

靜動樁載重試驗之數值分析

馮正一¹ 李俊男² 蔡佩勳³

關鍵詞：樁載重試驗、數值模擬、靜動樁載重試驗

摘要

本研究以有限差分 FLAC 程式來進行樁基礎於靜動載重試驗時受力變形之模擬。首先對基樁與土層建立數值分析網格，為了符合基樁與土壤之實際情況，在基樁與土壤間使用設立界面元素並以軸對稱進行模擬，利用現場靜動載重試驗資料來驗證數值模擬之正確性。靜動載重試驗數值分析結果與現地試驗之量測結果相當吻合。本研究結果驗證了應用數值模擬可合理反應樁與土壤之互制關係與模擬靜動樁載重試驗，可預測樁之垂直承載力，將可節省現場樁載重試驗所需之龐大經費。

A NUMERICAL STUDY OF THE STATNAMIC LOADING TESTS OF PILES

Zheng-yi Feng¹ Jun-nan Li² Pei-hsun Tsai³

Key Words: Pile load test, numerical simulation, statnamic load tests.

ABSTRACT

This study uses the finite difference code, FLAC, to simulate the load-deformation characteristics of Statnamic loading tests of piles. The meshes for numerical analyses were first established with interface elements and axisymmetrical configurations to reflect the actual situations of the pile and soils. The test results of full scale statnamic field tests were utilized to verify the correctness of the numerical simulations. The numerical results are in very good agreement with the monitored full scale statnamic tests. This study proves that the interaction of pile and soils can be rationally reflected using the numerical scheme and the statnamic loading tests of piles can be properly simulated; therefore, the simulation results can be used to predict vertical bearing capacities of piles to save huge budgets of full scale pile loading tests.

一、前言

基樁承載力因地層複雜以基樁經驗公式不易準確預測，因此，需以現地載重試驗來確認基樁之承載力，一般常用之現地基樁載重試驗包括靜載重試驗、靜動樁載重試驗（Statnamic Loading Test）驗與高應變動力試驗。

由於靜載重試驗所耗費之時間與經費相當高，且主樁與錨定樁須有五倍之間距（ASTM_D1143-81），所以對直徑大之基樁較難施做，而高應變動力載重試驗又容易引起撓曲應力，所得之結果又需與相同或近似的基樁類型，如樁徑、樁長或土層等加以比對與驗證。靜動載重試驗為最近期新發展的樁基礎載重試驗，可用以推估樁基礎之極限承載力。本研究是以 FLAC 模擬現地不同地層之性質，並模擬地層中基樁受「靜動樁載重試驗（STN）」，以得其載重與變位之關係圖，進而求其承載力。本文描述模擬靜動載重試驗之過程，並和現地靜動載重試驗比對及驗證所分

析之結果，用來檢核 FLAC 分析靜動載重試驗之數值成果。

二、文獻回顧

樁基礎之靜動載重試驗由加拿大 Berminghammer 公司與荷蘭 TNO 所合作發展(Berminghammer, 2004)，試驗所花費的時間較短，對於高承載力之基樁亦可使用，惟目前仍需多方驗證該方法的準確性。

Hajduk1, et al.(1998)在黏土層中進行靜載重試驗、靜動載重試驗和動載重試驗等，依現地試驗所得之數據對試驗程序、準確性和周圍土壤之影響等，進行評估。

林三賢等(2004)利用台北縣市等地，進行樁基礎之靜動載重試驗、靜載重試驗等試驗之比較，對現地靜動載重試驗之數據進行承載力評估。依土層之層數將樁分成單元體，在對單元體進行載重和樁身摩擦力進行運算與力量傳遞計算，繪製載重-變位圖以進行承載力之評估。該研究發現靜動載重試驗受載過程中，仍需注意推斷樁單元體表面

¹中興大學水土保持學系助理教授

²朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

³朝陽科技大學營建工程系助理教授

摩擦角之計算，雖需複雜數學運算但所得之成果甚佳。

靜動裝載重試驗之優點為(Profound, 2004): 迅速且經濟、水平方向可進行試驗、可循環使用、不會造成樁之損害、測量結果可直接運用、施作方法靈活等。

三、靜動載重試驗之數值分析方法

本研究是使用有限差分 FLAC 4.0 程式，對各工程案例之全尺寸靜動載重試驗製作樁與土層之網格，並加入靜動載重試驗之載重歷時，由於靜動試驗所作用之力極為短暫，本分析以時間域作動態分析，把載重與時間輸入至樁頂，並記錄時間與載重和樁頭變位量。計算得基樁之載重與變位後，與現地試驗之載重與變位量測值比對，分析其差異性與影響分析結果之影響因子。

