

ANALYSIS OF ABNORMAL AMPLIFICATION OF PEAK GROUND ACCELERATION OF JHUIZHUU WEATHER STATION BY COMPLEX DEMODULATION METHOD

CHENG-YU LEE¹, JENNY LIU¹, YUH-CHI KAO¹, CHENG-HAO HUANG¹, RUO-HAN MA¹,
LI-CHENG WANG¹ AND KUANG-JUNG CHEN¹

1. Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Some anomalous amplified peak ground accelerations at Jhuzihhu Weather Station were found. This study used the complex demodulation to obtain the time-frequency solutions of the earthquakes that showed anomalous amplified which recorded in Jhuzihhu Weather Station. The contents of the frequencies span near the arrived time of PGA were resolved to explain the possible geological interpretation of the anomalous amplification. We found that the peak ground accelerations at Jhuzihhu Weather Station were larger than those at Anbu Weather Station and Taoyuan Elementary School by ratios of between 1 and 40. The amplified ratios in East-west component is larger than the North-South, and vertical component respectively. The values of PGAs at Jhuzihhu Weather Station were found to have predominated frequencies at the ranges 7.2 ± 0.3 Hz in the vertical component, 8.0 ± 1.0 Hz in the NS component, and 7.8 ± 0.8 Hz in the EW component. Comparing to the same earthquake, the values of PGAs at Anbu Weather Station and Taoyuan Elementary School were completely different from those at Jhuzihhu Weather Station. Most of the predominated frequencies are between 1.5 ± 0.5 Hz, 2.0 ± 1.0 Hz, and 2.0 ± 1.4 Hz in the vertical component, NS component and EW component respectively. From the theoretic modelling calculation, the abnormal amplification in PGA at Jhuzihhu Weather Station is due to a soft flexible layer with a thickness of 12.5 ± 1.7 meters.

Key words: complex demodulation, PGA abnormal amplification, site effect

1. Cheng-Yu Lee, e-mail: bfr1973@yahoo.com.tw

以複數解載法分析竹子湖強震站最大地動加速度的異常放大現象

李正宇¹、劉貞玲¹、高毓琦¹、黃丞嶸¹、馬若涵¹、王立程¹、陳光榮¹

1. 國立臺灣師範大學地球科學研究所

摘 要

根據對中央氣象局竹子湖強地動觀測站(TAP056)自1995年至2008年地震資料,發現竹子湖測站與鄰近測站(鞍部測站(TAP066)及桃源國小測站(TAP094))的最大地動加速度值(Peak Ground Acceleration, PGA)相較之下,有異常放大現象。為了探討此現象,本研究使用複數解載(complex demodulation),解析出竹子湖測站地震事件紀錄的全時頻圖,針對出現異常放大現象的地震,找出在PGA時間點上的頻率分布,進而找出最大加速度之主要頻率,由其頻率特性進一步推測造成此現象的可能原因。

竹子湖測站分別與鞍部測站及桃源國小PGA比值約在1~40之間;竹子湖測站PGA放大現象多以東西分量放大最多,南北分量居次,垂直分量最小。

竹子湖測站垂直分量上的PGA震幅最大頻率集中於 7.2 ± 0.3 (Hz)之間、南北分量PGA震幅最大頻頻率集中於 8.0 ± 1.0 (Hz)之間、東西分量PGA震幅最大頻率集中於 7.8 ± 0.8 (Hz)之間。相同事件群中,鞍部氣象站及桃源國小測站之PGA震幅最大頻率和竹子湖測站不同,垂直分量集中於 1.5 ± 0.5 (Hz)之間,南北分量集中於 2.0 ± 1.0 (Hz)之間;東西分量集中於 2.0 ± 1.4 (Hz)之間。竹子湖測站遷站後PGA值的異常放大現象仍未完全消除。

本研究推論造成竹子湖PGA異常放大的鬆軟層厚度為 12.5 ± 1.7 m。

關鍵詞：複數解載、PGA異常放大、場址效應

1、緒 言

臺灣位於環太平洋地震帶上，受到歐亞板塊與菲律賓海板塊相互碰撞的影響，1991年1月至2016年3月發生地震合計9,110個，顯著有感地震3,001個，小區域地震6,109個(中央氣象局，2016)，因此預防地震所造成之破壞、減低震災的損失，就一直是政府的施政重點。

地震災害的程度，與當地所受到的地動加速度大小相關；地動加速度在同一地區、同一地震事件上，一般不會相差太多，然而中央氣象局自由場強地動觀測網架設於臺北地區陽明山竹子湖氣象站之強震儀(TAP056)(後稱竹子湖測站)所記錄的地動加速度峰值(PGA)經常異常高於其他測站(溫國樑等(1998)、牟鐘香(2004)、李正宇(2008)、陳中保(2008)、陳平護等(2004)等)。

溫國樑等(1998)發現竹子湖測站及鞍部測站(TAP066)同樣位於大屯山區、均由安山岩流及安山岩質碎屑構成，且兩測站之間距離相差不遠，當地震發生時，鞍部測站相較於竹子湖測站不易收到地震紀錄。由頻譜圖來看，竹子湖測站無論地震之大小或來源不同，地震事件紀錄各頻率能量分布大致相同，而鞍部測站地震事件紀錄各頻率能量分布則會隨著地震遠近不同而有所改變，此現象顯示出影響鞍部測站地震紀錄最大原因為地震之震源特性，而影響竹子湖測站地震紀錄最大原因為當地的場址效應，也是造成其最大地動加速度異常放大的原因。

牟鐘香(2004)也針對此兩測站進行場址效應的探討，發現於1995年到2002年之間，竹子湖測站和鞍部測站收到地震的次數大不相同，前者收到85次，而後者只收到25次，經測站檢查後發現非儀器故障造成此異常現象。由地震觀測、微地動測量、淺層震測等方法與雙站法和單站法交叉進行地震資料和微地動資料的討論，研判是由設置地震儀草坪之表層速度較低的回填土(厚度0.8公尺)造成此異常放大現象。

另外陳平護等(2004)針對竹子湖測站進行分析研究，應用音頻大地電磁法探測地層的電阻率構造，發現竹子湖測站的地層電阻率方向異性強烈，異質性嚴重。在竹子湖測站北方的噴氣孔位址N45°E方向呈現低於50 Ω -m的低電阻率帶，此電阻率帶從地表延伸至400多公尺深。研判此低電阻率帶是溫泉儲集帶，以汽多水少，溫度高，壓力大的狀態存在，而此地下流態物質為竹子湖測站異常放大原因。

竹子湖強震站收到的地震紀錄，無論地震大小、震源位置不同，PGA值皆有異常放大現象，經檢查發現非儀器故障也非人為因素，此異常放大現象，對於地震資料的統計及震度報告有嚴重的干擾，故本研究根據地震資料分析結果，對竹子湖測站PGA異常放大現象提出探討，研判其可能造成之原因。

影響地震波傳至地面時地動大小的因素有三，包括震源效應(source effect)、路徑效應(path effect)、及場址效應(site effect)。為了確定竹子湖測站PGA異常放大現象為場址效應造成，本研究使用下列資料選取與處理條件：1、固定震源效應：選取不同測站所記錄相同之地震事件，固定震源效應影響；2、減少路徑效應：本研究除竹子湖測站外，另選用相鄰兩測站做比較，分別為鞍部測站(TAP066)及桃源國小測站(TAP094)，此三測站間的距離遠小於震源與三測站間的距離，減少路徑效應之影響；3、分析場址效應：由於地動加速度影響因素中，前兩項因素影響降低，故分析結果主要影響因素應為場址效應。

牟鐘香(2004)利用傅氏頻譜找出竹子湖測站對鞍部氣象站的主要放大頻率範圍在 8 Hz~10 Hz之間，此方法顯示地震事件記錄時間內的全頻率加總相對峰值，無法顯示PGA時間點上的頻率分布狀況，為了研究PGA瞬時頻率分布，本研究運用複數解載法(Complex demodulation)，來探討PGA瞬時各頻率分量之震幅大小，以分析場址效應對主要頻率及造成PGA異常放大的影響。

