

災害下考量永續因素之運輸系統恢復力 最佳化模型建立之研究

TRANSPORTATION RESILIENCE OPTIMIZATION MODEL UNDER DISASTER WITH THE CONSIDERATION OF SUSTAINABILITY

胡大瀛 Ta-Yin Hu¹

吳宥萱 You-Shiuan Wu²

(105 年 9 月 9 日收稿，105 年 12 月 15 日第 1 次修改，105 年 12 月 20 日定稿)

摘 要

氣候變遷在近年來已經成為相當重要的議題，且氣候變遷導致自然災害的發生越來越頻繁，也越來越嚴重。由於交通建設在災害下是非常脆弱的，所以必須擬定計畫來增強其恢復力。然而恢復力的概念較模糊且較難被量化，永續性議題也較少被納入考慮，所以本研究之目的在於探討運輸系統中恢復力與永續性間的關聯，並提出一個數學模型以量測運輸系統於災害下之恢復力及永續性。

本研究著重於不同假設與限制下，災前及災後的運輸路網恢復力最佳化，並納入永續性作為考量因子，主要目標為建立一個能夠連結恢復力及永續性之最佳化模式。此最佳化模式是根據多指標系統建立，欲藉由有效率的資源分配來執行災前準備及災後復原工作，以提升運輸系統之恢復力。

災害下之恢復力指標數據藉由交通指派模擬軟體 DynaTAIWAN 模擬求得，而恢復力與永續性指標間之權重由分析層級程序法 (AHP) 來求得。本

-
1. 國立成功大學交通管理科學系教授 (聯絡地址：70101 臺南市東區大學路 1 號 成功大學交通管理科學系；電話：06-2757575 轉 53224；E-mail: tyhu@mail.ncku.edu.tw)。
 2. 國立成功大學交通管理科學系碩士。

研究將以 2014 年高雄市氣爆事件進行實證研究分析，以應用及驗證此整合性模式，並且設定多個情境來實驗。最後依據求得之結果可擬訂相關建議，供有效資源分配計畫及災前防範計畫參考之用，且可納入永續性作為考慮的一環。執行災前準備及災後復原工作，不僅可以改善災害下的路網績效，還能提升永續程度，尤其是災前的準備工作。另外，預算的增加能使永續程度快速提升，因此考慮永續必須先有充足的經費預算考量。

關鍵詞：恢復力；災害；運輸網路；永續性

ABSTRACT

Climate change has become a critical issue in recent year, and lead to natural disasters happen more frequently and seriously. Transportation infrastructures are vulnerable under disasters, so resilience enhancement plan is necessary to conduct. However, resilience is a relative vague concept and hard to quantify, and seldom takes sustainability into consideration, so the purpose of this research is to discuss the connection of resilience and sustainability in transportation systems and to formulate the mathematical model for measuring transportation resilience with the consideration of sustainability under disasters.

This research focuses on the pre-disaster and post-disaster optimization of network resilience and sustainability under different assumptions and constraints. The main objective is to establish an optimization model that can both consider transportation resilience and sustainability. The optimization model based on multiple indicators are proposed to improve transportation resilience by efficient resource allocation for pre-disaster preparedness and post-disaster recovery actions.

DynaTAIWAN is used to evaluate the resilience index under disasters, and AHP method is used to combine multiple indicators. The experts think coping capacity is the most important indicator. Empirical study of Kaohsiung Gas Explosions in 2014 is carried out to illustrate the application, and different scenarios are carried out in experiments. The results can offer some advices for efficient resource allocation plans and disaster prevention enforcement plans when sustainability is considered. Taking preparedness and recovery actions can not only improve network performance under disaster but also increase the level of sustainability, especially for preparedness. Further, level of sustainability increases most rapidly with respect to budget. Thus, enough budget is needed for considering sustainability.

Key Words: Resilience; Disaster; Transportation network; Sustainability

一、前言

由於自然與人為災害具有不可預測性與破壞性，近年來對運輸設施的影響有越來越嚴重的趨勢，像是 2005 年的美國卡崔娜颶風、2008 年的四川大地震、2009 年侵襲臺灣的莫拉克颱風，以及 2011 年的日本 311 海嘯。除此之外，人為災害發生的頻率也逐漸升高，必須受到重視，例如：2011 年的美國 911 事件、2014 年的高雄氣爆、2015 年的泰國四面佛炸彈事件…等。因此於災害發生前應事先做好準備，極小化災害所帶來的影響，並盡快回復至原先的狀態。IPCC^[1] 於 2007 年的第 4 次評估報告中警告，人類活動加速了溫室氣體排放，導致氣候型態發生變化和海平面上升。而洪水、颱風、暴風…等極端氣候現象將會越來越嚴重，同時也帶給環境、經濟、社會三大面向的衝擊。自然與人為災害破壞了運輸路網的各個層面，而恢復力則可用來量化這些災害所帶來的影響。

面對災害時，運輸設施往往是相當脆弱的，根據 Holling^[2] 於 1995 年所說，脆弱度源自於恢復力的下降。由於運輸服務已經是人們必須滿足的基本需求，所以當運輸設施受到嚴重破壞時，將會對社會、企業、經濟帶來巨大影響。故如何在遭遇極端事件時增強運輸系統的恢復力已經成為相當重要的課題。例如：美國國土安全部^[3] 於國家設施保護計畫中，即著重於國家基礎設施的恢復力強化。

恢復力指的是在受到外力衝擊下，能夠調整自我以回復到原先狀態的能力^[4,5]，而為了確保災害下的旅途通行以及避免嚴重的延滯情形發生，運輸系統的恢復力評估及量化非常重要，可作為改善恢復力策略的擬訂參考。然而有關運輸系統恢復力的討論目前仍相當有限，而且永續性的概念較少被納入考量，但長期的發展計畫亦相當重要，所以不僅要提升恢復力，也要考慮整體系統的永續發展。本研究著重於最佳的資源分配決策方式，以獲得有限資源下之系統最大恢復能力。

本研究目的在於建構一個路網恢復力最佳化模式，同時將永續性納入考量，並且求解有限預算下之最有效資源分配問題，資源將用於災前準備工作及災後復原工作上。而恢復力衡量指標間的權重透過 AHP 專家問卷求得，接著使用 DynaTAIWAN 來模擬評估各指標於災害下之績效表現。實證研究分析則選用 2011 年的高雄氣爆事件來驗證。

第二章將回顧恢復力與永續性之相關文獻，第三章介紹模式建構與求解程序，第四章將高雄氣爆事件作為實證研究分析，最後於第五章完成結論與建議。

二、文獻回顧

本研究之文獻回顧主要分為 3 個部分，第 2.1 與 2.2 節將分別回顧永續性及恢復力相關文獻；第 2.3 節介紹探討兩者關係之文獻。

2.1 永續運輸

關於永續運輸之國內外文獻主要可分為三大方向：定義永續運輸、建立永續運輸衡量指標、利用永續運輸指標來衡量政策規畫或國家都市發展趨勢。定義永續運輸之研究大多回顧歷年永續性相關文獻，並參考永續發展之相關國際組織之定義，將其彙整並確立永續運輸之定義；建立永續運輸指標首先須有明確定義，接著根據各面向訂定多項衡量指標，並以指標挑選原則評估各指標之重要性及可行性；部分文獻採用永續運輸指標以衡量或比較國家或都市間的永續運輸程度，或是用以評估運輸建設或相關政策之執行是否符合永續發展方向。

