

## 海上地盤改良工搗固施工法

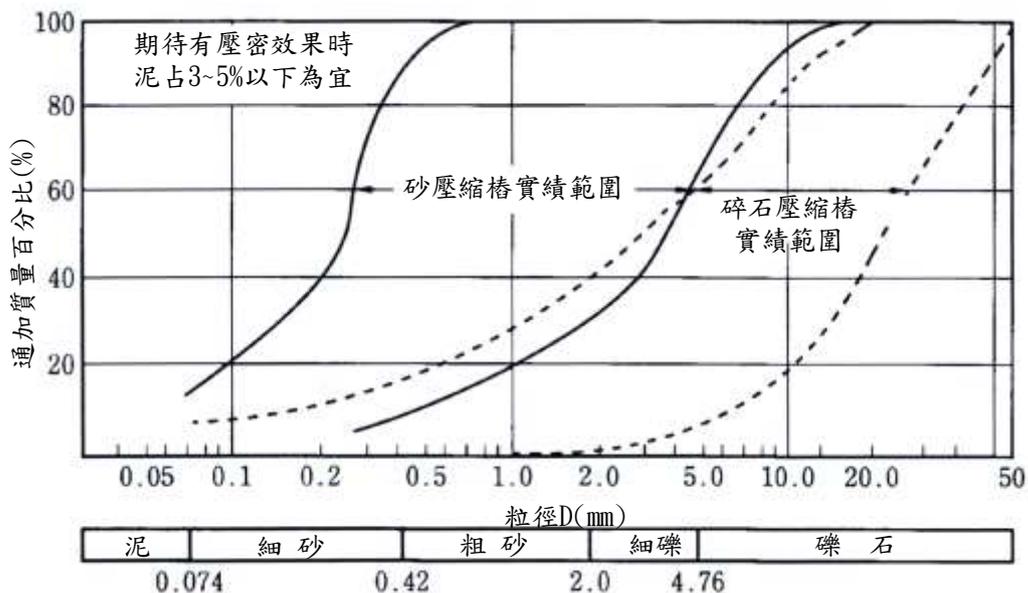
### 1. 搗固(砂壓樁)法

#### 1) 設計調查

設計砂壓樁法應作下表所示各項調查調查。

調查項目		調查或整理內容
原地盤 地質調查	土層結構	地質柱狀圖、土層斷面圖、地下水位、水深
	黏性土 有機質土	潤濕單位體積重量、黏著力、黏著力增加係數、壓密降伏應力、壓密係數、c-log p 曲線、體積壓縮係數、壓縮指數、粒徑組成(特別是細料含有率)等
	砂質土	N 值、粒徑組成(特別是細料含有率)
使用材料調查		粒徑組成、可供應量及價格、供應路線
施工區域 條件調查	陸上工程	交通狀況、有無鄰近結構物、有無地中結構物、施工區域周邊土地利用狀況、施工區的高度限制(電線等)
	海上工程	有無鄰近結構物(護岸、碼頭、防波堤等)、鄰近陸上設施、施工區的高度限制(機場等)、有無養殖場、海底地盤有無有害物質

#### 2) 砂壓樁材料粒徑實績範圍



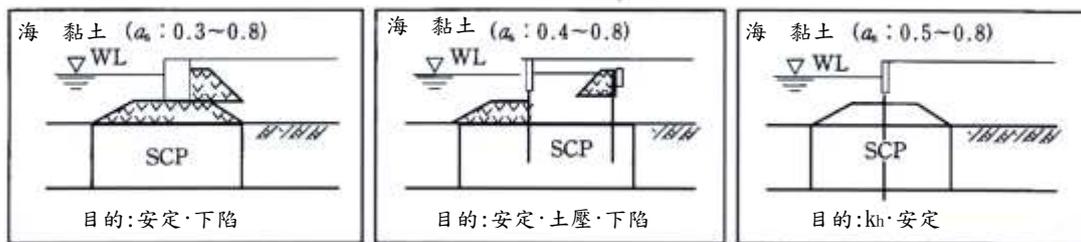
砂壓樁少使用材料為 0.074mm 以下細料，施工不會使用土粒子細粒化的材料。上圖為砂壓樁材料粒徑實績範圍，細料占 3~5%，最大粒徑為 40~50mm 者為宜。

### 3) 砂質土砂壓樁法設計

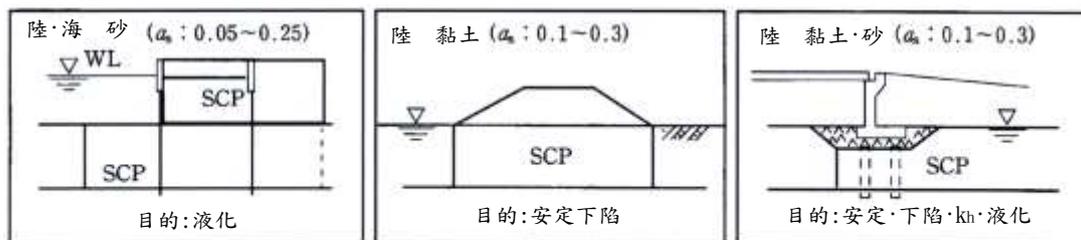
#### (1) 換置率與砂樁間隔

換置率( $a_s$ )是假定原地盤為 1 時，砂樁的體積比例，表示改良程度的參數。

通常砂質土或陸上黏性土的改良約在 30% 以下，海底黏性土在 30~80% 左右為多。其原因為設計、施工管理容易、工期短，若工期容許，使用低換置率 (30% 以下) 會比較經濟。換置率隨地質、施工地點而異，一般砂質土或陸上黏性土換置率為 0.3 以下，海上黏性土為 0.3~0.8。港灣設施適用本施工法者，歸類如下圖。



