

攪拌樁載重傳遞之模型試驗研究

蔡佩勳¹、陳俊偉¹

¹朝陽科技大學營建工程系

E-mail:phtsai@cyut.edu.tw

國科會計畫編號: NSC 93-2211-E-324-004

摘要

本研究之目的在模型箱內製作攪拌樁之複合土層，然後施以載重試驗，藉以評估剛性基礎下方之攪拌樁於不同之面積改良率、樁長之載重傳遞行為，包括攪拌樁與樁間土壤的載重分配比、樁頂沉陷量與載重之關係、樁身摩擦力分布、有效樁長等。本研究製作兩種型式(四、五支樁，面積改良率分別為 28.27%、35.34%)之攪拌樁群，其上方覆以剛性承載版，逐次對剛性版中央施以垂直載重，量測樁頂垂直位移量與樁身應力。由研究結果顯示，長徑比大之攪拌樁，當載重施加後攪拌樁承受比例較大的載重，而短樁在載重較大時承受比例則較小。攪拌樁在承受載重後，在樁頂算起 0.4 倍樁長產生較大的摩擦力，且中間樁之摩擦力小於角落樁。在本研究中，攪拌樁複合土層的有效長徑比約在 10 左右。攪拌樁複合土層的沉陷明顯小於未改良的紅土土層，因此攪拌樁具有降低土壤之壓縮性和減少結構沉陷的成效。

關鍵詞：攪拌樁、載重試驗、載重傳遞、複合土層。

1. 前言

台灣地狹人稠，可利用的土地日益減少，若想於高含水量及低承載力的軟弱地盤上興建結構物，地盤改良將扮演著一個重要的角色。地盤改良之目的都希望能提高地盤之承載力與降低土層壓縮性。地盤改良的方法中，深層攪拌樁是對軟弱土層添加土質改良材料，藉土壤與水泥或石灰或飛灰混拌而製成複合樁體，此複合樁體不僅具有一般基樁之功能，更藉由水泥與土壤間產生的物理化學反應來改變土壤的性質，進而達到地盤改良之目的。土壤與水泥系列之材料拌合後，將產生一系列之物理化學反應，因此降低了土壤含水量與塑性，增加土壤之剪力強度與承載力，降低土壤之壓縮性而減少結構物或地盤沉陷。攪拌樁與周圍土層形成複合土層，共同支承上部結構之載重，在剛性基礎下方各攪拌樁的垂直位移假設一樣時，攪拌樁所分配的載重比與樁間土壤分配的載重比，以及不同位置的攪拌樁所分配之載重皆隨面積改良率及水泥摻加比而異，然其影響如何似乎仍無明確之結論，當然也影響攪拌樁所形成複合土層之設計理念。因此，如何設計攪拌樁複合土層使其有效地承受載重，已然成為一個重要的課題。

過去對於水泥改良土之物理、力學性質的研究很多，像在水泥配比使用方面，根據 Terashi 等人(1980)[1]的研究指出，水泥摻加比愈高，其改良效果愈佳，但在添加至某一極限值後，改良土將趨近於混凝土性質。

Okumura(1989)[2]認為應用攪拌樁在加固地層時，其最小水泥摻加比為 10%，而一般取 10%~20%。本研究將依 Okumura 之結論建議，將水泥摻加比固定為 15%。同時，Okumura 也發現當載重小於某值時，改良土之壓縮性較小；但超過該值時，壓縮變形將大幅增加。段繼偉(1994)[3]採用樁長 12.5~15.0m 水泥攪拌樁進行現地載重試驗，研究水泥攪拌樁的載重傳遞規律，他認為樁體的變形、軸力、樁身摩擦力主要集中在臨界深度這部份的樁體上，超過臨界深度後，樁體的變形、軸力、樁側摩擦力之發揮較小。林德貴等人(2003)[4]對泰國 Bangna-Bangpakon 公路計畫中之全尺寸深層攪拌樁地盤改良路堤進行有限元素壓密沉陷分析，再反算一組最佳輸入參數。他們發現攪拌樁長度越長，土壤壓密沉陷量越小。Bouassida 等人(2004)[5]以降伏設計理論對攪拌樁承載力進行評估並與其他預測方法所得結果作比較。Ishikura 等人(2007)[6]以試驗方式研究土堤下方攪拌樁的改良率、改良深度、樁群配置對沉陷之影響，由其結果發現樁群配置對壓密沉陷之改良效果影響不大，樁身摩擦的存在可減少路堤的沉陷量。

