การวิเคราะห์ที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสี่ยงของการวิเคราะห์และประเมินความสูญเสีย คือการวิเคราะห์ Dam Break ผลการวิเคราะห์ Dam Break สามารถนำไปวิเคราะห์ความสูญเสียได้อย่างสมจริง เนื่องจากสามารถที่จะวิเคราะห์ในเชิงพื้นที่รวมทั้งวิเคราะห์ในเชิงของเวลาได้ในเวลาเดียวกัน

5. หลักการประเมินความน่าจะเป็น

ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง ความน่าจะเป็นดังกล่าวประกอบด้วย ความน่าจะเป็นของภัยพิบัติในระดับต่าง ๆ ความน่าจะเป็นของพฤติกรรมตอบสนองของเขื่อนรูปแบบต่างๆ เมื่อมีภัยพิบัติ ความน่าจะเป็นภัยพิบัติในลักษณะต่าง ๆ ความน่าจะเป็นของภัยพิบัติหรือโอกาสเกิดภัยพิบัติจำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลทางสถิติในอดีตมาวิเคราะห์หาเช่น ความน่าจะเป็นของระดับน้ำสูงสุด หรือความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของพฤติกรรมตอบสนองและความน่าจะเป็นในการพิบัติของเขื่อน สามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือวิธี Numerical Simulation วิธี Monte-Carlo Simulation และ Method of Moments วิธีวิเคราะห์โดย Monte-Carlo Simulation เป็นวิธีที่สามารถทราบลักษณะการกระจายตัวของผลลัพธ์ได้ดี อีกทั้งยังเป็นวิธีที่มีความละเอียด อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจจะต้องทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาวิเคราะห์หากแบบแบบว่า ลองการวิเคราะห์ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น วิธี Method of Moments จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้โดยมีหลักการประมาณค่าความแปรปรวนของผลลัพธ์โดยใช้ Taylor's Series Approximation ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธี First Order Second Moment Method

Christian, Ladd, and Baecher (1994) U.S. Army Corps of Engineer (1997 และ 1998) และ Duncan (2000) ได้ใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นของการพิบัติของโครงสร้างต่างๆ ทางวิศวกรรมปฐพี Soralump (2002) ได้นำวิธีนี้มาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นของการพิบัติของเขื่อนในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดจากการกระทำของแผ่นดินไหว หลักการของวิธี First Order Second Moment สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชันและความน่าจะเป็นของการพิบัติของลาดชัน สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$FS = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e \dots \dots \dots (1)$$

FS = อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดชัน

$g()$ = รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อหา FS เช่น Simplified Bishop's

x_i = ตัวแปรที่มีความแปรปรวนเช่น C และ ϕ

e = ความคลาดเคลื่อนของรูปแบบการวิเคราะห์ (Model Error)

ในการวิเคราะห์ปกติ ค่าต่างๆ ของตัวแปรจะใช้ค่าเพียงค่าเดียว โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์ข้อมูลและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพียงค่าเดียวเช่นเดียวกัน หรืออีกนัยหนึ่งคือการหา Expected Value ของผลลัพธ์โดยใช้ Expected Value ของตัวแปร

$$E[FS] = g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n]) \dots\dots\dots(2)$$

ความแปรปรวนของผลลัพธ์หรืออัตราส่วนความปลอดภัย สามารถประมาณได้ด้วยเทอมแรกของ Taylor's Series ดังต่อไปนี้

$$V[FS] \approx \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} C[x_i, x_j] + V[e] \dots\dots\dots(3)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถหาความแปรปรวนของอัตราส่วนความปลอดภัยได้ อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวไม่เหมาะสมและไม่ชักจูงให้ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงได้มีการตั้งสมมุติฐานและข้อกำหนดขึ้นโดย U.S.Army Corps of Engineer (1997 และ 1998) และได้พัฒนาการใช้ในรูปแบบต่างๆ โดย Duncan (2000) สมมุติฐานและข้อกำหนดต่างๆ ได้แก่

1. ไม่มีความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างตัวแปร
2. สมการอนุพันธ์ (Derivative Equation) ทำการประมาณ โดยใช้ Finite Difference (Christian, Ladd and Baecher, 1994)
3. การเพิ่มขึ้นและลดลงรอบค่า Expected Value ของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในสมการ จะเท่ากับค่า Standard Deviation ของตัวแปรนั้นๆ
4. ค่าความแปรปรวนที่เป็นผลลัพธ์ เป็นค่าความแปรปรวนรวมของตัวแปรอื่นประกอบด้วย
 - a. ความแปรปรวนจากความผิดพลาดทางสถิติ เช่น จำนวนข้อมูลมีน้อยเกินไป ทำให้เกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์ทางสถิติ
 - b. ความแปรปรวนจากความผิดพลาดจากการวัด
5. ค่าความแปรปรวนดังกล่าวไม่รวม
 - a. ความแปรปรวนในเชิงตำแหน่ง (Spatial Variation)
 - b. ความแปรปรวนจากแบบจำลอง (Model Error)
6. การกระจายตัวของค่าตัวแปร มีสมมุติฐานให้เป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การกระจายตัวของผลลัพธ์ สมมุติให้เป็นการกระจายตัวแบบปกติเช่นกัน เว้นแต่จะทราบลักษณะการกระจายตัวที่แน่นอน

