

# 橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究(3/4)

## Development of A Bridge Lifetime Detection and Analysis Model (3/4)

主管單位：<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心

邱永芳<sup>1</sup>

謝明志<sup>1</sup>

林雅雯<sup>1</sup>

Chiu, Yung-Fang

Hsieh, Ming-Jyh

Lin, Ya-Wen

邱建國<sup>2</sup>

鄭明淵<sup>2</sup>

徐梓隆<sup>2</sup>

吳育偉<sup>2</sup>

Chiu, Chien-Kuo

Cheng, Min-Yuan

Hsu, Tzu-Lung

Wu, Yu-Wei

<sup>2</sup>國立臺灣科技大學營建工程系

### 摘要

臺灣橋梁飽受天然災害侵害，造成橋梁損壞及安全疑慮。如何評估現有橋梁健康度與提升橋梁壽齡是迫切的課題，國內現行檢測作業多以可視老化為主，對於地震、耐洪等潛勢危害較少著墨，要維護橋梁使用安全無虞除了定期檢測維修外，診斷橋梁健康度的評估維護模式亦非常重要。為了驗證預測模式，本研究針對三座橋梁之現地調查結果，進行細部評估分析後，其結果與橋梁維修預測模式相近。此報告同時考量可視老化與潛勢危害等損壞因素，由於同一橋梁在不同時間點執行維護下，有不同之效益。即維修方案執行後使設施保持堪用狀態或延續壽命的程度可能會有所差異，在考量公路橋梁管理單位維護經費有限情形下，管理單位必須決定維修時間使橋梁維修經費運用達到最佳化。本研究延續前年度成果，使用共生生物演算法，加入生命週期成本導向之概念建置「橋梁維護策略最佳化模式」，將同時考量各橋梁所評估之現況及風險程度，推估未來橋梁壽齡及狀態，進而輔助公路管理單位針對單一橋梁進行維修時機及經費估計，依不同橋梁現況有效投入經費進行維護與補強工作。在施政上，本研究可提供交通部、橋梁管理單位在研擬橋梁維護與補強策略之參考。在實務上，可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

The bridges are usually damaged by natural disasters, since Taiwan is located in seismic zone and influenced by typhoon climate. As a result, these likely to cause damaged bridges and have safety doubts. Therefore, how to evaluate the health of existing bridges and enhance the life-span is an urgent issue. Now most of the inspections in Taiwan are tangible (visible), as earthquake and flood belonged potential (invisible) risk which resistant capacity has not been described much. Therefore, it would be difficult to assess the real bridge's condition. In order to ensure the safety of the bridge,

the regular repair and maintained examine strategy of the bridges is very important. This research both consider the tangible and the potential risk, and is utilized Monte Carlo simulation to calculate risk of the bridges, the research continue the previous review. Then is imitated the method of SOS (Stochastic Optimization of Stimuli) algorithm with life cycle concept to set up Bridge life cycle Maintenance Strategy Optimization Model (BMSOM).

