

# 都市基礎設施系統運作的 災害管理模型

蘇昭郎

國家災害防救科技中心副研究員

李洋寧

國家災害防救科技中心佐理研究員

鄧敏政

國家災害防救科技中心助理研究員

## 摘 要

基礎設施在維持都市系統運作上扮演極為關鍵的角色，甚至某些關鍵基礎設施對國家社會極為重要，一旦失效對社會與經濟的衝擊將造成重大影響。本文基於都市防災管理觀點，以系統分析與基礎設施系統相依性的概念，在災害衝擊思維下，探討一個都市系統中支持居民生活品質所需的基礎設施，一旦設施系統受到衝擊失效，所引起的都市基礎設施系統的混亂與相互影響性。除對都市系統相關研究進行文獻回顧外，以支持都市運作的基礎設施及相關服務為系統參數進行都市系統建模，並定義基礎設施單元的停止運作水準，結合經濟學的投入產出模型進行整合應用研究，藉以探討在災害衝擊下都市基礎設施系統之關聯影響與其整體運作管理的機制，提供都市管理者作為災害管理與危機處理之參考應用，以提升都市管理效能與抗災能力。

關鍵字：災害管理、都市系統、基礎設施、系統關聯

## 一、前 言

都市是一個複雜的動態系統，各項基礎設施扮演著維持這個都市動態系統的重要關鍵角色，此都會系統中存在著所謂系統中的動態系統(dynamic system of systems)，隨著都會系統的發展與建設，其基礎設施子系統也越來越趨向複雜，



往往各設施子系統均各自規劃與發展，形成自成一格的系統化設施，都市環境就是由不同系統化設施所組成的基礎設施系統所共同支持。因此，都市中的基礎設施具有各自獨立管理又相互依存的關係，往往一個基礎設施，會造成其他基礎設施的服務中斷，社會經濟受到嚴重衝擊。(NCDR, 2012)

關鍵基礎設施(Critical Infrastructure, CI)是國家重要的資產，是人民生活、經濟發展、政府運作與國家永續生存的重要關鍵。包括，公路與鐵路、高速鐵路與捷運設施、機場與港口、通訊設施、輸電與配電設施、發電廠、儲油槽與輸油管線、供水淨水設施、衛生下水道、醫療設施、銀行與財政服務設施等(Rinaldi et al., 2001)。

過去基礎設施管理者均各自建造本身的網絡系統，在設計階段甚少考慮彼此的相依性，但在設施的運轉維護階段，因實體或地理上等因素，使得不同基礎設施事實上必須依靠其他基礎設施服務方能正常運轉，一旦災害發生破壞某些關鍵基礎設施，這些相互關聯性將很快地惡化災害的損害程度，甚至造成連鎖骨牌效應(Pederson et al., 2006)。例如，在供水系統中增建一台抽水機，雖然增加自來水的傳送距離，但也讓供水系統更依賴電力系統的正常供電給抽水機，方能讓整個系統正常運作，其依存性增加。

這些跨系統的複雜相依關係，將隨著時間演進更新基礎設施元件而更複雜，對於國家安全的威脅和關鍵基礎設施的脆弱性也隨之增加，因此，研究關鍵基礎設施系統間如何相互作用與相依性(Interdependency)已成為一項重要的課題。(NCDR, 2011)

Chang (2009) 提出未來都市的基礎設施面臨三項挑戰：系統相依性、複合災害與永續性的挑戰。近年來國內外有許多災例與關鍵基礎設施有關，這些災例也凸顯出基礎設施對於都市系統運作的重要性，相關災例整理如表 1。

