

公路早期防救災決策支援系統及橋梁管理模組維護

TRENDS Maintenance and Modules Update

主管單位：交通部運輸研究所

邱建國¹ 鄭明淵¹ 廖國偉¹ 林雅雯² 吳育偉¹
Chiu, Chien-Kuo¹ Cheng, Min-Yuan¹ Liao, Guo-Wei¹ Lin, Ya-Wen² Wu, Yu-Wei¹

¹ 國立臺灣科技大學營建工程系

² 交通部運輸研究所

摘要

臺灣橋梁因天然環境因素，遭受洪水與地震等災害時倒塌或斷裂的機率極高。尤其災害一旦發生，對於公路之影響更為嚴重，造成災民之生命財產損失亦難以估計。為此，交通部運輸研究所於94、95年委託研究計畫「交通工程防災預警系統建立之研究」，並逐年擴充建置台灣公路早期防救災決策支援系統(Taiwan Road Early Nature Disaster prevention Systems, TRENDS)。考量到橋梁防災分析與評估方法逐年修正，本計畫擬針對以下不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，並確認系統實用性及穩定性，包括：(1)鋼結構橋梁維護分析模式精進、(2)橋梁整體耐震能力評估模式選取一座橋梁分析、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式模組建置。本研究包含已建置公路總局轄管橋梁維護策略最佳化模式，並提供可查詢之功能模組，提升使用者查詢便利性。以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行橋梁整體耐震能力分析。至南雲大橋進行雨季前後振動頻率量測，並確認量測方法與外在干擾來源。最後建置橋梁災後巡檢路線規劃模組，可於線上進行巡檢路徑之規劃。

關鍵詞：橋梁損傷評估、鋼橋維護管理、防災預警

Abstract

Taiwan's bridges are highly prone to collapse or breakage during floods and earthquakes due to natural environmental factors. In particular, once a disaster occurs, the impact on the road is more serious, and the loss of life and property of the victims is difficult to estimate. From 2005 and 2006, the Institute of Transportation, MOTC commissioned a research project and expanded the Taiwan Road Early Nature Disaster Prevention Systems (TRENDS) year by year. Therefore, this study aims to improve TRENDS practicality and stability by adding several functions: (1) Steel bridge maintenance analysis model improvement, (2) Add one case study using bridge seismic capacity inference model, (3) Bridge health evaluation using the pier vibration frequency, (4) Post-disaster route planning model for bridge inspection. The results of this study include the optimization of the bridge maintenance strategy adopted by the Directorate General of Highways, and the provision of function that can be query to improve user accessibility. Take the Zhongkeng bridge as an example to analyze the overall seismic capacity of the bridge. The Nanyun bridge was use for vibration frequency before and after the rainy season, and the measurement method and external interference sources

were confirm. Finally, the post-disaster inspection route-planning module is developed, and the inspection route can be search online.

Keywords : Bridge Seismic Evaluation 、 Steel Bridge Maintenance, Disaster Prevention

一、前言

本研究進行 TRENDS 系統資料更新、提高分析準確度並與相關單位監測資料進行驗證，納入本所近期研究之分析模組及成果，並確認系統實用性及穩定性。本研究至公路總局某一個養護工程處進行系統介紹與訪談，藉由訪談讓公路橋梁管理單位更了解系統特性，並由訪談過程了解橋梁管理單位實務運作情形及使用需求，作為本研究系統與研究方向修正之依據。本研究預計新增與更新項目除系統維護外另包括：

1.1 鋼結構橋梁維護策略：

鋼結構橋梁風險分析及單橋維護策略分析模式擴展至群橋風險管理及群橋維護策略，並與前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略成果結合，建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)風險分析資料庫、風險評估與查詢功能模組。

1.2 整體橋梁耐震能力評估：

進行 1 座整體橋梁耐震能力側推案例，持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。

1.3 橋梁振動頻率方面：

選取 1 座橋梁安裝 2 組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。

1.4 橋梁巡查與檢測路徑規劃：

精進災後橋梁巡查與檢測路線規劃模式，建置模組。

二、研究目的

本研究目的為進行臺灣公路早期防救災決策支援系統(TRENDS)維運，並針對以下不同領域進行系統模式更新、提高分析準確度，確認系統實用性及穩定性，包括：(1)鋼結構橋梁維護策略擬定。(2)整體橋梁耐震能力評估模式。(3)橋梁振動頻率之驗證。(4)橋梁巡查與檢測路徑規劃之精進。

三、橋梁維護策略最佳化文獻回顧

各個國家在定義橋梁維護優選排序時，考量之因素與方法眾多，其考慮之因素差異相當大，如道路之重要性等級、維護成本的最低估算、政策、替代道路長短、道路等級與橋梁生命週期成本、橋梁管理單位維護預算限制等方式來管理橋梁之維護策略。目前國內之研究與美國相似，以重要性相關因子權重的方式決定。本研究整理出國內與國外目前橋梁維護排序方法與各國橋梁管理單位優選排序考量之因素，如下表 1 所示。

表 1 國內外橋梁維護優先順序文獻蒐集

國家/系統	橋梁優先排序考量因素
臺灣	1.橋梁的重要性等級 2.結構性指標 3.特殊性指標 4.服務性指標 5.易損性指標
芬蘭	維護的指標(結構元件的破壞程度和傷害造成維護的緊急等級)
法國	1.橋梁的情況 2.道路等級 3.地方管理單位的有限預算 4.政治 5.地方政府維護的可行性(考察與維護)
挪威	1.橋梁破壞的程度與後果 2.調查並考量技術性或替代策略 3.評估價值工程(直接成本與非直接成本)
美國加州(DOT)	效率成本比率
美國各州(未含加州)	橋梁的重要性等級
德國	1.橋梁的情況 2.橋梁破壞的程度與後果 3.道路等級 4.橋面板的淨空度 5.交通安全 6.合宜的人員
比利時	結構物可靠度的風險
葡萄牙	1.橋梁的情況 2.傷害的範圍與結果 3.交通的安全性 4.維護成本的最小化
英國	1.全生命週期 2.安全性指標 3.政治

四、TRENDS 系統架構

TRENDS 架構分為資料交換平台、資料庫與預警通報機制等。並以 1.易於進行資料查詢及分析；2.提供橋梁基本、災害、監測資訊；3.GIS 圖形介面等使用需求進行系統規劃(圖 1)。

(1)系統使用需求

- 1.易於進行資料查詢及分析
- 2.提供橋梁基本、災害、監測相關資訊
- 3.GIS圖形化網頁介面

(2)系統發展概念研擬



圖 1、TRENDS 系統概念

- 1.資料交換平台：應用港研中心「交通工程防災預警系統建立之研究」中所建置之「災害預警資料交換機」，建置資料交換平台，統整各項資訊。透過通報機制，於洪水災害發生時，第一時間收集監測資料與災害分析研判，並將結果即時透過各項通訊管道(手機簡訊與 E-mail 等)回報災情與範圍，提升救災效率，減少災情之損失與避免人員之傷亡。
- 2.資料庫：為了解決各介面整合與資源共享等問題，此階段將根據資料倉儲理念進行資源整合，研究資源項目包含 GIS 圖層、儀器監測值、氣象報告、水文資料、橋梁基本資料、橋梁耐洪安全評斷標準等資訊。
- 3.預警通報機制：為了能立即掌握即時橋梁安全情況，並提供災時工程人員應變、決策及通報的機制，將應用災害預警資料交換機即時收集災情資訊與安全評估結果，一旦橋梁到達設定之警戒值時，系統將以主動及被動兩種方式與公路總局通報機制進行整合。

