



多種地球物理探測法於 基隆河河岸土層剪力波波速調查

林志峯／臺北市政府工務局 局長

曾俊傑／臺北市政府工務局土木工程科 科長

蕭秋安／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

周坤賢／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 副理

胡志昕／新中光物理探測股份有限公司 總經理

王鶴翔／新中光物理探測股份有限公司 顧問

臺北市特殊的盆地地形與軟弱土壤性質，導致地震發生時恐易產生土壤液化現象。又場址放大效應造成近地表鬆軟土層內之地震加速度會較原先放大，除了影響土壤液化評估結果外，亦直接影響地表建物安全，為利於後續都市防災工作推動，建置地表下 30 公尺內之土層剪力波波速 V_{S30} 資料有其必要性。本文針對基隆河河岸某一場址，以懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測法等進行探測，土層剪力波波速隨深度增加而增加，大致由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，此四種探測技術測得之土層剪力波波速分布均相仿，且前三種探測技術結果極為相近，可提供後續臺北市範圍內建築物規劃設計與安全評估參考應用。

關鍵字：剪力波波速、懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法、地球物理探測。

前言

臺灣位處歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交會處，地震發生頻繁；又臺北盆地主要係由淡水河及三大主要支流（大漢溪、新店溪、基隆河）沖積而成，部分地區土壤較為鬆軟，特殊的盆地地形與軟弱土壤性質，使得臺北市在地震發生時恐易產生土壤液化現象，造成結構物傾斜甚或倒塌，相關維生管線、排水系統及道路也因沉陷而變位，影響其正常功能，造成停電、停水等災害^[1]。鑒於 2016 年 2 月 6 日美濃地震在臺南地區造成嚴重液化災情^[2]，行政院於 2016 年核定實施「安家固園」計畫，逐年撥付經費協助各縣市政府進

行老舊建築物耐震評估補強，以及土壤液化潛勢區改善防治等工作，進一步瞭解國人居住環境之土壤液化潛勢情形，預防地震造成重大的人命與財產損失。

臺北盆地受場址放大效應影響，地震波由岩盤進入近地表鬆軟土層時，基盤地震加速度會較原先放大，此現象除了影響土壤液化評估結果外，亦直接影響地表建物安全。為利於後續都市防災工作推動，臺北市政府於「安家固園」計畫支持下，通過地球物理探測方法探查、建置臺北市地表下 30 公尺內之土層剪力波波速 V_{S30} 資料，並探討較合適之地層波速量測方法與施作流程，達到精進臺北市土壤液化潛勢圖資之目標。

地球物理探測廣泛應用於地層調查、斷層定位、礦坑探測、地下水位調查、地下污染分布劃定等地質工作^[3-5]，計有電磁波、磁法、電阻法、震波法等技術，亦可配合孔內檢測進行混搭調查使用，其中地電阻影像法與地面波頻譜法曾應用於土壤液化災後調查之用^[6]，可有效分辨受液化擾動之土層，作為快速災損調查或較大區域液化潛勢評估狀況使用。本文係於基隆河河岸某一場址，採用四種常見土層剪力波波速量測技術進行探查，包括懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等，提供後續臺北市範圍內建築物規劃設計與安全評估參考應用。

探測技術概述

懸盪式波速井測

懸盪式速度井測探測系統包含：一組自發性人工震源，以及二組固定距離（通常距離為 1 公尺）之垂直與水平方向受波器結合成的探測棒、捲揚機及資料擷取器，記錄由震源經孔壁—地層傳遞至近端及遠端受波器之人工震波，讀取近端與遠端受波器的震波波列時間差，可分別計算二受波器距離範圍內地層的壓力波（簡稱 P 波）與剪力波（簡稱 S 波）波速，現場配置及施測示意如圖 1。

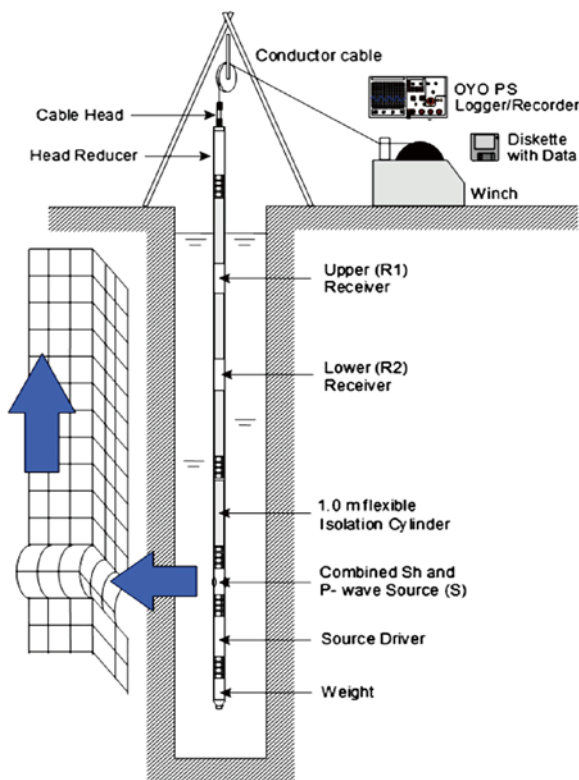


圖 1 懸盪式速度井測圖

懸盪式速度井測之波速計算流程說明如下：(1) 資料輸入—將現地施測資料傳入讀取初達波軟體；(2) 讀取初達波時間—分別由近端及遠端受波器之波形記錄，讀取 P 波與 S 波初達波時間，並顯示於各深度系列記錄上；(3) 初達波讀取時間輸出—參考近端與遠端受波器之初達波讀取時間並比較走時模式後，將初達波讀取時間輸出；(4) 波速計算—由初達波讀取時間，走時—距離關係計算各深度地層波速；(5) 重複步驟 (2)~(3) 完成整個探測深度；(6) 繪製土層波速成果剖面。

