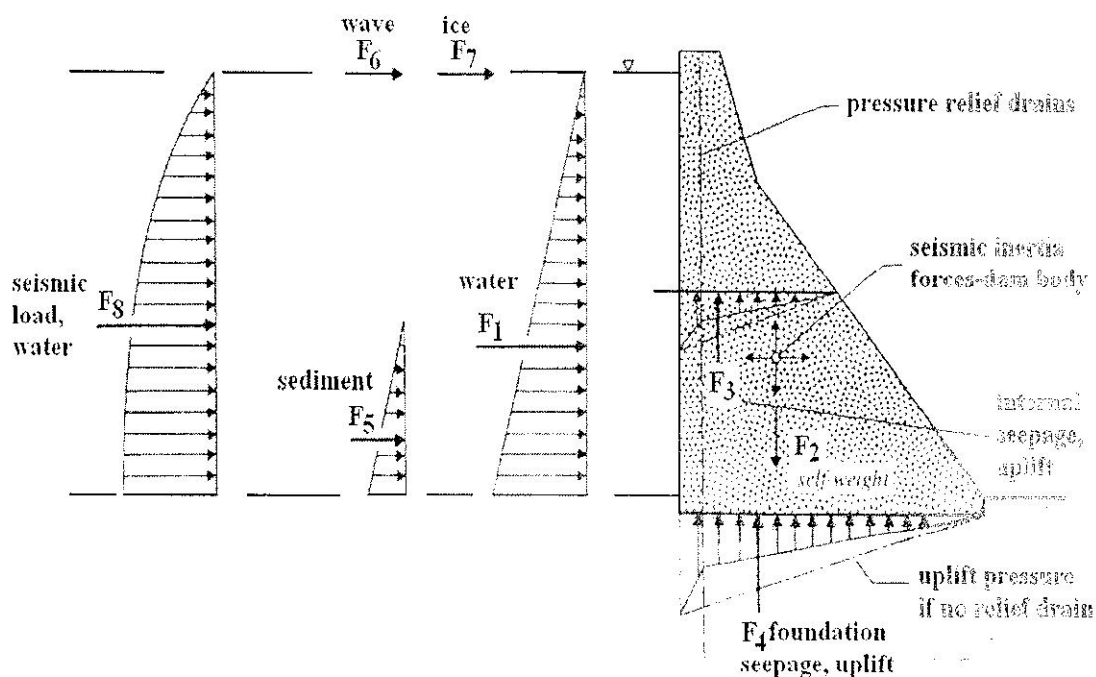
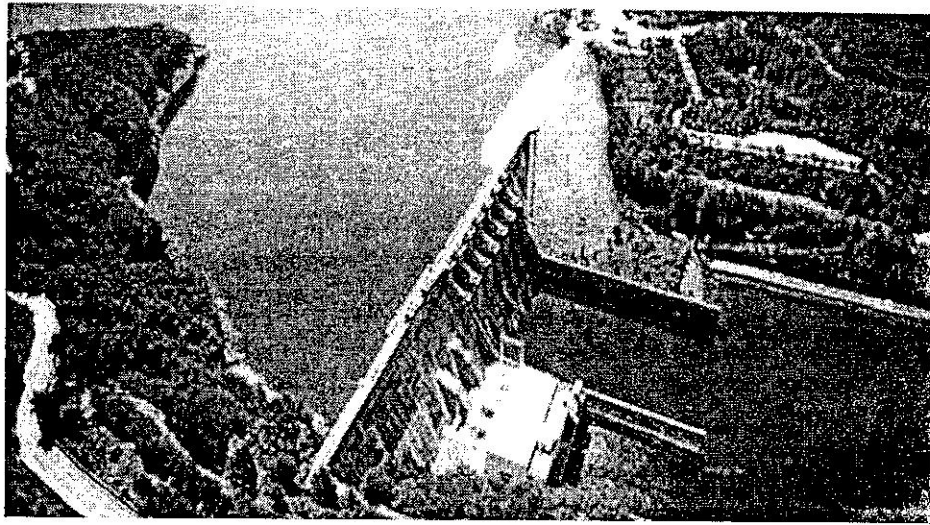


# Gravity Dam

เขื่อนที่สร้างจากวัสดุที่มีความมั่นคง แข็งแรง เช่น Concrete เพื่อให้น้ำหนักตัวเขื่อนสามารถต้านทานต่อแรงทั้งภายนอกและภายในได้



รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

# Dams

- Spillways
- Outlet Works
- Ancillary Works
  - River Diversisn
  - Cut-offs
  - Internal Drainage
  - Internal Galleries and Shafts

## ICOLD Statistics

(International Commission an Large Dams)

- Large Dam
  - (1)  $H > 15$  m
  - (2)  $10 < H < 15$  m
  - AND Storage Volume  $> 1$  mcm.
  - OR Flood Discharge Capacity  $> 2,000$  cms.

## • World Register

|                      |        |
|----------------------|--------|
| Large Dams in 1950 = | 5,196  |
| NOW =                | 36,235 |
| China =              | 19,000 |
| USA =                | 5,459  |

# Loads on Dams

## (Forces Acting on Dams)

### 1. Primary Loads

Loads ที่มีความสำคัญกับเขื่อนทุกประเภท

- 1.1 Hydrostatic Load (Water Load)
- 1.2 Self-weight Load (Weight of Dam)
- 1.3 Uplift Force (Seepage Load)

### 2. Secondary Loads

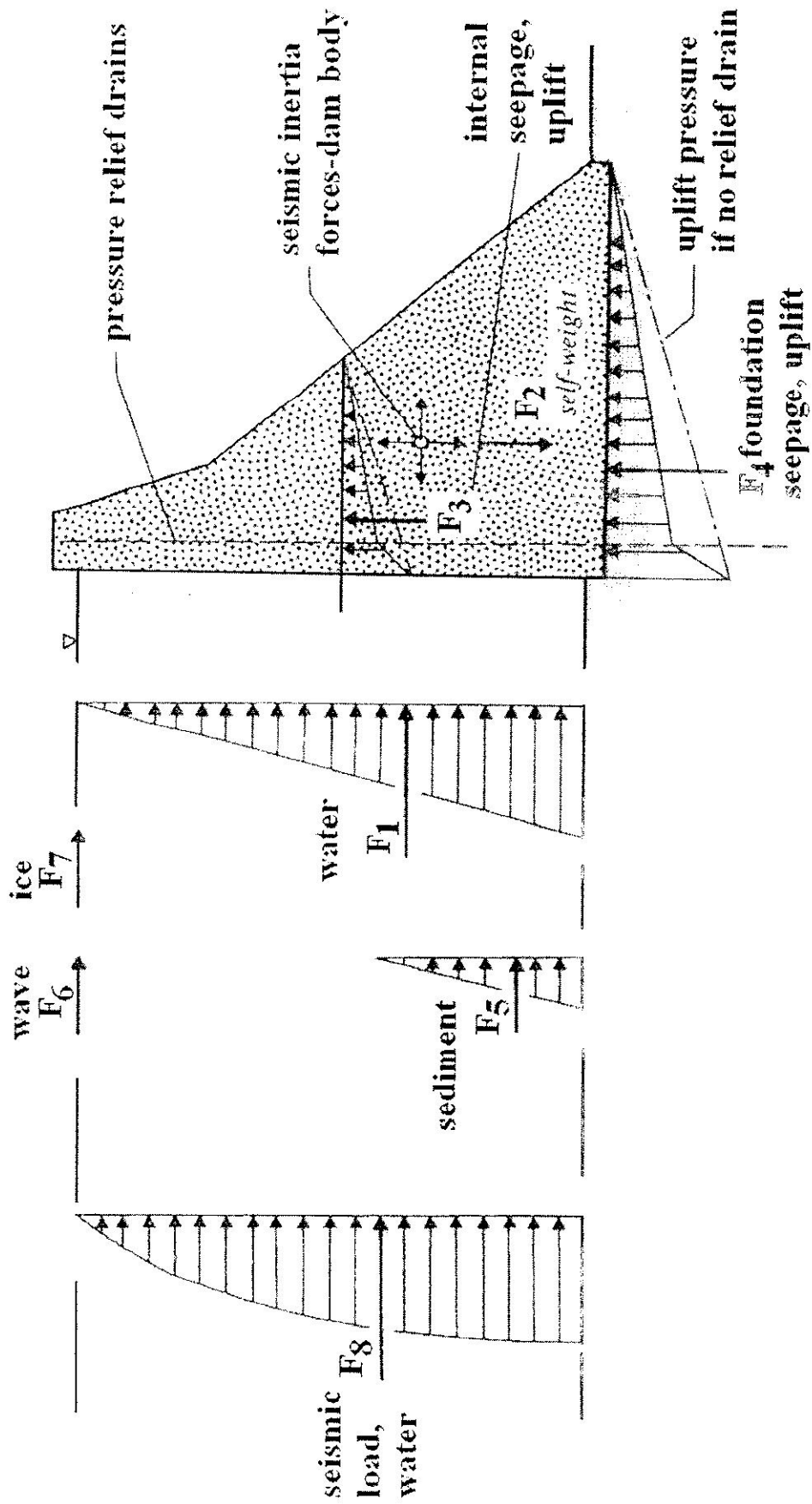
Load ที่มีความสำคัญรองลงมาจาก Primary Load

- 2.1 Sediment Load
- 2.2 Hydrodynamic Wave Load
- 2.3 Ice Load
- 2.4 Thermal Load
- 2.5 Interactive Effect
- 2.6 Abutment Hydrostatic Load

### 3. Exceptional Loads

- 3.1 Seismic Load

→ Seismic Load (Earthquake Load)



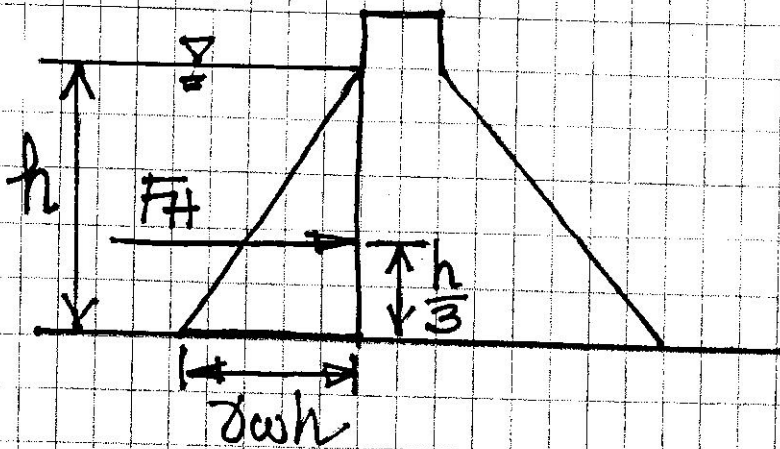
## Forces Acting on Dam



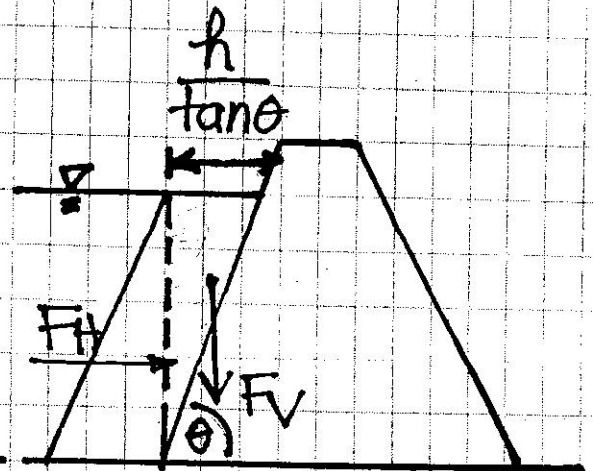
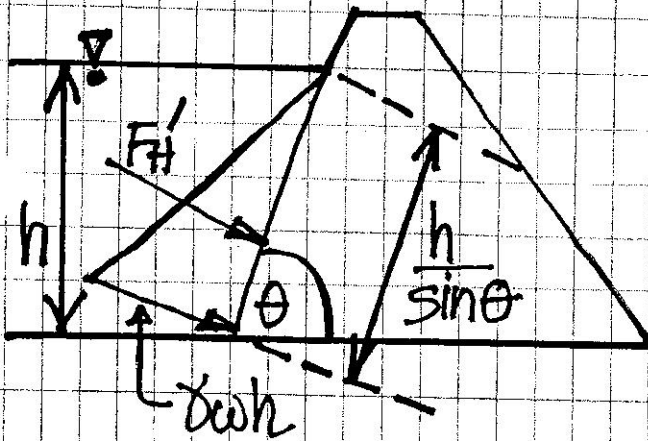
การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อเสาเข็ม

A. Primary Loads

(1) Hydrostatic Load (Water Pressure)



