วิชา 203553 การออกแบบเขื่อนดินและหิน
คาบที่ 2

รศ. ดร. วรากร ไม้เรียง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระดับการพิบัติและความเสียหายในงานเขื่อน

1. การพิบัติที่รุนแรง (Catastrophic Failure)

เป็นการพิบัติที่เกิดขึ้นฉับพลัน มีความรุนแรงมาก มักทำความเสียหายอย่างกว้างขวาง มักเกิดจากน้ำล้นสันเขื่อน การกัดเซาะภายในและฐานรากเขื่อน การเคลื่อนพังของลาดดิน

2. การพิบัติเพียงเล็กน้อย (Minor Damage)

ความเสียหายมีปรากฏการณ์ให้เห็นล่วงหน้าสามารถซ่อมแซมได้ แต่หากปล่อยปละละเลยก็อาจขยายตัวเป็นการพิบัติที่รุนแรงได้

การรวบรวมสถิติการพิบัติของเขื่อน

การพิบัติของเขื่อนมิได้มีการรวบรวมสถิติเอาไว้อย่างครบถ้วน เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการเมือง กฎหมาย และการเก็บรวบรวมข้อมูล แต่มีผู้ประเมินว่า การพิบัติอาจมีถึง **2,000** กรณี และมีผู้คนเสียชีวิตมากกว่า **8,000** คน (Dam Safety Project, 1996) จากการประชุม World Power Conference ที่กรุงเบอร์ลิน คศ. 1924 ก็ได้มีการจัดตั้งหน่วยงาน "คณะกรรมการเขื่อนใหญ่ระหว่างประเทศ" (ICOLD) ขึ้นเป็นหน่วยงานกลาง และทำหน้าที่เก็บรวบรวมสถิติการพิบัติของเขื่อนนำมาเผยแพร่ให้เป็นความรู้ต่อวิศวกรเขื่อนต่อไป

สาเหตุแห่งการพิบัติของเขื่อนใหญ่ โดย ICOLD

ขั้นตอนที่เป็นสาเหตุ	จำนวนที่เกิดขึ้น						รวม
	A	B	G	E	R	M	
การสำรวจ	9	5	6	49	2	1	72
วัสดุก่อสร้าง	1	-	2	8	-	-	11
การวางตำแหน่ง	-	1	4	17	3	-	25
การออกแบบ	4	6	13	48	3	2	76
การก่อสร้าง	1	1	2	32	5	-	41
การใช้งาน	-	-	-	5	1	-	6
การควบคุม	1	1	-	3	-	-	5
รวม	16	14	27	162	14	3	236

หมายเหตุ A = Arch, B = Buttress, G = Gravity, E = Earthfill, R = Rockfill, M = Miscellaneous

สาเหตุการพิบัติของเขื่อน

ประเทศสเปน

รายงานใน ค.ศ. 1961 จากเขื่อนจำนวน 1,620 เขื่อน 19% อยู่ในสภาพวิกฤติจากสาเหตุ

- เกี่ยวกับฐานราก **40%**
- ทางระบายน้ำล้นไม่พียงพอ **23%**
- การก่อสร้างไม่เหมาะสม **12%**

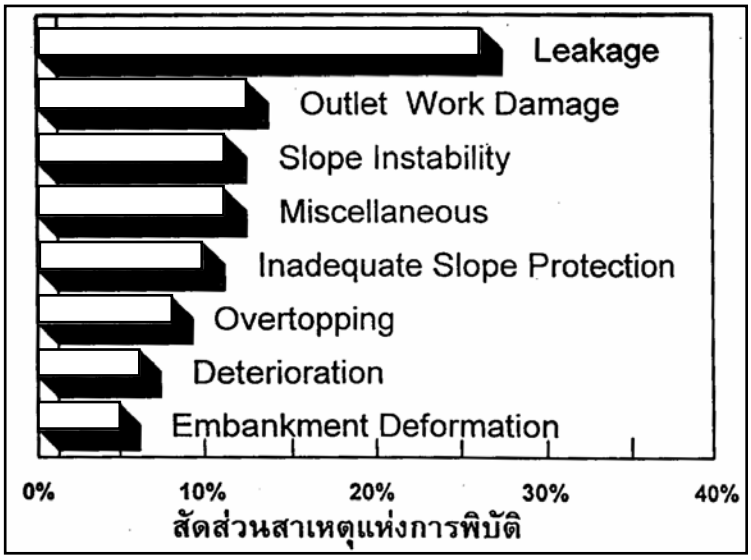
สาเหตุการพิบัติของเขื่อน

ประเทศอัฟฟริกาใต้

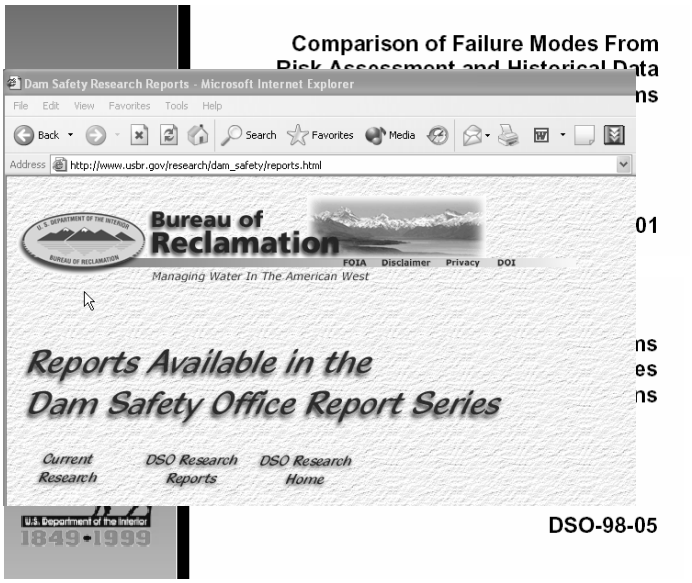
Olwage และ Oosthuizen ได้รายงานความเสียหาย จากเขื่อนจำนวน 50 เขื่อน ดังนี้

