

Seepage Through Earth Dams

by Varawoot Vudhivanich

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen

Kasetsart University

2559

Dam Failure modes

- ❑ Overtopping – inadequate spillways (1/3)
- ❑ Dam/Foundation failure (1/3)
 - Excess seepage through dam/foundation
 - Piping – insufficient drainage/grading
- ❑ Others
 - Wave action
 - Erosion of downstream face
 - Bank stability
 - Seismic activity
 - Degradation – lack of maintenance
 - Material supplies sub specification

See videos

Dam Seepage Analysis

**การวิเคราะห์การไหลซึมน้ำผ่านเขื่อน
และฐานราก**

- seepage through dams**
- seepage through dam foundation**

ทำไมต้องรู้เกี่ยวกับการไหลซึมของน้ำ(Seepage)

1. ถ้าน้ำไหลซึมออกบนผิวเขื่อนด้านท้ายน้ำ ดินบริเวณนั้นจะอิ่มตัวด้วยน้ำ และเกิดการพังทลายได้ง่าย
2. ถ้ามีการลดระดับน้ำหน้าเขื่อนอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown) ดินบริเวณด้านหน้าเขื่อนอาจเกิดการพังทลายได้
3. ถ้าน้ำของไหลผ่านตัวเขื่อนหรือฐานรากไหลแรงและเร็วจนเกิดการพัดพาเม็ดดิน (Piping Esrosion) จะเกิดโพรงซึ่งสามารถขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนเขื่อนพังทลายได้

จึงจำเป็นต้องรู้ลักษณะการไหลซึมของน้ำผ่าน
เขื่อนและฐานราก เพื่อจะได้ออกแบบเขื่อน
(ระบบระบายน้ำภายในตัวเขื่อน/ ระบบลด
อัตราการไหลซึม)ให้สามารถควบคุมการไหล
ซึม จนไม่เป็นอันตรายต่อเขื่อน

Seepage → Piping → Failure (St. Francis Breach)



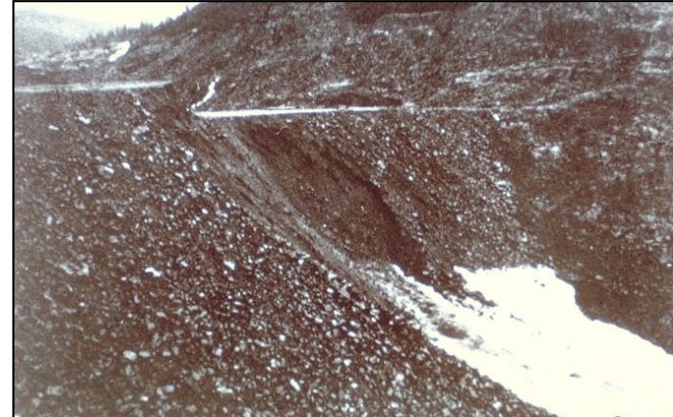
Seepage → piping (Teton Dam)



Failure: Piping - Hellhole dam



Dec 22 3:00 pm



Dec 23 7:00 am

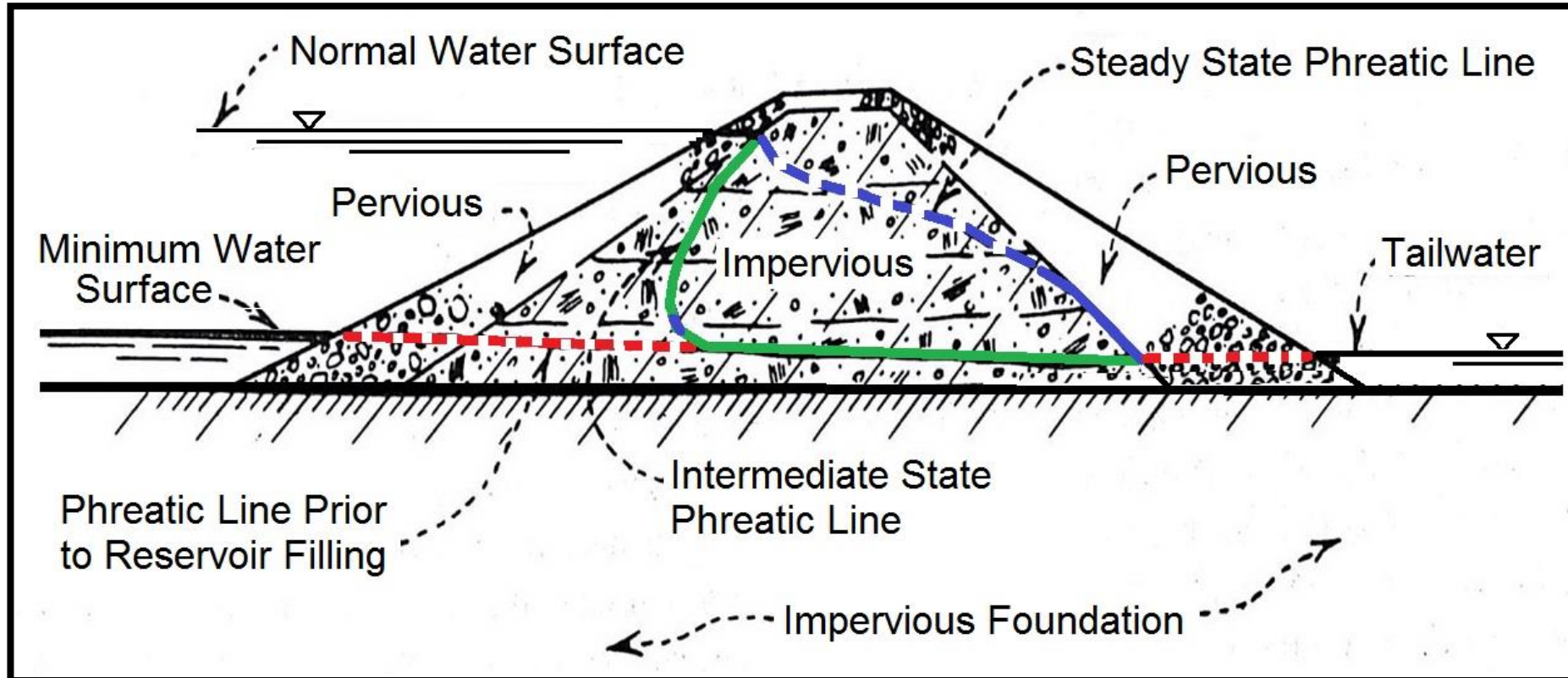


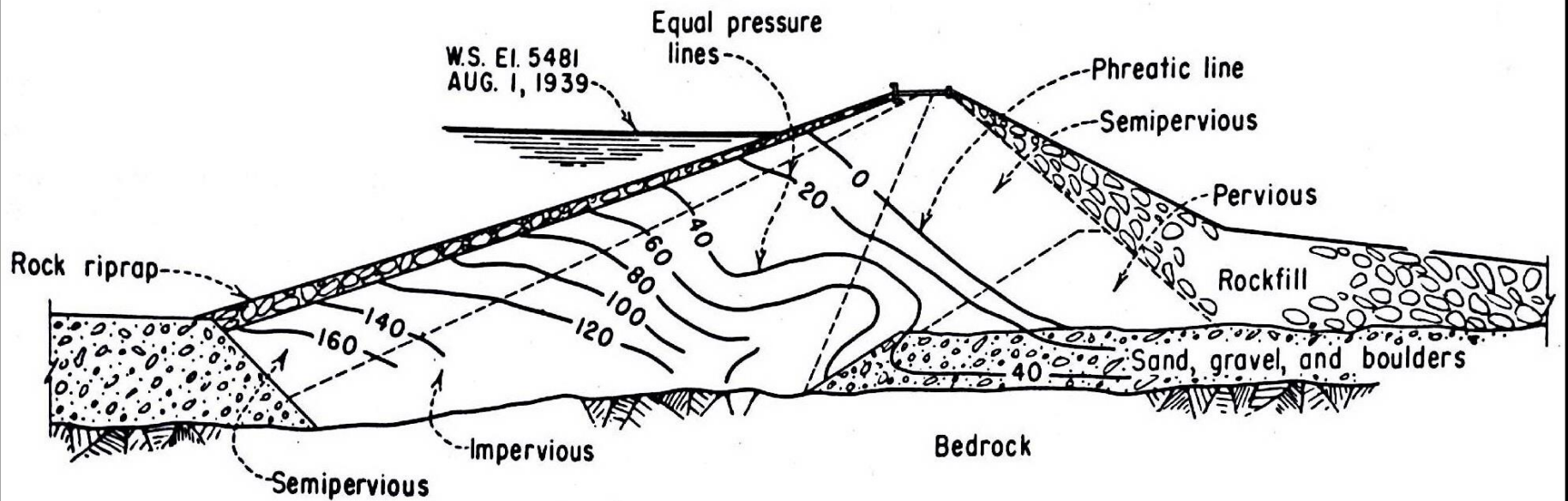
Dec 23 9:30 am



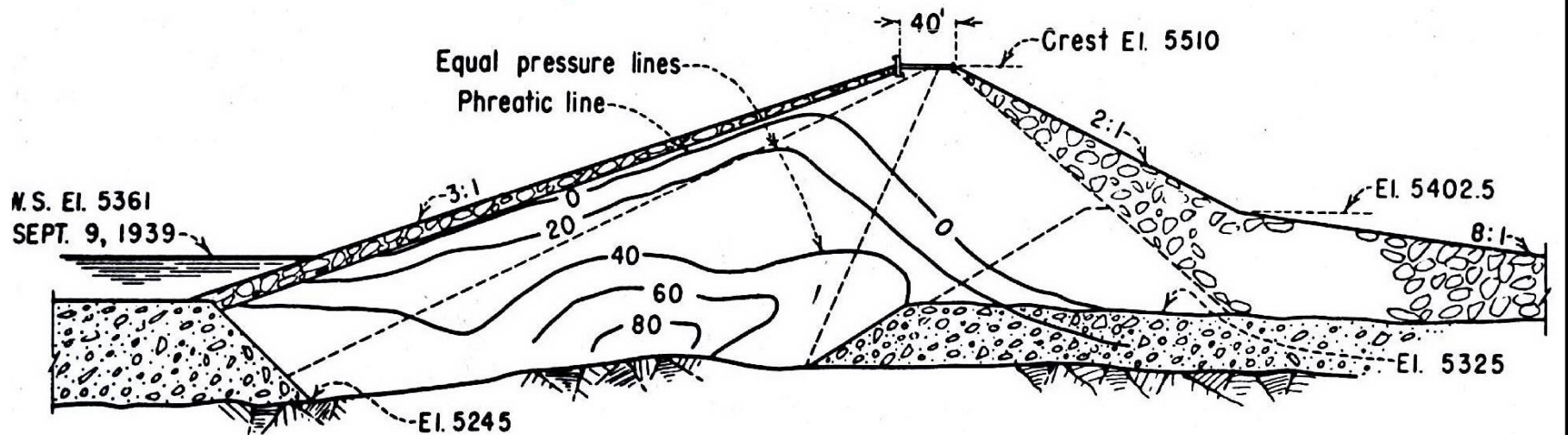
Dec 23 3:30 pm

Phreatic Line



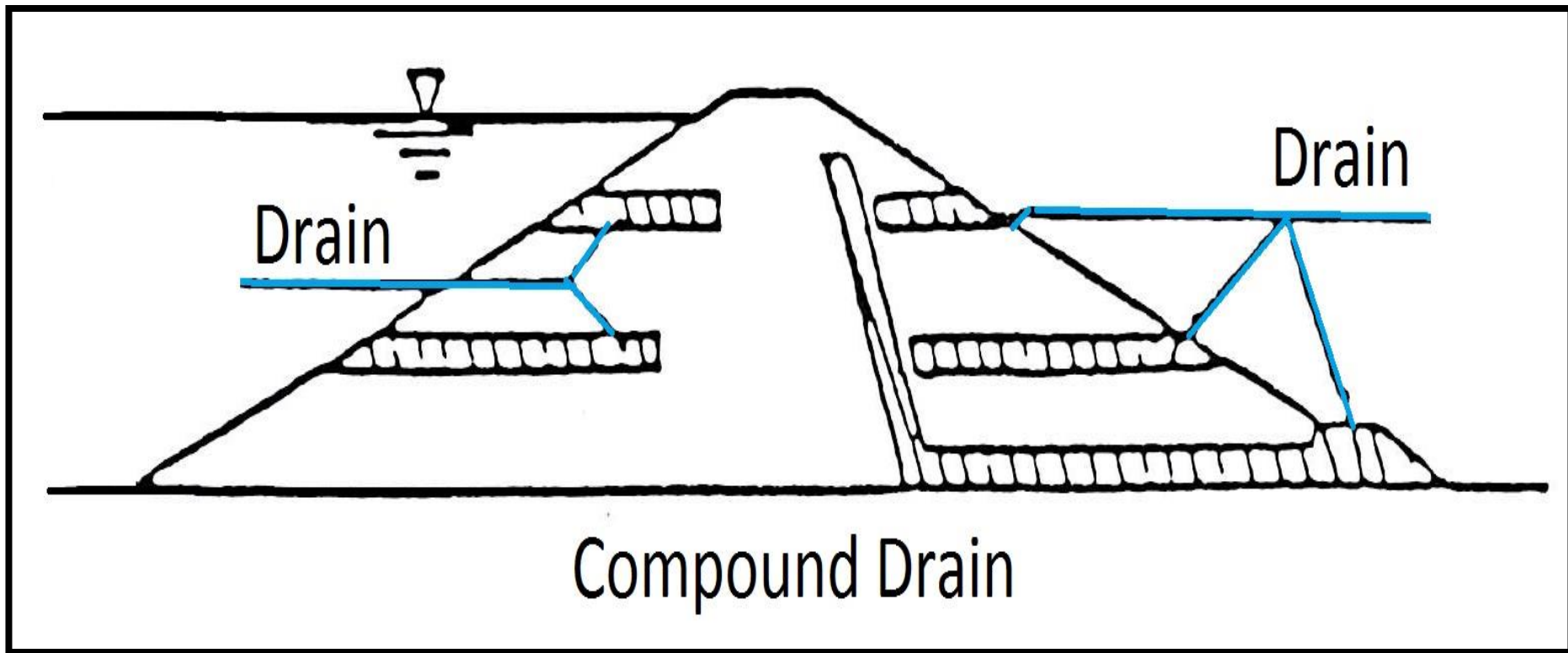


A) Steady State Condition

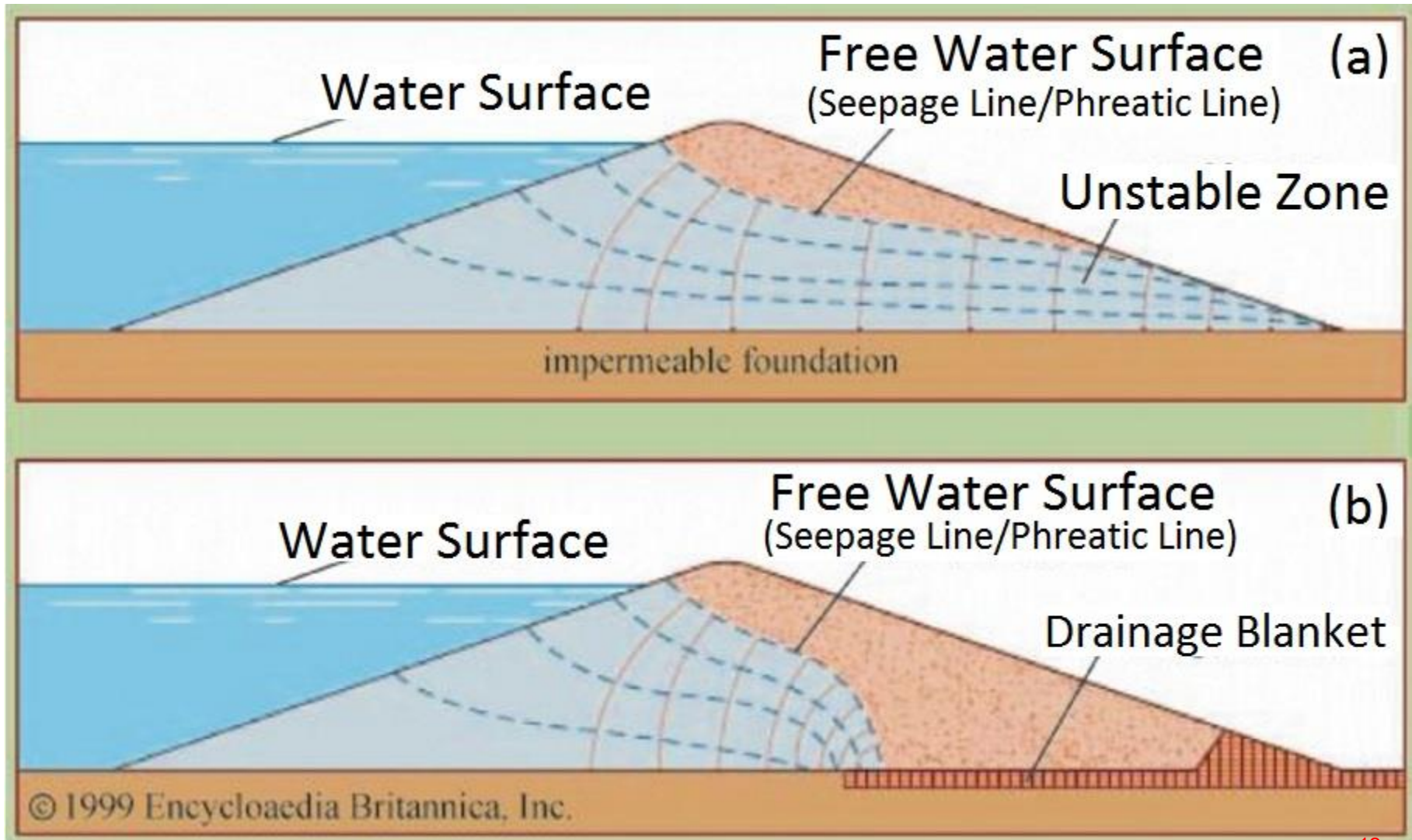


B) Rapid Drawdown Condition

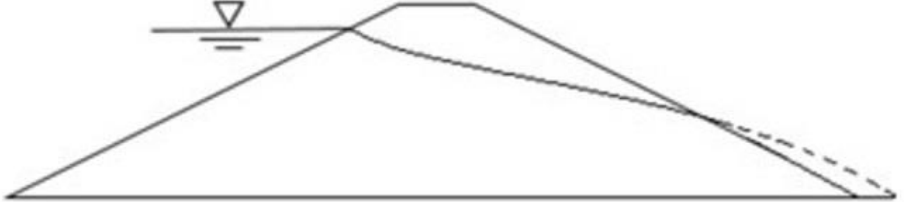
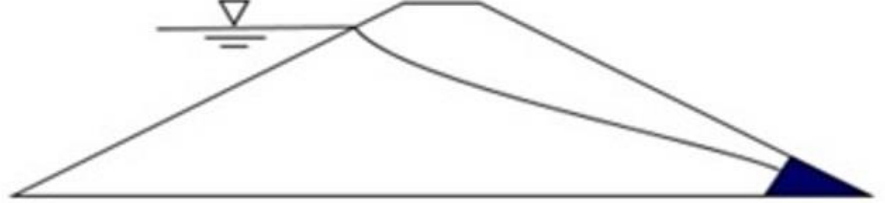
Internal Drain - reduce piping



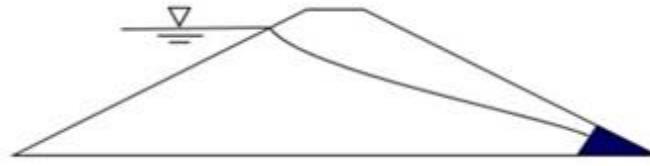
ระบบระบายน้ำในตัวเขื่อนจะช่วยลดระดับ Phreatic Line ไม่ให้น้ำไหลซึมออกที่ผิวเขื่อนด้านท้ายน้ำ



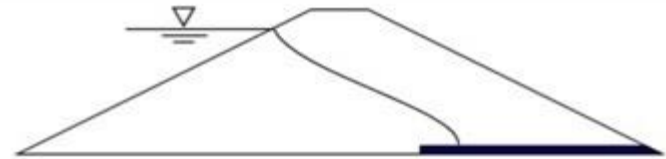
Seepage

Dam Type	Drain Type	Seepage through dams
Homogenous	No drain	
Homogenous	Toe drain	
Homogenous	Blanket drain	
Homogenous	Chimney and blanket drain	
Impervious Core	Upstream blanket	

Toe drain



- สูงประมาณ 30-40% ของ Head ในอ่าง
- $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$ ของความสูงเขื่อน

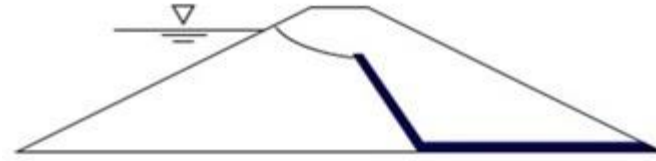


Horizontal drain (Blanket)

- ความยาว 25-100% ของระยะทางจากจุดกึ่งกลางเขื่อนถึงปลายเขื่อนด้านท้ายน้ำ(Toe)

- ข้อเสียของ Horizontal Blanket คือ ถ้า

$K_H \gg K_V$ เส้น Phreatic Line อาจไม่พบกับ Blanket แต่จะไปออกที่ผิวเขื่อนด้านท้ายน้ำ ทำให้ Blanket ที่ออกแบบไว้ไม่เกิดประโยชน์

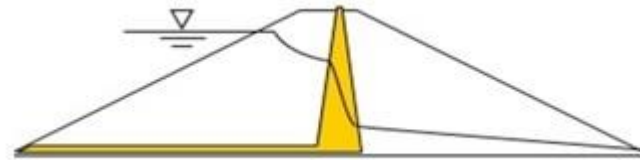


Chimney Drain

-แก้ไขข้อเสียของ Horizontal Blanket โดยเสริม Blanket ในแนวตั้งเพื่อดักรับน้ำให้ลงมาที่ Horizontal Blanket

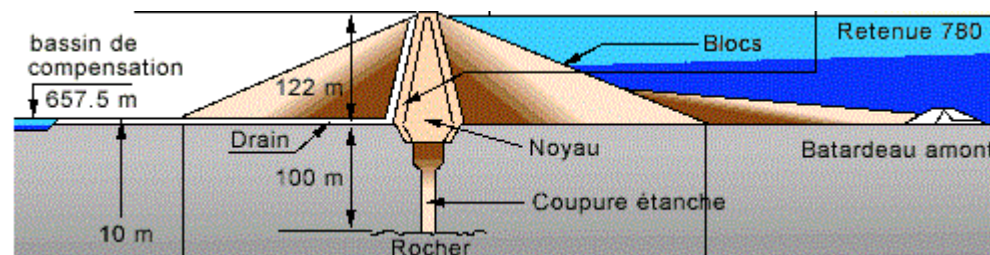
การลดอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อน