$$F_H = \frac{1}{2} \delta_w h^2 \left( \frac{N}{m} \right)$$



$$F_V = \delta_w \times h$$

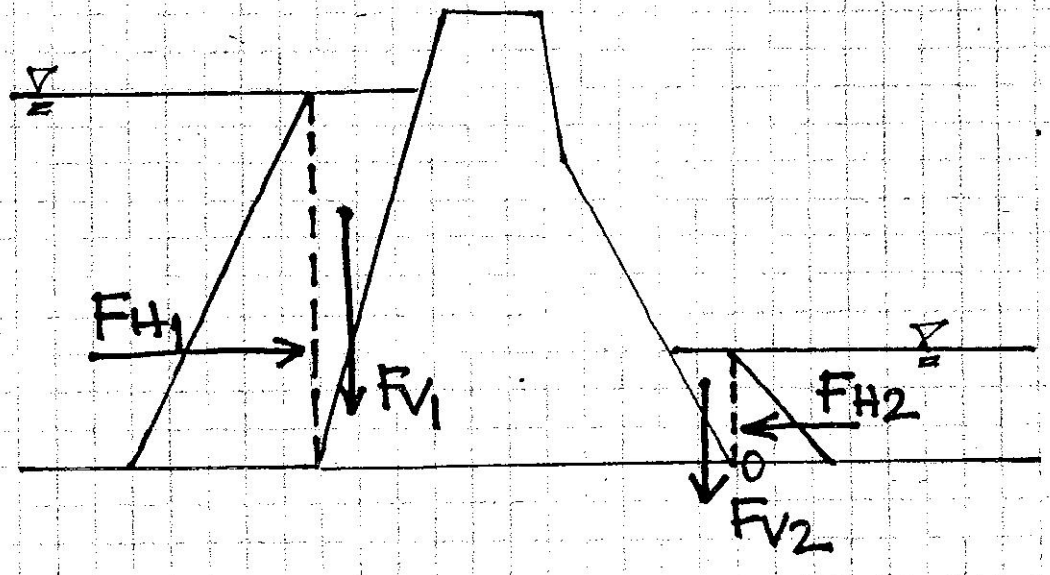
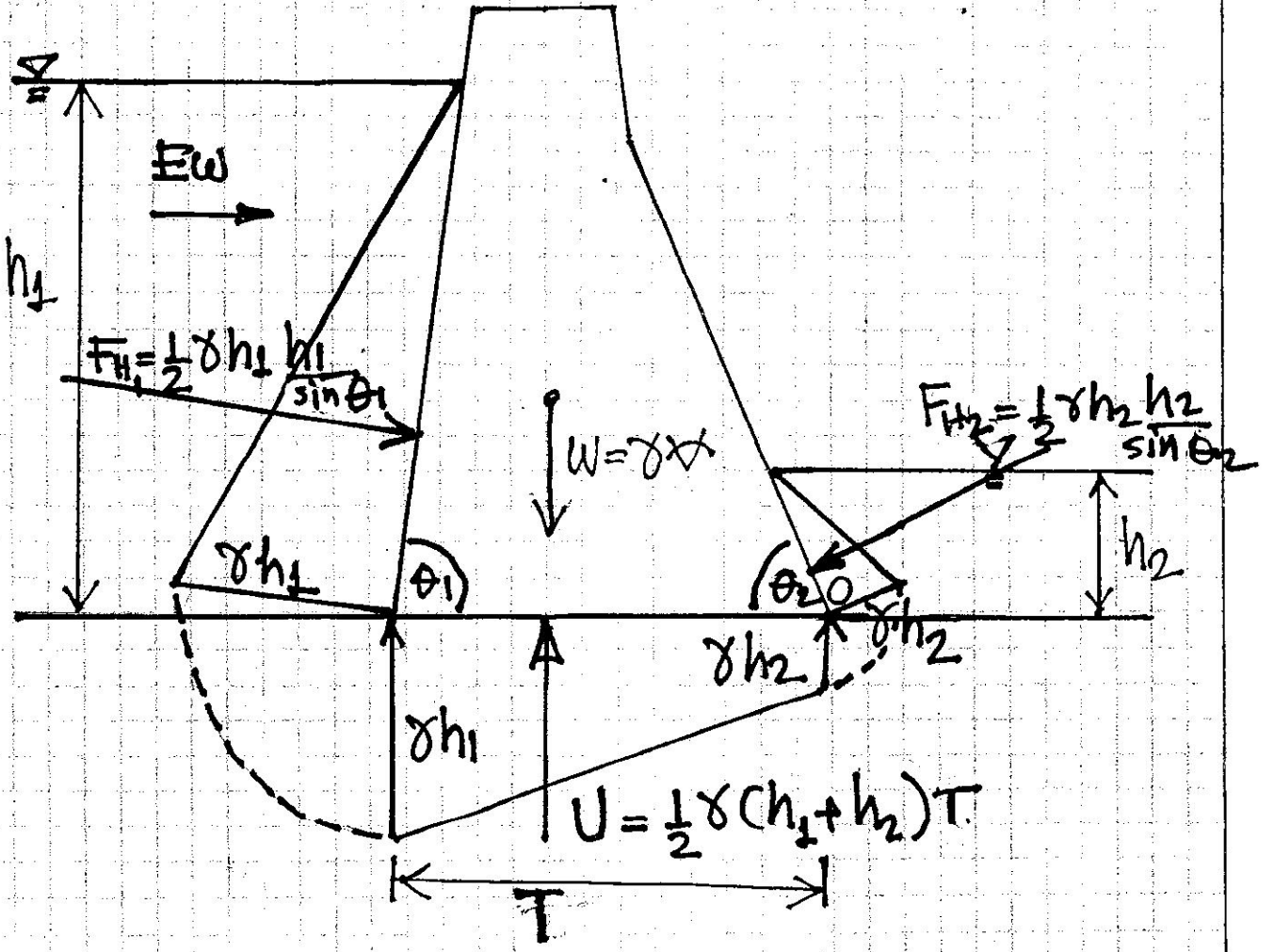
$$\delta_w = 9810 \frac{N}{m^3}$$

$$F_H' = \frac{1}{2} \delta_w \frac{h^2}{\sin \theta} = \sqrt{F_H^2 + F_V^2}$$

$$= \sqrt{\left( \frac{1}{2} \delta_w h^2 \right)^2 + (\delta_w h)^2}$$

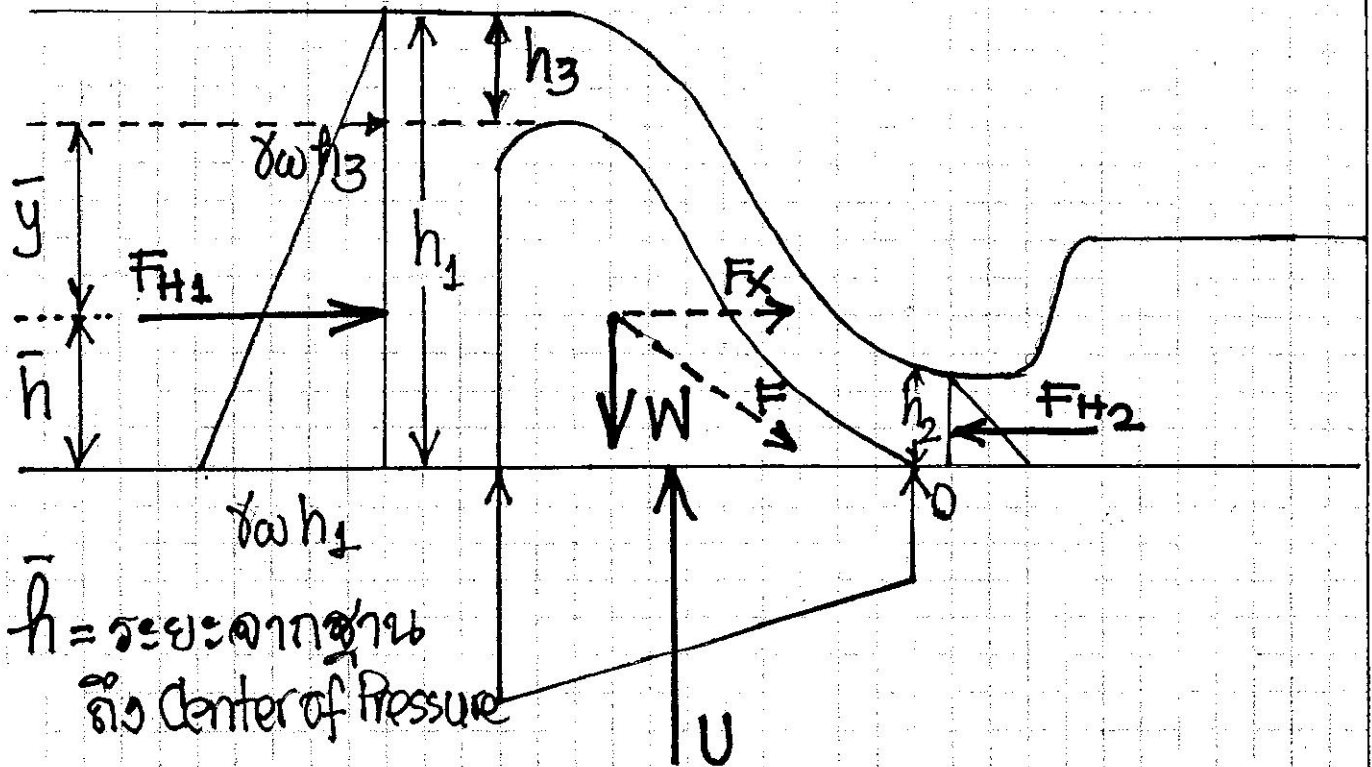
$$= \sqrt{\left( \frac{1}{2} \delta_w h^2 \right)^2 + \left( \delta_w \left( \frac{1}{2} \frac{h^2}{\tan \theta} \right) \right)^2}$$

$$= \frac{1}{2} \delta_w h^2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta}}$$





# การรับน้ำไหลลงท้ายเขื่อน Spillingway Section



## Hydrostatic Force

$$F_{H1} = \frac{1}{2} \gamma \omega (h_1 + h_3) (h_1 - h_3)$$

$$= \frac{1}{2} \gamma \omega (h_1^2 - h_3^2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{3} (h_1 - h_3) \frac{(2h_1 + h_3)}{(h_1 + h_3)} \quad (\text{See prove})$$

$$\bar{h} = (h_1 - h_3) - \bar{y}$$

$$= \frac{1}{3} (h_1 - h_3) \frac{(h_1 + 2h_3)}{(h_1 + h_3)}$$

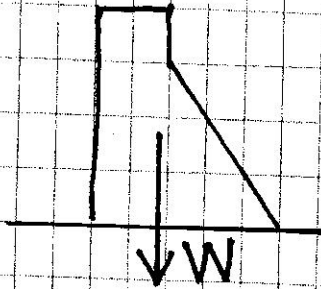


(2) Weight of Dam (W)

$$W = \gamma_c V_c \quad (\text{c} = \text{concrete})$$

$$\rho_c = 2.4 \text{ ton/m}^3$$

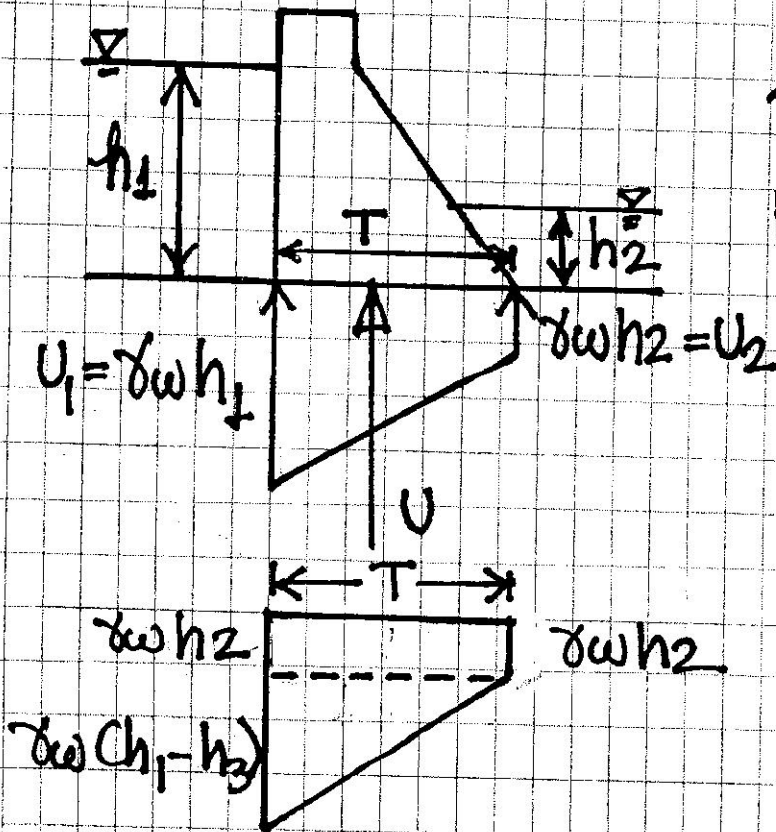
$$\gamma_c = 2.4 \times 9,810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = 23,544 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$



(3) Uplift Force (U) (แรงยกก้น) การไหลจากขวาไปซ้าย

การไหลจากขวาไปซ้าย

Homogeneous Permeable

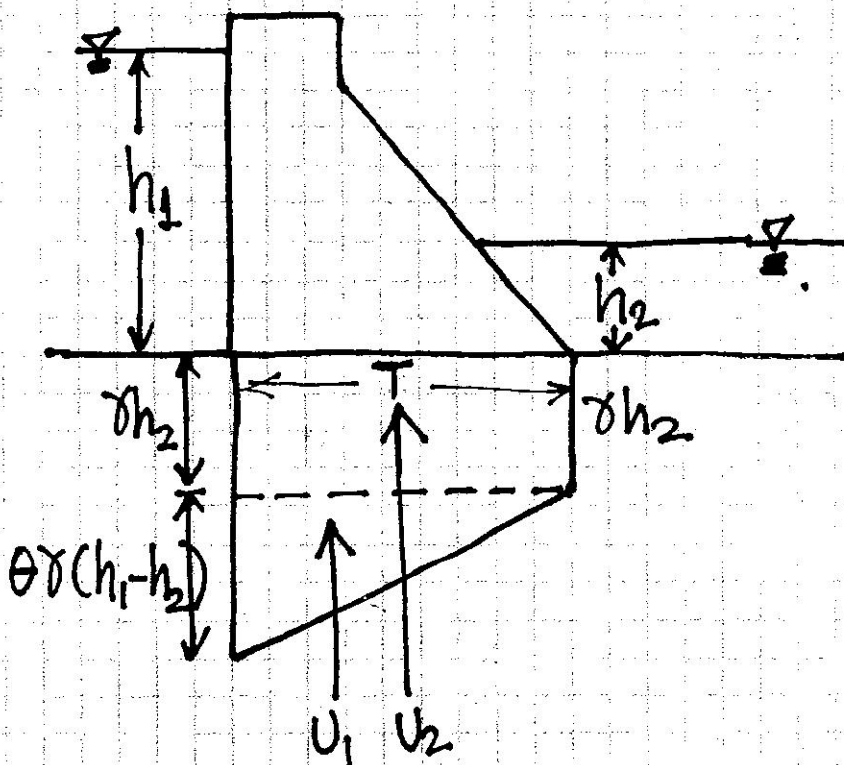


$$U = \frac{1}{2} \gamma_w (h_1 + h_2) T$$

$$= \gamma_w h_2 T + \frac{1}{2} \gamma_w (h_1 - h_2) T$$



กรณีของแรงดันน้ำใต้ดินที่มีค่าสูงเกินกว่า (Curtain Grouting) ตลอดแนวฐานรากเพื่อ และป้องกันการยกตัวของฐานรากเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ดิน (Lift Force) ได้.



$$U_2 = \gamma_w h_2 T$$

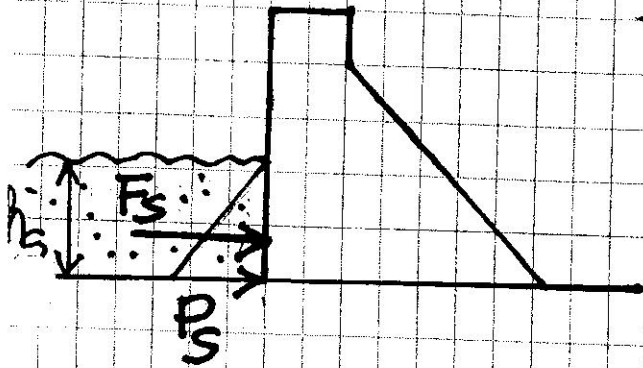
$$U_1 = \frac{1}{2} \theta \gamma_w (h_1 - h_2) T$$

- กรณีของแรงดันน้ำใต้ดินที่มีค่าสูงเกินกว่า และป้องกันการยกตัวของฐานราก  $\frac{\theta}{1.0}$
- กรณีของแรงดันน้ำใต้ดินที่มีค่าสูงเกินกว่า และป้องกันการยกตัวของฐานราก  $0.67 - 0.75$
- กรณีที่ค่าของแรงดันน้ำใต้ดินมีค่าสูงเกินกว่า  $0.50 - 0.67$



## B. Secondary Loads

### (4) Sediment Load (silt)



$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma_w$$

$\gamma'_s$  = Submerged Unit Weight of Sediment ( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma_s$  = Saturated Unit Weight of Sediment ( $\text{kN/m}^3$ )

$$= 18 - 20 \text{ kN/m}^3$$

$\phi_s$  = Angle of Internal

Friction of Sediment (shearing resistant)

(มุมภายในของตะกอน: 17.0°)  $\approx 30^\circ$

$$P_s = \gamma'_s h_s k_a$$

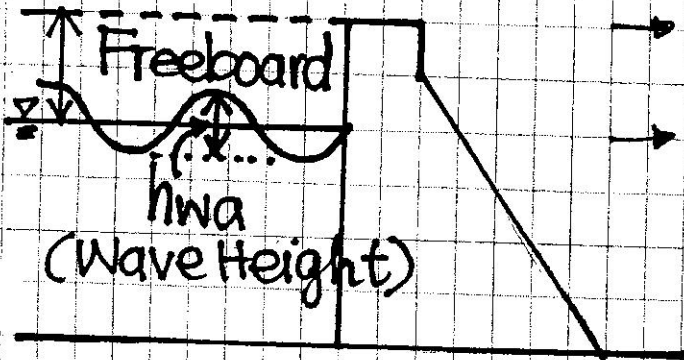
$$= 11.29 \text{ kN/m}^2$$

$$k_a = \frac{1 - \sin \phi_s}{1 + \sin \phi_s} = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = \frac{1}{3}$$

$$F_s = \frac{1}{2} \gamma'_s h_s^2 \left( \frac{1 - \sin \phi_s}{1 + \sin \phi_s} \right) \quad (\text{kN/m})$$



### (5) Hydrodynamic Wave Load (Fwa)



- เกิดจากลมและแผ่นคลื่นในทะเล
- Fwa ที่เกิดจากลมมีค่าโดยประมาณ
- ขนาดความสูงคลื่นที่เกิดจากลมจะนำไปใช้กับขนาด Freeboard

$$F_{wa} = 2 \rho_w h_{wa}^2 \quad (\text{kN/m})$$

Fwa กระทำที่  $\frac{3}{8} h_{wa}$  เหนือระดับปลิวเข้าของ

### Modification of Davis and Sorensen (1969)

กรณี Wind Fetch (F) > 20 km.

