

公路早期防救災決策支援系統及鋼橋管理 模組維護更新

鄭明淵 國立臺灣科技大學營建工程系特聘教授

吳育偉 國立臺灣科技大學營建工程系博士後研究員

邱建國 國立臺灣科技大學營建工程系教授

廖國偉 國立臺灣大學生物環境系統工程學系副教授

林雅雯 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

臺灣橋梁因天然環境因素，遭受洪水與地震等災害而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，本所於 94、95 年委託研究計畫「交通工程防災預警系統建立之研究」，並逐年擴充建置臺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，本研究針對以下不同領

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)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟。在施政上，本研究結果可提供交通部、橋梁管理單位管理橋梁時作為橋梁維護與補強之參考。在實務上，可在地震、洪水來臨時即時篩選危險橋梁，並進行自動通報，降低用路人之風險。

一、前言

由於臺灣多山多河的地理特性，使得橋梁成為連結陸上交通的重要設施。有鑑於台灣天然災害頻傳，如地震災害、水災及土石流等等；災害之來臨常帶來嚴重的損失，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，本所於 94、95 年著手進行交通工程防災預警系統建

立之相關研究，並逐年擴充建置臺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，本研究擬針對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。其中新增與更新項目包括：

1.1 初擬鋼結構橋梁維護分析模式架構

臺灣屬於多山多河之海島地形，更需要多且性能良好之橋梁建設以建構完整之路網系統。隨著南北高速公路、東西向快速道路及臺灣高速鐵路之蓬勃發展，交通路網脈絡交錯頻繁，為減少道路對環境之分割與衝擊，高架方式與大跨徑之構築是現在橋梁所必須考慮的課題。鋼結構橋梁有著高強度、高韌性、工廠化生產、品質控管容易、工期短、回收價值高等優點，為長跨徑橋梁優先選擇方案。然而鋼結構橋梁仍有鏽蝕與強度衰減之維護問題，因此如何在生命週期成本最小化之需求下，求得鋼橋之維修時機與方法，成為一迫切研究課題。

1.2 橋梁整體耐震能力評估模式擬定

如果橋梁耐震能力不足，地震發生時可能造成橋梁損傷，因此須對橋梁進行耐震評估，國內現行研究以橋梁下部結構-橋柱性能的耐震能力為主，較少同時考量橋梁整體結構，亦未將上部結構資料納入分析。然而上部結構耐震能力不足時，可能造成落橋等災害，影響用路人通行安全。因此，目前現行橋梁管理單位所採用之評估方法，尚無法完整

反應橋梁整體現況。

1.3 橋梁振動檢測案例分析

本研究已累積一定數量之橋梁振動頻率檢測紀錄，但在統計檢定之樣本數要求上，需提升檢測紀錄樣本數，以驗證於伸縮縫附近橋面板上量測災前與災後頻率比值可取代於墩帽上量測結果。

1.4 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟

目前橋梁在地震後雖然可以依據損壞機率排出巡檢優先順序，但是在實務巡檢上，直接依據橋梁損壞機率大小排序將面臨跳點方式巡檢之問題，實際執行上可能窒礙難行，因此如何在不同路段上考量各橋梁之損壞機率、橋梁重要性權重、巡檢路線繞路長度即為一個多目標最佳化問題。

1.5 與公路總局既有系統介接

目前系統已開發不同災害下之分析模式，如何與公路總局現有防災系統介接，為重要課題，因此以公路總局所開放介接之格式為前提，將系統目前成果介接至公路總局系統中，提升系統使用性。

二、研究目的

根據前述之動機，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)初擬鋼

結構橋梁維護分析模式之架構、(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟。

三、文獻回顧

本研究針對國內外防災預警系統進行文獻回顧。

3.1 國內預警系統之開發實例

本研究整理國內外相關防災預警研究，預警系統通常藉由地理資訊系統對空間分佈及屬性資料的展現，可讓決策者更能有效率地制定最佳的空間資訊政策。一方面可降低災害對人類的衝擊與損失，另一方面可有效達成災害預防與災後重建的目的，並提高分析的便利性與準確度。目前國內相關研究成果如下表 1 所示。

表 1、國內開發之預警系統

No	名稱	技術與應用
1	國土資訊系統	GIS 整體規劃、示範工作、空間資料處理、應用程式、GIS 工具發展、標準化及訓練專業人才
2	颱風災害應變管理決策支援系統	網路地理資訊系統為展示平臺，並結合氣象、坡地、洪水災害模式及即時環境監測資料。
3	臺北市防災資訊網暨防災救災決策支援系統	提供民眾掌握，最即時颱風洪淹水及坡地等警戒資訊及相關災害潛勢分析資料
4	公路防救災資訊系統(BOBE)	結合衛星定位儀、攝影工具及 3G 之資訊傳輸方式，將公路災害之現場影像與空間資訊傳遞至相關單位
5	系集降雨預報應用於洪水預報之研究	在水患發生前，透過降雨推估和逕流、洪水演算，有效操作水庫閘門蓄減洪峰，降低洪水所造成傷亡
6	P-alert	利用偵測 P 波並在 3 秒內決定是否災害性地震來襲，並在具破壞力之 S 波到達前發出警報訊息

7	TELES	結合地震與地震工程、社會與經濟等各領域的知識，提供各級政府有關地震災害損失評估工具
8	經濟部水利署防災資訊服務網	利用整合自動化電話語音調查系統與 GIS 圖層功能，以圖示化方式快速調查彙整防汛志工與防汛夥伴回報之災區訊息，提供快速有效的淹水資訊收集
9	臺北市防災資訊網	臺北市防災資訊網包括:防災宣導、氣象地震資料、疏散避難資訊、組織及應變中心與防災人員專區等功能。

3.2 國外預警系統之開發實例

先進國家都已經投入相當多的人力及物力進行防災預警系統研究及發展，但各國地理環境的不同所面對的災害亦不相同，因此依不同的災害發展出不同的預警系統來減低災害所造成的損失。如下表 2 所示，列出了美國、歐洲、荷蘭及日本所研發的預警系統名稱及系統的開發團隊，並予以分類。

表 2、國外開發之預警系統

No	系統名稱	開發團隊
1	Integrated Decision Support System (IDSS)	太平洋災害應變中心(Pacific Disaster Center)
2	The European Flood Forecasting System (EFFS)	歐洲自然水部門(European national water services)
3	Delft Hydraulics' Flood Early Warning System (Delft-FEWS)	戴伏特水利研究所(Delft Hydraulics)
4	Earthquake Early Warning(EEW)	沖電氣工業株式會社(Miyagi Oki Electric Co.)

