

橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究(4/4)

Development of A Bridge Lifetime Detection and Analysis Model (4/4)

主管單位：交通部運輸研究所

邱永芳¹

謝明志¹

林雅雯¹

Chiu, Yung-Fang

Hsieh, Ming-Jyh

Lin, Ya-Wen

鄭明淵²

邱建國²

吳育偉²

徐梓隆²

Cheng, Min-Yuan

Chiu, Chien-Kuo

Wu, Yu-Wei

Hsu, Tzu-Lung

¹交通部運輸研究所港灣技術研究中心

²國立臺灣科技大學營建工程系

摘要

橋梁除具有跨越河川及山谷、聯絡外地之功能，亦擔負起維繫經濟動脈之重要使命。台灣地處環太平洋地震帶與受太平洋季風區影響，颱風與地震頻繁，因而加速橋梁元件老化；再者，隨著台灣地區橋梁建設趨於飽和，橋梁重點由新建轉成維護橋梁，如未適時做適當的維護補強修復，提升橋梁安全與壽命，一旦橋梁遭受到天然災害，將導致橋梁損壞，危及用路人之旅行與安全。因此，橋管單位如何在年度預算限制下，規劃群橋(同一橋梁管理單位)生命週期維護策略，以提升橋梁壽齡，為一重要且刻不容緩的問題。

有鑒於此，本研究提出可視(Visible)與不可視(Invisible)危害二風險類別，考量橋梁在危害風險狀況下造成用路人損失之成本。可視危害部分主要考量元件老化風險因子，而不可視危害則包括洪水沖刷與地震二因子，然後應用風險期望值(風險成本)的觀念，分別計算各因子在橋梁生命週期內可能造成之損壞機率與維護成本，再以兩者相乘積和，進一步建立群橋風險指標 $E(\text{Cost})$ 與評估模式。本研究權衡橋管單位年度維護經費限制與群橋生命週期維護成本兩者，建立目標函數，再應用生物共生演算法最佳化搜尋，以生命週期成本導向之概念，建置「群橋維護策略最佳化模式」，尋找群橋生命週期內，符合預算限制下各橋之最佳維護時機與成本，使得群橋生命週期風險總成本最低，研究成果可輔助橋管單位針對群橋進行維護時機及經費估計，在有限維護經費下達到最佳經濟效益，節省橋梁管理單位維護補強經費。

關鍵詞：風險成本，維護策略，生命週期成本

Abstract

Proper maintenance and restoration strategy for bridges is an essential issue, for Taiwan is an island with frequent earthquake, typhoon and heavy rain, thus, bridge competent might deteriorate more seriously. Nowadays, the bridge inspections in Taiwan are almost visible (tangible), while the invisible (potential) risks such as earthquake and scour resistant capacity are not taken into account.

This paper considers main risk factors as the competent deterioration, scour and earthquake. In order to ensure the safety and extend the life-span for bridges and the government limit budget, this study proposes the novel model, the Group Bridge life cycle Maintenance Strategy Optimization Model. In the model, first, the study uses Monte Carlo simulation to estimate the bridge maintenance probability from the historical data. Second, using the artificial intelligence (AI) ESIM model to estimate risk impact influence cost from the relationship through the input data (DER&U) and output data (historical maintenance cost). Third, estimate the user cost of the bridges without maintenance. Forth, sum up each risk factor's multiplication of bridge maintenance probability and risk influence cost to obtain the risk cost as $E(\text{Cost})$. Last, the model utilizes (SOS, Symbiotic Organism Search) algorithm to obtain the minimum LCC cost $EGT(\text{Cost})$, and every year the budget limit will be confirmed. As a result, this study can provide the optimal maintenance timing and cost as maintenance strategy for bridge management division.

Keywords : Life cycle cost, Maintenance strategic

一、前言

台灣受季風氣候影響及位處地震帶，颱風與地震頻傳，橋梁飽受天然災害侵害，每年颱風、豪大雨及近年來河床嚴重下降、氣候變遷等因素，橋梁易受沖刷而導致損壞，根據統計台灣橋梁95%以上為混凝土橋梁，且75%以上橋齡均在二十年以上，橋梁強度堪慮(賴明皇，2004) [1]; 再者，隨著台灣地區橋梁建設趨於飽和，橋梁重點由新建轉成維護橋梁，如未適時做適當的維護補強修復，提升橋梁安全與壽命，一旦橋梁遭受到天然災害，將導致橋梁損壞，危及用路人之旅行與安全。因此，橋管單位如何在年度預算限制下，規劃群橋生命週期維護策略，以提升橋梁壽齡，為一重要且刻不容緩的問題。

本研究模式將風險類別分為可視與潛勢危害，可視危害考量元件老化因子，而潛勢危害則包括洪水沖刷與地震。依據歷史資料，應用蒙地卡羅模擬求得橋梁損壞機率;維修成本則應用AI模式，找出歷史案例中輸入值(D.E.R.&U.)與輸出值維修成本之關係。因橋管單位維護預算有限，必須篩選橋梁維護的優先順序，因此本研究將橋梁重要性非直接成本因子與社會成本納入，將各橋梁維護重要性非直接成本因子進行篩選，並量化成社會成本，同時考慮洪水與地震造成重建之風險成本。最後為輔助橋梁管理單位，得到橋梁最適維護順序及預算分配，應用生物共生演算法搜尋求得群橋生命週期與有限經費下之最適維護策略。

二、研究方法

本研究發展建立一群橋生命週期維護策略最佳化之模式，群橋之定義為同一工程處管理之橋梁。橋梁風險評估模式中考量之風險因子分為可視風險(Visible):元件老化與潛勢危害(Invisible):洪水與地震，然後根據各風險因子分析計算風險成本，再加入用路人風險成本。本研究主要包含4個步驟。以下按照研究步驟依序論述，如圖1所示：

