

# 數位網格化技術於地震衝擊分析與應用

劉淑燕／國家災害防救科技中心助理研究員

吳佳容／國家災害防救科技中心佐理研究員

柯孝勳／國家災害防救科技中心副研究員

李中生／國家災害防救科技中心副研究員

李維森／國家災害防救科技中心研究員

張芝苓／國家災害防救科技中心助理研究員

利用數學模式預先分析地震衝擊影響、瞭解災害情境，再透過評估結果進行演練、擬定計畫、推動防救災工作，進而提升區域以及都會區對於地震災害的耐災能力、降低災害損失，為國際間重點研發的課題。國家災害防救科技中心為增進防救災研發能量，整合地震衝擊相關研發成果與技術，建置地震衝擊分析所需基礎資料庫，並結合地理空間資訊，以 500 m × 500 m 地理網格為單元進行模擬，利用國內外既有的分析模型，量化評估示範區域遭受大規模地震衝擊之後的災害情境。本研究工作以地震情境設定，分析研判該地震事件可能造成的災害衝擊與設施失效的影響，分析項目包括建物、人口、交通系統、水電維生設施損壞與衝擊評估。本研究期望能建立整體性的地震衝擊自動化評估流程與研究環境，並得出地理空間性較佳的預測結果，作為未來規劃災前減災策略以及研擬防救災與應變計畫之參考。

## 前言

處於菲律賓海板塊衝撞歐亞大陸板塊的交界面上，臺灣飽受地震災害的威脅，依據行政院九二一災後重建委員會的統計資訊，1999 年襲擊臺灣集集的 M7.3 地震，造成高達 2,455 人罹難，50 人失蹤，超過 11,000 人受傷，逾 8 萬戶房屋全半倒，以及水、電、橋梁、交通等維生設施中斷等嚴重災情；而今年 2 月 6 日發生芮氏規模 6.6 的美濃地震，亦造成 117 人死亡、551 人受傷，台 20 線、台 86 線及台 3 線交通阻斷，累計停水 400,300 戶、累計停電 173,163 戶等，影響範圍包含臺南、高雄地區（內政部消防署<sup>[1]</sup>）。因此，評估地震災害的損失與脆弱性，從而建立具有高抗災韌性的都會區始終為各界重視之課題。

國家災害防救科技中心（以下簡稱災防科技中心）被賦予之規劃協調、政策研議、技術支援與落實

應用等任務，以推動與整合災害防救研發能量，運用各項災害防救科技研發成果，研提災害調適策略，協助政府強化災害防救作業效能與提昇社會整體抗災能力為發展目標。為達此目的，災防科技中心利用網格化方式提供地震災害研究全面性衝擊情境影響評估的量化數據，並將研發成果應用至減災防災，提供研究機構，事業主管機關，地方政府和中央政府使用。其主要應用為支持學術研究，強化評估模型，藉以具體量化分析地震衝擊情境，作為研擬大規模地震相關防災與應變計畫之防護目標與規劃依據，圖 1 為網格化地震衝擊分析及其應用架構。

## 國際對於地震災害衝擊分析之趨勢

由於土地過度開發，都市化地區不斷擴充，氣候變遷以及防災意識的低落，愈來愈多的生命與財產暴

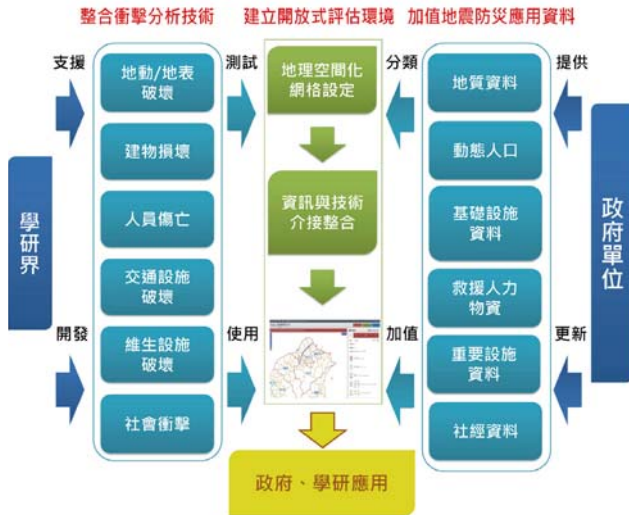


圖 1 網格化地震衝擊分析及其應用架構

露於較高的災害風險中。在現今的環境條件下，一旦發生大規模的天然災害，其損失規模與衝擊將較以往更加擴大嚴重。1999 年臺灣集集地震、2003 年伊朗大地震、2008 年中國四川汶川地震、2011 年東日本大地震、2013 年菲律賓地震、中國四川雅安地震等近來發生的大規模震災，其共同特徵為造成都會區建築物、交通、水利、電力與其他重要基礎設施的嚴重損壞，並引發連鎖性的災害，擴大了災害的複雜度，造成更嚴重的損害。

因此，分析評估地震災害的損失與脆弱性，從而建立具有高耐災韌性的都會區是許多國家的重要任務。其中一個有效的方法就是開發地震損失評估工具，藉由系統性的分析能預先評估地震災情及災損，亦可作為災前建立救災準備與減災策略規劃之依據。

