

HAZ-Taiwan 地震災害損失評估系統

DAMAGE ASSESSMENT SYSTEM HAZ-TAIWAN FOR SEISMIC LOSS ESTIMATION IN TAIWAN

羅俊雄^{*} 葉錦勳[†] 陳亮全[#] 洪鴻智[‡] 簡文郁[†] 廖文義[†]

Ching-Hsiung Loh Chin-Hsun Yeh Liang-Chun Chen Hung-Chih Hung Wen-Yu Jean Wen-I Liao

^{*}主任、教授 [†]副研究員 [#]副教授

^{**}國家地震工程研究中心

^{*}國立台灣大學土木工程學系

[#]國立台灣大學建築與城鄉所

[‡]國立台北大學地政學系

^{*}Director, Professor

[†]Associate Research Fellow

[#]Associate Professor

National Center for Research on Earthquake, R.O.C.

Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Graduate Institute of Building and Planning, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Department of Land Economics, National Taipei University, Taipei, Taiwan 104, R.O.C.

Abstract

The National Science Council and the Department of Industrial Technology, MOEA, adopt the HAZ-Taiwan system as a decision support tool in the seismic disaster mitigation and loss estimation in 1998. Analysis modules of seismic damage assessment and loss estimation as well as collection of relevant inventory database and analysis parameters are the bases in development of HAZ-Taiwan program. It is also essential to test the software modules and to calibrate site-dependent parameter values, in order to simulate earthquake scenarios more accurately. The main purpose of this paper is to introduce the methodology and the related researches in HAZ-Taiwan program in the aspect of seismic hazard analysis, soil liquefaction potential estimation, fragility analysis of buildings and bridges, and direct economic loss estimation of buildings.

摘要

行政院國家科學委員會與經濟部技術處合作，於民國八十七年引進 HAZ-Taiwan 系統，作為地震風險與損失評估的決策支援工具。地震災害損失評估的分析模式與相關資料庫的建置是發展 HAZ-Taiwan 系統的基礎。為使該系統能精確模擬台灣地區在地震作用下的工程結構物損害和人員傷亡等，相關軟體模組的測試與本土化分析參數的訂定為不可或缺的要素。本文之目的，即在介紹 HAZ-Taiwan 系統中，有關地震災害潛勢分析、土壤液化潛能評估、一般建築物及橋梁之易損性分析及建築物直接經濟損失評估等的相關研究成果。

1. HAZ-Taiwan 簡介

民國八十七年國家科學委員會和經濟部技術處合作，引進美國所研發的地震災害損失評估系統 HAZUS。為縮短自行研發所需時間，乃委託美國的 Risk Management Solutions 公司仿照 HAZUS 的分析架構，但參酌些許本土化的分析模式和資料分類系統，開發一套適用於台灣地區的地震災害損失評估系統，並定名為 HAZ-Taiwan。

該系統基本上包含了地震災害損失評估與境況模擬所需的各項分析功能，如圖 1 所示。簡言之，由使用者定義模擬地震的規模和震源參數，地震災害潛勢分析模組可推估地震引致的地表振動強度和土層破壞程度，進而評估工程結構物遭受不同損害程度的機率和可能的損失金額。工程結構物依結構型態概分為建築物、橋樑和地下管線系統等，依用途別又區分為一般建築物、重要設施、交通系統和民生系統等。不同結構型態的工程結構物有不同的損害評估模

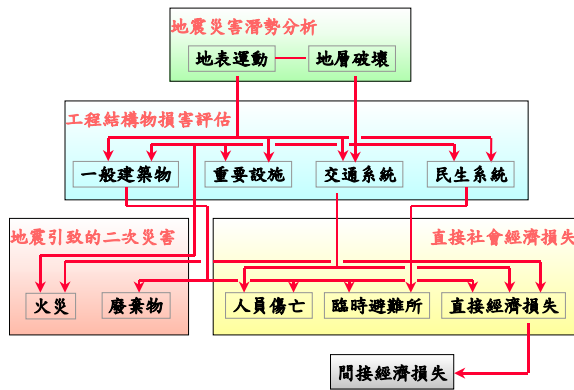


圖 1 HAZ-Taiwan 的分析流程與架構

Fig. 1 Framework of methodology in HAZ-Taiwan

式，不同用途分類則據以評估其經濟的損失和對社會的衝擊。一般建築物的損害評估是地震災害境況模擬的重要一環，其輸出結果除用以估計建築物結構系統的損害程度及所需的重建或補強成本外，更重要的是估計非結構系統的設備和庫存品的損失金額、租金和所得的減少……等等。其次，地震引致的廢棄物種類和數量、人員傷亡程度和數量，以及臨時避難所的需求等，大部分後續的分析模組也需一般建築物的損害評估結果。因此，在地區災害防救計畫、震災風險評估與管理中，一般建築物的損害評估都扮演關鍵性的角色。

除上述直接物質損害評估外，因地震引致火災的數量與延燒範圍、廢棄物的種類與數量、人員傷亡的統計、臨時避難所的需求、直接與間接經濟損失評估等，一系列的二次災害和社會經濟損失評估均包含在該系統的分析架構中 [1]。在應用方面，地震災害損失評估與境況模擬的研究結果可提供各級政府，在擬訂地區防救災計畫時，各項重要的參考數據。譬如在假設的最大可能地震作用下，各地區的震度分布和土壤液化的機率、一般建築物在不同損害狀態的機率和可能損害的總樓地板面積、人員傷亡的程度和數量……等等，都可提供防救災計畫擬定時的參考，了解地方政府在平時應準備之救災資源的分布和數量，平時並做好防救災的演練。地震災害境況模擬也可應用到其他有關的風險評估與風險管理的領域，諸如一般建築物之地震災害保險費率的訂定等。為實際落實應用到地區災害防救計畫的研擬，國家科學委員會和台北市政府於民國八十九年簽訂防災合作計畫。其中重要的工作項目即是收集建置防災相關資料庫，及應用既有的 HAZ-Taiwan 系統進行地震災害的境況模擬。目前國家地震工程研究中心已協助台北市政府完成一般建築物的數量統計，並協助評估在最大可能地震作用下的災情分布和災害規模 [2]。

地震災害損失評估與境況模擬研究是以實用為

導向、跨領域的科技研究，須結合許多專家學者和工程實務的經驗，也須藉助社會和財經領域之專家的協助，方能達到以下的整體目標：

就分析架構而言，提供標準且一致的資料分類系統，整合地震災害潛勢分析、工程結構物的損害評估、地震引致二次災害的推估及社會經濟損失評估等分析模組，提供各級政府規劃緊急應變措施、擬定地區災害防救計畫和做好平時減災整備的工作。為因應地震、地震工程及其它防災相關科技的進步，整體的分析架構和應用軟體的開發須注意模組化的設計，以便利日後分析模式與資料庫的維護更新。為比較不同模擬地震或不同地區的損害狀況和災害規模，尚須應用已知的最新分析模式作定量而非僅定性的損失評估。在選擇分析模式時，須考慮輸入資料的詳細度、分析參數的精度、耐震需求和結構系統本身的不確定性……等等，應注意平衡發展各分析模組，避免過度繁複的計算。舉例而言，工程結構物或地下管線系統的損害評估有賴前端地震災害潛勢分析的結果，也有賴現有可用資料庫的精細度及內容是否完整。唯有提高各分析模組之輸入資料的精度方能保障輸出結果的可信度。

就應用軟體的功能而言，須適合不同使用者的需求，並提供人性化的使用者介面。使用者可選擇部份或全部的分析項目，並依使用者的經費與人力多寡接納不同程度的資料完整性和精度。分析模式中所用之參數值的設定，如沒有其他更好的選擇，可採用系統內建的預設值。然而如有專家指導的情況下，也可根據各地區不同的自然、人文與工程背景特性，自訂較適合的分析參數。在定義模擬地震方面，目前提供三種主要的分析模式，分別為已知地震規模和震源位置的模擬地震事件、利用不同迴歸期的震度分布圖進行機率分析、和使用者提供的實測或虛擬的震度分布圖。所使用的資料庫內容和格式等須與其它天然災害防治的應用，如防洪、防颱、土石流等共享。

為達前述目標，地震災害損失評估方法必須具備數位化、電腦化、網路化、標準化、模組化和人性化等特點。隨著資料庫的收集建置、分析模式與參數的研擬訂定，除資料庫內容更新外，有時還必須更改應用軟體的程式碼。為真正發揮預期防救災的功能，國家地震工程研究中心肩負維護更新 HAZ-Taiwan 的責任，因此有必要研讀應用軟體的程式碼並作適當的修改。有關更新應用軟體的功能部份可參考文獻 [3]。

2. 地震災害潛勢分析

「地震災害損失評估」的準確性對平時地震防災與緊急搶救計畫之擬定，有極大的影響。因此必須提

高地震災害潛勢分析評估的可靠度，尤其是都會區的地震災害潛勢分析。都會區因人口集中，若發生地震災害，其衝擊十分巨大。另一方面，則因都會區通常位於沖積平原或盆地，地震震波在這類地質與地形條件下會發生震波放大的效應。沖積平原或盆地上的都會區的地震災害潛勢分析必須考慮地盤放大效應，因此變得十分困難。雖然地盤放大效應和土層的軟硬及土層厚度有關，但其關聯性並非傳統的考慮地盤分類的震度衰減律可以完全涵蓋。因此如何將地盤放大效應考慮在地震危害度分析程序中仍然需要加以研究，以獲得更為可靠的地震潛勢。

藉由地震危害度分析進行地震災害潛勢評估，可以分為機率分析法 (probabilistic seismic hazard analysis, PSHA) 與境況模擬分析法 (earthquake scenarios or deterministic approach, 或稱為肯定分析法)。機率分析法考慮工址附近所有地震震源對危害度的可能影響，建立所有震源區的震源特性參數 (例如規模、震源距離) 的機率密度函數，經由機率分析計算而得到危害度曲線。境況模擬分析法則考慮單一地震對工址的影響，此一地震通常選擇歷史性重要地震或透過分析判斷決定 (地震規模與距離)，直接經由衰減律計算設計 PGA 等地震震度。境況模擬分析法須採用衰減律計算，因此仍然具有「機率」的成分在。

地震危害度分析是評估選定區域在未來某一定期間內，因地震而引致的地表震動程度 (震度)，通常視評估對象以最大地表加速度 PGA 或其他足以代表震度的地震參數如 PGV、PGD、短週期加速度反應譜 S_{AS} 及長週期加速度反應譜 S_{AL} 等來表示。地震危害度分析的結果以危害度曲線或震度分佈圖來表現是許多地震工程應用的基礎分析工作，必須有可靠的地震危害度分析結果才能在地震震害評估、耐震設計參數擬定、土壤液化分析等應用領域獲得可靠之結果。因此在地震工程應用的領域裡，地震危害度分析模式及參數必須精細的加以研究，使能真實反映區域地震地質特性。

以地震災害潛勢分析建立地區震度潛能資訊工作，包含歷史性地震資料分析，探討地震震源特性參數及相關分析模型，進行危害度分析。所考慮的因素眾多，其中以震度衰減律對分析結果之可靠度影響最大，不論採用機率分析法或境況模擬分析法，都必須建立足以反應前述地盤放大效應的震度衰減律。

