



# 203552 Advanced Soil Mechanics

## Lecture No. 1

**Dr. Warakorn Mairaing**  
**Associate Professor**

**Civil Engineering Department**  
**Kasetsart University, Bangkok**  
**Tel: 02-579-2265**  
**Email: mairaing@yahoo.com**

1

## Outlines

1. 2-D Flow and Excess Pore Pressure
  - Two Dimensional Flow in Soil
  - Soil Permeability and Pore Pressure Monitoring
  - Pore Pressure Development
2. Soil Consolidation
  - Concepts of Consolidation
  - Terzaghi's theory of Consolidation
  - Settlement Analyses
3. Undrained Shear Strength
  - Flownet, Pressure Distribution and Seepage Force
  - Soil Permeability and Pore Pressure Monitoring
  - Pore Pressure Development

2

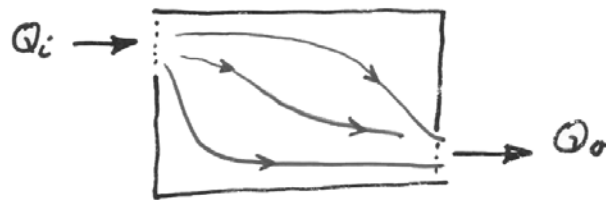
## 2-D and 3-D Flow in Soil Mass

Q1 : Why 2-D or 3-D Flows are needed?

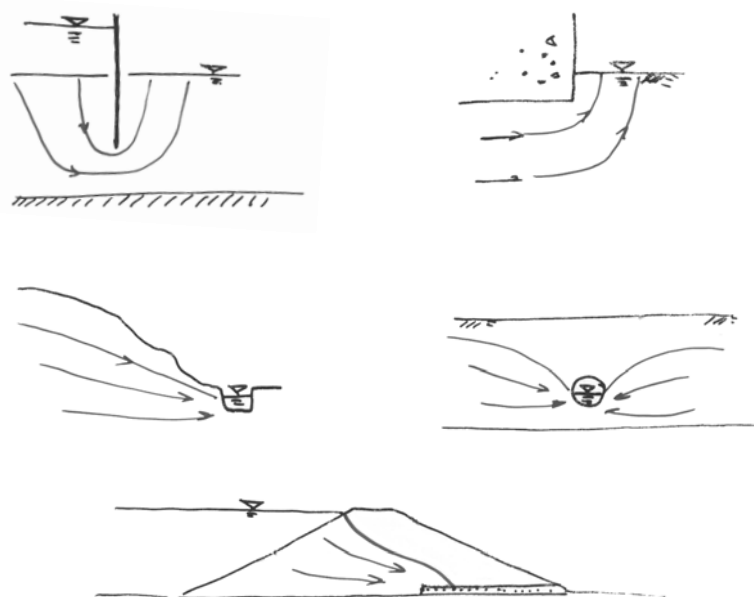
A1 : Whenever flow directions are not in 1-direction.

Q2 : Where 2-D or 3-D Flow should be applied?

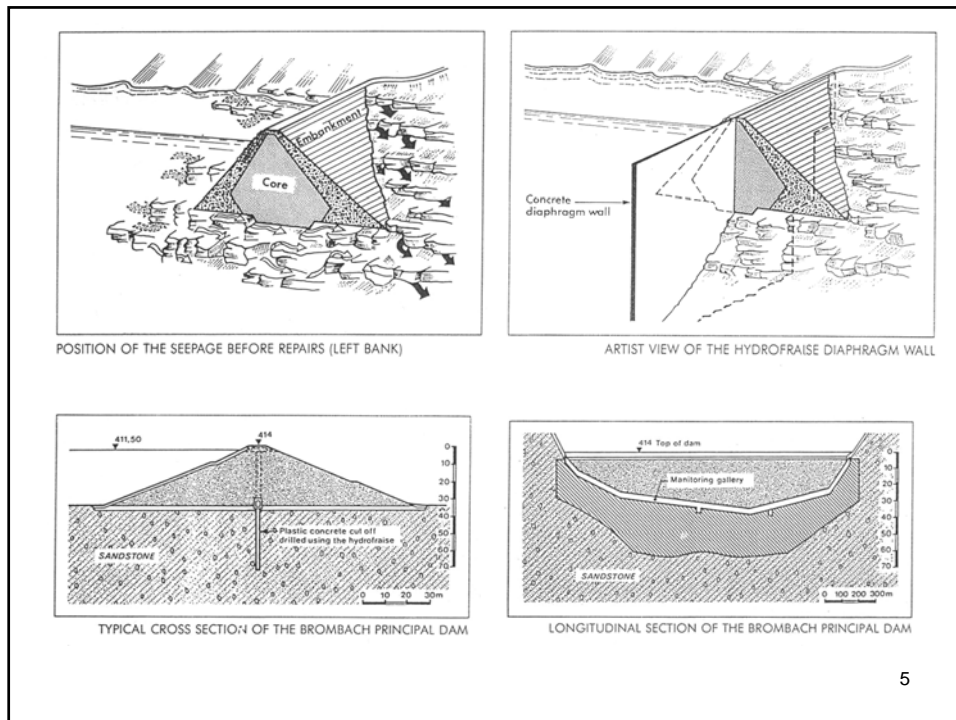
A2 : Most of the cases in ground water flow.