四、TRENDS 系統架構

有鑑於臺灣天然災害頻傳，本研究計畫導入資訊科技改善既有防救災機制，並徹底檢討現有防災體系，提升災情通報效率，減少災情擴大。本研究於 94 年首度導入智慧代理人概念開發資訊交換平臺，94、95 年交通部運輸研究所委託研究計畫「交通工程防災預警系統建立之研究」[鄭明淵、陳生金、呂守陞等，2005]所開發之「災害預警資料交換機」申請專利，並技術移轉運輸研究所港灣技術研究中心，作為「公路防救災決策支援系統」[鄭明淵、吳育偉、張于漢等，2010]與「跨河橋梁安全預警系統」[鄭明淵、吳育偉、林三賢等，2013]二計畫之

核心，提供資料交換平臺，整合災害上、中、下游資訊，並整合歷年成果建置『臺灣公路早期防救災決策支援系統 (Taiwan Road Early Nature Disaster Prevention System, TRENDS)』。以下針對 TRENDS 系統之系統架構與模組功能進行分析，以釐清系統模組功能資料更新、提升精確度與驗證之可行性。

TRENDS 架構分為資料交換平臺、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)。

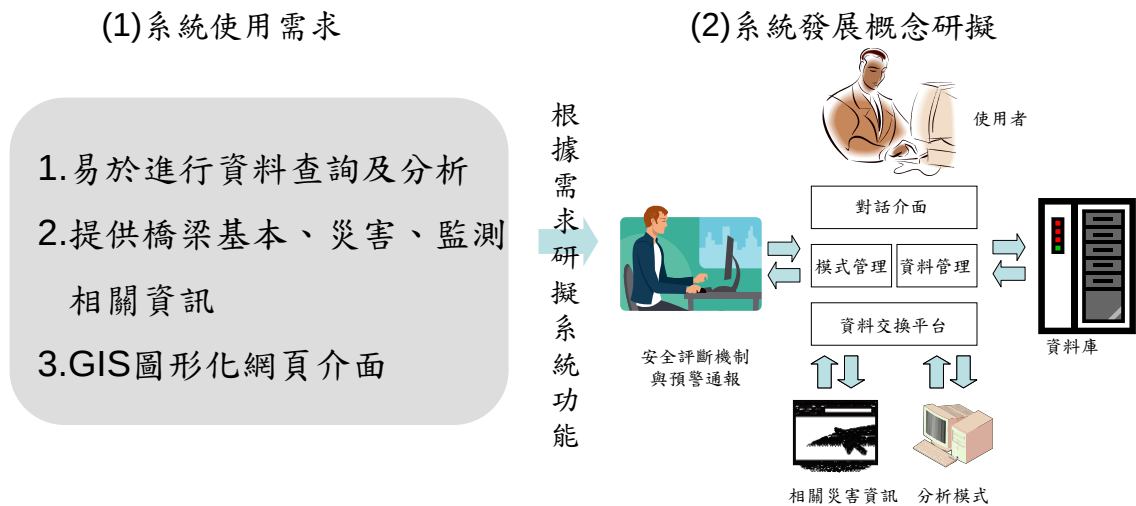


圖1 TRENDS系統概念

1. 資料交換平臺

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」，建置資料交換平臺，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

最後，本研究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，應用災害預警

資料交換機即時蒐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。

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

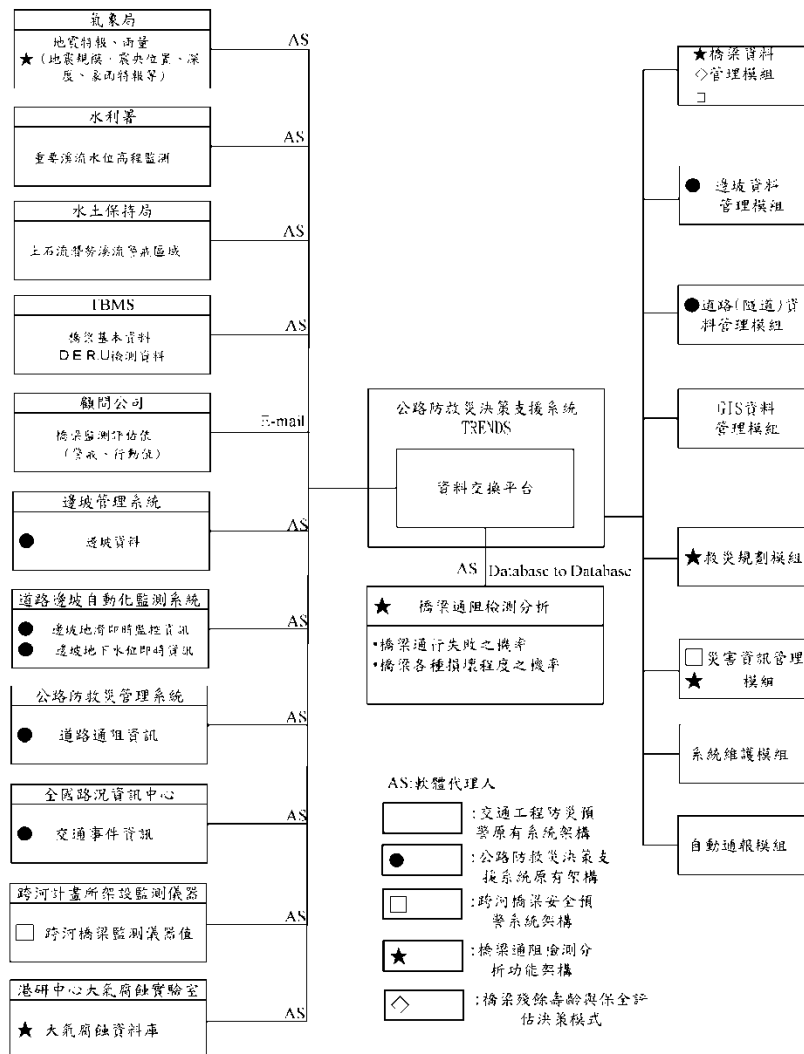


圖2 TRENDS系統模組

圖 2 中圓形、方形、星形與菱形記號分別代表 TRENDS 整合不同計畫成果，各模式之說明如下：

(1) 橋梁資料管理

橋梁資料管理部分主要提供使用者對橋梁基本資料進行管理維護的功能，以及橋梁破壞模式、橋梁補強技術、評估表單進行管理維護的功能。

(2) 邊坡資料管理

邊坡資料管理部分主要提供使用者對邊坡基本資料、目視檢查表、巡檢表單、整治工法、監測儀器、災損資料進行管理維護的功能。

(3) 道路（隧道）資料管理

道路（隧道）基本資料管理部分主要提供使用者對於道路工程資料進行管理維護的功能。

(4) GIS 圖層資料管理

運用 ArcGIS Server 建構線上地理資訊系統，以地理圖層方式呈現使用者所查詢之橋梁位置、狀況異常橋

梁、災害資訊、邊坡災損等資訊。

(5) 救災規劃

此模式運用各交通工程在不同自然環境與天然災害下可能發生破壞之潛勢及可能造成災損與風險值之計算結果，藉以搜尋替代道路最適行車路線之規劃，進而可應用於救災資源調派之功能。

