

譜震度衰減距離選擇之研究

高清雲* 葉永田

嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所

摘要

地震工程學家常以最大地表加速度 (Peak Ground Acceleration) 來估計可能的震災，但最大地表加速度只能代表作用時間極短的(最大)地震力，且一般而言，組成最大地表加速度的地震動成份的振動頻率較高，對於結構簡單且自然振動頻率較高的低矮建築物影響較大，以今日複雜的結構物環境，很難只用最大地表加速度來推估可能的震災。譜震度 (Spectrum Intensity) 包含地震延時、振幅和頻率內涵等與震災相關的種種特性，因此更適合做為評估地震災害的指標。雖然探討譜震度分佈時距離 (在相關文獻裡距離定義為場址到震源距離或場址到地表斷層線距離) 是個重要參數，但從來沒有文獻探討過不同型態地震的適用距離。本研究定義距離為場址到能量源頭的距離，並以 921 地震 (有明顯的斷層錯動) 和嘉義地震 (無明顯的斷層錯動) 為對象從地震能量輻射的觀點來探討距離的選擇方式。

關鍵詞：譜震度、衰減率、距離、基因演算法

*通訊作者：嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所

TEL: +886-6-2664911 ext. 6106

FAX: +886-6-2667320

E-mail: chingyun@mail.chna.edu.tw

壹、前言

地震工程學家常以最大地表加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 來估計可能的震災，但最大地表加速度只能代表作用時間極短的 (最大) 地震力，且一般而言，組成最大地表加速度的地震動成份的振動頻率較高，對於結構簡單且自然振動頻率較高的低矮建築物影響較大，以今日複雜的結構物環境，很難只用最大地表加速度來推估可能的震災。Housner(1952)建議譜震度 (Spectrum Intensity, SI) 可作為地震危險度的指標。Housner 之後，有一些地震工程學者繼續探討不同週期範圍的譜震度及其應用(Hidago and Clough, 1974; Kappos, 1991; Matsumura, 1992;

Martinez-Rueda, 1998); Matsumura(1992)的研究結果顯示，作為地震動強度(震度)的量度，譜震度比 PGA (最大地表加速度：適用於固有週期較短的結構物) 和 PGV (Peak Ground Velocity) (最大地表速度：適用於固有週期較長的結構物) 有較大的 (週期) 適用範圍。最近，簡文郁等(2002)及葉永田(2007)以台灣地區的強震紀錄研究震度衰減律和強地動的地盤效應，其結果顯示譜震度比最大地表加速度有較好的震災指標性。

在工程應用上，地震危害度裡衰減關係的發展對地震災害減災是一個很有用的方法。雖然探討譜震度分佈時距離 (在相關文獻裡距離定義

爲場址到震源距離或場址到地表斷層線距離 (Campbell, 1981; 簡文郁等, 2002)) 是個重要參數，但從來沒有文獻探討過不同型態地震的適用距離。本研究定義距離爲場址到能量源頭的距離，並以921地震（有明顯的斷層錯動）和嘉義地震（無明顯的斷層錯動）爲對象從地震能量輻射的觀點來探討距離的選擇方式。某種週期(或頻率)的地震能量從輻射的起始點到場址的時間與輻射的起始點到場址的距離成正比，因此，藉由比較某種週期(或頻率)的地震能量從輻射的起始點到場址的等時圖和距離的等值圖即可知道哪種距離較適當。此外，本研究進一步比較選擇不同距離的譜震度衰減模式的迴歸誤差，較適當的距離應有較小的迴歸誤差。地動參數(例如 PGA、譜震度等)和地震參數(例如地震規模、震源到場址距離、斷層形式、場址狀況)相關的衰減模式則有很多種 (Abrahamson and Silva, 1997; Sadigh et al., 1997; Campbell, 1981)，因爲 Campbell (1981)的衰減模式可以合理地模擬台灣 PGA 的衰減(簡文郁等, 2002)，因此，本研究採用 Campbell (1981)所提的衰減模式。以往衰減模式裡的係數都是以最小平方法求得，例如 Campbell (1981) 使用加權最小平方法嘗試補償資料在距離上不均勻分配的情況。爲了克服傳統數學方法(例如最小平方法)的缺點，例如起始點的猜測影響最佳解是否可以求得、函數微分必須存在、所求的解爲局部最佳解非全域最佳解，本研究使用基因演算法(Genetic Algorithm, GA)求衰減模式裡的係數全域最佳解。此外，考量地震致災及能量輻射的問題，本研究每一筆資料的權重爲距離(場址到震源的距離或場址到斷層面的最短距離)的函數。

