

都市地區震災緊急路網評估方法之研究¹

陳亮全² 詹士樑³ 洪鴻智⁴

論文投稿日期：92 年 08 月 21 日

第一次修正日期：92 年 10 月 14 日

第二次修正日期：93 年 02 月 23 日

論文接受日期：93 年 03 月 11 日

摘 要

震災發生後都市地區道路系統的功能發揮正常與否，直接影響避難與救災的成效，相對減低災害傷亡的可能。本文的主要目的，在收集與整理系統性的路網評估方法，建立具實務操作性的評估方法。在震災緊急路網系統的評估中，除了個別路段的有效性外，整體系統的有效性更是需要探討的重點。針對以上考量，本文將避難救災動線系統的評估，區分為兩個層次討論，首先是依據震災對路網影響因素的界定，進行個別路段的評估；其次是討論對整體動線系統評估的方法。在個別影響因素的界定上，對於避難救災動線的評估應考慮的因子，包括道路本身實質影響因子與活動影響因子兩類，個別因素提供路線評估一個基本參考資料，例如建物高度比、高架道路或捷運路線等易造成路段封閉，影響避難救災之功能等；路網系統的整體評估，則可透過連續性變動指標及最短路徑成本變動比來進行。

關鍵詞：都市地震災害、避難救災路徑、評估方法

1.本文為國科會專題研究計畫(編號：91-2625-Z-305-001)之部分研究成果，承兩位匿名審查委員的寶貴意見，特表謝忱。

2.國立台灣大學建築與城鄉研究所副教授，E-mail：lcchen@ccms.ntu.edu.tw。

3.國立臺北大學地政系副教授，E-mail：slchan@mail.ntpu.edu.tw。

4.國立臺北大學地政系副教授，E-mail：hung@mail.ntpu.edu.tw。



ON THE ASSESSMENT OF THE EMERGENCY NETWORK FOR THE URBAN EARTHQUAKE DISASTER

Liang-Chun Chen

Graduate Institute of Building and Planning, National Taiwan University

Taipei, Taiwan, 106

Shih-Liang Chan and Hung-Chih Hung

Department of Land Economics and Administration, National Taipei University

Taipei, Taiwan, 104

ABSTRACT

The effectiveness of local network after earthquake has significant impact on the function of hazard mitigation. The main purpose of this paper is to articulate the method of network evaluation in the earthquake hazard and to provide with feasible evaluation method based on the data availability. Two levels of network evaluation are considered in the study, which includes the evaluation of the individual link and the network system. The evaluation of single link applies the factors of width of road, parking, debris, the activities beside the road and some indicators composed of them. For the network system evaluation, a connectivity index is introduced and modified to illustrate in the paper.

Keywords: Urban earthquake disaster, Emergency network, Assessment approach

一、前言

都市是人口與經濟活動高度聚集的地區，因此，受到地震災害影響的程度遠較其他非都市地區來的顯著。日本阪神大地震導致大規模的人員傷亡、建築物倒塌、交通設施及維生管線破壞，以及地震延伸災害的損失，對都市發展與民眾生活影響既深且遠。因此，自日本阪神大地震以來，都市地區的防救災計劃更是備受重視，政府部門也相繼擬定相關方案，投入都市防災的規劃與整備工作，期能防止此類都市廣域性災害的蔓延；台灣地區 921 地震所造成的影響，雖未集中在高度發展的都市地區，但也造成重大損害，因此對於道路在災害發生時可否發揮疏散避難、救援、復原的機能，應建立系統性的評估方法。



道路系統在地震災後之避難與救災過程中，扮演最基本的功能，道路系統的功能發揮正常與否，直接影響避難與救災的成效，相對也就減低災害傷亡的可能。就整個災害發生的時序與避難救災的作為而言，避難救災動線系統是首先發揮功能的第一線防災空間系統，再者，道路系統與其他的防災空間系統也是息息相關，各空間系統的功能發揮，都需要藉助道路的正常運作方可達成。因此，緊急道路系統在防災整體的規劃作業上，扮演了最關鍵性的角色。為確立避難與救災動線系統的功能，需要建立一個兼具有效性與可行性的評估模式，傳統以交通問題為基礎的評估方式，需要複雜的模型架構與資料，對實際應用有其困難性存在，本文嘗試以較簡易的方式，進行單一路段與路網系統連續性之評估，以提供震災緊急路網評估的基本資訊，提供進一步防救災計劃擬定之參考。由於避難與救災路徑是都市防救計劃中重要的一環，該動線系統的有效性更是直接影響避難與救災據點能否發揮預期功能，透過完整的評估方法，將有助於確認避難與救災路徑之個別與整體有效性，提供都市計劃通盤檢討在防救災功能上之規範與調整。

本文的主要目的，在收集與整理都市地區震災之避難與救災路徑評估方法，期能建立適合國內環境的評估模式，發揮評估避難與救災路徑的功能。由於影響都市地區避難救災路徑之有效性的因素，除了道路之實質面，包括道路及損壞程度、道路關閉可能性、可供緊急避難救災之實際寬度等，尚需考慮其他因區位及周邊活動特性所造成的差異性，因此，在本文的第二部份將對震災對路網系統的影響因素，以及近年來相關研究加以整理；第三部份以路段影響因素為依據，說明個別路段有效性評估可採行的參考指標；第四部份則延伸至路網可靠度分析，以路網系統的整體連續性為基礎，討論連續性變動指標與設施可及程度變動兩種評估方法；第五部分提出本文的結論與建議。

二、都市地震災害與路網系統

道路系統在都市日常生活具有多樣性功能，包括供人員或車輛通行、停車空間、人員上下車及貨物裝卸、構成街廓、日照、通風及採光所需之生活空間、都市防災之必須空間等。在都市防災方面，道路則具有避難用道路、火災蔓延之遮斷帶、緊急輸送用道路、消防用道路等功能。然而，在地震災害中，路網系統會因為震災而產生毀損，以致無法發揮其應有的功能，因此在討論道路系統之防救災功能時，必須先了解道路在震災中可能遭受的損害，以及造成損害的原因，才能進一步探討其防救災效能。根據地震災害的內容與分類，可以將地震對道路系統之影響類型概分為二：