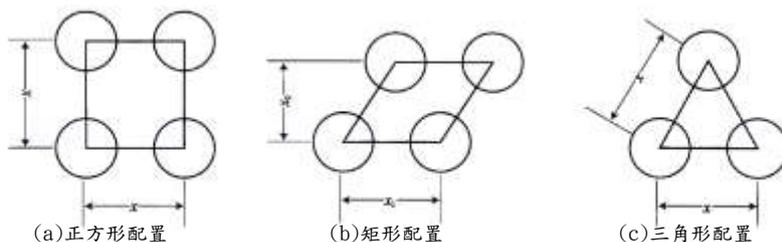
(a)重力式護岸·防波堤 (b)拉桿式板樁·雙重板樁·筒式護岸 (c)自立式板樁護岸·防波堤



(d)板樁前背面·筒平填 (e)填土 (f)橋基·橋腳·背面側填土

海:表示海上工程 陸:表示陸上工程 kh:橫方向地盤反作用力係數

砂樁配置有如下圖所示正方形、矩形及三角形配置等



(a)正方形配置

(b)矩形配置

(c)三角形配置

換置率  $a_s$  以下式表示

正方形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2}$

矩形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x_1 x_2}$

三角形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{A_s}{x^2}$

$A_s$  : 砂樁斷面積

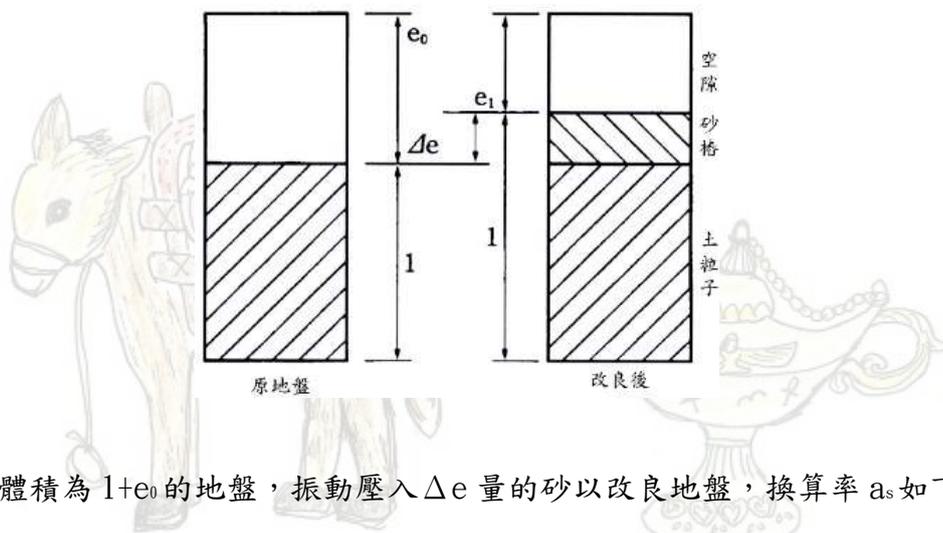
$A$  : 1 根砂樁分擔面積

$x, x_1, x_2$  : 砂樁間隔

陸上工程標準砂樁直徑為 70cm，海上工程黏性土改良為 160 或 200cm，砂質土為 80~120cm。

(2) 設計法

砂質土砂壓樁法設計基本概念為如下圖所示



對體積為  $1+e_0$  的地盤，振動壓入  $\Delta e$  量的砂以改良地盤，換算率  $a_s$  如下

$$a_s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (b)$$

$e_1$ : 改良後地盤的空隙比

$e_0$ : 原地盤的空隙比

對砂質土地盤共有下列 3 種設計法，首先從原地盤地質調查取得原地盤 N 值  $N_0$ ，依上部工的條件取得改良後目標 N 值  $N_1$ 。

(a) 方法 A(利用過去業績良好的簡易圖表設計法)

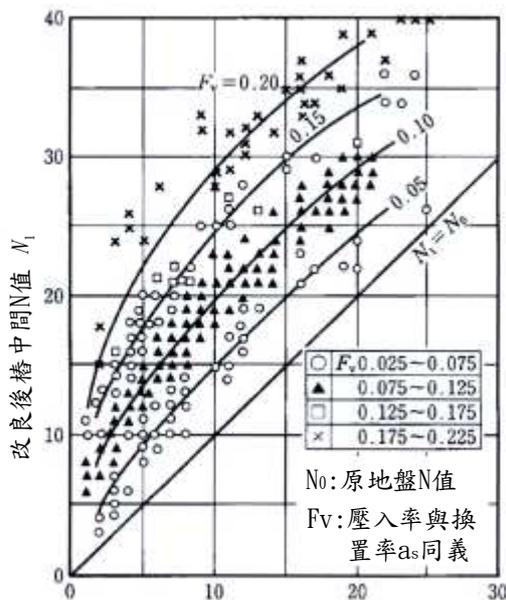
① 以改良後樁中間 N 值  $N_1$  作為目標 N 值，依圖(a)求出必要換置率  $a_s$ 。