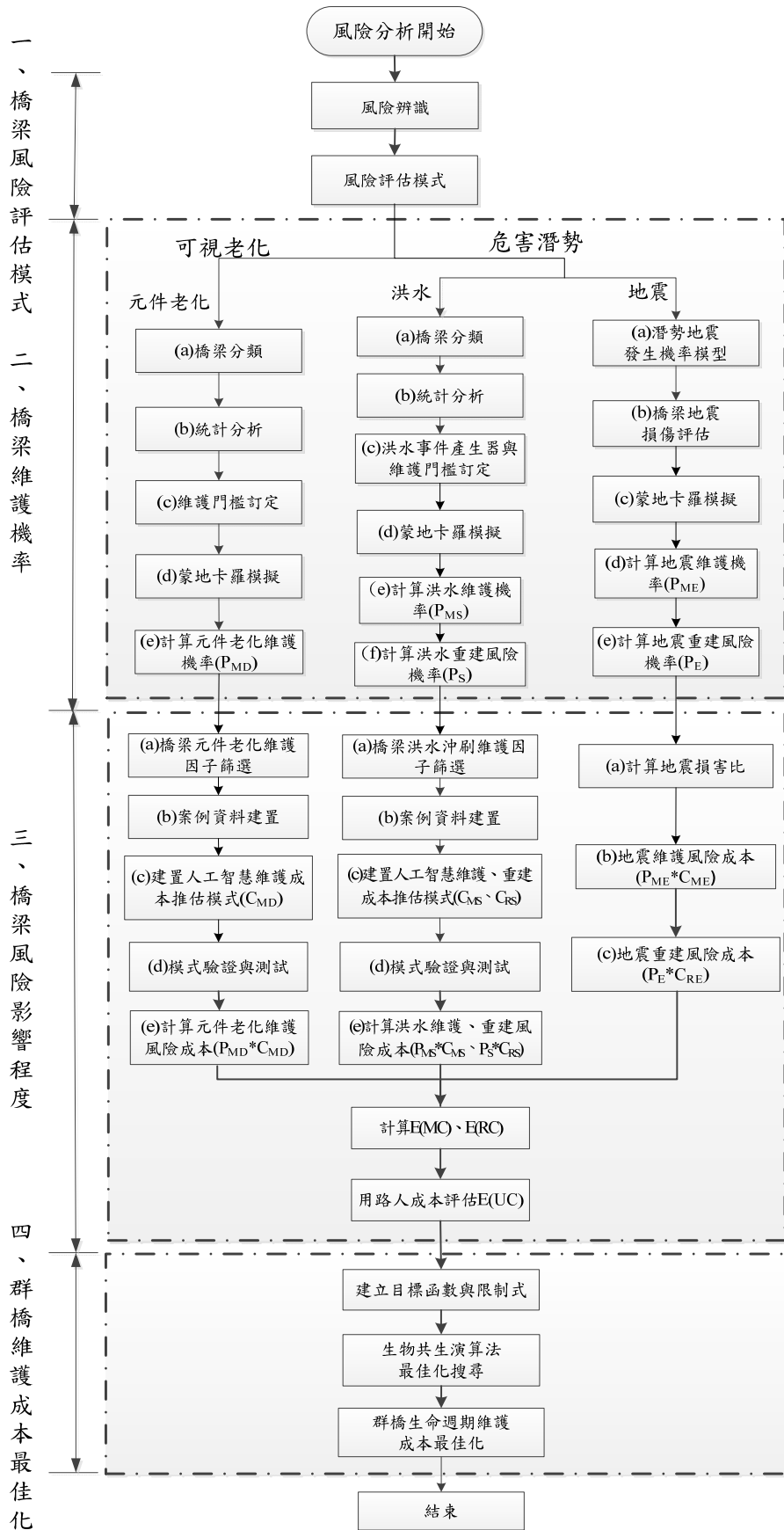


圖 1 橋梁風險評估及維護策略模式建置流程

2.1 橋梁風險評估及維護策略模式

步驟一:橋梁風險評估模式:

本階段首先針對本土橋梁進行風險辨識，篩選風險因子，其包括元件老化、洪水、地震等，發展橋梁風險評估模式，並將用路人風險成本納入橋梁風險評估模式，模式中求得之橋梁維護風險期望值(風險成本)定義為橋梁綜合能力指標，並按此一指標，作為求解群橋生命週期最適維護時間及最小總成本之依據。

步驟二:橋梁維護機率:

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 CI 及 SSI 下降趨勢，再應用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 PGA。再考量橋梁現有耐震強度(A_y, 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。

步驟三:橋梁風險影響程度:

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，求得不同年限下元件老化程度(CI)與洪水沖刷程度(SSSI)值，作為前述 AI 輸入值，以推論求得可能維護成本。地震部分擬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。

步驟四:群橋維護成本最佳化:

本部分流程將分成三部分完成，分別為橋梁用路人成本評估 $E(UC)$ 、生物共生演算法最佳化搜尋與群橋生命週期維護成本最佳化成果。用路人成本評估橋梁維護或是車輛改道額外增加之成本損失。另外，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 $EGT(Cost)$ 之維護時機組合。最後，群橋生命週期維護成本最佳化成果可提供橋管單位從生命週期成本(LCC)的角度，規劃群橋最佳維護時機及成本，在有限維護經費條件下達到最佳經濟效益。

2.2 橋梁綜合能力指標

本研究風險類別分為可視危害(Visible)與潛勢危害(Invisible)二部份，如圖 3 所示。其中可視危害主要考量元件老化風險因子，其風險指標為平時 D.E.R.&U.檢測可得之狀況指標(CI, Condition Index)，風險評估採用蒙地卡羅模擬求得元件老化維護之發生機率。而潛勢危害則包括洪水沖刷與地震二因子，洪水沖刷部分採用 SSI

值作為風險指標，在風險評估方面則採用蒙地卡羅模擬不同重現期之洪水事件，以求得橋梁因洪水造成損傷之機率。地震風險指標使用考慮材料劣化影響之結構耐震容量(Ay 及 Ac)，同樣應用蒙地卡羅模擬生命週期地震事件，再結合受損結構性能修正模型來評估因地震累積損傷影響之風險機率。風險影響程度將維護、重建風險成本和用路人成本損失納入。

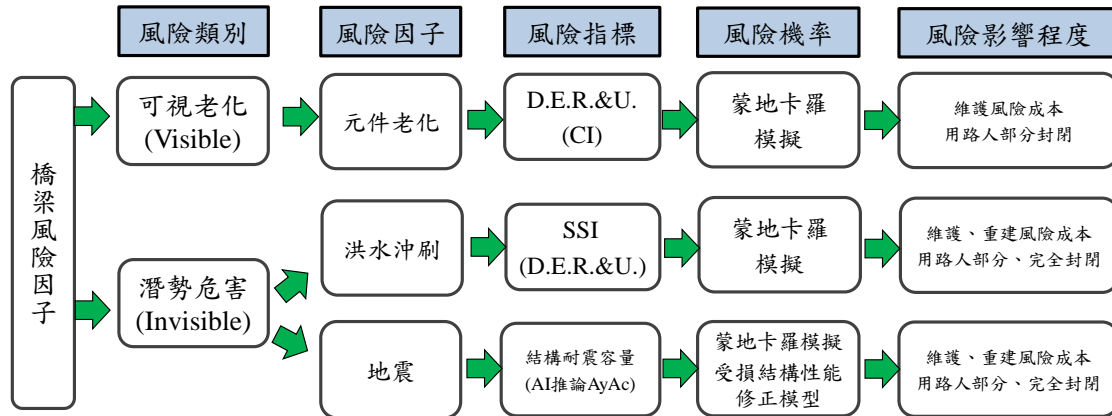


圖 2 橋梁風險評估

在群橋維護策略最佳化問題中，除需考量因老化、洪水、地震而造成之維護風險成本 E(MC)及重建風險成本 E(RC)外，亦須將用路人成本之損失 E(UC)納入。本研究根據風險評估模式之因子，以風險期望值之概念，建立橋梁維護之風險期望值 $E_B(\text{Cost})$ ，如公式 1。

$$E_{Bj}(\text{Cost})=E(\text{MC})+E(\text{RC})+E(\text{UC}) \quad (1)$$

其中：

$E_{Bij}(\text{Cost})$: Bridges Expected Cost，為第 i 年第 j 座橋梁之風險期望成本，其中，j 為同一管理單位之橋梁。

E(MC): Maintenance Cost，為風險下維護成本。

E(RC): Rebuilding Cost，為橋梁在未維護狀態下，因地震或洪水損害造成之重建風險成本。

E(UC): User Cost，因災害發生，造成橋梁中斷完全改道或是維護部分改道之用路人成本。

橋梁維護風險成本 E(MC)部分由可視、不可視之機率與成本組成，如公式 2。

$$E(\text{MC}) = \left(P_{\text{MD}_{ij}} \times C_{\text{MD}_{ij}} + P_{\text{MS}_{ij}} \times C_{\text{MS}_{ij}} + P_{\text{ME}_{ij}} \times C_{\text{ME}_{ij}} \right) \quad (2)$$

式 2 中：

i 某段期間橋梁的使用年限，本研究 i=1~20 年

j: 為同一橋管單位之第 j 座橋梁

P_{MD} : 元件老化造成橋梁損壞之維護機率值 (Maintenance Probability Caused by Deterioration)。

P_{MS} :洪水造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Scour)。

P_{ME} :地震造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Earthquake)。

C_{MD} :元件老化造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Deterioration)。

