



雲嘉南地區譜震度衰減函式、殘值與

場址工程特性關聯性探討

翁永賢

南榮技術學院營建工程系助理教授

摘要

本文應用中央氣象局設置在嘉南地區 TSMIP 強震測站歷年所記錄的強震數據分析嘉南地區的各場址的工程特性，作地質分區以供作工程設計的參考。分析包括譜震度 (SI)、譜震度的距離衰減，並探討場址的譜震度殘差與地盤工程特性間之關聯性。

分析結果提供雲嘉南地區的譜震度(SI)的衰減函式及強震記錄數值處理經驗。分析所得雲嘉南地區譜震度(SI)衰減式如下

$$SI = 0.1056e^{1.724M} (R + 1.000e^{0.539M})^{-1.502}$$

式中 SI 為譜震度(cm/sec)，R 為震源距離，由 5km 到 250km 作曲線擬合，M 為地震規模(Local magnitude, M_L)。

比較測站地質特性與譜震度衰減式的誤差關係。結果顯示岩石地盤的譜震度標準偏差較小而土質地盤(Soft soil site)的標準偏差較大。此現象顯示土質地盤的譜震度預期值的可靠性較低，而岩石地盤譜震度的預期值可靠性較佳。本文使用 UBC 場址分類標準(1997)分類雲嘉南地區中央氣象局測站，計算 B、C、D、E 等四種不同地盤之譜震度 SI 的迴歸殘值、 NR_i 平均殘值以探究不同地盤對譜震度的影響。結果顯示軟岩地盤(B class)的修正殘值為負值，譜震度比預期值小，亦即地震危害度較低。而殘值大小由岩石地盤到土層地盤依序增加，此一結果驗證鬆土層地盤之譜震度較高，亦即地震危害度較高，而岩盤之譜震度較小。

關鍵詞：譜震度、地震防災、地震微分區、地震參數

一、緣起

譜震度(Spectral Intensity, SI)定義原是用以作為地震在場址的危害度指標，震度的大小也就代表當地在指定地震發生時結構物的可能受損害程度。由於大地並非是理想彈性體，所以 SI 會隨著震央距的增加而減弱，當 SI 小於一定值以下，該地震對於當地的危害就可忽略。因而計算譜震度相對震央距的衰減曲線，配合地震震央頻發區定位，有助於判別當地可能的地震危害度及進行地震防災預警。

由於 SI 為地震的危害度指標，而場址的譜震度高低可應用譜震度的衰減曲線之迴歸殘差估算，迴歸殘差與 UBC 地盤分類間之關係尚未有充份之研究，本文探討兩者之關係。中央氣象局在嘉南地區設置之強震測站已有 UBC 地質分類^[1]，本文將利用



中央氣象局設置在嘉南地區之強震測站所記錄的歷年強震數據分析嘉南地區 SI 衰減曲線以及各測站殘差，並與測站的場址地質分類比對，以探討使用 SI 迴歸分析殘差來代表地盤工程特性的合理性。

二、文獻回顧

地震震度(Seismic Intensity)用以表示在特定地點所感受到之地震強烈程度。常用的地震強指標有 JMA 地震強度(Japan Meteorological Agency Intensity Scale)、修訂麥氏震度(Modified Mercalli Scale)等，我國氣象局目前使用的地震強度分級延用 JMA 震度。地震震度是使用尖峰加速度(Peak Ground Accerleration, PGA)作為指標。以地表加速度作為指標有其限制，Matsumura (1992)^[2]的研究認為，PGA 與 PGV (Peak Ground Velocity)作為建築物的危害度指標，分別對短週期及長週期範圍的結構物較為適用。為考慮不同週期結構物的適用性，另有尖峰地表速度(Peak Ground Velocity, PGV)以及很多種對建築結構的地震危害度指標被提出。而以平均譜速度作為危害度指標則可適用於較為廣泛的結構物範圍，平均譜速度即定義為譜震度(Spectral Intensity, SI)^[3]:

$$SI(\xi) = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi, T) dT \quad (1)$$

式中 $S_v(\xi, T)$ 為速度反應譜。譜震度的定義積分範圍由 0.1 到 2.5 秒，此範圍幾乎涵蓋了所有建築物的週期範圍。Housner (1952)^[3]提議以 SI 的大小來表示地震的危害度。

對於譜震度的適用性，Neuman (1954)^[4]曾經根據美國 100gal 以下之地震數據研究地震震度與地震災害間之關係，結果指出地震波週期較短者對建築結構損壞程度即不若週期較長者，但假如譜速度值相同時，則不論週期長短，損壞程度均相同，例如：使房屋牆壁龜裂之大地震的譜速度約為 4.7cm/sec。日本的經驗則顯示當 SI 大於 50cm/sec 時損壞就會發生，此相當於 JMA 的 V 級強震。當 SI 小於 10cm/sec 以下時就不致於有損壞發生^[5]。

式(1)的週期範圍幾乎涵蓋了全部建築結構物的週期範圍，Hidago and Clough (1974)^[6]研究鋼筋混凝土剛架結構物的合理週期範圍，考慮對於小振幅振動其週期上





限只在 1 秒以下，所以建議將 (1) 式的上限改為 1 秒。關於最佳週期範圍的研究尚有 Kappos (1990)^[7]、Matsumura (1992)^[2]、Martinez-Rueda (1996)^[8]

Nau and Hall (1984)[9]應用 12 個地震記錄計算彈性系統及雙線性 S.D.O.F. (Single Degree Of Freedom)振動系統的譜速度以估算地震記錄折算有效危害度的方法，獲致結論是設計譜分為高頻、中頻及低頻三個頻段，分別為加速度控制區段、速度控制區段及位移控制區段。其週期分界是依平均值的變異係數為最小的方式調整得到。

