

# 高雄小林地區強地動分析

劉坤松

高苑科技大學通識教育中心暨防災研究中心

## 摘 要

本研究使用中央氣象局所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算，分析高雄小林地區的強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性以及場址特性。結果顯示：最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離呈現非線性效應，會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，此說明強震與弱震的放大函數會有所差異。南北對垂直方向的顯著頻率平均值約為8 Hz，其最大振幅譜比的平均值為11.4倍。東西對垂直方向則分別為7 Hz及13.6倍。水平方向對垂直方向的最大振幅譜比約為4-20倍，但因為其場址效應產生了強烈的共振效應，最大振幅譜比值可達50-60倍。本研究成果可作為了解造成災害區域之環境特性及重建之建築等結構物規劃設計的參考。

關鍵詞：小林、強地動、場址效應、共振效應

## 一、前言

臺灣位於地震活動非常頻繁的環太平洋地震帶上，歐亞板塊與菲律賓海板塊日以繼夜的碰撞、擠壓，常有強烈的地震發生。此外，臺灣地處西太平洋颱風路徑上，平均每年有4個颱風侵襲；雪上加霜，颱風加上地震的威脅，大大提高了山區發生土石流、山崩的潛勢，致使臺灣地區，近20年來因天然災害所造成的直接財物損失，平均1年高達新臺幣174億元，近年來並有升高的趨勢，不僅直接關係到人民生命財產的安全，更影響到社會經濟建設的發展。

2009年8月莫拉克颱風引致臺灣山區大規模崩塌、落石及土石流災害，造成619人死亡、76人失蹤及相當多的房舍掩埋沖毀，是臺灣史上傷亡最慘重的颱風

災害(國家災害防救科技中心,2009;潘國樑,2010)。尤其是高雄縣甲仙鄉小林村500人失蹤的村落掩埋，更讓人怵目驚心。是什麼原因造成如此慘重的災情，是單純的天災或亦有人為的疏失所造成，也是社會關注的重點，因此學術研究領域投入了相當多的人力來了解事件發生的緣由及進行救災工作。

李錫堤等人認為是莫拉克颱風帶來超級的雨量，先在小林村後方山坡誘發大型山崩，造成村落掩埋。山崩發生1小時後，堰塞湖潰決，大水沖刷被土石掩埋的村落，留下慘不忍睹的景象；而造成巨災的癥結是因地質構造、地表水的滲入及滑動區坡度太高所致(李錫堤等,2009)。游峻一等人則利用地電阻及電磁波測勘方法，來進行地質調查及尋找掩埋於土石區之房舍，進而搜尋大體。由其調查結果，建議

未來調查土石流災區，應先進行地質調查與地球物理探查，以供將來研究土石流的基礎(游峻一等,2009)。此外，陳建志等人綜合水文、地質、地形、地球物理探勘和地震等資料，精準訂出小林山崩發生時間，兩階段災變過程土石覆蓋小林全村(Chen et al., 2010)。

除了上述的地質及地球物理方法外，地動資料的分析也是可用來瞭解災害區域之環境特性。例如葉永田在921地震後，分析嘉南與高屏地區的地動特性，得到各區域的地盤基本週期(葉永田,2000)。溫國樑分析921地震中，地表加速度大於1G的名間單一測站(TCU129)(Wen et al., 2001)。溫國樑分析大屯山兩相鄰強震站，竹子湖測站(TAP056)與鞍部測站(TAP066)兩者強地動特性的差異，顯示出竹子湖測站的場址效應(Wen et al, 2008)。劉與蔡則分析921地震建築物與鄰近自由場強震資料，顯示大樓會因基本週期的共振效應，會有高達7倍的加速度放大效應(劉與蔡,2007)。

綜上所述，本研究使用中央氣象局位於高雄小林國小所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算，分析其強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性，以了解小林的環境區域特性如地層基本週期、場址效應，提供資訊供後續解析事件發生的緣由，以及在未來重建時，建築物如房舍及教室能妥善規劃設計，避免共振效應的發生，有助於日後地震發生時降低生命財產的損失。

## 二、研究區域與強震資料

### (一)研究區域

本研究區域小林村位於在高雄縣甲仙鄉，村民聚落主要分布於旗山溪左岸之高

灘地及低位河階上，與河床之高差約在5至10公尺之間。小林村附近出露之地層為上新世鹽水坑頁岩及糖恩山砂岩，主要岩性分別為頁岩與砂岩或泥質砂岩。周邊之高位階地、低位階地及分布於河道上之現代沖積層，均以砂礫為主。小林向斜是本區最主要的地質構造，向斜軸東側約800~900公尺處有甲仙斷層通過，係高角度向東南傾斜的逆斷層，再往東約2公里處另有旗山斷層通過(李錫堤等,2009)。

### (二)強震資料

本研究使用中央氣象局在高雄小林國小所設置強震站的強震紀錄，中央氣象局自1990年7月起執行第1期為期6年之「強地動觀測計畫」(TSMIP)，此計畫目的在於蒐集高品質的強震紀錄，除可作為耐震設計規範修訂之依據外，並可用來研究地震震源、波傳路徑與場址效應等重要課題(劉坤松等，1994)；至第1期計畫結束時已先後設置了超過630個自由場強地動觀測站；除中央山脈外，各站站距約為5公里，是目前世界最密集的強震觀測網。

小林國小強震站，測站編號kau001，位於北緯23.1625度、東經120.6352度，海拔高度365公尺，設置於1993年2月17日，至2009年8月8日因莫拉克颱風引致山區大規模崩塌而遭掩埋，期間共蒐錄了數十筆寶貴的強震記錄。本測站之強震儀的觀測先後有IDS、IDSA及SMTA 3種型態，其硬體部分由5個單元所組成，分別是加速度感應器、信號紀錄處理裝置、記憶單元、時間裝置與電源裝置；並具有下列功能及特色(Liu et al., 1999；Liu and Tsai, 2005)：

1. 數位式紀錄方式，解析度高，至少為16位元，對滿格(full scale)為2g的加速度感應器，其解析度為0.0598gal/count

以上。

2. 動態紀錄範圍大，可至少為96dB，強震、微震均可記錄，目前觸發位準設定於滿格的0.2% (約3.92gal)。
3. 頻率反應範圍廣，由DC至50Hz，且儀器反應並經振動台測試確認。
4. 滿格為2g之力平衡式加速度感應器，可避免強震時遭到信號裁剪。
5. 可設定地震事件前後時間長度，以保紀錄完整，目前各站一般設定為事件前20秒，事件後15秒的記憶時間。
6. 可配備GPS時間校正系統，使時間誤差維持在每日5msec以內。

本研究所選取52個強震紀錄的編號、日期、時間、經緯度、地震深度、震央距離、震源距離及地震芮氏規模整理如表1。而小林測站及52個地震的震央位置分布圖如圖1所示。同時，52個地震的地震芮氏規模範圍介於2.8至7.1。震源距離範圍介於4.6 KM至169.4 KM。地震此兩參數的關係分布如圖2所示。

### 三、分析方法

對於高雄小林地區強地動的分析方法，我們先檢視所有地震的強震紀錄，先繪出各地震垂直、南北、東西三方向之加速度波形，並標出各方向之最大加速度值。其次，本研究對加速度紀錄作了進一步的分析處理，包含傅氏振幅譜及單站頻譜比法二部分。有關單站頻譜比法之計算原理簡述如下：

以往研究場址效應大都使用地震頻譜來作分析，即在頻率域處理，而常用的分析方法，主要可分為傅氏頻譜與反應譜。傅氏頻譜是將地震紀錄的時間序列做傅立葉轉換至頻率域，包括傳統的雙站頻譜比法和單站頻譜比法(葉永田,2000)。由於傳