系統中各個模組以模式庫方式呈現，而且各個模組均可配合資料的改變來更新模式中的參數，使模組能應付現實狀況的改變，同時亦可反覆執行指定模組，以確保使用者可以得到所需之決策支援，進而達到模組管理的功能，如圖 2 所示。

目前公路橋梁管理單位所使用之系統包含 TBMS、公路防救災資訊系統(以下簡稱 BOBE)、公路防救災 GIS 決策支援系統(以下簡稱 TGIS)與臺灣地震損失評估系統 TELES。各系統之目的與決策評估方法皆不同，以下用表格方式統整各系統與 TRENDS 間之差異比較，如表 2 所示。

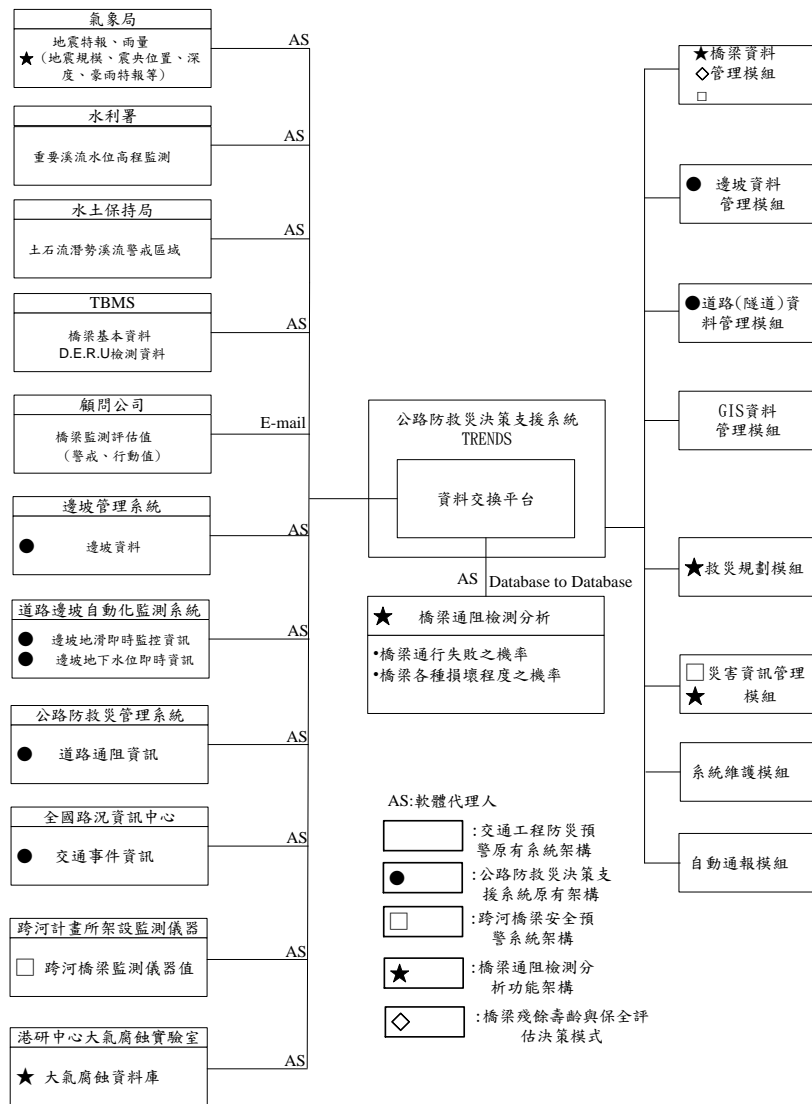


圖 2、TRENDS 系統模組

表 2、TRENDS 與其他系統比較

類別	系統	TRENDS 與各系統比較	
		同	異
基本資料	TBMS	TRENDS 採用 TBMS 建置之基本資料進行後續分析。	1. TBMS 目前所保留之基本資料作為耐震能力與耐洪能力評估之需求尚不足。 2. TRENDS 系統納入規劃設計階段參數，並可自動化分析評估橋梁於耐震與耐洪之安全性，提供防災預警之決策支援。
地震	TELES	由橋梁之降伏加速度(Ay)與破壞	1. TELES 為都市整體災害潛勢分析，故建築物、交通設施皆納入分析範圍。

類別	系統	TRENDS 與各系統比較	
		同	異
災害		加速度(Ac)計算求得各橋梁之通行失敗機率	2.TRENDS 藉由人工智慧推論模式，並加入橋梁鋼筋材料劣化之因素，推論未進行詳細評估(側推分析)橋梁之耐震能力。經與 TELES 驗證比較可提升地震耐震能力推論值之準確性。
	TBMS	以橋梁所在地之震度為通報標準	TRENDS 除了橋梁所在地震度以外，由橋梁之降伏加速度(Ay)與破壞加速度(Ac)計算求得各橋梁之通行失敗機率。
洪水災害	BOBE	接收中央氣象局 QPESUMS 雷達降雨預報資料。	1.BOBE 以橋梁跟上游集水區雨量站之迴歸關係式訂定雨量站門檻值。 2.TRENDS 系統以大甲溪流域為例，從首先中央氣象局接收雷達降雨預報，接著進行集水區演算、地表漫地流演算、河道一維水理演算、水庫演算，推估河道之流量、水位、流速與沖刷深度，然後計算橋梁之耐洪安全係數作為即時及未來 1 小時橋梁預警之依據。分析結果如超過警戒值，則自動啟動預警通報機制，提早通報橋梁管理單位，爭取防災應變之黃金時間，給予用路人生命財產更多的保障。
	TGIS	以 Google 底圖為展示平台。	TGIS 僅為圖資展示之平台，無分析功能，TRENDS 之地震、洪水安全評估分析結果可作為 TGIS 圖資的來源。
道路邊坡	BOBE	根據邊坡歷史崩塌紀錄訂定邊坡強降雨與累積降雨之門檻值。	1. BOBE 依據過去崩塌紀錄擬定門檻值，並在每次豪雨事件後，開會檢討修正門檻值。 2.TRENDS 根據歷史紀錄，分析災害發生時之雨量資料。最後，根據雨量參數分析結果，分別將發生可能性 30% 和 50% 之降雨值訂定為降雨基準值上下限。
維護策略	TBMS	TRENDS 採用 TBMS 建置之 DER&U 巡檢紀錄進行後續分析。	1. TBMS 僅記錄歷史 DER&U 巡檢紀錄未建議何時維護之方案。 2.TRENDS 分別探討橋梁可視(Visible)與不可視(潛勢)(Invisible)危害 2 風險類別，並將橋梁在維護或是斷橋風險下造成經濟損失之用路人成本納入考量，建立橋梁維護風險成本分析模式，並分別提出單橋或群橋維護策略。

五、系統修正訪談

本研究於 105 年 10 月 20 日至公路總局應變中心進行訪談會議，藉由訪談公路管理單位人員，做為系統功能精進與加強之依據(如圖 3)。

會議中依 1.地震破壞潛勢評估、2.颱洪跨河橋梁安全預警、3.橋梁振動頻率檢測、4.道路邊坡災害預警及決策支援、5.橋梁耐震耐洪設計與維護階段防災預警整合、6.橋梁保全評估與養護經費決策支援、7.自動通報機制等主題，簡報系統成果，再針對討論課題，分別進行討論。