本研究可推廣找出各測站造成PGA的最大震幅頻率，作為工程上防震設計的參考。

2、研究方法

2.1 複數解載

本研究方法主要為複數解載，它可以用來濾取時間系列中的單一頻率分量，更可以用來查驗時間序列中某一頻率分量之振幅(Amplitude)及相位(phase)隨時間變化情形，進而分析出資料所能提供的任何單一頻率所對應之震幅及相位的時間函數變化；因此，也可進一步將所有頻率所對應之震幅及相位的時間函數變化做成時頻圖，並進而分析某一時間各不同頻率對應的震幅。Bingham, Godfrey及Tukey在1967年提出以FFT解決時序函數問題後FFT被廣泛討論，延伸出很多種技術。複數解載是這些延伸

技術中用來處理時序及頻率域問題的重要技術演進。此技術已被廣泛應用到各領域：電子、醫學、電信、通訊…等。Banks(1975) 首次在地球物理上運用此技術，他用來求出地磁場日變化的解調係數及相位，並探討深層地磁場探測的問題。在臺灣Chen *et al.* (1985)首先應用複數解載於地磁資料的分析研究，何英銳(2003)利用複數解載方法解析台灣崙坪地磁資料。Chen *et al.* (2007)利用該方法找出地震活動度與地磁場的相關性。

複數解載使用到的工具包含有：快速傅立葉轉換(FFT)、餘弦濾波(cosine bell filter)、頻率平移(shift)及傅立葉反轉換(inverse FFT)。

假設有一個週期函數含有固定頻率 f_0 ($\omega_0 = 2\pi f_0$)，此時序函數可表示成：

$$X(\omega, t) = A \cos(\omega t + r) \quad (1)$$

其中頻率分量 f_0 稱為中央頻率(central frequency)，式中 A 可解釋成 f_0 的振幅(amplitude)， r 則為 f_0 的相(phase)。將(1)式以Euler's identities展開並且乘以時間序列的變數位移到零的頻率，可將每個頻帶產生的序列定義如下：

$$X_s(t) = X(\omega_0, t) \exp(-i\omega' t) \quad (2)$$

如此 $X_s(t)$ 的數學意義為 $X(\omega_0, t)$ 在頻率域中向左平移 $(\omega'/2\pi)$ 後的時序函數。將 $X(\omega_0, t)$ 以Euler's identities展開，則 $X_s(t)$ 成為：

$$\begin{aligned} X_s(t) &= X(\omega_0, t) \exp(-i\omega' t) \\ &= (A/2) (\exp(i(\omega_0 t + r)) + \exp(-i(\omega_0 t + r))) \exp(-i\omega' t) \\ &= (A/2) (\exp(-i((\omega' + \omega_0) t + r)) + \exp(-i((\omega' - \omega_0) t - r))) \end{aligned} \quad (3)$$

令 $\omega' = \omega_0 + \delta\omega$ 則

$$X_s(t) = (A/2) (\exp(-i((2\omega_0 + \delta\omega) t + r)) + \exp(-i(\delta\omega t - r))) \quad (4)$$

若是對 $X_s(t)$ 做頻率平移時，取 ω' 趨近於 ω_0 ，即 $\delta\omega \rightarrow 0$ ，則 $\delta\omega t \ll r$ ， $\delta\omega t$ 可忽略不計，於是 $X_s(t)$ 可簡化成：

$$X_s(t) = (A/2) (\exp(-i((2\omega_0 + \delta\omega)t + r)) + \exp(ir)) \quad (5)$$

此時若對 $X_s(t)$ 做濾波處理，可得到一精簡的時間序列函數 $X_d(\omega_0, t)$ ：

$$X_d(\omega_0, t) = (A/2) \exp(ir) \quad (6)$$

由此 $X_d(\omega_0, t)$ 中可解出振幅及相位：

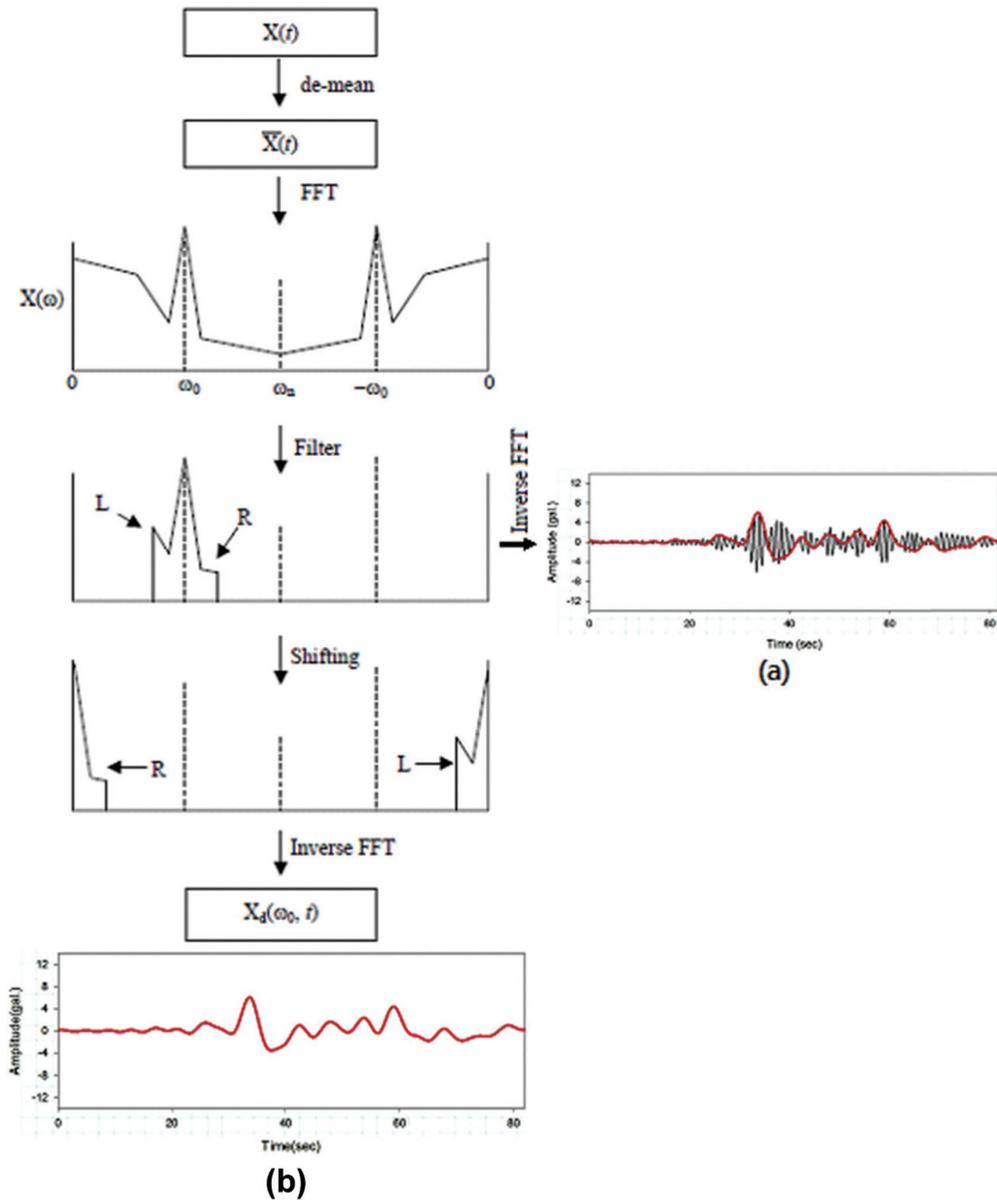
$$r(t) = \tan^{-1} (\text{Image}(X_d(\omega_0, t)) / \text{Real}(X_d(\omega_0, t))) \quad (7)$$

$$A(t) = X_d(\omega_0, t) / \cos(r(t)) \quad (8)$$

此處濾波主要目的為濾除所有其他非觀測目標的雜訊，即使輸入的原始資料是由多種頻率的混合而成，亦可因此獨立出所需要的頻率的準確震幅及相位隨時間的變化情形，處理程序如圖一。再將各個頻率分量資料疊合即可得到時頻圖，亦可將某個時間點的各頻率對應的震幅大小繪出成瞬時頻譜圖。