จากสมมุติฐานดังกล่าว สมการ 2 เราสามารถเปลี่ยนให้เป็นสมการที่ใช้งานทางปฏิบัติได้ง่ายขึ้นดังต่อไปนี้

$$V[FS] \approx \sum_{i=1}^k \left[\frac{g(x_{i+}) - g(x_{i-})}{2\sigma_{x_i}} \right]^2 \sigma_{x_i}^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$x_{i+} = E[x_i] + \sigma_{x_i}, x_{i-} = E[x_i] - \sigma_{x_i}$$

จากสมการข้างต้นผู้ออกแบบสามารถหาความแปรปรวนของผลลัพธ์ได้โดยง่าย หากทราบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_{x_i}) และค่าประมาณของตัวแปร ($E[x_i]$) หรือทราบสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation, COV) และ $E[x_i]$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ได้แก่

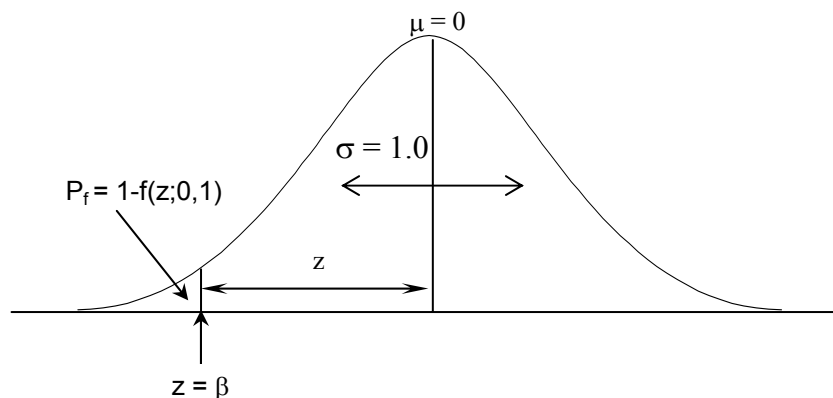
$$COV = \frac{\sigma(x_i)}{E(x_i)} \dots\dots\dots (5)$$

เพื่อให้การนำไปใช้งานง่ายขึ้น Soralump (2002) ได้ออกแบบรูปแบบตารางการวิเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์ทั่วไป ดังแสดงดังตารางที่ 2

เมื่อทราบค่า Expected Value และค่าความแปรปรวนของผลลัพธ์แล้ว เราสามารถหาค่าความน่าจะเป็นในกรณีต่างๆ ได้ สำหรับในกรณีของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชัน ความน่าจะเป็นของการพิบัติคือพื้นที่ใต้โค้งการกระจายตัวมาตรฐานของ $\log$ ของอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าน้อยกว่า 1.0 ทั้งนี้เนื่องจากเรากำหนดให้การพิบัติเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังแสดงในรูปที่ 7 แสดงการกำหนดความน่าจะเป็นของการพิบัติ

ตารางที่ 2 ตารางการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการพิบัติโดยวิธี SFOSM (Soralump,2002)

Run	x_1	x_2	x_3	x_n	Performance Function, $g(x)$	Variance Component	% of Variance
$E[x]$	$E[x_1]$	$E[x_2]$	$E[x_3]$	$E[x_n]$	$H[\delta] = g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$		
2	$E[x_1] - \sigma_{x1}$	$E[x_2]$	$E[x_3]$	$E[x_n]$	$g(x_1) = g(E[x_1] - \sigma_{x1}, E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_1) - g(x_{1-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_1))^2}{2} \right] \times 100$
3	$E[x_1] + \sigma_{x1}$	$E[x_2]$	$E[x_3]$	$E[x_n]$	$g(x_1) = g(E[x_1] + \sigma_{x1}, E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_2) - g(x_{2-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_2))^2}{2} \right] \times 100$
4	$E[x_1]$	$E[x_2] - \sigma_{x2}$	$E[x_3]$	$E[x_n]$	$g(x_2) = g(E[x_1], E[x_2] - \sigma_{x2}, E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_2) - g(x_{2-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_2))^2}{2} \right] \times 100$
5	$E[x_1]$	$E[x_2] + \sigma_{x2}$	$E[x_3]$	$E[x_n]$	$g(x_2) = g(E[x_1], E[x_2] + \sigma_{x2}, E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_3) - g(x_{3-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_3))^2}{2} \right] \times 100$
6	$E[x_1]$	$E[x_2]$	$E[x_3] - \sigma_{x3}$	$E[x_n]$	$g(x_3) = g(E[x_1], E[x_2], E[x_3] - \sigma_{x3}, \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_3) - g(x_{3-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_3))^2}{2} \right] \times 100$
7	$E[x_1]$	$E[x_2]$	$E[x_3] + \sigma_{x3}$	$E[x_n]$	$g(x_3) = g(E[x_1], E[x_2], E[x_3] + \sigma_{x3}, \dots, E[x_n])$	$\left[\frac{g(x_3) - g(x_{3-})}{2} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_3))^2}{2} \right] \times 100$
↓							
n	$E[x_1]$	$E[x_2]$	$E[x_3]$	$E[x_n] - \sigma_{xn}$	$g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n] - \sigma_{xn})$	$\left[\frac{g(x_{n+}) - g(x_{n-})}{2\sigma_{x_n}} \right]^2$	$\left[\frac{(\Delta g(x_n))^2}{2} \right] \times 100$
n+1	$E[x_1]$	$E[x_2]$	$E[x_3]$	$E[x_n] + \sigma_{xn}$	$g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n] + \sigma_{xn})$		
					SUM	$V[\delta] \approx \sum_{i=1}^k \left[\frac{\Delta g(x_i)}{2} \right]^2$	100%



