

沉箱設計實例

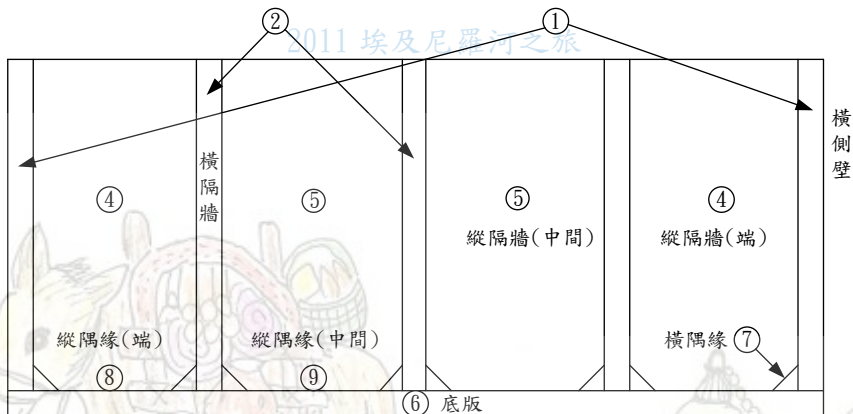
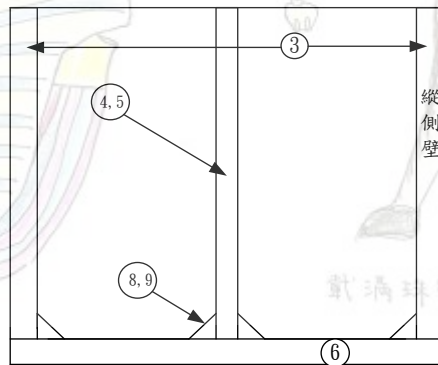
尺寸：高 $H=7\text{m}$ ，寬 $B=8\text{m}$ ，長 $L=16\text{m}$

