

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

李洋寧、劉淑燕、李沁妍、吳佳容、鄧敏政

柯孝勳、李中生

國家災害防救科技中心

中華民國 103 年 04 月

中文摘要

中英文摘要（三百字為度）、中英文關鍵詞（各 6 個以內）

關鍵字：各個關鍵字之間以頓號分開

ABSTRACT

Keywords:

目錄

第一章 道路系統震後受損情境分析	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 道路損壞情境分析	2
1.2.2 橋梁損壞情境分析	4
1.3 道路系統損壞情境分析	7
1.3.1 資料調查	7
1.3.2 分析方法	8
1.3.3 大臺北地區大規模地震交通設施衝擊評估	15
1.4 後續研究方向	15
第二章 震後供水中斷情境研判	26
2.1 前言及研究目的	26
2.2 文獻回顧	27
2.2.1 大臺北地區供水設施基礎資料與圖層	27
2.2.2 供水設施失效衝擊評估方法	29
2.3 供水系統失效衝擊評估	31
2.3.1 供水系統之易損性分析	31
2.3.2 供水系統中斷之衝擊分析	32

2.4	小結	32
第三章 電力系統中斷情境分析		49
3.1	前言	49
3.2	電力系統失效之災害衝擊評估架構	49
3.3	電力系統失效之災害衝擊評估方法	54
3.3.1	北臺灣電力系統概述	56
3.3.2	電力系統之地震易損性分析	57
3.3.3	利用 ArcGIS 分析電力之震後衝擊評估	59
3.4	小結	62
第四章 大臺北地區防救災系統震後能力評估		71
4.1	研究目的	71
4.2	重要設施分類	71
4.2.1	文獻回顧	71
4.2.2	重要設施分類	72
4.2.3	建立重要設施資料庫與圖層	73
4.3	重要設施衝擊分析	74
4.3.1	重要設施評估分析流程	74
4.3.2	震後設施查報	75
4.3.3	醫院設施衝擊分析	75

參考文獻.....102

圖目錄

圖 1.1、交通設施衝擊評估流程架構	22
圖 1.2、橋梁/道路通行失敗機率評估流程	22
圖 1.3、超越不同損害狀態之易損性曲線與損害狀態機率示意圖 ...	23
圖 1.4、大臺北地區重要平面聯繫道路封閉機率圖	23
圖 1.5、臺北市重要聯外跨河橋梁、快速(高架)道路通行失敗機率圖	24
圖 1.6、國道 1 號系統橋梁通行失敗機率圖	24
圖 1.7、國道 3 號系統 (含 3 甲) 橋梁通行失敗機率圖	25
圖 1.8、國道 5 號系統橋梁通行失敗機率圖	25
圖 2.1、UIF 格式轉換說明	41
圖 2.2、大臺北地區供水系統列表	41
圖 2.3、示範區域供水設施基礎資料	42
圖 2.4、利用 ArcGIS 計算供水設施之震後失效衝擊流程.....	42
圖 2.5、供水設施損壞評估結果_中度以上機率	43
圖 2.6、供水設施損壞評估結果_重度以上機率	43
圖 2.7、供水管線不服務水準評估_HAZUS 係數	44
圖 2.8、供水管線不服務水準評估結果_係數修正	44
圖 2.9、供水設施中度以上損壞評估	45

圖 2.10、供水設施重度以上損壞評估	45
圖 2.11、初步估計影響人數.....	46
圖 2.12、震後第 1 天估計之復原天數	46
圖 2.13、震後第 7 天估計之復原天數	47
圖 2.14、震後第 14 天估計之復原天數	47
圖 2.15、震後第 21 天估計之復原天數	48
圖 3.1、地震損害分析與減災之關係架構	66
圖 3.2、電力系統震後損壞衝擊評估發展架構	66
圖 3.3、北臺灣電力系統示意圖	67
圖 3.4、典型之易損性曲線	67
圖 3.5、供電系統震後失效衝擊分析流程	68
圖 3.6、北臺灣大規模地震電力中斷情境分析示意圖	68
圖 3.7、北臺灣大規模地震電力中斷影響範圍與程度分析圖	69
圖 3.8、北臺灣大規模地震電力中斷影響人數分析圖	69
圖 3.9、北臺灣大規模地震電力中斷修復天數之影響人口趨勢.. 錯誤!	
尚未定義書籤。	
圖 4.1、921 集集大地震災序分析	84
圖 4.2、日本阪神大地震災序分析	84
圖 4.3、311 東日本大震災災序分析	85

圖 4.4、重要設施分類細目	85
圖 4.5、緊急救援與醫院基本圖資（緊急應變中心及警察機關） ...	86
圖 4.6、緊急救援與醫院基本圖資（醫院及消防機關）	86
圖 4.7、醫院及消防機關基本圖資（收容/避難場所）	87
圖 4.8、水資源及能源基本圖資	87
圖 4.9、交通基本圖資	88
圖 4.10、高科技園區及高損失設備基礎圖資	88
圖 4.11、弱勢族群基本圖資.....	89
圖 4.12、高危險設施基本圖資	89
圖 4.13、人潮集中及學校基本圖資	90
圖 4.14、重要設施震後失效服務能力評估流程	90
圖 4.15、基礎圖資套疊地震參數	91
圖 4.16、基本圖資套疊外部衝擊分析結果	91
圖 4.17、醫院之關連性分析	92
圖 4.18、失效衝擊機率彙整表	92
圖 4.19、重要設施剩餘服務能力評估圖	93
圖 4.20、震後緊急救援與醫院設施查報圖(緊急應變中心及警察機關)	93
圖 4.21、震後緊急救援與醫院設施查報圖（醫院及消防機關）.....	94

圖 4.22、震後緊急救援與醫院設施查報圖(收容/避難場所).....	94
圖 4.23、震後水資源及能源設施查報圖	95
圖 4.24、震後交通設施查報圖	95
圖 4.25、震後高科技園區及高損失設備查報圖	96
圖 4.26、震後弱勢族群查報圖	96
圖 4.27、震後高危險設施查報圖	97
圖 4.28、震後人潮集中及學校查報圖	97
圖 4.29、醫院基礎圖資	98
圖 4.30、醫院基礎圖資套疊地震參數	98
圖 4.31、醫院設施震後情境圖層	99
圖 4.32、地震災害與醫療系統之營運條件分析	99
圖 4.33、醫院失效機率之彙整表	100
圖 4.34、醫院設施的震後失效與剩餘服務能力計算公式	100
圖 4.35、醫院震後失效機率	101
圖 4.36、醫院震後失效機率統計	101

表目錄

表 1.1、道路損壞情境分析方法	17
表 1.2、重要聯繫道路篩選原則	17
表 1.3、道路損壞狀態之描述	18
表 1.4、Hazus® -MH MR5 道路易損性參數	18
表 1.5、TELES 之典型橋梁分類	19
表 1.6、地表震動引致損害的 TELES 典型橋梁分類之易損性曲線參數	20
表 1.7、永久位移引致損害的 TELES 典型橋梁分類之易損性曲線參數	21
表 2.1、供水設施圖資資料蒐整表	34
表 2.2、供水設施及管線評估分析方法	35
表 2.3、供水設施 Fragility Curves 收整情形	36
表 2.4、管徑分類說明	38
表 2.5、管材分類說明表	38
表 2.6、管線評估計算公式步驟流程	39
表 2.7、供水設施損壞說明	40
表 3.1、維生設施系統地震易損性曲線之 IM 一覽表	64
表 3.2、電力設施損壞狀態說明	65
表 4.1、地震災例篩選彙整表	78

表 4.2、地震災害管理需求之重要設施一覽表_以 921 國家防災日演練 為例.....	79
表 4.3、優先關注的設施查報參考項目	80
表 4.4、都會區震後損壞衝擊評估分析項目	81
表 4.5、重要設施分類與細項設施	81
表 4.6、設施資料庫蒐整格式範例	82
表 4.7、重要設施圖資蒐整情形	83

第一章 道路系統震後受損情境分析

1.1 研究動機與目的

都會區之道路系統與相關設施為交通運輸與民生活動之重要管道。在災害發生時，各項防災系統如緊急救援、避難疏散、醫療、收容安置與重要設施防護等，亦需要倚靠道路系統而得以發揮其功能。橋梁設施為道路系統中極為重要的關鍵設施。橋梁損壞不但影響交通運輸功能，更會直接危及用路人之生命安全。國內外的災害案例中已顯示，重大的橋梁損壞將造成區域交通癱瘓並損及國家經濟建設發展，產生極大的社會成本付出。而在大規模災害發生時，橋梁損壞亦將直接衝擊災後急難救援與民生醫療物資的運輸，進而影響整個救災工作的進行。

臺灣三分之一的人口居住在大臺北地區。大臺北都會區的人口和建築物分布集中且密度高，鐵路、公路、捷運與市區道路形成複雜交錯的交通運輸網絡，區域內並涵蓋中央政府部門、金融、機場、電廠等諸多重要設施，為我國政治、行政與經濟中心。因此，亟需優先對此一重要都會區進行地震災害風險分析，進而推估其受災情境，作為各項減災、救災、應變以及復原準備工作之參考。

本文介紹都會區道路系統遭受地震衝擊後之損壞情境評估方

法。初步將道路系統分為橋梁與道路兩大主要設施，分別進行文獻回顧與整理，目的為建立道路系統設施衝擊評估架構及操作流程。本文以地區行政區作為展示範例，介紹大規模地震道路系統之衝擊評估結果。文末則提出結論與建議，作為本文後續研究及政府相關單位推動相關評估技術發展與精進之參考。

1.2 文獻回顧

1.2.1 道路損壞情境分析

根據陳亮全等人（2003）整理文獻，提出地震對道路造成影響分為直接損壞及間接損壞兩種類型；直接影響包括道路斷裂、高架道路或橋梁斷落，間接影響則有建築物破壞或倒塌、土壤液化、地震地滑等造成的道路損壞。因此，道路損壞情境分析方法雖多，但主要可分為道路直接損壞及建物倒塌造成道路阻斷兩類（如表 1.1 所示），說明如後。

1. 道路直接損壞（易損性評估）

以評估道路直接損壞進行衝擊評估的文獻包括 Hazus® -MH MR5 (2010)、SYNER-G(2011)；以 Hazus® -MH MR5(2010)為例，透過道路易損性曲線(Fragility Curve)模式的建立（橋梁、隧道亦同），可計算已知地動程度下，道路達到或超過某種損壞狀態的機率，並評估修復

(復原)的狀態及時間。而在實務操作上，輸入資訊包括道路（路段）地理區位、地動參數 PGD（Permanent Ground Deformation；地表永久變位）及道路分級（2 車道、4 車道以上兩類），透過易損性分析，可獲得道路損壞機率、修復（復原）的狀態及時間等輸出資訊，藉以評估地震災害對道路造成的損壞衝擊。直接損壞評估方法可以在短時間內得到初步的損害評估結果，且不需考量建物倒塌造成道路封阻的影響，但其缺點是並未考慮整體路網運輸之影響。道路運輸系統包含道路、橋梁以及隧道，但是任何一處的設施損壞，均會連帶影響其他設施的運作。未來仍需開發具備相依性分析的評估方法，來進行整體路網的衝擊分析。

2. 建物倒塌造成道路阻斷

日本內閣府（2010）提出的首都直下型地震受災情境方法及 Pitilakis and Kakderi(2011)，均以建物倒塌掉落的殘垣瓦礫造成道路阻斷作為衝擊評估方法。以日本內閣府（2010）首都直下型地震受災情境方法為例，透過道路閉塞率模式，可計算寬度不超過 13 公尺的道路，周邊房屋倒塌所造成的道路通阻；Pitilakis and Kakderi(2011)則以建物高度、殘礫寬度，透過模式計算道路寬度減少及封閉機率。雖就實務操作上，此方法可得知因建物倒塌造成道路阻斷的間接損害，同

時考量直接與間接損壞將使評估流程更為完善；然而，此一評估方法需要開發本土化的建物倒塌以及殘礫散布的評估模式，方能進行進一步分析。

1.2.2 橋梁損壞情境分析

目前評估橋梁遭受地震衝擊之損害程度多以橋梁易損性曲線進行分析。先利用地震危害度分析求得橋梁所在位置的可能地震荷載，進一步得出 475 年回歸期地震及地表最大加速度密度函數，再利用橋梁易損性曲線推估橋梁的損害程度與機率。所謂易損性曲線，就是在不同的地震強度下，工程結構對應不同損害狀況的機率值。

在橋梁易損性曲線之建立方面，ATC-13(1985)開始以橋長定義橋梁類別為一般(Conventional)與主要(Major)兩大類。在單跨長度小於 500ft 的一般類別中，再依上部結構系統的連續性分為多跨簡支型(Multiple simple spans)與連續型(Continuous monolithic)兩個子類。在損壞程度描述方面，將損害分成七個等級，包括有：無、微小損害、輕微損害、中度損害、重度損害、主要損害與完全損害，而各種損害狀態分別有對應之損害範圍百分比(Damage Factor Range %)。利用修正麥式強度(Modified Mercalli Intensity Scale, MMI)表示地表振動及上述之結構性質和損害程度，發展成問卷調查的形式。經由專家的訪查，以 Delphi Method 作統計分析，得出在不同震度下，發生超越某

一損害等級的機率，形成損害機率矩陣 (Damage Probability Matrix)。此方法以統計學上的問卷調查方法，試圖將主觀的專家意見以較科學的方法將其客觀化，但是損害機率矩陣內的數值則皆由參與研究的專家小組訂出，其選擇對象的工程經驗與理論背景是否具可靠性佔有決定性的影響。此外，經過一段時日則需重新評估一次，且評估者無法由易損性曲線間接獲知如構件內力大小、結構物位移等工程性質。

1997 年由 RMS (Risk Management Solutions, Inc)發展出一套分析程式 HAZUS (目前版本為 Hazus® -MH MR5, 2010)，其中對於結構物的易損度曲線有較客觀的制定方法，並且可以加速度以及位移兩種模式來評估結構物的損害程度。對於損害參數的制定方式，RMS 發展出理論分析方法與經驗統計分析方法兩種。經驗統計方法乃依據現有的橋梁地震損害資料及專家、學者的知識經驗，經由問卷調查建立資料庫，然後利用統計及或然率理論方法建立起各類橋梁的地震損害狀態與地震需求參數 (如地表加速度 PGA，譜加速度 Sa，或地表永久位移 PGD) 之關係。理論分析方法則採用性能曲線 (Capacity Curve) 與需求反應譜 (Demand Spectrum) 來評估地震損失。主要針對特定型式結構，建立力學分析模型進行分析計算，分析橋梁在不同損壞狀態下所對應之地震力。此方法必須建立橋梁詳細資料，且分析往往需要耗費大量的計算時間、金錢，較適用於特殊且重要橋梁的損害評

估。

由於橋梁數量非常多，而且有些橋梁建造年代較早，無法收集到完整的結構設計參數，不可能針對每座橋梁進行詳細的耐震能力評估來建立其易損性曲線。因此，國內外如 Hazus® -MH MR5(2010)與葉錦勳「臺灣地震損失評估系統—TELES」(2003)所採用的做法乃是根據所收集到的道路橋梁資料庫，依結構形式與耐震能力等因素進行適當分類，如 HAZUS 分為 28 類。TELES 則區分為 8 種主要類別，每一主要類別再依是否符合最新耐震設計規範分為 3 個子類別，也就是總共為 24 類。接下來，對於每一類橋梁選擇數座具代表性的標準橋梁進行耐震評估，藉以求得每一類別之標準橋梁的易損性曲線參數。在進行易損性曲線參數研究前，先依據損害評估模式將橋梁的損害狀態定義為無、輕微損害、中度損害、嚴重損害與完全損害五級。在建立每一類別之典型橋梁的易損性曲線之後，再根據跨數、橋墩與車行方向夾角、橋寬與跨長比、橋墩基礎型式等其他耐震評估參數調整個別橋梁的易損性曲線。這種方法的優點是可以在短時間內得到損害評估結果，而且不需詳細的結構系統設計參數，但是也因為不同橋梁間的差異性大，利用少數標準橋梁的耐震評估資料確實不易代表精確的損害評估結果。

1.3 道路系統損壞情境分析

參考國內外文獻，本研究提出道路系統衝擊評估的初步流程架構，如圖 1.1 所示，包括地震境況模擬、資料調查、損壞評估、衝擊評估以及衡量指標。其中，地震境況模擬以最嚴重和易發生之兩種地震情境作為分析對象，詳見前冊報告第二章，餘者於以下小節說明。

1.3.1 資料調查

首先將蒐集研究範圍內之橋梁與道路基本資料建立資料庫，道路損壞情境分析所需的基本資料包含空間位置、道路等級與道路寬度；橋梁損壞情境分析所需的基本資料則包含空間位置、結構形式、建造材料、地盤種類、幾何尺寸（長度、寬度、跨數、跨距、歪斜角）、橋柱與橋臺基礎型式、建造年代、設計地表加速度等。為確保損壞分析結果的精確性，在整理道路系統基本資料庫時，須檢核座標資料是否正確無誤。特別是橋梁的空間資訊，往往由於來源或建立時間不同甚至人為錯誤等因素，造成個別橋梁在定位時使用的座標系統不一致，經緯度座標與二度分帶座標交互使用，或經緯度座標對調、數字輸入錯誤等，利用地理資訊軟體 ArcGIS 或 MapInfo 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 發現並修正。

其次進行研究範圍內之重要聯繫道路/橋梁篩選。參考侯鵬曦 (2001)、公路法、市區道路條例等文獻與法規，考量道路的防災功

能、運輸功能及行政系統分類，訂定重要聯繫道路篩選原則，如表 1.2 所示。另外，考量大臺北地區涵蓋臺北市、新北市、及基隆市等行政轄區，其橋梁與道路功能屬性及管理單位有所差異，故區分為大臺北核心區（臺北市）及非核心區（新北市、基隆市）。核心區選定之重要聯繫道路為主要幹道以上之市區道路，包括高速公路(國道)、快速（高架）道路、主要幹道（省道、市區幹線）；次核心區選定之重要聯繫道路為縣道以上之公路，包括國道、省道（含快速公路）、縣道。

1.3.2 分析方法

蒐整國內外之易損性曲線，篩選適合該區域之曲線函數，利用所建立之易損性模組進行分析分別考慮地表震動 PGA 以及因土壤液化造成的地表永久位移(permanent ground deformation)引致的橋梁/道路損壞，建立損壞衝擊評估之操作流程如圖 1.2 所示。

在強烈地震下，地表震動與地表破壞是造成道路系統損壞的主要因素，其中地表震動強度以地表最大加速度(PGA)表示，地表破壞程度以地震引致的永久位移量(PGD)表示。影響地表破壞有土壤液化、地震引致的山崩、斷層錯動等因素，本研究目前僅考慮由土壤液化引致的地表永久位移，山崩與斷層錯動因尚無成熟推估模式而未納入。在進行道路系統損壞分析時，平面道路與隧道損壞的主要致災因子為

PGD，而橋梁（含高架道路）損壞的致災因子則是包括 PGA 與地 PGD。

易損性曲線主要用來描述結構物（道路、橋梁、隧道）在地震作用下超越不同損害程度的機率，橫軸可以是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(2010)定義損害狀態的方式，將損害狀態分為無損壞 ds1、輕微損壞 ds2、中度損壞 ds3、嚴重損壞 ds4 與完全損害 ds5 等五級。

易損性曲線通常包括 4 條曲線，如圖 1.3 為示，在給定評估參數下，分別表示超越輕微損壞、超越中度損壞、超越嚴重損壞和完全損壞的機率，將超越不同損害狀態的機率兩兩相減，便可得到結構物處於不同損壞狀態的機率，稱之為損壞狀態機率。

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 PGD 或 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， β 為其變異係數，則其機率密度函數如下：

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln m}{\beta}\right)^2\right] \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (1.1)$$

將式 1.1 積分為機率分佈函數 $F(x)$ ，並繪出其圖形，即為易損性曲線。

在平面道路分析部分，依據 Hazus® -MH MR5(2010) 與

SYNER-G(2011)，對於道路不同損害狀態的描述如表 1.3 所示，當強烈地震發生時，道路的損害狀態由沉陷或偏移量來決定。

由於國內目前尚無本土化道路易損性參數的相關研究，本研究採用 Hazus® -MH MR5(2010)道路分級與易損性曲線參數如表 1.4 所示。

將重要聯繫道路圖層以網格切割分段後，在給定的地震參數下，便可獲得每個網格內該道路分段的 PGA 與 PGD，透過表 1.3 易損性參數與式 1 的積分計算，便可獲得各分段道路的超越不同損害狀態的機率。假設一網格內某分段道路的超越不同損害狀態的機率分別是 F_2 、 F_3 、 F_4 ，則該分段道路為輕微損害、中度損害、嚴重／完全的損害狀態機率分別為 $ds_2 = F_2 - F_3$ 、 $ds_3 = F_3 - F_4$ 、 $ds_4 = F_4$ 。

考慮災後道路封閉情況對於救災行動的影響，根據表 1.3 的定義，在輕微損壞狀態下，道路仍可有條件的開放；但在中度損壞狀態時，道路則是可能需封閉的狀況，因此定義道路的封閉機率為超越中度損害的機率，即道路封閉機率 $= F_3 = \sum ds_i$ ， $i = 3、4$ 。

橋梁方面，採用國內 TELES 的典型橋梁分類，先依據橋梁跨數概分為單跨橋與多跨橋兩類；再依上部結構與橋墩形式將多跨橋分為六類；其他不屬於梁柱型式的橋梁則歸納為其他橋梁。上部結構系統分為簡支與連續兩類，橋墩型式分為單柱、構架式與壁式三類。此外，

依橋梁是否經過耐震設計、或是原為傳統設計但經過適當耐震補強等因素，考慮公路橋梁耐震設計規範頒布時間，本應以建造或設計年份為民國 84 年為界，但因所收集之橋梁基本資料均只記錄竣工年份，故改以竣工年份為民國 86 年為界，各典型橋梁再細分為三類。依據上述考量因素，所有橋梁依跨數、上部結構型式、橋墩型式與耐震設計水準形式共分為 24 類，如表 1.5 所示（交通部公路總局，2008）。

造成橋梁結構系統損害的致災因子有地表震動與地表破壞兩類，分別以地表最大加速度 PGA 與地表永久位移量 PGD 表示。本研究採用 TELES 地表震動與永久位移引致損害的典型橋梁分類之易損性曲線參數（交通部公路總局，2008）進行評估。

以地表震動的橋梁易損性分析而言，TELES 以數值模擬分析求出每座代表橋梁的降伏加速度及崩塌加速度，予以正規化後再加以平均，作為典型橋梁分類的耐震易損性曲線的參數值。假設正規化後的降伏加速度與崩塌加速度分別為 A_{yn} 與 A_{cn} ，以 A_{yn} 作為超越輕微損害狀態的易損性曲線中值， A_{cn} 為超越完全損害狀態的易損性曲線中值，超越中度損害與超越嚴重損害狀態的易損性曲線的中值則分別以 A_{yn} 與 A_{cn} 的三等分間距內差得到。則各典型橋梁分類之振動易損性曲線的中值與標準差及如表 1.6 所示，下標 2 為超越輕微損害狀態、3 為超越中度損害狀態、4 為超越嚴重損害狀態、5 為超越完全損害狀態。

個別橋梁的耐震易損性曲線參數值可再根據橋梁的竣工年份、所處地盤種類、橋梁基礎型式、橋梁的幾何特性等進行微調。以下式計算個別橋梁的振動易損性曲線中值：

$$A_y = A_{yn} \times (Z_{dsg}/0.23) \times K_{soil} \quad (1.2)$$

$$A_c = A_{cn} \times (Z_{dsg}/0.23) \times K_{soil} \times K_{3D} \times K_{skew} \quad (1.3)$$

其中 A_{yn} 與 A_{cn} 分別為典型橋梁分類對應等值耐震設計水準 0.23g 的降伏加速度與崩塌加速度； K_{soil} 為地盤種類修正係數，與不同年份的耐震設計規範有關； K_{3D} 為橋面版的三維修正係數； K_{skew} 為車行方向與橋墩歪斜時的修正係數。

依據民國 76 年和民國 84 年所頒布的橋梁耐震設計規範， K_{soil} 為修正值分別如下式 1.4 與式 1.5 所示：

$$K_{soil} = \begin{cases} 1 & Type1 \\ 1.167 & Type2 \\ 1.333 & Type3(臺北盆地) \end{cases} \quad (Code76) \quad (1.4)$$

$$K_{soil} = \begin{cases} 1 & Type1 \\ 1.25 & Type2 \\ 1.5 & Type3 \\ 1.75 & 臺北盆地 \end{cases} \quad (Code84) \quad (1.5)$$

參照 HAZUS99 的技術手冊，修正係數 K_{3D} 和 K_{skew} 為下列所示：

$$K_{skew} = \sqrt{\cos(90 - \alpha)} \quad (1.6)$$

$$K_{3D} = 1 + a/(N - b) \quad (1.7)$$

其中 α 為橋墩之車行方向與橋墩的夾角，當 $\alpha=90$ 度時代表車行

方向與橋柱正交， N 為橋墩數，各類型橋梁分類的 a 和 b 分別列於表 1.5。除了超越輕微損害狀態外，超越其他各損害程度之振動易損性曲線的中值均須乘以 K_{3D} 和 K_{skew} 兩修正係數。

以永久位移的橋梁易損性分析而言，TELES 所採用的分析模式主要參考 HAZUS 的技術手冊，將沉箱基礎和樁基礎歸類為深基礎；直接基礎或開放基礎則歸類為淺基礎，在相同耐震設計規範下，深基礎與淺基礎相比，假設其易損性曲線的中值提高兩倍（交通部公路總局，2008）。

具彎斜角或不同上部結構的橋梁，其永久位移引致的易損性曲線中值須做修正。第一種情況($I_{pgd}=1$)為單跨橋梁，第二種($I_{pgd}=2$)為多跨簡支承橋梁，第三種($I_{pgd}=0$)為多跨連續橋梁。各橋梁分類的 I_{pgd} 值如表 1.7 所示。超過輕微損害、中度損害與嚴重損害狀態之易損性曲線的中值須乘以 f_1 ，完全損害狀態之易損性曲線的中值須乘以 f_2 。 f_1 與 f_2 分別以下兩式表示：

$$f_1 = \begin{cases} 1 & I_{pgd} = 1 \\ \frac{2NW \sin \alpha}{L} & I_{pgd} = 2 \\ 1 & I_{pgd} = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

$$f_2 = \begin{cases} 1 & I_{pgd} = 1 \\ \frac{2NW \sin \alpha}{L} & I_{pgd} = 2 \\ \sin \alpha & I_{pgd} = 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

其中 N 為橋梁的跨數， W 為橋寬， L 為橋長， α 為彎斜角。

橋梁的長度與寬度隨實際交通需求而定，短橋可能僅幾公尺，長橋或高架道路則可能達上千公尺，本研究目前除了臺北市快速高架道路是以線段(類似平面道路計算方式)為單位進行計算，其他橋梁(包含國道)均是以橋梁中心點為評估單元進行運算。

在模擬地震作用下，可獲得橋梁中心點所在網格之地表最大加速度與地表永久位移量，經由典型橋梁分類之易損性曲線參數與個別橋梁之調整係數的計算，便可獲得每座橋梁因地表震動或永久位移造成超越不同損害狀態的機率分別為 $F_{2,pga/pgd}$ 、 $F_{3,pga/pgd}$ 、 $F_{4,pga/pgd}$ 、 $F_{5,pga/pgd}$ ，則整座橋梁因地表震動或永久位移造成的輕微損害、中度損害、嚴重損害和完全損害的損害狀態機率分別為 $p_{2,pga/pgd} = F_{2,pga/pgd} - F_{3,pga/pgd}$ 、 $p_{3,pga/pgd} = F_{3,pga/pgd} - F_{4,pga/pgd}$ 、 $p_{4,pga/pgd} = F_{4,pga/pgd} - F_{5,pga/pgd}$ 、 $p_{5,pga/pgd} = F_{5,pga/pgd}$ 。

參考《公路橋樑耐震能力評估及補強工程可行性研究》期末報告(交通部公路總局，2008)，定義橋梁失敗為橋梁因損害嚴重而有安全疑慮時，導致車輛無法通行，故橋梁失敗機率亦可稱為橋梁阻斷機率。假設橋梁在輕微損害狀態下，車輛大多可以通行，因此橋梁之阻斷機率為 0；橋梁在中度損害狀態時，雖無立即危險，但有時為安全考量有可能封閉橋梁，因此假設阻斷機率為 0.2；在嚴重損害狀態下，橋柱可能已達降伏階段，危及車輛通行安全，故假設阻斷機率為 0.8；

在完全損害狀態下，通常為了安全考量須禁止車輛通行，因此假設橋梁阻斷機率為 1.0。亦即，橋梁的失敗機率可表為下式：

$$P_f = 0.2 \times P_3 + 0.8 \times P_4 + 1.0 \times P_5 \quad (1.10)$$

$$\text{其中，} P_i = p_{i,pga} + p_{i,pgd} - p_{i,pga} \times p_{i,pgd} \text{，} i = 3,4,5 \quad (1.11)$$

1.3.3 大臺北地區大規模地震交通設施衝擊評估

經由 1.4.1 節所訂定的重要聯繫道路/橋梁篩選原則，篩選出大臺北地區重要聯繫道路/橋梁，再透過 1.4.2 節的評估方法與分析流程，得出大臺北地區重要聯繫平面道路封閉機率如圖 1.4 所示，由圖中可看出，臺北市中山區、大同區、萬華區、中正區，以及新北市三重區、板橋區、土城區的平面道路受損嚴重。圖 1.5 顯示臺北市的聯外跨河橋梁中，關渡橋與中興橋可能因受損嚴重而封閉無法通行；環河快速道路、新生高架道路、建國高架道路與水源快速道路可能因嚴重損害造成交通中斷。國道系統橋梁方面，國道 1 號系統自汐止系統交流道以降恐無法通行(圖 1.6)；國道 3 號在中和交流道與汐止系統交流道匝道恐無法通行(圖 1.7)；國道 5 號在南港系統交流道可能部分封閉。

1.4 後續研究方向

本文採用 Hazus® -MH MR5 (2010)提出的設施易損性分析方法，進行地震災害下道路損壞衝擊評估。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，將參數進行本土化調整是必要的，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。

目前進行道路系統地震衝擊評估時，並未考慮橋梁與道路之間的相依性；然而，橋梁、道路及隧道任何一處損壞，均會連帶影響其他設施的運作。後續研究將考量設施間的相依性。本案現階段僅完成橋梁/道路通行失敗（封閉）機率之評估，對於交通設施損壞造成的衝擊影響，如橋梁/道路阻斷形成孤島區域、車流堵塞，造成救災/復原困難等課題，尚需後續的研究與探討。

表 1.1、道路損壞情境分析方法（本研究整理）

分析方法	文獻	地震參數
道路易損性曲線	HAZUS-MH MR5	PGD
道路易損性曲線	SYNER-G	PGD
建物易損性曲線推估	5 ICEGE	PGA
由建物損害率推道路通阻狀況	首都直下型地震受災情境方法	震度

表 1.2、重要聯繫道路篩選原則

防災觀點				運輸觀點		行政系統	
道路系統		功能說明	路寬條件(m)	道路系統(都會區)	功能說明	道路系統(都會區)	功能說明
緊急道路		聯絡其他地區	20米以上	高速公路	城際間運輸及區域中心間之交通	國道	聯絡兩省(市)或重要設施
				快速公路(快速道路)	都會區與主要地方中心間、兩主要地方中心間、或區域中心與交流道間等之連絡	省道(市區道路)	聯絡重要縣(市)及省際交通
救援、輸送道路		提供市區內救援活動及物資運送	15米以上	主要公路(主要幹道)	縣市、鄉鎮間或都會區內之交通幹線	縣道(市區道路)	聯絡縣(市)及縣(市)與重要鄉(鎮、市)間
				次要道路(次要幹道)	連接一般市鎮通往次要地方中心或次要地方中心間之連絡線		
避難輔助道路	消防避難道路 緊急避難道路	聯絡各避難空間以及其他道路系統	8米以上 8米以下	地區公路(集散道路/地區街道)	提供地區性出入次要公路或集匯公路之公路，一般皆屬鄉鎮與村里間之連絡線	鄉道(市區道路)	聯絡鄉(鎮、市)及鄉(鎮市)與村里間

