

地震災害風險-效益分析於土地使用規劃之應用： 應用 HAZ-Taiwan 系統¹

陳亮全² 洪鴻智³ 詹士樑⁴ 簡長毅⁵

論文投稿日期：92 年 08 月 04 日
第一次修正日期：92 年 10 月 29 日
論文接受日期：92 年 11 月 21 日

摘 要

本文主要目的在提出一套分析地震災害危險度與風險的方法，供規劃者評估地區災害風險現況與不同土地使用方案潛在的風險-效益。文中應用國科會與經濟部合作開發的HAZ-Taiwan系統，以土地使用計畫圖與地震風險機率模型，進行台北市士林區的地震潛勢、危險度與風險分析。從設定之三個地震事件中，發現士林區之西南、西與南部區域為地震危險度與風險較高之區域，三個地震事件平均估計總經濟損失約為1,137億元，年預期平均損失約為0.77億元。另亦估計不同土地使用方案(圖)的地震風險-效益，成果顯示通盤檢討案較原方案，可平均降低損失風險86億元(約降低總暴露價值之4.39%)。透過HAZ-Taiwan，可有效建立地震災害風險圖及風險-效益評估方法，提供規劃者評估土地使用計畫與社區地震風險，以避免不妥適的規劃行為。

關鍵詞：HAZ-Taiwan，土地使用，地震風險，風險-效益分析，都市防災

1. 本文為國科會專題研究計畫(編號：NSC 92-2415-H-305-019-SSS)與內政部建築研究所研究計畫之部分研究成果(編號：MOIS 921013)，對於兩個單位的經費補助特表謝忱，並感謝國家地震工程研究中心簡文郁博士的技術支援，及兩位匿名審查委員的寶貴意見。
2. 國立台灣大學建築與城鄉研究所副教授，E-mail: lcchen@ccms.ntu.edu.tw。
3. 國立台北大學地政學系副教授，E-mail: hung@mail.ntpu.edu.tw。
4. 國立台北大學地政學系副教授，E-mail: slchan@mail.ntpu.edu.tw。
5. 國立台北大學地政學系碩士，E-mail: Changyi1119@yahoo.com.tw。

中華民國都市計劃學會 民國九十二年



AN APPLICATION OF EARTHQUAKE RISK-BENEFIT ANALYSIS IN LAND USE PLANNING: USING HAZ-TAIWAN SYSTEM

Liang-Chun Chen

Graduate Institute of Building and Planning, National Taiwan University

Taipei, Taiwan, 106

Hung-Chih Hung, Shih-Liang Chan, Chang-Yi Chien

Department of Land Economics and Administration, National Taipei University

Taipei, Taiwan, 104

ABSTRACT

Local authorities rarely use risk analysis instruments, the most appropriate level of seismic hazard and risk assessment, to employ as a decision-making support system in their planning and development procedures. The main purpose of this article is to provide an available instrument and methodology for planners to accomplish such analysis. We illustrated an example of seismic risk analysis for Shilin district, using available land-use map, and a probabilistic earthquake hazard model developed by National Science Council's HAZ-Taiwan earthquake loss estimation software. We estimated the total and annual expected loss owing to three earthquakes and the spatial distributions of risk. The analysis presented that the average total predicted loss in Shilin was NT\$ 113.7 billion and the expected annual earthquake loss was NT\$ 77 million per year. The risk was more accumulated in the southwest, south and west regions in Shilin. We also investigated the extent to which future land-use plan growth would change this risk. It showed that the planned growth reduce of 1.18% would cause a decreasing in risk to NT\$ 8.6 billion. This paper suggests the ways in which to perform the earthquake hazard and risk evaluations. It is important for planners to evaluate whether their planning is appropriate.

Keywords: Earthquake risk, HAZ-Taiwan, Land use, Risk-benefit analysis, Urban disaster prevention

一、前言

傳統以工程手段為主的防救災策略，在日本阪神與 921 地震的災難性摧毀中，已有許多檢討的文獻(大震災口地方自治研究会，1996；洪鴻智，2002a)。但從非工程災害防救的角度，



應用土地使用規劃手段於天然災害損失降低的議題，在一般防救災研究領域，並未受到應有的重視(何明錦、洪鴻智，2002)。

應用土地使用計劃推動地震防減災，主要困難在於缺乏評估災害風險、災感度(vulnerability)與危險潛勢⁶的適當方法與工具。導致土地使用規劃成果常潛藏不可知的地震風險，而無法依風險評估(risk assessment)成果，配合地方風險特徵與需求，建立風險導向(risk-based)的土地使用規劃模式，甚至亦無法提出適宜的防減災策略(Olshansky and Wu, 2001; Nelson and French, 2002)。此困境造成許多實務上的地震防災規劃過程，多只能從圖面作業，提出如庇護所、避難路徑、防災避難圈劃設等供給導向的「空間系統配置」規劃(李威儀等，1997；洪鴻智、詹士樑，2001；洪鴻智等，2001)。其他如都市更新選址、新市鎮開發、土地使用管制、都市計畫通盤檢討等，皆無法契合地震風險特性，進行適切的土地使用規劃(何明錦、洪鴻智，2002)。

地震災害圖(seismic hazard map)或風險圖(risk map)，除可提供土地使用或防減災規劃過程的重要資訊外(Mader, 1997)，尚可提供不同土地使用或都市發展決策可能產生的地震風險衝擊訊息(Olshansky and Wu, 2001；陳亮全等，2001)，而可作為土地使用規劃、管制、通盤檢討或審議的決策支援(Shinozuka, 1996)。地震風險的決定，除地理空間實質的災害潛勢外，尚決定在暴露於地震潛勢區內的人口分布、建物開發強度、設施等社經特性(Burby and Dalton, 1994)。故土地使用計畫的擬定，除供給面外，尚需從需求與整合性角度，分析不同土地使用規劃的潛在風險，以更審慎的程序擬定都市發展政策。

本文主要目的在提供一套地震風險—效益分析(risk-benefit analysis)法，作為土地使用規劃之地震風險分析與策略評估參考。文中將應用 HAZ-Taiwan 系統，以台北市士林區為例，評估其地震危險潛勢、災感度與風險分布，並透過風險—效益分析估計不同土地使用方案轉變，潛藏的地震風險—效益變動，以助於評估不同土地使用計劃之地震風險內涵。以下第二節說明地震風險分析與土地使用計劃之關係；第三節說明風險—效益分析方法的建立過程；第四節說明 HAZ-Taiwan 的組成與功能；第五節則以士林為例，模擬其土地使用現況之地震危險潛勢與風險分布；第六節則以士林現有都市計畫與通盤檢討案的土地使用轉變為例，分析地震風險—效益變動；最後一節為結論與討論。

二、地震風險分析與土地使用計劃

6. 本文所稱「地震風險分析」指特定地區潛在地震損害與損失分布的估計與分析，包含不同地震規模與震源，可能產生之損失(或損害)程度與機率分布之估計。「災感度」指從受體的角度，在特定的地震事件下，特定地理區域內，曝露在地震影響範圍內的人口、建物或設施的潛在損失或傷害程度；「地震潛勢或危險度」指特定地區遭受地震侵襲的可能強度(或規模)與機率分配(參見 Olshansky and Wu, 2001)。