C_{MS} :洪水造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Scour)。

C_{ME} :地震造成橋梁損壞之維護成本(Maintenance Cost of Earthquake)。

重建風險成本 $E(RC)$ 可由公式 3 求得。

$$E(RC) = (P_{S_{ij}} \times C_{RS_{ij}} + P_{E_{ij}} \times C_{RE_{ij}}) \quad (3)$$

式 3 中:

i : 某段期間橋梁的使用年限, 本研究 $i=1\sim 20$ 年

j : 為同一橋管單位之第 j 座橋梁

P_S : 洪水造成斷橋之風險機率值 (Bridge Broken Probability of Scour)。

P_E : 地震造成斷橋之風險機率值(Bridge Broken Probability of Earthquake)。

C_{RS} : 因洪水造成斷橋之重建成本(Rebuilding Cost of Scour)。

C_{RE} : 因地震造成斷橋之重建成本 (Rebuilding Cost of Earthquake)。

在群橋維護成本最佳化中, 將計算斷橋影響下橋梁完全封閉之用路人成本 C_S (考慮洪水與地震), 與橋梁維護造成部分封閉之用路人成本(考慮老化、洪水與地震)。其中, 因老化造成斷橋機率數值較小故不考慮, $E(UC)$ 計算方式如公式 4 所示。

$$E(UC) = (P_{S_{ij}} \times C_{U_{ij}} + P_{E_{ij}} \times C_{U'_{ij}}) + (P_{MD_{ij}} \times C_{U_{ij}} + P_{MS_{ij}} \times C_{U'_{ij}} + P_{ME_{ij}} \times C_{U_{ij}}) \quad (4)$$

式 4 中:

i : 某段期間橋梁的使用年限, 本研究 $i=1\sim 20$ 年

j : 為同一橋管單位之第 j 座橋梁

C_U : 橋梁完全封閉之用路人成本(User Cost of Entire Closed Bridge)。

C_U' : 橋梁部分封閉之用路人成本(User Cost of Partial Closed Bridge)。

P_S : 洪水造成斷橋之風險機率值(Bridge Broken Probability of Scour)。

P_E : 地震造成斷橋之風險機率值(Bridge Broken Probability of Earthquake)。

P_{MD} : 元件老化造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Deterioration)。

P_{MS} : 洪水造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Scour)。

P_{ME} : 地震造成橋梁損壞之維護機率值(Maintenance Probability Caused by Earthquake)。

2.3 橋梁損壞維修機率

風險辨識部分已將風險類別分為可視老化(visible)與潛勢危害(invisible), 其中可視老化中元件老化為風險因子, 其風險指標為平時 D.E.R.&U. 檢測可得之狀況指標

CI 值，透過蒙地卡羅模擬求得維護機率。潛勢危害部分可分為地震及洪水沖刷為主要原因，洪水沖刷部分採用現行 SSI 值作為風險指標，亦採用蒙地卡羅模擬洪水事件以進行風險評估。地震則是以地震潛勢機率模型求得各橋梁所在地之 PGA，再考量橋梁現有耐震強度(Ay,Ac)，求得橋梁地震損傷指標，再以蒙地卡羅模擬找出橋梁地震損傷需維護及重建之風險機率。橋梁維護與重建機率可分成五個部分(P_{MD}、P_{ME}、P_{MS}、P_S、P_E)，依元件老化、洪水、地震順序介紹，按模擬步驟分別求得各橋梁 1~20 年之維護機率。

2.3.1 橋梁元件老化維護機率

因為元件老化隱含了許多不確定性，本研究將以統計的概念找出同類型橋梁不同年限時狀態指標 (CI) 之機率密度函數，並導入可靠度評估方法，以蒙地卡羅模擬方式找出元件老化維修機率，其步驟如下：

- (1) **橋梁分類**：依據結構型式、距海遠近、交通流量等因子進行橋梁分類，並假設同一類型橋梁其元件老化狀況類似。
- (2) **統計分析**：根據 TBMS 檢測歷史資料，將不同橋梁類型之檢測資料進行統計，繪出每座橋的橋齡(X 軸)與 CI(Y 軸)散佈圖，再求出每一年度之 CI 平均值與標準差。最後迴歸分析找出橋梁橋齡與 CI 之關係式，如此即可獲得各橋梁類型 CI 下降趨勢。
- (3) **維修門檻訂定**：透過文獻、訪談或歷史資料擬定維修門檻 CI 值，依據以往 TBMS 資料庫中歷史維護記錄，本研究初步設定門檻範圍為 75-90。
- (4) **蒙地卡羅模擬**：將各橋梁類型之 CI 下降趨勢作為蒙地卡羅模擬之輸入(圖 3)，模擬 10000 次，找出橋梁於未來各時間點 CI 小於門檻值之累計次數，除以模擬次數即為橋梁因可視危害所造成之維修機率。
- (5) **計算元件老化風險機率(P_{MD})**：以門檻值 75 分為例，在 10000 次蒙地卡羅模擬中，總計有 200 次橋梁的 CI 值低於 75 分，故 $P_{MD} = 200/10000 = 2\%$ 。

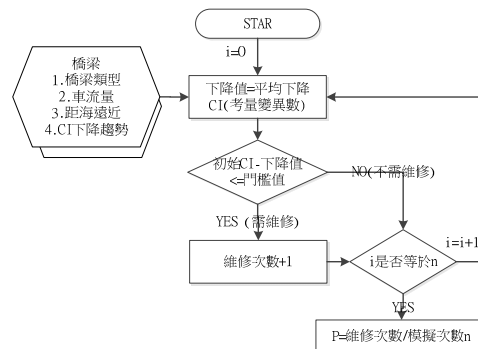


圖 3 可視危害造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

2.3.2 橋梁洪水維護與重建機率

洪水狀況隱含了相當多的不確定性，在橋梁未來生命週期中可能會發生不同大小的洪水事件。本研究藉由 TBMS 歷年 SSI 調查記錄與水利署水位站監測記錄，統計分析找出各年度 SSI 下降值與當年對應之洪水重現期之關連性。並導入可靠度的觀念，以蒙地卡羅模擬橋梁受洪水影響而需維修或重建之機率，其步驟如下：

(1)橋梁分類：因橋梁所屬流域不同，所遭遇之洪水程度與頻率亦會有所差異，故本研究將依橋梁所屬流域分群進行評估；參考水利署台灣主要河川之流域定義，分為二十四個流域。

(2)統計分析：根據 TBMS 歷年 SSI 調查記錄與水利署水位站監測資料，找出橋梁遭遇不同洪水流量時 SSI 所下降分數，並依此洪水流量所對應之洪水重現期(水文資訊網，2012)，統計分析找出 SSI 下降值與所對應之洪水重現期之關係。

(3)洪水事件產生器與維修門檻訂定：根據不同的洪水重現期，在橋梁未來生命週期中產生不同的洪水事件，圖 4 為 100 年洪水重現期強度發生次數所對應 SSI 值下降曲線示意圖。本研究同樣初步訂定 SSI 值介於 75-90 為維修門檻搜尋範圍。

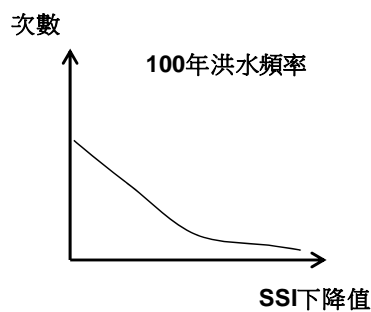


圖 4 發生 100 年洪水時對應 SSI 指標下降曲線示意圖

(4)蒙地卡羅模擬：此階段使用蒙地卡羅模擬橋梁未來 100 年洪水可能發生事件，流程如圖 5 所示，模擬計算 10000 次，依 SSI 下降趨勢曲線計算可能之 SSI 值，找出橋梁因洪水沖刷損壞而需維修機率。

