



波速量測 對 地動評估 之重要性及常見方法之比較

郭俊翔／國立中央大學地球科學系 助理教授

謝宏灝／財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 助理研究員

林哲民／財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員

黃雋彥／財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 副研究員

賴翔威／國立中央大學地球科學系 碩士班研究生

近期研究指出使用地動預估式 (GMM) 搭配量測所得之 V_s30 (地表至深度 30 公尺地層之平均剪力波速)，則可獲得較低的測站殘餘項標準差 (相較於推估所得之 V_s30)，代表地動預估之準確性較高；若要進行地盤反應分析時，建立可靠且深度足夠的剪力波速剖面是相當重要的步驟，由上述兩點可突顯波速量測對地動評估之重要性。本研究使用實際案例說明常見的侵入式和非侵入式波速量測方法，針對國內外近年實際使用的改良式地盤反應分析程序，需要建立較完整的工址波速剖面 (百公尺以上等級) 時，採用被動式震源的微地動陣列法為相當合適的技術。

前言

近地表地層的波速特性對地動特性及其評估有相當重要的影響，而波速量測是瞭解地層波速特性最直接可靠的方法。在常見的地盤反應分析 (seismic site response analysis) 方法 (如 SHAKE) 中，地層的剪力波速剖面、密度和阻尼比為最重要的地層參數。從 1990 年代開始，地表至深度 30 公尺之平均剪力波速值，即所謂的 V_s30 ，也開始被美國國家地震減災計畫 (NEHRP) 及統一建築規範 (UBC) 等建議作為耐震設計規範中的場址參數，特定場址的設計反應譜必須根據工址所在震區設計值，並調查工址的 V_s30 以決定工址的場址分類，乘上其所對應的場址放大係數，才能得到工址的設計反應譜。而國內現行的《建築物耐震設計規範及解說》(內政部^[1]) 也採用類似的原理。

雖然 V_s30 僅是一簡化的場址參數，並不能完全反映場址效應的複雜性，但因其數值和不同週期的震波

放大係數具有正相關性 (圖 1)，因此 V_s30 的使用越來越為普遍。臺灣位於板塊活動極為活躍的區域，強震測站相當密集^[2]，早在 1980 年代就有 SMART1 強震儀陣列，將重要的強震資料提供給全世界使用，是全世界強地動記錄主要提供者之一。集集地震發生後，大量的近斷層強震記錄再次造成相當熱門的需求，強震站的場址條件也因此成為資料分析和使用時重要的參考資訊，經過多年調查與研究，目前臺灣島內約有半數的強震站都能具有實測波速剖面^[3]，而絕大多數的強震測站也都已具有可靠的 V_s30 數值^[4,5]。

當進行特定場址的地動預估或地動模擬時，詳細且可靠的波速剖面仍是必要的資料。本研究將說明波速量測對地動評估之重要性，並比較幾種常見的波速量測方法應用在淡水氣象站和七股氣象站的波速量測結果，另外會說明波速剖面探測能力達數百公尺以上的量測技術之重要性。

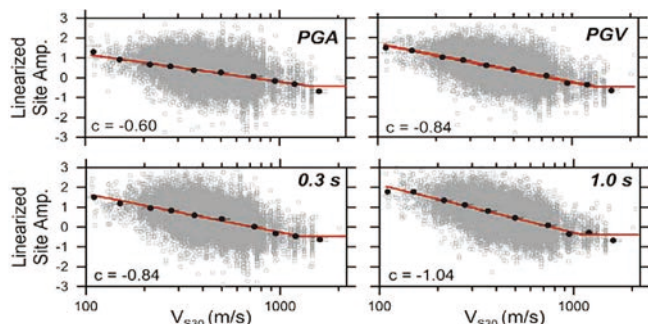


圖 1 不同週期震波的放大倍率 (Y 軸) 都和 V_{s30} (X 軸) 具相關性，放大倍率隨 V_{s30} 減小而升高。(取自 Seyhan and Stewart [6])

