

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	楊承道 ¹	劉季宇 ¹
Yeh, Chin-Hsun	Yang, Cheng-Tao	Liu, Gee-Yu
林祺皓 ¹	陳志欣 ¹	黃尹男 ²
Lin, Chi-Hao	Chen, Chih-Hsin	Huang, Yin-Nan
范秋萍 ¹	黃為學 ¹	
Fan, Chiu-Ping	Huang, Wei-Xue	

¹財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

²國立台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(108)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)地震防災與應變雲端資訊服務、(3)震後路網阻斷衝擊評估研究、(4)醫院震後功能性衝擊研究、與(5)自來水系統地震風險評估研究。

關鍵詞：震損評估、早期評估、近斷層、急救責任醫院、交通路網、自來水系統

Abstract

This research project “Seismic Risk Assessment and Management Platform” continues studies and implementations of improved methodology, database and services related to earthquake loss estimation. It aims at providing the government agencies and utility managers with the know-how to achieve better seismic hazard mitigation, preparedness, emergency response and recovery. The research subjects of Year 2019 consist of: (1) Data collection and models for near-fault earthquake loss estimation (2) Development of Taiwan Early Seismic Loss Estimation Website; (3) Seismic risk assessment of roadway and highway networks; (4) Evaluation of post-earthquake functionality of hospitals; and (5) Seismic risk assessment of water supply systems.

Keywords: early seismic loss estimation, seismic risk assessment, near fault, first-aid hospitals, roadway and highway networks, water supply system

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)[5], 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(108)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)地震防災與應變雲端資訊服務開發、(3)震後路網阻斷衝擊評估研究、(4)醫院震後功能性衝擊研究、(5)自來水系統地震風險評估研究, 以下分節概要說明。

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, 本子計畫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, 以研擬更好的地震災害防救計畫。本子計畫擬以三年時間, 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(第一)年度工作項目, 為整理九二一地震建築物震害資料, 並初步進行建築物災損與地震動、斷層錯動的關聯性分析。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。

地震防災與應變雲端資訊服務開發方面, 以國震中心研發之TELES為基礎所發展之地震防災與應變網路服務-「台灣地震早期損失評估資訊網」, 在震後能快速提供震損評估結果予政府事業主管機關、防災協力機構等單位, 以利於進行災情研判, 輔助其救災應變作業。為持續精進及強化「台灣地震早期損失評估資訊網」之輔助分析能力, 本子計畫整合與蒐集中央氣象局地震活動彙集資訊整合及外部圖資, 發展地震活動彙集資訊之查詢, 震度分佈主題圖之繪製, 前震、主震、餘震靜動態展示等輔助功能。相關階段性成果簡述於「地震防災與應變雲端資訊服務」一節。

震後路網阻斷衝擊評估研究方面, 以台北都會區為研究區域, 針對台灣地區道路震後衝擊評估模式進行研究, 目的在於建立一套適用台灣都會區道路於震災衝擊下的阻斷損失評估模式以協助於震前對道路進行地震災害風險檢視與防災規劃。本子計畫規劃三年完成, 本(第二)年度將以107年建立的資料庫為基礎, 考量市區道路、關鍵基礎設施(消防局與醫院)的區位、建物耐震特性, 建立路網震後阻斷衝擊評估模式。相關階段性成果簡述於「震後路網阻斷衝擊評估研究-以台北都會區為例」一節。

醫院震後功能性衝擊研究方面，主要為探討醫院建築內的偏心非結構構件受到水平地震力時的晃動及傾倒行為。隨著建築技術的進步和法規的發展，建築物的結構耐震性能已經有明顯的提升，但是建築內的非結構物卻沒有受到相同程度的重視。近年來的地震災區紀錄中，受到地震襲擊後的建築物，醫院結構本身通常沒有受到嚴重的損害，但是建築內的非結構物等設備與構件受到破壞的情形卻相當普遍，導致醫療能力大幅下降。本子計畫以醫療空間內的醫療設備為研究標的，將其視為具有質量偏心的剛性塊進行分析。相關階段性成果簡述於「醫院震後功能性衝擊研究-以台北都會區為例」一節。

自來水系統地震風險評估研究方面，本年度配合國震中心承接北水處委託研究計畫「建置配水管網地震損害風險地圖」進行應用研究。臺北自來水事業處(北水處)轄區內之盆地效應明顯，導致其自來水設施與管線容易受遠域大規模地震的影響。鄰近盆地西北側有經濟部中央地質調查所公布之第二類活動斷層—山腳斷層，一旦該斷層破裂可能引致災難性的大規模地震。根據工程地質鑽探結果也顯示臺北盆地內飽和鬆散的砂土在強震作用下有極高的土壤液化災害潛勢。為防範強震對輸配水設施與管線的威脅，本子計畫主要研究課題在釐清北水處轄區內的土壤液化災害潛勢，並建議既有配水管線汰換為NS耐震管的優選排序。相關成果簡述於「建置北水處配水管網地震損害風險地圖」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

近斷層區域之地震災害潛勢，以斷層錯動(土層破壞)與具速度脈衝型式之地震動為主。對於不同樓高及結構型式的建築物，會有不同的破壞模式與機率；其次，對於線型結構物，例如鐵公路橋梁或維生管線，隨斷層距離與方位角、上下盤位置之不同，亦可能造成多樣的損害模式與狀態；最後，大型維生系統設施如淨水場、變電所等往往占地遼闊，要徑上的設備一旦遭逢近斷層地震災害而損害，則對於自來水及電力系統影響甚鉅。本(108)年度，首先為建置歷史地震近斷層區域的建築物震害資料庫。