參考美國緊急應變管理局 (FEMA) 建立的地震災損評估系統 HAZUS 評估架構 (FEMA [2])，我國國家地震工程研究中心，於 2002 年開發台灣地震損失評估系統 TELES (Taiwan Earthquake Loss Estimation System)。TELES 以行政區域作為分析單元，建立資產設施資料庫，並以國內地質資料以及歷史災情資料修正各項評估模型。此外，結合中央氣象局的地震速報系統，TELES 已增加提供早期地震災損評估之功能 (Yeh [3])。

地震災損分析與減災的關係與基本步驟如圖 2 所示，包括了地震情境的模擬、建立分析資料庫、直接與間接災害衝擊評估，以及復原計畫與減災策略。其中，



圖 2 地震損害分析與減災之關係架構

地震情境的模擬包括分析震源、模擬地動分佈，以及地質情形與土壤狀況等。建立分析資料庫則針對社經資產，並對於重要設施作地理空間位置上的系統資料彙整與分析。而直接災害衝擊則利用易損性模型，分析地震情境下設施項目損壞的災害風險。藉由分析建築物以及重要基礎設施的損壞範圍與程度，評估人員傷亡以及直接經濟損失。對於重要基礎設施失效後，衝擊其他產業與社會經濟狀況所造成的間接損失，則必須作進一步的分析評估。最後，利用地理資訊系統，分析並展示在模擬地震情境下的災損分佈狀況，作為事先擬訂緊急應變計畫、災後復原計畫以及減災整備策略，達到提升都會區地震耐災韌性之目的。

### 因應台灣特性之分析方式

參考國內外發展之災損評估系統，震後損壞評估之分析架構如圖 3 所表示，包括地震情境模擬、基本資料調查、易損性模組開發、直接損壞評估以及設施失效後之衝擊分析。其中地震情境模擬將以最嚴重發生之地震情境作為分析對象；基本資料調查就所選定

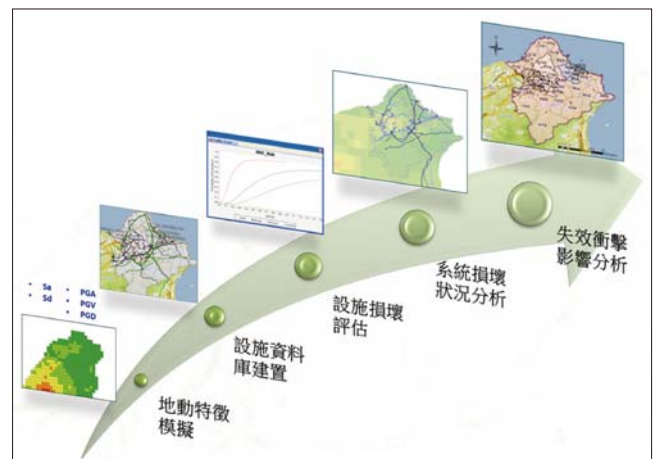


圖 3 設施系統震後損壞衝擊評估發展架構

之設施系統項目作清單調查，建立設施資料庫包括設施位置坐標、材料型式、設備容量等；易損性模組開發將蒐整國內外之易損性曲線，篩選適合該區域設施特徵之曲線函數；設施直接損壞評估模組則利用所建立之易損性模組進行分析；設施失效後之衝擊評估則利用設施損壞分析之結果，套疊區域人口、社經資料以及其他重要設施等圖層，建立其影響關係矩陣並作進一步之衝擊分析。

本研究利用網格化方式提供地震災害研究全面性衝擊情境影響評估的量化數據，其目的在於成為衝擊情境分析技術和資料收集的平台，藉以協助整合學研界的分析技術以及政府的資訊數據，並提供一個標準化、整體性的地震衝擊評估研究流程與環境。

### 何謂數位網格方式

本研究採用內政部臺灣地區五萬分之一圖幅，以2013年臺澎金馬範圍行政區界為基礎，500 m 為網格單位進行數位化，取得 500 m × 500 m 網格共計 132,712 筆，命名為「臺澎金馬 500 m × 500 m 網格」(圖 4)。

由於高樓大廈林立，人口密度不斷提高，地震災

害衝擊評估運用一般平面屬性資料恐會失真，因此災防科技中心運用房屋稅籍資料，推估建物、人口的數量、地理分布，並作為建物毀損、人口傷亡計算模組之分析基礎資料。又房屋稅籍資料量相當龐大，本研究參考 TELES 建物分類方式(葉<sup>[5]</sup>)，依據建物結構型態、建物高度、建造年代、耐震設計規範等進行資料處理工作，將大量房屋稅籍資料轉化為具一致性及正確性之基礎資料。

房屋稅籍資料須先將地址 2D 化，去除樓層資訊後再轉換成坐標值。再依建材、樓層高度分門別類(共有 15 類)，並以坐落位置、建物年份換算出 4 種耐震設計值，並依地址坐標得出坐落的網格。最後每個網格透過不同建材類別、不同耐震設計進行統計，共計有 60 種組合。

