

台灣中西部地區反應譜比之研究

張添炮¹ 余貴坤² 劉芳嬌¹

摘要

本研究選用中央氣象局強震網 1995 至 1999 年間 9 個規模大於 5.3 的大型地震記錄，先用水平(H)與垂直(V)分量反應譜比的方法，配合地質資料將測站屬性由堅硬至鬆軟分為 A、B、C 三類，接著分析不同類型測站反應譜比的差異。研究顯示不同規模、深度、距離的地震記錄，在同一測站上所求出的反應譜比很類似；H/V 方法所作的測站分類和實際地質資料相當吻合。H/V 圖形的顯著頻率隨著測站類型從 A → B → C 逐漸降低，而主放大值則逐漸增加；集集主震的 H/V 圖形比其它地震偏向低頻，主放大值比其它地震稍小。

關鍵詞：反應譜比，測站分類，集集主震

一、前言

在場址效應的研究上，頻譜分析法已經被廣泛地使用，經由頻譜分析可以了解各測站在不同頻率震波作用下，相對於參考站的放大情形。例如，傳統上利用水平分量沖積層站(S_{HS})與臨近岩盤站(S_{HB})傅氏振幅譜的比值：

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (\text{雙站法}) \quad (1)$$

可以有效地評估沖積層站的顯著振動頻率和放大值。但是雙站法有其困難之處，是岩盤站的記錄不容易獲得，當測站分布範圍太廣時，如果仍使用同一岩盤站作為參考站似乎不合理。而且針對不同地震，參考站也不一定都有收到記錄。

Nakamura(1989)提出單站頻譜比的方法，利用微地動記錄水平與垂直向之傅氏頻譜比分析場址的放大。提出震源之振幅效應：

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

其中 S_{VS} 和 S_{VB} 分別是地表和地底下岩床(bedrock)的垂直分量傅氏振幅譜。垂直分量的運動，除了一些雷利波(Rayleigh wave)之外，比較不受到淺部低速層的放大作用所影響。如果雷利波在水平和垂直方向的效應接近的話，則 E_S 可用來評估雷利波的效應。則 S_{TT} 轉換函數(transfer function)適合用來描述場址的特性：

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = (S_{HS} / S_{VS}) / (S_{HB} / S_{VB}) \quad (3)$$

Nakamura(1989)並指出地底下 S_{HB} / S_{VB} 比值在相當頻寬內，其比值接近一；亦即 $S_{HB} / S_{VB} \approx 1$ 。在這種情況下 S_{TT} 可改寫成：

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (4)$$

1.南開技術學院電子工程系

2.萬能技術學院土木工程系

這表示水平與垂直方向的頻譜比(H/V)，僅從地表的運動即可以獲得地層的轉換函數，亦即只須單站的記錄就可求出場址效應。

Lermo and Chavez-Garcia(1993)研究層狀構造 S 波的轉換函數，認為 H/V 可以有效地評估第一階共振的頻率和振幅。Field and Jacob(1993)和 Field et al.(1995)分析微地動訊號對於沉積層的反應，一致認為 H/V 在研究沉積層的基本共振頻率上，是一個有效、可靠的方法。Dravinski et al.(1996)利用頻譜比探討深厚沉積盆地的地震特性，也發現 H/V 方法對於決定基本共振頻率有相當好的結果，但是在決定高階共振頻率上結果並不好。Huang and Tseng(2002)利用微震資料的 H/V 探討台灣中部土壤液化的問題，認為液化區的 H/V 易損度指數(vulnerability index)大於鄰近的地區。

另外，有些研究則是進一步把 H/V 方法應用到測站地質的分類上。Yamazaki and Ansary(1997)利用速度反應譜的 H/V 做測站分類，認為 H/V 圖形比較不受到地震規模、震源深度、波傳路徑的影響。Atkinson(1993)、Theodulidis et al.(1996)和 Zare et al.(1999)，分析不同地質條件的反應譜比，都認為 H/V 在測站的分類上可以提供相當好的參考依據。