1. เลือกวัสดุที่มีความทึบน้ำมาสร้างเขื่อน
2. ออกแบบให้มีแกนทึบน้ำ



การลดอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน

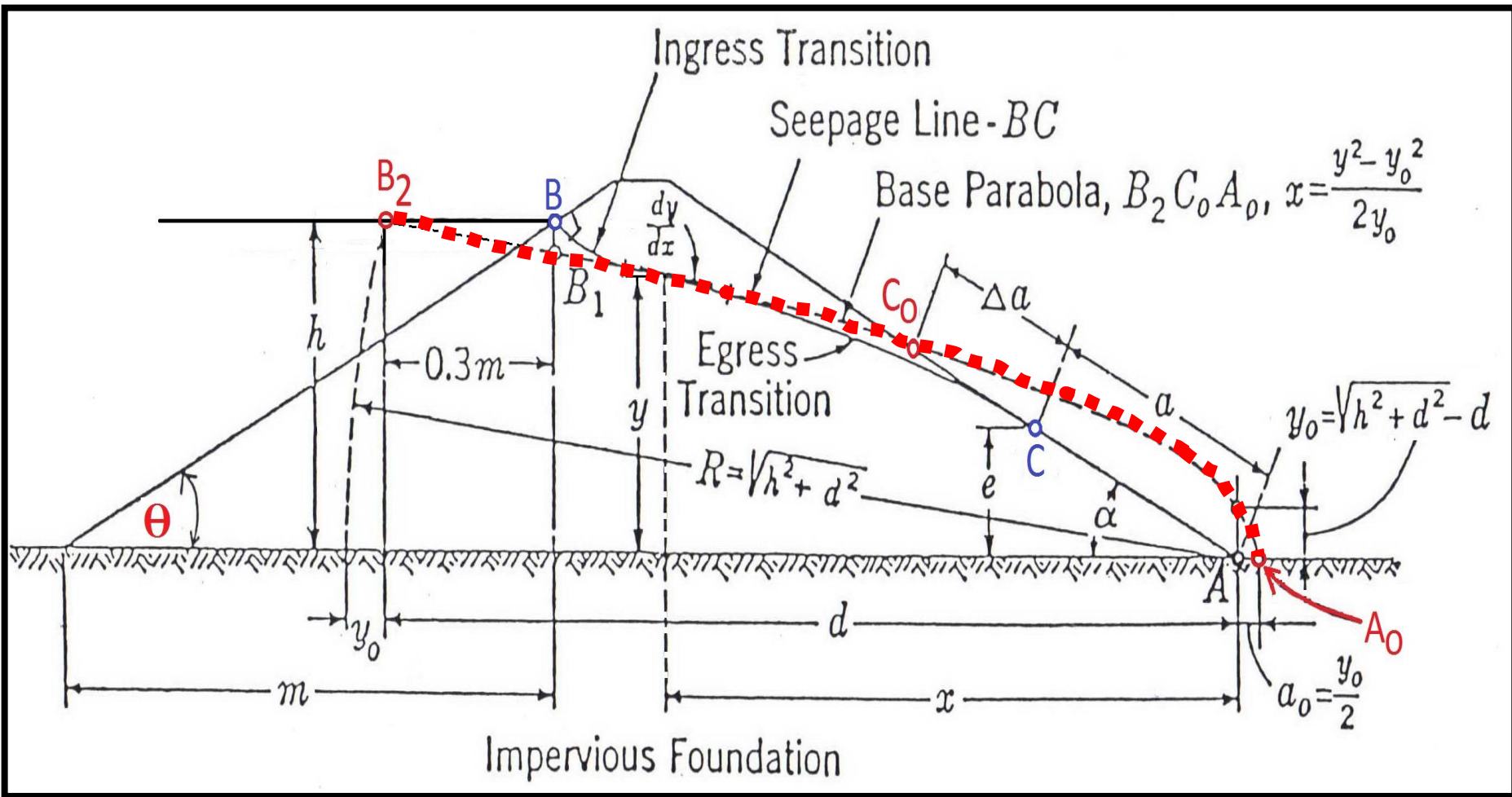
1. ออกแบบร่องแกนทึบน้ำ (Cutoff Trench)
2. ฉีดแนวมาน้ำปูน (Curtain Grout)
3. ตอกเข็มพีค (Sheet Piles)



Range of Permeability for Various Soils

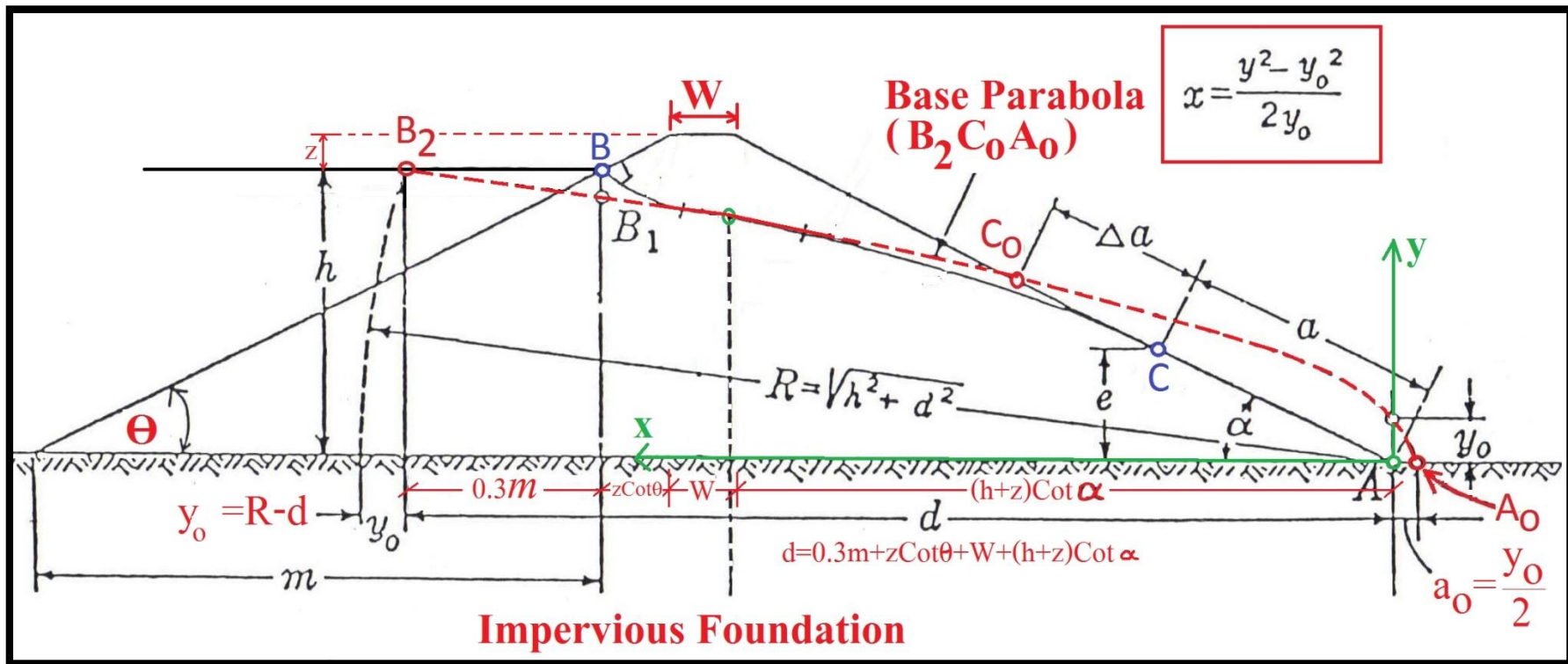
<i>Soil</i>	<i>Permeability Coefficient, k (cm/sec)</i>	<i>Relative Permeability</i>
Coarse gravel	Exceeds 10^{-1}	High
Sand, clean	10^{-1} to 10^{-3}	Medium
Sand, dirty	10^{-3} to 10^{-5}	Low
Silt	10^{-5} to 10^{-7}	Very low
Clay	Less than 10^{-7}	Impervious

Seepage(Phreatic) Line

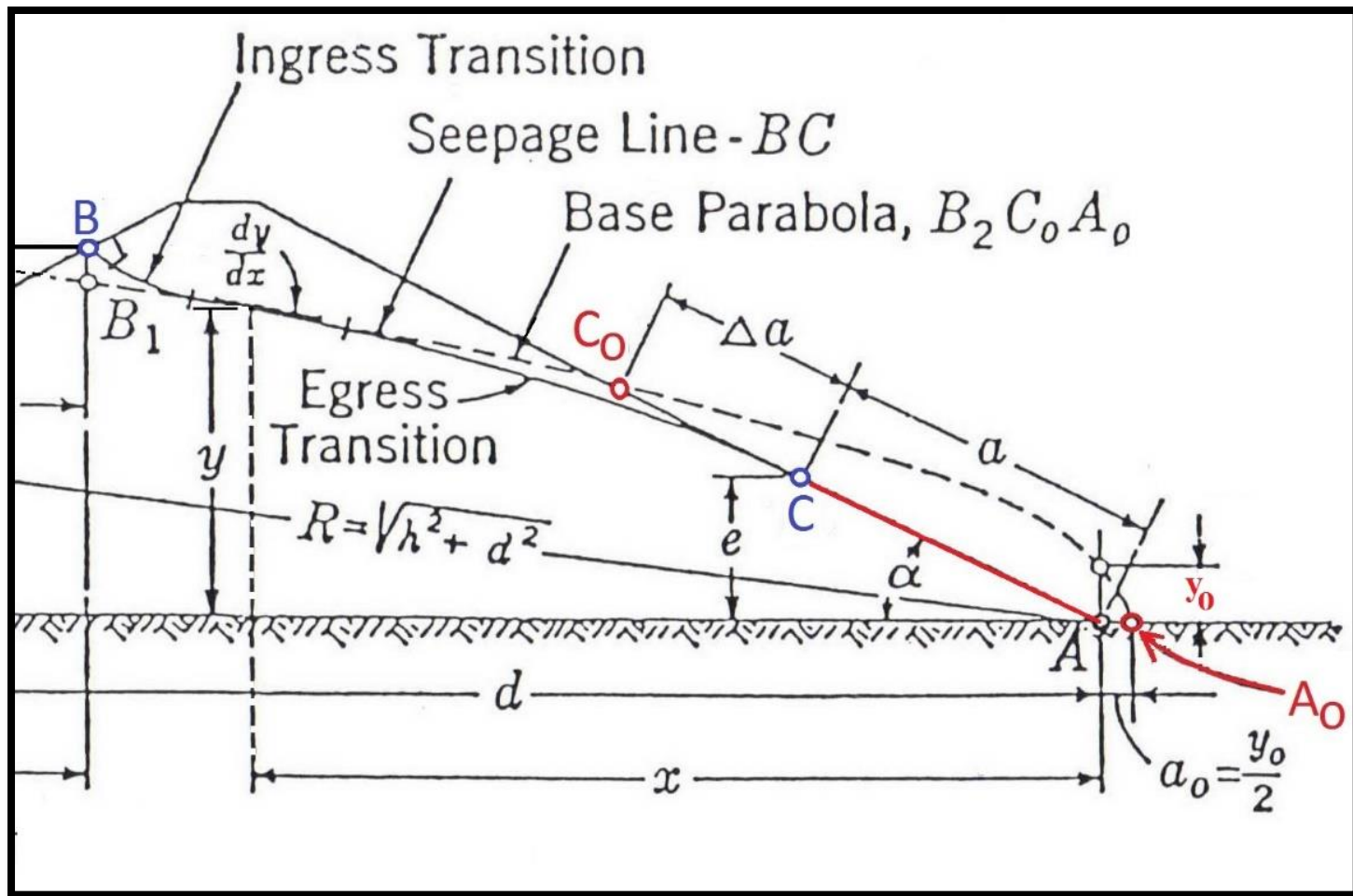


$$\alpha=90, \quad c=0.5-90/360=1/4, \quad c=\Delta a/(a+\Delta a)$$

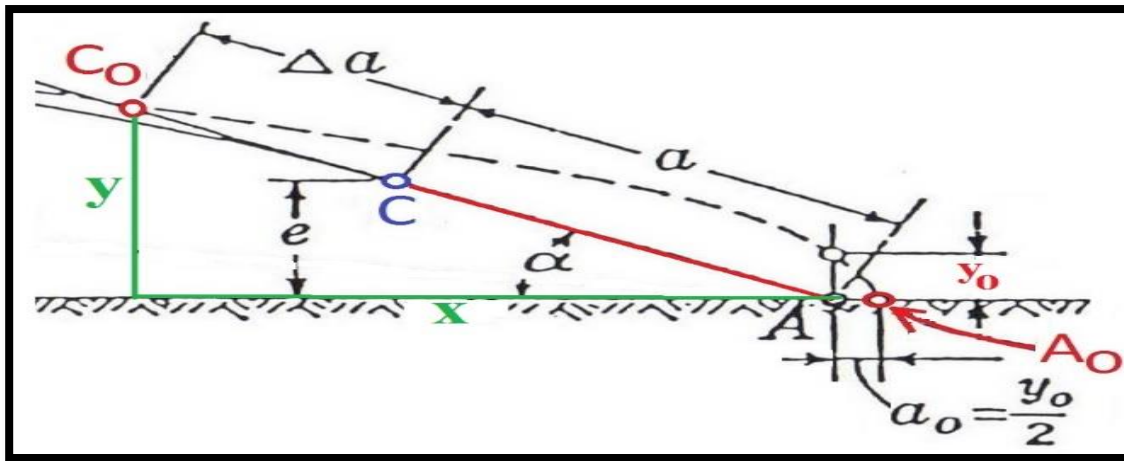
การสร้าง Base Parabola



X	Y
$-a_o = -y_o/2$	0
0	y_o
d	$\sqrt{y_o^2 + 2y_o d} = \sqrt{y_o(y_o + 2d)} = \sqrt{(R - d)(R + d)} = h$



- Discharge Face (a) คือส่วนของผิวลาดเขื่อนที่ Seepage จะไหลออก
- หาได้จากจุดตัดของ Base Parabola กับผิวลาดเขื่อน ซึ่ง $= (a + \Delta a)$
- $c = f(\alpha)$ ซึ่งหาได้จากกราฟ หรือหาโดยประมาณจากสมการ $c = 0.5 - \alpha/360$
เมื่อ α = slope of discharge face
- หา Δa จากสมการ $c = \Delta a / (a + \Delta a)$ เมื่อทราบ c และ $(a + \Delta a)$



$$x = (a + \Delta a) \cos \alpha ; y = (a + \Delta a) \sin \alpha$$

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

แทนค่า x และ y ลงในสมการ Base Parabola

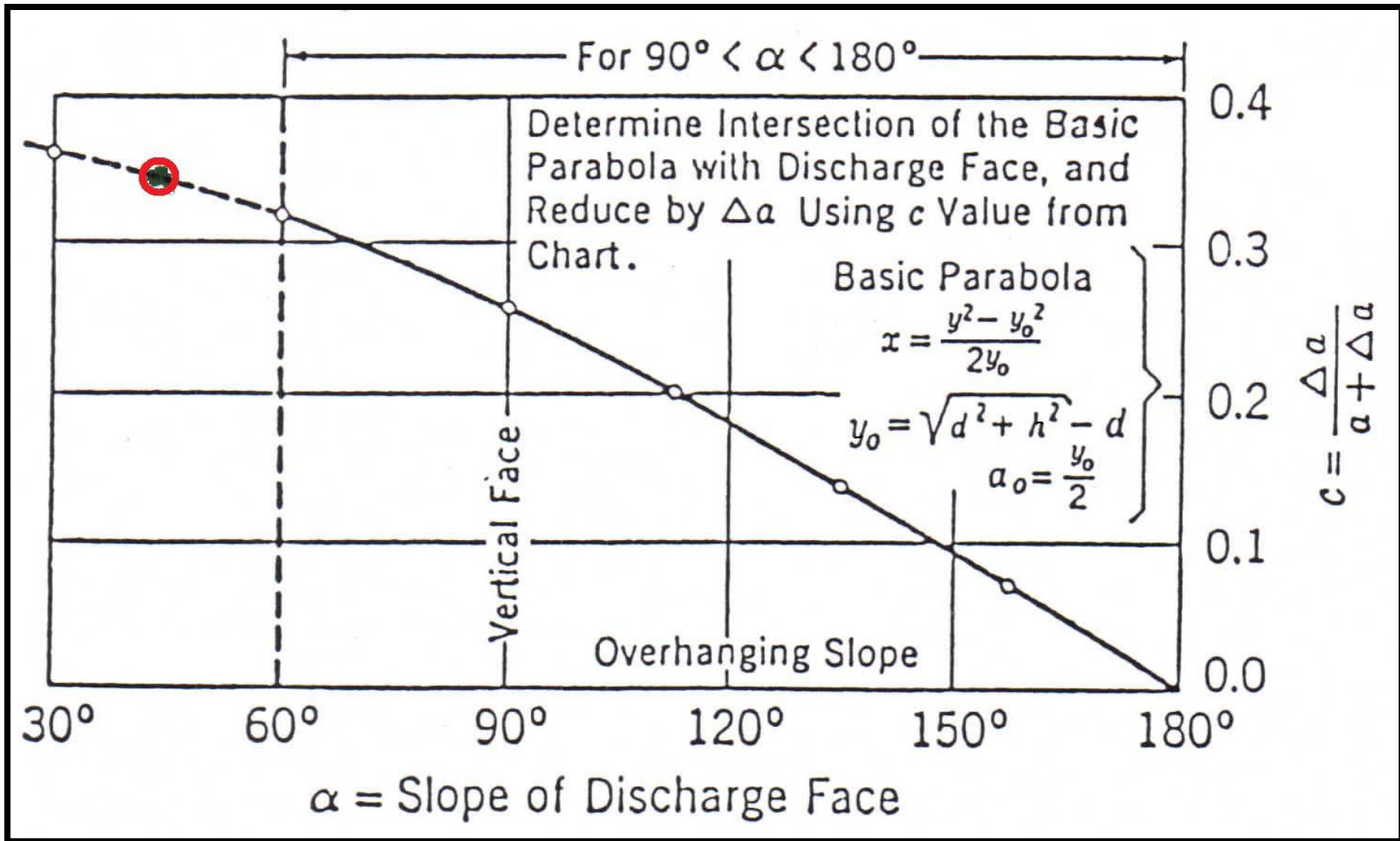
$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha}$$

(1) Prove it.

$$\text{ให้ } c = \frac{\Delta a}{a + \Delta a}$$

(2)

$$\Delta a = \frac{cy_0}{1 - \cos \alpha} ; a = \frac{(1 - c)y_0}{1 - \cos \alpha}$$

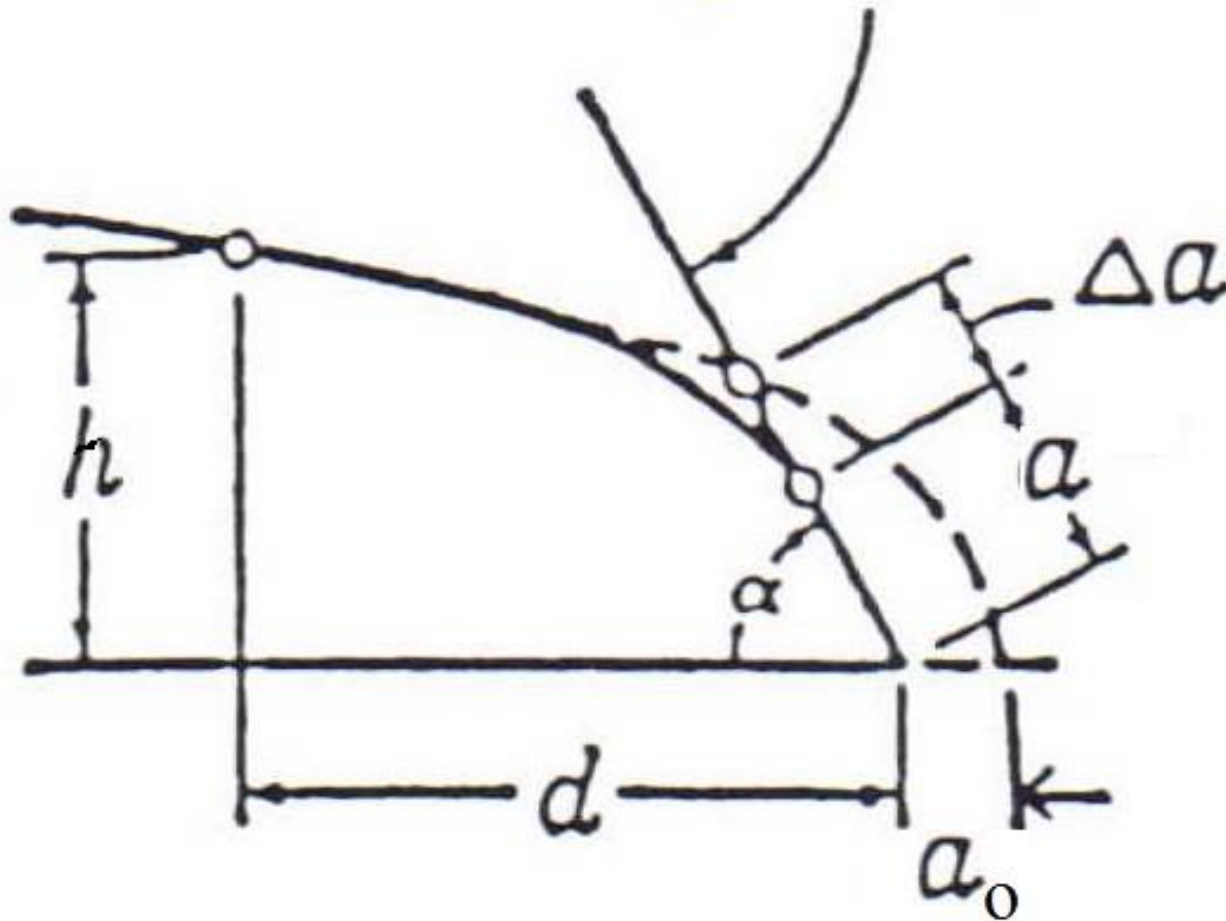


$$C = 0.5 - \alpha / 360 \text{ (ค่าโดยประมาณ)}$$

ค่า c จากกราฟและสมการ

α	c (Graph)	$c=0.5-\alpha/360$
30	0.360	0.417
60	0.325	0.333
90	0.255	0.250
120	0.175	0.167
150	0.090	0.083
180	0.000	0.000