貳、研究方法

一、譜震度

Housner(1952)首先提出譜震度的概念，他建議的譜震度是週期 0.1 到 2.5 秒的譜速度之積分，簡文郁等(2002)所使用的譜震度則爲譜加速度的平均值，與其原始的定義不同。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，

$$S(\xi, T) = S_a(\xi, T) \text{ (短週期)加速度控制區}$$

$$S_v(\xi, T) \text{ (中週期)速度控制區}$$

$$S_d(\xi, T) \text{ (長週期)位移控制區} \quad (2)$$

在定義譜震度放大區間的截切週期(Cut-off Period) T_1 和 T_2 時，由於屬於區域特性，可從研究區域內大量的強震資料求取平均。本研究擷取 T_1 和 T_2 的方法如下(葉永田, 2007)：以 S_v 反應譜爲例(圖 1)，超過 PGV 的部分則定義爲放大區。以 0.02s(15s)週期對應的 S_v 值沿著譜線延伸(橘色虛線，由最小平方法擬合所得)至與 PGV 交接處即爲 T_1 (T_2)。 S_a 及 S_d 也是用同樣方法，只是依照譜線形狀， S_a 僅能決定 T_2 值、 S_d 僅能決定 T_1 值。值得注意的是因爲譜震度形狀的關係，從 S_a (S_d) 只能算出 T_2 (T_1)。此外，因爲 T_1 比 T_2 可靠，本研究只採用 T_1 來區分這三個控制週期。這個方法(以程式計算)的優點是：方便、快速、準確、免除人爲主觀因素。缺點是碰到反應譜形狀特別怪異(機會比較少)時，會偏差比較多，所以仍然要重新檢視結果，必要時加以修正。此外，葉永田(2007)發現譜震度放大區間的截切週期與地震規模有關，其週期和頻寬且隨著規模增加而增大。這樣定義的譜震度可作爲人爲結構物地震災害的良好指標(葉永田, 2007)。由於與譜震度相關的地震波之週期範圍明確，在探討譜震度的衰減時也可將物理衰減與幾何衰減分開處理。



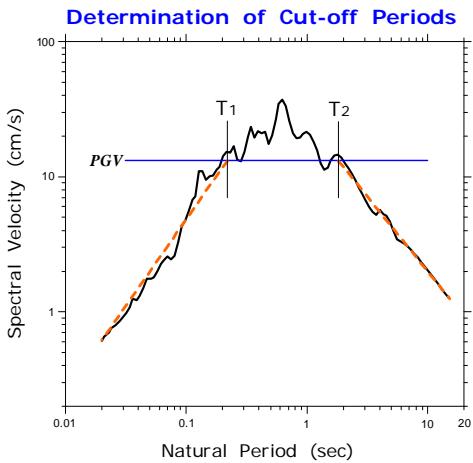


圖 1 速度反應譜截切週期 T_1 和 T_2 的決定方法之示意圖。短週期與長週期範圍之兩條斜虛線為與觀測譜線之最小擬合。

一般常用的震度衰減律僅包括地震規模和距離兩個參數，很難表達震度受震源過程(Source Process)的複雜性的影響，特別是像 921 集集地震這樣伴隨著很長的斷層錯動之震源的情況時。要探討地震的震源斷層錯動對譜震度分佈的支配情況，可以從研究不同週期的地震波之波源與其傳播路徑著手。

單自由度(Single Degree of Freedom)的線性結構物受到地震動的影響時，其運動方程式可以寫成下式：

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

其相對位移反應解 $x(t)$ 可以寫成下式：

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

上式中， ω 為結構物的無阻尼自然振動頻率；

$$\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

率； $\ddot{x}_g(t)$ 是地動加速度歷時； ξ 為結構物的阻尼比。而位移反應譜 $S_d(\xi, \omega)$ 的定義是

$$S_d(\xi, \omega) = |x(t)|_{\max} \quad (5)$$

類似的情形，速度反應譜 $S_v(\xi, \omega)$ 和加速度反應

譜 $S_a(\xi, \omega)$ ，可以分別定義如下：

$$S_v(\xi, \omega) = |v(t)|_{\max} \quad (6)$$

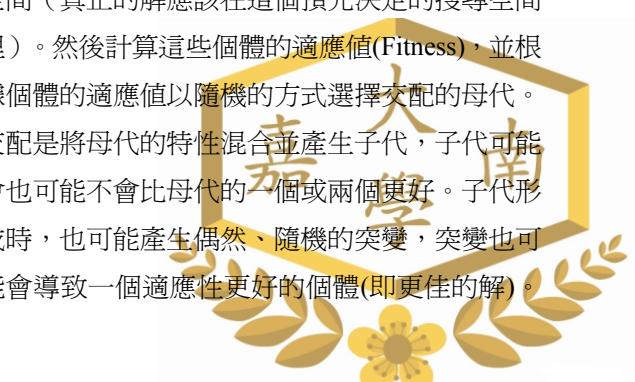
$$S_a(\xi, \omega) = |a(t)|_{\max} \quad (7)$$

其中 $v(t)$ 與 $a(t)$ 分別是單自由度線性結構物的相對速度和絕對加速度反應歷時。由(4)的算式可知單自由度線性結構物對地震動的反應，類似一個高斯窄頻濾波 (Gaussian Narrow Band Filtering) 的作用。

Alexander(1963)證明經由窄頻濾波後的地震波歷時，其包絡線(Envelope)的最大值即為該對應頻率地震波之振幅，對應於最大值的時間即為該對應頻率地震波到達場址的時間。因此，上述的 S_a 、 S_v 和 S_d 大致可視為對應頻率地震波之振幅，而其對應的時間亦可視為該對應頻率地震波到達場址的時間。經由檢視不同頻率的 S_a 、 S_v 和 S_d 之到時等值線分佈圖 (Contour of Equal Arrival)，我們可以研究不同週期的地震波之波源與其傳播路徑(距離)；經由檢視不同頻率的 S_a 、 S_v 和 S_d 之等值線分佈圖 (Contour of Equal Amplitude) 我們可以研究不同週期的譜震度之衰減狀況。