รูปที่ 7 การกำหนดความน่าจะเป็นของการพิบัติ (Soralump, 2002)

6. ระดับของการประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยงสามารถกระทำได้หลายระดับ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น ระดับความสูญเสีย, งบประมาณในการวิเคราะห์และประเมิน, งบประมาณในการซ่อมบำรุง และงบประมาณในการก่อสร้าง เพื่อให้เหมาะสมกับปัจจัยดังกล่าว การประเมินความเสี่ยงจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระดับอันได้แก่

1. ระดับเบื้องต้น ได้แก่การประเมินและวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปของโครงการ หรือ เป็นการประเมินสำหรับโครงการที่มีงบประมาณจำกัด หรือเป็นโครงการที่มีระดับของความสูญเสียต่ำ การวิเคราะห์ในขั้นนี้จะไม่มีการวิเคราะห์ Dam Break ดังนั้นการวิเคราะห์ความสูญเสียนั้นจะใช้จากสถิติความเสียหายในอดีต หรือการคาดการณ์พื้นที่น้ำท่วมเบื้องต้น การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นจะใช้ข้อมูลทางสถิติเท่าที่ทำได้ ประกอบกับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก ความถูกต้องของการประเมินในขั้นนี้จะอยู่ในระดับของการประเมินความเป็นไปได้ของโครงการในระดับเบื้องต้น หรือการประเมินงบประมาณเบื้องต้น เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุง การวิเคราะห์ในเบื้องต้นนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องการผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่มีประสบการณ์เนื่องจากจะต้องมองภาพรวมได้ดี เพื่อลดความผิดพลาดโดยรวมที่สามารถจะเกิดได้ง่ายในขั้นตอนนี้

2. ระดับรายละเอียด ได้แก่ การประเมินและวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อใช้ในการตัดสินใจในโครงการก่อสร้างหรือปรับปรุงที่มีงบประมาณสูงหรือโครงการที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียในปริมาณมาก เช่น เขื่อนที่ก่อสร้างเหนือชุมชนใหญ่ ถึงแม้ว่าอาจเป็นเขื่อนขนาดเล็กแต่สามารถส่งผลกระทบต่อความสูญเสียในระดับสูง การประเมินและการวิเคราะห์นี้จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ที่ละเอียด เช่น การวิเคราะห์ Dam Break, การวิเคราะห์ความสูญเสียในระดับรายละเอียดของชนิดของความสูญเสีย, การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นที่สัมพันธ์กับแบบจำลองทางด้านวิศวกรรม (Probabilistic Engineering Analysis) หรือการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความน่าเชื่อถือของโครงสร้างปัจจุบัน (Uncertainty and Reliability of Engineering Structure)

7. ประเภทของการวิเคราะห์ความเสี่ยง

การวิเคราะห์ความเสี่ยงนอกจากจะสามารถกระทำได้หลายระดับแล้ว ยังสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของระบบการชลประทาน อันได้แก่

1. การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงสำหรับเขื่อนเดี่ยว (Single Dam) ได้แก่การมุ่งความสนใจไปยังเขื่อนเพียงเขื่อนเดียว ซึ่งอาจจะเป็นเขื่อนที่มีพื้นที่รับผิชอบกว้างหรือเป็นเขื่อนที่มีปริมาณน้ำหรือมีอิทธิพลมากเทียบกับเขื่อนอื่นๆ ภายในลุ่มน้ำ

2. การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของระบบเขื่อน (Portfolio Risk Assessment) ได้แก่การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนหลายๆ เขื่อนในลุ่มน้ำเดียวกันหรือหลายๆ ลุ่มน้ำประกอบกัน ทั้งนี้จะได้วิเคราะห์ผลกระทบและความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำระหว่างเขื่อนต่างๆ ภายในระบบทั้งจากสภาพการใช้งานปกติและจากสภาพที่เกิดการพิบัติของเขื่อนในระบบ

