# การวิเคราะห์เกี่ยวกับเขื่อนดิน

# Analysis of Earth Dam

โดย

รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

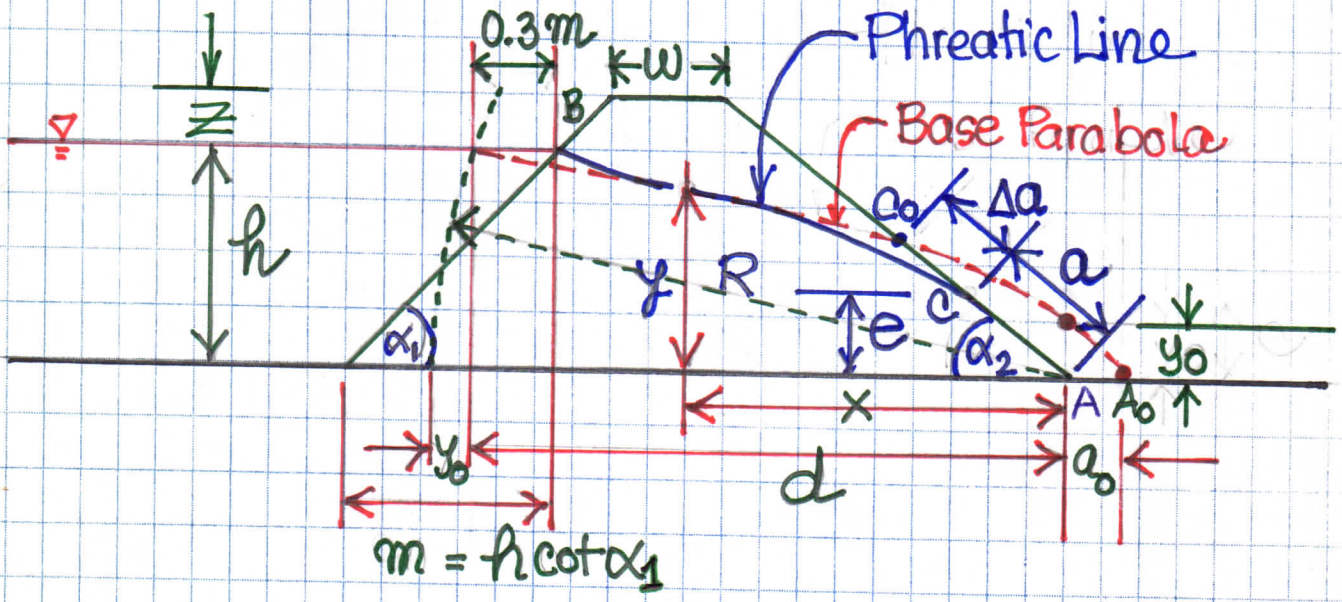
กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2550

# Seepage Through Dam

## การวิเคราะห์การไหลซึมน้ำผ่านตัวเขื่อนแบบ Homogeneous

### Phreatic Line หรือ Top Seepage Line




### ① Base Parabola

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

x = ระยะทางในแนวราบจากจุด A

y = ระยะทางในแนวดิ่งจากฐานเขื่อน

จุดยอดของ Base Parabola อยู่ที่จุด $A_0$

ห่างจากจุด A = $a_0 = \frac{y_0}{2}$

$$y_0 = R - d$$

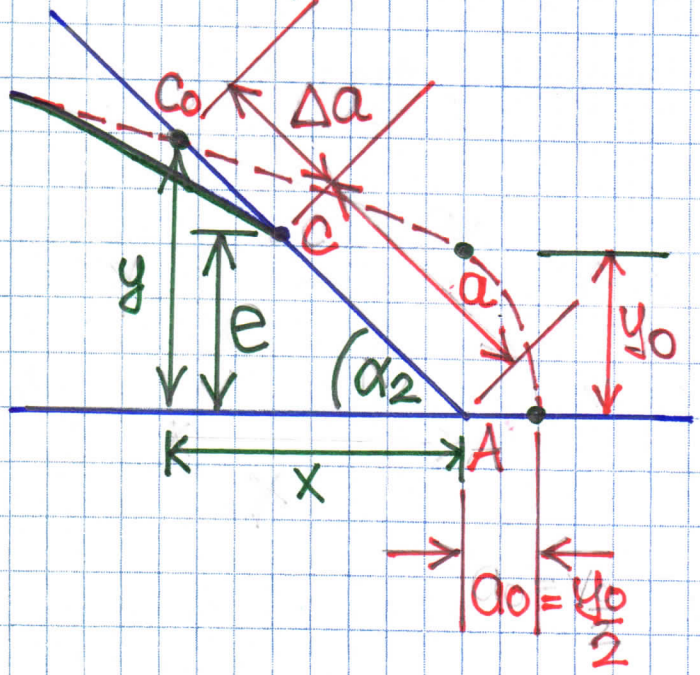
$$= \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

$$m = h\cot\alpha_1$$

$$d = 0.3m + z\cot\alpha_1 + w + (h+z)\cot\alpha_2$$

$$= 0.3h\cot\alpha_1 + z\cot\alpha_1 + w + (h+z)\cot\alpha_2$$

② หาจุดที่น้ำไหลชนออกจากตัวเขื่อน (จุด C) $\{\frac{a}{\Delta a}\}$




$$X = (a+\Delta a)\cos\alpha_2$$

$$y = (a+\Delta a)\sin\alpha_2$$

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

$$(a+\Delta a)\cos\alpha_2 = \frac{(a+\Delta a)^2\sin^2\alpha_2 - y_0^2}{2y_0}$$

$$= \frac{(a+\Delta a)^2(1-\cos^2\alpha_2) - y_0^2}{2y_0}$$

$$(a+\Delta a)^2\cos^2\alpha_2 + 2y_0(a+\Delta a)\cos\alpha_2 + y_0^2 = (a+\Delta a)^2$$

$$[(a+\Delta a)\cos\alpha_2 + y_0]^2 = (a+\Delta a)^2$$

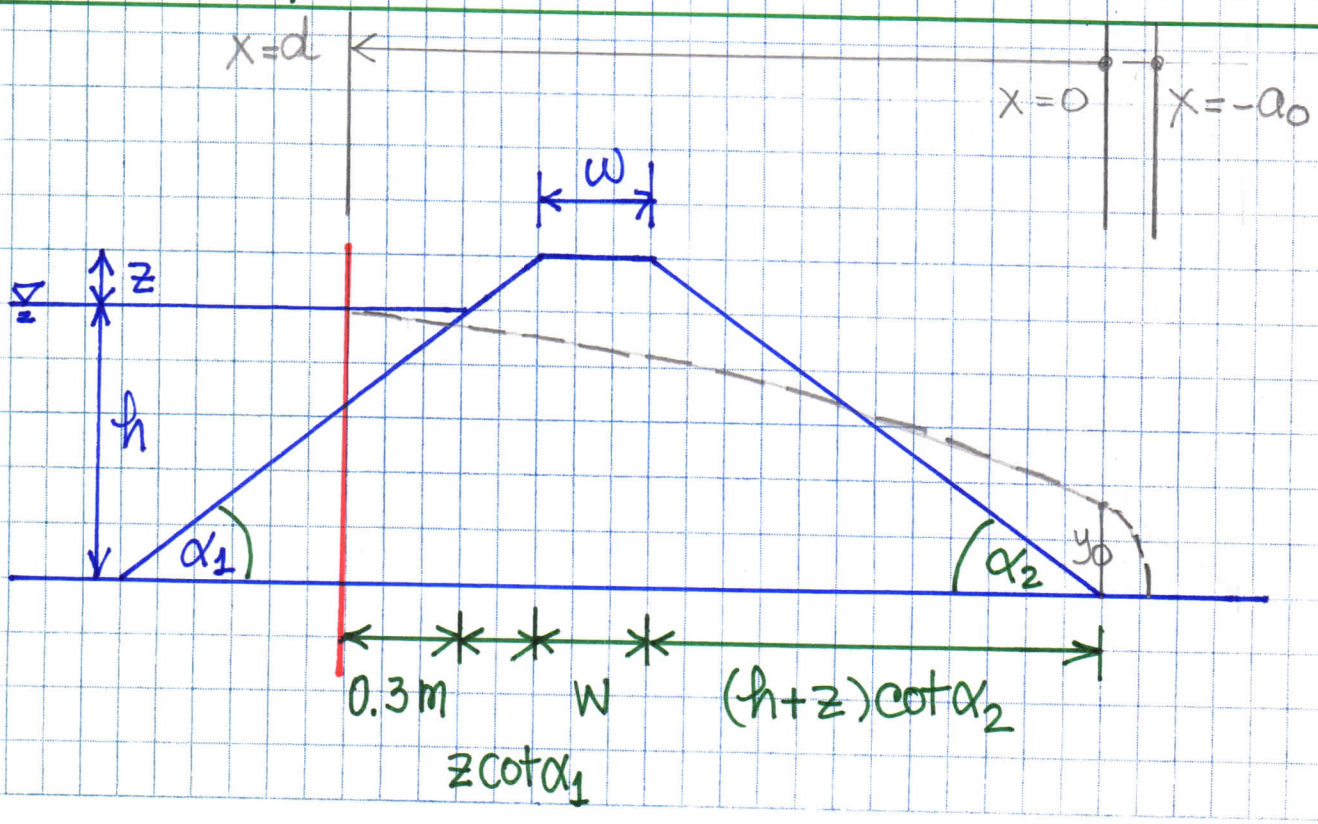
$$(a+\Delta a)\cos\alpha_2 + y_0 = (a+\Delta a)$$

$$a+\Delta a = \frac{y_0}{1-\cos\alpha_2} \quad \text{—— (1)}$$

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

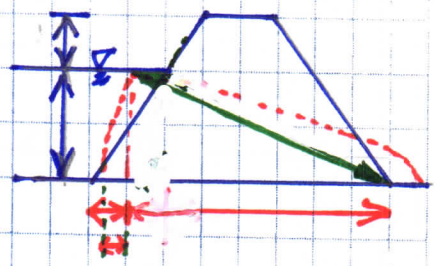
| X | Y |
|---|---|
| 0 | $y_0$ |
| $-a_0 = -\frac{y_0}{2}$ | 0 |
| d | $\sqrt{y_0^2 + 2y_0 d}$ |

$$= \sqrt{y_0(y_0 + 2d)}$$
$$= \sqrt{(R-d)(y_0 + d + d)}$$
$$= \sqrt{(R-d)(R+d)}$$
$$= \sqrt{R^2 - d^2}$$
$$= \sqrt{h^2}$$
$$= h$$



## ③ ขั้นตอนการสร้าง Phreatic Line

Given $h, \alpha_1, \alpha_2, w, z$




### การคำนวณ Base Parabola

1. $m = h\cot\alpha_1$
2. $d = (0.3h+z)\cot\alpha_1 + w + (h+z)\cot\alpha_2$
3. $R = \sqrt{h^2+d^2}$
4. $y_0 = R - d$
5. $x = \dfrac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$ (Base Parabola)

### การหาจุดที่น้ำซึมออก (จุด C)

1. หาค่า C จากรูปที่ 16 ; $C = f(\alpha_2) \approx 0.5 - \dfrac{\alpha_2}{360}$
2. $a = \dfrac{(1-C)y_0}{1-\cos\alpha_2}$

$$\Delta a = \frac{Cy_0}{1-\cos\alpha_2}$$

$$\rightarrow \quad a+\Delta a = \frac{y_0}{1-\cos\alpha_2}$$

$$q_f = kiA = ky_0 = \frac{4}{9}\frac{kh^2}{\ell}$$

จากรูปที่ 16 (นิยาย) จะสามารถหา $C$ จาก $\alpha_2$

$$C = \frac{\Delta a}{a+\Delta a} \quad \text{---②}$$

$$a+\Delta a = \frac{\Delta a}{C}$$

$$\frac{\Delta a}{C} = \frac{y_0}{1-\cos\alpha_2}$$

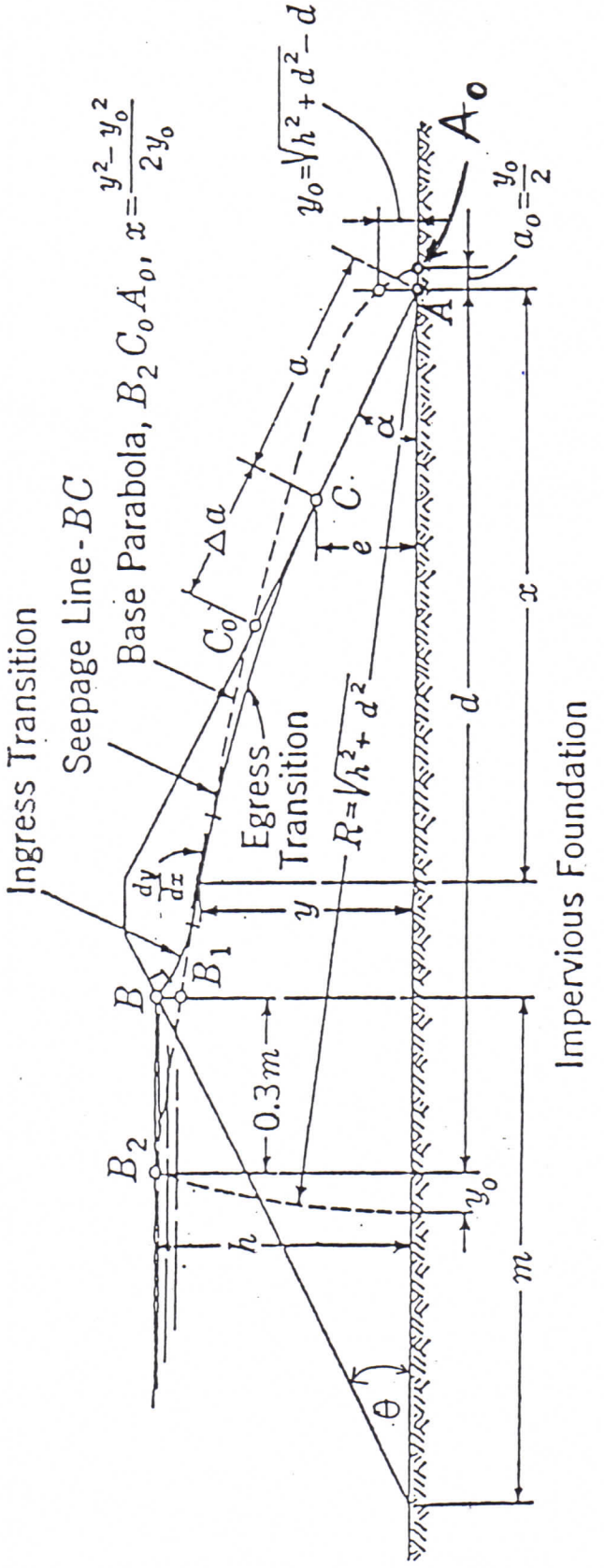
$$\Delta a = \frac{C y_0}{1-\cos\alpha_2}$$

$$a = \frac{y_0}{1-\cos\alpha_2} - \frac{C y_0}{1-\cos\alpha_2}$$

$$= \frac{(1-C)y_0}{1-\cos\alpha_2}$$

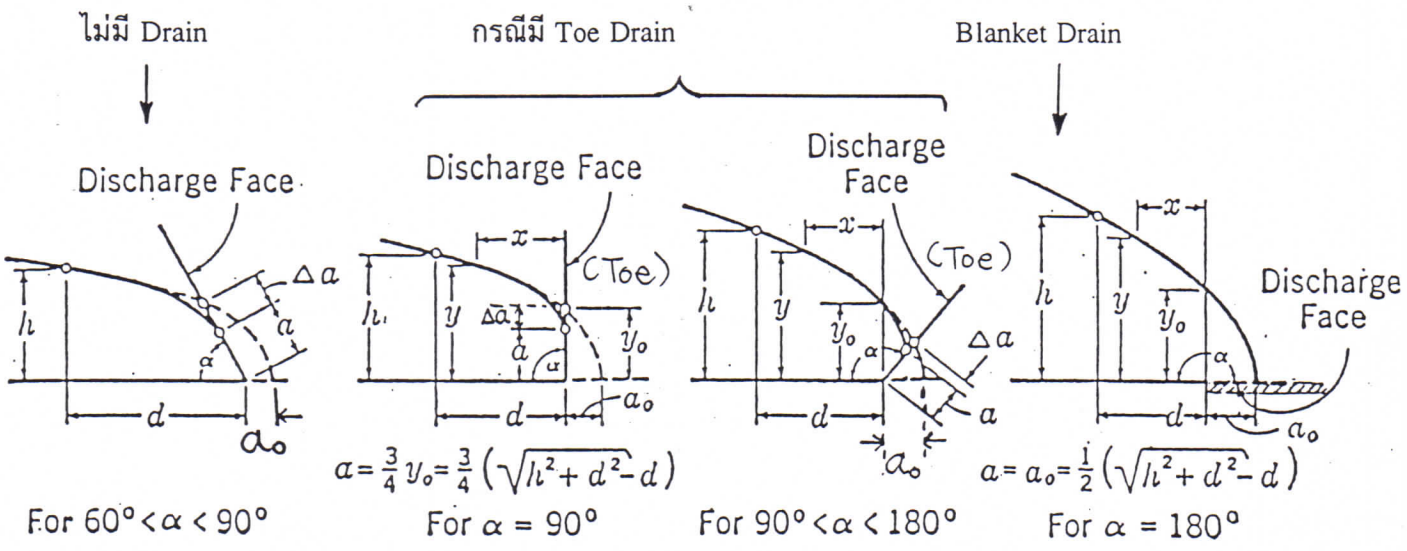
* ความสัมพันธ์ระหว่าง $C$ กับ $\alpha$ ในรูปที่ 16.

$$C = 0.5 - \frac{\alpha}{360^\circ}$$

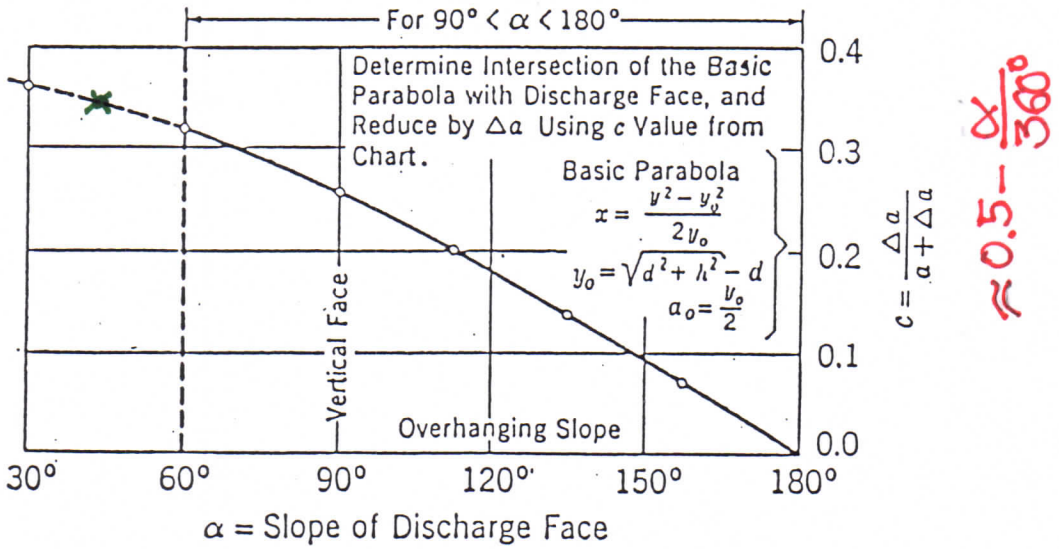



รูปที่ 15 การหาตำแหน่งของ Seepage line

* Discharge Face = ผิวหน้าเขื่อนที่จะมีการไหลซึมออกของน้ำ



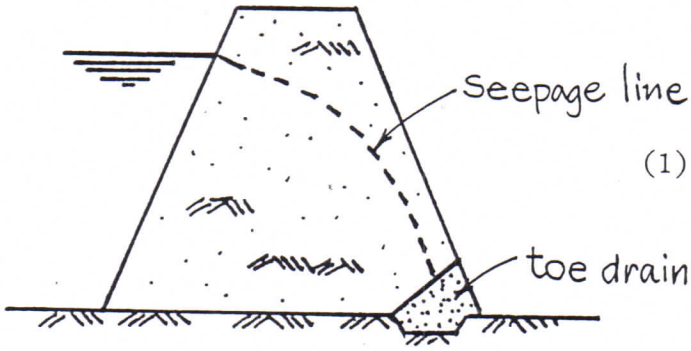

(a)




