

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

南科園區橋樑基礎實體模型振動試驗之分析

Analysis for Vibration Test of Pile Foundation at TSIP

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-052

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 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

興建中的高速鐵路將貫穿以高科技產業為主的台南科學園區，高鐵行車時所引起之地盤振動是否會對廠房造成影響已成為各界關注的焦點。國科會為達減振之目的，於園區內構築一高鐵橋樑基礎實體模型，利用該模型進行一系列試驗，其中包含單樁之強迫振動試驗與重錘落擊試驗。本研究即針對上述單樁之強迫振動與重錘落擊兩項試驗進行模擬分析，分析方法分別使用 ABAQUS 程式與 FLAC 程式，前者為有限元素分析程式，而後者為有限差分分析程式，用以分析基樁與基礎之動態反應，以及遠域地盤地表面之振動大小，再與現地量測記錄作相關性分析，以驗證以往所用分析模式與分析方法之適用性與可靠性。

關鍵詞：地盤振動、單樁振動試驗、現地試驗分析

Abstract

The constructed Taiwan High Speed Rail (THSR) passes through the Tainan Science-based Industry Park (TSIP). The problem of ground vibrations induced by the future operation of THSR is a major concern to the high-tech fabs inside the TSIP. Therefore, a full-scale bridge foundation model has been constructed in TSIP for in-situ tests. The test program includes the

single pile test, foundation vibration test, and associated vibration-reduction tests.

The aim of this study is to simulate the forced vibration test and the drop-weight test of a single pile conducted at TSIP, by using the computer programs ABAQUS and FLAC, respectively. The former is formulated by the finite-element method, while the latter is formulated by the finite-difference method. Based on the correlations between the results of two-different approaches and that of in-situ test, the effectiveness and suitability of the commonly used method of analysis and analytical model can be verified. Results obtained will be very valuable for the assessment of the effectiveness of future ground-vibration mitigation engineering.

Keywords: ground vibration, single pile vibration test, simulation analysis.

二、緣由與目的

沿台灣西部走廊興建中之台灣高速鐵路工程，其行車路線將穿越設置於台南縣新市附近之南部科學園區，該園區內之高科技產業對地盤振動之影響甚為敏感，而高鐵行車行經此地勢必引起地盤振動，其對科學園區廠房之振動影響變成各界關心之焦點，國科會、交通部、台灣高鐵公司三方面曾為此問題爭論不休，最後由行政院出面協調，高鐵維持原案繼續施工，惟須解決車橋共振問題，而國科會則須負責

召集三方面共同研擬減振方案，以確保南科高科技廠房不受振動問題之影響。

經台灣高鐵公司委託中鼎公司與美國 ICE 公司之研究結果顯示[1]，高鐵行經南科時有顯著之低頻振動，在距高鐵路線 200 公尺處之垂直向最大值振動值可達 68dB 左右，此振動值實超出南科園區高科技廠房所能承受之振動標準；而國科會委託林聰悟等之研究[2]，預測高鐵行車可能引致之地盤振動更高於美國 ICE 公司之研究結果，對南科園區未來之發展影響甚鉅。而國科會原已承諾南科廠商設廠之地盤振動標準為 48dB，遠低於高鐵未來行車時可能造成之地盤振動，基此，國科會為達減振之目的，擬公開甄選國際顧問公司或廠商進行減振工程之設計與施工，在此之前，先行委託中華顧問工程司於南科園區內工九空地上先行施築一模擬高鐵橋樑基礎之實體模型[3]，並進行相關之振動試驗，以了解橋樑基礎實體模型受力時所引起之地盤振動及其分布情形，作為未來採行減振方案之根據。

國科會在進行橋樑基礎實體模型之振動試驗時，曾進行單樁之強迫振動試驗與重錘落擊試驗，這些試驗均有完整之量測記錄。本研究即針對此二項試驗分別以 ABAQUS 與 FLAC 程式進行模擬分析，分析基樁與基礎之動態反應，以及振動在地盤中之傳遞現象，以驗證以往所用分析模式與分析方法之正確性與可靠性。

三、結果與討論

1. 試驗結果

本試驗之基樁實體模型位於南科園區內之工九空地上，鄰近高鐵路線。根據現地鑽探結果，南科園區的地層大多屬於砂土與黏土交錯之互層，土壤性質隨深度增加而漸趨緊密，地下水位約位於地表面下 3

