

台灣中部地區最大加速度衰減模式之研究

張添炮¹ 余貴坤² 劉芳嬌¹ 李振銘¹

摘要

本文從中央氣象局強地動觀測計畫(TSMIP)的加速度紀錄中，挑選 9 個發生在中部地區的大型地震(M_w 5.1~7.6)，以震矩規模與震源距離當參數，採用二階段回歸分析模式，求得中部地區最大地表加速度水平與垂直向的衰減公式。為了探討不同類型測站訊號衰減的差異，把測站分為堅實土層和鬆軟土層兩大類。本研究的幾何擴散係數(約 0.55)比其他研究所得為小，但是非彈性衰減係數(約 0.02)則比其他研究大。若把規模設定在 6.5 和其他相關研究比較，發現水平分量衰減曲線只在近距離部份和其他針對大範圍地區所作的結果有些差異；垂直分量則在遠距離比其他結果為大。

關鍵詞：衰減模式，二階段回歸，最大地表加速度

一、緒論

台灣地區地震活動頻繁，時常有災害性地震發生，對於人民的生命財產造成重大威脅。目前在地震危害度的評估方面，衰減模式(attenuation model)的研究仍佔有極重要的地位，它可以評估一個地震發生後，在多遠的距離內會造成多大的振動，可以在建築工程上做為耐震設計的參考。尤其在最大地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)衰減的研究上最受重視，因為加速度間接反應建築物所受的力量。

一個地震發生以後，能量由震源(source)向四周傳遞出去，經由不同的路徑(path)、方位(directionality)抵達不同屬性的場址(site)被接收。所以一個測站所接收到的振動訊號，其實是由震源效應(source effect)、路徑效應(path effect)、場址效應(site effect)所綜合迴旋的結果

(convolution theorem)。所以在分析訊號的衰減時，必須考慮到這些因素的存在。訊號的強度大致可以寫成以下方程式：

$Y = k f_1(M) f_2(R) f_3(M, R) f_4(P) \varepsilon$ 式中， Y 為振動訊號，例如 PGA； k 為常數係數； $f_1(M)$ 為規模函數，代表地震能量的大小； $f_2(R)$ 為距離函數，與幾何擴散有關； $f_3(M, R)$ 為規模和距離的函數，與非彈性衰減有關； $f_4(P)$ 為場址函數； ε 為隨機誤差。在過去的文獻中，在規模參數的選擇方面，有使用芮氏規模(M_L)，也有使用震矩規模(M_w)的，台灣早期大多採用芮氏規模，但是芮氏規模在規模較大時會有飽和的情形，所以近年來學者大多採用震矩規模。在距離方面，大致有震央距離、震源距離、測站至破裂面的最短距離、測站到破裂面投影至地表之最短距離等多種。在使用上是根據構造環境的不同來決定。

1. 南開技術學院

2. 萬能科技大學土木工程系

二、文獻回顧

世界各國對於振動衰減模式的研究，一直都在進行中，尤其是地震測網發展較早的美國，很早就針對不同的構造環境，不同的測站屬性，做過定性與定量分析。

Campbell(1981)曾利用世界各地的地震記錄，以測站至破裂面的最短距離為參數作分析，得到水平向 PGA 的衰減模式：

$$PGA = 0.0185e^{1.28M} (R + 0.147e^{0.732M})^{-1.75}$$

Joyner and Boore(1981)針對北美西部震矩規模 5 以上的地震，以震矩規模與測站到破裂面投影至地表之最短距離作研究，得到水平向 PGA 的衰減模式：

$$\ln(PGA) = -1.02 + 0.249M - \ln(R) - 0.00255R$$

以上二篇研究中有一個共同的結論是：在相同規模相同距離之下，鬆軟土層的 PGA 值比堅硬岩盤大。

Boore et al.(1997)在做回歸分析時，以地下 30 公尺內剪力波的平均速度 $V_s(m/sec)$ 做為測站分類的依據，將測站分為若干類型，以震矩規模、測站到破裂面投影至地表之最短距離為參數，得到水平向 PGA 的衰減模式：

$$\ln(PGA) = -0.242 + 0.527(M - 6) - 0.778\ln(R) - 0.371\ln(V_s/1396)$$

Campbell(1997)選取 $M_w \geq 5$ 之地震，以測站至破裂面的最短距離為參數，針對不同的破裂型式與測站類型回歸，求得水平向 PGA 的衰減公式：

$$\ln(PGA) = -3.512 + 0.904M - 1.328\ln(\sqrt{R^2 + (0.149e^{0.647M})^2}) + [1.125 - 0.112\ln(R) - 0.0957M]F + [0.44 - 0.171\ln(R)]S_{SR} + [0.405 - 0.222\ln(R)]S_{HR}$$