根據加拿大永續運輸中心 (CST) ^[6] 於 2005 年提出之定義，永續運輸應包含經濟、環境與社會三大面向的均衡發展。經濟發展方面，主張永續運輸是以公平、有效率的營運方式，並為運輸方式提供多種選擇，讓大眾有能力負擔，同時促進區域經濟之協調發展；環境方面認為永續運輸應提升資源使用效率並減少汙染排放，同時降低土地衝擊與噪音影響；社會方面主張公平分配，認為運輸系統應提供各階層與各世代人民的運輸基本需求，並塑造一個安全、健康之運輸環境。

為了更明確定義永續運輸，許多研究以不同指標來衡量運輸系統的永續程度。Richardson ^[7] 調查了影響運輸永續性的因子，包含安全、燃油消耗、壅擠、環境和可及性。Kennedy ^[8] 等人針對永續運輸系統的四大支柱進行討論，包含：有效的土地使用與交通管理；公平、有效率且穩定的資金來源；有策略性的基礎設施投資；最後是都市街道設計之重視。Awasthi 與 Chauhan ^[9] 提出一方法以衡量綠色運輸所帶來之影響，而用來評估永續性的準則包括：社會、交通、環境、能源和經濟。綜上所述，永續運輸是一個長遠的發展，且可以由社會、經濟、環境層面的多個指標來進行評估。

2.2 運輸恢復力

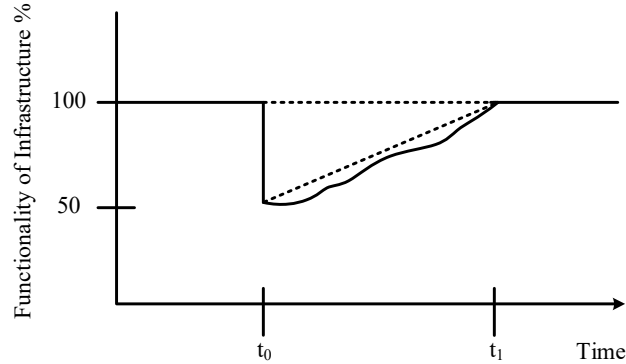
由於氣候變遷及災害頻傳，恢復力的議題逐漸受到重視。恢復力相較來說是一個較新的概念且被廣泛應用於各種領域，例如：生物學、社會學、經濟學、人類群體學、產業體系…等。此外，有些研究也討論將恢復力應用於運輸領域，本節將整理並彙整其定義、量化方式與應用實例。

2.2.1 恢復力定義

Holling ^[10] 首先提出恢復力的概念並應用於生物學領域，其定義為「恢復力決定一個系統內部關聯的持久性，且為系統吸收變化的能力」。MCEER ^[11] 定義恢復力為「系統遭受災害後並盡速回復至原先狀態的能力」，此外，他們開發出恢復力的 R4 架構，包含穩健度 (robustness)、冗餘性 (redundancy)、資源豐富性 (resourcefulness) 和速度 (rapidity)。

Tierney 與 Bruneau ^[12] 提出一個「恢復力三角形」的概念，如圖 1 所示，描述系統遭受破壞後功能性下降，並隨著時間漸漸回復至原本狀態的過程。Murray-Tuite ^[5] 認為運輸

恢復力包含十大面向，包含：多餘性 (redundancy)、多樣性 (diversity)、效率 (efficiency)、獨立性 (autonomous)、組成 (components)、強度 (strength)、協同度 (collaboration)、適應性 (adaptability)、機動性 (mobility)、安全 (safety)、以及快速恢復的能力 (ability to recover quickly)。



資料來源：Tierney 與 Bruneau^[12]。

圖 1 恢復力三角形示意圖

2.2.2 運輸恢復力的應用

恢復力概念被應用於許多不同領域，而交通運輸是其中一個重要且須加以討論的領域^[13]。故此節將回顧恢復力於不同運輸領域之評估方式及應用研究，包含路網恢復力、港口恢復力、機場恢復力、貨運恢復力、橋梁恢復力及軌道恢復力…等。

Ip 與 Wang^[14] 提出一個量化評估方法來分析運輸路網的恢復力，以地震發生時的中國鐵路網為例，評估其恢復力與脆弱度，並將中國前 20 個都市進行排序。Paul 與 Maloni^[15] 發展一個模擬模型來評估與分析災害下的港口路網。Faturechi 等人^[16] 嘗試評估並極大化機場道路路網於不同災害情境下的恢復力。Miller-Hooks 等人^[17] 提出一個有限預算下最大化貨運路網恢復力的數學模型，且可決策最佳之災前與災後工作。Lokuge 與 Setunge^[18] 則嘗試找出橋梁蒐集數據與其脆弱度之間的關聯。

2.2.3 恢復力之量化

Madhusudan 和 Ganapathy^[19] 回顧並統整了近幾年關於災害下運輸設施恢復力的研究，另外，Mattsson 與 Jenelius^[20] 也完成運輸脆弱度與恢復力的文獻總結回顧，且針對近期之研究進行一些討論。根據先前文獻回顧，已經有相當多的衡量方法被用來衡量恢復力，且應用於各種災害情境。有些研究定義恢復力指標為「系統克服失效的能力」，有些研究則以「系統表現績效遭受損害的程度」來衡量。整體來說，衡量恢復力的方法主要可

以分成三大類，包含概念性的架構^[21-26]、數學規劃模型^[17,27,28]、以及其他方法^[5,29]。

2.3 永續性與恢復力

回顧完永續性與恢復力之定義與衡量方法後，發現有一些衡量指標同時存在於兩者間，所以永續性與恢復力之間的關聯可以根據此共同指標來定義。首先回顧比較兩者關係的文獻，Walker 與 Salt^[30] 提出：永續是一個長期管理資源的方法，且以保障福利及促進當代和未來世代公平為目標；而恢復力相對是一個較短期的概念，為系統吸收破壞並維持基本功能的能力。Folke 等人^[31] 則認為恢復力應該被納入成為永續性考量的一部分，使永續的概念更加具體與強烈。Redman^[32] 認為永續性與恢復力有相似的運作原則及目標，但各自也有一些不同的假設。Saunders 與 Becker^[33] 針對永續性與恢復力進行討論，並提出一個紐西蘭基督城的地震案例，最後結果顯示一個具有恢復力的都市同樣也應該是一個永續的都市。

永續性的衡量指標有些可與恢復力衡量指標互相呼應，像是安全、擁擠程度、連通度等。雖然永續性與恢復力間的關聯已越來越多研究提出討論，但目前仍沒有一個較明確的衡量方法，此外，同時考量並整合恢復力與永續性的研究仍有限。本研究綜合上述相關討論，選擇 6 項指標作為評估路網於災害下之績效表現變化，包含包容力 (coping capacity)、穩健度 (robustness)、彈性 (flexibility)、反應力 (response)、資源有效性 (resource availability) 及永續性 (sustainability)；6 項評估指標之定義如下：

1. 包容力 (coping capacity)：包容力衡量路網被破壞或道路容量降低後，路網維持運作的連通程度或可靠程度^[34]。
2. 穩健度 (robustness)：穩健度衡量系統是否具備備用或多餘的元件模組 (redundancy)，以維護其基本工作之功能^[28]。
3. 彈性 (flexibility)：彈性衡量路網在外力衝擊下是否具備自我調整彈性^[28]。
4. 反應力 (response)：反應力衡量系統在面臨外力下之反應能力。
5. 資源有效性 (resource availability)：資源有效性用於評估與分配可用的資源，如人力與預算。
6. 永續性 (sustainability)：永續性衡量系統在執行工作時，是否考慮對整體環境的永續性。

總結以上文獻，雖然永續性與恢復力間的關聯已越來越多研究提出討論，但目前仍沒有一個較明確的衡量方法，故本研究將嘗試發展一個模型，用以同時評估恢復力與永續性。

三、研究方法

本研究之目的為極大化運輸網路的恢復力以分配有限資源，並將永續性納入考量。以下於 3.1 節描述本研究所處理的問題假設與模型架構；3.2 節介紹本研究最佳化模式；3.3

