運輸計劃季刊
第五十一卷 第二期
民國一一一年六月
頁 81～頁 116

Transportation Planning Journal
Vo1. 51 No. 2
June 2022
PP. 81～116

基於事件隨機性考量之國道緊急應變派遣模式

A DISPATCH MODEL OF FREEWAY EMERGENCY RESPONSE TEAMS BY CONSIDERING STOCHASTICITY OF INCIDENT OCCURRENCE

李弘亦 Hong-Yi Li [1]
許聿廷 Yu-Ting Hsu [2]

(109 年 9 月 21 日收稿，110 年 2 月 2 日第一次修正，110 年 5 月 31 日第二次修正，110 年 7 月 8 日接受)

摘 要

高速公路上由事件所造成的非重現性延滯約占總延滯的 13%至 30%，因此減少事件應變所花費的時間、提高整體應變效率，能改善高速公路的延滯狀況。本研究提出以多場站車輛途程問題為基礎之動態事件應變指派模型及其運作流程，目標為最小化整體事件之應變時間，同時考量潛在事件發生的隨機性，並建構禁忌搜索演算法作為求解方式。案例分析顯示本研究提出之模型可將求解時間縮短至 40 秒內，並可改善事件的應變效率，尤其在高事件發生頻率之情境,其事件應變時間改善效益可達14%至42%。此外，相較於不考量事件隨機性的狀況，模型在考量隨機性下對總應變時間可增加約 3.79%之改善，但若過度考量隨機性反而會導致總應變時間增長。

關鍵詞： 高速公路事件應變；事件發生隨機性；動態派遣模型；車輛途程問題；禁忌搜索演算法

1. 國立臺灣大學土木工程學系碩士。
2. 國立臺灣大學土木工程學系副教授 (聯絡地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號臺灣大學土木館 305 室，電話：(02)3366-4237，E-mail：yutinghsu@ntu.edu.tw)。

ABSTRACT

The non-recurrent delay caused by the incident accounts for around 13% to 30% of the total freeway delay. Hence, shortening the time spent on incident response and improving response efficiency are critical for reducing the delay of the freeway. This study proposes a dynamic dispatch model of emergency response teams for freeway incidents based on the multi-depot vehicle routing problem and the online operation procedure of the proposed model. The major objective is to minimize the total incident response time while taking into account of the stochasticity of potential incident occurrence and constructs a tabu search algorithm as the solution method for the mathematical model. The results of the case study indicate that the proposed model can shorten the solution time to less than 40 seconds and improve the efficiency of the incident response. Especially in the scenario where the frequency of incident occurrence is relatively high, the improvement can reach 14% to 42%. In addition, compared with the situation that does not consider the stochasticity of incident, the proposed model provides additional 3.79% improvement in terms of total response time when considering the stochasticity. However, over-emphasis on the stochasticity may lead to an increase in the total response time because of relatively conservative strategies.

Key Words: *freeway incident response; stochasticity of incident occurrence; dynamic dispatch model; vehicle routing problem; tabu search algorithm*

一、前　言

高速公路上發生的壅塞可分為重現性壅塞 (recurrent congestion) 以及非重現性壅塞 (non-recurrent congestion) 兩類，其中重現性壅塞所指為經常性或週期性發生在特定路段的壅塞狀況，如平日晨峰及昏峰通勤車流或是假日特定景點出遊車流所導致的壅塞；非重現性壅塞則是由於事件 (incident) 發生所造成的非週期性壅塞狀況，而事件可再細分為可預期性或是隨機性兩類，前者如道路施工、路側清潔等事先排定的行程；後者則包含交通事故、散落物等臨時且不可預期之事件。其中，隨機性事件尤其可能造成多個車道被阻擋，導致道路容量下降，進而對相鄰路段甚至是整個國道路網系統造成嚴重的延滯。相關研究提到，高速公路上非重現性延滯約占總延滯的 13%至 30%，而事故等隨機性事件所引起的延滯更可能高達非重現性延滯整體的 72% (Skabardonis 等人 [1])。

此外，隨機性事件也可能導致二次事件的發生，且越長的事件持續時間越可能導致較高的二次事件發生機率。Karlaftis 等人 [2] 的研究提到事件的清除時間顯著影響二次事件發生的可能性，而通過統計驗證也顯示主要事件的持續時間與二次事件發生兩者之間存在顯

著的相依性 (Khattak 等人 [3])。

綜上所述，越長的事件持續時間對高速公路系統運作效率所造成的影響越大，縮減事件的應變、處理時間除可改善一定比例由事件本身所造成的非重現性延滯之外，也可大幅降低二次事件的發生機率。此外，由於高速公路屬於半封閉型的路網系統，車輛行駛速率也較一般道路高，事件發生除可能造成嚴重的人員損傷或道路壅塞，更可能衍生成長時間、大範圍的影響。因此減少事件的應變時間、提升整體應變效率，對於高速公路的管理以及維護而言，是重要的目標之一。

目前國內對於高速公路上事件應變的機制係透過行控中心統一指派分駐不同點位的事故處理小組 (事故班) 前往處理個別事件。一起事件從發生到該事件完全排除的過程如圖 1 所示意，依照時間點可區分為五個階段：事件發生、事件偵測、事故班指派、事故班抵達、事件清除。本研究主要針對應變時間中的「旅行時間」進行改善，亦即縮減事故班指派至事故班抵達事件發生地兩時間點之間的時間差，基於此一目標建立最佳化模式；而根據所建立之模式並可協助行控中心更有效率地進行事故班指派的決策，從而縮減「指派時間」。

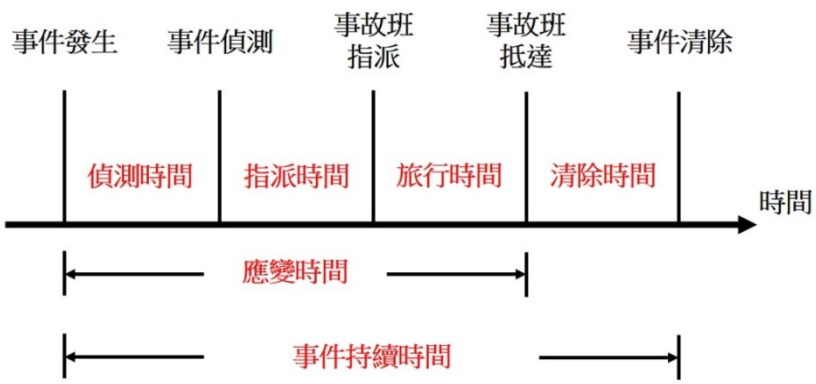


圖 1　事件應變流程

目前國內高速公路對於各類事件的應變、處理主要仰賴事故班的運作，以交通部高速公路局北區養護工程分局為例，其將國道路網依照路段與方向區分成數個轄區，再由各個事故班分別負責某個轄區。一旦有事件發生時，交控中心的調度員即會指派轄區與事件發生地相應或是接近的事故班，亦或是依據自身的經驗指派合適的事故班前往處理事件；但受限於經費以及事故班駐點設置條件等緣故，事故班的數量和所駐點位有限。在 2015 年 2 月至 2019 年 5 月共 109,863 起的北區高速公路事件歷史資料中，約有 48%的事件發生在尖峰時段；而以 2019 年 5 月的事件資料為例，將 2,520 起事件依派往處理的事故班進行分類後，其中約有 36%的事件在前一起事件仍未處理完時便發生，在尖峰時段也有約 39%的事件發生於前一起事件尚未排除時。若在短時間內不斷有新的事件發生，甚至是發生在同一

區域內，則當前基於靜態轄區或人工判斷的指派方式便無法達到彈性且有效率的事故班派遣，甚而可能導致更長的延滯時間。此外，於緊急醫療服務調度之研究也指出，與最佳的策略相比，採用指派最近車輛的策略會導致約 2.7 倍的車輛延遲抵達 (Jagtenberg 等人 [4])。

隨著高速公路上所佈設的偵測設備日漸完善，可提供更為準確的歷史與即時車流數據。亦有研究提出了基於實時交通數據的動態事件應變模式 (戴至佑 [5])，可提供交控中心更有效率的事故班調度，但此種應變模式僅根據當下車流和事件處理狀況計算最佳的調度決策，並未考量到後續可能發生的事件 (事件隨機性)，若後續在已指派前往執行任務的事故班轄區中有新的事件發生，可能就必須指派其他轄區的事故班前來支援或進行處理，而可能造成整體應變時間的增加，尤其在多起事件接續發生的狀況下這樣的問題會特別顯著。

基於前述原因，本研究之主要目的如下：

1. 基於不同路段事件發生機率或隨機性的狀況下，發展一動態之最佳化事故班調度模式。
2. 提供高速公路管理單位在最小化總事件應變時間的同時，亦考量到事件發生隨機性的最佳調度策略，進而避免事件應變、處理時間過度增加之狀況。
3. 提高調度模式的求解效率，確保該模式在實務應用上對於尖峰時段線上事件應變、事故班派遣的可行性。

二、文獻回顧

2.1 事件調度模型

在關於調度模型的研究中，主要有兩個較常被提及之策略，本研究將其分為指派 (dispatch) 和部署 (deployment)。指派為作業 (operation) 層面之策略，表示在事件發生後，再由調度員決定要將該事件安排由哪個事故班進行處理的程序，同時也是本研究之調度模型所欲精進的事故班調度策略；部署則偏向規劃 (planning) 層面，是在事件發生之前，就由交通管理單位決定將事故班預先調度到某一地點，以應對未來一段時間內可能會發生的事件。

而調度模型亦可區分為靜態和動態的調度模型，以及考量到隨機性的調度模型，本節分別回顧這三類模型，並將相關文獻彙整如下。

2.1.1 靜態調度模型

Zografos 等人 [6] 通過靜態最佳化模型部署事故班以最小化高速公路事件所造成的延滯，其研究結果顯示，該模型可以幫助高速公路的管理單位決定事故班的車隊大小，以及事故班的運作模式。Ghiani 等人 [7] 回顧並介紹車輛途程問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) 應用在各類問題上的相關研究，並將實時的車輛途程問題進行分類、介紹個別定義，

依照模型的輸入資料是否隨時間變動，可將其分為靜態以及動態兩類車輛途程問題；另外，根據求解時是否所有的輸入資料皆為已知，可再區分為確定性 (deterministic) 問題和隨機性 (stochastic) 問題。

靜態調度模型所決定者為路網中所需的事故班數量，或是個別事故班所負責的區域範圍，並未考量事件發生時實際調度、應變的動態過程和指派決策，因此靜態的模型較動態模型來說較為簡單，但缺點為不夠彈性，無法因應新發生的事件作出更有效率的應變。

2.1.2 動態調度模型

由於資通訊和偵測技術的發展，現今許多設備能回傳高速公路上相關的實時資訊。妥善應用這些資訊可有效提高服務水準以及降低應變成本。為因應此需求，需要可靠的動態調度模型，以於事件發生時，可以即時計算求得最佳的派遣、調度策略。

在相關研究中，Haghani 等人 [8] 提出針對緊急醫療車輛的彈性指派模型，考量事件的緊急程度，並根據實時旅行時間，以動態最短路徑演算法 (dynamic shortest-path algorithm) 所得出之最短路徑進行調度策略的最佳化，並允許車輛更改路線或重新指派事件。Han-tao Zhao 等人 [9] 提出一高速公路緊急車輛指派之動態派遣模型，其亦考量事件嚴重度，並納入應變時間過長的懲罰值、重新指派事件的標準以及潛在事件發生時的應變延遲時間。戴至佑 [5] 建構基於多場站車輛途程問題的動態指派模型，協助高速公路事件管理者決定調度指派的策略，該模型考量事件的優先程度，並允許在考量懲罰值的狀況下重新指派事件給不同事故班。Jiandong Zhao 等人 [10] 在考量以實時和歷史行駛速率預測旅行時間的條件下，建構一兩階段的動態車輛途程模型，以解決緊急車輛的路徑指派規劃。該研究提出結合 K 條最短路徑演算法 (K-shortest-path algorithm) 和混合蛙跳演算法 (shuffled frog leaping) 之最短路徑演算法求解兩階段問題。

然而，文獻中所設計的彈性指派模型無法直接安排每個事故班對於不同事件指派的順序，因為這類模型假設每起事件處理完後，事故班會先回到駐點，再前往處理其他事件 (戴至佑 [5])。另外，動態車輛途程問題具備快速反應 (quick response) 的特性，可以透過事件優先服務 (First-Come First-Serve, FCFS) 這類策略簡化指派的複雜程度，或是採用啟發式演算法，以快速將資訊更新後對於修改的路徑求解 (Ghiani 等人 [7])。

因為本研究之目的為在於求得最佳的指派策略，且因應事件發生的頻率，調度模型需要在短時間內完成運算，因此本研究以車輛途程問題為基礎，建構符合實際調度需求的應變模型。

2.1.3 隨機性調度模型

為了最佳化對於高速公路上事件應變的效率，不能僅考慮基於當下車流和事件回報、處理狀況的最佳化調度決策，進一步考量整體路網中不同路段在後續一段時間內的事件發生率是必須的，因此本節更行回顧了考量隨機性的調度模式及其相關研究。