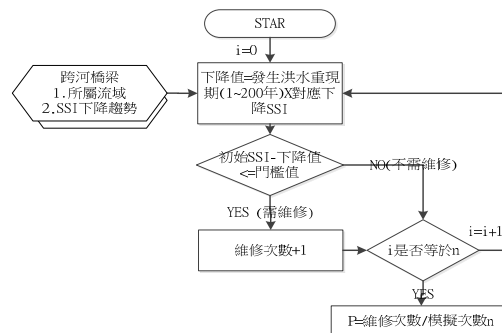


圖 5 洪水造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

(5)計算洪水維修機率(P_{MS})：以門檻值 75 分為例，在 10000 次蒙地卡羅模擬中，如總計有 150 次橋梁的 SSI 值低於 75 分，則 $P_{MS} = 150/10000 = 1.5\%$ 。

(6)計算洪水斷橋機率(P_{RS})：國內橋梁興建時，皆以重現期 100 年洪水為耐洪設計標準，本階段為求得橋梁因洪水而中斷之機率，故擷取步驟(4)蒙地卡羅模擬中，洪水事件中超過 100 年重現期之機率。例如，在 10000 次蒙地卡羅模擬中，如出現 20 次超過 100 年重現期之洪水，則 $P_S = 20/10000 = 0.2\%$ 。

2.3.3 橋梁地震維護與重建機率

此階段主要評估橋梁未進行任何維護下之地震風險，依順序應用潛勢地震發生機率模型、地表震動分析模式與橋梁地震損傷評估方式評估橋梁地震維修機率。說

明如下:

(1)潛勢地震發生機率模型:本部分主要參考文獻為國家地震工程研究中心所執行計畫「最具潛勢及歷史災害地震之強地動模擬,2005」。本研究將採用計畫中所提出之數學機率模型,建立臺灣地區一般性震源、活動斷層之潛勢地震發生機率模型,並依機率模型推估未來臺灣100年之地震發生次數與機率。

(2)地表震動分析模式:根據前一階段之潛勢地震評估結果可求得地震震央與強度之發生可能性,本階段進一步考量距離衰減律與地盤場址分類,計算橋梁所在地之地表加速度(PGA)。本研究擬參考(張毓文,2002)之地表震動模式,將地震震央位置、規模與深度等參數作為輸入,計算求得橋梁所在地之PGA。

(3)橋梁地震損傷評估:本節將採用交通部運輸研究所之橋梁通阻檢測分析計畫案(2011)中所建置之側推模式(Pushover),並利用武田模式(Takeda model)進行橋梁之非線性動力分析。依橋梁所在位置之劣化影響及考慮100年可能遭遇之地震,計算其地震損傷指標。

(4)蒙地卡羅模擬:本研究依據蒙地卡羅運算模擬地震發生序列,並假設橋梁在不修復的條件下,未來100年因地震所造成的累積損傷,流程如圖6所示。模擬計算10000次,依橋梁累積損傷計算橋梁地震破壞機率。

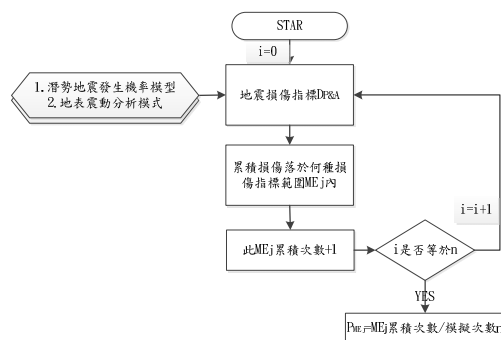


圖 6 地震造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

(5)計算地震維修機率(P_{ME}):根據損傷指標(D_{P&A})範圍將損壞等級分為五個等級,如表1(參考日本阪神大地震之統計分析結果),然後應用蒙地卡羅模擬結果,繪製使用年與不同損壞分級之維修機率(P_{MEj})。以繪製圖8為例,在10000次蒙地卡羅中,橋梁於第5年時,其損傷指標(D_{P&A})介於0.1~0.2的次數共8500次,則對應之損傷分級落在輕微損傷之機率 P_{ME2}=8500/10000=85%。依此類推,即可匯出圖7之關係曲線。

表 1 RC 結構物之損傷指標

損壞分級(ME _j)	損傷指標(D _{P&A})	損壞程度之描述
無損傷 ME ₁	<0.1	外部輕微裂縫非結構元件出現
輕微損傷 ME ₂	0.1-0.2	結構元件出現微小裂縫
中度損傷 ME ₃	0.2-0.4	隔間住上下兩端出現撓剪裂縫。非結構元件出現明損壞。
重度損傷 ME ₄	0.4-0.1	混凝土橋柱之核心混凝土碎裂,箍筋嚴重鬆脫,主筋挫屈。
完全崩塌 ME ₅	>1.0	混凝土橋柱之核心混凝土嚴重碎裂脫離,喪失承載能力,橋柱倒塌趨勢。

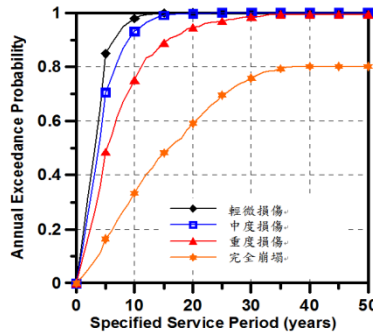


圖 7 未來損傷分級機率

(6)計算地震斷橋機率(P_{RE}):前一階段所求得之完全崩塌機率 (P_{MES}) 曲線，即為橋梁在不同使用年限時，因地震造成斷橋的機率曲線。例如，在10000次蒙地卡羅中，其損傷分級落在完全崩塌之次數總計有8次，因此可得到地震造成斷橋機率 $P_{RE} = 8/10000 = 0.08\%$ 。

2.4 橋梁風險影響程度

本研究將橋梁破壞後，維護達原設計水準 90% 所花費之成本，然後乘上橋梁維護或重建之風險機率定義為風險影響程度(高橋稔明, 2005)[11]。有鑑於此，本研究分別建立檢測歷史紀錄、元件老化與洪水橋梁維護案例資料，藉由檢測歷史紀錄與維護案例資料之連結，可得不同損壞狀態下(CI 及 SSI)所對應之維護成本。然後應用人工智慧推論模式，以 CI 及 SSI 等因子為輸入，維護成本為輸出，建立橋梁老化、耐洪維護成本推估模式，以預測未來橋梁分別因老化與洪水維護所需花費的成本(CMD&CMS)。地震部分則參考日本阪神地震之文獻，依據前一階段所求得橋梁各損傷指標發生機率，先乘上此指標所對應損害分級之損害比，加總後再乘上興建成本即為橋梁因地震風險下所需成本。用路人成本部分利用重要性影響因子建立用路人成本評估模式，蒐集各橋梁之參數資料，經由計算求得。最後橋梁因老化與洪水因素所需花費的維護成本(CMD&CMS)分別與因老化與洪水維護機率(PMD&PMS)相乘，再加上橋梁因地震風險下所需維護成本，即可得到橋梁風險下維護風險成本 E(MC)(式 3.2)。而洪水與地震橋梁重建成本與橋梁重建機率相乘即可得到橋梁在損害風險下之重建風險成本 E(RC)(式 3)。另外將各風險因子維護機率乘上部分封閉用路人成本，加上不可視因子重建機率乘上完全封閉用路人成本即可得到用路人成本 E(UC) (式 4)。本章節利用上章節獲得之橋梁維護機率(P)結合本章推估之橋梁維護成本(C)，推論各橋梁風險影響程度。