節介紹層級程序分析法於模式中的應用，並呈現專家問卷所獲得之結果。

3.1 問題描述與研究假設

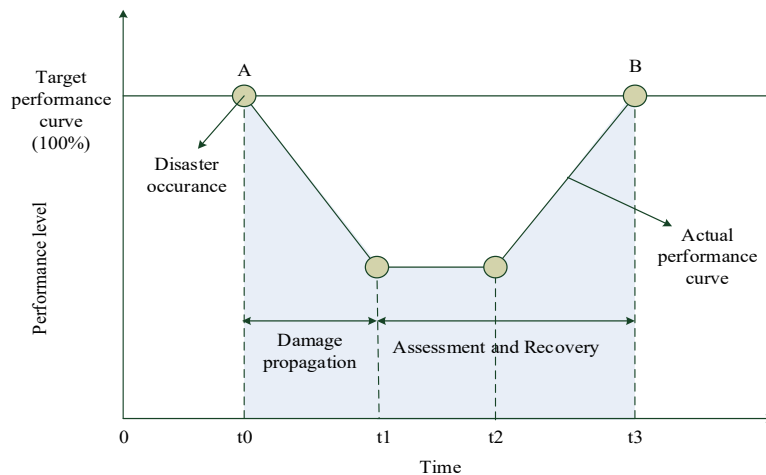
人為及自然災害破壞了運輸路網的各個層面，而恢復力可以用來量化這些災害所帶來的影響。本研究著重於路網於災害下之恢復力衡量及最佳資源分配決策，以獲得最有效率之災前與災後工作執行方案，而路網的表現績效以多個指標來做評估。

災害下考量永續性之恢復力最佳化問題中，目標函數包含了多個衡量指標，並設計 AHP 專家問卷以決定指標之間的權重。另外，以實證研究來驗證並應用此恢復力最佳化模型，且納入永續作為考量因子，最後提出可能的災前準備工作及災後復原工作，以增強路網於災害下的績效表現。

在本研究中假設災害下的系統績效變化分成 4 個階段，階段 1 為災害發生，階段 2 為破壞已達最大程度，階段 3 為投入救災後的階段性回復，階段 4 為系統回復到原先狀態；各個階段之間的時間間隔長短，會根據不同的災害情境而有變化。另外，執行災前準備工作 (preparedness) 與災後復原工作 (recovery)，能夠增強運輸路網的恢復力表現。

3.2 模式建構

本節介紹納入永續考量之路網恢復力最佳化模式建構，最佳化模式中的運輸恢復力 (TR)，以兩塊面積的比值來呈現，如圖 2 及式 1 所示，分母為路網目標績效曲線 (TP) 與時間軸之間的區域面積，分子為路網實際績效曲線 (AP) 與時間軸之間的區域面積，而目標績效假設在各階段下皆為 100%，故 AP 在各階段下的績效越高，代表恢復力 (TR) 也越大。



資料來源：Ouyang 等人^[25]。

圖 2 災害下各階段路網績效表現變化曲線圖

$$TR = E \left[\frac{\int_0^T AP(t)dt}{\int_0^T TP(t)dt} \right] \quad (1)$$

其中，

$AP(t)$ 為各階段下的路網實際績效曲線；

$TP(t)$ 為各階段下的路網目標績效曲線，本研究假設為一水平直線；

T 為災害發生至災後復原為原本績效情形之時間長度。

為了量化運輸恢復力及建立最佳化模式，本研究使用多個指標來評估路網於災害底下之績效表現變化，包含包容力 (coping capacity)、穩健度 (robustness)、彈性 (flexibility)、反應力 (response)、資源有效性 (resource availability) 及永續性 (sustainability)。上述評估指標之定義與討論如以下：

1. 包容力 (coping capacity)

本標的旨在衡量路網災害下之包容力，包含路網道路受到影響或破壞時之連通度 (network connectivity)，也就是路網道路被破壞或容量降低後，路網仍能運作的連通程度或可靠程度^[34]，而路網的連通機率可用災後與災前的道路容量比值來呈現，其算法如式 2 所示。

$$X_w^\xi = \sum_{k \in K_w} P_{wk} \left(\prod_{a \in k} \frac{C_{apr}^\xi}{C_a} \right), \forall k \in K_w, w \in W \quad (2)$$

其中，

W : 所有起訖對的集合；

K_w : 每個起訖對 w 中的 k 條路徑集合；

P_{wk} 起訖對 w 中第 k 條路徑的車輛行走比例；

C_a 節線 a 於災前之容量；

C_{apr}^ξ : 節線 a 於災害 ξ 發生前後執行準備工作 p 及復原工作 r 後之容量；

X_w^ξ : 起訖對 w 於災害 ξ 下之連通度。

2. 穩健度 (robustness) :

本標的旨在衡量路網於災害下之穩健度，包括系統是否具備備用或多餘的元件模組 (redundancy)，以維護其基本工作之功能^[28]，以及路網系統車輛之運行、乘載或能耗是否具備一定程度之效率 (efficiency)，以因應突如其來之外力衝擊。

3. 彈性 (flexibility)

本標的旨在衡量路網對於外力衝擊之自我調整是否具備彈性^[28]，包括運用交通管制、即時路況資訊發布等策略，使系統可於災害下進行調整並適應 (adaptability)，以及救災車輛行駛受到干擾或延誤之程度 (mobility)。

4. 反應力 (response)

本標的旨在衡量路網在面臨外力衝擊 (天災或人禍) 時之反應力，包括救災單位能否在有限時間內執行救災任務之能力 (recovery time)，以及部門間溝通與合作之能力 (collaboration)。

5. 資源有效性 (resource availability)

本標的旨在衡量路網於災害發生前後是否規劃整備與救災工作 (preparedness and recovery actions)，以及是否針對需要工作進行預算編列與資源分配計畫 (budget)。

6. 永續性 (sustainability)

本標的旨在衡量路網於災害發生前後的執行工作，是否考慮對整體都市及環境的永續性。

在本研究中，由於指標之可衡量性及資料之可取得性，僅選用其中的 4 個指標評估路網的恢復力，包含：包容力、穩健度、彈性及永續性，每個指標的評估值皆與災前、災後的執行工作相關。模式相關參數設定及數學式呈現如下：

集合

- P : 災前準備工作之集合；
- R : 災後復原工作之集合；
- W : 路網中所有起迄對 w 的集合；
- K_w : 起迄對 w 的 k 種路徑集合；
- A : 路網中所有節線 a 的集合。

參數

- $AP(t)$: 路網於階段 t 的實際績效函數， $t = 1, 2, 3, 4$ ；
- $TP(t)$: 路網於階段 t 的目標績效函數， $t = 1, 2, 3, 4$ ；
- T : 災害發生至災後復原為原本績效情形之時間長度，包含 $t = 1, 2, 3, 4$ ；
- we_i : 系統績效指標 i 的權重值， $i = 1, 2, 3, 4$ ； $\sum_i we_i = 1$ and $we_i \geq 0$ ；
- B : 給定之預算；
- b_{ar} : 在節線 a 上執行災後復原工作 $r \in R$ 所需之成本；
- b_{ap} : 在節線 a 上執行災前準備工作 $p \in P$ 所需之成本；
- Δb_{ar}^p : 在節線 a 上同時執行災前準備 p 及災後工作 r 所節省之成本；
- λ_{pr} : 準備及復原工作之關係矩陣 ($\lambda_{pr}=1$ 代表復原工作 r 受準備工作 p 影響，反之則為 0)；
- X_w : 起迄對 w 的災前包容力 (連通度)；
- X_{wt}^ξ : 起迄對 w 於階段 t 的災後包容力 (連通度)， $t = 1, 2, 3, 4$ ；
- P_{wk} : 起迄對 w 中第 k 條路徑的車輛行走比例。
- C_a : 節線 a 於災前之容量；

