

地震時捷運雙孔潛盾隧道與既有建物之互制研究

蔡明欣、馮正一、陳錦清
財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

摘要

本文以捷運雙孔隧道為題，根據台北都會區地層資料、實測得 921 地震記錄、一般建築物型式等，考慮隧道所在深度、及雙孔隧道排列，以有限元素法動力程式 FLUSH，進行地震反應分析。由本文案例研究的結果顯示，潛盾隧道的存在對地表建物下方之加速度放大效應約在 10% 以下，而隧道所在深度及排列方式對地表反應之影響較不明顯。

關鍵字：雙孔隧道、地震、動力互制

The Study on the Soil-Building-Twin tunnel Interaction During Earthquake

M. S. Tsai, Z. Y. Feng, J. C. Chern
Geotechnical Research Center, Sinotech Engineering Consultant, Inc.

ABSTRACT

The dynamic interaction behavior of soil and twin tunnel beneath existing building is studied in this paper. Based on the soil properties of Taipei basin, the input motion from the record of Chi-Chi Earthquake, and the type of existing building, the dynamic finite element program FLUSH was used for numerical analysis. Parameter studies were performed including the depth of twin tunnel and the arrangement of tunnels. The results of case analyses show that the acceleration of ground motion due to existing tunnels increases less than 10%, the influences of tunnel depth and arrangement of tunnels on the ground response are not significant.

Keywords: Twin tunnel, Earthquake, Dynamic interaction

一、前言

九二一大地震震撼全台，即使遠在百餘公里外的台北都會區亦傳出災情。許多民眾開始關切自己居住的建築物是否安全。尤其台北捷運某些雙孔隧道之轉彎段，必須通過民房之下方，故引起其上方民眾對潛盾隧道之存在是否影響建物受震時之安全性的顧慮。由於目前工程設計規範並未考慮此類地震力之互制因素，工程界對這個問題的研究也較少。為釐清此問題，有必要瞭解潛盾隧道存在對地表建物受震反應之影響。

因此本研究擬針對上述問題分別考慮隧道存在與否、隧道深度、隧道排列等變因之影響進行數值模擬分析，目的在瞭解潛盾隧道之存在對其上方建築物、土層乃至於隧道本身受震反應之影響，與既有建築物及隧道之受震互制行為。

二、研究內容與方法

本研究以潛盾雙孔隧道為例，根據台北都會區現有地質調查資料、實測得 921 地震紀錄、一般建物形式，考慮隧道所在深度及雙孔隧道排列等變因，建立數值模式。分析程式採用能考慮土體受震弱化之等值

線性有限元素法程式 FLUSH [1] 進行地震反應分析。評估隧道構築後對其上方地表面各點受震時之影響。茲將本研究主要內容及方法分述如下：

2.1 地層參數及其他參數

分析所採用之土層以鄰近淡水河一帶之土層為例，該土層屬台北盆地土層之淡二區，土層以沉泥質黏土及沉泥質砂為主，其土層之基本資料及最大剪力模數如表 1 所示，其中最大剪力模數係得自現地井下 (Down-hole) 震測法。分析土層之基盤面取至 40m 深，40m 以下為台北盆地之景美礫石層。土層之正規化剪力模數及阻尼比隨剪應變振幅變化之關係得自土壤動態三軸及共振柱等動態性質試驗結果，其關係如圖 1 所示。

隧道環片厚度假設為 25cm 之高強度 (單壓強度 450kg/cm²) 混凝土。地表建物以一般五層樓高民宅為

表 1 分析採用土層參數

土層深度 (m)	SPT N 值	單位重 γ_t (t/m ³)	最大剪力模數 G_{max} * (kN/m ²)	土層分類 USCS
0.0 ~ 3.0	3	1.84	29400	CL
3.0 ~ 10.0	7	1.95	68600	SM
10.0 ~ 17.0	6	1.90	78400	CL
17.0 ~ 27.5	6	1.90	156800	CL
27.5 ~ 32.0	13	1.99	196000	SM
32.0 ~ 40.0	14	2.01	196000	CL

