

地工技術

淺談基樁之承載力試驗

張有恒

台安工程技術顧問公司

摘要

關鍵字：基樁試驗、儀器監測、打樁動力分析、動力載重試驗、靜動荷重試驗。

欲獲得正確之基樁承載力，有賴正確之載重試驗方法。本文係針對靜載重試驗方法、監測系統及相關事項逐一說明，祈能提供相關業者對試樁規範之內容能有多一層參考。此外並介紹打樁動力分析(PDA)及動力載重試驗方法(DLT)，及利用國內試樁案例說明動力分析可以改進基樁施工效率及驗證基樁施打後之品質。最後介紹國外最新之靜動荷重試驗方法，其原理及試樁實際案例。以期借此三種方法靈活運用使國內之基樁品質控制能達到較經濟有效之目標。

AN INTRODUCTION TO METHODS OF PILE LOAD TEST

CHANG YU HERNG

Diagnostic Engineering Consultants, Limited

KEY WORDS : pile load test, instrumentation, Pile Driving Analysis,
Dynamic Load Test, statnamic.

ABSTRACT

The correctness of pile capacity comes from accurate and reliable load testing methods. This paper addresses the method of pile load test by means of dead weight, The associated instrumentation for data acquisition, and highlights some practical problems. Secondly, the concepts of Pile Driving Analysis (PDA) and Dynamic Load Test (DLT) are presented in details. Local case records on pile load tests are used to demonstrate that PDA and DLT can be applied to improve the driving efficiency and to check the quality of driven piles. Finally, the latest pile load test by statnamic method is introduced. Some actual pile test results are cited for reference. With the application of these testing methods, better quality of pile load test may be achieved at lower cost.

地工技

一·前言

近年來由於重大公共工程及超高層建築蓬勃發展，基樁被廣泛使用於軟弱土層，以克服其承載力之不足，並減少結構物之沉陷量。然而由於基樁之承載理論尚未完善，及同一地區土層具有差異性，基樁之承載力除了依賴設計者之經驗判斷外，尚須以現地之載重試驗來確認其承載力。但礙於工程經費有限，往往一個工地僅作少量載重試驗（例如每 1 0 0 支作一支、或每 2 0 0 支作一組傳統靜載重試驗），對整個工程基樁之安全性實難掌握，尤其是在工程進行中如果發現品質有問題之基樁卻因缺乏時間、空間或反力系統等狀況下，以致無法對基樁結構體之完整性及承載力作確實驗證造成困擾。國外對於改善或替代試樁方法之研究，已頗有成果。本文之目的在說明基樁承載力之傳統試驗方法—靜載重試驗(Static Load Test)在國內之應用並討論其缺點。同時亦介紹二種國外新試樁方法：高應變動力試樁(Dynamic Load Test)及靜動載荷試樁(Statnamic Load Test)，以期借此三種方法靈活運用使國內之基樁品質控制能達到較最經濟、有效及全面性之目標。

二、靜載重試驗

2.1 基樁之傳統靜載重試驗目的

基樁之傳統靜載重試驗，其目的可分列成七項：

- (1).基樁設計之確認。
- (2).工程驗收或修正設計之依據。
- (3).作為推估其他樁徑基樁之參考。

(4).基樁工法之推展-針對新的一種施工方法或機具所打設完成之基樁進行載重試驗，以提供實際證據。

(5).基樁種類之選擇。

(6).對品質有問題的基樁進行載重試驗。

(7).提供其他載重試驗之對比驗證。

依試樁時間及目的的不同，亦可劃分為前期試驗(Preliminary Load Test)及驗證試驗(Proof Load Test)。

2.2 試驗之方式

(1).依設計載重不同，試樁可分為垂直壓力載重試驗。

(2).拉力載重試驗

(3).側向載重試驗-測試基樁承受側向荷重或水平地震力之位移，可分為自由端(Free-Head)及有樁帽約束固定端(Fixed-Head)兩種。

(4)斜樁載重試驗-橋梁或海岸工程之基礎，為增加水平之抵抗力而採用斜樁之設計，但以目前反力系統因基樁傾斜之關係，試測困難。一般僅能針對傾斜度 7 度以下之斜樁進行壓力載重試驗。

2.3 試驗之加載方式

(1).呆重方式

即在現有基樁上，直接堆放重物作為加壓之反力裝置，其重量必須為試驗載重之 1.1 倍以上，由於成本高及施工較危險，一般是在錨樁距離太遠或沒有錨樁下之狀況才採取此種方式試樁。此種方式極易造成地表之沉陷(可能高達 20 ~ 30cm)，且依 Poulos(1975)之理論研究，由於載荷對基點之下沉，會使樁頂之量測下沉量偏小，故在基準梁支柱距離 r 小於五倍樁徑 d 之情況下，樁之實測下沉量須

乘以 1.5 ~ 2.0 或更大之修正係數，而只有在 $r \geq 0.5L$ (L =樁長)時上述影響才會較小。國內基樁多屬長樁及高承載力樁，使用呆重法試樁既耗時，亦昂貴；應謹慎考量。

(2).地錨方式

此種方法雖使錨定系統對主樁實測位移之影響較小，但其穩定性較差，高承載之試驗樁應該避免使用此種方法。

(3).利用錨樁反力梁載荷方式此種方法為國內最常使用之方法，視實際樁長、樁徑及土層狀況錨樁數量可為 2 支、4 支或 8 支。所使用之錨樁多為永久工作樁，故試驗時應確保錨樁不致因載重試驗之作用而使其結構體或承載力受到影響。國內試樁均有使用現有結構之逆打鋼柱作為抗拔或抗壓之錨樁，應避免造成逆打鋼柱之變形。採用工作樁為錨樁，應該是屬於最經濟之方法。惟應注意錨樁對主樁位移之影響，國外對於錨樁間距之規定列之如表一。

表一 各國錨樁與主樁及參考梁支柱之距離規定

距離國別	主樁與錨樁淨間距	主樁與參考梁支主淨間距	錨樁與參考梁支柱淨間距
美國	5 d > 2.0 m	> 2.5 m	> 2.5 m
日本 1971	$\geq 3 d$	$\geq 5 d$	$\geq 2.5 d$
瑞典 1967	$\geq 1.5 m$ 或 $> 5 d$	$\geq 2 m$	$\geq 1 m$
蘇聯	$\geq 6 d$		$\geq 6 d$
中國大陸	$\geq 3 d$ > 1.5 m	$\geq 4 d$ > 2.0 m	$\geq 4 d$ > 2.0 m
備註	d - 試驗樁直徑；d' - 錨樁直徑		