下孔式速度井測

下孔式速度井測法係將震源設置在地表上，受波器設置於孔內，記錄在特定深度震波所傳達之時間，由時間與深度關係計算震波速度。為防止鑽孔崩塌掩埋受波器，鑽孔需以內徑 56 至 86 毫米塑膠套管保護受波器，鑽孔井壁與塑膠套管間需以細砂填實。施測時在距離孔口一公尺處（或適當距離）分別設置一厚枕木及金屬塊，枕木以長釘固定於地表，同時在上方以重物壓重，此舉乃為防止震源滑動及為加強震源與地表密合性。再以水平方向側擊枕木塊，產生水平方向震波；水平方向側擊分別正向及反向，獲取 180 度位相位差之震波，以利波形辨認。

使用的受波器係為具三方向之孔內受波器組合，配備緊靠井壁裝置，具防水抗壓功能。第一組為垂直向受波器接收垂直向震波，第二組為水平向受波器接收水平向震波，第三組亦為水平向受波器，仍接收水平向震波但與第二組受波器方向垂直。測點間距之選擇，主要視地層變化程度而定，本案間距設定為 1 公尺。記錄方式一般採用重合記錄，首先判讀垂直向震波及水平向震波之到達時間，進行垂直向震波修正，然後繪製震波走時曲線，由走時曲線計算震波速度，現場配置及施測示意如圖 2。

跨孔式速度井測

土層跨孔式速度井測的測量，係將震源與受波器分別設置於相同深度之之二孔內（震源孔及接收孔），記錄在特定深度時，震波由震源孔至接收孔所傳達之時間，由時間與二孔間水平距離關係可計算震波速度。

實際施作係將三維（3-D）孔內受波器置於接收孔內，下降至孔底使彈簧彈出以貼緊孔壁，受波器以電纜連接至震測儀，三個分量可同時記錄一組垂直震波與兩組水平震波。將震源置於震源孔內，下降至受波

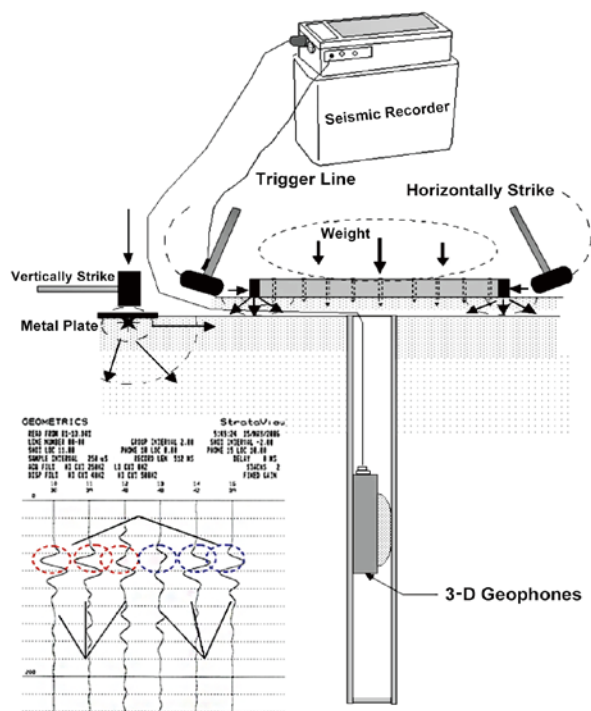


圖 2 下孔式速度井測地施測示意圖

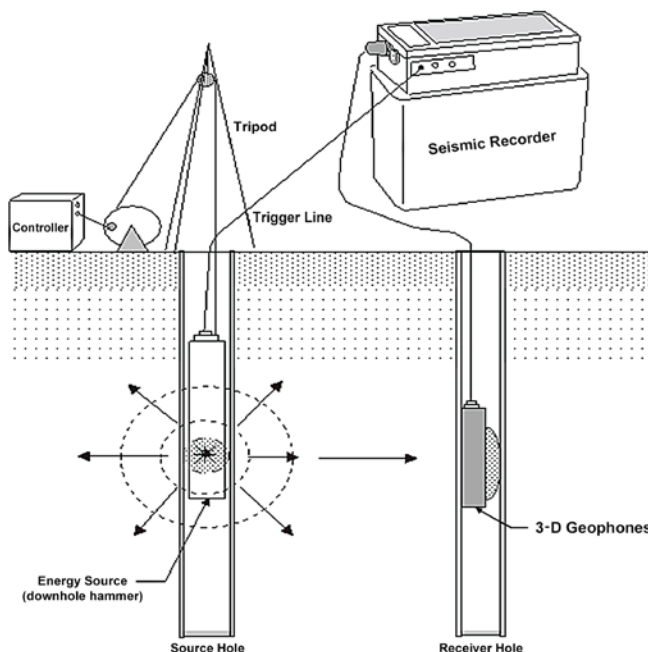


圖 3 跨孔式速度井測地施測示意圖

器相同高度，利用氣壓裝置撐開震源緊靠孔壁裝置，利用孔內重錘裝置分別向上與向下錘擊，產生 180 度相位差的震波分別記錄並存檔。以捲揚器同時將受波器及震源向上提升 1 公尺，進行下一次施測，重複上述步驟直到地表，現場配置及施測示意如圖 3。