圖 3、公路總局應變中心訪談會議

今年度 107 年 6 月 4 日訪談公路總局第二區養護工程處橋梁業務承辦人員，該承辦人員業務為負責橋梁道路維護管理經費編列，亦有工務段服務之經驗，因此訪談可同時了解工務段與工程處之養護經費編列與使用之流程。

訪談內容涵蓋三大層面問題，分別為：分析方法、系統介面、研究成果與實務面之應用。訪談主要結論為目前實務上維護策略常額外考量橋梁長度、跨徑或跨數等橋梁規模等因素，但在目前的研究架構下，並沒有針對較重點橋梁特別考量，而是轄管所有橋梁求得風險成本最小化。因此建議未來研究可考量橋梁風險成本、橋梁長度、跨徑或跨數等多項搜尋目標並建立最佳化維護策略。

六、鋼結構橋梁維護分析模式精進

本計畫發展建立一鋼橋風險評估模式如圖 4，模式中考量之風險因子類別分為可視老化風險(Visible):構件老化與潛勢危害(Invisible):塗裝劣化、洪水與地震，然後根據各風險因子類別確認其風險指標，並進行風險評估。在橋梁管理單位有限維護預算下，搜尋群橋生命週期最佳維護時機與最小成本。

本研究參考相關文獻成果[邱建國等，2014]建立群橋成本維護最佳化模式，在 20 年橋梁壽齡中，各橋梁在不同時機維護，其損壞機率與維護成本不同，群橋維護之時間點組合方案眾多較難以估計，若採傳統試誤法等方式求解，將無法在短時間內求得。因此本研究使用生物共生演算法(SOS)，分別計算不同維護方案之風險影響程度，再以最佳化模式找出群橋生命週期總風險成本最低之維護組合。此方法以保持生物共生時的多樣性及加速收斂的效果，搜尋最佳化結果，使得群橋維護總成本最低，如此橋梁管理單位即可依此規劃長程群橋之維護策略，俾利將有限資源做最有效運用。此階段分成 3 部分做介紹，分別為建立目標函數與限制式、生物共生演算法最佳化搜尋及群橋生命週期維護成本最佳化。流程如圖 5 所示。

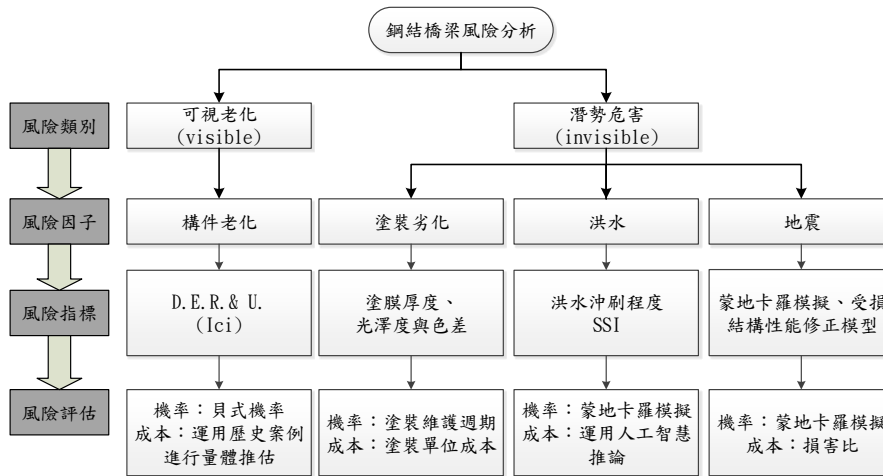


圖 4、鋼橋風險評估架構

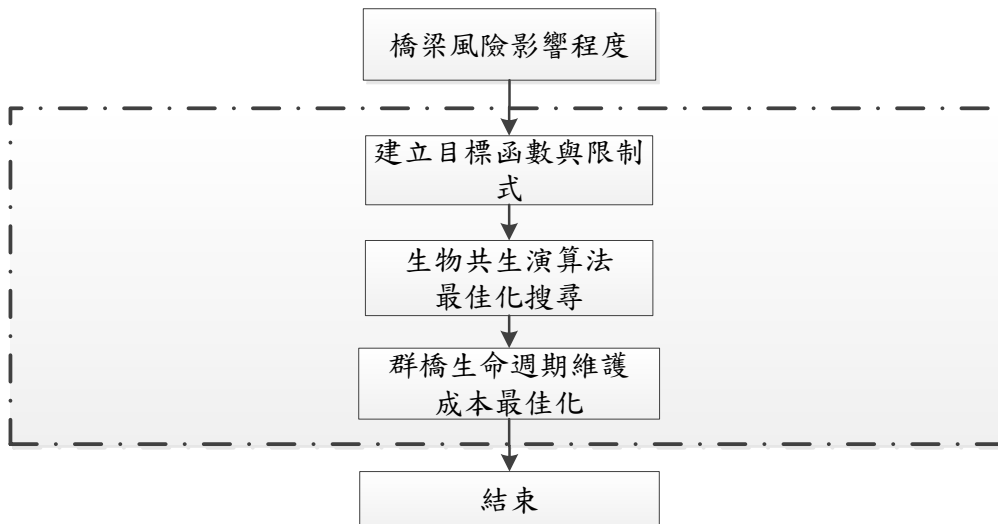


圖 5、群橋維護成本最佳化流程圖

1. 建立目標函數與限制式

將各橋之風險期望成本 $EB(\text{Cost})$ 加總可得到群橋風險期望成本，而群橋維護最佳化之目標方程式，係以各工程處之預算為限制條件，找出群橋生命週期最小的風險期望成本 $E_{GT}(\text{Cost})$ ，如公式(1)。

$$\text{Min}E_{GT}(\text{Cost}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{Bij}(\text{Cost}) \quad (1)$$

式(1)中：

$E_{GT}(\text{COST})$: 群橋風險成本 (Total Risk Cost of Group Bridges)

E_{Bij} : 同一工程處各橋梁 j ，與 i 年內之風險成本總和。

本模式之限制式為橋梁管理單位的維護預算，以第 i 年為例，最佳化需滿足第 i 年之預算限制。在生物共生演算法最佳化搜尋過程中會用隨機組合之方式，來找

出滿足最小群橋風險成本 EGT(Cost)同時又滿足限制式的維護策略。

2. 生物共生演算法最佳化搜尋

現今的啟發式演算法通常是模擬自然界生物的現象，例如蜂群演算法 ABC(Artificial Bee Colony) 模擬蜜蜂成群地覓食特性；遺傳演算法 GA(Genetic Algorithm) 模擬自然進化的過程，粒子群優化演算法 PSO(Particle Swarm Optimization) 模擬動物群聚行為。而生物共生搜尋演算法 SOS 模擬生物體間的交互共生作用做配對，用於搜索生物體間最合適的交互共生作用關係，SOS 演算法主要的特點是可以解決空間維度連續數值的最佳化搜尋。

本研究使用之生物共生演算法 (SOS)，其靈感來自自然生態系統中生物之間的互動模式，SOS 主要使用三種計算策略分別為互利共生、片利共生和寄生，以模擬自然生態的共生模式。另外 SOS 演算法的三個階段在操作上是容易的，只需要用簡單的數學運算法則。此外，相較於同類演算法，SOS 不使用微調的參數，並提高了性能的穩定性，比同類演算法使用較少的控制參數，還能夠解決各種數值最佳化之問題，其在尋優與運算時間表現均優於目前被廣為應用之基因演算法(Genetic Algorithms, GA)與粒子群演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。

