

地表開挖寬度對震波散射問題之數值研究

蔡佩勳¹ 洪英州² 黃毓棋³

摘要

本文利用二維頻率域邊界元素法，分析震波入射到基礎開挖面之散射反應。針對震波散射影響因素，如開挖寬度、入射波型式、頻率與入射角等加以探討，並以能量比參數來評估開挖面對震波散射之影響。由本文之計算結果顯示，不管 P 或 S 波垂直入射，或 R 波水平入射於三種不同開挖型式，其垂直壁與開挖底面之水平或垂直位移比皆近乎相等。若地表基礎面與 P 或 S 波震源同一側，因震波散射之緣故，基地面上有較大振動能量。但如果地表基礎面與震源異側，因開挖面之屏蔽作用，使開挖面後方之地表基礎承擔能量較小，致整體能量有下降之趨勢。

關鍵字：邊界元素法，散射，地表開挖。

Numerical Analysis of Wave Scattering Effect Due to Width of Underground Excavations

Pei-Hsun Tsai Yin-Chou Hung Yu-Chi Huang

ABSTRACT

The 2-D frequency domain boundary element method is proposed to study the scattering problem of incident P, S or R waves to underground excavations in this paper. The influence of parameters, such as the width of excavation, frequency, and the angle of incident waves, are discussed. The numerical results with energy factor are compared in this paper, and the displacement amplitudes of excavated surface are computed as well. With P, S waves vertical incidence or R waves horizontal incidence, the displacement amplitudes of vertical excavated plane seem to be the same in all the excavated types, and the larger horizontal displacement amplitude is occurred on the ground surface foundation with partial excavation. The ground surface foundation with partial excavation and the source of P, S wave in the same side, the energy factor of excavated surface will be the larger value, but the opposite sides will be another. Besides, the energy factors of partial excavation are large than of the full excavation.

Key Words: boundary element method, scattering wave, excavation.

一、前言

在 921 地震後，部分民間業者發現，建築基地之一半面積來當地下室，其地下室結構損毀情形，大部分比建築基地全面開挖成地下室嚴重。雖然影響因素甚多，但一般學者認為最大的影響因素可能是震波入射於不規則地形時，由於震波反射、散射(scattering)及繞射(diffraction)所造成的影響，其中造成震波散射效應之因素，通常與地形、地質材料、入射波的類型、頻率及角度有關。

近年來，學者在探討震波散射效應問題，曾採用不同數值方法進行分析，常見的數值分析方法如有限元素法、有限差分法，邊界元素法及混合模式法等。其中，邊界元素法(BEM)在分析震波散射效應問題上，可避免有限元素法(FEM)及有限差分法(FDM)分析問題時，切割範圍太大及人造邊界反射問題等缺點，且可降低物理問題之維度，及自動滿足無窮遠處之輻射條件等優點。從過去文獻中，有關震波散射問題之研究，大部分集中於開孔前後方位移振幅放大或

衰減方面，對開孔內位移振幅分佈之研究反而較少。又本文將討論具開挖面的建築基地受震波影響，故本文將對此課題做一系列之影響參數研究。

本研究將應用二維頻率域邊界元素法對基礎開挖面之震波散射反應進行研究，分析時假定土壤為線彈性，均質且均向的半無限域介質材料。應用頻率域無限域基本解(fundamental solution)及貝氏交換定理(Betti's reciprocal theorem)[1]，推導出邊界積分方程式。

二、分析模式

本文討論震波入射至基礎開挖面，所引起之震波散射效應，考慮中低頻率之實體波或表面波，以不同角度入射到基礎開挖面上。當震波碰到開挖面會有反射、繞射、散射的現象，討論基地面上位移振幅之分佈情形，與不同基礎開挖型式間的能量關係，藉以了解何種基礎型式在震波入射後，其振動能量偏高，對耐震能力有不利之影響。

為檢核邊界元素程式之正確性，本研究將先分析垂直入

1. 朝陽科技大學營建系助理教授

2. 朝陽科技大學營建系碩士

3. 朝陽科技大學營建系碩士班研究生

射 P 波於半徑 1m 之半圓形開孔案例，並與 Mossessian 等人 (1987)[2] 之分析結果比對，以確定所撰寫之邊界元素數值程式在數值模擬上的正確性。本案例基本數據為：土壤剪力模數 $G=125 \text{ MN/m}^2$ ，土壤柏松比 $\nu=0.33$ ，頻率 $f=19.89\text{Hz}$ ，波數 $k=0.5\text{rad/m}$ ，土壤單位重 $\gamma=19.6\text{kN/m}^3$ 。分析後之結果如圖 1 所示，其結果與 Mossessian 之研究結果相當接近。