- C_a^ξ 節線 a 災後之容量；
 C_{aprt}^ξ 節線 a 於災害發生前後執行準備工作 p 及復原工作 r 後之容量；
 ΔC_{ap} 在節線 a 執行災前準備工作 p 可以增加之容量；
 ΔC_{ar}^ξ 在節線 a 執行災後復原工作 r 可以增加之容量；
 t_w 起迄對 w 的災前穩健度 (旅行時間)；
 t_w^ξ 起迄對 w 的災後穩健度 (旅行時間)；
 t_{wrt}^ξ 起迄對 w 執行災後復原工作後之災後穩健度 (旅行時間)；
 Δt_{ar}^ξ 在節線 a 執行災後復原工作 r 後可以減少之旅行時間；
 d_w 起迄對 w 的災前彈性 (延滯時間)；
 d_w^ξ 起迄對 w 的災後彈性 (延滯時間)；
 Δd_{ar}^ξ 在節線 a 執行災後復原工作 r 後可以減少之延滯時間；
 d_{wrt}^ξ 起迄對 w 執行災後復原工作之災後彈性 (延滯時間)；
 T_{max}^w 起迄對 w 的最大允許旅行時間；
 S_p 執行災前準備工作 p 的永續影響因子；
 S_r 執行災後復原工作 r 的永續影響因子；
 S_p^* 於災前準備工作 p 中最大的永續影響因子；
 S_r^* 於災後復原工作 r 中最大的永續影響因子。

決策變數

- β_{apt} 決定是否於節線 a 執行災前準備工作 p 之二元變數 ($\beta_{ap}=1$ 表示執行災前準備工作，反之則為 0)， $t = 1, 2, 3, 4$ ；
 γ_{art}^ξ 決定是否於節線 a 執行災後復原工作 r 之二元變數 ($\gamma_{ar}^\xi=1$ 表示執行災後復原工作，反之則為 0)， $t = 1, 2, 3, 4$ 。

模式建構

$$\text{Maximize} \quad TR = E \left[\frac{\int_0^T AP(t) dt}{\int_0^T TP(t) dt} \right] \quad (3)$$

Subject to

$$AP(t) = we_1 \left(\sum_{w \in W} X_{wt}^\xi / \sum_{w \in W} X_w \right) + we_2 \left(\sum_{w \in W} t_w / \sum_{w \in W} t_{wrt}^\xi \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 &+ we_3 \left(\sum_{w \in W} d_w / \sum_{w \in W} d_{wrt}^\xi \right) \\
 &+ we_4 \left[\left(\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} S_p \beta_{apt} + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} S_r \gamma_{art}^\xi \right) / \left(\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} S_p^* \beta_{apt} + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} S_r^* \gamma_{art}^\xi \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$X_{wt}^\xi = \sum_{k \in K_w} P_{wk} \left(\prod_{a \in k} \frac{C_{aprt}^\xi}{C_a} \right), \quad \forall k \in K_w, w \in W, \forall t \in T \quad (5)$$

$$C_{aprt}^{\xi} = C_a^{\xi} + \sum_p \Delta C_{ap} \beta_{apt} + \sum_r \Delta C_{ar}^{\xi} \gamma_{art}^{\xi}, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (6)$$

$$C_{aprt}^{\xi} \leq C_a, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq X_{wt}^{\xi} \leq 1, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (8)$$

$$t_{wrt}^{\xi} = t_w^{\xi} - \sum_{a \in k} \sum_r \Delta t_{ar}^{\xi} \gamma_{ar}^{\xi}, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (9)$$

$$d_{wrt}^{\xi} = d_w^{\xi} - \sum_{a \in k} \sum_r \Delta d_{ar}^{\xi} \gamma_{ar}^{\xi}, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (10)$$

$$t_{wrt}^{\xi} + d_{wrt}^{\xi} \leq T_{max}^w, \forall k \in K_w, w \in W, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_a \sum_p b_{ap} \beta_{apt} + \sum_a \sum_r b_{ar} \gamma_{art}^{\xi} - \sum_a \sum_r \sum_p \Delta b_{ar}^p \lambda_{pr} \beta_{apt} \gamma_{art}^{\xi} \leq B \quad (12)$$

$$\sum_p \beta_{apt} \leq 1, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_r \gamma_{art}^{\xi} \leq 1, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\beta_{apt} \in \{0,1\}, \forall a \in A, p \in P, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\gamma_{art}^{\xi} \in \{0,1\}, \forall a \in A, r \in R, \forall t \in T \quad (16)$$

目標函數 (3) 為極大化路網實際績效與理想績效之比值，實際績效函數 (AP) 和目標績效函數 (TP) 為連續的時間函數，但為了簡化其量化方法，在實際計算上將其視為 4 階段的離散函數。另外，目標績效函數在本研究中假設在各階段下皆為原本狀態 100%，而實際績效函數為結合多指標的評估函數，如式 (4) 所示，共包含四大指標，以下分別說明。包容力以災後與災前的路網連通可靠度比值作為衡量，穩健度以各起訖對災後與災前的平均旅行時間比值進行評估，彈性則以災後與災前的延滯時間比較進行量化，最後永續性是以執行災前準備工作 p 與災後復原工作 r 所帶來的永續影響程度進行衡量，並與理想的永續值進行比較，其中理想的永續值，為所有節線皆實行最大永續程度的災前與災後工作。

限制式 (5) 為起訖對 w 於災害下之包容力函數；限制式 (6) 為計算節線 a 執行災前準備及災後復原工作後的災後容量。執行災前準備工作 $p \in P$ ，可以增加節線受到災害後的容量（增加量為 ΔC_{ap} ），而執行災後復原工作 $r \in R$ ，可以增加節線受到災害後的容量（增加量為 ΔC_{ar}^{ξ} ）；限制式 (7) 表示災害後的節線容量必低於原先路網之節線容量；限制式 (8) 則將起訖對間的連通度（包容力）值限制在 0 與 1 之間。

限制式 (9) 至 (10) 說明執行災後復原工作對旅行時間及延滯時間的影響；限制式 (11) 為限制各別起訖對 w 於災害後之最大總旅行時間 T_{max}^w ，包含旅行時間與延滯時間；限制式 (12) 為預算限制式，將執行災前準備及災後復原工作的總成本控制在預算 B 之內。而於同一條節線上同時執行災前準備及災後工作，將會節省實施成本，兩者之間關係由矩陣 λ_{pr} 來表示。換句話說，若發生災害後，需要修復的道路於災前已執行過準備工作，其執

行災後復原工作之成本將低於未做災前準備工作的成本。

限制式 (13) 表示一條節線上只能執行一種災前準備工作；限制式 (14) 則表示一條節線上只能執行一種災後復原工作；限制式 (15) 與 (16) 將決策變數 β_{apt} 和 γ_{art}^{ξ} 設定為零壹變數，有執行災前準備或災後復原工作為 1，未執行工作則為 0，每條節線上皆可選擇是否執行災前準備工作及災後復原工作。