- น้ำล้นสันเขื่อน **32%**
- การกัดเซาะภายในตัวเขื่อนและฐานราก **28%**
- การสลายตัวของวัสดุก่อสร้าง **24%**
- การเคลื่อนพังของลาดดิน **8%**
- การกัดเซาะที่ผิวเขื่อน **4%**
- การเคลื่อนตัวมากเกินไป **4%**

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนในสหรัฐ



ตัวอย่าง Web Page ที่มีข้อที่มีข้อมูลด้านการพิบัติของเขื่อน



ลำดับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเขื่อนในประเทศไทย

- **พ.ศ.** 2501 – 2515
  - มีการก่อสร้างเขื่อนดินขนาดใหญ่หลายแห่ง ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instruments)
- **พ.ศ.** 2513 – 2515
  - มีรายงานความเสียหายของเขื่อนขนาดกลางของกรมชลประทาน 4 แห่ง คือ
    - ลำสำราย
    - ลำเชียงไกร
    - ห้วยสวาย
    - อำปึล

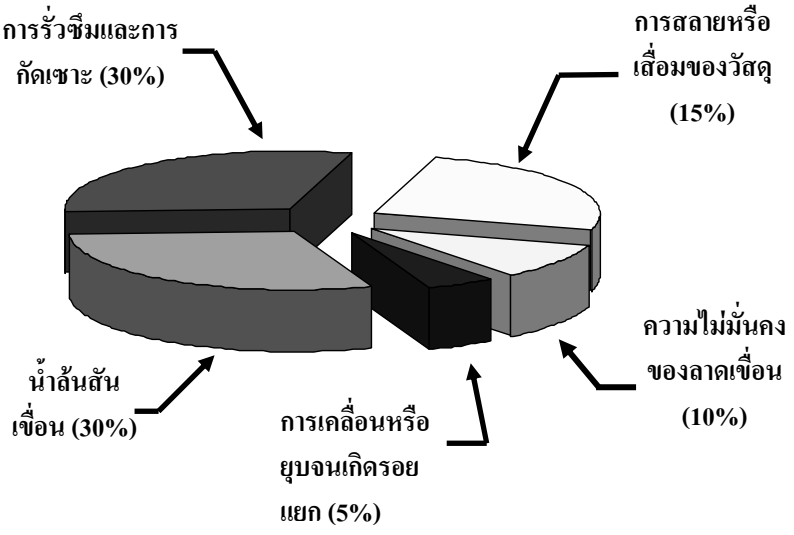
  สรุป สาเหตุเนื่องมาจากการใช้ Dispersive Clay มาก่อสร้างตัวเขื่อน

ลำดับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเขื่อนในประเทศไทย (ต่อ)

- **พ.ศ.** 2521
  - มีน้ำหลากจากพายุ KIT ระดับน้ำเกือบล้นข้ามสันเขื่อนอุบลรัตน์ จนภายหลังได้มีการเสริมสันเขื่อนและ Spillway ขึ้นอีก
- **พ.ศ.** 2525
  - การไฟฟ้าฝ่ายผลิต จัดตั้งฝ่ายบำรุงรักษาโยธาขึ้น เพื่อเป็นหน่วยงานทาง Dam Safety ขึ้นครั้งแรก
- **พ.ศ.** 2533
  - กรมชลประทาน จัดตั้งศูนย์ตรวจสอบและประเมินความปลอดภัยของเขื่อน
  - เกิดการรั่วซึมของฐานรากเขื่อนลำมูลบน จ.นครราชสีมา
  - กระทรวงเกษตรฯ แต่งตั้งกรรมการวิชาการ เพื่อพิจารณาสาเหตุการชำรุด
  - สำนักนายกรัฐมนตรี แต่ตั้งคณะอนุกรรมการตรวจสภาพเขื่อนดินทั่วประเทศ 225 เขื่อน

ลำดับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเขื่อนในประเทศไทย (ต่อ)

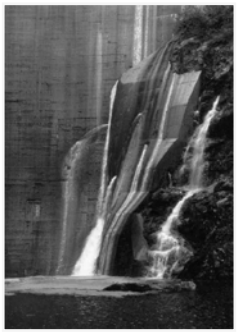
- **ตุลาคม** 2534
  - กระทรวงเกษตรฯพิจารณาดำเนินการหามาตรการระยะยาวในการ "ตรวจสอบบำรุงรักษาเขื่อนดินและอาคารประกอบ"
- **ตุลาคม** 2537
  - เกิดการพิบัติของเขื่อนขนาดกลาง และขนาดเล็ก 5 เขื่อน เนื่องจากฝนตกหนักต่อเนื่อง มีคนเสียชีวิต 1 คน และบ้านเรือนราษฎรเสียหาย 50 หลังคาเรือน
- **มกราคม** 2538
  - การซ่อมแซมเขื่อนมูลบน โดยใช้กำแพงทึบน้ำใต้ดินกันการไหลซึมแล้วเสร็จ และมีการกักเก็บน้ำได้ตามปกติ
- **สิงหาคม** 2539
  - สำนักงานชลประทานที่ 9 ได้ดำเนินการจ้างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จัดทำฐานข้อมูลเขื่อนเพื่อประเมินความปลอดภัยและบำรุงรักษาในระยะยาวของเขื่อนทางภาคตะวันออก จำนวน 31 เขื่อน



SEEPAGE THROUGH FOUNDATION

TETON DAM, IDAHO, USA.