表 1 近年與基礎設施衝擊有關災例

項	災害事件
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>1999 年 7 月 29 日台南左鎮鄉編號第 326 輸電鐵塔因先前連日豪雨致地基土壤流失而傾斜，中北部的各發電廠因保護機制而跳脫，導致台南以北地區大規模停電，約 846 萬人受到影響。</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>1999 年 921 地震南投中寮變電所開關設備毀損，造成南北電力失衡，中、北部電壓瞬間下降，發生連鎖跳脫反應造成大規模停電，使得彰化以北地區全部陷入一片漆黑，停電用戶高達 649 萬 7 千多戶，幾乎占全台 2/3 用戶無法供電。</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>2004 年 8 月艾利颱風於大漢溪上游地區總降雨量均超過 1,200 毫米，造成大範圍崩塌與土砂災害，取水口均遭受阻塞，水庫土砂淤積為排除淤泥，也造成原水濁度高達 11,000NTU(甚至高達 7 萬 NTU)，嚴重影響板新給水廠淨水作業，自來水停水長達 18 天</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>2010 年 10 月梅姬颱風因外圍環流與東北季風共伴效應影響，破紀錄的強降雨造成蘇花公路多處嚴重落石損毀，造成 6 部大小車輛、26 人傷亡嚴重事故，也使得花蓮到宜蘭間道路中斷，嚴重影響花東地區的產業與經濟活動。</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>2003 年美加大停電—是指 2003 年 8 月 14 日美國俄亥俄州北部三條超高壓輸電線路突然發生故障，由於警報系統失靈，控制人員沒有發現並採取有效措施，保護裝置也未能啟動功能，導致輸電系統出現連鎖反應，造成美國東北部部分地區以及加拿大東部地區出現的大範圍停電。美國 8 個州以及加拿大的安大略省的電力中斷，這是北美歷史上最大範圍的停電，受影響的人估計約 5000 萬人。(在加拿大有 1000 萬，約占三分之一的人口，在美國有 4000 萬)。</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>2012 年印度大停電—是指 2012 年 7 月 30 日和 31 日接連發生在印度北部的兩次大停電事故。該事故為一條 400 kV 的電纜發生短路，從而引發電網崩潰，所有受影響地區的主要發電站先後關閉，造成大約 320 億瓦特的電力缺口。使得印度超過 22 個邦受到影響，其中第一次停電事故就影響了 14 個邦，而第二次事故則多達 20 個。該事故也是歷史上最大規模的停電，超過 6 億人的日常生活受到影響，約占印度總人口的一半左右。這也是迄今為止世界最大規模停電事故。</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>2012 年 10 月珊迪颶風重擊美國東北部，由於變電所爆炸導致大規模停電。紐約曼哈頓東區「愛迪生聯合電力公司」(Consolidated Edison Inc.)電廠變電所爆炸及兩座地下電力網絡系統因淹水故障，造成曼哈頓大規模停電。受停電影響所造成的二次災害，加重災區的衝擊與搶救復原。地鐵淹水復原困難，停電更是延後修復與電車復駛時間，企業無法正常上班工作，淹水受災區無電可用，災民苦不堪言。紐約大學醫院與多家大型醫院，也因停電進行病患轉院與全院疏散避難。珊迪颶風造成的經濟損失，估計高達 500 億美元，主要因為電力與公用事業的損失龐大，加上運輸與道路關閉，使得許多企業停止營運時間長過預期。</li> </ul>

## 二、支持都市系統運作的指標

本節將比較各主要國家關鍵基礎設施研究、國際間各項城市競爭力指標，以都市及區域系統規劃的角度、全球化現代化城市競爭與城市管理的角度，探討支持都市系統運作與生活品質的相關指標。



### (一)都市規劃及區域系統

都市及區域系統內容包羅萬象，要選定支持都市系統運作的指標，可從不同角度來思考。對都市規劃者而言，都市系統可分為兩個部分：社會經濟活動以及實質環境。社會經濟活動為滿足其活動目的，對實質環境將產生各種需求，譬如：居住活動就會產生住宅的需求。而實質環境的狀況則會引導社會經濟活動的發生，譬如：購物中心的設置就會引導購物的活動。同時，各種社經活動之間以及各種實質環境之間也會產生互相影響的互動效果。因此，為了有系統地表達與探討這種複雜的影響關係，都市及區域規劃者一般將整個都市系統區分為數個部門，通常區分為屬於社經活動的「人口」與「產業」，以及屬於實質環境的「土地使用」、「交通運輸」與「公共設施」等五個基本部門進行分析，至於「其它」部門，可包括環境、觀光遊憩、財政部門等。

