

搗固工(砂壓樁法)

砂壓樁法(sand compaction method)是在地中造成大口徑搗實砂樁達到改良地盤的施工法稱為搗固工，海上施工範圍可達水面下 50~60 公尺。施工法特徵為：

① 施工地盤

砂壓樁法具有搗固、補強及壓密排水效果，適用於砂質地盤、黏土地盤、有機質地盤、岩碎地盤、火山灰堆積地盤等，幾乎可適用全部地盤。

② 工期

砂壓樁法兼具搗固及壓密排水效果，施工期短，實施高換置率時，殘留下陷小。

③ 地盤強度

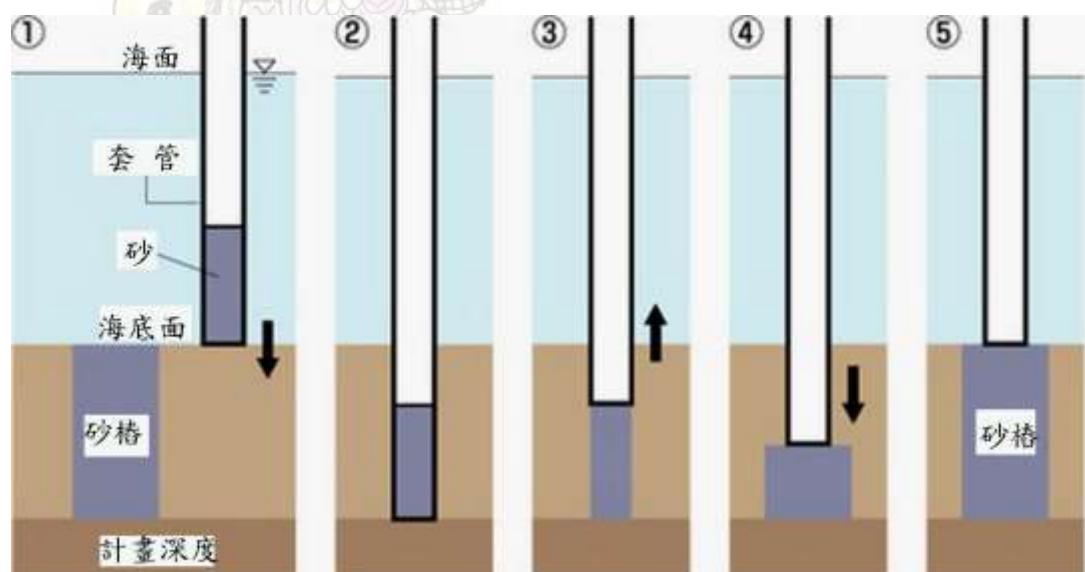
配合地盤強度，可變更樁間隔、砂樁直徑、砂樁強度等，能得適切的改良強度。

2011 埃及尼羅河之旅

④ 隆起

因注入砂，使周邊地盤隆起，必須去除。

砂壓樁法施工順序如下圖



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

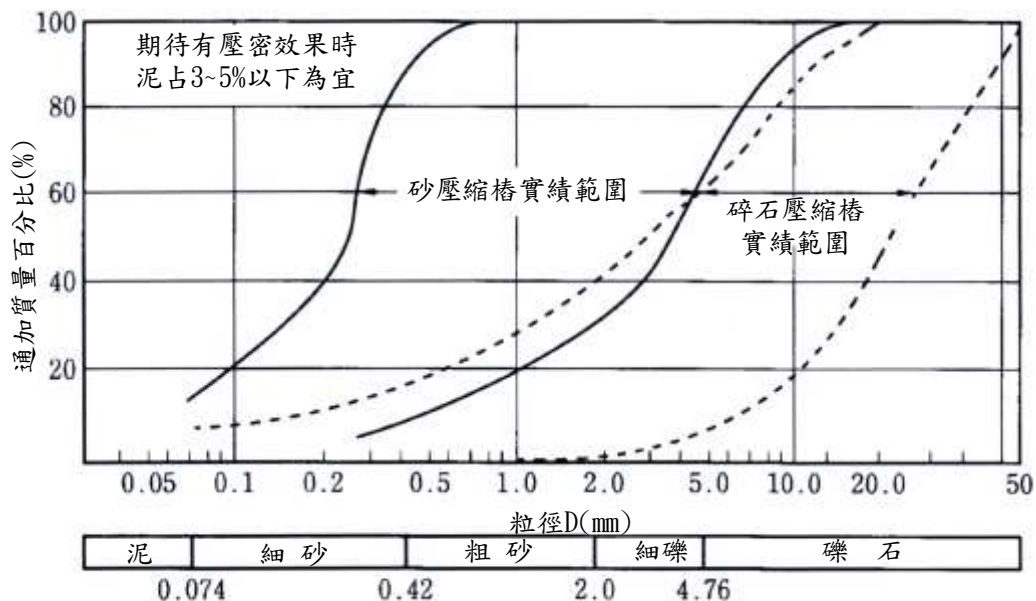
- ① 將外套管(casing)固定於預定位置、投入一定量的砂
- ② 利用起振機將外套管貫入預定深度
- ③ 將外套管提昇至規定高度並將外套管內的砂排出
- ④ 打擊外套管搗固排出的砂及周邊地盤
- ⑤ 重復③④步驟至砂樁達預定高度