* 最大剪力模數為 Down-hole 震測結果

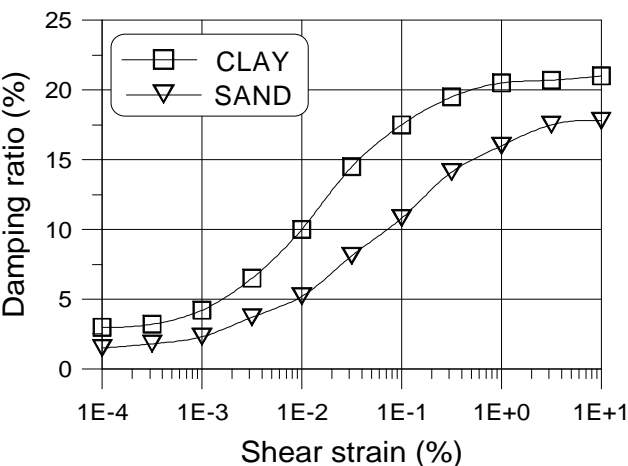
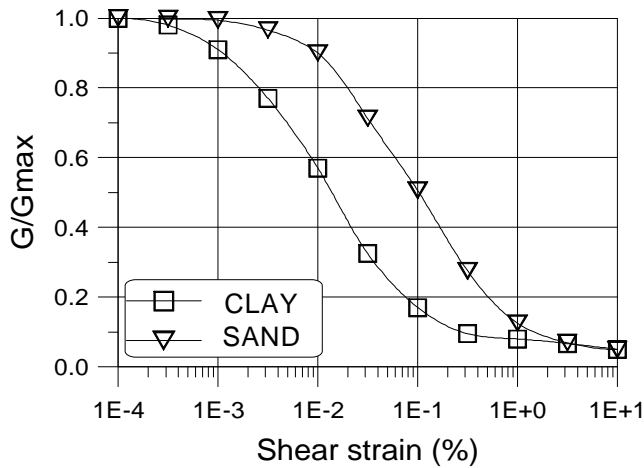


圖 1 土層正規化剪力模數及阻尼比與剪應變關係

例，簡化為五層框架 (frame) 結構。

2.2 地震資料

由於地震之頻率內涵影響地盤反應甚大，且地表之地震特性與地震波傳遞經過之土層特性有關。因此本研究之地震資料選自 921 地震時中正紀念堂測站 (TAP100) 所測得之地震紀錄，其中以最大加速度較大之南北向加速度歷時放大至 0.237g 作為本研究之地表自由場地地震，其加速度歷時曲線如圖 2 所示。自由場地地震加速度歷時再以一維波傳程式 SHAKE [2] 程式反摺積 (Deconvolution) 至基盤面上，作為數值模式基盤面的輸入地震歷時。其加速度歷時曲線如圖 3 所示。