**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，橋梁飽受各種天然災害侵害，如地震、颱風及材料劣化等。地震方面因多次地震事件造成許多橋梁不同程度的損壞，早期老舊橋的耐震能力更有不足之慮。而洪水方面因每年颱風、豪雨及近年來河床嚴重下降、氣候變遷等因素，使得河水暴漲且水勢洶湧，劇烈淘刷橋墩及橋台之基礎處河床，特別對原本已裸露之橋基，災情更形惡化，橋梁易受沖刷而導致損壞。材料劣化方面因海島型氣候使環境中充滿鋼筋腐蝕劣化的因子，橋梁往往須於其壽齡內花上大筆費用進行維護補強工作，嚴重造成政府財政的負擔。此外在人為使用方面，亦有車輛超載問題。近年來，許多橋梁由於過去施工技術不足，加上施工品質未能嚴謹控制，造成未屆設計年限，卻面臨拆除或需花費龐大金額進行維修補強，對於政府日漸拮据之財務狀況，無疑是雪上加霜。因此，橋梁耐久性與安全性日益受到質疑與堪慮，保全橋梁殘餘壽齡以達到工程永續迫在眉睫。如何評估現有橋梁之健康度，進而計算不同時間點進行維護之延壽與經濟效益是迫切的課題。要保全甚至延長橋梁壽命，維持橋梁安全可靠的運輸狀況，除了規劃設計與施工恰當妥善以外，維修養護非常重要，這有賴於完整適當的橋梁檢測制度與系統之建立，安全檢測工作的實施，以及檢測後所做的性能評估、修繕、補強與維護管理。依照公路養護規定，橋梁檢測結果採用D.E.R.&U.方式評定，但因D.E.R.&U.是以目視方式進行，檢測成果常會因檢測人員之訓練程度、經驗與主觀意識而有不一致之現象，橋梁管理單位檢測的人力、機具、經費、檢測是否確實及彙整至橋梁管理系統之正確性，皆為公路橋梁管理單位了解橋梁狀況及排列維護優先順序之關鍵，攸關橋梁及用路人之安全。本研究前期已探討分析國內目前橋梁檢測作業規定及其執行情形，找出檢測作業問題點及不同檢測人員結果之變異性，研擬建議橋梁檢測有效施行之方法。本研究前期已探討分析國內目前橋梁檢測作業規定，並提出橋梁安全風險評估之規劃建議。同時考量可視老化與潛勢危害等損壞因素下，導入風險概念，並以可靠度分析方法計算橋梁風險值，最後建議合併相關檢測表單，建置本土化橋梁綜合能力評量表。上述成果可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，橋梁管理單位便能有效掌握橋梁狀況與風險排序。但是，由於同一橋梁在不同時間點執行維護下，有不同之效益。即維修方案執行後使設施保持堪用狀態或延續壽命的程度可能會有所差異。在考量公路橋梁管理單位橋梁現況且維護經費有限情形下，管理單位無法同時對所有橋梁進行全面檢測與修復之工作。因此，將有限資源做最有效運用更顯重要。本次研究延續前年度成果，加入生命週期成本導向之概念建置「單橋維修策略最佳化評估模式」，同時考量各橋梁所評估之現況及風險程度，推估未來橋梁壽齡及狀態，進而輔助公路管理單位針對單一橋梁進行維修時機及經費估計，針對單一橋梁依照不同現況有效投入經費進行維護與補強工作。進而在有限維護經費下達到最佳經濟效益。