統的雙站頻譜比法常常會遇到參考站選定的困擾，甚至某些場址區域附近，根本找不到適合的參考點測站。因此，降低了雙站頻譜比法的實用性。

單站頻譜比法(H/V Ratio)是由Nakamura(1989)利用微地動資料估算場址效應所得的經驗式。由於單站頻譜比法沒有參考站選擇的問題，所以此方法的實用性增加了不少。Nakamura指出場址的顯著振動週期及其對應之振幅放大效應應直接與場址水平向及垂直向微動訊號之比值有關。單站頻譜比法的基本假設有3個：

- (1)微動訊號是由表面波以及在表面土層(未壓密土層)內反射與折射之剪力波2個成份波所組成。
- (2)表面波不會影響未壓密土層底部(即基盤)處之所蒐集的微動訊號。
- (3)未壓密土層不會放大垂直向上傳遞之微動訊號。

量測到的振動反應紀錄主要受到：震源效應、路徑效應、與場址效應之影響。如果要探討場址效應，應該要去除其他兩個效應才行。若 $V_S$ 為沖積層測站所量得之垂直向傅氏頻譜、 $H_S$ 為沖積層測站所量得之水平向傅氏頻譜、 $V_B$ 為岩盤測站所量得之垂直向傅氏頻譜、 $H_B$ 為岩盤測站所量得之水平向傅氏頻譜。則來自震源的效應可以近似為 $A_S$ ：

$$A_S = V_S / V_B \quad (3)$$

而場址效應 $S_E$ 為

$$S_E = H_S / H_B \quad (4)$$

為了除去來自震源的效應，Nakamura將 $S_E$ 除以 $A_S$ ，並將路徑效應視為一致，可得：

$$S_M = S_E / A_S = (H_S / H_B) / (V_S / V_B) \quad (5)$$

Nakamura於1989利用井下微地動觀測資料來證實在岩盤上水平向與垂直向傅氏頻譜的比值為1。因此式(5)可表示成：

表1. 本研究所使用地震之參數

Table 1. Earthquakes whose records are used in this study.

No.	Date yy/mm/dd	Time	Lat. (N)	Lon. (E)	Depth (km)	Epi. Dist (km)	Hypo. Dist (km)	ML
1	1993/4/25	15:31.3	23.119	120.676	3.8	6.32	7.37	3.33
2	1993/4/25	31:38.7	23.121	120.677	4.15	6.31	7.55	3.74
3	1993/4/25	54:07.2	23.119	120.681	4.24	6.73	7.95	3.49
4	1993/12/15	49:43.1	23.213	120.524	12.5	12.73	17.84	5.7
5	1993/12/22	22:20.0	23.211	120.510	11.71	13.84	18.13	4.63
6	1994/1/20	50:15.6	24.065	121.852	49.45	159.41	166.9	5.58
7	1994/7/4	07:58.2	23.180	120.750	7.08	11.91	13.86	4.09
8	1994/10/5	13:24.5	23.156	121.720	31.28	111.11	115.43	5.83
9	1995/1/24	17:15.2	23.319	120.759	14.12	21.5	25.72	4.51
10	1996/1/27	39:31.3	23.170	120.772	1.37	14.03	14.1	4.13
11	1996/2/10	02:36.8	23.178	120.769	5.61	13.85	14.94	3.98
12	1996/9/5	42:07.9	22.001	121.367	14.76	148.98	149.71	7.07
13	1998/2/14	22:17.3	23.084	120.735	3	13.37	13.7	3.92
14	1998/3/12	03:21.7	22.981	120.664	14.05	20.34	24.72	4.39
15	1998/7/17	51:15.0	23.503	120.663	2.8	37.78	37.88	6.2
16	1998/8/16	13:03.8	23.203	120.532	8	11.49	14	4.8
17	1998/11/17	27:32.5	22.832	120.790	16.49	39.89	43.16	5.51
18	1998/12/20	34:04.5	23.220	120.539	2.84	11.71	12.05	3.88
19	1999/4/18	32:11.1	23.165	120.656	4.08	2.17	4.62	3.19
20	1999/4/30	45:05.7	23.172	120.672	5	3.87	6.32	3.82
21	1999/6/17	18:14.9	23.176	120.601	8.3	3.79	9.12	3.28
22	1999/7/7	53:13.4	23.319	120.735	13.78	20.1	24.37	5.1
23	1999/7/7	06:29.2	23.313	120.745	11.34	20.08	23.06	4.55
24	1999/7/9	36:51.7	23.322	120.748	9.7	21.05	23.18	4.53
25	2001/2/12	57:01.7	23.149	120.684	6.05	5.24	8	2.95
26	2001/9/12	38:35.4	23.112	120.692	7.17	8.01	10.75	3.65
27	2002/9/30	35:13.5	23.328	120.614	8.12	18.45	20.16	5.04
28	2003/11/6	58:44.4	23.124	120.451	17.63	19.35	26.18	4.96
29	2003/12/10	38:13.5	23.067	121.398	17.73	78.86	80.83	6.42
30	2003/12/17	27:25.3	22.606	121.311	32.2	92.78	98.21	5.43
31	2004/2/8	39:44.6	23.179	120.629	7.99	1.93	8.22	3.35
32	2004/7/25	04:19.0	23.088	120.712	4.15	11.39	12.12	3.86

33	2004/9/2	07:50.9	23.201	120.499	7.51	14.54	16.36	4.26
34	2005/4/11	01:55.7	23.268	120.532	5.2	15.8	16.63	4.63
35	2006/4/15	40:55.4	22.856	121.304	17.9	76.47	78.54	6.04
36	2006/12/26	26:21.0	21.687	120.555	44.11	163.56	169.4	6.96
37	2006/12/26	34:15.1	21.970	120.420	50.22	133.92	143.03	6.99
38	2007/7/9	03:51.4	23.150	120.601	4.72	3.8	6.06	3.51
39	2007/12/23	50:22.3	23.103	120.672	7.62	7.61	10.77	4.2
40	2007/12/23	31:10.8	23.099	120.664	7.76	7.65	10.9	3.28
41	2008/3/4	13:36.9	23.208	120.698	11.58	7.68	13.9	4
42	2008/3/4	31:47.5	23.207	120.696	11.32	7.39	13.52	5.22
43	2008/3/4	42:32.6	23.213	120.707	11.95	8.68	14.77	4.58
44	2008/3/5	51:40.3	23.201	120.690	11.4	6.52	13.13	3.59
45	2008/7/3	05:37.4	23.190	120.670	15.13	4.24	15.71	4.28
46	2008/7/26	15:10.4	23.203	120.549	14.96	10.78	18.44	4.13
47	2008/7/26	51:21.8	23.209	120.548	15.04	11.09	18.69	4.31
48	2008/12/6	55:28.4	23.179	120.593	9.29	5.57	10.83	3.75
49	2008/12/6	34:46.2	23.177	120.597	9.01	5.02	10.31	3.53
50	2008/12/23	04:43.8	22.946	120.551	17.09	25.62	30.8	5.32
51	2008/12/26	08:30.2	23.182	120.610	7.11	4.16	8.24	2.81
52	2009/2/13	51:43.3	23.167	120.620	6.09	2.48	6.58	2.78

$$S_M = H_S // V_S \quad (6)$$

此經驗式即為Nakamura所提出的單站頻譜比法。雖然對於Nakamura所提出的假設與理論仍有些爭議，但相對於其他方法而言，此法的有效性與可行性已被廣泛的接受與利用(Wen et al., 2006)。

#### 四、強地動特性

##### (一)最大地表加速度

為瞭解高雄小林地區的強地動特性，我們先檢視小林國小強震站所記錄到地震的強震紀錄，先繪出各地震垂直、南北、東西三方向之加速度波形，並標出各方向之最大加速度值，總共選用了52筆強震

紀錄，其編號、地震震度、震源距離、芮氏規模、垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向之最大地表加速度及紀錄長度整理如表2。同時，也繪出垂直、南北、東西三方向之最大地表加速度與芮氏規模及震源距離的關係如圖3所示。垂直向之最大地表加速度範圍介於1.84至45.02(gal)，南北向之最大地表加速度範圍介於1.84至92.92(gal)，東西向之最大地表加速度範圍介於4.54至72.58(gal)。水平向的最大地表加速度大於垂直向的最大地表加速度，這些地震的最大震度可達5級(80gal)。