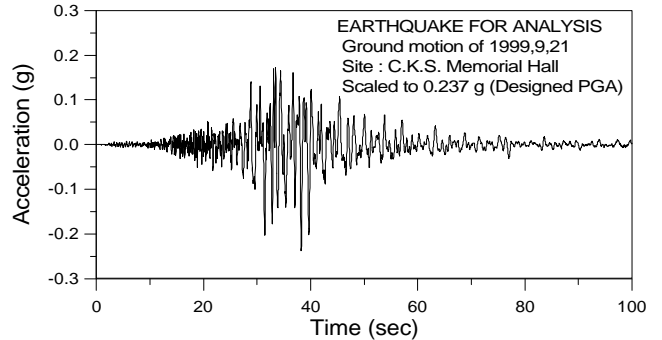


圖 2 本研究採用之地表自由場加速度歷時曲線

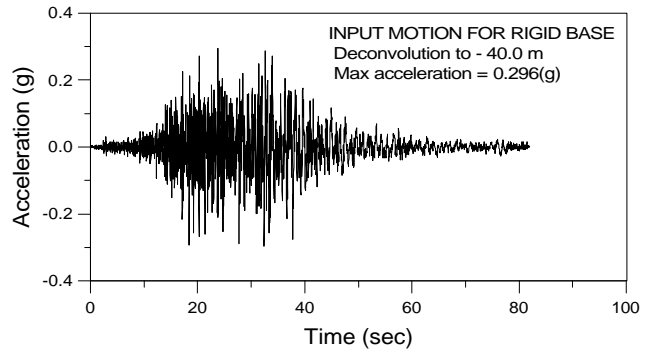


圖 3 基盤面之輸入地震加速度歷時曲線

2.3 數值分析程式

潛盾隧道與其上方建築物受地震力作用之互制分析模式，主要以有限元素法之動態分析程式 FLUSH [1] 進行數值模擬。該程式由美國加州大學 Berkeley 分校 Lysmer 教授等於 1975 年發展成功，其假設土壤為等值線性彈性體，其剪力模數及阻尼比隨應變之大小而改變，以模擬土壤受震後勁度弱行之行為。其使用元素類型包括三至四邊形之固體元素及結構樑元素。為節省分析域與網格數目，程式中並具有傳導邊界 (Transmitting boundary) 可大量減少兩側自由域土層之元素數量，節省分析時間。分析結果可求出土體與結構物受震反應之加速度及應力。

2.4 分析方法

為瞭解潛盾隧道之存在對其上方既有建築物受震時之影響，本研究以直徑 6m 之潛盾隧道為例，考慮之分析變數主要包括：

- (一) 有隧道與無隧道對地震反應之影響，
- (二) 水平雙孔隧道深度對地震反應之影響，
- (三) 垂直雙孔隧道與水平雙孔隧道對地震反應之差異。

分析之各案例潛盾隧道位置如圖 4 所示。

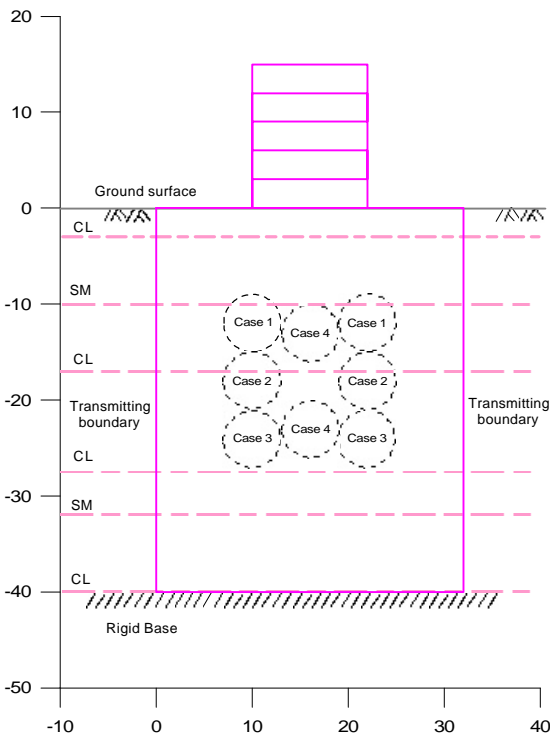


圖 4 分析之各案例簡圖

根據前述各案例之分析結果，比較各案例有無隧道存在時，沿雙孔隧道中線深度之加速度反應變化及沿地表各點之加速度反應。分別將各案例分析之結果整理於後。

3.1 水平雙孔隧道深度對地震反應之影響

關於水平雙孔隧道所在深度對地震反應之影響，本研究以水平距離為一倍隧道直徑（即 6m）之雙孔隧道為例，考慮隧道頂拱距地表分別為 1.5、2.5 及 3.5 倍直徑（即 9m、15m 及 21m）等三種案例（如圖 4 之 Case 1~3）作比較，三案例之有限元素網格如圖 5 所示。

有隧道與無隧道之地盤加速度反應，以有隧道時之最大反應加速度與無隧道時之最大反應加速度比例作為其影響之放大倍率（amplification factor）。根據分析結果，各案例分析得有隧道存在時之最大加速度反應放大倍率繪製如圖 6 及圖 7 所示。由二圖可見隧道之存在對地表加速度反應有放大作用，約放大 6~9%，其中建物下方因隧道存在產生的放大效應較高，約較無隧道時增加 8~9%，而建物以外的區域放大倍率約 6~8%。另外可觀察到最大反應加速度放大倍率在隧道所在深度附近有很大的變化，顯示在受震時隧道與其週邊土層

