

台灣地區中度地震致災因素之探討

A Study on the Causes of Damage Produced by Moderate Earthquakes in Taiwan

主管單位：交通部中央氣象局地震測報中心

葉永田

高清雲

Yeh, Yeong Tein

Kao, Ching-Yun

嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所

陳承俊

高境良

Chen, C. C.

Kao, C. L.

交通部中央氣象局地震測報中心

摘要

自 1973 年以來台灣地區平均每年約發生 1.6 個 $6 \leq M_L < 7$ 的地震，其中只有小部分造成較嚴重之災害。這個情形顯示除了探討 $M_L \geq 7$ 的地震的致災因素之外，詳細研究 $6 \leq M_L < 7$ 的地震之致災原因是必須的。本研究擬蒐集數個 $6 \leq M_L < 7$ 的地震之相關資料，並從發震地區的地質構造環境、震源機制與過程、強地動的分佈與特性、受災地區的地質與人為環境等方面來研究這些中度地震的致災原因，同時作一些比較與探討。上述相關資料的完備性是決定研究成果良窳的最重要因素，2010/03/04 發生的甲仙地震 ($M_L=6.4$; $M_W=6.5$) 具有較為完整的相關研究資料，因而本計畫今年主要是以甲仙地震為研究標的。

關鍵詞：甲仙地震、強地動、譜震度、地震災害、地理資訊系統

Abstract

There are about 1.6 earthquakes with $6 \leq M_L < 7$ occurred around Taiwan since 1973 and only a few of them produced serious damage. It reveals the necessity of investigating the causes of damage of these moderate earthquakes, in addition to large earthquakes ($M_L \geq 7$). This study intends to do this from the directions of geology of earthquake source region, focal mechanism and source process, strong motion characteristics, and the geology and man-made environments of suffered area. The completeness of aforementioned earthquake related data is the most important factor to affect research quality. Since the data of Jiasian earthquake ($M_L=6.4$; $M_W=6.5$), occurred on March 4, 2010, are more complete, it is the research object of this year.

Keywords : Jiasian Earthquake, Strong Ground Motion, Spectrum Intensity, Earthquake Disaster, Geographic Information System.

一、前言

自 1900 年以來，台灣地區約有 100 個地震引發不同程度的災害(中央氣象局網站)，其中規模 $M_L \geq 6.0$ 約有 73 個，圖一顯示的是它們的震央分布，表一則是這 73 地震的詳細震源資料和引致的災害情況(鄭世楠等人，2011)。從表一我們可以找到這 73 個地震中，約有 57 個地震至少造成一個以上的人員傷亡，其中災情較嚴重(造成 10 個以上人員傷亡)的地震約有 32 個，這 32 個災害性地震中規模 $M_L \geq 7$ 的僅有 12 個(包括 1906 梅山地震和 1935 新竹-台中地震；這二個地震的規模個人認為應該進一步討論，因此仍然保留它們在 $M_L \geq 7$ 之列)，而有 20 個其規模是介於 6~7($6 \leq M_L < 7$)之間，大約 5-6 年發生一次。根據目前的地震目錄(鄭世楠等人，2011)，自 1973 年以來台灣地區每年約發生 1.6 個規模介於 6~7($6 \leq M_L < 7$)的地震，也就是說規模介於 6~7 的地震至少有 1/10 以上的機會導致相當程度的災害。這個情形顯示除了探討 $M_L \geq 7$ 的地震的致災因素之外，詳細研究 $6 \leq M_L < 7$ 的地震(特別是位在台灣島內或近海區域的地震)之致災原因是必須的。

本研究擬蒐集數個台灣地區 1993 之後規模介於 6~7($6 \leq M_L < 7$) 的地震之相關的地震、地物、地質及震災資料。並從發震地區的地質構造環境、震源機制與過程、強地動的分佈與特性、受災地區的地質與人為環境等方面來研究這些中度地震的致災原因，並作一些比較與探討。上述相關資料的完備性是決定研究成果良窳的最重要因素，2010/03/04 發生的甲仙地震($M_L=6.4$ ； $M_W=6.5$)具有較為完整的相關研究資料，因而本計畫第一年主要是以甲仙地震為研究標的。

二、方法與資料

2.1 強地動參數

本研究使用最大地動尖峰加速度(PGA)，與加速度、速度、以及位移等三個譜震度(Spectral Intensities)來代表地動強度。最大地動尖峰加速度的意義明顯，不須贅述，下列段落則對譜震度作一個簡單的描述。

葉永田(2007)修飾簡文郁等(2002)提出的概念，將平均譜震度參數定義如下：

$$\bar{S}(\xi) = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} S(\xi, T) dT \quad (1)$$

其中，

$$\begin{aligned} S(\xi, T) &= S_a(\xi, T) && \text{(短週期)加速度控制區} \\ &S_v(\xi, T) && \text{(中週期)速度控制區} \\ &S_d(\xi, T) && \text{(長週期)位移控制區} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 S_a 、 S_v 、 S_d 分別是單自由度結構物(阻尼比為 ξ 、自然週期為 T)的加速度、速度、位移反應譜。譜震度的截切週期(Cut-Off Period) T_1 和 T_2 屬於區域特性，可從研究區域內大量的強震資料求取平均。高清雲和葉永田(2010)建議使用下述的方法推求截切週期 T_1 和 T_2 ：由於臺灣地區的建築物大都介於 1 到 56 層之間，其對應的自然周期依序為 0.1 至 3 秒，因此 $T_1(S_a)$ 和 $T_2(S_d)$ 可分別定為 0.1 秒和 3 秒，而 $T_2(S_a)$ 和 $T_1(S_v)$ 共同使用 $T_1(S_v)$ 的值， $T_1(S_d)$ 和 $T_2(S_v)$ 共同使用 $T_1(S_d)$ 的值。每個地震的各測站之強震歷時記錄，可依圖二所示的方法推求 $T_1(S_v)$ 和 $T_1(S_d)$ 的值，而個別地震的 $T_1(S_v)$ 和 $T_1(S_d)$ 的平均值可由下式求得：