เขื่อนมูลบน, นครราชสีมา



การรั่วซึมและกัดเซาะ

กรณีเขื่อน Teton

Dam Gates Under Attack

เขื่อนมูลบน อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา เป็นเขื่อนดินแบบ Homogeneous สูง 32 เมตร ในช่วงปีแรกของการใช้งานนั้นมีน้ำไหลเข้าอ่างน้อยมาก จนปีถัดมาในเดือนตุลาคม 2533 มีพายุฝนจากไต้ฝุ่นทำให้มีน้ำไหลเข้าอ่างในช่วง 18 วัน มากกว่า 100 ล้าน ลบ.ม. ทำให้เกิดรูรั่วผ่านใต้ฐานเขื่อนมาไหลออกที่ตีนเขื่อน 2 แห่ง โดยมีการพัดพาเอาดินตะกอนออกมาพร้อมน้ำถึง 2-6 ลบ.ม. ต่อวินาที ได้มีความพยายามที่จะอุดรูรั่วด้วยวิธีต่าง ๆ และลดระดับน้ำในอ่างโดยวิธีกาลักน้ำ โดยใช้เวลาประมาณ 10 วัน จึงสามารถควบคุมปริมาณน้ำที่รั่วให้อยู่ในระดับปลอดภัย

สิ้นค่าก่อสร้างซ่อมแซม 314 ล้านบาท เทียบกับราคาก่อสร้างในครั้งแรก 150 ล้านบาท

กรณีเขื่อนมูลบน (พ.ศ. 2533)

น้ำรั่วซึมผ่านฐานรากชั้นทราย หนา 15-20 เมตร

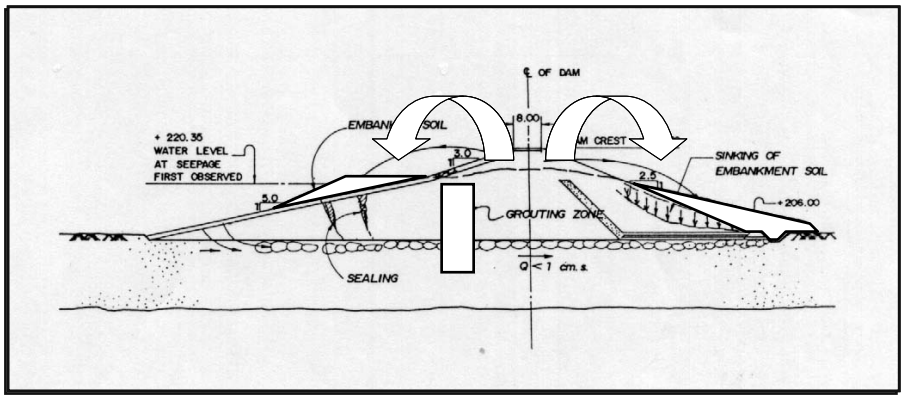
สาเหตุการเกิดการชำรุดเสียหาย

1. การรั่วของเขื่อนเกิดจากการกัดเซาะใต้ฐานรากเขื่อน เนื่องจากเขื่อนไม่มีร่องแกนแต่ใช้ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ ทำหน้าที่ยืดทางเดินของน้ำออกไป

2. ชั้นกรองด้านท้ายน้ำไม่สามารถรับน้ำและระบายน้ำที่ไหลผ่านดินฐานรากได้เพียงพอ

3. จุดรั่วซึมเป็นบริเวณลำน้ำเดิมและลำน้ำที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวลำน้ำทำให้มีแถบดินทราบตกตะกอนอยู่เป็นแนวการไหลของน้ำได้ดี

ลำดับการเกิดการรั่วซึมและการแก้ไขสถานการณ์เฉพาะหน้า



การออกแบบแก้ไขซ่อมแซมเขื่อนมูลบน

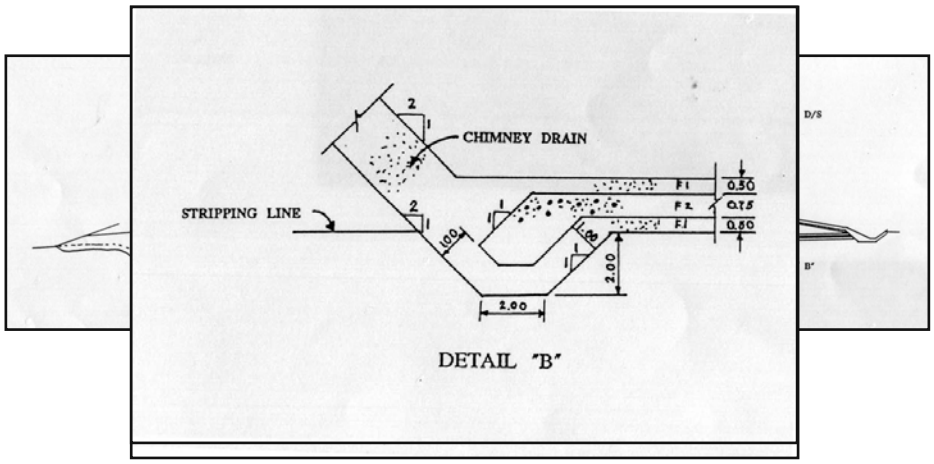
กรมชลประทานและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกันออกแบบแก้ไขซ่อมแซมเขื่อนมูลบน โดยได้วางหลักการออกแบบแกไขสรุปดังนี้

1. การออกแบบแก้ไขจุดบกพร่องที่พบ
2. การออกแบบเผื่อในส่วนที่อาจมีความบกพร่อง แต่อาจไม่ได้ตรวจพบ
3. การก่อสร้างซ่อมแซมแก้ไข
4. การตรวจสอบพฤติกรรมเขื่อน