國內目前均採用 ASTM 1143-81 之規定，即主樁與錨樁需有 5 倍樁徑之淨間距，對於 1.2m 直徑以上之基樁，即有試

驗鋼梁尺寸過大及運輸等問題存在。

2.4 試驗之加載程序

基樁載重試驗之加壓程序依 ASTM 1143-81 所列之方式計有 7 種，即標準加載法、循環加載法、超額加載法、等時間距加載法、等速貫入法、快速加載法及沉陷控制法。標準加載及循環加載試驗需時約在兩天至三天左右，快速加載法則大大縮短了試驗之時間，循環加載可依不同目的而加以採用，循環加載可能會改變基樁之基本行為，不應忽視。至於標準加載與快速加載究竟有何差異，依國外文獻報導，其差異在 5 % 之內，惟依筆者所觀察基樁在不同試樁加載程序下，快速及慢速之加載方式對長樁及樁底有沉泥之鑽掘樁之差異較大。故建議作為回饋設計用之前期載重試驗(Preliminary Load Test)宜以標準加載法進行試驗，對於後期作為驗收及驗證用之驗證試驗(Proof Load Test)則可使用快速加載法，同時亦建議將每一加載保壓用原 ASTM 採用之 2.5 分鐘改為 10 分鐘，最高壓及零荷重階段則改為各兩個小時，目前此種快速加載法已廣為國內工程界使用。

2.5 試樁空打部份摩擦力之消除

使用於深開挖工程中之承載基樁，開挖至底部再行試樁執行上極為困難，故一般均將基樁打設至地面，在地表面進行樁載重試驗，再扣除挖面以上(空打部份)之摩擦力或以隔離方法消除摩擦力，常用之方法有下列幾種：

- (1).以模板分離法-以保麗龍及模板包覆鋼筋籠之方式來隔離樁身空打部份與土壤之接觸。
- (2).鋼柱法-混凝土僅澆置至開挖底

面，空打部份則以鋼柱作為壓力或拉力傳遞之構件，並填以級配料，此種方法可免除日後之打除作業，鋼柱亦可回收，惟其易造成偏心及應力集中之情形。

(3). 雙套管方式-在空打部份以內外套管方式與土壤隔離，在內套管塗佈油脂及鋼筋籠外圍包覆帆布，或兩個套管之間安裝間隔器，以隔離內外套管，均有相當高之成功率，以雙套管方式之隔離效果可高達 95% 左右。

(4). 埋設儀器方式-在樁頂及開挖界面埋設儀器以計算之方式扣除摩擦力。

2.7 試樁之監測系統討論

(1). 電子式位移計-用於量測主樁之位移，以 90° 等分配置於主樁樁頂，除了量測主樁之沉陷（壓力試驗）及上拔（拉力試驗）外，亦用於量測錨樁之沉陷或上拔。每支錨樁至少需設置乙只位移計。ASTM D1143-81 中有關位移計之規定為衝程 50mm，可測讀至 0.25mm。然就台灣之大型長樁而言，筆者建議應使用 100mm 衝程及精度為每個讀數 0.01mm 之位移計，尤其是在標準加载中以沉陷速率 0.25mm/hr 作判定時，每個讀數 0.25mm 之位移計將無法判定。

(2). 測微錶-測微錶乃屬機械式之位移計，由人工測讀。一般可作為檢核電子式位移計之用，其精度為 0.01mm，衝程為 50mm。測讀時應注意人員安全及避免誤觸，否則試驗前功盡棄。

(3). 樁頂荷重計-依 ASTM 1143-81 3.2.2 所述，除非使用校正過之電子荷重計，否則整套加壓系統（油壓千斤頂、油壓泵及壓力計）均需一起進行校正。國內之試樁大部份沿用千斤頂之校正方式，惟油壓千斤頂之壓力錶均採用指針式壓力

錶，較不準確，電子荷重計則可達每個讀數 0.125t 左右，精度較高。並可隨時觀察試樁壓力是否有降低之現象，現場電腦立即顯示之荷重可供監造單位明瞭每個加載階段千斤頂之荷重是否確實施加於試驗樁上，其是在基樁破壞時，以電腦控制快速掃瞄，可得到試樁破壞時之荷重與沉陷之關係。

(4). 鋼筋應力計-於各個土層界面設置鋼筋計，每個斷面 3 至 4 只以等角度配置，可求得樁身之傳遞荷重 (Load Transfer) 分佈 (ASTM 1143-81 4.4.1)，並用以推估同類土層不同樁徑之承載力。

(5). 樁體變位計-即為傳統所言之 Tell-tale，設於基樁之重要面，得以分離彈性及樁身之塑性沉陷，亦可提供樁身之位移 (Slip) 資訊，同時亦可作為樁身傳遞荷重計算之依據。

(6). 混凝土應變計-混凝土應變計在國內試樁極少使用，一般均參考鋼筋計之應變量為計算依據。而在拉力試驗時，混凝土可能因拉力超過其拉力極限而開裂，為求計算之合理性，在鋼筋計之埋設斷面亦設置混凝土應變計，實有必要。

(7). 樁尖荷重計-設置於樁尖，以量測樁尖之點承力。

(8). 樁體傾度儀-使用於側向試驗中，可求得在側向荷重下，樁身全長之撓曲變形曲線。

(9). 樁頂傾度銅盤-使用於類似煙囪工程下之基樁在進行側向試驗時，量測其樁頭之傾斜角。

(10). 自動化量測及處理系統-台灣之基樁載重試驗，超過 1000t 以上者已相當普遍，傳統式之測微錶及人工測讀方式，不但威脅測讀人員安全，且易發生誤讀及誤觸量測系統之缺點，因此應以電腦自動

