

震災風險評估與管理平台

Platform of Seismic Risk Assessment and Management

主管單位：財團法人國家實驗研究院

葉錦勳 ¹ Yeh, Chin-Hsun	林祺皓 ¹ Lin, Chi-Hao	楊承道 ¹ Yang, Cheng-Tao	劉季宇 ¹ Liu, Gee-Yu
陳志欣 ¹ Chen, Chih-Hsin	黃李暉 ¹ Huang, Lee-Hui	黃尹男 ² Huang, Yin-Nan	曹雅筑 ¹ Tsao, Ya-Chu
林祐萱 ¹ Lin, You-Xuan	周寶卿 ¹ Chou, Pao-Ching		

¹財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

²國立臺灣大學土木工程學系

摘要

震災風險評估與管理平台的研發目標，在提供政府機關、事業單位、防災協力研究機構等，專業的地震損失評估工具與服務。為達此目標須持續彙整與校正各種災害潛勢與基礎設施資料、整合與研發先進的震損評估模式，以及開發貼近使用者需求的應用軟體與雲端服務。本(110)年度主要工作項目包含：(1)近斷層區域震損評估模式精進及應用、(2)新一代強地動預估模式整合應用、(3)整合震損評估與 GIS 軟體研究、(4)震後緊急醫療韌性評估研究、(5)救援路線規劃與震後阻斷風險評估、與(6)宜花東大規模地震災損推估。

關鍵詞：震損評估、近斷層、急救責任醫院、交通路網、琉球海溝

Abstract

This research project “Seismic Risk Assessment and Management Platform” aims at providing the government agencies, utility managers, research institutes of disaster prevention with professional tools and services for seismic loss estimation. To achieve this goal, it is necessary to continuously collect and correct the data of disaster potentials and infrastructures, develop and integrate the cutting-edge seismic loss estimation methodology, and devise application software as well as cloud services that cater to users’ needs. Subjects in 2021 include: (1) model improvement for near-fault earthquake loss estimation and applications, (2) the next generation prediction model of strong ground motion and integrated applications, (3) integration of seismic loss estimation and GIS software, (4) resilience evaluation of post-earthquake emergency medical systems, (5) rescue route planning and seismic risk evaluation of blockage, and (6) seismic loss estimation of large-scale earthquake in Yilan, Hualien and Taitung.

Keywords : seismic risk assessment, near fault, first-aid hospitals, road networks, Ryukyu Trench.

一、前言

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心(簡稱國震中心)已研發的台灣地震損失評估系統(Taiwan Earthquake Loss Estimation System, 簡稱TELES), 整合多種全國性資料、震損評估模式和本土化參數值, 並結合地理資訊系統展示各項設施、資源與震損評估結果的空間分佈。TELES, 一方面已協助各縣市政府和防災協力暨學術單位進行防災規劃和相關研究; 另一方面已應用於地震應變機制, 於震後快速提供人員傷亡、建築物損害、自來水管線災損、地震保險理賠損失金額等模擬結果, 大幅提升政府和事業單位的應變效率。為精進國震中心之地震防災應變技術支援能力, 協助政府與民間業者提出健全的地震防救災對策, 本(110)年度主要工作項目包含: (1)近斷層區域震損評估模式精進及應用、(2)新一代強地動預估模式整合應用、(3)整合震損評估與GIS軟體研究、(4)震後緊急醫療韌性評估研究、(5)救援路線規劃與震後阻斷風險評估、與(6)宜花東大規模地震災損推估。

近斷層區域震損評估模式精進及應用方面, 旨於探討近斷層效應對於不同工程結構物及維生系統大型設施損害損失之影響, 精進台灣地震損失評估系統(TELES)的評估模式, 以提升評估結果可信度。由於臺灣地區活動斷層密布, 重大震害事件皆屬活動斷層地震所導致, 乃未來國土規劃及地震災害防救之重點; 因此, 本研究之成果可提供想定地震下, 近斷層區域之精確災損推估數據, 協助掌握近斷層災害特性, 研擬更好的地震災害防救計畫。本計畫擬以三年時間, 進行活動斷層地震近斷層區域損害損失資料收集整理, 以及近斷層災害特性與重要評估因子探討, 並參酌近斷層的地震動特徵, 與建築物、橋梁耐震分析與試驗資料的研究成果, 研擬適用於近斷層區域之震損評估模式。本(第三)年度工作項目, 為收集整理九二一地震大型維生設施震害資料, 進行災損初步分析與TELES既有模式檢討。相關階段性成果簡述於「近斷層區域震損評估模式精進及應用」一節。

新一代強地動預估模式整合應用方面, 近年以地球科學地震學領域相關理論為基礎的新一代地震動預估模型研究, 逐漸發展成熟成為主流。國震中心在執行台灣核能電廠之高階地震危害度評估計畫(SSHAC Level3, 2018年)時, 即是參考美、日及歐洲等國外新一代地震動預估模型, 但採用台灣本土的強震觀測資料, 建立適用於台灣地區之地震動預估模型, 命名為NCREE 19 (趙書賢, 2019)。TELES所採用的地震動預估模型已歷經多年, 為使TELES接軌新一代之地震動預估模式, 本研究將整合台灣地區之新一代地震動預估模型NCREE 19, 以 $V_{s30}=760(m/s)$ 為參考岩盤, 建立適合廣域震損評估之場址效應模式。整合NCREE 19的岩盤震動強度推估結果, 並結合本研究的場址效應模式研究成果, 期可應用於廣域震損評估, 更新精進TELES之地震動預估模型。相關階段性成果簡述於「新一代強地動預估模式整合應用」一節。

整合震損評估與GIS軟體研究方面, TELES原先是藉由商用軟體MapInfo的資料庫管理、圖形運算與地圖展示等地理資訊系統(GIS)功能, 進行地震損失評估與分析結果展示。但因MapInfo更改外部應用軟體與其整合介接的方式, 未來將無法供TELES介接使用。為改善此一問題, 運用開源程式庫Spatialite與MapWinGIS整合既有震損評估模組與

GIS軟體，可使TELES的維護更具彈性，未來推廣台灣地震損失評估相關子系統時，將不再受限於商用軟體之版權和成本限制，更有助於地震風險評估、管理與防災教育等實務應用與推廣。相關階段性成果簡述於「整合震損評估與GIS軟體研究」一節。

震後緊急醫療韌性評估研究方面，當災難型地震造成大量傷患時，醫療院所是否保有緊急救護功能且如何確保傷患得到及時緊急醫療救護，是決定地震對社會的衝擊程度與修復速度的關鍵因素之一。以2018/02/06花蓮地震為例，訪問當地醫院得知，震後兩小時內處理了高達一百名以上的傷病患。急診壅塞容易使傷患無法得到及時診治，導致惡化或提升死亡風險。除了醫療需求增加外，若醫院本身也受地震影響，醫院震損造成醫療資源減少，進而導致緊急醫療能量下降。因此，為了能夠於震前評估急救責任醫院於地震災害下的震損情況，本研究開發了「臺灣急救責任醫院地震損失評估系統」(THospital)，以供震前應變整備使用。相關階段性成果簡述於「震後緊急醫療韌性評估研究」一節。

琉球海溝引致宜花東大規模地震災損推估方面，國震中心配合行政院災害防救辦公室和科技部自然司之指示，110年協助完成宜花東地區大規模地震情境模擬與對策擬定，琉球海溝引致大規模地震即為想定之情境。「震源情境模擬」小組完成琉球海溝的地動模擬後，國家地震工程研究中心(以下簡稱，國震中心)配合該小組的地動模擬結果，利用台灣地震損失評估系統(TELES)分別進行一般建物、人員傷亡、公路橋梁和自來水系統等標的之「災損推估」工作，各種標的之地震災損情境推估結果簡述於「宜花東大規模地震災損推估」一節。

二、近斷層區域震損評估模式精進及應用

2.1 背景說明

本計畫旨於探討近斷層效應對於不同工程結構物之震害影響，精進台灣地震損失評估系統(TELES)的評估模式，以提升評估結果可信度。由於臺灣地區活動斷層密布，重大傷亡事件皆屬活動斷層地震所導致，乃未來國土規劃及地震災害防救之重點。因此，本計畫成果有助於想定地震下，評估及研析近斷層區域之精確災損，協助掌握近斷層災害特性，以研擬更好的地震災害防救計畫。

考慮維生線系統中，大型設施如淨水場與變電所往往占地遼闊，其間的重要設備一旦蒙受近斷層震害，對於自來水及電力系統將影響甚鉅。因此，本計畫本年度乃以九二一地震中的豐原第一、第二淨水場為案例(近二十年實際發生嚴重設施災損且資料保存相對完整之少數案例)，進行：(1)場站平面配置、設備單元關聯性與結構屬性資料收集，工址災害潛勢(含土層破壞)以及整體災損概況研析；(2)淨水程序中，個別膠羽池、沉澱池、快濾池、清水池等要徑設備，實際震害與修復照片整理比對與損害狀態判定；(3)考慮不同池狀結構之耐震易損性，進行淨水場整體災損分析，並與TELES子系統Twater既有模式之結果比對。

2.2 標的設施及其震害

九二一地震是台灣近數十年來傷亡損失最嚴重的自然災害，當時大台中地區自來水系統全面損害，供水困難。台中主要水源為鯉魚潭水庫(大安溪)和石岡壩(大甲溪)之水

庫原水，並分別經由鯉魚潭淨水場以及豐原第一、第二淨水場處理，再提供清水予大台中地區的用戶。地震導致地盤隆起錯位，車籠埔斷層北段石岡、豐原附近破裂帶與重要原水與淨水設施的空間關係，如圖2-1所示。其中，石岡壩因三座溢洪道閘門毀損，庫水傾洩而出，壩體與閘墩局部開裂，部份閘門及其傳動軸變形，無法運作。由石岡壩取水口導引原水至豐原第一、第二淨水場的南幹渠，其中的引水隧道受車籠埔斷層破裂帶通過，隧道末端斷裂錯動3.5公尺，導致兩座淨水場原水中斷(葉純松，2002)。

豐原第一淨水場因西側被車籠埔斷層直接通過，整場遭嚴重破壞，無法使用，歷經長期整修(含部分重建)方得再度運轉，其損害狀態可訂為嚴重且接近完全損害。豐原第二淨水場則因距離斷層破裂帶稍遠，受損相對較輕，經緊急搶修後可勉強出水，其損害狀態可訂為中度損害。另外，兩座淨水場共同對外的一條管徑2000公厘輸水幹管，受地層擠壓嚴重變形破損，無法供水。配置於清水池頂的數台抽水機，均損害不堪使用，其他各項淨水設備、器材大量損壞(台灣自來水公司，2000)。



圖2-1 九二一地震石岡、豐原附近斷層破裂帶與重要原水與淨水設施分布

本計畫收集整理豐原第一、第二淨水場的基本資料，包含場站平面配置、設備單元關聯性與結構屬性資料，以及個別設備的震害與修復照片。以豐原第一淨水場為例，平面配置如圖2-2所示，主要設備均為水池結構，經過比對後，可大致進行標定並作損害情況的判定。參考表2-1所列的水池結構的不同損害狀態以及定義，這兩座淨水場的所有受損水池結構，可分別決定確切發生的損害狀態，供本計畫的震損推估結果比較之用。豐原第一淨水場的一期沉澱池(圖2-3)、15,000噸清水池(圖2-4)，經判定分別為嚴重損害與完全損害。

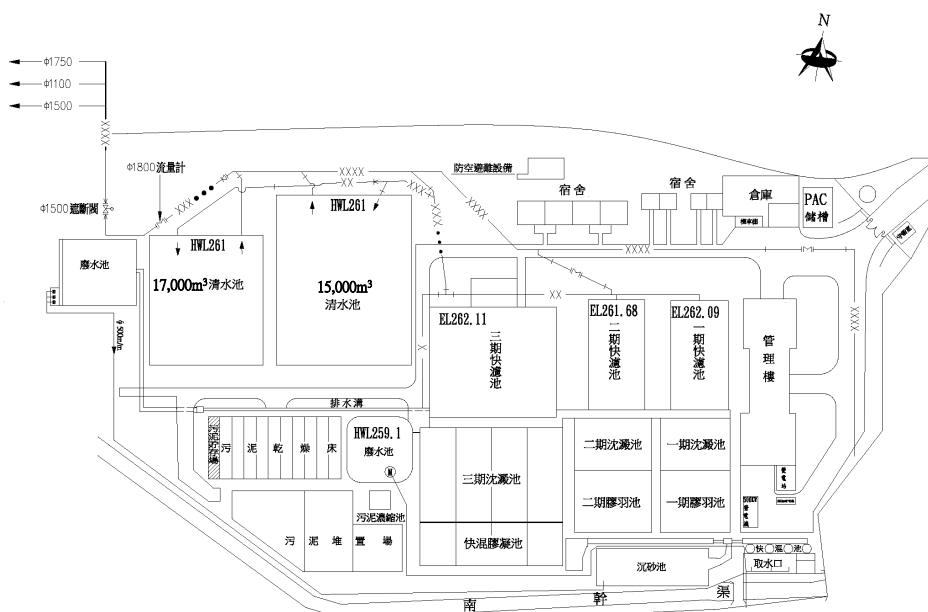


圖2-2 豐原第一淨水場平面配置

表2-1 淨水場之水池結構損害狀態及定義

損害狀態	定義
無損壞	無
輕微損害	池體輕微損壞，例如池頂因水面晃動撞擊而輕微損壞、內柱或內梁輕微開裂、池壁輕微開裂但仍保持水密功能
中度損害	池體相當程度受損，例如內柱或內梁開裂變形但仍穩定、池壁中度開裂且開始滲水
嚴重損害	池體嚴重受損，例如池頂崩塌、內柱或內梁嚴重變形、池壁裂損無法儲水
完全損害	池壁極嚴重開裂或倒塌，儲水盡失



圖2-3 九二一地震豐原第一淨水場沉澱池損害(台灣自來水公司，2000)



圖2-4 九二一地震豐原第一淨水場清水池損害(台灣自來水公司，2000)