二、資料收集與處理

本研究採用中央氣象局強地動觀測計畫(TSMIP)的加速度記錄，為了探討整個中部地區的強震特性，本文只挑選規模較大激發測站數較多的地震作研究，如表 1 所示。連同集集主震在內一共有 9 個規模 5.3 以上的大型地震，這些地震大致都分布在本研究區域的東側(圖 1)，其中編號 3 是 1998 年的瑞里地震，編號 4 至編號 8 都屬於集集地震的餘震序列。距離測區較遠的編號 1 地震位於花蓮海岸線附近，會被採用是因為它的規模大，激發的測站數目多，另一方面是因為它的距離明顯比其它地震遠，這可以用來說明強震的距離效應。扣除不良的記錄之後，每一地震在本研究區域至少都激發 42 個測站以上。這些地震的規模接近，震央位置也算靠近，使得波傳的路徑效應也接近，可以方便分析在不同地質條件下的強震特性差異。本研究的測站主要分佈在台中縣、台中市、彰化縣、南投縣以及雲林縣等五個縣市(圖 2)，總共有 89 站，其範圍在 120.1°~121.3°E，23.6°~24.4°N。這些縣市在過去是相對較少被研究討論的地區。

本研究是取整段的加速度歷時作分析，在頻率對數軸上等間隔取樣，計算出各測站 5% 臨界阻尼速度反應譜，包括垂直、南北、東西三個分量，並將南北與東西分量取幾何平均當做水平分量。

表 1 本研究所選用地震之參數。

| Eqqs. | Date (y/m/d) | Long. (°E) | Lat. (°N) | Depth (km) | Mag. (M_L) | Strike (°) | Dip (°) | Rake (°) | Stations Triggered |
|-----------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|------------|-------------|-----------------------|
| No.1 | 1995/02/23 | 121.687 | 24.204 | 21.7 | 5.8 | 11 | 85 | 75 | 64 |
| No.2 | 1995/07/07 | 121.090 | 23.893 | 13.1 | 5.3 | 30 | 25 | 90 | 46 |
| No.3 | 1998/07/17 | 120.662 | 23.503 | 2.8 | 6.2 | 45 | 30 | 110 | 42 |
| No.4 | 1999/09/20 | 120.876 | 23.792 | 3.5 | 6.6 | 25 | 32 | 97 | 76 |
| No.5 | 1999/09/22 | 121.047 | 23.826 | 15.6 | 6.8 | 13 | 25 | 124 | 58 |
| No.6 | 1999/09/25 | 121.006 | 23.859 | 9.9 | 6.8 | 50 | 44 | 126 | 67 |
| No.7 | 1999/09/20 | 121.028 | 23.926 | 11.0 | 6.4 | 303 | 49 | 65 | 72 |
| No.8 | 1999/09/20 | 120.811 | 23.612 | 1.1 | 6.6 | 242 | 55 | -158 | 62 |
| Chi-Chi M.S. | 1999/09/20 | 120.815 | 23.853 | 8.0 | 7.3 | 5 | 34 | 65 | 74 |

