หัวข้อในการบรรยาย

1. บทนำ
2. ปัญหาของการไหลซึมในเขื่อน
3. พฤติกรรมการไหลผ่านเขื่อนและการควบคุม
4. การหาค่าความซึมน้ำในงานเขื่อน
5. การวิเคราะห์การไหลซึมด้วยการเขียน Flownets
6. การวิเคราะห์การไหลซึมด้วยโปรแกรม
7. กรณีตัวอย่าง
   - เขื่อนสะเดา
   - เขื่อนกิ่วคอหมา
   - เขื่อนคลองท่าด่าน
   - เขื่อนห้วยบ้านพุ่ม
   - เขื่อนลำปาว
   - เขื่อนศรีนครินทร์(ถ้ามีเวลา)
8. การตรวจวัดพฤติกรรมการไหลซึม
9. สรุป

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์การไหลซึมโดยทั่วไป

วัตถุประสงค์ทางตรง

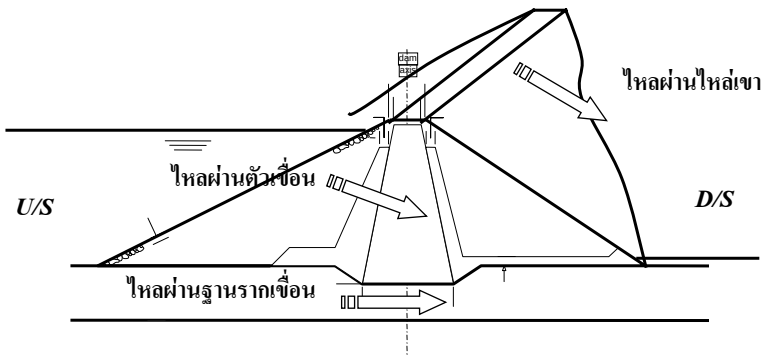
- การประมาณปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านดินหรือหินที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางวิศวกรรม
- การหาแรงดันน้ำที่ทำให้เกิดแรงดันลอยตัว การเกิดทรายดูด
- การหาความเร็วของการไหลซึมที่ทำให้เกิดการพัดพาวัสดุและการกัดเซาะ

วัตถุประสงค์ทางอ้อม

- การลดความแข็งแรงของมวลดิน
- การพัดพาของเสียทำให้เกิดมลพิษในดิน
- การสูบน้ำเกินสมดุลทำให้เกิดการทรุดตัว

การไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อน

เขื่อนปิดกั้นลำน้ำ ⇨ เกิดความต่างศักย์ระหว่าง U/S-D/S ⇨ เกิดการไหลของน้ำ



ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อน

การกัดเซาะและการพัดพาวัสดุ (Seepage Erosion)

- ลาดเขื่อน
- ฐานรากเขื่อน
- ข้างท่อลอด
- ภายในตัวเขื่อน
- ฐานยัน
- ใต้ทางระบายน้ำล้น

การรั่วซึมมากทำให้สูญเสียน้ำเก็บกัก (Excessive Leakage)

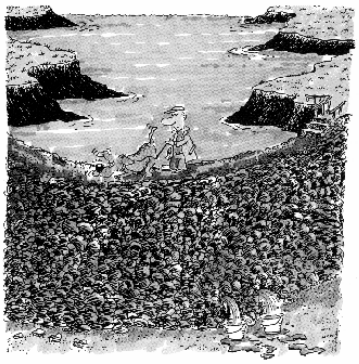
- ผ่านตัวเขื่อนและบริเวณข้างเคียง
- ผ่านขอบและก้นอ่างเก็บน้ำ

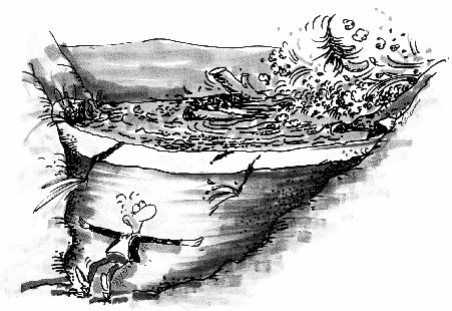
ความดันสูงในบริเวณต่างๆ มีผลต่อเนื่องถึงการเคลื่อนพัง

- ลาดเขื่อน
- ลาดดินธรรมชาติบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำ

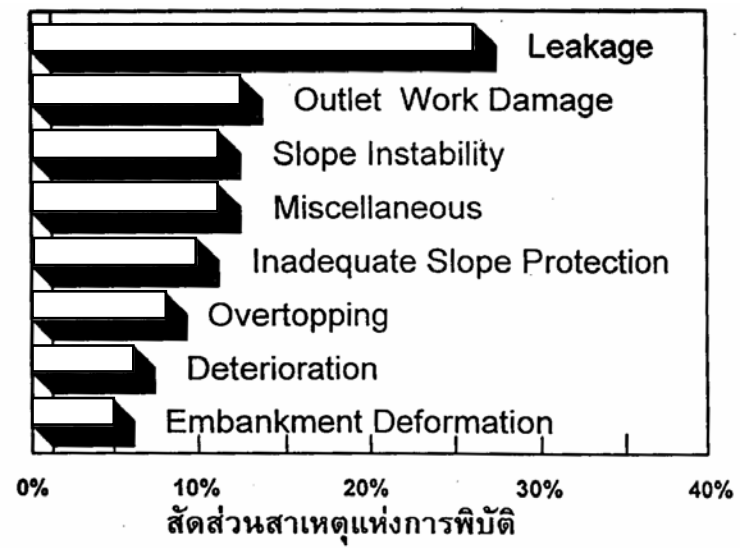
DAM SEEPAGE FAILURES

Most critical condition in dam

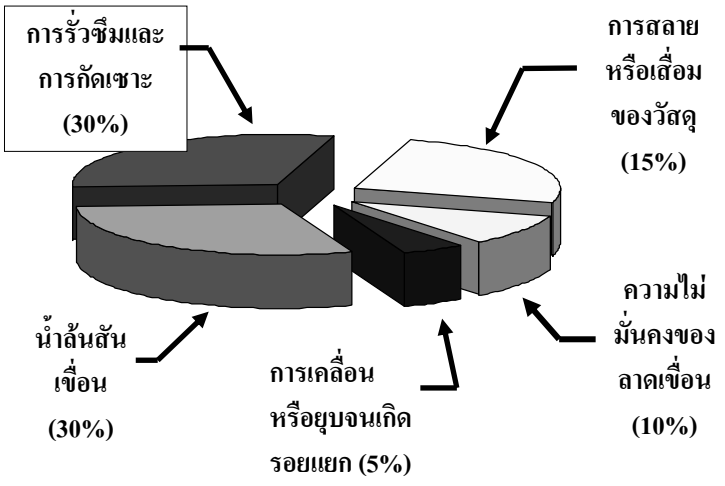




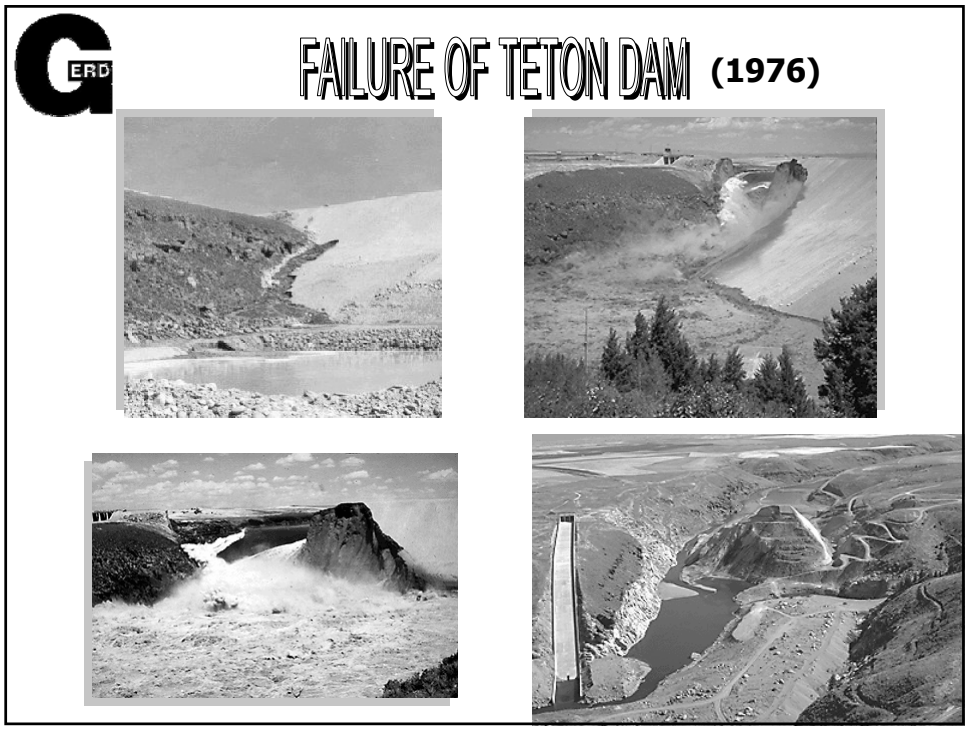
ลักษณะการพิบัติของเขื่อนในสหรัฐ



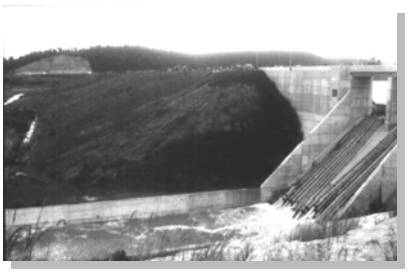
ลักษณะการพิบัติของเขื่อนในประเทศไทย



ERD
UPLIFT FORCE
LEAKAGE
ผลการรั่วซึมของเขื่อน
BOILING
PIPING

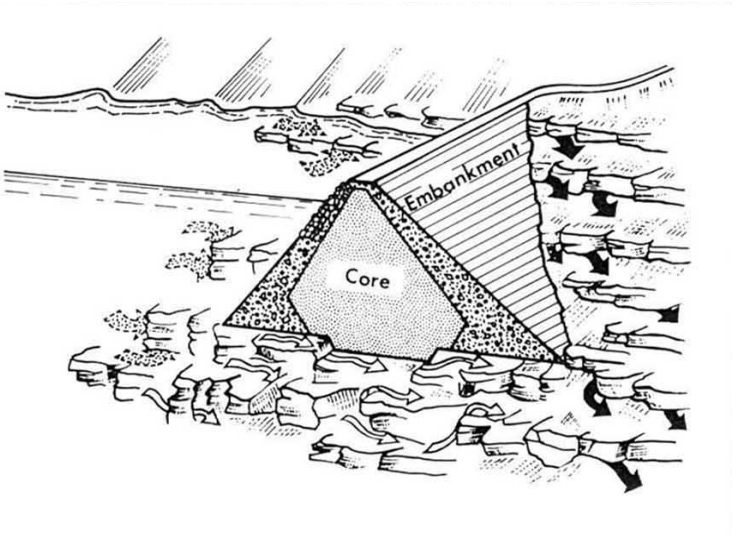

ERD
FAILURE OF TETON DAM (1976)

กรณีเขื่อนมูลบน (พ.ศ. 2533)

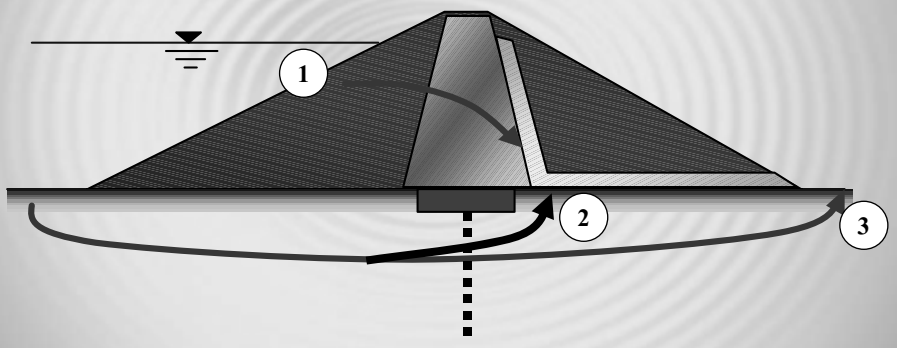


น้ำรั่วซึมผ่านฐานรากชั้นทรายหนา 15-20 เมตร

การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากและไหล่เขา

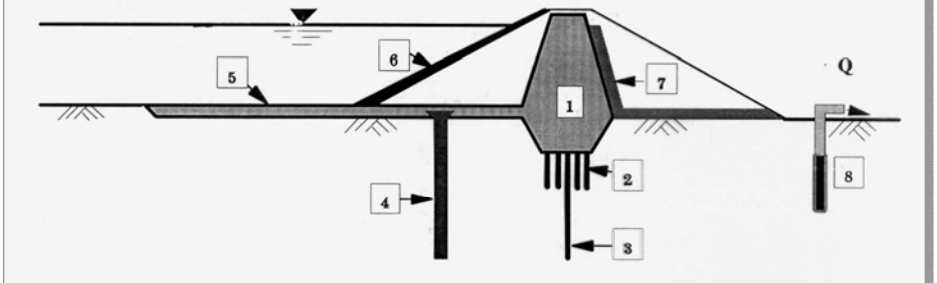


การไหลซึมของน้ำที่เกี่ยวข้องกับเขื่อน ๆ



1 ผ่านตัวเขื่อน 2 ผ่านฐานรากเข้าสู่ชั้นกรอง 3 ผ่านฐานรากออกทางท้ายน้ำ

รูปแบบการปิดกั้นและควบคุมน้ำผ่านเขื่อน



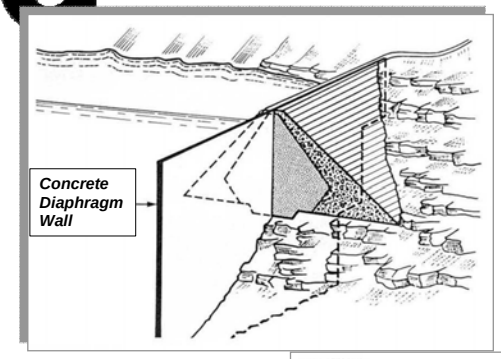
1	IMPERVIOUS CORE	5	IMPERVIOUS BLANKET
2	BLANKET GROUTING	6	IMPERVIOUS FACE
3	CURTAIN GROUTING	7	FILTER AND DRAIN
4	CUTOFF WALL	8	RELIEF WELL

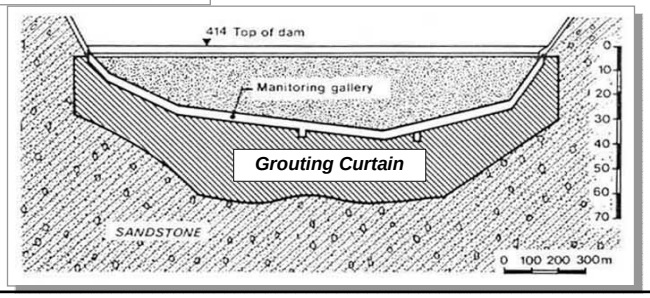
วิธีการควบคุมการไหลซึมในงานเขื่อน

1. การปิดกั้นหรือลดปริมาณการรั่วซึม (Seepage Reduction)

Impervious Core
Core Trench
Foundation Cutoff Wall
U/S Impervious Blanket
Grouting Zones
U/S Faced Slab

การปิดกั้นการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก





วิธีการควบคุมการไหลซึมในงานเขื่อน

2. การป้องกันการกัดเซาะและระบายน้ำ (Filter and Drainage)

D/S Slope Filter
Toe Filter
Horizontal Filter
Chimney Filter
Geotextile Drain
Relief Well
Pipe Drain

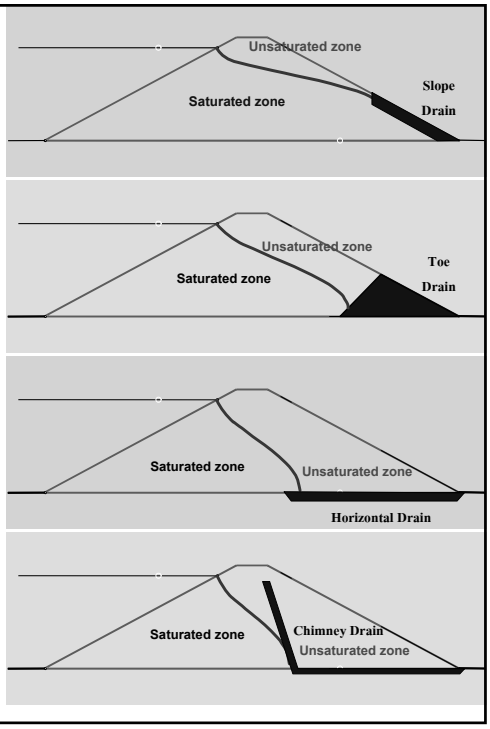
ประสิทธิภาพการระบายของชั้นกรอง

1. Slope Drain

2. Toe Drain

3. Horizontal Drain

4. Chimney Drain



การหาค่าความซึมน้ำของงานเขื่อน

กำหนดจากสภาพจริงในสนามและ
ทดสอบตามสภาพการก่อสร้างจริง

ค่าความซึมน้ำในงานเขื่อน

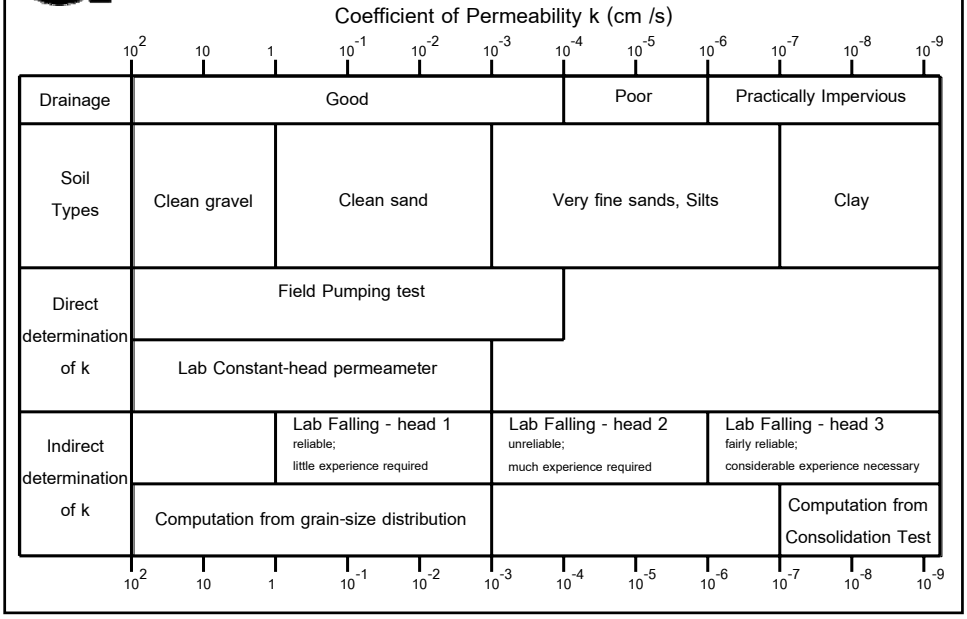
ความจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบด้านต่างๆคือ

- **การไหลซึมผ่านในเขื่อนและอาคารทางชลศาสตร์**
- **การออกแบบชั้นระบาย**
- **การป้องกันการกัดเซาะบริเวณผนังกันดิน ท้ายเขื่อน ลาดเขื่อน**
- **การออกแบบการอัดฉีดน้ำปูนและกำแพงทึบน้ำใต้ดิน**

แหล่งที่มาข้อมูลค่าความซึมน้ำ

- ข้อมูลการออกแบบและการก่อสร้าง
- ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของโครงการที่กำลังดำเนินการ
- ผลการทดสอบในสนามของโครงการที่กำลังดำเนินการ
- เอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง แต่ต้องใช้ข้อมูลการทำสอบมาประกอบด้วย