3.3 層級程序分析法(AHP)與分析結果

在最佳化模式中，為了將多個指標整合在目標函數並求得最後的恢復力指標值 (TR)，本研究選用 AHP 方法來求得各指標間的權重值。AHP 問卷的評估尺度設計為 9，3.2 節中的 6 個衡量指標皆兩兩比較其重要性，並以 2014 年高雄氣爆事件作為實際案例說明。此 AHP 問卷共發放給 27 位專家學者，包含產官學研四大領域，最後回收了 21 份問卷，每份問卷皆檢測其一致性比率 (CR)，其中僅有 18 份通過一致性檢定為有效問卷。本研究使用 Goepel^[35] 所開發之 EXCEL 模板來計算和分析 AHP 問卷資料，其分析結果如表 1 所示，包容力與反應力的權重遠高於其他指標。

表 1 恢復力衡量指標間之權重

6 Indicators	Total		Industry		Government		University		Academy	
	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank
Coping Capacity	32.6%	1	13.5%	5	33.7%	2	31.8%	1	45.6%	1
Robustness	11.4%	5	7.5%	6	9.0%	4	18.2%	3	8.6%	5
Flexibility	11.4%	4	15.2%	4	8.0%	5	8.9%	5	15.6%	3
Response	25.1%	2	23.2%	1	34.0%	1	25.5%	2	17.5%	2
Resource Availability	12.1%	3	21.9%	2	11.3%	3	9.9%	4	8.7%	4
Sustainability	7.5%	6	18.8%	3	4.0%	6	5.7%	6	4.0%	6

模式中若只考慮包容力、彈性、穩健度 3 個指標，計算所得權重值分別為 0.570、0.193 和 0.237，若再多加入永續性作為考量因子，則權重值則分別為 0.483、0.176、0.207 和 0.134，由結果可以得知，包容力是最重要的指標。

3.4 求解流程

本研究之恢復力最佳化模型中有兩大問題需進行求解，第一是衡量路網於災害下之恢復力，並納入永續性作為考量因子；第二為有限預算下之資源分配。本模式實際操作流程如下：

步驟 1: 災前準備及災後復原工作

首先，把災前準備工作與災後復原工作之執行內容、關係矩陣、執行成本、績效改善

幅度設定完成，而災前準備及災後復原工作的執行內容係參考 UNESCO^[36] 所介紹的定義。

步驟 2: 資料蒐集與路網建構

蒐集路網資料，並將其整理成模擬軟體 DynaTAIWAN 所需要之格式，建構一個包含節線及節點的路網，以供後續步驟進行模擬實驗。

步驟 3: 以 AHP 法決定指標間的權重

設計並發放 AHP 專家問卷，以決定目標函數中各指標間之相對權重值；此權重由指標間兩兩比較其重要性所得。

步驟 4: 蒐集災害資料並定義災害過程階段

首先確定災害對路網的影響範圍及影響規模，對道路容量造成多少折損，接著定義路網系統於災害發生過程所經歷之四大階段。階段 1 為災害發生，故系統仍維持原本績效；階段 2 為系統已達最大破壞程度，此時系統尚未作業，若於災前預做準備工作，將可改善此階段績效；階段 3 為投入救災後的階段性回復，此階段之系統績效，會根據災前有無準備而有變化；階段 4 為系統回復到原先狀態，所以系統績效將與階段 1 相同。

步驟 5: 參數設定

完成上述步驟後，接著以交通指派軟體 DynaTAIWAN 模擬路網災前及災後的狀況，並根據模擬結果設定模式中的參數值。

步驟 6: 路徑篩選 (path selection)

模擬路網災前及災後情形後，發現災害發生確實會造成車輛路徑的改變，為了納入災前及災後路徑，並合理簡化起訖對間的連通度計算過程，本研究選用各起訖對間較常被使用之路徑，且一個起訖對最多有 5 條替選路徑。

步驟 7: 最佳化模式求解

本研究之數學模式為整數非線性規劃問題，使用套裝軟體 LINGO 11.0 可求解此類型問題，此模式求解所得結果，為路網系統於各階段下之績效，以及資源分配在災前準備及災後復原工作的最佳方式，亦即可決定要在哪條節線執行哪些災前準備工作和災後復原工作，以得到路網之最大恢復力。而 DynaTAIWAN 可用來模擬及驗證求解結果，是否有效改善路網的災後情形。

步驟 8: 求得路網恢復力

整體路網之恢復力，係由求得災害發生後各階段之路網各個績效值所計算而得，當災

害後的路網績效越高，代表路網之恢復力越大，而災害下的績效變化過程可用恢復力三角形來呈現。

四、實證研究分析

本章節將以 2014 年高雄氣爆作為實證研究分析，包含事件描述、路網說明、實驗設定、各情境之結果分析、敏感度分析與總結。

4.1 高雄氣爆事件

2014 年 7 月 31 日夜間，高雄前鎮及苓雅區發生一連串的氣爆事件，許多街道都因此炸裂毀損。當路網受到破壞時，交通管制、災後復原工作、資源配置…等等，為必須實行的措施，以使路網儘快恢復至災前的狀態。為了找出災前及災後工作最有效的資源分配方式，本研究以高雄氣爆事件為案例分析對象，並設計 3 個不同情境進行模擬，實驗路網圖如圖 3 所示，實心之節點為各區中心，虛線節線為受到災害而毀損之道路，含有箭頭之節線為單向道路，於此路網中為高速公路，虛線箭頭節線為上下匝道之道路。

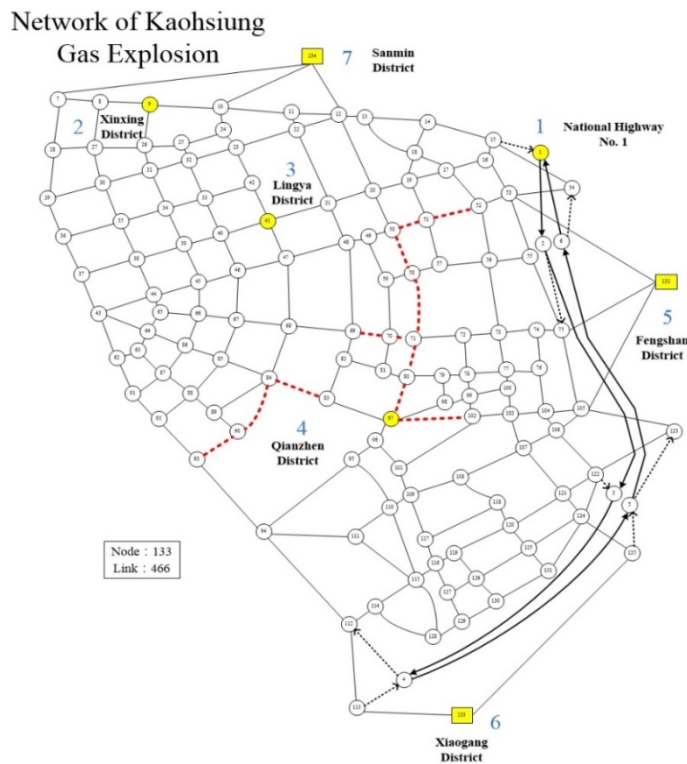


圖 3 高雄氣爆路網圖

此實驗路網包含 7 個交通分區、42 個起訖對、133 個節點和 466 條節線，整體路網面積大約 14.4 平方公里，國道 1 號座落於路網的東側。路網中的交通旅次分布，係參考高雄市政府完成之家戶旅次報告書^[37]，機車流量約為汽車流量的 4 倍，而氣爆所毀損的路網道路共有 24 條節線，在模擬過程中這些受損節線的容量會被折減。

4.2 實驗設定

4.2.1 情境設計

本實驗共設計 3 個情境來應用此恢復力最佳化模式：

1. 情境 1：假設爆炸第 1 次發生，所以沒有事前準備工作，只有事後復原工作執行。
2. 情境 2：爆炸第 2 次發生，有了第 1 次的經驗，所以多了事前準備工作。
3. 情境 3：爆炸發生不只一次，資料與經驗都較為豐富，故將永續性一同納入考量，使提升路網永續性也變成目標之一。