(6) 災害資訊管理

提供使用者對資料交換平臺交換所得之災害資料進行查詢的功能，包含橋梁地震潛勢、跨河橋梁安全預警等。

(7) 系統維護

本模式之建立在於提供系統管理者對使用者之權限進行管控。

(8) 自動通報

此模式提供自動化的通報機制，藉由 E-mail 及手機簡訊給該橋梁或邊坡之管理單位人員，通知其儘速進行處理或調查。

五、初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構

橋梁是臺灣重要的交通工程設施之一，因臺灣在地形上擁有許多高山以及河川等特殊地貌，所以有時在現場施工時，在現有技術的考量下，採用了施工快速且跨度較長的鋼結構橋梁來進行施作。在自然氣候方面，臺灣經常發生颱風以及豪雨等災害，在大雨以及強風的侵襲，使橋梁的各個構件折減了原本能使用的期限；在雨勢加劇的同時，導致河川發生溪水暴漲，在急遽水流的衝擊

下，使橋梁不斷的受沖刷而損害。在地理位置方面，因為臺灣位處地震帶上，導致臺灣發生地震的頻率頻繁，地震發生時，對橋梁結構所造成的影響也是不容忽視；另一方面，臺灣因為四面環海的關係，環境中充斥著讓鋼材腐蝕劣化的因子，對於鋼結構的橋梁，表面的油漆塗膜維護更顯重要。因此如何在合適的時機進行鋼結構橋梁的維護補強工作，以提升鋼結構橋梁的使用安全及使用年

限是重要的課題。

國內鋼結構橋梁大部分都經過了一段使用時間，在橋齡持續增加的同時，也代表著橋梁因歲月所累積的損傷日趨嚴重。透過檢測人員定期對橋梁進行例行性巡檢，以評估橋梁的外部損傷，讓管理單位能在鋼結構橋梁的生命週期中，在適當地時機進行維護補強的作業，以盡早修復損傷嚴重的橋梁，來防止後續風險成本的增加，避免影響到用路人的人身安全。鋼結構橋梁於平時的定期檢測中，主要依據交通部所頒布的公路養護規定來進行橋梁檢測作業，因為檢測方法採取 D.E.R.&U.的方式進行，但是因為 D.E.R.&U.是以檢測人員採取目視檢測，所以僅能觀看到橋梁外部的損傷，檢測人員不容易診斷出因地震、洪水、塗裝劣化以及構件老化等因素所造成的鋼橋內部損傷。

由於橋梁管理單位在每一年編列橋梁維護預算時，所編列的維護經費有限，所以並無法將所有受損的橋梁皆進行相關的維護補強，因此橋梁管理單位需要

考量每座橋梁的維護時機與其維護成本，來求得橋梁在生命週期維護總風險成本最低且有效的維護經費。

5.1 建置鋼結構橋梁風險評估模式

過去案例大多以現有鋼筋混凝土橋之維護紀錄並參考專家建議，以決定鋼橋各元件或構件之劣化速率與維護週期，於生命週期成本評估與維護決策建議時會有不合理現象。為建立合適鋼橋之生命週期維護管理策略，除須重新檢視既有維護資訊是否足夠用於劣化預測外，須進行鋼橋專用之塗裝或塗膜系統劣化性能與維護策略研究，此外，鋼材因會塗裝或塗膜系統劣化而腐蝕，然而其結構性能之評估則尚未被重視與研究；因此，本研究將以塗裝或塗膜系統劣化評估建立塗裝系統更新週期，以建立適用鋼橋之生命週期維護管理系統。並參考運研所港研中心委託計畫案「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究」[邱建國、鄭明淵、吳育偉等，2014]之風險評估架構(圖 3)，分別以可視危害(Visible)與潛勢危害(Invisible)二部份進行評估。

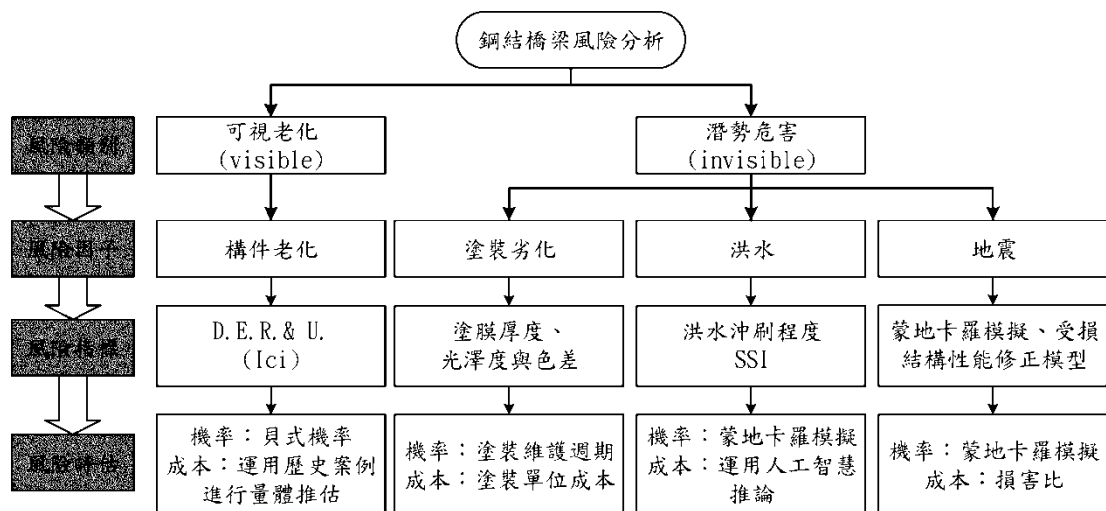


圖3 鋼橋風險評估架構

本研究建立一鋼橋風險評估模式，模式中考量之風險因子類別分為可視老化風險 (Visible) 及潛勢危害風險 (Invisible)，可視老化風險包括構件老化風險，潛勢危害風險包括塗裝劣化、洪

水與地震的危害風險，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。本研究主要包含 3 個步驟。以下按照研究步驟依序論述，如圖 4 所示。