2.3 工址地震災害潛勢

根據國震中心趙書賢博士之研究，取得兩次地震的強地動分布資料。該研究以中央氣象局強震測站的實測地震動紀錄為基礎，以500m邊長正方形網格方式，透過數值內插計算，豐原兩座淨水場工址的地震動PGA達354.7g。另外，根據經濟部中央地質調查所的九二一地震車籠埔斷層破裂跡線調查，最近此工址的調查點有二處，斷層錯動造成的高差均為3.5m，水平視位移均為左移約5m(經濟部中央地質調查所，1999)。由於土層劇烈錯動發生於斷層跡線，經過處為豐原第一淨水場之西北隅(圖2-1)，該處緊鄰此淨水場的兩座清水池；至於豐原第一淨水場其他地方與豐原第二淨水場，則根據現場勘查，似僅在數個局部地方發生土層變形的情形。因此，本計畫假設前者(兩座清水池)之地表永久變位為5m，後者(其他)則簡化假設為40cm。以上稱為實際災害潛勢，將用於後面的損害推估。

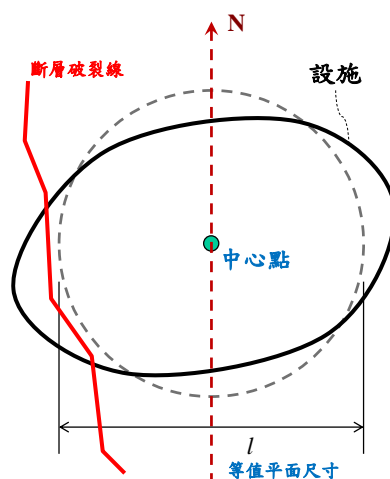


圖2-5 TELES 鄰近斷層設施震損評估模式之空間關係示意圖

倘若根據TELES模式推估九二一地震的地震災害潛勢，則豐原兩座淨水場工址的結果為地震動PGA達0.593g，斷層錯動量達72.27cm，遭遇機率為0.688，土壤液化災害則可以忽略(算例請參閱經濟部水利署，2019)，此推估災害潛勢亦將用於後面的損害推估。對於鄰近斷層的設施，TELES雖然採用「點物件」，根據其中心點(座標)計算至斷層面

之最短距離，評估所在位置的斷層錯動量及遭遇機率，但也會另外根據設施的規模大小，按預設公式概估其所佔據的面積(圓)以及等值平面尺寸，如圖2-5所示，以進一步決定該設施是否被斷層通過以及其後果。詳細的震損評估模式，可參閱經濟部水利署(2019)。

2.4 震損推估模式

本計畫以易損性曲線方式推估損害。易損性曲線用於反映標的物之耐震易損特性，是指發生超越輕微、中度、嚴重、完全損壞狀態的一組四條的超越機率曲線，取對數常態分布(log-normal distribution)之函數型式，由中值和標準差作為參數(FEMA, 2010)。過往研究中，曾針對淨水場及配(清)水池進行易損性曲線參數的研擬，細節可參閱經濟部水利署(2019)。

本計畫之豐原兩座淨水場，按規模均屬該研究中設施分類的大型淨水場。兩座淨水場內的各個水池結構，按底版的連續性以及牆與底版關係，屬於框架式結構，配置方式則均為地上式，另考慮尺寸效應，依容量概分為小型(<1,000噸)、中型(1,000~10,000噸)和大型(>10,000噸)之水池結構。水池結構由於設計與建造上的共通性，可假設配(清)水池的震損評估模式及參數，同樣適用於淨水場內的膠羽池、沉澱池、快濾池等結構。

經整理之Twater淨水場及水池結構易損性曲線參數，包含地震動PGA (中值單位g)以及地表永久變位(中值單位cm，斷層錯動或土壤液化造成)兩類，按設備別分別如表2-2、表2-3所列 (經濟部水利署，2019)。推估淨水場或水池結構發生超越輕微、中度、嚴重、完全損壞狀態的機率時，係採機率集合理論，換言之兩個獨立事件(地震動、地表永久變位分別造成的損害)之聯集的發生機率，為個別獨立事件發生機率之和，再扣掉二者交集的發生機率。

本計畫根據淨水場內的各個水池結構的損害推估，進行淨水場整體的損害推估。推估時考慮對於淨水功能而言屬於必要的設備，亦即所謂的要徑水池，而排除沉砂池、廢水池、汙泥濃縮池非要徑水池不作評估。

表2-2 Twater淨水場及水池結構之地震動易損性曲線參數

設備別	輕微損害		中度損害		嚴重損害		完全損害	
	中值	標準差	中值	標準差	中值	標準差	中值	標準差
淨水場	0.432	0.55	0.576	0.50	0.720	0.45	1.080	0.40
小型水池	0.552	0.55	0.736	0.50	0.920	0.45	1.380	0.40
中型水池	0.504	0.55	0.672	0.50	0.840	0.45	1.260	0.40
大型水池	0.456	0.55	0.608	0.50	0.760	0.45	1.140	0.40

表2-3 Twater淨水場及水池結構之地表永久變位易損性曲線參數

設備別	輕微損害		中度損害		嚴重損害		完全損害	
	中值	標準差	中值	標準差	中值	標準差	中值	標準差
淨水場	22.0	0.60	30.8	0.50	44.0	0.45	66.0	0.45
小型水池	44.0	0.60	61.6	0.50	88.0	0.45	132.0	0.45
中型水池	37.0	0.60	51.8	0.50	74.0	0.45	111.0	0.45
大型水池	24.0	0.60	33.6	0.50	48.0	0.45	72.0	0.45

以豐原第一淨水場而言，係分三期興(擴)建，所以有三套淨水單元。根據圖2-2所示之豐

原第一淨水場平面配置，三套淨水單元各自包含膠羽池(快混膠凝池)、沉澱池、快濾池等，依序串聯而成。淨水單元各自獨立運作，三套採並聯方式，統一自取水口進水，淨水後則各自流入兩作相互並聯的清水池後，再出水至供水區域。按照以上說明，可繪製其要徑水池邏輯圖，如圖2-6所示。在釐清各淨水單元、各要徑水池的串聯或並聯關係後，可根據一般可靠度分析原理，經由各水池結構的可靠度(損害)，計算並決定整體淨水場的可靠度(損害)。

同理，可繪製豐原第二淨水場的要徑水池邏輯圖，如圖2-7所示。

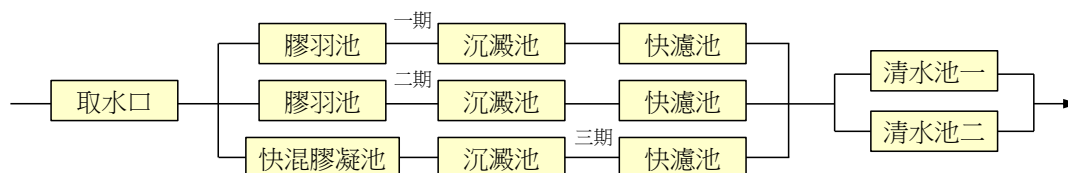


圖2-6 豐原第一淨水場之要徑水池邏輯圖

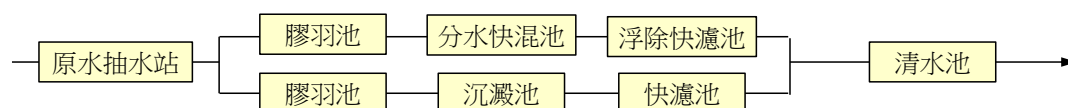


圖2-7 豐原第二淨水場之要徑水池邏輯圖

2.5 震損推估結果比較

根據所研判的各淨水場與要徑水池實際損害狀態(i)，應用 Twater 以及推估或實際災害潛勢所得到的損害狀態推估(ii、iii)，以及本計畫個別要徑水池災損推估與應用邏輯圖而進一步得到的淨水場整體損害狀態推估(iv)，以上結果可整理如表 2-4 所列。

表2-4 豐原兩座淨水場之實際損害與震損推估結果比較

推估標的	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
	實際損害	Twater 推估損害 (推估災害潛勢)	Twater 推估損害 (實際災害潛勢)	本計畫推估損害 (實際災害潛勢)
豐原第一淨水場整體	嚴重(近完全)	嚴重	完全	完全
豐原第一淨水場各要徑水池	完全~中度	-	-	完全~中度
豐原第二淨水場整體	中度	嚴重	中度	中度
豐原第二淨水場各要徑水池	中度	-	-	中度

比較以上各項結果，可知：(1)使用TELES的地震災害潛勢推估值時，所得到的損害狀態與實際差距較大，地震災害潛勢的現象有高度不確定性，近斷層區域內的土層破壞程度與分布更是如此，推估本質即是如此，實屬必然；(2)運用Twater既有模式與本計畫方法，結合實際災害潛勢進行推估，結果與實際損害情況相近，Twater得到淨水場結果，本計畫方法則在過程中同時得到各要徑水池結果，推估細緻度較高，其中豐原第一淨水場的兩座清水池因已賦予實際地表永久變位而均得到完全損害之結果，雖然已知實際災害潛勢屬於「事後諸葛」，但無論如何二者均間接驗證Twater既有模式與本計畫方法的合理性。

本計畫剖析大型設施內要徑設備之耐震屬性與易損性，應用於推估個別設備與整體場站之損害，得到較詳細的災損推估資訊。誠而，近斷層區域的土層破壞程度與分布具

有隨機性，對於個別設備的損害推估影響極大，此點必須特別留意。

三、新一代強地動預估模式整合應用

近年以地球科學地震學領域相關理論為基礎的新一代地震動預估模型研究，逐漸發展成熟成為主流。國震中心在執行台灣核能電廠之高階地震危害度評估計畫 (SSHAC Level3, 2018 年) 時，即是參考美、日及歐洲等國外新一代地震動預估模型，但採用台灣本土的強震觀測資料，建立適用於台灣地區之地震動預估模型，命名為 NCREE 19 (趙書賢, 2019)。

TELES 所採用的地震動預估模型已歷經多年，為使 TELES 接軌新一年代之地震動預估模式，本研究將整合台灣地區之新一代地震動預估模型 NCREE 19，以 $V_{s30}=760(\text{m/s})$ 為參考岩盤，建立適合廣域震損評估之場址效應模式。整合 NCREE 19 的岩盤震動強度推估結果，並結合本研究的場址效應模式研究成果，期可應用於廣域震損評估，更新精進 TELES 之地震動預估模型。

3.1 TELES 場址效應修正模式

國震中心研發之台灣地震損失評估系統 (TELES) 採用的地震動預估模型可概分為「震動衰減律」和「場址效應修正」兩部分。亦即利用與地震規模和距離相關的震動衰減律，概估在參考地盤條件下的震動強度；再利用各地的地盤種類和震動強度等因素，進行場址效應修正。

使用之地震動參數有最大地表加速度 (PGA)、0.3 秒週期結構譜加速度 ($S_{a0.3}$) 與一秒週期結構譜加速度 ($S_{a1.0}$) 等。前述三種地震動參數的震動衰減律和場址效應修正係數皆不同，須個別進行迴歸分析。以 PGA 為例，圖 0-1 所示乃 TELES 所採用的場址效應修正模式示意圖。在推估各地之地震動強度時，可先依震動衰減律獲得岩盤的震動強度預估值 PGA_a ，再比較實測地震動強度 PGA_s 與岩盤震動強度 PGA_a ，藉此獲得不同岩盤震動強度下的場址效應修正係數。地震動強度實測值與岩盤震動強度預估值的比率通常大於 1.0，故場址效應修正係數有時也稱工址放大係數。

配合 TELES 廣域震損評估應用之需求，本研究結合 TELES 之地震動預估模型，成果可供 TELES 進行廣域地震動推估使用。

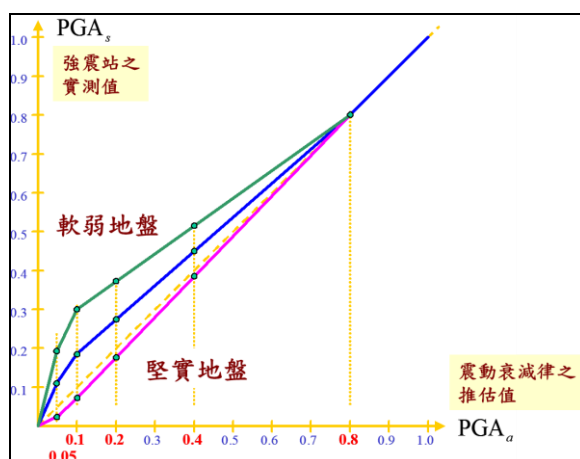


圖0-1 TELES場址效應修正模式示意圖

3.2 研究方法與步驟

本研究除採用 NCREE 19 之地震動預估中值模型推估岩盤震動強度外，也運用該研究所蒐錄的強震紀錄資料庫。該資料庫涵蓋民國 70 年至 105 年台灣地區歷年的強震觀測紀錄，包含中央氣象局裝設之 843 個地震站，365 個地震事件，44,600 筆強震紀錄。本研究保留其中解析度較高的 732 個強震站和挑選適用於場址效應分析的強震紀錄。

採用 NCREE 19 之地震動預估中值模型，假設參考地盤(或岩盤)的剪力波速為 760 m/s，推估在不同地震事件下，各測站所在地之岩盤震動強度。比較推估的參考基盤震動強度與地表測站實測強地動紀錄之差異，並進行迴歸分析，歸納不同震動強度下之場址效應。

逐一檢視個別測站之 PGA 、 S_{a03} 和 S_{a10} 紀錄，多數測站均無足夠的實測地震紀錄供探討場址效應，尤其在地震動強度較大的區間更是缺乏資料點。為彌補個別測站資料點不足的窘境，本研究先探討不同地盤分類之場址效應修正係數。當個別測站無足夠資料點時，即可利用該測站之地盤分類來輔助擬訂其場址效應修正係數。再依個別測站之場址效應修正係數，利用空間內插法計算網格格點之場址效應修正係數。最終可獲得 PGA 、 S_{a03} 和 S_{a10} 在不同震動強度下的場址效應修正係數分布。

因篇幅因素，本文後續主要以 S_{a03} 為例，分別就分類地盤、個別測站和網格格點之場址效應修正係數研究方法與成果進行簡要說明。

3.3 分類地盤之場址效應修正係數

地表下 30 公尺內的平均剪力波速(V_{s30})為工程上普遍應用於區分地盤種類的參數，且各測站皆有 V_{s30} 之量測值或推估值，因此本研究採用 V_{s30} 作為地盤分類的依據。

分別以 760、630、540、450、360、270 和 180 m/s 為界，概分成 8 類地盤。此外，為探討隨岩盤震動強度而變的場址效應修正係數，另將岩盤震動強度劃分為數個區間。

S_{a03} 的前三個區間分別為 0~0.1g、0.1g~0.2g 和 0.2g~0.4g，岩盤震動強度由弱至強，分別以第一、第二和第三區間稱之。前三個岩盤震動強度區間與地盤分類分別統計之實測紀錄的數量，如表 0-1 所示。由該表可知，第一區間的資料數量較多，但第二區間和第三區間的資料數量急遽減少。