資料來源：(1)侯鵬曜(2001)；(2)本研究整理。

表 1.3、道路損壞狀態之描述

	完全無損壞 (ds1)	輕微損壞 (ds2)	中度損壞 (ds3)	嚴重損壞 (ds4)	完全損壞 (ds5)
損害狀態	無	輕微沉陷(< 30cm)或偏移	中度沉陷(30-60cm)或偏移	大範圍沉陷(>60cm)或偏移	同 ds4
復原水準 (第 1 天)	100%	90%	25%	10%	10%
效能減損 (第 1 天)	0%	10%	75%	90%	90%
道路通行 (修復期間)	可通行	開放。但車速下降或部分車道封閉。	封閉數天	封閉數天至數週	封閉數天至數週

表 1.4、Hazus® -MH MR5 道路易損性參數

道路分級	損壞狀態	中值 Median (inch)	變異數 β
主要公路 (四線道以上 道路)	輕微/較小損壞	12	0.7
	中度損壞	24	0.7
	嚴重/完全損壞	60	0.7
都市道路 (兩線道道路)	輕微/較小損壞	6	0.7
	中度損壞	12	0.7
	嚴重/完全損壞	24	0.7

表 1.5、TELES 之典型橋梁分類

跨數	上部結構	橋墩型式	是否耐震設計	分類
單跨			傳統	HWB1C
			補強	HWB1R
			耐震	HWB1S
多跨	簡支橋	單柱	傳統	HWB2C
			補強	HWB2R
			耐震	HWB2S
		構架式	傳統	HWB3C
			補強	HWB3R
			耐震	HWB3S
		壁式	傳統	HWB4C
			補強	HWB4R
			耐震	HWB4S
	連續橋	單柱	傳統	HWB5C
			補強	HWB5R
			耐震	HWB5S
		構架式	傳統	HWB6C
			補強	HWB6R
			耐震	HWB6S
		壁式	傳統	HWB7C
			補強	HWB7R
			耐震	HWB7S
其他橋梁			傳統	HWB8C
			補強	HWB8R
			耐震	HWB8S

表 1.6、地表震動引致損害的 TELES 典型橋梁分類之易損性曲線參數

Class	a	b	m_2	β_2	m_3	β_3	m_4	β_4	m_5	β_5
HWB1C	0.25	1	0.402	0.5	0.668	0.45	0.934	0.4	1.2	0.4
HWB1R	0.25	1	0.402	0.5	0.668	0.45	0.934	0.4	1.2	0.4
HWB1S	0.25	1	0.402	0.5	0.668	0.45	0.934	0.4	1.2	0.4
HWB2C	0.25	1	0.262	0.5	0.287	0.45	0.313	0.4	0.338	0.4
HWB2R	0.25	1	0.262	0.5	0.349	0.45	0.435	0.4	0.522	0.4
HWB2S	0.25	1	0.333	0.5	0.396	0.45	0.459	0.4	0.522	0.4
HWB3C	0.25	1	0.438	0.5	0.456	0.45	0.474	0.4	0.492	0.4
HWB3R	0.25	1	0.438	0.5	0.525	0.45	0.613	0.4	0.7	0.4
HWB3S	0.25	1	0.438	0.5	0.525	0.45	0.613	0.4	0.7	0.4
HWB4C	0.25	1	0.273	0.5	0.303	0.45	0.332	0.4	0.362	0.4
HWB4R	0.25	1	0.273	0.5	0.367	0.45	0.461	0.4	0.555	0.4
HWB4S	0.25	1	0.273	0.5	0.367	0.45	0.461	0.4	0.555	0.4
HWB5C	0.33	0	0.346	0.5	0.38	0.45	0.413	0.4	0.447	0.4
HWB5R	0.33	0	0.346	0.5	0.442	0.45	0.538	0.4	0.634	0.4
HWB5S	0.33	1	0.361	0.5	0.452	0.45	0.543	0.4	0.634	0.4
HWB6C	0.33	0	0.471	0.5	0.493	0.45	0.516	0.4	0.538	0.4
HWB6R	0.33	0	0.471	0.5	0.549	0.45	0.627	0.4	0.705	0.4
HWB6S	0.33	1	0.471	0.5	0.549	0.45	0.627	0.4	0.705	0.4
HWB7C	0.33	0	0.392	0.5	0.425	0.45	0.459	0.4	0.492	0.4
HWB7R	0.33	0	0.392	0.5	0.494	0.45	0.596	0.4	0.698	0.4
HWB7S	0.33	1	0.409	0.5	0.505	0.45	0.602	0.4	0.698	0.4
HWB8C	0.33	0	0.406	0.5	0.478	0.45	0.549	0.4	0.621	0.4
HWB8R	0.33	0	0.406	0.5	0.478	0.45	0.549	0.4	0.621	0.4
HWB8S	0.33	1	0.467	0.5	0.533	0.45	0.599	0.4	0.665	0.4

表 1.7、永久位移引致損害的 TELES 典型橋梁分類之易損性曲線參數

CLASS	I_{pgd}	m_2	β_2	m_3	β_3	m_4	β_4	m_5	β_5
HWB1C	1	25	0.80	50	0.80	100	0.80	200	0.80
HWB1R	1	25	0.80	50	0.80	100	0.80	200	0.80
HWB1S	1	25	0.80	50	0.80	100	0.80	200	0.80
HWB2C	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB2R	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB2S	2	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB3C	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB3R	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB3S	2	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB4C	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB4R	2	12	0.80	24	0.80	48	0.80	96	0.80
HWB4S	2	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB5C	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB5R	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB5S	0	20	0.80	40	0.80	80	0.80	160	0.80
HWB6C	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB6R	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB6S	0	20	0.80	40	0.80	80	0.80	160	0.80
HWB7C	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB7R	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB7S	0	20	0.80	40	0.80	80	0.80	160	0.80
HWB8C	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB8R	0	15	0.80	30	0.80	60	0.80	120	0.80
HWB8S	0	20	0.80	40	0.80	80	0.80	160	0.80

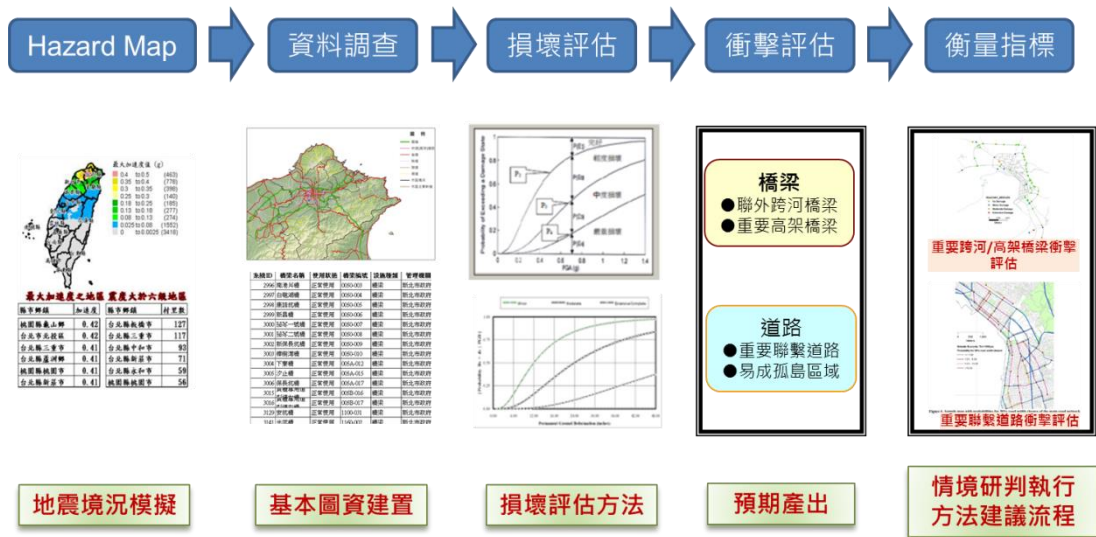


圖 1.1、交通設施衝擊評估流程架構

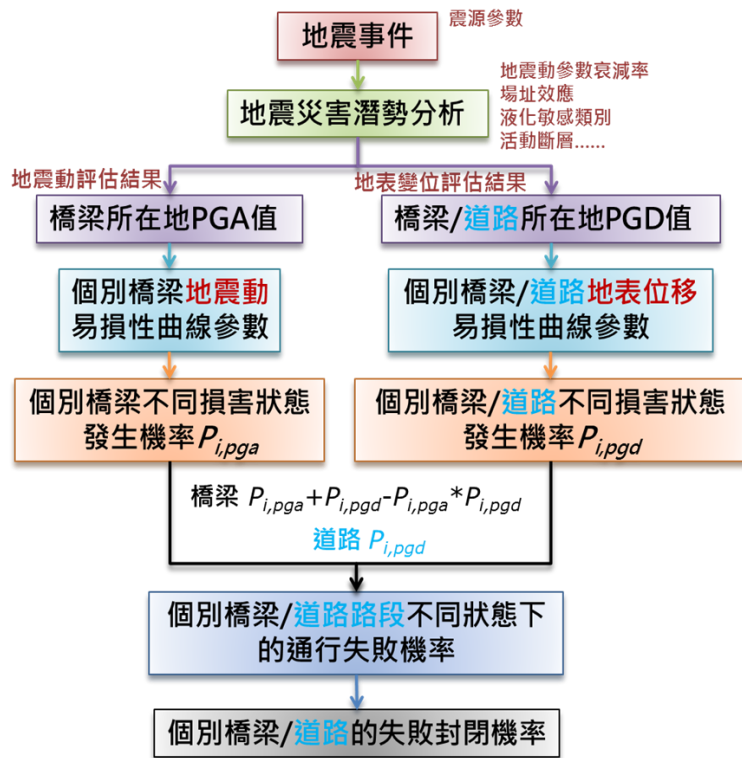


圖 1.2、橋梁/道路通行失敗機率評估流程

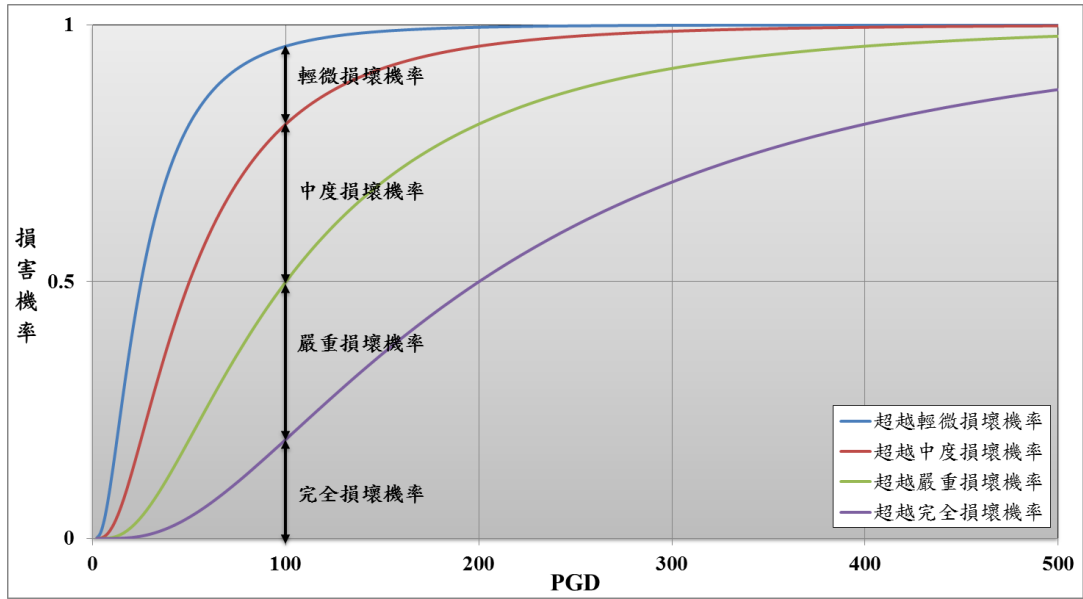


圖 1.3、超越不同損害狀態之易損性曲線與損害狀態機率示意圖

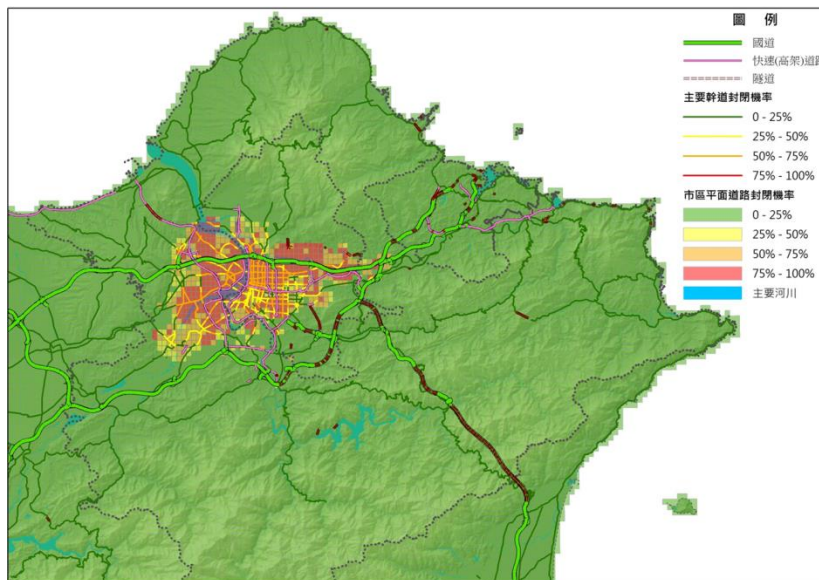


圖 1.4、大臺北地區重要平面聯繫道路封閉機率圖

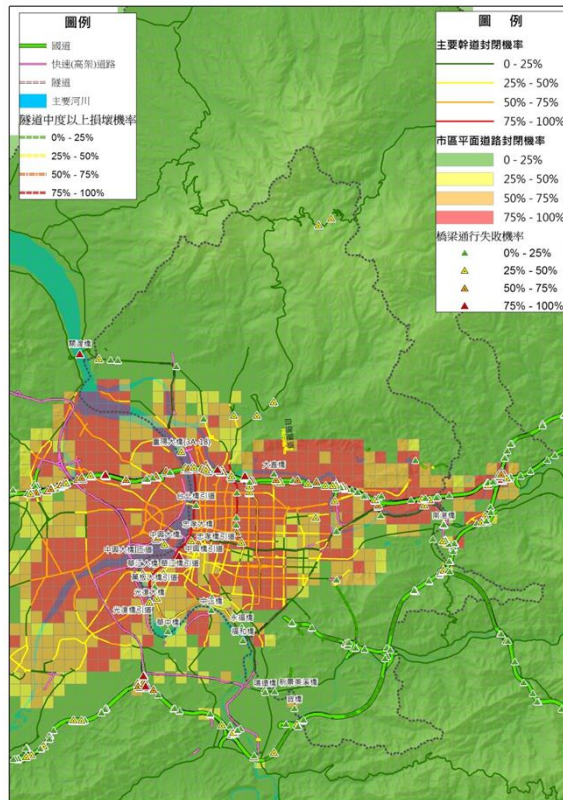


圖 1.5、臺北市重要聯外跨河橋梁、快速(高架)道路通行失敗機率圖

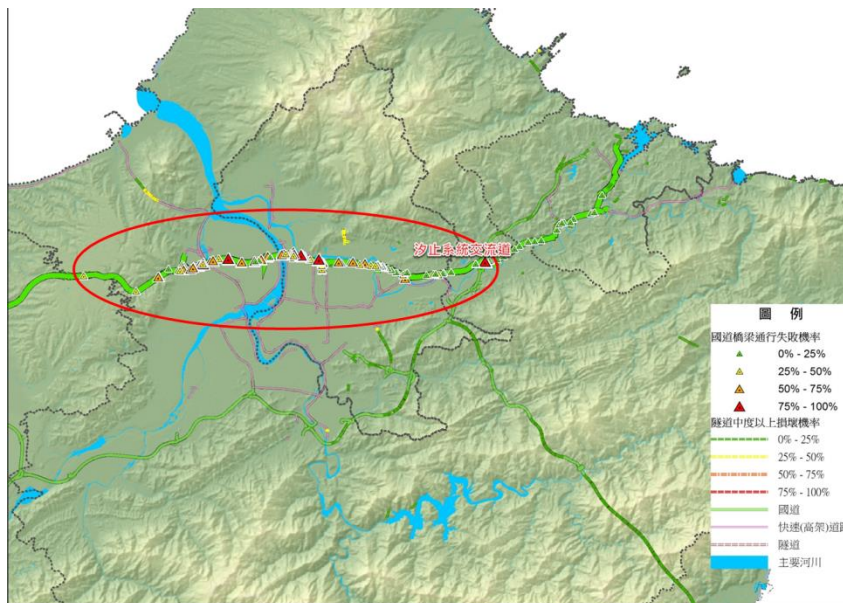


圖 1.6、國道 1 號系統橋梁通行失敗機率圖

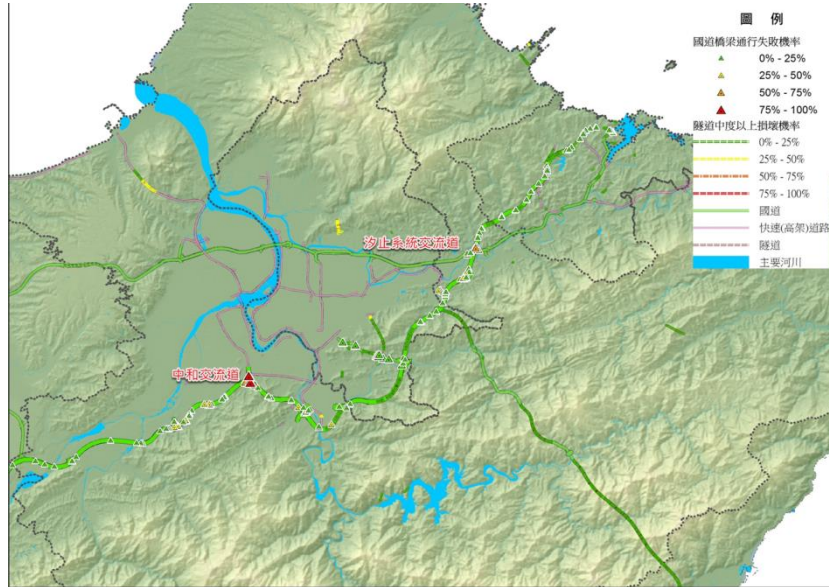


圖 1.7、國道 3 號系統（含 3 甲）橋梁通行失敗機率圖

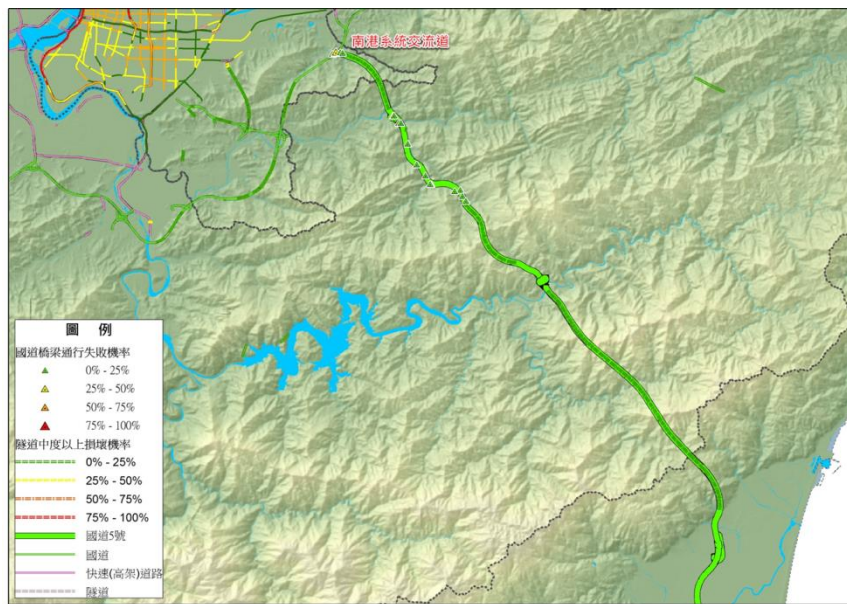


圖 1.8、國道 5 號系統橋梁通行失敗機率圖

第二章 震後供水中斷情境研判

2.1 前言及研究目的

水與生命密不可分，更是生活中十分重要的資源，為了便於使用，早在清代劉銘傳撫臺在臺北市內開鑿水井、過濾消毒，供民眾飲用，為臺北公共給水之發軔，爾後，政府積極實施水資源的長期發展計畫，利用供水系統，提供民眾使用乾淨、衛生又方便的水。國內外過去數起地震災害，造成供水維生設施的損壞或失效，導致民眾生活上的不便，甚至妨礙救援行動，若能於災前評估失效的境況，提供改善的建議，便能降低受災後的衝擊。

供水系統是由河川取水後，由淨水廠將淡水經過「混凝、沉澱、過濾、消毒」等淨水程序，以加壓站通過輸配水管道供給至用戶端(蘇昭郎等，2013)。本研究以翡翠水庫、西勢水庫、新山水庫、石門水庫供水區，包括臺北自來水事業處、臺灣自來水公司第1區處、第2區處及第12區處，作為供水系統示範區域，101年底統計的供水普及率分別為99.6%、92.53%、94.82%及99.04%(各區處網站統計資料，2013)。本研究利用地理資訊系統技術，分別建立上述四個供水管理區處之取水、導水、淨水、及配水相關重要元件之圖層，以及供水設施衝擊評估架構及操作流程，評估結果包含設施損壞機率百分比及設施復原天數、管線損壞影響範圍及損壞程度、影響人口。研究範

圍為大臺北地區（臺北市、新北市、基隆市）及桃園縣市，分析取水口 64 個、淨水場 31 個、加壓站 372 個點位，以及供水管線圖層 715,482 筆，評估結果供主管機關及重要設施失效衝擊評估之參考。

本研究目的為評估供水系統損壞與中斷情境，利用供水設施損壞分布圖與供水中斷情境說明，評估供水中斷的可能影響情形，包含影響範圍及其程度、人口數等，評估結果供重要設施失效衝擊評估之應用，並建立供水設施衝擊評估架構及操作流程。

2.2 文獻回顧

2.2.1 大臺北地區供水設施基礎資料與圖層

為執行大臺北大規模地震供水中斷情境研判之研究，截至 102 年 10 月已向臺北自來水事業處、臺灣自來水公司第 1、2 及 12 區處取得大臺北地區（臺北市、新北市、基隆市）及桃園縣市的取水口、淨水場、加壓站、供水管線之圖資及其屬性資料，取得圖資格式包含 SHP（主要），UIF（北水）及 DWG 格式，本研究以 ArcGIS 進行圖資建置及分析計算，因此將格式統一轉為 SHP 格式、TWD97 座標，並確認座標正確無偏移、無遺漏後使用。今年主要著重在建置分析計算流程方法，因此部分以 DWG 格式提供之圖資，暫時使用 101 年度取得之舊資料，彙整結果如表 2.1。

UIF(Utility Interchange Format)格式為針對養工處管理地下管線

目的而專門規劃之交換介面格式，格式適用於地下管線資料之特質，主要之描述對象為點、線及文字等三種型態資料，依識別碼串接管線單元之屬性資料，圖形及屬性資料皆以文數字型態之 TEXT 格式呈現（內政部營建署，2013）。原始資料將圖資及屬性資料分別儲存，圖資以 UIF 格式建置，利用 MapInfo 判讀內容，經由程式運算轉建 SHP 檔；屬性資料以 PIP 格式建置，以 C#語言轉 Excel 檔，共 48 萬多筆資料，再運用 Access 將資料轉成 dbf 檔。最後運用 ArcGIS 的 Join 工具將圖資與屬性資料合併後使用（如圖 2.1）。

因 DWG 檔案格式需另行處理成 SHP，本年度臺水管線資料部分使用 101 年收集的舊資料。新舊資料個別處理如下說明：

1. 102 年資料：北水處（臺北市及新北市 6 區），轉為 SHP 格式後，刪除不合理資料（資料空白或長度數值為 0）後使用；臺水一區（基隆及新北市 14 區），已為 SHP 格式，刪除不合理資料後使用。
2. 101 年資料：臺水二區（桃園）、臺水十二區（新北市 7 區），與 102 年資料比對，修正偏移的情形，再刪除不合理資料後使用。目前共收整大臺北地區供水設施圖資點位，取水口 64 個、淨水場 31 個、加壓站 372 個點位，以及供水管線圖層 715,482 筆（圖 2.2、圖 2.3）。

2.2.2 供水設施失效衝擊評估方法

供水設施的分析方法分為供水設施（取水口、淨水場及加壓站）及供水管線，彙整國內外相關文獻結果，如表 2.2，初步選用美國 HAZUS 的評估方法，利用表 2.3 之易損性曲線(Fragility Curves)進行損害評估，將設施點(Point)及管線(Line)各別進行評估計算，再以實際的地震災例衝擊結果，判斷評估結果的合理性，發現供水管線的評估結果較實際結果嚴重許多，推測可能是美國的供水管徑大小、長度及分布密度與臺灣差異太大，導致計算上的差異，因此供水管線的計算參數，改採用中央大學蔣偉寧老師指導之學生論文(黃沛群,2002)修正的參數結果。

1. 供水設施評估計算步驟（如圖 2.4）：

- (1) 利用前冊第二章之規模 7.1 的山腳斷層錯動結果網格化，以 500 公尺正方為單位進行計算，將網格化計算的地震情境資料，運用 ArcGIS 之 Spatial Join 工具與供水設施圖資結合。
- (2) 利用 Fragility Curves(表 2.2)進行供水系統損壞評估計算，分別計算出輕度、中度、嚴重及完全損壞，四種不同程度的損壞結果。設施損壞 % = $0.5 \times \left(1 + \text{ERF} \left(\frac{\ln(\text{PGA}) - \ln(\text{Median})}{\beta \times \sqrt{2}} \right) \right)$ 。
- (3) Join 圖資及計算結果進行繪圖。

2. 供水管線評估計算步驟：

管線計算評估結果較實際結果嚴重許多，因此管線計算參數採用黃沛群（2002）論文研究成果。

- (1) 基礎圖資資料處理：利用 ArcGIS 將管線進行分類，管徑以 20 吋（508 公尺）為界分為大小管徑（見表 2.4）、管材依照文獻資料所示，ACP、CIP、PCCP、PCV、PCVP、PCVP/PE、PCVP+DIP、PCVPE 以及 RCP 為脆性，其餘為延性管材（見表 2.5）。共分六類，個別整理分割出基礎圖層
- (2) 運用 ArcGIS 工具將資料以 PGA 網格為單位進行分割，並計算網格內管線的長度。
- (3) 利用 Fragility Curves，依照表 2.6 之流程步驟進行計算，求得供水管線不服務水準。
- (4) Join 計算結果與圖資，進行繪圖

3. 供水失效之衝擊人口數

假設評估設施損壞百分比，依相等比率影響同地區的居住民眾，估算方式系將居住人口網格化計算後，比對相同的網格，將兩者相乘而得。

$$\text{衝擊人口數} = \text{網格內的居住人口} \times \text{網格內管線不服務水準}\%$$

4. 供水設施損壞修復天數估算

HAZUS 文獻指出若 4 人一組，進行小管徑水管的修復工作，洩漏情形需花費 4 個小時、破裂情形需花費 8 個小時；換言之，想要在 1 小時內完全修復，洩漏情形需 16 個人力、破裂情形需 32 個人力。若 4 人一組進行大管徑水管的修復工作，洩漏情形需花費 6 個小時、破裂情形需花費 12 個小時。因此，想要在 1 小時內完全修復，洩漏情形需 24 個人力、破裂情形需 48 個人力。上述概念可得復原天數公式：復原天數 = $\frac{1}{\text{工作人力}} \times \left[\left(\frac{\text{小管洩漏}\%}{1} \right) + \left(\frac{\text{小管破裂}\%}{0.5} \right) + \left(\frac{\text{大管洩漏}\%}{0.66} \right) + \left(\frac{\text{大管破裂}\%}{0.33} \right) \right]$ （※隨意假設工作人力進行計算。）

2.3 供水系統失效衝擊評估

2.3.1 供水系統之易損性分析

供水設施損壞說明如表 2.7 描述，本研究依照損壞說明，7 天的缺水結果，除影響人民日常生活外，亦可能衍生衛生問題，因此選用中度以上損壞結果進行境況圖層展示及說明。

1. 供水設施之易損性評估：供水設施中度以上損壞評估結果機率如圖 2.5，供水設施重度以上損壞評估結果機率如圖 2.6 所示。
2. 供水管線之不服務水準：直接使用美國 HAZUS 提供之參數計算

結果，管線的損壞情形相當嚴重，與大臺北地去過去的地震案例衝擊結果並不相同，原因可能為計算中所使用的參數非國內可適用，搜尋國內相關研究學者，以蔣偉寧教授指導之學生論文，研究所得之參數結果進行重新計算，如圖 2.7、圖 2.8 所示。

3. 供水設施及管線綜合評估：將供水設施評估結果與管線不服務水準評估結果進行套疊，由圖 2.9、圖 2.10 可以看出，設施及管線的損壞程度，與 PGA 的大小分布情形大致相同。現階段的情境分析結果，設施與管線仍為各自表述，缺乏上下游的相關性分析。

2.3.2 供水系統中斷之衝擊分析

1、衝擊人口分析

運用前冊報告所估算之網格人口數，進行衝擊人口分析，範圍不包含桃園地區，配合本研究的末端管線不服務水準進行計算，初步估計影響人數為 2,727,623 人，影響的範圍如圖 2.11 所示。

2、初步估計之復原天數

運用美國 HAZUS 之設施復原天數計算，依照臺灣的實際情況，假設設施供單位 24 小時輪流不間斷地進行修復工作，復原的速度如圖 2.12 至圖 2.15 所示。

2.4 小結

本年度完成大臺北地區震後供水設施中斷之情境研判，建立供水

系統之損壞評估計算流程架構、清單及圖資、設施易損性分析，以及區域衝擊之情境評估，研究結果可供供水設施之管理維護單位，於地震災害前進行減災預防之參考。

基礎圖資已在本年度全數取得，唯資料內容部分不合理，已逕自刪除，圖資格式彙整部分，今年度完成臺北市地區 UIF 格式之轉置，以及校正沿用 101 年度收集之資料。圖資不合理之處，礙於時間有限，僅以電話詢問方式與提供單位進行確認。此外，設施與供水管線之分析結果為各自展示，單純將圖層疊加呈現，並未串聯上下游整體的相互關係，仍需更進一步的討論。

表 2.1、供水設施圖資資料蒐整表（本研究整理）

管理區處	資料範圍	格式	使用圖資內容	備註
臺北市自來水事業處	臺北市全區 及新北市六區	UIF	管線、加壓站、淨水場、水庫。	已轉成 SHP 檔案格式
臺灣自來水公司第一區處	基隆市及新北市 14 區	SHP	加壓站、取水口、水庫、淨水場、管線。	直接使用。
臺灣自來水公司第二區處	桃園地區	DWG	格式待轉成 SHP	使用 101 年舊資料
臺灣自來水公司第十二區處	新北市 7 區	DWG	格式待轉成 SHP	使用 101 年舊資料