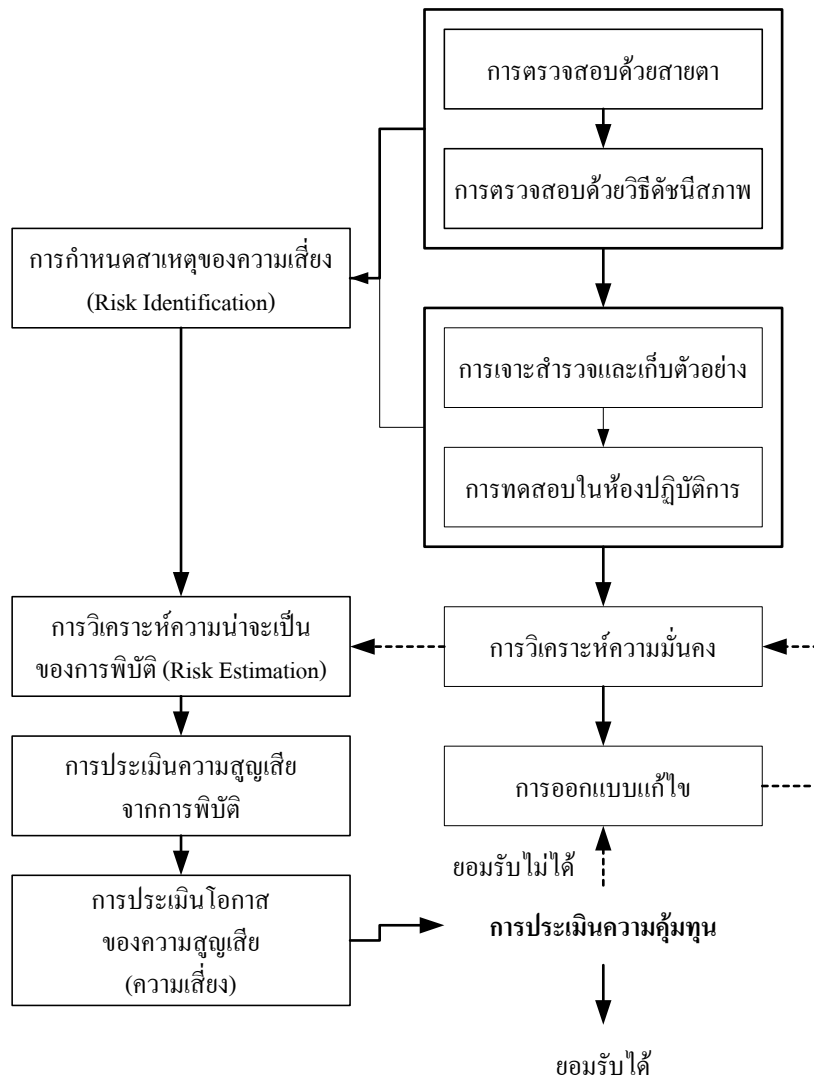
นอกจากการแบ่งประเภทของการวิเคราะห์ความเสี่ยงตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงยังสามารถที่จะแบ่งเป็นประเภทได้อีกรูปแบบหนึ่งตามลักษณะของเขื่อนอันได้แก่

1. การวิเคราะห์เขื่อนใหม่ ได้แก่การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงที่สามารถกระทำไปได้พร้อมกับการประเมินความเป็นไปได้ของโครงการ การออกแบบขั้นรายละเอียด หรือแม้กระทั่งการปรับปรุงหรือปรับเปลี่ยนระหว่างก่อสร้าง การวิเคราะห์เขื่อนใหม่นี้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ต่างๆ ในโครงการมาปรับใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงจึงเป็นความพยายามที่เพิ่มขึ้นมาที่ไม่มากจนเกินไป ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงจะสามารถชี้ถึงองค์ประกอบของระบบเขื่อนที่เสี่ยงต่อการพิบัติและสูญเสียและจำเป็นต้องเสริมความมั่นคงเพื่อที่จะลดความเสี่ยง รวมทั้งยังสามารถชี้ถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อความสูญเสียและสามารถดำเนินการลดงบประมาณในส่วนนี้ได้ ด้วยเครื่องมือของการวิเคราะห์ความเสี่ยงนี้ทำให้ ผู้ตัดสินใจมีข้อมูลที่จะใช้ประกอบในการเพิ่มหรือลดองค์ประกอบหรืองบประมาณในส่วนต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีเหตุผล ส่งผลให้การออกแบบและก่อสร้างเป็นไปด้วยความประหยัดและปลอดภัย

2. การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงเขื่อนปัจจุบัน ได้แก่การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเขื่อนปัจจุบันที่ได้ก่อสร้างเสร็จสิ้นและอยู่ระหว่างการใช้งาน การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงเขื่อนปัจจุบันมีความจำเป็นอย่างยิ่งในด้านการปลอดภัยด้วยเหตุผลดังได้กล่าวมาข้างต้น