表0-1 依震動強度與地盤類別統計 S_{a03} 實測紀錄資料數量

V_{s30} (m/s)	S_{a03} 震動強度(g)		
	0 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4
> 760	423	56	43
760 ~ 630	415	64	31
630 ~ 540	795	155	60
540 ~ 450	1,099	178	78
450 ~ 360	702	101	34
360 ~ 270	572	95	62
270 ~ 180	1,533	179	95
< 180	123	10	8

以 V_{s30} 介於 360~270 m/s 的地盤分類為例， S_{a03} 之岩盤震動強度推估值與地表震動強度實測值的資料分布如圖 2 所示。須留意圖 2 之橫軸與縱軸皆為對數軸。圖中 45 度之斜虛線代表岩盤震動強度推估值等於測站地表震動實測值，亦即無場址放大現象。依 S_{a03} 之岩盤震動強度推估值劃分為 0~0.1g、0.1g~0.2g 和 0.2g~0.4g 等三個區間，各區間之資料點分別進行迴歸分析。迴歸分析所使用的數學模型乃固定斜率為 1 的直線，如下式所示：

$$\log_{10}(y_s) = \log_{10}(y_a) + c \quad (1)$$

其中 y_a 為岩盤震動強度推估值， y_s 為測站地表震動強度實測值，截距 c 為迴歸參數。截距越大表示放大越多，場址效應越明顯。 10^c 則為該區間的場址效應放大倍率，亦即該震動強度區間的場址效應修正係數。

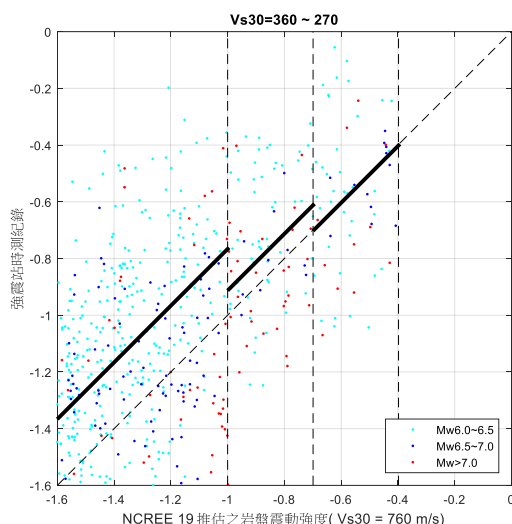


圖0-2 S_{a03} 之岩盤震動強度推估值與地表震動強度實測值的資料分布，以 V_{s30} 介於 360~270 m/s 為例

圖 0-2 之三條粗的 45 度斜線段分別代表前三個區間的迴歸結果。由三個區間所得之迴歸參數可轉換為場址效應的放大倍率，分別為 1.7、1.2 和 1，其值乃代表在岩盤震動強度區間的平均放大倍率。當岩盤震動強度越大，放大倍率越小，場址效應越不明顯。一般而言，第三區間的資料數量較少且場址效應不明顯，或可推論迴歸結果極不可靠，因此本研究僅探討第一區間和第二區間的迴歸結果。不同地盤分類之 S_{s03} 的場址效應迴歸分析結果，以 c 表示，如表 0-2 所示。

表0-2 S_{s03} 地盤分類之場址效應迴歸結果

V_{s30} (m/s)	第一區間	第二區間
> 760	0.0833	0.0000
760 ~ 630	0.0850	0.0000
630 ~ 540	0.1214	0.0418
540 ~ 450	0.1756	0.0662
450 ~ 360	0.2790	0.1628
360 ~ 270	0.2336	0.0870
270 ~ 180	0.3328	0.1344
< 180	0.3478	0.2355

將不同地盤分類之第一區間的場址效應迴歸參數 c 的分析結果繪製於圖 0-3。圖 0-3 中的資料點即為各地盤分類之迴歸參數的分析結果。進一步將圖中各點分別依 PGA、 S_{s03} 與 S_{a10} 進行線性迴歸，迴歸式如下

$$c = a \times V_{s30} + b \geq 0 \quad (2)$$

其中， a 、 b 分別為迴歸係數。依 PGA、 S_{s03} 與 S_{a10} 之平滑化經驗式的迴歸係數 a 、

b 之分析結果如表 0-3 所列，即圖 0-3 中之粗線。如此一來，只要知道某區域的 V_{s30} 即可計算對應的迴歸參數 c 值，並獲得其場址效應修正係數。對應圖 0-3 的場址效應修正係數的計算結果如圖 0-4 所示。

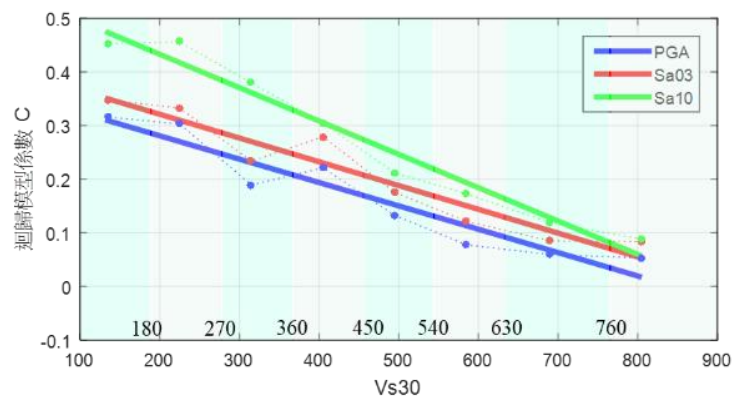


圖0-3 不同地盤分類之第一區間場址效應迴歸係數

表0-3 場址效應迴歸係數 c 於第一震動強度區間之推估經驗式的係數

參數		PGA	S_{a03}	S_{a10}
a		-0.000436	-0.000443	-0.000622
b		0.368253	0.409887	0.557492

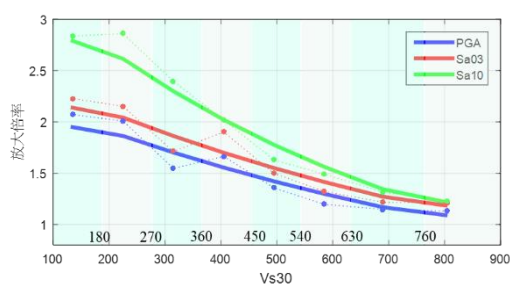


圖0-4 不同地盤分類之第一區間場址效應放大倍率

3.4 個別測站之場址效應修正係數

探討個別測站在不同岩盤震動強度區間的場址效應時，可採用類似式(1)述的迴歸模型，藉以獲得個別測站獨特的場址效應修正係數。但個別測站的資料筆數有限，無法單憑個別測站的資料點獲得可靠的迴歸分析結果；通常須參考個別測站之 V_{s30} 分類地盤的場址效應修正係數。換言之，個別測站在各區間的場址效應修正係數須參採兩種分析結果，其一為依據個別測站的實測地震紀錄，其二為依據個別測站的 V_{s30} 並運用前節所述分類地盤的場址效應修正係數。兩種分析結果的權重可視個別測站在各區間的資料多寡而定。如區間內的資料越多，則可越採信實測地震紀錄的分析結果；此時，也越能反映個別測站的特性。另一方面，即使在無任何資料的區間，也能參考個別測站之 V_{s30} ，獲得近似的分類地盤場址效應修正係數。如此一來，每個測站在各區

間皆可獲得獨特的場址效應修正係數。

個別測站之 S_{a03} 在第一區間的場址效應修正係數繪製，如圖 0-5 所示。圖中粗黑線乃採用 V_{s30} 分類地盤的場址效應修正係數。由圖可窺知，個別測站之場址效應修正係數約略分布於粗黑線的上下，顯示個別測站的場址效應確實與 V_{s30} 相關，但變異性頗大。如單純以 V_{s30} 分類地盤的場址效應修正係數推估想定地震下的地表震動強度，約有一半地區可能有低估的疑慮。

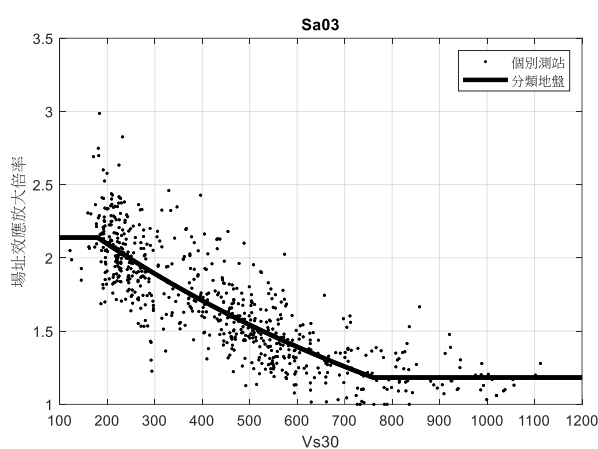


圖0-5 個別測站之 S_{a03} 在第一區間的場址效應放大倍率

3.5 網格格點之場址效應修正係數

從已計算所有測站之 PGA、 S_{a03} 和 S_{a10} 在第一區間和第二區間的場址效應修正係數。依測站所在座標，可進一步利用空間內插法，分別計算 PGA、 S_{a03} 和 S_{a10} 在第一區間和第二區間之場址效應修正係數的分布。具體而言，本研究以 500 公尺x500 公尺網格進行內插分析，進而獲得全台灣各地每一網格中心點的場址效應修正係數，以 S_{a03} 在第一區間為例，內插結果如圖 0-6 所示。

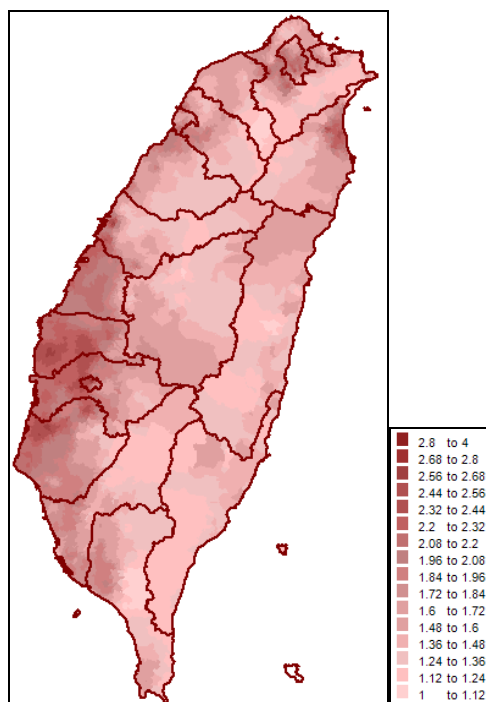


圖0-6 S_{a03} 在第一區間的場址效應修正係數分布

3.6 小結

本研究結合 TELES 地震動預估模型，以 NCREE 19 參考地盤(或岩盤)的剪力波速為 760 m/s 作為「震動衰減律」，分析各測站 PGA、 S_{a03} 和 S_{a10} 在不同震動強度下的場址效應，並內插至其他無測站之區域，得到廣域的場址效應分布，可作為 TELES 進行廣域震損評估時「場址效應修正」之用。待未來程式更新，即可應用於 TELES 之地震動預估模型。

四、整合震損評估與 GIS 軟體研究(1/2)

「台灣地震損失評估系統(TELES)」原先是藉由商用軟體 MapInfo 的資料庫管理、圖形運算與地圖展示等地理資訊系統(GIS)功能，進行地震損失評估與分析結果展示。但因 MapInfo 更改外部應用軟體與其整合介接的方式，未來將無法供 TELES 介接使用。為改善此一問題，運用開源程式庫 Spatialite 與 MapWinGIS 整合既有震損評估模組與 GIS 軟體，可使 TELES 的維護更具彈性，未來推廣台灣地震損失評估相關子系統時，將不再受限於商用軟體之版權和成本限制，更有助於地震風險評估、管理與防災教育等實務應用與推廣。

4.1 研究規劃

新版 TELES 以原本 TELES 既有的系統架構與資料流為基礎，運用微軟公司所定義之 MFC 類別程式庫，將震損評估所需 GIS 功能分別以開源程式庫 Spatialite 與 MapWinGIS 取代。需要整合 Spatialite 之資料庫管理與圖形運算、分析…等功能，以及 MapWinGIS 的地圖展示、圖層控制與主題圖繪製…等使用者介面功能，以完成一

般建築物地震損失評估子系統(Tgbs) 與自來水系統震損評估子系統 Twater 之各項模組的 GIS 功能移轉與更新。本計畫項目期程共兩年，預計在 111 年完成一般建築物地震損失評估子系統(Tgbs)之各項模組的 GIS 功能移轉與更新，工作內容規劃如下：

1. Spatialite 資料庫格式移轉：將既有的各類以 MapInfo 格式儲存之資料表，如行政區界圖資、地震災害潛勢相關參數、一般建築物損害評估所需資料與分析參數、人員傷亡與社會經濟衝擊評估所需資料與分析參數…等檔案移轉為開源程式慣用的 Spatialite 資料庫格式。
2. 系統架構設定：TELES 系統架構設定與主控資料夾之建置，主控資料夾包含基本的行政區界圖資和震損評估所需分析參數資料等檔案外，也存放使用者匯入之評估標的資料。而當新增專案時會建置專案資料夾，並自動匯入震損評估所需各項圖資表格與參數設定，以完成專案資料夾建置。
3. 基本圖資展示與想定地震設定：整合 MapWinGIS 開發圖資展示與使用者溝通平台，在地圖視窗中展示地震事件或斷層等圖資，開發圖層控制對話框，回傳使用者所選取的圖形物件資訊，以提供視覺化的想定地震設定對話框，以完成想定地震事件設定與模擬地震事件資料夾建置等。
4. 震損評估模組之移轉與整合：TELES 包含多個震損評估模組，如推估地震動強度與土壤液化機率的 earthquake 災害潛勢分析模組，Tgbs 子系統獨有的一般建築物損害評估模組以及人員傷亡與經濟損失的模組，以及 Twater 子系統需要的管線類與設施類的損害損失評估模組與推估管網系統損失的模組等，需整合 Spatialite 編輯、儲存、查詢圖形物件等功能，並運用其幾何分析與圖形運算功能，以完成各評估模組的 GIS 功能移轉與更新。
5. 整合 MapWinGIS 與 Spatialite 程式庫：整合 Spatialite 資料庫處理與 MapWinGIS 地圖展示之功能，開發震損評估軟體使用者所需之 UI 介面，藉由查詢介面，讓資料庫能更緊密連結，而資料庫內容、災損模擬結果與查詢結果之表格瀏覽與地圖展示、圖層控制、主題圖繪製等功能，強化使用者操作機制，同時也讓使用者能夠容易掌握資料庫內容。為提升使用者資料展示的方便性，尚須提供完善的地圖展示主題圖繪製功能，包含使用者自訂主題圖繪製介面、震損評估軟體所需之非預設線形樣式與地圖輸出圖形檔案等功能。
6. 子系統之更新與測試：Tgbs 子系統更新完成後需要測試應用程式使用介面各項功能，確認軟體之穩定性和運算效率，並藉由匯入相同的基本圖資、分析參數和設定數個想定地震，比較既有以 MapInfo 為基礎的 Tgbs 和更新後 Tgbs 的各項震損評估結果，以測試及驗證新版 Tgbs 的正確性。