二、基因演算法

基因演算法(Genetic Algorithm, GA)是一個基於進化理論的穩健搜尋方法(Holland, 1975)。它的穩健特性已經經過廣泛的研究並且顯示 GA 可以處理廣泛領域問題的能力。基於進化理論的方法已經被應用到不同領域來解決問題，包括影像處理、類神經網路的訓練等等。基因演算法的流程如下：一開始由隨機的方式產生族群裡的個體(即可能的解)，個體分佈於一個預先決定的搜尋空間(真正的解應該在這個預先決定的搜尋空間裡)。然後計算這些個體的適應值(Fitness)，並根據個體的適應值以隨機的方式選擇交配的母代。交配是將母代的特性混合並產生子代，子代可能會也可能不會比母代的一個或兩個更好。子代形成時，也可能產生偶然、隨機的突變，突變也可能會導致一個適應性更好的個體(即更佳的解)。



選擇、交配和突變的過程在每一個世代不斷的重複以產生更好的下一代(解)。

三、衰減形式

本研究採用 Campbell 的衰減形式，其形式如下

$$Y = b_1 e^{b_2 M_L} [R + b_4 e^{b_5 M_L}]^{-b_3} \quad (8)$$

其中本研究所用之 Y 為譜震度， M_L 為芮氏規模， R 為場址到震源的距離或場址到斷層面的最短距離。

四、迴歸分析

Kao 等人(2010) 應用基因演算法迴歸台灣西南部最大地表加速度衰減公式，考量地震能量輻射的複雜性及地震災害程度(離震央越近，災害越大)，因此實際應用上，越靠近震源之資料越重要，因此應給予更大的權值，所以將資料權值定義為距離的函數，他們指出適應函數(Fitness Function)如(9)~(10)式是合理可行的。因此本研究使用適應函數如(9)~(10)式之基因演算法來進行地震資料的迴歸分析。

$$C - \sum_{p=1}^P \frac{1}{R_p} (\ln Y_{m,p} - \ln Y_{e,p})^2 / P \quad (9)$$

$$C - \sum_{p=1}^P \frac{1}{\sqrt{R_p}} (\ln Y_{m,p} - \ln Y_{e,p})^2 / P \quad (10)$$

其中 C 為常數， $Y_{m,p}$ 和 $Y_{e,p}$ 分別為第 p 筆資料之真實的反應譜和計算的反應譜， P 為資料總數， R_p 為第 p 筆資料之距離(場址到震源的距離或場址到斷層面的最短距離)。公式(9)和公式(10)裡每一點的資料權值分別為 $1/R_p$ 和 $1/\sqrt{R_p}$ 。基因演

算法使用公式(9)和公式(10)之適應函數分別標記為 GA1 和 GA2。GA1 和 GA2 之迭代次數為 5000，交配和突變之機率分別為 0.8 和 0.05。Campbell 形式裡的 5 個係數設定搜尋範圍均為 0.001~30。

參、結果與討論

本研究之地震資料為 1999 年的 921 地震和嘉義地震。其參數如表一所列。

表一、921 地震和嘉義地震之地震參數

Earthquake	Origin Time (UT)	Epicenter		Depth (km)	Magnitude (M _L)
		Lon. (E)	Lat. (N)		
921地震	1999/09/20	120.82	23.85	8.0	7.3
嘉義地震	1999/10/22	120.25	23.31	16.6	6.4

一、921 地震

圖 2(a)為 921 地震東西向地震紀錄之短週期(0.3 秒) S_a ，圖 2(b)為 921 地震東西向地震紀錄之短週期 S_a 所對應之時間分布圖。短週期所對應之時間分布約為短週期地震波到達對應地點的時間，由圖中可觀察出短週期(高頻)地震波主要是由車籠埔斷層中南段輻射出來，斷層錯位由震源沿斷層面向上及南北向傳遞。圖 2(c)為 921 地震東西向地震紀錄之中週期(1.6 秒) S_v ，圖 2(d)為 921 地震東西向地震紀錄之中週期 S_v 所對應之時間分布圖。中週期所對應之時間分布約為中週期地震波到達對應地點的時間，由圖 2(c)可觀察出中週期(中頻)地震波主要是由車籠埔斷層南北兩段輻射出來，圖 2(d)亦可觀察出斷層錯位由震源沿斷層面向上及南北向傳遞。圖 2(e)為 921 地震南北向地震紀錄之長週期(8.0 秒) S_d ，圖 2(f)為 921 地震南北向地震紀錄之長週期 S_d 所對應之時間分布圖。圖 2(e)可看出長週期(低頻)地震波主要亦是由車籠埔斷層南北兩段輻射出來。長週期所對應之時間分布約為長週期地震波到達對應地點的時間，圖 2(f)亦可看出相關的斷層錯位幾乎是南北同步，有些跡象顯示車籠埔斷層南北兩端的轉折(北端向東，南端向西)對長週期波的生成機制有相當程度的影響。 S_a 、 S_v 和 S_d 所對應之時間分布可探討各頻率區間主要能量在斷層面上的源頭，此與 S_a 、 S_v 和 S_d 衰減公式中所選擇之距離有關，圖 3 為台灣各測站和車籠埔斷層面之最短距離等值圖，其圖形類型與 921 地震短週期 S_a 、中週期 S_v 和長週期 S_d 所對應之時間分布類似，因此 921 地震 S_a 、 S_v 和 S_d 衰減公式中的距離選擇各測站和車籠埔斷層面之最短距離是適當的。



