

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

層狀土層混合模式分析法及其應用

Hybrid Modeling for Layered Soil-Structure Interaction and Its Applications

計畫編號：NSC 88-2611-E-002-040

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：陳正興 國立臺灣大學土木工程學研究所

一、中文摘要

對於一土壤~結構互制作用問題，混合模式法 (Hybrid modeling) 以有限元素法模擬近域土壤及結構之多變性，而以連體力學法模擬遠域土壤之波動特性，為一非常有效之分析方法。本研究擬發展二維混合模式分析電腦程式，利用其探討基礎振動、地震反應及各項震波阻隔措施之效益等問題。全部研究工作分兩年進行，第一年主要為理論推導及程式撰寫，第二年則為各種應用情況之探討，包含基礎阻抗問題之分析以及將其應用於高速鐵路行車所引起之振動問題分析與利用溝槽、地下牆等隔震措施之效益問題分析。

關鍵詞：土壤~結構互制、地盤反應、混合模式、隔離振動

Abstract

To solve the problem of soil-structure interaction in viscoelastic layered media, the method of hybrid modeling has both the advantages of finite element approach and continuum approach. It uses the finite element model to model the complex near-field, and uses the indirect boundary element method to model the wave motions in the infinite far-field soil. This study is aiming to develop a two-dimensional hybrid modeling program to analyze the associated soil-structure interaction problems, such as the problems of foundation impedance, seismic response, and the effects of vibration isolation by using excavated trenches or buried walls. It is planned to complete all

works in two years. The first year will concentrate on theoretical derivations and the associated programming. The second year will concentrate on its applications, including the studies of foundation impedance problem. Furthermore, it can be used to investigate the ground vibrations induced by High Speed Trains and to evaluate the effects of counter measures of vibration isolation by using excavated trenches and buried walls.

Keywords: soil-structure interaction, ground response, hybrid model

二、緣由與目的

擬興建之台灣高速鐵路 (High Speed Rail, 以下簡稱 HSR) 將穿過「台南科學工業園區」(簡稱為 TSIP) 基地前後達三公里長，而 TSIP 新市基地將設有「微電子精密機械」、「半導體」高科技產業，對於背景振動有相當嚴格之限制。未來由於 HSR 高速行車所引致之振動及對 TSIP 之影響遂成為各方關切之焦點，欲深入探討此問題除需進行現地量測試驗外，亦必須有一功能完整之程式進行土壤~結構互制作用分析，以評估振動影響範圍及研擬改善措施等，是為本研究發展分析程式之動機。

近年來，用於土壤~結構互制作用分析之方法，可概分為兩類，一類為連體法，如 CLASSI 法⁽¹⁾，另一類則為有限元素法，前者具有精確模擬震波在遠域土壤輻射阻尼

現象之優點，但只有簡單之基礎形式才具有理論解可資應用，後者之有限元素可模擬各種不同形式或不同性質之基礎及土壤，為其最大優點，但須有非常大之分析域來消除邊界效應為其缺點；因此，近年來，許多分析模式均應用邊界元素法來縮小分析域，以改進其缺點，諸如FLUSH⁽²⁾，SASSI⁽³⁾，HASSI⁽⁴⁾及LAYSSI^(5,6)等法，使其在工程應用上更具實用價值。

李洋傑等所發展之LAYSSI法具有模擬層狀土壤覆於半無限空間之能力，為一相當有效之分析法，值得推廣應用，惟若要考慮HSR行車振動對TSIP基地振動之影響，則必需考量移動型荷載下傳基礎後，對遠域地表振動之影響。基此，本研究擬發展一二維分析模式，以平面應變來簡化分析模型，但同時考量第三方向有移動型荷載，以評估HSR行車振動對TSIP基地振動之影響，此分析方法不僅比較迅速有效，而且可同時研究構築地下壁或是挖掘溝槽以隔離振動之功效。

三、研究進度報告

為模擬移動載重所造成基礎土壤及遠域土壤之振動，本研究之分析模型繪如圖 1 所示：令行車方向為 x ，假設移動載重 $p(x,t)$ 之行進速度為定值 c ，則 $p(x,t)$ 可用下式表示：

$$p(x,t) = p(x-ct)$$

經對時間 t 作富利葉轉換，可得

$$\bar{p}(x,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x,t) e^{i\omega t} dt$$

再對座標 x 作富利葉轉換，可得

$$\bar{p}(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(x,\omega) e^{ik_x x} dx$$

其中 ω 為振動頻率， k_x 為 x 方向之波數。經轉換後，移動載重已表為頻率與波數之函數，因此整個問題可變為在頻率與波數域內分析，分析座標平面為 yz 平面，但須考慮行車方向之位移，故稱為 2.5D 分析。