目前已完成上述 1-3 項工作項目，包含整合 Spatialite 資料庫管理功能，完成 Tgbs 子系統之架構設定與主控資料夾之建置；新增專案後，依專案設定匯入震損評估所需各項圖資與特殊設定，完成專案資料夾建置。同時整合 MapWinGIS 開發圖資展示與使用者溝通平台，完成想定地震事件設定。預計 111 年持續進行震損評估模組之移轉與整合、MapWinGIS 與 Spatialite 程式庫整合以及 Tgbs 子系統之更新與測試等工作項

目，以完成一般建築物地震損失評估子系統(Tgbs)之各項模組的 GIS 功能移轉與更新。

4.2 TELES 架構說明

TELES 程式是應用 Visual Studio 的 MFC(Microsoft Foundation Classes) 建立的，除了自行開發的各類震損模式外，其中的 GIS 空間分析運算與地圖展示功能是應用現成的開源程式庫 sqlite、Spatialite 與 MapWinGIS 之軟體功能，TELES 工作項目架構以及與各軟體的相互關係可參見圖 4-1 所示。由 Sqlite 與 Spatialite 軟體提供資料庫管理、資料儲存查詢與空間分析運算功能，而 MapWinGIS 軟體提供地圖展示、圖資套疊等功能，以取代原先商用軟體 MapInfo 功能。但由於開源程式庫 Spatialite 與 MapWinGIS 是兩個不同的軟體，因此如何在兩個程式間傳遞訊息，將 Spatialite 的空間分析結果由 MapWinGIS 來展示是本計畫中最需要克服的難題。其次是開源程式庫不像商用軟體已有成熟的使用者介面，如圖 4-1 所示之使用者對話框、SQL Select、主題圖繪製、圖層控制視窗、訊息視窗、物件之屬性展示視窗等功能，都需要再重新研發製作。

使用 Spatialite 軟體的優點是可以有效的提升運算效率，由於以往 MapInfo 檔案與 TELES 溝通時，檔案內容都須先以文字方式轉換成所需格式，才能使用其資料，但 Spatialite 資料庫可以直接以 Binary 方式讀寫資料，更有效率。且 Spatialite 資料庫可在記憶體資料庫中完成所有讀取計算分析後再一次性地匯入檔案，不需要一直重複讀取寫入動作，大幅地減短分析時間。由於 Visual Studio 軟體與 sqlite、Spatialite、MapWinGIS 開源程式庫都仍不定期的需要升級版本，在升級版本時要注意版本間的相互搭配事項。

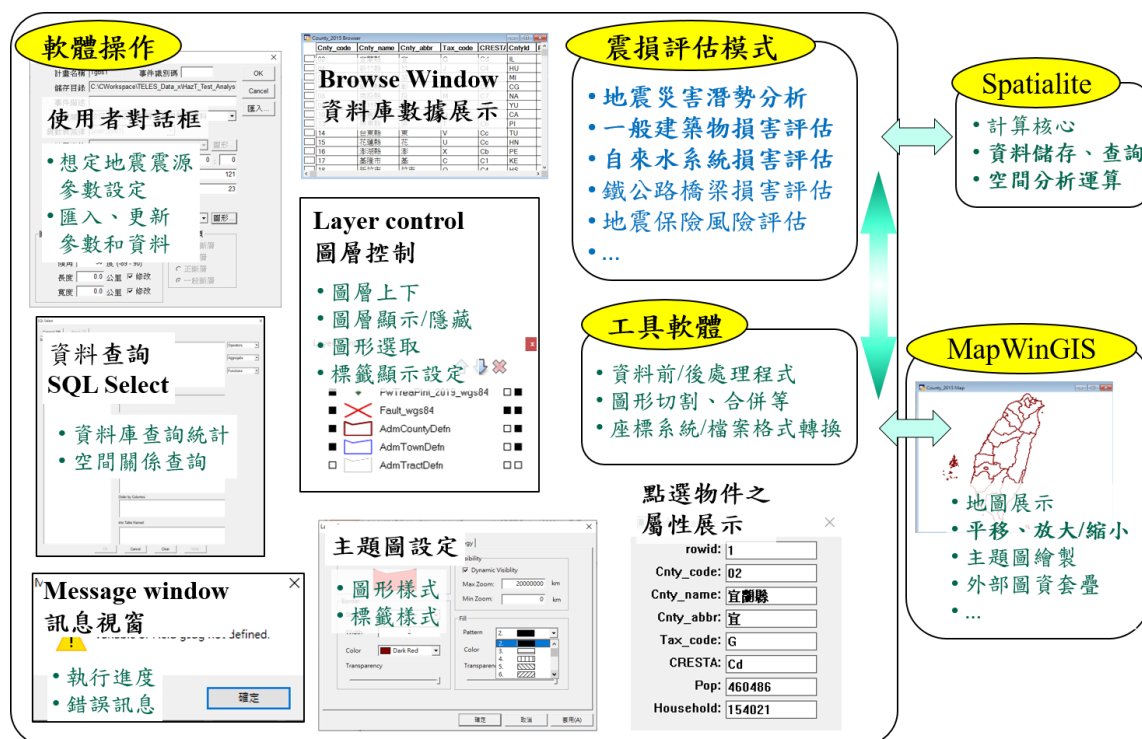


圖4-1 Open GIS震損評估軟體開發架構

目前 TELES 程式已完成 Spatialite 資料庫管理與空間分析運算功能，以及 MapWinGIS 之地圖展示與圖層控制等功能之整合，可進行設定想定地震震源之使用者

對話框、資料庫數據展示、地圖展示等功能。111 年的工作目標為 Spatialite 與 MapWinGIS 兩個程式庫之間的溝通整合以及使用者所需的 UI 介面如 SQL Select、主題圖繪製等功能，以完成震損評估模組之移轉與整合以及 Tgbs 子系統之更新與測試等工作項目。

4.3 資料處理說明

在 TELES 中採用兩種資料格式，分別為 Shapefile (.shp) 與 Spatialite(.sqlite)資料庫格式。Shapefile (.shp) 格式檔案為資料匯入前的基本資料，主控資料夾、專案資料夾或是模擬地震事件資料夾中的檔案是 Spatialite(.sqlite)資料庫格式。在 TELES 中 Master Settings 功能可以設定基本資料夾、主控資料夾與專案資料夾的路徑，如圖 4-2 對話框所示。而 Register 功能可以將基本資料夾中的 Shapefile (.shp) 格式檔案轉換為 Spatialite(.sqlite)資料庫格式後匯入到主控資料夾中，各資料夾格式與建置方式可參見表 4-1 內容。

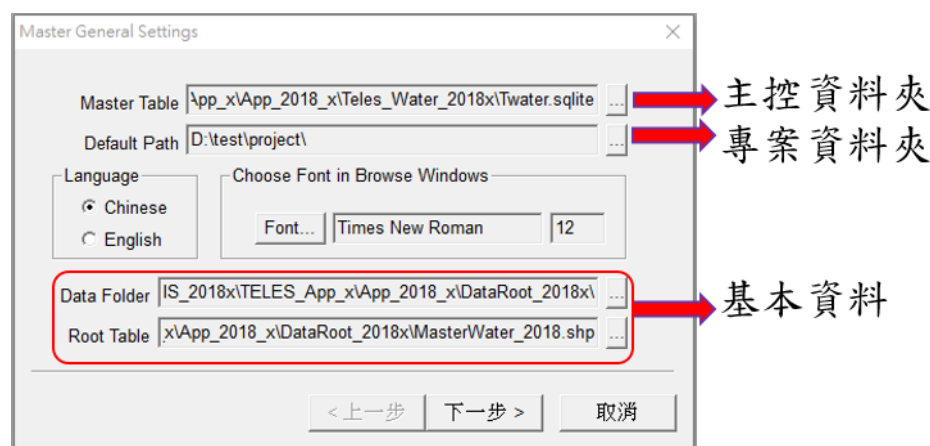


圖0-1 Master Settings對話框設定資料夾

表0-1 資料夾格式與建置方式說明

名稱	資料格式	匯入方式
基本資料夾 DataRoot	shapefile	原始資料須自行建置
主控資料夾 Master Folder	Spatialite	Register：依據 MasterWater.shp 檔案由基本資料夾匯入
專案資料夾 Project Folder	Spatialite	Aggregate：由主控資料夾匯入 Import：選取 shapefile 檔案匯入

主控資料夾包含 4 個資料庫 DataAdmin.sqlite、DataPesh.sqlite、Analysis.sqlite 與如 Tgbs.sqlite。DataAdmin 與 DataPesh 這 2 個資料庫內容是共用的，而 Analysis 與 Tgbs 資料庫內容會隨各子系統需求而有所不同。專案資料夾 Project Folder 是執行建立新專案功能時建置的，建立專案資料夾 Project Folder 的同時會將主控資料夾 Master Folder 中的相關資料，DataAdmin.sqlite、Analysis.sqlite 與專案名稱.sqlite 匯入專案資料夾 Project Folder 內，在專案中匯入建物資料時會將相關資料建置至 DataGbs.sqlite 資料庫中，建立模擬地震事件時會將相關資料建置至 DataDhcs.sqlite 資料庫中。新增模擬地

震事件時，會在專案資料夾中建置 SCENARIO 模擬地震事件資料夾，SCENARIO 資料夾中為各個模擬地震事件的資料夾，以模擬地震事件名稱(m_strScenID)為資料夾名稱，每個模擬地震事件資料夾中都包含地震潛勢分析結果資料庫 ScenPesh.sqlite 與建物震損評估分析結果資料庫 ScenGbs.sqlite。

4.4 小結

TELES 程式運用開源程式庫 Spatialite 的資料庫管理、空間分析運算功能與 MapWinGIS 的地圖展示功能，以取代原先商用軟體 MapInfo 功能，完成既有震損評估模組與 GIS 軟體之更新及整合，可使 TELES 的維護更具彈性。且未來推廣台灣地震損失評估相關子系統時，將不再受限於商用軟體之版權和成本限制，更有助於地震風險評估、管理與防災教育等實務應用與推廣。

使用 Spatialite 資料庫的優點是可以有效的提升運算效率，直接以 Binary 方式讀寫資料。且可在記憶體資料庫中完成所有讀取計算分析後再一次性地匯入檔案內，不需重複進行讀取寫入動作，大幅地減短分析時間。但由於 Spatialite 與 MapWinGIS 是兩個不同的軟體，因此如何將 Spatialite 的空間分析結果資訊傳遞至 MapWinGIS 來進行地圖展示是需要克服的難題。其次是開源程式庫不像商用軟體已有成熟的使用者介面，因此所有的使用者 UI 介面能，都需要再重新研發。

目前已完成整合 Spatialite 資料庫管理與空間分析運算功能，完成 Tgbs 子系統之架構設定與主控資料夾、專案資料夾建置，並整合 MapWinGIS 地圖展示與圖層控制功能以完成想定地震事件設定。預計 111 年持續進行震損評估模組之移轉與整合、MapWinGIS 與 Spatialite 程式庫整合以及 Tgbs 子系統之更新與測試等工作項目，以完成一般建築物地震損失評估子系統(Tgbs)之各項模組的 GIS 功能移轉與更新。

五、震後緊急醫療韌性評估研究

5.1 前言

1971 年美國加州 San Fernando 地震、1994 年北嶺地震以及日本阪神地震的醫院建築勘災報告中，都有地震導致災區醫院嚴重受創而無法參與救災的記錄。台灣處於環太平洋地震帶，近年來震度六級以上地震紀錄中，如：1999 年集集地震、2006 年台東、恆春地震、2010 年高雄甲仙地震等，都有發生醫院無法發揮醫療機能的情形。從這些經驗中得知，當災難型地震造成大量傷患時，醫療院所是否保有緊急救護功能且如何確保傷患得到及時緊急醫療救護，是決定地震對社會的衝擊程度與修復速度的關鍵因素之一。

根據我國緊急醫療救護法規定，急救責任醫院需辦理的緊急醫療業務，第一項即為「全天候提供緊急傷病患醫療照護」，故急救責任醫院必須在大地震後仍能執行緊急醫療工作。為能即時掌握與識別大地震發生時，這些醫療重要設施的地震風險，本研究團隊以建置急救責任醫院之地震風險評估系統為目標。

除此之外，以 2018/02/06 花蓮地震為例，訪問當地醫院得知，震後兩小時內處理了高達一百名以上的傷病患。急診壅塞容易使傷患無法得到及時診治，導致惡化或提升死亡風險。除了醫療需求增加外，若醫院本身也受地震影響，醫院震損造成醫療資

源減少，進而導致緊急醫療能量下降。因此，為了能夠於震前評估急救責任醫院於地震災害下的震損情況，本研究開發了「臺灣急救責任醫院震損評估系統」(以下簡稱 THospital)，以供震前應變整備使用。本章節將介紹 THospital 雛形系統與其功能，功能介面主要分為五大區塊，如圖 5-1 所示：(1) 資料選擇區：選擇地震事件與欲評估之縣市區域、(2) 計算功能區：提供 6 項基本功能、(3) 顯示數值區：顯示計算後的數值、(4) 額外功能區：提供更多使用功能，如：呈現易損性參數曲線、按照能力分級篩選急救責任醫院、進行損壞模擬、(5) 地圖顯示區：圖形化呈現地震潛勢與醫院位置於地圖之上。