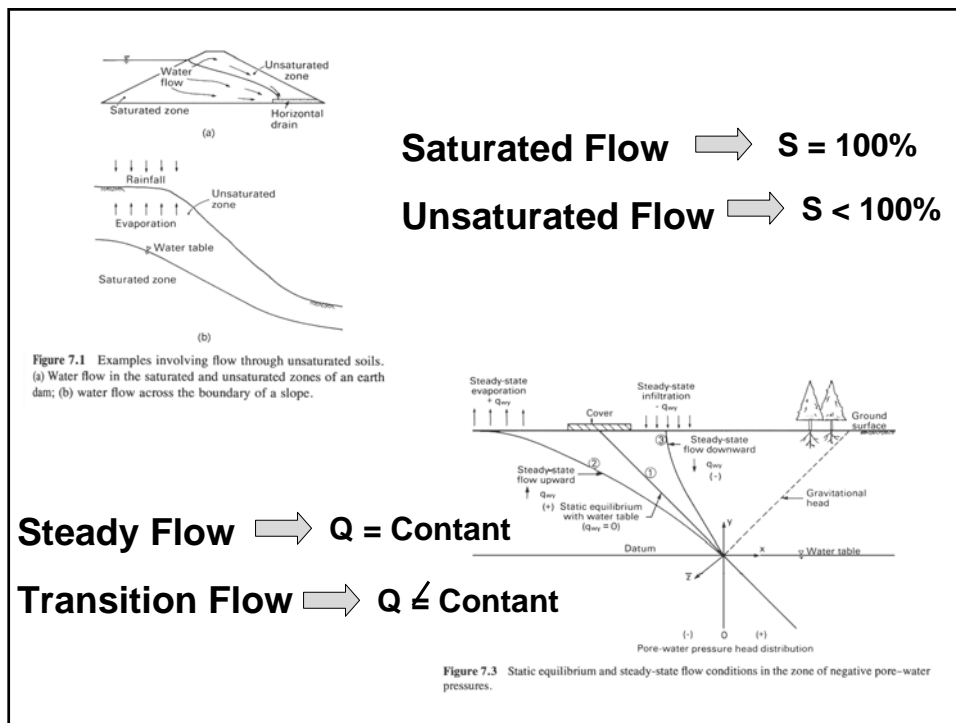
3



4



5



### Drainage, Dewatering

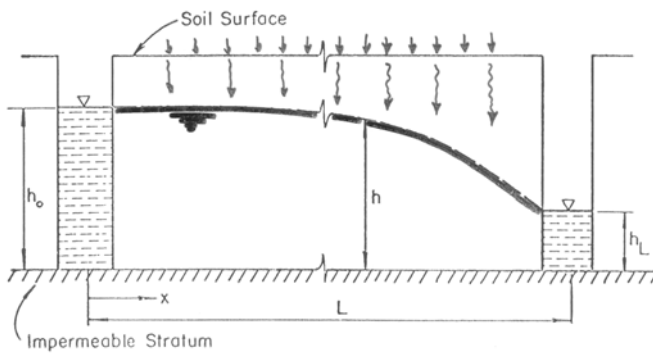


Figure 3-2. Steady flow between two parallel alluvial channels

### Dewatering, Land Subsidence

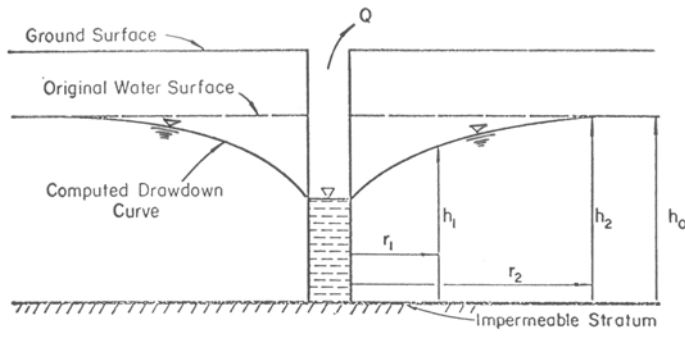
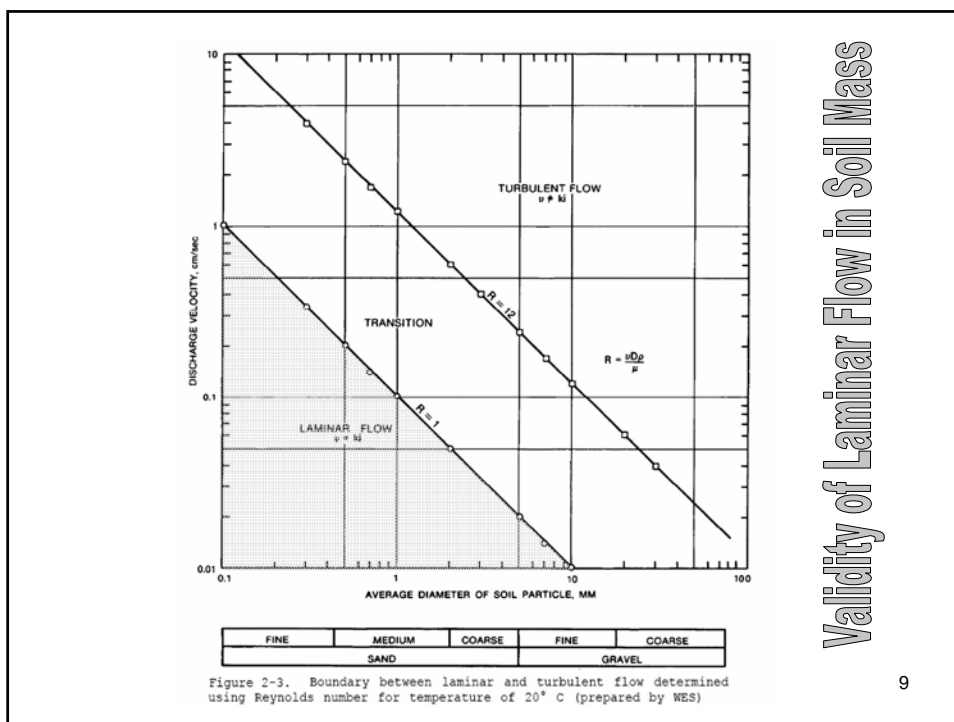



Figure 3-3. Steady radial flow toward a fully penetrating well in an unconfined aquifer

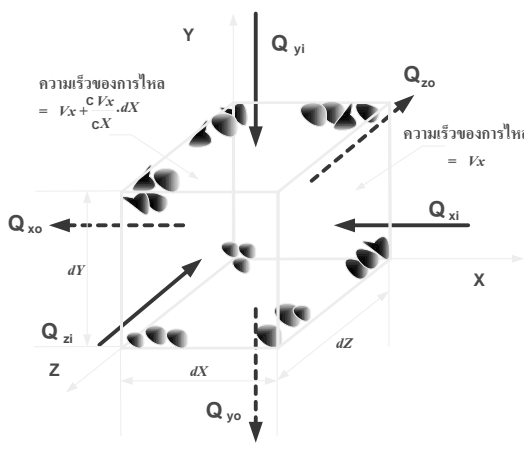


Validity of Laminar Flow in Soil Mass

9



## สมการพื้นฐานการไหลของน้ำผ่านดิน



ความเร็วของการไหล  
 $= v_x + \frac{c}{cX} \cdot dX$

ความเร็วของการไหล  
 $= v_x$

**Laplace's Equation สำหรับ 3-D**

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

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

ดินอิ่มตัวและการไหลคงที่

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

10

Flow-in,  $x$ -direction;  
 $Q_{xi} = v_x \cdot A = v_x \cdot dy \cdot dz$  — (1)

Flow-out;  
 $Q_{xo} = (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx) \cdot dy \cdot dz$  — (2)

Net  $Q_x = Q_{xi} - Q_{xo} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$  — (3)<sub>x</sub>

Net  $Q_y = -\frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$  — (3)<sub>y</sub>

Net  $Q_z = -\frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$  — (3)<sub>z</sub>

Total Net  $Q = \sum (Net\ Q_x + Net\ Q_y + Net\ Q_z) = \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) dx \cdot dy \cdot dz$  — (4)

From Darcy's law ( $v = ki$ )  
 $v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}$ ,  $v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y}$ ,  $v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z}$  — (5)

Subs (3) and (5) into (4)

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dx \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

$$\boxed{k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}}$$
 — (6)

Basic Laplace's Equation for 3-D Flow

11

## Steady State Flow (Flow in = Flow Out)

When  $Q_{in} = Q_{out}$  is usually occurred in saturated steady flow with no volume change soil mass.

Then  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$

Then Equation (6) become;

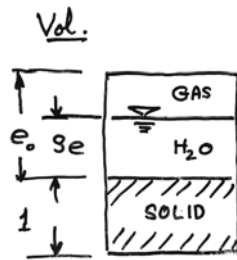
$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{---(7)}$$

12

### Unsteady State Flows (Flow in $\neq$ Flow out)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \neq 0$$

When  $\theta$  = Volume of water in unit volume of soil



$$\theta = \frac{S.e}{1+e_0} \quad \text{---(8)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{\partial (s.e)}{\partial \sigma (1+e_0)} \quad \text{---(9)}$$

13

Substitute in (6), then the general Laplace's Flow Equation is obtained

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_0} \left( e \cdot \frac{\partial S}{\partial t} + s \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad \text{---(10)}$$

Considering RHS-Term in Eq. (10), there are 4 possible cases

**Case 1** : Both S and e = const.  $\rightarrow$  Steady State Flow

**Case 2** : S = Const, E Varied  $\rightarrow$  Consolidation

**Case 3** : S varied, e = Const.  $\rightarrow$  Unsaturated flow

**Case 4** : S and e varied;  $\rightarrow$  Shrinkage and Capillary rising (lowering)

14

### Solutions to Laplace's Equation of flow in soil

Simplified Laplace's Equation for 2-D, Steady State flow.

Homogeneous and isotropic soil:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{---(11)}$$

The general solution can be written in function form of;

$$h(x,y) = A(x).B(y) \quad \text{---(12)}$$

We want to solve Eq. (11) for the total head ( $h$ ) at any coordinates  $x,y$  in flow boundary.

15

### Methods of Solving

1. Exact Solution or Direct Integration (out of date)
2. Numerical Methods
  - Finite Element Method (FEM)
  - Finite Different Method (FDM)
  - Relaxation Method, etc.
3. Electrical Analogy
4. Seepage Models → Sand Model, Viscous Model
5. Graphic Method → Flow net Sketch

16



## Outline of Exact Solution

See More Detail in Advanced Soil Mechanics by B.M. DAS (P102-120)

② *Advanced Soil Physics* by D. Kirkham.

From Equation (12)  $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$  Then

1. Assume solution  $h(x, y) = A(x) \cdot B(y)$  — (13)

2. Differentiate (13) with respect to  $x$  and  $y$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} &= A''(x) \cdot B(y) \\ \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} &= A(x) \cdot B''(y) \end{aligned} \right\} \text{ — (14)}$$

3. Substitute Eq. (14) into (12)

4. Establish boundary conditions for particular flow problems.

5. Solve differential equation in form of Fourier's Series

17

## Solution Form



- solutions 1) "Equipotential lines" where the potential (head) function is constant
- 2) "Flow lines" where flux or flow function is constant.

18

## 2-D v.s. 3-D Flows

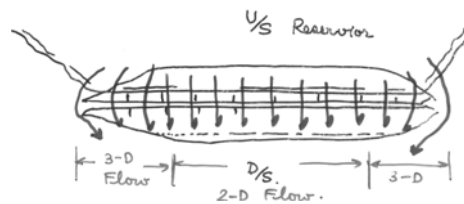
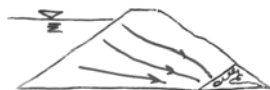
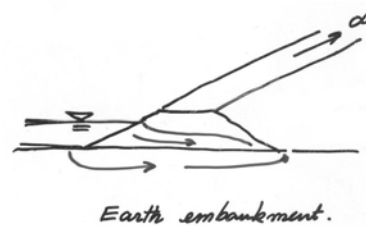
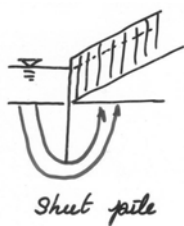
Normally engineers would like to simplified flow problems from 3-D to 2-D. When ever the problems can be accepted with the reasonable accuracy.

For 2-D Steady state flow;

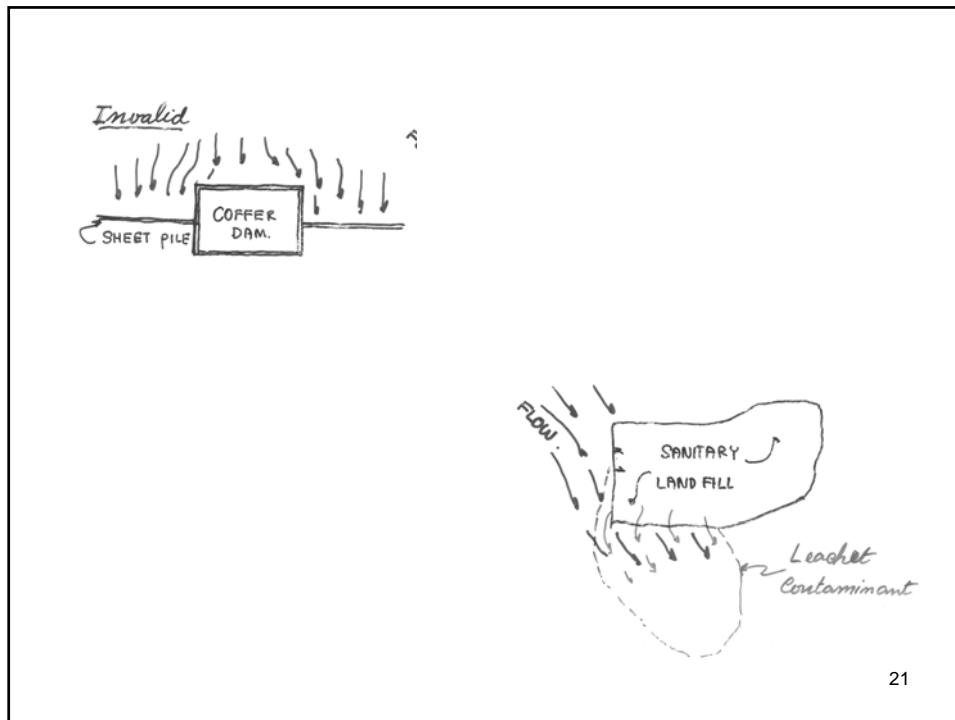
$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{---(15)}$$

19

## Validity of 2-D Flow Cases



20



21

### NUMERICAL METHODS

1. Finite Element Method (FEM) ← most popular
2. Finite Difference Method (FDM)
3. Relaxation Method. ← Manual calculation

### Advantages

1. Suitable for complete flow model and boundaries
  - $k_x \neq k_y$  (Anisotropic)
  - $k$  varied within flow boundary
2. Faster compute time by using P.C.
3. Plotting capability → good presentation
4. Some program can work on unsaturated or non steady state flow.