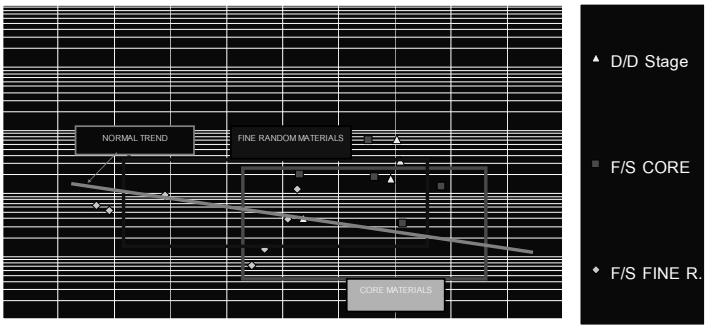
วิธีการหาค่าความซึมน้ำของดิน



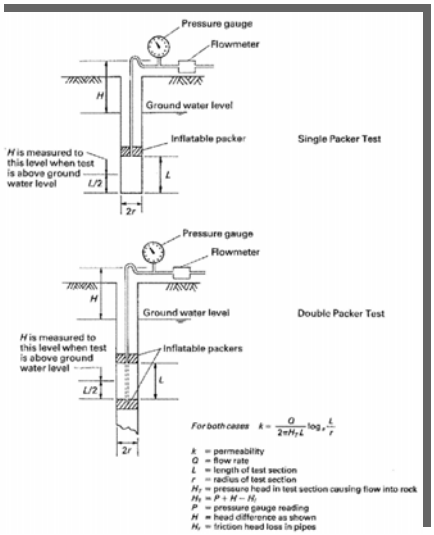
สรุปค่าความซึมน้ำของเขื่อนมูลบน

Material	Permeability (cm/sec) k_h	k_v	k_e	Permeability Ratio k_h/k_v
1. Dam Embankment	$1x10^{-6}$	$3.3x10^{-7}$	$6x10^{-7}$	3
2. Foundation Soils				
2.1 Clayey Soils (CL,SC)	$1.3x10^{-4}$	$1.4x10^{-5}$	$4.2x10^{-5}$	9
2.2 Sandy Soils (SP)	$1.1x10^{-2}$	$1.1x10^{-2}$	$1.1x10^{-2}$	1
2.3 Equivalent Permeability	$5.81x10^{-3}$	$2.85x10^{-5}$	$4.0x10^{-4}$	203.83
3. Foundation Rocks				
3.1 Relatively Pervious	$1.8x10^{-5}$	$1.8x10^{-5}$	$1.8x10^{-5}$	1
3.2 Relatively Impervious	$3x10^{-3}$	$3x10^{-3}$	$3x10^{-3}$	1
4. Slurry Wall Material				
4.1 Perfect Wall	$1x10^{-6}$	$1x10^{-6}$	$1x10^{-6}$	1
4.2 Imperfect Wall	$3x10^{-5}$	$3x10^{-5}$	$3x10^{-5}$	1

ตัวอย่างของเขื่อนกิ่วคอหมา



การหาค่าความซึมน้ำของหิน



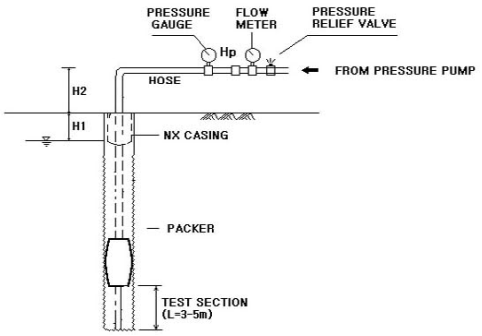
การทดสอบแรงดันน้ำ (Water Pressure Test) โดยการอัดน้ำภายในหลุมเจาะและวัดอัตราการไหล

k = 10Q/LtP (Lugeon)

ซึ่งทดสอบได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

- Quick Test ทดสอบที่แรงดันคงที่ นาน 10 นาที
- Comprehensive Test ทดสอบที่แรงดัน 3 ระดับ คือ สูง กลาง และต่ำ ทดสอบทั้งทางขึ้นและลง

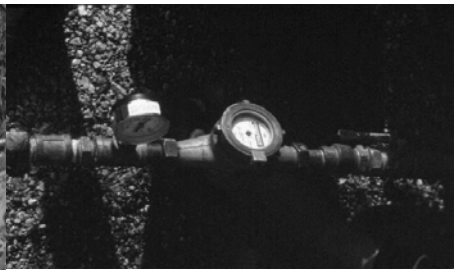
Rock Permeabilty Test



Lugeon Test

Pumping Test

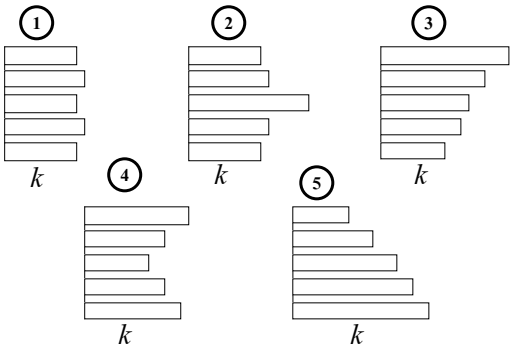
Packer Test

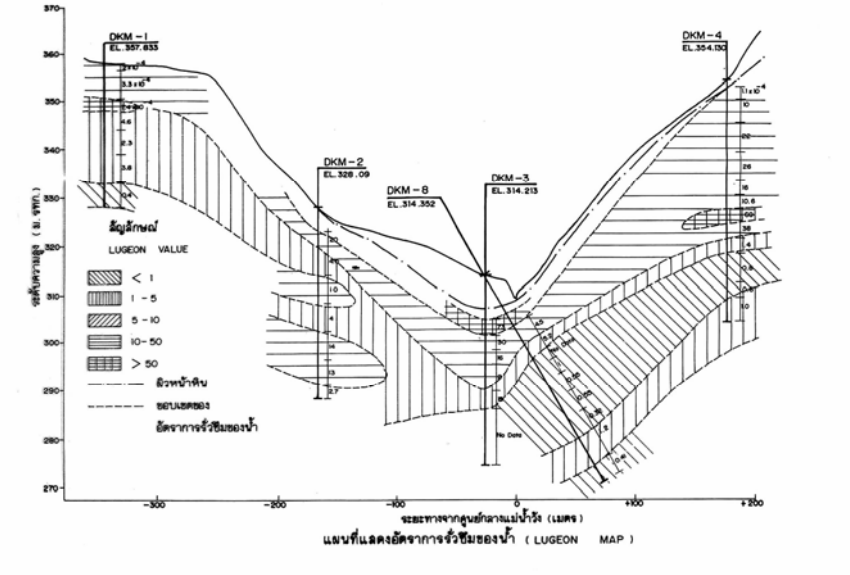


ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของหิน

ผลจากการทดสอบแรงดันน้ำแบบ Comprehensive **Houslby (1992)** ได้ประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ โดยแบ่งการไหลของน้ำผ่านรอยแยกเป็น 5 แบบ

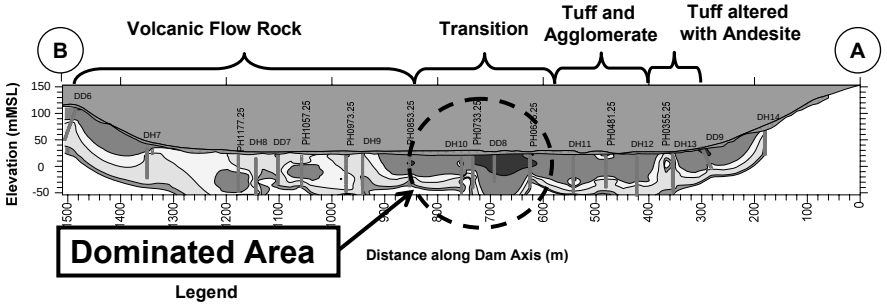
1. Laminar Flow
2. Turbulent Flow
3. Dilation
4. Wash out
5. Void Filling





แผนที่แสดงอัตราการรั่วซึมของน้ำ (LUGEON MAP)

ค่าความซึมน้ำของเขื่อนคลองท่าด่าน



Legend

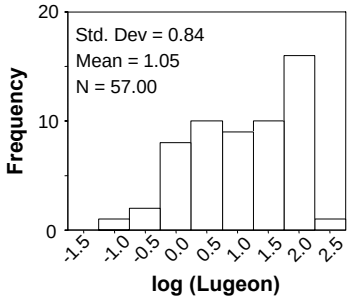
- Overburden
- > 50 Lugeon = Pervious Rock
- 10 - 50 Lugeon = Rather Pervious Rock
- 5 - 10 Lugeon = Semi - Pervious Rock
- 1 - 5 Lugeon = Semi - Impervious Rock
- < 1 Lugeon = Impervious Rock

Remark : 1 Lugeon = 1.3 x 10^{-5} cm/sec

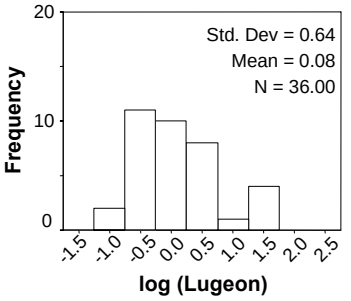
การวิเคราะห์ทางสถิติ

Transition Zone

Shallow Level (EL +30.00 - -15.00 mMSL)



Deep Level (EL -15.0 - less mMSL)



ค่าความซึมน้ำของเขื่อนคลองท่าด่าน

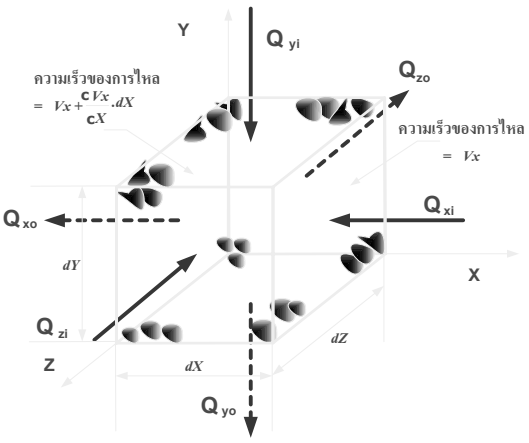
Table of permeability

Type		No of Test*	Permeability (Lugeon)	
			Mean	Upper Bound**
Tuff altered with Andesite	Shallow	31 (1)	2.7	4.3
	Deep	21 (0)	0.9	1.2
Tuff and Agglomerate	Shallow	54 (4)	5.7	7.7
	Deep	43 (0)	4.2	5.7
Transition	Shallow	59 (2)	11.2	15.6
	Deep	39 (3)	1.2	1.6
Volcanic Flow	Shallow	82 (4)	2.8	3.8
	Deep	66 (4)	1.2	1.5
Grouting Curtain		30 (0)	0.5	1.0

* In parentheses are Number of Test that Lugeon = 0.
** Upper bound at 90% Confidential.

Remark : 1 Lugeon = 1.3×10^{-5} cm/sec

สมการพื้นฐานการไหลของน้ำผ่านดิน



Laplace's Eqauation สำหรับ 3-D

$$k_x.\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+k_y.\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+k_z.\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0$$

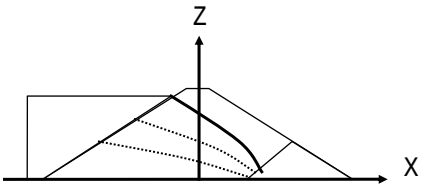
Laplace's Eqauation สำหรับ 2-D
เมื่อ $k_x = k_y$

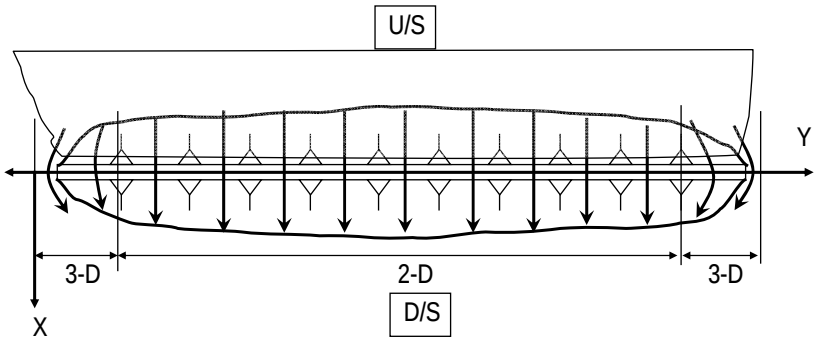
ดินอิ่มตัวและการไหลคงที่

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=0$$

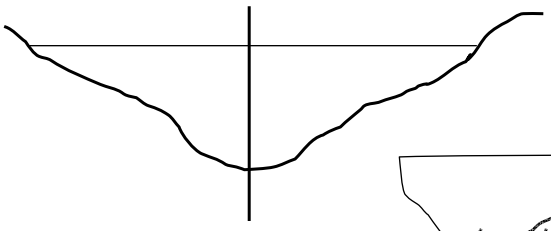
การไหลซึมผ่านเขื่อนเป็น 2 มิติ จริงหรือไม่

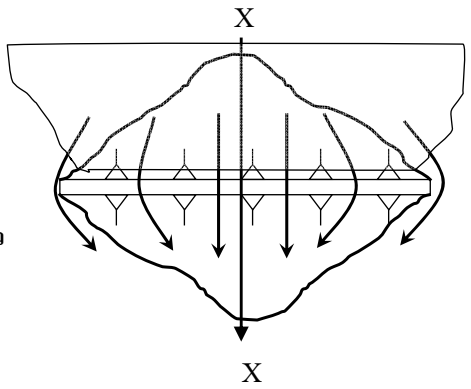
1. เขื่อนมีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างของฐานและความสูงของเขื่อน





2. เขื่อนที่มีสันเขื่อนสั้นและลักษณะช่องเขาเป็น V-Shape และค่อนข้างสมมาตร บริเวณหน้าตัดเขื่อนวิกฤตที่ร่องน้ำลึกจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบ 2-D





- การไหลในแนวหน้าตัด x-x เป็นหน้าตัดที่วิกฤต

- การประมาณปริมาณการไหลด้วย 2-D ผ่านแนว X-X จะได้ปริมาณการไหลที่มากที่สุด เนื่องจากจะมี hydraulic gradient (i) มากที่สุด หรือ Conservative Design

การหาคำตอบของสมการ Laplace's Equation

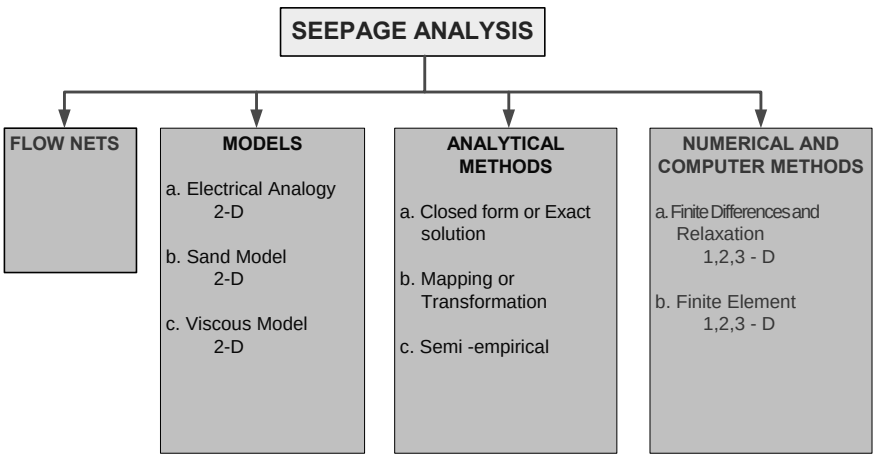
การแก้สมการ Laplace's Equation โดยวิธีทางคณิตศาสตร์จะให้คำตอบในรูป Fourior's Series และด้วยการแทนค่า Boundary conditions ที่ทราบก็จะได้

$$h(x,y) = f(x,y)$$

เมื่อ h(x,y) = total hydraulic head บน พื้นที่การไหลที่ ตำแหน่ง x และ y ใดๆ

$f(x,y)$ = คำตอบในรูปของ function ที่อยู่ในเทอมของ x และ y

ดังนั้นถ้าหากเราต้องการทราบค่า hydraulic head ที่ตำแหน่งใดๆก็สามารถแทนค่าพิกัดของ x และ y ก็จะได้คำตอบของ h(x,y) ได้



Seepage Analysis Methods (from Radhakrishnan,1978)

การเขียน Flownets กรณี Anisotropic Soil

การบดอัดในเขื่อนดินอาจทำให้อัตราการไหลซึมของแนวราบสูงกว่าแนวดิ่ง ซึ่งเรียกว่า “ **Anisotropic Permeability**” จากการสำรวจพบว่า

ในดินเหนียวบดอัดอัตราส่วน **Kx/Ky = 4**

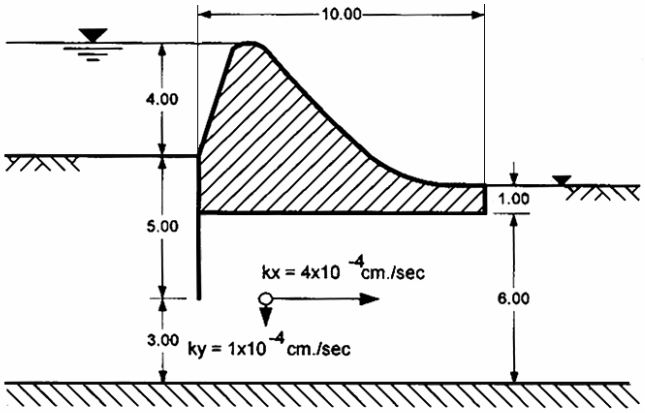
ดังนั้นการเขียน **Flownet** จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนสเกลของการเขียนด้วยการย่อแกน **X** ลง เป็น

$$x_T = \sqrt{\left(\frac{k_y}{k_x}\right)}.x$$

และเมื่อเขียนเสร็จแล้วจึงขยายสเกลกลับไปเท่าเดิม ในกรณีนี้การคำนวณปริมาณน้ำไหลให้ใช้ค่าความซึมน้ำเทียบเท่า **(Equivalent Permeability)**