多頻道表面波量測震測法

震波測勘所記錄之表面波多以雷利波 (Rayleigh Wave) 為主，而表面波其所內含之各種不同頻率或波長，具有不同波傳相速 (Phase Velocity)，其所代表的涵意為不同地層厚度 (深度) 之地層訊息，即短波長之表面波反應的為近地表淺層特性，而愈長波長反應的為地表至較深層地層之綜合效應 (圖 4)。地層之剪力 (S) 波波速多與表面波相速成正相關，通常表面波波速約為剪力波波速的 0.9 至 0.95 倍，故藉由多頻道之表面波記錄，分析表面波各頻率所對應之相速度變化，可獲得表面波之頻散曲線 (Dispersion Curve)，進而反演獲致地層之剪力波速度模型剖面。

本案採用多頻道表面波量測震測法 (Multi-channel Analysis of Surface Wave method, MASW)，使用震測系統儀器設備主要包括：多個受波器、電纜、觸發器、震波放大器、信號加強器、震波資料處理器、震波記

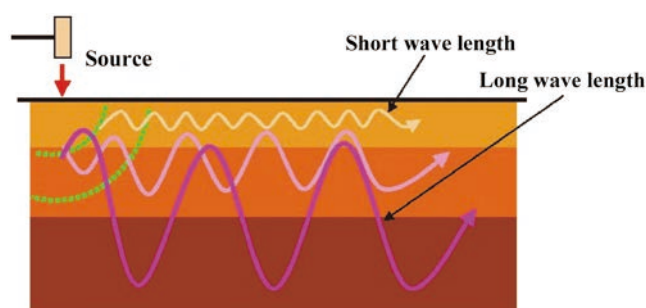


圖 4 表面波探測震波傳播示意圖 (摘自 [7])

錄儀及人工震源 (如重錘或震盪車) 等，將多個受波器設置於同一直線上，反覆敲擊並疊加收取之訊號，可達到消除雜訊，提高表面波品質之目的。

案例分析

本案場址位於基隆河畔的觀山河濱公園，根據現地三個孔位鑽探紀錄，該場址的地層由地表至地表下 3.5 公尺為回填棕灰色粉質黏土夾紅磚、草根與細砂，標準灌入試驗 N 值範圍為 1 ~ 5 不等；3.5 公尺至 30 公尺為灰色粉質黏土偶夾貝屑，標準灌入試驗 N 值範圍為 0 ~ 4 不等，地下水位距地表以下 1.5 至 3.8 公尺不等。土層剪力波之四種地球物理探測分析如下說明。

懸盪式速度井測

圖 5 為懸盪式速度井測探測系統，由一組自發性人工震源，以及二組 1 公尺距離之垂直與水平方向受波器結合成的探測棒組成，震源經孔壁—地層傳遞至近端及遠端受波器，由讀取近端與遠端受波器的震波列時間差，以分別計算二受波器距離範圍內地層的 P 波與 S 波波速，通常 P 波會遠早於 S 波到達。

圖 6 為典型懸盪式速度井測量測波形圖，其中 V1 與 V2 分別代表遠端與近端垂直向受波器訊號，訊號到達起始時間用量測 P 波波速，圖中所在土層 P 波波速為每秒 1515.2 公尺；H + 1 與 H + 2 分別代表正向水平震波下，遠端與近端水平向受波器訊號，H - 1 與 H - 2 分別代表反向水平震波下，遠端與近端水平向受波器訊號，正向與反向水平震波所形成的訊號，其相位差恰恰相反，可用於決定 S 波訊號到達起始時間，圖中所在土層 S 波波速為每秒 141.4 公尺。

於土層每公尺處反覆進行上述土層波速量測，繪製預定深度的土層波速成果剖面。本場址三鑽孔的懸盪式速度井測其土層 S 波速度剖面圖如圖 7 所示，土層 S 波波速隨深度增加而持續遞增，由每秒 135 公尺增至每秒 230 公尺，沒有明顯波速劇變的現象，且三個鑽孔內土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 20 公尺。