式中， F 為破裂型式(0 for strike-slip; 1 for otherwise)； S_{HR} (1 for hard rock; 0 for otherwise)； S_{SR} (1 for soft rock; 0 for otherwise)；

台灣地區自從 1990 年中央氣象局的自由場強震測站開始設置以後，便陸續收錄到大量且高品質的資料，對於研究台灣的振動衰減模式有很大的幫助。

台灣大學土木工程教授羅俊雄(1996)曾針對

台灣地區軟弱地盤，以芮氏規模、測站至破裂面的最短距離為參數，採用 Campbell 的型式回歸得到水平向 PGA 衰減公式：

$$PGA = 0.0273e^{1.1158M} (R + 0.141e^{0.656M})^{-1.6472}$$

Loh et al.(1998)針對台灣地區堅硬岩盤測站，用 Campbell 型式以震矩規模、測站至破裂面的最短距離為參數，求得水平向 PGA 的衰減公式：

$$PGA = 0.02968e^{1.20M} (R + 0.1464e^{0.6981M})^{-1.7348}$$

辛在勤(1998)也針對台灣地區 22 個地震，以芮氏規模、震源距離為參數，回歸得到水平向 PGA 衰減公式：

$$PGA = 12.44e^{1.31M} R^{-1.837}$$

劉坤松(1999)選取 1993 年以後的 35 個地震，利用 Joyner and Boore 二階段回歸分析法，以震矩規模、震源距離為參數，也考慮近距離飽和問題，建立台灣地區水平向最大加速度的衰減模式，當震源距離在 100 公里以內時：

$$\ln(PGA) = -1.339\ln(R + 2.12) - 0.0071R + 1.167M + 2.192$$

稍微缺憾的是國內在衰減模式的研究中，絕大部份都是針對台灣全島所作的，鮮少有只針對台灣中部地區而作的研究，而所用的最大規模往往也只有 6 左右。中部地區近年來經濟活動日益發達，人口數也不斷上升，1999 年甚至遭逢集集大地震的侵襲，損失慘重。因此本研究認為有必要針對這個地區振動的特性做一瞭解，再與台灣全島乃至世界其他地區的模式作一比較。另一方面，有鑑於過去文獻在垂直方向振動的研究比較少，本研究也把垂直方向的振動一併討論，希望可以作為危害度評估方面的參考。

三、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)的加速度紀錄，為了探討整個中部地區的振動特性，本文只挑選規模較大激發測站數較多的地震作為研究，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)，震源深度都很淺。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。其中，編號 9 是 1999 年的集集主震，編號 2 是 1998 年的瑞里地震，編號 3 至編號 8 都屬於集集地震的餘震序列。除了集集主震的震矩規模(M_w)是來自 Harvard，其餘均根據 Tsai and Chen(1998)研究台灣地區不同地震規模之相關性而得。其關係式為：

$$M_L = 0.193 + 0.993M_w$$

扣除品質不良的記錄之後，每一地震在本研究區域至少都激發 48 個測站以上。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，總共有 92 站，其範圍在 $120.1^\circ \sim 121.3^\circ E$ ， $23.6^\circ \sim 24.4^\circ N$ 。為了探討不同類型測站加速度訊號衰減的差異，本研究參考張添炮(2003)在本區域所作的分類，把測站分為堅實土層(stiff)和鬆軟土層(soft)兩大類。其中，堅實土層是張添炮(2003)所分類

的 A 和 B 類測站，鬆軟土層是 C 類。在本區域中屬於鬆軟土層的測站佔多數，主要分佈在西部沿海地區。圖 1 中，圓形、方形、三角形分別代表 A、B、C 類測站。

