

# 新一代台灣地區的強地動衰減式

## Taiwan's Next Generation Attenuation Relationship for Ground Motion

林柏伸（國立中央大學地球物理研究所）；李錫堤（國立中央大學應用地質研究所）

Lin Po-Shen (Institute of Geophysics, National Central University)；

Lee Chyi-Tyi (Institute of Applied Geology, National Central University)

關鍵詞：強地動衰減式、反應譜、尖峰地動加速度

Keyword: ground-motion attenuation relationship, response spectra, PGA

### 摘要

為了建立適合台灣地區機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)使用的反應譜強地動衰減式(spectral ground motion attenuation relationship)，本研究以中央氣象局的自由場強地動觀測網計畫(TSMIP)及中央研究院地球科學研究所的SMART-1 陣列豐富之強震資料，挑選了 62 個地殼地震共計 6570 筆強震資料以及隱沒帶地震事件 45 個共計 4635 筆強震資料，資料的空間分佈如圖一所示。地殼地震其地震矩規模( $M_w$ )分佈範圍從 3.9 至 7.6(圖二(a))，距斷層面最短距離從 3.6 至 208 公里；隱沒帶地震其地震矩規模分佈範圍從 4.3 至 7.3(圖二(b))，距斷層面最短距離從 40 至 342 公里。

本研究所採用的每筆強震資料都經過基線校正(baseline correction)及帶通濾波(band-pass filtering)，並參考美國太平洋地震工程研究中心(PEER)所完成的 NGA 計畫(Next Generation Attenuation of Ground Motions Project)中的資料庫架構，建構本研究所需的強震資料庫系統(TNGA Database)。

本研究將以最大概似法(maximum likelihood method)利用混合效應模型(mixed-effect model)來進行本研究衰減式的迴歸分析，透過非線性迴歸分析來探討地動值與震源、路徑及場址之間的關係，以地震學理論基礎的衰減模型，考慮場址特性( $V_s30$ )、震源機制(focal mechanism)以及地體構造特性差異，完成適合台灣地區之地殼地震及隱沒帶地震的 PGA 及各週期反應譜衰減式及其殘差分析。

## 前言

強地動衰減式(ground-motion attenuation relationship)在地震危害度分析中扮演著舉足輕重的角色。一個合適的衰減式不僅可以估計地動值(中值, median), 並且可以推估其變異量。提供給工程界作為工程耐震設計之用, 減少地震可能帶來的損失。

強地動衰減式的研究可以分為兩個方向: 其一是以實際記錄的強震資料來建立衰減式的經驗法(empirical), 另一類是以有限斷層(finit-fault model)來模擬強地動的理論(數值)法(theoretical/numerical)。目前的強地動衰減式研究仍以經驗法為主, 須利用大量且規模、距離及場址特性分布良好的強地動實測資料進行妥善的迴歸分析而得。台灣地區位於環太平洋地震帶上, 且建置了許多強震站, 陸續累積了許多寶貴的強震資料(Liu et al., 1999), 非常適合進行強地動衰減式的研究。

## 強震資料處理

本研究所蒐集的強震資料都有進行濾波及基線校正的處理, 確認資料品質良好才進行各週期反應譜值的計算, 最後將完成處理的各項強震資料參數整理匯入資料庫當中, 方便後續的研究分析之用。本研究所使用的地殼地震資料是「強震資料庫建置與維護及使用者平台開發(一)計畫」(李錫堤等人, 2006)中之 TNGA (Taiwan Next Generation Attenuation Project) 資料庫成果, 而隱沒帶地震強震資料則是「強震資料庫建置與維護及使用者平台開發(二)計畫」的成果。