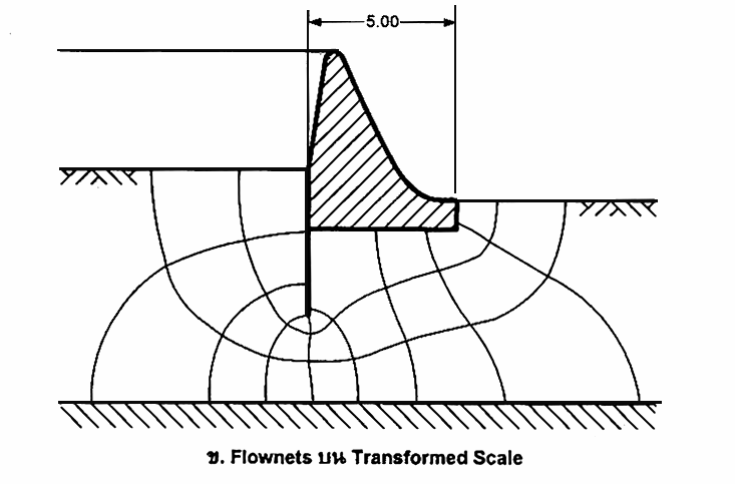
$$k_e = \sqrt{k_x.k_y}$$

หน้าตัดฝายตามมาตราส่วนปกติ



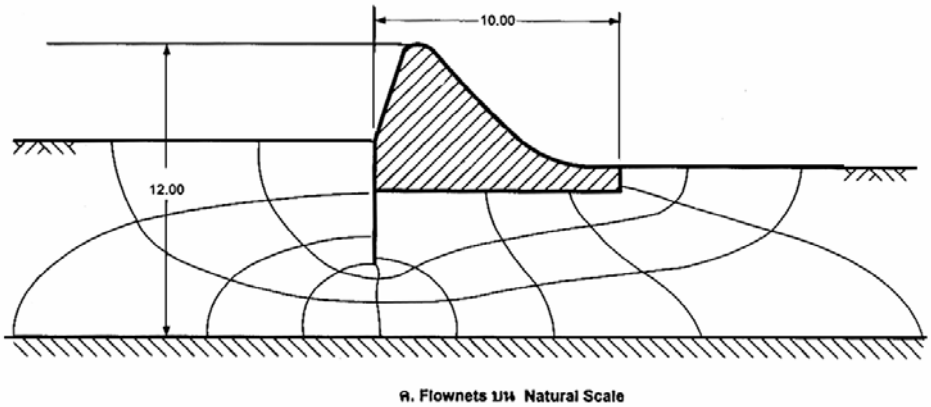
ก. หน้าตัดฝายและคุณสมบัติดิน

ฝายตามมาตราส่วนปรับสัดส่วนและการเขียน Flownets



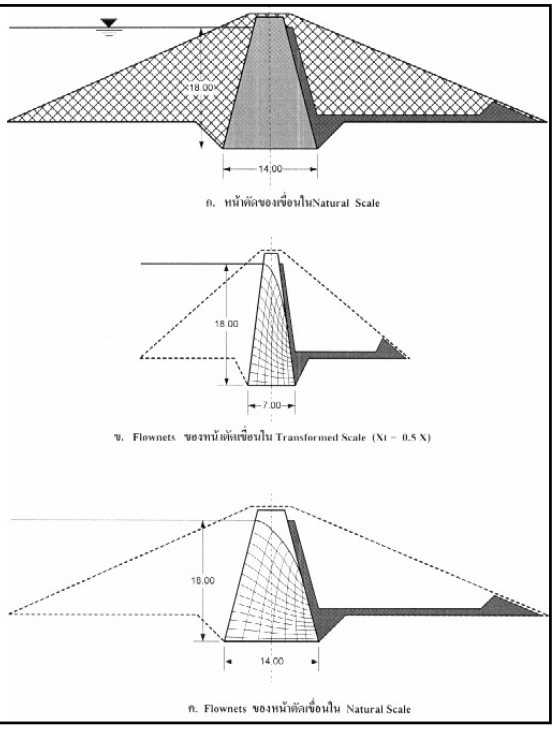
ข. Flownets บน Transformed Scale

การขยายกลับเข้าสู่มาตรส่วนปกติพร้อม Flownet



ค. Flownets บน Natural Scale

การเขียนFlownets ของเขื่อน กรณีดิน เป็น Anisotropic

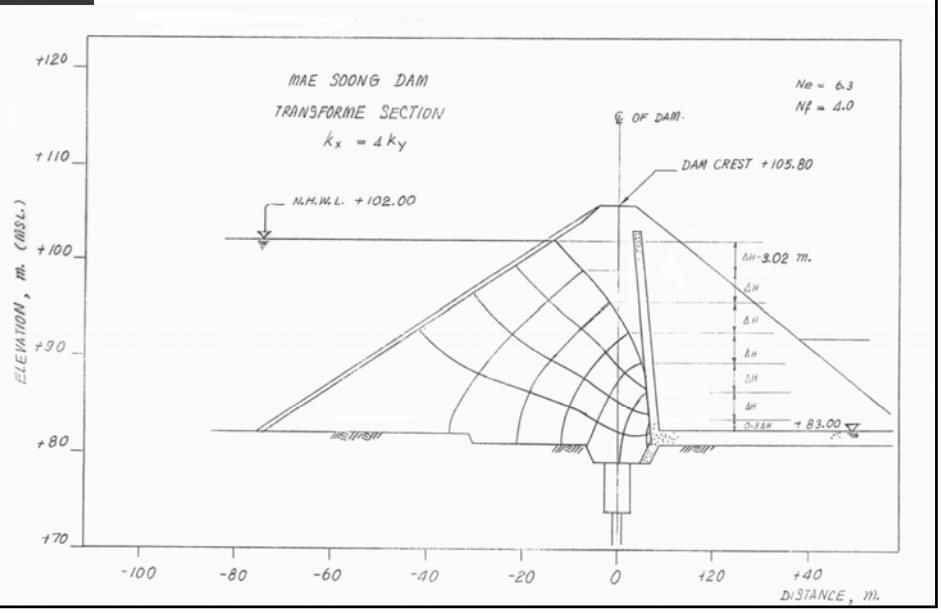


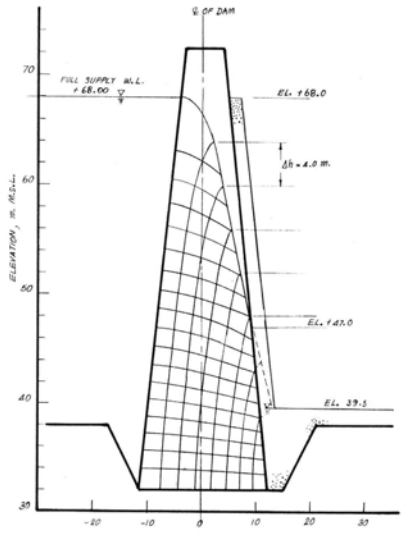
ก. หน้าตัดของเขื่อนในNatural Scale

ข. Flownets ของหน้าตัดเขื่อนใน Transformed Scale (Xt = 0.5 X)

ก. Flownets ของหน้าตัดเขื่อนใน Natural Scale

การเขียน Flownet ด้วยมือ





KHLONG SADAO DAM, CHANGWAT SONGKHLA

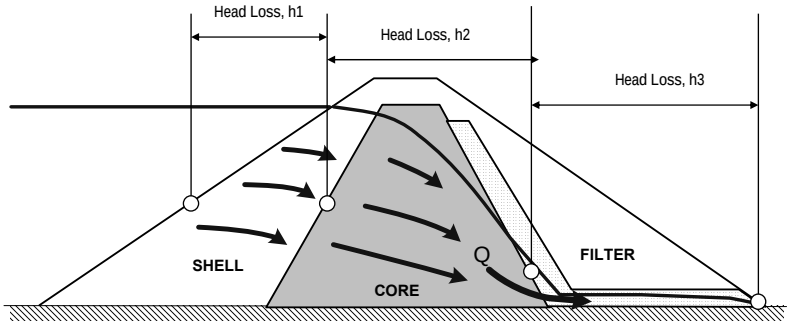
FLOW NETS OF TRANSFORMED SECTION

Flownets ของเขื่อนคลองสะเดา จ. สงขลา

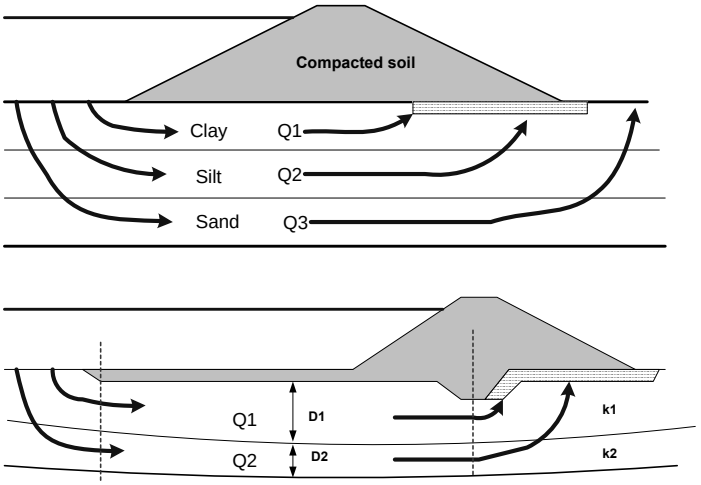
Zoned Dam กรณีที่ ค่า k ของ Core Zone น้อยกว่าของ Random Zone (Shell) มาก

ให้เขียน Flownet เฉพาะ Core Zone โดยถือว่า Random Zone โปร่งน้ำ

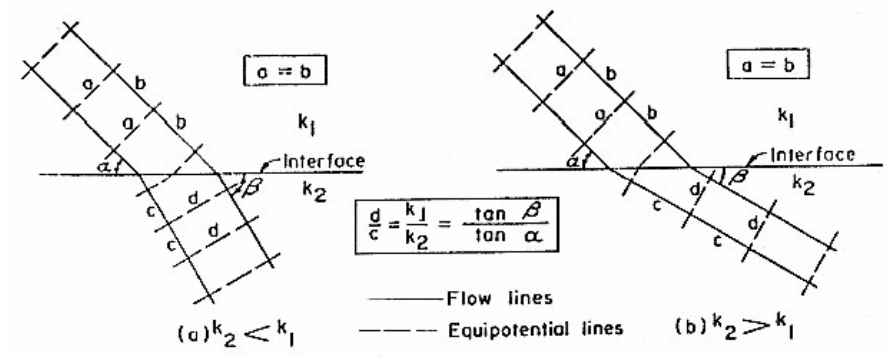
Non Homogeneous Flow in Dam



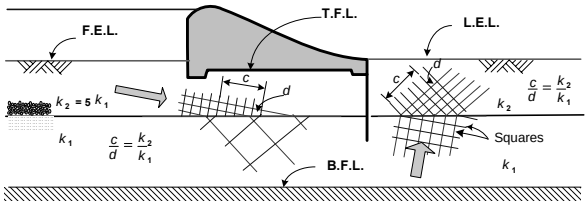
Non Homogeneous Flow in Dams



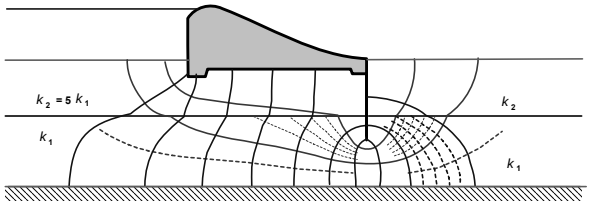
Deflection of Flow Lines at Material Interfaces



การเขียน Flownet ของชั้นดินต่างชนิด

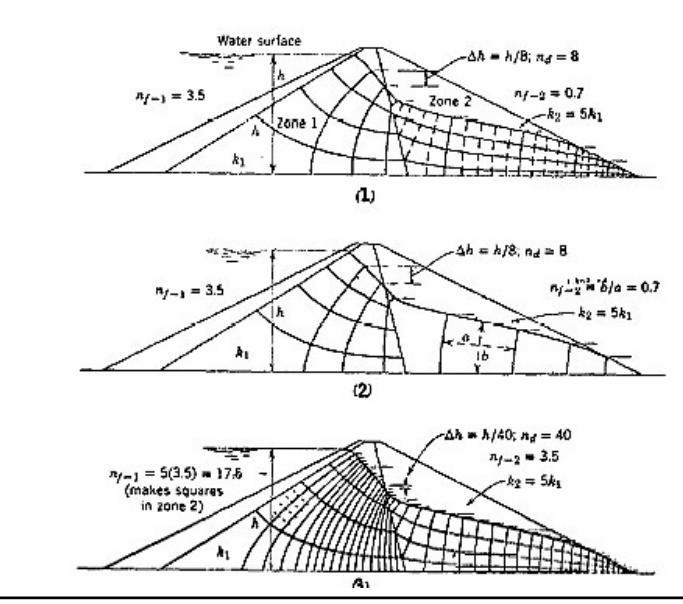


ก) ระบุ Boundary Lines และสร้างทิศทางของ Flownet นำร่องที่ผิวเชื่อมต่อของวัสดุ

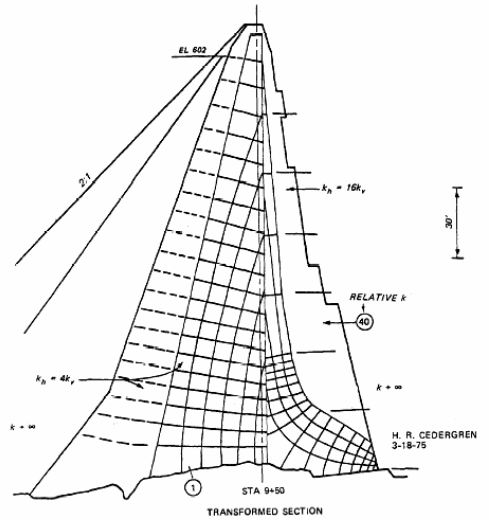


ข) เขียน Flownet โดยมีการตรวจสอบจากการแบ่งพื้นที่ย่อย

Deflection of Flow Lines in Zone Dam

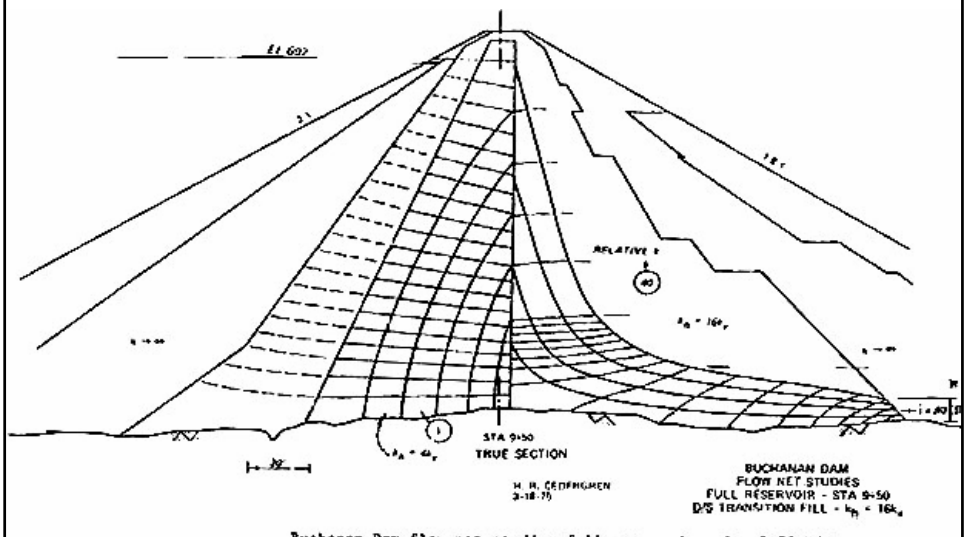


Deflection of Flow Lines in Rock-filled Dam



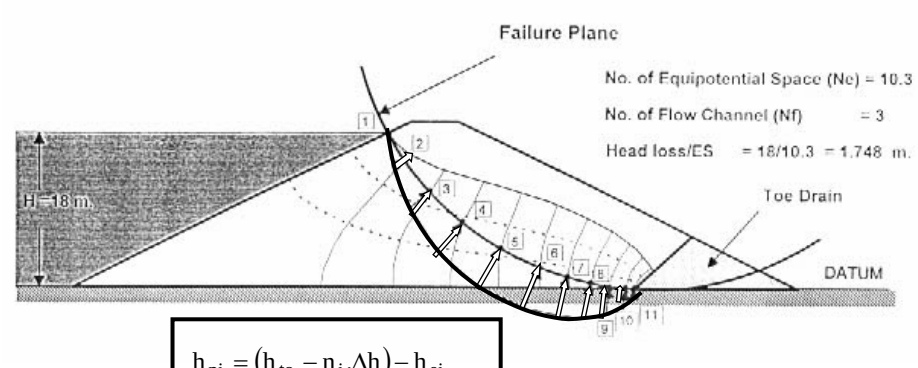
Transformed Scale

Natural Scale



Buchanan Dam flow net studies full reservoir - Sta 9+50 D/S transition fill - $k_h = 16\ k_v$ true section (from Cedergren[25] and U. S. Army Engineer District, Sacramento 1977).

การคำนวณแรงดันน้ำจาก Flownets



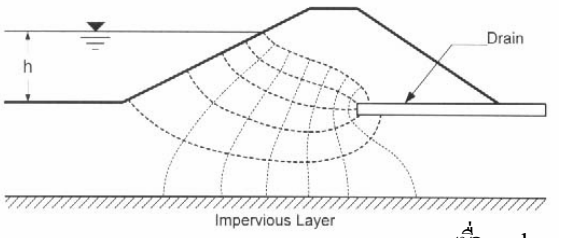
$$h_{pi} = (h_{to} - n_i.\Delta h) - h_{ei}$$

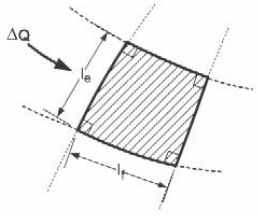
เมื่อ h_{to} = ศักย์รวมเริ่มต้น Δh = ศักย์ที่สูญเสียในช่วง Equipotential Space

n_i = จำนวน Equipotential Space จากจุดเริ่มต้นไปถึงจุด I ใดๆ

h_{ei} = ศักย์ความสูงของจุด I ใดๆ

การคำนวณปริมาณน้ำที่รั่วซึมจากเขื่อน





N_f = 5
N_e = 7
$\Delta h = h/N_e$

$$Q = k.h.\frac{N_f}{N_e}$$

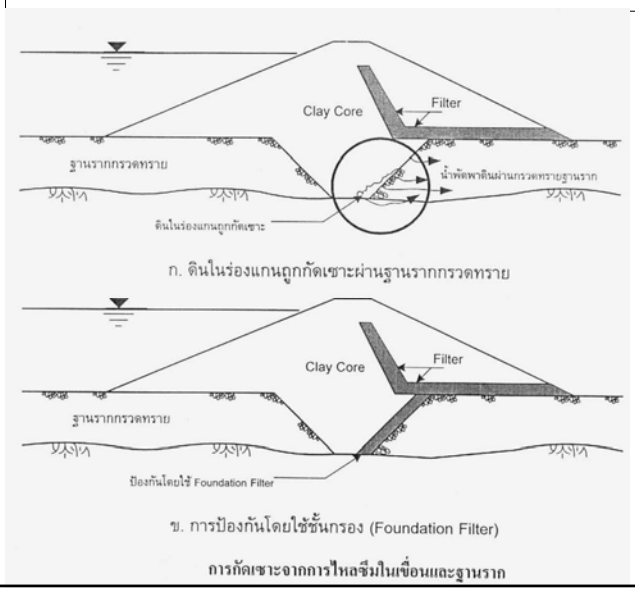
เมื่อ k = Permeability ของดินตัวเขื่อน

h = ความต่างศักย์ระหว่างหน้าน้ำและท้ายน้ำ

N_f = จำนวน Flow Channel

N_e = จำนวน Equipotential Space

การกัดเซาะจากน้ำไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน



การกัดเซาะจากการไหลซึมในเขื่อนและฐานราก

การวิเคราะห์การไหลซึมในเขื่อนโดยวิธี ไฟไนอิลิเมนต์

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนกรณีที่สลับซับซ้อนและมีหลายกรณีที่ต้องทำการศึกษาในปัจจุบันใช้วิธี Finite Element Method

1. โดยการแบ่ง พื้นที่การไหลซึมออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ

2. ระบุเงื่อนไขการไหลและความดันน้ำที่ขอบเขตการไหลในส่วนต่างๆให้ถูกต้อง

3. สร้าง Matrix จากสมการพื้นฐานของการไหลซึม

4. Invert Matrix เพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนการวิเคราะห์

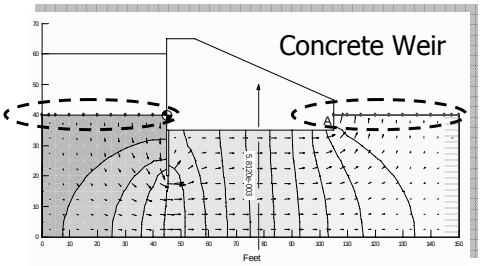
- ต้องมีความเข้าใจถึงพื้นฐานของทฤษฎีการไหลของน้ำในดิน
- ต้องตรวจสอบความเชื่อถือได้ของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม
- ต้องสามารถกำหนดขอบเขตของการไหลให้ถูกต้องสอดคล้องกับความเป็นจริง
- ต้องมีสามัญสำนึกในการคาดการณ์ของคำตอบที่น่าจะเป็นไปได้
- ต้องทราบข้อจำกัดในบางกรณีที่โปรแกรมไม่สามารถวิเคราะห์ได้

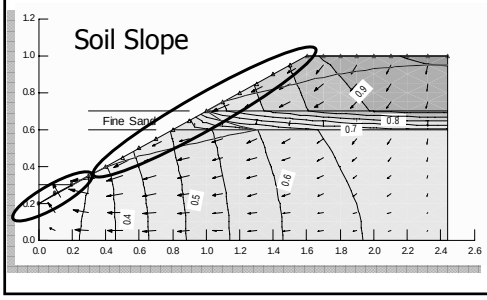
FEM

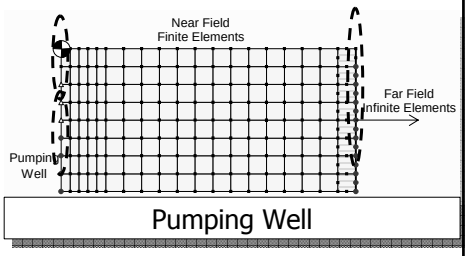
นไขขอบเขต (Boundary Condition)

แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

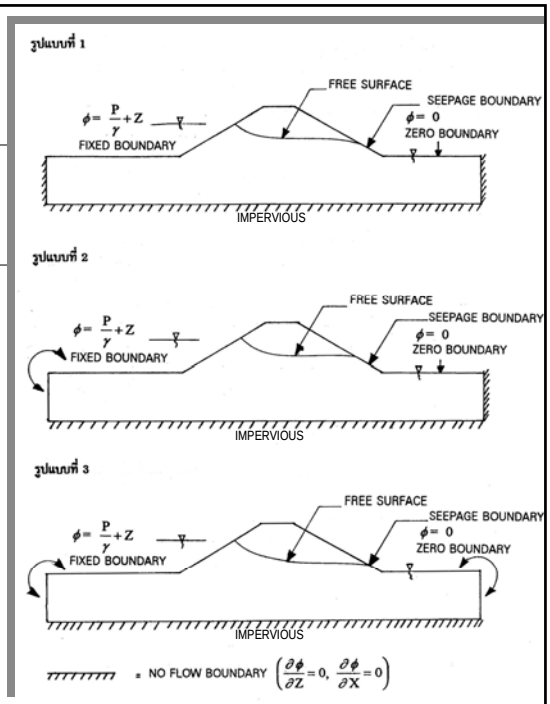
- **Fixed Head Boundary**
- **Flow Boundary**