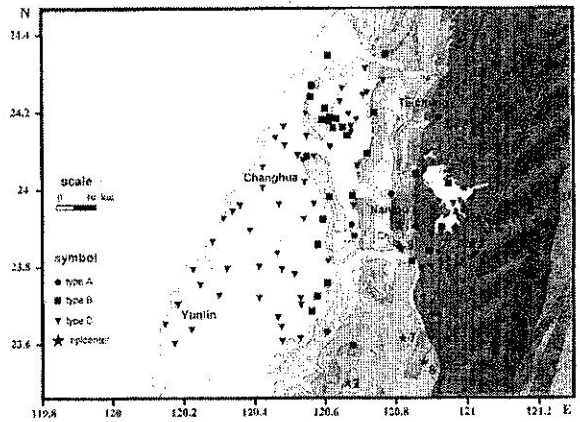


圖 1.測站與震央分佈圖(from 張添炮，2003)。

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)	Mag. (M_w)	Stations triggered		
							All	Stiff	Soft
EQ1	1995/07/07	121.090	23.893	13.1	5.3	5.1	50	23	27
EQ2	1998/07/17	120.662	23.503	2.8	6.2	6.1	48	21	27
EQ3	1999/09/20	120.876	23.792	3.5	6.6	6.5	80	29	51
EQ4	1999/09/22	121.047	23.826	15.6	6.8	6.7	63	26	37
EQ5	1999/09/25	121.006	23.859	9.9	6.8	6.7	70	21	49
EQ6	1999/09/20	121.028	23.926	11.0	6.4	6.3	76	23	53
EQ7	1999/09/20	120.811	23.612	1.1	6.6	6.5	64	21	43
EQ8	1999/09/20	120.867	23.551	7.4	5.3	5.1	51	20	31
EQ9 (Chi-Chi)	1999/09/20	120.815	23.853	8.0	7.3	7.6	83	34	49

四、研究方法與步驟

本研究以震矩規模(M_w)當作地震參數，震源距離當作波傳遞參數，並將南北與東西分量取幾何平均當做水平分量。採用 Joyner and Boore(1981)二階段回歸分析方法(two-stage regression model)，分析最大加速度的衰減模式，按照最小二乘方原理，求得最適合的係數。二階段回歸分析法的一個優點是，可將與振動訊號有關的規模與距離項分離出來，避免同時回歸規模與距離時，計算規模的誤差會影響到距離項的係數。另一個優點是在決定規模項時，每個地震都有相同的權重，而不致於接收記錄多的地震佔了較大的權重。

其回歸公式為：

$$\ln(Y) = A \ln(R) + BR + CM + D + E$$

式中， Y 為振動訊號(PGA)； R 為震源距離； M 為震矩規模； A 為幾何擴散係數； B 為非彈性衰減係數； C 為規模項的係數； D 為常數； E 為場址項係數；回歸分析步驟如下：

1. 將各個地震之振動訊號對數值對距離作回歸，得到

$$\ln(Y) = a \ln(R) + bR + c \text{ 之係數 } a、b、c。$$

2. 將各個地震之PGA值在距離30公里處正規化(normalized)至100gal。
3. 計算全部正規化後之振動訊號對距離的回歸係數，即得到係數 A 、 B 。
4. 將係數 A 和 B 代入衰減公式固定其斜率，求得各個地震的截距。
5. 回歸截距與規模的關係，得到係數 C 、 D 。
6. 將係數 A 、 B 、 C 、 D 代入衰減公式，分別針對堅實土層和鬆軟土層計算場址項係數 E 。

五、研究成果分析

本研究使用 $\ln(Y) = A \ln(R) + BR + CM + D + E$ 回歸模式，針對中部地區作分析，圖2和圖3分別是正規化之後的水平和垂直分量PGA對

距離之回歸結果，標準偏差用虛線表示，可以看出來在去除規模效應之後，PGA隨著距離增加而呈現遞減的現象，其回歸係數如表2所示。圖4和圖5分別是水平和垂直分量PGA截距對於規模之回歸，截距隨著規模增大而呈現遞增的趨勢，代表規模愈大地表加速度也愈大，其回歸係數如表3所示。在不考慮測站場址效應的情況下，整個資料的回歸係數如表4所示，其中 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ 是標準偏差， σ_1 、 σ_2 分別為PGA對距離和對規模回歸時的標準偏差。接著利用已知的回歸係數 A 、 B 、 C 、 D ，分別針對堅實土層和鬆軟土層作回歸，即可得到場址效應係數 E ， σ_3 為其標準偏差。鬆軟土層的 E 係數為正而堅實土層為負，這反應了鬆軟土層的振動值大於堅實土層。