2. 試驗材料、設備與方法

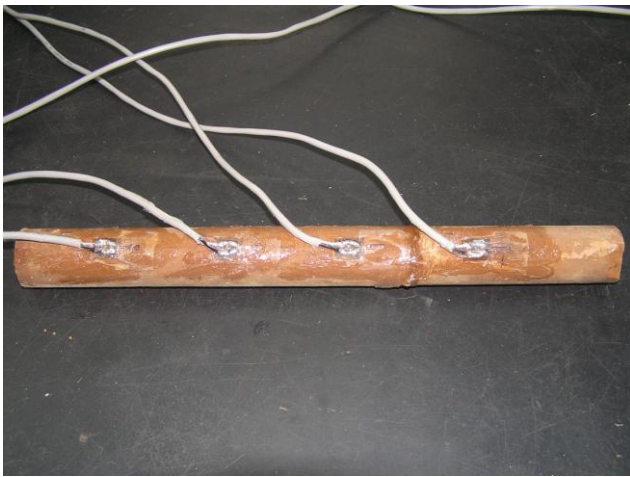
本研究所使用的主要材料包含紅土、水泥兩部分，配合試驗模型箱、量測裝置、資料擷取系統等進行模型箱載重試驗。本研究將固定水泥摻加比為 15%、樁徑 3cm，然後改變其面積改良率與攪拌樁樁長，探討剛性基礎下方攪拌樁複合土層受垂直向載重之力學行為。本研究使用之紅土取自臺中大肚山山地，位於台中都會公園附近之空地。其土粒比重 $G_s=2.71$ ，天然含水量 $w_n=17.2\%$ ，飽和度 $S=71.2\%$ ，單位重 $\gamma=1.92t/m^3$ ，液性限度 $LL=40\%$ ，塑性限度 $PL=21.3\%$ 。依據統一土壤分類系統的分類準則，紅土為低塑性粘土 (CL)。為了充分瞭解攪拌樁複合土層之力學行為，以評估改良後地盤之壓縮性及承載力，本研究在模型箱內製作攪拌樁之複合土層，然後施以載重試驗，藉以評估剛性基礎下方之攪拌樁於不同之面積改良率(28.27%、35.34%)、樁長 ($L/D=6.67$ 、10、13.33、16.67)之承載行為，包括攪拌樁與樁間土壤的載重分配比、樁頂沉陷量與載重之關係、樁身摩擦力分布、有效樁長等。試驗進行中將量測應變計、LVDT、土壓計之讀數，因此本研究以資料擷取系統，配合電腦來記讀多個電子感測器之數據，並建立虛擬儀器控制軟體 LabView，來控制試驗中試驗數據之擷取與資料之管理等。

本研究在土壤內埋入兩種型式(四支、五支攪拌樁)

之群樁，如圖 1 所示。於其上方覆以剛性承載版，承載板大小及攪拌樁設置，逐步對剛性版施以垂直載重，量測樁頂垂直位移量與各樁之樁頂應力。另外為了瞭解樁身與周圍土壤間摩擦力之分布情形，沿著樁身分別黏貼四個應變計進行量測，如圖 2 所示。



照片 1 載重塊與 LVDT 及變位計



照片 2 攪拌樁模型 (已貼應變計)

另外亦針對土壤在未埋設任何攪拌樁情況下進行載重試驗，作為土壤改良前後之對照組。

複合土層製作完成後，經五天的壓密(平均壓密度 U 達 90%) 後，隨即進行載重試驗。載重試驗之加載方式係參考 ASTM 1143-81 快速加載法[7]，將載重塊依次加載至剛性承載版上，施加载重每次加載為 0.63kg，共計加載 10 次，之後於第 11 次每次加載 2.53kg，共計 2 次，每次的加載時間為 5 分鐘，在進行下一次加載前量測承載版上 LVDT、樁頂的土壓計及樁身應變計的讀數並記錄之。試驗完成後，將擷取的資料轉換成所需之數據進行整理與分析。