Discharge Face



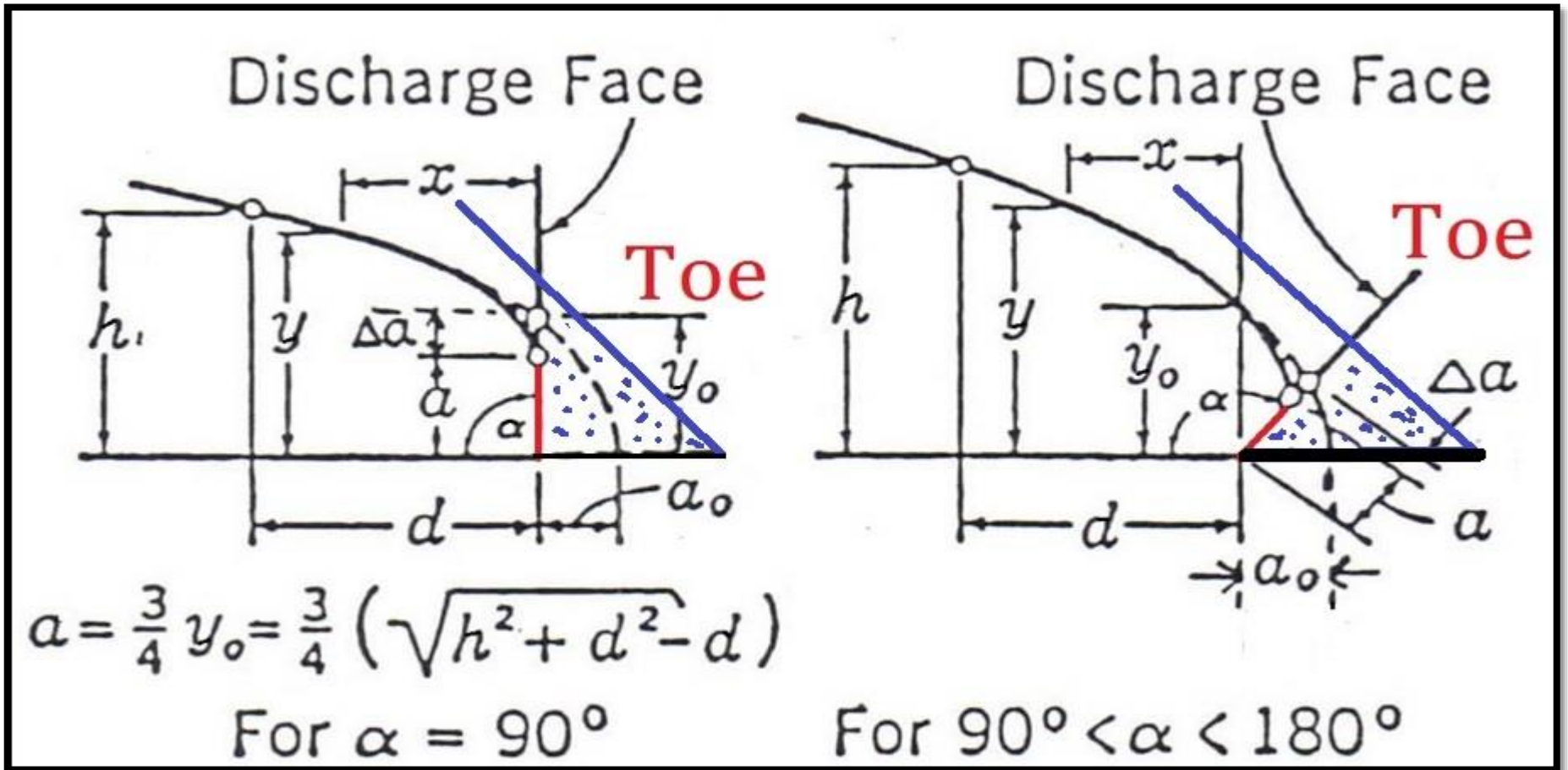
For $60^\circ < \alpha < 90^\circ$

No Drain

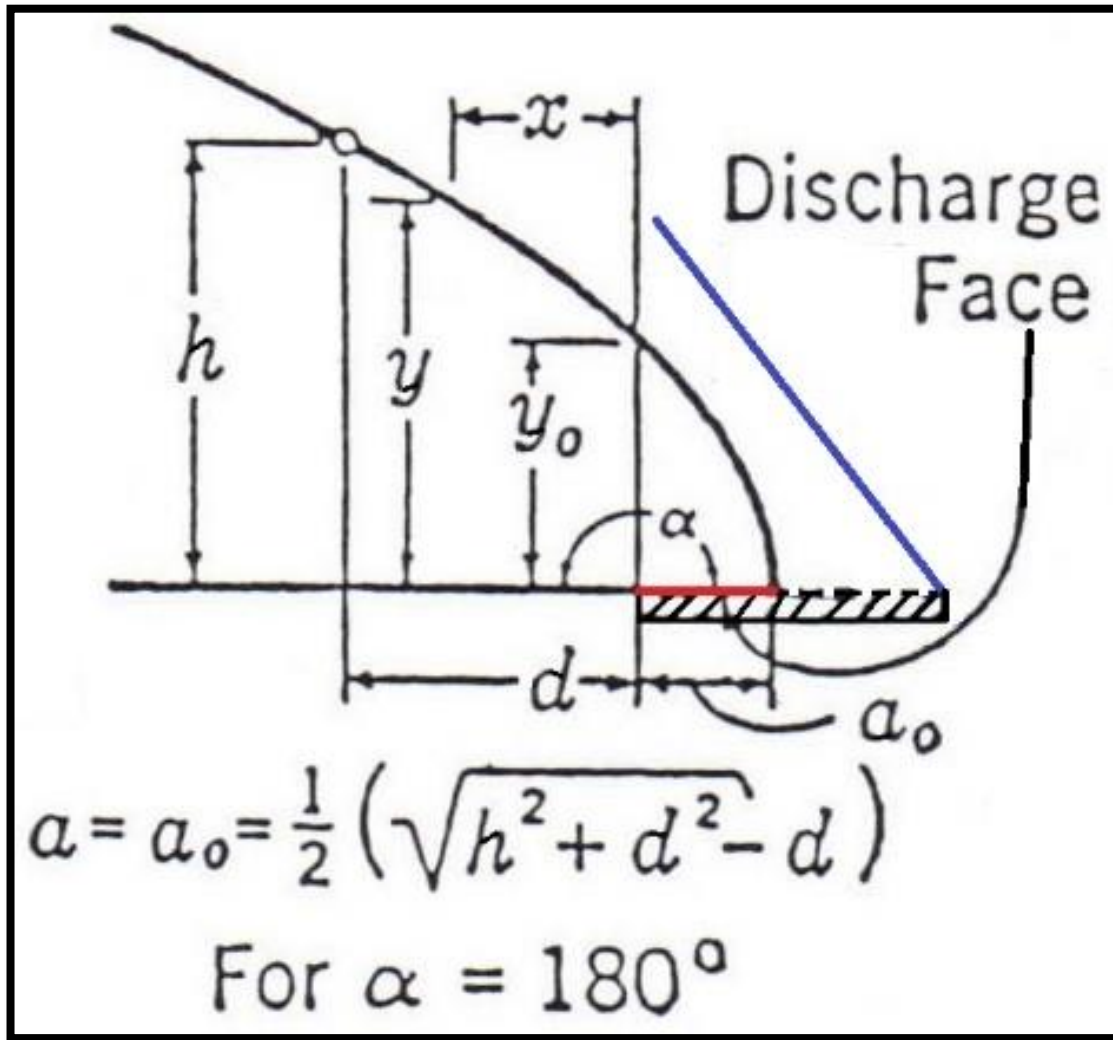
$$a = \frac{(1 - c)y_o}{1 - \cos \alpha}$$

$$\Delta a = \frac{cy_o}{1 - \cos \alpha}$$

Toe Drain



$\alpha = 90$, $c = 0.5 - 90/360 = 1/4 = \Delta a / (a + \Delta a)$
 $a = 0.75 y_0$, $\Delta a = 0.25 y_0$



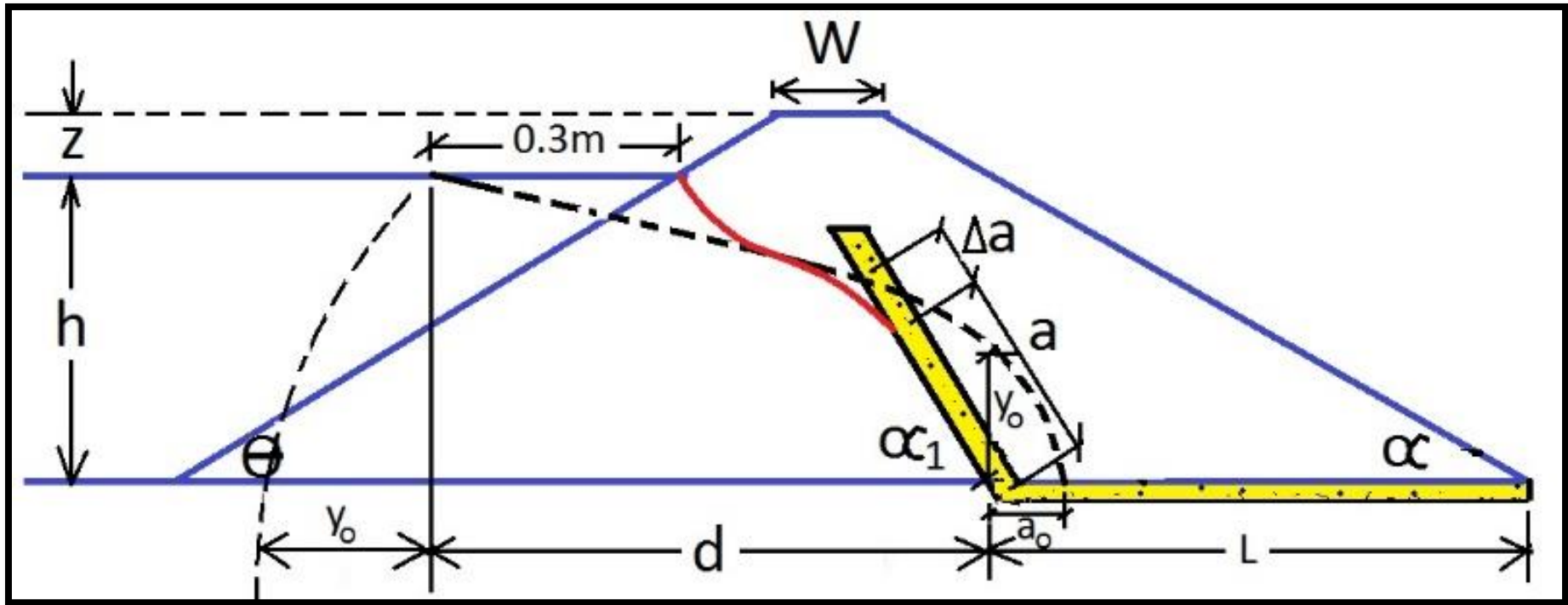
Blanket Drain

$$a = a_0 = y_0/2$$

$$\Delta a = 0$$

$$\alpha = 180, c = 0.5 - 180/360 = 0 = \Delta a / (a + \Delta a)$$

Chimney drain



$$d = (0.3h + z)\text{Cot}\theta + W + (h + z)\text{Cot}\alpha - L$$

$$R = \sqrt{h^2 + d^2}$$

$$60 < \alpha < 90$$

$$y_0 = R - d$$

$$a = \frac{(1 - c)y_0}{1 - \text{Cos}\alpha_1}$$

$$\Delta a = \frac{cy_0}{1 - \text{Cos}\alpha_1}$$

สรุปขั้นตอนการสร้าง Phreatic Line

1. ข้อมูลที่ต้องการ $\{h, z, W, \theta, \alpha\}$

2. การคำนวณ Base Parabola

$$m = h \cdot \cot(\theta); \quad d = 0.3m + z \cdot \cot(\theta) + W + (h + z) \cot(\alpha)$$

$$R = \sqrt{h^2 + d^2}; \quad y_0 = R - d; \quad x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

3. การหาจุดที่น้ำซึมออก

หา c จากกราฟ (หรือ $c = 0.5 - \alpha/360$)

$$a = \frac{(1-c)y_0}{1 - \cos \alpha}; \quad \Delta a = \frac{cy_0}{1 - \cos \alpha}$$

การคำนวณหาอัตราการไหลซึมของน้ำผ่าน ตัวเขื่อน

calculation of Seepage Rate

Darcy's law

$$q = KiA$$

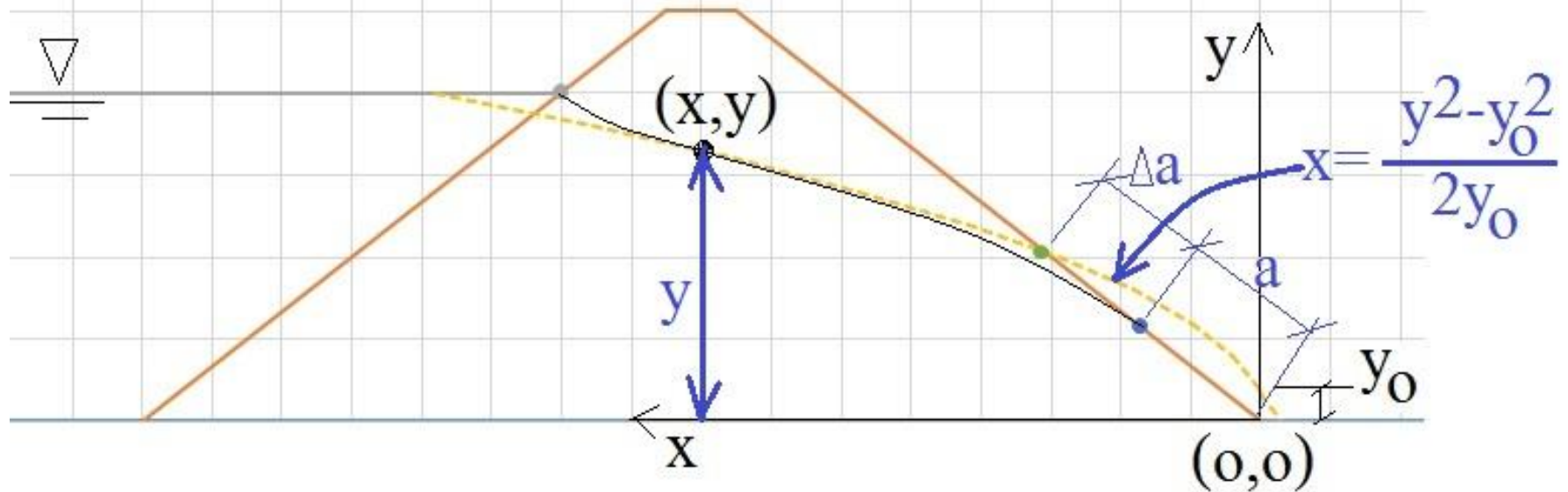
q =Seepage rate ($\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$)

K =Permeability coefficient (m/d)

i =Hydraulic gradient (dy/dx)

A =Cross sectional area of flow(m^2/m)

Homogeneous dam(No drain)+Isotropic



For $30 < \alpha < 180$

$$A = y = \sqrt{y_0^2 + 2xy_0}$$

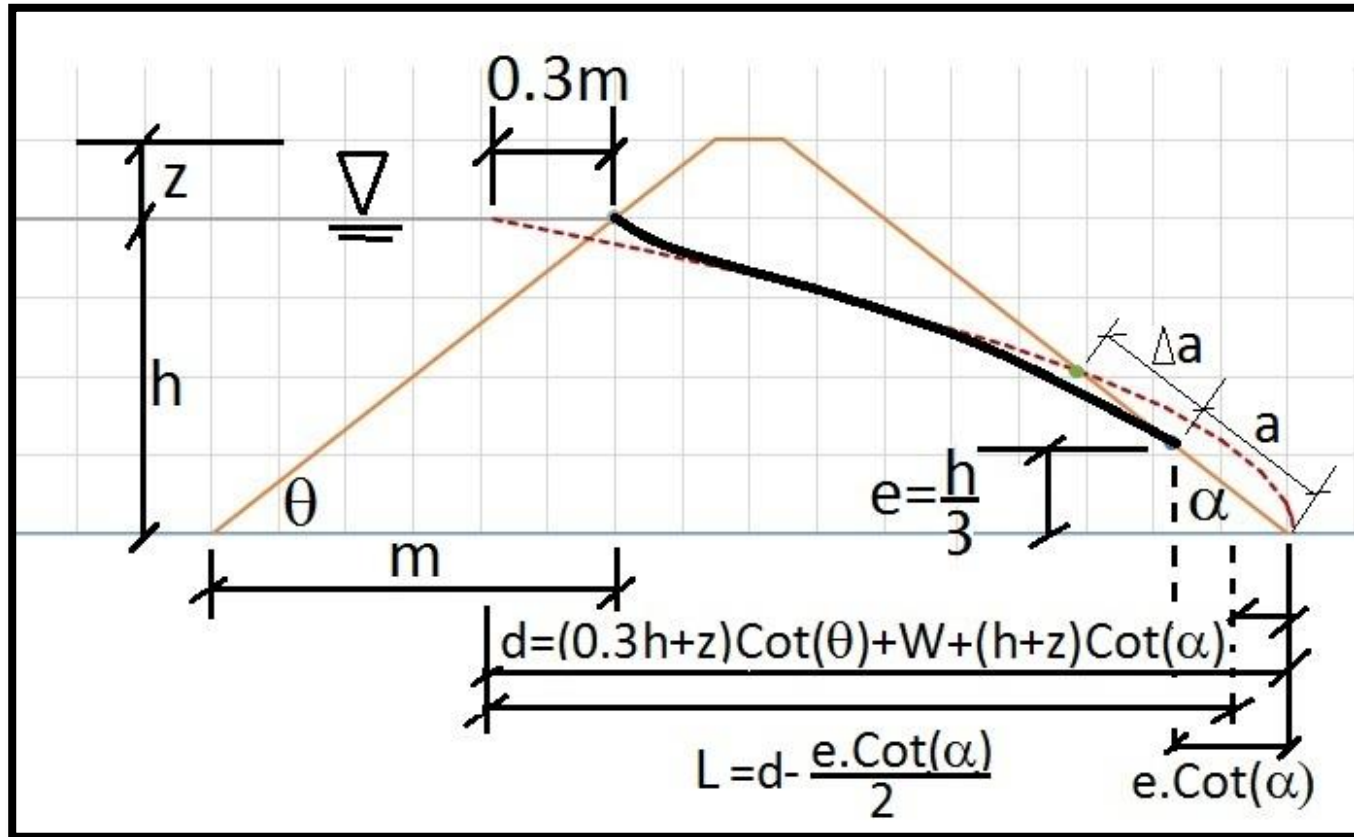
$$i = \frac{dy}{dx} = \frac{y_0}{\sqrt{y_0^2 + 2xy_0}}$$

$$q = KiA = Ky_0$$

For $\alpha < 30$

$$Q = K \cdot a \cdot \sin^2(\alpha)$$

Approximation method(For $\alpha < 90^\circ$)



Assume $e = h/3$

$$q = KiA, \quad i = \frac{h - e}{L},$$

$$A = \frac{(h + e)L}{2}$$

$$q = K \frac{(h^2 - e^2)}{2L},$$

$$q = \frac{4Kh^2}{9L}$$

การหา Phreatic Line และ Seepage Rate กรณี $K_V \neq K_H$ (Anisotropic)

1. $p = \sqrt{\frac{K_V}{K_H}}$

2. แปลงระยะราบ (x) ด้วย p หรือ $x' = p \cdot x$

3. หา Phreatic line ตามวิธีที่กล่าวมาแล้ว

4. คำนวณหา q จากสมการ

1. $q = K y_o$ ($30^\circ < \alpha < 180^\circ$)

2. $q = K \cdot a \cdot \sin^2 \alpha$ ($\alpha < 30^\circ$)

3. $K = \sqrt{K_V \cdot K_H}$

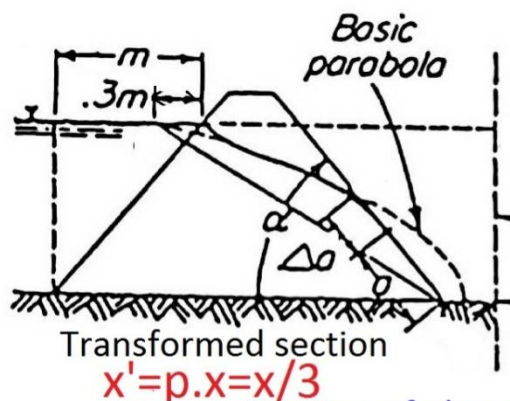
ค่าอัตราส่วน K_v/K_H

1. กรณีบดอัดตัวเชื่อมด้วย Tamping Roller

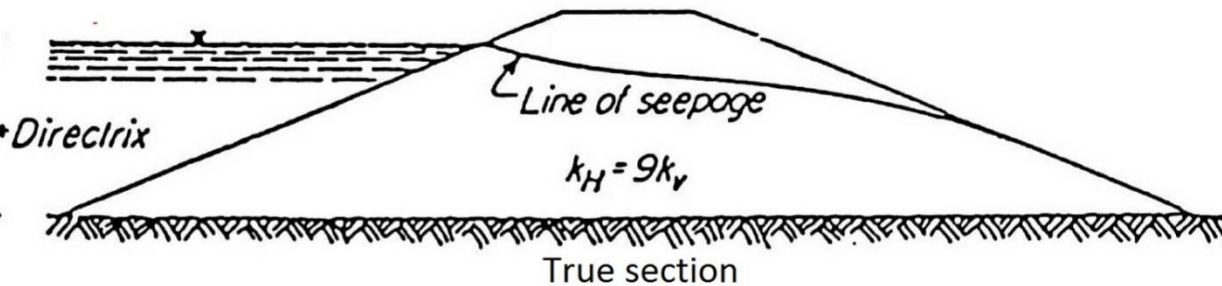
$$K_v/K_H = 0.10-0.50 \text{ เฉลี่ย } = 0.20$$

2. กรณีบดอัดตัวเชื่อมด้วย Pneumatic Tired Roller

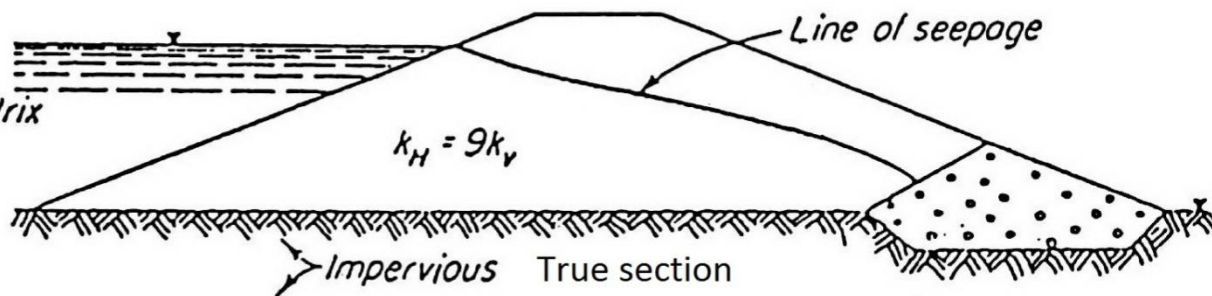
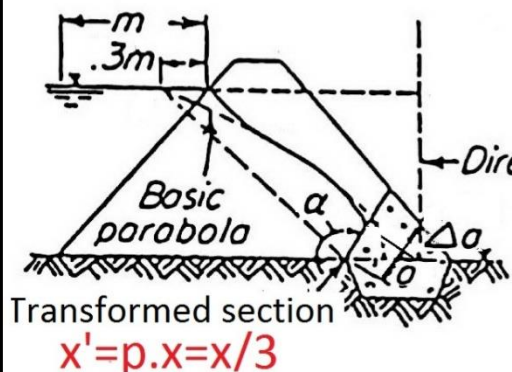
$$K_v/K_H = 0.03-0.05 \text{ เฉลี่ย } = 0.04$$



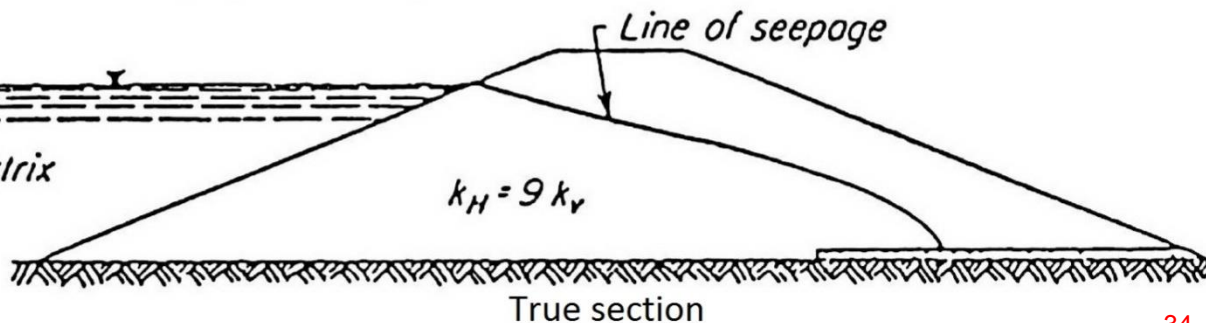
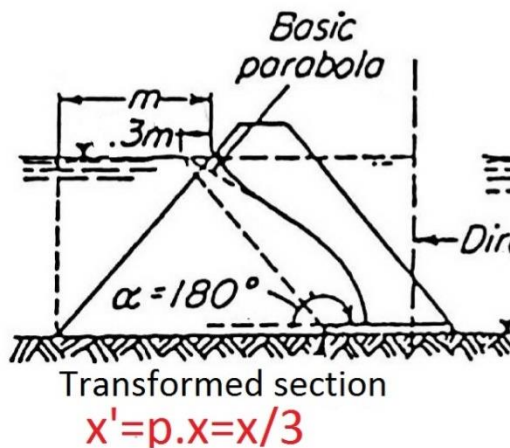
$$p = \sqrt{K_V/K_H} = \sqrt{1/9} = 1/3$$