土地使用計劃是多向度與多目標的決策過程，目的不但在追求一個安全的環境，亦須在滿足地方社會經濟條件下進行規劃。美國在 1971 年舊金山大地震後，認為土地使用計劃至少要扮演：(1)災害資訊提供者；(2)有效應用災害風險資訊者；(3)建築安全設計標準提供者。1990 年後則擴展至：(1)應用地震災害潛勢特性，提出開發程序與管制標準；(2)鼓勵提出政策誘因，使開發者或住戶願意執行防減災措施；(3)對災害潛勢較高地區，實施更嚴格的土地使用管制；(4)對公共設施與維生系統實施較嚴格的管制與安全措施(Mader, 1997)。

美國從 1970 至 1990 年代的土地使用計劃，已從消極的資訊與建築安全標準提供者，轉為更緊密結合地震災害風險特質與災害防救需求的災害風險管理模式(Kunreuther, 2000; Olshansky, 2001; 何明錦、洪鴻智, 2002)。依 Meulbroek (2002) 提出的統合性風險管理(integrated risk management)觀點，認為災害風險管理，已脫離風險控制模式，且是否精確預測災害風險與損失亦非關鍵，重要的是如何釐清規劃標的之風險特性，彈性採取合適的策略，方是有效的災害防救模式。

從上述土地使用計劃在地震防救災扮演的功能、發展趨勢及風險管理需求，可知從事土地使用規劃，除需顧及土地開發的效益外，尚需瞭解土地使用規劃的災害風險特徵與分布，其中地震災害與風險圖製作與風險分析方法的建立，為重要的基礎(Olshansky, 1997)。其成果不但可提供規劃區之風險資訊，亦可協助規劃者或地方政府評估土地使用計畫(或圖)的風險-效益，以提昇規劃品質與降低土地使用規劃潛藏的災害風險(Burby et al., 1998; Olshansky, 2001)。

地震損害或風險評估工具的發展，目前較常用的系統，如日本東京都地震災害評估系統，東京都廳曾引為評估地震建物倒塌風險、火災風險、人體風險與避難風險之風險評估工具(Uitto, 1998; 陳建忠、詹士樑, 1999)。義大利國家研究委員會(National Council of Research)亦曾與國家地震防範中心(National Group for Defense against Earthquake)合作開發地震災害潛勢評估系統，作為劃設地震災害潛勢區的基礎(Meletti et al., 2000)。美國開發之 HAZUS 系統，其主要應用範疇，除地震之災害潛勢與風險分析外，亦應用於土地使用措施的評估與開發審議的決策支援(Whitman et al., 1997)。

歸納各國地震災害風險評估工具的建立過程，在土地使用規劃過程中，主要應用向度為：(1)地震風險與災感度分析；(2)地震減災措施的風險-效益評估；(3)提供土地使用分區管制、規劃、建築管制標準研判之資訊；(4)提供災害防救、應變與重建計畫擬定之基礎。其應用經驗，例如美國洛杉磯地區(Kircher et al., 1997; Olshansky and Wu, 2001)，舊金山、東京皆有應用風險分析工具，進行比較性地震災害風險分析與政策評估的經驗(Bendimerrad, 2001)。然應用風險評估工具，進行土地使用規劃風險-效益分析的文獻仍非常稀少，而建立此方面應用的方法論，乃風險導向土地使用規劃推動之基礎。

三、風險-效益分析



地震災害風險的組成，主要有兩部分：(1)災害影響(損害或損失)的可能範圍與程度；(2)不同災害影響程度的機率分配。防減災或土地使用措施執行的目的，即在設法降低災害影響的程度或機率(或兩者同時降低)，而估計此類措施可能降低之風險的效益，可稱為風險—效益分析(Freeman, 1993)。

風險—效益分析方法的選擇，可分成兩個向度：(1)個體效用分析；(2)公共政策總體評估。第一種分析向度乃應用效用函數量測防減災措施的效益，藉之評估風險改善的個體價值，再透過加總方式估計整體社會之福利增進(Smith and Desvousges, 1987; Freeman, 1993; 洪鴻智, 1998)。另一種分析向度，則較偏重總體與計畫衝擊，對效益採較狹義解，視效益為資本財的投資或政策的正面衝擊(可視為一種影子價格(shadow price))，直接建立風險(或效益)模型估計經濟行為、災害與改善措施的風險與效益(Wilson and Crouch, 2001; 陳明健, 2003)。

風險—效益分析係在成本—效益分析中，納入風險與不確定性(陳明健, 2003)。風險—效益分析於土地使用規劃應用，並非單純的經濟效益估計，需同時檢視規劃區的風險特性，及不同土地使用模式的風險變動衝擊，故較適於使用上述第二種分析方法。此種分析方法的應用，偏重在地震風險分布與土地使用關係之分析(如 Burby et al., 1998; Olshansky, 1997; 2001)，惟近來亦擴展至地震風險(成本)估計與風險分攤策略評估的領域(Burby et al., 1991; Olshansky and Wu, 2001)。

地震災害損失可視為土地使用模式與地震災害潛勢的函數，而估計地震損失可應用損失(或損害)函數法(Freeman, 1993)，建立損失函數：

$$L = f(E, B_i, D_j, S) \dots\dots\dots(1)$$

式(1) L ：地震損失(或損害)，其為地震災害潛勢 E (決定在地球科學條件、地震規模(與震源區位)、地震發生機率)，建物與設施結構特性 B_i (i 為結構型態， $i = 1, 2, \dots, m$)，建物或土地使用型態 D_j (j 為使用種類， $j = 1, 2, \dots, n$)，及其他社會經濟與設施特性 S (如人口、重要設施特性等)的函數。式(1)估計的地震損失 L ，是特定機率分配之地震事件下的預期損失，故可視為「地震風險」。然損失函數的估計為困難且複雜的課題，需結合地球科學、地震工程、統計與經濟模式，故需引用綜合性地震損失估計模組進行估計。

因無法預知地震發生的時間、區位與規模， E 的估計需在假設的地震情境下進行估計，且需假設 L 與地震規模成正比。另 B 與 L 的關係，乃建立在震度與建物損壞易損曲線(fragility curve)之關係上。易損曲線指在特定震度下，建物各種損壞程度的累積機率分配⁷。 D 影響 L 的程度，乃決定在土地開發強度(如容積率)及建物重置成本，開發程度愈高或重置成本愈高的土地使用，地震損失(或風險)愈大。

