

地工技術

礫石樁應用於抗液化之設計及施工

吳建閩 王鴻基

萬鼎工程服務股份有限公司

陳彥良、龔浩然、洪崇發

台朔重工股份有限公司

摘要

集集大地震後於台灣中部部份地區出現難得一見的土壤液化現象，包括海埔新生地、河岸高灘地、舊河道沈積層及地下水豐富和淺層地層中含有厚層疏鬆砂質土壤等區域，伴隨冒水噴砂並出現地層沉陷之情形，嚴重者則造成建物傾斜、基礎破壞及地層側向流動等災害，而如何減輕高液化潛能區液化災害更是產官學界大家討論的焦點，本文介紹國外行之有年之抗液化地盤改良方法－礫石樁(Stone Column)工法，說明本工法應用於提高抗液化能力之理論及設計方法，並配合國外及國內六輕工業區實際之施工案例探討其成效，以提供日後進行地盤改良設計之參考。

關鍵字：礫石樁、液化、地質改良。

DESIGN AND CONSTRUCTION OF STONE COLUMN APPLIED TO LIQUEFACTION MITIGATION

WU, C. M. WANG, H. J.

CHEN, Y. L. KUHN, H.R. HRENG, C. F.

RESI

FORMOSA HEAVY IND. CORP.

ABSTRACT

After the Chi-Chi Earthquake, the rarely soil liquefaction phenomenon occurred in the reclaimed land, river banks, old river channel and the alluvial plain with high water tables of the central part of Taiwan, where the soils are mostly composed of gravel and sand. Soil lateral movements, tilting of buildings and foundation failures were induced by serious settlements as a result of liquefaction. Henceforth, soil liquefaction has been a hot topic, and mitigation of disasters within the high liquefaction potential regions has been discussed by the professionals and researchers. This article introduces one of the methods of soil improvement – the stone column method, which has been widely used abroad and also in the Sixth Cracking Industrial Park. Theories and design methods are described together with case histories to serve as references for future practices of liquefaction mitigation.

KEY WORDS : Stone Column, Liquefaction, Soil Improvement.

地工技術

、前言

礫石樁乃振動揚實法(Vibroflotation)系列工法之一支。振動揚實法最早之應用係利用揚實錐(Vibroflot)之振動與擠壓回填粒料之方式改良疏鬆砂質地盤，以提高其強度並降低壓縮性及液化潛能。由於其機制主要在藉反覆振動以達夯實改良之目的地，故稱振動夯實法(Vibro-Compaction Method)。此後，揚實錐之應用延伸至軟弱粘性土壤改良，在粘性土層中以揚實錐施做一群以砂礫等材料組成之高強度樁體，與現地土壤構成一較高強度且較低壓縮性之複合地盤，由於此種施工方式可於地層中形成連續而緊密之礫石柱狀體，故又以礫石樁工法(Stone Column Method)或粗礫樁工法(Granular Column Method)稱呼之。礫石樁依施工方式而有不同名稱，施工若以水沖出土而改填以礫石，則稱為振動置換法(Vibro-Replacement Method)；若全靠揚實錐擠壓成孔，再填充礫石，則稱為振動位移法(Vibro-Displacement Method)。

1930年代振動揚實之技術在德國萌芽，首先應用於建築物之基礎土壤改良，1940年代引入法國、美國，1950再傳進英國與日本，台灣地區在1980年代初期於高雄林園工業區中美和化工廠基礎土壤改良工程中首次引進本工法，惟當時國內廠商並未購入施工設備，因此該案完成後即中斷十餘年。直至1990年代台塑六輕工業區建廠工程初期各種振動揚實工法再度被引進，主要是應用於改良深度大於13公尺，以動力夯實(Dynamic Compaction)工法無法有效改良之地區。迄今國內廠商

已擁有八部以上之礫石樁施工機組，其中台朔重工引進德國BAUER及KELLER之機具共六部。

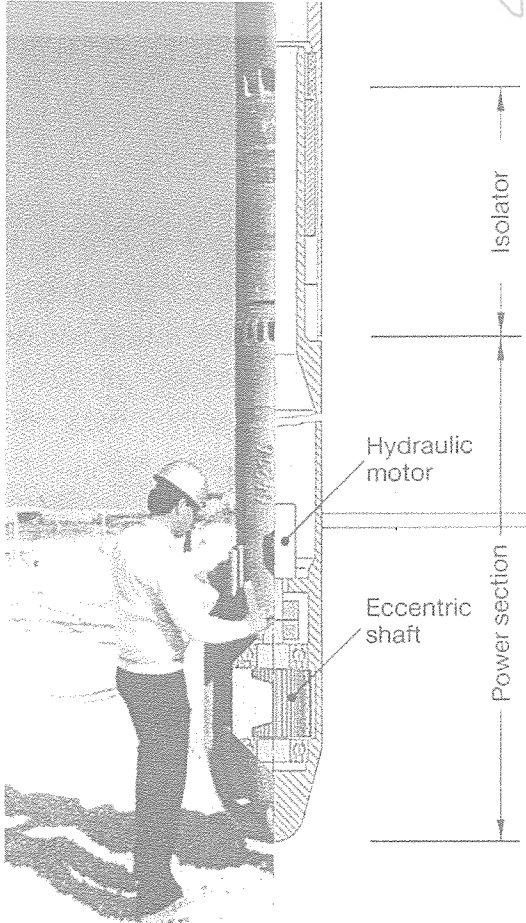
由於國內有關礫石樁工法之報導文章有限，筆者遂不揣淺陋整理礫石樁最新之施工方法，與礫石樁應用於抗液化改良之相關設計方法，期有助於讀者對礫石樁抗液化機制與應用之瞭解，並藉由礫石樁於六輕地質改良工程之經驗與國外施工案例，探討礫石樁改良成效與抗液化之可靠度，以提供地工界同仁選擇抗液化地改工法之參考。

二、礫石樁施工法與功能

2.1 振動夯實工法礫石樁之施工

礫石樁工法使用之主要機具設備包括揚實錐、操作揚實錐所需之吊車、剷土機等。揚實錐的原理係旋轉一偏心鐵塊以產生一定頻率與振幅之水平振動力，揚實錐之構造可參考圖一所示。振動夯實工法之施工可分為傳統之濕式(Wet Method)頂部投料(Top Feed)與改良之乾式(Dry Method)底部供料(Bottom Feed)兩種施工方式。傳統之濕式工法係藉由水沖並配合揚實錐之振動以形成樁孔，並利用水流以維持孔壁之穩定與回填料之輸送。而改良之乾式工法則係利用油壓並配合揚實錐之振動與高壓空氣將揚實錐壓入地層中形成樁孔，並以高壓空氣(約 $1\sim 2\text{kg}/\text{cm}^2$)來維持孔壁之穩定。投料方式上，傳統之頂部投料方式係先將回填料置於孔口附近之地面上，再直接以剷裝機傾卸入孔中；而底部供料方式，回填礫石料係由施工機械