波速量測之重要性

由於 V_{s30} 在地動模型 (GMM) 相關研究和耐震規範中的重要角色，近年來有許多推估 V_{s30} 的方法被提出，當中以利用地質年代 (geological age)、地形坡度 (slope)、高程 (elevation)、和地貌類別 (geomorphic categories) 等代理參數 (proxy) 推估 V_{s30} 的方法最被廣泛使用 [4,7]，其所得 V_{s30} 結果雖準確度較低，但因這種方法可分析現有的高密度數值高程模型 (DEM) 資料，進而獲得廣大區域內的高密度 V_{s30} 格點化資料，這類方法獲得 V_{s30} 的能力在空間分布上的優勢遠大於傳統波速井測或其他地球物理方法，使用者若直接採用美國地質調查所 (USGS) 的全球 V_{s30} 地圖 [8]，其波速調查成本甚至為零。然而最新研究 (Chao *et al.* [9]) 採用臺灣資料分析後指出，地動模型若使用波速量測結果所得的 V_{s30} ，其特定測站殘差 (station-specific residual) 之標準差能顯著低於使用間接推估 (inferred) 而得的 V_{s30} (圖 2)，證明透過波速量測所得的 V_{s30} 能較佳地反映地動場址特性。

當然在使用各種 proxy 推估 V_{s30} 時，必須找出各種 proxy 和 V_{s30} 之間的相關性，故某區域仍必須有依靠量測而得的地層波速資訊和 V_{s30} ，才能建立起較好的 proxy 和 V_{s30} 之關係式；再者，當工址屬於特殊地盤或結構物具特殊重要性時，會需要更正確地計算其地盤反應，只有 V_{s30} 數值並無法滿足此類的需求，必須要進行現地波速量測來瞭解工址的剪力波速剖面，並依此進行地盤反應分析。

平均波速與波速剖面

波速量測方法可分為侵入式 (invasive) 與非侵入式 (noninvasive)，侵入式方法需要將感測器或人工震源經由鑽孔置入地層中，再進行地層波速的探測，其優點

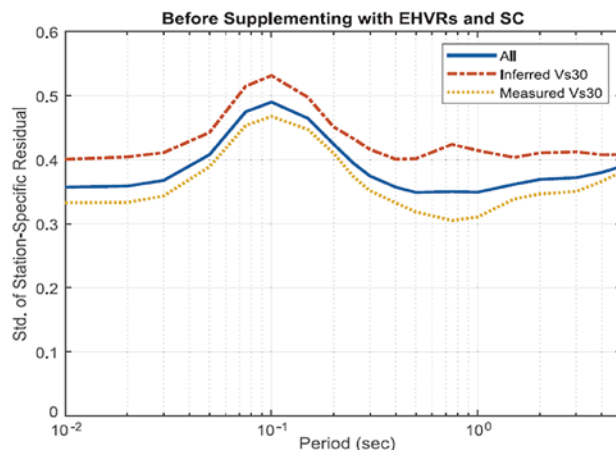


圖 2 不同方法所得 V_{s30} 的特定測站殘差之標準差比較。量測所得之 V_{s30} 的標準差在所有週期都明顯低於推估所得 V_{s30} 。(取自 Chao *et al.* [9])

是直接進入地層中量測，方法簡單，且能藉由鑽孔過程得知地層種類、密度和其他物理性質，缺點為價格較為昂貴、施工時間較長等；非侵入式方法則將儀器置於地表施測，利用受波器的幾何分布與其訊號之間的到時差以獲得波速資訊，其優點為施測和分析所需時間較短、成本較為低廉，缺點為分析方法較為複雜。值得注意的是，侵入式方法在鑽孔過程中所採用的方法和施工品質會影響周圍地層擾動程度，管壁套管的材質與灌漿方式也會影響施測結果。

常見的幾種波速量測方法包括下孔式 (Downhole)、跨孔式 (Crosshole)、懸盪式 (Suspension)、震錐測試法 (SCPT)，以上為侵入式；多頻道表面波頻譜分析法 (MASW) 和微地動陣列法 (MAM) 則為非侵入式，量測方法在此不多做介紹。國研院國家地震工程研究中心過去在淡水氣象站 (TAP055) 和七股氣象站 (CHY115) 分別以上述的方法 (微地動陣列法除外) 進行波速量測，圖 3 為量測所得結果，兩個工址在該試驗中各規劃 3 個鑽孔，鑽孔之間的距離約在 3 ~ 5 公尺，其中一個為裸孔 (深度 20 公尺) 進行懸盪式井測，另外兩個 (深度 35 公尺) 以 PVC 套管保護並在孔壁和井壁間灌漿，分別進行下孔法、跨孔法及懸盪式等井測。在裸孔進行懸盪式井測施測時考慮到井測儀器可能會因坍塌而埋沒的風險，因此設計施測深度小於 20 公尺，結果以紅色虛線表示，此試驗也證實若能適當地使用 PVC 套管和灌漿，則量測的剪力波速 (V_s) 結果相當接近；跨孔法有兩組結果，分別將震源與接收器置於相鄰 5 公尺的兩個鑽孔中並互相調換，下孔法和懸盪法在同一孔深度 35 公尺的鑽孔也完成施測；SCPT 法在淡水氣象站僅 9.8 公尺，因地層中含安山