Martinez-Rueda (1998)[10]研究將譜震度細分為加速度、速度、位移三種物理量以作為地震危害度指標的適用性。我國的結構物環境與其他國家可能不盡相同，本地的譜震度參數研究有簡文郁等(2002) [11]提出將譜震度分為長週期、短週期，應用在在台北盆地與地震災害作位置比對，在 2002 年 0331 花蓮地震於台北盆地引起的災害相關性甚好。

近年來的研究常見有將 SI 的週期區分為三個頻段，以短、中、長週期分別作為地震波對於矮建築、中等高度建築及高層建築物之災害指標。其區分方式大略有二個方向，其一是延用譜震度 SI 的定義，以平均譜速度為基準將週期劃分為短、中、長三段範圍(e.g. Nau and Hall, 1984; Martinez-Rueda,1998)，另一個方式是應用設計譜觀念，將平均譜加速度、平均譜速度、平均譜位移搭配短、中、長三個週期範圍來延伸譜震度的應用，作為地震波對低矮建築物、中等高度建築物及高層建築物危害度指標(e.g. 簡文郁等(2002))，而原始的譜震度(SI)定義則可作為整體危害度指標。

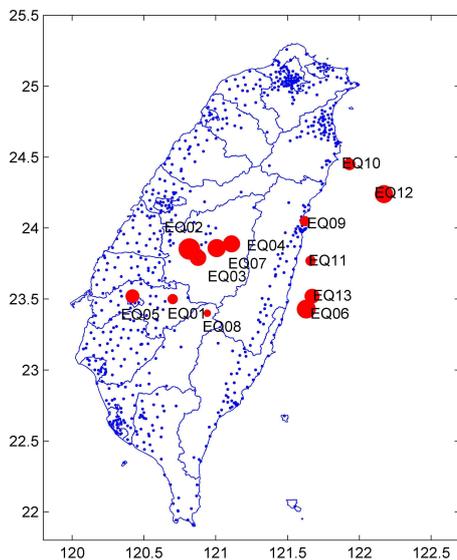
三、地震資料的選用

本研究使用中央氣象局台灣強震觀測站網在 1990-2004 年的強震記錄選取地震規模較大的地震，包括 1999 年發生的 921 集集地震及 2002 年 331 花蓮外海地震等災害性地震等。用以計算位於雲林縣、嘉義縣市及台南市各測站的譜震度(SI)特性，建立 SI 隨著震央距衰減的數學式與其迴歸殘差的特性，以了解及闡明本地的 SI 特性，並探討 SI 與測站分類間的關連性以驗證使用譜震度作為地震強度指標的可用性。

選取的記錄共計 52 個地震，發震時間 1992 年以後，選取在雲嘉南地區造成 4 級以上的震度且在雲嘉南地區測站有記錄且分佈均勻的地震，各測站座標資料可在中

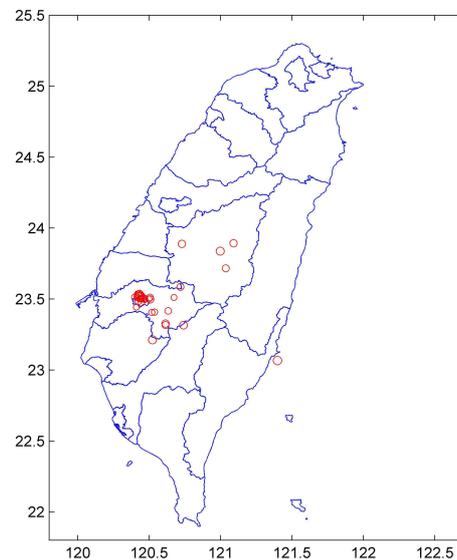


中央氣象局網站上自由取得。本文將選取的地震分為兩組，Group1 為地震規模大於芮氏規模六以上的地震，Group2 為芮氏規模六以下但於雲嘉南地區之最大震度達 4 級以上之區域性地震。由於本文以探討地震防災為目的，所以未列入最大震度四級以下之地震。Group1 地震共有 13 個，震源參數如附表 1，其中包括著名的 1998 年 7 月 17 日瑞里地震、1999 年 9 月 21 日的 921 大地震、1999 年 10 月 22 日 1022 嘉義地震、2002 年 3 月 31 日的 331 花蓮地震等。此 13 個地震的震央分佈如圖 1，圖中紅點為地震震央所在位置，紅點大小代表地震規模，藍點代表中央氣象局之地震測站位置。Group2 的地震共 39 個，其震央分佈如圖 2。震源參數如附表 2 所示。



*紅色圓點為所使用地震之震央位置，紅點大小代表地震規模，圖中計 13 個地震震央，藍色小點為中央氣象局之測站位置。

圖 1 Group1 地震震央分佈圖



*紅色圓點為所使用地震之震央位置，圖中計有 39 個地震，其中大部份震央在嘉義縣境內。

圖 2 Group2 地震震央分佈圖

四、強震資料處理

(一)地震分量的選用

地震波所產生的震動分量有垂直向、南北向、東西向等三個分量，地震災害的損害調查分析顯示結構物損害主要來自水平向，除位於緊臨震源區時結構物受垂直分量影響比較明顯外，垂直向分量常常並非控制分量。而水平向兩分量計算譜震度(SI)之

選用組合可能有東西向、南北向、主軸方向、波傳縱向、波傳橫向或兩水平方向平均值、兩水平向最大值、兩水平向幾何平均值等。根據簡文郁(2002)^[11] 研究以幾何均值的結果最穩定，亦即其回歸分析之誤差最小，因此本研究對以幾何平均值(Geometric Mean)，亦即採用兩水平向乘積的平方根定義譜震度 SI

$$SI = \sqrt{(SI_{EW} \times SI_{NS})} \quad (2)$$

(二)地震記錄長度調整

地震資料之處理方面，由於地震記錄產生難免錯誤而需先經處理方能取得正確數據。中央氣象局所使用之地震儀之最大記錄長度為 90 秒。但某些大規模地震，如 921 集集地震則有超過 90 秒之地動記錄。