2.2 研究資料

本研究使用的台灣地區地震資料，為交通部中央氣象局TSMIP計畫所提供的加速度波形三分量記錄(垂直分量，東西分量和南北分量)，時間為地震觸發後120秒內，取樣頻率為1/200秒或1/250秒。此計畫中，竹子湖測站(TAP056)於1994年啟用，在2004.4.27曾因異常放大等原因而遷於20公尺外的地區，地理經度東經121.54，地理緯度北緯25.16，高程為470公尺。為了與竹子湖測站做比較，本研究另外選取與竹子湖測站相鄰的兩個地震測站，鞍部測站(TAP066)與桃源國小測站(TAP094)。鞍部測站於1992.9.30啟用，地理經度東經121.53，地理緯度北緯25.18，高程為826公尺。桃源國

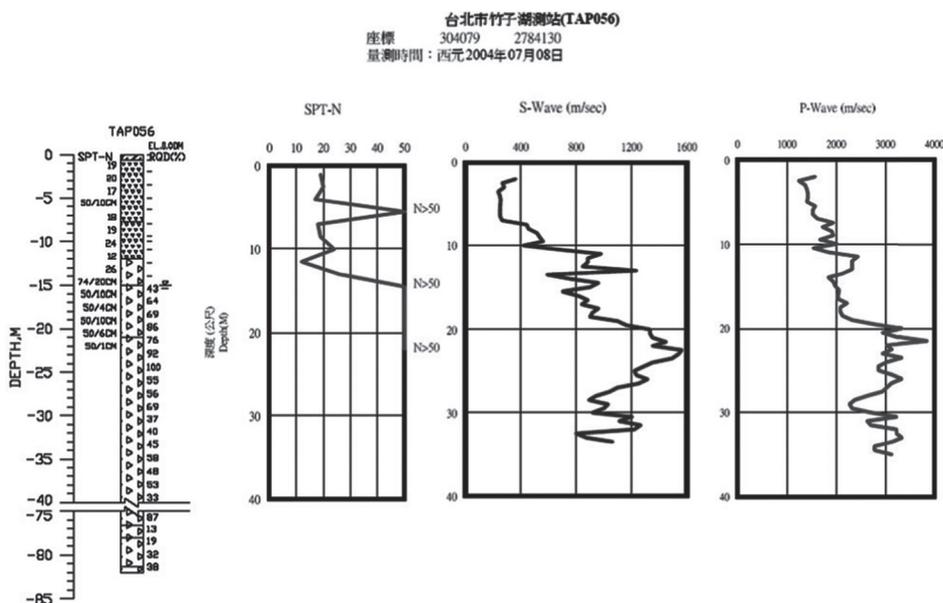


圖一、複數解載數位處理流程。X(t)是原始的波型記錄；(a)圖中的黑線圖形為X(t)，紅線為高頻波譜經過頻率域濾波、未經過頻率平移直接傅立葉反轉換後得到的加速度隨時間變化；(b)經過頻率域濾波與頻率平移後傅立葉反轉換得到之目標頻率振幅之絕對物理量隨時間的變化。

Figure 1. Flow chart of Complex demodulation. X(t) is the original waveform record (a) The black line graph is X(t). Red line: the high-frequency spectrum in the figure is the time-frequency map obtained by frequency-domain filtering without inverse Fourier transform of frequency translation; (b) The time domain of the amplitude changes that, after complex demodulation.

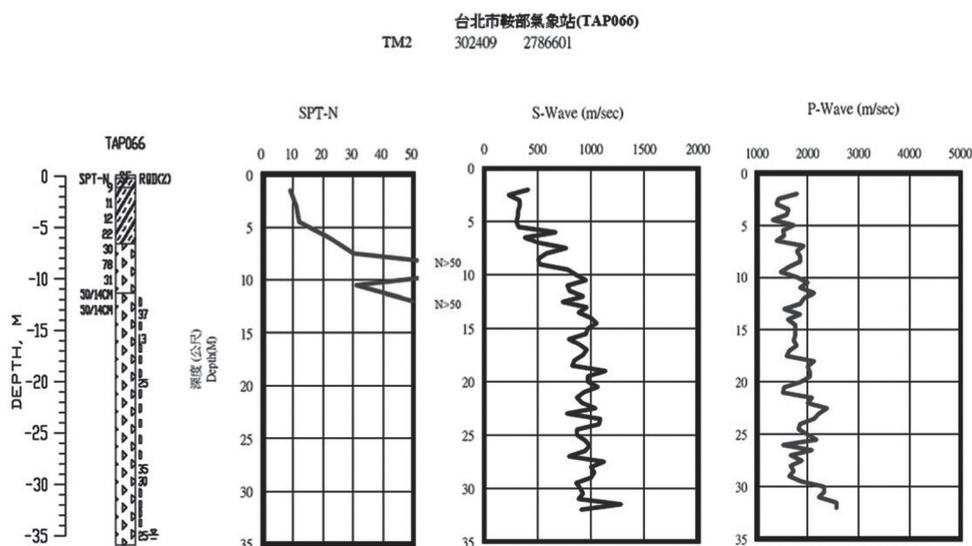
小測站於1995.2.9啟用地理經度東經121.48，地理緯度北緯25.14，高程為20公尺。

圖二、圖三、圖四為交通部中央氣象局與財團法人國家實驗研究院國家地震工程



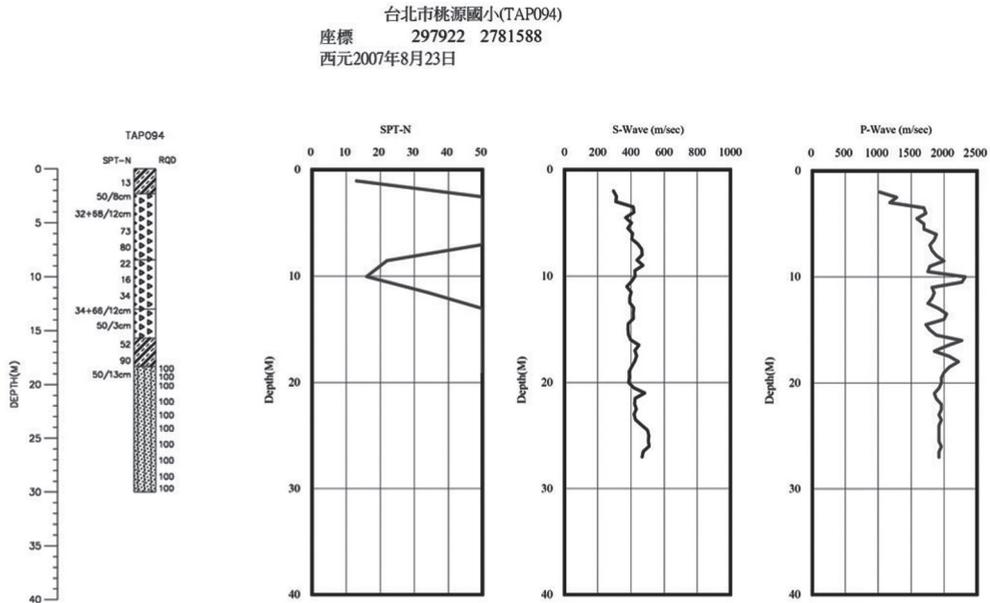
圖二、竹子湖地震波速及地層柱狀圖(中央氣象局)。

Figure 2. Seismic velocity and stratigraphic histogram of Jhuzihhu Weather Station.



圖三、鞍部測站地震波速及地層柱狀圖(中央氣象局)。

Figure 3. Seismic velocity and stratigraphic histogram of Anbu Weather Station.



圖四、桃源國小測站地震波速及地層柱狀圖(中央氣象局)。

Figure 4. Seismic velocity and stratigraphic histogram of Taoyuan Elementary School.

研究中心，利用懸盪式鑽井所測得的地震波速剖面圖。鞍部測站的S波波速在深度10公里內變化較大，但深度超過10公里的波速就穩定在1,000 m/sec左右，P波波速大約穩定1,600到2,100 m/sec之間。桃源國小測站的S波波速則相當穩定的約400 m/sec，自深度10公里以下的P波波速亦穩定的維持在2,000 m/sec左右。鞍部測站和桃源國小測站的地下地震波速度大致上都維持一定的速度範圍，但竹子湖測站的地震波速度隨深度變化大，S波速度從300到1,600 m/sec不等，P波波速則從1,200到4,000 m/sec不等。

本研究所使用之地震資料，自1995年至2008年，選取條件為臺北盆地強震站竹子湖測站、鞍部測站及桃源國小測站三測站皆有紀錄的地震事件。中央氣象局在2004年4月27日將竹子湖測站遷移至20公尺外之處，故遷站後資料挑選條件和遷站前不同，遷站後共有13筆資料中有6筆事件已無異常放大現象，但仍有7筆事件有異常放大事件。因此遷站後挑選條件改為竹子湖和鞍部測站或桃源國小測站中任一測站有記錄者，且除去6筆已無異常放大現象之地震事件。在剔除品質不佳的地震事件後，本研究共選取23個事件來做分析討論(表一及圖五)。

表一、本研究所用地震資料參數，日期相同之資料以不同編號區別

Table 1. Catalog of the earthquake events used in this study.