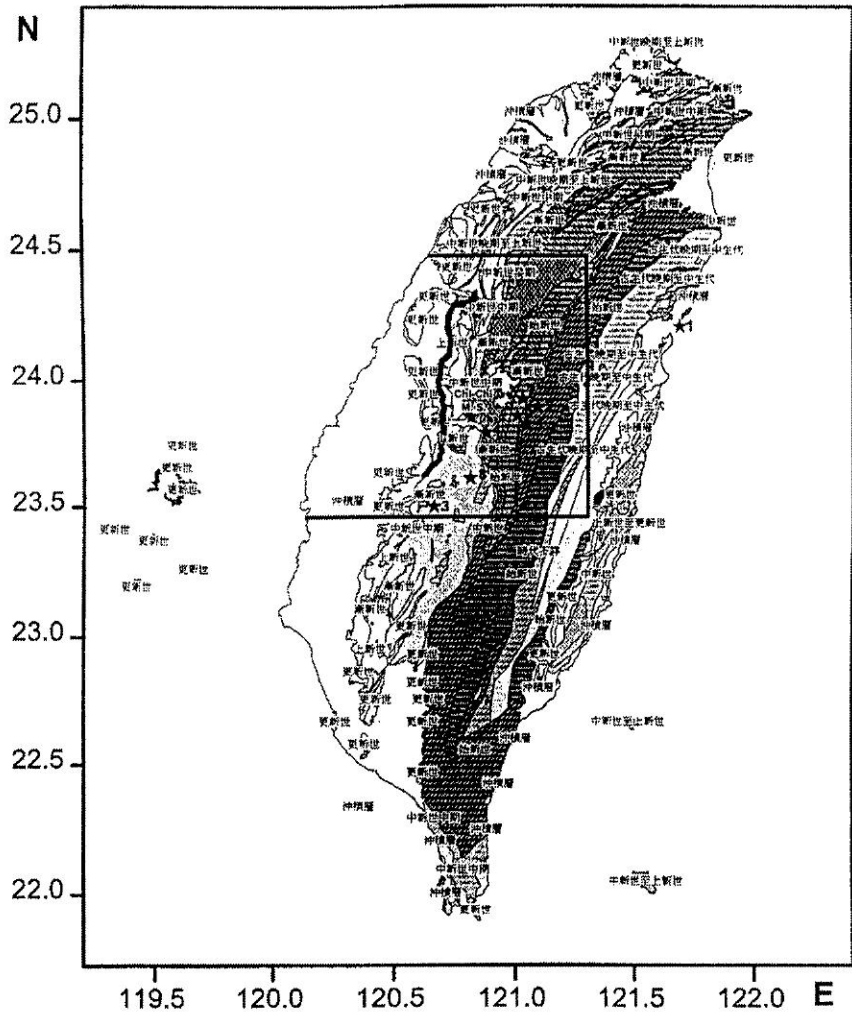


圖 1 台灣地質分區圖(經濟部中央地質調查所, 1999)。框框所示為本研究之區域範圍，粗線為車籠埔斷層，星號為震央。

三、測站的分類

關於測站的分類，國內現行建築法規耐震設計規範(Taiwan Building Code, TBC)，是將台灣地區的地盤依據工址地層週期 T_G 的長短分為三類：第一類地盤為堅實地盤其 $T_G \leq 0.2$ 秒，第二類地盤為普通地盤， $0.2 < T_G \leq 0.6$ 秒，第三類地盤為軟弱地盤其 $T_G > 0.6$ 秒，而台北盆地因地質情況特殊，另成一類。地層週期 T_G 的計算公式如下：

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{\beta_i} \quad (\text{李位育, 2000})$$

其中 H_i 為第 i 層土層厚度(公尺)， β_i 為第 i 層土層 S 波波速(公尺/秒)， i 為由地表面至基盤面分為 n 層中之各層編號，此處所指的基盤面為其下方土層 S 波速大於 300 公尺/秒之土層面。

中央氣象局地震測報中心曾經參考美國建築結構耐震設計規範(Uniform Building Code, UBC)，將強震測站按照地質特性分為四類(郭鎧紋, 1994)，這四類分別是 S_1 ：類似岩石的物質，或堅硬、緻密的土壤； S_2 ：土壤剖面為堅硬或緻密的土壤組成； S_3 ：土壤剖面厚度 21 公尺以上，其中包含 6 公尺以上，12 公尺以下之鬆軟到中等硬度的黏土層； S_4 ：土壤剖面中含有 12 公尺以上之鬆軟黏土層，或剪力波速度小於 150 公尺/秒。但是本研究區域的測站大都尚未分類。Lee et al.(2001)曾依據地質和地形圖資料，將台灣地區 708 個自由場強震測站由硬至軟依序分為 B、C、D、E 四類，並用速度反應譜比圖形(H/V)作為校對。發現 B 和 E 類測站的反應譜較容易辨認，C 和 D 類很近似不易辨認。所以建議把 C 和 D 類合併為一類。另外，也建議未來可以考慮把土壤液化的地區歸為 F 類。

本研究也是利用反應譜比的方法，把全部 8 個大地震(不包括集集主震)的記錄合併在一起畫出總平均 H/V 圖形，再配合地質資料把測

站類型決定。為了不讓問題太過於複雜，也考量到國內建築技術規則只將地盤分成三類，因此本研究把測站分為 A、B、C 三類，如圖 2 所示，A 類有 7 站，B 類 28 站，C 類 54 站。A 和 B 二類測站主要分佈在研究區域的東側麓山地帶；而西部彰化、雲林濱海一帶則幾乎都是 C 類測站。基本上，本研究的 A 類測站在 Lee et al.(2001)的分類中，大致是屬於最堅硬的 B 類；本研究的 C 類在 Lee et al.(2001)的分類中，大致是最鬆軟的 E 類；本研究的 B 類則大致介於 Lee et al.(2001)的 C 或 D 類之間。