表 2.2、供水設施及管線評估分析方法

評估公式	說明
$FC = 0.5 \times (1 + \text{ERF}((\text{LN}(\text{PGA}) - \text{LN}(\text{Median})) / (\beta \times \sqrt{2})))$	<p>美國 HAZUS 的供水設施及管線評估方法(Hazus® -MH MR5, 2010)，為本研究使用之評估方法，其中管線計算參數另使用中央大學蔣偉寧老師指導之學生論文（黃沛群，2002）修正之結果。</p>
$RR_0 = \max(RR_{\text{PGA}}, RR_{\text{PGD}(\text{Fault})}) + RR_{\text{PGD}(\text{Liquef})} \times P_{\text{Liquefaction}}$	<p>管線災損公式計算，由國家地震工程研究中心開發（2013），因其中 $P_{\text{Liquefaction}}$ 計算參數尚無法取得，暫不考慮使用。</p>
$Rm(V) = C_p \times C_d \times C_g \times R(V)$	<p>日本財團法人水道技術研究中心開發之管線損壞推估公式（2011），由於管線分類方式不同，管徑最大只到 900 公釐，因此暫不使用。</p>

表 2.3、供水設施 Fragility Curves 收整情形

設施 項目	地震 參數	元件特性	Fragility Curves	計算參數																																		
取水口 Wells	PGA	(1 – 5 mgd)		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Peak Ground Acceleration</th> </tr> <tr> <th>Classification</th> <th>Damage State</th> <th>Median (g)</th> <th>β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Wells (PWE1)</td> <td>slight/minor</td> <td>0.15</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>moderate</td> <td>0.36</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>extensive</td> <td>0.72</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>complete</td> <td>1.50</td> <td>0.80</td> </tr> </tbody> </table>	Peak Ground Acceleration				Classification	Damage State	Median (g)	β	Wells (PWE1)	slight/minor	0.15	0.75	moderate	0.36	0.65	extensive	0.72	0.65	complete	1.50	0.80													
Peak Ground Acceleration																																						
Classification	Damage State	Median (g)	β																																			
Wells (PWE1)	slight/minor	0.15	0.75																																			
	moderate	0.36	0.65																																			
	extensive	0.72	0.65																																			
	complete	1.50	0.80																																			
淨水場 Water treatment plants	PGA	小型 (10 - 50 mgd) 中型 (50 – 200 mgd) 大型 (大於 200 mgd)	<p style="text-align: center;">中型淨水場</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Peak Ground Acceleration</th> </tr> <tr> <th>Classification</th> <th>Damage State</th> <th>Median (g)</th> <th>β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Plants with anchored subcomponents (PWT3)</td> <td>slight/minor</td> <td>0.37</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>moderate</td> <td>0.52</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>extensive</td> <td>0.73</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>complete</td> <td>1.28</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Plants with unanchored subcomponents (PWT4)</td> <td>slight/minor</td> <td>0.20</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>moderate</td> <td>0.35</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>extensive</td> <td>0.75</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>complete</td> <td>1.28</td> <td>0.50</td> </tr> </tbody> </table>	Peak Ground Acceleration				Classification	Damage State	Median (g)	β	Plants with anchored subcomponents (PWT3)	slight/minor	0.37	0.40	moderate	0.52	0.40	extensive	0.73	0.50	complete	1.28	0.50	Plants with unanchored subcomponents (PWT4)	slight/minor	0.20	0.40	moderate	0.35	0.40	extensive	0.75	0.50	complete	1.28	0.50
Peak Ground Acceleration																																						
Classification	Damage State	Median (g)	β																																			
Plants with anchored subcomponents (PWT3)	slight/minor	0.37	0.40																																			
	moderate	0.52	0.40																																			
	extensive	0.73	0.50																																			
	complete	1.28	0.50																																			
Plants with unanchored subcomponents (PWT4)	slight/minor	0.20	0.40																																			
	moderate	0.35	0.40																																			
	extensive	0.75	0.50																																			
complete	1.28	0.50																																				

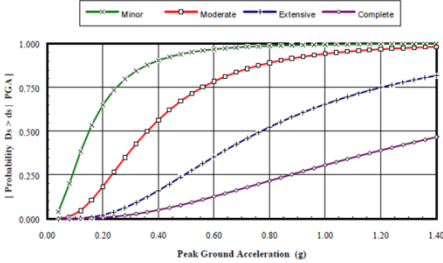
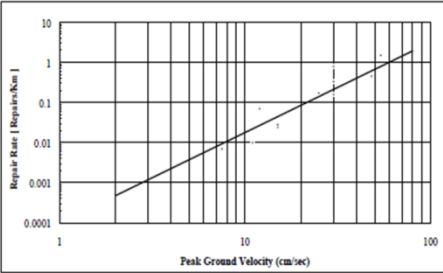
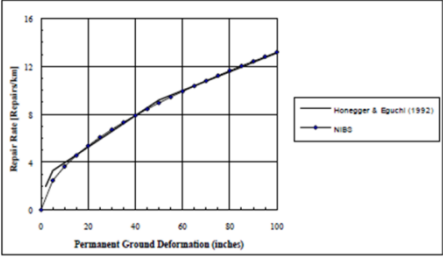
<p>加壓站 Pumping plants</p>	<p>PGA</p>	<p>小型 (小於 10 mgd) 中/大型(大於 10 mgd)</p>	 <p>中/大型加壓站</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Peak Ground Acceleration</th> </tr> <tr> <th>Classification</th> <th>Damage State</th> <th>Median (g)</th> <th>β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Plants with anchored subcomponents (PPP3)</td> <td>slight/minor</td> <td>0.15</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>moderate</td> <td>0.36</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>extensive</td> <td>0.77</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>complete</td> <td>1.50</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Plants with unanchored subcomponents (PPP4)</td> <td>slight/minor</td> <td>0.13</td> <td>0.60</td> </tr> <tr> <td>moderate</td> <td>0.28</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>extensive</td> <td>0.77</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>complete</td> <td>1.50</td> <td>0.80</td> </tr> </tbody> </table>	Peak Ground Acceleration				Classification	Damage State	Median (g)	β	Plants with anchored subcomponents (PPP3)	slight/minor	0.15	0.75	moderate	0.36	0.65	extensive	0.77	0.65	complete	1.50	0.80	Plants with unanchored subcomponents (PPP4)	slight/minor	0.13	0.60	moderate	0.28	0.50	extensive	0.77	0.65	complete	1.50	0.80
Peak Ground Acceleration																																						
Classification	Damage State	Median (g)	β																																			
Plants with anchored subcomponents (PPP3)	slight/minor	0.15	0.75																																			
	moderate	0.36	0.65																																			
	extensive	0.77	0.65																																			
	complete	1.50	0.80																																			
Plants with unanchored subcomponents (PPP4)	slight/minor	0.13	0.60																																			
	moderate	0.28	0.50																																			
	extensive	0.77	0.65																																			
	complete	1.50	0.80																																			
<p>管線 Pipes</p>	<p>PGV PGD</p>	<p>脆性管材 延性管材</p>	 	<p>脆性管材： PGV 造成 20%的損壞、PGD 造成 80%的損壞。 延性管材： 受到的損壞僅脆性的 30%。</p>																																		

表 2.4、管徑分類說明

欄位名稱	管徑型式	管徑大小
B	大管徑	>20 英吋，>508mm
S	小管徑	<20 英吋，<508mm

表 2.5、管材分類說明表

欄位名稱	延性/脆性	管材名稱
v	脆性	ACP、CIP、PCCP、PCV、PCVP、 PCVP/PE、PCVP+DIP、PCVPE 及 RCP
d	延性	其他

表 2.6、管線評估計算公式步驟流程

管線損壞計算公式	代表意義
$PGV_{\text{Repairs/km}} = 0.0001 \times (PGA)^{2.25}, PGV(\text{cm/s})$	PGV 可能帶來的損壞
$PGD_{\text{Repairs/km}} = \text{Prob}[\text{liq}] \times (PGD)^{0.56},$ PGD(inches)	PGD 可能帶來的損壞
$(PGV_{\text{Repairs/km}} \times 20\% + PGD_{\text{Repairs/km}} \times 80\%) \times \text{網格內總長}(\text{km})$	網格內脆性管材的損壞數量。
$30\% \times (PGV_{\text{Repairs/km}} \times 20\% + PGD_{\text{Repairs/km}} \times 80\%) \times \text{網格內總長}(\text{km})$	網格內延性管材的損壞數量。
$(\text{脆性損壞數量} + \text{延性損壞數量}) / \text{網格內總長} = \alpha$	網格內供水管線可能的損壞數量。
不服務水準 $= 0.5 \times (1 + \text{ERF}((\text{LN}(\alpha) - \text{LN}(0.1)) / (0.85 \times \sqrt{2})))$	網格內，供水管線的不服務水準。

表 4.7、供水設施損壞說明

損壞狀況	損壞說明
輕度損壞	淨水場、加壓站、取水口：輕微廠房故障，3 天內可修復，可能影響供水品質。
中度損壞	淨水場、加壓站、取水口：廠房故障的程度約需 7 天時間可修復，已影響供水品質。
嚴重損壞	淨水場、加壓站、取水口：設施與管線連接處、結構或非結構要素損壞嚴重，無法修復造成停機。
完全損壞	淨水場、加壓站、取水口：完全故障或建物倒塌，無法提供設施功能。

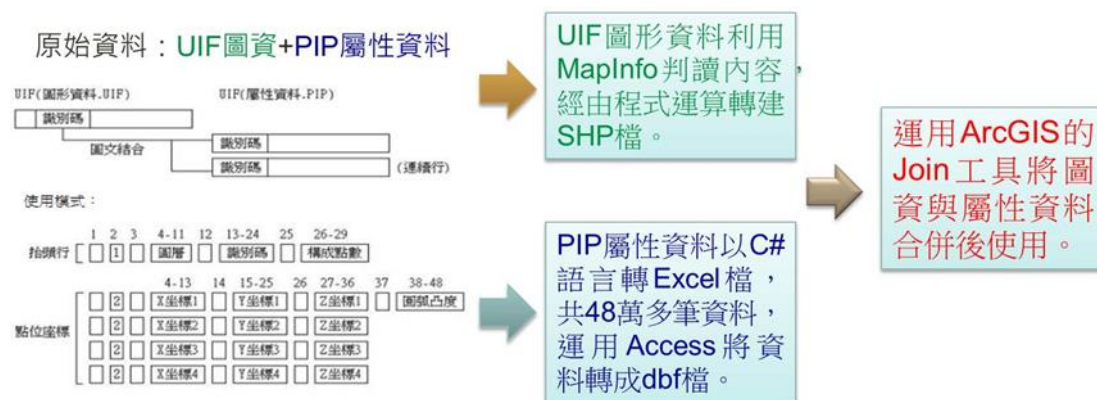


圖 2.1、UIF 格式轉換說明

設施項目	設施元件	所在縣市(數目)	資料內容	資料筆數
供水系統	• 水庫	台北市(0)、基隆市(2)、新北市(4)、桃園(1)	水庫名稱、點位、所屬單位	7
	• 淨水場	台北市(4)、基隆市(5)、新北市(21)、桃園(1)。	淨水場名稱、點位、所屬單位	31
	• 取水口	台北市(3)、基隆市(9)、新北市(42)、桃園(10)。	名稱、點位、所屬淨水廠、河川來源、取水型態	64
	• 加壓站	台北市(111)、基隆市(68)、新北市(154)桃園(39)。	點位、地址、所屬單位、加壓型態、水壓	372
	• 管線 北水(13-3600mm) 台水(20-4200mm)	北水：台北及部分新北市(690,969)。 台水：基隆、桃園及部分新北市(24,513)。	點位、所屬單位、管徑、管材	715,482