化方式連線測讀，使現場在每次掃瞄之後能立即顯示物理量及變化曲線，自動化量測具有下列優點：

(a). Real time 顯示各測點之物理量 (mm、ton、kg/c m²、° Q) 提供現場專業工程之研判。

(b). 監控室在安全距離外，可確保人員及測讀儀器安全。

(c). 以工作樁作為錨樁時，可隨時觀察其沉陷或上拔量，不致損壞永久工作樁。

(d). 現場可顯示各儀器之歷時曲線，可充分掌握基樁之力學行為，並可隨時檢查各儀器是否有異常之現象。

(e). 在基樁破壞時，可藉助電腦快速掃瞄記錄荷重與位移之關係，此為人工測讀方式所不能及者。

(f). 試驗完成後在現場立即可提供各測點之電腦報表記錄(物理量)予業主。

(g). 樁頂之荷重是否減少，可經由電腦充分瞭解，必要時應予補壓。

三．打樁動力分析及動載重試驗

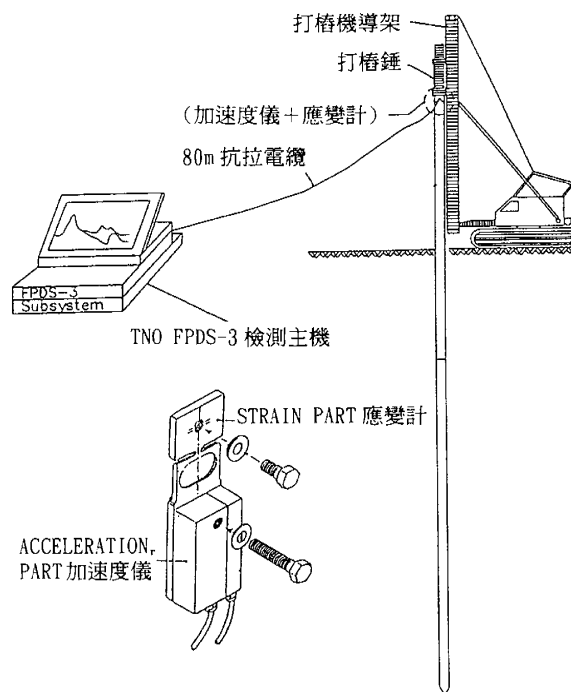
動力試樁乃是在樁頂以自由落錘或打樁機在樁頂施加一衝擊荷重，藉由樁頂之加速度儀及應變計所測得之數據為邊界條件，依波動理論求得基樁之樁身應力完整性、土壤摩擦力及土壤點承力等。

近年來由於電子科技之進步，及波動理論之發展益至成熟，使得專業工程師得以借助動力量測系統所得數據，再經由波動理論之推演及信號比對 (Signal Matching) 之分析，而能對打擊樁、鑽掘樁之完整性及承載力作正確之估計，此種試樁方法即如 ASTM D4945-89 中所述之

高應變動力試樁法 (Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Pile)，本文即對此一方法就國內外之實際應用作一介紹，以期能對國內基樁之設計、施工及品管單位有所裨益。動力試樁之設備採用荷蘭科技研究院建築工程暨材料研究所研發之 TNO FPDS-3 測試設備及 TNOWAVE Signal Matching 分析軟體。

3.1 動力試樁之種類

動力試樁之方式大致可分為兩類，即打樁動力分析簡稱 PDA (Pile Driving Analysis 詳見圖一) 及動力載重試驗簡稱 DLT (Dynamic Load Test) 前者在打樁過程中同步監測，後者則在基樁打設後至少 48 小時以上實施。



圖一 PDA 檢測示意圖

3.1.1 PDA 打樁動力分析

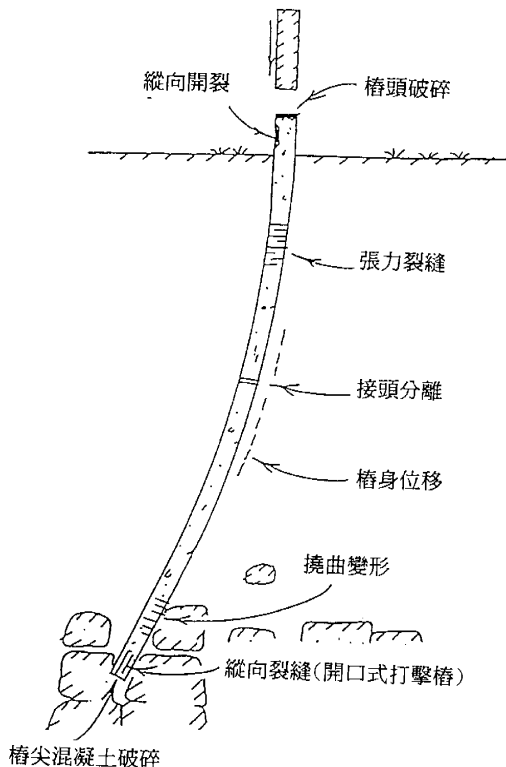
本試驗之主要目的所作為打擊樁打設

程序控制，在打樁過程中可求得：

(1). 最大壓應力 (Maximum Compression stress)-如基樁打入極堅硬土層，則樁尖視同為一固定端，故其壓應力為樁頭之兩倍，若超過材料之容許壓應力則極易發生樁尖碎裂情況。

(2).最大拉應力(Maximum Tension Stress)-於軟弱土層之初打或基樁穿過硬層後遇到軟弱土層時，樁身極易受拉力破壞，一般均發生在樁尖或基樁中間。通常 P C 樁（中空樁尖閉合型）打設完後，中間部份積水即可能屬於此類型式破壞。

(3).傳輸能量(Transferteed Energy)-由於國內打樁機大部均為柴油式樁鎚，而老舊或不適合之打樁機常易造成樁頭損壞及樁身破壞，且可能因使用低效率之打樁



圖二 打擊樁在打設過程中樁身所可能發生之損害

機而使工期延長，P D A 可記錄每一樁槌之打擊能量。

(4).打擊阻抗(Driving Resistance)-國內一般打擊樁大部分依設計打設至設計樁長，再予截樁，結果極易因為硬打造成樁頭樁身損壞，經用 P D A 之檢測可隨時瞭解樁身之打擊阻抗及樁身完整性，以判定截樁之最佳深度位置。

(5).打擊數、打擊速率(Blow count ; Blow rate)