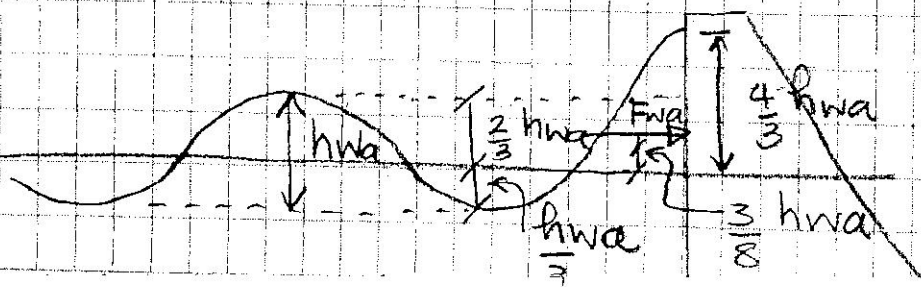
$$h_{wa} = 0.032 \sqrt{V \cdot F} + 0.76 - 0.24 \sqrt[4]{F} \quad (\text{cm.})$$

กรณี F < 20 km.

$$h_{wa} = 0.032 \sqrt{V \cdot F}$$

F = Wind Fetch (km.)

V = Wind Speed (km/hr)





## Wave Freeboard (FB<sub>w</sub>) ICE (1978)

$$FB_w = 0.75 h_d + \frac{c^2}{2g} \quad (\text{cm})$$

$c$  = Wave Propagation Velocity (cm/s)

$$= (1.5 + 2h_d)^2$$

$h_d$  = Design Wave Height (m.)

Concrete Dam,  $h_d = 0.75 h_{swa}$

Earth Dam,  $h_d = 1.3 h_{swa}$

$h_{swa}$  = Significant Wave Height (m.)

$$= f(V, F) \quad \text{ตารางที่ 4.1}$$

ICE = Institute of Civil Engineers  
ICE (1978). Flood and Reservoir Safety. London

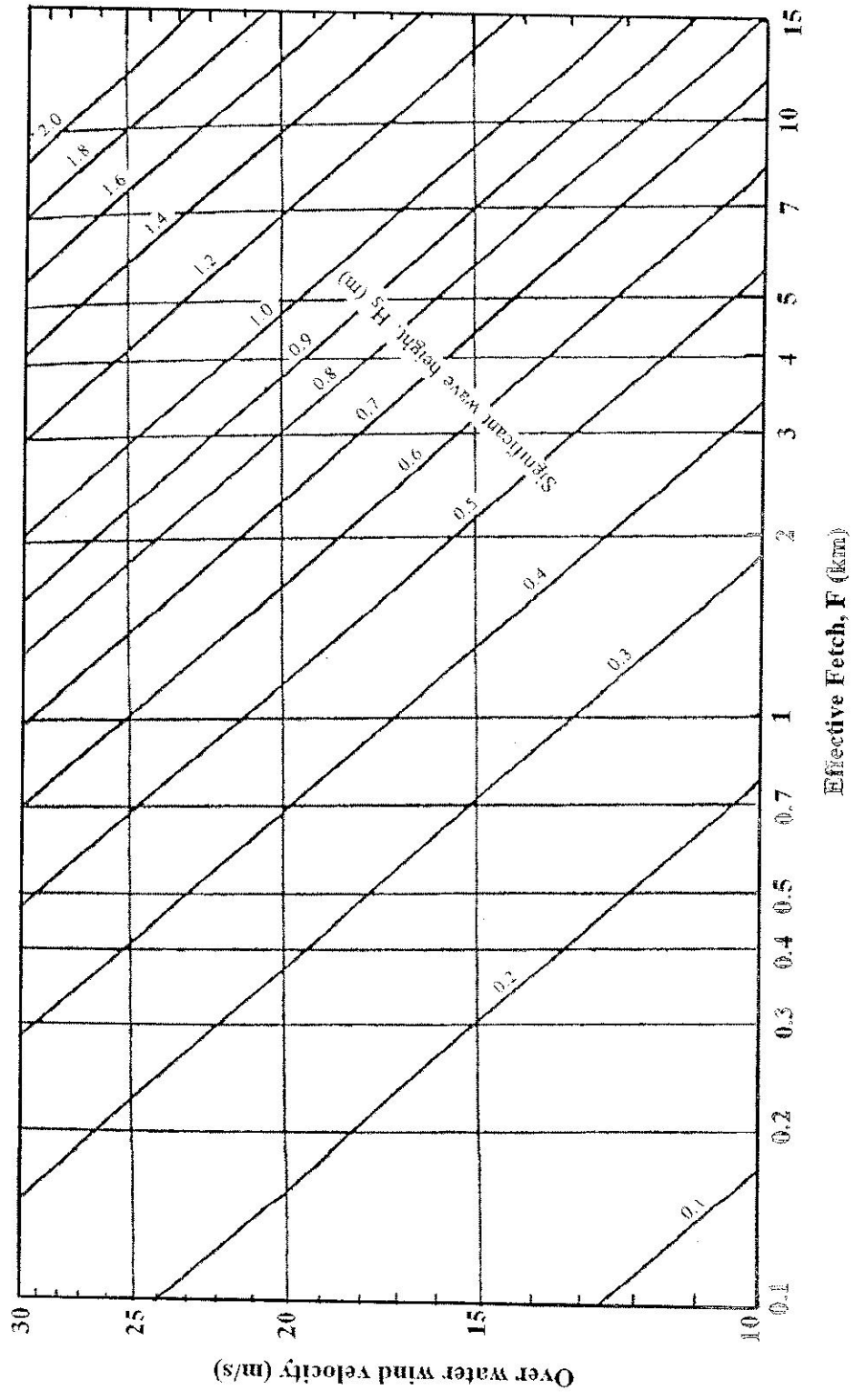


Figure 4.1 Relationship between effective fetch, wind speed and significant wave height (ICE, 1978)

12/17/84

## Exceptional Loads (Seismic load)

Dynamic Load ที่เกิดเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquake)

จำเป็นต้องวิเคราะห์แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะการสร้างเขื่อนในเขตที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (High - Risk) เช่นอยู่ในบริเวณที่มีรอยเลื่อน (Fault)

Seismic Activity จะทำให้แผ่นดินไหวด้วยอัตราเร่งแบบ Oscillating Patern (ทั้งแนวตั้งและแนวราบ) และส่งผลให้เกิดแรง (Transient Load ) 2 แรงกระทำต่อตัวเขื่อน คือ

(7) แรงเฉื่อยของตัวเขื่อน (Inertia of Dam)

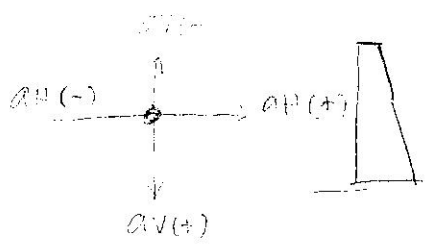
(8) Hydrodynamic Force (Water Reaction)

กรณีที่วิกฤตที่สุดคือ กรณีมีน้ำเต็มเขื่อน

# ความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว

Intensity of shock

= Earthquake Intensity =  $a_H, a_V$



$a_H$  = ความเร่งในแนวราบ

$a_V$  = ความเร่งในแนวตั้ง

$$a_H > a_V$$

ให้  $\alpha_H = a_H/g =$  seismic acceleration coef.

$\alpha_H = 1.5\alpha_V - 2.0\alpha_V$  (for initial analysis)

| $\alpha_H$ | General Damage Level |
|------------|----------------------|
| 0.0        | Nil                  |
| 0.05       | Minor                |
| 0.10       | Moderate             |
| 0.15       | Major                |
| 0.20       | Great                |

เพิ่มค่า 0.1 - 0.12  
(เมื่อความเร่ง)

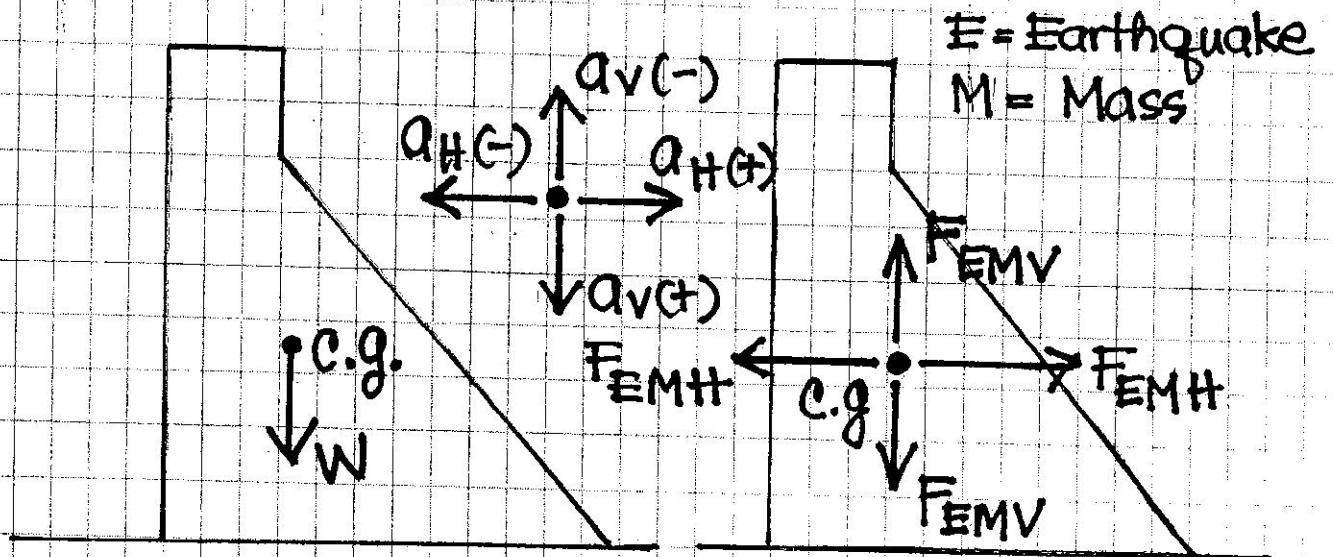
ในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวรุนแรงมาก  $\alpha_H > 0.20$

เช่น Japan ใช้  $\alpha_H = 0.4$

เคยมีกรณีเขื่อนพังเมื่อ  $\alpha_H = 0.5-0.8$



### (7) Inertia Forces (Mass of Dam) ( $F_{EM}$ )



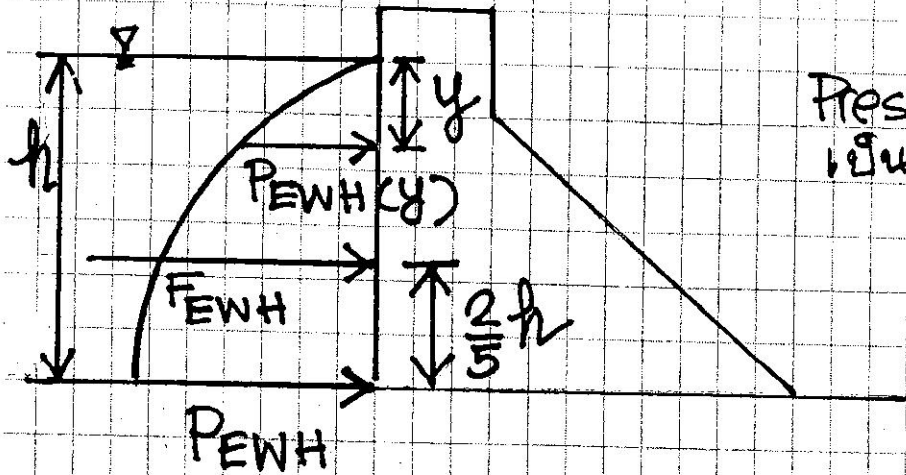
$$F_{EMH} = \pm \alpha_H W$$

$$F_{EMV} = \pm \alpha_V W \quad (\alpha_V = \frac{1}{2} \alpha_H - \frac{2}{3} \alpha_H)$$

→  $F_{EM}$  กระทำที่ Centroid ของ W.ก.  
น้ำหนักตัวเอง



(8) Hydrodynamic Forces ( $F_{EWH}$ )



Pressure Distribution  
เป็น parabola

$$P_{EWH}(y) = C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{y} h \quad (\text{KN/m}^2)$$