$$\bar{T}_1(S_v) = \sum_i T_1(S_v)_i / N \quad (3)$$

$$\bar{T}_1(S_d) = \sum_i T_1(S_d)_i / N \quad (4)$$

上式中 N 是強震記錄的個數，也就是對應的強震測站個數。如此，平均譜震度參數的定義可以改寫成：

$$SI_a(\xi) = \frac{1}{\bar{T}_1(S_v) - 0.1} \int_{0.1}^{\bar{T}_1(S_v)} S_a(\xi, T) dT \quad (\text{短週期})\text{加速度控制區} \quad (5)$$

$$SI_v(\xi) = \frac{1}{\bar{T}_1(S_d) - \bar{T}_1(S_v)} \int_{\bar{T}_1(S_v)}^{\bar{T}_1(S_d)} S_v(\xi, T) dT \quad (\text{中週期})\text{速度控制區} \quad (6)$$

$$SI_d(\xi) = \frac{1}{3 - \bar{T}_1(S_d)} \int_{\bar{T}_1(S_d)}^3 S_d(\xi, T) dT \quad (\text{長週期})\text{位移控制區} \quad (7)$$

這個方法（以程式計算）的優點是：方便、快速、準確、免除人為主觀因素。這樣定義的譜震度可以作為評估地震災害的有效指標（葉永田，2007；高清雲和葉永田，2011）。由於與譜震度相關的地震波之週期範圍明確，將來在探討譜震度的衰減時也可以將物理衰減與幾何衰減分開處理。

2.2 甲仙地震

2010 年 3 月 4 日上午 8 時 18 分，高雄地區發生一起芮氏規模 $M_L=6.4$ 之地震，震央位置在北緯 22.97 度、東經 120.71 度(甲仙地震站東偏南方約 17.0 公里)，震源深度 22.64 公里。該地震事件為高雄地區近年來規模較大的地震，震撼整個台灣，各地都感受到明顯搖晃，嘉義縣大埔地區及台南縣的楠西地區最大震度皆達到六級。依據中央氣象局之統計，在主震發生後 28 小時內，約有 275 次的餘震發生，

最大的餘震達到規模 5.7。這次地震造成的人員傷害約 96 人，以及部分建築物、橋樑和地質的破壞，並造成台灣高鐵出軌(中央地質調查所，2010；國家地震工程研究中心，2010)；建物損壞並遠達嘉義市。若非震央地區位於人口及建設較少的偏遠山區，這個地震的震災規模可能大增。

三、結果與討論

圖三為蒐錄到甲仙地震的強震歷時之測站分佈圖。甲仙地震加速度、速度和位移控制區之範圍分別為 0.1s~0.4s、0.4s~0.85s 和 0.85s~3s，其對應之樓層分別為 1~4 樓、5~10 樓和 11 樓(含)以上。甲仙地震的震央位於偏遠山區，而主要震災則位於人口及建設較多的台灣西南部地區，其災害資料包括建築物災害(目前所收集到的均為 1~4 樓)、橋樑災害以及地質災害資料。圖四~圖八分別為震災資料和兩水平向 PGA 最大值、垂直向 PGA、兩水平向 SI_a 最大值、兩水平向 SI_v 最大值、兩水平向 SI_d 最大值分布比較圖。由這些圖可以看出：一般而言，水平向的強地動比垂直向的強地動對災損有較佳的指示性，低矮建築物破壞與兩水平向 PGA 最大值及兩水平向 SI_a 最大值分布對應較佳(圖四和圖六)，橋梁破壞與兩水平向 SI_v 最大值及兩水平向 SI_d 最大值分布對應較佳(圖七和圖八)，地質災害則和兩水平向 PGA 最大值及垂直向 PGA 分布對應較佳(圖四和圖五)。特別值得一提的是：古蹟的損壞與 SI_v 的相關性比與 SI_a 好(比較圖六和圖七)，這可能是由於古蹟的建材相對較軟，使得其固有週期稍長。水平向最大加速度分布圖(圖四)和 SI_v 分布圖(圖七)的樣式相似度很高，這可能說明了甲仙地震強地動的主要頻率範圍約落在 0.4s~0.85s 間，也說明了甲仙地震的災損分布，與水平向最大加速度分布(圖四)及 SI_v 分布(圖七)有幾乎一樣好的對比。

由圖六至八可以看出，大體而言，受損建築物大致位於地動參數 SI_a 、 SI_v 與 SI_d 大於 400gal、30cm/sec 與 4cm 之區域範圍內。另外應該一提的是甲仙地震在斷層下盤地區引致的災害範圍相對於上盤地區而言頗大，這點和 921 集集地震有些不同，主要的原因可能是甲仙地震的錯動斷層為盲斷層，其斷層錯位沒有到達地表，因而在斷層上下盤於地表的地區均引起相當程度的位移。而 921 集集地震的車籠埔斷層上盤已錯移地表達數公尺之多，使得上下盤的錯位有較為尖銳(下盤地區的位移很小)的差異所致(余聰明，2004)。此外，由強地動參數分布圖也可看到，近地表斷層分布對強地動分布和地震災害的影響不容輕視。