生物共生演算法是以其他演算法為研究基礎所發展出的演算法，SOS 可在搜尋空間不斷地迭代候選解，進而求得全域最佳解。在 SOS 演算法中，初始假設數值空間是一個生態系統，在這個生態系統搜尋空間中，會有一組隨機生成的生物群，生物群中的每一個生物體代表一個對應問題的候選解，同時每一個生物體在生態系統中也代表一組目標適存值(Fitness value)，這個目標適存值會反映預期目標的適存程度。如圖 6，先輸入橋梁相關參數，應用 SOS 搜尋，輸出群橋維護策略方案。

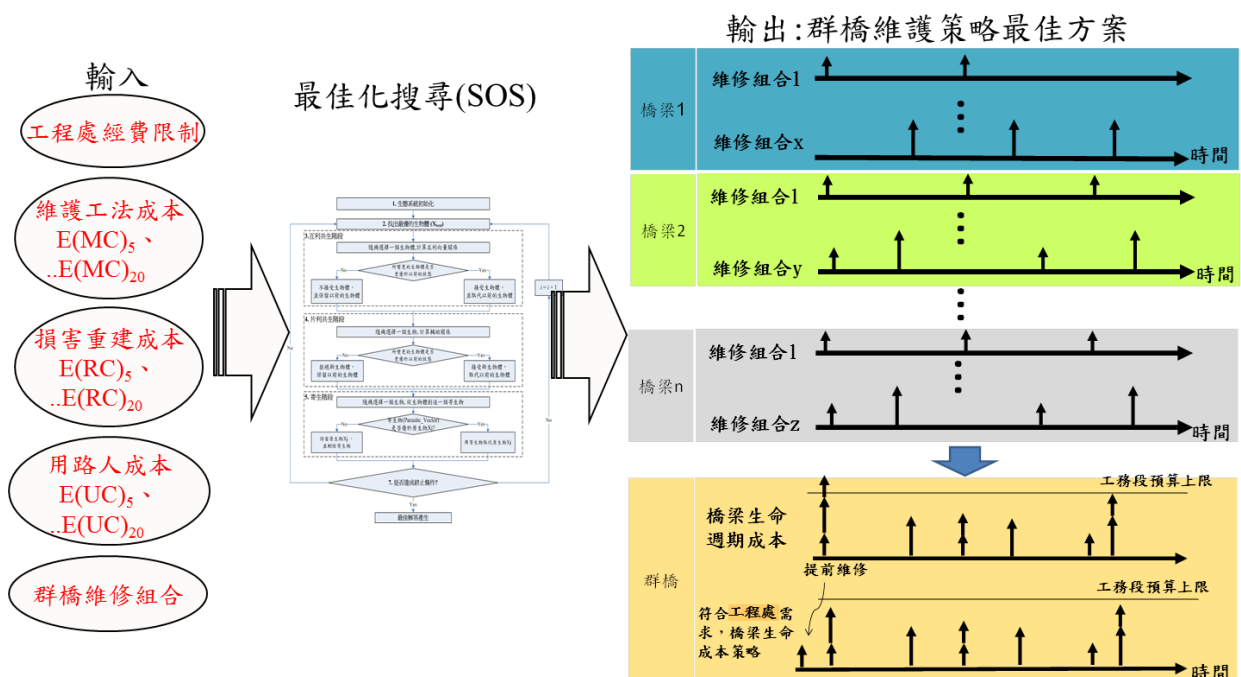


圖 6、群橋最佳化應用 SOS 演算法程序

3. 群橋生命週期維護成本最佳化

本研究導入生命週期成本導向之概念，建置群橋維護策略最佳化模式，如圖 7

所示。由於同一橋梁在不同時間點執行維護下，有不同之效益，即維護方案執行後使設施保持健康或堪用狀態的程度可能會有所差異。因此，根據各橋梁之劣化曲線，求得橋梁殘餘能力，再依照前述之計算成果與求得群橋各橋梁風險，並加總求得生命週期維護風險成本 $EB(\text{Cost})$ ，最後在符合維護預算限制下，找出最小之 $EGT(\text{Cost})$ ，來決定工程處各橋梁因年限、外力影響受損之最佳維護時機。

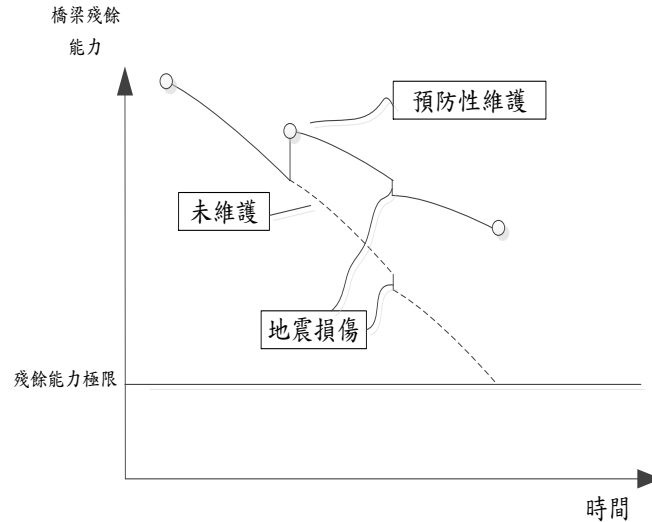


圖 7、橋梁維護策略示意圖

以 A 橋作為範例的橋梁綜合能力指標如表 3，根據本研究所計算出來的橋梁綜合能力指標，可提供橋梁管理單位進行評估，根據當年度的維護經費來決定哪些橋梁需要進行維護動作。

表 3、A 橋之綜合能力指標

橋齡 \ 風險	5	10	15	20	25
構件老化	4,632,586	12,233,132	15,826,761	17,692,469	19,086,368
塗裝劣化	903,190	1,047,045	1,213,812	1,407,141	1,631,262
洪水維護	96,588	663,261	17,367,974	42,237,070	45,815,127
地震維護	4,154,650	11,079,065	23,543,014	36,006,963	45,701,145
洪水重建	546,725	2,051,323	3,223,754	4,741,379	6,414,118
地震重建	373,919	997,116	2,118,871	3,240,627	4,113,103
E[Cost]	10,707,657	28,070,942	63,294,185	105,325,649	122,761,123
橋齡 \ 風險	30	35	40	45	50
構件老化	19,905,112	20,434,039	21,212,880	21,588,485	21,896,689
塗裝劣化	1,891,080	2,192,279	2,541,453	2,946,240	3,415,500
洪水維護	51,572,688	59,464,839	63,219,360	63,991,748	64,063,566
地震維護	55,395,327	56,780,210	56,780,210	56,780,210	56,780,210

洪水重建	8,767,357	11,298,319	13,908,259	15,358,020	17,297,163
地震重建	4,985,579	5,110,219	5,110,219	5,110,219	5,110,219
E[Cost]	142,517,143	155,279,905	162,772,381	165,774,922	168,563,348