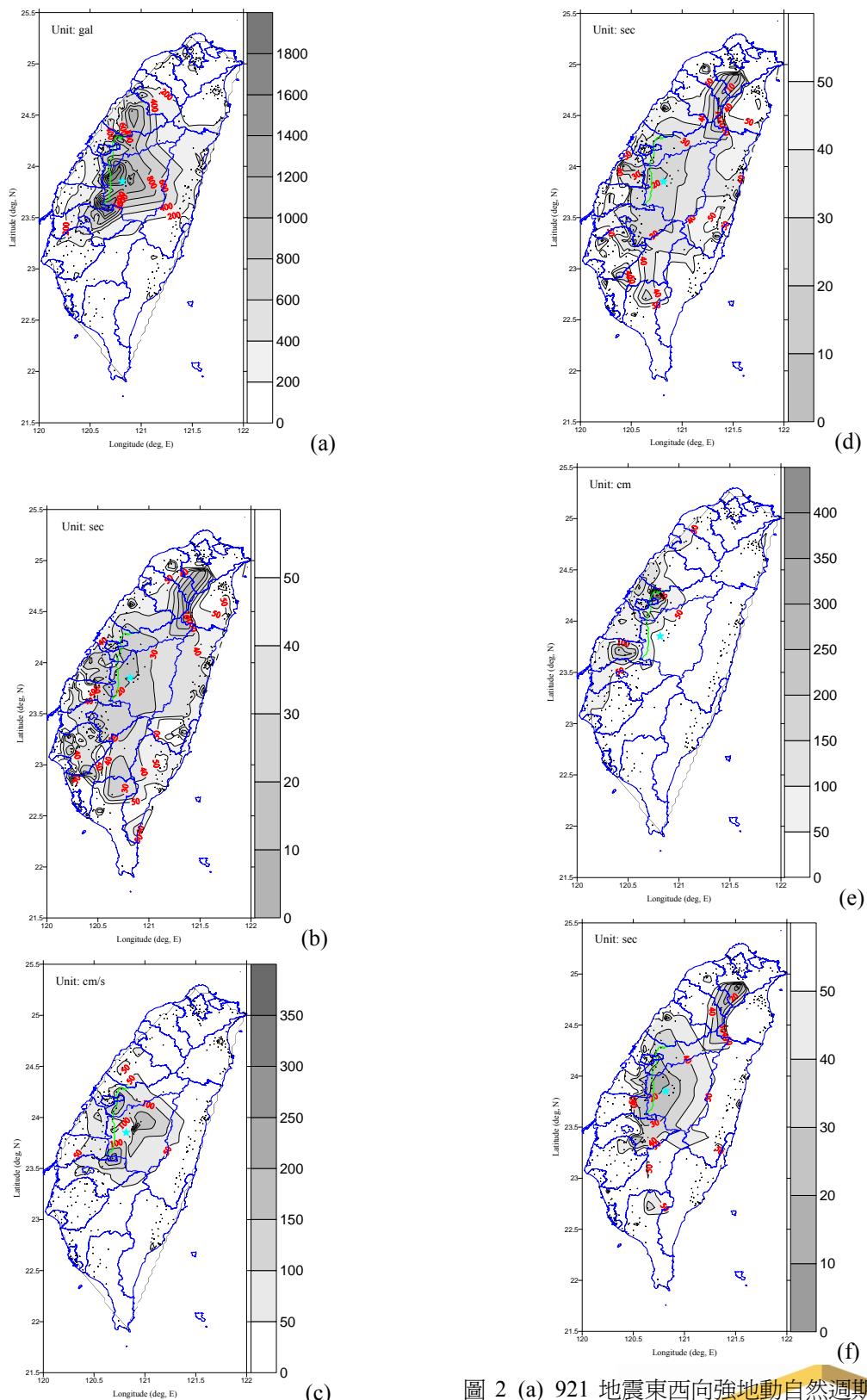
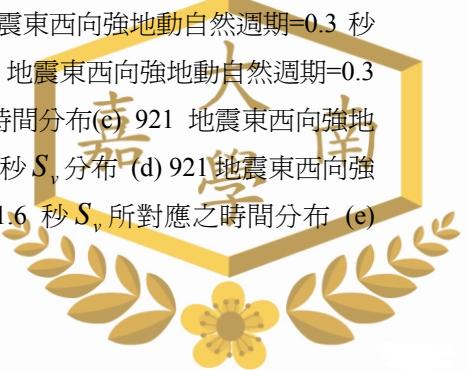


圖 2 (a) 921 地震東西向強地動自然週期=0.3 秒
 S_a 分布 (b) 921 地震東西向強地動自然週期=0.3
 秒 S_a 所對應之時間分布 (c) 921 地震東西向強地動自然週期=1.6 秒 S_v 分布 (d) 921 地震東西向強地動自然週期=1.6 秒 S_v 所對應之時間分布 (e)