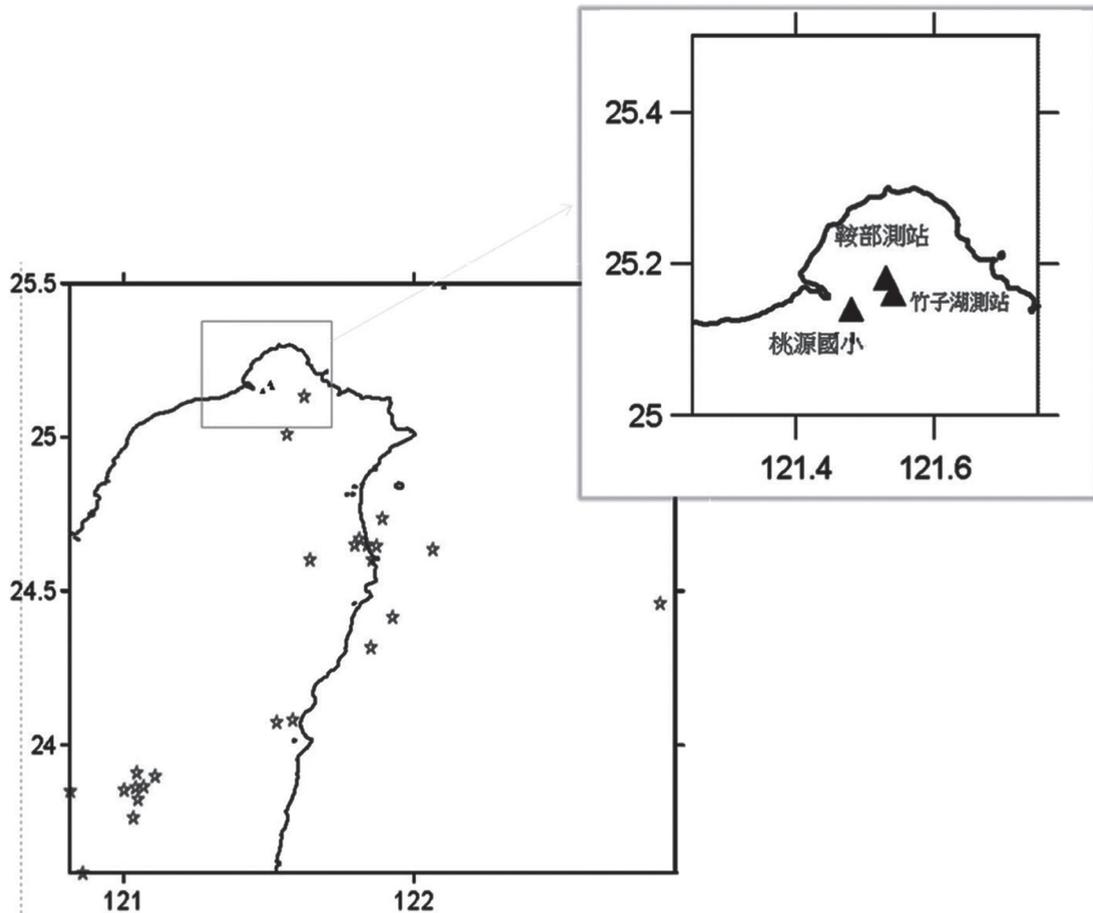
事件	經度	緯度	深度	規模
19951201	24.606	121.642	45.07	5.72
19990507	24.739	121.892	4.17	5.44
19990920-585	23.853	120.816	8.00	7.30
19990920-558	23.912	121.044	7.68	6.44
19990920-421	23.865	121.067	12.49	6.70
19990920-795	23.862	121.041	12.53	6.66
19990920-704	25.137	121.622	11.57	3.38
19990920-811	23.585	120.857	8.57	6.59
19990922-077	23.826	121.047	15.59	6.80
19990922-345	23.765	121.031	17.38	6.20
19990925	23.854	121.002	12.06	6.80
20000610	23.901	121.109	16.21	6.70
20000910	24.085	121.584	17.74	6.20
20010614	24.419	121.928	17.29	6.30
20020515	24.651	121.872	8.52	6.20
20040509	24.569	121.766	69.16	5.49
20040808	24.670	121.815	81.18	4.98
20040830	24.605	121.859	78.13	4.73
20041015	24.462	122.852	91.03	7.10
20041023	25.013	121.564	9.49	3.73
20050305-009	24.655	121.841	6.39	5.90
20050305-173	24.653	121.798	6.95	5.96
20050601	24.637	122.066	64.78	6.00

3、結果與討論

3.1 各測站PGA比較

當地震發生後，地震測站接收到的加速度型三分量紀錄，各個分量的最大值即是該分量的PGA值，三個分量PGA中的最大值即是此地震事件該測站的PGA值。

表二列出各地震事件三個測站的三分量PGA的值，比較資料發現竹子湖測站及桃



圖五、本研究所用地震之震央分佈圖。紅色星代表地震震央，黑色三角代表三測站(竹子湖測站、鞍部測站、桃源國小測站)。

Figure 5. The epicentral distribution of the earthquakes used in this study. Red star on behalf of the earthquake epicenter, black triangle on behalf of the three stations (Jhuzihhu Weather Station, Anbu Weather Station, Taoyuan Elementary station).

源國小測站最大PGA的方向主要發生在東西分量，而鞍部氣象站最大PGA方向主要發生在南北分量。

圖六發現在本研究使用的規模範圍裡(規模3.38~7.3)，除了19990920-558及19990925兩次地震事件中，桃源國小測站的PGA值較竹子湖測站大外，其餘21筆事件中，不論震源位置、地震規模大小，竹子湖測站的PGA值皆比較部測站和桃源國小測站大，其比值在1~40之間。仔細將各分量分別比較，會發現除了桃源國小測站的垂直

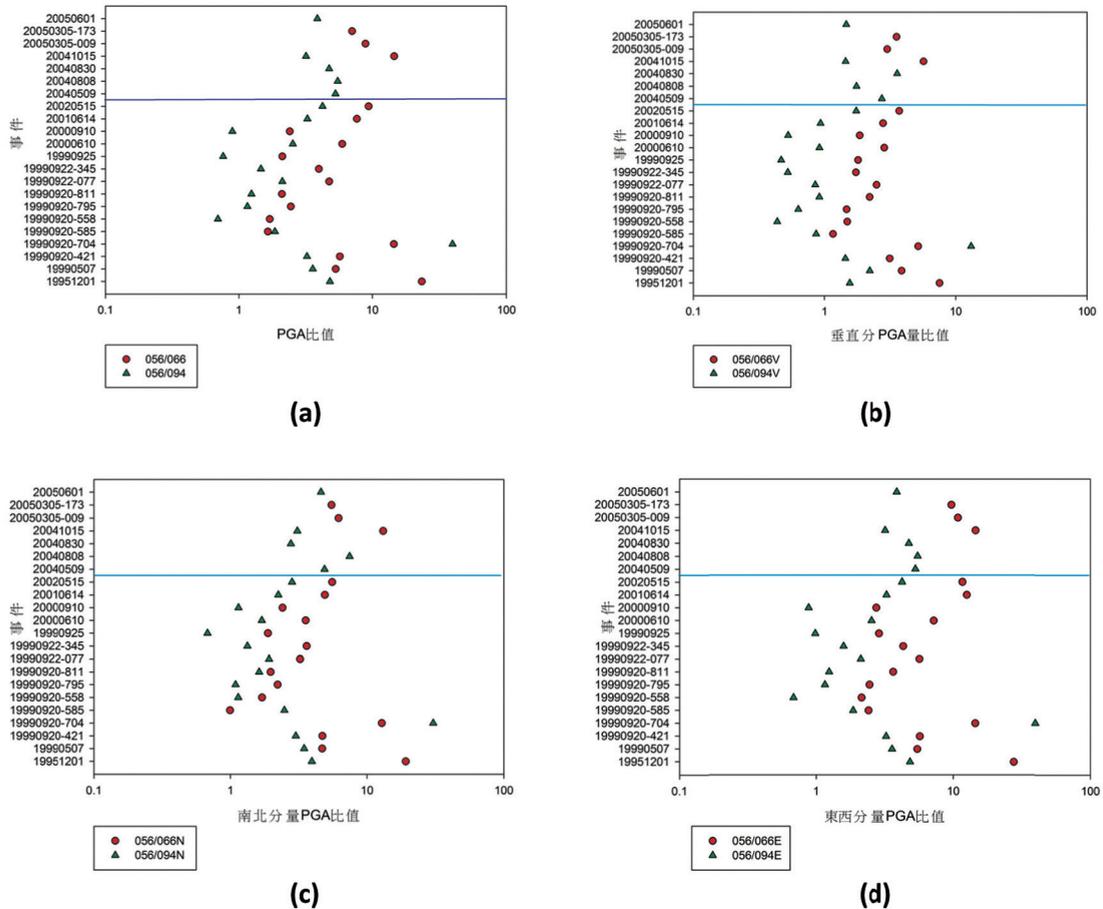
表二、各測站PGA值(紅色表示各站最大分量)
Table 2. The PGA value of each station (maximum red)