事件隨機性的考量反映在靜態模型中，Zhu 等人 [11] 建構了基於 P－中位問題

(p-median) 的區位配置模型，目標為最小化事件應變所造成的潛在延滯，其考量事件發生機率，並假設同時發生 2 件以上事件的機率極低，以在頻繁發生事件的路段上有效地分配事故班，結果表明該方法相較基於經驗的調度策略可以減少 17%到 34%的總旅行時間。Hu 與 Chan [12] 建構一非線性隨機規劃模型，考量不同嚴重程度之二次事件發生的不確定性，以總應變成本最小化為目標，驗證結果發現與平均分配工作量的輪換策略相比，雖然指派的車輛數相同，但是該隨機性模型可以降低總工作時間。Lei 等人 [13] 則是提出兩階段隨機規劃模型以解決緊急車輛重新部署的問題，其採用的策略為將事故班從需求低的地點移動至需求熱點；同時，考量到潛在的事件以及事故班被占用時間的不確定性，其假設一般會指派與事件點距離最近的事故班，並使用增強的 L 型法求解該問題。結果驗證將當前車輛狀態的變化資訊納入重新部署的計畫中，可以有更好的應變效率。

Kim 等人 [14] 提出動態部署模型以最佳化事故班的位置分配，隨機性的部分主要考量事件發生機率以及事件持續時間的不確定性，結果顯示，在最小化事件所引起總延滯的面向上，實時的動態調度策略相較靜態調度策略以及現行的巡邏策略有更好的績效。Schmid [15] 使用近似動態規劃 (approximate dynamic programming, ADP) 求解隨機動態救護車輛再定位與派遣模型以最小化平均應變時間；模型考量到進行指派後對同一區域或鄰近區域發生新事件請求的影響，並於服務完成後決定該車輛以及其他閒置中的車輛應前往路網上何處待命新的任務。該研究假設事件的因應採 FCFS 的機制，並僅考量到求解當下空閒的車輛。然而，相較於指派最近車輛以及於事件結束後返回原先所在地的策略，該模型仍可使平均應變時間下降約 12.89%。

Nicoletta 等人 [16] 使用基數限制 (cardinality-constrained) 的穩健方法求解救護車選址及調度問題，模型中考慮了事件發生的隨機性，以最小化預期的應變時間。Bertsimas 與 Ng [17] 則是就最佳化救護車部署提出了穩健與隨機的最大覆蓋問題，模型中納入緊急呼叫數據的不確定性，目標為將應變延遲的救護車比例最小化，建構確定性等價模型，並使用 C&CG 演算法 (Column-and-Constraint Generation algorithm) 求解，可減少約 19%至 28%的延遲。

本研究將本節回顧之文獻整理如表 1，其中大多數先前的研究皆著重於部署的問題面向，僅有 Hu 與 Chan [12] 以及 Schmid [15] 的研究包含指派策略，但前者所考慮的事件發生率偏重於二次事件，因此該研究假設只要事件處理時間夠短，便能將二次事件發生的機率降低，藉此將潛在事件的應變成本從目標式中移除；而後者針對指派的部分則假設採用的策略為 FCFS，亦即該模型無法考量到重新指派事件的問題。此外，有關事件發生的隨機性是最直接影響事件應變的重要因素，也因此每個對於隨機性調度模型的研究皆會探討到該項目，以保證模式解答之有效性及可靠性。

由於過往關於隨機性之文獻缺乏考量指派層面的研究和應用，而有關指派策略的動態模型又少有考慮隨機性之因素，因此，本研究擬探討指派策略之應用並加以考量隨機性以求解應變決策最佳化的問題。本研究使用車輛途程問題建構隨機動態數學模型，因其可以作出較為彈性的應變策略，且可以進行路程 (事件處理順序) 的規劃，除此之外，模型中

並考量事件類別、最短路徑、重新指派事件的情境，以及事件發生隨機性的影響。

表 1　隨機性調度模型文獻整理比較

作　者	研究領域		著重策略		考量之隨機性			其他
	交通事件應變	緊急醫療服務	指派	部署	事件發生	處理時間	持續時間	
Zhu 等人 [11]	V			V	V			
Hu 與 Chan [12]	V		V		V			考量二次事件
Lei 等人 [13]	V			V	V		V	nearest neighbor
Kim 等人 [14]	V			V	V		V	
Schmid [15]		V	V	V	V	V		FCFS
Nicoletta 等人 [16]		V		V	V	V		
Bertsimas 與 Ng [17]		V		V	V			

2.2 禁忌搜索演算法於車輛途程問題之應用

因為旅行銷售員問題 (traveling salesman problem, TSP) 已被證明是 NP-hard 問題 (Garey、Johnson [18])，而旅行銷售員問題又是車輛途程問題的特例，因此車輛途程問題也是 NP-hard 問題。由於本研究欲改善的目標時段為事件發生間隔較短的尖峰時段，考量到隨機性模型的複雜度，僅依靠求解器 (solver) 難以於短時間內求得最佳解，因而考慮透過啟發式 (heuristic) 演算法幫助模型在有限的時間內快速得出可接受效用之可行解。

禁忌搜索演算法由 Glover 於 1989 年提出，為一全域性的局部搜索演算法，其演算法最大之特色為建構有短期記憶特性的禁忌列表，透過搜索時禁止選取禁忌列表中的決策作為移步 (move) 的方向，及對禁忌列表的添加與釋放，加上演算法接受比當前最佳可行解較差解之特性，使得演算法在搜索時有較高的機會能跳出局部最佳解 (Glover、Taillard [19])。

過去的文獻中也有不少研究應用禁忌搜索演算法於求解車輛途程問題或多場站之車輛途程問題上，Rego 與 Roucairol [20] 在求解動態多裝卸站的卡車調度問題中即運用到禁忌搜索以改善初始解求得的路徑。Jean-François Cordeau 等人 [21] 亦使用禁忌搜索啟發式演算法求解週期性 (periodic) 的車輛途程問題、週期性的旅行銷售員問題，以及多場站的車輛途程問題，並表明該方法可以在合理的計算時間內求得良好的解決方案。亦有研究提出平行迭代 (parallel iterated) 的禁忌搜索演算法，有效求解車輛途程問題、週期性車輛途程問題、多場站車輛途程問題以及多車種車輛途程問題 (Jean-François Cordeau、Maischberger [22])。

本研究基於多場站車輛途程問題建構高速公路事件應變之模型，上述研究結果顯示在

運用於計算此類問題上，禁忌搜索演算法能提供合理且有效答案的方法，因此本研究亦擬採用禁忌搜索演算法作為考量運算時間限制下的求解方法。

三、研究方法

3.1 問題定義

在現行的高速公路事件應變制度之下，交控中心接獲事件發生的資訊之後，除了依照已分配之轄區進行事故班指派外，還要考量到當下路網的車流狀況、旅行時間、事故班任務執行狀態、待處理事件數、事故班前往事件發生地是否為順行等因素，再依照調度員的經驗進行最後的指派。而如果於短時間內有多起事件發生，甚至是發生在相近的區域內時，調度員將難以在短時間內對各個事故班作出有效率的事件處理任務調度，且此種狀況的發生率並不低。根據高速公路局北區養護工程分局的事件處理歷史資料，整體事件中約有 36%的事件在前一起事件仍未處理完時即發生，於尖峰時段的事件中更有約 39%的事件發生於此種情況下。

因此，本研究欲發展一事件應變之動態派遣模式，可將上述各項因素作為輸入模型之參數，以線上協助調度員於較為複雜的狀態下，仍能作出合理且有效率的調度決策，並且在模型中將進一步考量到事件發生的不確定性，以提供相較於以往的動態指派模型更為穩健的緊急車輛調度、派遣方案。

圖 1 中紅字部分為本研究對於事件應變流程其中各階段時間之定義，其介紹如下：

1. 偵測時間：

事件發生至交控中心接獲事件相關資料之時間差；交控中心主要經由當事人或目擊者報案、公路警察通報、警廣通知，以及透過 CCTV 等偵測設備得知及確認事件的相關資訊，偵測時間的長短會受事件通報系統的效率或事件偵測設備的精準度所影響。

2. 指派時間：

交控中心接獲事件發生資訊至調度員做出指派決策，並將其通報給相應事故班之間所經過的時間。於本研究提出之模式中，該段時間可視為模型求解之時間。

3. 旅行時間：

事故班接收到任務指派後，前往事件之發生地所需要的時間。若事故班位於駐點，該段時間會包括事故班對人員、車輛、機具設備進行清點及檢查的準備時間；若事故班正在處理事件或是有其他需要先前往處理的事件，則該段時間會包含事故班處理完所有已經被指派事件所花費的旅行時間及處理時間。

4. 清除時間：

事故班抵達事件發生地後，至該事件自國道上排除，且事故班離開事件現場所經歷的時間。會受到事件的類型、處理難度、發生地點及時段、嚴重程度、牽涉到的車輛及車道數所影響。

5. 應變時間：

事件發生至事故班抵達事件發生地所花費的總時間，包含事件偵測時間、指派時間、旅行時間，可作為判斷調度效率的績效指標。

6. 事件持續時間：

事件發生至事件完全排除所需要的時間，除了前三段時間之外，也含了事件的處理時間。

本研究對於事件應變時間之定義為事件發生至事故班抵達事件發生地之間的時間差，同時也是本研究期望能降低之主要目標。應變時間中主要包含了事件偵測時間、指派時間以及旅行時間；這三者中，偵測時間主要受到事件通報系統或事件偵測設備所影響，因此並不在本研究提出之模型的改善範圍內，但其不會影響到所採用的參數，因此不會使模型的績效比較產生差異。而關於指派時間，由於考量到隨機性的模型會需要較長的運算時間，且其同時對於整體應變作業的運作也是相當重要的要素：越快將事件指派給事故班，則事件就有可能越快被排除。為因應實務上對於指派時間的要求，本研究將擬採用啟發式演算法幫助模型進行求解，以達成在合理的有限時間內求解之需求。

本研究提出之整體應變模式的運作邏輯流程如圖 2 所示。當交控中心收到新事件的通報後，系統會確認各個事故班當前的位置及狀態，並同時取得以及更新模型所需之參數，如以各路段旅行時間、該時段下路網各地的事件發生率等。而後即執行應變派遣模型，並依照模型之結果進行事故班指派，最後會更新資料庫與高速公路交通路網系統中因新的指派決策而改變的狀態，以及模型求解所需之參數。

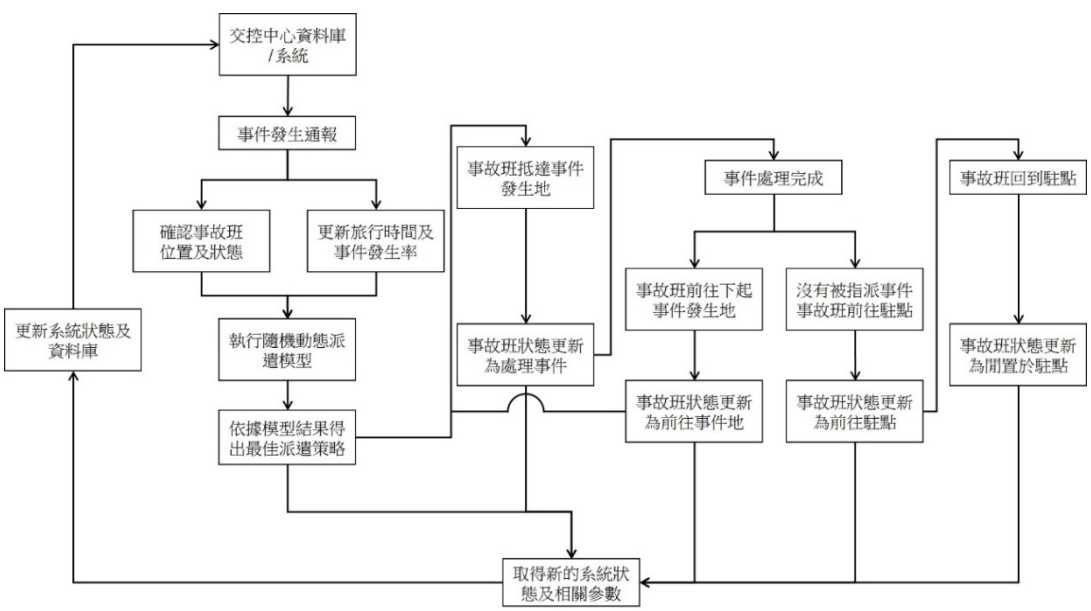


圖 2　事件應變系統運作流程圖

此外，整體應變派遣系統在以下三類事件發生時，會進行相關參數的更新 (如事故班之當前位置與任務執行狀態)，因為上述參數會直接影響到不同事件當下最佳之指派對象，事先進行更新有利於下起事件發生時能以較短的運作時間得出最佳化的調度策略。