圖 2.2、大臺北地區供水系統列表

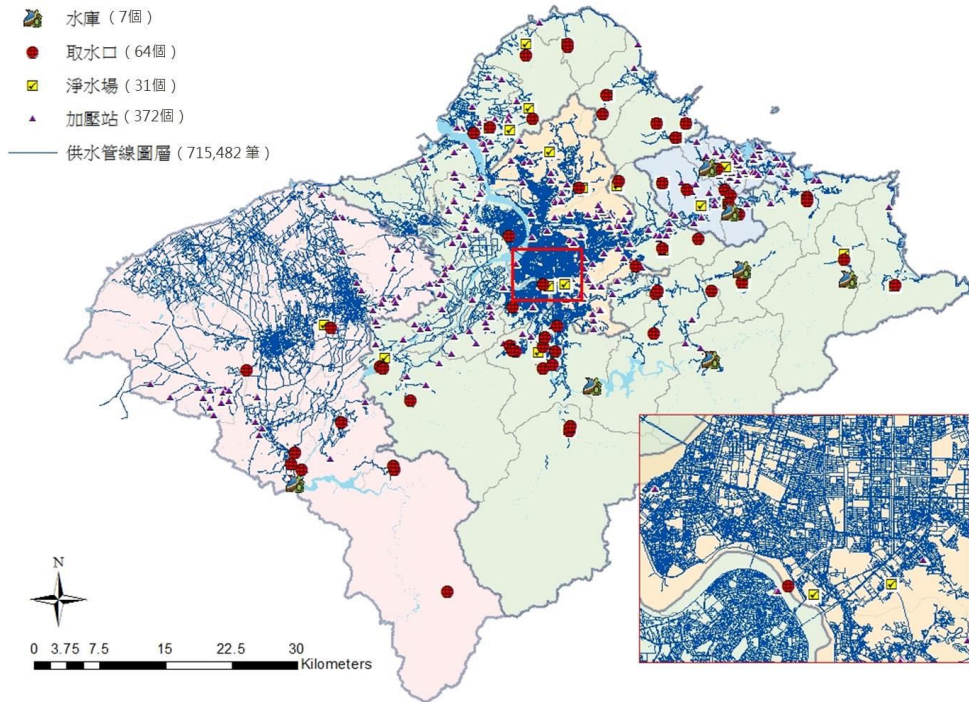


圖 2.3、示範區域供水設施基礎資料

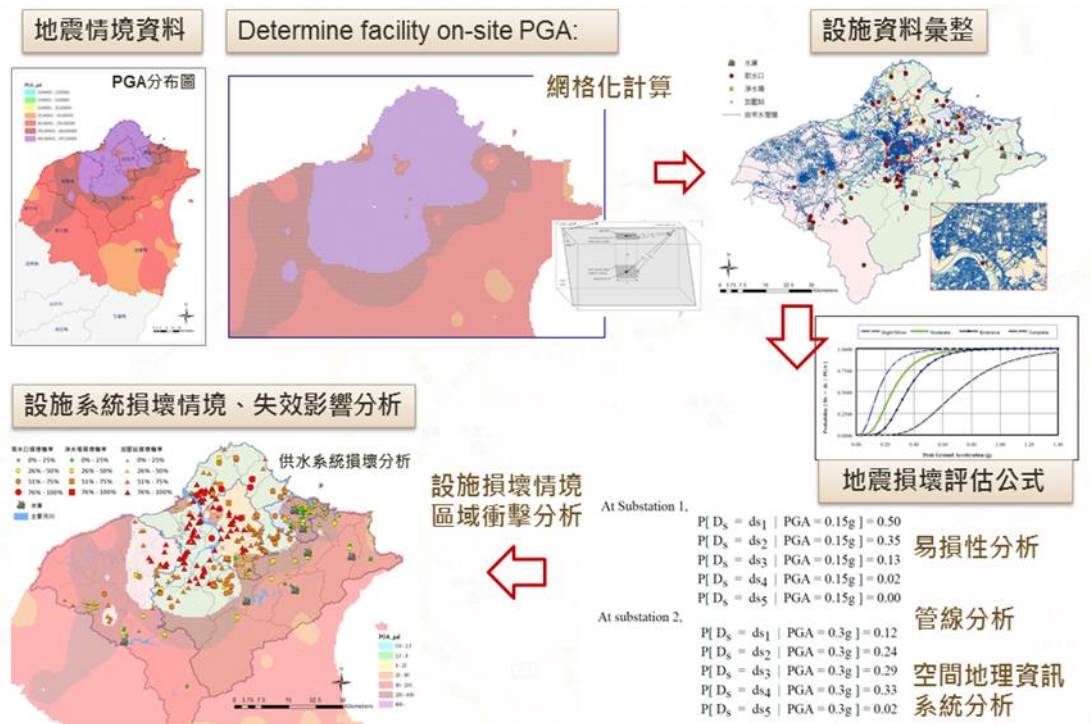


圖 2.4、利用 ArcGIS 計算供水設施之震後失效衝擊流程

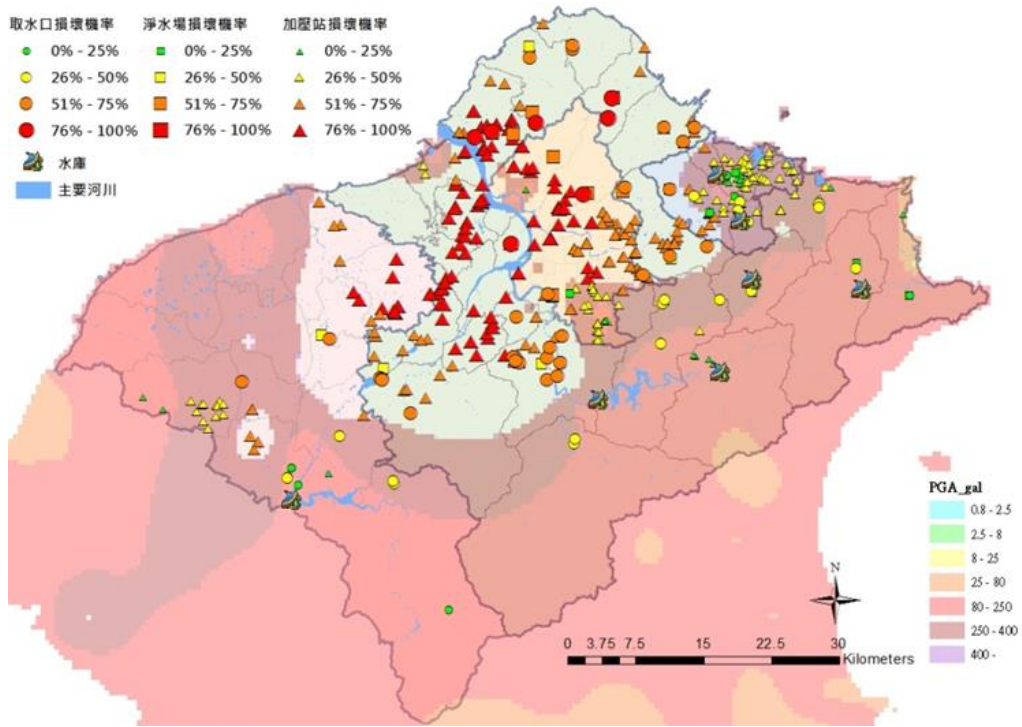


圖 2.5、供水設施損壞評估結果_中度以上機率

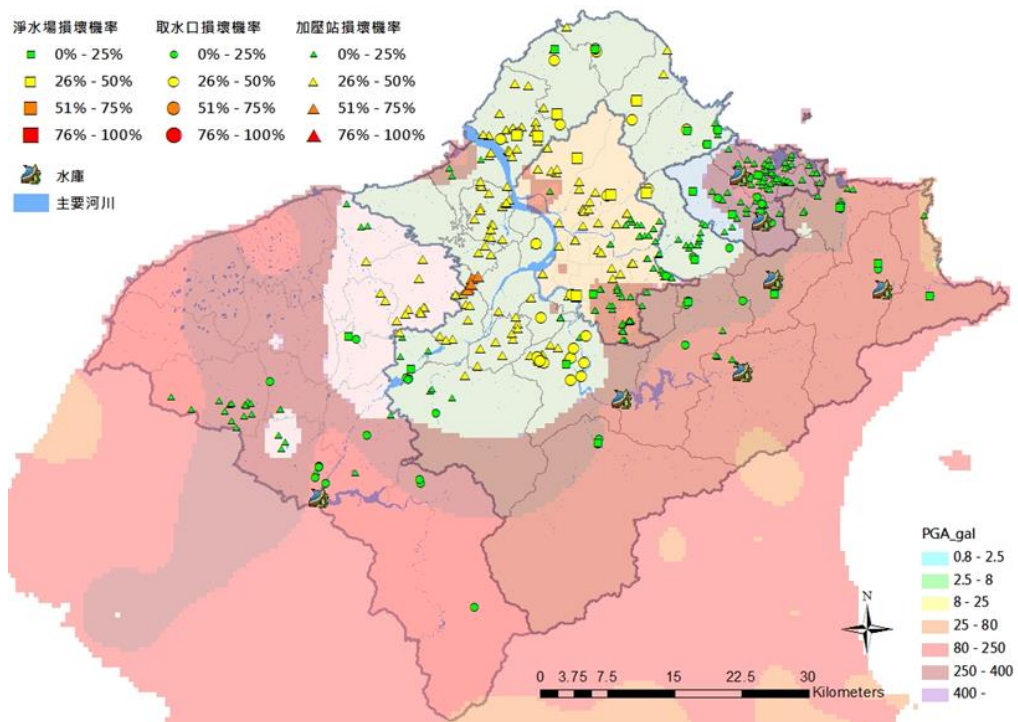


圖 2.6、供水設施損壞評估結果_重度以上機率

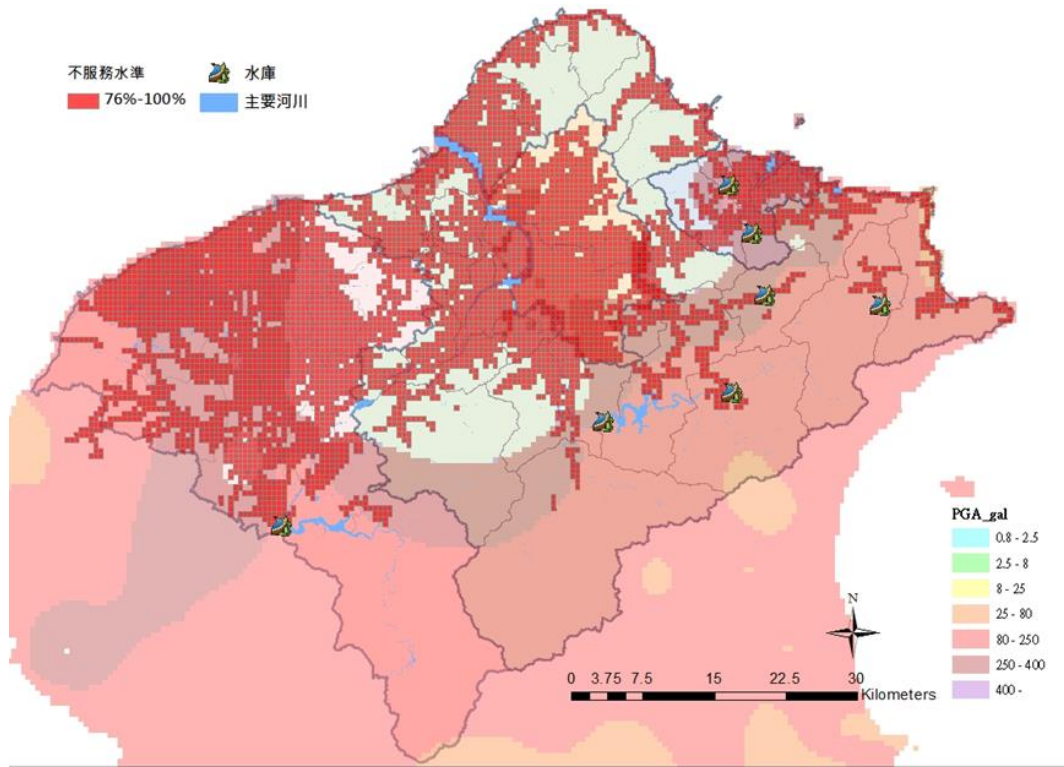


圖 2.7、供水管線不服務水準評估_HAZUS 係數

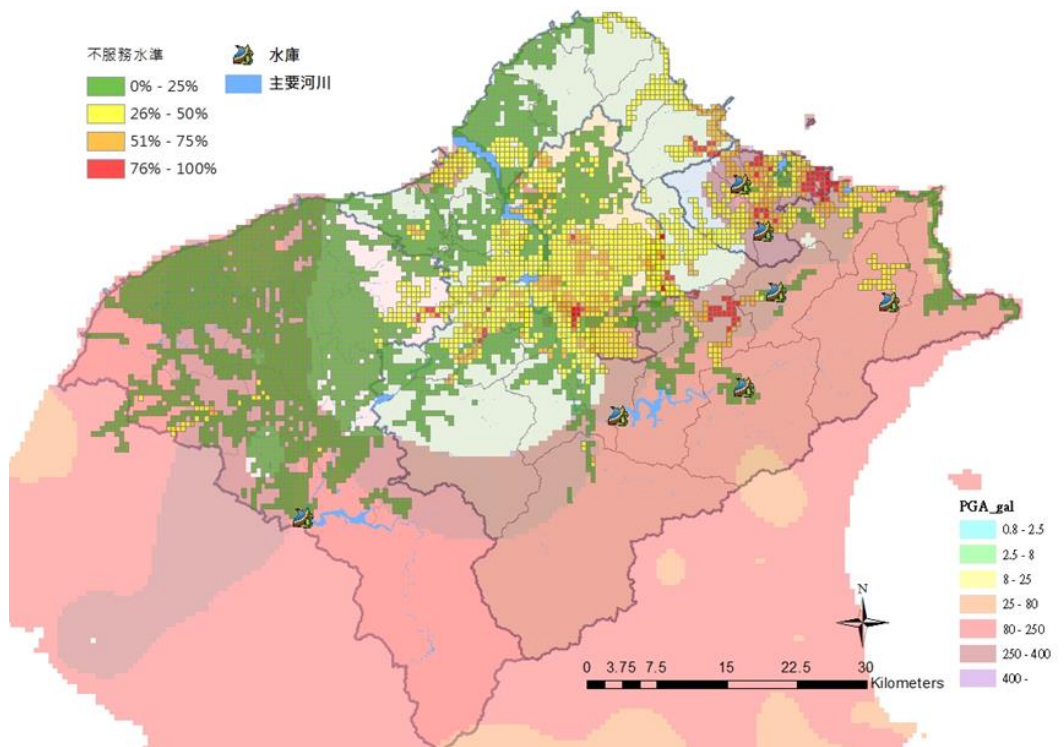


圖 2.8、供水管線不服務水準評估結果_係數修正

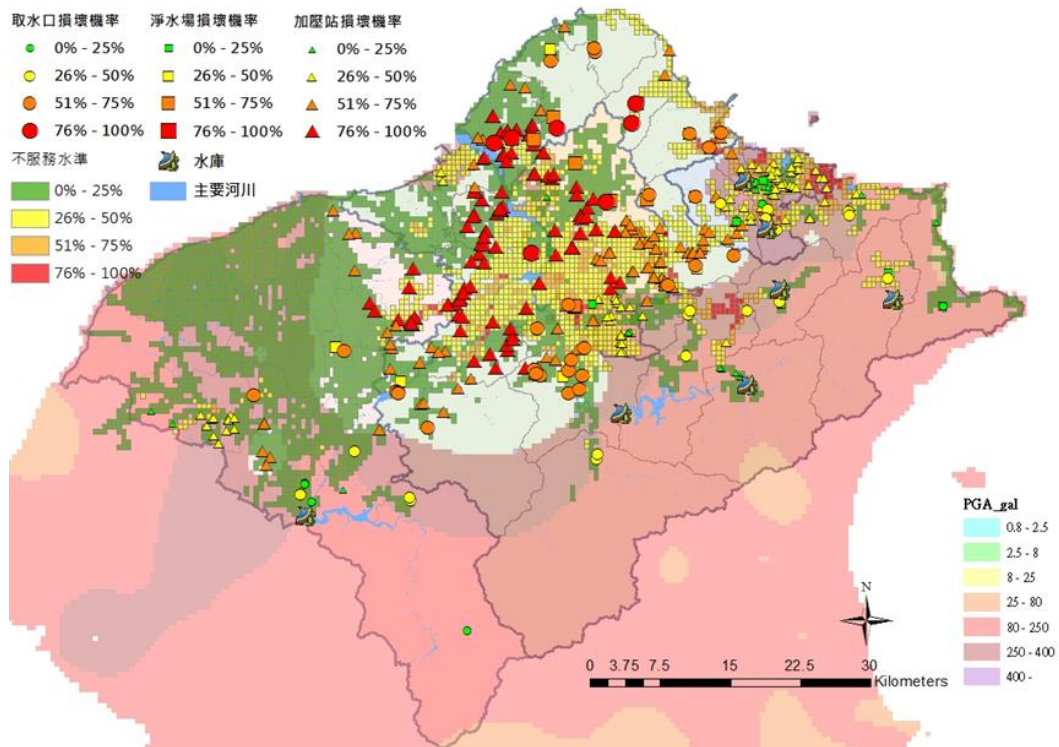


圖 2.9、供水系統中度以上損壞評估

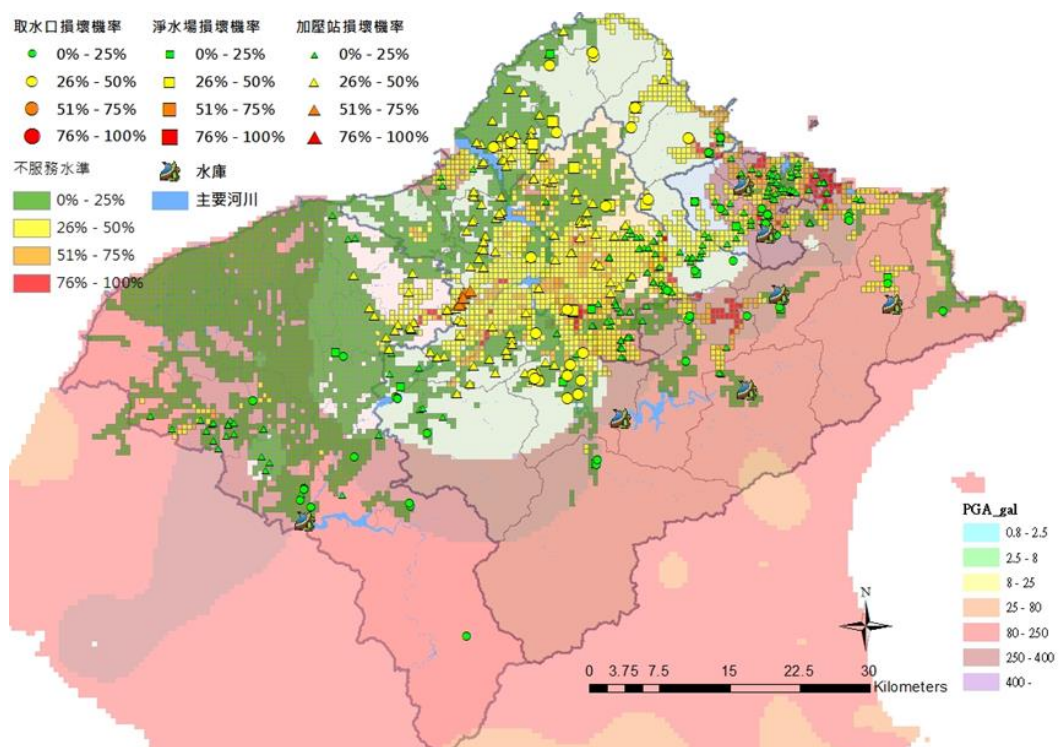


圖 2.10、供水系統重度以上損壞評估

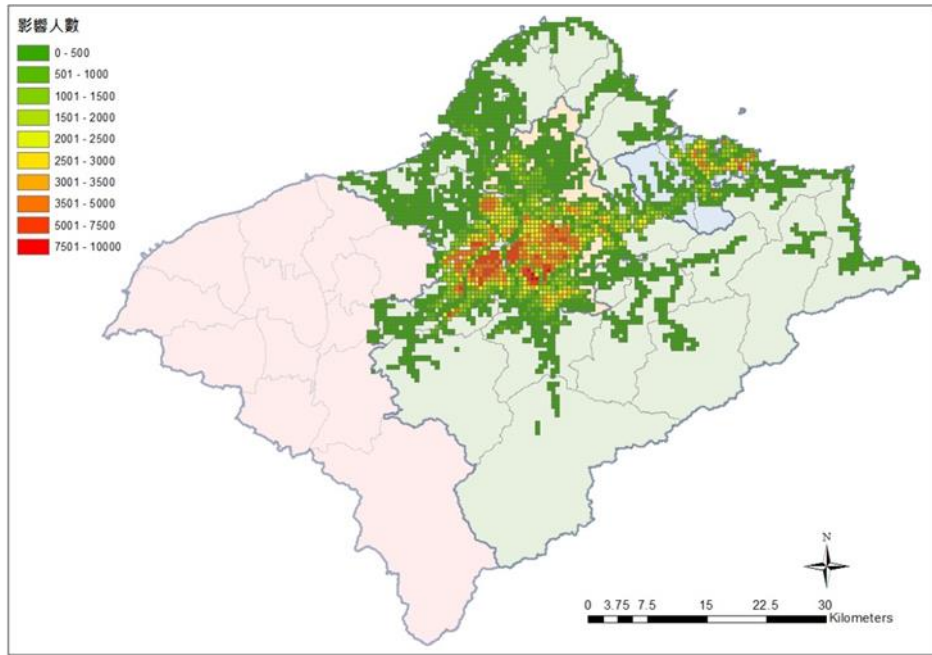


圖 2.11、初步估計影響人數

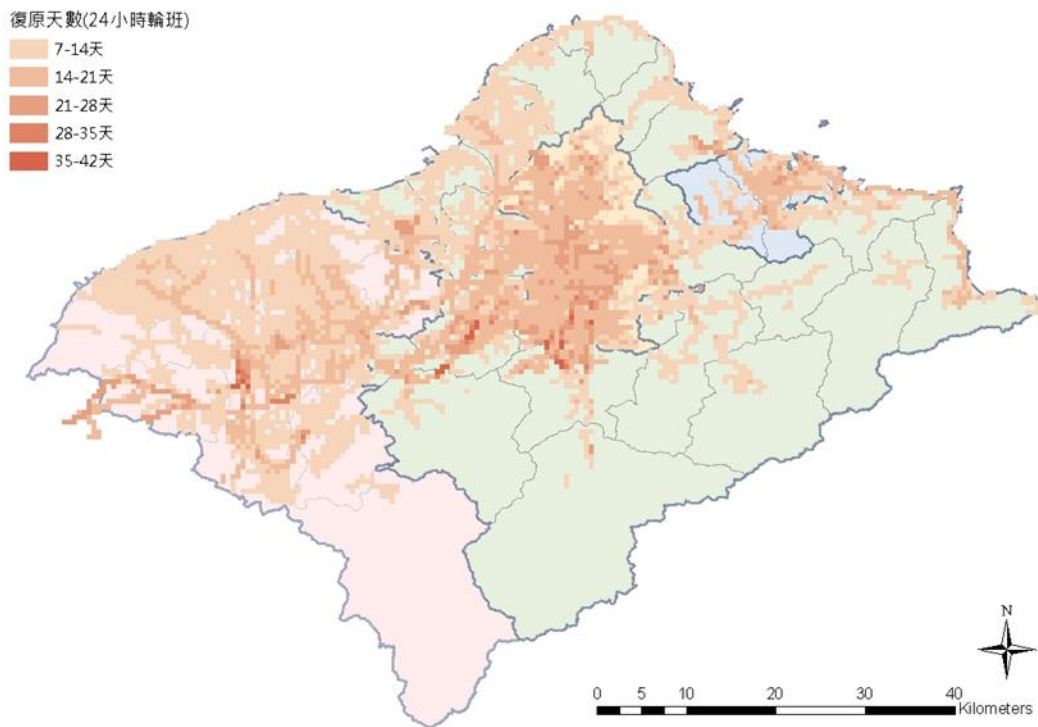


圖 2.12、震後第 1 天估計之復原天數

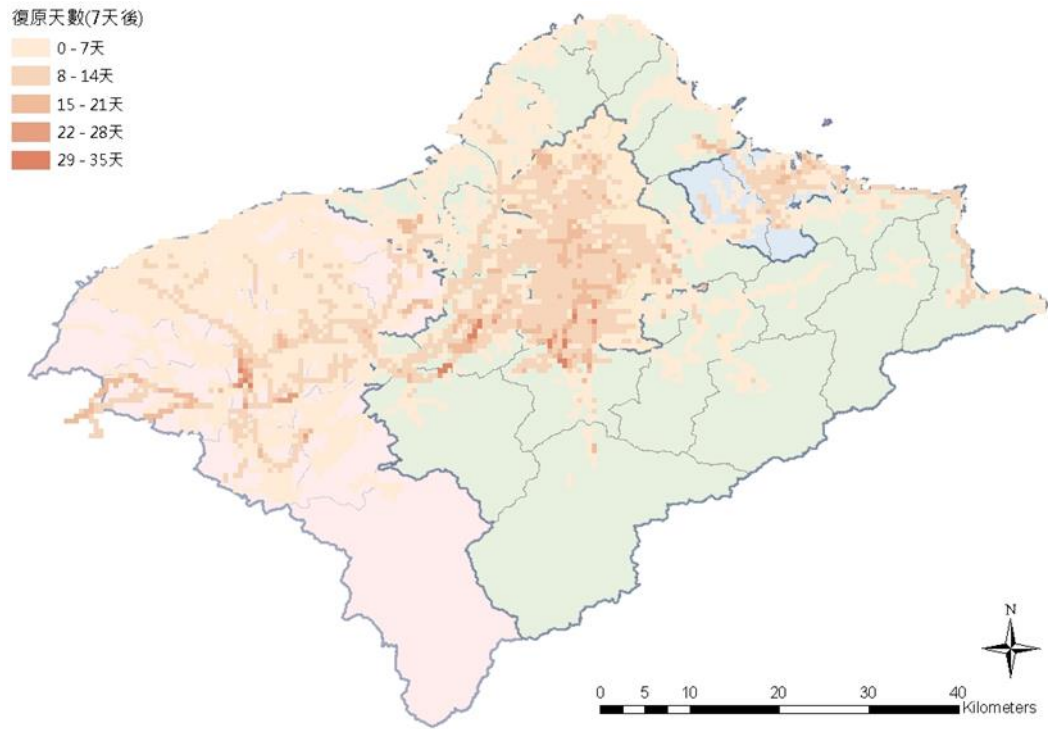


圖 2.13、震後第 7 天估計之復原天數

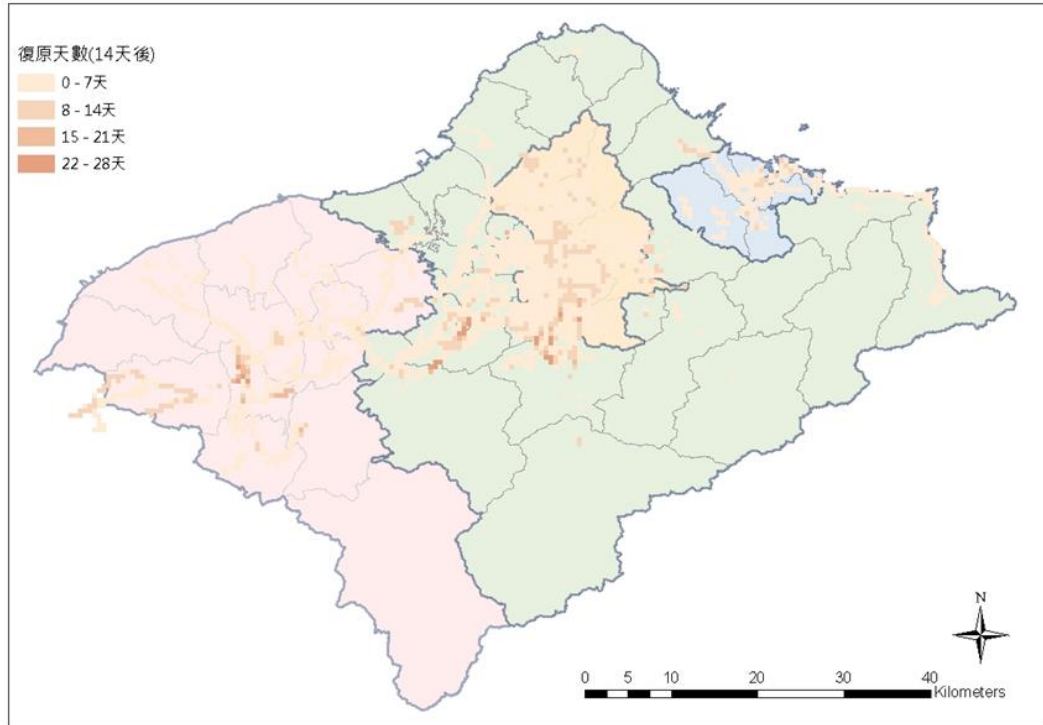


圖 2.14、震後第 14 天估計之復原天數

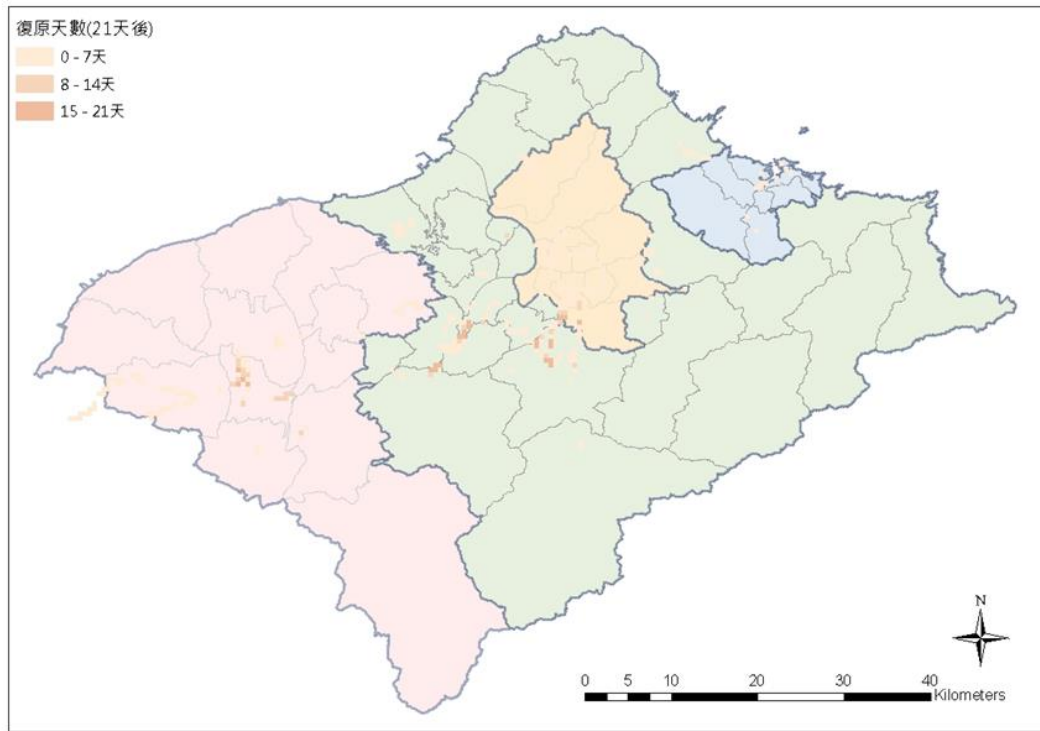


圖 2.15、震後第 21 天估計之復原天數

第三章 電力系統中斷情境分析

3.1 前言

臺灣地區天然災害發生頻繁，統計資料顯示臺灣國內總生產毛額暴露於颱風、坡地、地震，以及海嘯等災害之比例均為世界前五名，1999年9月21日發生的集集大地震則為臺灣近二十年來最重大之天然災害，造成二千四百多人死亡、一萬多人受傷、房屋全倒和半倒約十四萬間，以及水、電、橋樑、交通等維生設施中斷等嚴重災情。因此，在遭受各類災害之威脅下，如何維護電力系統之持續營運，減少其失效後之衝擊影響一直是各界重視之課題。參考日本首都直下型地震計畫之擬定精神與目的，本研究擬就北臺灣電力系統進行地震後之情境分析，據以作為未來擬定緊急應變與減災計畫、災後管理以及復原策略規劃之參考。本文扼要介紹如何利用 ArcGIS 於都會區電力系統震後情境分析之基本流程與架構，利用地理資訊系統的圖層套疊等方式，評估電力系統受到地震災害衝擊後之服務能力的可行性。

3.2 電力系統失效之災害衝擊評估架構

一直以來，人類對於環境與氣候的變化以及天然危害(Hazard)發生原因的了解程度，遠不及經濟發展、都市建設與土地開發的速度，使得現代人的生命與財產暴露在越來越高的災害風險之下。此外，人口急遽增加、貧窮問題、減災與應變準備不足、防災技術與觀念落後，

以及災害風險管理上的缺乏亦是造成災害規模擴大的原因。在過去二、三十年裡，許多大規模地震發生在人口稠密的都會區附近，造成嚴重的人員傷亡與經濟損失，包括 Michoacan, Mexico, 1985; Loma Prieta, CA, 1989; Northridge, CA 1994; Kobe, Japan, 1995; Turkey, and Chi-Chi, Taiwan, 1999; Guharat, India, 2001; Sumatra, Indonesia, 2004; Pakistan, 2005; Sichuan, China, 2008; Haiti, 2010; Christchurch, New Zealand, and Tohoku, Japan, 2011。這些大規模震災共同的特徵為造成都會區建築物、交通、電力系統等基礎設施的嚴重損壞，並引發連鎖性的災害。因此如何能事先評估地震災情、提升區域以及都會區對於地震災害的抗災能力、降低災害損失一直是各方努力的課題。目前最主要的方法為發展地震災損評估系統(Earthquake Loss Estimation System)，藉由系統性的分析，不但能預先評估地震災情及災損，亦可作為土地規劃、災前建立救災準備與減災策略規劃之依據。

最早的地震災損評估研究源於 1970 年代早期，在 1971 年發生 San Fernando 地震之後，美國政府需要了解人員傷亡情形，作為有效分配醫療資源的依據。爾後將道路、維生設施、通訊等設施系統納入災損評估，用以規劃地震後之緊急應變計畫。在 1997 年，美國緊急應變管理局(FEMA)首先提出地震災損評估系統 HAZUS(Schneider P. J.等, 2006；Hazus® -MH MR5, 2010)。近年來，對於防救災的重視以及地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)技術的發展，針

對不同區域以及地區設施系統的特徵，一些結合 GIS 的地震災損評估技術系統亦大幅的發展。如美國中部地震中心 (Mid-America Earthquake, MAE Center) 所開發的 MAEviz (Elnashai, A. M. 等, 2008)、由挪威 NORSAR 以及西班牙 Alicante 大學合作開發的 SELENA (Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach) (Molina, S. 等, 2010)、紐西蘭 GNS Science 以及 NIWA 共同開發的災害風險分析軟體 RiskScape (RiskScape User Manual, 2010)、土耳其 Bogazici 大學所開發之 ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) (Karmer, Y. 等, 2010)、歐盟整合型研究計畫 SYNER-G (SYNER-G, 2009) 等。我國國科會於 1998 年引進 HAZUS 系統，並由 Risk Management Solutions (RMS) 公司協助執行 HAZUS-Taiwan 計畫。國家地震工程研究中心 (National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE) 參考 HAZUS 之方法架構，於 2002 年開發臺灣地震損失評估系統 TELES (Taiwan Earthquake Loss Estimation System)。類似 HAZUS 的分析方法，TELES 亦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，而部分分析功能仍持續開發中。此外，結合中央氣象局的地震速報系統，TELES 增加提供早期地震災損評估之功能 (Yeh, C.-H., 等, 2006)。

圖 3.1 所示為地震災損分析與減災的關係與基本步驟，包括了地

震情境的模擬(Seismic Hazard Identification)、建立分析資料庫(Inventory Collection)、直接與間接災害衝擊評估(Direct and Indirect Impact Assessment)，以及復原計畫與減災策略(Restoration Plan and Mitigation Strategy)。其中地震情境的模擬包括分析地震源、模擬地表運動特徵(位移、速度、加速度)分佈，以及地質情形與土壤分佈狀況…等。建立分析資料庫則對社經資產(如:金融、工商企業、人口分布…等)，以及對於重要設施(建物、交通、學校、醫療資源、通訊、防救災設施、維生設施…等)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脆弱性模型(Fragility Model)，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，評估人員傷亡以及經濟上的直接損失。對於重要基礎設施失效後，衝擊其他產業與社經狀況所造成的間接損失(Indirect Impact)，則必須藉由系統關聯性(System Interdependency)作進一步的分析評估。最後，利用地理資訊系統平臺，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策略，達到提升都會區抗災能力之目的。

臺灣地區天然災害發生頻繁，統計資料顯示臺灣國內總生產毛額(Gross Domestic Product, GDP)暴露於颱風、坡地、地震、海嘯等災害之比例均為世界前五名。在近 20 年(1980-2010)臺灣災損統計之中，

地震災損約 140 億美金，颱風災損約 50 億美金，平均每年災損約 6 億 2,000 萬美金（國家地震工程研究中心，2012）。其中，1999 年 9 月 21 日發生的集集大地震則為臺灣近 20 年來最重大之天然災害，造成二千四百多人死亡、一萬多人受傷、房屋全倒和半倒約十四萬間，以及水、電、橋樑、交通等維生設施中斷等嚴重災情。臺灣地區人口約 2,300 萬人，其中接近 40% 的人口集中居住於臺北市、新北市、基隆市、桃園縣等面積總和僅佔全臺灣 10% 的北部縣市，而這些縣市之 GDP 亦佔全國 GDP 的 45%。此外，臺灣的政經指揮樞紐集中於這些北部縣市，因此有其必要對這些地區進行地震災害情境分析，並據以進行相關地震災害防治、減災與救災計畫策略制定與實施。

參考日本首都直下型地震計畫之擬定精神與目的，本研究擬以大臺北直下型地震對策計畫之開發與訂定，負責發展包括基隆市、新北市、臺北市、桃園縣等地區維生設施之損壞評估模組以及分析其失效後之影響。期望利用本研究分析結果，模擬大臺北地區維生設施於地震後之失效情境，據以作為擬定緊急應變與減災計畫、災後災害管理以及復原策略的規劃、企業與政府持續經營(Business Continuity Plan, BCP, and Government Continuity Plan, GCP)計畫、評估地區抗災能力與回復力評估之參考。

參考 HAZUS(Schneider P. J.等, 2006；Hazardus® -MH MR5, 2010)、

SYNER-G (SYNER-G, 2011)、日本內閣府地震對策計畫 (日本內閣府, 2012) 以及我國關鍵基礎設施安全防護計畫 (行政院國家關鍵基礎設施安全防護專業服務委外研究案第三階段), 本研究歸納都會區震後損壞衝擊評估所需分析之類別以及項目, 本年度針對電力系統發展震後損壞評估方法架構。

參考國內外發展之災損評估系統, 電力系統震後損壞評估之分析架構如圖 3.2 所表示, 包括地震情境模擬、設施資料調查、易損性模組開發、設施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之地震情境作為分析對象; 設施資料調查將就所選定之設施系統項目作清單調查, 建立設施資料庫包括設施點位、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。本研究所開發之維生設施分析流程將可作為後續其他維生設施分析之用, 亦將作為重要防救災設施如醫療、消防、警察等系統之震後能力評估之使用。

3.3 電力系統失效之災害衝擊評估方法

與我們日常生活息息相關的維生系統包含各項重要的基礎設施:

電力、供水、石油、天然氣、污水系統、資通訊及公路運輸等。面對每年日益增加的各種災害，如何能於災害後妥善保持維生系統運作，降低因為災害導致的損失及生活機能的恢復，則是政府單位與維生設施營運企業更加重視的。本研究以大臺北地區為範例都會區域，進行地震災害維生設施之損壞評估。本年度針對電力系統進行震後脆弱度分析相關研究。

電力系統一般以網狀形式，遍佈需要供應服務的區域，其中又分為架空、負掛或地下的方式鋪設，早期設置系統元件時，以營運成本為優先較缺乏災害考量，因此，相對於其他重要元件（如發電廠），電力系統較下游的設施元件（如輸電線路）地震脆弱度則較為脆弱。電力系統於都會區內的佈設複雜且密集，遭遇破壞性的地震後，難以在短暫的時間內完成修復而恢復服務功能。

電力系統，存在許多電器設備與儀器，平時正常運作時，供電系統的發電量及用電量間必須保持一定的平衡，且供電系統受到任何擾動對於系統的影響是即時的，因此，供電系統即時的穩定度是非常重要的。而供電設施元件及設備，如：變電所或電塔等，有部分設備位於戶外或架空，於緊急搶修作業中，與供水設施相比，較無障礙，較能迅速恢復（洪祥瑗等，2007）。

本研究參考日本首都直下型地震計畫之擬定精神與目的，針對北

臺灣電力系統進行地震後之情境分析，建置研究範圍內所有的供電系統設施元件等基礎資料之完整屬性及空間座標。示範區域涵蓋臺北市、新北市、基隆市、桃園縣、新竹縣、宜蘭縣等，除了考量首都區域之重要性，亦考量設施系統的高複雜度及供電網絡的分區特性，電力系統眾多重要設施元件所在位置，皆座落於示範區域內。以下將介紹電力設施系統之概況，以及如何利用 ArcGIS 於都會維生設施震後情境分析之基本流程與架構，包括目前執行狀況以及後續的發展方向。

3.3.1 北臺灣電力系統概述

電力系統是一個網絡架構，為了降低遠距傳輸所產生的耗損，一般以提高電壓的方式輸電，輸送電力的過程中通過各級變電所分階段逐步降壓，輸送至眾多的大型或是一般用戶端。此外，就大型設施的系統調度管理而言，若考量到系統內所有的用戶端，將是沒有效率的，反之，應掌握電力系統中上游核心部分-超高壓、高壓、中壓和低壓的電力輸配能力，除了降低電力系統的複雜程度，亦可更清晰的呈現電力系統較為重要的設施元件之損壞狀況。據此，本研究著重在電力系統主要的電壓層級進行後續分析與討論。

電力系統主要的電壓層級分為：345kV、161kV、69kV。主要以交流 345kV 超高壓輸電線路為骨幹，必須通過超高壓變電所 (Extra-High Voltage Substation 簡稱 E/S，電壓 345/161kV)，將 345kV

降壓至 161kV，其後通過 161kV 輸電線路輸送至一次變電所 (Primary Substation 簡稱 P/S，電壓 161/69kV)，將 161kV 降壓至 69kV，再通過 69kV 線路輸送至二次變電所 (Secondary Substation 簡稱 S/S，電壓 69/23kV 或 69/11kV)，將 69kV 降壓至 23 或 11kV，電力繼續輸送和降壓至各級用戶端或是小型變電所 (臺灣電力公司，2012)。本研究運用地理資訊系統技術，分別建立北臺灣發電、輸電及配電相關重要元件之圖層，其中，示範區域內大型發電廠 11 處、小型發電廠 6 處、E/S 變電所 9 處、P/S 變電所 21 處、D/S 變電所 97 處、S/S 變電所 84 處、345kV 電塔共計 1,350 處 (其中，345KV 北北基區域資料較為完整，共 1,133 處，新竹桃園地區則是示意表示，共 217 處)、161kV 電塔 3,686 處 (其中，各區域 161KV 資料不齊全，已擷取可用之資料進行分析)、69kV 電塔 4,038 處 (其中，69KV 以北北基資料為主)，相關資料用以進行地理資訊之空間分析，北臺灣電力系統示意圖請參閱圖 3.3，作為地震災害損失評估之基礎。

3.3.2 電力系統之地震易損性分析

易損性曲線 (Fragility Curves) 廣泛使用於風險分析當中，已成為評估風險發生機率 (Probabilistic Risk Assessment) 之重要工具。使用於地震風險分析，易損性曲線可呈現在特定的外力作用下，結構物或設施到達或是超越所設定的反應程度的發生機率。而整條易損性曲線所

要表達的是，當結構物或設施暴露在可能遭受的外力作用程度改變下，該結構物或設施之可靠度(Reliability)亦或是損壞發生機率(Probability of Failure)的變化情形(Schultz, M., T.等, 2010)。

損壞發生機率一般以常態分佈(Nominal Distribution)函數表示，為計算目的亦可用對數常態分佈(Lognormal Distribution)函數表示。以對數常態分佈函數為例，其自變數值恆為正，在某自變數下之發生機率則為對應之對數常態分佈函數的累積值(Cumulative Lognormal Distribution)，而易損性曲線即為對應於自變數變化之機率累積分佈函數。圖 3.4 為典型之易損性曲線。其中 IM (Intensive Measure)為危害源之強度值，如風速、淹水高度、地表最大加速度、地表永久位移...等，而不同的易損性曲線對應結構物與設施在不同損壞程度之損壞機率分佈(Schultz, M., T.等, 2010)。式 4.1 為易損性曲線函數。

$$P[DS \geq ds_i | IM] = \Phi \left(\frac{\log(IM/\overline{IM})}{\beta} \right) \quad (3.1)$$

其中 DS 為推估損害程度(damage state)， ds_i 為設定損害程度， \overline{IM} 為 ds_i 損害程度下 IM 之平均值， β 為對數標準偏差， Φ 則為機率累積分佈函數。

易損性曲線可依其損壞機率函數之建立方式分為四類：判斷型(judgmental)、經驗型(experimental)、學理型(analytical)，以及混合型

(hybrid)。判斷型易損性曲線建立於專家或工程師之專業意見與工程判斷結果。經驗型易損性曲線則藉由自然觀察或科學試驗之資料而得。學理型易損性曲線則建立於學理模型之分析結果。混合型易損性曲線則發展於以上兩至三種資料建立方法。這四類型易損性曲線各有其優缺點，其應用範圍與目的亦不相同。對於易損性曲線之發展與應用可參考 SYNER-G(2011)。

目前對於電力系統所發展的地震易損性曲線，依其設施特性可分為設施單元與區域管網兩大類別。歐盟整合型研究計畫 SYNER-G 已彙整地震危害相關之易損性曲線，並就不同設施系統所使用之 IM 類別提出建議，如表 3.1 所示(SYNER-G, 2011)。其中，對於設施單元包括建築、設備等多以最大地表加速度(PGA)作為易損性曲線之 IM，而對於區域管網則多以 PGV 以及 PGD 為主。本研究參考 HAZUS-MH，SYNER-G 以及國內研究報告結果，彙整電力系統之易損性曲線資料庫，作為本研究評估分析之用。

3.3.3 利用 ArcGIS 分析電力之震後衝擊評估

1. 建立評估流程、分析電力設施損壞情境：

本研究針對供電系統進行下列供電系統失效範例分析，分析流程圖，請參考圖 3.5：

(1) 地震參數-最大地表加速度(PGA)資料網格化處理：

以前冊報告第二章所提供之地動資料，模擬山腳斷層全段錯動，其中，斷層的模擬長度為陸上長度約 34 公里、海域長度約 16 公里，地震規模 7.1，作為模擬情境示範案例，推估全臺各地 500 公尺 x 500 公尺之最大地表加速度 PGA 網格資料。進一步再與設施元件空間套疊，可獲得每一個設施元件受到地震影響的 PGA 值。

(2) 易損性曲線的建立與分析：

目前使用 Hazus® -MH MR5(2010)、SYNER-G(2011)、TELES(2012)等國內外相關研究提出之易損性曲線，本研究將持續蒐整易損性曲線相關研究，並透過專家會議檢視分析結果之適切性。電力系統易損性曲線分為發電廠、變電所、電塔及末端管網等四種。

(3) 損壞狀況分析：

蒐集適用於不同電力系統的易損性曲線，針對個別的設施元件與對應的地震影響參數，進行易損性分析，可獲得每一個設施元件之輕微損壞(Minor)、中度損壞(Moderate)、嚴重損壞(Extensive)、完全損壞(Complete)之損壞機率，可得到每個設施元件四個不同程度的損壞機率值。此外，將設施元件不同程度的損壞機率值進行加值分析，參考表 2.2 之電力系統損壞狀態描述，即可將變電所及發電廠不同程度之損壞機率值加以運算，成為其破壞機率值，用以呈現整體設施系統的損壞情形，北臺灣大規模地震電力中斷情境分析示意圖，請參考圖 3.6。

本研究之地震影響參數以 PGA 做為參考，使用每個設施元件之 PGA 值，參考易損性曲線，可得到每個設施元件四個不同程度的損壞機率值，不同的損壞程度由嚴重到輕微分為四種等級，分別以紅色、橘色、黃色及綠色表示。分析結果中，末端管網於新北市泰山區、新莊區、板橋區、土城區等區域之損壞較為顯著，此局部區域範圍內的 E/S 變電所、P/S 變電所及 D/S 變電所之破壞機率較高。其次，需要關注臺北市信義區、北投區及士林區等局部區域，其末端管網及電力系統設施元件之破壞機率較為明顯。

(4) 區域失效影響—末端管網復原分析：

蒐集適用於電力系統的復原曲線，針對末端管網與對應的地震影響參數，進行復原分析，可獲得末端管網地震後 3 日、一週（7 日）、一個月（30 日）、三個月（90 日）之復原機率，除了能掌握電力系統修復情形外，亦能提供指揮官之參考與應用，北臺灣大規模地震電力中斷影響範圍與程度分析圖，請參閱圖 3.7。

(5) 區域失效影響—末端管網影響人口分析：

為能掌握電力系統損壞後，受到電力中斷影響的人口分布，因此，結合了前冊報告所提供的居家時段人口分布資料以及末端管網的損壞機率值，進行空間分析，即可得到末端管網之網格內，受到電力中斷影響之人口分布圖。

本研究進一步將「影響人口」及「復原分析」兩項因子加值處理，針對復原分析中，不同時間點的復原機率，考慮

居家時段人口分布後，即可獲得末端管網地震後 3 日、一週（7 日）、一個月（30 日）、三個月（90 日）之影響人口分布，以作為首都直下型地震計畫之參考，北臺灣大規模地震電力中斷影響人數分析圖，請參閱圖 3.8。其中，電力中斷修復天數之影響人口趨勢如圖 3.9 所示，隨地震發生後的時間演進，復原機率值逐漸提升，而受到電力中斷所影響的人口數亦隨之逐漸降低。

3.4 小結

本年度完成北臺灣大規模地震電力中斷情境分析之電力系統運作架構、設施清單與圖資建立、設施損壞分析、區域衝擊分析。然而，執行專案過程中，基礎圖資等取得的部分，仍需進一步與相關單位接洽，克服圖資取得不易之難處。此外，設施系統皆具有上下游串聯以及整體管網相互關係，電力系統內部關連圖資之建立，亦需要努力和突破資料相容性之困難。而在分析方法精進的部分，則在於電力系統內的元件關連、電力系統與其他設施系統間的相依性分析方法，以及影響設施持續營運之影響因子，皆須更深入的討論與瞭解。

後續執行方向除了將上述困難加以克服外，本研究完成之現階段成果，將尋求專家意見並將其建立研判機制，列入北臺灣大規模地震電力中斷情境分析影響圖之影響因子，以更進一步修正影響圖之分析結果。同時，為了整合目前正進行的各項設施系統之情境分析、分析

成果未來的開放上的流通性與使用上的便利性、以及加速目前情境分析之效能，本研究下一階段所設定之執行方向，將著重於地震減災應用相關平臺之開發，透過平臺操作方式，期待可以建立一套簡易操作演算快捷的多元模組、快速評估之分析平臺，來強化情境分析之準確性及便利性，透過這樣的操作模式，以彌補地震災害初期損壞資訊不足的問題，提供相關災前整備工作規劃之參考，將有助於減災相關應用上之操作。

表 3.1、維生設施系統地震易損性曲線之 IM 一覽表 (摘自 SYNER-G , 2011)

設施系統	子系統	Common IM	Recommended IM
供水	取水口	PGA	PGA
	淨水廠	PGA	PGA
	加壓站	PGA	PGA
	儲水槽	PGA, PGD	PGA
	管網	PGV, PGD, PGA, ϵ	PGV, PGD
	運河	PGV, PGD	PGV, PGD
	隧道	PGA	PGA
	汙水處理站	PGA	PGA
供電	變電所及變電設施	S _a , PGA, PGD	PGA
	電網	PGA	PGA
石油 天然氣	煉油廠	PGA, PGD	PGA, PGD
	儲槽	PGA, PGD	PGA
	管網	PGV, PGD, PGA, ϵ , SI	PGV, PGD
	加壓站	PGA	PGA