七、橋梁整體耐震能力評估模式擬定

本節將以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行上述章節的分析，求得橋梁整體損傷超越機率。

7.1 橋梁整體耐震能力側推分析

此章節跟據前 1 年度所確立之研究流程如圖 8，進行橋梁整體耐震能力測推分析，其中 SERCB 參考文獻[宋裕棋，2017]。

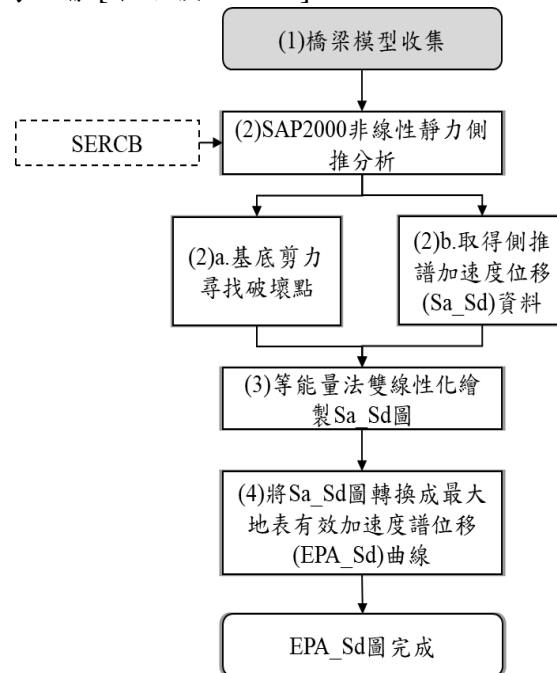


圖 8、側推分析流程圖

7.2 橋梁基本資料

中坑高架橋位於新北市五股區觀音里，採用之設計規範為 84 年版，工址屬臺北盆地微分區一區，並為重要橋梁。本振動單元為連續 3 跨橋梁，上部結構配置一根預力箱型梁，橋面寬 11.5m；下部結構為單柱混凝土橋梁。此橋梁使用之材料強度如表 4 所示，其結構模型如圖 9 所示。

表 4、結構材料強度

項次	混凝土強度 (kgf/cm ²)
橋面板	280
基礎	245
橋台、擋土牆	245

場鑄基樁	280
橋墩	350
無筋混凝土	141
項次	降伏強度(kgf/cm ²)
#10(含)以下	2800
#13(含)以上	4200
項次	降伏強度(kgf/cm ²)
ASTM A572 GR.50	3500

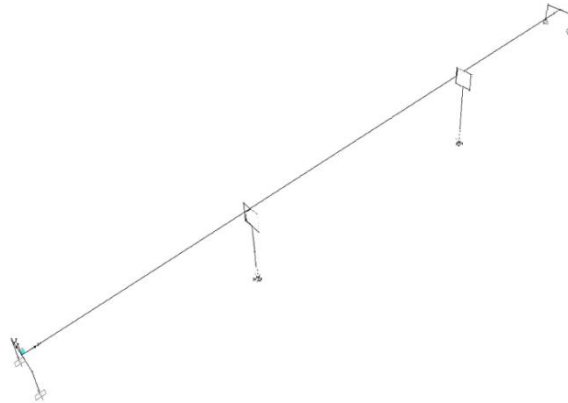


圖 9、結構分析 SAP2000 模型

7.3 橋梁分析結果

計算得到橋梁整體損傷等級超越機率，如圖 10 與圖 11 所示。

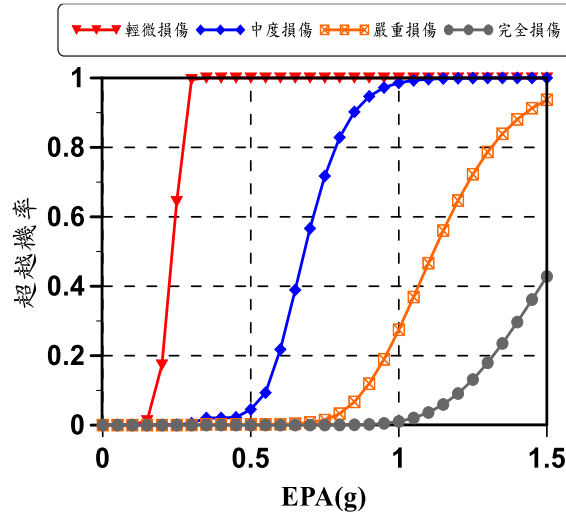


圖 10、行車向

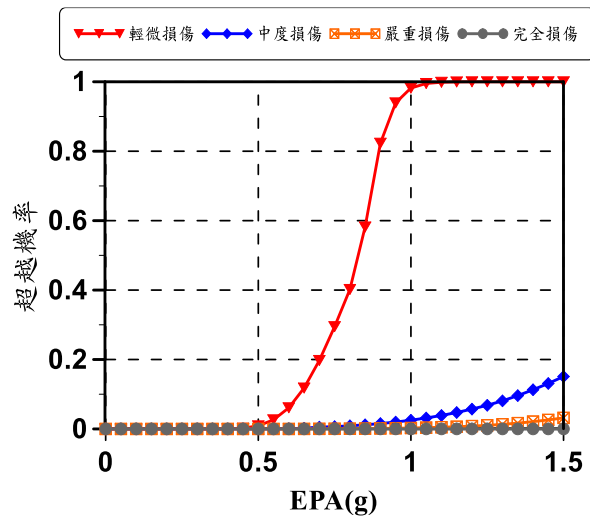


圖 11、橫向

八、橋梁振動檢測案例分析

本研究分兩組試驗，其中第 1 組試驗使用兩台三軸速度計分別置於墩柱與橋面版伸縮縫處；第 2 組試驗使用 10 個單軸速度計，以 2 個一組，分別置於試驗橋跨的起點、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨與終點處，如圖 12 所示。兩組試驗的結果將進行比對，以確認置於伸縮縫處的三軸速度計所取的頻率為橋梁局部或整體的振動訊息。

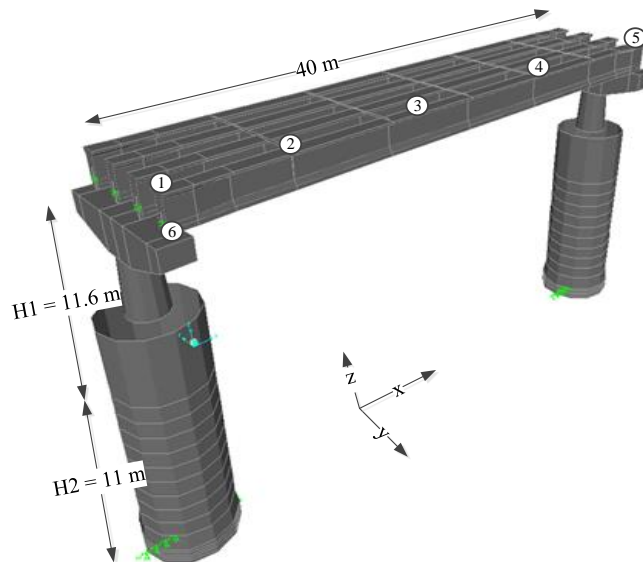


圖 12、速度計配置圖 (No.1(起點)及 No.6(橋墩):三軸、No.1~No.5(終點):單軸)

8.1 現地試驗

本研究於颱風季節前後分別進行 1 次試驗，颱風前的試驗時間為 6 月 19 日晚間至 6 月 20 日清晨(較無車流時段)。根據往年經驗，每年 6、7 月為颱風較為頻繁的季節，因此，本研究另於 10 月 12 日晚間至 13 日清晨進行第 2 次試驗。6 月 19 日晚間至 6 月 20 日清晨試驗的初步分析結果(分為 4 種情形)說明如下。如圖 13 所示，為同一時間不同位置所量測之結果。