2.2 九二一地震建築物震害資料庫建置

本子計畫整理之建築物震害資料來源有二，一為國震中心的九二一集集地震資料分析與災情資訊管理系統(Chi-Chi Earthquake Database and Management System, 簡稱CEDAMS資料；王聖銘, 2000)[1]中的災損普查紀錄，有按勘災調查表填寫之完整紀錄，單位為「棟」、「處」。另一為根據地震後各鄉鎮公所之慰助金印領清冊(Subsidy List, 簡稱SL-921資料)所整理建置的資料(蕭江碧等, 1999 & 2001)[2,3]，登載有房屋全半倒情形及受災戶地址，單位為「戶」。經過門牌號碼的正規化，以及比對地震發生年的房屋稅籍資料後，可以還原個別損害建築物的樓地板面積、構造類別、樓層數、建造年代、座標點位等，資料筆數共44,672筆(以門牌號為單位)，比對率達75.12%，如表2-1所列，可供未來進一步研究分析之用。

根據統計分析結果，九二一地震當時全國建築物(以房屋稅籍資料為基準)，總門

牌號數共3,613,893號，按樓地板面積統計之不同構造別占比如圖2-1(左)所示。其中，C1L、C1M、C1H、RML、RMM等五種，分別為鋼筋混凝土造的低、中、高，以及加強磚造低、中樓層數的建築物，占總量之大宗；其他一種，為土、磚、木構造，在中部地區鄉間占比頗高，損壞比例亦高，然多未按規範設計建造，較無工程意義。由於SL-921資料中建築物損害僅有全、半倒之別，不敷使用，故本研究分別假設為嚴重、中度損害，乃不得不之保守詮釋，須予留意。如此，九二一地震超越中度、嚴重損害建築物之構造別占比，如圖2-1(中、右)所示。

表2-1 九二一地震建築物震害資料整理概況

	CEDAMS 資料	SL-921 資料
整理前	9,352 (棟、處)	84,255 (戶)
整理後	17,203 (號)	49,634 (號)
整併後資料數	59,466 (號)	
損害程度	完全毀壞(整體或部分塌陷) 完全毀壞(整體或部分傾斜) 嚴重破壞(補強或拆除) 中度破壞(可修復或補強) 輕度破壞(可修復)	全倒(假設嚴重損害) 半倒(假設中度損害)
可比對門牌號數	44,672 (號) 比對率 75.12%	

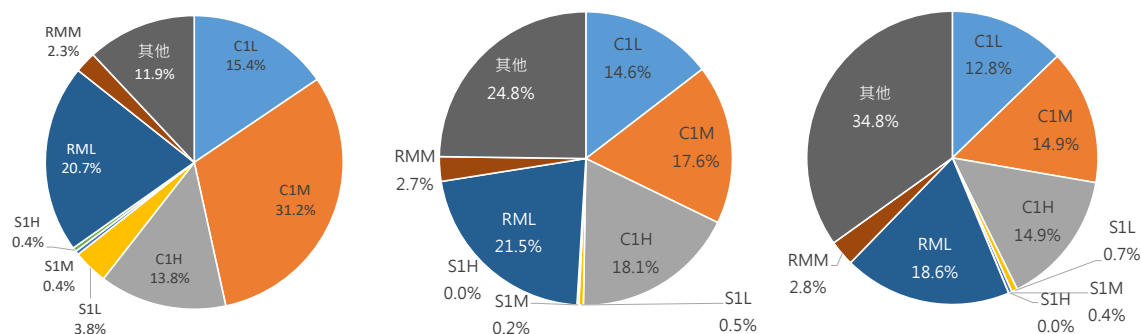


圖2-1 九二一地震全國建築物(左)、超越中度(中)、嚴重(右)損害建築物構造別占比

2.3 九二一地震建築物震害初步分析

就地震動PGA值、斷層破裂帶、地震動具速度脈衝特徵之區域，分別研析不同構造類別、樓高、…等的建築物耐震易損性，亦即不同母群建築物的超越中度、嚴重損害之災損率，探討與這些因子間的關聯性。九二一地震之震央、車籠埔斷層破裂帶、地震動PGA分布與受損建築物點位，以及地震紀錄具有速度脈衝特徵測站(共52座)的位置等，如圖2-2所示(中部地區)，後二者由國震中心趙書賢博士提供。研究中將全國區域以500m正方形網格分割，以網格為單元，統計不同PGA區間內的建築物災損率(根據樓地板面積)。

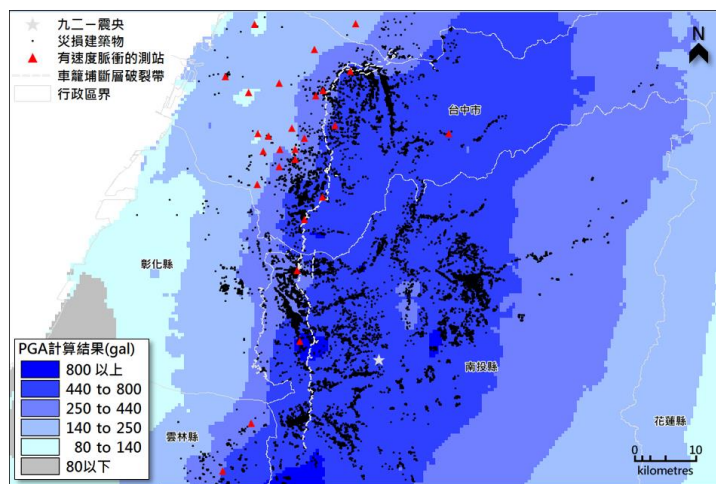


圖2-2 九二一地震之地震動PGA與受損建築物點位分布

鋼筋混凝土造(C1)及加強磚造(RM)之建築物為例，災損率(%)與不同PGA(單位g)之關係如圖2-3所示，顯示災損率隨PGA而遞增之合理趨勢，且二者有趨於相同的情形；地震動PGA值極大時，災損趨於飽和，且有紊亂的情形，紊亂之緣由或為斷層破裂帶內有土層破壞因素的干擾，此點有待後續研究予以確認。

