

橋樑定期檢測作業排程最佳化模式 之研究¹

AN OPTIMAL ROUTING AND SCHEDULING MODEL FOR REGULAR BRIDGE INSPECTIONS

顏上堯 Shangyao Yan²

范琇綾 Hsiu-Ling Fan³

陳怡君 Yi-Chun Chen⁴

(104 年 4 月 17 日收稿，104 年 9 月 23 日第 1 次修改，105 年 3 月 13 日定稿)

摘 要

臺灣地區的橋樑必須每年進行所有構件的全面性定期檢測。實務上橋樑定期檢測作業排程主要由人力指派方式決定，缺乏系統性分析與整體考量，當面臨龐大的檢測作業排程時，將造成人力、經費與時間等成本之浪費。緣此，本研究建構一橋樑定期檢測作業排程最佳化模式，期能使執行橋樑定期檢測作業的總成本最小化。此外，本研究模式為一大型含額外限制之整數網路流動問題，屬 NP-Hard 問題，難以現有最佳化軟體直接求最佳解，故本研究發展一啟發解演算法。最後，本研究以國內某地區之橋樑定期檢測作業為測試範例，其結果良好，顯示本研究模式與演算法可供實務界應用之參考。

關鍵詞：橋樑定期檢測作業；排程；含額外限制之整數網路流動問題；啟發解法

-
1. 本研究承科技部專題計畫(MOST-101-2221-E-008-096-MY3)之部分補助，特此致謝。作者亦感謝二位審查委員寶貴的修正意見，使得本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授，本文通訊作者（聯絡地址：32001 桃園市中壢區中大路 300 號 中央大學土木工程學系；聯絡電話：03-4227151 分機 34141；E-mail：t320002@cc.ncu.edu.tw）。
 3. 國立中央大學土木工程學系碩士。
 4. 國立中央大學土木工程學系博士班研究生。

ABSTRACT

The bridges in Taiwan have to be inspected regularly in every year. In practice, the routing and scheduling for bridge inspections depend on the experience of the decision maker, which is neither efficient nor effective. Therefore, in this study we propose an optimal routing and scheduling model with the objective of minimizing the total cost for bridge regular inspection. In addition, the model is formulated as an integer network flow problem with side constraints, which is characterized as NP-hard. To efficiently solve the realistically large problems occurring in practice, a heuristic algorithm is developed. Finally, we perform a case study using real data of bridge inspections from a Taiwan city to demonstrate and to evaluate the model and the solution algorithm. The results are good, showing that the model and the solution algorithm could be useful references for practices.

Key Words: Regular bridge inspection; Routing and scheduling; Network flow problem with side constraints; Heuristic algorithm

一、緒 論

臺灣地形多河川與山谷，常需要仰賴橋樑連結，因此橋樑在公路系統中佔了相當重要的地位。然而橋樑的生命週期裡，除了有結構老化及鏽蝕等情況外，亦有因自然環境因素、施工品質或建造時的設計標準等原因，造成橋樑損壞，進而影響整體結構安全，導致橋樑無法正常使用並降低其服務水準。由於橋樑需跨越河川、溪谷等障礙物，不僅建置費用龐大，施工期也較長，損壞後不易修復，故平時的管理與養護十分重要，而確實的檢測則可有效掌握橋樑的現況是否有降低結構功能、提供其裂化程度資訊，以記錄結構劣化情況，並即時進行維修與補強，確保其結構之完整與安全。至於檢測的類別又分為定期檢測與特別檢測兩種，前者之目的為透過定時對橋樑構件實施檢測，能早期發現構件劣化程度並評估橋樑功能損傷及其原因，以掌握橋樑結構安全；後者則針對因天災（如颱風、豪雨、地震等）或人為破壞（如火災、車輛撞損等）等因素所引起之災害，導致可能損傷橋樑結構所作之檢查。

根據交通部所頒定之公路養護手冊^[1]規定，臺灣地區的橋樑需於每年定期接受針對所有構件之全面性檢測。定期檢測之執行方法為檢測小組搭乘車輛至各橋樑檢測點檢查，直至轄區內的橋樑均被檢測完畢為止。而實務上橋樑定期檢測作業之排程，主要由橋樑管養單位之決策者以人工指派方式決定，此作法雖簡易可行，但當轄區內需檢測之橋樑數量眾多時，此作法不但效率不佳，更可能造成人力、經費與資源之浪費，由此可知人工指派缺乏整體系統性的分析與規劃，無法有效地處理龐大的橋樑定期檢測作業排程。目前已有許多學者對於橋樑維護與管理機制進行探討，如延允中^[2]指出為維護橋樑之服務水準，

橋樑每年維護費需為其重建費的 $1/200$ ，且費用有增加的趨勢。然而橋樑之劣化屬必然趨勢，透過維護管理，並立即修補、改善缺失，除了能延緩劣化速率、延長壽命外，還能減緩維護經費之增加。吳秋木^[3]曾提到橋樑生命週期中的維護階段，係以維護其結構安全與要求的服務水準之前提下，對橋樑進行定期或不定期之檢驗，並作必要之修護、整建或重建。柴志傑^[4]利用專家問卷，列出 6 項時間影響因子與橋樑檢測時間進行多元線性迴歸，將每日可工作之時間納入考量，建立橋樑目視檢測行程模式，以檢測時間最短為目標，並應用啟發式演算法與基因演算法求解模式。顏上堯與姜蔚宗^[5]透過零壹整數規劃方法，構建橋樑檢測作業規劃模式，由於在求解方面受到子迴圈影響，導致問題規模受到限制，故不符實務應用上之需求。Dai 等人^[6]則指出執行橋樑檢測最主要的關鍵為檢測人員，在美國橋檢人員需具有 10 年以上之相關經驗才得以任用，而在中國橋檢人員也需有 5 年以上相關經驗。

