

第二章 文獻回顧

2.1 防災實務相關研究

2.1.1 都市防災系統

對於都市防災之相關研究，過去曾提出許多觀點面向。在都市計劃防災系統規劃方面，對於地震災害及其可能引發之火災，相關研究提出防災生活圈之觀念。其架構除避難、醫療、物資、消防、警察等五大防災避難據點外，主要包含救災、避難、延燒阻隔三大防救災功能；救災路線功能為救災物資、器材及人員之運送道路，須擔負消防活動、各防災據點物資運送之路徑，因此宜分開規劃；然若受到實質環境條件因素，則須考量避難、救災路線合併、共同管制方式進行之；因此面對防災道路空間品質現況，如進一步檢討，則對整併或分開規劃可提供參考之方向。

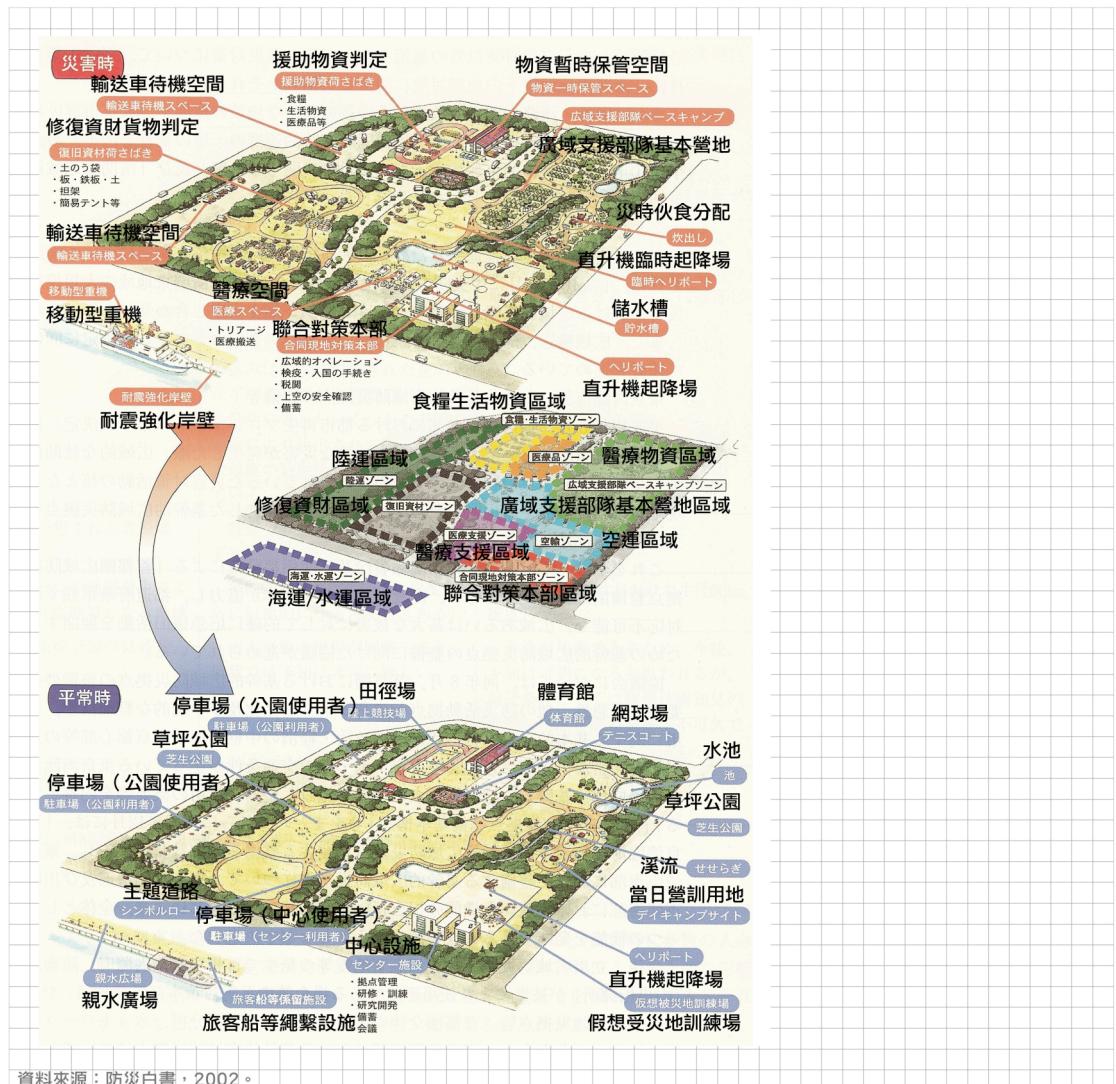
過去關於都市防災系統的相關實務研究，包括：都市防災計畫（台灣省住都處市鄉局，1998）、都市計劃防災系統的規劃（張，1999）、防災空間系統規劃（李，1999）、規劃實務案例（李、謝，1999）、災害境況模擬（陳、林、賴，1999）、防救災交通動線系統及防救據點（何、李，1998）、避難救災路徑有效性（陳、詹，1999）、防災都市整備計劃（黃，1999）、防災規劃作業（何、黃，1997）、災害危險度評估（林、陳，1998）、防災規劃作業程序及設計準則（陳、黃、黃，1999）、國土城鄉防災綱要計畫（林，2003）等。