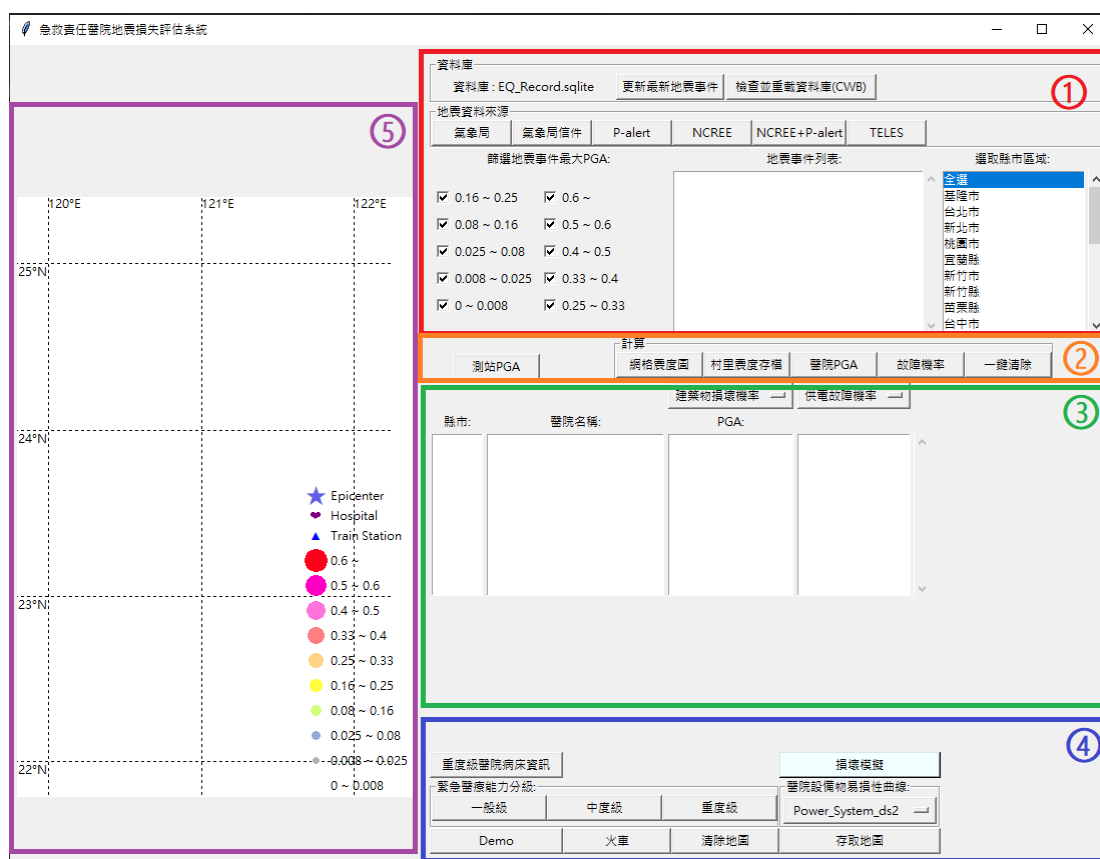


圖5-1 THospital使用者介面首頁畫面

5.2 地震事件與評估區域選擇

開始評估前，使用者必須選定地震事件。於資料選擇區塊內，選擇地震事件來源，如圖 5-2 所示，本系統提供六種地震事件資料庫。其中，氣象局、P-alert、NCREE、NCREE+P-alert 為利用 Python 網路爬蟲函式庫 (urllib2) 擷取網站上的地震資料所建構之地震事件資料庫，分別為收集氣象局地震速報測站 (Rapid Earthquake Information Release System, RTD)、台灣大學吳逸民教授開發之 P-alert 測站以及國震中心(NCREE) 強地動測站的地震資訊。氣象局郵件則為地震事件發生後，由氣象局主動發送 RTD 測站地震資訊的即時電子郵件。除了以上 5 種實測地震資料外，本系統介接台灣地震損失評估系統 (TELES; Taiwan Earthquake Loss Estimation System) 以取得推測地震事

件。以上地震資料均以 SQL 關聯式資料庫儲存。

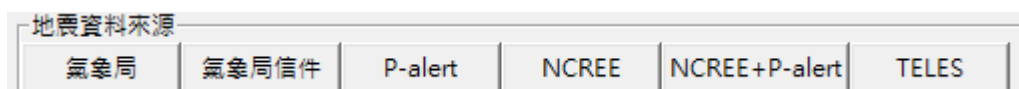


圖5-2 地震事件來源

選定地震事件來源後，本系統將讀取對應資料庫，並於地震事件列表中列出所有事件，同時顯示事件代碼與最大 PGA (Peak Ground Acceleration)。使用者可於事件列表左方「篩選地震事件最大 PGA」區塊，自行勾選 PGA 範圍，進行資料篩選（見圖 5-3）。於地震事件列表中選取事件後，該事件會以藍色反白顯示。之後便可選擇評估縣市，預設為「全選」，即評估全臺所有縣市之急救責任醫院。若使用者欲分析特定縣市，則取消「全選」，並選取欲評估之縣市，可同時選取多個縣市，已選取之縣市同樣以藍底反白標示。

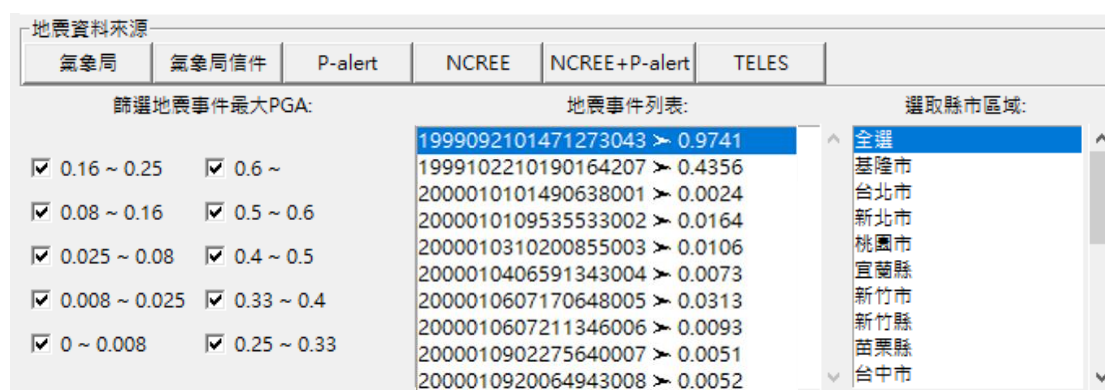


圖5-3 地震事件篩選與區域選擇

5.3 醫院場址 PGA 推估

完成事件與評估區域選擇後，本系統從醫院資料庫中篩選出座落於該區域內之所有急救責任醫院，並將縣市與醫院名稱列於顯示數值區塊內的「縣市」與「醫院名稱」窗格（見圖 5-4）。由於醫院之震損受醫院場址 PGA 影響，也就是地震當下，該醫院所在位置之地震動大小。本系統以 Kriging 內插法，從地震事件資料庫取得各測站測得該事件的最大 PGA，以及從醫院資料庫取得醫院位置，再由測站位置到醫院位置以內插方式求得各醫院的場址 PGA。

本系統自動記錄醫院 PGA 計算歷史於資料庫中，開始評估前，系統搜尋事件場址 PGA 資料庫，若資料庫中缺乏該事件之醫院場址資料，則介面顯示「未計算」，提示使用者必須點選計算功能區塊中的「醫院 PGA」進行計算。醫院 PGA 計算結果對應醫院名稱顯示於右方之 PGA 顯示窗格（見圖 5-4）。

縣市:	醫院名稱:	PGA:
台北市	台北醫學大學附設醫院	未計算
台北市	國泰醫療財團法人國泰綜合醫院	
台北市	財團法人臺灣基督長老教會馬偕新	
台北市	台北市立萬芳醫院 - 委託財團法	
台北市	國立台灣大學醫學院附設醫院	
台北市	臺北榮民總醫院	
台北市	三軍總醫院附設民眾診療服務處	
台北市	新光醫療財團法人新光吳火獅紀念	
台北市	振興醫療財團法人振興醫院	
台北市	長庚醫療財團法人台北長庚紀念	

圖5-4 評估醫院列表與醫院PGA

5.4 醫院建築結構損壞推估

完成上述事件選擇、評估縣市選擇，並取得醫院 PGA 後，便可進行損壞機率評估。點選計算功能區塊內的「故障機率」按鈕開始計算，根據使用者的電腦效能，所需執行時間通常約 2~5 分鐘，執行進度可由標題列得知。若選擇之事件曾經過計算且評估結果存在於本系統的資料庫中，則系統直接從資料庫取出評估結果，毋須重新計算。計算完畢後，點選額外功能區的「Demo」按鈕於介面呈現評估結果。以下將詳細介紹結構物損壞機率評估方法、計算邏輯與系統操作。

結構物的震損狀況主要受到地震動強度與建物本身之屬性影響，本系統之結構分析依賴醫院建築物屬性資料庫與結構物易損性參數。以下將詳述本系統採用之醫院建築物屬性資料庫建置方法、建物耐震屬性參數，以及損壞機率評估方法與介面操作。

醫院建築物屬性資料庫資料來源為內政部房屋稅籍資料，房屋稅籍資料中記錄課稅單位的位置描述與建物資料，包含結構損壞推估相關的耐震屬性，如：建造年代、樓層數、構造類別等資訊。根據衛福部公布之急救責任醫院名單，於醫院資訊公開平台取得各家醫院地址，並以地址作為索引，比對房屋稅籍資料庫中的位置敘述，取出各家醫院的建物資料，建置成醫院建築物屬性資料庫。以圖 5-5 為例，比對醫院代號 Demo001 的地址與房屋稅籍資料，成功比對出 13 棟建物，分別取得每棟建物的構造類別 (classification)、樓高 (floors) 與建造年代 (constr_yr)，紀錄於醫院建物屬性資料表。

Liao (2006) 依照構造類別、樓高、耐震設計，將建物分類為不同的模型建物，並將損壞分為四種損壞狀態 (damage state)：輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞、完全損壞，提出相應的易損性參數，以評估不同模型建物面臨不同強度 PGA 時，各建築物處於不同損壞狀態的損害機率 (failure probability)。本系統將 Liao 提出的易損性參數建置成表格儲存於醫院建築物關聯性資料庫 (如圖 5-6)。表中耐震等級 (resistance_level) 依照建造年代分為低 (L)、中 (M)、高 (H) 三種層級：1981 年以前 (含) 為低耐震設計規範、1982 年至 1988 年 (含) 為中耐震設計規範、1989 年以後為高耐震設計規範。除此之外，樓高分為低 (L)、中 (M)、高 (H)、超高 (SH)，分別對應 3 樓以下 (含)、4 至 7 樓 (含)、8 至 18 樓 (含)、19 樓以上 (含)。假設易損性是具有中值 x 和對數標準偏差 β 的雙參數對數常態分佈函數，導入地震動 α 可得到損壞概率，如下方程式所示：

$$P(\alpha) = \Phi \left[\frac{\ln(\alpha/x)}{\beta} \right]$$

易損性參數如圖 5-6 中所記，x 為易損性曲線函數中值，代表 PGA 強度達到易損性中值時，超越損害機率為 50%，beta 則表示易損性曲線的離散程度。易損性曲線如圖 5-6 所示，X 軸為 PGA，Y 軸為超越損壞機率。建物易損性曲線可於 THospital 額外功能區塊中的易損性曲線選單中選取繪製。

hospital_id	building_id	classification	floors	constr_yr
Demo001	1	C1H	17	2002
Demo001	2	C1H	14	2006
Demo001	3	C1M	4	1983
Demo001	4	C1L	1	1991
Demo001	5	C1L	2	1964
Demo001	6	C1M	4	1965
Demo001	7	RML	3	1964
Demo001	8	C1H	10	1992
Demo001	9	C1M	4	1974
Demo001	10	C1M	6	1976
Demo001	11	C1L	3	2002
Demo001	12	RML	1	1964
Demo001	13	C1H	8	1994

圖5-5 醫院建物屬性資料表

classification	resistance_level	x	beta	seismic_detail
S1L	L	0.200000	0.500000	鋼構造
S1L	M	0.250000	0.500000	鋼構造
S1L	H	0.300000	0.500000	鋼構造
S1M	L	0.210000	0.500000	鋼構造
S1M	M	0.250000	0.500000	鋼構造
S1M	H	0.300000	0.500000	鋼構造
S1H	L	0.210000	0.500000	鋼構造
S1H	M	0.230000	0.500000	鋼構造
S1H	H	0.290000	0.500000	鋼構造
S1SH	L	0.210000	0.500000	鋼構造
S1SH	M	0.230000	0.500000	鋼構造
S1SH	H	0.290000	0.500000	鋼構造

圖5-6 易損性參數對應表

本系統將建築物損壞評估結果以獨立視窗呈現，點選顯示數值區塊內的「建築物損壞機率」即開啟新視窗顯示每家醫院每棟建物的損壞機率（圖 5-7）。為方便檢視，醫院名稱下方標註該建物的基本屬性資料。使用者可自行點選視窗上方的區域分頁，自行選擇查看不同區域的醫院建物評估結果。若未於選擇評估縣市時選擇該區域之縣市，則該分頁顯示內容為空白。點選上方欄位名稱「縣市」、「醫院名稱」、「building_id」、

「DS1~5」，則可對該欄位進行排序顯示結果。DS 代表損壞狀態，1 至 5 分別為：無損壞、輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞、完全損壞。