集集主震因為牽動車籠埔斷層的錯動，斷層破裂時間持續相當長，使得整個反應譜傾向低頻，H/V 圖形也比其他地震呈現低頻，所以未列入測站分類的憑據。

四、研究成果分析

研究顯示，不同規模、不同深度、不同距離的地震記錄，在同一測站上所求出來的反應譜比很類似；而從個別地震針對同類型全部測站所算的平均反應譜比中，發現 H/V 圖形的顯著頻率從測站類型 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 呈現漸減的趨勢，每個地震皆然。如表 2 和圖 3 至圖 10 所示，在不同地震中 A 類測站的顯著頻率介於 4.5 和 6.0 Hz 之間；B 類測站介於 2.1 和 4.0 Hz 之間；C 類介於 1.1 和 2.3 Hz 之間。全部 8 個地震針對 A、B、C 三類測站所算的總平均 H/V 之顯著頻率分別是 5.0、3.0、1.6 Hz(圖 11)。集集主震比其它地震低頻，其 A、B、C 三類測站的顯著頻率分別是 3.5、2.0、1.0 Hz(圖 12)。至於主放大倍數方面，每個地震中鬆軟的 C 類測站其主放大值都大於 B 類測站(A 類測站數太少，不予考慮)。全部 8 個地震針對 B、C 兩類測站所算的主放大值分別是 2.5、2.8 倍。集集主震 B、C 兩類測站的主放大值很接近，分別是 2.3、2.2 倍。和其它 8 個地震比較起來集集主震的放大值幾乎是最小的，推論是車籠埔斷層的逆衝上下運動，使得垂直方向振動被加強，以致 H/V

值偏低的現象。

表 2 每個地震針對同類型全部測站所算的平均反應譜比。

| Eqks. | A 類測站 | | B 類測站 | | C 類測站 | |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 顯著 頻率 | 主放 大值 | 顯著 頻率 | 主放 大值 | 顯著 頻率 | 主放 大值 |
| No.1 | 4.5 | 2.5 | 3.5 | 2.6 | 2.0 | 3.3 |
| No.2 | 5.5 | 6.5 | 4.0 | 2.3 | 2.3 | 3.1 |
| No.3 | 5.0 | 3.3 | 3.5 | 2.8 | 1.5 | 2.9 |
| No.4 | 4.6 | 3.3 | 2.3 | 2.5 | 1.3 | 2.6 |
| No.5 | 5.0 | 9.0 | 3.5 | 3.5 | 2.0 | 3.6 |
| No.6 | 5.0 | 2.8 | 3.5 | 2.4 | 1.3 | 2.5 |
| No.7 | 6.0 | 3.0 | 2.1 | 2.7 | 2.0 | 3.5 |
| No.8 | 5.5 | 3.5 | 2.5 | 2.3 | 1.1 | 3.2 |
| 8 個地震 之總平均 | 5.0 | 3.1 | 3.0 | 2.5 | 1.6 | 2.8 |
| Chi-Chi M.S. | 3.5 | 3.6 | 2.0 | 2.3 | 1.0 | 2.2 |

從本研究針對 8 個不同規模、不同深度、不同距離地震的比較中，可以看出同一類型測站在不同的地震中所得到的 H/V 圖形相當接近；但是在同一地震中不同類型測站之間其圖形則有較大的差異，包括顯著頻率和主放大倍數的差異。這表示 H/V 方法可以把地震規模大小、震源深度、距離遠近等效應去除，進而把測站的效應凸顯出來。集集主震牽動車籠埔斷層的錯動，雖然反應譜和 H/V 圖形都較其它地震偏向低頻，但是 H/V 方法仍然可以把不同地質條件的測站區隔開來。

另外，值得一提的是不管是哪一類型的測站，在所有的地震當中，H/V 圖形都大約在 0.2Hz 附近和 20Hz 附近出現較小的值，亦即在這兩個頻率附近垂直分量具有相對較大的反應值。A 類和 B 類測站的 H/V 圖形幾乎都大於 1，這代表它們的水平分量反應值大於垂直分量的反應值。C 類測站在編號 5、編號 8、集集主震等地震的 20Hz 附近，H/V 圖形有低於 1 的現象。