2.4.1 橋梁元件老化維護成本(C_{MD})

(1)橋梁元件老化維修因子篩選:公路總局 TBMS 橋梁屬性資料欄位共 107 欄位，由於原始資料庫欄位過多，無法明確表示出各因子與橋梁維修成本之相關性。非跨河橋梁其損壞以老化為主，因此本研究將以 TBMS 系統中非跨河橋梁維修紀錄，利用 SPSS 分析評估因子與維修成本相關性，擬挑選顯著相關參數做為模式因子。初擬之元件老化維修成本影響因子如表 2 所示。

表 2 元件老化維修成本因子

影響因子	關聯	單位
CI	維修前 CI 指標	數字
橋版投影面積	維修量體	M2
最低橋下淨高(M)	維修量體	M
竣工年*	施工技術	民國年

(2)案例資料建置:本階段根據上一步驟所確認之因子，建置非跨河橋梁維修案例資料庫，如表 3 所示。本步驟所完成之維修案例資料庫，可提供後續人工智慧推論模式學習預測使用。

表 3 非跨河橋維修案例(節錄)

No	新 CI	維修金額(原拾值)	維修金額修正後	物價指數	最近維修年	橋版投影面積(M ²)(維修量體)	最低橋下淨高(M)(維修量體)	結構型式(維修方式)	距海遠近	每日平均車流量	EV	山地考量(物價修正用)	竣工年
1	99	600	600	100.00	2006	222.48	5	梁式橋	27676	2306	200.10	0	76
2	99	2000	2000	100.00	2006	187	3	梁式橋	30160	2306	142.84	0	76
3	88	3298681	3537839	93.24	2005	6072	5	箱型橋	20323	2834	23.26	0	81
4	83	4420146	3903343	113.24	2009	27730	4.6	梁式橋	22293	1537	37.00	0	85
5	86	3814037	4090559	93.24	2005	893.44	4	梁式橋	2487	2306	9.66	0	82
6	84	3560679	4388315	81.14	2003	480	8.6	梁式橋	26842	3634	36.08	0	63
7	85	3560679	4388315	81.14	2003	130	3.3	梁式橋	28884	3634	129.73	0	59
160	80	6000000	6435006	93.24	2005	23322	3	梁式橋	14236	20919	4.69	0	75

(3)建置人工智慧橋梁維護成本推估模式:

本研究擬使用(Cheng and Wu, 2008)所發表之 Evolutionary Support Vector Machine Inference Method「演化式支持向量機推論模式, ESIM」作為人工智慧橋梁維護成本推估模式之核心。首先將前一階段所建置案例資料庫中之橋梁基本資料及檢測結果(CI)等值作為模式輸入值,利用 ESIM 人工智慧學習機制,進行案例資料學習與訓練,找出歷史案例中輸入值與輸出值維修成本之映射關係,據此推論不同破壞程度(CI)下,所需之維修成本。本階段將推論公路總局所管轄之 3961 座橋梁未來不同元件老化程度下之維修成本。其模式分析流程如圖 8。

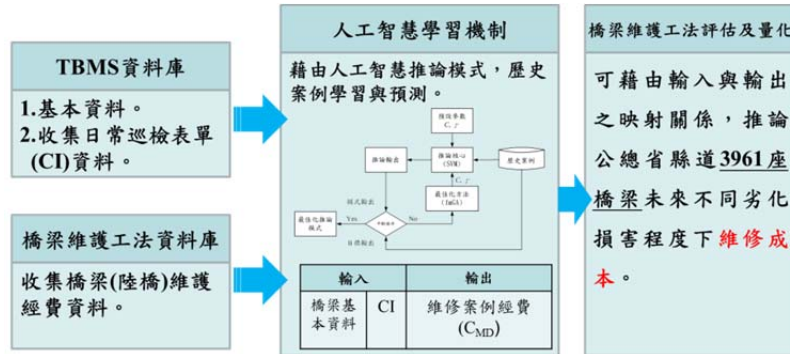


圖 8 人工智慧橋梁維修成本推論模式

(4)模式驗證與測試:為求模式之準確性以及廣泛應用性,本研究擬採取文獻中人工智慧常用之十組交叉驗證(10 fold Cross-validation)方式進行案例訓練與測試。其概念為將案例資料庫分成十組,輪流將其中 9 組當作訓練集,1 組當作測試集,並將 10 次的結果平均驗證方法可行性,以確保元件老化維護成本推論之正確性。

2.4.2 橋梁洪水冲刷維護成本(C_{MS})

(1) 橋梁洪水冲刷維修因子篩選:本階段同樣利用 SPSS 分析評估因子與維修成本相關性,從原始 TBMS 橋梁屬性資料 107 欄位中,挑選出顯著相關參數。初擬影響洪水

冲刷維修成本的 7 項影響因子如表 4 所示。

表 4 洪水維修成本影響因子

影響因子	關聯	單位
SSI	維修前 SSI 指標	數字
橋版投影面積	維修量體	M ²
最低橋下淨高(M)	維修量體	M
結構型式	維修方式	文字
高程*	山地與平地考量	文字
是否為跨河橋	跨河橋或陸橋案例	是/否
最近維修年	物價修正用	民國年

(2)案例資料建置: 本階段根據前一步驟所確認之洪水維修成本影響因子, 收集跨河橋維修案例, 建置維護案例資料庫。

(3)建置人工智慧橋梁維護成本推估模式: 本階段同樣應用 ESIM 作為人工智慧橋梁維護成本推估模式之核心。並以跨河橋維修案例庫為學習案例, 找出歷史案例中輸入值(SSI)與輸出值維修成本之映射關係, 據此推論未來洪水冲刷不同破壞程度下, 所需之維修成本。

(4)模式驗證與測試: 本階段同樣採用人工智慧常用之十組交叉驗證, 進行模式之驗證與測試, 以確保洪水維護成本推論之正確性。

(5)洪水重建成本(C_{RS}): 以橋梁原興建成本為基準, 透過現值法轉換求得橋梁因洪水造成重建之成本。

2.4.3 橋梁地震護成本(C_{ME})

(1)計算地震損傷比:

當結構物受地震損壞時, 一般會以結構物損壞狀況之損害比(Damage Ratio)此一量化標準來描述, 如式(5)。

$$\text{Damage Ratio} = \frac{C_L}{C_I} \quad (5)$$

上式, C_L: 結構物受損所需之修復成本; C_I: 結構物之建造成本。

本研究參考 ATC-13(1985)及 HAZUS(FEMA(1997))之損害程度定義及其損害比之關係, 將結構物各損壞分級(ME_j)對應之損害比(D_j)定義如表 5。

表 5 損害狀況及損害比之關係

損害分級(ME _j)	損害比(D _j)
無損傷	0.00
輕微損傷	0.02
中度損傷	0.10
重度損傷	0.50
完全崩塌	1.00

(2)地震風險成本(C_{ME}): 本階段根據所求得各損傷分級之發生機率(P_{MEj}), 乘上表 5 中

各損害分級之損害比(D_j)，加總後求得橋梁因地震在不同年限下之損害比關係圖(圖9)。圖中，在第10年時，可能維修補強成本等於興建成本之0.6倍，接著再乘以興建成本，即為橋梁因地震損傷造成可能之維修補強成本(C_{ME})。