2.1 地表運動衰減律

當地震發生時，能量由斷裂帶 (面) 以波的形式傳播至工址，由於傳播路徑材料及幾何上的關係，震度 (以 PGA 為例) 必定發生衰減現象，在工程上震度 Y 之衰減律可表為

$$Y = f(M, R) \quad (1)$$

其中 M 、 R 分別為地震規模及震源距離。工程上有多種常用的衰減律形式。本文採用 Campbell 所提出的衰減公式 [4]。如下

$$Y_r = PGA(g) = f(M, R) \\ = b_1 e^{b_2 M} [R + b_4 \exp(b_5 M)]^{-b_3} \quad (2)$$

其中 $b_1 \sim b_5$ 為常係數可由回歸分析求得。震度衰減律分析通常會將地震測站加以分類，但中央氣象局的測站地質調查工作尚未完成，且以傳統的地盤分類方式無法適當地考慮地盤放大效應。為了能確實反映不同地盤條件的測站之放大效應，本研究並未採用先依地盤條件分類再進行衰減律回歸分析的傳統程序，而採用二階段式步驟進行震度衰減律分析。

第一階段回歸出一個不分地盤條件的震度衰減律作為參考衰減式 Y_r ；第二階段則分析每一個測站資料對參考衰減式 Y_r 的系統偏差，而得到考慮地盤條件的修正衰減律 Y_s 。以此方法可以經由歷年地震紀錄得到中央氣象局所有強震站的修正衰減律。此一修正衰減律將用來進行地震危害度分析，以更準確的評估地震時全國各地的地震災害潛勢。

2.2 衰減律分析資料庫

衰減律分析主要使用中央氣象局所紀錄的台灣地區地震資料，地震資料庫選用地震規模 $M_L = 5.0 \sim 7.5$ 共 59 個地震，取兩個水平向的幾何平均值，淺源地震 (震源深度 = 0 ~ 35 公里)。59 個地震震央分布如圖 2 所示，所選用地震資料庫之地震位置分布足以反映台灣地區地震特性。

中央氣象局速報站設置在地理上較均勻，強震網站設置在地理上有集中於人口較多的都會區的趨勢，會導致某些設站密集的地區有相當多的資料，形成資料的權重不一的現象。因此回歸分析時應盡量使用速報站資料，以避免權重不一的現象。但因速報站資料缺乏近距離的紀錄，會使得分析結果在近距離部分不合理。第一階段參考衰減式回歸分析時採用所有速報站的資料，再加上強震網資料中所有距離小於 25 公里的資料。除了排除台北盆地、宜蘭平原具深厚沉積土層測站外，其餘測站資料均加入分析資料庫中，並未針對測站地盤特性加以分類，因此結果可作為一般性地盤之衰減律使用。衰減律分析資料庫包括 921 主震及餘震資料。除了 921 主震採用地表斷層距離外，其餘地震均採用震源距離。

第二階段進行所有測站資料對參考衰減式 Y_r 的系統偏差分析，則採用所有速報站與強震網站的資料。

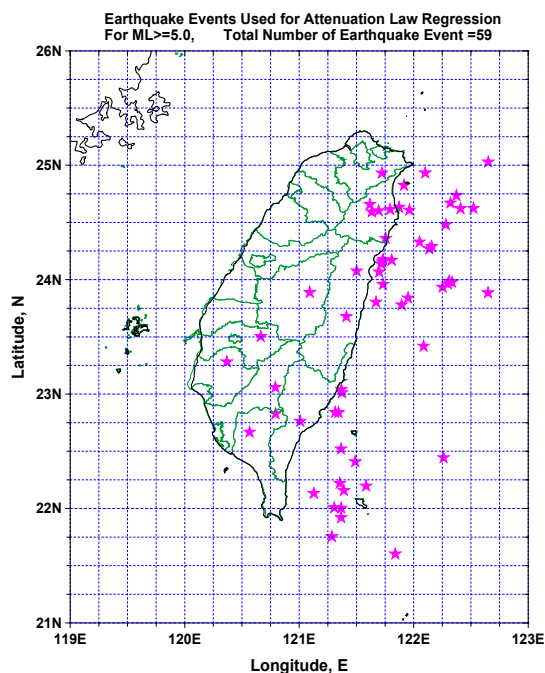


圖 2 衰減律回歸分析選用地震資料庫之地震震央位置

Fig. 2 Epicenter of earthquake events used in attenuation law analysis

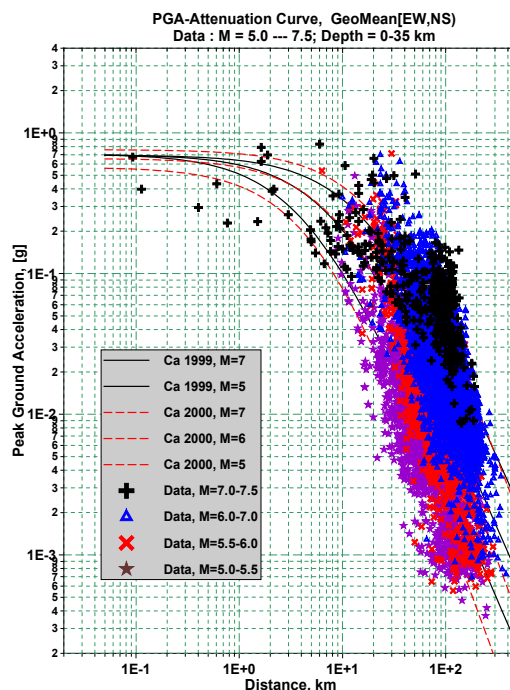


圖 3 衰減律與實測資料之比較

Fig. 3 Comparison of the proposed attenuation law and the recorded data

表 1 Campbell 衰減律回歸分析之係數

Table 1 Coefficients for the Campbell attenuation law

Case	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
PGA	0.0036944	1.7537666	2.0564446	0.1221955	0.7831508
S_{as}	0.0097360	1.7348416	2.0857212	0.1136533	0.8003162
S_{al}	0.0027914	1.7730463	2.0419005	0.1154175	0.7713924

2.3 參考衰減律分析

第一階段參考衰減式回歸分析是對實測資料與式(2)的誤差 Err 的平方和做最小化，因為衰減律本身是非線性函數，所以屬於非線性回歸分析，採用求解極值（最小值）的方法。以 PGA 為例，回歸分析所得衰減律與實測資料之比較如圖 3 虛線所示，分別繪出規模 5 ~ 7 的衰減曲線，迴歸分析 $\sigma_{lnE} = 0.749$ 。圖中規模大於 7.0 的地震為 921 集集地震主震資料（符號 $\blackplus$ ），顯示此衰減律仍可適用於像集集地震這類大規模且引起地表錯動的地震。圖中也同時將集集地震之前採用 15 個地震資料回歸之 PGA 衰減式（實線）繪出比較。

HAZ-Taiwan 地震災害潛勢分析模組推估地震引起的地表振動強度，進而評估工程結構物發生不同損害程度的機率和可能的損失金額。其評估方式採用均布危害度反應譜作為境況模擬地震之定義，主要由短週期加速度反應譜值 S_{as} 與一秒週期加速度反應譜值 S_{al} 構成。因此需要提供 S_{as} 與 S_{al} 之衰減律以進行地震災害潛勢分析。依照相同的程序可以回歸分析得到各衰減律在式(2)之係數如表 1 所示。

2.4 地震特性修正之衰減律

第二階段進行所有測站資料對參考衰減式 Y_r 的系統偏差分析，定義其正規化殘值 (residual) [4]

$$NR_i = \frac{(\text{Err}_i) - MR}{\sigma_{\text{Err}}} \quad (3)$$

其中 $\text{Err}_i = \ln \text{PGA}_i - \ln \overline{\text{PGA}_i}$ 為每個測站資料對式(2)的誤差, PGA_i 為實測值, $\overline{\text{PGA}_i}$ 為參考衰減式 Y_r 的計算值。誤差統計分析之均值 MR 及標準偏差 σ_{Err} 。

以 TAP 測站為例, 測站誤差統計分析之殘值對 PGA 之關係如圖 4 所示, 顯示誤差殘值隨 PGA 呈半對數關係。同時對地震規模及震源距離做比較, 結果發現誤差殘值與地震規模及震源距離之關聯性不高。各測站所顯現之系統偏差應可視為完全反映該測站之地盤特性。此一系統偏差為震度大小之函數。

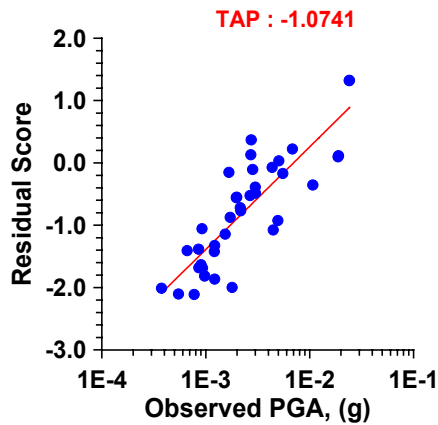


圖 4 TAP 測站誤差統計分析之殘值對 PGA 之關係
Fig. 4 Relationship between the PGA and the residual of error statistic analysis for Taipei stations

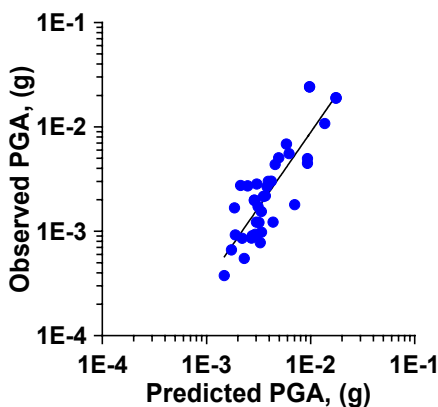


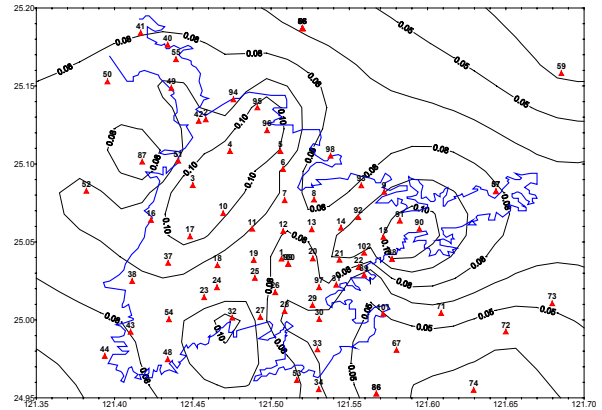
圖 5 TAP 測站實測 PGA 與參考衰減式 Y_r 的計算值比較

Fig. 5 Comparison of the PGA contours by recorded data with the calculated result by attenuation equation Y_r

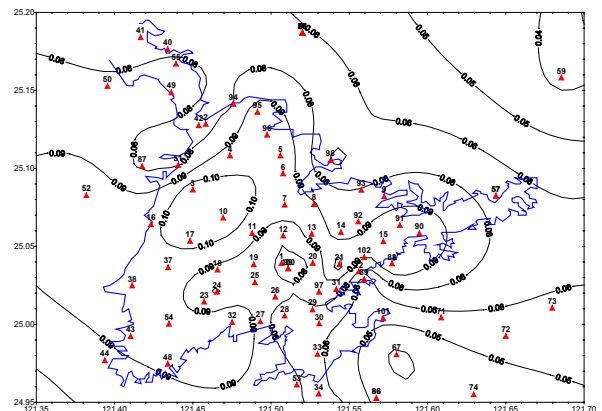
因此對每一個測站而言式(2)均可以另一個修正函數加以修正而得到考慮地盤震動特性之修正衰減式。其修正關係函數定義為

$$\ln(Y_s) = C_0 + C_1 \ln(Y_r) \quad (4)$$

其中 Y_s 為測站修正衰減式。圖 5 繪出實測值 PGA_i 與參考衰減式 Y_r 的計算值 $\overline{\text{PGA}_i}$ 之關係比較, 即可回歸得到上式的係數 C_0 及 C_1 。配合中央氣象局之測站資料, 式(2)及式(4)應用於地震災害潛勢分析可以得到相當不錯之結果。圖 6 以 921 集集地震為分析例, 比較台北盆地實測紀錄之 PGA 震度圖與前述分析所得氣象局各測站衰減律之地盤修正函數計算所得之震度圖, 二者之吻合良好。