② 設定目標 N 值為

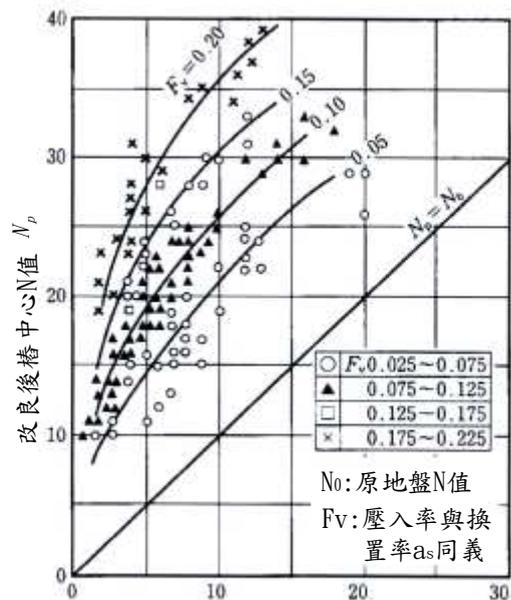
$$N = (1 - a_s)N_1 + a_s N_p$$

$N_p$  為改良後樁中心 N 值，從圖(a)及圖(b)返復計算可求得  $a_s$ 。

③ 由(a)式求出間隔  $x$



(a) 原地盤 N 值  $N_0$  與樁間  $N_1$  值的關係

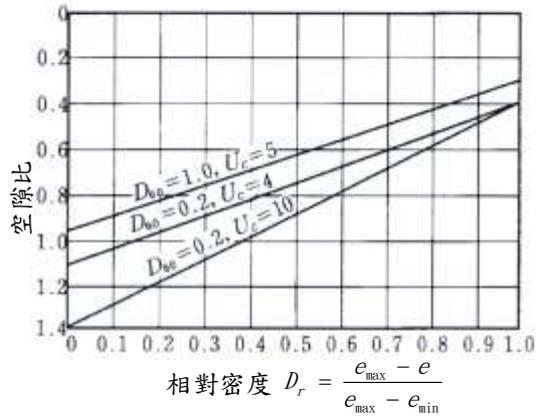
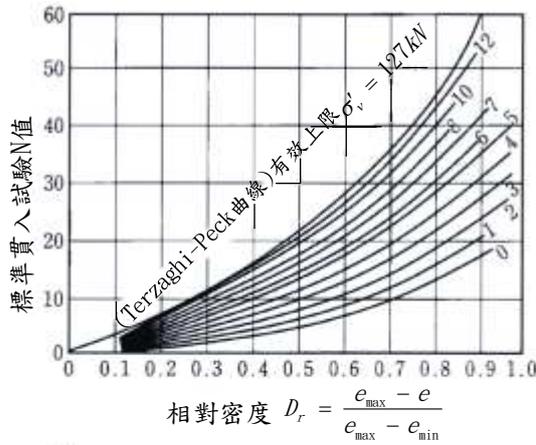


(b) 原地盤 N 值  $N_0$  與樁中心  $N_p$  值的關係

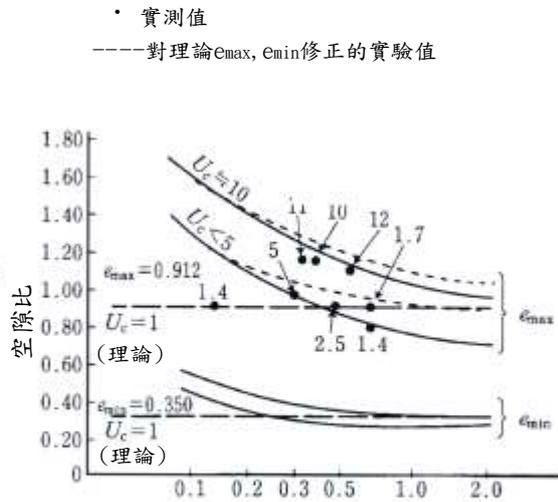
載滿貨品的驢子

阿拉丁神燈

(b) 方法 B(利用 N-D<sub>r</sub>-e 間關係的設計法)



(a) N-D<sub>r</sub>-e 圖



D<sub>60</sub>: 60%粒徑  
D<sub>p</sub>: 頻率最大粒徑

(b) 粒徑·粒度與 e<sub>max</sub>, e<sub>min</sub> 關係

- ① 由原地盤粒徑(D<sub>60</sub> 或 D<sub>p</sub>)依下圖(b)求得 e<sub>max</sub>, e<sub>min</sub>。
- ② 在圖(a)下圖中, 對 e<sub>max</sub>, e<sub>min</sub> 繪相對密度 D<sub>r</sub> 與空隙比 e 的直線。
- ③ 利用圖(a)上圖中 N-拘束壓-e 的關係, 讀取因上載壓引起 N<sub>0</sub>, N<sub>1</sub> 的變化引起相對 e 變化量 Δe(e<sub>0</sub>-e<sub>1</sub>), 再由下式計算 a<sub>s</sub>。