圖九為甲仙地震斷層滑移量分布在地面上的投影(Lee et al, 2011)。依據 Lee et al (2011)的反演結果，甲仙地震的錯動(slip)始於斷層東南段約 20 公里的深部地殼，錯動形式為具少許左移的逆斷層(上盤在東北側)，接著，錯動持續向西北端的淺部傳遞，且左移分量增大，最後到達西北端約 5 公里的淺部地殼。他們發現甲仙地震的主要餘震分布與較深部的錯位區相當一致，而西北端的淺部錯位區則幾乎沒有餘震發生。他們也說錯動的複雜度是受到震源區域斷層分布的影響(圖九)。檢視圖四至圖八的各種強地動參數分布，我們可以看到斷層對強地動分布的影響非常明顯而且重要，特別是在多條斷層交錯的區域。因此未來近震源的波形反演，可能必須加入斷

層構造(不連續面)，才能得到較接近事實的結果(雖然這是一個很大的挑戰)。

四、結論與建議

本研究以甲仙地震為研究對象，由強地動的分佈與災害分布的關係可知短週期結構破壞與水平向 PGA 及 SI_a 關係密切，中長週期結構破壞與 SI_v 及 SI_d 關係密切，而地質災害則與水平向和垂直向 PGA 的關係較為密切。大體而言，受損建築物大致位於地動參數 SI_a 、 SI_v 與 SI_d 大於 400gal、30cm/sec 與 4cm 之區域範圍內。此外，甲仙地震在斷層下盤地區引致的災害範圍相對於上盤地區而言頗大，究其原因可能是甲仙地震的錯動斷層為盲斷層，其斷層錯位沒有到達地表，因而在斷層上下盤於地表的地區均引起相當程度的位移。此外，近地表斷層分布對強地動分布和地震災害的影響也不容輕視。

參考文獻

1. 中央地質調查所，2010：“20100304 地震地質調查報告”，經濟部中央地質調查所。
2. 余聰明，2004. 斷層錯動、地殼變位及強地動與地震災害相關性之研究：以 1935 年及 1999 年台灣中部兩次地震為例。國立中央大學博士論文。
3. 高清雲和葉永田，2010. 尚未發表。
4. 國家地震工程研究中心，2010. “2010 年 0304 高雄甲仙地震事件勘災報告”，國家地震工程研究中心。
5. 葉永田，2007. 譜震度預估模式的發展及其應用(II)，國科會專題研究計劃成果報告(NSC 95-2119-M -041-001)。
6. 鄭世楠等人，2011. 尚未發表。
7. 簡文郁、張毓文、溫國樑、羅俊雄，2002. 台北盆地地盤效應分析，結構工程，17，3，3-17。
8. Lee, S. J., Liang, W. T., Mozziconcci, L., Hsu, Y. J., Lu, C. Y., Huang, W. G., and Huang, B. S., 2011. Source complexity of the 4 March 2010 Jiashian, Taiwan, Earthquake determined by joint inversion of teleseismic and near field data, in review.

