



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 群樁基礎地震反應之波動方程分析

### Wave Equation Analyses for Seismic Grouped Pile Response

計畫編號：NSC-90-2211-E-032-025

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：張德文

淡江大學土木工程學系

計畫參與人員：林伯勳 王志煒

淡江大學土木工程學系

#### 一、中文摘要

本研究使用波動方程式模擬地震下群樁互制之單樁行為。依據結構運動方程式之相對位移分析法，本研究將原波動方程式中之結構體相對位移改以結構體、土壤絕對位移差值表示，以考慮地層之震動影響。使用集中質塊分析方法求解土層自由場反應並做為波動方程分析之前置解，利用一般土壤結構物互制之疊加分析概念求解樁體行為。研究另將以 ABAQUS 有限元素分析直接解比較，以證明該項分析的可行性。

**關鍵詞：**群樁、波動方程分析、自由場反應

#### Abstract

*The seismic response of the interactive piles in a pile group is modeled in this study using the wave equation analysis. Based on the relative displacements between the pile and the soils, the solutions of the structural deformations are obtained decomposing the analysis into two steps, proceeded with a free-field solutions of the site from the lumped mass analysis and a pile response solution from the wave equation analysis. Validation of the analysis are made with the ABAQUS FEM solutions.*

**Keywords:** Grouped Piles, Wave Equation Analysis, Free-filed Response

#### 二、緣由與目的

樁基礎動態行為分析可使用有限元素法、邊界元素法或者彈性基礎樑(Winkler 基礎)模式進行模擬。其中 Winkler 基礎模式分析相對簡易，為工程界處理基樁問題常用方法。該模式可配合有限元素法來分解基樁、邊界積分法模擬樁周土壤支承性。其中分析法以波動方程為代表。近年來有許多學者陸續提供了多種數值方法和模式來模擬非線性、群樁互制以及土樁界面等問題，使得樁基礎的分析更加完整。為了讓頻域的阻尼能使用在時域的波動方程中，Chang and Yeh (1999); Chang *et al.* (2000)曾建議時域的土壤阻尼模式，此模式先由 Novak (1974)所建議動力阻抗函數計算幾何阻尼比值，再藉由富氏轉換求得時域阻尼配合靜態的土壤彈簧供求解之用。本研究將受地震影響的群樁結構系統分割如圖 1 所示。藉波動方程之數值解分析整體群樁行為。

#### 三、群樁基礎地震反應分析

##### (1)地層自由場反應分析

由於本研究採用的分析方式為間接分析法則，其分析步驟係先利用有限元素法或集中質塊系統分析地層之的自由場運動，再將分析結果輸入波動方程式中求解樁體之反應，因此自由場的分析尤為重要。集中質量法是將土壤的受垂直地震之振動行為，簡化為集合參數系統的質量-彈簧-消能盤模式分析之。Idriss and Seed (1968)曾針對由不同線彈性土壤所組成的土層，利用集中質量方法求解土層變形量，求取自由場之反應。同理，本研究以集中質塊-彈簧-阻尼方式分割整個土層，如圖 2 所示。分解之土壤節塊配以土壤彈簧及阻尼模式，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自由場之反應。本研究另使用 ABAQUS 有限元素軟體來分析自由場的振動。圖 3 即為自由場之有限元素分析之幾何網格。圖 4 為不同分析所得 Kobe 地震下自由場反應，其整體的趨勢十分相似。

### (2) 群樁系統波動方程反應分析

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。筏基亦經相同於力分配的比例關係得到單樁上所應對應之筏基單元面積，如圖 5 所示。依據節塊力平衡狀態，配合各部分節塊所需的邊界條件，並將土壤受到地震力影響納入進方程式中，藉著絕對位移（速度、加速度）的相減，得到樁和土壤之間的相對位移（速度、加速度），進而推導且計算出單樁在任一深度受地震影響的位移歷時曲線，以進行基礎地震力行為之反應的模擬。相關公式之推導請見王世權(2001)和王志煒(2002)論文。

### (3) 群樁互制影響

互制因子之觀念早期乃由 Poulos 所提出，利用彈力疊加原理可推導樁群對於彼此所造成的靜態位移量影響。Dobry and Gazetas (1988)曾根據 Poulos (1968)公式推導群樁動力互制因子簡易公式。本研究即以此互制因子為主，推導群樁基礎中任意樁在垂直和水平地震力作用下的周身土壤阻抗，並依此計算土壤彈簧和阻尼，以在分析中納入互制的影響。一般而言，互制將減少樁周身的土壤彈簧值，但阻尼和彈簧勁度的比值約為定值，相關細節亦請見王世權(2001)和王志煒(2002)論文。

