

行道樹傾倒脆弱度結合道路網路分析之 災害防救規劃-以金門縣為例

THE DISASTER MANAGEMENT COMBINED THE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF
STREET TREES WITH NETWORK ANALYST -IN THE CASE OF KINMEN COUNTY

國立臺北科技大學
土木與防災研究所
博士班研究生
金門縣消防局秘書

林俊
Chun Lin

銘傳大學
國土規劃與減災中心
專案經理

陳首騎
Shou-Chi Chen

銘傳大學
都市規劃與防災學系
教授兼系主任

林文苑
Wen-Yen Lin

銘傳大學
都市規劃與防災學系
助理教授

馬國宸*
Kuo-Chen Ma

銘傳大學
國土規劃與減災中心
專案經理

張育箏
Yu-Cheng Chang

摘要

國內在探討災害的環境脆弱度時，甚少探討行道樹受強風影響傾倒之脆弱度，金門縣曾經因為颱風帶來的強大陣風導致大量樹木傾倒，對當地災害防救事務造成重大的影響。以2016年莫蘭蒂颱風對金門縣之影響為例，雖然無重大傷亡案件，但對於金門地區之維生管線、各級產業經濟損失或緊急救護事件卻有極大之影響，可以發現對金門縣在地災害特性而言，風災(尤其是颱風)對於道路兩側所產生的風倒木是當地政府與民眾最為重視的議題之一。本研究藉由以金門縣林務所建置之林木基礎資料為基礎，透過文獻回顧與評析，以定性分析完成金門地區行道樹傾倒之脆弱度分布，再結合樹高、胸徑等樹木尺寸作為道路障礙點設定與地理資訊系統之道路網路分析，探討納入行道樹傾倒脆弱度影響下緊急救護車輛與避難場所之道路網路運作服務範圍，期望能夠對金門縣未來災害防救整備工作提供重要參考之依據。

關鍵詞：環境脆弱度、行道樹、災害防救、道路網路分析。

* 通訊作者，銘傳大學都市規劃與防災學系助理教授

33348 桃園市龜山區大同里德明路5號 · kcma@mail.mcu.edu.tw

THE DISASTER MANAGEMENT COMBINED THE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF STREET TREES WITH NETWORK ANALYST -IN THE CASE OF KINMEN COUNTY

Chun Lin

National Taipei University of Technology, Department of Civil Engineering, Fire Bureau, Kinmen County

Shou-Chi Chen

Ming Chuan University, Urban Adaptive Planning and Disaster Mitigation Design Research Center

Wen-Yen Lin

Ming Chuan University, Dept. of Urban Planning and Disaster Management

Kuo-Chen Ma*

Ming Chuan University, Dept. of Urban Planning and Disaster Management

Yu-Cheng Chang

Ming Chuan University, Urban Adaptive Planning and Disaster Mitigation Design Research Center

ABSTRACT

In the discussions on environmental vulnerability of disasters in Taiwan, the vulnerability of street trees is seldom discussed. However, a lot of trees fell down because of the strong typhoon, which greatly affected the disaster prevention and protection in Kinmen County. For example, in terms of the effects of Typhoon Meranti on Kinmen County in 2016, there were no casualties, but it had great effects on the life-support pipelines, economy or emergency rescue of Kinmen County. This shows that, as for the characteristics of the disaster in Kinmen County, the trees fallen on both sides of all roads in the wind disaster is one of the most important issues for the local government and the public. According to the basic data about trees established by the forest department of Kinmen County Government, this study completed the vulnerability distribution of the street trees in Kinmen County through literature review and evaluation, and then respectively by qualitative analysis and semi-quantitative analysis. In the end, the effects of street tree vulnerability distribution on the road network operation service scope of emergency ambulance vehicles and shelters were analyzed and discussed by combining with the geographic information system network, with the expectation of providing reference for future disaster prevention, protection and preparation.

Keywords: Environmental vulnerability, Street tree, Disaster prevention and response, Network analyst.

一、前言

1.1 研究動機

強烈颱風莫蘭蒂(英語：Typhoon Meranti，國際編號：1614，聯合颱風警報中心：16W)為2016年西北太平洋最強的熱帶氣旋，更是21世紀西北太平洋海域第三強風暴，僅次於2013年颱風海燕和2010年颱風梅姬。莫蘭蒂於2016年9月15日凌晨2時30分在金門登陸，當地於隨後一小時測得42.2公尺/每秒持續風速和61.7公尺/每秒最高陣風，打破金門所有氣象站建站以來之紀錄，颱風期間風勢比台灣本島更猛烈。莫蘭蒂颱風對金門影響與1999年丹恩颱風路徑相似，路徑為從台灣本島南部繞過直接撲向金門，颱風進入金門時結構仍然保持完整型態，對金門造成嚴重之衝擊。相較於台灣本島常見風災影響不同，如金門縣2016年受到莫蘭蒂颱風的侵襲，為該縣近十年內造成最嚴重災害損失之重大案例，根據中央氣象局氣象數據顯示其颱風侵襲期間觀測到瞬間陣風超過17級風以上之風力強度，對金門地區造成極大之影響。金門地勢平坦，未有高聳山脈阻擋等地形條件下，依據金門縣林務所(2016)資料，颱風期間直接造成樹木輕、重傷的風倒木超過3百萬株、行道樹4,100株，另有1百萬株包括小盆栽在內的綠籬，折損亦超過五百萬株大、小植物等，光是林木損害金額就達新台幣18億元，且造成金門全島行道樹及林木嚴重損毀，傾倒之樹木使許多地區停水停電，而金門地區更超過七成以上路樹倒塌，阻斷主要道路而無法通行的路段以環島東路南段、中山路、慈湖路北段，環島西路北段、環島北路、瓊徑路與沙青路為主。