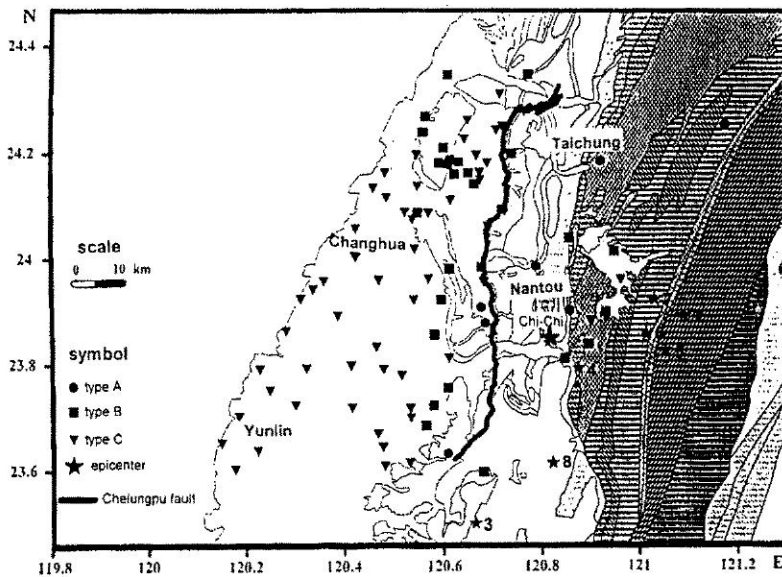


圖 2 測站分類圖。圓形、方形、三角形分別為 A、B、C 類測站。地層年代說明請參考圖 1。

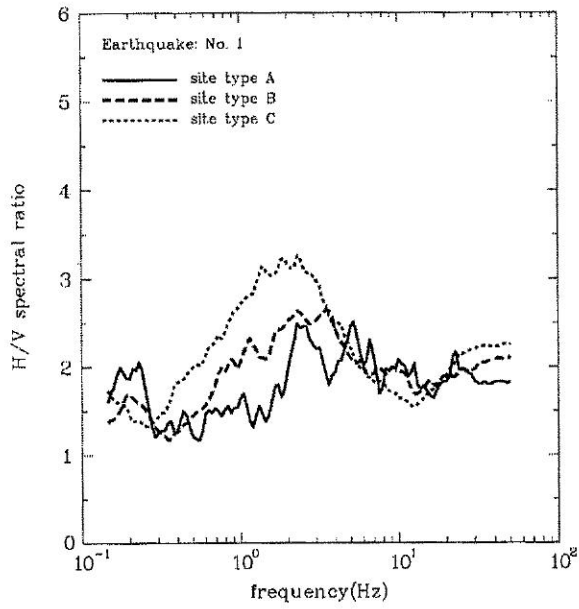


圖 3 編號 1 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

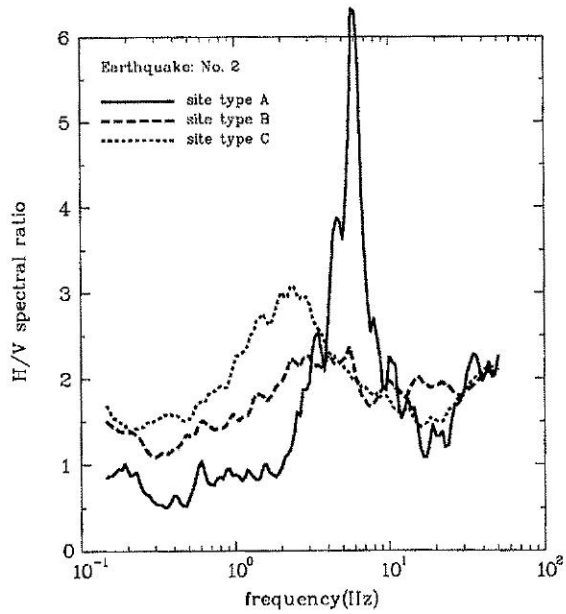


圖 4 編號 2 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

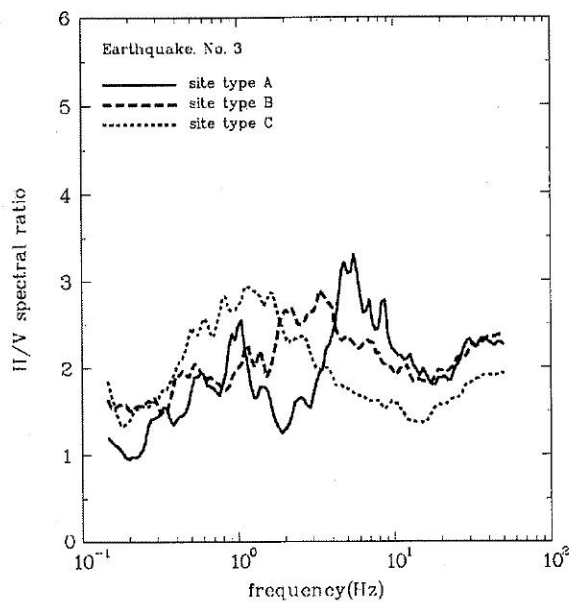


圖 5 編號 3 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