22

General Procedures.

1. Subdivide flow boundary into finite elements.  
Generally  $\square$  or  $\nabla$  with corresponding to flow boundaries and critical area.
2. Establish flow boundaries eg.  
- flow in, flow out bound. - Impervious bound.  
- free surface -
3. Set up matrix from control equation (Laplace's)
4. Find solution  $h(x,y)$  by inversion of matrix

23

**Groundwater flow (2D) software**

- AqModel - Commercial - DOS, Win3x, Mac
- BOSS SEEP2D - Commercial - Win3x, Win95/98, WinNT, UNIX
- FastSEEP-2D - Commercial - Win3x, UNIX, IBM RS6000, Sun, SG, HP, DEC
- FEMWATER 2D - Public domain - DOS
- FESEEP for Windows - Commercial - Win95/98, WinNT ←
- FLONET - Commercial - DOS
- FlowCAD - Commercial - DOS
- FLOWPATH - Commercial - Win95/98, WinNT ←
- GEOFLOW - Commercial - DOS
- GWFLOW - Public domain - DOS
- MODFE - Public domain - DOS
- MSEEP - Commercial - DOS
- PAT - Commercial - DOS
- PercPlan - Commercial - DOS
- PLASM - Commercial - DOS
- QuickFlow - Commercial - DOS
- RADFLOW - Public domain - DOS
- SEEP - Commercial - DOS
- SEEP (Virginia) - Commercial - DOS
- SEEP-W - Commercial - Win3x ←
- SEEPS2D - Commercial - DOS
- SEEPU2D - Commercial - DOS
- SefCut - Commercial - Win3x
- SefWeir - Commercial - Win3x
- WinFlow - Commercial - Win3x

[Return to main index](#)

24

**AqModel**

**Category :** Groundwater flow (2D)

**Publisher :** WellWare

**Platform :** DOS, Win3x, Mac

**Status :** Commercial

**Description :** Analytical 2D uniform groundwater flow modelling in confined or unconfined aquifers. Simulates hydrological boundaries by the method of images. Models over 500 pumped/recharge wells, unlimited number of observation wells. Uses Thiem and Theis equations. Calculates drawdown, water level, streamlines, equipotentials. DOS and Windows versions require Surfer for output plotting. Mac version requires Transform or DeltaGraph Professional 2.0.

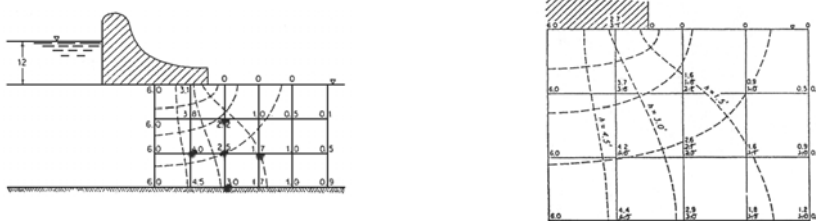
**Cost :** US Dollars 129

**Supplier in The Netherlands :** TerraWare

**Supplier in USA :** Rockware Inc

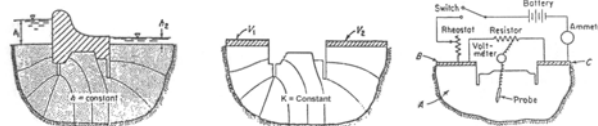
**Supplier in United Kingdom :** GeoMEM Software

[Return to category index](#)

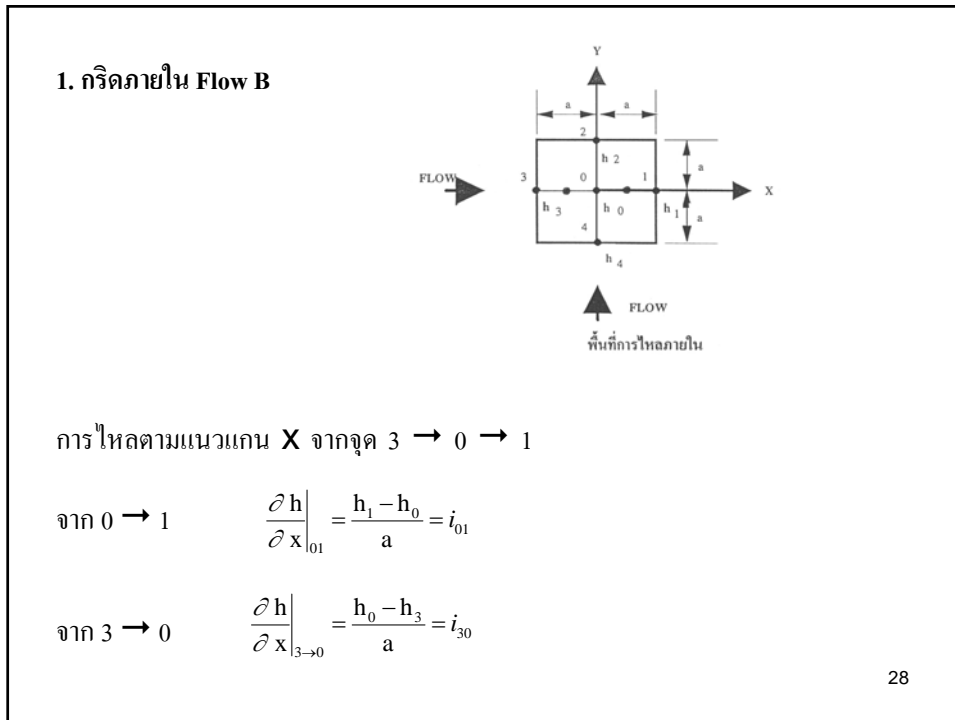
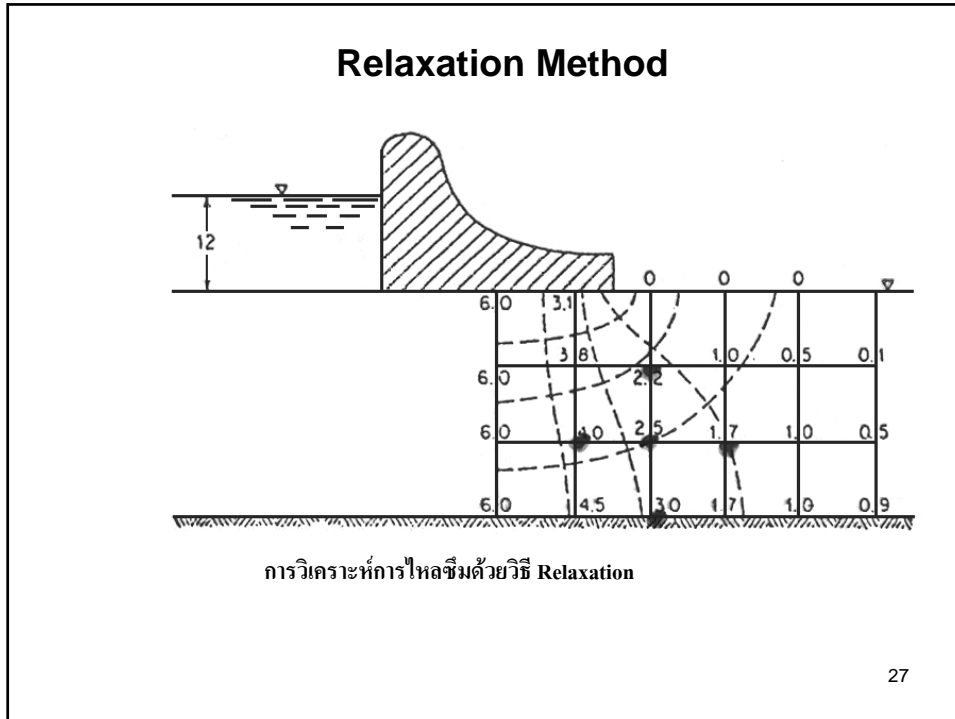


การวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธี Relaxation

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Relaxation



การใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าแทนการไหลของน้ำ



อัตราการเปลี่ยนแปลงของ **Hydraulic gradient** จากจุดกึ่งกลาง ด้าน 3-0 และ 0-1 คือ

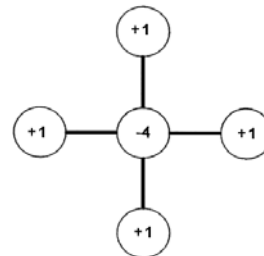
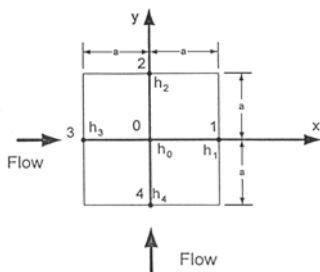
$$\left. \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right|_{301} = \frac{\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{01} - \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{30}}{a} = \frac{h_1 + h_3 - 2h_0}{a^2}$$