金門縣道路網路特性較為單純且依賴數條主要幹道，因此直接性的行道樹倒塌會導致全島第一時間交通上之困難，道路服務水準急遽降低甚至造成一般車輛無法通行。而樹木攀折導致維生管線受損，包含扯落電線間接導致全縣2.4萬戶停電，因電力中斷，更進一步導致停水。停電、停水則甚至直接影響縣政府主要經濟事業單位金門酒廠之運作，單就酒廠而言，莫蘭蒂風災即損失新台幣9,912萬元，對於視金酒為經濟命脈的金門縣而言，無非是一大重擊。金門縣政府(2016)災後統計顯示，莫蘭蒂颱風災自9月15至24日縣府及國軍總計出動20,863人次、車輛3,005車次救災，其中最主要的任務為道路樹木之移除及障礙清理排除，顯示颱風期間受到風倒木之影響甚劇；另外，於颱風影響期間有民眾因居家聯外道路受風倒木之影響而造成救

護車輛無法通行與執行救護任務困難之案例，亦無法以簡易機具排除障礙樹木，需另行通報林務所委外工程機具廠商進行清除，最終耗費了9個小時完成民眾的救護後送。

依據莫蘭蒂颱風之災害防救經驗，金門縣地文條件、過去行道樹種植特性，導致道路網路運作困難，使風倒木成為了金門風災主要重要災害特性。

1.2 樹木危險評估與傾倒脆弱度

樹木必需以安全為目的進行健康診斷(吳孟玲，2018)，在追求安全、安心道路空間的同時，也要避免受保護樹木因颱風或強風倒下，或枝條斷落而造成人身及物品危害。林振榮等(2015)也認為樹木危險性是為了解測在不同目標地區具有危險缺點的樹木，進而評估危險缺點的嚴重性並在樹木發生破壞傾倒的公共事件前，提出正確的樹木經營管理建議方案，以便採取樹木處理的行動，在後續顯示樹木在種植的同時，持續檢視樹木本身的安全性，以維護公共安全。臺灣本島多數區域在當初種植的樹種選擇上未考量相關安全性，相關研究(章錦瑜，2009)顯示由於城市化的快速增長，人們可用的戶外空間變得越來越狹窄，由於種植樹木的選擇和種植方式不當，人們的生活環境質量受到影響並引起投訴和各種糾紛。

樹木危險評估是針對可能部分或全部樹體將會發生破壞現象(Fail)的掉落或傾倒，並造成損害或傷害之前，來檢查及評估樹木的過程。其中樹藝師執行樹木危險評估時，藉由預測及防止樹木結構性的破壞(Structural failure)，以促進公共安全；依據美國International Society of Arboriculture 大師級樹藝師Kevin K. Eckert在行政院農業委員會林業試驗所曾言：『全世界對於「樹木危險評估」的方式與步驟皆有不同，但每個方法皆有其限制條件與不確定性。樹木是否健康與是否有危險性並無絕對的關係，換言之，健康也不代表沒危險。』國內林振榮(2013)亦認為分析出樹木危險評估要考慮三個因素：

- (1) 樹木本身發生結構性破壞而傾倒的可能性 (Failure potential)
- (2) 各種環境 (Environment) 因素促使樹木的破壞傾倒
- (3) 將造成損害或受傷的目標(人或物，目標)

另依據 Intergovernmental Panel on Climate Change (2014)提及風險的概念是由危害度(危險度)、脆弱度、暴露量所組成，其公式為

$$R = H \times V \times E$$

R：風險(Risk)

H：危害(Hazard)

V：脆弱度(Vulnerability)

E：暴露量(Exposure)

對於樹木受外力影響所產生之風險而言，危害度為外在環境變化促使樹木受到破壞，可能為強大的風力，或土壤狀況之改變等樹木本身以外的外部條件；暴露量則是以樹木受損、傾倒後影響的範圍定義之(如經濟活動、人員傷亡、建物或基礎設施)，例如行道樹因強風若受損，倒塌於道路上，進而影響道路系統運作，受影響之路段則為暴露量而脆弱度為樹木本身之相關物理特徵(如樹種、根系等)。

與樹木傾倒之相關脆弱度的研究甚多，吳孟玲等(2018)認為針對樹木的脆弱因子必須考慮許多因素，包括樹種、生長習性、缺陷、枝條連結的品質、根系狀況、傾斜、樹木及生育地的歷史等；或是直接針對樹種本身適當性，如章錦瑜(2009)研究提出行道樹爭議性的產生乃因不適當的選種及栽植，討論包括植物體本身之花朵、果實、種子、根、枝葉與樹幹，以及天災(如風害)、嚴重之病蟲害、與生態不平衡等造成問題，行道樹因根群造成的爭議多來自根害，具根害的樹木意指其根會破壞道路、人行道鋪面、PU 跑道、房屋基礎等基礎設施，以及阻塞排水溝影響水流而造成積水，亦會破壞人工地盤之防水層而造成漏水等等。根據其研究彙整樹種之相關物理特徵如下：

具根害樹種(負面)有鳳凰木、榕樹、垂榕、菩提樹、印度橡膠樹、木棉、大葉桃花心木、吉貝木棉、印度紫檀、銀葉樹、欖仁、麵包樹、第倫桃、木麻黃、刺桐、大葉山欖、黑板樹、水黃皮、阿勃勒、茄苳、楓香與掌葉蘋婆等；而較不具耐風特性(負面)部分，常見行道樹如黑板樹、豔紫荊、羊蹄甲、鐵刀木、檸檬桉、鳳凰木、黃槐、垂柳、印度紫檀與豔紫荊等較不耐強風，於颱風過後易斷枝、折幹或整株倒伏，後續之環境清理工作急迫又繁重，屬於高度維護管理樹種。金門縣林務所與清潔隊(2016)根據莫蘭蒂颱風受損之實務經驗，彙整脆弱度因子除了樹種耐風特性、根害問題之外，樹高及胸徑大小則會影響救災單位執行相關任務之時效性與時間。

1.3 災害脆弱度運用於道路網路分析

對於災害風險評估中的曝露量而言，道路系統為其中一種常常被討論的重要基礎設施類型，依據金門莫蘭蒂颱風經驗，道路網路運作失效之情況造成了一定之損失。國內針對樹木危險評估後之運用，對於風

