

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

樁基礎之非線性反應分析

Nonlinear Analysis of Pile Foundations

計畫編號：NSC 88-2611-E-002-039

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：陳正興 國立臺灣大學土木工程學研究所

一、中文摘要

樁基礎是國內工程大量採用之基礎型式，傳統基樁設計大都偏重於基樁垂直承載力之估計，對於其受側向力之反應行為研究甚少，而且現地實體樁載重試驗資料亦不多，必須以數值分析法分析基樁在承受側向力作用下之非線性行為。

本計畫規劃分為兩年之研究。第一年之研究係以樁帽為主，以FEADAM84有限元素分析軟體為工具，應用雙曲線土壤非線性模式模擬分析樁帽受側向力作用下之非線性反應行為，以了解樁帽承受側向力之阻抗；第二年則以非線性有限元素分析技巧發展單樁之非線性反應分析程式，進行單樁受側向荷重之非線性反應分析，以研究基樁受力變形及土壤反力之發展；此外，並發展一回歸分析模式，利用基樁試驗時所量測之測傾管資料回歸反算基樁之受力情形及土壤反力係數。

關鍵詞：樁基分析、非線性分析、土壤反力係數

Abstract

Pile foundations have been used very extensively in Taiwan area. Conventionally, engineering design usually focuses on the estimation of bearing capacity of pile foundations, but pay very little attention to the deformation behaviour of the pile as well as the response of the soil, particularly for the behaviour of pile foundation subjected to

lateral loading. Considering the very high cost of pile test, an alternative and effective way is to analyze the nonlinear response of pile foundations under lateral load by means of numerical modelling. The purpose of this study is to evaluate the pile and soil behavior through analytical analysis.

In the first year of this study, the main work is to evaluate the lateral resistance of a pile cap, by using the computer program FEADAM84 to analyze the lateral resistance of a pile cap subjected to lateral loadings. Results are going to be compared with an in-situ proto-type test for verification. For the second year, the work is to develop a nonlinear model for pile analysis. Besides, a regressive model is also to be developed to back analysis the pile responses and soil reactions by using the inclinometer data measured in a pile test. All the models developed will be varified by comparing the results obtained from the Chia-Yi in-situ proto-type pile tests.

Keywords: pile analysis, nonlinear analysis, subgrade reaction coefficient of soil.

二、緣由與目的

樁基礎一直為國內重大工程建設所大量採用之基礎型式，尤其是橋梁工程，包括公路橋梁、高架式之捷運系統以及未來高速鐵路之高架段等等，大都以基樁為基礎，因此有必要對樁基礎力學行為進行分析研究。

目前工程上對於基樁受力之位移分析大都採用非線性土壤反力曲線，例如基樁受垂直載重之位移分析普遍採用 Coyle & Reese 之非線性 t-z 及 q-z 曲線法，對於樁受側向載重之位移分析則採用 Reese & Cox 之 p-y 曲線法，然而此等曲線是否適用於台灣地區之土壤，仍有待進一步之研究。

橋樑樁基礎通常採用群樁設計，群樁分析中非常重要之考慮因素之一係因基樁彼此過於接近而造成各單樁承载力減少之群樁折減效應（簡稱群樁效應），但是由於群樁試驗規模過於龐大，包括國內外都鮮少有試驗資料可供參考，即使是數值分析研究，亦由於完整之群樁分析必須進行三向度之分析，其複雜性、困難度、計算時間以及成本都相對地提高，因此前人研究非常有限，且目前已進行之分析大都以彈性分析為主，並不足以代表樁結構與土壤真正之互制反應。

由於土壤之受力行爲呈高度之非線性反應，因此完整之樁基礎分析應考慮土壤之非線性行爲，且由於三向度分析相當費時及昂貴，必須採用特殊之數值技巧以節省計算時間，因此，本研究針對前人研究未逮之處，擬研究發展一完整之數值分析方法，俾能同時考慮土壤層次之分佈、土壤性質之變異性、土壤之非線性效應、樁帽效應等等，以進行完整之基樁模擬分析。