เพื่อให้เห็นภาพรวมของการวิเคราะห์ความเสี่ยง การวิเคราะห์ความเสี่ยงเบื้องต้นของเขื่อนตัวอย่างในประเทศไทยได้นำมาใช้เป็นกรณีตัวอย่าง เชื่อดังกล่าวตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและมีความต้องการจะเก็บกักน้ำเพิ่ม โดยยกระดับน้ำเก็บกักปกติขึ้น 2 เมตร การกระทำดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเพิ่มความสูงของสันเขื่อนเนื่องจาก ยังมี Freeboard ที่เพียงพออย่างไรก็ตาม การเพิ่มระดับกักเก็บน้ำจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของเขื่อนทั้งด้านความมั่นคงของลาดชัน และการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน นอกจากนั้นการยกระดับน้ำปกติขึ้น ย่อมเป็นการเพิ่มความสูญเสียท้ายน้ำ หากเขื่อนพิบัติ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความเสี่ยงทั้งความเสี่ยงต่อการพิบัติและความเสี่ยงต่อความสูญเสีย

การวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนตัวอย่างได้ดำเนินการควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อนตามปกติ เพียงแต่เพื่อการวิเคราะห์บางอย่างประกอบ ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสี่ยงได้แสดงดังแผนภูมิในรูปที่ 8 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการพิบัติและการประเมินโอกาสของความสูญเสีย



รูปที่ 8 แนวทางการวิเคราะห์ความเสี่ยงของเขื่อนตัวอย่าง

การวิเคราะห์สาเหตุของความเสถียรดำเนินการโดยการตรวจสอบเงื่อนไขโดยวิธีดัชนีสภาพ การเจาะทดสอบดินตัวเชื่อมและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการดำเนินการจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อน โดยดำเนินการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดชันและวิเคราะห์การไหลซึม การดำเนินการดังกล่าวสามารถนำมาสรุปถึงสาเหตุของความเสถียรที่จะทำให้เขื่อนพิบัติในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้เพื่อกำหนดรูปแบบของการปรับปรุงเขื่อนเพื่อลดความเสี่ยง ในกรณีของเขื่อนตัวอย่างรูปแบบของการปรับปรุงเขื่อนได้แก่ การเพิ่ม Internal Filter โดยการตัดท้ายเขื่อนเพื่อก่อสร้าง Internal Filter ก่อนทำการถมกลับ การปรับปรุงโดยการเพิ่ม Internal Filter ที่ลาดท้ายน้ำพร้อมทั้งขยายลาดน้ำให้ลาดชัน สุดท้ายคือปรับปรุงโดยใช้กำแพงน้ำ (Slurry Wall)

เมื่อวิเคราะห์สาเหตุและความเสี่ยงและกำหนดรูปแบบการปรับปรุงเพื่อลดความเสี่ยงแล้ว จึงได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาโอกาสของความสูญเสียจากการปรับปรุงเขื่อนในแต่ละรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบหารูปแบบการปรับปรุงเขื่อนที่เหมาะสมที่สุด การวิเคราะห์โอกาสของความเสถียรดำเนินการโดยการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นในการพิบัติ และการวิเคราะห์ปริมาณความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นต่อการพิบัติดำเนินการโดยใช้ค่าความแปรปรวน 2 ลักษณะอันได้แก่ ค่าความแปรปรวนมาตรฐานและค่าความแปรปรวนจริง (Bias) จากการทดสอบดิน โดยใช้วิธีวิเคราะห์ใน 2 รูปแบบอันได้แก่ วิธี First Order Second Moment (FOSM) และวิธี Monte Carlo ทำให้ได้ผลสรุปดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นในการพิบัติ (สุทธิศักดิ์, 2548)