倒木影響道路系統或路網分析之探討甚少，王義仲(2017)進行樹木危險評估後結果運用於樹木所在位置不利大型機具進出時，可透過分析結果有效降低機具移動上之受影響程度，因此本篇結合金門道路網路的特性探討緊急救護車輛與收容避難場所服務區結合樹木傾倒脆弱度之災害防救規劃策略為主。陳建璋等(2017)亦在研究中分類高、中、低、微量風險等級在健康度高風險的情況下且具有高人為活動時，必須列為優先處理的對象。林振榮等(2012)在《危險樹木檢查及管理基礎手冊》中提出頻繁人類活動的領域和更高價值的財產，比在森林公園面積中央的有較大的風險可能性存在，曾碩文等(2008)提出胸徑大小與人行道硬體的毀損，呈現顯著正相關；且隨著胸徑的增大，黑板樹、阿勃勒及菩提樹，對人行道的破壞較其他樹種更甚。

而針對整個區域道路網路運作上，陳亮全等人(2004)認為道路系統的功能是否能夠正常運行將直接影響地區避難及救災的效率，但在災後影響道路通行的因素很多，如莫蘭蒂颱風所帶來的倒木造成車輛無法順利通行問題，因此確保災時道路能夠正常運行非常重要，影響到災時第一時間的搶救作業。避難及救災動線為災害發生時首先發揮功能的防災系統，且道路系統為其他防災空間的主要聯繫管道(張立山等，2011)。因此在規劃時必須建立在道路系統的特性上，否則可能導致防救災作業效率與運作降低，如陳亮全等(2004)表示有效的動線系統更直接反映避難及救災據點是否發揮預期功能。

ArcGIS Network Analyst 為 ESRI 所研發的地理資訊系統軟體 Arc GIS 其中一項功能。其中的網路(Network)是一種由互聯元素組成的系統，例如線和連接的節點等元素組成，這些元素用來表示從一個位置到另一個位置的可能路徑。而且可以通過對點位具體優化排序並查找停靠點之間的最短路徑來減少旅程時間，並且同時還可以考慮一些限制性因素，如道路網路中通行車輛容量和最長行駛時間等。常見利用人員、資源和貨物、車輛等都將沿著網路(可能為道路、線路、管線等)行進。像是汽車和貨車在道路上行駛，飛機沿著預定的航線飛行，石油沿著管道鋪設路線輸送。通過使用網路構建潛在行進路徑模型，亦可以藉由網路設定流動方向，例如石油、貨車或其他物件的移動相關的分析。最常用的網路分析是查找兩點之間的最短路徑。

國內在模擬道路網路運作上有謝承憲(2014)擬定道路網路脆弱度，需考慮包含道路面向與社會面兩部分，接著透過 GIS 系統進行圖層繪製及套疊，

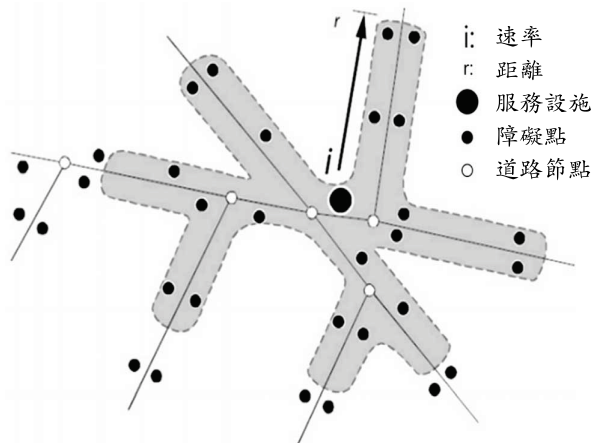


圖 1 道路網路分析服務區概念圖 (Andres Sevtsuk, 2012)

分析各路段脆弱度及路段失效所導致之道路網路脆弱度，其分析所選用之準則及權重應因地制宜，瞭解當地風險狀況。國外 Andres Sevtsuk(2012)認為運用道路網路分析系統，可以納入道路特性、考慮旅程時間其相關阻斷等因子，藉由道路網路的運算，可以找到符合實際情況之旅程時間和距離，如圖 1 設計道路網路分析參數為例， i 值為速率， r 值為距離，大黑點為服務設施，小黑點為障礙點，計算過程可結合道路節點來得到在不同環境條件設定下之道路可服務之區域。

ArcGIS Network Analyst 可以設定個別網路運作之速度並建立網路模組，以道路網路為例，可設定個別道路的車速(甚至設定日、夜間等)完成道路網路之建製，作為後續最佳路徑。如國內黃傳楷等(2017)運用 Network Analyst 探討捷運站失能後影響較大之站點等，而在最佳路徑與有效性等研究外，亦可以檢討是否有效利用網路分析結果，與地區防救災資源結合，探討負責區位與服務區之劃設(陳建忠等，1999)。

本研究以圖像化方式整合空間資訊並展示本研究

以金門縣本地環境及過去災害經驗，探討樹木傾倒對於道路系統所帶來的影響，並透過道路網路分析了解金門縣 18 條主要道路在救災上與樹木傾倒之間的關係及影響程度，而依據經驗行道樹的倒塌會直接影響道路網路的運作，於災害期間最為嚴重之影響乃緊急救護車輛「前往(To)」及收容避難場所之「集合(Back)」雖然指向有所不同，但仍可以利用 Network Analyst 中的 Service Area(服務區)，了解緊急救護車輛時間內可達之範圍，或是收容避難場所一定時間內可收容之範圍。

二、研究區域與基礎資料

2.1 研究區域

研究區域與相關空間屬性資料由金門縣林務所提供，為大金門地區(金城鎮、金湖鎮、金沙鎮、金寧鄉等四個鄉鎮)18 條主要道路兩側行道樹之點位，共計 23,647 筆點位資料。