目前人口資料多以戶籍人口為主要統計數據，但戶籍人口用於表示區域內實際停留的人口數則較為不符合實際現況，故本研究建立一簡易動態人口評估模式(吳等人<sup>[6]</sup>)，由主計總處「99年人口及住宅普查」獲得臺灣地區常住人口與活動人口基礎資料，進行四個時段(夜間居家時段 22 時 ~ 6 時、上班通勤 6 時 ~

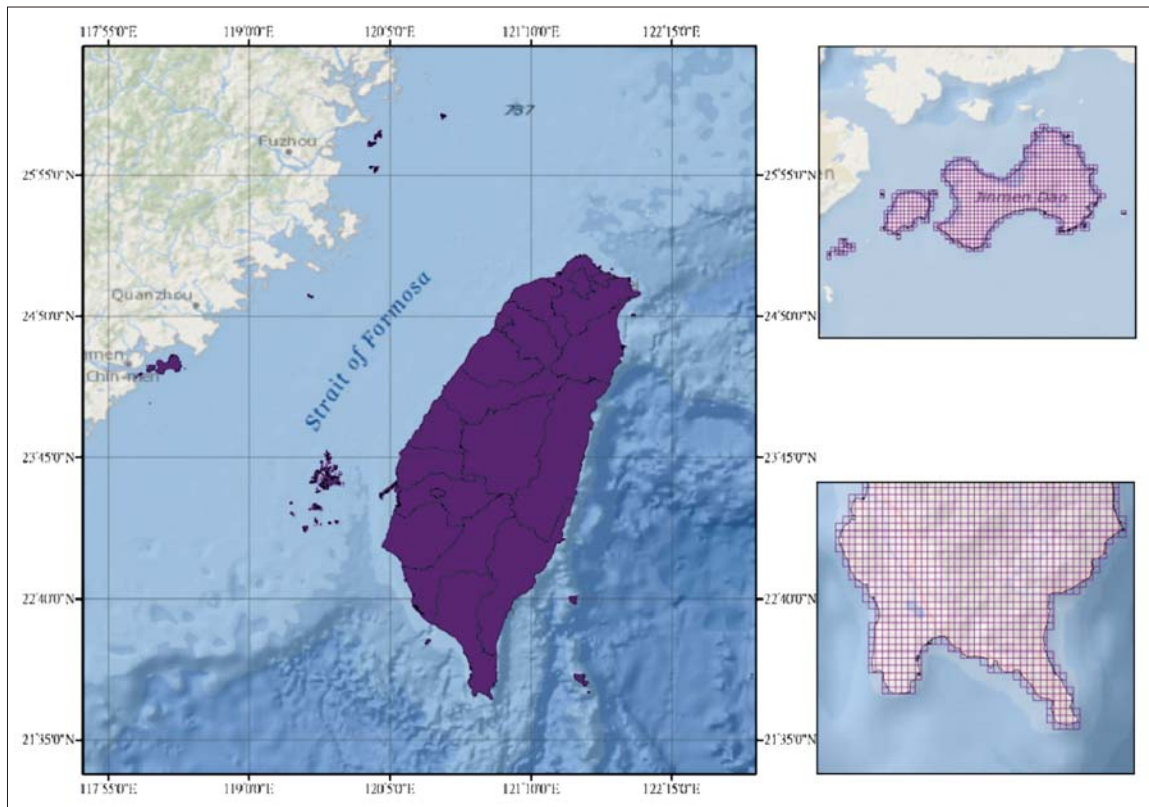


圖 4 臺澎金馬 500 m × 500 m 網格 (李等人<sup>[4]</sup>)

9時、日間上班時段9時~17時、下班通勤17時~22時)室內人口運算。人口分布資料之網格化工作，是將稅籍地址資料轉化成坐標後，統計出行政區建物總面積，再與鄉鎮人口數換算出鄉鎮動態人口密度，並用此人口密度與坐落於此行政區之網格建物總面積相乘，而得出此網格的動態人口數。

利用地理資訊系統技術將橋梁點位與路網數值圖套疊，或搭配網際網路上的電子地圖如 google.com 等進行坐標資料的檢核作業。完成坐標校正後，與網格圖層套疊，便可取得每座橋梁所在位置之網格編號。其次，利用重要聯繫道路篩選原則(劉等人<sup>[7]</sup>)進行各縣市內之重要聯繫道路/橋梁篩選，再採用 TELES 典型橋梁分類依結構系統、橋跨數、建材、地盤種類、幾何尺寸、橋墩型式、建造年代等特性進行 24 種橋梁分類。目前建立臺灣本島共 8,898 座重要公路(含國道)橋梁資料。

將國土測繪中心的全臺道路圖層資料，以道路等級編碼篩選重要聯繫道路，並以網格圖層切割分段進行網格化作業。其中，國土測繪中心道路圖層並無車道數欄位，但在進行道路衝擊評估時，須使用車道數進行道路分級，以決定所適用之易損性參數。因此，參考《交通部公路路線設計規範》及《營建署市區道路及附屬工程設計標準》道路車道寬度規定，依道路等級編碼分別以路寬制定車道數(李等人<sup>[4]</sup>)。