表 3.2、電力設施損壞狀態說明

損壞狀況	損壞說明
輕微損壞	<p><u>變電所</u>：5%開關斷線，或 5%線路損壞，或控電板或配電盤之齒輪儀器損壞因而跳脫，可能造成鍋爐或壓力閥損壞，或建物中物損壞</p> <p><u>發電廠</u>：渦輪機損壞，或柴油發電機輕微損壞，或建物輕微損壞</p>
中度損壞	<p><u>變電所</u>：40%開關斷線，或 40%線路損壞，或控電板或配電盤之齒輪儀器損壞因而跳脫，可能造成 40%鍋爐或壓力閥損壞，或建物中物損壞</p> <p><u>發電廠</u>：控電板或配電盤之齒輪儀器損壞因而跳脫，可能造成鍋爐或壓力閥損壞，或建物中物損壞</p>
嚴重損壞	<p><u>變電所</u>：70%開關斷線，或 70%線路損壞，或控電板或配電盤之齒輪儀器損壞因而跳脫，可能造成 70%鍋爐或壓力閥損壞，或建物中物損壞</p> <p><u>發電廠</u>：可能造成加壓馬達、大型垂直馬達損壞，或建物嚴重損壞</p>
完全損壞	<p><u>變電所</u>：所有開關斷線，或所有線路損壞，或控電板或配電盤之齒輪儀器損壞因而跳脫，可能造成所有鍋爐或壓力閥損壞，或建物中物損壞</p> <p><u>發電廠</u>：大型水平閥門損壞難以修復，大型供應馬達閥門損壞，建物完全損壞</p>

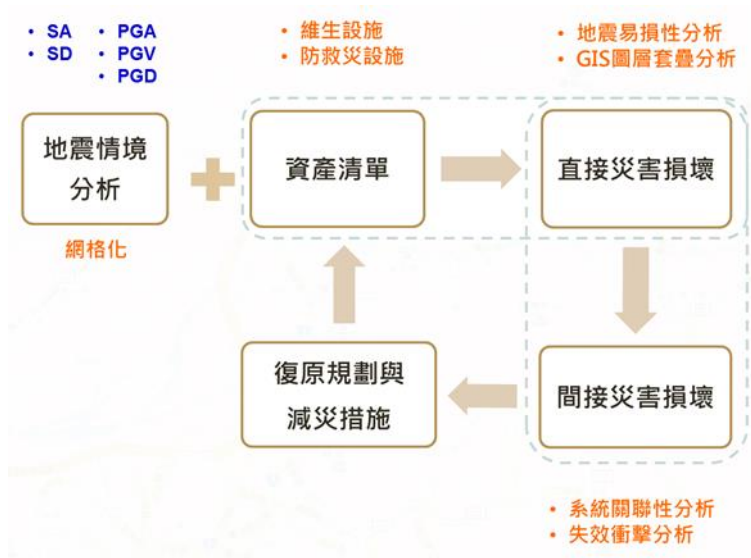


圖 3.1、地震損害分析與減災之關係架構

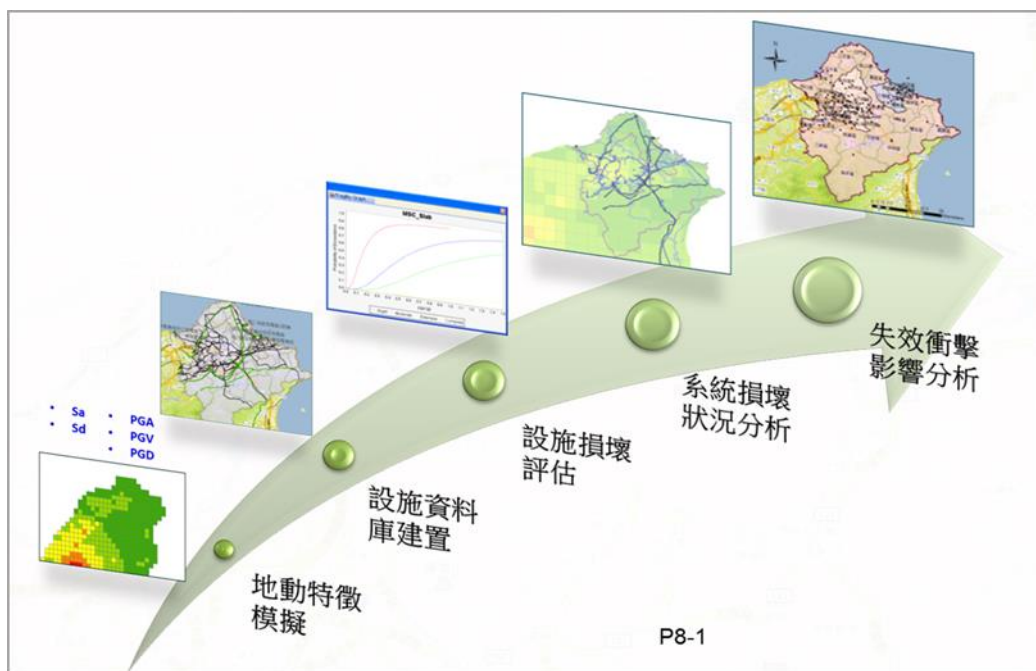


圖 3.2、電力系統震後損壞衝擊評估發展架構

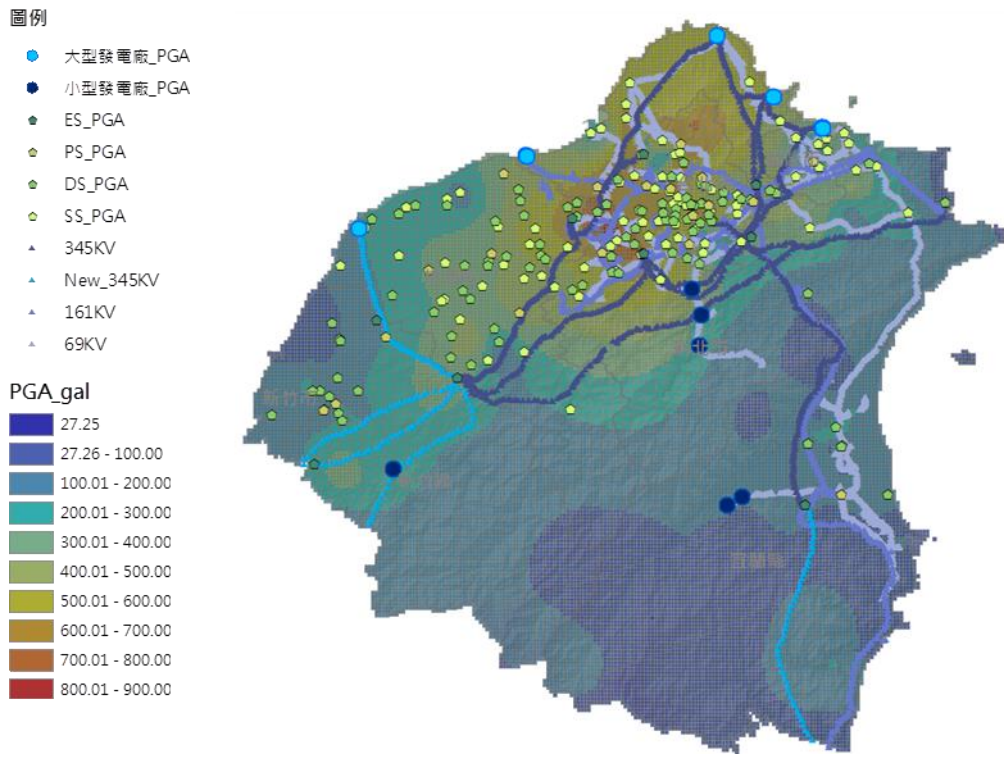


圖 3.3、北臺灣電力系統示意圖

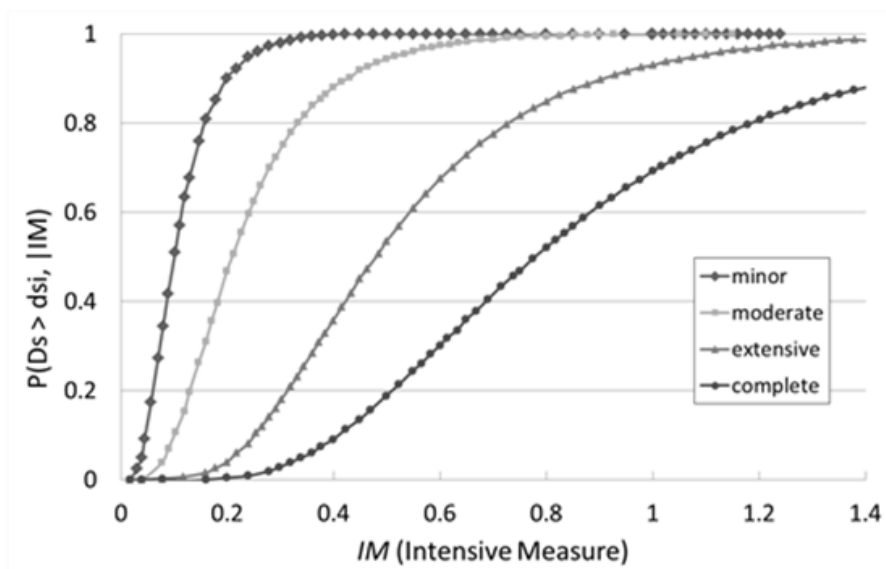


圖 3.4、典型之易損性曲線

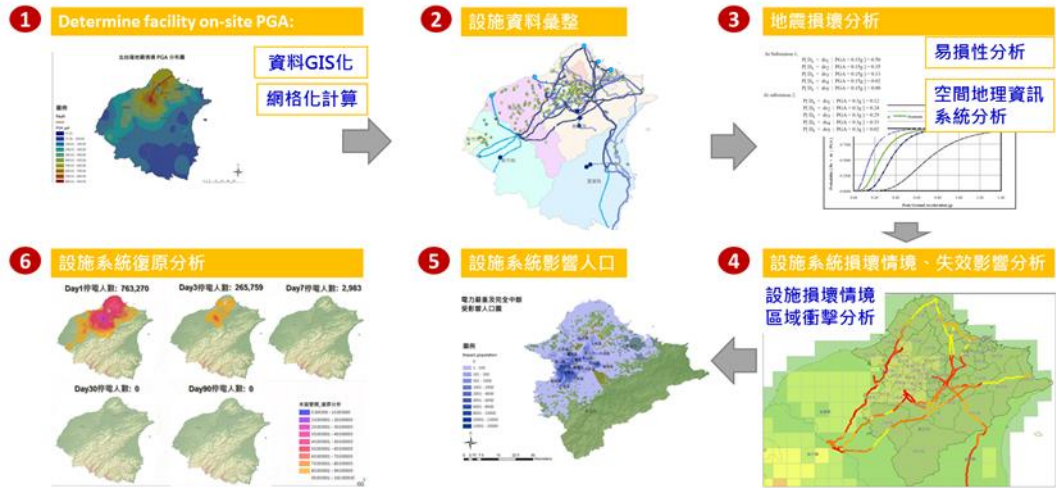


圖 3.5、供電系統震後失效衝擊分析流程

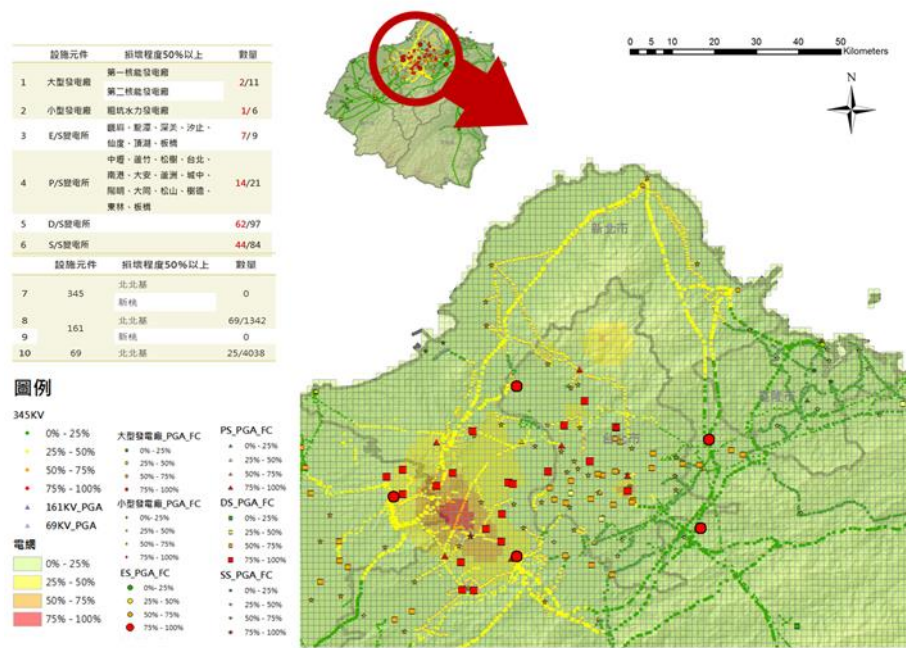


圖 3.6、北臺灣大規模地震電力中斷情境分析示意圖

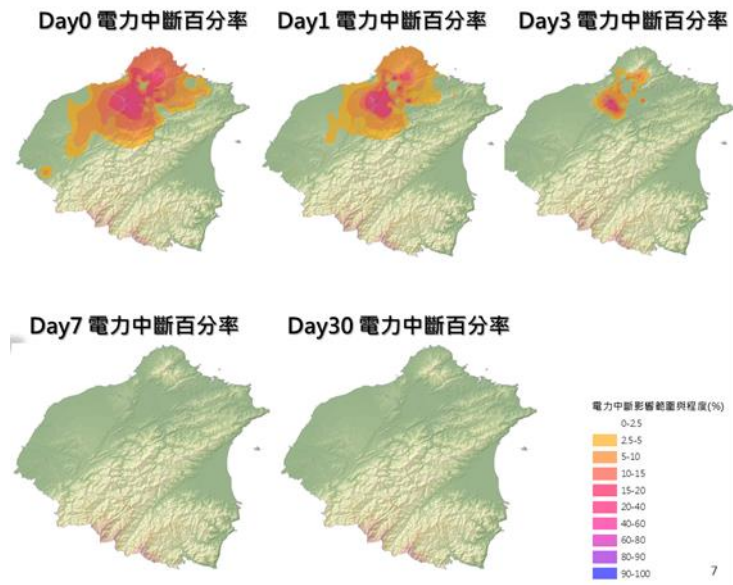


圖 3.7、北臺灣大規模地震電力中斷影響範圍與程度分析圖

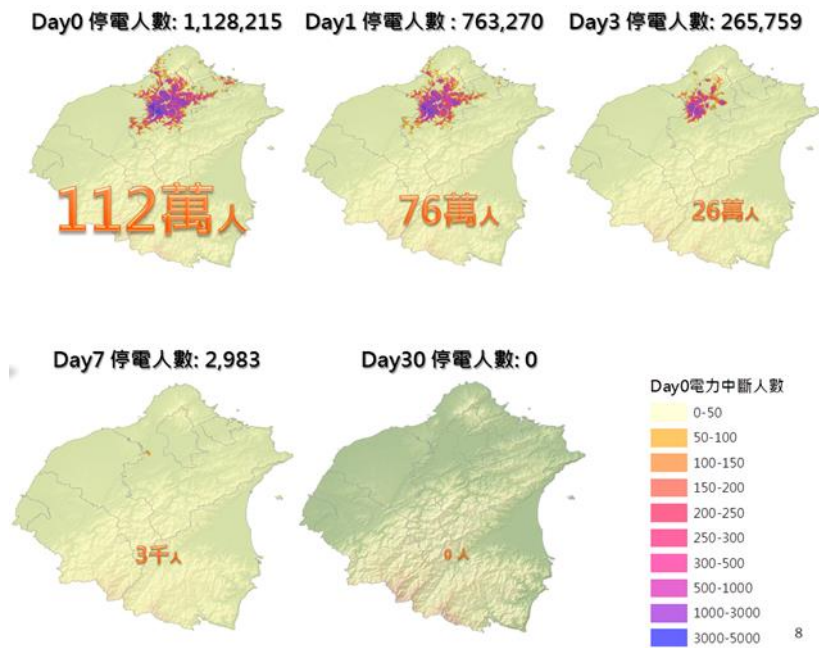


圖 3.8、北臺灣大規模地震電力中斷影響人數分析圖

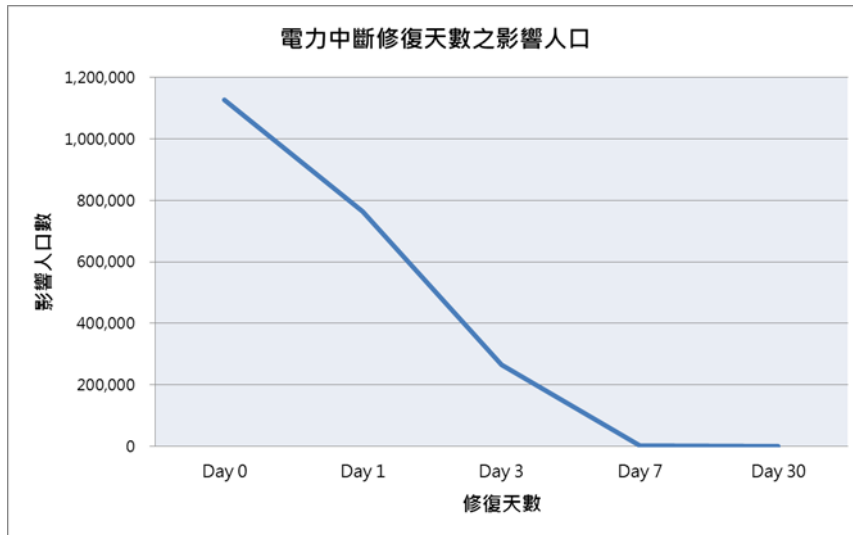


圖 3.9、北臺灣大規模地震電力中斷修復天數之影響人口趨勢

第四章 大臺北地區防救災系統震後能力評估

4.1 研究目的

本項工作主要目的為分析重要設施震後災害情境及建立分析步驟，以瞭解大規模重要設施在地震災害情境下，可能的營運狀況與失效情形，本年度執行成果如下列說明。

- 1、建立重要設施資料庫與圖層：彙整國內外地震相關資料及案例，完成重要設施分類，並依照分類的類別建置重要設施圖層，圖層資料包含點位、營運條件等屬性資料。
- 2、重要設施之災害查報應用：重要設施圖層套疊地震情境圖層或上述章節於地震情境下所產製之供水、供電及交通等設施外部衝擊結果，依據圖層可快速得知重要設施受地震或維生系統損傷衝擊的程度，於地震應變時作為篩選與查報之資料。
- 3、重要設施之衝擊評估：將上述章節於地震情境下所產製之供水、供電及交通等設施外部衝擊結果，結合設施內部之建物與設備等衝擊評估結果，分析評估重要設施之受災情境。

4.2 重要設施分類

4.2.1 文獻回顧

- 1、蒐整地震災害相關資料

蒐集地震災害相關資料包含國內外研究文獻、新聞報導(地震災例)，及包含財團法人國家地震研究中心勘災報告 6 篇、地震災害報告簡訊計 13 期，共 19 篇相關報導（彙整如表 4.1 所示）、東日本大震災災害調查相關資料、921 國家防災日設施安全資訊需求（見表 4.2 所示）、以及地震災害相關新聞資料，並藉由地震災例時序分析（見圖 4.1~圖 4.3），了解震災對重要設施造成的直接或間接損壞，並整理出震災下優先關注的設施查報參考項目（見表 4.3 所示）。

地震災例篩選條件為：

- (1) 受災的背景與大臺北地區同樣為都會區，係有一個（以上）之中心都市為核心，周邊存在著衛星市鎮，其社會及經濟活動合為一體之地區稱之都會區。
- (2) 地震強度大於芮氏規模 6 以上（強地震）或震度 6 (PGA>250gal)且為淺層地震(>70km)者。
- (3) 災害衝擊影響超過萬人、規模跨過兩個以上的行政地區、引發複合性災害或備受關注之案例。

4.2.2 重要設施分類

本研究參考 HAZUS(Schneider P. J.等, 2006；Hazardus® -MH MR5, 2010)、SYNER-G(SYNER-G, 2011)、日本內閣府地震對策計畫（日本

內閣府，2012) 以及我國關鍵基礎設施安全防護計畫 (行政院國家關鍵基礎設施安全防護專業服務委外研究案第三階段，2012) 震後損壞衝擊評估分析項目 (如表 4.4 所示)，進行重要設施歸納分類，目前重要設施分類依據，係採用行政院國土安全辦公室委託「行政院國家關鍵基礎設施防護計畫專業服務委外研究」所選定之八大類關鍵基礎設施，例如：能源、水資源、資通訊、交通、銀行與金融、緊急救援與醫院、中央政府、高科技園區等，並參考國家防災日地震災害管理需求及表 3 之設施查報項目，納入弱勢族群、人潮集中、高損失潛勢設施、高危險設施及其他等五項，合計共十三大類設施 (如圖 4.4 所示)，各分類大項所包含之細項設施，詳如表 4.5 所示。利用建立之重要設施資料庫與圖層，可做為掌握地震後首要關注與查報之對象。

4.2.3 建立重要設施資料庫與圖層

依據上述設施分類及本中心既有資料庫彙整，進行設施資料庫建置，其資料蒐整格式如表 4.6 所示，其中有關設施之營運條件，係設施持續營運的因素，此條件一般包含結構性要素 (建物、道路交通)、非結構性要素 (供水、供電、設備、通訊等) 以及功能性要素 (人力) 等。若災害衝擊任一營運條件，都可能導致不同程度的服務下降，進而影響設施整體服務能力。

截至 102 年 10 月，在建立重要設施資料庫與圖層方面，已完成

重要設施之基本圖層建置，包括緊急救援與醫院、中央政府、水資源、能源、交通、高科技園區、弱勢族群、人潮集中、高損失潛勢設施、高危險設施及其他等 11 類，除資通訊、銀行與金融等資料尚未建置外，相關設施資料清單與圖資，詳如表 4.7 與圖 4.5~圖 4.13 所示。

4.3 重要設施衝擊分析

重要設施衝擊評估方法建立目的，除可利用其評估結果來描述設施震後情境外，亦可藉由分析過程中，瞭解設施各營運條件失效衝擊程度，其所建立具備地理空間性的設施震後情境圖層，更可做為政府事先研擬設施防減災策略與應變計畫之參考依據。

4.3.1 重要設施評估分析流程

利用 4.2.3 節已建立之重要設施之基本圖層，配合各設施營運條件與損壞評估分析（請參考蘇昭郎等，2013），進一步分析重要設施之震後情境與服務能力評估，相關流程如圖 4.14 所示，藉由分析設施受災情境與風險，提出設施防護對應策略。

以下提出設施評估分析步驟：

1. 建立設施基本圖層：今年度建置情形如圖 4.5~圖 4.13 所示。
2. 基礎圖資匯入地震情境，產製設施震後查報圖層：將基礎圖資疊加地震參數。

3. 匯入地震情境下產製之供水、供電及交通等設施外部衝擊結果。
4. 設施營運因子分析：參考醫院作為關鍵設施之防護議題研究初探（李沁妍，2012）中已歸納，保持醫院持續營運的必要條件包含結構性要素(建物)、非結構性要素(醫療設備及水電等關鍵系統)以及功能性要素（人力、醫療資源等）。
5. 引入外部衝擊分析結果，建立設施失效衝擊機率彙整表，進行設施失效評估。
6. 產製設施之受災情境圖層與說明。

4.3.2 震後設施查報

今年度另外執行道路、供電系統及供水系統的震後損壞衝擊分析評估，詳細評估方法與計算流程參考前面章節內容，本研究將基本圖資與外部衝擊分析結果進行套疊，產製設施查報圖層，如圖 4.20~圖 4.28。提供主管機關或應變人員，迅速判斷可能受到重大衝擊的設施所在位置。

4.3.3 醫院設施衝擊分析

本節將以醫療系統為例，進行大臺北地區醫院衝擊評估分析，相關步驟將參考 4.3.1 節所建立之流程，分別說明如下：

1. 建立設施基本圖層

大臺北地區北北基桃各縣市約有 159 所醫院，相關圖資如圖 4.29 所示。

2. 匯入地震情境，產製設施震後查報圖層（圖 4.30）
3. 匯入地震情境下所產製之供水、供電及交通等設施外部衝擊結果（圖 4.31）
4. 設施營運因子分析

以醫療體系為例，依據國內外地震災例，包含 921 大地震、東日本大震災、阪神大地震等衝擊醫院的情形，分析醫院主要營運條件。若災害衝擊任一營運條件，都可能導致不同程度的醫療困難以及服務中斷。

其他如醫療人力亦與道路交通具有關連性，另外如通訊與電力則與建物狀況相關，地震災害與醫療系統之關連性分析圖如圖 4.32 所示。

5. 進行醫院設施內部之建物與設備等營運條件之衝擊評估，並建立設施失效衝擊機率彙整表（圖 4.33）

其中醫療儀器設備及建築物內損壞（以醫院天花板與隔間磚牆依權重推估），係參考醫院建築中非結構物之易損性曲線研究之參數（姚昭智等，2008）。

6. 進行設施失效評估

依據地震衝擊設施之實際地震狀況情境，估算醫院營運條件損壞程度，醫院各營運條件依失效影響給予不同權重（如建築物權重為 1，供電為 1.2，供水為 1.2，道路交通為 0.8，醫療儀器設備為 1.5）等，假設原有服務能力為 100%，減去設施的各項營運條件受地震衝擊造成損失，即可得到醫院單一點位之失效機率，配合營運條件的重要程度計算，亦可求算出簡易計算震後剩餘服務能力%，醫院設施的震後失效與剩餘服務能力，相關計算公式如圖 4.34 所示。

7. 產製設施之受災情境圖層與說明

經由上述計算，醫院震後的失效機率評估結果如圖 4.35 所示，其中失效機率大於 50% 之醫院，約有 64 家，其分佈結果顯示，設施衝擊並非僅由外部營運因子衝擊控制，設施內部衝擊結果亦需加入整體評估。

表4.1、地震災例篩選彙整表

地震名稱	時間	地點	芮氏規模	地震深度(公里)	人命損失	其他說明
東日本大震災	20110311	日本福島	9.0	24.4	死亡、失蹤超過 2 萬 3 千人	直接衝擊三個縣、非都會區
基督城地震	20110222	紐西蘭	6.3	5	140 死、數百人傷	都會區
基督城地震	20100904	紐西蘭	7.1	33	2 人受傷	都會區
甲仙地震	20100304	高雄桃源鄉	6.4	5	96 人受傷	非都會區
智利大地震	20100227	馬烏萊大區	8.8	35	1279 死、200 萬人無家可歸	引發海嘯、非都會區
汶川大地震	20080512	中國四川	8.0	16	69227 死、374643 傷	直接衝擊三個省、非都會區
印度洋大地震 (南亞海嘯)	20041226	蘇門答臘以 北之海底	9.1	30	>29 萬人	直接衝擊東南亞、南亞、東非等地的複合性災害
新潟中越地震	20041023	日本新潟縣	6.8	13	68 死 4805 傷	都會區
921 集集大地震	19990921	臺灣南投	7.3	8	29 死 11305 傷	衝擊 6 個縣市、都會區
神戶大地震 (阪神大地震)	19950117	日本	7.3	14	50215 死 43782 傷	直下型地震、都會區
北嶺地震	19940117	美國洛杉磯	6.8	17.7	72 死 11846 傷	長期受到關注
墨西哥大地震	19850919	Michoacán	8.1			衝擊 350Km 外的首都墨西哥城
關東大地震	19230901	日本	7.9		142800 死 103733 傷	影響東京、神奈川、靜岡及千葉
舊金山大地震	19060418	美國	7.8		約 3000 死 22 萬人無家可歸	長期受到關注

表4.2、地震災害管理需求之重要設施一覽表_以921國家防災日演練為例

年份	學校	機場	交通設施						維生設施						醫院	工業園區	科學園區	石化工廠	收容避難場所	行政機關	特殊空間	大量人潮集中空間
			軌道 (臺鐵、捷運)	高速鐵路	道路 (國道、省道、縣道)	救災支援道路	橋梁 (含外跨河橋)	港口	核電廠、發電廠	水庫	瓦斯	供水	供油	電信、通訊								
95	√	√			√		√	√	√		√		√				√					
96	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√				√		√		√				
97	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√								
99	√		√	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
100	√	√	√	√	√		√			√	√	√	√		√	√		√	√			
101	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√

表 4.3、優先關注的設施查報參考項目

類別	優先項目	說明
救援服務	民眾服務：中央政府機關。 緊急服務：消防局、緊急醫療系統、中央及縣市緊急應變中心、警察局、收容/避難處所。	消防及醫療設備替代性較低，其他項目只要具備人力、臨時場所及簡易設備，即可立即開設。
維生功能	維生系統：供水、供電、供油、供氣、污水、電信/通訊系統。 交通運輸系統：高速公路、高速鐵路、鐵路、捷運、道路、橋梁、港口、渡輪、機場。	交通與救援服務、物資、人力等支援有著極大的關聯性，災害中至少應保持最低的運作，若受災導致支援及傷者無法出入，將造成極大的傷亡。
高損失潛勢設施	水庫、核電廠、軍事設施、危害物質場所。	此類設施一旦致災，將對經濟或環境帶來巨大的間接傷害，東日本大震災因核電廠受損引發輻射災害就是最好的例子。
弱勢族群	社會福利機構：老人福利機構(老人之家、老人養護中心、教養院)、兒童少年之家、身心障礙福利服務機構。 護理機構：護理之家、居家護理所。	弱勢群族遇災需他人協助以順利避災，疏散後亦需要特別安置照顧，此類民眾容易因災害衝擊枉送生命，應給予特別關注。
其他	特殊空間：共構空間、長隧道等。 大量人潮集中空間：夜市、娛樂/休閒場所、展覽館等。 金融財政機構：中央銀行與交易中心,各金融機構總行。 資料儲存中心、物資存放中心等。	特殊空間及大量人潮集中空間，逃生不易且易造成大量傷亡，故需特別關注。

表 4.4、都會區震後損壞衝擊評估分析項目

評估類別	評估項目		評估內容
直接實體損壞	建物設施	一般建物類	住家、商業、工業、農業
		重要設施	政府、醫院、警察、消防隊、避難場所、學校、知名設施
		高損設施	核電廠、水庫、軍事設施
	運輸系統		高速公路、鐵路、捷運、公車系統、港口、船運、機場、橋梁、緊急救援道路
	維生設施		自來水系統、污水系統、燃料油、天然瓦斯、電力系統、通訊系統
引發性災害	水壩損壞、堤防損壞、海嘯、震後火災、油槽爆炸、有毒物質擴散...		