## 二、研究方法

為完成本計畫之目的，本計畫擬定六階段之研究內容(圖1)，分述如下：

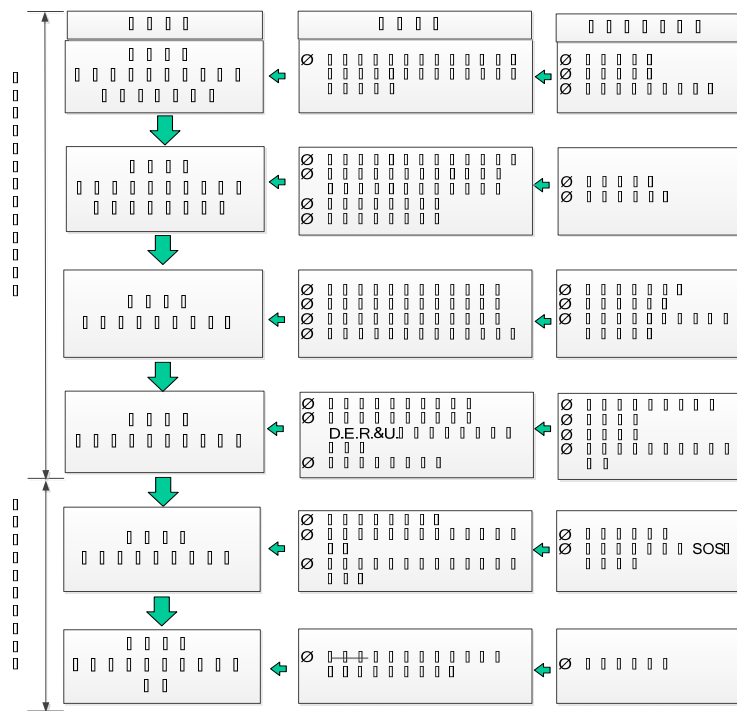


圖 1 研究階段及內容

### 2.1 蒐集彙整國內外相關橋梁維護管理資料

本階段擬先蒐集國內、外橋梁檢測文獻，再依據國內公路相關維護檢測作業、維護管理制度與機制提出國外橋梁檢測值得國內借鏡之建議。並蒐集臺灣地區橋梁管理資訊系統(TBMS)中橋梁檢測評估紀錄、損壞案例與維護工法資料及地震、洪峰歷史資料。

#### 2.2.1 國內公路相關維護檢測作業探討

「公路養護手冊」原頒布於民國七十六年十一月二十四日，為因應近年來全球氣候異常天然災害頻傳，養路技術亦有所增進，且各類型道路交通特性不同其相對應之養護項目及性質實有檢討修訂之必要。交通部公路總局於民國 100 年以國道高速公路局「高速公路公路養護手冊」為藍本，參考美國 AASHTO “Maintenance Manual for Roadways and Bridges, 4th Edition”，與日本道路協會「道路維持修繕要綱」等相關文件，並邀集交通部、運輸研究所及局內各養護單位，召開審查會議進行審查，修訂完成公路總局養護手冊。

#### 2.2.2 國外文獻探討

交通運輸是一個國家經濟與建設重要關鍵指標，橋梁更是公路運輸互相串連之命脈，本計畫彙整美國、英國、日本、中國大陸等檢測維護橋梁之相關規範、手冊、報告及資訊系統(如表 1)，而各國之作法可做為台灣未來對橋梁檢測維護之參考。

表 1 國外相關文獻整理表

國別	檢測規範	檢測手冊	檢測相關研究報告或書籍	檢測資訊系統
美國	National Bridge Inspection Standards,(Federal Highway Administration)	1. 橋梁檢測員參考手冊 2. 橋梁檢測員培訓手冊	1. Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges(1995 , Federal Highway Administration)。 2. 台灣與美國之橋梁檢測系統與制度	1. National Bridge Inventory Database 2. PONTIS
日本	橋梁定期点檢要領(案)	1. 橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領(案) 2. 橋梁における第三者被害予防措置(案)	1. 混凝土構造物の健全度診断技術開發報告書	J-BMS
英國	英國公路橋梁檢測優先權標準	-	1. Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects	BridgeMan
中國	公路橋涵養護規範	公路工程質量檢驗評定標準	1. 橋梁損傷診斷	CBMS

## 2.2 建置橋梁風險評估模式及最佳化維修策略

本研究首度將風險類別分為可視危害(visible)與潛勢危害(invisible)二部份，如圖 2 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可靠度指標。而潛勢危害則包括洪水沖刷與地震二因子，洪水沖刷採用 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。地震風險指標將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。

