

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

群樁等值墩基模式之比較研究 Comparative Study on Equivalent Pier Model of Pile Group

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC - 89 - 2211 - E - 032 - 017
執行期間： 88年8月1日至89年7月31日

計畫主持人：張德文
共同主持人：李咸亨

本成果報告包括以下應繳交之附件：
赴國外出差或研習心得報告一份
赴大陸地區出差或研習心得報告一份
出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：淡江大學土木工程研究所
國立台灣科技大學營建工程系

中華民國 89 年 10 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

群樁等值墩基模式之比較研究

Comparative Study on Equivalent Pier Model of Pile Group

計畫編號：NSC-89-2211-E-032-017

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

計畫主持人：張德文

淡江大學土木工程學系

共同主持人：李咸亨

國立台灣科技大學營建工程系

計畫參與人員：溫展華, 張一郎

淡江大學土木工程學系

一.中文摘要

本研究係以波動方程式分析含筏基群樁基礎受軸向動態載重之行為。其中根據Dobry and Gazetas(1988)建議之動力互制因子推導群樁基礎中單樁互制分析模式，並納入樁帽影響。單樁週遭土層以 $t-z$ 、 $Q-z$ 理論曲線模式模擬土壤彈簧，並以Novak(1974)動力阻抗函數推導土壤轉換輻射阻尼係數，代入有限差分公式進行分析。另以簡化之等值墩基模式、二維平面應變與三維有限元素法進行分析比較。

關鍵詞：群樁、波動方程式、轉換輻射阻尼、集中質量方法、有限元素法

Abstract

This study establishes the time-domain wave equation analysis on vertically loaded raft-pile. The pile interactions are considered for the soils along the pile restraint with an effective cap. The dynamic interaction factor suggested by Dobry and Gazetas (1988), the dynamic impedance functions of the group-pile and soil resistances around the pile cap were established on Novak's model (1974). The $t-z$ and $Q-z$ spring as well as the time-dependent dampings of the soils are incorporated into the finite different

formulations. Besides the comparison is made between simplified equivalent pier method, 2-D plane strain and 3-D solid finite element method.

二.計畫緣由與目的

基樁為土木工程界最常用來解決軟弱地層承載力不足的基礎型式之一。近年來台灣發生地震次數甚多，其結構體在地震時之抗耐震性、地震下的動態反應以及土壤與結構物間的互制行為(Soil Structure Interaction)等相關研究則更具意義。傳統動力分析中，求解時域運動方程式所需之時域阻尼矩陣不易求得，其原因在於阻尼會因時間與作用力之不同而改變，並非是一定值。因此本研究將以集中質塊-彈簧方式分割上述墩基，配以相似的土壤彈簧、阻尼，而藉矩陣分析方式求解基樁位移。分析結果可視為一維模式的比較，另將以二維有限元素分解墩基，配合土壤彈簧、阻尼模擬基樁行為，最後再以二維元素分解平面之樁群以及其周遭土壤。

三.群樁軸向行為之分析模式

1.群樁中互制影響之單樁

假設群樁中每根單樁之位移量均相等，經由樁頂剛性基版作用力傳遞至各單

樁的作用力將具有分配性，透過動力阻抗函數與互制因子即能計算作用在各別單樁上的力量。當整體群樁基礎受到一集中外力作用時，經由力分配性可求出個別單樁所承受之作用力，如此其與總力值的比例關係乘上原本總筏基面積後，便能得到適度縮小的單樁對應筏基單元面積。該項原則係假設筏基受力分布均勻，且分配在此單樁元素上的作用力也可以經由總承受外力乘上上述比例關係後得到。依據節塊力平衡狀態，配合各部分節塊所需的邊界條件，便可推導出一維波動方程之中值差分式，以進行基礎垂直受力行為反應的模擬。由以上推導可計算出單樁任一深度受動態載重下的位移歷時曲線，而直接將樁帽頂部、樁帽底部、單樁底部的邊界條件融入時域積分步驟中，簡化邊界處理的困難度。

2.等值墩基：波動方程解

Poulos and Davis (1980)提出等值墩基樁徑與材料模數轉換公式，表示如下：

$$d_{pier} = \sqrt{\frac{4}{f} A_g} = 1.13 \sqrt{A_g}$$

$$E_{pier} = E_s + (E_p - E_s) \frac{A_p}{A_g}$$

本研究以假設之等值墩基取代群樁，配合上部之方形筏基而構成整體群樁基礎系統，其中筏基與墩基介面為剛性連接。同理依據節塊力平衡狀態，配合各部分節塊所需的邊界條件，便可推導出一維波動方程之中值差分式，以進行基礎垂直受力行為反應的模擬。在求解分析中，使用外顯差分法可避免矩陣運算，各節塊公式將可獨立求解，但時間增量則需配合節塊長度與基礎材料性質加以變化調整，以確保分析之穩定性。