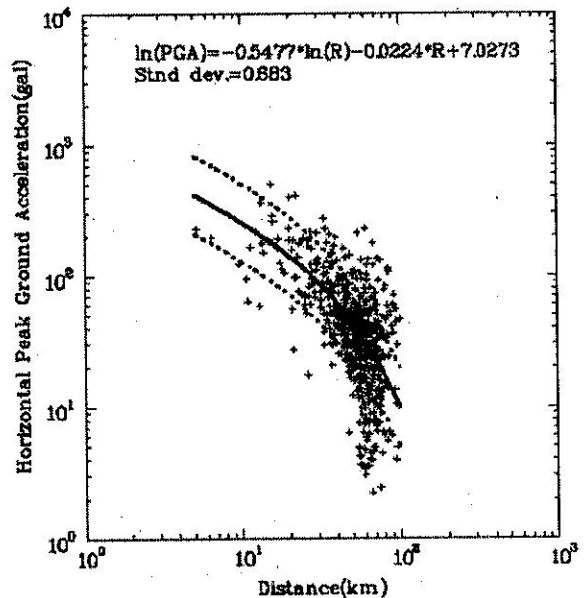


圖2. 水平分量PGA對距離之回歸。

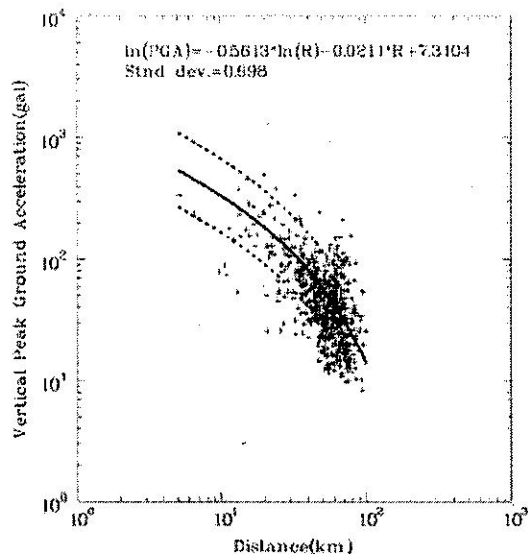


圖 3. 垂直分量 PGA 對距離之回歸。

表 2. 最大加速度正規化之後對距離的回歸係數

	A	B	C	σ_1
H-comp	-0.5477	-0.0224	7.0273	0.683
V-comp	-0.5613	-0.0211	7.3104	0.698