##### (二)頻譜特性

接下來，我們將對加速度紀錄作進一

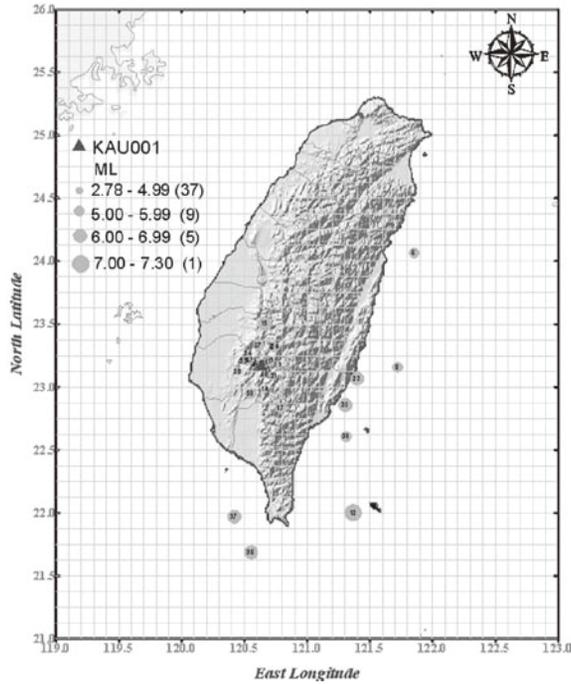


圖1. 本研究所使用之強震測站(KAU001)及地震震央分布圖。

Figure 1. Distribution of the TSMIP free-field station KAU001 and the epicenter locations of earthquakes used in this study.

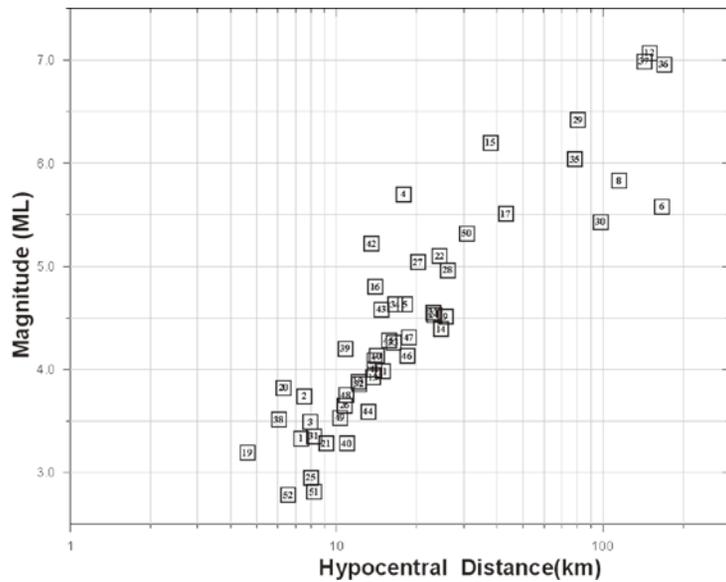


圖2. 本研究所選取強震紀錄的芮氏規模與震源距離關係，方形內數字為地震編號。

Figure 2. Distribution of strong motion data used in this study. The event numbers are also shown in the open square.

步的分析處理，包含傅氏振幅譜及單站頻譜比法二部分。本節將探討傅氏振幅譜的結果，結果顯示：同一個地震3個方向分量中，垂直向比水平向的傅氏振幅譜可延伸至較高頻的頻率範圍，另外，垂直向的最大傅氏振幅譜的頻率也比水平向的高。總共計算了52筆強震紀錄，其編號、垂直向最大振幅譜值(FAP V)及其顯著頻率(Pre. F V)、南北向最大振幅譜值(FAP NS)及其顯著頻率(Pre. F NS)、東西向最大振幅譜值(FAP EW)及其顯著頻率(Pre. F EW)分別整理如表3之第1至第7行。同時，也繪出垂直、南北、東西三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與芮氏規模及震源距離的關係分別如圖4及圖5所示。上、中、下方

分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。回歸曲線的相關係數R是用來評估兩參數彼此的相關程度，相關係數R的值介於-1至1，R值為正，則表示兩參數有正相關性，亦即一參數會隨另一參數增加而增加。如R值為負，則表示兩參數有負相關性，亦即一參數會隨另一參數增加而減少。如R值接近零，則表示兩參數相關性很低，是屬隨機關係。

由圖4及圖5皆顯示顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即顯著頻率皆隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，同時，在顯著頻率與芮氏規模

表2. 本研究所使用地震之三分量最大地表加速度

Table 2. The Peak Ground Acceleration of records in three components are used in this study.

No.	Inten.	Hypo. Dist (km)	ML	PGA(gal)			Rec. Length (sec)
				V.	NS	EW	
1	3	7.37	3.33	8.5	10.28	11.24	31
2	3	7.55	3.74	7.9	11.48	7.3	31
3	3	7.95	3.49	13.46	18.3	20.82	31
4	4	17.84	5.7	32.78	61.54	54.2	43
5	3	18.13	4.63	5.62	13.04	7.9	31
6	2	166.9	5.58	2.34	5.98	7.3	32
7	3	13.86	4.09	3.7	7.36	10.7	36
8	2	115.43	5.83	3.46	6.46	6.58	36
9	3	25.72	4.51	5.8	8.02	9.98	37
10	3	14.1	4.13	5.86	16.68	8.2	36
11	2	14.94	3.98	3.12	7.36	6.52	35
12	2	149.71	7.07	3.28	5.68	4.72	54
13	3	13.7	3.92	2.76	10.04	7.42	36
14	3	24.72	4.39	3.34	8.26	6.04	36
15	4	37.88	6.2	15.14	24.58	35.58	59
16	3	14	4.8	9.16	12.26	7.84	46

17	3	43.16	5.51	3.22	8.02	11.6	38
18	2	12.05	3.88	5.02	2.94	6.7	35
19	3	4.62	3.19	4	8.38	10.94	35
20	3	6.32	3.82	9.98	18.72	17.88	37
21	3	9.12	3.28	2.7	6.04	8.92	35
22	3	24.37	5.1	6.64	10.58	15.08	37
23	3	23.06	4.55	8.38	15.74	16.92	37
24	3	23.18	4.53	3.88	8.98	7.96	37
25	3	8	2.95	10.58	10.28	10.22	35
26	3	10.75	3.65	7.18	10.64	14.84	35
27	4	20.16	5.04	18.48	29.6	36.06	41
28	3	26.18	4.96	12.62	4.6	5.02	35
29	3	80.83	6.42	10.34	14.48	14	60
30	2	98.21	5.43	3.06	3.22	5.62	35
31	3	8.22	3.35	7	6.22	9.46	35
32	2	12.12	3.86	3.94	6.52	5.02	35
33	3	16.36	4.26	4.42	5.08	9.1	36
34	2	16.63	4.63	4.12	3.58	6.64	35
35	2	78.54	6.04	3.88	4.18	4.78	35
36	3	169.4	6.96	5.34	8.7	7.9	120
37	3	143.03	6.99	9.42	17.68	15.32	120
38	3	6.06	3.51	5.68	11.78	13.44	120
39	4	10.77	4.2	8.22	20.56	27.84	60
40	2	10.9	3.28	1.84	1.84	5.58	120
41	3	13.9	4	5.6	9.6	9.12	60
42	5	13.52	5.22	45.02	92.92	72.58	120
43	4	14.77	4.58	8.86	37.76	17.62	60
44	2	13.13	3.59	4.66	5.06	4.74	60
45	3	15.71	4.28	8.2	10.08	10.02	60
46	2	18.44	4.13	2.08	1.86	5.28	120
47	2	18.69	4.31	1.86	1.9	4.54	60
48	4	10.83	3.75	15.54	46.36	46.42	60
49	3	10.31	3.53	4.7	11.26	12.54	120
50	2	30.8	5.32	4.7	7.86	7.88	120
51	2	8.24	2.81	2.58	7.42	7.22	60
52	3	6.58	2.78	4.28	9.46	14.16	60