(a) 921 地震台北地區實測 PGA 震度分布圖



(b) 921 地震台北地區修正衰減律計算之 PGA 震度分布圖

圖 6 921 地震台北地區實測 PGA 與修正衰減律計算之 PGA 震度比較

Fig. 6 Comparison of measured PGA and estimated PGA from attenuation laws at Taipei basin in the 921 earthquake

3. 土壤液化潛能分析

在強烈地震作用下，地表振動和土層破壞是造成建築物和橋樑損害的重要因素；其中，土壤液化是引致土層破壞的主要原因之一。為評估土壤液化的機率和引致的地表永久位移量，以作為工程結構物損害評估的依據，HAZ-Taiwan 將各地區的土壤依液化敏感的程度，概分為極高、高、中、低、極低和無等六級。每一液化敏感類別的土壤在給定的地表最大加速度 (PGA)、地震規模和地下水位深度可以統計迴歸法求得的公式概估其液化的機率，以及一旦液化時可能引致的地表沉陷量和側移量。

由於各地區之土層分布和土壤材料特性的變異性極大，以往相關的研究大多針對小地區的液化潛能評估，無法直接應用到 HAZ-Taiwan 的分析架構。其中最主要的關鍵是缺乏台灣地區土壤液化敏感類別的物理定義，也欠缺較詳細的地質圖、古河道圖、航照圖和歷史性地震引致液化現象的紀錄……等等。因此，無法根據 HAZUS 所提供之土壤液化敏感類別的判定方法，進行台灣地區土壤液化敏感類別分布圖的製作。本文乃透過國家地震工程研究中心之「全國液化潛能圖之製作及評估方法之研究」整合型計畫所收集整理的工程地質鑽孔資料庫，探討液化敏感類別的定義，以及影響土壤液化潛能指數的因素。各液化敏感類別之液化潛能指數推估式，可提供 HAZ-Taiwan 進行後續工程結構物損害評估之用。

3.1 液化潛能評估方法

目前廣泛使用的土壤液化潛能評估方法，多半是由液化現場之案例調查配合室內試驗後所歸納整理出的經驗公式。使用之現地試驗的參數包含 SPT- N 、CPT- q_c 和震測剪力波速 V_s 等。由於 SPT- N 法是最早發展的現地強度試驗法，且土層資料的完整性較高，故 SPT- N 被認為是較可靠的評估參數。

Iwasaki 等人考慮到土層深度的影響，提出以深度加權法來評估某一鑽孔整體的液化潛能，亦即以液化

潛能指數 P_L 來表示某一鑽孔的液化損害程度。Iwasaki 等人比較發生液化與不曾液化的工址後，發現 $P_L = 15$ 是大部分液化與非液化工址的分界線。因此，提出以 $0 \leq P_L \leq 5$ 、 $5 < P_L \leq 15$ 和 $P_L > 15$ 等三級，分別代表輕微液化、中度液化、嚴重液化，以作為液化災害風險評估的依據。上述有關液化潛能評估方法的細節和步驟可參考文獻 [5]。

雖然液化潛能指數與液化發生機率的物理意義並不相同，但在沒有其他更適用且為工程界和學術界接受的評估方法前，將液化發生機率視為液化潛能指數的線性函數，應屬合理的假設。至於該線性函數的係數如何給定？可再進一步研究。

為簡化分析的流程和兼顧實際土壤的特性，HAZ-Taiwan 假設各地區發生土壤液化現象的敏感度，可經由專家或試驗數據判斷，並將液化敏感度分成極高、高、中、低、極低、無等六個等級。各液化敏感類別判定的標準在 HAZUS 的技術手冊有簡略的說明 [1]，但缺乏液化敏感類別的物理定義。即使在有工程地質鑽孔資料的地區，也無法據以判斷該鑽孔附近地區所屬的液化敏感類別。

一旦各地區之土壤液化敏感類別判定後，屬於不同液化敏感類別之地區發生液化現象的機率可由下式推估：

$$P[L_{SC}] = \frac{P[L_{SC} | \text{PGA} = a]}{K_M \cdot K_w} \cdot P_{ml} \quad (5)$$

其中 $P[L_{SC} | \text{PGA} = a]$ 是在地震規模 7.5、地下水位 1.5 公尺的前提下，於給定的 PGA 值之下發生液化現象的條件機率。 K_M 、 K_w 和 P_{ml} 分別為地震規模修正因子、地下水位修正因子和實際發生液化現象的面積比。 $P[L_{SC} | \text{PGA} = a]$ 如表 2 所示，不同液化敏感類別之液化機率隨 PGA 改變呈線性變化。表 2 中的 $(\text{PGA})_l$ 和沉陷量分別代表該類土壤發生液化現象的門檻值和沉陷量。各液化敏感類別一旦發生液化現象時，其沉陷量假設與地震規模和 PGA 無關，但側移量則假設與地震震時和 $\text{PGA} / (\text{PGA})_l$ 的比值有關。

表 2 HAZUS 所定義的土壤液化敏感類別，在固定地震規模 7.5 和地下水位 1.5 公尺時的液化條件機率及沉陷比

Table 2 Conditional liquefaction probability under seismic magnitude 7.5 and ground water depth 1.5 meters, threshold of PGA to induce liquefaction, proportion of liquefied area, and settlement of each liquefaction susceptibility category defined in HAZUS

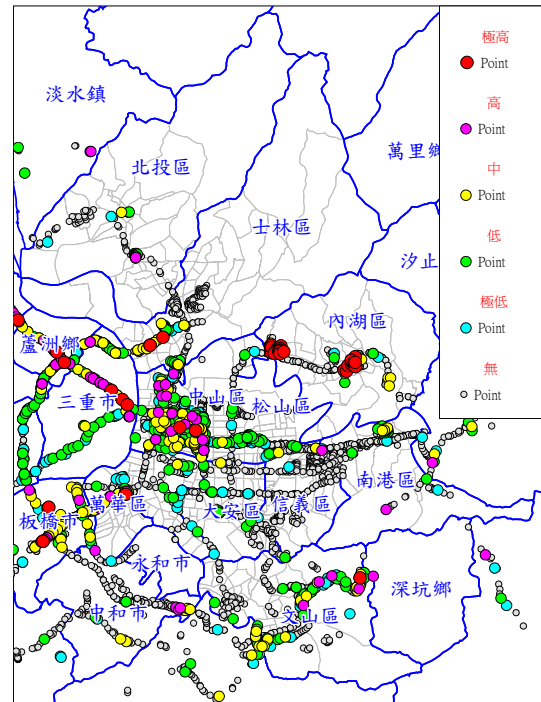
敏感類別	$P[L_{SC} \text{PGA} = a]$	$(\text{PGA})_l$	P_{ml}	沉陷量 (m)
極高	$9.09a - 0.82$	0.09g	0.25	0.30
高	$7.67a - 0.92$	0.12g	0.20	0.15
中	$6.67a - 1.00$	0.15g	0.10	0.05
低	$5.57a - 1.18$	0.21g	0.05	0.02
極低	$4.16a - 1.08$	0.26g	0.02	0.00
無	0	N/A	0.00	0.00

3.2 液化敏感類別與分區

本文採用美國 National Center for Earthquake Engineering Research 修正之 Seed 評估法所得 P_L 值供後續分析之用。為區分液化敏感類別及建立相關液化分析參數的目的，本文首先計算所有鑽孔在地震規模 7.5、地下水位 1.5 公尺的條件下，不同 PGA 下所推估的 P_L 值。由於相關文獻顯示 $P_L = 15$ 是大部分液化與非液化工址的主要分界線，且 P_L 值越大土壤液化的機率越高。因此本研究以 $P_L = 15$ 作為明顯液化的門檻值。當 PGA 達 0.15g 時，將 P_L 值大於 15 的鑽孔篩選出來，這些鑽孔的地質歸為「極高」液化敏感類。剩下的鑽孔在 PGA 等於 0.2g 時，將 P_L 值大於 15 的鑽孔篩選出來，這部分的鑽孔地質歸為「高」液化敏感類。依此類推，隨著 PGA 由小至大，依序篩選出極高、高、中、低、極低等液化敏感類別的鑽孔，分別代表 PGA 為 0.15g、0.2g、0.25g、0.35g 和 0.45g 時，該類鑽孔的 P_L 值大於 15。

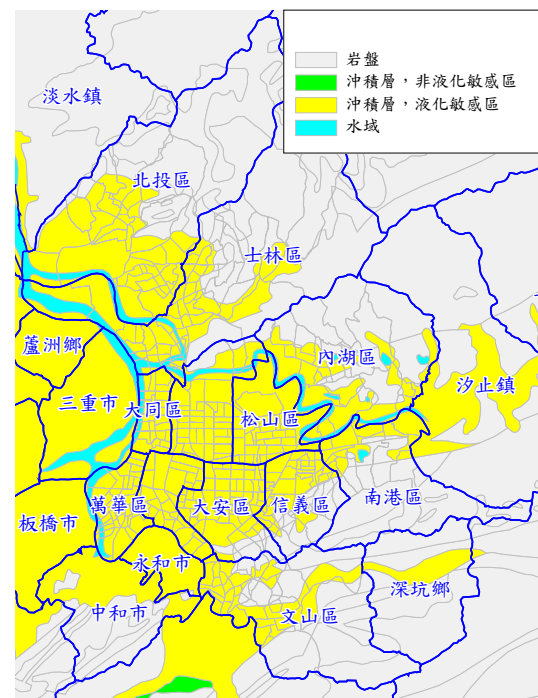
台北市附近各鑽孔的液化敏感類別標示於圖 7(a)；圖中分別以紅色、紫色、黃色、綠色和淺藍色代表極高、高、中、低和極低液化敏感類。圖中的小灰點代表有鑽孔資料，但評估結果屬於最不易液化的鑽孔。由圖可知，即使是台北市的工程地質鑽孔資料仍侷限於重大公共工程的地區，呈條狀分布，並非均勻分布於各村里內。如套疊中央地質調查所提供之比例尺為五十萬分之一的地質圖，則可知大部分的鑽孔位於沖積層 Q6 的地區。為便於進行大範圍區域的土壤液化潛能分區，首先將不屬於沖積層 Q6 的地區預設為不會液化的區域，如圖 7(b) 灰色和綠色的部分。沖積層 Q6 的地區塗以黃色，屬於可能液化但敏感度未定的區域。