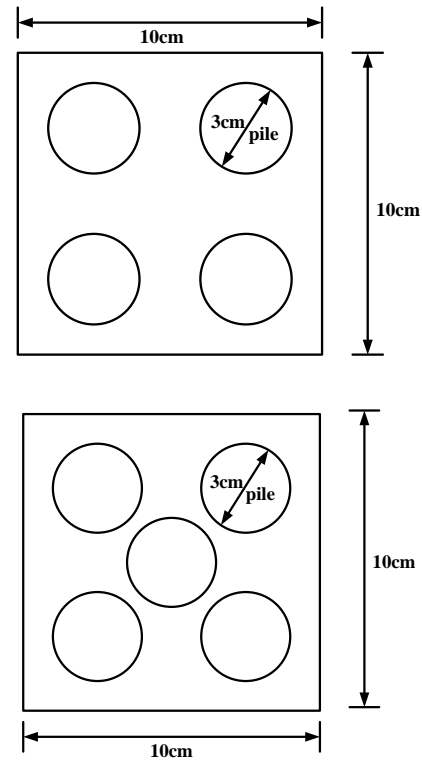


圖 1 攪拌樁平面配置示意圖

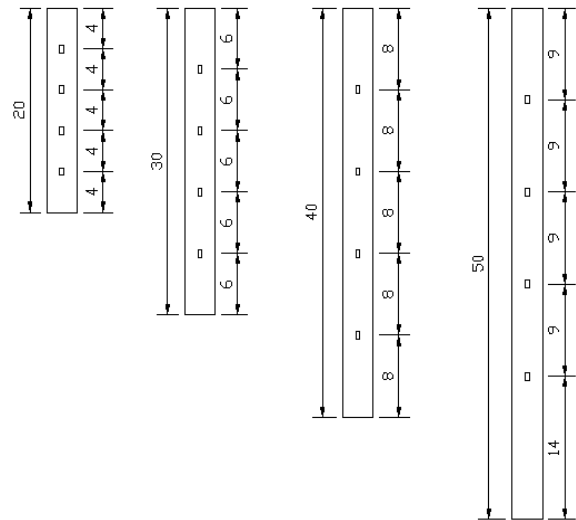


圖 2 應變計黏貼位置示意圖(單位: cm)

3. 試驗結果與討論

3.1 複合土層之樁土載重分配

經載重試驗結果顯示，在不同長徑比(L/D)下，每支攪拌樁承受的載重 Q_p 隨著載重的增加而增加，由攪拌樁載重分配比 (Q_p/Q) - 載重 (Q) 的關係圖可發現到，四支攪拌樁共分配了八成以上的載重，其餘才由樁間土壤承擔。在加載初期隨著載重的增加，攪拌樁載重分配比 (Q_p/Q) 有隨之增加的趨勢，但是當載重增加到某值後，攪拌樁載重分配比 (Q_p/Q) 不再增加，如圖 3 所示。而樁間土壤的載重分配比 (Q_s/Q) 當載重較大時，長徑比為 6.67、10 之攪拌樁樁間土壤載重分配比有增加的趨

勢，而長徑比為 13.33、16.67 攪拌樁之土壤載重分配比變化不大，如圖 4 所示。因此，由試驗結果看出，先由攪拌樁承受載重，當樁體承受載重達到某一極限值後，所增加的載重將轉由樁間土層承擔。

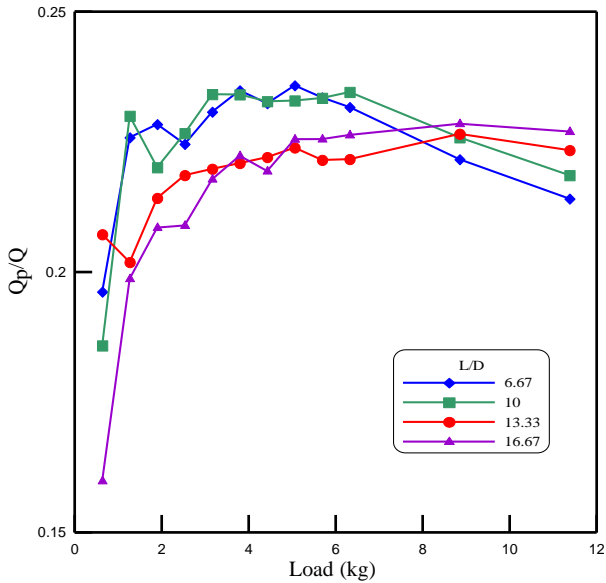


圖 3 單樁載重分配比-載重之關係(四支攪拌樁)

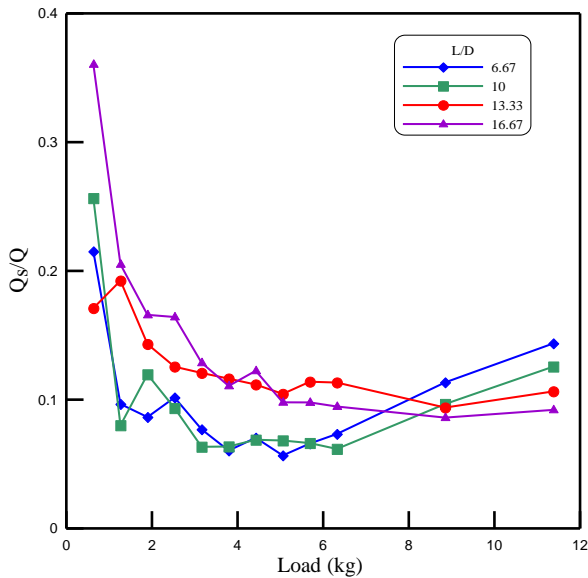


圖 4 樁間土壤載重分配比-載重之關係(四支攪拌樁)