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	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、粒度組成(特別是細料含有率)等
	有機質土	同上
	砂質土	N 值、粒度組成(特別是細料含有率)
使用材料調查		粒度組成、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) 砂壓樁材料的粒度實績範圍

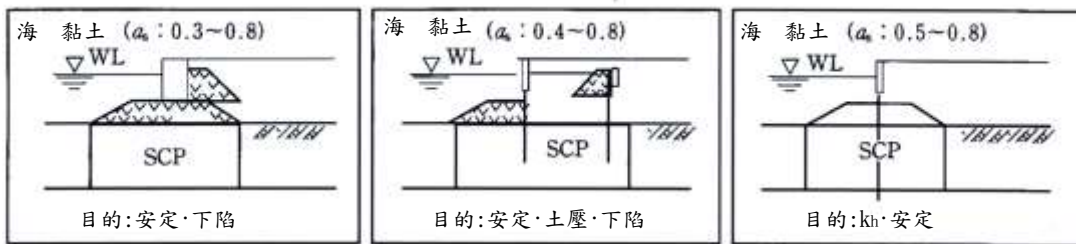


砂壓樁極少使用 0.074mm 以下細料，而且施工不會使用土粒子細粒化材料。上圖為砂壓樁材料的粒度實績範圍，細料占 3~5%，最大粒徑為 40~50mm 者為宜。

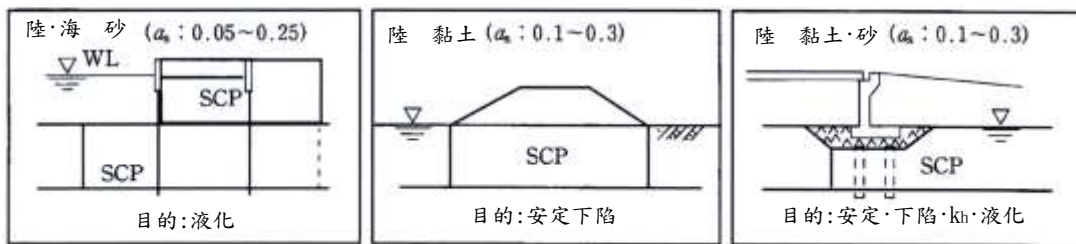
3) 砂質土砂壓樁法設計

(1) 換置率與砂樁間隔

換置率(a_s)是原地盤設為 1 時，砂樁的體積比例，為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



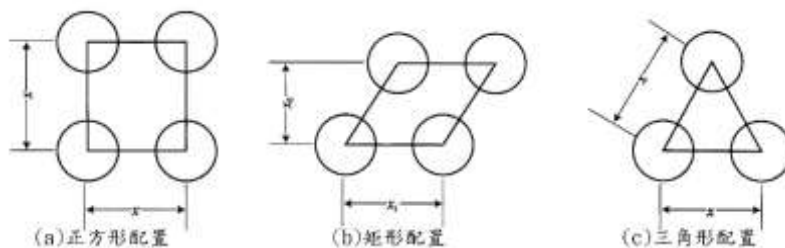
(a)重力式護岸·防波堤 (b)拉桿式板樁·雙重板樁·筒式護岸 (c)自立式板樁護岸·防波堤



(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

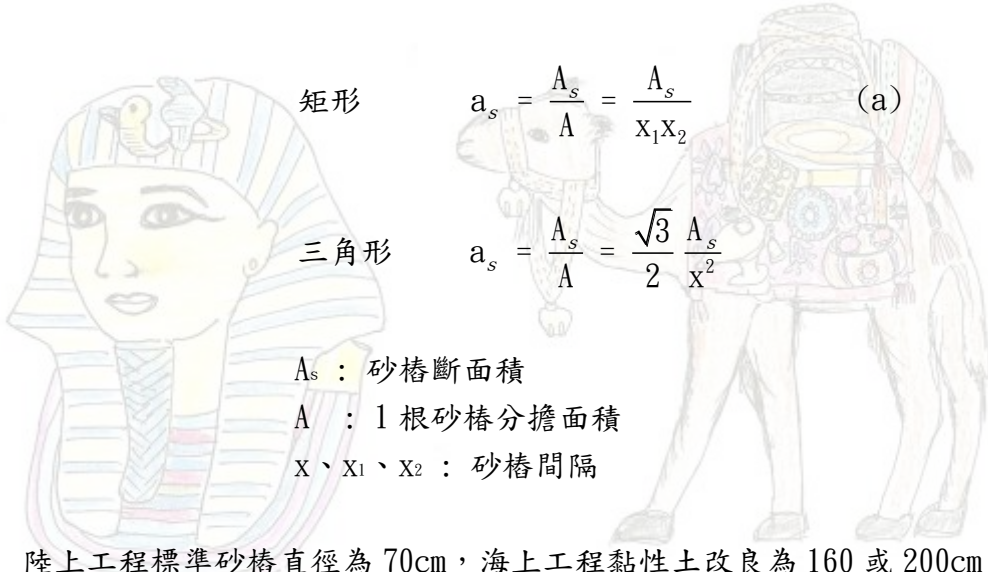
(c)三角形配置

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
$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x_1 x_2} \quad (a)$$