3.等值墩基：集中質量方法

本研究另以集中質塊-彈簧-阻尼方式分割等值墩基。分解之基樁節塊配以理論 t - z 與 Q - z 土壤彈簧、轉換輻射阻尼，藉由內隱積分法展開運動方程式，再利用矩陣分析方式求解基樁相對位移。運動方程式使用內隱法於時間 $t + \Delta t$ 時，系統之方程式可表示為：

$$M \ddot{u}_{t+\Delta t} + c \dot{u}_{t+\Delta t} + k u_{t+\Delta t} = P_{t+\Delta t}$$

式中 M 為質量矩陣， c 為阻尼矩陣， k 為勁度矩陣， u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 分別為相對位移、相對速度、相對加速度向量。決定 M 、 c 、 k 矩陣後，利用積分公式，即可求解。

4.有限元素法分析

對於群樁基礎動力分析問題，本研究亦採用 ABAQUS 中所提供內隱直接積分法進行分析。以有限元素模擬整體群樁與土壤系統，土壤與基樁材料假設為線彈性，土壤與基樁之接觸面假設為連續，整體系統簡化為二維問題，以平面應變元素切割基樁與土壤，左邊界以輻支承束制住水平方向自由度；對於半無限延伸區域之邊界問題，由於有限元素網格不能無限延伸，因此往外傳射的散射波若碰到固定之邊界，將產生反射波，影響系統的變形行為，因此本研究對於半無限延伸區域之邊界問題，採用無限遠域元素，以避免應力波從遠處之邊界反射而影響解的正確性。為了更確實模擬實際狀況，另以 2×2 群樁配置為例，以三維磚形元素切割基樁和土壤。

四.垂直載重群樁行為數值解比較

圖 1 所示為群樁配置 2×2 之二維與三維分析比較，由圖可以觀察，有限元素法三維磚形元素與二維平面應變元素分析樁頂之最大位移量，以二維分析值較高但差異不大。結果顯示：

1. 不同的分析方法其位移曲線趨勢相當的一致，惟有不同者，是由土壤阻尼所影響，但將不影響樁頂的最大位移量。
2. 除單調載重外，以有限元素法所求得樁頂最大位移量最大，群樁互制之單樁次之，等值墩基則最小。
3. 若以小於動態載重歷時或週期的時間區段內觀察，則亦以群樁互制之單樁分析位移量居中。
4. 以波動方程式分析群樁受互制之單樁與三維有限元素法位移解較為接近，二維分析解較高但差異不大。
5. 以等值墩基模式與群樁受互制之單樁比較，等值墩基模式分析單調載重其最大位移量較大，分析衝擊與諧和載重其最大位移量較小，其差異主要是模擬阻尼的方式不同所造成。

群樁互制之單樁分析結果為：

1. 假設群樁基礎為剛性並考慮樁與樁之間的互制，作用力約為平均分配於各樁上(如圖 2 至 3)。
2. 土壤彈簧勁度受群樁互制的影響，折減的比例以中間樁>邊緣樁>角隅樁(如表 1)。
3. 在時間域上，土壤互制阻尼與土壤勁度比約為一小於 0.5% sec 的定值(如圖 4)。
4. 增加樁間距和樁直徑比值(S/d)將使基礎垂直受力反應明顯地減少；基樁反應將隨樁-土層勁度比值(E_p/E_s)減少而明顯地降低；基樁反應將隨樁長與樁半徑(固定)比值(l/r)值增加而減少；土壤材料阻尼對樁位移影響甚微。(如圖 5 至 7)。

五.非線性行為影響

單樁與等值墩基周身土壤彈簧經由迭代修正剪力模數，以求得非線性土壤彈簧係數，代入波動方程求解之位移歷時曲線。單樁樁身之位移反應影響所及與土壤

勁度有某程度的關係，而與樁長較無直接的關切。換句話說，當土壤勁度較為軟弱，樁身必須提供較多的摩擦力，因此位移影響所及之樁身較長；當土壤勁度較為堅硬則反之。而在相同的土壤勁度使用不同的樁長，則因為只需要某長度的樁身提供摩擦力，故除加上安全係數與設計上的考量之外，樁長過長將不經濟。另外，轉換輻射阻尼的係數值大小對樁身位移曲線影響甚微。圖 8 為 3×3 群樁配置墩基周身位移曲線，受樁距與樁徑比值(S/d)、土-樁勁度比值(E_p/E_s)、細長比值(l/r)等影響因子之比較。與單樁相似的，細長比(改變樁長或半徑)影響不大，土-樁勁度比值與樁距與樁徑比值的影響較為明顯，圖中可以發現 E_p/E_s 比值愈大，土壤愈為軟弱者，位移曲線影響所及較長； S/d 比值愈大表示互制影響愈小，土壤彈簧勁度較大，樁身所需提供摩擦力的長度較短。