表 1、臺灣地區自 1900 以來 $M_L \geq 6.0$ 的有災害地震

編號	時間	地區	緯度	經度	深度(公里)	ML	MW	死(人)	傷(人)	全倒(戶)	破損(戶)
1	190106070805	宜蘭市附近	24.700	121.700	20.0	6.2	6.2			1	57
2	190404241439	嘉義市附近	23.375	120.475	2.0	6.1	6.1	3	10	66	840
3	190411060425	嘉義朴子附近	23.575	120.250	7.0	6.1	6.1	145	158	661	3170
4	190603170642	嘉義梅山附近	23.580	120.450	6.0	6.7	6.9	1258	2385	6772	14218
5	190604140318	台南白河附近	23.400	120.400	20.0	6.4	6.4	15	84	1794	10037
6	190801111135	花蓮光復附近	23.700	121.400	10.0	6.7	6.9	2		3	5
7	190904150354	台北中和市附近	25.100	121.475	72.0	7.0	7.4	9	51	123	1050
8	190905231844	埔里附近	24.075	120.950	5.0	6.1	6.1		6	10	32
9	190911211536	南澳南方	24.400	121.800	20.0	7.0	7.4		4	14	39
10	191004120822	基隆東方外海	25.100	122.900	200.0	7.3	7.8			13	59
11	191006171328	巴士海峽	21.000	121.000	0.0	6.9	7.1				小損害
12	191011141534	花蓮東北東方外海	24.200	122.000	20.0	6.5	6.6				1
13	191212250207	花蓮市附近	24.000	121.600	0.0	6.4	6.4				1
14	191301080650	花蓮市附近	24.000	121.600	0.0	6.2	6.2			2	
15	191608281527	日月潭附近	24.000	120.025	20.0	6.8	7.0	16	159	628	4885
16	191701050050	埔里附近	24.000	120.975	2.0	6.2	6.2	54	85	130	625
17	191803271152	蘇澳東方海上	24.600	121.900	7.0	6.0	6.0		3		6
18	192006051221	花蓮東方外海	23.925	122.125	6.0	7.5	8.0	5	20	273	1257
19	192209020316	蘇澳東方外海	24.575	122.350	20.0	7.2	7.7	11	23	17	196
20	192209150331	蘇澳東方外海	24.600	122.300	10.0	7.0	7.3		5	24	389
21	192506141338	花蓮東方外海	23.900	121.900	20.0	6.1	6.1		1		339
22	192708250209	台南新營附近	23.300	120.500	20.0	6.5	6.6	11	63	214	1209
23	193012081610	台南新營附近	23.300	120.400	20.0	6.3	6.3	4	25	214	449
24	193012220752	台南新營附近	23.300	120.400	10.0	6.0	6.0		14	121	2719
	6.1					6.1					
	6.2					6.2					
25	193408111618	宜蘭市附近	24.833	121.833	20.0	6.3	6.3		3	7	11
26	193502100320	龜山島東方	24.900	122.100	60.0	6.1	6.1				小損害
27	193504210602	苗栗卓蘭附近	24.350	120.820	5.0	6.9	7.2	3276	12053	17907	36781
28	193507170019	後龍溪口附近	24.600	120.700	30.0	6.0	6.0	44	391	1734	5887
29	193509040937	綠島南方海底	22.500	121.550	20.0	7.0	7.3				114
30	193608221451	恆春東方海底	22.000	121.200	30.0	7.0	7.4		3		
31	193712081632	成功東方海底	23.100	121.400	20.0	6.9	7.1				小損害
32	193809071203	花蓮東南方海底	23.800	121.800	0.0	6.9	7.1				小損害
33	194112170319	嘉義中埔附近	23.400	120.475	12.0	7.0	7.3	358	733	4520	11086
34	194310230001	花蓮壽豐附近	23.800	121.500	5.0	6.0	6.0	1	1	1	148
35	194402060120	花蓮鳳林附近	23.800	121.400	5.0	6.2	6.2			2	388
36	194612050647	台南新化附近	23.070	120.330	5.0	6.1	6.1	74	482	1954	2084
37	195110220534	花蓮東南10公里	23.875	121.725	4.0	7.1	7.5				
	195110221129	花蓮東北15公里	24.075	121.725	1.0	7.0	7.3	68	856	0	2382
	195110221343	花蓮東南30公里	23.825	121.950	18.0	6.9	7.1				
38	195111250247	台東池上附近	23.100	121.225	16.0	6.5	6.6				
	195111250250	花蓮玉里附近	23.275	121.350	36.0	7.0	7.4	17	326	1016	582
39	195504041912	鵝鑾鼻南方海底	21.775	120.975	0.0	6.5	6.6		7	22	171
40	195702240426	花蓮東方海上	23.900	121.850	17.0	6.9	7.2	11	33	64	115
41	195710200229	花蓮鳳林附近	23.600	121.550	15.0	6.3	6.3	4			
42	195904270440	三貂角東方外海	24.725	122.475	135.0	7.2	7.6	1		9	4
43	195908151657	鵝鑾鼻東南方	21.825	121.400	20.0	6.9	7.2	17	68	1214	1357
44	195909251036	蘭嶼西方海底	21.950	121.200	10.0	6.1	6.1		3	3	65
45	196302131651	南澳東方海底	24.475	122.225	26.0	7.1	7.3	15	3	6	6
46	196401182004	曾文水庫附近	23.150	120.575	13.0	6.3	6.3	106	650	10520	25818
47	196505180119	蘭嶼東方	22.525	121.150	0.0	6.1	6.9	1	1	21	70
48	196603130031	花蓮東方海底	24.050	123.000	42.0	7.3	7.7	4	11	24	30
49	197201251006	綠島東方50公里	22.550	122.100	61.0	7.1	7.4				
	197201251141	綠島東北50公里	23.050	122.325	16.0	6.9	7.1	1	1	5	4
50	197204241757	花蓮瑞穗附近	23.475	121.475	0.0	6.7	6.8	5	17	50	98
51	197807232242	大武東方海底	22.352	121.329	6.1	7.1	7.2				小損害
52	197812231923	台東長濱東方	23.297	122.005	4.1	6.9	7.0	2	3	0	2
53	198305100815	宜蘭太平山	24.458	121.507	1.2	6.0	5.7				小損害
54	198601162104	宜蘭東方海底	24.763	121.961	10.2	6.1	6.0				小損害
55	198605201325	花蓮附近	24.082	121.592	15.8	6.1	6.2	1	5		
56	198611150520	花蓮東方海底	23.992	121.833	15.0	6.8	7.4	15	62	35	32
57	199012140350	花蓮水瀨附近	23.766	121.627	1.3	6.0	6.3	2	3	4	11
58	199405241200	花蓮東方外海	23.827	122.603	4.4	6.6	6.5				小損害
59	199406050909	南澳附近	24.462	121.838	5.3	6.5	6.3	1	5		3
60	199506251459	南澳附近	24.606	121.669	39.9	6.5	5.9	2	4	6	1
61	199807171251	阿里山西方14.2公里	23.503	120.663	2.8	6.2	5.7	5		18	
62	199909210147	集集附近	23.853	120.816	8.0	7.3	7.6	2415	11334	51722	53831
63	199910221019	嘉義市附近	23.517	120.423	16.6	6.4	5.8		262	7	
64	200006110223	玉山北方	23.901	121.109	16.2	6.7	6.4	2			
65	200203311452	花蓮東方海底	24.140	122.192	13.8	6.8	7.1	5	269		160
66	200205151146	宜蘭蘇澳附近	24.651	121.872	8.5	6.2	6.1	1			
67	200312101238	台東成功附近	23.067	121.398	17.7	6.4	6.8		14		
68	200604011802	台東卑南附近	22.884	121.081	7.2	6.2	6.1		37	14	7
69	200612262026	墾丁西南方海底	21.687	120.555	44.1	7.0	7.0	2	42	3	4
70	200612262034	墾丁西方海底	21.970	120.420	50.2	7.0	6.9				
71	200911051732	南投民間附近	23.789	120.719	24.1	6.2	5.6		2		
72	200912192102	花蓮東南方海底	23.788	121.663	43.8	6.9	6.4		1		
73	201003040408	甲仙附近	22.970	120.710	22.6	6.4			96		