(一) 直接損害(道路系統本體受損)：

道路斷裂、鐵路彎曲起伏、高架道路或橋樑斷落，而其成因主要為地盤隆起、搖撼、土壤液化等自然環境破壞，但也可能是因為施工品質不良所致。



(二) 間接損害(道路系統受到阻礙)：

主要是因為人為環境破壞(周圍建物倒塌)所致，亦有因大量人群或所帶出的財物等造成使用上的阻礙。

上述兩類因地震所造成的損害類別，可以進一步細分為以下項目：

- 1.路面破壞
- 2.高架道路或高架橋因搖動之破壞
- 3.土壤液化災害
- 4.地震地滑
- 5.建築物破壞或倒塌災害
- 6.自來水管線斷裂所導致之道路關閉
- 7.天然瓦斯管線斷裂所導致之道路關閉
- 8.有害物質外洩斷裂所導致之道路關閉
- 9.水壩破壞之水災所引致之道路災害
- 10.其他(如停車、障礙物等)

根據美國加州地震研究中心針對加州 1989 年 Loma Prieta 地震與 1994 年 Northridge 地震之兩次都市地震災害調查發現，直接災害之自然環境破壞與人為環境破壞，對於道路系統的損害程度相當不同。雖然自然環境破壞比人為環境破壞對街道或高架道路的數量較少，但是影響程度卻較高，例如自然環境破壞所引起的道路損壞，約 45% 會導致無法通行，而人為環境破壞所引起的道路損壞則有 55%。其次，高架道路與橋樑的損壞多半起因於自然環境破壞(搖撼與山崩)且道路破壞程度比較嚴重，街道則多起因於人為環境破壞(高架道路、建物損壞所造成之落下物與水管破裂)但卻少有造成無法通行的狀況。尤其在都市密集地區要特別注意高架道路與建物的倒塌，因為會造成災害重建時難以解決的障礙，例如舊金山地震約造成八成的道路因建物倒塌而封閉，有關加州 1989 年 Loma Prieta 地震與 1994 年 Northridge 地震之兩次都市地震災害對道路所造成之直接與間接損害比例，如表一所列。

表一 Loma Prieta 與 Northridge 地震災害道路損害原因比較

	直接災害	間接災害	合計
Loma Prieta	46%	54%	142
North-ridge	45%	55%	140

資料來源：陳建忠、詹士樑(1999)

表一顯示震災中道路所受影響有相當高的比例來自間接因素，李威儀等(1997)依據避難救災道路的功能層級，指出不同道路寬度下，影響交通動線之防災力因子與影響範圍，詳如表二，顯示在評估路網之震災影響時，動線本體與周邊土地之使用現況均應納入評估的對象。



表二 影響交通動線防災力關係表

道路寬度(m)	避難救災層級	影響因子	影響範圍
4	避難輔助	單側停車 圍牆 電線桿、變電箱	人員通行有效寬度不足 車輛無法通行 倒塌或爆炸造成阻隔
6		單雙側停車 圍牆 電線桿、變電箱 招牌 騎樓	車輛通行困難 倒塌或爆炸造成阻隔 招牌墜落造成人員傷亡 阻礙通行 騎樓因結構因素引起建物傾倒
8			
10			
12			
15	救援輸送	單雙側停車 電線桿、變電箱 招牌 騎樓 人行道	招牌墜落造成人員傷亡 阻礙通行 騎樓因結構因素引起建物傾倒 機車停放造成人行動線阻隔 周邊商業行為造成有效寬度縮減
18			
20	緊急	單雙側停車 招牌 騎樓 高架橋 捷運	騎樓因結構因素引起建物傾倒 機車停放造成人行動線阻隔 周邊商業行為造成有效寬度縮減 高架橋因地震強度之影響造成阻隔 高架捷運受震之損壞及人員傷亡
30			
50			

資料來源：李威儀等(1997)

基於道路系統對震災防救功能之體認，國內近年來有相當多的研究投入相關議題的討論，謝嘉鴻(1998)經由建構模糊多目標避難區位分派模式(Location-Allocation Model)，規劃在大型震災後人員的疏散與指派，以達成在有限的空間與時間限制下，將人員順利且公平的指派，並結合相關的研究，以台北市為研究對象，對於地震二次災害避難疏散做分析研究與實例應用之探討。黃亦琇(2000)依據 921 集集大地震救災過程之經驗，試圖建立一套適合國內，且符合各項防災、救災工作所需之震災道路系統評估指標，並提出指標所需資料之調查蒐集方法，輔助救災人員在有限的時間內掌握狀況並作出最佳決策。該研究在參考了國內外震災之交通評估指標、國內外之防救災體系、921 集集大地震交通系統緊急應變相關研究等相關研究之文獻，並以 921 集集大地震為對象進行實證分析，將時間範疇分為災前、搶救、維生、復原四階段，利用各階段必須完成之工作，配合空間系統的概念分別找出各階段道路評估系統的評估指標。

呂獎惠(2000)嘗試構建一套都市震災救災路線選擇模式，於震災來臨時，能立即提供適合救災車輛行走之路線，該路線須同時具備安全性與效率性。其實證分析之結論認為：震災發生後，不論採行完全或部分交通管制，其旅行時間與延滯明顯比不實施交通管制少的多，而完全與部分交通管制間的差異則相當有限；由效率控制的救災路線，由於其主控因子為路段旅行時間延滯與總旅行時間，所以，當路網的交通量稍一改變，路線亦隨之改變。許添本(2001)利用地震可能造成房屋倒塌，以致阻斷道路之風險，結合因龐大之進出災交通需求可能帶來的交通

阻塞，建立聯合效用函數，結合 TRANSCAD 及 GIS 與交通指派功能，以南投災區之核心地區草屯及南投市之對外聯絡網絡為例，進行救災最短路徑之討論。王晉元及盧宗成(2001)藉由回顧交通設施災損緊急搶救與復建體制研究，與地震災害之道路系統管理策略等文獻回顧，分析防災、救災與重建各階段重要工作內容中之相關交通資料需求，並回顧目前國內交通電子地圖與資料庫之建置情況，探討資料需求與供給之間的差距，研究中並提供都市地區地震防災交通資料庫之初步架構：1.都市地區地震防災交通資料需求分析 2.地震防災交通資料庫之初步架構。最後在根據震災災變管理三階段中之交通相關資料需求分析建立都市地區地震防災交通資料庫之初步架構。