事件	竹子湖測站			鞍部氣象站			桃園國小測站		
	垂直分量	南北分量	東西分量	垂直分量	南北分量	東西分量	垂直分量	南北分量	東西分量
19951201	13.162	69.242	84.481	1.747	3.607	3.053	8.439	17.553	17.456
19990507	7.566	15.368	17.387	1.954	3.270	3.182	3.417	4.438	4.859
19990920-421	12.367	39.867	54.786	3.937	8.456	9.599	8.577	13.241	16.922
19990920-704	125.052	201.198	386.077	24.166	15.676	26.641	9.548	6.605	9.73
19990920-585	24.668	70.858	117.625	21.237	71.286	48.747	28.544	28.544	63.163
19990920-558	4.168	10.800	10.587	2.792	6.333	4.934	9.542	9.468	15.486
19990920-795	4.519	13.307	15.331	3.063	6.001	6.254	7.147	12.203	13.236
19990920-811	2.296	7.453	7.952	1.039	3.784	2.178	2.51	4.588	6.399
19990922-077	6.556	22.777	33.438	2.628	7.035	5.898	7.7	11.878	15.796
19990922-345	3.118	13.314	14.614	1.796	3.678	3.386	5.933	9.991	9.215
19990925	3.477	9.748	10.947	1.927	5.175	3.809	7.43	14.343	11.122
20000610	7.662	24.562	41.039	2.685	6.905	5.692	8.368	14.461	16.17
20000910	6.803	23.693	23.360	3.661	9.837	8.496	12.857	20.664	26.516
20010614	14.102	42.883	66.892	5.049	8.731	5.319	15.1	19.124	20.524
20020515	16.456	36.129	60.941	4.436	6.501	5.218	9.418	12.78	14.389
20040509	6.497	36.412	47.313				2.375	7.452	8.933
20040808	4.908	23.771	30.997				2.8	3.189	5.636
20040830	8.696	13.883	35.627				2.431	5.008	7.512
20041015	23.04	89.347	103.167	4.051	6.811	7.085	15.895	28.921	32.388
20050305-009	12.625	31.434	45.087	4.199	5.071	4.164			
20050305-173	10.763	31.397	40.302	3.038	5.714	4.151			
20050601	8.166	41.843	51.143				5.573	9.097	13.209

分量(V)部分比竹子湖測站大外, 竹子湖測站在各分量上都有較大的地動加速度值, 放大倍率在1~40之間, 且在東西分量上有較大的放大倍率。

3.2 PGA瞬時頻率分布探討

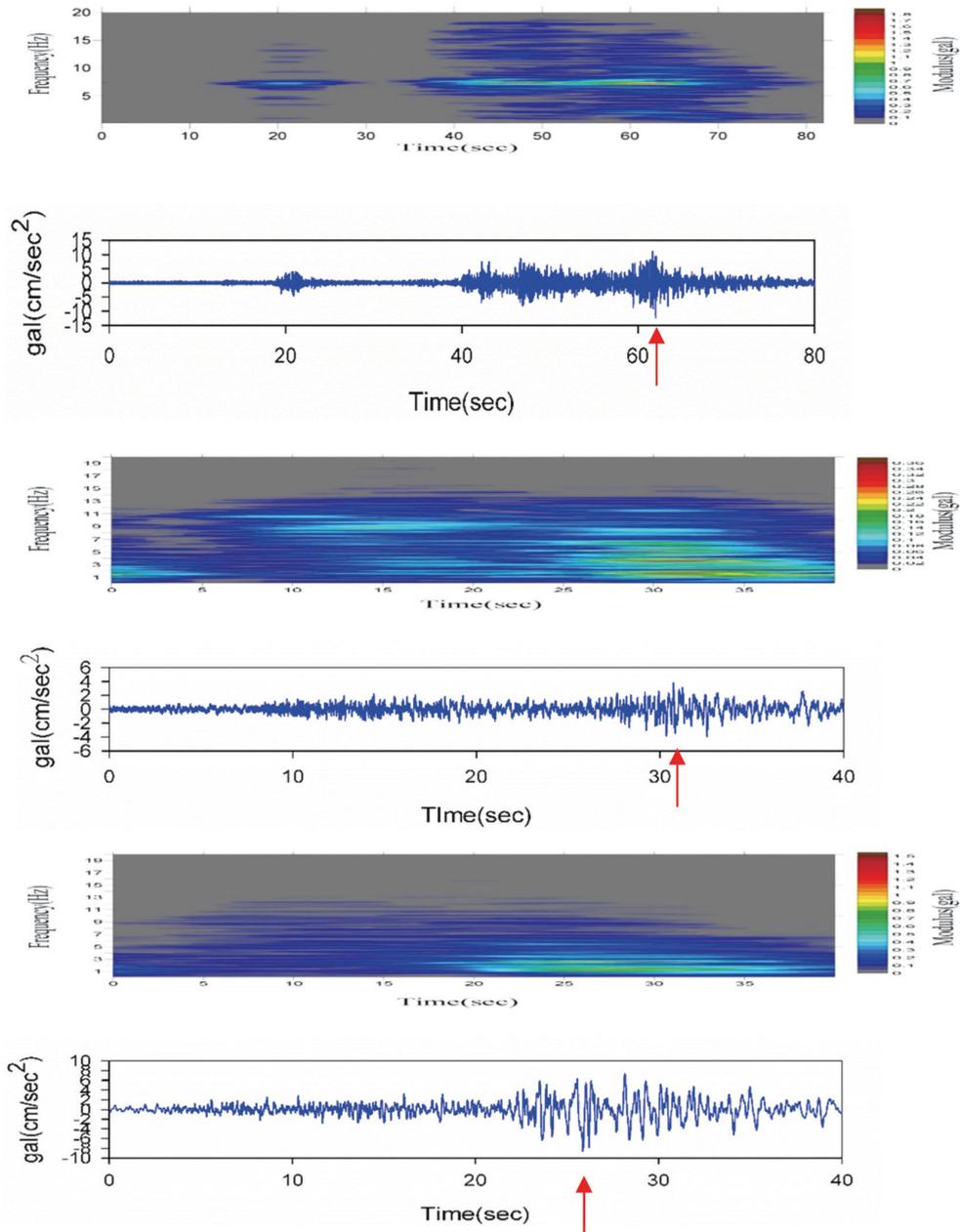
將地震紀錄經過複數解載計算後, 可得各分量時頻圖(如圖七、圖八、圖九)。由時頻圖中找出PGA發生時間的時頻剖面圖, 即是在PGA發生瞬時各頻率的震幅(如圖



圖六、所有地震事件之各測站PGA於各分量比值，(a)為總PGA、(b)垂直、(c)南北、(d)東西分量比值，紅色點代表竹子湖與鞍部測站比值、綠色點代表竹子湖與桃源國小測站比值。藍色線下方表示遷站前事件，藍色線上方表示遷站後事件。