3-1 參數決定之步驟

本研究分析之土壤模式係選用 Mohr-Coulomb 模式，而 FLAC 分析所需之地層參數，係依現地標準貫入試驗 SPT-N 值來求得，依不同之地層特性與土壤性質，本研究數值分析參數決定方法如下：

砂性土壤主要輸入之參數有剪力模數 G、統體模數 B、摩擦角 ϕ 、土壤單位重 γ 等，並假設砂土層中的凝聚力 C 參數為零。

砂土土壤之楊氏模數 E 以 SPT-N 值來估計，依砂性土壤之經驗公式 (Kulhawy and Mayne, 1990, page 5-17)：

$$\frac{E}{Pa} \approx 5N_{60} \text{ (sands with fines)} \text{-----(1)}$$

$$\frac{E}{Pa} \approx 10N_{60} \text{ (clean NC sands)} \text{-----(2)}$$

公式中的 Pa 為一大氣壓力， N_{60} 為標準貫入試驗 SPT-N 值，式 (1) 係指含有細粒料之砂時所使用，式 (2) 係指乾淨之砂時所使用。

依黏土與鬆砂和緊砂之柏松比 (Kulhawy and Mayne, 1990, page 5-4) 估計適用之柏松比 ν ，以彈性模數和柏松比 ν 關係式求得剪力模數 G 與統體模數：

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \text{-----(3)}$$

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \text{-----(4)}$$

G=剪力模數 B=統體模數

砂土層的摩擦角係以 SPT-N 值與摩擦角 ϕ 之關係 (Kulhawy and Mayne, 1990, page 4-15) 來求得，本研究依不同之砂土層之性質，做出參數估計。

凝聚性土壤主要輸入之參數有剪力模數 G、統體模數 B、凝聚力 C、土壤單位重 γ 等。凝聚性土壤之剪力強度 S_u ，以其 SPT-N 值與 S_u 之關係 (Kulhawy and Mayne, 1990, page 4-54)，依現地不同凝聚性土壤之性質來決定 S_u ，再以凝聚性土壤之經驗公式 (5) 決定楊氏模數 E：

$$\frac{E}{S_u} = 250 \sim 500 \text{ (Caly)} \text{-----(5)}$$

上式中 S_u 為土壤之不排水剪力強度。

當求出楊氏模數 (E) 後，依黏土與鬆砂和緊砂之柏松比 (摘自 Kulhawy and Mayne, 1990) 估計適用之柏松比 ν ，以彈性模數與剪力模數關係式 (3) 和統體模數關係式 (4) 求得 G 與 B。而凝聚性土壤之凝聚力則以土壤不排水剪力強度 S_u 。

3-2 參數之決定

當參數決定之步驟訂定，依分析案例之土層特性及標準貫入試驗 SPT-N 值，進行參數之決定。本研究之靜動載重試驗模擬的案例，分別為 1.台北縣某建築工地(Lin et al., 2004)，2. Shaft S81(San-Shyan Lin, 2004)，3.台灣高鐵 D195 #17 與#24(台安工程顧問公司, 2002)等。而土層之參數引用試驗資料或標準貫入試驗 SPT-N 值來推求土壤參數。其各案例依土層之特性所選取之參數與現地基本資料如下：

1. 台北縣某建築工地 (Lin et al., 2004)

此現地靜動載重試驗是 2002 年於台北縣所施作，其試樁長 $L=12.4m$ 直徑 $D=1.2m$ 貫入砂岩深至 5m。而各土層數值分析所用之參數如表 1。

表 1 台北縣某建築工地案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	ka	ks	ϕ
	N	kg/m3	N/m2	N/m2	N/m2	deg	ν	N/m2	k	k	deg
Sand (0~2.1m)	8	1.75E+3	1.92E+7	4.17E+7	0	30	0.3	5E+7	1E9	1E8	19
CL (2.1~7.13m)	7	1.76E+3	1.61E+7	7.50E+7	90000	28	0.4	4.5E+7	1E9	1E8	23
Sandstone(W) (7.13~13.3m)	33	1.94E+3	2.68E+7	1.25E+8	0	35	0.4	7.5E+7	1E9	1E8	26
Sandstone (13.3~16.1m)	50	2.15E+3	3.57E+7	1.67E+8	350000	45	0.4	1E+8	1E9	1E8	33

