

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

表面波頻散曲線之最佳化反算土層剪力波速

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC - 89 - 2211 - E - 002 - 149
執行期間：89年08月01日至90年07月31日

計畫主持人：左天雄

執行單位：國立台灣大學土木工程學系

中 華 民 國 九 十 年 十 月 廿 五 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

表面波頻散曲線之最佳化反算土層剪力波速

Dispersion Curve of Surface Wave with Optimizing Inversion for Shear Wave Velocity of Soil Stratum

計畫編號：NSC - 89 - 2211 - E - 002 - 149

執行期限：89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

主持人：左天雄 國立台灣大學土木工程學系

計畫參與人員：林潔興、唐瑋廷 國立台灣大學土木工程學系

一、中文摘要

本研究施行現地連續表面波試驗 (CSWT) 分析頻散曲線、電子震測錐試驗 (SCPT) 量測土層剪力波速、波傳矩陣法進行理論頻散曲線分析、以簡單體演算法 (SAs) 及基因演算法 (GAs) 進行理論頻散曲線反算最佳化分析、及表面波頻散曲線反算分析結果與 SCPT 量測結果比較以評估其可靠性。

波傳矩陣法之理論頻散曲線分析，使用 Haskell 於 1953 年所提之理論推導波傳矩陣方程式，其假設土層為水平層之彈性半無限空間，應用波傳理論、彈性力學理論、以及邊界條件，建立雷利波於層狀介質中之波傳矩陣，進而可求得頻散函數，再依此函數而得到雷利波理論頻散曲線。

本研究以基因演算法進行理論頻散曲線反算最佳化分析，基因演算法具平行演算結構之高效率搜尋特性，可將搜尋點的自變數編碼成染色體，經複製基因、配對、及突變等步驟，而達到最佳化目標。將基因演算法最佳化方法結合波傳矩陣法，發展一穩定之反算模式，使整個反算過程能達到自動化。

個案研究結果顯示 FBADC2001 程式反算所得層狀土層之剪力波速與 SCPT 分析獲得之剪力波速平均偏差量低，故本研究發展之 FBADC2001 程式為一有效利用頻散曲線反算土層剪力波速之程式。
關鍵字：連續表面波試驗、頻散曲線、剪力波速、基因演算法、最佳化法。

ABSTRACT

There are five main parts included in this study: (1) perform continuous surface wave tests (CSWT) for field dispersion curve, (2) run electronic seismic cone penetration tests (SCPT) to measure shear wave velocity v_s of soil stratum, (3) adopt wave propagation matrix to analyze theoretical dispersion curve, (4) use genetic algorithm method (GAs) to optimizing inversion of dispersion curve, and (5) make comparison between optimized inversion of dispersion curve and SCPT result.

The theoretical dispersion curve may be obtained by wave propagation matrix proposed by Haskell in 1953. The wave propagation matrix may be derived with the conditions of layered elastic half space, wave propagation theory, elasticity theory, and boundary conditions.

The optimizing inversion of dispersion curve can be performed by genetic algorithm method (GAs). GAs can use the parallel implementation with high efficiency to find out the global optimum in all data. The optimal goal may be achieved as follows: search space first coded as chromosome, and then three operators (i.e. gene reproduction, crossover, and mutation) used to search the performance points. The automatic optimization of inversion of dispersion curve for shear wave velocity of soil stratum may be achieved by using both wave propagation matrix and optimization analysis (GAs).

Case study shows that the results of inversion fit very well with those of other tests, such as seismic cone penetration test (SCPT), cross hole test, or resonant column test. It proves that the continuous surface wave test (CSWT) is a feasible in-situ test.

Key Words: continuous surface wave test (CSWT), dispersion curve, shear wave velocity, genetic algorithms (GAs), and optimization.

二、緣由與目的

土層之動態參數之測定方法主要可分為兩大範疇，即室內試驗測定及現地試驗測定。其中室內試驗的方法包括共振柱試驗，動三軸試驗及反覆單剪儀試驗等；然而無法避免的，室內試驗皆有土樣重模之應力狀態改變以及土樣試體之代表性等問題。因此，為克服以上的問題，則採用現地試驗的測定方法較為理想。而現地測定的方法中常用者為震測法。

震測法主要包括鑽孔震測法及無鑽孔震測法兩大類型，其中鑽孔震測法包括有上孔法、下孔法、跨孔法、電子震測錐試驗 (electronic seismic cone penetration test, SCPT) 等，但由於此等方法均需事先鑽孔方能量測，且量測時須變換接收器之位置以測得各土層深度對應之資料，故作業費時且費用高。無鑽孔震測法則包括有折射法、反射法以及表面波探測法。而表面波探測法則包括有穩態震測法 (steady-state vibratory Rayleigh wave method)、表面波譜分析法 (spectral analysis of surface wave, SASW) 以及近年新發展之連續表面波試驗 (continuous surface wave test, CSWT) 等。就折射