921 地震南北向強地動自然週期=8.0 秒 S_d 分布
(f) 921 地震南北向強地動自然週期=8.0 秒 S_d 所對應之時間分布

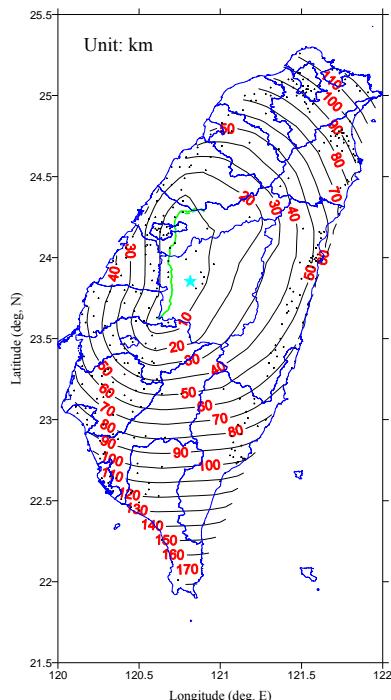


圖 3 台灣各測站和車籠埔斷層面之最短距離等值圖

表二為 GA1 和 GA2 選擇不同距離之 921 地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 和南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d 自然對數標準差。由表二可知不論 GA1 或 GA2，短週期 S_a 、中週期 S_v 、長週期 S_d 反應譜距離為場址到車籠埔斷層面之最短距離的自然對數標準差都比距離為場址到震源之距離的自然對數標準差小很多。所以針對有明顯斷層錯動的地震其衰減公式裡距離應選擇為場址到斷層面之最短距離較適當。此外從表二可知對於距離選擇為場址到車籠埔斷層面之最短距離，GA1 和 GA2 之自然對數標準差都差不多。地震發生時，離震央越近，災害越大，為了解 GA1 和 GA2 何者較適用於實際之應用，因此也分別求其近場($R_h \leq 50$ km)和遠場($R_h > 50$ km)之自然對數標準差，結果如表三所列。結果顯示不論短週期 S_a 、中週期 S_v 、長週期 S_d 反應譜，GA1 和 GA2 之近震源自然對數標準差都差不多，因此在實際應用上，GA1 和 GA2 都是好

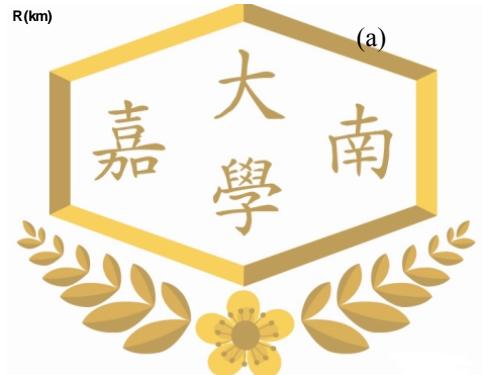
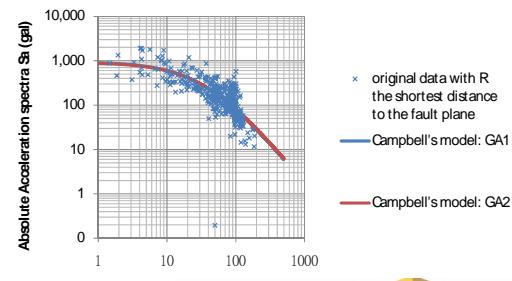
的方法。圖 4 為 921 地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 和南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d 之真實資料與其衰減形式之比較。GA1 和 GAA2 之 S_a 、 S_v 和 S_d 都幾乎重疊。

表二、 GA1 和 GA2 選擇不同距離之 921 地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 、南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d 自然對數標準差

反應譜	R	$\sigma_{ln(\sigma)}$	
		GA1	GA2
東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a	場址到震源 之距離	0.7440	0.7383
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.6639	0.6634
	場址到震源 之距離	0.8402	0.7381
東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.6987	0.6984
	場址到震源 之距離	0.7960	0.7946
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.7169	0.7167
南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d	場址到震源 之距離	0.7960	0.7946
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.7169	0.7167
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.7169	0.7167

表三、 GA1 和 GA2 之 921 地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 、南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d 近場和遠場自然對數標準差

反應譜	R	$\sigma_{ln(\sigma)}$			
		$R=50$ km	$R>50$ km	$R=50$ km	$R>50$ km
東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.7816	0.5935	0.7825	0.5920
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.7768	0.6575	0.7743	0.6588
東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.8331	0.6491	0.8352	0.6472
	場址到車籠埔斷 層面之最短距離	0.8331	0.6491	0.8352	0.6472



