

NCDR 109-T12

# 通訊基地台地震衝擊評估技術研發

Development of Seismic Impact Evaluation

Technology on Telecommunication Base Stations

---



國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center  
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 110 年 01 月



NCDR 109-T12

通訊基地台地震衝擊評估技術研發  
Development of Seismic Impact Evaluation  
Technology on Telecommunication Base Stations

---

吳秉儒、許智豪、柯孝勳



國家災害防救科技中心  
中華民國 110 年 01 月



## 中文摘要

強烈地震往往造成通訊雍塞或中斷，使重災區民眾無法與外界聯繫，救災單位無法掌握災區狀況；然而，國內尚無可供參考之通訊設施受震損壞評估模式。本研究考慮地表振動及電力中斷因素，建立震後通訊基地台受損評估模式，並以 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震及 2018 年 2 月 6 日花蓮地震進行案例分析與驗證，分析所得通訊基地台受損數量及分布與災情查報資料接近。最後將研究成果應用於本年度國家防災日地震演練，以中洲構造規模 6.9 地震分析通訊基地台受損情形，並將模擬結果提供內政部規劃緊急通訊恢復作業參考。

關鍵字：地震、通訊、基地台、損壞評估

## ABSTRACT

Strong ground motions often caused congestion or interruption in telecommunication systems which may impede the communication for residents in severely affected region to outreach supports and delay information transmission to emergency response departments. However, there are no appropriate models for evaluating telecommunication systems subject to major earthquakes in Taiwan. The research develops a seismic assessment methodology for base stations of telecommunication systems with consideration of both effects of ground shaking and electricity interruption. The analytical results showed the number of affected base stations and their geo-spatial distributions that quite fit the damage reports resulted from the 2016 Kaohsiung Meinong earthquake and 2018 Hualien earthquake. Finally, we evaluated the possible damages of base stations in a magnitude-6.9 scenario earthquake according to the Chungchou structure and proposed the simulation results to the Department of the Interior which were applied for the National Earthquake Drill in 2020.

**Keywords:** earthquake, telecommunication, base station, damage assessment

# 目錄

第一章 前言.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
第二章 行動通訊系統損壞評估相關研究 .....	3
2.1 行動通訊系統架構 .....	3
2.2 地震導致通訊基地台失效之原因 .....	4
2.3 通訊基地台受震損壞評估相關研究 .....	6
2.3.1 地表振動造成基地台損壞評估相關研究 .....	7
2.3.2 電力系統受震損壞評估相關研究 .....	9
2.3.3 通訊系統與電力系統受震損壞相依性分析 .....	10
第三章 通訊基地台受震損壞評估方法 .....	13
3.1 地表振動造成基地台損壞評估 .....	13
3.2 電力中斷造成基地台失效評估 .....	15
3.3 通訊基地台受震損壞評估流程 .....	19
第四章 地震案例分析及防災規劃應用 .....	25
4.1 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震案例分析 .....	25
4.2 2108 年 2 月 6 日花蓮地震案例分析 .....	29
4.3 2020 年國家防災日地震演練規劃應用 .....	33

第五章 結論與未來研究方向 .....	37
5.1 結論 .....	37
5.2 未來研究方向 .....	37
參考文獻.....	38





## 圖目錄

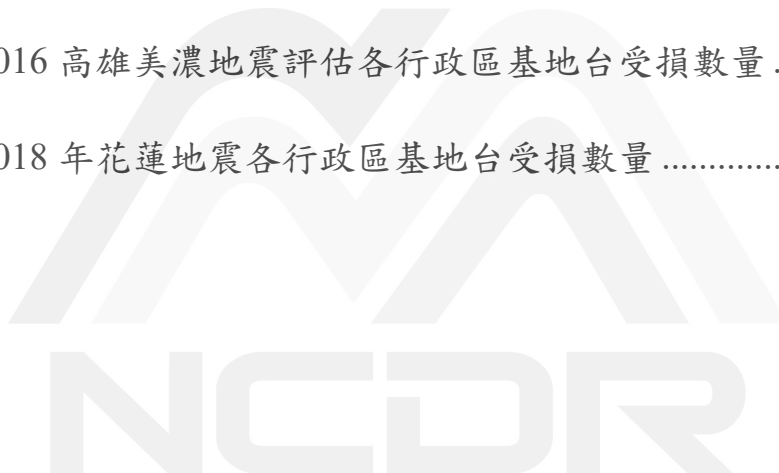
圖 2.1、蜂巢式行動通訊系統架構 .....	3
圖 2.2、地表振動造成通訊基地台破壞型態(2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震) .....	5
圖 2.3、故障樹分析通訊機房受震失效原因(Leelardcharoen, 2011)....	7
圖 2.4、不同層級通訊機房之易損性曲線(Leelardcharoen, 2011).....	8
圖 3.1、東、西部縣市通訊基地台易損性曲線 .....	15
圖 3.2、電力系統與通訊系統之相依衝擊分析流程 .....	16
圖 3.3、通訊基地台受震損壞評估流程 .....	19
圖 3.4、通訊基地台因停電而失效數量計算流程 .....	24
圖 4.1、2016 年高雄美濃地震實測地表加速度分布 .....	26
圖 4.2、2016 年高雄美濃地震通訊基地台受地表振動損壞分析 .....	26
圖 4.3、2016 年高雄美濃地震變電所受損及供電網絡分析 .....	27
圖 4.4、2016 年高雄美濃地震評估通訊中斷行政區與災情查報資料 之比較.....	29
圖 4.5、2018 年花蓮地震實測地表加速度 .....	30
圖 4.6、2018 年花蓮地震通訊基地台受地表振動損壞分析 .....	31
圖 4.7、2018 年花蓮地震變電所受損及供電網絡分析 .....	31
圖 4.8、花蓮地震評估通訊中斷行政區與災情查報資料之比較 .....	32

圖 4.9、中洲構造規模 6.9 地震模擬之地表加速度分布 .....	34
圖 4.10、中洲構造規模 6.9 地震模擬之通訊基地台受損評估結果..	34
圖 4.11、國家防災日地震演練啟動 .....	35
圖 4.12、國家防災日地震演練之建立緊急資通訊演練 .....	36



## 表目錄

表 2.1、不同層級通訊機房易損性參數(Leelardcharoen, 2011).....	8
表 2.2、通訊設施易損性參數(FEMA, 2013) .....	9
表 2.3、變電所易損性參數(FEMA, 2013).....	10
表 3.1、各縣市不同耐震設計要求建物所佔百分比 .....	14
表 3.2、上游變電所影響行政區 .....	17
表 3.3、上下游變電所對應關係及影響行政區 .....	18
表 4.1、2016 高雄美濃地震評估各行政區基地台受損數量 .....	28
表 4.2、2018 年花蓮地震各行政區基地台受損數量 .....	32





# 第一章 前言

## 1.1 研究背景

通訊系統在災害監測、預警資訊傳遞、救災通聯上扮演重要的角色，尤其是地震災害，需要爭取應變時效。由國內外重大地震災害經驗可知，大規模地震除了造成建物破壞、人員傷亡之外，亦可能導致交通設施、維生系統(自來水、電力、通訊、瓦斯等)損壞等災害衝擊；其中通訊中斷將影響救災單位指揮通聯及災情查報，可能使災害衝擊層面擴大。

為了降低地震引致通訊中斷造成之衝擊，防救災業務單位需要掌握震後通訊設施可能受損情形，以研擬防災因應對策。然而，國內地震造成通訊中斷之案例較少，且國內尚無可供參考的通訊設施受震損壞評估方法，有其研究的必要性。

## 1.2 研究目的

本研究參考國外相關研究，開發通訊基地台地震衝擊評估技術，並以 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震及 2018 年 2 月 6 日花蓮地震進行案例分析，經由與災情查報資料之比較，驗證分析結果之成效。此外，配合本年度國家防災日地震演練之情境設定，分析在中洲構造規模 6.9 模擬地震作用下，通訊基地台受損數量及分布，並將研究成果提

供內政部消防署規劃地震演練參用，以期對防救災實務工作有所助益。



## 第二章 行動通訊系統損壞評估相關研究

本章首先介紹行動通訊系統架構及運作機制，然後說明地震導致通訊基地台失效之原因，輔以國內外重大地震災例佐證，最後彙整通訊基地台受震損壞評估相關研究，闡述可供參考之分析方法。

### 2.1 行動通訊系統架構

在行動通訊系統中，基地台是最底層的通訊設施，包含天線、通訊設備及供電設備，每一個基地台有其有效服務範圍，行動裝置只要位於基地台有效服務範圍內就能保持通聯狀態；多個基地台彼此靠近構築行動通訊網絡，其架構通常以六角形的蜂巢結構表示(Agrawal and Zeng, 2016)，如圖 2.1，行動用戶可以透過換手(Handoff)機制在不同的蜂巢細胞內來回穿梭維持通聯狀態。

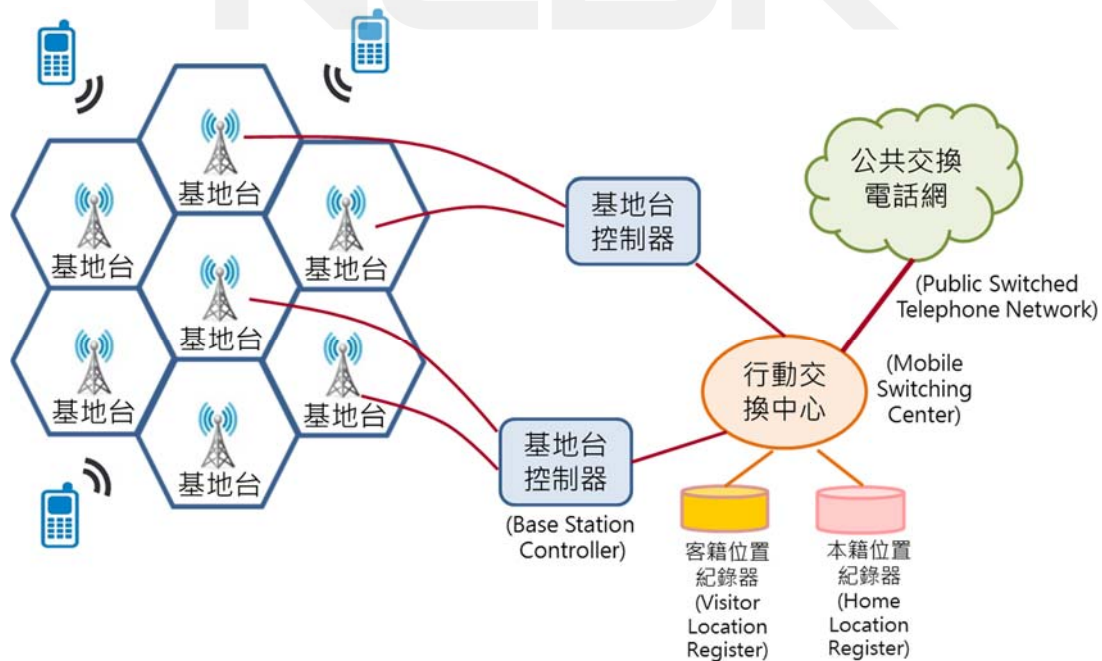


圖 2.1、蜂巢式行動通訊系統架構

基地台以固定線路連接至基地台控制器(Base Station Controller)，然後進入行動交換中心(Mobile Switching Center)進行訊息交換，每個行動交換中心皆配置客籍位置紀錄器(Visitor Location Register)，記錄所有移動至此行動交換中心服務範圍內的用戶資料，行動交換中心可以藉由這些資訊提供相關服務；而系統對於網路中所有使用者建立一份永久紀錄存放於本籍位置紀錄器(Home Location Register)，包含用戶資訊、目前所在位置及核准使用期限等相關資訊。客籍位置紀錄器與本籍位置紀錄器及認證中心(Authentication Center)建立訊息鏈路，用於資料查詢及認證功能。行動交換中心後端再連接公共交換電話網路(Public Switched Telephone Network)，與外界通聯。

## 2.2 地震導致通訊基地台失效之原因

通訊系統可能受到地震影響而無法正常運作，根據過去各國重大地震災害調查資料(Giovinazzi 等人，2017；Lu 等人，2008)，造成通訊系統失效的原因主要包括：

### 1. 通訊基地台設備破壞

在都會區中，通訊基地台相關設備通常附掛於建築物上，例如將交換機設置於室內，及將天線安裝於屋頂。因此，位於震央附近的基地台，可能因為建物嚴重損壞甚至倒塌而被壓毀，或者造成基地台天線脫落、交換機損壞、電池主機位移解聯等。例如 2016 年 2 月 6 日



發生於高雄美濃之規模 6.6 地震，造成 143 處基地台損壞，根據中央災害應變中心開設期間，國家通訊傳播委員會彙整各電信業者回報之通訊設施災情查報資料，包含受損基地台之經緯度座標、受災情形描述及照片，其中因為地表振動造成設備損壞之破壞型態如圖 2.2。



(a)建物倒塌壓毀基地台

(b)基地台天線脫落

(c)電池主機位移解聯

圖 2.2、地表振動造成通訊基地台破壞型態(2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震)

## 2. 相關支持系統失效

通訊系統之運作，除了基地台提供手機訊號處理之外，還需要後端相關網路傳輸設備與線路，以及電力系統支持。倘若基地台沒有配置不斷電系統及發電機，電力系統失效往往造成廣大範圍基地台無法正常運作。例如 2011 年 3 月 11 日規模 9.0 之東日本大地震，總共 29,000 個基地台停止運作，其中 20%是受到結構破壞影響，80%是因為電力中斷造成(ITU, 2013)。此外，2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震事件災情查報資料，地表振動造成 34 個基地台損壞(24%)，電力中斷導致 109 個基地台無法運作(76%)。

### 3. 通訊網路壅塞

大規模地震發生之後，許多民眾急於以手機跟親友聯絡，使得交換機負載過大而癱瘓，造成通訊網路壅塞。例如 1994 年規模 6.7 之美國北嶺地震(Northridge Earthquake)，震後第一天的通訊流量是平常的 10 倍；另外 1995 年規模 6.9 之日本阪神地震，震後第一天的通訊流量甚至高達平常的 50 倍(Tang, 1998)，大量訊號在短時間內湧入，遠超過交換機負荷量，導致通訊壅塞而無法通話。

由上述國內外重大地震災害經驗可知，地震造成通訊系統在硬體方面無法運作的原因，主要是強烈地表振動造成基地台相關設備損壞，及電力系統失效所致。

### 2.3 通訊基地台受震損壞評估相關研究

Leelardcharoen (2011)以故障樹分析通訊機房受震失效原因，包括通訊機房所在建物破壞、數位交換板(Digital Switching Board)損壞、電力中斷三部分，其中建物破壞、數位交換板損壞之原因主要為地表振動造成，而電力中斷包含商用電力、備用電力皆失效之情境。故障樹分析結果與我們從國內外重大地震受災經驗觀察所得一致，通訊基地台致災因素包含地表振動及電力系統失效兩大原因。

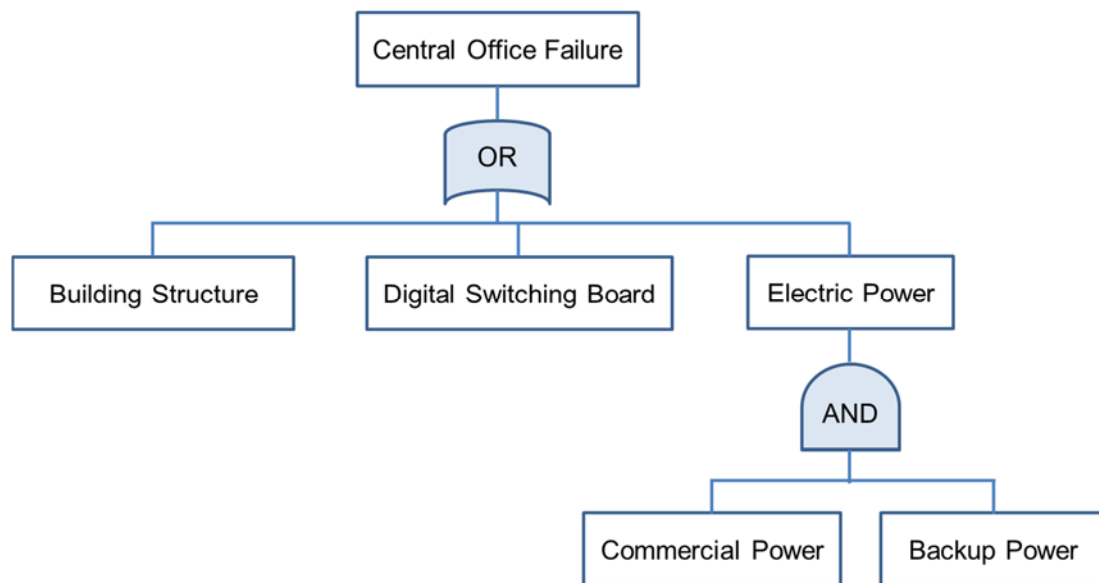


圖 2.3、故障樹分析通訊機房受震失效原因(Leelardcharoen, 2011)

### 2.3.1 地表振動造成基地台損壞評估相關研究

由於都會區通訊基地台大多設置於建築物內，因此通訊基地台受震損壞程度和所在結構物之耐震性能及損壞程度有關。一般評估建物或設施受到地表振動作用之損壞程度常以易損性曲線(Fragility Curve)來描述，其橫座標為地動參數(地表加速度、震譜加速度或震譜位移)，縱座標為損壞機率  $p$ 。假設兩者之間的函數關係為對數常態機率曲線(Lognormal Distribution)，以最大地表加速度(Peak Ground Acceleration,  $PGA$ )為橫座標之累積分布函數 $\Phi$ (Cumulative Distribution Function)如 2.1 式；其中  $m$  為中位數(Median)， $\beta$ 為標準差(Standard Derivation)。

$$p = \Phi \left[ \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{PGA}{m} \right) \right] \quad (2.1)$$

Leelardcharoen(2011)提出通訊網路架構中不同層級通訊機房之

易損性曲線如圖 2.4，易損性參數如表 2.1，包括網路最底層的末端機房(End Office)、中繼機房(Tandem Office)、及一個城市的主要網路連接點(Point of Presence)。末端機房所在建物通常為木構造，而中繼機房及網路連接點所在建物則主要為鋼筋混凝土或鋼構造房屋；由易損性曲線可看出，網路連接點所在建物之耐震性能最高，其次是中繼機房，最低則是末端機房。

表 2.1、不同層級通訊機房易損性參數(Leelardcharoen, 2011)

通訊機房層級	中位數(g)	標準差(g)
網路連接點	0.4	0.6
中繼機房	0.32	0.6
末端機房	0.26	0.5

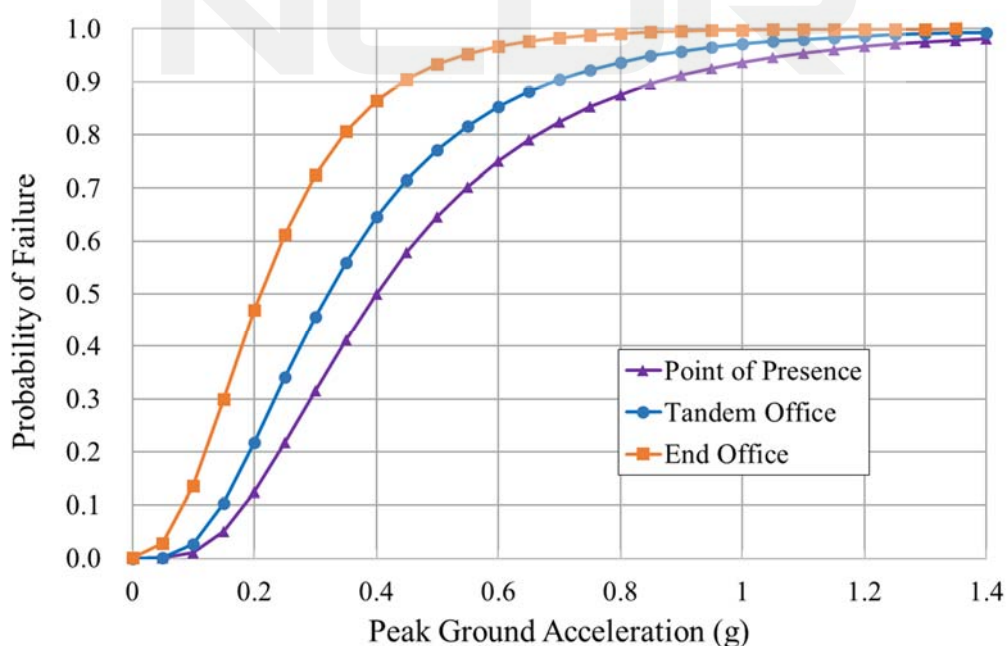


圖 2.4、不同層級通訊機房之易損性曲線(Leelardcharoen, 2011)

此外，美國災害風險評估軟體 HAZUS(FEMA, 2013)之通訊設施評估模組，設定輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞、完全損壞四種狀態之易損性參數如表 2.2，包含通訊設施具有錨定元件(Anchored Component)及無錨定元件(Unanchored Component)兩類。

表 2.2、通訊設施易損性參數(FEMA, 2013)

分類	損壞狀態	中位數(g)	標準差(g)
具有錨定元件 之通訊設施	輕微損壞	0.15	0.75
	中度損壞	0.32	0.60
	嚴重損壞	0.60	0.62
	完全損壞	1.25	0.65
無錨定元件 之通訊設施	輕微損壞	0.13	0.55
	中度損壞	0.26	0.50
	嚴重損壞	0.46	0.62
	完全損壞	1.03	0.62

### 2.3.2 電力系統受震損壞評估相關研究

美國災害風險評估軟體 HAZUS(FEMA, 2013)之電力系統受震評估模組，內建發電廠、高電壓至低電壓變電所、輸配電線路之易損性曲線參數；以變電所為例，高電壓(345 kV 至 161 kV)、中電壓(161 kV 至 69 kV)、低電壓(69 kV 至 22 kV)變電所在輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞、完全損壞狀態之易損性參數如表 2.3。

表 2.3、變電所易損性參數(FEMA, 2013)

分類	損壞狀態	中位數(g)	標準差(g)
高電壓變電所	輕微損壞	0.11	0.50
	中度損壞	0.15	0.45
	嚴重損壞	0.20	0.35
	完全損壞	0.47	0.40
中電壓變電所	輕微損壞	0.15	0.60
	中度損壞	0.25	0.50
	嚴重損壞	0.35	0.40
	完全損壞	0.70	0.40
低電壓變電所	輕微損壞	0.15	0.70
	中度損壞	0.29	0.55
	嚴重損壞	0.45	0.45
	完全損壞	0.90	0.45

本中心吳子修等人(2014)、劉淑燕等人(2014)參考美國 HAZUS 及國內相關研究，開發地震衝擊資訊平台(Taiwan Earthquake Impact Research and Information Application Platform, TERIA)，包含建物破壞、人員傷亡、道路、橋梁、自來水、電力設施等分析模組，並將所有分析模組整合建置於地理資訊系統，供使用者進行地震情境模擬分析、線上展示模擬結果，並提供使用者各項分析結果之數值檔(SHP 檔、KML 檔或 CSV 檔)。本研究採用 TERIA 平台之供電力衝擊分析模組，分析發電廠、變電所、輸配電線路受震損壞情形。

### 2.3.3 通訊系統與電力系統受震損壞相依性分析

電力系統受震損壞之後，可能導致通訊系統無法運作，二者相互

影響之特性稱為相依性(Interdependency)。Leelardcharoen(2011)提出通訊系統和電力系統受震損壞相依性分析方法，考慮地震及電力中斷兩個因素造成通訊系統損壞機率可以表示為：

$$P(E_{t,int}) = P(E_{t,EQ} \cup E_{t,power}) \quad (2.2)$$

其中 $P(E_{t,int})$ 為考慮系統相依性之損壞機率， $E_{t,EQ}$ 為地震造成通訊系統損壞事件， $E_{t,power}$ 為電力中斷造成通訊系統失效事件。將地震造成通訊系統損壞機率 $P(E_{t,EQ})$ 及電力中斷造成通訊系統失效機率 $P(E_{t,power})$ 代入得到：

$$P(E_{t,int}) = P(E_{t,EQ}) + P(E_{t,power}) - P(E_{t,EQ} \cap E_{t,power}) \quad (2.3)$$

假設 $E_{t,EQ}$ 和 $E_{t,power}$ 在統計上彼此獨立，二者交集之機率可以改寫為：

$$P(E_{t,int}) = P(E_{t,EQ}) + P(E_{t,power}) - P(E_{t,EQ}) \cdot P(E_{t,power}) \quad (2.4)$$