吳信輝(2001)歸納我國區域計畫與都市計畫主要著眼的實質部門有三：土地使用、交通運輸與公共設施，這些實質部門會受到非實質部門所影響，例如：社會、經濟產業、財政與政策。由於生態保育觀念日益受到重視，環境保育漸漸被納為實質部門來討論。馮正民等(2002)將都市整體部門架構區分為三個實質部門：土地使用(含公共設施)、交通運輸、環境保育，以及四個非實質部門：政策、經濟產業、財政、社會，並應用模糊認知圖法與專家意見，探討部門間的影響關聯，包括實質部門間的關聯及非實質部門與實質部門間的關聯。

黃書禮等人(1997)認為都市應朝向兼顧環境、社會與經濟等三個層面的永續發展，由都市生態經濟系統觀念建立永續發展指標系統。指出都市系統是一都市生態經濟系統的主體，都市除仰賴自然環境所提供之維生服務為其資源基礎外，亦須透過都市系統中各部門協調與合作始得以持續發展。因此，都市系統包含人口、交通、土地使用、環境品質、教育文化、衛生醫療、安全、社會福利等部門之發展，以表示都市整體發展之合理性與永續性。

綜合前述，支持都市系統運作的實質部門大致歸類為：土地使用、交通運輸、公共設施(含衛生醫療、安全)、交通運輸、環境等部門。因此，本文探討災害思維下支持都市系統運作的基礎設施模型，即可依照支持都市系統運作之部門，選定相應之基礎設施進行模型構建與分析。



## (二)城市競爭力指標

在全球化的今日，一個具有國際觀全球化的都市已經比國家整體思維，較為當前全球人類所重視，而一個具國際觀全球化的都市需要具備那些特性？依據國際城市指標報告 (The Global Power City Index)，具有五大面向：商業活動(30%)、人力資源(30%)、資訊交換(15%)、文化經驗(15%)與政治參與(10%)等，共計 25 項指標項目。其中強調包括經濟、研發、文化互動、生活度、環境、可及性等都市生活品質項目，以及支持這些指標項目的基礎設施扮演著相當重要的角色。(MMF, 2011)

全球化後都市的生活品質已經成為國際公司雇員往來各城市間差旅補貼的重要指標，Mercer LLC. 提出可以用 14 項參數來計算員工在不同都市生活的補償；並以包含政治社會環境、經濟環境、社會文化環境、健康衛生、學校教育、公共服務與交通、娛樂生活、消費物品、住宅、天然環境等，10 大類 39 項指標參數來做為不同都市生活品質的評比報告(Quality of Living Survey)，其中許多項目均與基礎設施有關。(Mercer, 2011)

當前國際競爭力之評比，以世界經濟論壇(WEF)及瑞士洛桑管理學院(IMD)所發佈之競爭力年報二者最具代表性及公信力，然觀察其各家的競爭力評比指標項目，基礎設施的服務均在各評比項目中居最重要的指標因子，或是關聯性最高的指標因子。

臺北市政府主計處自 2006 年起針對國際都市統計指標資訊進行蒐集彙整，其指標項目共計 13 類 45 項指標，內涵包括土地人口、婚育概況、勞動就業、教育文化、工商財經、公共建設、交通運輸、社會治安、公共安全、醫療衛生、環境保護、家庭生活、與政府服務等，其中與基礎設施服務有關的內容就占一半以上。

## (三)支持都市系統運作之基礎設施

American Lifelines Alliance (ALA) 美國維生管線聯盟針對天然災害所造成維生管線設施系統的危害，訂定相關防護標準與準則，共有十項系統設施：油品生產系統、天然氣系統、水系統(供水與原水)、污水系統、電力系統、通訊系統、港口與陸上水路、公路與道路、鐵路、以及建築與機電元件等。(ALA, 2005)