2.2 行道樹基礎資料

所有行道樹點位資訊均包含樹種、樹高、胸徑三項資料，雖然其中的 8,872 筆有除上述三項外之植栽年、根部、密度等調查資料，以及部分地區非結構破壞性檢測資料，但為考慮後續進行道路網路分析的完整度，因此使用 23,647 筆的樹種、樹高、胸徑作為本研究使用之基礎資料，18 條主要道路兩側之行道樹樹高及胸徑分佈詳見圖 2a 與 2b；另外所有點位之樹高與胸徑對應散布情形詳見圖 3，基本上樹木高度與木材粗細呈現一正比關係。

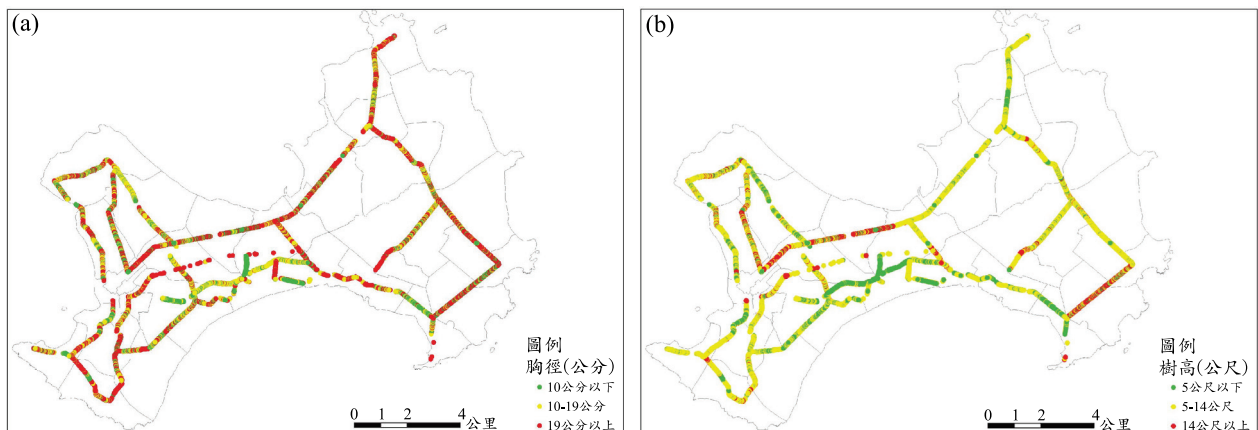


圖 2 (a)18 條主要道路樹木資料數值分布-胸徑(公分)；(b)18 條主要道路樹木資料數值分布-樹高(公尺)

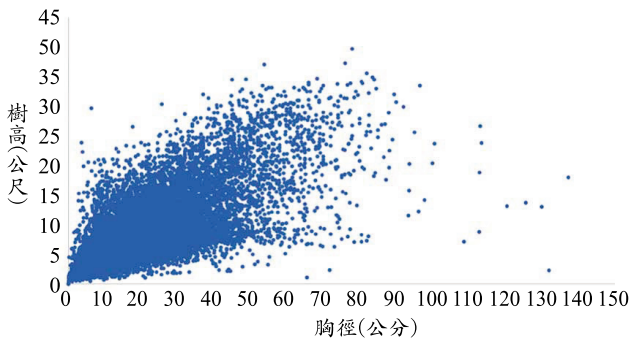


圖 3 18 條主要道路樹木資料數值散布圖

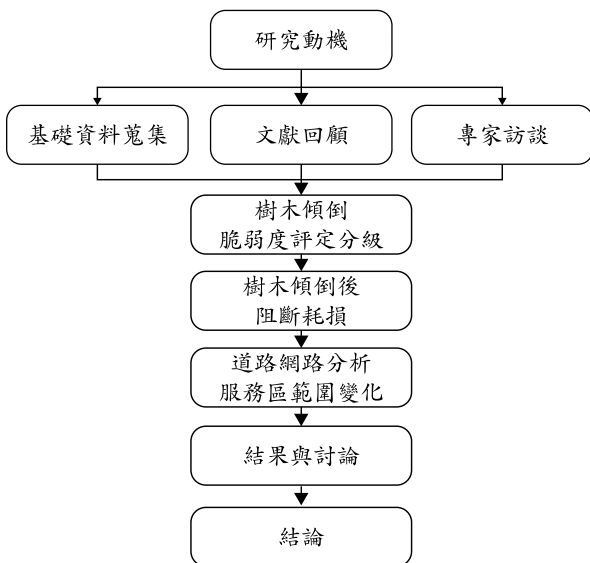


圖 4 研究流程圖

三、研究方法與流程

研究流程(詳見圖 4)以透過文獻回顧與基礎資料之相關限制條件下，結合樹種之特徵因子進行定性分析，進行受外力影響下傾倒程度之脆弱度分級，分別為脆弱度 I(高)、II(中)、III(低)三種級別。透過專家學者訪談及整合防救災基層從業人員之建議，利用樹高及胸徑等樹木尺寸大小作為阻斷參數與耗損時間之設定，並結合 ArcGIS 網路分析(運用道路作為 Network)計算緊急救護車輛及收容避難場所服務範圍再納入路樹傾倒脆弱度之差異。

3.1 樹木傾倒脆弱度分析

本研究使用定性分析，經過在地林務專家與公務部門依據現有資料進行討論，並彙整相關研究文獻探討樹木傾倒脆弱度之代表因子，最後依據基礎資料樹

表 1 金門樹木傾倒脆弱因子選擇

脆弱因子	內容	出處
耐風特性	黑板樹、豔紫荊、羊蹄甲、鐵刀木、檸檬桉、鳳凰木、黃槐、垂柳、印度紫檀等較不耐強風，於颱風過後易斷枝、折幹或整株倒伏，後續之環境清理工作急迫又煩重，屬於高維護管理樹種。	論台灣常見之爭議性行道樹
根害問題	具根害樹種常見的有鳳凰木、榕樹、垂榕、菩提樹、印度橡膠樹、木棉、大葉桃花心木、吉貝木棉、印度紫檀、銀葉樹、欖仁樹、麵包樹、第倫桃、木麻黃、刺桐、大葉山欖、黑板樹、水黃皮、阿勃勒、茄苳、楓香與掌葉蘋婆。	論台灣常見之爭議性行道樹