ทำนองเดียวกัน

$$\left. \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right|_{402} = \frac{h_2 + h_4 - 2h_0}{a^2}$$

$$\therefore \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{h_1 + h_3 + h_2 + h_4 - 4h_0}{a^2} = 0$$

หรือ  $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 4h_0$  “สมการควบคุม”



ตัวคูณน้ำหนักการกระจายของศักย์น้ำ

$$\frac{h_6}{2} + \frac{h_8}{2} + h_7 = 2hs \quad \text{“สมการควบคุม”}$$

ก) พื้นที่การไหล

ข) การกระจายน้ำหนักของสัคย์น้ำ

พื้นที่การไหลชนิดขอบที่บ้น้ำ

31

ก. พื้นที่การไหลปลายเข็มพืด

ข. พื้นที่การไหลมุมของขอบที่บ้น้ำ

พื้นที่การไหลปลายเข็มพืดและพื้นที่การไหลมุมขอบที่บ้น้ำ

32



จะเห็นได้ว่า “ศักย์น้ำ” ( $h$ ) ณ จุดต่างๆ ในบริเวณพื้นที่กริดใดๆ จะถูกต้องตามสมการ Laplace's ได้ก็ต่อเมื่อค่า “ $h$ ” มีความสัมพันธ์กันตาม “สมการควบคุม” ของพื้นที่นั้นๆ

หากไม่เป็นดังกล่าวก่อให้เกิด Error ขึ้น ซึ่งจะต้องกระจายไปตามน้ำหนักการกระจายศักย์ที่เขียนไว้ในแผนภูมิ

33

ตัวอย่างการกระจาย Error ของพื้นที่การไหลที่ขอบที่บนน้ำ

$$\text{ถ้า } h_{15} = 14.5 \text{ ม.} \quad h_{16} = 13.0 \text{ ม.}$$

$$h_{17} = 15.2 \text{ ม.} \quad h_{18} = 15.0 \text{ ม.}$$

$$h_{19} = 13.5 \text{ ม.}$$

สมการควบคุม

$$\frac{h_{16}}{2} + \frac{h_{17}}{2} + h_{18} + h_{19} = 3h_{15} \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\frac{13.0}{2} + \frac{15.2}{2} + 15.0 + 13.5}_{42.6} = \underbrace{3 \times 14.5}_{43.5}$$

$$\therefore \text{Error ข้างขวามากกว่าข้างซ้าย} = 43.5 - 42.6 = 0.9$$

แบ่ง Error ออกเป็น 6 ส่วน  $(0.5+0.5+1+1+3)$  ได้ส่วนละ  $= 0.15$

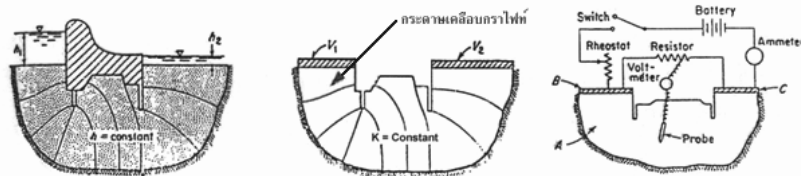
นำส่วนแบ่งของ Error  $= 0.15$  ไปปรับให้  $h_{15}$  ลดลง 1 ส่วน  $= 14.5 - 0.15 = 14.35$

$h_{16}, h_{17}, h_{18}, h_{19}$  เพิ่มขึ้น 1 ส่วน

34

การเปรียบเทียบการไหลของน้ำและกระแสไฟฟ้า

การไหลของน้ำ	การไหลของกระแสไฟฟ้า
Total head, $h$	Voltage, $v$
Permeability, $k$	Electrical conductivity, $C$
Discharge velocity, $v$	Current, $I$
Darcy's law	Ohm's law
$Q = \frac{KA}{L} h$	$I = \frac{CA}{L} v$
สมการ	สมการ



การใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าแทนการไหลของน้ำ

35

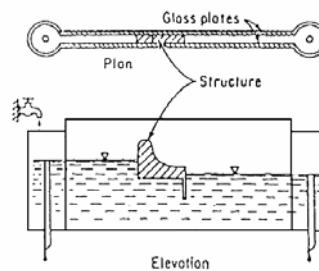
Seepage Tank



การจำลองการไหลด้วยถังทราย

Hele Shaw Model → Viscous flow

การจำลองการไหลด้วยแบบจำลองน้ำมัน



36

### ขั้นตอนการเขียน Flow nets ด้วยมือ

1. ใช้กระดาษเขียนแบบ รางน้ำคัดเขื่อน หรือพื้นที่การไหลลงในมาตราส่วนที่เหมาะสม โดยใช้ขนาด A4 → A3
2. กำหนดขอบเขตบนพื้นที่การไหลให้ถูกต้อง
  - 2.1 Top flow line (T.F.L.)
  - 2.2 Bottom flow line (B.E.L.)
  - 2.3 First equipotential line (F.E.L.)
  - 2.4 Last equipotential line (L.E.L.)
 ในกรณีของ Unconfined Flow ในเขื่อนให้สร้าง Top Flow Line โดยวิธี Casagrande's
3. เขียนแนวเส้น Flow lines ระหว่าง T.F.L. และ B.F.L. ไม่ให้เกิด 3-5 เส้น
4. เขียน Equipotential lines ตัดกับ Flow lines เป็นมุม  $90^\circ$  และเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสฐานโค้ง และวงกลมบรรจบภายในได้
5. ปรับ Flownets ในส่วนที่ยังไม่เข้ากับคุณสมบัติโดยการดูจากภาพรวมของทั้งพื้นที่
6. พลิกกระดาษไขกลับด้าน แล้วคัดลอกเส้นที่ถูกต้องเป็น Flownets ที่สมบูรณ์ต่อไป


37



### วิธีการเขียน Flownets โดยทั่วไป

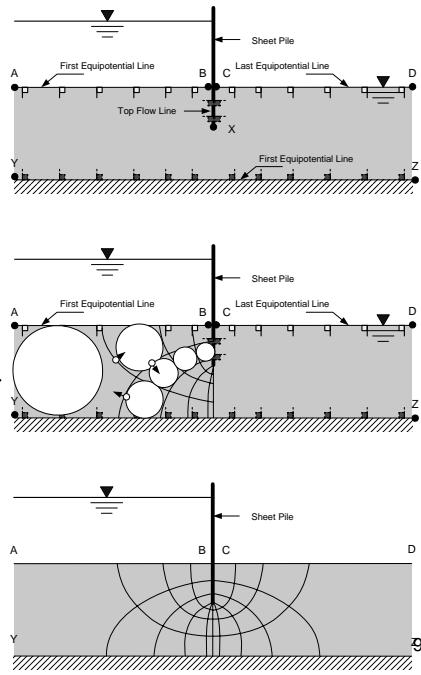
- เขียนพื้นที่การไหลซึมโดยใช้มาตราส่วนที่เหมาะสมลงบนกระดาษเขียนแบบ
- ระบุเส้นขอบเขตการไหล ได้แก่ Top Flow Line, Bottom Flow Line, First Equipotential Line และ Last Equipotential Line ให้ถูกต้อง
- ร่างเส้น Flow lines ที่อยู่ระหว่าง T.F.L. และ B.F.L. ประมาณ 3-5 เส้น
- ร่างเส้น Equipotential lines ที่อยู่ระหว่าง F.E.L. และ L.E.L. ให้เกิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสฐานโค้งตามคุณสมบัติของ Flownets
- พิจารณาทั้งหมดว่าบริเวณใดที่ยังไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของ Flownets ให้แก้ไข
- เมื่อถูกต้องแล้วให้เพิ่มเติมจำนวน Flow line และ Equipotential line ตามต้องการ
- พลิกกลับกระดาษไขแล้ววงเส้นหนักหรือใช้ปากกาลอกตามเส้นที่สมบูรณ์แล้ว


38



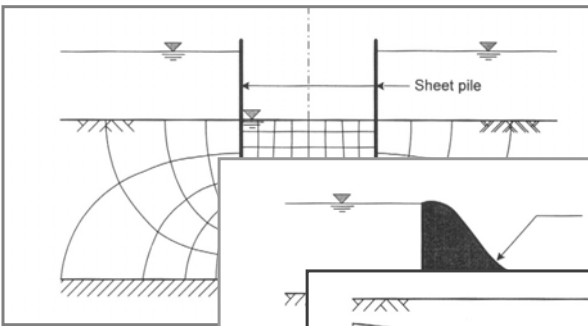
### ขั้นตอนการเขียน Flownets

1. สร้าง Boundary Lines
2. สร้าง Flow lines และ Equipotential lines เริ่มต้น
3. แก้ไขให้เข้าคุณสมบัติของ Flownets