(b)

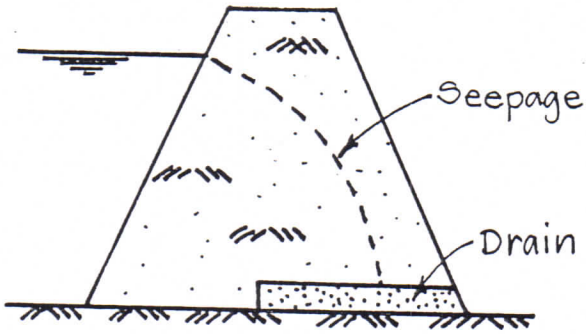
**รูปที่ 16 กราฟสำหรับใช้หา $\Delta a$ และ a เมื่อรู้ค่าของ $a+\Delta a$ และ $\alpha$**

(E-3)



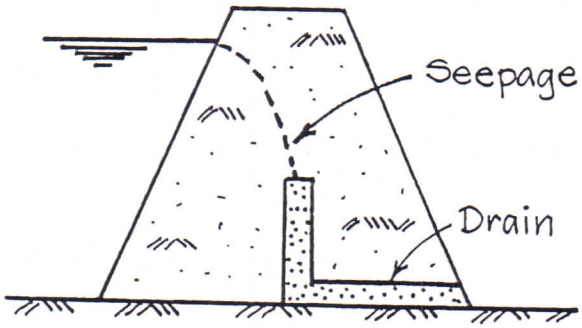

(1) Rock-fill Toe อยู่ที่ปลายฐานเขื่อนด้านท้ายน้ำ พร้อมตัวกรอง

$90^\circ < \alpha < 180^\circ$




(2) Drainage Blanket วางอยู่ในแนวราบด้านท้ายน้ำ

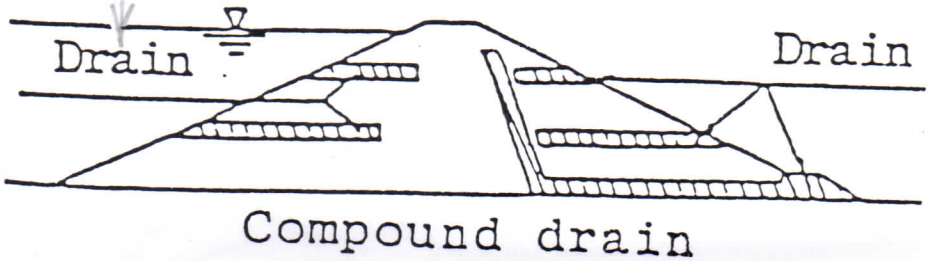
$\alpha = 180^\circ$




(3) Combine Horizontal and Vertical Blanket (Chimney Drain)

ป้องกัน Rapid Drawdown

(4) เพิ่ม Blanket ในแนวราบด้านเหนือน้ำ




Compound drain

รูปที่ 3 แสดงระบบระบายน้ำภายในตัวเขื่อนชนิดต่าง ๆ

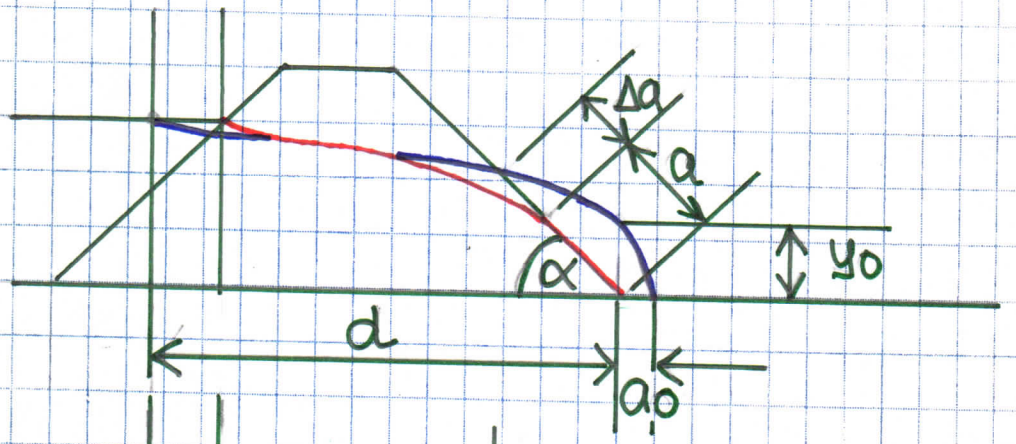
# ④ Discharge Face (ผิวหน้าเฉือนด้านน้ำไหลซึมออก)

**No Drain**

$60° < \alpha < 90°$

$$a = \frac{(1-C)y_0}{1-\cos\alpha}$$

$$\Delta a = \frac{Cy_0}{1-\cos\alpha}$$




**Toe Drain**

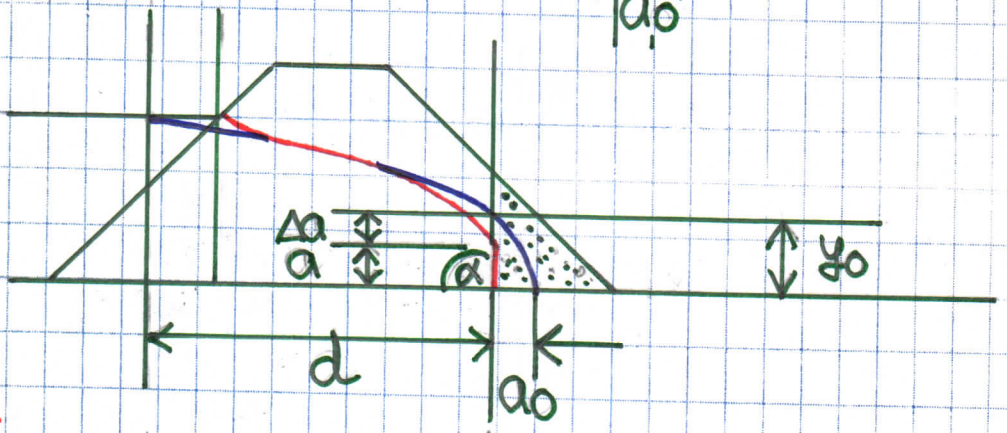
$\alpha = 90°$

$C = 0.25$

$\cos 90 = 0$

$a = 0.75y_0$

$\Delta a = 0.25y_0$

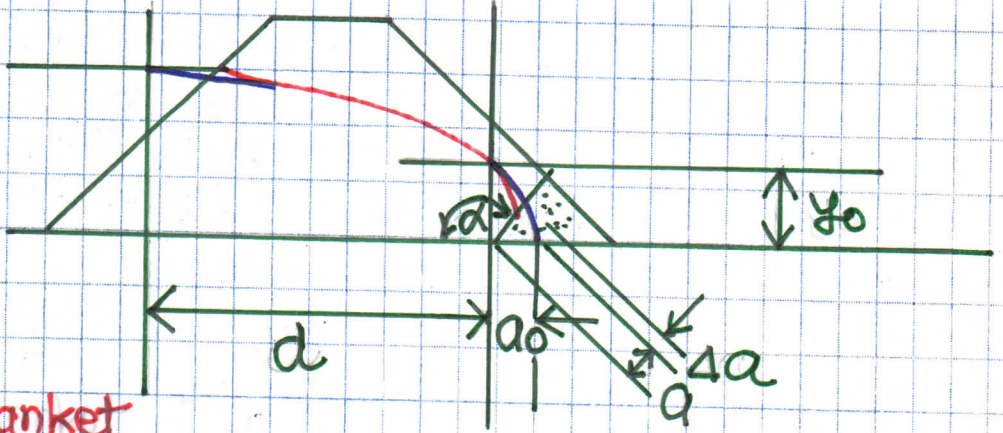



**Toe Drain**

$90° < \alpha < 180°$

$$a = \frac{(1-C)y_0}{1-\cos\alpha}$$

$$\Delta a = \frac{Cy_0}{1-\cos\alpha}$$




**Horizontal Blanket**

**Drainage Blanket**

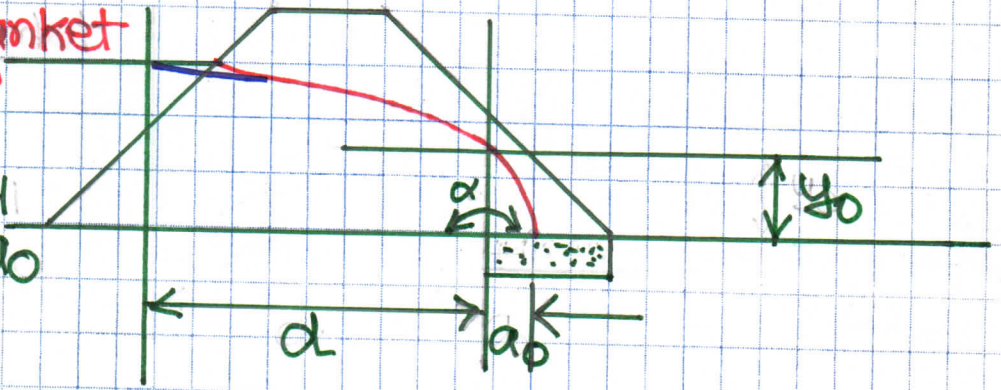
$\alpha = 180°$

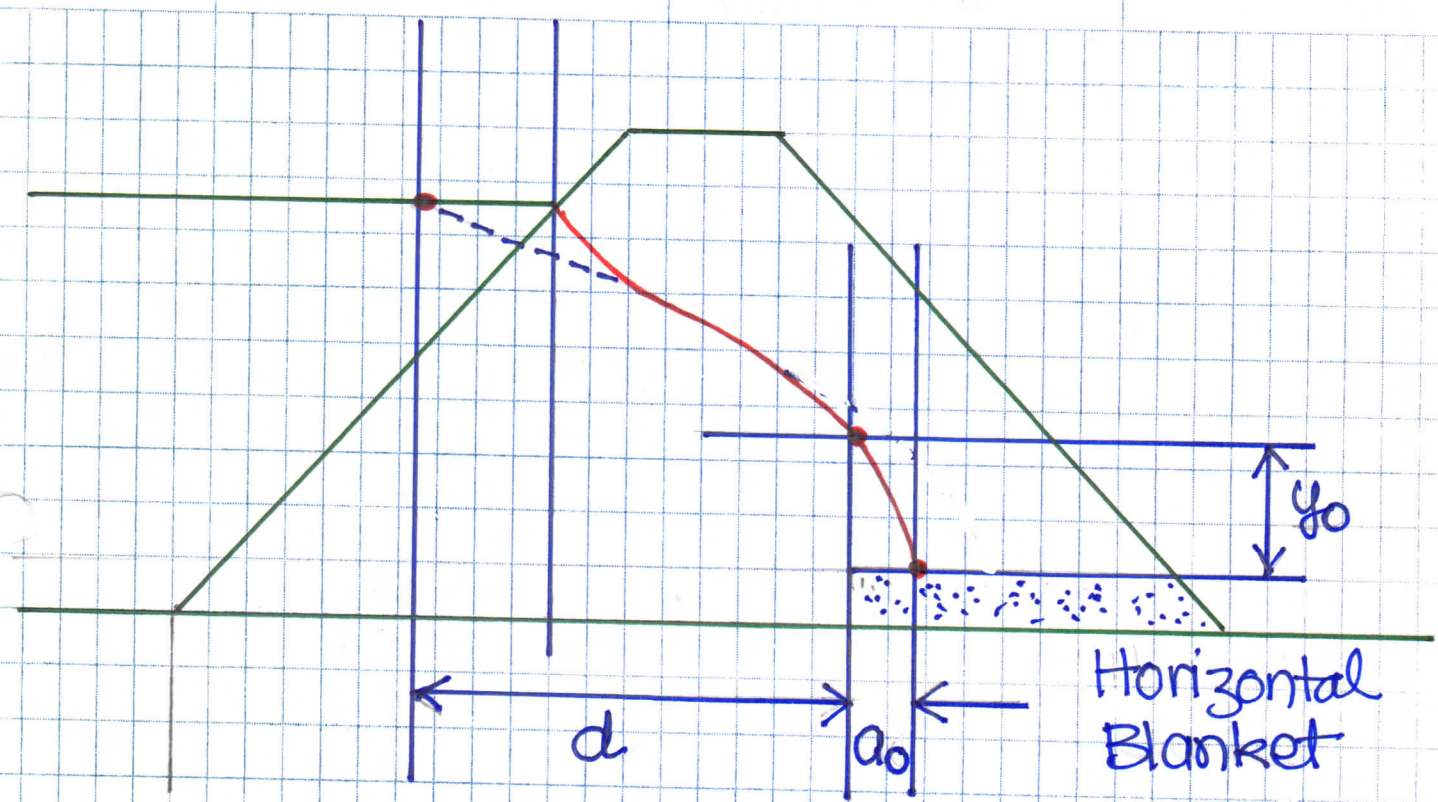
$C = 0$

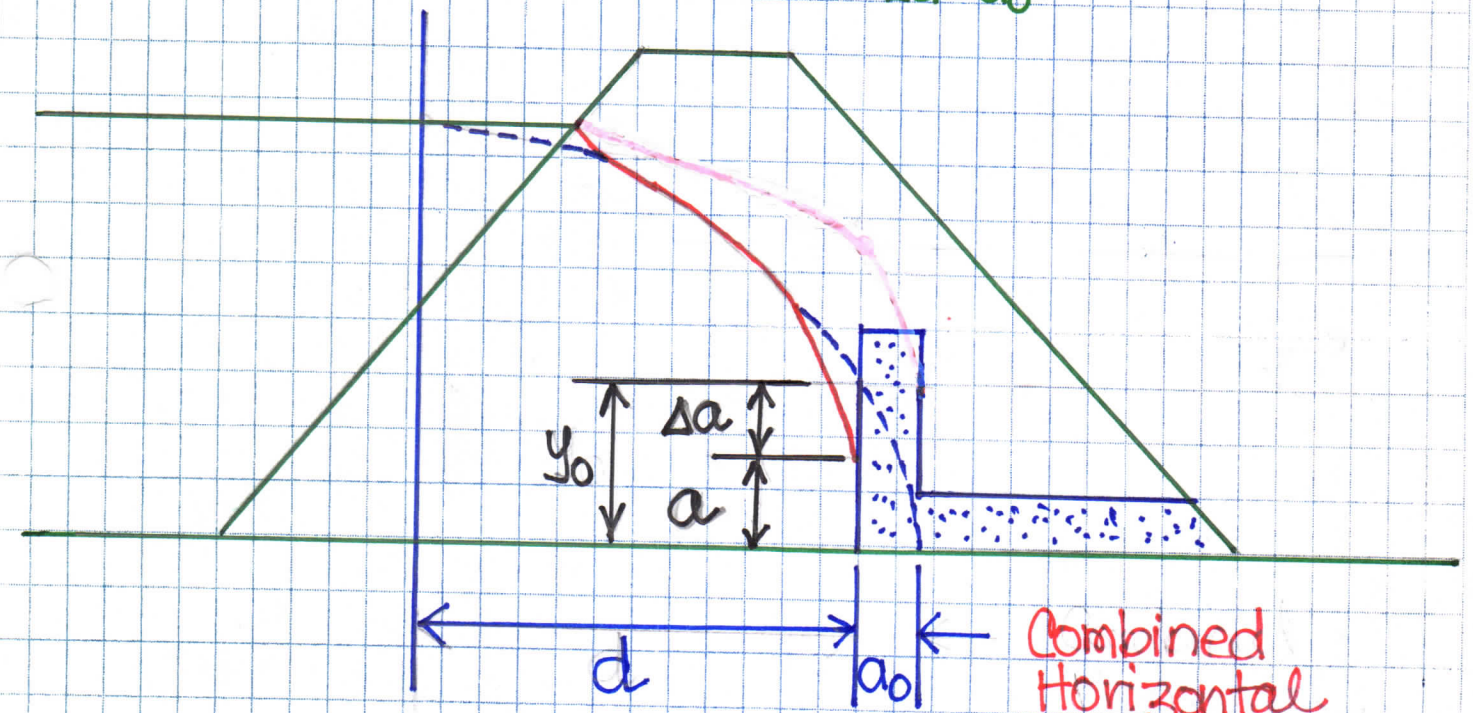
$\cos 180 = -1$

$$a = \frac{y_0}{2} = a_0$$

$\Delta a = 0$




$y_o$
d
$a_o$
$a+\Delta a = a_o$
Horizontal Blanket


$y_o$
$\Delta a$
a
d
$a_o$
Combined Horizontal and Vertical Blanket (Chimney Drain)

# 5. การคำนวณอัตราการไหลซึมน้ำผ่านตัวเขื่อน

## Darcy's Law

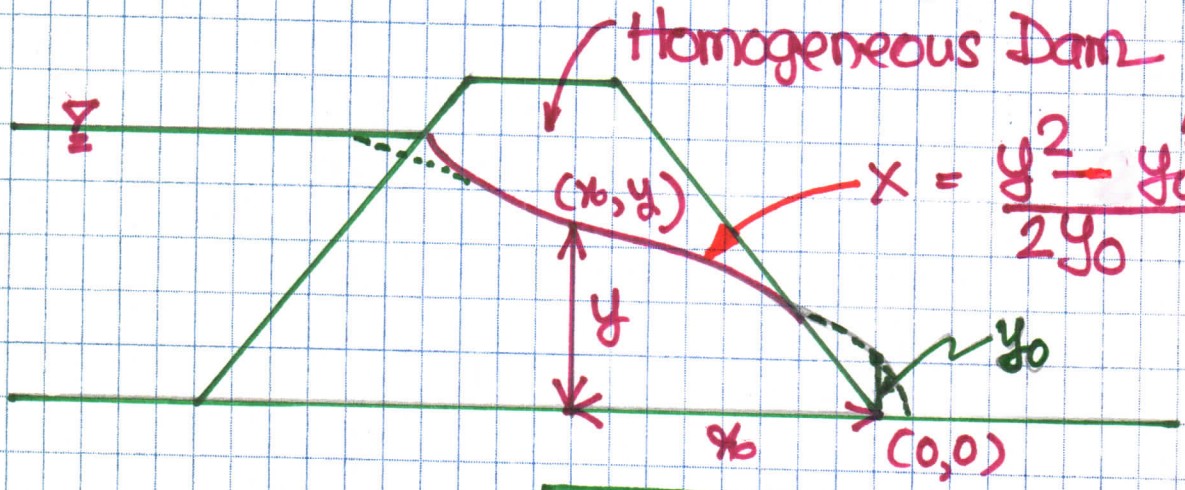
$$q = kiA$$

เมื่อ $q$ = อัตราการไหลซึม (Seepage Rate) $(cm^3/d/cm)$

$K$ = ความสามารถให้น้ำไหลซึมผ่านของวัตถุ (Permeability) $(cm/d)$

$i$ = Hydraulic Gradient $= \frac{dy}{dx}$

$A$ = Cross-sectional area of flow $(cm^2/cm)$



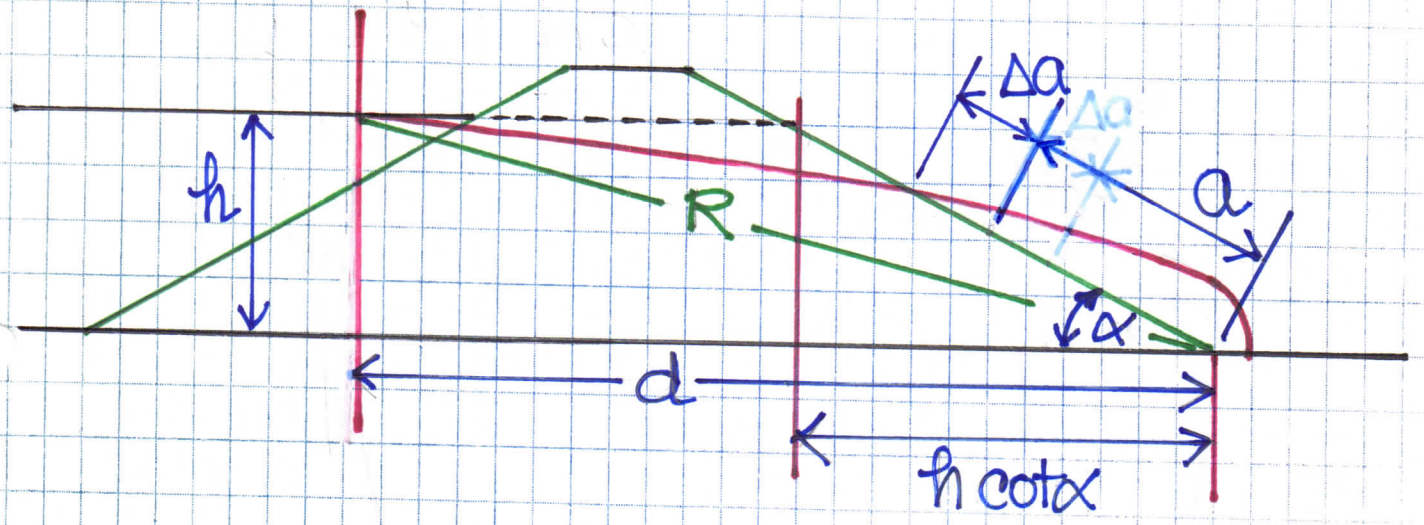

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

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

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

$$\rightarrow q = K\left(\frac{y_0}{\sqrt{y_0^2 + 2xy_0}}\right)\sqrt{y_0^2 + 2xy_0} = Ky_0$$

