

地震危害度分析技術之發展與應用

鄭錦桐* 江憲宗** 林柏伸*** 李錫堤****

摘要

台灣地區地震頻仍，因此工程結構物須慎重考慮耐震因素，而合理評估工址之地振動特性為公共工程建設之重要課題。財團法人中興工程顧問社(以下簡稱中興社)四十年以來，參與國內多項重大公共工程建設，其中水庫大壩、核電廠的地震評估技術要求更嚴格，隨著國內外地震科學與地震工程之研究進展，中興社不斷積極引進與使用國外最先進之地震評估技術，進而逐步提升國內公共工程之地震評估技術水準。本文將先回顧國內公共工程建設中地震評估技術之演進，以及簡述各階段重要技術之里程碑。再針對 1999 年集集大地震後，國內重要地震評估相關技術之改進要項進行彙整說明，並介紹國外最新地震評估技術的理論與優點。另外，依據最新的地震評估技術理論完成台灣地區地震危害度圖(Seismic Hazard Map)，突顯出活動斷層震源與強地動衰減式研究對於地震評估的重要性，最後本文對於國內地震危害度評估技術，提出後續工程應用以及研究方向的建議，冀期國內地震評估技術持續進步，進而提升公共工程品質與安全。

關鍵字：NGA、PSHA、地震危害度分析、強地動衰減式

一、前言

台灣位處太平洋西岸弧狀列嶼中，呂宋弧與琉球弧銜接之處，是呂宋弧與歐亞大陸碰撞後擠壓隆起的年輕島嶼。由於弧陸碰撞的結果，台灣地區是地殼變動激烈、斷層活動度高，且地震頻繁的區域，因此工程結構物須慎重考慮耐震因素，合理評估工址之地振動特性為工程建設之重要課題。一般建築物及工程計畫耐震設計所採用之設計地震參數，可依循政府制定之規範；對於重要結構物如：核能電廠、水庫、高鐵等而言，地震危害因素尤為重要，通常多會進行個案之地震評估，以研訂該計畫之設計地震參數。自 1999 年集集大地震之後，

其地震序列的強震觀測以及車籠埔斷層破裂研究之成果受到國際矚目，國內工程界亦陸續將地震科學研究成果應用於工程實務之耐震評估中，例如：水利署於 2004 年底發布施行「水利建造物檢查及安全評估辦法」，修改自前經濟部水利司公布之「蓄水庫安全評估規範」(1998，試行)，其中包含水庫壩體之地震評估要項規定；2005 年頒布新版「建築物耐震設計規範」適用一般結構物，該規範中有關地震評估部分乃參考工程地震學理論及近期國內外地震評估規範與評估方法，針對台灣地區地質及地震環境制訂而成，兼顧了學術理論與工程實務需要。另外，其他重大工程建設之地震評估需求仍持續制訂當中，並參考先進國家相關規範之經驗。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員兼防災科技組組長

** 中興工程顧問公司大地工程部工程師

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

**** 中央大學應用地質所教授兼所長

地震危害度分析技術領域必須包含地震學 (Seismology)、地質學 (Geology)、工程地震學 (Engineering Seismology) 以及地震工程學 (Earthquake Engineering) 等研究領域始能完善。近二十餘年來，全球都會區及人口密集區附近陸續發生強烈地震，包括：1985 年墨西哥西南岸外太平洋底地震、1989 年美國加州 Loma Prieta 地震、1992 年美國加州 Landers 地震、1994 年美國加州 Northridge 地震、1995 年日本兵庫縣南部地震、1999 年土耳其 Kocaeli 地震及 1999 年台灣集集地震、2004 年南亞大海嘯、2004 年與 2007 年日本新瀉地震、2008 年中國四川地震等，在前述大地震中蒐集到數量極多的強地動實測紀錄，以及斷層地表破裂之地質資訊與工程結構損失調查資料。近年來隨著研究成果陸續出爐，震源參數亦日益了解，推動了工程地震學的進展，而應用於工程實務方面，工程師更能掌握相關參數之設定，甚至發展新模式與經驗式，使得地震評估過程中相關參數之不確定性大為降低。

本文首先將介紹地震危害度評估方法，概述台灣地區地震評估演進發展，並詳細探討近年來國外地震評估方法之新技術發展現況，最後針對國外新技術應用於國內重大工程地震評估技術規範研訂內容之可行性，提出地震危害度分析於未來研究與工程應用之具體建議。

二、地震危害分析理論回顧

關於地震威脅潛能之研究早期稱為「地震危險度分析」(Seismic Risk Analysis)。近年來則將地震之「威脅」潛能，即評估震源規模、震源距離與工址震度大小，稱為地震危害度 (Seismic Hazard)；而保全對象遭受強烈地振動而造成「災害」傷亡損失時，則稱為地震風險度 (Seismic Risk)。本文主要探討地震之「威脅」潛能分析技術，領域涵蓋震源(活動斷層)發生規模大小與頻率之評估研究，以及震源(活動斷層)釋放地震波隨距離傳遞至工址地盤之震度預測關係式(或稱強

地動衰減式)研究，即透過具地震「威脅」潛能之地震規模與震源最短距離，來預測工址地盤振動大小。地震危害度方法主要區分為定值法 (Deterministic Method) 及機率法 (Probabilistic Method) 等兩種，茲將定值法與機率法之地震危害度評估方法詳述如后。

(一) 定值法

定值法為較早採用之方法，觀念也較簡化易懂，分析過程中需先透過古地震學 (Paleoseismology) 研究確定鄰近工址具威脅潛能之震源(活動斷層)的最大規模，逐一評估各震源之規模與距離工址最短距離，代入適當之強地動衰減關係式，評估各震源影響工址之震度大小，其最大者即該工址之設計地震。定值法之主要優點為評估過程透明，易對評估過程中每一項目單獨檢驗其正確性；另一優點為評估結果之敘述對使用者而言，簡明且易了解。因此，早期地震評估大都採用定值法，希望能求算「最壞狀況」(Worst-Case)時的設計地動參數。但震源(活動斷層)的發震機率以及強地動衰減關係式預測的強地動皆具變異性 (Variability)，都將影響最後的設計地動參數，故定值法無法了解真正工址地盤振動的發生機率，更無法了解其設計值的保守程度。

(二) 機率法

機率法地震評估原泛指所有涉及機率推演之方法，常見之機率法包括：振幅分布法 (Amplitude Distribution Method)、極值法 (Extreme Value Method) 及 Cornell (1968) 等方法 (李錫堤，1991)。目前為學術界及工程實務中最廣為運用並被接受之機率法則專指 Cornell 方法，一般稱之為「機率式地震危害度分析」(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)，此方法之基本理論及分析程序最早由 Cornell 於 1968 提出，主要是假設地震發生符合卜桑過程 (Poisson Process) 之統計模式；地震

規模大小之分布符合 Gutenberg - Richter 關係；地震震源分布則為點震源常態分布。後來 Kiureghian and Ang 於 1977 針對 Cornell 方法的點震源模式，提出斷層開裂模式(Fault Rupture Model)，以解決點震源模式未能充分反應地震破裂機制導致 PSHA 結果過低的情形。Kiureghian and Ang (1977) 的斷層開裂模式直至目前為止一直被廣泛使用。而後 Youngs and Coppersmith (1985) 採用斷層滑移速率來建立地震的發生次數與規模關係式，稱為特徵地震模式(Characteristic Earthquake Model)，是首先提出以斷層滑移速率(Slip-Rate)將斷層活動性納入 PSHA 中的學者(李錫堤，1993)。自此之後，PSHA 研究除根據地震目錄資料分析地震的活動性外，尚須考慮斷層的滑移速率，以決定因斷層活動而引致特徵地震的發生機率(National Research Council，1988)。

(三) PSHA 理論

PSHA 機率法係利用既有之地震與地質資料，以統計方法或其他機率方法推求場址的結構物在使用年限 T 下，遭受超過各程度的強地動值，如：尖峰地動加速度 (Peak Ground Acceleration，以下簡稱 PGA)或譜加速度(Spectral Acceleration，以下簡稱 SA)的機率，進一步推估某一再現週期 (Return Period) 下所遭受的強地動值 (National Research Council, 1988; EERI Committee on Seismic Risk, 1989)。配合地動衰減關係式及震源發震規模與次數之機率分布，即可計算某場址於特定時間內發生指定地動值之超越機率 (Probability of Exceedance)。以機率在週期 T 時間內，區域中所有震源至少有一次使場址強地動值 Z 超越 z 的機率如下(式 1)：

$$P(Z > z|T) = 1.0 - e^{-v(z) \cdot T} \leq v(z) \cdot T \quad (\text{式 1})$$

機率法概念上是將場址附近各不同規模震源的定值法成果，依據其發生機率綜合評估場址強地動值 Z 超越 z 的年平均發生次數 $v(z)$ ，描述如下：

$$v(z) = \sum_{n=1}^N \sum_{m_i=m_0}^{m_u} \lambda_n(m_i) \cdot \left[\sum_{r_j=0}^{r_j=r_{\max}} P_n(R=r_j|m_i) \cdot P(Z > z|m_i, r_j) \right] \quad (\text{式 2})$$