其次，依極高、高、中、低、極低和無液化敏感類別的鑽孔位置，分別畫出半徑為 200 公尺、300 公尺、400 公尺、600 公尺、800 公尺和 1000 公尺的圓形區域，分別屬於對應的液化敏感類別。如有部分區域重疊，該重疊區域歸為較高的液化敏感類別。譬如「高」液化敏感區和「低」液化敏感區的重疊部分，視為「高」液化敏感區，其餘依此類推。依此方法所得結果示於圖 8(a)，其中淺灰色且標示為未定的區域有兩類，分別為根據地質圖判定屬於或不屬於 Q6 的區域。將不同液化敏感區域的液化敏感值，由極高至極低的等級，分別定為 6、5、4、3 和 2。經液化評估結果屬於「無」液化敏感之區域及 Q6 區域的液化敏感值定為 1，其他未定之區域的液化敏感值則定為 0。將圖 8(a) 與村里界圖套疊，利用面積加權平均的方式，可得各村里的液化敏感值。液化敏感值在 5.5 以上的村里屬於極高液化敏感類別，介於 4.5 和 5.5 之間的村里屬於高液化敏感類別，其餘依此類推，所得結果示於圖 8(b)。



(a) 工程地質鑽孔的液化敏感類別

(a) Liquefaction susceptibility category map for each borehole

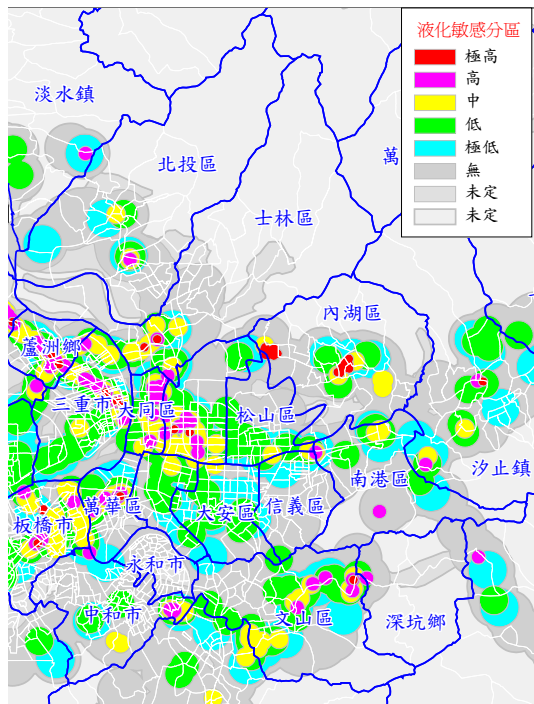


(b) 五十萬分之一地質圖 (中央地質調查所提供)

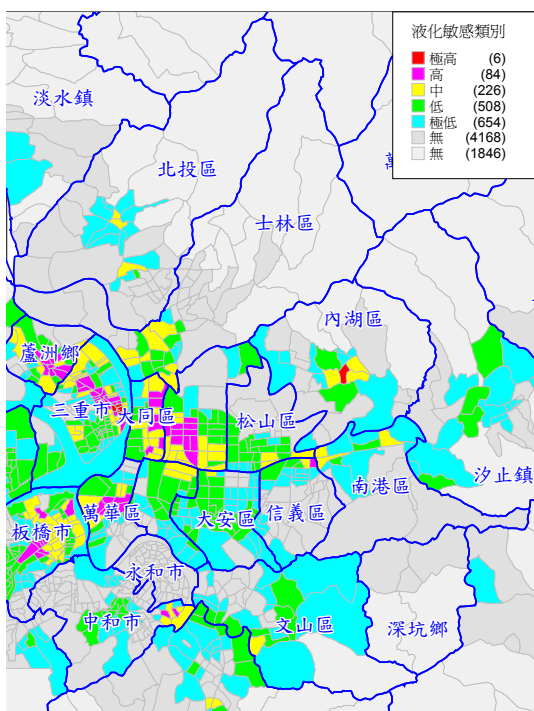
(b) 1/500,000 scale geologic map (from the Central Geologic Survey Bureau, Taiwan)

圖 7 台北市附近液化敏感區

Fig. 7 Liquefaction susceptibility category map in Taipei city



(a) 鑽孔附近的液化敏感分區
(a) for each circular region of borehole



(b) 以村里為單元的液化敏感類別
(b) for each administrative region (chun-li)

圖 8 台北市附近液化敏感區

Fig. 8 Liquefaction susceptibility category map in Taipei city

3.3 地震規模與地頭最大加速度對液化潛能指數的影響

各鑽孔的土壤液化敏感類別決定後，即可以統計的方式探討地震規模和 PGA 對液化潛能指數 P_L 的影響，但有關地下水位深度的影響不在本文探討的範圍。在地震規模 7.5，地下水位深度 1.5 公尺的條件下，不同液化敏感類別之 P_L 的平均值隨 PGA 呈線性變化，以最小平方差迴歸所得的直線方程式如表 3 所示。以相同的方法可求得在不同地震規模下， P_L 與 PGA 的線性關係式，其部分結果也摘錄於表 3。

觀察表 3 可知各液化敏感類別在不同地震規模下之 P_L 與 PGA 的線性關係式中，Y 軸的截距變化不大，斜率則隨地震規模作線性變化。因此，可合理地假設各液化敏感類別之液化潛能指數 P_L 與地震規模和 PGA 的關係式如下：

$$P_L = (\alpha M + \beta) a + \gamma \quad (6)$$

其中 M 和 a 分別為地震規模和 PGA， α 、 β 和 γ 為待定的係數。各液化敏感類別經非線性迴歸分析所得的 α 、 β 和 γ 綜整於表 4。在不同地震規模作用下，由式(7)可求得各液化敏感類別的液化門檻值

$$(PGA)_t = \frac{-\gamma}{\alpha M + \beta} \quad (7)$$

依直覺判斷，當地震規模變小時，液化門檻值應變大。式(6)和式(7)應較式(5)能反映真實狀況。

4. 週物易損性分析

4.1 標準週物型式之選擇

台灣地區常見之建築物的型式 [6]，對於低樓層數之建物主要之型式為 2 至 4 層樓之沿街店舖及透天厝為主，其一般為戶與戶之間擁有共同之牆壁，並同時興建而沿著街道成一直線；中樓層數之建物主要以 4 至 6 樓之雙併公寓為主，而高樓層數之建物主要以 10 至 15 樓之集合住宅及商用大樓為主，中樓層數與高樓層數之住宅一般之結構系統為抗彎矩構架，並常以 12 公分之 RC 牆為外牆及以 1/2B 磚牆為內部隔間牆。所以選用平面圖如圖 9 中所示之沿街店舖為低樓層數建物之標準型式，平面圖如圖 9 中所示之雙併公寓為中樓層數建物之標準型式，而平面圖如圖 10 中所示之四戶集合住宅及商用大樓為高樓層數建物之標準型式。另對於學校建築而言，一般小學及中學之教室皆為如圖 11 中所示之平面配置。

表 3 在不同地震規模下，各液化敏感類別的 P_L 值和 PGA 經迴歸分析所得的線性關係式Table 3 Linear relationships of P_L and PGA under different seismic magnitudes

敏感類別	$M = 5.5$	$M = 6.5$	$M = 7.5$	$M = 8.5$
極高	$105.1a - 13.8$	$158.3a - 13.4$	$192.5a - 9.5$	$282.3a - 11.1$
高	$84.3a - 19.2$	$125.4a - 18.1$	$179.5a - 17.9$	$236.2a - 16.8$
中	$69.7a - 20.3$	$103.3a - 19.2$	$146.7a - 18.7$	$197.2a - 18.1$
低	$42.3a - 13.8$	$73.2a - 16.3$	$96.6a - 14.1$	$133.6a - 14.3$
極低	$25.4a - 9.3$	$48.1a - 12.4$	$63.7a - 10.7$	$87.3a - 10.6$

表 4 各液化敏感類別之 P_L 值隨地震規模和 PGA 改變之迴歸式的參數值Table 4 Coefficients of empirical formula for estimation of P_L as function of seismic magnitude and PGA

	α	β	γ
極高	56.4	218.0	-11.0
高	51.0	205.0	-17.3
中	42.2	168.6	-18.6
低	28.5	115.6	-14.4
極低	19.1	78.8	-10.5

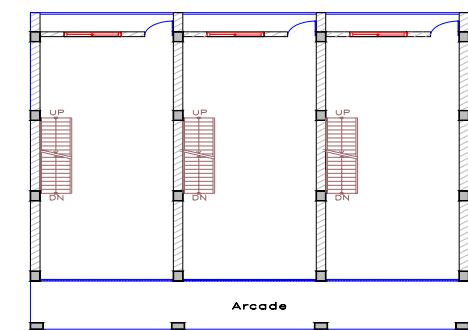
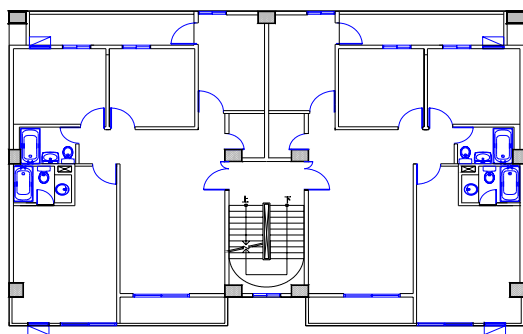


圖 9 典型雙併公寓及沿街店舖之平面圖

Fig. 9 Typical plan layout of duplex apartment and street house

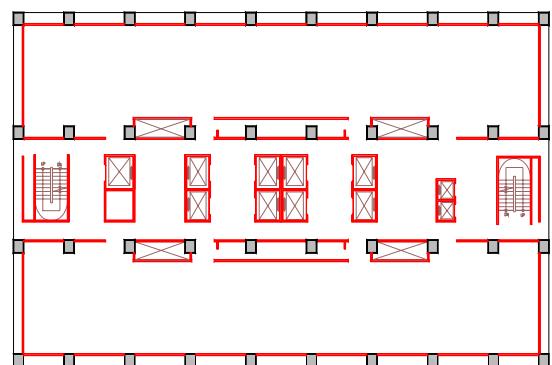
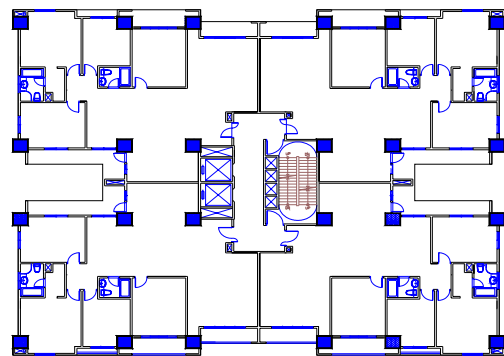


圖 10 典型集合住宅及商業大樓之平面圖

Fig. 10 Typical plan layout of condominium and commercial building

對於所選取之標準型式的建築物，將重新進行設計並依其設計年代將其區分為耐震設計及傳統設計兩大類，而每一大類中又區分為高耐震、中耐震及低耐震三種子類，其主要目的為反應建物座落於不同震區其原設計地震力不同，所以耐震能力應有所不同，另考量台灣地區之震區經過多次劃分，同一地區之地震危害度隨不同年代之震區劃分而有所不同，所以分成三個子類有其必要性及可使分析過程簡化。所謂耐震設計之建物代表為採用韌性設計及年代較新之建築物，其設計方法為採用現行耐震規範之方法進行設計，並考量其具有較好之韌性細節；傳統設計之建物