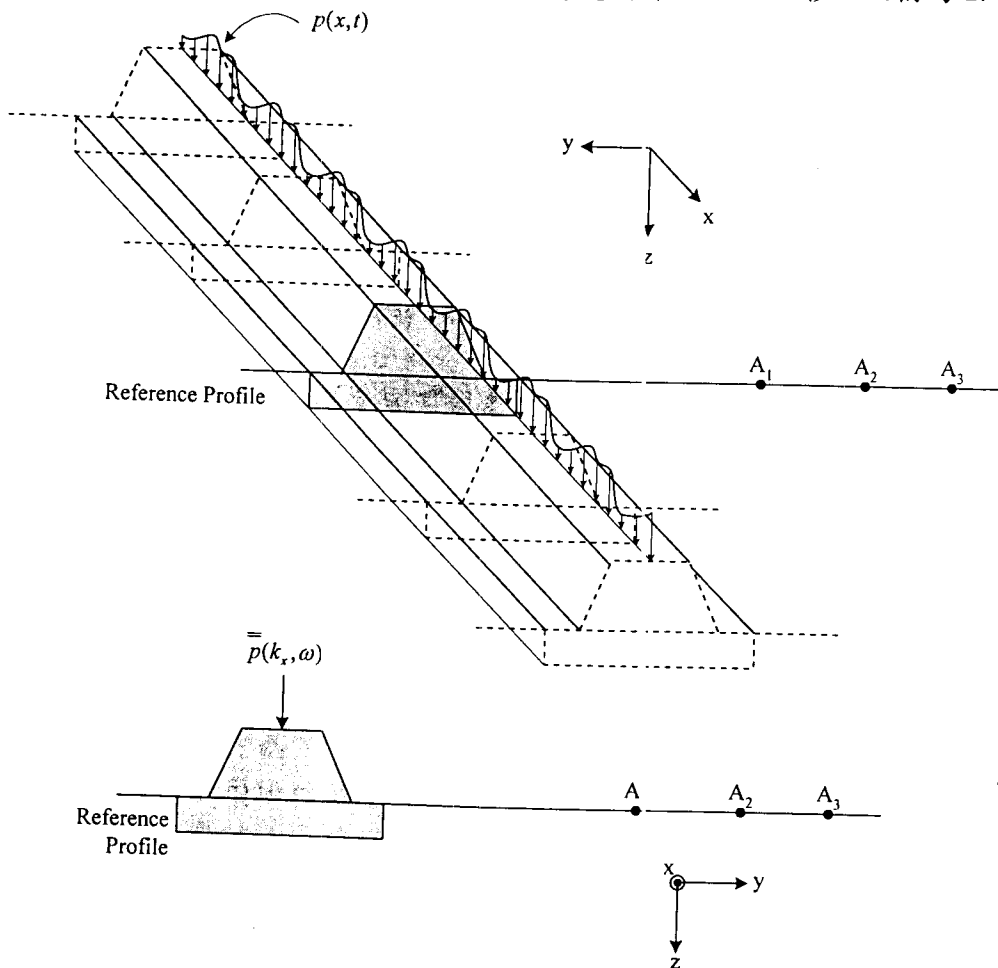


圖 1 移動型荷載引致地盤振動之分析模型

本研究為兩年期之研究計畫，第一年之主要工作包括下列各項：

1. 混合模式分析架構之建立：

本研究採用混合模式法 [3, 4]，混合模式法基本上是一種在頻率域中進行的次結構模擬 (Substructure modelling) 技巧，它將整個土壤-結構系統 (如圖 2 所示) 分為近域及遠域兩個部分 (即兩個次結構)。近域包含結構物 S 及結構物基礎附近土壤區域 I 及 N，遠域則由半無限延伸的土壤區域 F 所組成。近域用有限元素模擬，因此可以非常有效地處理幾何形狀及材料性質的複雜變化。近域中 S 區為結構體，I 區為基礎附近性質變化複雜的土壤區域，N 區為 I 區外性質變化規則的土壤區域。

遠域作為一個次結構，則當作一個自由度皆分布於近-遠域界面的超元素處理。結構物受動態外力作用時，應力波從結構體傳遞至土壤區域，透過近-遠域界面往外幅射的效應，可以用遠域阻抗矩陣來模擬。

在頻率域的分析中，對每一振盪頻率，將遠域阻抗矩陣與近域有限元素的動態勁度矩陣組合為整個土壤-結構系統的動態勁度矩陣，而動態外力亦組合為一外力向量，形成一個頻率域運動方程式，使用標準的 Gauss 消去法即可解得整個系統的頻率域動態反應。時間域的反應則再經 FFT 逆轉換求得。

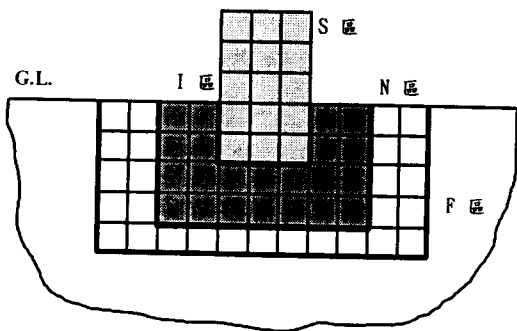


圖 2 混合模式法分析架構示意圖

2. 撰寫間接邊界元素法之程式模組：計算遠域阻抗矩陣；

如圖 3 所示為近域挖除後的遠域 F，圖中水平虛線表土層間的界面，以圓圈點連接成的曲線則表示近-遠域界面，圓圈點中心所在位置即為界面上的節點。假設在標示 n 的節點附近施加如圖中 $u(x) = N^n(x)$ 所示曲線的位移場 ($N^n(x)$ 表對應第 n 個自由度的形狀函數)，則對應此位移場在界面上所應施加的曳引力 $t(x) = F^n(x)$ 可以用加權剩餘法推導得近似的計算式。