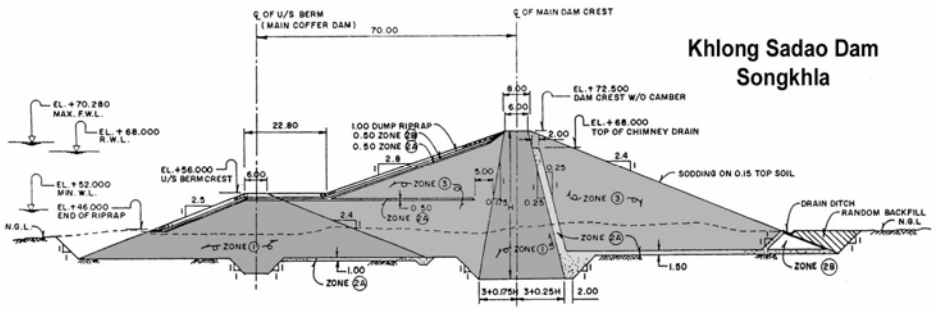


รูปแบบการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

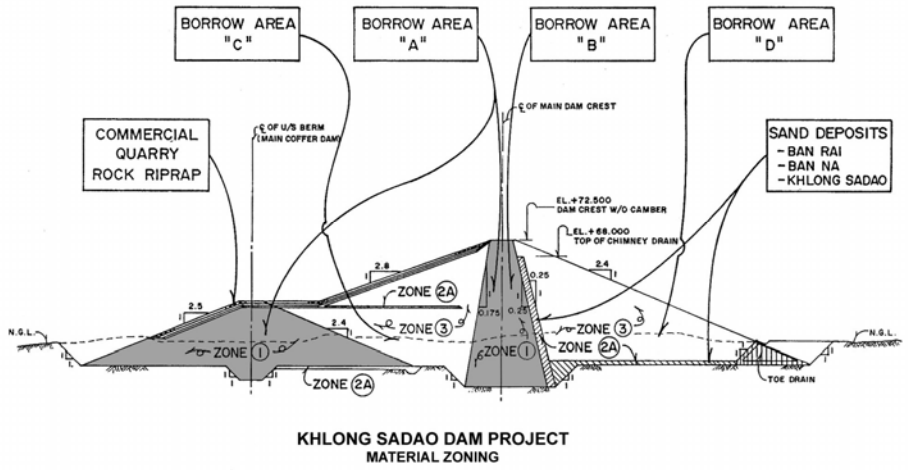


กรณีตัวอย่าง

เขื่อนคลองสะเดา จ.สงขลา

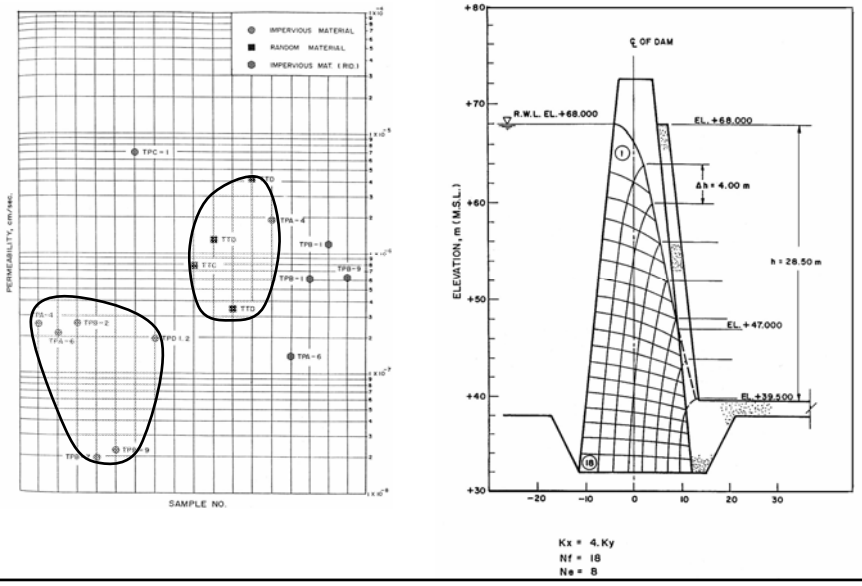


Material Zoning

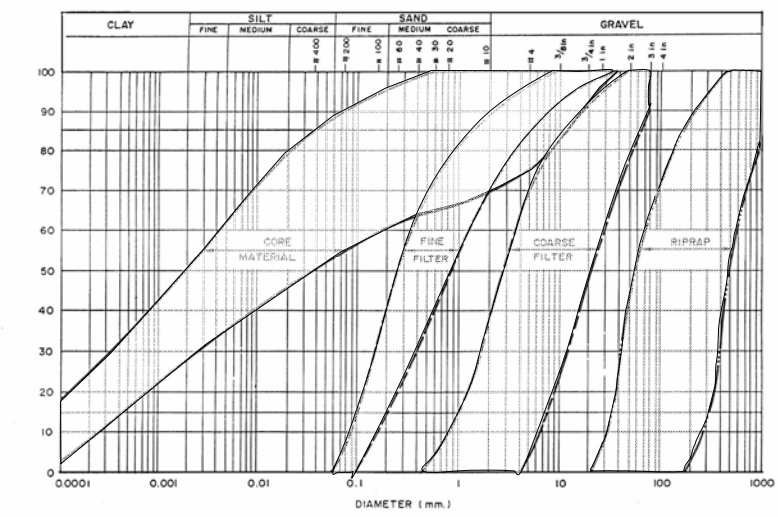


KHLONG SADAO DAM PROJECT
MATERIAL ZONING

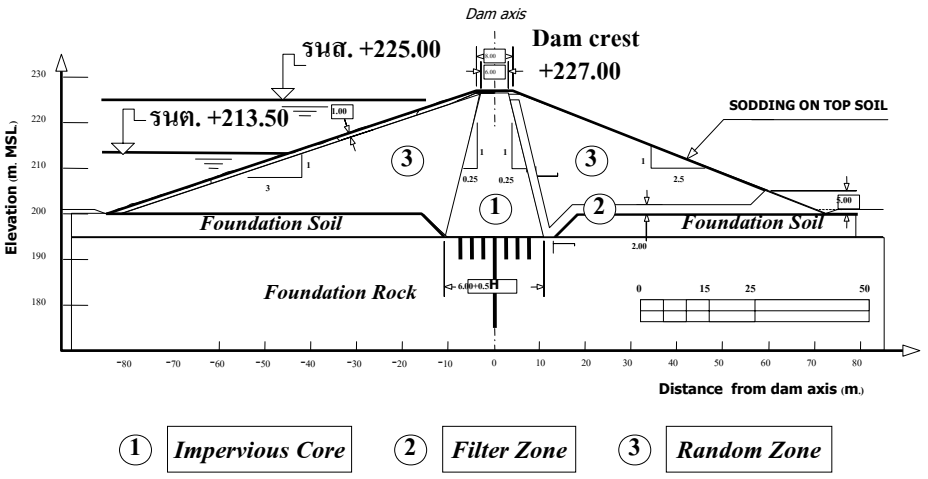
ค่าความซึมน้ำและFlownets
เขื่อนคลองสะเดา จ.สงขลา



Filter Design for Khlong Sadao
Songkhla Province



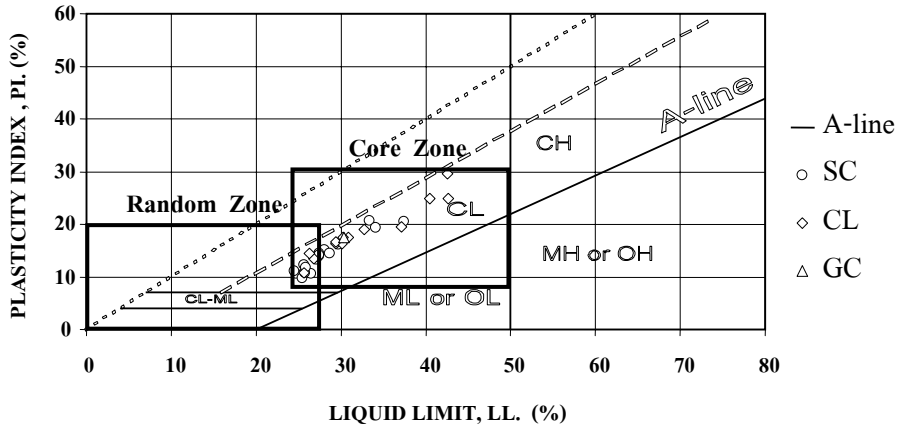
เขื่อนห้วยบ้านพุ่ม



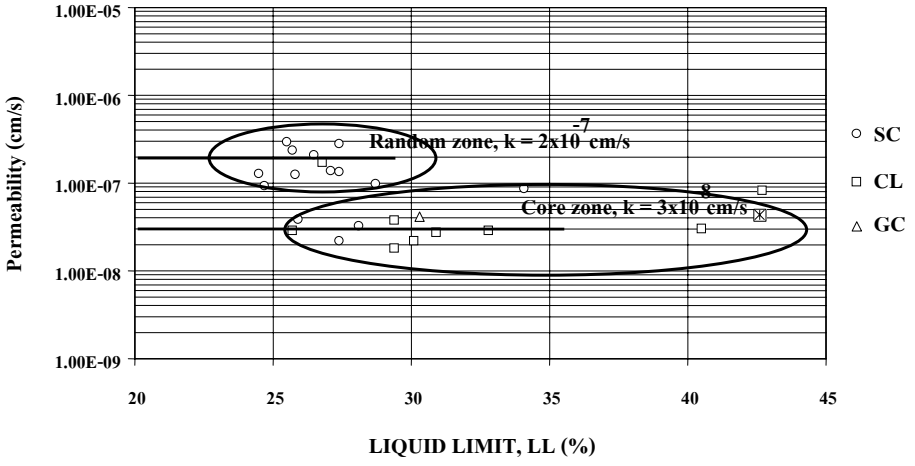
ลักษณะของตัวเขื่อน

ชนิดเขื่อน	**เขื่อนดินแบ่งส่วน**
ระดับสันเขื่อน	**+227.00 เมตร รทก.**
ความยาวของสันเขื่อน	**1600.00 เมตร**
ความสูงตัวเขื่อนจากระดับร่องน้ำลึก	**26.00 เมตร**
ระดับน้ำเก็บกัก (รนก.)	**+223.00 เมตร รทก.**
ระดับน้ำสูงสุด (รนส.)	**+225.00 เมตร รทก.**
ระดับน้ำต่ำสุด (รนต.)	**+213.50 เมตร รทก.**
ระดับน้ำต่ำสุดของกันร่องแกน	**+195.00 เมตร รทก.**

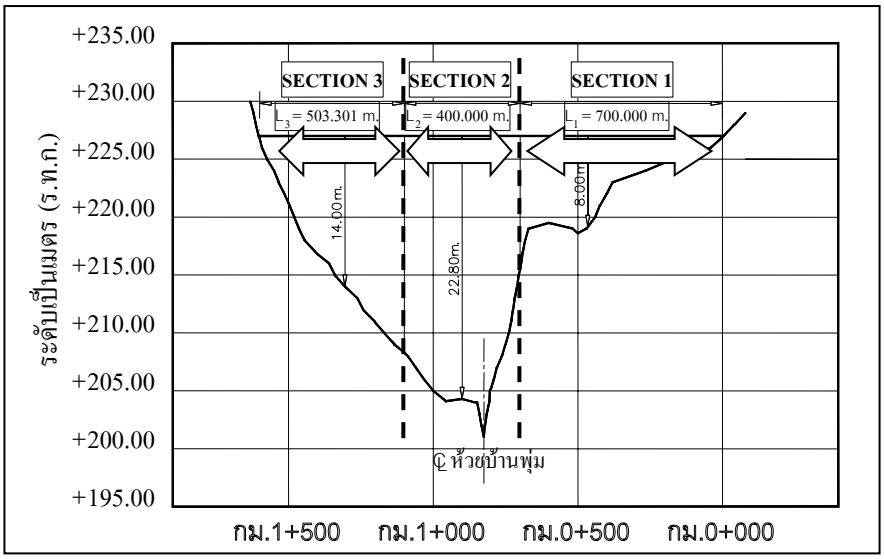
Plasticity Chart



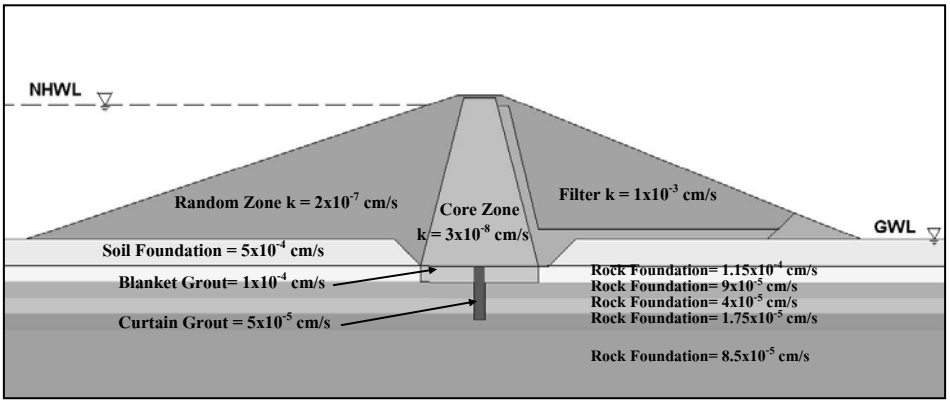
Permeability



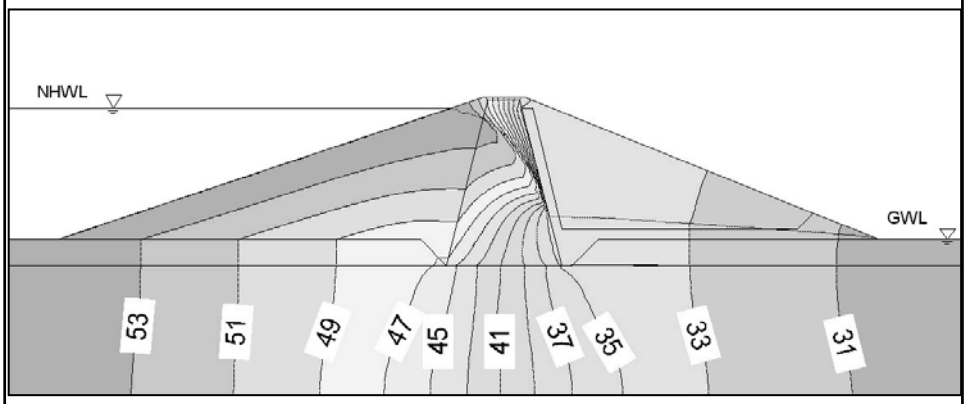
การแบ่งหน้าตัดสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม



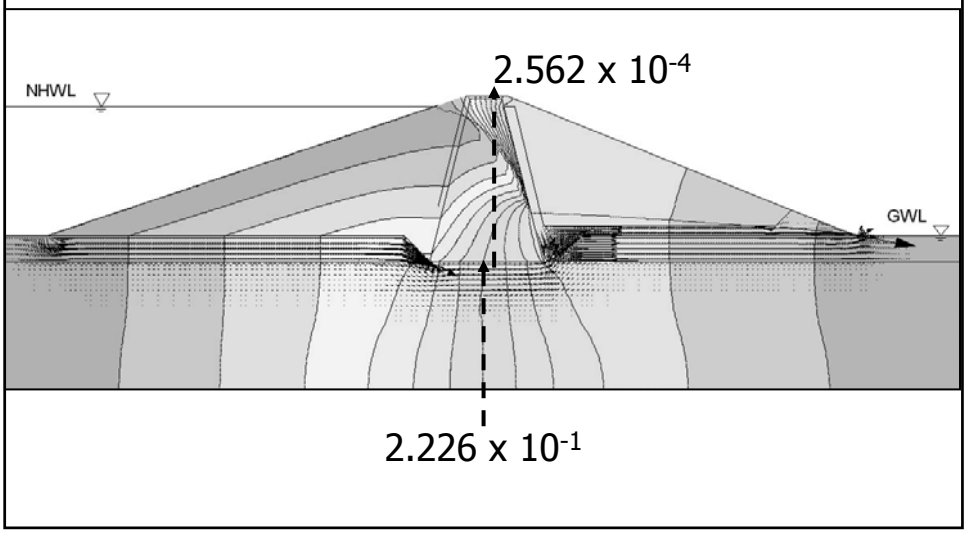
Material Properties



ผลการวิเคราะห์

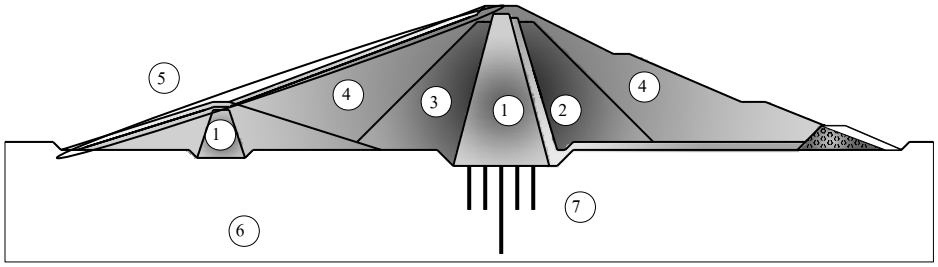


ผลการวิเคราะห์



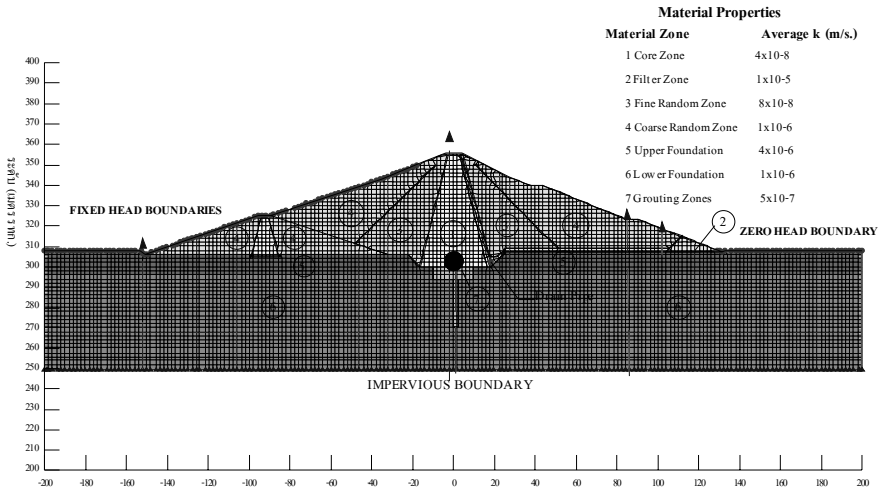
กรณีเขื่อนกิ่วคอหมา

หน้าตัดเขื่อนกิ่วคอหมา



1. Impervious Core Zone
2. Filter Zone
3. Fine Random Zone
4. Coarse Random Zone
5. Rock Riprap
6. Foundation
7. Grouting Zone

