

自由場測站強地動參數之預估與修正

Prediction of Strong Ground Motions for TSMN Stations

主管單位：交通部中央氣象局

鍾仁光¹

黃柏壽²

何美儀³

林金泉³

1.清雲科技大學

2.中央研究院地球科學研究所

3.中央氣象局地震測報中心

摘要

利用 Random Vibration Theory 分別推算出適用於台灣北部的淺震源及深震源地震震波地表最大振幅 (PGA 與 PGV) 之衰減模式，做為所有北部 CWB/TSMN 自由場測站未來在預估強地動參數的一個依據。本文從 54 個中規模以上地震之 3,874 筆水平分量觀測資料分析出個別測站之尖峰地動值的修正參數，對於淺震源地震而言，PGA 最大修正值約為 2.0，而 PGV 大致可達到 3.0 左右，而參考測站的修正係數大部分落在 1.0~1.2 的範圍內；而在深層地震方面，其分布型態與淺震源的結果相似，鬆軟地盤測站之 PGA 或 PGV 修正係數大致上在 2.0 左右。

關鍵詞：強地動、衰減律、場址效應

Abstract

In this study, the peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) attenuation models were obtained using a statistical tool called the random vibration theory, which are suitable for the shallow and deep earthquakes of the northern Taiwan, respectively. Based on these models, each free-field strong motion station of TSMN can be evaluated to find the empirical correction factor for predicting the peak ground parameters by analyzing the selected historical recordings. For the shallow events, the correction factors could reach to 2.0 for PGA, and 3.0 for PGV with large variation. The factors for reference sites are generally ranging from 1.0 to 1.2.

Key words: strong ground motion, attenuation law, site effect

一、計畫目的與資料選取

根據文獻研究與經驗 (例如：辛在勤，1998；劉坤松，1999)，TSMIP 強地動觀測網在各大都會區的歷史地震資料顯示出強烈的場址效應，且地震震源破裂特性在不同地區確實不同，若利用涵蓋全台之地震與強震紀錄推導地動衰減關係式，其離散程度可能居高不下，因此有必要利用分區的地震以及分區的測站資料進行個別強震測站之場址修

正因子(site factor)之估算，以做為強震預估之修正參數。

本研究利用散亂震盪理論(Random Vibration Theory, RVT) (Cartwright and Longuet-Higgins, 1956; Boore, 1983)估計地表地動(加速度、速度)的尖峰值，所需建置的參數包括：震源譜、地殼衰減函數、地動延時的距離函數，這些模式可以由大量的強地動紀錄迴歸獲得。基本原理是，挑選場址效應不明顯的岩盤或近似岩盤測站之紀錄進行分析，其地動—距離衰減關係即當成參考值，而盆地或平原測站之實測值便可與參考值做出比較求得修正係數(包含場址效應在內)，做為未來強地動測報修正之基礎。

本計畫為三年計畫(96~98 年度)，第一年研究的目標區域為大台北地區，分析的資料型態為強震波形(CWB/TSMN 資料)，希望能估計 TSMN 在台北地區各自由場測站的強地動經驗修正係數，做為未來強震侵襲下的地動值預估之用。為符合中央氣象局地震速報(或預警)系統和未來災害評估之需求，本計畫僅挑選 TSMIP 正式運作之後，台灣中部以北所發生的地震，芮氏地震規模 M_L 須在 5 以上，且台北地區的強震測站必須至少有 50%以上的觸發率。首先，為要篩選出岩盤或近似岩盤(場址分類為 B 或 C)之參考測站，第一階段乃選擇震源深度大於 35 公里的深震源地震共計 21 個，希望由強震紀錄各分量富氏振幅譜之形式特徵歸納出北部山區的幾個參考測站，以該等測站之歷年強震紀錄建立堅硬地盤之強地動衰減模式，做為後續計算所有測站地動之相對放大倍率的參考值。第二階段則選擇震源深度小於 35 公里的淺源地震共計 33 個進行分析，目的是為了瞭解不同震源深度地震對場址效應之影響，本計畫亦同時分析深震源紀錄作為比對。從圖 1 所示淺震源地震多分布在目標區域的東南方陸地及太平洋海域，震央距離約在 20~150 公里的範圍。