表 2 脆弱因子定性脆弱度分級

脆弱因子		耐風特性	
		較不耐風	較耐風
根害問題	較有根害問題	I (高)	II (中)
	較無根害問題	II (中)	III (低)

表 3 金門 18 條主要道路樹木脆弱度各級棵數

脆弱度分級	I (高)	II (中)	III (低)
棵數	580	7,073	15,994

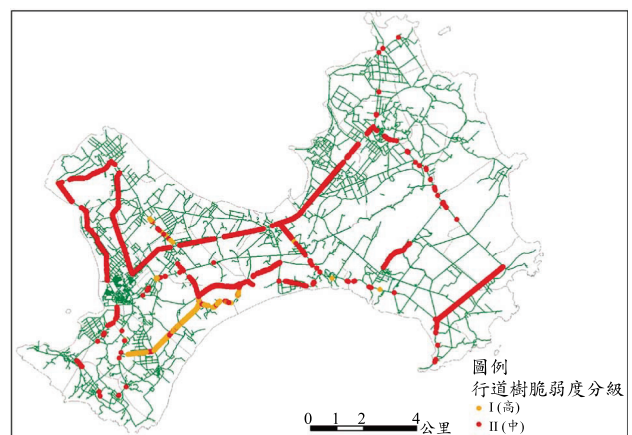


圖 5 金門縣 18 條主要道路樹木傾倒脆弱度中、高級分布圖

種資料，及上述眾多文獻中選出耐風特性、根害問題等因子並依據文獻回顧分析結果發現上述數項脆弱因子對於樹木風險具有相關性，依嚴重高至低分為 I、II、III 三個脆弱度層級，分級標準詳見表 2。脆弱度評估結果分別為 I(高) 580 棵，II(中) 7,073 棵，III(低) 為 15,994 棵(詳參表 3)，其中圖 5 為金門縣 18 條主要道路樹木傾倒脆弱度中、高之分布。

3.2 道路網路分析與服務範圍

除透過樹木本身脆弱度的研究分析外，本研究考慮災害管理之防救災實務運作，路樹傾倒主要為影響道路系統運作狀況，因此透過使用 ArcGIS 中的 Network Analyst 模組來模擬道路網路的運作，並以緊急救護車輛及收容避難場所服務區進行探討。其中 Network 採用金門道路作為運作網路(主要路網詳見圖 6)，在本研究中道路網路的單位為分鐘，並將道路分為主要道路(時速 50 公里) 830 公尺/分鐘，以及次要道路(時速 30 公里) 500 公尺/分鐘，作為道路網路旅程的運作。接續運用模組中之 Service Area(服務範圍)運作以緊急救護車輛(各鄉鎮消防分隊)、收容避難場所(作為 Facilities)畫設 3、5、15、30 分鐘區間之服務範圍。

障礙點設定則採用脆弱度分級結果為 I (高)及 II (中)之樹木，另因分級 III (低)乃考量抗強風性較佳之樹種，故不納入作為障礙點產生之考量。此外，利用樹木樹高、胸徑為阻斷(cost)時間之依據，將個別路樹點位作為周邊 5 公尺內最近路線上之交通阻抗(Traffic impedance)中障礙點(Point Barriers)考量，依據訪談金門林務所、清潔隊、鄉鎮公所等專家學者與基層公務人員之意見，賦予個別樹木(點位)處理時間作為耗費旅程，考量樹高及胸徑數值較高之樹木相對需要花費較多之處理時間，但一定尺寸以上之樹木處理程序皆需相關特殊機具與設備(如專業鏈鋸等)，排除障礙所花費時間並無太大差異，故本研究設定樹高 5~14 公尺(14 公尺以上為最高值)每增加 1 公尺耗損增加 0.5 分鐘；胸徑 10~19 公分(19 公分以上為最高值)每增加 1 公分耗損增加 0.5 分鐘。兩項合計各點位產生耗損時間在 1~10 分鐘之間。服務範圍影響後增設 60、180 分鐘區間作為表示，作為影響後探討阻抗影響之說明，本研究

表 4 道路網路分析參數與級距設定一覽表

主項目	次項目	參數或級距設定	
道路網路 (Network)	主要道路	830 公尺/分鐘	
	次要道路	500 公尺/分鐘	
緊急救護車輛及收容避難場所服務範圍*	影響前	3、5、15、30 分鐘	
	影響後	3、5、15、30、60、180 分鐘	
樹木脆弱度分級作為障礙點 (Point Barriers)-每經一點耗費旅程時間 (Added Cost)	樹高 5~14 公尺 (14 公尺以上為最高值)每增加 1 公尺耗損增加 0.5 分鐘。	0.5-5 分鐘	兩項合計
	胸徑 10~19 公分(19 公分以上為最高值) 每增加 1 公分耗損增加 0.5 分鐘。	0.5-5 分鐘	

*緊急救護車輛之時間區間，依據訪談消防相關人員訂定。

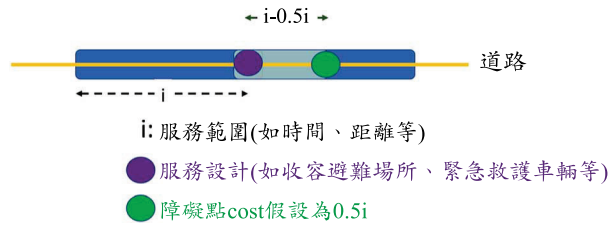


圖 7 道路網路分析與障礙點說明

所使用之各項參數與相關設定詳見表 4。以圖 7 為例，服務設施服務範圍為 i ，順道路向左無障礙點則為 i 之距離，而順道路向右有障礙點(cost 為 $0.5i$)，則會受到影響縮減障礙點後面服務範圍，甚至歸 0 停止。