在五支攪拌樁載重試驗結果中，角落樁、中間樁、樁間土壤與載重之關係，分別如圖 5、6、7 所示。角落樁分配到比例較大之載重比 Q_{pe}/Q ，且此比值隨載重之增加變化不大。中間樁樁頂分配的載重比 Q_{pc}/Q 隨樁長而異，長樁隨著施加载重的增加而降低。短樁隨著施加载重的增加而增加。從載重分配比-載重之關係圖中可以看出，攪拌樁載重分配的比例最大為角落樁，其次是中間樁，最後是樁間土壤。即由角落的攪拌樁承受較大比例的載重，其餘的部分由樁間土層及中間樁承擔。

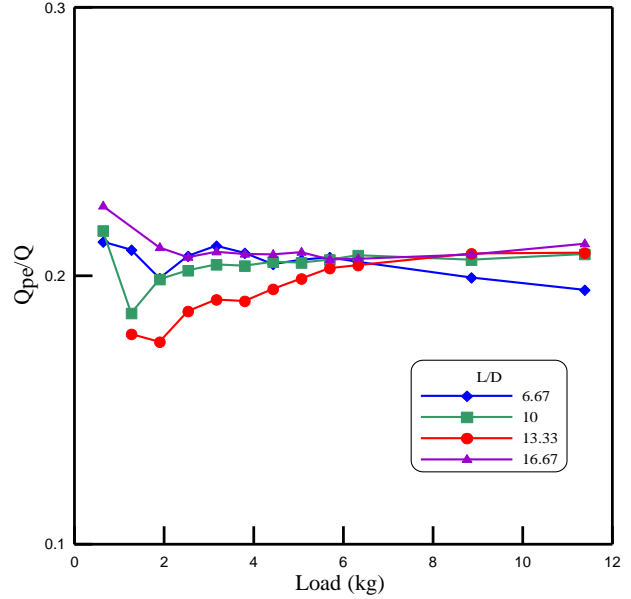


圖 5 角落樁載重分配比-載重之關係(五支攪拌樁)

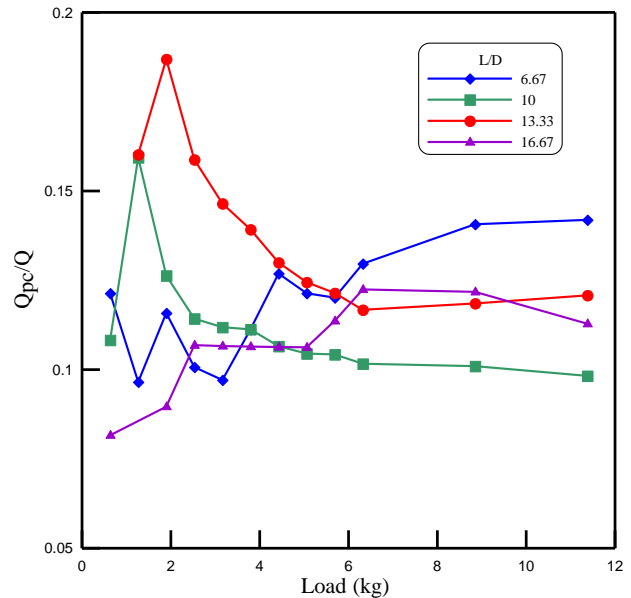


圖 6 中間樁載重分配比-載重之關係(五支攪拌樁)

3.2 攪拌樁複合土層沉陷量與載重之關係

四支攪拌樁之複合土層沉陷量與載重的結果，如圖 8 所示。由圖 8 可以發現，複合土層的沉陷量隨載重的增加而增加。在初始受力階段，複合土層沉陷量-載重曲線與未改良土壤的沉陷量載重曲線之差異不明顯，當加載到最後階段時，複合土層載重-沉陷量曲線才有明顯差異。

由圖 8 也可看出，隨著攪拌樁長徑比的增加，沉陷量-載重曲線越陡峭，即複合土層的壓縮性愈小，為研究不同攪拌樁的長徑比(6.67、10、13.33、16.67)之沉陷量改善效果，將複合土層沉陷量 s_p 與未改良土壤沉陷量 s_o 之比值定義為沉陷減小率 s ：