2.1.2 防災據點



國內對於防災據點之規劃，採以現有設施之防災空間分析方法（李、錢，1999）。透過研究調查區內之實質環境與使用現況之調查分析，探討學校、公園等防救據點的防災對應力，以檢測都市空間因應防災機能，於空間量、區位選定之適切性。防災系統分為行政單元、避難、醫療、物資、消防、警察六大構面，來對應出實質據點空間；實質空間則以現況概要（據點定位、據點地址、據點面積、相關設施、出入口數、周邊建築現況）、危害度分析（自然環境災害、建築物災害、維生管線災害、交通系統、火災）、總合評估（可及性、有效性）等三類，共十四項準則評定之。

國外對於防災據點，有詳盡的規劃與著墨。如圖2.1為日本內閣府之防災白書所提出的基礎廣域防災據點整備的概念，其防災公園平日所扮演的休憩功能，可於災害時轉換成完全的防災據點，這是由於公園的規劃本身，強烈隱含防災據點所需具備之設施與功能。



資料來源：防災白書，2002。

圖2.1 防災據點功能

2.1.3 防災路網

與防災據點同樣的思維，道路系統應具有轉換成防災路網的能力；同時，防災道路應具備防災設施、設備以提供防災功能。在日本神戶市復興計畫中，明示要將都市交通路網，對應都市空間，以構成廣域防災交通主軸基礎（1994）；此即指出，都市交通路網與防災路網之間，有著相當密切關係的事實。廣域防災交通網之規劃，主要是以對應都市空間結構為基礎，來規劃廣域交通軸、防災中樞據點、以及路海空防災據點。防災計劃之交通系統與兩項原則有關：1.都市與區域間長程交通系統規劃設置原則、2.都市性交通系統及設施規劃設置原則（何、黃，1997）。前者主要的目標，在規劃長程交通運輸系統防災之轉運連結路網，以疏散車流，降低區域間之人流、車流、物流之使用時間與空間之擁擠。後者主要的目標，係依據都市型態與適當運具，來健全都市內交通運輸系統之防災功能，以降低都市內之人流、車流、物流之使用時間與空間之擁擠。由此可知，防災路網之規劃，需與都市空間結構緊密配合，方能發揮其效用。

防災道路具有延燒阻斷之功能。為防止都市大火，日本江戶時代就已開始規劃防火帶以防止火勢延燒。採取之法，包括整建防火地、防火土，明治時代之不燃建築物防災計畫，以及現代耐火樹木植栽防火等都市防災方法（李、錢、李，1997）。

防災道路首次出現於日本為西元1879年北海道函館的「二十間坂」（にじゅつけんざか）。「間」是日本的長度單位，二十間約相當於36公尺，具有火災遮斷功能，發揮防火帶功能，其目的在抑制火災的蔓延，該防災道路的建造也是日本近代都市計畫的第一個案例。當時之策略，即採以道路寬度作為防災的手段。

目前台灣防災道路系統分類依據，主要係根據日本防災經驗，將防災道路系統劃依道路寬度分為緊急道路、救援輸送道路、避難輔助道路；緊急道路為20米以上之都市計畫道路，救援、運輸道路為15米以上之都市計畫道路，避難輔助道路為8米以上都市計畫道路（李、錢、李，1997）。