其中 $P(E_{t,EQ})$ 為地震造成通訊系統損壞機率，可由圖 2.4 易損性曲線獲得。因為 $E_{t,power}$ 是發生在地震造成供電中斷、且供電中斷導致通訊基地台失效的條件下，所以 $P(E_{t,power})$ 可以用條件機率的組合來表示：

$$P(E_{t,power}) = P(E_{t,power}|E_{p,EQ}) \cdot P(E_{p,EQ}) \quad (2.5)$$

其中 $P(E_{p,EQ})$ 為地震造成供電中斷的機率， $P(E_{t,power}|E_{p,EQ})$ 為地震造成之供電中斷進而導致通訊基地台失效的機率，定義為通訊系統和電力系統之間的耦合強度(Coupling Strength)參數；耦合強度參數介於 0 和 1 之間，1 代表二者完全相依，0 代表二者完全無關，可由過去地震災例統計分析而得。計算上可用地震造成變電所電力中斷進而使通訊台失效的數量，除以變電所電力中斷的總數。

雖然上述分析方法考慮通訊系統和電力系統相依性，可評估通訊設施受到地震作用的損壞機率，以及電力中斷導致通訊失效的機率。但是此方法主要評估整個通訊系統失效的機率，尚未探討通訊設施可能受損的數量及區域，且耦合強度參數仍待許多地震案例統計分析方能具代表性；對於電力中斷之影響，尚未考慮變電所上下游之網絡關係，及各階層變電所之供電範圍，無法評估電力中斷造成通訊基地台失效之數量及空間分布，然而這些卻是救災單位在應變期間迫切希望掌握的資訊。因此，本研究將於第三章提出一套評估方法，以解決上述問題。



### 第三章 通訊基地台受震損壞評估方法

由前章國內外地震案例及相關研究所述，造成通訊基地台受損主要因素為地表振動作用及電力中斷；因此，本研究主要考慮此兩項致災因素，建立通訊基地台受損損壞評估方法，說明如下。

#### 3.1 地表振動造成基地台損壞評估

對於地表振動造成通訊基地台之損壞評估，本研究採用前章所述 Leelardcharoen(2011)提出之通訊機房易損性曲線(如圖 2.4)。其中，中繼機房及網路連接點所在建物則主要為鋼筋混凝土或鋼構造房屋，與臺灣常見的房屋構造類別接近，所以採用此二者，二者的差別是網路連接點所在建物的耐震性能較高。

由於建物大多依照建築耐震設計規範要求而建造，進一步探究臺灣東、西部建築在高、中、低耐震設計要求所佔之比例。根據本心 TERIA 平臺之建物基本屬性資料統計(表 3.1)，東部宜蘭縣、花蓮縣、臺東縣三縣市之建物以高耐震設計要求者佔多數，西部縣市則以中、低耐震設計要求之建物較多。因此，對於東部三縣市之通訊機房，易損性曲線參數選用耐震性能較高的網路連接點之參數(對數常態機率曲線中位數為 0.4 g、標準差為 0.6 g)；而西部所有縣市之通訊機房，則選用中繼機房之參數(中位數為 0.32 g、標準差為 0.6 g)，繪製東、

西部縣市之易損性曲線如圖 3.1。

表 3.1、各縣市不同耐震設計要求建物所佔百分比

縣市	高耐震設計 要求	中耐震設計 要求	低耐震設計 要求	無耐震設計 要求
臺北市	0%	51.0%	24.6%	24.4%
新北市	0.0004%	52.5%	33.5%	14.0%
桃園市	0.008%	21.0%	74.3%	4.7%
新竹市	8%	64.3%	18.5%	9.2%
新竹縣	8.9%	47.0%	36.0%	8.2%
苗栗縣	25.1%	45.2%	14.8%	14.9%
臺中市	29.8%	50.0%	14.1%	6.1%
彰化縣	8.4%	63.1%	16.5%	12.1%
南投縣	23.3%	47.9%	16.9%	12.0%
雲林縣	27.6%	45.9%	8.2%	18.3%
嘉義市	36.4%	50%	0.01%	13.6%
嘉義縣	30.4%	43.4%	9.2%	17.0%
臺南市	19.9%	55.0%	13.6%	11.5%
高雄市	0.7%	28.6%	60.0%	10.9%
屏東縣	3.7%	39.7%	44.7%	11.9%
臺東縣	49.5%	16.5%	19.9%	14.2%
花蓮縣	46.6%	35.6%	3.4%	14.5%
宜蘭縣	39.0%	32.1%	19.4%	9.5%

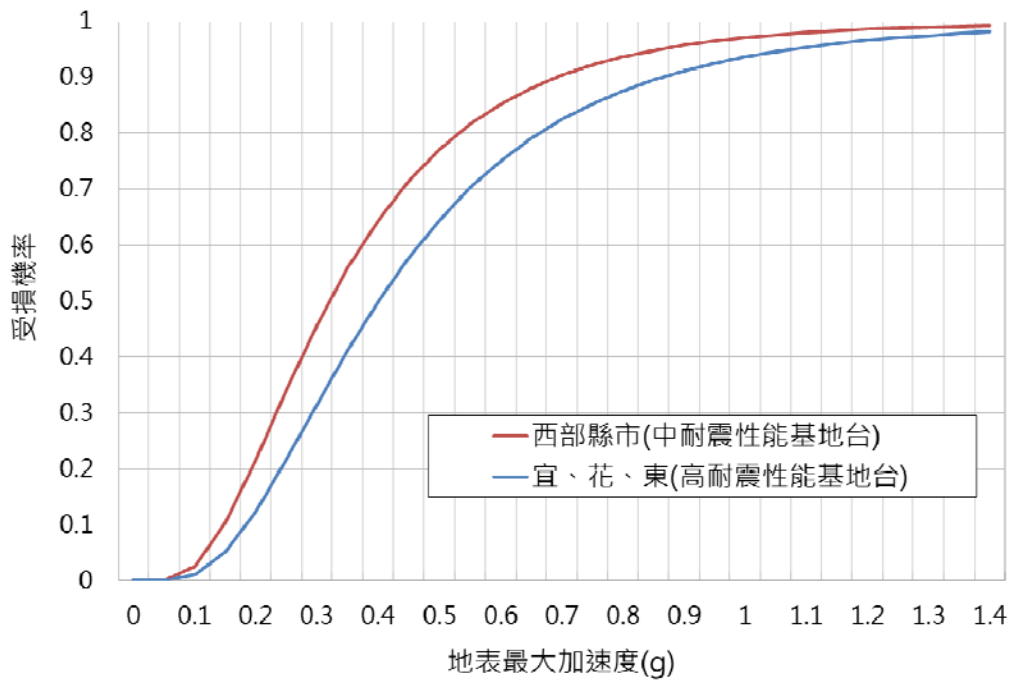


圖 3.1、東、西部縣市通訊基地台易損性曲線

### 3.2 電力中斷造成基地台失效評估

位於高震度區的電力設施，受地表振動作用引致發電廠、變電所、或輸電線路損壞時，可能使負載端失去連接電力、或系統異常而導致電力中斷，間接影響通訊基地台運作。本研究建立電力系統和通訊系統之相依衝擊分析流程如圖 3.2，根據地表加速度分布，運用 TERIA 平台之供電衝擊分析模組評估變電所損壞程度；此外，建立供電網絡架構，包括變電所上下游關聯性及各變電所受損可能影響之行政區，進一步分析供電中斷對通訊基地台失效之影響。變電所受震損壞程度越嚴重，將使行政區內通訊基地台失效比率越高；上游變電所損壞，將使下游變電所連帶失效，影響較大範圍之基地台運作。

在電力系統中，從發電廠至用戶端，必須經過多次變電所降壓及

輸配電線路傳送，變電所包括超高壓變電所(Extra-High Voltage Substation 簡稱 E/S，電壓從 345 kV 降至 161 kV)、一次變電所(Primary Substation 簡稱 P/S，電壓從 161 kV 降至 69 kV)、配電變電所(Distribution Substation 簡稱 D/S，電壓從 161 kV 降至 22 kV 或 161 kV 降至 11 kV)、及二次配電所(Secondary Substation 簡稱 S/S，電壓從 69 kV 降至 22 kV 或 69 kV 降至 11 kV)。由於臺灣輸配電系統是以 345 kV 為骨幹，超高壓變電所肩負最上游的變壓角色，因此本研究將超高壓變電所定義為上游變電所，其餘則定義為下游變電所。

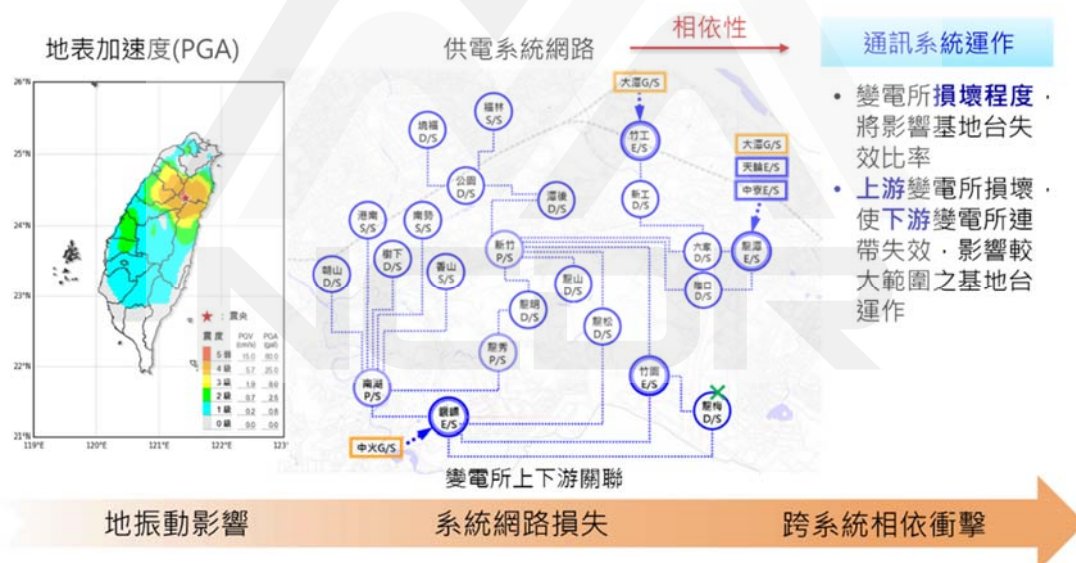


圖 3.2、電力系統與通訊系統之相依衝擊分析流程

根據台灣電力公司(<https://www.taipower.com.tw/>)之電廠與電網分布架構，建立上游變電所影響行政區如表 3.2、上下游變電所對應關係及影響行政區如表 3.3。處理方式為將上游變電所(超高壓變電所，E/S)所在行政區及其鄰近行政區設定為其受損影響行政區，上下

游變電所對應關係根據電網分布架構予以定義；下游變電所受損影響行政區呈現上以一次變電所(P/S)為主，配電變電所(D/S)及二次變電所(S/S)受損影響區均歸屬於一次變電所受損影響行政區之下。

臺灣近年來所發生的地震，以 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震及 2018 年 2 月 6 日花蓮地震影響較為顯著，兩次地震皆發生電力中斷且導致通訊系統失效情形，因此本研究首先對於這兩次地震所影響的區域進行分析。目前已完成供電網絡架構分析之區域包括臺南市、高雄市北部、嘉義市、嘉義縣南部、花蓮縣等，後續將以跨縣市之大分區方式逐步建立供電上下游對應關係及影響行政區。

表 3.2、上游變電所影響行政區

上游變電所	影響行政區
龍崎	臺南市龍崎區
	臺南市關廟區
南科	臺南市善化區
	臺南市新市區
嘉民	嘉義縣民雄鄉
	嘉義市東區
	嘉義市西區
	嘉義縣竹崎鄉
鳳林	花蓮縣鳳林鎮
	花蓮縣萬榮鄉
	花蓮縣光復鄉
	花蓮縣瑞穗鄉

表 3.3、上下游變電所對應關係及影響行政區

上游變電所	下游變電所	影響行政區
龍崎	山上	臺南市山上區
		臺南市新化區
		臺南市左鎮區
		臺南市永康區
		臺南市歸仁區
		臺南市官田區
		臺南市南化區
		臺南市楠西區
		高雄市六龜區
	新營	臺南市新營區
		臺南市柳營區
		臺南市東山區
		臺南市下營區
		臺南市學甲區
		臺南市北門區
		臺南市麻豆區
	臺南	臺南市東區
		臺南市仁德區
	安南	臺南市中西區
		臺南市安南區
	路北	高雄市路竹區
		高雄市田寮區
		高雄市湖內區
仁武	高雄市仁武區	
	高雄市大樹區	
鳳林	花蓮	花蓮縣吉安鄉
		花蓮縣新城鄉
		花蓮縣秀林鄉
	勝安	花蓮縣花蓮市
	壽豐	花蓮縣壽豐鄉
	玉里	花蓮縣玉里鎮
	臺東	花蓮縣富里鄉
	玉里	花蓮縣卓溪鄉

### 3.3 通訊基地台受震損壞評估流程

綜合地表振動造成基地台損壞評估及電力中斷造成基地台失效評估方法，建立通訊基地台受震損壞評估流程如圖 3.3，分別計算地表振動及電力中斷造成通訊基地台受損數量，以行政區(鄉鎮市區)為統計單元，將二者相加得到總數，分析步驟說明如下：

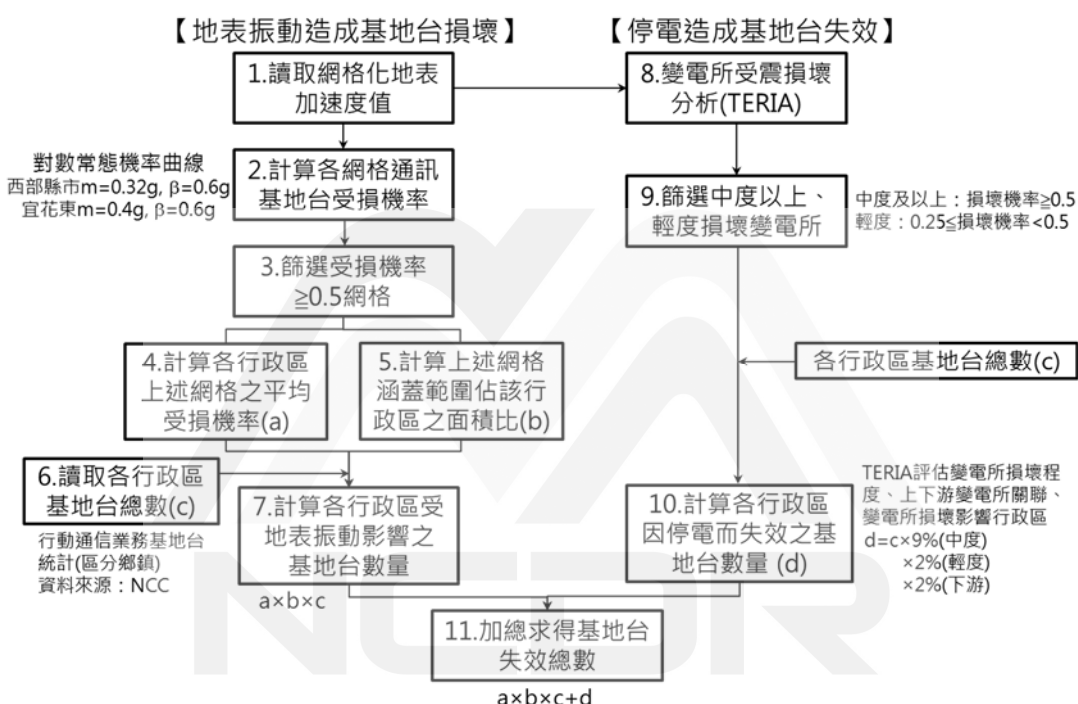


圖 3.3、通訊基地台受震損壞評估流程

#### 1. 讀取網格化地表加速度值

以 500 m × 500 m 網格為單位，讀取實測地表加速度或情境模擬之地表加速度值。

#### 2. 計算各網格通訊基地台受損機率

將各網格之地表加速值代入通訊基地台易損性曲線(對數常態機率曲線，如圖 3.1)，東部三縣市(宜蘭縣、花蓮縣、臺東縣)之參數為

中位數 0.4 g、標準差 0.6 g，西部所有縣市之參數為中位數 0.32 g、標準差 0.6 g。

### 3. 篩選受損機率 $\geq 0.5$ 網格

由地表加速度計算所得通訊基地台受損機率越高，代表基地台受震損壞可能性越高，因此篩選受損機率 $\geq 0.5$  者進行後續計算。

### 4. 計算各行政區受損機率 $\geq 0.5$ 網格之平均受損機率

由於從國家通訊傳播委員會網站取得之通訊基地台數量是以鄉鎮市區為統計單元，因此評估結果的呈現亦採用鄉鎮市區為單位。因每個網格的受損機率不同，故將前項步驟篩選出的網格，計算各行政區(鄉鎮市區)的平均受損機率，將這個數字標記為 a。

### 5. 計算受損機率 $\geq 0.5$ 網格涵蓋範圍佔該行政區之面積比

受損機率 $\geq 0.5$  網格數量愈多，代表行政區內通訊基地台可能受損的數量越多，因此計算受損機率 $\geq 0.5$  網格涵蓋範圍佔該行政區之面積比，將這個數字標記為 b。

### 6. 讀取各行政區基地台總數

國家通訊傳播委員會每個月會在網站公告各行政區(鄉鎮市區)通訊基地台數量統計(<https://www.ncc.gov.tw/>)，包括 4G、3G、2G 基地台數量。由於各類型基地台數量每個月皆有變化，且近年來 3G、2G



基地台逐漸減少，因此資料擷取上以三者最大者為主。不過，在 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震及 2018 年 2 月 6 日花蓮地震案例分析時，則擷取地震發生前最近之基地台統計資料，以符合當時基地台數量及分布，將這個數字標記為 c。

#### 7. 計算各行政區受地表振動影響之基地台數量

綜合步驟 4、5、6，各行政區受地表振動影響之基地台數量等於  $a \times b \times c$ 。

#### 8. 變電所受震損壞分析

將實測或情境模擬之網格化地表加速度輸入 TERIA 平台，分析各變電所受震損壞機率。

#### 9. 篩選中度損壞以上、輕度損壞變電所

定義通訊基地台損壞機率  $\geq 0.5$  為中度損壞及以上，損壞機率介於 0.25 和 0.5 之間為輕度損壞，篩選中度以上、輕度損壞變電所，損壞機率小於 0.25 者則不列入計算。

#### 10. 計算各行政區因停電而失效之基地台數量

上游變電所損壞，可能連帶使下游變電所電力中斷，使得較大範圍之基地台失去電力；變電所損壞越嚴重，需要較長時間修復，可能使較多基地台無法獲得電力供應。然而，各家電信業者基地台備援電

力系統建置情形不一，具有備援電力系統者，可以應付短暫幾天市區電力供應中斷之情形，維持基地台正常運作；但是不具備援電力系統者，電力供應中斷將使基地台無法運作。本研究採用歷史地震案例回饋分析，推估變電所受損造成電力中斷，進而導致通訊基地台失效之比率。

根據 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震應變期間由國家通訊傳播委員會提供之各電信業者回報通訊設施受損資料，擷取受災狀況描述為電力中斷者；此外，結合 TERIA 評估所得上游變電所與下游變電所之損壞機率、表 3.2 上游變電所影響行政區、與表 3.3 上下游變電所對應關係及影響行政區，推算上游變電所與下游變電所分別在中度損壞以上、輕度損壞狀態下導致通訊基地台失效百分比，過程說明如下：

(1)將各行政區(鄉鎮市區)災情查報基地台失效數量，除以各行政區基地台總數，得到各行政區基地台因停電失效百分比。

(2)對於評估中度損壞以上的上游變電所，由表 3.2 上游變電所影響行政區，計算每個上游變電所影響範圍內之基地台平均失效百分比。例如本案例 TERIA 評估有龍崎、南科兩個超高壓變電所為中度損壞，將這兩個上游變電所對應的基地台失效百分比相加除以 2，得到上游變電所影響範圍內基地台平均失效百分比為 9%。

(3)對於評估輕度損壞之上游變電所，計算每個上游變電所影響範圍內

之基地台平均失效百分比；本案例 TERIA 評估有嘉民超高壓變電所為輕度損壞，將其影響行政區之基地台失效百分比取平均值。

(4)受到上游變電所損壞影響，由表 3.3 帶出下游變電所及其影響行政區，下游變電所包含一次變電所、配電變電所及二次變電所，以一次變電所為主，將一次變電所評估為輕度損壞者，計算其影響行政區基地台平均失效百分比；對於一次配電所之下游(配電變電所及二次配電所)則計算其影響行政區之基地台平均失效百分比。本案例有山上、安南、臺南、新營、路北、仁武共 6 個一次變電所，將這 6 個下游變電所對應之基地台失效百分比，加上第(3)項輕度損壞上游變電所之基地台失效百分比，取平均值得到 2%。

綜合上述，上游變電所為中度損壞以上者，基地台失效百分比為 9%，其所對應下游變電所之基地台失效百分比為 2%。上游變電所為輕度損壞者，基地台失效百分比為 2%；在此條件下，進一步考慮下游變電所之損壞情形，中度損壞之基地台失效百分比為 9%，輕度損壞之基地台失效百分比為 2%。後者主要考慮震央距離上游變電所較遠(震度較小)，造成上游變電所受損較輕微；但是距離下游變電所較近(震度較大)，造成下游變電所受損較嚴重的情境。

通訊基地台因停電而失效數量計算流程如圖 3.4，依此邏輯計算每個行政區因停電而失效之基地台數量。最後將地表振動造成基地台

受損數量，加上基地台因停電而失效數量，得到各行政區基地台無法運作之數量。

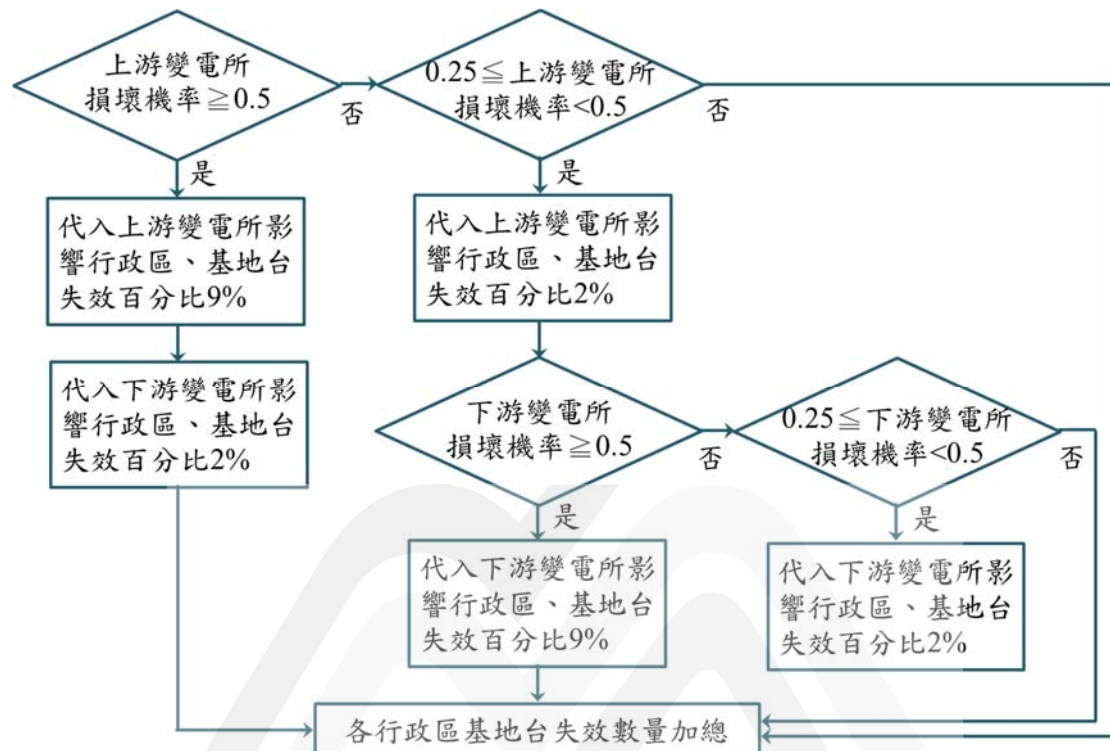


圖 3.4、通訊基地台因停電而失效數量計算流程

## 第四章 地震案例分析及防災規劃應用

運用前章所述方法，以 2016 年高雄美濃地震及 2018 年花蓮地震進行案例分析，將通訊基地台受損分析結果與災情查報比較驗證；此外，配合 2020 年國家防災日地震演練，提供通訊基地台受損評估結果協助緊急通訊恢復作業規劃。