六.理論設計曲線

Poulos(1989)建議之土-樁系統變位方程式可寫為：

$$I_p = \frac{udE_s}{P}$$

其中 u 為土-樁系統之變位， P 為垂直載重， d 為基樁直徑， E_s 為土壤楊氏模數， I_p 為樁頂變位修正因子。使用公式計算程式模擬結果，即可繪出本研究分析架構所得之理論設計曲線。圖 15 至圖 17 為 2×2、3×3 與 4×4 群樁配置型態下，受單調、衝擊和諧和載重作用，在不同樁距與樁徑比值下，不同基樁細長比對應不同土壤-樁勁度比值的理論設計曲線圖。由圖形可知影響樁頂位移最大者為樁徑與樁距比值(S/d)，土-樁勁度比值(E_p/E_s)與樁細長比(l/r)影響則次之。

七.參考文獻

1. 林光宗 (1998), "群樁互制效應對基樁反應之影響", 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 台灣, 淡水。
2. 劉祉祥 (1999), "垂直載重群樁之波動方程式時域解", 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 台灣, 淡水。
3. 溫展華(2000), "垂直群樁反應數值解比較研究", 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 台灣, 淡水。
4. 張一郎(2000), "波動方程式分析於群樁側向反應之應用", 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 台灣, 淡水。
5. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, Inc., New York.
6. Novak, M. (1974), "Dynamic Stiffness and Damping of piles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, pp. 574-598.
7. Liang, M. and Husein, A. I. (1993), "Simplified Dynamic Method for Pile-Driving Control", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 4, pp.694-713. Poulos, H. G. (1989), "Cyclic Axial Loading Analysis of Piles in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 6, pp.836-852.

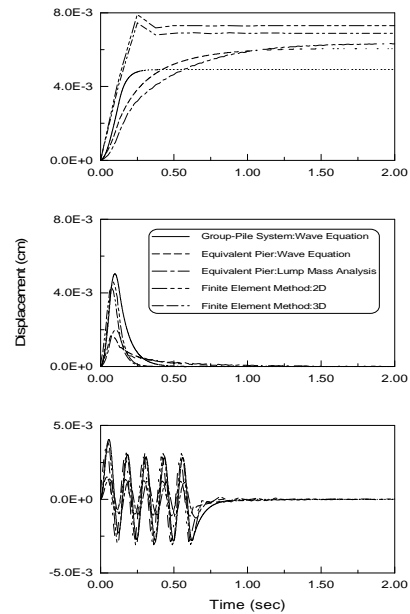


圖 1 群樁配置 2x2 之數值解比較

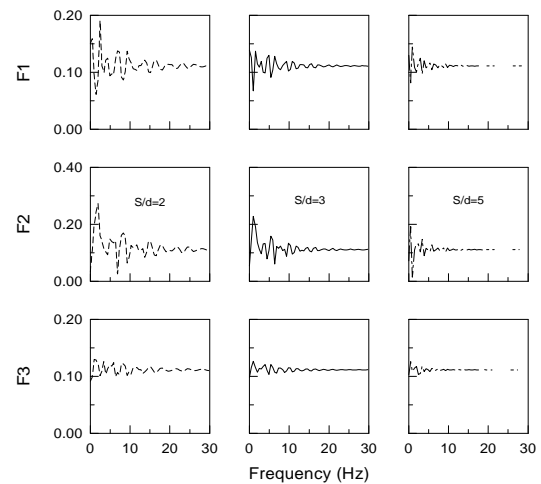


圖 2 不同樁距與樁徑比值於 3x3 群樁配置下，角隅樁 (F1) 中間樁 (F2) 與邊緣樁 (F3) 之力分配性

表 1 單樁周身互制土壤彈簧與原始土壤彈簧係數(K_s^*/K_s)比值

		4x4			3x3			2x2
		角隅樁	中間樁	邊緣樁	角隅樁	中間樁	邊緣樁	任意樁
S/d	2	24.3%	5.3%	16.8%	32.2%	6.8%	21.9%	41.3%
	3	26.3%	9.0%	19.5%	34.3%	13.4%	26.7%	46.3%
	4	28.1%	11.8%	21.7%	36.4%	17.8%	30.1%	49.9%
	5	29.6%	14.1%	23.5%	38.2%	21.2%	32.8%	52.7%