二、資料處理

為確保強震資料之可用性，本計畫完成 1993~2006 年間超過兩千五百筆三分量強震記錄圖之波形檢視，並完成包括基線修正、突跳點修正與餘弦窗制等必要步驟。為篩選參考測站，利用深震源地震在場址分類為 B、C 的測站所記錄的強震波形，挑出場址放大效應最低的 39 個山區的參考測站，圖 2 顯示這些參考測站分布的地區，大致集中在雪山山脈山區。為了增加觀測資料，本計畫亦搜尋並加入參考測站歷年來所記錄到規模 4~6 之近距離地震(震央距離 50 公里內)，包括 29 個深震源以及 54 個淺震源，使資料的涵蓋面更為完整。因此，本計畫分析的淺震與深震強震資料分別為 846 筆與 550 筆，作為計算振幅衰減特性的參考測站紀錄資料庫。

三、震波衰減特性

首先利用 Coda 波正規化法(Coda Normalization Technique)求取震波之振幅衰減的距離與頻率經驗函數，根據此經驗函數轉換成北部地區 S 波的 Q 模式；另一方面，從參考

測站震波紀錄獲取強地動延時的距離函數，並假設震源函數，利用 Random Vibration Theory 求出 PGA、PGV 的規模與距離關係，作為北部地區強地動預估的參考模式，進而推求場址放大因子之區域分布。

地震波紀錄的振幅通常可以表示為下式：

$$a(\omega) = E(\omega)P(\omega)S(\omega)I(\omega) \quad (1)$$

式中 $a(\omega)$ 代表地動的尖峰值， $E(\omega)$ 為震源效應， $P(\omega)$ 為震波傳遞綜合效應， $S(\omega)$ 為場址效應， $I(\omega)$ 為儀器響應。參考 Raof *et al.* (1999) 以及 Malagnini *et al.* (2000) 的方法，假設震波歷時記錄中，Coda 波的特性為一線性過程，而且其震源效應與場址效應與 S 波或 Lg 波的效應相同。因此，從大量的震波歷時紀錄中，可以獲得震波在地殼中傳遞的經驗衰減特性，包括非彈性效應與幾何擴散效應。再利用下式則可估計地殼震波傳遞之 Q 模式

$$\log a_{cn}(r, r_{ref}, f) = \log g(r) - \log g(r_{ref}) - \frac{\pi f(r - r_{ref})}{\beta Q_0(f / f_{ref})^\eta} \log e \quad (2)$$

其中，假設 $\beta = 3.5 \text{ km/s}$ 、 $f_{ref} = 1.0 \text{ Hz}$ 、 $g(r)$ 為幾何擴散函數。分別對每筆加速度紀錄以不同的頻率 ($f = 0.2, 0.25, 0.33, 0.4, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 \text{ Hz}$) 濾波，以計算 S 及 Lg 波的最大振幅和 Coda 波的 *rms* 振幅。

在淺震源資料方面，採用的參考震源距離 r_{ref} 為 60 公里，分析了 846 筆參考測站水平分量的加速度紀錄，求得各頻率的經驗衰減函數 $\log a_{cn}(r, r_{ref}=60)$ ，結果如圖 3 顯示淺震源地震紀錄不同頻率 S 波經正規化後之衰減型態，顯示低頻震波（小於 0.5Hz）的衰減情形比較快速，而且離散度較大，尤其在震源距離較大的部分，這原因應該是某些遠距離歷時紀錄通常因振幅太低使得紀錄時間長度較短，對於低頻成分振幅之計算可能會有採樣不足的現象。高頻部分則不會有這種問題。對於深震源資料之分析，參考震源距離則採用 100 公里，共分析了 550 筆參考測站水平分量的加速度紀錄

四、地動參數衰減律

極淺震源以及地殼下深度震源之幾何擴散特性必然不同，同時東北部板塊構造亦有影響，由於目前仍無法獲得深部震源之幾何擴散效應，本文參考 Sokolov *et al.* (2000) 以及 Roumelioti and Beresnev (2003) 的研究結果，不論震源深淺，均假設距離在 50 公里以內其幾何擴散修正為 $r^{-1.0}$ ，而大於 50 公里者為 $r^{-0.0}$ 。根據式(2)，以每個特定頻率，將參考距離以內所估計之 Q 值取平均值，最後求得 $Q(f)$ 模式，作為預估地動的輸入參數。結果顯示，不論利用淺震源資料或者深震源資料所迴歸之 Q 模式相當接近（或與採用相同的幾何擴散模式有關），因此可以用同一模式代表，模式如下：

$$Q(f) = 100(f / f_{ref})^{1.0}, \quad f > 0.2 \text{ Hz}, \quad f_{ref} = 1.0 \text{ Hz} \quad (3)$$