美國加州舊金山市(San Francisco)有鑑於基礎設施的重要性，特別針對維生基礎設施進行耐震防災的系統性強化，並參考 ALA 的建議，選定九項重要



設施：包括水及污水系統、電力系統、天然氣、通訊、公路與道路、港口與水路、捷運系統、鐵路、以及機場等設施項目。(SPUR, 2009)

HazUS - MH MR5 以數值模擬的方法提供震災境況模擬分析，探討在模擬地震作用下各地區的地震災害潛勢、結構物損害程度與數量、人員傷亡和經濟損失等的推估值。主要可分為地震災害潛勢分析、工程結構物損害評估、地震引致二次災害評估、與社會經濟損失評估等四個主要評估模組。其中，工程結構物依其用途和功能的不同，大致分為一般建築物、重要設施、交通系統和維生系統等四大類，如表 2 所示。(FEMA, 2010)

表 2 HazUS - MH MR5 直接實體損壞的評估項目

分 類		主要項目
一般建築物 General Building Stock		住家、商業、工業、農業等相關建物
重要設施 Essential Facilities	防救災重要設施	政府、醫院、警察、消防隊、避難場所、學校、知名重要設施
	高損失(HPL)設施	核電廠、水庫、軍事設施 (High Potential Loss, HPL)
運輸系統 Transportation Systems		高速公路、鐵路、捷運、公車系統、港口、船運、機場、橋梁、緊急救援道路
維生系統 Lifeline Utilities Systems		電力系統、自來水系統、通訊系統、燃料油、天然瓦斯、污水系統

內政部建築研究所推動都市防災空間系統手冊，希望透過都市防災系統的規劃，以保障災時生命財產的安全。該都市空間規劃主要是以 TELES 作為災損模擬，強調預先規劃可作為避難使用的空間，包括防災避難圈、防救災據點、防救災設施、避難收容所、避難路線等相關規劃項目。(何明錦，2007)

綜合上述各項支持都市系統運作的指標項目，實際在各國都市的特色內容並不完全相同，因此對於一個支持都市系統運作的基礎設施項目的選定須因地制宜，依各都市的系統運作需求來選定。

### 三、基礎設施系統的相依性

基礎設施系統間相依性分析技術目前在研究上尚屬基礎發展階段，過去文獻多僅針對容易量化之實體脆弱度進行關聯性分析，如關鍵基礎設施關聯性模型所探討之物理性、資訊性、地理性與邏輯性關聯等(Rinaldi et al., 2001)；或 Pederson et al.(2006)將社會性納入整體考量；或國家災害防救科技中心依災害因果關係推行所發展的災害衝擊鏈(Impact Chain)方法等(NCDR, 2012)，但仍缺乏以系統概念探討脆弱度因子間，尤其是針對都會基礎設施的運作與社會功能間的整體性、功能性及循環性等關聯性模型均不易完整建構。

都會區中的基礎設施通常屬高度連結且以複雜的方式相互依賴，當一個基礎設施發生損壞時，另一個設施亦會受到影響，而加劇災害或損害的產生。在災害發生時基礎設施除受到直接損害外，設施彼此間的互動也會造成間接性的損害，因此需要去了解基礎設施彼此間的關聯特性，稱之為系統相依性。

基礎設施的相依性模型主要是在分析及了解基礎設施可能的互動關係、避免損害擴大及作為基礎設施防護的決策與效能評估之用，在不同的觀點所使用的研究方法與結果相差甚大，甚至不同設施別的系統，模型運用上也有很大的差異。對於基礎設施系統相依性模式的應用，本文主要是採用 Haines 教授等人(2001, 2005)提出以 1973 年諾貝爾經濟獎得主 Dr. Wassily Leontief 之投入產出(Input-Output)模型為基礎的關鍵基礎設施相依性模型，稱做(Inoperability Input-output Model, IIM)。Santos et al. (2006)曾應用 IIM 於基礎設施系統相依性與產業經濟的衝擊影響。NCDR(2012)應用 IIM 模式技術於科學園區基礎設施系統的相依性分析。蘇昭郎等(2011)以都市系統選定變電供電系統、供水系統、公路系統、醫院及零售業等 5 項設施與服務系統為例，應用 IIM 模式說明在災害衝擊下，都市系統運作與基礎設施間的相互影響性。