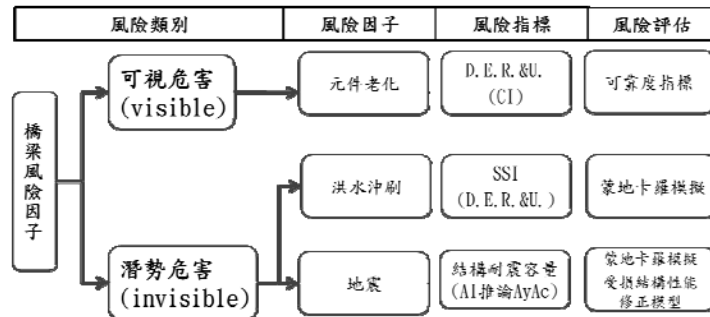


圖 2 橋梁風險評估

## 2.3 橋梁損壞維修機率

依據前一階段所確認之風險因子，本階段評估各風險因子造成橋梁損壞維修之機率。根據前步驟所確立之橋梁風險因子，計算橋梁風險成本 E(Cost)，如式(1)所示。E(Cost)同時考量老化、洪水、地震風險下之維修成本(Maintenance Cost)以下簡稱 E(MC)，與橋梁在未維修狀態下須承受可能損害之重建成本(Rebuilding Cost)以下簡稱 E(RC)，亦即橋梁因地震或洪水造成可能損害之重新興建成本。

$$E(\text{Cost}) = \overbrace{E(\text{MC})}^{\text{風險下維修成本}} + \overbrace{E(\text{RC})}^{\text{損害重建成本}} \quad (1)$$

其中：

E(Cost) :Expected Cost，為橋梁風險期望成本。

E(MC) : Expected Maintenance Cost，為風險下期望維修成本。

E(RC) : Expected Rebuilding Cost，為橋梁在未維修狀態下因地震或洪水造成損害之期望重新興建成本。

維護成本 E(MC)可由如公式 2 求得。

$$E(MC) = \left( \sum_{i=1}^{100} \overbrace{P_{MD_i} \times C_{MD_i}}^{\text{Visible}} + \sum_{i=1}^{100} \overbrace{P_{MS_i} \times C_{MS_i}}^{\text{Invisible}} + \sum_{i=1}^{100} P_{ME_i} \times C_{ME_i} \right) \quad (2)$$

式 2 中：

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

$P_{MS}$ : 洪水造成橋梁損壞之維修機率值(Maintenance Probability Caused by Scour)

$P_{ME}$ : 地震造成橋梁損壞之維修機率值(Maintenance Probability Caused by Earthquake)

$C_{MD}$ : 元件老化造成橋梁損壞之維修成本(Maintenance Cost of Deterioration)

$C_{MS}$ : 洪水造成橋梁損壞之維修成本(Maintenance Cost of Scour)

$C_{ME}$ : 地震造成橋梁損壞之維修成本(Maintenance Cost of Earthquake)

重建成本 E(RC)可由如公式 3 求得。

$$E(RC) = \left( \sum_{i=1}^{100} P_S \times C_{RS_i} + \sum_{i=1}^{100} P_E \times C_{RE_i} \right) \quad (3)$$

式 3 中：

$P_S$ : 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)

E(Cost)之計算流程步驟說明如下

### 2.3.1 橋梁維修機率-元件老化

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  $P_{MD} = 200/10000 = 2\%$ 。