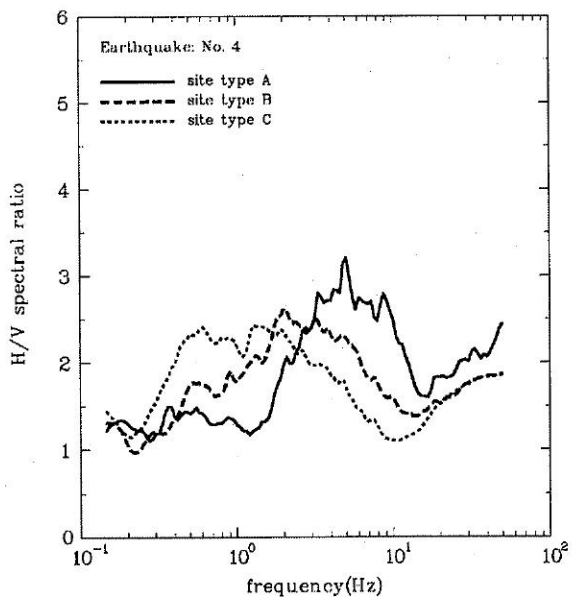


圖 6 編號 4 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

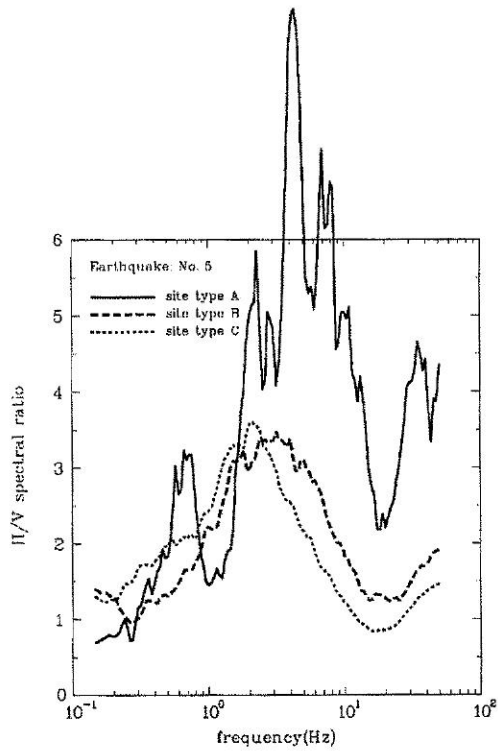


圖 7 編號 5 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

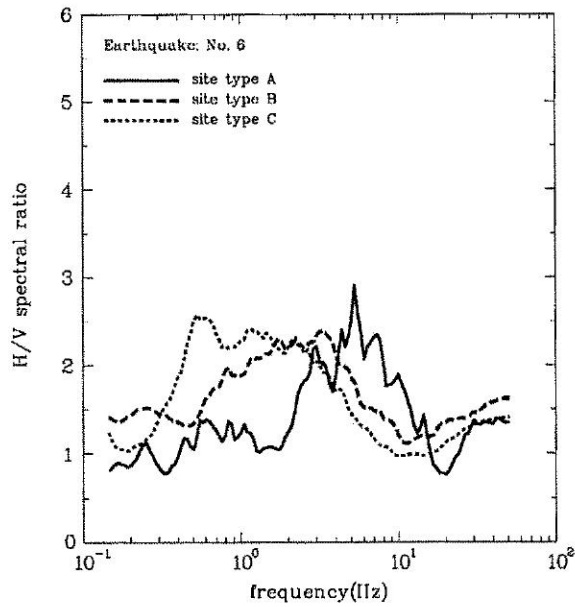


圖 8 編號 6 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

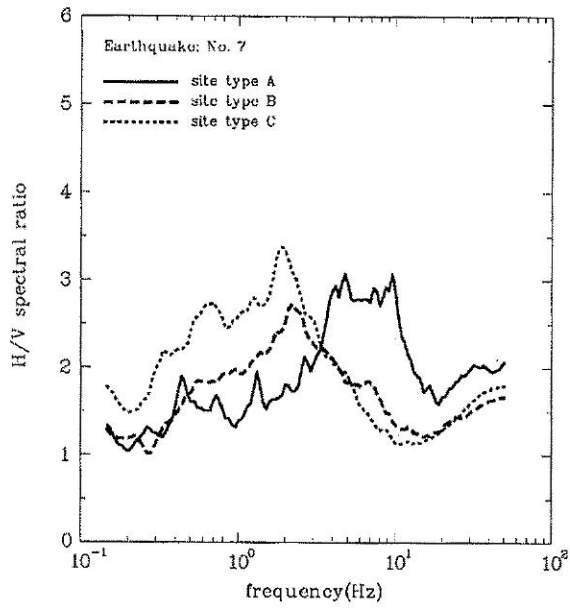