此外，橋樑定期檢測作業需在規定期程內完成，因此本研究問題亦可歸類為期間車輛排程問題 (periodical vehicle routing problems, PVRP)，即在一段時間內，根據顧客位置、數量、服務水準與車輛容量等因素下，決定期間內每天服務的顧客數及行車路線，使總成本最小化。有別於車輛排程問題 (vehicle routing problems, VRP)，PVRP 所規劃的時期不限於 1 天，且每天要服務最多少顧客也必須有所規劃，所以除了要安排車輛與路線外，亦須決定各個顧客於規劃期間內所應配送的時間。過去有許多學者曾嘗試用不同方法來解決 PVRP，如 Matos 與 Oliveira^[7]運用蟻群系統發展一套兩階段演算法，並以葡萄牙維塞烏垃圾車回收系統為測試案例，研究結果顯示此演算法有不錯的求解效率，適合求解大規模問題，且跟其他模式比較之下可減少運算量，但求解答案相同。Wen 等人^[8]針對瑞典一家大型經銷商送貨路線進行動態排程規劃，依據實際狀況以最小化旅行時間、最小化顧客等待以及在每日工作量計畫水準上等 3 項要求取得平衡為目標構建模式，並以三階段演算法求解，研究結果顯示此模式可有效地改善旅行時間、顧客等待及工作量。Yu 與 Yang^[9]應用改良式螞蟻演算法來解決具時窗限制之期間車輛路徑問題，將規劃期延長至數天，各需求必須在指定的時窗結束前被服務，亦加入多維資訊矩陣及交叉比對的方式來改善螞蟻演算法，其結果顯示求解績效良好。綜觀上述文獻得知，雖然已有研究曾嘗試運用數學規劃方法構建模式，以解決橋樑定期檢測作業排程問題，但因有子迴圈的影響，使得求解規模受到限制，無法於大規模的實務問題上應用，至於其他的期間車輛排程模式亦無法應用於本研究所探討的問題。

緣此，本研究以橋樑管養單位決策者的角度，將實際執行橋樑定期檢測的相關要求（如車輛旅行時間、檢測人員每日工時以及檢測時間之限制等）納入考量，建構一結合時間面與空間面之橋樑定期檢測作業排程最佳化模式，期望能達到檢測總成本最小化，提供相關主管機關在辦理橋樑定期檢測業務時之參考，以利提升橋樑定期檢測作業排程之效率，充分地利用人力、經費與時間等資源。此外，本研究模式可定式為含額外限制之整數網路流動問題，屬 NP-Hard 問題，針對實務大型問題，勢難在有限的時間內，直接以現有之最佳化軟體求得最佳解。因此，本研究根據問題之特性，發展一啟發解演算法。最後本研究以

國內某地區之橋樑定期檢測作業資料為範例，測試模式與啟發解演算法之效果。

除了本節外，本文後續內容如下：第二節建構橋樑定期檢測作業排程最佳化模式，第三節發展合適之啟發解演算法，第四節進行範例測試與分析，第五節提出結論與建議。

二、模式建構

由於時空網路可有效地表達物體或事件於時空中之相對位置與關係，因此在各領域已被廣泛應用，尤其是運輸領域的排程規劃，更是有不錯的成效，例如 Yan 等人^[10]、Yan 與 Shih^[11]、Lu 與 Chen^[12]、Yan 等人^[13,14] 等。有鑑於此，本研究亦利用時空網路流動之技巧，建構橋樑定期檢測作業之車輛在時空中的流動情形，並以數學規劃方法發展橋樑定期檢測作業排程最佳化模式，期望能使總成本最小化。本節針對模式基本假設、時空網路設計及數學模式等進行說明。

2.1 模式基本假設

為確保模式之建構能符合實務之需求，並界定使用上之限制，茲給定以下基本假設：

1. 已知所有橋樑資料

透過「臺灣地區橋樑管理資訊系統 (Taiwan Bridge Management System, TBMS)」取得各橋樑資料 (如地理位置、橋孔數、橋樑規模等)，且其檢測作業方式也有標準化之流程，故可得知橋樑檢測點間之旅行時間和其成本，並根據各橋樑資料假設可得知各橋樑檢測時間和其成本，因此模式所需的成本均為已知之固定值。

2. 排除不適合行車及檢測作業的惡劣天氣狀況

假設天氣狀況適合檢測小組出發作業，不干擾行車及檢測作業。

3. 每天出發點位置相同

所有檢測小組在任務開始第 1 天於工務段出發，然而因檢測作業不會跨夜執行，因此檢測小組需在每日工作結束後返回至工務段，隔日再由工務段出發。

4. 車輛行駛速度採平均速率，無特殊交通狀況

假設各檢測小組車輛行駛速度為平均速率，而各橋樑檢測點間之旅行時間亦為平均旅行時間。至於公路流量變化、路寬等會影響旅行時間之因素，決策者可依實際狀況，預先估計各路段旅行時間。另外本研究在規劃上對於道路上可能會發生的特殊事故之情形，暫不考慮，此類事件可在即時營運中臨時調整。