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



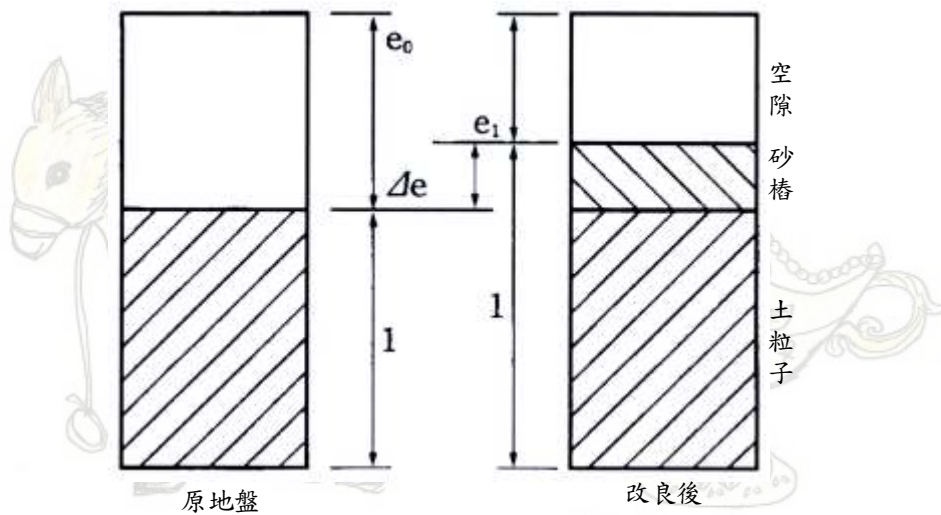
A_s : 砂樁斷面積
 A : 1 根砂樁分擔面積
 x 、 x_1 、 x_2 : 砂樁間隔

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

2011 埃及尼羅河之旅

砂質土砂壓樁法設計基本概念為，如下圖



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

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

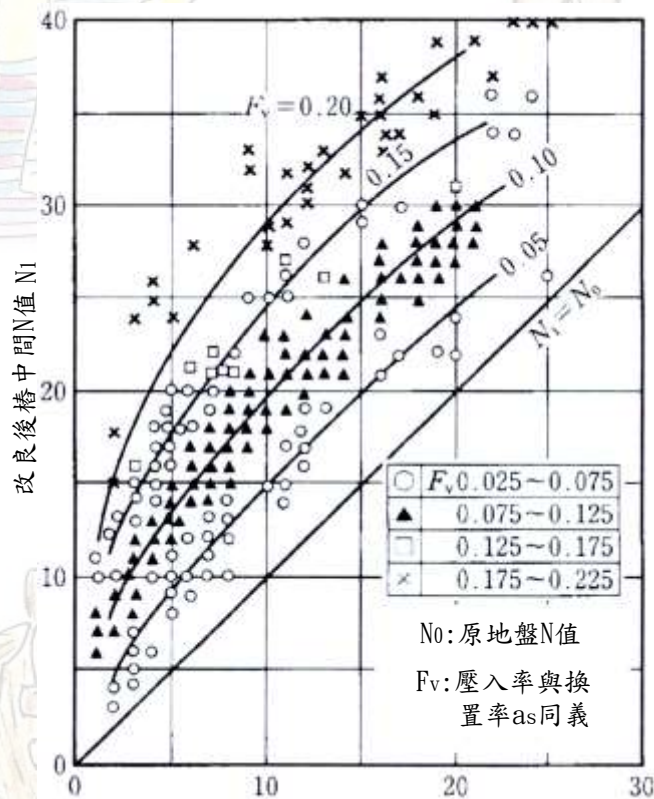
e_1 :改良後地盤的空隙比

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 ，依上部工條件取得改良後目標N值 N_1 ，

① 方法A (利用過去業績良好的簡易圖表設計法)