### 4.1 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震案例分析

高雄美濃地震(規模 6.6、深度 14.6 km)是近年來災情較嚴重之地震，共造成 117 人死亡、546 人受傷；除此之外，地震導致許多維生設施受損，包括 173,084 戶停電、143 個基地台無法運作等(內政部，2016)。圖 4.1 為實測地表加速度分布，加速度大於 250 gal 之地區(紅色標示)主要位於臺南市，以及雲林縣、嘉義縣、南投縣交界處。

根據實測地表加速度分布，分析通訊基地台受地表振動受損風險如圖 4.2，可看出基地台受損中風險地區(橘色標示)和地表振動較大地區(圖 4.1 紅色區域)大致對應，計算所得受地表振動影響之基地台有 31 個。

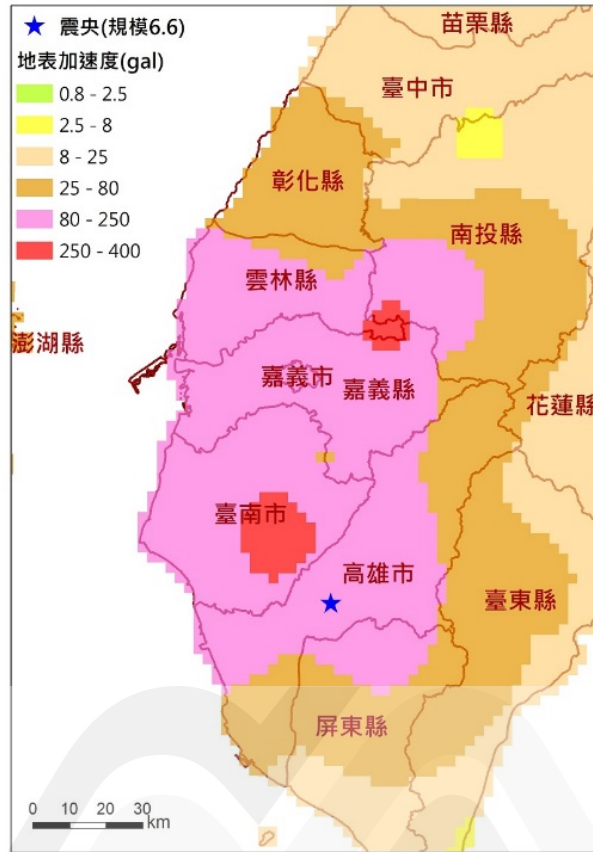


圖 4.1、2016 年高雄美濃地震實測地表加速度分布

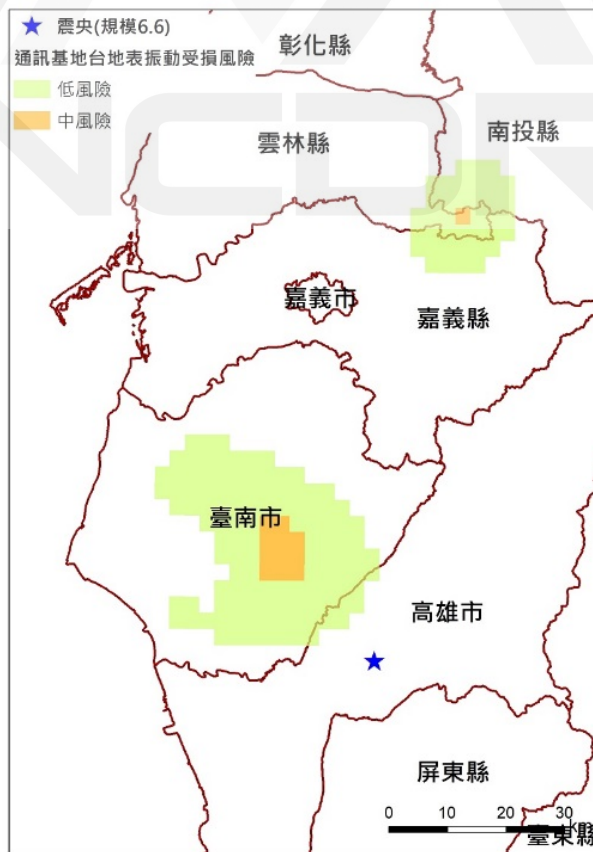


圖 4.2、2016 年高雄美濃地震通訊基地台受地表振動損壞分析

此外，由 TERIA 評估變電所受損情形如圖 4.3，包括龍崎超高壓變電所(E/S)、南科超高壓變電所(E/S)為中損壞風險，山上、路北、仁武、嘉民等一次變電所(P/S)為低損壞風險；進一步考量變電所上下游供電網絡關係，評估這些變電所損壞造成電力中斷之影響行政區如藍色標示，受電力影響而無法運作之基地台共 110 個。



圖 4.3、2016 年高雄美濃地震變電所受損及供電網絡分析

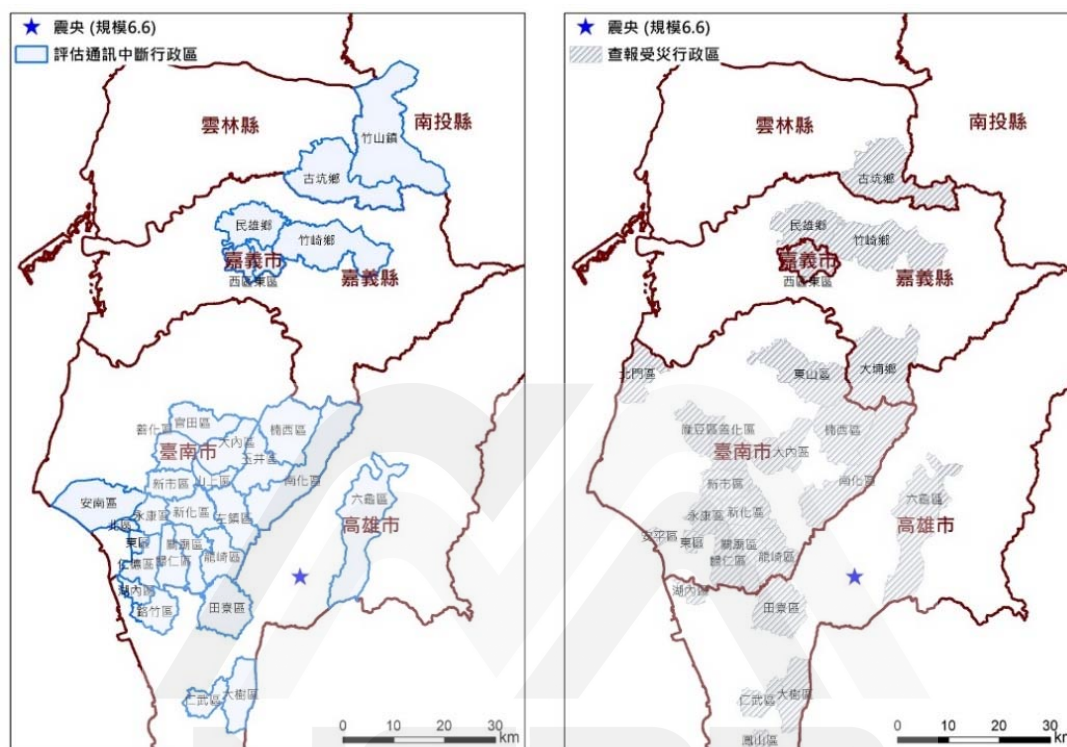
綜合兩項主要致災因素，評估基地台可能受損之數量共 141 個，各行政區評估結果如表 4.1，而災情查報資料為 143 個，二者相當接近。

表 4.1、2016 高雄美濃地震評估各行政區基地台受損數量

縣市	鄉鎮市區	基地台受損數量
臺南市	山上區	7
臺南市	大內區	8
臺南市	左鎮區	5
臺南市	新市區	15
臺南市	龍崎區	9
臺南市	善化區	10
臺南市	關廟區	5
臺南市	新化區	11
臺南市	東山區	1
臺南市	楠西區	1
臺南市	玉井區	1
臺南市	南化區	4
臺南市	柳營區	1
臺南市	安南區	6
臺南市	中西區	2
臺南市	永康區	9
臺南市	仁德區	4
臺南市	東區	4
臺南市	新營區	2
臺南市	麻豆區	1
臺南市	官田區	1
臺南市	歸仁區	1
臺南市	下營區	0
臺南市	學甲區	0
臺南市	北門區	0
高雄市	田寮區	1
高雄市	六龜區	2
高雄市	大樹區	4
高雄市	路竹區	2
高雄市	湖內區	1
高雄市	仁武區	4
嘉義市	東區	6
嘉義市	西區	6
嘉義縣	竹崎鄉	1
嘉義縣	民雄鄉	4
南投縣	竹山鎮	0
雲林縣	古坑鄉	2
合計		141



此外，對照評估通訊中斷影響行政區(藍色標示)及災情查報受災行政區(灰色斜線標示)如圖 4.4，可看到二者大致相符，評估結果亦可適切掌握可能通訊中斷之空間分布。



(a)評估通訊中斷行政區

(b)查報通訊受災行政區

圖 4.4、2016 年高雄美濃地震評估通訊中斷行政區與災情查報資料之比較

## 4.2 2108 年 2 月 6 日花蓮地震案例分析

花蓮地震(規模 6.2、深度 6.6 km)造成 17 人死亡、295 人受傷，還有部分維生設施受損，包括 2,008 戶停電、70 個基地台運作受到影響等(內政部，2018)。根據中央氣象局地震觀測資料，繪製本次地震地表加速度分布如圖 4.5，其中花蓮市及秀林鄉局部地區地表加速度大於 400 gal(紅色標示)，吉安鄉、壽豐鄉、新城鄉及宜蘭縣南澳鄉部分地區之地表加速度為 250 gal 至 400 gal(粉紅色標示)。

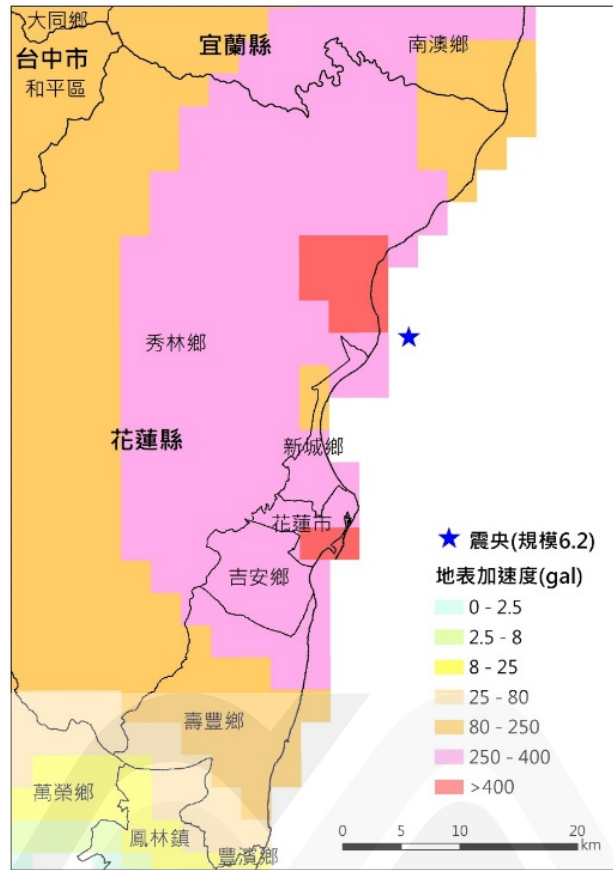


圖 4.5、2018 年花蓮地震實測地表加速度

以實測地表加速度分析通訊基地台受損風險如圖 4.6，可看出基地台受損中風險地區(橘色標示)主要落在地表振動較大地區，評估受地表振動影響之基地台為 37 個。

在電力中斷影響部分，由 TERIA 評估變電所受損情形如圖 4.7，勝安配電變電所(D/S)為中損壞風險、花蓮一次配電所(P/S)為低損壞風險、和仁配電變電所(D/S)為低損壞風險。運用本研究所建立之變電所上下游供電網絡關係，評估這些變電所失效所影響之行政區如藍色標示，電力中斷影響基地台運作之數量為 30 個。

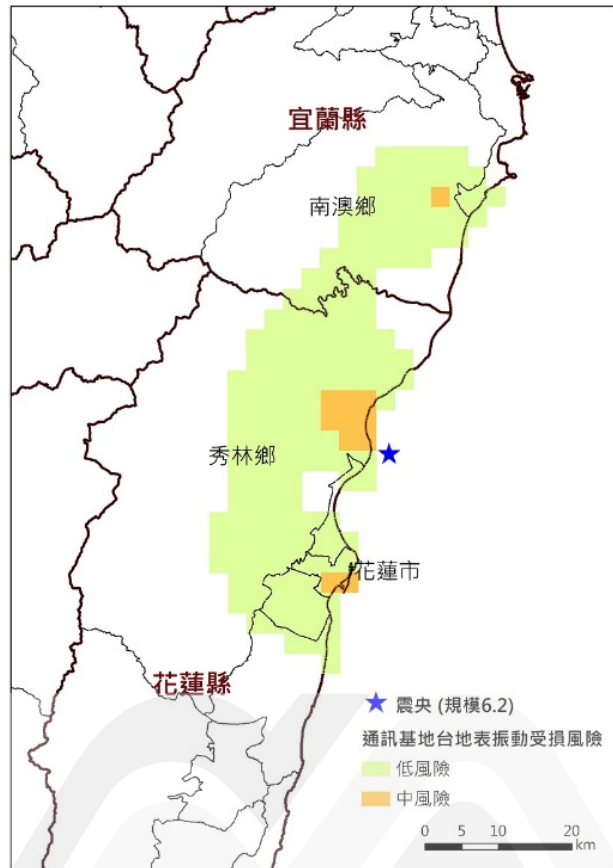


圖 4.6、2018 年花蓮地震通訊基地台受地表振動損壞分析

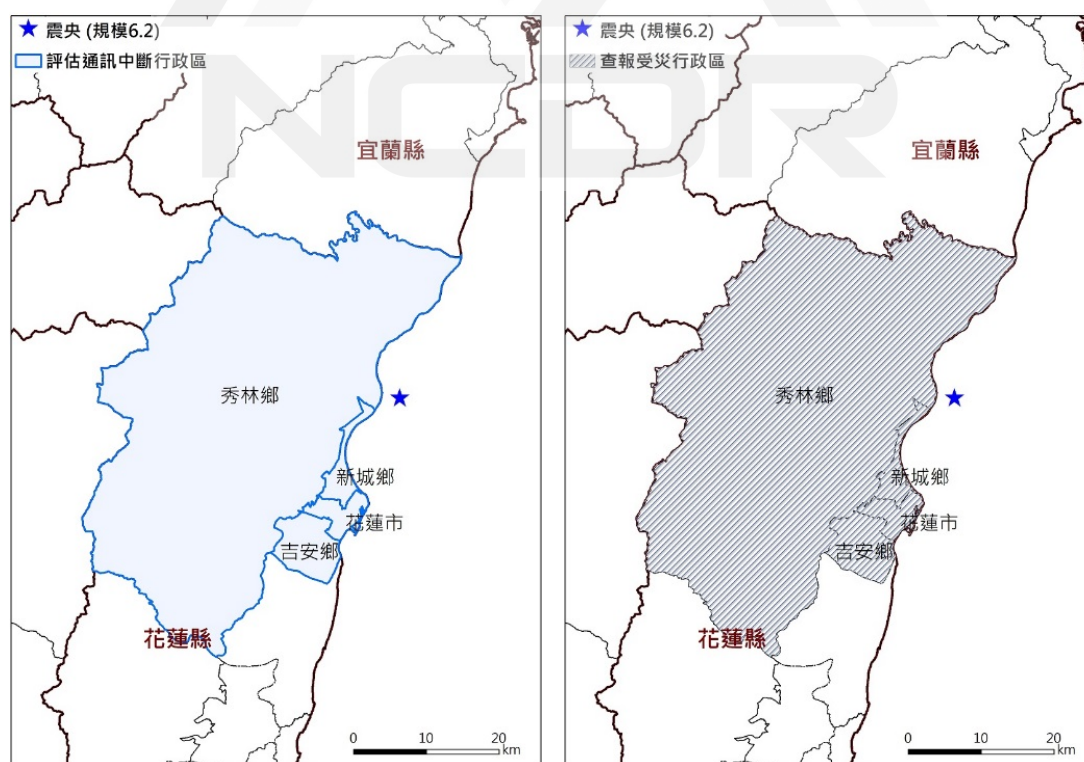


圖 4.7、2018 年花蓮地震變電所受損及供電網絡分析

綜合兩項評估所得，受影響基地台共 67 個，評估各行政區基地台受損數量如表 4.2，而災情查報資料為 70 個，二者相當接近。比較評估結果和災情查報受災行政區如圖 4.8，二者影響範圍一致，評估結果可有效掌握可能通訊中斷之空間分布。

表 4.2、2018 年花蓮地震各行政區基地台受損數量

縣市	鄉鎮市區	基地台受損數量
花蓮縣	花蓮市	56
花蓮縣	秀林鄉	6
宜蘭縣	南澳鄉	0
花蓮縣	吉安鄉	3
花蓮縣	新城鄉	2
合計		67



(a) 評估通訊中斷行政區

(b) 查報通訊受災行政區

圖 4.8、花蓮地震評估通訊中斷行政區與災情查報資料之比較

### 4.3 2020 年國家防災日地震演練規劃應用

內政部召開學者專家會議設定 2020 年國家防災日地震演練情境為中洲構造規模 6.9 地震，根據「大規模地震情境模擬案<sup>1</sup>」震源情境小組提供三維地動模擬在工程基盤之地動反應(加速度、速度等)，本中心考慮場址效應計算由工程基盤傳播至地表之地動反應，圖 4.9 為地表加速度分布；最大地表加速度達到 908 gal，地表加速度超過 400 gal 的地區涵蓋臺南市、高雄市、嘉義縣轄內共 39 個行政區。除此之外，採用 TERIA 平台分析地震造成建物破壞、人員傷亡、道路、橋梁、電力、自來水、通訊設施等項目之損壞數量及分布，提供給內政部規劃地震演練各項推演議題之處置措施參用。

根據地表加速度分布，考慮地表振動及電力中斷兩項因素，推估各行政區可能受損之通訊基地台數量，除以各行政區基地台總數，得到基地台受損百分比，評估結果如圖 4.10。評估共有 5,483 個基地台受損，以臺南市受損佔大多數(5,069 個)；各行政區基地台受損百分比超過 75%(紅色標示)的地區主要位於臺南市 19 個行政區，這些行政區之通訊基地台嚴重受損，亟需緊急通訊復原。

---

<sup>1</sup> 依據 2017 年 5 月 11 日第 36 次中央災害防救會報決議辦理，科技部主導震源情境小組及災損推估小組，內政部主導因應對策小組。震源情境小組(由學者專家、中央氣象局、中央地質調查所組成)設定震源參數並進行三維地動模擬，災損推估小組(由本中心與國家地震工程研究中心組成)根據地動模擬結果進行各項災損推估，因應對策小組(由內政部、相關部會、縣市政府組成)根據災損推估結果研擬防災因應對策。

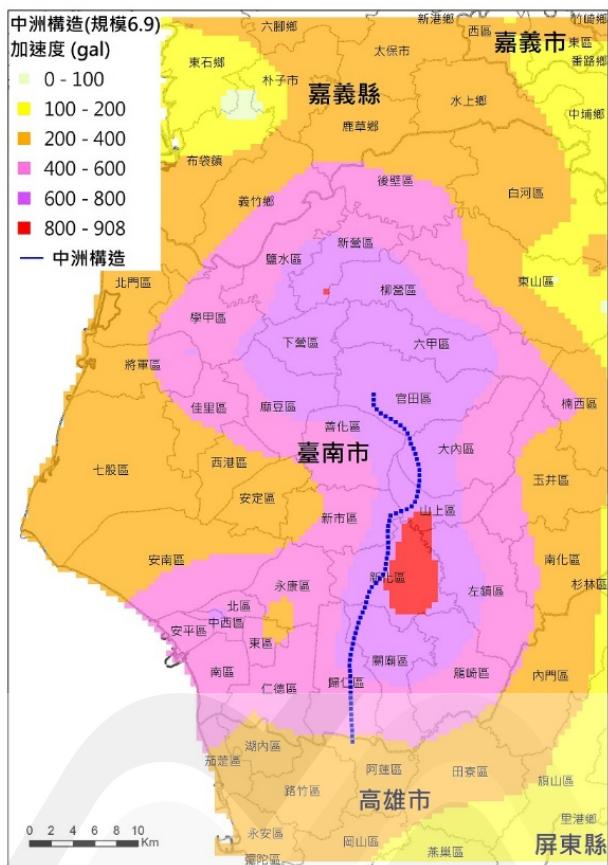
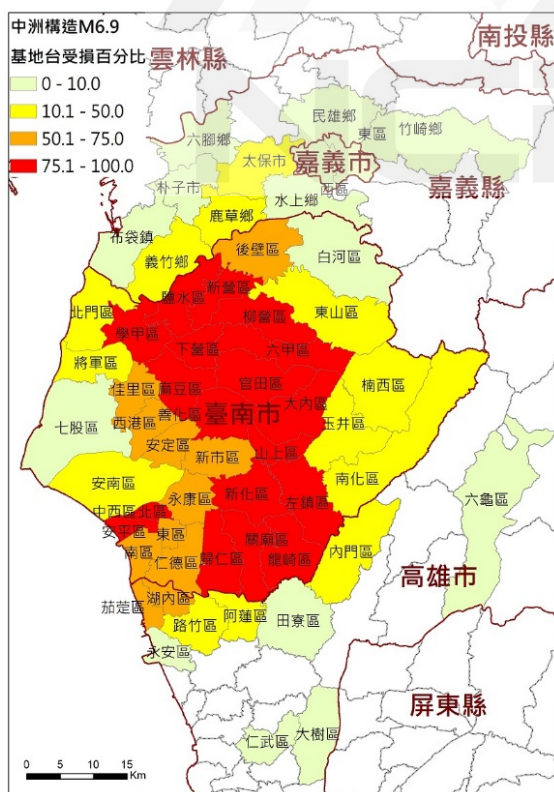


圖 4.9、中洲構造規模 6.9 地震模擬之地表加速度分布



(a)基地台受損百分比

縣市	基地台受損數量
臺南市	5,069
高雄市	234
嘉義縣	158
嘉義市	22
合計	5,483

(b)各縣市基地台受損數量

圖 4.10、中洲構造規模 6.9 地震模擬之通訊基地台受損評估結果

本年度國家防災日於臺南市都會公園舉行，9月21日上午9:21啟動之後，總統蒞臨現場視導，由內政部報告地震演練情境(如圖4.11)。之後展開各項推演議題之操作演練，包含支援部隊進駐救災據點演練、建立緊急資通訊演練、大規模震災人命搜救指管演練、搜索及救援(ASR)作業演練、後勤支援演練、國家級災難醫療救護隊災害緊急醫療應變實作演練、環境事故專業技術小組戰力展示等(內政部，2020)。



(a)總統視導

(b)內政部報告演練情境

圖 4.11、國家防災日地震演練啟動

根據通訊設施受震損壞評估結果，震後許多行政區可能皆處於通訊中斷狀態，亟需緊急通訊復原，因此緊急資通訊演練首先架設救災指揮通信平台車(如圖4.12)，並調度電信業者建立災區行動通訊系統。然後進行衛星電話、視訊、資料傳輸、應變管理資訊雲端(Emergency Management Information Cloud, EMIC)操作演練，及消防、國軍整合視訊演練等項目，結合消防單位、國軍及民間單位資源共同投入緊急通訊系統恢復作業。



(a)救災指揮通信平台車



(b)五大電信業者行動通訊車



(c)衛星電話



(d)消防、國軍整合視訊連線

圖 4.12、國家防災日地震演練之建立緊急資通訊演練

NCDR



## 第五章 結論與未來研究方向

### 5.1 結論

1. 本研究考慮地表振動及電力中斷兩項因素，建立通訊基地台受震損壞評估模式及流程，並經由 2016 年高雄美濃地震及 2018 年花蓮地震之案例驗證，評估結果可適切掌握通訊基地台受損數量及空間分布。
2. 供電網絡分析目前已完成臺南市、高雄市北部、嘉義市、嘉義縣南部、花蓮縣等地區，將以跨縣市之大分區方式，逐步建立其他區域之供電網絡。