Position of phreatic line in uniform embankment with impervious foundation



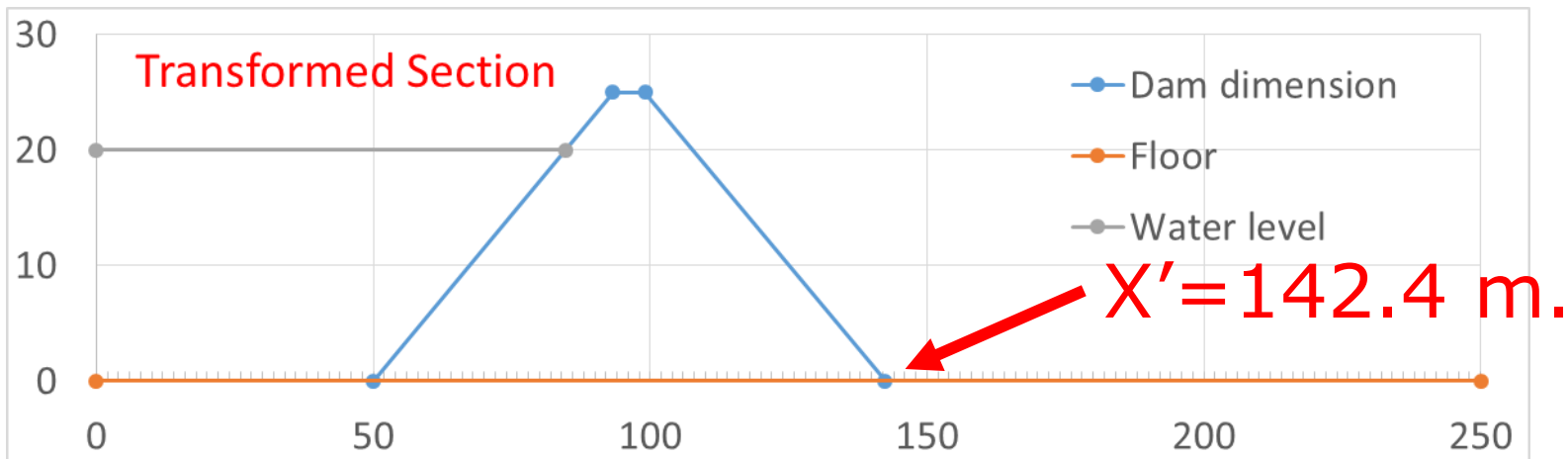
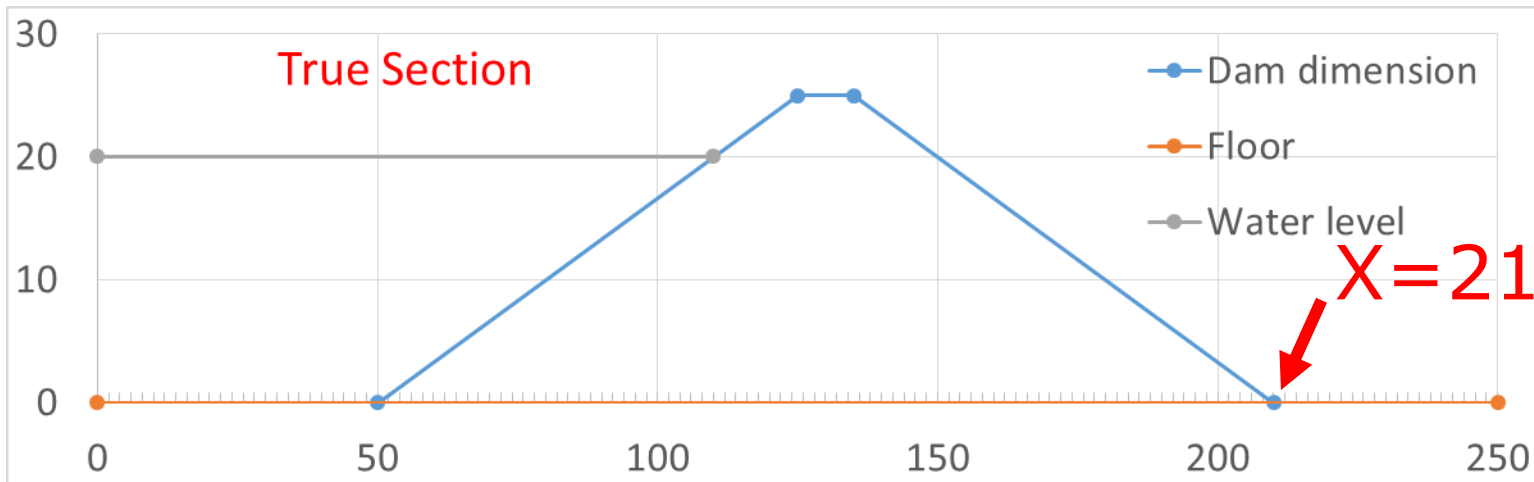
Position of phreatic line in uniform embankment with rock-fill toe



EXAMPLE 1: หา Transformed Section when $K_V \neq K_H$

เขื่อนดินมีมิติของ True Section ดังรูป จงหา Transformed Section

ถ้า $K_V = K_H/3$ หรือ $p = \sqrt{K_V/K_H} = \sqrt{1/3} = 0.5774$, $X' = p.X$



2.EXAMPLE

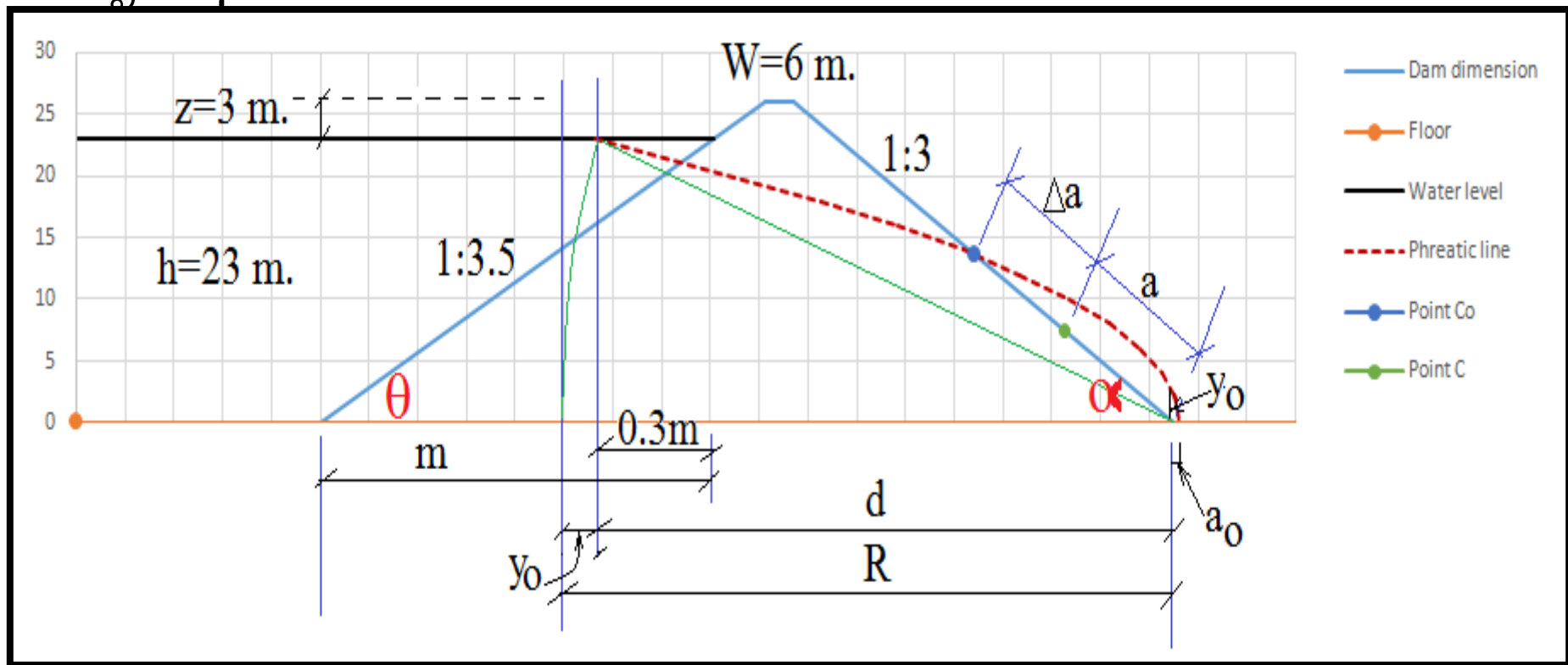
Seepage Calculation

Range of Permeability for Various Soils

<i>Soil</i>	<i>Permeability Coefficient, k (cm/sec)</i>	<i>Relative Permeability</i>
Coarse gravel	Exceeds 10^{-1}	High
Sand, clean	10^{-1} to 10^{-3}	Medium
Sand, dirty	10^{-3} to 10^{-5}	Low
Silt	10^{-5} to 10^{-7}	Very low
Clay	Less than 10^{-7}	Impervious

EXAMPLE 2: Homogeneous Dam-No drain

จงสร้าง Phreatic Line และคำนวณหาอัตราการไหล
ซึมน้ำผ่านเขื่อน (Seepage Rate) ซึ่งมีรายละเอียด



Permeability Coefficient(K)= $1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. (Low permeability)

EX.2: คำนวณ Phreatic Line/Seepage Line

$$\theta = 15.9 (V:H = 1:3.5), \alpha = 18.4 (V:H = 1:3)$$

$$m = h \cdot \cot(\theta) = 23 \times 3.5 = 80.5 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3m + z \cdot \cot(\theta) + W + (h+z) \cot(\alpha) \\ &= 0.3 \times 80.5 + 3 \times 3.5 + 6 + (23+3) \times 3 = 118.7 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$R = (h^2 + d^2)^{0.5} = (23^2 + 118.7^2)^{0.5} = 120.9 \text{ m.}$$

$$y_o = R - d = 120.9 - 118.7 = 2.2 \text{ m.}$$

$$a_o = 0.5y_o = 0.5 \times 2.2 = 1.1 \text{ m.}$$

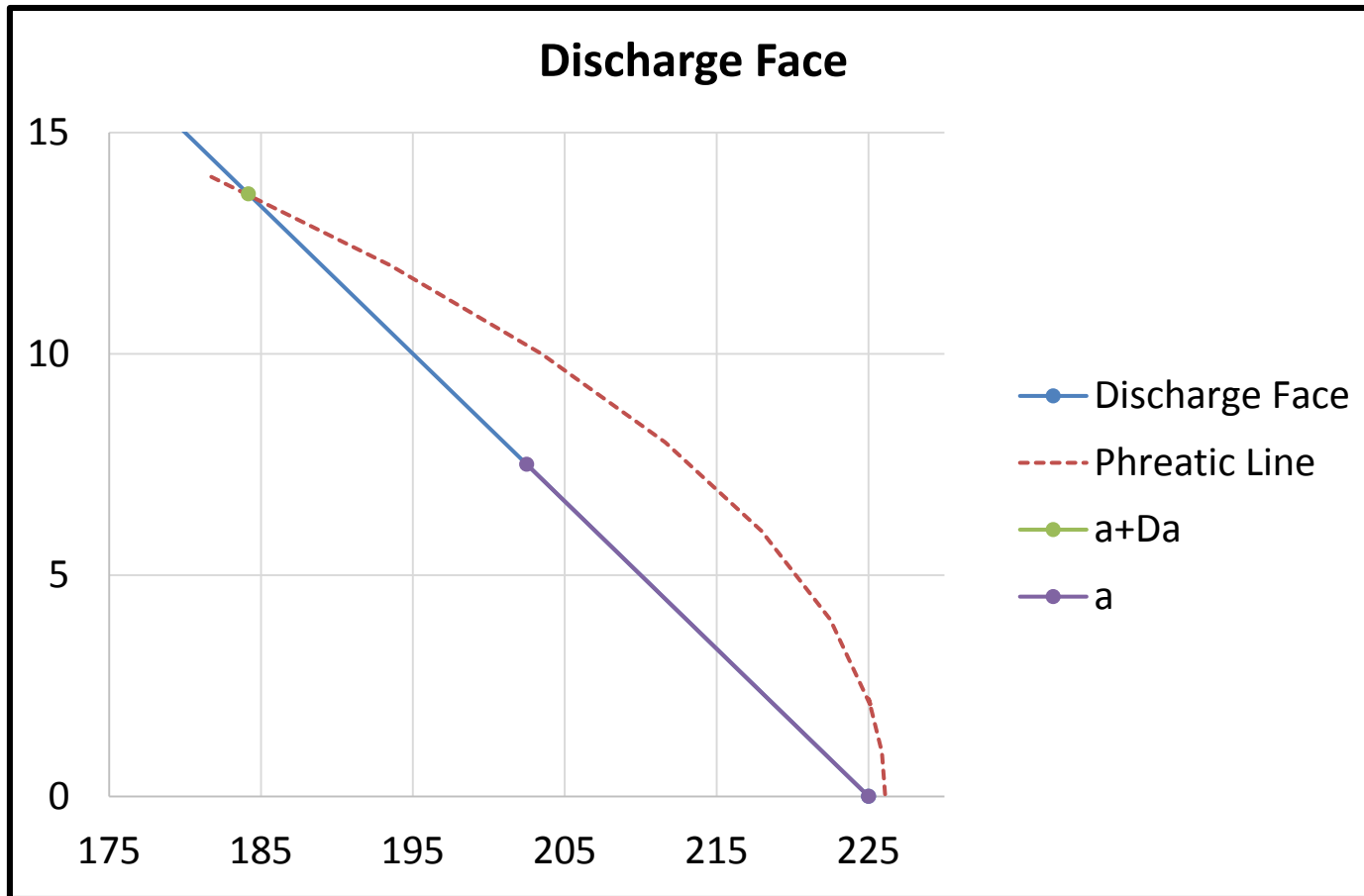
EX.2: การสร้าง Base Parabola

$$x=(y^2-y_o^2)/2y_o; y_o=2.2 \text{ m.}, y=(y_o^2+2xy_o)^{0.5}$$

Phreatic line	
y	x
23	118.7
18	72.2
16	56.8
14	43.3
12	31.5
10	21.5

Phreatic line	
y	x
8	13.4
6	7.0
4	2.5
2.2	0.0
1.0	-0.9
0	-1.1

EX.2



$$a + \Delta a = y_o / (1 - \cos(\alpha)) = 2.2 / (1 - 0.949) = 43.04 \text{ m.}$$

$$c = 0.5 - 18.4 / 360 = 0.4488$$

$$\Delta a = c(a + \Delta a) = 0.4488 \times 43.04 = 19.3162 \text{ m.}$$

$$a = 43.04 - 19.3162 = 23.7242 \text{ m.}$$

EX.2: คำนวณหา Seepage Rate

$$q=Ky_o$$

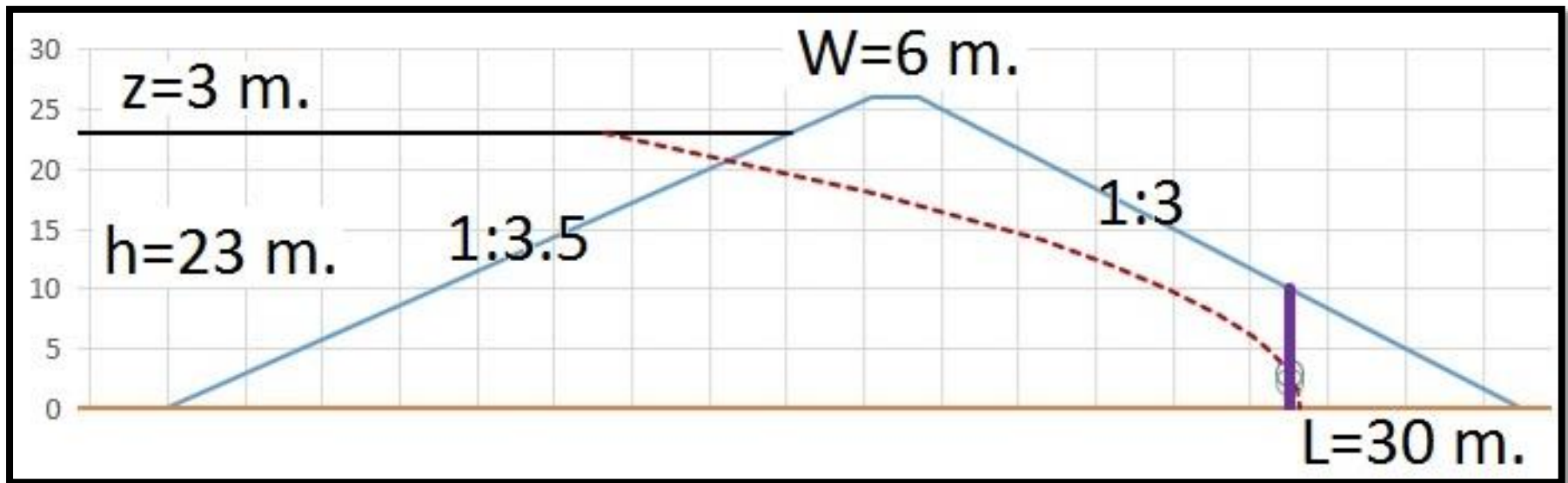
$$K=1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0.0108 \text{ m/d}$$

$$Y_o=2.2 \text{ m.}$$

$$q=0.0108 \times 2.2=0.0239 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

EXAMPLE 3: Homogeneous Dam-90 Toe Drain

จงสร้าง Phreatic Line และคำนวณหาอัตราการไหล
ซึมน้ำผ่านเขื่อน (Seepage Rate) ซึ่งมีรายละเอียด
ดังรูป



90-Toe: Toe height=10 m., Toe length(L)=30 m.

Permeability Coefficient(K)= 1.25×10^{-5} cm/s. (Low permeability)

EX.3: กำหนด Phreatic Line/Seepage Line

$$\theta=15.9(V:H=1:3.5), \alpha=18.4(V:H)=1:3)$$

$$\alpha_1=90(\text{Toe angle})$$

$$m=h.Cot(\theta)=23 \times 3.5=80.5 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3m + z.Cot(\theta) + W + (h+z)Cot(\alpha) - L \\ &= 0.3 \times 80.5 + 3 \times 3.5 + 6 + (23+3) \times 3 - 30 = 88.65 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$R=(h^2+d^2)^{0.5}=(23^2+88.65^2)^{0.5}=91.59 \text{ m.}$$

$$y_o=R-d=91.59-88.65=2.94 \text{ m.}$$

$$a_o=0.5y_o=0.5 \times 2.94=1.47 \text{ m.}$$

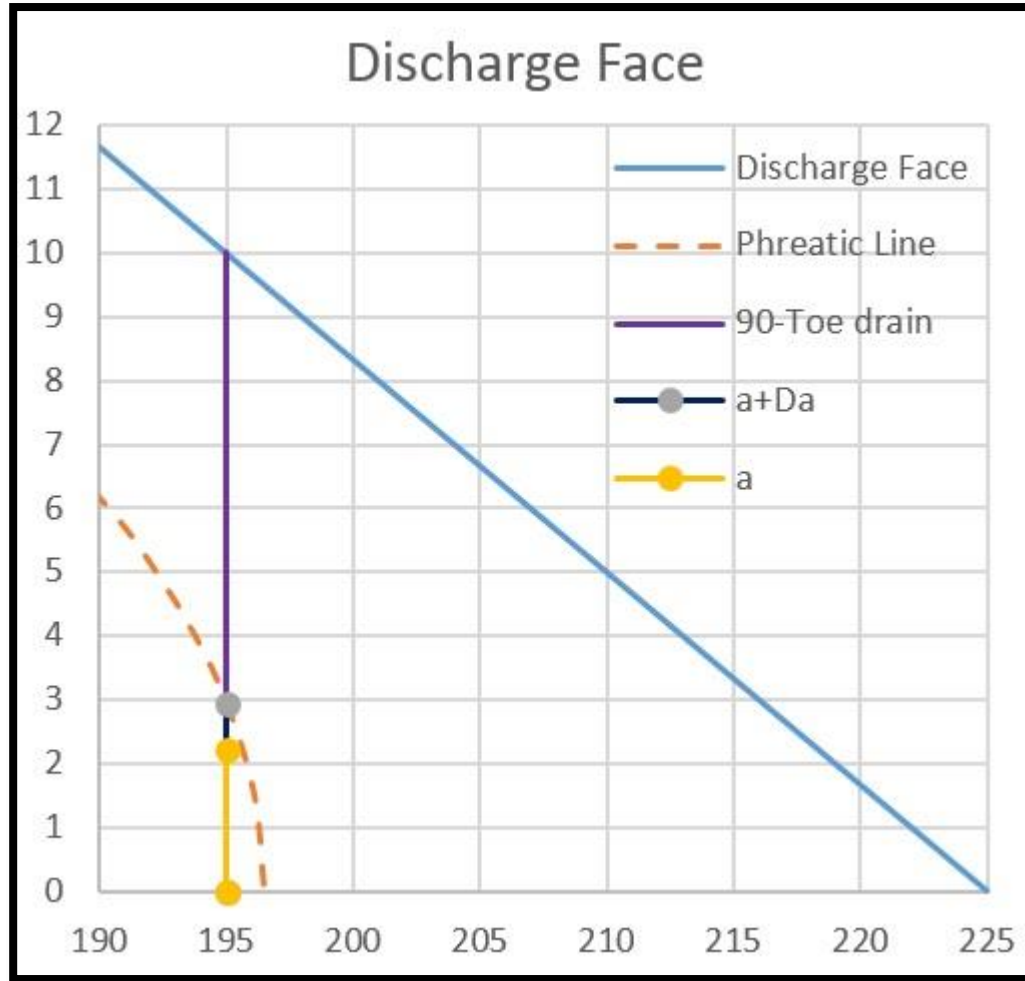
EX.3: การสร้าง Base Parabola

$$x=(y^2-y_o^2)/2y_o; y_o=2.94 \text{ m.}, y=(y_o^2+2xy_o)^{0.5}$$

Phreatic line	
y	x
23	88.65
18	53.73
16	42.14
14	31.92
12	23.06
10	15.57

Phreatic line	
y	x
8	9.44
6	4.67
5	2.79
4	1.26
2.94	0.00
1.50	-1.08

EX.3



$$a + \Delta a = y_o / (1 - \cos(90)) = 2.94 / (1 - 0) = 2.94 \text{ m.}$$

$$c = 0.5 - 90/360 = 0.25$$

$$\Delta a = c(a + \Delta a) = 0.25 \times 2.94 = 0.73 \text{ m.}$$

$$a = 2.94 - 0.73 = 2.21 \text{ m.}$$

EX.3: คำนวณหา Seepage Rate

$$q = Ky_o$$

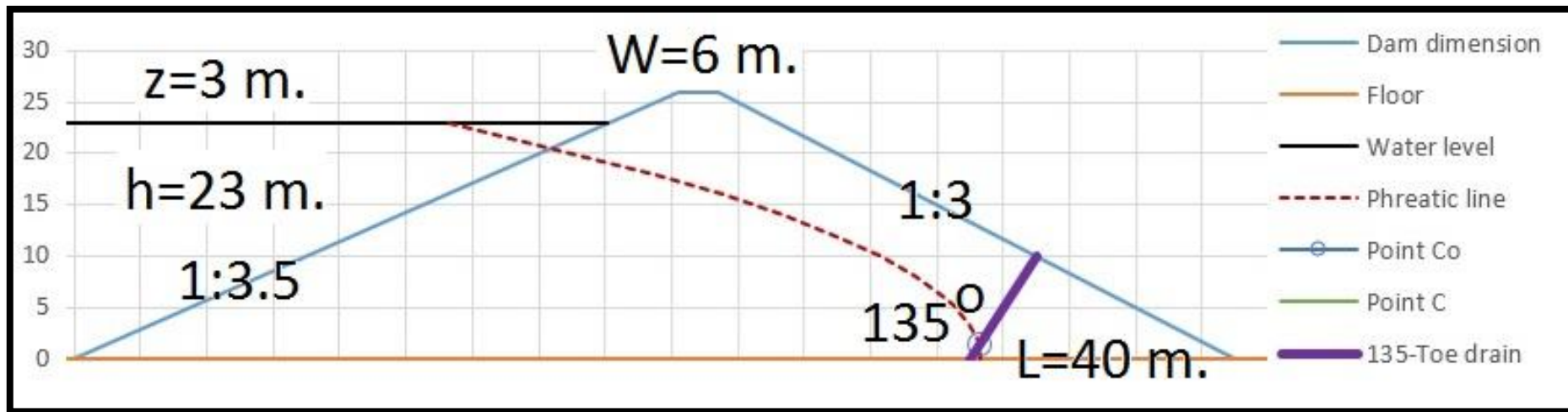
$$K = 1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0.0108 \text{ m/d}$$

$$Y_o = 2.94 \text{ m.}$$

$$q = 0.0108 \times 2.94 = 0.0317 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

EXAMPLE 4: Homogeneous Dam-135 Toe Drain

จงสร้าง Phreatic Line และคำนวณหาอัตราการไหล
ซึมน้ำผ่านเขื่อน (Seepage Rate) ซึ่งมีรายละเอียด
ดังรูป



135-Toe: Toe height=10 m., Toe length(L)=40 m.