圖 9 編號 7 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

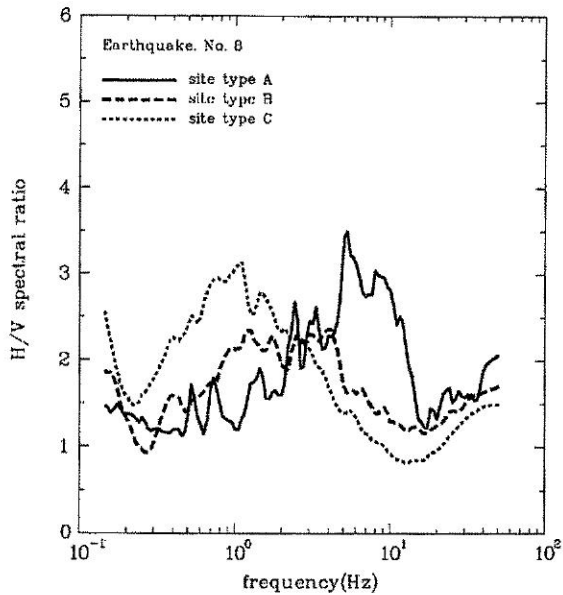


圖 10 編號 8 地震針對三類測站所算的平均反應譜比。

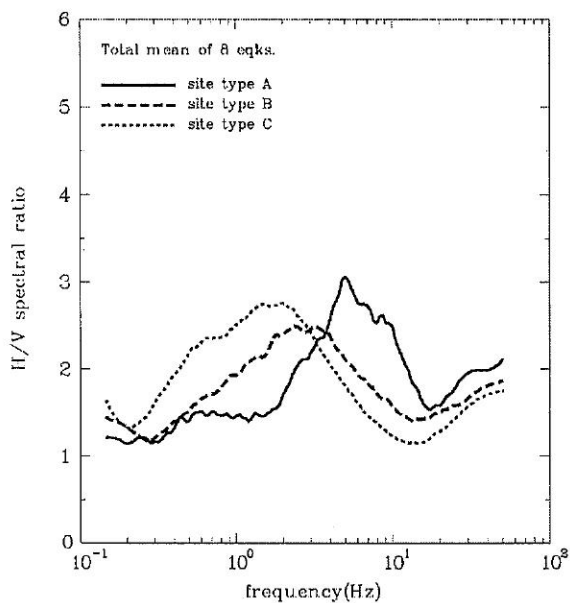


圖 11 8 個地震針對三類測站所算的總平均反應譜比。

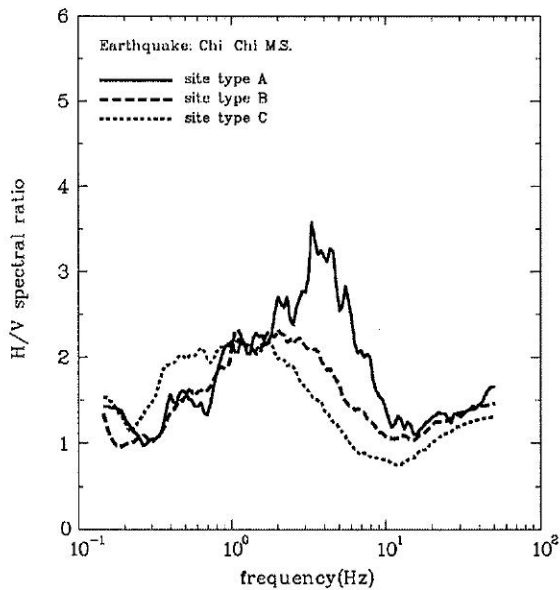


圖 12 集集主震針對三類測站所算的平均反應譜比。

五、結論

本研究選用中央氣象局強震網 1995 至 1999 年間 9 個規模大於 5.3 的大型地震記錄，先用水平(H)與垂直(V)分量反應譜比的方法，配合地質資料將測站屬性由堅硬至鬆軟分為 A、B、C 三類，接著分析不同類測站反應譜比的差異。