然仍有其他重要環境因素，如道路兩側空間的使用情形，也會對道路系統造成間接的影響。針對阪神地震所影響住宅地區街道之破壞進行分類的工作，以路網結構、道路寬度和臨街建築結構等資料分析，結果顯示臨街3米遠的木造房屋，才較不易對街道封閉造成影響（Tsukaguchi et al.，1999）；因此防災道路空間品質之評估，應考量道路兩側的建築物情形，以將道路通行之風險納入。

2.1.4 総合評析



根據國內外的實務研究可以發現，目前較著重在防災路網規劃的相關研究，多採以現存都市路網結構中，配合學校、公園等據點，並以路寬條件作為防災道路指定的準則，來進行路網之指定規劃。

以台灣防災道路規劃之現況觀察，防災道路係架構於都市現存路網之上，並以道路寬度為準則，用以歸屬道路之防災功能定位。此法之優點在於準則明確，防災路網結構易於確立，且道路寬度具空間特性，某種程度可反映安全性、通暢性之雙重意義；但若兩段相同路寬條件，如一者路側為公園空地，另一者雙側狹擠老舊公寓，因兩者為相同路寬，結果可能獲致相同評價。此外，該指標之獨立性，亦可能使道路與救災單位之區位配置等研究脫勾，較不易展現防災路網結構與救災單位之間的關係。

2.2 防災評估相關研究

2.2.1 道路評估相關指標

1. 避難救災功能評估指標

陳、詹（1999）提出幾項重要的單一指標，以檢視路段的避難救災功能。其中包括：

（1）街道調和比：街道調和比，為沿街建築物高度（ H ）與道路寬度（ D ）之比率。該比值建議以1-1/3之間為適當、1-2/3為適宜。該比值顯示出道路空間呈現閉鎖的機率，若比值過大，於大火災時有飛灰之危險性，而於地震時，建築物倒塌將使道路阻

塞，而妨礙緊急救援機具之通行。

(2) 街道建物比：街道建物比與街道調和比不同之處，乃在此指標以街道兩側之建築物數量來代表活動量。然而，此指標同時也隱含建築物數量影響道路有效寬度之因素；做此解釋時，則與街道調和比有相似之意涵。

(3) 路段人口負荷比：路段人口負荷比，在衡量一條路段的疏散效果。若於單位時間內匯集容納的人車過多，則將不利於避難救援。

(4) 高危險性路段：高危險性路段，係指位於地震帶、斷層、鬆軟地盤或環境敏感地區；或有高架橋、陸橋橫越，以及有地下管線經過處。地震容易造成路面斷裂、地層下陷而遭阻斷無法通行。

(5) 停車所佔道路長度與面積比例：路邊停車是影響避難救援最直接且最重要的因素。因為停車問題會直接影響道路空間，而降低了道路避難救援之要求。

(6) 道路兩側落下物：道路兩側物體於地震時，皆有可能掉落而影響避難救援道路之功能，因此指定為防災路網之道路，應避免兩側有掉落物的情形發生。這樣的掉落物包括有招牌、建物外牆、窗子、冷氣、電線桿等。

2. 佔有指標



在許多地區，狹窄的街道往往密度很高，要建造新的街道或是拓寬現有的街道並不容易，因此 Tsukaguchi & Jung (2002) 提出了一種新的方法來檢驗道路空間的配置是否合理 (Tsukaguchi and Jung, 2002)。他們延伸交通流佔有指標 (occupancy indicator of traffic flow) 的概念並加以擴展，提出新的佔有指標，這個新的指標可以檢驗住宅街道之道路空間配置是否恰當，此外，此研究不僅能對單一路段分別檢驗，也提出了檢驗整個住宅地區街道服務水準的方法。

3. 人行道指標

在行人設施方面，Mori & Tsukaguchi (1987) 提出兩種不同的方法：第一種是基於行人行為來評估，另一種則是基於行人的意願來評估 (Mori and Tsukaguchi, 1987)。透過行人密度和道路寬度等指標，來衡量出使用人行道的服務品質，然而一般來說，人行道都不足以滿足行人流 (pedestrian flow)，因此透過另一種以行人對人行道的認知來加以衡量。前者方法可用於所有的人行道，特別是行人流較大的人行道；後者則適用於行人流較小的人行道。