另外，災防科技中心將全臺電力系統與供水系統的資料進行轉置與分析，已完成全臺各縣市發電廠、變電所、電塔、末端管網、淨水場、加壓站、配水池、導水管線及配水管線等基礎資料之建置。目前已建置之全臺網格化基礎資料庫如圖 5 所示。

## 地動分布預估與土壤液化分析方法

本研究採用地動預估模式整理如表 1 所示，將最大地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、最大地表速度(Peak Ground Velocity, PGV)、最大地表位移(Peak Ground Displacement, PeakGD)以及譜加速度(Spectral Acceleration, SA)之各項數據整合，分析與建立地動分布預估模式。各地之地動分布預估流程可分為兩個階段，首先以地動預估模式進行各觀測站位置的地動值計算，最後再加以場址修正量(圖 6)。PGV 與 PeakGD 以相同流程進行各地之地動預估。

經由國內外相關研究之回顧與盤點，考量分析尺度及基本資料細緻程度，建立土壤液化之初步分析與詳細分析兩種評估方法如圖 7：

1. 土壤液化敏感性初步分析法：對於大範圍地區，在尚未取得工程鑽孔資料之前，參考 HAZUS 方法，使用地質圖、數值地形資料、水系分布資料，初步評估土壤液化敏感性。
2. 土壤液化風險詳細分析法：對於液化敏感性較高的地區，採用我國耐震設計規範之建議方法(內政營建署<sup>[13]</sup>)，及中央地質調查所提供之工程鑽孔資料，結合特定震源之地表最大加速度(PGA)分布值，詳細分析之土壤液化風險，其分析流程如圖 8。

## 自動化評估功能模組開發

圖 9 的易損性曲線主要用以描述結構物在地震作用下超越不同損害程度的機率，橫軸為震動強度參數或永久位移量，縱軸則是超越不同損害狀態的機率，其值介於 0 與 1 之間。參考 Hazus®-MH MR5<sup>[2]</sup> 定義

表 1 本研究選用之地動預估模式

	預估模式	修正項
Jean and Loh <sup>[8]</sup>	PGA, PGV, SA (T = 0.3 s), SA (T = 1.0 s) (Campbell, 岩盤站)	1. 無場址修正
張 <sup>[9]</sup>	PGA (Campbell, 岩盤站)	1. 各觀測站之場址修正 2. 地震規模修正
Jean et al. <sup>[10]</sup>	PGA, SA (T = 0.3 s), SA (T = 1.0 s) (Campbell, 岩盤站)	1. 各觀測站之場址修正 2. 地震規模修正
章 <sup>[11]</sup>	PGV (Campbell, 岩盤站)	1. 各觀測站之場址修正 2. 地震規模修正
Liu and Tsai <sup>[12]</sup>	水平向與垂直向 PGA, PGV, and PGD (Joyner and Boore)	1. 無場址修正項 2. 只針對 1999 年集集大地震與 2003 年成功地震得到殘差值分析