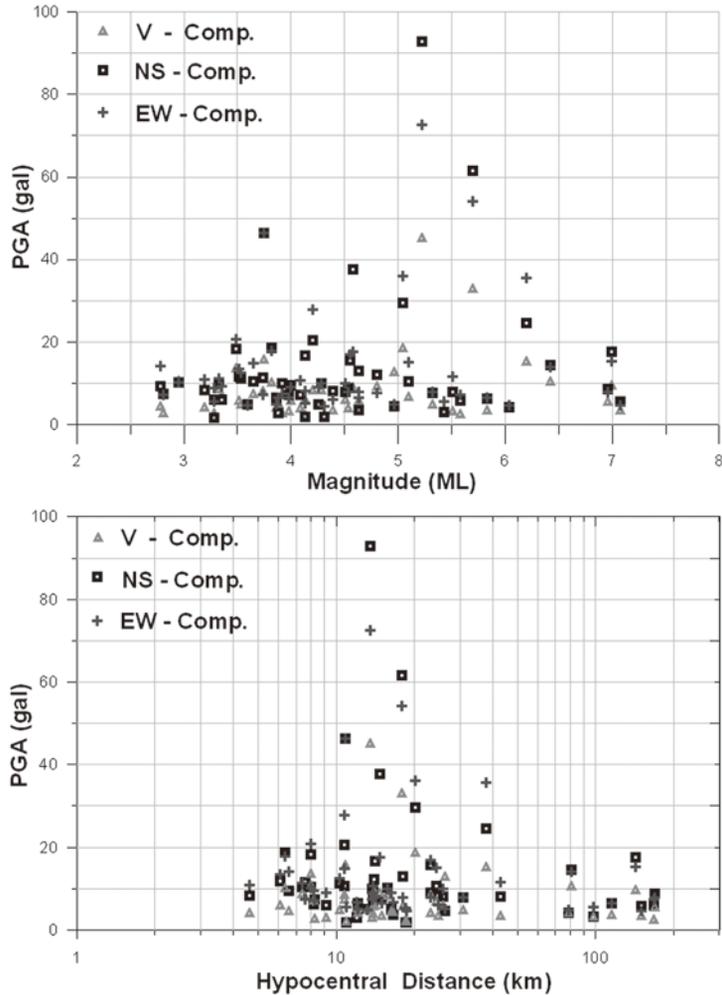


圖3. 垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向之最大地表加速度與芮氏規模(圖上方)及震源距離(圖下方)的關係。水平向的最大地表加速度大於垂直向的最大地表加速度。

Figure 3. The relations of PGA and magnitude (upper panel) as well as hypocentral distance (lower panel) are analyzed in three components.

或顯著頻率與震源距離的相關性，水平向比垂直向有較高的相關係數。此結果也說明隨著距離增加，因高頻波較快衰減的特性，地震波的能量會集中在低頻波。經計算垂直、南北、東西三方向顯著頻率的平均值分別為7.57Hz、7.30Hz及6.57Hz。此外，我們也繪出三方向之最大振幅譜值與芮氏規模的關係如圖6。上、中、下方

分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減1個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖3顯示三方向之最大振幅譜值與芮氏規模有正相關的關係，亦即最大振幅譜值隨著芮氏規模的增加而增加，但並不是規模最大的最大振幅譜值最高，還與震源距離有關，通常地震能量會

表3. 本研究所得三方向最大振幅譜值(FAP)及其顯著頻率(Pre. F)以及最大振幅譜比值及其顯著頻率

Table 3. The Fourier Amplitude Peak (FAP) and relative Predominant Frequency (Pre. F) as well as Fourier Amplitude Ratio (FAR) and relative Pre. F. of records in three components are analyzed.

No.	FAP V	Pre. F V	FAP NS	Pre. F NS	FAP EW	Pre. F EW	FAR NS/V	Pre. F NS/V	FAR EW/V	Pre. F EW/V
1	1.41	16.08	1.75	11.15	3.69	7.77	17.03	5.72	16.13	7.89
2	1.86	16.17	2.37	12.11	2.11	12.47	12.15	5.3	10.41	5.3
3	2.44	16.07	4.1	11.78	3.49	6.82	11.47	11.6	14.02	5.2
4	17.24	3.31	31.45	8.47	36.38	1.77	13.49	7.05	8.23	7.03
5	1.63	16.83	4.89	9.84	3.19	8.79	8.17	7.31	5.92	4.17
6	2.69	3.53	5.8	2.7	6.78	2.17	10.15	7.16	11.35	5.52
7	1.75	2.85	2.7	9.9	2.87	6.91	7.59	13.35	9.86	11.43
8	4.4	4.18	6.7	3.49	5.98	4.17	6.26	4.38	5.41	5.2
9	1.86	3.98	3.07	8.82	4.86	6.91	11.09	11.69	6.77	5.48
10	1.95	2.52	3.76	4.11	2.92	2.91	17.51	9.89	14.01	7.9
11	1.23	4.87	2.52	12.42	4.57	6.88	15.94	10.73	13.98	9.69
12	7.75	1.08	12.36	3.43	14.86	1.05	4.3	10.1	5.94	6.88
13	1.72	3.1	3.25	4.23	2.28	3.17	15.72	9.52	8.5	9.69
14	1.85	8.48	3.48	7.02	4.3	8.48	9.46	8.91	11.29	5.83
15	19.63	1.68	30.24	1.63	23.37	2.18	8.8	6.85	14.53	6.85
16	4.24	1.85	6.29	9.06	6.58	5.6	8.06	6.85	6.02	7.28
17	6.29	1.95	7.45	1.98	7.03	2.08	5.17	6.82	11.52	6.8
18	1.11	10.5	1.71	7.36	2.23	9.54	6.86	4.64	7.43	8.7
19	0.87	10.53	1.79	12.63	2.76	9.29	9.61	7	12.84	6.55
20	1.75	30.01	4.39	12.44	4.44	8.35	12.77	12.18	14.06	9.13
21	0.63	11.2	1.31	7.17	2.31	6.93	34.42	7.19	59.95	7.19
22	3.18	3.49	4.63	3.59	7.01	8.51	5.91	6.67	11.88	6.88
23	3.76	4.03	7.74	7.78	10.56	8.62	9.74	10.74	13.35	6.8
24	1.94	6.26	3.7	6.09	5.28	8.56	9.84	10.38	9.96	10.38
25	1.13	12.73	1.96	11.02	1.52	6.76	9.68	8.88	8.3	9.75
26	1.53	7.02	2.21	7.98	4.03	8.27	7.76	15.61	6.71	3.11
27	8.56	4.73	14.04	3.08	18.5	4.73	7.48	7.19	10.05	7.19
28	2.84	9.89	3.22	7.87	3.35	6.12	6.64	6.49	4.38	5.19
29	23.51	2.49	33.79	0.95	28.76	2.3	4.65	9.8	4.21	9.8
30	3.05	3.04	3.23	2.67	3.62	3.01	3.77	9.03	4.5	9.4
31	0.96	13.49	1.78	8.64	2.09	6.52	9.37	8.64	8.67	9.93