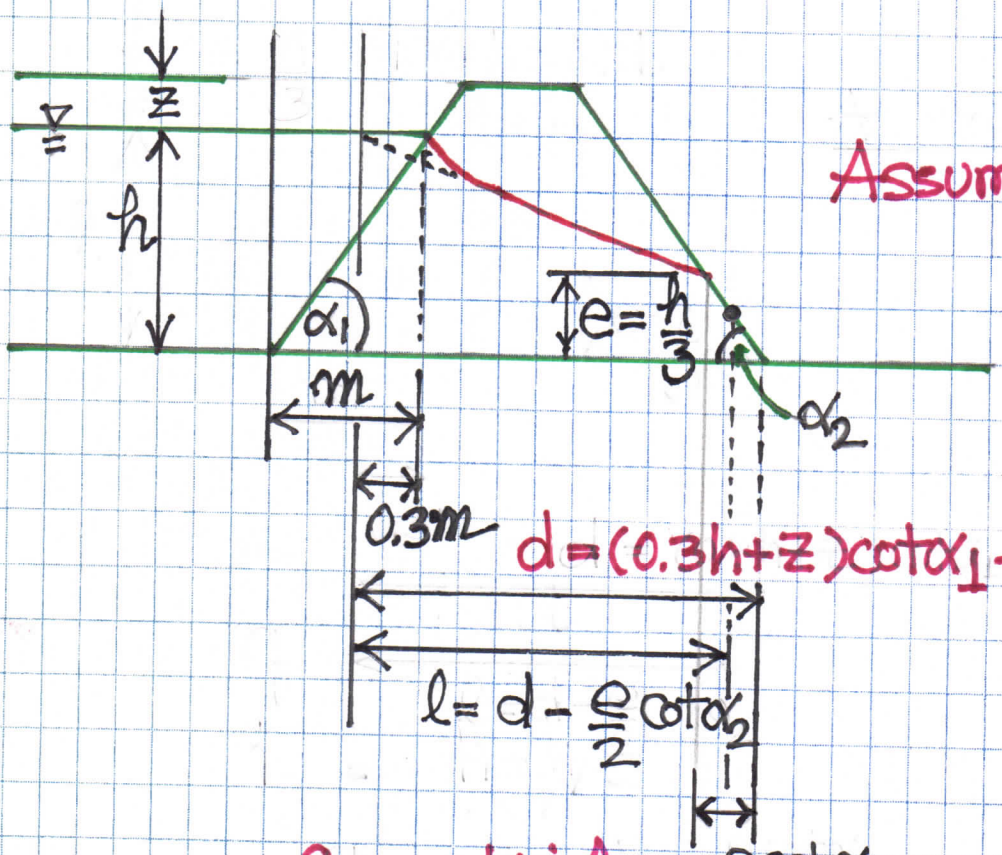
กรณี $\alpha < 30^\circ$ (ลอการิทึมในรูป 16)




$$q = K a \sin^2\alpha$$

$$a = \sqrt{h^2+d^2} - \sqrt{d^2-h^2\cot^2\alpha}$$

# 6. Approximation Method




Assume $e=\frac{h}{3}$

$$q_f = kiA$$

$$i = \frac{h-e}{l}$$

$$A = \frac{h+e}{2}$$

$$q_f = k\left(\frac{h-e}{l}\right)\left(\frac{h+e}{2}\right)$$

$$= \frac{k(h^2-e^2)}{2l}$$

$$= \frac{k(h^2-h^2/9)}{2l}$$

$$= \frac{4kh^2}{9l}$$ ใช้ได้เมื่อ $\alpha_2 < 90^\circ$

สรุป 7. การหา Phreatic Line และ Seepage Rate

กรณี Permeability ในแนวดิ่ง ($K_v$) ≠ แนวราบ ($K_H$)

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

2. แปลงหน้าตัดเขื่อนในแนวราบโดยคูณระยะ $x$ ทุกๆ ด้วย $p$

$x' = p.x$ (ดูรูปที่ 17)

3. หา Phreatic Line ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว

4. คำนวณ $q_f$

$q_f = Ky_0$ ; $30^\circ < \alpha < 180^\circ$

$q_f = K a \sin^2\alpha$ ; $\alpha < 30^\circ$

เมื่อ $K = \sqrt{K_v . K_H}$

$$P = \sqrt{\frac{K_v}{K_H}} = \sqrt{\frac{K_v}{9K_v}} = \frac{1}{3} \qquad \text{(E-26)}$$

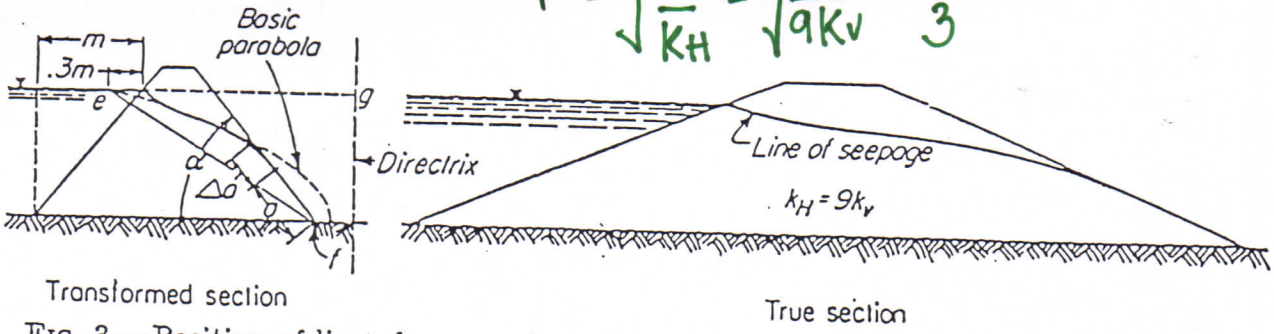
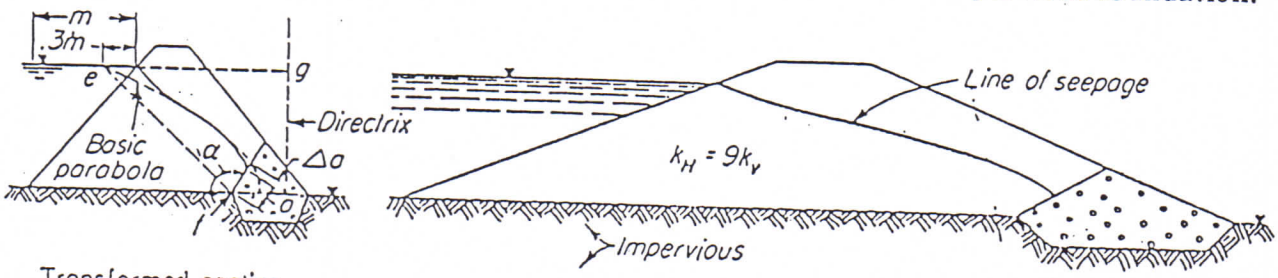
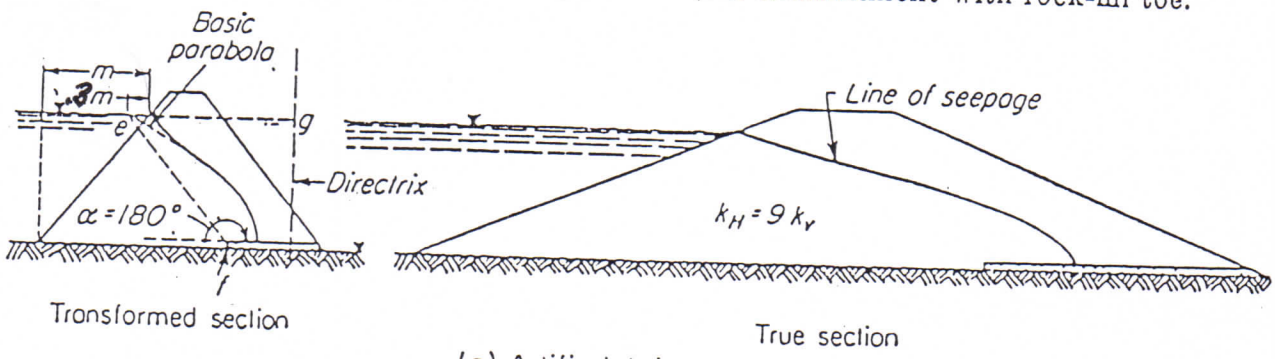


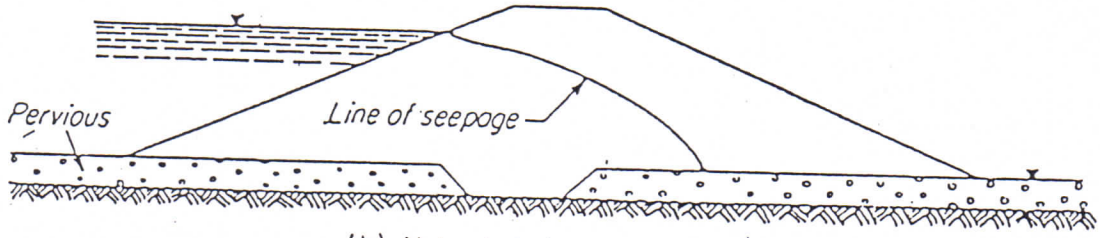

FIG. 3.—Position of line of seepage in uniform embankment on impervious foundation.




Position of line of seepage in uniform embankment with rock-fill toe.




(a) Artifical drainage blanket




(b) Natural drainage blanket

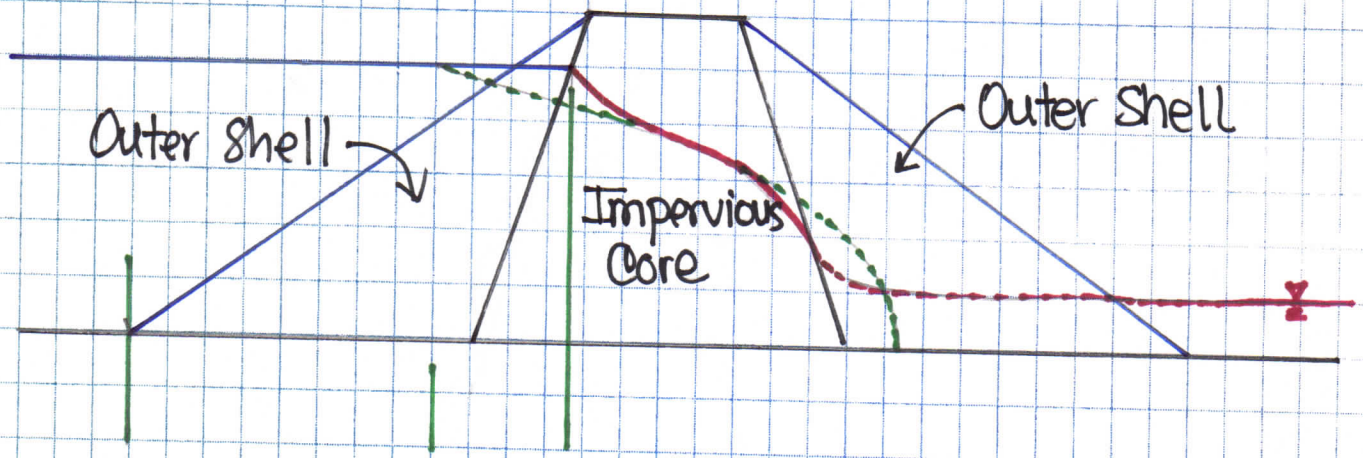
Position of line of seepage in uniform embankment with drainage blanket.

## รูปที่ 17 การแปลงหน้าตัดของเขื่อนกรณีค่า $K_v$ ไม่เท่ากับ $K_h$

- ค่าอัตราส่วน $K_v/K_h$ นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าดังนี้
- ถ้าตัวเขื่อนบดอัดด้วย Tamping Roller, $K_v/K_h$ = 0.10-0.50 , ค่าเฉลี่ย = 0.20
- ถ้าบดอัดด้วย pneumatic-tired rollers, $K_v/K_h$ = 0.03-0.05 , ค่าเฉลี่ย = 0.04

## 8. Seepage ใน Composite Section

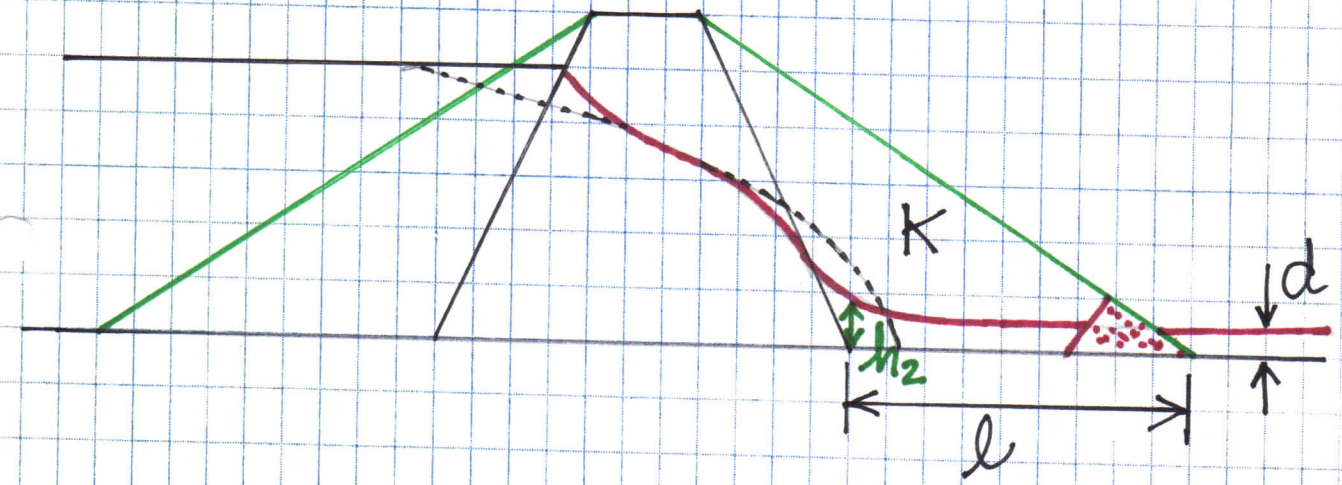
เขื่อนดินหรือเขื่อนหินที่ทำชนิดหลายโซน (Zone Type) จะมี Impervious Core (แกนที่กันน้ำ) เพื่อลด Seepage




Outer Shell สร้างจากวัสดุที่น้ำไหลซึมผ่านได้ดีกว่าใน Impervious Core มาก (อาจหลายร้อยเท่า) ดังนั้น Shell ทางด้านเหนือน้ำ จึงแทบไม่มีผลต่อ Seepage Line เลย นั่นที่ไหลซึมผ่าน Impervious Core จะมีปริมาณน้อยมาก เส้น Phreatic Line ใน Shell ด้านท้ายน้ำจะอยู่สูงกว่า TW เล็กน้อย

→ การวิเคราะห์ Seepage จะวิเคราะห์เฉพาะส่วนของ Impervious Core เท่านั้น Shell ด้านเหนือน้ำไม่มีผลต่อ Seepage

## 9. Seepage ใน Shell ด้านต้นน้ำ




$$q_f = KiA$$

$$i = \frac{h_2 - d}{\ell} = \frac{h'}{\ell} \qquad (h' = h_2 - d)$$

$$A = \frac{h_2 + d}{2} - d + \frac{h'}{2} = \frac{h_2 - d + 2d}{2}$$

$$= d + \frac{h_2 - d}{2}$$

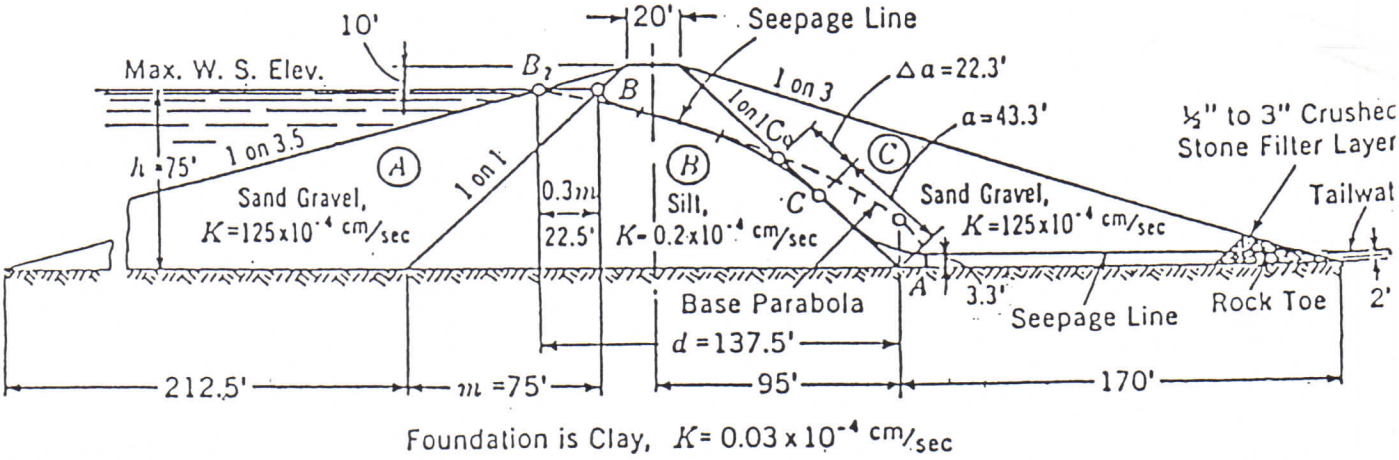
**ประโยชน์**

นำไปกำหนดขนาดความสูง (หนา) ของระบบระบายน้ำในตัวเขื่อน

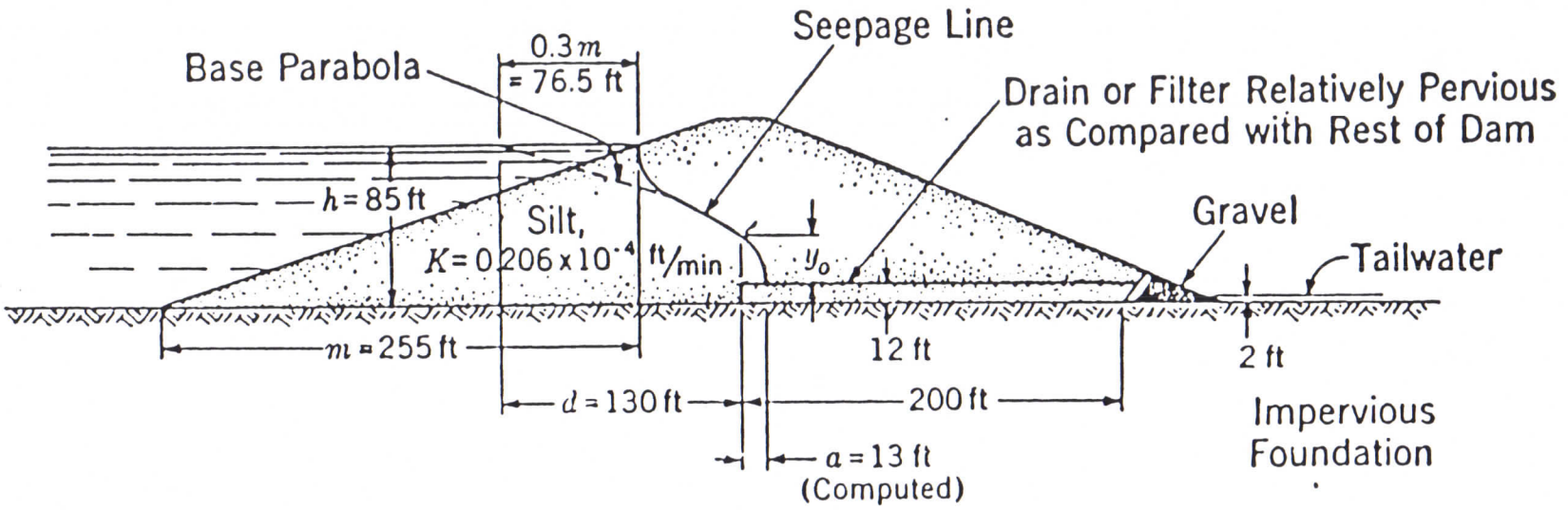
## 7.2 การหาตำแหน่งแนวการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนที่มีแกน