三、結果與討論

本研究為兩年期之研究計畫，其中有關樁帽側向力支承力之研究方面，已於去年完成，並寫成論文投稿於期刊審查中。本年度報告則總和歸納基樁受側向荷重之分析結果，並與嘉義太保之試驗結果作一比較，以驗證所採用非線性分析模式之適用性。

1. 分析模式

在工程實務上，對於基樁承受側向荷載之問題，最常使用之分析法為採用溫克

基礎模式[1]，假設基樁受力後在水平方向之變化量以 y 表示，則土壤抵抗基樁側向變位之單位面積水平反力可表示為

$$p(x, y) = k_h(x, y) \cdot y \quad (1)$$

其中 $k_h(x, y)$ 為地盤之水平反力係數，隨地盤深度 x 及變位量 y 之大小而定。據此，利用梁承載於彈性基礎上之理論，其控制方程式可寫為

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + D k_h y = 0 \quad (2)$$

其中 EI 為樁之撓曲剛度，

D 為樁之直徑。

上式中， k_h 通常為深度 x 與變位 y 之函數，即 $k_h(x, y)$ ，使得式(2)為一非線性方程式，不易求解。本研究採用之 k_h 函數以下述兩式計算[2, 3]：

$$k_h(y_1) = 0.34(\alpha E_0)^{1.1} D^{-0.31} (EI)^{-0.103} \quad (3)$$

$$k_h(y) = k_h(y_1) \left[\frac{y}{y_1} \right]^{-0.5} \quad (4)$$

上兩式中， $k_h(y)$ 為變位量等於 y 時之水平地盤反力係數， $k_h(y_1)$ 為樁頭變位等於 y_1 時之水平地盤反力係數，單位為 kgf/cm^3 ； y_1 為參考變位值，以往對於小口徑樁，取 $y_1 = 1\text{cm}$ 為準，對於大口徑樁則取為樁徑之 $1/100$ 為準，惟以 5cm 為限； α 為狀態參數，於常時取 $\alpha=1$ ，地震時取 $\alpha=2$ ； E_0 為土壤之等值彈性模數，可用 $E_0=28N$ 來估計， N 為標準貫入試驗之打擊數， E_0 之單位為 kgf/cm^2 ； D 為樁之直徑，單位為 cm ； EI 為樁之撓曲剛度，單位為 kgf-cm^2 ，

事實上，水平地盤反力係數與基礎作用面積之大小有關，根據日本道路協會之經驗公式[2]，於估計基樁產生側向位移之水平地盤反力係數時，其等值作用幅寬定義為

$$B_h = \sqrt{D/\beta} \quad (5)$$

其中 $\frac{1}{\beta} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_b D}}$ 為樁~土系統之特性長度

式(5)意指有效提供側向阻抗之土壤厚度為樁~土系統之特性長度($1/\beta$)，惟本研究考慮基樁之側向變形侷限於樁頭附近，其土壤阻抗主要由第一不動點深度以上之土壤所提供，因此本研究採用其第一不動點深度（即 $\pi/2\beta$ ）以上土壤之平均N值來計算，較能反應基樁之整體變形行為。據此所估計之水平地盤反力係數即可寫成一非線性彈簧元素以代表土壤之水平勁度，併入一般有限元素法程式進行分析，本研究採用 CBEAMC 程式[4]

2. 模擬分析

為進行模擬分析，本研究選取高鐵局於嘉義太保市所進行之現場大型基樁試驗為分析對象，包括 P13、B1 及 B2 三樁之側向承載試驗[5]，其中 B1 及 B2 兩樁為 $\phi 1500\text{mm}$ 之鑽掘樁，P13 樁為 $\phi 800\text{mm}$ 之打擊式預鑄混凝土樁，樁長均為 34m，試驗時樁頂高程位於 GL. 0m，地表面高程位於 GL. -1m，為自由樁頭式試驗。試驗場址之地質條件屬於相當典型的沖積層剖面，由上而下分別為黏土層(0~3m)，砂質土層(3~8m)，黏土層(8~12m)，緊密砂土層(12~20m)，黏土層(20~32m)，32m 以下到 40m 深度均為中等緊密至緊密砂土層。試驗場址的地下水位相當高，約在原地表面下 1m 左右(即 GL. -1m)。