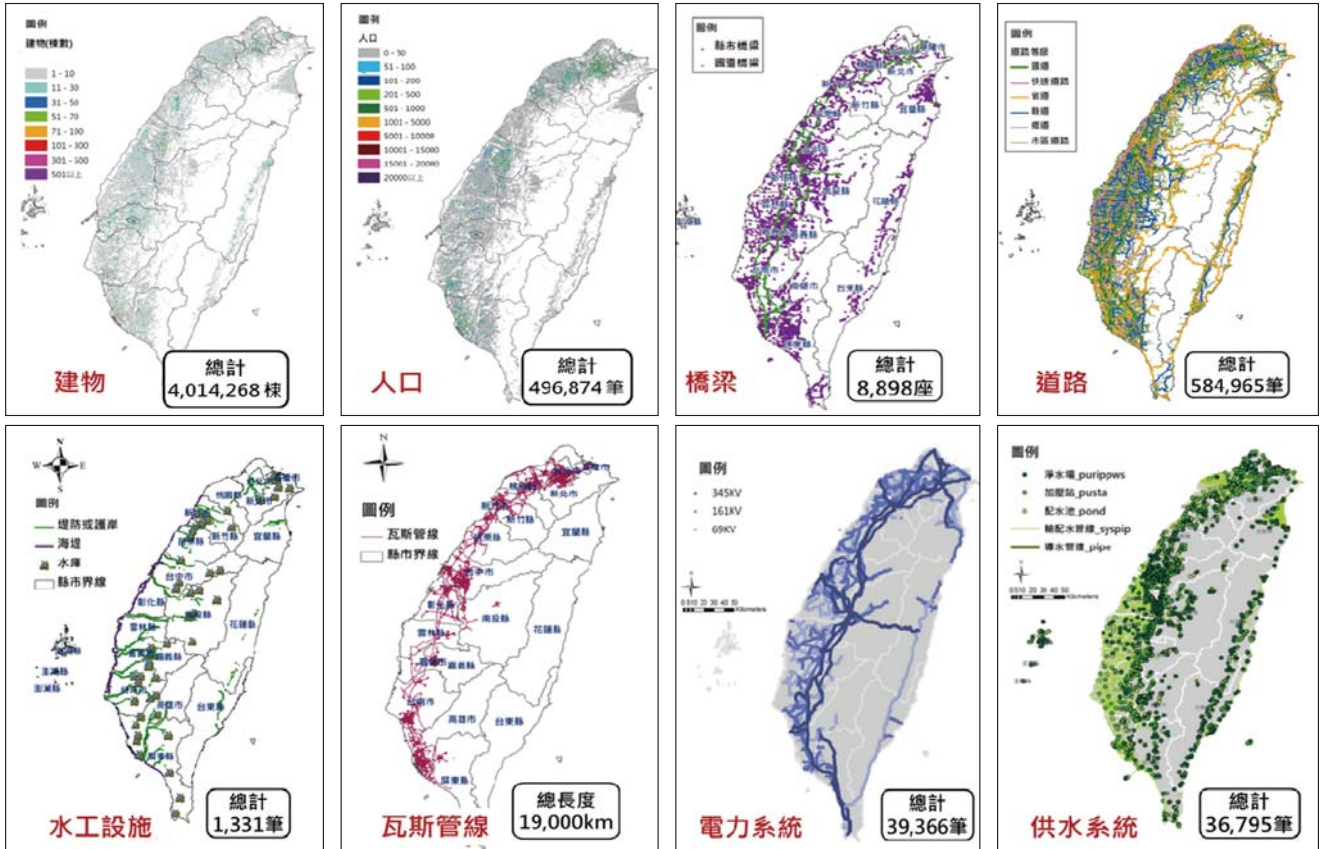


圖 5 全臺網格化基礎資料庫

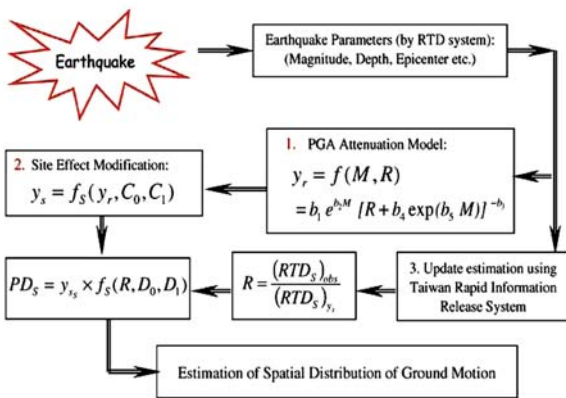


圖 6 地動預估之流程 (Jean et al.<sup>[10]</sup>)

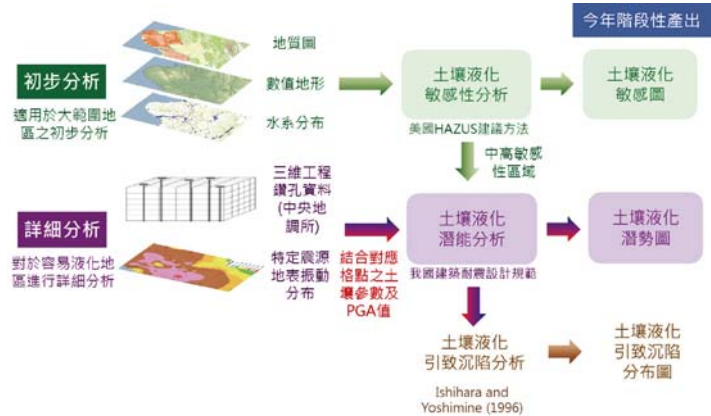


圖 7 本研究提出之土壤液化分析流程 (吳等人<sup>[6]</sup>)

損害狀態的方式，將損害狀態分為無損壞  $ds_1$ 、輕微損壞  $ds_2$ 、中度損壞  $ds_3$ 、嚴重損壞  $ds_4$  與完全損害  $ds_5$  等五級。易損性曲線通常以對數常態分布之機率分布函數來描述，將地表永久位移 (PGD) 或地表最大加速度 (PGA) 視為隨機變數  $x$ ， $m$  為上述各損壞狀態對應 PGD 或 PGA 之中值 (median)， $\beta$  為其變異係數，則其機率密度函數如下：

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \beta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln m}{\beta}\right)^2\right] \quad 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

將式 (1) 積分為機率分佈函數  $F(x)$ ，並繪出其圖形，即為易損性曲線。

本研究採用非線性靜力分析 (易損性分析) 的評估方法，開發網格化地震衝擊評估自動化模組。首先蒐整國內外之易損性曲線，篩選適合建物、人口、道路、橋梁、供水、電力等各項系統特徵之曲線函數，利用所建立之易損性分析方法進行設施直接損壞評估，再將各項設施系統損壞分析結果，考慮區域人口、交通阻斷機率等因素，做進一步之衝擊分析。其