台灣自1900年以來災害性地震分佈

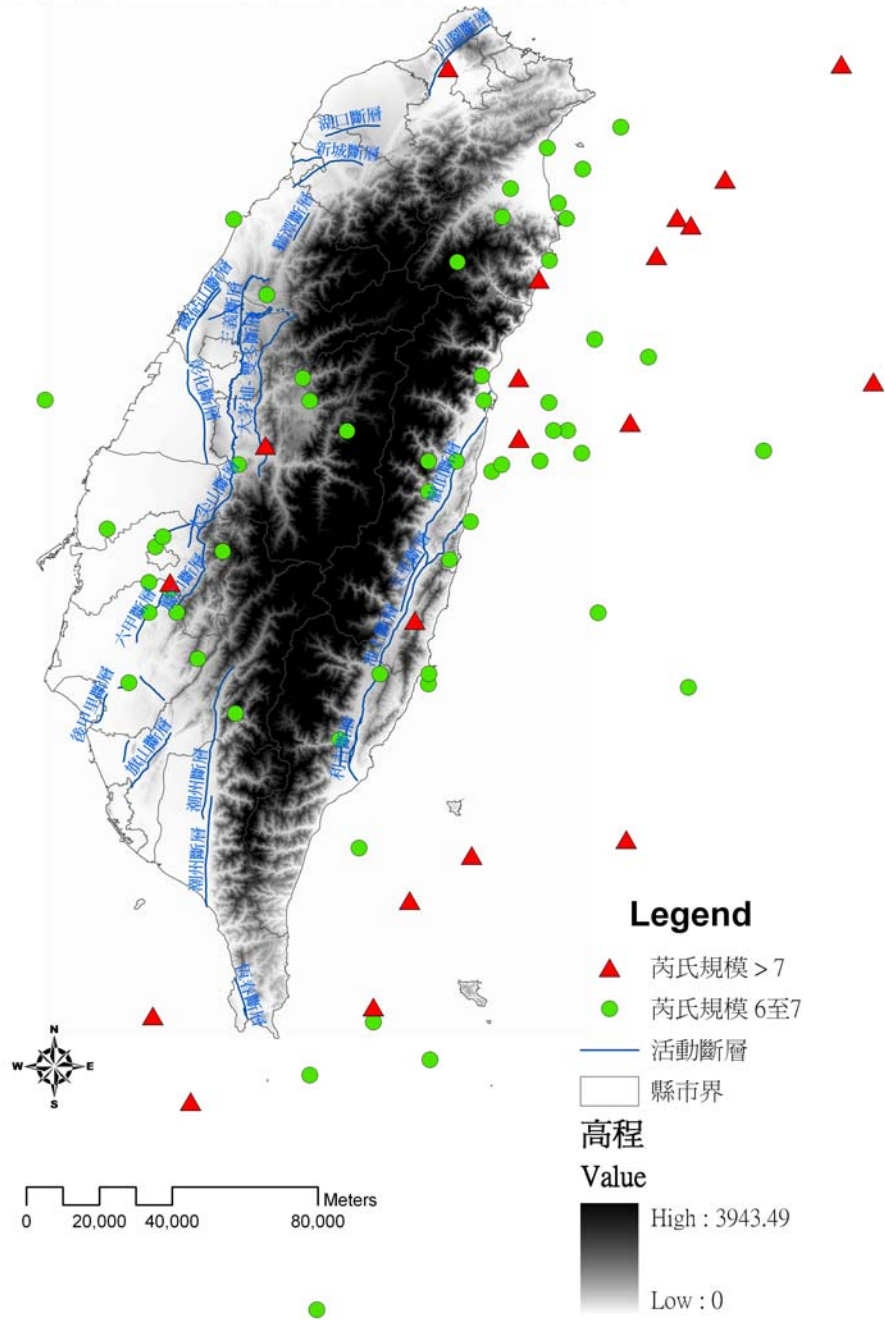


圖 1、臺灣地區自 1900 以來 $M_L \geq 6.0$ 的有災害地震震央分布

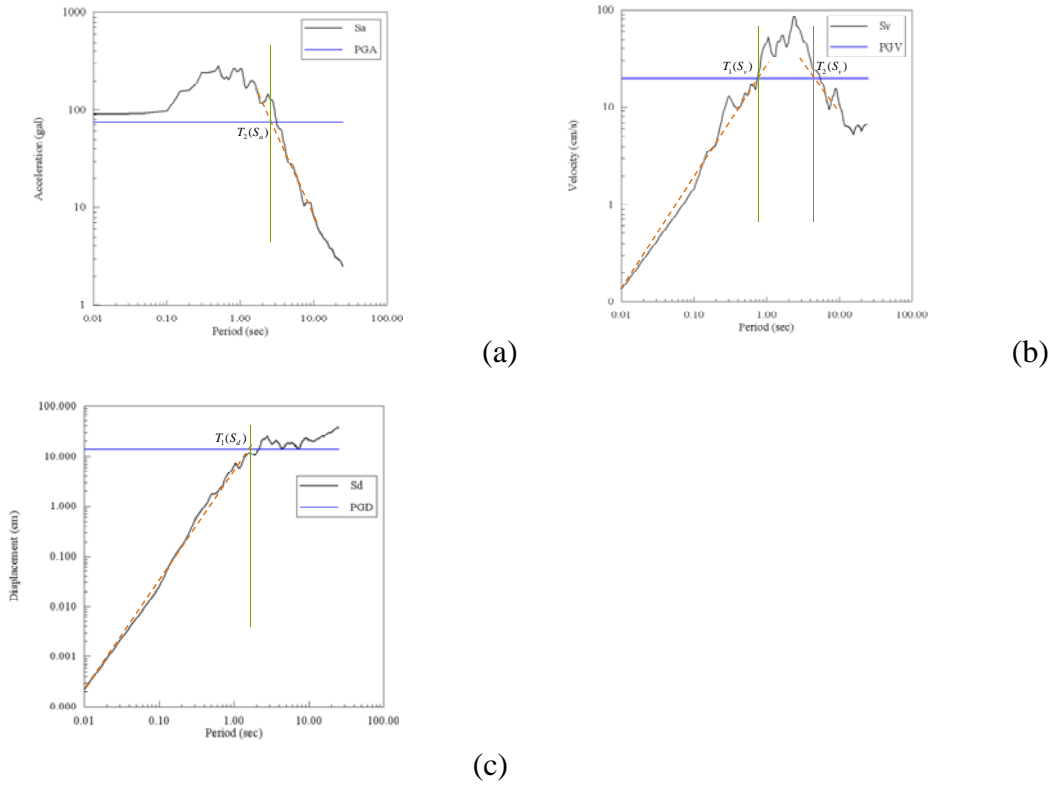


圖 2、截切週期 T_1 和 T_2 的決定方法示意圖 (a) S_a (b) S_v (c) S_d