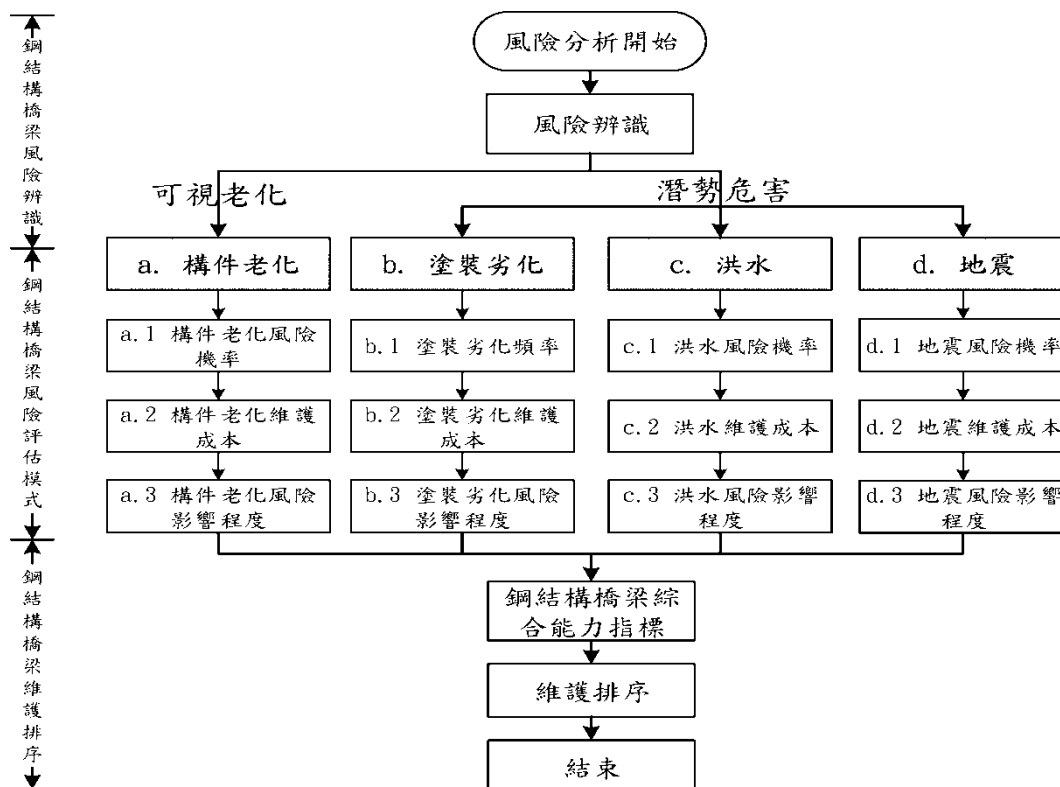


圖4 鋼橋風險評估模式流程

步驟一：鋼橋風險辨識：

本階段首先針對鋼構橋梁進行風險辨識，篩選風險因子，其包括元件老化、塗裝劣化、洪水、地震等，發展鋼橋風險辨識模式，模式中求得之橋梁維護風險期望值(風險成本)定義為鋼橋綜合能力指標，並按此一指標，作為求解維護策略之依據。

步驟二：鋼橋風險評估模式：

本階段將評估各風險因子之維護發生機率。元件老化與洪水部分，將依據不

同橋梁類型，蒐集 TBMS 歷史檢測紀錄，迴歸找出橋梁整體狀況指標 CI 及沖刷穩定指標 SSI 下降趨勢，再應用貝氏更新、蒙地卡羅模擬因元件老化、洪水沖刷造成橋梁需維護或重建之機率。地震則是以地震潛勢機率模型計算求得各橋梁所在地之最大地表加速度 PGA。再考量橋梁現有耐震強度(降伏 加速度 A_y , 崩塌加速度 A_c)，評估橋梁地震損失進而求得橋梁地震損傷指標，並以蒙地卡羅模擬找出橋梁地震損傷需維護及重建之機率。

將橋梁檢測歷史紀錄與維護補強案例庫連結，可建置不同檢測結果(CI 及 SSI)對應補強成本歷史案例庫，然後應用人工智慧推論模式，找出案例資料中輸入值(CI 及 SSI)與輸出值維護成本之映射關係，再依據迴歸橋梁檢測資料所得之橋梁損壞下降趨勢，求得不同年限下橋梁整體狀況指標(CI)與沖刷穩定指標(SSI)值，作為前述人工智慧AI輸入值，以推論求得可能維護成本。地震部分參考阪神地震文獻建議使用不同損傷超越機率所對應之風險成本計算求得。

步驟三：鋼橋維護策略：

使用生物共生演算法最佳化搜尋分別計算不同維護方案之風險影響程度，找出符合預算限制下，最低生命週期成本 ES(Cost)之維護時機組合。

如圖 5 中，A 橋在 50 年其維護方案有多種維護組合，例如維護策略 1 為橋梁於 10 年與 30 年各進行一次的維護，使橋梁各構件狀況指標 ICI 值能維持在門檻之上。本研究希望透過最佳化搜尋，求解最低總維護成本之鋼結構橋梁構件維護組合。

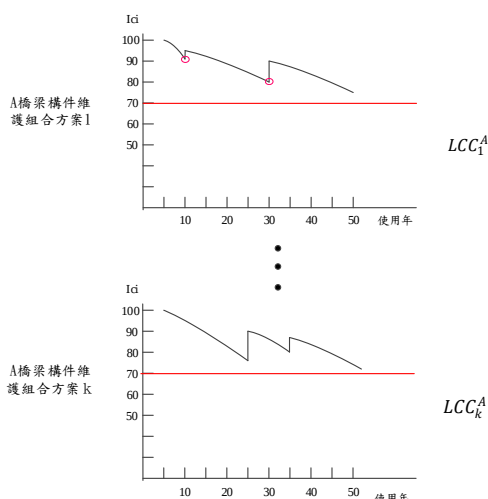


圖5 鋼橋在不同維護門檻維護策略

在圖 6 中，當維護門檻設定為 90 分時，維護間隔年為 5 年為單位進行最佳化，經最佳化搜尋成果，該座鋼結構橋梁的引道路堤分別需於橋齡 5 年、10 年、15 年、20 年及 50 年時進行維護。

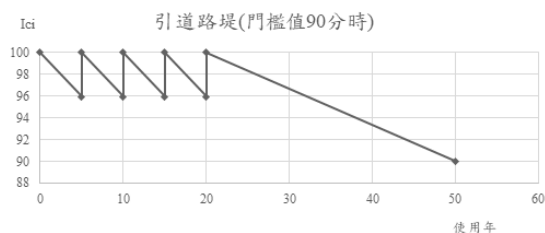


圖6 維護門檻值訂為90

而該橋經過最佳化搜尋後，如圖 7 所示，各門檻值(分數訂為 85~90)下的總風險成本依序為 149,544,846 元、154,008,181 元、155,757,564 元、141,309,348 元、141,499,679 元及 141,605,948 元。橋梁管理單位可根據維護經費預算與參考各門檻維護方案下之風險成本，選擇適當的維護方案。

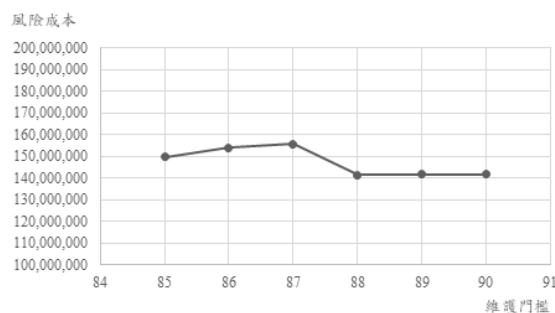


圖7 鋼橋在不同維護門檻值下之風險成本

六、橋梁整體耐震能力評估模式擬定

橋梁整體耐震能力評估與案例建置分為五個大流程，包括橋梁整體耐震能力側推分析、橋梁損傷評估、橋梁整體損傷評估案例建置、橋梁整體耐震能力影響因子確認及案例資料庫建立。

6.1 橋梁整體耐震能力側推分析

本階段將先進行鋼筋腐蝕率 0% 案例模型收集，因將鋼筋腐蝕率納入考慮，故須先透過更改鋼筋腐蝕率 0% 模型之鋼筋斷面資料，分別建置鋼筋斷面腐蝕率 5%、10%、20%、35% 模型，再進行側推分析，此階段分析流程如圖 8。