5. 橋樑定期檢測作業期程為非洪汛期間之可工作天數

實務上公路總局要求所有橋樑管養單位，須於每年汛期後至隔年汛期前完成各轄區之橋樑進行檢測作業，故每年 11 月至隔年 4 月為橋樑管養單位執行橋樑定期檢測作業時間。

6. 所有檢測人員作業效率相同

假設所有檢測人員對檢測作業的熟練度相同，不會因為個人的經驗與資歷而有檢測效率之差別。未來在模式的應用上，若有不一致之情形，則只需適當修訂模式中各檢測小組對各橋樑的檢測時間，而此修改並不會改變模式的架構。

2.2 時空網路設計

本研究應用時空網路流動技巧，以呈現檢測小組與車輛從出發點至各橋樑檢測點執行檢測作業之情形，其設計以一組檢測小組及車輛為單位建構一層時空網路，故為多層時空網路，如圖 1 所示。網路縱軸代表時間之延續，橫軸則表示出發點（即工務段）與各橋樑檢測點之空間分佈。本研究的規劃時窗須依據非汛期可進行橋樑定期檢測作業的期程來決定，參考實務作業，茲訂網路時間軸的長度為 10 天，每天作業時間為上午 8 點至下午 4 點，共 8 小時，節點間距為半小時，總計 170 個時點。未來決策者可依其實際情況及需求，自行調整上述參數。而網路中之節點與節線說明如下：

1. 節點

代表檢測小組在某一特定時間之時空點，可分為工務段、橋樑檢測點及匯集節點 3 種（如圖 1 所示）。每一工作天開始時（即上午 8 點），從出發點（即工務段，編號為 1）出發至各橋樑檢測點進行檢測作業，若時間允許則繼續到下一橋樑檢測點執行檢測作業，否則需在每天工作時間結束前（即上午 4 點）回到出發點，當所有任務結束時則回到匯集節點。由於橋樑定期檢測作業是以工務段為出發點，故將第 1 時點之工務段視為供給點，而匯集節點視為需求點，其需求量等於供給量，其餘皆為轉運點。

2. 節線

用來表示檢測小組與車輛於不同節點間之流動，亦為執行橋樑定期檢測作業之路徑，可細分為發車節線、服務節線、滯留節線、結束節線及匯集節線等 5 種，分別說明如下：

(1) 發車節線

如圖 1 中節線 (1) 所示。此類節線為檢測小組自工務段出發至各橋樑檢測點之時空連接線，起始時點為各工作日開始時間（即 08:00），節線流量上限為 1，表示最多僅有一組檢測小組被指派至該橋樑檢測點進行檢測作業，下限為 0，表示沒有檢測小組被指派至該橋樑檢測點進行檢測作業。節線成本則包含檢測小組自工務段出發至該橋樑檢測點之旅行成本與檢測成本。

(2) 服務節線

如圖 1 中節線 (2) 所示。此類節線代表檢測小組於兩相異橋樑檢測點間之時空連接線，表示檢測小組檢測完一座橋樑之後繼續前往下一座執行檢測作業。此外，檢測小組需在每日工時結束前（即 16:00）回到工務段，故服務節線沒有跨夜。而節線成本為檢測小組至各橋樑檢測點之旅行成本與檢測成本總和。節線之流量上限為 1，表示最多僅有一組檢測小組被指派至對應之橋樑檢測點進行檢測作業；流量下限為 0，表示沒有檢測小組被指派至對應之橋樑檢測點。

(3) 滯留節線

如圖 1 中節線 (3) 所示。此類節線係指檢測小組在工務段但不同時間之時空連接線，表示檢測小組在工務段停留一段時間，亦表示未被指派任務，故此類節線不會產生任何成本。其流量上限設為 1，表示最多僅一組檢測小組在該時段中停留於工務段，流量下限設定為 0，表示無檢測小組在該時段中停留於工務段。

(4) 結束節線

如圖 1 中節線 (4) 所示。此類節線連接各橋樑檢測點至工務段，代表檢測小組結束當日的檢測作業回到工務段。此類節線流量上限為 1，表示檢測小組在該橋樑檢測點與該時段結束當日的檢測作業，下限為 0，表示檢測小組未在該時空點結束檢測工作。而節線成本則僅有旅行成本，並無檢測成本。

(5) 匯集節線

如圖 1 中節線 (5) 所示。此類節線為從工務段之最終時點至匯集節點之連接線，其目的為使檢測小組執行完所有橋樑定期檢測作業後，流量能守恆。此類節線流量上限為 1，下限為 0，且不會產生任何成本，即節線成本為 0。

