

利用多頻道表面波譜法偵測土層波速剖面

蔡佩勳¹ 婁智鈞² 林建翰³

¹朝陽科技大學營建工程系副教授

²朝陽科技大學營建工程系四技部學生

³朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

摘要

本研究是利用多頻道表面波譜法來調查研究地點之土層分布，以傾斜疊加之訊號處理進行頻散曲線之分析，而理論頻散曲線以薄層勁度矩陣法來建立。研究地點位於台中市霧峰區朝陽科技大學之校區，在運動場上安裝一條測線，將12個速度計佈設於測線上，以鐵鎚敲擊震源處，由數據擷取系統擷取各速度計的振動資料，然後將所有速度計在測線上移動一段距離再次進行表面波試驗，直至完成10次的試驗為止。以數值分析軟體MATLAB程式來進行傾斜疊加訊號處理分析，其分析結果分別以10張頻譜圖來表示，每張頻譜圖與該測線中點正下方之土層剪力波速分布有關，因此再利用薄層勁度矩陣法進行反算以得到測線中點之剪力波速分布，結合這10次試驗之反算結果繪製成一張2D剪力波速剖面圖。配合鄰近鑽孔之結果，本研究區域之地層可用兩層土壤來模擬，由頻譜圖觀察出淺層土壤的剪力波速約為190m/s。本研究試驗所得的土層分布結果與鄰近的鑽探結果進行比較，發現兩者差異不大，所以本方法可用於地層波速剖面之調查上。

關鍵字：多頻道表面波譜法、剪力波速、頻散曲線。

Estimation of Shear Wave Velocity Profile Using MASW Method

Pei-hsun Tsai¹, Chih-chun Lou², Jian-han Lin³

¹ Associate Professor, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology

² Undergraduate student, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology

³ Graduate student, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology

ABSTRACT

In the paper the shear wave velocity profile is studied using the MASW test. The experimental dispersion curves were obtained by slant stack process. Theoretical dispersion curve can be constructed by thin layer stiffness matrix method. The study area is situated on Campus of the Chaoyang University of Technology, Taichung, Taiwan. A MASW system consists of a 16-channels seismograph with 12 geophones had been used. The spread and the location of impulsive source were moved together forward along the survey line until 10 measurements were finished. The soil layer information at the center of the survey line is represented by a dispersion curve which can be obtained from a surface wave test. A 2D shear wave velocity profile is obtained by constituting 10 soil layer information on the same line. The results show that the soil layers of the study area can be modeled as a sandy fill overlaid on an underlying half space. Test results also show that the asymptotes at high frequencies of the fundamental mode approach the phase velocities for the fill of 190 m/s. The depths of weathered bedrock estimating from dispersion curves match well with that of borehole data.

Keywords: MASW, Shear wave velocity, Dispersion curve.

1 前言

多頻道表面波譜法(multi-channel analysis of surface wave method, MASW)研究日趨成熟，透過訊號分析可得到土層波速分布，應用於地層調查、鋪面厚

度檢測、液化潛能分析等地工與環境問題上。由於此方法進行試驗時，僅需將受波器(receiver)設置於地表面，不須破壞土層，所以屬於非破壞檢測範疇，可較容易、經濟且快速地得到施測之成果。表面波震測法使用表面波進行量測，利用了表面波能量較大之特

性，因此在施測上較容易被偵測出來。當土層之剪力模數隨著深度而變化時，表面波之影響深度隨著頻率之不同而有所差異，造成表面波速亦隨著頻率(或波長)之不同而變化，此現象稱為頻散(dispersion)現象。表面波之影響範圍約一個波長大小，波長較短(頻率高)的表面波在較淺層範圍傳遞，故其表面波速將反映出淺層的土壤動態特性；相反地，波長較長(頻率低)的表面波則反應深層的土壤動態性質。當各土層的波速皆不相同時，某波長的表面波的波速，可用此一波長深度所涵蓋土層之“平均”波速來代表，稱其為相速度(phase velocity)，表示為相速度一波長的頻散曲線(dispersion curve)。

多頻道表面波譜法的施做是先於試驗場址佈設多個受波器後，以落錘或鐵鎚製造人為振源產生波傳現象，將受波器所接收振動訊號收錄後，對其進行訊號分析以獲得表面波頻譜圖，取頻譜圖之能量較高者之連線繪製出表面波頻散曲線。多頻道表面波譜法同時進行多點的震波量測，可以改進表面波譜法僅使用2個受波器易受雜訊混淆與需經驗判斷相位角反摺合(wrap)之問題。

過去對於多頻道表面波譜法之研究，有 Foti (2000)；Ryden et al., (2004)；Lu and Zhang (2004)；Lin et al., (2004)。本研究傾斜疊加法來調查研究地點之剪力波速垂直分布，另以鄰近之鑽探結果來驗證其正確性。