三、分析結果

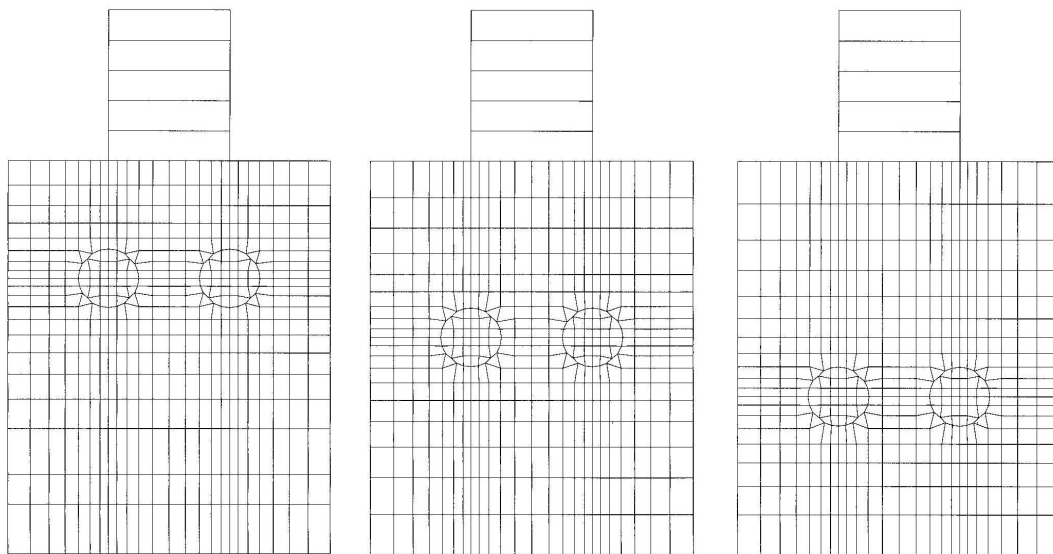


圖 5 水平雙孔隧道位於不同深度之有限元素網格

可能承受較大之應力。至於不同深度的水平雙孔隧道對於地表加速度反應之影響頗為相似，顯示隧道所在的深度對地表加速度之反應並不明顯。

3.2 垂直雙孔隧道對地震反應之影響

垂直雙孔隧道僅分析一案例，其中上隧道頂拱距地表為 10m，下隧道頂拱距上隧道仰拱 4m。分析之有限元素網格如圖 8 所示。分析結果之有隧道時加速度反應與無隧道時之加速度反應之放大倍率如圖 9

及圖 10 所示。

由分析結果可見隧道所在深度之最大反應加速度放大倍率變化很大，尤其在兩隧道間的區域更為顯著。而垂直排列雙孔隧道在地表建物下方之放大反應與水平排列之雙孔隧道者差不多，放大倍率約為 8~9%，而建物以外之區域則僅約為 5% 之放大倍率，可見垂直排列隧道在地表之加速度反應在建物周圍較為集中，建物外側的區域加速度反應增加幅度相對較小。

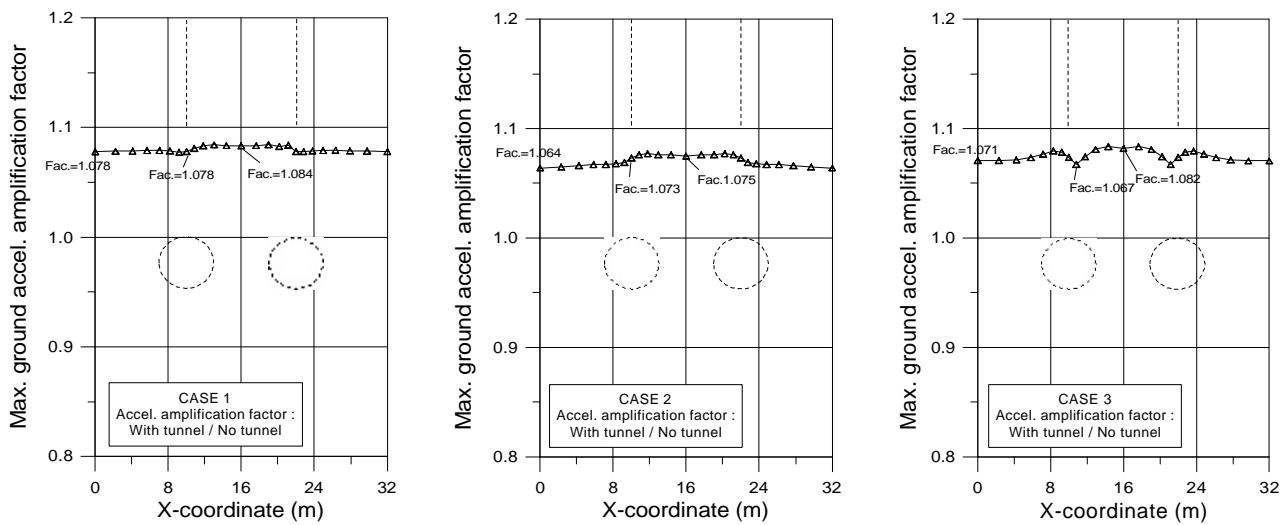


圖 6 有隧道與無隧道加速度反應比值 (沿地表面)