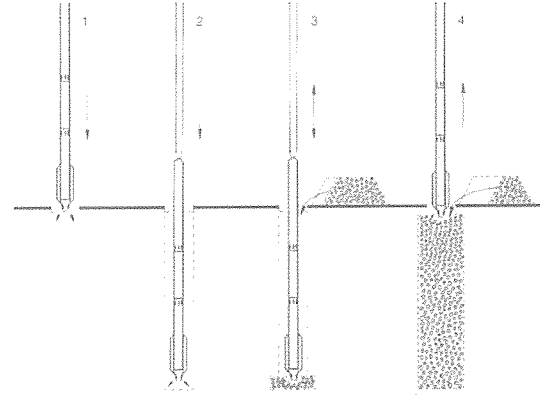
上部之填料斗 (Material Container) 投入，再透過供料管 (Transfer Pipe) 送至揚實錐底部，可確保回填料投放至預期深度。



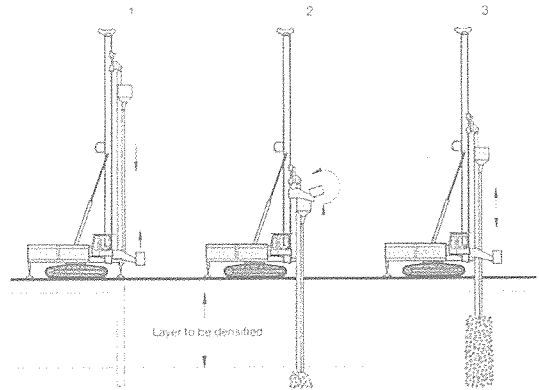
圖一 揚實錐基本構造

濕式頂部投料施工方式大致可分為如圖二所示四個步驟，施工時係利用揚實錐以噴水及振動方式使砂土層達到液化狀態，並利用揚實錐自重，使其貫入至預計改良深度。達預定深度後，降低水之流量，並將水流由下噴水口轉至上噴水口，使水流沿導桿外圍向上流動，於揚實錐周圍造成一水路，可使回填料從地表擠進至底部，而不致將揚實錐束縛住。當揚實錐於提昇階段，每一位置稍予振動將土壤密

化，同時由地表孔口不斷投入回填料，以填塞揚實錐提昇時所遺留之孔洞。在一般砂土層中，振動夯實階段之提昇速率，必須慢到足夠達到所需之緊密度，大約為0.3公尺/分鐘。



圖二 濕式頂部投料施工步驟



圖三 乾式底部供料施工步驟

改良乾式底部供料施工方式，如圖三所示，施工時係利用揚實錐產生之側向振動力使飽和砂土層液化，或藉由自重、油壓及高壓空氣之輔助將揚實錐貫入至設計深度，並由供料管口投入礫石料，經由供料管送至揚實錐尖處，當揚實錐拔起一定高度(約0.5~1.0m)，礫石料即由供料管底部開口卸入孔底，再藉由揚實錐向下及側向擠壓使周圍地層密實，並使投入礫石料

緊密成樁，俟振動夯實壓力達一定值(如 280 bar)或振實時間達2分鐘，即再拔起振動錐一定高度，反覆上述拉拔－投料－擠壓之步驟，即可完成礫石樁。採用乾式高壓空氣輔助施工相較於濕式使用噴射水流之施工方式，可保持乾淨之施工環境，同時採用底部供料方式較頂部供料方式，可確保礫石料投卸至施工深度而不致半途阻塞於樁孔內，對於施工品質較易掌握。

2.2 礫石樁功能

打設礫石樁以改良地盤，其改良機制與礫石樁功能大致歸納如下三項：

1. 擠壓密實：揚實錐貫入地盤，投入礫石料後再反覆振動擠壓，使得原土壤之體積減少、孔隙比降低、原土壤更為密實，此功效於砂性土壤尤為顯著。

2. 加勁補強：礫石樁打設完成後，由於礫石具有較高之內摩擦角，復經擠壓振實，形成較周遭土壤勁度更高的柱體，使整體地盤形成一經加勁補強之複合土體。

3. 加速排水：由於礫石樁具有較大之孔隙及較快之排水速度，地盤中打設礫石樁可提供垂直排水管道，縮短排水路徑。對砂性地盤承受地震力作用而言，礫石樁可加速超額孔隙水壓之排除，有助於降低液化潛能。對於粘性地盤，礫石樁之排水功能則有利於壓密沉陷之提早完成，縮短壓密所需時間。

雖然礫石樁在理論上具有上述之改良功效，但目前對於功效的大小，仍難有定量之評估方式，特別是降低液化潛能之排水及加勁功效評估。因此，一般在考量礫石樁改良土壤之抗液化能力上，主要以評定礫石樁之擠壓密實效能為主，依應力分擔比之觀念，考慮加勁補強效果，或依

改良樁體間距，考慮排水效應之設計觀念，則仍有待進一步以現場試驗確認及長期觀察。

三、礫石樁應用於抗液化改良之設計

3.1 設計原則

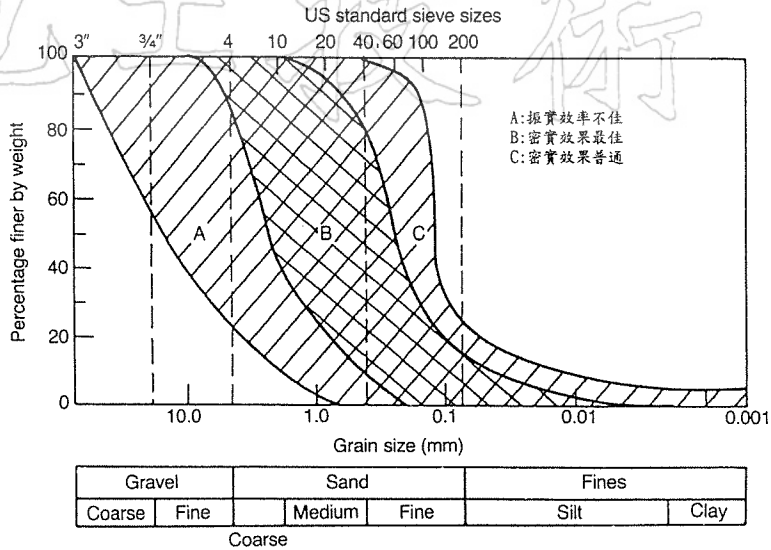
對有抗震要求之疏鬆砂質地盤而言，以礫石樁做為地質改良方式來增進其抗液化能力之設計，主要是根據欲改良砂土層之顆粒組成(細顆粒含量)、初始緊密程度(孔隙比、相對密度或SPT N值)、覆土應力、地下水位、設計地震規模及地表加速度，結構物範圍及重要性，以決定礫石樁之處理深度範圍、佈孔形式、間距。以下針對主要關鍵因素分別說明：

1. 適用土壤

適用本法之土壤主要為砂性土，以粉質細砂到含礫粗砂，只要細顆粒含量不超過10%，均可得到顯著之擠壓振實效果；若細料含量大於30%，則擠密效果明顯降低。適用於礫石樁改良之顆粒級配曲線範圍如圖四所示。圖中將適合使用振動夯實工法之土壤範圍劃為A、B、C三個區。若欲改良之砂土級配曲線全部位於B區，擠密效果最好；若砂層中夾有粘土薄層，或含有機質或細粒較多，則其擠密效果將顯著降低。若土壤之級配曲線全部位於C區，則因細顆粒含量過多，採用礫石樁進行改良將很難收到成效。級配曲線若位於A區則主要為礫石、緊密砂類之土層，將大大降低揚實錐之貫入速率，以致採用礫石樁進行地質改良並不符合經濟效益。