$$s = \frac{s_p}{s_o} \quad (1)$$

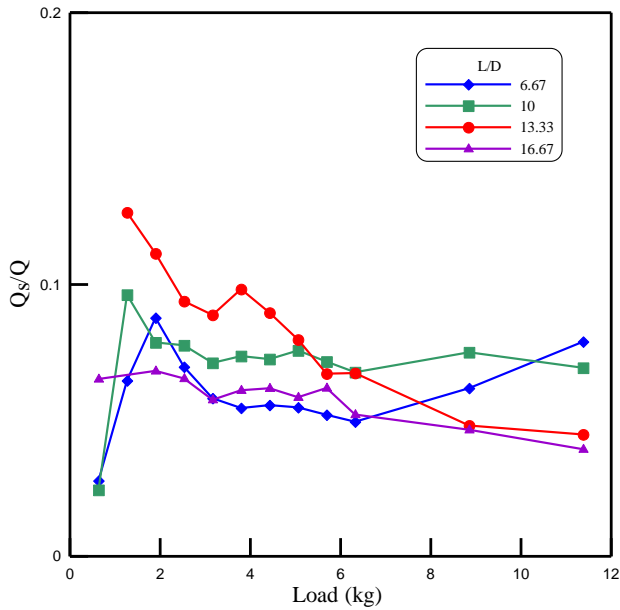


圖 7 樁間土壤載重分配比-載重之關係(五支攪拌樁)

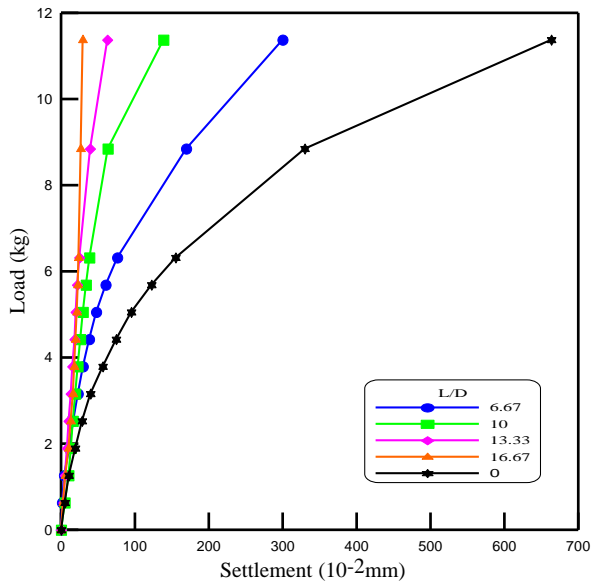


圖 8 四支攪拌樁土壤沉陷量與載重之關係

由圖 9 可看出沉陷減小率隨著攪拌樁長徑比的增加而減少，因此攪拌樁長徑比的增加，對抑制土層的沉陷量有一定的效果。林德貴等人(2003)[4]他們也有相同的發現，攪拌樁樁長越大，土壤沉陷量越小。

五支攪拌樁之複合土層沉陷量與載重之結果，如圖 10，可發現到它們的關係與四支攪拌樁者一樣，土層的沉陷量亦隨載重的增加而增加，而隨著攪拌樁長徑比增加而減少。由圖 11 可看出複合土層的沉陷減小率隨著長徑比的增加而減少。

由以上攪拌樁複合土層的沉陷量-載重結果，可以發現到隨著載重的增加，攪拌樁沉陷量也隨之增加。攪拌樁沉陷減小率隨著長徑比的增加而減少，這可能是因為增加樁長使樁底土層厚度變小，而樁底土壤沉陷佔整個複合土層沉陷的大部分，使得沉陷量減少。當增加攪拌樁數目，因能共同分擔上部荷載，因此土層沉陷量減