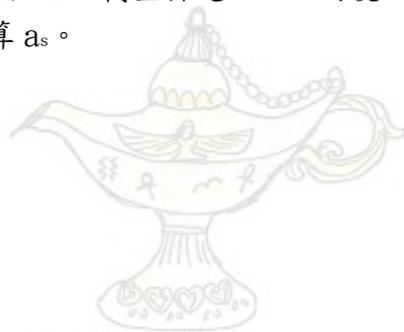
$$a_s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$$

- ④ 利用下式, 由 a<sub>s</sub> 計算間隔 x

正方形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2}$

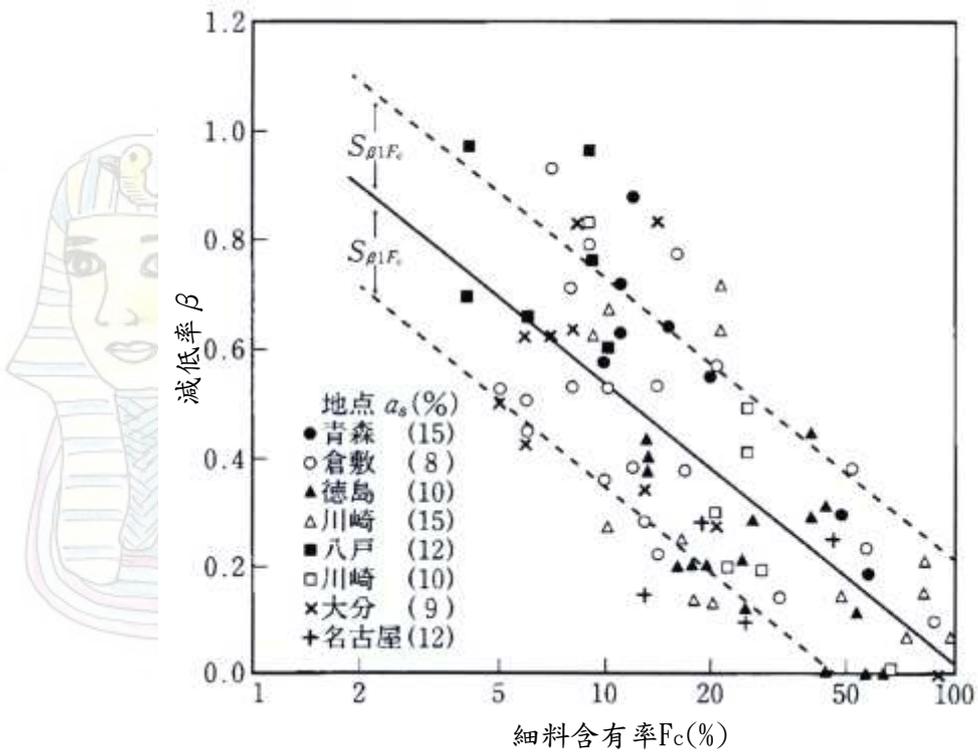
矩形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x_1 x_2}$

三角形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{A_s}{x^2}$



阿拉丁神燈

(c) 方法 C(考量細料含有率的設計法)



2011 埃及尼羅河之旅

① 利用細料含有率  $F_c(\%)$ ，依下式計算  $e_{\max}$ ， $e_{\min}$ 。

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0$$

$$e_{\min} = 0.008F_c + 0.6$$

② 由原地盤  $N$  值及拘束壓  $P'_{r0}$  ( $\text{kN/m}^2$ )，依下式求得相對密度  $D_{r0}$  及  $e_0$ 。

$$D_{r0} = 21\sqrt{100N_0 / (70 + P'_{r0})}$$

$$e_0 = e_{\max} - \frac{D_{r0}}{100}(e_{\max} - e_{\min})$$

載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈

③ 依下式計算，因細料引起的增加  $N$  值減低率  $\beta'$

$$\beta' = 1.05 - 0.51 \log F_c$$

④ 考量減低率  $\beta'$ ，計算無細料時的 N 值  $N'_1$

$$N'_1 = N_0 + (N_1 - N_0) / \beta'$$

⑤  $N_0$  中代入  $N'_1$ ，由②計算  $e_1$

⑥ 由  $e_0, e_1$  依下式計算  $a_s$

$$a_s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$$

⑦ 依下式計算間隔  $x$

正方形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2}$

矩形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x_1 x_2}$

三角形  $a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{A_s}{x^2}$

#### 4) 黏性土砂壓樁法設計

利用砂壓樁法將黏性土地盤作改良的砂樁與黏性土地盤稱為複合地盤，其應力分擔比 ( $n = \sigma_s / \sigma_c$ ) 約為 2~6 左右。

##### ① 改良地盤剪應力強度

改良地盤為由砂樁與黏性土地盤構成的複合地盤，其剪斷抵抗至目前為止，大致有下列 4 種表示法

$$\tau = (1 - a_s) \left( c_0 + kz + \frac{\mu_c \Delta \sigma_z c}{pU} \right) + (\gamma_s z + \mu_s \Delta \sigma_z) a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta$$

$$\tau = (\gamma_m z + \Delta \sigma_z) \mu_s a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta$$

$$\tau = (\gamma_m z + \Delta \sigma_z) \tan \phi \cos^2 \theta$$

$$\tau = (1 - a_s) \left( c_0 + kz + \frac{\mu_c \Delta \sigma_z c}{pU} \right) + (\gamma_m z + \Delta \sigma_z) \mu_s a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta$$