2 多頻道表面波譜訊號分析

本研究所用訊號分析方法選用 Ryden et al. (2004) 發展的傾斜疊加(slant stack)法，此方法說明如下：

假設 $r_i(t)$ ($i=1,2,\dots,N$) 為 N 個受波器在時間域的震動反應，可利用傅立葉轉換計算其頻率域的訊號為 $R_i(\omega) = \text{FFT}[r_i]$ ($i=1,2,\dots,N$)。其中， $R_i(\omega)$ 可表示為振幅項 $A_i(\omega)$ 與相位項 $P_i(\omega)$ 之乘積：

$$R_i(\omega) = A_i(\omega)P_i(\omega) \quad (1)$$

其中， $A_i(\omega)$ 會隨量測距離之增加而衰減，而 $P_i(\omega)$ 隱含著每一個頻率之相速度資訊。

$$P_i(\omega) = e^{-j\phi_i(\omega)} \quad (2)$$

其中，

$$\phi_i(\omega) = \omega x_i / c = \omega \{x_1 + (i-1)dx\} / c \quad (3)$$

上式中， ω 為角頻率， $j = \sqrt{-1}$ ， x_1 為第一個受波器與震源之距離， c 為相速度， dx 為兩相鄰受波器之距離。

由於振幅不包含任何有關相速度的資訊，為了將相位 $P_i(\omega)$ 由 $R_i(\omega)$ 抽離出來，可將傅立葉轉換後之複數訊號 $R_i(\omega)$ 除以其振幅 $|R_i(\omega)|$ ，以分析頻率函數的相速度。即

$$R_{i,\text{norm}}(\omega) = R_i(\omega) / |R_i(\omega)| = P_i(\omega) \quad (4)$$

將 N 個速度計之訊號疊合成一張頻譜圖，疊合使用的公式如下：

$$A_s(c_T) = e^{-j\delta_{1,T}} R_{1,\text{norm}}(\omega) + e^{-j\delta_{2,T}} R_{2,\text{norm}}(\omega) + \dots + e^{-j\delta_{N,T}} R_{N,\text{norm}}(\omega) \quad (5)$$

其中

$$\delta_{i,T} = \omega \{ [x_1 + (i-1)dx] / c_T \} \quad (6)$$

由於表面波之能量較高，所以提取頻譜圖上每個頻率之能量較高的點位之連線，得到現地頻散曲線，用來分析此測線中點正下方土層剪力波速隨深度之分布。如果已知土層之剪力波速分布情形，可利用薄層勁度矩陣法(thin layer stiffness matrix method)求出其理論頻散曲線，因此，當理論頻散曲線與現地頻散曲線之差異為最小時，代表該假設的土層之剪力波速分布與現地的土層之剪力波速分布吻合，利用此以進行土層剪力波速分布的反算分析。

理論頻散曲線將以薄層勁度矩陣法來計算，再與試驗所得現地頻散曲線做比較，以決定土層剪力波速度剖面之分布。薄層勁度矩陣法首先將地層分割成多個薄層，薄層的意思是指每一分層之厚度小於波長。當組合各單一薄層之勁度矩陣配合上下表面之邊界條件而成一個多層土壤之整體勁度矩陣，此勁度矩陣可表示為波數(wave number)的函數。利用求解特徵值及特徵向量，得到每個頻率相應的特徵值和特徵向量，其分別代表該頻率所對應之表面波的波數和模態形狀，依此計算此一多層土壤之理論頻散曲線。

3 多頻道表面波試驗

本研究進行多頻道表面波試驗之地點是台中市霧峰區朝陽科技大學之校區(圖1)，從鑽探資料與相關試驗結果來看，本地點是由一層從5至10.7m不等厚度的人工填土覆蓋在暗灰色的砂岩層上面。此灰色的填土是粉土質砂，偶夾雜一些礫石塊，在統一土壤分類法中屬於SM。此填土之工程性質如下：單位重 $\gamma_t = 19.5 \text{ kN/m}^3$ ，含水量 $\omega_n = 16\%$ ，摩擦角 $\phi = 25^\circ$ 。

多頻道表面波震測試驗之震源以10kg之重錘敲擊一塊直徑為20 cm之圓形鐵板，以製造出脈衝震源，為了消除近域之效應，第一個受波器與震源之距離等於5m，藉由震源敲擊地表產生表面波而進行震動量測。地表震動訊號之接收以16頻道之地震儀連接12個頻率為4.5Hz之速度計來完成，速度計之間隔為1m，所以整條測線共11m，如圖2所示。地震儀之取樣頻率設定為每秒讀取5000筆震動數據，即每隔0.002秒讀取一筆數據。為完成2D波速剖面之繪製，於完成一次測線量測後，將12個速度計之測線向前移動1m，再次進行表面波試驗，直至完成10次的表面波試驗量測為止。