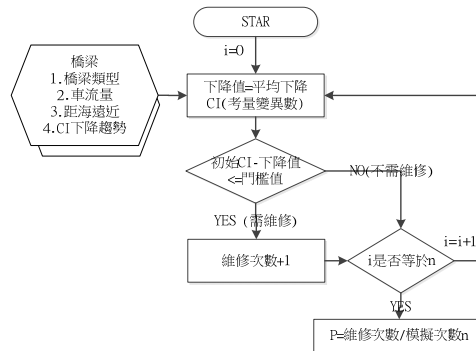


圖 3 可視危害造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

### 2.3.2 橋梁維修與損壞機率-洪水

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。

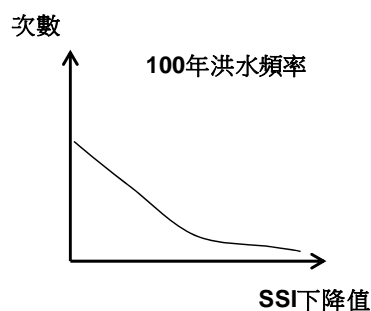


圖 4 發生 100 年洪水時對應 SSI 指標下降曲線示意圖

(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。

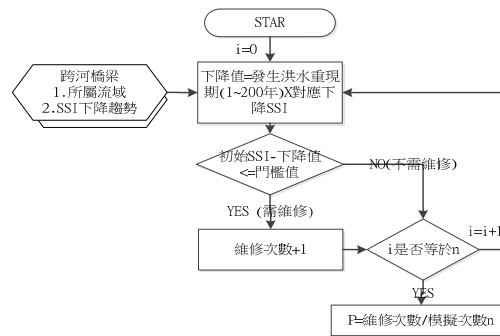


圖 5 洪水造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

(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 橋梁維修與損壞機率-地震:

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。



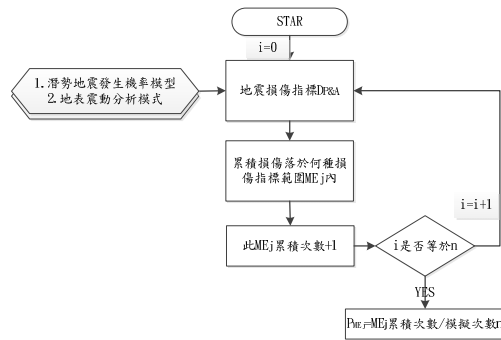


圖 6 地震造成維修機率蒙地卡羅計算流程圖

(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 2(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 6 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 2 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。

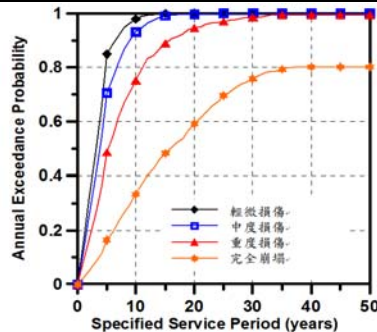


圖 7 未來損傷分級機率

(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 ( $P_{ME5}$ ) 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

對於橋梁強度偏低的橋梁,如能在適當的時機點維修,可在有限的成本下提升橋梁的壽齡。各橋可依前述求得之 CI 與 SSI 下降曲線,在未來某一時間點,求得所對應之 CI 和 SSI 值,然而目前尚無適當研究方法,來估算該時間點之 CI 與 SSI 值對應所需投入的維修成本。為解決此一問題,本研究將分別建立檢測歷史紀錄、元件老化與洪水橋梁維修案例資料庫,藉由檢測歷史紀錄與維修案例資料之連結,可

得不同損壞狀態下(CI 及 SSI)所對應之維修成本。然後應用人工智慧推論模式，以 CI 及 SSI 等因子為輸入，維修成本為輸出，建立橋梁老化、耐洪維修成本推估模式，以預測未來橋梁分別因老化與洪水維修所需花費的成本(CMD&CMS)。地震部分則參考日本阪神地震之文獻(高橋稔明等，2005)，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維修成本。最後將橋梁因老化與洪水因素所需花費的維修成本(CMD&CMS)分別與因老化與洪水維修機率(PMD&PMS)相乘，再加上橋梁因地震風險下所需維修成本，即可得到橋梁風險下期望維修成本 E(MC)。而橋梁斷橋重建成本與橋梁斷橋機率相乘，即可得到橋梁損害風險下期望重建成本 E(RC)。

### 2.4.1 橋梁元件老化維護成本(C<sub>MD</sub>)

(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 3 所示。

表 3 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	M <sup>2</sup>
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 4 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 4 非跨河橋維修案例(節錄)

No	新 CI	維修金額 (原值)	維修金額 修正後	物價指數	最近維修年	橋版投影面積 (M <sup>2</sup> )(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	EVI	山地 考量 (物價修正用)	竣工年 (物價修正用)
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	3500679	4388313	81.14	2003	480	8.6	梁式橋	26842	3634	36.08	0	63
7	85	3500679	4388313	81.14	2003	130	3.3	梁式橋	28864	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。