用以表示一次地震之數據長度的採用與地震延時的定義直接相關。例如 Bolt (1969)定義的地震延時為地震記錄中加速度開始大於 0.05g 到小於 0.05g 的時間差為地震延時，稱為 Bracketed Duration。此地震延時定義在工程上最被廣泛採用。而且強震儀的觸發點是在地表加速大於 4 gals 時發生，所以地震記錄的延時原理上與 Bracketed Duration 相同。但如果第一個地震波主震已過，而尾波還大於 4 gals，此時另一個波串又再到達，則在同一個地震記錄檔內可能記錄有二個以上地震，這種情形對於 PGA 的計算可能並無影響，但對於能量的計算則有部份影響。另外可能是記錄錯誤造成記錄超長，例如 0331 花蓮地震(2002 年) ILA008 測站記錄在開始後 133 秒時發生了 2G 的加速度，由於 0331 花蓮地震並不致於造成 2G 加速度，可推斷是地震儀在地震發生 2 分鐘後被外力撞擊所產生的，這部份的數據需先剔除。

本研究主要探討譜震度(SI)，若是前 90 秒之震動延時已足以引發結構物產生最大位移量，則超過 90 秒的數據求得的 SI 可能與前 90 秒數據所求得的 SI 相同。例如 921 地震時 TCU138 測站使用 90 秒之地震記錄與使用全部長度之地震記錄所求得之 SI 均為 55.87，90 秒的 SI 達成率已有 100%。本研究再以 0331 花蓮地震(2002 年)與 921 集集地震(1999)為例，抽樣統計使用前 90 秒記錄與使用全長地震記錄所求得之 SI 之差別，其中 331 地震記錄有 430 筆，分別計算後發有 9 筆求得之 SI 值有所不同，921 地震計有 443 筆有效記錄，分別計算後發現有 4 筆求得之 SI 值有所不同。總體而言使用記錄前 90 秒來計算譜震度(SI)只有 1.5%的記錄會有不同的結果，其中誤差最大的



記錄則是錯誤的記錄，所以本研究採用地震記錄前 90 秒數據計算譜震度(SI)之方法，因為限定了地震記錄總時間也可避免記錄大規模地震時產出超長地震記錄以致產生能量比較基準不同的誤差。此方法另一顯著優點是記錄長度大幅縮減，對於大規模地震的譜震度(SI)計算時間可大幅減少。

(三)迴歸分析之數學模型

譜加速度定義相當於地表之加速度加諸於結構模型後的最大反應加速度，以物理觀念而言可視為窄頻寬濾波的結果，因而討論譜震度的衰減時直接引用 PGA 的衰減模式應該是合理的，PGA 衰減模型主要有 Kanai's form (1961)^[13]、Joyner and Boore's form (1981)^[14]、Campbell's form (1981)^[15]、Abrahamson form (1997)^[16]。整體而言，這些函數特性是依序增加其複雜度。

本研究分析譜震度(SI)目的在提供作為地震危害度的指標，太過於複雜的數學模型可能因地震參數取得困難而不便於使用，因而本文選取傳播距離(R)、地震規模(M)為兩個主要參數，由於所用之地震參數與 PGA 相同，因而其衰減函數若以 Campbell's form (1981)表示應可滿足其函數曲線擬合的要求，Okamoto (1973)^[5] 曾經使用以下的衰減式來表示譜震度(SI)的衰減特性：

$$\log_{10} SI = aM - b \log_{10} \Delta - c \quad (3)$$

式中用來決定譜震度 SI 的參數有芮氏(Richter)地震規模 M、震央距離(Epicenter distance) Δ 以及常數 c。此數學式相當於 Kanai's form (1961)取震央距常數誤差項為零。而 Campbell's form 的迴歸分析雖然較複雜，但由於該式是較為近期的研究成果，有多數學者採用，本研究也採用 Campbell's form 作為迴歸分析的參考式。

(四)震央距離、震源距離與斷層破裂面最短距離的比較

由於地震波是自地震斷層破裂面開始往外傳播，其能量隨傳播距離增加而衰減。在迴歸分析所使用的數學模型中之傳播距離 R 在點震源之地震應為震源距，而考慮斷層線或斷層面 2D 模型或 3D 震源模型時則應使用距離斷層線或斷層面之最短距離 (Abrahamson,1997)^[16]。就本研究選用之為數眾多的區域性地震而言，大多數地震之斷





層並不明顯，因而假設為點震源模型，而於 921 集集地震(1999 年)伴隨有明顯斷層，則使用距震斷層面之最短距離。

為比較使用震央距離與最短斷層距離的迴歸分析效果，選取 921 地震記錄 442 筆分別計算依震央距迴歸所得的 SI 衰減曲線與使用斷層最短距離替代震央距離之 SI 衰減曲線，由於只有一個地震，所以衰減曲線與地震規模的關係未能確定，而 921 地震已知 $M=7.3$ 。依震央距迴歸所得 SI 衰減曲線為：

$$\log_{10} SI = 2.850 - 0.7978 \log_{10} \Delta \quad (4)$$

$\text{Log}_{10} SI$ 之標準差 $\sigma=0.1769\text{cm/sec}$ ，最大誤差 1.8580cm/sec 。

而依斷層線最短距離替代震央距離之 SI 衰減曲線為：

$$\log_{10} SI = 2.2324 - 0.5280 \log_{10} \Delta \quad (5)$$

$\text{Log}_{10} SI$ 之標準差 $\sigma=0.1634\text{cm/sec}$ ，最大誤差 1.7325cm/sec 。

本文亦比較了斷層面最短距離計算之譜震度衰減曲線。921 集集地震(1999)之的同震斷層(車籠埔斷層)向東傾 26 度，震源深度 8 公里，依此計算最短斷層面距離分析 SI 衰減曲線所得結果為：