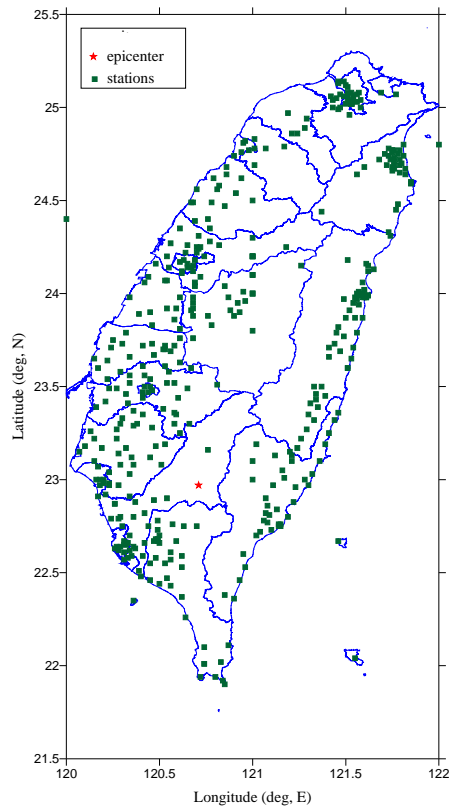


圖 3、本研究使用到的甲仙地震強震歷時的測站分布

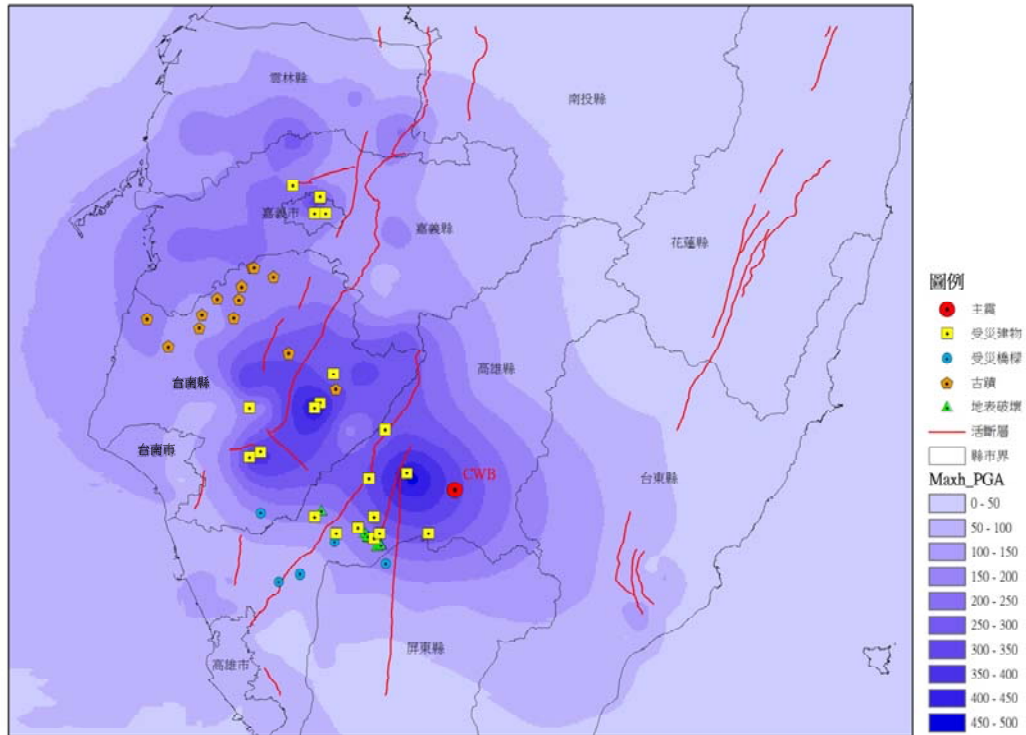


圖 4、甲仙地震災害分布與兩水平向 PGA 最大值分布比較

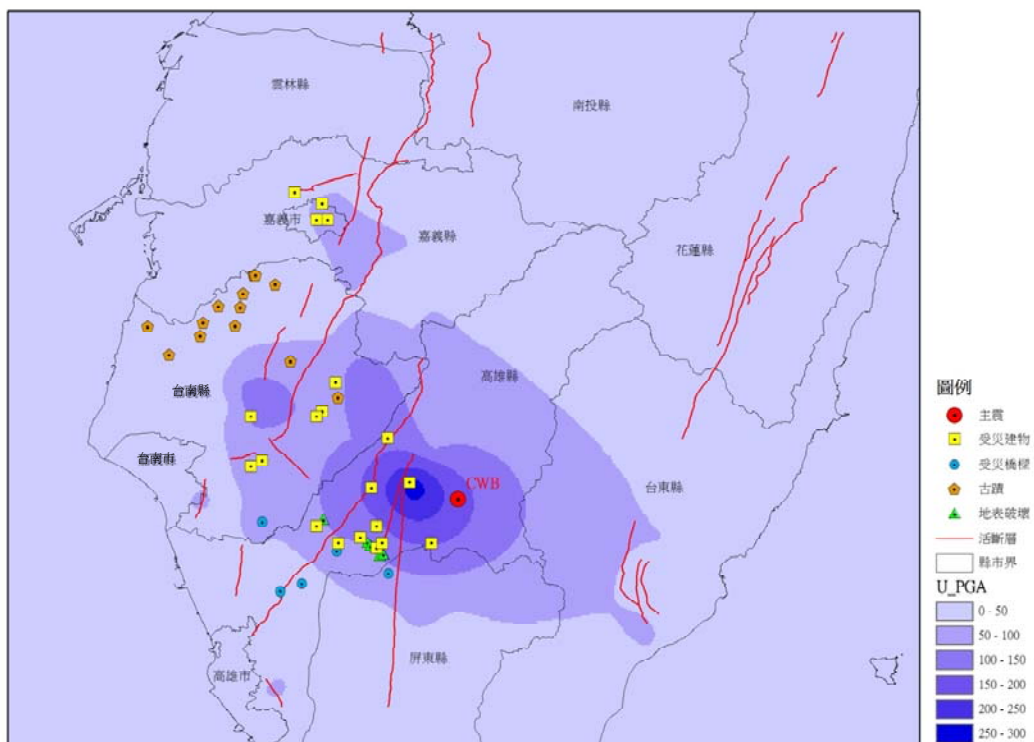