公尺處。基樁的直徑為 2.0 公尺，樁長 61.7 公尺，樁體內埋設 18 支鋼筋計(圖 1)。

(1) 強迫振動試驗

根據水平向強迫振動之試驗結果(圖 2)，當起振器出力超過 20kN 之後，樁頭之水平向振動幅值可達 100dB 以上，測線上除測點 10.4m 的振動幅值可達 85dB 外，其餘測點的數值大約介於 50dB 到 80dB 之間。在鉛垂向振動試驗中(圖 3)，各測點之振動量大致隨著頻率之增加而漸增，起振器出力達 25kN 之後，樁頭之鉛垂向振動幅值可達 95dB，各測點之數值則在 50dB~85 dB 之間。

至於地盤振動衰減係數 α 值，在水平向振動試驗中(圖 4)，低頻部分的水平徑向 α 值大約介於 0.02 到 0.03 之間，鉛垂向的 α 值則隨頻率之增加而上升，高頻部分的 α 值約在 0.01 左右。鉛垂向振動試驗中(圖 5)，頻率小於 15Hz 時， α 值大致隨頻率增加而上升的趨勢，頻率大於 15Hz 後，鉛垂向的 α 值略大於水平徑向的 α 值，大約介於 0.007 到 0.03 之間。

(2) 重錘落擊試驗

由落錘試驗之 1/3 倍頻頻譜圖可知(圖 6)，各測點振動值大致隨距離之增加而衰減，除測點 120m 處之外，鉛垂向之振動量均大於水平向，水平向振動幅值大約在 70dB 到 85dB 之間，鉛垂向振動幅值大約在 75dB 到 90dB 左右，將各測點振動值與背景振動值比較可知，本試驗振源所引致振動頻率之有效範圍約在頻率 6~50Hz。

於有效頻寬範圍內，鉛垂向地盤衰減係數如圖 7 所示，在頻率 8~40Hz 時大致隨頻率呈水平關係，其值介於 0.008~0.015 之間，頻率 40Hz 之後則略微下降；水平向地盤衰減係數在頻率 6~25Hz 時大致隨頻率之增加而下降，從頻率 6Hz 的 0.0065 變

為 0.0015，頻率 25Hz 之後則略微上升。

2. 數值模擬分析

(1) 分析模型

本研究乃針對鉛垂向強迫振動試驗與落錘試驗進行模擬分析，此兩項試驗皆屬於微小應變試驗，因此在模擬分析時，可假設樁體與土體均為彈性體，其應力應變關係為線彈性；在樁身與周圍土體之介面上，不考慮樁土分離效應。

本研究所採用 ABAQUS 程式與 FLAC 程式分析之模型如圖 8 與圖 9 所示，均採用二維軸對稱模型來模擬。分析域為 $120\text{m} \times 64\text{m}$ ，採用四節點平面軸對稱元素，元素水平向尺寸取 $0.9\text{m} \sim 1.1\text{m}$ 不等，垂直向尺寸則從 0.9m 隨深度漸增至 3m ；超過上述的範圍則採用平面軸對稱無限元素來模擬；邊界條件則限制對稱軸上的水平位移，僅允許垂直向移動，此對稱軸即為樁身軸心。

材料參數方面，樁體的楊氏模數 E_p 採用 $2.5 \times 10^7 \text{ kPa}$ ，密度 ρ_p 與柏松比 ν_p 分別為 2.5 t/m^3 和 0.3 ，阻尼比 ξ_p 為 0.025 ；土壤材料參數則取自現地試驗所求得之土壤相關參數。

由 ABAQUS 程式與 FLAC 程式分析所得之結果大致相當，因篇幅受限，以下僅針對 FLAC 程式之分析結果作代表來作說明。

(2). 鉛垂向強迫振動試驗之模擬結果

在正規化動態反應函數當中，鉛垂向數值分析在樁頭上(圖 10)之反應與試驗結果吻合度相當良好，而在土壤上之模擬則略有差異(圖 11-12)，此由於現地土層之便異性，以及試驗控制穩定度和儀器誤差等因素，且分析網格在較高頻率時過大等因素所造成。

在地表振動模擬部分，分別繪製各試驗頻率下各測點穩態歷時之最大振幅隨距離衰減關係，以及在基樁樁頭位移最大時之時間點下各測點之地表振動反應值，結果顯示 FLAC 程式模擬之吻合度良好，如圖 13~14 為頻率 10Hz 鉛垂向之結果。