Permeability Coefficient(K)= 1.25×10^{-5} cm/s. (Low permeability)

EX.4: กำหนด Phreatic Line/Seepage Line

$$\theta=15.9(V:H=1:3.5), \alpha=18.4(V:H)=1:3)$$

$$\alpha_1=135(\text{Toe angle})$$

$$m=h.Cot(\theta)=23 \times 3.5=80.5 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3m + z.Cot(\theta) + W + (h+z)Cot(\alpha) - L \\ &= 0.3 \times 80.5 + 3 \times 3.5 + 6 + (23+3) \times 3 - 40 = 78.65 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$R=(h^2+d^2)^{0.5}=(23^2+78.65^2)^{0.5}=81.94 \text{ m.}$$

$$y_o=R-d=81.94-78.65=3.29 \text{ m.}$$

$$a_o=0.5y_o=0.5 \times 3.29=1.65 \text{ m.}$$

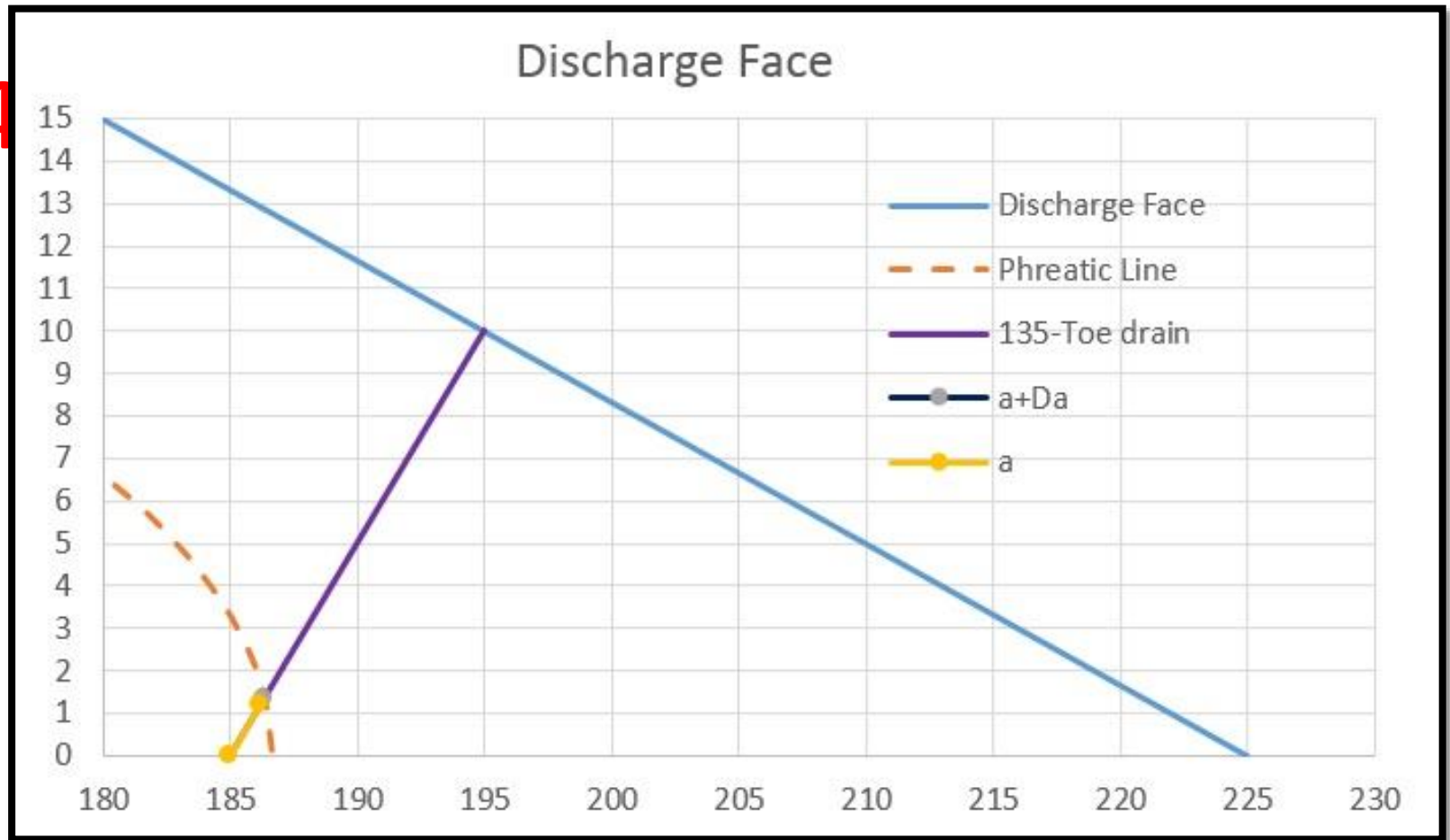
EX.4: การสร้าง Base Parabola

$$x=(y^2-y_o^2)/2y_o; y_o=3.29 \text{ m.}, y=(y_o^2+2xy_o)^{0.5}$$

Phreatic line	
y	x
23	78.65
18	47.53
16	37.21
14	28.10
12	20.21
10	13.53

Phreatic line	
y	x
8	8.07
6	3.82
5	2.15
4.5	1.43
3.29	0.00
1.70	-1.21

EX.4



$$a + \Delta a = y_o / (1 - \cos(135)) = 3.29 / (1 - (-0.707)) = 1.9296 \text{ m.}$$

$$c = 0.5 - 135/360 = 0.125$$

$$\Delta a = c(a + \Delta a) = 0.125 \times 1.9296 = 0.2412 \text{ m.}$$

$$a = 1.9296 - 0.2412 = 1.6884 \text{ m.}$$

EX.4: คำนวณหา Seepage Rate

$$q=Ky_o$$

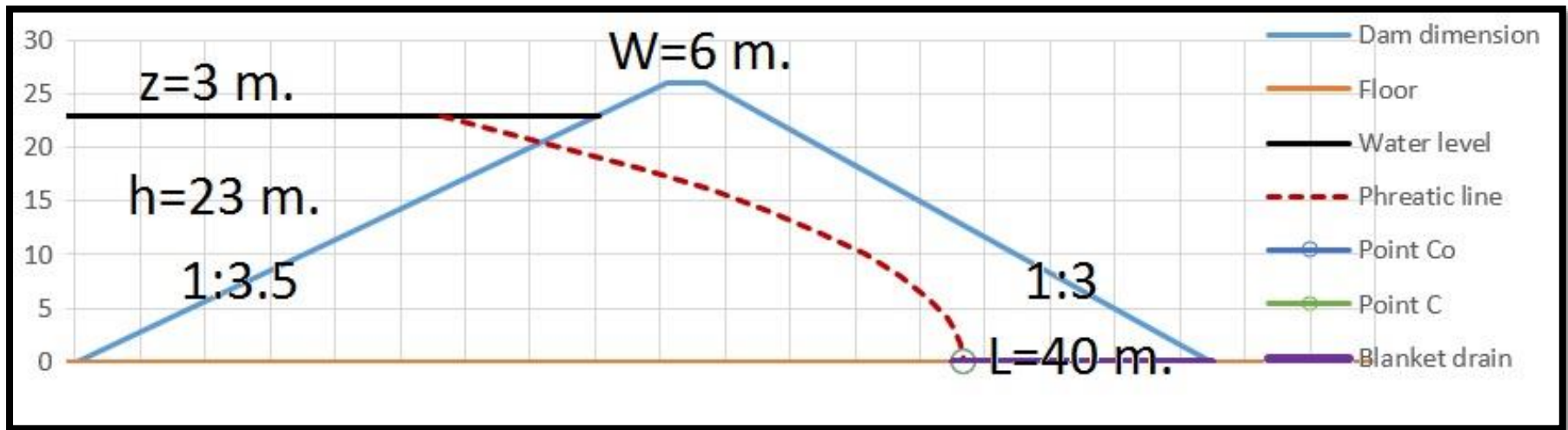
$$K=1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0.0108 \text{ m/d}$$

$$Y_o=3.29 \text{ m.}$$

$$q=0.0108 \times 3.29=0.0356 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

EXAMPLE 5: Homogeneous Dam-Blanket Drain

จงสร้าง Phreatic Line และคำนวณหาอัตราการไหล
ซึมน้ำผ่านเขื่อน (Seepage Rate) ซึ่งมีรายละเอียด
ดังรูป



Blanket Drain: Length(L)=40 m.

Permeability Coefficient(K)= $1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. (Low permeability)

EX.5: กำหนด Phreatic Line/Seepage Line

$$\theta = 15.9 (V:H = 1:3.5), \alpha = 18.4 (V:H) = 1:3$$

$$\alpha_1 = 180 (\text{Blanket Drain})$$

$$m = h \cdot \cot(\theta) = 23 \times 3.5 = 80.5 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3m + z \cdot \cot(\theta) + W + (h+z) \cot(\alpha) - L \\ &= 0.3 \times 80.5 + 3 \times 3.5 + 6 + (23+3) \times 3 - 40 = 78.65 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$R = (h^2 + d^2)^{0.5} = (23^2 + 78.65^2)^{0.5} = 81.94 \text{ m.}$$

$$y_o = R - d = 81.94 - 78.65 = 3.29 \text{ m.}$$

$$a_o = 0.5y_o = 0.5 \times 3.29 = 1.65 \text{ m.}$$

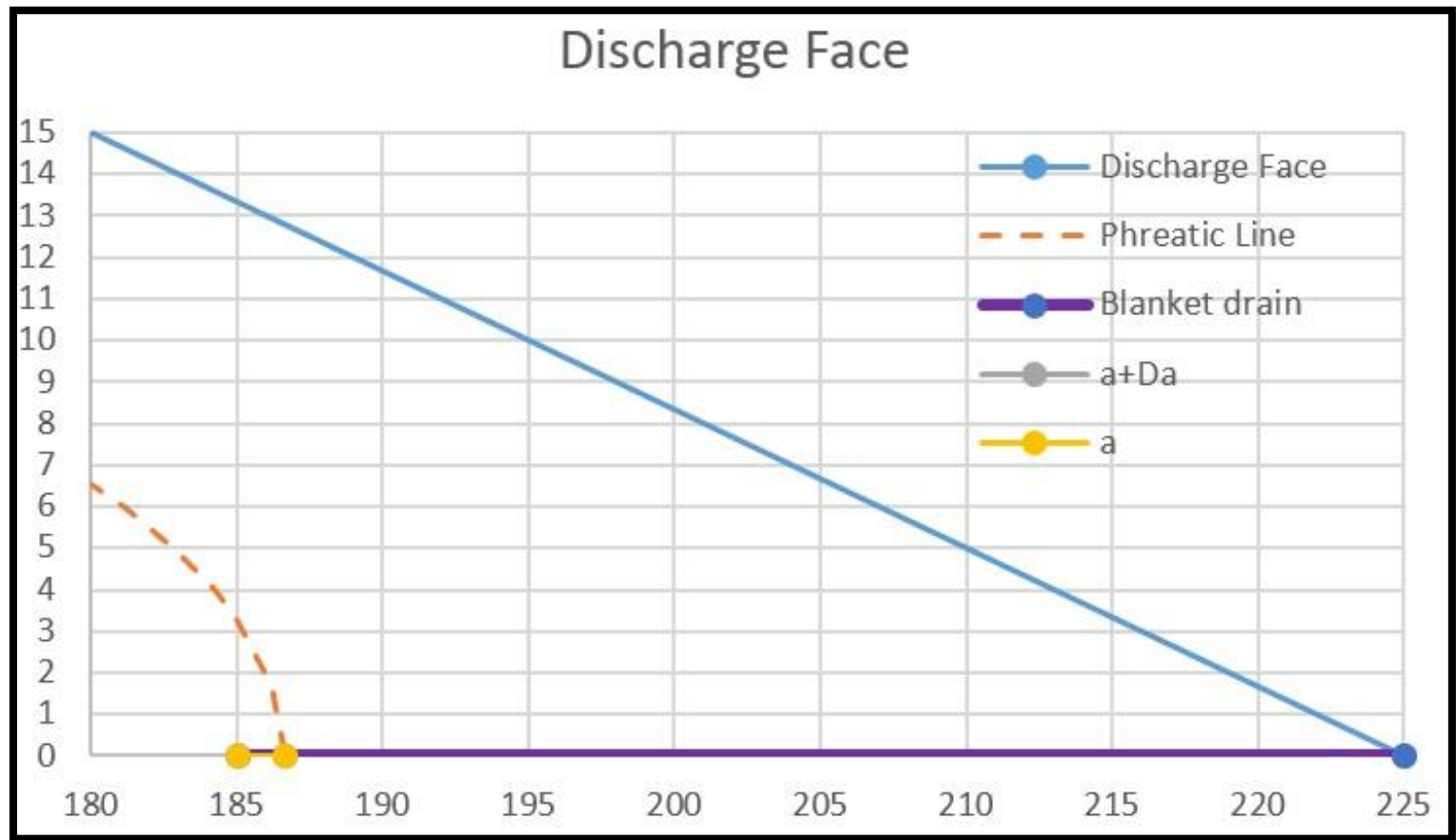
EX.5: การสร้าง Base Parabola

$$x=(y^2-y_o^2)/2y_o; y_o=3.29 \text{ m.}, y=(y_o^2+2xy_o)^{0.5}$$

Phreatic line	
y	x
23	78.65
18	47.53
16	37.21
14	28.10
12	20.21
10	13.53

Phreatic line	
y	x
8	8.07
6	3.82
5	2.15
4.5	1.43
3.29	0.00
1.70	-1.21

EX.5



$$a + \Delta a = y_0 / (1 - \cos(180)) = 3.29 / (1 - (-1)) = 1.647 \text{ m.}$$

$$c = 0.5 - 180 / 360 = 0$$

$$\Delta a = c(a + \Delta a) = 0 \text{ m.}$$

$$a = 1.647 - 0 = 1.647 \text{ m.}$$

EX.5: คำนวณหา Seepage Rate

$$q=Ky_o$$

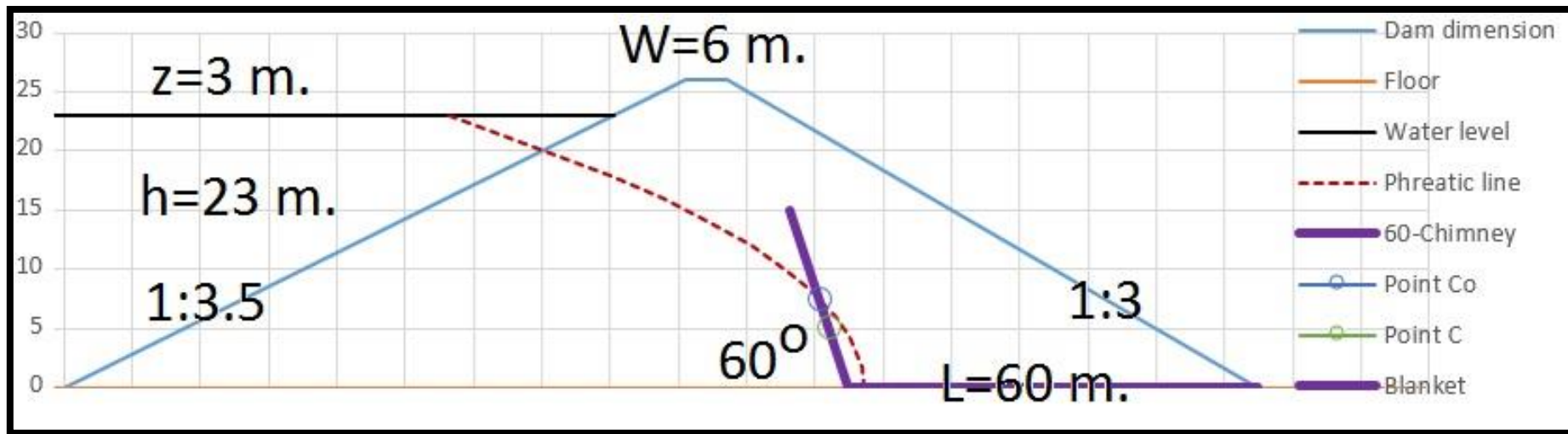
$$K=1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0.0108 \text{ m/d}$$

$$Y_o=3.29 \text{ m.}$$

$$q=0.0108 \times 3.29=0.0356 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

EXAMPLE 6: Homogeneous Dam-Chimney Drain

จงสร้าง Phreatic Line และคำนวณหาอัตราการไหล
ซึมน้ำผ่านเขื่อน (Seepage Rate) ซึ่งมีรายละเอียด
ดังรูป



Chimney Drain: Angle(α_1)= 60, Height=15 m., Length(L)=60 m.
Permeability Coefficient(K)= 1.25×10^{-5} cm/s. (Low permeability)

EX.6: กำหนด Phreatic Line/Seepage Line

$$\theta = 15.9(V:H=1:3.5), \alpha = 18.4(V:H)=1:3)$$

$$\alpha_1 = 60(\text{Chimney Drain})$$

$$m = h \cdot \cot(\theta) = 23 \times 3.5 = 80.5 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} d &= 0.3m + z \cdot \cot(\theta) + W + (h+z) \cot(\alpha) - L \\ &= 0.3 \times 80.5 + 3 \times 3.5 + 6 + (23+3) \times 3 - 60 = 58.65 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$R = (h^2 + d^2)^{0.5} = (23^2 + 58.65^2)^{0.5} = 63.0 \text{ m.}$$

$$y_o = R - d = 63.0 - 58.65 = 4.35 \text{ m.}$$

$$a_o = 0.5y_o = 0.5 \times 4.35 = 2.17 \text{ m.}$$

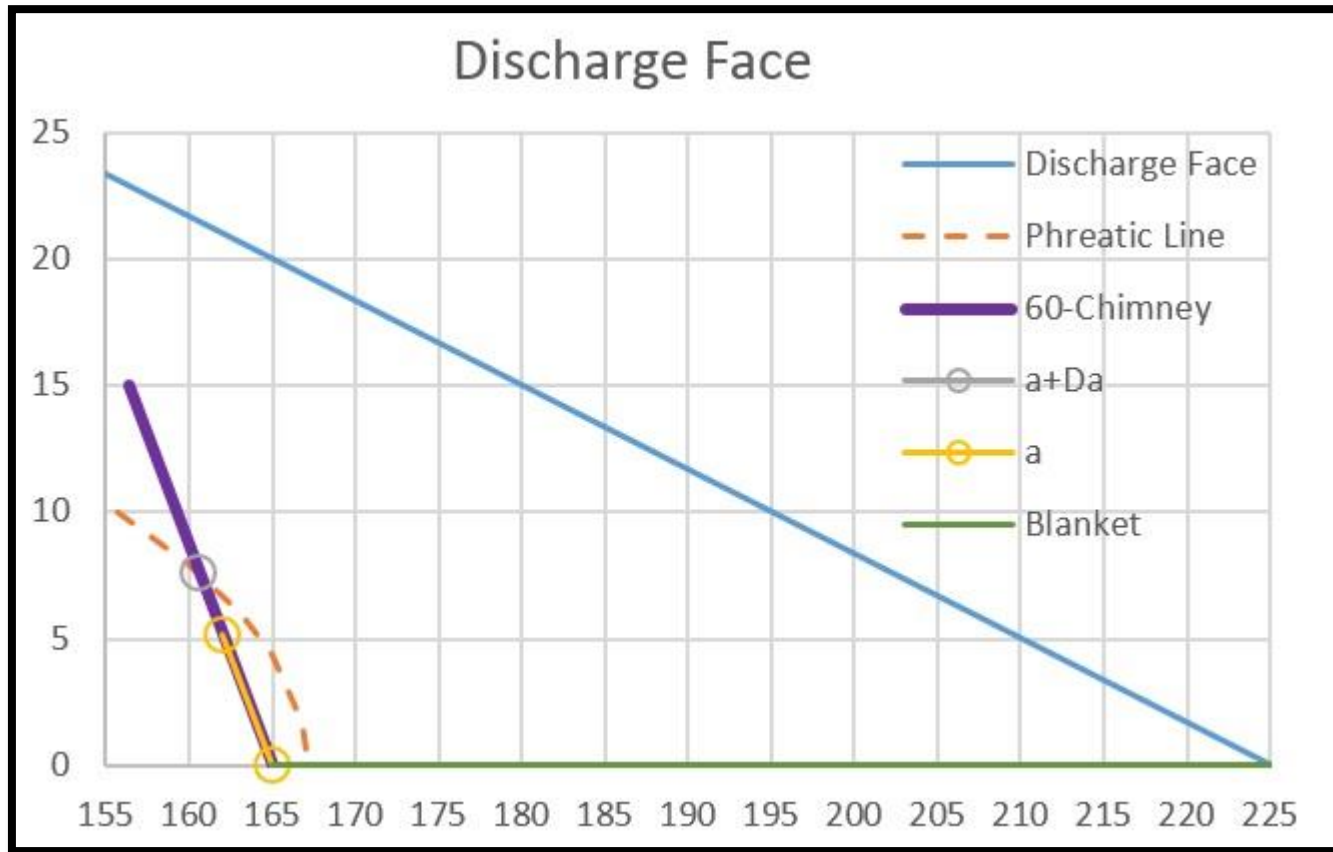
EX.6: การสร้าง Base Parabola

$$x = (y^2 - y_o^2) / 2y_o; y_o = 4.35 \text{ m.}, y = (y_o^2 + 2xy_o)^{0.5}$$

Phreatic line	
y	x
23	78.65
18	47.53
16	37.21
14	28.10
12	20.21
10	13.53

Phreatic line	
y	x
8	8.07
6	3.82
5	2.15
4.5	1.43
3.29	0.00
1.70	-1.21

EX.6



$$a + \Delta a = y_o / (1 - \cos(60)) = 4.35 / (1 - 0.5) = 8.70 \text{ m.}$$

$$c = 0.5 - 60/360 = 0.333$$

$$\Delta a = c(a + \Delta a) = 0.333 \times 8.70 = 2.7821 \text{ m.}$$

$$a = 8.70 - 2.7831 = 5.9141 \text{ m.}$$

EX.6: คำนวณหา Seepage Rate

$$q = Ky_o$$

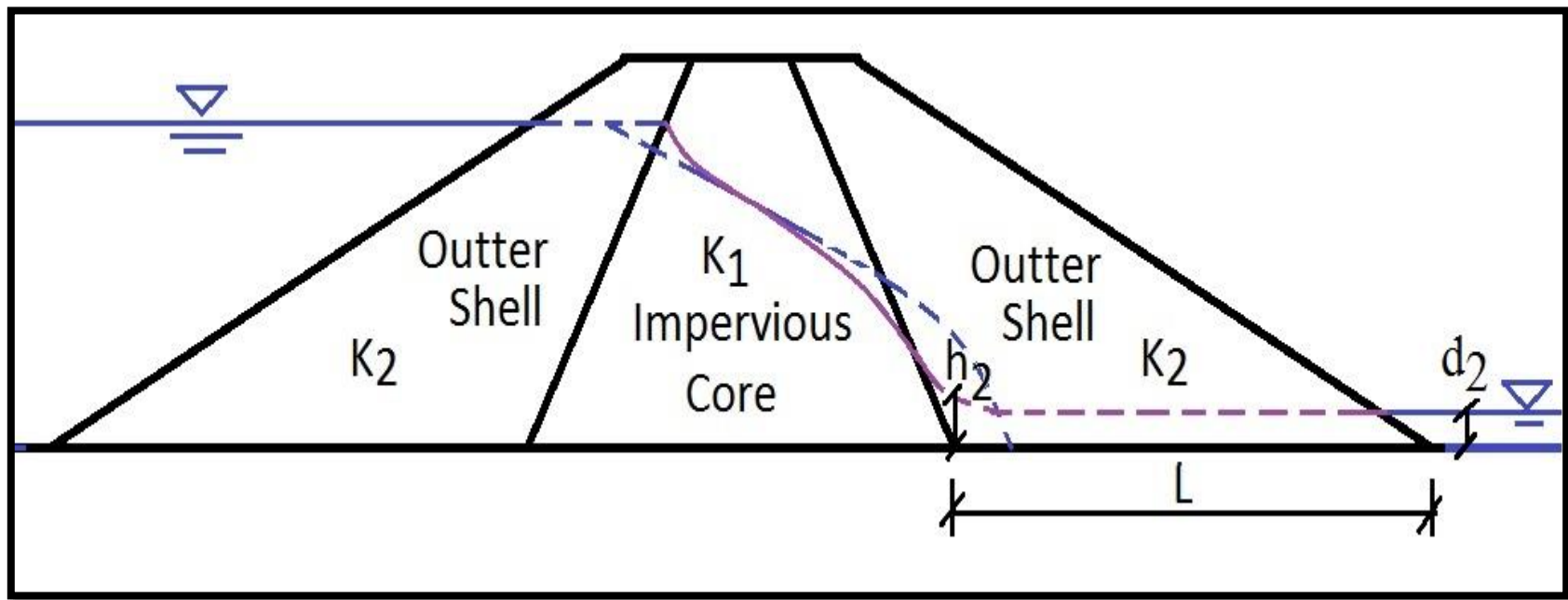
$$K = 1.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0.0108 \text{ m/d}$$

$$Y_o = 4.35 \text{ m.}$$

$$q = 0.0108 \times 4.35 = 0.047 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