利用 Random Vibration Theory (Cartwright and Longuet-Higgins, 1956; Boore, 1983) 可以求出不同規模之 PGA、PGV 與距離之衰減關係，做為台北地區強地動預估的參考模式。震源譜假設為 Brune 的 ω -square 模式 (Brune, 1970)，應力降 ($\Delta \sigma$) 採用 $\Delta \sigma = 100$ bars 的模式 (江嘉豪, 1994)。根據 RVT 的理論，強地動的延時長短與地動的大小有密切關係，在計算尖峰地動值時需要輸入地動延時的距離函數。

圖 4 即為利用參考測站強震資料，以散亂震盪理論所預估之淺震源與深震源 PGA 衰減曲線，圖中不同顏色符號分別代表不同芮氏規模區間 (4.5~5.4, 5.5~6.4, 6.5~7.1)，以方便與衰減曲線做比較。結果顯示，淺震源觀測資料與衰減曲線之匹配程度尚稱良好，但深震源資料在規模較小的部分，似乎預測值有偏低的現象。原因可能在所建立的 Q 模式比較適用在淺部地層。另外，距離較近的部分也有低估現象，是否代表所採用的全台幾何擴散模式有必要修正才能適用台灣東北部地區的震波傳遞特性，這是未來要探討解決的問題。圖 5 則為所預估之淺震源與深震源 PGV 衰減曲線，偏差特性與 PGA 相當類似。淺震源觀測資料與衰減曲線間有不錯之匹配程度，而規模 4.5~5.4 之深震源的估計值相較於觀測值明顯偏低。

五、場址修正因子

由參考測站強震資料求得 $Q(f)$ 模式與強地動延時特性，並假設了幾何擴散效應、特定的震源譜及平均應力降等震源參數，所推演出來的強地動參數之衰減模式基本上僅適用於預估堅硬場址的強震測站之強地動。而其餘較軟弱地盤之場址效應大致上可以由大量觀測值與該衰減模式預估值之比值來表示，獲得場址修正係數最主要的目的在於利用衰減模式即可快速預估強地動值，並且降低其偏差，對於地震測報工作有正面幫助。

參考測站的修正係數大部分落在 1.0~1.2 的範圍內 (圖 6)。各測站之修正係數普遍都是由大約 20 個地震的兩水平分量資料平均得來，其標準偏差顯示各個地震所造成的強地動值相當分歧，不過這個現象在參考測站比較不明顯，顯示鬆軟場址的場址效應問題並不單純，這其間似乎隱含震源特性與傳遞效應的平均化在台灣北部地區還是存在變異性偏大的問題，有必要針對個別地震去深入分析。

六、結論

由分析場址放大效應相對最低的 39 個台灣北部山區的參考測站於 1993~2006 年所記錄之強震資料，分別推算出適用於台灣北部的淺震源及深震源地震震波最大振幅 (PGA 與 PGV) 之衰減模式，做為所有北部 CWB/TSMN 測站未來預估強地動參數的一個依據。由這些衰減模式與 54 個中規模以上地震觀測資料可以分析出個別測站之尖峰地動值的修正參數，對於淺震源地震而言，PGA 最大修正值約為 2.0，而 PGV 大致可

達到 3.0 左右，而參考測站的修正係數大部分落在 1.0~1.2 的範圍內；而在深層地震方面，其分布型態與淺震源的結果相似，鬆軟地盤測站之 PGA 或 PGV 修正係數大致上在 2.0 左右，相對地，比淺震源的結果穩定。從以上分析得知，一些系統性的偏差可能源自於震源參數過於簡化以及東北部深層構造之複雜度無法解析，例如：板塊隱沒帶深層地震的應力降是否應該另予考量、深層地震的震波傳遞路徑的 Q 值是否應該修正以及其幾何擴散因子是否應採取其他模式？這些因素的探討是下年度的主要工作。