2. 改良深度

改良深度一般以改良至液化土層底



圖四 適用於礫石樁改良之顆粒級配曲線範圍(BROWN,1977)

部為原則，惟當液化土層厚度甚厚，或擬建之建物或設備基礎可以允許較大之沉陷時，亦可考慮只改良液化土層之上部，惟為確保建物及設施不致於產生過大之震陷而危及安全，液化地基之改良深度應使殘留之液化土層所造成之液化危害指數 P_L 值小於4，對於獨立基礎或條形基礎，改良深度則應至少深及於基礎底面下5公尺及基礎長邊寬度之較大值(建築抗震設計規範，1989)，同時須儘可能加強上部結構之勁度以適應可能之不均勻沉陷。有關液化危害指數 P_L 之定義及說明，讀者可參閱葉文謙等人(1998)文章。

3. 改良範圍

改良範圍一般視改良目的而定，有抗液化需求者，除基礎覆蓋之面積範圍外，改良範圍應自基礎外緣向外延伸一定之距離，一般延伸範圍為2/3~1.0倍之改良深度，特殊構造物之改良範圍得視其功能延伸改良範圍。

4. 孔位配置和間距

礫石樁孔位配置常用正三角形和正方形兩種。於獨立基礎和條形基礎下常用等腰三角形或矩形配置。對大面積改良處理，採用正三角形配置比正方形配置可得到更佳之擠密效果。礫石樁之間距視砂土之顆粒組成、密實要求、揚實錐功率而定。砂土粒徑越細，密實要求越高，則間距應越小。

5. 回填料選擇

回填料之作用一方面是填充在揚實錐提昇後於砂層中可能遺留之孔洞，另一方面是利用回填料作為傳力介質，使揚實錐之振動效應能透過連續填充之回填料傳遞至原土壤中，將揚實錐周圍之砂層進一步擠壓加密。

回填料之品質，主要由級配控制，回填料可用粗砂、礫石、碎石或爐渣等材料，粒徑一般為0.5~5cm。理論上回填料粒徑越粗，擠密效果越好，但採頂部投料方式施工時，回填料粒徑過大則易在孔中發生卡料現象，影響施工進度。為達到需求之緊

密度及獲得良好之施工速率與品質，Brown(1977)曾根據現場實作經驗提出一適合值指標— S_N (Suitability Number)，用以判別回填料級配之合適程度：

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

其中 D_{50} 、 D_{20} 、 D_{10} 分別為通過重量百分比為50%、20%及10%所對應之粒徑(mm)。回填料之品質影響揚實錐之容許提昇速率，在合理範圍內，適合值越小，則樁體之緊密度愈高，揚實錐之速率可以愈快越適合作為回填料。下表為適合值與等級之關係：

適合值	0~10	10~20	20~30	30~40	>50
等級	極佳	佳	普通	差	不適合

此外，為確保礫石樁之排水效果不致因細顆粒之填塞而降低，日本道路協會(1976)曾提出以下之回填料級配設計準則：

$$\frac{\text{礫石樁回填料通過重量百分比為5\%之粒徑尺寸}}{\text{周圍土壤通過重量百分比為85\%之粒徑尺寸}} < 5$$

3.2 設計方法

抗液化改良工程決定使用振動夯實工法之礫石樁時，事先必須有週密規劃，建立品質控制準則，通常對於夯實改良效果之檢驗，以使用標準貫入試驗N值或CPT qc值或相對密度為主。抗液化礫石樁打設間距之評估，設計階段得參考下列各節所述方法設計，並於正式施工前安排模擬施工(Pilot Test)與現場檢驗驗證之。

1. 等體積取代法

等體積取代法係假設擬改良地層達到抗液化之緊密度，土體中孔隙體積所需之減少量完全可由擠入之礫石樁體積所填充取代，同時假設改良效果於土體中各點

均相同，即假設改良效果十分均勻，因此對飽和土層而言，礫石樁改良之有效面積 A 與礫石樁斷面積 A_s 之關係可以改良前後之孔隙比表示如下：

$$A_s = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} A \quad (\text{式1})$$

式中 e_0 =現地土層之孔隙比， e_1 =改良後需求之孔隙比

若礫石樁直徑為 d_s ，則打設間距 S ，可由下列關係求得：

$$S = \alpha \sqrt{\frac{1 + e_0}{e_0 - e_1}} d_s \quad (\text{式2})$$

其中 α 為礫石樁之幾何配置係數，正三角形配置時 α 為0.952，正方形配置時為0.886。

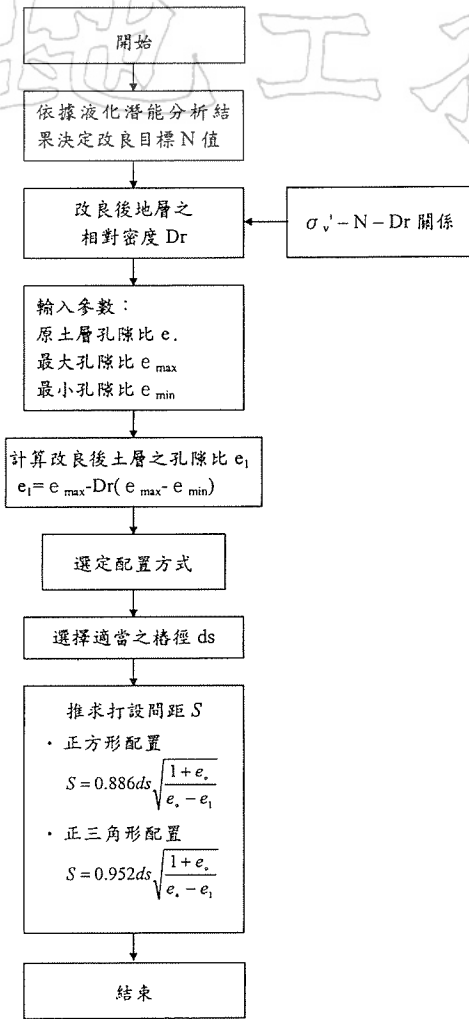
本法打設間距之計算流程整理如圖五所示。一般改良規範均會要求改良後之N值或相對密度至少須達某一標準，惟設計時不宜直接以需求值為標準，應將地層變異性及施工不確定性等可能造成之誤差納入，一般狀況相對密度可能達10%之誤差值，因此改良後之相對密度可取需求值再加10%為設計標準。

此設計法並未考慮細顆粒含量之影響，且忽略地層之變異性與改良效果隨距離礫石樁中心愈遠愈低之事實，因此對細顆粒含量較高與變異性大之砂土層可能高估其改良效果。

2. 排水理論法

(1) Seed & Booker's Method

本法係假定礫石樁工法之抗液化成效，完全由樁體提供之超額孔隙水壓消散功能所貢獻，且不考量礫石樁之夯實擠密效果，亦不考慮礫石樁之加勁效應。Seed & Booker(1977)假設經礫石樁改良後之地層，其超額孔隙水壓之消散是沿水平方



