

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

側向群樁行為之波動方程分析

Lateral Grouped Pile Behavior from Wave Equation Analyses

計劃編號：NSC-89-2211-E-032-041

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

計劃主持人：張德文

淡江大學土木工程學系

計劃參與人員：王世權, 蘇順帆

淡江大學土木工程學系

一.中文摘要

本研究依據轉換輻射阻尼模式以及Dobry and Gazatas (1988) 及Gazatas (1991)所建議之動力互制因子而推導群樁基礎中之互制單樁模式，並納入樁帽影響，基樁週遭土層支承以 p - y 理論曲線模式之土壤彈簧、轉換阻尼係數，以及Novak動力阻抗函數提供之土壤彈簧與阻尼係數值模擬之。另參考劉祉祥(1999)建立含樁帽之等值單一墩基，而以有限差分法進行分析。本研究分別針對群樁基礎中之互制單樁分析模式與等值墩基分析模式進程式模擬。此外並探討群樁中之互制單樁關於群樁間距、土層勁度以及樁長與樁徑比值等參數改變對於基礎反應造成之影響。

關鍵詞：群樁中之互制單樁、波動方程式、動力互制因子、等值墩基

Abstract

This study establishes the wave equation analytical model for piled raft foundation which is subjected to a laterally exciting force. The model of interactive single piles in group-pile system refers to the work suggested by Dobry and Gazatas (1988) and Gazatas (1991) on dynamic interaction factor. Soil spring constants were founded by theoretic p - y equations, and a time

dependent radiation damping model was derived based on the Novak's dynamic impedance functions (1974). Moreover, this study takes the grouped piles as a single equivalent pier, and the corresponding wave equation is derived with the FD method.

二.計劃緣由與目的

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。因此本研究以波動方程式模擬考慮群樁互制效應之基樁在側向動力載重下之行為。其中，基樁之振動能量乃以輻射阻尼方式向其四週土層傳遞，而樁周身的土壤勁度之選取則分別以對應於 p - y 曲線理論方程式為之，研究目的在於發展以轉換輻射阻尼機制為主之樁行為模式，並將樁與樁、土壤與樁、樁與基礎版之間的互制效應考慮其中，以模擬其側向受力行為。其中，針對群樁基礎之行為模擬，為了簡化分析可視為單一墩基方式處理(Poulos and Davis, 1980)，以比較不同分析

的差異。

三.群樁側向行為之分析模式

1.群樁中互制影響之單樁

本研究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，透過側向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，如圖 1 所示。同時，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。值得注意的是，若分析的單樁元素屬於中間樁時，其分析系統上部筏基節塊之周身將不受到土壤勁度與阻尼力量的作用。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 (*central difference equation*)，以進行基礎側向受力行為反應的模擬。

2.等值墩基：波動方程解

藉著等值墩基的分析模式，可以簡化整體群樁的複雜性，本研究假設筏基以下群樁部分可簡化為一等值墩基，藉以建立筏基與墩基組合所成的等值群樁基礎波動方程式，進行動態時域反應分析。波動方程分析運用至整體群樁分析，等值墩基模式介紹如下：Randolph (1994)均曾建議在計算整體群樁基礎反應時，可將群樁轉化為等值墩基方式模擬。本研究將原樁長保持不變，而將基樁與土壤系統以複合材料型式轉換成一等值之單一墩基材質(如圖 2 所示)。本研究參考劉祉祥 (1999)前期研究；依 Poulos and Davis (1980)所提出之基樁半徑與材料模數進行模擬。考慮慣性

矩的對稱性，則等值墩基之半徑、彈性模數和質量密度公式可表示如下：

$$E_{pier} = E_p \times \frac{I_p}{I_{total}} + E_s \times \frac{I_{total} - I_p}{I_{total}}$$
$$\dots_{pier} = \dots_p \times \frac{I_p}{I_{total}} + \dots_{soil} \times \frac{I_{total} - I_p}{I_{total}}$$

其中 E_{pier} 為等值墩材料模數； E_p 為基樁彈性模數； E_s 為土壤彈性模數； I_{pier} 為等值墩之慣性矩= I_{total} ； \dots_{pier} 為等值墩基密度； R_{pier} 為等值墩之慣性矩； r_0 為基樁之半徑； I_{pile} 為一根單樁本身之慣性矩； I_p 為每根單樁對筏基中心之慣性矩之和。

若考慮面積之轉換性，亦可將等值墩基之材料參數 E_{pier} 和 \dots_{pier} 使用面積比例關係建立，如下式

$$E_{pier} = E_p \times \frac{A_{pile}}{A_{pier}} + E_s \times \frac{A_{pier} - A_{pile}}{A_{pier}}$$
$$\dots_{pier} = \dots_p \times \frac{A_{pile}}{A_{pier}} + \dots_s \times \frac{A_{pier} - A_{pile}}{A_{pier}}$$