(1). B1 與 B2 樁

根據前述之分析模式分析嘉義太保 B1 與 B2 試驗樁，分析所得之 B1 樁頂荷載~位移曲線如圖 1 所示。圖中顯示分析結果與現地試驗曲線非常接近，由初始彈性反應階段至塑性反應階段均相當一致，顯示模擬結果很好。分析所得各荷載作用下之樁身變位與現地試驗結果亦非常接近，圖 2 為分析所得各荷載作用下之樁身彎矩

與現地試驗結果之比較，在圖中以實線表示，而代表試驗所得各荷重作用下之彎矩值係由埋於 B1 樁內填混凝土中之鋼筋計讀數依斷面性質估計而得，在圖中分別以不同之符號表示之。圖中顯示，在側向荷重分別為 20、40、60、90 及 120tons 時，分析所得在 7m 深度以內之樁身彎矩均與試驗結果接近。對於 B2 樁之模擬分析，分析所得與現地試驗結果之比較亦非常接近，顯示本分析已能充分模擬第一不動點深度以上之基樁彎矩。

(2). P13 樁

對於 P13 打擊式預鑄混凝土樁之模擬分析，分析所得之樁頂荷載~位移曲線、樁身變位曲線及樁身彎矩均與現地試驗結果作比較，結果亦非常接近，顯示模擬結果很好，在此從略。

3. 回歸分析

本研究提出一分析側向樁非線性變形行為的回歸分析方法，由假設樁身彎矩分佈曲線為出發點，分別以多項式(式 6)及彈性變形特徵函數(式 7)來模擬樁身上半段及下半段之彎矩反應，即：

$$M_1(z) = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + A_3 z^3 + A_4 z^4 + A_5 z^5 + A_6 z^6 + A_7 z^7 \quad (6)$$
$$z \leq z_0$$

$$M_2(z) = (C_1 \cos \beta(z - z_0) + C_2 \sin \beta(z - z_0))e^{-\beta(z - z_0)} \quad (7)$$
$$z \geq z_0$$

其中 $z_0, A_0 \sim A_7, C_1, C_2, \beta$ 均為待定係數，而 z_0 為兩模擬段之分界點。

據上合成函數，先透過數值積分反求得樁身斜率，再與由測傾管量得之樁身斜率資料進行回歸分析，代入基樁試驗時實際之邊界及連續條件，即可求得一最適之樁身彎矩分佈曲線，並對此彎矩分佈曲線進行數值積分即可得到樁身斜率與變形；進行微分即可得到樁身剪力及土壤反力分佈。

為驗證此分析法的適用性，本研究亦利用現地 P13 樁試驗資料進行回歸分析，結果顯示此模式能合理預測樁身之變形、斜率、彎矩、剪力及土壤反力分布。分析所得之土壤反力如圖 3 所示，顯示淺層土壤隨著側向荷載的增加逐漸進入降伏，降伏區隨荷重增加而往深處發展，與實際之物理現象相符，顯示分析結果的合理性。

四、結論

- (1) 利用溫克基礎模式分析基樁受側向荷載之變形行為為一相當簡便之分析法，本研究所採用之非線性分析模式均能合理地模擬基樁變形行為，包括樁頭水平位移、樁身變位及樁身彎矩。
- (2) 所提出的回歸分析模式具分段模擬之特點，以多項式與特徵函數之合成函數來模擬樁身彎矩函數，具有最佳之模擬效果，可應用於側向基樁在彈性或非線性變形階段之模擬，改善以往用多項式直接對樁身變形作回歸的缺點。經利用有限元素程式解與現地樁試驗資料進行回歸分析，結果顯示此模式能合理預測樁身之變形、斜率、彎矩、剪力及土壤反力分布，充分顯示本模式之優越性。未來可進一步綜合各載重階段的土壤反力及變形大小，便可建立該場址各層土壤的 p - y 曲線，供工程設計使用。

