

## Q與A專欄

歐晉德\*

本問題與解答專欄將定期於本刊登出，所擬問題均選自目前大地工程界於施工中可能遭遇之一些疑難小問題，此類問題雖小，但常造成施工人員之困擾。本欄歡迎名讀者提出問題，並歡迎學者專家就解答內容提供意見。有鑑於大地工程牽涉範圍及變化甚多，讀者亦請避免將本欄提供之解答視為唯一方案，以免造成施工或尋求解決方法之錯誤。

### Q31：何謂基樁完整性試驗(Pile Integrity Test)？其類別為何？

A：基樁品質之檢核，傳統上樁載重試驗幾乎是唯一檢核方法，但在一工地中其可涵蓋的樁數極為有限，且試驗費用高昂，檢核效果主要在表現載重—沉陷之關係外，對基樁本身品質的反映程度則較間接，因此其並非一完整的檢核方法。

在最近二十年來，國際工程界鑒於基樁之重要性及其應用之擴大，積極研究改善基樁品質控制法並提升基樁施工技術，特別在場鑄式鑽掘樁上，此改善工作除對施工規範制定，監工加強及施工效率提高外，主要發展之一即所謂基樁完整性試驗的發展，直接對完成之基樁進行檢核。

基樁之失敗基本上有二原因：一為基樁與土壤間之相互作用行為，在支承力或沉陷量上不能符合設計需求，另一為基樁本體材料上有缺陷，利用載重試驗可測定者，為土層之極限狀況(Ultimate Condition)或判定工作荷重(Working Load)下之行為，工程師自試驗結果判別沉陷量，而肯定其安全度，安全係數則根據1.荷重的變化性，2.單樁與群樁的相關性，3.地層局部變異性來訂定，至於樁體本身之可能缺陷如1.蜂窩(Honeycoming)，2.裂縫(Crack)，3.頸縮(Necking)，4.鋼筋保護層不足，5.混凝土包含異物等因素均無法自載重試驗直接測知，有時此類缺陷在短期內尚無法發現其影響，但長程上因逐步降低構造物的安全

性，仍具導致工程失敗之潛在危險，因此基樁雖在載重試驗上已滿足荷重及沉陷需求，但長程仍難保障其安全，基樁完整性試驗即為了彌補此類弱點而在此基礎上發展。

基樁之完整性試驗係利用非破壞性檢驗法(Non-destructive Test)檢核基樁本身材料之品質為主，近年來基樁完整性試驗有相當長足的進步，特別在動力及電子試驗及設備上。其他如聲波檢測或放射性檢驗亦有其發展，完整性試驗綜合言之應可歸納成以下幾類：

- 1.開挖法(Excavation)
- 2.鑽孔取樣法(Coring and Drilling)
- 3.閉路電視檢測法(Closed Circuit Television Methods)
- 4.音波探測法(Acoustic Methods)
- 5.放射線法(Radiometric Methods)
- 6.震波法(Seismic Methods)
- 7.動態反應法(Dynamic Response Methods )
- 8.應力波法(Stress Wave Test)
- 9.整體壓縮法(Integral Compression Test)
- 10.電測法(Electrical Test)

茲分述如下：

#### 1.開挖法

此為直接將基樁四周開挖以目視方式檢核基樁外表狀況之方法，嚴格言之，其僅可檢視基樁外緣的缺陷，能挖掘檢視的深度常受限，遭遇地下水或群樁密集之狀況下，檢驗費用極為龐大，此法通常僅在極嚴重之基樁破

\* 亞新工程顧問公司副總經理

壞狀況下始爲之。

### 2.鑽孔取樣法

利用岩心鑽孔機在基樁中連續鑽取混凝土心樣品，鑽孔直徑約在300mm以下，較常使用者多爲100至125mm，取得混凝土試體直徑在50mm至100mm間，鑽取混凝土試體可供瞭解基樁本身之品質，樁底土樣狀況，樁底沉泥情形，此類鑽孔較常遭遇的困難在於鑽孔垂直度難掌握，鑽孔過程必需隨時注意廻水，以檢核樁底是否有雜質存在，一般而言，如其中含小塊異物或斷裂均不易查覺。