圖五 等體積取代法礫石樁打設間距流程

向朝礫石樁中心之路徑排除，砂質地層可能存在之垂直排水效應則予忽略，根據徑向壓密理論，Seed & Booker推導出以下之控制方程式：

$$\frac{k_h}{\gamma_w m_v} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial t} \quad (3)$$

式中， k_h =現地土層之水平方向透水係數， u =超額孔隙水壓， r =礫石樁半徑， m_v =土壤之體積壓縮係數 (Coefficient of Compressibility) 可經由反覆三軸試

驗得出， γ_w =水之單位重， u_g =因受到反覆剪應力作用N次下所產生之超額孔隙水壓， N =反覆剪應力之作用次數。

土層於反覆剪力作用下孔隙水壓變化之關係則以實驗室中所得出之反覆剪應力作用次數N與激發之超額孔隙水壓 u_g 之近似曲線模擬之，如下式：

$$\frac{u_g}{\sigma_v} = \left(\frac{2}{\pi} \right) \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_\ell} \right)^{1/2\alpha} \dots\dots\dots (4)$$

其中， N_ℓ =現地土壤受到反覆剪應力作用後達到初始液化時所須之次數， α =常數(≐0.7)， σ_v =初始有效壓密壓力。

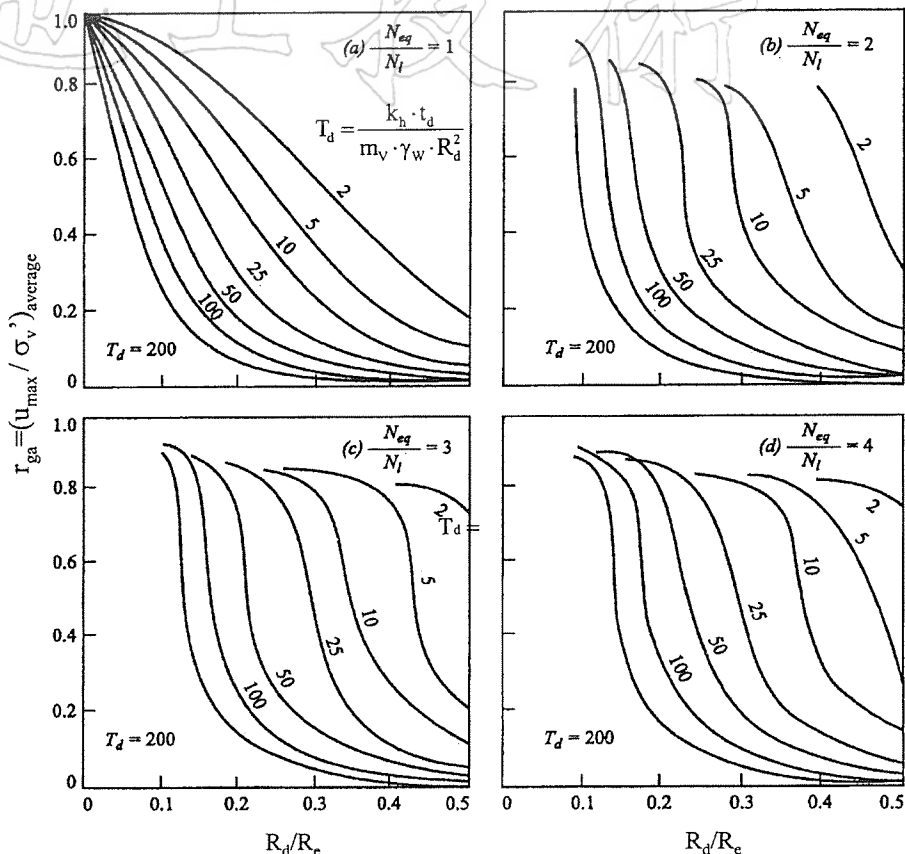
圖六所示為Seed & Booker根據(式4)解析(式3)之結果，以Seed & Booker之理論方法進行抗液化礫石樁改良間距之設計流程整理如圖七所示。

(2) Ohkita's Method

Seed & Booker於推導礫石樁之孔隙水壓消散理論時，係假設礫石樁之透水係數為無限大，而實際上礫石樁之透水係數為一有限值，當改良砂層中超額孔隙水壓消散排出之水流流向礫石樁，再通過礫石樁流出地表時，由於礫石料對滲流之阻力，將影響超額孔隙水壓消散之速率，此一現象稱為井阻(Well resistance)作用，井阻作用之規模可以井阻係數L表示之，如下式：

$$L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_d} \left(\frac{H}{2R_d} \right)^2$$

式中 R_d 、 k_d 分別為礫石樁之半徑及透水係數， H 為垂直向之排水距離。圖八所示為Ohkita等人(1986)考慮井阻作用所建議之礫石樁設計流程，根據Ohkita等人所建議之方法，考量井阻作用之超額孔隙水壓消散時間因素，須依據井阻係數及改良面積比進行折減。



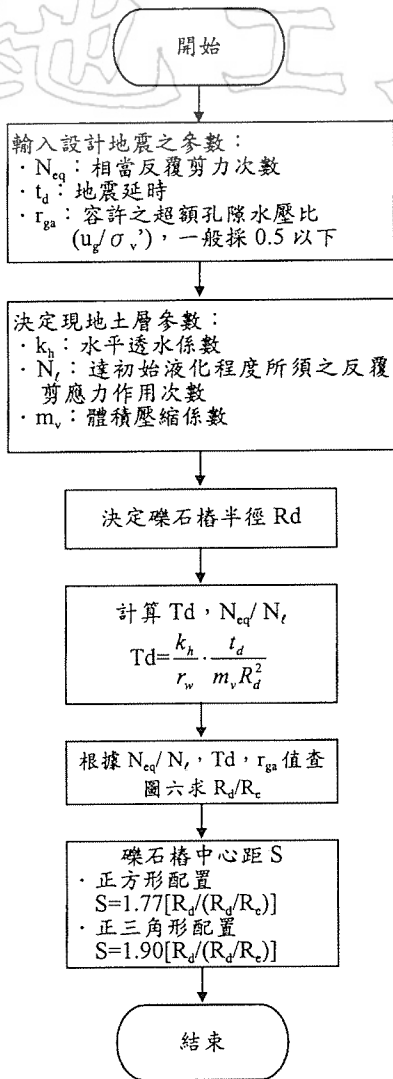
圖六 SEED & BOOKER之解析結果(SEED & BOOKER,1977)

3. 剪應力折減法 – Priebe's Method

在現行液化潛能之分析方法中，往往僅依據經礫石樁地質改良後之地層，其本身之緊密程度(SPT-N值)、細料含量FC、平均粒徑 D_{50} 等參數，評估改良後之抗液化成效，對於礫石樁對地盤所提供之加勁效果則並未納入分析考量。基於此，Priebe(1989)根據複合地盤中應力分擔之概念，將設計地震下所引致之反覆剪應力比以圖九中所示之折減係數予以折減，以反映礫石樁加勁之效應。此地震反覆剪應力折減係數與礫石樁之改良面積比、礫石樁回填材料內摩擦角及現地土壤之柏松比 μ 等參數有關。圖十中所