李克聰(2001)規劃設計出一套在最短時間、最短路徑及現有資源內緊急且有效疏散災民的大眾運輸系統，該研究分為四大部分：1.因應災害下所規劃與設置之臨時大眾運輸場站；2.因應災害下所規劃與設計之大眾運輸疏散系統；3.因應災害下所規劃與設計之災區外緣接駁轉運系統；4.結合上述場站、疏散路線系統、轉運系統所組成之路網。並同時採用了地理資訊系統、全球衛星定位系統等技術，於大眾運輸場站之選取、疏散路線之規劃與轉運站之接駁系統等三部份，進行系統的分析。

李泳龍等(2001)針對東勢地區進行之調查設計，對象包括道路網、道路寬度、阻絕因素(建物結構、建物樓層、路樹、圍牆)、阻絕寬度。經由外在四個道路等級加以區分，建立判別模型，結果顯示街道寬度(1-4 公尺)對於道路阻絕有顯著影響。並進一步發現都市層級較高之都市，相對都市人口較多、道路較密集，且都市蔓延地區也會存在，因此對於道路整建後之孤立據點改善相對較佳。

侯鵬曦(2001)嘗試釐清震災時市區道路之運輸功能特性，以作為未來防災道路系統規劃之原則，研究中以避難、救援(消防、醫療觀點)、物資輸送三個面向，來探討避難道路系統、救援道路系統、物資輸送道路系統之雛形，並以 java 程式語言建構路網矩陣，提出替代路網、關鍵路段等觀念。

上述對於震災路網系統相關研究，所應用到的理論方法與所需要的資料，均屬複雜且不易取得，在實務規劃的應用上，存在其實作的困難性。因此，本文以規劃應用之操作性為主要考量，透過指標的方式，探討路網中個別路段與整體路網的對震災時避難救災功能之正面效益。

三、單一路段之震災影響評估

根據影響道路系統在震災後避難救援功能的直接與間接因素，可以建立檢核表進行簡易路段評估，以路段在因素檢核表中各項影響因素的實質狀況為基礎，做為個別路段在改善時的參考，至於路段的避難救災功能的評估指標，則有以下幾類評估指標可資採用(陳建忠、詹士樑，1999)，各項指標本文以台北市仁愛路、市民大道、基隆路以及復興南路所圍繞之地區為例(詹



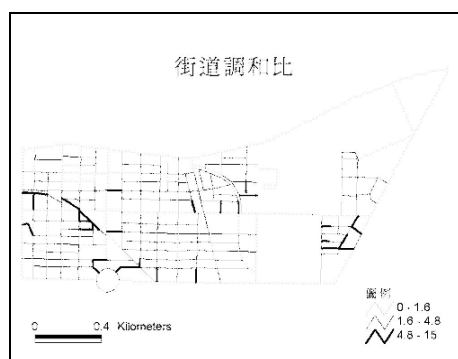
士樑，2002)，顯示其指標內容。

(一)街道調和比

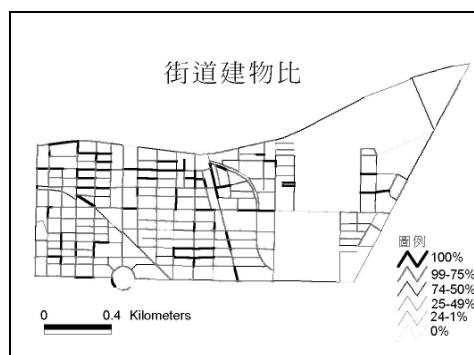
指街道沿線建築物之高度 H 與道路總寬度 D 之比率，以 H/D 表示之。當街道太狹窄時，可能因房屋倒塌、電線桿傾倒等狀況而影響救災、逃生及消防。 H/D 之比值以介於 $1/3$ 至 1 為適當(國立中央大學土木工程學系，1999)，若 H/D 太大，街道空間呈閉鎖狀，除大火災時有飛灰之危險性外，建築物倒塌時，將妨礙消防緊急車輛的通行，進而阻塞避難通道(圖一)⁵，對於 H/D 值較高的路段，應妥善規劃其避難與救災功能之替代道路。

(二)街道建築物比

街道建物比係指街道兩旁建物的密度，以建物總寬度除以路段長度計之。街道兩側建築物的數量可以代表活動量，是避難救災需求量的指標之一，同時，建築物的數量也是影響道路有效寬度的因素。如圖二所示，範圍內街道建物比在整體而言大部分路段是屬於大於 75%，建物占街道比例高達 100%之路段，分部在忠孝東路四段、延吉街部分路段，以及大安路 31、51 巷、復興南路 107 巷、敦化南路 161 項與其他位於巷弄間的零星路段。此類路段因活動密集，在避難時可能有大規模人群之群聚現象，因此在避難動線的規劃上，應強調其人群的引導性。



圖一 街道調和比



圖二 街道建物比

(三)路段人口負荷比

地震災難發生時，由於避難救援時間有限，一個路段若於單位時間內匯集容納的人與車輛過多，勢必影響該路段的疏散效果。透過地址對位之戶籍人口資料，可以計算各路段之避難人口負荷比，瞭解易造成阻塞之路段，如圖三所示。人口負荷比較高的路段，由於可能有人群聚集於週邊避難，容易產生避難與救災之功能衝突，在劃定緊急救難路線時，應考慮避免。

5.街道路段之建物高度採兩旁建物樓層數之家數，乘以3公尺為H值。

(四)高危險性路段

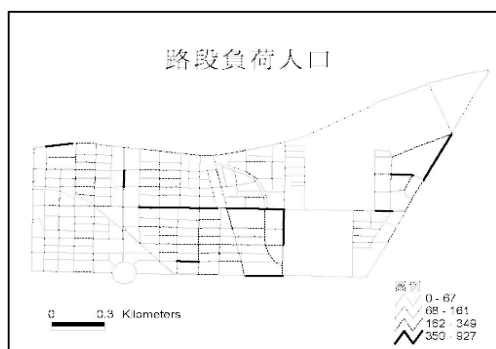
若某路段位於地震帶、斷層、鬆軟地盤或環境敏感地區，或者有高架橋、陸橋等橫越時，當發生地震時容易造成路面斷裂、地層下陷或遭阻斷而無法通行，此類路段若位於主要避救道路之處，可能造成災後避難救災功能之發揮，可以考慮以此類路段為防災避難圈之劃設邊界，以使分區具完整性。圖四顯示研究區內危險因素之天橋高架橋或捷運高架橋分佈狀況。