3 個情境皆假設災害路段容量降為 0，預算皆設定為 100 單位。

4.2.2 災前準備工作及災後復原工作設定

本實驗設定災害下可以執行兩種災前準備工作及 3 種災後復原工作（如表 2），每項工作的執行成本和造成之影響如表 3 所示，準備工作與復原工作間的關係矩陣如表 4。

表 2 災前準備工作與災後復原工作內容列表

工作項目	層級	工作內容
災前準備工作 preparedness	1	執行管線檢查與維護
	2	提前將備用之資源備妥
災後復原工作 recovery	1	於影響區域實施交通管制
	2	建造臨時道路
	3	修復和恢復受損的基礎設施

表 3 災前準備與災後復原工作之執行成本與影響

工作	單位成本 (unit)	節線容量增加 (%)	節線旅行時間 減少(%)	節線延滯時間 減少(%)	永續影響因子 (%)
P_1	2	40	—	—	5
P_2	3	45	—	—	2
R_1	1	35	10	5	0
R_2	4	45	15	10	1
R_3	6	50	20	15	3

表 4 災前準備與災後復原工作之關係矩陣

λ	R_1	R_2	R_3
P_1	1	1	1
P_2	0	1	0

4.2.3 其他設定

1. 若執行相關的災前與災後工作，其總花費可減少 20%。
2. 各情境中，災害 4 階段間之時間間隔假設為相同。
3. 以尖峰時段 (7:00 – 9:00 a.m.) 的交通量來模擬災害發生時的擁擠情形，此兩小時的交通量為日交通量的 29%。
4. 路網中重要路口的交通號誌皆設定為兩時相，週期長度為 120 秒。災害下每階段一次的模擬時間設為 180 分鐘。
5. 式 (11) 中每個起訖對的最大允許旅行時間 T_{max}^w 設為 Q_w 倍的災前旅行時間加延滯時間，當 $\frac{t_w^\xi + d_w^\xi}{t_w + d_w} \leq$ 此倍數的高斯符號取底加 0.3，則 Q_w 為此倍數的高斯符號取底；否則 Q_w 為此倍數的高斯符號取頂。0.3 為數值實驗得出的結果，為了避免時間限制過於寬鬆。 T_{max}^w 和 Q_w 的算式如式 (17)、式 (18) 所示。

$$T_{max}^w = Q_w \times (t_w + d_w), \quad w \in W \quad (17)$$

$$Q_w = \begin{cases} \left\lceil \frac{t_w^\xi + d_w^\xi}{t_w + d_w} \right\rceil, & \text{when } \frac{t_w^\xi + d_w^\xi}{t_w + d_w} \leq \left\lceil \frac{t_w^\xi + d_w^\xi}{t_w + d_w} \right\rceil + 0.3 \\ \left\lceil \frac{t_w^\xi + d_w^\xi}{t_w + d_w} \right\rceil, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

6. 在篩選路徑的過程中， α 設定為 70，代表路網中 70%車輛行走的路徑都被挑選出來，而 k 設定為 5，代表一個 OD 對中，若有路徑的車輛行走率之排序超過 5，則被刪除，以此控制路徑的數量。
7. 在最佳化模式進行之前，模式中的參數設定 (t_w 、 d_w 、 t_w^ξ 、 d_w^ξ 、 Δt_{ar}^ξ 、 Δd_{ar}^ξ)，需透過 DynaTAIWAN 模擬後求得。

五、結果分析

本節將呈現 3 個情境下的實驗與分析結果，相互比較其差異，並以 DynaTAIWAN 驗證求解結果。先前章節提到之篩選路徑流程，套用於高雄氣爆事件後可得知，在全部 42 個起訖對，共 2605 條路徑中，僅有 13% 的路徑受到災害影響，故後續的實驗情境結果與討論中，將著重於災區起訖對的結果，因為這是在災害下最為重視的部分。

5.1 情境 1：僅於災後執行復原工作

情境 1 下的路網績效變化如圖 4 所示，可知災區之路網績效在遭受破壞後下降至 66.5%，並在下個階段執行復原工作 (R) 後回復至 85%，可以看到災區的績效表現較整體差，但受到破壞後恢復的改善幅度較大。接著根據此曲線圖計算路網之恢復力，計算結果如表 5 所示，路網的恢復力為 0.840，代表災區路網在災後能維持 84% 的績效，而資源分配之結果顯示預算大多花費在整修毀損之設施上。

為了驗證最佳化模型求解的結果是否對災害下的路網績效有改善，使用 DynaTAIWAN 模擬執行災害復原工作後的情形，衡量指標包含平均旅行時間 (ATT)、平均延滯時間 (AST)、平均旅行距離 (ATD)，另外模擬了 3 個情況以觀察其變化，情況 1 為災前，情況 2 為災後不做任何事，情況 3 為災後有做復原工作。模擬所得之績效結果如下所示：

情況 1：ATT 為 72.97 min/veh；AST 為 27.69 min/veh；ATD 為 3638.72 m/veh；

情況 2：ATT 為 106.08 min/veh；AST 為 36.28 min/veh；ATD 為 3720.43 m/veh；

情況 3：ATT 為 82.75 min/veh；AST 為 31.74 min/veh；ATD 為 3644.29 m/veh。

根據以上結果，可知最佳化模式所得結果，確實可使災後路網績效改善，有做災後復原工作的平均旅行時間、平均延滯時間、平均旅行距離皆低於沒有做任何工作的情況。

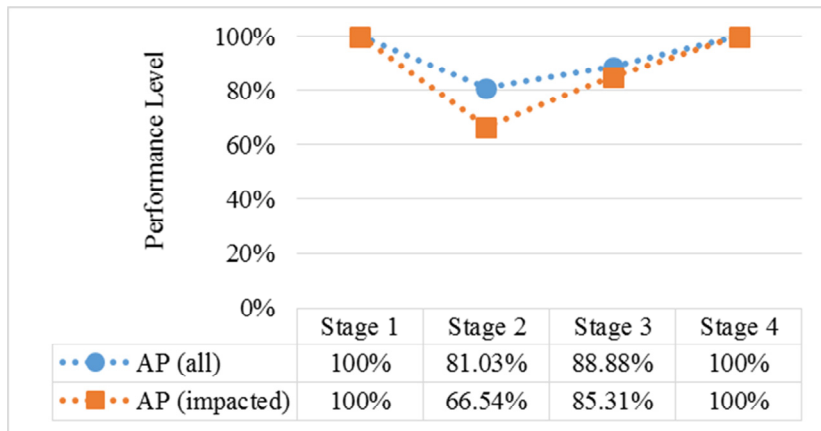


圖 4 情境 1 之路網績效變化圖

表 5 情境 1 之恢復力最佳化結果

	整體路網			災區路網		
路網恢復力	0.900			0.840		
路網指標評估值	包容力	0.935		包容力	0.796	
	穩健度	0.824		穩健度	0.999	
	彈性	0.831		彈性	0.871	
選擇執行之 災後復原工作	共 24 條節線			共 24 條節線		
數量及預算 分配比例 (災後復原工作)		數量	成本		數量	成本
	R_1	33.33%	8.00%	R_1	33.33%	8.00%
	R_2	8.33%	8.00%	R_2	8.33%	8.00%
	R_3	58.33%	84.00%	R_3	58.33%	84.00%