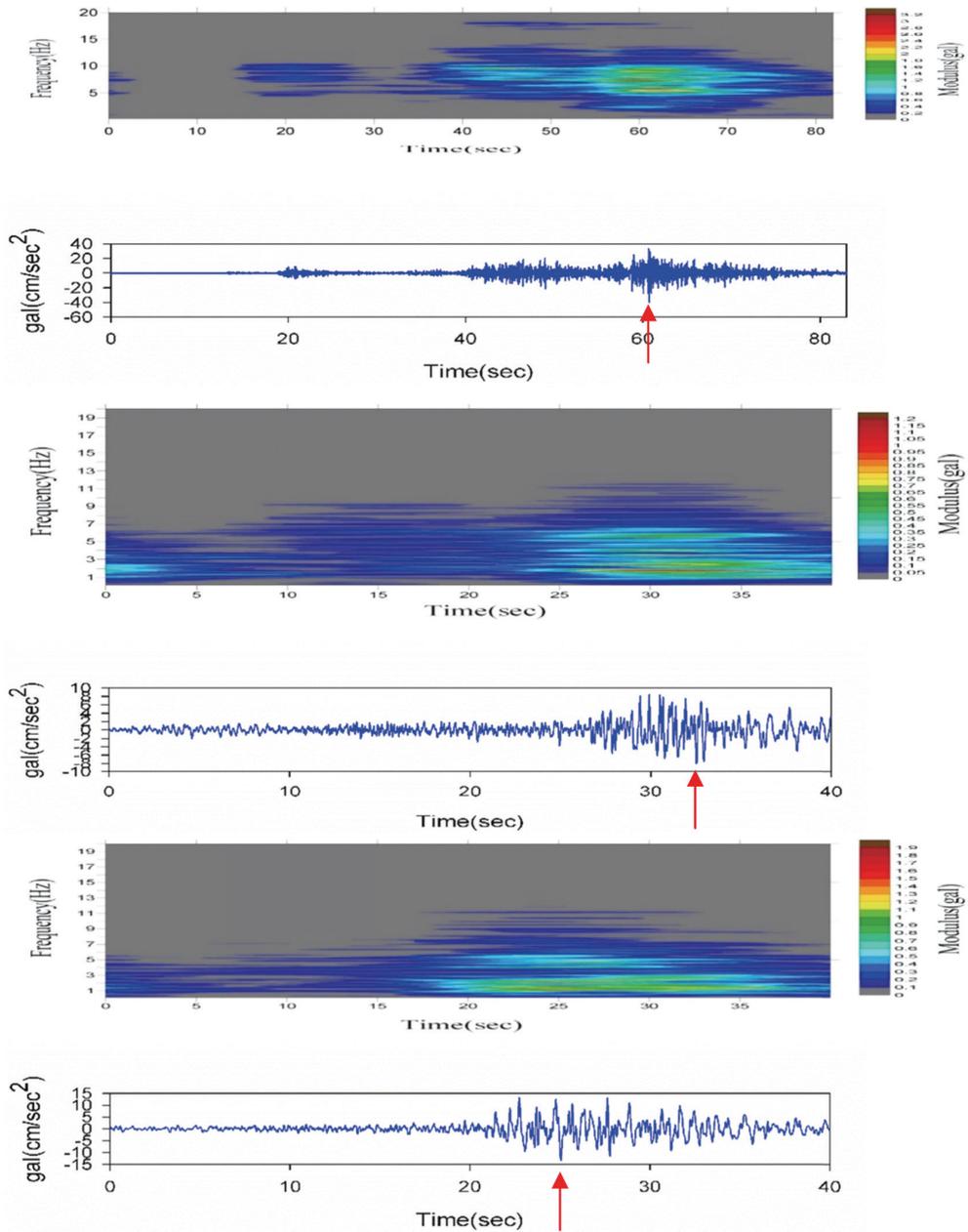
Figure 6. The ratios of PGA of all events and stations in each components in this study. (a) final PGA (b) vertical component (c) North-South component (d) East-West component. (green point represents the Jhuzihhu and Taoyuan elementary station ratio, blue line shows the event before the relocation, and the blue line indicates the event after the move.

十)，本研究將PGA瞬時震幅最大的頻率稱為震幅最大頻率。將每個事件三測站各個分量的震幅最大頻率整理成表三並繪成圖十一(a)、(b)、(c)。可得下列結果：遷站前竹子湖測站垂直分量上的PGA震幅最大頻率集中於 7.2 ± 0.3 (Hz)之間；南北分量PGA震幅最大頻頻率集中於 8.0 ± 1.0 (Hz)之間，東西分量PGA震幅最大頻率集中於 7.8 ± 0.8 (Hz)之間，相同事件群中，鞍部氣象站及桃源國小測站之PGA震幅最大頻率卻和竹子



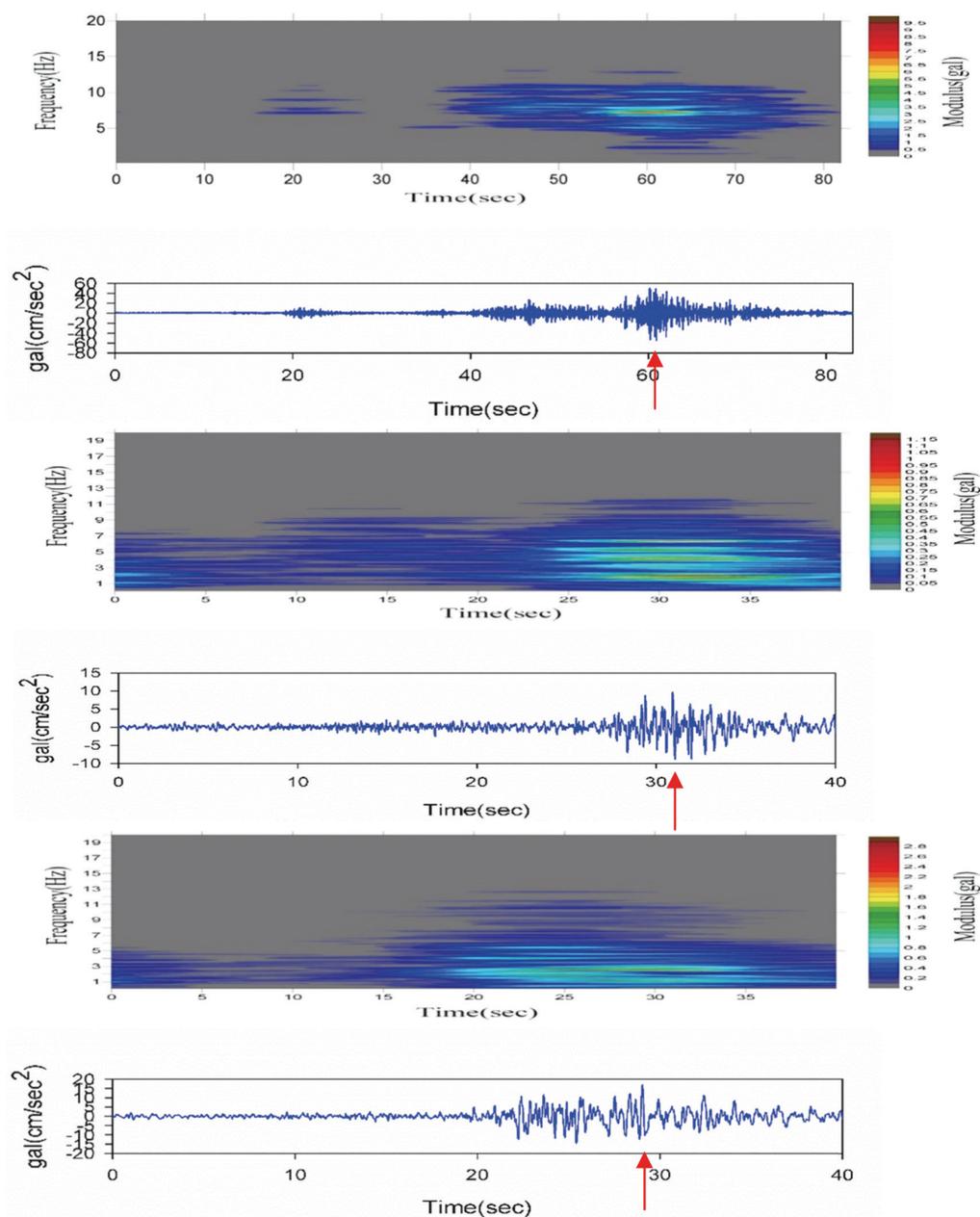
圖七、19990920-421地震垂直分量之時頻圖。從上至下分別為竹子湖測站(TAP056)、鞍部測站(TAP066)、桃源國小測站(TAP094)，時頻圖下為對應之原始加速度波形圖。紅色箭頭標示PGA瞬時。

Figure 7. The time-frequency spectrogram of the event 19990920-421 in vertical component of the stations TAP056, Tap066 and TAP094, respectively. The corresponding acceleration seismogram is shown in the bottom. The red arrow marks the PGA moment.