2.3 數學模式

1. 符號說明

於模式定式前，茲定義本模式所使用之集合、參數及決策變數如下。

集合定義：

BN^m ：第 m 層網路中所有節點之集合；

BA^m ：第 m 層網路中所有節線之集合；

U_d^m ：第 m 層網路中所有進入橋樑檢測點 d 的節線 (包含服務節線、發車節線) 之集合；

S^m ：第 m 層網路中供給點之集合；

T^m ：第 m 層網路中轉運點之集合；

D^m ：第 m 層網路中需求點之集合；

M ：所有網路層之集合；

DN ：所有服務橋樑檢測點之集合。

參數定義：

c_j^m ：第 m 層網路中節點 j 之檢測成本；

t_{ij}^m ：第 m 層網路中節線 (i,j) 之旅行成本。

決策變數：

x_{ij}^m ：第 m 層網路中節線 (i,j) 之流量。

2. 數學定式

目標式：

$$\text{Min } Z = \sum_{m \in M} \sum_{ij \in BA^m} (t_{ij}^m + c_j^m) x_{ij}^m \quad (1)$$

限制式：

$$\sum_{j \in BN^m} x_{ij}^m - \sum_{k \in BN^m} x_{ki}^m = \begin{cases} 1 & , i \in S^m \\ 0 & , i \in T^m \\ -1 & , i \in D^m \end{cases}, \quad \forall m \in M \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{ij \in U_d^m} x_{ij}^m = 1, \quad \forall d \in DN \quad (3)$$

$$x_{ij}^m = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \in BA^m, \forall m \in M \quad (4)$$

本研究模式為一含額外限制整數網路流動問題，其中目標式 (1) 為橋樑定期檢測作業總成本最小化，總成本指所有檢測小組的旅行成本及執行作業時的檢測成本之總和。限制式 (2) 為時空網路中各節點（包含供給點、轉運點及需求點等）流量守恒限制式，其目的為所有節點之進出流量能守恒。限制式 (3) 為橋樑檢測次數的限制，即各橋樑檢測點僅能被檢測 1 次。限制式 (4) 為決策變數之零壹整數限制，即決策變數之上限為 1，下限為 0。

三、求解演算法

本研究模式為含額外限制之整數網路流動問題，屬於 NP-hard 問題。求解難度隨著問題規模變大而更加困難，處理此大型問題時若僅利用既有之最佳化軟體（如 CPLEX 數學規劃軟體），勢將難以在合理的時間內求得最佳解，缺乏效率。過去在大型含額外限制之網路流動問題的求解方式大多是以分解演算策略來發展啟發解演算法，即將原本的大問題分解成數個子問題分別進行求解，以降低問題規模，如次梯度價格/資源導向分解演算法、分割式分解演算法等，其中又以分割式分解演算法最容易應用，且以往的研究（如 Barnhart 等人^[15]、Yan 等人^[16-18]）顯示其效果良好，故本研究利用此演算法，根據問題之特性發展一啟發解演算法，取得一較佳之可行解。此外，為評估啟發解演算法的績效，本研究亦發展一下限解法。

3.1 啟發解演算法

本研究以分解再組合的概念，先將原問題拆成數個子問題，以縮小問題規模，接著透

過分階段方式求解，可大幅減少運算時間。其流程為將原時空網路平均分割成 N 個小型的時空網路，接著將每一階段經過求解後之時空網路，納入下一階段進行求解，直至所有階段之網路均被求解完畢為止，即可得到一啟發解。在分割階段部分，本研究先將網路時間長度分割成 2 至 6 個階段進行測試，發現若僅分割成 2 階段，其子問題規模仍過大導致求解時間過長，且效率不佳；而分割成 4、5、6 階段，則每一子問題的網路時間長度太短容易發生無解或求解效果不佳之狀況，因此，權衡以上分割方式，本研究演算法採取分割成 3 階段之方式進行求解（本研究已利用第四節的範例資料，測試過 2 階段與 4 階段網路，發現若僅將網路分割成 2 階段，則問題規模仍太大，無法在合理時間內求解；而若採用 4 階段網路，以區域 2 為例，則所求得之解目標值為 36,772，運算時間為 3,882 秒，比 3 階段網路的解目標值 (36,075) 來的差，且時間也較長 (3,882 秒 > 2,288 秒)，由此可驗證 3 階段網路最適合本研究問題。至於其他問題的網路分割方法，則可於後續研究中探討），詳細之求解步驟如下所述：

步驟 1：分割問題

將原問題之網路時間長度平均分割成 3 階段，即每一階段之網路時間長度為原問題的三分之一，且設定每一階段之橋樑檢測點數亦為原問題的三分之一。

步驟 2：建立各階段時空網路並求解

依照步驟 1 之設定構建各階段時空網路，此時空網路設計方式與原時空網路相同，值得注意的是，由於原問題經過分割，若依照原需求限制將無法求解，故放鬆部分限制，即將原限制式 (3) 改為下列的限制式 (5) 及 (6)，其中 dp 為步驟 1 所設定之各階段的橋樑檢測點數，其他限制式則不更改。構建完成之後，以 CPLEX 求解該階段子問題。

$$\sum_{m \in M} \sum_{ij \in U_d^m} x_{ij}^m \leq 1, \quad \forall d \in DN \quad (5)$$

$$\sum_{d \in DN} \sum_{m \in M} \sum_{ij \in U_d^m} x_{ij}^m \geq dp \quad (6)$$