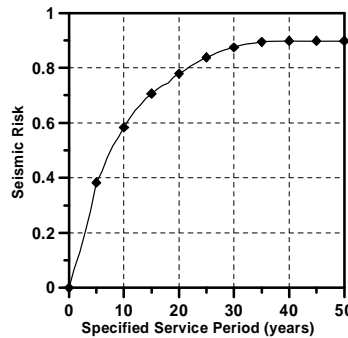


圖9 地震不同年限與損壞比關係圖

C_{ME} 可由式6計算求得。

$$C_{ME} = \sum_{i=0}^5 (D_j \times P_{MEj}) \times BuildingCost \quad (6)$$

上式， D_j ：建築物第j損壞分級之損害比。

P_{MEj} ：建築物第j損壞等級之發生機率。

Building Cost：以現值法轉換後橋梁興建成本。

(3)地震重建成本(C_{RE}):以橋梁原興建成本透過現值法轉換求得橋梁因地震造成重建之成本。

2.5 用路人成本評估 E(UC)

本階段將蒐集重要性非直接成本因子，並彙整相關用路人成本文獻，並經由篩選將重要性非直接成本因子量化成用路人成本，待確認用路人成本之量化公式後，本研究將收集用路人成本公式之相關資料與各橋梁之統計數據，如替代道路長度與車流量等，概算出橋梁部分封閉與完全封閉狀況下所額外增加之成本。

2.5.1 用路人直接成本評估模式

用路人成本概算表編號分成三大類。第一類為旅行延時成本，考量道路狀況分成部分封閉(維護時間間隔下，下次橋梁維護造成交通擁擠或是車流型態變化，而造成之用路人損失)與完全封閉(因洪水或是地震造成橋梁斷橋而道路中斷，用路人因橋梁封閉需改道行駛替代道路來抵達目的地之成本損失)。第二類為車輛運行成本，也分成部分封閉與完全封閉。第三類為事故發生成本，經由文獻(蘇振維，1991)[12]可得知，施工期間施工區肇事機率無明顯增加($A_n=A_a$)，因此本研究不考慮橋梁部分封閉之事故發生成本，故僅考慮完全封閉。另外，商家損失因不易評估，所以本研究僅考慮用路人成本。用路人直接成本概算表如表6所示。

表 6 用路人直接成本概算表(元/天)

用路人成本				
類別編號	成本項目	道路狀況	計算公式	說明
I	旅行延時成本	部分封閉	$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP$	L 為因子橋梁長度與改道長度量化部分 L：維修影響的道路長度(Km) L'：橋梁的改道長度(Km)
		完全封閉	$(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP$	S 為道路等級量化之部分，因不同道路等級平時車行速度不同 Sa：維修時車行速度(Km/hr) Sn：平日車行速度(Km/hr)
II	車輛運行成本	部分封閉	$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times r$	ADT 為橋上交通量量化部分 ADT：每日平均交通流量(輛/日)
		完全封閉	$(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times r$	
III	事故發生成本	完全封閉	$(L' - L) \times ADT \times A_n \times C_a$	W：旅行平均每小時時間價值(元/hr) NP：平均乘載駕駛人 r：車輛平均每小時燃料及折舊成本(元/hr) An：車輛事故發生率(次/百萬輛公里) Ca：每次事故成本(元/次)

2.5.2 旅行延時成本(Daily Traveler's Time Value)

用路人成本類別的第一類為旅行延時成本，為道路因橋梁維護或是災害發生時造成使用者旅行時間之延滯所帶來之成本損失。另外，延滯成本之產生也可能是由於道路進行工程施作時，造成交通擁擠或車流型態變化而造成旅行時間相對增加。其中施工期間之長短決定於施工作業量及施工效率，施工延時越長對於交通旅次將產生越大的衝擊。

2.5.2.1 旅行延時成本(部分封閉)

公式 7 為部分封閉的旅行延時成本計算公式，單位為(元/天)。

$$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP \quad (7)$$

參數名詞意義與說明

L=維護影響的道路長度(Km)，為橋梁之長度。

Sa=維護時車行速度(Km/hr)。依照 2012 年交通部公路總局快速公路施工交通管制手冊[13]之規定，相鄰兩最高速限標誌行車速度不得大於 20 公里，因此本研究假設 Sa 為 Sn 速限降低 20 公里。

Sn=平日車行速度(Km/hr)。依照交通部運輸研究所的第三期台灣地區運輸系統規劃-旅運特性與交通調查分析評估研究計畫(1995)[14]，其中，道路的平均車流速率可以依照道路等級設定，本研究依道路類別區分道路等級，如表 7 所示，本研究之橋梁所在道路類別有省級及縣級，因此根據橋梁所屬類別可找出各橋之平均自由車流速率。

表 7 道路等級與平均車流速率

道路等級	道路類別	自由車流速率(公里/小時)
2	(省級)主要道路	50
3	(縣級)主要道路	45

ADT=每日平均交通流量(輛/日)。可查詢 TBMS 系統，部分資料缺漏部分將使用交通部公路總局公路統計資訊(2014)[15]公布各路段之車流量。

W=旅行平均每小時時間價值(元/hr)，引用學者賴禎秀之研究[16]，按 2003 年運輸計畫季刊開車通勤者時間價值之模式研究，其考量可用時間、所得等各項限制條件，結果顯示車輛排隊等候時間價值每人約為每小時 98.8 元(經過基期換算後為每小時 115 元)。

NP =平均乘載人數。由於橋梁可供不同車種之交通工具行駛如機車、汽車、大客車等，而各車種之平均載客數又不相同。本研究依據運研所公路車輛行車成本調查(張杏珍，2000)[17]，統整出不同車種的平均載客數，如表 8 所示。並彙整中華民國交通部公路總局公路統計資訊(2014)[18]各區各車種之平均車流量，可算出各車種佔該區路線之百分比，最後乘上各車種之平均載客數，相加後得到該區之平均乘載人數。

表 8 各車種的平均載客數

車種	單位	機車	小型車	大客車	大貨車	聯結車
平均載客數	(人/車)	1.1	2	21.6	13	1.1

表 9 為各區工程處各車種之平均車流量，各車種可依照各區車種百分比乘上其平均載客數得到那一區之車種平均載客數。如二區工程處其平均乘載人數為 1.887 人。

表 9 各區各車種之平均乘載數

區域	項目	機車	小型車	大客車	大貨車	聯結車	總和
第一區	平均車流量	5296	10423	227	310	250	16505
	車種百分比	32.09%	63.15%	1.38%	1.88%	1.51%	1
	車種平均乘載數	0.353	1.263	0.297	0.024	0.017	1.954人
第二區	平均車流量	1516	3400	47	146	54	5163
	車種百分比	29.35%	65.84%	0.92%	2.83%	1.05%	1
	車種平均乘載數	0.323	1.317	0.198	0.037	0.012	1.887人
第三區	平均車流量	2311	2369	37	61	10	4788
	車種百分比	48.27%	49.47%	0.77%	1.28%	0.20%	1
	車種平均乘載數	0.531	0.989	0.167	0.017	0.002	1.706人
第四區	平均車流量	1439	4852	118	138	78	6626
	車種百分比	21.72%	73.23%	1.79%	2.09%	1.18%	1
	車種平均乘載數	0.239	1.465	0.386	0.027	0.013	2.129人
第五區	平均車流量	3158	6073	73	205	88	9597
	車種百分比	32.90%	63.28%	0.76%	2.14%	0.92%	1
	車種平均乘載數	0.362	1.266	0.165	0.028	0.010	1.830人

2.5.2.2 旅行延時成本(完全封閉)

公式 8 為完全封閉的旅行延時成本計算公式，單位為(元/天)。

$$\left(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}\right) \times ADT \times W \times NP \quad (8)$$