(6).打擊偏心(Eccentricity of blow)-打擊偏心易造成基樁碎裂及挫屈破壞。

(7).由速度及力量曲線判定基樁之完整性—打樁可能造成樁身之損壞詳見圖二。

3.1.2 動力載重試驗(DYNAMIC LOAD TESTING)

本試驗需於打擊樁打設後 48 小時以上或鑽掘樁打設後混凝土達到設計強度及土壤回復後進行之。其測試方法與 P D A 相同，動力加載方式為打樁機或落鎚(Drop hammer)，動力載重試驗所得數據與 P D A 之內容相同，惟 D L T 另需進行 T N O W A V E 信號比對分析，並與靜載重試驗結果進行校正，求得正確之動力及靜力參數，以作為他同類土層動力試樁之參考。

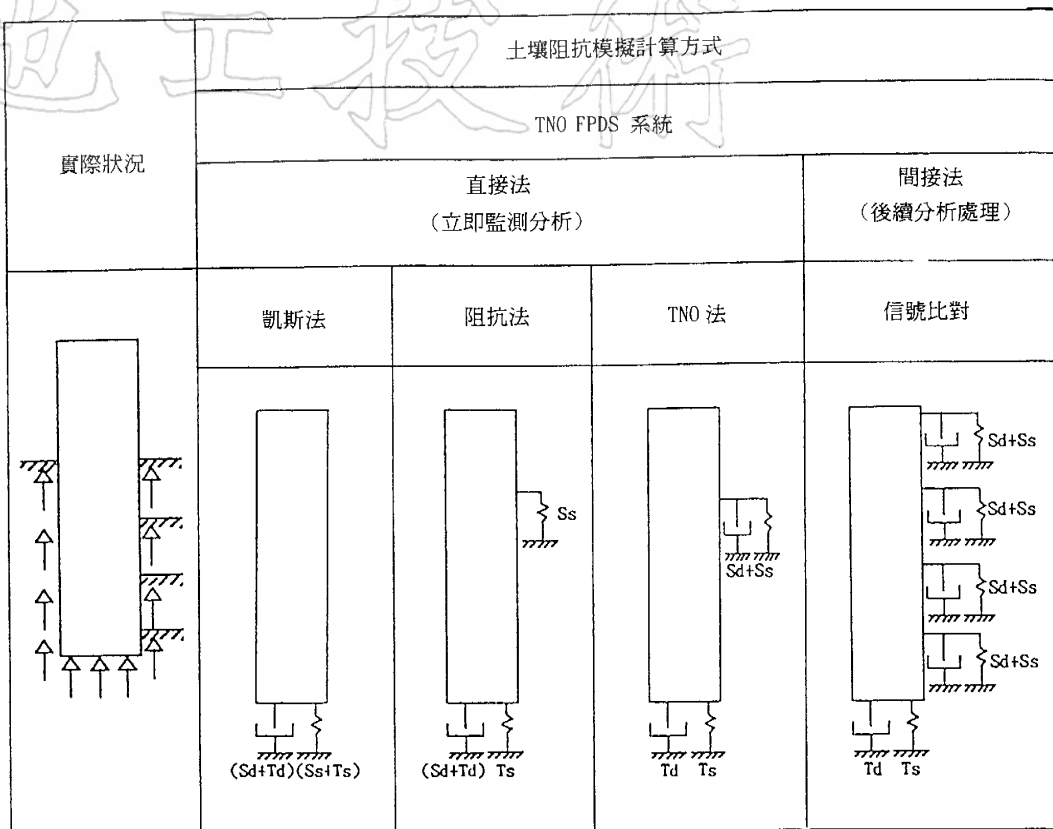
3.2 動力試樁之方法

(1).在距樁頂 1 ~ 3 倍樁徑位置鑽孔 10mm 孔徑，並植入膨脹螺絲。

(2).將加速度儀及應變計，固定於事先埋設之膨脹螺絲上，兩側各設置一組。

(3).與 FPDS-3 主機連線，並測試儀器功能是否正常。

(4).設定參數包括樁長、彈性模數、波速、儀器校正係數、土壤阻尼係數(Damping Factor)等。



圖三 動力試樁土壤模擬分析型式

(5).打樁機樁槌安裝定位完成，開始進行打樁。

(6).依樁頭之感應器可測得樁頭加速度及應變，經積分及換算，可得速度及力量曲線，再依單維波動理論可求得基樁之動承載力(Driving Resistance)