2. Shaft S81 (Lin et al., 2004)

此現地靜動載重試驗是 1999 年於台北市所施作，其試樁長 $L=81.1m$ 直徑 $D=1.5m$ 貫入砂岩深至 19m，現地樁載重試驗也作了一些土壤試驗求得凝聚力 C 與摩擦角 ϕ 。而各土層數值分析所用之參數如表 2。

3. 某工程 D195 #17 與#24 (台安工程顧問公司, 2004)

此案例是 D195 #17 與#24 之現地靜動樁載重試驗，其試樁直徑相同為 1000mm，樁長則分別為 51M(#24)和 61M(#17)，最大試驗載重為 2000T。而各土層數值分析所用之參數如表 3~4。

表 2 Shaft S81 案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	ka	ks	ϕ
	N	kg/m ³	N/m ²	N/m ²	N/m ²	deg	nu	N/m ²	k	k	deg
Sand (0~2m)	8	1.750E+3	1.92E+7	4.17E+7	0	30	0.3	5.0E+7	1E9	1E8	25
CL (2~19.4m)	7	1.764E+3	1.61E+7	7.50E+7	90000	28	0.4	4.5E+7	1E9	1E8	25
SM (19.4~28.9m)	18	1.911E+3	2.14E+7	1.00E+8	0	32	0.4	6.0E+7	1E9	1E8	25
CL (28.9~34.5m)	15	1.862E+3	2.68E+7	1.25E+8	20000	30	0.4	7.5E+7	1E9	1E8	25
Sandstone(W) (34.5~61.9m)	33	1.940E+3	2.68E+7	1.25E+8	0	35	0.4	7.5E+7	1E9	1E8	28
Sandstone (61.9~89.3m)	50	2.156E+3	3.57E+7	1.67E+8	350000	45	0.4	1.0E+8	1E9	1E8	35

表 3 D195 #17 案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	ka	ks	ϕ
	N	kg/m ³	N/m ²	N/m ²	N/m ²	deg	nu	N/m ²	k	k	deg
Sand (0~3.7m)	11	1.7E+3	1.79E+7	8.33E+7	0	35	0.4	5.0E+7	1E9	1E8	30
CL (3.7~6.2m)	12	1.8E+3	2.03E+7	5.00E+8	1.2E+5	30	0.48	6.0E+7	1E9	1E8	30
SM (6.2~34.6m)	15	1.9E+3	2.00E+7	9.33E+7	0	37	0.4	5.6E+7	1E9	1E8	30
SM (34.6~41.4m)	50	2.1E+3	3.25E+7	1.52E+8	0	45	0.4	9.1E+7	1E9	1E8	30
CL (41.4~53.1m)	9	1.8E+3	1.69E+7	4.17E+8	1.0E+5	0	0.48	5.0E+7	1E9	1E8	30
Sandstone (53.1~64.1m)	>50-100	2.3E+3	1.79E+7	8.33E+7	0	50	0.4	5.0E+7	1E9	1E8	30

表 4 D195 #24 案例之數值分析選用參數

Soil Type	SPT	Density	Shear Modulus	Bulk Modulus	C	Phi Angle	Poisson's Ratio	Young's Modulus	ka	ks	ϕ
	N	kg/m ³	N/m ²	N/m ²	N/m ²	deg	nu	N/m ²	k	k	deg
Sand (0~4.6m)	13	1.9E+3	1.96E+7	9.17E+7	0	31.3	0.4	5.5E+7	1E9	1E8	24
SM (4.6~17.2m)	11	1.9E+3	1.82E+7	8.50E+7	0	30.8	0.4	5.1E+7	1E9	1E8	24
SM (17.2~29.5m)	18	1.9E+3	2.14E+7	1.00E+8	0	33.2	0.4	6.0E+7	1E9	1E8	24
SM (29.5~39.7m)	62	2.1E+3	3.57E+7	1.67E+8	0	45	0.4	1.0E+8	1E9	1E8	24
CL (39.7~44.6m)	10	1.8E+3	1.69E+7	4.17E+8	1.0E+5	0	0.48	5.0E+7	1E9	1E8	24
Sandstone (44.6~55.2m)	>50-100	2.3E+3	1.79E+7	8.33E+7	0	50	0.4	5.0E+7	1E9	1E8	24