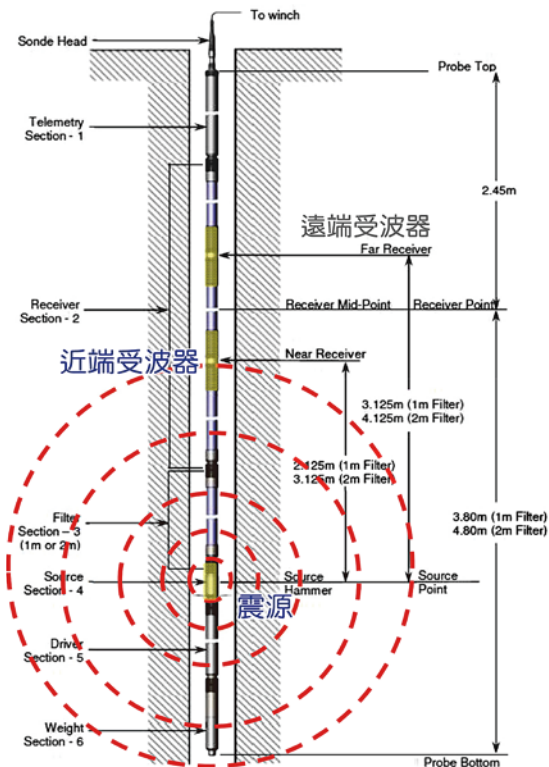


圖 5 懸盪式速度井測探測運作示意圖

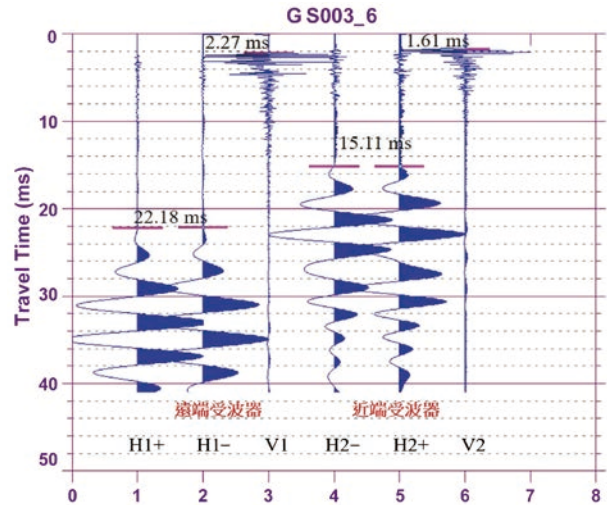


圖 6 典型懸盪式速度井測探測資料圖

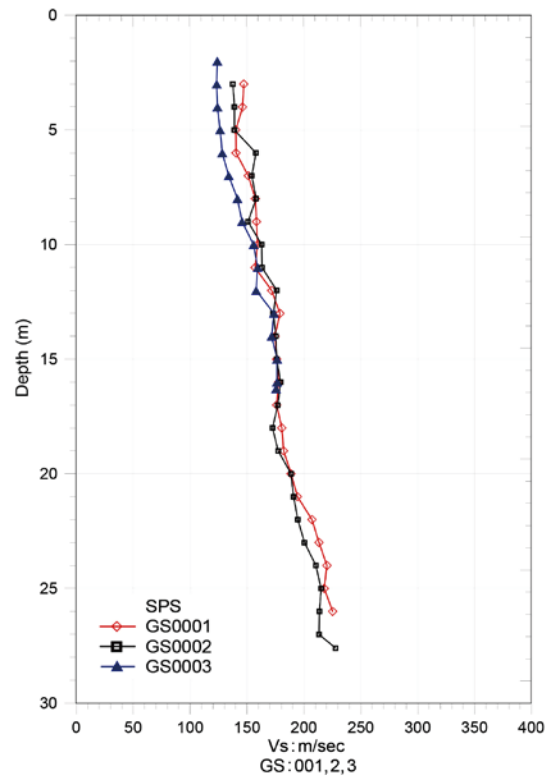


圖 7 懸盪式速度井測之三鑽孔土層 S 波速度剖面圖

下孔式速度井測

下孔式速度井測法的施作原理與懸盪式速度井測相仿，惟震源置於地表，由以鐵鎚重擊地表枕木或金屬塊以製造一人工震源，受波器設置於孔內，記錄在特定的深度震波所傳達之時間，人工震源有垂直方向敲擊，以及水平方向側擊枕木塊，產生水平方向震波，前者主要式量測 P 波波速，後者為量測 S 波波速，其中水平方向側擊分別正向及反向，以獲取 180 度位相位差之震波，以利波形辨認。

圖 8 為典型下孔式速度井測法量測波形圖，為受波器於 7、8、9 公尺深處所量測之訊號資料，所量測深度位置各有 6 道訊號，由左至右訊號依序分別為頻道 Ch1 至 Ch6，頻道 Ch1 ~ Ch3 分別為水平正向敲擊下，兩組水平向受波器訊號與垂直向受波器訊號，頻道 Ch4 為垂直向敲擊下，垂直向受波器訊號，頻道 Ch5 與 Ch6 為水平負向敲擊下，兩組水平向受波器訊號。先判釋出各深度之訊號到達起始時間，與懸盪式速度井測訊號判釋方式相仿，垂直向受波器訊號代表 P 波訊號，水平向受波器訊號代表 S 波訊號，P 波到達時間通常較易決定，S 波到達時間，則利用正向與反向

水平震波所形成的訊號，其相位差恰恰相反，以決定 S 波訊號到達起始時間。

將各深度位置的 P 波與 S 波到達時間，即震波走時點繪出如圖 9 所示，任意相鄰兩點的斜率倒數即為該段土層的 P 波波速與 S 波波速，圖 8 中深度 7 至 9 公尺處的 S 波訊號所對應之波速約為每秒 148 公尺。於土層每公尺處反覆進行上述土層波速量測，繪製預定深度的土層波速成果剖面。本場址三鑽孔的下孔式速度井測法其土層 S 波速度剖面圖如圖 10 所示，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 220 公尺，且三個鑽孔內土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 20 公尺。