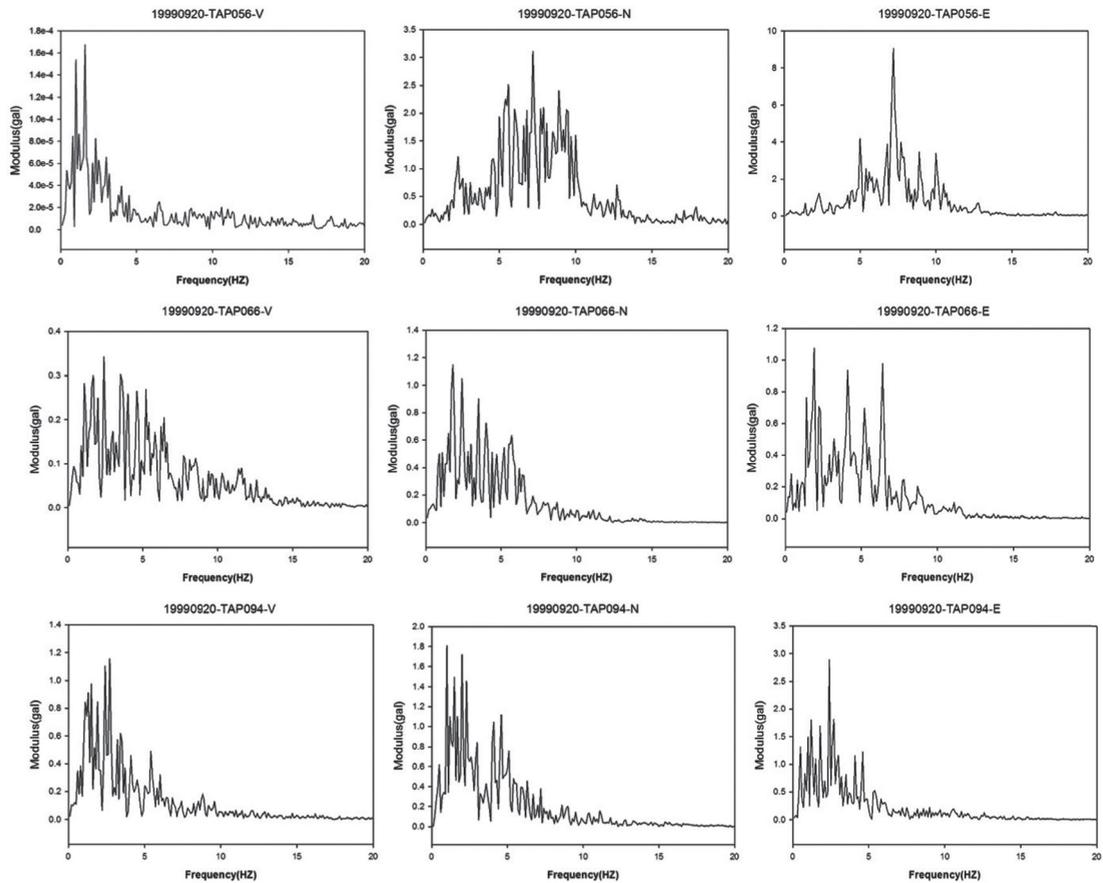
圖八、19990920-421地震南北分量之時頻圖。從上至下分別為竹子湖測站(TAP056)、鞍部測站(TAP066)、桃源國小測站(TAP094)，時頻圖下為對應之原始加速度波形圖。紅色箭頭標示PGA瞬時。

Figure 8. The time-frequency spectrogram of the event 19990920-421 in North-south component of the stations TAP056, Tap066 and TAP094, respectively. The corresponding acceleration seismogram is shown in the bottom. The red arrow marks the PGA moment.



圖九、19990920-421地震東西分量之時頻圖。從上至下分別為竹子湖測站(TAP056)、鞍部測站(TAP066)、桃源國小測站(TAP094)，時頻圖下為對應之原始加速度波形圖。紅色箭頭標示PGA瞬時。

Figure 9. The time-frequency spectrogram of the event 19990920-421 in East-west component of the stations TAP056, Tap066 and TAP094, respectively. The corresponding acceleration seismogram is shown in the bottom. The red arrow marks the PGA moment.



圖十、地震事件19990920-421三測站各分量在PGA瞬時之頻譜分析圖(由上至下分別為測站 TAP056、TAP066、TAP094；由左而右分別為垂直分量、南北分量、東西分量。)
Figure 10. The time-frequency spectrogram of each component of the three stations in the time of PGA occurs. (From top to bottom show the results of the stations TAP056, TAP066, TAP094; from left to right are vertical component, north-south component, east-west component, respectively.)

湖不同，垂直分量集中於 1.5 ± 0.5 (Hz)之間，南北分量集中於 2.0 ± 1.0 (Hz)之間；東西分量集中於 2.0 ± 1.4 (Hz)之間。由此可知並非震源或路徑效應影響竹子湖測站的主要頻率，而是竹子湖測站場址下方特殊的構造或物質造成部分頻率區間能量升高。