四、結果與討論

本研究為探討樹木脆弱度模式評估之結果，藉由莫蘭蒂颱風之災害實際經驗來探討成果可行性及道路網路分析相關參數之設定，因此藉由至金門地區當地各領域專家學者(消防、林務、交通、工務等)針對莫蘭蒂颱風受災經驗作為重要參考依據。

4.1 樹木傾倒脆弱度分布情形

依據金門縣林務所提供 18 條主要道路行道樹點位與上述研究方法中提及樹木傾倒脆弱度所考慮到兩種因子分析，脆弱度較高(不耐風特性樹種、具根害樹種、)之行道樹主要位於環島西路二段、環島北路一段、二段、環島東路五段、環島南路一段等路段。本研究與當

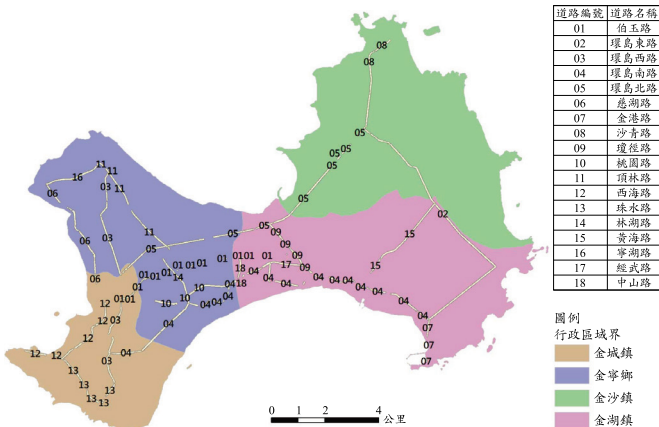


圖 6 金門縣 18 條主要道路

地執行災害防救業務人員了解莫蘭蒂颱風實際經驗，並參考金門縣林務所(2016)林區受損評估情形，可以發現上述之路段平均受損程度確實較高。

4.2 緊急救護車輛與收容避難場所服務區結合樹木傾倒脆弱度影響變化

本研究利用完成建置之道路網路，探討於災害事件中可能會需要使用道路系統的設施。金門地區之緊急救護車輛由各消防分隊管理及使用，故有通報案例時，將由消防勤務救災救護指揮中心進行分隊派遣。依據道路網路分析 Service Area 產製成果請見圖 8，可見其 30 分鐘內的服務範圍，除少部分無法通行地區外，其餘可遍及大金門全域(未含烈嶼鄉)，而其中有大約 80 %之區域面積在 15 分鐘內亦可以到達。

探討收容避難場所之服務範圍，金門地區大多為鄉鎮公所、各村里辦公處及活動中心作為收容避難場所為主。依據道路網路分析 Service Area 產製成果請見圖 9，可見其 15 分鐘內的服務範圍可遍及大金門全域，而其中有大約 60 %區域面積在 5 分鐘內亦可以到達。

依據上述研究成果，表示在大金門區域內，緊急救護車輛與收容避難場所所在空間分布與距離上皆適當。本研究利用風倒木脆弱度分析成果，採納脆弱度等級 I(高)及 II(中)作為道路網路運作之障礙點(Point Barriers)，並且考量不同胸徑及樹高之樹木傾倒現象，可能需要「移除處理倒木」的時間有所不同。

專家針對莫蘭蒂風災經驗而言，認為若樹木損壞胸徑較小，可能透過徒手搬運、鍊鋸等機具，簡易排除於路邊維持一道通行即可。而較大型之樹木，需要由林務所外包廠商重型機具來進行，在不考慮機具抵達時間下，重型機具處理一棵樹木也不會很久。因此本研究依據訪談人員實務經驗納入旅程耗損(Added Cost)作為參數設定依據，產製納入樹木傾倒脆弱度的緊急救護