示則為根據Priebe之剪應力折減法進行礫石樁間距設計之流程。

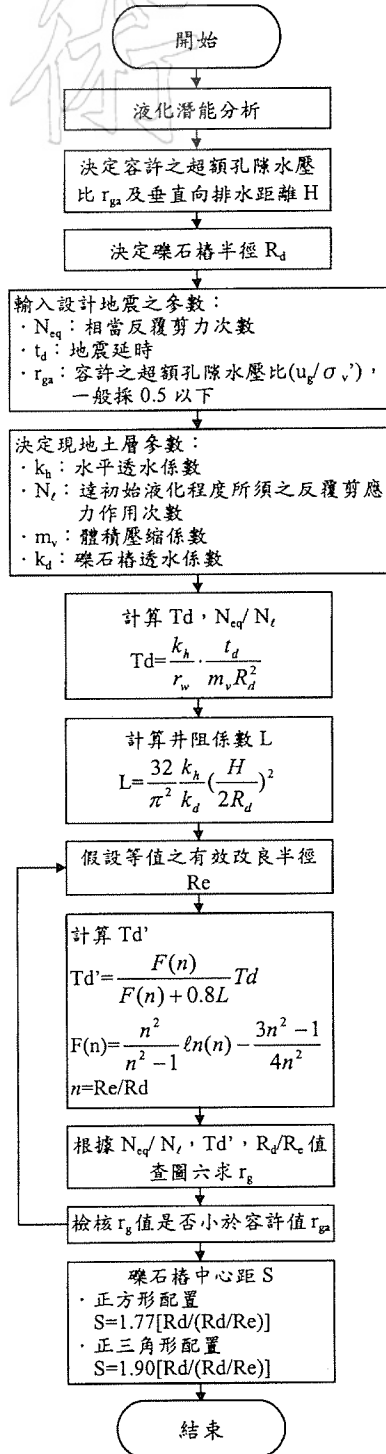
前述各種振動夯實工法礫石樁間距之設計方法或經驗方法，各有其發展之背景與假設條件，因此應用時應瞭解其使用限制與基本假設，方不致錯誤引用。上述設計方法為設計階段之選擇，事實上，於工程現場仍宜就實際打設情況作適當調整，因此對於回填料補給量(或樁徑)與施工間距之決定，應在現場分別以不同之補給量(或樁徑)與間距進行試驗，以決定最佳值，尤其對於大工程，不當的選擇，可能造成無謂之浪費。



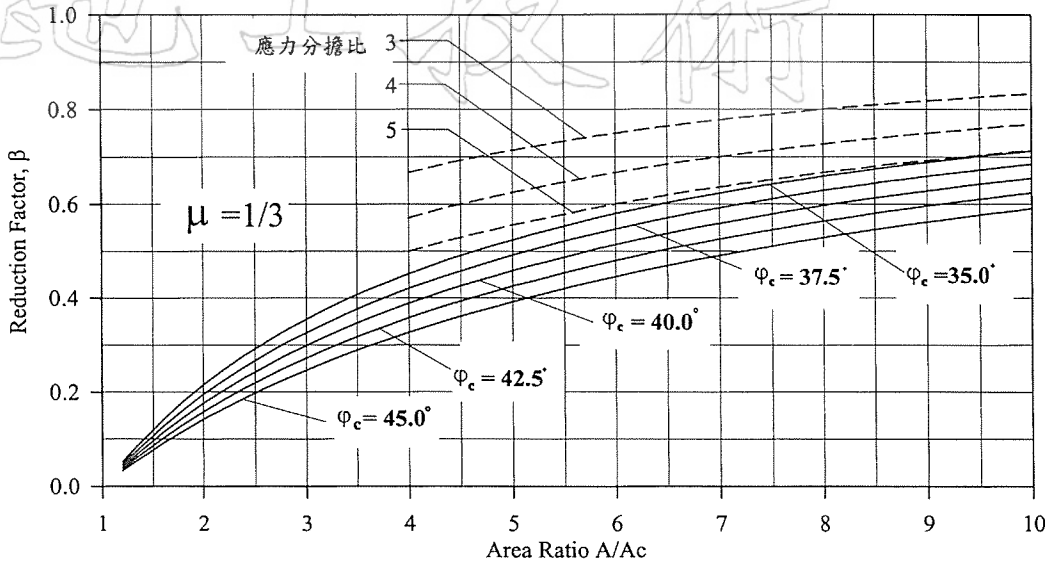
圖七 礫石樁打設間距流程 (SEED & BOOKER'S METHOD)

3.3 礫石樁改良之抗震實效

Mitchell等人(1995)曾整理37則經地層改良基地於經歷地震後之損壞情形，其中以礫石樁改良之基地共有五則，筆者等人重新整理並補入國內案例如表一所示，此等基地於歷經規模6.4以上，最大地表加速度0.11g以上之大地震作用後，礫石樁改良深度達到液化深度之基地均完



圖八 礫石樁打設間距流程(考慮井阻作用) (SEED & BOOKER'S METHOD)



圖九 PRIEBE建議之反覆剪應力比折減係數(PRIEBE,1989)

好無損，無液化、沉陷或損壞之災情報告；而改良深度未貫穿液化土層深度之基地，則由於淺層土壤受到礫石樁之加勁與補強，雖有沉陷情形發生，但差異沉陷及角變量(Angular Distortion)則甚為有限，對基礎及建物並未造成損壞情形，顯見礫石樁改良對提昇砂質土壤之抗液化能力，以及減少液化產生之沉陷與不均勻沉陷確實有效。