參考文獻

- 江嘉豪, 1994, 臺灣地區地震震源尺度模式之探討, 國立中央大學地球物理研究所碩士論文, 77 頁。
- 辛在勤, 1998, 台灣地區地震預警之初探, 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, 239 頁。
- Aki, K. (1980). Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **21**, 50-60.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- Brune, J. N. (1970). Tectonics stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997-5009.
- Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins (1956). The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proc. R. Soc. London*, **237**, 212-232.
- Frankel, A., A. McGarr, J. Bicknell, J. Mori, L. Seeber, and E. Cranswick (1990). Attenuation of high-frequency shear waves in the crust: measurements from New York state, South Africa, and Southern California, *J. Geophys. Res.*, **95**, 17441-17457.
- Malagnini, L., R. B. Herrmann, and M. D. Bona (2000). Ground-motion scaling in the Apennines (Italy), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1062-1081.
- Raouf, M., R. B. Herrmann, and L. Malagnini (1999). Attenuation and excitation of three-component ground motion in Southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 888-902.
- Roumelioti, Z., and I. A. Beresnev (2003). Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Application to rock and soil sites with implications for nonlinear site response, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1691-1702.
- Sokolov, V., C. H. Loh, and K. L. Wen (2000). Empirical model for estimating Fourier amplitude spectra of ground acceleration in Taiwan region, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**, 339-357.