### (4) 有限元素法 ABAQUS 分析比較

研究另採用 ABAQUS 分析群樁基礎之地震反應，以和所建議之分析方法進行比較。其中，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，左右邊界則以無限遠域元素模擬(infinite element)，下方的邊界係模擬堅硬岩盤，故以固定端來處理下邊界的問題，如圖 6 所示。

## 四、地震下群樁基礎行為研究

### (1) 群樁行為數值解比較

基本參數選擇與討論比較如下：

#### 一、地震加速度：

本節所選用的加速度記錄為 Kobe，此加速度皆經由基線修正法和地盤轉換函數所修正過之地震加速度歷時。

#### 二、基樁與樁身周圍土壤：

假設樁身周圍為一均質土層，柏松比  $\mu_s = 0.25$ ，土壤的楊氏係數  $E_s = 7 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ ，土壤的單位重為  $18.9 \text{ kN/m}^3$ 。假設基樁為圓形斷面彈性樁，樁長  $l = 40 \text{ m}$ ，樁半徑  $r = 0.45 \text{ m}$ ，楊氏係數  $E_p = 2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ，樁距為 3 倍樁徑，邊緣樁與角隅樁距基版各邊均為  $0.45 \text{ m}$ 。群樁配置以  $3 \times 3$  正方形版討論之。

觀察說明如下：

圖 7 為 Kobe 地震作用下之群樁波動方程解與有限元素分析的樁帽頂部位移比較結果，上圖為基樁振動之絕對位移量，下圖為基樁振動之相對位移量，也即扣除土層絕對位移量後之相對值。兩種數值方法所求解之位移量皆相當一致。表示本研究所建議的波動方程分析可提供且能合理的預測基樁受震行為。

### (2) 群樁行為影響參數

群樁行為針對在 Kobe 地震下反應，其觀察說明如下：

1. 圖 8(a)、9(a)為改變樁距對  $3 \times 3$  群樁在地震中之影響：固定樁長與土壤參數，而改變樁距進行分析比較。分析結果可發現當改變樁距時，對於群樁在地震下絕對位移之反應行為，並無明顯的影響與改變。
2. 圖 8(b)、9(b)為改變樁長對  $3 \times 3$  群樁在地震中之影響：固定樁半徑與土壤參數，而改變樁長進行分析比較。分析結果可發現當改變樁長時， $3 \times 3$  群樁在地震下的反應行為，並無較明顯的影響與改變。
3. 圖 8(c)、9(c)為探討  $3 \times 3$  群樁在不同土層中的行為反應。將採用不同土壤的楊氏係數進行分析比較。若土壤勁度越小者，基樁對於在地震下的反應行為越明顯，由此可知相同的樁勁度，在越軟弱的土層中基樁抵抗地震時的能力越

小，因此基樁的位移量會較大。

## 五、結論

綜合本研究所進行的垂直地震下樁基礎反應分析，茲將所獲得的結論整理如下：

1. 本研究所建議的分析方法切實可行。
2. 自由場的集中質塊分析結果仍需要調整，特別是對於現場的地質構造或土壤參數掌握，則有益於掌握更為確為的地層反應，以和有限元素分析結果比對。
3. 單樁和群樁的反應主要受制於地層反應，各項結構設計參數對其影響均有限，在大型地震中尤然。局部改善地盤的強度或許可減低樁基的位移量，但仍需針對個案進行研究。另傳統上部結構和基礎構造的剛性連接有必要改善，以改減輕垂直地震力對上部結構之影響。

## 六、參考文獻

1. Chang, D. W., Roesset, J. M. and Wen, C. H. (2000), "A time-domain viscous damping model based on frequency-depend damping ratios", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Vol. 19, pp. 551-558.
2. Chang, D. W. and Yeh, S. H. (1999), "Time-domain wave equation analysis of single piles utilizing transformed radiation damping," Soils and Foundations, JGS, Vol. 39, No. 2, pp. 31-44.
3. Poulos, H. G. (1968), "Analysis of the Settlement of Pile Groups", Geotechnique 18, No. 4, pp. 449-471.
4. Dobry, R. and Gazetas, G. (1988), "Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups", Geotechnique 38, No. 4, pp.557-574.
5. Idriss, I. M., and Seed H. B. (1968), "Seismic Response of Horizontal Soil Layers", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.94, No. SM4, pp.1003-1031.
6. Novak, M. (1974), "Dynamic stiffness and damping of piles," Canadian Geotech. J., Vol. 11, pp. 574 -598.
7. 王世權(2001), "垂直地震樁基之波動方程