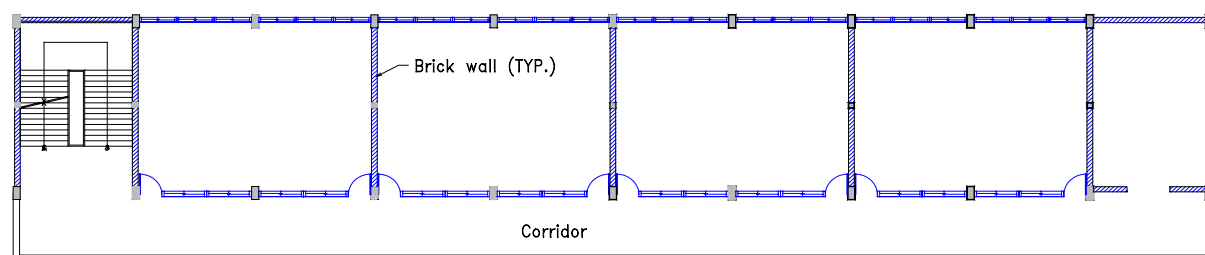


圖 11 典型校舍平面配置圖

Fig. 11 Typical plan layout of school building

代表為韌性細節較差及年代較久遠之建築物，其設計方法則根據過去規範規定之地震力進行設計，但在韌性細節上則根據實際抽調資料之結果作約略假設。

4.2 通易損性曲線之分析步驟

步驟 1

首先為建立建物之分析模型，結構分析中常見結構構材之模擬方式如圖 12 中所示並概要描述如下：

- (1) 梁柱構材：對於梁柱構材採用切片 (slice-fiber) 模型之線元素進行模擬，對於部份韌性及脆性構材並以軸力及韌性相依之剪力降伏元素來模擬其剪力破壞的情形；圖 13 中所示為不同破壞模式下構材之力與變形曲線之示意圖。
- (2) 填充磚牆：填充磚牆採用等值斜撐進行模擬。
- (3) 填充 RC 牆：填充 RC 牆一般為採用等值柱配合剪力降伏元素之方式進行模擬。

步驟 2

藉由非線性側推分析建立建物基底剪力 V 與屋頂位移 Δ_{roof} 之關係式，即側推曲線，圖 14 中所示為一些典型 RC 高樓層建物之側推分析曲線。將分析所得之側推曲線依下式轉換為容量震譜曲線

$$S_a = \frac{V}{W \alpha_1} \quad (8)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{\text{roof}}}{P F_1 \phi_{\text{roof},1}} \quad (9)$$

其中 $P F_1$ 為第一振態之振態參與因子 (modal participation factor)， α_1 為第一振態之振態質量係數 (modal mass coefficient)， $\phi_{\text{roof},1}$ 為第一振態在屋頂處之振幅， W 為建物重量， S_a 為譜加速度 (spectral-acceleration)， S_d 為譜位移 (spectral-displacement)。

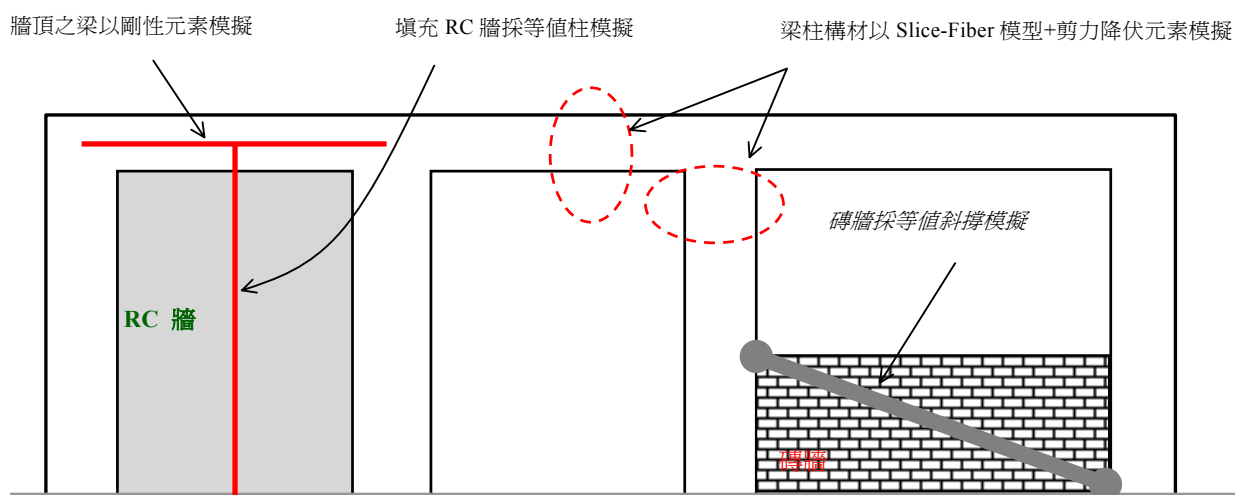


圖 12 結構構材之模擬

Fig. 12 Modeling of the structural components

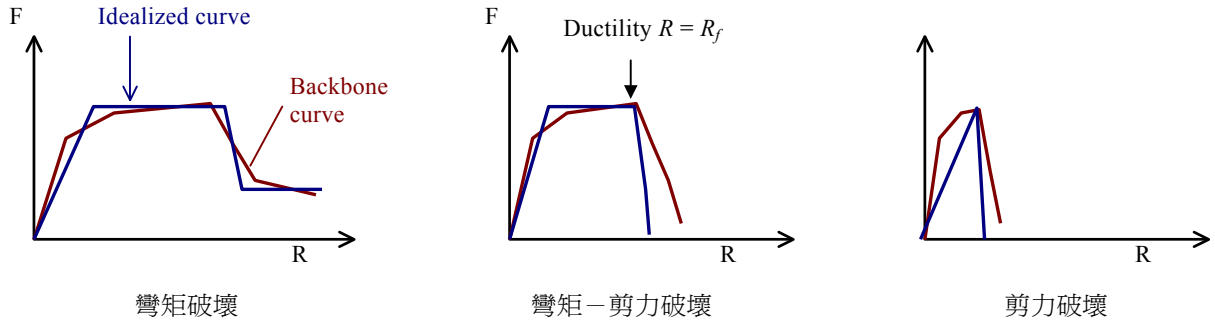


圖 13 不同破壞模型之 F-R 變位關係圖

Fig. 13 Load-deformation relations for different failure mechanisms

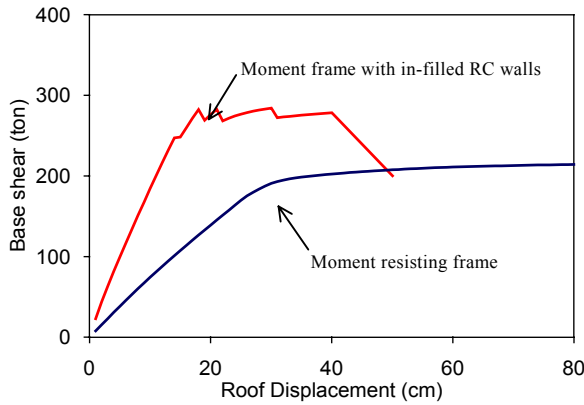


圖 14 不同結構形式之 RC 建物的側推分析曲線

Fig. 14 Pushover curves for high-rise RC building

步驟 3

由表 5 中所定義之損壞狀態所對應之需求譜位移 S_d 求取韌性需求 R 及彈性需求譜加速度值 S_{ae} ，其採用以下之方式進行計算：

$$R = S_d / S_{dy} \quad (10)$$

$$S_{ae} = S_{ay} \kappa F_u \quad (11)$$

$$F_u = \begin{cases} R & ; T \geq T_0 \\ \sqrt{2R-1} + (R - \sqrt{2R-1}) \times \frac{T-0.6T_0}{0.4T_0} & ; 0.6T_0 \leq T \leq T_0 \\ \sqrt{2R-1} & ; 0.2T_0 \leq T \leq 0.6T_0 \\ \sqrt{2R-1} + (\sqrt{2R-1} - 1) \times \frac{T-0.2T_0}{0.2T_0} & ; T \leq 0.2T_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 S_{ay} 為降伏譜位移， $T_0 = 0.4$ 秒， κ 為強度折減係數之調整因子，對於屬於耐震設計類之 RC 建物採用 $\kappa = 0.8$ ，屬傳統設計類之 RC 建物則採用 $\kappa = 0.5$ 。另在本分步驟中，所選用之 5% 阻尼比的彈性需求加速度反應譜之型式為

$$S_a = \begin{cases} S_S^D (0.4 + 7.5T) & ; T \leq 0.08 \text{ sec} \\ S_S^D & ; 0.08 < T < 0.4 \text{ sec} \\ 0.4 S_S^D / T & ; T \geq 0.4 \text{ sec} \end{cases} \quad (13)$$

其中 $S_S^D = S_a(T = 0.3)$ 為 0.3 秒週期之需求譜加速度值。採用此種加速度反應譜型式之主要原因為其 1.0 秒週期之譜加速度值 $S_a(T = 1.0 \text{ sec})$ 剛好等於 PGA 值，將使建立易損性曲線之分析步驟適度簡單化。但由於此需求加速度反應譜型式與實際危害度分析或地震模擬所得之反應譜型式可能不同及考慮各類地盤之放大效應，所以配合分析採用之反應譜形式，對於各類地盤之地震需求參數 $S_a(T = 1.0 \text{ sec})$ 須要以工址反應譜修正係數 K_{shape} 來加以修正，其中 K_{shape} 為

$$K_{\text{shape}} = F_v \frac{2.5 S_1^D}{S_S^D} \quad (14)$$

其中 S_S^D 及 S_1^D 分別為由危害度分析或地震模擬所得之 0.3 秒及 1 秒週期之譜加速度值，修正後之地震需求參數 $S_a(T = 0.3 \text{ sec})$ 及 $S_a(T = 1.0 \text{ sec})$ 為

$$S_a(T = 0.3)_{\text{new}} = F_a S_a(T = 0.3)_{\text{old}} \quad (15a)$$

$$S_a(T = 1.0)_{\text{new}} = K_{\text{shape}} S_a(T = 1.0)_{\text{old}} \quad (15b)$$

其中 F_a 為短週期之工址放大係數， F_v 為 1.0 秒週期之工址放大係數。

步驟 4

建物之易損性曲線為由地震需求參數之中值及損壞狀態下譜位移對數常態分佈之標準偏差值 (β) 所定義的，同 HAZUS 99[7] 之作法，HAZ-Taiwan 採用輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞及倒塌四種損壞狀態來描述建物的不同損壞情形，在表 5 中定義了以層間

變位及構材變形為量化參數之不同損壞狀態下所對應之容許值；對某一損壞狀態，若採地表最大加速度為所選取之地震需求參數，則由步驟 3 可得到對應於此損壞狀態下之彈性需求譜加速度係數，再配合關係式 $PGA = 0.4 S_D^S$ 則可以得到其對應之 PGA 值，並以此來代表易損性曲線之中值。一般而言，標準偏差值 (β) 之變異性主要來自於損壞狀態容許值之選取的不確定性、建物容量之變異性及地表運動本身之不確定性等，所以在決定值時須要考慮上述之主要三個因素，但由於目前為止對損壞狀態之不確定性及建物容量變異性還未有更進一步之可信研究前，本研究中並

不考慮此兩個項目之不確定性，僅以臺灣地區實測地震記錄位移反應譜的分佈來決定易損曲線之 β 值，圖 15 所示之譜位移 $S_d (T = 1.0 \text{ sec})$ 的分佈圖形為採用 921 集集地震時台北盆地所記錄到之地震記錄所分析得到之機率密度函數及累積機率函數圖形。在求得不同損壞狀態所對應之易損性曲線的中值及標準偏差值後，則可以建立不同損壞狀態下代表某一類型建物之易損性曲線，圖 16 為對一含非結構牆之 12 層 RC 建築進行分析，並以樓層變位角為超越機率及以 PGA 值為需求參數所得之易損性曲線，圖中所標示之百分比代表為樓層變位角。