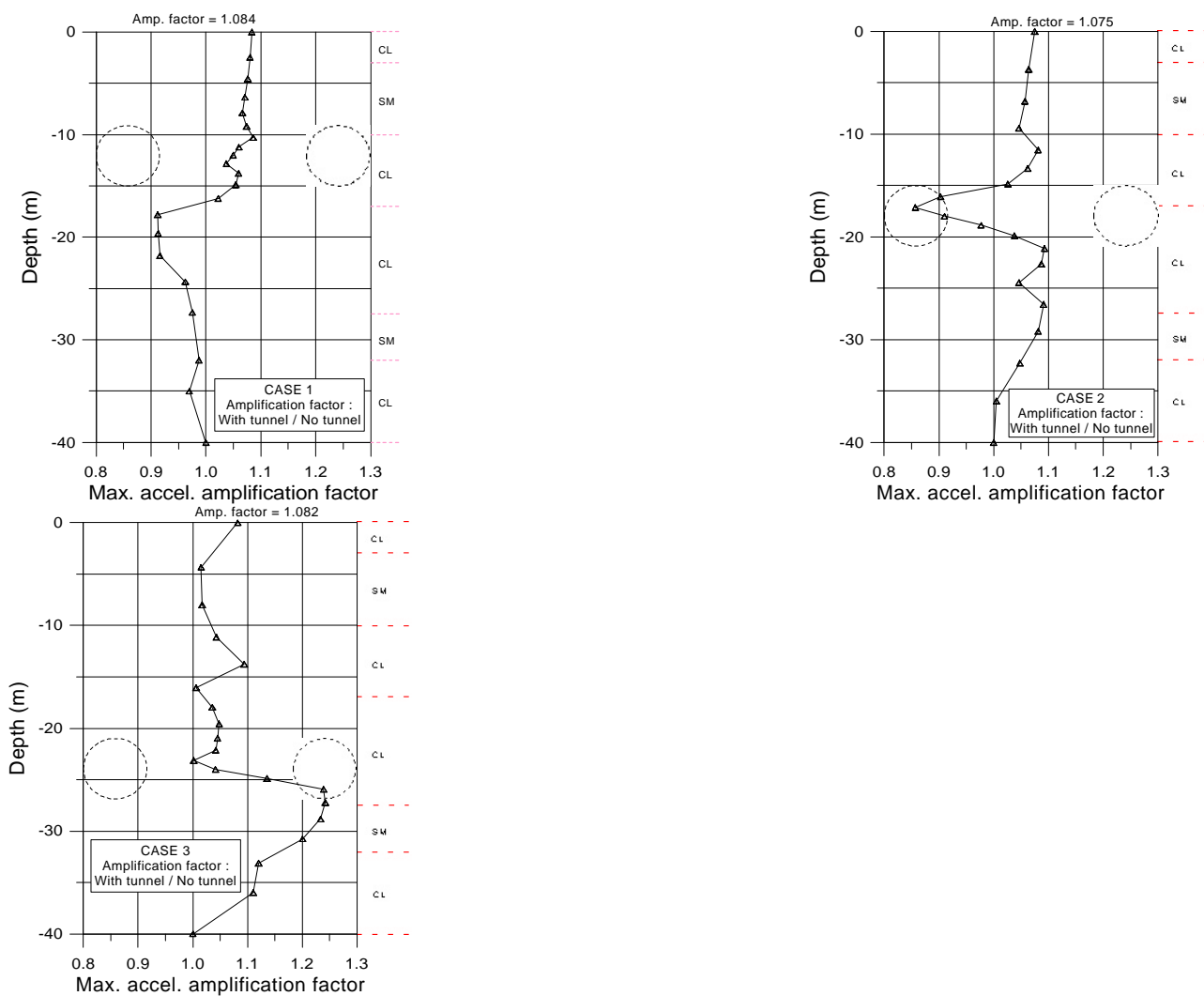


圖 7 有隧道與無隧道加速度反應比值 (沿雙孔隧道中線深度)