分析”，碩士論文，淡江大學土木工程研究所，台灣，淡水。

8. 王志煒(2002), "側向地震樁基之波動方程分析”，碩士論文，淡江大學土木工程研究所，台灣，淡水。

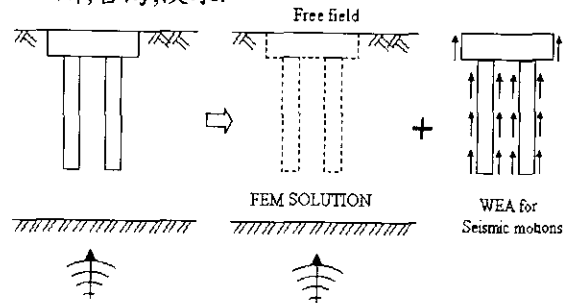


圖 1 本研究之群樁結構系統受震分割示意

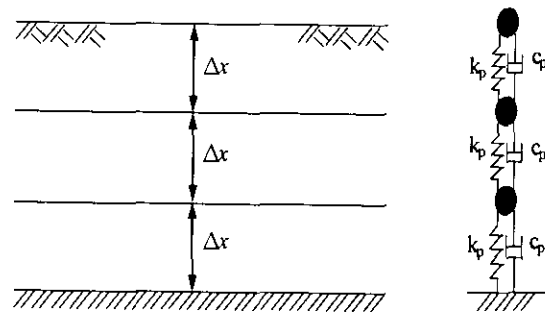


圖 2 自由場集中質量分解模擬示意圖

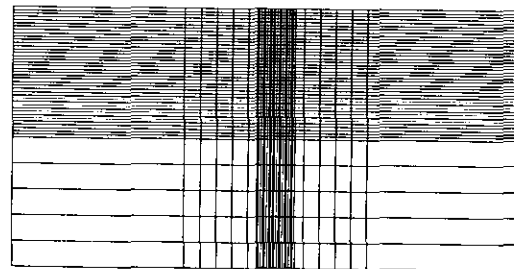


圖 3 自由場分析有限元素幾何網絡

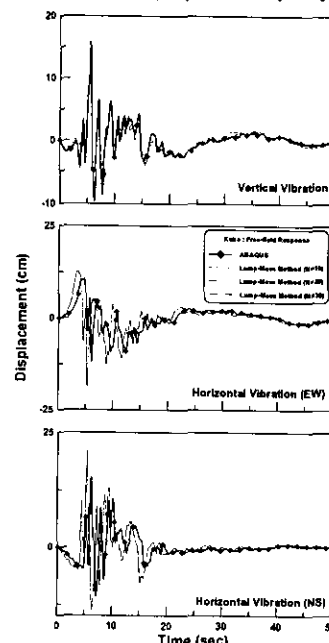


圖 4 Kobe 地震下自由場分析數值解之比較