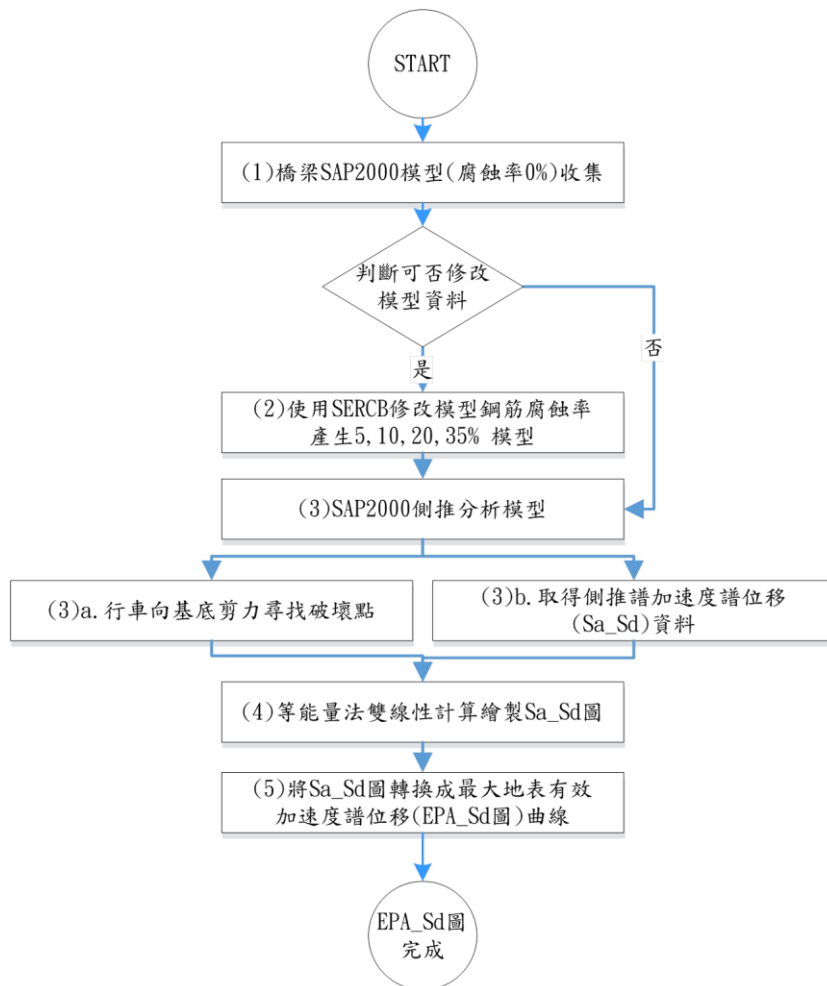


圖8 側推分析流程圖

各流程說明如下：

(1) 橋梁 SAP2000 模型(腐蝕率 0%)收集
此階段先取得某直轄市政府委外

建置之 17 座橋梁結構模型，因目前所建置之模型皆未考量鋼筋腐蝕率，因此，此階段取得之模型鋼筋斷面腐蝕

率為 0%。

(2)使用 SERCB for Bridge 修改鋼筋腐蝕率產生 5、10、20、35%之橋梁模型

此階段需先行判斷橋梁模型是否可以使用國立臺北科技大學土木工程系宋裕棋教授團隊研發之 SERCB for Bridge[宋裕棋, 2017]結構分析軟體重新進行塑鉸分析生成不同鋼筋腐蝕率之塑鉸資料。因軟體限制下, 部分橋梁無法重新定義塑鉸, 故此階段僅針對 6 座橋梁案例進行模型修正:

本研究參考文獻[歐昱辰, 2014]所建議, 將自然腐蝕鋼筋降伏強度 F_y 折減係數設定為 0.0123、彈性模數 E_s 折減係數設定為 0.013, 並於 SERCB for Bridge 修改橋柱鋼筋之降伏強度及彈性模數, 重新進行軸力彎矩分析、梁柱構件極限軸力分析、柱構件塑鉸分析。最後將結果匯入原橋梁模型產生鋼筋斷面腐蝕率 5、10、20、35% 之橋梁模型。

(3)SAP2000 側推分析模型

設定適當之側向力後, 進行非線性靜力側推分析, 並分別擷取基底剪力曲線(Pushover Curve)及 ATC40 建議之側推需求容量曲線(Pushover Curve Demand Capacity-ATC40)。

a.行車向基底剪力尋找破壞點

擷取基底剪力曲線(Pushover Curve), 並找尋基底剪力最大值(破壞點)。

b.取得側推譜加速度譜位移(S_a _Sd)資料 擷取側推需求容量曲線(Pushover Curve Demand Capacity-ATC40)中譜加速度值(S_a)及譜位移值(S_d), 並繪製譜加速度_譜位移曲線(S_a _Sd 圖)。

(4)等能量法雙線性計算繪製 S_a _Sd 圖 (如圖 9)

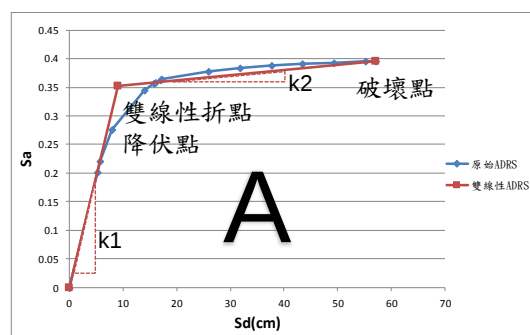


圖9 橋梁 S_a _Sd圖

a.先計算 S_a _Sd 圖下總面積 A 。

b.以第一點與原點間斜率為初始斜率 k_1 。

c.破壞點作為 S_a _Sd 圖之最大值(x_m , y_m)。

d.計算雙線性折點作為降伏點 (X_b, y_b)。

e.以降伏點至破壞點的斜率為 k_2 。

(5)將 S_a _Sd 圖轉換成有效地表有效加速度_譜位移圖(EPA_Sd 圖)