而在樁身所受軸力部分，利用起振器理論出力與樁體內推算之軸力進行修正，使數值分析樁頭受力與試驗時一致。由分析結果來看(如圖 15)，樁頭實際受力比起振器理論出力來得小，而兩者在深度 25m 以後數值漸趨一致，若以各曲線最接近地表面之最大軸力值為參考點，其樁身所受最大軸力衰減幅度大於試驗結果，約為參考點之 30% ，而各試驗頻率在深度 40m 時，樁身所受最大軸力均衰減至 5kN 以下。

(3). 重錘落擊試驗之模擬結果

由 $1/3$ 倍頻頻譜分析求得之頻譜圖發現，於有效頻寬之內趨勢大致吻合，但振幅則略大於試驗結果。在振動量隨距離衰減關係中，數值分析在有效模擬頻寬內，鉛垂向除了接近樁頭附近位置振動較大之外，其餘與試驗結果大致吻合，均隨著距離而逐漸衰減；水平向則在距離基樁 40m 以後振幅略微變大(如圖 16)，惟幅度較現地試驗來的小。

在樁身所受軸力部分，隨著深度遞增，樁身所受最大軸力亦逐漸遞減，若以最接近地表面之樁身所受最大軸力作為參考點，深度 25m 時所受之最大軸力約為參考點的 40% ，深度 40m 處約為樁頭的 16% 。

四、結論

1. 水平向強迫振動試驗中，當起振器出力超過 20kN 之後，樁頭之水平向振動幅值可達 100dB 以上，測線上各測點的振動幅值約介於 50dB 到 80dB 之間。在鉛垂向

振動試驗中，各測點之振動量大致隨著頻率之增加而漸增，起振器出力達 25kN 之後，樁頭之鉛垂向振動幅值可達 95dB，各測點之數值則在 50dB~85 dB 之間。

2. 由水平向試驗之位移動態反應函數可知，水平徑向的位移反應大於鉛垂向的反應，樁頭之位移反應在試驗頻率 10Hz 之內出現較大的反應。至於鉛垂向試驗之位移動態反應函數，樁頭反應隨頻率上升而漸減，測線上的鉛垂向反應大於水平徑向反應。
3. 分析落錘試驗之 1/3 倍頻頻譜圖，其所引致地盤振動之主要有效頻寬約在 6~50Hz 之間，造成之地盤振動幅值約為 70~90dB 之間。
4. 比較鉛垂向試驗之位移動態反應函數可知，此分析模式能有效模擬樁頭的鉛垂向振動反應，樁頭振動反應隨頻率上升而漸減；對於測線上振動反應之模擬，在低頻部分與試驗結果相近，高頻的結果則不太理想。
5. 在重錘試驗落距 2.5m 之模擬分析中，比較地表速度振動歷時之波形，僅在地表 20.8m 與 31.2m 處之水平徑向歷時反應較為相近。檢視前述速度振動歷時之富氏振幅譜，在頻率小於 10Hz 之低頻部分，數值分析所得之富氏振幅譜與試驗結果類似。

五、參考文獻

1. 行政院科技顧問組，”高鐵南科振動問題評估專案報告”，行政院科技顧問組(2001)。
2. 中鼎公司，”台灣高鐵計畫南科振動影響評估及對策研擬工作成果報告”，中鼎工程股份有限公司與美國ICE公司報告(1999)。
3. 林聰悟、陳正興、李洋傑，”高鐵行經南科園區振動研究—高架橋基礎與連續基礎之減振效果評估”，國科會專題研究(2000)。
4. 中華顧問工程司，”南科園區橋梁基礎實體模型試驗計畫”，中華顧問工程司(2001)。