i. 以改良後樁中間N值 N_1 作為目標N值，依下圖(a)求出必要換置率 a_s

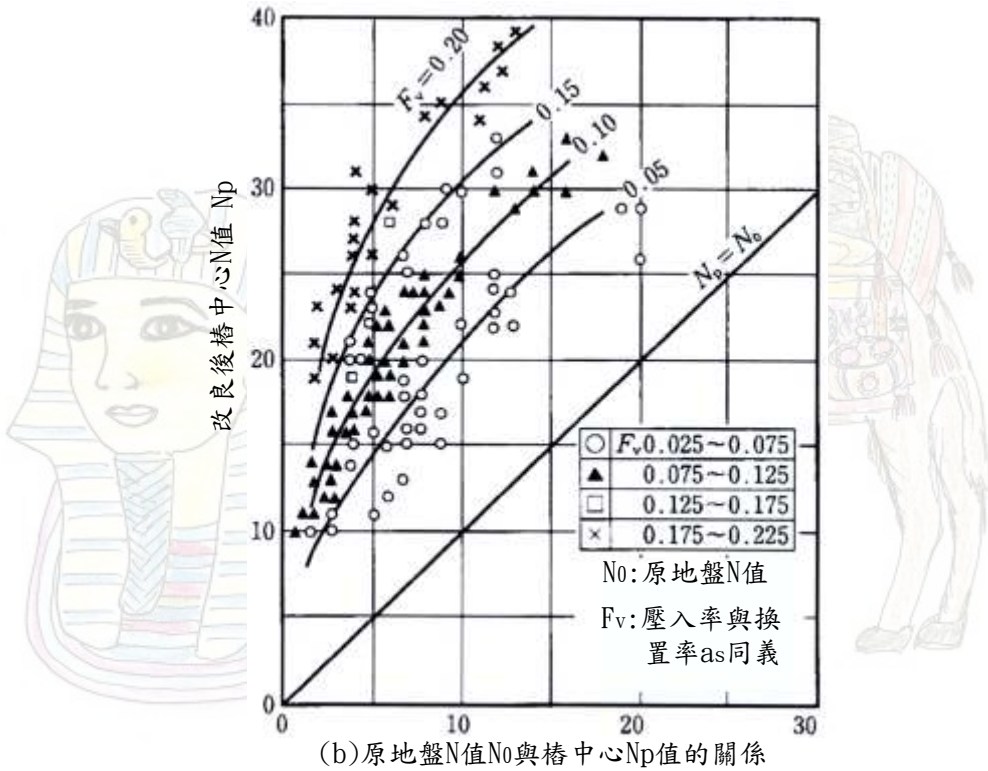


(a) 原地盤N值 N_0 與樁間 N_1 值的關係

ii. 設定目標N值為

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

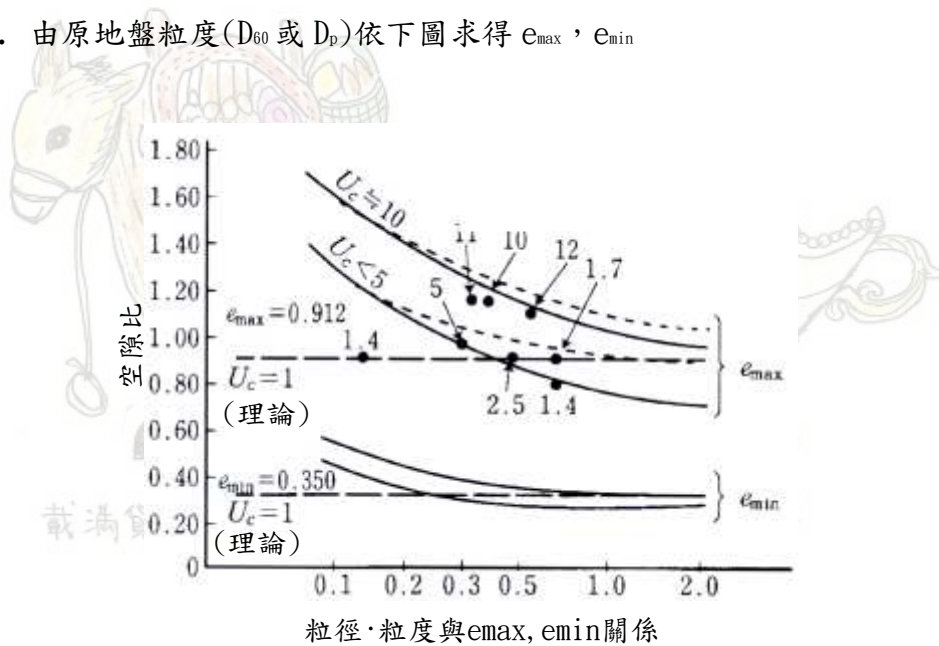
N_p 為改良後樁中心N值，從圖(a)及圖(b)反覆計算可求得 a_s



iii. 由(a)式求出間隔 x 2011 埃及尼羅河之旅

② 方法 B (利用 N-D_r-e 間關係的設計法)

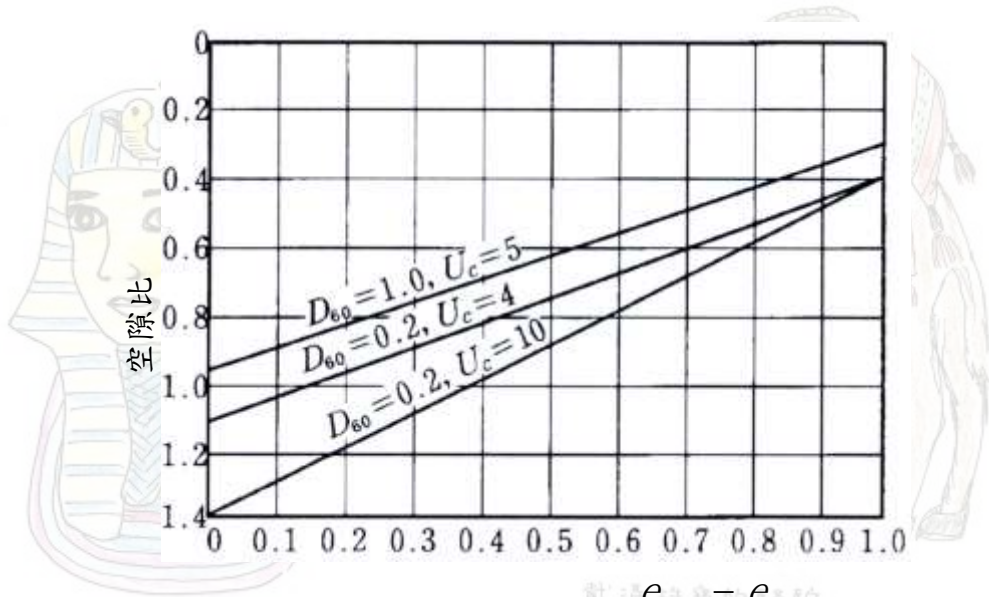
i. 由原地盤粒徑(D_{60} 或 D_p)依下圖求得 e_{max} , e_{min}