參考各工址之規範參數及 Fu-R-T 法將 S_a _Sd 圖轉換為 EPA_Sd 圖如圖 10, 作為下節之輸入。

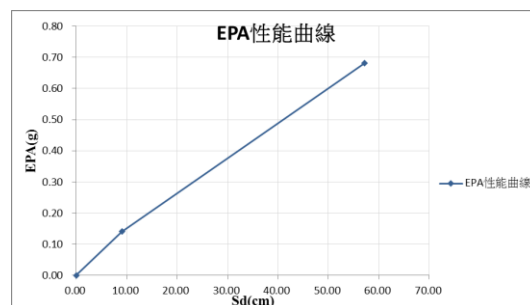


圖10 EPA_Sd圖

6.2 橋梁損傷評估

本階段將進行橋梁整體損傷評估，分別計算橋梁各元件、構件之結構耐震容量，並透過反應曲面法，求得橋梁整體損傷超越機率，詳細流程如圖 11，各步驟分述如下：

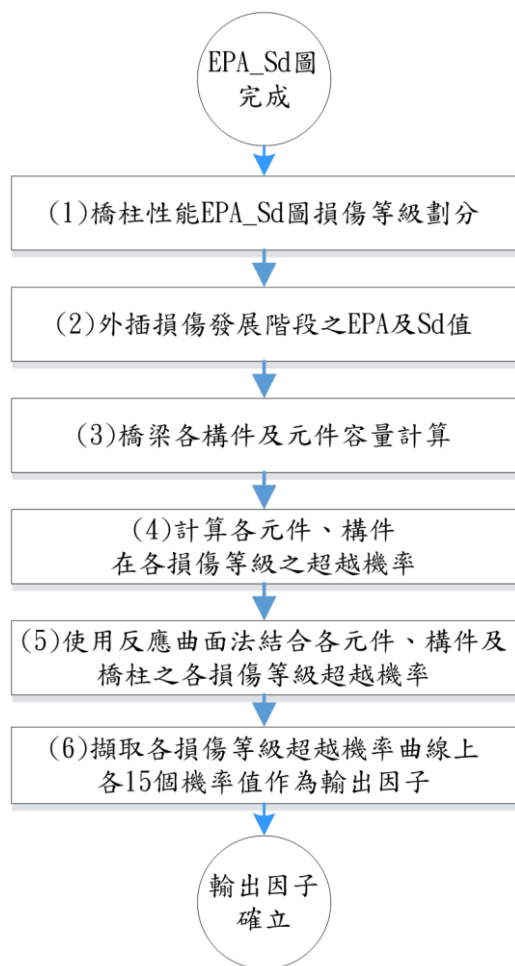


圖 11 橋梁損傷評估流程

(1) 橋柱性能 EPA_Sd 圖損傷等級劃分

前一節側推分析求得之有效地表加速度_譜位移圖(EPA_Sd 圖)，找出降伏點及破壞點，原點至降伏點區間為無損傷，降伏點與極限點間均分三等分為輕微損傷、中度損傷、嚴重損

傷以及破壞點後定義為完全損傷[交通部公路總局，2009]，如圖 12 所示。

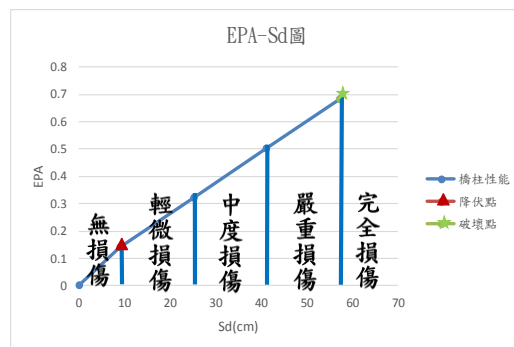


圖 12 損傷等級劃分

(2) 外插損傷發展階段之 EPA 及 Sd 值

因本研究將橋梁整體各元件、構件耐震容量納入分析，而側推分析結束時各譜位移值不相同，依文獻[呈瑞忠，2015]之建議即假設超越機率在 EPA 為 1.5g 時，各損傷超越機率皆為 1.0。故本階段需從破壞點進行外插直至獲得 EPA 為 1.5g 之橋梁耐震容量。

(3) 橋梁各構件及元件結構容量計算

選擇需計算耐震容量構件之每一個該構件項目，如需計算支承剪力，則選取橋梁模型中每一個支承，再從構件受力表單中找出承受最大剪力支承，擷取該支承的結構容量變化資料作為計算超越機率之用。

(4) 計算各元件、構件在各損傷等級之超越機率

在不同損傷等級下，由橋梁側推模型中找出該損傷等級下，須考慮的橋梁構件或元件側推下之受力狀態，以計算其損傷超越機率，各損傷等級需考慮之構件項目如表 3 所示。

表3 各損傷等級需考慮之構件項目

		無損傷	輕微損傷	中度損傷	嚴重損傷	完全損傷
下部結構	橋柱性能	✓	✓	✓	✓	✓
	橋柱穩定性					✓ (II)
	樁頂轉角					✓ (II)
	樁頭位移					✓ (II)
	基樁撓曲				✓ (II)	✓ (III)
	基樁剪力				✓ (II)	✓ (III)
	拉拔力				✓ (II)	✓ (III)
	軸壓力				✓ (II)	✓ (III)
	防落長度					✓ (II)
	支承剪力			✓ (II)	✓ (III)	✓ (III)
	帽梁剪力				✓ (II)	✓ (III)
	帽梁彎矩			✓ (II)	✓ (III)	✓ (III)
	上部結構					

以當地震之EPA達到中度損傷等級時為例，須考慮橋柱性能、支承剪力及帽梁彎矩三構件之檢核。

本研究共收集 17 座橋柱材質為鋼筋混凝土橋，以 SERCB for Bridge 修改模型加入鋼筋斷面腐蝕率後，共建置 41 筆模型，如表 4 所示。然後依前述步驟，分別建置橋梁整體損傷評估案例，輸出結果如圖 13 所示，並以側推分析過程各階段 EPA 值所對應之損傷超越機率值完成案例建置。

表4 案例資料依鋼筋腐蝕率分類

鋼筋腐蝕率	0%	5%	10%	20%	35%
模型案例數量	17	6	6	6	6

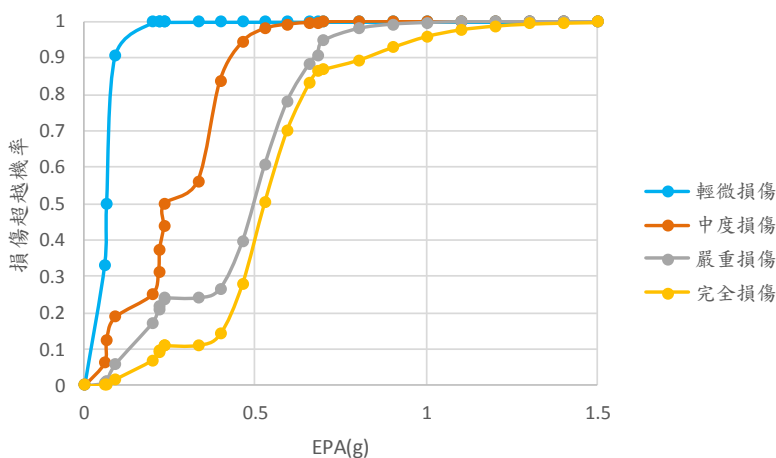


圖13 有效地表加速度損傷超越機率圖

七、橋梁振動檢測案例分析

本研究選擇彰化雲林間的「溪州大橋」(位於台 1 線)與南投雲林間的「南雲大橋」(位於台 3 線)進行現地試驗。檢測

的方式如下。試驗項目如下：

- 1.儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上無任何行車。

- 2.儀器(速度計)直接置於橋面版上，橋梁上行車正常。
- 3.儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上無任何行車。
- 4.儀器(速度計)直接置於墩柱上，橋梁上行車正常。

如前所述，溪州大橋與南雲大橋均針對兩座墩柱(位於與不位於水流處)進行測試，以探討水流與沖刷對振動頻率的影響。

7.1 現地試驗結果

本研究團隊於 106 年夏季前後分別進行一次試驗，夏季前的試驗時間為 6 月 23 日晚間至 6 月 24 日清晨。根據往年經驗，每年 6、7 月為颱風較為頻仍的季節，因此，本研究團隊另於 11 月 3 日晚間至 11 月 4 日清晨赴溪州大橋與南雲大橋進行第二次現地試驗。