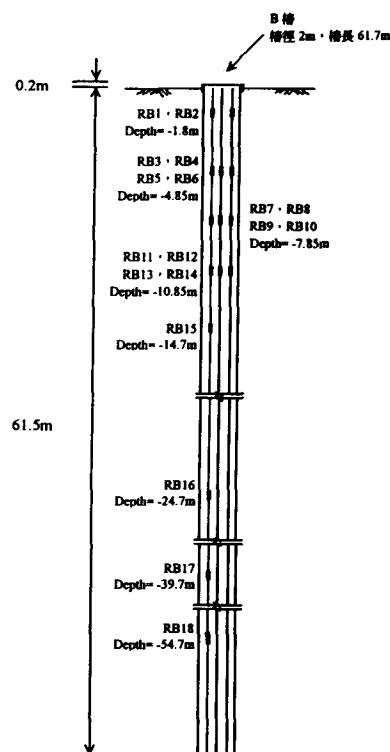


圖 1 樁身尺寸與鋼筋計配置圖

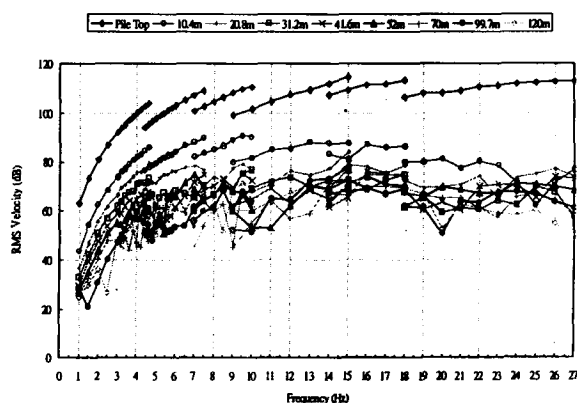


圖 2 水平試驗之水平徑向(Y)振動幅值

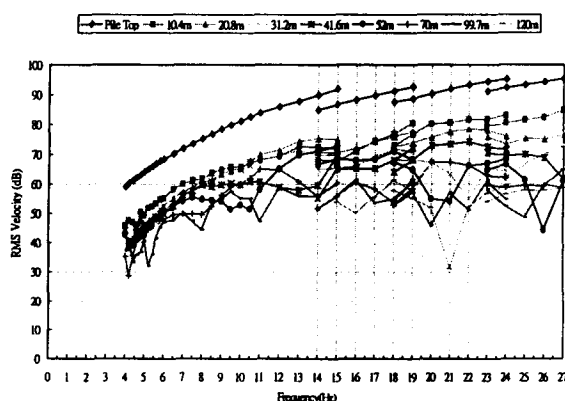


圖 3 鉛垂試驗之鉛垂向(Z)振動幅值

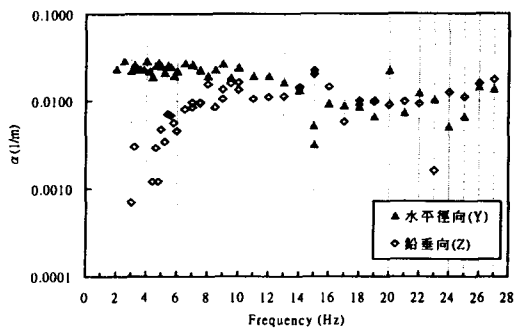


圖 4 水平試驗之地盤振動衰減係數

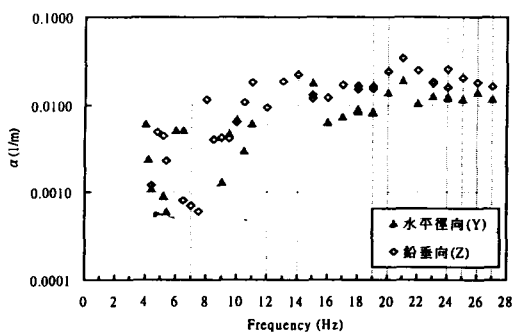


圖 5 鉛垂試驗之地盤振動衰減係數

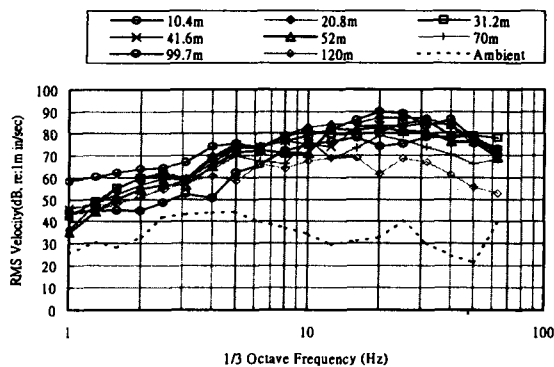


圖 6 重錘試驗 1/3 倍頻頻譜(鉛垂向)