2.2.2 路網評估相關指標

就路網績效指標的角度而言，以往相關研究有以下看法：

1. 連續性指標

毛利（1981）所定義之連續性指標，係為用於評估地區內部網路，可否達成指定之路徑通往指定地點的條件。指標之計算，乃透過節點矩陣（**Adjacency Matrix**）求得。若圖形為簡單無向圖（**Simple Undirected Graph**），則該矩陣元素為 $\{0,1\}$ ，來表示兩點間道路之無、有；透過下面之計算，即可獲致指標 $C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{C_{ij}}{n(n+1)/2}$ 。

其中 i 、 j 為不同結點， C_{ij} 為 $\{0,1\}$ ，分別表示 (i,j) 間，其最短路徑的邊集合元素不皆為1、以及皆為1，兩種情形；由此可知，此指標之定義，在連接圖的初始值皆為1，而在路網有破壞情形下重新衡量，才會有所改變。另外，簡單無向圖的連續性指標的範圍，必落在 $0 \leq C \leq 1$ ；非簡單圖的連續性指標，才可能有 $C > 1$ 的情形發生。

葉、吳（1998）認為，該指標以行人步行的觀點來看時，若任意兩點間的路徑中，只要有一路段無法通行均視為 $C_{ij} = 0$ ，為其指標之缺失。因此將該指標改進以 C'_{ij} 來取代其 C_{ij} ：

$$C'_{ij} = \frac{\sum e'}{\sum e}$$

其中 $e = [\ln(p) \times \ln(m) \times \ln(v)] \times l$ ，用來反應由行人（ p ）、機車（ m ）、汽車（ v ）三者組成之因素，以及路段長度 l ，共同反應其對地區性道路行人步行連續性的影響。 $\sum e'$ 表示任意兩點之最短距離中，具備有「行人道路」條件之各路段 e 值的總和； $\sum e$ 則表示任意兩點之最短距離中，全部「道路」之各路段 e 值的總和。

連續性指標具有災前、災後做比較的特性，因此，該指標相當適於做災後的路網評估，可綜合判斷路網水準的改變程度。然而，若要在災前作為防災路網規劃的參考，則可建議模擬路段毀損的方式，方可判斷出各路段對整體路網的重要性。

2. 最短路徑變動比

陳、詹（1999）認為，災變損失的程度，與救援之反應時間、以及疏散的快慢有極為密切的關係，而救援與疏散的速度，則取決於動線系統的整體效能。透過路段通行成本計算之最短路徑組合，與部分路段因地震災害中斷所形成新的最短路徑組合之成本差距，即可作為評定路徑系統的整體效能的指標，即：

$$R = \frac{TC'_{ij} - TC_{ij}}{TC_{ij}} \times 100\%$$

其中 TC_{ij} 表示從節點 i 至節點 j 的最短路徑旅行成本， TC'_{ij} 表示某種路段毀損的情況下，節點 i 至節點 j 新的最短路徑旅行成本，用 R 作為衡量指標，適用於評估兩個確立的節點之間，災後的路徑改變程度。

連續性指標與最短路徑變動比之間的差異，在於後者加入了路段權數特性的概念；同樣地，若要在災前作為防災路網規劃的參考，亦可透過模擬路段毀損的方式，方可判斷出各路段，對兩個確立點之間的重要性。

3. 路段關鍵性

徐、侯（2005）提出，災害期間救援機具會高頻次地使用某些路段，這些相形重要的路段，稱之為關鍵路段。路段關鍵性，係在路網中，依照使用者所認定之服務種類，透過深度優先搜尋（Depth-First Search）的方法，計算任意兩點之間使用路段的各種可能性，求取相對所有可能情形下之比值，以用來判別通過各路段的機率。而路段通過機率達特定門檻值以上時，該路段即為關鍵路段。

關鍵路段的判別，可以綜觀整體路網的可靠性，若要在災前作為防災路網規劃的參考，亦可透過模擬路段毀損的方式，找出關鍵路段，並以平行邊的規劃方式，來降低其關鍵性。路網中，如所有路段的關鍵性降低，相對路網而言，可靠性就反而隨之提高。

2.2.3 綜合評析

在防災道路的評估方面，評估法多採以指標擬定，並進行區域調查以反應路段實際狀況。而在避難救災功能評估指標方面，調查執行與量化過程有其模糊地帶。如建築物數量，以棟數或層數來衡量，精細度有所不同；此外，路段人口負荷雖極為重要，然而調查不易；高危險性路段，不易以量化方式描述；停車佔據道路長度與面積，並非固定不變；而道路落下物之物品與單位也多有不同。