### 5.2 未來研究方向

1. 未來若有較大規模地震造成通訊中斷事件，將持續以實際地震案例校驗分析模式。
2. 本年度完成中洲構造規模 6.9 地震情境模擬與各項設施損壞評估，未來將配合中央災害防救會報決議「大規模地震情境模擬案」之推動，於臺灣各地區挑選可能影響較大的斷層進行地震情境模擬，評估可能受影響基地台數量及分布，提供相關單位防災規劃參考。

## 參考文獻

- Agrawal, D. P. and Zeng, Q. A. (2016). *Introduction to wireless and mobile systems*. Boston: Cengage Learning.
- Giovinazzi, S., Austin, A., Ruiter, R., Foster, C., Nayyerloo, M., Nair, N.-K. and Wotherspoon, L. (2017). Resilience and fragility of the telecommunication network to seismic events: evidence after the Kaikōura (New Zealand) Earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 50, 2, 318-328.
- Federal Emergency Management Agency (2013). *Earthquake Model, Hazus-MH 2.1 Technical Manual*, Department of Homeland Security, USA.
- International Telecommunication Union (2013). *ITU handbook on telecommunication outside in areas frequently exposed to natural disasters*.
- Leelardcharoen, K. (2011). *Interdependent response of telecommunication and electric power systems to seismic hazard*. Ph. D. Dissertation. Georgia Institute of Technology. USA.
- Lu, M., Li, H., Wen, Z., Tian, J., Xiong, L., Du, X., Yu, A. (2008). The damage characteristic of mobile communication system in the Great Wenchuan Earthquake. *Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Tang, A. K. (1998). Factors Affecting Congestion (Change of Traffic Pattern) of Telecommunication Systems and Networks. *The Workshop on Performance Criteria for Telecommunication Services under Earthquake Conditions*, Stanford University, Stanford, California.
- 內政部(2016)。0206 高雄美濃震災中央災害應變中心總結報告。
- 內政部(2018)。0206 花蓮震災中央災害應變中心總結報告。
- 內政部(2020)。109 年國家防災日大規模震災消防救災動員演練實施計畫。

吳子修、黃明偉、吳秉儒、陳秋雲、蘇昭郎、李中生、柯孝勳(2014)。大臺北地區大規模地震衝擊情境之災害潛勢與建物人員災損分析。國家災害防災科技中心技術報告，NCDR 102-T14。

劉淑燕、吳佳容、李沁妍、鄧敏政、李洋寧、李中生、柯孝勳、簡賢文(2014)。大臺北地區大規模地震衝擊情境分析報告II：道路系統、水電設施、重要設施、情境綜整。國家災害防救科技中心技術報告，NCDR 102-T15。



## 通訊基地台地震衝擊評估技術研發

---

發行人：陳宏宇

出版機關：國家災害防救科技中心

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 109 年 12 月

出版年月：中華民國 110 年 01 月

版 次：第一版

非賣品



地址：23143新北市新店區北新路三段200號9樓

電話：++886-2-8195-8600

傳真：++886-2-8912-7766

網址：<http://www.ncdr.nat.gov.tw>

NCDR 109-T13

運輸系統災害衝擊鏈評估模式建置：

以道路系統為例

Development a method for disaster impact chain  
evaluation on transportation systems : pilot study for  
evacuation roadway system

---



行政法人

國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center  
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 110 年 01 月



NCDR 109-T13

運輸系統災害衝擊鏈評估模式建置：  
以道路系統為例

Development a method for disaster impact chain  
evaluation on transportation systems : pilot study for  
evacuation roadway system

---

許智豪、鄧敏政、柯孝勳、劉淑燕



國家災害防救科技中心  
中華民國 110 年 01 月





## 中文摘要

運輸系統於都市發展中具重要性，平時為提供居家、工作場所、公共服務、與醫療場所之交通運輸需求；災害發生時，提供災害救援、醫療救助、防救物資運補、民眾避難、設施修復之運輸廊道。然隨著都市更新與擴展，運輸需求增加、交通路網複雜，但也多曝露於天然災害中。在歷史重大震災事件中，1994 年美國洛杉磯北嶺地震、1995 年日本神戶地震、1999 年集集地震、2018 日本北海道地震等，強震後常造成道路與橋梁結構體毀壞、或建物倒塌致交通阻塞情況，不僅衝擊都市機能運作外，亦將導致連鎖性衝擊，救災作業延宕，連帶影響救災作業之進行。

本研究藉災害衝擊鏈觀點，整合間接衝擊與系統相依性，建立震後運輸系統衝擊鏈分析模式，除保留直接損壞分析模式外，優先考量震後建物倒塌衍生道路間接衝擊因素，發展出一套程序方法，研究結果可具體掌握震後道路系統損壞情況，可協助防救災有關設施運作之情資研判，做出合理且有效決策，與政府對設施查報、優先復原工作參考。

關鍵字：運輸系統、震災衝擊鏈、情境模擬、道路阻斷

# ABSTRACT

Transportation systems are vital to urban functions and connect all locations including habitation, workplace, and public units. The systems also have special importance in maintaining infrastructure's operation because all other utilities and transportation-related systems are directly or indirectly linked by transportation network. The road network is crucial in emergency response, after a strong earthquake to offer a safe and efficient transportation for emergency medical teams to help affected residents. High and rapid urbanization in Taiwan has been leading to increasing dependence on the transportation infrastructure. Experiences from worldwide earthquakes highlight that ground transportation systems could be vulnerable. For examples, cases h in the 1994 Northridge, 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, and 2018 Hokkaido earthquakes, roads and bridges in urban areas were severely damaged by ground motion. Additionally, in areas with high building density and high intensity, estimating the risk of road blockage due to collapsed buildings is of particular interest.

This study analyzes both direct and indirect damages and caused by cascading impacts when an earthquake hits urban transportation systems and develops a method of impact-chain assessment. This method can, in turn, be used to develop an earthquake disaster response mechanism. This is conducted by simulating earthquake disaster scenarios and then evaluating the risk of road blockages. The results of this study can assist the authorities in making better decisions regarding transportation system management in the event of an earthquake.

**Keywords:** Transportation System, Seismic Impact Chain, Scenario Simulation, Road Blackout

# 目錄

第一章 緒論.....	7
1.1 研究背景 .....	7
1.2 研究目的 .....	8
第二章 文獻回顧 .....	9
2.1 交通運輸災害文獻 .....	9
2.2 運輸系統衝擊傳播理論 .....	13
2.3 道路系統(含橋梁)直接損壞 .....	17
2.4 建物倒塌引起道路阻斷 .....	17
第三章 研究方法 .....	20
3.1 分析架構 .....	20
3.2 道路系統資料庫 .....	22
3.3 道路、橋梁地振動損壞分析模組 .....	25
3.4 建物倒塌引起道路阻斷分析模組 .....	29
第四章 實務案例應用 .....	38
4.1 背景說明 .....	38
4.2 一階衝擊：道路、橋梁直接損壞分析 .....	40
4.3 一階衝擊：建物倒塌引起道路阻斷分析 .....	42
4.4 二階衝擊：老舊街道救援道路衝擊 .....	46

4.5 二階衝擊：災區醫療救援道路衝擊 .....	49
4.6 成果討論 .....	51
第五章 結論與建議 .....	52
5.1 結論 .....	52
5.2 建議 .....	53
參考文獻.....	54
附錄 運輸系統災例回顧 .....	59
美國北嶺地震(Northridge Earthquake) .....	59
日本神戶地震(Kobe Earthquake) .....	63
台灣 921 集集地震(Chi Chi Earthquake) .....	67
日本北海道地震(Hokkaido Eastern Iburi Earthquake) .....	70

## 圖目錄

圖 1、基礎設施相依關聯圖 .....	15
圖 2、地震基礎設施實體損壞影響圖 .....	16
圖 3、地震基礎設施功能影響圖 .....	16
圖 4、道路系統震災衝擊影響模式 .....	21
圖 5、本研究之發展之道路系統震災衝擊鏈 .....	22
圖 6、災後道路系統(含橋梁)之供需架構.....	23
圖 7、橋梁易損性曲線-HWB1.....	28
圖 8、橋梁/道路衝擊評估流程 .....	28
圖 9、建築物倒塌密度面積 .....	30
圖 10、建物密度相對關係 .....	32
圖 11、完整道路可通行寬度示意圖 .....	33
圖 12、建物碎屑評估模式 .....	35
圖 13、建物倒塌引起道路阻斷分析流程 .....	37
圖 14、台南市地震動分布(中洲構造 M6.9).....	39
圖 15、台南市區道路、橋梁直接損壞道路封閉風險分布 .....	41
圖 16、台南市建物倒塌(棟數)分布.....	43
圖 17、台南市道路縱向阻斷分布 .....	44
圖 18、台南市道路橫向阻斷分布 .....	45

圖 19、台南市道路阻斷聯集結果分布 .....	45
圖 20、台南市中西區建物特性調查 .....	47
圖 21、災區老舊街屋道路阻斷衝擊評估 .....	47
圖 22、災區老舊街屋道路阻斷衝擊評估(中西區).....	48
圖 23、災區醫療救災外部救援道路、橋梁阻斷衝擊 .....	50
圖 24、災區醫療救災外部救援道路、橋梁阻斷衝擊(中西區) .....	50
圖 25、I5 州際公路損毀坍塌 .....	60
圖 26、I5 與 SR-14 州際公路封閉交通壅塞.....	61
圖 27、道路損壞維生管線破裂道路淹水、有害氣體洩漏 .....	61
圖 28、建物倒塌大量碎屑散落 .....	62
圖 29、神戶地震公路橋梁損壞分布 .....	65
圖 30、阪神高速公路坍塌 .....	65
圖 31、神戶港受土壤液化道路損壞塌陷 .....	66
圖 32、建物嚴重倒塌起火 .....	66
圖 33、公路橋梁嚴重毀損下落 .....	68
圖 34、集集鐵路線鐵軌隆起變形 .....	69
圖 35、南投民宅倒塌道路損壞 .....	69
圖 36、北海道地震災情分布 .....	71
圖 37、路口號誌停電交通管制 .....	72





## 表目錄

表 1、歷年重大地震災害下運輸系統受災情況 .....	12
表 2、道路系統資料來源 .....	24
表 3、道路系統於防災、運輸需求比較表 .....	24
表 4、道路易損性參數 .....	26
表 5、典型橋梁分類示例(單垮、多垮簡支橋).....	26
表 6、典型橋梁(單垮、多垮簡支橋)地振動之易損性參數 .....	27
表 7、典型橋梁(單垮、多垮簡支橋)永久位移之易損性參數 .....	27
表 8、台南市橋梁嚴重毀損數量統計(座).....	40
表 9、美國北嶺地震災情綜整 .....	60
表 10、日本神戶地震災情綜整 .....	64
表 11、台灣 921 集集地震災情綜整 .....	68
表 12、日本北海道地震災情綜整 .....	71

# 第一章緒論

## 1.1 研究背景

由歷史地震經驗顯示，震後道路系統較脆弱，位於都市中的運輸系統損壞後會產生短期和長期的影響，一般來說，災時道路毀損後，需較長時間來修復，故需規劃臨時替代道路維持通行，不僅會讓災害救援延宕外，亦會讓都市運輸機能與經濟商業活動停擺，在歷史地震災害事件中，1994 年美國北嶺(Northridge)地震；1995 年日本神戶(Kobe)地震；1999 年台灣 921 集集(Chi Chi)地震、與 2018 日本北海道(Hokkaido Eastern Iburi)地震，災害不僅造成人員傷亡外，大規模維生基礎設施(電力、自來水、天然氣中斷)，與運輸系統遭毀損，嚴重衝擊都市機能運作。

地震災害後，因應緊急應變作業進行，常封閉救援道路和疏散道路，是確保迅速應變管理，適當作為緊急應變之用，可讓人員傷亡、經濟損失降至最低。在災害風險管理重要因子中，應變中心、醫療院所、運輸系統，需將道路阻斷納入分析考量，乃因震後可能造成道路直接損壞、與間接阻斷影響，前者常為地表振動、土壤液化、或斷層破裂導致，後者為外在環境坍塌產生碎屑落下，造成道路空間縮減無法通行封閉，如建物倒塌、山崩地滑。台灣地震發生頻繁，對於災害

防治及應變處置需重視，目前對於道路受地振動損壞，可參考模式分析求得，然而對間接道路封閉情況納入分析非常有限，倘若災害發生後較難掌握設施失效對救災、復原作業的關聯與重要性，本研究藉考量系統受災特性，建立運輸系統衝擊鏈評估模式，應用於防救災工作上，乃是首要工作目標。

## 1.2 研究目的

根據災害管理觀念，震後優先採取緊急措施為醫療救援、人員撤離、物資運補、基礎設施搶修等，各環節皆和運輸系統相關。震後道路服務可依功能區分為四等級，(1)人車可通行、(2)車可通行、(3)僅人員可通行、與(4)完全封閉，強震後因應救災作業進行，道路運輸的需求量大幅增加，但道路系統在強地動作用下，可能造成不同程度的破壞，強震區的道路、橋梁可能封閉，間接影響救援作業效能與服務。本研究目的是藉災害衝擊鏈觀點，整合直接損壞與間接衝擊，建立震後運輸系統衝擊鏈分析模式，利用中洲構造規模 6.9 地震情境，進行運輸系統震災衝擊鏈分析，可快速評估災區救災道路損壞情況，以及重要設施外部運輸系統損失風險，可作政府對設施查報、優先復原工作參考，另可協助防救災有關設施運作之情資研判，做出合理且有效決策，提高救災執行效率。

## 第二章文獻回顧

### 2.1 交通運輸災害文獻

#### (一) 運輸系統災害定義

運輸系統提供都會平時多元性功能，主要功能為提供車輛通行、街廓步行廊道、及災時救援使用。對都市災害管理而言，道路系統具人員避難、火災蔓延遮斷、物資輸送、消防救援等功能，然而，在震災發生後，都市路網常會後強地動作用產生毀損，無法發揮功能，本研究對道路系統震災損害因子與災害特性進行彙整，有助於進行運輸機能衝擊分析。根據地震災害特性，道路系統受影響類型主要可分為直接損壞與間接災害，以下對兩類型進行討論：

#### ● 道路系統直接災害

直接損壞主要為強地動作用讓道路橋梁主體受損，功能無法正常使用，震後常見的直接災害如下：

1. 道路斷裂。
2. 高架道路或橋梁毀損落下。
3. 鐵路彎曲起伏、變形。
4. 土壤液化造成道路下陷。

## ● 道路系統間接災害

間接災害主要受外部環境改變，影響道路系統之使用(如建物倒塌、邊坡土石滑落)，間接造成道路阻斷封閉。

1. 地振動引起邊坡地滑掩埋道路。
2. 建物嚴重損壞碎屑散落道路無法正常通行。
3. 自來水、天然氣管路斷裂導致路面淹水、有害氣體洩漏情形，道路緊急封閉管制。
4. 水壩、蓄水池嚴重毀壞引起道路災害。

## (二) 運輸系統災害特性

重大歷史地震事件顯示，導致運輸系統毀損對災區之救災短期發展和長期經濟影響甚鉅，不僅影響災害救援行動外，震後因建築物倒塌、維生設施受損，將發生大規模電力、自來水、天然氣中斷；道路系統損壞阻斷，設施修復時程將延宕。過去幾次地震中 1994 年美國洛杉磯北嶺(Northridge)地震；1995 年日本神戶(Kobe)地震；1999 年台灣 921 集集(Chi Chi)地震；2018 年日本北海道(Hokkaido Eastern Iburi)地震，對交通設施及交通結構毀損甚多，路運部分，公路、橋梁開裂損壞、大眾運輸則改道開闢新路線，港灣設施、高速鐵路破壞中斷，對經濟財產則造成巨大損失。本研究對歷史重大地震災害紀錄進行彙整，

如表 1 所示。運輸系統災害特性重點歸納如下:

- 直接衝擊影響

1. 由地震災害調查結果顯示，直接災害破壞(地振動或液化)與間接破壞(建物結構落下之碎屑、道路下維生管路破裂)，對道路系統的損害程度不同。直接災害破壞較間接破壞影響程度較高，但間接影響對都市平面道路衝擊影響較大。
2. 橋梁為運輸系統中重要的構造物，震後發生災害時，除造成生命財產損失外，更會因交通封閉阻斷重要救災與復原工作的進行。地震事件中顯示，強震下高架橋梁損壞肇因多為地振動或山崩造成道路無法通行。
3. 海運與空運部分，港口設施損壞常為土壤液化現象，造成路面塌陷與破損毀壞，港口貨品無法載運而停擺，間接造成進出口經濟的損失;空運方面，機場破壞多為大廳、塔台發生非結構性損壞，如玻璃破裂或天花板塌陷，或電力中斷、水管破裂漏水等。

- 間接衝擊影響

1. 維生管路破壞(自來水、電力、天然氣)，常受到地振動或土壤液化作用下，管路結構體破裂而損壞，常使都會區運輸系統失效或封閉無法正常使用，及災區修復與復原時程延宕，而觸發二次災害

事件，如 1994 年美國北嶺地震、1995 年日本神戶地震因復電後引起火災事件，造成重大人員傷亡與經濟財產損失後果。

2. 建物倒塌碎屑散落會部分或完全阻斷道路上通行空間，尤其是在建物高密度之地區容易發生，故需考量高架道路、平面道路受建物倒塌影響，綜合分析救災道路受阻之情況。
3. 社會行為方面，震後多數民眾會走出建物並移動至戶外，藉由車輛移動到其他目的地(如辦公地點、避難服務據點等)，交通模式將發生變化，提高交通阻塞可能性。

表 1、歷年重大地震災害下運輸系統受災情況

事件	直接災害	間接道路災害
1994 年 美國北嶺地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路斷裂</li> <li>● 高架道路、橋梁落下</li> <li>● 鐵路彎曲起伏</li> <li>● 土壤液化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 天然氣、電力管線管路破裂大火延燒數天，數萬棟房屋燒毀，道路系統負荷增加。</li> <li>● 市區平面道路遭建物倒塌碎屑阻斷，避難人數突增，市區交通壅塞、救護車與消防車救援作業延宕。</li> <li>● 都市交通路網癱瘓，重創當地工商經濟發展與觀光旅遊業。</li> </ul>
1995 年 日本神戶地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路斷裂</li> <li>● 高架道路或橋梁落下</li> <li>● 鐵路彎曲起伏</li> <li>● 土壤液化(港灣)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 天然氣、電力管路破裂引起大火，建物延燒數天，數萬棟房屋燒毀，救護車與消防車執行救援作業，道路系統忙碌。</li> <li>● 市區平面道路受建物倒塌碎屑阻</li> </ul>

		<p>斷，市區交通壅塞救援作業延宕。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 港口設施土壤液化造成路面塌陷與破損毀壞，港口貨品無法載運停擺，間接造成進出口經濟的損失。</li> </ul>
1999 年 台灣 921 集 集地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路斷裂</li> <li>● 高架道路或橋梁落下</li> <li>● 鐵路彎曲起伏</li> <li>● 土壤液化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 邊坡地滑引起道路損壞封閉，偏鄉地區無法接受其他地區的物資救援。</li> <li>● 市區平面道路受建物倒塌碎屑阻斷，市區交通壅塞救援作業延宕。</li> </ul>
2018 年 日本北海道 地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路斷裂</li> <li>● 高架道路或橋梁落下</li> <li>● 山區道路崩塌</li> <li>● 鐵路彎曲起伏</li> <li>● 土壤液化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大規模停電，造成陸運、空運之交通運輸第一時間全面中斷。</li> <li>● 郊區多處山坡地滑引起道路損壞封閉，阻斷救難物資補給作業。</li> </ul>

## 2.2 運輸系統衝擊傳播理論

### (一) 運輸系統災害傳播性

強震過後，都會區維生機能需求增加，各基礎設施相依程度亦提升，災損狀況可能擴及到各項機能服務，如維生機能、運輸機能等。為減輕災後損害，故需瞭解基礎設施的相依結構，及災害衝擊傳播關係，在基礎設施相互依賴性項目多元，諸如電力、自來水、天然氣、交通運輸、資通訊、金融、醫療、與行政服務等，過去地震歷史經驗顯示，以電力、交通運輸、資通訊系統，在災後相依影響甚鉅，單一



失效將引發連鎖性後果。

運輸系統於都市發展中具重要性，災時為提供災害救援、物資運補、民眾避難之安全廊道，然強震下常造成道路與橋梁直接的嚴重毀壞、或建物倒塌間接引起道路阻斷，交通封閉後果恐讓救災作業產生延宕、或二次火災事故等連鎖性衝擊。在研究文獻中 Rinaldi et al. (2001)、Dudenhoefter et al.(2006)對於系統相依關係與特性關聯進行研究，圖 1 為災後基礎設施相依關聯性，交通運輸相依特性歸納如下：

- 實體損壞傳播：道路系統損壞時，將直接影響交通路網通行及服務能力，如橋梁或道路毀壞造成道路阻斷，阻礙救援任務的執行；運輸設施之道路系統損壞時，港口、機場、鐵路或轉運站將禁止人員和貨物的運輸作業。
- 地理災害傳播：建物倒塌後碎屑散落於緊鄰的道路上；或坡地土石崩塌掩埋道路，將間接阻斷道路可使用的空間。自來水或天然氣管路毀損；交通路口號誌失效妨礙交通，影響道路交通環境。
- 功能需求傳播：醫療院、消防或警政單位的救援車輛，災後衍生大量需求；港口、鐵路或機場航站大樓，貨物運輸需求增加，將引起都市交通路網阻塞或崩潰情況。

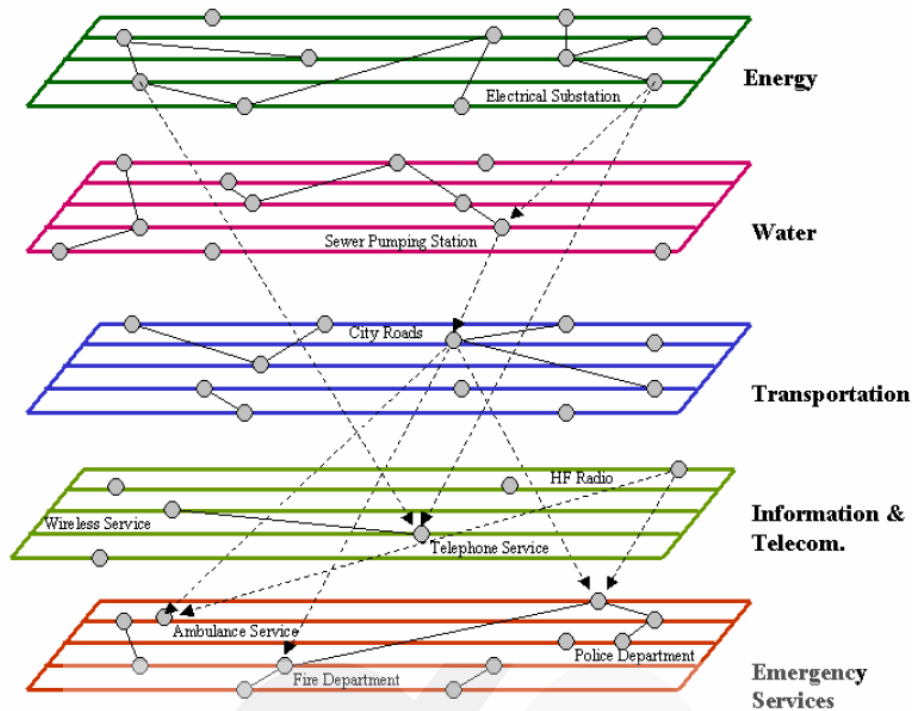


圖 1、基礎設施相依關聯圖

(資料來源:Dudenhoeffer et al. 2006)

## (二) 運輸系統損失影響性

Mai TSURUTA et al. (2008) 將理論應用於實際災害調查，彙整震後維生設施失效，並透過影響圖的繪製，利用線段相互連結，建立設施相互影響關係，圖上各節點表示各自獨立的基礎設施，影響關係利用弧線箭號表示。圖 2 為根據 1995 年日本神戶地震災害調查結果，繪製設施實體損壞影響圖，結果顯示共有八項基礎設施在震後實體損壞，其中公路橋梁與鐵路為肇始事件，損壞後影響他項基礎設施。圖