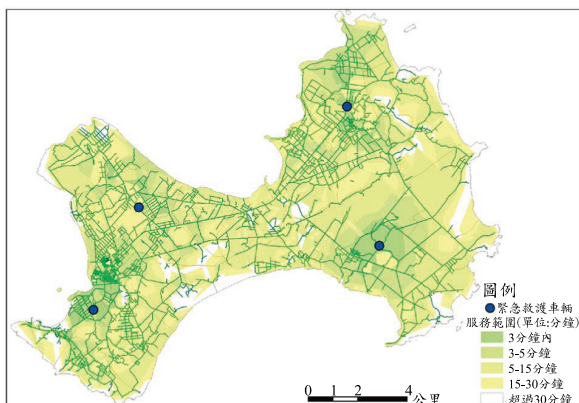


圖 8 金門緊急救護車輛服務範圍

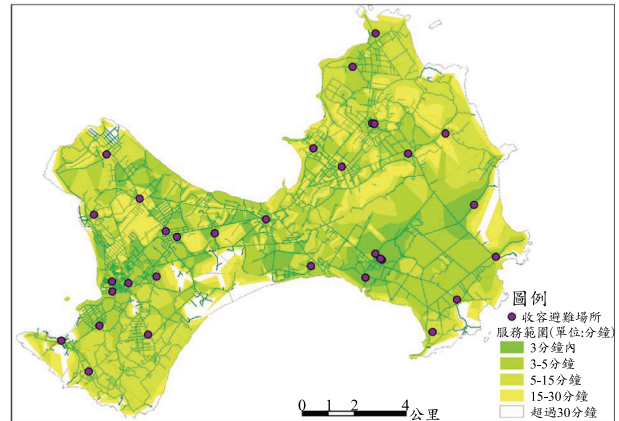


圖 9 金門收容避難場所服務範圍

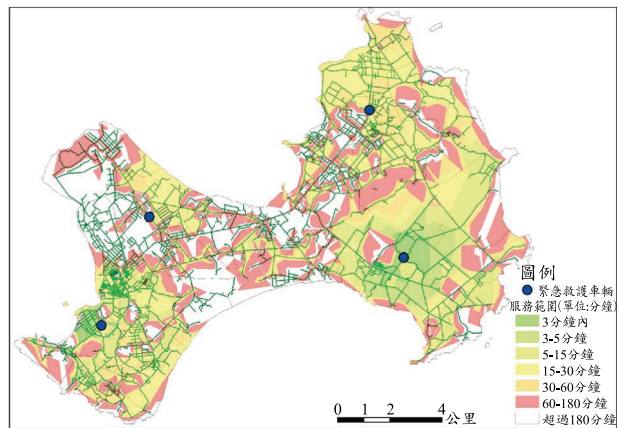


圖 10 金門緊急救護車輛服務範圍-納入樹木傾倒脆弱度後

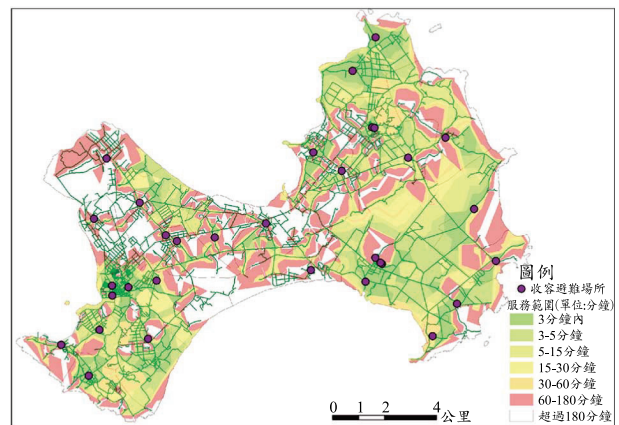


圖 11 金門收容避難場所服務範圍-納入樹木傾倒脆弱度後

車輛與收容避難場所服務範圍見圖 10、圖 11。依據納入樹木傾倒脆弱度後，可以發現在緊急救護車輛原先 30 分鐘的服務範圍降至僅於大金門 30 %左右之範圍，並且主要為依賴東南方之消防分隊。有許多區域在(大金西北地區)180 分鐘的服務範圍仍無法到達。

依據莫蘭蒂颱風在金寧鄉(金門縣西北地區)呼吸器案家之經驗，在道路順暢情況下救護車輛僅需要 5 分鐘內可以到達現場，而颱風期間因為樹木倒塌嚴重，加

上大型機具從預先停放定點一路移除至緊急救護車輛位置再依序搶通至案家，該案例最終花費共 8~9 小時(從通報時間起算)救護車輛才到達。而收容避難場所部分，依據納入樹木傾倒脆弱度後，可能因為避難收容場所位置與數量分布廣泛且平均，可以發現在緊急救護車輛原先 15 分鐘的服務範圍降至僅於大金門 60 % 左右之範圍，而大約 80 % 的範圍能在 60 分鐘內抵達，除了同緊急救護車輛服務範圍相同在西北方有部分區域 180 分鐘的服務範圍仍無法到達。路網影響後服務範圍之白色區域(耗費時間超過 180 分鐘以上)主要因素為主要幹道兩側脆弱度 I、II 級樹種數量較多，且胸徑、高度數值較高。以圖 10 為例，大金門西北部分地區雖然緊鄰緊急救護車輛點位，但道路兩側因臨近 I、II 級樹木數量較多，造成耗損時間較長，且無其他可替代之道路導致還未抵達及耗損所有時間，導致消防分隊與救護車輛無法在三個小時內服務之情形。

4.3 樹木風險概念延伸

透過相關樹木風險評估文獻，如鐘明哲(2017)可得知對於樹木風險本身已有許多相關研究結果，本文也根據這些研究結果配合目前現有資料為基礎列舉出相關脆弱因子以定性方式進行評估，為考量都市行道樹本身受災亦會造成許多复合型災害發生，故利用 GIS 道路網路分析將樹木風險結果延伸結合金門道路網路服務區變化等影響，評估大範圍之地區做後續參考，在飽受颱風災害侵襲的金門地區可提前預判救援道路之選擇亦可提升救援效率。

本文中所提及之脆弱度低中高等級亦可與災害概念相互應用，利用風險地圖可得知平時基於樹木保養之重點範圍，如修剪以移除或減少對樹體各部位可能破壞傾倒的載重或是以鋼纜、橫向支架、柱提供樹木結構性衰弱的部分，供地方政府災害發生時之調查及管制區範圍之劃定及限制、禁止措施等，而整備方面可應用本研究道路網路結合樹木風險之成果進行災害防救對策之研擬及推動，並落實應變體制。災害緊急應變部分針對所有已知高風險之地區路段進行執行災區人車管制、替代道路選擇、區域劃定、環境消毒或危害檢除等措施；災後復原重建針對易脆弱度高之樹種進行重新評估選擇，例如經由文獻回顧章錦瑜(2009)所提及榕樹、鳳凰木、木麻黃等具有根害及不耐風特性之樹種，此外板根型(印度紫檀與大葉桃花心木)、地面氣生根群(榕樹、印度橡膠樹與菩提樹)、淺根型(黑板樹、裂葉蘋果樹與鐵刀木)以及幹基型(樟樹與木棉)，這四種根型的行道樹都是對硬體較具破壞性的。例如桑科

榕屬的榕樹、印度橡膠樹與菩提樹已被台北市及台中市定位人行道的殺手，章錦瑜(2009)因此建議金門地區在未來災後重建之部分可另擇樹種。

4.4 金門道路網路的特性

本研究針對國內較少探討之路樹受風力影響後的脆弱度進行探討，並且應用於道路網路分析以及服務範圍之變化。以緊急救護車輛為例，根據模擬仍有許多區域可能需要 30 至 180 分鐘才能夠抵達，分析原因除了路樹本身脆弱度與分布特徵之外，另一重點為金門道路網路較為依賴主要道路。相較於台灣都市區域多以棋盤式道路網路分布，僅管主要道路受到阻礙，但次要道路基本上仍還能運行，而金門則有許多區域與自然聚落只要主要道路通行困難，可能就無法與外面通聯。