少。如果以未設置攪拌樁與設置攪拌樁之複合土層的沉陷量來比較，設置攪拌樁之複合土層的沉陷減小率可大大的減少，這也說明了攪拌樁具有降低土壤之壓縮性的成效。

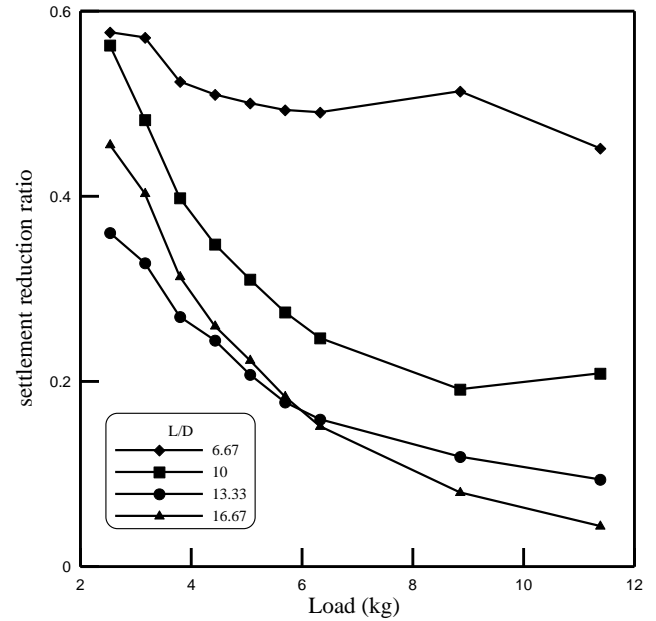


圖 9 四支攪拌樁沉陷減小率與載重之關係

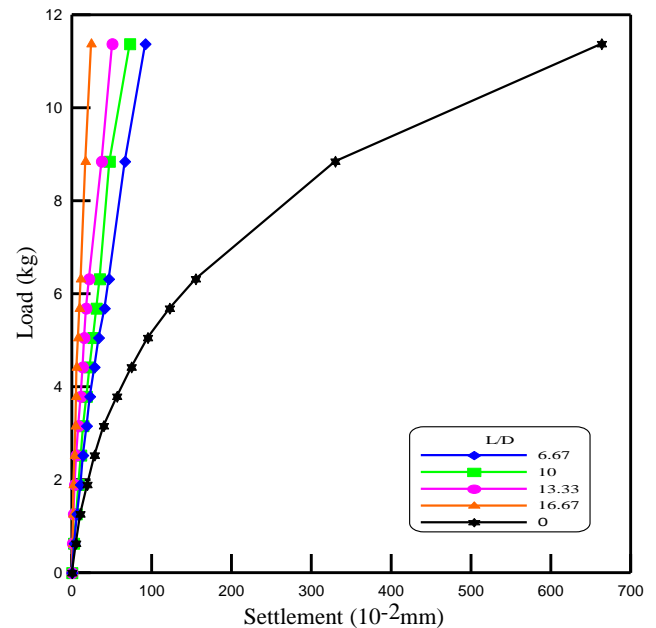


圖 10 五支攪拌樁土壤沉陷量與載重之關係

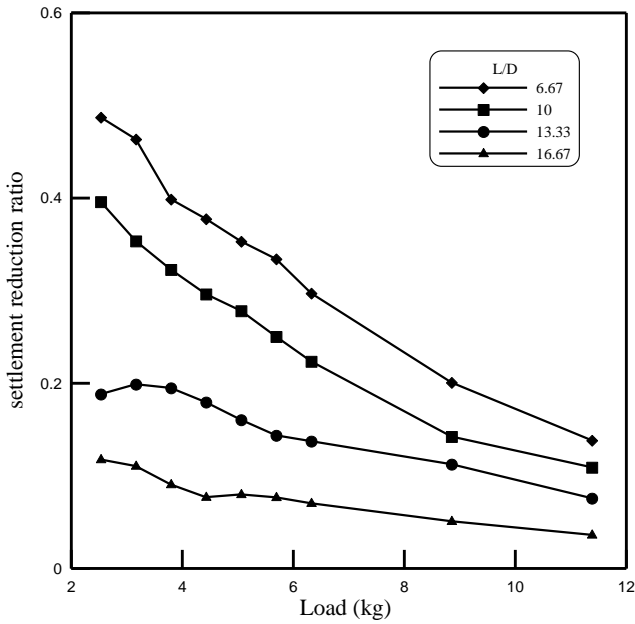


圖 11 五支攪拌樁沉陷減小率與載重之關係

3.3 攪拌樁樁身所形成複合土層之摩擦力分布

由載重試驗之結果顯示，四支攪拌樁在加載後樁身上部產生摩擦力，且集中在深度約 0.4 倍樁長的範圍內，之後隨著深度的增加摩擦力逐漸減小。這可能是因為當樁頂承受載重時，靠近樁頂處樁身產生較大的軸向應變，但隨著深度增加，載重傳遞到下方土層，因共同承載使軸向應變減少，下部樁身摩擦力也隨之減少，如圖 12 所示。

五支攪拌樁之角落樁樁身與土壤間摩擦力分布趨勢大致上與四支攪拌樁者相同，在樁身上部亦產生較大之摩擦力，超過深度 0.4 倍樁長後摩擦力逐漸減小而趨一穩定值如圖 13 所示。由圖可看出對於同一深度而言，長徑比大的攪拌樁產生的摩擦力大於長徑比較小的攪拌樁。由載重試驗之結果顯示，五支攪拌樁中間樁與土壤間之摩擦力小於角落樁者，於樁頂端產生最大摩擦力後，隨著深度增加摩擦力開始減小，如圖 14 所示。這可能是因為施加垂直載重後，複合土層類似整個塊體沉陷，因此中間樁被包覆於角落樁之中，與樁間土壤之摩擦力相對的就沒有角落樁大，造成中間樁與樁間土壤之摩擦力略小於角落樁者。從以上結果可發現，攪拌樁在承受垂直載重後，樁身摩擦力大都集中在樁頂 0.4 倍樁長附近，之後隨著深度的增加摩擦力逐漸減小。而中間樁因樁土所成複合土層產生類似塊體移動而使其摩擦力略小於角落樁。