3 為設施功能失效影響圖，電力乃功能影響傳播的肇始事件，失效後將間接影響運輸系統、維生系統的營運。

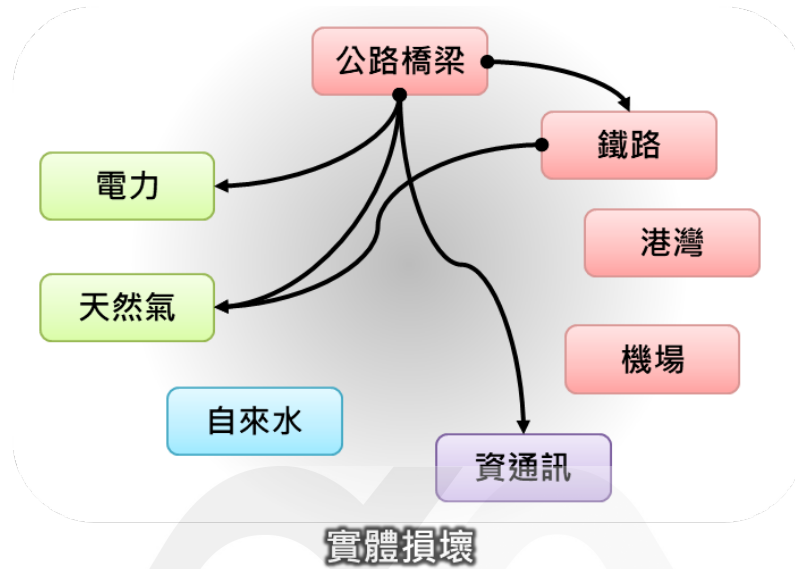


圖 2、地震基礎設施實體損壞影響圖  
(根據 Mai TSURUTA et al.2008 資料編修)

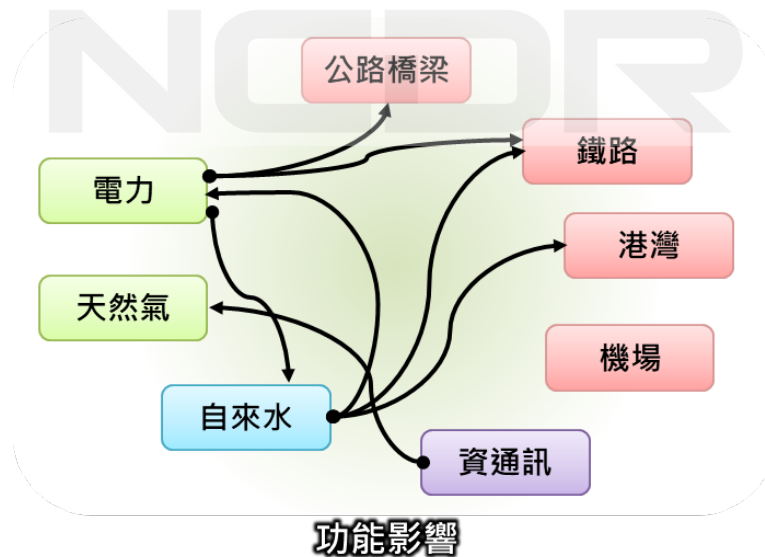


圖 3、地震基礎設施功能影響圖  
(根據 Mai TSURUTA et al.2008 資料編修)

## 2.3 道路系統(含橋梁)直接損壞

在道路系統直接損壞評估研究文獻中，以 Hazus-MH MR5(2010)與 SYNER-G(2011)的研究成果為主，報告中採易損性曲線(Fragility Curve)分析在不同地動下，設施達到或超過特定損壞狀態的機率。道路分析時需要的重要資料包含，道路(路段)座標、道路等級、道路結構等資料分類，再利用易損性分析將可輸出道路損壞機率，通常直接損壞評估模式在短時間內可得到初步結果，但缺點是未考量道路間接損害與運輸網絡影響。

## 2.4 建物倒塌引起道路阻斷

震後道路受阻斷的程度為車輛與人員可否通行的指標，當阻斷程度愈高時，表示道路不可通行的機率高，除結構直接損壞外，一般可利用斷層距離、建物倒塌情況來分析道路阻斷程度。其中震後道路可能受緊鄰的建物倒塌碎屑落下而影響通行，尤其是在建物倒塌高密度的區域，故進行都市防災規劃時，需要考量道路間接災害影響，減少人員傷亡與縮短救援時間。

在震後道路脆弱性或道路阻斷風險分析方面，過去國外的研究學者皆有進行相關的研究與成果，其中建物倒塌引起道路阻斷亦為重要研究課題，本研究以下將彙整重要的研究內容。

Argyroudis et al.(2005) 提出一套可用於都市道路網絡的地震風險評估方法，研究中考慮橋梁直接損壞、建物倒塌間接損壞之災害模式，利用建物模型建構，包含建物高度、道路有效距離、構造形式等，計算出建物毀壞產生的碎屑寬度形狀後，進而建構出建物倒塌數值模型，推估不同樓層數的碎屑平均值。計算建物倒塌分析公式體積量為  $V^* = k \cdot V_0$ ，其中  $V_0$  為原始體積，可由原始建物尺寸計算之(高、寬、長)， $k$  參數假定為 0.3、0.5。碎片寬度計算公式為  $W_d = m \cdot h$ ，其中  $h$  為建物倒塌高度， $m$  假定為 1.0、1.5，結果顯示當建物越高時，原始體積比建物倒塌高度影響更大。該研究中以實際案例分析建物倒塌對通往醫院特定道路影響進行分析與探討。

Tung(2006) 研究中將建物倒塌碎屑阻斷形式區分為二類型，分別為沿道路兩側建物倒塌密度，導致路段被碎屑產生的縱向阻斷，以及倒塌建物緊鄰道路並直接面對一條路線受碎屑百分比之影響之橫向阻斷，爾後再將兩類結果進行整合，提出道路阻斷程度。縱向阻斷分析為採用線性建物倒塌密度分析公式  $P_L = k\sqrt{P_A}$ ，其中  $P_A$  為倒塌密度， $k$  為建物密度與區域單元內部比例關係，橫向阻斷分析為考慮完整碎屑寬度分析公式  $W_{FD} = W_D \times M \times C$ ，其中  $W_D$  為碎屑寬度、 $M$  為建築材料、 $C$  為構造形式。

Pitilakis and Kakderi (2011) 考量道路系統脆弱度因子，並利用地震情境模擬出道路系統(含橋梁)的直接損壞、與建物損壞對於道路間接影響，研究目的乃對於社會經濟脆弱度進行風險分析，分析過程納入災後復原研究結果，推估出整體損失和優先分配順序。

Ertugay et al. (2016) 提出震後道路封閉機率評估模式，分析項目為道路、橋梁直接震損、建物倒塌間接阻斷因子進行分析，評估出道路損壞的機率值，封閉概率得分  $Normalized (e_i) = (e_i - E_{min}) / (E_{max} - E_{min})$ ，其中  $E_{min}$  是所有封閉道路機率中最小值， $E_{max}$  是封閉道路機率最大值。研究結果顯示，道路封閉與道路、橋梁損壞，及倒塌毗鄰道路建物有關。

Toma-Danila(2018) 提出一套考量地振動對道路網絡功能影響評估之方法，道路系統直接損壞常為強地動所造成，可利用結構易損性曲線評估求得，間接破壞為建物倒塌碎屑引起道路阻斷，道路間接影響，利用建物基礎屬性資料(含樓層高度、材料、街道距離等)，結合特定使用道路的寬度等級，推估出建物倒塌產生碎屑寬度，計算公式為：影響區域(公尺) =  $(2/3) \cdot$  樓層數，研究成果採直接損壞與間接影響影響整合之結果，代表道路系統阻斷風險。

## 第三章研究方法

### 3.1 分析架構

震後衝擊鏈關係到的研究課題極為廣泛，如緊急應變議題、避難收容議題、持續營運議題，皆與運輸系統息息相關。本研究希冀藉震災衝擊鏈之概念，進一步分析運輸服務機能影響。日本國土交通省在過去 1995 年日本阪神大地震災害經驗下，推動提升交通路網可靠度作為重要課題與目標，並定義 9 項道路系統安全因子，包括防災道路、建物倒塌、危險管路、交通號誌、橋梁、邊坡落石、土壤液化、即時影像與人流動向，希冀減輕未來天然災害帶來的衝擊影響。

在發展震後衝擊鏈推演模式上，本年度優先考慮道路系統衝擊鏈作為評估項目，主要衝擊影響項目為道路、橋梁，研究中為考量直接與間接災害因子，建置出道路系統震災衝擊評估程序，其中道路與橋梁設施過去研究已分年逐步完成模式建置，故本研究保留直接損壞模式，並優先發展震後建物倒塌引起道路阻斷評估模式，圖 4 為道路系統震災衝擊影響模式。

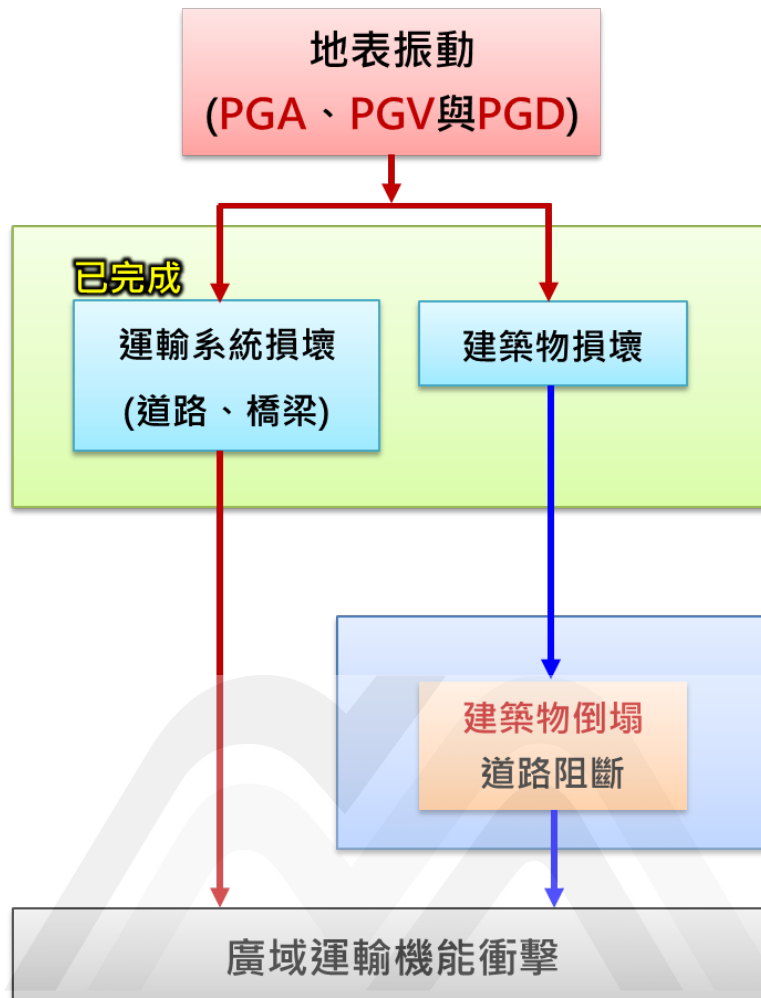


圖 4、道路系統震災衝擊影響模式

根據第二章運輸系統災害特性歸納得知，震後強地動區域之道路、橋梁之基礎設施可能直接毀壞，或受建物倒塌引致道路封閉，除造成運輸機能衝擊外，也可能引起二次災害，如避難收容、醫療救援衝擊等影響。圖 5 為本研究建置道路系統災害衝擊鏈模式，以道路、橋梁、建物倒塌為一階衝擊、醫療救援受阻為二階衝擊之兩大功能進行評估，具體掌握災害引致都市機能運作與相互影響性。



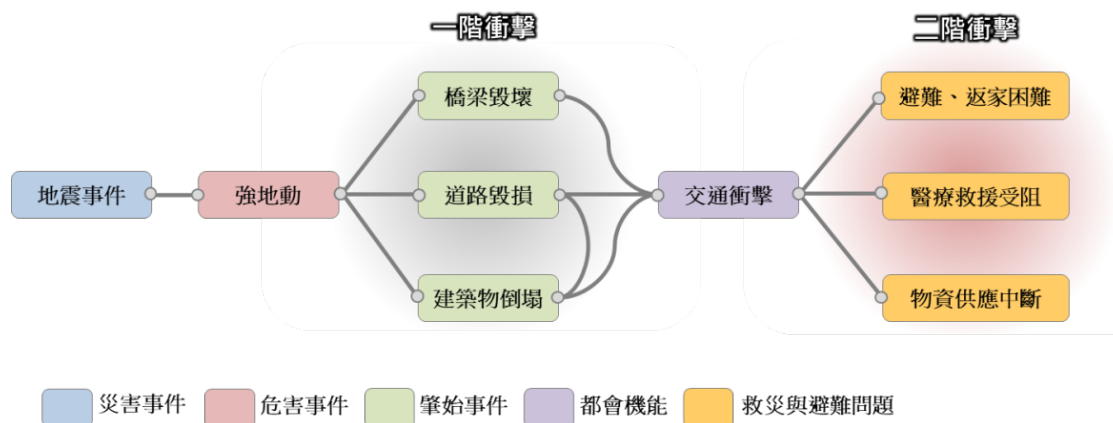


圖 5、本研究之發展之道路系統震災衝擊鏈

### 3.2 道路系統資料庫

彙整研究示範區的道路與橋梁基本資料為研究的重要工作，本研究由國土測繪中心，與橋梁管理資訊系統資料取得道路基本資料(表 2)。其中道路資訊包含空間位置座標、道路等級與道路寬度等；橋梁資訊所需的基本資料包含空間位置、結構形式、建造材料、幾何尺寸(長度、寬度、跨數、跨距、歪斜角)、橋柱與橋台基礎型式、建造年代、設計地表加速度等。本研究考量道路防災功能、運輸功能及行政系統分類，係依據侯鵬曦(2001)所訂定重要聯繫道路篩選準則，對示範區內定義出重要聯繫道路，主要幹道以上之市區道路，包括快速(高架)道路、主要幹道(省道、市區幹線、縣道)，表 3 為道路系統於防災與交通需求比較。

防災道路為救援作業的交通媒介，可提供消防救援、醫療、警政、物資等單位，連接受災後各地區的需求，充分發揮出交通運輸功能。災害預防於救援道路規劃上，目的為適時提供災區即時救援道路外，同時也可提供避難場所的连接道路，包括消防、警政單位前往避難收容所的连接道路，醫療與救援物資單位的運輸通道，圖 6 為災後道路系統(含橋梁)之供需架構。然而災害發生有地點不確定性，故需結合地震情境模擬進行衝擊評估，再憑藉合理規劃防災安全廊道，災時可快速應變有效率的降低生命與財產損失。

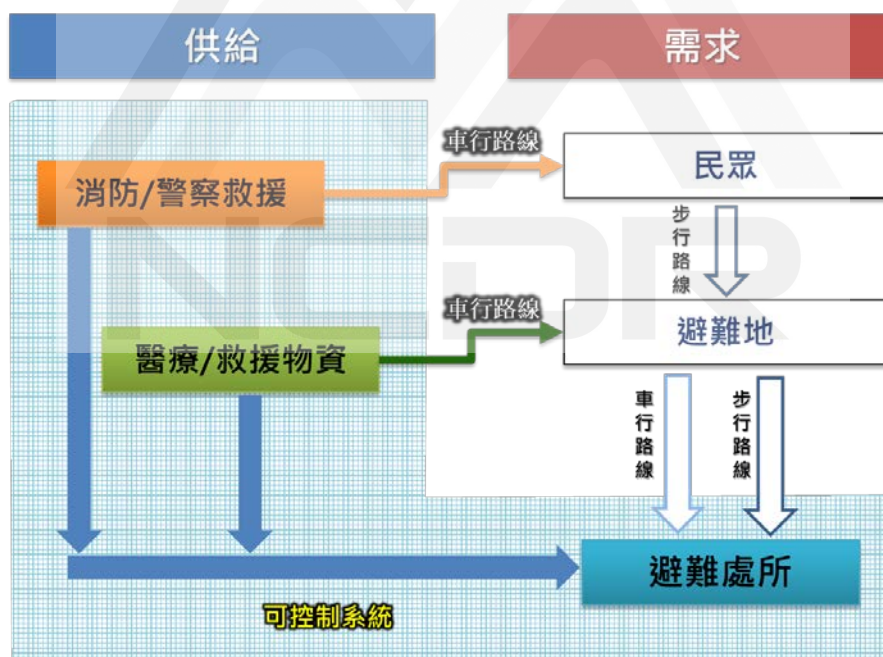


圖 6、災後道路系統(含橋梁)之供需架構(侯鵬曦，2006)

表 2、道路系統資料來源

項目	資料名稱	年份	資料來源
道路	道路基本資料	2019	國土測繪中心
橋梁	國道橋梁	2013-2014	公路總局、縣市政府、運輸研究所(臺灣地區橋梁管理資訊系統)
	縣市轄管橋梁		
	省道公路橋梁		

表 3、道路系統於防災、運輸需求比較表(侯鵬曦，2001)

防災需求			運輸需求	
道路系統	功能說明	路寬	道路系統	功能說明
緊急道路	地區聯絡	大於 20 公尺	快速道路	地區聯絡
救援、輸送道路	救援與物資運送	大於 15 公尺	主要道路	縣市、鄉鎮區間之道路
			次要道路	市區往次要地區之道路
			集散道路	主、次要道路匯集與分散市區車流
避難輔助道路	消防避難道路	避難空間與道路系統聯絡	大於 8 公尺	
	緊急避難道路		小於 8 公尺	地區街道
			地區街道	地區聯絡路線

### 3.3 道路、橋梁地振動損壞分析模組

震後地振動造成地表破壞為道路系統損壞的主要因子，通常用來分析地振動強度參數為地表最大加速度(PGA)，與最大地表位移量(PGD)。本研究進行損壞分析時，道路損壞的影響參數採用PGD，橋梁(含高架道路)的影響參數採用PGA與PGD。結構易損性曲線可用來評估構造物(道路、橋梁)在不同地振動情況下之損害程度機率，橫軸為地動強度(PGA)或位移量(PGD)，縱軸則是損害機率。Hanus-MH MR5(2010)、SYNER-G(2011)將損害狀態分為五個等級，分別為ds1無損壞、ds2輕微損壞、ds3中度損壞、ds4嚴重損壞，與ds5完全損害，表4為本研究模式所使用之道路易損性曲線參數。系統將道路圖層以500m×500m網格分段，並設定地震參數，即可取得網格內各分段道路之PGA與PGD值，爾後再藉易損性曲線計算，就可獲得各分段道路不同損害狀態的機率。

橋梁方面依交通部公路總局(2008)橋梁分類可依跨數、上部結構型式、橋墩型式與耐震設計水準共區分為24類，表5為單跨、多跨簡支橋示例，橋梁損害影響因子有地表震動(PGA)與地表破壞(PGD)兩類，考量兩類破壞形式對橋梁進行易損性曲線評估，表6、7分別為Hanus-MH MR5(2010)橋梁受PGA與PGD引致損壞的易損性參數，易損性曲線如圖7所示。地振動下橋梁與道路損壞分析流程如圖8。

表 4、道路易損性參數  
(Hazus-MH MR5，2010)

道路分級	損壞情況	中值(inch)	變異數 $\beta$
主要道路 (四線道)	輕微損壞	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)	輕微損壞	6	0.7
	中度損壞	12	0.7
	嚴重/完全損壞	24	0.7

表 5、典型橋梁分類示例(單垮、多垮簡支橋)  
(交通部公路總局，2008)

垮數	上部結構	橋墩形式	是否耐震設計	分類
單垮			傳統	HWB1C
			補強	HWB1R
			耐震	HWB1S
多垮	簡支橋	單柱	傳統	HWB2C
			補強	HWB2R
			耐震	HWB2S

表6、典型橋梁(單跨、多跨簡支橋)地振動之易損性參數  
(Hazus-MH MR5, 2010)

類別	$a$	$b$	$m_2$	$\beta_2$	$m_3$	$\beta_3$	$m_4$	$\beta_4$	$m_5$	$\beta_5$
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

表7、典型橋梁(單跨、多跨簡支橋)永久位移之易損性參數  
(Hazus-MH MR5, 2010)

類別	$I_{pgd}$	$m_2$	$\beta_2$	$m_3$	$\beta_3$	$m_4$	$\beta_4$	$m_5$	$\beta_5$
HWB1C	1	25	0.8	50	0.8	100	0.8	200	0.8
HWB1R	1	25	0.8	50	0.8	100	0.8	200	0.8
HWB1S	1	25	0.8	50	0.8	100	0.8	200	0.8
HWB2C	1	12	0.8	24	0.8	48	0.8	96	0.8
HWB2R	1	12	0.8	24	0.8	48	0.8	96	0.8
HWB2S	1	15	0.8	30	0.8	60	0.8	120	0.8

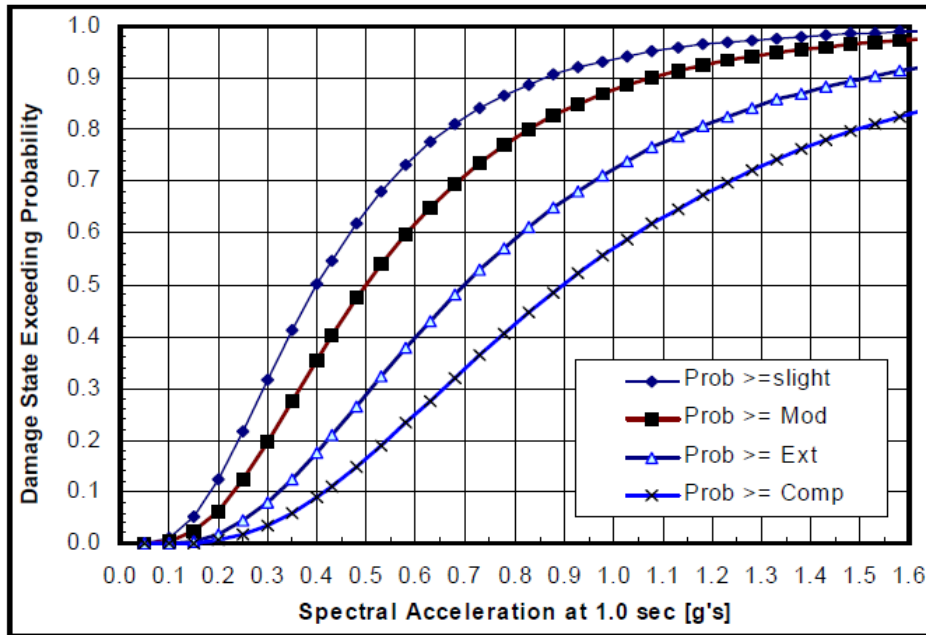


圖7、橋梁易損性曲線-HWB1 (Hazes-MH MR5, 2010)

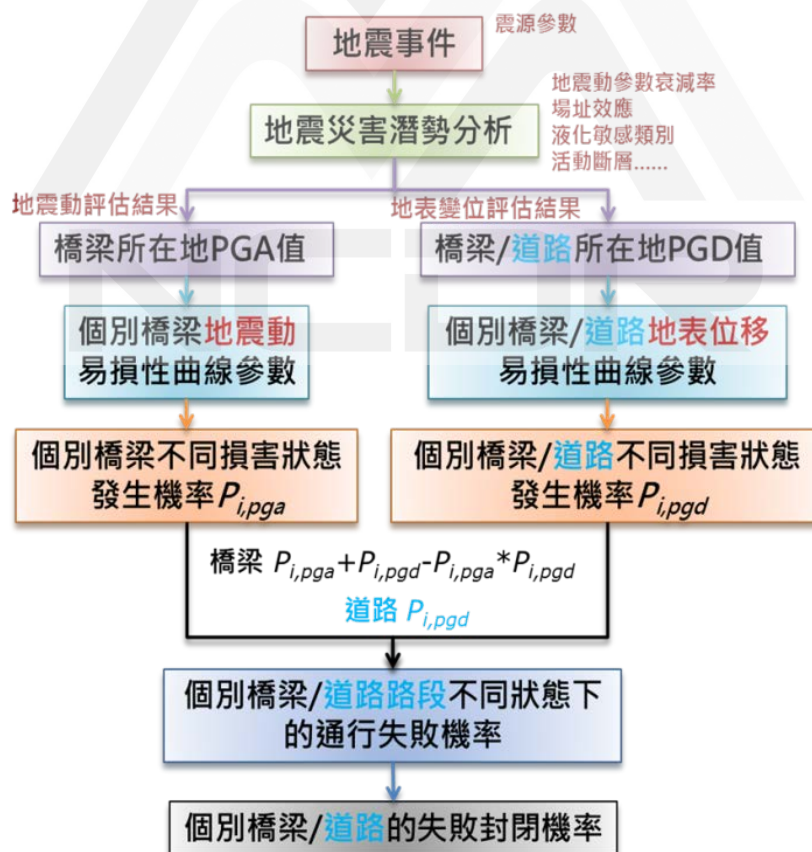


圖8、橋梁/道路衝擊評估流程(李洋寧等, 2014)