32	1.12	8.36	2.19	8.53	1.8	8.3	6.43	11.03	6.64	9.96
33	1.65	8.77	3.05	9.09	3.8	8.79	6.83	9.38	9.17	4.3
34	1.76	5.68	1.82	8.12	3.27	4.72	5.54	0.24	3.87	4.17
35	4.95	1.04	6.36	1.56	11.41	1.65	5.24	3.27	4.87	3.28
36	11.37	1.66	12.98	1.39	16.08	1.45	7.13	8.3	7.69	5.84
37	10.35	2.03	16.19	3.2	18.34	6.69	9.07	9.7	6.45	7.29
38	1.98	11.33	3.24	8.84	2.42	10	17.96	9.07	15.81	10.68
39	1.97	13.31	4.97	5.52	8.32	7.68	12.57	8.44	20.14	8.42
40	0.04	3.17	0.05	9.64	0.09	9	10.03	6.59	19.72	6.6
41	1.82	13.39	3.41	8.97	3.87	12.26	9.18	6.99	11.19	5.27
42	12.67	8.41	32.69	6.74	22.49	7.98	17.46	6.49	9.54	1.54
43	4.44	4.26	12.1	6.81	8.94	6.82	22.95	11.8	15.93	7.03
44	1.29	9.55	2.16	9.01	2.24	9	15.14	9.88	13.11	17.11
45	3.94	13.17	4.01	13.15	5.14	8.94	8.23	8.62	16.78	8.24
46	0.17	2.76	0.2	8.86	0.35	6.46	7.5	14.86	8.96	6.54
47	0.72	2.73	1.24	9.58	2.4	6.76	8	1.76	17.04	6.58
48	3.65	10.51	10.96	8.64	10.78	8.88	29.95	6.9	50.55	6.9
49	1.65	11.54	2.75	8.68	2.81	9.03	8.65	5.21	18.57	6.53
50	3.86	1	5.3	1.6	4.95	3.19	16.45	9.7	10.53	4.92
51	1	11.62	1.85	8.86	1.37	7.39	25.29	7.32	54.69	7.32
52	1.59	11.51	2.09	11.6	3.69	8.97	21.81	5.36	36.16	5.36

Remark: FAP=Fourier Amplitude Peak (unit=cm/sec). FAR=Fourier Amplitude Ratio.  
Pre. F= Predominant Frequency (unit=Hz).

隨震源距離增加而衰減，致使振幅譜值會減低，在52個地震中以編號4號的最大振幅譜值最高，其芮氏規模為5.7及震源距離為17.8公里。

## 五、場址特性

在本節中，我們將使用單站頻譜比法去分析高雄小林地區的場址特性。延續上一節的結果，分別計算52筆強震紀錄南北向與垂直向振幅譜比值(FAR NS/V)及其顯著頻率(Pre. F NS/V)、東西向與垂直向振幅譜比值(FAR EW/V)及其顯著頻率(Pre.

F EW/V)分別整理如表3之第8至第11行。為了讓頻譜比有較穩定的結果，不致於有很高或很低的比值出現。各方向的振幅譜先進行3點平滑化處理，可將頻譜中散亂之尖峰頻率平滑出容易判讀之顯著頻率值(葉永田,2000)，在本研究中取平滑10次。

### (一)顯著頻率

圖7及圖8分別為南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與芮氏規模及震源距離的關係。圖上、下方分別為南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的結果，回歸曲線、加減

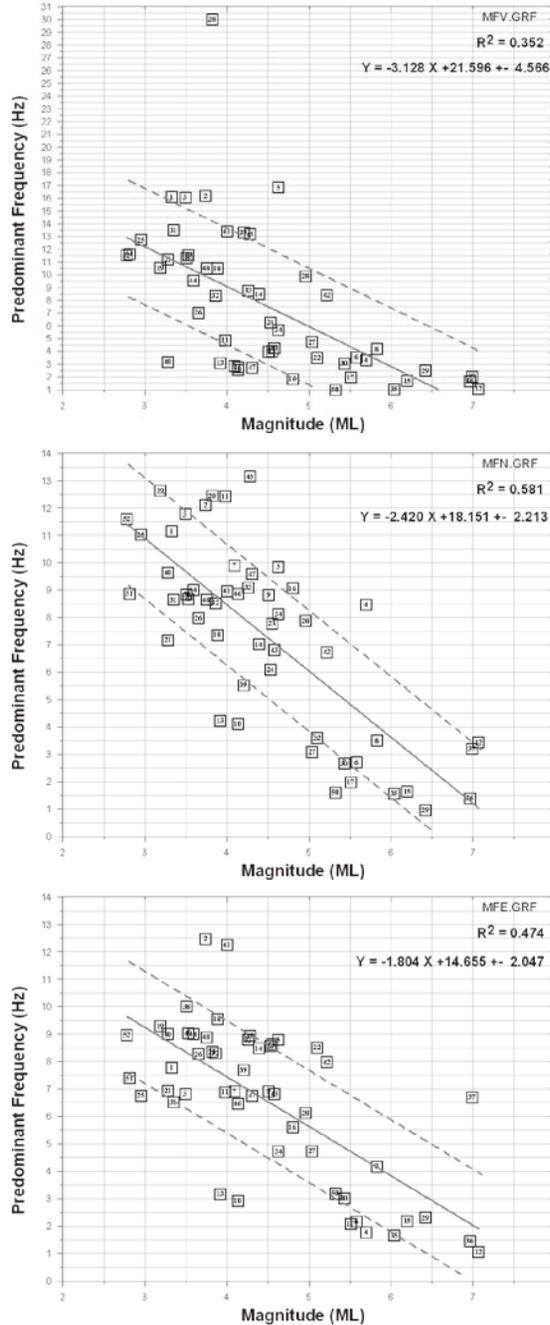


圖4. 三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與芮氏規模的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及  $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 4. The relations of predominant frequency and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

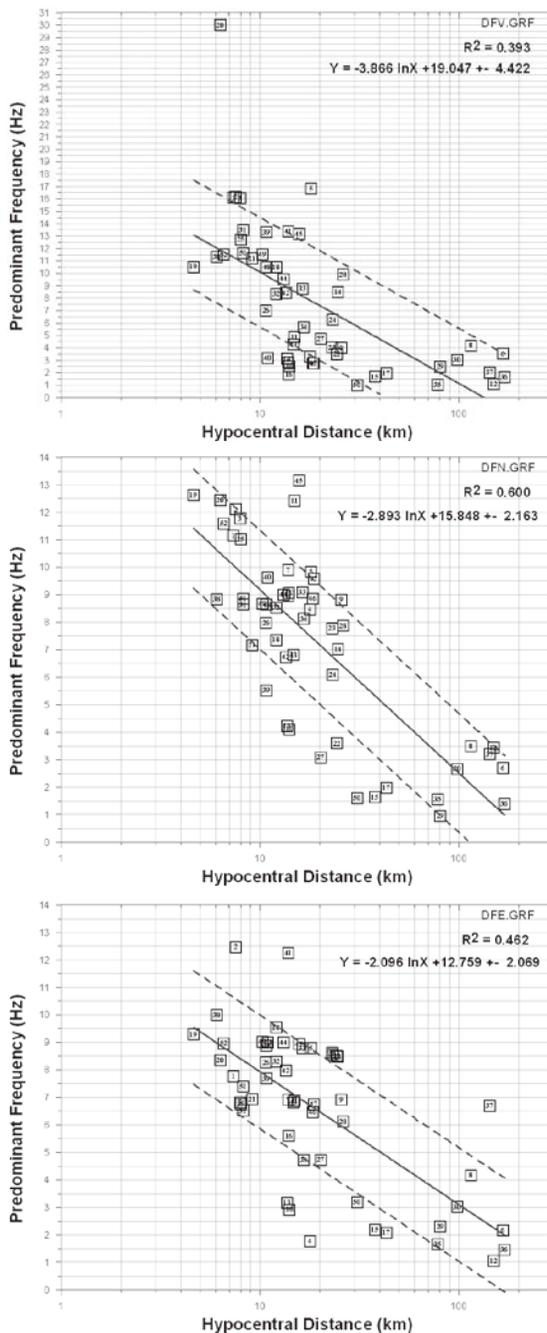


圖5. 三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與震源距離的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及  $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 5. The relations of predominant frequency and hypocentral distance in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