四、結論與建議

綜合以上討論，根據本研究分析結果，雙孔隧道經過建物下方對地震反應之影響歸納結論如下：

1. 地表的最大加速度反應因隧道存在產生放大的效應主要集中在建物下方。約較無隧道時增加 10% 以下。
2. 不同深度的水平雙孔隧道對於地表加速度反應之影響頗為相似。顯示隧道所在的深度對地表加速度之反應較不明顯。
3. 根據分析結果，垂直排列之雙孔隧道在地表建物下方之受震加速度反應與水平排列之雙孔隧道者相近，放大倍率約為 8~9% 左右。而建物以外區域則以水平雙孔隧道之放大倍率較高，相較之下，垂直雙孔隧道對地表之加速度反應較集中於建物下方。
4. 本文所獲結論係基於特定地層條件與特定地震紀錄下之分析結果，對於不同地層條件與地震紀錄狀況之潛盾隧道與既有建物受震互制行為，仍應進行詳細之評估分析。

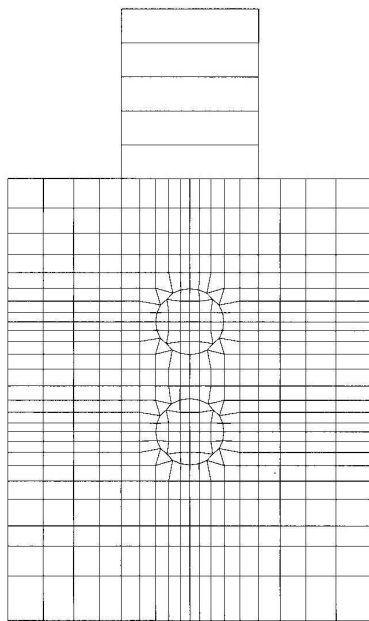


圖 8 垂直雙孔隧道之有限元素網格

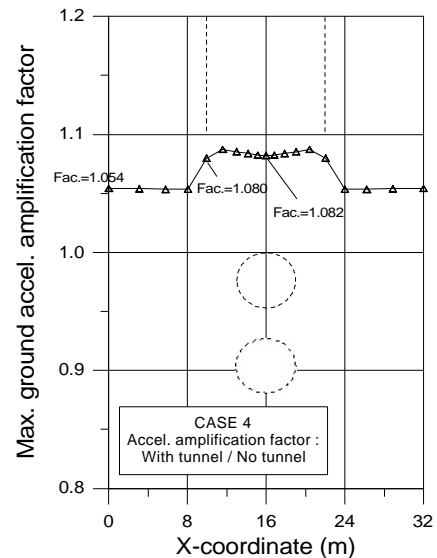


圖 9 垂直雙孔隧道加速度放大倍率(沿地表面)

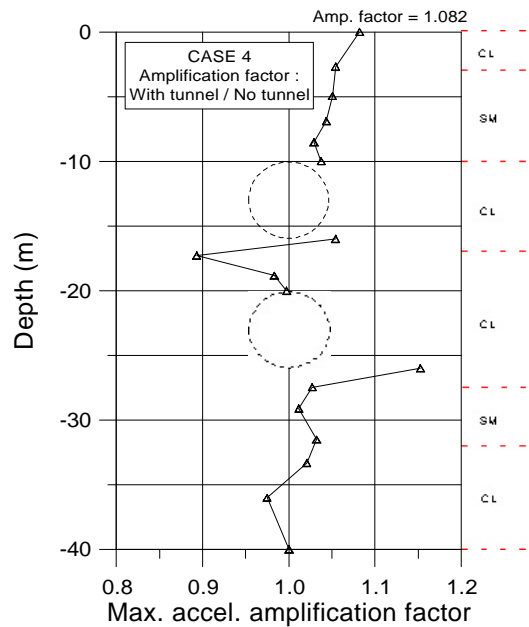


圖 10 垂直雙孔隧道加速度放大倍率 (沿隧道中線)

五、參考文獻

- 1) Lysmer, J., Udaka, T., Tsay, C. F., Seed, H. B., "FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, November (1975).*
- 2) Schnable, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 74-4, University of California, Berkeley, December (1974).*