四、數值分析結果

完成 FLAC 分析樁之靜動載重試驗後擷取基樁之變位與載重之關係，再與現地基樁之靜動載重試驗數據比對。由以上各案例之分析與探討如下：

1. 台北縣某建築工地 (Lin et al., 2004)

台北縣案例分析所得之時間與沉陷關係結果如圖 1。圖中「This study」為本研究 FLAC 所分析之結果，「Taipei county」則是靜動試驗之量測結果。其中本研究分析之沉陷較試驗之沉陷要來得大，但曲線的趨勢與現地試驗相同，其中之差異可能是樁與土壤之間界面參數有關的。由載重-變位圖來觀察 FLAC 模擬結果與現地試驗結果，如圖 2 所示，其最大沉陷量與殘留沉陷量相近，兩曲線之趨勢亦相近似。

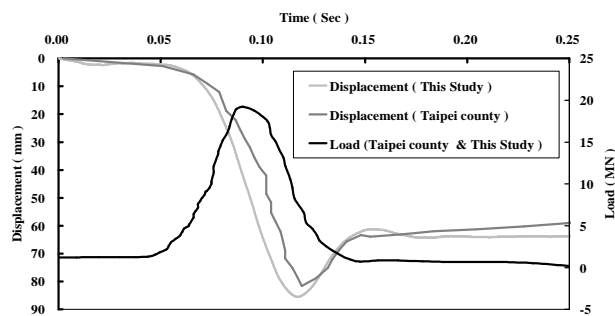


圖 1 台北縣案例「This Study」與「Taipei county」的載重與變位和時間關係圖

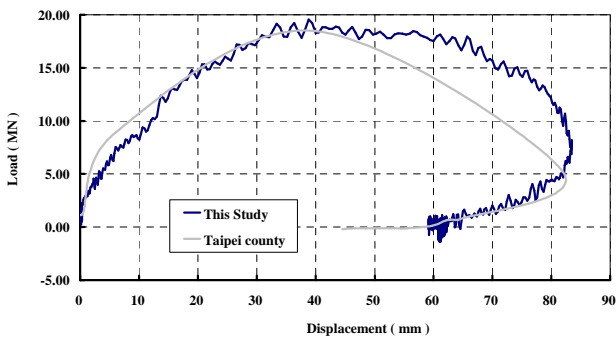


圖 2 台北縣案例「This Study」與「Taipei county」的載重與變位關係圖

2. Shaft S81 (Lin et al., 2004)

Shaft S81 位於台北市區之地層，因為其樁長達 81M 貫入風化砂岩與未風化砂岩層，其砂岩 SPT-N 值遠大於 50，因此，本研究中採用 FLAC 內建之砂岩參數進行分析，其分析出來之沉陷結果如圖 3 所示。圖中「This study」曲線為 FLAC 所得之結果，其最大沉陷量為 17mm。「S81」曲線則是現地試驗之結果，其最大沉陷量亦為 17mm。此案例分析出現之結果與「Taipei county」案例有所不同，其現地試驗之試樁受載重後出現樁回彈之現象，而 FLAC 分析出並未出現此現象。研判可能是界面參數之假設與現地情況尚有差異，且 Shaft S81 貫入砂岩層較深，致使砂岩與樁之界面出現較高之握裹力，以致於在 $t=0.12$ 秒時分析結果出現沉陷量較現地試驗小。此現象亦可由載重-變位圖 4 來觀察，即現場試驗基樁回彈量比數值分析結果為大。