1. 事故班抵達事件發生地：

在事故班抵達事件地並開始排除事件時，該事故班便無法被改派前往處理其他事件，因此會更新該事故班的當前狀態，使其在處理完該事件前無法被應變派遣模型重新指派不處理當前的事件。

2. 事件處理完成：

事件處理完成後，在應變模式中該事故班有兩種可能之行為：前往下起被指派的事件發生地、回到該事故班之駐點。不論其後續狀態為何，在派遣模型中皆可以被考慮重新指派其他事件，因此也會在系統中更新其狀態。

3. 事故班回到駐點：

當事故班回到駐點後，系統亦需要更新其狀態，因為指派閒置之事故班時，模型需要考量到事故班出發前對人員及設備進行清點及檢查的準備時間。

基於前述對於改善目標之定義，以及應變模型求解上的相關要求，本研究提出以多場站車輛途程問題 (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) 為基礎的動態事件指派模型，並考量不同路段之事件發生機率，以求解最佳化的應變決策；模型目標式中將包含三個主要項目：最小化總應變時間、最小化單一事故班之應變時間、最小化調度後對於潛在事件的應變時間。

3.2 問題假設

本研究對於問題以及模型之建構設定以下假設：

1. 一起事件僅能被一個事故班服務。
2. 事故班於階段 0 時，皆閒置於其原駐點。
3. 除了變換國道上行駛的方向時可能需下到平面道路，事故班原則僅透過高速公路路網前往事件發生地點。
4. 事故班於各路段的行駛速率皆為已知，並不考慮行駛速率隨時間變動的隨機性。
5. 事故班會透過最短路徑前往事件發生地或回到駐點。
6. 各事故班於變換國道或行駛方向時所需的旅行時間為已知。
7. 各事故班於駐點出發所需的準備時間皆相等。
8. 當事故班並非正在處理事件的狀況下，可以從當前的所在地直接前往處理其他的事件，包含接收到之新的調度指派 (如新事件指派或重新指派)，而不需要先回到其駐點。
9. 當事故班抵達一事件發生地，該起事件便不能再被重新指派給其他事故班，而該事件必須由該事故班完成事件的處理與排除。

10.事故班處理完當前模型指派的所有事件後才能對其他事件進行應變。
11.模型中僅考慮路段有潛在事件發生的機率，而不考慮於短時間內發生多起事件的機率。
12.模型求解時所考慮的事件處理時間為該類別事件的平均處理時間。
13.潛在事件所需的處理時間假設為各交通事故類別之平均處理時間。

3.3 數學模型建構

本研究以多場站車輛途程問題 (MDVRP) 為基礎，提出隨機動態事件應變派遣之數學模型，當有新事件發生時，模型會產生新的求解階段，並且會以當下階段之參數進行運算，模型求解完成後會得出相應的最佳指派策略，以降低事件應變的時間成本，進而達成整體事件應變時間最小化的目標。

模型中考量各個路段於該階段下的潛在事件發生機率，並以此為基礎提出較為穩健的調度決策。此外，隨著時間的變動，各個事故班的位置、狀態以及相關參數也會有所改變，模型有可能會得出與先前決策不同的最佳解，因此，本研究也加以考量更改同一事故班的事件應變順序，或是重新指派事件給不同事故班的情形；為避免模型頻繁發生重新指派，造成事故班人員無所適從，或某些事件不斷被延後處理的狀況，本研究並於模型中加入相應的懲罰值，以限制此一狀況的發生次數。

3.3.1 符號定義

模型中所採用的數學符號如表 2 所示，整體路網構成由$G(N \cup POT, A)$表示，其中N為實際進行指派決策時會考量到的所有節點的集合，包含事故班當前位置的集合V、事故班駐點位置的集合S、待處理之事件發生點的集合I、虛擬終點的集合E；POT為潛在事件之發生點或路段的集合；A則代表路網中所有節線的集合。

V和S分別由子集合V_k以及S_k所組成，而虛擬終點則是一個假設的節點，與其他屬於N的所有節點皆有節線相連，且此類節線上的旅行時間為零，其作用為對於各個事故班建構車輛途程問題中的完整路徑，同時能標記每個事故班接受指派後其路徑最後的所在地點，以計算對於潛在事件的應變成本期望值。

表 2 中共有 9 個變數，其中決策變數$X_{ijk}(t)$為該階段最後模型所給出的調度決策，也是模型主要求解的對象，其餘的變數則是用以表示若依照模型所作出的決策進行調度後所導致的狀況，或是用以表示是否有達成某些研究所訂立的條件。

3.3.2 模型求解策略

因為車輛途徑問題於路網中的節點數量增加時，容易遇到求解困難的問題，為縮減問題的求解複雜度，本研究於模型中考量簡化後的高速公路路網，其示意圖如圖 3，整體路網中僅考慮 4 種類型的節點，分別為事故班當前位置、等待事故班前往處理的事件發生點、虛擬終點，以及潛在事件的發生地點。

表 2　數學符號定義

符號	定義描述
集合	
N	路網中不含潛在事件的發生點之外所有節點的集合，$N = (V \cup S \cup I \cup E)$。
V	事故班當下位置的集合。
V_k	事故班k當下位置的集合，其中$k \in K$。
S	事故班駐點的集合。
S_k	事故班k駐點的集合，其中$k \in K$。
I	事件發生點的集合。
E	虛擬終點的集合。
A	路網中所有節線的集合。
K	事故班的集合。
C	事故班當下狀態的集合。
P	前一階段模型所使用到的所有節線的集合。
POT	潛在事件發生點的集合。
POT_k	事故班k所能涵蓋之潛在事件發生點的集合，其中$k \in K$。
參數	
t	當前模型運算的階段，模型進入下個階段時t會增加 1。
$P_l(t)$	在階段t下，節點l有新事件發生的機率，其中$l \in POT$。
$TT_{ij}(t)$	在階段t下，從節點i到節點j的旅行時間，其中$i, j \in N$。
$w_k(t)$	在階段t下，事故班k前往處理下個事件的準備時間，其中$k \in K$。
PT_{ij}	節點j所代表事件的所需處理時間。在虛擬路中，將此一時間成本亦納入虛擬節線的旅行時間之中，故以PT_{ij}表示從節點i前往節點j所涉之事件處理時間，其中$i, j \in N$。
PT_k^0	事故班k對於當前正在處理之事件的剩餘處理時間，其中$k \in K$。
$\overline{PT}$	一起事件的平均處理時間。
$\overline{PR}$	事故班從駐點出發所需要花費的準備時間。
$\overline{OC}(t)$	在階段t下，到下起事件發生之間的平均時間，或是調度員設定事故班對於潛在事件發生點及時應變的最長時間長度。
V_{kc}	事故班k於模型運算當下的狀態，其中$k \in K$且$c \in C$，各狀態如下： $c = 0$：代表事故班k閒置於駐點。

	$c=1$：代表事故班k正前往被指派的事件發生地。 $c=2$：代表事故班k正在處理事件。 $c=3$：代表事故班k正在回到駐點的路上。
α	目標式中第一部分所佔的權重。
β	目標式中第二部分所佔的權重。
γ	目標式中第三部分所佔的權重。
τ^R	重新指派事件時的懲罰值。
M	極大的定值。
決策變數	
$X_{ijk}(t)$	在階段t下，事故班k是否有被指派通過節線(i,j)，若是，則$X_{iik}(t)$會等於 1；若否，則等於 0，其中$i,j \in N$ 、$k \in K$且$X_{ijk}(t) \in (0,1)$。
變數	
$Y_{ijk}(t)$	在前一階段時，事故班k被指派通過節線(i,j)，而在階段t下，事故班k是否有被指派通過不同的節線，若是，則$Y_{iik}(t)$會等於 1；若否，則等於 0，其中$i,j \in P$、$k \in K$且$Y_{ijk}(t) \in (0,1)$。
$R_k(t)$	在階段t下，對於事故班k，是否有大於等於 1 個$Y_{iik}(t)$之值為 1，若是，則 $R_k(t)$會等於 1；若否，則等於 0，其中$k \in K$且$R_k(t) \in (0,1)$。
z	所有事故班中作業時間最高的事故班的作業時間，為連續變數。
u_i	用以避免車輛途程問題中子迴圈的發生，其中$i \in V \cup I$，為連續變數。
$X_{ik}^{POT}(t)$	在階段t下，事故班k在指派路徑的最後是否被指派到節點i，若是，則$X_{ik}^{POT}(t)$會等於 1；若否，則等於 0，其中$i \in N$ 、$k \in K$且$X_{ik}^{POT}(t) \in (0,1)$。
$\delta_k(t)$	在階段t下，事故班k在指派後是否仍待在駐點，若是，則$\delta_k(t)$等於 1；若否，則等於 0，其中$k \in K$且$\delta_k(t) \in (0,1)$。
$UC_{lk}(t)$	在階段t下，事故班k在指派後是否無法及時應對節點l所發生的事件，若是，則$UC_{lk}(t)$等於 1；若否，則等於 0，其中$l \in POT$ 、$k \in K$且$UC_{lk}(t) \in (0,1)$。
$UC_l(t)$	在階段t下，節點l若發生事件，是否沒有大於等於 1 個$UC_{lk}(t)$等於 0，若是，則$UC_l(t)$會等於 1；若否，則等於 0，其中$l \in POT$且$UC_l(t) \in (0,1)$。

前三者構成實際進行指派決策時會考量到的路網與節點，如圖 3 之上半部由黑色實線所框起的範圍，而圖中的實線箭頭表示模型針對當前事故班以及待處理事件的所在地規劃的指派路徑；綠色及紅色的實線箭頭則代表不同事故班的指派順序。其中，事故班的位置會隨著時間的變化而有所變動，但事故班的總數量並不會有所改變；而待處理的事件點會隨著新事件的發生而增加，當有事故班抵達一事件發生地點時則會減少，且事件發生地點並不會改變。此外，黑色實線範圍內的各點皆會與虛擬終點相連，這些節線的旅行時間為

0，且該虛擬終點為各個事故班指派路徑的終點，通過該點後代表無其他需前往的事件地點，事故班會回到駐點。

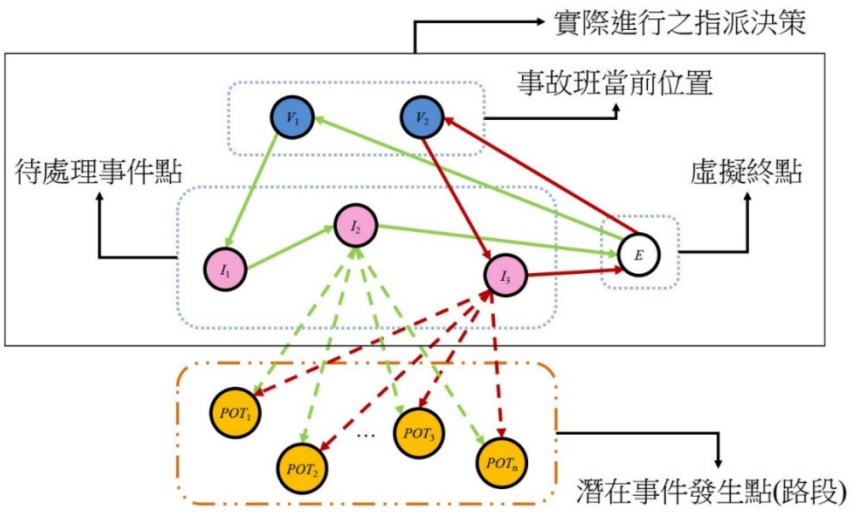


圖 3　模型所考量之虛擬路網示意圖

橘色虛線所框之範圍為路網中的潛在事件發生的地點或是路段，其節點的數量並不會隨著時間而有所變動。虛線箭頭表示從事故班於模型所規劃之指派路徑的最後所在位置(即前往虛擬終點前的節點)，到各個潛在事件發生點的路徑。

為避免增加模型的計算複雜度 (complexity) 而延長求解時間，因此模型中不考慮各點之間的路徑規劃，而是直接考量各起訖點之間的連結。關於路徑的選擇，本研究透過交通部高速公路局交通資料庫的歷史資料庫，蒐集高速公路上各路段的 VD 資料，以其行駛速率為基礎建構路網，並預先使用 Dijkstra 最短路徑演算法計算出包含潛在事件發生點與各節點之間的最短路徑以及其旅行時間，並假設各事故班皆會遵循這些最短路徑前往各個節點，因此在模型中不另進行最短路徑的規劃。