表 4.5、重要設施分類與細項設施

類別	項目
緊急救援與醫院	醫療照護及醫院、緊急應變體系
中央政府	國會、政府、司法、行政、國安及國防、國家資產
水資源	水源、水庫、淨水系統、供水線路
能源	電力、石油、天然氣、化學與核能材料
資通訊	資訊系統、通訊系統
交通	陸運、航運、海運、郵政及物流
銀行與金融	銀行、證券與保險投資、金融市場與外匯
高科技園區	內湖園區、龍潭園區、宜蘭園區、新竹園區、新竹生物醫學園區、臺中園區、銅鑼園區、后里園區/后里七星園區、虎尾園區、二林園區、臺南園區、高雄園區
弱勢族群	社會福利機構、身心障礙福利服務機構、老人安養院、護理之家、老人福利機構(老人之家、教養院)、兒童少年之家、居家護理所
人潮集中	夜市、地下街商場、百貨公司、風景區、知名設施、娛樂/休閒場所、體育館、大型展覽館
高損失設施	工業區、軍事設施、大型石化廠
高危險設施	管制量 30 倍以上危險物品場所、爆竹煙火儲存場所、毒化物運作場所
其他	資源儲放中心(醫療、物資)、學校、特殊空間(共構空間、長隧道)

表 4.6、設施資料庫蒐整格式範例

主部門 (Sector) 設施分 類	次部門次 系統	重要元件(Critical elements)設施 項目	服務能力(Service Capacity)	資料收集(截至 102.8.29)	營運條件						資料 取得 年月	
					建 物	道 路 交 通	供 水	電 力	設 備	通 訊		人 力
緊急救 援與醫 院	醫療照護 及醫院	衛生福利部(含食品藥物管理 署、疾病管制署)、醫學中心、區 域醫院、重要軍事醫院	醫師人數、醫療 人力、總病床數	醫院點位(159)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	2012. 07
	緊急應變 體系	中央災害應變中心、內政部消防 署、空中勤務總隊(含重要機隊駐 地與設備)、行政院海岸巡防署 (含重要設施與救護設備)、各縣 市政府消防局及應變中心及警 察局、主要抽水站、相關重要消 防與救護設備、收容/避難場所	人力、設備	中央及縣市緊急 應變中心與機關 點位(86)、消防機 關點位(46)、警察 機關點位(380) 收容/避難場所 (940)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	2012. 07

表 4.7、重要設施圖資蒐整情形

類別	已建置圖層項目(資料筆數)
緊急救援與醫院	中央及縣市緊急應變中心(15)、消防機關(168)、警察機關(380)、收容/避難場所(940)、醫院(159)
中央政府	國會、政府、行政
水資源	水庫(7)
能源	供油中心(5)、液化石油氣分裝廠(35)、核電廠
資通訊	未建置
交通	鐵路車站(41)、捷運車站(101)、港口(35)、機場(2)
銀行與金融	未建置
高科技園區	科學工業園區(1)
弱勢族群	社會福利機構(112)、身心障礙福利服務機構(108)、老人安養院(398)、護理之家(137)
人潮集中	夜市
高損失設備	工業區(21)
高危險設施	管制量 30 倍以上危險品場所(35)、爆竹煙火儲存場所(2)
其他	學校