3.4 有效樁長

由圖 3 可看出四支攪拌樁所形成之複合土層在長徑比低於 10 的情況下當載重加至 6kg 以上時，樁載重分配比有稍微下降的趨勢，如前所述，這可能是樁已發揮其承載力，因此載重轉由樁間土壤來承擔。所以，如果以本試驗結果來看，當此複合土層所承擔的重量為 6kg 時，其有效長徑比可定在 10~13.33 間隨載重的增

加，攪拌樁有效長徑比也隨之增加。同樣地，也可由圖 7 看出五支攪拌樁在承受 6kg 載重時，其複合土層之攪拌樁有效長徑比約在 6.67~10 之間。由圖 9 可看出四支樁複合土層在長徑比大於 10 的三條曲線較為接近，即攪拌樁的存在所能減少的基礎沉陷量已趨於定值，因此如果以沉陷的觀點來看，四支攪拌樁的複合土層其有效長徑比約在 10 左右。

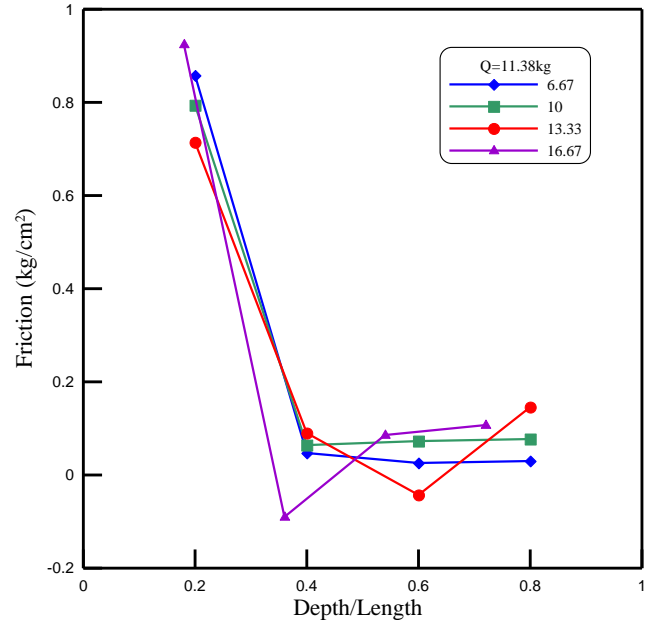


圖 12 樁身摩擦力分布 (四支攪拌樁, Q=11.376kg)

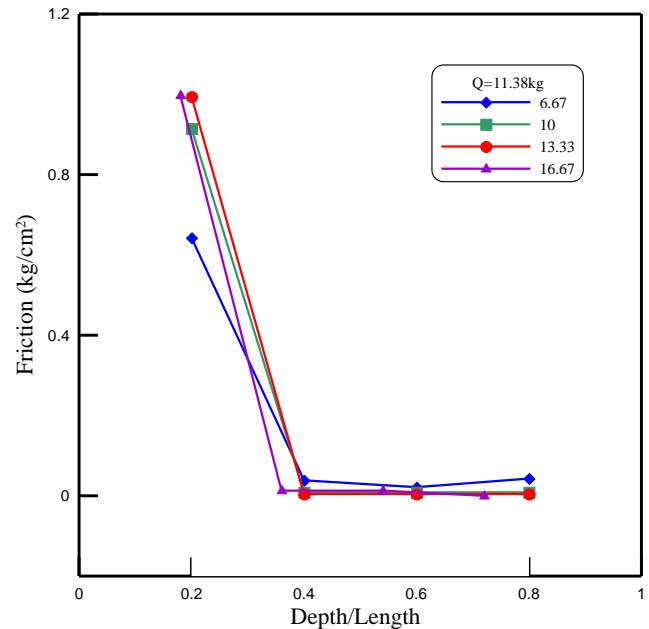


圖 13 角落樁樁身摩擦力分布 (五支攪拌樁, Q=11.376kg)