為便於討論震波入射至基礎開挖面所引起之震波散射效應，本文假設建築基地寬為 20m，地下室開挖深度將 10m，開挖寬度則分 5m(1/4 開挖)、10m(1/2 開挖)與 20m(全開挖)三種情形，如圖 2 所示。入射波型式將包括壓力波(P 波)、剪力波(S 波)與雷利波(R 波)，其震波頻率假設為 1-10Hz，實體波之入射角 將討論 60° 30° 0° -30° -60° 五種角度，雷利波之入射角 則分 90° 與 -90° 兩種情形，即左方與右方水平入射。土壤假設為均質、均向、線彈性體，土壤剪力模數 $G=125 \text{ MN/m}^2$ ，單位重 $\gamma=19.6 \text{ kN/m}^3$ ，柏松比 $\nu=0.45$ 。

因地震所造成基地面之損害程度，主要取決於震波散射效應。為了評估震波在基地面不同位置之位移振幅分佈情形，本文將基地面上位移振幅以入射波位移振幅做正規化，即水平位移比 U_x/U (基地面質點水平位移振幅除以入射波位移振幅)及垂直位移比 U_y/U (基地面質點垂直位移振幅除以入射波位移振幅)對作為評估標準。為了評估震波散射後，基地面振動能量之高低，本文將以能量比參數 E_s/E_i ，來評估不同開挖型式對震波散射之能力。能量比參數 E_s/E_i 之定義為部份開挖之能量參數 E_s 與全面開挖之能量參數 E_i 的比值，能量參數係取基地面質點的位移振幅與振動頻率乘積之平方總和，即

$$\frac{E_s}{E_i} = \sum_{i=1}^{N_E} (u_{ix}^2 + u_{iy}^2) f^2 \Delta L_i$$

上式中， ΔL_i 基地面上單一元素長度， N_E 為基地面上元素總數， u_{ix} 、 u_{iy} 分別為 x、y 方向之位移振幅。

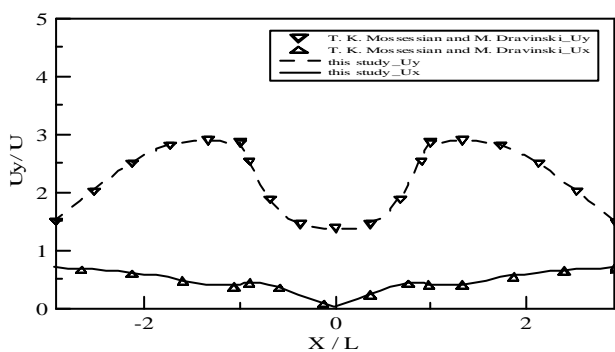


圖 1 水平及垂直位移精度比較圖

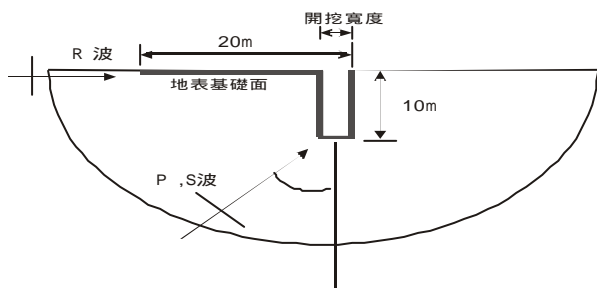


圖 2 基礎開挖幾何示意圖

三、結果與結論

1. 基地面上位移比分佈

為了探討震波入射至上述開挖基地，其不同位置之位移

比分佈情形，本文將以頻率 1Hz 之 P 或 S 波垂直入射($\theta=0^\circ$)及 R 波水平入射($\theta=90^\circ$, -90°)至上述開挖面，並以在基地面上之水平位移比 U_x/U 及垂直位移比 U_y/U 分佈，繪製成泡泡圖，圖上圓圈之半徑與位移比成正比。

(1) P 波垂直入射

由圖 3、4 可看出，三種不同開挖型式，其垂直壁與開挖底面之水平或垂直位移比近乎相等。但是，在 1/4 開挖或 1/2 開挖之地表基礎面上，有較大之垂直與水平位移振幅。