### 3.4 建物倒塌引起道路阻斷分析模組

都市交通運輸系統在災時扮演重要角色，確保道路系統在震後能發揮正常功能，救援車輛得以順利通行、民眾疏散避難，方能減輕生命財產的損失。然而，隨著都市發展迅速擴張，人口與經濟活動蓬勃發展，高密度的建物與基礎設施，恐提高受災之風險。由過去的地震歷史經驗顯示，震後常發生交通設施震損破壞、建物倒塌引起道路災害，因此實有必要建構災後安全廊道，即時提供都市內準確救援使用之道路。市區道路為一連續路段組成，進行評估時需個別計算道路上各路段的阻斷情形，包括緊鄰道路的建物因子特性：

- 建築物倒塌數數越高，則道路阻斷可能性越高。
- 建物耐震度較低構造形式為磚造建物，或未加勁磚造兩類。
- 耐震力不足之懸臂式建築物。
- 建物樓層高度與建物到道路距離比，將影響建物碎屑阻斷道路可能性。

研究文獻顯示，評估震後建物倒塌後道路上碎屑阻斷程度，需充分考慮建物災害特性與道路屬性資料，可利用式(1)表示：

道路阻斷程度 = 建物倒塌密度 + 建物特徵 + 道路通行寬度 (式 1)



### 3.4.1 道路縱向阻斷

#### (一) 倒塌建物密度 $P_A$

沿道路倒塌建物的密度為決定道路可否通行主因，震後特定路段可能被建物碎屑阻斷，或道路受到多少百分比碎屑影響。本研究根據網格面積與倒塌建物數量評估倒塌建物的密度質(圖 9)。數據中可用倒塌建物數和原始建物數，利用式(2)計算建物倒塌的面積  $A_c$ 。

$$A_c = (N_{cb} / N_b) \cdot A_b \quad (\text{式 2})$$

式中  $N_{cb}$  為網格內建物倒塌數， $N_b$  為網格內建物數， $A_b$  為網格內建物面積，爾後藉由倒塌面積與單一網格面積之比，計算建物倒塌密度  $P_A$ ：

$$P_A = A_c / A_{\text{unit}} \quad (\text{式 3})$$

式(3)中  $A_c$  建物倒塌面積， $A_{\text{unit}}$  為網格面積。

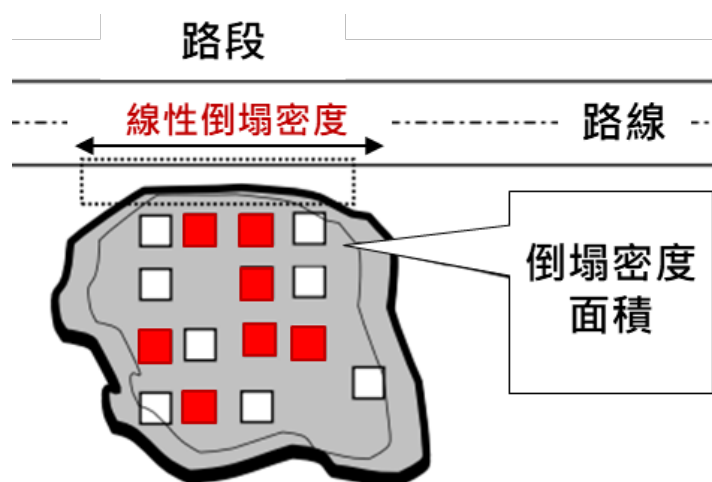


圖 9、建築物倒塌密度面積

## (二) 線性倒塌密度值 $P_L$

考慮建物密度相對比較內部道路和建築物密度值(k)，在不同 k 值下評估路段受建物碎屑縱向阻斷的可能性，利用建物密度值計算區域線性倒塌密度值  $P_L$  如式(4)所示。

$$P_L = k\sqrt{P_A} \quad (\text{式 4})$$

式中 k 值為建物密度相對比(網格內道路和建築物密度關係)，本研究利用建物數區分為 4 類，分別為 k = 0.9 相鄰道路之建物密度較小(建物數為 0~100 棟)、k = 1.0 相鄰道路之建物密度等小(建物數為 100~400 棟)、k = 1.1 相鄰道路之建物密度大(建物數為 400~800 棟)、k = 1.2 相鄰道路之建物密度較大(建物數大於 800 棟)，網格內建物密度相對關係示意圖如圖 10 所示。

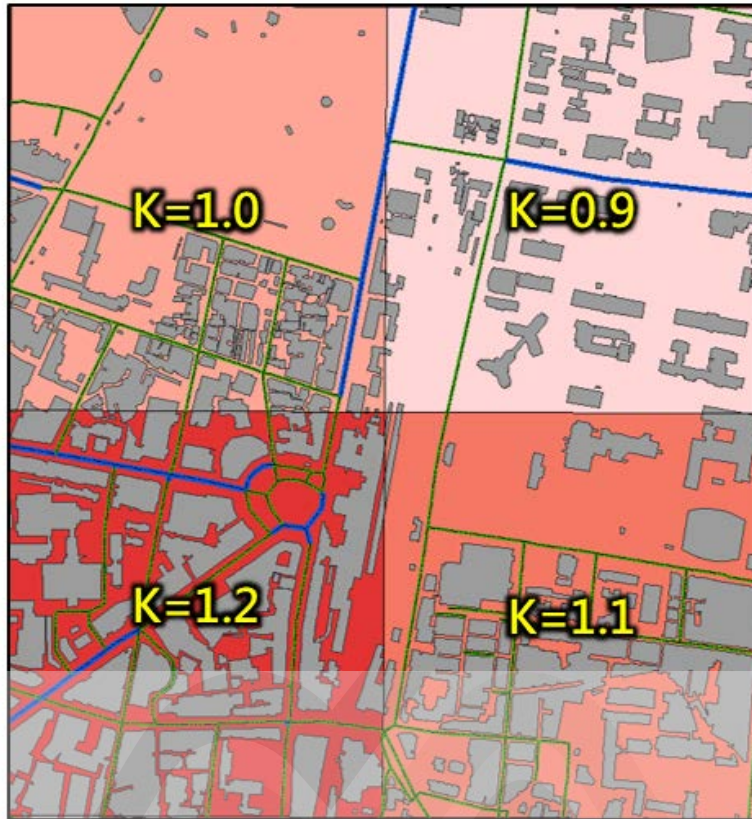


圖 10、建物密度相對關係

由碎屑阻斷路線的大小進行分類如下所示，基於縱向碎屑阻斷程度  $P_L$ ，可區分為以下不同程度道路阻斷。

- $P_L < 0.30$             低度碎屑縱向阻斷
- $0.30 < P_L < 0.50$     中度碎屑縱向阻斷
- $P_L > 0.50$             高度碎屑縱向阻斷

### 3.4.3 道路橫向阻斷

建物與道路之間的距離會影響道路阻斷的可能性，距離越遠，道路阻斷的可能性越低。係指相對道路兩側的建物  $D_B$ 。該數據庫為地

計算建物倒塌碎屑影響範圍，需考慮道路與建物的間距(通常為人行步道)，圖 11 為建物緊鄰道路側距離示意圖，完整道路可通行寬度  $D_B$  可依據下式計算求得：

$$D_B = \gamma * W_R \quad (\text{式 } 5)$$

式(5)中  $W_R$  為道路寬度， $\gamma$ 表示建物到道路間距寬度比例，本研究設定為 1.1。

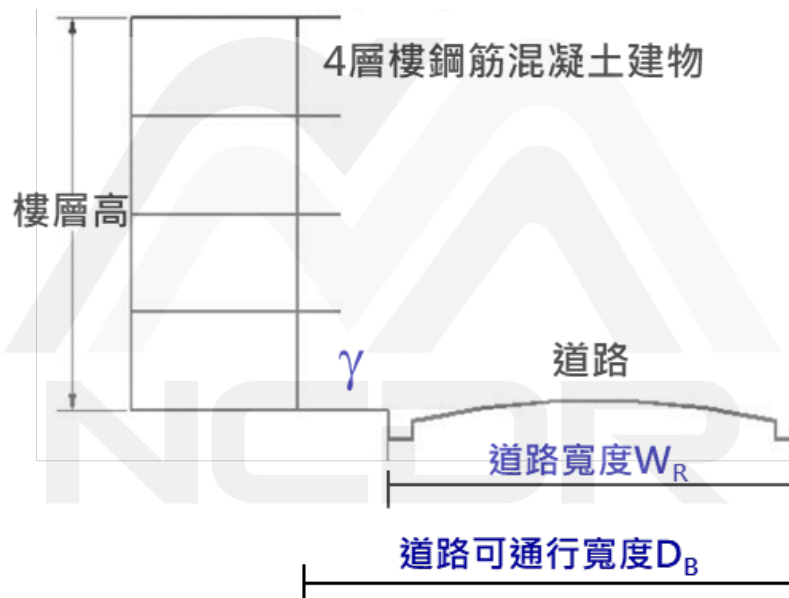


圖 11、完整道路可通行寬度示意圖

### (三) 懸臂效應 C

老舊式建築中懸臂式建物底層無柱子分擔樓板重量與地震力，耐震性較差，一般來說，懸臂形式建物通常比非懸臂建物倒塌機率來的高，故在道路因建物碎屑阻斷評估時，納入懸臂建物因子 C，本研究

以郊區與都會區來區分。通常郊區懸臂比例較低(<30%)C 值設為 1.1，反觀都會區比例較高 C 值設為 1.3。

#### (四) 建物材料類型 M

建物倒塌後產生的碎屑型態將影響道路可使用空間狀況，分析時可利用建築材料因子(M)表示，依照常見建物材料類別，常見為磚造，震後易造成垂直崩塌，鋼筋混凝土造，與鋼構造毀壞後則為向一側傾斜坍塌，耐震度方面以鋼筋混凝土建物相較磚造建物更為堅固，但鋼筋混凝土建物發生毀損倒塌時，建物產生的碎屑將擴散到離建物遠處位置，當碎屑堆寬度越大時，道路阻斷程度就越高。本研究考量建築材料係數 M 設定為鋼筋混凝土造建物 1.3，其他材料(磚造、非加強磚造)1.1。

#### (五) 建物高度

估計離建物碎片的寬度，根據圖像的建物碎屑形狀和大小，與歷史地震相比倒塌建物到建物的高度和建物類型，估計平均碎屑寬度可取決於建物的高度，沿道路之建物平均樓層數高計算如下式：

$$\text{樓層數高} = 0.01 \times \text{樓高總和(佔建物材料百分比} \times \text{建物樓高)} \quad (\text{式 } 6)$$

建物前牆與線之間的角度，連接建築物前牆的頂部，碎屑最遠點

估計為 20°(圖 12)。在這種情況下，建築物的高度是平均高度，碎片的寬度堆計算如下：

$$W_D = H_E \times \tan 20^\circ \quad (\text{式 7})$$

其中  $W_D$  建物碎屑寬度， $H_E$  建物高度

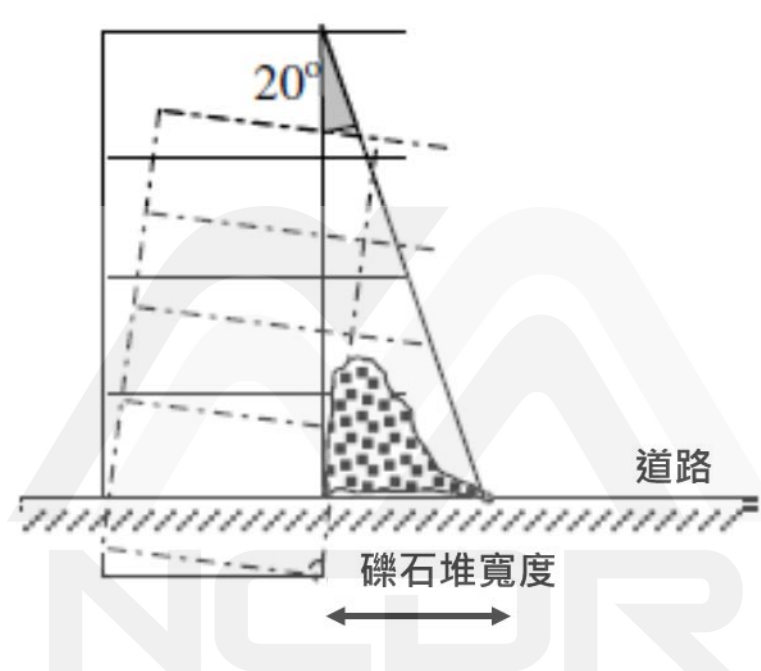


圖 12、建物碎屑評估模式

#### (六) 道路阻斷碎屑推估

建物碎屑阻斷評估主要目的為量化出建物碎屑佔據道路可能性，係依據建物類型及道路至建物之間的距離。垂直於道路中心線，這種阻斷形式可稱為橫向阻斷，碎屑寬度  $W_{FD}$  是  $M$ 、 $C$  和  $W_D$  的函數總合，計算公式如下：

$$W_{FD} = W_{D \times M \times C} \quad (\text{式 } 8)$$

根據上述建物特性得知，建物碎屑坍塌寬度取決於建物高度，結構類型，在典型建物密集區域外牆附連續性，建物倒塌主要發生在前側或建物背面。道路一側的雜物寬度之間存在比率評估中使用的道路  $D_B$  的可用寬度在一條道路上被碎屑橫向阻塞；這個比例稱為  $D_{occ}$ ，如下所示：

$$D_{occ} = W_{FD}/D_B \quad (\text{式 } 9)$$

基於橫向碎屑阻斷程度  $D_{occ}$ ，可區分為以下不同程度道路阻斷。

- $D_{occ} < 0.15$             低度碎屑橫向阻斷
- $0.15 < D_{occ} < 0.25$     中度橫向阻斷
- $D_{occ} > 0.25$             高度橫向阻斷

強震動下，本研究考量倒塌建物密度、建物特徵(樓層高度、材料)、倒塌形式，評估道路縱向與橫向阻斷情況，並聯集歸納出道路阻斷結果，完整分析流程如圖 13 所示。

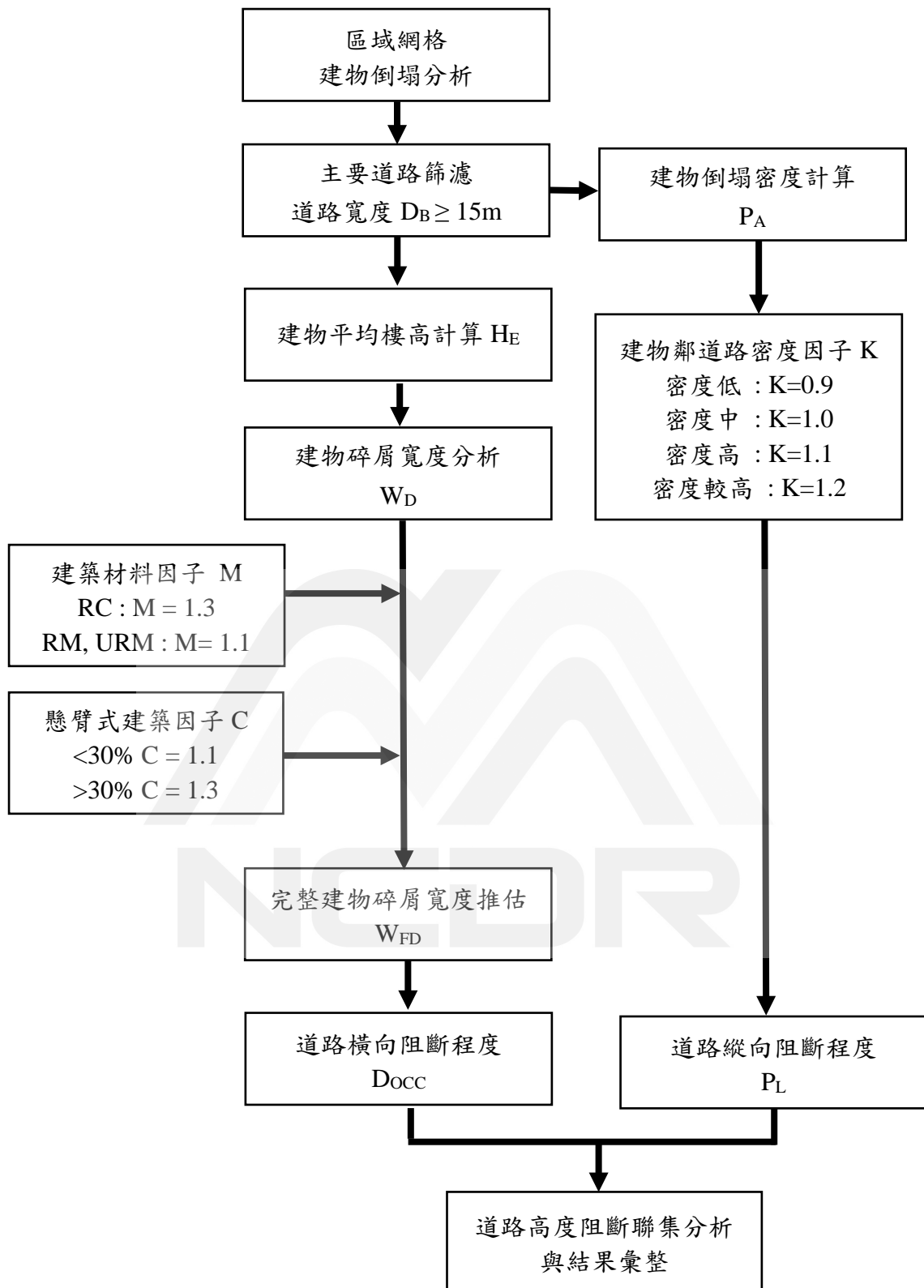


圖 13、建物倒塌引起道路阻斷分析流程



## 第四章實務案例應用

### 4.1 背景說明

本研究參考 109 年度國家防災日大規模地震規劃，以中洲構造模 M6.9 地震情境對台南市示範區進行案例分析，研究首先利用地震衝擊資訊平台系統(TERIA)模擬分析，在地振動評估採 500×500 公尺網格為單位。在強震作用下，常以地振動參數表示區域的受震反應，包括地表最大加速度(Peak ground acceleration, PGA)、地表最大速度(Peak ground velocity, PGV)或地表最大位移(Peak ground displacement, PGD)。地表加速度反應值利用地振動模擬分析程序，考量場址效應設定之地動反應，最終地動預估可演算得到 500×500 公尺網格之地表加速度分布，圖 14 為台南市最大地表加速度(PGA)分布情況，結果顯示震度大於六級(>400gal)地區，台南市共有 14 個區域，分別為善化區、新市區、新化區、北區、東區、中西區、南區、安平區、新營區、將軍區、七股區。

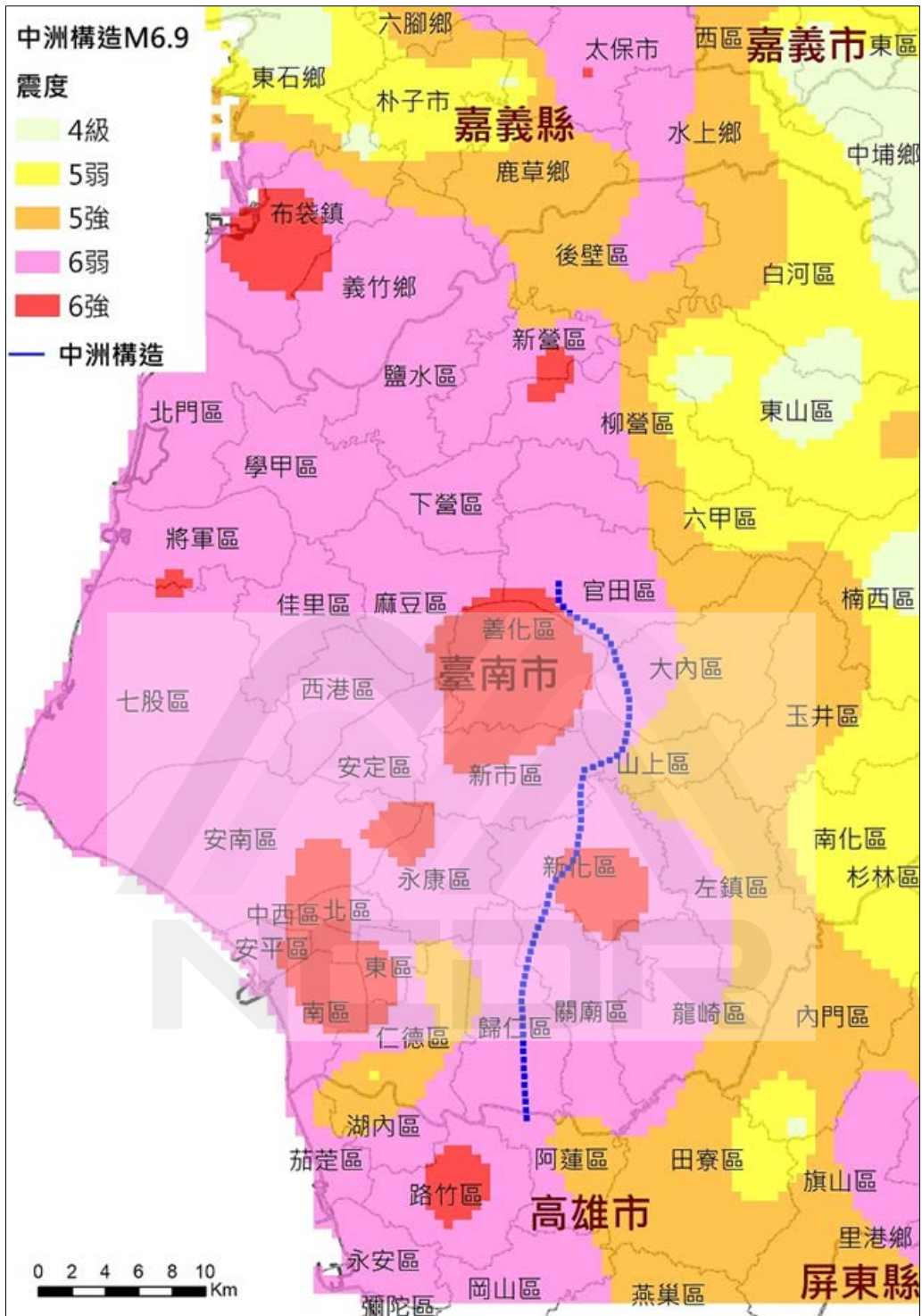


圖 14、台南市地震動分布(中洲構造 M6.9)

## 4.2 一階衝擊：道路、橋梁直接損壞分析

都會區之道路、橋梁與相關設施為交通與民生之重要管道。在災害發生時，救災道路、橋梁亦是交通設施中的重要設施，損壞亦將直接衝擊災後急難救援、民生醫療物資運輸，進而影響整個救災工作的進行。

在中洲構造規模 6.9 地震情境下，台南市示範區在地振動影響下，許多區域的震度都大於六級(>400gal)，分析結果顯示，台南市共有 27 座橋梁受到地振動衝擊下而嚴重損壞，包含 4 座國道、12 座省道、3 座縣道、與 8 座市區橋梁，中風險損壞共 81 座，表 12 為台南市橋梁嚴重毀損數量統計，圖 15 為台南市都會區交通設施損失分析，結果顯示，重災區之救災道路、聯外橋梁有高度阻斷風險，可能影響居民避難、傷患救援與物資運補。台南市中西區的新臨安橋與新南橋有嚴重毀損情況。

表 8、台南市橋梁嚴重毀損數量統計(座)

地區	國道	省道	縣道	市區
新營區	0	1	0	1
官田區	0	3	0	0
左鎮區	0	1	0	0

新化	2	2	0	0
南化	0	1	0	0
安南	0	1	0	2
永康	0	1	1	0
北門	0	1	0	0
關廟	2	1	0	0
六甲	0	0	2	0
南區	0	0	0	3
中西區	0	0	0	2

