

振動揚實法

VIBROFLOTATION - AN INTRODUCTION

郭俊良，前亞新工程顧問公司工程師

歐晉德，亞新工程顧問公司協理

C.L. Kuo, Formerly Geotechnical Engineer

and

C.D. OU, Vice President

Moh and Associates, Inc.

Taipei

原載於地工技術雜誌第1期，72年6月第43-48頁

Reprinted from

Sino-Geotechnics, No. 1

Jan. 1983, pp. 43-48

振 動 揚 實 法

郭 俊 良* 歐 晉 德**

1. 概 論

振動揚實法 (Vibroflotation) 為改良深層疏鬆砂質地盤，以增加土壤支承力，減小基礎沉降量，與降低土壤液化潛能所使用之工法。此技術於1930年代在法國發展，首先應用於建築物之基礎土壤改良，1940年代引入美國，1950年代再傳進日本，臺灣地區則在1970年代才開始採用此工法。

這工法之優點為：

- (1) 地盤改良效果均勻。
- (2) 在地表下 8 公尺內之深度均可施工，最大改良深度至地表下 35 公尺左右。
- (3) 施工作業不受地下水位之影響。
- (4) 改良後土壤之壓縮性降低，並可防止不均勻沉降。
- (5) 所需工期短，施工安全性高。

缺點為：

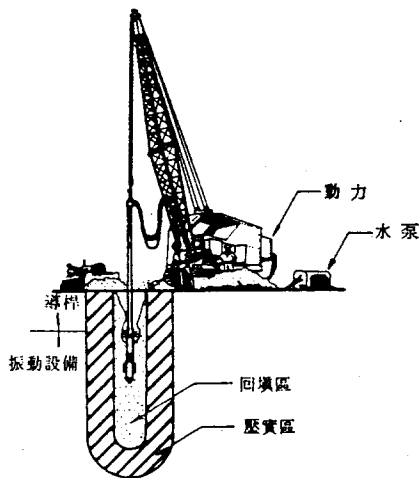
- (1) 對砂質地盤之改良效果較彰。惟若細料含量超過 40%，很難達到改良之效果。對於細料含量少於 15% 之砂質地盤，效果最好。
- (2) 現階段之施工深度仍受到限制。
- (3) 振動揚實法之振動為水平振動，一般振動機無法使用，且故障率高。

2. 工法原理與施工步驟

振動揚實法使用裝備包括揚實錐 (Vibroflot)、抽水機、吊車、與挖土機等，如圖一所示。最主要工具為揚實錐，由兩個部份組成，下部份為一水平振動機，約 2.1 公尺 (7 英尺) 長，以沉向接頭與上部份連接，上部份為一導管，依據所需壓實深度，

其長度可任意調整。揚實錐係屬專利，國內目前並無此類設備，表一為美國專利揚實錐之一些主要性能 (Brown, 1977)。

本工法之施工步驟，在理論上可分為四個步驟，如圖二所示，步驟一，首先以吊車將揚實錐懸空吊著，由揚實錐噴水，以振動方式使土壤達到液化狀態。步驟二，利用揚實錐本身重量，使其下墜。步驟三，當揚實錐到達預計深度後，降低水之流量，且將水流由下噴水口轉至上噴水口。由緊接振動機上方之出口沿導管外圍向上噴出。這向上水流在揚實錐周圍造成一水路，可使回填料從地表擠進至底鄰，而不致於使揚實錐被束縛住。步驟四，當水流連續地流回地表時，逐漸將揚實錐提起，於



圖一 振動揚實法之裝備

* 前亞新工程顧問公司大地工程部工程師

** 亞新工程顧問公司協理

提昇階段，每一位置稍予振動，將土壤密化。同時，不斷地填入回填料，以填塞揚實錐提昇時所遺留之孔隙。若向上水流由於孔內崩塌而被阻絕時，可再上下抽動揚實錐，重新造成環狀水路。