3. Zone Type Dam

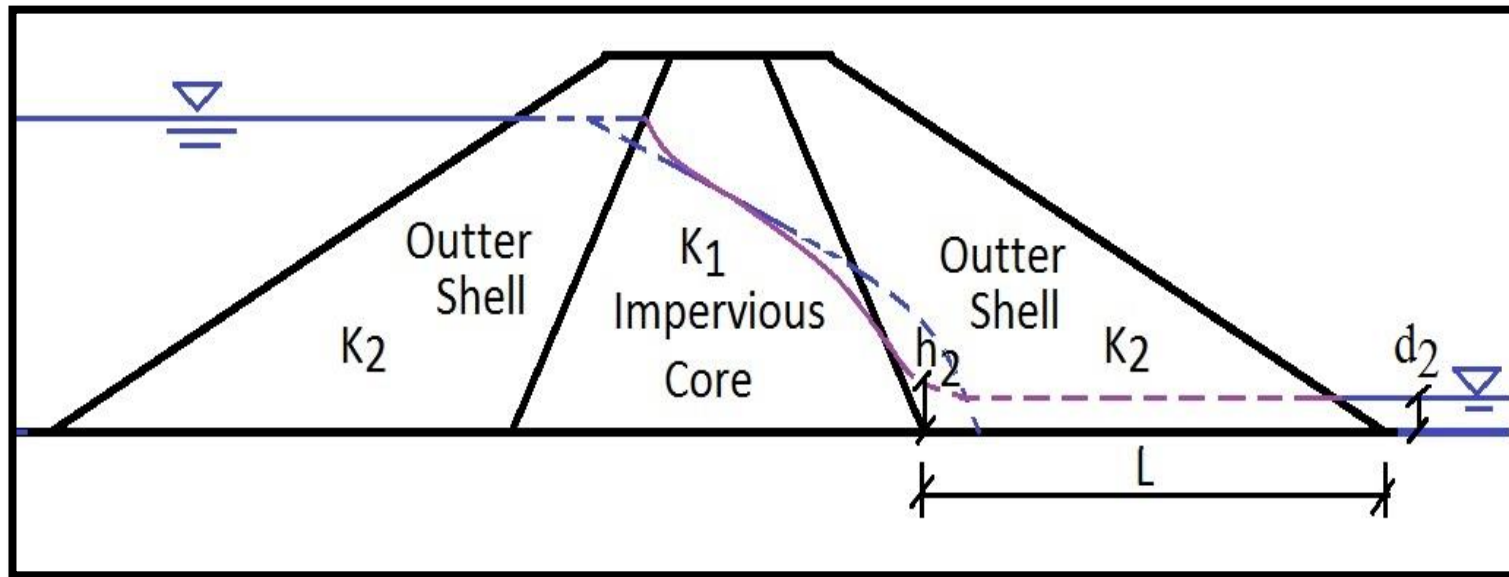
เขื่อนดินหรือเขื่อนหินทิ้งชนิดหลายโซน (Zone Type/Composite Section) จะมีแกน
ที่บั่นน้ำ (Impervious Core/Clay
Core) เพื่อลด Seepage ผ่านตัวเขื่อนดังรูป



K_1 (Permeability Coefficient) ของ Impervious Core มีค่าต่ำกว่า K_2 ของ Outer Shell มาก (อาจน้อยกว่าหลายร้อยเท่า) ดังนั้น Outer Shell ด้านเหนือน้ำจึงแทบไม่มีผลต่อ Seepage เลย และน้ำที่ไหลซึมผ่านแกนที่บ้น้ำจะมีปริมาณน้อยมาก

ในการออกแบบเขื่อนที่มีชั้นดินที่บ้น้ำเป็นแกน จะวิเคราะห์การไหลซึมน้ำเฉพาะส่วนที่เป็นชั้นที่บ้น้ำเท่านั้น

การหา Seepage ใน Outer Shell ด้านท้ายน้ำ



$$q = K_2 i A$$

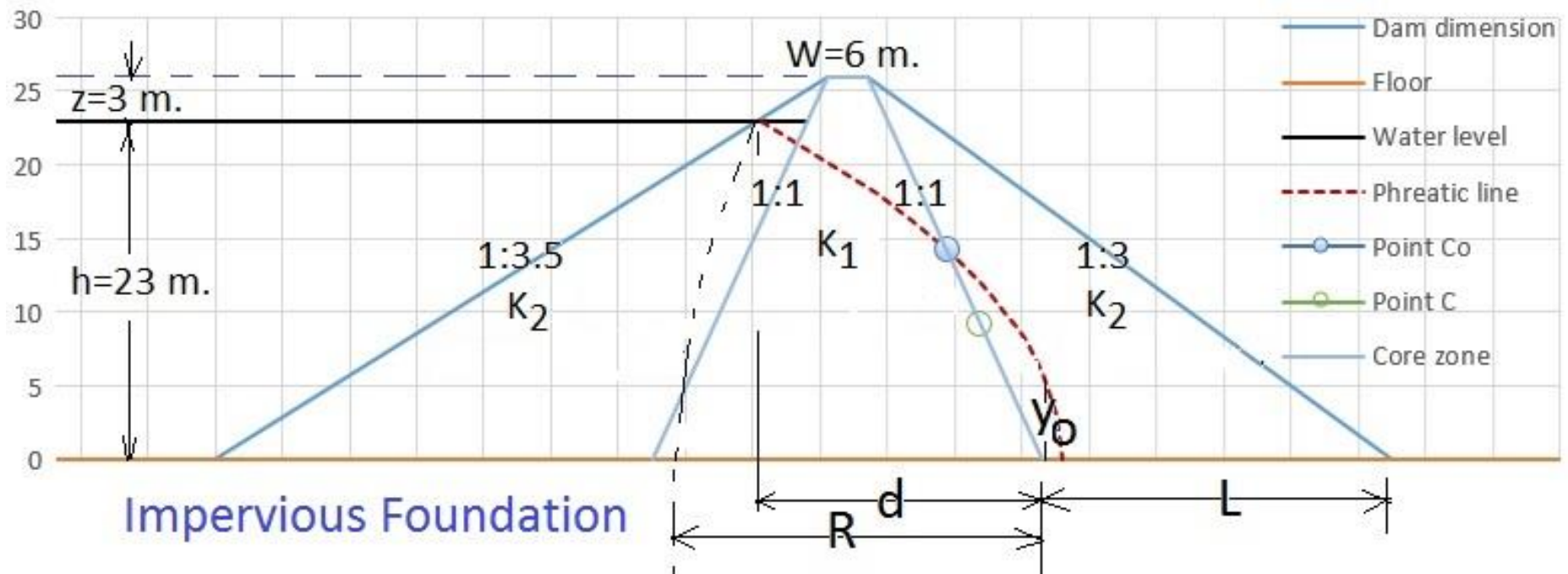
$$i = (h_2 - d_2) / L$$

$$A = (h_2 + d_2) / 2$$

$$q = K_2 (h_2^2 - d_2^2) / 2L$$

- เมื่อทราบ q , K_2 , d_2 และ L จะสามารถหาค่า h_2 ได้
- ค่า h_2 จะนำไปใช้ในการกำหนดความสูงของระบบระบายน้ำใน Outer Shell

EXAMPLE 7: Phreatic Line in Impervious Core



จงคำนวณหา (1) Phreatic Line (2) Discharge rate (3) Depth of flow in downstream outer shell ถ้าระดับน้ำด้านท้าย (d_2) น้ำลึก 0.6 m.

$$K_1 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}, K_2 = 1.25 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$m=h.\cot(\theta)=23\cot(45)=23 \text{ m.}$$

$$d=0.3m+3.\cot(45)+6+(23+3)\cot(45)=41.9 \text{ m.}$$

$$R=\sqrt{23^2+41.9^2}= 47.7976 \text{ m.}$$

$$y_o=R-d= 47.9-41.9=5.9 \text{ m.}$$

$$a_o=0.5*5.9= 2.95 \text{ m.}$$

Calculation of
discharge face
from Graph= 0.35

$$a+\Delta a=20.1356 \text{ m.}$$

$$\Delta a= 7.0475 \text{ m.}$$

$$a= 13.0882 \text{ m.}$$

Point Co

$$y(C_o)=(a+\Delta a)\sin(45)=14.2381 \text{ m.}$$

Point C

$$y(C)=e=a*\sin(45)= 9.2547 \text{ m.}$$

Base Line Calculation	
y	x
23	41.9000
18	24.5200
16	18.7550
14	13.6681
12	9.2596
11	7.3096
10	5.5292

Base Line Calculation	
y	x
9	3.9184
8	2.4771
7	1.2054
5.9	0.0000
3.0	-2.1858
0	-2.9488

Seepage Rate(q) through dam

$$K_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$K_1 = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3,600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

$$y_o = 5.8976 \text{ m.}$$

$$q = K_1 i A = K_1 y_o = 0.01728 \times 5.9 = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

ความลึกของน้ำใน Outer Shell ด้านท้ายน้ำ (h_2)

$$q = K_2 i A = K_2 \frac{(h_2 - d_2)}{L} \frac{(h_2 + d_2)}{2} = K_2 \left(\frac{h_2^2 - d_2^2}{2L} \right)$$

$$q = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

$$K_2 = 1.25 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

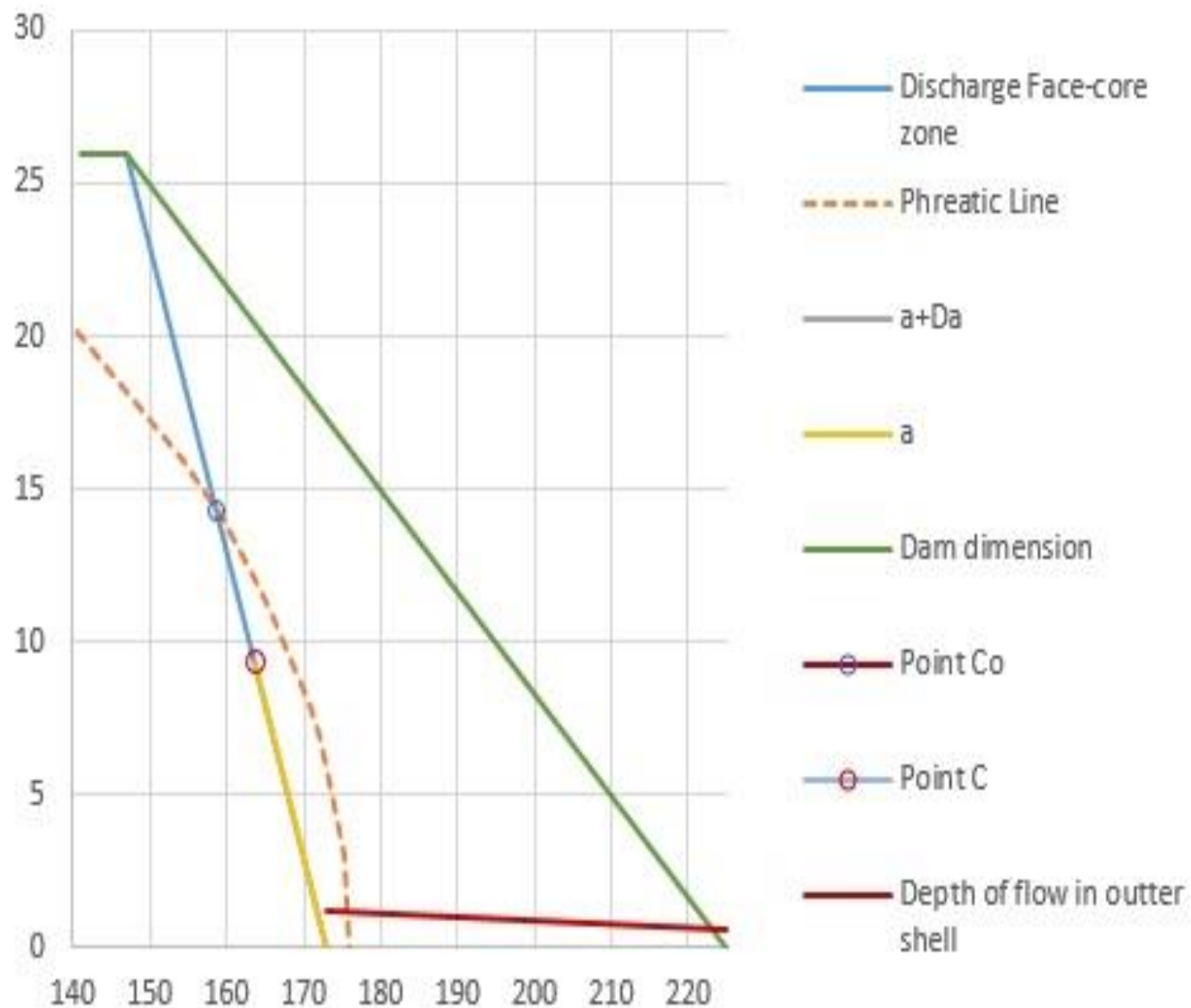
$$K_2 = 1.25 \times 10^{-3} \times 24 \times 3,600 / 100 = 1.08 \text{ m/d}$$

$$L = 26 \times (3 - 1) = 52 \text{ m.}$$

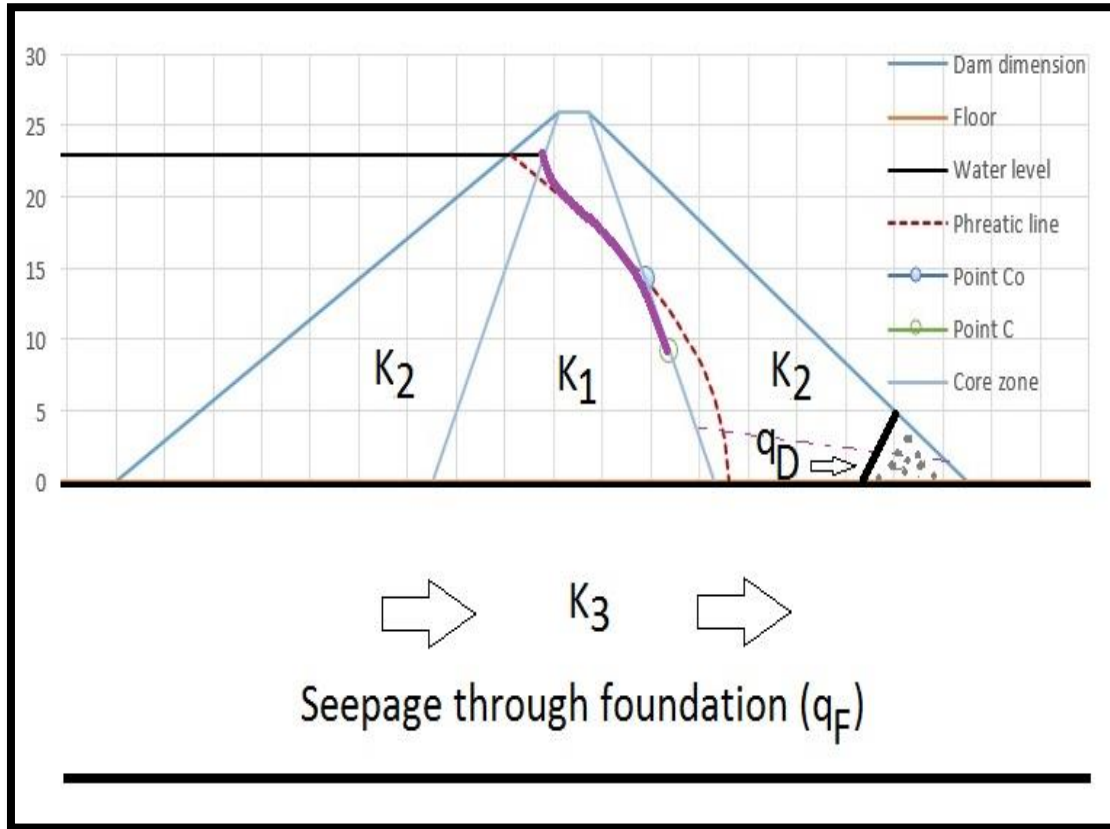
$$d_2 = 0.6 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= \sqrt{2qL/K_2 + d_2^2} = \sqrt{2 * 0.1019 * 52 / 1.08 + 0.6^2} \\ &= 3.1896 \text{ m.} \end{aligned}$$

Discharge Face



การคำนวณ Seepage Rate ผ่านฐานราก (Foundation, q_F)



$$q_F = K_3 i A$$

$$q_T = q_D + q_F$$

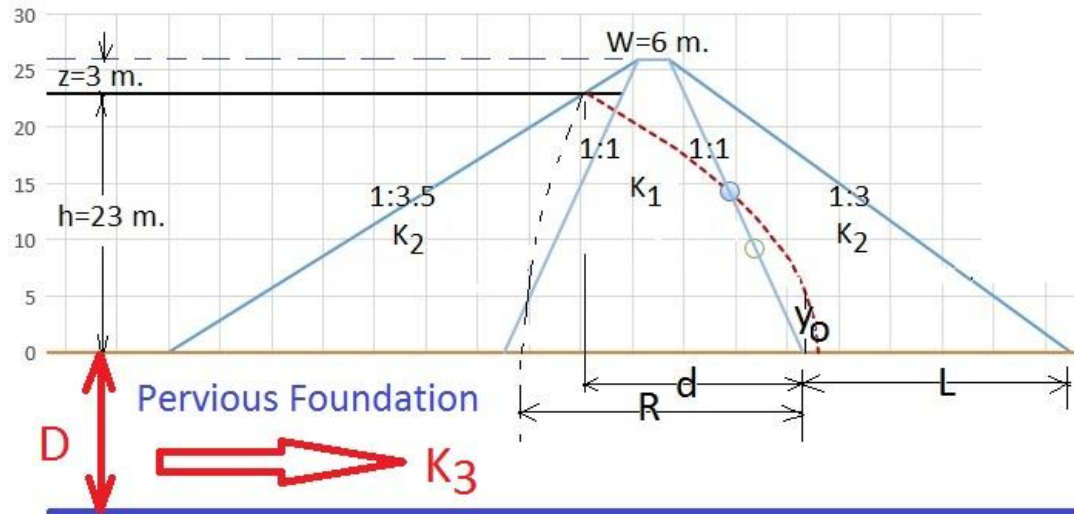
เมื่อ

q_T = Total seepage

q_D = Seepage through dam

q_F = Seepage through foundation

Example 8: จากข้อมูลเงื่อนไขใน Example 7 จงคำนวณ Seepage Rate ผ่านฐานราก ถ้าเขื่อนตั้งอยู่บนฐานรากหนา (D)=12 m. ที่มีค่า $K_3 = K_1 = 2 \times 10^{-5}$ cm/s



$$L_{\text{core}} = 26 + 6 + 26 = 58 \text{ m.}$$

$$h_2 = 3.1896 \text{ m.}$$

$$i = (23 - 3.1896) / 58 = 0.3416$$

$$A \text{ in } \text{m}^2/\text{m} = 12 \times 1 = 12$$

$$q_F (\text{m}^3/\text{d}/\text{m}) = K_3 \cdot i \cdot A$$

$$= 0.01728 \times 0.3416 \times 12 = 0.0708$$

$$q_F = K_3 i A$$

$$K_3 = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$= 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

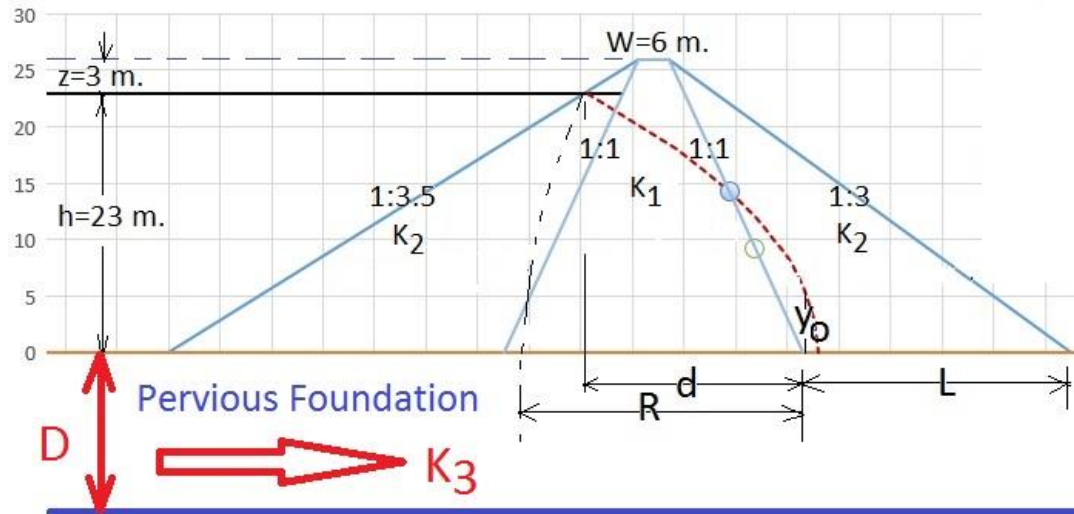
$$i = (h - h_2) / L_{\text{core}}$$

$$q_T = q_D + q_F$$

$$= 0.1019 + 0.0708$$

$$= 0.1727 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m.}$$

Example 9: จากข้อมูลเงื่อนไขใน Example 7 จงคำนวณ Seepage Rate ผ่านฐานราก ถ้าเขื่อนตั้งอยู่บนฐานรากหนา (D)=12 m. ที่มีค่า $K_3 = 1.25 \times 10^{-4}$ cm/s



$$L_{\text{core}} = 26 + 6 + 26 = 58 \text{ m.}$$

$$h_2 = 3.1896 \text{ m.}$$

$$i = (23 - 3.1896) / 58 = 0.3416$$

$$A \text{ in m}^2/\text{m} = 12 \times 1 = 12$$

$$q_F \text{ (m}^3/\text{d/m)} = K_3 \cdot i \cdot A$$

$$= 0.108 \times 0.3416 \times 12 = 0.4427$$

$$q_F = K_3 i A$$

$$K_3 = 1.25 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

$$= 1.25 \times 10^{-4} \times 24 \times 3600 = 0.108 \text{ m/d}$$

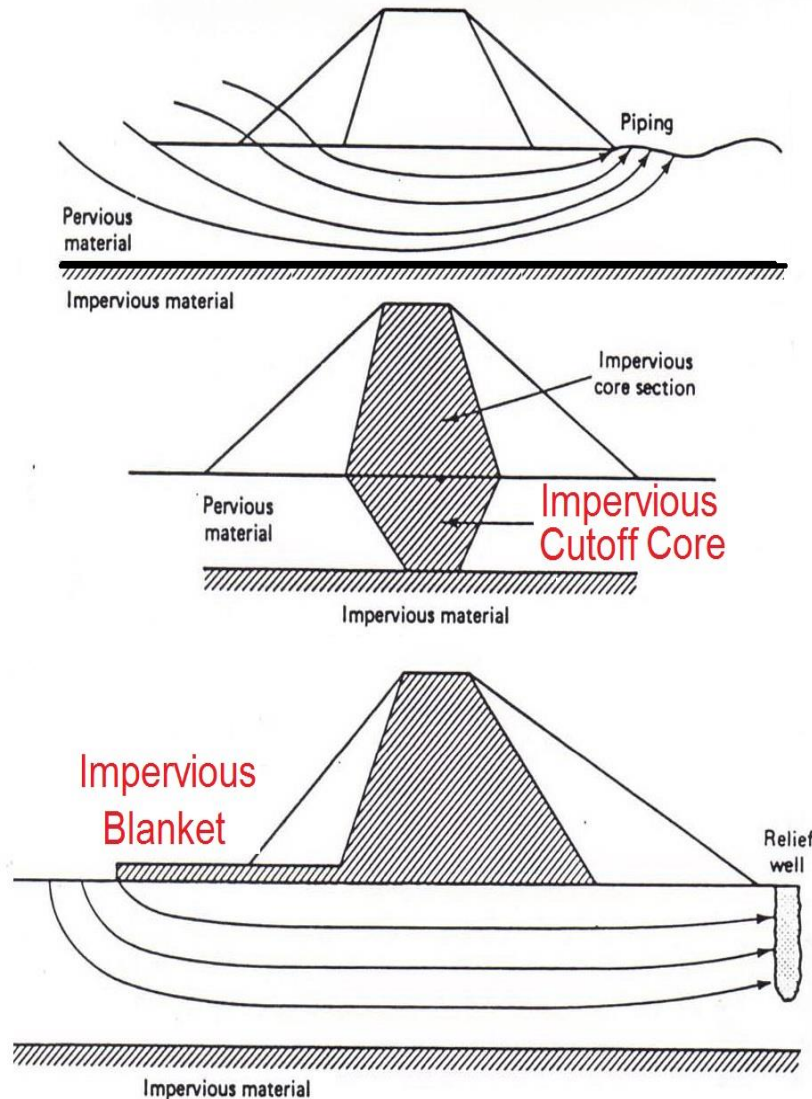
$$i = (h - h_2) / L_{\text{core}}$$

$$q_T = q_D + q_F$$

$$= 0.1019 + 0.4427$$

$$= 0.5446 \text{ m}^3/\text{d/m.}$$

การลดการไหลซึมผ่านฐานราก



ถ้าวัสดุฐานรากเป็น **Pervious Material** มีค่า **Permeability Coefficient(K)** สูง น้ำจะไหลซึมผ่านฐานรากด้วยอัตราสูง และเสี่ยงต่อการเกิด **Piping**

วิธีการลดอัตราการไหลซึมผ่านฐานรากสามารถทำได้โดยการสร้าง

1. Impervious Cutoff Core

หรือ

2. Impervious Blanket

การลดการไหลซึมผ่านฐานรากด้วย Impervious Blanket

1.Blanket ควรหนาอย่างน้อย 5 ฟุต หรือ 1.524 m.