- มีวิธีการเหมือนเขื่อนชนิดเนื้อเดียวล้วน (Homogeneous) โดยถือเกณฑ์ดังนี้
  - ถือว่าเปลือกเขื่อนทั้งด้านเหนือและท้ายน้ำมีสภาพการซึมน้ำได้ดี
  - ดังนั้นการเขียนเส้นกราฟ Base Parabola ก็จะเขียนในส่วนของแกนทึบน้ำ

- รูปที่ 19 เป็นรูปตัดของเขื่อนชนิดหลายโซน และแสดงวิธีการหาตำแหน่งของเส้น Seepage line



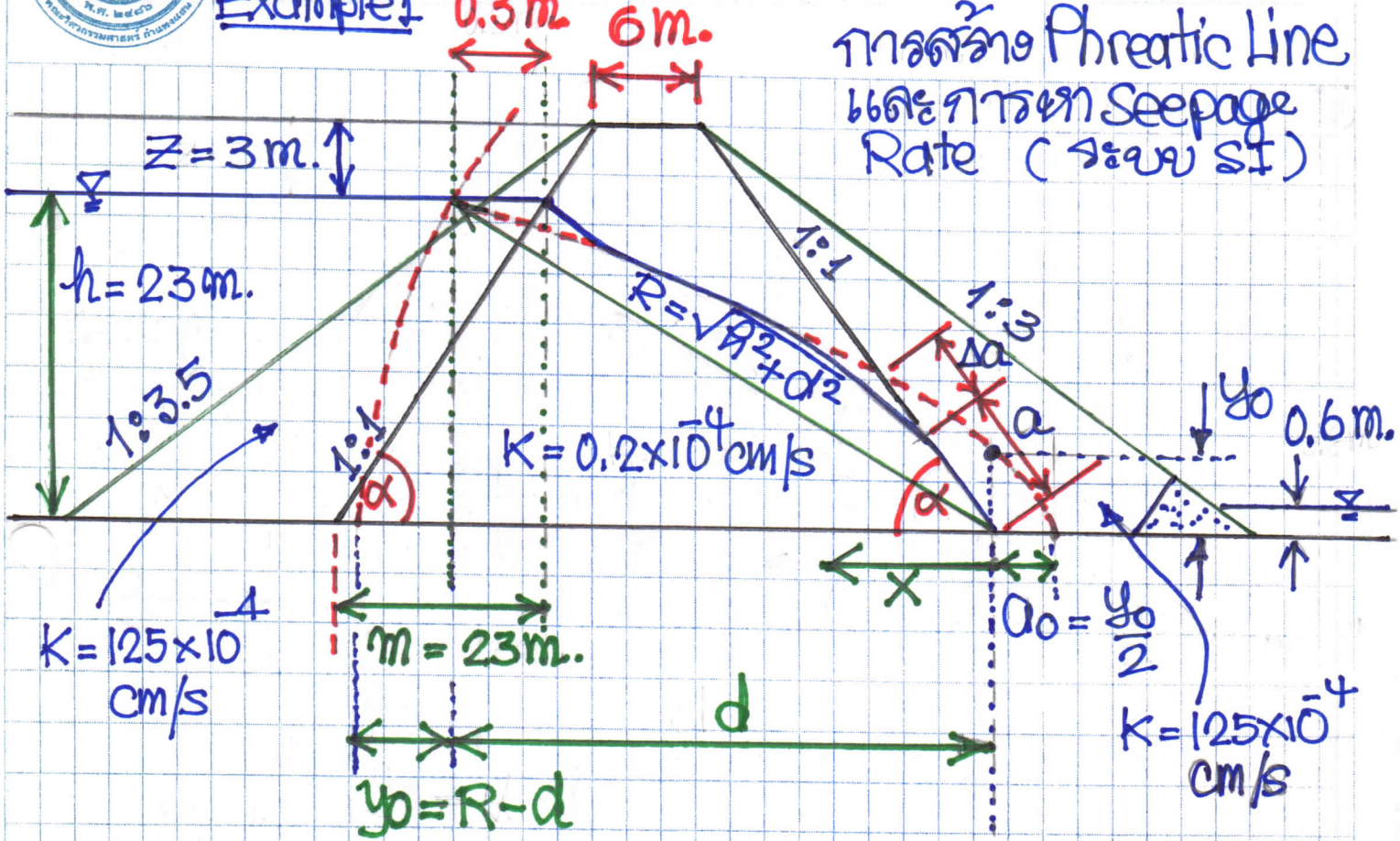

รูปที่ 19 การหาแนวการไหลซึมผ่านหน้าตัดเขื่อนที่มีแกนกลาง




รูปที่ 29 ผลกระทบของตัวระบายน้ำต่อแนวการซึม

## Example1

การสร้าง Phreatic Line และการหา Seepage Rate (ระบบ SI)




$$m = h\cot\alpha = 23\cot(45^\circ) = 23\ m.$$

$$d = 0.3m + Z\cot 45^\circ + w + (h+Z)\cot 45^\circ$$

$$= 2(h+Z)\cot 45^\circ - 0.7h\cot 45^\circ + w$$

$$= 2(23+3) - 0.7(23) + 6$$

$$= 41.9\ m.$$

$$R = \sqrt{23^2 + 41.9^2} = 47.8\ m.$$

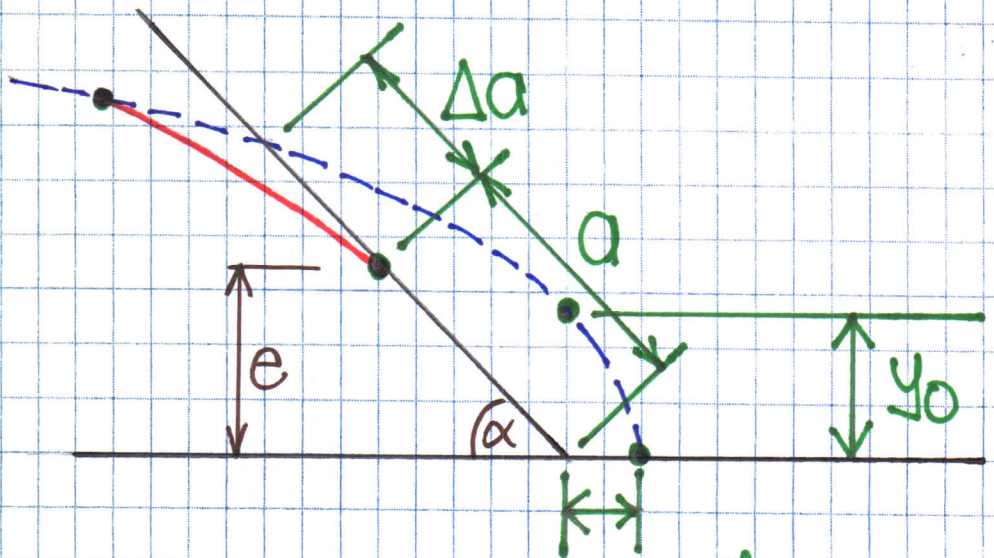
$$y_0 = R - d = 47.8 - 41.9 = 5.9\ m.$$

สมการ Parabola

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

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

| X (m.) | Y (m.) |
|---|---|
| $-2.95$ $(-a_0 = -\frac{y_0}{2})$ | 0. |
| 0 | 5.90 $(y_0)$ |
| 5 | 9.68 |
| 10 | 12.36 |
| 15 | 14.55 |
| 20 | 16.45 |
| 25 | 18.16 |
| 30 | 19.71 |
| 35 | 21.16 |
| 40 | 22.51 |
| 41.9 | 23.00 |




$$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{5.9}{2} = 2.95 \text{ m.}$$

$$(a+\Delta a)\cos 45^\circ = \frac{[(a+\Delta a)\sin 45^\circ]^2 - y_0^2}{2y_0}$$

$$a+\Delta a = \frac{y_0}{1-\cos 45^\circ}$$

$$= \frac{5.9}{1-\frac{1}{\sqrt{2}}} = 20.14 \text{ m.}$$

จากรูป 16 (ซีมิดาร)

$$\alpha = 45^\circ \quad , C = \frac{\Delta a}{a+\Delta a} = 0.35$$

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

$$\Delta a = 0.35(20.14) = 7.05 \text{ m.}$$

$$a = 20.14 - 7.05 = 13.09 \text{ m.}$$

$$q = k_i A = k y_0$$

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

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

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

$$q = k\frac{y_0}{\sqrt{y_0^2+2xy_0}}\sqrt{y_0^2+2xy_0}$$

$$= k y_0$$

$$K = 0.2\times10^{-4} \text{ cm/s}$$

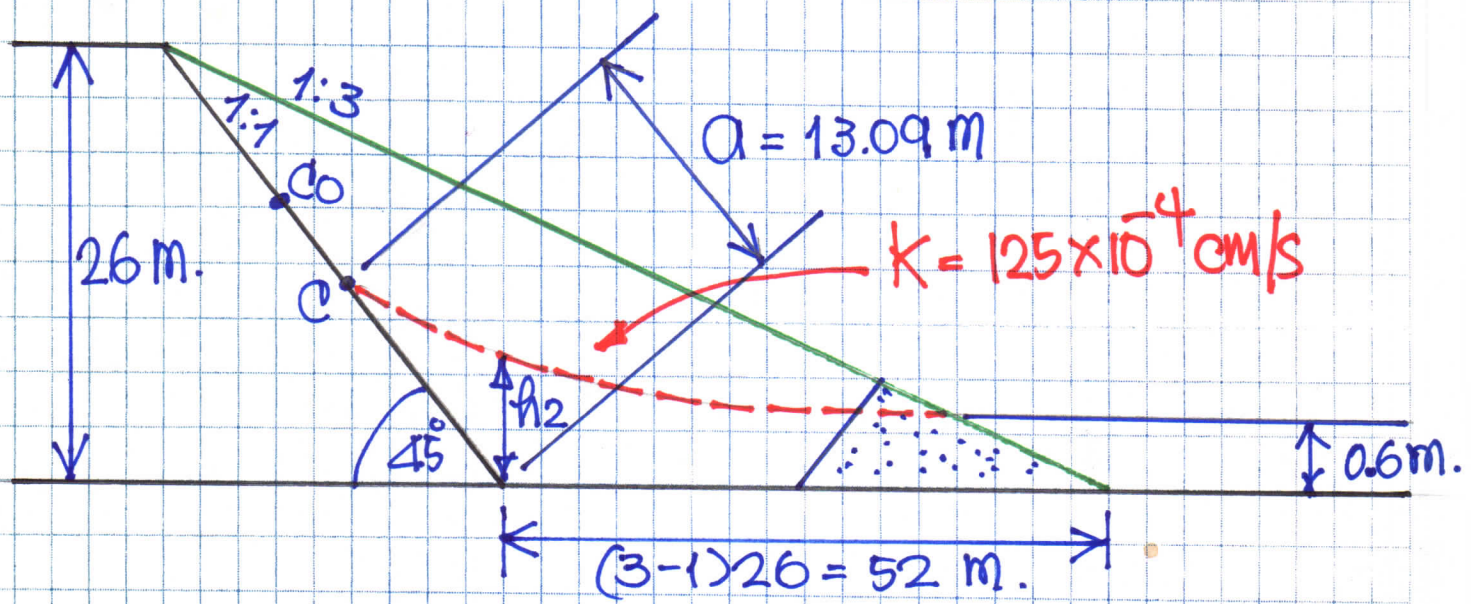
$$= \frac{0.2}{10^4}\times\frac{1}{10^2}\times24\times3{,}600$$

$$= 0.0172 \text{ m/d}$$

$$q = 0.0172\times5.9$$

$$= 0.10148 \text{ m}^3/\text{d}/1 \text{ m. of dam width}$$

## การคำนวณหาความลึกของน้ำในเขื่อนนอกชั้นหินทึบน้ำ




$$q = KiA$$

$$q = 0.10148 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

$$K = 125\times10^{-4}\times10^{-2}\times24\times3{,}600$$

$$= 10.8 \text{ m/d}$$

$$i = \frac{h_2 - 0.6}{52}$$

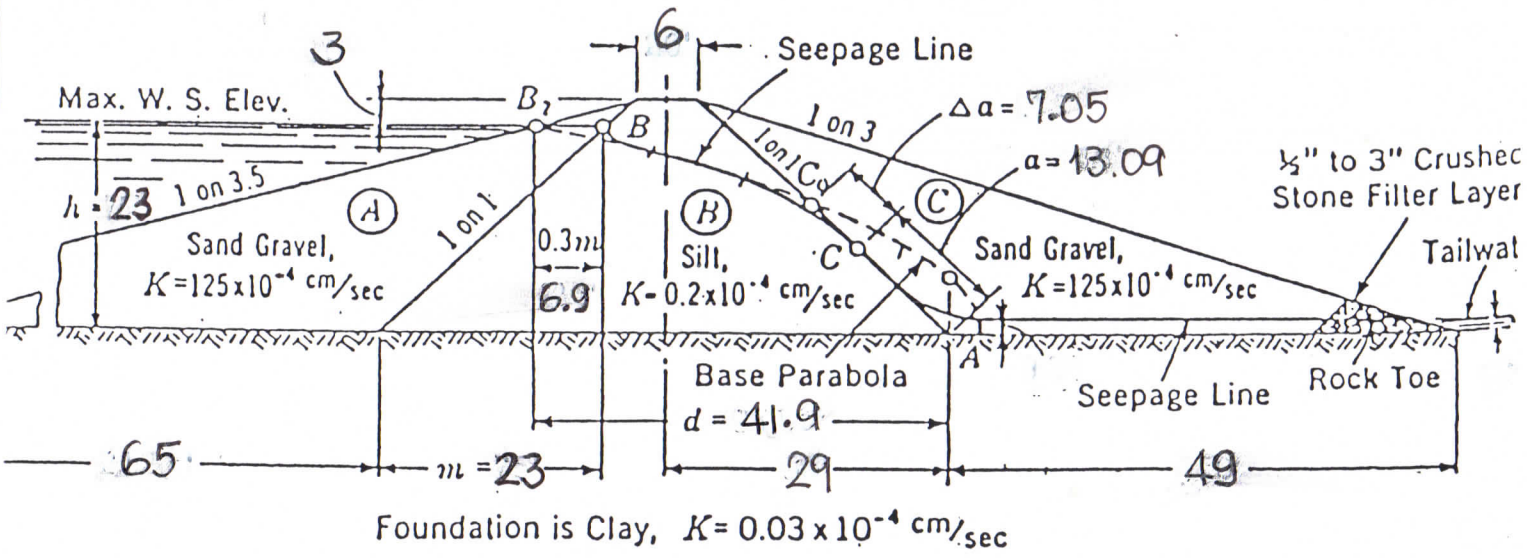
$$A = \frac{h_2 + 0.6}{2}$$

$$0.10148 = 10.8 \times \left(\frac{h_2 - 0.6}{52}\right)\left(\frac{h_2 + 0.6}{2}\right)$$

$$h_2^2 - 0.36 = \frac{0.10148 \times 52 \times 2}{10.8}$$

$$h_2^2 = 1.3372$$

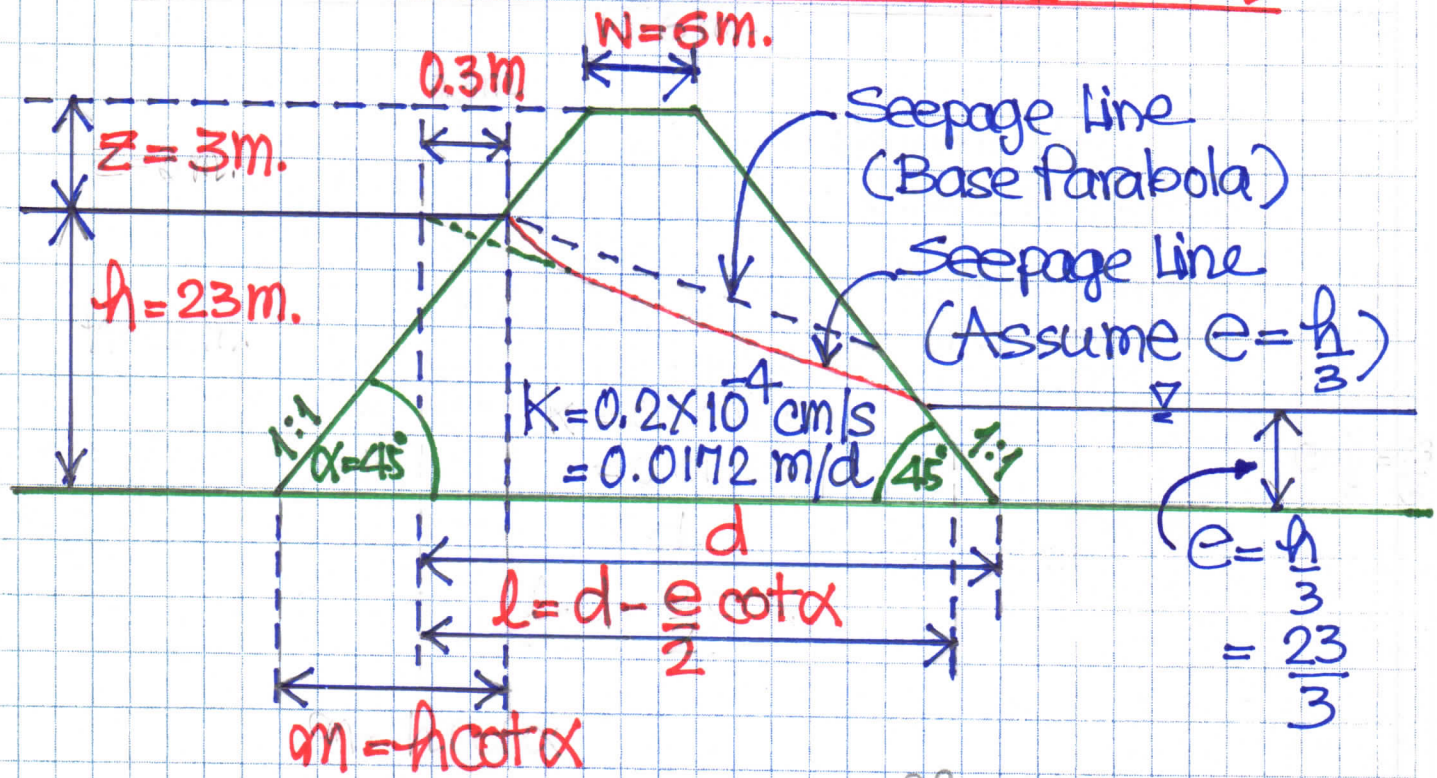
$$h_2 = 1.156 \text{ m.}$$




หน่วยเป็นเมตร

**รูปที่ 19 การหาแนวการไหลซึมผ่านหน้าตัดเขื่อนที่มีแกนกลาง**

# การหาอัตราการซึมผ่านเขื่อนโดยประมาณ




$$q_f = KiA = \frac{1}{9}\frac{Kh^2}{l}$$

$$K = 0.2\times10^{-4}\ \text{cm/s}$$

$$= 0.0172\ \text{m/d}$$

$$i = \frac{h-e}{l} = \frac{h-h/3}{l} = \frac{2h}{3l}$$

$$l = d - \frac{e}{2}\cot\alpha$$

$$= 0.3m + Z\cot45^\circ + W + (h+Z)\cot45^\circ - \frac{h}{6}\cot45^\circ$$

$$= 2(h+Z)\cot45^\circ + W - 0.7h\cot45^\circ - \frac{h}{6}\cot45^\circ$$

$$l = 2(23+3)(1)+6-0.7(23)-\frac{23}{6}$$

$$= 52+6-16.1-3.83$$

$$= 38.07 \text{ m.}$$

$$A = \frac{h+e}{2} = \frac{23+23/3}{2} = \frac{4\times 23}{2\times 3}$$

$$= 15.3 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$q_f = 0.0172\left(\frac{2\times 23}{3\times 38.07}\right)15.3$$