- $\tau$  : 滑動線位置平均剪斷強度  
 $a_s$  : 砂樁的換置率  
 $c_0$  :  $z=0$  處黏性土黏著力  
 $k$  : 深度方向強度增加率  
 $z$  : 垂直座標(滑動線的深度)  
 $c_0 + kz$  :  $z$  深處黏著力  
 $\Delta\sigma_z$  : 滑動線處外力引起平均垂直應力增分  
 $n$  : 應力分擔比( $n=\sigma_s/\sigma_c$ , 黏性土地盤砂樁,  $n=3$ )  
 $\mu_c$  : 樁間黏土部份應力減低係數  $\mu_c = \frac{1}{1 + (n-1)a_s}$   
 $\mu_s$  : 砂樁部份的應力集中係數  $\mu_s = \frac{n}{1 + (n-1)a_s}$   
 $c/p$  : 原地盤黏性土強度增加係數  
 $\gamma_s$  : 砂樁單位體積重量(地下水面下為  $\gamma'_s$ )  
 $\gamma_c$  : 黏性土單位體積重量(地下水面下為  $\gamma'_c$ )  
 $\phi_s$  : 砂樁內內部摩擦角  
 $U$  : 樁間黏土平均壓密度  
 $\gamma_m$  : 平均單位體積重量  $\gamma_m = a_s\gamma_s + (1 - a_s)\gamma_c$   
 $\theta$  : 滑動線與水平面所呈角度  
 $\phi$  : 將高換置率改良地盤假定成均一地盤改良地盤時的假想內部摩擦角

## ② 圓弧滑動

設計港灣結構物時，砂壓樁法換置率以下列為標準

### ① 換置率 70%以上

檢討圓弧滑動時視為  $\phi=30^\circ$  的均一地盤，以下式檢討。

$$\tau = (\gamma'_s z + \sigma_z) \tan 30^\circ \cos^2 \theta$$

### ② 換置率 70%以下

檢討圓弧滑動時剪斷抵抗力以下式表示

$$\tau = (1 - a_s)c + (\gamma_m z + \sigma_z) \tan \phi_m \cos^2 \theta$$

改良地盤內，原地盤地質參數變化很大或變更換置率時，不將改良地盤視為均一地盤，而是分成多層設定其地質參數，安全率應訂為 1.3。

### ③ 承載力

作為複合地盤的改良地盤容許承載力，可依下式計算。

$$q_A = q_{As} + q_{Ac} + \gamma_2 D$$

$q_A$  : 改良地盤容許承載力

$q_{As}$  : 砂樁容許承載力  $q_{As} = 1 / F_s a_s (\beta \gamma_s B N_\gamma + \gamma_2 D N_q)$

$q_{Ac}$  : 原地盤容許承載力  $q_{Ac} = 1 / F_s c (1 - a_s)$

$\gamma_2$  : 基礎底面上方土單位體積重量

$\gamma_s$  : 砂樁單位體積重量

$D$  : 基礎層高度

$c$  : 砂樁間黏性土的黏著力

$\beta$  : 基礎形狀係數

$a_s$  : 換置率 2011 埃及尼羅河之旅

$F_s$  : 安全率 (2.5 以上)