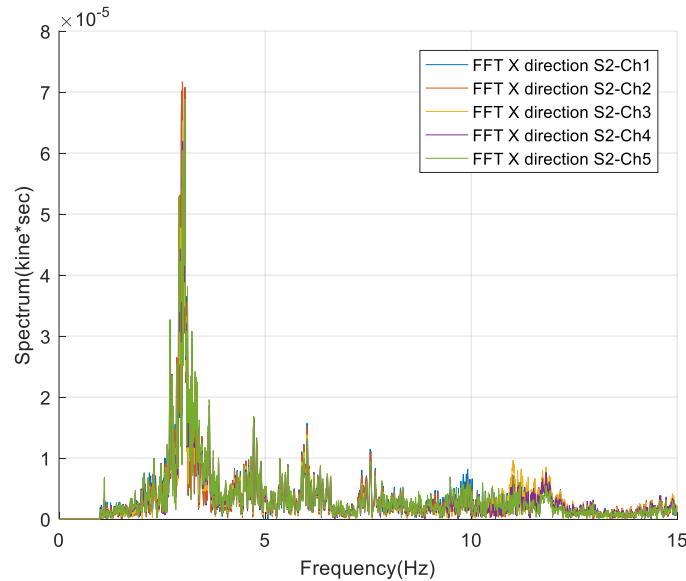


圖 13、起點(Ch1)、1/4 跨(Ch2)、1/2 跨(Ch3)、3/4 跨(Ch4)與終點處(Ch5)之振譜 (pier 14、有行車，車行方向)

8.2 試驗結果分析

表 5~表 8 所示為 6 月 19 日與 10 月 12 日設置於橋面板處 5 次試驗的結果(平行車行方向與垂直車行方向)。除表 5 的第 5 次試驗與表 6 的結果有較大的變異性外，其餘的結果均相當一致。其中，平行車行方向在十次試驗的過程中，所量測到的範圍為 2.72Hz 到 3.06Hz，平均值約為 2.9Hz 左右，且變動幅度不大(最大約 6%)。顯示平行車行方向的第一振態的振動頻率應該可以確認在 2.90Hz 附近。此點另可由表 7 得到佐證。表 7 為設置於伸縮縫處與墩柱處所測量的結果，同樣地，其振動頻率亦均落於 2.90Hz 附近。

不同於平行車行方向有十分穩定的結果，垂直車行方向雖然多數試驗的結果亦十分一致，但似乎另有主頻落在 2.6 與 3.0 左右，導致試驗結果不如預期。

因垂直車行方向的结果不如預期，故於 10 月 12 日的試驗結果分析時加入 Welch 分析法，惟 Welch 分析法基本上與 FFT 相似，無法提供進一步的訊息。

上述垂直於車行方向的試驗結果進一步說明如下。根據橋梁系統與試驗結果可知，當有重車經過橋梁時，重車對平行車行方向的振動影響很大，因此推論此處所見的 3Hz 應為平行車行方向橋梁結構的振動頻率。雖然此時主要係量測垂直車行方向的振動，但除非速度計的擺設位置完全沒有平行方向的分量(這在技術上不容易達成)，否則，垂直方向的量測結果將包含水平方向的內涵，而若此時有重車

經過，將加強此訊號，因此，導致於垂直方向偶而會看到接近 3Hz 的頻率。

表 5、南雲大橋 6/19 於無車、平行車行方向之量測結果(P14、單軸速度計)

Condition	一	二	三	四	五
伸縮縫	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/4 跨處	2.72	2.91	2.94	2.77	3.06
1/2 跨處	2.81	2.72	2.97	2.73	3.01

表 6、南雲大橋 6/19 於無車、垂直車行方向之量測結果(P14、單軸速度計)

Condition	一	二	三	四	五
伸縮縫	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/4 跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.58
1/2 跨處	2.08	2.12	2.10	2.13	2.17

表 7、南雲大橋 10/12 於無車、垂直車行方向之量測結果(P14、三軸速度計)

Condition	一	二	三	四	五
伸縮縫	2.07	3.17	2.88	2.93	2.27
1/4 跨處	2.07	3.16	2.90	2.93	2.30
1/2 跨處	2.08	3.04	2.88	2.93	2.27

表 8、南雲大橋 6/19 於無車、平行車行方向之量測結果(P14、三軸速度計)

Condition	一	二	三	四	五
伸縮縫	2.95	2.95	2.97	2.96	2.96
墩柱	2.75	2.91	2.94	2.77	3.06

九、災害橋梁巡檢路線規劃模式

TRENDS「災害資訊管理模組」中的「橋梁地震破壞潛勢」功能，會在地震災害發生時，藉由資料交換平台擷取中央氣象局地震速報，再結合全臺省縣道橋梁耐震資料庫，分析求得各橋所在位置之地表加速度及其通行失敗機率，然後以各橋耐震能力之 A_y 值，所對應求得之通行失敗機率為門檻值，列出該地震事件中，橋梁通行失敗機率大於門檻值之所有橋梁清單，並按機率大小排序。公路管理單位可利用此通行失敗機率作為排序巡檢優先順序之參考。

TRENDS 雖然在地震發生後，能夠即時分析計算所有橋梁之通行失敗機率，並按順序列出各分析機率超過其門檻值之橋梁，提供橋梁管理單位巡檢優先順序之參考依據。然而實務上，按機率值排定之巡檢順序橋梁，往往並非在同一路網或路線，所以不能夠直接依此分析結果作跳點式巡檢；且特別巡檢路線規劃時，因時間之緊迫性，旅運時間為一重要考量因素；而且橋梁重要度涉及災區可及性、生命安全、經濟衝擊、維生管線、緊急應變系統(位於救災系統或緊急醫療系統中)，

以及歷史價值亦為在規劃時，須納入之影響因素，歸納上述，如何同時考量橋梁通行失敗機率、旅運時間及橋梁重要度 3 因子，進行災時特別巡檢之多目標巡檢路網規劃，為公路防救災規劃之重要研究課題。

9.1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子

本研究首先找出規劃災後橋梁巡檢路線時所需考量之因子，根據過去公路總局委託計畫報告與文獻回顧，初步歸納為：需要巡檢橋梁之數量、橋梁重要性排序(橋梁重要等級)、橋梁的損壞機率(通行失敗機率)、車輛旅行時間、區域內可用之檢測人員(巡檢組數)數量、檢測人員檢測時間之限制等。

其中橋梁重要性排序部分將參考公路總局委託國立中央大學計畫「橋梁重要程度等級之建立」報告[蔣偉寧等，2004]第五章中，橋梁重要等級評定方法之定義，依據其原則進行重要等級評定，如表 9 所示。

表 9、橋梁重要因素表[蔣偉寧等，2004]