法與反射法而言，於多層地層中，探測波多次反射及折射形成的訊號耦合 (coupling) 現象，易導致縱波與剪力波產生辨識上的困難。

表面波譜分析法，雖以簡單的重鎚敲擊作為激發的震源，然不可避免的，某些頻率將無法獲得，需經重複的敲擊來彌補；而此則可由連續表面波法之頻率控制 (5~600Hz) 震源來克服之，且 CSW 法接收到的是單一頻率的訊號，因此，不想要的雜訊 (noise) 很容易就可從資料中濾掉，而可得較精確的結果。CSWT 由六個受波器接收同一地表震源之波形記錄，藉頻譜分析推求雷利波相速度 (phase velocity) 與視波長 (apparent wave length) 之關係曲線，即建立現地雷利波之頻散曲線，再經由頻散曲線反算程序求得各土層之動態參數。

在獲得現地頻散曲線資料之後，可利用簡化法 (simplify method) 或反算程序求得土層剪力波速剖面。簡化法為一經驗式，即將試驗所求得現地頻散點之雷利波波速乘上一常數後得到剪力波速，此常數通常取理論值 1.1，且將雷利波波長乘上一折減因數得到深度，而此一折減參數需視現地土層性質而定，一般而言，在剪力波速隨深度增加的土層取 1/4，而軟弱土層取 1/2，而在未知土層性質的情況下，則取 $1/3^{[1,2,3]}$ ，如此便能得到粗略之土層之剪力波速剖面。

反算程序則是指利用理論分析 (包括波傳矩陣法、有限差分法或有限元素法等)，評估其理論頻散曲線與現地實驗所得之頻散曲線的誤差，若兩者之間的誤差愈小，則表示我們所預估的剪力波速剖面愈接近現地的剪力波速剖面。若利用最佳化方法，則可尋找到最合適的剪力波速剖面。

依據 Haskell (1953) 所提出之波傳矩陣理論推導，建立 Rayleigh 波於多層介質內，求取頻散相速度之控制方程式，並應用 Dunkin (1965) 之 Delta 矩陣運算技巧，克服直接矩陣運算中，對於高頻波於彈性層域介質中，求解雷利波相速度所引致之數值計算障礙，進而建立理論之頻散曲線^(4,5)。

反算方面，王宗文於 1999 年選擇 Simplex 最佳化方法結合 Haskell 之波傳矩陣法，逐步調整試算參數來進行反算。Osama 於 1998 年，進行 SASW 震測試驗，並採用基因演算法進行反算工作，進而求得道路鋪面系統之分層與動態參數，並舉出實例說明基因演算法在反算方面之優越性^(6,7)。本研究以基因演算法進行理論頻散曲線反算最佳化分析，基因演算法具平行演算結構之高效率搜尋特性，可將搜尋點的自變數編碼成染色體，經複製、配對、及突變等步驟，而達到最佳化目標。將基因演算法最佳化方法結合波傳矩陣法，以發展一穩定之反算模式，使整個反算過程能達自動化。

三、結果與討論

為瞭解本文所發展之計算程式 FBADC，反算層域介質內土層動態參數之可行性與精確性，針對五個試驗場址之連續表面波試驗結果進行反算分析，將分析結果進行討論，並且分別與試驗位址處之 SCPT 結果進行分析探討。

本研究之現地試驗場址有 (1) 台大校園、(2)

台北市士林百齡橋、(3) 台北縣五股工業區、(4) 台北市關渡、及(5) 花蓮和平火力發電廠。試驗場址之決定，主要是因為有部份場址有已知之 SCPT 試驗資料，因此希望藉由 CSWT 所得之結果，配合本文所提之反算法，將反算求得之土層剪力波速值與 SCPT 獲得之剪力波速值進行比較。

3.1 台大校園

台大校園游泳池旁共有三次連續表面波試驗資料，分析結果則如圖 1 所示。此表面波試驗在低頻 5Hz 時，其波長可反應至 45~50m 左右，亦即此試驗於此場址可反應出土層深度 45~50m 範圍內之土層性質。經由 FBADC 反算所得之理論頻散曲線與各試驗之現地頻散迴歸曲線間，皆能達一定之吻合程度。而各試驗之剪力波速縱深分佈與 SCPT 試驗結果比較，亦有相當不錯的吻合。