$C_e$  = Pressure Factor =  $f\left(\frac{y}{h}, \phi_u\right)$

$y$  = ความลึกที่ใญ่จากผิวน้ำ

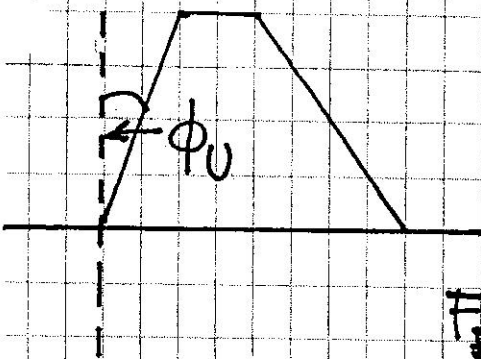
$h$  = ความลึกของน้ำที่หน้าเขื่อน

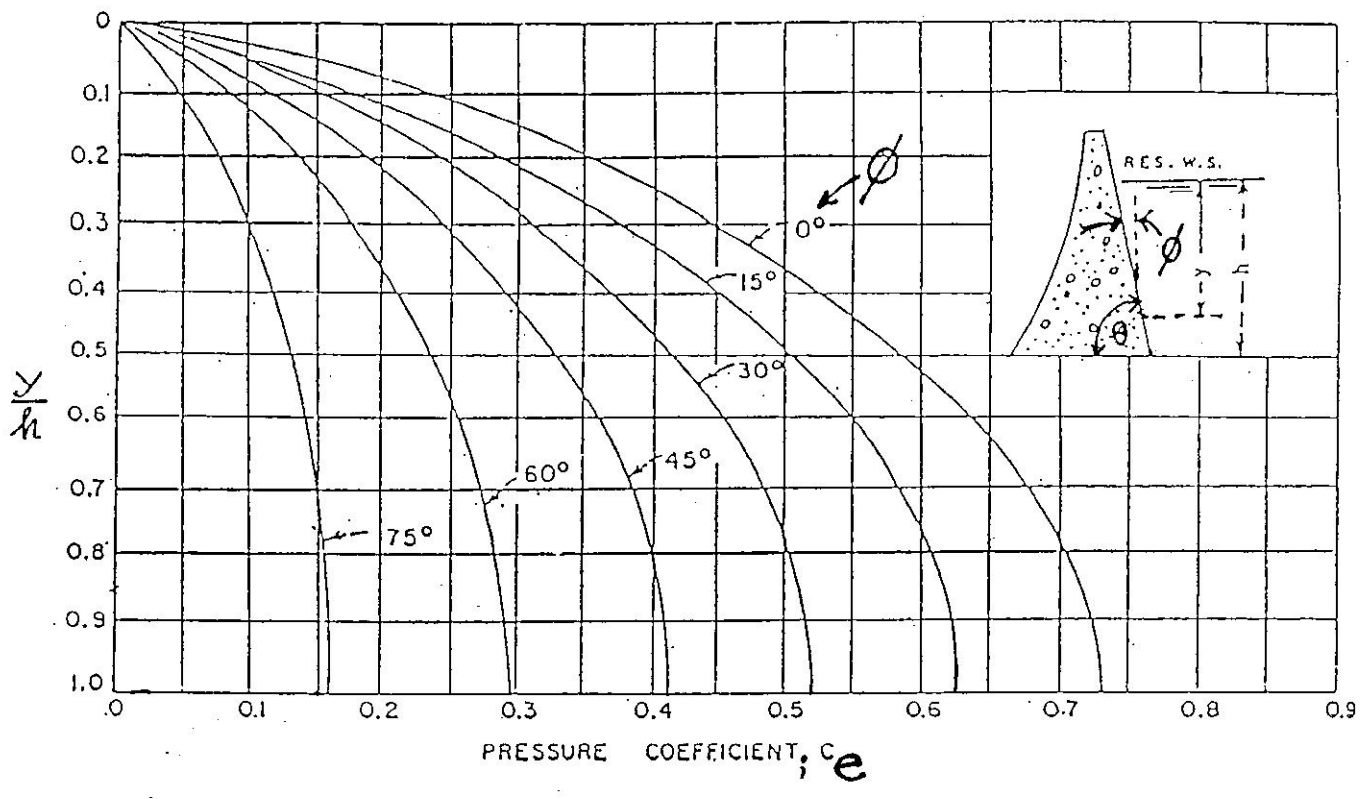
$\phi_u$  = Angle of Inclination of  
Upstream face to Vertical

$$F_{EWH} = \int_0^h C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{y} h \, dy$$

$$= C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{h} \frac{h^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{2}}$$

$$F_{EWH} = \frac{2}{3} C_e \alpha_H \gamma_w h^2 \quad (\text{KN/m})$$





รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์ของการกระจายแรงดันเมื่อความลาดเทของผิวเขื่อนมีค่าคงที่

## แรง $F_{EWH}$ กระทำที่ $2h/5$ จากพื้น

Seismic Pressure Factor( $C_e$ ) (*Dimensionless*)

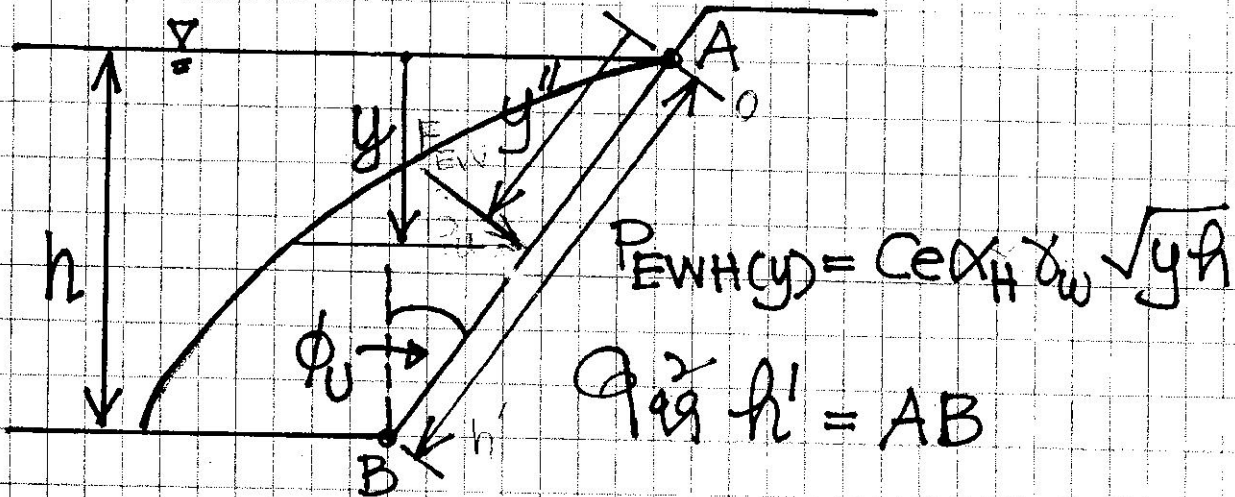
| $y/h$ | $C_e$            |                   |       |
|-------|------------------|-------------------|-------|
|       | $\phi_u=0^\circ$ | $\phi_u=15^\circ$ |       |
|       |                  |                   | สมการ |
| 0.2   | 0.353            | 0.294             | 0.29  |
| 0.4   | 0.529            | 0.441             | 0.45  |
| 0.6   | 0.646            | 0.538             | 0.55  |
| 0.8   | 0.713            | 0.594             | 0.61  |
| 1.0   | 0.735            | 0.613             | 0.605 |

$$C_e = \frac{C_m}{2} \left[ \frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right)} \right]$$

$$\begin{aligned} C_m &= \text{Maximum } C_e \\ &= 0.735 \left( 1 - \phi_u/90^\circ \right) \end{aligned}$$



การคำนวณหาแรงดันไฮดรอลิกที่มุม  $\phi_u$  กับแนวตั้ง



$$\frac{h}{h'} = \cos \phi_u ; \quad \frac{y}{y'} = \cos \phi_u$$

$$h' = \frac{h}{\cos \phi_u} ; \quad y' = \frac{y}{\cos \phi_u}$$

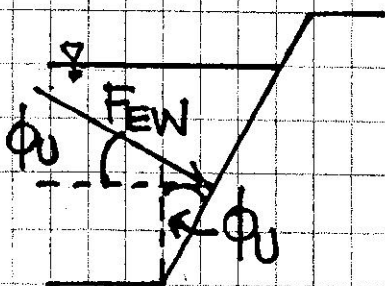
$$F_{EW} = \int_0^{h'} C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{y} h \, dy'$$

$$= C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{h} \sqrt{y'} \cos \phi_u \, dy'$$

$$= C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{h} \sqrt{\cos \phi_u} \int_0^{h'} \sqrt{y'} \, dy'$$

$$= C_e \alpha_H \gamma_w \sqrt{h} \sqrt{\cos \phi_u} \frac{1}{3/2}$$

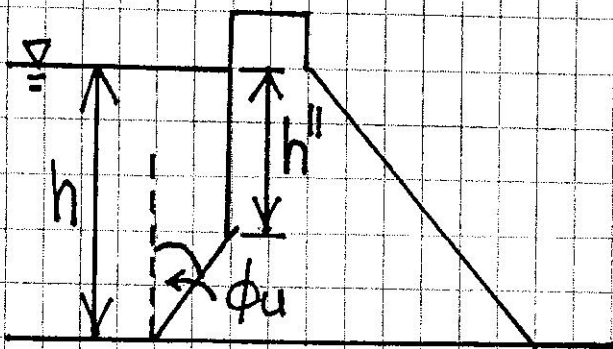
$$= \frac{2}{3} C_e \alpha_H \gamma_w \frac{h^2}{\cos \phi_u}$$



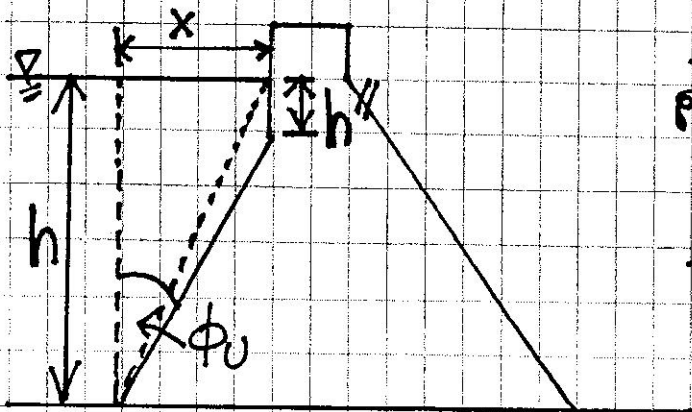


$$\begin{aligned} F_{EWH} &= F_{EW} \cos \phi_u \\ &= \frac{2}{3} C_e \alpha_H \delta \omega h^2 \frac{\cos \phi_u}{\cos \phi_u} \\ &= \frac{2}{3} C_e \alpha_H \delta \omega h^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{EWV} &= F_{EW} \sin \theta \\ &= \frac{2}{3} C_e \alpha_H \delta \omega h^2 \tan \phi_u \end{aligned}$$



$$\frac{h''}{h} > 0.5 ; \phi_u = 0$$



$$\frac{h''}{h} < 0.5 ; \phi_u \neq 0$$

$$\tan \phi_u = \frac{x}{h}$$

# Stability Analysis of Dam

(การวิเคราะห์เสถียรภาพและความปลอดภัยของเขื่อน)

วิเคราะห์ทุก Probable Load Conditions  
รวมทั้งกรณี Reservoir Empty Condition

## 3 Criteria

- (1) Sliding (การเลื่อนไถล)
- (2) Overturning (การพลิกคว่ำ)
- (3) Overstress and material failure  
(หน่วยแรงในวัสดุมากเกินไปและวัสดุพังทลาย)
- (4) Piping (การกัดพามาเม็ดดินใต้ฐานเขื่อน)

### เกณฑ์ที่ 1 และ 2

ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพและความปลอดภัยเขื่อนทุกประเภท

### เกณฑ์ที่ 3

ใช้สำหรับตรวจสอบเขื่อนคอนกรีต และฐานรากที่เป็นหิน (Rock Foundation)

**เกณฑ์ที่ 1 เป็นเกณฑ์ที่สำคัญที่สุด**

# 1. Sliding Stability

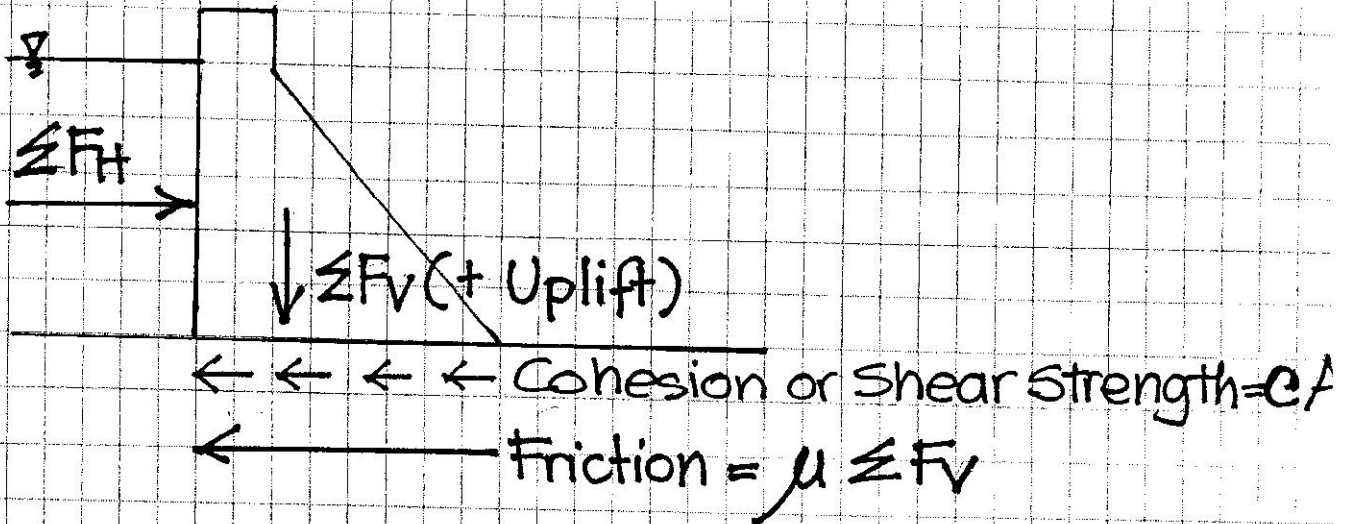
**FSs = Factor of Safety for Sliding**

$$\frac{\text{Resistance (Friction + Cohesion)}}{\text{Load}} \geq \text{FS}_s$$

|                         | <b>Non-cohesive material<br/>(c=0)</b> | <b>Cohesive material<br/>(Shear strength)</b> |
|-------------------------|--|---|
| <b>Horizontal Plane</b> | <b>1</b>                               | <b>2</b>                                      |
| <b>Inclined Plane</b>   | <b>3</b>                               | <b>4</b>                                      |



## A. การเคลื่อนที่บน Horizontal Plane



### 1. Non-cohesive material ( $c=0$ )

Resistance (แรงต้านทานการเคลื่อนที่) (แรงต้านทานการเคลื่อนที่)

$$= \text{Friction} + \text{Shear Strength}$$

$$= \mu \Sigma F_V + cA$$

$$\frac{\mu \Sigma F_V}{\Sigma F_H} \geq F_{Ss}$$

$$\mu = \tan \phi = \text{ค.ย.ค. ความเสียดทานสถิต} \text{ (Static Friction Coef.)}$$

### 2. Cohesive material ( $c \neq 0$ )

$$\frac{cA + \mu \Sigma F_V}{\Sigma F_H} \geq F_{Ss}$$

## ค่า $\mu$ สำหรับวัสดุฐานราก

| วัสดุฐานราก  | $\mu = \tan \phi$ |
|--|-------------------|
| หินแข็ง ผิวสะอาดและผิวขรุขระมาก<br>(Sound rock, clean and irregular surface) | <b>0.80</b>       |
| หินทั่วไป มีรอยแตกและผิวเรียบ<br>(Rock, some jointing and laminations)       | <b>0.70</b>       |
| กรวดและทรายหยาบ<br>(Gravel and Coarse Sand)                                  | <b>0.40</b>       |
| ทราย ดินดาน ดินตะกอน และดินเหนียว<br>(Sand, shale, silt and clay )           | <b>0.30</b>       |

**Table 3.4**

Range of shearing resistance parameters

| <b>Location of plane of shearing–sliding</b>       | <b>Cohesion <math>c</math>(<math>\text{MNm}^{-2}</math>)</b> | <b>Friction <math>\tan \phi</math></b> |
|--|--|--|
| Mass concrete: Intact                              | 1.5-3.5  | 1.0-1.5                                |
| Mass concrete:<br>Horizontal<br>construction joint | 0.8-2.5  | 1.0-1.5                                |
| Concrete–rock<br>interface                         | 1.0-3.0  | 0.8-1.8                                |
| Rock mass: Sound                                   | 1.0-3.0  | 1.0-1.8                                |
| Rock mass: Inferior                                | < 1.0  | < 1.0                                  |