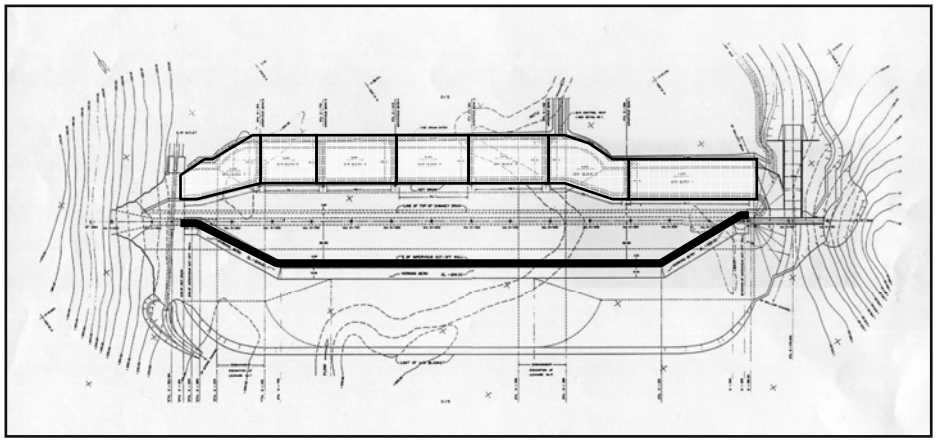
แนวทางเลือกในการแก้ไข

1. เพิ่มความยาวของการซึมผ่านด้วยด้วยการก่อสร้างชั้นทึบน้ำหน้าเขื่อน และขยายฐานเขื่อนบางส่วนออกไป
2. ออกแบบระบบระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพ โดยขยายความหนาของชั้นระบายแนวราบ เพิ่มร่องระบายฝังลึกลงไปในดินฐานราก และเพิ่มประสิทธิภาพการระบายด้วยท่อระบาย
3. ก่อสร้างกำแพงทึบน้ำใต้ดิน ลึกถึงหน้าหินตลอดความยาวเขื่อน
4. การแก้ไขปัญหาดินกระจายตัวในบริเวณลาดเขื่อน ด้วยการผสมปูนขาวและเพิ่มชั้นกรวดทรายรองพื้นและหินทิ้งน้ำ
5. การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทั้งในช่วงระหว่างการก่อสร้างเพื่อปรับปรุงเขื่อน และภายหลังการใช้งานเขื่อนในระยะยาว

หน้าตัดเขื่อนที่ออกแบบแก้ไข



แนวกำแพงทึบน้ำและชั้นกรองที่มีการออกแบบแก้ไข



การวิเคราะห์เพื่อการออกแบบ

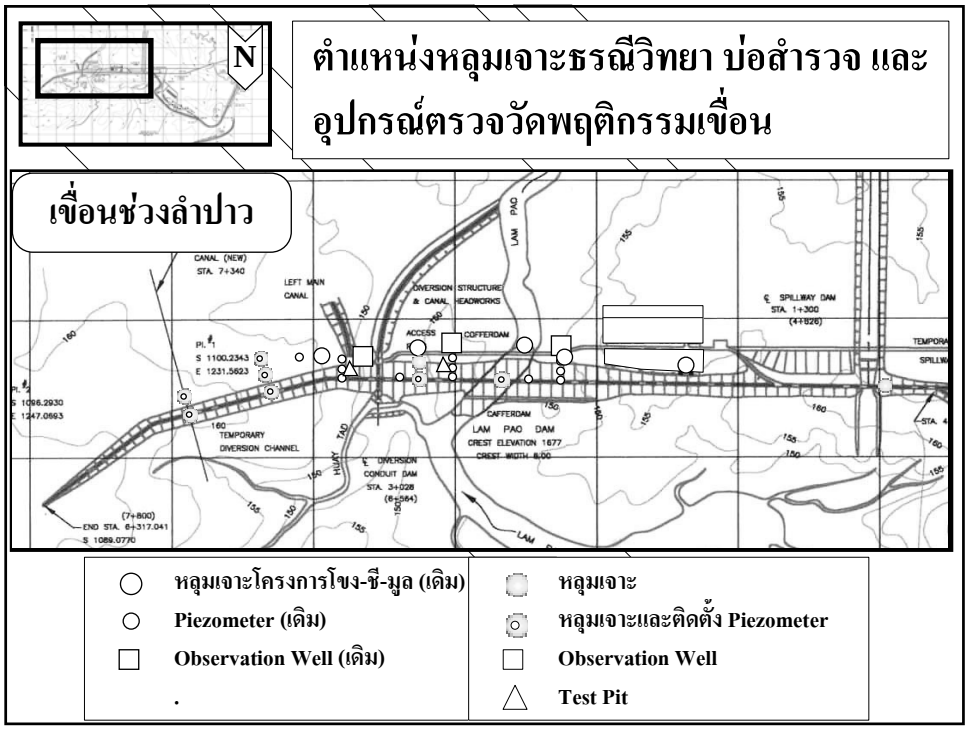
1. วิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากโดยวิธี FEM 50 กรณี

2. วิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเขื่อนของ 2 หน้าตัดเขื่อน จำนวน 19 กรณี

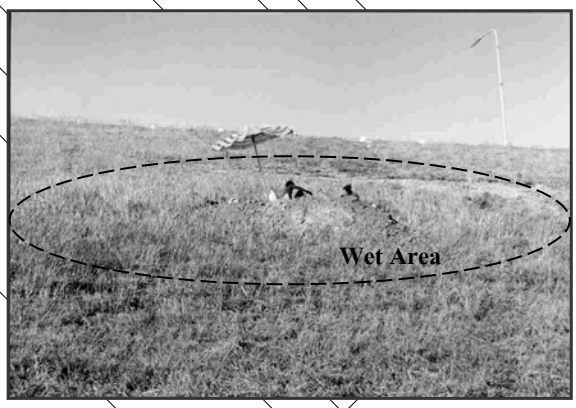
3. วิเคราะห์หน่วยแรงและการเคลื่อนตัว จำนวน 3 กรณี

นอกจากนั้นก็มีการออกแบบเพื่อติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนในระหว่างการก่อสร้างและใช้งาน 6 ชนิด คือ