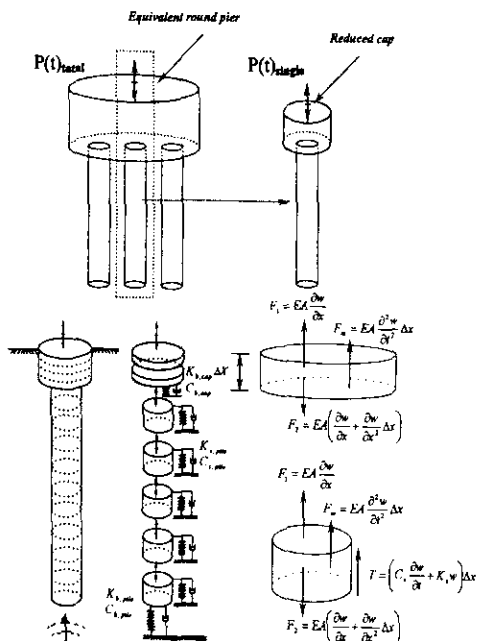


圖 5 群樁基礎分解模擬與節塊元素力平衡示意圖

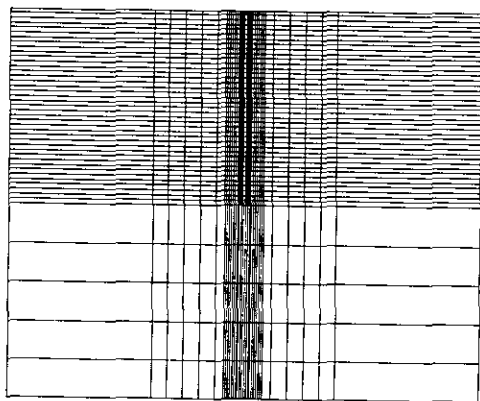


圖 6 群樁配置有限元素幾何網格

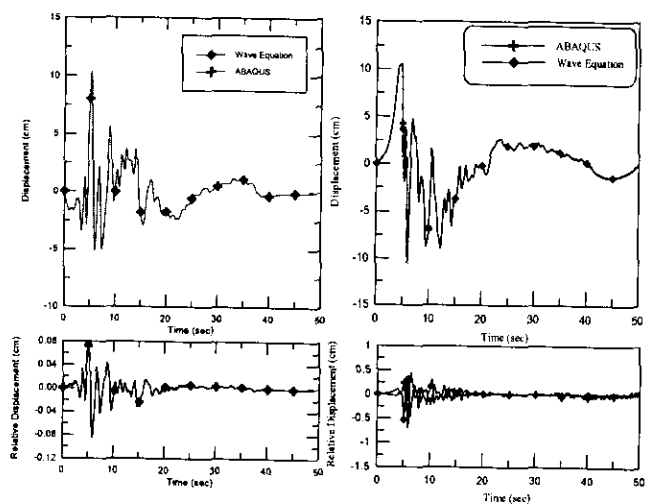


圖 7 群樁配置 3x3 之互制影響單樁分析與 ABAQUS 有限元素法在 Kobe 地震下之樁頂位移歷時曲線比較

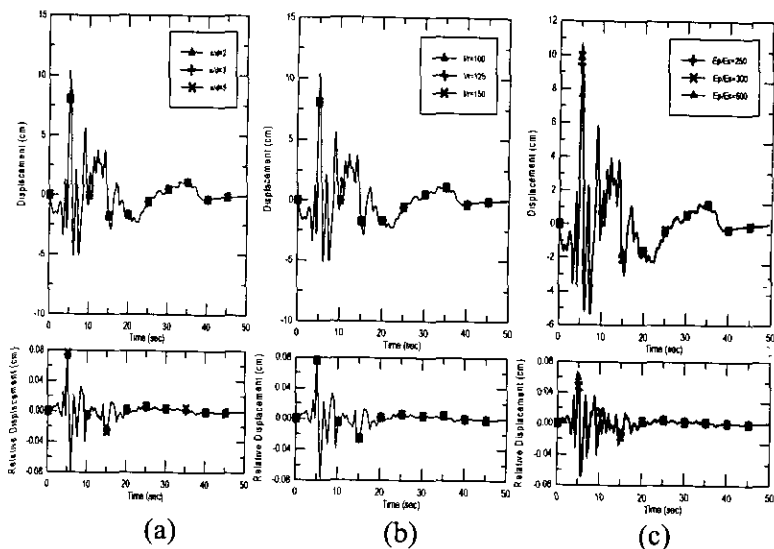


圖 8 Kobe 地震垂直向作用下群樁行為影響參數

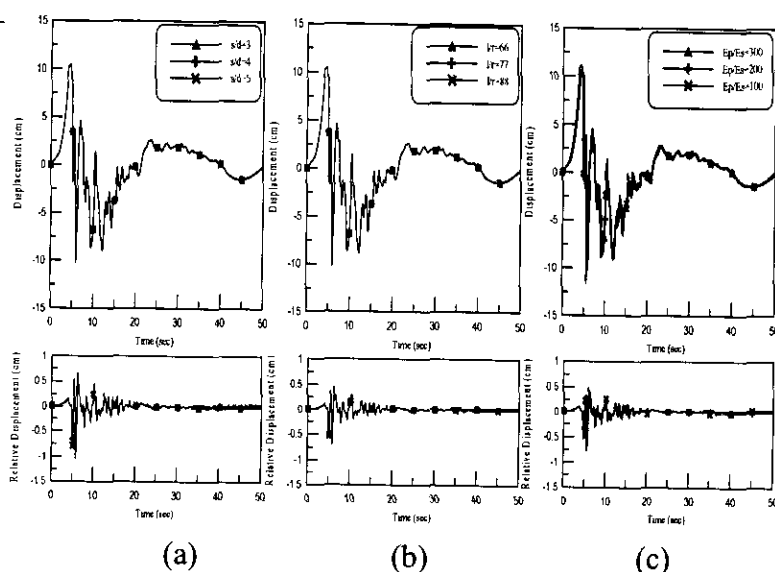


圖 9 Kobe 地震水平向作用下群樁行為影響參數