在一般砂土層中，揚實錐之下墜速率約 1.0~

1.8 公尺/分鐘，而在揚實階段之提昇速率，則必須慢到足夠達到所需之緊密度，大約為 0.3 公尺/分鐘 (Mitchell, 1970)。

3. 揚實程度之影響因素

根據振動揚實法之施工經驗，影響揚實程度之因素 (Law Engineering Testing Co., 1960~1975) 可分為(1)裝備；(2)振動位置之間隔與模式；(3)土壤性質；(4)揚實錐之提昇過程；(5)回填料。茲分述如下：

3.1 裝備

表一所列為在美國所使用不同揚實錐之主要性能。揚實錐之馬力對於揚實能力有相當的影響，若所有之因素皆相同時，100 馬力揚實錐可在土層中產生較高之振動振幅，且傳遞的更遠，因此所造成之緊密度比 30 馬力揚實錐者更高，且影響範圍更廣。

3.2 振動位置之間隔與模式

振動揚實法係以不同振動間隔與模式進行。典型之間隔與模式示如圖三。由於離振動位置愈遠，其增加之緊密度愈小，因此振動位置之間隔有其極限。在細料含量小於 5% 之砂土層中，單一振動位置之影響範圍，若使用 30 馬力揚實錐約為 1.8 公尺，而 100 馬力揚實錐約 2.7 公尺。

位置模式亦影響緊密程度。對於大區域，通常主要使用等邊三角形模式，而對於單獨之條形基脚，一般使用正方形或矩形模式。在大區域中若使用正方形模式以代替等邊三角形模式，則需要增加 5~8% 之振動點，才能達到相同之緊密程度。

從許多現場試驗，以觀察緊密程度隨距離振動位置遠近之關係，可發現 (D'apponia, 1955)：

- (1) 在距離單獨振動位置達 1 公尺以上時，其相對密度不易超過 70%。
- (2) 鄰近點之揚實效應可應用疊合原理判別。
- (3) 揚實點間距超過 2.4 公尺時，疊合效應很小。
- (4) 間距小於 1.8 公尺時，在改良區域內，相對密度可達 70% 以上。
- (5) 三角形模式可獲得最大之疊合效應。

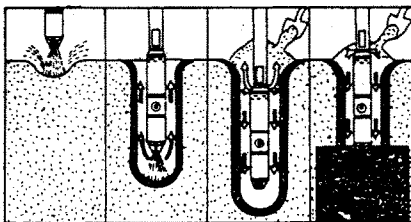
3.3 土壤性質

現場土壤之性質對於振動揚實法之效果有很大的影響 (Webb and Hall, 1969)。圖四顯示適合於使用振動揚實法之土壤範圍。振動揚實法於地下

表一 揚實錐規格

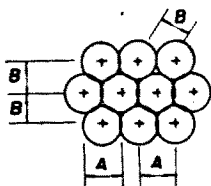
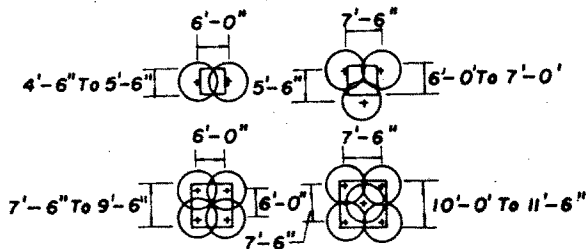
| 馬 達 形 式 (1) | 100-馬力 電力式及水力式 (2) | 30-馬力 電力式 (3) |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------|
| (a) 振 動 頭 | | |
| 長 度 feet | 7.0 | 6.11 |
| 直 徑 inches | 16 | 15 |
| 重 量 pounds | 4,000 | 4,000 |
| 最大位移 inches | 0.49 | 0.30 |
| 離 心 率 tons | 18 | 10 |
| (b) 偏 心 柱 | | |
| 重 量 pounds | 260 | 170 |
| 偏 心 量 inches | 1.5 | 1.25 |
| 長 度 inches | 24 | 24 |
| 轉 速 revolutions per minute | 1,800 | 1,800 |
| (c) 水 泵 | | |
| 流 量 gallons per minute | 0-400 | 0-150 |
| 水 壓 pounds per square inch | 100-150 | 100-150 |
| (d) 導 桿 | | |
| 直 徑 inches | 12 | 12 |
| 重 量 pounds per foot | 250 | 250 |