### ④ 壓密

改良地盤下陷量  $S$ ，可以無處理土壤試驗結果的下陷量  $S_0$  乘以下陷減低係數  $\beta$ ，以下式計算

$$S = S_0 \beta$$

低換置率 ( $a_s < 0.5$ ) 時

$$\beta = \mu_c = \frac{1}{1 + (n - 1)a_s}$$

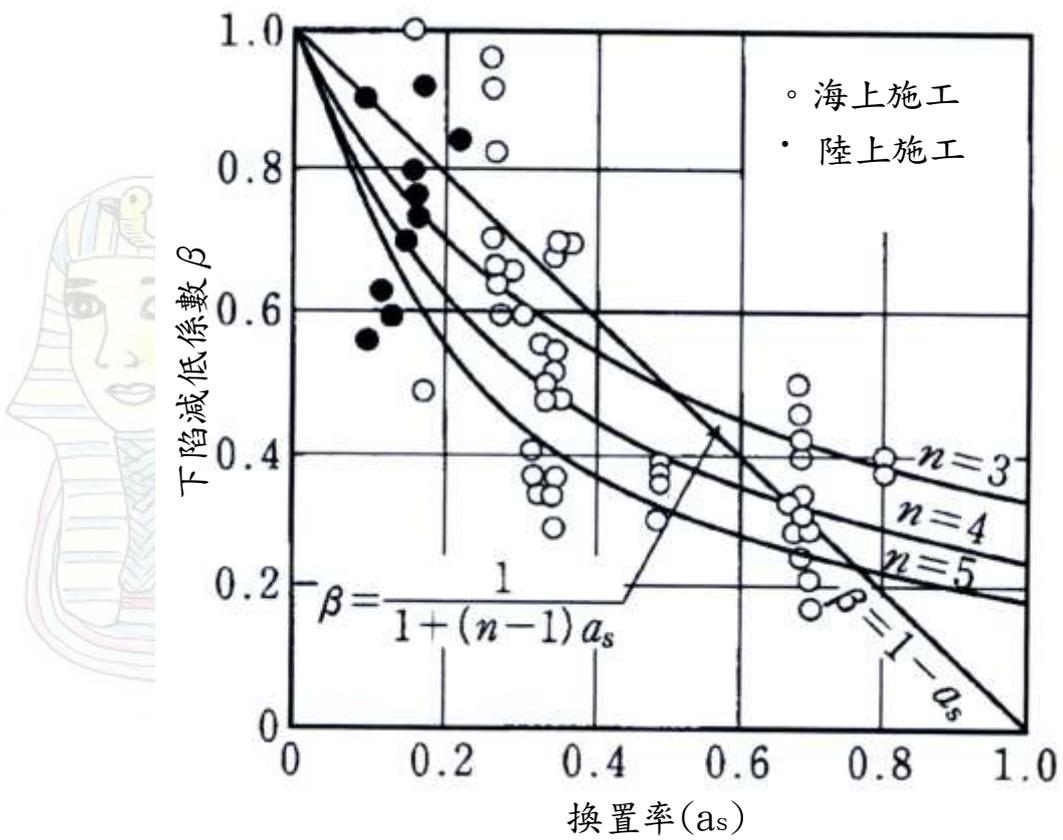
高換置率 ( $a_s \geq 0.5$ ) 時

$$\beta = 1 - a_s$$

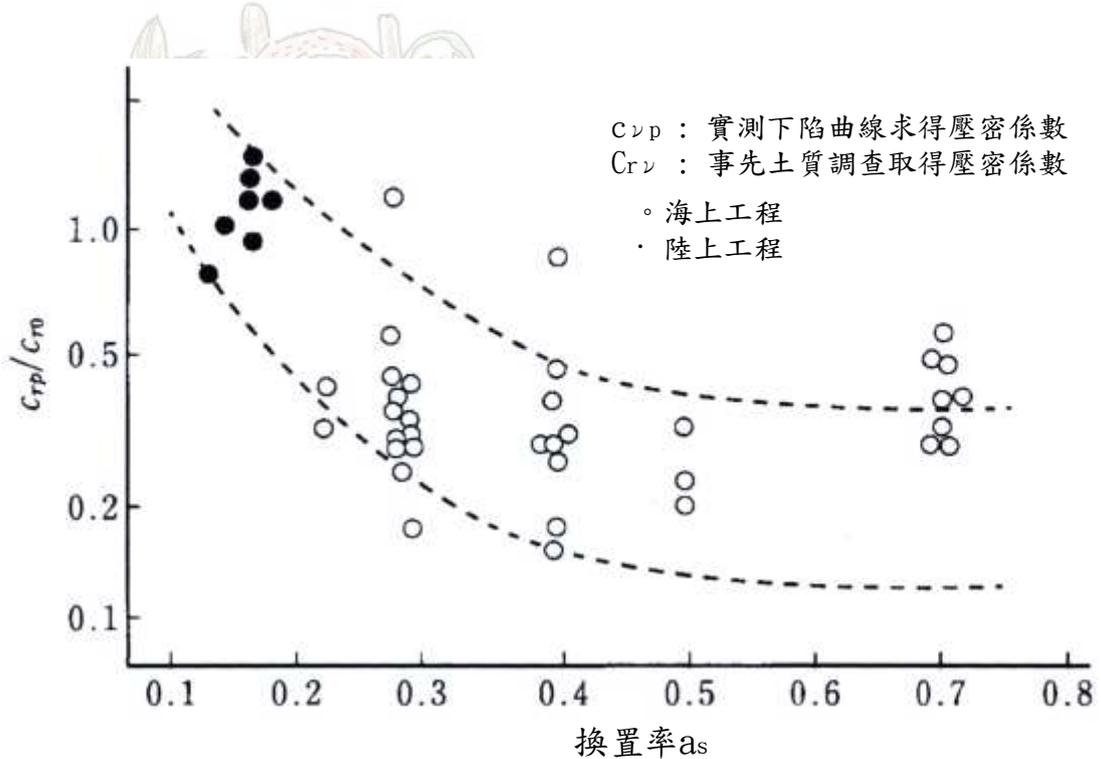
載滿貨品的驢子

阿拉丁神燈

根據現場資料整理，得  $\beta$  與換置率的關係如下圖。



海上施工時，由於實際壓密時間比計算值慢 2~10 倍(改良率越高越顯著，如下圖)，故施工後放置 3 個月左右為宜。



⑤ 隆起土

地盤改良會導致周邊地盤隆起，應檢討下列事項。

① 對周邊地盤影響

砂壓樁法係利用振動錘將砂壓入地盤中，應注意施工中的振動、噪音及周邊地盤位移等影響。

② 隆起量

因砂壓樁法的砂樁打設可能會造成地盤面隆起，設計及施工管理宜加注意。海底面為傾斜地盤，中小規模施工引起地盤隆起量，根據過去現場調查，地盤改良範圍的陸側高度  $H_u$  及海側高度  $H_d$ ，可依下式估算

$$H_u = a_s [2.8 + Z_0(0.36a_s + 0.11)] \times 0.15$$

$$H_d = a_s [2.8 + Z_0(0.36a_s + 0.11)] \times 0.65$$

2011 埃及尼羅河之旅

$Z_0$  : 平均樁長(m)

隆起量可以下列方法估算

$$V' = \mu V$$

$V'$  : 隆起土量( $m^3$ )

$V$  : 設計投入砂量( $m^3$ )