縣市	北區	中區	南區	高屏區	東區	醫院名稱	building_id	PGA	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1H, constr_year = 2002, floors = 17	1	0.2939	0.592	0.313	0.084	0.008	0.004
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1H, constr_year = 2006, floors = 14	2	0.2939	0.592	0.313	0.084	0.008	0.004
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1M, constr_year = 1991, floors = 4	3	0.2939	0.461	0.420	0.082	0.019	0.018
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1L, constr_year = 1964, floors = 1	4	0.2939	0.461	0.367	0.113	0.035	0.024
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1L, constr_year = 1993, floors = 2	5	0.2939	0.281	0.393	0.170	0.080	0.077
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1M, constr_year = 1965, floors = 4	6	0.2939	0.343	0.458	0.115	0.040	0.045
台北市						台北醫學大學附設醫院 RML, constr_year = 1964, floors = 3	7	0.2939	0.251	0.267	0.221	0.140	0.120
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1H, constr_year = 1992, floors = 10	8	0.2939	0.403	0.383	0.169	0.027	0.018
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1M, constr_year = 1974, floors = 4	9	0.2939	0.343	0.458	0.115	0.040	0.045
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1M, constr_year = 1976, floors = 6	10	0.2939	0.343	0.458	0.115	0.040	0.045
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1L, constr_year = 2002, floors = 3	11	0.2939	0.592	0.313	0.071	0.010	0.014
台北市						台北醫學大學附設醫院 RML, constr_year = 1964, floors = 1	12	0.2939	0.251	0.267	0.221	0.140	0.120
台北市						台北醫學大學附設醫院 C1H, constr_year = 1994, floors = 8	13	0.2939	0.403	0.383	0.169	0.027	0.018
台北市						國泰醫療財團法人國泰綜合醫院 C1M, constr_year = 1976, floors = 6	1	0.3139	0.296	0.462	0.130	0.050	0.062
台北市						國泰醫療財團法人國泰綜合醫院 C1L, constr_year = 1976, floors = 3	2	0.3139	0.239	0.381	0.181	0.096	0.104
台北市						財團法人臺灣基督長老教會馬偕紀念社會事業基金會馬偕紀念醫院 C1H, constr_year = 1980, floors = 13	1	0.3923	0.143	0.329	0.288	0.106	0.135
台北市						財團法人臺灣基督長老教會馬偕紀念社會事業基金會馬偕紀念醫院 S1H, constr_year = 1999, floors = 16	2	0.3923	0.273	0.513	0.162	0.031	0.022
台北市						台北市立萬芳醫院 - 委託財團法人私立臺北醫學大學辦理 SRC1H, constr_year = 1995, floors = 13	1	0.2823	0.435	0.377	0.153	0.024	0.012
台北市						台北市立萬芳醫院 - 委託財團法人私立臺北醫學大學辦理 C1L, constr_year = 1995, floors = 3	2	0.2823	0.493	0.356	0.102	0.029	0.019
台北市						國立台灣大學醫學院附設醫院 SRC1H, constr_year = 1991, floors = 15	1	0.377	0.229	0.366	0.264	0.080	0.061

圖5-7 建築物損壞機率

六、救援道路規劃與地震阻斷風險評估

6.1 背景說明

救援道路為災害發生時，提供生命救援與快速復原之維生線。負擔機具、車輛、人員、物資之運輸與對外聯絡之重要任務。是故，災前依據地理環境、災害潛勢、路網條件、人口與建物分布等，預先劃定救援道路為防災規劃的重要環節之一。在災中與災後，掌握道路災損與救援是否可及受災區域，亦為重要議題。在災害管理上，不論國內外皆視救援道路規劃與其風險之管理為重要議題。例如，鄰近之日本，部分地方政府即訂定相關政策，列救援道路兩旁之建築物為優先耐震補強之標的。國內內政部營建署亦訂有「防災道路與避難據點規劃準則」[14]。但由於台灣本島內都會區地形相對複雜、城鄉交錯與道路寬度等級不一等因素，地方政府在實地進行救援道路規劃時面臨相當之挑戰。故至今除臺北市已公告「臺北市重大災害緊急救援路線」[13]外，其它都會區雖有相關學術研究成果或類似之救援計畫，但未見官方正式版本與統合性規劃。例如，新北市雖訂有「新北市地震廣域救災外部支援作業指南」，但僅規劃重大災害發生時廣域集結點與外部縣市支援之聯絡道路，對新北市內部區域間之連結與台北市跨河之相互支援與風險較無著墨。

本技術之發展，以大台北地區為研究區域，研究過程即緊密與臺北市政府消防局、新北市政府消防局、國立台灣大學土木系與台灣世曦工程顧問有限公司等單位進行協作。近年累積之成果，已建立適用台灣地區的救援道路規劃模式[36]與道路於地震災害衝擊下的阻斷風險評估模式[18, 37, 38]。並透過彙整大台北地區的災害潛勢、數值路網、人口與建築分布、車流動態、重要跨河橋梁與救援據點資料等，建立一個適用路網震後阻斷衝擊評估的『數值路網與救援據點資料庫』。這個資料庫可配合發展完成的模式，因應在地政府的需求，對現有的救援道路進行地震風險評估與重新規劃。

6.2 救援道路規劃模式

本救援道路規劃模式之建置，參考內政部營建署的「防災道路與避難據點規劃準則」[14]，「防災道路」係指連繫各指定臨時避難場所和各防救災據點設施間的主要動線通路，亦為災害發生時第一時間逃生、避難和救援之路徑，是都市防救災計畫中極為重要的一部份，必須隨時保持暢通來確保其功能得以正常發揮。綜合來說，救災道路的擇定以道路本身的路寬條件與是否串接重要救援據點為主要的考量因素。本模式利用規劃流程可概分為以下幾個步驟：

步驟一：優先候選路線選取：選取 15 公尺以上或道路等級為縣道之道路，這裡的縣道是以道路等級。以新北市為例升格前為台北縣，已成直轄市前的道路等級為參考，考慮台灣特殊地形與歷史變革等因素，在規劃時得特別將此因素列入。

步驟二：區域重要據點選擇：選取區域內人口聚集區、重要救援據點（例如：醫院、消防隊、收容所）、重要交通據點（例如：跨河橋匝道，高速公路與快速公路匝道出入口），選定市政府與各行政區區公所代表救援據點。

步驟三：利用路網設計模型，（請參考圖 6-1），考慮救援據點相互間進行救援之情境下，效益最佳之路徑與周邊替代路徑。考慮區域內既有的道路狀態、優先選取候選路線、連接鄰近縣市的已規劃完成的救援道路。例如，規劃新北市時將台北市已規劃完成的重大災害救援道路的聯絡列為考量。

數學規劃模式的基本原理，大致上是先確立救援據點，例如消防隊視為供給節點。然後將受災區域視為需求節點。最後以地區的數值路網為基礎，建構一個網路流動問題求解。最適化的目標在求解相互救援時間(成本)最小化。限制式中，有三個最重要的考量條件為：(1)旅行成本：由車輛旅行時間、路寬條件決定。(2)救援需求：以建築人口稠密區與交通要道為主體。(3)節線權重：已規劃救援道路的區域其節線成本折減。

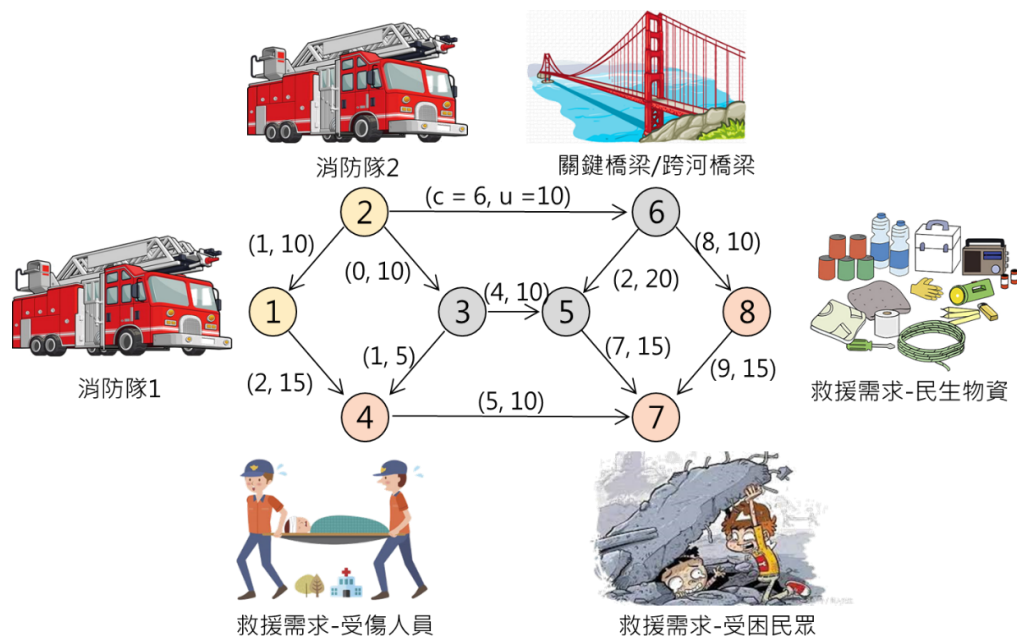


圖 6-1 救援路網數學規劃模式示意圖

6.3 數值路網與救援據點資料庫

本計畫所用之數值路網是以用 104 年交通部數值路網圖為基礎，輔以政府開放資料，並經過研究者 GIS 幾何座標校正建立。校正所得的數值路網圖，如圖 6-2，包含台北市、新北市與基隆市三個行政區。救援據點主要是以政府開放資料為主，包含醫院、收容所、消防、政府機關等。

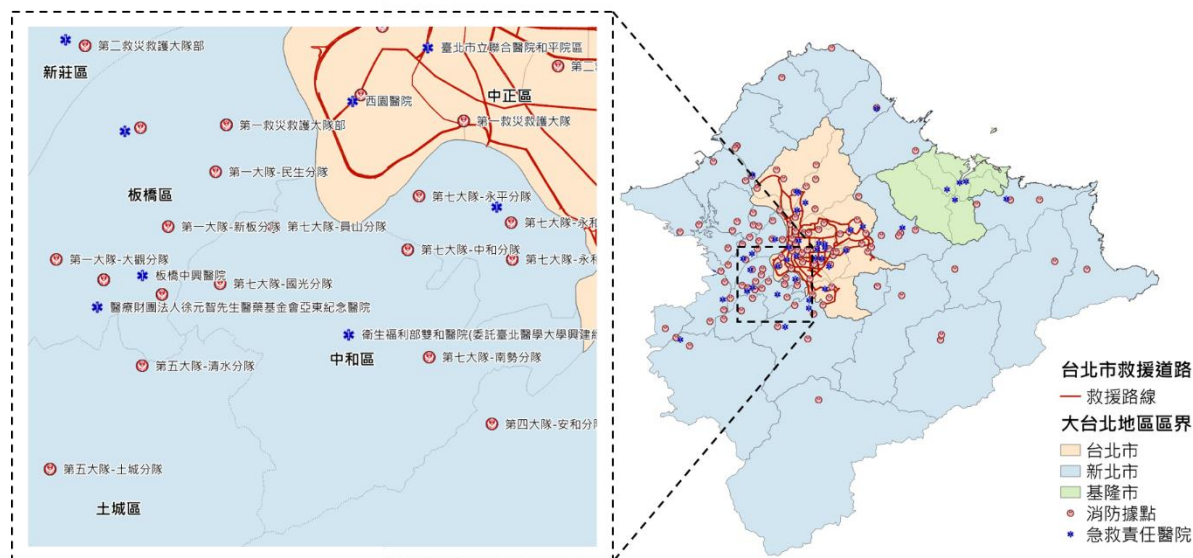


圖 6-2 新北市與周邊城市救援據點示意圖

大台北地區的道路等級多樣，包含高速公路、省快速道路、省縣道、市區道路、市區快速道路、產業道路、無名道路等。除參考行車速限差異外，各種道路等級的路

寬條件也因地形出現不均值的變化。以高速公路為例，大部分的情況下國道的路寬比省快速道路的寬度更寬。例如，如果比較特殊地形下的極值，研究區域內的省道快速道路寬度在特殊區域可能會大於國道。因存在這種不均值的現象，在救援道路規劃時如果以嚴格的路寬限定來選擇路線，則道路間的聯通可能會出現斷鏈之情況。透過完整現地資料的收集，本計畫建立『數值路網與救援據點資料庫』。這個資料庫，可配合本數學規劃模式，解決台灣地區因為城鄉區域混合的複雜境況，在規劃救援道路時所造成的挑戰。

6.4 新北市救援道路規劃

配合新北市特殊的地理環境與台北市已經公告的重大災害緊急救援道路，進行新北市的救援道路規劃，將整個大台北地區的路網，以及鄰近的桃園市部分列入考量。利用上節所敘述的規劃原理，以整個新北市都會區的建物稠密區與偏鄉地區的聚落為需求節點，並以大台北地區內可提供救援的據點為供給節點，利用本數學規劃模式完成救援路網規劃，如圖 6-3。救援路網求解時是以整個大台北地區整體的數值路網圖進行求解，數學模式內的變數包含整體北北基地區數值路網圖的所有節線（數量約有 14 萬左右）、新北市內選定的重要交通節點、救援據點與需求節點。求解時，於新北市與基隆市地區的道路節線，旅行時間設置是以道路等級之速度限制為基礎。台北市因為已完成救援道路規劃，其救援道路旅行時間，則乘以折減係數，而非救援道路則遵守同樣的設置原則。此設置在規劃模式上的效果是進入台北市區域優先使用其救援道路。



圖 6-3 大台北地區全區救援路網示意圖

6.5 大台北地區救援道路地震阻斷風險分析地圖

救援道路的阻斷，考慮之因子有二，一為臨路建築物倒塌對救援道路之影響，臨

救援道路兩旁之建築物係透過彙整房屋稅籍資料與地址定位資料，標定建物耐震特性，識別路段因臨路建物震後倒塌之阻斷風險；二為連接道路之關鍵設施橋梁對救援道路之影響，將透過橋梁資料之整理與想定地震境況模擬，研析與標示其震後損壞引致之路段阻斷風險。

臨路建物震後倒塌而引致的道路阻斷之分析，引用朱易昌等人[18,37,38] 衍生自 Pho Thanh Tung[39]之分析方法，針對台灣境況發展之量化指標進行。包含建築殘骸散落寬度嚴重性指標與影響路段長度比例指標兩個指標，以下簡略說明兩個指標的計算公式。建築殘骸散落寬度嚴重性指標(指標一)：綜合考量路段相鄰建物樓高、構造類別、倒塌機率、液化程度、最大地表加速度、臨路街廓數等參數，本指標以表現在想定地震境況下，因臨路建築倒塌對路段橫向使用寬度(車輛可用車道)造成危害的嚴重性。建築殘骸散落影響路段長度比例指標(指標二)：考慮街廓形狀因子、建物基地面積、倒塌機率、液化程度、最大地表加速度、臨路街廓數、路段長度等參數。代表在想定地震境況下，路段因臨路街廓內建築倒塌而受影響的程度。

橋梁損壞震後損壞而引致的道路阻斷之分析，所使用之橋梁資料，包含新北市橋梁 1441 座、台北市橋梁 409 座、基隆市橋梁 221 座，橋梁屬性資料，包含識別橋梁的基礎資料、結構形式、橋頭橋尾座標等。將上述橋梁資料經比對彙整後，轉換為 TELES [15]子系統 Thighway [16, 17]所需的橋梁震損評估資料。資料校正確認後，即採用 TELES 進行想定地震境況下橋梁阻斷風險評估。