註：1 ft=0.305 m, 1 in=25.4 mm, 1 lb=0.453 kg,
1 ton=9.8 kN, 1 gal/min=0.004 m³/min,
1 psi=6.9 kN/m², 1 lb/ft=14.6 N/m



步驟 1 步驟 2 步驟 3 步驟 4

圖二 振動揚實法之施工步驟

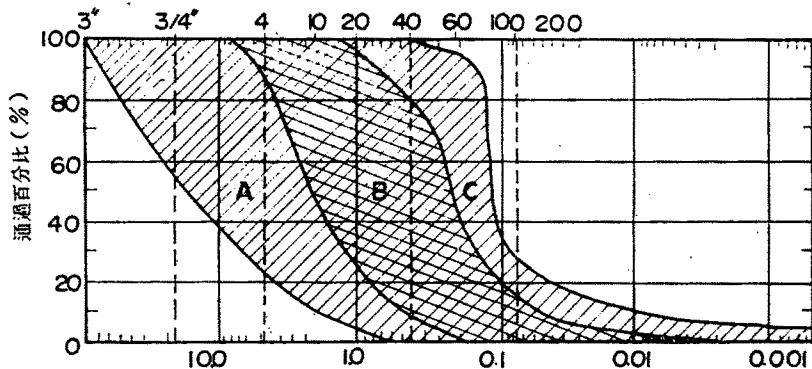


| 間距 (呎) | | 揚實點數 / 每千平方呎 |
|--------|------|--------------|
| A | B | |
| 6 | 5.2 | 33.3 |
| 7 | 6.1 | 23.8 |
| 8 | 6.9 | 17.9 |
| 9 | 7.8 | 13.9 |
| 10 | 8.7 | 11.8 |
| 11 | 9.5 | 9.6 |
| 12 | 10.4 | 7.9 |

+ 揚實點
 □ 基脚

圖三 典型之振動揚實法模式

美國標準篩



粒徑 (mm)

| | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|-------|--|-----|
| 礫石 | | 砂 | | | 細 沉 泥 | | 粘 土 |
| 粗 | 細 | 粗 | 中 | 細 | 沉 泥 | | |

圖四 適合於振動揚實法之土壤

水位以下之砂土層為適用，而當其粒徑分佈曲線完全落在圖四中B區之極鬆砂土時效果最佳。

若土層中有黏土層存在。細料含量太多、或含有機物都會使振動揚實法之效果顯著下降。通常，若土壤之粒徑分佈曲線完全落於圖四中C區，則振動揚實法很難收到成效。

對於礫石（圖四中A區）、緊密砂、或水位相當深之狀況，會降低揚實錐之正常貫入速率，而若貫入速度太慢，可能使本工法變成不經濟。

3.4 揚實錐之提昇

為達到有效緊密化之最大振動傳遞效應，土壤必須能緊壓在揚實錐周圍。因此，揚實錐之提昇速率必須配合回填料之填塞速率。若揚實錐提昇太慢，雖可達到最大之緊密度，但揚實錐易受到束縛，而延誤工期且增加裝備之損耗率。若提昇很快，可提高施工速率，但無法達到需求之緊密程度。最佳之提昇速率應介於兩極端間。例如揚實錐每次提昇0.3公尺，並停留30秒，雖與每次提昇1.2公尺，停留2分鐘之提昇速率相同，但每次提昇0.3公尺造成之壓實效果遠較1.2公尺者均勻。