$$\log_{10} SI = 2.2879 - 0.5602 \log_{10} \Delta \quad (6)$$

$\text{Log}_{10} SI$ 之標準差 $\sigma=0.1605\text{cm/sec}$ ，最大誤差 1.7384cm/sec 。

式(4)、式(5)及式(6)中，地震記錄使用前 90 秒部份，有效記錄數為 442 站，震央距與斷層最短距離單位公里(km)，SI 之單位為 cm/sec 。

整體而言，依斷層線最短距離所迴歸之 SI 衰減公式在標準偏差與最大誤差上均有改善，標準偏差減少 7.3%，最大誤差約減少 7.0%。而改為斷層面最短距離後，其標準偏差能再稍微改善。其未能大幅改善的原因推論為 921 集集地震(1999)震源深度甚淺(8km),但由於此地震之同震斷層線長達百公里以上，所以由震央距離改為斷層線距離可有明顯改善。由以上的比較結論，地震斷層呈線狀分佈之 921 集集地震之 SI 衰減曲線使用斷層面最短距離替代震央距可減少衰減曲線之誤差，而提高預測正確性。所以本研究對於 921 地震單獨取斷層面最短距離，其餘地震則以震源距離計算。



五、譜震度 SI 衰減曲線分析

在地震數據迴歸分析產生譜震度衰減曲線的過程中由於使用 Campbell's form 不能將地震規模、震央距兩項分解為線性組合，所以將地震規模、震源距同時作迴歸分析，但 Campbell's form 不能轉化為線性迴歸式，所以需採用試誤法，以求誤差均方根為最小值的方式求解。資料前置處理包括有方向分量取兩個水平分量幾何平均、地震數據長度取前 90 秒、地震記錄採用校對記錄剔除錯誤後用於進行後續計算。使用 Group1 的地震及 Group2 地震迴歸分析結果分別如式(7)及式(8)

$$SI = 0.0871e^{1.613M} (R + 1.481e^{0.453M})^{-1.320} \quad (7)$$

$$SI = 0.0115e^{1.910M} (R + 4.657e^{-0.620M})^{-1.447} \quad (8)$$

式中 SI 為譜震度(cm/sec)，R 為震源距離，由 5km 到 250km 作曲線擬合，M 為地震規模(Local magnitude, M_L)。

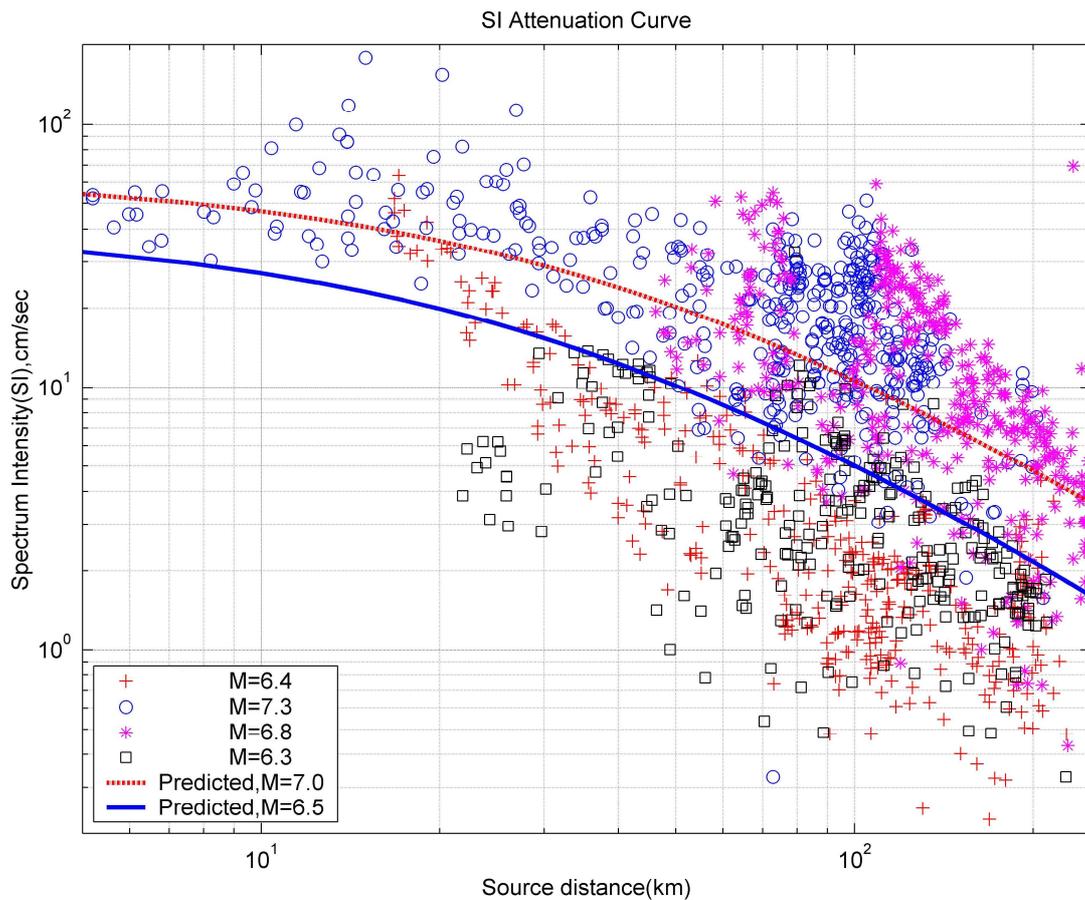
式(7)與式(8)的迴歸係數相差甚多，繪圖分析顯示式(8)線型較不合理，經比對後發現其誤差均方根雖然是最小值，但由於地震記錄的震央分佈導致其迴歸成果偏離。若將 Group1 與 Group2 合併一起作迴歸分析，得：