圖 4 為目標式中所考慮的各項時間成本的示意圖。首先，不論事故班當前狀態為何，若要前往處理其他事件皆需要不同的準備時間$w_k(t)$，會依事故班當下的出勤狀況而有所不同。而前往被指派的各個事件點則會有相應的旅行時間以及事件的處理時間，根據車輛途程問題的架構，在圖 3 的虛擬路網中，將事件處理時間亦納入在節線的旅行時間之中；而節點僅標註事故班出勤的途程中執行各指派任務的順序，節點上不涉及時間成本的屬性。路徑的最後會與虛擬終點相連，其時間成本為 0；最後會納入潛在事件發生時對於事故班所額外產生的旅行時間以及處理時間。

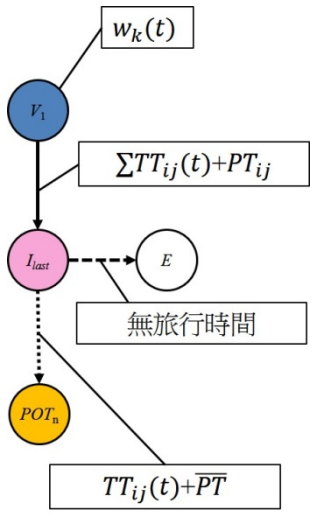


圖 4　模型所考量之應變時間成本

3.3.3 數學模型

本研究所提出事件應變調度模型之目的在於將各事件妥善指派給合適的事故班進行處理，同時在考量未來事件發生狀況下最小化事件的總應變時間。應變時間由事件偵測時間、指派時間以及旅行時間組成，其中旅行時間之定義為「事故班接獲調度決策後，前往事件發生地所需要之時間」，若一事故班需處理多起事件，則對於第一起事件以外的事件而言，其各別應變時間除了事故班的準備時間以及從前一起事件發生地點到行駛至該起事件發生地點的旅行時間之外，需再加上事故班處理完該事件之前所有事件的應變時間和處理時間，因此在本調度模型的目標式中也會加入各起事件的處理時間。

在本研究中以事件的發生代表不同階段，建構一以事件為基礎 (event-based) 之動態調度模型，當有新事件發生時，階段t會加 1，本研究對於階段t當下的混合整數規劃數學模型 (Mixed Integer Programming, MIP) 之建構與描述如下：

目標式：

$$Min\ Z(t) = \alpha \times z \tag{1}$$

$$+\beta \times [\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K} X_{ijk}(t) \times (TT_{ij}(t) + PT_{ij})$$

$$+\sum_{i\in V_k}\sum_{j\in I}\sum_{k\in K} X_{ijk}(t) \times w_k(t) + \tau^R \times \sum_{k\in K} R_k(t)]$$

$$+\gamma \times [\sum_{i\in N}\sum_{l\in POT_k}\sum_{k\in K} X_{ik}^{POT}(t) \times UC_l(t) \times P_l(t) \times (TT_{il}(t) + \overline{PT})$$

$$+\sum_{i\in N}\sum_{l\in POT_k}\sum_{k\in K} X_{ik}^{POT}(t) \times P_l(t) \times (\overline{PR} + (1-\delta_k) \times (\overline{PT} - \overline{PR}))]$$

限制式：

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\left[X_{ijk}(t)\times\left(TT_{ij}(t)+PT_{ij}\right)\right]+\sum_{i\in V_k}\sum_{j\in I}\left[X_{ijk}(t)\times w_k(t)\right] \quad (2)$$

$$+\tau^R\times R_k(t)\le z,\ \forall k\in K$$

$$w_k(t)=V_{k_0}\times\overline{PR}+V_{k_2}\times PT_k^0,\ \forall k\in K \quad (3)$$

$$X_{ijk}(t)=0,\ \ \forall i\in\left((S\cup V)\setminus V_k\right),\ j\in N,\ k\in K \quad (4)$$

$$X_{ijk}(t)=0,\ \forall j\in\left((S\cup V)\setminus V_k\right),\ i\in N,\ k\in K \quad (5)$$

$$1-\left[X_{ijk}(t)\times X_{ijk}(t-1)\right]\le M\times Y_{ijk}(t),\ \forall(i,j,k)\in P \quad (6)$$

$$\sum_{(i,\,j,\,k)\in P}Y_{ijk}(t)\le M\times R_k(t),\ \forall k\in K \quad (7)$$

$$\sum_{i\in V_k\cup I,\,i\ne j}\sum_{k\in K}X_{ijk}(t)=1,\ \forall j\in I \quad (8)$$

$$\sum_{j\in I\cup E,\,i\ne j}\sum_{k\in K}X_{ijk}(t)=1,\ \forall i\in I \quad (9)$$

$$\sum_{i\in N,\,i\ne h}X_{ihk}(t)-\sum_{j\in N,\,j\ne h}X_{hjk}(t)=0,\ \forall h\in N,\ k\in K \quad (10)$$

$$\sum_{i\in V_k}\sum_{j\in I\cup E,\,i\ne j}X_{ijk}(t)=1,\forall k\in K \quad (11)$$

$$\sum_{i\in E}\sum_{j\in N,\,i\ne j}X_{ijk}(t)\le 1,\forall k\in K \quad (12)$$

$$u_i-u_j+(|V|+|I|)\times\sum_{k\in K}X_{ijk}(t)\le|V|+|I|-1,\ \forall i\in V\cup I,\ j\in V\cup I,\ i\ne j \quad (13)$$

$$X_{ijk}(t)=X_{ik}^{POT}(t),\ \forall i\in N,j\in E,k\in K \quad (14)$$

$$X_{ijk}(t)=\delta_k(t),\ \forall i\in S_k,j\in E,k\in K \quad (15)$$

$$M\times UC_{lk}(t)\ge\sum_{i\in N}\left[X_{ik}^{POT}(t)\times(TT_{il}+\overline{PT})\right]-\overline{OC},\ \forall l\in POT_k,\ k\in K \quad (16)$$

$$\overline{OC}(t)-\sum_{i\in N}\left[X_{ik}^{POT}(t)\times(TT_{il}+\overline{PT})\right]\le M\times[1-UC_{lk}(t)],\ \forall l\in POT_k,k\in K \quad (17)$$

$$UC_{lk}(t)=1,\forall l\in(POT\setminus POT_k),\ k\in K \quad (18)$$

$$|K|-1+UC_l(t)\ge\sum_{k\in K}UC_{lk}(t)\ge UC_l(t),\ \forall l\in POT \quad (19)$$

目標式 (1) 可分為三個部分，並分別予以α、β和γ的權重：

1. 事故班中總作業時間最高之事故班的作業時間。
2. 所有事故班的總作業時間成本。
3. 無法及時對潛在事件進行應變之狀態下，所額外產生的作業時間期望值。

第一部分是為了避免模型因為事故班駐點所在地等因素而將過多的事件指派給同一個事故班，即便如此能達到最小的應變時間，但對於個別事故班的任務負擔分配可能過重，且可能造成應變順序較後的事件其應變時間及事件持續時間過度地拉長，為了防止此種狀況發生，本研究將個別事故班的應變時間也納入目標式考慮，該部分之組成如限制式 (2) 所列，以達到極小化極大化 (minmax) 的求解過程。第二部分將個別事故班處理完所有事件的作業時間成本加總，第一部分及第二部分之結合能在降低高速公路事件總應變時間的目標的同時不使任一事件的應變時間過高，進而在個別事故班的任務分配與整體事件的應變時間上達成平衡。

第二部分中，總作業時間成本之計算包含四個項目：(i) 事故班前往事件發生點的旅行時間、(ii) 事故班對於各別事件的處理時間、(iii) 事故班接受指派後的作業準備時間、(iv) 重新指派事件給不同事故班或更改事件指派順序時的懲罰值。前三者為本研究所定義之應變時間，最後一項則是避免模型過度更改先前指派的決策。

最後第三部分則是考量在該階段的指派執行後，若有潛在事件發生且沒有事故班能及時前往處理的狀況下，所產生的潛在應變成本，包含事故班前往潛在事件點的旅行時間、事故班對於各別事件的平均處理時間以及事故班接受指派後的作業準備時間，而上述成本於計算時會再乘上各別路段的潛在事件發生率。其中$\overline{PR}+(1-\delta_k)\times(\overline{PT}-\overline{PR})$代表事故班於指派過後前往潛在事件發生點前所需的準備時間，$\delta_k=1$代表事故班於指派後仍待在駐點，則其所需的準備時間為對人員、車輛、機具設備進行清點及檢查的作業時間$\overline{PR}$，若是事故班 k 不在駐點，則其所需的準備時間為事件的平均處理時間$\overline{PT}$。

因為潛在事件若發生亦為新發生之事件，不會有被重新指派給不同事故班的狀況，且本研究假設潛在事件需於事故班處理完當前受指派的全部事件後，方對其進行應變，所以也不會更改先前的事件指派順序，因此在第三部分中不考慮重新指派事件的懲罰值。

目標式三個部分分別由相應的權重值α、β、γ來表示各項目於目標式中所佔有的比例，而其中三者的大小為$\alpha\geq\beta\gg\gamma$，因為第一部分僅有單一事故班的作業時間，和所有事故班的總作業時間相比，若要使其對於目標式有所影響，達到不使任一事故班之應變時間過長的目標，便須增加其在目標式中所佔的權重；而本研究欲解決之問題主要仍在於實際的應變調度決策，因此模型也以實際發生之事件為重，兼以可能發生潛在事件的路段數遠大於當前待處理事件點的數量，因此γ的數值必須相當程度地小於α及β。由於需考量到上述狀況及條件，於本研究中該數值將擬以人工方式校估得出。

限制式 (2) 中的 z 即為目標式中的第一部分，其需要大於或等於各別事故班處理完當前階段最後一起事件的總作業時間，由於本調度模型為最小化問題，因此 z 會等於各事故班中最長的作業時間，以避免模型僅依照事件與事故班間的距離而在事件任務指派上過度集中於特定事故班的狀況。

限制式 (3) 為每個事故班前往事件發生點前所需的準備時間計算，主要是依據事故班當前的狀態所決定，於本研究中，假設事故班有四種狀況：閒置於駐點、前往被指派的事件發生地、正在處理事件、返回駐點。其中當事故班處於前往事件發生地或是返回駐點的

路上，該事故班可以直接前往處理新的事件，而不需要前置的準備時間；當事故班之狀態為閒置於駐點時，則需要對人員、車輛、機具設備進行清點及檢查的準備時間$\overline{PR}$；而當事故班正在處理事件時，其準備時間則為當前處理之事件的剩餘處理時間PT_k^0。

由於事故班於指派後的最後位置會影響其對於不同潛在事件發生點的應變條件，為防止模型指派事故班前往非事件發生點，或是憑空出現不存在之路徑，限制式(4)及(5)用以防止事故班的路徑從非當前位置的節點開始或結束，也避免事故班進入其他事故班的駐點或當前位置。

限制式 (6) 及 (7) 定義了模型中重新指派事件發生的情況。限制式 (6) 表示在本階段沒有選擇與上一階段相同的事故班 k 處理事件 j，也就是當前階段與上一階段X_{ijk}數值不同時，會使 $Y_{ijk}(t)$等於 1；而若兩者相同，則$Y_{ijk}(t)$ 可以是 0 或 1，但因為目標式為最小化問題，因此會使 $Y_{ijk}(t)$ 等於 0。限制式 (7) 將所有$Y_{ijk}(t)$ 加總，表示事故班 k 如果有任一個事件被重新指派，也就是有任一個$Y_{ijk}(t)$之值為 1，則$R_k(t)$ 也會為 1；若沒有任何事件被重新指派，則 $R_k(t)$ 會為 0。

限制式 (8) 至 (13) 為車輛途程問題相關的限制式，其中限制式 (8) 確保事故班只能從該階段的當前位置或是其他事件的發生點前往事件點 j；而限制式 (9) 描述從事件點 i 只能前往其他事件發生點或是虛擬終點，且 (8)、(9) 式皆限制每起事件僅能指派給一個事故班。限制式 (10) 流量守恆限制式。基於限制式 (11)，事故班從當前位置一定要前往一個事件發生點或是虛擬終點，且只能經過事故班當前位置一次。限制式 (12) 確保每個事故班不經過虛擬終點超過一次。限制式 (13) 則用以防止子迴圈的產生。

限制式 (14) 用於定義各個事故班於派遣過後的最後位置，因車輛路徑最後會經過虛擬終點再回到事故班該階段的起始位置，因此對於事故班而言，其路徑中前往虛擬終點前的節點便是該事故班於當前指派路徑最後會抵達的位置；若該節點為事故班在該階段的起始位置，則代表該事故班沒有被指派任何事件。

限制式 (15) 表示各事故班於指派後是否待在駐點，若$X_{ijk}(t)$為 1，則$\delta_k(t)$也會等於 1，代表事故班 k 仍停留於駐紮點；反之，則$\delta_k(t)$會為 0，代表事故班 k 不在駐點。

限制式 (16) 至 (19) 定義了模型派遣後無法及時對每個節點所發生之潛在事件進行應變的狀況。其中$\overline{OC}$為當前時間點至下起事件發生的平均時間，或是調度員設定之適當的時間長度，$\sum_{i\in N}\left[X_{ik}^{POT}(t)\times(TT_{il}+\overline{PT})\right]$為事故班 k 從指派後的最後位置到潛在事件發生點 l 的估計應變時間。