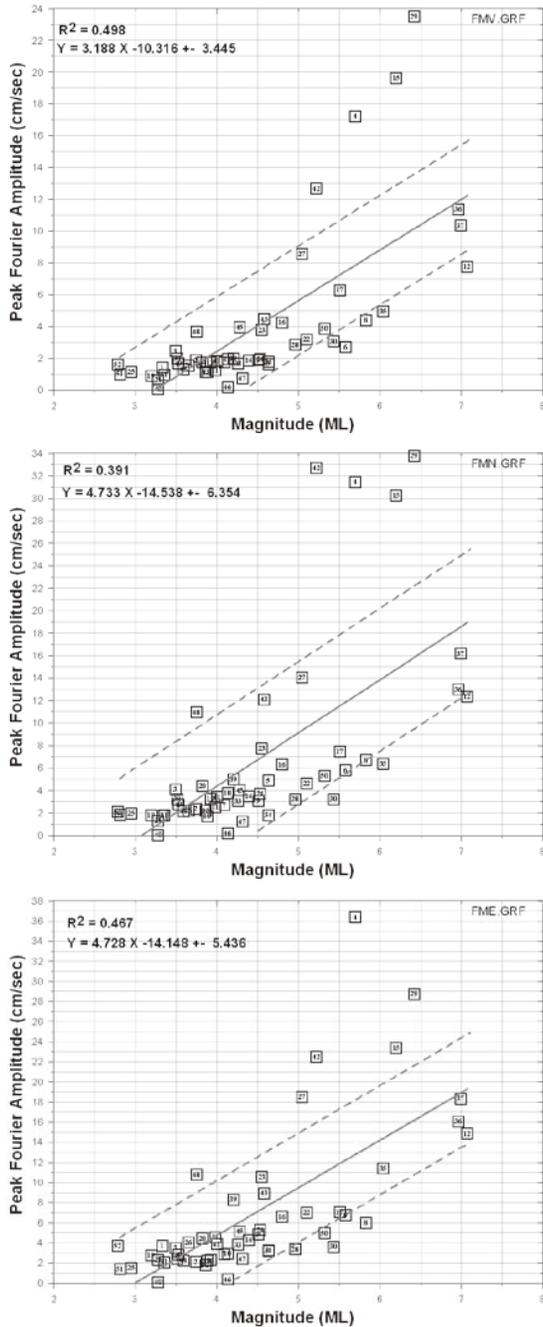


圖6. 三方向之最大振幅譜值與芮氏規模的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 6. The relations of peak Fourier Amplitude and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

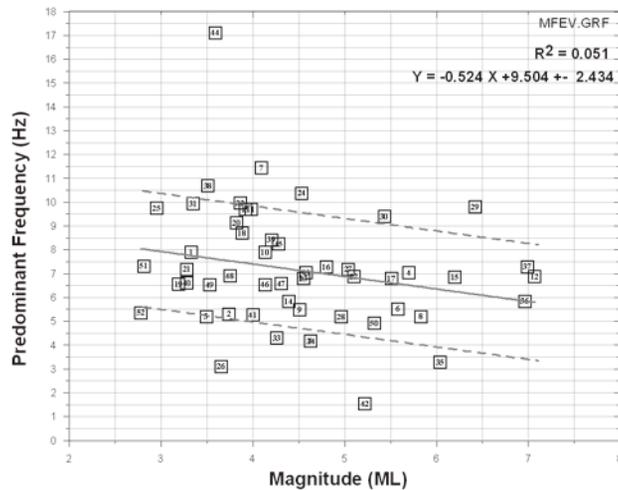
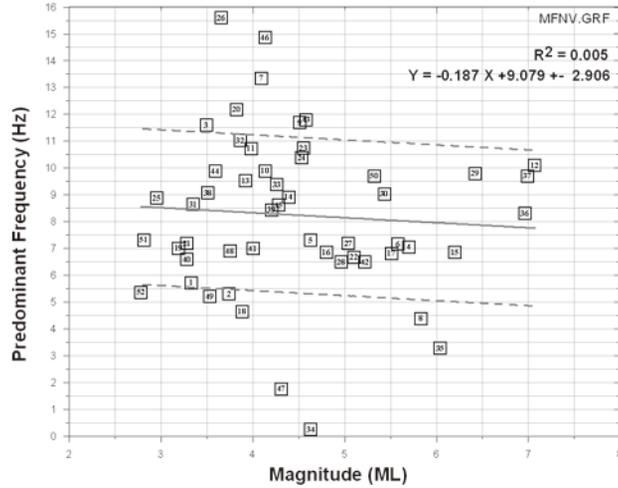


圖7. 南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與芮氏規模的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure7. The relations of predominant frequency and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination  $R^2$  are also shown in the figure.

1個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖7及圖8皆顯示顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆為相關性低的結果， $R^2$ (相關係數的平方)遠小於1.0。此結果也說明經此單站頻譜比法去計算之顯著頻率與芮氏規模(震源因素)及

震源距離(波傳播路徑因素)相關性低，能顯示出該測點的場址特性。經計算南北/垂直與東西/垂直顯著頻率的平均值分別為 $8.24 \pm 2.91$  Hz及 $7.15 \pm 2.43$  Hz。上述顯著頻率與古美玲(2001)使用反應譜比方法所得小林國小測站的顯著頻率7Hz相當接近。

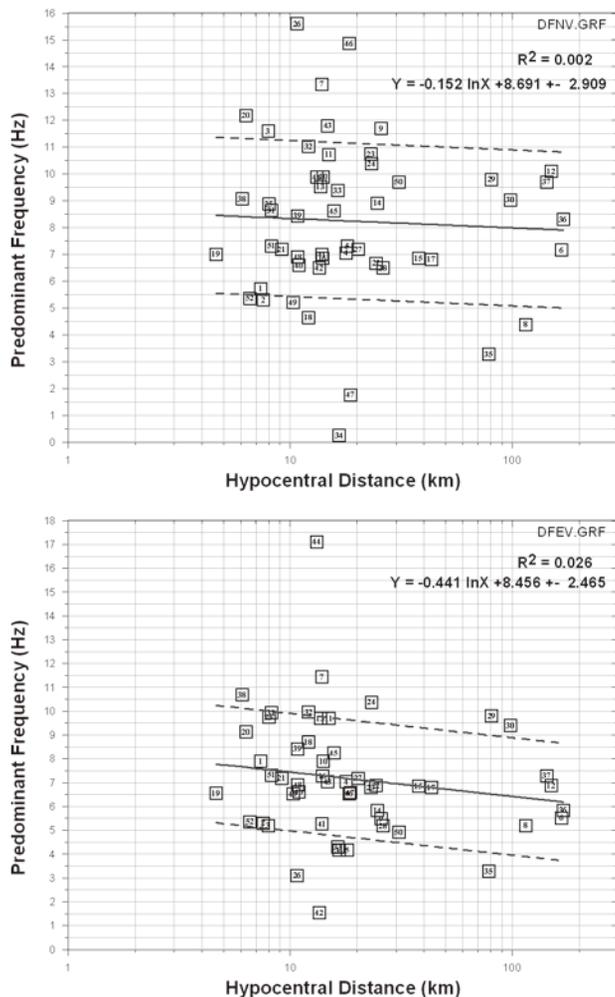


圖8. 南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與震源距離的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的结果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 8. The relations of predominant frequency and hypocentral distance in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination  $R^2$  are also shown in the figure.