$$SI = 0.1056e^{1.724M} (R + 1.000e^{0.539M})^{-1.502} \quad (9)$$

上式之標準偏差為 11.294 cm/sec。

式(9)與式(7)所得迴歸係數較為接近，線型亦較為合理。在線型擬合的方法採用試誤法計算求出五個迴歸係數，在實作的過程中發現初始值的設定影響終值收斂的速度甚大，而且數據點數不足時可能造成迴歸係數 $b_1 \sim b_5$ 等數值不穩定的現象，因此在使用 Campbell's form 作為衰減模型時取較多數據同時一次進行迴歸計算可得較為穩定的結果。圖(3)繪出式(9)在 $M=6.5$ 及 $M=7.0$ 時之衰減曲線。圖中並繪出部份地震之數據分佈點，包括 1022 嘉義地震($M=6.4$)、921 集集地震($M=7.3$)記錄、331 花蓮地震($M=6.8$)及另一編號 EQ11 的地震($M=6.3$)。歸迴分析使用地震記錄計 7206 筆記錄。迴歸分析發現就同一測站而言，不同地震之 SI 變化很大，顯示出震源效應及傳播路徑等效應相當明顯，要讓場址效應顯現出來應取多數地震的平均以抵消震源效應及傳播路徑影響。





*使用 Campbell's form 求出之嘉義地區譜震度衰減曲線，圖中同時點出部份地震數據以供參考

圖 3 嘉南地區譜震度 SI 衰減曲線

溫國樑(2006)等^[17]提出台灣地區短、長週期譜加速度 S_{as} 、 S_{al} 衰減曲線分析成果，經比較衰減曲線，兩者相近，因兩者單位不同及目標區域不同以致不能直接比較，但本研究成果之衰減率略低。

六、場址 SI 與衰減曲線殘差分析

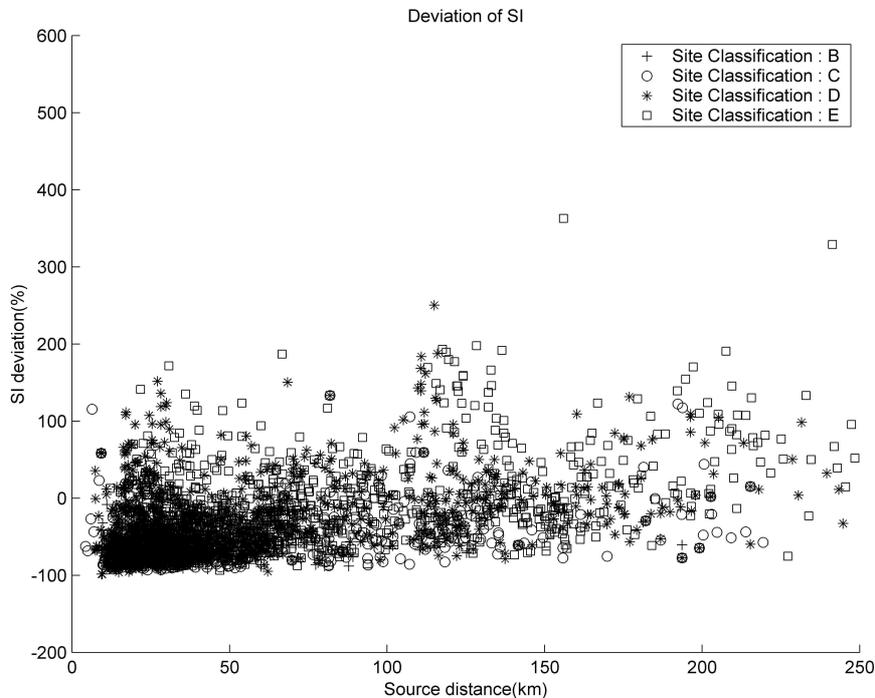
Lee, C.T. (2001)^[1]研究台灣地震測站地質分類，並完成全國 708 個自由場強震測站之分類表。其研究成果顯示反應譜線型分類(RSS)及水平垂直頻譜比法(HVSR)可作為測站地質分類之輔助方法。但測站之地質分類與譜震度大小之間的關係之課題仍待一步研究。譜震度的影響因子除了測站的地質之外尚包括波傳路徑及震源因子，但由於本研究採用多數地震的平均，其波傳路徑及震源因子可有相當程度的抵消，本研究



乃以譜震度衰減數學式為基礎，分析不同地盤種類的測站譜震度之實測值與預期值之偏差量，探討譜震度與測站地盤種類的關係。

雲嘉南地區的強震觀測站，在 UBC(1997)地盤分類上有 B, C, D, E 四類地盤(Lee, C.T. 2001)^[1]。沒有分為 A 類的地盤。分類為 B 的地盤有 4 站，C 類有 20 站，D 類有 44 站，E 類有 54 站。各類地盤的定義參照 UBC (ICBO, 1997)規範。

圖 4 分析式(9)迴歸 SI 衰減曲線之殘差的誤差百分比。誤差百分比的計算式採用測站實測值與預期值之差值與預期值的比值計算，即 $(SI_{site}-SI)/SI$ 。其中 SI_{site} 表示測站的實測值， SI 為迴歸式的預期值，圖中橫軸為震源距離。由圖 4 可知 SI 的迴歸誤差與震源距離無明顯相關。



*誤差百分比以 $(SI_{site}-SI)/SI$ 計算。其中 SI_{site} 表示測站的實測值， SI 是指迴歸式的預期值。地盤分類為 B, C, D, E 之地盤的測站數分別有 127, 485, 1158, 1502 個記錄。在雲嘉南地區並沒有測站地質分類為 A。

圖 4 雲嘉南地區譜震度(SI)衰減式誤差與地盤相關性分析

圖 4 將雲嘉南地區 122 測站所有測站地震記錄之 SI 值與預期值之誤差，依四類不同地盤分別繪出。圖中誤差以百分比表示，其計算式為：

$$E_R = \frac{SI_{site} - SI}{SI} \quad (10)$$

其中 SI_{site} 表示測站的實測值， SI 為迴歸式的預期值。圖 4 中 B、C、D、E 各類地盤平均誤差分別為 -56.6%，-53.6%，-29.8%，及 -27.3%。而其標準偏差依 B、C、D、E 地盤順序分別為 36.9%，35.5%，74.2%，80.6%。