Piezometers, Observation, Wells, Seepage flowmeters, Reference

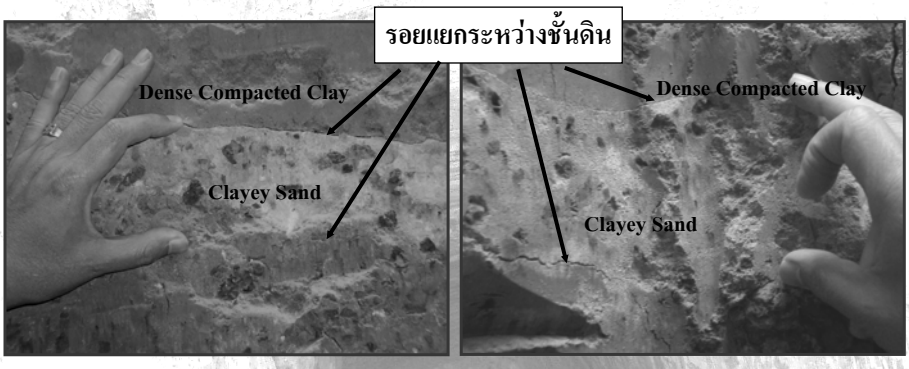


ภาพหน้าตัดทางธรณีของหลุม Test Pit; TP-3



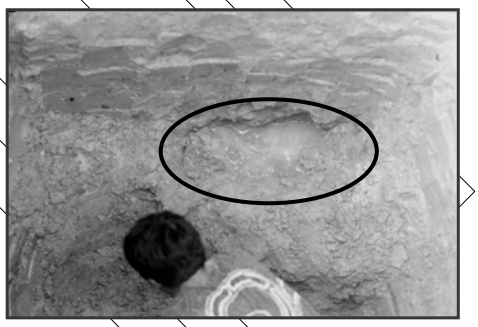
TP-3 เป็นหลุมเจาะบริเวณที่เป็น Wet Area

ภาพหน้าตัดทางธรณีของหลุม Test Pit; TP-1



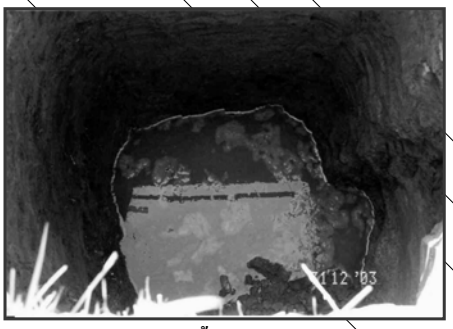
มีการแบ่งชั้นระหว่างดินต่างชนิดที่บดอัดชัดเจน โดยมีรอยแยกจากการหดตัวของดินจากการสูญเสียความชื้นร่วมด้วยโดยรอบหลุม

ภาพหน้าตัดทางธรณีของหลุม Test Pit; TP-3

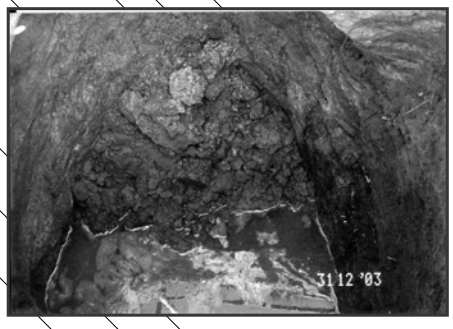


เมื่อขุดลึกผ่านชั้นดินเหนียวบดอัด แล้วพบ Wet Layer ซึ่งมีน้ำไหลซึมตลอดเวลา ต้องมีการตักน้ำออกขณะขุด

ภาพหน้าตัดทางธรณีของหลุม Test Pit; TP-3

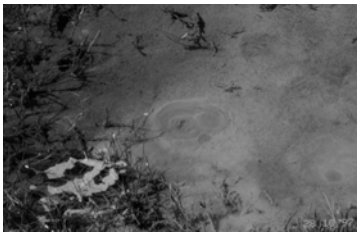


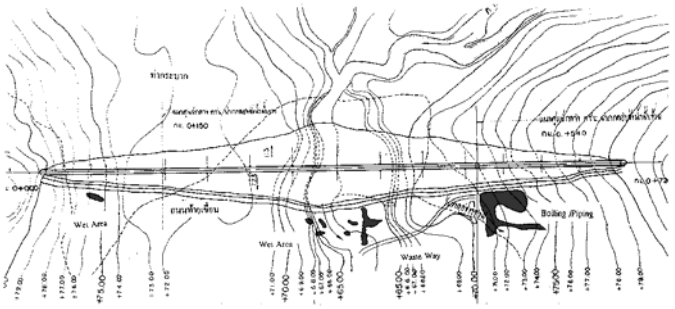
ระดับน้ำภายหลังขุด 1 วัน



หลุมพัง

พบน้ำไหลผ่านตัวเขื่อนพอสมควร ซึ่งสังเกตจากระดับน้ำภายหลังขุด 1 วัน ซึ่งเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานหลุม ก็เกิดการพังหลายลง





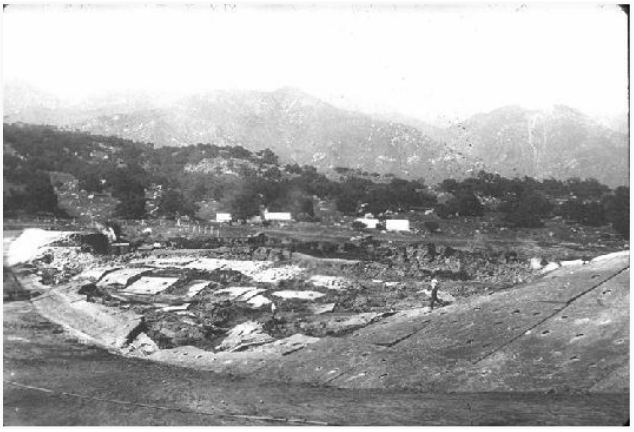
ลักษณะน้ำซึมลอดใต้ฐานเขื่อน ระดับที่ยังไม่รุนแรง

SLOPE INSTABILITY

SHAFFIELD DAM, UK.

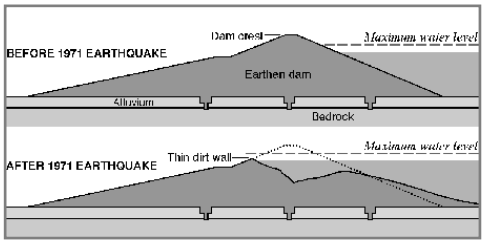
SAN FERNANDO DAM, USA.

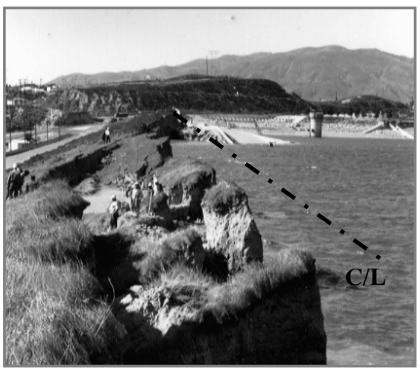
กรณีเขื่อน Shaffield



การพิบัติของตัวเขื่อนจากแผ่นดินไหว

San Fernando Dam, California, U.S.A.