(五)停車所佔道路長度與面積比例

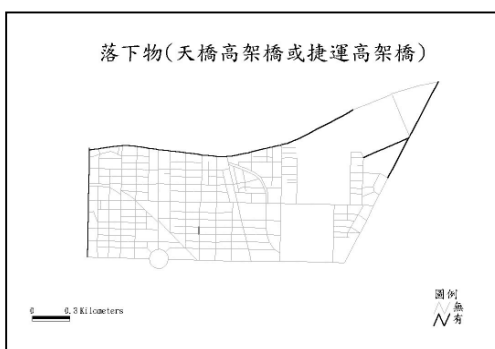
路邊停車問題是影響道路緊急避難救援有效面積最直接且最重要的因素，即使道路規劃面積符合避難救援之要求，仍會受到道路單側或雙側停車之影響，而減少其在緊急情況下功能之發揮，以圖五為例，在忠孝東路、仁愛路、安和路、光復南路所為成的區間，幾乎每個路段的兩側被車輛佔據的寬度都超過 75%以上，其餘路段的被佔用寬度約在 49%以下。

(六)道路兩側落下物

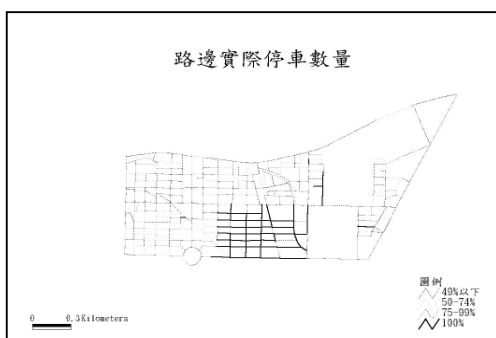
道路兩側之落下物包括招牌、建物外牆、窗子、冷氣、電線桿等，於地震發生時皆有可能掉落而影響避難救援道路的功能(圖六)。



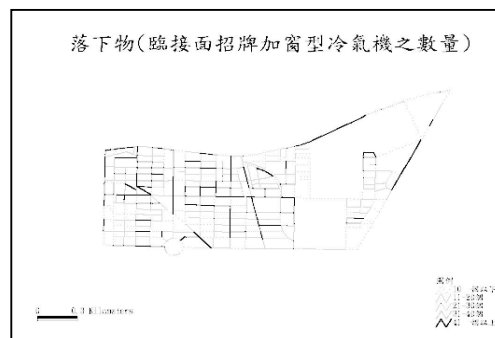
圖三 路段人口負荷比



圖四 天橋高架橋或捷運高架橋分佈



圖五 路邊實際停車數佔路寬比例分佈圖



圖六 臨接面招牌加窗型冷氣數量分佈圖

(七)道路損壞機率模式

機率模式的應用，主在估計各避難路線發生不同損壞程度之機率。此種機率與損害程度之估計，乃地震風險分析最基本之工作。然欲估計各避難路線發生損害之機率與損害程度，須從兩個層面進行估計。第一個層面為路面發生損害之機率與損害程度；第二部分為地震發生後各路面發生阻礙(如障礙物之掉落、發生火災等)，造成無法通行(或難以通行)之機率。最後，再將此兩部分所估計之成果，進行複合機率的計算，如此方能完善的估計各避難路線損害之風險。以下即分就此兩部分之機率與損害程度估計方式說明之。

- (1)對於路面實質損害之危險度評估：此方面之機率與損害程度估計，可使用 HAZ-Taiwan 系統之交通運輸系統損害估計模組之損害方法進行估計。HAZ-Taiwan 模組中之估計方法，乃以損害函數或脆弱曲線(fragility curves)，估計設施損害超過特定損害情況之機率，作為危險度評估之基礎。損害函數之估計方式，係以對數分配之型態，直接估計在特定地表損壞的條件下，特定交通設施或交通路段之損害機率(超過特定之損害情況)。損害函數對於地表損壞情況之界定，乃是依據不同的 PGA(最高加速地表滑動)與 PGD(永久性地表損壞)情況下，地表損害程度，以其發生損害情況之中位數為依據，再加上其擴散係數(dispersion factor)，據以計算出發生危害之對數分配累積機率，做為危險度分析之基礎。
- (2)路面發生障礙之機率估計：除了上述以道路實體因素考量所進行的道路毀損機率分析之外，屬於道路兩側土地使用的因素，亦是造成路面障礙必須考慮的因素，例如建築物之障礙物掉落或引發火災等原因，而造成路段阻塞。此類因素因所涉及之變項過多，若欲精確的估計每一路段發生不同程度阻礙的機率分配，是非常困難之工作。此類道路阻礙分析之一般函數模式，進一步透過以建立機率分配模型(例如利用迴歸模型、Logit 模型、Probit 模型等)，即可估計各路段 i 發生各種損害與阻礙程度之機率分配。理論上根據上述程序，應可估計各路段發生不同程度阻礙之機率分配，如「完全毀損、嚴重毀損、局部毀損、輕微毀損、完全通行」等狀態之機率模型，惟在實際應用狀況，仍有太多之不確定因素、資料蒐集的困難及估計的時間與成本等課題的存在，形成模型校估的困難。故在實際應用時，為簡化分析模式，可直接利用 0/1 之二元值(例如有阻礙發生則狀態值為 1；反之，如無阻礙發生則為 0)，直接模擬各路段發生阻礙時／無發生阻礙時之避難路線評估，可簡化前述模型建立之困難。

綜合前述兩種機率分配之估計，進行複合機率估計，例如以兩項機率值相乘等，即可評估個別路段發生損害之機率與損害程度之估計，亦可直接估計個別路段之地震災害之風險，而可作為避難路線評估之基礎，惟機率模式之建立有賴完整的地震後路段毀損調查資料，目前國內對此資料闕如，僅有 921 地震後之建物毀損調查，並已進行相關機率模式建立之研究，道路部分則尚難進行。