對於界面上任一給定的位移場 $N(x)$ 及其近似式 \tilde{N} 可以用 n 個近似函數的線性組合表示為

$$N^n(x) \doteq \tilde{N}^n(x) = \sum_{k=1}^{n_p} a_k^n U^k(x) \quad (1)$$

其中 $U^k(x)$ 為圖 3 所示波源面上單位波源所造成近-遠域界面上之位移基本解。

再利用加權剩餘法：

$$\int_{\sigma} W^l(x) \left[N^n(x) - \sum_{k=1}^{n_p} a_k^n U^k(x) \right] dA = 0 \quad (2)$$

根據 Galerkin 法原則，取 $W^l(x)$ 為近-遠域邊界上之曳引力函數 (對應於上述近-遠域界面上之位移基本解)，則可計算得遠域阻抗矩陣，此阻抗矩陣之自由度包含近-遠域界面上所有節點之自由度，可當一起元素使用。

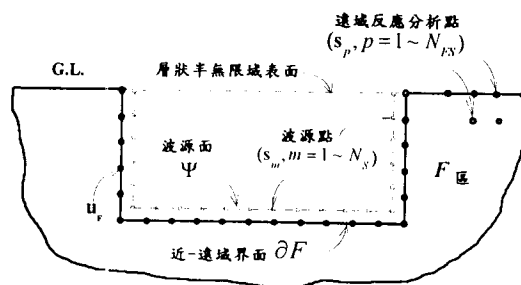


圖 3 混合模式法遠域模型示意圖

3. 撰寫近域有限元素法之程式模組：

混合模式法的分析中，近域包含結構物 S 及結構物基礎附近土壤區域 I 及 N。S 區為結構體，以梁元素、彈簧元素及 2.5D 平面應變元素等模擬。梁元素及彈簧元素使用六個自由度的節點，包括三個平移自由度及三個轉角自由度，2.5D 平面應變元素的節點除包括二個 in-plane 平移自由度外，還包括一個 anti-plane 平移自由度以模擬移動型荷載所引致之振動，不同於一般之平面應變元素。I 區及 N 區為土壤區域，皆以 2.5D 平面應變元素模擬。N 區為 I 區外性質變化規則的土壤區域，I 區為基礎附近性質變化複雜的土壤區域。

2.5D 平面應變元素不同於一般之平面應變元素，無現成之程式可應用，須重新推導並改寫程式。本程式現已改寫完成，並經測試無誤，待遠域阻抗矩陣之程式完成後，即可將兩者結合，以從事土壤~結構互制作用分析。惟此分析須在頻率與波數域內分析，分析所得結果須在作兩次富利葉轉換回 x 座標與 t 時間域內，方可得歷時反應。

四、結論

為模擬移動型荷載所引致之振動，本研究採用混合模式法，所發展之 LAYSSI2D 程式具有完整之理論架構，將整箇土壤~結構系統分為近域及遠域兩箇子結構，近域所包含之結構物、基礎及鄰近土壤可利用各種不同之有限元素作充分之模擬，而遠域土壤則利用動彈性力學之基本解建立其阻抗矩陣，可充分模擬層狀土層半無限域之輻射阻尼效應，為一理論周詳且功能完整之分析程式。

由於整個推導係根據移動型荷載之情況進行，將 3D 之情況轉變為 2.5D，程式撰寫須時甚多，目前仍在測試中，待完成後即可從事 2.5D 之土壤~結構互制作用分析，並用於評估高鐵高速行車所引致之地盤振動及對台南科學工業園區之影響。

五、參考文獻

- [1] H.L.Wong and J. E. Luco, [1980], "Soil-Structure Interaction: A Linear Continuum Mechanics Approach (CLASSI)," CE79-03, University of Southern California, Los Angeles, USA.
- [2] Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. F., and Seed, H. B., [1975] "FLUSH --- A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," EERC-75/30, University of California, Berkeley, California, U.S.A.
- [3] Lysmer, J. et al, [1981], "SASSI --- A System for Analysis of Soil-Structure Interaction," UCB/GT/81-02, University of California, Berkeley, U.S.A.
- [4] Gupta. S., T.W.Lin, J, Penzien, and C.S.Yeh, [1980], "Hybrid Modeling of Soil-Structure Interaction," EERC-80-9, Univ. of California, Berkeley, U.S.A.
- [5] 李洋傑, [1992], 「層狀土壤與結構物之互制作用分析」, 博士論文, 國立台灣大學土木工程研究所。
- [6] 李洋傑, [1997], 「鋼結構實體模型之土壤與結構物互制作用分析研究」, 國科會專題研究成果報告。