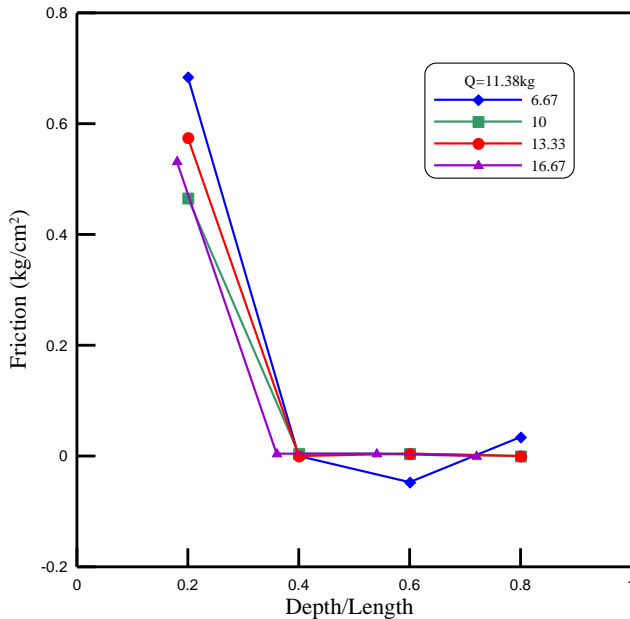


圖 14 中間樁樁身摩擦力分布(五支攪拌樁， $Q=11.376\text{kg}$)

4. 結論

- (1) 長徑比大之攪拌樁，當載重施加後攪拌樁承受載重的比例較大，而長徑比小之攪拌樁在載重初期，由攪拌樁分配的載重比較大，但在載重較大時則逐漸減小，轉由樁間土壤來分擔。
- (2) 角落樁分配到比例較大之載重比，中間樁樁頂分配的載重比隨樁長而異，長樁隨著施加载重的增加而降低。短樁隨著施加载重的增加而增加。即由角落的攪拌樁承受較大比例的載重，其餘的部分由樁間土層及中間樁承擔。
- (3) 攪拌樁複合土層的沉陷明顯小於未改良的紅土土層，因此攪拌樁確實具有降低土壤壓縮性而減少結構物或地盤沉陷的成效。
- (4) 攪拌樁在承受垂直載重後，在離地面約 0.4 樁長範圍產生較大的摩擦力，之後隨著深度的增加摩擦力逐漸減小。且中間樁之摩擦力小於角落樁之摩擦力。
- (5) 攪拌樁複合土層之有效樁長，可由樁載重分配來決定，在本研究中，四支攪拌樁複合土層的有效長徑比約在 10，而五支攪拌樁複合土層之有效長徑比也約在 10。

5. 致謝

本文感謝國科會(計畫編號 NSC93-2211-E-324-004)支持研究經費，使本計畫得以順利完成，特此致謝。

6. 參考文獻

- [1] M. Terashi, H.H. Tenaka and T. Okumura, "Engineering Properties of Lime-Treated Marine Soil and D.M. Method," Proceeding of 5th Asian Regional Conference, pp. 191~194, 1980.
- [2] T. Okumura, "Deep Mixing Method as a Chemical Soil Improvement," Proceedings of the Sino-Japan

- Symposium on Improvement of Weak Ground, 1989.
- [3] 段繼偉，「水泥攪拌樁的荷載傳遞規律」，岩土工程學報，第 16 卷，第四期，1994。
 - [4] 林德貴，「水泥漿深層拌合樁改良軟弱地盤之沉陷分析」，第十屆大地工程學術研討會論文集，台北，2003。
 - [5] M. Bouassida and A. Porbaha, "Ultimate Bearing Capacity of Soft Clays Reinforced by a Group of Columns-Application to a Deep Mixing Technique," Soils and Foundations, Vol. 44, No. 3, pp. 91-101, 2004.
 - [6] R. Ishikura, H. Ochiai, K. Omine, N. Yasufuku and T. Kobayashi, "Estimation of the Settlement of Improved Ground with Floating-type Cement-Treated Columns," Soft Soil Engineering, Chan & Law (eds), pp. 625-635, 2007.
 - [7] ASTM, *Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load D 1143-81*, pp.93~103, (Reapproved 1994).

A Model Study of the Load Distribution in Deep Mixing Method

Pei-Hsun Tsai¹, Chun-Wei Chen²

¹Department of Construction Engineering
Chaoyang University of Technology

ABSTRACT

The main purpose of this research is to study the bearing behavior of composite ground, including the influence of the ratio of mixing pile load to soil load, the relationship of deflection and load, by model load test. The main influence factors considered in this study are including the improved area ratio, length of mixing pile, and mechanics properties of composite ground. A composite ground contained treated cement columns will be set up in the soil box. A rigid plate will be placed over the top of cement column. The displacement of pile and pressure on pile head are measured by LVDT and soil pressure meter, respectively. The results of this study shows that piles bear more loading than soil as the pile with higher length-diameter ratio. But the bearing ratio of the shorter pile will be reduced when the loading of plate increases. Applying the load on the plate, the friction of pile within the depth of 0.4 pile length is greater. The friction stress of the middle pile is slightly smaller than one of the corner pile. In the study, composite ground suitable length-diameter ratio is about 10. The composite ground settlement obviously is smaller than the untreated soil layer. Therefore the composite ground can reduce compression of the soil, and the settlement of the structure.

Keywords: deep mixing method, loading test, load distribution, composite soil.