## 強地動衰減模型

本研究強地動衰減模型的建立是以地震學的基本理論為基礎, 考慮了震源的尺度效應(seismic source scaling)(包含: 規模尺度, magnitude scaling; 震源機制, rupture style)、路徑尺度效應(path scaling)(包含: 近距離、遠距離、斷層上下盤)、場址效應, 參考了 Chiou and Youngs (2006)所提出的衰減模型建立本研究的強地動衰減模型如下:

$$\begin{aligned} \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a} F_{Rvi} + c_{1b} F_{NMi} + c_7 (Z_{TORi} - 4) + c_2 (M_i - 6) + \frac{(c_2 - c_3)}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\ & + c_4 \ln(R_{rupij} + c_5 \cosh(c_6 (M_i - c_{HM}, 0)_{\max})) + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{rupij}^2 + c_{RB}^2}) \\ & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh[(M_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max}]} \right\} R_{rupij} \\ & + c_9 \cos^2 \delta_i \tanh\left(\frac{R_{rupij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left(1 - \frac{R_{rupij}}{R_{rupij} + 0.001}\right) \\ & + \tau \cdot z_i \end{aligned}$$

$$\ln(SA_{ij}) = \ln(SA_{1130ij}) + \phi_1 \left[ \ln \left( \frac{Vs30_{ij}}{1130} \right), 0 \right]_{\min} \\ + \phi_2 \left\{ e^{\phi_3 [(Vs30_{ij}, 1130)_{\min} - 360]} - e^{\phi_3 (1130 - 360)} \right\} \ln \left( \frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4} \right) + \sigma \cdot z_{ij}$$

上式中， $R_{rup}$ 為距斷層面最短距離(km)， $R_{JB}$ 為Joyner-Boore距離(km)， $\delta$ 為斷層面傾角， $W$ 為斷層面寬(km)， $Z_{TOR}$ 為地表到斷層破裂面頂部距離(km)， $\lambda$ 為滑移角， $Vs30$ 為地表下30公尺內的平均剪力波速(m/s)， $F_{RV}$ 和 $F_{NM}$ 表示震源機制( $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ, F_{RV}=1$  否則 $F_{RV}=0$ ； $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ, F_{NM}=1$  否則 $F_{NM}=0$ )， $\tau$ 和 $\sigma$ 分別代表inter-event及intra-event的標準差。

### 迴歸分析

本研究以統計方法中的最大概似法(maximum likelihood method)利用混合效應模型(mixed-effect model)來進行本研究衰減式的非線性迴歸分析(Chiou and Youngs, 2006)。早期的強地動衰減式迴歸分析中只考慮一個固定的誤差項( $\varepsilon_{ij}$ )，稱為僅考慮固定效應(fixed effects)的迴歸分析，而地震規模大小相同卻表現出不同的地震動強度使我們需要考慮地震事件間的差異，因此在迴歸分析中不能只考慮固定效應，需要加入隨機效應(random effects)，同時考慮隨機效應及固定效應的迴歸模型，即為本研究中所使用的混合效應模型(mixed effects model)(Abrahamson and Youngs, 1992)。而衰減式的迴歸分析模型可以表示如下：

$$\ln Y_{ij} = f(M_i, R_{ij}, \theta) + \eta_i + \varepsilon_{ij}$$

上式中， $Y_{ij}$ 為地動參數值(PGA或pseudo-spectral acceleration)， $M_i$ 為地震矩規模， $R_{ij}$ 為距斷層面最短距離， $\eta_i$ 為第*i*個地震事件的隨機效應，代表著事件間(inter-event)變異程度的大小， $\varepsilon_{ij}$ 為第*i*個地震事件在第*j*個測站的固定效應，代表著事件內(intra-event)變異程度的大小。