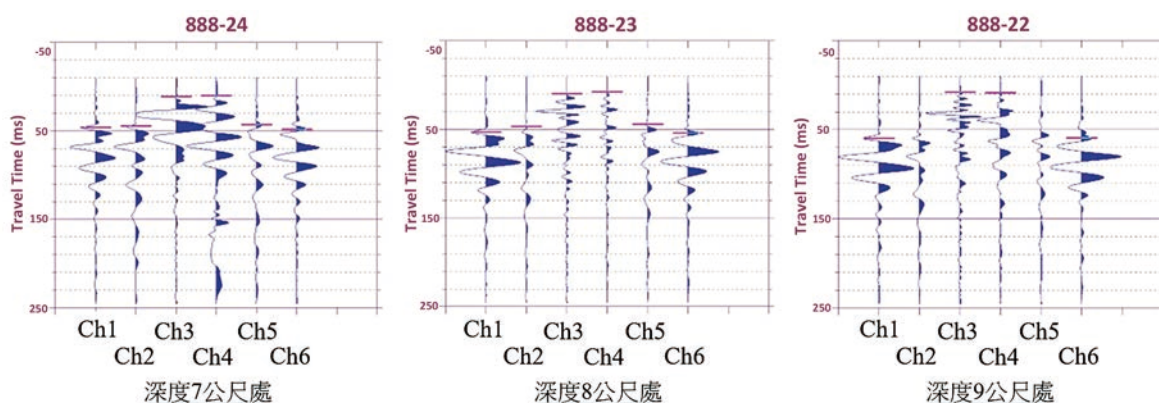


圖 8 典型下孔式速度井測資料圖

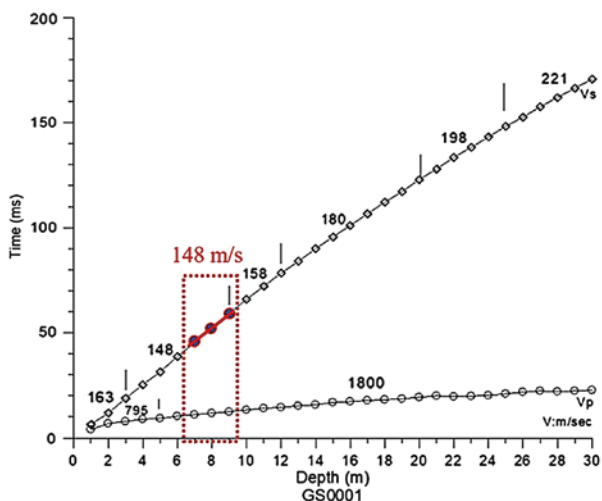


圖 9 下孔式速度井測土層 P 波、S 波對應深度走時曲線及速度成果圖

跨孔式速度井測

跨孔式速度井測法的施作原理與下孔式速度井測相仿，惟震源置於另一鑽孔內，利用孔內重鎚裝置分別向上與向下鎚擊，以製造一人工震源，受波器設置於相同深度之接收孔，記錄在特定的深度時，震波

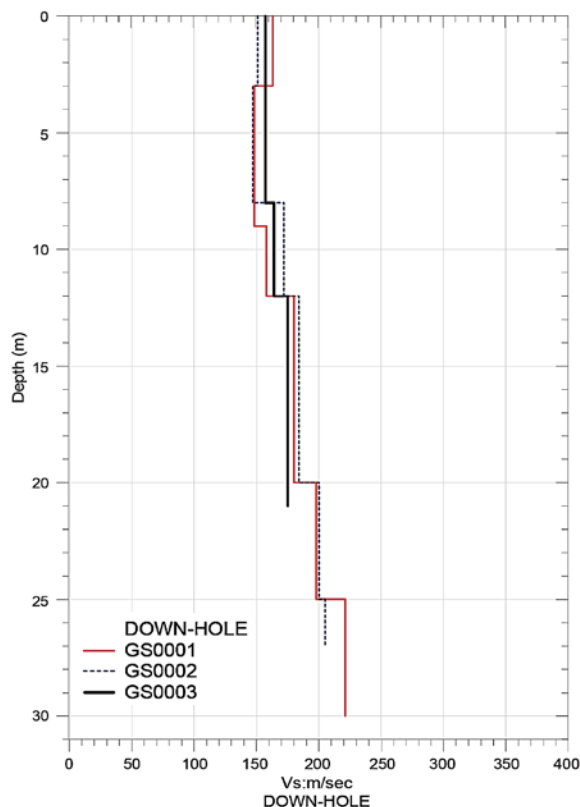


圖 10 下孔式速度井測三鑽孔土層 S 波速度成果圖

由震源孔至接收孔所傳達之時間，利用垂直向受波器紀錄向上與向下錘擊訊號，以獲取 180 度位相位差之震波，以利 S 波波形辨認。

圖 11 為典型跨孔式速度井測法量測波形圖，所量測深度位置有 6 道訊號，由左至右訊號依序分別為頻道 Ch1 至 Ch6，頻道 Ch1 ~ Ch3 分別為向上敲擊時，兩組水平向受波器訊號與垂直向受波器訊號，頻道 Ch4 ~ Ch6 分別為向下敲擊時，垂直向受波器訊號與兩組水平向受波器訊號。跨孔式速度井測法只需判釋出各深度之垂直向受波器訊號到達起始時間，該訊號與橋擊方向平行，代表土層傳遞的 S 波訊號，與懸盪式速度井測訊號判釋方式相仿，則利用向上與向下敲擊震波所形成的訊號，其相位差恰巧相反，以決定 S 波訊號到達起始時間。