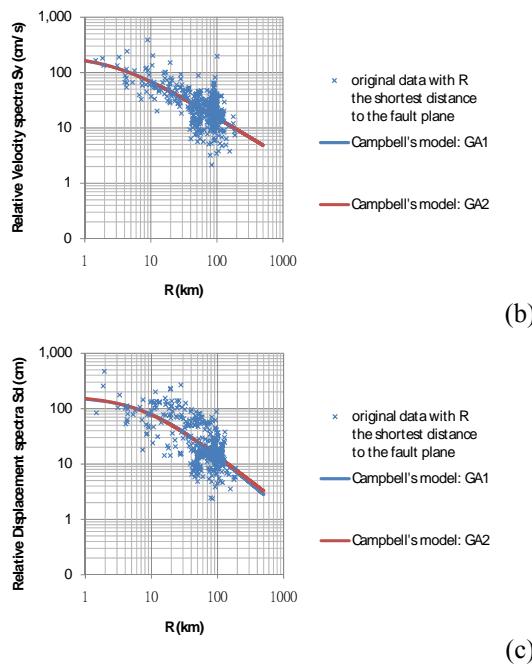


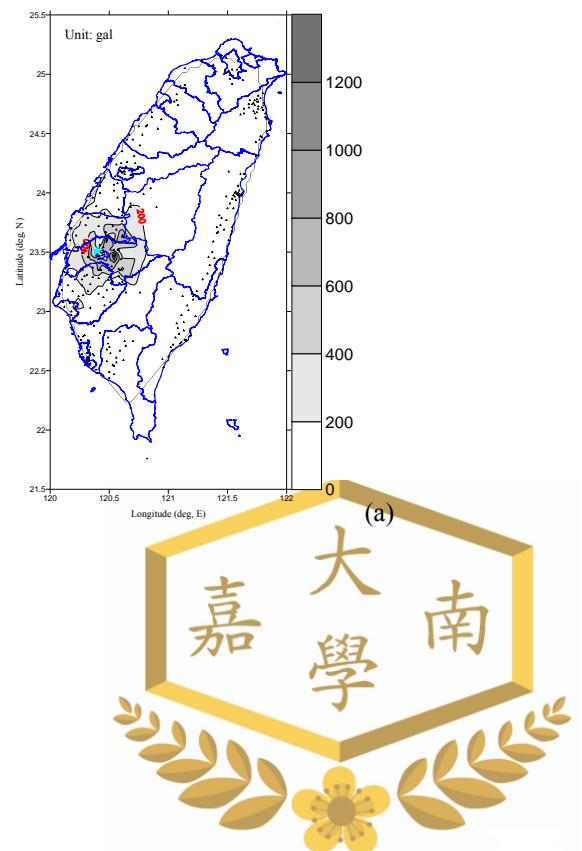
圖 4 921 地震真實資料與其衰減形式之比較(a)東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a ，(b)東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v ，(c)南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d

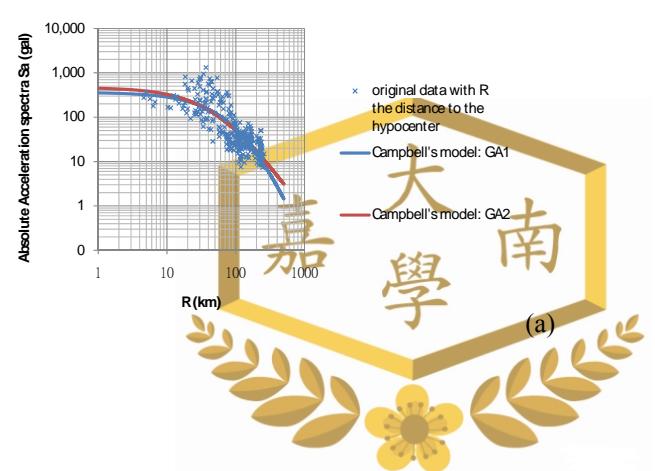
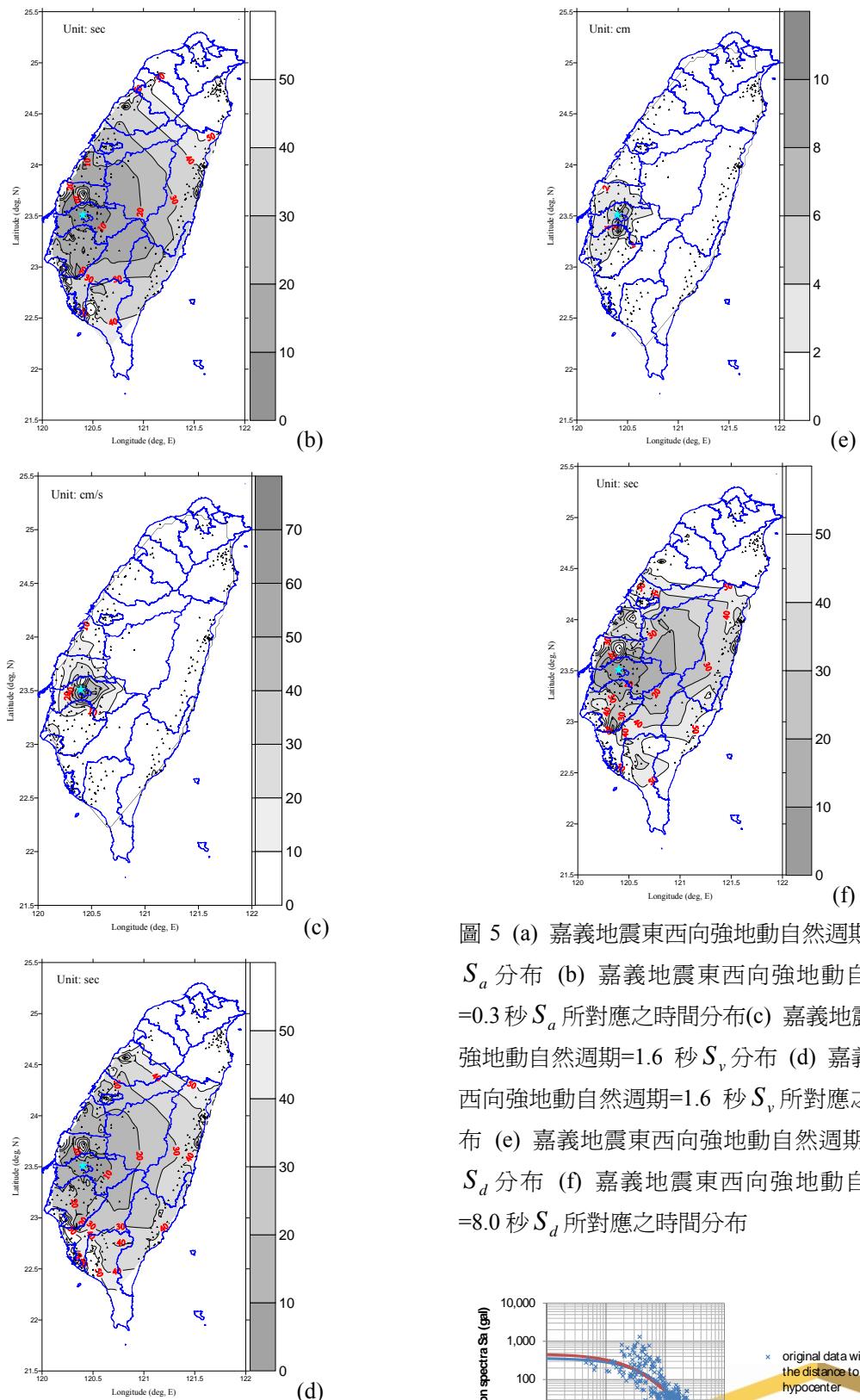
二、嘉義地震