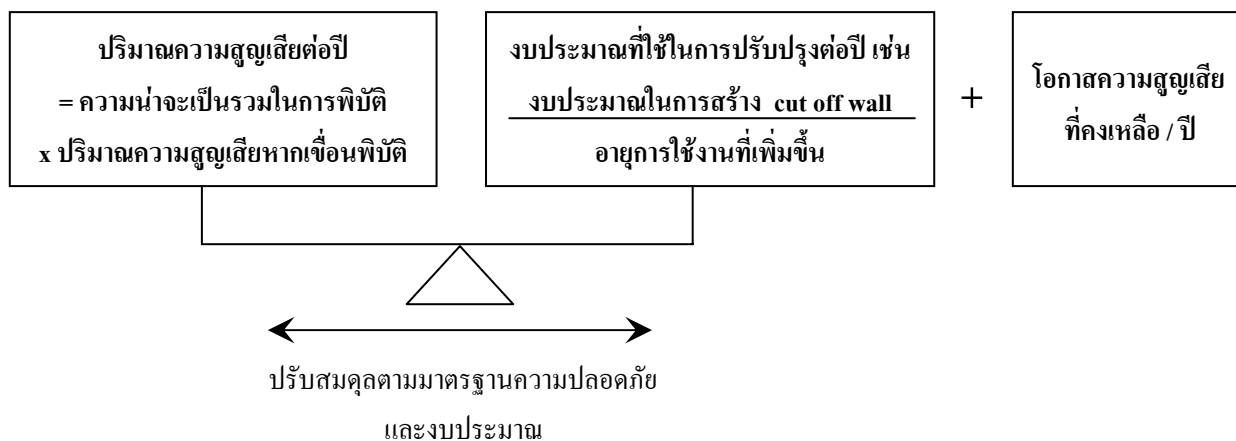
ทางเลือก	สภาพเขื่อนและการแก้ไข	ความมั่นคงของลาดเขื่อนด้าน	Suggested Allowable F.S.	Calculated F.S.	ความน่าจะเป็นในการพิบัติ		
					มาตรฐาน	จริง	เฉลี่ย
1	สภาพเขื่อนในปัจจุบัน (+164.00)	D/S Slope	1.5	1.196	2.54×10^{-2}	1.74×10^{-1}	9.97×10^{-2}
2	ปรับปรุงโดยใช้ Internet Drain (D/S Chimney Filter)	D/S Slope	1.5	1.332	5.84×10^{-4}	6.35×10^{-2}	3.20×10^{-2}
3	ปรับปรุงโดยใช้ การขยายลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	D/S Slope	1.5	1.399	3.6×10^{-4}	1.75×10^{-2}	8.93×10^{-2}
4	ปรับปรุงโดยใช้ Concrete Cut-Off Wall	D/S Slope	1.5	1.566	$<1 \times 10^{-6}$	7.8×10^{-3}	$<3.90 \times 10^{-3}$

ความน่าจะเป็นในการพิบัติ (Pf) ในตารางดังกล่าว เป็นความน่าจะเป็นที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเขื่อน จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 ความน่าจะเป็นในการพิบัติหรือ Probability of Failure (Pf) นี้ได้ถูกคำนวณจากความแปรปรวนของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ 2 รูปแบบอันได้แก่ ความแปรปรวนมาตรฐาน และความแปรปรวนจริง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจโดยง่ายถึงค่าความน่าจะเป็นที่โยงถึงความปลอดภัยเราสามารถเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในลักษณะสัดส่วนของตัวเลข ยกตัวอย่างเช่น ความน่าจะเป็นในการพิบัติเท่ากับ 0.01 หากเทียบเป็นสัดส่วนจะเท่ากับ 1/100 หรือแปลได้ความว่ามีโอกาสในการพิบัติ 1 ใน 100 หรือ 100 เขื่อนจะมีโอกาสพิบัติ 1 เขื่อน (เขื่อนที่มีลักษณะเดียวกัน ตัวเลขที่ยอมรับได้โดยทั่วไปสำหรับงานเขื่อน คือประมาณ 1×10^{-4} หรือ 1 ใน 10,000)

จากผลการวิเคราะห์พบว่าความน่าจะเป็นต่อการพิบัติมีค่าลดลงตามทางเลือกที่ 1 ถึง ที่ 4 โดยความน่าจะเป็นของการพิบัติในสภาพปัจจุบันมีค่าที่ค่อนข้างสูง และต่ำกว่ามาตรฐานมาก ในขณะที่ทางเลือกของการใช้ Cut off Wall ทำให้ความน่าจะเป็นต่อการพิบัติมีค่าลดลงและต่ำที่สุดเทียบกับทุกทางเลือก จะเห็นได้ว่าความน่าจะเป็นต่อการพิบัติในกรณีที่ใช้ Cut off Wall นี้หากเฉลี่ยระหว่างผลจากการใช้ความแปรปรวนมาตรฐานและความแปรปรวนจริง จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลประโยชน์สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์ความเสี่ยงไม่ได้อยู่ที่การวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นในการพิบัติแต่เพียงอย่างเดียว แต่เป็นการได้มาซึ่งตัวเลขของปริมาณความสูญเสียที่มีโอกาสเกิดขึ้นในหนึ่งปี โดยคิดตามโอกาสและความน่าจะเป็นต่าง ๆ ที่เขื่อนจะพิบัติ วิเคราะห์รวมเข้ากับมูลค่าความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ ปริมาณความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นในหนึ่งปีนี้ จะนำไปเปรียบเทียบกับงบประมาณที่จะต้องใช้จ่ายซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงให้อยู่ในความปลอดภัยตามระดับที่ต้องการ หลักการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 หลักการในการเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลดความเสี่ยง (สุทธิศักดิ์, 2548)