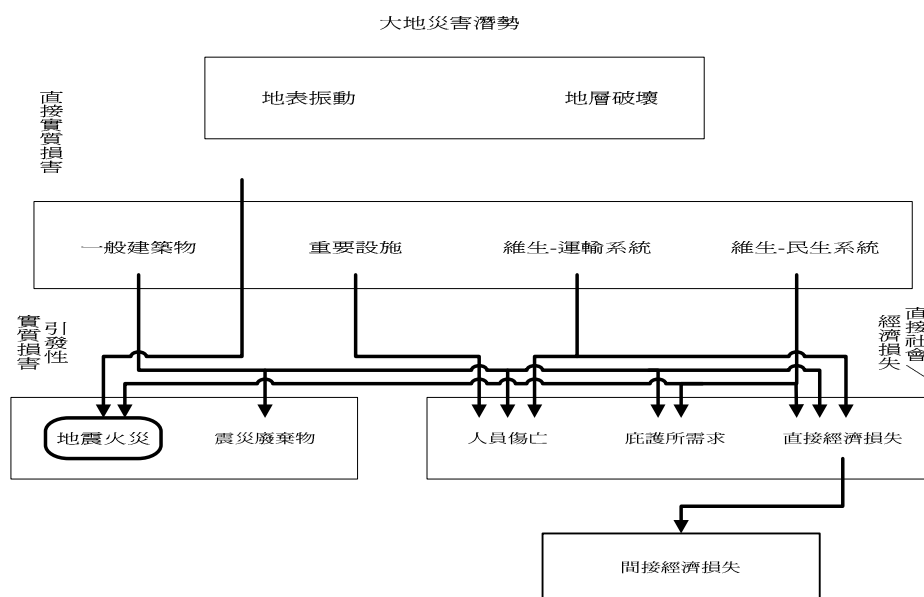
7 HAZ-Taiwan將建物損害程度分成：「無」、「輕度」、「中度」、「嚴重」與「完全」損害五個等級，每一個損害等級皆由一個lognormal易損累積機率分配所組成。然各種損害程度門檻值的界定，主要由地球科學災害參數(如PGA值)及建物損害的lognormal隨機分配參數共同決定，詳細的估計與界定方法可參見National Institute of Building Science (1999), Ch.5。



四、HAZ-Taiwan 系統

HAZ-Taiwan 係 1998 年由國科會與經濟部技術處，合作引進美國 HAZUS 系統，並委託 Risk Management Solutions (RMS) 公司開發而成(羅俊雄等，2002)。由於地震造成的損害與損失層面非常廣泛，包含物理性的建物與設施損害、經濟損失、人員傷亡與社會衝擊。為因應此等地震損害估計需求，HAZ-Taiwan 的估計模組亦設計成多元評估組合，包含圖一的評估模組架構。

圖一顯示，HAZ-Taiwan 係藉由地表振動與大地破壞的模擬，將地震損害分成三類：(1)直接實質損害：包含建物、重要設施、維生管線-運輸系統損壞程度與機率之估計；(2)引發性實質損害：包含地震引發之洪水、火災等之估計；(3)直接與間接社會經濟損害：包括人員傷亡、庇護所需求，及直接與間接經濟損失估計(National Institute of Building Science, 1999；何明錦、洪鴻智，2002)。因 HAZ-Taiwan 具有 HAZUS 的優點，並結合地理資訊系統及台灣本土開發的地震潛勢估計模組，可製作不同種類的地震災害與風險圖，而適於作為都會型機率模式地震災害評估。



圖一 HAZ-Taiwan 系統模組架構

資料來源：洪鴻智等，2003

HAZ-Taiwan 建置與應用之相關文獻與經驗，偏重在三個層面：(1)資料與參數庫建立；(2)模組與地震損失估計方法引介；(3)地震損害損失估計與都市規劃應用(陳亮全等，2001；何明錦、洪鴻智，2002；羅俊雄等，2002；洪鴻智等，2003)。HAZ-Taiwan 的測試，主由國科會與

國家地震工程研究中心執行，雖發現 HAZ-Taiwan 會低估地震規模大之地震危險度，而高估規模小之地震危險度，然已將台北市的地震特性與特有的「盆地效應」納入 HAZ-Taiwan 修正，對於估計不同地區之相對地震危險度，有良好的估計成效(羅俊雄等，2002)。

五、士林區之地震危險與風險分析

本節之境況模擬將以台北市士林區為例，以下針對：(1)資料內容與取得方式；(2)地震事件設定；(3)地震危險與風險境況模擬成果分別說明之。

(一)資料內容與取得

HAZ-Taiwan 境況模擬之資料輸入，需依使用模組需求，輸入相關資料與參數。模擬之模組與資料需求包含：(1)災害潛勢估計模組群：所需資料包含斷層圖、土壤圖、地下水深圖等；(2)直接實質損壞模組群：所需資料包含建物與相關設施之使用型態、結構、區位、數量；(3)直接社會經濟損失模組群：所需資料包含建物結構體、非結構體重置成本、人口統計等。

上述三個模組群所需的主要資料來源為：(1)災害潛勢模組群：國家地震工程研究中心；(2)直接實質損壞模組群：防災國家型科技計畫辦公室(現為國家災害防救科技中心)、國家地震工程研究中心與土地使用調查；(3)直接社會經濟損失模組群：建物重置成本資料主取自營造廠、房屋仲介公司與建築師的訪談及工商普查，人口統計資料則由台北市政府與防災國家型科技計畫辦公室提供。

(二)地震事件設定

地震危險度或潛勢模擬方法，有兩種主要型態：(1)機率模式：依特定地區在單位時間內，發生不同地震規模的期望累積機率分配進行模擬；(2)單一地震事件模式：直接設定地震位置、震源深度與規模進行模擬(Olshansky and Wu, 2001)。

HAZ-Taiwan 的地震境況模擬方法，採單一地震事件模式，故須有三項假設：(1)對單一斷層或地震分區，只選擇單一震央、深度與規模。實際上，斷層(或地震分區)上每一點皆可能發生地震，但限於 HAZ-Taiwan 特性，只選擇斷層(或地震分區)的中心點為震央代表之；(2)HAZ-Taiwan 的資料格式係以里為基本單位，故須假設同里之土壤、地質條件等為一致；(3)對於地震事件的規模與深度，採較悲觀角度，設定為淺層且以該斷層(或地震分區)可能發生最大規模的地震事件進行模擬。另因每一斷層或震源發生特定規模地震的再現機率，無法從 HAZ-Taiwan 估計，須另利用機率模式，以蒙地卡羅(Monte Carlo)分析，模擬每 1,000 年發生的機率(簡文郁，1996)。最後可將欲模擬的三個地震事件內容⁸，列於表一。

8. 三個地震事件的選擇與設定，係參考國家地震工程研究中心建議、地震歷史事件的歸納與台北市地區災害防救計畫。

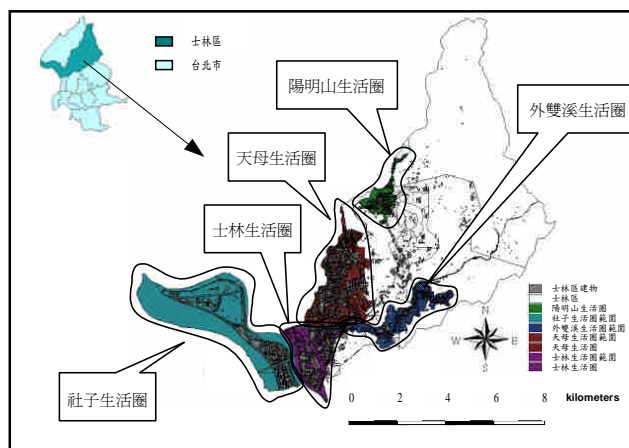


表一 三個地震震源事件

地震事件	規模	斷層型態	震央位置(二度分帶)	震源深度	每 1000 年發生機率
宜蘭外海	7.61	—	332899, 2694039	10 km	1.14
新城斷層	7.13	逆衝斷層	269000, 2742000	10 km	0.42
獅潭斷層	7.13	逆衝斷層	245917, 2721782	10 km	0.42