平行法線方向： $m(=3)$ 隔牆

垂直法線方向： $n(=1)$ 隔牆

共 $(m+1)(n+1)=8$ 個隔室

側壁及底版視為連續版，隔牆視為柱。



沉箱各部名稱

1 浮遊時的安定計算

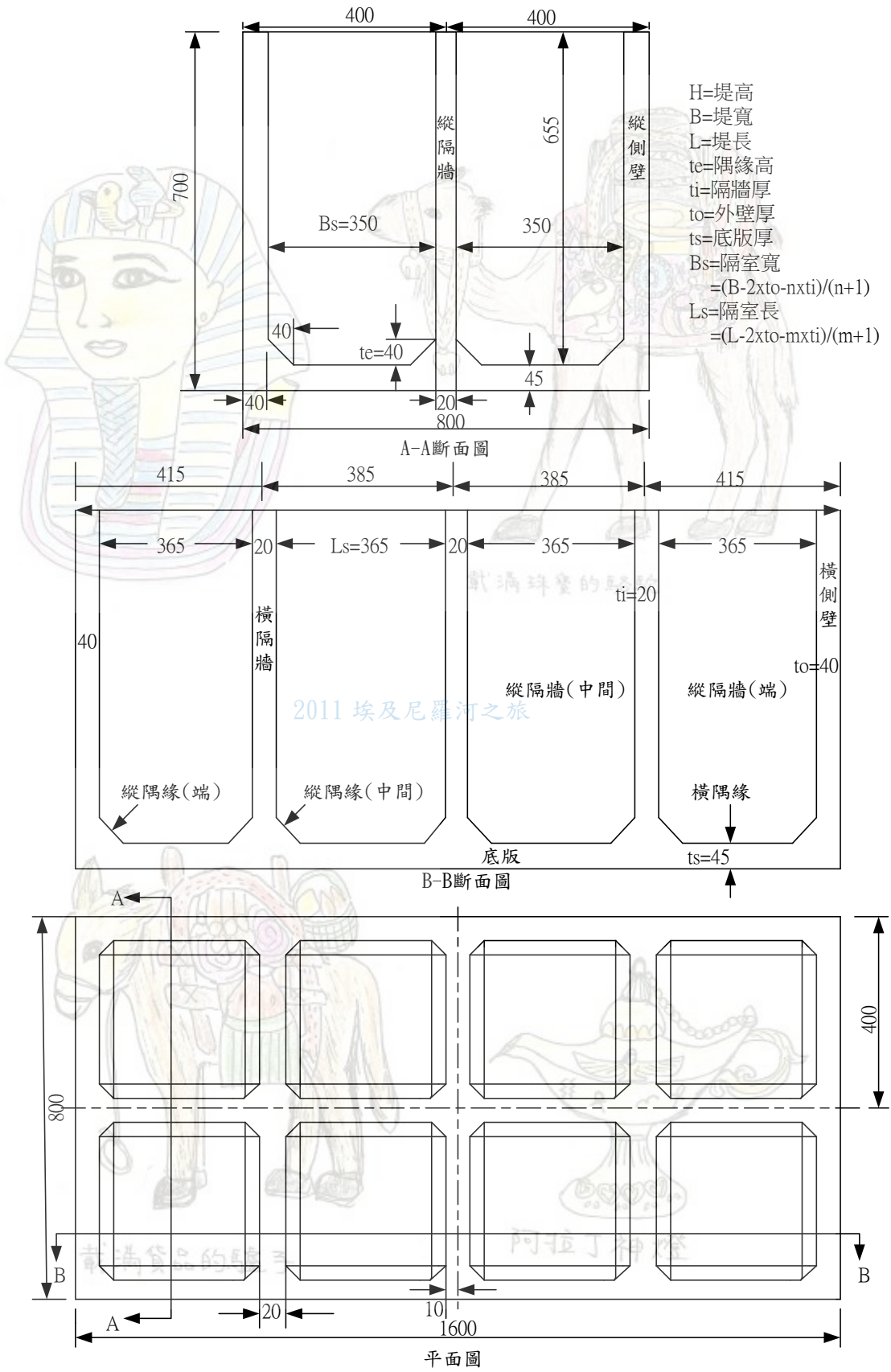
V_0 =沉箱總體積

V_1 =沉箱鋼筋混凝土部份總體積

V_2 =沉箱水面上體積

γ_w =海水單位體積重量

γ_{cr} =鋼筋混凝土單位體積重量



沉箱平面、縱橫斷面

(1) 吃水 D

(a) 計算總體積 V_0

$$V_0 = BHL = 7 \times 8 \times 16 = 896 \text{ m}^3$$

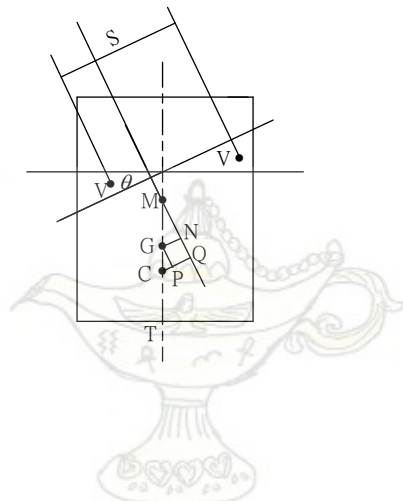
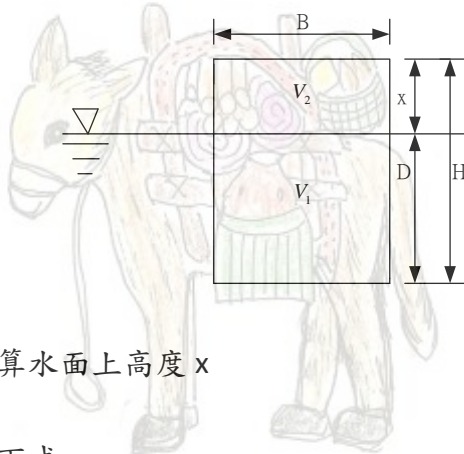
(b) 計算水面下體積 V_1

- ① 橫側壁 $v_1 = t_o * (H - t_s) * B * 2$
- ② 縱側壁 $v_2 = t_o * (H - t_s) * (L - 2t_o) * 2$
- ③ 橫隔牆 $v_3 = t_i * (H - t_s) * (B - 2t_o) * m$
- ④ 縱隔牆 $v_4 = t_i * (H - t_s) * (L - 2t_o - t_i * m) * n$
- ⑤ 底版 $v_5 = t_s * B * L$
- ⑥ 水平偶緣 $v_6 = t_e^2 / 2 * [2 * (L_s + B_s)] * (m + 1) * (n + 1)$
- ⑦ 垂直偶緣 $v_7 = t_e^2 / 2 * (H - t_s) * 4 * (m + 1) * (n + 1)$

$$V_1 = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 \text{ (m}^3\text{)}$$