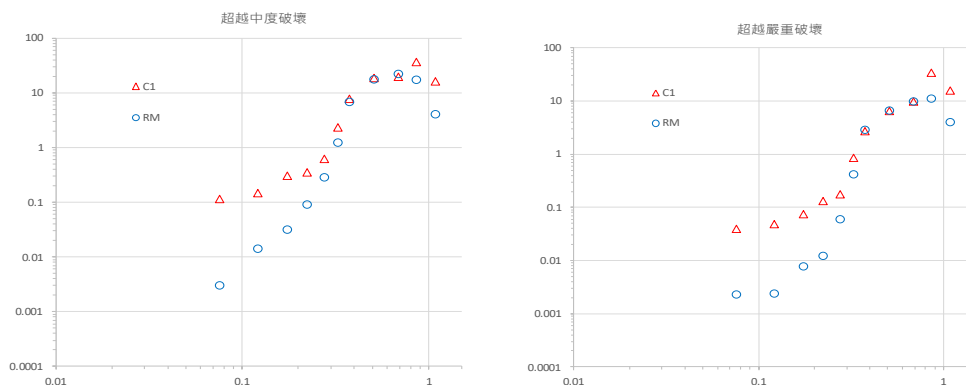


圖2-3 不同PGA(單位g)下之超越中度(左)、嚴重(右)損害建築物災損率

學理上一般認為對於具速度脈衝特徵的地震動，高樓層建築物的結構反應會較為劇烈，甚至可能因此損害。針對前述52座測站，本研究初步假設半徑1km環域內，為地震動具速度脈衝特徵區域，將52個環域的高樓鋼筋混凝土造建築物(C1H)，按不同的實測一秒週期譜加速度(Sa1)的區間，計算其災損率如圖2-4所示(標為「測站」)，圖中呈現按所有網格統計之C1H災損率(標為「網格」)，比較結果前者災損率並未明顯高於後者，其原因可能是Sa1並非具速度脈衝特徵地震動，其致災能力的最佳代表參數，且廣域統計容易摻雜干擾因子，不利驗證，此點亦有待後續研究予以確認。

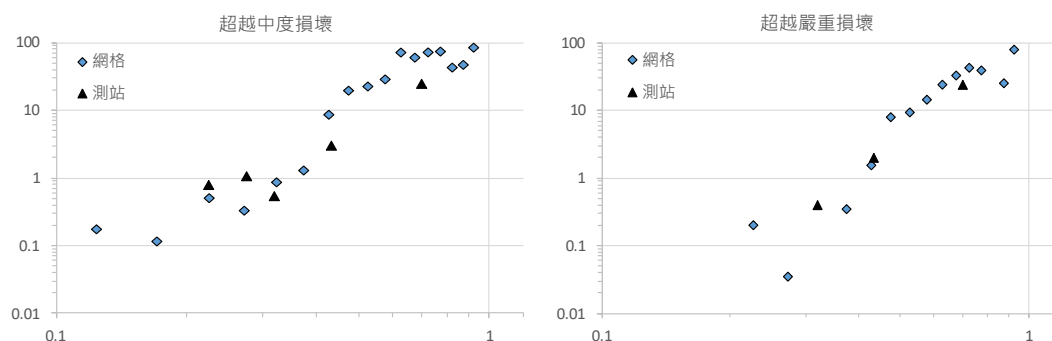


圖2-4 不同Sa1(單位g)下之超越中度(左)、嚴重(右)損害C1H建築物災損率

三、地震防災與應變雲端資訊服務

3.1 背景說明

中央氣象局掌握全台歷史與即時之地震活動資訊，其資訊包含地震資訊(震源參數)及監測資訊(震度資訊、即時強地動震波圖、即時速度震波圖、寬頻CMT等)。此資訊有助於震前預防整備及學術研究；提供震後應變作業之參考。因此本研究開發應用程式服務，透過HTTP網頁通訊協定，自動擷取地震活動彙集資訊，並將其匯入至資料庫中。其次，本子計畫於「台灣地震早期損失評估資訊網」中開發查詢介面，提供地震事件之查詢功能，如圖3-1所示。使用者可將歷次地震事件繪製於地圖上，並可點選地震事件查看其震源參數，同時可於地圖上檢視即時強地動監測站之空間分布，查看其監測數據，如垂直向、南北向及東西向之地表加速度。此外，使用者亦可查看各監測站之即時速度震波圖、即時強地動震波圖、寬頻CMT等資訊。



圖3-1 地震活動彙集資訊查詢

3.2 前震、主震、餘震靜動態展示功能

前震、主震、餘震等地震事件之時間序列與空間分佈，反應著地震發生前後之時空狀態，此過程與地震之起因及後續餘震之發展息息相關，有助於應變人員判識震源參數、斷層走向，或進行更精確之震損評估。因此，本研究藉由前述所蒐集之中央氣象局之地震活動彙集資訊，於資訊網中開發前震、主震、餘震靜動態展示功能。使用者可針對單一地震事件，於地圖上查看地震發生前後之前震及餘震，如圖