D_{60} : 60%粒徑

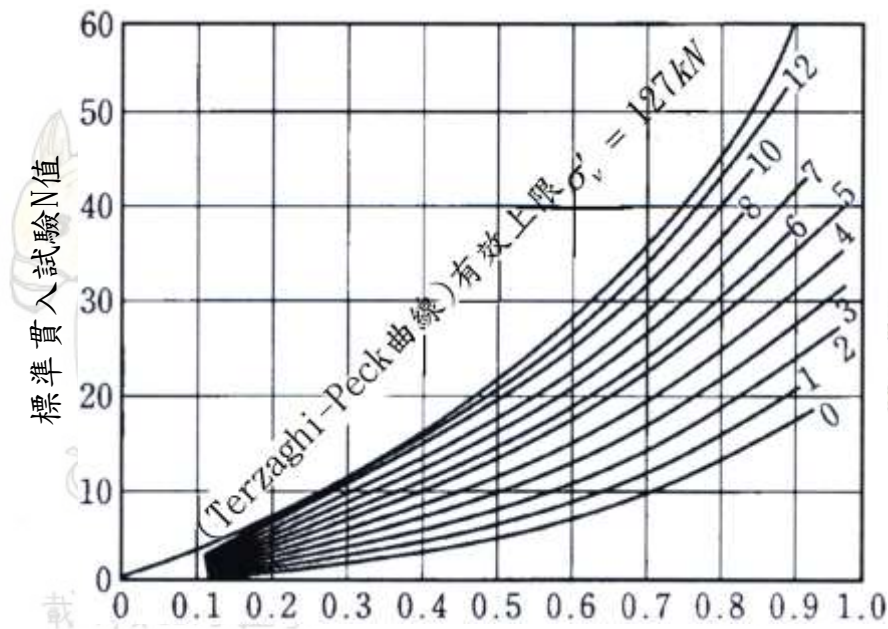
D_p : 頻率最大粒徑

ii. 在下圖中，對 e_{\max} ， e_{\min} 繪相對密度 D_r 與空隙比 e 的直線



$$\text{相對密度 } D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

iii. 利用下圖中 N -拘束壓- e 的關係，讀取因上載壓引起 N_0 ， N_1 變化引起的相對 e 變化量 Δe ($e_0 - e_1$)，再由下式計算 a_s 。



$$\text{相對密度 } D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

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

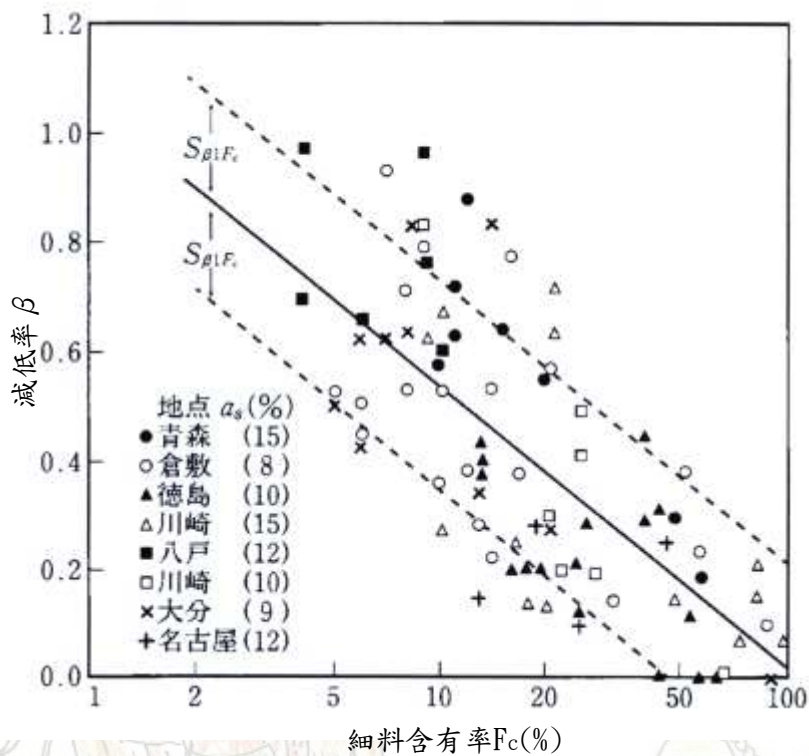
④ 利用下式，由 a_s 計算間隔 x

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

③ 方法 C (考量細料含有率的設計法)