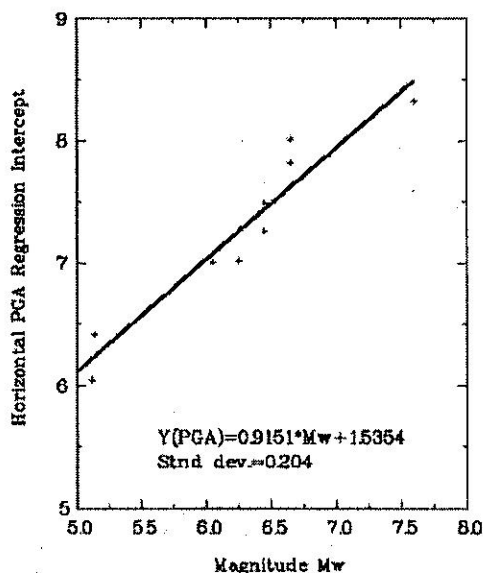


圖 4. 水平分量 PGA 截距對規模之回歸。

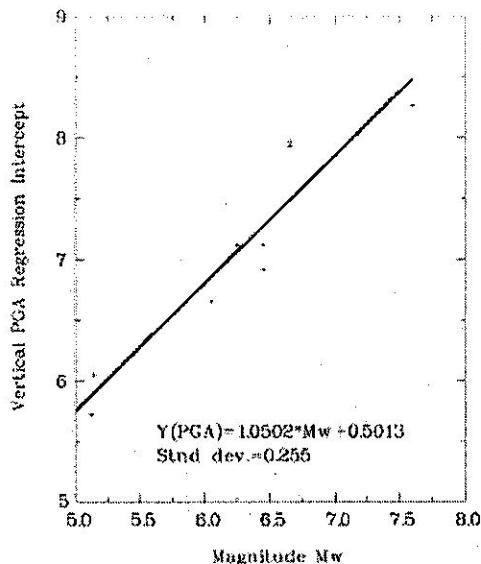


圖 5. 垂直分量 PGA 截距對規模之回歸。

表 3. 最大加速度截距對規模的回歸係數

	C	D	σ_2
H-comp	0.9151	1.5354	0.204
V-comp	1.0502	0.5013	0.255

接著把相關研究的衰減公式作一比較，規模都設定在 6.5。圖 6 和圖 7 分別是水平和垂直分量，本研究的衰減公式用粗黑實線表示。由以上之比較顯示，在不同地區，或使用不同的回歸模式、參數，所得曲線會有差異。大體而言，本研究結果和其他學者所得結果還算接近。水平分量只在近距離處有較大差異，垂直分量在 20 公里以上有稍微偏大的現象。這些現象可以從回歸係數來說明，本研究的幾何擴散係數(0.5477 和 0.5613)和 Boore et al.(1997)相近，比劉坤松(1999)針對台灣全島所得要小；非彈性衰減係數(0.0224 和 0.0211)則比 Joyner and Boore(1981)以及劉坤松(1999)所得要大。另外 Campbell 模式的特徵是不同的規模在近距離時會呈現飽和現象，與本文之衰減模式不同，這也是造成差異的因素之一。

表 4. 台灣中部地區最大加速度衰減模式之係數

	A	B	C	D	σ	E	σ_3
H-comp	-0.5477	-0.0224	0.9151	1.5354	0.713	-0.1326(stiff) +0.0707(soft)	0.744 0.732
V-comp	-0.5613	-0.0211	1.0502	0.5013	0.743	-0.1107(stiff) +0.0638(soft)	0.782 0.753

本文是針對台灣中部所作的分析，震源與測站位置都集中在一小範圍內，推論是有些測站因為靠近震源，而受到震源效應的影響，造成振動訊號的改變。另外，本研究所用的地震規模都相當大，有相當多測站的紀錄持續時間(duration)達到 90 秒以上，容易使振動產生非線性的變化。其他像地震特性變數的不足以及衰減模式的過度簡化也都可能是誤差的來源，這些都值得將來再作深入的探討。