本研究持續以 IIM 模式為理論基礎，建立矩陣模型與求解工具，期能將之應用於都會區公共基礎設施與服務資源之系統相依性模型的描述。有關 IIM 技術的基本理論並不在本文討論範圍，詳細內容請參考上述相關文獻。在此僅定義基礎設施的停止運作水準(inoperability)，係指該設施單元、產業或經濟體無法進行生產活動或提供服務的程度，此處設定為 0-1 的任何數值，0 代表系統無失誤的正常運作，1 代表系統完全無法操作。例如某設施單元的停止運作水準為 0.2，則代表該設施單元僅能提供服務的能力為 80%，有 20%的能力是失效的。



定義基礎設施相依性的投入產出模型如式(1)-(3)所示。

$$X = AX + C \quad (1)$$

$$X = (I - A)^{-1} C \quad (2)$$

就基礎設施系統的相依性而言， $A$  為系統關聯矩陣，代表每項子系統間的相互關係，以  $n \times n$  矩陣表示之； $X$  為系統的產出矩陣，為子系統間的相互關聯特性，以各子系統的停止運作水準表示； $C$  為投入矩陣(即外力)，以各子系統受衝擊後的停止運作水準(失效)表示。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X \\ i \\ \vdots \\ k \end{bmatrix}}_{\text{產出矩陣 } X} = \left( I - \underbrace{\begin{bmatrix} A_{im} & A_{in} & A_{im} \\ fm & \dots & fm \\ i & \dots & i \\ kn & \dots & km \end{bmatrix}}_{\text{系統關聯矩陣 } A} \right)^{-1} \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ i \\ \vdots \\ k \end{bmatrix}}_{\text{投入矩陣 } C} \quad (3)$$

當系統受到外力衝擊，各子系統受到損壞，通常由各系統業管單位依管道通報者，其衝擊後果使得服務水準下降，其外力矩陣  $C$  可由各子系統衝擊後的停止運作水準表示之，各子系統的停止運作水準之定義如式(4)所示。

$$\text{停止運作水準 \%} = 1 - \left( \frac{\text{現有運作量}}{\text{正常運作量}} \right) \quad (4)$$

以供電系統為例，其停止運作水準=1-(區域內各變電站的現有輸出電量和/正常輸出電量總和)；供水系統的停止運作水準=1-(區域內各給水廠的供水量%)。

依據系統關聯矩陣，可定義兩項系統的綜合指數，第一個指數為被動影響性(dependency index)  $\delta$ ，為系統關聯矩陣中各行(row)係數的總和，代表該子系統的被動影響性，以下式表示。被動影響性高代表該子系統容易受其他關聯子系統的影響，且受影響程度高與後果較嚴重。

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i}^n a_{ij} \quad (\text{各列總和}) \quad (5)$$

另外一項系統的綜合指數為主動影響性(influence index)  $\rho$ ，為系統關聯矩陣中各列(column)係數的總和，代表該子系統的主動影響性，以下式表示。主動影



響性高代表該子系統的被依賴程度高，一旦受損失效容易影響其他子系統的運作，且其主動影響性高與後果較嚴重，例如供電系統即是主動影響性高的子系統設施。

$$\rho = \frac{1}{n-1} \sum_{i \neq j}^n a_{ij} \quad (\text{各行總和}) \quad (6)$$

式(5)與(6)中，系統綜合指數均採正規化(normalized)處理，其綜合指數為 0-1 的數值，不會受系統選用于子系統的數量多寡而影響其指數的高低，因此可以相互比較，也可以藉以說明該子系統在都市系統中的重要性。