四、麥寮工業區應用案例

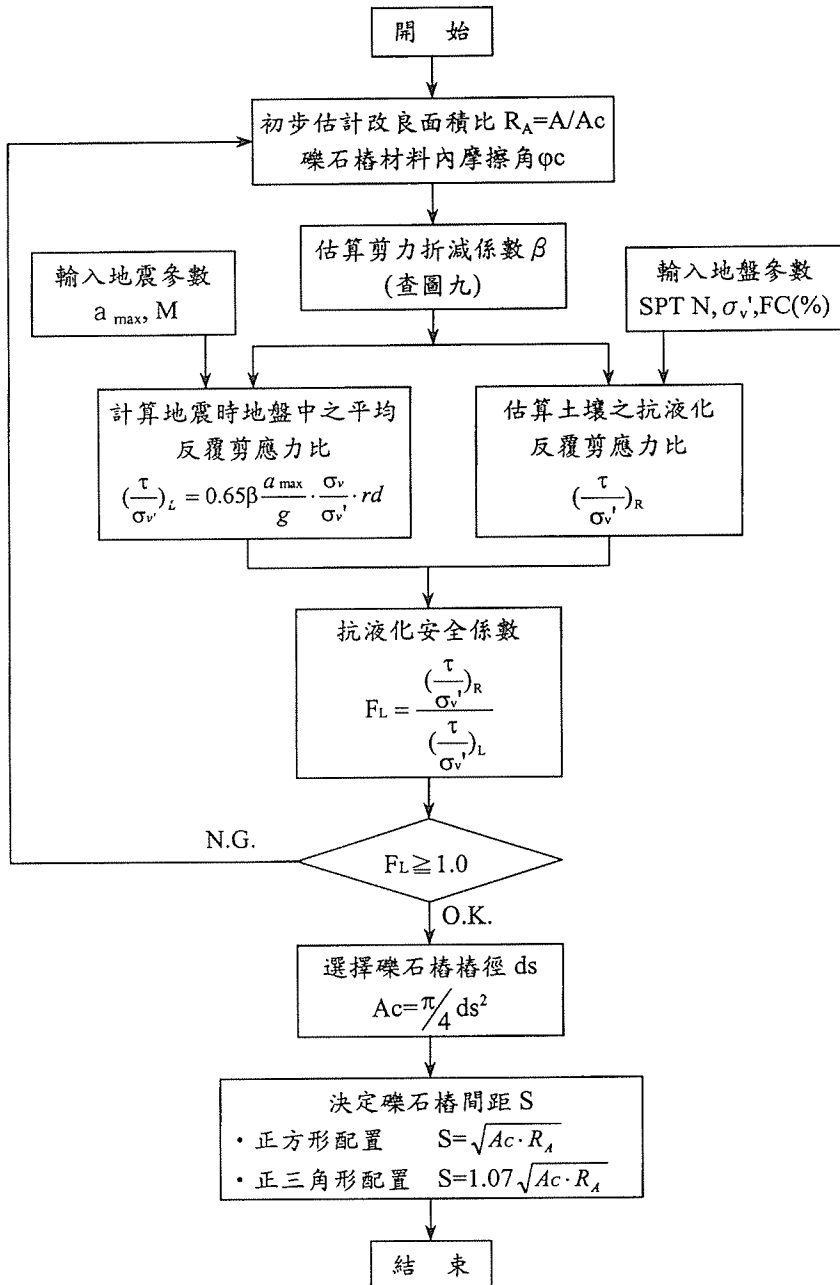
台塑六輕石化工業區位處台灣中部西海岸，緊臨濁水溪出海口南岸及新虎尾溪口北方，佔地約2600公頃，長約8km，寬約4km。本工業區原本為平緩之淺海灘地形，大部份位於潮間帶，經以水力浚填及陸運填土方式回填至平均海面上4.5~6m高，而成平坦之人工新生地。由地質調查結果顯示，六輕基地地表下20公尺深度範

圍內之地層主要由疏鬆至中等緊密之粉質細砂層所組成，地下水位約在地表下2~3公尺間，於設計地震力 ($M=7.3$ ， $a_{max}=0.21g$)作用下，淺層砂質土壤液化潛能甚高，為此工業區內各廠區基地均實施地盤改良以提高土壤之抗液化能力。對於可能液化深度小於13公尺之基地，均採動力夯實工法 (Dynamic Compaction Method)進行抗液化之地盤改良，液化深度大於13公尺或經動力夯實工法或預壓工法無法有效改良之廠區，則採礫石樁工法改良。本文介紹之案例係位於六輕煉油廠T-8125~T-8128四座原油槽基地，該基地是目前六輕廠區內少數未經動力夯實改良或預壓即直接施打礫石樁改良之廠區，有助於瞭解礫石樁直接改良之成效。

4.1 地層概況

本區地表下深度20m範圍內之地層主要由粉土質細砂所組成，其間偶夾粘土薄

層，其SPT N值多在20下以內(N值平均約10)；屬疏鬆程度之粉質細砂層。深度20m以下至80m間則主要為細砂、粉土與粘土交互沉積而成，其N值大多在15~40下之間，地層隨深度之變化如圖十一所示。



圖十 剪應力折減法礫石樁間距設計流程

表一 礫石樁改良案例於經歷地震後之情形

地震/日期	地震規模	基地位置及工程概況	基地最大地表加速度	改良前地層概況	礫石樁改良概況	改良後土壤性質	地震後之損壞情形	資料來源
Loma Prieta 17 Oct 1989	Mw=6.9	Treasure Island 舊金山,加州 醫藥大樓(2層樓)	0.16g	0~6m 為水力回填之疏鬆至中等緊密砂土; $(N_{100})_{60} = 4 \sim 62$, 平均 $(N_{100})_{60} = 27$, 細粒含量 <10%, 6m~12m 以下為極疏鬆粉土質砂, 其下為海灣黏土, 地下水位 GL-2.3m	<ul style="list-style-type: none"> 改良間距 3.0m 基礎下方改良深度 6.5m 	CPT 檢驗結果顯示未達設計規範要求, 平均相對密度 $D_r = 77 \sim 80\%$	55m 長度內之最大差異沉降為 2.2cm, 電梯基坑底部有 2.4m 之積砂, 但基礎無損壞; 建物外側未改良區出現噴砂及地裂情形, 研判為 6.7~12.2m 深度間之粉土質砂土液化所致	整理自 Mitchell 等人, 1995
Loma Prieta 17 Oct 1989	Mw=6.9	Treasure Island 舊金山,加州 碼頭	0.16g	0~13m 為水力回填之疏鬆至中等緊密砂土, 細料含量 <10%, 其下為海灣黏土, 地下水位 GL-3.0m	<ul style="list-style-type: none"> 改良深度 12m 最低改良需求: $SPT-(N_{100})_{60} = 17 \sim 25$, 隨深度增加 	9~12m 深度處之 SPT N 值未達改良需求	改良區域內無位移現象發生, 未改良區則出現部份陷坑及發生噴砂情形	整理自 Mitchell 等人, 1995
Loma Prieta 17 Oct 1989	Mw=6.9	Richmond, 加州 港灣遊藝場	0.11g	0~4m 為中等緊密至緊密砂質及礫質回填土, 其下 3.5m 為疏鬆之水力回填粉土質砂, $(N_{100})_{60} = 11 \sim 22$, 細顆粒含量 <55%, 下方則為海灣黏土, 地下水位 GL-1.4m	<ul style="list-style-type: none"> 礫石樁直徑 1.1 m, 採用正方形配置間距 1.8m 改良深度為液化深度加 0.3m 礫石樁回填料採粒徑 2.5cm 以下之碎石 	平均 $(N_{100})_{60} = 22$, 平均 $Q_{c1} = 88 \text{ kg/cm}^2$	改良區無液化及側向流動現象發生, 距改良位址 1.6 公里外之未改良區有小規模噴砂情形	整理自 Mitchell 等人, 1995
Northridge Jan 1994	Mw=6.7	El Monte, 加州, 高架鐵路基礎	$a_{max} = 0.11g$	砂及粉土質砂, Q_c 值約 $7 \sim 185 \text{ kg/cm}^2$, $f_r = 0.8 \sim 4\%$	<ul style="list-style-type: none"> 礫石樁直徑 0.9m 改良間距 2.7m, 改良寬度 9m 改良深度 5.5m 	$Q_c = 15 \sim 280 \text{ kg/cm}^2$ $f_r = 0.3 \sim 2.8\%$	未發現損壞情形	整理自 Mitchell 等人, 1995
Northridge Jan 1994	Mw=6.7	加州 Cal-State 變電所	$a_{max} \geq 0.7g$	0~12 為疏鬆至中等緊密砂質粉土及粉質砂互層, $(N_{100})_{60} = 12 \sim 14$, 地下水位深度在鑽孔深度以下	<ul style="list-style-type: none"> 礫石樁直徑 0.8m, 改良間距 2.0m 改良深度 4.6m 	N/A	變電所附近無液化現象發生	整理自 Mitchell 等人, 1995
嘉義地震 22 Oct 1999	$M_L = 6.4$	Northridge 雲林麥寮工業區, 台灣原油儲槽基礎	$a_{max} = 0.12g$	0~20m 間為粉土質細砂, 偶夾粘土薄層, Q_c 值介於 $20 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ 間, 平均 SPT-N 值約為 10, 細料含量約 20%, 地下水位約在地表下 2~3 公尺。	<ul style="list-style-type: none"> 礫石樁直徑 0.95~1.0m, 採用正三角形配置, 改良間距 2.7m 改良深度 17~18m 改良範圍延伸至槽殼外 10 公尺 	$Q_c = 50 \sim 130 \text{ kg/cm}^2$	儲槽無損壞, 周圍地表無液化現象	萬鼎工程服務股份有限公司(1999)