**Table 3.5**

Foundation rock shear strength characteristics

| <b>Foundation description</b>   | <b>Cohesion <math>c(\text{MNm}^{-2})</math></b> | <b>Friction <math>\tan \phi</math></b> |
|---|---|--|
| <b>Sound conditions</b>   |   |  |
| Generally competent parent rock; few significant                                  | > 1.0   | >1.0                                   |
| <b>Discontinuities in mass; no significant degree of alteration or weathering</b> |   |  |
| gneiss  | 1.3   | 1.7                                    |
| granite   | 1.5   | 1.9                                    |
| micaschist  | 3.0   | 1.3                                    |
| sandstone   | 1.0   | 1.7                                    |
| <b>Inferior conditions</b>  |   |  |
| gneiss, unaltered   | 0.6   | 1.0                                    |
| granite, weathered  | 0.3   | 1.3                                    |
| greywacke   | <0.1  | 0.6                                    |
| limestone, open jointed   | 0.3   | 0.7                                    |
| micaschist  | 0.4   | 0.7                                    |
| sandstone   | 0.1   | 0.6                                    |
| <b>Critical foundation features</b>   |   |  |
| fault or crush zone material  | <0.2  | <0.3                                   |
| clay seam or clayey joint infill  | <0.1  | <0.2                                   |

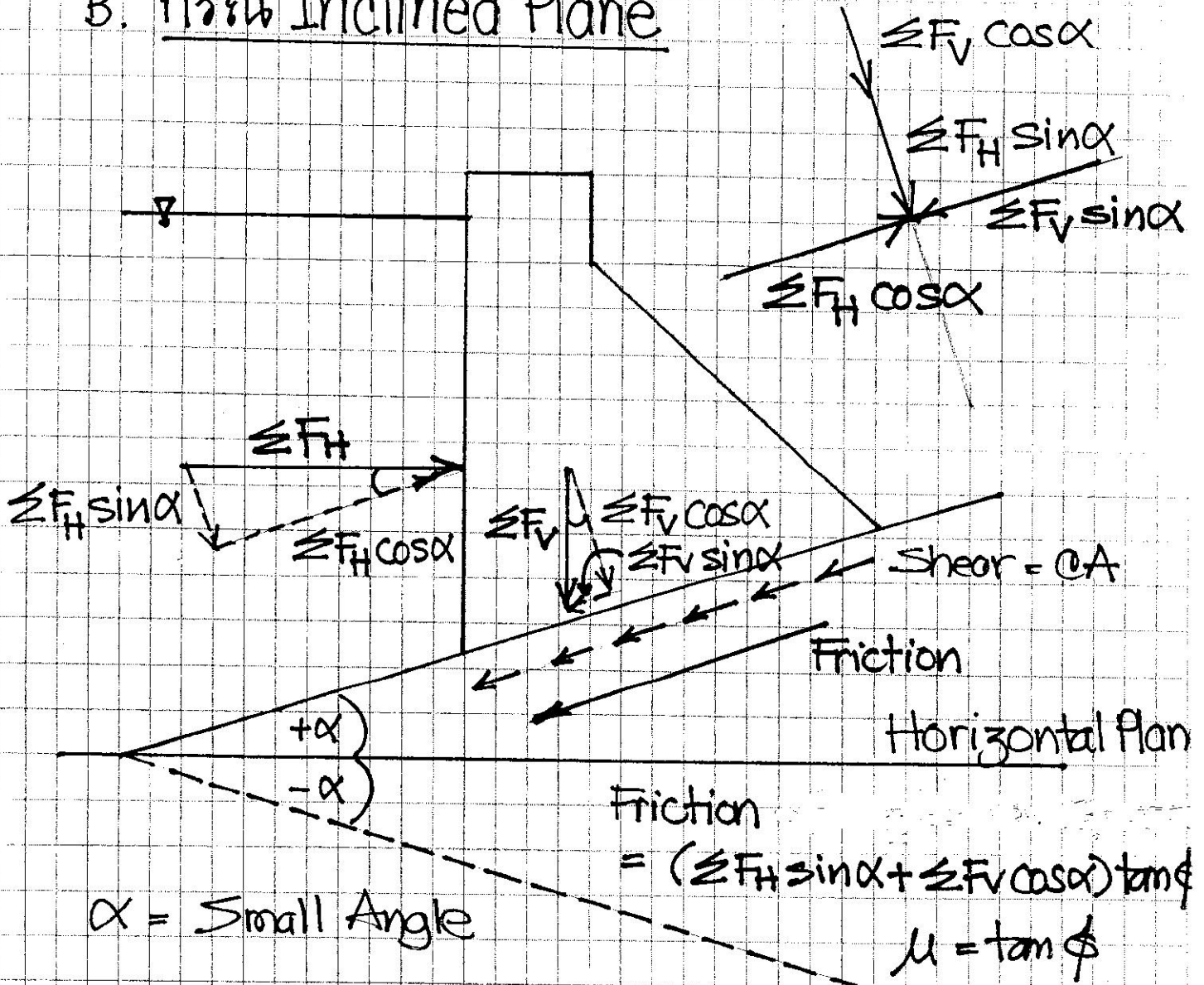
**Table 3.6**

Examples of shear strength degradation

| <b>Rock Type and Condition</b> | <b>Cohesion <math>c(\text{MNm}^{-2})</math></b> | <b>Friction <math>\tan \phi</math></b> |
|--------------------------------|---|--|
| <b>Gneiss 'A'</b>              |   |  |
| :sound                         | <b>1.0</b>                                      | <b>1.7</b>                             |
| :jointed-decomposed            | <b>0.4</b>                                      | <b>0.5</b>                             |
| <b>Granite 'B'</b>             |   |  |
| :sound                         | <b>1.0</b>                                      | <b>1.8</b>                             |
| :weathered-disintegrated       | <b>0.1</b>                                      | <b>0.8</b>                             |
| <b>Shale 'C'</b>               |   |  |
| :dry                           | <b>0.2</b>                                      | <b>0.4</b>                             |
| :saturated                     | <b>0</b>  | <b>&lt;0.2</b>                         |



### B. กรณี Inclined Plane



### 3. กรณี Non-cohesive material (c=0)

$$FS_S \leq \frac{(\Sigma F_H \sin \alpha + \Sigma F_V \cos \alpha) \mu}{(\Sigma F_H \cos \alpha - \Sigma F_V \sin \alpha)}$$

$$\leq \mu \left\{ \frac{\Sigma F_H \sin \alpha}{\Sigma F_H \cos \alpha - \Sigma F_V \sin \alpha} + \frac{\Sigma F_V \cos \alpha}{\Sigma F_H \cos \alpha - \Sigma F_V \sin \alpha} \right\}$$



$$\begin{aligned}
 FS_S &\leq \mu \left\{ \frac{1}{\tan \alpha} - \frac{\sum F_V}{\sum F_H} + \frac{1}{\frac{\sum F_H}{\sum F_V} - \tan \alpha} \right\} \\
 &\leq \mu \left\{ \frac{\sum F_H \tan \alpha}{\sum F_H - \sum F_V \tan \alpha} + \frac{\sum F_V}{\sum F_H - \sum F_V \tan \alpha} \right\} \\
 &\leq \mu \left( \frac{\sum F_V + \sum F_H \tan \alpha}{\sum F_H - \sum F_V \tan \alpha} \right)
 \end{aligned}$$

#### 4. กรณี Cohesive material (c ≠ 0)

$$FS_S \leq \frac{cA + (\sum F_H \sin \alpha + \sum F_V \cos \alpha) \mu}{(\sum F_H \cos \alpha - \sum F_V \sin \alpha)}$$

กรณี

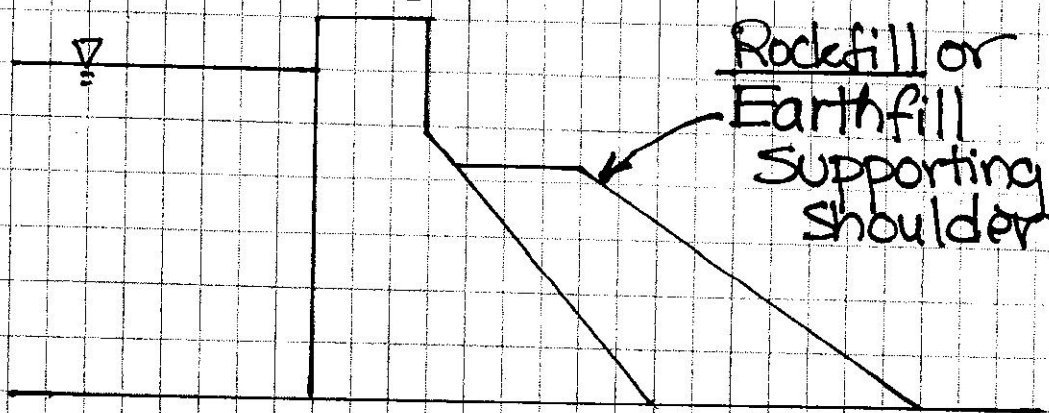
$$FS_S (\text{Novak}) \leq \frac{cA}{\cos \alpha (1 - \tan \phi \tan \alpha)} + \frac{\sum F_V \tan(\phi + \alpha)}{\sum F_H}$$

| กรณี  | FS <sub>S</sub> |
|---|-----------------|
| 1. ELC  | 1.3             |
| 2. NLC  | 2.0             |
| 3. วัสดุที่ไม่แน่น<br>= Unconsolidated Material | 2.5             |
| 4. กรณี c ≠ 0                                   | 3.0 - 4.0       |

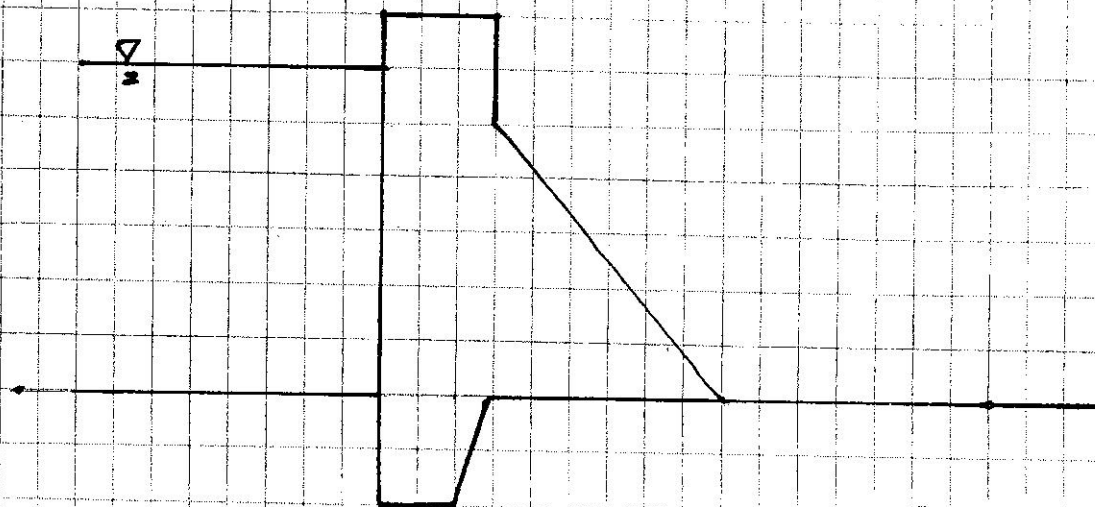


กรณีที่เกิดการวิเคราะห์ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย (FSs) ต้องเพิ่มแรงต้านทานการเคลื่อนไถ

1. เพิ่ม หน้. หน้. หน้. เพิ่ม Friction โดยออกแบบแบบ Supporting Shoulder



2. ออกแบบ Key ยึดเพื่อเพิ่ม Shear Strength



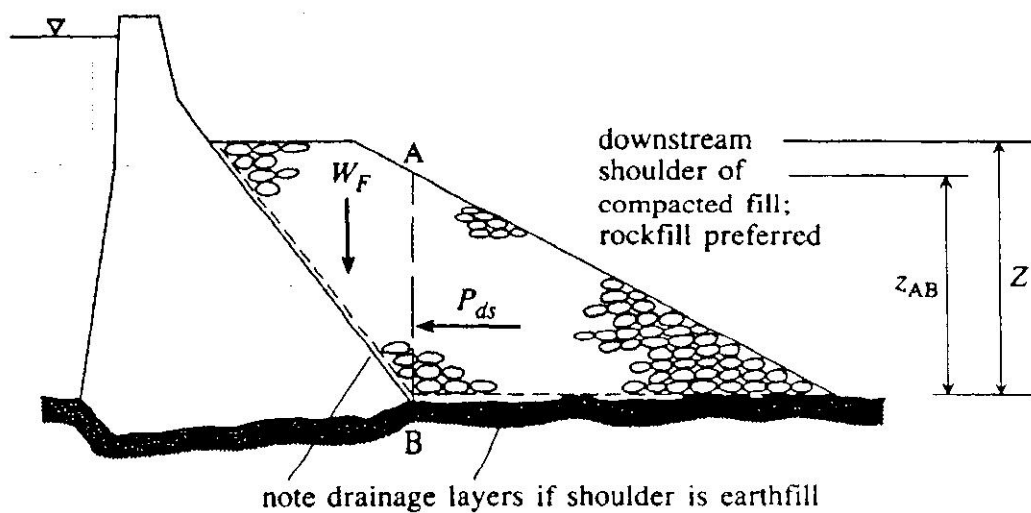
### (b) Downstream supporting shoulder

A supporting shoulder can be constructed, as shown in Figure 3.11, employing compacted earthfill or rockfill. Support is provided from the positive contribution to stability made by the weight of fill above the downstream face,  $W_F$ . A further contribution is made by the horizontal 'at rest' pressure,  $P_{ds}$ , generated on plane AB.

$$W_F = \gamma(\text{area } A) \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (3.42)$$

and may be considered to act through the centroid of the fill profile of area  $A$  above the toe, and

$$P_{ds} = K_0 \gamma z_{AB} Z \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (3.43)$$