3-2所示，透過不同的顏色、數字、大小，表示其狀態(前震、主震、餘震)、發生順序及地震規模。使用者亦可藉由時間序列之方式，以動態播放方式於地圖上展示。

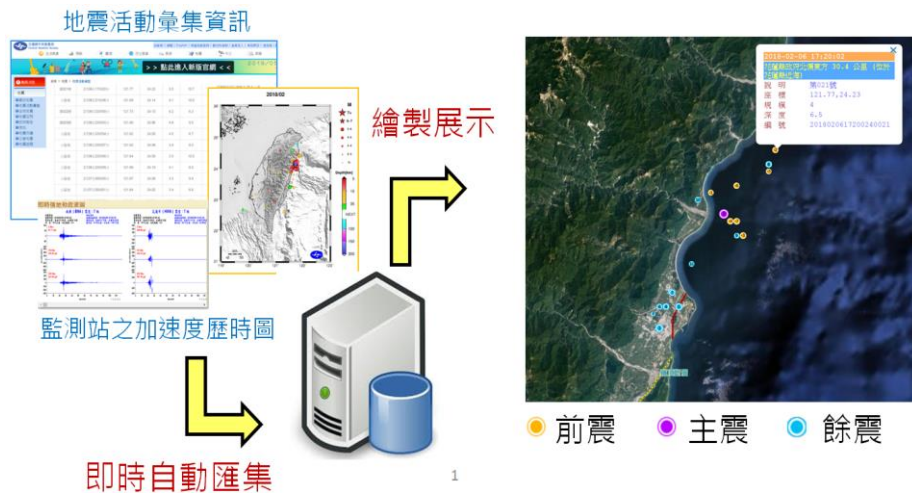


圖3-2 地震活動彙集資訊整合與前震主震及餘震展示

3.3 外部圖資整合與查詢

近年來，由於政府不斷推動開放資料予民，以利資源有效運用。本子計畫亦期望整合政府各單位所提供之開放資料，強化防災與應變之能量。本研究整合之項目包含中央地調所土壤液化圖資、105年台北市土壤液化圖資、106年台北市土壤液化圖資等圖資。透過圖資資料原始檔之取得及網路地圖服務(Web Map Service, 簡稱WMS)技術，將上述圖資匯入或整合至資訊網，以提供各類圖資之套疊及其屬性資料之查詢。此外，目前網路上有眾多民間或企業資源可供運用，如Google、Microsoft等單位提供許多珍貴之圖資或網路服務資源。如圖3-3，本子計畫亦將這些圖資或網路服務進行整合運用，整合之項目包括Google電子底圖、Google衛星底圖、Microsoft Bing Maps、Microsoft Bing 衛星底圖、開放街圖OpenStreetMap等。藉由各種圖資能量之彙集，期望於震後應變時期，輔助應變人員進行災情研判與救災應變作業。

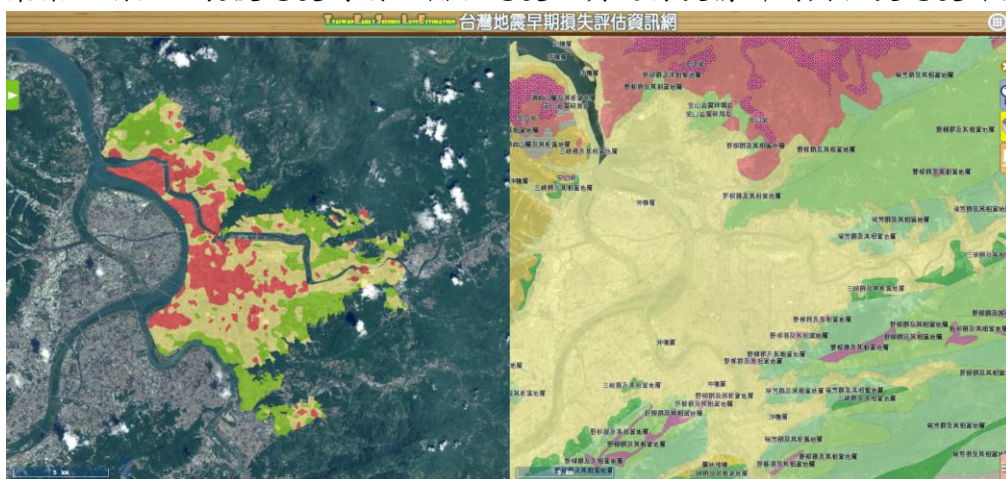


圖3-3 台北市土壤液化圖套疊國土測繪正射影像(左)
地調所地質圖套疊Google衛星圖(右)

四、震後路網阻斷衝擊評估-以台北都會區為例

4.1 背景說明

本子計畫旨在於建立一套適用台灣都會區道路於震災衝擊下的阻斷評估模式，以協助道路管理單位於震前對所管轄的道路網絡與周邊救災資源進行地震災害潛勢檢視與防災規劃，功用類似於 REDARS2[4]。規劃三年的研究期程(107-109)，各年工作內容分別是(107)基礎路網資料收集與資料模型建立；(108)路網震後阻斷衝擊評估模式建立；(109)重要跨河橋梁阻斷衝擊研究。本(108)年度以台北市與新北市跨河橋樑為研究範例，透過地區運輸需求資料之收集，並利用107年已建立的資料庫為基礎，建立路網阻斷衝擊評估模式。以下舉例說明本模式之概念。