而在於防災道路設計考量方面，如應符合的水準條件，過去相關研究則較少著墨。相較而言，防災據點之功能與定位，則明確詳盡許多。



至於在防災路網的評估，多採以災前、災後路網破壞的模擬狀況，來進行比較評估；此乃由於災害發生時間、地點不確定性所致。而災害模擬方法，多著墨於路段毀損之觀點，對於救災單位亦可能受災的情形則較少探討。

2.3 路網模型相關研究

圖論（Graph Theory）是探討路網模型的主要理論方法之一，圖形結構係由節點、節線兩種元素來組成，藉由節線權數的指定，可展現如成本、機率等各種概念；例如，路網就是屬於最常見的一種圖形。節線的權數在路網圖之中，可表示為路段長度、或旅行時間。路網圖在圖論中有許多實際應用的層面，本研究探討之防災路網模型，多採用圖論領域發展的相關理論。

2.3.1 最短路徑

1. Bellman-Ford演算法

Bellman-Ford演算法（Bellman, 1958），乃計算權賦有向圖中，單一來源之最短路徑；並容許權數為負。所謂的最短路徑，即是在該賦權有向圖中， u 到 v 的所有路徑中，找到一條具有最小

權重總合的有向路徑 P 。然而Bellman-Ford演算法的效率比Dijkstra演算法低，因此多用於圖形中包含有負權數的情況。

2. Dijkstra演算法

Dijkstra演算法（Dijkstra，1959）乃由荷蘭的電腦科學家Dijkstra（1930-2002）所提出。該演算法主要在解決非負權數邊（nonnegative edge）之有向圖（directed graph）中，單一來源的最短路徑問題。Dijkstra演算法先從起點開始，確定連接週邊節點的最短路徑後，在慢慢將範圍擴大，直到涵蓋所有節點的最短路徑。

3. Floyd-Warshall algorithm

Floyd-Warshall演算法（Floyd，1962；Warshall，1962），乃計算權賦有向圖中，所有配對之最短路徑問題。該演算法採用鄰點矩陣（Adjacency Matrix）為輸入項，以表示有向圖 (V, E) 中邊的權數關係。該演算法允許權數為負的邊，然不允許路徑權數總和為負的圈（cycle），並可計算出每一對節點間，最小權數總和的路徑。

4. A*搜尋演算法

A* 搜尋演算法（Hart, Nilsson, and Raphael, 1968；Hart, Nilsson, and Raphael, 1972）為最佳優先搜尋（best-first search）的方法之一。圖形中給定一個起點與一個終點，該演算法以啟發式的評價方法，對每個節點的最佳路徑評價予以排序，進而找出最小權數總和的路徑。



5. Johnson的演算法

Johnson的演算法（Johnson，1977），乃在解決所有配對的最短路徑問題。該演算法運用了Bellman-Ford演算法來檢查負權數的圈，最後再結合Dijkstra演算法來求取解答。

2.3.2 繞徑問題

1. 橋段問題

尋找橋段（bridge）問題（Tarjan，1974）乃由Tarjan所提出。橋段之定義，即在圖形中，連接任意兩點間的所有路徑，都會使用到某路段；該路段即稱為橋段。

該理論為：路段 (v, w) 為圖形 G 之橋段，若且唯若 $v \rightarrow w$ 在 \vec{T} 之內，而 $H(w) \leq w$ 、且 $L(w) > w - ND(w)$ 。

\vec{T} ：有向根樹

$v \rightarrow w$ ：從節點 v 至節點 w 的路段 (v, w)

$v \xrightarrow{*} w$ ：從節點 v 至節點 w 的路徑

$v - w$: 圖形 G 中不包含於樹 T 的路段 (v, w)

$v = NUMBER(v)$: 節點數量

$ND(v)$: 樹 T 中節點 v 子代的節點數量 (包含 v 在內)

$$S(v) = \left\{ w \mid v \xrightarrow{*} w \right\} \cup \left\{ w \mid \exists u \left(v \xrightarrow{*} w \text{ and } u - w \right) \right\}$$

$$H(v) = \max(S(v))$$

$$L(v) = \min(S(v))$$

橋段問題將是路網設計中相當重要的觀念，因為即使兩點間有許多連結彼此的路徑方式，然而一旦橋段被移除了，所有的路徑都將無法再連接此二節點。

2. 路段重要性問題

路段重要性 (most vital links) 的問題於1982年由Corley和Sha (1982) 提出，他們的問題為單一最重要路段問題。1983年，Malik論文提出了最短路徑之 k 最重要路段問題。而1989年時，Ball等人也發表了一般化的重要路段問題 (Ball, Golden, and Vohra, 1989)，在類似的條件下與Malik觀點呼應。而Malik則再次重申其論文之論點，並與Mittal、Gupta共同發表文章，以說明最短路徑之 k 最重要路段的演算法之複雜性 (Malik, and Mittal, 1989)；該文明確地說明決定 k 最重要路段之演算法機制，另外，也提供與Dijkstra演算法所費時間相同之演算法，來解決單一最重要路段之問題。