30馬力揚實錐之標準提昇速率為每分鐘0.3公尺，但100馬力揚實錐目前尚無標準速率，目前較多使用30秒提昇0.3公尺或每分鐘0.6公尺，或兩者交替使用。若改良深度超過9公尺，土壤不容易下沉，或使用細砂回填時，提昇速率必須減慢，使回填料能下沉至底部，通常速率為標準速率之一半。

3.5 回填料

要達到需求之緊密度，必須供給足夠之回填料，使振動效應能傳遞至原土壤中，且填充揚實錐遺留之孔隙。填充料之品質，主要由級配控制。細砂、粗砂、礫石、碎石、與爐渣都會使用為回填料。爐渣在某些地區，所需費用可能極微，然其下沉速率，比起其他回填料為緩慢。含極少細料之粗料係最佳回填料，然而若顆粒太大，可能會堵住循環水路，使回填料無法下沉至底部。

因而顯見回填料之級配為控制回填料下沉速率之最大因素。根據現場經驗及回填料下沉速率得知，回填料之適合性可以一適合值判別。

$$\text{適合值} = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{10})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{30})^2}} \quad (1)$$

此處 D_{10} 、 D_{20} 、與 D_{30} 分別為通過百分率 50%、20%、與 10% 之粒徑，單位為厘米。回填料之品質影響揚實錐之容許提昇速率。在合理之範圍內，適

表二 回填料之估計準則

| 適合值 | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 750 |
|-----|------|-------|-------|-------|-----|
| 速率 | 極佳 | 佳 | 普通 | 差 | 不適合 |

合值愈小，揚實錐之速率可以愈快，而仍能達到需求之緊密度，表二列舉適合值與速率之關係範圍。

4. 規劃與設計方法

當一改良工程決定使用振動揚實法時，事先必須有週密規劃，建立品質控制準則，通常對於壓實效果之檢驗，以使用標準貫入試驗 N 值與相對密度關係式判別較為簡便。一般而言，於工程開始前直選定地點先行現場試驗，以建立適合該工程地點土壤性質 N 值與相對密度關係式。振動揚實法之一般規劃與設計程序如圖五所示。