### 初步成果

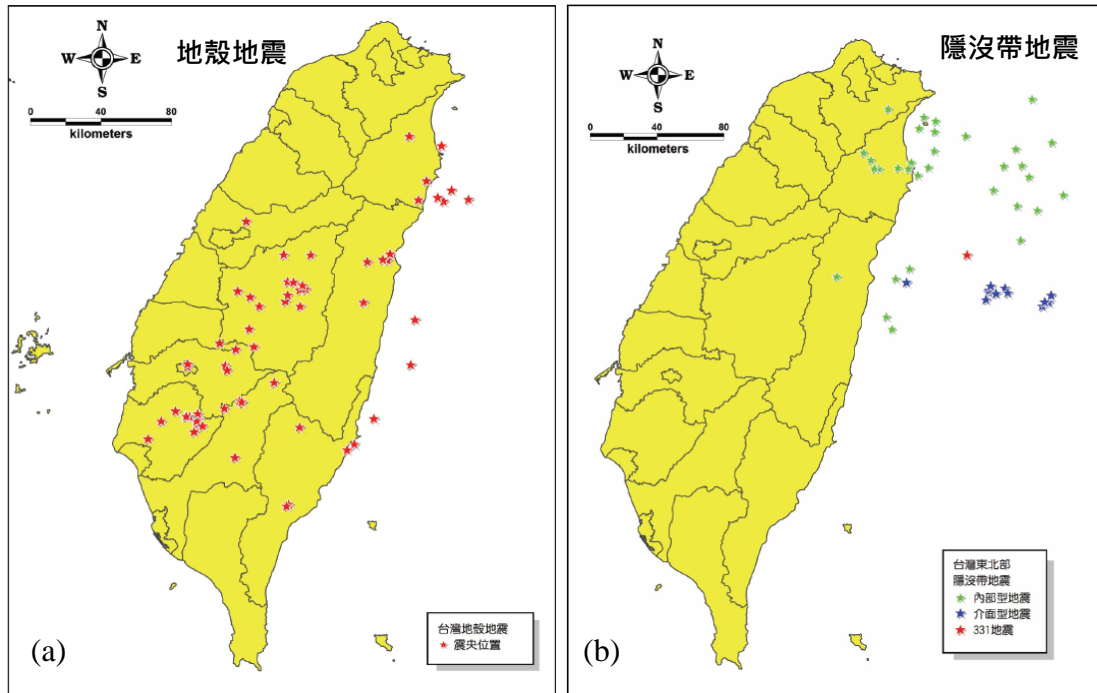
圖三為本研究初步建立之衰減式， $Vs30$ 為750m/s時不同規模( $M_w5 \sim M_w8$ )PGA及SA(0.1秒、0.3秒、1.0秒)隨距離衰減情形，圖四則是集集地震事件實際資料與衰減式擬合的情形，三條曲線分別代表中間值與正負一個標準差。

### 參考文獻

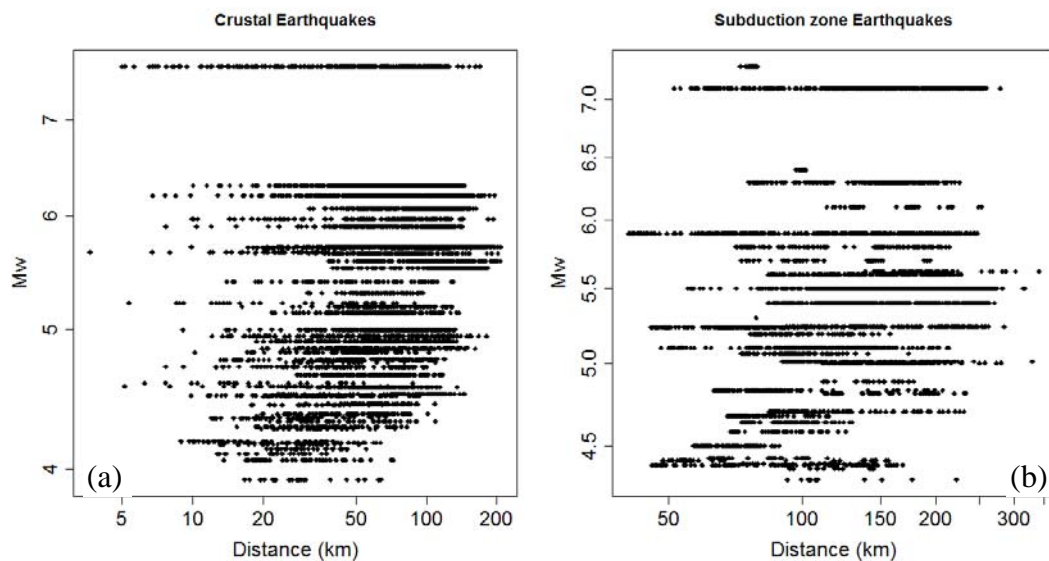
- Abrahamson, N. A., and R. R. Youngs (1992). A Stable Algorithm for Regression Analyses Using the Random Effects Model, *Bull. Seism. Soc. Am.* **82**, 505-510.
- Chiou B. S.-J. and R. R. Youngs (2006). Chiou and Youngs PEER-NGA Empirical

Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of Peak Acceleration and Pseudo-Spectral Acceleration for Spectral Periods of 0.01 to 10 Seconds, *PEER report*, [http://peer.berkeley.edu/products/rep\\_nga\\_models.html](http://peer.berkeley.edu/products/rep_nga_models.html)  
 Liu, K. S., T. C. Shin, and Y. B. Tsai, 1999: A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP, *TAO* **10**, 377-396.

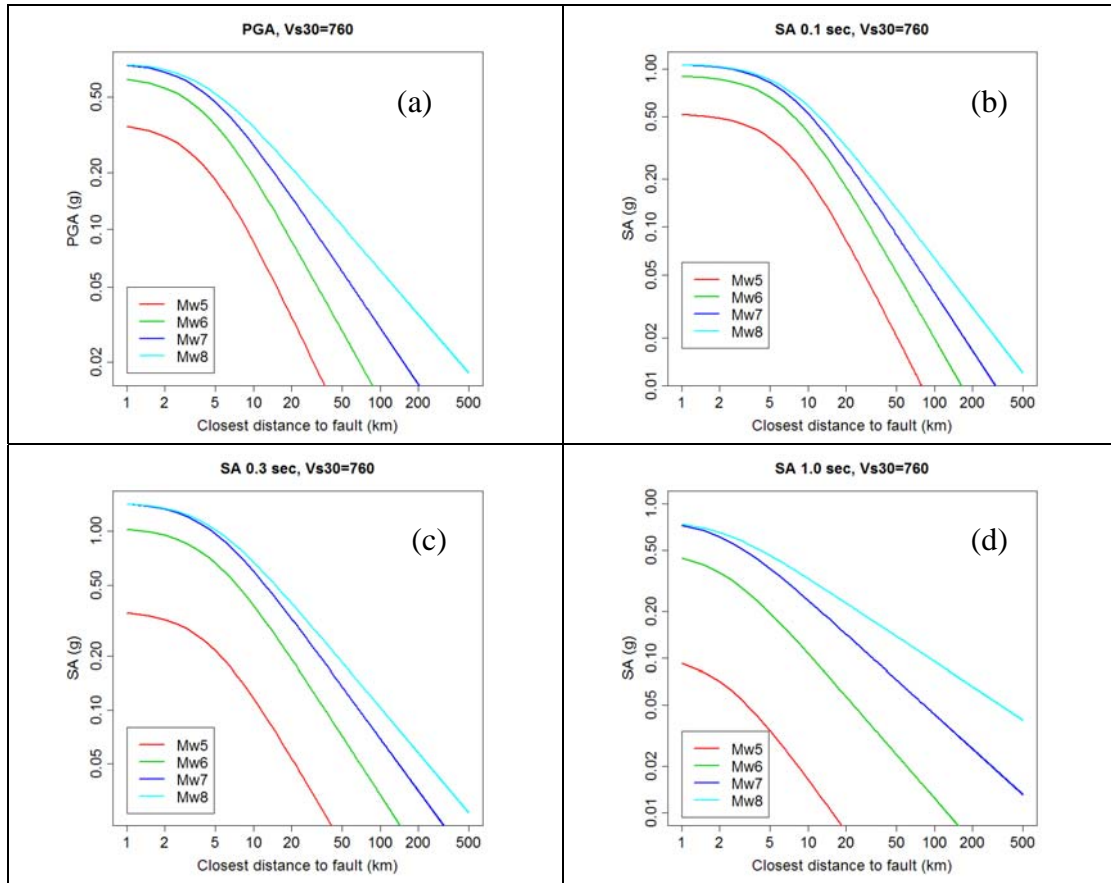
李錫堤、邱宏智、林柏伸、鄭錦桐 (2006). 強震資料庫建置與維護及使用者平台開發(一)成果報告，中興工程顧問社，共 83 頁。