4.2 施工及檢驗規劃

1. 改良深度及範圍

煉油廠T-8125~T-8128等四座13萬公秉原油槽，儲槽直徑為86公尺，其礫石樁改良範圍除槽體正下方外，更自槽殼向外延伸約10m範圍，每座儲槽之改良面積約9581m²，改良深度則視各儲槽基址土壤可能之液化深度而定，約17~18公尺。

2. 施工方法簡介

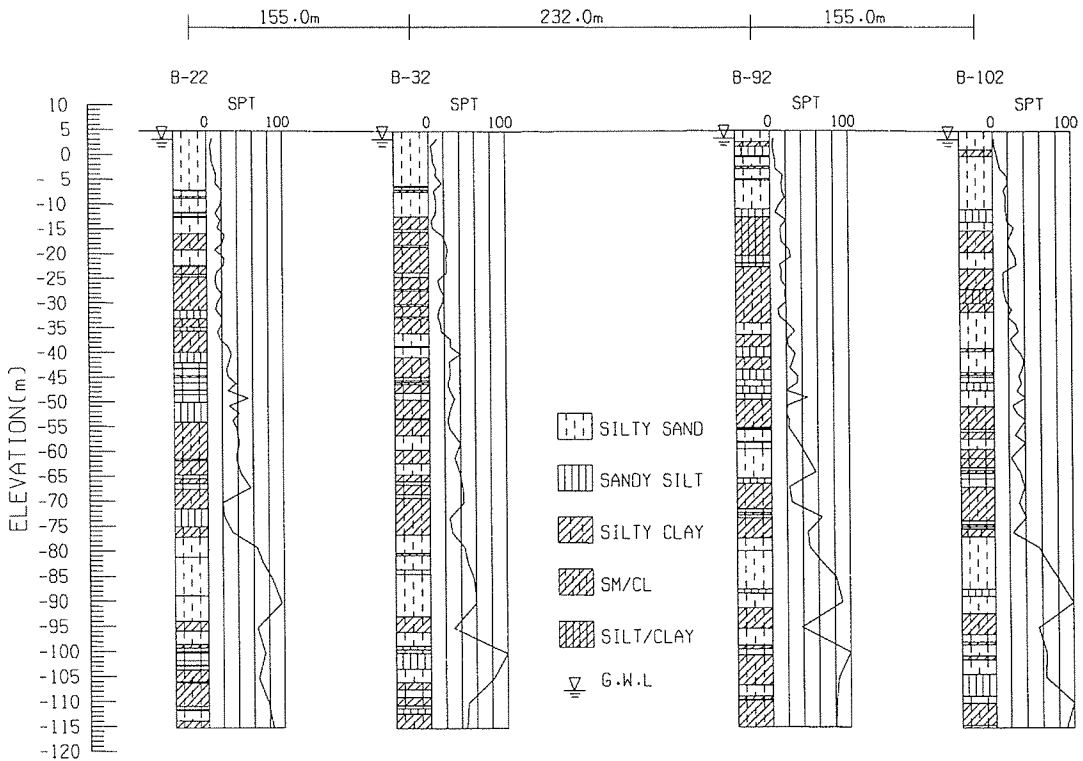
麥寮六輕廠區之礫石樁由台朔重工公司施作，係以改良式振動夯實工法採乾式底部供料方式施工。回填之礫石料則採粒徑15~25mm之碎石料。針對表層較堅

實之地層，為縮短揚實錐貫入之時間，本工程採預鑽孔方式，利用直徑0.5~0.8m之螺旋土鑽於礫石樁擬施打之孔位先行鑽孔掘鬆，惟為確保擠壓夯實效果，土鑽鑽至施工深度後，即採反向旋轉方式拔桿以減少出土量。

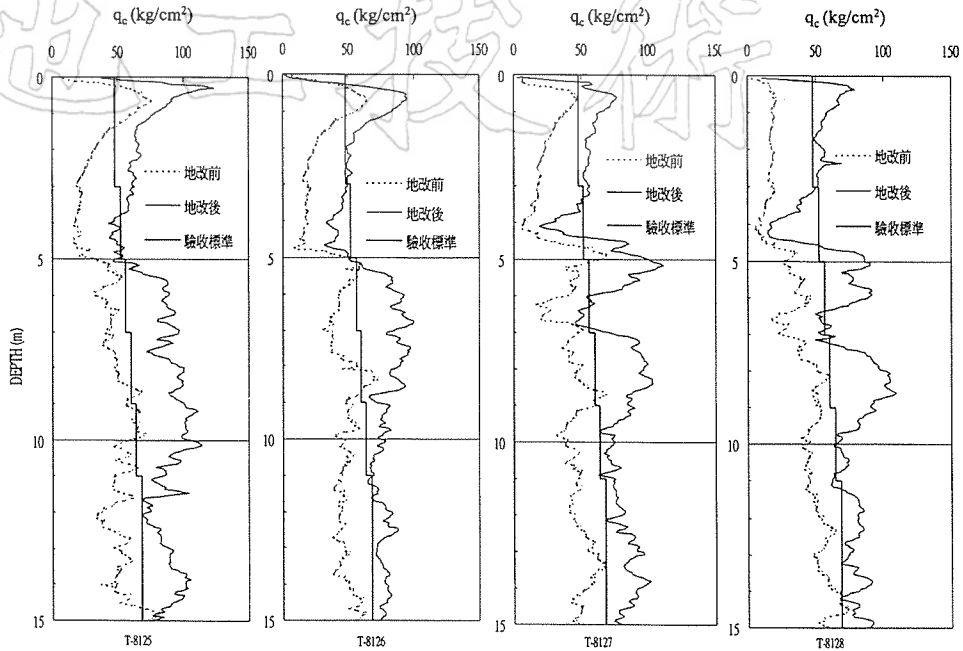
3. 礫石樁改良參數

廠區名稱	樁徑 (m)	間距* (m)	樁長 (m)	夯實壓力 (bar)
T-8125	0.95	2.7	18	280
T-8126	0.95	2.7	18	280
T-8127	0.99	2.7	17	280
T-8128	0.98	2.7	17	280