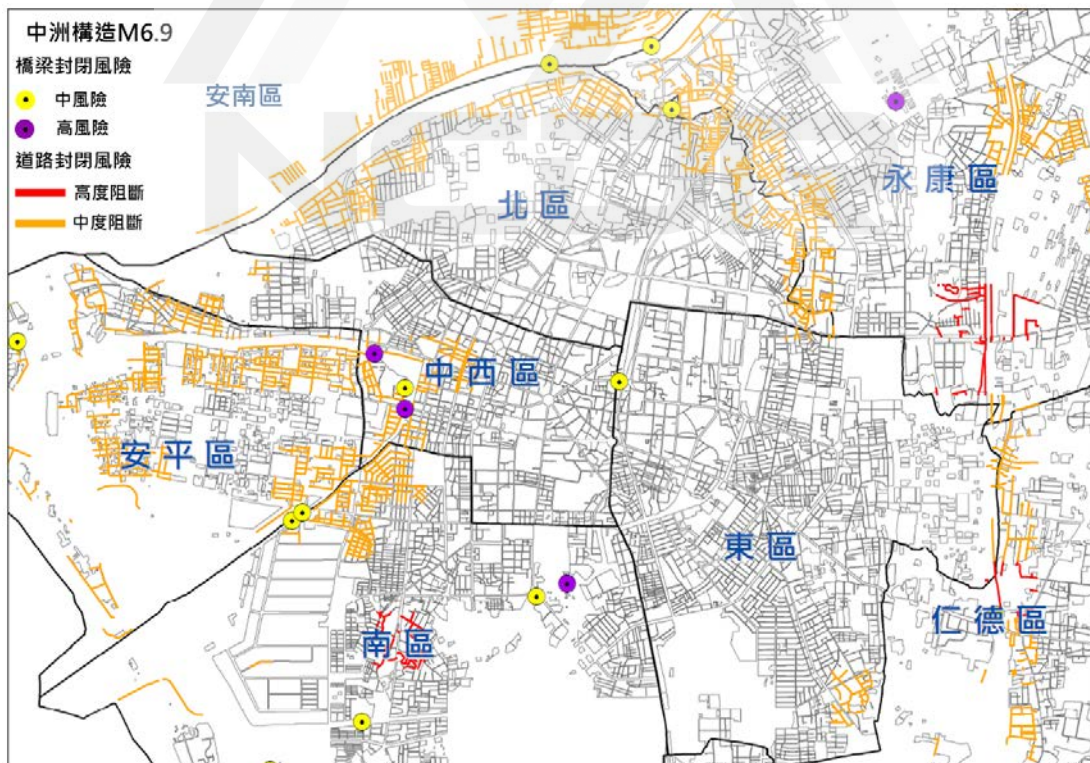


圖 15、台南市區道路、橋梁直接損壞道路封閉風險分布

### 4.3 一階衝擊：建物倒塌引起道路阻斷分析

都會交通網絡在交通運輸中扮演重要角色，倘若交通網路震後無損壞並能發揮功能，損失將大大減少，可讓救援車輛可順利通行，確保人員疏散安全區域。然而都市建物和基礎設施的建設，曝露在天然災害風險下，地震歷史經驗表示交通路網易受損壞，尤其建物倒塌後，將破壞交通道路。在中洲構造規模 6.9 地震情境下，本研究根據建物倒塌的結果，然後利用建物碎屑評估道路阻斷程度流程，分別進行道路縱向阻斷與橫向阻斷分析。

#### (一) 建物倒塌結果

在情境模擬作用下，本研究藉利用 TERIA 系統進行建物損壞計算，圖 31 為台南市區建物倒塌棟數分布，結果顯示台南市中西區建物倒塌數量最為嚴重、其次為台南市的北區與南區，鄰近周邊行政區則是出現部分倒塌情況，本研究依照建物倒塌引起道路阻斷分析流程(圖 16)，對示範區內救援道路(路寬>15 公尺)進行道路阻斷評估，以下就建物倒塌碎屑導致縱向阻斷，與橫向阻斷進行討論。

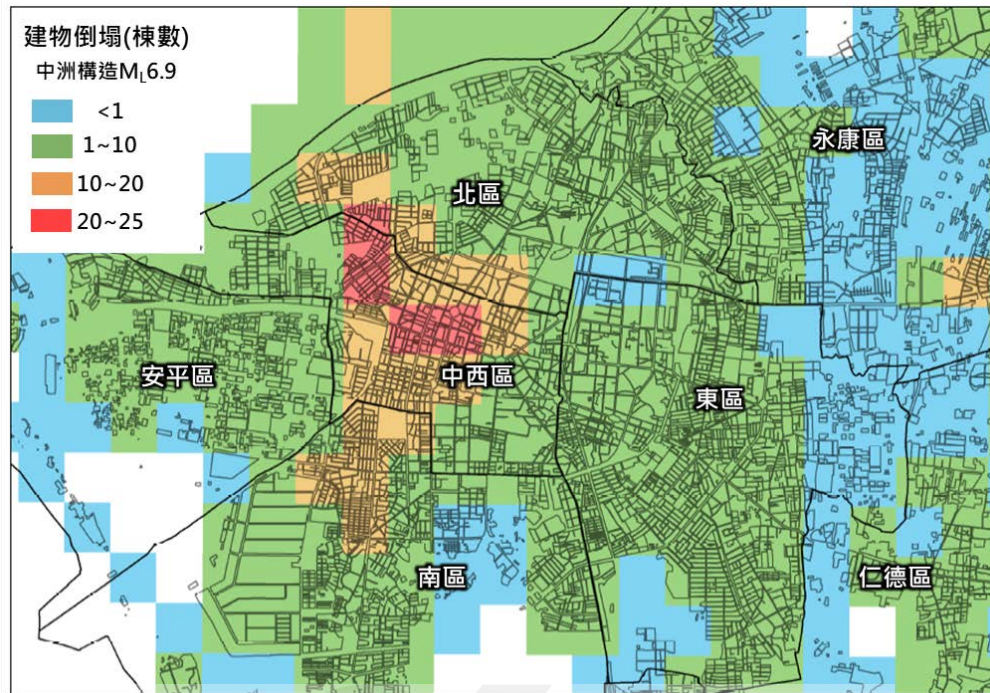


圖 16、台南市建物倒塌(棟數)分布

## (二) 道路阻斷結果

圖 17 為台南市建物倒塌引起道路縱向阻斷情況，研究顯示，在建物倒塌嚴重的重災區內，建物倒塌線性塌陷密度值較高，緊鄰的救援道路將受到影響，在中西區北區與安平區出現道路高度縱向阻斷情況，南區與東區及永康區則是部分路段出現中度縱向阻斷情形，震後進入重災區內進行緊急救援搶救，與傷患運輸作業時避開高、中度阻斷的路段，道路受碎屑散落可能無法有效通行。

圖 18 為台南市建物倒塌引起道路橫向阻斷情況，研究顯示，中高層鋼筋混凝土構造建築，在強震區內，因建物特性產生面積較寬碎屑，緊鄰救援道路將受其影響，在安平區、東區出現道路高度縱向阻斷情

況，其他鄰近行政區則是部分路段出現中度縱向阻斷情形，震後進入重災區內進行緊急救援搶救，與傷患運輸作業時避開高、中度阻斷的路段，道路受碎屑散落可能無法有效通行，另外也需注意高樓建物因餘震而產生的碎屑下落。本研究將縱向與橫向阻斷分析結果聯集詳如圖 19 所示。

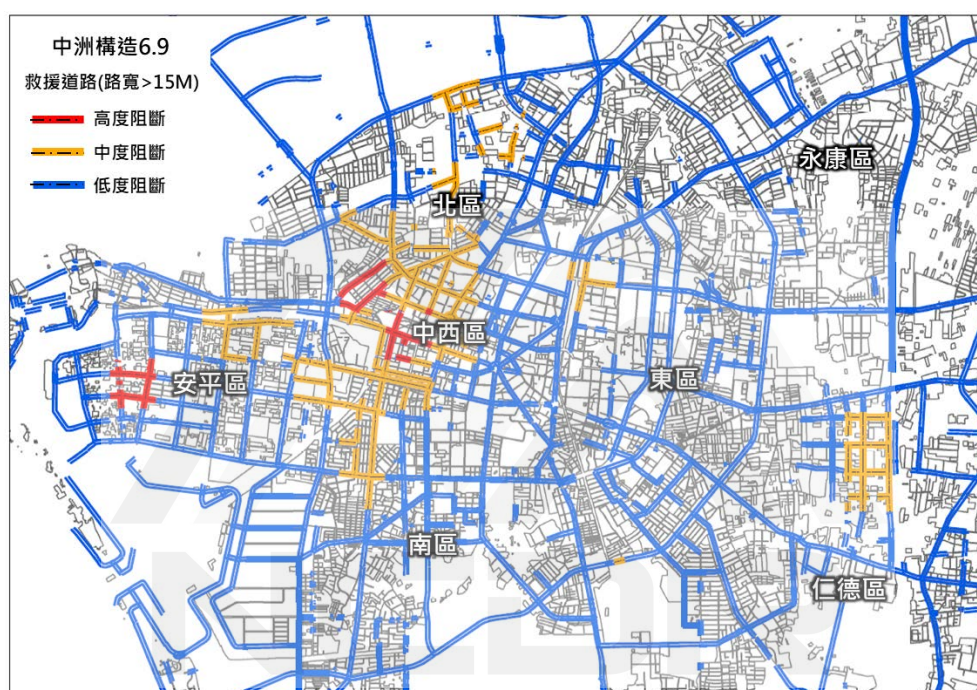


圖 17、台南市道路縱向阻斷分布

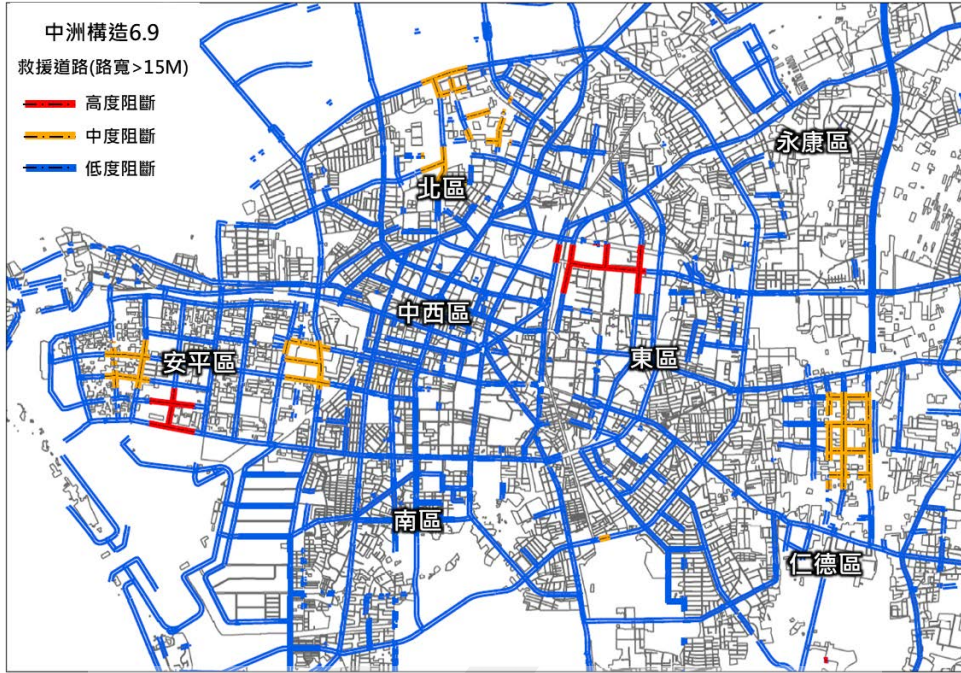


圖 18、台南市道路橫向阻斷分布

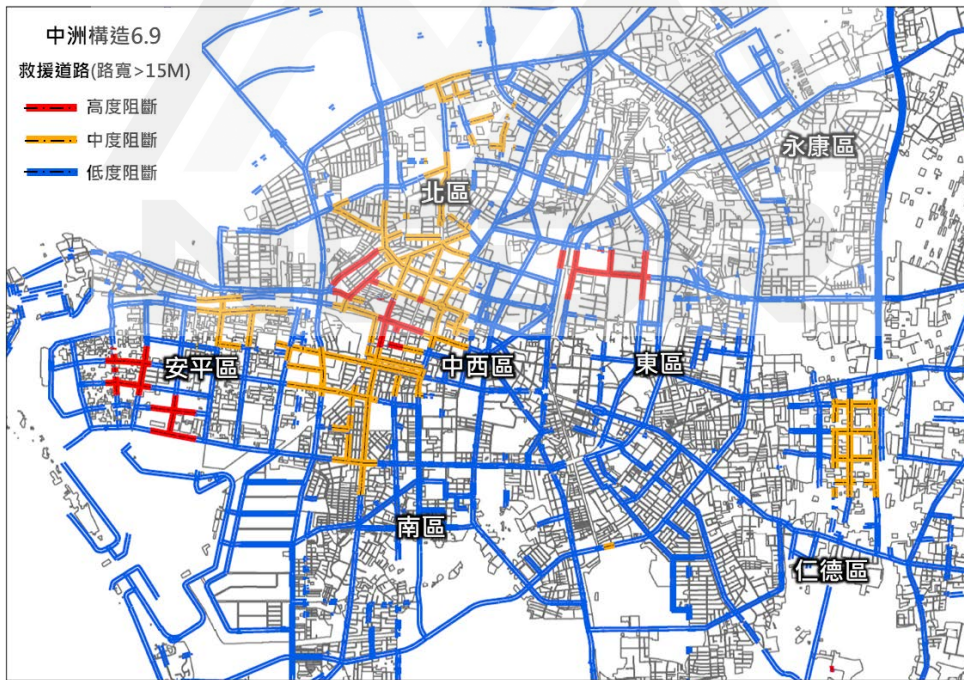


圖 19、台南市道路阻斷聯集結果分布



#### 4.4 二階衝擊：老舊街道救援道路衝擊

對於都市災害風險管理而言，災後救援道路的可通行性相當重要，可提供緊急救援服務保護重災區之生命財產安全，尤其是在都市發展較早區域，通常建築較為密集，其特點為重要街道及震損高風險建物。當地震發生，相當重要考慮因子為建物倒塌後引起道路阻斷情況，例如強震後火災事件，行人和車輛阻塞可能會阻礙消防隊、救護車迅速進入災區，或救護車抵達進行救援服務時，市區幾處建築崩塌高風險區域的道路則無法使用需繞道進入。

台南市中西區為早期發展區域歷史悠久，都市內有多處老舊街道，因多數巷道狹窄，對於救援車輛進出之交通與都市防災系統都是需要解決的課題。圖 20 為台南市中西區老舊建物資料統計，1974 年以前建造共有 9 千多戶，以中低樓層建物為主，1~3 樓為 5600 戶以上，4~7 樓約 700 戶，建築型式為磚造、非加勁磚造，台南市早期老舊建物震後可能易致災的地區，也是災害搶救可能發生障礙最有可能發生區域。圖 21 為將分析結果套疊老舊街屋道路阻斷衝擊。研究結果得知，中西區老舊街區為高度、中度道路阻斷，在建物倒塌嚴重與人員傷亡情況下，可能會增加消防隊、救護車迅速進入災區進行救援服務之困難(圖 22)。

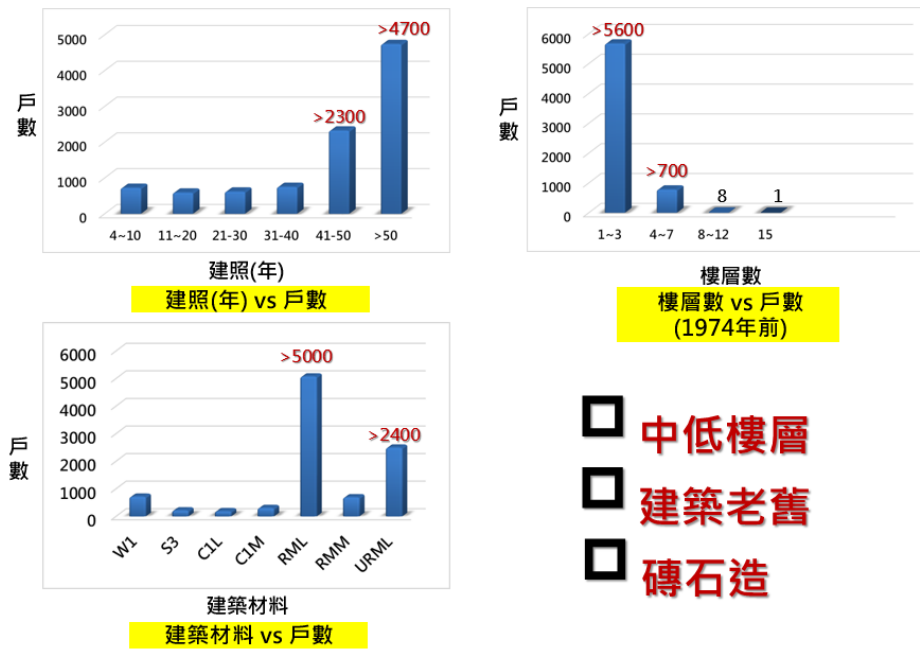


圖 20、台南市中西區建物特性調查

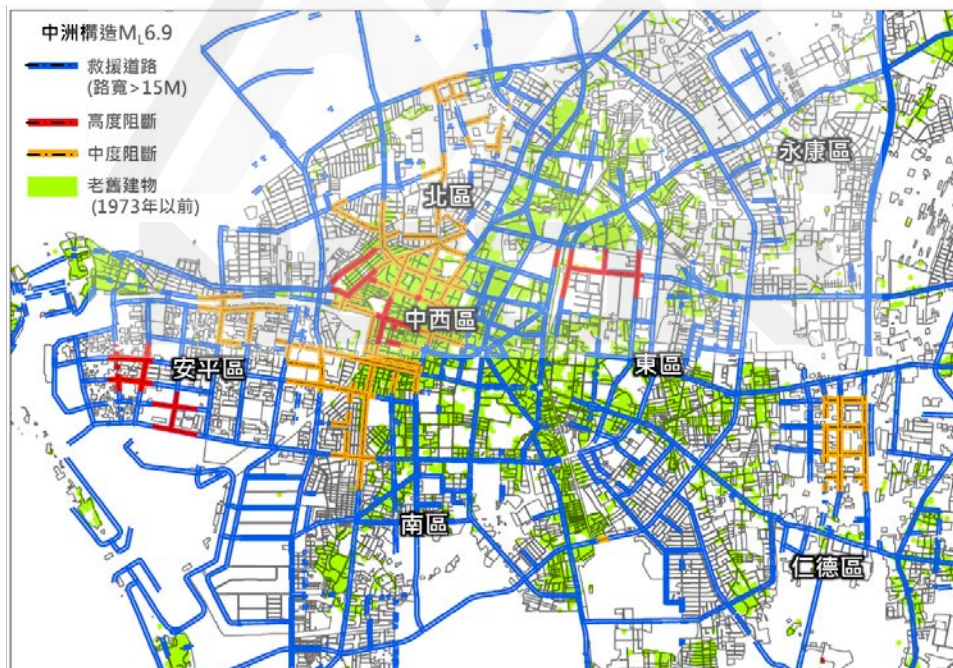


圖 21、災區老舊街屋道路阻斷衝擊評估

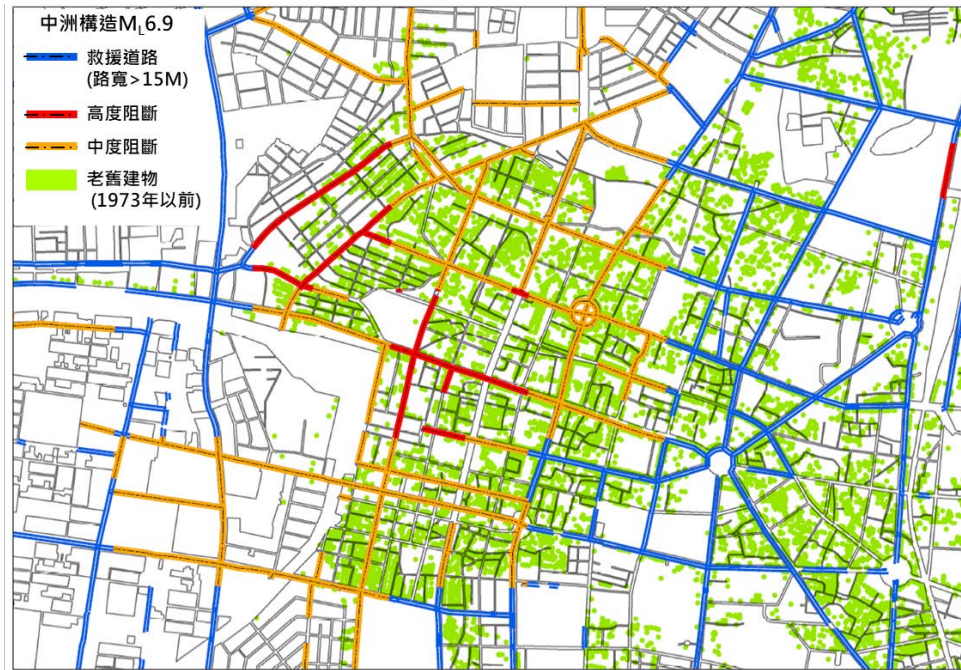


圖 22、災區老舊街屋道路阻斷衝擊評估(中西區)



## 4.5 二階衝擊：災區醫療救援道路衝擊

保持醫院持續運作必要條件除結構性要素(建物)、非結構性要素(水、電)以及功能性要素(人力)也相當重要。運作關聯性如下：電力供給醫療設備需要運作機能，電力中斷將導致設備失效。自來水維護醫院的衛生，醫療行為進行(如洗腎、消毒)，缺水將阻礙醫療工作進行，道路、橋梁損壞導致交通中斷，阻礙救護車護送病患行動，或是救護人員難到達現場進行醫療救治。

圖 23 顯示台南市責任急救醫院與救援道路阻斷情況，之外部維生系統損失風險，研究結果顯示，緊急醫療院所受外部道路阻斷影響，醫院持續營運與傷患運輸、後送可能受到影響，尤其是在重災區中西區的醫療院所不僅道路嚴重阻斷外，市區橋梁也受到嚴重損壞或中度所壞，醫療物資運送可能中斷，院內病患需撤離與安置(圖 24)。除此之外，需觀察震後醫療設施之外部維生系統損失風險，如電力、自來水、道路交通連鎖相依影響，可能加劇災害或損壞產生。

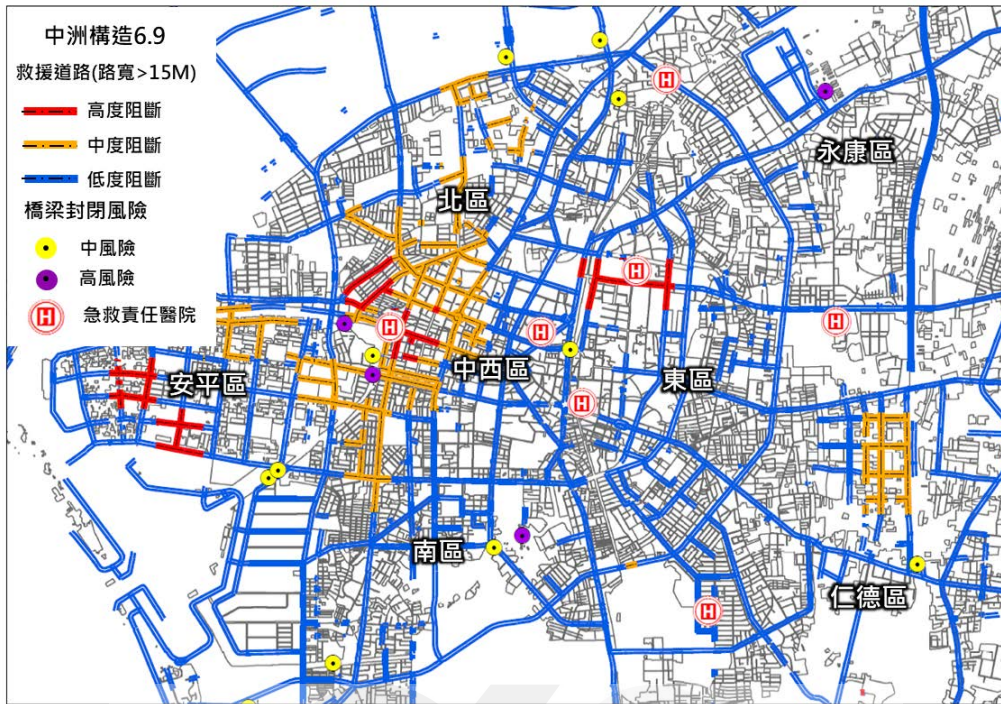


圖 23、災區醫療救災外部救援道路、橋梁阻斷衝擊

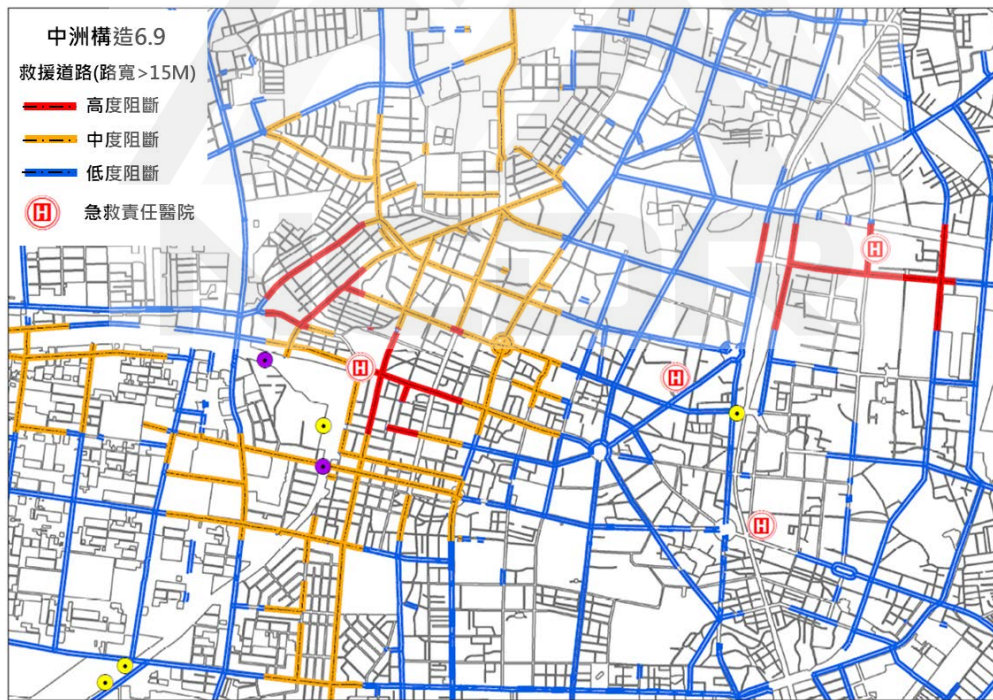


圖 24、災區醫療救災外部救援道路、橋梁阻斷衝擊(中西區)