(三) 士林區地震危險與風險分析

士林區位於台北市之北部與東北部區域，人口約 292,096 人，人口密度約 47 人/公頃，皆佔台北市第二位。士林區之總面積約 6,237 公頃，土地使用型態非常多元，同時包含都市發展(約佔 23%)、非都市發展(53%)與陽明山國家公園(24%)，而適於作為地震災害境況模擬地區。士林發展較密集之都市發展用地，住宅用地最多(佔 13.7%)，其次為公共設施用地(佔 12.5%)，而開發強度較高之工業與商業用地，分別只佔 0.4%與 1.2%。從圖二士林土地使用分區與建物套疊圖，可發現士林開發強度較高之地區集中在西南、西與南部區域，亦即為天母、士林與社子生活圈，隱含這些地區可能是震災受體較集中的區域。



圖二 臺北市士林區土地使用分區與建物分布

資料來源：行政院內政部營建署全臺區域計畫

1. 地震災害潛勢分析

三個地震事件模擬地震災害潛勢，以新城斷層事件最為嚴重，PGA(peak ground acceleration) 值介於 0.10 g 與 0.32 g 間⁹，其次為宜蘭外海與獅潭斷層事件。產生 PGA 差異的原因，除因土

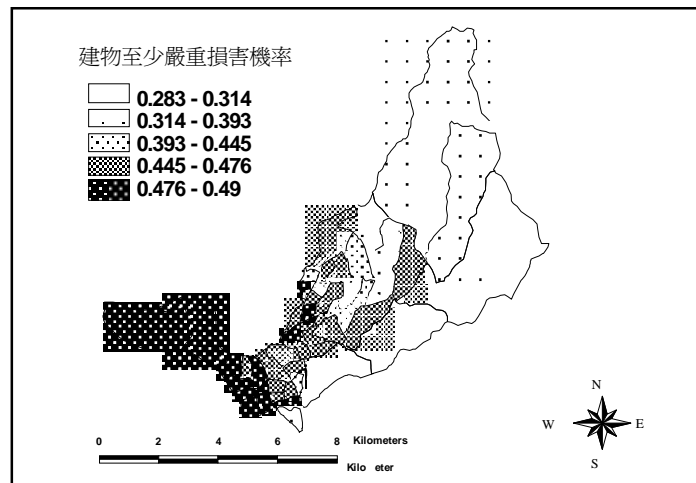
9. PGA (g)值可轉成震度衡量單位，亦即 1 gal = 1 cm/sec²，1g = 980 gal，其中gal表地動加速度，PGA 值愈高，隱含地動加速度愈大。另震度可以gal值為分級標準，分級內容可參考中央氣象局全球資訊網 (<http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm>)。

壤、地質等條件之差異外，主因震源的區位及地震規模。此三個事件發現地震災害潛勢，以西南、南與西部地區之災害潛勢度較高，隱含此等地區可能具較高之地震災害危險度，此等地區亦是士林都市發展較密集之區域。

2. 直接實質損害

(1) 建物損害估計

三個地震事件模擬之建物損害狀況，宜蘭外海與新城斷層事件差異不大，獅潭斷層事件則較為輕微。從表二的歸納，建物發生嚴重損壞以上之機率，新城斷層與宜蘭外海事件機率合計分別為 43.4% 與 42.4%。如以損害較大之新城斷層事件為例，從圖三之地震危險圖，可發現建物發生至少嚴重損害之機率較高地區偏重在西南部、中部與西部地區，約在社子、天母一帶，恰為估計之 PGA 較大及都市發展較密集地區。



圖三 新城斷層事件建物至少嚴重損害機率危險圖

表二 建物損害機率估計

地震事件	樓地板面積 (1000m ²)	各種建物使用別平均損害機率(%)				
		無損害	輕度損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
宜蘭外海	8,339	49.73	1.73	5.81	14.48	27.96
新城斷層	8,339	49.45	1.78	5.30	12.90	30.53
獅潭斷層	8,339	51.66	2.74	9.24	19.31	16.99

(2) 重要設施與交通-維生系統損害估計

重要設施之地震損害估計，包含醫院病床數、消防設施、飲用水管線、通訊、橋樑、電力

供應設備的功能維持率¹⁰，從表三可歸納三個地震事件發生當天之估計功能維持率，多可在50%以上。這些設施功能維持率的估計，在防災避難與應變規劃擬定過程，不但可提供此等設施與系統之功能維持率資訊，且可配合當地(或防災避難圈)防救災的需求，做為相關規劃的基礎。

表三 重要設施與交通、維生系統地震當天估計之功能維持率

地震事件	醫院病床		消防隊		學校		飲用水管線		公路橋樑		通訊設施		電力供應設施	
	數量	維持率	數量	維持率	數量	維持率	數量	維持率	數量	維持率	數量	維持率	數量	維持率
宜蘭外海	1168 個	51%	4 個	60%	39 個	63%	61km	74%	35 個	74%	8 個	74%	1 個	73%
新城斷層	1168 個	49%	4 個	58%	39 個	61%	61km	64%	35 個	74%	8 個	74%	1 個	72%
獅潭斷層	1168 個	52%	4 個	69%	39 個	74%	61km	95%	35 個	80%	8 個	75%	1 個	73%

(3)建物直接經濟損失估計

HAZ-Taiwan 估計之建物直接經濟損失內容包括：a.資產損失：建物結構體、非結構體、內部財產與庫存損失；b.收入損失：因建物功能中斷造成的營業與租金收入損失。

表四列出三個地震事件，模擬之建物直接經濟總損失與年預期損失，估計年預期損失最大者為宜蘭外海事件(約為 1.4 億元)，估計總損失約為 1,227 億元。年預期損失較高之原因除在於建物損害機率較高外，宜蘭外海事件之年發生機率較高亦為主因。從圖四亦可發現宜蘭外海事件，年預期損失風險較高的里為三玉、蘭雅、蘭興等里(集中在天母生活圈)。表四最右欄顯示建物損失佔建物總重置成本(即為「暴露建物總值」)之比率(或稱損失-成本比)，可藉之觀測評估地區相對的災害嚴重程度。從圖五可發現各里之年預期損失-成本比風險分布，以西南區域(約為社子與士林生活圈)較為嚴重。