重要因素	關鍵因素	分數等級	權重
生命安全 (0.34)	橋上交通量(U _{TC}) (0.65)	$0 \leq 1 - \frac{(ADT_{Carry} - 28000)^2}{784 \times 10^6} \leq 1$	0.22
	橋下交通量(U _{TU}) (0.13)	$0 \leq 1 - \frac{(ADT_{under} - 28000)^2}{784 \times 10^6} \leq 1$ 跨越鐵路(1.0)；其它為(0.0)	0.04
	橋長(U _L) (0.22)	$0 \leq \frac{L}{200} \leq 1$	0.08
經濟衝擊 (0.38)	橋上交通量(U _{TC}) (0.06)	$0 \leq 1 - \frac{(ADT - 28000)^2}{784 \times 10^6} \leq 1$	0.02
	道路等級(U _{RT}) (0.32)	國道 (1.0) 省道 (0.75) 縣道 (0.5) 鄉鎮道路 (0.25) 產業道路 (0)	0.12
	改道長度(U _{DL}) (0.35)	15 公里以上 (1.0) 5 公里以上 15 公里以下 (0.5) 5 公里以下 (0.2)	0.13
	橋長(U _L) (0.27)	$0 \leq \frac{L}{200} \leq 1$	0.11
維生管線 (0.04)	維生管線(U _{UT}) (1.0)	無 (0) 橋梁上附掛一種維生管線 (0.5) 橋梁上附掛二種維生管線 (1.0)	0.04
緊急應變系統 (0.16)	緊急應變系統(U _{ER}) (1.0)	無(0) 位於救災系統或緊急醫療系統中 (1.0)	0.16
歷史價值 (0.08)	工程技術唯一性(U _U) (0.5)	橋梁工程技術具唯一性 (1.0) 橋梁工程技術不具唯一性 (0)	0.04
	古蹟(U _H) (0.5)	此橋梁為古蹟 (1.0) 此橋梁為非古蹟 (0)	0.04

9.2 災後橋梁巡檢路線規劃模式

公路總局 5 個養護工程處 34 個工務段約三千座橋梁，於地震發生後規劃橋梁巡檢路線，進行緊急評估，並依橋梁之受損狀況決定正常管制通行或是封橋，以利提升災後橋梁搶救之效率，降低二次災害的發生。本研究建立「多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式」，流程圖如圖 14 所示，執行步驟說明如下：

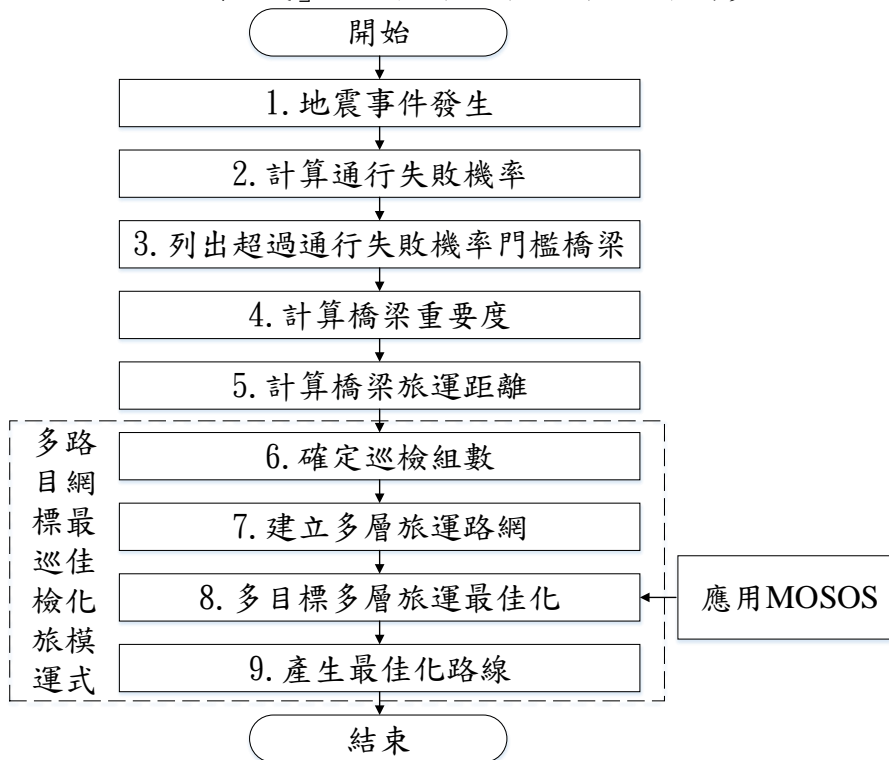


圖 14、多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃流程圖

當地震災害發生時，TRENDS 系統中資料交換平台會自動擷取地震速報資訊 (取自中央氣象局)。根據全臺灣各地地表加速度，以 ArcGIS Server 的 Geoprocess Service 計算各橋梁所在地之最大地表加速度(PGA)，再依據各橋梁之降伏強度(Ay)值與破壞加速度(Ac)，計算橋梁通行失敗機率。

根據前一步驟所計算之各橋梁通行失敗機率，與各橋 Ay 值對應求得之通行失敗機率設定為門檻值比較，若此地震事件該橋之通行失敗機率超過此門檻值，即為須巡查、進行緊急評估之橋梁。(如圖 15)

多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網								
工程處	二區			工務段	信義			
考量因子	<input checked="" type="checkbox"/> 旅運時間 <input checked="" type="checkbox"/> 通行失敗機率 <input checked="" type="checkbox"/> 橋梁重要度							
巡檢組數	3			巡檢橋數	43			
列出路線規劃方案								
橋名	所在鄉鎮	路線	橋頭里程(K)	橋頭里程(M)	橋尾里程(K)	橋尾里程(M)	參考地標	地圖
風坑橋	水里	臺16線	13	373	13	393	無	橋梁位置
天水橋	水里	臺16線	13	833	13	844	無	橋梁位置
清山橋	水里	臺16線	14	46	14	57	無	橋梁位置
新城橋-台16線	水里	臺16線	14	293	14	314	無	橋梁位置
中山橋	水里	臺16線	15	361	15	445	玉山國家公園管理處	橋梁位置

圖 15、該工務段需要巡查之橋梁清單(示意)

應用多目標生物共生演算法(MOSOS)概念，建立多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃模式。以旅運時間與通行失敗機率及橋梁重要度進行多目標排序，其結果如圖 16 所示。