限制式 (16) 表示當事故班 k 的估計應變時間較$\overline{OC}$長時，$UC_{lk}(t)$等於 1，代表該事故班無法及時因應潛在事件發生點 l 所發生的事件。限制式 (17) 表示當事故班 k 的估計應變時間較$\overline{OC}$短時，$UC_{lk}(t)$會等於 0，代表該事故班可以及時因應潛在事件發生點 l 所發生的事件。限制式 (18) 示若潛在事件發生點 l 並非位於或鄰近該事故班之轄區，則$UC_{lk}(t)$必須為 1。最後，限制式 (19) 定義各個潛在事件發生點 l 若有事件發生時是否有事故班可及時前往因應、處理，若有一個或以上的事故班可以及時應對，則$UC_l(t)$會等於 0；反之，則$UC_l(t)$為 1。

3.4 禁忌搜索演算法

即使本研究已採用簡化之路網，但將路網中的潛在事件發生點納入考量後，因隨機性因素之複雜度而使得模型的求解時間仍舊過長，不足以因應現實的應變作業的時間要求，且在待處理事件數增加時，其求解時間也會呈指數性地上升，難以達到本研究所欲改善之短時間內事件發生頻率較高之調度情境。由於僅依靠一般的數學模型求解軟體無法滿足現實層面調度之需求，因此本研究採禁忌搜索演算法進行求解，以協助動態事件應變模型於有限的時間內快速求得有效的可行解。

3.4.1 禁忌搜索演算法介紹

禁忌搜索演算法為一巨集啟發式 (meta-heuristic) 演算法，其設計上較為靈活，並可透過演算法中建構的禁忌列表 (tabu list)，使其在搜尋過程中較不易被局部最佳解限制。相較另一常用之巨集啟發式演算法「基因演算法」，其求解過程中涉及較高的隨機性，有機會在較短的時間內便可大範圍而概略地搜尋過解空間，而較快速地收斂至較佳的解，特別對於規模較小的問題，可達到較高的運算效能和一定的求解品質。然而，對於規模較大的問題 (對於本研究而言，即為有較多待處理事件的狀況)，則未必能顯現這樣的優勢。相對而言，「禁忌搜尋法」則可能有機會較穩定地沿著鄰域搜尋 (並允許一定程度的隨機性) 而在可接受的運算時間內獲得較佳的解。

此外，在過往比較性的文獻中亦實證，「禁忌搜尋法」有機會在途程問題 (Arostegui 等人 [23])、選址問題 (Jang [24]) 等路網、區位最佳化相關問題中有較佳的求解結果。針對本研究所提出之問題，經測試禁忌搜索演算法可在時間限制之下得出合理之可行解，因此本研究以其作為模型之求解方法。

禁忌搜索演算法主要組成包含：

1. 鄰域：鄰近當前解的所有可行解存在之範圍。
2. 候選列表：以當前解進行鄰域搜索後，所產生之全部可行解的集合。
3. 移步：從當前解移動或轉換至候選列表中最好的鄰近可行解的過程。在禁忌搜索演算法中，即便候選最佳解劣於當前解，也會更新當前解。
4. 禁忌列表：記錄演算法前幾次移步所選取的決策之集合，位於列表中的決策在後續一定次數的迭代過程中不得被作為移步的方向，其模擬了人類短期記憶的特性，在禁忌列表長度達到上限後，會從第一個被加入列表的元素開始移除，被移除的決策便可以再次被選為移步的目標。
5. 渴望準則：因為禁忌列表在防止被侷限於局部最佳解的同時，也可能會使演算法錯失真正的最佳解，當候選最佳解位於禁忌列表中但符合渴望準則時，便可將其移出禁忌列表，並選取其作為移步的方向，常見渴望準則的設定為該候選解是否可對歷史最佳解產生一定程度之改善。
6. 結束條件：禁忌搜索演算法會重複鄰域搜索及更新最佳解等迭代過程，當該次迭代完成

且滿足結束條件後，演算法便會停止。常見的結束條件如迭代次數達到設定的最大次數、歷史最佳可行解經過一定迭代次數後仍未有任何改善、達到設定的最大運行時間等。

禁忌搜索演算法的運作邏輯如圖 5 所示，演算法於停止後會輸出歷史最佳解之路徑，即為該階段之指派決策。

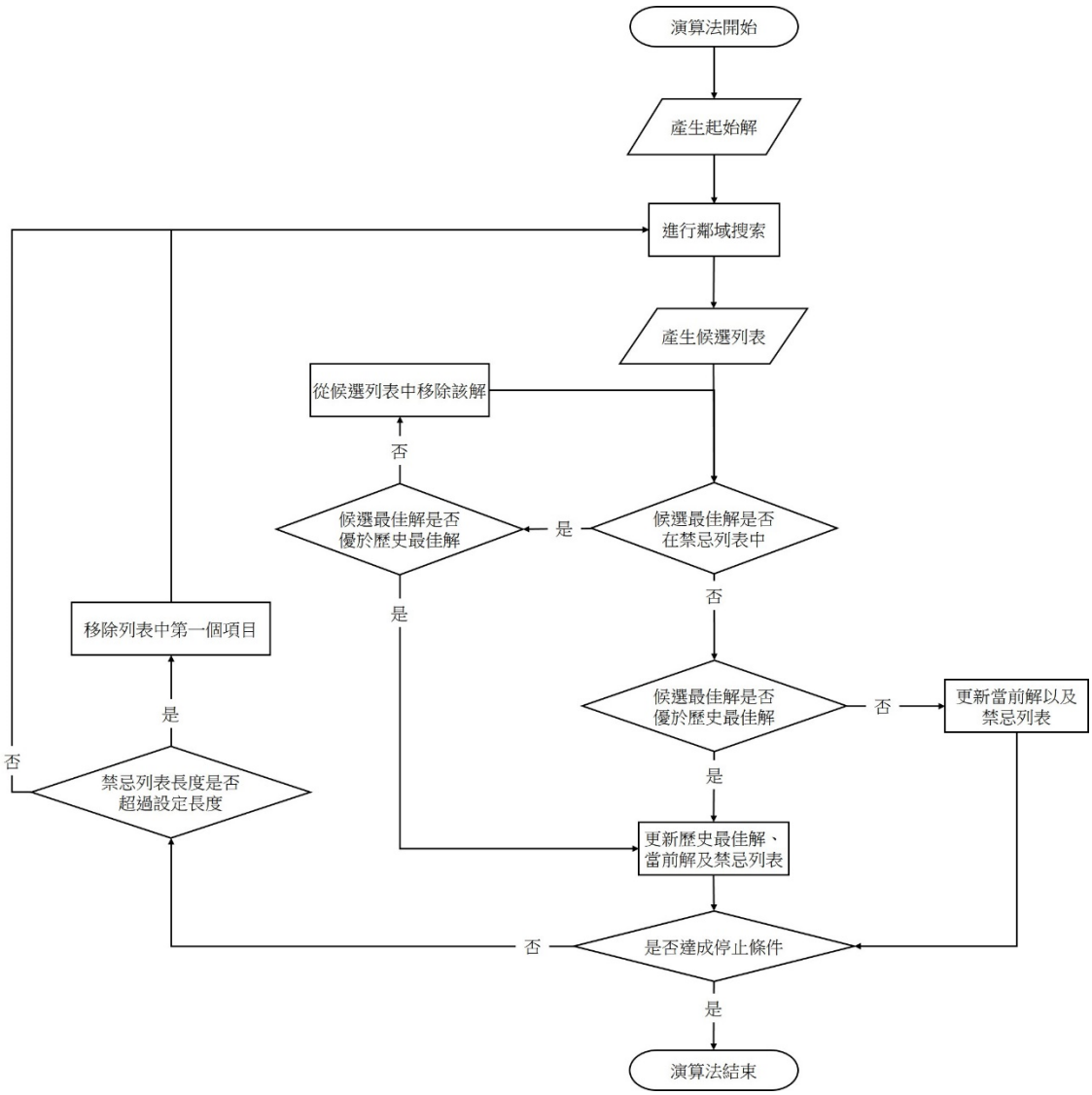


圖 5　禁忌搜索演算法運作邏輯

3.4.2 起始解產生方式

在本研究中，基於希望模型減少對於先前各事故班的事件應變順序進行更改的次數，

因此關於起始路徑的產生，本研究會以上一階段應變模型所求出的路徑為基礎，並將新發生的事件安排至事故班列表中第一個事故班應變路徑的最尾端，如圖 6 所示。

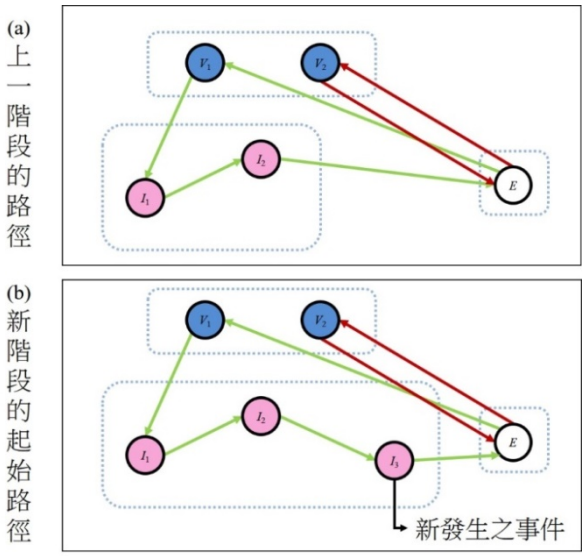


圖 6　起始路徑產生範例

四、案例分析

本章節以交通部高速公路局北區養護工程分局之轄區路網，以及其實際的事件應變調度資料作為案例，並應用本研究提出之事件應變模型進行事件指派的測試，以驗證本模型於實際狀況應用上之績效。

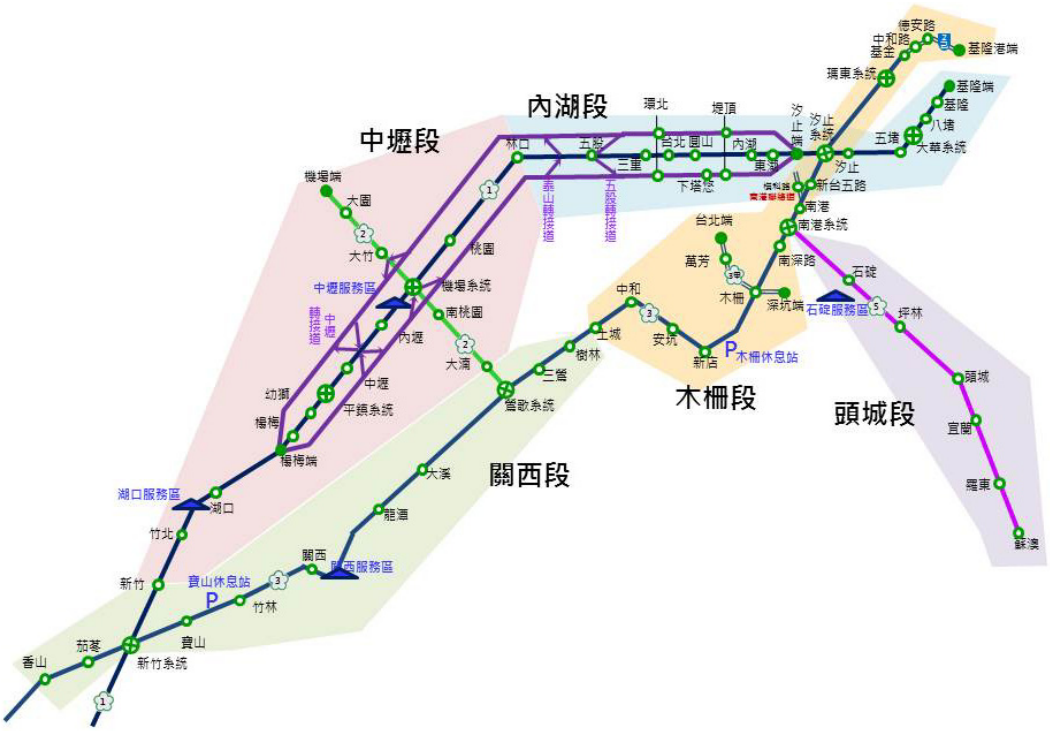
4.1 研究範圍

高速公路北區路網範圍如圖 7 所示，涵蓋國道 1 號平面、高架路段、國道 2 號、國道 3 號、國道 3 甲、國道 5 號、南港聯絡道、港西聯外道路，全區里程數共計 355.161 公里。轄區內有兩個交通控制中心負責管理路網系統的交通車流狀況；其中坪林交通控制中心之轄區為國道 5 號全線路道 5 號全線路段 (共約 54.2 公里)，其餘路段則交由位於泰山之北區交通控制中心負責。