(式 2)中， $\lambda_n(m_i)$ 是第 n 個震源在 m_i 規模區間下的地震發生率，而規模的範圍從最小規模 m_0 至最大震源規模 m_u ； $P_n(R=r_j|m_i)$ 是針對第 n 個震源在規模 m_i 時，離場址距離 r_j 情形下的機率。而年超越機率 P 的倒數即相當於一般所稱再現週期 (Return Period)，對不同之工址地動值 z ，計算其年超越機率 P ，即得到該工址之地震危害度曲線圖 (Seismic Hazard Curve)，依據此圖可找到設計水準所需之工址地動值，例如，「再現週期 475 年」或機率意義上同等於「結構物使用年限 50 年內，超越強地動 z 的機率為 10%」之工址地動值。

三、國內地震評估技術演進

台灣雖然多地震，但民國 60 年代以前，由於經濟發展因素，一般建築物注重防範風、雨、暑熱及費用低廉，相對忽略地震影響。民國 63 年建築技術規則納入設計地震參數，一般建築物耐震設計開始有遵循依據。之後民國 76 年公路橋梁設計規範亦規定設計地震參數，供公路工程耐震設計之依據。茲將台灣地區地震評估分階段發展概述如后。

(一) 第一階段(民國 60 年代以前)

惟民國 60 年代以前，台灣地區僅設置少數地震儀且地震研究貧乏，要從事工址之地震評估實有困難，設計地震參數之訂定乃沿用國外經驗與作法，此時期重大工程如：日據時代的日月潭水庫、民國 40 年代的石門水庫、民國 50 年代的曾文水庫等採用地震與地質條件與台灣類似的日本做法，民國 50 年代的德基水庫則以設計國家義大利做法為依據。

(二) 第二階段(民國 60 年代)

徐明同 (Hsu, 1971)利用歷史災害地震之震度分布完成台灣地區最大震度分布圖，其成果成為 63 年版建築技術規則地震分區依據。而後徐明同(1975)引用日本河角氏(Kawasumi)之方法及經驗公式，計算出再現週期(Return Period)各為 50 年、75 年及 100 年之台灣地區 PGA 的等值分布圖(圖 1)。張之高(1977)採用 Schnable and Seed (1973)推導之美國西部地區地震衰減曲線，以極值法 (Extreme Value Method) 及振幅分布法 (Amplitude Distribution Method)得到台灣地區再現週期 50 年之地震加速度分布圖(圖 2)。茅聲燾 (1978)引用國外之地動加速度衰減公式，首度應用 Cornell (1968)方法，進行台灣地區 PSHA 分析。其將地震發生模式視為貝氏更新過程 (Bayesian Updating Process)，以點-線混合震源模式(Hybrid Point-Line Source Model)考慮地震震源，得到再現週期 475 年之加速度等值分布圖(圖 3)。

而在重要結構物的地震評估工程實務應用方面，民國 63 年起中央研究院地球科學研究所先後採用定值法進行中山高速公路苗栗—台中段以及核能一、二廠地震評估。翡翠壩及榮華壩之規

劃設計亦採用定值法從事壩址之地震評估，以活動斷層作為設計地震震源，提出最大可能地震 (Maximum Credible Earthquake, MCE)觀念，並研製設計反應譜，應用到大壩耐震設計。民國 60 年代後期之翡翠水庫興建工程，除聘請國內外地震及結構動力專家學者共同會商外，並結合了地震學及地質學知識，提出修正之定值法。其原因乃由於設計基準地震(DBE)及運轉基準地震(OBE)之需，以統計方法分析過去發生之地震事件，以求得 DBE 及 OBE 之地震規模。當時翡翠水庫地震評估工作得到極高評價，並為國外書籍引用為大壩地震評估之範例，其地震評估之重大突破與里程碑意義為：

1. 首次針對特定工址進行微震觀測，調查計畫區域之地震活動度。
2. 針對台灣地區獨特的地震與地質條件，發展出修正定值法。
3. 引進最大可能地震(MCE)、設計基準地震 (DBE)及運轉基準地震(OBE)作為大壩耐震分析基準。
4. 除了提供地震係數供仿靜態耐震分析外，亦提出設計反應譜及加速度歷線供壩體動態分析之用。

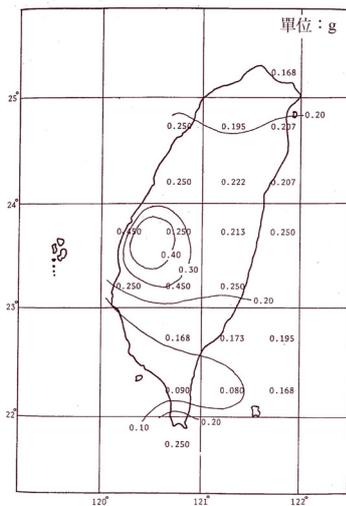


圖 1 台灣地區 PGA 等值分布圖(摘自徐明同, 1975)

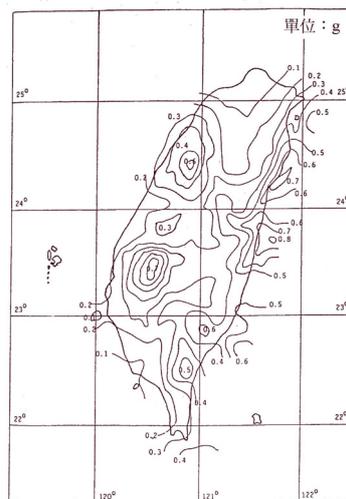


圖 2 台灣地區 50 年再現週期之 PGA 等值分布圖(摘自張之高, 1977)

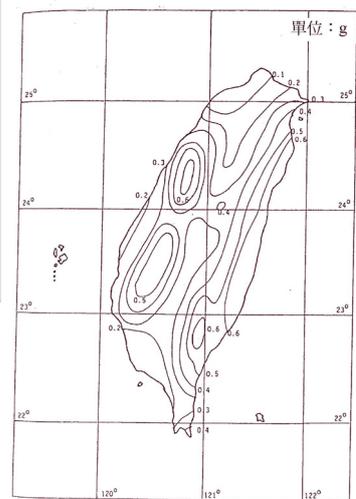


圖 3 台灣地區 475 年再現週期之 PGA 等值分布圖(摘自茅聲燾, 1978)

(三) 第三階段(民國 70~80 年代)

民國 70 年之後，隨著台灣經濟快速發展，地震評估廣泛應用於重大工程及重要結構物之設計地震參數制訂。此時期國內地震評估工作除了採用傳統定值法外，亦陸續應用以 Cornell (1968) 理論之 PSHA 方法。賴世聲、熊雲嶺及蔡主權 (1982) 為中油公司求算各主要儲油槽之設計地震參數，以卜桑過程的地震發生機率模式及區域震源(Area Source)模式之假設，得到台灣地區再現週期 475 年之地震加速度分布圖(圖 4)。蔡主權、羅俊雄及葉永田(Tsai et al., 1987)假設地震發生模式為卜桑過程，考慮區域震源及線震源，並採用以台灣地區實測地震紀錄迴歸之四組加速度衰減公式，分別算出台灣地區再現週期 50、100 及 475 年之加速度等值分布圖(圖 5)。其後，羅俊雄及其合作者以更新的地震資料，又多次重新分析台灣地區地震危害度，其部分成果如(圖 6)所示，其所作之貢獻包括：

1. 重新劃分震源區並計算其地震發生率(a、b 值)；
2. 重新推算適用於台灣地區地震加速度衰減公式之係數並提出新的衰減公式；
3. 配合 Uniform Hazard Spectrum(羅氏譯為均布危害度反應譜)提出針對不同結構振動週期之加速度等值分布圖。

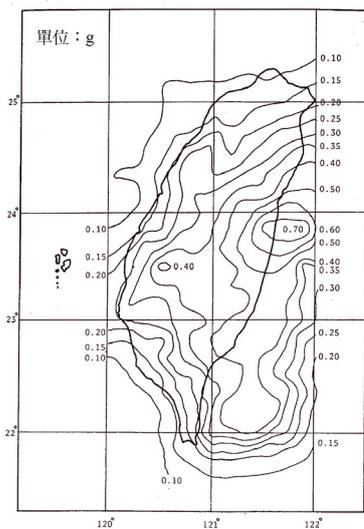


圖 4 台灣地區 475 年再現週期之 PGA 等值分布圖(摘自賴世聲等，1982)