每公尺進行跨孔式速度檢測法，紀錄並判釋 S 波到達時間，本場址兩孔之間距離為 5.2 公尺，即可計算每一公尺深度之 S 波波速。本場址兩鑽孔的跨孔式速度井測之土層 S 波速度剖面圖如圖 12 所示，圖中實線為 2 號孔（震源）至 1 號孔（接收）的波速圖，虛線為 1 號孔（震源）至 2 號孔（接收）的波速圖，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 130 公尺增至每秒 215 公尺，且兩者推算的土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 10 公尺。

多頻道表面波量測震測法

多頻道表面波量測震測係將 10 個或 10 個以上之受波器，以直線方式等距鋪設於待測地表上，本案測線跨越 1 號孔與 2 號孔，計安設 23 顆受波器，受波器間距為 3 公尺，1 號孔與 2 號孔約於測線中央位置，以獲致最佳訊號；於兩兩相鄰受波器的中點位置，以重錘製造一人工震源，並記錄每次敲擊的所有受波器訊號。

圖 13 為典型多頻道表面波量測震測土層 S 波速度剖面處理流程，資料處理時，先將震波記錄依施測之震源、接收器位置作整理排序，獲得每個同中點（Common Midpoint, CMP）及該處之不同展距表面波記錄。計算每處同中點表面波記錄之相位，隨距離（即記錄展距）之改變作交叉比對，透過時間、頻率域之空間與速度轉換，疊加獲得頻散曲線圖；每個同中點由震波相速 - 頻率分布圖，可將各頻率之集中穩定相速度揀選出來，即可獲得該同中點之表面波頻散曲線；再據此進行地層波速模型之反演運算，以獲致該同中點最佳一維 S 波速度與深度關係剖面圖；將所有同中點的一維 S 波速度與深度剖面，整合繪製為二維成果剖面圖。

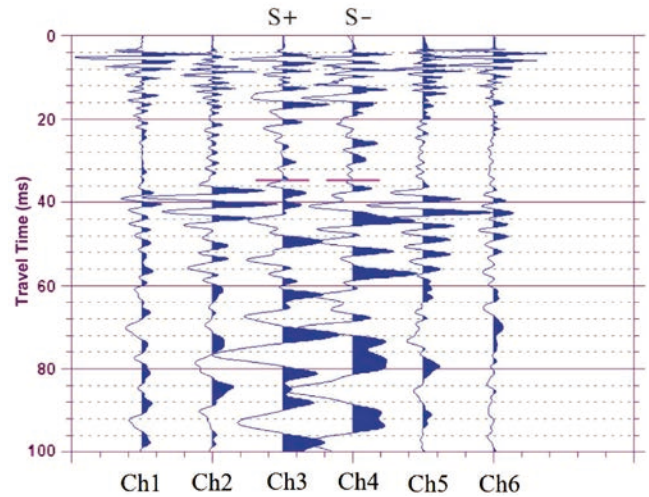


圖 11 典型跨孔式速度井測資料圖

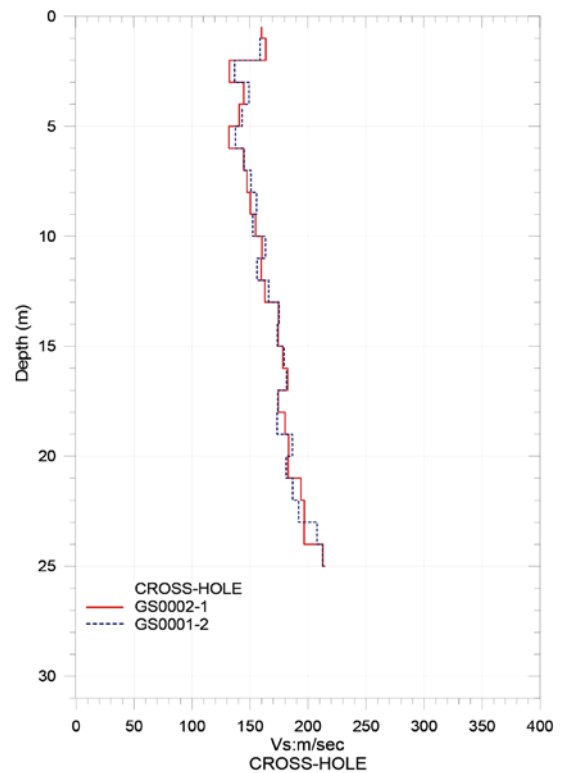


圖 12 跨孔式速度井測雙鑽孔土層 S 波速度成果圖

鄰近 1 號鑽孔附近的同中點處，其頻散曲線圖與一維 S 波速度剖面圖繪於圖 14，表面波頻散曲線上波速由低頻的每秒 190 公尺，隨頻率增加快速降至每秒 150 公尺，並穩定於該值，再經地層波速模型反算的一維 S 波速度剖面圖，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 220 公尺。擷取 1 號鑽孔前後各 30 公尺內的一維 S 波速度剖面圖，整合繪製成二維成果剖面圖如圖 15 所示，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 240 公尺。