變異係數(Coefficient of Variation)是定義為標準差與算術平均數之比。但若應用於式(9)，由於本衰減函數曲線非採用線性迴歸的參數，不能直接套用，所以比照變異係數的涵義採用誤差與標準偏差的比值方式對誤差值予以正規化。

由圖中可知近震源地帶其誤差百分比並無明顯較大，可知 Campbell's form 的線形擬合良好，在距離近震源區仍無明顯誤差，相對的在 Kanai's form 的擬合上近震源區的誤差比例則明顯較大，本研究試作結果顯示 Kanai's form 在較近 50km 以內地帶，其預期值的可靠性不佳。在譜震度與地盤分類上而言，由於雲嘉南地區沒有 A 類地盤，而 B 類地盤只有四站，代表性不足而僅可供參考，而 C、D、E 等三種地盤分類站數較多，代表性較為足夠。大致上說，岩石地盤(Rock site)的譜震度標準偏差較小而土質地盤(Soft soil site)的標準偏差較大(D、E 類)。此現象顯示土質地盤的譜震度預期值的可靠性較低，而軟岩地盤(B、C 類)譜震度的預期值可靠性較佳。而土質地盤(Soft soil sites)，即分類為 E 者，誤差平均值比軟岩(B 類)為大，其中代表的意義是土質地盤的譜震度通常較軟岩地盤測站之譜震度為高。

七、場址效應與迴歸分析殘值

由測站地震記錄求得之譜震度除了震源與傳播路徑的影響外，因受到場址地盤的影響而有一定的放大或減小的特性，稱為場址效應。本研究使用多數地震記錄以計算譜震度的衰減函數，由於不同震源及路徑其效應將互相削減，各測站的實際譜震度與衰減函數之殘差足可供作場址效應之參考值。

Campbell (1981)^[15] 為應用於 PGA 殘差分析，建議定義正規化 PGA 殘值 NR_i ，

$$NR_i = \frac{(Err_i) - MR}{\sigma_{Err}} \quad (11)$$

式中 $Err_i = \ln PGA - \ln \overline{PGA}_i$ 為測站 i 對式(9)的誤差，亦即迴歸殘差。MR 為全部數據的平均值， σ_{Err} 是全部數據的標準偏差。此一數學式中 PGA 若以譜震度 SI



替代亦可引用作為譜震度的殘值。某一測站殘值 NR_i 可作為測站譜震度預期值的修正依據。

與式(10)中定義的 E_R 相比較，式(11)採用誤差與標準偏差的比值方式對誤差值予以正規化而 E_R 並未對標準偏差作正規化。 E_R 較有利於觀察實測數據是否與數學模型相吻合，而 NR_i 則有利於觀察單一測站數據之偏差特性，此特性可顯示出場址的效應值。

簡文郁(2002)研究 PGA 的衰減函數的迴歸殘差特性，結論顯示與 PGA 成對數關係。Abrahamson(1997)對於譜加速度 S_a 衰減數學模型在地盤修正函數，結論建議殘差大小與 PGA 的對數值成線性關係。Campbell (1981)建議的殘差 NR_i 則對標準偏差取正規化，理論良好的數學模型，其殘值應與震央距離無關。在本文稍後的分析，比對本文使用 Campbell's form 作迴歸分析結果，殘值大致與震源距離無關，而試作 Kanai's form 迴歸分析結果則有依震央離距減少而誤差放大的情形。可見得 Campbell's form 線形較佳，但其迴歸係數之收斂較不穩定，需有分佈良好之多數地震記錄搭配使用。

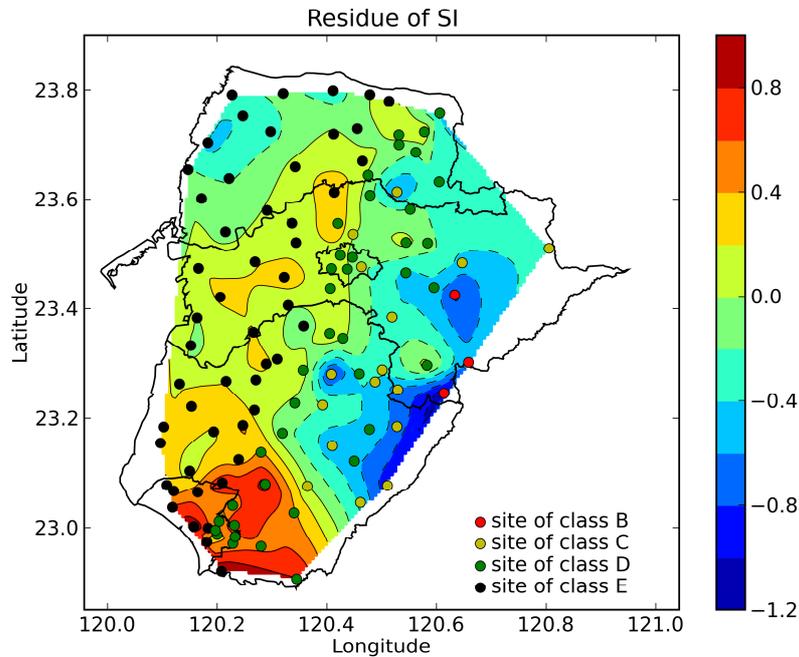
分析測站對式(9)的誤差，其原因主要有地盤因素尚未列入。所測站的殘差應與地盤特性具有較大相關性。本研究分別計算雲嘉南地區 B, C, D, E 等四種不同地盤之譜震度 SI 的迴歸殘差 NR_i ，迴歸衰減函數採式(9)， NR_i 的定義採式(11)，以 SI 替代 PGA。計算雲嘉南地區 122 強震測站之 NR_i ，其值如表 1。為驗證其正確性，所有測站之殘值 NR_i 總合計算其值為零。為了解不同地盤種類之殘值特性，本研究繪出雲嘉南地區地盤與殘值分佈圖如圖 5。計算各種類之地盤的所有測站的平均殘值 NR_i 以探究不同地盤對譜震度的影響，得知本區 SI 之殘值(NR_i) 介於-1.37 至 0.97 之間。最小值發生在曾文水庫壩底測站(測站編號 CHY110)，最大值發生於台南市安平區石門國小。圖 5 中顯示 SI 的殘值與地質分類具有部份相關，整體而言 B 類、C 類等堅實地盤的 SI 迴歸殘值偏低而 D 類、E 類等軟弱地盤的 SI 迴歸殘值偏高，例如：嘉義縣東部山區地盤分類為 B 或 C 類，其殘值亦相對偏低，而西部沿海地盤分類為 D 或 E 類，其殘值亦相對偏高。可解讀為 B 類或 C 類地盤的建築物之地震危害度較低。台南市東區附近出現區域性的迴歸殘值偏高的現象，應可歸類為地盤異常地區，此類區域之 SI 殘值可能源自於場址效應而導致殘值偏高。不同地質地盤殘值平均依 B, C, D,