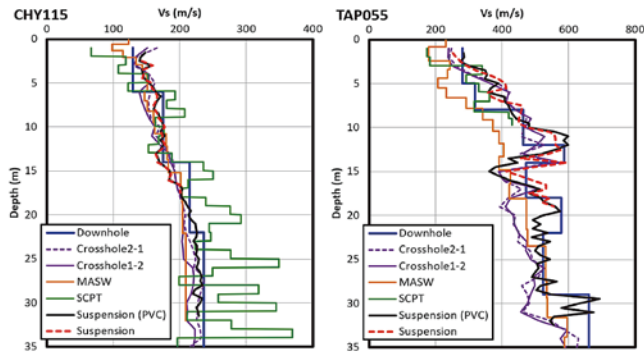


圖 3 各種波速量測方法所得之波速剖面在 (左) 七股氣象站 (CHY115) 和 (右) 淡水氣象站 (TAP055) 之結果

岩塊故中止施測。在七股氣象站的各波速剖面彼此間的一致性較高，但 SCPT 之 Vs 剖面在深度 15 公尺以上出現異常高值，初步審視波形情況正常，波速高值可能為其他因素所造成，尚待進一步研究；在淡水氣象站的波速剖面彼此間的差異較為顯著，為該工址地層中散布風化程度和粒徑大小不一的安山岩塊所造成。

各種方法所得的 Vs30 也有所差異，如表 1 所列，淡水氣象站的 Vs30 明顯地高於七股氣象站，而其誤差分布的中位數 ($\mu_{\ln Vs30}$) 和標準差 ($\sigma_{\ln Vs30}$) 也列於表中。誤差分布的標準差高低常被用來評估某種預測模型的優劣，在此我們以懸盪法之結果為基準來做計算， $\sigma_{\ln Vs30}$ 在七股站和淡水站分別為 0.03 和 0.09，郭俊翔等人 [9] 比較臺灣實測 Vs30 的 $\sigma_{\ln Vs30}$ 為 0.06，由數字上看這次試驗和過去的結果差異不大，而在美國 (NGA-W2) 之分析結果為 0.1。

國內的耐震設計規範中也使用 Vs30 區分地盤種類和場址放大係數，而對工址 Vs30 之取得可採現地量測或是由標準灌入 N 值換算 Vs 值後而獲得。我們若採用目前規範所建議的公式來計算上述兩個測站的 Vs30，則所得結果分別為 214.4 m/s (CHY115) 和 235.6 m/s (TAP055)。雖然七股站的差異尚能接受，但在淡水站兩者的差異顯著，此比較更突顯基於實測方法獲取 Vs30 之重要性。

表 1 各方法所得之 Vs30 及其誤差 (residual) 分布

	七股氣象站 Vs30	淡水氣象站 Vs30
Downhole	183.7	431.7
Crosshole 1-2	184.0	412.6
Crosshole 2-1	177.9	414.2
MASW	172.4	350.3
SCPT	175.6	-
Suspension w/PVC	185.5	444.6
Mean Vs30	179.8	410.7
$\mu_{\ln Vs30}$	0.04	0.07
$\sigma_{\ln Vs30}$	0.03	0.09

更完整的速度構造

利用前述的波速井測方法和主動震源的表面波頻譜分析方法，可獲得詳細的速度剖面及工址的波速剖面變化範圍，各種波速量測方法的震源頻率不同、震波傳遞的路徑也有差異，因此會造成波速剖面不盡相同而有某種變化範圍。我們計算圖 3 中各波速剖面的平均和標準差後，可將其結果表示為圖 4，可清楚看到淡水站的速度剖面存在較大的變異性，和表 1 當中 Vs30 所呈現的結果類似。