鑽孔法僅能檢測樁體鑽孔部份之缺陷，對大口徑基樁如直徑超過100公分以上者，宜採2至3以上之鑽孔，此時若配合下井測法(Down Hole Test)或其他之音波探測法，則可取得更多基樁斷面資料以幫助判別，如混凝土心取樣良好，尚可進行試體抗壓試驗以了解其強度，但需注意取樣過程對試體強度之影響。

### 3.閉路電視檢測法

此法係利用特殊之閉路電視系統檢視樁體，爲使攝影機能通過鑽孔，鑽孔直徑需達約110mm，且垂直精度要高，同時鑽孔後需以空氣將孔內水份清除，俟24小時後鑽孔乾燥，再置入攝影機檢視鑽孔狀況，鑽孔亦可以清水填滿，而利用水中攝影機檢視，通常此類攝影機均可檢視360度視野，其影像即可在閉路電視顯像器中顯示，乾燥孔的顯像狀況一般較佳，甚至可檢視樁體內之滲流情形。

### 4.音波探測法

利用音波探測基樁完整性之試驗方法，因所測定之方式不同，基本上可分成兩類：

#### (1)單孔檢測法(Single Hole Test)

於單孔檢測法中，如圖31-1所示，發波器與收波器組合於一探測器上，其直徑55mm，長度2公尺，此探測器置入樁體鑽孔或預埋管中，沿樁體下降，利用發波器發射超音波，經混凝土介質傳遞而由接收器接受訊號，品質良好之混凝土，則波速穩定，如混凝土品質不良，或出現蜂窩時，則波速變低，此時接收器將接收之波速訊號轉換成電能，即電壓的變化，在指示

器上振盪繪出深淺不同的線條以分析樁體之缺陷點。

爲使探測效果較穩定清晰，孔內以填滿均質之穩定液爲佳，而探測器之移動應保持穩定速率，同時由於音波在鋼材中之傳遞速度較快，預埋管以使用塑膠材料爲宜。發波器與接收器之間距可以調整，以增加探測的範圍，但亦影響其判別之明晰程度，根據Knott(1971)說明當發波器與接收器的最小間距採300mm時，其有效解析範圍大致爲50mm，而音波檢測通常採300mm，600mm及1m的間距檢測三次。

#### (2)雙孔探測法(Twin Holes Test)

音波探測之另一方式即採用雙孔法，將發波器置於一孔，而接收器於樁體內之另一孔中，其發波與收波之原理與單孔法相同，雙孔法則得以檢視兩孔間之樁體缺陷，如圖31-2所示，雙孔法可採不同角度之探測而得以檢視缺陷之範圍，使用此法，樁體內需裝設二個以上直徑爲42mm之圓管，圓管材料可採塑膠，金屬管則更佳，此類方法對場鑄基樁有其特殊之效果。

### 5.放射線檢驗法

此法利用核子輻射線的技術，以檢核基樁材料密度的變化，以反映樁體缺陷，在操作上

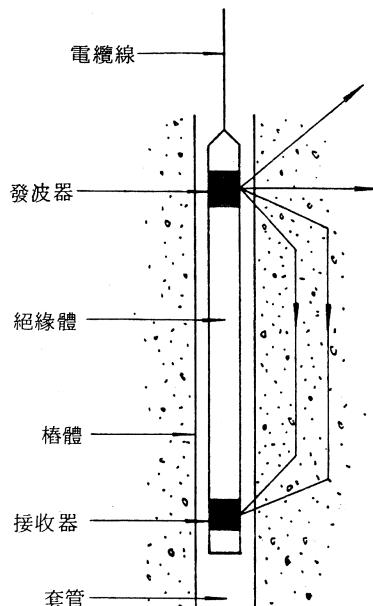


圖31-1 音波探測器

，其基本方式與音波探測法相同，可以單孔或雙孔檢測，目前應用放射線法有伽瑪射線檢驗法(Gamma-Ray)亦稱後掃描法(Backsheet Test)以及中子射線檢驗法(Neutron Test)前者利用直徑48mm，長600mm之探測器如圖31-3所示，置入直徑54mm之預埋鋼管中，利用發射器鉛護管內之輻射物質放射伽瑪射線，掃描樁體，伽瑪粒子部份被樁體吸收，而接收器則計算伽瑪粒子反射量，當樁體中有其他密度低之介質存在時，因吸收量降低，則計數器讀數將增加，此法則以吸收量之多寡判別樁之整體性，此法可測試的範圍大約為預埋管外100mm範圍，因此對大樁而言，則需較多之探測管。至於中子射線法則以雙管為之，中子傳遞數量因介質之含水量而異，較易測試樁體含水孔隙狀況。使用放射線法檢驗需特別注意其安全管制問題，因此用途常受限。