E 順序各別為為 -0.8299, -0.4847, 0.0977, 0.1442, 如表 1 所示。此一結果顯示軟岩地盤(B class)的修正殘值為負值, 亦即譜震度較小、地盤工程特性良好。而由岩石地盤到土層地盤, 殘值依序增加, 此一結果驗證為鬆土層地盤之譜震度較大, 而岩盤之譜震度平均比預期值為小。

表 1 譜震度 SI 的場址殘差(Residue) NR_i .

地盤分類	SI 的 NR_s 殘值分類平均	測站數
B	-0.8299	4
C	-0.4847	18
D	0.0977	44
E	0.1442	53*



*雲嘉南地區 SI 之殘值(NR_i) 介於-1.37(CHY110)至 0.97(CHY098)之間。最小值發生在曾文水庫壩底測站(CHY110), 最大值發生於台南市安平區石門國小(CHY098), 整體而言 B 類、C 類等堅實地盤的 SI 迴歸殘值偏低, 而 D 類、E 類等軟弱地盤的 SI 迴歸殘值偏高。

圖 5 雲嘉南地區譜震度(SI)衰減式殘值(NR_i)與地盤相關性分析

八、結論

本文討論以地震記錄分析雲嘉南地區的譜震度(SI)衰減函式及強震記錄數值前置處理方法, 包括代表地震的選取分為全國性的 Group1 及區域的 Group2 的兩群地震組



合方式以代表不同的強地動特性，採用相同的地震記錄長度方式以避免導入錯誤資料及保持譜震度權重一致。使用震源距替代傳統震央距離以符合能量消散的物理基本原理。

雲嘉南地區之譜震度衰減曲線以 Campbell's form 迴歸分析結果所得如式(9)

本文比較測站地質特性與譜震度的關係。分析結果顯示岩石地盤的譜震度標準偏差較小而土質地盤的標準偏差較大(D、E類)。此現象顯示土質地盤的譜震度預期值的可靠性較低，而軟岩地盤譜震度的預期值可靠性較佳。土質地盤(Soft soil sites)，分類為 E 者，誤差平均值比軟岩(B類)為大，其中代表的意義是土質地盤的譜震度通常較軟岩地盤測站之譜震度為高。

本研究分別計算雲嘉南地區 B, C, D, E 等四種不同地盤之譜震度 SI 的迴歸殘值 NR_i 平均殘值以探究不同地盤對譜震度的影響。其值依 B, C, D, E 順序各別為 -0.8299, -0.4847, 0.0977, 0.1442。此一結果顯示軟岩地盤(B class)的修正殘值為負值，亦即譜震度預期之場址危害性較小。而由岩石地盤到土層地盤，殘值依序增加，此一結果驗證為鬆土層地盤之譜震度較大、地震危害度較高，而岩盤之譜震度較小、地震危害度較低。其殘差值如表 1，可作為工程耐震設計參考。

參考文獻

1. Lee, C.T., Cheng, C.T., Liao, C.W. and Tsai, Y. B. (2001), Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.91, No 5, Oct
2. Matsumura, K. (1992), On the intensity measure of strong motions related to structural failures, *Proceeding of 10 WCEE*, 1, 375-380.
3. Housner, G. W. (1952), Spectrum intensity of strong-motion earthquakes, *Proceeding Symposium Earthquake and Blast Effects on Structures*, EERI, U.C.L.A.
4. Neumann, F. (1954), Earthquake Intensity and related ground motion, *University of Washington Press*, Seattle,
5. Okamoto, S. (1973). *Instruction to Earthquake Engineering*, John Wiley, New York, New York。





6. Hidalgo, P., and Clough, R.W. (1974), Earthquake simulator study of a reinforced concrete frame, *Report UCB/EERC-74/13*, EERC, University of California, Berkeley, CA.
7. Kappos, A.J. (1990), Sensitivity of calculated inelastic seismic response to input motion characteristics, *Proceedings of 4th USNCEE*, 2, 25-34.
8. Martinez-Rueda, J. E. (1996), Application of passive devices for the retrofitting of reinforced concrete structures, CD ROM. *Proceeding of 11 WCEE*.
9. Nau, J.M., and Hall, W.J. (1984), Scaling methods for earthquake response spectra, *Journal of Structure Engineering*, ASCE, 110(7)1533-1548.
10. Martinez-Rueda, J. E. (1998), Scaling procedure for natural accelerograms based on a system of spectrum intensity scales, *Earthquake Spectra*, Vol.14 No.1.
11. 簡文郁、張毓文、溫國樑、羅俊雄 (2002) 台北盤地地盤效應分析, *結構工程*, Vol. 17, No.3, 3-17.
12. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975), On the correlation of seismic intensity with peaks of recorded strong ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.65, pp.139-162.
13. Kanai, K. (1961), An experimental formula for the spectrum of strong earthquake motions,, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, vol 39, 1961.
14. Joyner, W.B., Boore, D.M. (1981), Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6): 2011-2038.
15. Campbell, K. W. (1981), Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 6, pp.2039-2070.
16. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. (1997), Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seismological Research Letters*, vol.68, No.1
17. 溫國樑,張毓文,簡文郁 (2006) 「梅山斷層地震潛勢評估」,梅山地震百年研討會,3.16-3.18.