關於事件應變部分，每年約有 25,000 起事件發生於高速公路北區，為因應事件的處理，共設有九個事故班以及八個事故班的駐點 (汐止、五股、中壢、湖口、木柵、關西、坪林、頭城)。其中，中壢班於 2018 年 7 月新增一事故班，因而改制為中壢 A 班與中壢 B 班，但兩者之駐點以及轄區範圍相同，各事故班之駐點皆可以同時對兩方向的事件快速進行應變。

由於國道 5 號之事件應變單獨由坪林交通控制中心以及坪林班與頭城班負責，與轄區內其他路段之狀況差異較大並較為獨立，因此不納入本案例研究的範圍內。另者，本研究著重於高速公路上之事件應變與事故班的指派調度，因此於案例分析中僅考量發生於國道 1 號、國道 2 號以及國道 3 號的事件。

本研究旨在於改善短時間內事件發生頻率較高之調度情境。一般而言，以尖峰時段較容易出現此種狀況，因此分析案例集中於平日之晨峰時段，並由 2019 年 5 月的資料中進行挑選，因自中壢班新增事故班後已經過 10 個月，事故班以及交控中心對於編制的改動也已熟悉，對於事件的應變的調度亦較為穩定。



資料來源：交通部高速公路局北區養護工程分局

圖 7　高速公路北區路網

當前事件應變的方式為預先將整體高速公路路網依據事件的分布以及各事故班進出路網、迴車的動線劃分為不同的區域，各個區域發生的事件原則上即由各別的事故班負責應變，稱為事故班的「靜態守備範圍」，如圖 8 所示。當有事件發生、回報至交控中心時，調度員即會依照事件發生位置分布於哪一事故班的守備範圍，指派相應的事故班處理該事件。雖在某些狀況下調度員會指派事故班前往非守備範圍內的事件，但於現行高速公路事件應變作業，多數事件仍依照靜態守備範圍的位置進行事故班指派。

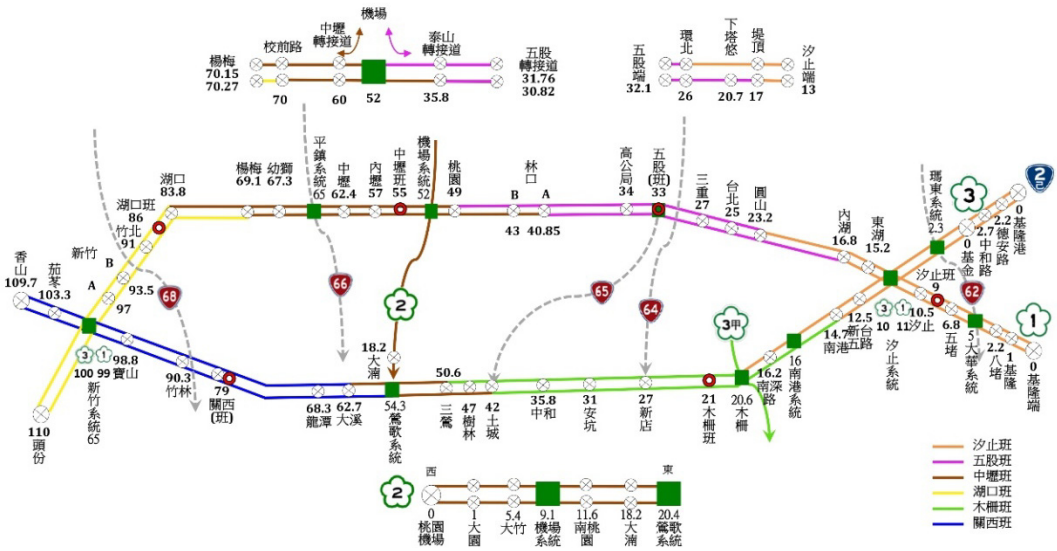


圖 8　各事故班靜態守備範圍

4.2 模型應用參數

於案例分析中，本研究之相關參數設定如表 3 所示。其中由於潛在事件的應變時間是利用旅行時間和$\overline{PT}$加總所計算得出，而 $\overline{PT}$ 為事故類事件的平均處理時間，如表 4 所示為 14 分鐘，因此本研究將 $\overline{OC}$ 設為 20 分鐘，表示若事故班對該潛在事件發生點的應變時間超過 20 分鐘，則代表該事故班無法及時對該點的潛在事件進行應變。

表 3　模型參數設定

參數	設定數值	參數	設定數值
$\overline{PT}$	事故類事件的平均處理時間	α	0.55
$\overline{PR}$	3 分	β	0.4
$\overline{OC}$	20 分	γ	0.05
V_{kc}	於階段 0 時，各事故班皆 閒置於駐點	τ^R	20
		M	100

其中，γ 的設定反映管理單位對於潛在事件的評估和重視程度，亦可詮釋為對於潛在事件所預留的應變能量。若 γ 值設為 0 即表示完全不考慮未來潛在事件發生的隨機性，然而若 γ 值設定太高（保留太多應變能量）則可能影響到當前的應變作業。為突顯對於潛在事件的考量並不至於對於當前的應變作業造成太大的影響，是以本研究在案例中預設 γ 遠

小於 α 和 β；透過歷史資料進行測試，嘗試不同參數值的組合後，設定 α、β、γ 參數值如表 3 所示 (三者參數值加總為 1)。

其餘需經過估計或是從其他資料來源取得之參數，如事件發生機率、事件處理時間以及高速公路路網中的旅行時間會於 4.2.1 至 4.2.3 作進一步說明。

4.2.1 事件發生率

本研究以 2019 年 1 月至 4 月的事件資料作為事件發生率計算之基礎，將整體路網以每 5 公里區分成不同路段，並將上午 7 點至 10 點內發生於相同路段的事件數加總，再除以總天數後求得。

圖 9 為平日晨峰之事件發生機率，除國道 1 號高架路段整體之機率明顯低於 0.1 外，其餘路段之事件發生率大致介於 0.1 至 0.3 間。由於事件發生的隨機性過大，僅使用事件分布作為依據會使整體事件發生機率的差異不明顯，無法反映出有哪些特定路段需著重應變能量之預留，因此本研究於案例分析中另會以計算出的機率值為基礎，提高該時段內各路段事件發生之機率，以觀察事件發生率對於事故班派遣策略所造成之影響。

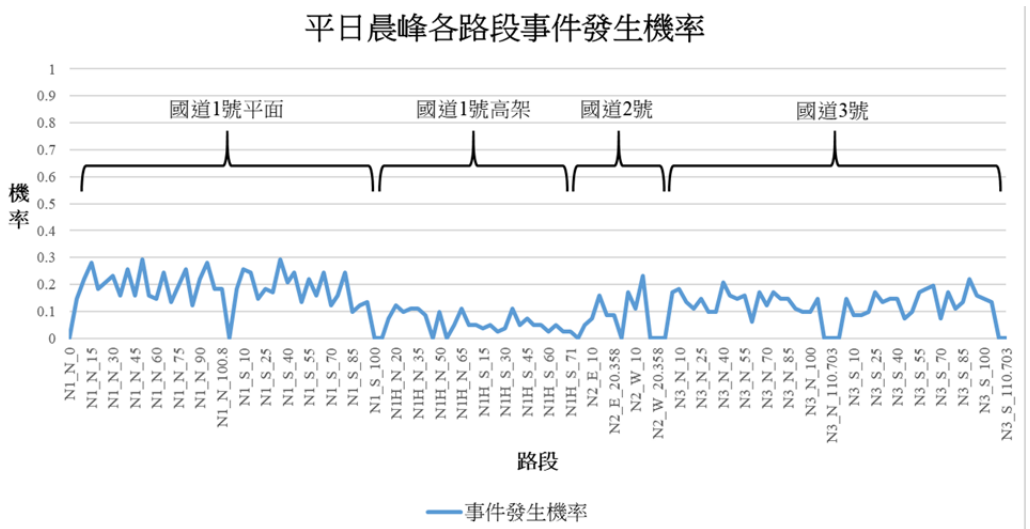


圖 9　平日晨峰各路段事件發生機率

4.2.2 事件處理時間

事件的處理時間對於整體事件的總應變時間的影響甚為顯著，但不論於事件發生當下，或是交控中心調度員進行事故班指派時，皆無法得知各個事件所需的確切處理時間，因此必須針對各類型的事件的處理時間進行估計。

本研究以不同類型事件的平均處理時間作為模型中事件處理時間的估計值，戴至佑 [5] 以及陳薇亘 [25] 於研究中分析臺灣高速公路北區歷史事件資料，將其區分為五大類，各類

別事件之平均處理時間如表 4 所示。本研究採用其結果作為各類別事件處理時間之估計，而於計算潛在事件的額外應變成本時，則使用事件數佔整體事件 34%、優先序較高之事故類別的平均處理時間作為$\overline{PT}$之參數值。

表 4　各類別事件之平均處理時間

事件性質	優先序	平均處理時間(分鐘)
事故類	高	14
散落物類	中	1.9
動物入侵類	中	1.9
鋪面類	中	4
交通維持類	中	9

資料來源：戴至佑 [5]、陳薇亘 [25]

4.2.3 旅行時間

本研究以交通部高速公路局交通資料庫 VD 五分鐘動態資訊為基礎，取用 2019 年 5 月第二週晨峰之歷史資料，並區分平日 (星期二、三、四) 以及週末 (星期六、日)，進而將各車種別之流量依據小型車、大型車和聯結車之小客車當量進行換算，以計算各路段於平日以及週末之加權平均速率。

再以上述所求得之路段和平均速率資訊建構路網，使用 Dijkstra 最短路徑演算法求出各點間之最短路徑及其旅行時間，該路徑與旅行時間即作為模型運算、更新事故班位置之參數，以及案例分析時整體應變時間之計算依據。

4.3 分析案例簡介

本研究將案例分析區分為平日和週末，平日晨峰包含有事件數較多以及較少的狀況，而假日之事件分布並無明顯晨峰時段，因此本研究以同時段之資料進行案例分析。案例之相關資訊如表 5 列，其中案例 1 以及案例 2 為平日晨峰且事件發生頻率較高之案例，案例 3 則為平日晨峰但事件數較少之情況，最後案例 4 為週末同時段之案例，且其發生之事件數同樣較少。

4.4 模型計算結果分析及比較

本研究於案例分析所使用的配備如下：

1. CPU：Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ @ 2.50 GHz
2. RAM：Kingston 16.0 GB
3. 作業系統：Windows 10 家用版 64 位元

求解所使用的軟體以及運作環境如下：

1. MIP 求解軟體：Gurobi 8.1.0
2. 演算法運行環境：Python 3.6.5

表 5　分析案例簡介

編號	日期	星期	平假日	時段	總事件數
1	2019/05/07	二	平日	8:00-10:00	21
2	2019/05/08	三	平日	7:00-9:00	21
3	2019/05/09	四	平日	7:00-10:00	13
4	2019/05/11	六	假日	7:00-10:00	15

4.4.1 演算法求解時間比較

為確保禁忌搜索演算法所求得之結果是否為實際應用上可行之指派決策，本節使用案例 1 進行測試，比較數學模型和禁忌搜索演算法之求解時間以及所求得的最佳解，其詳細結果如表 6。其中，「待處理事件數」一欄係指交控中心偵測或接獲編號事件回報當下，所探討高速公路路網範圍中尚待處理的事件數 (包含仍在處理中和最新的這一起事件)。可看出在待處理事件數為 3 件時，MIP 模型求解時間已超過 1 分鐘，而禁忌搜索演算法僅需 3.73 秒即可求出相同解。在事件 6 發生、待處理事件數為 5 件時 (編號 1 的事件已經處理完畢)，MIP 模型求解時間總共為 4,654.50 秒，而禁忌搜索演算法僅需 10 至 11 秒求出解答；且依表 6 所示，兩者所求出之解答皆相同，顯示本研究所建構之禁忌搜索演算法求解的方向正確，在事件發生數較少的狀況下，演算法可以求得最佳解。

此外，於事件 5 發生時，其待處理事件數同為 5 件，但 MIP 模型求解耗時 110.28 秒，與前述之 4,654.5 秒落差極大，表示該模型求解時間相當不穩定，且若需耗時超過 1 小時才能求解出決策，則該模型在現實應用上並不可行。相較之下，禁忌搜索演算法之求解時間相對穩定；如表 7 所示，即便在最多 9 起待處理事件之情境下，也僅需要約 38 秒即可完成求解計算，且於後續案例分析之結果亦可見其所求得之決策皆屬合理、有效率之可行解，並不會出現指派距離事件發生地甚遠之事故班前往處理的調度策略。