表四 建物直接經濟損失估計

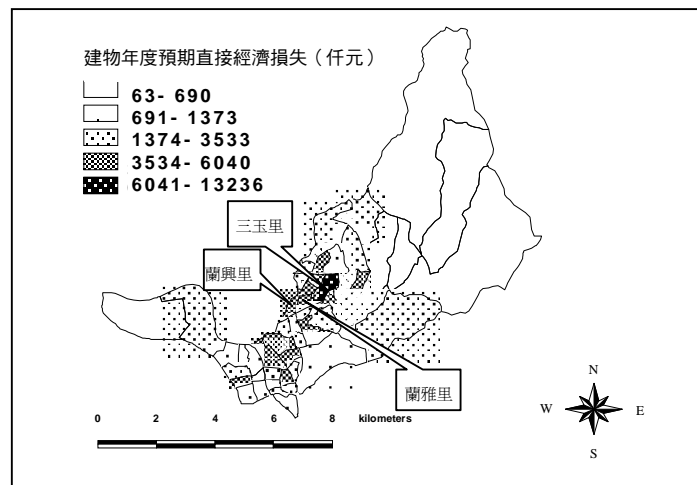
地震事件	估計總損失(億元)	年發生機率	年預期損失(億元)	年預期損失-成本比
宜蘭外海	1,227	0.00114	1.40	0.029%
新城斷層	1,281	0.00042	0.54	0.011%
獅潭斷層	902	0.00042	0.38	0.001%

3. 人員傷亡與庇護所需求估計

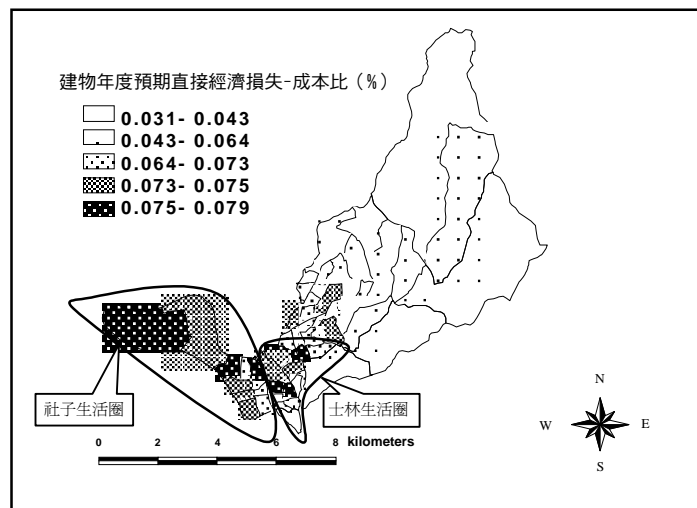
(1)人員傷亡估計

10. 「功能維持率」乃指設施在地震發生後，可維持原有功能的百分比。例如病床數的功能維持率，指地震發生後，仍可維持原有功能的病床數比率。

HAZ-Taiwan 對於地震人員傷亡估計，可依不同時段，估計不同傷亡程度¹¹的人員數。然因日間人口資料的缺乏，故模擬之人員傷亡只考慮凌晨二時的情境。表五顯示三個地震事件之四級傷亡人員估計成果，仍以新城事件較為嚴重。三個地震事件人員傷亡較嚴重的分佈地區為蘭雅、百齡里等，主要原因在於此等地區之暴露人口較多，當然亦顯示此等地區之災時醫療支援網絡建立的重要性。



圖四 宜蘭外海事件估計建物直接經濟損失風險分布



圖五 宜蘭外海事件估計建物直接經濟損失－成本比風險分布

11 HAZ-Taiwan估計之人員傷亡程度可分為四級：(1)第一級：輕微受傷：僅需要基本醫療不需住院；(2)第二級：較嚴重之傷害：需要較多醫療程序且需住院，但無生命危險；(3)第三級：嚴重傷害：若無適當且迅速的醫療處理，會有生命威脅；(4)第四級：當場死亡。

表五 傷亡人員估計

單位：人

地震事件	宜蘭外海			新城斷層			獅潭斷層		
	在家人口	工作人口	總計	在家人口	工作人口	總計	在家人口	工作人口	總計
一級傷害	13,375	63	13,438	14,076	69	14,145	10,098	38	10,136
二級傷害	2,650	12	2,663	2,795	14	2,808	1,977	7	1,985
三級傷害	402	2	404	424	2	426	298	1	299
四級傷害	402	2	404	424	2	426	298	1	299
總計	16,829	79	16,908	17,719	87	17,805	12,671	47	12,719

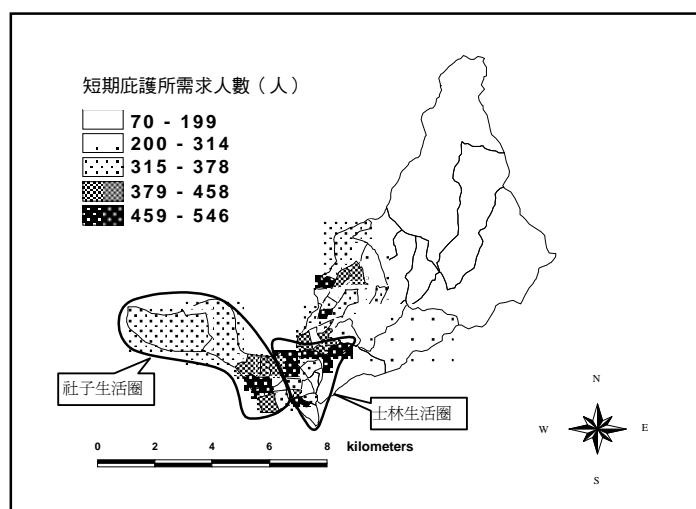
(2) 庇護所需求估計

HAZ-Taiwan 之庇護所需求估計內容包括：無家可歸家戶數與短期庇護所需求人數。從表六，依然顯示新城事件較為嚴重，其中無家可歸之戶數，約為 37,690 戶。其中短期庇護所需求，指在無家可歸家戶數中，扣除可自行找尋或從親友處獲得暫住處者所外，需相關單位提供短期庇護所之人數。三個地震事件之庇護所需求人數，約在 12,000 人–16,787 人間，約佔士林總人口之 4.2% 至 5.7%。從圖六可發現新城事件，短期庇護所需求人數之分布，以社子、士林生活圈需求較集中，隱含此等地區之庇護所設置需求較高或較需提供支援。

表六 庇護所需求估計

地震事件	無家可歸家戶數	短期庇護所需求人數
宜蘭外海	35,977	16,032(5.4%) ^a
新城斷層	37,690	16,787(5.7%)
獅潭斷層	27,891	12,447(4.2%)

a：佔總人口比率



圖六 新城斷層事件短期庇護所需求人數分布

從士林土地使用現況之地震災害危險度與風險模擬成果，發現士林都市發展較密集地區，亦為災害潛勢與風險較高之地區。此成果可提供規劃者，進行土地使用規劃或檢討的參考，亦可提供災害防救規劃有用之資訊。然在土地使用規劃過程，除需瞭解空間之地震風險資訊外，尚需有適當方法與工具，協助研判不同土地使用方案是否會創造更多的地震風險，或不同土地使用方案的風險差異。為處理此課題，以下即以 HAZ-Taiwan 的輸出為依據，進行土地使用的地震風險—效益變動分析。