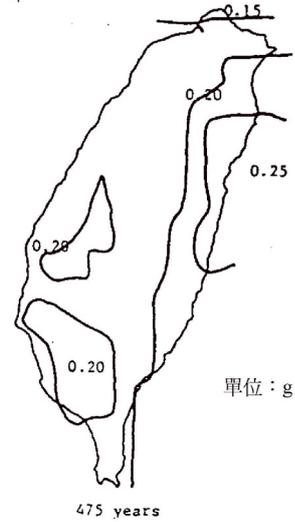


圖 5 台灣地區 475 年再現週期之 PGA 等值分布圖(摘自 Tsai et al., 1987)

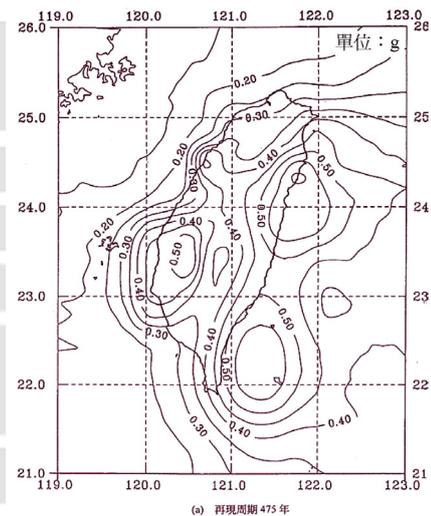


圖 6 台灣地區 475 年再現週期之 PGA 等值分布圖(摘自羅俊雄等，1994)

地震評估的工程實務應用方面，依據蔡主權、羅俊雄及葉永田(Tsai et al., 1987)的研究成果，中研院地球所採用定值法先後完成鯉魚潭水庫(1984)、建民水庫(1993)、湖山水庫(1994)地震評估以及核能三、四廠先後使用定值法及機率法進行地震評估。而後台大地震工程研究中心採用機率法完成第二高速公路(1986)、台北捷運系統(1987)、高速鐵路(1992)、高雄捷運系統(1993)及眾多火力電廠、超高樓之地震評估。

此時期隨著水庫安全評估及水利發電工程的推動，國內工程顧問公司亦陸續引進國外先進之地震評估方法及觀念，地震評估工作逐漸在民間工程顧問公司生根，並依據台灣地區獨特之地震與地質條件發展適合本地之地震評估方法，此階段(民國 70~80 年代)之重要里程碑為：

1. 70 年代初期，中研院開始有強震儀之設置，民國 80 年中央氣象局執行台灣地區強地動觀測計畫 TSMIP，廣設強震站達六百餘部，使國內強震紀錄日漸增加，而得以開始嘗試以本土之強震紀錄製作設計反應譜及人造加速度歷線，有別於以往引用國外資料的做法。
2. 引進日本核能電廠地震評估方法，即當工址附近無活動斷層分布時，假設工址下 10km 處規模 6.5 地震為設計地震震源，推求工址之 PGA 值(美濃水庫可行性規劃)，由於當時國內對活動斷層分布不甚了解，此方法不失為一良策。
3. 引進日本河川局(1977)推求地震係數公式(烏山頭水庫安全評估)，此方法考慮壩址所處地區之地震活動情形、壩址地盤條件及壩型而決定壩體之地震係數，用於大壩工程相當合適。
4. 在大壩耐震分析方面，引進最大設計地震(Maximum Design Earthquake, MDE)觀念。
5. 此階段末期，李錫堤等人(1999 年 6 月)首度在美濃水庫壩址完成了場址相關(Site-Dependent)反應譜衰減式，並完成了場址相關均布危害度反應譜以及模擬旗山斷層活動所推演的壩址地震加速度歷線，供土石壩動力分析之用。

(四) 第四階段(民國 90 年代)

民國 88 年台灣發生 921 大地震，車籠埔斷層活動造成地表錯動及極大之強地動實測紀錄，讓學術界及工程界更進一步認識台灣地區地體環境及地質構造，也使得國內地震評估工作面臨挑戰與檢討，其課題包括：評估方法的檢討、地動衰減式的更新、建築法規之震區劃分及近斷層效應(Near-Fault Effect)之考量暨斷層地表錯動問題

與斷層帶禁限建之考慮等。近年來國外對於 PSHA 已有許多新的思維，而國內也已有相當程度的改進，將於下節中詳細說明。以下僅就地動衰減式及建築法規之更新作介紹。

921 之後的地動衰減式更新主要包括了羅俊雄等人(2000)及林柏伸等人(2002)所提出的反應譜衰減式。此兩組衰減式目前仍廣泛地被應用在國內各項地震評估工作中。由於 921 前的地動衰減式缺少大規模及近距離地震資料支持，因此在大規模及近距離地震部分有所低估。新的地動衰減式的提出，使得評估之設計地震參數較以往大幅提高，對耐震分析暨工程設計技術造成衝擊。

建築法規方面，建築物耐震設計規範(2005)已採用了全新的震區劃分；將全台灣本島除北高兩市外皆提昇為強震區，並採用近斷層因子，其值大小依工址與斷層距離遠近而定。在斷層地表錯動問題處理方面，參考美國加州之法規作斷層帶禁限建問題之探討，並針對車籠埔斷層的 921 斷裂線做成兩側各 30 公尺限建之規定。湖山水庫細部規劃(2003)亦嘗試估算斷層可能之錯動量，並納入於設計中考量。

四、國外PSHA新思維與集集大地震之經驗

1999 年 9 月 21 日集集大地震之後，由於引起重大損失與傷亡，喚起國內各界對於活斷層相關研究的重視，並根據集集地震獲得的寶貴經驗及資料，開始重新檢討各種地震評估方法、資料更新及耐震設計的問題。PSHA 研究方面，921 集集大地震之前，國內不同單位暨不同作者所提出的 PSHA 結果悉數低估了中部的危害度(如圖 1~6)，突顯出活斷層震源與強地動衰減式研究對於 PSHA 結果影響的重要性，而如何合理的評估地震危害度是工程耐震設計不容忽視的重要研究課題。鄭錦桐的博士論文研究從 921 地震之後開始探討活斷層震源與強地動衰減式的關鍵問題，

隨即於鄭錦桐(2002)及李錫堤(2002)充分討論，並反應於美濃水庫 2002 年的設計地震評估與 2004 年的寶山二期水庫的設計地震覆核中。

近年來，世界先進國家的 PSHA 方法與技術不斷提昇，尤其美國加州地震頻仍且活斷層密布，故極為重視地震評估的相關技術研發。目前不論是建築法規(IBC, 2000)或是橋梁、核電、水壩等重大工程的地震評估工作，其分析方法皆以 PSHA 為主，且 PSHA 的方法流程(圖 7)與注意事項也均已於 National Research Council (1988)及 EERI Committee on Seismic Risk (1989)中提出，並強調 PSHA 分析前需要有充足的地球科學研究成果，奠定目前美國以 PSHA 進行公共工程地震評估之理論方法基礎。

目前國內建築法規及公共工程的地震參數取得仍未普遍使用新的 PSHA 方法，故有進一步強調之必要。以下將說明新 PSHA 分析方法(National Research Council, 1988; EERI Committee on Seismic Risk, 1989)與國內傳統分析方法的差異。

(一) 震源模式與震源分區

1. 傳統方法：當活動斷層位置與位態不清楚時僅能使用區域震源，故 921 地震前 PSHA 中的震源類型僅使用區域震源，震源分區也較為簡化而多未考慮實際之斷層分布。
2. 新方法：圖 7 流程中在地震目錄與活動斷層震源的基本資料建立方面，建議以地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)建立成資料庫與 GIS 圖層(鄭錦桐等人, 1998)，然後決定震源模式並進行震源分區(建議分為活動斷層、區域震源與隱沒帶震源)。區域震源劃分時(如圖 8 及圖 9 所示)，在 GIS 系統中套疊震央分布、重力、地質圖等資訊，並搭配地體構造研究成果(Shyu et al., 2005)而劃分完成(Cheng et al., 2007)。活動斷層震源方面，地調所近期已公布活動斷層圖(林啟文等人, 2000)及鄭錦桐(2002)提供之斷層震源參數表，可依此進一步建構三維斷層面震源進行 PSHA 分析。距離工址甚近之斷層，其斷層幾何形狀將影響工址距斷層面之最短距離及其 PGA 推估，故應仔細分析。