圖 5(a)為嘉義地震東西向地震紀錄之短週期 (0.3 秒) S_a 分布圖，圖 5(b)為嘉義地震東西向地震紀錄之短週期 S_a 所對應之時間分布圖，由圖中可觀察出短週期 S_a 較大的值主要是在震源東南方一小段距離的地方，而短週期(高頻)地震波主要亦是由震源附近幅射出來，且向各方向幅射速度差不多。圖 5(c)為嘉義地震東西向地震紀錄之中週期 (1.6 秒) S_v 分布圖，圖 5(d)為嘉義地震東西向地震紀錄之中週期 S_v 所對應之時間分布圖，由圖中可觀察出中週期 S_v 較大的值主要是在接近震源附近的地方，而中週期(中頻)地震波主要亦是由震源附近幅射出來，向各方向幅射速度與短週期地震波比較起來較不一致。圖 5(e)為嘉義地震東西向地震紀錄之長週期 (8.0 秒) S_d 分布圖，圖 5(f)為嘉義地震東西向地震紀錄之長週期 S_d 所對應之時間分布圖，由圖中可觀察出長週期 S_d 較大的值主要是在震源南方一小段距離的地方，而長週期(低頻)地震波主要亦是由震源附近幅射出來，向各方向幅射速度與短、中週期地震波比較起來更不一致。因為短週期 S_a 、中週

期 S_v 和長週期 S_d 地震波主要都是由震源附近幅射出來，因此嘉義地震 S_a 、 S_v 和 S_d 衰減公式中的距離選擇場址到震源之距離是適當的。

表四為 GA1 和 GA2 選擇不同距離之嘉義地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 和東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d 自然對數標準差。由表五可知對於東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 和東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v ，GA2 之自然對數標準差較 GA1 之自然對數標準差小，而對於東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d ，GA1 之自然對數標準差則較 GA2 之自然對數標準差小，但都相差不多。表五為 GA1 和 GA2 之嘉義地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 、南北向地震紀錄 8.0 秒 S_d 近場和遠場自然對數標準差，結果顯示對於短週期 S_a 、中週期 S_v 、長週期 S_d 反應譜，GA1 之近場自然對數標準差均較 GA2 小，但相差亦不多。圖 6 為嘉義地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 和東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d 之真實資料與其衰減形式之比較。GA1 和 GA2 之 S_a 、 S_v 和 S_d 都差異不大。值得注意的是，和 921 地震比較，嘉義地震距離 10 公里以內的資料非常少，因此，嘉義地震距離 10 公里以內的迴歸結果較不可靠。





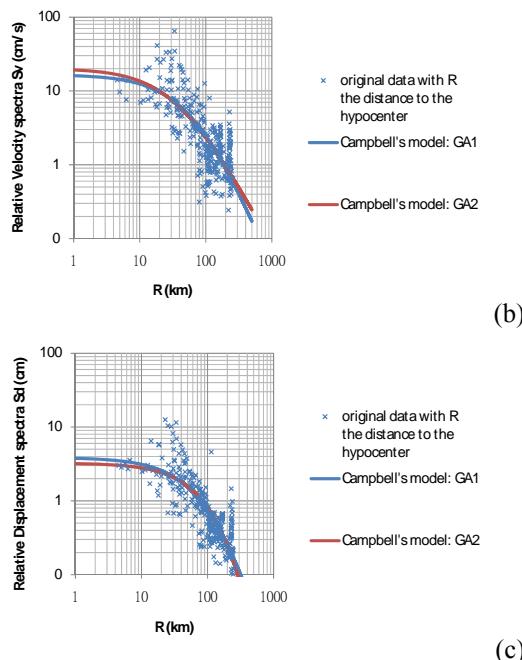


圖 6 嘉義地震真實資料與其衰減形式之比較(a)東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a ，(b)東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v ，(c) 東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d