這些關於路段重要性的問題，具體說明路網或最短路徑中，若移除重要的路段，將造成特定兩點間最短距離之增量成本。

3. 繞路問題

Nardelli等人於1998年延伸了路段重要性之問題，直指出最短路徑上中臨界繞路路段 (detour-critical edge) 之特性。繞路問題點出了圖論中一個很特殊的觀點；所謂的繞路，即是發生在某一對點間之路線中，有任一路段無法通行時，如何從原路網中，找尋另一路段來連接此兩點的策略。而他們提出的演算法，乃在尋找出路段無法通行時，會造成此兩點間繞路最遠的情形。此外2001年時，Nardelli等人再次針對同樣的問題，改善了更快速的演算方法；並將原來 detour-critical edge 的用字，採取路段重要性理論的初期用詞，即最短路徑的最重要路段 (the most vital edge)。

下面則是所謂的繞路問題中，繞路、以及繞路臨界路段的正式定義。若 $P_G(r, s)$ 表示無向圖 G 中，節點 r 和節點 s 之間的最短路徑，所謂在 u 節點的繞路 (detour)，其定義為：
 $u \in P_G(r, s) = \langle r, \dots, u, v, \dots, s \rangle$ ，最短路徑 $P_{G-e}(u, s)$ 從 u 到 s 不使用到路段 $e = (u, v) \in P_G(r, s)$ 。而，繞路臨界路段之定義為： $e^*(r, s) = \max_{i=1, \dots, k} \{d_{G-e_i}(s_i, s) - d_G(s_i, s)\}$ 。

而繞路問題的目標，就是在找出路網之中， $e^*(r,s)$ 這些臨界路段。因為對原路網而言，這些路段的毀損，將會造成兩地之間，繞路過程，耗用最可觀的時間。

2.3.3 存活路網

圖論之中有一支研究方向，專注於探討容錯（fault-tolerable）路網模型，稱之為存活路網（survivable network）。最早有關存活路網演算法的知識，是源於1969年，由Steiglitz、Weiner、和Kleitman所提出。他們曾經應用該演算法來求解10個節點、和58個節點，連接度分別採用 $\{3,4,5,6\}$ 、和 $\{6\}$ ；但是該結果的最佳解並未流傳下來，因此無法評斷該演算法的效果（Grotschel et al., 1995）。

存活路網模型探討的範疇，為節點、節線權數固定的模型；若要探討權數含有機率概念的問題時，則要引用路網可靠度（network reliability）的計算，常見的路網可靠性問題，包含有： k 場站可靠性（ k -terminal reliability）、可及性（Reachability）、 s,t 連結度（ s,t -connectedness）等。以上該領域目前主要關注的幾個研究問題，在演算的複雜度上， k 場站可靠性已被證實是NP困難（NP-hard）的問題、而可及性及連結度則是P完成（P-complete）的問題。

而就路段機率都固定的情形下，可靠度則為路徑排列組合的問題；然而，以本研究的觀點，所構建之防災路網，雖有路段、節點毀損之可能性，不過相對而言，那個「可能性」是多少？和哪些因素有關？要如何去估量？這些都必須要進一步以實驗方式驗證才具意義；因此在本研究中，進行路段權數固定的討論；相對的，直接認定防災路網應是被穩固的，或者是即使在某種規模、條件的破壞之下，仍保持其某種品質的連接性，方為更重要之觀點。

本研究在考量路網設計規劃時，採用權數固定模型，也就是存活路網之連結度（connectivity），來作為防災路網規劃的研究思考方向；以規劃的角度而言，存活路網模型提供了更好的思維，以解決路網遭受災害所面臨不確定性的問題。