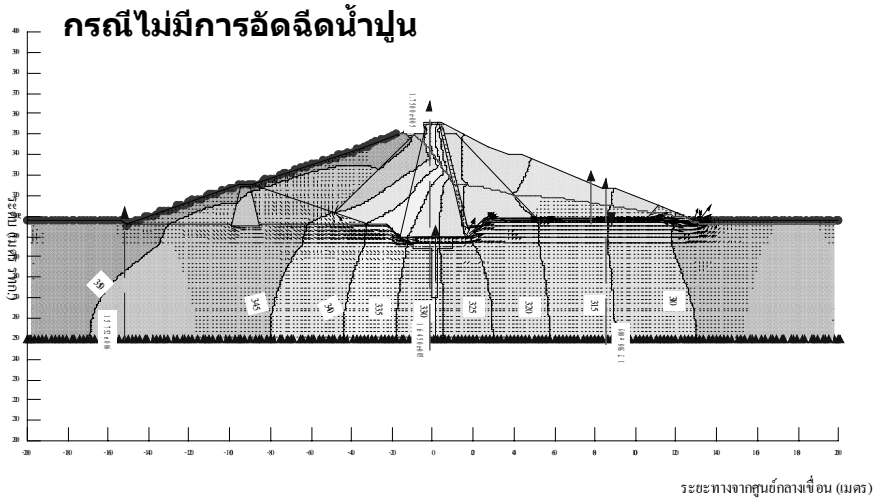
โครงข่ายของเขื่อนกิ่วคอหมา



โครงการเขื่อนกิ่วคอหมา จ.ลำปาง

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก

EQUIPOTENTIAL LINES
กรณีไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน

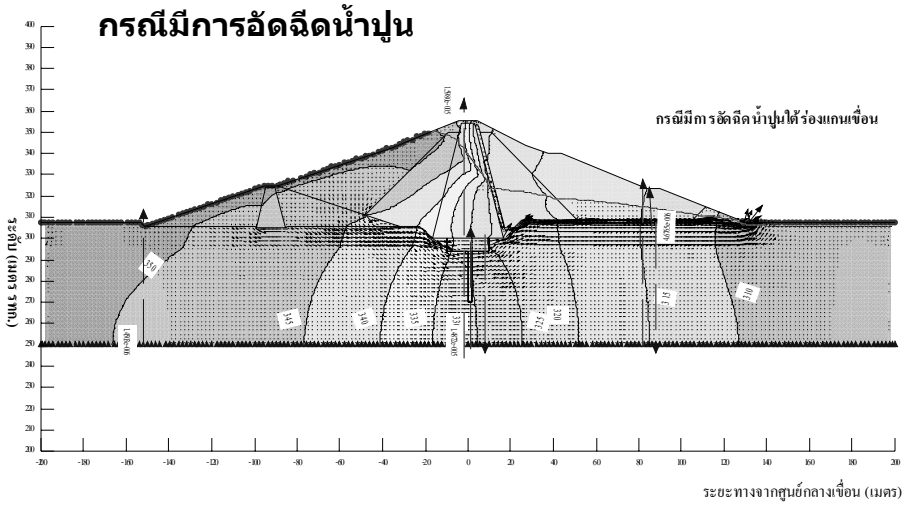


โครงการเขื่อนกิ่วคอหมา จ. ลำปาง

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก

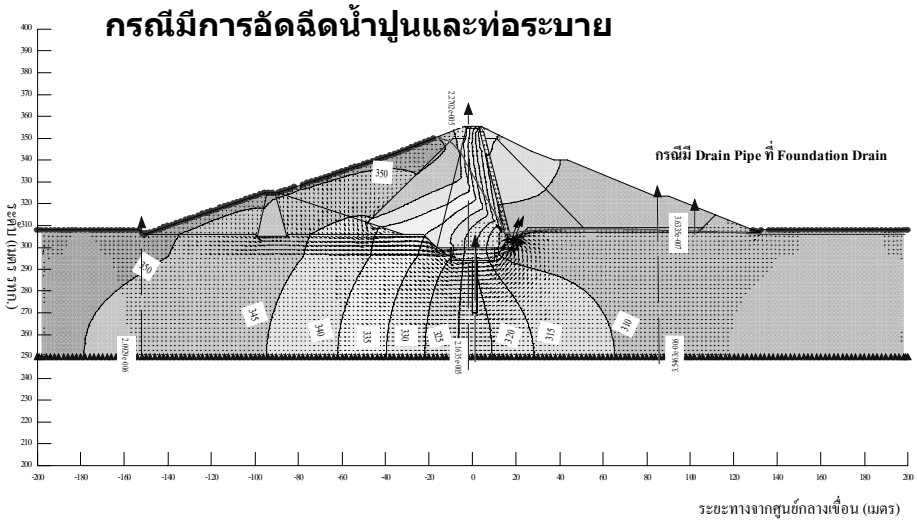
กรณีไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนใต้ร่องแกน

EQUIPOTENTIAL LINES
กรณีมีการอัดฉีดน้ำปูน



โครงการเขื่อนกิ่วคอหมา จ.ลำปาง
การวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

EQUIPOTENTIAL LINES
กรณีมีการอัดฉีดน้ำปูนและท่อระบาย



โครงการเขื่อนกิ่วคอหมา จ.ลำปาง
การวิเคราะห์การไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

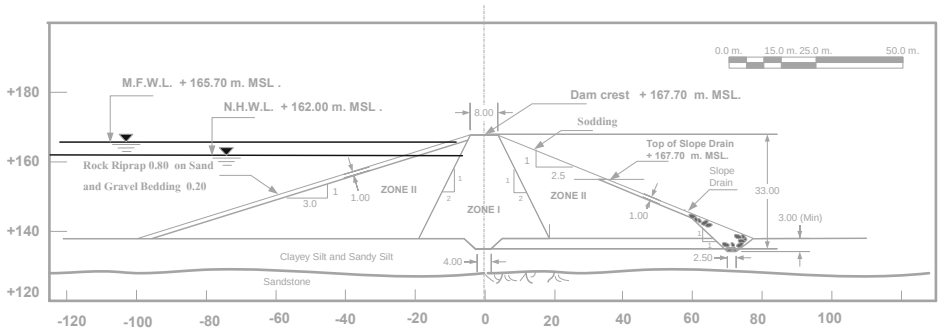
ผลการวิเคราะห์เขื่อนกิ่วคอหมา

Case No.	Conditions	Total Flow $Qx10^{-5}$ cu.m./m./sec.	Quantity of Flow in								Max. Gradient ,i(max.)		Velocity V(max.)
			Foundation		Embankment		Pipe drain		H. Filter				
			$x 10^{-5}$ cms.	(%)	$x 10^{-5}$ cms.	(%)	$x 10^{-5}$ cms.	(%)	$x 10^{-5}$ cms.	(%)	Core trench	D/S Toe Slope	$x 10^{-6}$ m/sec.
1	ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนในฐานราก	1.750	1.645	94.00	0.105	6.00	-	-	0.465	26.57	3.224	0.373	2.41
2	มีการอัดฉีดน้ำปูนในฐานราก	1.598	1.483	92.80	0.115	7.20	-	-	0.468	29.29	0.862	0.567	2.14
3	มีการอัดฉีดน้ำปูนในฐานรากและท่อระบายน้ำ	2.270	2.164	95.33	0.106	4.67	1.951	85.95	0.036	1.59	1.086	0.036	3.73

กรณีเขื่อนลำปาว

1. สรุปสภาพเขื่อน

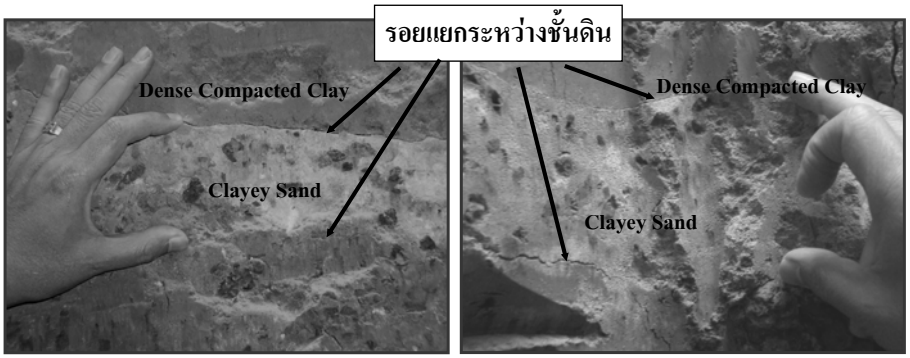
จากการพิจารณาข้อมูลและการวิเคราะห์เบื้องต้น สามารถสรุปสภาพเขื่อนได้ดังนี้



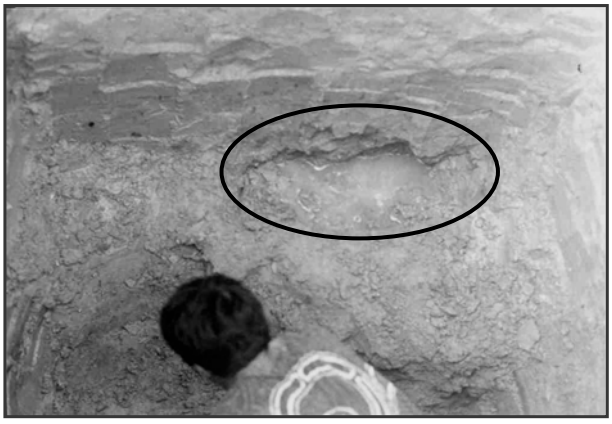
หน้าตัดเขื่อนโดยทั่วไปของแบบเขื่อนลำปาว

- **การไหลซึมและพื้นที่ชุ่มน้ำในบางบริเวณทางลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำของตัวเขื่อนลำปาว**

เนื้อเขื่อนประกอบด้วยดินบดอัด ในกลุ่มดิน SM CL และ SC สลับชั้นกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ตามชั้นของการบดอัดซึ่งแสดงว่าได้มีการนำวัสดุก่อสร้างมาจากหลายแหล่งที่แตกต่างกัน

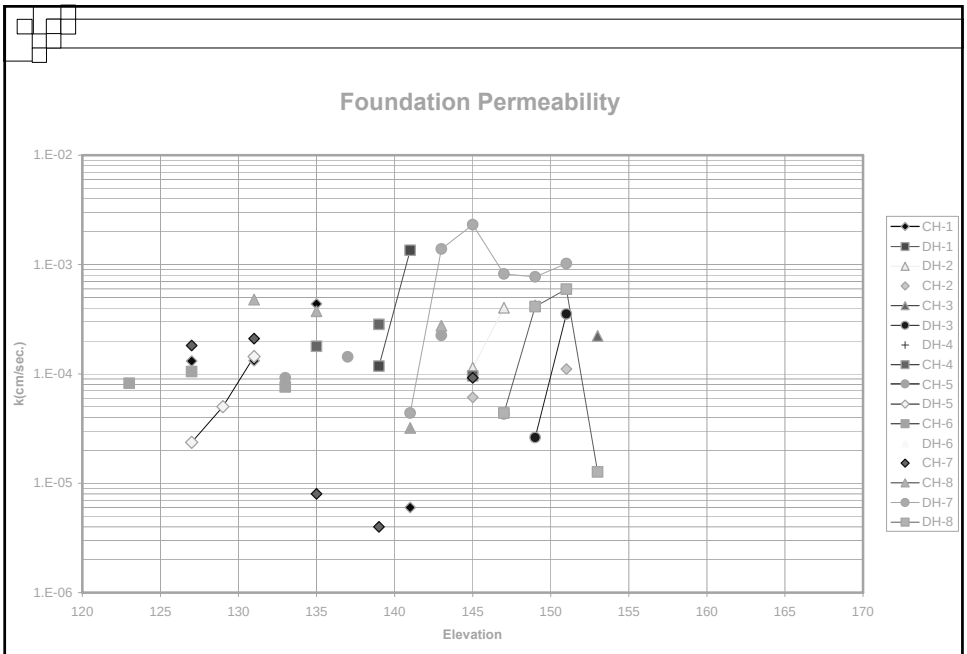


ชั้นดินตัวเขื่อนที่มีค่าความซึมน้ำค่อนข้างสูง (SM) มีความชุ่มน้ำมากกว่าชั้นอื่นๆ และคาดว่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดพื้นที่ชุ่มน้ำในบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ถ้าหากชั้นดินดังกล่าวมีความต่อเนื่องตามความกว้างของหน้าตัดเขื่อน



ความลึก	หลุมเจาะ และ STA.															
	CH-1	DH-1	DH-2	CH-2	CH-3	DH-3	DH-4	CH-4	CH-5	DH-5	CH-6	DH-6	CH-7	CH-8	DH-7	DH-8
ม.รทก.	500	644.55	1060	2000	3200	3500	4750	5600	5900	5992	6100	6365	6500	6750	6870	7312
167																
165																
163																
161																
159																
157																
155																
153					2.23E-04											1.27E-05
151				1.11E-04		3.53E-04									1.02E-03	5.96E-04
149					4.22E-04	2.62E-05									7.71E-04	4.13E-04
147			4.03E-04						4.30E-05						8.20E-04	4.39E-05
145			1.14E-04	6.10E-05				9.60E-05					9.20E-05		2.32E-03	
143									2.25E-04					2.76E-04	1.39E-03	
141	6.00E-06	1.35E-03										3.21E-05			4.39E-05	
139		1.18E-04						2.84E-04					4.00E-06			
137									1.43E-04							
135	4.37E-04							1.79E-04					8.00E-06	3.74E-04		
133									9.20E-05		7.60E-05					
131	1.32E-04									1.44E-04			2.10E-04	4.78E-04		
129										5.02E-05						
127	1.31E-04									2.37E-05	1.05E-04		1.82E-04			
125																
123											8.20E-05					
121																
119											7.00E-06					

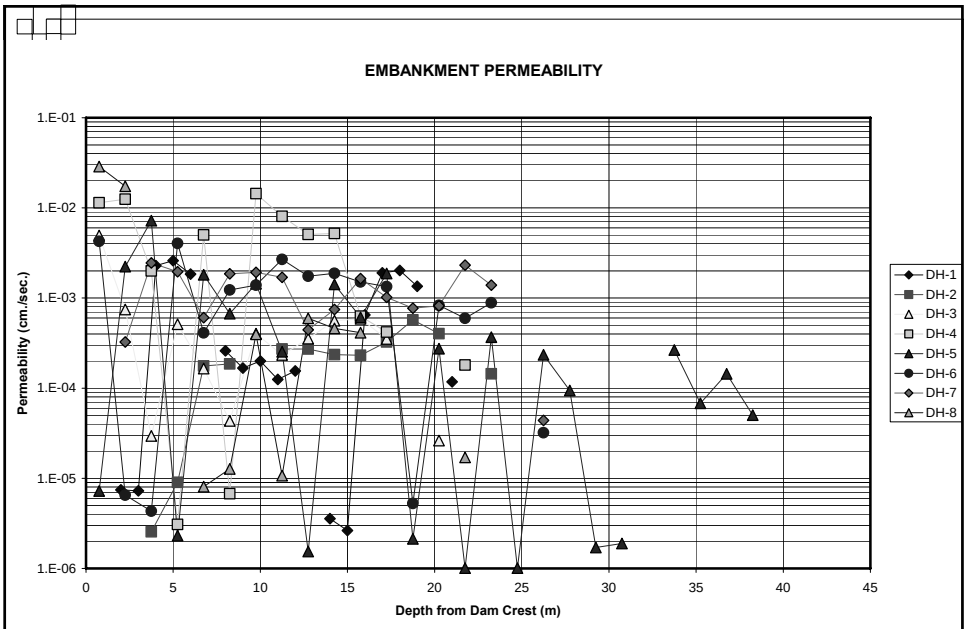
ค่าการรั่วซึมของหินฐานราก (หินทราย)



ผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของหินฐานราก

ตารางค่าการรั่วซึมของตัวเขื่อน

ความลึก	ลึกจากสัน	หลุมเจาะ และ STA							
	167.8	DH-1	DH-2	DH-3	DH-4	DH-5	DH-6	DH-7	DH-8
ม.รทก	(ม.)	644.55	1060	3500	4750	5992	6365	6870	7312
167.05	0.75	0	0	4.94E-03	1.14E-02	7.23E-06	4.26E-03	0	2.87E-02
165.55	2.25	7.44E-06	0	7.45E-04	1.25E-02	2.23E-03	6.51E-06	3.25E-04	1.74E-02
164.05	3.75	7.25E-06	2.55E-06	2.95E-05	2.00E-03	7.21E-03	4.32E-06	2.45E-03	0
162.55	5.25	2.29E-03	9.01E-06	5.13E-04	3.08E-06	2.31E-06	4.03E-03	1.96E-03	0
161.05	6.75	2.60E-03	1.76E-04	1.65E-04	5.02E-03	1.81E-03	4.11E-04	6.07E-04	8.07E-06
159.55	8.25	1.84E-03	1.86E-04	4.33E-05	6.76E-06	6.70E-04	1.23E-03	1.86E-03	1.27E-05
158.05	9.75	0	0	4.02E-04	1.44E-02	1.44E-03	1.39E-03	1.93E-03	3.96E-04
156.55	11.25	2.60E-04	2.72E-04	2.34E-04	8.07E-03	2.54E-04	2.68E-03	1.70E-03	1.07E-05
155.05	12.75	1.67E-04	2.72E-04	3.54E-04	5.07E-03	1.54E-06	1.75E-03	4.44E-04	5.96E-04
153.55	14.25	2.00E-04	2.36E-04	5.61E-04	5.20E-03	1.42E-03	1.88E-03	7.45E-04	4.60E-04
152.05	15.75	1.25E-04	2.32E-04	5.89E-04	6.29E-04	6.12E-04	1.51E-03	1.64E-03	4.13E-04
150.55	17.25	1.55E-04	3.25E-04	3.52E-04	4.19E-04	1.87E-03	1.34E-03	1.02E-03	
149.05	18.75	0	5.73E-04			2.13E-06	5.25E-06	7.71E-04	
147.55	20.25	3.56E-06	4.03E-04	2.62E-05		2.74E-04	8.29E-04	8.20E-04	
146.05	21.75	2.64E-06			1.81E-04	1.01E-06	5.97E-04	2.32E-03	1.71E-05
144.55	23.25	6.50E-04	1.44E-04			3.68E-04	8.87E-04	1.39E-03	
143.05	24.75	1.90E-03				1.01E-06			
141.55	26.25	2.02E-03				2.35E-04	3.21E-05	4.39E-05	
140.05	27.75	1.35E-03				9.44E-05			
138.55	29.25					1.71E-06			
137.05	30.75	1.18E-04				1.89E-06			
135.55	32.25					0.00E+00			
134.05	33.75					2.65E-04			
132.55	35.25					6.81E-05			
131.05	36.75					1.44E-04			
129.55	38.25					5.02E-05			
128.05	39.75								
126.55	41.25								
125.05	42.75								
123.55	44.25								
122.05	45.75								
120.55	47.25								
average		6.44E-04	1.92E-04	8.93E-03	5.39E-03	7.32E-04	1.43E-03	1.25E-03	



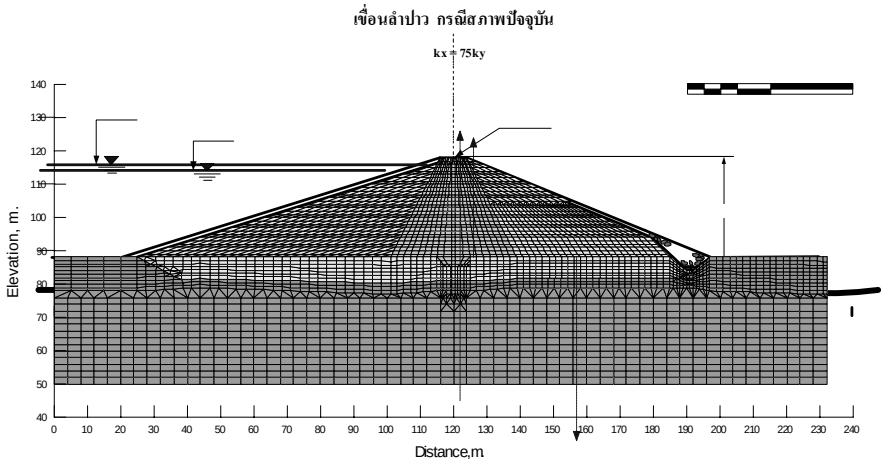
ผลการวิเคราะห์การรั่วซึมของดินตัวเขื่อนเดิม

Seepage Analysis

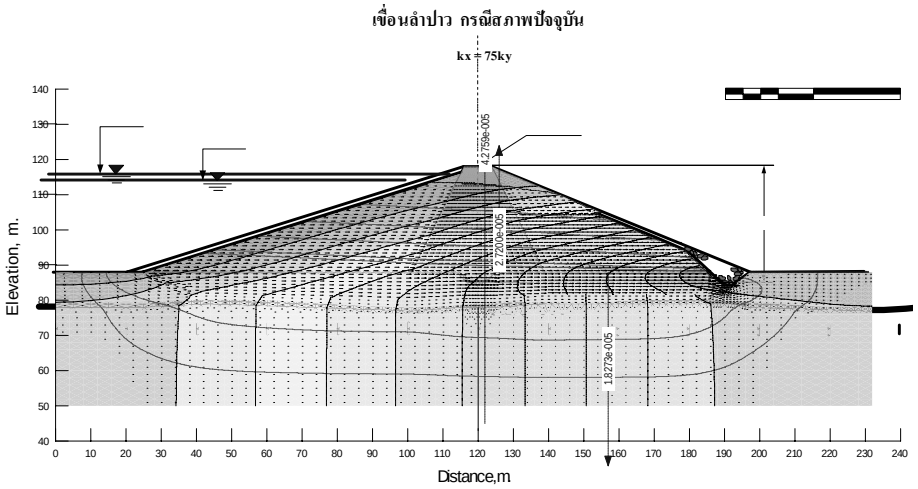
Material Properties

ส่วนต่างๆ ของเขื่อน	ค่าความซึมน้ำ kx, (cm/s)	อัตราส่วนความซึมน้ำ (kx:ky)
Rock Foundation	2×10^{-4}	10
Soil Foundation	5×10^{-4}	10
Core Zone (ZoneI)	7×10^{-4}	75
Random Zone (Zone2)	7×10^{-4}	75
Filter	1×10^{-2}	1
Rock Toe Drain	1×10^{-2}	1
Plastic Concrete (Slurry Wall)	1×10^{-6}	1