**Figure 3.11** Stabilizing, by construction of downstream supporting shoulder.



② Overturning Stability  
 (ความปลอดภัยต่อการพลิกคว่ำ)



$$FS_o \leq \frac{\sum M_o(+)}{\sum M_o(-)}$$

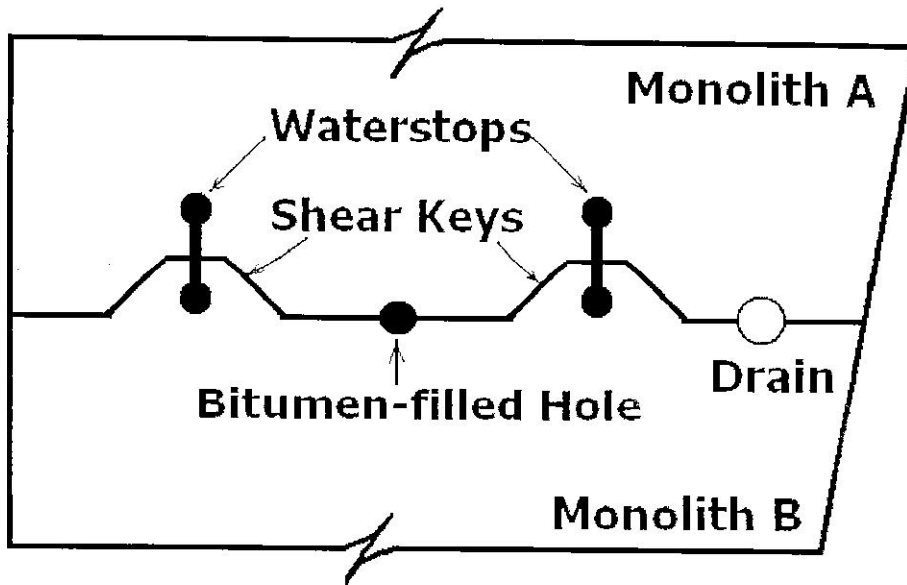
(โมเมนต์ต้านทาน)  
(โมเมนต์พลิก)

$$FS_o = 1.5 \text{ (Kennard et. al. 1995)}$$

$$= 2.0$$

## 2. Stress Analysis (Gravity Method Analysis)

สำหรับกรณีไม่มี Shear Key หรือ Transverse Contraction Joints ระหว่าง Monolith



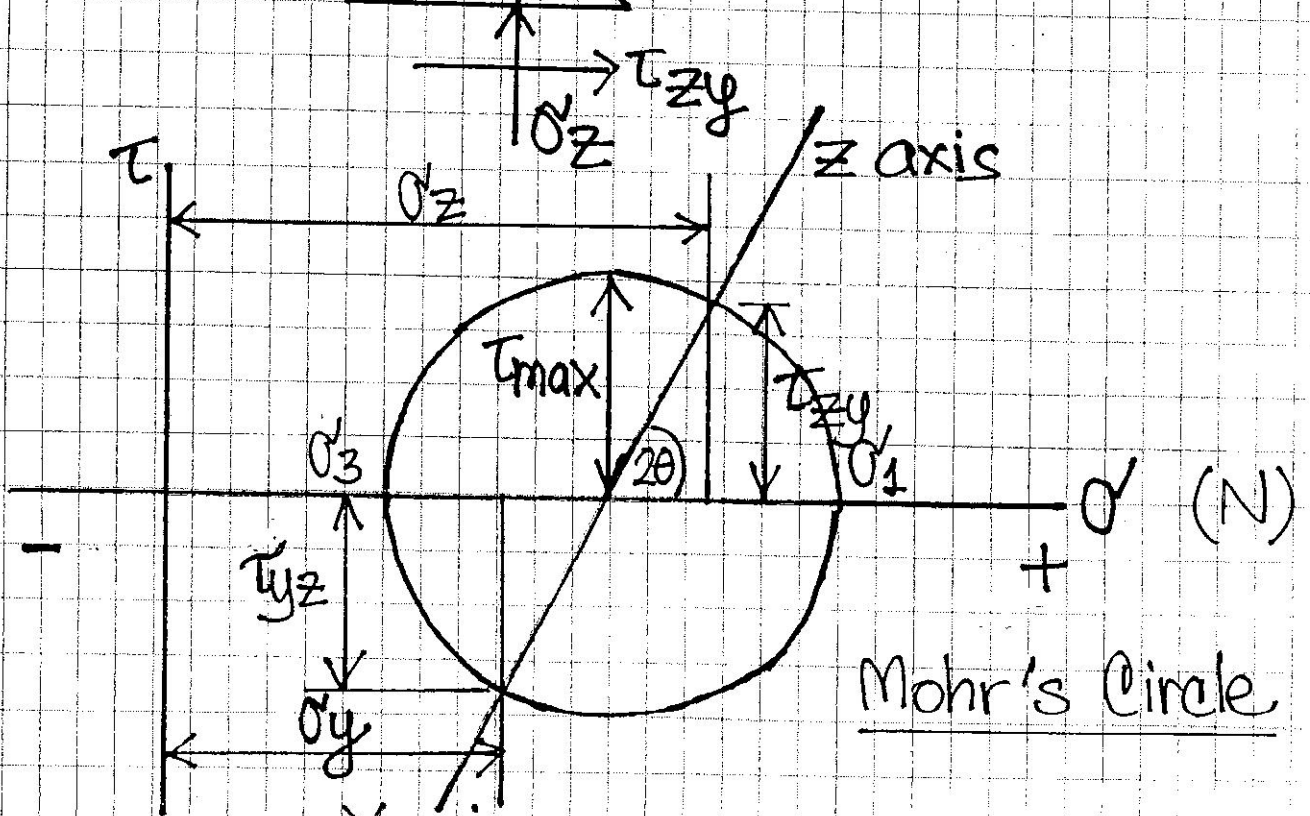
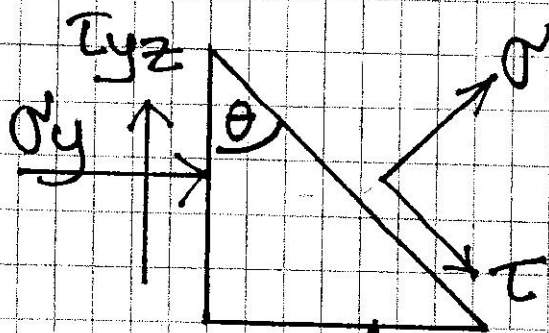
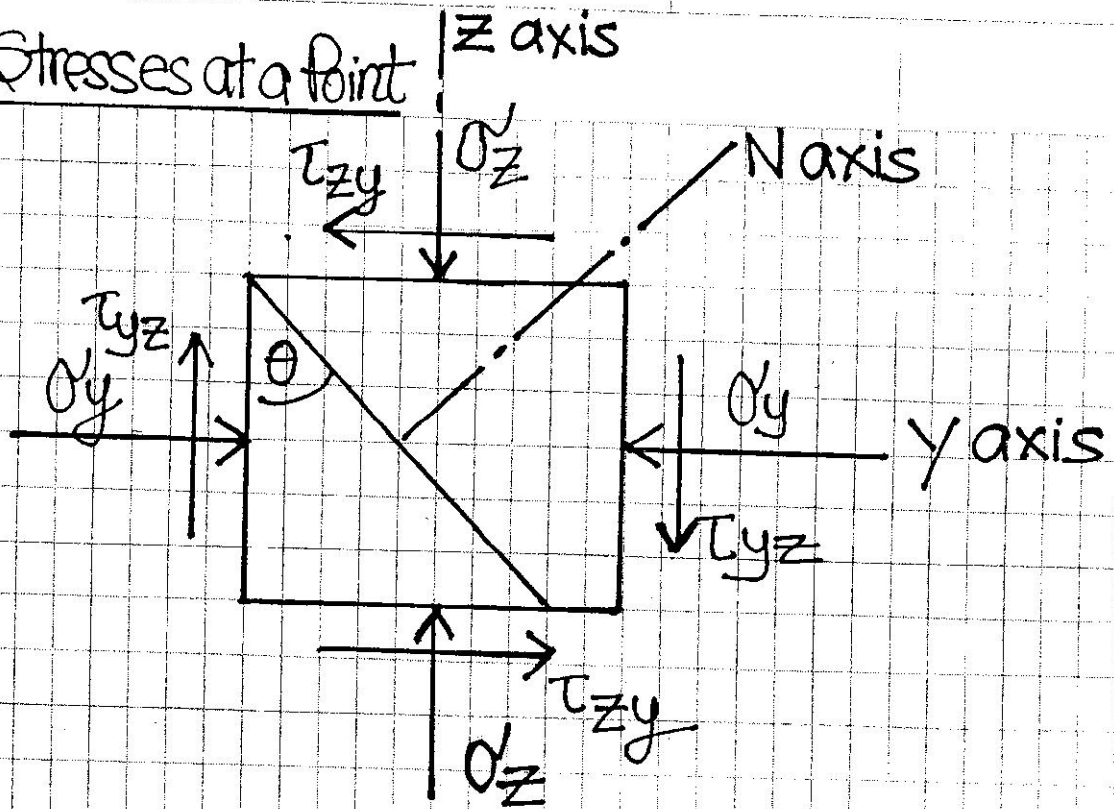
Transverse contraction joint and shear keys

### Primary Stresses

1.  $\sigma_z$  = vertical normal stresses on horizontal planes
2.  $\sigma_y$  = horizontal normal stresses on vertical planes
3.  $\tau_{zy}$  = horizontal shear stresses
4.  $\tau_{yz}$  = vertical shear stresses
5.  $\sigma_1$  = major stresses on neutral axis
6.  $\sigma_3$  = major stresses on neutral axis  
( $\sigma_1, \sigma_3$  = principal stresses)



# Stresses at a Point



Mohr's Circle

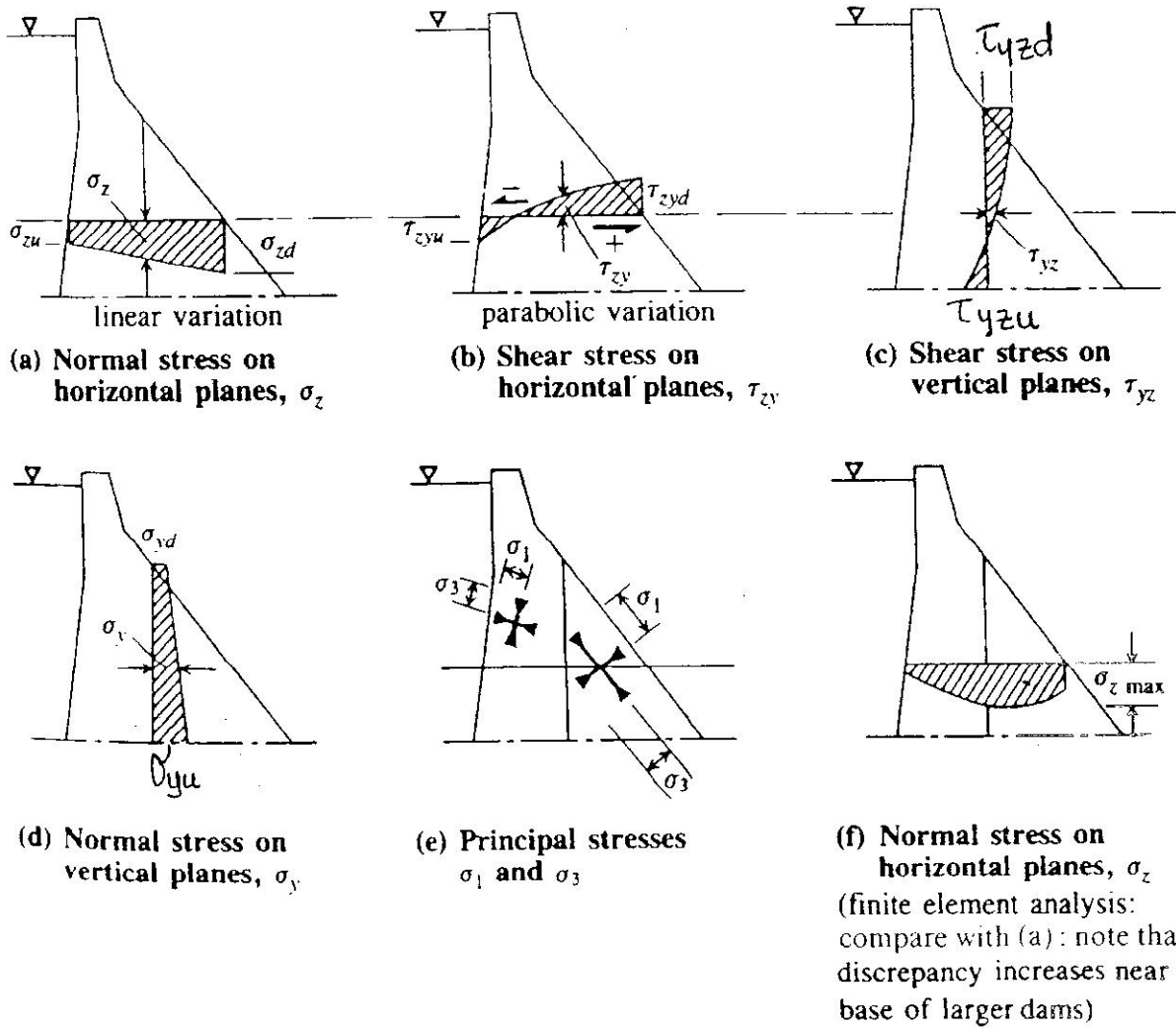


Figure 3.7 Internal stress distribution: gravity method analysis (after USBR, 1976).

Vertical Normal Stresses ( $\sigma_z$ )

$$\sigma_z = \frac{\sum F_v}{A} \pm \frac{M \cdot c}{I}$$

$\sum F_v$  = แรงลัพธ์ในแนวตั้ง ไม่รวม Uplift

$$M = \sum F_v \cdot e$$

= Moment รอบ Centroid ของ Plane

$c$  = ระยะจาก Centroid ถึงจุดที่คำนวณ  $\sigma_z = \frac{I}{2}$

$e$  = ระยะเยื้องศูนย์กลาง

$$= \frac{\sum M_o - c}{\sum F_v} = \frac{\sum M_c}{\sum F_v}$$

$A$  = พ.ท. ของ Plane ต่อ 1 หน่วยความกว้าง  
=  $4 \times T$

$I$  = Moment of Inertia

(กรณี Plane หนา  $h$   $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{T^3}{12}$ )

กรณี Plane หนา  $h$ 

$$\sigma_z = \frac{\sum F_v}{T} \left( 1 \pm \frac{6e}{T} \right)$$

$\sigma_z$

$\sigma_z (+)$  = Compression

$\sigma_z (-)$  = Tension





เมื่อ  $6e$  ละเอียด + หรือ - ขึ้นอยู่กับแนวแรง  
 ลัพธ์จากด้านบนหรือด้านล่างของศูนย์กลาง

ถ้าแรงลัพธ์จากด้านล่างของศูนย์กลาง  
 (กรณีนี้ค่า  $e$  เป็นลบ)

$$\sigma_{zu} = \frac{\sum Fv}{T} \left(1 - \frac{6e}{T}\right)$$

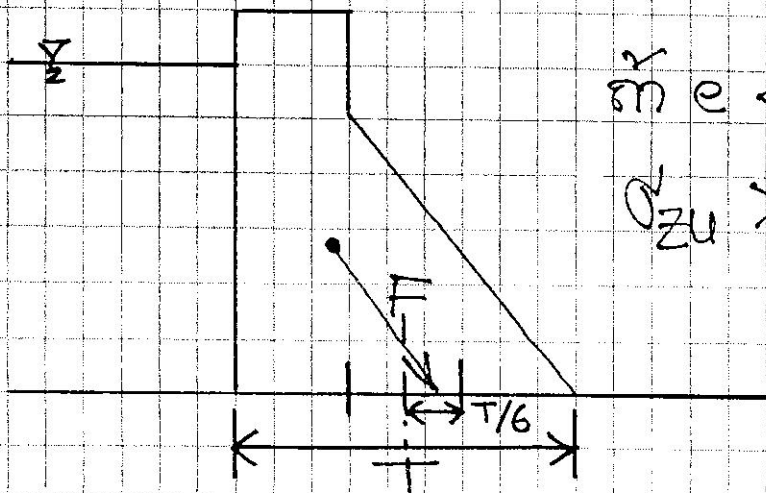
$$\sigma_{zd} = \frac{\sum Fv}{T} \left(1 + \frac{6e}{T}\right)$$