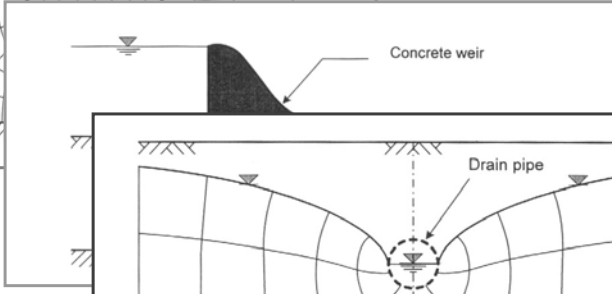




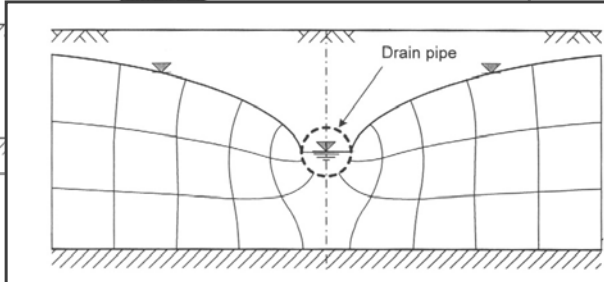
### ตัวอย่างการเขียน Flownets



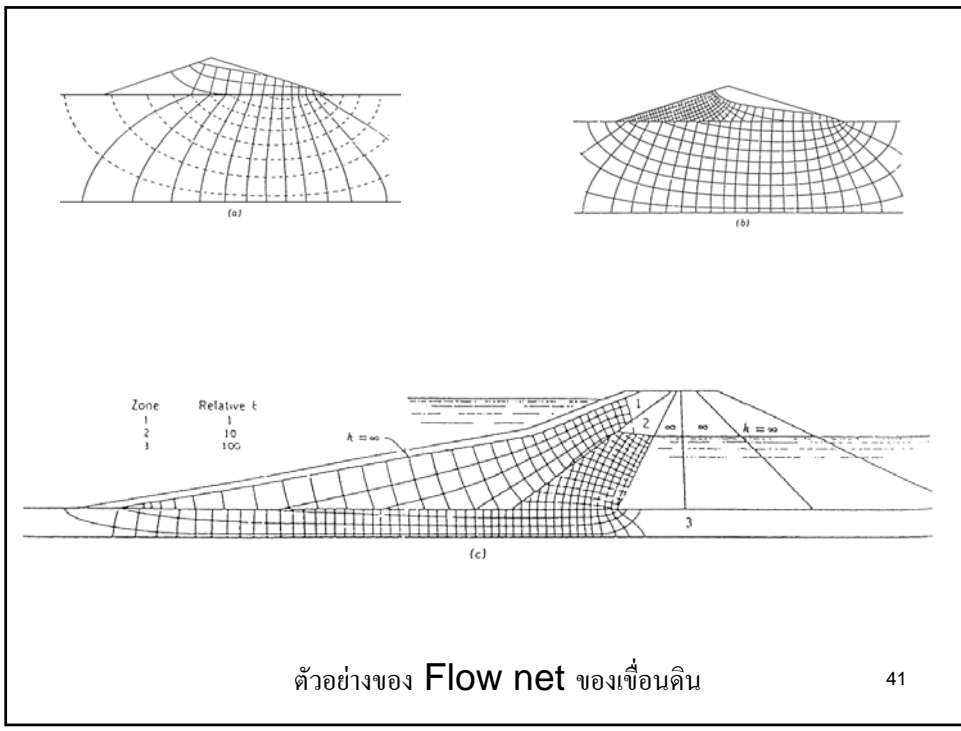
**Flow into Cofferd Dam**



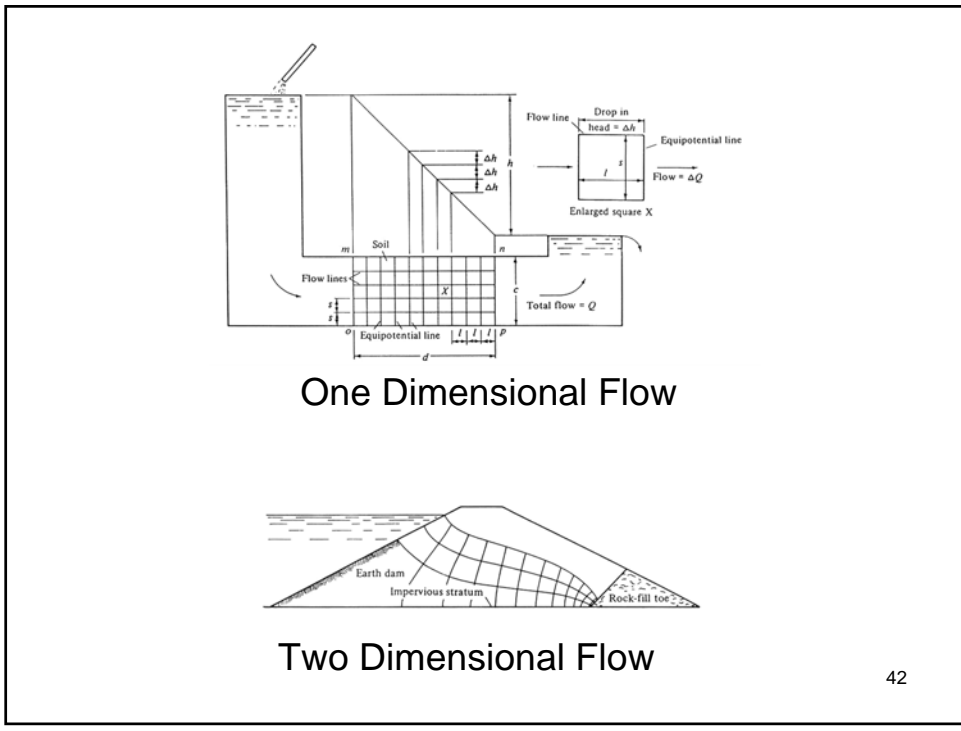
**Flow under Weir**



**Flow into Drain Pipe**



ตัวอย่างของ Flow net ของเขื่อนดิน



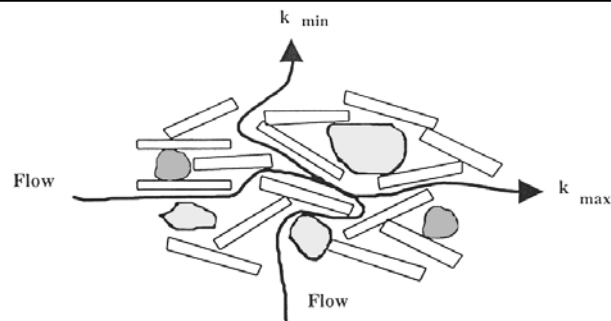
### Anisotropic Flow; when $k_x \neq k_y$

1. Compacted Soil

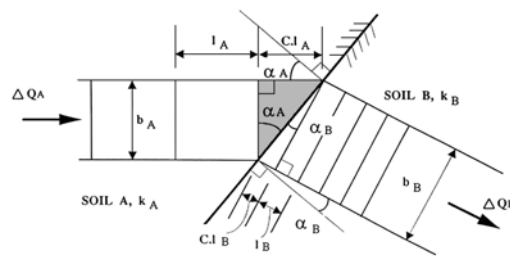
- Compaction by Sheepfoot  $\rightarrow k_H \approx 4 k_v$
- Compaction by Rubber tyre roller  $\rightarrow k_H \approx 20 k_v$