(c) 計算水面上體積 V_2 (如下圖) 11 埃及尼羅河之旅

$$V_2 = xBL$$



(d) 計算水面上高度 x

依下式

$$V_2 = V_0 - \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_w} V_1$$

得

$$x = H - \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_w} \frac{V_1}{BL}$$

即得沉箱吃水 D 如下

$$D = H - x = \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_w} \frac{V_1}{BL}$$

(2) 浮心 C 位置

底面上至浮心位置

$$\overline{TC} = \frac{1}{2} D$$

(3) 重心 G 位置

(a) 底面上至各構材重心位置如下

① 橫側壁 $g_1 = t_s + (H - t_s)/2$

② 縱側壁 $g_2 = t_s + (H - t_s)/2$

③ 橫隔牆 $g_3 = t_s + (H - t_s)/2$ 埃及尼羅河之旅

④ 縱隔牆 $g_4 = t_s + (H - t_s)/2$

⑤ 底版 $g_5 = t_s/2$

⑥ 水平偶緣 $g_6 = t_s + t_e^2 * 2/3$

⑦ 垂直偶緣 $g_7 = t_s + (H - t_s)/2$

(b) 各構材對底面的力矩 m_i

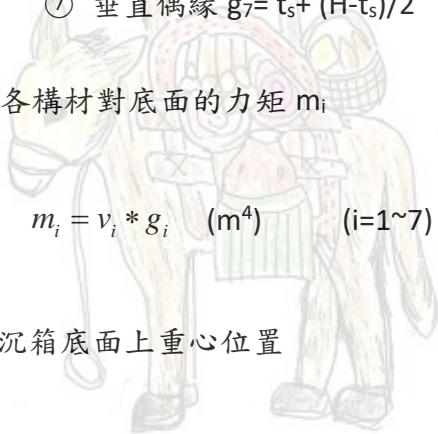
$$m_i = v_i * g_i \quad (m^4) \quad (i=1 \sim 7)$$

(c) 沉箱底面上重心位置

$$\overline{TG} = \frac{\sum m_i}{V_1}$$



載滿珠寶的駱駝



阿拉丁神燈

(4) 沉箱浮遊時安定度

如上圖所示

M=定傾中心

G=重心

C=浮心

θ =傾斜角

V=沉箱沒水部份體積

I=吃水線斷面對縱軸的斷面2次力矩

v=傾斜時變位沒水部份體積

S=相當於v體積水重量的力引起力矩的力臂

GN=復原力矩的力臂

(a) 定傾中心

$$\overline{MC} = \frac{I}{V} = \frac{B^3 L}{12 DBL} = \frac{B^2}{12D}$$

即

$$\overline{MG} = \overline{MC} - \overline{GC} = \overline{MC} - (\overline{TG} - \overline{TC})$$

若 $\overline{MG} > 0$ 表示安定。2011 埃及尼羅河之旅

(b) 小傾斜復原力矩($\theta \leq 5^\circ$)

$$GN = MG \sin \theta$$

$$\text{復原力矩} = \overline{GN} * W = \overline{GN} * \gamma_{cr} * V_1$$

(c) 大傾斜復原力矩($\theta > 5^\circ$)

$$v = \frac{1}{2} \frac{B}{2} \frac{B}{2} \tan \theta L$$

$$S = \frac{\frac{B}{2}}{\sin \theta} \frac{\frac{2}{3} \frac{B}{2}}{2} = \frac{2}{3} \frac{B}{\sin \theta}$$