表 6　模型求解比較 - 2019/05/07 上午 8 至 10 時

2019/05/07 8:00-10:00					
事件編號	待處理事件數 (件數)	MIP (Gurobi 8.1.0)		禁忌搜索演算法	
		求解時間 (秒)	指派對象	求解時間 (秒)	指派對象
1	1	1.99	五股班	0.40	五股班
2	2	5.42	關西班	1.62	關西班
3	3	81.23	中壢 A 班	3.73	中壢 A 班
4	4	65.96	木柵班	6.65	木柵班
5	5	110.28	木柵班	10.91	木柵班
6	5	4,654.50 (超過可接受運算時間)	汐止班	10.69	汐止班

表 7　禁忌搜索演算法求解時間

待處理事件數	求解時間 (秒)	待處理事件數	求解時間 (秒)
1	0.40	6	15.11
2	1.62	7	21.45
3	3.73	8	29.97
4	6.65	9	37.60
5	10.91		

4.4.2 結果分析

表 8 為各個案例的指派結果比較，可看出事件應變模型應用於每個案例皆可使整體的事件應變時間產生改善；其中，在事件發生頻率較高的情境下，模型的改善效果尤佳，其改善率約 14%至 42%。應變模型主要仍是透過考量各事故班當前之位置，從而指派應變時間較短之事故班處理事件；而案例 2 有多起事件於短時間內接連發生於一事故班原有轄區內，且其事件分布較為分散、位於不同方向或國道上，甚至是發生在鄰近事故班的守備範圍交界處的狀況。由於這類狀況下的事件調度目前主要仍基於人為判斷，比較容易產生決策的偏誤或盲點，因而本研究所提出之應變模型對於此類狀況的應變時間改善績效亦更為顯著。

表 8　各案例結果比較

	事件發生頻率	原應變時間 (分)	模型應變時間 (分)	改善率 (%)
案例 1	高	364.02	312.54	14.14
案例 2	高	629.56	365.76	41.90
案例 3	低	162.59	148.92	8.40
案例 4	低	292.37	272.42	6.82

在事件發生頻率較低的情境如案例 3、案例 4，模型的對於應變時間的改善效果相對較低，分別為 8.40%以及 6.82%。因為當事件發生時，事故班多已處理完先前被指派的事件，甚至已回到原駐點，再加上事故班守備範圍之訂定也已有考量歷史事件的分布狀況，因此對於此種較接近靜態問題的情境，應變模型較難給予大幅的改善率。且由於多數狀況下，事故班皆可在發生新事件前完成既有事件之排除，因此額外預留應變能量不但無法對後續事件的處理效率產生效益，反而可能使改善的幅度下降。

圖 10 為各案例應變時間的累積折線圖，其顯示各案例皆於事件數達到 4 至 6 起時，模型開始對於應變時間有所改善；主要原因在於事故班已離開駐點，因此需要考慮各事故班之當前位置以進行最佳的調度指派，而歷史資料的指派策略多仍以靜態守備範圍為依據進行指派，所以才會與本研究所提出模型之結果產生差異。

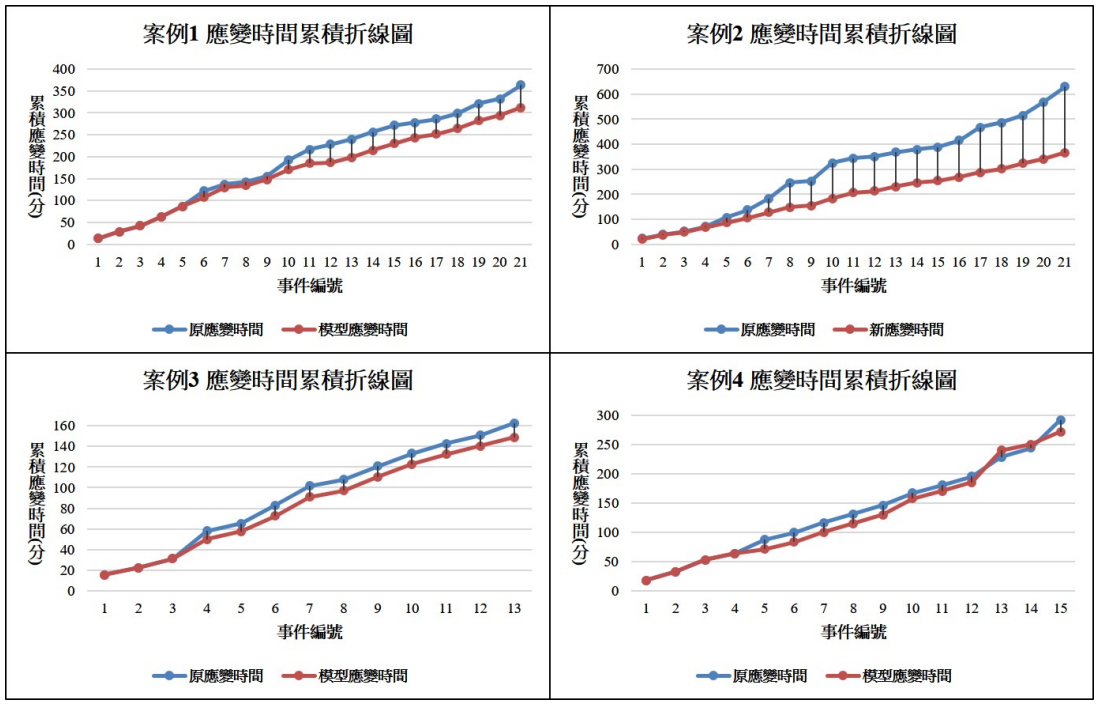


圖 10　各案例之應變時間累積折線圖

再者，案例 1 至案例 3 中，累積改善幅度在某些事件後會有些微減少，顯示這些事件的應變時間相較於原指派結果有所增加，其主要原因有二：一是由於前幾起事件已將最接近事件發生點的事故班派往處理其他事件，因此只能指派其他事故班處理或是等待原事故班處理完其他事件；二則是因為模型考量到某些事故班的守備範圍內有較的高事件發生率，因此改指派鄰近的事故班予以支援。上述因素使得部分事件的個別應變時間有所增加，但直至最後模型所求得派遣決策下的累積應變時間皆優於原指派策略，顯示整體的應變時間相較於原指派決策確實有改善。而案例 4 的累積應變時間在事件 13 處急遽上升至超過原指派策略，此係由於模型重行安排事故班對於各事件之應變順序，造成事件 13 之應變時間較原指派策略大幅增加，但最後模型之整體累積應變時間仍較原指派策略之應變時間有所縮減。

4.4.3 有無考量事件發生隨機性之比較

為驗證事件發生隨機性是否會對調度決策造成影響，本節以改善幅度最大之案例 2 為測試基準，透過調整目標式 (1) 第三部分於整體目標式中之權重，對照有無考量隨機性所產生之差異，或是將隨機性於目標式中所佔有比重提高後之影響。於測試中僅改動目標式中第三部分所佔的權重γ，其餘的參數皆與原案例分析相同。

表 9 為有無考量事件發生隨機性下應變模型指派之結果比較，模型的指派策略使總應變時間從原先的 629.56 分鐘降為 389.61 分鐘，整體改善率約 38.11%，但其改善幅度相較於考量隨機性下應變模型所得出的指派策略差了 3.79%。

關於有無考量隨機性最明顯的差異為事件 11 至事件 16，此六起事件的事故班指派路徑如圖 11 所示；圖 11(a) 為考量到事件發生隨機性之事故班指派路徑、圖 11(b) 則是無考量事件發生隨機性下所得出的事故班指派決策。事件 11 位於五股班之轄區內，在不考量守備範圍內潛在事件發生率的狀況下，其周圍空閒的事故班僅有中壢 B 班及五股班，模型因而指派應變時間最短的五股班前往處理；而考量到事件發生隨機性之模型則因為先前多預留了中壢 A 班，且五股班守備範圍內之潛在事件發生率同樣較高，因此選擇將事件 11 指派給應變時間略高之中壢 A 班處理，留下五股班以應對後續可能發生之事件；對於此事件而言，考量隨機性下的應變時間相較增加約 4.63 分鐘。但後續事件 14 發生時，在未考量隨機性下的狀況下，則因為中壢 A、B 兩班皆有事件須處理，且為平衡各事故班的任務分配量，因此將其指派由較鄰近的湖口班處理，此處相較考量隨機性的決策則增加約 4.37 分鐘之應變時間。最後事件 16 在兩種狀況下，皆將其指派由應變時間最短的五股班進行處理，但在無考量隨機性的狀況下，因為五股班剛處理完事件 11，因此造成前往事件地點的旅行時間較長 (相較圖 11(a) 中直接從駐點出發)，因此該事件在應變時間上相較於考量隨機性的狀況增加約 12.49 分鐘。

對於隨後發生之事件，由於中壢 A、B 班、湖口班、五股班皆已被指派前往處理事件，並無可預留的應變能量，因此模型以旅行時間以及估計之應變時間為考量，指派較合適之事故班，此處考量事件發生隨機性的模型總共減少了約 10.18 分鐘的應變時間。

表 9　案例 2 有無考量事件隨機性之指派結果

事件編號	傳送時間	原傳送對象	原應變時間(分)	模型傳送對象(考量隨機性)	模型應變時間(分)	模型傳送對象(無隨機性)	模型應變時間(分)
1	07:11	中壢 A 班	24.00	湖口班	21.05	湖口班	21.05
2	07:13	中壢 B 班	16.21	中壢 A 班	16.21	中壢 A 班	16.21
3	07:31	五股班	11.85	五股班	11.85	五股班	11.85
4	07:35	關西班	19.03	關西班	19.03	關西班	19.03
5	07:36	關西班	35.66	湖口班	18.37	中壢 A 班	18.29
6	07:50	木柵班	29.97	關西班	19.26	關西班	19.26
7	07:52	木柵班	47.10	湖口班	22.95	中壢 A 班	22.95
8	07:53	木柵班	62.66	木柵班	19.46	木柵班	19.46
9	07:54	中壢 A 班	6.64	中壢 A 班	6.64	中壢 B 班	6.64
10	08:04	木柵班	71.81	木柵班	28.62	中壢 A 班	30.15
11	08:13	五股班	18.59	中壢 A 班	23.22	五股班	18.59
12	08:19	中壢 B 班	7.20	中壢 B 班	7.20	中壢 B 班	7.20
13	08:20	汐止班	16.55	汐止班	16.55	汐止班	16.55
14	08:25	中壢 A 班	11.85	中壢 B 班	15.52	湖口班	19.89
15	08:33	汐止班	8.75	汐止班	8.75	汐止班	8.75
16	08:34	五股班	26.80	五股班	14.31	五股班	26.80
17	08:34	五股班	53.23	中壢 A 班	19.18	中壢 B 班	19.57
18	08:36	中壢 B 班	18.95	中壢 B 班	13.00	湖口班	16.53
19	08:38	中壢 A 班	27.27	湖口班	22.77	木柵班	30.86
20	08:42	五股班	54.17	五股班	17.76	中壢 B 班	20.45
21	08:44	木柵班	61.29	湖口班	24.06	中壢 A 班	19.55
		總應變時間	629.56	總應變時間	365.76	總應變時間	389.61

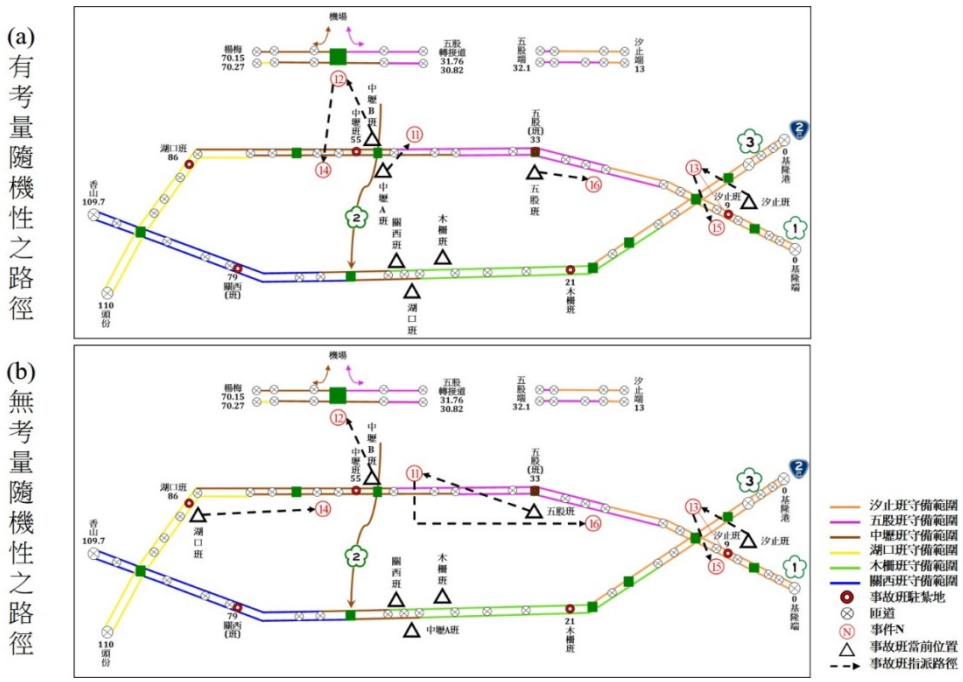


圖 11　有無考量隨機性之指派路徑差異-事件 11 至事件 16

從表 9 最後的結果可以看出，雖然兩者對於歷史資料的指派決策來說，皆可以減少整體的事件應變時間，但將事件發生的隨機性納入考量並額外預留應變能量，確實可以將改善的幅度進一步提升。