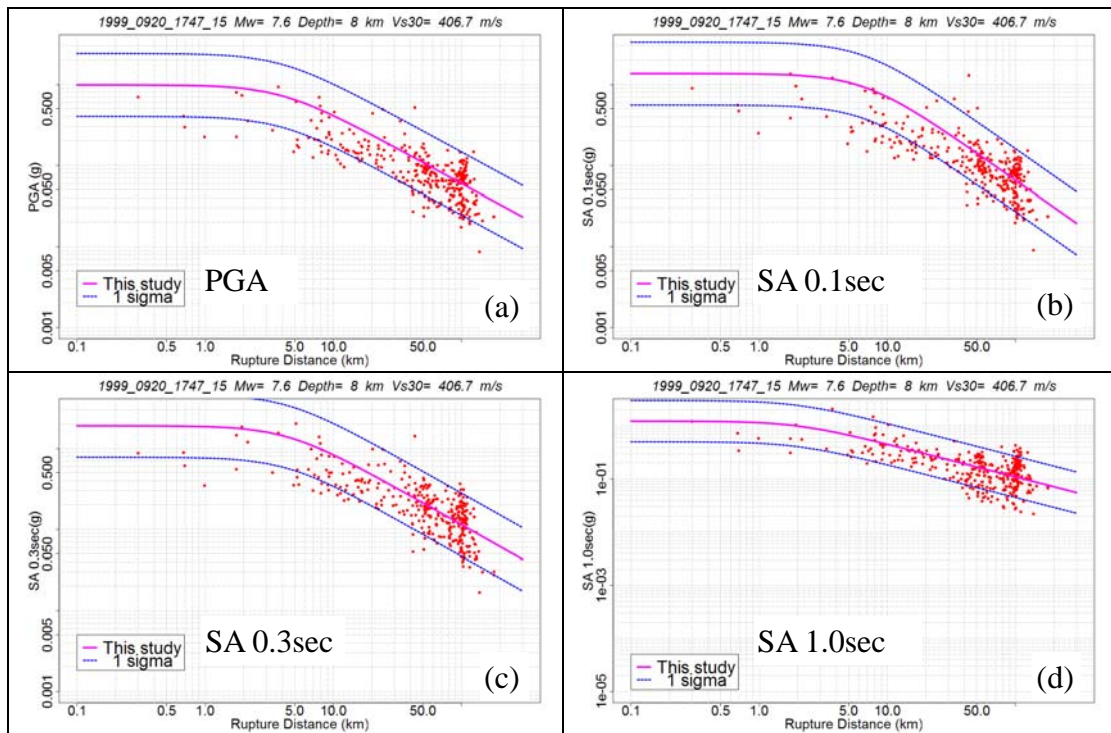
圖一、本研究所使用的地震震央分佈圖。(a)地殼地震，(b)隱沒帶地震。



圖二、本研究所使用強震資料的距離與規模分佈圖。(a)地殼地震，(b)隱沒帶地震。



圖三、本研究所初步完成的衰減式隨距離衰減情形( $V_{s30}$  為 750m/sec)。(a)PGA, (b)SA 週期 0.1 秒, (c) SA 週期 0.3 秒, (d)SA 週期 1.0 秒



圖四、本研究所初步完成的衰減式與 921 集集地震強震資料擬合的情形 ( $V_{s30}$  為資料的平均值 406m/sec)。(a)PGA, (b)SA 週期 0.1 秒, (c) SA 週期 0.3 秒, (d)SA 週期 1.0 秒。