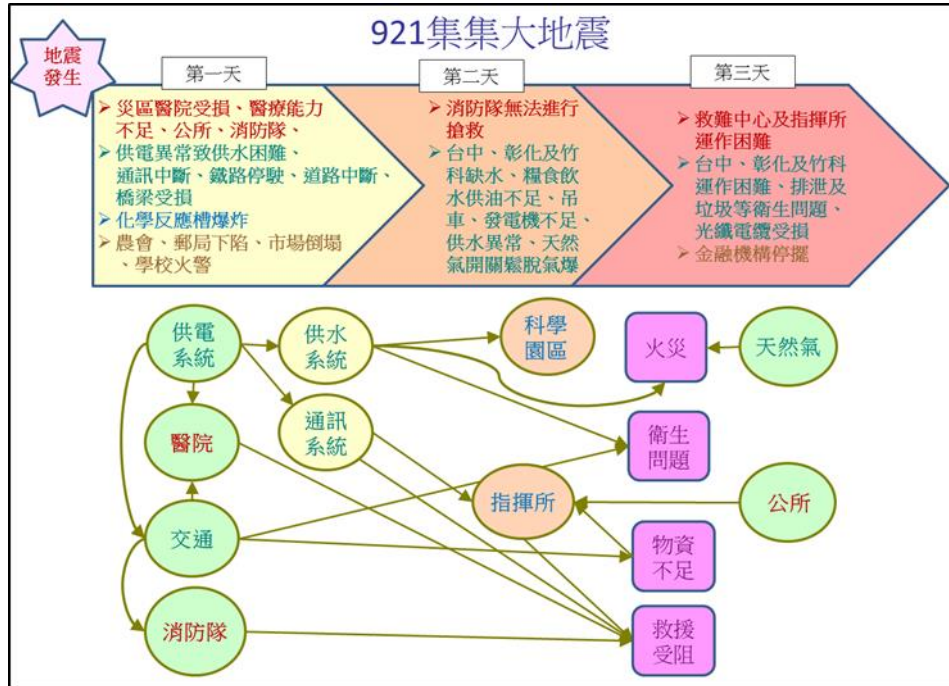


圖 4.1、921 集集大地震災序分析

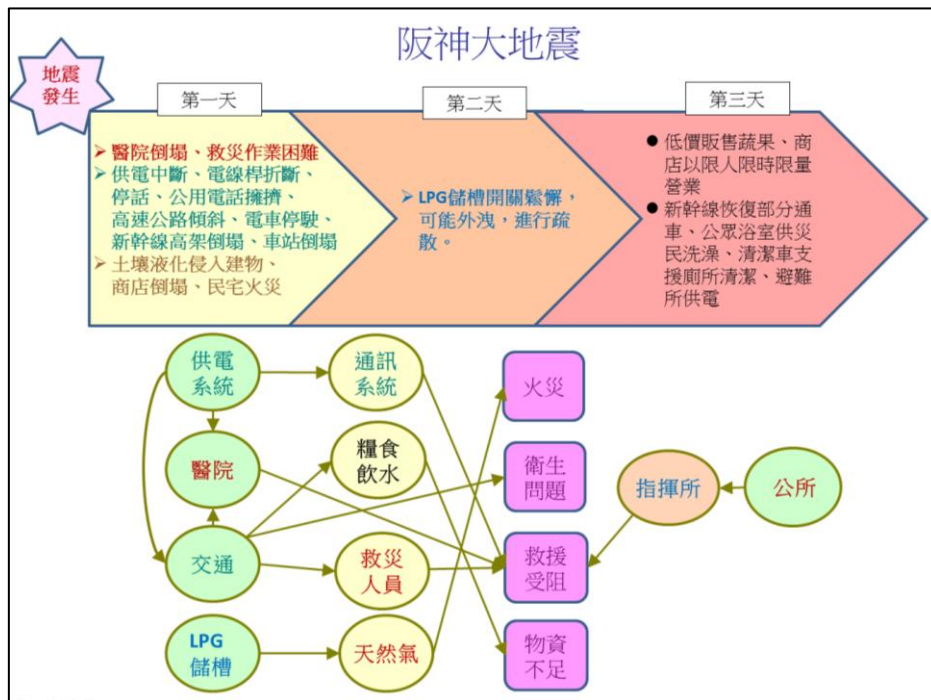


圖 4.2、日本阪神大地震災序分析

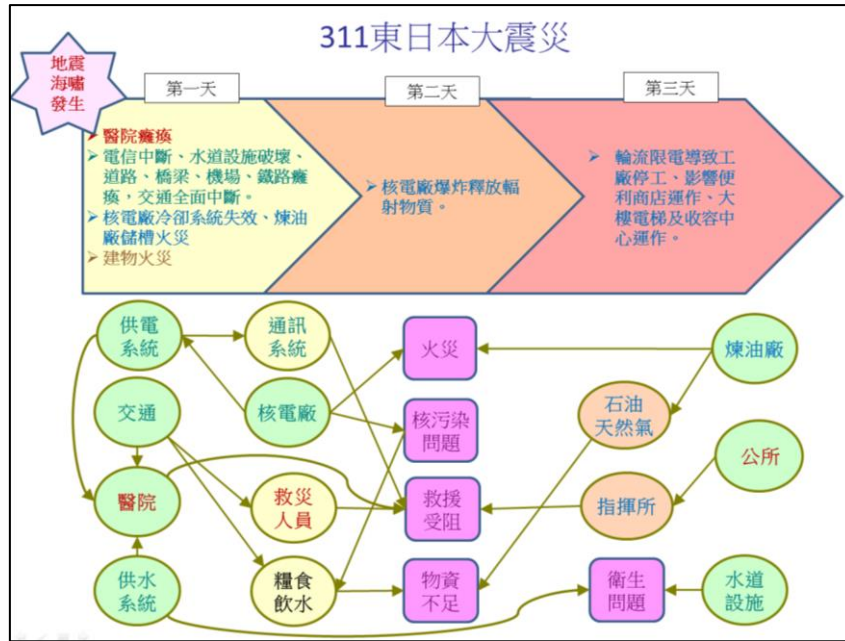


圖 4.3、311 東日本大震災災序分析

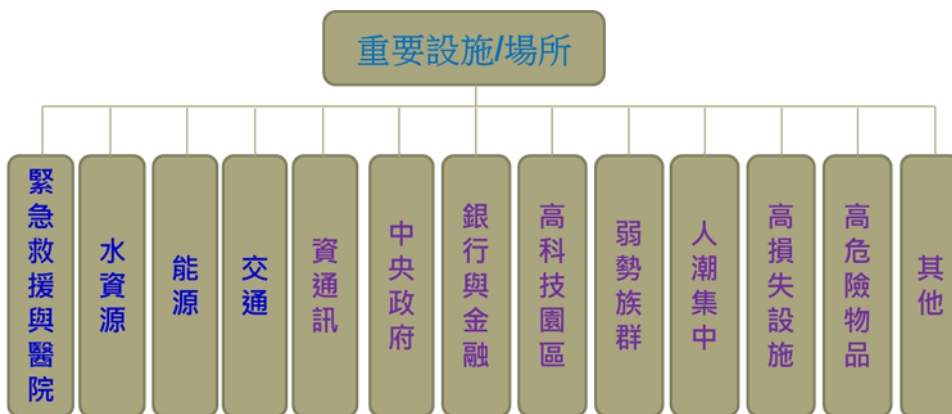


圖 4.4、重要設施分類細目

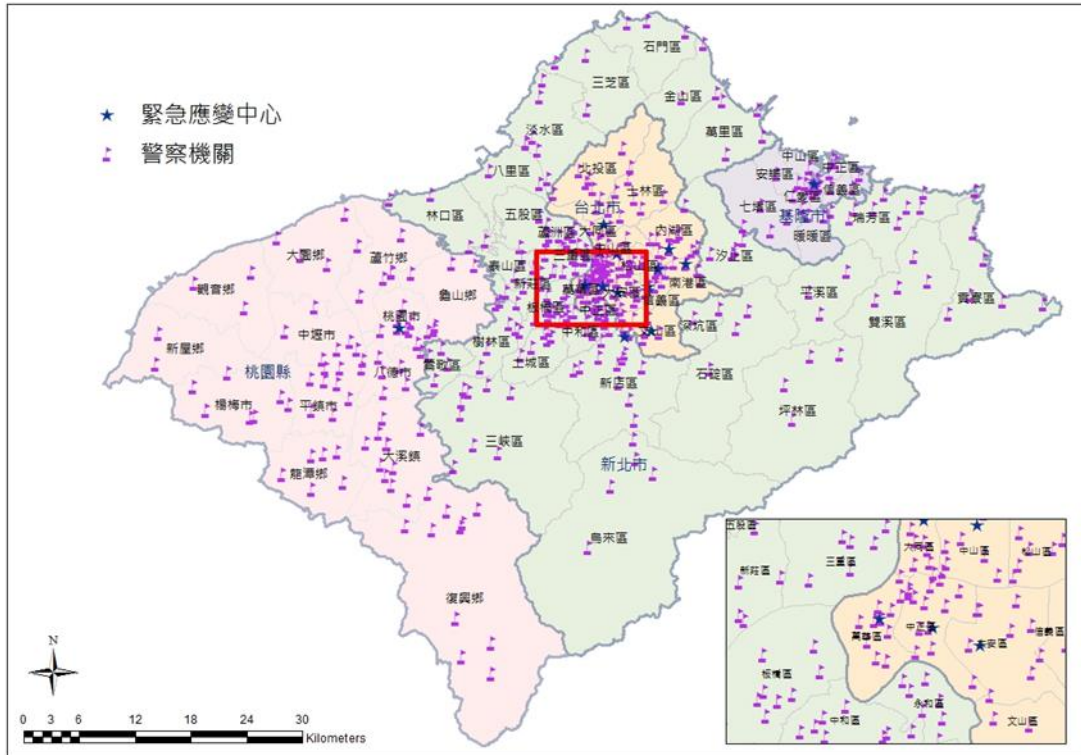


圖 4.5、緊急救援與醫院基本圖資（緊急應變中心及警察機關）

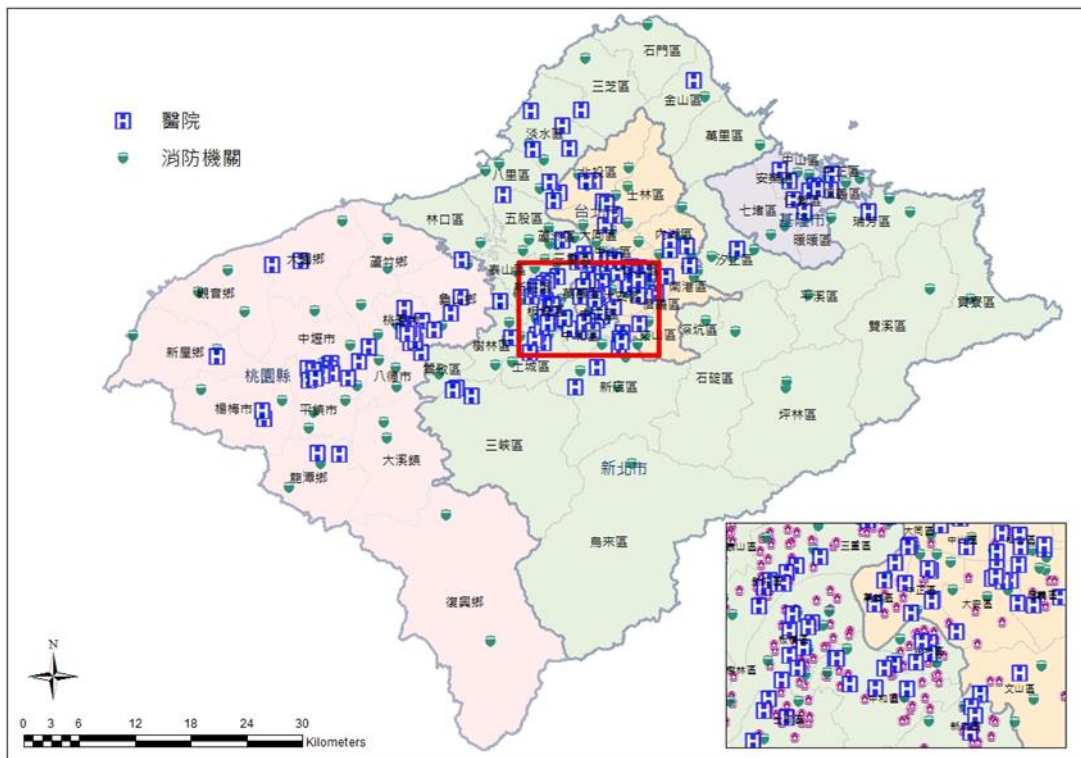


圖 4.6、緊急救援與醫院基本圖資（醫院及消防機關）

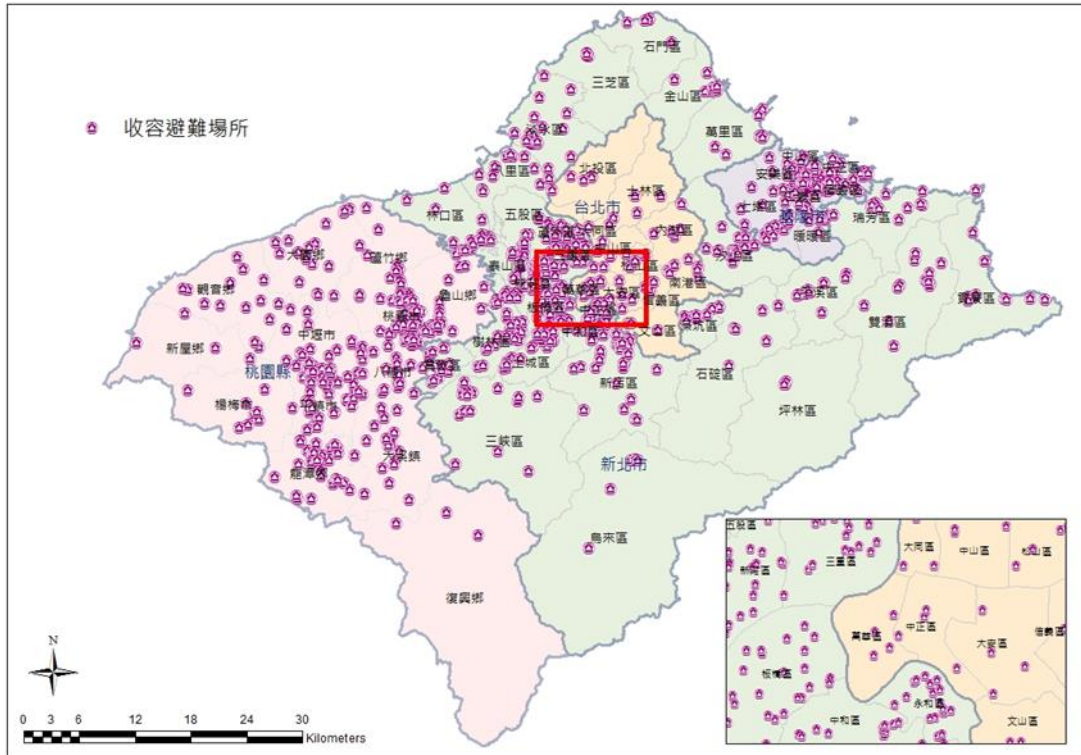


圖 4.7、醫院及消防機關基本圖資（收容/避難場所）

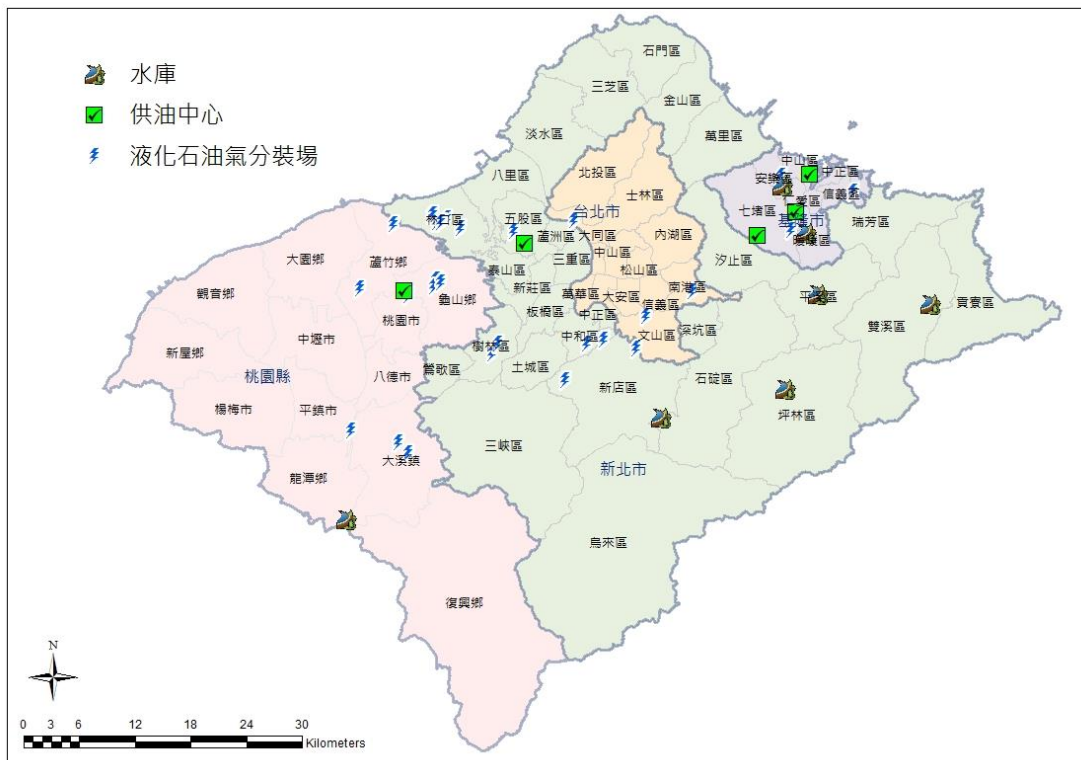


圖 4.8、水資源及能源基本圖資

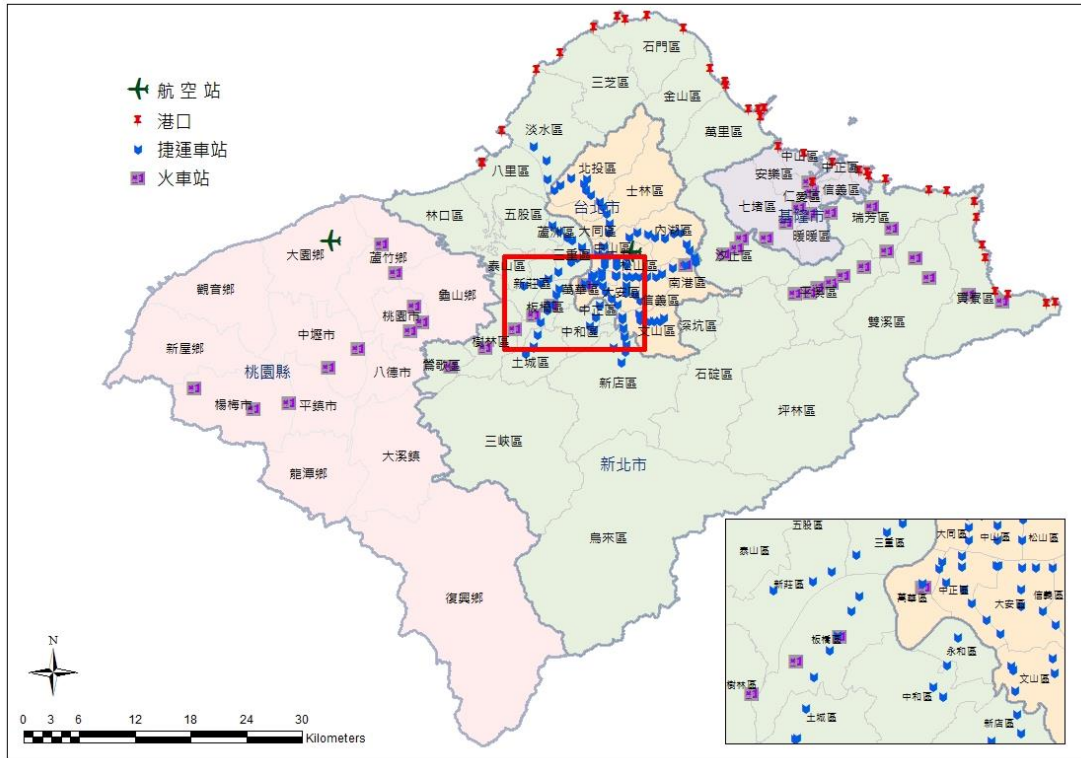


圖 4.9、交通基本圖資



圖 4.10、高科技園區及高損失設備基礎圖資

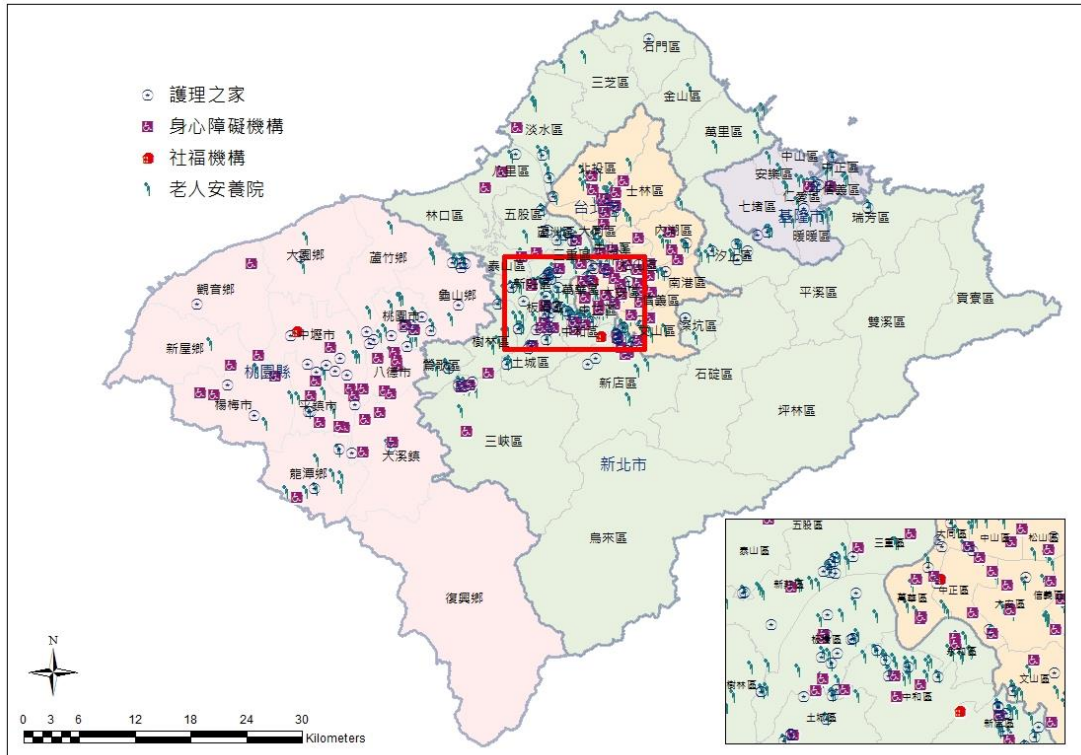


圖 4.11、弱勢族群基本圖資



圖 4.12、高危險設施基本圖資

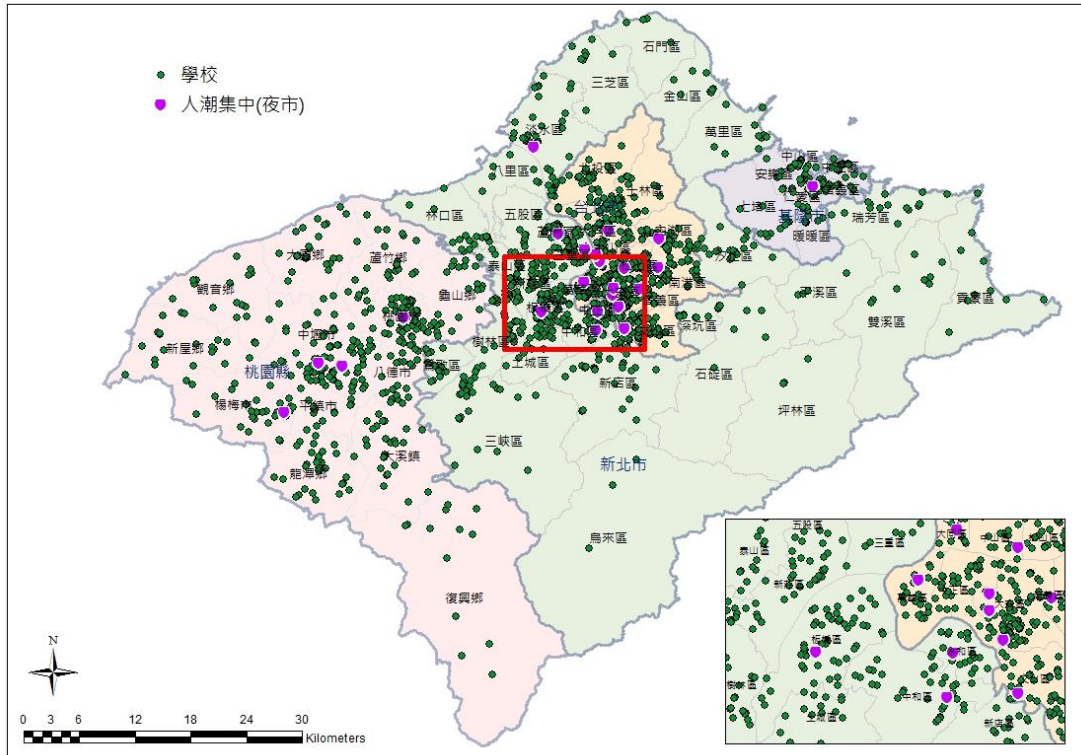


圖 4.13、人潮集中及學校基本圖資

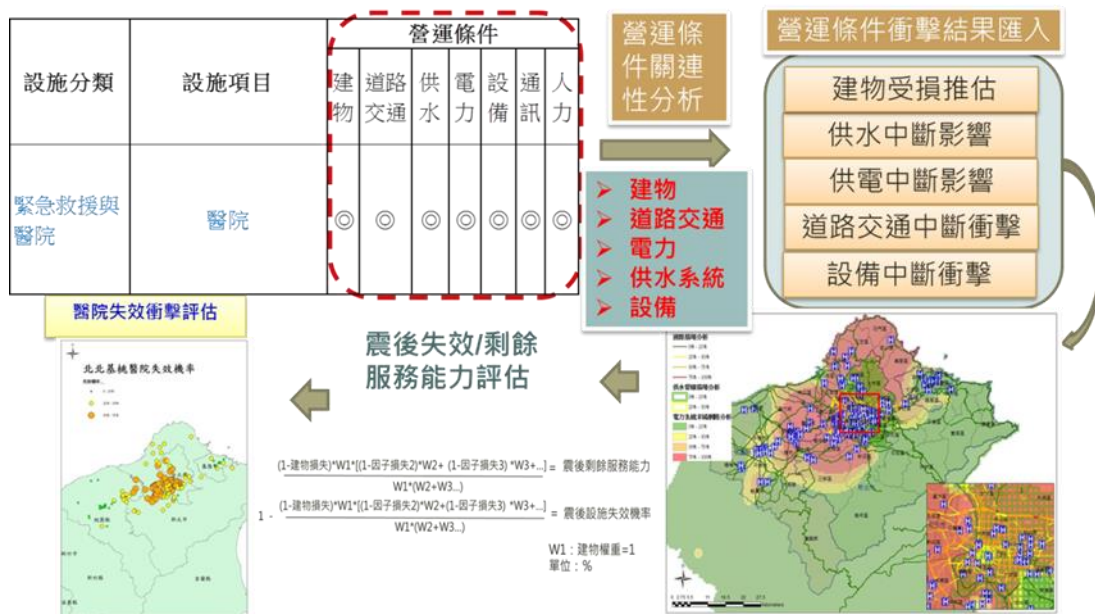


圖 4.14、重要設施震後失效服務能力評估流程

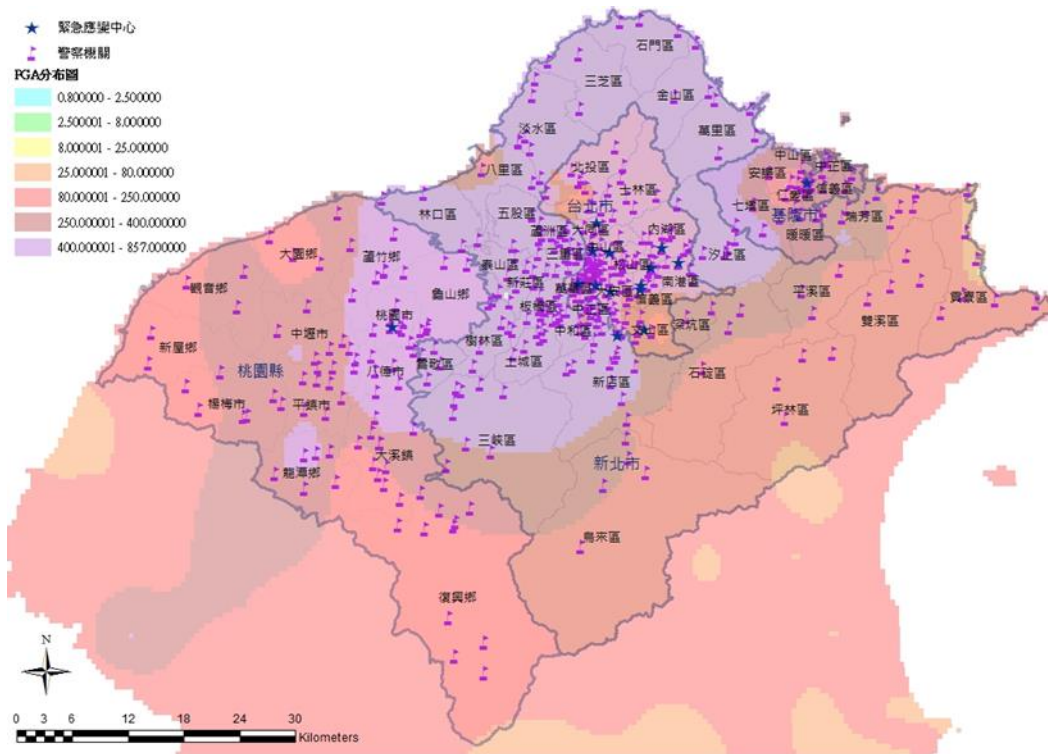


圖 4.15、基礎圖資套疊地震參數

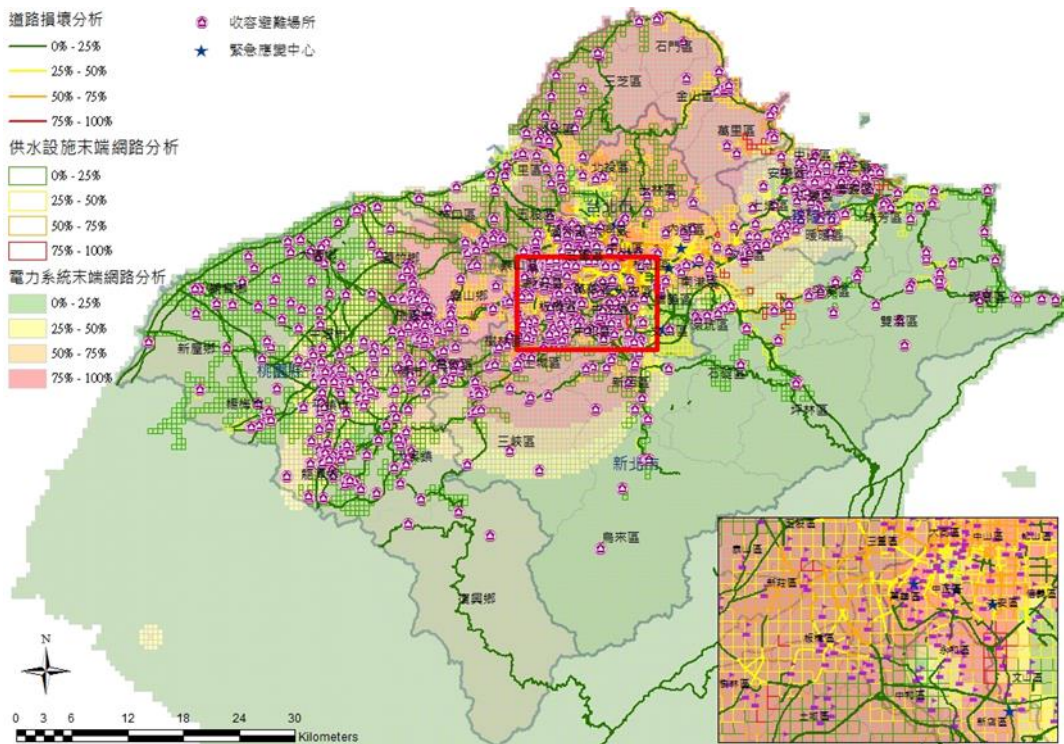


圖 4.16、基本圖資套疊外部衝擊分析結果

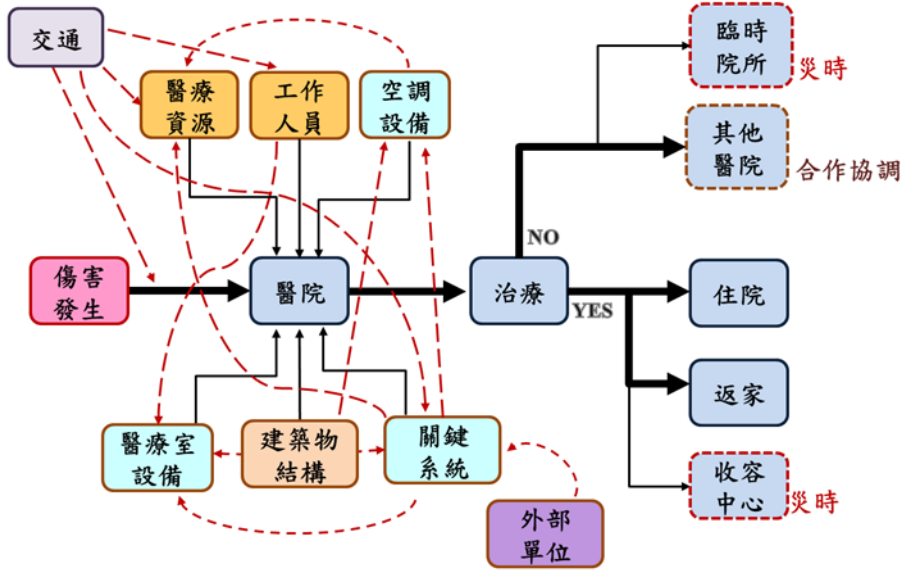


圖 4.17、醫院之關連性分析 (李沁妍等, 2012)

醫院名稱	所在縣市	行政區	PGA_gal	供水 Loss_all_P	供電(嚴重)	道路交通(中停)	醫療儀器設備(嚴重)	建築物內損壞	剩餘能力	失效機率(%)	剩餘服務能
1 廣川醫院	新北市	士城區	703.60	18.192778	43.899932	0.000000	31.79611676	44.52456161	0.410517594	58.94829461	0.410517
2 財團法人天主教耕莘醫院	永和市	永和區	534.81	58.436605	2.372482	23.401299	21.13148594	32.09908522	0.500748771	49.02512286	0.500748
3 板橋祥德產科醫院	新北市	永和區	485.22	47.092264	0.425680	0.000000	17.83949474	27.22709500	0.593897561	40.61024391	0.593897
4 瑞芳瑞生醫院	新北市	瑞芳區	303.71	60.761546	0.000000	0.017677	6.51738792	10.20500513	0.739941176	26.00582338	0.739941
5 名譽護理醫院	新北市	鶯歌區	495.97	10.351358	0.647930	0.000000	18.55430623	28.70157531	0.650741321	34.92596786	0.650741
6 新北市立聯合醫院	新北市	三重區	622.17	26.886128	16.513111	58.886548	26.79962322	38.99776959	0.429108171	57.0891829	0.429108
7 臺北市立聯合醫院中興院區	臺北市	大同區	531.09	45.248730	2.123945	61.423514	20.88546455	31.78231189	0.482873509	51.71264912	0.482873
8 行政院衛生署臺北醫院城區	臺北市	中正區	531.09	45.248730	2.123945	61.423514	20.88546455	31.78231189	0.482873509	51.71264912	0.482873
9 國立台灣大學醫學院附設醫院	臺北市	中正區	287.65	54.465022	0.000000	44.972798	5.676713833	8.75785227	0.699164631	30.08336962	0.699164
10 國立台灣大學醫學院附設醫院	臺北市	中正區	287.65	54.465022	0.000000	44.972798	5.676713833	8.75785227	0.699164631	30.08336962	0.699164
11 三軍總醫院丁林院區	臺北市	中正區	564.51	70.700350	5.240660	5.753739	23.08505811	34.56088191	0.472888421	52.7111579	0.472888
12 三軍總醫院丁林院區	臺北市	中正區	564.51	70.700350	5.240660	5.753739	23.08505811	34.56088191	0.472888421	52.7111579	0.472888
13 臺北市立聯合醫院博愛院區	臺北市	中正區	545.09	47.782306	3.177420	42.676652	21.80997789	32.96475451	0.487777029	51.22229706	0.487777
14 新莊同德醫院	臺北市	中正區	242.26	51.099596	0.000000	0.017677	3.559537457	5.09762793	0.814397713	18.5602865	0.814397
15 郵政總局郵政醫院	臺北市	中正區	545.09	47.782306	3.177420	42.676652	21.80997789	32.96475451	0.487777029	51.22229706	0.487777
16 三軍總醫院附設基隆民眾診	基隆市	中正區	338.75	19.858013	0.000025	0.017677	8.485398293	13.53263668	0.797391198	20.26088016	0.797391
17 三軍總醫院附設基隆民眾診	基隆市	中正區	338.75	19.858013	0.000025	0.017677	8.485398293	13.53263668	0.797391198	20.26088016	0.797391
18 新國民醫院	桃園縣	中壢市	383.57	2.258864	0.001345	0.017677	11.20929035	17.95304139	0.786338427	21.3641573	0.786338
19 裕民醫院	桃園縣	中壢市	396.47	5.020473	0.003480	0.000000	12.02493688	19.23057503	0.766336611	23.36633888	0.766336
20 永安醫院	桃園縣	中壢市	383.57	2.258864	0.001345	0.017677	11.20929035	17.95304139	0.786338427	21.3641573	0.786338
21 中環敬盛醫院	桃園縣	中壢市	395.88	1.374762	0.003337	0.000000	11.98738571	19.17223367	0.774510923	22.54890775	0.774510
22 安其醫療社團法人宏其婦幼	桃園縣	中壢市	372.90	0.706483	0.000577	0.017677	10.54401481	16.89506914	0.801558311	19.84416887	0.801558
23 天祝醫療社團法人天惠醫院	桃園縣	中壢市	372.90	0.706483	0.000577	0.017677	10.54401481	16.89506914	0.801558311	19.84416887	0.801558
24 仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.000847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36032277	0.796396
25 仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.000847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36032277	0.796396
26 仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.000847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36032277	0.796396
27 仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.000847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36032277	0.796396
28 華興醫院	桃園縣	中壢市	381.78	0.944421	0.001172	0.017677	11.09705693	17.77556241	0.79113478	20.8862201	0.791138
29 中環長庚醫院	桃園縣	中壢市	405.26	1.857230	0.006369	0.000000	12.58693219	20.09825325	0.763118264	23.68817364	0.763118
30 三軍總醫院附設民眾診	臺北市	內湖區	440.05	30.303445	0.051460	0.000000	14.84928671	23.48857613	0.669556653	33.04434666	0.669556
31 三軍總醫院附設民眾診	臺北市	內湖區	440.05	30.303445	0.051460	0.000000	14.84928671	23.48857613	0.669556653	33.04434666	0.669556
32 財團法人康寧醫院	臺北市	內湖區	464.10	38.063556	0.170754	52.253471	16.43715707	25.77260273	0.564855199	43.51448015	0.564855
33 中國醫藥大學附設醫院	臺北市	內湖區	453.61	40.418340	0.103469	0.000000	15.74293533	24.78347522	0.636550491	36.3450694	0.636550

圖 4.18、失效衝擊機率彙整表

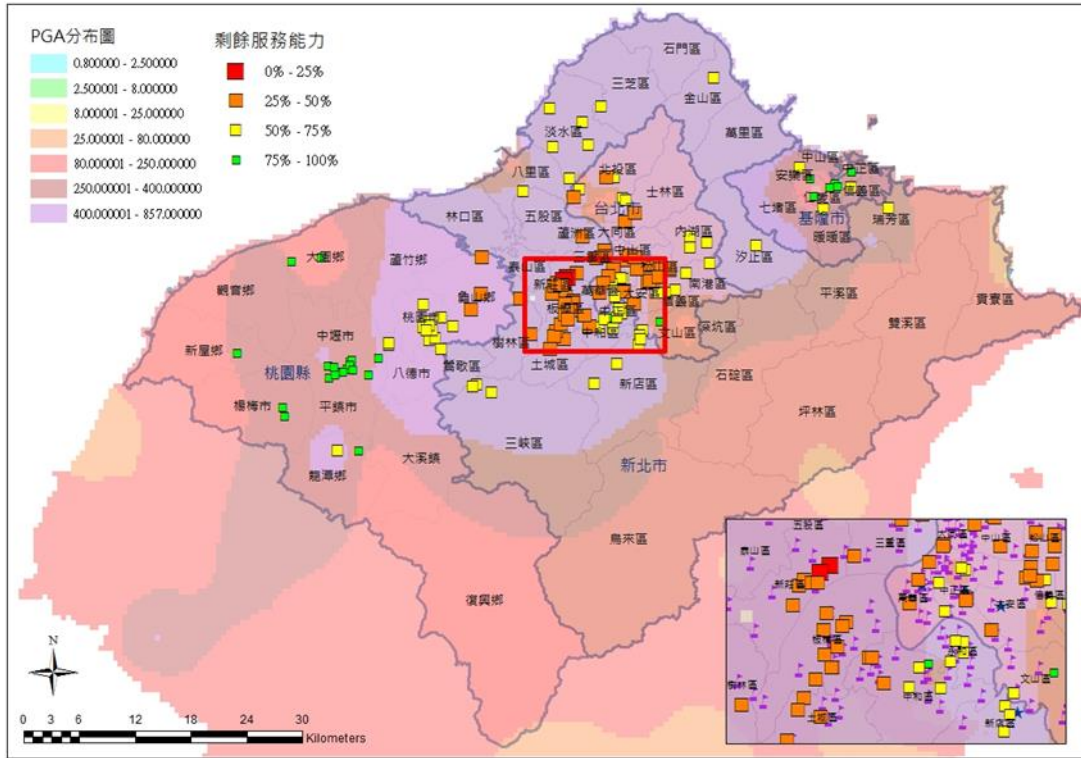


圖 4.19、重要設施剩餘服務能力評估圖

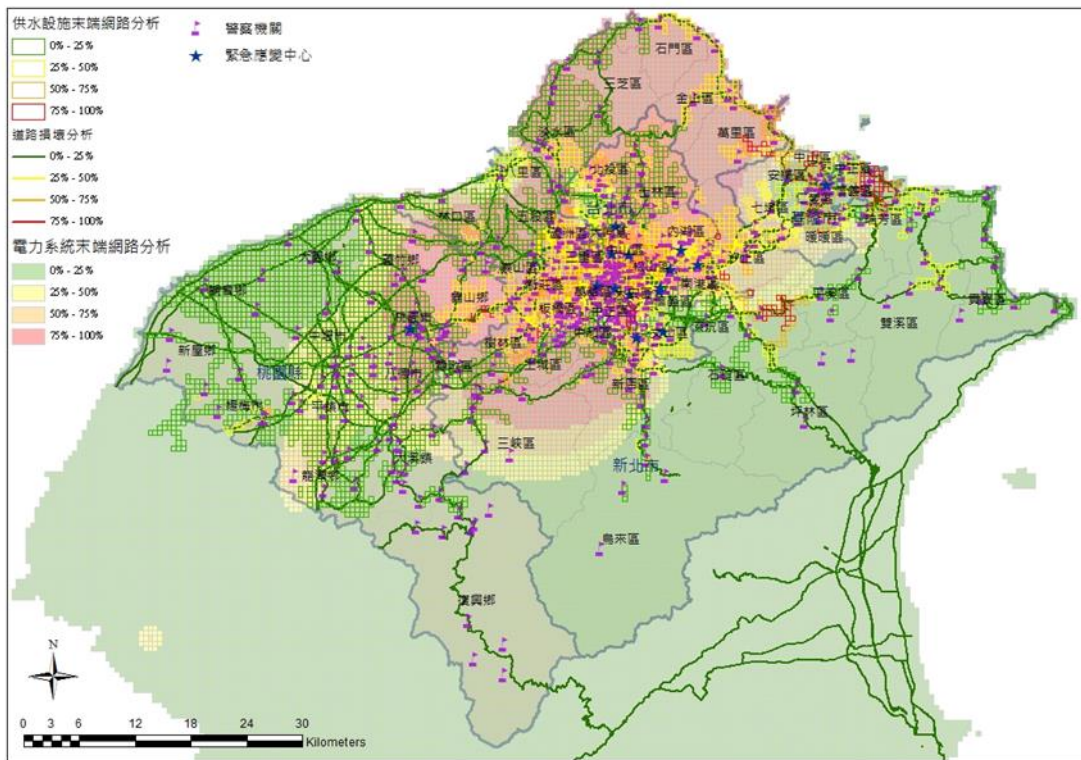


圖 4.20、震後緊急救援與醫院設施查報圖(緊急應變中心及警察機關)

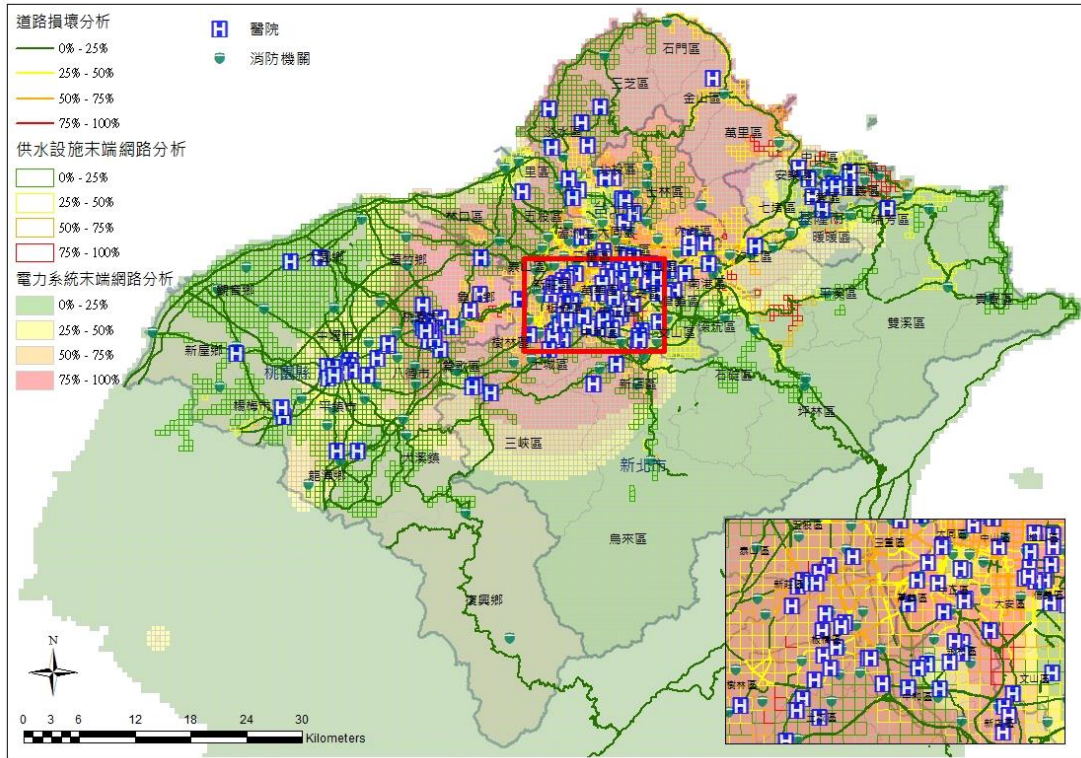


圖 4.21、震後緊急救援與醫院設施查報圖 (醫院及消防機關)

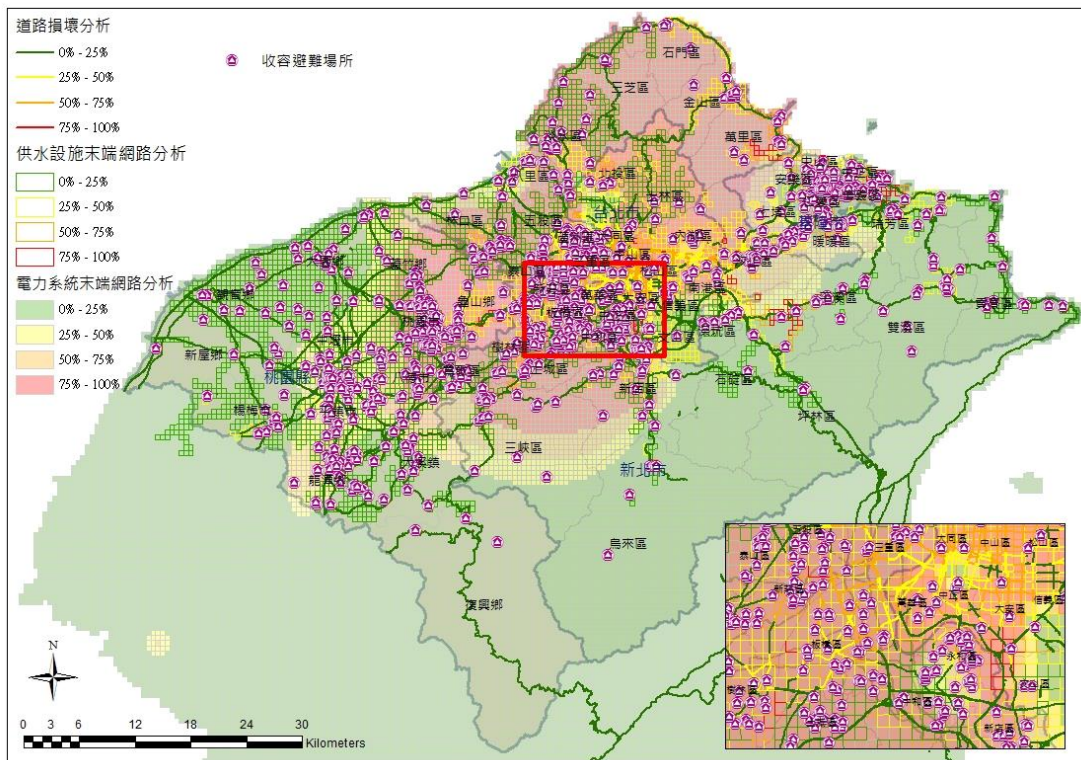


圖 4.22、震後緊急救援與醫院設施查報圖(收容/避難場所)