$\mu$  : 隆起率，可依下列提案計算

$$\mu = 0.316a_s L + 0.036q_u + 0.700$$

$$\mu = 2.803 \frac{1}{L} + 0.356a_s + 0.112$$

$L$  : 平均樁長

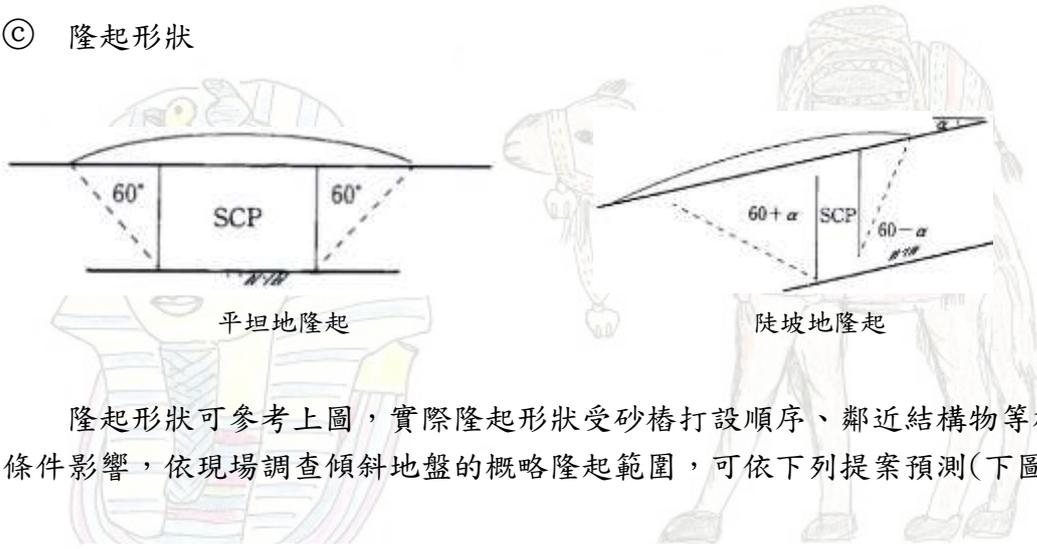
$q_u$  :  $L/3$  處的單軸壓縮強度

最近由於水深、砂樁直徑等大型化，有下列提案。

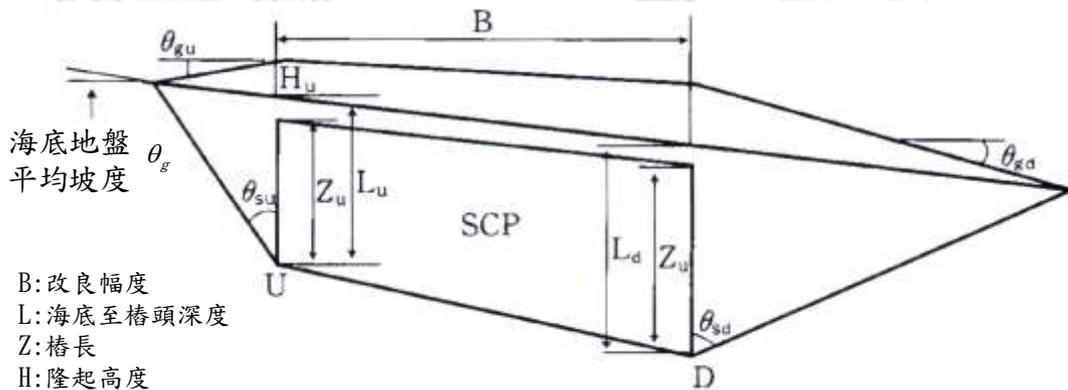
砂樁徑 1.6m  $\mu = \frac{1.999}{L} + 0.678a_s + 0.053$

砂樁徑 2.0m  $\mu = \frac{2.117}{L} + 0.718a_s + 0.056$

© 隆起形狀



隆起形狀可參考上圖，實際隆起形狀受砂樁打設順序、鄰近結構物等施工條件影響，依現場調查傾斜地盤的概略隆起範圍，可依下列提案預測(下圖)。



- B: 改良幅度
- L: 海底至樁頭深度
- Z: 樁長
- H: 隆起高度
- $\theta_g$ : 海底地盤傾斜角度
- $\theta$ : 限制隆起範圍角度