以南雲大橋為例，每次試驗均進行十次重複的量測(每次 30 秒)，而每次量測均分為車行方向與水流方向，因此，共有 $10(\text{次}) \times 2(\text{方向}) \times 4(\text{量測方式}) \times 2(\text{墩柱}) \times 2(\text{夏季前後}) = 320$ 個試驗結果。

因為試驗的結果數目較多，以下僅就重要的部分進行說明。橋梁振動頻率是否可以作為橋梁健康診斷的依據，主要觀察的重點有：

- (1)量測的頻率是否穩定。
- (2)橋梁狀態是否可以藉由頻率的變化得知。
- (3)對於移動式量測的方式，橋面板所取的頻率應如何應用。

以下將藉由回答上述問題的過程中，說明試驗的結果。

量測結果是否穩定可以藉由同次現地試驗中的數次試驗結果觀察得知，南雲大橋同一個量測位置(橋面板)同一天試驗的變異係數值(coefficient of variation, cov)。就南雲大橋而言，當儀器置於橋面板，其最大的 cov 值為 0.21，若至於帽梁處時，則為 0.184，顯示帽梁處的量測具有較佳的穩定性。其中，2017/6/23 的試驗過程中，置於橋面板的速度計的 y 軸(水流方向)損壞，因此，若扣除此項資料，有上表中可知，由此次試驗所得之 cov 可知其變異性仍屬可接受的範圍。由圖 14 可驗證於車行方向，主頻較為明確，因此在歷次的量測中，變異性較小。

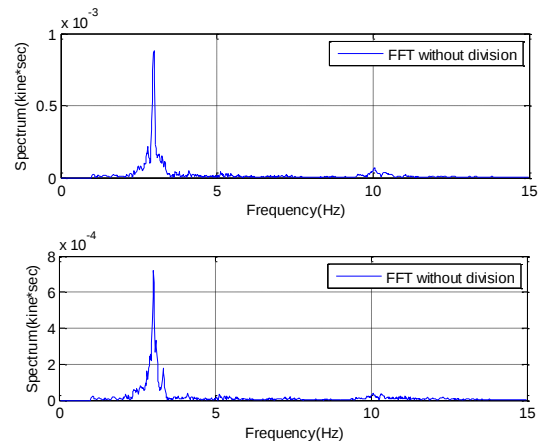


圖 14 南雲大橋橋面板(上)與帽梁(下)振譜(pier 9、無行車，車行方向，2017/6/23)

如表 5~7 所示，藉由前後兩次試驗比值的計算，於帽梁或橋面版所取得的頻率並無顯著的差異(包含 2016 年尖山大橋的結果)，表示確實可以以前後兩次試驗比值作為指標。然而，目前所分析的條件僅限於橋梁狀態沒有明顯改變，若橋梁具有明顯的沖刷深度，比值是否仍如目前分析的結果，尚有待觀察。

表5 南雲大橋水流方向頻率比值的比較
(pier 14)

	6/13/2016	10/3/2016	比值
帽梁	2.47 (0.05)*	2.44 (0.07)	1.010
橋面板	2.42 (0.06)	2.44 (0.07)	0.991
Z-test	-	-	相等

*cov

表6 溪州大橋水流方向頻率比值的比較
(pier 36)

	6/23/2017	11/3/2017	比值
帽梁	2.38 (0.36)	2.43 (0.57)	0.98
橋面板	2.10 (0.28)	2.31 (0.57)	0.91
Z-test	-	-	相等

表7 尖山大橋水流方向頻率比值的比較

	6/17/2016	9/28/2016	比值
帽梁	2.83 (0.06)	2.63 (0.17)	1.076
橋面板	2.80 (0.06)	2.79 (0.17)	1.003
Z-test	-	-	相等

7.2 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統

如能在橋梁安裝固定式振動檢測儀器，監控橋梁所在地之地表加速度，如加速度大於橋梁降伏加速度時，則啟動警報系統，警告用路人，可避免災情之發生。但有鑑於大型速度計成本較高之因素，如在每座橋梁皆安裝則將需龐大經費，因此本階段將以開發微型低成本加速度計作為振動監測儀器為目標。

本研究計畫利用 Arduino 開發板，透過 nRF24L01 與 ZigBee 無線傳輸模組，在發射模式下可達到低功耗之效果[曹永忠，2015]。其中模組所採用之 ZigBee 是採用 IEEE 802.15.4 開放式無線個人區域網(Wireless Personal Area Networks)的標準規範，它主要的特色為低速、低耗

電、低成本、支援大量網路節點、支援多種網路拓撲、低複雜度、可靠與安全[江柏翰，2016]。

並根據小電流控制大電流運作的一種“自動開關”之特性，選擇中繼電器模組做為控制開關，進而驅動啟動警示燈。接著採用微型加速度計 mma8451 中三軸加速度所量測出加速度 x、y 軸之分量，並且使用編譯程式碼來制定喚醒警示燈範圍條件，若量測出加速度分量超出所制定範圍，將立即延遲量測動作並且傳遞指令喚醒警示燈。其架構如圖 15 所示。

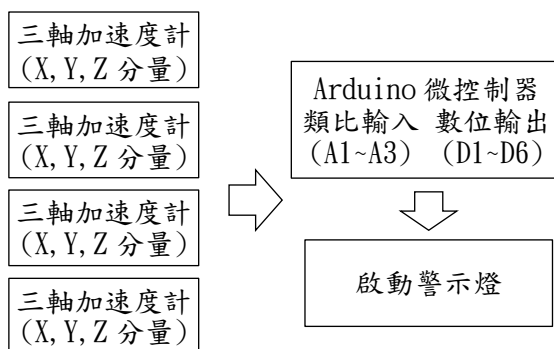


圖15 警示系統架構示意圖

而根據試驗結果顯示，警示燈運轉順利，符合本研究所訂定的目標，能在不同振動加速度下啟動警示燈。如圖 16 所示為 Arduino(左上)、無線傳輸配置(右)與系統完成配置圖(左下)。

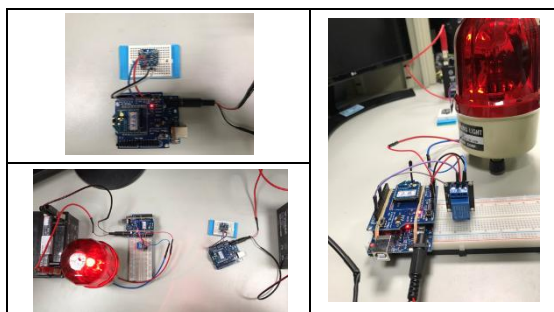


圖16 Arduino(左上)、無線傳輸配置(右)與系統完成配置圖(左下)

八、確認災害橋梁巡檢路線規劃模式

不定期檢測依交通部公路總局之規定，因天災（如颱風、豪雨、地震等）引起之災害，致可能損傷橋梁結構時執行。檢測重點在針對災後，探討是否造成橋梁功能損傷及是否需維修、補強。另規定當地震發生後，須進行特別巡檢，緊急評估轄內各橋梁受損情形，判定橋梁是否正常通行，管制通行或是封橋。