四、緊急路網系統連接性可靠度評估

除了上述單一路段的評估之外，整體路網系統的效能在震災救援的評估上，亦是重點，此項工作可從破壞或退化交通系統(degradable transportation system)的可靠度或可及性研究著手(Nicholson and Du, 1997; Iida, 1999; Pirie, 1979)。傳統交通路網可靠度研究主要關注於兩方面，包括連接性可靠度分析(connectivity reliability analysis)與旅行時間可靠度分析(travel time reliability)分析。前者之可靠度分析，主指路網節點仍可聯通的機率分析。後者分析的焦點，在於指定的起迄點中，於特定時間內，可順利聯通的機率分析。Du and Nicholson(1997)後來提出一個整合的均衡模型，目的在模擬道路容量受制於不同道路退化水準時，道路系統流量低於特定水準的機率分析。Chen et al. (1999) 延續 Nicholson and Du(1997)及 Du and Nicholson (1997)的工作，提出容量可靠度分析法(capacity reliability analysis method)—亦即路網容量自動調節至一特定需求水準的機率，他們採取路網保留容量(network reserve capacity)的概念，估計交通路網的最大容量。在可及性研究方面則是在不同的空間規模下討論人或設施的可及性，做為評估路網或設施在效能或公平性之工具(Chang, 2003)。

對於上述之連接性、旅行時間以及容量三種可靠度的衡量方式，內容簡述如下：

(一)連接性可靠度(connectivity reliability)

連接可靠度是利用路網節點相連的機率值來計算，即特定的起訖點(origin-destination, OD)間是否存在一條通路(path)，只要任兩端點間有一條通路存在即代表成功。此評估方式未考慮道路的容量問題，因此只有兩種情境，即完全通行(operating at full capacity)或者完全不能通行(complete failure with zero capacity)。此種分析可適用於非常狀態之分析，如地震破壞等，但只限於兩種情境之分析為其主要缺失。

(二)旅行時間可靠度(travel time reliability)

旅行時間可靠度指給定 OD 間之一旅次能於特定時段內成功聯通的機率，此方式比較適於評估日常流量變化下的路網績效問題。因此，常應用在日常路網流量需求下的旅行時間變動分析，或在路段被破壞的情境下，對於流量的衝擊分析(Asakura, 1996)。此類型之可靠度分析，可用於路網服務水準標準訂定的探討，但如交通量過大(接近無限大)時，則難應用此分析。

(三)容量可靠度(capacity reliability)

容量可靠度指路網可消化特定之交通需求量，以滿足路段特定服務水準要求的機率。道路路網的路段容量(arc capacity)會因各種原因隨時改變，例如交通意外而造成道路阻斷。容量可靠度可清楚的考慮，在路段因物理或操作因素造成道路破壞或退化的不同情境下，視路段的容量為連續性的流量問題時，路段容量可能產生的不確定性問題。容量可靠度分析的過程中，因可同時考慮旅行時間的可靠度問題，尤其是可有效的探討需求滿足的課題，故可更綜合性的



評估路徑系統的可靠度問題。

根據上述的三種路網可靠度內容，吾人可以發現，連接性可靠度對於震災後路網功能最為基本；旅行時間可靠度在設定之服務標準下(例如避難時之步行時間門檻、緊急救援最低時間門檻等)，可以用來檢視路網之效能；容量可靠度則為較綜合性之方法，可以應用在需求量已知情況下，避難或救災功能之滿足程度。本文主要在探討路網基本特質在震災情況下之有效性，並未深入探及避難救災行為特性，亦即未討論到有關服務標準或需求量的部分，因此，對於路網可靠度之衡量，將著重在第一項之連續性可靠度。處理上可以應用道路中斷之可能性為基礎，評估避難救災路徑的連續性，及討論在避難區及避難據點已知的情況下，避難救災路徑與據點的配合程度，其結果將有助於動線系統完整性以及避難區及避難據點規劃設置之參考。以下分就依據連接性可靠度概念所研擬之連續性變動指標與設施可及程度變動比兩項方法介紹。

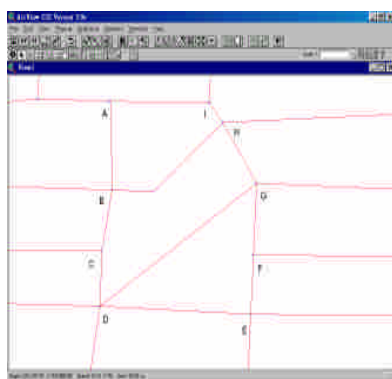
1.連續性變動指標

評估地區內各地點的車輛或行人能否經由指定之避難救援路徑通往避難據點，可採連續性指標來作評估(毛利正光等，1981；吳永隆、葉光毅，1998)，其方法係由圖形理論中結點與結點之連續矩陣，用布林代數(1 或 0)來表示道路之有無，再求取連續矩陣，由該矩陣內之元素，透過下列公式求得連續指標。

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{C_{ij}}{n(n-1)/2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 n 為路網中路段總數， i, j 為節點。而 $C_{ij} = 1$ 表示，往來於任意兩結點間之最短距離中之各路段全部可以順利通行，若最短路徑中只要有一路段為不可通行，造成原最短路徑成本增加時，即 $C_{ij} = 0$ 。

路網系統整體評估中連續性指標的計算可由以下例子說明，在最短路徑的計算上，將應用地理資訊系統軟體 ArcView 中之路網分析模組為工具，進行計算與成果展示的工具。假設圖七中為地震災害前之路網系統，系統中計有 9 個節點(A 至 I)，在未受災之前各點間均存在一最短路徑，其最短路徑所組成之最短路徑矩陣為 X 。



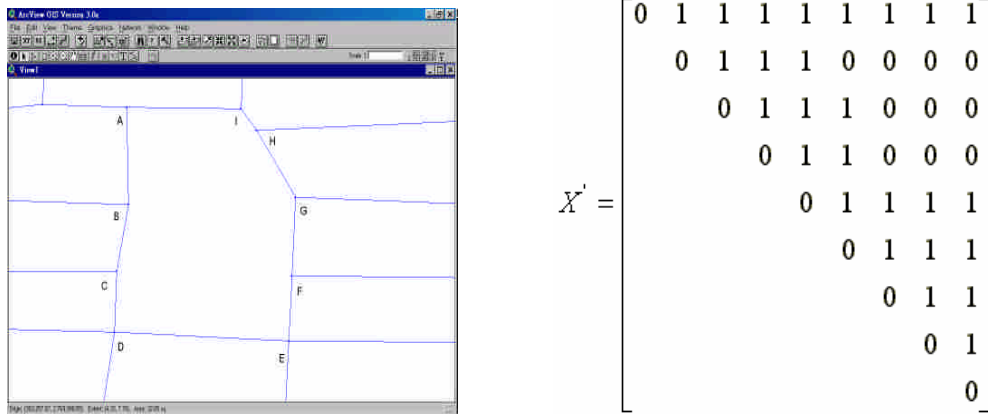
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & 0 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & 0 & 1 & 1 \\ & & & & & & & 0 & 1 \\ & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