步驟 3：判斷該階段子問題所設定的橋樑檢測點數是否均被服務

判斷該階段子問題的橋樑檢測點數是否均被服務，若是，則固定此階段求解結果，並將其納入下一階段中，接著回到步驟 2 繼續下一階段之子問題求解；若否，則回到步驟 1，減少給定之橋樑檢測點數或增加網路時間長度。值得一提的是，由於橋樑定期檢測作業不會有跨夜執行的情況，然而演算法將原網路時間長度以等分之方式進行分割，導致各階段的最後 1 個工作天可能不足 1 天，因此在每階段求解結果的固定方式上，會放鬆該階段最後 1 個不足 1 天的工作天之時點數，以此做為銜接下一階段時空網路的放鬆部分。舉例來說，第 1 階段由第 1 時點至第 56 時點，即 3 個工作天又 2.5 小時，在求解完此階段之部分

解後，固定第 1 時點至第 51 時點（即 3 個工作天）的流量解，放鬆第 52 時點至第 56 時點的流量解。

步驟 4：判斷是否已達到停止條件，即所有子問題的網路均被求解完畢。若否，則返回步驟 2 繼續求解；若是，則求解結束，得到啟發解。

3.2 目標值下限解

由於啟發解演算法僅能求得一較佳的可行解，因此為評估本研究所發展之演算法的求解績效，我們發展一下限解法。其作法係將原問題中，所有零壹整數限制鬆弛為非負實數，即將原問題之限制式 (4) 改為限制式 (7)。另外，將所有檢測小組時空網路合併為一層，即將限制式 (2) 中之 m 值設定為 1，而供給量及需求量則由 1 及 -1 改成檢測小組之數量。經此修正後，原車輛排程模式改為車隊排程模式，其限制較原模式為鬆，因此所求得之解目標值為原問題解目標值的下限。

$$x_{ij}^m \geq 0, \quad \forall i, j \in BA^m, \forall m \in M \quad (7)$$

四、範例測試

為驗證本研究所發展的模式與求解演算法之效果，本節以國內某地區（簡稱 X 地區）之橋樑定期檢測作業資料為測試範例。經訪談並蒐集實務上相關資料後，透過系統性分析整理及做部分合理假設後，作為範例測試之輸入資料。本研究在 Intel Core i7-3770 CPU 3.40GHz、8.00GB RAM 搭配作業系統為 Microsoft Windows 7 之個人電腦上，利用 Microsoft Visual C++ 6.0 軟體撰寫程式，並結合 CPLEX 11.1 最佳化軟體進行模式之求解

4.1 輸入資料

基本輸入資料主要可分為橋樑資料、檢測成本與旅行成本資料，以及其他相關參數資料等，茲分別說明如下：

1. 橋樑資料

本研究自臺灣地區橋樑管理資訊系統取得 X 地區所有橋樑資料，包含各橋樑位置、橋板面積、總橋孔數等。根據橋樑位置計算出每座橋樑之間的距離，接著假定車輛之平均行駛速率以獲得平均旅行時間，而橋板面積與總橋孔數則為推估橋樑檢測時間的重要影響因素。

2. 檢測成本與旅行成本資料

橋樑檢測成本包含人員出差費及檢測工具成本等，此成本依據每座橋樑而定，而旅行成本則包含檢測車輛的油耗及維修保養成本。此部分成本由業者所提供之資料進行粗估，

為研究測試用，決策者未來若要應用到實務時，則應使用更精確的數據。

3. 其他相關參數資料

本研究規劃之期程為 10 天，每一日之檢測作業時間從早上 8 點至下午 4 點，共計 8 小時，並以 30 分鐘為一時點間距，總計有 170 個時點。X 地區所需檢測的橋樑共有 171 座。另外，本研究以 5 組檢測小組作為車隊規模，並假設每組檢測小組工作效率類似。值得一提的是，因為需檢測的橋樑數過多，可能導致求解時間過長，為考量求解效率及結果之執行合理性上，遂將 171 座橋樑依據其地理位置，劃分成 4 個區域，而這 4 個區域之橋樑檢測點數分別為 37、42、45、47 座。上述所有輸入資料均彙整於表 1。

表 1 輸入資料

項 目	輸入資料	
規劃期程	10 天	
每日執行檢測作業時間	08:00-16:00	
每個時點間距	30 分鐘	
檢測區域數	4 區	
檢測小組數	20 組 (5 組/區)	
所有檢測橋樑數	171 座	
各區檢測橋樑數	第 1 區	37 座
	第 2 區	42 座
	第 3 區	45 座
	第 4 區	47 座

4.2 結果分析

本研究將測試範例分割成 4 個區域，共有 171 座橋樑，其中，區域 1 有 37 座橋樑檢測點；區域 2 有 42 座；區域 3 為 45 座；區域 4 則有 47 座。每個區域皆有 5 組檢測小組執行檢測作業。規劃期程為 10 天，每天僅能任務的時間為 8 小時（早上 8 點至下午 4 點），時點間距設定為 30 分鐘，共有 170 個時點。由於本研究問題規模龐大，若僅利用現有最佳化軟體求解，將導致求解時間過長，有鑑於此，本研究發展分階段啟發解演算法，將原問題分成 3 階段的方式進行求解，第 1 階段由第 1 時點至第 56 時點，第 2 階段為第 57 時點至第 112 時點，第 3 階段則由第 113 時點至第 170 時點，並設定每一階段之橋樑檢測點數，將每一階段之結果納入下一階段繼續進行求解，直至所有階段均求解完畢為止。在求解時間限制方面，各階段上限為 3,600 秒（1 小時），收斂誤差（MIPGAP）設定為 1% 以下。