#### 四、都市基礎設施系統運作模型

依照都市發展與持續營運的需要，選定都市系統運作所需之基礎設施與服務項目，以系統分析概念進行系統相依性特性分析與都市設施系統模型建置的探討。以下將分別以基礎設施系統模型建立程序，及其模型之示範操作等兩部分進行基礎設施系統模型的運作方式說明。

##### (一)基礎設施系統運作模型之建立

綜合上述都市系統運作與系統相依性關聯矩陣理論之敘述，本研究選定以大型都會區(例如大台北地區)為例，根據區域內城鄉、政治、社會、經濟、民生等面向，並參考第三節的建議項目，依照地區特性分別依重要設施、運輸系統、維生設施等三類，進行基礎設施系統模型的建置，初步選出與都市系統運作相關的基礎系統項目共 25 項，列表 3。

表 3 都市系統運作之基礎設施系統模型的建議選用項目

分 類	主要項目
重要設施與服務 Essential Facilities and Services	政府(GOV)、醫院(HSP)、警察局(POL)、消防隊(FIR)、避難場所(STR)、學校(SCH)、銀行金融(BNK)、重要工業區(IND)、抽水站(PUM)、核電廠(NPP)、水庫(RSV)、軍事設施(MIL)
運輸系統 Transportation Systems	公路(HWY)、鐵路(RAL)、捷運(TRA)、公車系統(BUS)、港口(POR)、船運(SHP)、機場(APO)、橋梁(BRG)
維生系統 Lifeline Utilities Systems	電力系統(PWR)、自來水系統(WAT)、通訊系統(CUM)、燃料油(OIL)、天然瓦斯(GAS)、污水系統(SEW)



基於系統與系統間的相互關聯係數為都市系統運作關聯矩陣的重要基礎，在資料建立的可靠度上，人為研判與評估因素頗為重要，需要依賴了解系統的專家評分給定，或是由可靠的損毀或維修紀錄資料，做最好的假設與估計；亦可由過去的災害經驗加以推算設定與修訂之。本文以大型都會區為例，依照表 3 中的基礎設施項目，據以建置其都市系統運作的關聯矩陣，如表 4。

支持都市系統運作的關鍵設施可由系統關聯矩陣中的主、被動影響性關係得知，一般而言，主、被動影響性均高者，因影響層面擴大，其失效的衝擊後果會較大，即為系統中的關鍵設施。特別是其中主動影響性高者尤其重要，因此需要加強防護與持續營運，一旦失效需能迅速復原，方能使系統的衝擊與損失降低。由表 4 中可知，都市系統運作系統的主動影響性依數值高低排列分別為：電力系統、自來水系統、橋梁、通訊系統、燃料油等五項子系統；其系統的被動影響性依數值高低排列分別為：醫院、重要工業區、機場、銀行金融、消防隊、電力系統等六項子系統，其中電力系統無論主、被動影響性均屬重要的設施系統，故可將電力系統視為都市系統運作的關鍵設施，因為其主、被動影響性皆高，因此一旦電力系統失效將造成都市系統在經濟與社會等各面向的嚴重衝擊與後果，甚至造成骨牌效應，影響都市系統的正常運作。