(2) S 波垂直入射

由圖 5、6 可看出，三種不同開挖型式，其垂直壁與開挖底面之水平或垂直位移比也近乎相等。但在 1/4 開挖或 1/2 開挖之地表基礎面上，有較大之水平位移振幅。

(3) R 波水平入射

由圖 7-圖 10 可看出，三種不同開挖型式，其垂直壁之水平或垂直位移比也近乎相等。但是，不管震源在左方($\theta=90^\circ$)或右方($\theta=-90^\circ$)，其最大水平位移比係發生在 1/4 開挖或 1/2 開挖之地表基礎，而垂直位移比在 1/4 開挖或 1/2 開挖之開挖底面均比全開挖者大。

綜合以上分析結果，開挖部份建築基地作為地下室，其餘面積構築地表基礎，在實體波垂直入射或雷利波水平入射至開挖面，將使地表基礎或開挖底面產生較大之位移振幅。因此，這也可說明，此種開挖型式其地下室結構損毀情形比全面開挖者嚴重。

2. 基地面上能量大小

為了探討震波散射與各影響參數之關係，本文將以基地面上之能量比參數與震波頻率為坐標軸，繪製不同震波型式、入射角度、開挖型式之關係曲線，如圖 11~圖 16 所示。

(1) 入射壓力波

如果壓力波自下方垂直入射($\theta=0^\circ$)，如圖 11 所示，對於低頻($f < 3\text{Hz}$)或中高频($f > 6\text{Hz}$)震波，1/4 開挖與 1/2 開挖之部分開挖型式，其能量比參數大於一，即其振動能量比全開挖者要大，承擔較大之振動能量。

(2) 入射剪力波

如果剪力波自下方垂直入射($\theta=0^\circ$)，如圖 11 所示，對於中低頻($f < 8\text{Hz}$)之震波，1/4 開挖與 1/2 開挖之能量比參數大於一，其振動能量比全開挖者要大，此與同時前述壓力波之影響相似，左下方入射比右下方入射所產生之散射能量要大許多，此也與開挖面之屏蔽作用有關。

(3) 入射雷利波

由圖 16 可看出，入射雷利波後，能量比參數大多超過一，亦即 1/4 開挖與 1/2 開挖之基地面上能量要比全開挖者大，且 1/4 開挖之基地面振動能量又高於 1/2 開挖者。左方入射($\theta=90^\circ$)產生之散射波對基地面之能量，比右方入射($\theta=-90^\circ$)要大許多，即地表基礎面與震源同一側，因震波散射之緣故，基地面上有較大振動能量。