## (二) 頻譜比值

接下來，我們繪出南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離的關係分別如圖9及圖10所示。圖上、下方分別為南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的结果，回

歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖9及圖10皆顯示最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即最大振幅譜比值會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，呈現非線性效應。此結

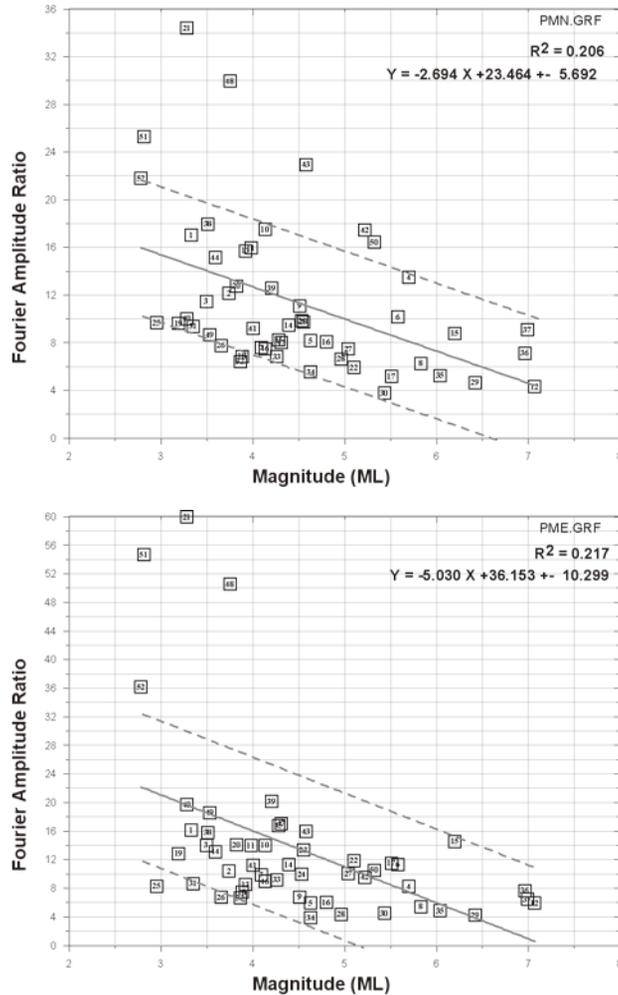


圖9. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與芮氏規模的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的结果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 9. The relations of Fourier Amplitude Ratio and magnitude are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

果說明強震與弱震的放大函數會有所差異，在小林國小測站，如發生較小地震或地振動但在較近距離也會有較高的放大場址效應。例如地震編號21，規模3.28，震源距離9.12公里，甚至在東西方向紀錄的

振幅譜比值可達到60倍，此原因下一段會繼續探討。

最後，我們繪出南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與顯著頻率的關係如圖11所示。圖上、下方分別為南北

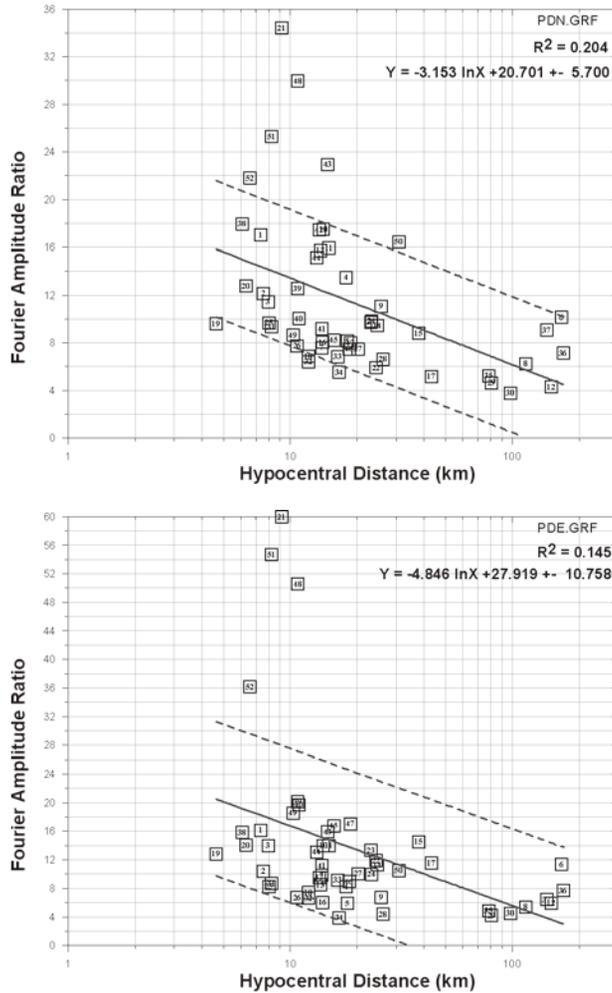


圖10. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與震源距離的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 $R^2$ (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 10. The relations of Fourier Amplitude Ratio and hypocentral distance are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的結果，最大振幅譜比值的平均值分別為11.4與13.6及加減1個標準偏差(以虛線表示)亦標示在圖上。由圖顯示東西(EW)對垂直(V)方向的最大振幅譜比值

約為4-20倍，但地震編號21、48與51的比值可達50-60倍，探究原因此3個地震的規模雖小(ML:2.81-3.75)，但距離近(震源距離:8.24-10.83公里)，而最主要的原因是因為其場址效應的顯著頻率約在7Hz與地震

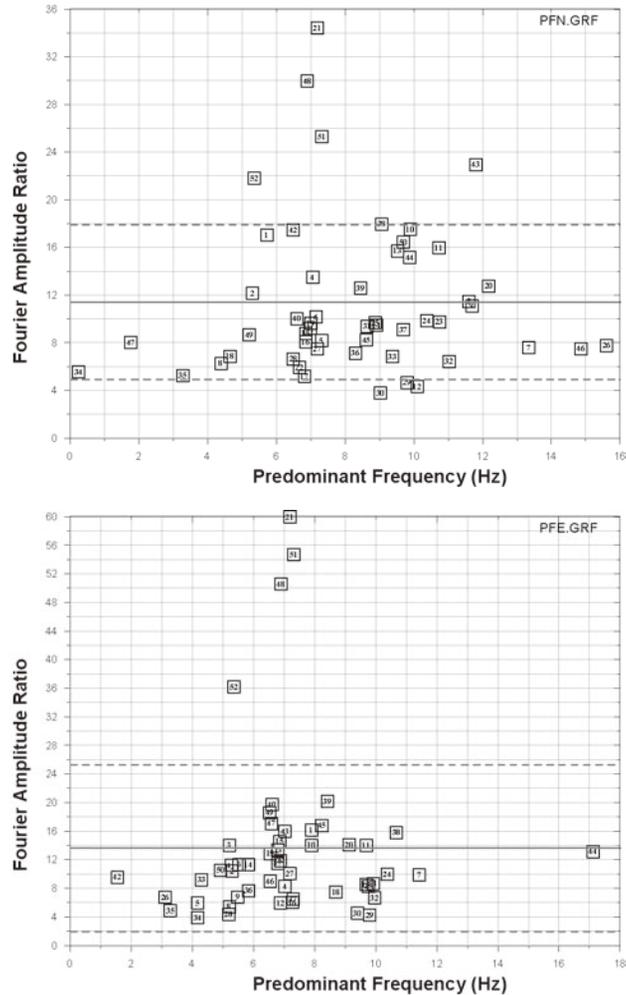


圖 11. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與顯著頻率的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，最大振幅譜比值的平均值分別為 11.4 與 13.6、加減一個標準偏差(以虛線表示)亦標示在圖上。

Figure 11. The relations of Fourier Amplitude Ratio and predominant frequency are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The average of Fourier Amplitude Ratio, plus and minus one standard deviation are also marked in the figure.