五、參考文獻

- [1] Hetenyi, M., *Beams on Elastic Foundation*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan (1946).
- [2] 日本道路協會，「道路橋示方書・同解說」，社團法人日本道路協會(1996)。
- [3] 日本建築學會，「建築基礎構造設計指針」，社團法人日本建築學會(1988)。
- [4] Dawkins, W.P., "User's guide: computer program for analysis of beam-column structures with nonlinear supports," Report K-82-6, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miss., USA (1982).
- [5] 交通部高速鐵路工程局，「高鐵橋樑基礎最佳化研究總報告」，財團法人台灣營建研究院研究報告(1997)。

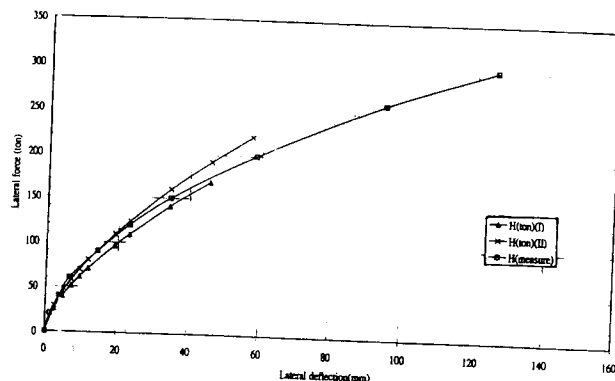


圖 1 分析所得樁頂變位與試驗結果之比較

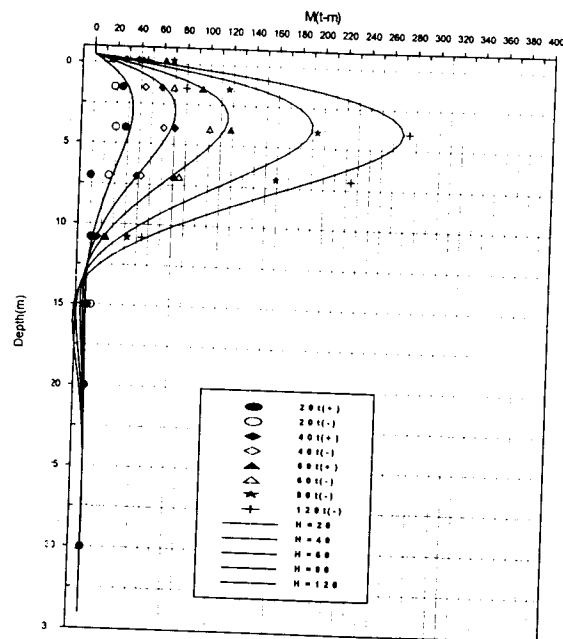


圖 2 分析所得樁身彎矩與試驗結果之比較

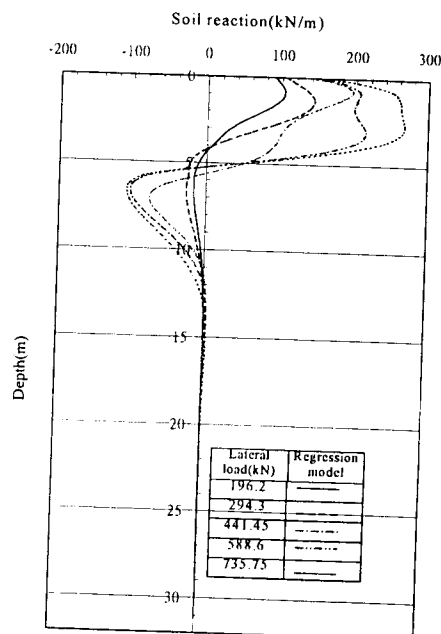


圖 3 土壤反力分佈圖