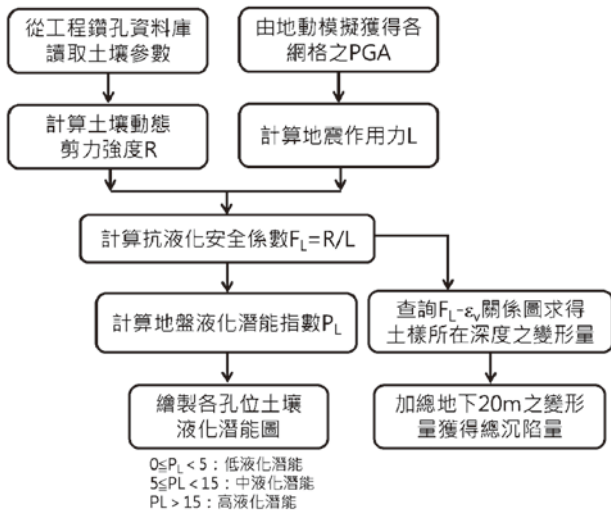


圖 8 土壤液化風險詳細分析流程 (李等人 [4])

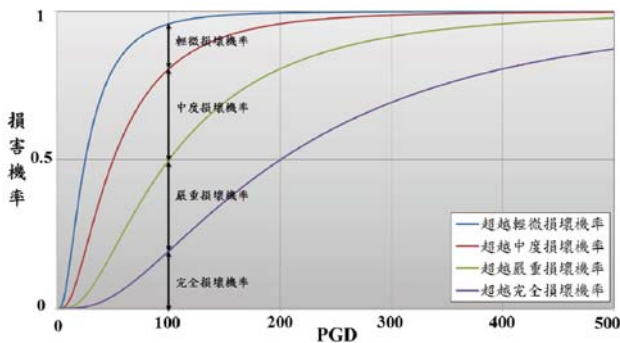


圖 9 不同損害狀態之易損性曲線與機率示意圖

次，將分析流程撰寫為模組化程式，建置自動化分析模組，只需讀入相關參數，便可自動計算每一個網格不同衝擊程度的設施或人員數量 (李等人 [4])。

## 地震衝擊分析應用

### 以網格化資訊整合震後衝擊情境

支援 103 年度國家防災日演練情境探討，模擬 103 年 9 月 19 日，花東縱谷斷層錯動，引發規模 7.0 的地震，東部地區最大震度高達 7 級。應用本研究所開發之網格化地震衝擊評估技術，將強震區內重要設施如醫院、消防單位、兒童福利機構、身障福利機構、老福機構等搭配建物倒塌、人員傷亡、電力中斷、供水停止等衝擊主題的網格分析結果，再綜整至同一空間呈現如圖 10 所示，可提供決策者更細緻的研判震後須優先進行緊急醫療與救援疏散的空間性趨勢。