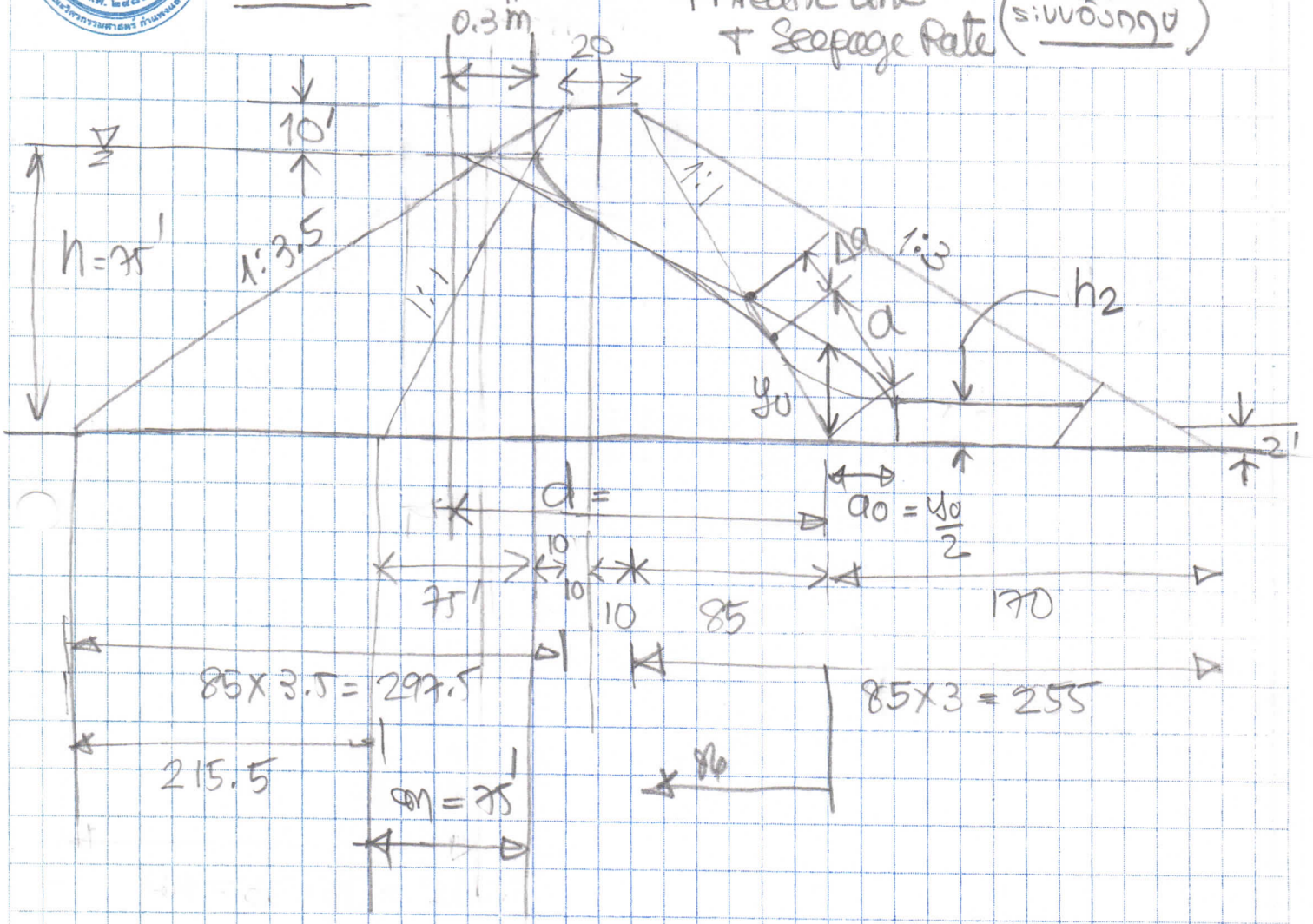
$$= 0.106 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

---

สูตร $q_f = \frac{4}{9}\frac{KB^2}{l} = \frac{4}{9}\frac{(0.0172)(23)^2}{38.07}$

$$= 0.106 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m.}$$

ตัวอย่าง 2 Zone Type Embankment Phreatic Line + Seepage Rate (ระบบกราฟ)




$0.3m = 0.3 \times 75 = 22.5$

$d = 22.5 + 10 + 20 + 85 = 137.5$

$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$

$= \sqrt{75^2 + 137.5^2} - 137.5$

$= 156.62 - 137.5 = 19.12$

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

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

h= 75 d= 137.5

y0= 19.125

| x | y |
|---|---|
| -9.56228 | 0.00 |
| 0 | 19.12 |
| 10 | 27.35 |
| 20 | 33.63 |
| 30 | 38.90 |
| 40 | 43.54 |
| 50 | 47.73 |
| 60 | 51.58 |
| 70 | 55.17 |
| 80 | 58.53 |
| 90 | 61.71 |
| 100 | 64.74 |
| 110 | 67.63 |
| 120 | 70.40 |
| 130 | 73.06 |
| 137.5 | 75.00 |

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

$$= \frac{y_o}{1-\cos 45^\circ} = \frac{19.12}{1-0.707}$$

$$= 65.3$$

ตามรูป

$$\alpha = 45^\circ, \quad C = 0.35$$

$$\frac{\Delta a}{a+\Delta a} = 0.35$$

$$\Delta a = 0.35 \times 65.3 = 22.86$$

$$a = 65.3 - 22.9 = 42.4$$

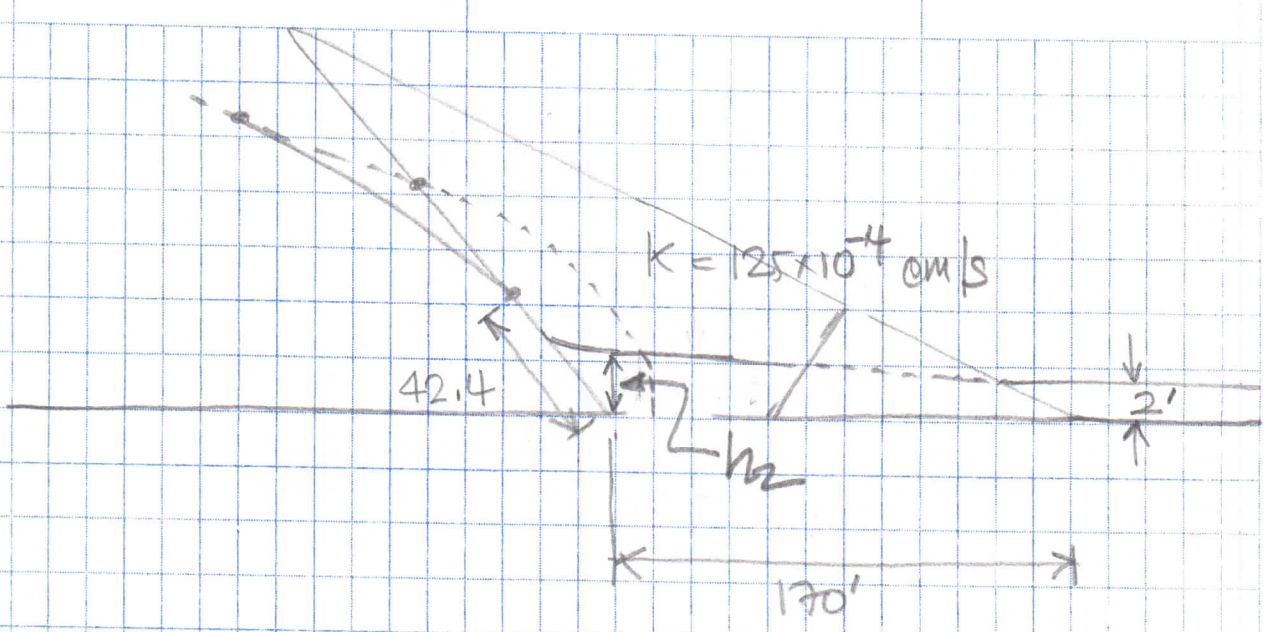
$$q_f = k y_o$$

$$k = 0.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

$$= 0.4 \times 10^{-4} \text{ ft/min}$$

$$q_f = 0.00004 \times 19.12$$

$$= 0.0007648 \text{ ft}^3\text{/min}$$




$$q = kiA$$

$$q = 0.0007648 \ ft^3/min.$$

$$k = 125 \times 10^{-4} \ cm/s$$

$$= \frac{125}{104} \times \frac{1}{30.48} \times 60 = 0.0246 \ ft/min.$$

$$i = \frac{h_2 - 2}{170}$$

$$A = \frac{h_2 + 2}{2} =$$

$$0.0007648 = 0.0246 \times \frac{(h_2-2)}{170} \times \frac{(h_2+2)}{2}$$

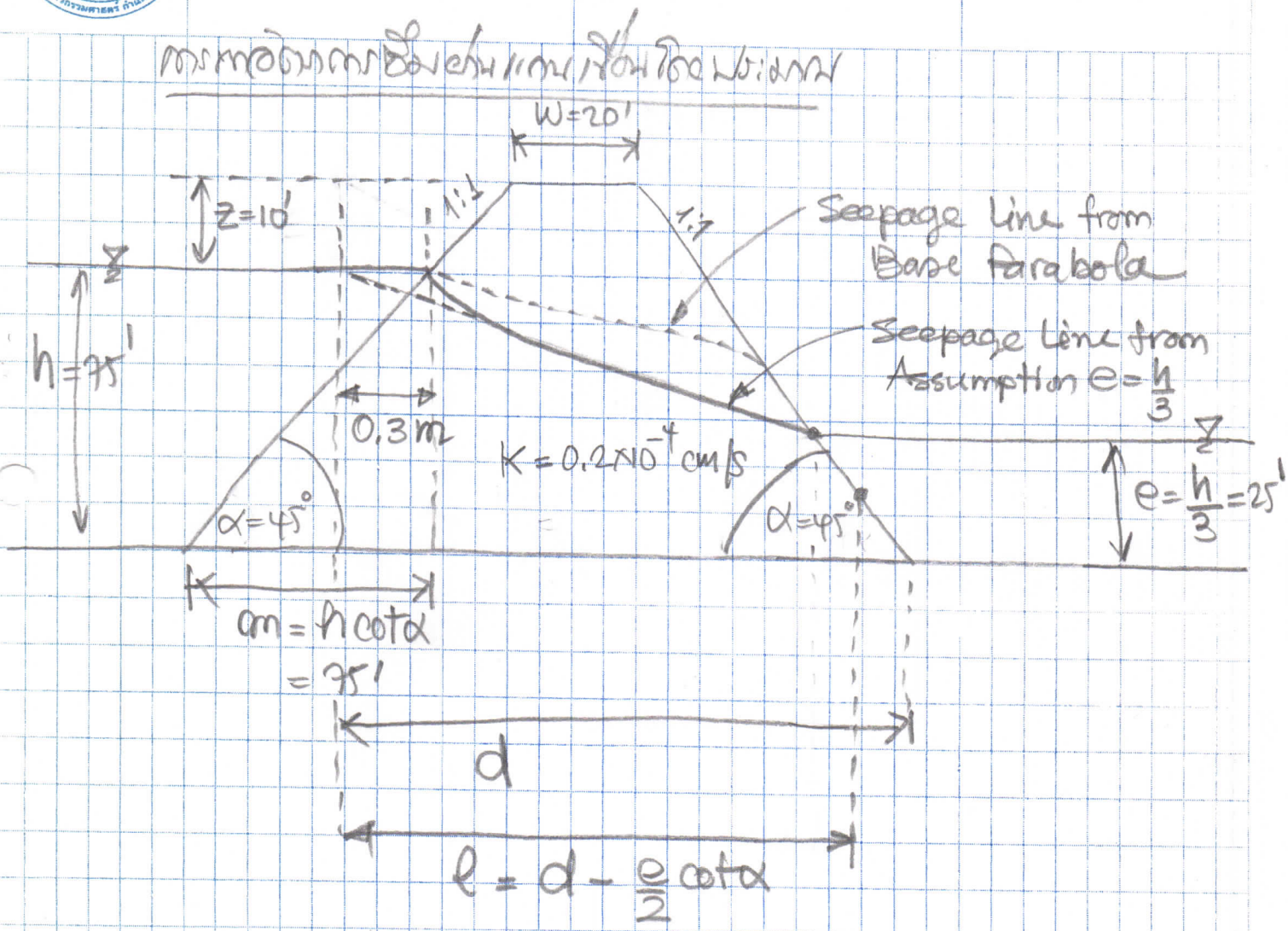
$$h_2^2 - 4 = \frac{0.0007648 \times 170 \times 2}{0.0246}$$

$$h_2^2 - 4 = 10.57$$

$$h_2 = \sqrt{10.57+4} = \sqrt{14.57}$$

$$= 3.817 \ ft.$$

การหาอัตราการซึมเข้าแนวดิ่งใต้เขื่อนกั้นน้ำ




$$q = kiA$$

$$k = 0.2\times10^{-4}\ \text{cm/s}$$

$$= \frac{0.2}{10^4}\times\frac{1}{30.48}\times 60 = 0.00003937\ \text{ft/min}$$

$$i = \frac{h-e}{l} = \frac{h-h/3}{l} = \frac{2h}{3l}$$

$$l = d - \frac{e}{2}\cot\alpha$$

$$= 0.3m + 2Z\cot\alpha + w + h\cot\alpha - \frac{e}{2}\cot\alpha$$

$$l = 2(h+z)\cot\alpha + w - 0.7h\cot\frac{\alpha}{2} - \frac{h}{6}\cot\alpha$$

$$= 2(75+10)+20-0.7(75)-\frac{75}{6}$$

$$= 125'$$

$$A = \frac{h+e}{2} = \frac{75+75/3}{2} = 50$$

$$q = 0.0000393 \times \left(\frac{2\times 75}{3\times 125}\right) 50$$

$$= 0.00079 \quad ft^3/min$$

## ตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านฐานราก

จากตัวอย่างที่ 1 ค่าที่ชั้นดินใต้ฐานรากมีค่า K เท่ากับแกนเฟื่อน $0.2\times10^{-4}$ cm/s หนา 12 m. วางอยู่บนชั้นดินที่มี $K = 0.03\times10^{-4}$ cm/s

→ จงคำนวณหาปริมาณน้ำที่ซึมผ่านฐานรากและตัวแผ่น

$$q_T = q_D + q_f$$

$q_D = 0.10148$ m$^3$/d/m.

$q_f = KiA$

$K_f = 0.2\times10^{-4}$ cm/s

$= 0.0172$ m./d

$i = \frac{h}{L}$

$h = 23$ m.

$L =$ ความยาวแกนเฟื่อน

$= 2(23+3)+6 = 58$ m.