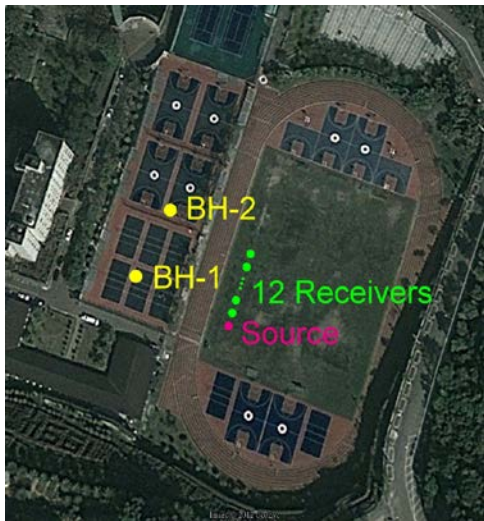


圖1 研究地點鑽孔與表面波試驗測線相對位置

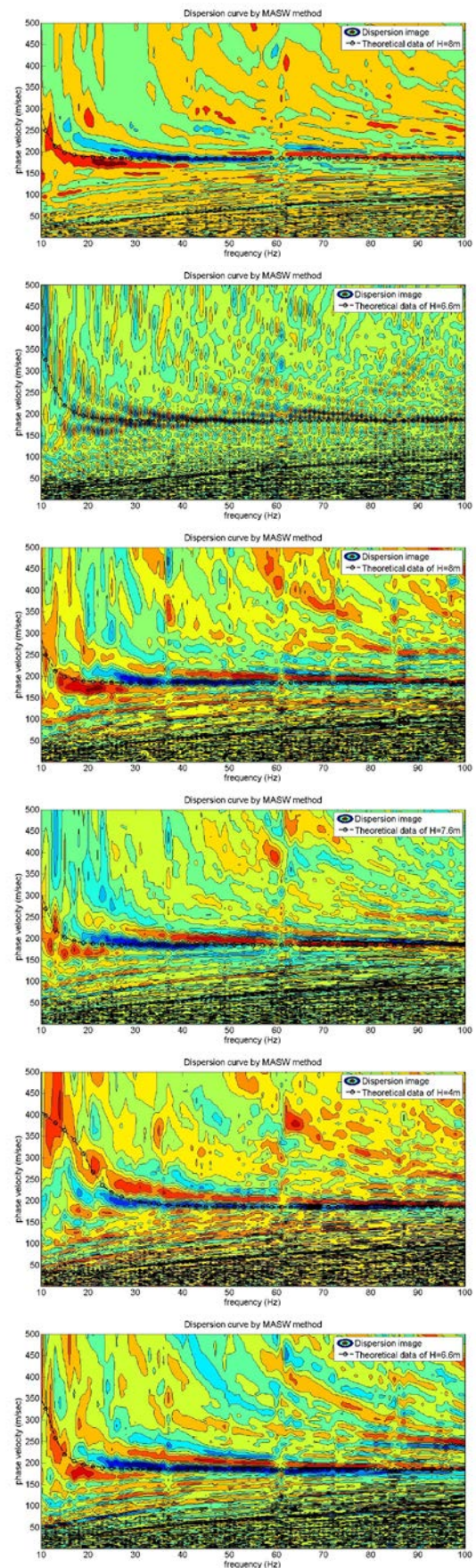


圖2 MASW現場佈線

4 結果與討論

在研究地點共進行10次的多頻道表面波震測試驗，每次試驗的測線於完成後，將測線向前平移1 m，亦即10次測線之中點皆位於同一直線上，且相隔1 m。依上述的傾斜疊加訊號分析方法，共得到10張頻譜圖，如圖3所示。每張頻譜圖分別代表該測線中點正下方之土層波速分布的訊息。圖中紅色代表能量較高，黃色次之，綠色再次之，深藍色之能量最低。圖3可看出，除了基本模態之頻散曲線也存在數個高階模態之頻散曲線，由於上層土壤之剪力波速小於岩層之剪力波速，所以基本模態之頻散曲線還是較為明顯，因此本研究將以基本模態之頻散曲線進行反算分析。圖3也以黑色小圓符號標示理論的基本模態之頻散曲線位置，其係利用薄層勁度矩陣法進行反算得到，在選擇出理論頻散曲線與現地頻散曲線之差異為最小之反算結果後，反算出來之表層填土厚度也標示於各圖之右上角的圖例上。