圖七 地震災害前路網示意圖

矩陣 X 經連續指標計算，連續性指標值為 1，即

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{C_{ij}}{\frac{n(n-1)}{2}} = \frac{8+7+\dots+2+1+0}{36} = 1$$

假設地震災害造成部分路段損壞或關閉，情況如圖八所示。



圖八 地震災後路網示意圖

上圖中因部分路段的關閉，節點中部分最短路徑勢必會改變，例如原來的 D 到 G 因路段關閉必須繞道，代表新來的最短路徑通行成本會較原來高、抑或兩點已不復連通，此時將連續矩陣中的 C'_{ij} 值，由 1 調整為 0，組成新的連續性矩陣 X' ，並重新計算其連續性指標 C_1 ，即

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{C'_{ij}}{\frac{n(n-1)}{2}} = \frac{8+3+3+2+4+3+2+1}{36} = 0.72$$

為討論連續性指標之可能型態，本文定義另二種連續性之處理，其一以 i 與 j 兩點為完全無法連通時之 $C_{ij} = 0$ ，應用式(1)計算連續性指標 C_2 。其二，隨著避難救援主體的不同，路徑連續性的程度亦會有所差異，例如，在面對混雜的交通狀況時，仍能採取迴避或迂迴的方式來維持步行的連續性，因此，對於避難路徑無須完全以(1,0)表示，可以依照震災後與震災前之最短路徑成本比值為度，則 $0 \leq C_{ij} \leq 1$ ，如式(2)所示，再依式(1)計算連續性指標 C_3 。

$$\begin{cases} TC'_{ij} > TC_{ij} & C_{ij} = TC_{ij} / TC'_{ij} \\ TC'_{ij} = -1 & \Rightarrow C_{ij} = 0 \\ else & C_{ij} = 1 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

其中 C_{ij} ：最短路徑成本比值

TC_{ij} ：地震災害前 i 與 j 點最短路徑成本

TC'_{ij} ：地震災害後 i 與 j 點最短路徑成本(-1 代表不連通)

上述的連續性指標可以代表一地區中，節點間的連續性，可視為避難救災功能在地區內的可及程度(accessibility)。同時，透過地區間連續性指標的比較，可以作為擬定改善地區性動線系統的優先順序。

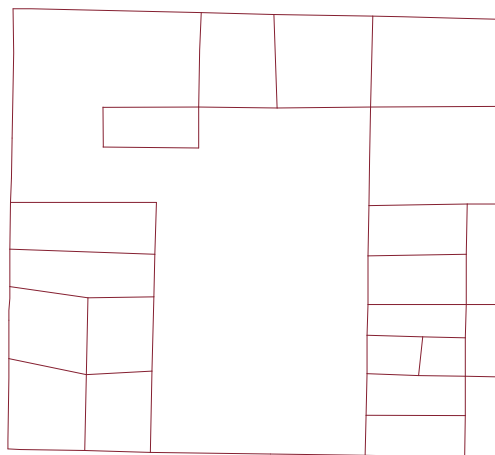
依據上述概念，本文以圖九之路網為例，進行整體路網之連續性指標計算，惟操作上需要路段之毀損機率之校估函數，而校估需要實際震災之調查資料，台灣地區目前尚無此類資料庫可資應用，因此，本文採用 Tsukaguchi et al.(1999)以實證方式，所建立如表三之機率對照關係，做為路段毀損的判斷依據，其中 Rank1 為無損害，Rank2 為局部損害，Rank3 為嚴重損害，Rank4 為完全無法通行，亦即 40%之四公尺以下路段、28%之 4-8 公尺路段，以及 10%之 8-10 公尺路段因震災受到毀損無法通行。唯此機率會受到地方性的因素影響，因此在引用上應配合一些背景資料的分析，以確定其參考性。參考表三之路段毀損機率，本文以隨機方式，指定分區內的封閉路段，封閉比率分別為 10%、30%、50%，並計算區內的連續性變動指標，兩次模擬的結果整理如表四，指標值愈高代表震災後地區內路網愈能支援避難救災工作。表中顯示，在 10%的路段關閉情況下，地區路網的連續性以 C_1 表之為(0.46 及 0.53)，以 C_2 表之為(1.00、1.00)， C_3 則為(0.88、0.92)，當在 50%的路段關閉情況下，路網的連續性均呈現急劇下降至 0.1 左右，顯示路網毀損對於其功能而言是呈現指數的破壞。觀察三種連續性指標的變化， C_2 由於採完全無法連通時之值為 0，以都市路網密度較高的特性而言，發生的頻率較低，因此有可能會高估連續性指標。 C_1 則以最短路徑成本增加時之值為 0，則在災後毀損路網情形下，出現的頻率偏高，對於路網連續性產生低估之虞。相較之下， C_3 的指標值除能呈現路網毀損對其功能之指數型態的影響外，其數值亦較與路網破壞程度對稱。

表三 震災路段毀損程度與機率對照表

路 寬	Rank1	Rank2	Rank3	Rank4
低於 4m	25%	10%	25%	40%
4-6m	32%	18%	22%	28%
6-8m	24%	25%	23%	28%
8-10m	38%	32%	20%	10%
10-12m	30%	62%	4%	4%
12-16m	45%	51%	2%	2%
16-25m	70%	30%	0%	0%
高於 25m	61%	39%	0%	0%

資料來源：Tsukaguchi et al.(1999)