附表 1. Group1 選用之全國性地震震源參數

地震編號	發震時間 (UT)	規模 (M_L)	緯度 ($^{\circ}$)	經度 ($^{\circ}$)	震源深度 (km)	有效記錄數 (全台)	備註
EQ01	19980717045101	6.2	23.5	120.7	2.80	286	
EQ02	19990920174715	7.3	23.85	120.82	8.00	444	921 地震
EQ03	19990920180340	6.6	23.79	120.88	3.50	367	921 地震餘震
EQ04	19990925235249	6.8	23.86	121.01	9.90	397	921 地震餘震
EQ05	19991022101856	6.4	23.52	120.42	16.59	385	1022 嘉義地震
EQ06	19991101175300	6.9	23.43	121.63	31.33	421	
EQ07	20000610182302	6.7	23.89	121.11	16.21	450	
EQ08	20000728202800	6.1	23.4	120.94	7.35	291	
EQ09	20000910085404	6.2	24.05	121.62	17.74	238	
EQ10	20010614023502	6.3	24.45	121.93	17.29	286	
EQ11	20020212032702	6.2	23.77	121.66	29.98	417	
EQ12	20020331145254	6.8	24.24	122.17	13.81	432	331 花蓮地震
EQ13	20030610084003	6.5	23.52	121.67	32.31	465	

附表 2. Group2 選用之區域性地震參數

發震時間(UT)	規模(M_L)	震央緯度($^{\circ}$)	震央經度($^{\circ}$)	震源深度(Km)
199312152149043	5.70	23.2133	120.5237	12.50
199401030912006	4.35	23.4080	120.5377	3.79
199404060112011	5.03	23.5325	120.4212	13.44
199507070304048	5.30	23.8935	121.0900	13.07
199509281758005	4.48	23.5075	120.4458	9.27
199807200313033	4.11	23.5115	120.6732	1.33
199910181601058	4.99	23.7167	121.0363	21.40
199910220218056	6.40	23.5170	120.4225	16.59
199910220227027	4.81	23.4755	120.4443	14.37
199910220243025	4.77	23.4865	120.4253	18.94
199910220310017	6.00	23.5330	120.4307	16.74
199910220557047	3.98	23.5037	120.4693	13.97
199910221757004	4.92	23.5280	120.4320	16.74
199910231708003	5.08	23.5048	120.4605	12.41
199910231829055	3.93	23.5035	120.4718	12.28
199910232153001	4.46	23.5400	120.4328	14.83
199911032134010	4.88	23.3177	120.6148	6.18
199911040048059	4.27	23.5003	120.4412	11.85
199911120109049	4.94	23.5045	120.4578	12.66
199911150725021	5.06	23.4972	120.5065	7.03
199911151056007	4.55	23.5120	120.5060	9.17
199911151810049	4.75	23.5248	120.4427	11.67
199911160518003	4.42	23.4998	120.4975	5.35
199912011706055	4.45	23.5017	120.4348	10.94





199912031457000	4.08	23.4947	120.4695	10.93
200001310257025	3.90	23.4995	120.4627	10.56
200002152133018	5.59	23.3160	120.7403	14.71
200003032302008	4.04	23.5243	120.4458	14.76
200005261114028	4.25	23.5133	120.3975	13.62
200007290515054	4.06	23.4993	120.4483	12.00
200008310306028	3.98	23.5173	120.4135	10.88
200101281309036	4.21	23.4435	120.4103	7.93
200102081734009	4.66	23.4165	120.6330	11.30
200102182025010	4.94	23.5853	120.7185	17.67
200103011637050	5.80	23.8377	120.9972	10.93
200209061102001	5.30	23.8897	120.7287	28.82
200209300835013	5.04	23.3280	120.6142	8.12
200303310613003	4.45	23.4055	120.5190	5.51
200312100438013	6.42	23.0667	121.3982	17.73

附表 3. 1997 UBC 場址地盤分類標準

Site class	Site class description of 1997 UBC Provisions
A	Hard rock, eastern United States sites only, $\bar{V}_s > 1500$ (m/s).
B	Rock, \bar{V}_s is 760 to 1500 (m/s).
C	Very dense soil and soft rock, \bar{V}_s is 360 to 760 (m/s), Undrained shear strength $u_s \geq 2000$ psf ($u_s \geq 100$ kPa) or $N \geq 50$ blows/ft.
D	Stiff soils, \bar{V}_s is 180 to 360 (m/s), Stiff soil with undrained shear strength $1000 \text{ psf} \leq u_s \leq 2000$ psf ($50 \text{ kPa} \leq u_s \leq 100 \text{ kPa}$), or $15 \leq N \leq 50$ blows/ft.
E	Soft soils, Profile with more than 10ft (3m) of soft clay defined as soil with plasticity index $PI > 20$, moisture content $w > 40\%$ and undrained shear strength $u_s < 1000$ psf (50kPa), or $N < 15$ blows/ft.
F	Soils requiring site specific evaluations. 1. Soil vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading: e.g. liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils. 2. Peats and/or highly organic clays (10ft (3m) or thicker layer). 3. Very high plasticity clays: (25ft (8m) or thicker layer with plasticity index > 75). 4. Very thick soft/medium stiff clays: (120ft (36m) or thicker layer).