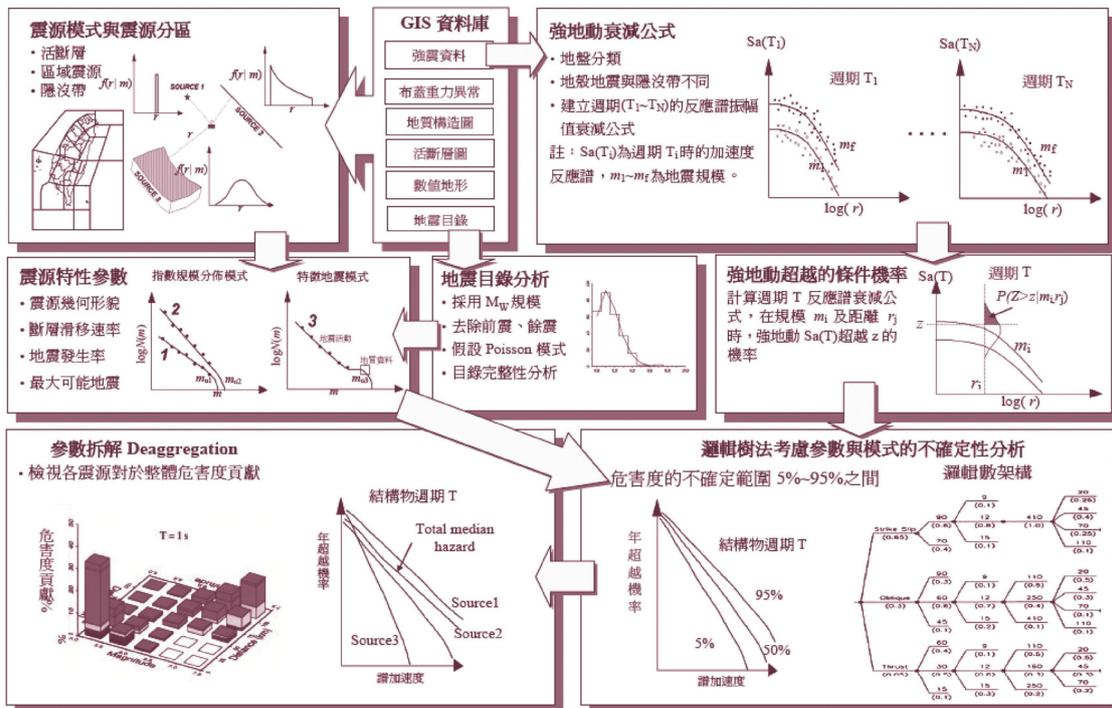


圖 7 新 PSHA 理論方法流程圖(摘自鄭錦桐等人, 2009)研發報告

大地工程技術

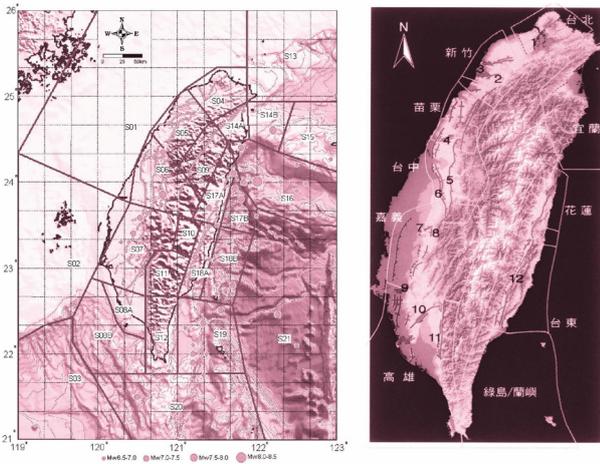


圖 8 最新國內 PSHA 使用之淺層(深度小於 35km)區域震源分區圖(左圖)，對照(Shyu et al., 2005)之台灣地體構造區分圖(右圖)

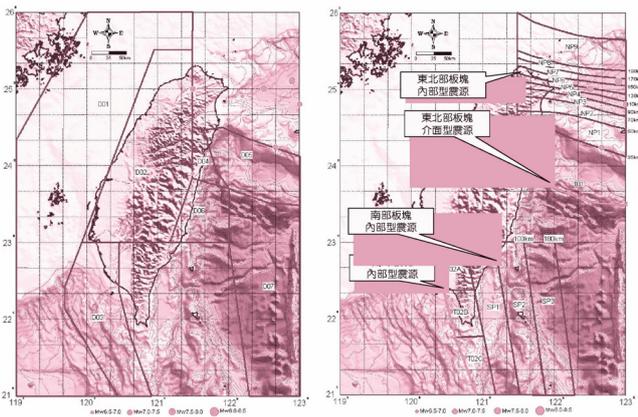


圖 9 最新國內 PSHA 使用之深層(深度大於 35km)區域震源分區(左圖)與隱沒帶震源分區圖(右圖)

(二) 地震目錄分析

1. 傳統方法：921 地震前，國內地震規模單位尚選擇芮氏地震規模(M_L)為主，但因芮氏規模 6.5 以上時已經呈現飽和情形，於大地震時將無法反應出斷層破裂釋放之能量大小。以 921 大地震而言，其規模 $M_L 7.3$ 已經呈現能量飽和情形，而以 $M_w 7.6$ 較能反應出真實斷層破裂釋放之能量大小。另外，921 地震前多數 PSHA 工作並未對地震目錄作統計檢定；實際

上過去的台灣地震目錄並不能符合卜桑過程而會使 PSHA 成果產生偏差。

2. 新方法：目前國外 PSHA 常採用地震矩規模(M_w) (Hanks and Kanamori, 1979; Coppersmith, 1991)，主要原因是地震矩規模可反應斷層破裂大小且與能量直接相關 (Wells and Coppersmith, 1994)，且無類似芮氏地震規模(M_L)之規模飽和現象。在地震目錄處理方面，美國 National Research Council (1988)、Kramer (1996) 認為 PSHA 採用的地震目錄，必須以 Wyss (1979)、Arabasz and Robinson (1976)、Gardner and Knopoff (1974) 或 Uhrhammer (1986) 等人所提出的主震與前餘震序列的時間視窗與距離視窗經驗關係式，來去除與主震有關的前震及餘震，而獲得獨立事件主震目錄，並須通過卜桑模式之統計檢定與確認地震發生率無時間上的趨勢(Trend)變化。

(三) 震源特性參數

1. 傳統方法：過去未能考慮斷層之活動度/發生率，而僅能以台灣地區近百年來的地震觀測紀錄所彙整的地震目錄進行統計，評估各區域震源之地震發生率。由 921 之經驗顯示，以傳統方法未能反映車籠埔斷層的影響而確實低估了中部的危害度。

2. 新方法：區域震源方面，考慮大規模地震因為資料少而可能產生之可能誤差，以最大概似估計法(Maximum Likelihood Estimation)進行截切指數模式(Truncated Exponential Model)之 a, b 值推估。活動斷層方面，將斷層之活動度列入考慮，採用特徵地震模式(Characteristic Earthquake Model)，以斷層滑移速率(Slip-Rate)來描述地震的發生率(Youngs and Coppersmith, 1985)。

(四) 強地動衰減關係式(PGA 與加速度反應譜 振幅)

1. 傳統方法：強地動衰減式在 PSHA 分析中扮演極重要的角色，主要是因為其影響場址的強地動以及反應譜特性的推估。以往國內採用之衰減式無近場資料，由集集大地震經驗顯示必須考慮斷層上盤與下盤效應的差異(Hanging Wall and Footwall Effect)，才能反應等距離下強地動的差異情形，如圖 10 顯示不論是國內集集大地震，或是國外數個大地震的上下盤強震資料，皆顯示距斷層相同距離下，上盤側強地動明顯較高(如圖 11 所示)。另外，過去場址地盤分類資料不足，且距離定義上並非距斷層面最短距離，加上地震規模單位仍以 M_L 為主，故常造成分析上的不合理。
2. 新方法：PSHA 必須採用集集大地震與國外重要大地震的近場強震資料進行強地動衰減關係式迴歸工作。美國 PSHA 近期採用之強地動衰減式特點包含：斷層上盤與下盤差異、地盤類別進行硬址(Rock Site)與軟址(Soil Site)的區分、工址土層深度 30m 內的平均剪力波速 V_{S30} 、震源機制、隱沒帶震源與地殼震源分屬不同的衰減模式(隱沒帶震源強地動衰減慢，如圖 11 所示)(Campbell, 1997; Boor et al., 1997; Sadigh et al., 1997; Somerville et al., 1997; Youngs et al., 1997; Cheng et al., 2007; Lin and Lee, 2008)。另外，在近斷層的效應中，考慮斷層的破裂方向效應(Directivity Effect)將影響長週期的反應譜(Abrahamson and Silva, 1997)。目前美國太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)剛完成的 NGA 計畫(Next Generation Attenuation of Ground Motions Project)蒐集全世界的強震資料，已完成建立全球新一代符合地震工程分析需求的強地動衰減式，將是國內未來 PSHA 中強地動衰減關係式研究重點。