所有區域之 3 階段橋樑檢測點數的設定方面，區域 1 為 13、26、37 座；區域 2 為 15、30、42 座；區域 3 為 15、30、45 座；區域 4 為 16、32、47 座。而範例測試結果如表 2 所

示，其中，啟發解目標值代表橋樑定期檢測作業總成本，分別為區域 1：72,692 元、區域 2：36,075 元、區域 3：73,627 元、區域 4：25,445 元；求解時間分別為區域 1：57.26 秒、區域 2：2,288.35 秒、區域 3：129.19 秒、區域 4：7,698.78 秒；4 個區域之啟發解與最佳解收斂間距部分：區域 1 與區域 3 均為 0%，區域 2：0.8%，區域 4：2%；各區域之下限解目標值依序為 72,475 元、35,568.48 元、72,715.8 元、24,717.91 元；下限解求解時間為：區域 1：0.11 秒、區域 2：2.4 秒、區域 3：1.15 秒、區域 4：17.93 秒；啟發解與下限解兩者之間距以區域 4：2.94%最大，區域 2：1.42%次之，區域 3：1.25%，區域 1：0.30%最小。由上述結果可知本研究發展之啟發解演算法效果良好。

表 2 範例測試結果

	區域 1	區域 2	區域 3	區域 4
橋樑檢測點數 (座)	37	42	45	47
啟發解目標值 (元)	72,692	36,075	73,627	25,445
啟發解求解時間 (秒)	57.26	2,288.35	129.19	7,698.78
啟發解與最佳解收斂間距 (%)	0	0.80	0	2
下限解目標值 (元)	72,475	35,568.48	72,715.8	24,717.91
下限解求解時間 (秒)	0.11	2.40	1.15	17.93
啟發解與下限解之間距 (%)	0.30	1.42	1.25	2.94

此外，由細部解結果可知，區域 1 第 1 組共檢測 12 座橋樑，第 2、3 組各 9 座，第 4 組 2 座，第 5 組 5 座；區域 2 之第 1 與第 2 組均檢測 12 座橋樑，第 3 組 10 座，而第 4、5 組各 4 座；區域 3 第 1 組共檢測 12 座橋樑，第 2、3 組各 7 座，第 4 組 9 座，第 5 組 10 座；區域 4 第 1 組共檢測 15 座橋樑，第 2 組 18 座，第 3 與第 4 組各 7 座，而第 5 組則沒有執行檢測作業。另外，表 3 為檢測小組在各區域執行橋樑定期檢測作業的路線，礙於版面關係，僅以區域 1 之橋樑定期檢測作業路線為例。

4.3 敏感度分析

本節針對車隊規模、旅行成本及檢測成本等 3 項重要參數進行敏感度分析，以評估這些參數對模式目標值的影響程度，提供決策者做規劃時之參考。至於其他參數之敏感度分析，可依類似作法執行，為節省篇幅，不再詳細敘述。

1. 車隊規模

在執行橋樑定期檢測作業時，檢測小組搭乘車輛至各橋樑檢測點，以 1 輛車載運 1 組檢測小組為原則，故車輛數等於檢測小組數。將車隊規模變動為 4 輛、5 輛、6 輛與 7 輛時，目標值之變化如表 4 所示。由結果可發現，車隊規模由 4 輛變成 5 輛時，除了區域 3 之外，其他所有區域之目標值皆呈現下降趨勢，然而，當車隊規模由 5 輛變成 7 輛時，目

標值之變化則呈現不穩定走向，究其原因可能是由於演算法僅能求得可行解非最佳解，因此目標值會受到啟發解誤差造成擾動的現象，所以於敏感度分析中會有目標值變化呈現不

表 3 區域 1 橋樑定期檢測作業路線

	第 1 組	第 2 組	第 3 組	第 4 組	第 5 組
第 1 天	1*	1	1	1	1
第 2 天	1	1→21→36→1	1	1	1
第 3 天	1→26→27→1	1	1	1	1
第 4 天	1→22→1	1→14→8→1	1→11→37→1	1	1
第 5 天	1→7→38→1	1	1→9→20→1	1	1
第 6 天	1→10→1	1	1→30→1	1	1→33→12→1
第 7 天	1→3→17→1	1→32→13→1	1→28→1	1→6→1	1→5→19→1
第 8 天	1→2→4→1	1→15→1	1→23→1	1	1
第 9 天	1→29→1	1→35→1	1→25→1	1	1→18→1
第 10 天	1→34→1	1→16→1	1→24→1	1→31→1	1

註：*編號 1 為工務段，即檢測小組出發處與匯集處。

表 4 車隊規模之敏感度分析結果

	車隊規模 (輛)	4	5	6	7
區域 1	目標值 (元)	72,856	72,629	72,692	72,475
	啟發解求解時間 (秒)	43.15	56.14	65.65	75.82
	目標值變化率 (%)	0.31	0	0.09	-0.21
區域 2	目標值 (元)	36,279	36,075	36,149	36,174
	啟發解求解時間 (秒)	673.92	2,288.35	3,622.79	4,549.35
	目標值變化率 (%)	0.57	0	0.21	0.27
區域 3	目標值 (元)	--*	73,627	73,653	73,639
	啟發解求解時間 (秒)	--	129.19	192.56	256.43
	目標值變化率 (%)	--	0	0.04	0.02
區域 4	目標值 (元)	26,116	25,445	25,458	25,675**
	啟發解求解時間 (秒)	1,0047.20	7,738.80	8,144.33	5,937.35
	目標值變化率 (%)	2.64	0	0.05	0.9