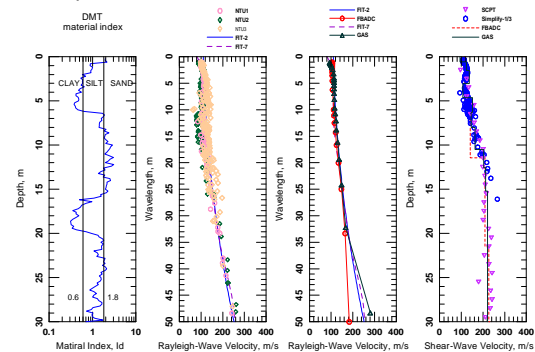


圖 1 台大校園連續表面波試驗及反算結果

簡化法 (z/L 比值為 1/3) 與反算結果及 SCPT 值在淺層有不錯之吻合，此說明簡化法於此場址某深度範圍內，有相當程度之適用性。

3.2 台北市士林百齡橋

士林百齡橋場址共有兩次連續表面波試驗資料，其頻散曲線與反算結果進行綜合分析與比較，如圖 2 所示。經由反算綜合分析之結果，兩試驗之理論頻散曲線與剪力波縱深分佈關係仍相當吻合，再次說明了本文之現地試驗方法與反算分析模式具有高度之再現性。

本例之簡化法 (z/L) 採比值為 1/2 與 SCPT 值較為接近。因此，簡化法中 1/2 於此場址是較適當之比值常數。

3.3 台北縣五股工業區

此場址位於台北縣五股工業區內，依 CPT 及平鉞膨脹儀試驗結果判斷：地層之分佈大致可區分為：0~6m 為卵礫石層；6m~7.65m 為粘土層；7.65m~16.75m 為粉土質砂。

五股工業區之土層狀況比較特殊，表層至地下 6m 內為勁度較大之卵礫石層，以下始為粘土質砂，因此試驗求得之頻散曲線，在短波長處，雷利波速值會隨著波長增加而漸減，而至波長約 15m 後，波速才又隨著波長之增加而變大 (如圖 3(b) 所示)，由此現象可以再次說明，以 CSWT 求得之頻散曲線確實能反應出地下土層之狀況。

本案例波長在 15m 以內之雷利波速明顯隨深度驟降，此點將形成頻散方程式出現複數根，為方便求得解，便將複數根之實部忽略之，僅取虛部求其解 (Nazarian, 1984)⁽³⁾。

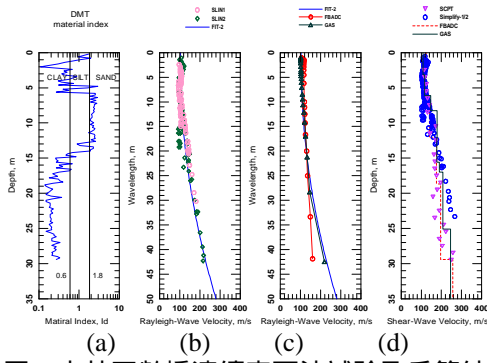


圖 2 士林百齡橋連續表面波試驗及反算結果

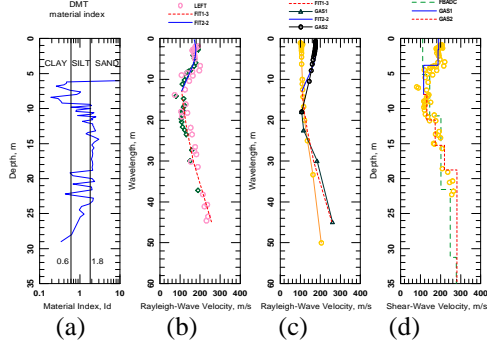


圖 3 五股工業區連續表面波試驗及反算結果

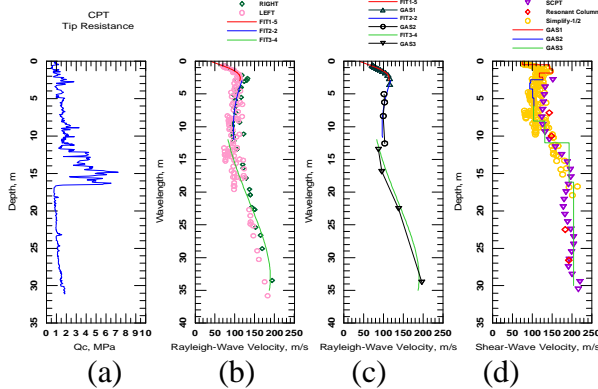


圖 4 台北關渡連續表面波試驗及反算結果

3.4 台北市關渡

台北關渡場址之連續表面波現地試驗資料點與散頻點迴歸曲線示於圖 4(b)。該場址於地表附近有一堅硬土層，由試驗資料亦可清楚辨識。並且由現地頻散曲線可明顯看出有曲折現象，文例採取切割三段分析，其分析進行方式與五股案例相同，圖 4(c)、及 4(d)則為計算程式 FBADC 反算求得之理論頻散曲線與剪力波速縱深分佈。