存活路網為本研究防災路網模型的主要核心方法，存活路網所涵蓋的意義，相當多層次，因之正式的模式介紹，往後章節會有更詳細的定義。在此，則先用以下較口語的概念來說明。

存活路網中所謂的「存活」（survivability），即是指：發生重大災害事件，仍有能力復原路網服務之意（Grotschel et al., 1995）；而所謂的重大災害事件，在路網中即指：節線破壞、或節點破壞。而，具有存活性質的路網，即為存活路網。

存活路網在圖論中的另一種說法，即是 k 連接圖（ k -connected graph, k -CON graph）。圖 G 的連接度（connectivity）寫做 $\kappa(G)$ ，若圖 G 移除節點集合 S ，可使得圖 $G - S$ 不連接、或只剩一個節點，則稱圖 G 的連接度為 $\kappa(G) = |S|$ 。

k 連接圖，隱含了兩種意義：第一種即為上述之定義，可以容許 $S - 1$ 個節點的刪除，仍保持圖形連接；在此情形之下，該圖同樣會滿足第二種意義：容許 $S - 1$ 個節線的刪除，仍保持圖形連接的情形，稱之為 k 邊連接圖（ k -edge connected graph, k -ECON graph）；但是，反之不亦然；也就是說， k 邊連接圖未必是 k 連接圖；因此也可知 k 連接圖的形成條件高於 k 邊連接圖。

1. 存活路網通式模型

存活路網通式模型，係由Grotschel (1995) 等學者所提出。其方法乃是以「存活條件」使路網具有存活之特性；存活條件有兩種：邊存活條件、點存活條件。以下分別依照該學者所提出之定義分別說明之。

若圖形 G 中的節點集合為 V ，而 V 中任一子集合 W 的任一元素節點 s ，與 $W \setminus V$ 集合中的任一元素節點 t 之間，存在至少 r_{st} (非負整數) 條使用不同邊的路徑，則稱 r_{st} 為圖形 G 的「邊存活條件」。

採取與上述相同條件的類似觀點；若 V 中的另一子集合 Z 的尺寸為 k_{st} (非負整數)，而移除 Z 會使得 $W - Z$ 的任一元素節點 s ，與 $(W - Z) \setminus (V - Z)$ 集合中的任一元素節點 t 之間，存在至少 d_{st} (非負整數) 條使用不同邊的路徑，則稱 k_{st} 、 d_{st} 為圖形 G 的「點存活條件」。下面定義，即可說明路網之存活條件。其中， $con(W)$ 即為邊存活條件， $d(Z, W)$ 即為點存活條件。

$$con(W) := \max \{r_{st} \mid s \in W, t \in V \setminus W\} \quad (2-1)$$

$$d(Z, W) := \max \{d_{st} \mid s \in W \setminus Z, t \in V \setminus (Z \cup W)\} \text{ for } Z, W \subseteq V \quad (2-2)$$

若另引進一個整數 x_{ij} ，來表示圖形 G 中、邊集合 E 的任一元素邊 e_{ij} (節點 i 和節點 j 之間的邊)，則可將存活路網設計問題，轉化為下列線性規劃型式的限制條件：

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V \setminus W} x_{ij} \geq con(W), \text{ for all } W \subseteq V, \phi \neq W \neq V \quad (2-3)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V \setminus (Z \cup W)} x_{ij} \geq d(Z, W), \text{ for all eligible } (Z, W) \text{ of subsets of } V \quad (2-4)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1, \text{ for all } ij \in E \quad (2-5)$$

$$X_{ij} \text{ integral, for all } ij \in E \quad (2-6)$$

其中，第一類限制式 (2-3)，即在滿足「邊存活條件」；第二類限制式 (2-4)，即在滿足「點存活條件」；第三、第四類型為零一限制式 (2-5)、(2-6)。此即存活路網通式模型。這個存活路網的通式模型，囊括了：第一類限制式的 k 邊連接圖 (k-edge connected graph, k-ECON 圖)、第二類限制式的 k 點連接圖 (k-connected graph, k-NCON 圖) 兩種存活路網；而需要同時考量兩種限制式的圖形，實務上則較少見。預期道路 (節線) 遭受地震破壞之觀點，防災路網之替代路徑之建構，則可採以 k 邊連接圖之路網模型。