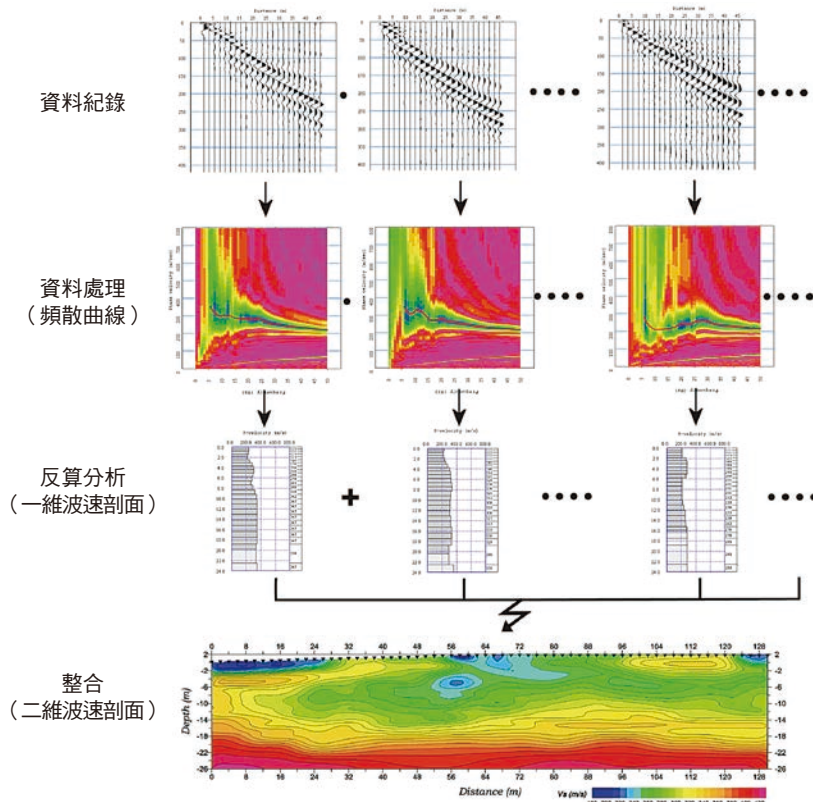


圖 13 多頻道表面波量測震測法土層 S 波速度剖面處理流程

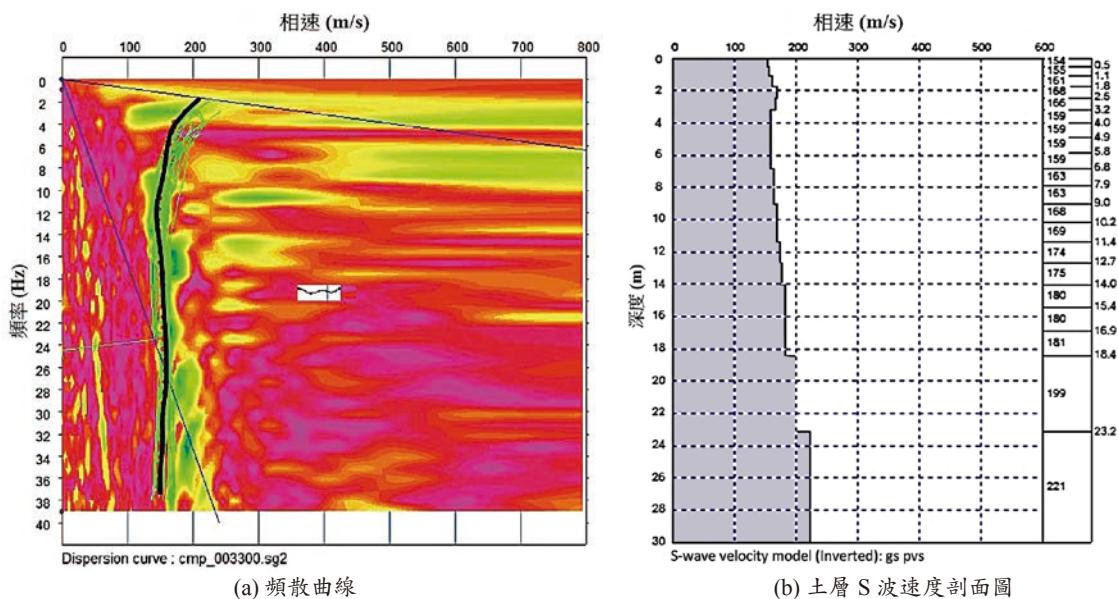


圖 14 多頻道表面波量測震測法

將 1 號孔處所進行之懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等四類地球物理探測，地表下 30 公尺內之土層剪力波波速調查彙整為圖 16，該處土層 S 波波速原則上隨深度增加而持續遞增，由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，且四種檢測方法測得之土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超