#### 6. 震波法

震波法主要在量測樁體中應力波(Stress Wave)之傳遞速度，試驗時於樁頂裝設一加速度測定器(Accelerometer)，如圖31-4所示，試驗時，以重錘打擊樁頂，此時此加速度測定器即被激盪，而測得打擊之表面瑞雷波(Rayleigh Wave)，同時並繼續接收到傳遞至樁底反射回來之震波，當震波於樁內傳遞遇到頸縮(Necking)現象，或樁體不連續時，則因介質面之變化，即有反射波發生並回升至樁頂，而由加速度測定器接收此反應，震波經由濾波及放大器傳達至示波器(Oscilloscope)上顯現，圖31-5為典型之顯示圖型。

震波法量測表面波速 $V_R$ 及沿樁身傳送之反射波速 $V_L$ 時，需假設二波速之比例常數C，當樁質均勻，則 $V_L = CV_R$ ，C值約為1.90，有時樁頂表面波速未能測得時，則假設波速為每秒4000公尺。自樁頂至樁底或至不連續面之距離( $\ell$ )可按測得之遲滯時間t推求，得 $2\ell = t \times C$ 。利用震波法，對小口徑基樁表面波有時無法產生，有時未能測得樁底反射波，此表示樁頂甚為結實，對場鑄樁而言，震波法應在混凝土澆鑄並養護至少7天後始得進行，對於預鑄樁有搭接情況時，則記錄分析