(7).可採凱斯法(Case Method)、阻抗法(Impedance)及 TNO 法三種土壤模擬方式進行測試。詳見圖三。

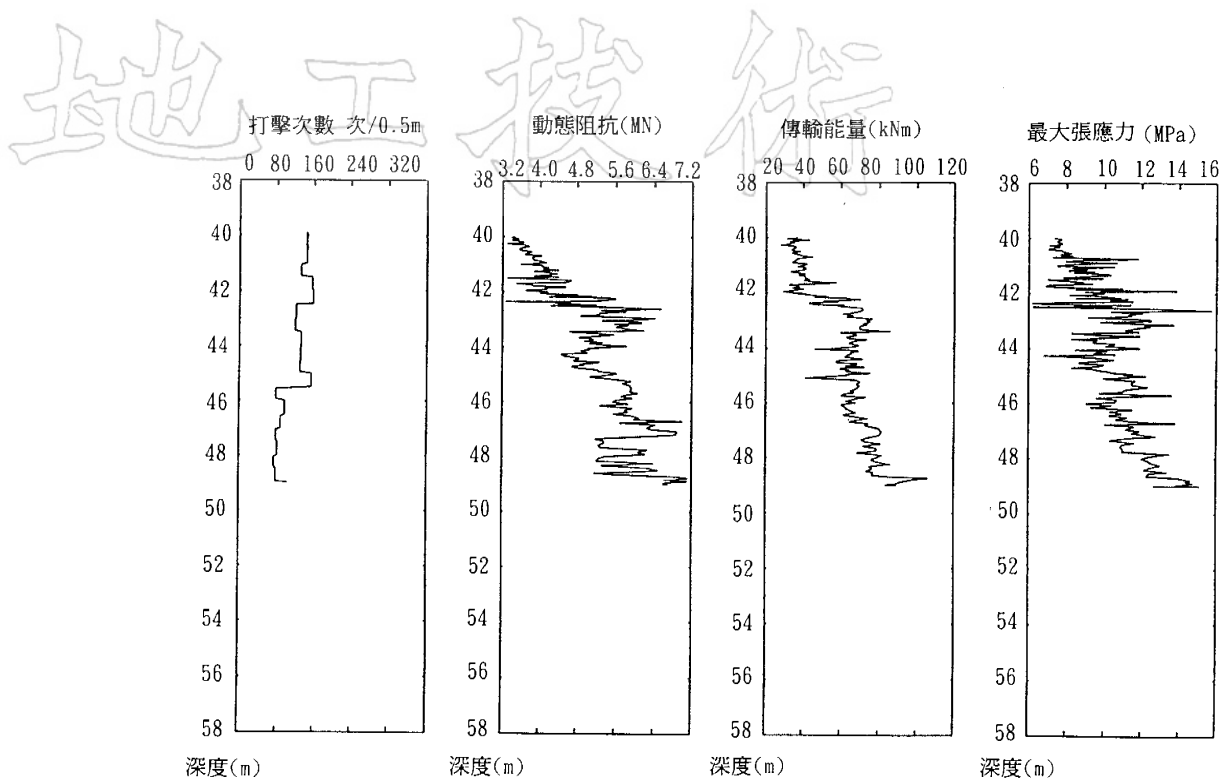
(8).PDA 及 DLT 所使用之軟硬體均相同，其差異僅是在打樁過程中（最後一節打擊樁）作 PDA 及在基樁打設完成土壤回復後再進行 DLT。DLT 測試完成後，作 TNOWAVE 及 TNOSTAT 波動理論訊號比對(Signal Matching Process)以求得更準確之土壤動力參數作為爾後其他驗證

樁(Proof Loading Test Pile)。

3.3 動力試樁實例介紹

3.3.1 案例一：打樁動力分析（PC 樁 5 1 M）

本案例為針對 PC 樁打設過程中進行 P D A 打樁動力分析，基樁總長度為 51m，自 39m 開始 P D A 檢測，本節基樁總計打擊了 2800 下，樁身在 45m 至 49m 左右，土壤之動態阻抗(Dynamic Resistance)約在 6 ~ 7MN 之間，最大張應力為 14.6MPa，最大壓應力則為 39.4MPa，張應力稍高於容許值 [3*(fc^0.5) + 預力值]。依打擊數、傳輸能量及打擊阻抗顯示在 39m 至 43m 之間打樁有較高打擊數但呈現低能量及低打



圖四 PC 樁打擊次數、動態阻抗、傳輸能量及張應力關係圖

擊阻抗，顯示打樁機之效率偏低，經過現場垂直度修正及打樁墊襯材料加厚之後，打擊阻抗及能量均有明顯之改進。(詳如圖四)打樁機之能量約在 60 ~ 80kNm 之間，約僅有額定能量之 30%。

由上例可知依打擊數或出廠額定能量作為判定截樁時機及以打樁動力公式推求承载力常因打樁機之實際傳輸能量之差異，而發生極大的誤差。

3.3.2 案例二：打樁動力分析 (PC 樁 31.5M)

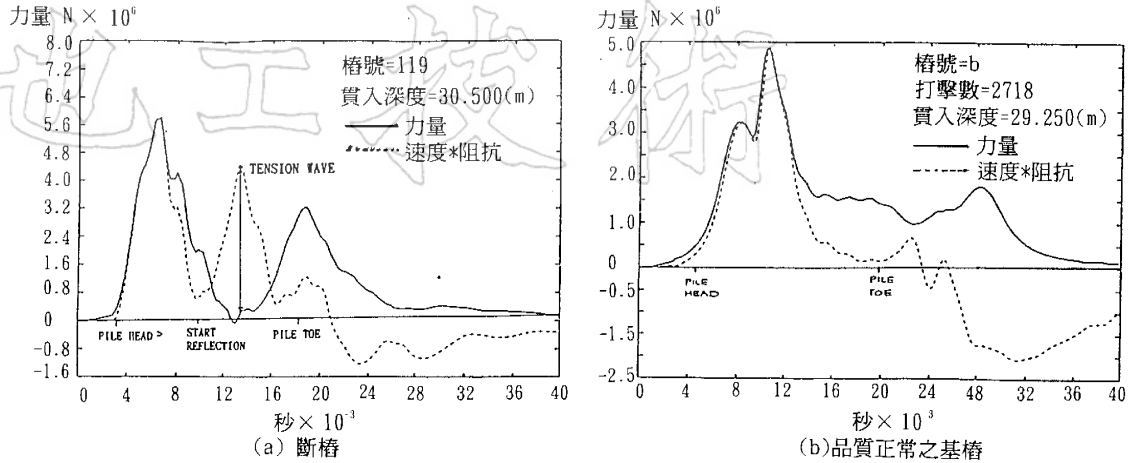
打擊樁在打設過程中可能產生如圖二所示之損害，故對整個工區之基樁作某個比例之 P D A 檢測，將有助於基樁之品質，如圖五 (b) #b 基樁為品質良好之基樁，而基樁 #119 在 14.5m 處有一極為明顯之張力波，顯示 PC 樁已經呈斷樁現象。(圖五 (a))。

3.3.3 案例三：鋼管樁 (DLT 動力載重試驗)