圖九 地區路網與節點圖

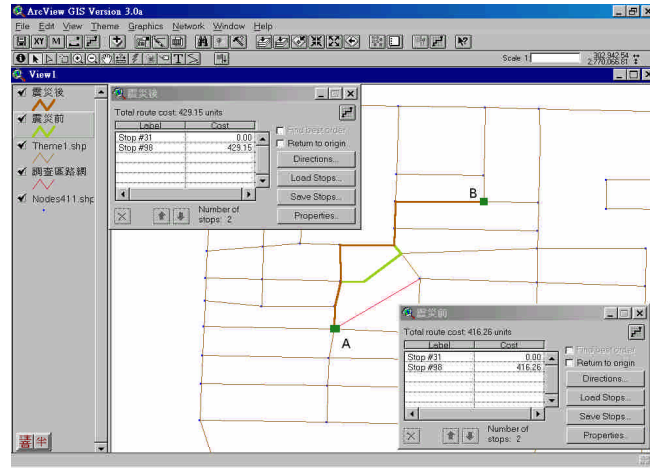
表四 地區路網毀損後連續性變動指標

		10%	30%	50%
C_1	模擬一	0.46	0.25	0.05
	模擬二	0.53	0.16	0.06
C_2	模擬一	1.00	0.85	0.12
	模擬二	1.00	0.31	0.13
C_3	模擬一	0.88	0.65	0.10
	模擬二	0.92	0.43	0.12

2. 設施可及程度變動比

上述 C_3 指標所衡量的是整體路網的功能，對於特定設施，例如避難據點或救援設施，亦可以引用，透過最短路徑成本變動的狀況，代表救援到達的時間以及疏散的時效上之改變。以地震災後之醫療救援為例，路網完全暢通時，依據路段通行成本所計算之最短路徑組合，其中部分路段因地震災害而中斷，新的最短路徑組合將大於原來之組合，應用兩者的差距當成指標，可以用來評定特定路網系統下該設施的效能，並應用敏感度模擬特定路段中斷對該設施整體效能的影響。

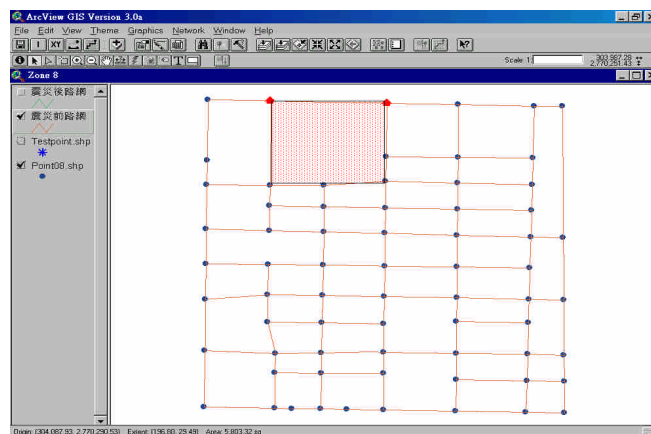
圖十中 A 與 B 之間的最短路徑在受災前以實心線條表之，若以路線長度為度量，其最短路徑值如圖中右下角方塊所示，為 416.26 公尺，若地震災害引致部分路段關閉，則 A 與 B 間之最短路徑變更為圖中左上角方塊所示，為 429.15，變動率為 $(429.15-416.26)/416.26$ ，即 3.09%。



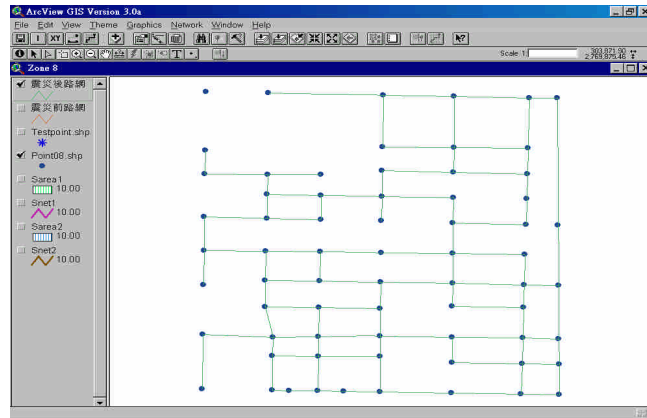
圖十 最短路徑成本變動比示意圖

上述之設施可及程度變動率主要應用有二，若將地區中(例如避難救災分區)所有節點的最短路徑成本變動率加總，可以衡量地區動線系統受到地震災害的影響程度，如進一步透過路段的敏感度模擬，可以辨識地區中的重要路段(critical segment)，亦即若該路段關閉，所引發的變動率較其他路段為大，以此等路段做為優先維護獲改善的對象。

如前所述，最短路徑成本變動比是指震災後兩點間的最短路徑與原來的最短路徑之變動，以圖十一路網為例，其中區塊之標示為台北市立仁愛醫院，醫院區位的救援出入口以兩角落的圓點標示，在原来的路網下，每一個節點均存在一條連接台北市立仁愛醫院任一入口的最短路線，此路線可能是由數個路段組合而成，一旦其中的任一路段因震災而生損害，則最短路線勢必重組而增加成本，設施可及程度變動比即在衡量此變動的比例。以圖十一的路網結構為基礎，透過表三之路段毀損機率，可以模擬得到地區道路關閉的狀況，如圖十二所示。