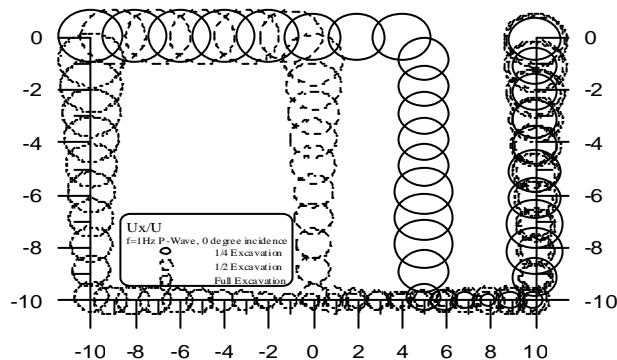


圖 3 垂直入射壓力波之水平位移比分佈圖

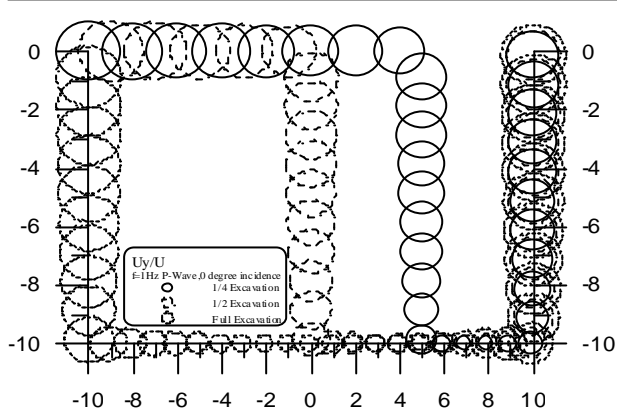


圖 4 垂直入射壓力波之垂直位移比分佈圖

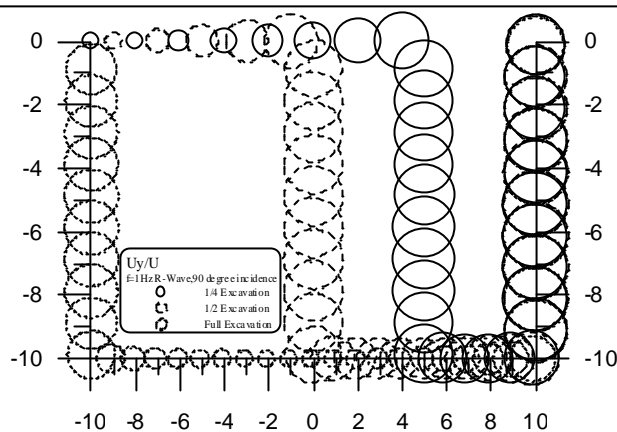


圖 8 左方入射雷利波之垂直位移比分佈圖

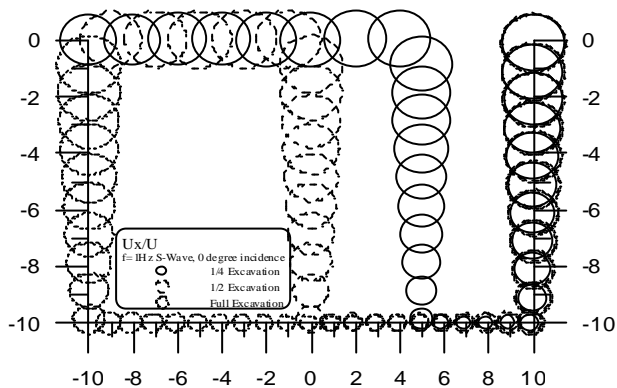


圖 5 垂直入射剪力波之水平位移比分佈圖

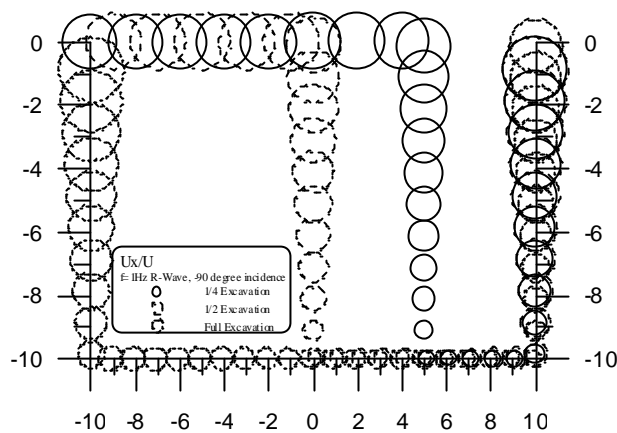


圖 9 右方入射雷利波之水平位移比分佈圖

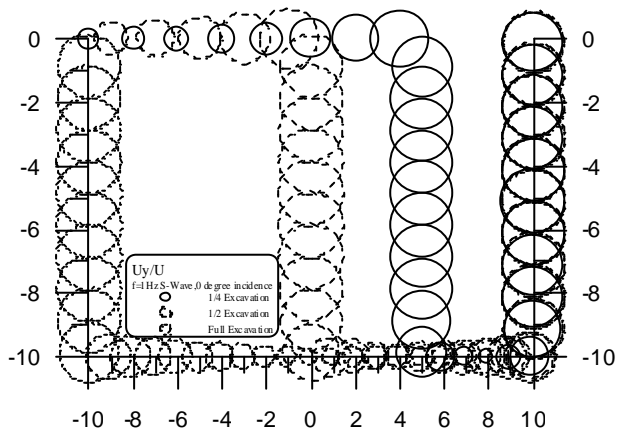


圖 6 垂直入射剪力波之垂直位移比分佈圖