2. 二邊連接模型

具有替代路徑之路網模型，其中當以二邊連接模型為所有 k 邊連接模型中，成本最小之模型。二邊連接模型是存活路網模型中的一個特例；一個路網圖如果提供了一種保障，即在除去任意一邊的情況下，此路網圖仍然相互連接，則稱這個路網為二邊連接（two-edge connected，簡稱 2ECON）。這個名字的由來，是因為至少要移除兩個以上的邊，才會使得該路網被一分為二，因而獲得此稱號。二邊連接模型如下：

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V \setminus W} x_{ij} \geq 2, \text{ for all } W \subseteq V, \phi \neq W \neq V \quad (2-7)$$

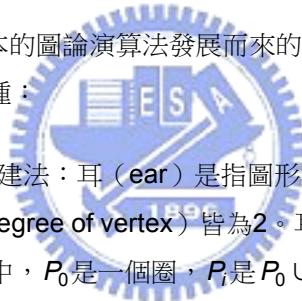
$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \text{ for all } ij \in E \quad (2-8)$$

$$X_{ij} \text{ integral, for all } ij \in E \quad (2-9)$$

此即刪除存活路網模型的第二類限制式，並令 $r_{st} = 2$ 。而由此模式亦可知，邊的存活度愈高，則存活路網模型第二類限制式的 r_{st} 就要愈大；此即代表替代路徑的數目就愈多，然而路網結構之成本也就愈形可觀。

3. 存活路網相關演算法

存活路網模型，是基於基本的圖論演算法發展而來的接續性的問題，相關基礎的演算法，多採用啟發式解法。包含以下幾種：



(1) 貪婪耳構建法：耳（ear）是指圖形中一種最大的路徑（maximal path），其中內部點的度（degree of vertex）皆為2。耳解構（ear decomposition）則是指：組成集合 P_0, \dots, P_k 中， P_0 是一個圈， P_i 是 $P_0 \cup \dots \cup P_{i-1}$ 中的一個耳，其中 $i \geq 1$ 。二連接圖和耳解構有相當密切的關係；事實上，一個圖形要是為二連接圖，若且為若該圖有耳解構（Whitney, 1932）。因此，要建立最少邊的二連接圖（edge-minimal 2CON Graph），可由耳解構的程序來建立（Lovasz & Plummer, 1986）。貪婪耳構建法（greedy ears construction heuristic）簡要來說，即是利用二連接圖的耳解構特性，首先建立一個包含欲要點（desired nodes）圈，再重複尋找可以涵蓋欲要點的耳，直到所有欲要點皆被包含為止，即完成一個可行的二連接圖。

(2) 隨機鬆散構建法：隨機鬆散構建法（random sparse construction heuristic），首先係找出特殊點的任一子集合，並找出該集合的深度優先樹，透過隨機尋找一個不存在於該樹之中的邊，必能建立一個圈；其次，再隨機加入含有特殊點的耳，直到所有的特殊點皆被納入2CON圖中。然而，由於隨機鬆散建構法並不考量成本資訊，因此計算所得之結果，未必是成本最小的解。

(3) 交換法：交換法（interchange heuristic）包含：一最佳（one-optimal）交換法、二最佳（two-optimal）交換法、以及三最佳（three-optimal）交換法。任何一個2CON圖，至少會包含一個圈；而若由該圈中相同節點，替換某些邊集合，來產生新的圈，也將會是一種可行解。這個概念，即是交換法的基礎。一最佳交換法嘗試以不在圈中

的一個邊，來替換原圈中的一個邊，達到更低成本的目的；類似的觀念，二最佳交換法則嘗試同時交換二個邊，來達到相同的目的；同理，三交換法則是同時交換三個邊。

(4) 樹法：樹法 (tree heuristic) 將邊的零壹變數限制鬆綁，並欲以提高邊的連接度來達成連接圖的目標，亦即邊滿足 $x(\delta(W)) \geq r(W)$ 的條件 (Goemans & Bertsimas, 1993)； $x_e \geq 2$ 可以解釋為邊 e 使用了 x_e 次，以達成提高連接度之目的。

2.3.4 綜合評析

路網模型相關理論主題豐富，無論是從概念、或落實到各種演算方法，皆相當獨立而完整。然而，本研究欲關注的幾種路網模型之結合，例如在存活路網模型中來考量繞路問題；例如繞路問題中，同時關注多個需求點，而非僅單一供給點；則過去的文獻則較少著墨。此外，以責任分區做為節點單位，來探討點連接度的觀念，也屬獨特而突破之想法；因此，尚未尋獲相關文獻可供參考。