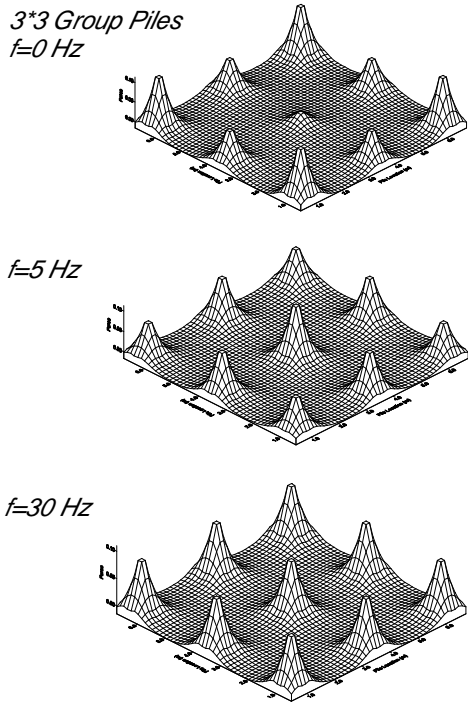


圖 3 3×3 群樁配置型態之單樁作用力分配性示意圖

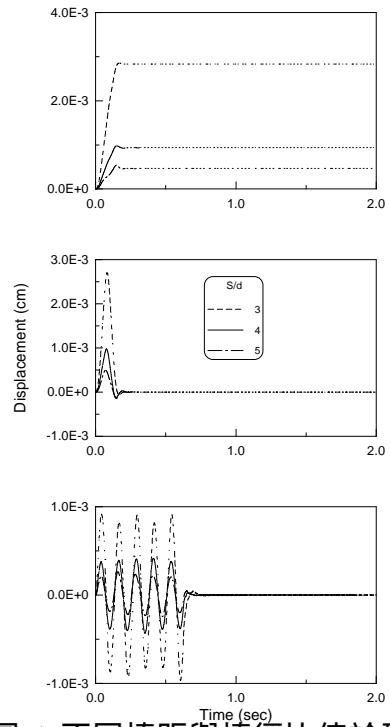


圖 5 不同樁距與樁徑比值於群樁配置型態 3×3 之單樁位移歷時曲線

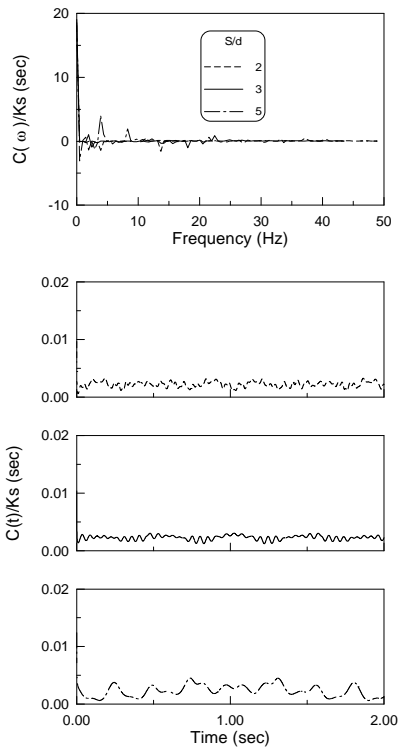


圖 4 不同樁距與樁徑比值於群樁配置型態 3×3(中間樁)下之頻域與相對應之時域阻尼

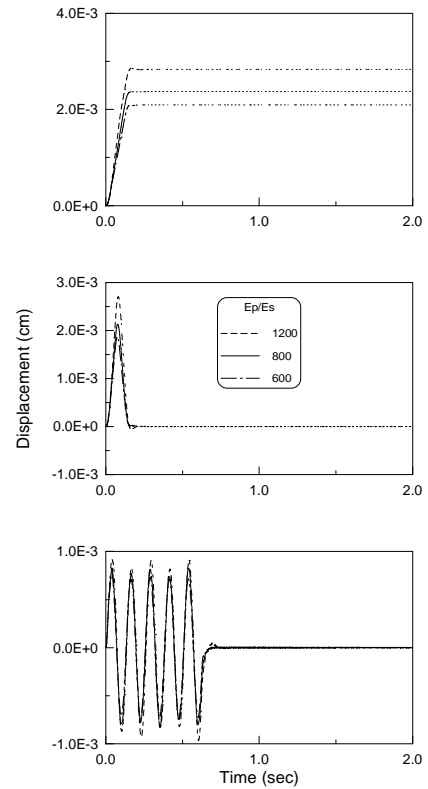