*礫石樁採正三角形配置



圖十一 煉油廠原油槽區(T-8125~T-8128)地層分佈圖

圖十二 各槽區地改良前後之 Q_c 平均值

4. 檢驗計畫

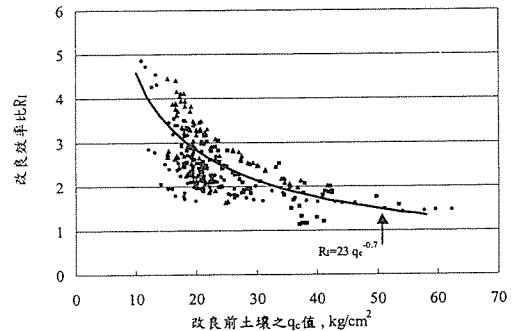
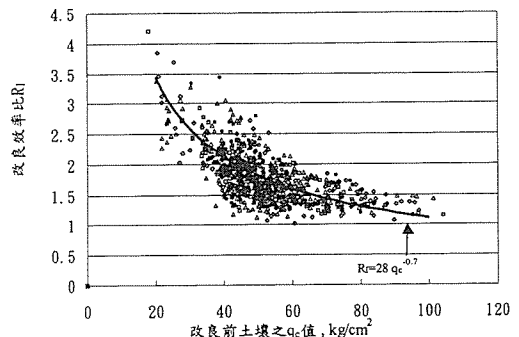
4個槽區共規劃20孔之CPT檢測，平均每一槽區檢測5孔，檢測孔均為20m深，總計400m之檢測深度。檢測工作係安排於礫石樁打設完成二~四週後進行。

4.3 改良成效探討

1. 地改前後之 q_c 值

圖十二中所示分別為各槽區改良前地層之平均 q_c 值與改良後地層平均 q_c 值之比較，由圖中可知經礫石樁改良後之土層，其CPT- q_c 增量至少均在10 kg/cm^2 以上，大多介於10~60 kg/cm^2 間，其中尤以改良前 q_c 值在30~60 kg/cm^2 間之地層，改良成效較佳，改良後地層之 q_c 值增量最高可達70~80 kg/cm^2 ；顯示改良成效與改良前地層之強度有密切關係。

圖十三及圖十四所示分別為淺層土壤(深度小於等於5m範圍內之地層)及深層土壤(深度5~15m間之地層)之改良成

圖十三 礫石樁地改前之 Q_c 值與改良成效比之關係(深度5M以內之淺層土壤)圖十四 礫石樁地改前之 Q_c 值與改良成效比之關係(深度5~15M之深層土壤)

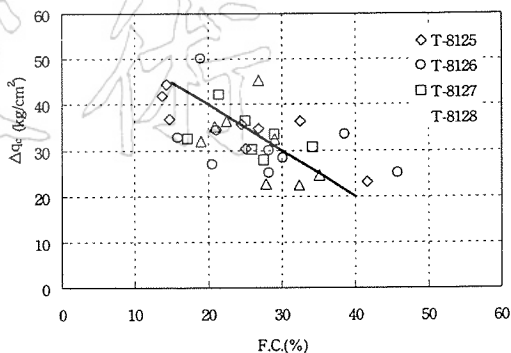
效比 R_i (改良後地層之 qc 值除以改良前地層之 qc 值)與地質改良前之 qc 值關係。圖中顯示改良成效比隨著地層改良前之 qc 值增加而遞減，淺層土壤與深層土壤改良成效比隨改良前 qc 值增加而遞減之趨勢約略相同，惟淺層土壤之改良成效比則約比同一 qc 值之深層土壤低約20%，研判應係淺層土壤有效覆土壓力較低所致。

2. 細顆粒含量對改良效果之影響

圖十五所示改良後土壤 qc 值增量(Δqc)與土壤細粒料含量(FC)之關係，由圖中可知隨著細顆粒含量之增加，礫石樁之改良成效亦隨之減少，當細顆粒含量低於20%時，礫石樁改良對地層 qc 值之改善效果多在30~50 kg/cm^2 以上；當細顆粒含量大於30%以上時，礫石樁改良後 qc 值之增量則多在30 kg/cm^2 以下，此與Mitchell(1970)之研究成果一致，Mitchell指出擬改良之地層若細顆粒含量大於20%，則擠密效果將明顯降低，改良效果不佳。

3. 改良後地層之預壓沉陷量

改良後之地層雖已具備足夠之抗液化能力，惟經沉陷分析，儲槽營運後之沉陷量將大於容許沉陷量(30公分)，非平面沉陷之扭曲率亦可能超過規範容許之1/333，因此於儲槽建造前設計單位規劃進行覆土預壓，以使沉陷得提以早發生，以確保儲槽安全。預壓覆土高度為15m，預壓載重約30 t/m^2 ，觀測結果顯示經約2~3個月之滿載持壓，儲槽中心處之最大沉陷量約121公分，槽中心與槽殼處之最大差異沉陷量約36公分，較諸鄰近地區未改良地層直接預壓之沉陷監測結果一槽心最大沉陷量約146公分，槽心與槽殼處最大差異沉陷58公分，顯示礫石樁之改良對於減低沉陷及差異沉陷量均頗有助益。



圖十五 細顆粒含量對地改後QC值增量之影響

五、結語

1. 礫石樁具有擠壓密實、加勁補強及加速排水之功能。依據過去之震害調查結果顯示，礫石樁改良深度達到液化深度之基地均完好無損，無液化、沉陷或損壞之災情，部份改良深度未達液化深度之基地，雖有噴砂及沉陷發生，但差異沉陷則甚為有限，對基礎及建物未造成損壞情形，顯見礫石樁改良對提昇砂質土壤之抗液化能力，以及減少沉陷與不均勻沉陷確有實效。

2. 抗液化礫石樁打設間距之評估，設計階段可參考本文所述方法設計，惟於正式施工前仍應安排模擬施工(Pilot Test)與施工成效之現場檢驗，以確認施工成果是否可符合設計需求，並評估是否須修改設計或調整施工參數或程序等，以滿足改良要求。

3. 抗液化改良工程決定使用振動夯實工法之礫石樁時，事先必須有週密規劃，並建立品質控制程序與準則，以確保施工之高品質。對於改良效果之檢驗，則宜使用標準貫入試驗N值或CPT qc 值或相對密度為驗收依據。

參考文獻

- 郭俊良、歐晉德(1983), "振動揚實法", 土工技術, 第一期, 43-48頁。
- 萬鼎工程服務股份有限公司(民國八十八年), "麥寮六輕石化工業區大地工程綜合評估顧問工作(I、II、III)總結報告書"。
- 中華人民共和國建設部(1989), "建築抗震設計規範(GBJ 11-89)", 中國建築工業出版社, 北京。
- 葉文謙、吳建閩、鍾毓東、余明山(1998), "液化風險與土壤改良評估案例", 土工技術, 67期, 43-54頁。
- BROWN, R. E. (1977), "Vibrofloatation Compaction of Cohesionless Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT12), 1437-1451.
- MITCHELL, J. K. (1970), "In-Place Treatment of Foundation Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 96(SM1), 73-110.
- MITCHELL, J. K., BAXTER, D. P. AND MUNSON, T.C.(1995), "Performance of Improved Ground During Earthquakes", Geotechnical Special Publication, ASCE, No.49, 1~36.
- PRIEBE, H.(1989), "The Prevention of Liquefaction by Vibroreplacement", International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design (ERCAD), Balkeman, 211~219.
- SEEᵀ, H. B. AND BOOKER, J. R. (1977), "Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT7), 757~768.