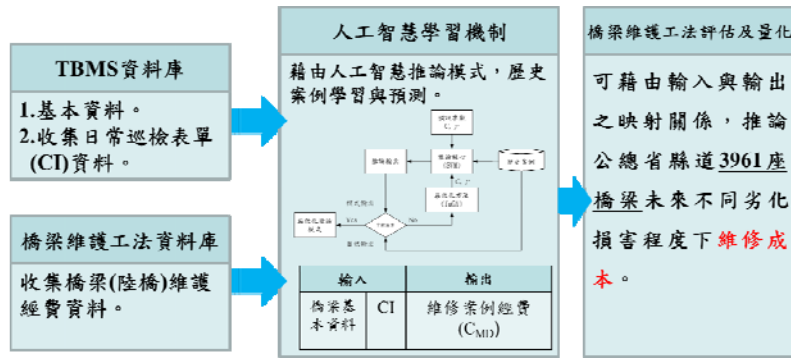


圖 8 人工智慧橋梁維修成本推論模式

(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 橋梁洪水沖刷維護成本(C<sub>MS</sub>)

(1) **橋梁洪水沖刷維修因子篩選:**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。初擬影響洪水沖刷維修成本的 7 項影響因子如表 5 所示。

表 5 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 <sup>2</sup>
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，據此推論未來洪水沖刷不同破壞程度下，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<sub>RS</sub>):**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<sub>ME</sub>)

(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(4)。

$$\text{Damage Ratio} = \frac{C_L}{C_I} \quad (4)$$

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 6。

表 6 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( $P_{ME_j}$ )，乘上表 7 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( $C_{ME}$ )。

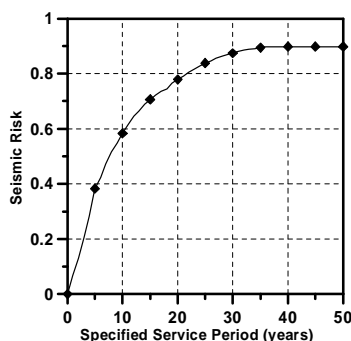


圖 9 地震不同年限與損壞比關係圖

$C_{ME}$  可由式 5 計算求得。

$$C_{ME} = \sum_{i=0}^5 (D_j \times P_{ME_j}) \times \text{Building Cost} \quad (5)$$

上式， $D_j$ ：建築物第  $j$  損壞分級之損害比。

$P_{ME_j}$ ：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 單橋維護成本最佳化

在橋梁生命週期中，不同維護時機之損壞機率與維修成本不同，其組合眾多。若以傳統試誤法等方式求解，將無法在短時間內找到答案。因此本研究擬使用生物共生演算法(SOS)建置「橋梁維護策略最佳化模式」(Bridge life cycle Maintenance Strategy Optimization Model, BMSOM)分別計算不同維修時機點之風險影響衝擊程度與所需維修成本，進而找出最低生命週期成本之維修方案。由於同一橋梁在不同時間點進行維護有不同之效益，如圖 10 所示，如未進行預防性維護，在遭受多次地震或洪水影響下，橋梁可能提早進入不堪使用或破壞的狀態。如能進行預防性維護補強，並考量最低橋梁生命週期成本之條件，則能在有限維護經費條件下達到最佳經濟效益。