能量集中在 6.9~7.3Hz 產生了強烈的共振效應所致 (參見表 3)。另在南北(NS)對垂直方向(V)的最大振幅譜比值則約為 4-18 倍，但地震編號 21、48 與 51 的比值可達 25-34 倍，也是因為共振效應的結果。

### (三)地質及地體構造相關性分析

綜合了上述顯著頻率及頻譜比值的結果，本節進一步分析高雄小林地區的場址特性與地質及地體構造的相關性。在 Lee 等 (2001) 綜合了地質、工程鑽探資料及

標準貫入試驗之N值和頻譜分析等方法將全臺灣強震站的場址分為B、C、D、E4類。其中B類可視為岩盤的場址，而小林國小測站因處於河階地被歸為D類，與本研究結果有所差異，可能在分類時因測站地質狀況不夠清晰，僅能從小比例尺地質圖去比對分類，無法充分代表該測站場址之工程特性。此外，林孝維(2004)將強震站場址依顯著放大頻率區分為4類。第1類為振幅譜比曲線在小於1Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第2類為振幅譜比曲線在1Hz~10Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第3類為振幅譜比曲線在大於10Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第4類為振幅譜比曲線比值在整個頻帶趨近於1的測站。小林國小測站屬於第3類與本研究的結果在較高頻有大的放大現象相符合。同時本研究結果，小林地區的顯著頻率位於高頻(約7Hz)，與古美玲(2001)論文圖4.12中場址分類型態屬B類亦相符合。因此我們將小林國小測站的場址分類歸於B類。

另一個令人爭議、也是社會關注的重點是此次小林村500人失蹤的村落掩埋，是單純的天災或與曾文水庫越域引水工程有關呢？學術研究領域投入了相當多的人力來了解事件發生的緣由。李錫堤等人認為是莫拉克颱風帶來超級的雨量，先在小林村後方山坡誘發大型山崩，造成村落掩埋。山崩發生1小時後，堰塞湖潰決，大水沖刷被土石掩埋的村落；而造成巨災的癥結是因地質構造、地表水的滲入及滑動區坡度太高所致(李錫堤等, 2009)。另由日本NHK電台所製作的專輯，提及此次的山崩是屬於較少見的「深層崩塌」。究竟曾文水庫越域引水工程會不會引致山崩，學者調查結果聲稱可能性非常小。以一般的隧道鑽炸似乎不會引起如此大規模

的山崩。而由本研究場址分析顯示：小林地區最大振幅放大值約為4-20倍，但地震編號21、48與51的值可達50-60倍，探究原因，此3個地震的規模雖小(ML:2.81-3.75)，但距離近(震源距離:8.24-10.83公里)，但最主要的因素是因為其場址效應的顯著頻率約在7Hz與此3個地震能量集中在6.9~7.3Hz，產生了強烈的共振效應所致(參見表1、表3及圖9至圖11)。因此是否有人為外力因素會產生顯著頻率約在7Hz相近的能量，致使裂縫生成，而進一步的誘發深層崩塌，則有待進一步的探究！

## 六、結論

本研究使用中央氣象局於高雄小林國小所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算。分析高雄小林地區的強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性，以了解小林的環境區域特性如地層基本週期、場址效應，得到下列結論：

1. 顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即顯著頻率皆隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，同時，在顯著頻率與芮氏規模或顯著頻率與震源距離的相關性，水平向比垂直向有較高的相關係數。經計算垂直、南北、東西三方向顯著頻率的平均值分別為7.57Hz、7.30Hz及6.57Hz。
2. 最大振幅譜值與芮氏規模有正相關的關係，亦即最大振幅譜值隨著芮氏規模的增加而增加，但並不是規模最大的最大振幅譜值最高，還與震源距離有關。
3. 使用單站頻譜比法去分析高雄小林地

區的場址特性，南北/垂直與東西/垂直顯著頻率的平均值分別為 $8.24 \pm 2.91$  Hz及 $7.15 \pm 2.43$  Hz。

4. 最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離呈現非線性效應，會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少。此結果說明強震與弱震的放大函數會有所差異。
5. 南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向最大振幅譜比值的平均值分別為11.4與13.6。東西(EW)對垂直(V)方向的最大振幅譜比值約為4-20倍，但因為其場址效應產生了強烈的共振效應，最大振幅譜比值可達50-60倍，在南北(NS)對垂直方向(V)的最大振幅譜比值亦有類似的結果。

## 七、誌謝

本研究所使用之強震資料來自中央氣象局，在此謹表謝忱。感謝兩位審查委員的寶貴意見，讓本文內容更加充實。本研究經費由國科會贊助，計畫編號NSC99-2116-M-244-001，特表謝忱。

## 八、參考文獻：

- Chen C. C., J. J. Dong, C. Y. Kuo, R. D. Hwang, M. H. Li, C. T. Lee, R. Han, the Morakot Team, 2010, Kinematics of the tragic Shialin debris avalanche in Taiwan reconstructed by geophysical, geological and simulated evidence. (submitted to *Nature*).
- Lee, C. T., C. T. Cheng, C. W. Liao, and Y. B. Tsai., 2001, Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 1283-1297.
- Liu, K. S., T. C. Shin and Y. B. Tsai, 1999. A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP, *Terr. Atmos. Ocean*, Vol. 10, No 2, 377-396.
- Liu, K. S. and Y. B. Tsai, 2005, Attenuation Relationships of Peak Ground Acceleration and Velocity for Crustal Earthquakes in Taiwan., *Bull. Seis. Soc. Am.* Vol. 95, No3,1045-1058.
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Rep. Railway Tech. Res. Inst. Japan*, Vol. 30, No. 1, pp. 25-33.
- Wen, K. L., H. Y. Peng, Y. B. Tsai, and K. C. Chen, 2001, Why 1G Was Recorded at TCU129 Site During the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 1255-1266.
- Wen, K. L., T. M. Chang, C. M. Lin, and H. J. Chiang, 2006, Identification of nonlinear site response using the H/V spectral ratio method, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 17, 3, 533-546.
- Wen, K. L., C. M. Lin, H. J. Chiang, C. H. Kuo, Y. C. Huang, and H. C. Pu, 2008, Effect of surface geology on ground motions: The case of station TAP056 - Chutzuhu Site, *Terr. Atmos. Ocean*, Vol. 19, No.5, 451-462.
- 古美鈴,2001,高屏地區場址效應之探討,國立中央大學地球物理研究所碩士論文,共117頁。
- 李錫堤、董家鈞、林銘郎,2009,小林村災變之地質背景探討。地工技術,第122期,第87-94頁。

- 林孝維,2004,利用傅氏振幅譜比法分析全臺灣強震站的場址,國立中央大學地球物理研究所碩士論文,共217頁。
- 游峻一、蕭開平、胡志昕、李正兆、劉興昌,2009,莫拉克風災後(新開部落、小林村)地質調查及大體搜尋初步成果,災害防救電子報第050期。
- 葉永田,2000,九二一集集大地震後續短期研究告—嘉南與高屏地區微地動研究,共331頁。
- 國家災害防救科技中心,2009,莫拉克颱風概述。地工技術,第121期,第75-82頁。
- 楊偉甫、葉純松、連上堯、侯秉承、黃崇仁、李民政、李怡德,2010,曾文水庫越域引水工程於莫拉克颱風後所面臨之課題。地工技術,第126期,第29-38頁。
- 潘國樑,2010,地工小百科—小林地區的走勢滑動與洋蔥狀剝離理論。地工技術,第125期,第105-108頁。
- 劉坤松、辛在勤、李泮鑑、蔡義本,1994,中央氣象局強地動觀測計畫—基本自由場強震儀比較分析,氣象學報第三十九卷第三期,第132-150頁。
- 劉坤松和蔡義本,2007,以921集集地震之建築物強震資料探討大樓高層震度的放大效應,建築學報第61期,第151-173頁。

# **Analysis of Seismic Strong Ground Motion in Xiaolin Area, Kaohsiung**

Kun-Sung Liu

General Education Center & Hazard Mitigation Research Center, Kao Yuan University

## **ABSTRACT**

To investigate the strong ground motion characteristics, including the source, path, and site effect, in Xiaolin area, Kaohsiung is the purpose of this paper. Fifty-two strong motion records with magnitude ranging from 2.8-7.1 were collected from the Taiwan Strong-Motion Instrumentation Program conducted by the Central Weather Bureau of Taiwan, R.O.C. In strong motion records, the ratio of Fourier amplitude spectrum (FAS) component in the horizontal to that in the vertical is first found to decay with magnitude on Richter scale and hypocentral distance and interact nonlinearly with them. The average values of FAS ratio in north-south (NS) and east-west (EW) to the vertical component are 11.4 and 13.6, respectively, and the predominant frequencies in NS and EW components are about 8 Hz and 7 Hz, respectively. In addition, FAS ratio appears significantly high values of 50-60 in response to the resonance of seismic excitation.

**Key words:** Xiaolin, strong ground motion, site effect, the resonance of seismic excitation