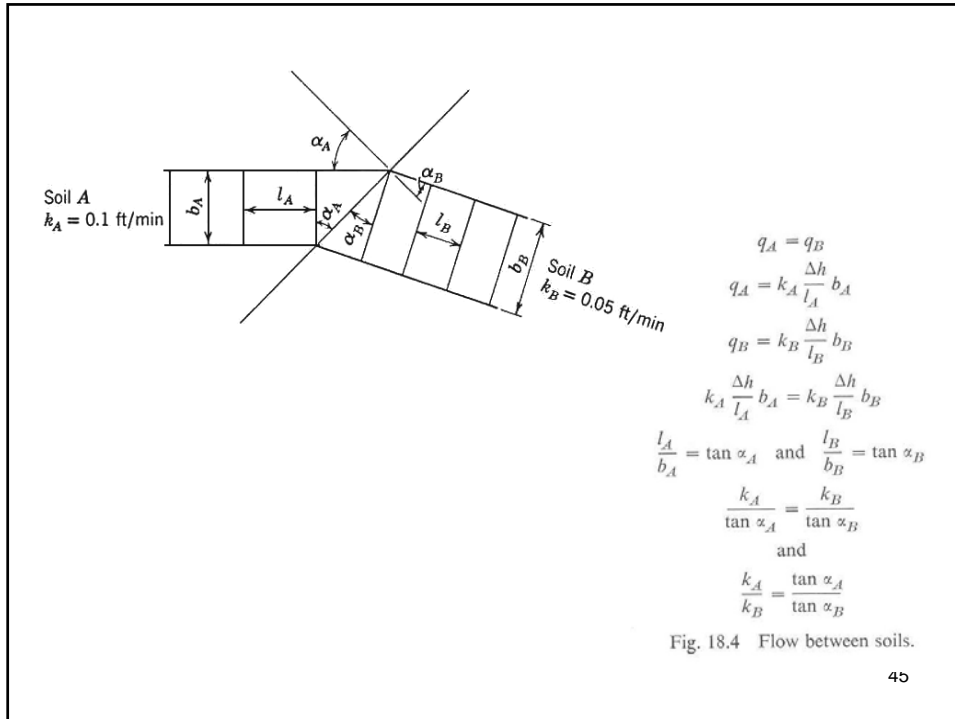
2. Sediment Soil

- Layered soil  $\rightarrow k_H \approx 20 - 200 k_v$

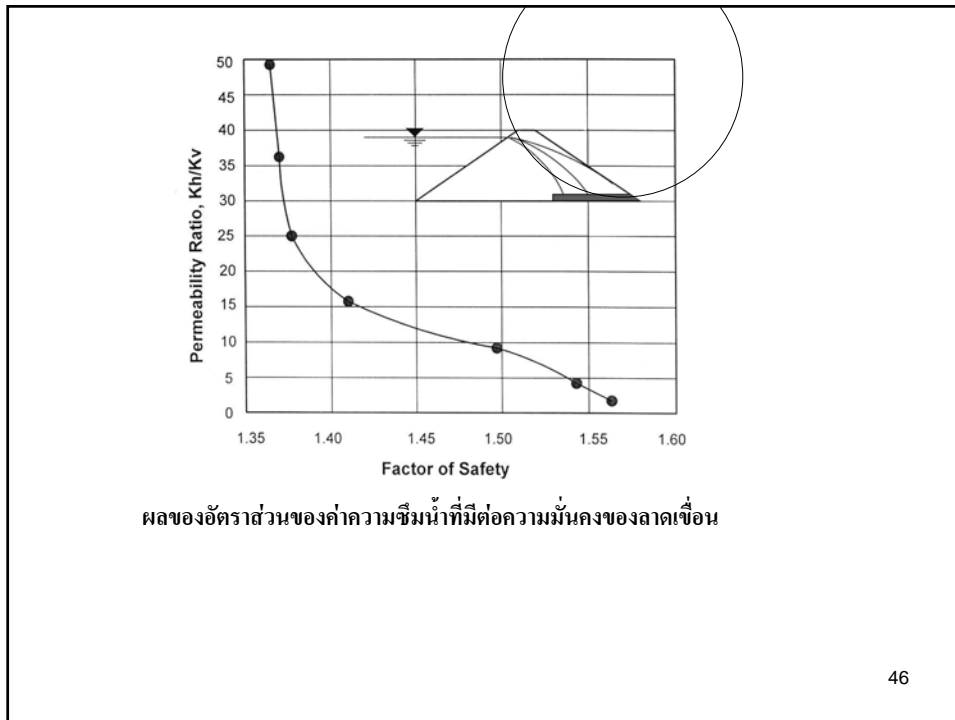


Flow lines at soil interface





45



46

Transformation of Laplace's Equation for Anisotropic Soil

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{if } k_x > k_y \quad \text{--- ①}$$

ด้วย Scale x ใหม่ เทียบกับ x  $x_T = \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{\frac{1}{2}} x$

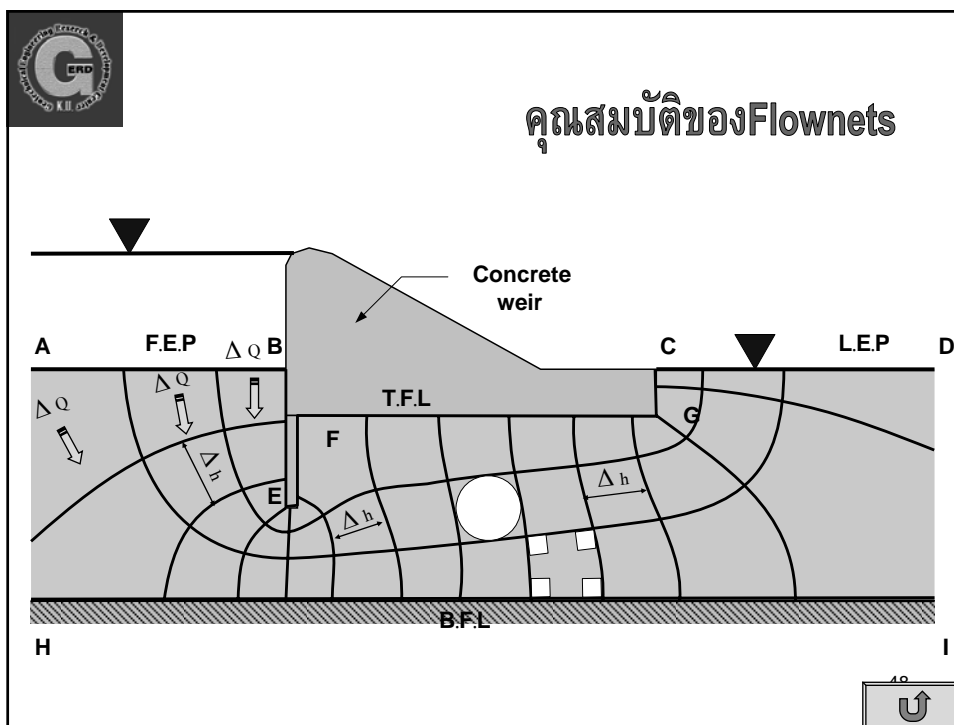
แทน ① ลงในสมการโดยให้  $k_y$  มาตลอด

$$\frac{\partial^2 h}{\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{\left[\left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{\frac{1}{2}} x\right]^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

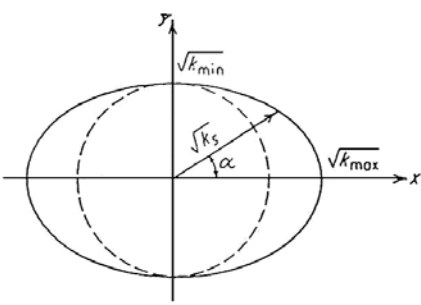
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_T^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

47



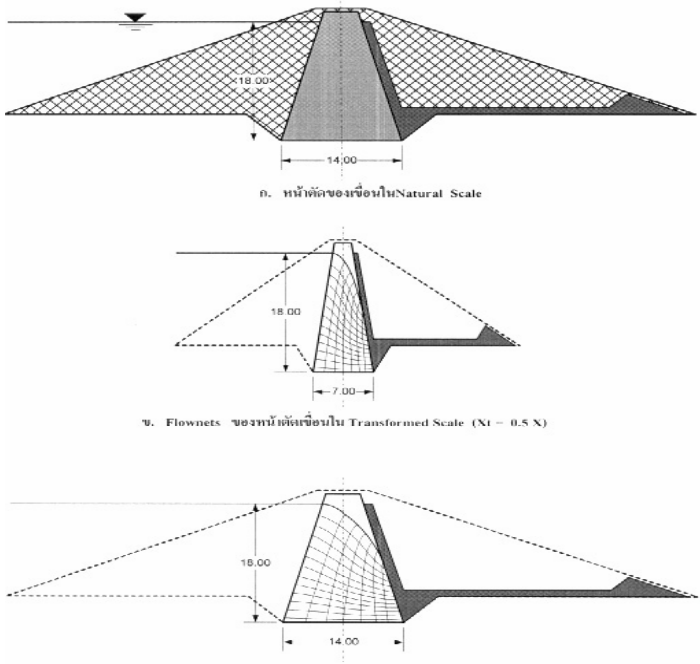


$$k_{\alpha}^2 = \frac{k_{\max}^2 \cdot k_{\min}^2}{k_{\max}^2 \cdot \sin^2 \alpha + k_{\min}^2 \cdot \cos^2 \alpha}$$

$$k_{av} = \sqrt{k_{\max} \cdot k_{\min}}$$


ความแตกต่างของค่าความซึมน้ำแทนด้วย Ellipse of Direction

49



ก. หน้าตัดของเขื่อนใน Natural Scale

ข. Flownets ของหน้าตัดเขื่อนใน Transformed Scale (N1 = 0.5 X)

ค. Flownets ของหน้าตัดเขื่อนใน Natural Scale

50

ชั้นดินที่มีค่าความซึมน้ำต่างกันตามทิศทาง

ค่าความซึมน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง

51

### Flow nets Sketch for Anisotropic Soil

$$x_T = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \cdot x$$

$$= \sqrt{\frac{k_x}{4k_y}} \cdot x$$

$$= \frac{1}{2}$$

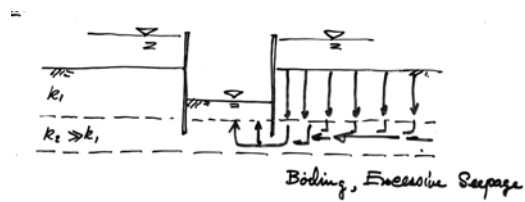
52

## Non-homogeneous Flow in Soils

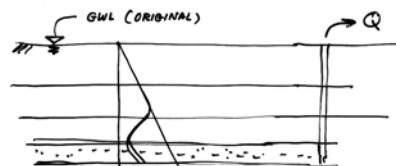
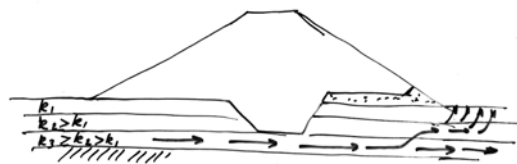
Cause concentration of flow in some loayer and uplift pressure on another layer

Other effects to flow problems

- Perched water table
- Artesian water table



53



54

การคำนวณ Flowrate ของ Nonhomogeneous Soil.

1. Simplified 2D problem & note

1.1 Non-homogeneous soil

1.2 Non-homogeneous soil

55

1.3 Combined

2. Complex boundary

วิธี Finite Element Method.

56

การที่ต่อมารวม.

1. ขีดความสามารถที่รับน้ำ  $Q$
2. ค่าความซึมผ่านที่รวม  $k_e = f(k_1, k_2, \dots)$
3. อัตราการไหล: ระบุเป็นปริมาณต่อหน่วยพื้นที่

การที่ต่อมารวม.