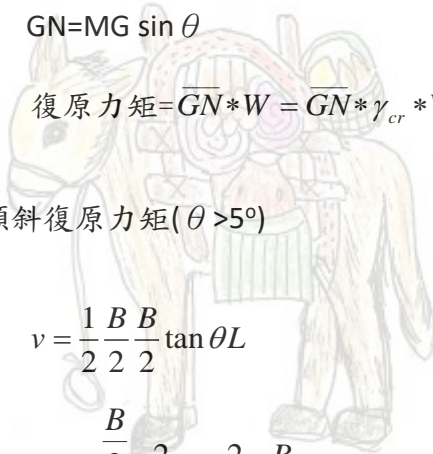
$$\overline{CQ} = \frac{vS}{V}$$

$$\overline{CP} = \overline{GP} \sin \theta$$

$$\overline{GN} = \overline{CQ} - \overline{CP}$$



載滿珠寶的駱駝



載滿寶品的馬



阿拉丁神燈

$$\text{復原力矩} = \overline{GN} * W = \overline{GN} * \gamma_{cr} * V_1$$

復原力矩越大表示沉箱浮遊時越安定。

2. 各構材強度計算

(1) 側壁及底版

(a) 外力及其引起彎矩及剪力



側壁

底版

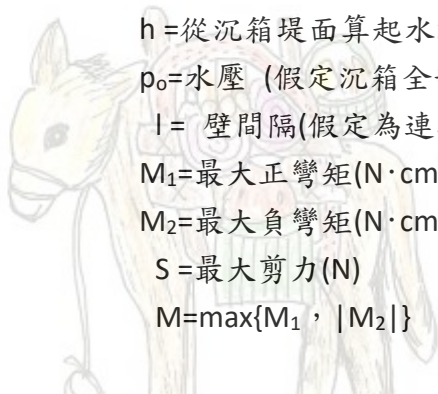
$$M_2 = -\frac{p_o l^2}{10}$$

2011 埃及尼羅河之旅

$$S = \frac{p_o l}{2}$$



載滿珠寶的駱駝



h = 從沉箱堤面算起水深(m)

p_o = 水壓 (假定沉箱全部沒入水中, N/m^2)

l = 壁間隔(假定為連續版時的間距, m)

M_1 = 最大正彎矩($N \cdot cm$)

M_2 = 最大負彎矩($N \cdot cm$)

S = 最大剪力(N)

$M = \max\{M_1, |M_2|\}$



阿拉丁神燈

底版視為堤寬方向受支撐的連續版, 作用於底版外力為水壓減去底版自重, 但為安全起見, 通常不考慮底版自重。

載滿貨品的驢子

(b) 決定斷面

σ_c = 混凝土容許壓縮應力度

σ_s = 鋼筋容許拉張應力度

n = 鋼筋揚氏係數/混凝土揚氏係數, 假定為 5

b=版斷面單度寬=100cm

d=版壓縮側表面至拉張鋼筋斷面圖心的距離(版的有效高度)

d'=版壓縮側表面至壓縮鋼筋斷面圖心的距離(通常 5~10cm)

e=鋼筋保護層

t=版厚度 d+e

A_s=拉張鋼筋斷面積

A'_s=壓縮鋼筋斷面積

k=壓縮側表面至中立軸距離/有效高度 d

p=拉張鋼筋斷面積/混凝土斷面積

p'=壓縮鋼筋斷面積/混凝土斷面積

假定 σ_c , σ_s , n, A'_s/A_s, d'/d 值, 依下式決定版的有效高度 d

$$d = \frac{\sqrt{\frac{M}{b}}}{\sqrt{\frac{\sigma_c k}{2} \left[\left(1 - \frac{k}{3}\right) + \frac{A'_s \left(k - \frac{d'}{d}\right) \left(1 - \frac{d'}{d}\right)}{(1-k) - \frac{A'_s \left(k - \frac{d'}{d}\right)}{A_s \left(k - \frac{d'}{d}\right)}} \right]}}$$

$$k = \frac{n\sigma_c}{n\sigma_c + \sigma_s}$$

上式求得 d 為必要 d 值, 但實際上採用的值會加餘裕。

(c) 決定插入鋼筋

q = 拉張鋼筋的中心間隔

q' = 壓縮鋼筋的中心間隔

φ = 拉張鋼筋直徑

φ' = 壓縮鋼筋直徑

$$p = \frac{\frac{M}{bd^2} + \frac{\sigma_c k}{2} \left(\frac{k}{3} - \frac{d'}{d} \right)}{\sigma_s \left(1 - \frac{d'}{d} \right)}$$

$$p' = \frac{\frac{M}{bd^2} - \frac{\sigma_c k}{2} \left(1 - \frac{k}{3}\right)}{\frac{n\sigma_c}{k} \left(1 - \frac{d'}{d}\right) \left(k - \frac{d'}{d}\right)}$$

$$A_s = pbd$$

$$A'_s = p'bd$$

依上式求得 p, p', A_s, A'_s 與實際採用的 p, p', A_s, A'_s 會有些差異。當 p' 為負值表示不需要配置鋼筋，但為了進水、設置時安全考量，通常採用 25% A'_s 的 A_s 。