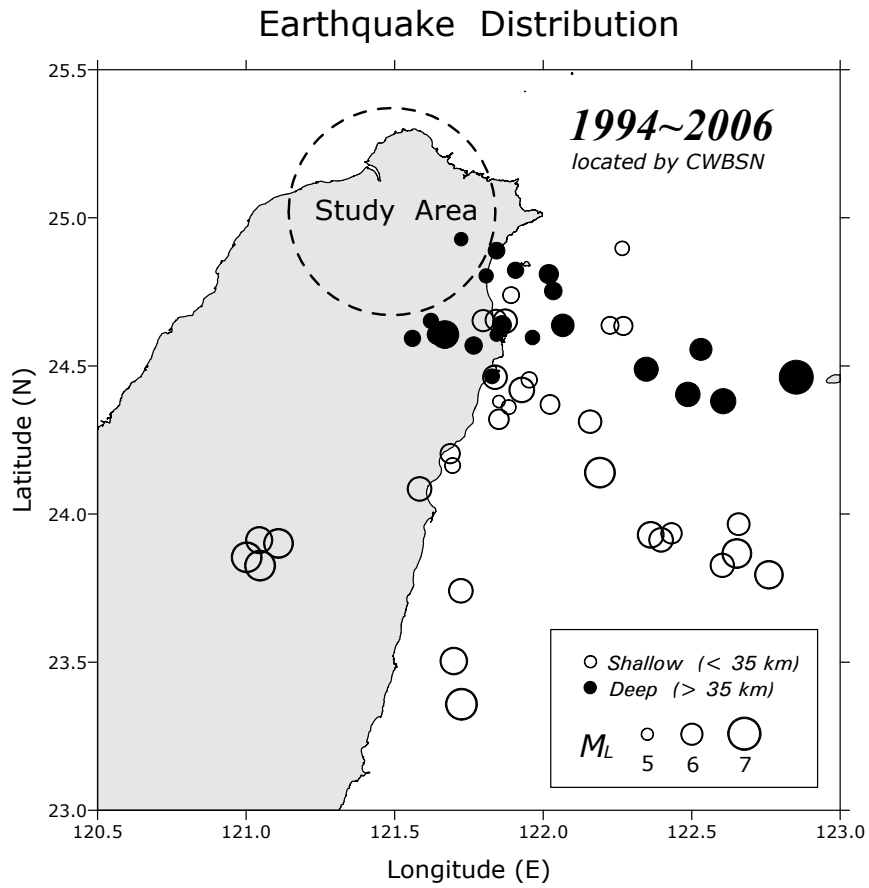


圖 1、本計畫分析規模 5 以上之地震震央分布。實心圓為深源地震；空心圓為淺源地震。

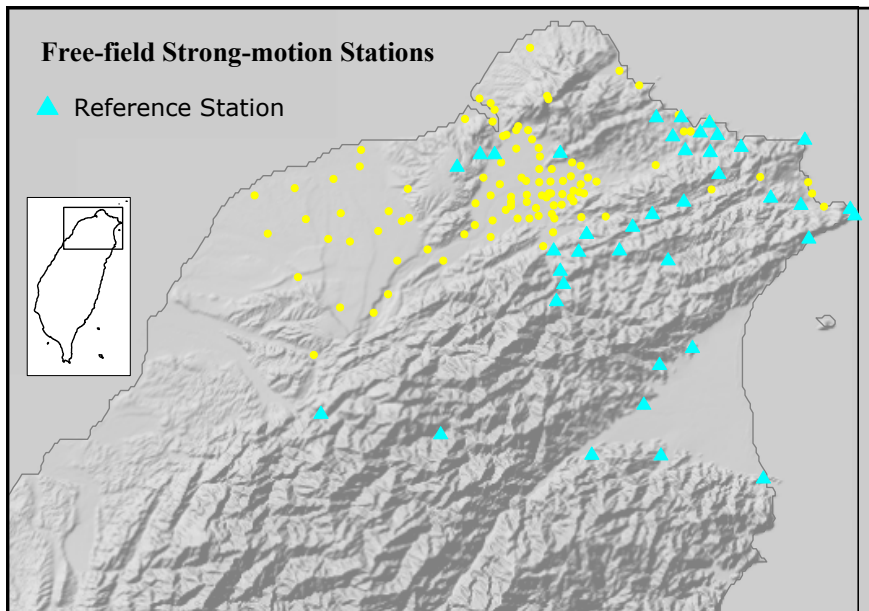


圖 2、參考測站（三角形）與其他測站之位置分布。