### 建立不同防護地震之耐災力評估方法

考量國內防災計畫情境模擬現況及防災規劃需求，從防護規模的角度著手，針對極端地震及防護地震情境，設定不同震度地震進行情境模擬，分析其對

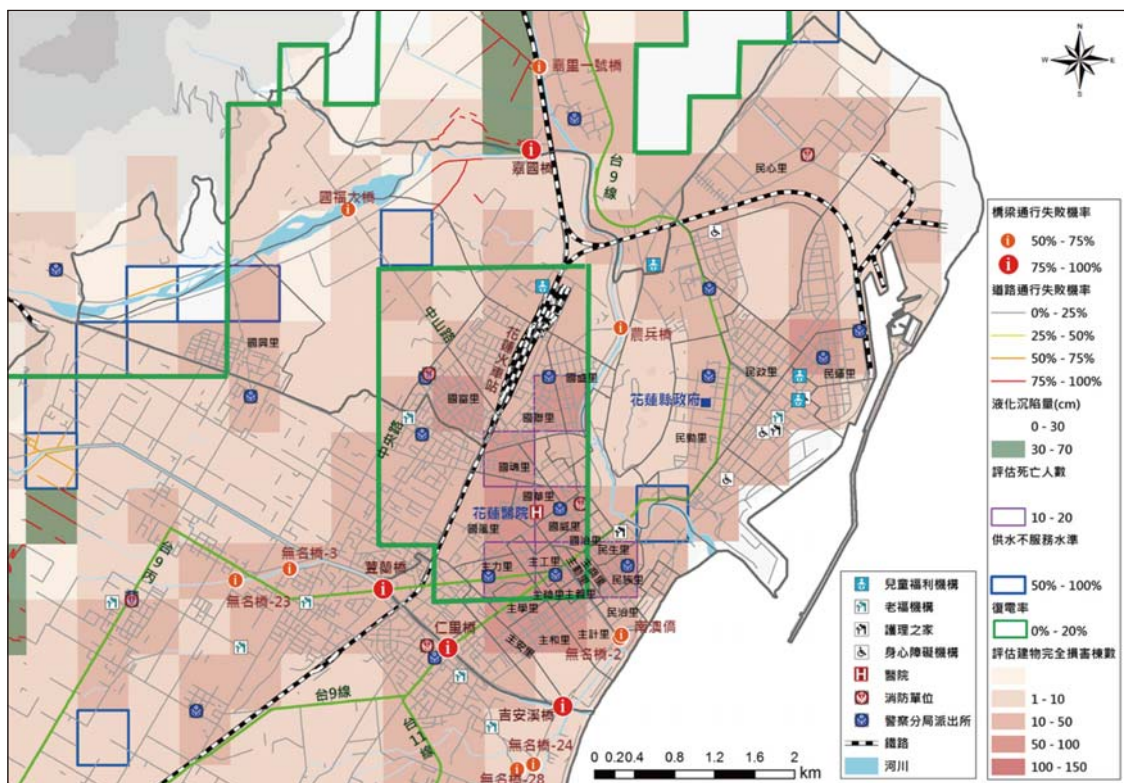


圖 10 強震區內各衝擊主題綜整圖

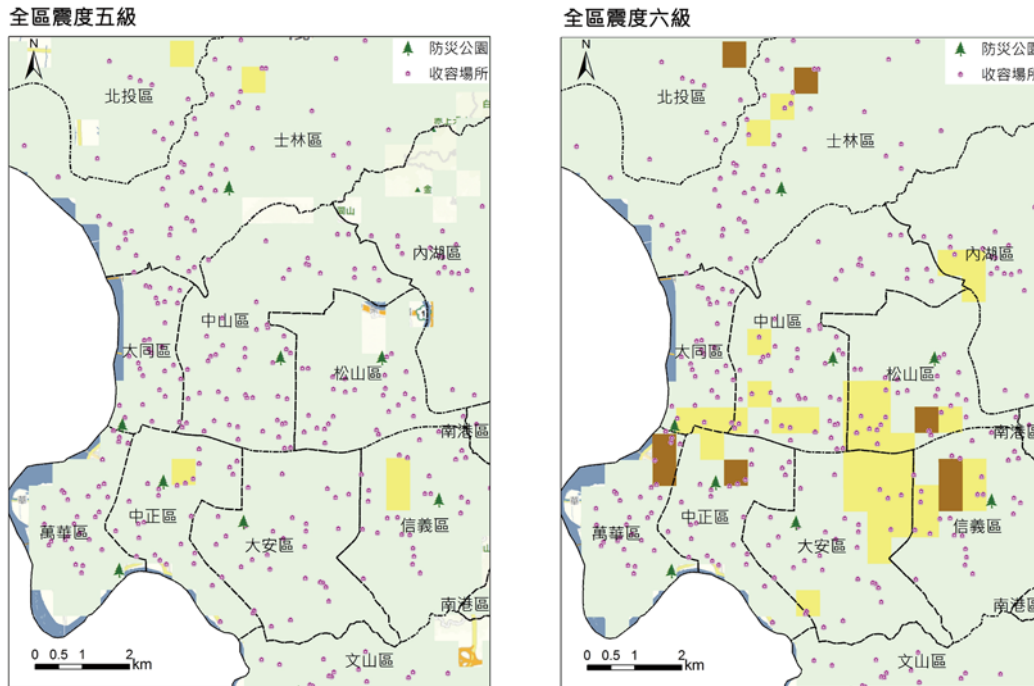


圖 11 不同等級地震避難收容人口衝擊分析



圖 12 TERIA 圖台操作介面

## 網格化分析工具開發： 地震衝擊資訊平台 TERIA

防災科技中心建立具量化與空間解析特性之細緻化地震衝擊評估平台，彙整各項衝擊評估模式，並運用 GIS 地理資訊系統，以 500 m × 500 m 地理網格為單元進行模擬。「地震衝擊資訊平台 (TERIA)」以視覺化理念進行開發，具備基礎資料統計分析、衝擊評估運算與分析結果查詢展示，並達到自動化匯出圖資與數值資料等功能。圖 12 為 TERIA 圖台操作介面。

建物及各項設施造成之衝擊，掃描弱點項目及所在地區，提供地方政府設定防護等級、研擬防災強化對策之參考 (吳等人<sup>[14]</sup>)。

防災科技中心協助行政院災害防救專家諮詢委員會「全災害管理體系建構—以都會型大規模地震災害為例」議題，選定臺北市為示範區，分別設定全區震度五級 (240 gal)、六級 (320 gal) 為兩種防護等級地震情境，以土壤液化、建物及死亡人口、避難收容、交通、醫療救護、維生系統 (水、電) 為地震衝擊情境模擬項目，建立分析情境。圖 11 為避難收容人口衝擊分析。

## 結論與建議

防災科技中心彙整各項衝擊評估模式，建置地震衝擊分析所需基礎資料庫，並運用 GIS 地理資訊系統，以 500 m × 500 m 地理網格為單元進行模擬，用以評估示範區域遭受大規模地震衝擊之後的災害情境。本年度開發線上分析及展示平台的使用者操作介面，可迅速將分析結果展示於畫面中，能提供空間化及統計分析整合的減災資訊；此外，同時能自動化將分析結果輸出空間及數值資料，可提供決策者執行更進一步的分析加值作業。

綜上所述，地震災害衝擊情境的預先評估，能夠提供減災策略規劃、設計演習情境與腳本之依據，建立整體性的地震衝擊自動化評估流程與研究環境，並得出地理空間性較佳的推估結果，作為未來規劃減災策略以及研擬防救災與應變計畫之參考。