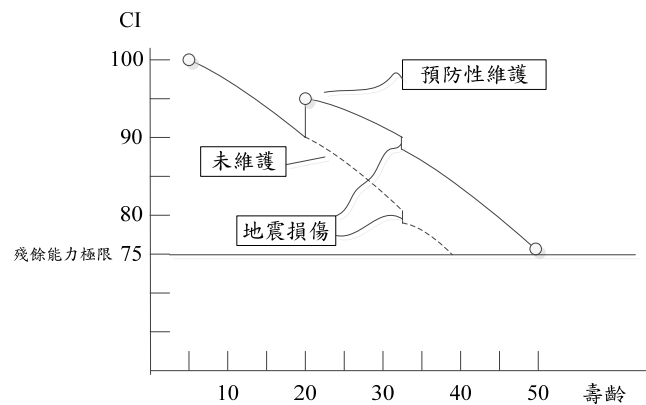


圖 10 橋梁維修策略示意圖

橋梁在不同時機維護，損壞機率與維修成本不同，其組合眾多。因此本研究擬發展一創新最佳化搜尋方法-生物共生演算法(Stochastic Optimization of Stimuli, SOS)，搜尋單橋生命週期最適維護時機與成本，以作為單橋擬定最適維護策略之參考，分析結果可提供公路管理單位從生命週期成本(LCC)的角度，規劃單一橋梁最適維修時機及成本。本研究擬發展一創新最佳化搜尋方法-生物共生搜尋演算法 SOS(Symbiotic Organism Search)，此靈感來自自然生態系統中生物之間的互動模式，如圖 11 所示。SOS 共使用三種策略:互利共生、片利共生和寄生模擬等自然互動的模式。由於 SOS 不使用微調的參數，相較於同類演算法其操作步驟更顯容易。另外，由於 SOS 提供了性能的穩定性，因此儘管比同類算法使用較少的控制參數，還能夠解決各種數值最佳化搜尋問題。

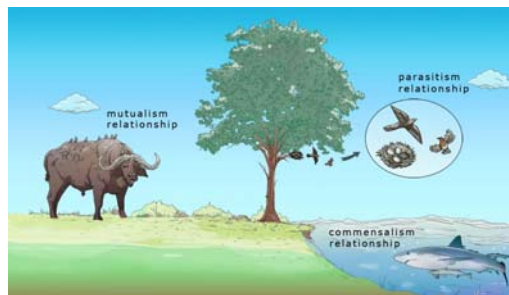


圖 11 SOS 演算法使用的三種策略:互利共生、片利共生和寄生示意

## 2.6 單橋橋梁風險管理策略訂定

根據上述最佳化流程，本研究在單橋維修策略模式最佳化過程中，初步將目標函數訂為求解最低的橋梁風險期望成本  $E(\text{Cost})$ ，如式 5.6 所示。本研究以橋梁壽齡 100 年為例，在同時考量三項因素下，分別為:1.老化、洪水、地震風險下之期望維修成本  $E(\text{MC})$ 、2.橋梁在未維修狀態下須承受可能損害之期望重建成本  $E(\text{RC})$ 與 3.保持橋梁堪用狀態，亦即是橋梁的狀態指標(假設 CI 值為 75~90 區間以上)必須維持在一定水準之上。進行單橋維護策略最佳化搜尋，計算橋梁 LCC 最低之  $\sum E(\text{Cost})$  維修成本。

風險下維修成本 重建成本

$$\text{Min } \sum_{i=1}^{100} E(\text{Cost}) = E(\text{MC}) + E(\text{RC}) \quad (6)$$

如圖 12 中，A 橋梁維修方案有多種維修組合，例如維修策略 1 為橋梁於 10 年與 30 年各修一次，使 CI 值能維持在門檻之上。維修策略 2 為 10 年、15 年、40 年各修一次，亦可使 CI 值維持在門檻之上，但其  $E(\text{MC})$ 、 $E(\text{RC})$  皆不同，即  $E(\text{Cost})$  有不同答案。因此本研究希望透過最佳化搜尋，求解 LCC 最低之維修組合。