4.2 研究區域

如圖 4.1 所示為本範例研究區域，包含台北市萬華區與新北市板橋區。這兩個區域被淡水河分隔開來。淡水河上有四座橋梁連接這兩個區域。表一，所列為(107年度台北市交通流量調查資料)，四座橋梁上早上通勤時段(7:30-9:30)觀測到進入台北市的車輛數，運輸需。板橋區包含 126 個里，萬華區包含 36 個里。範例中假定這兩個區域為獨立區域完全與其他區域隔絕，所有的車輛都是從板橋區的這 126 的中心之一出發，選擇經過這四座橋梁的其中之一，前往其中萬華區內 36 個里以建立板橋區與萬華區間的 Origin-Destination Matrix。之後透過路徑指派(Route assignment)計算得到這兩個區域於通勤時段所有車輛從板橋區進入萬華區總體所需要的交通時間。假定地震情境下四座橋梁之一損壞，若要計算橋梁阻斷對區域交通的影響，則可以將損壞的橋梁從路網中移除，重新進行 Route assignment 則可得到總體所需要的交通時間。



圖 4.1、板橋區/萬華區 連接橋梁示意圖

表 4.1 早上通勤時間由板橋區進入萬華區的車輛數

橋梁名稱	PCU
華江橋	10436
萬板大橋	2174
華翠大橋	6296
光復大橋	4176

4.3 區域運輸需求與分配 O-D MATRIX

O-D MATRIX 的建立需要以(節線)上的交通輛觀測結果為基礎，並配合理的假設進行推估。在本範例中**假定(1)**由四座橋梁上，早上通勤時間由板橋進入萬華區的所有車輛，都是從板橋區內的 126 里之一為出發點，選擇經過四座橋梁的其中之一，抵達萬華區內的某一個里。**假定(2)**板橋區內，每個里出發的車輛數比例與該里內所有住宅用樓地板面積的比例成正比，如圖 4.2。**假定(3)**萬華區內，每個里抵達的車輛數比例與該里內所有商業用樓地板面積的比例成正比。**假定(4)**使用者選擇交通時間較短的路徑，從家裡出發前往工作地。在符合這些假定的情況下，將每一個可能出現 O-D Pair 建構成配對問題反覆疊代求解即可推估這兩個區域於早上通勤時段的 OD Matrix。

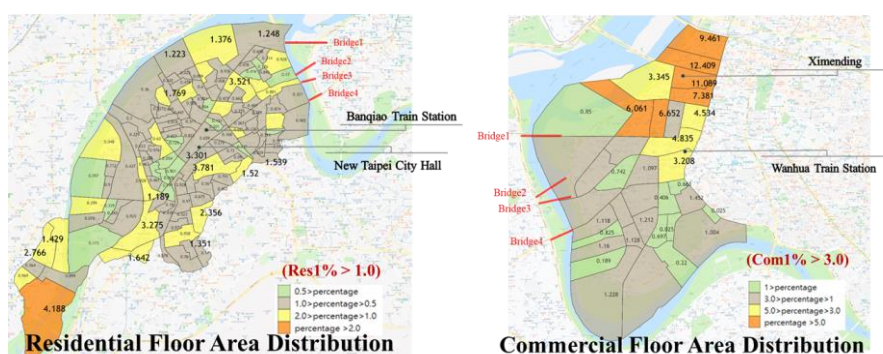


圖 4.2、板橋區各里內的住宅面積比例/萬華區各里商用建物面積比例

4.4 路徑指派(使用者均衡 User-optimized equilibrium)

本模式以使用者均衡替每個旅次(O-D Pair) 選擇旅行的路徑。選擇路徑的方法是假定每輛車都會選擇旅行時間最短的路徑從起點到達目的地。若起點與目的相同，而若選擇不同的路徑時，不同路徑所耗費的旅行時間是相當的。將所有的旅次分批分配進路網後，統計所有車輛的總旅行時間，即得到這個示範區在路網無受損時的總旅行成本。假定地震情境下四座橋梁可能損壞，將損壞的橋梁從路網中移除，重新進行 Route assignment 則可得到受損路網總體所需要的交通時間。比較增加的交通時間即可得到個別橋梁損壞對路網所造成的衝擊。

4.6 案例分析

表 4.2 所列為示範區完整路網與部分損壞路網情境下通勤日早上的總體的旅行時間。由於本範例區域為小型區域，且只考慮單向由板橋區進入萬華區的車輛，所以總體的旅行時間不能作為實際路網運作的參考值。但個別橋梁損壞所造成的旅行時間增加量可以用來比較每個橋樑對於區域的重要性。如表 4.2 所列，華江橋若損壞對於區域的衝擊最大，而萬板大橋阻斷的衝擊則相對較小。本子計畫所發展的模式後續可以配合國震中心已經開發完成的公路橋梁損失評估工具進行地震情境下的交通路網的衝擊評估。

表 4.2 完整路網與部分損壞路網情境下的系統成本

Scenarios	System cost (travel time)
完整路網	220,440 min
華江橋	227,959 min (+7519)
萬板大橋	220,528 min (+88)
華翠大橋	222,280 min (+1840)
光復大橋	224,247 min (+3808)