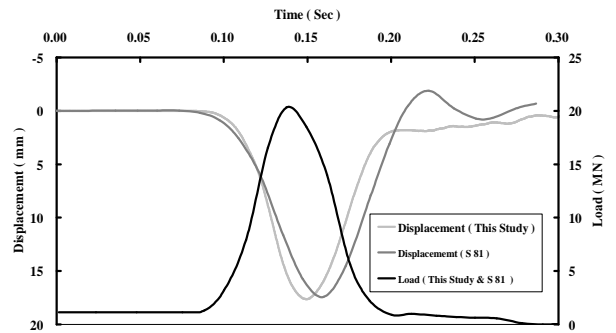


圖 3 Shaft S81 案例「This Study」與「S81」的載重-變位和時間關係圖

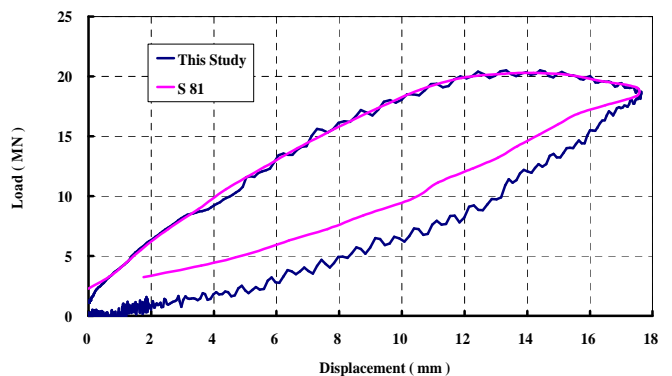


圖 4 Shaft S81 案例「This Study」與「S81」的載重-變位關係圖

3. 某工程 D195 #17 與 #24 (台安工程顧問公司, 2004)

D195 #17 與 #24 基樁位於高雄地區，其地層土壤大多為砂性地層，且試樁貫入砂岩層達 10M，其砂岩 SPT-N 值遠大於 50。因此，分析時採用 FLAC 程式內建之砂岩力學參數進行分析，其結果如圖 5 和圖 6。圖 5 中「This Study」曲線為 FLAC 所分析之結果，最大沉陷量 26mm。「D195 #17」曲線則是現地試驗之結果，最大沉陷量 27mm，而圖 6 中 FLAC 分析之結果最大沉陷量 27.5mm，「D195 #24」曲線則是現地試驗之結果，最大沉陷量一樣為 27.5mm。由圖 7 和圖 8 曲線中可知，分析結果與現場試驗之趨勢相近似，且最後殘留之變形亦很相近。