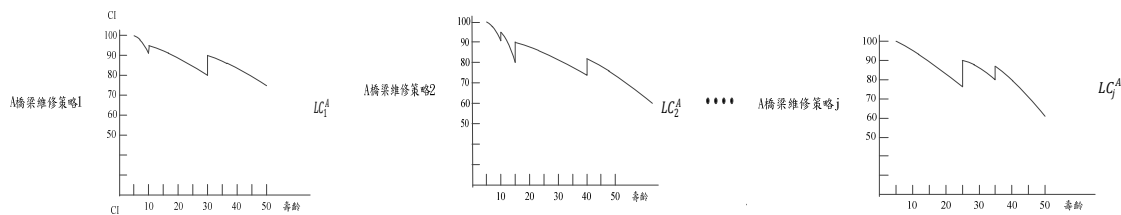


圖 12 橋梁維修組合方案

本研究期望求得最佳之橋梁維修成本與橋梁重建成本組合，如圖 13 所示，如果維修次數增多，雖能降低橋梁重建風險成本，但橋梁維修成本亦會同步增加。因此本研究考量橋梁生命週期總成本最小化，找出最佳維修策略之橋梁風險期望成本  $E(\text{Cost})$ 。

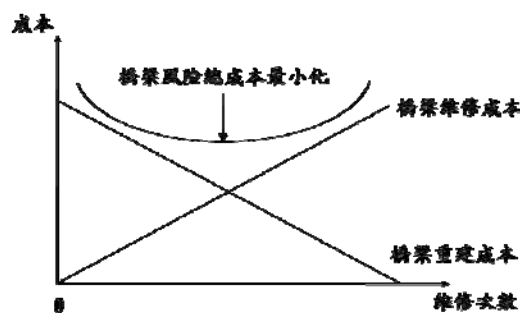


圖 13 單橋維修策略最佳化示意圖

如圖 14 所示，SOS 將從  $n$  種維修組合方案中，搜尋單橋生命週期最適維護時機與成本，以作為單橋擬定最適維護策略之參考，分析結果可提供公路管理單位從生命週期成本(LCC)的角度，規劃單一橋梁最適維修時機及成本，在有限維護經費

條件下，達到最佳經濟效益。

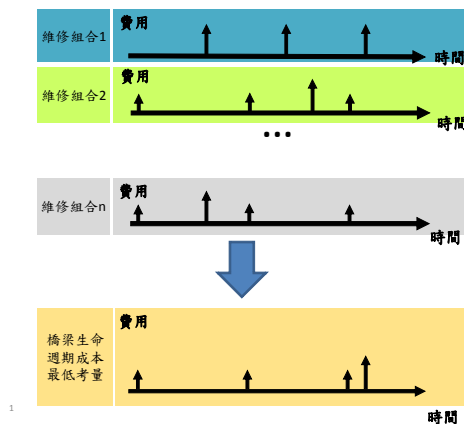


圖 14 單橋維修策略與方案

### 三、結論與建議

本研究同時考量可視劣化(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推論橋梁不同維修策略之維修成本，最後使用SOS最佳化演算法，搜尋橋梁於生命週期成本中，保持在一定水準之上的維護最低費用。本報告研究範圍僅限於鋼筋混凝土橋梁，未來可將其他形式之橋梁加入探討範圍。在此針對單一座橋梁進行維護策略最佳化之評選。然而，在考量公路橋梁管理單位無法同時對所有橋梁進行全面檢測與維護之作業，因此如何針對群體橋梁進行預算分配及經費評估，並依不同橋梁現況有效投入經費進行維護與補強工作，是一發展方向。

### 參考文獻

1. 高橋稔明、酒井通孝、関博、松島学(2005)，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。
2. 溫國樑、簡文郁、張毓文(2005)，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。
3. 張毓文(2002)，場址特性分析及最大加速度衰減模式校正，碩士論文，國立中央大學。
4. 鄭明淵等(2011)，橋梁通阻檢測分析模式建立研究，交通部運輸研究所。
5. Cheng, Min-Yuan and Wu, Yu-Wei, (2009), "Evolutionary Support Vector Machine Inference System for Construction Management", Automation in Construction, 18(5), pp.597-604, UK, SCI, EI.