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

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

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

ii. 由原地盤 N 值及拘束壓 P'_{v0} (kN/m^2), 依下式求得相對密度 D_{r0} 及 e_0

$$D_{r0} = 21\sqrt{100N_0 / (70 + P'_{v0})}$$

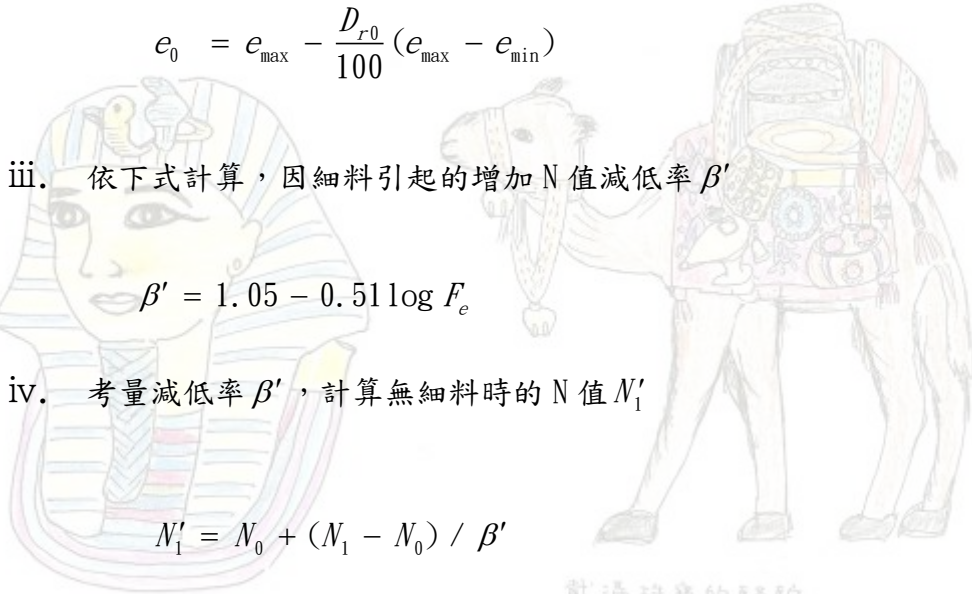
$$e_0 = e_{\max} - \frac{D_{r0}}{100} (e_{\max} - e_{\min})$$

iii. 依下式計算，因細料引起的增加 N 值減低率 β'

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

iv. 考量減低率 β' ，計算無細料時的 N 值 N'_1

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



載滿珠寶的駱駝

v. N_0 中代入 N'_1 ，由②計算 e_1

vi. 由 e_0 ， e_1 依下式計算 a_s 埃及尼羅河之旅

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

vii. 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	$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{A_s}{x^2}$



阿拉丁神燈

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

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

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

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

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

τ : 滑動線位置的平均剪斷強度

a_s : 砂樁的換置率

c_0 : $z=0$ 處黏性土的黏著力

k : 深度方向的強度增加率

z : 垂直座標(滑動線的深度)埃及尼羅河之旅

$c_0 + kz$: 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($n = \sigma_s / \sigma_c$)，黏性土地盤的砂樁， $n=3$)

μ_c : 樁間黏土部份的應力減低係數 $\mu_c = \frac{1}{1 + (n-1)a_s}$

μ_s : 砂樁部份的應力集中係數 $\mu_s = \frac{n}{1 + (n-1)a_s}$

c/p : 原地盤黏性土的強度增加係數

γ_s : 砂樁的單位體積重量(地下水面下為 γ'_s)

γ_c : 黏性土的單位體積重量(地下水面下為 γ'_c)

ϕ_s : 砂樁內的內部摩擦角

U : 樁間黏土的平均壓密度

γ_m : 平均單位體積重量 $\lambda_m = a_s \gamma_s + (1 - a_s) \gamma_c$

θ : 滑動線與水平面所呈角度

ϕ : 將高換置率改良地盤假定成均一地盤的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：

i. 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。

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

ii. 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 承载力

作為複合地盤的改良地盤容許承载力，可依下式計算。

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

q_A : 改良地盤容許承载力

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

$$q_{Ac} : \text{原地盤容許承载力 } q_{Ac} = 1 / F_s c (1 - a_s)$$

γ_2 : 基礎底面上方土單位體積重量

- γ_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
- β : 基礎形狀係數
- a_s : 換置率
- F_s : 安全率(2.5 以上)