表 5 不同損壞狀態下之結構系統層間變位之容許值
Table 5 Damage states and limit value of building structure

Performance level		Slight damage	Moderate damage	Extensive damage	Complete damage
Story drift ratio (%)	Moment resisting frame	0.005	0.010	0.020	0.025
	Moment frame with in-filled non-structure walls (L & M)	0.004	0.008	0.012	0.016
	Moment frame with in-filled non-structure walls (H)	0.004	0.008	0.015	0.025
	Dual system	0.004	0.008	0.012	0.016

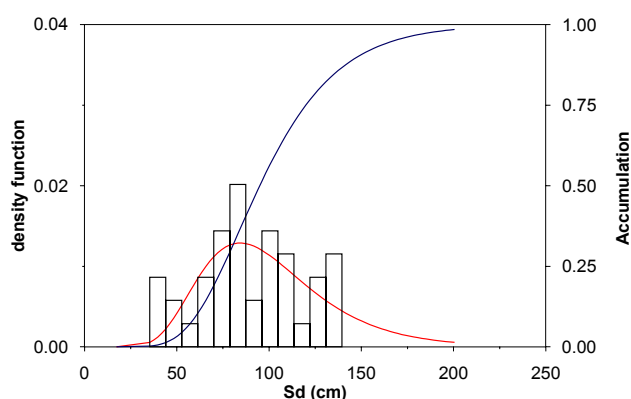


圖 15 台北盆地地震記錄之譜位移分佈及累積圖形
Fig. 15 Distribution of the spectral displacement and corresponding cumulative distribution for earthquake data recorded in Taipei basin

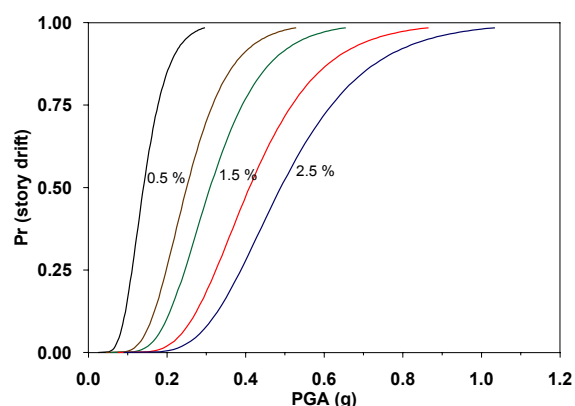


圖 16 以樓層變位角之超越機率及 PGA 表示之高層 RC 建物之易損曲線
Fig. 16 Fragility curve represented by exceeding probability of story drift and demand parameter PGA for a high-rise RC building with in-filled non-structural walls

5. 橋梁易損性分析

5.1 橋梁分類

由於公路橋梁為數眾多，不可能對每座橋梁作詳細的耐震能力評估來建立其易損性曲線，是以首先需要根据其橋梁結構特性加以分類，建立各類標準型式

橋梁之易損性曲線，然後利用地震需求與損壞關係來評估橋梁震害風險，在進行橋梁分類主要根據橋墩類型（單柱、多柱或壁式橋墩）、跨數（單跨）及橋跨連續性（簡支或連續）三個項目來進行，並依結構型態將橋梁區分為 8 個類型，對於佔橋梁總數之比例很小的鋼橋、大跨距特殊橋梁與少見的結構型式也一併歸於其他類，橋梁分類型式與易損性分析時採用之橋梁

表 6 本州之橋梁分類表

Table 6 Class of bridge

跨數	上部結構	橋墩型式	分類
單跨			TYPE 1
多跨	簡支橋	單柱	TYPE 2
		構架式	TYPE 3
		壁式	TYPE 4
	連續橋	單柱	TYPE 5
		構架式	TYPE 6
		壁式	TYPE 7
其他橋梁			TYPE 8

如表 6 中所示。對於每一類橋梁則再依是否為耐震設計（由設計規範決定）分為兩個子類，其中 C 代表傳統設計，S 代表耐震設計。

5.2 橋梁易損性曲線之建置

橋梁震害之易損性曲線可以用來描述橋梁在地震下各種損害程度的發生機率，藉此可評估橋梁在地震後的損害情形（功能性與經濟損失）及修復所需的成本（時間與金錢）。一般橋梁地震損害評估方法可區分為理論方法與經驗方法：理論評估方法主要針對單一特定橋梁，建立力學分析模型進行分析計算，分析

橋梁在不同損壞狀態下所對應之地震水準。經驗方法大都是收集以往地震發生後的橋梁損害資料，建立起各類橋梁的地震損害狀態與地震需求參數（PGA, S_a ）之關係，也就是易損曲線，橋梁類別的定義與各種損害程度的界定便成為曲線適用性的關鍵。本研究建立易損性曲線的方式為採用理論分析的方式，從已完成分類的橋梁資料庫中，對每一類型之橋梁均挑選出至少一座具代表性之橋梁來進行分析。

在分析橋梁易損性曲線前，首先要定性及定量的描繪出橋梁之損壞狀態，本研究參考 Basoz 與 Mander [8] 及 HAZUS 99[7] 之定義損壞狀態的方式將損壞狀態區分為輕微損壞（S），中度損壞（M），嚴重損壞（E），完全損壞（C）等損壞狀態，表 7 中為各損壞狀態之損壞描述及對應之定量描述，表中之 R_f 代表為橋柱產生彎矩剪力破壞時所對應之韌性，其意義可參見文獻 [9] 中之說明。

由於舊有之橋梁設計時，對於支承墊或防落橋裝置之設計並不一定採用橋墩產生塑鉸後反算之水平力來設計，所以橋梁之破壞並非都為橋柱破壞，亦有可能破壞產生於支承處，所以進行分析時則須要考慮強支承－弱橋柱及弱支承－強橋柱兩種分析模式，以下針對本研究針對不同破壞型式之易損性曲線的建置過程分別加以說明。

表 7 橋梁損壞之說明

Table 7 Damage states of bridge

損壞狀態	說明	強支承－弱橋柱		弱支承－強橋柱 (側向位移)
		耐震設計 (S)	傳統設計 (C)	
輕微損壞	橋台處產生細微之裂縫並發生輕微之混凝土剝落現象，橋台剪力鋼棒及橋面板產生細微之裂縫，橋柱有輕微混凝土剝落現象。	韌性需求 $R = 2.0$	韌性需求 $R = 1.0$	支承達降伏強度
中度損壞	橋柱出現中度之剪力裂縫及混凝土剝落，橋柱結構似仍安全；橋台發生中度之位移（小於 5 公分）；剪力鋼棒出現嚴重之裂縫及混凝土剝落現象；橋台連結鋼筋破壞，失去錨定作用；剛性支承破壞或發生中度沉陷現象。	$R = 4.0$	$R = 1 + \frac{R_f - 1}{2}$	側向位移達 10cm
嚴重損壞	橋柱因剪力破壞造成強度嚴重下降，橋柱結構屬不安全狀態，但尚未崩塌；在交接處產生明顯之殘餘移動量或發生明顯之沉陷；橋台產生垂直之位移；剛性支承破壞或發生中度沉陷。	$R = 6.0$	$R = R_f$; R_f 為橋柱產生彎矩剪力破壞時對應之韌性	側向位移達 20cm
完全損壞	橋柱傾倒崩塌，連接處失去支承能力，並可能造成橋面板之崩塌；基礎之破壞造成下部結構嚴重傾斜。	$R = 9.0$	$R \geq R_f$, 橋柱達耐震能力極限	側向位移達 min (40, 2N/3) N 為防落長度

5.2.1 強支承—弱橋柱之情形

在 HAZUS 99 中對於橋柱破壞時之分析，為根據經驗式計算出橋柱之強度，然後配合 ATC-40 中之震譜容量法，求得不同損壞狀態下之易損性曲線的中值。震譜容量法以等值線性系統之等效阻尼來折減彈性需求震譜，但是經相關研究證實 [10]，其結果於某些情形下並不可靠，所以本研究採用同建物分析之方法來進行橋梁結構易損性曲線之建立。

5.2.2 弱支承—強橋柱之情形：

在支承發生破壞而橋柱不壞的情況下，橋梁在支承破壞後，僅存上部結構與下部結構間之摩擦力來抵抗地震力，所以其側向力與位移之關係如圖 17 中所示，在支承受力剛達到降伏強度時，此損害狀態下對應的 EPA 值的計算方式為

$$EPA = S_a(T = 1.0) = \frac{F_y / W}{C} \quad (16)$$

其中 F_y 為支承降伏強度， W 為有效重量， C 為將(13)式正規化之反應譜。

在支承破壞後，橋梁以摩擦力消能來抵抗地震力時，其損壞狀態對應之 EPA 值的計算方式為

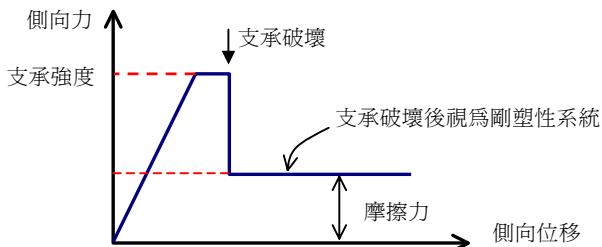


圖 17 支承部之側向力與變形示意圖

Fig. 17 Force-deformation relationship of the bearing

$$EPA = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_{ay} g}} S_{ay} B_L = 2\pi \sqrt{\frac{S_d \mu}{g}} B_L \quad (17)$$

其中 S_d 為不同損壞狀態所對應之需求位移值， μ 為摩擦係數， B_L 為中長週期阻尼調整係數，於本研究取為 2.0。

5.3 橋梁易損曲線建立示範例

在本節中以中山高基隆到內湖段某橋梁之軸向分析為例，說明如何建立橋梁之易損曲線。其在分類中屬於 TYPE 6 之 5 跨構架式橋墩連續橋，見圖 18，上部結構分為 2 跨及 3 跨連續兩振動單元，在此取右 3 跨作為一振動單元來分析，此一振動單元在橋台及左端伸縮縫處為活動支承，中間兩橋柱處則為以剪力鋼棒固定之固定支承，支承均採用合成橡膠墊。

將建立完成之結構分析模型進行側推分析，側向力沿著車行方向施加於結構物上，為考慮橋梁各部分結構破壞的可能性及不同的破壞模式，將整體結構的破壞方式區分為橋台破壞與橋柱破壞，即先對整體橋梁進行側推分析，在橋台破壞後，將橋台提供之強度移除後再進行第二階段之側推分析，則整座橋梁的容量震譜曲線如圖 19 所示。橋台背牆破壞後，橋梁之容量曲線則為由橋柱所控制，在本範例中橋柱鋼筋提供之剪力強度為小於橋柱之平均需求剪力，所以破壞模式為彎矩—剪力破壞，計算可得發生彎矩剪力破壞時對應之韌性 R_f 為 3.1。經由以上的側推分析，可決定出發生各種損壞狀態下橋梁所達到的韌性 R 值，如輕微損壞定義為進橋板損壞或伸縮縫損壞；中度損壞為背牆損壞，嚴重損壞為橋柱彎矩破壞且韌性 R 達 $0.8 R_f$ ；完全損壞為橋柱剪力破壞、側向強度下降，此時 $R = R_f$ 。如此即可算出橋梁易損曲線中值，並得到如圖 20 所示之易損曲線。