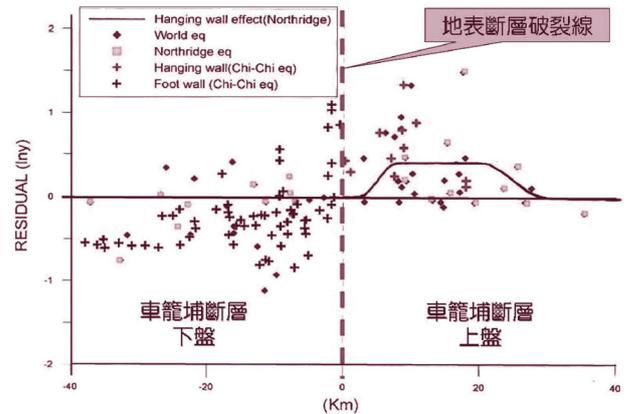


圖 10 集集大地震與 Northridge 地震及世界其他大地震比較於上盤處強地動值較高

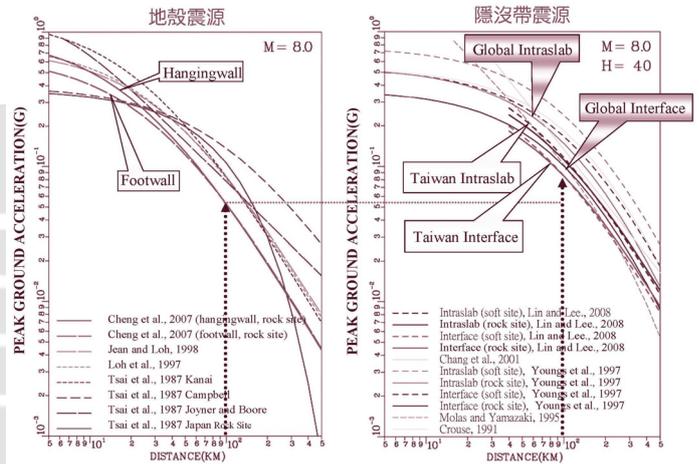


圖 11 國內外常用之 PGA 強地動衰減關係式比較圖

(五) 使用邏輯樹(Logic Tree)考慮參數與模式之不確定性

1. 傳統方法：評估結果為單一危害度曲線，無法涵蓋對地震規模及其他震源參數描述上之不確定因素。
2. 新方法：圖 12 為美國 PG&E 公司進行 Diablo Canyon 核電廠 PSHA 時所使用的邏輯樹(Logic Tree)結構。圖中邏輯樹的節點是各種 PSHA 分析所需的參數/模式的不確定性或可能性狀況(如斷層幾何面、上限地震規模、斷層滑移速率、地震規模分布、衰減公式等)。

Cramer et al. (1996)及 Cramer (2001)認為處理 PSHA 不確定性問題時，必須先建構參數的邏輯樹架構(如圖 7 中右下角所示)，並引入蒙特卡羅方法(Monte Carlo)根據各 PSHA 分析需求之地震參數組合的機率/權重分布狀況，進行取樣而獲得各分支的參數組合，再個別進行 PSHA 分析而獲得其不確定性分布。新 PSHA 方法之結果非單一危害度曲線，而是提供不確定性區間，供決策者根據風險考量決定採用之設計值。

(六) 均布危害度反應譜

1. 傳統方法：設計反應譜乃以類似工址地質條件的地震紀錄經由統計分析而得，通常以平均值或平均值加一標準差後所得之反應譜，再進一步將 PGA 予以正規化至 1g，稱正規化反應譜型。經過 PSHA 獲得危害度曲線後，根據設計需求，將上述正規化反應譜型乘上某再現週

期(e.g., 475 年)下 PGA 值，可獲得調整反應譜型後之設計反應譜，此為工址相關反應譜 (Site-Dependent Response Spectrum)，其缺點是 PGA 之大小即決定各結構物週期(Structural Period)下的反應譜值的調整比例中，無法充分反應工址地質條件、震源機制、地震規模、震源距離所造成的反應譜型差異(Shaw et al., 1979; Silva and Green, 1989)，而且不同結構物週期強地動衰減式之差異等因素並未列入考慮。

2. 新方法：首先選取全台灣地盤特性相近於工址的強震資料，以分析各結構物週期下的加速度反應譜衰減關係式，再以 PSHA 分析在一致的年超越機率或再現週期下，獲得各個結構物週期的加速度反應譜振幅值，稱為均布危害度反應譜(Uniform Hazard Response Spectrum，簡稱 UHRS) (ERRI Committee on Seismic Risk, 1989; Jean and Loh, 1998; Lee et al., 1999)。

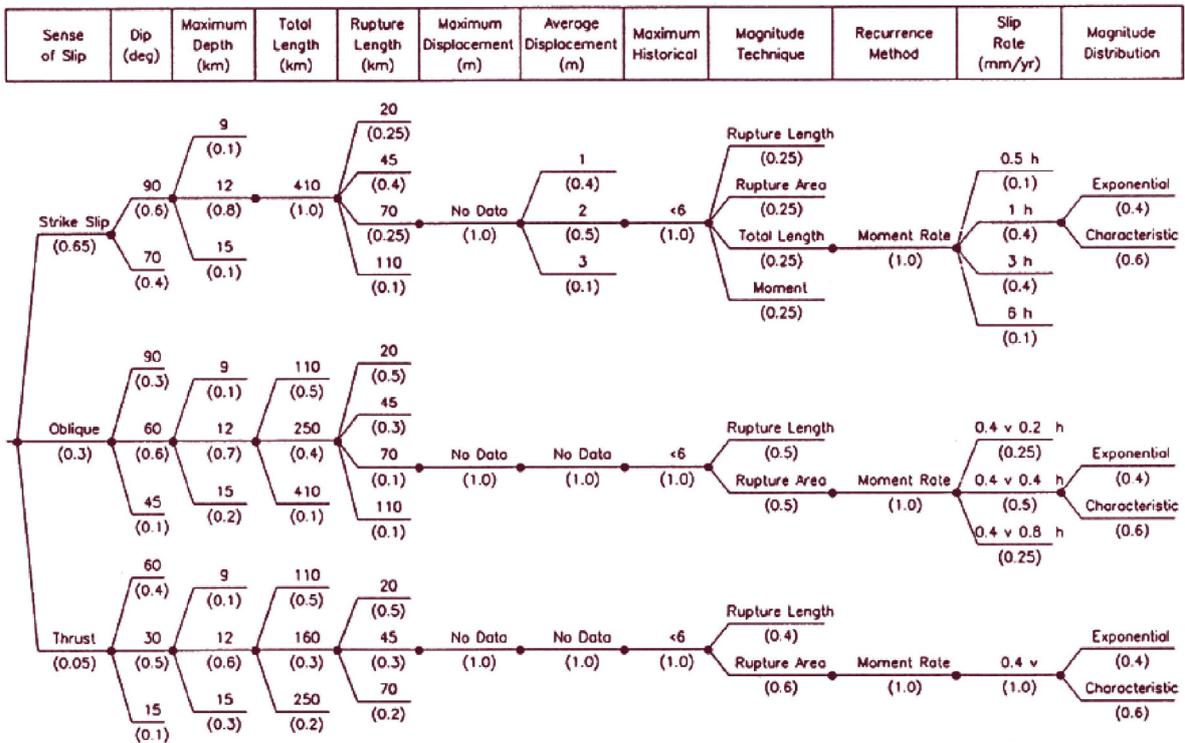


圖 12 美國 PG&E 公司採用 PSHA 設計 Diablo Canyon 核電廠時，所建立邏輯樹，括號中為各分支參數的權重(摘自 PG&E, 1988)

(七) 參數解構(Deaggregation)

1. 傳統方法：過去無進行此分析。
2. 新方法：所謂的參數解構是指將超越某一地動值的總年超越機率/發生率(Annual Exceedance Probability/Rate)，將其拆解成各個震源的貢獻情形；或是進一步拆解成各規模區間(Magnitude Bins)與距離區間(Distance Bins)的危害度貢獻，以了解場址的總地震危害度主要來自於附近哪些主要的震源規模及位置。其有助於地震防災的地震境況模擬(Scenario Earthquake)選擇，以及決定最大考量地表振動(Maximum Considered Earthquake Ground Motion, MCE)的震源空間位置，或者藉由少量或單一組震源的參數即可作為工程上的設計地震(Design Earthquake)參考。

(八) 人工合成地震歷時(Spectral Compatible Motions)

1. 傳統方法：根據確定 MCE 之設計地震的規模與 PGA 後，再使用源自於自然散漫振動理論的 SIMQKE 程式，擬出符合 MCE 設計地震 PGA 值的人工合成地震歷時，其缺點為：(1) 未考慮震源機制與破裂過程；(2) 未考慮波傳的速度構造；(3) 訊號低頻部分控制不佳；(4) 人工合成地震與真實地震波型差異大，較類似雜訊(White Noise)。以 SIMQKE 程式合成的加速度歷線，因為是定常性(Stationary)的而與真實地震有很大的不同，故不適合於土石壩等非線性材料的動力分析。
2. 新方法：使用與設計地震規模及震源機制相近的地震，且選擇場址特性與壩址地質條件相似的實際地震歷時紀錄，在時間域(Time Domain)使用 RSPMATCH 程式進行吻合設計反應譜的人工合成地震歷時之製作(Lilhanand and Tseng, 1988)。其結果為具有真實地震紀錄外觀與相角特性(Phase Property)且吻合設計反應