3.3 竹子湖測站遷站前後探討

竹子湖測站遷站後雖有6個事件沒有異常放大現象，但仍有超過半數(7件)有異常放大現象。圖六中藍色線區隔遷站前後PGA比值，藍色線以上為遷站後的事件PGA比

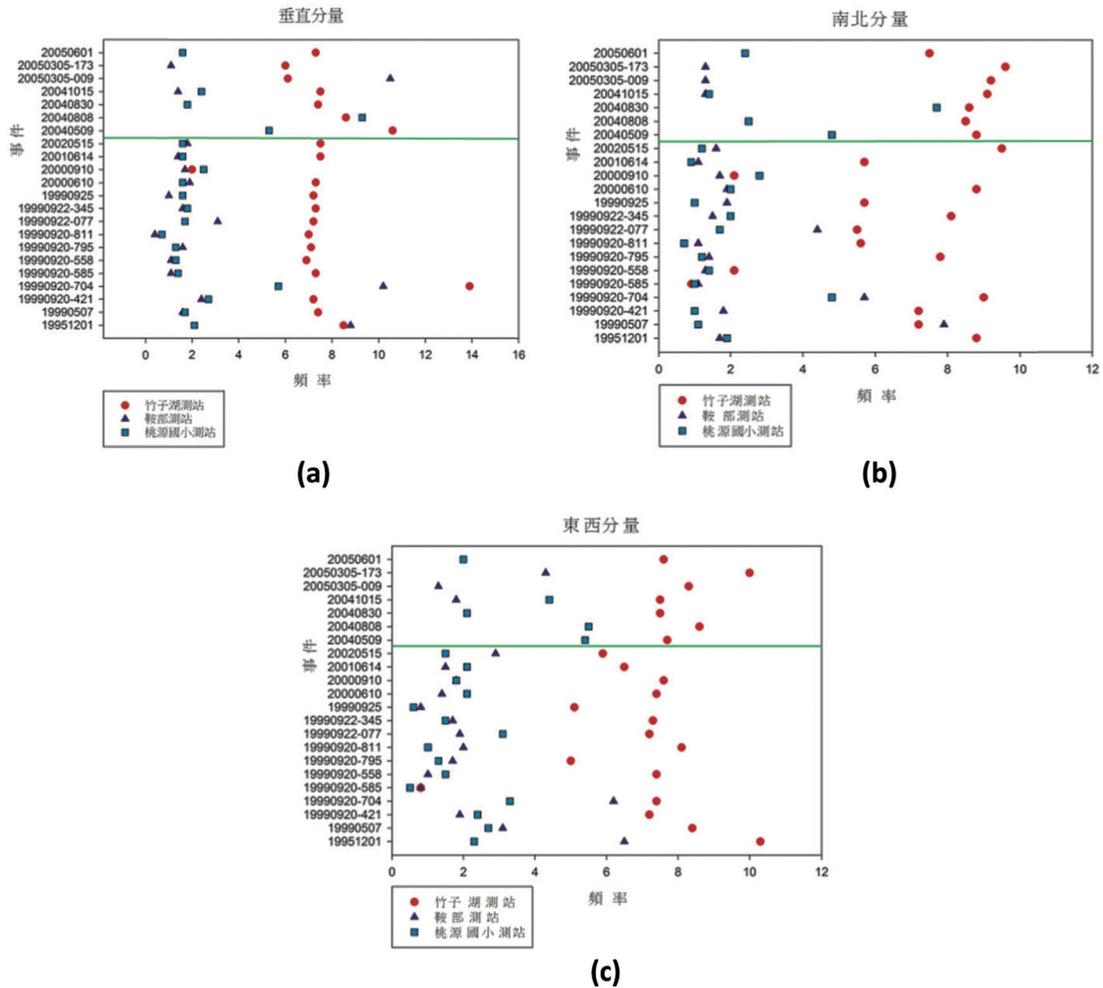
表三、各測站PGA時間震幅最大頻率

Table 3. The frequency of maximum amplitude at PGA time of each station

事件	竹子湖測站			鞍部氣象站			桃園國小測站		
	垂直分量	南北分量	東西分量	垂直分量	南北分量	東西分量	垂直分量	南北分量	東西分量
19951201	8.5	8.8	10.3	8.8	1.7	6.5	2.1	1.9	2.3
19990507	7.4	7.2	8.4	1.6	7.9	3.1	1.7	1.1	2.7
19990920-421	7.2	7.2	7.2	2.4	1.8	1.9	2.7	1.0	2.4
19990920-704	13.9	9.0	7.4	10.2	5.7	6.2	5.7	4.8	3.3
19990920-585	7.3	0.9	0.8	1.1	1.1	0.8	1.4	1	0.5
19990920-558	6.9	2.1	7.4	1.1	1.3	1.0	1.3	1.4	1.5
19990920-795	7.1	7.8	5.0	1.6	1.4	1.7	1.3	1.2	1.3
19990920-811	7.0	5.6	8.1	0.4	1.1	2.0	0.7	0.7	1.0
19990922-077	7.2	5.5	7.2	3.1	4.4	1.9	1.7	1.7	3.1
19990922-345	7.3	8.1	7.3	1.6	1.5	1.7	1.8	2.0	1.5
19990925	7.2	5.7	5.1	1.0	1.9	0.8	1.6	1.0	0.6
20000610	7.3	8.8	7.4	1.9	1.9	1.4	1.6	2.0	2.1
20000910	2.0	2.1	7.6	1.7	1.7	1.8	2.5	2.8	1.8
20010614	7.5	5.7	6.5	1.4	1.1	1.5	1.6	0.9	2.1
20020515	7.5	9.5	5.9	1.8	1.6	2.9	1.6	1.2	1.5
20040509	10.6	8.8	7.7				5.3	4.8	5.4
20040808	8.6	8.5	8.6				9.3	2.5	5.5
20040830	7.4	8.6	7.5				1.8	7.7	2.1
20041015	7.5	9.1	7.5	1.4	1.3	1.8	2.4	1.4	4.4
20050305-009	6.1	9.2	8.3	10.5	1.3	1.3			
20050305-173	6.0	9.6	10.0	1.1	1.3	4.3			
20050601	7.3	7.5	7.6				1.6	2.4	2.0

值，由藍線上方之事件可看出遷站後仍有事件存在異常放大現象，其比值在0~15之間。而且遷站後PGA值的放大倍率，並未較遷站前的PGA值放大倍率低。

詳細比較竹子湖測站在遷站前後的PGA振幅最大頻率(圖十一(a)、(b)、(c))。遷站後的地震事件PAG振幅最大頻率除了南北分量頻率由原本 7.0 ± 2.0 (Hz)增加到 8.5 ± 1.0 (Hz)外，東西分量和垂直分量的頻率變化都不大，仍可看出頻率的集中度，表示仍有特定頻率存在使其異常放大，亦表示新測站位置並未脫離造成竹子湖測站PGA異常



圖十一、三測站各地震事件，各分量之PGA最大振幅頻率圖。(a)垂直分量。(b)南北分量。(c)東西分量。綠線區隔竹子湖測站遷站前、後事件。

Figure 11. The corresponding frequencies related to time of PGA of all events in this study. (A) Vertical component. (B) North-South component (C) East-West component Green Line Jhuzihhu Weather Station separates the results before and after relocation of the Jhuzihhu Weather Station.

放大的場址範圍。

3.4 竹子湖測站特有頻率之地下異常體範圍估算

地震波的波速(V)與頻率(f)、波長(λ)有下列關係

$$V = f\lambda$$

由圖二的地震波速資料顯示，竹子湖測站底下15公尺S波平均速度約為400 m/sec，由竹子湖測站PGA振幅最大頻率範圍為 8.0 ± 1.0 Hz計算，波長約為 50.0 ± 7.0 m之間。造成共振的最小長度為波長的1/4，可以推估造成竹子湖PGA異常放大的厚度約為 12.5 ± 1.8 m，對照竹子湖測站的地層層狀圖(圖2.2-1)，發現竹子湖測站下方的確有約12 m的鬆軟層，因此推論此鬆軟層即為造成竹子湖PGA異常放大的主因。

由於遷站後並未離開這個特殊的地體構造範圍，故PGA瞬時震幅最大頻率並未有太明顯變化，PGA異常放大現象雖有改善，但仍有相當比例的事件存在異常放大現象。

4、結 論

1995年至2008年的地震資料發現竹子湖測站與相鄰的鞍部氣象站及桃源國小測站相較，確實存在PGA異常放大的現象，且在東西分量上有較大的放大倍率。這個現象在竹子湖測站遷站後並未完全消除。

本研究利用複數解載去計算出PGA發生時間點各個頻率的震幅分布，找出最大震幅頻率，發現竹子湖測站的最大震幅頻率分布在 8.0 ± 1.0 Hz之間(各分量略有不同)，與相鄰的鞍部測站及桃源國小測站的最大震幅頻率分布(2.0 ± 1.0 Hz)有明顯差異，證明造成竹子湖測站的PGA異常放大現象的主因是由於特殊的場址效應。

利用最大震幅頻率與波速計算出造成PGA異常放大的波長範圍在 50.0 ± 7.0 m之間，進一步推估造成此PGA異常放大的厚度約為 12.5 ± 1.7 m。進一步比對地質鑽井紀錄，發現竹子湖測站的確位於約12 m的鬆軟層之上，因此推論出造成PGA異常放大的主因為測站下方約12 m的鬆軟層。

5、特別致謝

感謝審稿人提供寶貴建議及中央氣象局提供研究資料，在此一併致謝！

參考文獻

牟鍾香 (2004) 竹子湖強震站場址效應之探討，國立中央大學應用地質研究所碩士論

文，共110頁。

李正宇 (2008) 台灣地區最大地動加速度時空變化，國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共70頁。

何英銳 (2003) 地磁複變解調與地震活動之相關性：以台灣崙坪全磁力資料為例，國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共54頁。

陳中保 (2008) 利用最大加速度值評估台灣西部四大都會區之耐震規範，國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共105頁。

陳平護、劉玉龍與黃昭連 (2004) 陽明山竹子湖氣象站之地電探勘，中央氣象局93年度防救災專案計畫成果研討會，第343-384頁。

溫國樑、彭瀚毅、郭鎧紋與劉坤松 (1998) 竹子湖與鞍部強震站地動紀錄之比較，台灣地區強地動觀測計畫研討會(三)論文摘要，第114-122頁。

地震活動彙整及測站資料查詢，中央氣象局，(<http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/>) 2016年3月查詢。

Banks, R.J. (1975) Complex demodulation of geomagnetic data and the estimation of transfer function, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 43, p.87-101.

Chen, K.J., Yen, Y.H. and Tsai, Y.B. (1985) A study on complex demodulation of the geomagnetic total intensity data of Taiwan, *Bull. Inst. Earth Sciences, Academia Sinica*, vol. 5, p. 125-136.

Chen, K.J, Ho, Y.R., Chiu, B., Wang, J.S., Sun, R. and Lin, C.H. (2007) Correlation Between Time Change in Modulus of Short-Period Geomagnetic Variation and Seismicity in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 18, no. 3, p.577-591.