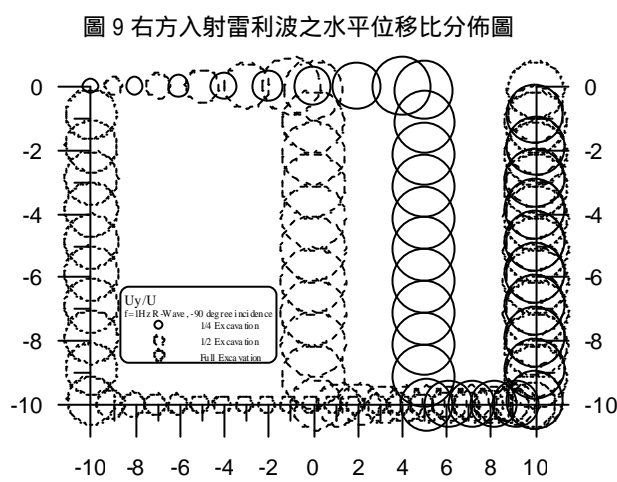


圖 10 右方入射雷利波之垂直位移比分佈圖

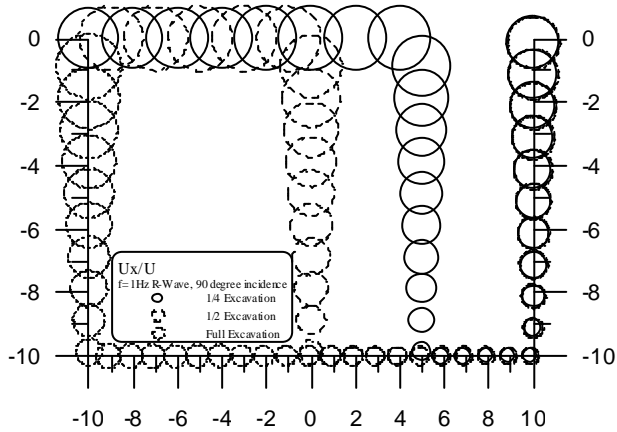


圖 7 左方入射雷利波之水平位移比分佈圖

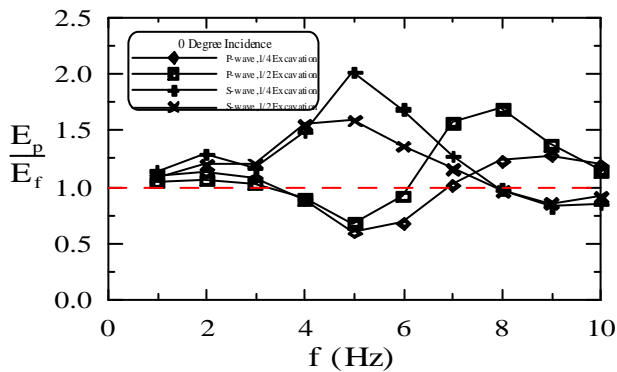


圖 11 入射實體波之能量比影響圖($\theta=0^\circ$)

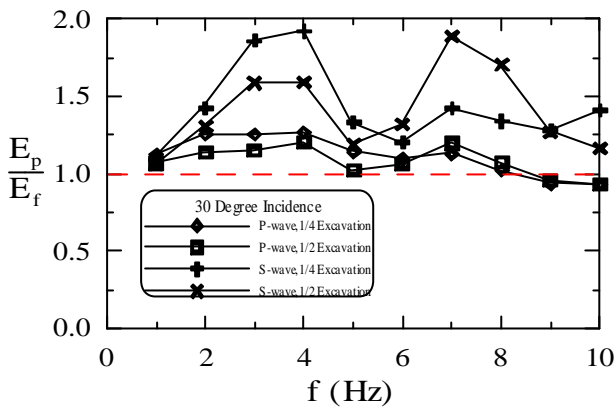


圖 12 入射實體波之能量比影響圖($\theta=30^\circ$)

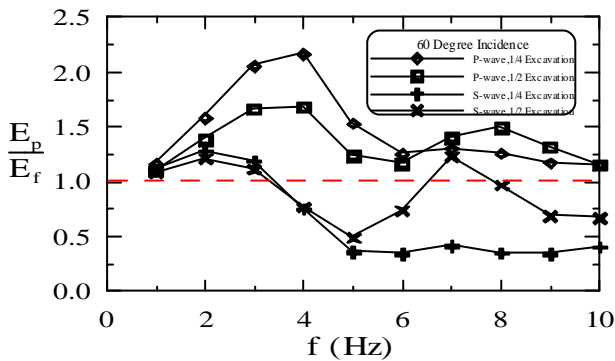


圖 13 入射實體波之能量比影響圖($\theta=60^\circ$)