譜之設計地震歷時，可適用於線性及非線性材料的動力分析。

五、地震危害度分析成果應用

(一) 考慮活動斷層的地震危害度圖

圖 13 為台灣地區 475 年再現週期(50 年內有 10% 年超越機率)的 PSHA 成果，其中圖 13(a)為未考慮活動斷層者，圖 13(b)為本研究考慮活動斷層者。圖 13(a)即為採用傳統 PSHA 之分析方法，結果呈現較高的 PGA 區多位於嘉南及花東一帶，但其分布並未與斷層活動直接相關。然而，從中部集集地震的經驗，車籠埔斷層上盤有較高的 PGA 強地動值，台灣過去傳統 PSHA 分析並未充分考慮此類斷層活動度，以致低估強地動值。因此，圖 13(b)的 PSHA 成果清楚呈現出與活動斷層活動度影響地震危害度分析之成果。

(二) 台灣北部地震危害度圖

圖 14 為台灣北部地區(a) 475 年再現週期(50 年內有 10% 年超越機率)以及(b)2475 年再現週期(50 年內有 2% 年超越機率)在堅硬地盤場址的 PGA 危害度等值圖。整體而言，北部的危害度由宜蘭外海向西北遞減，至桃園西北部外海一帶最小，在台灣島內的 PGA 地震危害度結果，中央山脈分隔東部縱谷與西部麓山帶兩大高危害度區域，危害度突出的位置恰都位於緊鄰數條滑移速率高的斷層附近(Cheng et al., 2007)，而且高區出現在上盤處，即斷層面在地表投影面的幾何中心。圖 14(a)中 475 年再現週期顯示 PGA 最高處在花蓮外海以及新竹一帶，可達 0.5g 以上；圖 14(b)中 2475 年再現週期條件下，花蓮外海以及新竹一帶的 PGA 已出現大於 0.7g 以上的情形。在 2475 年再現週期條件下，活動斷層的空間分布會影響突顯出高危害度，其斷層傾向亦影響危害度之分布，如北部山腳斷層及新竹一帶。

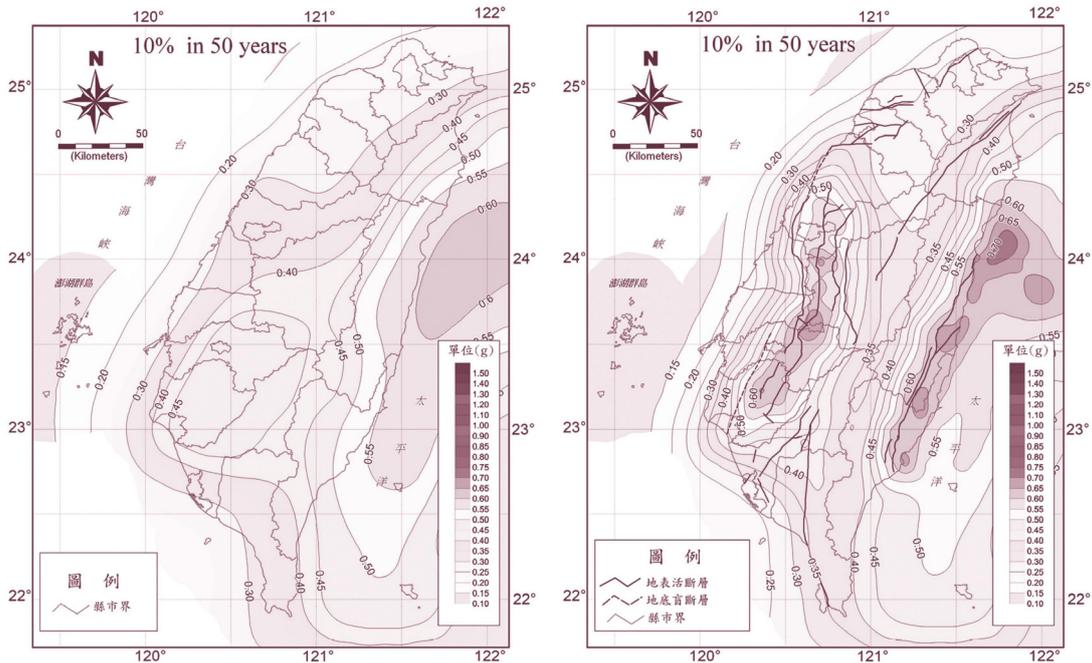


圖 13 台灣地區 75 年迴歸期的 PSHA 分析 (a)不考慮活斷層震源；(b)考慮活斷層震源

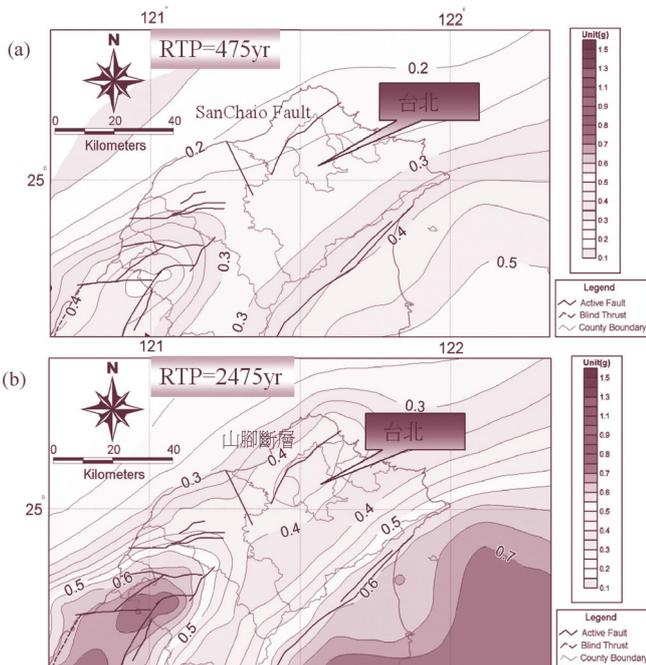


圖 14 台灣北部 PSHA 成果(a)475 年再現週期
(b)2475 年再現週期

(三) 台北市地震危害度分析參數拆解範例

台北市場址之 PSHA 經參數解構後，由圖 15 可以發現在 50 年再現週期時，隱沒帶板塊內

部型與界面型震源主導危害度，以距離 60 公里、 $M_w7.6$ 的震源為主；其次是台北市本身所處的區域震源 S04 區，以 $M_w5.6$ 左右最主要；再則為東北部的區域震源 S14B 區，以距離 30 公里、 $M_w7.4$ 左右為主。當再現週期增加至 475 年時，危害度則改由鄰近的山腳斷層主導，其最可能地震矩規模為 $M_w6.8$ 左右，而由標準差個數 (或稱標準正規化變異，Standard Normal Variate) ϵ 介於 $-1\sim 0$ 之間可知斷層本身發生率並不高，而是強地動容易超越 $0.3g$ ；另外，隱沒帶板塊內部震源距離台北市最短距離僅約 60 公里左右，威脅性仍不可忽視，其最可能發生的地震矩規模是 $M_w7.6\sim 7.8$ ，都是以 $\epsilon > 1$ 的情形影響危害度，其超越 $0.3g$ 機率不高，而是此震源的地震發生率頻繁。當再現週期為 2475 年時，山腳斷層已成為主要的震源，其 ϵ 是 $0\sim 1$ ；對於區域震源、隱沒帶板塊界面震源及內部震源而言，超越 $0.49g$ 的機率並不大，因為 $\epsilon > 2$ 以上，故無危害度貢獻。