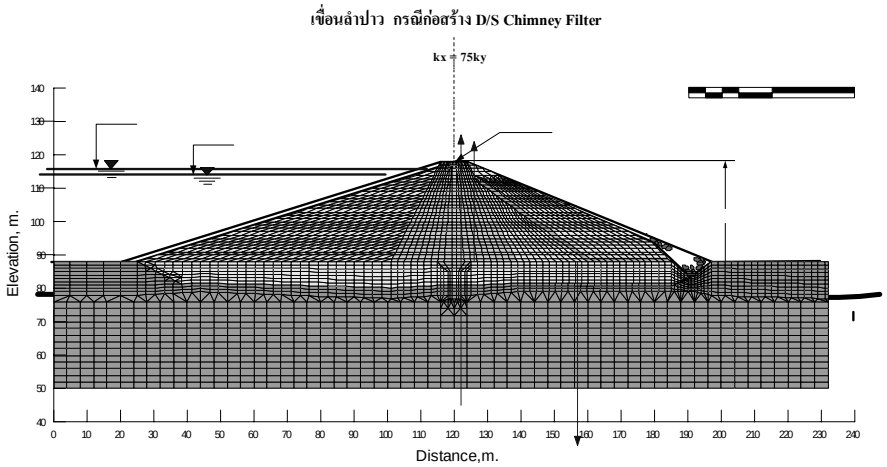
ตาข่ายการไหล กรณีเขื่อนปัจจุบัน



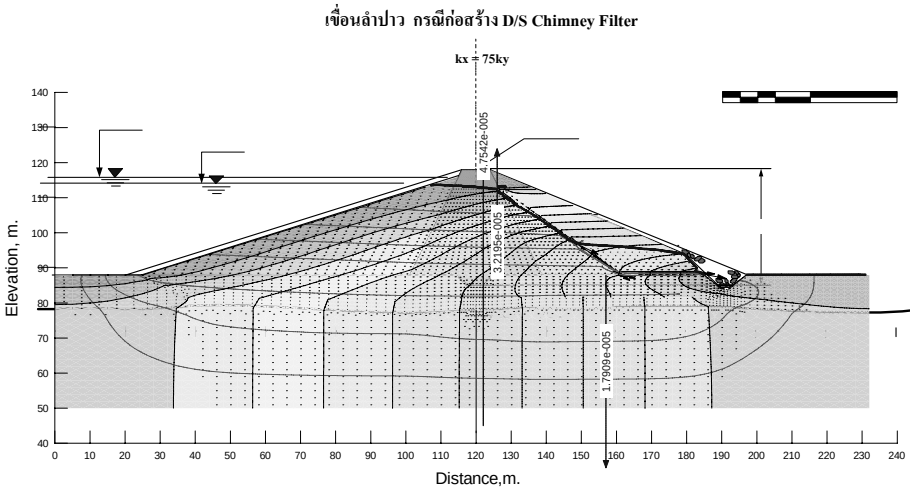
ผลการวิเคราะห์ กรณีเขื่อนปัจจุบัน



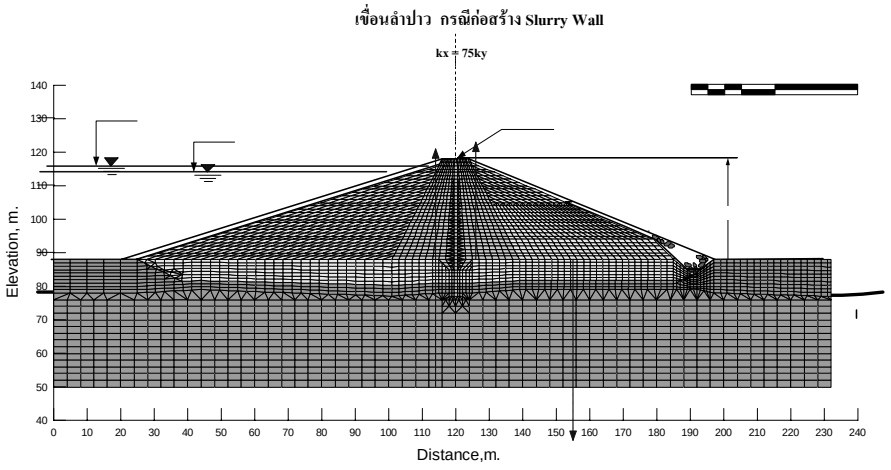
ตาข่ายการไหล กรณี Internal Drain



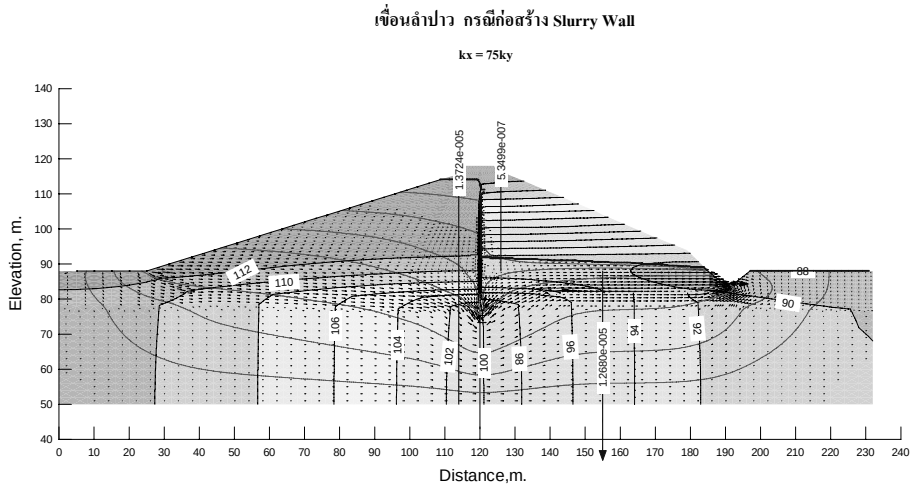
ผลการวิเคราะห์ กรณี Internal Drain



ตาข่ายการไหล กรณี Concrete Cut-off Wall



ผลการวิเคราะห์ กรณี Concrete Cut-off Wall



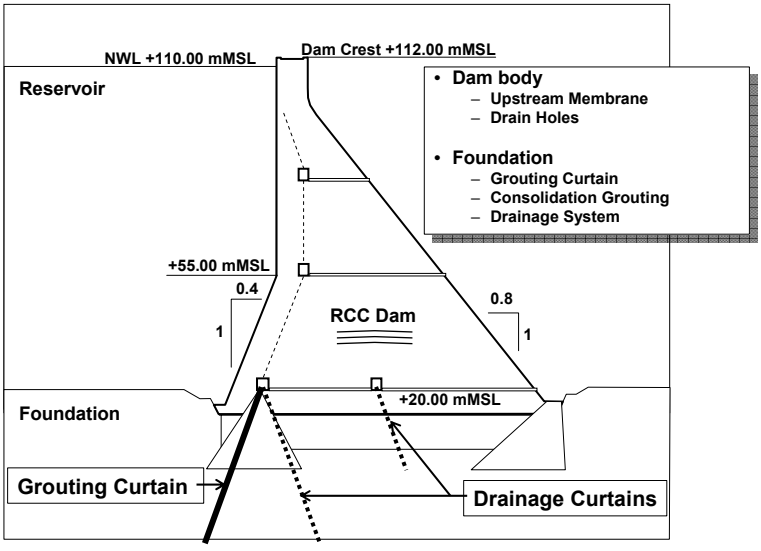
Seepage Analysis

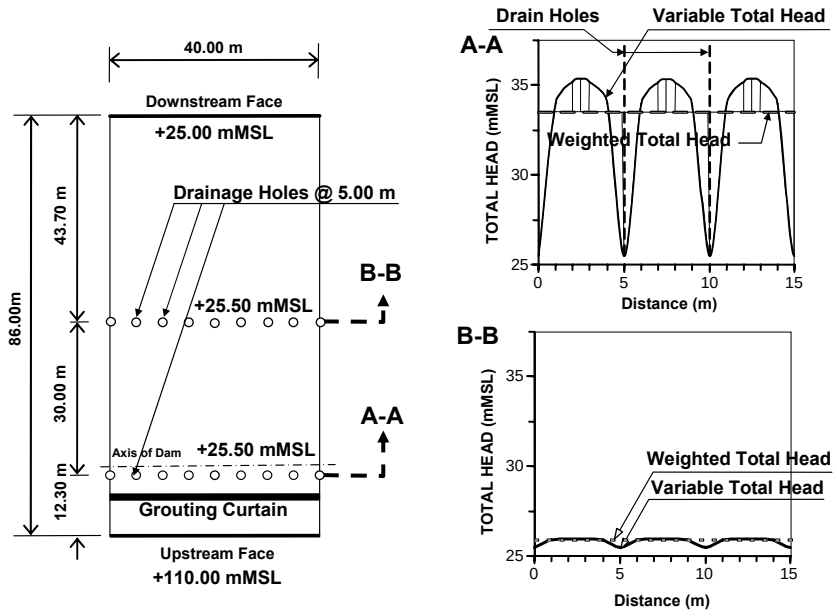
ผลการวิเคราะห์

กรณีที่	สภาพตัวเขื่อนและการแก้ไข	ปริมาณน้ำไหลซึม(ลบ.ม./ว./ม.)			ระดับผิวน้ำในตัวเขื่อนด้านท้ายน้ำ	ความเร็วการไหลซึมด้านท้ายน้ำ
		รวมทั้งหน้าตัด	เฉพาะตัวเขื่อน	เฉพาะฐานราก	(ม. จากฐานราก)	(ม. / วินาที)
1	สภาพตัวเขื่อนปัจจุบัน	4.28E-05	2.72E-05	1.56E-05	22	8.67E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	100.0%	100.0%	100.0%		
2	ปรับปรุงด้วยการก่อสร้าง Internal Drain(D/S Filter)	4.75E-05	3.22E-05	1.53E-05	6	8.71E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	111.0%	118.4%	98.1%		
3	ปรับปรุงด้วยการก่อสร้าง Cut-off Wall (Slurry Wall)	1.37E-05	5.35E-07	1.32E-05	1	6.36E-07
	เปรียบเทียบกับปัจจุบัน	32.0%	1.7%	86.0%		

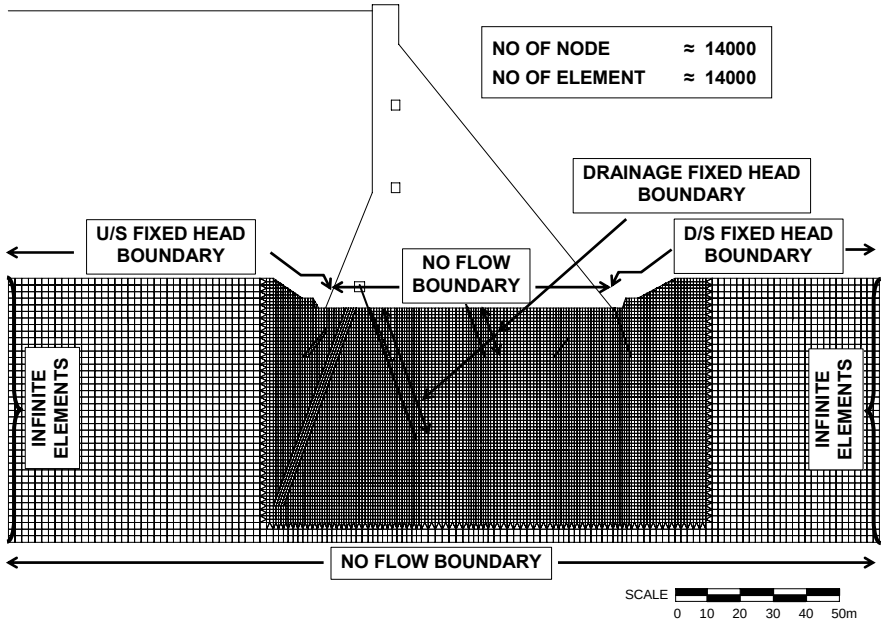
กรณีเขื่อนขุนด่านปราการชล (เขื่อนคลองท่าด่าน)

หน้าตัดเขื่อนคลองท่าด่าน



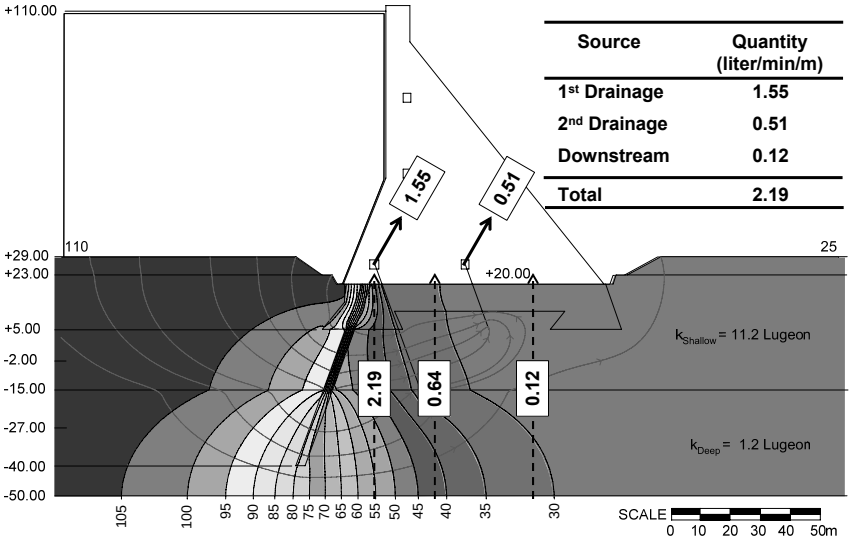


แบบจำลองแนวระนาบ



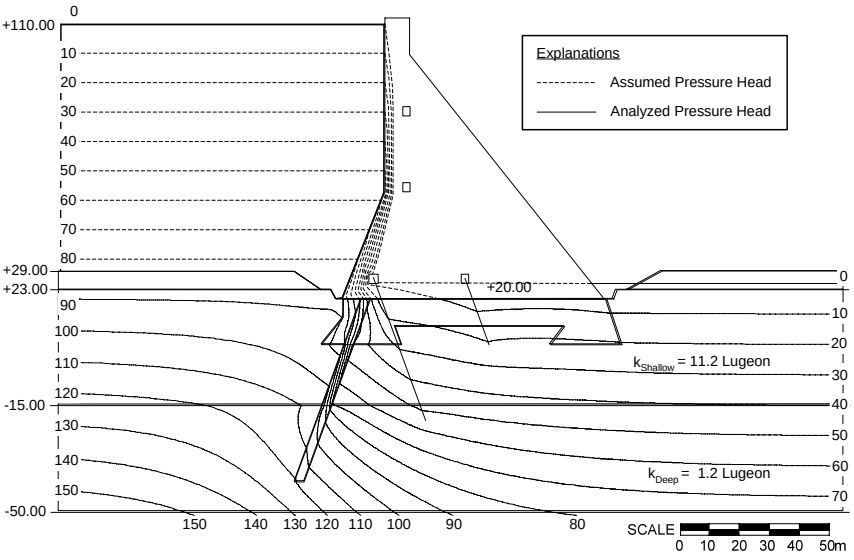
แบบจำลองแนวหน้าตัด 2 มิติ

Equipotential Line และ Flow Path ในกรณีปกติ

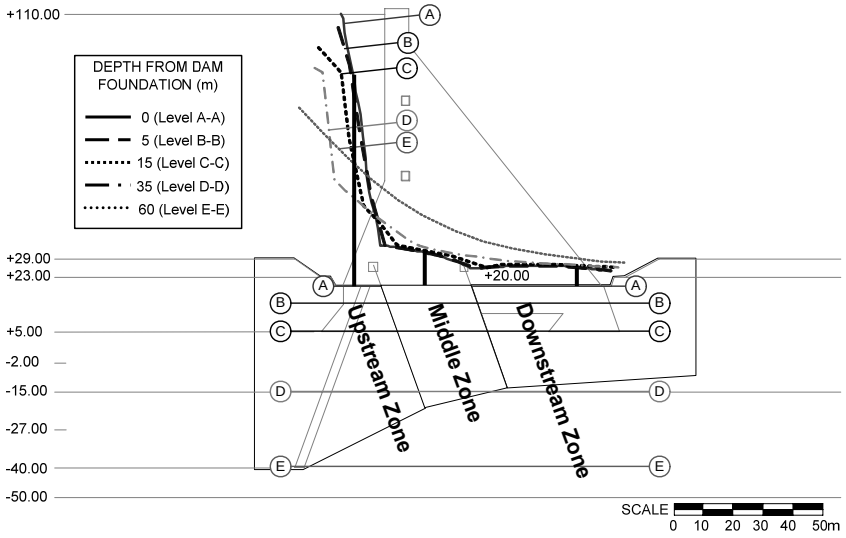


Source	Quantity (liter/min/m)
1st Drainage	1.55
2nd Drainage	0.51
Downstream	0.12
Total	2.19

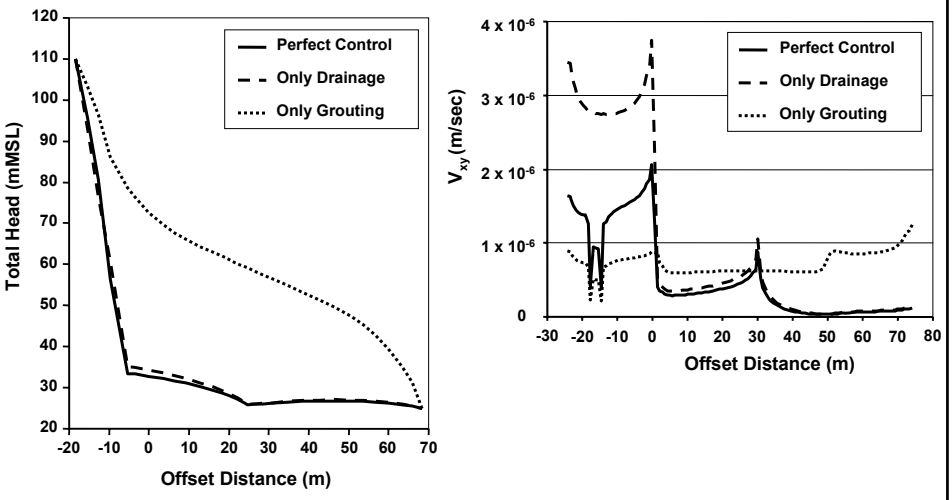
ศักย์ความดัน



แรงดันลอยตัว

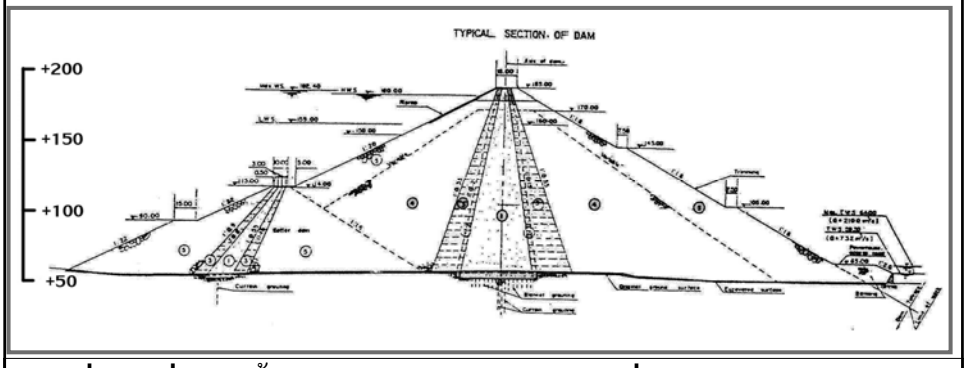


กลไหลการควบคุมการไหลซึม



กรณีเขื่อนศรีนครินทร์

เขื่อนศรีนครินทร์



ชนิดเขื่อน : เขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว	**ระดับสันเขื่อน : +185.00 ม.รทก.**
ธรณีวิทยา : Quarzite, Sandstone, Limestone	**ระดับเก็บกักปกติ : +180.00 ม.รทก.**
ความสูง : 140 เมตร	**ความจุอ่างที่ รนส. : 17,745 ล้าน ลบ.ม.**
ปริมาตรวัสดุถมตัวเขื่อน : 12 ล้าน ลบ.ม.	**พื้นที่รับน้ำ : 10,880 ตร.กม.**