表 4 都市系統運作之基礎設施系統模型的關聯矩陣

	政府 (GOV)	醫院 (HSP)	警察 (POL)	消防隊 (FIR)	避難場所 (SCH)	銀行金融 (BNK)	商業區	抽水站 (PUM)	核電廠 (NPP)	水庫 (RSV)	軍事設施	公路 (HWY)	鐵路 (RAL)	捷運 (MRT)	公車 (BUS)	港口 (POR)	機場 (APO)	橋梁 (BRG)	電力系統	自來水系統	通訊系統	燃料油 (OIL)	天然瓦斯	污水系統	被動影響性	
政府 (GOV)			0.2	0.1		0.5			0.2		0.3	0.2		0.1	0.1	0.1	0.1		0.5		0.3	0.1	0.1	0.1	0.13	
醫院 (HSP)				0.2		0.1			0.3			0.3		0.2	0.1			0.2	1	1	0.75	0.5	0.5	0.75	0.257	
警察 (POL)	0.1					0.1						0.2						0.2	0.75	0.3	0.75	0.2			0.113	
消防隊 (FIR)	0.1											0.5						0.2	0.5	0.8	0.75	0.2			0.133	
避難場所 (SRT)	0.1																	0	0.5	0.75	0.3	0.1	0.1	0.1	0.085	
學校 (SCH)																		0.1	0.5	0.5				0.1	0.052	
銀行金融 (BNK)	0.2		0.1				0.2					0.2		0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.75	0.5	0.75			0	0.148	
商業工業區 (IND)			0.1			0.3				0.4			0.1			0.2	0.2	0.2	1	1	0.75	0.5	0.5	0.75	0.261	
抽水站 (PUM)																			0.75	0.5	0.1	0.2			0.067	
核電廠 (NPP)			0.1																0.75	0.3		0.1			0.054	
水庫 (RSV)																			0.5						0.022	
軍事設施 (MIL)																			0.5	0.3	0.1	0.1			0.043	
公路 (HWY)													0.1	0.1				1	0.1						0.057	
鐵路 (RAL)												0.1						1	0.3	0.2	0.1	0.1			0.078	
捷運 (MRT)							0.2											0.2	0.75	0.4	0.1	0.1			0.076	
公車 (BUS)													0.1					1	0.2			0.2			0.065	
港口 (POR)																	0.2	0.75	0.5	0.1	0.2	0.1			0.08	
機場 (APO)			0.1			0.1						0.3	0	0.1	0.1	0.3		0.5	0.75	0.5	0.2	0.5			0.15	
橋梁 (BRG)																										0
電力系統 (PWR)								0.1	0.5										0	0.5	0.1	1	0.75		0.128	
自來水系統 (WAT)								0.2		1									0.75		0.1	0.3			0.102	
通訊系統 (CUM)																			1	0.2					0.052	
燃料油 (OIL)																1		0.3	0.5	0.1					0.083	
天然瓦斯 (GAS)																1		0.3	0.5	0.1					0.083	
污水系統 (SEW)								0.2											0.75	0.5					0.063	
主動影響性	0.022	0	0.026	0.013	0	0	0.048	0.009	0.03	0.043	0.061	0.013	0.078	0.009	0.03	0.022	0.117	0.03	0.263	0.613	0.372	0.233	0.187	0.085	0.078	

(二)模型之操作與用途

不論是天然災害衝擊、人為恐怖攻擊或是意外事故，其系統受衝擊的後果，對基礎設施而言會造成該受影響設施單元有某種程度的失效，即以該設施單元或系統設施的停止運作水準來呈現，即前述基礎設施相依性的投入產出模型中的投入矩陣 C。

當都市系統受到外力衝擊，透過式(3)與(4)計算，可以獲得系統初次平衡後的穩定狀態，即各子系統的停止運作水準。若在平時以各種不同外力情境進行模擬分析，例如採用蒙地卡羅方法(Monte Carlo Method)，進行大數量可能情境的分析，可以找出該系統在何種外力情境下會造成最大的衝擊後果，也可以找出系統中那一項設施的失效或多項設施的失效組合比較具有嚴重的衝擊後果，藉此各設施管理部門可事先研擬減災對策與應變計畫，讓災害的衝擊後果減至最低。



本文基於篇幅受限，未以不同外力衝擊來計算整體系統受到衝擊的分析結果，僅以系統關聯矩陣說明其都市系統運作與基礎設施間的關聯性，藉以說明支持都市系統運作的基礎設施如何相互關聯與影響。