表四、GA1 和 GA2 選擇不同距離之嘉義地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 、東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d 自然對數標準差

反應譜	R	$\sigma_{ln(\sigma)}$	
		GA1	GA2
東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a	場址到震源之距離	0.7288	0.7063
東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v	場址到震源之距離	0.7299	0.7155
東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d	場址到震源之距離	0.5905	0.6161

表五、GA1 和 GA2 之 嘉義地震東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a 、東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v 、東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d 近場和遠場自然對數標準差

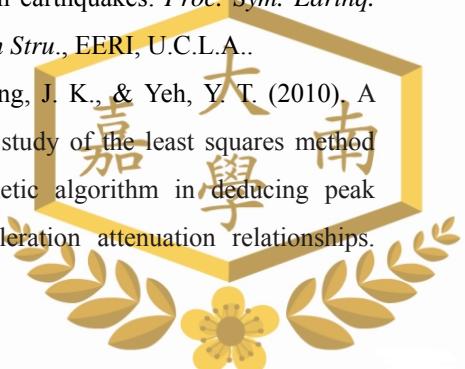
反應譜	R	$\sigma_{ln(\sigma)}$			
		GA1	GA2	$R=50\text{km}$	$R>50\text{km}$
東西向地震紀錄 0.3 秒 S_a	場址到震源之距離	0.8371	0.6990	0.8529	0.6614
東西向地震紀錄 1.6 秒 S_v	場址到震源之距離	0.7654	0.7264	0.7718	0.7048
東西向地震紀錄 8.0 秒 S_d	場址到震源之距離	0.7085	0.5547	0.7099	0.5903

肆、謝辭

本文為交通部中央氣象局委託研究計畫，計畫編號 MOTC-CWB-99-E-23-。感謝交通部中央氣象局提供研究經費。

伍、參考文獻

- 葉永田 (2007)。譜震度預估模式的發展及其應用(II)。行政院國家科學委員會專題研究成果報告(報告編號：NSC 95-2119-M -041-001)。
- 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。
- Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seism. Res. Lett.*, 68, 94-127.
- Alexander, S. S. (1963). *Surface Wave Dispersion in the Western United States*. Unpublished doctoral dissertation, Cal. Inst. Tech., Pasadena, California.
- Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 2039-2070.
- Hidalgo, P., & Clough, R. W. (1974). *Earthquake simulator study of a reinforced concrete frame* (Report UCB/EERC-74/13). CA: EERC, University of California, Berkeley.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in nature and artificial systems*. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press.
- Housner, G. W. (1952). Spectrum intensity of strong-motion earthquakes. *Proc. Sym. Earthq. Blast Eff. on Stru.*, EERI, U.C.L.A..
- Kao, C. Y., Chung, J. K., & Yeh, Y. T. (2010). A comparative study of the least squares method and the genetic algorithm in deducing peak ground acceleration attenuation relationships.



- Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 21(6), 869-878.
- Kappos, A. J. (1991). Analytical prediction of the collapse earthquake for R. C. buildings: suggested methodology. *Earthq. Eng. Stru. Dyn.*, 20(2), 167-176.
- Martinez-Rueda, J. E. (1998). Scaling procedure for natural accelerograms based on a system of spectrum intensity scales. *Earthq. Spec.*, 14(1), 135-152.
- Matsumura, K. (1992). On the intensity measure of strong motions related to structural failures. *Proceeding of 10 WCEE*, 1, 375-380.
- Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F., & Youngs, R. R. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Lett.*, 68, 180-189.



A Study on the Choice of Distance for Spectrum Intensity Attenuation

Ching Yun Kao* Yeong Tein Yeh

Institute of Industrial Safety and Disaster Prevention,
Chia-Nan University of Pharmacy and Science,
Tainan, Taiwan 71710, R.O.C.

Abstract

Nowadays, the structural environment is becoming so complicated that the originally defined intensity scale and peak ground acceleration (PGA) are not adequate to do a good job for assessing earthquake damage. Therefore, an index adequately assess earthquake damage is needed. Spectrum intensity (SI) includes the three elements affecting earthquake damage, earthquake duration, frequency content, and amplitude, and it is a more adequate intensity parameter to assessing earthquake damage. Although distance, defined as the distance from site to hypocenter or distance from site to the fault on earth surface in related literatures, is an important parameter for exploring the distribution of spectrum intensity, there is no study investigated the adequate distance for different types of earthquake. In this study, distance is defined as the distance from the energy source to site and the selection of adequate distance is discussed from the concept of energy radiation by using the data of Chi-Chi earthquake and Chia-Yi earthquake.

Key words: Spectrum Intensity, Attenuation Law, Distance, Genetic Algorithm

*Correspondence: Institute of Industrial Safety and Disaster Prevention, Chia Nan University of Pharmacy & Science, No. 60, Sec. 1, Erh-Jen Rd., Tainan, Taiwan 71710, R.O.C.

TEL: +886-6-2664911 ext. 6106

FAX: +886-6-2667320

E-mail: chingyun@mail.chna.edu.tw