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，再結合全台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。接著，TRENDS 會自動啟動指派機制，通知公路總局值班人員進行巡檢，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。

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上，所以不能夠直接依此分析結果作跳點式巡檢；再者，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三因子，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。

8.1 確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子

此階段找出規劃災後橋梁巡檢路線時所需考量之因子，根據過去報告與文獻回顧，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、區域檢測人員（巡檢組數）數量、檢測人員檢測時間之限制等。

橋梁重要性排序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]第五章橋梁重要等級評定方法之定義，如表 8 所示。

表8 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)	$0 \leq 1 - \frac{(ADT_{Tory} - 28000)^2}{784 \times 10^6} \leq 1$	0.22
	橋下交通量(U_{TU}) (0.13)	$0 \leq 1 - \frac{(ADT_{Tunder} - 28000)^2}{784 \times 10^6} \leq 1$ 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_{GR}) (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

8.2 初擬災後橋梁巡檢路線規劃模式

公路總局五個養護工程處三十四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。本研究將建立「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 17 所示，執行步驟說明如下：

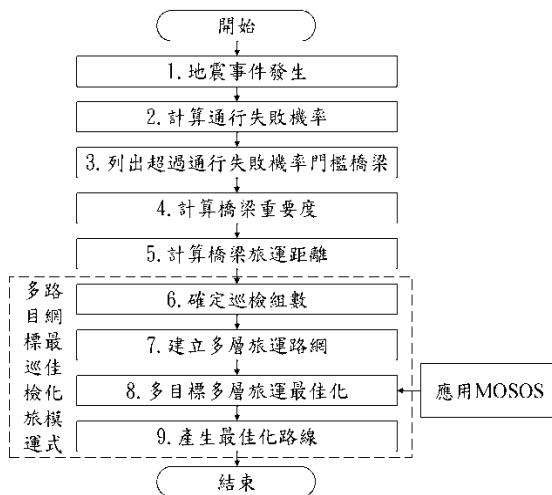


圖 17 多目標地震災後橋梁特別巡檢旅運路網規劃流程圖

步驟一 地震事件發生

當某一地震事件發生時，須先根據中央氣象局地震速報資訊，如橋梁所在地區震度達到五級，則該區域橋梁依目前規範須進行特別巡檢。

步驟二 計算通行失敗機率

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 計算各橋梁所在地震地之地表加速度(PGA)，再依據各橋梁之

降伏強度(A_y)值與破壞加速度，計算橋梁通行失敗機率。

步驟三 列出超過通行失敗機率門檻橋梁

根據前一步驟所計算之各橋梁通行失敗機率，與各橋 A_y 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，即為須巡檢，進行緊急評估之橋梁。

步驟四 計算橋梁重要度

考量生命安全、經濟衝擊、維生管線、緊急應變系統，以及歷史價值等因素，計算橋梁重要度，其值越高須優先巡檢。

步驟五 計算橋梁旅運時間

應用 Google Map API 計算出橋梁兩兩間之旅運時間，作為後續路網規劃，計算總旅運時間之基礎。

步驟六 確定巡檢組數

根據待命巡檢人員與車輛數量，決定檢測小組之組數。

步驟七 建立多層旅運路網

依據步驟二至步驟五，將須檢定之橋梁列出，再按步驟六所決定之巡檢組數，以每組一路網圖層進行規劃，建構多層旅運路網圖，其限制為各層檢測之橋梁不能重複。

步驟八 多目標多層旅運最佳化

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。

步驟九 產生最佳化路線

同時考量通行失敗機率、旅運時間，以及橋梁重要度之因子，求得最佳化之巡檢路網，以作為橋梁管理單位在規劃災時特別巡檢路線時之參考。

依此，所進行測試案例考量旅運時

間、通行失敗機率、橋梁重要度三維度求得之支配個數最佳解為，第一組：O

→D →A→ F;第二組:O→ C →B→ E，其路徑圖 18 所示



圖18 橋梁特別巡檢旅運路網規劃結果

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)初擬鋼結構橋梁維護分析模式之架構、(2)橋梁整體耐震能力評估模式擬定、(3)橋梁振動檢測案例分析、(4)確認災後橋梁巡檢路線規劃模式考量因子與步驟，以提升TRENDS系統運作穩定性與模組之精確性為目標，整合相關計畫成果於同一操作介面下，降低人力操作與維護需求，本研究綜合上述做以下結論:

1.在鋼結構橋梁風險評估方面:收集目前國內橋梁管理單位所採用鋼結構橋梁檢測評估、維修（保護）工法與延壽策略等相關文獻。並初步確認鋼結構橋梁風險因子，釐清鋼結構損壞之因素，接著擬定鋼結構橋梁生命週期成本導向之橋梁風險評估模式，並嘗試

以生命週期成本計算橋梁較適宜的維護門檻值。

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。本研究已收集分析 17 筆橋梁整體耐震能力案例，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，建置橋梁整體耐震能力評估案例庫。接著確認整體橋梁耐震能力影響因子，並應用不同人工智慧進行模式訓練與測試，以供後續研究人工智慧推論使用。

3.橋梁振動檢測分析部分:本研究 106 年至南雲大橋與溪州大橋進行雨季前(2017/06/23)與雨季後(2017/10/13)振動頻率量測，例次試驗均顯示於帽梁

或橋面版所取得的頻率並無顯著差異。並已開發橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報之雛形系統。

4. 透過災後巡檢路線規劃之考量因子之確認，可同時考量橋梁通行失敗機率、旅運時間及橋梁重要度三因子，進行災時特別巡檢之多目標巡檢路網規劃。

後續系統使用效益與應用如下：

1. 提升臺灣公路早期防救災決策支援系統模組之實用性及穩定性。
2. 增加鋼橋管理模組及橋梁整體耐震能力分析功能。
3. 建立橋墩上微型加速度計振動監測、無線傳輸分析及警報系統，提升橋管人員應用振動量測實用性。

參考文獻

1. 鄭明淵、陳生金、呂守陞等，「交通工程防災預警系統建立之研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2005。
2. 鄭明淵、吳育偉、張于漢等，「公路防救災決策支援系統建立之研究(4/4)」，交通部運輸研究所，2010。
3. 鄭明淵、吳育偉、林三賢等，「跨河橋梁安全預警系統之建置更新驗證與維護管理」，交通部運輸研究所，2013。
4. 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。
5. 宋裕棋，SERCB 軟體介紹，<http://sercb.dyndns.org/SERCBWeb/>，2017。
6. 歐昱辰、郭陳風、劉澄洲，腐蝕鋼筋之拉力行為，土木水利，第四十一卷，第二期，2014。
7. 交通部公路總局，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，2009。
8. 呈瑞忠，「考慮回復性能之橋梁補強效益研究」，國立臺灣科技大學碩士論文，2015。
9. 曹永忠，邁入『物聯網』的第一步：如何使用無線傳輸；<http://www.techbang.com/posts/25459-technology-in-the-future-internet-of-things-business-model-how-to-use-wireless-transmission-the-basic-text>，2015。
10. 江柏翰，低頻微振動量測用之加速規研製與無線傳輸應用，南臺科技大學機械工程系碩士論文，2016。
11. 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。