由圖3可看出，在高頻範圍之頻散曲線的相速度皆接近於190 m/s，此相速度即為表層填土之表面波傳播速度。



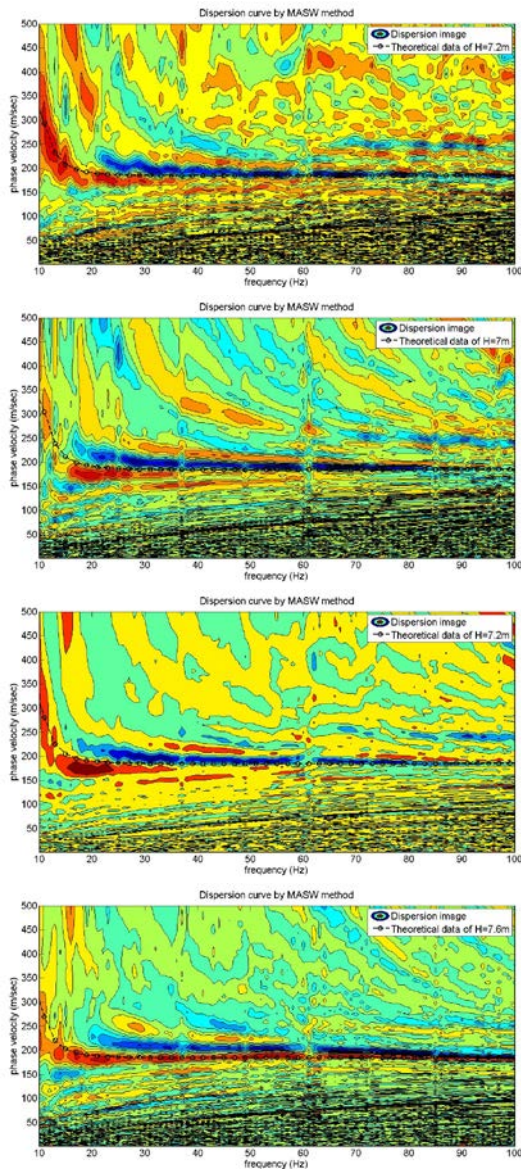


圖3 現地表面波震測試驗之頻譜圖(10條測線)

結合圖3之10張現地頻譜圖的反算結果繪製成一張2D剪力波速剖面圖, 如圖4所示。由於鄰近本次研究地點有兩口鑽孔(BH-1與BH-2), 由BH-1與BH-2之鑽孔資料可看出, 此兩孔之填土厚度分別為5與10.7 m, 若將其描繪於圖4對應的位置, 可以看出本次利用多頻道表面波試驗所得的土層波速分層與該區的鑽探結果大致吻合。

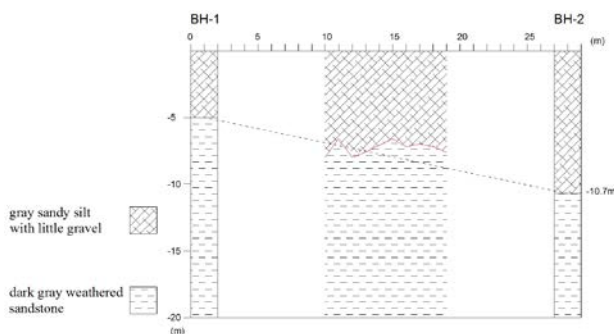


圖4 2D剪力波速剖面與地質鑽探比較

5 結論

本研究利用多頻道表面波譜法來繪製研究地點之頻譜圖以及頻散曲線, 而理論頻散曲線以薄層勁度矩陣法來建立, 經由反算分析得到研究地點之2D剪力波速剖面。由試驗結果顯示, 靠近地表之土壤的剪力波速約為190m/s, 比較多頻道表面波試驗所得的剪力波速剖面與試驗地點附近的鑽探報告, 發現兩者差異不大, 顯示本方法可用於地層波速剖面之調查。

誌謝

本研究承蒙國科會計畫(NSC 99-2221-E-324-018)之經費支持, 使本研究能順利進行, 特此致謝。

參考文獻

- Foti, S.: *Multistation Method for Geotechnical Characterization Using Surface Waves*, (Ph.D., Politecnico di Torino, 2000).
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P. and Miller, R.D. (2004): Multimodal approach to seismic pavement testing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(6), 636-645.
- Lu, L. and Zhang, B. (2004): Analysis of dispersion curves of Rayleigh waves in the frequency-wavenumber domain, *Can. Geotech.*, **41**, 583-598.
- Lin, C.P., Chang, C.C. and Chang, T.S. (2004): The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 689-698.
- Chai, H.Y., Phoon, K.K., Wei, C.F. and Lu, Y.F. (2011): Analysis of effects of active sources on observed phase velocity based on the thin layer method, *Journal of Applied Geophysics*, **73**, 49-58.