註：1. *表無解。

2. **表示記憶體容量不足，取軟體求解到最後的解，其啟發解與最佳解收斂間距分別為 3.19%及 3.17%。

穩定的情形發生。理論上，在最佳化下，車輛數愈多時，規劃彈性愈大，故目標值應愈少(或維持相同)。值得一提的是，區域 3 在 4 輛車時，目標值呈現無解的狀態，原因為本研究的啟發解演算法將網路切割成 3 階段，而每一階段的時窗長度不足以滿足 4 輛車的求解需求，亦即車輛數仍不足，無法服務所有需求。

2. 旅行成本

本研究將旅行成本依序變動其倍率為 80%、90%、100%、110%、120%，其敏感度分析結果如表 5 所示。從表中可得知，所有區域在旅行成本倍率從 80%增加至 120%的變動下，目標值隨之增加，呈現上升的趨勢，即目標值與旅行成本為正向關係。

表 5 旅行成本之敏感度分析結果

	旅行成本比例	80%	90%	100%	110%	120%
區域 1	目標值 (元)	71,279.6	71,947.3	72,692	73,282.7	73,950
	啟發解求解時間 (秒)	57.11	57.59	56.14	57.83	60.75
	目標值變化率 (%)	-1.94	-1.02	0	0.81	1.73
區域 2	目標值 (元)	34,497.4	35,303.8	36,075	36,783.1	37,659.4
	啟發解求解時間 (秒)	2,282.10	2,175.91	2,288.35	1,056.91	3,042.25
	目標值變化率 (%)	-4.37	-2.14	0	1.96	4.39
區域 3	目標值 (元)	70,330.6	71,955.1	73,627	75,266.7	76,905.4
	啟發解求解時間 (秒)	351.82	306.02	129.19	161.42	147.38
	目標值變化率 (%)	-4.48	-2.27	0	2.23	4.45
區域 4	目標值 (元)	23,676.6	24,667.7	25,445	26,374.3*	27,578.59
	啟發解求解時間 (秒)	8,316.87	7,812.58	4,854.60	5,346.65	8,125.43
	目標值變化率 (%)	-6.95	-3.05	0	3.65	8.39

註：*表示記憶體不足，電腦軟體無法求解到最後，採取最後求出之啟發解。其啟發解與最佳解收斂間距為 2.53%。

3. 檢測成本

本研究將檢測成本依序變動其倍率 80%、90%、100%、110%、120%，其求解結果均列於表 6 中。當檢測成本在倍率由 80%增加至 120%時，目標值隨著檢測成本增加，呈現上升的趨勢，所以目標值與檢測成本亦為正向關係，此情形與旅行成本相同，但較旅行成本敏感。

表 6 檢測成本之敏感度分析結果

	檢測成本比例	80%	90%	100%	110%	120%
區域 1	目標值 (元)	59,427.4	66,021.2	72,692	79,208	85,802.6
	啟發求解時間 (秒)	53.01	57.47	56.14	61.60	60.61
	目標值變化率 (%)	-18.25	-9.18	0	8.96	18.04
區域 2	目標值 (元)	30,432.6	33,273.3	36,075	38,953.7	41,755.4
	啟發求解時間 (秒)	2,785.39	2,790.37	2,288.35	2,471.46	2,869.90
	目標值變化率 (%)	-15.64	-7.77	0	7.98	15.75
區域 3	目標值 (元)	62,190.8	67,903.9	73,627	79,314	85,038
	啟發求解時間 (秒)	158.70	177.58	129.19	304.17	247.84
	目標值變化率 (%)	-15.53	-7.77	0	7.72	15.5
區域 4	目標值 (元)	22,567	23,853.5	25,445	26,933.5	28,693
	啟發求解時間 (秒)	7,670.56	8,211.76	4,854.60	7,839.92	7,729.96
	目標值變化率 (%)	-11.31	-6.25	0	5.85	12.76

五、結論與建議

執行橋樑檢測作業時，所有檢測小組每日均由工務段出發至各區執行任務，並於每日工作結束後返回工務段。然而實務中橋樑管養單位每年在執行橋樑定期檢測作業排程時，檢測小組的指派與調度安排均以人工指派方式規劃，結果常不穩定，此作法缺乏系統性的分析與整體考量，常造成檢測作業效率不彰，進而導致人力、經費與時間等資源的浪費。因此，為符合實務上的需求與應用，本研究基於橋樑管養單位之決策者的角度，將執行檢測作業的成本與限制納入考量，以系統最佳化之概念，透過時空網路定式車輛執行檢測作業時的路線安排，建構一同時考量時間與空間面的橋樑定期檢測作業排程規劃模式，提供各決策單位辦理橋樑定期檢測作業排程之輔助工具，以增進檢測效率，進而節省相關成本的耗費。另外，由於本研究模式屬於含額外限制之整數網路流動問題，若以既有的數學規劃軟體直接求解大規模之實務問題時，勢必耗時且無效率，故本研究根據問題特性，透過分階段求解之概念，發展一啟發解演算法，除了能減少求解時間外，決策者亦可針對部分參數進行調整，使本研究模式更具彈性與實用性。然而啟發解演算法僅能求得一較佳之可行解，本研究亦將原問題中的零壹整數限制鬆弛為非負實數限制，發展一下限解法，由於此下限解法之限制較原模式為鬆，故所求得的解目標值為原問題之下限，因此可以此下限解來評估此啟發解演算法之績效。