5.2 情境 2：災前準備及災後復原工作皆執行

情境 2 下的路網績效變化如圖 5 所示，可知災區之路網績效在遭受破壞後下降至 71%，並在下個階段回復至 92%，與情境 1 相比，因為災前有做準備工作 (P)，所以災後的路網績效較佳。接著根據此曲線圖計算路網之恢復力，計算結果如表 6 所示，路網的恢復力為 0.876，代表災區路網在災後能維持 88% 的績效，而資源分配之結果顯示，預算大多花費在執行災前管線維護及檢查 (P_1)、災後交控政策 (R_1) 及整修毀損之設施 (R_3)。

同樣將求解結果進行模擬驗證，此情境共模擬 4 種情況，情況 1 為災前，情況 2 為災後沒做任何動作，情況 3 為災前有做準備工作的災後情形，情況 4 為災前有做準備，災後也有做復原工作的情形。模擬所得之績效結果如下所示：

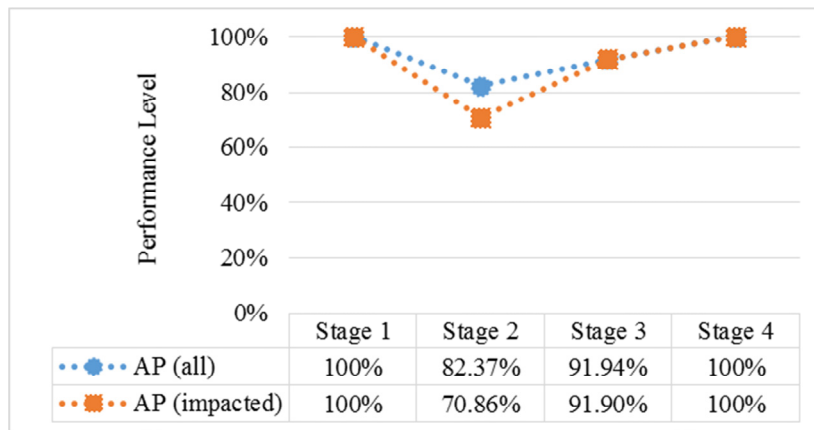


圖 5 情境 2 之路網績效變化圖

表 6 情境 2 之恢復力最佳化結果

		整體路網			災區路網		
路網恢復力		0.912			0.876		
路網指標評估值		包容力	0.982		包容力	0.929	
		穩健度	0.815		穩健度	0.972	
		彈性	0.824		彈性	0.852	
選擇執行之工作	災前準備工作	共 16 條節線			共 19 條節線		
	災後復原工作	共 22 條節線			共 24 條節線		
數量及預算 分配比例			數量	成本		數量	成本
	災前準備工作	P_1	39.47%	24.59%	P_1	44.19%	30.89%
		P_2	2.63%	2.46%	P_2	0	0
	災後復原工作	R_1	18.42%	5.74%	R_1	25.58%	8.94%
		R_2	10.53%	13.11%	R_2	4.65%	6.50%
		R_3	28.95%	54.10%	R_3	25.58%	53.66%

情況 1：ATT 為 72.97 min/veh；AST 為 27.69 min/veh；ATD 為 3638.72 m/veh；

情況 2：ATT 為 106.08 min/veh；AST 為 36.28 min/veh；ATD 為 3720.43 m/veh；

情況 3：ATT 為 85.33 min/veh；AST 為 29.99 min/veh；ATD 為 3635.52 m/veh；

情況 4：ATT 為 76.95 min/veh；AST 為 28.34 min/veh；ATD 為 3633.81 m/veh。

根據以上結果，可知執行災前準備跟災後復原工作後的路網改善狀況，與情境 1 相比，災前有做準備工作的路網績效較佳。

5.3 情境 3：災前準備及災後復原工作皆執行（納入永續因子）

情境 3 納入永續作為考量因子，其路網績效變化如圖 6 所示，與情境 2 相比差異不大。接著根據此曲線圖計算路網之恢復力，計算結果如表 7 所示，路網的恢復力為 0.876，與情境 2 相同，資源分配之結果顯示，預算大多花費在執行災前管線維護及檢查 (P_1)、災後交控政策 (R_1) 及整修毀損之設施 (R_3) 上，與情境 2 相比，分配至災前準備工作的預算較多。

同樣將求解結果進行模擬驗證，此情境共模擬 4 種情況，情況 1 為災前，情況 2 為災後沒做任何動作，情況 3 為災前有做準備工作的災後情形，情況 4 為災前有做準備，災後也有做復原工作的情形。模擬所得之績效結果如下所示：

情況 1：ATT 為 72.97 min/veh；AST 為 27.69 min/veh；ATD 為 3638.72 m/veh；

情況 2：ATT 為 106.08 min/veh；AST 為 36.28 min/veh；ATD 為 3720.43 m/veh；

情況 3：ATT 為 82.18 min/veh；AST 為 29.01 min/veh；ATD 為 3647.12 m/veh；

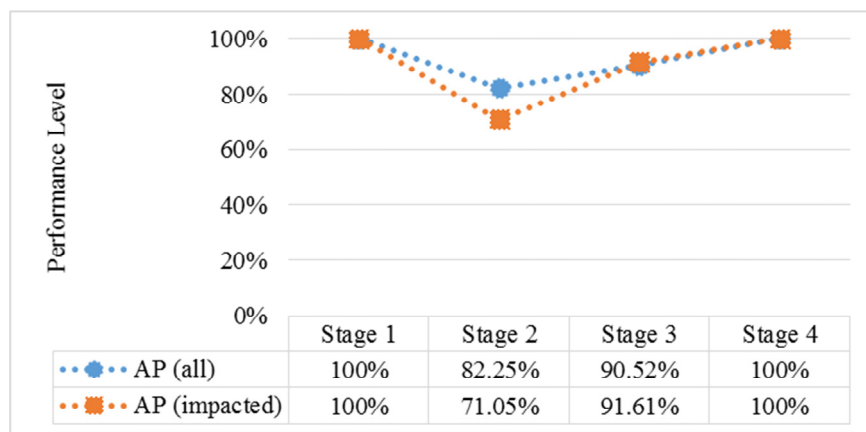


圖 6 情境 3 之路網績效變化圖

表 7 情境 3 之恢復力最佳化結果

		整體路網			災區路網		
路網恢復力		0.909			0.876		
路網指標評估值		包容力	0.974		包容力	0.930	
		穩健度	0.808		穩健度	0.958	
		彈性	0.818		彈性	0.848	
		永續性	0.750		永續性	0.786	
選擇執行之工作	災前準備工作	共 22 條節線			共 24 條節線		
	災後復原工作	共 20 條節線			共 24 條節線		
數量及預算分配比例			Amount	Cost		Amount	Cost
	災前準備工作	P_1	52.38%	36.07%	P_1	50%	38.40%
		P_2	0	0	P_2	0	0
	災後復原工作	R_1	19.05%	6.56%	R_1	27.08%	10.40%
		R_2	2.38%	3.28%	R_2	2.08%	3.20%
		R_3	26.19%	54.10%	R_3	20.83%	48.00%

情況 4：ATT 為 76.66 min/veh；AST 為 28.85 min/veh；ATD 為 3642.96 m/veh。

根據以上結果，可知執行災前準備跟災後復原工作後的路網改善狀況，與情境 2 相比，由於災前進行較多的準備工作，所以災害後的路網績效較佳。

六、結論與建議

本研究提出恢復力最佳化模型之目的，在於求出最有效的資源分配，以及衡量災害下考量永續因素之路網恢復力，目標函數中多個評估指標間的權重，係由 AHP 專家問卷求得，問卷結果顯示，大多數專家皆認為包容力是最重要指標。最後根據最佳化模式求出結果，可得路網於災害下的績效變化，而且也能決定有限資源下的工作執行方式，使整體路網能有最大的恢復力表現。