(d) 驗算應力

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$p' = \frac{A'_s}{bd}$$

2011 埃及尼羅河之旅

$$k = \sqrt{2n \left(p + \frac{p'd'}{d} \right) + n^2 (p + p')^2} - n(p + p')$$

$$j = \frac{k^2 \left(1 - \frac{k}{3}\right) + 2np' \left(k - \frac{d'}{d}\right) \left(1 - \frac{d'}{d}\right)}{k^2 + 2np' \left(k - \frac{d'}{d}\right)}$$

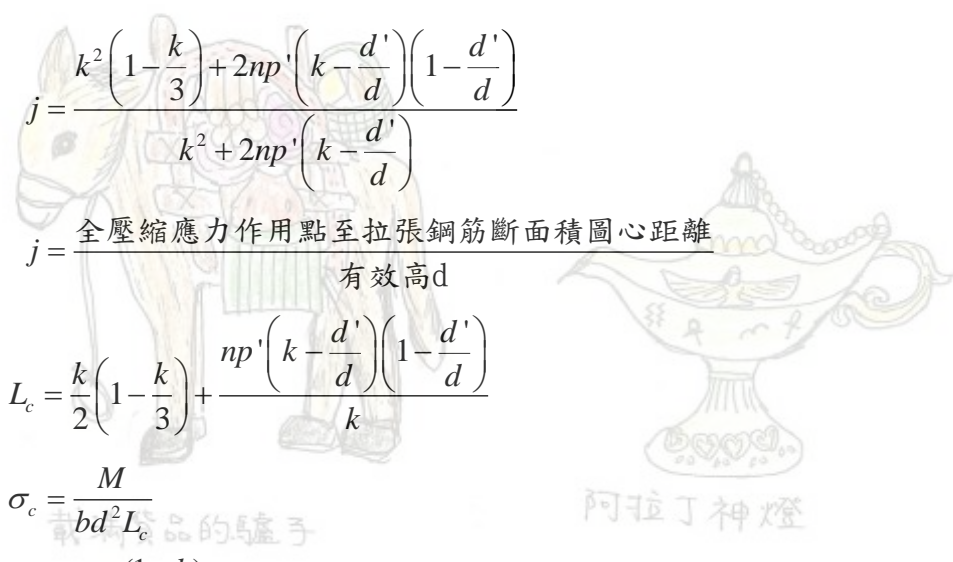
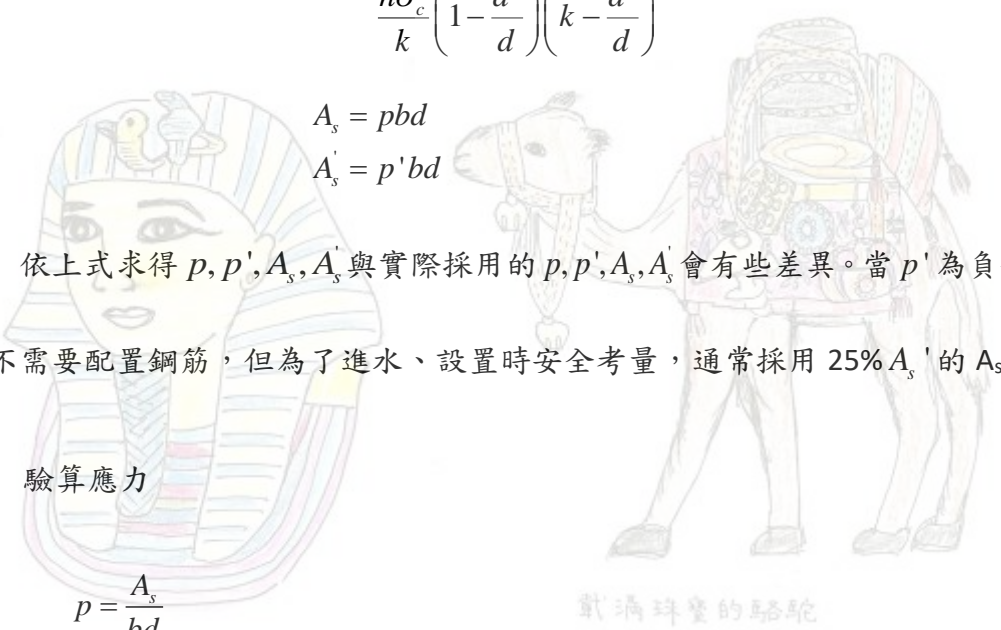
$$j = \frac{\text{全壓縮應力作用點至拉張鋼筋斷面積圖心距離}}{\text{有效高}d}$$