參數名詞意義與說明

L=維護影響的道路長度(Km)。

L'=改道長度(Km)，為車輛行駛替代道路的長度。資料來源係使用 TBMS 系統上之資料，部分缺漏之資料則以查閱地圖之方式判定求得。

S_n=平日車行速度(Km/hr)。

ADT=每日平均交通流量(輛/日)。

W=旅行平均每小時時間價值(元/hr)。

NP=平均乘載人數。

2.5.3 車輛運行成本(Daily Vehicle Detouring Cost)

非直接成本因子類別的第二類為車輛運行成本。可能為道路施工管制期間，因工程需要橋梁必須全面封閉施工，此時原行駛車流將移轉到鄰近替代道路通行，或是因道路部分封閉造成車流速度降低或是交通擁塞，因而除了影響鄰近道路交通量，也同時增加了用路者行車成本。

2.5.3.1 車輛運行成本(部分封閉)

公式 9 為部分封閉的車輛運行成本計算公式，單位為(元/天)。

$$\left(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}\right) \times ADT \times r \quad (9)$$

參數名詞意義與說明

L=維護影響的道路長度(Km)，說明同 24 頁。

S_a=維護時車行速度(Km/hr)，說明同 24 頁。

S_n=平日車行速度(Km/hr)，說明同 24 頁。

ADT=每日平均交通流量(輛/日)，說明同 24 頁。

r=車輛平均每小時燃料及折舊成本為 13(元/小時)。

2.5.3.2 車輛運行成本(完全封閉)

公式 10 為完全封閉的車輛運行成本計算公式，單位為(元/天)。

$$\left(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}\right) \times ADT \times r \quad (10)$$

參數名詞意義與說明

L=維護影響的道路長度(Km)。

L'=改道長度(Km)。

S_n=平日車行速度(Km/hr)。

ADT=每日平均交通流量(輛/日)。

r=車輛平均每小時燃料及折舊成本 13(元/小時)。

2.5.3.4 事故發生成本(Accident Occurrence Cost)

非直接成本因子類別的第三類為事故發生成本。當駕駛人行駛於道路時就會有發生事故的可能，當事故一旦發生即可能造成使用者生命財產之損失。經由文獻[12]可得知施工期間施工區肇事機率無明顯增加($A_n=A_a$)，因此本研究不考慮橋梁部分封閉之事故發生成本，僅考慮完全封閉車輛行駛替代道路造成之事故發生成本。計算公式 11 之相關參數解釋如下。

$$(L'-L) \times ADT \times A_n \times C_a \quad (11)$$

參數名詞意義與說明

L = 維護影響的道路長度(Km)

L' = 改道長度

ADT = 每日平均交通流量(輛/日)

A_n = 車輛事故發生率，從交通部交通統計月報之道路交通事故及違規概況[18]，可得知車輛交通事故 97 年~102 年每年的平均肇事率為 102.34 次/萬輛，且每輛車一年之駕駛里程為 12,808 公里(交通部統計處，2011)[19]，兩者相除後可得到車輛事故發生率為 0.799 次/百萬輛公里。

表 10 97 年~102 年肇事率、死亡率與受傷率統計

交通事故統計						
年份	件數	死亡	受傷	肇事率	事故死亡率	事故受傷率
單位	(件)	(人)	(人)	(件/萬輛)	(死亡人次/事故件數)	(受傷人次/事故件數)
97 年	170,127	2,224	227,423	81.39	0.01307	1.33678
98 年	184,749	2,092	246,994	87.01	0.01132	1.33692
99 年	219,651	2,047	293,764	101.94	0.00932	1.33741
100 年	235,776	2,117	315,201	107.3	0.00898	1.33687
101 年	249,465	2,040	334,082	111.94	0.00818	1.33919
102 年	273,234	1,928	362,562	124.45	0.00706	1.32693
平均	222,167	2,075	296,671	102.34	0.00934	1.33568

C_a = 每次事故成本 = 每次事故(受傷+死亡)成本(元/次)。每次事故成本可以分成交通事故受傷成本與交通事故死亡成本。由 97 年~102 年交通統計月報之道路交通事故及違規概況[20]，如表 10，可得知每次事故平均造成 0.00934 人死亡與約 1.33568 人受傷。將每次事故的死亡損失 96,515 元/次與每次事故的受傷損失 626,236 元/次，兩者相加後，可估算出每次事故成本(受傷+死亡)約為 722,751 元/次，在經過基期的換算後(2000 年至 2014 年)，最後可得每次事故成本約為 835,968 元/次。此部分計算參考文獻[21]

2.5.3.5 用路人直接成本小結

綜合上述各節成本計算流程結果，可彙整公路總局所管理的 2590 座橋梁之用路人直接成本。分成部分封閉與完全封閉，將部分封閉乘上維護機率，與完全封閉乘上重建機率，兩者取平均再乘上施工天數即可求得 $E(UC)$ 。

2.6 單橋橋梁風險管理策略訂定

將各橋之風險期望成本 $E_B(\text{Cost})$ 加總可得到群橋風險期望成本 $E_{GT}(\text{Cost})$ ，

$E_B(\text{Cost})$ 之計算方式如式 1 所示，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(式 13)，找出群橋生命週期最小的風險期望成本 $E_{GT}(\text{Cost})$ ，如公式 12。

$$\text{Min}E_{GT}(\text{Cost}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{Bij}(\text{Cost}) \quad (12)$$

式 12 中:

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

$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{Bij}(\text{Cost})$: 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(如式 13)。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 $E_{GT}(\text{Cost})$ 同時又滿足限制式的維護策略。

$$\begin{aligned} &\text{For } i=1 \text{ to } 20 \\ &\text{Subject to } \sum_{j=1}^m E_{ij}(\text{MC}) \leq B_i \\ &\text{END} \end{aligned} \quad (13)$$

式 13 中

m : 工程處轄區橋梁總數

B_i : 第 i 年度預算(Budget)

j : 為同一橋管單位之第 j 座橋梁

i 某段期間橋梁的使用年限，本研究 $i=1\sim 20$ 年

2.7 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 10 之示意。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。因此依照前述之計算成果可求得群橋各橋梁各年度之 $E(\text{MC})$ 、 $E(\text{RC})$ 與 $E(\text{UC})$ ，並加總求得生命週期維護風險成本 $E_B(\text{Cost})$ ，最後在符合維護預算限制下，找出最小之 $E_{GT}(\text{Cost})$ ，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。

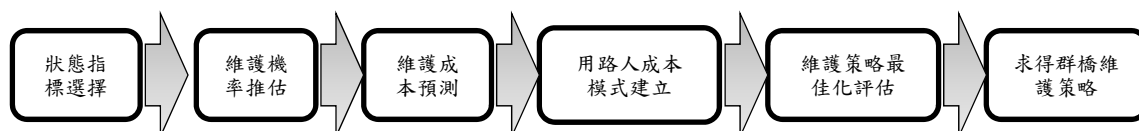


圖 10 群橋維護策略最佳化模式流程

以二區工程處為例，二區工程處目前總共管理 647 座橋梁，其橋梁維護方案有多種維護組合，SOS 會由同一工程處所有橋梁 $E_B(\text{Cost})$ 加總所得之 $E_{GT}(\text{Cost})$ 中，在

小於預算限制式下，搜尋金額最低之成本組合，進而找出適合之維護策略。本研究以二區工程處為例，群橋生命週期 20 年之維護策略計算結果如表 11 所示。其中，二區工程處管理橋梁數量為 647 座，預算限制為每年 3,780,217,329 元(平均值加上兩倍標準差)。另外，本研究成本計算部分皆考慮基期的影響。