$i = \frac{23}{58}$

$A = 12 \ m^2/m.$

$q_f = 0.0172 \times \frac{23}{58} \times 12$

$= 0.0818 \ m^3/d/m.$

$q_T = 0.10148 + 0.0818$

$= 0.1833 \ m^3/d/m.$

---

## ใช้สูตรโดยประมาณของ Terzaghi

$I = L = 58 \ m.$

$U = 12 \ m.$

$I > 2U$

$$q_f = \frac{hK}{0.88 + \frac{I}{U}} = K\left(\frac{h}{I + 0.88U}\right)U$$

$$= 0.0172\left(\frac{23}{58 + 0.88 \times 12}\right) \times 12$$

$$= 0.0172 \times \frac{23}{68.56} \times 12$$

$$= 0.06924 \ m^3/d/m.$$

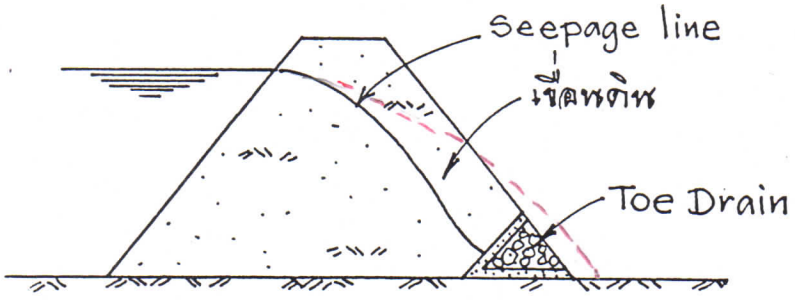
## 8. การควบคุมการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก

- ทำได้โดยการสร้างระบบระบายน้ำน้ำไว้ในตัวเขื่อนและฐานราก
- เหตุผลที่ต้องทำการควบคุมการไหลซึมของน้ำ

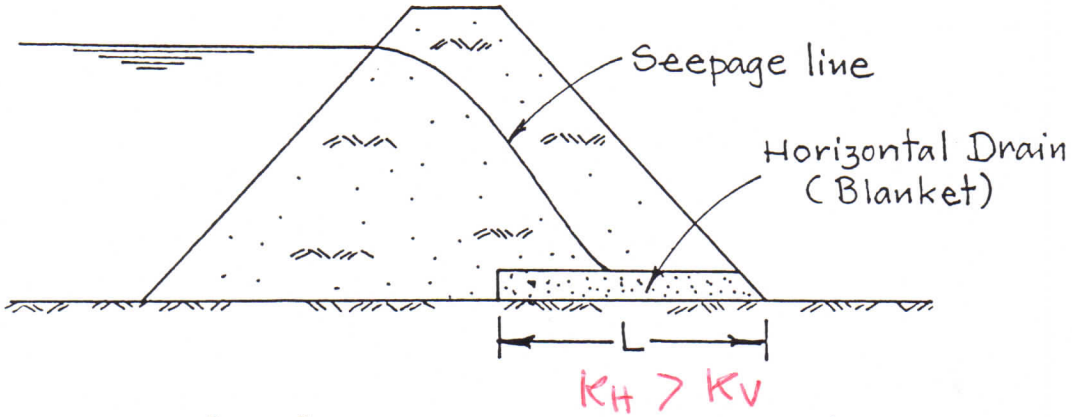
1. เมื่อน้ำถูกระบายออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินภายในตัวเขื่อน จะช่วยทำให้ตัวเขื่อนเกิดการทรุดตัวแน่น (Consolidate)
2. ช่วยลดระดับแนวการไหลซึมไม่ให้ไปปรากฏการไหลออกบนผิวเขื่อนด้านท้ายน้ำ อันจะทำให้เกิดการพังทลายได้
3. ช่วยลดแรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (เนื่องจากมีทางออก) โดยเฉพาะส่วนของเขื่อนทางด้านท้ายน้ำ
4. ป้องกันการเกิดการไหลแรงและเร็วจนเกิดการกัดพาเม็ดดิน (piping) ในบริเวณส่วนของเขื่อนด้านท้ายน้ำ

8.1) การควบคุมการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน มีวิธีการดังต่อไปนี้ :

8.1.1) สร้าง Toe Drain : ความสูงโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 30-40% ของ Head น้ำในอ่าง (หรือ $\frac{1}{4}-\frac{1}{3}$ ของความสูงเขื่อน)



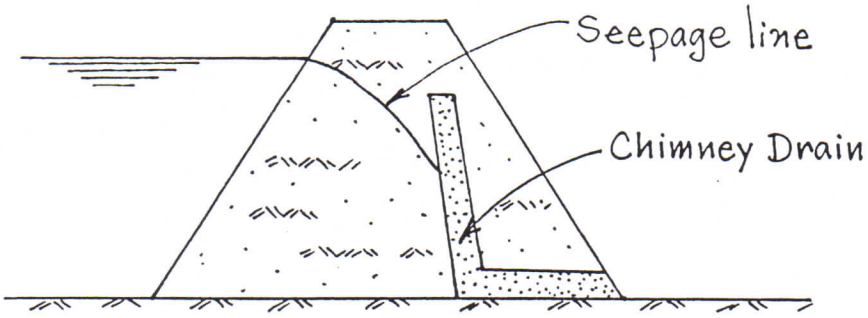

8.1.2) สร้าง Horizontal Drain : ความยาวเป็นไปได้ตั้งแต่ 25-100% ของระยะจากปลายเขื่อนด้านท้ายน้ำมายังจุดกึ่งกลางเขื่อน




- ข้อเสียของระบบระบายน้ำแบบนี้คือ ถ้าดินมีค่า K ในแนวราบมากกว่าแนวดิ่ง เส้น Seepage line อาจจะไม่พบกับ Horizontal Blanket นี้ได้ แต่จะไปออกที่ลาดผิวเขื่อนด้านท้ายแทน

8.1.3) สร้างระบบระบายน้ำแบบ Chimney Drain

- เป็นการปรับปรุงจากข้อด้อยของระบบระบายน้ำแบบ Horizontal Blanket.

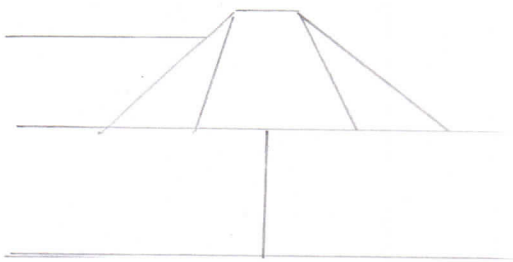



8.2) การควบคุมการไหลซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน : มีวิธีการดังต่อไปนี้

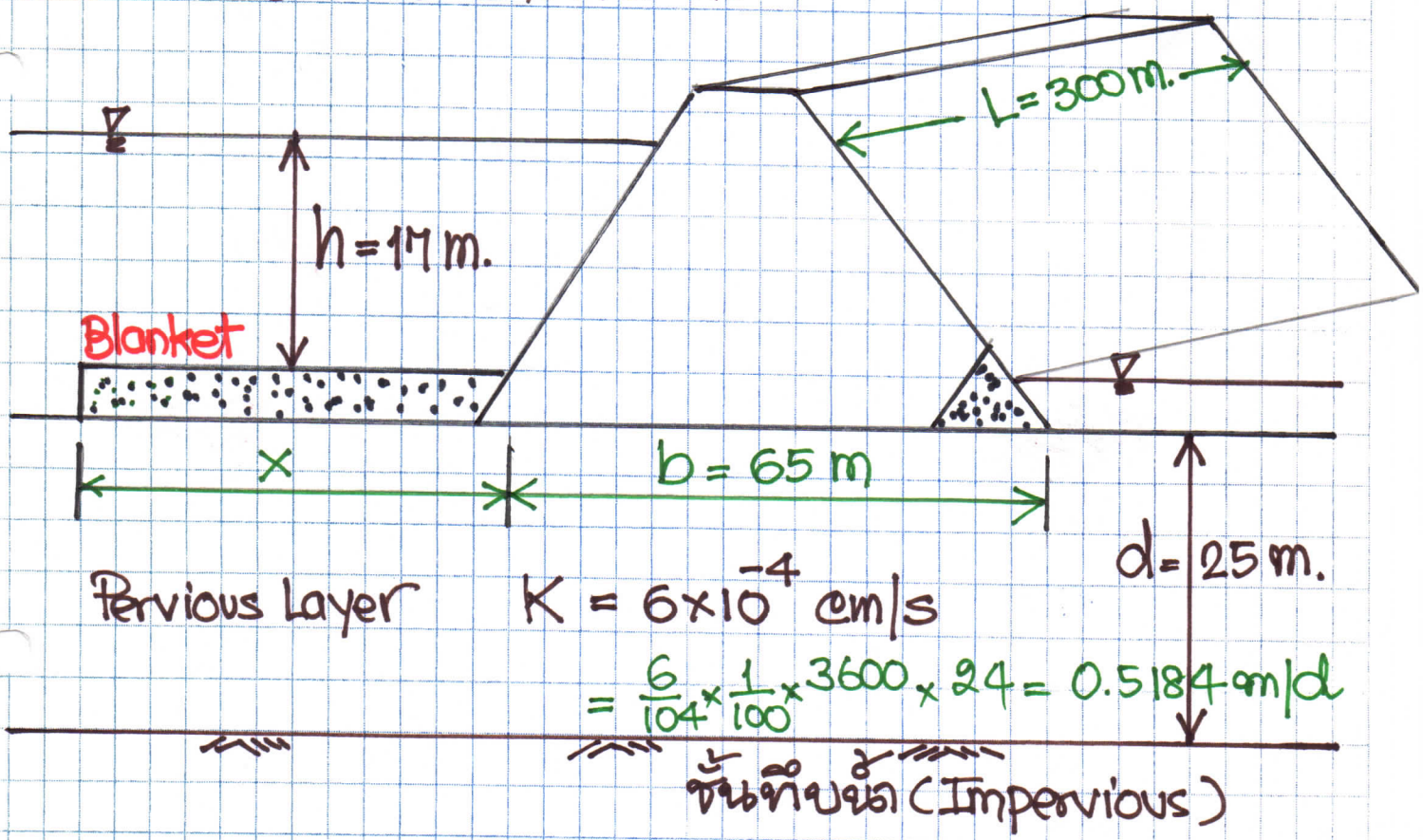
8.2.1 ตัวสกัดกั้นทึบน้ำ (Impervious Cutoff)

มีหลายประเภทด้วยกันคือ

- ร่องแกนทึบน้ำ (Cutoff trench)
- การอัดฉีดแนวม่านน้ำปูน (Grout Curtain)
- การตอกเข็มพืด (Sheet Piles)



**Ex** จงคำนวณหาอัตราการไหลซึมลอดใต้เขื่อน และถ้าต้องการลดอัตราการไหลซึมลงเหลือ 20% จะต้องใส่ Impervious Upstream Blanket ยาวกี่เมตร



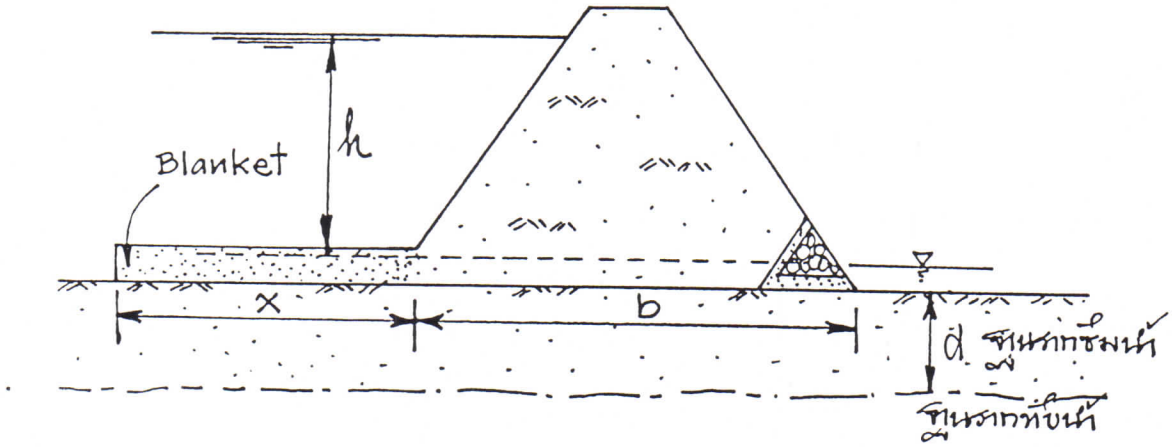

## กรณีไม่ใส่ Impervious Ustream Blanket

$$q_f = kiA = k\frac{h}{b}d$$

$$= 0.5184 \times \frac{17}{65} \times 25 = 3.39 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$$

$$Q = q_f L = 3.39 \times 300 = 1,017 \text{ m}^3/\text{d}$$

8.2.2 การปูด้วยวัสดุทึบน้ำยื่นออกไปหาพื้นอ่างเก็บน้ำ (Impervious Upstream Blanket)




**รูปที่ 22 แสดงการปูวัสดุทึบน้ำทางด้านเหนือน้ำ**

- ข้อกำหนดทั่วไปของ Impervious Upstream Blanket
  - ควรหนาอย่างต่ำ 5 ฟุต (1.524 m.)
  - (x + b) ไม่ควรน้อยกว่า 8h.

    เมื่อ x = ความยาวของ Blanket

    b = ส่วนทึบน้ำของตัวเชื่อน
  - ความยาวของ Blanket, x หาจากสูตร

$$x = \frac{K.h.d - p.q.b}{p.q}$$

เมื่อ ;

K = ค่า permeability เฉลี่ยในแนวราบของดินฐานราก

h = เฮดทั้งหมดด้านเหนือน้ำ

d = ความลึกของชั้นดินฐานรากที่น้ำซึมผ่านได้ (pervious)

p = ปริมาณการไหลซึมที่ยอมให้มีเกิดขึ้นได้เมื่อมี Blanket (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการไหลซึมทั้งหมดเมื่อไม่มี Blanket)

b = ความยาวของส่วนทึบน้ำของตัวเชื่อน

q = ปริมาณการไหลซึมผ่านฐานรากต่อหน่วยความกว้างเมื่อไม่มีการปู Blanket

$$= K\frac{h}{b}d$$

$$p\%f = \frac{q'_s}{} = k_s\left(\frac{h}{x+b}\right)d \leftarrow \text{มี Blanket}$$

ต้องการลดอัตราการไหลซึมลอดใต้เขื่อนลงเหลือ 20% ($P = 0.2$)

$\rightarrow$ $20\% q_f = 0.2 \times 3.39 = 0.678$ ม$^3$/d/ม.

ต้องเพิ่ม Upstream Blanket ยาว = X ม.

$$X = \frac{khd - pq_f b}{pq_f}$$

$$= \frac{0.5184 \times 17 \times 25 - 0.2 \times 3.39 \times 65}{0.2 \times 3.39}$$

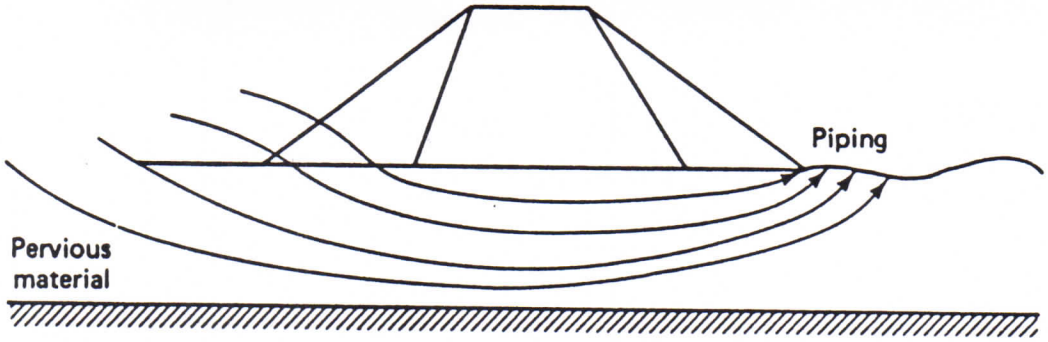
$$= 259.9 \sim 260 \text{ ม.}$$

Check $q' = k \frac{h}{X+b} d$

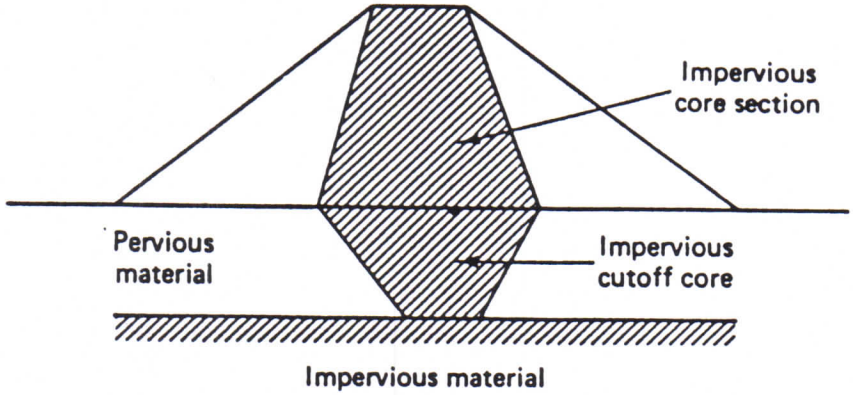
$$= 0.5184 \times \frac{17}{260+65} \times 25 = 0.678 \text{ ม}^3/\text{d}/\text{ม.}$$

$\rightarrow (X+b) > 8h$

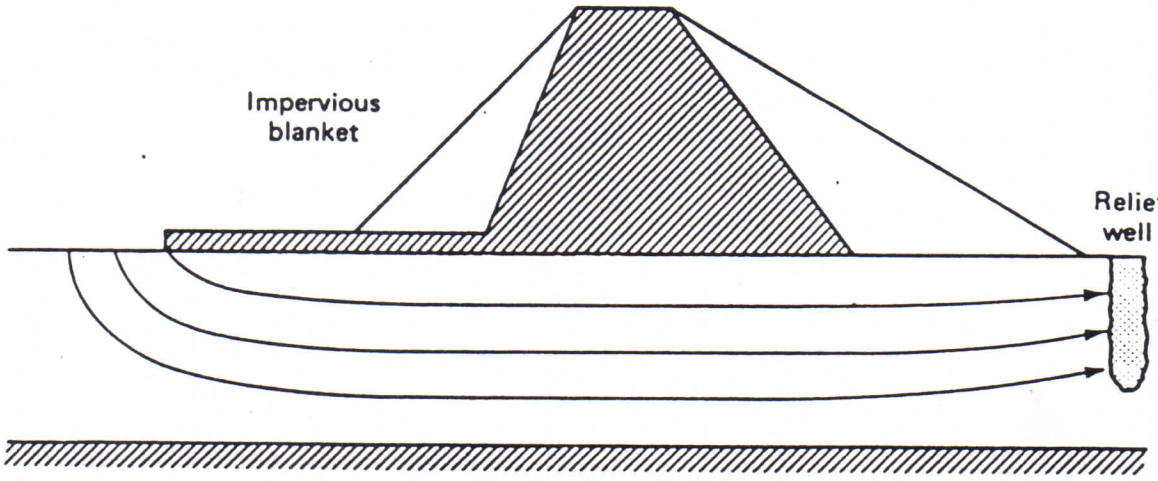
$260+65 = 325 > 8 \times 17 = 136$ Ok.




(a)




(b)




(c)

**Figure 9.12** (a) Piping phenomenon in dam; (b) cutoff trench on pervious foundation; (c) impervious blanket to relieve pressure.

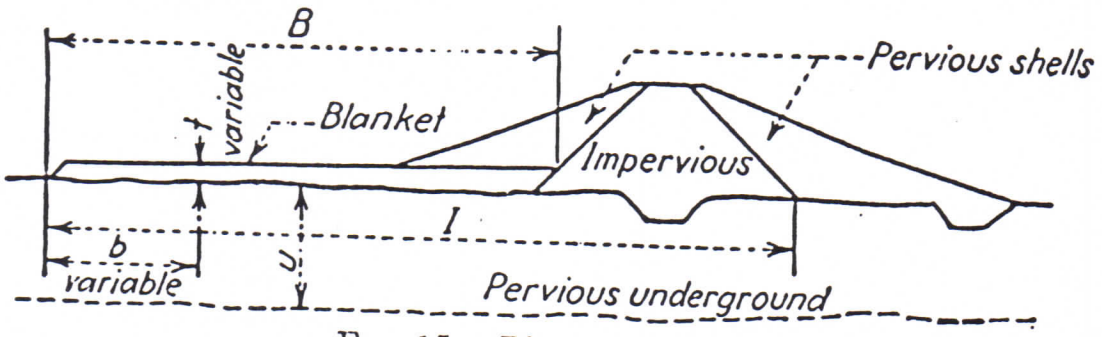



FIG. 15.—Blanket diagram.