若將反算結果與簡化法 (1/2)、SCPT 分析、以及共振柱分析結果進行比較，比較後發現，四者之吻合度相當不錯 (如圖 4(d)所示)，顯見本文之反算方法所獲得之結果與現地之 SCPT 試驗以及室內之共振柱試驗有良好之符合度。

3.5 花蓮和平火力發電廠

本研究場址之土層分佈，根據鑽探取樣之結果，整層大多為大體積之卵礫石，其中部份夾雜有粉土砂 (如圖 5 所示)。

花蓮和平電廠共有三次連續表面波試驗資料進行反算，由於三次實驗之位置彼此距離甚遠 (200m~300m)，因此並沒有將三次之結果合併討論。而其中試驗二有下孔法試驗資料可進行比較。

試驗二結果與理論分析頻散曲線間之關係，顯示現地頻散曲線與理論頻散曲線吻合度頗高，反算後之剪力波速值與下孔法比較，除在地表附近偏差較大之外，其餘大致上是吻合。

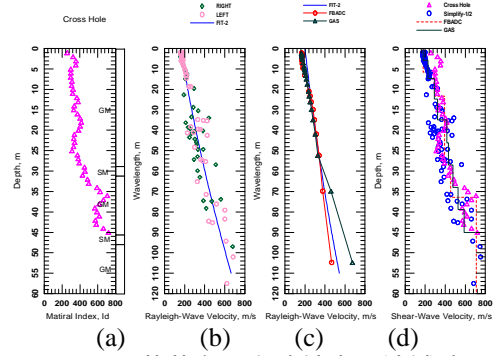


圖 5 花蓮和平之連續表面波試驗

3.6 討論

由於在使用基因演算法進行反算分析時，必須先限制出每個反算參數值之上限值 (upper bound) 與下限值 (lower bound)，因此為方便反算工作之進行與節省時間，利用 Excel 試算表編寫出反算程式所需讀取之資料檔，如此可大為節省參數預測與參數輸入之時間。在程式運算中柏松比與密度均給予合理之定值。

對於現地試驗後之頻散點，本文採用多項式迴歸，至於迴歸的次數需視情況而定，一般而言，盡可能使迴歸曲線貼近頻散點與確實反映頻散趨勢為原則。由於現地試驗之低頻部分約為 5~6 Hz 左右，但波傳矩陣法所獲得解之低頻部分卻有低於 5 Hz 之情形，因此在求解過程中，必須修正並限制頻率不得低於 5 Hz，也就是找尋較高階模態之解，如此方能更為符合實際情況。

五股場址現地試驗資料點 0~14m 部分與台北關渡 3~12m 部分，為一相速度隨深度驟降之情形，因此，原有正向分析模式無法模擬，必須採用反向分析模式方法加以解決，也就是取波傳矩陣之虛數解。在其它案例中亦有出現部分剪力波速隨土層深度降低之情形 (如台大，士林等)，因均屬小部份降低，且剪力波波速降低幅度不大，因此未做如五股案例之方式分析。

四、計畫成果自評

本研究之成果如下：碩士論文壹篇、研討會論文參篇、及發展頻散曲線之自動化反算程式。

五、參考文獻

1. Abbiss, C.P., " Shear Wave Measurement of the Elasticity of the Ground, " Geotechnique 31, No.1, pp.91-104, 1981.
2. Gazetas, G., " Vibration Characteristics of Soil Deposits with Variable Velocity," J. Num. Anal. Meth. Geimech., 6, pp.1-20, 1982.
3. Nazarian, S., " In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement Systems by Spectral Analysis of Surface Wave

- Method," Ph. D. Dissertation, U. of Texas at Austin, 440p, 1984.
4. Dunkin, J.W., " Computation of Modal Solutions in Layered Elastic Media at High Frequencies, " Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 55, No.2, pp.335-358, 1965.
 5. Haskell, N.A., " The Dispersion of Surface Wave on Multilayered Media, " B.S.S.A., Vol. 43, No.1, pp.17-34, 1953
 6. 王宗文 " 以連續表面波(CSW)反算土層動態參數之研究, " 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 民國八十八年六月。
 7. Osama, H., " Evolution-Based Genetic Algorithms for Analysis of Non-Destructive Surface Wave Tests On Pavement, " NDT&E International, Vol. 31, No.4, pp.273-280, 1998.