請參考圖 6-4 與 6-5 分別為大台北地區，想定地震境況下，建物倒塌引致阻斷風險與橋梁損壞引致阻斷風險地圖，紅色代表高風險而黃色為中風險。這裡分析標的於台北市選定官方公告之路線，新北市則為本數學規劃模式求解所得。想定地震的震源參數，列於表 6-1。

表 6-1 想定地震震源參數

斷層別	規模 (ML)	深度 (km)	傾角 (度)	長度 (km)	寬度(km)
山腳斷層	17	6	65	16.0	13.2



圖 6-4 大台北地區想定地震境況下建物倒塌引致阻斷風險示意圖



圖 6-5 大台北地區想定地震境況下橋樑損壞引致阻斷風險示意圖

6.6 結論與後續發展

本年度(110 年)即協助臺北市政府建立『臺北市救援路線地震阻斷風險分析地圖』，臺北市政府以其檢視既有救援道路的地震風險。後續，將在救援道路替代方案與臺北市區內其它道路相關地震風險分析方面繼續進行研究。110 年度亦利用本技術協助新北市完成『新北市救援道路規劃與地震阻斷風險分析』。為落實推動新北市之救援道路規畫成果，於本年度年 12 月由本中心主辦，新北市消防局及台灣世曦工程顧問公司協辦，辦理『新北市救援道路規劃工作坊』。彙整在地政府與協力機構意見，成果深獲肯定，目前正與新北市消防局進行技術整合討論，後續本成果將整合於新北

市『全災型智慧化指揮監控平臺』，協助新北市政府進行災害管理。

本技術後續亦可應用於大台北地區外之縣市，協助各都會區對救援道路進行規劃，並針對臨路建築與橋梁進行想定地震境況下之風險分析。此分析結果可應用於地震發生時排定優先巡檢之標的，於防災整備時，可針對建物及橋梁之耐震補強進行優選排序，或納入都市更新及階段性補強之名單參考；針對想定地震境況下，高地震阻斷風險之路段鄰近之街廓，建議政府加強推動補強政策。例如，階段性補強方案，可列為優先補助之區域。而高風險橋梁亦可建議對其現況與耐震能力進行詳細評估，確認其安全性並進行補強與替代方案探討。

七、宜花東大規模地震災損推估

7.1 背景說明

中央災害防救會報於 106 年 5 月 11 日第 36 次會議決定，啟動「震源情境模擬」、「災損推估」及「因應對策」等小組，共同進行大規模地震情境模擬與對策擬定。由國立中央大學馬國鳳教授帶領的「震源情境模擬」小組完成地動模擬，國震中心配合該小組的地動模擬結果，利用台灣地震損失評估系統(TELES)完成「災損推估」工作，將結果提供因應對策小組作為後續研擬因應對策的參考。106 年至 107 年針對「山腳斷層南段錯動」的大規模地震模擬分析大台北都會區可能的災害情境，108 年完成台灣周遭隱沒帶震源引致大規模地震，對大台北都會區之衝擊情境模擬。109 年則探討「中洲構造引致大規模地震」對南部地區之衝擊。國震中心持續配合震源情境模擬結果進行災損推估工作並精進評估技術，未來將逐步完成竹苗和東部等地區的大規模地震情境災損推估，供各地研擬因應對策與防災整備之參考。以下針對宜花東大規模地震災損推估結果分段說明。

7.2 一般建物損害與人員傷亡評估結果

在花蓮外海引致大規模地震情境下，TELES 之一般建物災損推估結果，展示如圖 7-1，分別為宜花東地區高中低樓層全半倒棟數分布，其中高樓層為 8-16 樓建築物，中樓層為 4-7 樓建築物，低樓層為 1-3 樓建築物，半倒為對應於建築物嚴重損害之棟數，全倒為對應於建築物完全損害之棟數。由分布圖可知，建物損害較嚴重之行政區為花蓮市(229 棟)、吉安鄉(52 棟)和宜蘭縣的羅東鎮(54 棟)。

人員傷亡評估模式考慮因一般建築物損害所引致的傷亡數量，人員傷亡程度概分為四級：第一級(輕傷)僅需基本治療，不需住院；第二級(中傷)需較多的醫療手續且需住院，但無生命危險；第三級(重傷)若無適當搶救且迅速的送醫治療將有立即的生命危險；第四級(死亡)則是震後立即死亡。圖 0-2 為宜花東地區各時段之人員傷亡數量分布，圖中所示之傷亡數量為第三級(重傷)與第四級(死亡)之數量總和。由推估數值得知，宜花東人員傷亡數量較嚴重之行政區為花蓮市、吉安鄉和宜蘭縣的羅東鎮等。

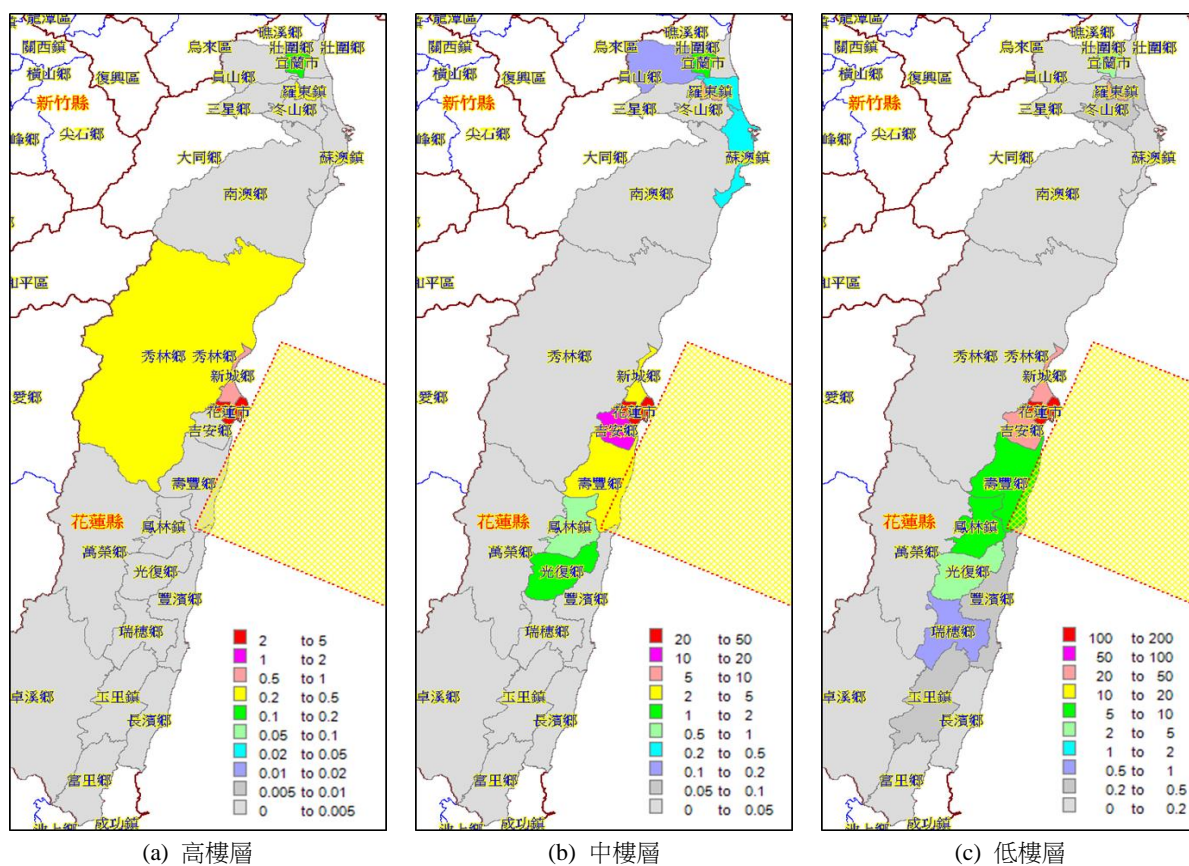


圖 0-1 宜花東全半倒棟數分布

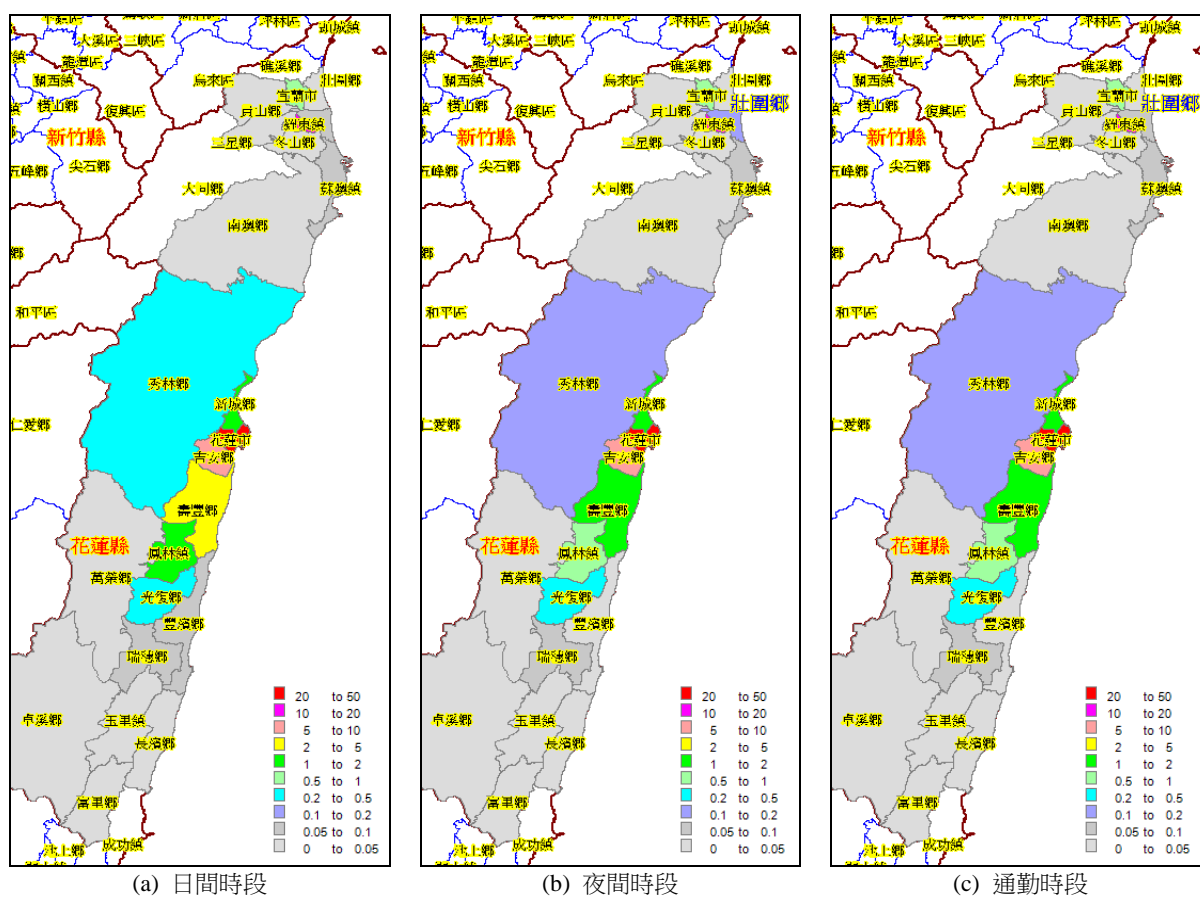


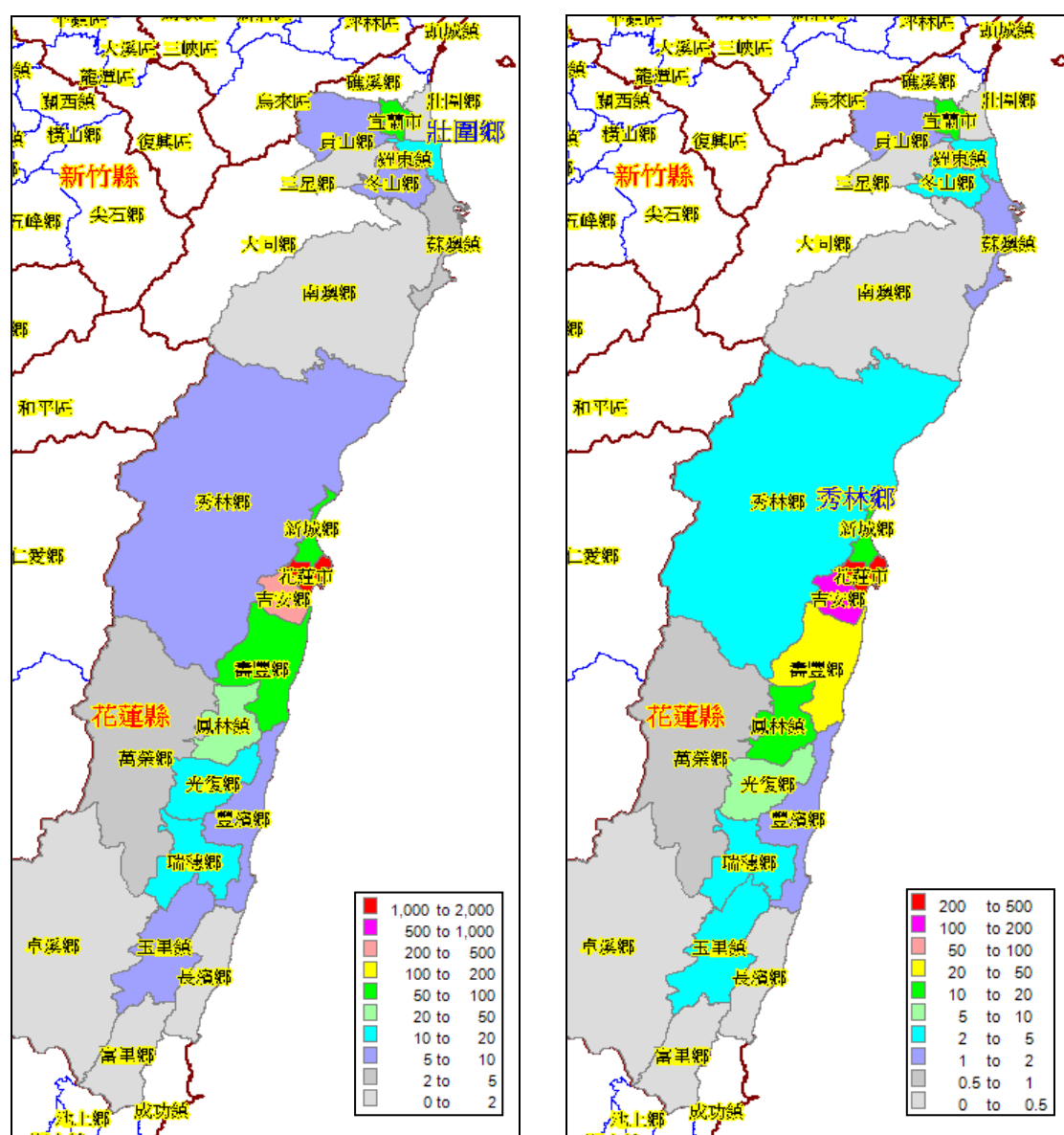
圖 0-2 宜花東人員傷亡數量分布

7.3 避難收容

震後避難行為可概分為緊急避難、短期收容和長期安置等三個階段。當強烈地震剛發生時，一方面住宅可能損害不堪居住，一方面擔心餘震隨時會再發生，因而有緊急避難的需求。主震過後數日內，大多數的民眾將視情況回到自己的家、借住親友家、投宿旅社或需政府提供短期收容的地方。藉由一般建築物損害評估結果，可推估由建築物損害而導致需搬遷人數與短期避難收容需求。