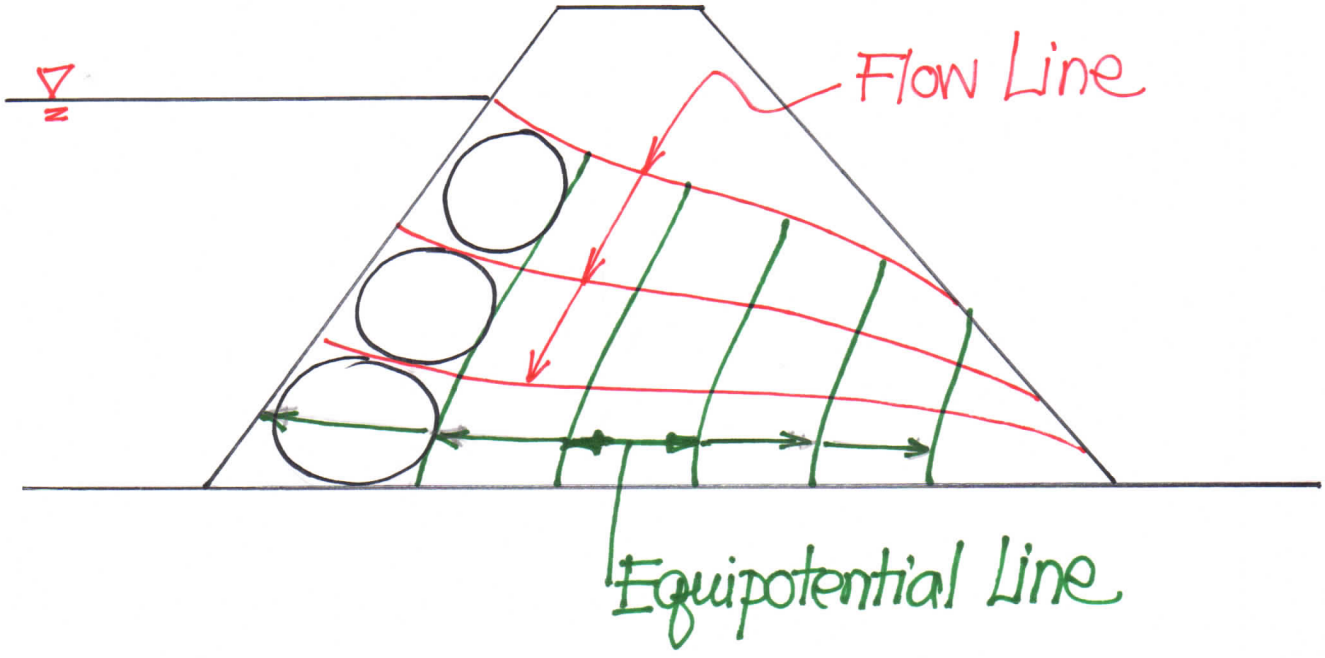
รูปที่ 28 เขื่อนดินที่มีแกนกลางทึบน้ำและด้านเหนือน้ำปูด้วยวัสดุทึบน้ำ

# Flow Net(Approximation Method)

**วิธีการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน หรือลอดใต้ตัวเขื่อน โดยการสร้าง Stream Line และ Equipotential Line**

**Stream Line คือ เส้นที่แสดงแนวการไหลซึมของน้ำ**

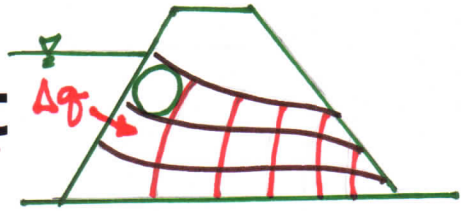
**Equipotential Line คือ เส้นที่แสดงค่าความดันน้ำที่เท่ากัน**



## ○ประโยชน์ของ Flow Net

1. คำนวณหา Seepage Rate(q)
2. คำนวณหาความเร็วของการไหลซึม (Seepage Velocity)
3. คำนวณหาความดันน้ำในเขื่อนหรือใต้เขื่อน

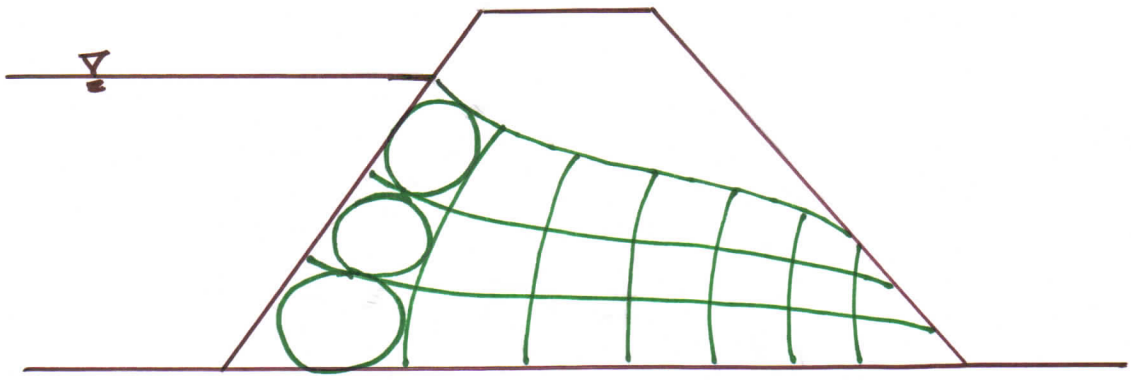
## ○คุณสมบัติของ Flow Net

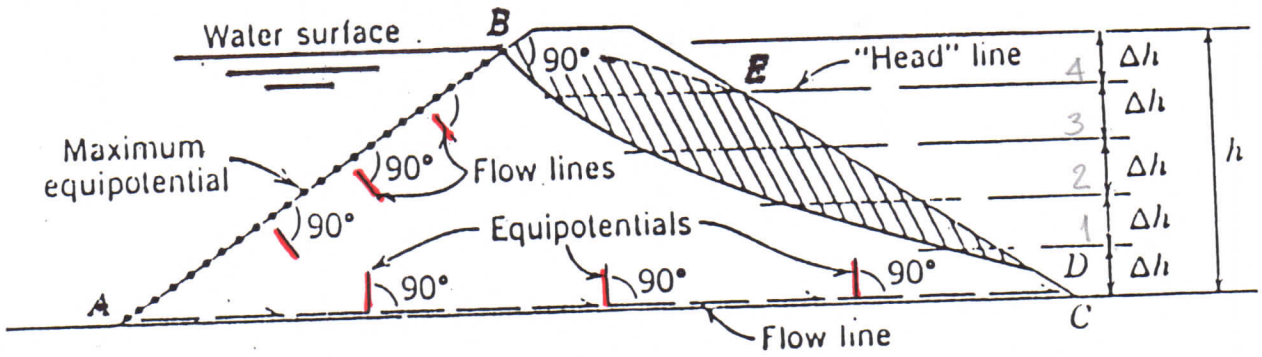



1. Flow Lines ตั้งฉาก Equipotential Line
2. รูปสี่เหลี่ยมที่เกิดจาก F-Line และ E-Line เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ ถ้าเขียนวงกลมในสี่เหลี่ยมจัตุรัส เส้นรอบวงจะสัมผัสด้านทั้ง 4
3. ไม่มีการไหลข้าม F-Line(F-Line ไม่ตัดกัน)
4. E-Line ไม่ตัดกัน
5. Head ของน้ำที่ลดลงระหว่าง E-Line คู่ใดๆ($\Delta h$)เท่ากัน เรียกว่า Equipotential Space
6. $\Delta q$ ระหว่าง F-Line คู่ใดๆ ซึ่งเรียกว่า Flow Channel เท่ากัน

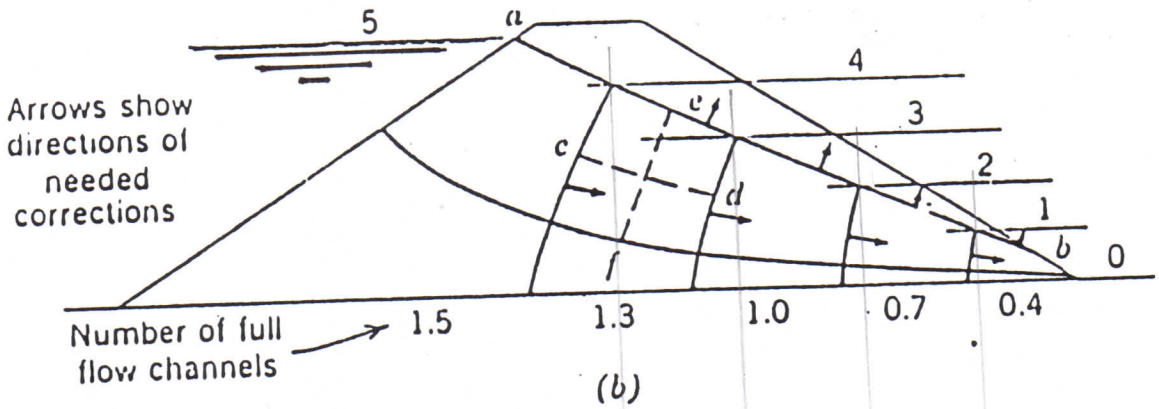
# ขั้นตอนการเขียน Flow Net

1. เขียนรูปตัดเขื่อน
2. สร้างเส้น
   - Top Flow Line (Phreatic Line)
   - Bottom Flow Line
   - First Equipotential Line
   - Last Equipotential Line
3. ลากเส้น Flow Lines(3-5 เส้น โดยประมาณว่า $\Delta q$ ของแต่ละ Flow Channel เท่ากัน)
4. ลากเส้น Equipotential Line ตั้งฉากกับ Flow Lines
5. ปรับแก้จนได้ Flow Net ที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด

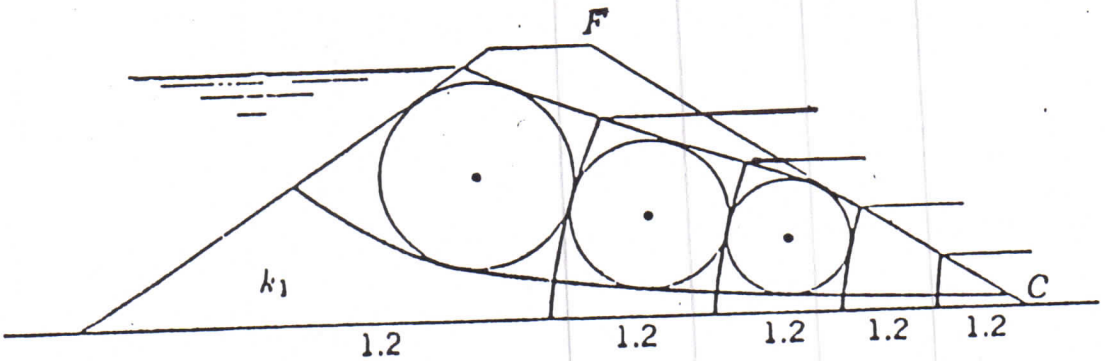





(a)




(b)




(c)

รูปที่ 23 ขั้นตอนการเขียน Flownet

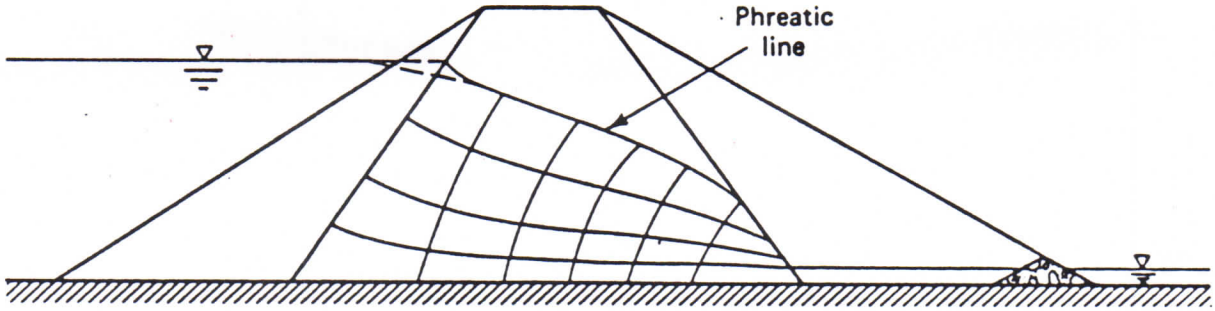



**Figure 9.9** Seepage net in a dam of composite section.

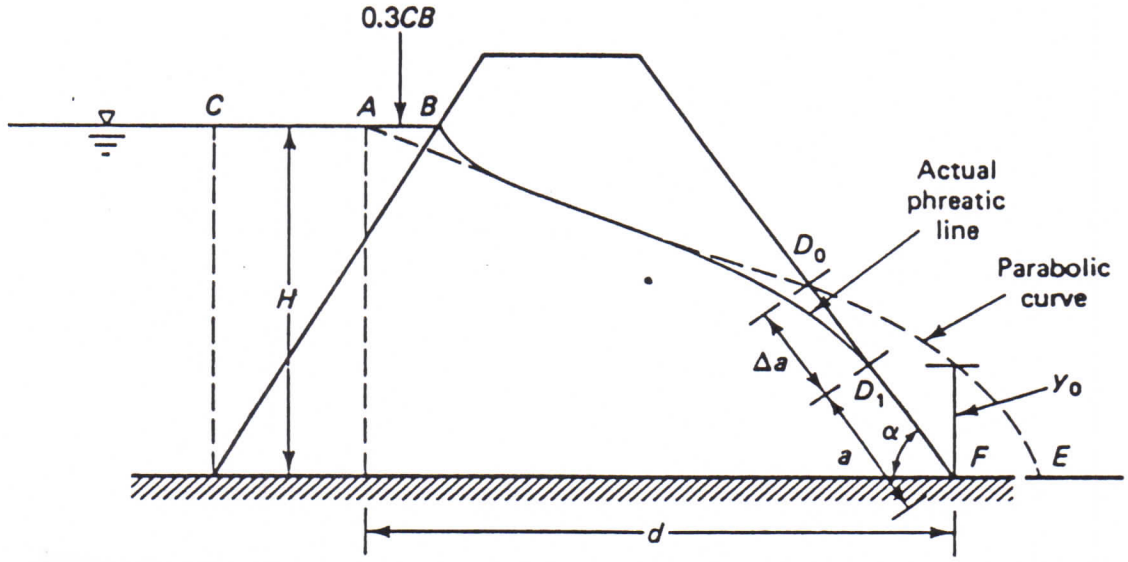
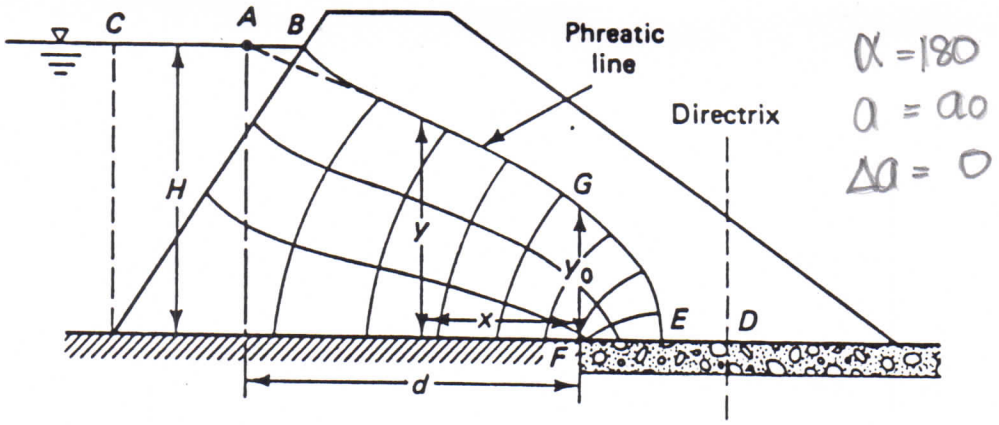
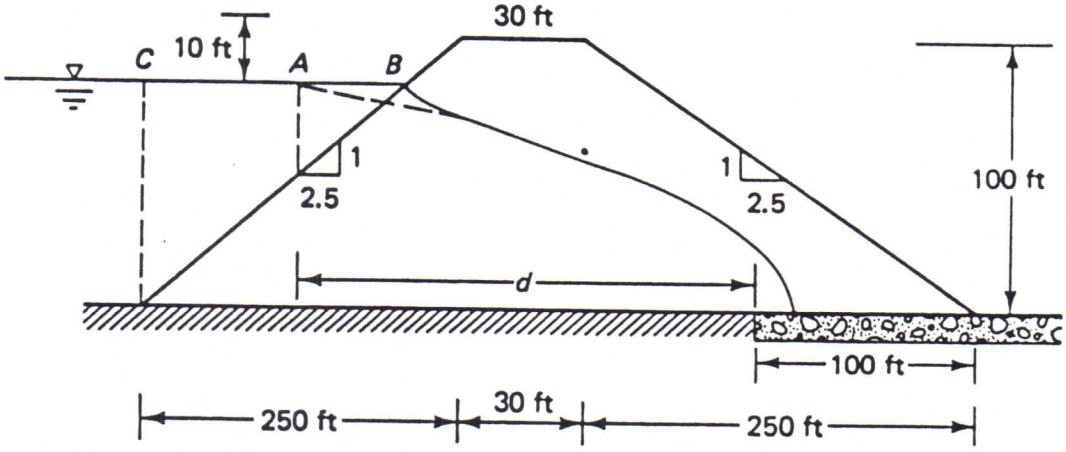



**Figure 9.10** Central core portion of a composite section.

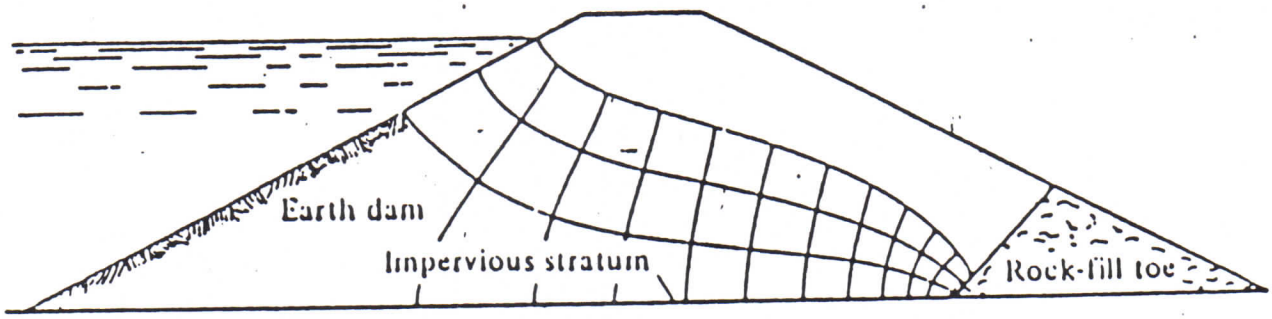



(a)

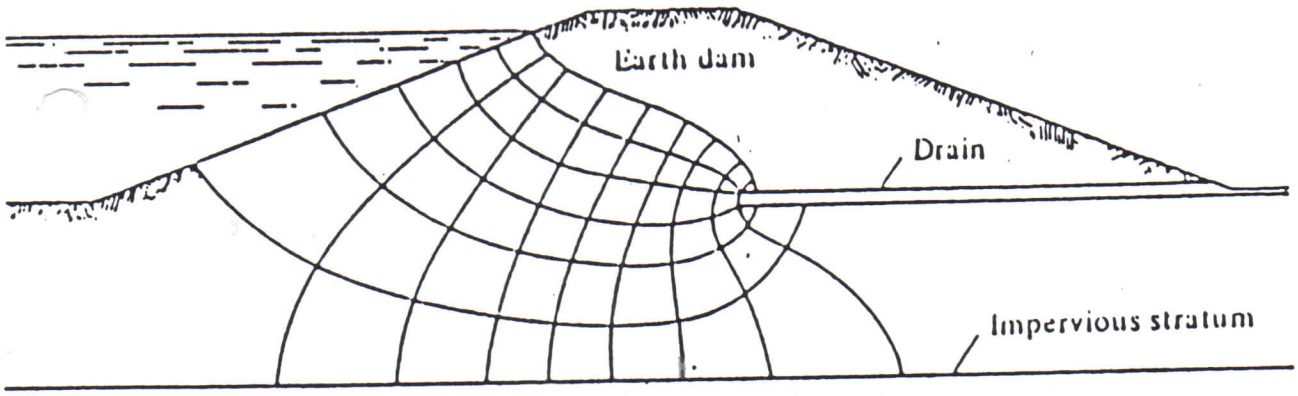



(b)

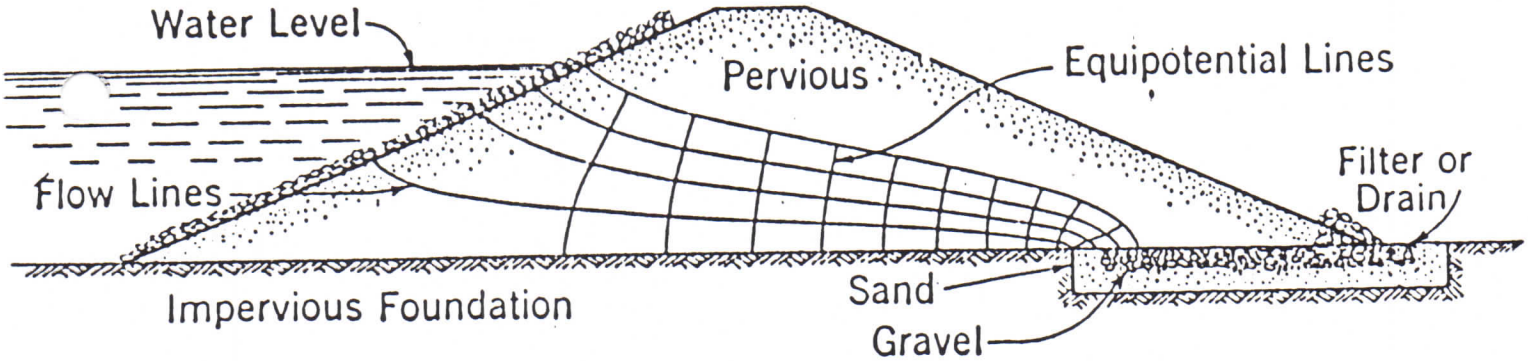
**Figure 9.8** (a) Seepage pattern through a homogeneous section with a filter blanket; (b) seepage for Example 9.4.