其中， A_{pile} 為所有單樁截面積之和； A_{pier} 為等值墩截面積。

四.側向載重群樁行為數值解比較

本研究已建立之群樁基礎單樁系統模式以及群樁基礎等值墩基模式，配合以一維波傳理論與中值差分外顯法所編寫的 *Fortran* 程式，針對基礎在不同側向動態荷重作用下所產生的反應進行分析。並且探討相關參數改變對基礎反應所造成的影響，同時比較群樁中之互制單樁模式和等值墩基模式的分析結果比較。

1.互制單樁與等值墩基模式之比較

位移歷時曲線所產生之振盪現象之產生則肇因於阻尼函數本身之振盪所致，此現象與所用受互制影響之動力阻抗函數有關。而由圖 3 之群樁中之互制單樁與等值墩基之比較可以發現，群樁配置為

2×2、3×3、4×4，受單調荷重下其位移歷時曲線可以說相當一致。而於受衝擊荷重與諧和載荷重下等值墩基之位移明顯較大。

2. 慣性矩與面積模式之等值墩基反應比較

圖 4 (a)和(b)部分別為使用慣性矩轉換和面積轉換於單調載重、衝擊載重和諧和載重等外力作用下，群樁配置型態為 3 × 3 時之等值墩基頂部位移歷時曲線圖；不同曲線表樁視邊節情況改變所產生的影響。由圖可知，二種轉換的差異甚微，可予忽略之。

五. 理論設計曲線

Poulos(1989)建議之士-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 5 為 3 × 3 群樁配置型態下，基礎受單調、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。由圖形可觀察出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/d)影響則次之。對於土壤材料阻尼比(γ)的變化影響樁頂位移甚小；而樁半徑與剪力波速比值(r/V_s)則可視為土-樁勁度比值的一種，故兩者影響因子不在理論設計曲線範圍內討論。

六. 結論與建議

1. 群樁配置型態為 3 × 3 與 4 × 4 者，單樁於中間、角隅、縱向邊緣和橫向邊緣

位置時的力分配性將隨頻率改變而變動，其中於頻域和時域所得到之群樁中之單樁之力分配係數相加為 1，而由振頻為零(靜態力分配)時所對應之力分配性，可知依據 Dobry and Gazatas 建議的側向互制因子推導而得之力分配受群樁互制的影響，折減的比例以中間樁 > 橫向邊緣樁 > 縱向邊緣樁 > 角隅樁。

2. 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。
3. 增加樁間距和樁直徑比值(S/d)對樁位移之影響最大，其次為樁-土層勁度比值(E_p/E_s)影響，而改變樁細長比(L/d)，則對基礎側向位移影響為最小。而邊界對於群樁受動力荷重下，顯示自由端之邊界受力的反應為大，半固定端次之，固定端為最小。
4. 等質墩基之慣性矩轉換模式與面積轉換模式之分析方法，其結果可以顯二者位移曲線非常吻合。
5. 單調荷重時，群樁中之互制單樁與等值墩基受力反應分析模式所得非常吻合，然在衝擊荷重與諧和載重下，等值墩基之解則較高，其間的反應差異亦可看出結構系統自然週期與施力週期互動的影響。

七. 參考文獻

1. 葉興鴻 (1996), “轉換輻射阻尼於基樁軸向、側向行為之模擬與應用”，碩士論文，淡江大學土木工程研究所，台灣，淡水。
2. 劉祉祥 (1999), “波動方程式時域解於垂直載重群樁基礎之研究”，碩士論，私立淡江大學土木工程研究所，台北。
3. Dobry, R. and Gazetas, G. (1988), “Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups”, *Geotechnique* 38, No. 4, pp.557-574.

4. Novak, M (1974), "Dynamic Stiffness and Damping of Piles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, pp. 574-598.
5. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.
6. Poulos, H. G. (1989), "Cyclic Axial Loading Analysis of Piles in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 6, pp.836-852.
7. Randolph, M.F. and Worth, C.P. (1979), "An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups", *Geotechnique*, 29(4), pp. 423-439.