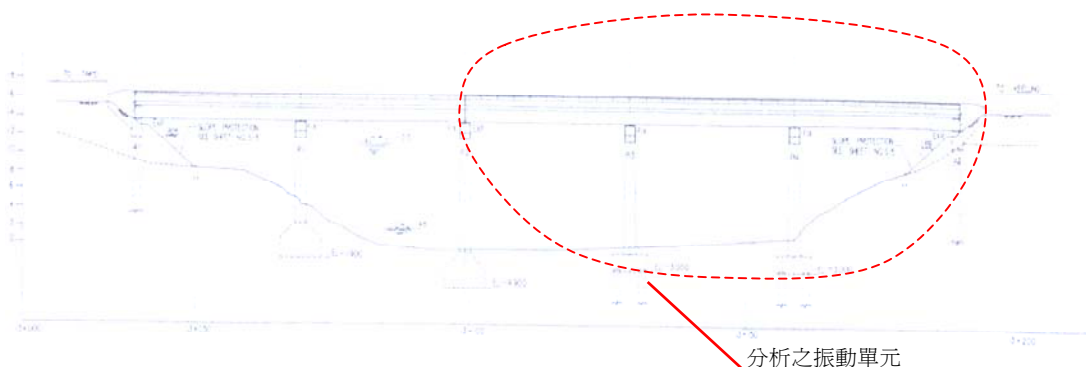


圖 18 中山高基隆—內湖段橋梁立面圖

Fig. 18 Elevation view of the bridge

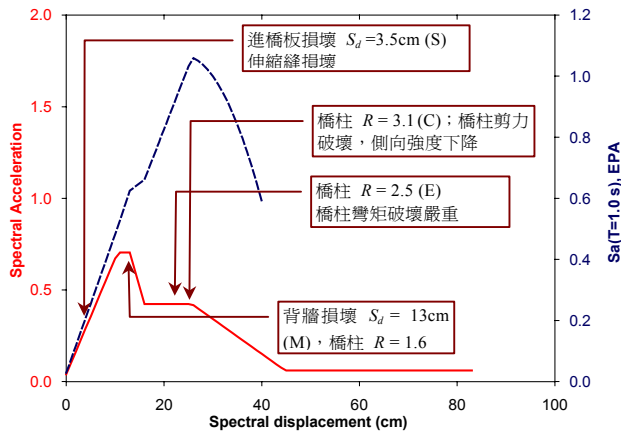


圖 19 橋梁軸向之容量震譜圖（實線）與Sd-EPA圖（虛線），及各損壞狀態對應之譜位位移及韌性值

Fig. 19 Capacity spectra and the Sd-EPA relationship for the longitudinal direction of the analyzed bridge

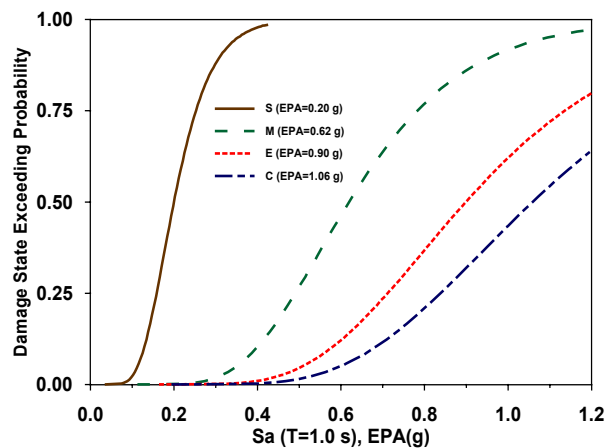


圖 20 分析橋梁之易損性曲線
Fig. 20 Fragility curves of the analyzed bridge

6. 地震災害建物破壞直接經濟損失之模式與方法

地震發生所造成的損害，除包含實質損害，如自然環境的變遷、交通運輸系統的摧毀、公共設施的損害、建物損壞外，尚包含許多嚴重的社會經濟衝擊。此兩個層面的損壞與衝擊，從經濟損失估計的層面，可分成地震造成的直接實質損失與間接或後續效應引發的間接損失衝擊兩類。前者估計主要關心的課題，在於地震發生後對於資產與公共設施的直接衝擊評估，估計成果對社會緊急救助需求與衝擊估計，甚至對重建資源投入決策選擇具有重要意義。後者估計

的重心，則在於地震後產業、就業、災後重建與其他社會經濟的衝擊評估，兩種類型損失的估計對於防救災計畫的推動皆非常重要。

HAZ-Taiwan 系統災害評估系統建立之基礎，係以地震災害損失評估方法之建置與相關資料庫與地理資訊系統資料庫的建立為運作之基礎，亦是後續 HAZ-Taiwan 系統相關模組測試與配合本土化之工作不可或缺之要素。本章節之目的，即在介紹 HAZ-Taiwan 系統，估計地震災害建物破壞直接經濟損失估計之方法、內容與所需資料。以下各節分別介紹一般估計地震損失估計的方法、HAZ-Taiwan 系統估計地震建物直接經濟損失的模式與方法、估計地震損失所需的資料及簡要結論。

6.1 地震損失估計方法

地震帶來的損害與損失層面非常的廣泛，包含社會經濟之實質與非實質資產，故地震損失估計內容非常複雜，且與地方的災感度有極大之相關 [11]。另攸關地震災害損失估計方法論之內涵，須從決策支援的角度考慮估計方法與內容的選擇。如決策需要詳盡且精確的損失估計，則方法的選擇與資料庫建立，即需花費龐大的經費、時間與人力進行詳盡的資料庫建立，而使系統性的估計地震損失成為困難之工作 [12]。

建立地震災害損害評估模式之重大課題，在於對災害「損失」或「損害」界定之模糊，使評估之過程益顯複雜，特別是針對估計項目與內涵的爭議 [13]。從廣義而言，損失應泛指社會福利的損失，但此方面的估計有資料蒐集與操作上的困難，故一般對所謂的損失多採狹義定義，只估計地震造成的實質設施損害之貨幣損失，而以重置成本法估計之。以重置成本估計地震災害損失的相關評估方法論中，常引用之估計模式係以成本損害分析法，將各項損害貨幣化，再以加總方式評估 [14]。

地震直接經濟損失估計另一個重要課題，在於不確定問題的影響。一般解決此問題的方法，皆透過機率模式，以風險或敏感度分析方式估計損失的機率分配，以解決不確定性的問題。整合機率模式與重置成本估計法進行自然災害損失估計的系統，主由美國國家建築科學研究所 (NIBS) 與 Michael Baker 公司所發展出之「決定型模型 (deterministic model)」之關聯模組，及由美國聯邦緊急事務管理總署 (Federal Emergency Management Agency; 以下簡稱 FEMA) 與 Risk Management Solutions 公司 (以下簡稱 RMS) 合作開發的 HAZUS 系統模組，兩者皆結合地理資訊系統，用以估計不同自然災害，造成之不同型態建物結構、維生管線與社會經濟的綜合損失 [15]。此兩個系統皆提供綜合性的決策支援系統模組，而可提供決策

者進行境況模擬、議題分析與決策追蹤的功能。

歸納相關之地震損失估計方法選擇文獻，本文將引用較具普遍性與綜合性之重置成本法，估計地震造成建物結構體損壞的直接損失，而以行政院國家科學委員會與美國 RMS 公司合作開發之 HAZ-Taiwan 系統所提供之模組作為估計之基礎，以下即說明 HAZ-Taiwan 系統之內涵、損失估計方法與模型。

6.2 HAZ-Taiwan 系統估計建物直接經濟損失方法

HAZ-Taiwan 系統之地震直接經濟損失估計法，可將建物損失以貨幣損失額表之。地震之建物直接經濟損失估計內容包括四個項目：1. 建物維修與重建成本（含建物結構與非結構體）；2. 建物內部財物損失；3. 建物內存之商業貨品庫存損失；4. 建物維修期間可能之損失估計包括：(1) 重安置成本（relocation costs）；(2) 租金損失。以下即依四項損失估計方法說明之：

1. 建物維修與重建成本估計

此部分之估計乃依各建物使用類別在各種損害程度之機率下，分就建物結構與非結構部分之損失估計之。建物結構體地震損失之估計式為：

$$CS_{ds,i} = CI \times \sum_{j=1}^n FA_{i,j} \times PMBTSTR_{ds,j} \times RCS_{ds,i,j} \quad (18)$$

$$CS_i = \sum_{ds=2}^5 CS_{ds,i} \quad (19)$$

式(18)、(19)之建物使用類別為 i ($i=1, 2, \dots, n$)，建物結構別為 j ($j=1, 2, \dots, m$)。 $CS_{ds,i}$ 表第 i 種使用類別建物が ds 地震損壞程度下的結構損壞成本； CS_i 為 i 種使用類別結構損失成本； CI 表區域成本調整指數； $FA_{i,j}$ 為樓地板面積； $PMBTSTR_{ds,j}$ 表 j 種結構建物發生 ds 地震損壞程度之機率； $RCS_{ds,i,j}$ 為建物之單位重建或維修成本。 $ds=1, 2, 3, 4, 5$ 分別表損壞程度，1 代表為無損壞、2 為輕微損壞、3 為中度損壞、4 為嚴重損壞、5 為完全損壞。

非結構體損失之成本估計與結構體估計法類似，惟非結構體區分為加速－敏感型損壞（acceleration sensitive damage）（指天花板、機房與電力設備、管線與樓梯）與流動－敏感型損壞（drift-sensitive damage）（指隔牆、外牆、裝飾品與玻璃）兩類，而可將估計式示之如下：

$$CNSA_{ds,i} = CI \times FA_i \times PONS A_{ds,i} \times RCA_{ds} \quad (20)$$

$$CNSA_i = \sum_{ds=2}^5 CNSA_{ds,i} \quad (21)$$

$$CNSD_{ds,i} = CI \times FA_i \times PONS D_{ds,i} \times RCD_{ds} \quad (22)$$

$$CNSD_i = \sum_{ds=2}^5 CNSD_{ds,i} \quad (23)$$

式(20)~(23)之 $CNSA_{ds,i}$ 表在損害程度 ds 下，加速－敏感型非結構部分之損壞成本。 $CNSA_i$ 為加速－敏感非結構部分之損壞總成本； $CNSD_{ds,i}$ 表 ds 損壞程度下，流動－敏感非結構部分之損壞成本； $CNSD_i$ 為流動－敏感非結構部分之損壞總成本； $PONS A_{ds,i}$ 為加速－敏感非結構部分損壞程度達 ds 程度之機率； $PONS D_{ds,i}$ 乃流動－敏感型非結構部分損壞程度達 ds 之機率； $RCA_{ds,i}$ 係加速－敏感非結構部分之單位維修或重建成本； $RCD_{ds,i}$ 表流動－敏感非結構部分之單位維修或重建成本。