## 五、結論與建議

基礎設施在維持都市動態系統中扮演極為關鍵的角色，一旦失效對社會與經濟的衝擊將造成重大影響。本研究以系統分析的概念嘗試對於支持都市系統運作的基礎設施進行系統性研究，在災害衝擊威脅的思維下，發展都市系統運作的建模，透過都會區案例分析，進行不同災害情境組合的系統衝擊評估與關聯分析，發展系統評估工具，以提供都市管理者作為災害管理與危機處理之參考應用。

都市系統運作的概念已初步完成都市系統運作模型的關聯矩陣，透過關聯矩陣的關聯分析，以主動影響性  $\rho$  代表系統中的主要的被依賴設施系統，以及被動影響性  $\delta$  代表系統中易受影響的設施系統：若主、被動影響性均高者，代表可能為系統中的關鍵設施。

本研究定義設施單元的停止運作水準，結合經濟學投入產出理論，應用於支持都市系統運作的基礎設施系統相依性分析，具有系統關聯描述性，可以有效解釋基礎設施的系統相依性，適合運用於都市系統管理者在研擬減災對策與危機管理參考。

## 參考文獻

1. American Lifelines Alliance (ALA), *Protecting Our Critical Infrastructure: Findings and Recommendations from the American Lifelines Alliance Roundtable*, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., 2005.
2. Chang, Stephanie E., *Infrastructure Resilience to Disaster*, U.S. *Frontiers of Engineering Symposium*, National Academy of Engineering, 2009.
3. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *HAZUS-MH MR5: Technical Manual*, Vol. Earthquake Model. Federal Emergency Management Agency, Washington DC., 2010.
4. Haimes, Y. and Jiang P., Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 7(1), 1-12, 2001.



5. Haimes, Y., Infrastructure Interdependencies and Homeland Security, *Journal of Infrastructure Systems, ASCE*, 11(2), 65-66, 2005.
6. Mercer LLC., *Quality of Living Survey*, Marsh & McLennan Co., <http://www.mercer.com>, last accessed at Aug. 2012, 2011.
7. Mori Memorial Foundation (MMF), *Global Power City Index*, Tokyo, Japan: Institute of Urban Strategies at the Mori Memorial Foundation, 2011.
8. Pederson, P., Dudenhoeffer, D., Hartley, S. and Permann, M., *Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research*, INL/EXT-06-11464, Idaho National Laboratory, 2006.
9. Rinaldi, S., Peerenboom, J. and Kelly, T., Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies, *IEEE Control Systems Magazine*, 21: 11-25, December, 2001.
10. Santos J., Inoperability Input-Output Modeling of Disruptions to Interdependent Economic System, *System Engineering*, 9(1), 20-34, 2006.
11. San Francisco Planning and Urban Research Association (SPUR), *Lifelines: Upgrading Infrastructure to Enhance San Francisco's Earthquake Resilience*, San Francisco Planning and Urban Research Association, 2009.
12. NCDR, *關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理*, 國家災害防救科技中心, 技術報告 NCDR 99-T12, 2011。
13. NCDR, *關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：災害衝擊評估方法 I*, 國家災害防救科技中心, 技術報告 NCDR 100-T33, 2012。
14. 蘇昭郎、周建成、李洋寧、鄧敏政, 基礎設施系統相依性方法之應用, *2011 危機管理研討會*, 197-206, 桃園, 2011。
15. 何明錦、洪鴻智, *都市防災空間系統手冊彙編增修*, 內政部建築研究所, 2007。
16. 吳信輝, 應用模糊認知圖於都市規劃系統關聯之初探, 國立交通大學交通運輸研究所碩士論文, 2001。
17. 馮正民、林楨家、吳信輝, 應用模糊認知圖法分析都市發展系統關聯之初探, *都市與計劃*, 第 29 卷第三期, 中華民國都市計劃學會, 2002。
18. 黃書禮、翁瑞豪、陳子淳, 台北市永續發展指標系統之建立與評估, *都市與計劃*, 第 24 卷第一期, 中華民國都市計劃學會, 1997。