1. Non-homogeneous อนุกรม.

1.  $Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$  — ①
2.  $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$  — ②

ตาม Darcy's law  $Q = kvh$

$\therefore Q_1 = k_1 \cdot \frac{\Delta H_1}{L_1} \cdot D$ ,  $Q_2 = k_2 \cdot \frac{\Delta H_2}{L_2} \cdot D$ ,  $Q_3 = \dots$  — ③

$\therefore \Delta H_1 = \frac{Q_1 \cdot L_1}{k_1 \cdot D}$ ,  $\Delta H_2 = \frac{Q_2 \cdot L_2}{k_2 \cdot D}$ ,  $\Delta H_3 = \frac{Q_3 \cdot L_3}{k_3 \cdot D}$ ,  $\Delta H = \frac{Q \cdot L}{k_e \cdot D}$  — ④

57

③ แทนที่ ②

$$\frac{Q \cdot L}{k_e \cdot D} = \frac{Q_1 \cdot L_1}{k_1 \cdot D} + \frac{Q_2 \cdot L_2}{k_2 \cdot D} + \frac{Q_3 \cdot L_3}{k_3 \cdot D}$$

$$\frac{L}{k_e} = \sum \frac{L_i}{k_i} \quad \text{--- ⑤}$$

คือ  $k_e =$  Equivalent permeability รวมกัน

เมื่อ  $Q = k_e \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot D$  — ⑥

ใช้  $Q$  แทนที่ใน ② จะได้  $\Delta H_1, \Delta H_2, \Delta H_3$

58

2. Non-homogeneous permeable

1.  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots$  (7)

2.  $\Delta H = \Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 \dots$  (8)

$$k_e = \frac{\sum k_i}{\sum \frac{D_i}{D_i}} \quad (9)$$

$$Q = k_e \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot D_i \quad (10)$$

3. Combined.

59

**APPLICATION OF FLOWNETS FOR SEEPAGE ANALYSIS**

After flownets are established, the following calculations can be done.

1. Pore water pressure or uplift pressure at any points on flow boundary.
2. Hydraulic gradient ( $i$ ) and seepage velocity ( $v$ )
3. Seepage force and boiling condition.
4. Quantity of seepage ( $Q$ )

Pore Pressure Calculation ( $h_p, u$ )

When water flow in from first equipotential line, the total head loss occurs due to drag forces (friction) of flowing water around soil particles.

At any point on flow boundary; total head equal to.

$$h_{Ti} = h_{T0} - n_i \cdot \Delta h \quad \text{--- (1)}$$

when  $h_{T0}$  = Initial total head on upstream face.  
 $n_i$  = number of equipotential space to point  $i$   
 $\Delta h$  = head loss / one equipotential space

from  $h_p = h_T - h_e \quad \text{--- (2)}$

Then  $h_{pi} = (h_{T0} - n_i \cdot \Delta h) - h_{ei}$  --- (3)

### การคำนวณแรงดันน้ำจาก Flownets

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

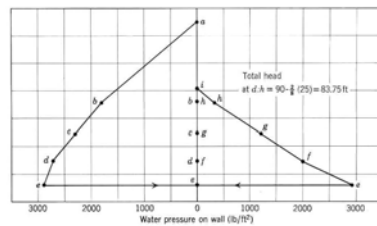
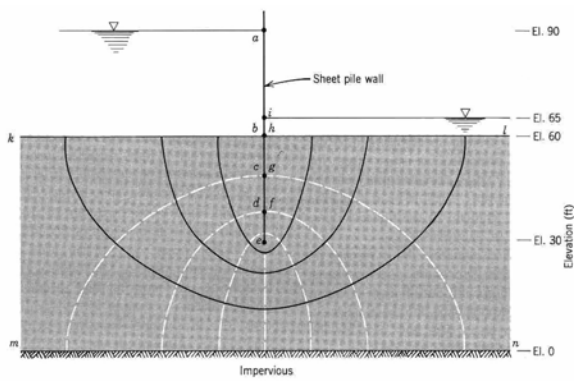
เมื่อ  $h_{to}$  = ศักย์รวมเริ่มต้น  $\Delta h$  = ศักย์ที่สูญเสียในช่วง Equipotential Space  
 $n_i$  = จำนวน Equipotential Space จากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุด I ใดๆ  
 $h_{ei}$  = ศักย์ความสูงของจุด I ใดๆ

62

การคำนวณความดันน้ำจาก Flownets

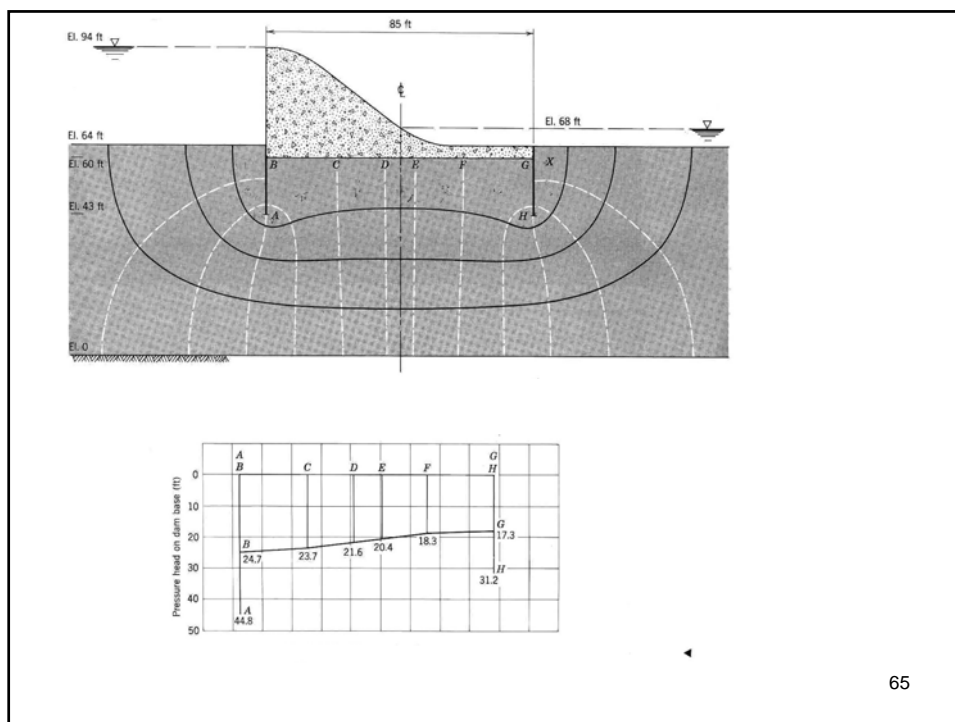
จุดที่	$h_{T0}$ (เมตร)	$n_i$ (ช่อง)	$n_i \cdot \Delta h$ (เมตร)	$h_{ei}$ (เมตร)	$h_{pi}$ (เมตร)	$u_i$ (ตัน/ตร.ม.)
1	18.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0
2	18.0	1.0	1.7	15.0	1.3	1.3
3	18.0	2.0	3.5	11.0	3.5	3.5
4	18.0	3.0	5.2	7.5	5.3	5.3
5	18.0	4.0	7.0	4.5	6.5	6.5
6	18.0	5.0	8.7	2.3	7.0	7.0
7	18.0	6.0	10.5	1.0	6.5	6.5
8	18.0	7.0	12.2	0.5	5.3	5.3
9	18.0	8.0	14.0	0.2	3.8	3.8
10	18.0	9.0	15.7	0.1	2.2	2.2
11	18.0	10.0	17.5	0.0	0.5	0.5

63



64



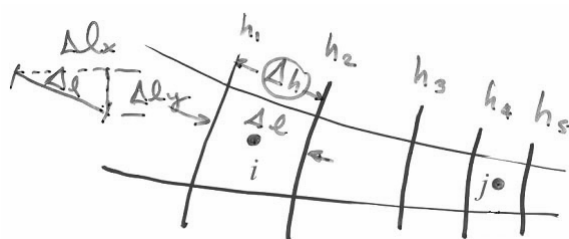


65

### Hydraulic Gradient (C)

On flow boundary at any point (x) hydraulic gradient ( $i_x$ ) equal to

$$i_x = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad \text{---(4)}$$



$$i_x = \frac{\Delta h}{\Delta L_x}$$

$$i_y = \frac{\Delta h}{\Delta L_y}$$

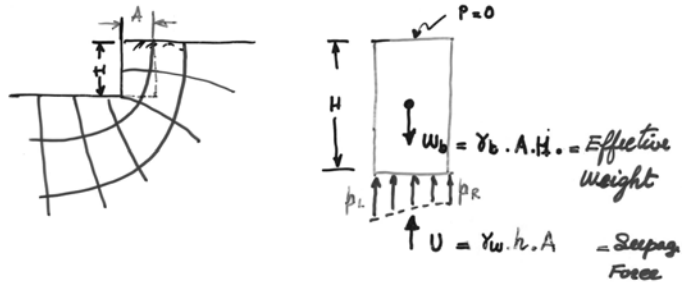
$$\Delta L_y < \Delta L_x \rightarrow \therefore i_y > i_x$$

Seepage velocity ( $v$ )

$$v_x = ki_x \quad \text{and} \quad v_y = ki_y \quad \text{---(5)}$$

66

## Seepage Force and Boiling



$$\text{F.S. (boiling)} = \frac{W_b}{U}$$

$$\text{If boiling occurring} \quad = \frac{v_b \cdot A \cdot H}{v_w \cdot h \cdot A} \quad \text{---(6)}$$

67

$$\text{Then} \quad 1 = \frac{v_b}{v_w} - \frac{H}{h} \quad \rightarrow \quad \frac{h}{h} = \frac{v_b}{v_w}$$

Then F.S. = 1,

68

## Seepage Quantity (Q)

69

### Seepage Quantity (Q)

1. Estimation of seepage loss
  - Reservoir (Dam)
  - Leachet from sanitary landfill
2. Pumping and drainage capacity
  - Filter Design
  - Dewatering



From Darcy's law

$$v = ki$$

or  $Q = kiA$  ---(1)