而為探討事件隨機性於目標式中之比例對指派決策所造成的影響，本研究將權重值γ分別設置為 0、0.05、0.1 以及 0.15，並將其對於整體事件應變時間的影響記錄於表 10。

表 10　隨機性所佔權重之差異

γ	0	0.05	0.1	0.15
總應變時間 (分)	389.61	365.76	629.99	479.57
改善率 (%) (與原指派決策相比)	38.11	41.90	-0.07	23.82
差異百分比 (%) (與$\gamma = 0.05$相比)	-6.52	0.00	-72.24	-31.12
最大待處理事件數 (件數)	9	9	10	10
總運算時間(秒)	218.22	251.48	327.07	294.99

對於事件總體應變時間的改善，最佳的權重值為 0.05，其改善率為 41.90%，其次為 0 (不考量隨機性) 的 38.11%，再其次為 0.15 之 23.82%，最差的權重值則是 0.1，相較於歷史資料中的指派決策，反而增加了 0.07%的指派時間。於最大待處理事件數方面，後兩者之數值較權重值為 0 或 0.05 的參數設定下還要多出 1 件，表示潛在事件對於目標值所佔的影響權重過大時會導致應變效率下降。

考量事件發生的隨機性確實可對應變時間的改善效益有所提升，但模型若過度偏重對於潛在事件發生的考量，反而會使模型預留過多的事故班應變能量，因而導致改善率降低，甚至可能會比原決策更差。因此，對於隨機性於目標式中所佔有之比例需訂定合適的數值；即便只增加些微比例，亦可能使決策產生相當程度的差異。

五、結論與建議

本章節總結本研究對於考量事件發生隨機性的應變模型之建構，以及提出的應變模型應用於不同情境下之研究發現，並對未來相關研究之方向與可改進之處提出建議。

5.1 結論

本研究所提出之動態事件應變模型著重於過往相關文獻較少探討的指派層面，考量到未來不同路段上事件發生的隨機性，並在平衡各事故班工作量的條件下，允許對事件進行重新指派。相較過往相關研究多採用 FCFS 的方式進行指派（如 Schmid [15]）或考量二次事件發生的機率（如 Hu、Chan [12]），本研究對於整體路網中的事件發生隨機性和事故班派遣提出更為全面而富彈性的事件應變模式。透過禁忌搜索演算法，本研究成功將模型的求解運算時間控制在可接受範圍內，並在案例分析中展示本應變模型確實可改善現行事故班指派之應變效率，在考量事件發生之隨機性後，可進一步改善各事故班的總事件應變時間。

本研究將主要結論與貢獻總結至以下四點：

1. 本研究提出一基於多場站車輛途程問題的高速公路事件應變動態指派模型以及其運作流程，允許對事件進行重新指派或調整事故班對於事件的應變順序，並於模型中考量事件於不同路段上發生之隨機性。
2. 為加速事件應變模型的求解時間，以實際線上應用於短時間內有多起事件發生之情境，本研究簡化路網的表達方式，並建構禁忌搜索演算法進行求解。結果顯示禁忌搜索演算法能將求解時間控制在 40 秒內。
3. 根據高速公路北區路網實際資料的案例分析中，本研究提出之事件應變模型皆可對事件的應變效率產生不同程度的改善。特別在事件發生頻率較高之情境下，模型對於指派策略的改善空間較大，應變時間的改善幅度約在 14%至 42%之間；而在事件發生頻率較低的情境下，仍可以降低約 6.82%至 8.40%的總應變時間。

4. 在事件發生率較高的路段，模型會傾向保留可用之事故班作為預備的應變能量，而非僅考慮當下的最佳解，以更有效率地應對未來可能發生的潛在事件。於有無考量事件發生隨機性之比較中，顯示在考量隨機性後，可以對總應變時間進一步衍生約 3.79%的改善，但若過度考量隨機性反而會使模型保留過多的應變能量，導致總應變時間增長。

5.2 未來研究建議

本研究之限制或未考量之部分以及針對未來相關研究的建議整理如以下八點：

1. 本研究考量到事故班轄區變化之因素，對於各路段之事件發生率僅以四個月的歷史資料計算得出，然事件的發生還牽涉如車流、速率、天氣條件等眾多因素，因此若能應用對於事件發生預測準確率高的模型作為輔助，應可以進一步提升事件應變模型對於應變時間的改善程度。
2. 本研究主要考量到事件發生的隨機性，後續研究可嘗試將更多的隨機性納入模型建構的考量中，如行車速率、車流狀況、旅行時間、事件類別、事件的處理及持續時間、事件對於鄰近路段的影響等，皆為影響事件應變之不確定性因素；若能更全面地考量相關不確定因素之影響，應可進一步求得更精確、有效的指派決策。然而隨著問題中隨機性的增加，模型的運算時間也會隨之上升，可優先考慮事件處理時間、旅行時間等直接影響事故班應變時間之因素，且本應變模型之參數中也有考量到前述二者，在建構新模型上或可沿用本研究之架構及求解策略。
3. 本研究對於行車速率假設為已知 (在案例中係透過歷史 VD 資料進行推估)，而根據已知之路段行車速率/旅行時間，建立虛擬路網之旅行時間 (如圖 3)。然而在行車速率涉及高度隨機性的情況下，可能會使模型產生不同的決策。因此，將有關行車速率、車流狀況或旅行時間的隨機性納入模型考量，或能得出更有效的指派決策，但同時亦會增加模型的複雜度及求解時間。除將其作為隨機性直接納入模型並發展演算法外，也可考慮建構一預測旅行時間之模型，並將其結果作為參數輸入本應變模型中，以減少模型因放鬆該假設所增加之運算時間。
4. 考量到各事故班之間任務量的平衡，以及優先處理已發生事件等因素，本研究對於α、β以及γ之權重為人工設定之定值，但從 4.4.3 之比較可看出調整權重值也會對模型之結果產生影響。表 10 的測試結果中顯示γ值設定為 0.05 時，對於所討論的案例，在總應變時間上可獲得最佳的表現。對於普遍通例上的應用會受到實際潛在事件發生機率影響，而管理單位對於各成本項重要性之衡量亦直接影響參數值，故仍需對於更多的案例情境進行測試，抑或考量採用柏拉圖最適解前緣 (Pareto-optimal front) 以及其他求解多目標最佳化之方法，進行不同權重之間的比較，以求得不同情境下較合適或依時性之權重值。
5. 事件的嚴重度越高，其對於高速公路車流的影響可能也較大，因此可針對事件的嚴重程度或是應變的優先順序進行更細緻的考量，分析此類因素對於模型的指派決策會產生何種改變。

6. 在實際的事件應變上，不同類別或嚴重程度的事件可能會需要由相應的車輛或機具 (如救護車、水車) 協助處理，後續研究可將個別事件的應變條件納入模型中，建構考量多車種的緊急應變派遣模型，以求得更符合實務應用上之指派決策。
7. 由於本研究希望降低對於先前事件之應變順序進行更改的次數，因此對於演算法的起始解產生方式為一固定之規則，但起始解亦會影響禁忌搜索演算法最終產生之最佳路徑，因此可針對起始路徑進行擾動，觀察是否會有較佳的可行解，尤其是在擁有多起待處理事件、或是有發生重新指派事件應變順序的狀況，或可有較高的機會產生不同的最佳可行路徑。
8. 可考慮使用穩健最佳化的方式進行模型建構以及求解，並與有無考量隨機性之決策進行比較，觀察兩者間之差異，進一步探討何者較適用於實際狀況之調度指派。

參考文獻

1. Skabardonis, A., Varaiya, P. and Petty, K. F., "Measuring Recurrent and Nonrecurrent Traffic Congestion", *Transportation Research Record*, Vol. 1856, No. 1, 2003, pp. 118-124.
2. Karlaftis, M. G., Latoski, S. P., Richards, N. J. and Sinha, K. C., "ITS Impacts on Safety and Traffic Management: An Investigation of Secondary Crash Causes", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, No. 1, 1999, pp. 39-52.
3. Khattak, A., Wang, X. and Zhang, H., "Are Incident Durations and Secondary Incidents Interdependent?", *Transportation Research Record*, Vol. 2099, No. 1, 2009, pp. 39-49.
4. Jagtenberg, C. J., van den Berg, P. L. and van der Mei, R. D., "Benchmarking Online Dispatch Algorithms for Emergency Medical Services", *European Journal of Operational Research*, Vol. 258, No. 2, 2017, pp. 715-725.
5. 戴至佑，「以動態車輛路線最佳化模型決定高速公路事件應變車隊任務」，臺灣大學土木工程學研究所碩士學位論文，民國 107 年。
6. Zografos, K. G., Nathanail, T. and Michalopoulos, P., "Analytical Framework for Minimizing Freeway-Incident Response Time", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 119, No. 4, 1993, pp. 535-549.
7. Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G. and Musmanno, R., "Real-Time Vehicle Routing: Solution Concepts, Algorithms and Parallel Computing Strategies", *European Journal of Operational Research*, Vol. 151, No. 1, 2003, pp. 1-11.
8. Haghani, A., Tian, Q. and Hu, H., "Simulation Model for Real-Time Emergency Vehicle Dispatching and Routing", *Transportation Research Record*, Vol. 1882, No. 1, 2004, pp. 176-183.
9. Zhao, H. T., Leng, J. Q. and Ma, G. S., "Research on Highway Emergency Vehicle Dispatching Model", 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Vol. 2, IEEE, 2009, pp. 296-299.
10. Zhao, J., Guo, Y. and Duan, X., "Dynamic Path Planning of Emergency Vehicles Based on Travel Time Prediction", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2017, 2017.

11. Zhu, S., Kim, W. and Chang, G. L., “Design and Benefit–Cost Analysis of Deploying Freeway Incident Response Units: Case Study for Capital Beltway in Maryland”, *Transportation research record*, Vol. 2278, No. 1, 2012, pp. 104-114.
12. Hu, J. and Chan, Y., “Stochastic Incident-Management of Asymmetrical Network-Workloads”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 27, 2013, pp. 140-158.
13. Lei, C., Lin, W. H. and Miao, L., “A Stochastic Emergency Vehicle Redeployment model for an effective response to traffic incidents”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 2, 2014, pp. 898-909.
14. Kim, W., Kim, H. and Chang, G. L., “Design of real-time emergency response system for highway networks: application for high frequency of traffic emergency events during peak hours”, *Transportation research record*, Vol. 2484, No. 1, 2015, pp. 70-79.
15. Schmid, V., “Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming”, *European journal of operational research*, Vol. 219, No. 3, 2012, pp. 611-621.
16. Nicoletta, V., Lanzarone, E., Bélanger, V. and Ruiz, A., “A cardinality-constrained robust approach for the ambulance location and dispatching problem”, International Conference on Health Care Systems Engineering, Cham, 2017, pp. 99-109.
17. Bertsimas, D. and Ng, Y., “Robust and Stochastic Formulations for Ambulance Deployment and Dispatch”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 279, No. 2, 2019, pp. 557-571.
18. Garey, M. R. and Johnson, D. S., *Computers and intractability*, W. H. Freeman and Company, New York, 1979.
19. Glover, F. and Taillard, E., “A User's Guide to Tabu Search”, *Annals of Operations Research*, Vol. 41, No. 1, 1993, pp. 1-28.
20. Rego, C. and Roucairol, C., “Using Tabu Search for Solving a Dynamic Multi-Terminal Truck Dispatching Problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 83, No. 2, 1995, pp. 411-429.
21. Cordeau, J. F., Gendreau, M. and Laporte, G., “A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems”, *Networks: An International Journal*, Vol. 30, No. 2, 1997, pp. 105-119.
22. Cordeau, J. F. and Maischberger, M., “A Parallel Iterated Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems”, *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No. 9, 2012, pp. 2033-2050.
23. Arostegui Jr, M.A., Kadipasaoglu, S.N. and Khumawala, B.M., “An Empirical Comparison of Tabu Search, Simulated Annealing, and Genetic Algorithms for Facilities Location Problems”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, No. 2, 2006, pp.742-754.
24. Jang, K.W., “A Tabu Search Algorithm for Routing Optimization in Mobile ad-Hoc Networks”, *Telecommunication Systems*, Vol. 51, No. 2, 2012, pp.177-191.
25. 陳薇亘，「提升國道事件應變效率: 事件派遣資料與處理時間分析」，臺灣大學土木工程學研究所碩士學位論文，民國 108 年。