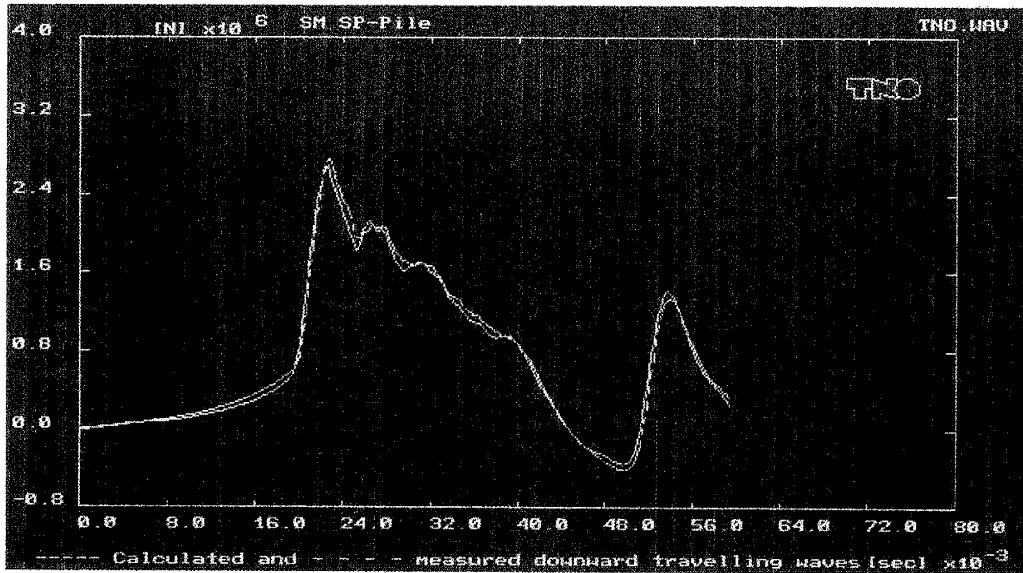
於鋼管樁打設後 7 天，進行重打 (Restrike) 動力載重試驗，經過信號模擬比對 (如圖六) 後，求得動力及靜力參數進而求得荷重-沉陷曲線圖，其被激發靜承载力 (Mobilized Static Resistance) 為 2.93MN, 至於極限承载力則可依所求得之荷重沉陷曲線依國內常用之試樁方法評估之。

四、靜動載荷試樁法 (STATNOMIC LOADING TEST)

如前文所述靜載重試驗較能提供可靠之承载力，而動力試樁則提供快速、經濟之檢測方法，但動力試樁與傳統之靜載重試驗仍有下列幾項缺點：



圖五 PDA 檢測 PC 樁之完整性範例



圖六 DLT TNOWAVE 信號比較分析

1. 動力試樁如果使用不當之落錘 (落距) 易在樁身產生張力波, 過大之張力波可能對樁身材質產生不良影響。
2. 動力試樁之打擊造成之偏心可能會使樁身產生撓曲應力(Bending Stress)而損害樁身。
3. 動力試樁需要受過相當訓練, 而且有經驗之工程師從事試驗及分析。
4. 動力試樁必須與同類型、同樁徑、同長度、同斷面且類似土層之基樁載重靜

試驗結果進行校正(Calibration)。

5. 靜載重試驗費用昂貴且費時, 而且工程上常為了省錢, 利用現有工作樁作為錨樁或甚至作為試驗主樁, 可能會對工作樁造成損害。
6. 對斜樁, 載重試驗靜載重試驗只能作到斜度 7° 以內之斜樁, 且安裝困難度及工程成本都很高。
7. ASTM D1143-81 中有關主樁與錨樁必須有五倍樁徑淨距將使直徑 1.2m 以

上之基樁無法以反力錨樁之方式試樁，如以笨重方式則成本高，且試驗結果可能因表土之大量沉陷而誤導其基樁行爲。

爲了克服上述之限制，荷蘭科技研究院 (TNO) 及加拿大 Berminghammer 公司聯合共同發展了 Statnamic 試樁系統，即取 STATic 及 dyNAMIC 兩個英文字之結合，意指 STATNAMIC 係介於靜載重與動力載重之間之試樁方法，其加載之期間(Duration)要比動力載重法長，但卻小於靜載重試驗。故名之爲靜動載荷試樁法。

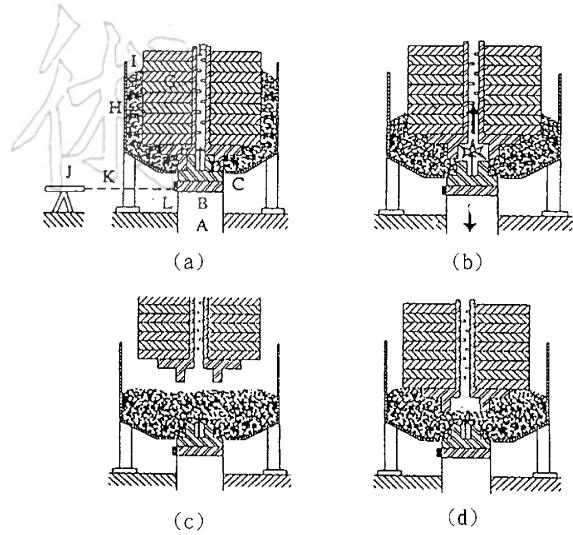
4.1 STATNAMIC 試樁法之原理

本試樁法之原理如圖七所示，在汽缸中引燃一種燃料產生高壓，而將置於樁頂之反力塊垂直向上推射升空，其所生之反力則將基樁壓入土壤中。樁頂之荷重可經由電子荷重計量測，特殊研製而成之雷射感應器則用來量測樁頭之沉陷。反力塊一般爲試驗載重之 5% 至 10%，圖七爲 Statnamic 之試樁連續性示意圖。圖七 (a) 發射前之狀態。圖七 (b) 爲燃料引爆產生高壓，使反力塊加速推射升空，基樁即刻進入受載階段，將基樁壓入土中，力量及位移立即記錄至 TNO 之 F P D S 系統。

圖七 (c) 反力塊因上昇造成空間，故由原圍在周邊之礫石填充。

圖七 (d) 因重力之關係，礫石在樁頂形成一層礫石層，當反力塊降下時，其能量爲礫石層所吸收，同時其衝擊力立即傳遞至土壤表層。

Statnamic 試驗法因具有較長之延時 (duration)，故可使基樁在一定之壓力下承受載重，因此不會有張力波產生，而 Statnamic 設計在樁中心加載之模式可