70

Seepage Quantity (Q)

for 1 - flow channel

$$\Delta Q = k \cdot \frac{\Delta h}{l_e} \cdot 1 \quad \text{---(2)}$$

Any flow spacer

$$l_e \approx l_f \quad \text{and} \quad \Delta h = \frac{h}{N_e}$$

$$\therefore \Delta Q = k \cdot \frac{h}{N_e} \quad \text{---(3)}$$

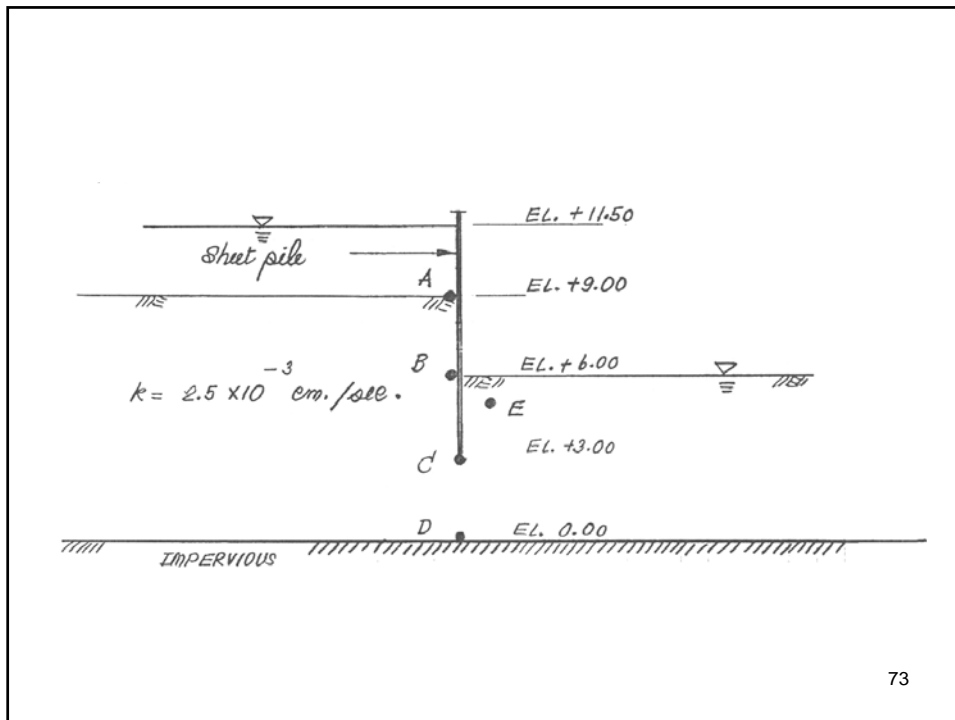
Summation of every flow channels,  $Q = \Sigma \Delta Q$ 

$$Q = N_f \cdot \Delta Q = \frac{N_f}{N_c} \cdot k \cdot h \quad \text{---(4)}$$

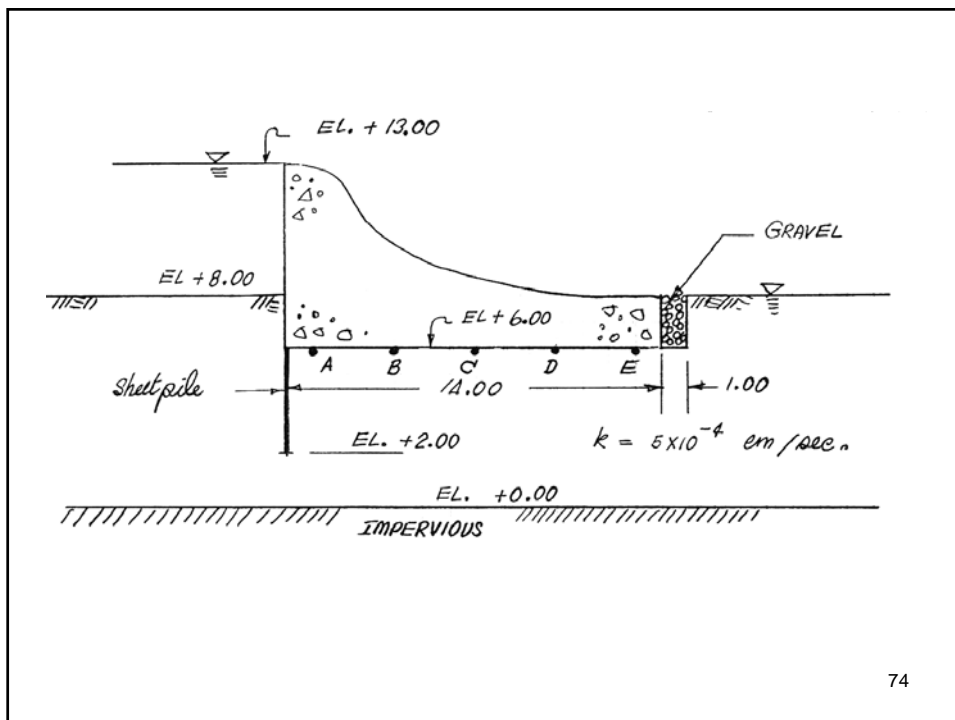
71

## Homework

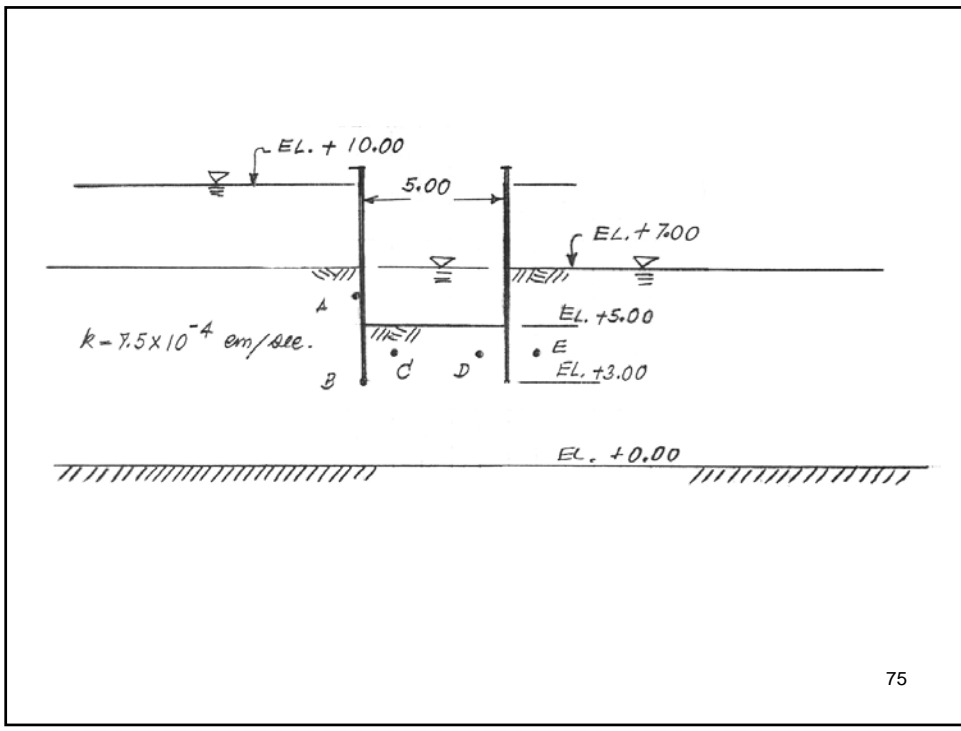
72



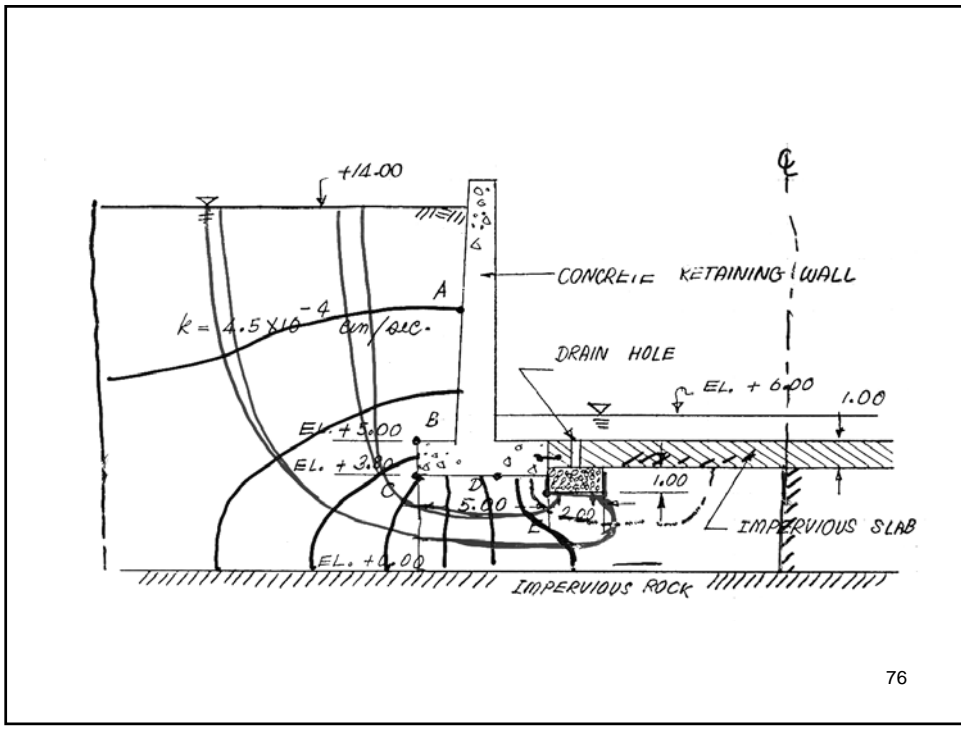
73



74



75



76