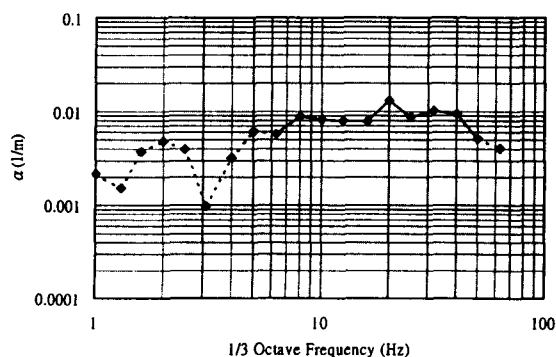


圖 7 重錘落擊試驗地盤振動衰減係數(鉛垂向)

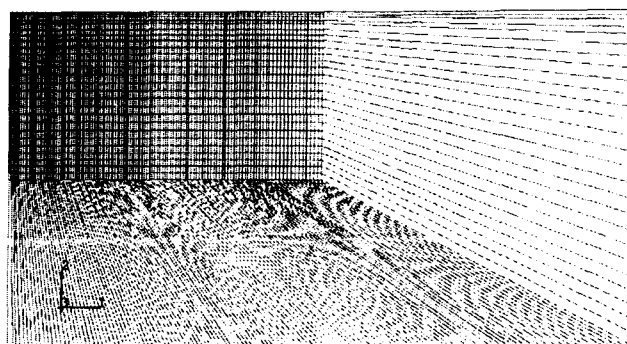


圖 8 ABAQUS 分析之網格

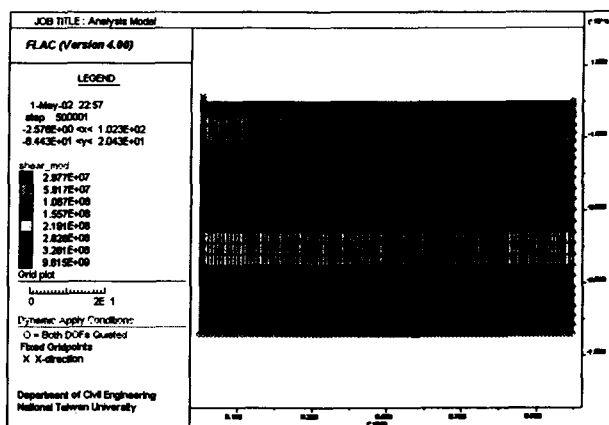


圖 9 FLAC 分析之網格

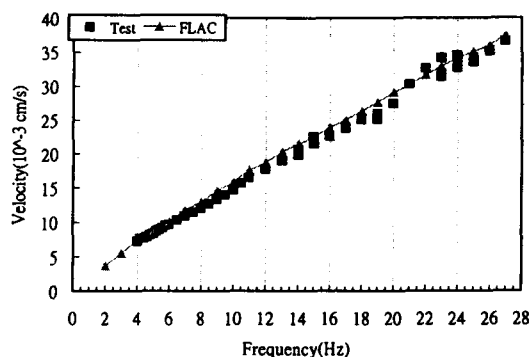


圖 10 鉛垂試驗樁頭速度動態反應函數

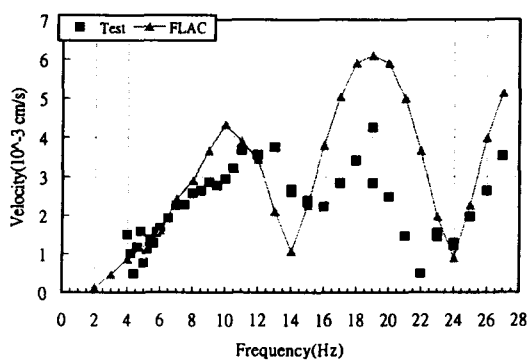


圖 11 鉛垂試驗 31.2m 鉛垂向速度反應函數

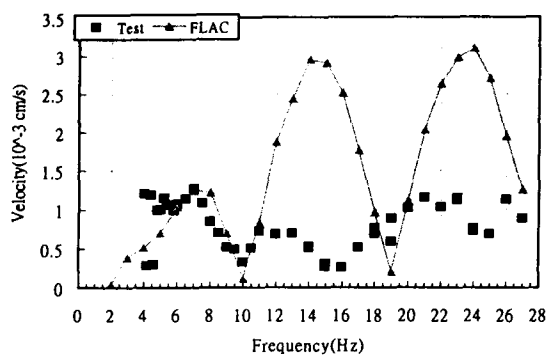