圖 5、甲仙地震災害分布與垂直向 PGA 分布比較

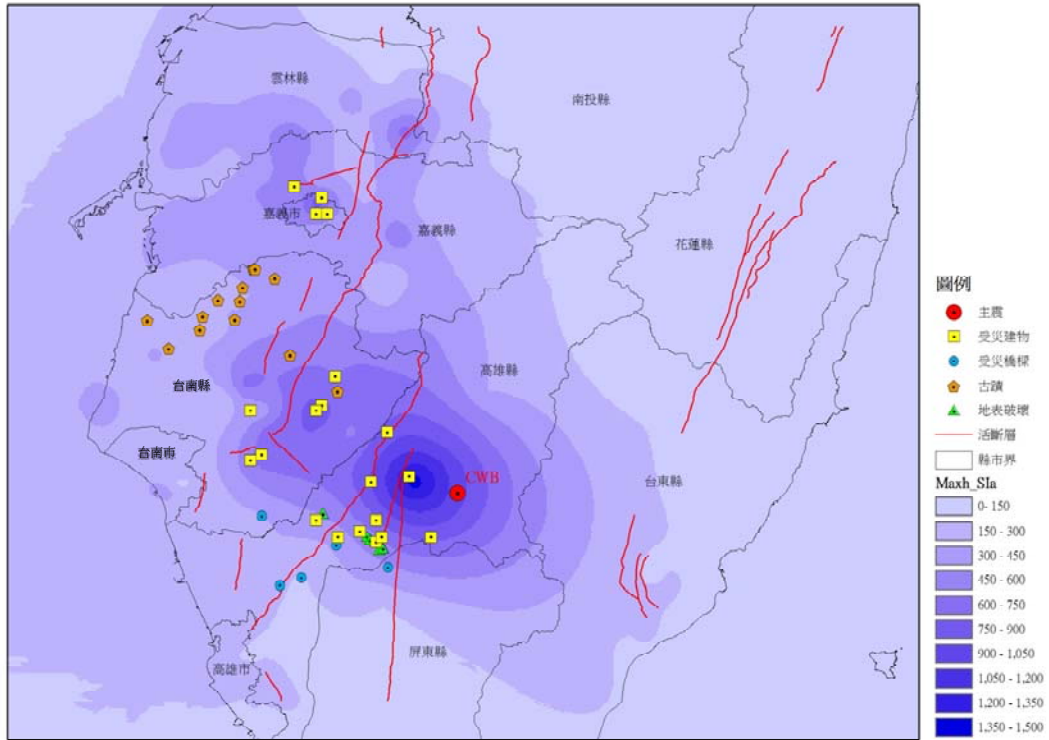


圖 6、甲仙地震災害分布與兩水平向 SI_a 最大值分布比較

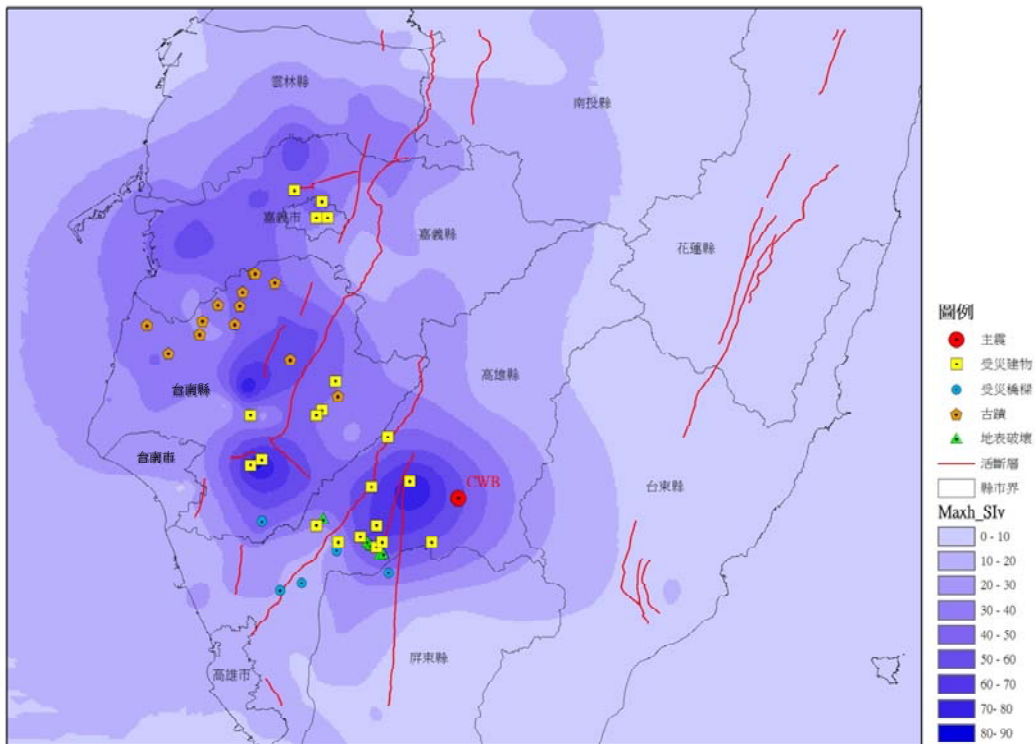


圖 7、甲仙地震災害分布與兩水平向 SI_v 最大值分布比較