圖七 STATNAMIC 試樁連續性示意圖

確保沒有偏心之荷重加之於樁頂。同時亦使試驗樁之變形行爲與靜載重相似，也就是說應力波將不再列入考慮，基樁將僅考慮 Statnamic Force，慣性力 (Inertia force) 及土壤阻抗 (Soil Resistance) 如圖八之所示。在 Statnamic 試驗中 Statnamic force，簡稱爲 F_{stn} 及位移 u 均以時間爲函數量測，依平衡條件：

$$F_{stn}(t) = F_{soil}(t) + F_a(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$F_{stn}(t) = \text{Statnamic Load (由量測而得)}$$

$$F_{soil}(t) = \text{土壤阻抗} = F_u(t) + F_v(t) + F_p(t) \dots (2)$$

$$F_u(t) = K \cdot u(t) = \text{靜態阻抗} \dots \dots \dots (3)$$

$$F_p(t) = P \cdot v(t) = \text{孔隙水壓阻抗} \dots \dots \dots (4)$$

$$F_v(t) = C \cdot v(t) = \text{土壤之阻壓力} \dots \dots \dots (5)$$

$$F_a(t) = m \cdot a(t) = \text{慣性力} \dots \dots \dots (6)$$

其中 k = 彈簧勁度 (N/m)

c = 阻尼係數 (N s/m)

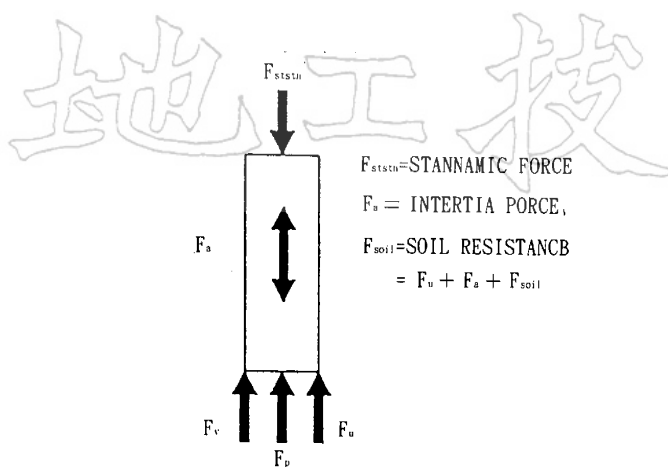
m = 基樁質量 (kg)

p = 孔隙水壓阻抗 (m/s)

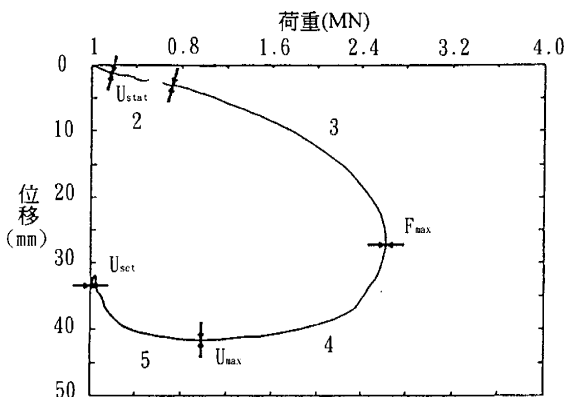
$u(t)$ = 位移 (由量測而得) (m)

$v(t) = du/dt$ = 速度 (m/s)

$a(t) = d_{2u}/dt^2$ = 加速度 (m/s²)



圖八 STATNAMIC 加載時作用於基樁之力量



圖九 STATNAMIC 分析重點區域圖

為簡化分析孔隙水壓阻抗可視為阻尼之一部份故 $F_p(t)$ 可由方程式中去除。如圖九所示為一 Statnamic 之荷重位移圖，在第 1 階段反力塊依序加載於樁頂，故其變形行為純粹為靜態的，故在第 1 階段之最後量測而得之荷重及位移分別稱為 F_{stat} 及 U_{stat} ，所以彈簧勁度 K_1 可由下式求得：

$$K_1 = F_{stat} / U_{stat} \dots \dots \dots (7)$$

在第 2 階段反力塊被發射升空，Statnamic 荷重開始加諸於基樁，土壤之阻抗仍為彈性狀態，此時慣性力及阻尼力同時作用在基樁上；在第 3 階段靜態土壤阻抗到達極限強度，而且在 F_{uy} 降伏，

速度及慣性力持續增高，直到本階段結束，達到最大之 Statnamic 荷重。在第 4 階段 Statnamic 荷重開始減少，而由於基樁之慣性作用，其位移仍持續增加，土壤達到降伏值 F_{uy} ；基樁速度減至“0”且符號改變，在此階段結束時 (t_{umax})，位移達到最大值 U_{max} ，而且速度等於“0”。於是阻尼力亦等於“0”因此在此點 Statnamic 荷重減去慣性力應等於靜態土壤阻抗。

$$F_u(t_{umax}) = F_{stn}(t_{umax}) - m \cdot a(t_{umax}) \dots \dots \dots (8)$$

此力量之大小可視為在加載期間土壤所能提供之最大靜態阻抗。當基樁加載至破壞時，極限承載力 F_{uy} 等於 $F_u(t_{umax})$ 即

$$F_{uy} = F_u(t_{umax}) \dots \dots \dots (9)$$

在第 5 階段靜態土壤的解壓荷重 $F_u(t)$ 克服其相反方向之力，而將樁向上推擠。故在此階段結束後，樁之最終沉陷量便可獲得。

4.2 STATNAMIC 試驗實際案例

(1). 案例. 試驗地區：加拿大 McMaster University

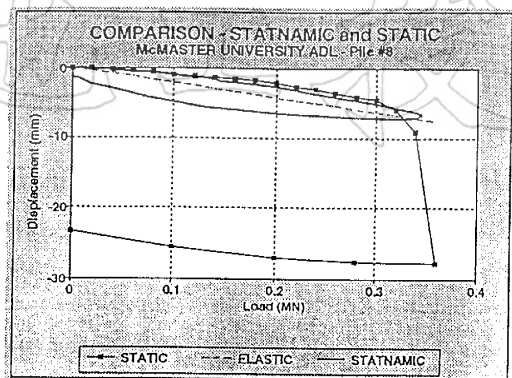
業主：National Research Council of Canada

基樁型式：閉口型鋼管樁 樁徑 = 178mm，厚度 = 8mm，樁長 = 18.3m

土層描述：樁身埋設應變計、沉泥、粘土及細砂，至 19m 處為頁岩 (Queenston Shale) 試驗結果：詳見圖十。

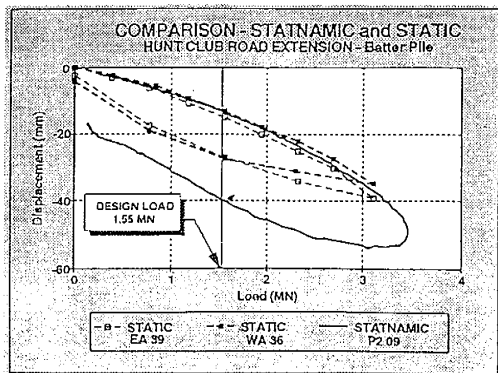
(2). 案例. 試驗地區：加拿大，渥太華 業主：Golder and Associates.