$$L_c = \frac{k}{2} \left(1 - \frac{k}{3}\right) + \frac{np' \left(k - \frac{d'}{d}\right) \left(1 - \frac{d'}{d}\right)}{k}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{bd^2 L_c}$$

$$\sigma_s = \frac{n\sigma_c(1-k)}{k}$$

$$\tau = \frac{S}{bjd}$$



針對實際採用的 d , A_s , A_s' 利用上式驗算 σ_c , σ_s , τ (混凝土剪力), 若在容許應力度內, 即為安全經濟斷面。

(2) 隔牆

(a) 斷面及鋼筋量

假定斷面及鋼筋量, 驗算視為柱時的容許載重及水壓。

(b) 視為柱的容許應力

σ_c =混凝土容許壓縮應力度

d_o =混凝土有效厚度= $t-2e$

A_{co} =混凝土有效斷面積

A_{so} =軸方向鋼筋總斷面積

h =柱高

i =支柱全斷面的最小回轉半徑

$$= \sqrt{\frac{\text{最小斷面2次力矩}}{\text{柱斷面積}}} = \sqrt{\frac{t^3 b}{12 t b}} = \frac{t}{3.464}$$

h/i =細長比

$h/i > 45$ 長柱

$h/i < 45$ 短柱

P_o =柱中心軸方向載重= $p_o l$

$P_1 = \sigma_o (A_{co} + 15 A_{so})$ =短柱容許中心軸方向載重

$P_2 = P_1 (1.45 - 0.01 h/i)$ =長柱容許中心軸方向載重