2014 年高雄氣爆事件被選為本研究之實證分析案例，共設計 3 個情境作為恢復力最佳化模型之驗證。情境 1 假設爆炸第 1 次發生，所以沒有事前準備工作，只有事後復原工作執行；情境 2 為爆炸第 2 次發生，有了第 1 次的經驗，所以多了事前準備工作；情境 3 為爆炸發生不只一次，資料與經驗都較為豐富，故將永續性一同納入考量，使提升路網永續性也成為目標之一。

實驗結果顯示，充足的預算及執行災前災後工作，對於改善恢復力及永續性相當重要，本研究建議高雄市政府應同時考量並執行災前準備及災後復原工作，以強化路網之恢復力，此最佳化模式可協助求得最有效之資源配置，並使恢復力最大化。此外，永續性也應一同納入考量範疇，使都市路網更加永續。

最後，由於此模型操作上需事先確定災害之影響地點及規模大小，故建議政府機構建置一個災害資料庫來模擬都市路網，預測出災害發生之高風險區域。實際應用上，未來可針對不同災害情境校估模式之參數，以更符合實際情形。

參考文獻

1. Parry, M. L. (Ed.), "Climate Change 2007-Impacts, Adaptation and Vulnerability", *Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Vol. 4, Cambridge University Press, 2007.
2. Holling, C. S., "What Barriers? What Bridges?", *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*, Edited by Gunderson L., Holling, C. S., and Light, S., Columbia University Press, New York, 1995.
3. Department of Homeland Security (DHS), "National Infrastructure Protection Plan", <http://www.dhs.gov/national-infrastructure-protection-plan>, 2009.
4. Turnquist, M. and Vugrin, E., "Design for Resilience in Infrastructure Distribution Networks", *Environment Systems and Decisions*, Vol. 33, No. 1, 2013, pp. 104-120.
5. Murray-Tuite, P. M., "A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions", *Simulation Conference, WSC Proceedings of the Winter*, 2006, pp. 1398-1405.
6. Centre for Sustainable Transportation (CST), "Sustainable Transportation Performance

- Indicators”, www.cstctd.org, 2005.
7. Richardson, B. C., “Sustainable Transport: Analysis Frameworks”, *Journal of Transport Geography*, Vol. 13, No. 1, 2005, pp. 29-39.
 8. Kennedy, C., Miller, E., Shalaby, A., Maclean, H., and Coleman, J., “The Four Pillars of Sustainable Urban Transportation”, *Transport Reviews*, Vol. 25, No. 4, 2005, pp. 393-414.
 9. Awasthi, A. and Chauhan, S. S., “Using AHP and Dempster-Shafer Theory for Evaluating Sustainable Transport Solutions”, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 26, No. 6, 2011, pp. 787-796.
 10. Holling C. S., “Resilience and Stability of Ecological Systems”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, 1973, pp. 1-23.
 11. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), *White Paper on the SDR Grand Challenges for Disaster Reduction*, MCEER, Buffalo, NY, 2005.
 12. Tierney, K. and Bruneau, M., “Conceptualizing and Measuring Resilience: A Key to Disaster Loss Reduction”, *TR News*, No. 250, 2007, pp. 14-17.
 13. Reggiani, A., “Network Resilience for Transport Security: Some Methodological Considerations”, *Transport Policy*, Vol. 28, 2013, pp. 63-68.
 14. Ip, W. H. and Wang, D., “Resilience and Friability of Transportation Networks: Evaluation, Analysis and Optimization”, *IEEE Systems Journal*, Vol. 5, No.2, 2011, pp. 189-198.
 15. Paul, J. A. and Maloni, M. J., “Modeling the Effects of Port Disasters”, *Maritime Economics and Logistics*, Vol. 12, No.2, 2010, pp. 127-146.
 16. Faturechi, R., Levenberg, E., and Miller-Hooks, E., “Evaluating and Optimizing Resilience of Airport Pavement Networks”, *Computers & Operations Research*, Vol. 43, 2014, pp. 335-348.
 17. Miller-Hooks, E., Zhang, X., and Faturechi, R., “Measuring and Maximizing Resilience of Freight Transportation Networks”, *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No.7, 2012, pp. 1633-1643.
 18. Lokuge, W. and Setunge, S., “Evaluating Disaster Resilience of Bridge Infrastructure When Exposed to Extreme Natural Events”, In *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Resilience 2013*, University of Salford, 2013, pp. 1-12.
 19. Madhusudan, C. and Ganapathy, G. P., “Disaster Resilience of Transportation Infrastructure and Ports – An Overview”, *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol. 2, No.2, 2011, pp. 443-455.
 20. Mattsson, L. G. and Jenelius, E., “Vulnerability and Resilience of Transport Systems—A Discussion of Recent Research”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 81, 2015, pp. 16-34.
 21. Ip, W. H. and Wang, D., “Resilience Evaluation Approach of Transportation Networks”, *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, IEEE, 2009, pp. 618-622.
 22. Zhang, L., Wen, Y., Huang, Z., and Jin, M., “Framework of Calculating the Measures of Resilience (MOR) for Intermodal Transportation Systems”, No. FHWA/MS-DOT-RD-10-220, 2010.

23. Omer, M., Mostashari, A., and Nilchiani, R., “Measuring the Resiliency of the Manhattan Points of Entry in the Face of Severe Disruption”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No.1, 2011, pp. 153-161.
24. Tamvakis, P. and Xenidis, Y., “Resilience in Transportation Systems”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 48, 2012, pp. 3441-3450.
25. Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., and Min, X., “A Three-Stage Resilience Analysis Framework for Urban Infrastructure Systems”, *Structural Safety*, Vol. 36, 2012, pp. 23-31.
26. Adams, T. M., Bekkem, K. R., and Toledo-Durán, E. J., “Freight Resilience Measures”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 11, 2012, pp. 1403-1409.
27. Chen, L. and Miller-Hooks, E., “Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport”, *Transportation Science*, Vol. 46, No. 1, 2012, pp. 109-123.
28. Faturechi, R. and Miller-Hooks, E., “A Mathematical Framework for Quantifying and Optimizing Protective Actions for Civil Infrastructure Systems”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 29, No. 8, 2014, pp. 572-589.
29. Cox, A., Prager, F., and Rose, A., “Transportation Security and the Role of Resilience: A Foundation for Operational Metrics”, *Transport Policy*, Vol. 18, No. 2, 2011, pp. 307-317.
30. Walker, B. H. and Salt, D., *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*, Island Press, Washington, D.C., 2006.
31. Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., and Rockström, J., “Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability”, *Ecology and Society*, Vol. 15, No.4, 2010, Art. 20.
32. Redman, C. L., “Should Sustainability and Resilience Be Combined or Remain Distinct Pursuits”, *Ecology and Society*, Vol. 19, No. 2, 2014, Art. 37.
33. Saunders, W. S. A. and Becker, J. S., “A Discussion of Resilience and Sustainability: Land Use Planning Recovery from the Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 14, Part 1, 2015, pp. 73-81.
34. Iida, Y. and Wakabayashi, H., “An Approximation Method of Terminal Reliability of Road Network Using Partial Minimal Path and Cut Sets”, *Transport Policy, Management and Technology towards 2001: Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transport Research*, Vol. 4, 1989, pp. 367-380.
35. Goepel, K. D., “Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs”, *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process 2013, ISAHP, 2013*.
36. UNESCO World Heritage Centre, “Prevention, Preparedness, Response, Recovery – Unesco”, http://webworld.unesco.org/safeguarding/en/pdf/txt_sini.pdf, 2016.
37. 高雄市政府交通局, 高雄都會區家戶旅次訪問調查與旅次特性分析報告書, 民國 98 年。