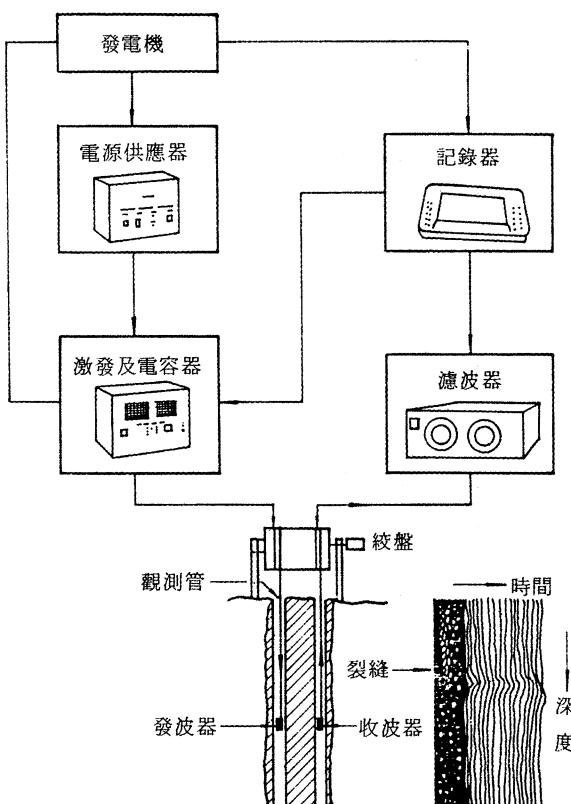


圖31-2 音波檢驗儀器配置圖

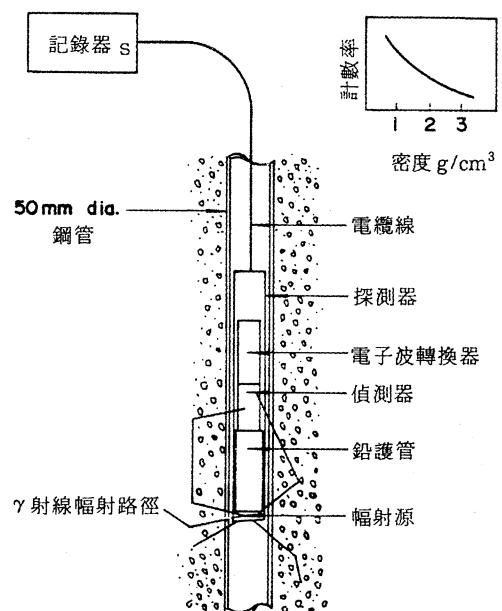


圖31-3 伽瑪射線檢驗法

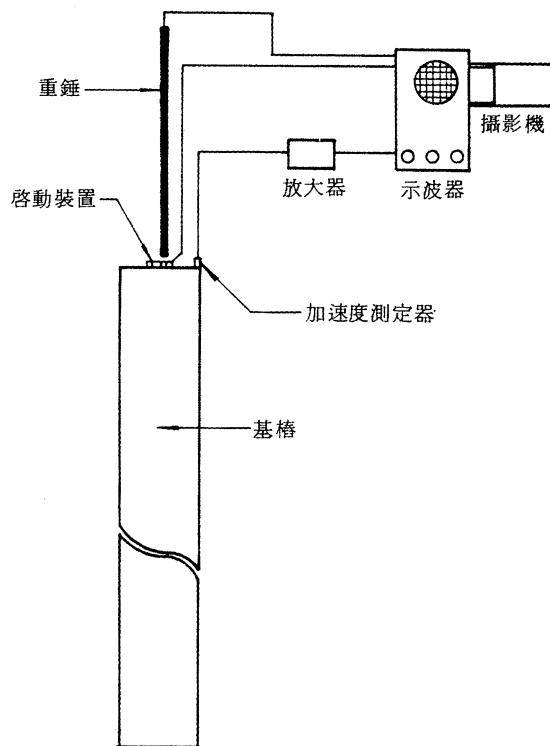


圖31-4 震波法儀器配置

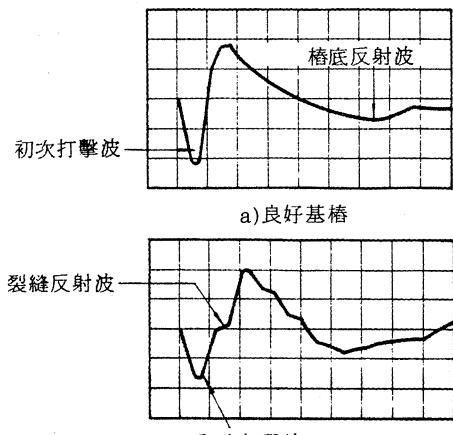


圖31-5 震波法檢驗結果

常生困難。

#### 7. 動態反應法

動態反應法，係作用一持續振動或作用一單一衝擊波於樁上，而後量測樁對某一特定振譜之反應頻率，或量測對某一衝擊而生振盪波在樁身瞬時之反應。動態反應法中量測基樁瞬時反應之早期應用係由 Dvorak (1969)

提出，即所謂衝擊法(Impulse Method)，試驗時樁頂施加軸向或側向之打擊，並記錄樁之反應波，反應波具兩種振動模式，基本模式相對應於樁與土壤間之振動，其頻率低而振幅大，另一共振波頻率甚高，屬樁本身之振動，其頻率與樁長及混凝土品質有關。基樁之動態反應試驗，利用持續穩定之振動方式者，即所謂振動試驗法 (Vibration Method)由 CEBTP 所發展，如圖31-6 所示，於樁頂裝設一振動器產生連續振動，而後利用速度轉換器(Velocity Transducer)量測樁受振動後之反應，根據振動而生之共振波波峯變化記錄，可以演繹樁長及樁身缺陷，此法可在基樁澆鑄四天後即進行試驗。CEBTP 所發展的方法係輸入持續之等振幅正弦波(Constant-Amplitude Sinusoidal Input)其頻率在 20 至 1000HZ 間，亦可再次施予 20 至 5000HZ 之振盪以獲得較廣之振譜，速度傳送器接收的樁頂速度 V，除以施加力量 F<sub>0</sub> 所得之值稱為基樁之機械輸入值(Mechanical Admittance)，如圖 31-7 所示為理想之反應曲線，初期的斜率 m，表示樁與土壤系統間之剛性度，與樁在受力下之行為有關，圖 31-7 中，在高頻率時兩波峯間的距離與樁的有效長度 l 有關，即  $\Delta f = V_c / 2l$ ， $V_c$  為混凝土體中軸向波傳遞速度，如  $V_c$  為已知，則可求得有效樁長，再根據平均振幅 N，以及基樁混凝土材料之密度  $\rho_c$  即可推求基樁之平均斷面  $A_c = 1/\rho_c \times V_c \times N$ 。