圖 12 鉛垂試驗 31.2m 水平向速度反應函數

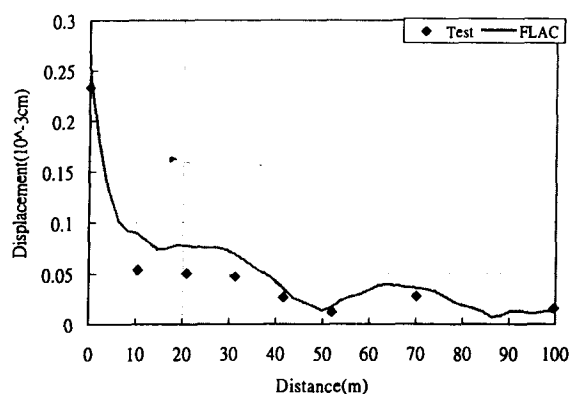


圖 13 鉛垂試驗鉛垂向地盤振動傳遞曲線 (10Hz)

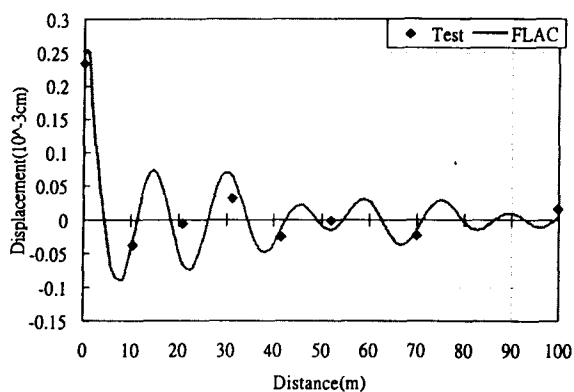


圖 14 鉛垂試驗鉛垂向地盤振動傳遞曲線 (10Hz)

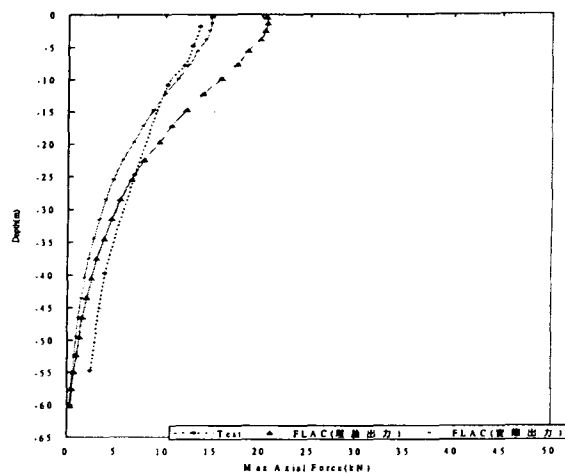


圖 15 鉛垂試驗樁身最大軸力隨深度變化 (10Hz)

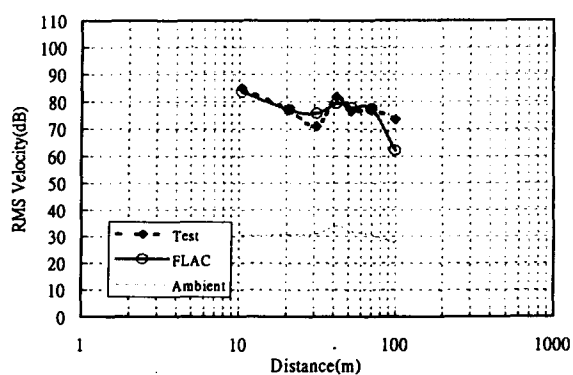


圖 16 重錘試驗水平向地盤振動衰減關係 (16Hz)

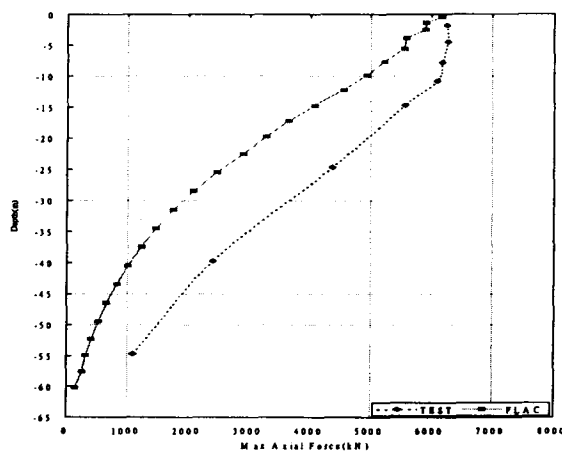


圖 17 重錘試驗樁身最大軸力隨深度變化 (落距 2.5m)