表 11 二區工程處橋梁生命週期 20 年維護策略(節錄)

ID	E(MC)1	E(MC)2	E(MC)3	E(MC)4	E(MC)5	●●●●	E(MC)19	E(MC)20	Ej(Cost)
B01-0010-010A	1,330,494	1,333,695	-	1,816,265	1,343,344		3,372,605	1,392,645	13,605,096
B01-0010-091A	-	-	-	-	-		-	-	782,450
B01-0010-092A	148,305	-	-	579,565	-		1,062,189	-	3,420,739
B01-0010-097A	-	-	-	23,999,776	-		-	-	96,990,233
B01-0010-097B	2,773,040	2,779,711	-	12,381,976	2,799,822		2,895,611	-	84,261,017
B01-0010-097C	1,666,460	1,670,469	-	4,230,869	1,682,554		-	-	28,504,626
B01-0010-098A	-	-	-	-	-		-	224,347	1,915,868
⋮						⋮			⋮
B08-0760-023AL	482,040	483,200	484,362	-	12,595,586		25,698,513	-	184,254,065
B08-0760-023AR	-	1,637,329	1,075,134	1,077,720	-		13,026,514	-	93,011,278
B08-0760-026A	-	-	2,986,188	-	-		-	-	20,434,855
B08-0760-026B	503,880	505,092	506,307	-	-		1,315,040	-	20,650,975
維護橋數	269	280	284	273	336	●●●●	302	260	
$\sum_{j=1}^m E_{ij}(MC)$	1,123,352,542	1,425,774,076	1,721,602,940	1,585,075,426	1,961,542,235	●●●●	1,817,230,014	1,873,819,339	41,278,150,716

如圖 11 所示，目標函數最佳化搜尋結果中的 X 軸為疊代次數、而 Y 軸為最佳化之目標函數 $\text{Min } E_{GT}(\text{Cost})$ 。由此可知二區工程處在每個年度皆滿足預算限制下，20 年的維護策略 $\text{Min } E_{GT}(\text{Cost})$ 為 41,278,150,716 元。如表 21 所示。其維護策略為第一年維護 269 座、第二年維護 280 座、以此類推、第 20 年維護 260 座，由此可估計每一年平均維護的橋梁數量為 295 座。

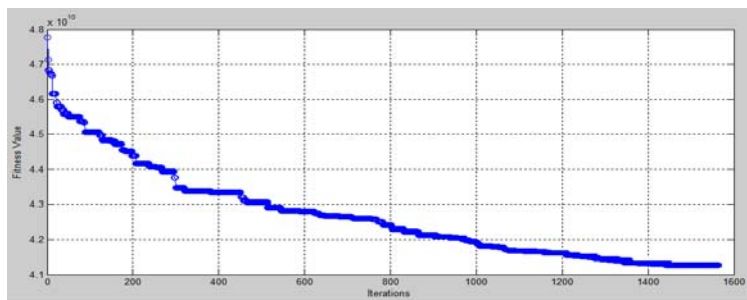


圖 11 最佳化搜尋目標函數結果

四、結論

本研究同時考量可視老化(visible)與潛勢危害(invisible)等損壞因素，導入風險概念，並以蒙地卡羅模擬計算橋梁生命週期將遭遇之災害頻率及強度，進而評估橋梁可能風險，並輔以 ESIM 推論橋梁不同維護策略之維護成本。最後，使用生物共生最佳化演算法，在低於歷年維護經費限制下，搜尋最低之群橋生命週期風險成本的維護策略。

本節彙整前述之研究過程及完成之研究成果，歸納以下幾點作為結論：

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，決定橋梁因年限、外力影響受損之最佳維護時機，進一步求得維護經費。

本研究針對國內橋梁進行風險辨識，篩選影響橋梁安全維護之風險因子，主要包括元件老化、洪水、地震等，另外納入用路人成本之損失，以風險期望值(風險成本)之概念，發展一橋梁風險評估模式，進而確立橋梁綜合能力指標。

本研究建立之橋梁綜合能力指標分別計算各因子在橋梁生命週期內可能造成之損壞機率與維護成本。機率部分依機率模型建置事件模擬器，透過蒙地卡羅模擬求得。成本部分應用人工智慧 ESIM 推估與預測各工程處內橋梁不同維護經費成本。再以兩者相乘積和，進而評估橋梁生命週期中可能造成的風險影響程度，加總得到群橋風險期望成本。

考量公路橋梁管理機關在維護經費有限情形下，應用生物共生演算法建置群橋生命週期維護策略最佳化模式，搜尋風險高低順序排列，並依據預算限制找出在預算限制下需維護之橋梁名單與成本。本研究可建議橋梁管理機關依不同橋梁現況有效投入經費進行維護與補強工作，找出群橋最小生命週期風險期望成本維護方案。

參考文獻

1. 賴明皇，台灣地區公路橋梁特性統計分析之研究，碩士論文，中央大學土木研究所，2004。
2. Kihyon Kwon, Dan M. Frangopol,(2011). “Bridge fatigue assessment and management using reliability-based crack growth and probability of detection models”, Probabilistic Engineering Mechanics 26471–480.
3. Huang, Rong-yau and Wen-zheng Hsu, “Reliability-Based Component Deterioration Model for Bridge Life-Cycle Cost Analysis” Integrated Life-Cycle Management of Infrastructures.
4. H. Ping Tserng, Samuel Yen-Liang Yin, and Chin-Lung Chung, “Maintenance Strategy for Bridge Components on the Basis of Performance”, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23(4), 234–243.
5. 全國法規資料庫(公路法與公路修建養護管理規則)，<http://law.moj.gov.tw/Index.aspx>，2014。
6. 吳育偉，「物件導向演化式支持向量機推論模式於營建管理決策之應用」，台灣科技大學營建工程系，2007。
7. Doddy Prayogo, "Symbiotic Organisms Search (SOS): A new metaheuristic optimization algorithm“, Elsevier Computer and structure, 2014.
8. 鄭明淵等，「橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究(3/4)」，交通部運輸研究所，2012。

9. 鄭明淵等，「橋梁通阻檢測分析模式建立研究」，交通部運輸研究所，2011。
10. 溫國梁、簡文郁、張毓文，「最具潛勢及歷史災害地震之強地動模擬」，國家地震工程研究中心，2005。
11. 高橋稔明、酒井通孝、関博、松島学，塩害環境下における RC 構造物の LCC 算定と補修工法選定システムの開発，コンクリート工學論文集，2005。
12. 蘇振維，「都市地區影響交通之重大工程施工規劃研究」，碩士論文，國立交通大學交通運輸工程研究所，新竹，1991。
13. 交通部公路總局，快速公路施工交通管制手冊，2012。
14. 交通部運輸研究所，第三期台灣地區運輸系統規劃-旅運特性與交通調查分析評估，1995。
15. 中華民國交通部公路總局公路統計資訊，<http://www.thb.gov.tw/TM/Default.aspx>，2014。
16. 賴禎秀，「開車通勤者時間價值之模式研究」，運輸計劃季刊 32 卷 3 期，2003。
17. 張杏珍，「公路車輛行車成本調查」，交通部運輸研究所，2000。
18. 中華民國交通部，交通統計月報之道路交通事故及違規概況
<http://www.motc.gov.tw/ch/index.jsp>，2014。
19. 自用小客車使用狀況調查報告，交通部統計處，2011。
20. 陳孜穎、周榮昌、邱裕鈞、郭仲偉，「交通事故賠償金額之研究—法院民事判決之應用」，中華民國運輸年會暨學術論文國際研討會，2012。
21. 徐梓隆，群橋生命週期維護策略最佳化之研究。碩士論文，台灣科技大學，2014。