五、醫院震後功能性衝擊研究-以台北都會區為例

5.1 背景說明

本子計畫主要探討醫院建築內的偏心非結構構件受到水平地震力時的晃動及傾倒行為。針對醫療空間內的醫療設備，將其視為具有質量偏心的剛性塊進行分析。在過去的研究中[6-11]，對於具有均勻質量分布的剛性塊受到外力的響應，已經進行了廣泛的研究，然而，在實際情況中，醫院內的設備可能具有較大的質量偏心率，這些偏心非結構物，會使得它們受到地震後的反應與無偏心非結構物截然不同。所以，使用具有質量偏心的模型來模擬醫院中非結構物的地震反應是相當需要的。在此研究中，將非結構物設備視為具有質量偏心的剛性塊，並假設摩擦力足夠大以防止剛性塊滑動，利用數值分析剛性塊受到一系列地震紀錄的水平分量的影響。將結果與具有均勻質量分布的剛性塊比較，並繪出不同偏心率的剛性塊在不同PGA下的易損性曲線，評估偏心非結構物在地震來襲時的損壞機率。

5.2 剛體運動模型

本研究將醫院中的偏心非結構物考慮為一質量不均勻的的矩形剛體，並將其立於剛性基礎上，如圖5-1所示。其寬為 b 、高為 h ，質量為 m ，質心至兩邊底部頂點的距離為 R_1 及 R_2 ， α_1 與 α_2 分別為質心與底部頂點 O_1 及 O_2 之連線與剛體長邊夾角角度。假設此剛體受到的地震力有水平方向(\ddot{x}_g)及垂直方向(\ddot{y}_g)的震動，而剛體要從靜止狀態轉變為晃動狀態必須讓剛體之水平慣性力對支點之傾覆力矩大於剛體本身重力對該支點產生的力矩。且為了使剛體在受到地震力時的搖晃狀態能維持在二維的運動，方便晃動模型的計算，剛體與剛性基礎的接觸面必須有足夠的摩擦力防止滑動發生。

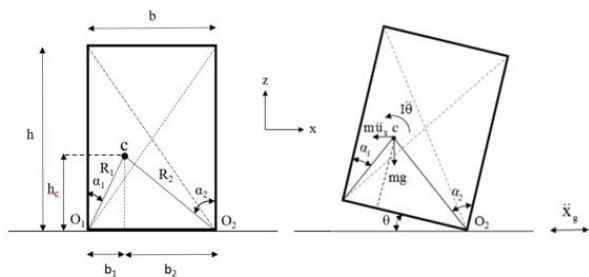


圖5-1 剛體運動模型

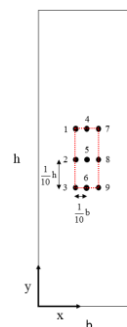


圖5-2 剛性質量塊重心示意圖

5.3 剛體模型耐震易損性

為了繪出非結構物上不同質心的易損性曲線，將偏心的質心假設在偏離形心 $1/10b$ 與 $1/10h$ 的八個點上(圖5-2)，且需要得到不同質心受到不同大小地震力的反應進行統計，因此選定了30條地震加速度歷時作為欲輸入的水平地震力(表一)，將30條地震力歷時依照PGA(Peak ground acceleration)值進行縮放，每一條的縮放範圍為 $0.04g$ 至 $2g$ ，而每兩個之間的時間為 $0.04g$ ，也就是每一條地震力縮放後會得到50條不同大小的地震力，再輸入至剛體中9個不同的質心位置的模型進行模擬，總共會有13500個結果，模擬結果的示意圖如圖5-3所示，(a)、(b)分別為質心位置在8時受到PGA縮放至 $0.48g$ 及 $0.52g$ 的Chi-Chi地震時的模擬結果，上圖代表角度(degree)與時間(s)的關係，而下圖代表經過縮放後的水平地震外力歷時圖，其中(a)為沒有傾倒的結果，(b)為傾倒的結果。

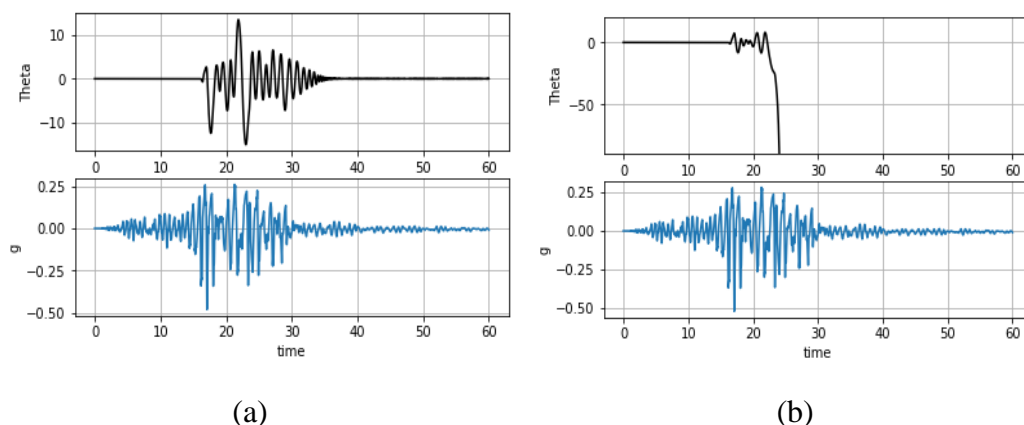


圖5-3 模擬結果示意圖(a)質心位置在8時受到PGA縮放至 $0.48g$ 的Chi-Chi地震時的模擬結果(b)質心位置在8時受到PGA縮放至 $0.52g$ 的Chi-Chi地震時的模擬結果

將模擬的結果依照縮放的地震力大小分為四個區間($0.44g \sim 0.8g$ 、 $0.84g \sim 1.2g$ 、 $1.24g \sim 1.6g$ 、 $1.64g \sim 2g$)，將地震外力輸入後造成傾倒的結果註記為損壞，統計每個區間因為地震造成損壞的個數，再經由計算四個區間的PGA加權平均數，與累積損壞機率，可以得到四個資料點，將資料點註記於縱座標為損壞機率及橫坐標為PGA的圖形上，便可以利用對數常態分佈的機率累積分佈曲線的函數來進行曲線擬合，便可以得到不同質心位置的易損性曲線。