i) 防波堤等寬度比較狹的地盤改良

陸側  $\theta_{su} = 45^\circ - \theta_R$

海側  $\theta_{su} = 45^\circ + \theta_R$

或安息角以下角度。

ii) 鄰近既有改良工地時，參照其拘束條件。

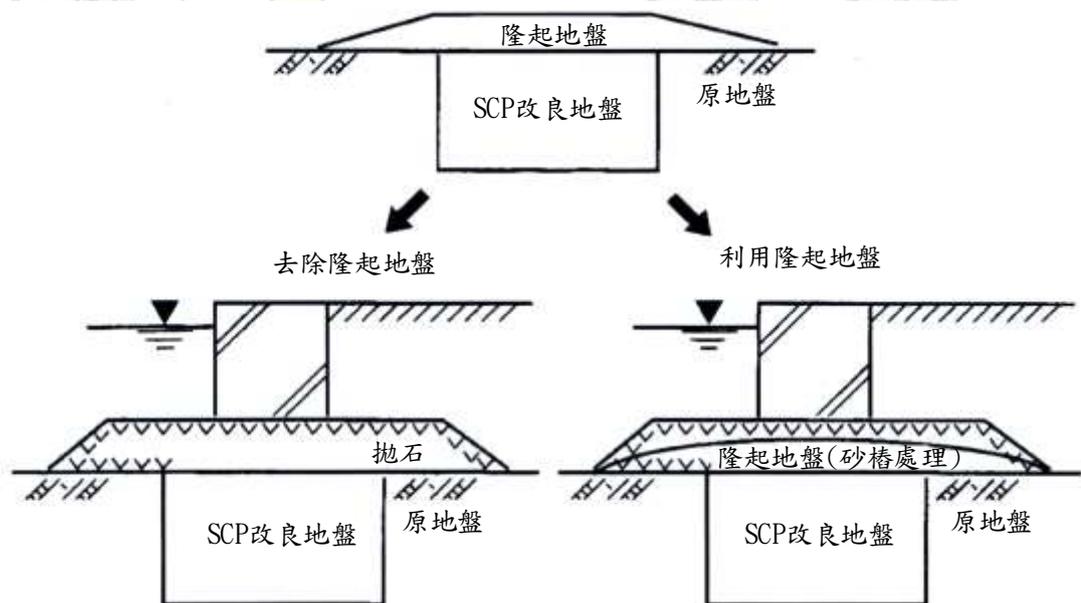
iii) 如上圖，視隆起形狀為，由 i) 決定的角度、兩側隆起高度、隆起土底面作為底邊及改良地盤寬作為上邊的梯形。

#### ④ 隆起土性質

依現場調查，地表部強度小時，隆起土的土性與原地盤地表部的土性大致相同，可將隆起土視為地盤的一部份。地表部強度強時( $q_u > 19.6 \text{kPa}$ )，隆起土的強度稍弱。

#### ⑤ 處理方法

最容易處理方法為挖除，但必須注意事後處理及對周邊海域的污染問題。另外可如下圖，經過搗固、壓密等處理後加以利用。

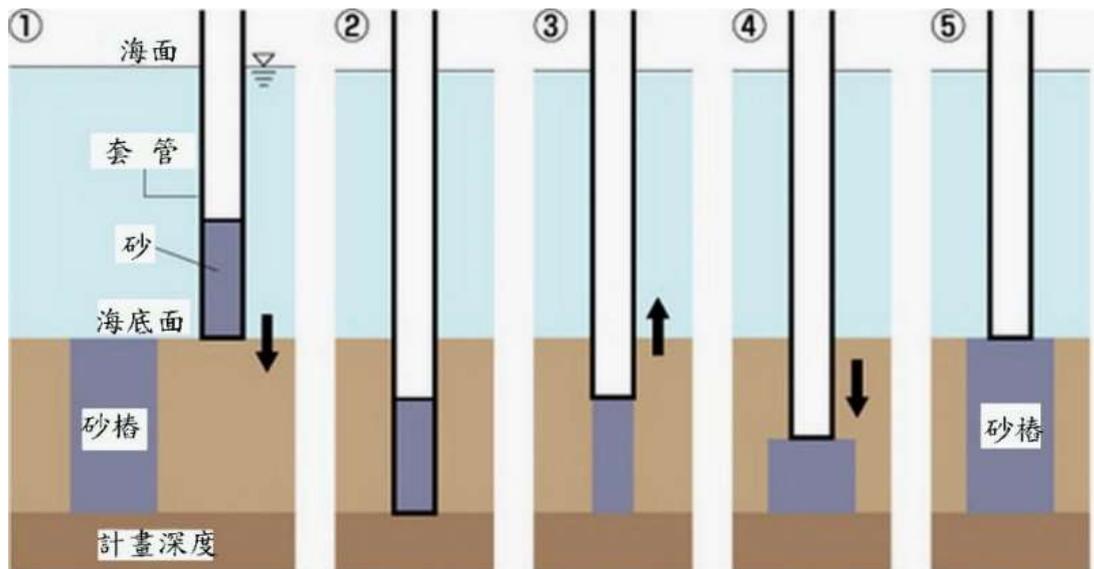


## 2. 施工及施工管理

### 1) 施工順序

海上工程是使用砂壓縮樁船進行壓密排水，施工順序如下圖

- ① 將外套管(casing)固定於預定位置、投入一定量的砂
- ② 利用起振機將外套管貫入計畫深度
- ③ 將外套管提昇至規定高度並將外套管內的砂排出
- ④ 打擊外套管搗固排出的砂及周邊地盤
- ⑤ 重複③、④步驟至砂樁達預定高度



摘譯自：<http://www.umeshunkyo.or.jp/108/prom/236/page.html>

## 2) 施工時應注意事項

- ① 砂樁使用砂品質
- ② 砂樁貫入深度及投入設計砂量
- ③ 砂樁切割
- ④ 不攪動原地盤

2011 埃及尼羅河之旅

與砂樁排水法相同，使用透水性佳、粒徑分布佳的粗砂，周邊黏土粒子不可混入砂樁內。使用自動計測裝置測定記錄打設過程，調整空氣壓、套管上下速度，盡可能不攪動原地盤，設置監測鑽探確認地盤強度。



回海洋工作站

載滿貨品的驢子



回港灣工程施工

阿拉丁神燈