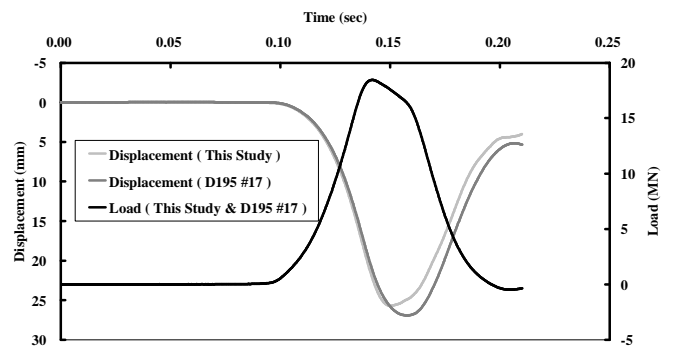


圖 5 D195 #17：「This Study」與「D195 #17」載重與變位和時間關係圖

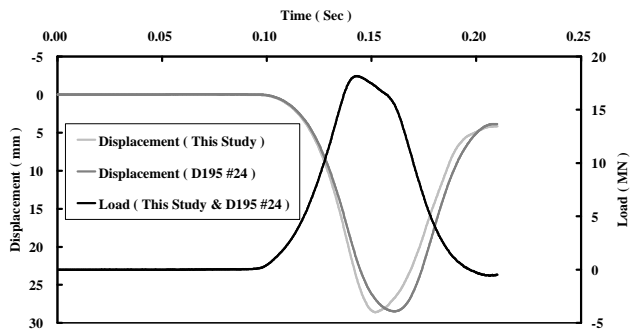


圖 6 D195 #24 :「This Study」與「D195 #24」載重與變位和時間關係圖

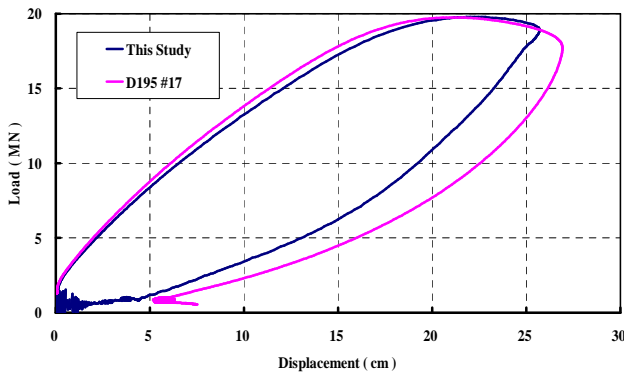


圖 7 D195 #17 :「This Study」與「D195 #17」載重-變位關係圖

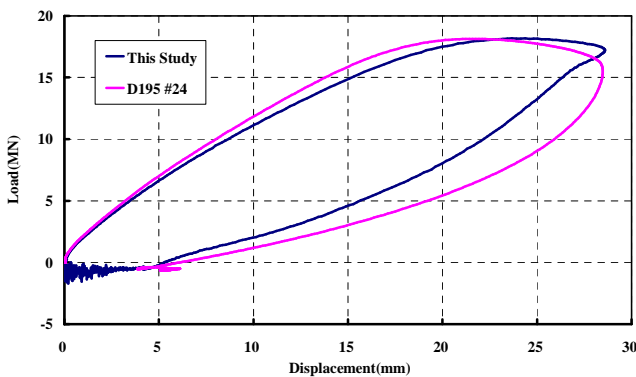


圖 8 D195 #24 :「This Study」與「D195 #24」載重-變位關係圖

五、結論與建議

本研究以 FLAC4.0 程式模擬靜動樁載重試驗之情形，與現地試驗數據之比對下，雖非完全吻合但以結果來看趨勢是相似的，其根據數值模擬之結果，得到以下之結論：

1. 本研究所須之參數，因實際試驗參數無法取得，主要以現場 SPT-N 值所推導而得，故難免和實際之參數有所誤差，可能影響分析之結果。
2. 以簡易之 Mohr-Coulomb 之土壤模式即可進行時間域之動態模擬，分析結果尚稱滿意。

3. 現地水平應力之假設直接影響基樁之樁身承載力，側向應力亦將影響靜動試驗之載重-變形曲線。而樁與土壤之界面參數亦有影響，可進一步研究之。
4. 由載重-變位關係圖中可發現本數值分析之加載區段和現地試驗曲線近似，但卸載區段之曲線有所出入，可能因實際界面參數所造成之影響，但對最終之殘留沉陷量與載重影響不大。

本研究之數值模擬結果，雖然分析並無法完全與現場試驗結果相同，但也已有達到 70%~90%之接近程度。因此，以 FLAC 模擬基樁之靜動載重試驗是可行的，考量現地試驗之經費與人力，以 FLAC 分析基樁靜動試驗應為最佳之工具。

誌謝

本文承國科會 NSC-92-2218-E-005-011 計劃之支持，以及台安工程顧問公司試驗資料之提供，及林三賢博士之資料協助得以完成本研究之成果，在此感謝對本研究付出心力者。

參考文獻

- [1] 台安工程技術顧問公司,(2004), 靜動樁載重試驗資料 personal communication.
- [2] S.S. Lin, J.L. Hong, W.F. Lee, and Y.H. Chang, (2004) "Capacity Evaluation of Statnamic Tested Long Piles", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004) 829-838.
- [3] E.L. Hajduk, S.G. Paikowsky, A.G. Mullins, C. Ealy, C. Lewis, and N.M. Hourani (1998) "The Behavior of Piles in Clay During Statnamic, Dynamic, and Different Static Load Testing Procedures", Proceedings of the 2nd International STATNAMIC Seminar, Tokyo, Japan, 28-30 October, pp.59-73.
- [4] Berminghammer (2004) Berminghammer Foundation Equipment Company homepage, <http://www.berminghammer.com/stat.html> Assessed on August 6, 2004.
- [5] Profound (2004), Profound B.V. Company homepage <http://www.profound.nl/productline.htm> Accessed on August 6, 2004.
- [6] Kulhawy, FH. And Mayne PW. (1990) "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design", Research Project 1493-6 (EL-6800), Electric Power Research Institute.