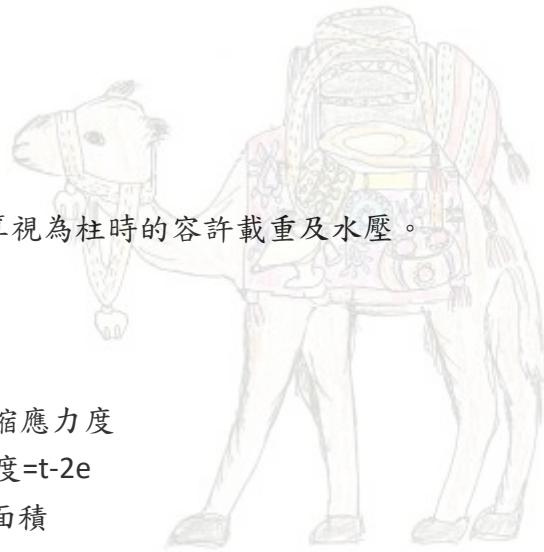
計算 P_o , P_1 , P_2 判定是否安全

(c) 驗證版受水壓引起彎矩

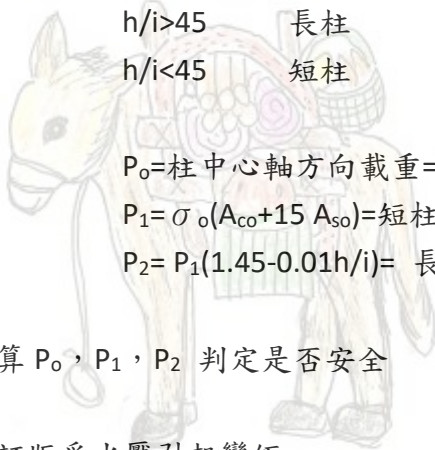
載滿貨品的驢子

$$p = p' = \frac{A_s}{bd}$$

$$k = \sqrt{2n \left(p + p \frac{d'}{d} \right) + 4n^2 p^2 - 2np}$$



載滿珠寶的駱駝

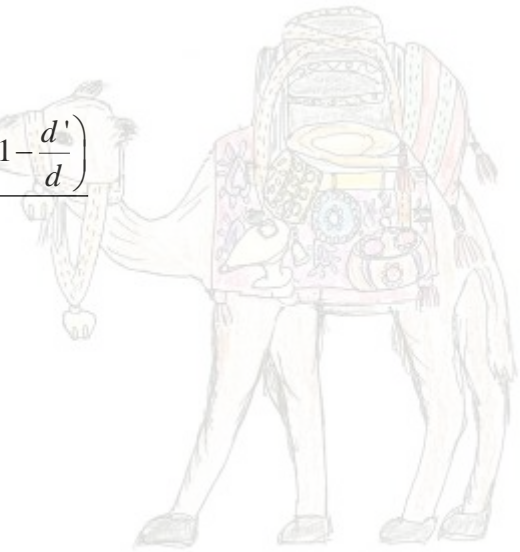
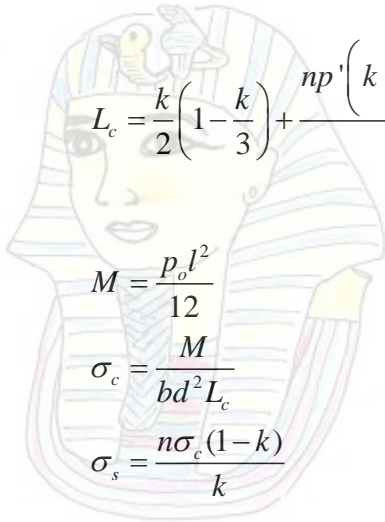


載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈

$$j = \frac{k^2 \left(1 - \frac{k}{3}\right) + 2np \left(k - \frac{d'}{d}\right) \left(1 - \frac{d'}{d}\right)}{k^2 + 2np \left(k - \frac{d'}{d}\right)}$$



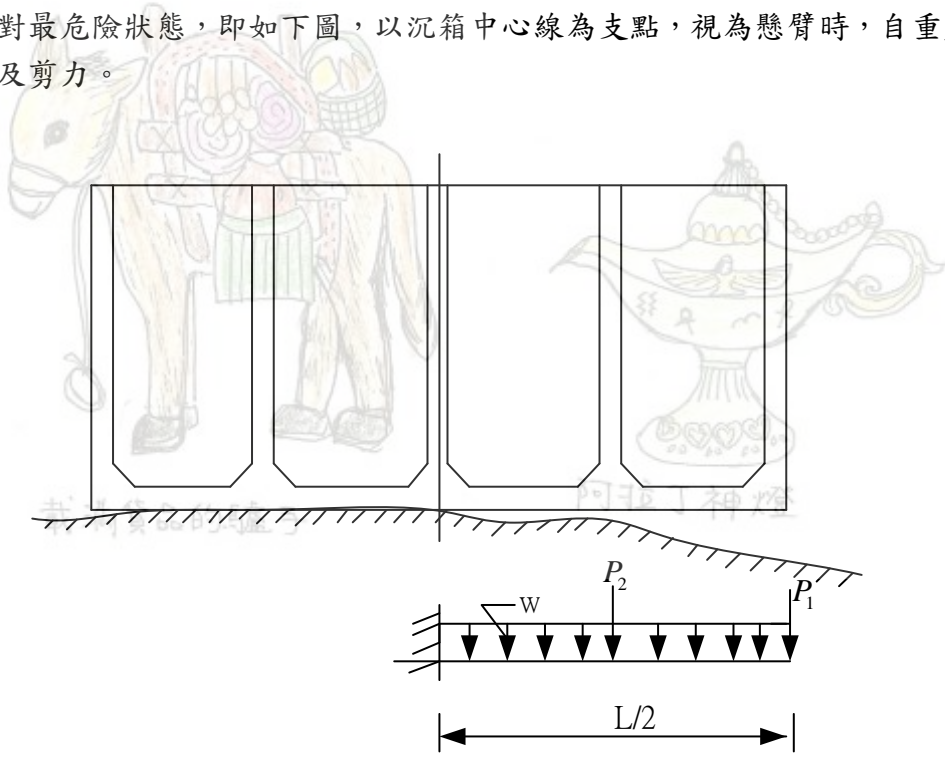
載滿珠寶的駱駝

水壓致使隔牆產生彎矩為暫時性，大於平時 $\sigma_c/1.5$ 倍即可

3. 視沉箱為一體時的強度計算 埃及尼羅河之旅

(a) 應力計算

針對最危險狀態，即如下圖，以沉箱中心線為支點，視為懸臂時，自重產生的彎矩及剪力。



① 集中載重 P_1

包含：

橫側壁、橫隅緣、垂直隅緣

② 集中載重 P_2

包含：

橫側壁、橫隅緣、垂直隅緣

③ 等均勻載重 w (1 公尺寬)