過每秒 30 公尺；相形之下，懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測結果又較為接近，可能原因為：懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測均是在土層中直接量測剪力波波速，然而多頻道表面波量測震測則是透過表面波反算推估土層剪力波波速，多次分析反算均會造成波速計算誤差量較高。

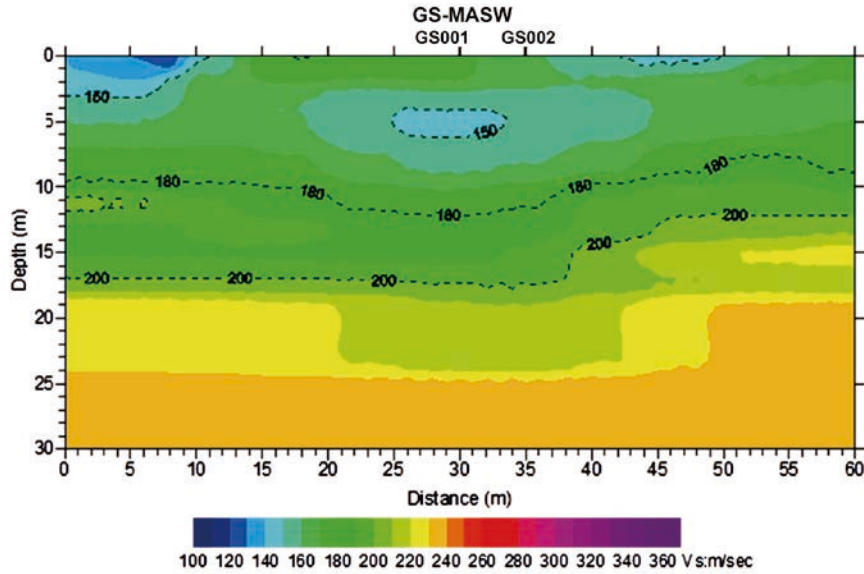


圖 15 多頻道表面波量測震測法之土層二維 S 波速度成果圖

結論

本文係採常用土層剪力波波速量測四種技術，分別為懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等四類地球物理探量測技術，針對基隆河河岸某一場址，其地表下 30 公尺內之土層進行剪力波波速調查，相關現地量測案例顯示：

1. 原則上土層波速隨深度增加而增加，大致由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，且此四種探測技術測得之土層 S 波波速分布狀況均相仿，足見探測技術具相當穩定性與準確性。
2. 懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測結果較為接近，可能原因為此三類探測技術均是在土層中直接量測剪力波波速；而多頻道表面波量測震測則是透過表面波反算推估土層剪力波波速，多次分析反算均會造成波速計算誤差量較高。

參考文獻

1. 陳正興、陳家漢 (2014), 「地震引致的土壤液化與側潰現象」, 科技發展, 第 498 期, 第 12-17 頁。
2. 黃俊鴻、陳正興、蔡祜欽、王國隆、許尚逸、楊炫智、張為光、陳家漢 (2016), 「美濃地震台南地區土壤液化與地工災害之踏勘調查」, 國家地震工程研究中心報告, 報告編號 NCREE-16-004, 臺北, 臺灣。
3. Wightman, W.E., Jalinoos, F., Sirls, P., and Hanna, K. (2003), Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems, Report No. DTFH68-02-P-00083, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, Colorado, U.S.A.
4. Butler, D.W. (editor-in-chief) (2005), Near-Surface Geophysics, Investigations in Geophysics No. 13, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 525-550.

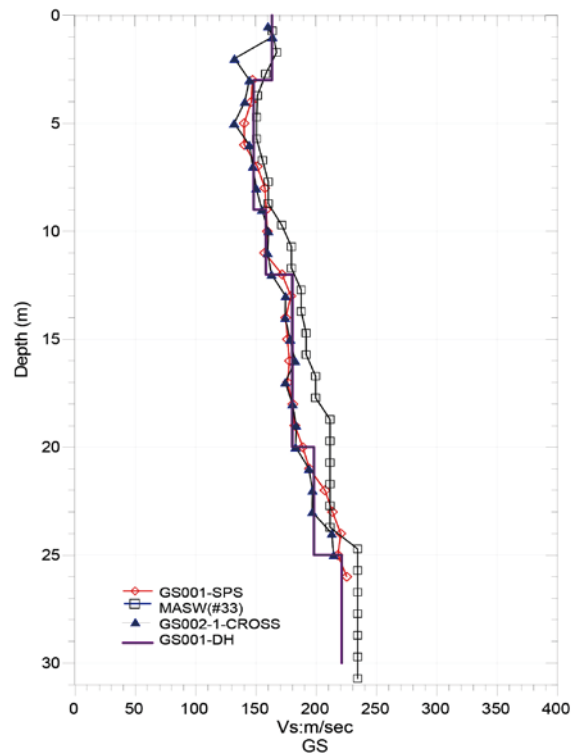


圖 16 觀山河濱公園各項調查之土層剪力波波速成果比較圖

5. Society of Exploration Geophysicists of Japan. (2014), Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), Houten, the Netherlands.
6. 胡志昕、謝盛雄、蔡曜竹、謝文誠、王鶴翔 (2017), 「地球物理探測在土壤液化區之研究」, 工程環境會刊, 第 37 期, 第 60-75 頁。
7. Hayashi, K. (2003), "Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Waves," the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003) Short Course, San Antonio, Texas, U.S.A.