基樁型式：閉口型鋼管樁，斜樁 1H:5V，樁徑 = 324mm，厚度 = 13mm，樁長 = 31m



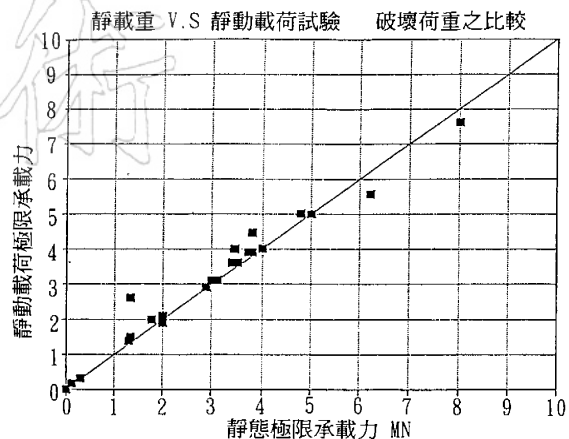
圖十 斜樁靜載重 STATNOMIC 試驗比較

土層描述：表土約 2m 為沉積砂，其下層為 10 ~ 13m，原為靈敏性粘土，粘土下層為緊密且變量性較大之沉泥、砂、粘土及冰積川層，岩盤位於 30m 之深度位置。試驗結果：詳見圖十一。



圖十一 MCMASTER UNIVERSITY 靜載重與 STATNOMIC 試驗比較

(3). S T A T N A M I C 試驗之驗證在 1990 至 1993 年間，經由加拿大、美國、荷蘭、德國、日本、以色列等國 43 組 Statnamic 試驗與 24 組靜載重比對驗證，其結果如圖十二所示，充分顯示 Statnamic 與靜載重試驗結果相當接近。由於 Statnamic 試驗從架設至試驗完畢只耗時 2 ~ 3 天，並且可節省鉗樁工



圖十二 1990 ~ 1993 年國外靜載重及 STATNOMIC 試驗結果比較

料及打除(都市土木空打部份)費用，實為一省時、經濟及可靠之試驗法，值得在國內推廣。

Statnamic 之最大試驗荷重，理論上沒有極限，非常適合國內大口徑長樁之承載力試驗，且依試驗結果與靜載重試驗結果相當接近，歐美日先進國家已廣為採用，連要求最嚴格之日本人亦已接受此種試驗方法，目前在日本有五所大學及 22 個民間工程單位組成“Statnamic 靜動載荷試驗研究會”將 Statnamic Load Test 廣泛的應用於大口徑樁、海域樁、斜樁、群樁甚至結構物之地震試驗，並正研議 statnamic 施工規範使之正式列入日本國家規範中。A S T M 亦將在不久的將來將此種試驗方法列入正式規範之中。

五、結論

(1).由於 ASTM D1143-81 中有關主樁與鉗樁之淨間距為 5 倍樁徑之規定，使樁徑大於 1.2m 且高承載力之試樁難以常用之反力鋼梁方式進行試驗，目前有回復使用呆重方式來試驗之趨勢，然而使用重

大之呆重卻難免對樁頭附近土壤產生沉陷，影響對基樁試驗之準確性。

(2). 試樁空打部份以雙套管之隔離方式較為可靠，試樁之結果較能代表真正工作樁之實際承載力。

(3). 大型工程如果先進行前期試驗，應可對工程之經濟性、安全性施工方法及施工時間提供莫大之幫助。

(4). 試樁應以電腦自動測讀方式，以保障人員安全及提供現場專業人員立即之判斷及分析。

(5). 適當數量之動載重試驗與靜載重試驗相互比對，將可減少靜載重試驗之數量，並能對整個工區有較全面性之瞭解。

(6). 在監造過程中，如果發現品質有問題之基樁，除了鑽心補樁之外，也許可以動力載重試驗 (DLT) 之方式求得基樁之承載力以作為瑕疵基樁取捨之指標。

(7). Statnamic 可解決五倍樁徑及斜樁(7°)試驗之限制。

(8). 靜載重試驗、動力載重試驗(PDA+DLT)及靜動載荷試驗(Statnamic)三種試驗方法如能靈活配置，相信必能節省工程成本，減少工期及作更全面性之基樁品質控制。

六、誌謝

本文承「三力技術工程顧問有限公司」總經理胡邵敏博士撥冗指正得以完稿，特表敬意誌謝。

參考文獻

台安工程技術顧問股份有限公司，"台塑企業六輕發電廠汽電區試樁工程動力載重(PDA+DLT)試驗總報告"。

MIDDENDORP, PETER(1989), "TNOWAVE User Manual Ver 2.2".

MIDDENDORP, PETER(1989), FPDS course PDA.DLT. TNOWAVE Signal Matching .

ASTM D4945-89, Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing Pile.

BROMS, BENGT B.(1994), "Damage of Piles During Driving", *Conference on Deep Foundations and Ground Improvement Schemes*.

POULOS, H.G. ET AL. (1975), " A Theoretical Examination of Errors in Measured Settlements of Test Piles ", II Australia-New Zealand Conference on Geotechnics.

BERMINGHAMMER CORPORATION, STATNAMIC Test Case Histories, Canada, (1989 - 1991), Stanamic Test Result S9001 ~ S9308(1990 ~ 1993).

MIDDENDORP, PETER(1992), "The First Statnamic Load Testing of Foundation Piles in Europe".

BERMINGHAMMER CORPORATION (1993), "STATNAMIC Load Test On Drilled Shafts at Cupertino, California", Prepared for FHWA Report S9303,

本文之討論意見將在後期雜誌中刊出，請您將意見於三個月內寄交雜誌編輯委員會。

84年7月11日 收稿

84年9月11日 修改

84年11月7日 接受