## 4.6 成果討論

1. 運輸系統提供平時通勤功能，聯繫公共場所、工作場域等，但同時也曝露在天然災害之下，災後道路、橋梁結構本身會受到強地震引起毀壞外，建物倒塌產生碎屑落下，亦可能會造成道路災害。故進行整體道路阻斷評估時，應同時考量強地震引起直接損壞，及間接造成影響，尤其是建物倒塌碎屑散落引起道路阻斷。
2. 城市早期發展的區域，建物密度通常較高，強震後除需留意建物倒塌引起道路阻斷情況外，行人和車輛行為將改變，道路阻塞情況也將會阻礙消防隊、救護車迅速進入災區，或救護車輛進行救援服務時，建物崩塌區域的道路無法使用，需改道前往。
3. 醫院持續營運主要要素為結構因子(建物)、非結構因子(水、電)及道路系統因子，其中道路、橋梁損壞會導致交通中斷，阻礙救護車輛運送病患，或救護人員赴現場困難度提高。除此之外，亦需觀察震後醫療設施之外部維生系統損失風險，如電力、自來水、道路交通連鎖相依影響，可能加劇災害或損壞產生。

## 第五章結論與建議

### 5.1 結論

回顧國內外運輸系統震災事件，震後位於強震區道路系統可能受到嚴重毀壞，進行衝擊分析時，除考量道路、橋梁結構直接損壞外，也應考量間接影響，尤其是建物倒塌引起道路阻斷情況。本研究歸納出結論重點如下。

1. 本研究藉災害衝擊鏈觀點，整合間接衝擊與系統相依性，建立震後運輸系統衝擊鏈分析模式，本研究保留直接損壞分析模式外，考量震後建物倒塌衍生道路間接衝擊，發展出一套評估方法。
2. 以中洲構造規模 6.9 地震情境，利用震損衝擊分析取得建物倒塌結果、道路系統(含橋梁)直接損壞結果，然後利用建物碎屑評估道路阻斷程度流程，進行道路阻斷分析，實際應用於台南市示範區。
3. 重大地震災害發生後，強地動會使得建物破壞而造成慘重傷亡，尤其是老舊街區的巷弄狹小，需特別留意倒塌碎屑引起道路阻斷情況。除此之外，醫療院所外部道路、聯外橋梁提供救護車輛運送病患之用。本研究係對示範區之老舊街區、醫療院所外部救援道路進行震災衝擊鏈評估，結果可作設施查報、優先復原工作參考，提高救災執行效率。

## 5.2 建議

1. 災後運輸系統與基礎維生設施相互依賴，因道路、橋梁損壞後需較長的修復時間，恐導致後續連鎖效應發生，故後續研究實有必要對都會區的維生機能、運輸機能相互影響性進行細緻分析，利於掌握都會機能之持續運行。
2. 研究顯示，震後醫療院所周邊道路將受到建物倒塌引起之道路阻斷，醫院主要出入口連接道路可規劃替代道路、平時與防救團體建立連絡機制，協助傷病運輸與後送。
3. 本年度已完成運輸機能震災衝擊鏈評估模式，求得震後救援道路阻斷分布，未來可延續研究內容，連結即時動態資訊(如人流、車流)，配合動態分析評估軟體應用，可評估在緊急應變或復原階段，人員避難或設施修復之最佳方案。



## 参考文献

Rinaldi, Steven M., James P. Peerenboom, and Terrence K. Kelly (2001)

“Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure

Interdependencies,” *IEEE Control Systems Magazine* Vol. 21, No.

6, pp. 11-25.

Dudenhoeffer, D.D, M. R. Permann, and M. Manic (2006) “CIMS: A

Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and

Analysis.” *Proceedings of the 2006 Winter Simulation*

*Conference*, Monterey, CA, USA.

Mai Tsuruta (2008), “Damage propagation caused by interdependency

among critical infrastructures,” *The 14th World Conference on*

*Earthquake Engineering*, Beijing, China.

FEMA (2010) *Hazus®-MH MR5 Technical Manuals and User's Manuals*,

Washington, D.C.

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.

Argyroudis, S., Pitilakis, K. and Anastasiadis, A., (2005) "Roadway Network Seismic Risk Analysis in Urban Areas: The case of Thessaloniki - Greece," *Proc. International Symposium of GEOLINE*, Lyon.

Pitilakis, K., and Kakderi, K. (2011) "Seismic Risk Assessment and Management of Lifelines Utilities and Infrastructures," *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, (pág. 28). Santiago de Chile.

Ertugay, K., Argyroudis, S. and Düzgün, HŞ. (2016) "Accessibility modeling in earthquake case considering road closure probabilities: A case study of health and shelter service accessibility in Thessaloniki, Greece," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 17. pp. 49 - 66.

Toma-Danila, D., (2018) "A GIS framework for evaluating the implications of urban road network failure due to earthquakes: Bucharest (Romania) case study," *Natural Hazards*, Vol. 93, No. 1, pp. 97-111.

William Petak, (2000) "The Northridge Earthquake USA and its

Economic and Social Impacts,” *Euro Conference on Global Change and Catastrophe Risk Management*, IIASA, Luxemburg, Austria.

Diana Todd, Nicholas Carino, Riley M. Chung, H. S. Lew, Andrew W.

Taylor, William D. Walton, James D. Cooper, and Roland

Nimis (1994) “1994 Northridge Earthquake – Performance of

Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems,” *Gaithersburg,*

*MD: National Institute of Standards and Technology (NIST).*

*The Northridge Earthquake: 20 Years Ago Today*, The Atlantic,

2014/1/17, [https://www.theatlantic.com/photo/2014/01/the-](https://www.theatlantic.com/photo/2014/01/the-northridge-earthquake-20-years-ago-today/100664)

[northridge-earthquake-20-years-ago-today/100664.](https://www.theatlantic.com/photo/2014/01/the-northridge-earthquake-20-years-ago-today/100664)

*25-year anniversary of Northridge Earthquake Comes with warnings*, abc7,

2019/1/18, [https://abc7.com/5094789.](https://abc7.com/5094789)

Haeri, S. M. (2016) “The role of geotechnical engineering in sustainable

and resilient cities,” *Scientia Iranica*, Vol. 23, No. 4, pp. 1658-1674.

Philip, E. and Eizaburo, T. (1995) “KOBE EARTHQUAKE – Lessons

Learnt,” *Keynote Paper in BGS Int’l Conference*, Coventry.

*Kobe earthquake of 1995*, Britannica, 1995,

<https://www.britannica.com/event/Kobe-earthquake-of-1995>

*11 dead, at least 32 missing after magnitude 6.7 quake strikes Hokkaido,*

The straits times, 2018/9/6, <https://www.straitstimes.com/asia/east-asia/powerful-66-magnitude-quake-hits-japans-hokkaido-island-usgs>.

國土交通省 (2013), 道路の管理の充実／道路の防災対策・危機管理の充実, 九州地方整備局道路部, [http://www.qsr.mlit.go.jp/n-michi/project/bousai/taisaku\\_01.html](http://www.qsr.mlit.go.jp/n-michi/project/bousai/taisaku_01.html)

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, 碩士論文, 國立交通大學, 新竹。

李洋寧、劉淑燕、李沁妍、吳佳容、鄧敏政、柯孝勳、李中生 (2014), 大臺北地區大規模地震衝擊情境分析報告 II, 技術報告, 國家災害防救科技中心, 台北。

葉超雄 (1995), 日本阪神淡路地震引起阪神大震災之訪查與探討, 研究報告 NCREE-1995-001, 國家地震工程研究中心, 台北。

國家災害防救科技中心 (1995), 神戶地震災害調查, 國家災害防救科技中心, 台北。

張國鎮 (1999), 九二一集集大地震全面刊災報告-橋梁震害調查, 研究報告 NCREE-99-055, 國家地震工程研究中心, 台北。

許添本、李明聰 (2000), 地區性道路交通安全風險評估模式之建立, 89 年道路交通安全與執法研討會, 桃園。

2018 年 9 月 6 日日本北海道規模 6.7 地震事件說明，全球災害事件

簿，國家災害防救科技中心，網站：

<https://den.ncdr.nat.gov.tw/1132/1188/1205/19197/21123/>

921 地震 20 周年 - 從他的鏡頭看見不能忘記的傷口 (2019)，今周

刊，台北。

國家災害防救科技中心 (2018)，0906 北海道地震 Mj6.7，國家災害

防救科技中心，台北。

北海道規模 6.7 強震民宅倒塌新千歲機場關閉(2018)，中央社，網

站：[https://movies.yahoo.com.tw/article/北海道規模 6-7 強震-民宅](https://movies.yahoo.com.tw/article/北海道規模-6-7-強震-民宅倒塌新千歲機場關閉-230112018.html)

[倒塌新千歲機場關閉-230112018.html](https://movies.yahoo.com.tw/article/北海道規模-6-7-強震-民宅倒塌新千歲機場關閉-230112018.html)



## 附錄 運輸系統災例回顧

### 美國北嶺地震(Northridge Earthquake)

1994 年 1 月 17 日在美國南加州洛杉磯北嶺地區(Northridge)發生芮氏規模 6.6 地震，震源深度 14 公里，地震共造成 55 人死亡、5 千多人受傷、2 萬 5 千人安置於避難處所。在強地動作用下共計 44 萬 9 千戶房屋受損(其中包含 6 千棟廠房、4 千棟公有建物與醫療院所)。維生管路毀損(電力、供水和煤氣)供應鏈中斷，運輸系統毀壞，以公路橋梁毀損崩塌最為嚴重，直接衝擊民眾生活、工商發展、與觀光旅遊業，統計結果顯示，直接經濟損失達 418 億美元，間接財物損失達 65 億美元(William Petak, 2001)，表 9 為美國北嶺地震災情彙整。

#### (一) 公路橋梁毀損

地震於洛杉磯市區造成公路橋梁嚴重損壞的災情，十餘條重要公路橋梁結構嚴重受損毀崩塌，南加州地區東西向 10 號州際公路、南北向 5 號州際公路(圖 25)、14 號州際公路與 118 號州際公路橋梁崩落，切斷城市主要跨區連接的路徑，迫使通勤者需改道，間接造成交通嚴重阻塞(圖 26)(Diana Todd et al.1994)。

#### (二) 市區道路間接損壞

強震區中維生管路震損破裂(自來水、電力、與煤氣管路等)，造成道路淹水、煤氣洩漏情況，阻礙車輛與人員通行(圖 27)。市區建物大

面積傾倒毀壞，包括民宅、醫療院所、購物商城，倒塌後產生大量碎屑散落於市區平面道路上(圖 28)。

表 9、美國北嶺地震災情綜整

維生設施災害	二次災害
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自來水、電力、煤氣中斷。</li> <li>● 洲際公路毀損坍塌。</li> <li>● 貨運鐵道列車出軌。</li> <li>● 機場天花板塌落、管路漏水。</li> <li>● 直接財物損失為 418 億美元。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 煤氣與電力管線損壞，造成 50 多起火災事件。</li> <li>● 市區建物倒塌、聯外橋梁阻斷封閉，造成救災作業延宕。</li> <li>● 交通系統網絡癱瘓，重創工商經濟與觀光旅遊業。</li> <li>● 間接財物損失 65 億美元。</li> </ul>



圖 25、I5 州際公路損毀坍塌

(資料來源:The Atlantic)



圖 26、I5 與 SR-14 州際公路封閉交通壅塞

(資料來源:The Atlantic)



圖 27、道路損壞維生管線破裂道路淹水、有害氣體洩漏

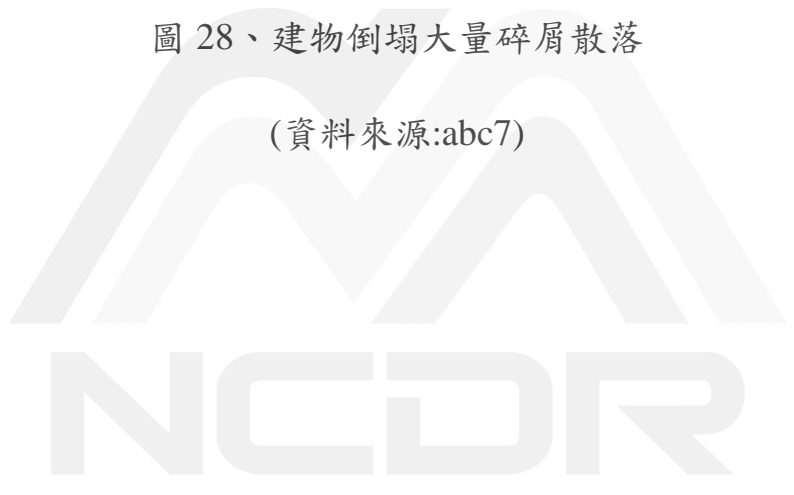
(資料來源:The Atlantic)





圖 28、建物倒塌大量碎屑散落

(資料來源:abc7)



## 日本神戶地震(Kobe Earthquake)

日本關西地區在 1995 年 1 月 17 日發生規模  $M_j7.2$  地震，震源深度 17.6 公里，震後造成 5 萬 5 千棟建物毀損，並引起五百多起火災事件，約 7 千多棟建物遭燒毀，該地震共有 5 千 4 百多人死亡，3 萬 4 千人受傷，35 萬人安置於避難處所，財務損失高達 2 千億美元。強震區之陸地交通設施受損，主要為公路橋梁與鐵道設施，都市交通網絡幾乎全面中斷，海運部分，港灣碼頭、防波堤之附屬結構設施，受土壤液化災害影響，下陷位移破壞，強震區內的地下維生管路(如自來水、天然氣、電力等)嚴重受損，震後無法快速恢復，需長期進行檢查與修復，表 10 為日本神戶地震災情彙整(葉超雄，1995)。

### (一) 公路橋梁、鐵路毀壞

地震造成運輸系統嚴重衝擊，包括公路橋梁二十餘處坍塌(圖 29)，震損最嚴重者包括，阪神高速公路(神戶地區主要交通動脈)(圖 30)、名神高速公路(神戶地區至名古屋重要幹道)、國道 2 號、43 號與 171 號之橋梁受到震損破壞。鐵路車站與月台崩塌約有六處以上造成毀損、地下隧道車站出現塌陷，鐵路橋梁為 JR 新幹線公路高架橋毀損掉落、支柱斷裂，導致新幹線受到震損破壞，包括山陽新幹線、東海道本線、阪急電鐵、阪神電鐵，本次地震高架橋梁結構體受地振動崩塌下落外，橋墩處地面也因土壤液化下陷而產生結構體破壞的情況

(國家災害防救科技中心，1995)。

## (二) 港灣碼頭損壞

受大規模土壤液化及地層下陷影響，神戶港碼頭、岸壁等港灣設施嚴重毀損(圖 31)，再加上重要公路橋梁、港灣聯絡公路損害，港口機能全面中斷，導致貨櫃裝卸量占全日本 30%的神戶港暫時停止營運，間接造成物流和經濟極大影響(國土交通省，1995)。

表 10、日本神戶地震災情綜整

維生設施災害	二次災害
<ul style="list-style-type: none"><li>● 電力、自來水、煤氣中斷。</li><li>● 高速公路約 20 處坍塌毀壞。</li><li>● 新幹線橋梁、軌道位移變形。</li><li>● 神戶港內約 80%的港灣碼頭受土壤液化損壞。</li><li>● 直接財物損失為 2000 億美元。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 建物倒塌造成天然氣、電力管路破裂大火延燒數天，總計造成 7 萬 5 千棟房屋燒毀。</li><li>● 建物碎屑阻斷主要道路，加上居民戶外避難，道路交通壅塞(圖 32)。</li><li>● 23 萬人於臨時避難處所安置，救援物資配送短缺。</li></ul>

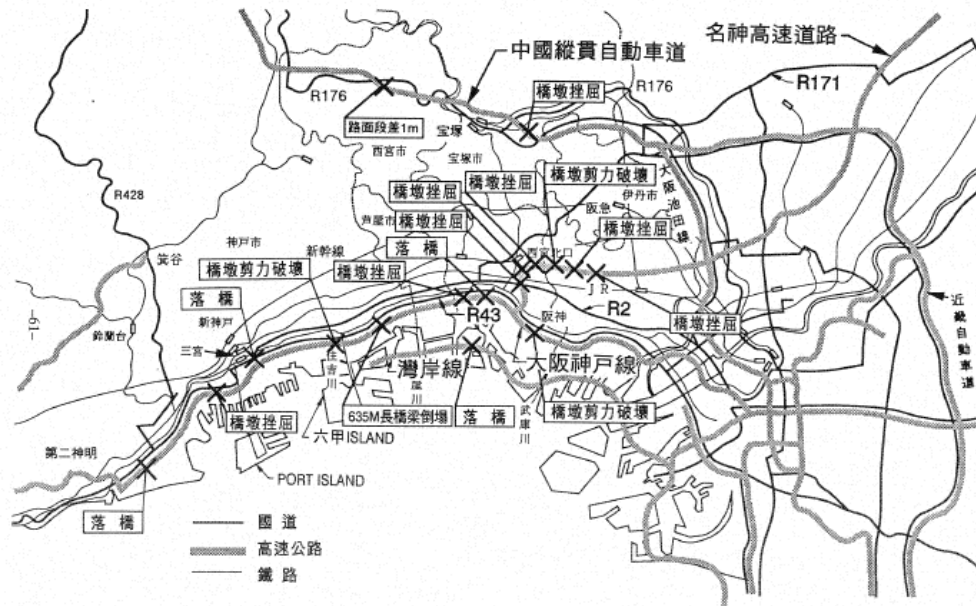


圖 29、神戶地震公路橋梁損壞分布

(資料來源: 葉超雄, 1995)



圖 30、阪神高速公路坍塌

(資料來源: Philip and Eizaburo, 1995)



圖 31、神戶港受土壤液化道路損壞塌陷

(資料來源: Haeri., 2016)



圖 32、建物嚴重倒塌起火

(資料來源: Britannica)

## 台灣 921 集集地震(Chi Chi Earthquake)

1999 年 9 月 21 日凌晨，台灣南投集集地區發生規模  $M_L 7.3$  強震，震源深度 8 公里，共計造成 2 千 4 百多人死亡，29 人失蹤，1 千 1 百多人受傷，10 萬人於收容避難處安置。地震重創維生基礎設施，震毀道路、橋梁及水利港灣設施，除此之外，醫院、學校、一般民宅毀損倒塌，共計約 5 萬多棟建物倒塌(張國鎮，1999)。電力受中寮超高壓變電所嚴重損壞影響，造成全台大規模停電；自來水方面共 5 座淨水廠受損，供水管路嚴重損壞，約 114 萬戶停水；天然氣管線則受損 70%，表 11 為 921 集集地震災情彙整。

### (一) 公路橋梁毀損、鐵路毀損

根據交通部公路總局統計資料顯示，地震共造成 44 條主要道路受損，33 條道路中斷封閉，其中以台 8 線中橫公路受損最為嚴重(圖 33)，需長時間維修整建，整體公路設施損壞重建費用預估為 114 億 2 千萬元。鐵路工程部分，縱貫鐵路隧道發生拱頂坍塌及軌道扭曲情況，鐵路集集線路基隆起、路線彎曲、站房受損傾斜(圖 34)。

### (二) 道路系統間接損壞

強震區的建物大面積傾倒毀壞，包括一般民宅、醫療院所、購物商城等，倒塌後造成路面阻斷情況(圖 35)(許添本，2000)。

表 11、台灣 921 集集地震災情綜整

維生設施災害	二次災害
<ul style="list-style-type: none"><li>● 自來水、電力、天然氣中斷。</li><li>● 公路、橋梁坍塌毀壞。</li><li>● 鐵路路基隆起、軌道彎曲損壞。</li><li>● 直接財物損失約為 3647 億台幣。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 震後陸續發生 90 件震後火災、上百起天然氣外洩事故。</li><li>● 主要道路受建物碎屑阻斷，人員避難增加、救護車與消防車救援作業延宕。</li></ul>



圖 33、公路橋梁嚴重毀損下落

(資料來源: 今周刊)



圖 34、集集鐵路線鐵軌隆起變形

(資料來源：今周刊)



圖 35、南投民宅倒塌道路損壞

(資料來源：今周刊)



## 日本北海道地震(Hokkaido Eastern Iburi Earthquake)

2018年9月在日本北海道東部地區發生規模  $M_J6.7$  地震，震源深度 37 公里，最大震度發生在厚真町地區測得 7 級，在札幌市、千歲市、與函館則測得 5 ~6 級的震度。本次地震共造成 41 人死亡、651 人受傷、32 棟建物倒塌，2 千 7 百多人避難處所安置。震後札幌地區發生土壤液化現象，建物因不均勻沉陷傾斜(圖 36)，地下自來水管線損壞破裂。受發電廠緊急停機、供電線路受損情形，北海道全境約 295 萬戶電力中斷，亦影響 249 家醫院之醫療機能，及供水系統之運作。表 12 為北海道地震災情彙整。(國家災害防救科技中心，2018)

### (一) 運輸系統災害

本次地震造成交通運輸系統受損，影響陸運交通，受鐵路軌道變位情況與填方龜裂問題，札幌市地鐵全線停駛、JR 北海道線列車全面中斷。部分高速公路封閉禁止通行；空運部分，札幌新千歲機場的天花板坍塌，震後國內線與國際線航班全部停飛(圖 36)；公路系統之交通號誌受供電中斷影響，市區客運全面停駛(圖 37)；郊區產業道路因土石崩落掩埋 (圖 38)。

表 12、日本北海道地震災情綜整

維生設施災害	二次災害
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電力、自來水與煤氣中斷。</li> <li>● 鐵路軌道變位，市區地鐵停駛、JR 北海道線路線中斷。</li> <li>● 市區客運全面停駛，高速公路封閉禁止通行。</li> <li>● 千歲機場國內線與國際線航班停飛。</li> <li>● 直接經濟損失 4000 億美元。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地震造成大規模停電，空運、陸運、鐵路等交通運輸全面中斷，間接讓區域產業活動暫停。</li> <li>● 受電力、自來水中斷後，共 249 個醫療院服務受影響。</li> </ul>



圖 36、北海道地震災情分布

(資料來源：國家災害防救科技中心)



圖 37、路口號誌停電交通管制

(資料來源: The Straits Times)



圖 38、土石崩落掩埋道路

(資料來源: 中央社)

## 運輸系統災害衝擊鏈評估模式建置：以道路系統為例

---

發行人：陳宏宇

出版機關：國家災害防救科技中心

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 109 年 12 月

出版年月：中華民國 110 年 01 月

版 次：第一版

非賣品



地址：23143新北市新店區北新路三段200號9樓

電話：++886-2-8195-8600

傳真：++886-2-8912-7766

網址：<http://www.ncdr.nat.gov.tw>