六、土地使用變更的地震風險—效益變動分析

以下將分別估計士林現況、現有都市計畫(以下簡稱原方案)與通盤檢討(最後一次修正為 2002 年 9 月)之不同土地使用方案間，因土地使用轉變造成之地震損失風險—效益變動。惟為簡化分析內容，以下只考慮建物之直接經濟損失風險與效益。

(一) 土地使用條件

應用 HAZ-Taiwan 於土地使用計劃評估較困難的問題，在於需將不同土地使用方案，轉換成各種建物使用別之樓地板面積方能進行估計。故以下考慮之土地使用方案：現況、原方案與通盤檢討案(三個方案的內容與差異列於表七)，需轉換成樓地板面積。其中「原方案」：指將各種土地使用之面積，依「臺北市土地使用分區管制規則」所訂標準，假設在完全開發下，分別估計各里，各種土地使用別的建物樓地板面積。「通盤檢討案」：亦假設在完全開發下，各種土地使用別的建物樓地板面積。表七顯示通盤檢討案與原方案的差異(變動 1)，主增加商業與教育使用，而降低住宅、工業與機關之樓地板面積，總計降低約 228,000 m²。通盤檢討案較之現況(變動 2)，則所有土地使用建物樓地板面積皆會增加，總計增加約 10,852,000m²。

表七 不同土地使用之樓地板面積變動比較 單位：1000m²

	農業	住宅	商業	教育	工業	機關	總計
現況	323	5,992	513	575	436	500	8,339
原方案	323	12,021	2,824	575	835	2,840	19,418
通盤檢討	323	11,648	3,090	778	662	2,689	19,191
變動 1 ^a	0	-373	266	203	-173	-151	-228
變動 2 ^b	0	5,656	2,577	203	226	2,189	10,852

註：a.變動 1：通盤檢討案樓地板面積—原方案樓地板面積；b.變動 2：通盤檢討案樓地板面積—現況樓地板面積

士林的土地使用類別編訂，不僅表七之六種，然為簡化分析及配合 HAZ-Taiwan 資料格式，簡併為六類。另農業與教育使用之樓地板面積，難透過土地使用分區管制規則估計其樓地板面積，故在原方案中沿用現況資料。



(二)地震風險-效益乘數估計

評估土地使用規劃方案，可透過不同土地使用模式變動之地震損失風險，及各種土地使用轉變可能創造之效益進行比較。而土地使用變動的地震風險-效益，可引用建物使用乘數 (building-use multiplier；以下簡稱 BUM)，衡量土地使用轉變隱含的風險-效益變動。地震風險的 BUM(簡稱 RBUM)可藉由下列迴歸模型估計：

$$\text{LnRISK} = a_0 + a_1RE + a_2CO + a_3IN + a_4AG + a_5GO + a_6ED + \varepsilon_1 \dots \dots \dots (2)$$

式(2)之 LnRISK 為應變數，代表地震(損失)風險，乃以估計的地震總損失(元)對數值¹²(包含建物結構體與非結構體之總損失)代之，其為 HAZ-Taiwan 輸出值；解釋變數之 RE：住宅使用，CO：商業使用，IN：工業使用；AG：農業使用；GO：機關使用，與 ED：教育使用之樓地板面積(m²)；a₀為截距項；a_j(j=1, 2, ..., 6)為迴歸係數，可視為地震風險的 RBUM(增加一單位建物樓地板面積增加的邊際損失風險)，ε₁為隨機誤差項。土地使用效益的 BUM(簡稱 BBUM)，亦可利用下式估計：

$$\text{LnBENE} = b_0 + b_1RE + b_2CO + b_3IN + b_4AG + b_5GO + b_6ED + \varepsilon_2 \dots \dots \dots (3)$$

式(3)之 LnBENE 為應變數，為建物效益，乃建物暴露價值¹³(元)的對數值；b₀為截距項，b_j(j=1, 2, ..., 6)為迴歸係數可視為 BBUM，ε₂為隨機誤差項。建物效益的估計可視為建物暴露總值的估計，換另一個角度而言，即為土地開發的災感度估計。

表八為應用 SAS 軟體，以迴歸模型估計之 RBUM 與 BBUM。可發現三個地震事件皆是住宅與工業使用的 RBUM 最高，代表增加此兩類建物使用之邊際地震損失風險較高；RBUM 值較小者為商業與農業使用。以宜蘭外海事件為例，透過 RBUM 的估計值，增加一 m²的住宅樓地板，平均可能增加 17,845 元的潛在損失風險。在獅潭事件中，則以機關之 RBUM 較低。綜合三個地震事件，商業使用的邊際損失風險較低的主因，可能在於士林住商混合使用情況嚴重，且 HAZ-Taiwan 的資料係以里為基本單位，皆可能造成商業使用的邊際損失風險難以突顯。另在 BBUM 估計，亦以住宅與工業使用之 BBUM 較大，隱含增加此兩類土地使用之邊際效益(暴露價值或災感度)較高，而增加機關使用之 BBUM 最低。

表九乃應用 RBUM 與 BBUM，估計表七不同土地使用樓地板面積變動產生的地震損失風險-效益衝擊。表中顯示通盤檢討案較之原方案，因開發強度的降低，會降低損失風險，三個地震事件降低的損失風險約在 65 - 98 億元間，約可降低建物總暴露價值 3.31% - 4.99%間。另通盤檢討案較之現況，隱含如依通盤檢討的土地使用強度完全開發，將增加約 893 - 1,250.23 億元間之損失風險。

12. 此處所謂之地震總損失，是在特定地震發生機率下的總損失，故只要乘上發生機率，即為地震風險或地震損失風險(預期損失)，以下為突顯所估計的損失係在特定機率下的估計損失，而稱為「損失風險」或簡稱「風險」。

13. 暴露總值係以建物重建價格估計，乃以不動產估價之「原價法」估計之不動產價值(林英彥，1988)，而不考慮土地價值與預期投資價值。



表八 RBUM 與 BBUM 之估計

變數/模型	宜蘭外海(<i>t</i> 值)	新層斷層(<i>t</i> 值)	獅潭斷層(<i>t</i> 值)	效益(<i>t</i> 值)
截距項	19.35 (103.39)	19.38 (101.72)	19.06 (99.75)	20.32 (120.05)
RE	0.000011 (8.58)	0.000011 (8.44)	0.000011 (8.56)	0.000010 (9.28)
<i>CO</i>	0.0000012 (0.24)	0.0000014 (0.28)	0.0000014 (0.29)	0.0000022 (0.53)
<i>IN</i>	0.000013 (2.84)	0.000013 (2.81)	0.000012 (2.63)	0.000013 (3.14)
<i>AG</i>	0.0000017 (0.23)	0.0000015 (0.19)	0.0000030 (0.40)	0.0000079 (1.22)
<i>GO</i>	0.0000025 (0.77)	0.0000022 (0.68)	0.0000010 (0.30)	0.0000052 (0.18)
<i>ED</i>	0.0000019 (0.31)	0.0000025 (0.42)	0.0000037 (0.60)	0.0000077 (1.48)
R^2	0.70	0.70	0.70	0.75
Adj R^2	0.66	0.66	0.66	0.71
<i>F</i> 值	16.97	16.58	16.55	21.21
樣本數	50 里	50 里	50 里	50 里