ถ้า  $e > \frac{T}{6}$

$\sigma_{zu} < 0$  (Tensile stress)

(Not permissible for concrete)

### Middle Third Rule ( $e < \frac{T}{6}$ )



ถ้า  $e < \frac{T}{6}$

$\sigma_{zu} > 0$



ถ้าเราตั้งพิกัดหน้าจุดศูนย์กลาง

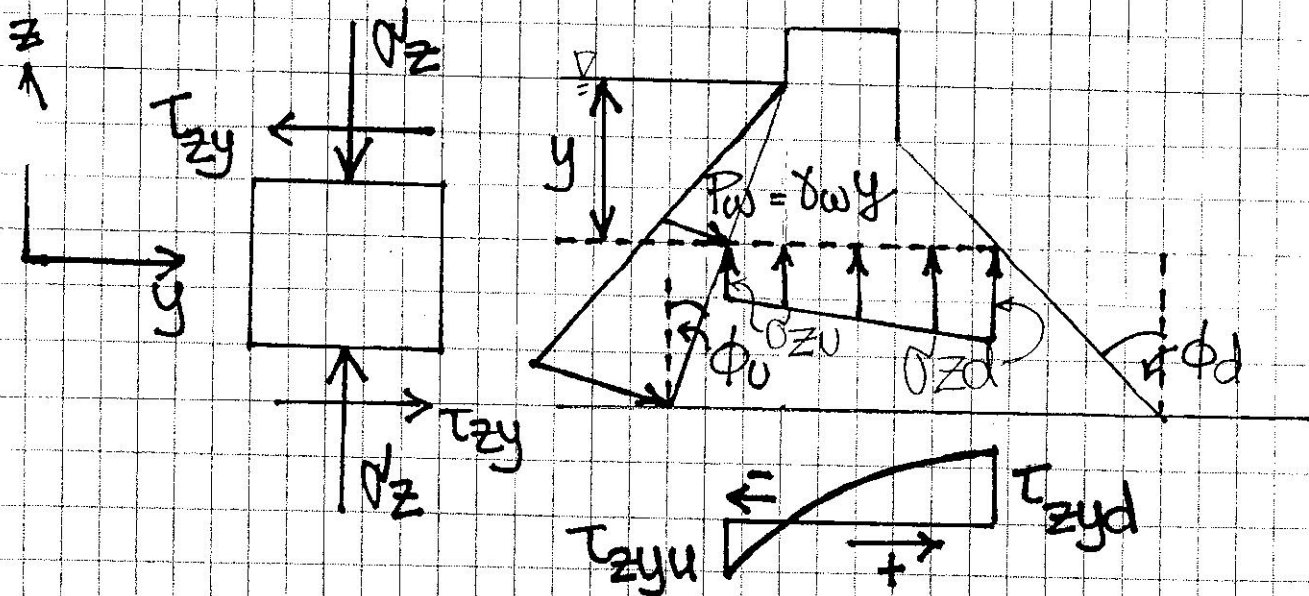
$$Z_U = \frac{\sum FV}{T} \left(1 + \frac{Ge}{T}\right)$$

$$Z_D = \frac{\sum FV}{T} \left(1 - \frac{Ge}{T}\right)$$



# Horizontal Shear Stress ( $\tau_{zy}$ )

$\tau_{zy}$  เกิดจากการรับน้ำหนักของ  $\sigma'_z$  บน Horizontal Plane



$$\tau_{zyu} = (P_{\omega} - \sigma'_{zu}) \tan \phi_u$$

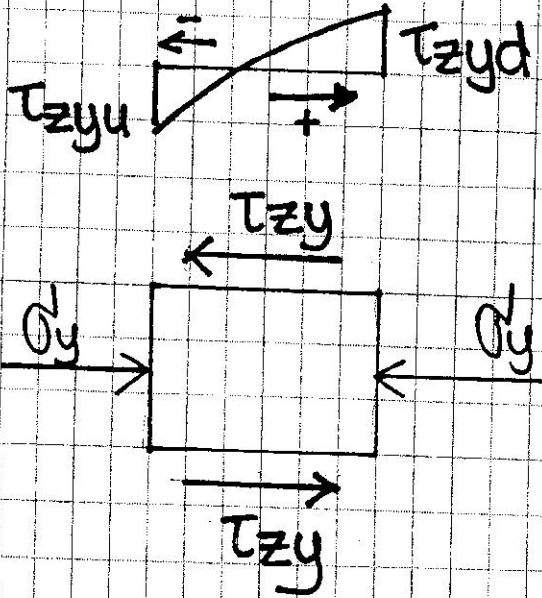
$$\tau_{zyd} = \sigma'_{zd} \tan \phi_d$$

$\tau_{zy} (+)$  มี Moment ๑ Element  $\curvearrowright$

$\tau_{zy} (-)$  มี Moment ๑ Element  $\curvearrowleft$



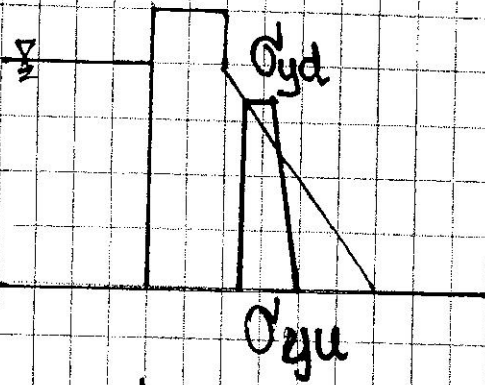
## Horizontal Normal Stresses ( $\sigma_y$ )



Difference in  $\tau_{zy}$  at  $z$  and  $d$   
 Balance  $\sigma_y$

$$\sigma_{yu} = p_w + (\sigma'_{zu} - p_w) \tan^2 \phi_u$$

$$\sigma_{yd} = \sigma'_{zd} \tan^2 \phi_d$$

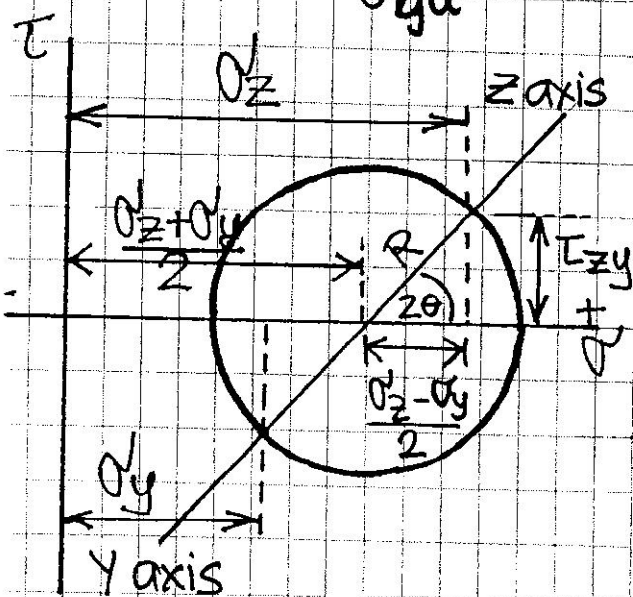


## Principal Stresses

$\sigma_1$  = Major stress

$\sigma_3$  = Minor stress

## Mohr's Circle



$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + T_{max} \text{ (Zero Shear)}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} - T_{max} \text{ (Zero Shear)}$$

$$T_{max} = R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}$$



$$\sigma_{1u} = \sigma_{3u} (1 + \tan^2 \phi_u) - P_w \tan^2 \phi_u$$

$$\sigma_{3u} = P_w$$

$$\sigma_{1d} = \sigma_{3d} (1 + \tan^2 \phi_d)$$

$$\sigma_{3d} = 0$$

## Permissible Stresses and Cracking

ปกติแล้ว Compressive Stress ใน Gravity Dam ซึ่งเกิดจาก Primary Loads มีค่า  $< 2-3 \text{ MNm}^{-2}$  ซึ่งถือว่าน้อยมาก ยกเว้นในเขื่อนที่สูงมากๆ

ถ้า  $\sigma_{zU}(\text{w/o Uplift}) < \sigma_{zU}(\text{min.})$

อาจเกิด Horizontal Cracking ที่ฐานเขื่อนด้านเหนือน้ำได้

$$\sigma_{zU}(\text{min}) = \frac{K'_d \gamma_w Z - \sigma'_t}{F'_t}$$

$K'_d$  = drainage factor  
 = 0.4 for effective drains  
 = 0 for no drains

$\sigma'_t$  = tensile strength of concrete

$F'_t$  = factor of safety

(ดู  $F_c$  และ  $F_r$  จากตาราง)

**Table 3.9**  
**Permissible compressive stresses**  
**(USBR. 1976)**

| Load combination | Min. Factor of Safety on Compressive Strength  |                            |
|------------------|--|----------------------------|
|                  | <b>F<sub>c</sub>(concrete)</b>                 | <b>F<sub>r</sub>(rock)</b> |
| <b>Normal</b>    | <b>3.0(<math>\sigma_{\max} &lt; 10</math>)</b> | <b>4.0</b>                 |
| <b>Usual</b>     | <b>2.0(<math>\sigma_{\max} &lt; 15</math>)</b> | <b>2.7</b>                 |
| <b>Extreme</b>   | <b>1.0</b>                                     | <b>1.3</b>                 |

\* $\sigma_{\max}$  = max. allowable compressive stress

Cracking จะเกิดจากด้านหน้าเขื่อนจนถึงจุดที่  
 $\sigma_z = Pw$  (Uplift)

**Notional Foundation Stresses  
(Dams = 100 m. in height)**

| <b>Dam Type</b>   | <b>Notional Max. Stress</b> |
|-------------------|-----------------------------|
| <b>Embankment</b> | <b>1.8-2.1</b>              |
| <b>Gravity</b>    | <b>3.2-4.0</b>              |
| <b>Buttress</b>   | <b>5.5-7.5</b>              |
| <b>Arch</b>       | <b>7.5-10.0</b>             |

## 4. Seepage and Piping

ตรวจสอบระยะทางที่น้ำซึมลอดใต้เขื่อนว่ามี ความยาวมากพอที่จะไม่ก่อให้เกิดการกัดเซาะ เม็ดดินหรือไม่

ถ้าไม่พอ น้ำจะไหลเร็วและกัดเซาะเม็ดดินได้ เชื่อนออกไป ทำให้เกิดโพรงและวิบัติได้

### วิธีแก้ไข

- (1) สร้างกำแพงกันน้ำซึม (Slurry Cutoff)
- (2) เพิ่มความยาวแผ่นทับน้ำ (Imperious Blanket)

Lane Weighted Creep Ratio(WCR) =

Weighted Creep Distance(WCD)

H

$$\mathbf{WCD} = \Sigma \mathbf{L}_i \times \mathbf{C}_{WCDi} \text{ (ม.)}$$

**H** = ผลต่างระดับน้ำด้านหน้าและท้ายเขื่อน(ม.)

**L<sub>i</sub>** = ระยะทาง(ม.)

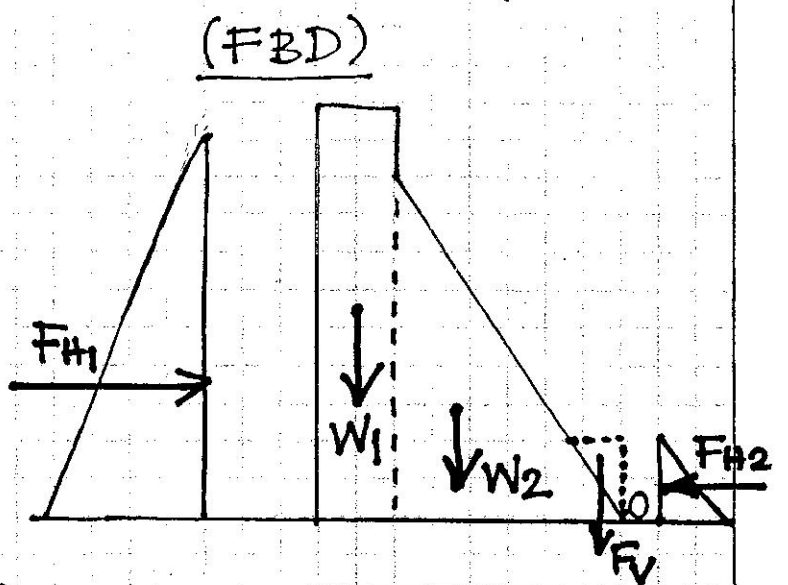
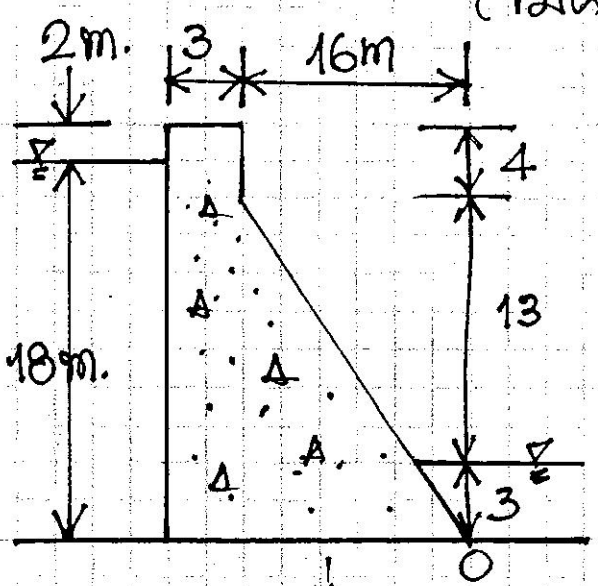
|  | <b>C<sub>WCDi</sub></b> |
|--|-------------------------|
| L <sub>i</sub> อยู่ในแนวตั้งหรือ $\theta_i > 45^\circ$ | <b>1</b>                |
| L <sub>i</sub> อยู่ในแนวตั้งหรือ $\theta_i > 45^\circ$ | <b>1/3</b>              |

## ตารางที่ 9.2 Weighted Creep Ratio

| ชนิดดิน                         | Weighted Creep Ratio (WCR) |
|---------------------------------|----------------------------|
| ทรายละเอียดมาก<br>หรือดินปนทราย | 8.5                        |
| ทรายละเอียด                     | 7.0                        |
| ทรายหยาบปาน<br>กลาง             | 6.0                        |
| ทรายหยาบ                        | 5.0                        |
| กรวดละเอียด                     | 4.0                        |
| กรวดหยาบปาน<br>กลาง             | 3.5                        |
| กรวดหยาบ                        | 3.0                        |
| หินใหญ่มีกรวด<br>แทรกอยู่       | 2.5                        |
| ดินเหนียวอ่อน                   | 3.0                        |
| ดินเหนียวแข็ง<br>ปานกลาง        | 2.0                        |
| ดินเหนียวแข็ง                   | 1.8                        |
| ดินเหนียวแข็ง<br>มากหรือดินดาน  | 1.6                        |



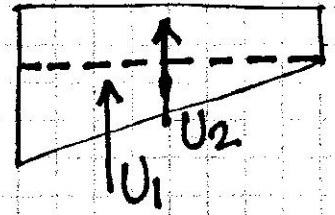
**EX 9.1** จงวิเคราะห์แรงที่เกิดจากน้ำหนักของน้ำที่กระทำต่อคันโยก  
(โดยใช้วิธีแบ่งน้ำหนักเป็นชั้นๆ)



วิเคราะห์น้ำหนักของน้ำ 1 ชั้น.