4.5 樹木傾倒脆弱度與服務區變化具體運用

回顧眾多相關文獻可發現許多不適合種植之行道樹樹種(不耐風及易有根害)仍被大量種植在金門縣主要道路的兩旁作為行道樹或防風林使用，配合樹高及胸徑等因素致使主要道路脆弱度增加，公共安全風險提升，而一旦發生樹木傾倒則會對周遭道路服務區產生重大影響，以緊急救護車輛為例，根據訪談結果可以發現，較嚴重之樹木傾倒需要依賴大型機具及專業設備前往排除，以莫蘭蒂颱風實務經驗上來說大型機具等是從駐守地點一路清除過去，因此大型機具駐守的位置點或重機具預置位置之選擇就非常重要，若評估服務區受影響較大之緊急救護車輛位置甚至可以考慮預置機具與救護車輛同一地點。而收容避難場所相較與緊急救護車輛之勤務急迫性較低，未來亦可以針對無法服務或是服務困難的區域增設其他收容避難場所點位，或是與民宿業者相互合作，以補齊颱風期間樹木傾倒後道路通行之困難。

依據金門縣政府(2016)針對莫蘭蒂颱風檢討，制定「樹倒優先搶通順序」共 10 項：

- (1) 人命傷亡受困現場。
- (2) 各消防分隊聯外道路。
- (3) 對外交通設施(機場、碼頭)。
- (4) 各鄉鎮通往醫院之主要幹道。
- (5) 停電區域(台電工程車搶修路線)。
- (6) 停話區域(中華電信工程車搶修路線)。
- (7) 居家使用維生器材需救護車載運案家之聯外道路。

- (8) 各鄉鎮自然村聯外道路。
- (9) 國軍營區。
- (10) 村里長、民眾回報道路。

而實務上若相關救災搶險機具和專業設備預設位置較遠，還是難以快速協助上述 10 順序進行道路搶通，因此應優先考慮道路網路之樹木脆弱度，進而預置機具，以作為緊急處置。

五、結論

因應道路系統之網路服務的穩定性為災害應變效率重要項目之一，若以颱風造成的風災引致路樹傾倒，直接或間接造成如交通中斷、停水停電等情形，本研究可提供金門縣防救災相關單位進行平時減災與災前整備對策之規劃，亦具有推廣至其他縣市參考的價值。以災害管理層面角度而論，未來可以藉由此類研究，探討災時應變道路或避難場所之替代方案，以及搶通優先順序方案擬定之依據，均為非常重要的課題。

六、謝誌

本計畫承蒙科技部整合型計畫「中央與地方防救災情資整合管理研究計畫-金門縣」(計畫編號：MOST 109-2119-M-130-001-)經費補助與技術支援得以順利完成階段性成果並持續精進與推廣應用，謹致謝忱。

參考文獻

1. 王義仲、羅翊瑄、林志欽，「以目視樹木評估法判斷中國文化大學之校園樹木健康風險」，華岡農科學報，第 40 期，P.61-74 頁，2017。
2. 吳孟玲、劉則言、李其龍、莊柏遵，「樹木健康管理與風險評估」，臺灣林業，第 44 卷第 1 期，P.27-34，2018。
3. 林振榮，「樹木風險評估的概念」，林業研究專訊，第 19 卷第 2 期，P10-15，2012。
4. 林振榮，「樹木應具備之樹木風險評估及管理」，林產工業，第 32 卷第 1 期，P49-61，2013。
5. 林振榮、張婕瑜、龔其主，「樹木風險評估的分類及等級」，林產工業，第 34 卷第 2 期，P.101-108，2015。
6. 林振榮、黃裕星、黃國雄、張東柱、吳孟玲，都市樹木風險性評估及管理參考手冊，行政院農業委員會林業試驗所出版，行政院農業委員會林業試驗所發行，2012。
7. 金門縣林務所，金門地區莫蘭蒂颱風森林災損評估案結案報告書，2016。
8. 金門縣政府消防局，105 莫蘭蒂颱風檢討報告，金門縣政府消防局，2016。
9. 張立山、孟德光、董艷英、邢艷，「城市應急避難所的建設現狀與對策」，International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)，2011。
10. 章錦瑜，「論台灣常見之爭議性行道樹」，造園景觀學報，第 15 卷第 1 期，P.1-19，2009。
11. 陳亮全、詹士樑、洪鴻智，「都市地區震災緊急道路網路評估方法之研究」，都市與計劃，第 31 卷第 1 期，P.47-64，2004。
12. 陳建忠、詹士樑(1999)，都市地區避難救災路徑有效性評估之研究，內政部建築研究所專題研究計畫成果報告。
13. 陳建璋、魏浚紘、謝依達、陳朝圳，「行道樹、受保護樹木之調查及資訊系統建立與應用」，中華林學季刊，第 50 卷第 1 期，P.33-56，2017。
14. 陸象豫、林昭遠、黃良鑫，「莫拉克颱風後六龜試驗林崩落地空間分布特性探討」，台灣林業科學，第 26 卷第 4 期，P.399-408，2011。
15. 曾碩文、黃光亮，「嘉義市人行道上行道樹根系對植穴邊框、鋪面與路緣石之損毀」嘉大農林學報，第 5 卷第 2 期，P.35-45，2008。
16. 謝承憲、馮正民、柯旻輝，「構建都會區運輸道路網路脆弱度評量模式」，第 26 卷第 3 期，P.349-372，2014。
17. 鐘明哲，「頭份市社區伯公樹的樹木風險」，林業研究專訊，第 24 卷第 5 期，P.30-34，2017。
18. 黃傳楷、王聖鐸，「臺北捷運路網之脆弱度分析」地理研究，第 66 期，P.1-16，2017。
19. Andres Sevtsuk, Michael Mekonnen, "Urban Network Analysis: A New Toolbox for ArcGIS," Revue International de géomatique, 22:287-305, 2012.
20. Na, J., N. Okada, and L. Fang, "A Participatory Workshop Approach to Scenario Development for Disaster Relief, Response and Recovery Processes." Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Istanbul, Turkey, October 10-13, pp. 3433-3438, 2010.

收稿日期：民國 109 年 04 月 21 日
修正日期：民國 109 年 06 月 02 日
接受日期：民國 109 年 08 月 04 日