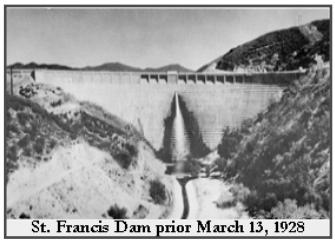
Slope Failure during Construction of Calaveras Dam, California, 1918.

FOUNDATION INSTABILITY

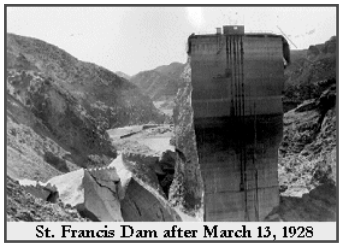
SAINT FRANCIS DAM, USA.

MALPASSET DAM, FRANCE

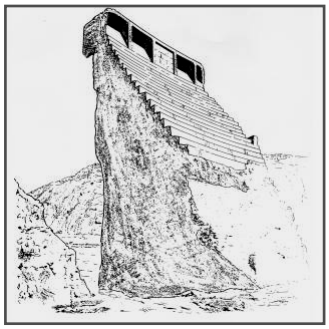
กรณีเขื่อน Saint Francis



St. Francis Dam prior March 13, 1928



St. Francis Dam after March 13, 1928



Malpasset Dam, France

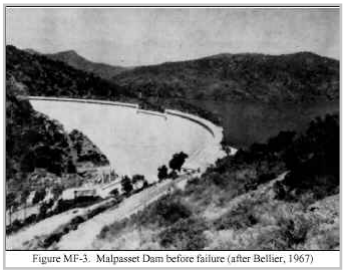


Figure MF-3. Malpasset Dam before failure (after Bellier, 1967)

Figure MP-6. Looking from downstream after failure (after Bellier, 1967)

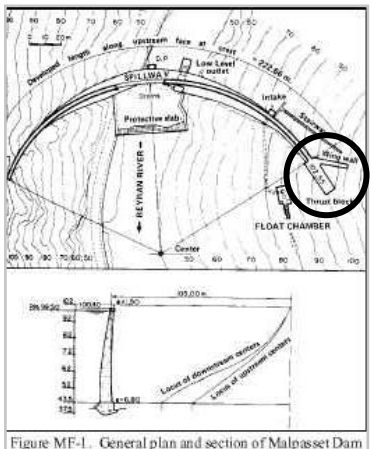


Figure MF-1. General plan and section of Malpasset Dam (after Londe, 1987)

SPILLWAY BLOCKAGE

PORT WING DAM, USA.

กรณีเขื่อน Port Wing Dam

ทางระบายน้ำถูกกีดขวางและน้ำล้นสันเขื่อน

The powerhouse, breached embankment, and debris behind the dam.