最後，本研究以國內某地區之橋樑定期檢測作業做為測試範例，以驗證模式與演算法之實用性。由於該地區橋樑數過多，且考量到求解效率及實務的運作，因此將需檢測的 171 座橋樑依據其地理位置劃分成 4 個區域，分別求得這 4 個區域執行橋樑定期檢測作業所花

費的成本 (即目標值)、路線規劃等。由求解結果可知，本研究所發展之啟發解演算法與下限解的間距均不超過 3%，而求解時間於實務上都在可接受範圍內，表示此啟發解演算法求解結果頗佳且確實較有效率，故驗證了本研究的模式與啟發解演算法符合實務上之需求與應用，可為實務應用之參考。此外，本研究亦針對部分重要參數進行敏感度分析，其結果顯示，當旅行成本或檢測成本增加時，目標值亦隨之增加，表示這兩個參數對目標值的影響為正向關係，而車隊規模對目標值的影響則為不一定，究其原因為雖然理論上車輛數增加可降低 (或持平) 目標值，但因啟發解誤差的原因，導致目標值之變化呈現不穩定情形。此等測試結果可提供給決策者參考。

最後，本研究所構建之模式係以橋樑定期檢測作業為基礎，其橋樑檢測點為已知之固定值，然而實務上在橋樑檢測業務中還有因天災人禍等不同原因而必須立即執行的特別檢測，其需要檢測之橋樑數為不固定之隨機值，建議後續研究可針對橋樑特別檢測的隨機性需求進行研究。此外，本研究假設各橋樑間之旅行時間為平均旅行時間，而在現實中則會受到車流特性影響，有擾動或依時性的狀況，未來研究可嘗試將隨機旅行時間納入考量，以更貼近實務情況。值得一提的是，演算法需依照問題的特性發展，以增進求解效率，而本研究的演算法經實例證實適合本研究問題，至於其他啟發式演算法的發展，建議可於後續研究中進行研究。

參考文獻

1. 交通部公路總局，**公路養護手冊**，民國 101 年。
2. 延允中，「橋樑維護管理機制、成效查核與經費編列探討－以公路總局為例」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，民國 93 年。
3. 吳秋木，「橋樑目視檢測系統安全因子篩選之研究」，國立嘉義大學土木與水資源工程研究所碩士論文，民國 95 年。
4. 柴志傑，「臺灣地區橋樑目視檢測行程最佳化之研究」，國立中央大學營建管理研究所碩士論文，民國 98 年。
5. 顏上堯、姜蔚宗，「公路橋樑檢測最佳化模式分析」，**臺灣公路工程**，第 39 卷，第 9 期，民國 102 年，頁 2-42。
6. Dai, K., Smith, H. B., Chen, S. E., and Sun, L., "Comparative Study of Bridge Management Programmes and Practices in the USA and China", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 10, No. 5, 2014, pp. 577-588.
7. Matos, A. C. and Oliveira R. C., "An Experimental Study of the Ant Colony System for the Period Vehicle Routing Problem", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3172, 2004, pp. 286-293.
8. Wen, M., Cordeau, J. F., Laporte, G., and Larsen, J., "The Dynamic Multi-Period Vehicle Routing Problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 37, No. 9, 2010, pp.1615-1623.

9. Yu, B. and Yang, Z. Z., “An Ant Colony Optimization Model: The Period Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Transportation Research Part E*, Vol. 47, No. 2, 2011, pp. 166-181.
10. Yan, S., Chen, S. C., and Chen, C. H., “Air Cargo Fleet Routing and Timetable Setting with Multiple On-Time Demands”, *Transportation Research Part E*, Vol. 42, No. 5, 2006, pp. 409-430.
11. Yan, S. and Shih, Y. L., “A Time-Space Network Model for Work Team Scheduling after a Major Disaster”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 30, No. 1, 2007, pp. 63-75.
12. Lu, H. A. and Chen, C. Y., “A Time-Space Network Model for Unit Load Device Stock Planning in International Airline Services”, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 17, No. 2, 2011, pp. 94-100.
13. Yan, S., Hsiao, F. Y., Guo, J. J., and Chen, Y. C., “Effective Aircraft Maintenance Schedule Adjustment Following Incidents”, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 34, No. 8, 2011, pp. 727-745.
14. Yan, S., Chen, C. Y., and Chang, S. C., “A Carpooling Model and Solution Method with Stochastic Vehicle Travel Times”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 1, 2014, pp. 47-61.
15. Barnhart, C., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W. P., and Vance, P. H., “Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs”, *Operations Research*, Vol. 46, No. 3, 1998, pp. 316-329.
16. Yan, S., Tang, C. H., and Fu, T. C., “An Airline Scheduling Model and Solution Algorithms under Stochastic Demands”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, No. 1, 2008, pp. 22-39.
17. Yan, S., Wang, S. S., and Wu, M. W., “A Model with a Solution Algorithm for the Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problem”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 464-473.
18. Yan, S., Wang, S. S., and Chang, Y. H., “Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling under Stochastic Travel Times”, *Engineering Optimization*, Vol. 46, No. 3, 2014, pp. 289-307.