4.1 回填料之補給量與施工間隔之決定

在振動揚實法中，回填料的補給量是必要的。根據現場密度與需求緊密度、與壓實砂層之情形大略相同，估計所需要之補給量：

$$v = \frac{(1+e_1)(e_0 - e')}{(1+e_1)(1+e')} \quad (2)$$

此處 v = 要達到需求緊密度、現場土層單位體積之需求補給量 (m^3/m^3)。

e_0 = 現場土層之孔隙比。

e_1 = 補給回填料之孔隙比。

e' = 改良後之需求孔隙比。

在估計回填料之補給量後，亦可決定所必需之施工間隔：

$$d = \alpha \sqrt{s/v} \quad (3)$$

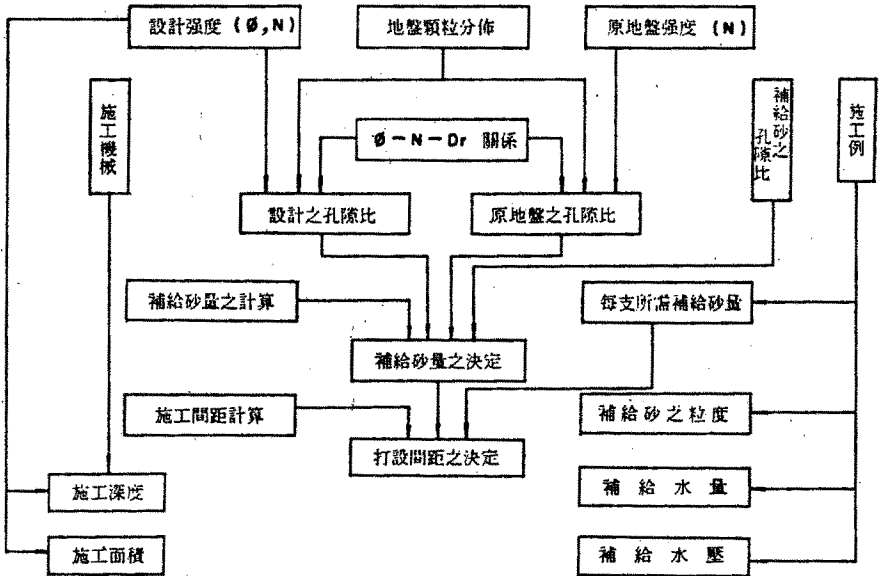
此處 d = 施工間隔， m 。

α = 係數；正方形模式為 1.0，正三角形模式為 1.075。

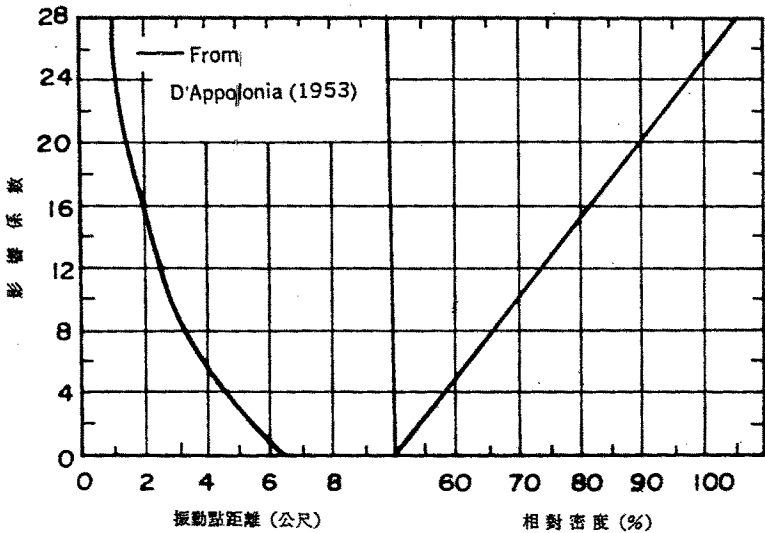
s = 振動揚實位置單位長度之可能補給量 (m^3/m)。

v = 現場土層單位體積之需求補給量。

由現場經驗，根據單一振動揚實位置的影響範圍，亦可估計所需之施工間隔 (D'Appolonia, 1953)，其假設振動揚實效可應用疊合原理求影響係數、間隔、與相對密度三者間之關係，圖六表示影響曲線，可用以決定在需求之緊密度下，所需之施



圖五 振動搗實法之規劃與設計程序



圖六 影響係數，距振動搗實位置距離與相對密度之關係

工間隔。例如，若決定採用正三角形模數，當設計相對密度為75%時，由圖六查得影響係數為13，由三個振動揚實位置均攤，則每一位置為4.3，再由圖六查得，每一振動位置距離三個振動位置之中心1.4公尺，則所需間隔為2.4公尺。若使用正方形模式，則間隔需縮小1.075倍，即2.3公尺。

上述者為設計階段之選擇，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與施工間距之決定，應在現場分別以不同之補給量與間距進行試驗，以決定最佳值，尤其對於大工程，不當的選擇，可能造成經濟上之極大損失。

參 考 文 獻

BROWN, R. E. (1977), Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils, *Journal of the Geotechnical*

Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT12, December.

D'APPOLONIA, E. (1953). Loose Sands—Their Compaction by Vibroflotation, *Special Technica Publication No. 156*, ASTM.

D'APPOLONIA, E., MILLER, L. E., and WARE, T. W. (1955), Sand Compaction by Vibroflotation, *Transactions, ASCE*, Vol. 20.

MITCHEL, J. K. (1970), In-Place Treatment of Foundation Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM1, Jan.

Law Engineering Testing Co., "Subsurface Investigation Reports and Case Histories Concerning Vibroflotation (1960-1975)", Washington, D. C.

WEBB, D. L. and HALL, R. I. (1969), Effects of Vibroflotation on Clayer Sands, *Journal of Soil Mechanical and Foundation Division, ASCE*. Vol. 95, No. SM6, Nov.