RESERVIOR RIM INSTABILTY

VAIONT DAM, ITALY

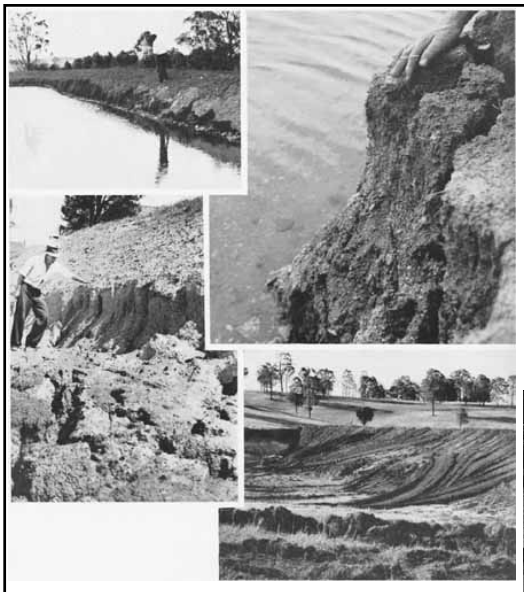
กรณีเขื่อน VAIONT, ITALY

Figure VI-2. View of left reservoir bank following failure

Figure VI-5. Village of Longarone before failure

Figure VI-6. Village of Longarone after the failure

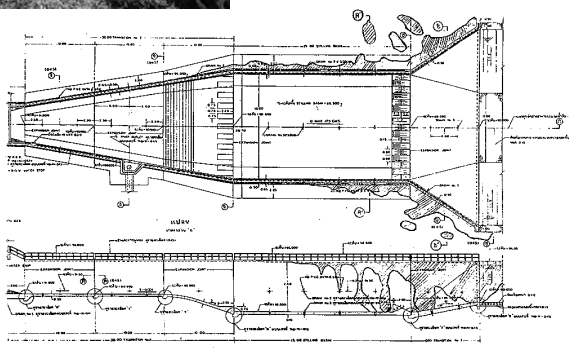
ลักษณะของลาดเขื่อนและสันเขื่อน



WAVE

EROSION

การกัดเซาะของ
น้ำฝนในดิน
กระจายตัว



น้ำขังในValve

Camber

แรงยกตัวของ
น้ำซึมใต้พื้น

Spillway

การรั่วของ Sluice

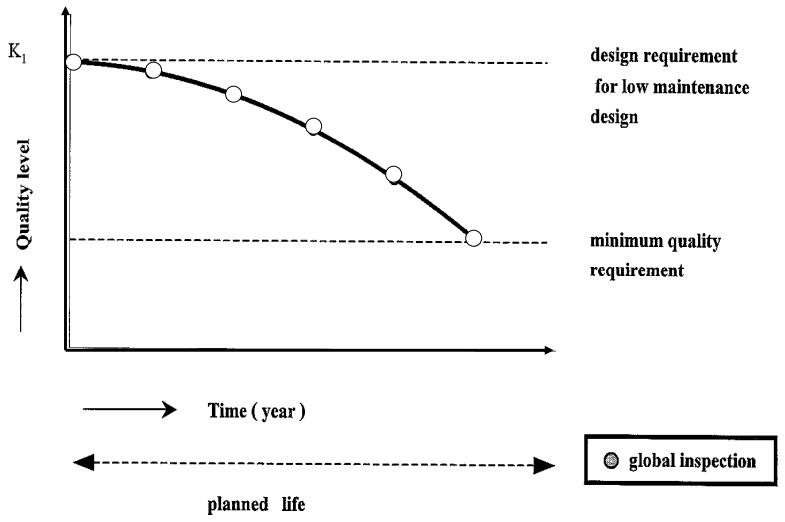
Valve

การกัดกร่อนของคอนกรีต
และการกัดเซาะขอบอ่าง

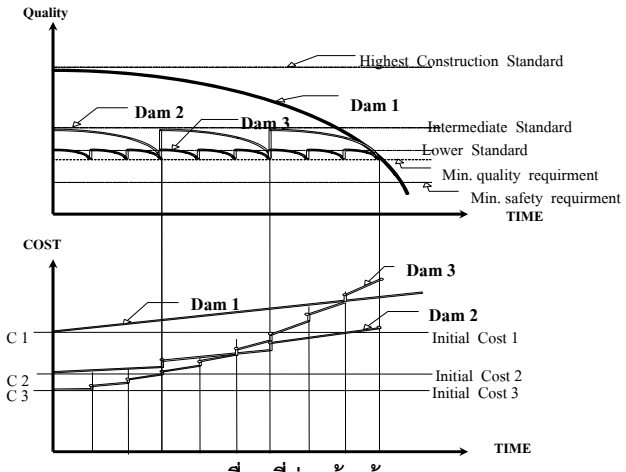
แนวคิดในการลงทุนก่อสร้างเขื่อน

ก. **เขื่อนที่มีการก่อสร้างสูงกว่ามาตรฐานมาก** โดยคาดหวังว่าจะมีการบำรุงรักษาน้อยที่สุดหรือเกือบไม่มีการบำรุงรักษาเลยในช่วงอายุการใช้งาน แต่ก็จะมีค่าก่อสร้างที่สูงตามไปด้วย ระหว่างการใช้งานถึงแม้จะมีความเสียหายหรือชำรุดเกิดขึ้นก็ตามแต่ก็ยังมีคุณภาพสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานต่ำสุด จนกระทั่งถึงอายุการใช้งานของเขื่อน

ข. **เขื่อนที่มีการก่อสร้างไม่สูงกว่ามาตรฐานมากนัก** โดยจะต้องมีการบำรุงรักษาเป็นช่วง จึงจะทำให้คุณภาพของเขื่อนอยู่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งค่าลงทุนในระยะแรกของการก่อสร้างจะถูกกว่าลักษณะแรก แต่จะต้องมีค่าซ่อมบำรุงมากกว่า และถ้าไม่มีการตรวจสอบและซ่อมบำรุงคุณภาพก็จะต่ำกว่าเกณฑ์จนถึงระดับที่ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยได้ (Safety limit)



ระดับคุณภาพของเขื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุ



หมายเหตุ **Dam 1 = เขื่อนที่ก่อสร้างด้วยราคาสูง - คุณภาพสูง**

Dam 2 = เขื่อนที่ก่อสร้างด้วยราคาปานกลาง - คุณภาพปานกลาง

Dam 3 = เขื่อนที่ก่อสร้างด้วยราคาต่ำ – คุณภาพต่ำ

ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษา ตลอดช่วงอายุใช้งาน

การประเมินความปลอดภัยของเขื่อน

“การประเมินความปลอดภัยของเขื่อน”

ตามปกติจะหมายถึง การเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านเทคนิคเขื่อนทั้งในระหว่างการสำรวจ ออกแบบ ก่อสร้าง ใช้งาน ตลอดจนการตรวจสอบสภาพด้วยตา และตรวจสอบพฤติกรรมจากเครื่องมือวัดในตัวเขื่อนนำมาประมวลและประเมินลำดับความปลอดภัยหรือความเสี่ยงออกมาเป็นตัวเลขหรือเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งสามารถบ่งชี้ความสมบูรณ์หรือความเสี่ยงของเขื่อนได้อย่างชัดเจน

ระดับของ Hazard Potential Classification

ระดับความเสียหาย	การสูญเสียชีวิต	การสูญเสียทางเศรษฐกิจ
น้อย	ไม่มี – เนื่องจากไม่มีสิ่งก่อสร้างและที่อยู่อาศัยทางท้ายเขื่อน	น้อยมาก – เนื่องจากไม่มีพื้นที่ทำการเกษตร และสิ่งก่อสร้างได้รับความเสียหายน้อยมาก
มีความสำคัญ	มีผู้เสียชีวิต 2-3 ตาย	พอประมาณ (เป็นพื้นที่เกษตรกรรมและแหล่งอุตสาหกรรม)
สูง	มากกว่า 2-3 ราย	มากมาย (เป็นพื้นที่ชุมชน แหล่งอุตสาหกรรม และพื้นที่เกษตรกรรม)

Priority Rating Criteria (ของ USBR)

CONDITION

Item	Levels of Dam Condition			
Age (years)	Under 5	5-24	25-49	50-
	(0)	(3)	(4)	(9)
General condition	Excellent	Good	Fair	Poor
	(0)	(3*)	(6)	(9)
Seepage problems	None	Slight*	Moderate	High
	(0)	(3)	(6)	(9)
Structural behavior measurements	Yes		Partial	No
current and within acceptable range	(0)		(6)	(9)

Priority Rating Criteria
(ของ USBR) ต่อ

DAMAGE POTENTIAL

Item	Low	Significant	High	Extreme
Capacity – $M^3(x10^6)$	0-1.0	1.1-61.6	61.7-616	617-
	(0)	(3)	(6)	(9)
Hydraulic height –M	0-15	16-30	31-90	91-
	(0)	(3)	(6)	(9)
Hazard potential	(0)	(4)	(8)	
Hydrologic adequacy	Yes	-	-	No
	0-1	2	3	4
	(0)	(3)	(6)	(9)