震後需搬遷戶數與搬遷人數乃指因建築物損壞、民生系統(如自來水、瓦斯或電力系統)停擺，甚至因震後火災或有毒物質外洩等二次災害，原有的住所已無法提供正常的生活機能而需要搬遷的戶數與人數。

圖 0-3 為宜花東地區需搬遷人數分布和臨時避難收容人數分布。由推估數值得知，花蓮市震後臨時避難收容人數需求較高。



(a) 需搬遷人數分布

(b) 臨時避難收容人數分布

圖 0-3 避難收容需求分布推估

7.4 公路橋梁損害評估

宜花東交通路網較西部都會區單純，僅宜蘭有國道 5 號，花蓮、台東皆無國道。因震源於花蓮外海，位於陸路上的公路橋梁無遭受斷層錯動引致地表破壞之疑慮，且因距離較遠，震動強度較小，因此國道和省縣道公路橋梁的損害推估結果皆無損壞。部分橋梁評估結果雖無損壞，但仍建議震後仍須注意其狀況，其分布如圖 0-4 所示，大致可看出皆是位於花蓮縣較近震源的公路橋梁。



圖 0-4 宜花東省縣道公路無損壞仍須注意橋梁

7.5 自來水系統損害評估

本次模擬琉球海溝想定事件，供水設施震損推估結果彙整如表 7-1 所列。大致而言，各項設施震損推估結果並不嚴重，震後主要設施包含淨水場、配水池、加壓站及水管橋均無損壞，但台水九區淨水場、配水池及水管橋，仍有部分設施標示無損害，然而輕微損害之機率仍存在，建議須作警戒，這些設施所需修復所需金額約 4.2 百萬元，修復所需天數為 38 天。

管線災損數與停水戶數統計如表 7-2 所列，由表可知自來水管線災損數最多的為台水九區，占整體管線量體的九成以上，其因為斷層破裂面延伸花蓮外海鄰近台水九區，因此對於台水九區之管線較具影響，想定地震情境下供水評估單元別自來水管線災損數分布如圖 7-10 所示，以台水九區的鳳林系統、北吉安、壽豐、花蓮市、南吉安和美崙供水評估單元中之管線災損推估數較多，這 6 個供水評估單元中之災損數皆達 100 處以上。整體管線之修復所需金額，推估約 26,599,800 元，修復所需人時，推估約 28,745 人時，倘若以 100 人的工班投入搶修，並以每日工作 10 小時估計，則約需 1 個月的時間方能完全修復。停水戶數總計約為 15,970 戶，其中亦以台水九區影響較大約有 14,527 戶可能遭受停水所苦。

表7-1 供水設施震損結果統計

管理單位	淨水場		配水池		加壓站		水管橋		總損失 (百萬)	修復所需 天數
	總數量	無損壞，但仍需注意	總數量	無損壞，但仍需注意	總數量	無損壞，但仍需注意	總數量	無損壞，但仍需注意		
台水八區	24	-	28	-	12	-	2	-	-	
台水九區	32	10	11	1	7	0	56	11	4.2	38
台水十區	43		3		尚無資料		尚無資料			
合計	99	10	42	1	19	0	58	11	4.2	38

表7-2 管線災損數與停水戶數統計

管理單位	管線總災損數 (處)	管線修復所需人時 (人時)	管線修復所需金額 (千元)	受影響戶數	每日配水量(CMD)	缺水量(CMD)	缺水率(%)	停水戶數
台水八區	44	737	703.1	80,269	105,654	2,683	2.54	1,422
台水九區	1,957	27,935	25,815.1	107,315	112,897	19,047	1377	14,527
台水十區	4	74	81.6	6,945	5,118	21	0.41	21
總計	2,004	28,745	26,599.8	194,529	223,669	21,751	9.72	15,970

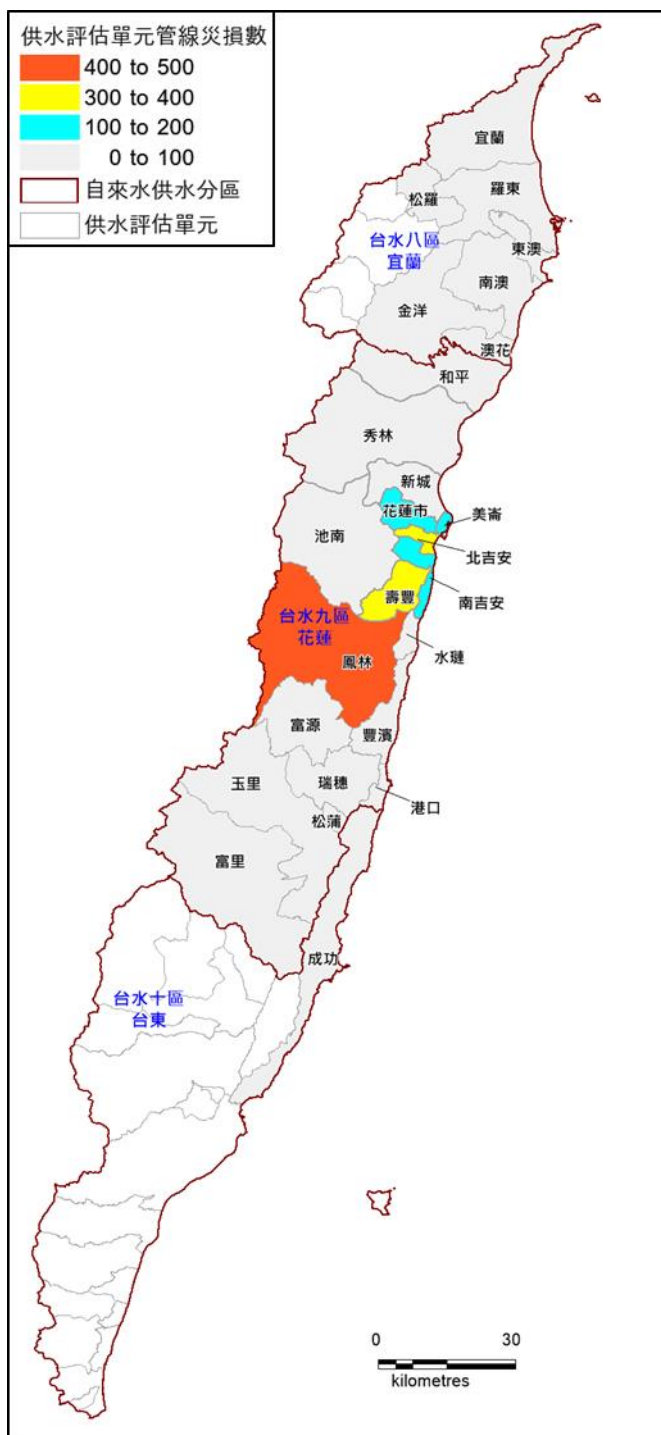


圖7-10 供水評估單元自來水管線災損分布

參考文獻

1. 花蓮縣政府，2018，「花蓮地震橋梁特檢表」，花蓮。
2. 洪曉慧、陳俊仲、蘇進國、李柏翰、江奇融、宋裕祺，2018，「0206 花蓮地震橋梁震損調查與分析」，中華民國第十四屆結構工程研討會暨第四屆地震工程研討會論文集，論文編號 24014，台中。
3. 張國鎮，1999，「九二一集集大地震全面勘災報告—橋樑震害調查」，國家地震工程研究中心研究報告，編號 NCREE99-055，台北。
4. 經濟部中央地質調查所，1999，「九二一地震地質調查報告」。
5. 經濟部中央地質調查所，2018，「20180206 花蓮地震地質調查報告」。
6. 新北市.(2015). 新北市災害防救深耕第 2 期計畫. 新北市消防局委託專業服務. 台灣大學氣候天氣災害研究中心團隊執行.
7. 許聖富.(2003). 基隆市防災道路與避難據點之規劃. 基隆市共同管道系統整體規劃案-防災道路研討會論文集
8. 王聖銘(2000)，「九二一集集地震資料分析與災情資訊管理系統之發展」，國家地震工程研究中心研究報告，編號 NCREE-00-056，台北。
9. 蕭江碧等(1999)，「九二一集集大地震全面勘災報告—建築物震害調查」，國家地震工程研究中心研究報告，編號 NCREE99-054，台北。
10. 蕭江碧、李秉乾、周天穎(2001)，「九二一大地震建築震害特性分析與統計」，內政部建築研究所，台北。
11. 葉錦勳、謝旻諺、李君宇、張光仁、羅俊雄，2002，「土壤液化潛能分區與評估參數研究」，液化潛能評估方法及潛能圖之製作研討會，國家地震工程研究中心主辦。
12. 葉錦勳、劉季宇、范秋屏、陳志欣、於積璿，2019，「建置配水管網地震損害風險地圖」，成果報告，臺北自來水事業處，2019 年 5 月。
13. 台北市政府交通局交通管制工程處，2019。行車管制/台北市重大災害之緊急救援路線，網址取自：
<https://www.bote.gov.taipei/News.aspx?n=ABCA7DF2180572E8&sms=E3EF5A43DA22E1CB>（資料取得時間：29/06/2021）。
14. 內政部營建署，2011。防災與救援據點規劃準則，內政部營建署。
15. 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。
16. 劉季宇、葉錦勳、張國鎮，2011。公路橋梁地震早期損失評估資料庫建置與模組開發之研究，交通部運輸研究所委託研究報告，國家地震工程研究中心。
17. 葉錦勳、黃李暉、劉季宇，2014。國道橋梁 TELES 系統地震損失評估之研究（含地震特別檢測時機建議），林同棧工程顧問公司委託研究報告，國家地震工程研究中心。
18. 朱易昌、林偲妘、楊承道、曹雅筑，2021。台北市救援道路受震損建物殘骸阻斷風險分析，營建工程與管理學術研討會暨國際會議，台北，台灣。

19. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2009). 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Retrieved from https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf.
20. Shiu, M.N. (2013). Emergency Department Overcrowding Analysis and Countermeasures. Department of Medical Affairs. Ministry of Health and Welfare. Retrieved from <https://www.mohw.gov.tw/dl-3079-d8ff7291-e302-4a8f-a2a5-8208c4a1ada2.html>.
21. Favier, P., Poulos, A., Vásquez, J.A., Aguirre, P. and de la Llera, J.C. (2019). Seismic risk assessment of an emergency department of a Chilean hospital using a patient-oriented performance model. *Earthquake Spectra*, 35(2), 489-512.
22. Côté, M.J. (1999). Patient flow and resource utilization in an outpatient clinic. *Socio-Economic Planning Sciences*, 33, 231-245.
23. Müller, K. and Vignaux, T. (2003). SimPy: Simulating Systems in Python. ONLamp.com Python Devcenter.
24. Ministry of the Interior. 2019. Summary report by central emergency operation center for 0206 Hualien Earthquake.
25. Kao, C.Y., Yang, J.C. and Lin, C.H. (2015). The impact of ambulance and patient diversion on crowdedness of multiple emergency departments in a region. *PLoS ONE*, 10(12), 1-14.
26. Werner, S. D., Taylor, C. E., Cho, S., Lavoie, J. P., Huyck, C. K., Eitzel, C., ... & Eguchi, R. T. (2006). Redars 2 methodology and software for seismic risk analysis of highway systems (No. MCEER-06-SP08).
27. Yeh C H, Loh C H, Tsai K C. Overview of Taiwan earthquake loss estimation system[J]. *Natural hazards*, 2006, 37(1-2): 23-37.
28. Poulos, A., Favier, P., Vásquez, J. and de la Llera, J.C. (2015). "Scenario-based seismic performance assessment of a Chilean hospital," *Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 156.
29. Housner, G.W. (1963). "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 403-417.
30. Yim, C.S., Chopra, A.K. and Penzien, J. (1980). "Rocking response of rigid blocks to earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8, 565-587.
31. Ishiyama, Y. (1982). "Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 635-650.
32. Boroscheck, R.L. and Romo, D. (2004). "Overturning criteria for non-anchored non-symmetric rigid bodies," *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 295.
33. Nezamisavojbolaghi, K. and Hosseini, M. (2017). "Behavior of special hospital equipments as rigid block with mass eccentricity subjected to horizontal component of ground motion," *Procedia Engineering*, 199, 753-758.

34. Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K., 1982, "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquake", Proceedings of the Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Volume II, pp. 925-939.
35. Yeh, C. H., G. Y. Liu and L. H. Huang 2015. "New Study on Soil Liquefaction Susceptibility Categories," 9th WRF/JWWA/CTWWA Water System Seismic Conference, Sendai, Japan.
36. Cheng-Tao Yang, Chi-Hao Lin, Yi-Jie Chuang, Wei-Hsueh Huang, 2019. Development of Seismic Impact Assessment for Taiwan Road Network, International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taipei, Taiwan.
37. Yi-Chang Chu, Szu-Yun Lin, 2022. Post-Earthquake Risk and Vulnerability Assessment of Rescue Roads, 12th National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Salt Lake City, UT.
38. Yi-Chang Chu, Szu-Yun Lin, Cheng-Tao Yang, 2022. Post-earthquake road risk and vulnerability assessment: A case study of Taipei City. National Taiwan University, Taipei, Taiwan. (文稿處理中)
39. Pho Thanh Tung, 2004. Road vulnerability assessment for earthquakes. ITC-Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Nepal