研究顯示不同規模、深度、距離的地震記錄，在同一測站上所求出的反應譜比很類似，表示反應譜 H/V 方法可以把場址效應呈現出來，對測站分類可以提供良好的建議。

H/V 圖形的顯著頻率隨著測站類型從 A → B → C 逐漸降低，而主放大值則逐漸增加；集集主震的 H/V 圖形比其它地震偏向低頻，主放大值比其它地震稍小，推論是車籠埔斷層的逆衝上下運動，使得垂直方向振動被加強，以致 H/V 值偏低的現象。

六、誌謝

本研究能夠順利完成，要特別感謝中央氣象局提供豐富的強震記錄供分析。本研究部份經費由南開技術學院校內型研究計畫編號：91-29-C1201-29 支助，也一併致謝。

七、參考文獻

- Atkinson, G. M., 1993. Notes on ground motion parameters for eastern north America. Duration and H/V ratio. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 587-596.
- Dravinski, M., G. Ding and K. L. Wen, 1996. Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 646-654.
- Field, E. H. and K. H. Jacob, 1993. The theoretic response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2925-2928.
- Field, E. H., A. C. Clement, K. H. Jacob, V. Aharonian, S. E. Hough, P. A. Friberg, T. O. Babaian, S. S. Karapetian, S. M. Hovanesian and H. A. Abramian, 1995. Earthquake site response study in Giumri (formerly Leninakan), Armenia using ambient noise observations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 349-353.
- Huang, H. C. and Y. S. Tseng, 2002. Characteristics of soil liquefaction using H/V of microtremors in Yuan-lin area, Taiwan. *TAO*, **13**, 325-338.
- Lee, C. T., C. T. Cheng, C. W. Liao and Y. B. Tsai, 2001. Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1283-1297.
- Lermo, J. and F. J. Chavez-Garcia, 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, **30**, 25-33.
- Theodulidis, N., P. Y. Bard, R. Archuleta and M. Bouchon, 1996. Horizontal-to-vertical spectral ratio and geological conditions: The case of Garner Valley downhole array in southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 306-319.
- Yamazaki, F. and M. A. Ansary, 1997. Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization. *Earth-quake Eng. Struct. Dyn.*, **26**, 671-689.
- Zare, M., P. Y. Bard and M. Ghafory-Ashtiany, 1999. Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dyn.*

Earthquake Eng., 18, 101-123.

郭鎧紋，1994。中央氣象局強地動觀測網之地質特性研究(三)——嘉南地區，中央氣象局八十三年度研究報告，第 CW83-1A-12。

經濟部中央地質調查所，1999。台灣地質圖。
李位育，2000。結構耐震設計概論，台北市文笙書局。

A Study of Response Spectral Ratio in West-Central Taiwan

Tian-Pau Chang¹, Guey-Kuen Yu² and Feng-Jiao Liu¹

ABSTRACT

In this paper, the accelerograms recorded by the network of Taiwan Strong Motion Instrumentation Program of the Central Weather Bureau are used to analyze the characteristics of the response spectral ratios. The data consists of 9 earthquakes with $M_L \geq 5.3$ which occurred in Taiwan area between 1995 and 1999.

Firstly, we classify the station sites into three types based on both the spectral ratio of horizontal to vertical components(H/V) and geological data, from hardness to softness, called type A, B and C, respectively. Then, we investigate the differences of H/V spectral shape among three types of site. The results show that the H/V spectral shape to the specific site calculated from different events is very similar; also the site classification results obtained by H/V method are compatible with the geological data.

For any event, the dominant frequency of H/V spectral ratio decrease gradually with the site type from A \rightarrow B \rightarrow C, but the dominant amplification factor is increased. For Chi-Chi mainshock, both the dominant frequency and amplification factor are lower than those of any other event.

Key words: response spectral ratio, site classification, Chi-Chi mainshock

1.Department of Electronic Engineering, Nankai College, Nantou, Taiwan, ROC

2.Department of Civil Engineering, Van-Nung Institute of Technology, chungli, Taiwan, ROC