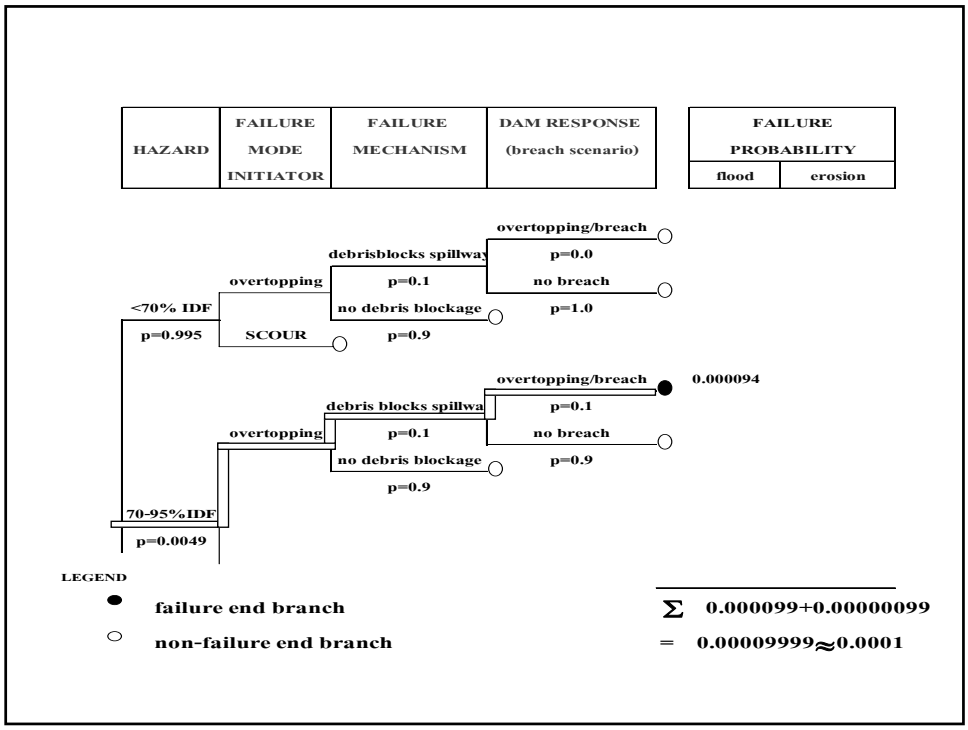
Condition Index System

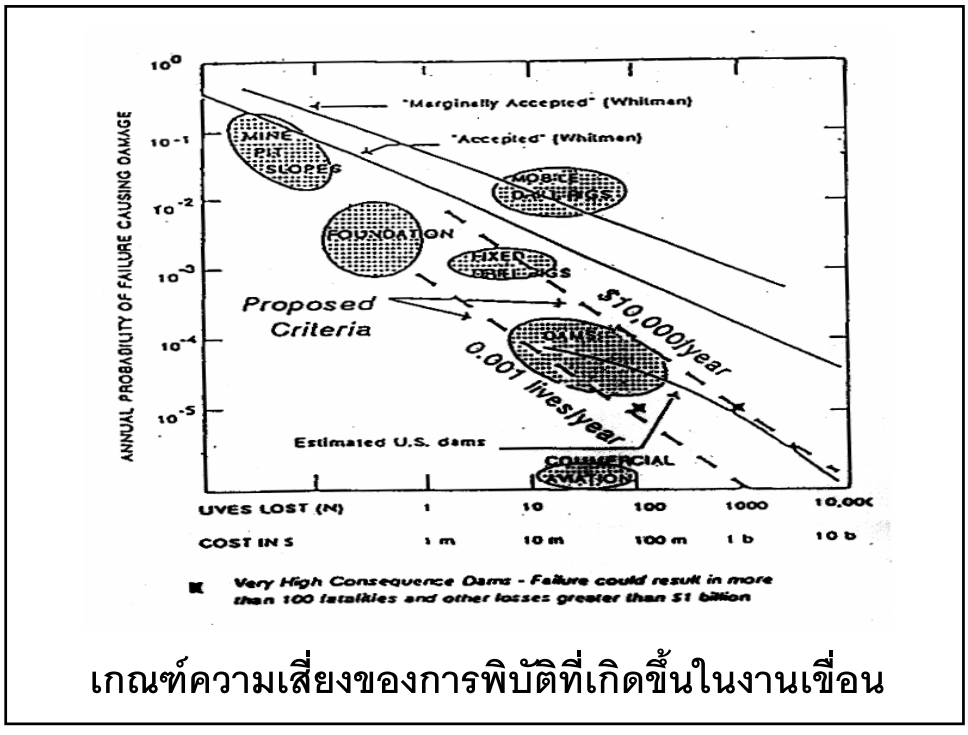
Embankment and Appertaining Structures	Consolidation in the foundation due to imposed loading	Embankment geometry controls the maximum reservoir depth and volume	
Differential settlements will induce shearing stresses	**Foundation and Abutments**	High permeability could affect storage capacity	Geologic history and local site conditions affect seismicity
Seepage forces affect the state of stress and could cause piping or instability	Seepage forces affect the state of stress and could cause piping or instability	**Reservoir**	Changes in regional loading patterns could induce seismic events
Surface runoff erosion, desiccation, liquefaction, cracking, and weathering	Surface runoff erosion, liquefaction, and excessive vegetation	Generation of wind waves, inflow rates to reservoir, and water chemistry	**Environmental Loading**

ตัวอย่าง Matrix ความสัมพันธ์ขององค์ ประกอบของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ

เกณฑ์ของสภาพเขื่อนตามระบบ Function Indexing System

Zone (1)	Condition index (2)	Condition description (3)	Recommended action (4)
1	85–100	Excellent: No noticeable deviation from ideal condition	Immediate action is not required.
	70–84	Very Good: Only slight deviation from the ideal condition are evident.	
2	55–69	Good: Some deviation the ideal condition are evident but function with respect to the particular objective is not significantly affected.	Economic analysis of REMR alternative is recommended to determine appropriate action.
	40–54	Fair: Moderate deviation from the ideal condition but the function is still adequate with respect to the particular objective.	
3	25–39	Poor: Serious deviation from the ideal condition in at least some portion of the structure. The function is inadequate with respect to the particular objective.	Detailed evaluation is required to determine the REMR activity to be taken. An evaluation of the impact of the failure of the facility to meet the specific objective is recommended.
	10–24	Very Poor: Extensive deviation from the ideal condition. The facility is barely functional with respect to the particular objective.	
	0–9	Failed: Facility has failed to meet a particular objective.	





เกณฑ์ความเสี่ยงของการพิบัติที่เกิดขึ้นในงานเขื่อน