ปริมาณความสูญเสียนี้ ประกอบด้วยความสูญเสียในหลายรูปแบบ อันได้แก่ ความสูญเสียทางเศรษฐกิจทางตรง ความสูญเสียทางเศรษฐกิจทางอ้อม ความสูญเสียด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และรวมถึงความสูญเสียชีวิตของประชาชน เนื่องจากการวิเคราะห์ความสูญเสียจากการพิบัติของเขื่อนตัวอย่างนี้ ต้องอาศัยเวลาและข้อมูลจำนวนมาก รวมทั้งยังต้องการการวิเคราะห์พิเศษ เช่น การวิเคราะห์ Dam Break Model ซึ่งอาจไม่จำเป็นในกรณีนี้ เนื่องจากการเปรียบเทียบหารูปแบบของการปรับปรุง ดังนั้นความสูญเสียเนื่องจากการพิบัติจึงใช้ค่าประมาณโดยให้ครอบคลุมทุกช่วงของปริมาณความสูญเสีย โดยพิจารณาแต่ความสูญเสียด้านเศรษฐกิจโดยตรงเท่านั้น

การประมาณความสูญเสีย (ต่อปี) เนื่องจากการพิบัติของเขื่อนในกรณีของการปรับปรุงในรูปแบบต่าง ๆ อาศัยข้อมูลด้านความน่าจะเป็นที่วิเคราะห์มาแล้ว ประกอบกับข้อมูลความน่าจะเป็นอื่น ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการประมาณการของปริมาณความสูญเสียโดยอาศัยหลักการดังแสดงในความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\boxed{\text{ปริมาณความสูญเสียที่เป็นไปได้จากการพิบัติ (บาท / ปี)}} = \boxed{\text{ความน่าจะเป็นของระดับน้ำใด ๆ (ต่อปี)}} \times \boxed{\text{ความน่าจะเป็นในการพิบัติที่ระดับน้ำนั้น ๆ}} \times \boxed{\text{ความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ}}$$

ปริมาณความสูญเสียที่เป็นไปได้จากการพิบัติ (บาท/ปี) = ความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นได้หากเขื่อนพิบัติ วิเคราะห์เป็นปริมาณความสูญเสียต่อปี

ความน่าจะเป็นของระดับน้ำใด ๆ (ต่อปี) = ความน่าจะเป็นที่ระดับน้ำจะคงอยู่ในระดับที่ใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคงในรอบ 1 ปี (+ 164.00)

ความน่าจะเป็นในการพิบัติ = ความน่าจะเป็นที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดเขื่อนจะน้อยกว่า 1.0 โดยวิเคราะห์ที่ระดับน้ำใด ๆ (+164.00)

ความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ = ความสูญเสียโดยรวมหากเขื่อนพิบัติ (ไม่รวมความสูญเสียชีวิต) ที่ระดับน้ำที่วิเคราะห์ (+ 164.00)

ตารางที่ 4 สามารถยกตัวอย่างอธิบายได้ดังนี้ เช่น ในกรณีที่มีความสูญเสียโดยรวมหากเขื่อนพิบัติมีค่าเท่ากับ 1,000 ล้านบาท หากเราได้ปรับปรุงเขื่อน โดยปล่อยให้เขื่อนอยู่ในสภาพปัจจุบัน ความน่าจะเป็นในการพิบัติจะมีค่าสูง ทำให้ส่งผลให้ปริมาณความสูญเสียที่มีโอกาสเกิดขึ้นต่อปี มีค่าสูงถึง 32.90 ล้านบาท/ปี ตัวเลขนี้คือความเสี่ยงที่จะต้องยอมรับในแต่ละปี หากไม่มีการปรับปรุงใด ๆ กับตัวเขื่อน ในขณะที่ถ้าเราดำเนินการปรับปรุงตัวเขื่อนเพื่อเสริมความมั่นคง ความน่าจะเป็นการพิบัติจะลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ความเสี่ยงต่อความสูญเสียคิดเป็นมูลค่าเงินมีค่าลดลงเช่นกัน ในกรณีของการปรับปรุง โดย Cut off Wall ความเสี่ยงต่อความสูญเสียจะลดลงเหลือแค่ 1.29 ล้านบาท / ปี โดยหากเปรียบเทียบความคุ้มค่าในเบื้องต้นจะสามารถเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

ปริมาณความสูญเสีย หากไม่ปรับปรุง	Vs	งบประมาณการ ปรับปรุงคิดเป็นต่อปี	+	ปริมาณความเสี่ยงที่ เหลืออยู่หลังปรับปรุง
32.90 ล้านบาท / ปี	Vs	$\frac{600}{50}$ (ราคาค่าปรับปรุงโดยประมาณ) (อายุการใช้งานหลังปรับปรุง)	+	1.29 ล้านบาท / ปี
32.9 ล้านบาท / ปี		>>		13.29 ล้านบาท / ปี

หรือ

ความเสี่ยงที่เหลือหลังจากปรับปรุง + ราคการปรับปรุง (13.29 ล้านบาท / ปี)	<<	ความเสี่ยงต่อความสูญเสียในปัจจุบัน (32.90 ล้านบาท / ปี)
--	----	--

ตารางที่ 4 ประมาณการความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ (สุทธิศักดิ์, 2548)