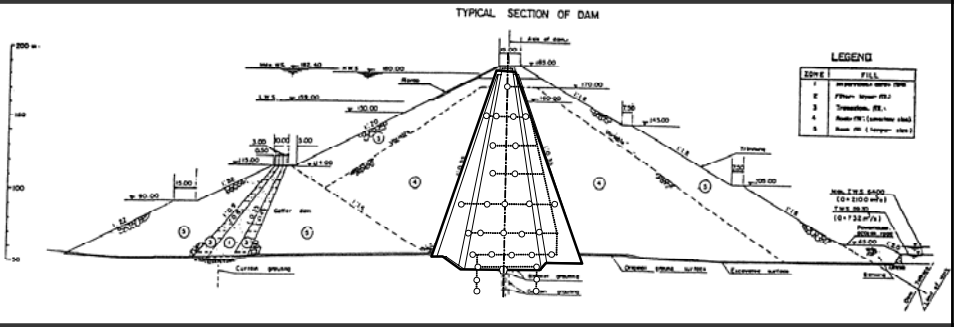
เครื่องมือวัดที่ได้ทำการวิเคราะห์

Deformation	Installed	Operating	Analysis
Crest Settlement	9	9	☐
D/S Slope Settlement	6	6	☐
Crest Displacement	8	8	☐
Inclinometer	3	3	

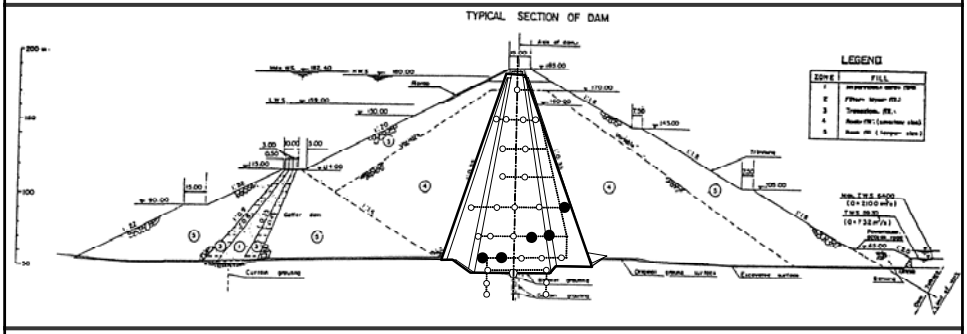
Seepage	Installed	Operating	Analysis
Piezometer	30	10	☐
Additional piezometer	12	3	☐
Observation well	24	23	
Seepage in gallery	10	10	

เครื่องมือวัดความดันน้ำ ภายในตัวเขื่อนและฐานราก

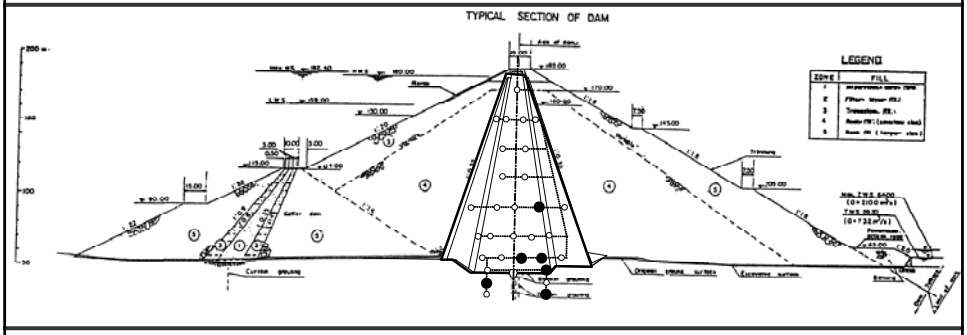
เมื่อวันที่ 3 ธันวาคม 2525



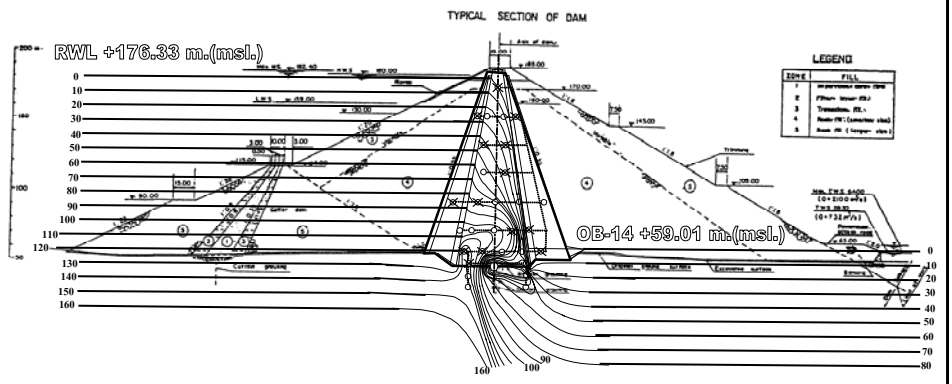
เครื่องมือวัดความดันน้ำ ภายในตัวเขื่อนและฐานราก
เมื่อวันที่ 6 มกราคม 2541



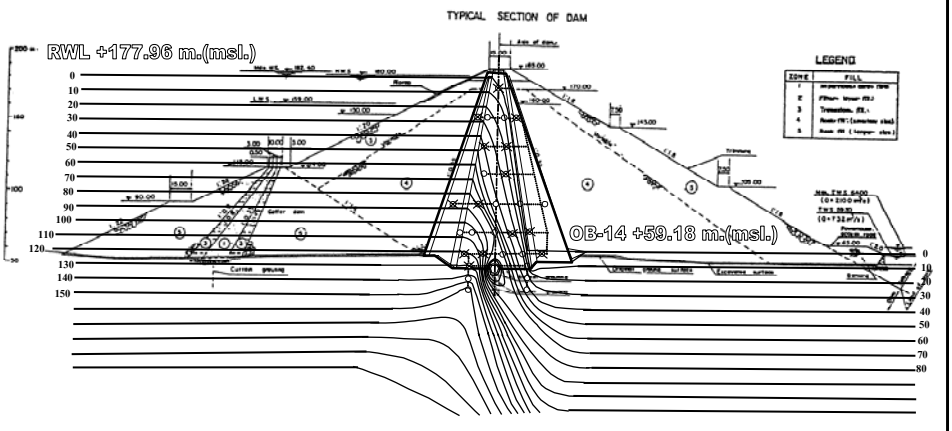
เครื่องมือวัดความดันน้ำ ภายในตัวเขื่อนและฐานราก
เมื่อวันที่ 24 ธันวาคม 2544



เส้นระดับความดันน้ำที่เท่ากัน ภายในตัวเขื่อนและฐานราก
เมื่อวันที่ 3 ธันวาคม 2525

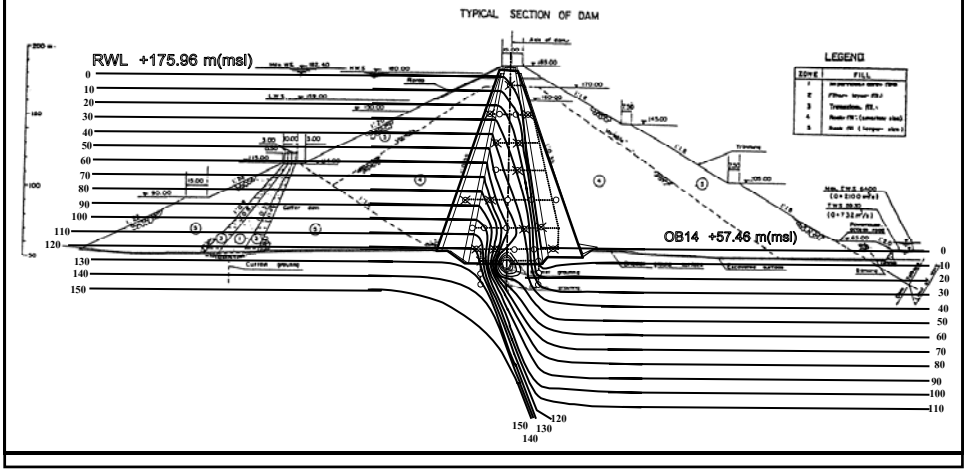


เส้นระดับความดันน้ำที่เท่ากัน ภายในตัวเขื่อนและฐานราก
เมื่อวันที่ 6 มกราคม 2541

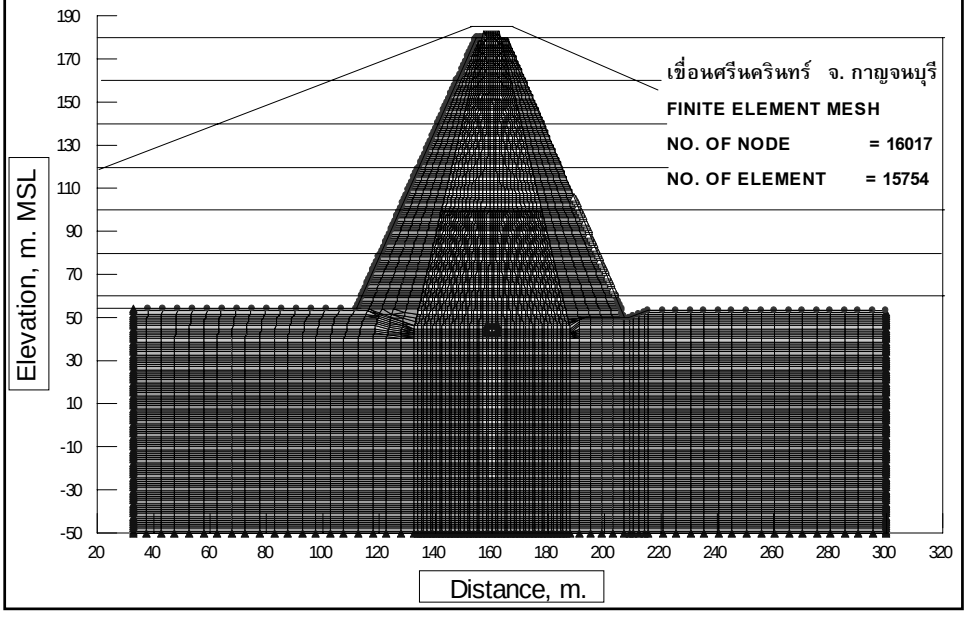


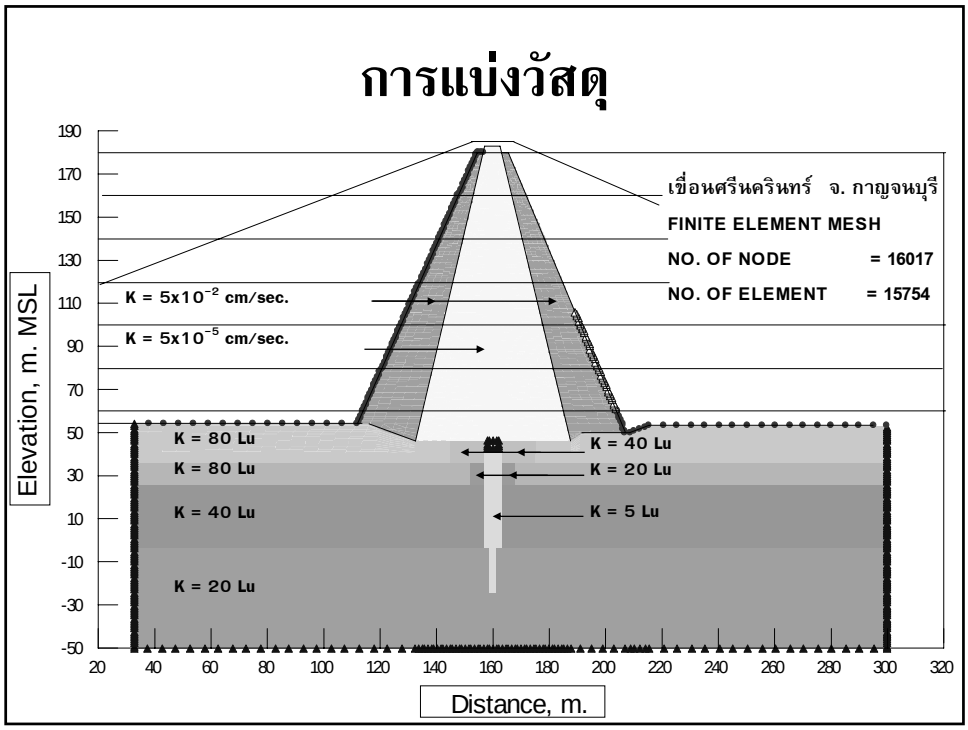
เส้นระดับความดันน้ำที่เท่ากัน ภายในตัวเขื่อนและฐานราก

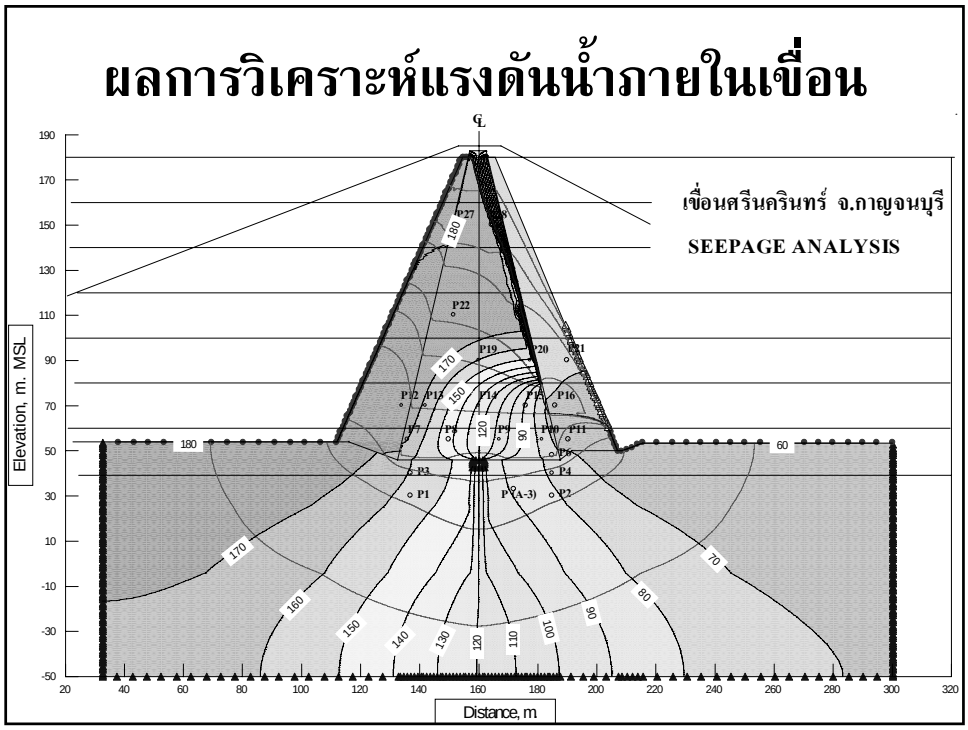
เมื่อวันที่ 24 ธันวาคม 2544

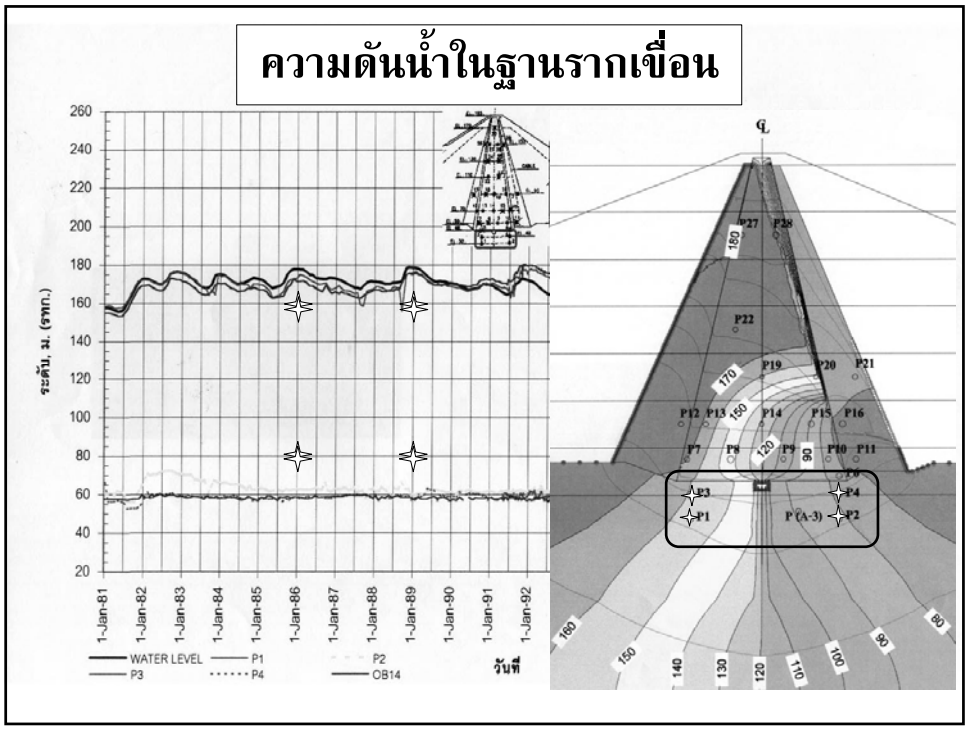


การแบ่งพื้นที่การไหลซึม




การแบ่งวัสดุ
เขื่อนศรีนครินทร์ จ. กาญจนบุรี
FINITE ELEMENT MESH
NO. OF NODE = 16017
NO. OF ELEMENT = 15754
K = 5x10-2 cm/sec.
K = 5x10-5 cm/sec.
K = 80 Lu
K = 80 Lu
K = 40 Lu
K = 20 Lu
K = 40 Lu
K = 20 Lu
K = 5 Lu
Elevation, m. MSL
Distance, m.