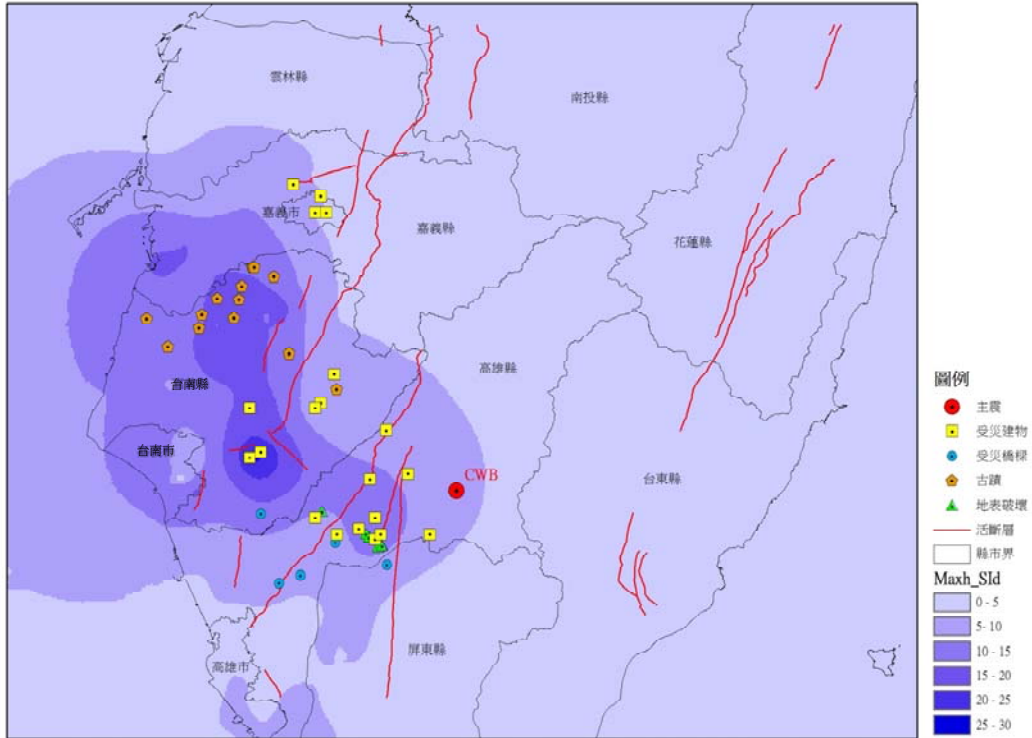


圖 8、甲仙地震災害分布與兩水平向 SI_a 最大值分布比較

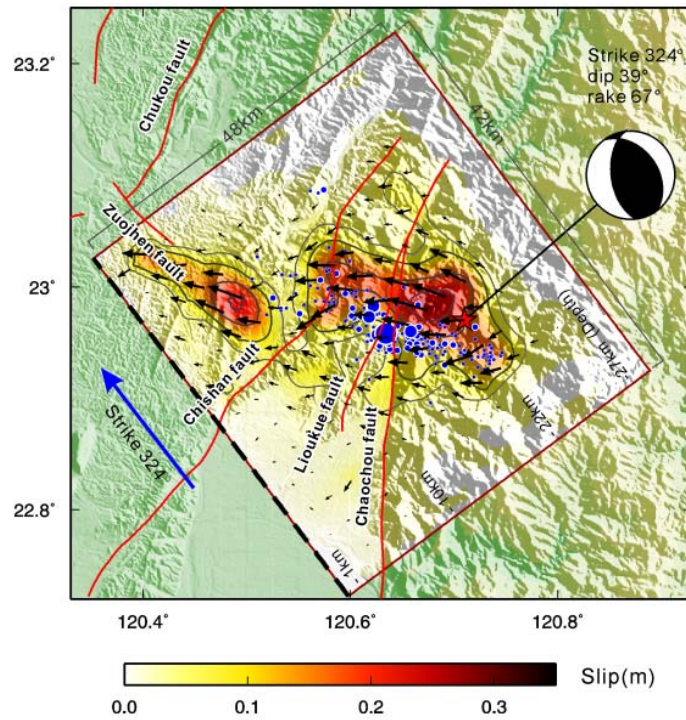


圖 9、甲仙地震的餘震分布和斷層滑移量分布在地面上的投影
(from Lee et al., 2011)