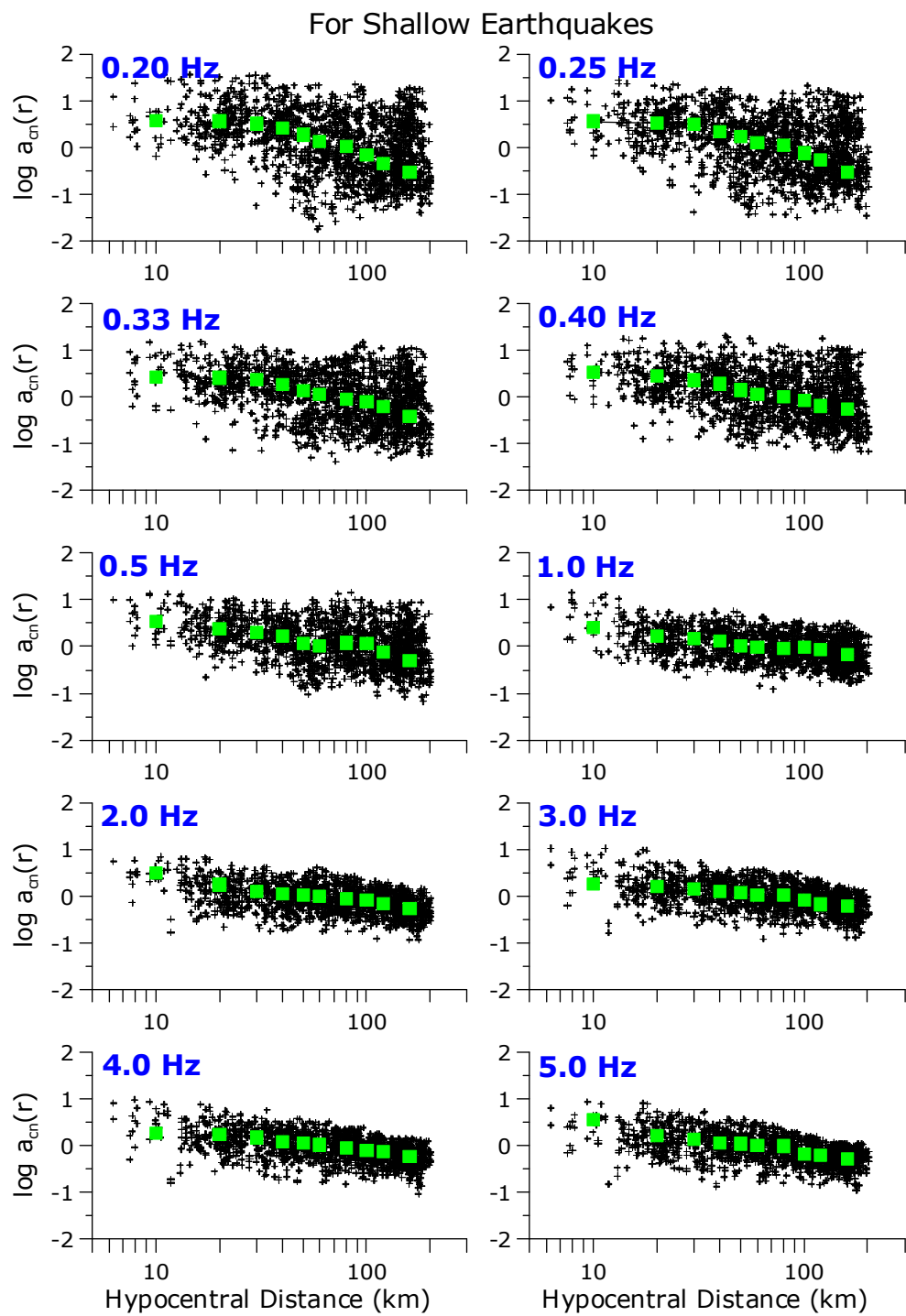


圖 3、淺震源地震紀錄不同頻率 S 波經正規化後之振幅衰減型態。

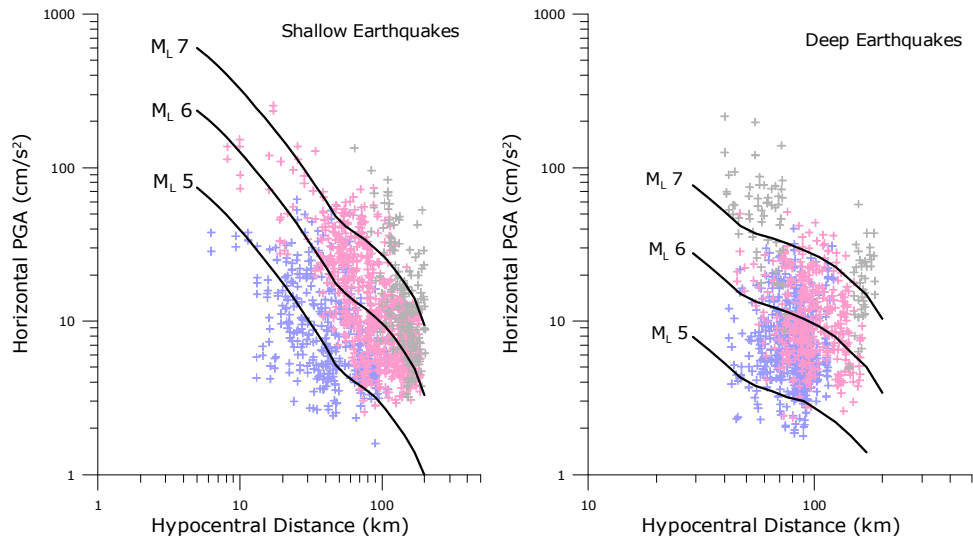


圖 4、對不同震源深度地震，參考測站之 PGA 衰減關係。此處採用芮氏規模。