④ 壓密

改良地盤的下陷量 S ，可以無處理時的土壤試驗結果的下陷量 S_0 乘以下陷減低係數 β ，以下式計算

$$S = S_0 \beta$$

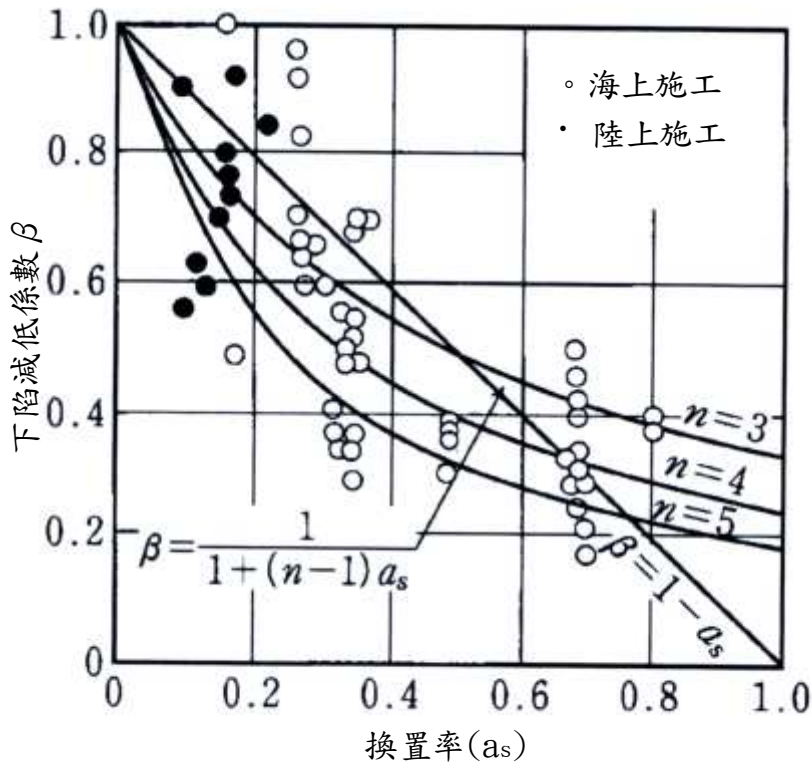
低換置率($a_s < 0.5$) 時

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

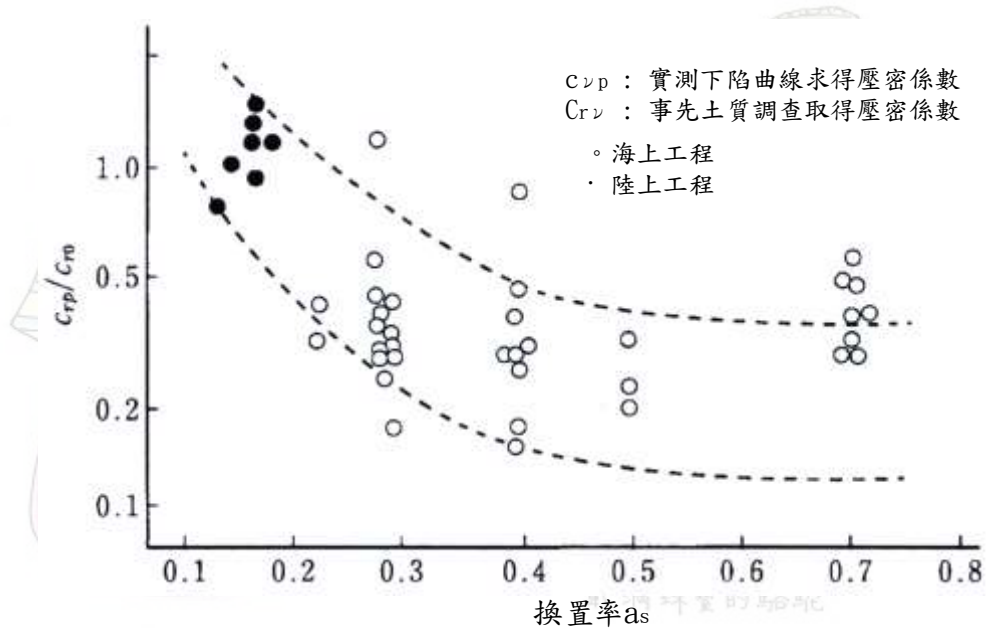
高換置率($a_s \geq 0.5$) 時

$$\beta = 1 - a_s$$

根據現場資料，整理得 β 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)，故施工後放置約 3 個月為宜。



⑤ 隆起土

2011 埃及尼羅河之旅

地盤改良會導致周邊地盤隆起，應加以檢討。

i. 對周邊地盤影響

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

ii. 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

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

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

Z_0 : 平均樁長(m)

隆起量亦可以下列方法估算

$$V' = \mu V$$

V' : 隆起土量(m^3)

V : 設計投入砂量(m^3)