表九 不同土地使用方案平均地震風險－效益比較

單位：億元

地震事件	損失風險/效益	農業	住宅	商業	教育	工業	機關	總計
宜蘭外海	變動 1 增加之損失	0	-66.56	5.18	6.26	-36.48	-6.12	-97.73
	變動 2 增加之損失	0	1,009.30	50.17	6.26	47.66	88.78	1,202.16
新城斷層	變動 1 增加之損失	0	-69.24	6.28	8.56	-37.95	-5.61	-97.95
	變動 2 增加之損失	0	1,049.94	60.88	8.56	49.58	81.27	1,250.23
獅潭斷層	變動 1 增加之損失	0	-51.27	4.65	9.39	-25.94	-1.89	-65.06
	變動 2 增加之損失	0	777.43	45.08	9.39	33.89	27.35	893.14
變動 1 增加之效益		0	-157.58	24.72	66.04	-95.01	-3.32	-165.15
變動 2 增加之效益		0	2,389.51	239.52	66.04	124.12	48.09	2,867.27

綜合表九與表十，可從另一角度觀察通盤檢討案對降低損失風險的效果。表十呈現通盤檢討案在三個地震事件，較原方案雖可平均降低約 86 億元的損失風險(約降低建物總暴露價值之 4.4%)，但總損失風險-效益比率皆為 38%，年預期損失風險-效益比皆為 0.016%，此對於降低地震風險佔整體建物之災感度比率無具體幫助。

表十 不同土地使用方案年預期損失之比較

單位：億元

	平均總損失	各里平均	標準誤	平均年預期損失風險	效益	年損失風險/效益比
現況	759.96	15.20	11.13	0.87	2,112.36	0.041%
原方案	1,961.10	39.22	14.55	0.82	5,144.78	0.016%
通盤檢討	1,875.10	37.50	11.21	0.79	4,979.63	0.016%



士林通盤檢討案共有 18 個里的土地使用產生轉變，利用 RBUM，可估計 18 個里於通盤檢討後之總損失與年預期損失風險變動，其中年預期損失風險變動的估計，為三個地震平均損失乘上發生機率的加權平均。表十一顯示，多數里的風險皆會降低，主因住宅使用樓地板面積的降低。地震損失風險提昇者為明勝、福林與蘭興里，其中蘭興里位於地震災害危險度較高之地區。表中雖顯示多數里之損失風險會降低，但許多住宅變商業使用之地區，皆集中在士林西南與南部地區，此等地區為災害潛勢較高之地區，故仍需審慎評估其潛在地震風險。

表十一 通盤檢討案與原方案各里各種使用樓地板面積變動 單位： m^2 /億元

村里	住宅	商業	工業	農業	機關	教育	損失變動	年預期損失風險變動 ^a
溪山里	1007	0	-3358	0	0	0	-0.48	-0.00048
天壽里	-64566	0	0	0	0	64566	-8.23	-0.0081
天福里	-135362	0	0	0	0	135362	-17.25	-0.017
蘭興里	0	-7979	0	0	10233	0	0.15	0.00015
翠山里	-35827	-54292	-7781	0	-148052	0	-13.04	-0.013
德行里	-9142	70549	-81810	0	0	0	-15.93	-0.016
福林里	0	1602	0	0	26600	0	0.83	0.00082
舊佳里	-19422	19422	0	0	0	0	-2.86	-0.0028
永倫里	0	0	630	0	0	0	0.12	0.00012
社子里	0	-3996	0	0	-25420	0	-0.85	-0.00084
福德里	-4544	72089	-80651	0	0	3314	-14.70	-0.015
仁勇里	-10151	16824	0	0	0	0	-1.36	-0.0013
義信里	-10515	20824	0	0	0	0	-1.34	-0.0013
社新里	-46168	46168	0	0	0	0	-6.79	-0.0067
葫蘆里	-25677	25677	0	0	0	0	-3.77	-0.0037
承德里	-43560	97928	0	0	0	0	-5.31	-0.0053
富光里	0	0	0	0	-14381	0	-0.43	-0.00043
明勝里	33649	-33649	0	0	0	0	4.95	0.0049

綜合三個方案的地震損失風險-效益分析，發現如依都市計畫完全開發，將大幅提昇地震風險。通盤檢討案因土地使用強度的降低，呈現較原方案低的損失風險，然在考慮土地使用變動或調整土地使用強度，仍可進一步考慮地震災害潛勢與危險度分布，將更能確保減災的效應及避免不適宜的土地使用規劃。

七、結論與討論

土地使用或防災規劃過程中，地方政府或規劃者甚少應用災害風險分析工具輔助防災規劃，而因較少從防減災角度，建立風險導向的土地使用規劃決策模式。本文以士林區為例，利



用 HAZ-Taiwan 之地震危險度機率模式，模擬士林的潛在地震災感度、危險度、損失風險、傷亡、庇護所需求分布等特性。發現士林之南、西與西南部區域為地震危險度與風險較高之區域，三個地震事件平均估計之總經濟損失約為 1,136.7 億元，年平均總預期損失風險為 0.77 億元。

文中另應用 BUM，估計不同土地使用方案(或土地使用分區圖)的地震風險—效益。成果顯示通盤檢討案較原方案，因使用強度的降低，可平均降低損失風險約 86 億元。然通盤檢討案，變更為高強度之土地使用區位，許多位於高災害潛勢區域，可能會因而增加潛在地震風險。另從土地使用的地震風險—效益比率研判，不管是原方案或通盤檢討之年預期損失風險—效益比皆相同，隱含通盤檢討案雖降低開發強度，但對於降低地震風險佔整體建物總暴露價值或災感度的比率，無具體幫助。

本文提出一套分析地震災害危險度與風險的工具與方法，提供規劃者評估災害風險與不同土地使用方案潛在的風險—效益變動。理想的防災規劃，應藉由風險分析與防減災需求估計，配合地區特性，擬定配套的空間與設施計畫。故風險分析與需求估計的方法與工具，為土地使用與都市防災規劃的重要決策支援。透過 HAZ-Taiwan 的引入，可提供此類分析工具應用的可能方式，並可藉之建立適宜的震災風險—效益評估方法。

地震風險分析，並非僅限於貨幣化的風險—效益評估，尚可應用傷亡、庇護所需求與其他質化風險(如風險知覺)分析，作為計畫評估與土地使用規劃的決策支援。評估方法的建立，除可透過 HAZ-Taiwan 的境況模擬，以檢視補強建物抗震強度、調整容積管制標準等策略對地震風險—效益的衝擊外，尚可結合多屬性決策或多目標規劃，納入居民風險知覺與偏好特性(周士雄、施鴻志，2000；洪鴻智，2002b)，綜合評估地震防減災措施的有效性。