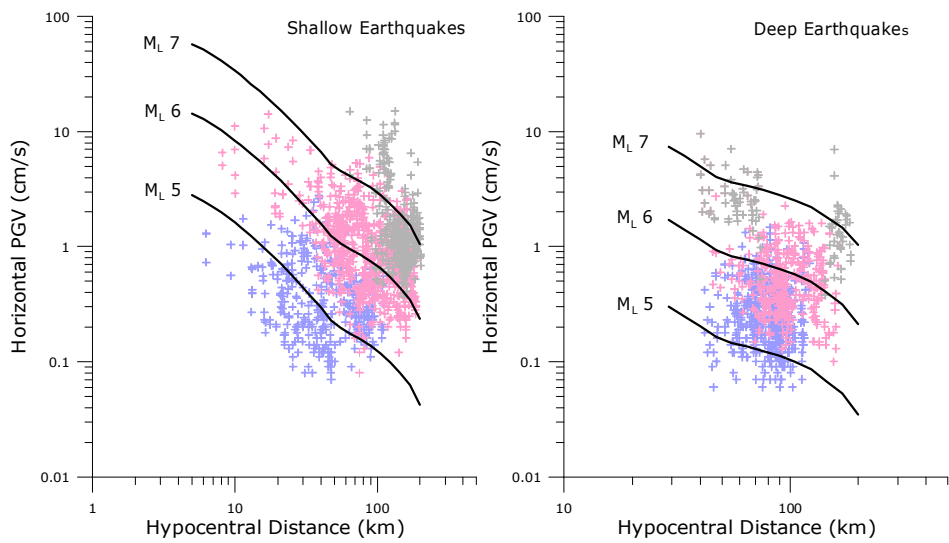


圖 5、對不同震源深度地震，參考測站之 PGV 衰減關係。此處採用芮氏規模。

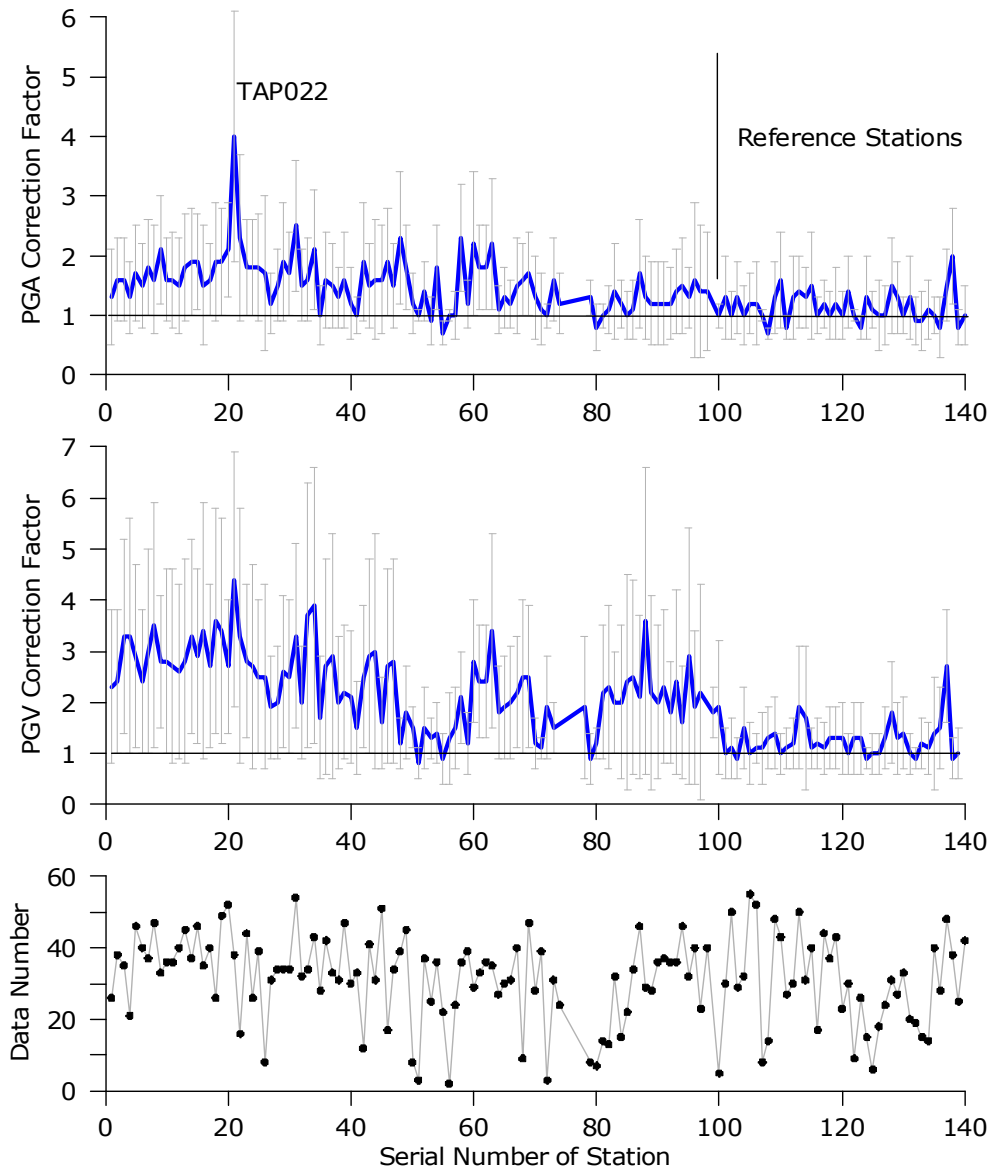


圖 6、針對淺震源地震 PGA 與 PGV 場址修正係數。