ผลการวิเคราะห์แรงดันน้ำภายในเขื่อน
เขื่อนศรีนครินทร์ จ.กาญจนบุรี
SEEPAGE ANALYSIS
Elevation, m. MSL
Distance, m



การตรวจวัดการไหลซึมในเขื่อน

การตรวจวัดความดันน้ำและปริมาณน้ำซึมผ่าน

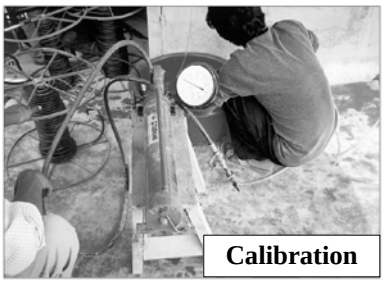
(Pore pressure and seepage monitoring)

Piezometer

Observation Well

Seepage Flow Meter

ELECTRIC VIBRATING WIRE PIEZOMETERS



Calibration

Installation

การกองเก็บสายระหว่างการบดอัดตัวเขื่อน

OBSERVATION WELLS

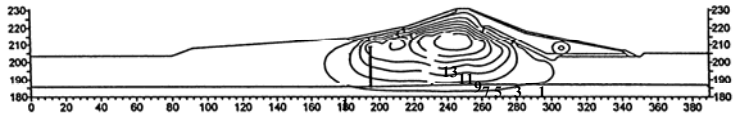
Installation

Dip Meter

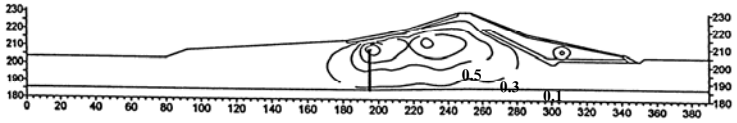
Reading

การกระจายความดันน้ำส่วนเกิน

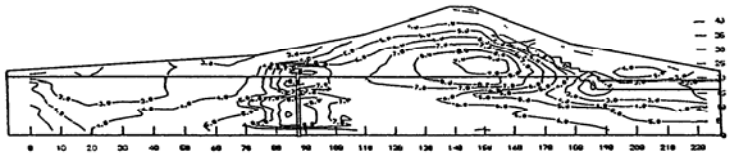
ก) ความดันน้ำส่วนเกินภายในเขื่อนมูลบน



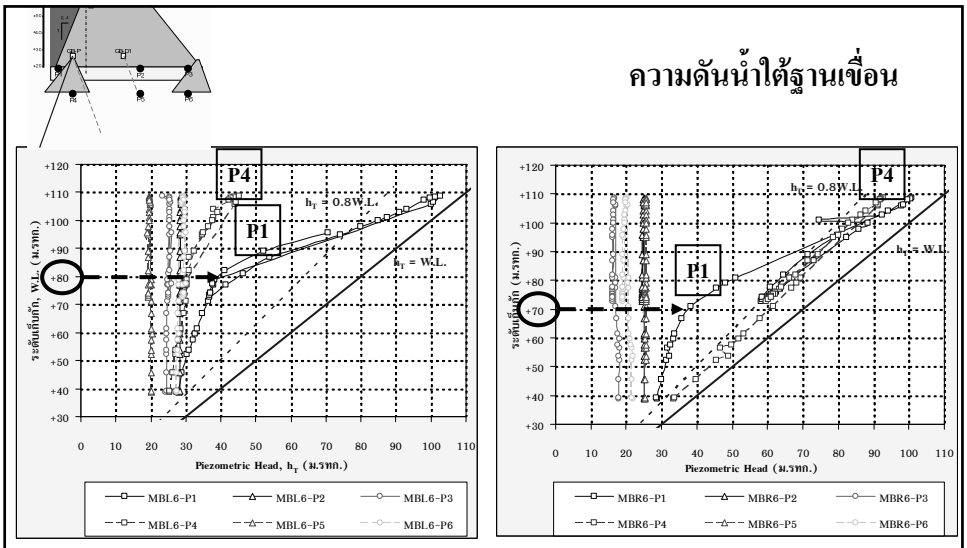
ข) อัตราส่วนความดันน้ำภายในเขื่อนมูลบน



ค) ความดันน้ำส่วนเกิน วิเคราะห์โดยโปรแกรม FEECON



ความดันน้ำใต้ฐานเขื่อน



MBL 6 MBR 6

- มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำชัดเจนที่ Upstream Zone เมื่อระดับน้ำในอ่าง > +70 mMSL
- จากหัววัด P4 พบว่า ประสิทธิภาพการปิดกั้นของม่านอัดฉีดน้ำปูน MBL6 ดีกว่า MBR6

แรงดันลอยตัวใต้ฐานเขื่อน

วันที่ 29 พฤศจิกายน 2548
ระดับน้ำในอ่าง + 108.7 mMSL

แรงดันลอยตัว

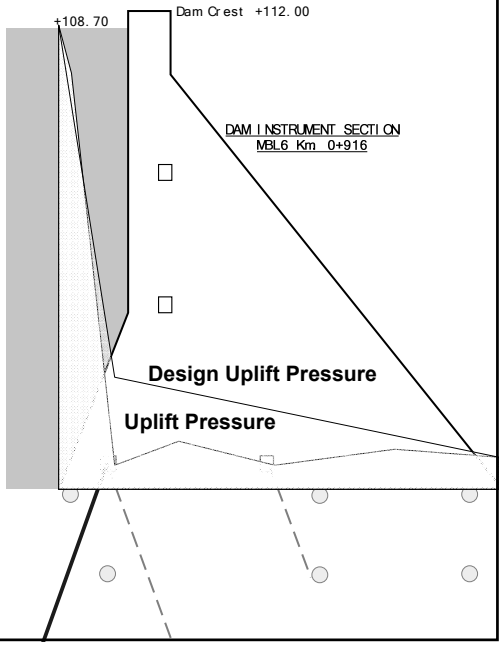
จากการตรวจวัด	จากการออกแบบ
1,068 ton/m	1,922 ton/m

FS against Sliding

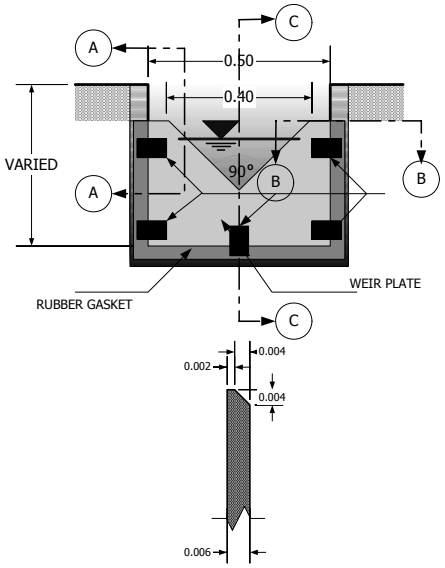
จากการตรวจวัด 3.2	จากการออกแบบ 3.0

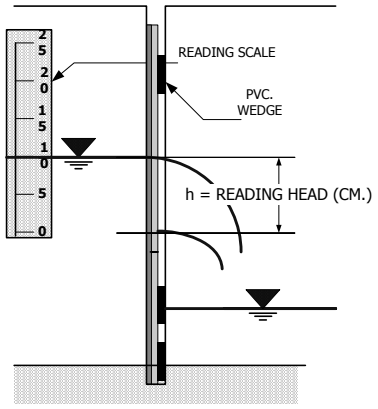
FS against Overturning

จากการตรวจวัด 2.3	จากการออกแบบ 1.9



V-NOCTH FLOW METER



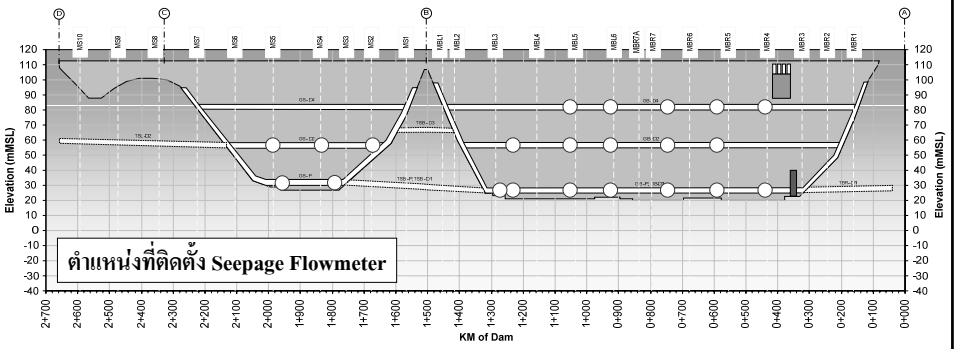


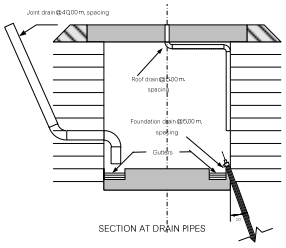
SECTION C-C

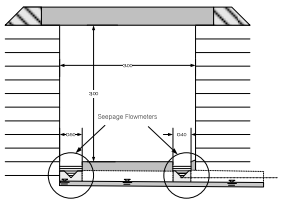
NOT TO SCALE

DAM INSTRUMENTS

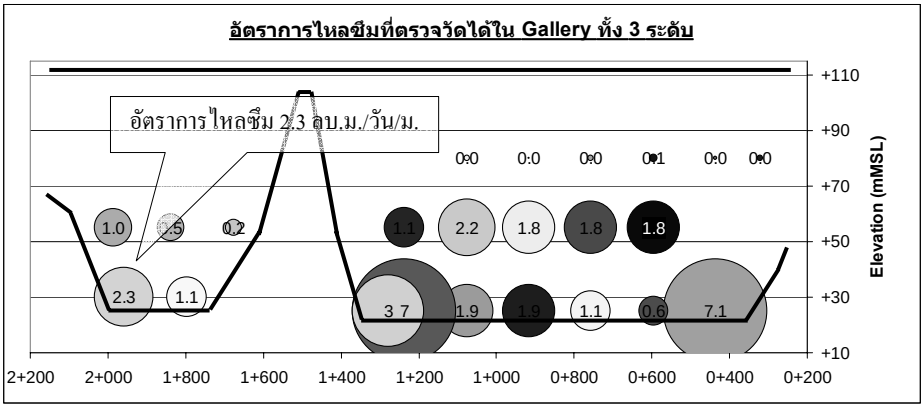
การไหลซึมผ่านตัวเขื่อนและฐานราก







อัตราการไหลซึมที่ได้จากการตรวจวัด Seepage Flowmeter

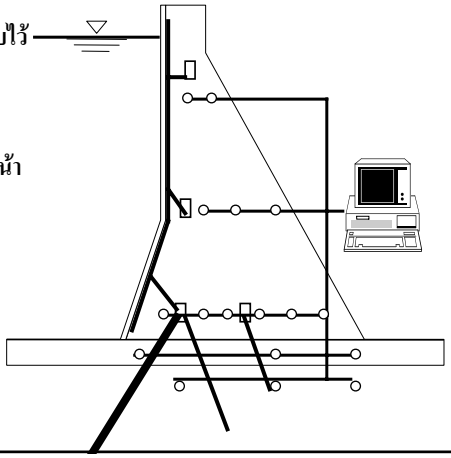


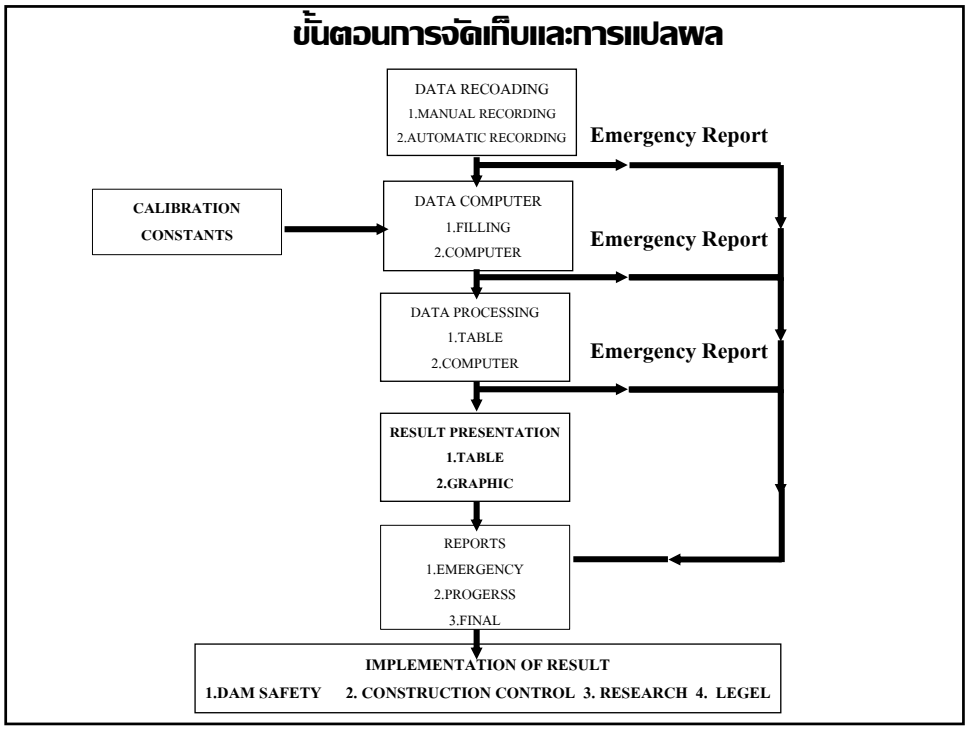
อัตราการไหลซึม (ลบ.ม./วัน/ม.) ณ ระดับเก็บกักน้ำ +102.8 ม.รทก.

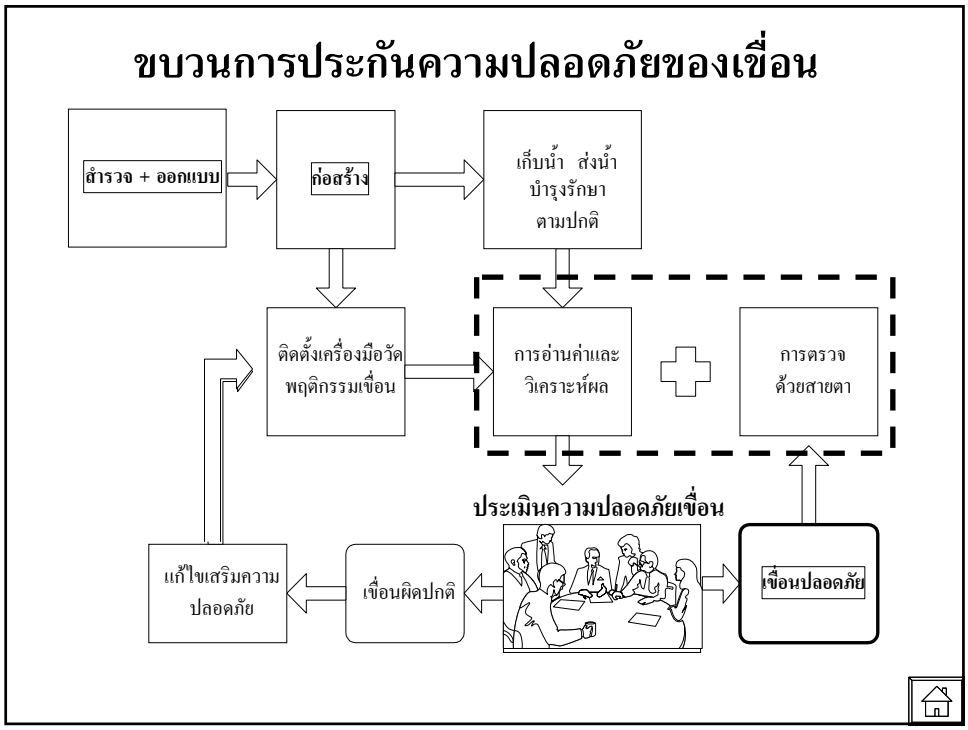
การตรวจวัดพฤติกรรมในงานเขื่อน

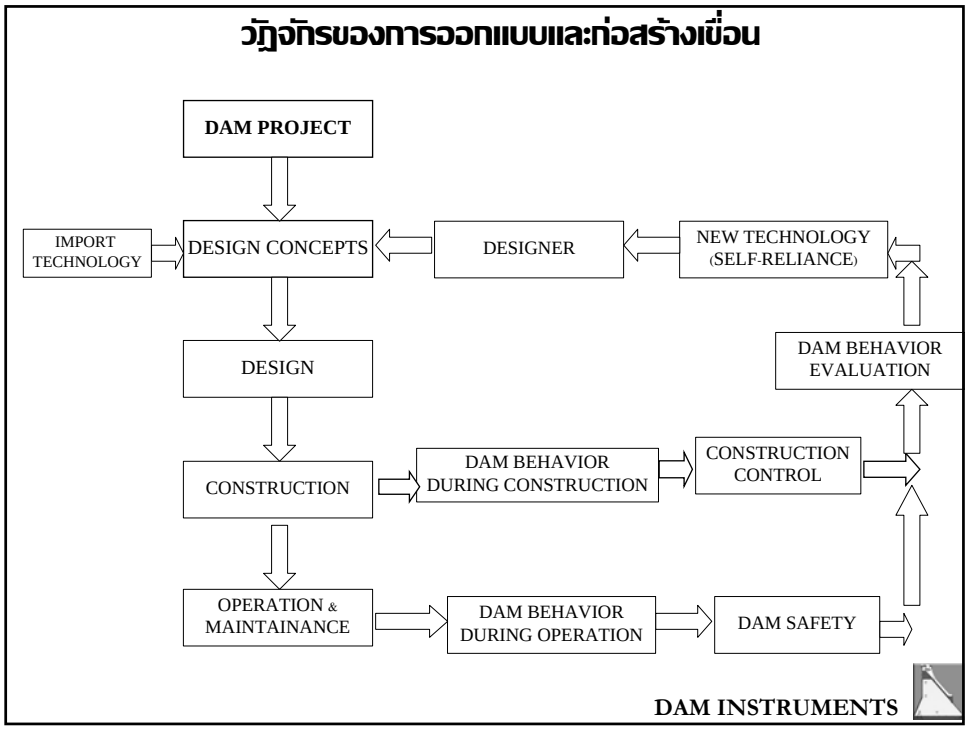
เขื่อนต้องมีการตรวจวัดพฤติกรรมตั้งแต่ในระหว่างการก่อสร้างจนใช้งานแล้ว 5-10 ปี

- ตรวจสอบพฤติกรรมจริงเปรียบเทียบกับที่ออกแบบไว้
- ช่วยประกอบการตัดสินใจปรับเปลี่ยนวิธีการให้เหมาะสมในระหว่างการก่อสร้าง
- ช่วยเตือนภัยเมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นให้ทราบล่วงหน้า
- ได้ข้อมูลที่มีค่าไว้สำหรับเขื่อนต่อไป
- สร้างความมั่นใจในระยะยาว




ขั้นตอนการจัดเก็บและการแปลผล
DATA RECOADING
1.MANUAL RECORDING
2.AUTOMATIC RECORDING
Emergency Report
CALIBRATION CONSTANTS
DATA COMPUTER
1.FILLING
2.COMPUTER
Emergency Report
DATA PROCESSING
1.TABLE
2.COMPUTER
Emergency Report
RESULT PRESENTATION
1.TABLE
2.GRAPHIC
REPORTS
1.EMERGENCY
2.PROGERSS
3.FINAL
IMPLEMENTATION OF RESULT
1.DAM SAFETY 2. CONSTRUCTION CONTROL 3. RESEARCH 4. LEGEL


ขบวนการประกันความปลอดภัยของเขื่อน
สำรวจ + ออกแบบ
ก่อสร้าง
เก็บน้ำ ส่งน้ำ
บำรุงรักษา
ตามปกติ
ติดตั้งเครื่องมือวัด
พฤติกรรมเขื่อน
การอ่านค่าและ
วิเคราะห์ผล
การตรวจ
ด้วยสายตา
ประเมินความปลอดภัยเขื่อน
แก้ไขเสริมความ
ปลอดภัย
เขื่อนผิดปกติ
เขื่อนปลอดภัย



บทสรุป

- การรั่วซึมเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดของการชำรุดเสียหายของเขื่อนในประเทศไทย
- แนวทางการออกแบบทำได้ 2 ลักษณะคือการปิดกั้นน้ำและการควบคุมการระบายน้ำ
- ข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบควบคุมการไหลซึมคือค่าความซึมน้ำ(k) ซึ่งต้องทดสอบในสนามสำหรับดินหรือหินฐานราก และทดสอบในห้องทดลองสำหรับดินบดอัดตัวเขื่อน
- การวิเคราะห์ออกแบบทำได้โดยการเขียน Flownet หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM แต่ต้องมีความเข้าใจพื้นฐานของทฤษฎีการไหลซึมของน้ำ
- การตรวจสอบพฤติกรรมจริงในสนามจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการยืนยันความถูกต้องของการออกแบบและก่อสร้าง ทั้งยังสามารถตรวจสอบความผิดปกติและเตือนภัยได้อีกด้วย

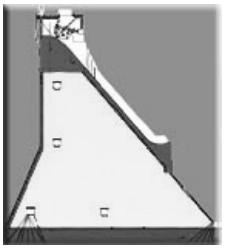
บทสรุป (ต่อ)

- **<u>เขื่อนห้วยบ้านพุ่ม</u>** จากการออกแบบเบื้องต้น พบว่าปริมาณน้ำที่ไหลซึมส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นฐานรากมากกว่าในตัวเขื่อนที่ทึบน้ำกว่า
- ในการออกแบบ **<u>เขื่อนกิ่วคอหมา</u>** การวิเคราะห์สามารถยืนยันได้ว่าการอัดฉีดน้ำปูนใต้ฐานรากเขื่อนมีความจำเป็น และการออกแบบท่อรับน้ำในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำได้ดี
- การวิเคราะห์การไหลซึมในฐานรากของ**<u>เขื่อนคลองท่าด่าน</u>** แสดงให้เห็นความสำคัญของการระบายน้ำผ่านรูระบายใต้ฐานเขื่อนเพื่อลดแรงดันลอยตัวที่กระทำต่อตัวเขื่อน

บทสรุป (ต่อ)

- **<u>เขื่อนศรีนครินทร์</u>**
  - Piezometer ที่ติดตั้งในตัวเขื่อนจะค่อย ๆเสื่อมสภาพไปตามเวลาในขณะนี้สามารถอ่านค่าได้ 33 % ของที่ติดตั้งทั้งหมด
  - ค่าความดันน้ำในตัวเขื่อนที่วัดด้วย Piezometers ที่สามารถอ่านค่าได้ ณ. หน้าตัดที่ลึกที่สุดแสดงค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite Element Method
  - ความดันที่อ่านได้ในฐานรากเขื่อนด้านเหนือน้ำก่อนถึงแนวอัดฉีดน้ำปูนแสดงค่าสูงใกล้เคียงกับน้ำในอ่างซึ่งสูงกว่าผลของ FEM และลดลงมากประมาณ 100 เมตรเมื่อผ่านแนวอัดฉีดน้ำปูน
  - ความดันทางด้านท้ายน้ำแสดงให้เห็นว่ามีการลดลงรวดเร็วจากอิทธิพลของชั้นระบายด้านท้ายน้ำซึ่งเป็นปกติ

จบการนำเสนอ



DAM SEEPAGE