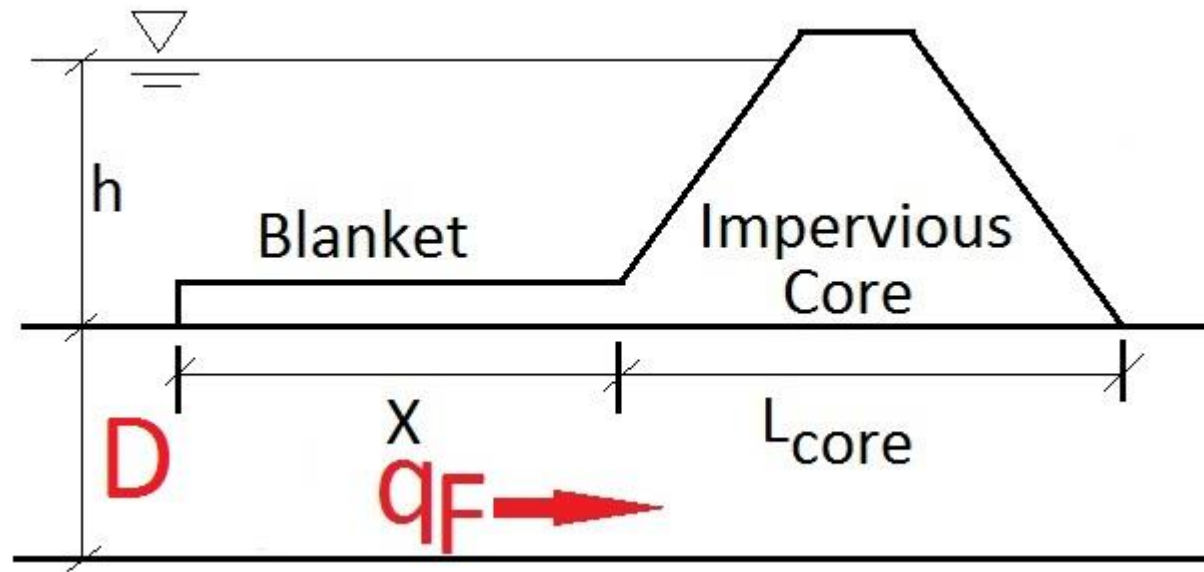
2.ความยาวของ Impervious Core(L_{core})+Impervious Blanket (X) >8 เท่าของความลึกเก็บกักสูงสุดของน้ำหน้าเขื่อน(h)หรือ $(L_{core}+X)>8h$

3.ความยาวของ Blanket(X) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลซึมที่ต้องให้การลดลง หาได้จากสูตร:

$$X = L_{core} \left(\frac{1-p}{p} \right) \dots \text{see prove next page}$$

เมื่อ $p = \frac{q'_F}{q_F}$, q_F = อัตราการไหลซึมผ่านฐานรากกรณีไม่มี Blanket

q'_F = อัตราการไหลซึมผ่านฐานรากกรณีมี Blanket



Without blanket: $q_F = K(h/L_{core})D$ (1)

With blanket: $q'_F = K(h/(L_{core} + X))D$ (2)

Equation (2)/(1)

$$p = q'_F/q_F = L_{core}/(L_{core} + X)$$

$$X = L_{core} \left(\frac{1 - p}{p} \right)$$

EXAMPLE 10: ออกแบบ Upstream Blanket เพื่อลด q_F ใน EXAMPLE 9 ให้เหลือ 75, 50 และ 30% สมมติไม่คิดความลึกน้ำด้านท้ายน้ำ

จาก EXAMPLE 9: $q_F = 0.4427 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$, $L_{\text{core}} = 58 \text{ m}$, $h = 23 \text{ m}$.

p	q'_F ($\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$)	$X(\text{m.}) =$ $L_{\text{core}}(1-p)/p$	$(X+L_{\text{core}})/h$
1	0.4427	0.00	2.52
0.75	0.3320	19.33	3.36
0.5	0.2213	58.00	5.04
0.30	0.1328	135.33	8.41

ความยาวของฐาน Outter Shell ด้านเหนือหน้า $= (3.5-1) * 26 = 65 \text{ m}$.

ถ้า $X=65$ m.

$$P=L_{\text{core}}/(L_{\text{core}}+X) = 58/(58+65)=0.4715$$

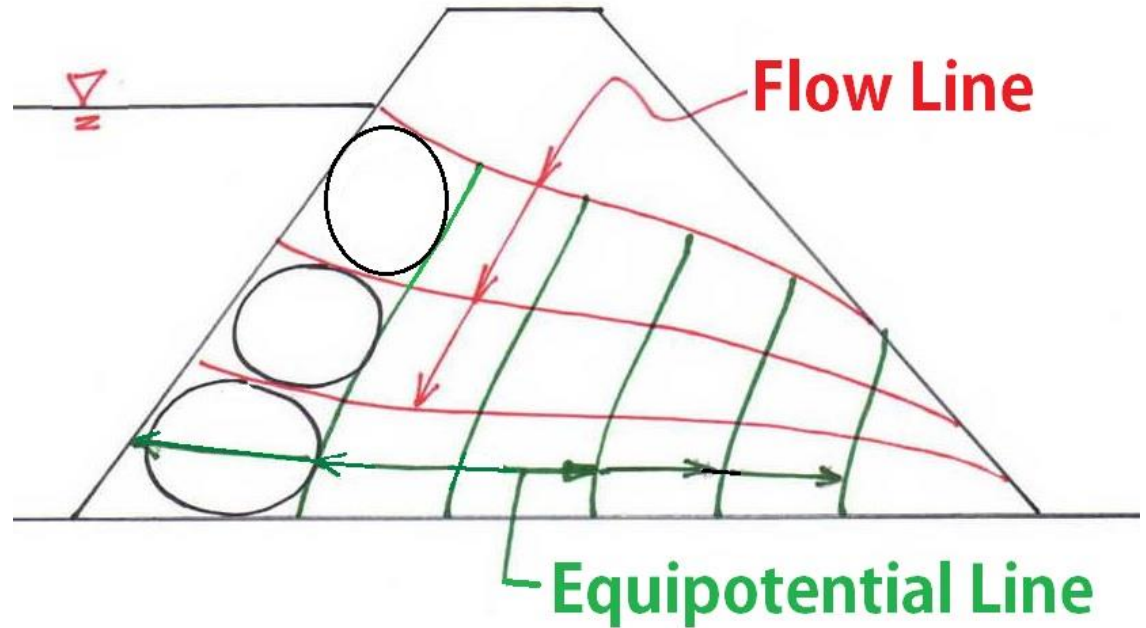
$$\begin{aligned} q'_F &= p * q_F = 0.4715 * 0.4427 \\ &= 0.2087 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m} \end{aligned}$$

4.Flow Net

(Approximation Method)

วิธีการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัว
เขื่อน หรือผ่านฐานรากตลอดได้ตัวเขื่อน โดย
วิธี **Graphic** ซึ่งจะหาค่าโดยประมาณ

Flow Net

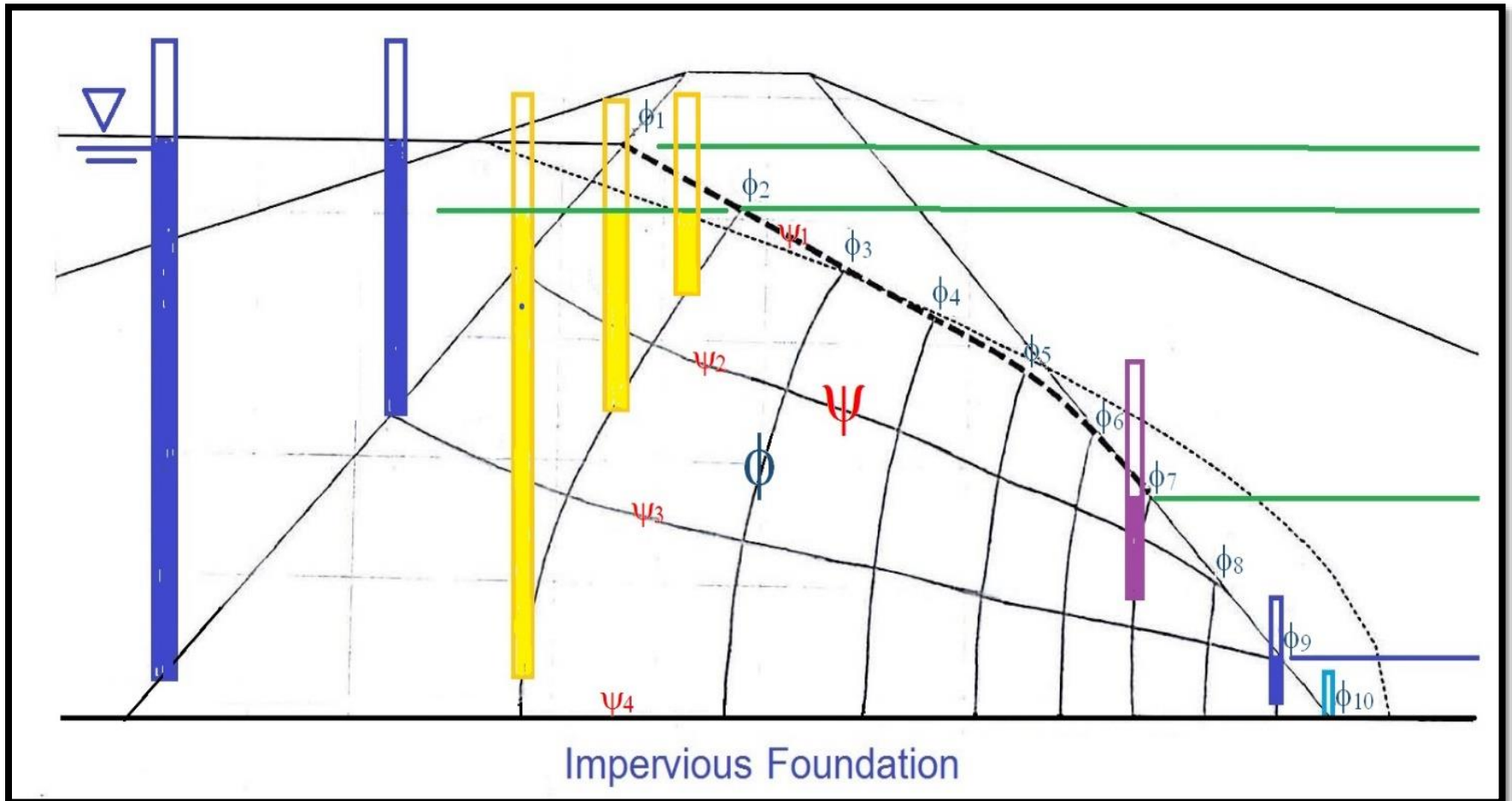


เป็น **Graphical Method** ในการหาอัตราการไหลซึมของน้ำผ่าน
เขื่อนและฐานราก โดยการสร้าง **Flow line** และ
Equipotential line ดังรูป

Flow line คือเส้นที่แสดงแนวการไหลซึมของน้ำ

Equipotential line คือเส้นที่แสดงค่าความดันน้ำที่เท่า

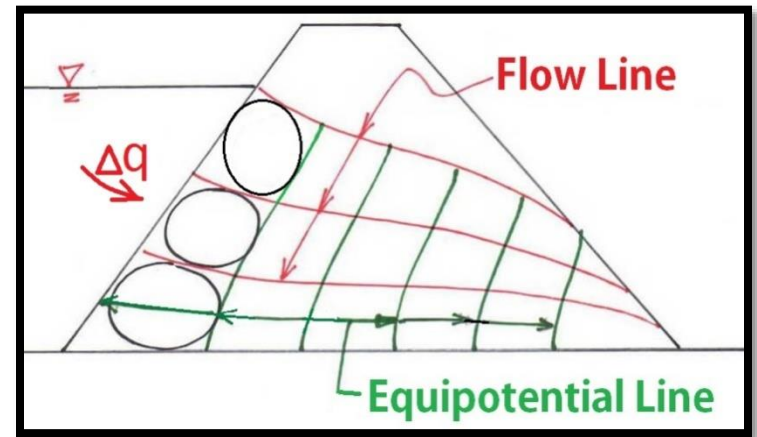
Flow Line VS. Equipotential Line



ประโยชน์ของ Flow net

1. คำนวณหา **Seepage rate (q)**
2. คำนวณหา **Seepage velocity**
3. คำนวณหาความดันน้ำ (**Head**) ในเขื่อนหรือฐานราก

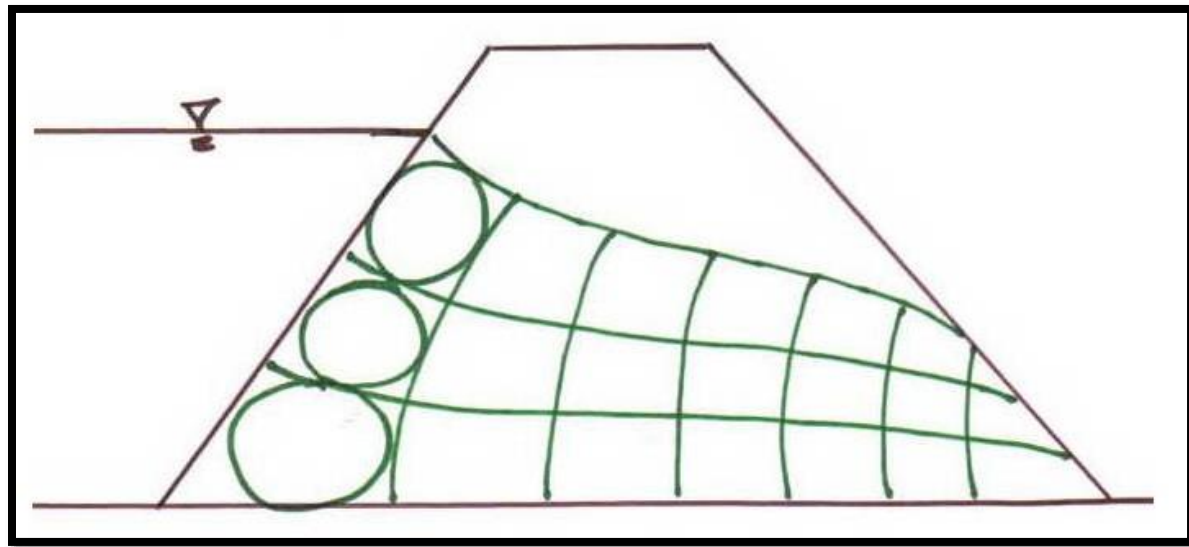
คุณสมบัติของ Flow net



1. Flow Line ตั้งฉากกับ Equipotential Line
2. Flow Line จะตัดกับ Equipotential Line ทำให้เกิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ ถ้าเขียนวงกลมในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เส้นรอบวงจะสัมผัสกับด้านทั้งสี่
3. ไม่มีการไหลข้าม Flow Line หรือ Flow Line จะไม่ตัดกัน
4. Equipotential Line ไม่ตัดกัน
5. Head ของน้ำที่ลดลงระหว่าง Equipotential Line คู่ใดๆ เท่ากัน เท่ากับ Δh ซึ่งเรียกว่า Equipotential Space
6. Seepage rate ระหว่าง Flow Line คู่ใดๆ (Flow Channel) มีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับ Δq

ขั้นตอนการสร้าง Flow Net

1. เขียนรูปตัดเขื่อน
2. สร้างเส้น



Top Flow Line(Phreatic Line)

Bottom Flow Line

First Equipotential Line

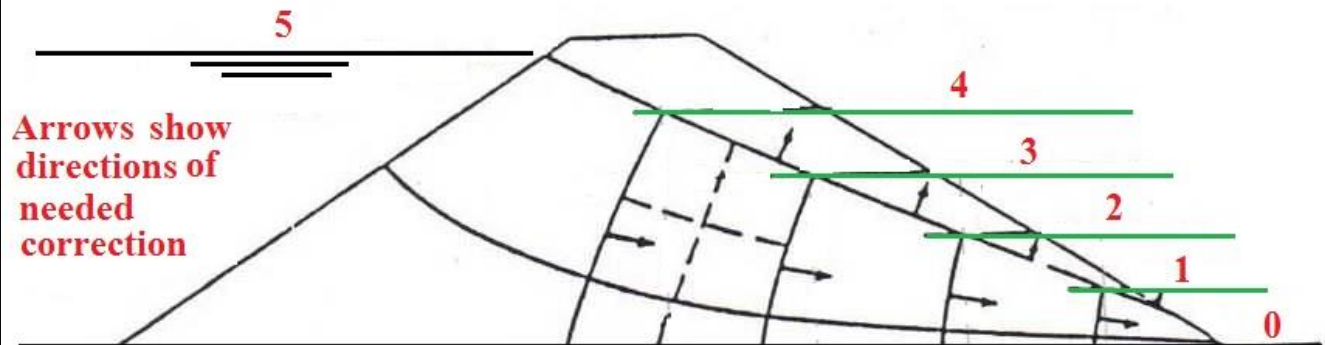
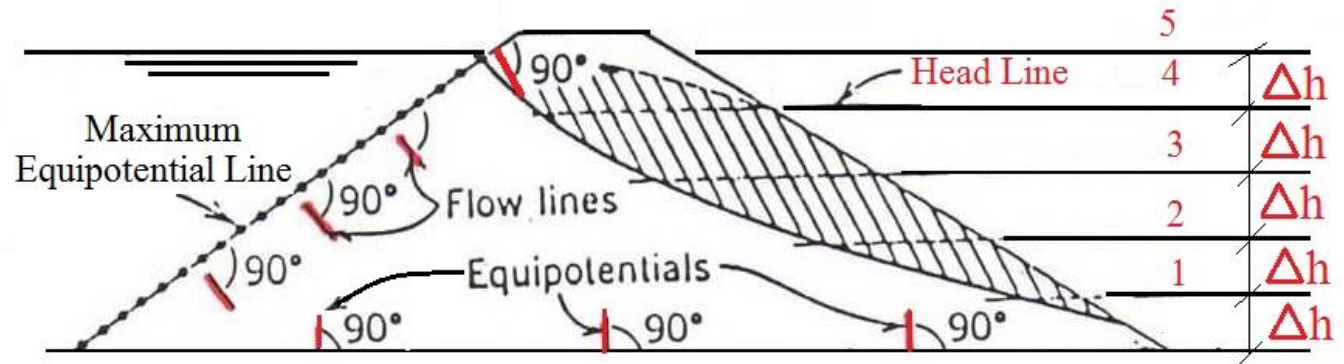
Last Equipotential Line

3. ลากเส้น Flow Line 3-5 เส้น โดยประมาณว่า Δq ของแต่ละ Flow Channel เท่ากัน

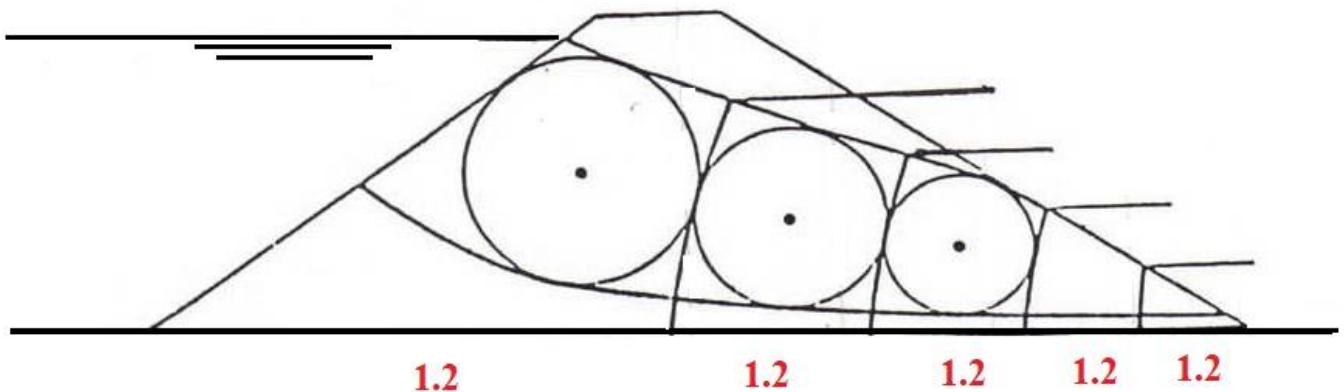
4. ลากเส้น Equipotential Line ตั้งฉากกับ Flow Line

5. ปรับแก้จนได้ Flow Net ที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด

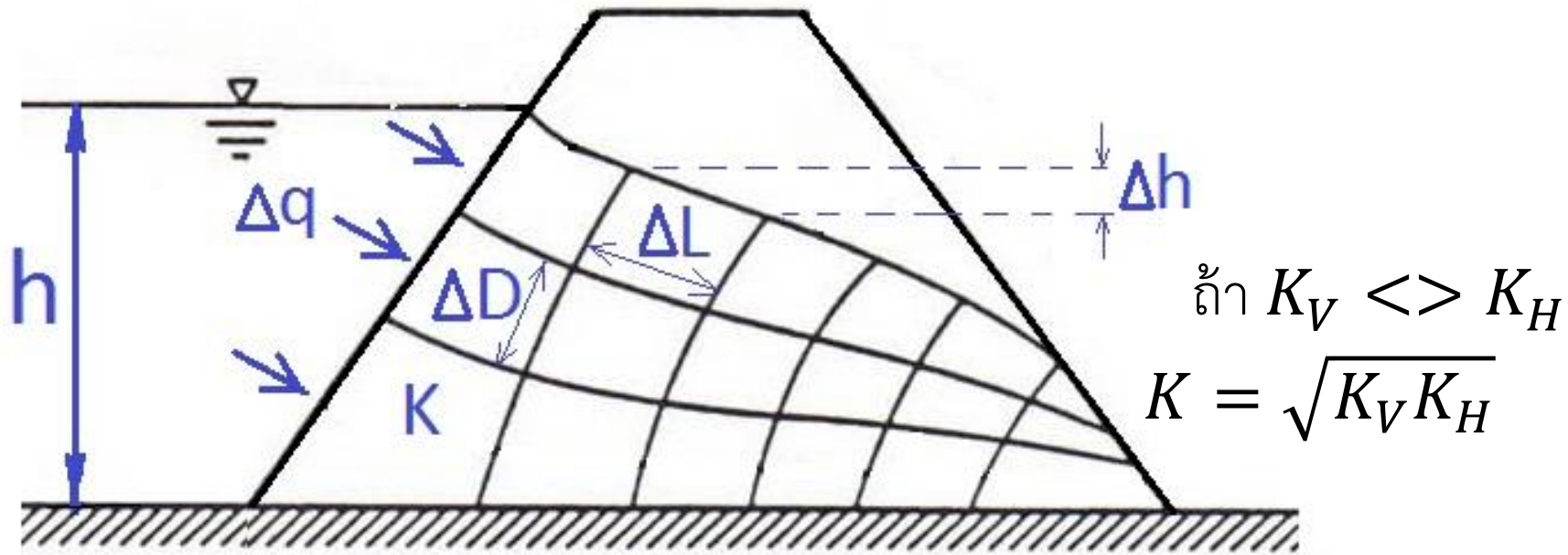
ขั้นตอน การเขียน Flow Net



Number of full flow channels → 1.5 1.3 1.0 0.7 0.4



การคำนวณหาอัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนด้วย Flow Net



$$\Delta q = K i a \quad ; \text{ (channel flow)}$$

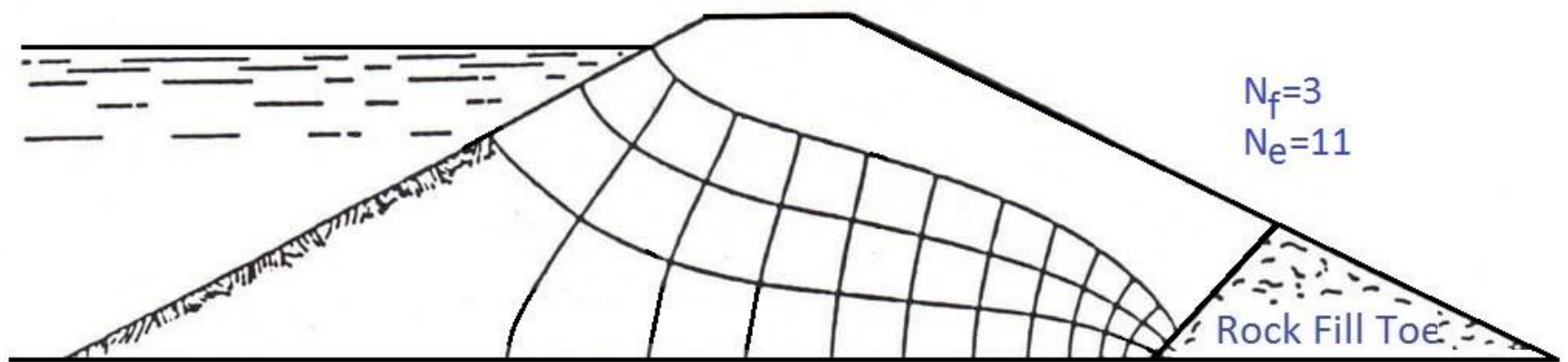
$$i = \Delta h / \Delta L \quad ; \quad a = \Delta D$$

$$\Delta q = K (\Delta h / \Delta L) \Delta D = K \Delta h = K (h / N_e)$$

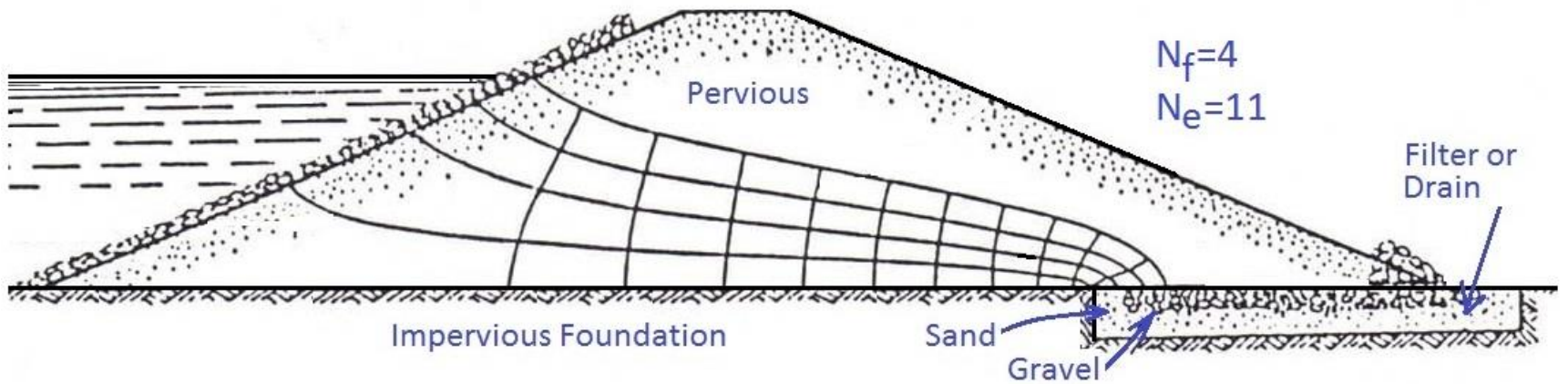
$$q = K h (N_f / N_e) \quad ; \text{ seepage rate per unit width}$$

$$N_f = \text{No. of flow channels (} N_f = 3 \text{)}$$

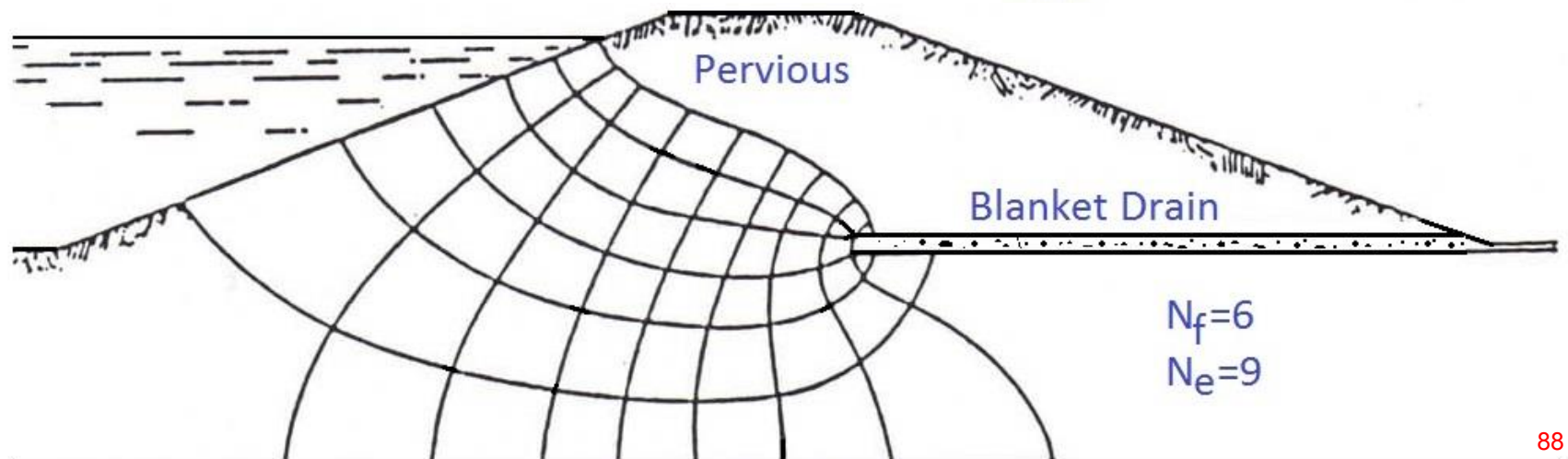
$$N_e = \text{No. of equipotential line intervals (} N_e = 6 \text{)}$$



Impervious Foundation

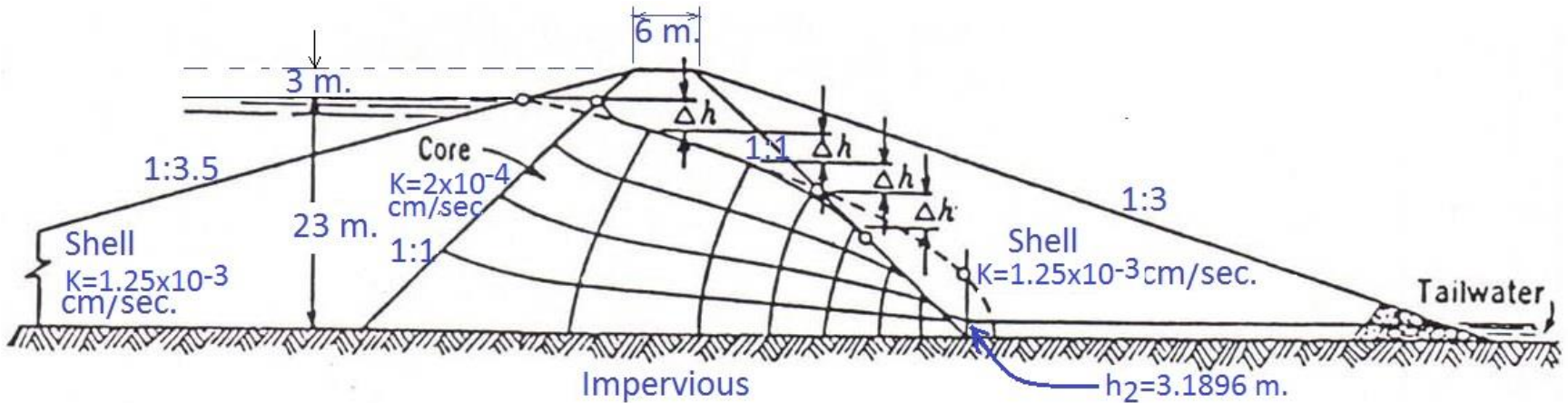


Impervious Foundation



Impervious Stratum

EXAMPLE 11: Flow Net-Seepage Through Dam Impervious Foundation



$$N_f = 3.5 \text{ ***}, N_e = 7$$

$$h = 23 - 3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

$$K = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec} = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

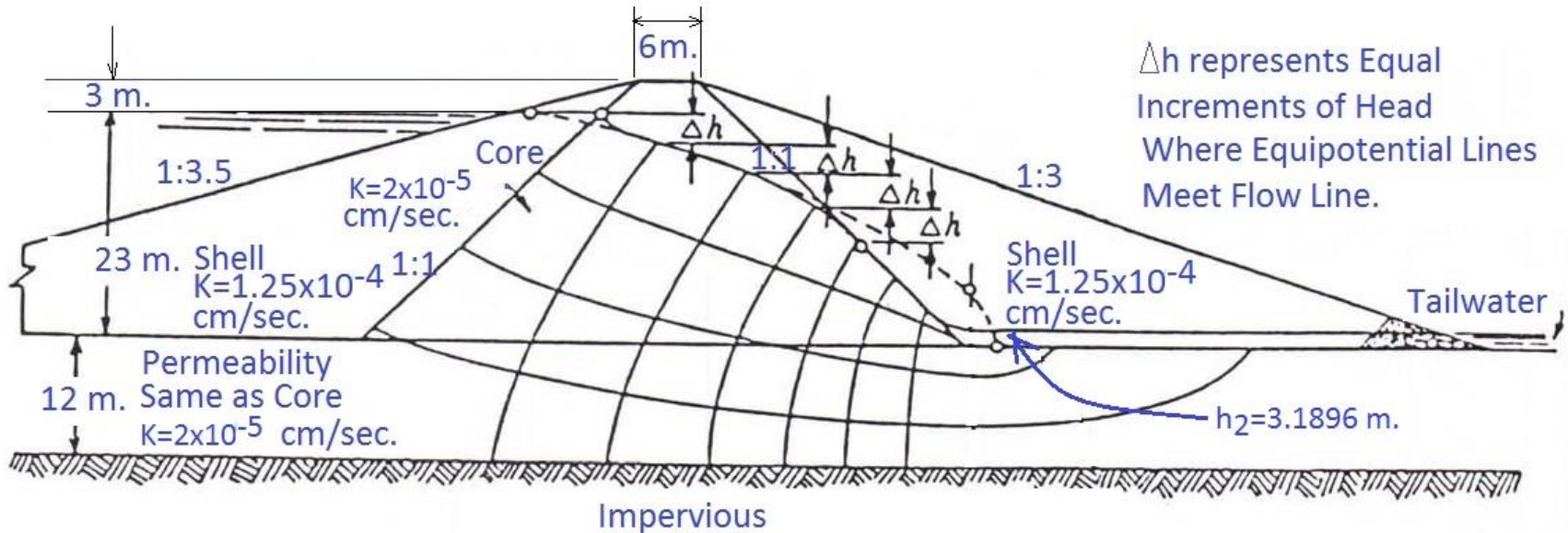
$$q_D = Kh(N_f/N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 3.5 / 7$$

$$= 0.17116 \text{ m}^3/\text{d/m}$$

(From EXAMPLE 7 Calculated $q_D = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d/m}$)

EXAMPLE 12-Flow Net-Seepage Through Dam and Foundation

Permeability of foundation same as core zone



$$N_f = 4, N_e = 7, \Delta h = 23 - 3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

$$K = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

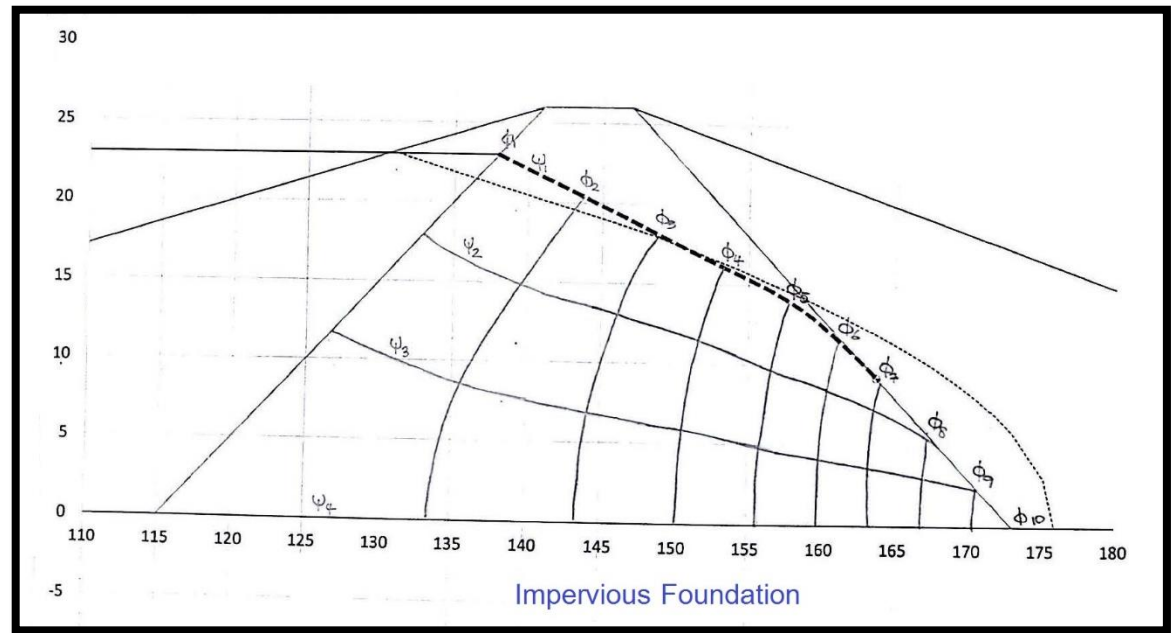
$$= 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

$$q_T = K \Delta h (N_f / N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 4 / 7 = 0.1956 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

(From EXAMPLE 8 Calculated $q_T = 0.1727 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$)

EXAMPLE 13

Redraw Flow Net for EXAMPLE 11



$$N_f=3, N_e=9$$

$$h=23-3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

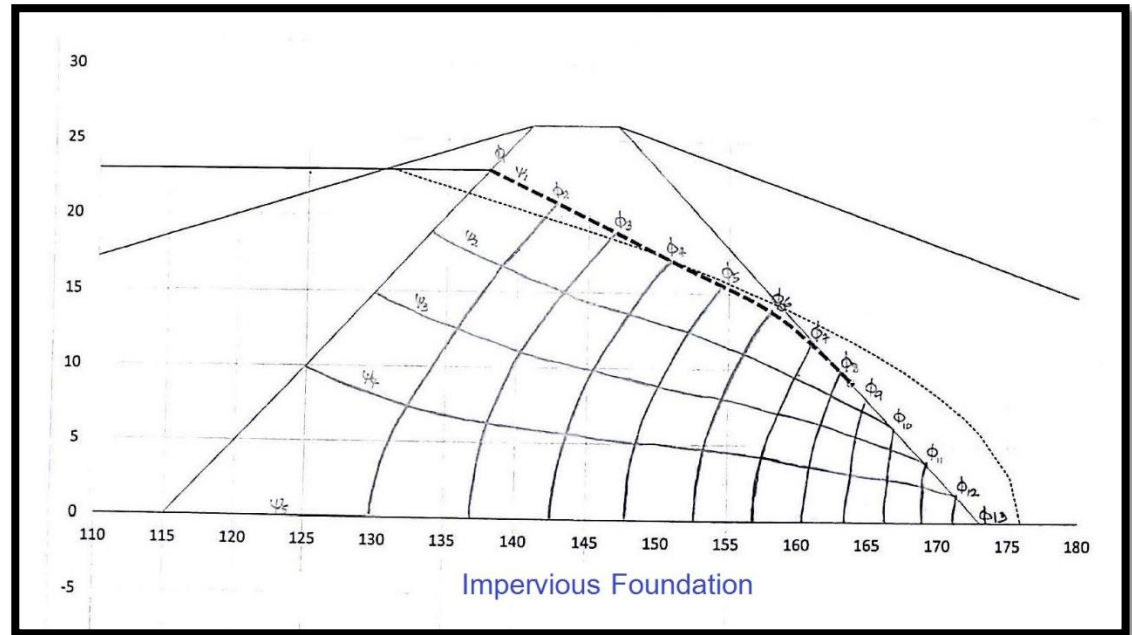
$$K=2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec} = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

$$q_D = Kh(N_f/N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 3/9 \\ = 0.1141 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

(From EXAMPLE 7 Calculated $q_D = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$)

EXAMPLE 14

Redraw Flow Net for EXAMPLE 11



$$N_f=4, N_e=12$$

$$h=23-3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

$$K=2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec} = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

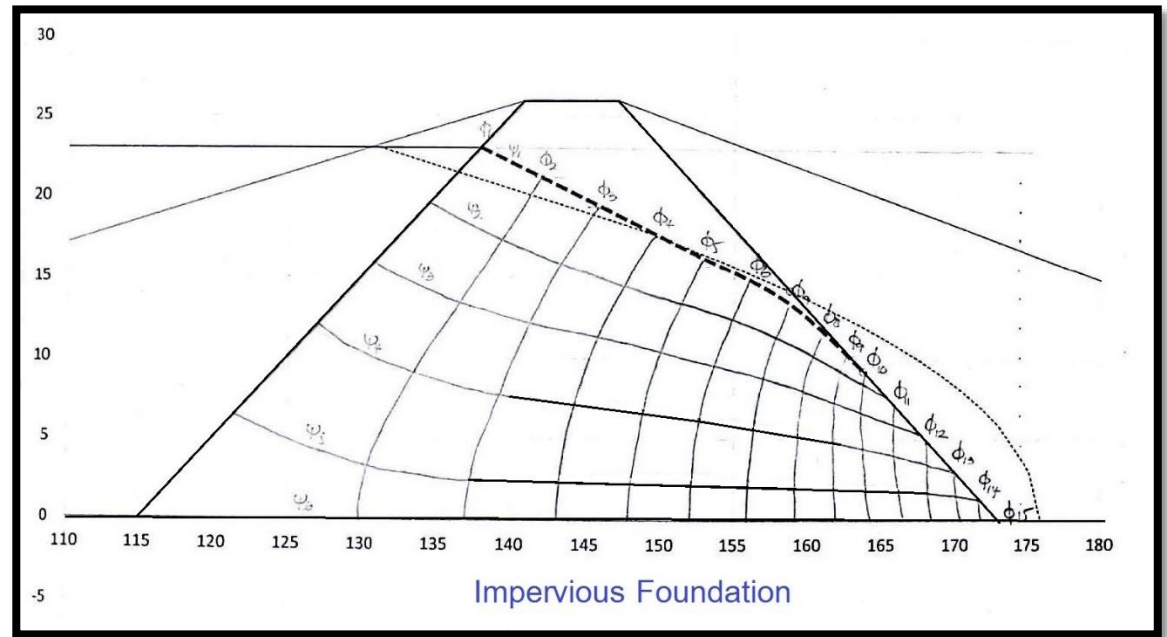
$$q_D = Kh(N_f/N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 4 / 12$$

$$= 0.1141 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

(From EXAMPLE 7 Calculated $q_D = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$)

EXAMPLE 15

Redraw Flow Net for EXAMPLE 11



$$N_f = 4.5, \quad N_e = 14$$

$$h = 23 - 3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

$$K = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec} = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

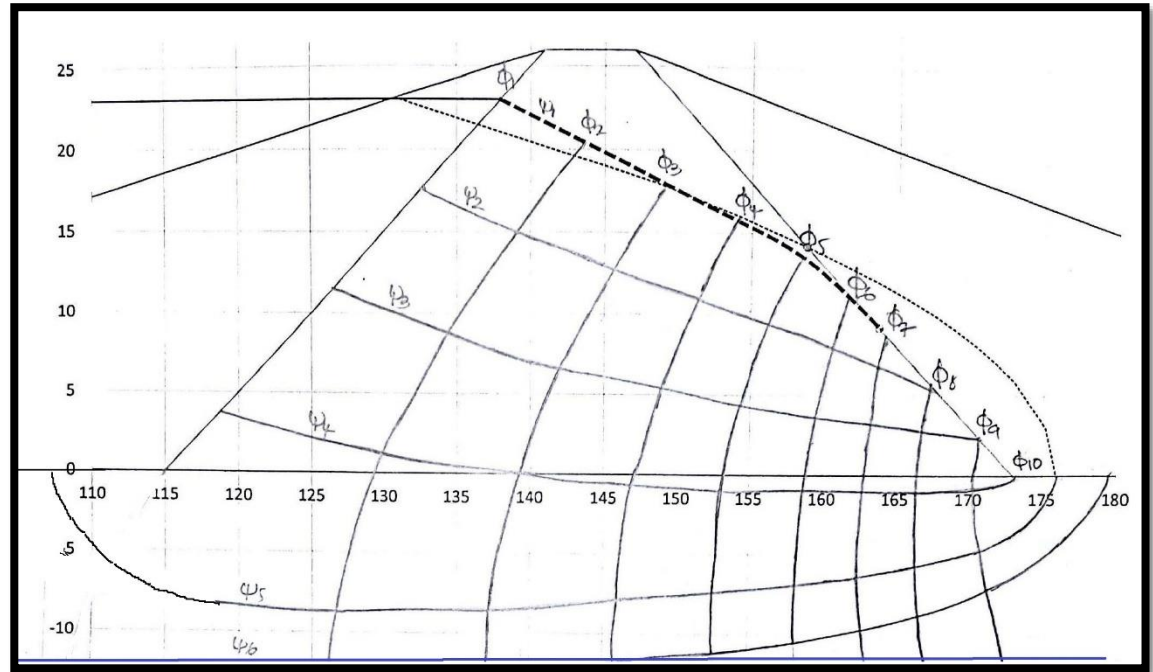
$$q_D = Kh(N_f/N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 4.5 / 14$$

$$= 0.1100 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

(From EXAMPLE 7 Calculated $q_D = 0.1019 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$)

EXAMPLE 16

Redraw Flow Net for EXAMPLE 12



$$N_f = 4.5, \quad N_e = 9$$

$$h = 23 - 3.1896 = 19.8104 \text{ m.}$$

$$K = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/sec} = 2 \times 10^{-5} \times 24 \times 3600 / 100 = 0.01728 \text{ m/d}$$

$$q_T = Kh(N_f/N_e) = 0.01728 \times 19.8104 \times 4.5 / 9$$

$$= 0.17116 \text{ m}^3/\text{d/m}$$

(From EXAMPLE 8 Calculated $q_T = 0.1727 \text{ m}^3/\text{d/m}$)