某些區域的沖積層很厚，使用波速井測法所費不貲，也不一定能夠達到預期成果。圖 5 代表兩個測站

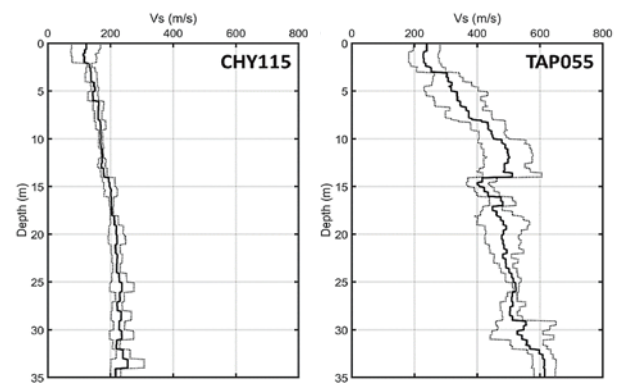


圖 4 七股氣象站 (CHY115) 和淡水氣象站 (TAP055) 之平均 Vs 剖面及其標準差

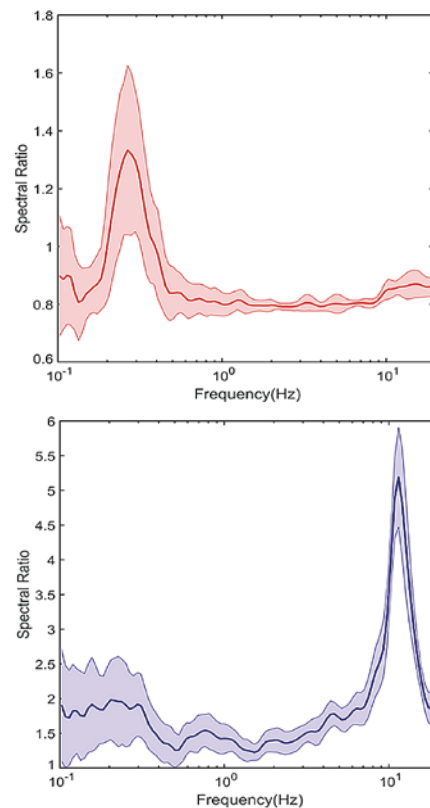


圖 5 微地動單站頻譜比在 (上) 七股氣象站 (CHY115) 和 (下) 淡水氣象站 (TAP055) 之結果，分別顯示其地盤主頻出現於低頻和高頻的頻率。

的微地動單站頻譜比，其主頻（dominant frequency）可代表地盤自然頻率，由分析結果可見淡水站的主頻為 11.4 Hz，因該處沖積層厚度在 10 公尺以內，但七股站的主頻為 0.27 Hz，代表其重要的場址效應會作用在此頻率，若要使用井測瞭解此處的完整的波速剖面則需要準備深度數百公尺以上的鑽孔，成本和難度相對提高許多。使用被動震源的表面波分析法，即微地動陣列法（MAM）可解決此一難題，此技術在日本和歐洲使用相當普遍且行之多年，國內也有許多研究採用此技術以求得數百公尺以上深度的剪力波速構造^[10-14]。

近年來美國 DCPD（Diablo Canyon Power Plant）的地盤反應分析採用一改良程序，而臺灣 SSHAC Level 3 的地盤反應分析也採用同一方法進行^[15]，採用此方法時需要有較深的工址剪力波速剖面，才能與通用地盤剖面有較佳的介接以達到更好的分析效果，此時微地動陣列法則為最合適的速度剖面分析方法。

結論

由於地動模型相關研究的蓬勃進展，使用場址參數 V_s30 表示地動場址效應的情況越來越普遍，各種估算 V_s30 的技術也更加多元化，已有許多不需要依靠實際波速量測也能獲取大量 V_s30 的方法。這種基於 proxy 預估的 V_s30 在原本缺乏鑽探資料的區域是相當有用的資訊，然而若要達成特定場址尺度且可靠度足夠的地動預估，使用 GMM 預估岩盤條件的地動值後仍必須進行地盤反應分析（site response analysis），此時仍須仰賴地層波速實測。

對地質調查資料原本就較多的國家或區域（如日本、臺灣、加州等）而言，基於 proxy 預估的 V_s30 因其涵蓋範圍大但精確度較低的特性，可將其視為輔助性的使用，根據 Chao *et al.*^[9] 的研究，若能有實測資料所得的 V_s30 則利用 GMM 估算出的地動值準確度較高，對於重要場址的地動評估將是較佳的選項，本研究所比較的下孔法、跨孔法、懸盪法及 MASW 都是非常見且可靠的波速調查方法。而目前國內耐震設計規範所建議的 N 值換算 V_s 公式對臺灣許多地點的地質特性而言，無法達到足夠準確的估算（如本研究所列之淡水氣象站）。