5.4 醫療偏心設備應用

階段性研究成果提供了如機電設備及醫療設備等等非結構物，在實際情況中存在偏心的條件下以及受到不同大小的水平地震力後的易損性曲線分析，從易損性曲線圖與平均值的等高線圖可以得到，非結構物傾倒的機率會隨著質心的垂直偏心率而改變，若是存在質心方向與水平外力震動方向平行的偏心情況，非結構物會增加搖晃與傾覆的風險。當質心的位置越低，易損性平均值的變化率就會越大，例如有兩個具有相同的垂直偏心率但質心高度不同的非結構物，則水平偏心會對質心較低的非結構物對造成較大的改變，也就是非結構物的垂直偏心率，會對水平方向的易損性平均值的變化率產生影響。

六、建置北水處配水管網地震損害風險地圖

6.1 背景說明

國震中心承接北水處委託研究計畫「建置配水管網地震損害風險地圖」之主要成果(葉錦勳等, 2019)[13]概分三項：首先整理臺北市與新北市的工程鑽孔資料，並依土壤液化臨界加速度的概念，繪製轄區內之土壤液化敏感類別圖和液化災害潛勢圖；其次，以北水處自訂之817個供水小區為單元，綜合考慮個別供水小區之地震災害潛勢、管線易損性和管線汰換效益等三項指標，進行配水管線汰換的優選排序；再者，進行數個想定地震事件的境況模擬，探討前述各項指標之權重設定的合理性以及汰換優選排序的效益，以下分段說明：

6.2 土壤液化敏感類

參考Iwasaki等人(1982)[14]之研究，每一工程鑽孔依地表下20公尺內的土壤特性，可計算在設計地震作用下的液化潛能指數 P_L ，並依 P_L 值判斷所在地未來發生土壤液化現象的潛勢高低。通常依 $0 \leq P_L \leq 5$ 、 $5 < P_L \leq 15$ 和 $P_L > 15$ 劃分三個區間，分別代表低液化潛勢、中液化潛勢和高液化潛勢。欠缺鑽孔資料的地區需仰賴鄰近鑽孔之 P_L 值並進行空間內插分析。換言之，先依工程鑽孔之土層分布特性和設計地震條件下計算 P_L 值；之後進行 P_L 值的內插分析，依 P_L 內插值判識各地液化潛勢高低。具體而言，影響某工址發生液化現象的關鍵因素包含地震規模、最大地表加速度(PGA)和地下水位深度等；可分別參採工址所在地之設計地震(回歸期475年)的水平加速度和控制地震規模，以及長期觀測的地下水位深度。各地之設計水平加速度值須考慮並納入近斷層效應與場址效應等修正係數。

另一方面，在特定地震規模和地下水位條件下，可批次計算個別鑽孔在不同最大地表加速度(PGA)作用下所對映的液化潛能指數 P_L 值。一般而言，PGA越大， P_L 值也越大；且 P_L 值可視為PGA的連續函數。因此，存在對映 $P_L = 15$ 的PGA值，命名為液化臨界加速度。葉錦勳等(2002)[12]即提出液化敏感類別的可操作式定義：在地震規模7.5和地下水位1.5公尺條件下，依個別鑽孔之液化臨界加速度所在區間判識其所屬的液化敏感類別，並在2015年微調分類數量和區間。圖6-1顯示如何依液化臨界加速度值將液化潛勢區(地表屬沖積層區域)概分為9種液化敏感類別(Cat. 1~Cat. 9)。為方便震災境況模擬時使用，Yeh, et al. (2015)[15]依非線性迴歸分析方式，獲得各液化

敏感類別在不同地震規模、PGA和地下水位條件下的 P_L 值或震陷量推估式。

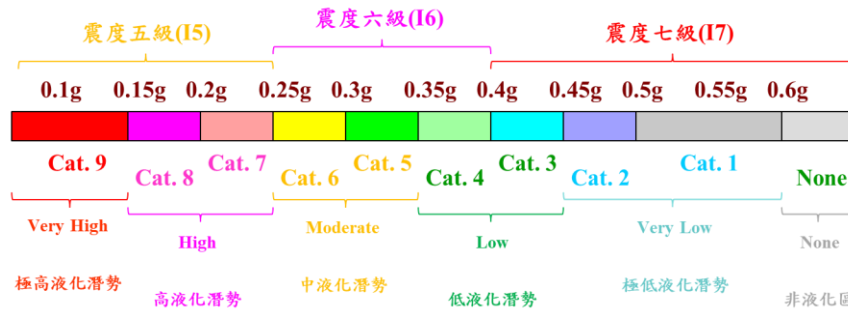


圖6-1 依液化臨界加速度值所在區間判識(1)液化敏感類別和(2)液化災害潛勢。

6.3 液化災害潛勢圖

為比較不同區域發生土壤液化災害潛勢高低，須綜合考慮鄰近區域的震源分布和活動特性。根據台灣地區之災害地震經驗，地震規模可以7.5、7.0和6.5為代表；考量其不確定性和經驗研判，權重分別設為0.4、0.4和0.2。其次，各地區之地下水位隨季節而變；為保守計，將常態地下水位與固定地下水位1.5公尺的權重分別為0.8和0.2。在地震規模7.5且固定地下水位1.5公尺條件下，各地區之液化臨界加速度以 a_{c75} 表示。在地震規模7.5、7.0和6.5且為常態地下水位條件下，各地區之液化臨界加速度分別以 a_{v75} 、 a_{v70} 和 a_{v65} 表示。綜合考慮前述四種組合條件下之液化臨界加速度，並依加權平均值 $\bar{a} = 0.4 \cdot a_{v70} + 0.2 \cdot (a_{c75} + a_{v75} + a_{v65})$ 判識液化災害潛勢高低。如圖6-1下半部所示，可將液化潛勢概分為極高、高、中、低、極低等五級，地表屬沖積層以外地區則屬非液化潛勢區。圖6-2所示為依加權後之液化臨界加速度 \bar{a} 劃分之臺北盆地內之北水處轄區的液化災害潛勢圖。