μ : 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

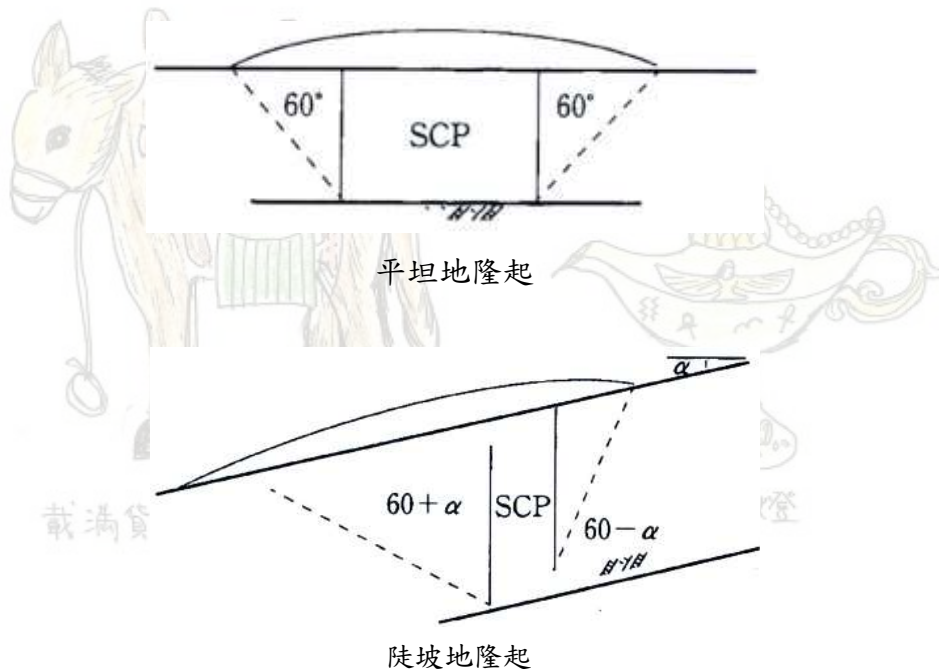
q_u : $L/3$ 處的單軸壓縮強度

最近由於水深、砂樁直徑等大型化, 有下列提案。

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

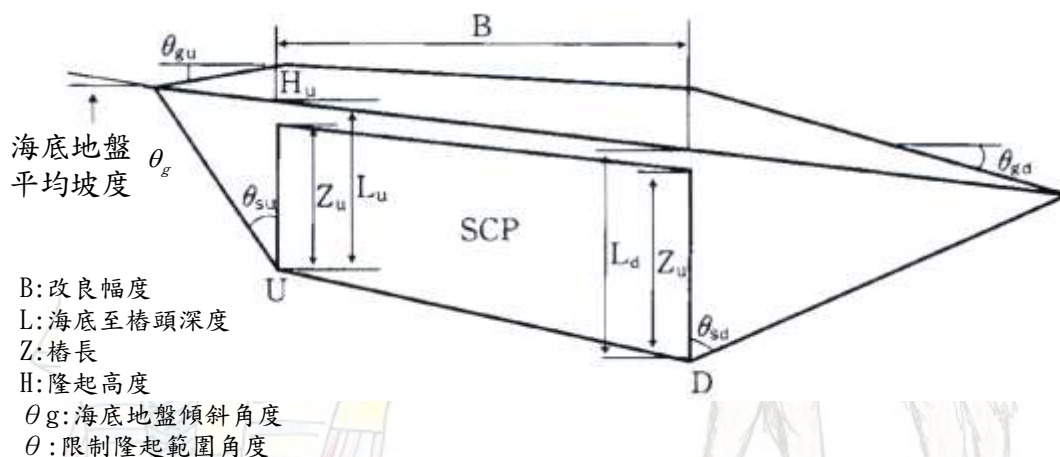
砂樁徑 2.0m $\mu = \frac{2.117}{L} + 0.718a_s + 0.056$

iii. 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)。



a. 防波堤等寬度比較狹的地盤改良

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

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

或安息角以下的角度。埃及尼羅河之旅

b. 鄰近既有改良工地時，參照其拘束條件。

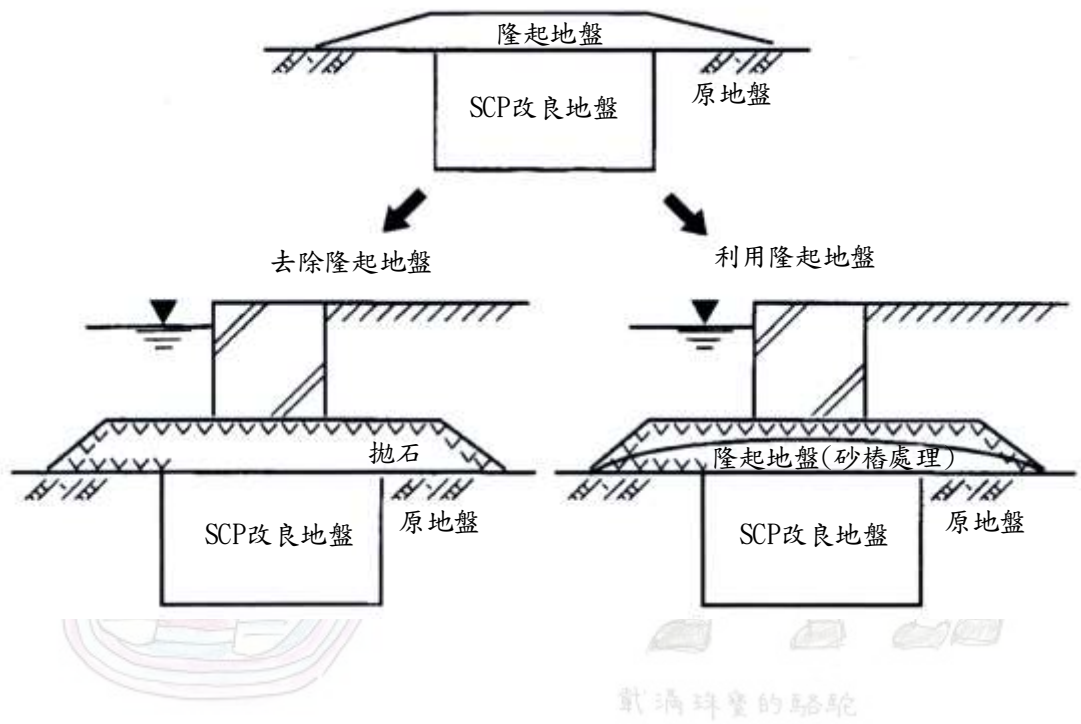
c. 如上圖，視隆起形狀為，由1)決定的角度、兩側隆起高度、隆起土的底面作為底邊及改良地盤寬作為上邊的梯形。

iv. 隆起土性質

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

v. 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。另外可如下圖所示，經過搗固、壓密等處理後加以利用。



回港灣設施設計埃及尼回港灣設計參考資料



載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