傳統地盤反應分析採用的剪力波速模型深度範圍多在數十公尺以內，而近年來國內外開始採用的改良程序（張毓文等人^[15]）會需要深度數百公尺的地層

模型，若要調查百公尺以上尺度的剪力波速剖面，使用鑽孔加上波速井測需有較高經費並花費較多時間，MAM 法具備量測時間短、成本較便宜、不需主動震源對附近環境及居民較為友善等優勢，使用幾何分布設計得宜之 MAM 法可以有效達到改良程序剪力波速模型建立的需求。

參考文獻

1. 內政部（2022），《建築物耐震設計規範及解說》。
2. Shin, T.C., C.H. Chang, H.C. Pu, H.W. Lin, and P.L. Lu (2013). The geophysical database management system in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 24, 11-18.
3. Kuo, C.H., K.L. Wen, H.H. Hsieh, C.M. Lin, T.M. Chang, and K.W. Kuo (2012). Site Classification and V_s30 estimation of free-field TSMIP stations using the logging data of EGD. *Engineering Geology*. 129-130, 68-75.
4. Kwok, O.L.A., Stewart, J.P., Kwak, D.Y., and Sun, P.-L. (2018). Taiwan-specific model for V_s30 prediction considering between-proxy correlations. *Earthquake Spectra* 34, 1973-1993.
5. 郭俊翔、林哲民、章順強、溫國樑、謝宏灝（2017），臺灣強震測站場址資料庫，國家地震工程研究中心，NCEE-17-004，共 80 頁。
6. Seyhan E and Stewart JP (2014). Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra* 30(3): 1241-1256
7. Wald, D.J. and Allen, T. I. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, no. 5, 1379-1395.
8. Heath, D., Wald, D.J., Worden, C.B., Thompson, E.M., and Scmocyk, G. (2020). A Global Hybrid V_s30 Map with a Topographic-Slope-Based Default and Regional Map Insets”, *Earthquake Spectra*, Vol. 36, 3: pp. 1570-1584.
9. Chao, S.C., C.M. Lin, C.H. Kuo, J.Y. Huang, K.L. Wen, and Y.H. Chen (2021). Implementing Horizontal-to-Vertical Fourier Spectral Ratios and Spatial Correlation in a Ground-Motion Prediction Equation to Predict Site Effects. *Earthquake Spectra*, 37(2), 827-856.
10. Lin, C.M., T.M. Chang, Y.C. Huang, H.J. Chiang, C.H. Kuo, and K.L. Wen (2009). Shallow S-wave Velocity Structures in the Western Coastal Plain of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 20(2), 299-308.
11. Kuo, C.H., C.T. Chen, C.M. Lin, K.L. Wen, J.Y. Huang, and S.C. Chang (2016). S-Wave Velocity Structure and Site Effect Parameters Derived by Microtremor arrays in the Western Plain of Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*. 128, 27-41.
12. Yamada, M., I. Cho, C.H. Kuo, C.M. Lin, K. Miyakoshi, Y. Guo, T. Hayashida, Y. Matsumoto, J. Mori, Y.T. Yen, and K.C. Kuo (2020). Shallow subsurface structure in the Hualien basin and the relevance to the damage pattern and fault rupture during the 2018 Hualien earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(6), 2939-2952.
13. Chen, C.T., C.H. Kuo, C.M. Lin, J.Y. Huang, and K.L. Wen (2022). Investigation of shallow S-wave velocity structure and site response parameters inferred from microtremor analysis in Taiwan. *Engineering Geology*, 297, 106498.
14. 顏銀桐、謝寶珊、林哲民、冀樹勇、溫國樑（2017），微地動探查之地盤構造解析及應用，*中興工程*，136 期，45-52 頁。
15. 張毓文、許尚逸、劉勳仁、張哲瑜、郭俊翔、林哲民、張志偉、簡文郁、吳俊霖、蔡明欣、溫國樑、孫一鴻（2019），基於通用地盤修正之地盤反應分析程序，*土工技術*，162 卷，27-36 頁。