* ความสูญเสียโดยรวม (ล้านบาท / เหตุการณ์)	ความสูญเสียที่เป็นไปได้ (ล้านบาท / ปี)			
	สภาพปัจจุบัน 1	Internal Drain 2	Enlarge Slope 3	Cut off Wall 4
** 1,000	32.90	10.56	2.95	1.29
2,000	65.80	21.12	5.89	2.57
3,000	98.70	31.68	8.84	3.86
4,000	131.60	42.24	11.79	5.15
5,000	164.51	52.80	14.73	6.44
6,000	197.41	63.36	17.68	7.72
7,000	230.31	73.92	20.63	9.01
8,000	263.21	84.48	23.58	10.30
9,000	296.11	95.04	26.52	11.58
10,000	329.01	105.60	29.47	12.87
15,000	493.52	158.40	44.20	19.31
20,000	658.02	211.20	58.94	25.74
25,000	822.53	264.00	73.67	32.18
30,000	987.03	316.80	88.41	38.61

* ความสูญเสียหากเขื่อนพิบัติ (มิได้รวมความเสียหายของประชากร)

** มูลค่าความสูญเสียน้อยที่สุด ประเมินจากมูลค่าของตัวเขื่อน

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าหากเราดำเนินการปรับปรุงเขื่อนโดยใช้ Cut off Wall จะช่วยลดความเสี่ยงได้อย่างมากถึง 31.61 ล้านบาท / ปี (32.90-1.29) อีกทั้งเมื่อคิดงบประมาณการปรับปรุงประกอบด้วยยังพบว่ามีค่าคุ้มค่าในแง่ของการลงทุนอย่างยิ่ง กรณีที่ยกมามากกว่าเป็นกรณีที่ประมาณการความสูญเสียมีค่าเท่ากับมูลค่าของตัวเขื่อนเท่านั้น (1,000 ล้านบาท) หากรวมความสูญเสียอื่น ๆ อีกจะยิ่งทำให้เห็นถึงความเสี่ยงที่สามารถลดลงและค่าคุ้มค่าในการลงทุน มากขึ้นอย่างมาก

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ทำให้สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าการปรับปรุงเขื่อนโดยวิธีใช้ Cut off Wall จะสามารถลดความเสี่ยงในการพิบัติและความเสี่ยงของการสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุ้มทุนในระยะยาวได้ดีที่สุด กรณีของการเสริมลาดเขื่อนเป็นอีกกรณีหนึ่งที่เข้าข่ายที่ดีเช่นกัน อย่างไรก็ตามในกรณีดังกล่าว เราไม่สามารถลดความเสี่ยงหรือปิดกั้นความเสี่ยงของการพิบัติเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ฐานเขื่อนซึ่งอาจนำไปสู่การพิบัติแบบ piping ได้ ดังนั้นวิธีการปรับปรุงโดยใช้ Cut off Wall จึงน่าจะเป็นวิธีที่ปลอดภัยและคุ้มค่าในการลงทุนที่สุด

9. บทสรุปของประโยชน์จากการวิเคราะห์ความเสี่ยง

การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงสามารถดำเนินการได้โดยใช้ความพยายามในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นจากปกติในระดับที่ยอมรับได้ แต่ผลประโยชน์ที่ได้คุ้มค่ากว่าทั้งในด้านการลดความเสี่ยงและการใช้งบประมาณได้เต็มประสิทธิภาพ ประโยชน์เบื้องต้นของการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถทราบปริมาณความเสี่ยงหรือความสูญเสียจากเขื่อนปัจจุบัน โดยใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจดำเนินการได้อย่างชาญฉลาด
2. ทำให้เข้าใจและยอมรับในสถานการณ์ของความเสี่ยงของเขื่อน หากไม่ได้ดำเนินการซ่อมบำรุงเพื่อลดความเสี่ยง
3. เป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคู่ไปกับการออกแบบหรือประเมินความเป็นไปได้ของโครงการ ซึ่งทำให้ได้องค์ประกอบเขื่อนที่เหมาะสมและมีความเสี่ยงต่อความสูญเสียในระดับที่ยอมรับได้
4. เป็นเครื่องมือในการกำหนดมาตรการเพื่อการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมได้อย่างประหยัดและตรงจุดทำให้อัตราการลดลงของความเสี่ยงเร็วกว่าการดำเนินการปกติ และยังเป็นการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. สามารถดำเนินการซ้ำได้เมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากแบบจำลองของการวิเคราะห์สามารถดำเนินการได้โดยการใส่ตัวแปรที่มีผลเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเวลาได้ ทำให้สามารถสังเกตการปริมาณความเสี่ยงต่อการสูญเสียได้ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง
6. เป็นการวิเคราะห์ที่มีแนวคิดฐานศูนย์ (Zero-Based) ทำให้มองผลประโยชน์ที่ได้รับอย่างชัดเจน
7. เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และกำหนดมูลค่าการประกันและเบี้ยประกันเขื่อนที่เหมาะสม เพราะอาศัยหลักการทางวิศวกรรมเข้ามาวิเคราะห์โดยตรง