此法之應用由於樁之阻尼作用，在土壤類別，樁徑及樁長上略有限制，於堅實黏土層中，可量測之樁長不超過樁徑的 20 倍，有時可以延伸至 30 倍，在鬆軟沖積土覆蓋於堅實地層上之狀況，樁長與樁徑之比可延展至 50:1。對有接樁之場合，此法則不適用，對場鑄鑽掘樁之場合，則受斷面變化之影響，在結果之闡釋上雖較困難，但亦可指出施工時基樁斷面變化之處。

#### 8. 應力波法

應力波法即前者之動態反應法中測瞬時反應之進一步方法，自樁體對衝擊之反應狀況，判別樁之完整性，試驗時樁錘打擊基樁，使生向下之移動產生壓力波，打擊之力量即由

樁頂之應變計量測，同時樁頂位移量則由電子式經緯儀測讀，此法分別由美國的 Case Western Researve 大學及荷蘭 TNO 研究所發展，除檢測基樁本身之品質外，尚根據應力波理論(Stress Wave Theory)分析樁身之摩擦力及端點支承力。

#### 9. 整體壓縮試驗

係將基樁整體施加工作荷重之試驗法，如圖 31-8 於樁體內以套管，鋼索自樁頂部至底部穿繞而後於樁頂錨碇施加應力，根據其壓縮性反映基樁品質，此法對土壤與樁體間之互制作用則無法具體判別。

#### 10 電測法

利用電擊方式量測基樁或樁 / 土間對電流之感應以判別樁體完整性，目前所利用者包含

- a) 自電位法(Self-Potential)
- b) 電阻法(Resistivity Testing)
- c) 地電阻法(Resistance to Earth)
- d) 脈動法(Pulse Method)亦稱極化法(Induced Polarization)

##### (1) 自電位法

基本原理係根據基樁鋼筋本身具有之電位與地層電位間之基本差異性發展而出，此法需敏感度極高之微伏特電位計以量測鋼筋與地層之電位差，方法甚簡單，但結果受鋼筋長度，地下水位等之影響較大。

##### (2) 電阻法

此法在量測基樁鋼筋與另一埋設電極間之電阻，如圖 31-9 所示，以基樁鋼筋為一電極，並另接一包含非極化電極之導體，試驗時於兩極間施加一電位差，而利用一 Meggar Earth Tester 量測電位差，不正常的電位差則表示樁有缺陷。

##### (3) 地電阻法

主要在量測地電阻，試驗時於鋼筋上通電，而在距樁不等間距處量測電流量，裝設如圖 31-10 所示，基本上與電阻法類似，唯一差別是本法中量測之電壓錶係與樁及電極串聯。