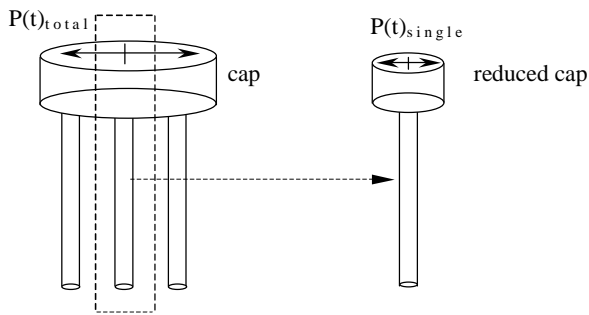


圖 1 單樁分析系統示意圖

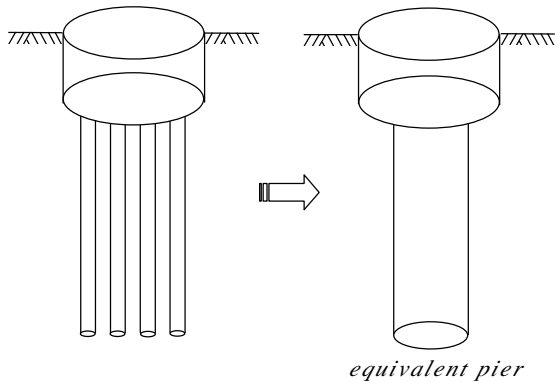


圖 2 等值墩基模式示意圖

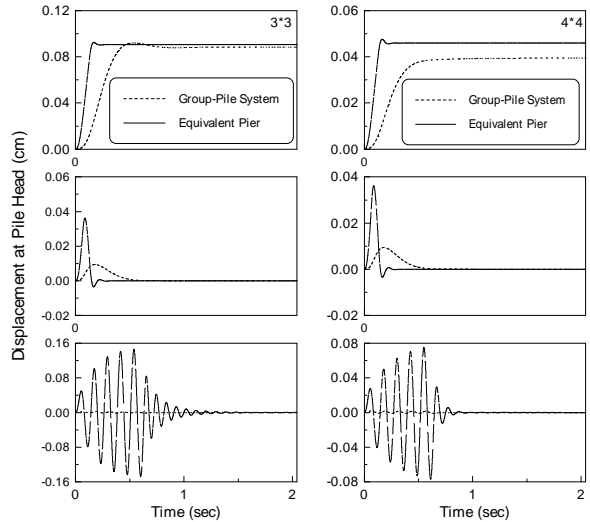


圖 3 群樁配置 3x3、4x4 之互制影響單樁分析與等值墩基解分析比較 (a) 值墩基解分析比較 (b)

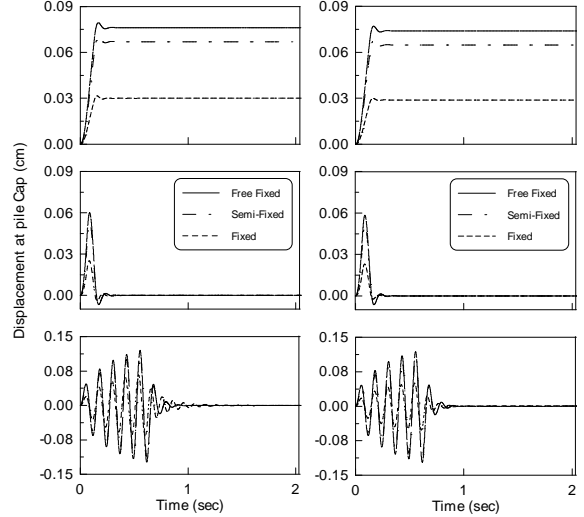


圖 4 3x3 群樁配置於不同邊界條件之筏基頂部位移歷時曲線慣性矩轉換模式 (b)面積轉換模式

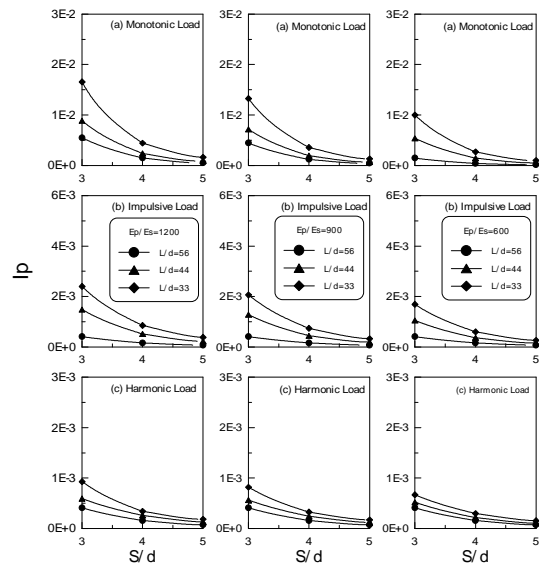


圖 5 群樁配置 3x3 之理論設計曲線