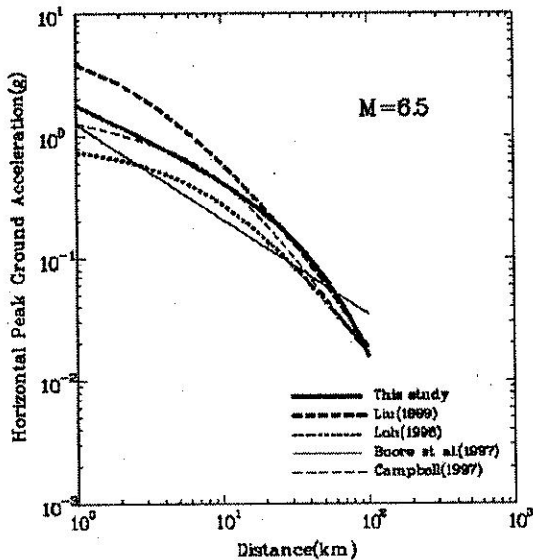


圖 6. 水平分量 PGA 衰減公式之比較。

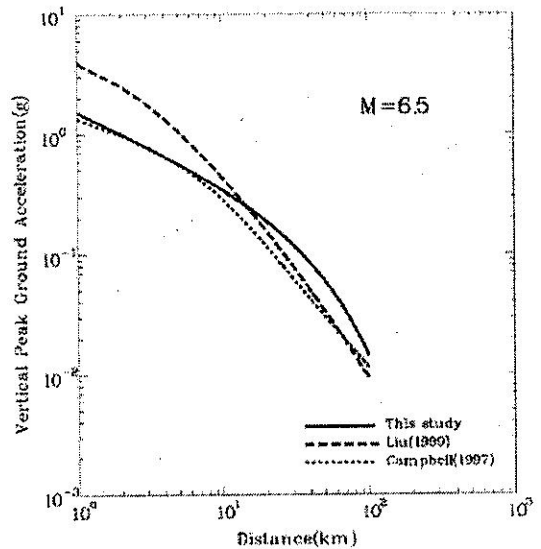


圖 7. 垂直分量 PGA 衰減公式之比較。

六、結論

本文根據中央氣象局強地動觀測計畫(TSMIP)的加速度紀錄，挑選 9 個發生在中部地區的大型地震(M_w 5.1~7.6)，震源與測站都集中在小範圍內，採用二階段回歸分析模式，求得中部地區最大地表加速度水平與垂直向的衰減公式。為了探討不同類型測站訊號衰減的差異，把測站分為堅實土層和鬆軟土層兩大類。本研究的幾何擴散係數(約 0.55)比其他研究小，但是非彈性衰減係數(約 0.02)則比其他研究大。若把規模設定在 6.5 和其他相關研究比較發現，水平分量衰減曲線只在近距離部份和

其他針對大範圍地區所作的結果有些差異；垂直分量則在遠距離比其他結果為大。造成這些差異的原因，可能是所用衰減模式的不同，或者其他的近震源效應，非線性反應，值得將來再作深入的探討。

六、誌謝

本研究能夠順利完成，要特別感謝中央氣象局提供高品質的強震記錄供分析。本研究部份經費由國科會專題計畫：NSC92-2119-M-252-001 以及南開技術學院校內型研究計畫：92-26-C1201-10 支助，也一併致謝。

七、參考文獻

- Boore D. M., W. B. Joyner and T. E. Fumal, 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north America earthquakes. *Seism. Res. Lett.* 68,1,128-153.
- Campbell, K. W., 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration., *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 2039-2070.
- Campbell, K. W., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seism. Res. Lett.* 68,1,128-153.
- Joyner, W. B. and D. M. Boore, 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 2011-2038.
- Loh, C. H., C. S. Hwang and Y. W. Jean, 1998. Seismic demand based on damage control model-considering basin effect and source effect. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 335-345.
- Tsai, Y. B. and K. P. Chen, 1998. The importance of re-regulating the Taiwan earth-quake catalogue.
- 羅俊雄，1996。強地動特性及耐震評估有關之參數，電信與運輸系統之耐震安全評估與補強準則，2-3。
- 辛在勤，1998。台灣地區地震預警之初探訪。交通部氣象學報。
- 劉坤松，1999。台灣地區強震地動衰減模式之研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
- 張添炮，2003。台灣中西部地區之強震特性，國立中央大學地球物理研究所博士論文。

The Attenuation Model of Peak Ground Acceleration in Central Part of Taiwan

Tian-Pau Chang¹ Guey-Kuen Yu² Feng-Jiao Liu¹ and Cheng-Ming Lee¹

ABSTRACT

In this study, the acceleration data from 9 earthquake with Mw 5.1~7.6, recorded by the network of Taiwan Strong Motion Instrumentation Program of the Central Weather Bureau are used to analyze the attenuation model of peak ground acceleration (PGA) in central part of Taiwan. The earthquake centers are nearly located in the same area. For examining the dependence of PGA on the site effects, the recorded sites are classified into stiff and soft soil types.

The technique of two-stage regression method from Joyner and Boore is adopted to fit the data, the moment magnitude and hypo-distance are used here as the regression parameters. The coefficients of the attenuation model are obtained for both horizontal and vertical components. The geometric spreading coefficients in this study are about 0.55, and the inelastic attenuation coefficients are about 0.02.

Several attenuation models are compared for magnitude anchored at 6.5. The results show that the horizontal components have more differences near the source regions, and the vertical component in this study is greater than the others at distance farther than about 20 km.

Keywords: attenuation model, two-stage regression method, peak ground acceleration

¹Nankai College, Nantou, Taiwan, ROC

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