##### (4) 脈動法

此法裝設如圖 31-11 所示，電路中包含一信號發生器，以及示波器檢視波形，信號發生器則以脈動方式產生一方形波(Sq-

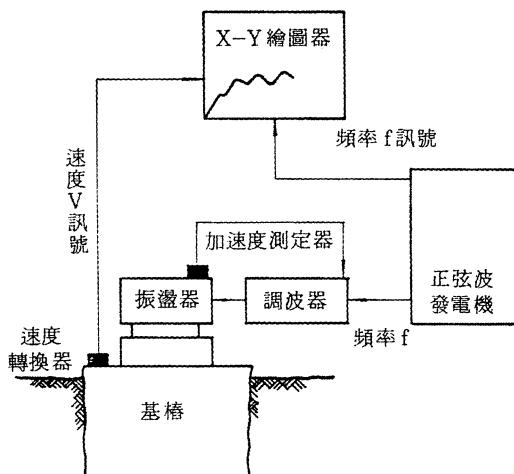


圖 31-6 動態反應檢驗配置圖

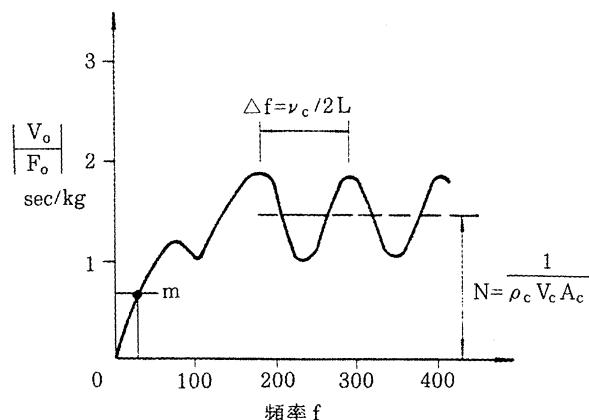


圖 31-7 理想反應曲線

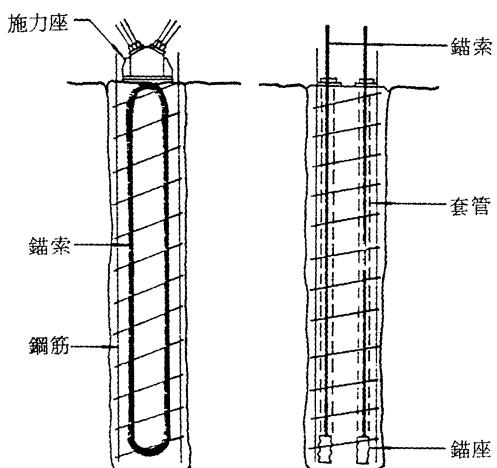


圖 31-8 整體壓縮法示意圖  
a) 錨索施力系統      b) 錨碇式系統

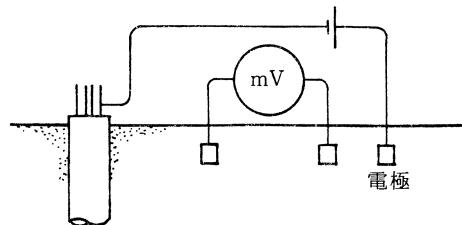


圖3I-9 電阻法裝置

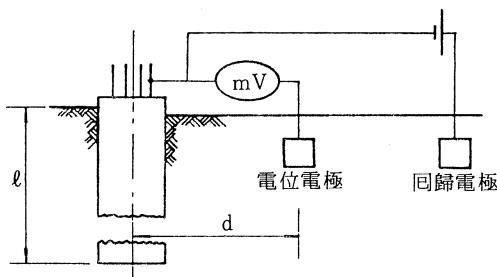


圖3I-10 地電阻法裝置

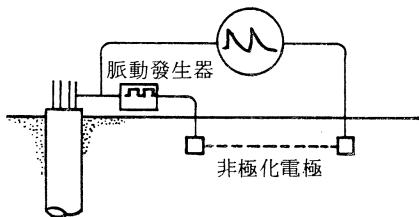


圖3I-11 脈動法配置圖

quare Wave), 而由示波器接收樁與電極間之波形及延時，試驗中可製造不同脈動振幅，以產生一系列之反應曲線，不正常的曲線表示不良基樁。

電測法中大致上以地電阻法接得之效果較

佳，其他方法結果較難明確，電測法對鋼筋暴露的狀況較易測得，但對樁體中若含其他雜物則不易測知。

以上係對現已發展之基樁完整性檢驗法，如前述完整性檢驗法正逐步推廣中，以直接幫助提升基樁品質，讀者如有興趣可參閱以下文獻：

1. Bobrowski, J., Bardhan-Roy, B. K., Magiera, R. H. and Lowe, R. H. (1975), "The Structural Integrity of Large Diameter Bored Piles," Behavior of Piles, Proc. Conference, ICE, London, Sept.
2. Bruckl, E. P. (1984) "Pile Integrity Test" , Interfels Presentation Athen, November.
3. Davis, A. G., and Robertson, S. A. (1975) "Economic Pile Testing" Ground Engineering , May.
4. Preiss, K., Weber, H. and Caiserman, A. (1978) "Integrity Testing of Bored Piles and Diaphragm Walls," The Civil Engineering in South Africa, August.
5. Weltman, A. J. (1977), "Integrity Testing of Piles: A Review," DOE and CIRIA Piling Development Group Report PG4 , September.