HAZ-Taiwan 應用在地震風險與規劃策略評估，尚為嶄新的工具，在土地使用規劃應用，尚有三項主要課題需克服：(1)資料蒐集與資料庫建立：尤其是建立全台的資料庫，仍需相關團體的合作建置；(2)資料格式與基本單位：特別是引入更精細的資料庫，以滿足更細部或不同空間設計的規劃需求。因 HAZ-Taiwan 之資料係以村里為基本單位，分析過程會喪失許多資訊，特別在村里範圍過大或村里內土地使用模式同質性不高時，皆可能產生估計的偏誤，造成特定土地使用模式轉變對風險—效益衝擊無法彰顯；(3)土地使用規劃應用：HAZ-Taiwan 估計建物損失係奠基於建物樓地板面積，不但需龐大的資料庫及詳盡的土地使用調查支援，且欲直接應用在平面式之土地使用規劃尚有落差，故如何建立簡化的應用與資料轉換方法，為值得開發的後續研究方向。

參考文獻

1. 大震災口地方自治研究会(1996)，「大震災口地方自治：復興口口提言」，自治体研究社，東京都。
2. 何明錦、洪鴻智(2002)，「應用 HAZ-Taiwan 系統進行都市計畫防災規劃方法與方式探討」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，台北。
3. 李威儀、錢學陶、李威亨(1997)，「台北市都市計畫防災系統之規劃」，台北市政府都市發



展局委託，台北。

4. 林英彥(1998)，「不動產估價(五版)」，文笙書局，台北。
5. 周士雄、施鴻志(2000)，環境風險管理決策中之公眾認知探討：以地震災害減緩措施為例，「都市與計劃」，第 27 卷，第 3 期，第 363-380 頁。
6. 洪鴻智 (1998)，模糊數學於環境風險-效益條件評價法之應用，「中華民國區域科學學會 1998 年學術研討會」，台北。
7. 洪鴻智、詹士樑(2001)，「都市地區有效避難路線與救災路徑評估方法之研究(III)：與 HAZ-Taiwan 整合應用」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，台北。
8. 洪鴻智、詹士樑、陳柏廷、廖仲仁(2001)，都市地區避難救災路徑有效性評估方法之研究：與 HAZ-Taiwan 整合應用，「民國 90 年度建築計畫聯合研討會」，台北。
9. 洪鴻智(2002a)，「公私合作的都市防災財務機制：環境災害保險的供、需評估(I)」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告(NSC 90-2415-H-305-008-SSS)。
10. 洪鴻智(2002b)，科技風險知覺與風險消費態度的決定：灰色訊息關聯分析之應用，「都市與計劃」，第 29 卷，第 4 期，第 575-593 頁。
11. 洪鴻智、詹士樑、簡長毅(2003)，運用 HAZ-Taiwan 系統於土地使用規劃之地震風險-效益評估：以台北市士林區為例，「2003 年全國土地管理與開發學術研討會」，長榮管理學院，台南。
12. 陳建忠、詹士樑(1999)，「都市地區避難救災路徑有系性評估之研究」，內政部建築研究所專題研究計畫成果報告，台北。
13. 陳亮全、洪鴻智、賴美如(2001)，應用 HAZ-Taiwan 系統進行地震建物直接經濟損失之估計：以台北市士林區為例，「2001 年地震災害境況模擬研討會」，國家地震工程中心，台北。
14. 陳明健(主編)(2003)，「自然資源與環境經濟學：理論基礎與本土案例分析」，雙葉書廊，台北。
15. 簡文郁(1996)，「設計地震力參數與結構可靠度分析」，國立台灣大學土木工程學系博士論文，台北。
16. 羅俊雄、葉錦勳、陳亮全、洪鴻智、簡文郁、廖文義(2002)，HAZ-Taiwan 地震災害損失評估系統，「台大工程學刊」，第 85 期，第 13-32 頁。
17. Bendimerad, F. (2001). Loss estimation: A powerful tool for risk assessment and mitigation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21: 467-472.
18. Burby, R. J., Cigler, B. A., French, S. P., Kaiser, E. J., Kartez, J., Roenigk, D., Weist, D. and Whittington, D. (1991). *Sharing Environmental Risks: How to Control Governments' Losses in Natural Disasters*. Oxford: Westview Press.
19. Burby, R. J. and Dalton, L. C. (1994). Plan can matter! The role of land use plans and state planning mandates in limiting the development of hazardous areas, *Public Administration Review*, 54: 229-238.
20. Burby, R. J. French, S. P. and Nelson, A. C. (1998). Plans, code enforcement, and damage



- reduction: Evidence from the Northridge earthquake, *Earthquake Spectra*, 14: 59-74.
21. Freeman III, A. M. (1993). *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. Washington DC: Resources for the Future.
 22. Kircher, C. A., Reitherman, R. K., Whitman, F. V. and Arnold, C. (1997). Estimation earthquake losses to buildings, *Earthquake Spectra*, 13: 703-720.
 23. Kunreuther, H. (2000). Public-private partnership for reducing seismic risk losses, *Paper presented at Second EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe*. Laxenburg Austria.
 24. Mader, G. G. (1997). Enduring land-use planning lessons from the 1971 San Fernando earthquake, *Earthquake Spectra*, 13: 45-54.
 25. Meletti, C., Patacca, E. and Scandone, P. (2000). Construction of a seismotectonic model: The case of Italy, *Pure and Applied Geophysics*, 157: 11-35.
 26. Meulbroek, L. (2002). The promise and challenge of integrated risk management, *Risk Management and Insurance Review*, 5: 55-66.
 27. Nelson, A. C. and French, S. P. (2002). Plan quality and mitigating damage from natural disasters: A case study of the Northridge earthquake with planning policy considerations, *Journal of the American Planning Association*, 68: 194-207.
 28. Olshansky, R. B. (1997). The role of earthquake hazard maps in loss estimation: A study of the Northridge earthquake, *Earthquake Spectra*, 13: 721-737.
 29. Olshansky, R. B. (2001). Land use planning for seismic safety: The Los Angeles County experience, 1971-1994, *Journal of the American Planning Association*, 67: 173-185.
 30. Olshansky, R. B. and Wu, Y. (2001). Earthquake risk analysis for Los Angeles County under present and planned land uses, *Environment and Planning B*, 28: 419-432.
 31. Shinozuka, M. (1996). Lifeline seismic disaster mitigation: research and implementation, *Regional Development Dialogue*, 15: 195-205.
 32. Smith, V. K. and Desvovages, W. H. (1987). An empirical analysis of the economic value of risk changes, *Journal of Political Economy*, 95: 89-114.
 33. Uitto, J. I. (1998). The geography of disaster vulnerability in megacities: A theoretical framework, *Applied Geography*, 18: 7-16.
 34. United States National Institute of Building Science (1999). *HAZUS 99: Technical Manual*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency.
 35. Whitman, F. V., Anagnos, T., Kircher, C. A., Lagorio, H. J., Lawson, R. S. and Schneider, P. (1997). Development of a national earthquake loss estimation methodology, *Earthquake Spectra*, 13: 643-661.
 36. Wilson, R. and Crouch, E. A. (2001). *Risk-Benefit Analysis (2ed ed.)*. Cambridge MA: Harvard University Press.