น้ำหนัก

$$F_{H1} = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 = \frac{1}{2} (9.81) (18)^2 = 1,589 \text{ kN/m} \rightarrow$$



$$F_{H2} = \frac{1}{2} (9.81) (3)^2 = 44 \text{ kN/m} \leftarrow$$

$$F_V = \gamma V = 9.81 \left( \frac{1}{2} \times 3 \times 3 \right) = 44 \text{ kN/m} \downarrow$$

น้ำหนักของน้ำ

$$\gamma_c = 2.4 \gamma = 2.4 \times 9.81 = 23.54 \text{ kN/m}^3$$

$$W_1 = 23.54 (3 \times 20) = 1,413 \text{ kN/m} \downarrow$$

$$W_2 = 23.54 \left( \frac{1}{2} \times 16 \times 16 \right) = 3,013 \text{ kN/m} \downarrow$$

Uplift Force

$$U_2 = \gamma_2 t = 9.81 \times 3 \times 19 = 559 \text{ kN/m} \uparrow$$

$$U_1 = \frac{1}{2} \gamma (\gamma_1 - \gamma_2) t = \frac{1}{2} \times 9.81 \times (18 - 3) \times 19 = 1,398 \text{ kN}$$



Sliding

$$\begin{aligned}
 FS_s &= \mu \frac{\sum F_v}{\sum F_H} \quad \text{กำหนดให้ } \mu = 0.65 \\
 &= \frac{0.65 (44 + 1,413 + 3,013 - 559 - 1,398)}{1,589 - 44} \\
 &= \frac{0.65 \times 2,513}{1,545} = 1.05 < 1.5 \quad \text{No. K}
 \end{aligned}$$

(หมายเหตุ: ค่าของแรงปัดจะต่ำกว่าแรงเสียดทานตามเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนด)

Overturning

$$\begin{aligned}
 FS_o &= \frac{\sum M_o}{\sum M_c} \\
 &= \frac{17.5 W_1 + \frac{2}{3} \times 16 W_2 + 1 F_v + 1 F_H2}{6 F_H1 + \frac{19}{2} U_2 + \frac{2}{3} \times 19 U_1} \\
 &= \frac{17.5 \times 1,413 + \frac{2}{3} (16 \times 3,013) + 1 \times 44 + 1 \times 44}{6 \times 1,589 + \frac{19}{2} \times 559 + \frac{2}{3} (19 \times 1,398)} \\
 &= \frac{24,728 + 32,139 + 44 + 44}{9,534 + 5,310 + 17,708} \\
 &= \frac{56,954}{32,552} = 1.75 < 2 \quad \text{No. K}
 \end{aligned}$$



Shear Stress

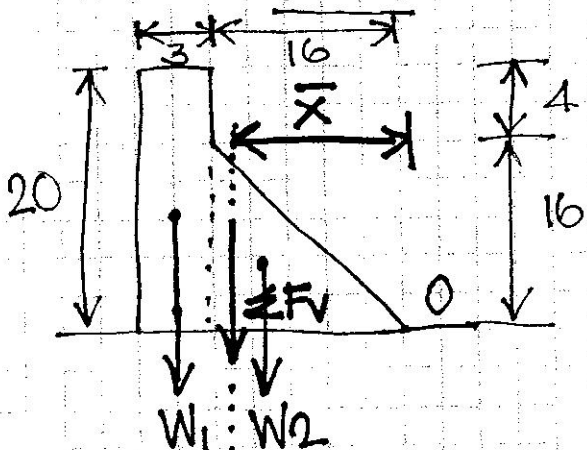
$$\tau = \frac{\sum F_H}{A}$$

$$= \frac{F_{H1} - F_{H2}}{19 \times 1} = \frac{1,589 - 44}{19} = 8.13 \text{ kN/m}^2$$

Stress ที่อนุกรมงาน

$$\sigma = \frac{\sum F_V}{A} \pm \frac{M \cdot c}{I}$$

น้ำหนัก : 6000 กิโลกรัม



$$\begin{aligned} \sum F_V &= W_1 + W_2 \\ &= 1,413 + 3,013 \\ &= 4,426 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum W_i X_i}{\sum W_i}$$



จุดศูนย์กลาง

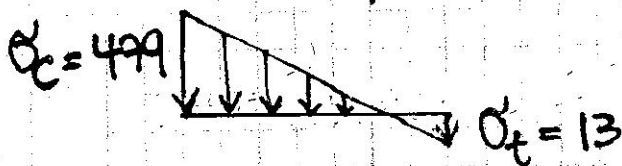
$$= \frac{17.5 W_1 + \frac{2}{3} \times 16 W_2}{W_1 + W_2}$$

$$= \frac{17.5 \times 1,413 + \frac{2}{3} (16 \times 3,013)}{4,426}$$

$$= \frac{24,728 + 32,139}{4,426} = \frac{56,867}{4,426} = 12.85$$

$$e = 12.85 - 9.5$$

$$= 3.35 \text{ m}$$



$$M = \sum F_V \cdot e = 4,426 \times 3.35 = 14,827 \text{ kN}$$



$$I = \frac{1 \times 19^3}{12} = 571.58 \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{4,426}{1 \times 19} \pm \frac{14,827 \times 9.5}{571.58} \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$= 233 \pm 246$$

$$= 479, -13 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

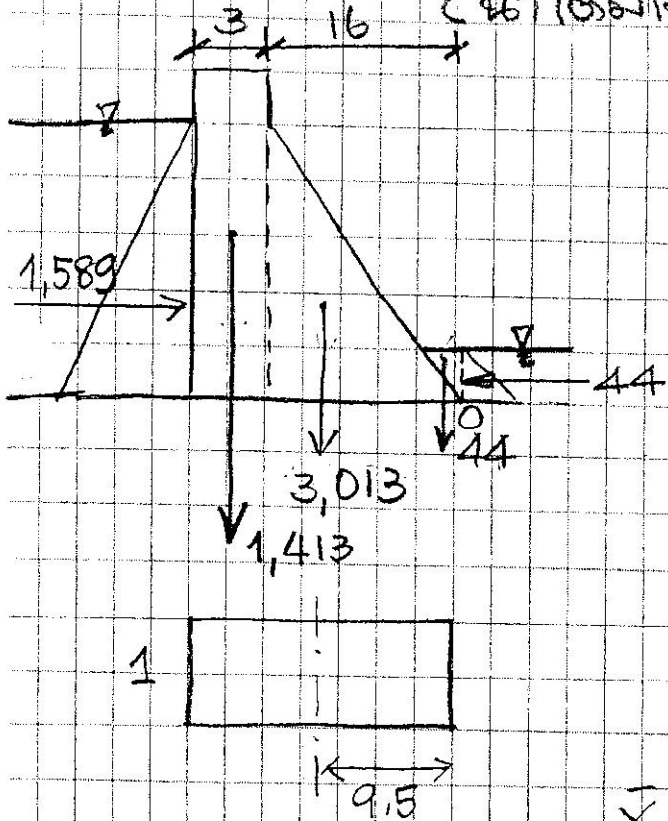
$$\sigma_u = 479 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ (Compression)}$$

$$\sigma_d = -13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ (Tension)}$$

การมีค่าเป็น Tensile stress มากกว่า  
Concrete จะ Tension ไปด้วย.



Task 2: ① โจทย์ W.P. Creager 600; B.O. McOy.  
 (ข้อนี้ใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางมวล (Centroid))



$$\sum M_O = 17.5 \times 1.413 + \frac{2}{3} \times 16 \times 3.013 + 1 \times 44 + 1 \times 44 = 56.954 \text{ kNm}$$

$$\sum M_O = 6 \times 1.589 = 9.534 \text{ kNm}$$

$$\sum F_V = 1.413 + 3.013 + 44 = 44.70 \text{ kN}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum M_O - \sum M_O}{\sum F_V} = \frac{56.954 - 9.534}{44.70} = 10.61 \text{ m}$$

$$e = \bar{X} - 9.5 = 10.61 - 9.5 = 1.11 \text{ m}$$

ข้อนี้ใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางมวล (Centroid)

$$O_z = -\frac{\sum F_V}{A} + \frac{M.C}{I}$$

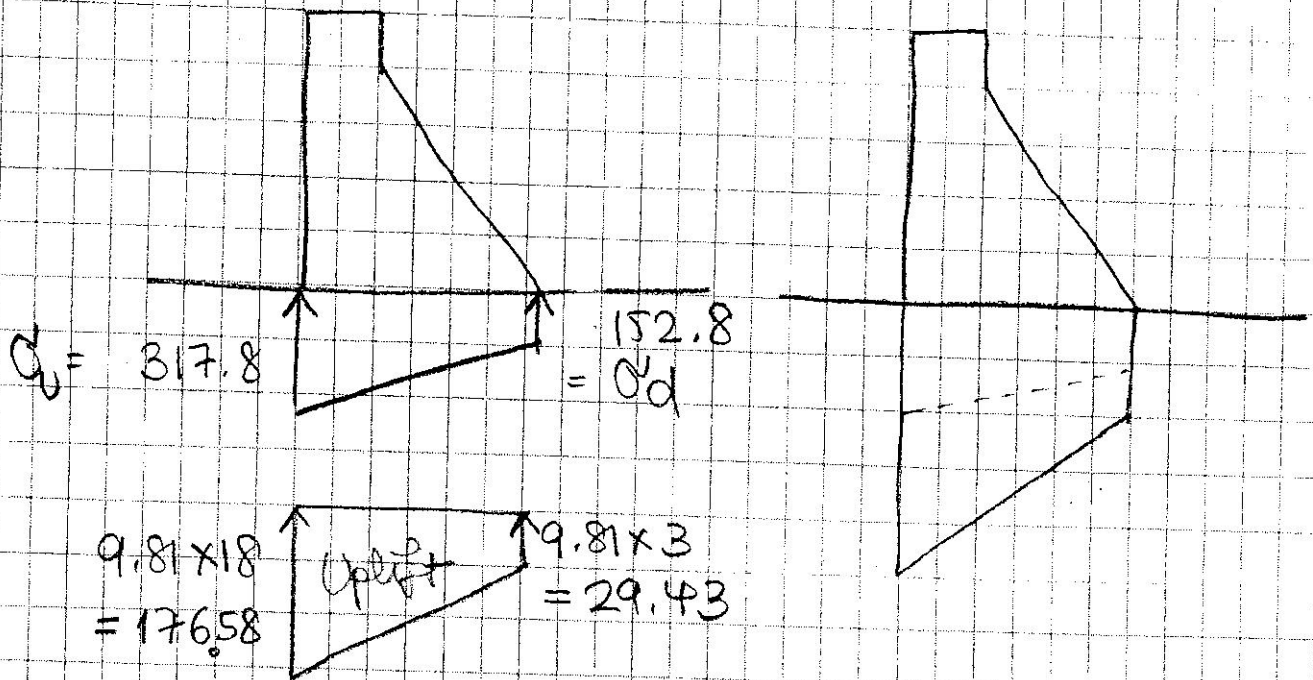
$$M = (\sum F_V) e = 44.70 \times 1.11 = 4961.7 \text{ kNm}$$



$$\sigma = \frac{4470}{1 \times 19} + \frac{4,961.7 \times 9.5}{571.58}$$
$$= 235.3 \pm 82.5$$

$$\sigma_u = 235.3 + 82.5 = 317.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = 235.3 - 82.5 = 152.8 \text{ kN/m}^2$$



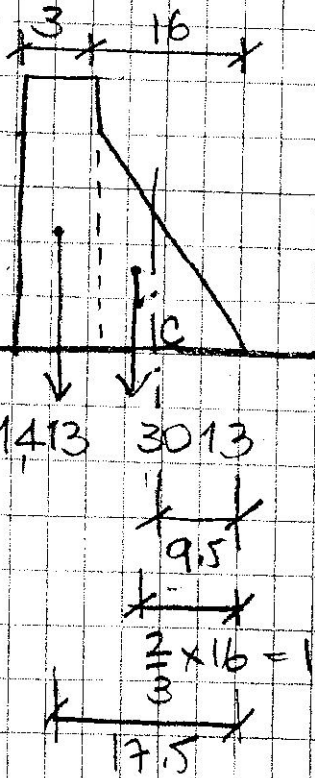
$$\sigma'_u = 317.8 + 176.58 = 494.38 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_d = 152.8 + 29.43 = 182.23 \text{ kN/m}^2$$



๒) กำหนดให้ Tower take moment sou Centroid

การหาจุดศูนย์กลาง



$$\sum M = + ; \sum \sigma = -$$

$$e = \frac{\sum M_c}{\sum F_v}$$

$$\sum M_c = 14.13 \times (17.5 - 9.5) + 3.013(10.67 - 9.5)$$

$$= 11,304 + 3,525.21$$

$$= 14,829.21 \text{ kNm}$$

$$\sum F_v = 1,413 + 3,013 = 4,426 \text{ kN}$$

$$e = \frac{14,829.21}{4,426} = 3.35 \text{ m}$$

การหาโมเมนต์ + การ uplift

$$M_c = 11,304 + 3,525.21 + 44 \times 1$$

$$- 1,589 \times 6 - 1,398 \left( \frac{2}{3} \times 19 - 9.5 \right) - 44(9.5 - 1)$$

$$= 11,304 + 3,525.21 + 44 - 9,534 - 4,427 - 374$$

$$= 538.21$$

$$e = \frac{538.21}{2,513} = 0.21 \text{ m}$$

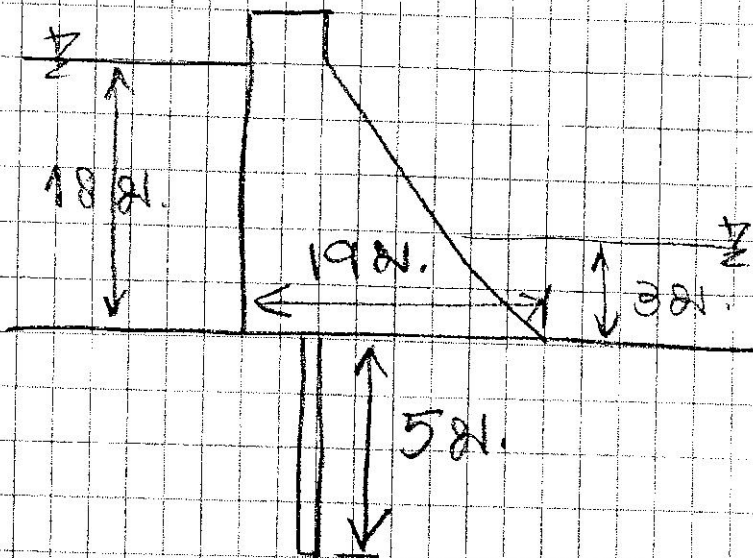


# Piping

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน WCR\* = 5.0

$$WCR = \frac{WCD}{H} = \frac{19 \times \frac{1}{3}}{(18-3)} = 0.42 < 5.0$$

แสดงว่าไม่ปลอดภัยต่อกรณี Piping  
ต้องเพิ่ม Cutoff Wall



$$5 = \frac{2L + \frac{1}{3}(19)}{(18-3)}$$

$$2L = 5(18) - 6.33$$

$$L = 34.35 \text{ m.}$$

- Sliding
- Overturning