然而，本研究尚有待加強之工作項目如下：

1. 網格化資料庫的擴充與更新：考慮地震後的避難收容場所，以及重要設施持續運作功能的重要性，校舍與公有建物資料以及軌道橋梁資料尚待蒐整，水工設施與危險物質管線資料亦須加值處理後方能運算。
2. 本土化參數的建立：平面道路與隧道衝擊評估係採用 Hazus@-MH MR5 (FEMA<sup>[2]</sup>) 所提出之設施易損性分析方法，雖然此模式廣泛被使用，且多次進行模式、參數更新，然每個國家或地區有其特殊環境背景，尚有賴相關研究單位協助將易損性分析之模式／參數予以本土化的調整。
3. 相依性分析方法的建立：目前進行地震衝擊評估時，將每次地震視為單一獨立發生事件，若在大規模地震後發生較大規模之餘震，在對該餘震進行衝擊評估時，並未考慮前次主震引致災損對其之相關影響。另外，目前採用之地震衝擊評估技術，亦未考量各項設施之間的相依性，以及影響設施持續營運之影響因子而進行分析。
4. 分析模組的擴充與更新：目前已建置之分析模組為建物、人口、道路、橋梁、供水、電力六大類，將持續朝其他如軌道橋梁、危險物質管線、山崩潛勢分析等分析模組開發努力；未來希望能納入更多相關專家學者所開發之新模組或分析參數，產出更客觀豐富的資訊供決策研判者參考。

## 誌謝

感謝中央研究院地球科學所、中央氣象局、中央地質調查所、國土測繪中心、臺灣區國道高速公路局、公路總局、財政部財政資訊中心、各地方政府（稅捐、工務單位）、臺灣自來水公司、臺北自來水事業處、臺灣電力公司、國家實驗研究院、國家地震工程研究中心等單位協助提供相關資料與技術，並感謝

黃明偉博士提供地動與液化分析程式、吳秉儒博士提供液化潛勢評估方法、吳子修博士提供建物衝擊分析程式、陳秋雲小姐提供人口衝擊分析方法及協處理臺北市圖資、劉致灝博士撰寫衝擊分析模組、黃俊宏先生處理房屋稅籍資料、包正芬小姐處理道路資料，使本研究工作得以順利進行。

## 參考文獻

1. 內政部消防署 (2016), 0206- 災害應變處置報告 <http://www.nfa.gov.tw/main/List.aspx?ID=&MenuID=556&ListID=4664>
2. FEMA (2010), Hazus@-MH MR5 Technical Manuals and User's Manuals, Washington, D.C.
3. Yeh, C.-H., Loh, C.-H., and Tsai, K.-C. (2006), "Overview of Taiwan Earthquake Loss Estimation System," *Natural Hazards*, Springer, 37, pp. 23-37.
4. 李中生、柯孝勳、劉致灝、劉淑燕、吳佳容、黃俊宏、吳子修、吳秉儒、包正芬、鄧敏政、張子瑩 (2015), 地震衝擊研究與資訊應用平台 (I): 架構開發與資料庫建置, 國家災害防救科技中心, NCDR 103-T05。
5. 葉錦勳 (2003), 台灣地震損失評估系統 - TELES, 國家地震工程研究中心, NCREE-03-002。
6. 吳子修、黃明偉、吳秉儒、陳秋雲、蘇昭郎、李中生、柯孝勳 (2014), 大臺北地區大規模地震衝擊情境之災害潛勢與建物人員災損分析, 國家災害防救科技中心, NCDR 102-T14。
7. 劉淑燕、吳佳容、李沁妍、鄧敏政、李洋寧、李中生、柯孝勳、簡賢文 (2014), 大臺北地區大規模地震衝擊情境分析報告 II: 道路系統、水電設施、重要設施、情境綜整, 國家災害防救科技中心, NCDR 102-T15。
8. Jean, W.Y. and Loh, C.H. (2001), "A Study on the Classification of Site Effects and Its Application to the Seismic Hazard and Microzonation," 10th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, SDEE' 2001, Volume of Extended Abstracts, 82.
9. 張毓文 (2002), 場址特性分析及最大加速度衰減模式校正, 國立中央大學碩士論文。
10. Jean, W.Y., Chang, Y.W., Wen, K.L., and Loh, C.H. (2006), "Early Estimation of Seismic Hazard for Strong Earthquakes in Taiwan," *Nat. Hazards*, 37, pp. 39-53.
11. 章順強 (2009), 場址特性分析及最大速度衰減模式校正, 國立中央大學碩士論文。
12. Liu, K.S. and Tsai, Y.B. (2005), "Attenuation Relationships of Peak Ground Acceleration and Velocity for Crustal Earthquakes in Taiwan," *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, pp. 1045-1058.
13. 內政部營建署 (2011), 建築物耐震設計規範及解說。
14. 吳秉儒、陳秋雲、李沁妍、劉淑燕、劉致灝、柯孝勳、李中生 (2016), 不同防護等級地震衝擊分析方法研究, 國家災害防救科技中心, NCDR 104-T20。 