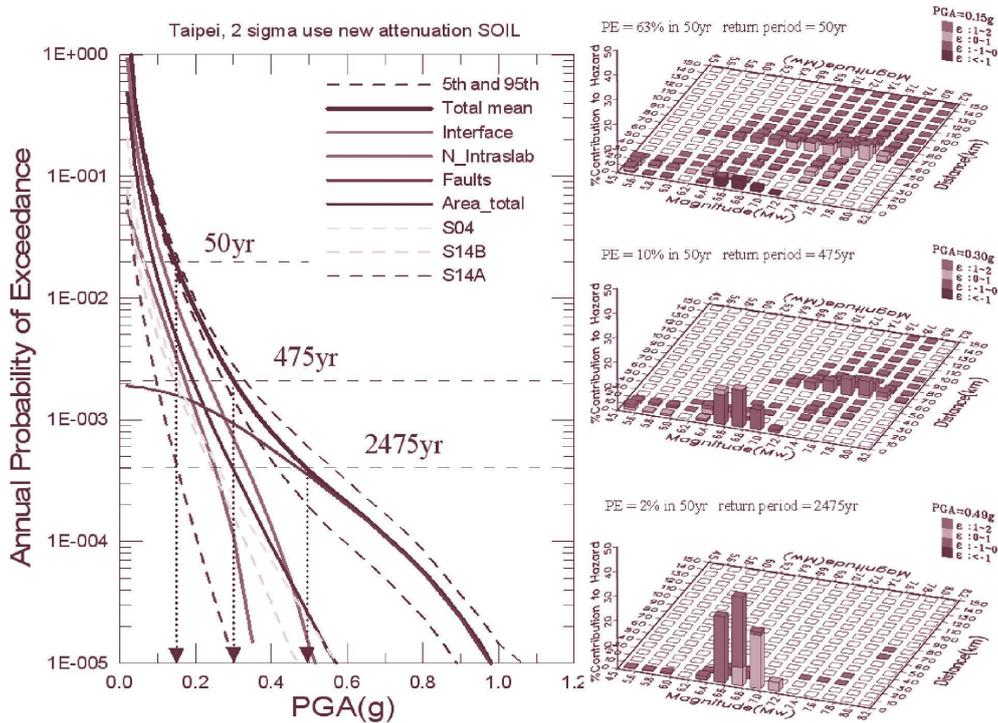


圖 15 台北市地震危害度曲線與參數解構成果

六、未來國內地震危害度重要之研究與應用課題

(一) 核電廠地震安全評估

美國國會 2005 年通過的能源法案中，發展節能減碳及綠色環保能源，含有經濟誘因，鼓勵興建先進且不會產生溫室氣體的新核電廠，因而帶動美國核電廠興建熱潮，甚至影響世界潮流。另外，日本原子力研究開發機構在 10 月 16 日發表的「2100 年核能願景—對低碳社會的建言」的一份報告，特別將 2008 年 7 月在日本北海道洞爺湖舉行的 G8 高峰會議所達到 2050 年以前世界全體溫室氣體排放量至少要減少 50% 的共識。而其他先進國家亦積極發展綠色乾淨能源，以因應節能減碳之世界潮流，而核電是其中的一個優選項，而在核電廠興建之安全性問題中，地震評估是最重要的環節之一。

新瀉縣內的柏崎刈羽核電廠，共有 7 座反應

爐，是世界上最大的核能發電廠，日本本州島新潟縣中越外海，發生規模 6.8 級的強烈地震造成核電廠內部附屬設施受損，發生在柏崎刈羽核電廠的震度最後證實高達 2.056g。因為安全的顧慮，下令停止運轉，直到確認安全後始能啟動核電廠，這也是日本核電廠第一次因為地震而全廠停機。國內 2006 年 12 月 26 日屏東外海發生兩場芮氏規模約 7.0 的地震，所幸位於恆春半島的核三廠無安全之虞，但因而也喚起國內核電廠地震安全之技術提昇需求。目前正適逢核一、核二、核三電廠近期將重新更換運轉執照，並且核四廠將於 2011 年試運轉，甚至未來不排除擴建機組之可行性評估等。為了國內的核電廠安全評估，我國政府與各工程顧問公司更積極參考日本柏崎刈羽核電廠最新的地震評估經驗(原子力編規格委員會，2007)以及美國核電廠新建的相關法規 (U.S. RG 1.208; U.S. NRC, RG 1.165)儘速提昇地震評估技術達國際水準。

(二) 蓄水庫大壩地震係數

2007 年日本柏崎刈羽核電廠遭受本州島新潟縣中越外海大地震，其所實際觀測收錄的 PGA 強地動值高於原設計地震水準；1999 年台灣地區發生集集大地震，在車籠埔斷層上盤近距離的工址不論是實際觀測，或是由 921 之後新的強地動衰減式所評估的強地動水準(Cheng et al., 2007)，皆已明顯超過當時各水壩的設計水準，但位於上盤處強震區的數個水壩並無明顯破壞情形。水庫壩體地震評估若採前經濟部水利司公布之「蓄水庫安全評估規範(草案)」(中興工程顧問公司，1998，試行)，其中「地震評估規範」之某些條文內容顯然不足，因而不符實際狀況及學術理論或窒礙難行，故於國內新頒布之「水利建造物檢查及安全評估技術規範」中予以修訂，以符合實際需要。

過去「蓄水庫安全評估規範(草案)」中規範規定「地表地震係數應以尖峰地表加速度值直接折減，其折減之比例不得小於 1/2」。此做法以「日月潭水庫九二一震後緊急安全評估報告」之日月潭水庫水社壩分析成果為例，壩址於地震時約承受 0.5g 以上的尖峰加速度仍安全無虞，而以二分之一 PGA 作為地震係數則為 0.25 (原設計為 0.14)，再以此地震係數進行壩體受震之安定性分析，其安全係數僅約 0.6 以下，卻顯示壩體不安全，因此突顯出地震係數過於保守。此問題為目前地震評估時普遍存在之問題，因此已於「水利建造物檢查及安全評估技術規範」(中興工程顧問公司，2005) 中重新檢討規範有關地震係數由 PGA 折減之原則相關規定。

對於大型重要之公共工程建設而言，以 PGA 決定地震係數之做法實屬簡陋。鑑於台灣地區地震發生頻繁及 921 地震後之分析經驗，大型重要之公共工程結構的動態分析實為唯一之耐震設計與安全評估之合理方法。以「蓄水庫安全評

估規範(草案)」為例，製作供壩體動態分析用之設計反應譜及人造加速度歷線之相關條文，已於「水利建造物檢查及安全評估技術規範」中適當調整與檢討，尤其均布危害度反應譜是目前國外採行的方式，因為大規模與中小規模地震之反應譜型並不相同，不能僅以『壩址附近或與壩址相似之地質條件之自由場實測強震紀錄所製作』。另外，目前結構物動態分析之電腦程式與技術已十分普及，未來應考量實際採用 PSHA 流程，製作符合均布危害度反應譜之人工合成地震歷時，以提供工程結構物動態分析使用應屬趨勢。

(三) 台灣地區新一代強地動衰減式研究

地震評估不論是採用定值法或機率法，強地動衰減關係式影響地震危害度分析結果甚鉅，尤其近年全球大地震後，有許多新的思維與研究成果，值得改進台灣目前常用之 Campbell 強地動衰減模式(Campbell, 1981)。美國 PEER 的 NGA (Next Generation Attenuation of Ground Motions Project) 計畫已經完成五組不同的衰減式(Abrahamson and Silva, 2008; Boore and Atkinson, 2008; Campbell and Bozorgnia, 2008; Chiou and Youngs, 2008; Idriss, 2008)，而 NGA 的強震資料庫中涵蓋了集集地震主餘震的強震資料，數量將近為整個資料庫的一半之多，此資料庫中的資料都是經過一定的資料處理程序(基線校正、濾波)，並且對於地震、測站的參數進行完整的蒐集與研究。研究者利用此一完整的資料庫建立出新一代的衰減式，新的衰減式表現了最新的地震科學研究成果，分別考慮了在不同反應譜週期的規模衰減效應(Magnitude Scaling)、距離衰減效應(Distance Scaling)及測站場址的放大效應(Site Amplification Effect)，並且因為採用更多的參數，有效的降低了衰減式的標準差，這不但可以讓地動值的推估上更為精準，也可以讓地震危害

度分析結果更合理，十分值得國內工程界參考。

近期國內中興社與台灣地震科學研究中心 (Taiwan Earthquake Research Center, TEC) 合作，仿效 NGA 資料庫規格共同建立 TNGA 強震資料庫，期能建立符合國內工程界地震評估使用之強震資料庫，並已有國內學者(林柏伸，2009)利用該資料進行強地動衰減關係式研究。另外，目前 TNGA 強震資料庫中，國內建立之強地動經驗式仍有近斷層或特殊震源狀況下的強震資料不足情形，可以搭配物理模型模擬強地動值，再建立經驗式。

(四) 時間相依的 PSHA 研究

集集大地震之後，台灣中部地區暨車籠埔斷層已經釋放了可觀的應變能，其地震危害度理應較震前降低許多。然而，若僅採用以往慣用的靜態卜桑模式來預估地震發生過程，仍無法顯現地震前後地震發生率的變化及地震危害度的差別，而有待非靜態卜桑模式的採用，或採用其他適當的時間相依地震危害度分析方法。Lee and Lin (2006) 結合了 PSHA 與斷層的條件機率模式在斷層資訊較為豐富的台灣中部地區進行時間相依地震危害度分析。其結果可適用於建築法規之震區劃分或應用於使用年限較短或重要性低的工程結構耐震設計參數訂定。

與時間相依模式 (Time-Dependant Model) 發展上必須搭配充足的斷層活動度資訊，可合理的推估未來 20 年、50 年間的斷層活動機率。日本「地震調查研究推進本部」的地震調查委員會於 2006 年已完成全日本國境內於未來 30 年內震度超過 6 級以上之機率圖，分別於 2007 年及 2008 年再改版(日本地震調查研究推進本部地震調查委員會，2008)；美國 USGS 以新 PSHA 方法完成全美的地震危害度機率分布圖，是採用靜態卜桑模式 (Static Poisson Model) 完成，而另一單位

Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP, 2003)，則考慮與時間相依的地震危害度分析模式，分別計算加州舊金山灣區各斷層在未來 30 年之發震機率。不論日本與美國，針對特定斷層使用時間相依模式評估短期內之發震機率之成果，已提供圖資讓民眾上網下載，對於地震災害防救與國土規劃工作十分具有參考價值，值得台灣學習。

(五) 結構物強震後破壞風險分析

近年來地震評估逐漸以 PSHA 分析為主，主要原因是目前地震風險評估 (Seismic Risk Assessment) 必須以機率角度為出發點；首先進行 PSHA，分析出地震規模及/或強地動值發生之機率，再與工程結構物的易損性機率結合綜合分析，根據分析的結果得到評估對象/結構物受地震影響的風險程度或損失情形。結構物強震後破壞的風險分析，主要應用的領域包含：防災、救災及地震保險費率的研擬等，另外針對不同結構物建立易損性曲線後，可進一步探討性能設計 (Performance-Based Design) 之相關議題。

參考文獻

- Abrahamson, N. A. and W. J. Silva (1997) Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, 68, pp.94-127
- Abrahamson, N. A. and W. J. Silva (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-motion Relations, *Earthquake Spectra*, 24, pp.67-97
- Arabasz, W. J. and R. Robinson (1976) Microseismicity and Geologic Structure in the Northern South Island, *Journal of Geology and Geophysics*, 19, pp.569-601
- Boore, D. M. and G. M. Atkinson (2008) Ground-motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra*, 24, pp.99-138
- Boore, D. M., W. B. Joyner, and T. E. Fumal (1997)

- Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, *Seism. Res. Letters*, 68, pp.128-153
- Campbell, K. W. (1981) Near-source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, pp.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, pp.154-179
- Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia (2008) NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s, *Earthquake Spectra*, 24, pp.139-171
- Cheng, C. T., S. J. Chiou, C. T. Lee, and Y. B. Tsai (2007) Study on Probabilistic Seismic Hazard Maps of Taiwan, *Journal of Geo. Engineering*, 2, pp.19-28
- Chiou, B. S.-J. and R. R. Youngs (2008) Chiou-Youngs NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, *Earthquake Spectra*, 24, pp.173-215
- Coppersmith, K. J. (1991) Seismic Source Characterization for Engineering Seismic Hazard Analyses, *Proceeding Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Stanford University, 4, pp.3-60
- Cornell, C. A. (1968) Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, pp.1583-1606
- Cramer, C. H. (2001) A Seismic Hazard Uncertainty Analysis for the New Madrid Seismic Zone, *Engineering Geology*, 62, pp.251-266
- Cramer, C. H., and M. D. Petersen (1996) Predominant Seismic Source Distance and Magnitude Maps for Los Angeles, Orange, and Ventura Counties, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp.1645-1649
- EERI Committee on Seismic Risk (1989) The Basics of Seismic Risk Analysis, *Earthquake Spectra*, 5, pp.675-702
- Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974) Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, pp.1363-1367
- Hanks, T. C. and H. Kanamori (1979) A Moment Magnitude Scale, *J. Geophys. Res.*, 84, pp.2348-2350
- Hsu, M. T. (1971) Seismicity of Taiwan and Some Related Problem, *Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng.*, Tokyo Japan, Vol. 8, pp.41-160
- Idriss, I. M. (2008) An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra*, 24, pp.217-242
- Jean, W. Yu. and C. H. Loh (1998) A Study on Seismic Design Parameters, *國立台灣大學工程學刊*, 73, pp.1-19
- Kiureghian, A. D. and Ang, A.H-S. (1977) A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 67, pp.1173-1194
- Kramer, S. L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle River
- Lee, C. T. and P. S. Lin (2006) An Example of Time-Dependent Seismic Hazard Analysis from West Central Taiwan, Commemorating the 100th Anniversary of the 1906 San Francisco Earthquake, 82
- Lilhanand, K. and W. S. Tseng (1988) Development and Application of Realistic Earthquake Time Histories Compatible with Multiple Damping Response Spectra, *Proceeding 9th World Conf. Earth. Engineering*, Tokyo, Japan. Vol. II, pp.819-824
- Lin, P. S. and C. T. Lee (2008) Ground-motion Attenuation Relationships for Subduction-zone Earthquakes in Northeastern Taiwan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, pp.220-240
- National Research Council (1988) *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, National Academic Press, Washington, D.C.
- Sadigh, K., C. Y. Chang, J. A. Egan, F. Makdisi, and R. R. Youngs (1997) Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data, *Seism. Res. Lett.*, 68, pp.180-189
- Schnable, P. B. and H. B. Seed (1973) Acceleration in Rock for Earthquakes in the Western United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp.501-516
- Shyu, J. B., K. Sieh, Y. G. Chen, and C. S. Liu (2005) Neotectonic Architecture of Taiwan and Its Implications for Future Large Earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 110, B08402
- Silva, W. J. and R. K. Green (1989) Magnitude and Distance Scaling of Response Spectral Shapes for Rock Sites with Applications to North American Tectonic Environment, *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 3, pp.591-624
- Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson (1997) Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seism. Res. Lett.*, 68, pp.199-222
- Tsai, C. C., C. H. Loh, and Y. T. Yeh (1987) Analysis of Earthquake Risk in Taiwan Based on Seismotectonic Zones, *Mem. Geol. Soci., China*, 9, pp.413-446

- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1997) Regulatory Guide 1.165 – Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide Office of Nuclear Regulatory Research
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (2007) Regulatory Guide 1.208 – A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide Office of Nuclear Regulatory Research
- Uhrhammer, R. A. (1986) Characteristic of Northern and Central California Seismicity Abs., Earthquake Notes, 1, 21
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994) New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 4, pp.974-1002
- Working Group On California Earthquake Probabilities (2003) Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region, USGS, pp.2002-2031
- Wyss, M. (1979) Estimating Maximum Expectable Magnitude of Earthquakes from Fault Dimensions, Geology, 7, pp.336-340
- Youngs, R. R. and K. J. Coppersmith (1985) Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates, Bull. Seism. Soc. Am., 75, pp.939-964
- Youngs, R. R., S. J. Chiou, W. J. Silva, and J. R. Humphrey (1997) Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes, Seism. Res. Lett. 68, pp.58-73
- 中興工程顧問公司 (1998) 蓄水庫安全評估規範草案，經濟部水利署
- 中興工程顧問公司 (2005) 水利建造物檢查及安全評估技術規範之研訂，經濟部水利署
- 日本地震調查研究推進本部地震調查委員會 (2008) 全國地震動預測地圖，2008年版
- 日本建設省河川局 (1977) 多目的ダムの建設，第4卷，第1-40頁
- 李錫堤 (1991) 地震危害機率分析方法之檢討，工程地質技術應用研討會III論文集，第5-1~5-19頁
- 李錫堤 (1993) 活斷層工程評估新發展，地工技術，第44期，第5-18頁
- 李錫堤 (2002) 機率式地震危害度分析方法的新進展，2002年岩盤工程研討會論文集，第691-700頁
- 李錫堤、馬國鳳、秦葆珩 (1999) 美濃水庫設計地震評估研究，台灣省南區水資源局建教合作計畫成果報告
- 林柏伸 (2009) 台灣地區強地動衰減式研究與路徑效應分析，博士論文，國立中央大學地球物理研究所
- 林柏伸、李錫堤、鄭錦桐 (2002) 台灣地區隱沒帶震源與地殼震源強地動反應譜衰減式，第九屆台灣地區地球物理研討會暨2002年中國地球物理學會年會論文集，第24-31頁
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000) 台灣活動斷層概論第二版，五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第13期
- 茅聲燾 (1978) 地震之工程危害度研究及其應用，中國土木水利學刊，第5卷，第1期，第35-40頁
- 原子力編規格委員會 (2007) 原子力發電所耐震設計技術指針-基準地震動測定・地質調查編 JEAG4601，電氣技術指針編
- 徐明同 (1975) 台灣地區地震危險度之研究，中央氣象局氣象學報，第21卷，第2期，第33-40頁
- 張之高 (1977) 台灣地震危害機率之研究，碩士論文，國立中央大學地球物理研究所
- 羅俊雄、溫國樑、簡文郁、柴駿甫、鄧崇任、饒瑞鈞 (2000) 考慮區域近斷層效應及均布危害度之設計地震力需求，內政部建築研究所
- 鄭錦桐 (2002) 台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解，博士論文，國立中央大學地球物理研究所
- 鄭錦桐、李錫堤、蔡義本 (1998) 利用地理資訊系統輔助地震危害度分析，地工技術，第69期，第41-50頁
- 鄭錦桐、邱顯晉、林伯勳、蔡明欣、李錫堤、林柏伸 (2009) 台灣地區地震危害度分析程式發展與強地動衰減模式建立，中興工程顧問社
- 賴世聲、熊雲帽、蔡主權 (1982) 台灣區各主要儲油槽區之地震危害安全度評估研究報告，工業技術學院營建工程技術