圖 6 不同土-樁勁度比值於群樁配置 3×3 之單樁位移歷時曲線

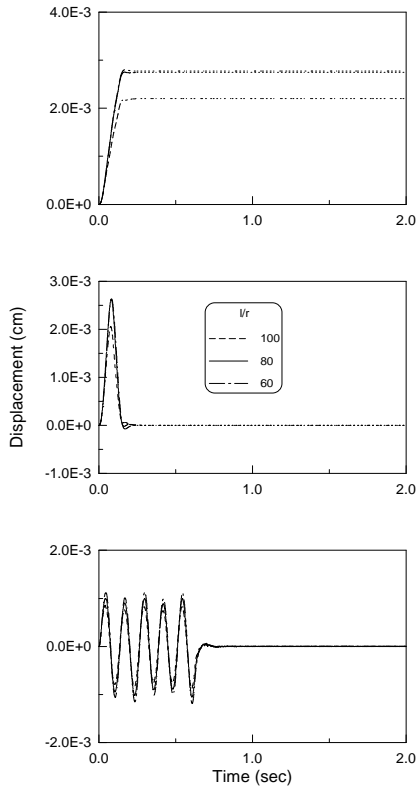


圖 7 不同樁長於群樁配置型態 3×3 之單樁位移歷時曲線

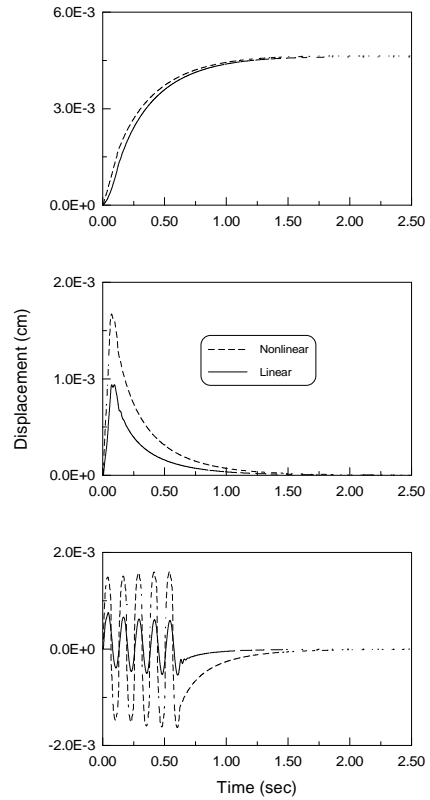


圖 8 群樁配置 3×3 之等值墩基模式受三種型式載重下，非線性與線性分析比較

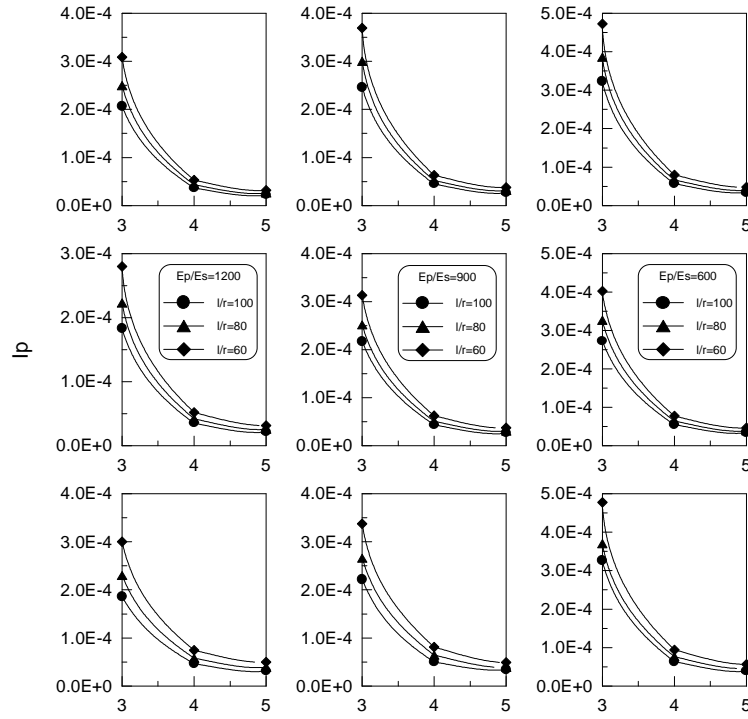


圖 9 受單調載重(上)、衝擊載重(中)、諧和載重(下)之群樁配置 3×3 之理論設計線