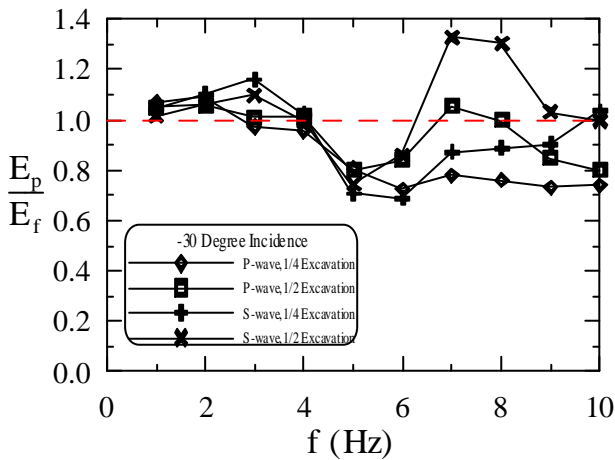


圖 14 入射實體波之能量比影響圖($\theta= -30^\circ$)

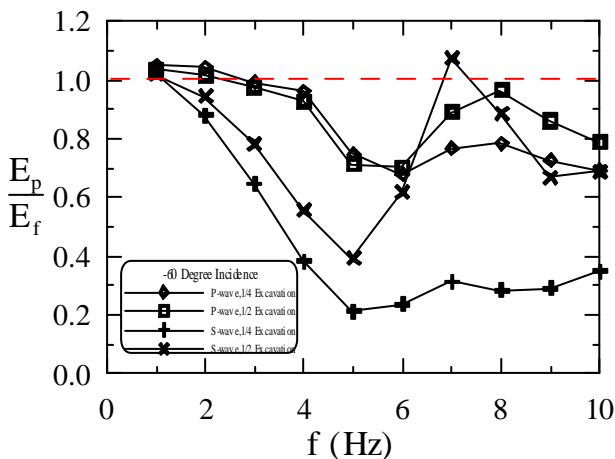


圖 15 入射實體波之能量比影響圖($\theta= -60^\circ$)

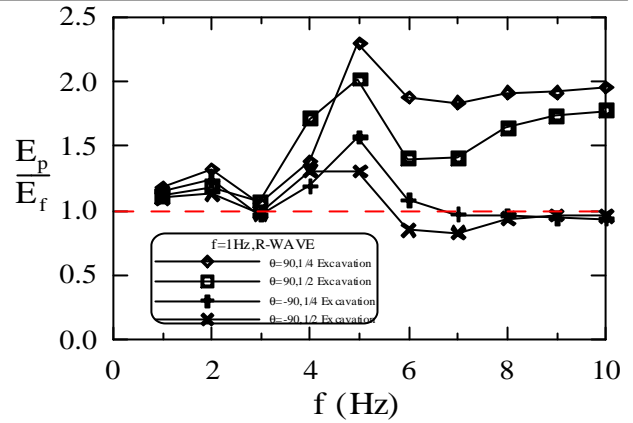


圖 16 水平入射雷利波之能量比影響圖

四、結論

1. 不管 P 或 S 波垂直入射，或 R 波水平入射於三種不同開挖型式，其垂直壁與開挖底面之水平或垂直位移比，皆近乎相等。
2. 開挖面受到 P 或 S 波之垂直入射或 R 波水平入射，在 1/4 開挖或 1/2 開挖之地表基礎面上，有較大之水平位移振幅。
3. 地表基礎面與 P 或 S 波震源同一側，因震波散射之緣故，基地面上有較大振動能量。但如果地表基礎面與震源異側，因開挖面之屏蔽作用，使開挖面後方之地表基礎承擔能量較小，致整體能量有下降之趨勢。
4. 入射雷利波於 1/4 開挖與 1/2 開挖之基地面上，其振動能量皆比全開挖者要大。
5. 地表基礎與雷利波震源同側，因震波散射之緣故，基地面上有較大振動能量。

參考文獻

- [1]洪英州，「地下室開挖形狀對震波散射問題之數值研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，臺中(2002)。
- [2]Mossesian T. K. and Dravinski M., "Application of a Hybrid Method for Scattering of P, SV, and Rayleigh Waves by Near-Surface Irregularities," Bulletin of Seismological Society of America., Vol. 77, No.5, pp. 1784-1803 (1987).
- [3]Kitahara, M., Boundary Integral Equation Methods in Eigenvalue Problem of Elastodynamics and Thin Plates, Elsevier Science Publishers, B.V. (1985).
- [4]Dominguez J. and Abasi R., Advanced Boundary Element Methods, pp. 125-133 (1987).
- [5]鄭吉宏，「含孔半平面動彈性問題之邊界元素法解析」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，臺南(1990)。
- [6]Fishman K. L. and Alimad S., "Seismic Response for Alluvial Valleys Subjected to SH, P and SV Waves," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 14, pp. 249-258 (1995).