多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網							
工程處	二區			工務段	信義		
考量因子	<input checked="" type="checkbox"/> 旅運時間 <input checked="" type="checkbox"/> 通行失敗機率 <input checked="" type="checkbox"/> 橋梁重要度						
巡檢組數	3			巡檢橋數	43		
重新搜尋							
方案	第1組	第2組	第3組	旅運時間	通行失敗機率	橋梁重要度	
1	工務段→中山橋→望美橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→清山橋→大勇橋→郡安橋→新郡橋→無名橋 【路線規劃】	工務段→風坑橋→新興橋→郡平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→新開橋→松柏橋→頂平二號橋→豐丘橋→郡坑橋→沙里凍橋→郡坑溪橋→愛玉橋→圳頭橋→頂平一號橋→新山橋→神和橋→玉泉橋→上安橋→龍神橋 【路線規劃】	工務段→九層橋→玉平橋→望鄉橋→社子橋→天水橋→新城橋-台16線→上和隆橋→庫坑橋→郡坑口橋→松泉橋→陳有蘭溪橋→民和橋→草坪橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551	
2	工務段→郡坑溪橋→望美橋→庫坑橋→豐丘橋→玉平橋→清山橋→大勇橋→愛玉橋→天水橋 【路線規劃】	工務段→松泉橋→社子橋→頂平一號橋→郡平橋→頂平四號橋→信義橋-台21線→郡坑口橋→上和隆橋→九層橋→頂平二號橋→松柏橋→中山橋→郡安橋→草坪橋→新郡橋→陳有蘭溪橋→沙里凍橋→玉泉橋→上安橋 【路線規劃】	工務段→新山橋→望鄉橋→民和橋→龍神橋→神和橋→頂平三號橋→筆石橋→民和橋→新城橋-台16線→圳頭橋→風坑橋→無名橋→新興橋→新開橋 【路線規劃】	1512	12519	82.415594107551	
3	工務段→松柏橋→新開橋→清山橋→豐丘橋→民和橋→郡安橋→風坑橋→頂平二號橋→九層橋→無名橋→庫坑橋 【路線規劃】	工務段→陳有蘭溪橋→玉泉橋→上和隆橋→新山橋→圳頭橋→郡坑溪橋→郡平橋→新城橋-台16線→玉平橋→大勇橋→中山橋→郡坑口橋→信義橋-台21線→頂平一號橋→上安橋→沙里凍橋→郡坑橋 【路線規劃】	工務段→社子橋→龍神橋→愛玉橋→頂平三號橋→望美橋→筆石橋→天水橋→民和橋→頂平四號橋→望鄉橋→新郡橋→松泉橋→草坪橋→新興橋→神和橋 【路線規劃】	1752	12025	87.1086053369388	
4	工務段→玉泉橋→社子橋→望鄉橋→草坪橋→松泉橋→民和橋→信義橋-台21線→新城橋-台16線→豐丘橋 【路線規劃】	工務段→郡平橋→九層橋→大勇橋→沙里凍橋→上和隆橋→新山橋→望美橋→中山橋→庫坑橋→筆石橋→龍神橋→郡坑溪橋→陳有蘭溪橋→郡安橋→郡坑口橋→風坑橋→松柏橋→郡坑橋→無名橋	工務段→上安橋→玉平橋→愛玉橋→頂平三號橋→頂平二號橋→民和橋→神和橋→圳頭橋→天水橋→新郡橋→新開橋→新興橋→頂平四號橋→清山橋→頂平一號橋	1984	11986	88.0686103303062	

圖 16、以旅行時間與通行失敗機率及重要度多目標規畫結果

以方案一為例，第一組巡查小組從工務段出發後分別巡查中山橋、望美橋、頂平三號橋、筆石橋、民和橋、清山橋、大勇橋、郡安橋、新郡橋、無名橋等，路線如圖 17 所示。

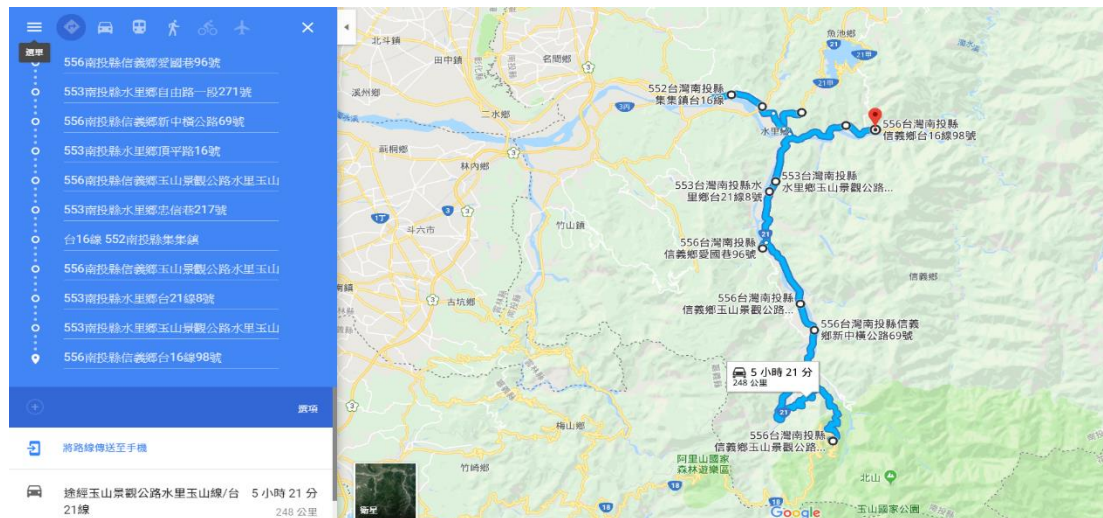


圖 17、第一組路線規畫結果

十、結論

本研究針對 TRENDS 系統中不同領域進行模組更新與功能提升，包括：1.鋼結構橋梁維護策略：將鋼結構橋梁風險分析及維護策略單橋分析模式擴展至群橋風險管理及維護策略，與前期「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研發」鋼筋混凝土群橋風險管理及維護策略成果結合，並建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)風險分析資料庫及風險評估與查詢功能模組。2.整體橋梁耐震能力評估：進行 1 座整體橋梁耐震能力側推案例，並持續蒐集整體橋梁耐震能力評估案例並納入系統資料庫。3.橋梁振動頻率方面，選取 1 座橋梁安裝 2 組以上速度計同時進行橋梁多點頻率量測，藉以了解振動頻率雜訊來源與變動原因。4.橋梁巡檢路徑規劃部分：精進災後橋梁巡檢路線規劃模式，與建置巡檢路徑規劃模組。綜合上述做以下結論：

- 1.在鋼結構橋梁風險評估方面：根據前一年度所確認之評估機制，並建置公路總局轄管橋梁分析資料庫。最後同時納入鋼筋混凝土橋梁與鋼橋進行群橋風險分析評估，最後建置公路總局轄管橋梁(含鋼筋混凝土橋及鋼橋)維護策略最佳化模式，並提供可查詢之功能模組，提升使用者查詢便利性。
2. 整體橋梁耐震能力評估部分：根據目前結構分析之趨勢，新增橋梁整體耐震能力評估方式，加入上部結構耐震能力評估指標。本研究以公路總局所轄管之橋梁-中坑高架橋為例進行橋梁整體耐震能力分析，並分別進行耐震能力側推分析，依據整體耐震能力分析結果，求得橋梁整體損傷超越機率。
3. 橋梁振動檢測分析部分：本研究至南雲大橋進行雨季前 107 年 6 月 19 日與雨季後 107 年 10 月 12 日振動頻率量測，其結論如下：(1)兩次量測期間，橋梁的振動特性沒有明顯改變、(2)FFT 和 Welch 方法都產生相同的橋頻率內涵之估計、(3)在沒有外力的情況下進行環境振動測試為最佳的狀況。因為當有汽車時，車行方向的振動將會影響垂直車行方向的量測結果。因本試驗為爭取時間(試驗時，不易有無車狀態)，當車輛剛駛離觀測的振動單元時，即開始測量，但經觀察，剛離開時在車行方向的振動仍會影響垂直車行方向的量測結果。

4. 建置橋梁災後巡檢路線規劃模組:可於線上進行巡檢路徑之規劃，在同時考量巡檢路徑長度、橋梁損壞機率與橋梁重要度的不同條件，系統可建議合適的巡檢路線，降低巡檢時繞路之可能性。

參考文獻

1. 邱建國、鄭明淵、吳育偉等，「橋梁殘餘壽命與保全評估決策模式之研發(4/4)」，成果報告，交通部運輸研究所，2014。
2. 宋裕棋，SERCB 軟體介紹，<http://sercb.dyndns.org/SERCBWeb/>，2017。
3. 蔣偉寧、顏上堯、周建捷、姚乃嘉、許文科、洪東謀，交通部公路總局，橋梁重要程度等級之建立，2004。