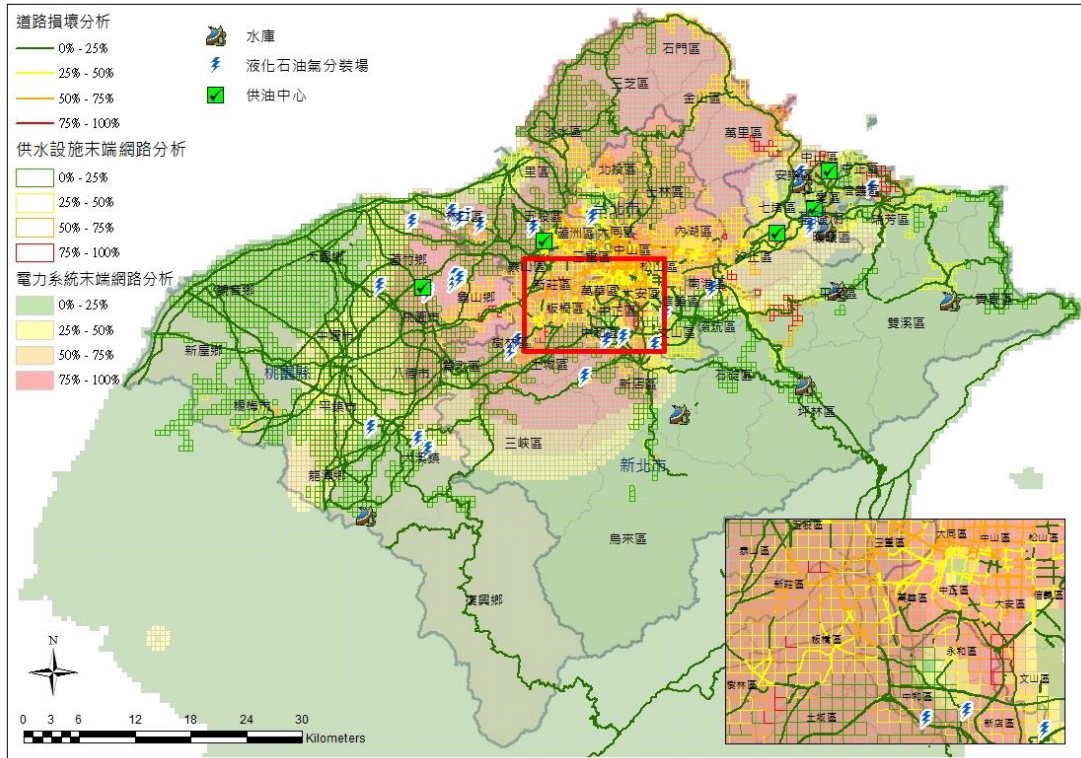


圖 4.23、震後水資源及能源設施查報圖

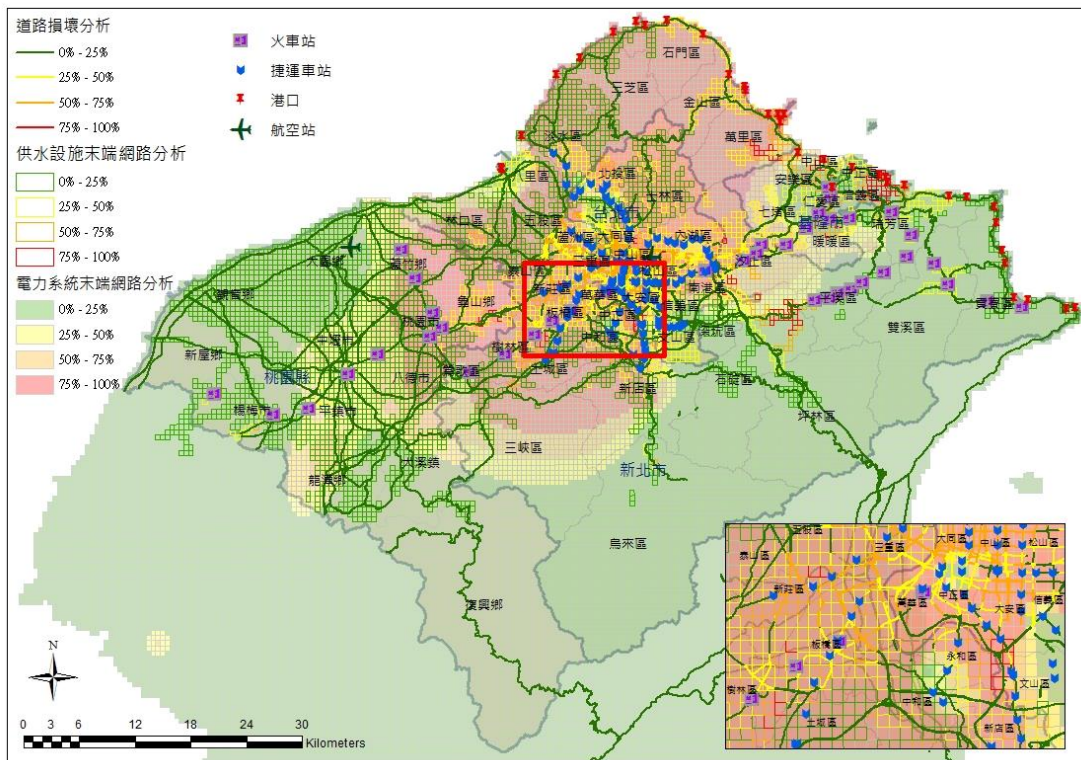


圖 4.24、震後交通設施查報圖

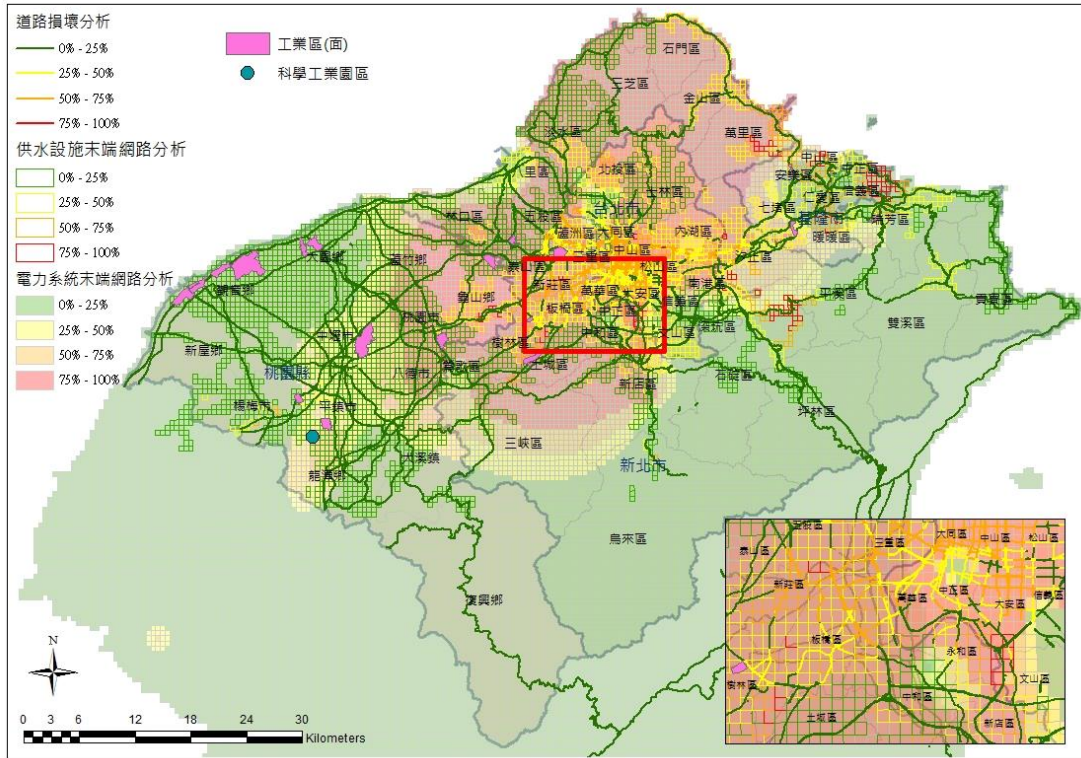


圖 4.25、震後高科技園區及高損失設備查報圖

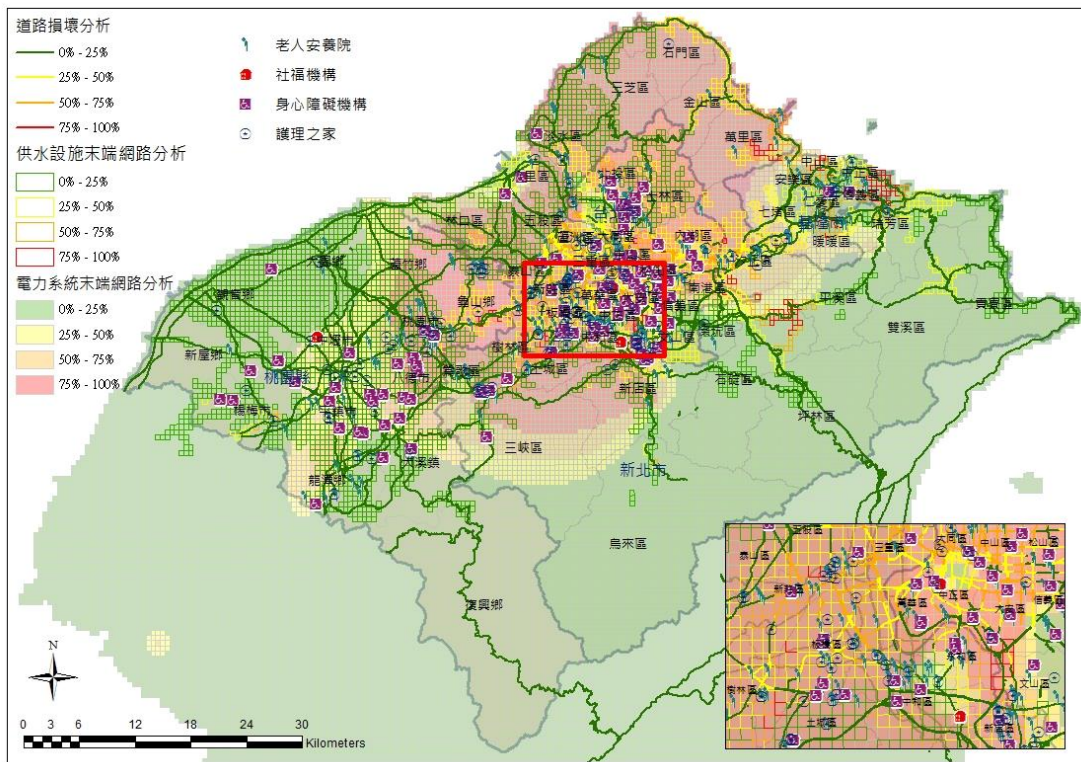


圖 4.26、震後弱勢族群查報圖

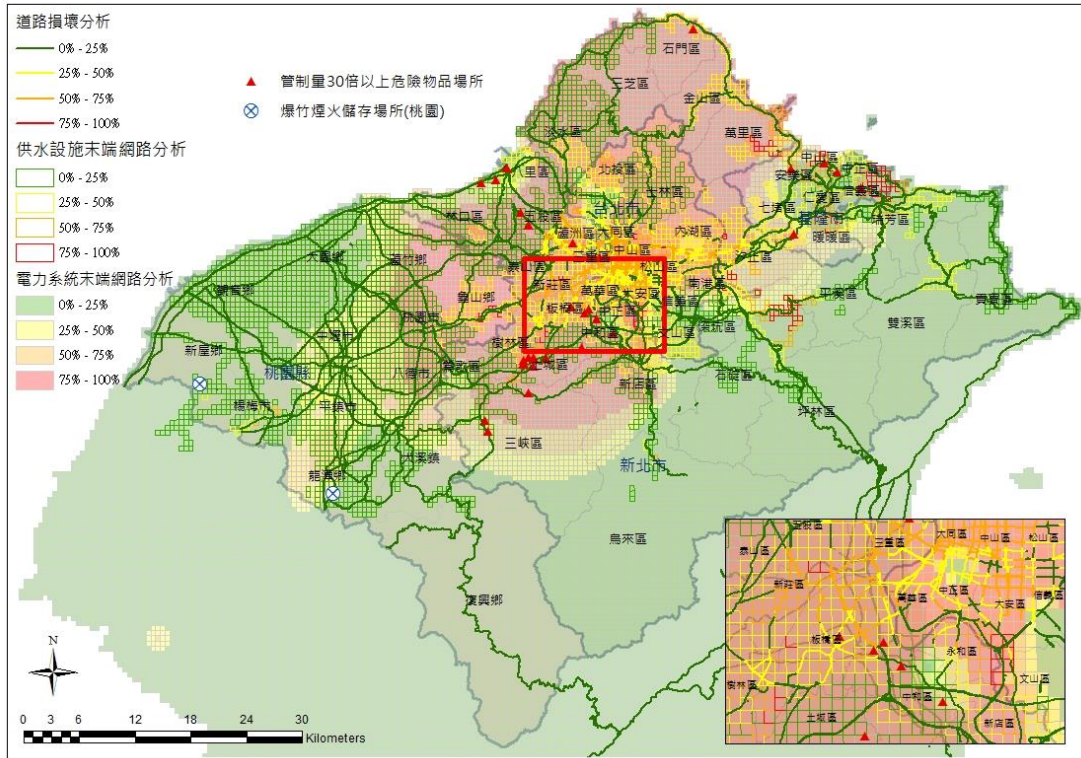


圖 4.27、震後高危險設施查報圖

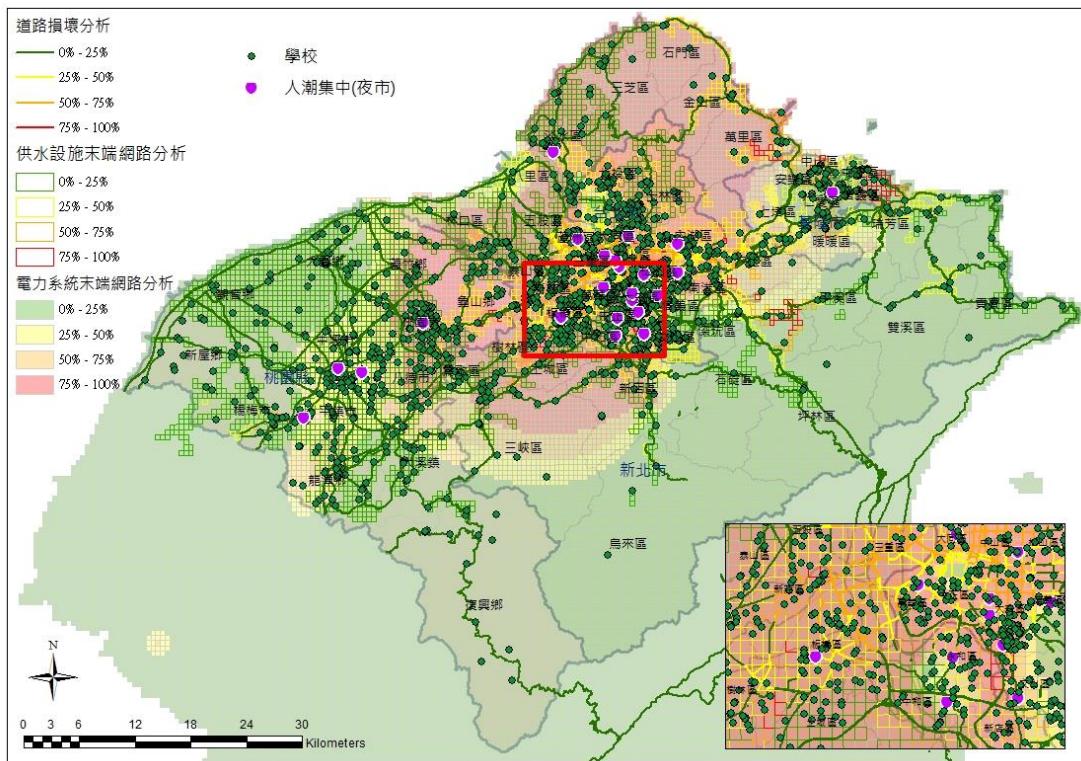


圖 4.28、震後人潮集中及學校查報圖

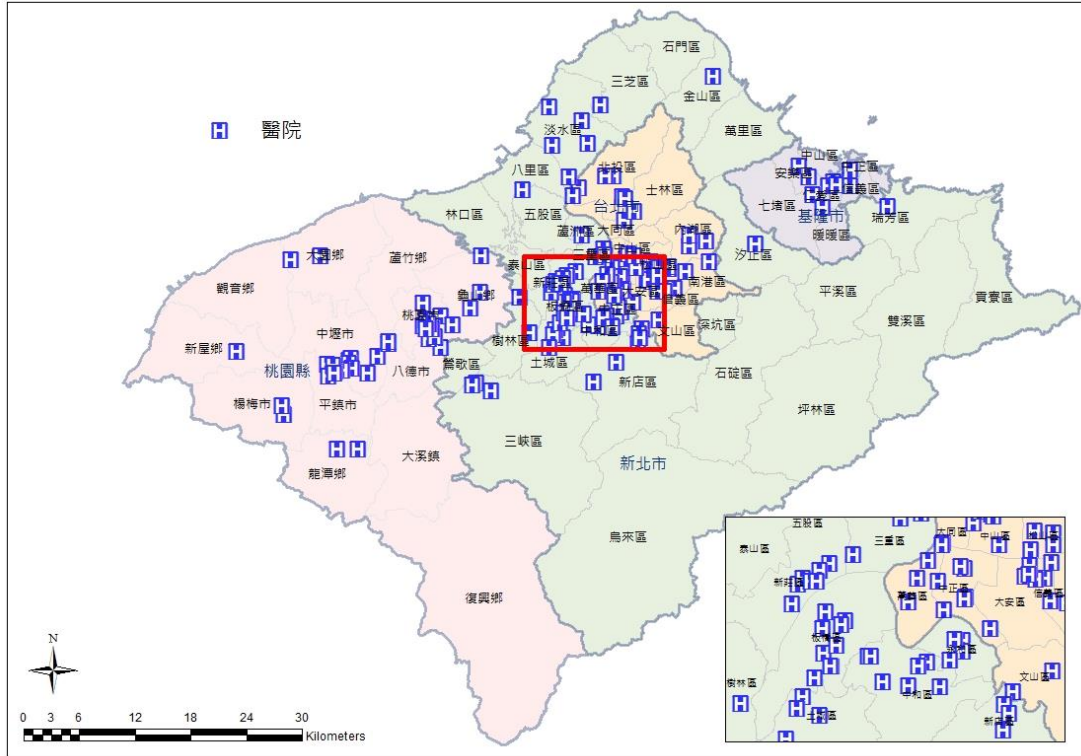


圖 4.29、醫院基礎圖資

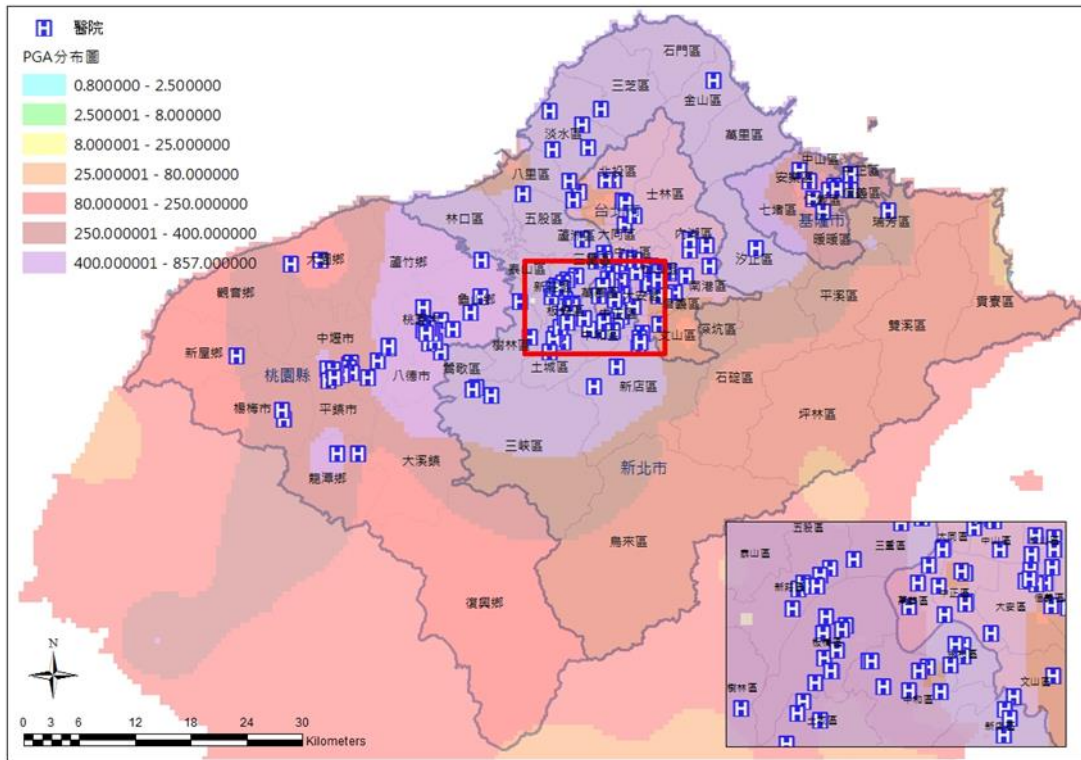


圖 4.30、醫院基礎圖資套疊地震參數

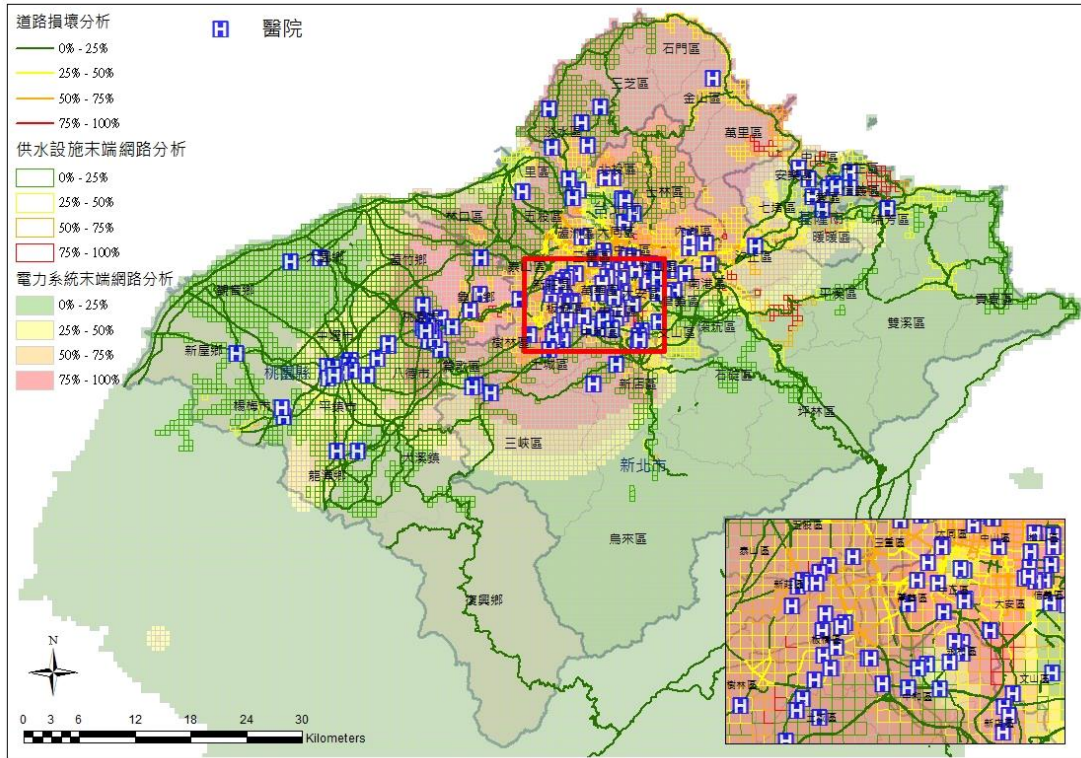


圖 4.31、醫院設施震後情境圖層

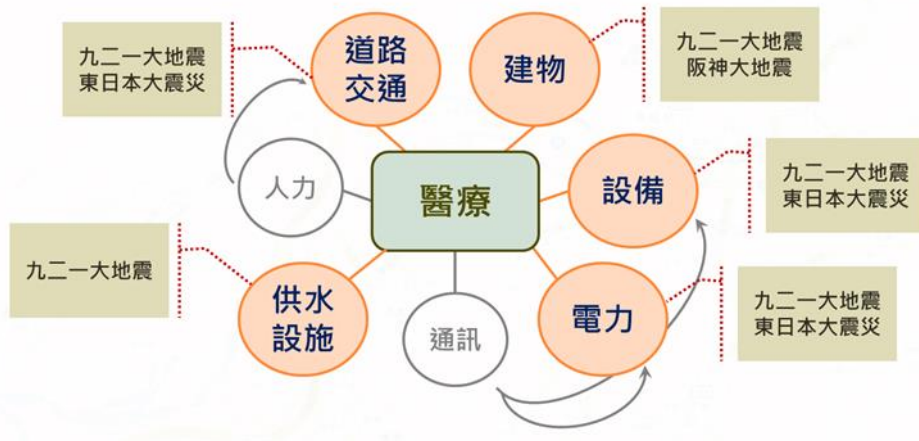
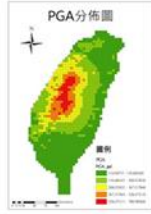


圖 4.32、地震災害與醫療系統之營運條件分析 (蘇昭郎等, 2013)

醫院名稱	所在縣市	行政區	PGA_gal	供水_Loss_all_P	供電(萬瓩)	道路交通(中斷)	醫療儀器設備(萬瓩)	建築物內備有以醫院天化板與隔震磚隔樓板	剩餘能力	失效機率(%)	剩餘服務能
廣川醫院	新北市	土城區	703.60	18.192778	43.895932	0.000000	31.79611676	44.52456161	0.410517504	58.94824961	0.410517
財團法人天主教耕莘醫院	新北市	永和區	534.81	58.436605	2.372482	23.401299	21.13148594	32.09908522	0.500748771	49.92512286	0.500748
柯瑞祥博產科醫院	新北市	永和區	485.22	47.892254	0.425680	0.000000	17.83949474	27.72709500	0.593897561	40.61024391	0.593897
瑞芳護士醫院	新北市	瑞芳區	303.71	60.761546	0.000000	0.017677	6.51738782	10.20500513	0.739941176	26.05882328	0.739941
名譽康醫院	新北市	鶯歌區	495.97	10.351358	0.647930	0.000000	18.55430623	28.70157531	0.650741321	34.92586786	0.650741
新北市立聯合醫院	新北市	三重區	622.17	26.886128	16.513111	58.886548	26.79962322	38.99776959	0.429108171	57.0891829	0.429108
臺北市立聯合醫院中興院區	臺北市	大同區	531.09	45.248730	2.123945	61.423514	20.88546455	31.78231189	0.482873509	51.71264912	0.482873
行政院衛生署台北醫院城區	臺北市	大同區	531.09	45.248730	2.123945	61.423514	20.88546455	31.78231189	0.482873509	51.71264912	0.482873
國立台灣大學醫學院附設醫院	臺北市	中正區	287.65	54.465022	0.000000	44.972798	5.676713833	8.75785227	0.699164631	30.0833692	0.699164
國立台灣大學醫學院附設醫院	臺北市	中正區	287.65	54.465022	0.000000	44.972798	5.676713833	8.75785227	0.699164631	30.0833692	0.699164
三軍總醫院丁津院區	臺北市	中正區	564.51	70.700350	5.240660	5.753739	23.08505811	34.56088191	0.472888421	52.7111579	0.472888
三軍總醫院丁津院區	臺北市	中正區	564.51	70.700350	5.240660	5.753739	23.08505811	34.56088191	0.472888421	52.7111579	0.472888
臺北市立聯合醫院博愛院區	臺北市	中正區	545.09	47.782306	3.177420	42.676652	21.80997789	32.96475451	0.487777029	51.22229706	0.487777
新崙醫院	臺南市	中正區	242.26	51.899996	0.000000	0.017677	3.59537457	5.09762793	0.814397713	18.56022865	0.814397
郵政總局郵政醫院	臺南市	中正區	545.09	47.782306	3.177420	42.676652	21.80997789	32.96475451	0.487777029	51.22229706	0.487777
三軍總醫院附設基隆民眾診察部	基隆市	中正區	338.75	19.859013	0.000025	0.017677	8.485398293	13.53263668	0.797391198	20.30809016	0.797391
三軍總醫院附設基隆民眾診察部	基隆市	中正區	338.75	19.859013	0.000025	0.017677	8.485398293	13.53263668	0.797391198	20.30809016	0.797391
新國民醫院	桃園縣	中壢市	383.57	2.258864	0.001345	0.017677	11.20929035	17.95304139	0.786358427	21.3641573	0.786358
祐民醫院	桃園縣	中壢市	396.47	5.002473	0.003480	0.000000	12.02493688	19.23057503	0.766338888	23.36633888	0.766338
永安醫院	桃園縣	中壢市	383.57	2.258864	0.001345	0.017677	11.20929035	17.95304139	0.786358427	21.3641573	0.786358
中壢醫院	桃園縣	中壢市	395.88	1.374762	0.003337	0.000000	11.98738571	19.17223367	0.774510923	22.54890775	0.774510
宏其醫療社團法人宏其博幼	桃園縣	中壢市	372.90	0.706483	0.000577	0.017677	10.54401481	16.89506914	0.801538311	19.84416887	0.801538
天祐醫院社團法人天祐醫院	桃園縣	中壢市	372.90	0.706483	0.000577	0.017677	10.54401481	16.89506914	0.801538311	19.84416887	0.801538
仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.009847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36036277	0.796396
仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.009847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36036277	0.796396
仁祥醫院	桃園縣	中壢市	377.65	0.631059	0.009847	0.017677	10.83905154	17.36602283	0.796396372	20.36036277	0.796396
華興醫院	桃園縣	中壢市	381.78	0.934421	0.001172	0.017677	11.09705693	17.77562401	0.79113478	20.8862201	0.791134
中壢長庚醫院	桃園縣	中壢市	405.26	1.857230	0.006369	0.000000	12.58693219	20.09825325	0.763118064	23.68817364	0.763118
三軍總醫院附設民眾診療服務部	臺北市	內湖區	440.05	30.303445	0.051460	0.000000	14.84928671	23.48857613	0.669556653	33.04433466	0.669556
三軍總醫院附設民眾診療服務部	臺北市	內湖區	440.05	30.303445	0.051460	0.000000	14.84928671	23.48857613	0.669556653	33.04433466	0.669556
財團法人康寧醫院	臺北市	內湖區	464.10	38.063556	0.170754	52.253471	16.43715707	25.77260273	0.564855199	43.51448015	0.564855
中國醫藥大學附設醫院	臺北市	內湖區	453.61	40.418340	0.103469	0.000000	15.74293533	24.78347522	0.636554931	36.34450694	0.636554

圖 4.33、醫院失效機率之彙整表



防救災重要設施
醫療
消防

	建物損壞	交通阻礙	供水受阻	電力失效	設備失效	其他因子...
權重 (W)	W1	W2	W3	W4	W5	

依據地震衝擊設施之狀況情境，估算以行政區域為單位的各設施營運條件因子損壞程度。

介接L3各子計畫分析結果，作為設施營運條件因子損壞衝擊的數據

(1-建物損失)*W1*[(1-因子損失2)*W2+ (1-因子損失3) *W3+...] = 震後剩餘服務能力

W1*(W2+W3...)

1 - $\frac{(1-建物損失)*W1*[(1-因子損失2)*W2+(1-因子損失3) *W3+...]}{W1*(W2+W3...)}$ = 震後設施失效機率

W1：建物權重=1
單位：%

圖 4.34、醫院設施的震後失效與剩餘服務能力計算公式

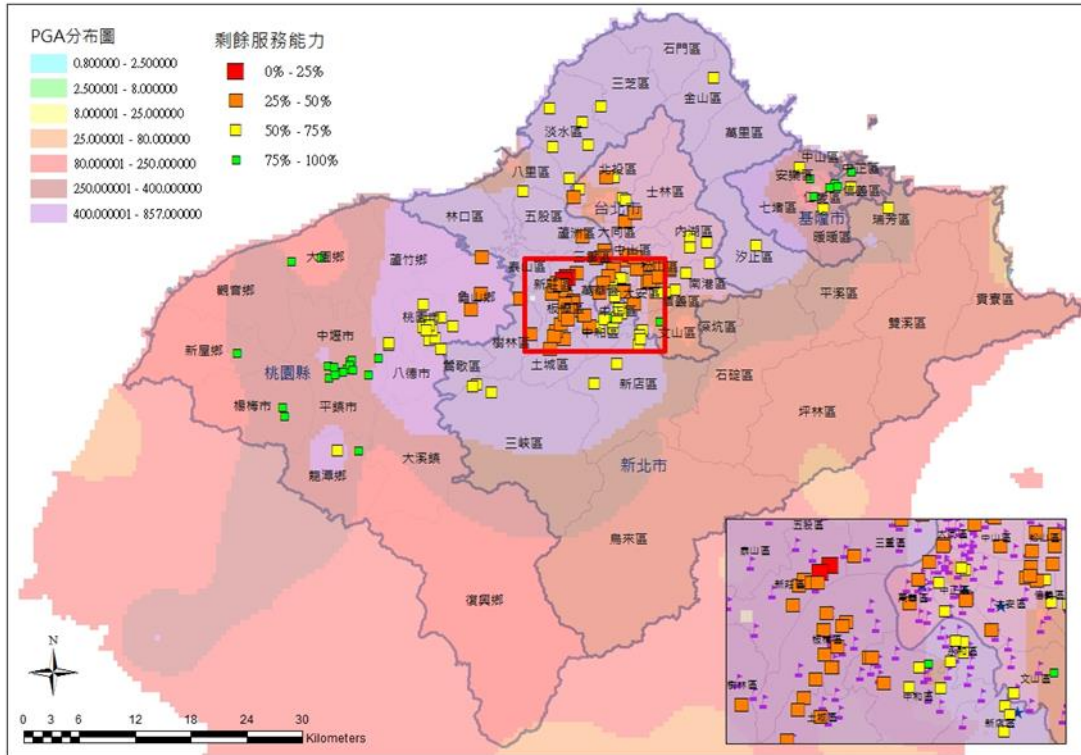


圖 4.35、醫院震後失效機率

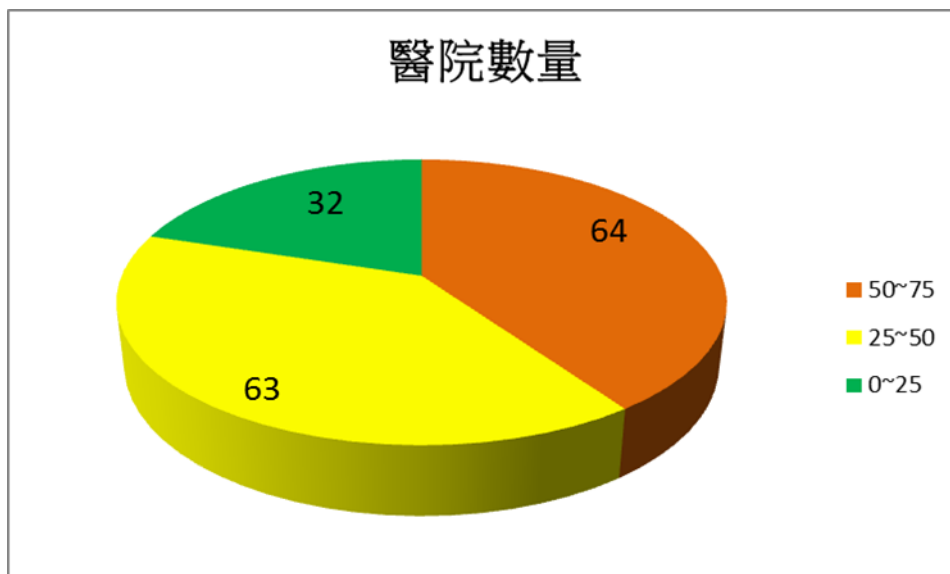


圖 4.36、醫院震後失效機率統計

參考文獻

- Applied Technology Council., (1985) *ATC-13 Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Redwood City, California.
- Elnashai, A. M., Cleveland L. J., Jefferson, T., and Harrald J., (Sept, 2008) *Madrid Seismic Zone Catastrophic Earthquake Response Planning Project, Final Phase I Report: Impact of Earthquakes on the Central USA*, MAE Center Report No. 08-02.
- FEMA, (2010) *Hazus® -MH MR5 Technical Manuals and User's Manuals*, Washington, D.C.
- HaCIRIC and Loughborough University, (2008) *Healthcare Resilience Tool(HeaRT)*, HaCIRIC, UK.
- ISDR/WHO, (2008) *2008-2009 World Disaster Reduction Campaign: Hospitals Safe from Disasters*. ISDR/WHO.
- Kamer, Y., et al. (2010) *Earthquake Loss Estimation Routine ELERv3.0 User Manual*, Department of Earthquake Engineering, Bogazici University, Istanbul.
- Kyriazis Pitilakis, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), (2011) *D3.11 - Fragility functions for fire fighting system elements*. Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain.
- Molina, S., Lang, D. H., Lindholm C. D., Lingvall, F. , (Oct. 1, 2010), *User Manual for the Earthquake Loss Estimation Tool: SELENA, NORSAR*.
- National Institute of Building Sciences, (2004) *HAZUS: Hazard US: Earthquake Loss Estimation Methodology*, NIBS document 5200-03, Washington, D,C.
- Pitilakis, Kyriazis D. and Kakderi, Kalliopi G., (2011) *Seismic Risk Assessment and*

Management Of Lifelines, Utilities and Infrastructures, the 5th International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering (5-ICEGE), Santiago, Chile.

RiskScape User Manual, GNS and NIWA, (May 10, 2010).
<http://www.riskscape.org.nz/>

Schneider, P. J. and Schauer, B. A., (May 2006) “HAZUS-Its Development and Its Future”, *Natural Hazard Review*, ASCE, pp. 40-44,.

Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., Wibowo, J. , (July 2010) *Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability*, *Geotechnical and Structural Laboratory*, ERDC SR-10-01, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.

SYNER-G,(2009). *Deliverable 1.1-SYNER-G work plan: WP1-Project coordination and management, Delivery Report*, Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety gain.

SYNER-G,(2011).*Deliverable 2.12-Efficient Intensity Measures for Components Within a Number of Infrastructures: WP2-Development of a Methodology to Evaluate Systemic Vulnerability, Delivery Report*, Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain.

Yeh, C.-H., Loh, C.-H., and Tsai, K.-C., (2006) “Overview of Taiwan Earthquake Loss Estimation System”, *Natural Hazards*, Springer, 37:23-37.

U.S. Department of Homeland Security, (2009) *National Infrastructure Protection Plan: Partnering to enhance protection and resiliency*, Washington, D.C.

WHO/WPRO, (2009) *Safe Hospitals in Emergencies and Disasters- Structural, on-structural and Functional Indicators*, WHO/WPRO, Manila, Philippines.

- 日本內閣府 (2010)。首都直下型地震受災情境方法。
- 日本內閣府 a，これまでの首都直下地震対策，日本內閣府網路公開資料 (2012 年 6 月下載)。 http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/syuto_top.html
- 日本內閣府 b，震災対策の流れ，日本內閣府網路公開資料 (2012 年 6 月下載)。
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_gaiyou/gaiyou_top.html
- 日本財團法人水道技術研究中心 (2011)。地震による水道管路被害予測の手引き。
- NIPP 小組 (2012)。我國關鍵基礎設施安全防護總計畫書(NIPP)精進版：期末報告。行政院國家關鍵基礎設施安全防護專業服務委外研究案(第三階段)。
- 內政部營建署 (2013)。公共管線資料庫網站。
http://duct.cpami.gov.tw/pubWeb2/Util/P4_2.aspx
- 交通部公路總局 (2009)。公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究—期末報告。
- 李沁妍、蘇昭郎、簡賢文 (2012)。醫院作為關鍵設施之防護議題研究初探，國家災害防救科技中心技術手冊
- 洪祥瑗、文慶霖、柯明淳、劉季宇、葉錦勳 (2007)。自來水地下管線、輸電鐵塔與震後火災之災損推估模式研究，國家地震工程研究中心研究報告 NCREE-07-020。
- 姚昭智等 (2008)。醫院建築中非結構物之易損性曲線研究，中國土木水利工程學刊，第二十卷，第四期，539 - 553。
- 侯鵬曦 (2001)。震災時都市道路系統運輸功能評估與防災路網之研擬，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
- 陳亮全、詹士樑、洪鴻智 (2003)。都市地區震災緊急路網評估方法之研究，都市與計劃，第三十一卷第一期，47-64。

- 郭俊欽 (2001)。九二一震災地方行政部門緊急應變執行過程之研究-以埔里鎮與東勢鎮為例，國立臺灣大學建築與城鄉研究所碩士論文。
- 國家災害防救科技中心 (2011)。關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：基礎研究方法，NCDR 99-T12，國家災害防救科技中心。
- 國家地震工程研究中心 (2012)。臺灣地震損失評估系統使用手冊，
<http://www.ncree.org>
- 基隆市政府 (2010)。基隆市地區防災業務計畫，基隆市：基隆市政府。
- 黃沛群 (2002)。地下維生管線地震損害評估以虛擬管線為例，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所。
- 新北市政府 (2011)。新北市地區防災業務計畫，新北市：基隆市政府。
- 葉錦勳 (2003)。臺灣地震損失評估系統—TELES，NCREE-03-002。
- 臺北市政府 (2011)。臺北市地區防災業務計畫，臺北市：臺北市政府。
- 劉季宇、鍾立來、葉錦勳、林祖榕、周光武、簡文郁、洪祥瑗、陳志欣、周寶卿、陳世良、林峻毅、黃仲偉 (2013)。公共給水系統震災早期災損預警技術研究(I/2)，經濟部水利署期末報告，財團法人國家實驗研究院國家地震工程中心。
- 蘇昭郎、李中生、鄧敏政、吳啟瑞、吳佳容、李洋寧、李沁妍、周建成、簡賢文 (2013)。關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：災害衝擊評估方法 II，NCDR 101-T14，國家災害防救科技中心。