欲估計所有 i 類建物其非結構部分之總損失可將式(21)與(23)式相加：

$$CNS_i = CNSA_i + CNSD_i \quad (24)$$

估計所有 i 類建物之地震總損失（含結構與非結構體），可以下式(25)表之：

$$CBD_i = CS_i + CNS_i \quad (25)$$

估計所有種類的建物之總地震損失，則可將 n 種建物使用別之損失加總：

$$CBD = \sum_{i=1}^n CBD_i \quad (26)$$

2. 建物內部財物損失估計

建物內部財產損失估計項目指不包含在建物結構體與非結構體之物件，主要指傢俱、櫥櫃、桌椅、櫃檯等設備的損失，而可將建物內部財物損失成本以式(27)、(28)估計之：

$$CCD_i = CI \times CV_i \times \sum_{ds=2}^5 CD_{ds,i} \times RC_{ds,i} \quad (27)$$

$$RC_{ds,i} = \sum_{j=1}^m PMBTNSA_{ds,i} \times FA_{ds,j} \times (RCA_{5,j} + RCD_{5,j} + RCMBT_{5,i,j}) \quad (28)$$

式(27)、(28)之 CCD_i 表建物內部財物損失成本； CV_i

為內部財物單位價值（以建物重建價值之比率表之）； $CD_{ds,i}$ 表內部財物損壞比率； $RC_{ds,i}$ 表建物之重建成本，其可以式(28)估計之； $PMBTNSA_{ds,j}$ 表加速－敏感型非結構體損壞達 ds 程度之機率。

3. 商業營業庫存損失估計

商業營業庫存之內容與數量會隨建物類別而有差異，故估計庫存損失，各種建物類別之營業額成為極佳之估計指標。另庫存產生損失之主要原因，可能在於地震造成之貨品翻落、建物倒塌壓損或水管破裂造成之破損，所以建物加速－敏感型非結構部分的損害狀況，亦成為估計之重要依據。故庫存損失可依式(29)、(30)估計之：

$$INV_i = FA_i \times SALES_i \times BI_i \times \sum_{ds=2}^5 PONS A_{ds,i} \times INVD_{ds,i} \quad (29)$$

$$INV = \sum_{i=1}^n INV_i \quad (30)$$

式(29)、(30)之 INV_i 為營業庫存損失價值； INV 表所有建物之營業庫存總損失； $SALES_i$ 表單位建物之每年毛營業額； BI_i 為營業庫存損失佔每年毛營業額之比率； $PONS A_{ds,i}$ 為建物之加速－敏感型非結構體設施損害機率； $INVD_{ds,i}$ 乃營業庫存在損害程度 ds 的損壞比率。

4. 建物修護與功能喪失時間估計

在地震損壞之情境中，須瞭解建物功能喪失與修護所需之時間，方易於估計因營業功能喪失的相關損失。所謂的「功能喪失」，指設施無法營業或發揮應有功能的情況稱之。此期間通常比建物修護期為短，因在建物修護期間，仍可能另覓他處或藉由其他變通方式營業，直到建物功能恢復為止。

建物修護時間包含：(1) 建物本身之建造與清潔時間，(2) 取得經費、完成設計與取得許可營業之時間。影響功能修復時間因素非常複雜，這些影響因素，在 HAZ-Taiwan 乃利用經驗調查之結果，建立參數系統以調整所估計之建物修護時間。以下可將建物失去功能之時間以式(31)估計之：

$$LOF_{ds} = BCT_{ds} \times MOD_{ds} \quad (31)$$

式(31)之 LOF_{ds} 指功能喪失時間； BCT_{ds} 乃建物重建或維修時間； MOD_{ds} 為建物維修時間乘數。

5. 重安置成本

地震後對受害廠商或建物使用者的重安置成

本，主產生在建物損壞後進行維修或重建，使用者須另覓他處進行營業或居住行為所需之成本。故重安置成本包括：(1) 中斷成本 (disruption costs)：因建物損壞，所需之遷移與搬運成本。(2) 租金成本：指租用臨時建物或其他營業處所需之租金支出。此兩種成本對建物自有者而言，皆須支付。但對建物承租者而言，租金之支付只是轉移予新房東，對整體之租金成本並無增加，因而可只估計中斷成本。

HAZ-Taiwan 系統不計入無損壞與輕微損壞兩種 ($ds = 1, 2$) 狀態下之支出，因兩種損壞情況，對建物原有功能妨害並不大，使用者之重安置支出亦不明顯，故可忽略不計。最後可將估計方式表為：

$$REL_i = FA_i \times [(1 - \%OO_i) \times \sum_{ds=3}^5 (POSTR_{ds,i} \times DC_i) + \%OO_i \times \sum_{ds=3}^5 (POSTR_{ds,i} \times (DC_i + RENT_i \times LOF_{ds}))] \quad (32)$$

式(32)之 REL_i 為建物之重安置成本； DC_i 表中斷成本 (元/平方公尺)； LOF_{ds} 表在地震損壞程度 ds 下，建物功能中斷時間； $\%OO_i$ 表建物自有率； $RENT_i$ 表單位租金成本 (平方公尺/天)。

6. 租金損失

估計租金損失涉及之變數，包括建物單位租金、建物樓地板面積與建物功能喪失時間。惟估計租金損失，對 $ds = 1, 2$ 之情況亦不列入。另估計租金損失，尚須瞭解建物之自有率，估計時須扣除建物自有者，以估計租金之實質損失。最後租金損失之估計方式可表為：

$$RY_i = (1 - \%OO_i) \times FA_i \times RENT_i \times \sum_{ds=3}^5 POSTR_{ds,i} \times RT_{ds} \quad (33)$$

上式之 RY_i 表租金損失； $RENT_i$ 為單位租金 (平方公尺/天)； RT_{ds} 為地震損壞程度 ds 下，所需之維修時間。

6.3 資料需求

HAZ-Taiwan 系統進行地震災害損失估計，需有完整的資料庫支援，所需的資料庫內容與取得方法可分述如下：

- (1) 建物使用類型分類：依 HAZ-Taiwan 之內設值共分 31 類。
- (2) 建物修復或重建成本：依建物使用型態與結構，

訪談營建公會或建築公會取得單位成本。

- (3) 建物加速－敏感型與移動－敏感型非結構部分之修護或重置成本。
- (4) 內部重建成本：以建物結構體與非結構體重建成本的特定比率估計之。
- (5) 產業平均總產值：以行政院主計處之工商普查資料為基礎。
- (6) 庫存產值：以工商普查與問卷調查之資料為基礎。
- (7) 功能恢復時間：以 HAZ-Taiwan 內設值為基礎。
- (8) 租金成本：以房屋公司提供之市場成交租金市價為基礎。
- (9) 建物自有比率：以工商普查與問卷調查成果為基礎。
- (10) 土地使用現況：以土地使用調查成果為基礎。

6.4 小結

本章節主要在介紹 HAZ-Taiwan 系統，估計地震災害建物損壞之直接經濟損失估計的內容、方法與所需之資料庫。事實上，HAZ-Taiwan 系統之地震災害直接經濟損失估計之內容，尚包含交通運輸系統與重要公共設施損壞的重置成本估計。惟估計的方法與模式與建物損壞直接經濟損失估計之模式類似，只要蒐集這些設施的重置與損壞成本之損失資料，仍可進行估計。從以上的內容，可針對任何評估地區，估計地震損失區位分布與機率分配，對於防災規劃與決策應用，而可引用為決策評估之輔助工具。

7. 結 語

本文之目的，主要在介紹 HAZ-Taiwan 系統中，在地震災害潛勢分析、液化潛能評估方法、一般建物及橋梁結構之易損性分析及建物破壞直接經濟損失估計方法各方面之進行中的相關研究。為達地震災害損失評估方法之數位化、電腦化、網路化、標準化、模組化和人性化等特點，除了資料庫的收集建置、分析模式與參數的研擬訂定及資料庫內容更新外，還必須要更改應用軟體的程式碼。為真正發揮預期防救災的功能，國家地震工程研究中心還具有維護更新 HAZ-Taiwan 的責任，因此有必要研讀應用軟體的程式碼及進行相關之研究以對 HAZ-Taiwan 作適當的修改。

參考文獻

- [1] Risk Management Solutions, *Earthquake Loss Estimation Method—HAZUS97 Technical Manual*, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., 1997.
- [2] 葉錦勳、羅俊雄，「HAZ-Taiwan 在台北市地震災害境況模擬之應用」，投稿於亞太工程科技學報，已審核通過，預計刊登於創刊號，2002。
- [3] 葉錦勳，「地震災害境況模擬方法與應用軟體整合研究」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-02-009，2002。
- [4] K. W. Campbell, "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, 1981.
- [5] 林美聆、陳銘鴻、沈建志，「全國液化潛能圖之製作及評估方法之研究」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-01-017，2001。
- [6] E. C. M. Su, "Building structural types in Taiwan," *Handouts of the International Training Programs for Seismic Design of Building Structures*, Taipei, 2002.
- [7] National Institute of Building Sciences, *HAZUS99 Technical Manual*, 1999.
- [8] N. Basoz and J. Mander, "Enhancement of the highway transportation lifeline module in HAZUS," 1998.
- [9] 交通部，「公路橋梁耐震設計規範修訂草案之研究」，2001。
- [10] A. K. Chopra and R. K. Goel, "Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems," PEER-19902, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, April 1999.
- [11] P. Blaikie, T. Cannon, I. Davis, and B. Wisner, *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, London: Routledge, 1994.
- [12] F. Bendimerad, "Loss estimation: a powerful tool for risk assessment and mitigation," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 2001, pp. 467-472.
- [13] W. J. Petak and A. A. Atkisson, *Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy: Anticipating the Unexpected*, New York: Springer-Verlag, 1982.
- [14] D. C. Perry, and N. Stubbs, "Evaluation of cost-effectiveness of various retrofit mitigation strategies, impact of new code provisions, and assessment of incentive programs," Paper presented at *INEEL Annual Conference*, Idaho Falls, IO, 1998.
- [15] M. R. Boswell, R. E. Deyle, R. A. Smith, and E. J. Baker, "A quantitative method for estimating probable public costs of hurricanes," *Environmental Management*, 23, 1999, pp. 359-372.



羅俊雄 (Ching-Hsiung Loh) 國立台灣大學土木工程學系教授及國家地震工程研究中心主任，1980 台大土木所博士班畢業。主要興趣研究領域為結構系統識別、訊號處理、可靠度分析、結構主被動控制及地震工程。



葉錦勳 (Chin-Hsun Yeh) 國家地震工程研究中心副研究員，民國 71 年畢業於國立台灣大學土木工程學系，民國 76 年、78 年分別獲得美國伊利諾大學香檳校區土木工程學系的碩士和博士學位，專長為資料處理與震災境況模擬。



陳亮全 (Liang-Chun Chen) 日本早稻田大學工學博士，現職國立台灣大學建築與城鄉研究所副教授、防災國家型科技計畫共同主持人兼體制研究群召集人、行政院中央災害防救會報委員、行政院災害防救專家諮詢委員會委員。專長為災害管理、都市計畫及社區營造。



洪鴻智 (Hung-Chih Hung) 現職為國立台北大學地政學系副教授，專長為環境風險管理、都市財務分析。



簡文郁 (Wen-Yu Jean) 台灣省高雄縣人，民國 50 年生，1996 年國立台灣大學土木所博士班畢業。現為國家地震工程研究中心副研究員，主要興趣研究領域為結構耐震設計及結構可靠度分析，地震工程。



廖文義 (Wen-I Liao) 台灣省南投縣人，民國 57 年生，1997 年國立台灣大學土木所博士班畢業。現為國家地震工程研究中心副研究員，主要興趣研究領域為結構耐震設計、橋梁工程與地震工程。

收稿日期 91 年 4 月 29 日、修訂日期 91 年 6 月 3 日、接受日期 91 年 6 月 18 日
Manuscript received April 29, 2002, revised June 3, 2002, accepted June 18, 2002