包含：

底版、縱側壁、縱隔牆、縱隅緣

最大彎矩 M_{max}

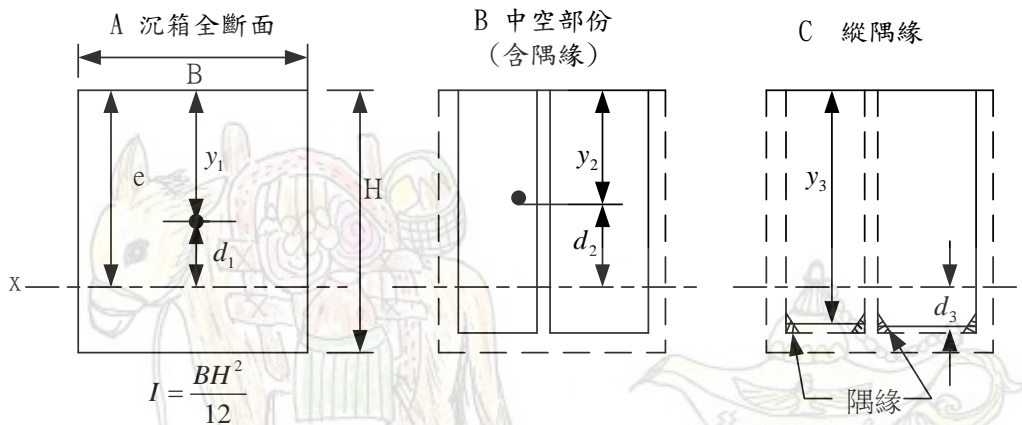
$$M_{max} = P_1 * L / 2 + P_2 * L / 4 + w l^2 / 2$$



載滿珠寶的駱駝

(b) 計算斷面係數

2011 埃及尼羅河之旅



對通過沉箱橫斷面圖心，求斷面 2 次力矩，除以圖心至堤面距離，即可得斷面係數 Z 。計算方法為

- ① 沉箱全斷面 A
- ② 沉箱中空部份斷面 B
- ③ 隅緣部份 C

①-②+③ 即可求得。

阿拉丁神燈

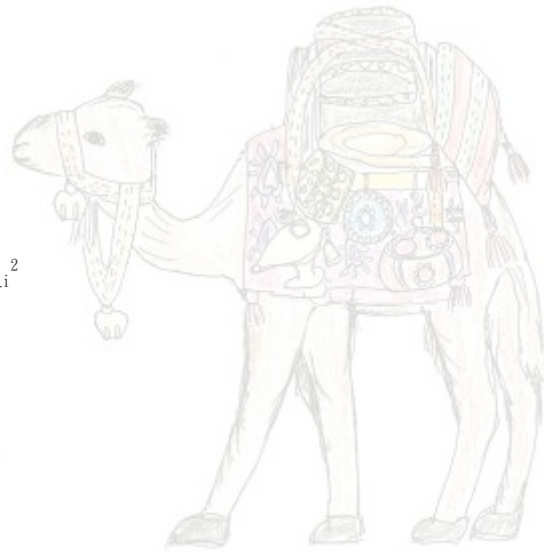
上述 3 部份個別計算步驟為

- ① 斷面積 A_i
- ② 圖心位置 y_i
- ③ 斷面 1 次力矩 Q_i
- ④ 圖心至 x 軸距離 $d_i=e-y_i$
- ⑤ 斷面 2 次力矩 I_i
- ⑥ 軸移動引起增量 $=A_i d_i^2$
- ⑦ 對 x 軸的斷面 2 次力矩 $I_i+ A_i d_i^2$

$$\textcircled{8} \quad e = \frac{\sum A_i y_i}{\sum Q_i}$$

- ⑨ 斷面係數 $z=I/e$

(c) 判定



載滿珠寶的駱駝

$$\text{緣應力 } \sigma = \frac{M_{\max}}{z}$$

2011 埃及尼羅河之旅

- ① 判斷單靠混凝土能否承擔拉張應力
- ② 判斷鋼筋應力度安全與否。



載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