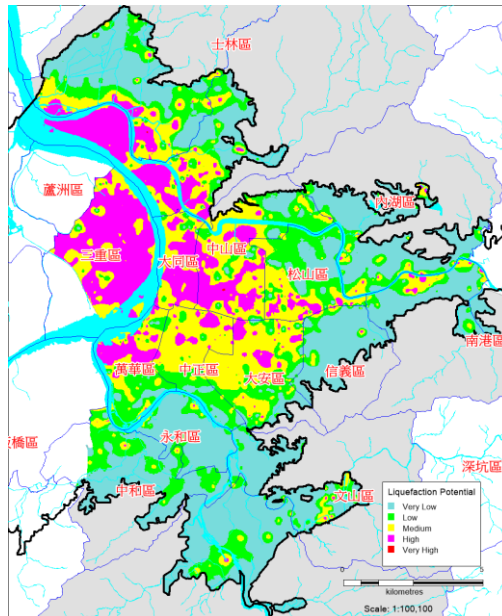


圖6-2 北水處轄區依液化臨界加速度值 \bar{a} 劃分之土壤液化災害潛勢圖。

未來發生地震時，在極高或高液化潛勢區內，一旦PGA值達0.15g~0.25g(相當於舊制震度五級)時即可能發生液化現象；但在中或低液化潛勢區內，PGA值須達舊制震度六級以上方可能發生液化現象。與依液化潛能指數作為判識液化潛勢高低比較，依液化臨界加速度作為判識液化潛勢高低的標準，可能較具明確的物理意義。

6.4 汰換優選排序指標

進行個別供水小區之汰換優選排序時綜合考慮三項指標：地震災害潛勢、管線易損性和管線汰換效益。其中，考慮地震災害潛勢和管線易損性指標的目的在藉由汰換為較耐震的NS管後，可大幅降低強震後配水管線的總災損數；考慮管線汰換效益指標的目的則在確保強震後有較多的用戶數可持續正常供水。在計算個別供水小區之地震災害潛勢分數時僅考慮土壤液化潛勢和地震動場址效應；在計算管線易損性時考量管線耐震化率和近10年內管線汰換率等兩項因子；受限於可取得資料和計畫執行時間，管線汰換效益則僅考量各供水小區內的用戶數。令第*i*個供水小區的「地震災害潛勢分數」、「管線易損性分數」和「管線汰換效益分數」分別以 H_i 、 V_i 和 B_i 表示，其汰換排序綜合分數 R_i 可表為

$$R_i = w_h \cdot H_i + w_v \cdot V_i + w_b \cdot B_i$$

其中， w_h 、 w_v 和 w_b 分別為地震災害潛勢、管線易損性和管線汰換效益的權重值。

分別挑選遠域的新城斷層與近域的山腳斷層作為想定地震事件的震源；其中山腳斷層又依地震規模概分兩種可能情境。比較近域地震和遠域地震的震災境況模擬結果：(1)當近域發生地震時，轄區內各供水小區均面臨相似的地震災害潛勢；因此，加大管線易損性分數的權重對於防治近域地震較有效。(2)但當遠域發生大規模地震時，因盆地地形和土層的場址效應，每個供水小區面臨的地震災害潛勢有較大差異；因此，加大地震災害潛勢分數的權重對防治遠域地震較有效。有鑑於強震發生與否的不確定性、臺北盆地未來面臨大規模地震的震源分布，以及近域與遠域地震所引致管線災損嚴重程度的差異等，建議權重值 w_h 、 w_v 和 w_b 可分別設定為0.3、0.3和0.4。圖6-3即為依供水小區之汰換排序綜合名次所繪製的主題圖。

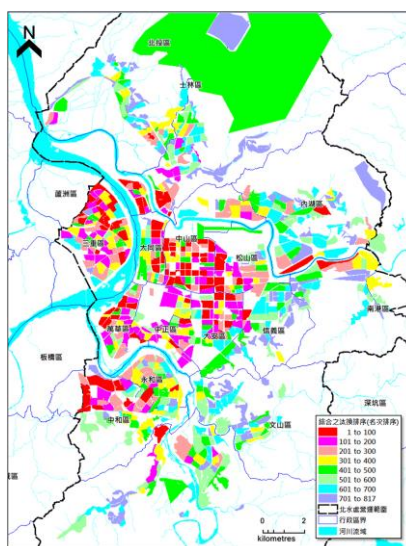


圖6-3 以供水小區為單元之汰換排序綜合名次分布圖(名次越小者分數越高)。

參考文獻

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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).
5. 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.
6. 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.
7. Housner, G.W. (1963). "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, 53, 403-417.
8. 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.
9. Ishiyama, Y. (1982). "Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations, " Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 635-650.
10. 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.
11. 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.
12. 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。
13. 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。
14. 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.
15. 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.