Flow net for earth dam with rock-fill toe.

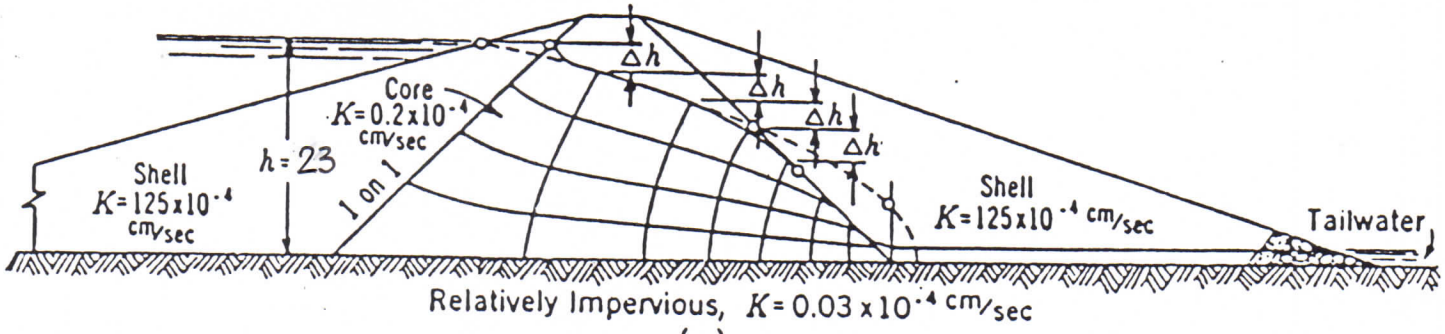


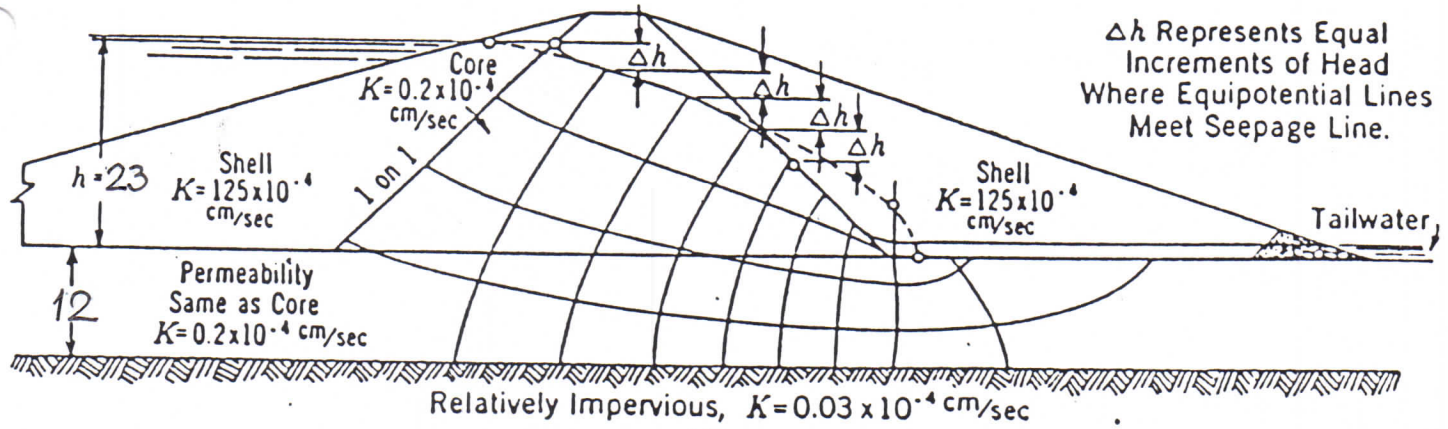

Flow net for earth dam with downstream drain.




Flow net for dam of homogeneous material but with a drainage system.

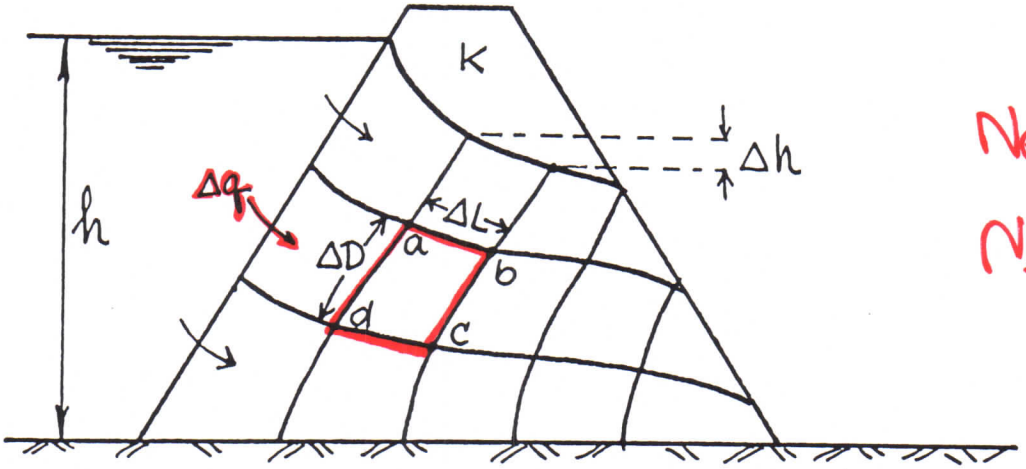
รูปที่ 24 ตัวอย่าง Flownet ในเขื่อน




รูปที่ 27 เปรียบเทียบแนวการไหลซึมและ Flownet เมื่อฐานรากทึบน้ำ และไม่ทึบน้ำ

## (ง-3) การคำนวณหาอัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนจาก Flow net




Ne = 5

Nf = 3

- จาก Darcy law; Q = K i A
- พิจารณาต่อความกว้างเขื่อน 1 หน่วย

อัตราการไหลผ่าน □ abcd = $\Delta q$

$\Delta q = K i a$

$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$

$a = \Delta D \times 1.0 = \Delta D$

แทนค่า ; $\Delta q = K \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta D$

จากคุณสมบัติของ Flow net, $\Delta D \approx \Delta L$ ✓

และ $\Delta h = \frac{h}{Ne}$

เมื่อ Ne = จำนวนช่องของ Equipotential line

แทนค่า ; $\Delta q = K . \frac{h}{Ne}$

ถ้า $N_f$ = จำนวน flow Channel

และ q = เป็นอัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

$\therefore q = \Delta q \times N_f = Kh \frac{Nf}{Ne}$

หรือ $$q = K h \frac{N_f}{N_e}$$

- ประโยชน์ที่ได้จากการหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อน ประการหนึ่งก็คือใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับระบบระบายน้ำด้านท้ายเขื่อน
- กรณีค่า $K_V \neq K_H$ ให้ใช้ $K = \sqrt{K_V \times K_H}$

## 7.5 การไหลซึมผ่านฐานรากซึมน้ำ (Pervious Foundation)

- ไม่ว่าฐานรากจะเป็นชั้นทึบน้ำ (Impervious) หรือชั้นน้ำซึมผ่านได้ (Pervious) แนวเส้น Seepage line (ภายในตัวเขื่อน) จะมีลักษณะเหมือนกันและหาได้ตามวิธีที่กล่าวไปแล้ว
- มีแต่ Flownet ที่แตกต่างกัน
- ดูรูปประกอบเปรียบเทียบเพื่อความเข้าใจ
- ในการหาค่าปริมาณอัตราการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อนอาจใช้สมการของ Darcy ได้ดังนี้

$$q_f = K_f \cdot \frac{h}{I} \cdot A.$$

เมื่อ ;

$q_f$ = อัตราการไหลซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน ต่อหน่วยความกว้างเขื่อน

$K_f$ = ค่า Permeability ของดินฐานรากเขื่อน

$h$ = ความลึกของน้ำ

$I$ = ระยะในแนวราบของฐานเขื่อนที่น้ำซึมผ่าน

$A$ = พื้นที่หน้าตัดในส่วนของฐานรากที่มีการไหลซึมผ่านได้

- ดังนั้นในกรณีเขื่อนดินที่ตั้งอยู่บนฐานราก ที่น้ำซึมผ่านได้ อัตราการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนทั้งหมด ($q_T$) จะเป็น

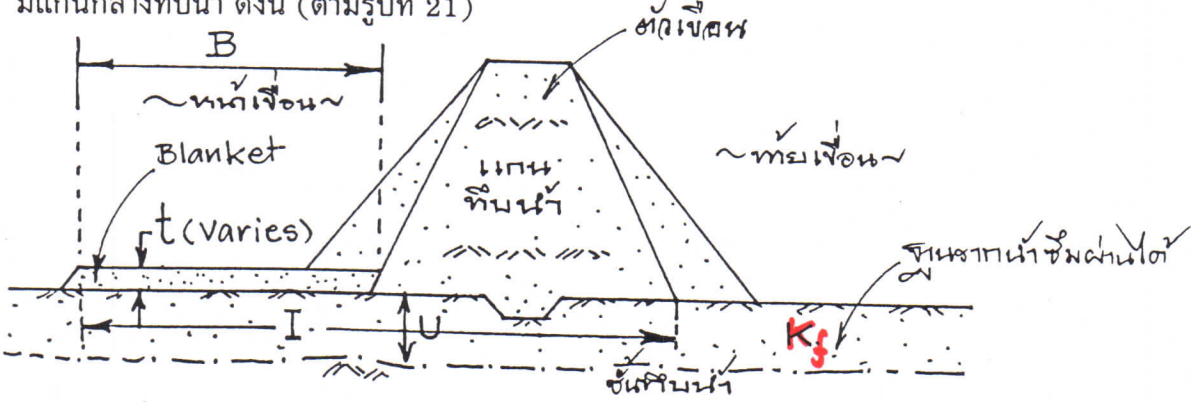
$$q_T = q_d + q_f$$

เมื่อ ;

$q_d$ = อัตราการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน $= Kq_0 = \frac{1}{9} \frac{Kh^2}{l} = Kh \frac{Nf}{Ne}$

$q_f$ = อัตราการไหลซึมผ่านฐานราก $= K_f \frac{h}{I} A$

- Terzaghi ได้พัฒนาสมการคำนวณปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านฐานรากที่ซึมน้ำได้ของเขื่อนที่มีแกนกลางทึบน้ำ ดังนี้ (ตามรูปที่ 21)

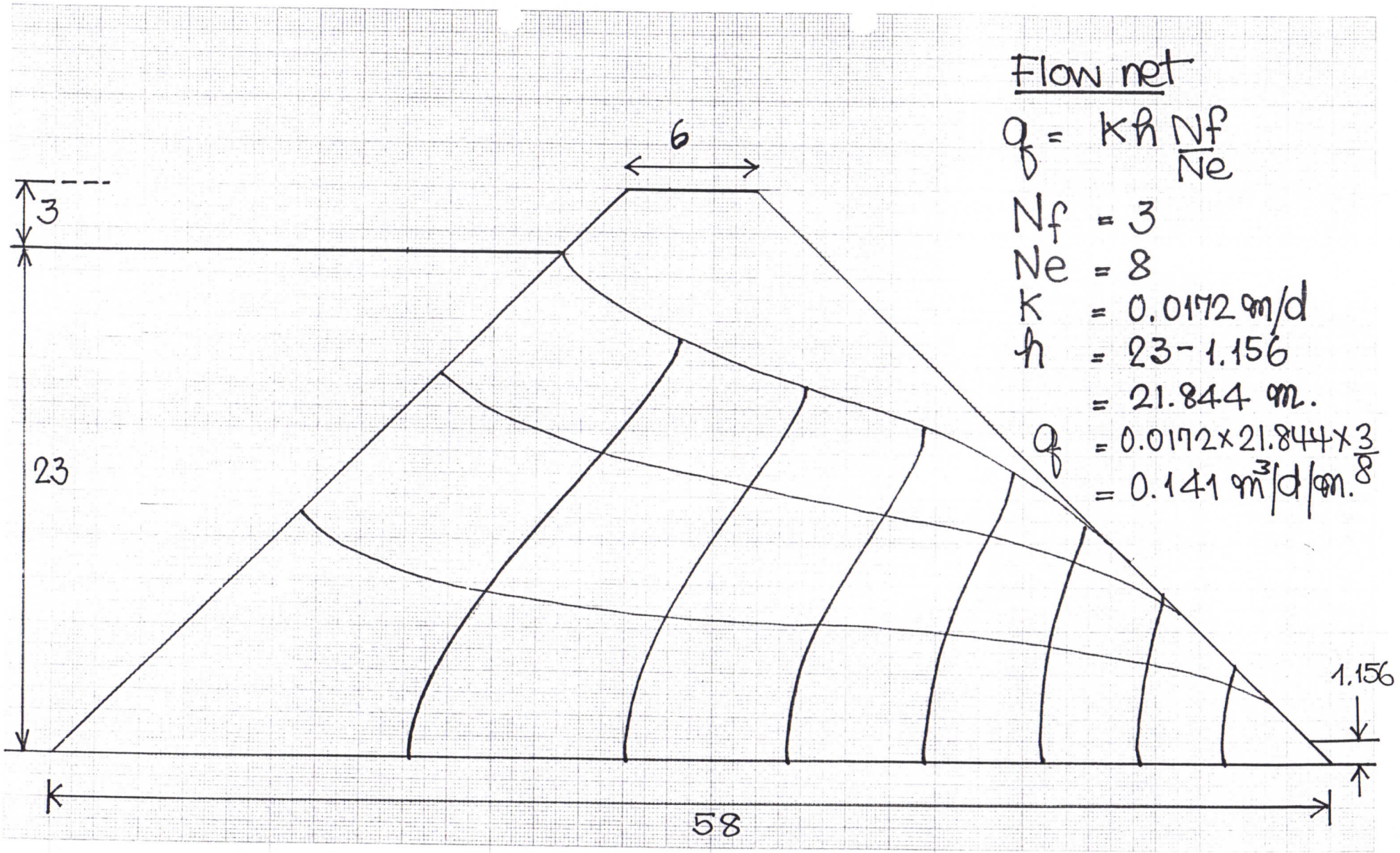



**รูปที่ 21 แสดงค่าต่าง ๆ ของตัวเขื่อนที่ใช้คำนวณปริมาณน้ำผ่านฐานราก**

กรณีที่ I เมื่อ I > 2U ; $Q = \frac{h.K}{0.88 + \frac{I}{U}}.L$

กรณีที่ II เมื่อ I < 2U; $Q = \frac{h.K}{2}(\frac{2U}{I} - 1)^{1/3}.L$

L = ความกว้างของเขื่อน




## Flow net

$$q_f = k h \frac{N_f}{N_e}$$

$N_f = 3$

$N_e = 8$

$K = 0.0172 \text{ m/d}$

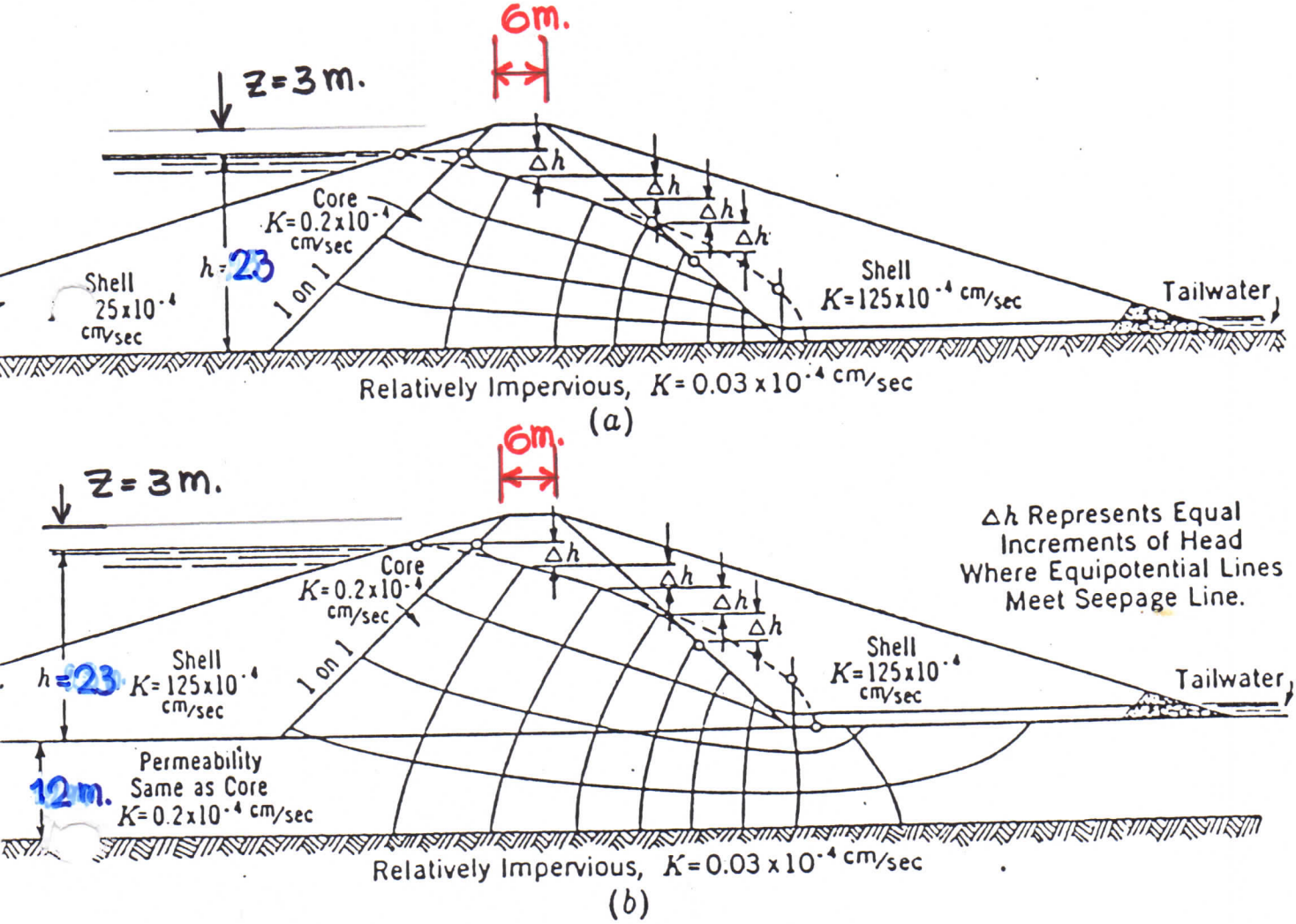
$h = 23 - 1.156$

$= 21.844 \text{ m.}$

$q_f = 0.0172 \times 21.844 \times \frac{3}{8}$

$= 0.141 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m.}$

7.5 <u>การไหลซึมผ่านฐานรากซึมน้ำ</u> ถ้าฐานรากเป็นวัสดุซึมน้ำบนชั้นหินหรือชั้นดินทึบน้ำ หน่งของแนวการไหลซึมก็ยังสามารถหาได้จากวิธีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ใต้ฐานเขื่อนลง ะมีการไหลซึมเกิดขึ้น ในรูปที่ 27 b แกนกลางและฐานรากมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ กัน และใต้ฐานเขื่อนลงมา 40 ฟุต เป็นชั้นดินที่ค่อนข้างจะทึบน้ำ จะเห็นว่าตำแหน่ง แนวการไหลซึมจะเหมือนกัน แต่ Flownet จะมีความแตกต่างกัน




รูปที่ 27 เปรียบเทียบแนวการไหลซึมและ Flownet เมื่อฐานรากทึบน้ำ และไม่ทึบน้ำ