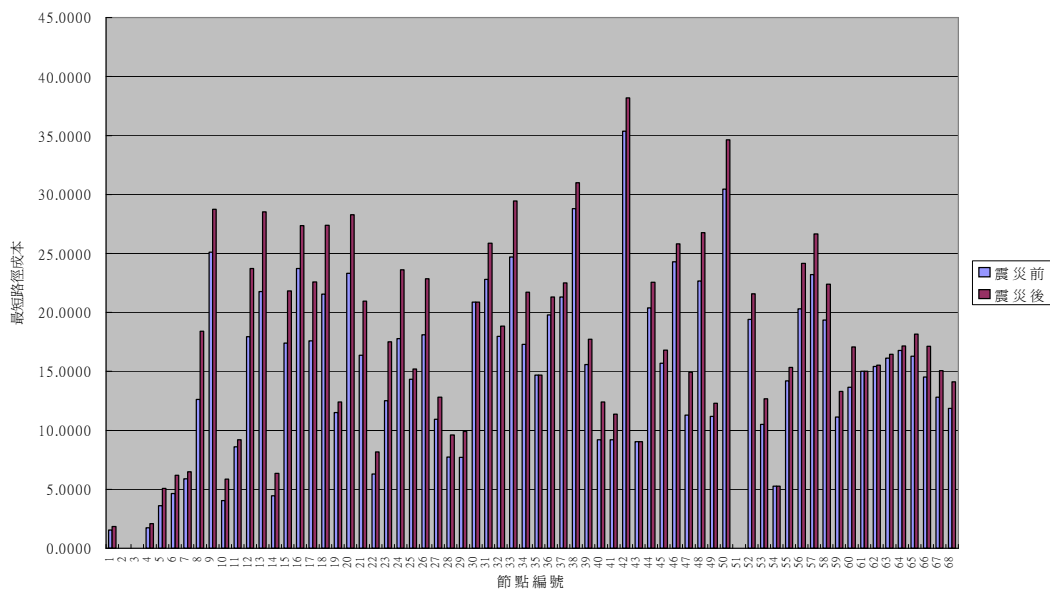


圖十一 地區路網與醫療中心區位



圖十二 路網毀損模擬

應用以上的資料以及設施可及程度變動比計算方式，可以計算出以路段距離與加權成本為指標的變動比，圖十三為路段長度之最短路徑成本變動，其中縱軸代表距離，橫軸為節點編號，節點上之 2 長條即為路網毀損前後之最短路徑成本變動比(即 R 值)，由圖中可以觀察變動比較大之節點位置(如節點 13、18、20、24 等)，另外，若將整體路網之震災前後總路徑成本加以計算，其值為 16%，意指在震災部份路段受損的情況下，地區中各節點至市立仁愛醫院的設施可及程度將減低 16%。上述處理在未來實際應用時，路段成本的處理應可再改善，以求精確。



圖十三 地震災害前後最短路徑成本變動比

五、結論與建議

本文整理對避難救災動線系統的評估方法，區分兩個層次討論，首先是透過震災對路網影響因素的界定，進行個別路段的評估方法；其次，透過個別路段的效能與配合度，進一步討論對整體動線系統評估的方法，據以提出一個避難救災動線評估的架構。在減災、備災、應變與復原的四個災害管理的階段中，由於所要進行的工作內容不同，對於路網系統的評估，會有不同的方法，但是路網的連續性效能，卻是最基本的資訊，例如減災備災階段，可以依據連續性效能的檢驗，確認關鍵路段並加強其維護；未來亦可透過路網評估結果，與地區防救災資源結合，共同以區位分派方式進行防救災資源服務區之劃設。而在應變階段，亦可以經由連續性效能的資訊，調整疏散與救援的作為。由於都市地區的活動具多樣性，在不同時段的活動人口會隨不同土地使用分區的特性而異，而活動人口的數量影響避難救災動線甚巨，在實際作業中，應可配合實際活動人口估計方式，以確實了解路段的避難救災負荷。本文所介紹的評估方式，較側重總體層面的評估，以及實務應用性，唯在實際震災發生時，避難者在路徑的選擇上可能有不同的影響因素，例如住所周邊的道路狀況、避難者的行為特性及日常避難的教育與宣導等，這些因素必須進一步掌握，方得以在都市震災緊急路網的規劃上取得均衡的效果。

參考文獻

1. 毛利正光、塚口博斯、中村俊策(1981)，住區内における歩行者道路網の評価に関する-考察，「土木學會關西支部年次學術演講會演講概要」，日本。
2. 王晉元、盧宗成(2001)，都市地區地震防災交通資料庫系統架構之規劃，「都市地區地震防災交通系統之研究八十九年度期末研究成果研討會論文集」，台北。
3. 吳永隆、葉光毅(1998)，地區性道路網便利性、舒適性、防災性基準之研究，「建築學報」，第 26 卷，第 19-34 頁。
4. 呂獎惠(2000)，「都市震災救災路線選擇模式之構建」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
5. 李克聰(2001)，因應震災大眾運輸即時疏散系統之規劃設計，「都市地區地震防災交通系統之研究八十九年度期末研究成果研討會論文集」，台北。
6. 李泳龍、葉光毅、黃幹忠(2001)，921 大地震對地區道路阻絕影響調查報告—以東勢震為例，「都市地區地震防災交通系統之研究八十九年度期末研究成果研討會論文集」，台北。
7. 李威儀、錢學陶、李咸亨(1997)，「台北市都市計畫防災系統之規劃」，中華民國都市計畫學會。



8. 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。
9. 國立中央大學土木工程學系(1999)，「土木工程防災概論」，藝軒圖書出版社。
10. 許添本(2001)，地震救災最小風險路徑產生模式之建立與應用，發表於「都市地區地震防災交通系統之研究：89 學年度期末研究成果研討會」，淡江大學，台北。
11. 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劃，台北。
12. 黃亦琇(2000)，「震災道路系統評估指標之建立」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
13. 詹士樑(2002)，「大規模地震時台北市商業區、新興社區、老舊社區防災據點與救災路線關係之研究：台北市避難路線與救災路線衝突性之評估研究(一)」，國科會專題研究計畫(計畫編號：90-2625-Z-305-001)。
14. 謝嘉鴻(1998)，「都市地區震災避難疏散指派規劃之研究－以台北市為例」，國立交通大學交通運輸研究所。
15. Asakura, Y. (1996). Reliability measure of an origin and destination pair in deteriorated road network with variable flows, In *Proceeding of the 4th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*.
16. Chang, S. (2003). Transportation planning for disasters: an accessibility approach, *Environment and Planning A*, 35: 1051-1072.
17. Chen, A., Yang, H., Lo, H. K. and Tang, W. H. (1999). A capacity related reliability for transportation networks, *Journal of Advanced Transportation*, 33: 183-200.
18. Du, Z. P. and Nicholson, A. (1997). Degradable transportation systems: Sensitivity and reliability analysis, *Transportation Research*, 31(B): 225-237.
19. Iida, Y. (1999). Basic concepts and future directions of road network reliability analysis, *Journal of Advanced Transportation*, 33(2): 125-134.
20. Nicholson, A and Du, Z. P. (1997). Degradable transportation systems: An integrated equilibrium model, *Transportation Research*, 31(B): 209-223.
21. Pirie, G. H. (1979). Measuring accessibility: a review and proposal, *Environment and Planning A*, 11: 299-312.
22. Tsukaguchi, H., Vandebona, U. and Li, Y. (1999). Planning of residential street network for disaster prone urban areas, *Proceedings of the 8th WCTR*.

