

橋梁振動頻率量測方法與安全評估模式之研發

鄭明淵	國立臺灣科技大學營建工程系特聘教授
廖國偉	國立臺灣科技大學營建工程系副教授
吳育偉	國立臺灣科技大學營建工程系博士後研究員
林雅雯	交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
郭佑綱	國立臺灣科技大學營建工程系碩士

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。因此，對現有橋梁進行健康度檢測勢在必行。本研究以量測橋梁自然振動頻率取代目前例行性目視檢測方式(D.E.R.&U.)，改善其僅能觀看橋梁外部受損，無法評估內部性能損傷的缺點。而振動量測方式可分為直接和間接，直接量測法雖然結果較準確，但全面安裝測量儀器不僅費時且所需經費高。因此，本研究參考已發展之間接量測技術，評估間接量測所量測到橋面版之振動頻率是否能反應直接量測法量測到之橋墩振動頻率，進一步藉由量測頻率評估橋梁安全性。

根據上述，本計畫分為兩部分：1. 驗證間接量測橋面板之振動頻率能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率：分為實驗室試驗與現場調查兩部分進行驗證。首先，建立縮尺模型之水工

試驗成果，確認橋梁洪水沖刷與頻率之相關性，再藉由現地量測驗證間接量測能否反映直接量測之振動頻率；2. 決定橋梁振動頻率基準值，以作為衡量判斷橋梁是否安全之標準：用數值分析方法進行耐震與耐洪側推分析，推導求得橋梁損壞前後之頻率變化比值，定義為「地震損壞臨界頻率比值」(Rec)與「洪水沖刷臨界頻率比值」(Rsc)。並發展創新人工智慧推論模式，應用案例學習機制，找出所建置 27 座橋梁分析案例之初評因子(輸入)與詳評 Rec、Rsc 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋梁之 Rec 與 Rsc，作為判斷各橋梁是否安全之振動頻率比值基準值。公路橋管單位在災時即可藉由災害前後所量測之橋梁振動頻率比值與基準值比較，作為判斷橋梁封橋後能否開放通行之依據。平時則可用來檢視橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。

一、前言

橋梁為台灣地區用來連絡河流兩岸之重要交通工程設施，然而台灣屬季風型氣候夏季多雨，每年洪水來襲皆造成橋梁重大威脅，由於河水沖刷導致河床降低，使橋梁基礎深度變淺，影響橋梁的安全性能。此外台灣為多地震的國家，一旦發生地震等大規模天然災害時，橋梁倒塌或斷裂的機率極高。為了避免災害發生時，造成橋梁損壞導致交通中斷、居民受困或是人員傷亡等事件的發生，對現有橋梁進行健康度檢測勢在必行。目前臺灣橋梁例行性檢測方式係採用臺灣地區橋梁管理系統(TBMS)中之構件劣化評估方法(D.E.R.&U.)^[1]，此檢測方法為目視檢測，最大優點是執行容易、省時且耗費不多，但缺點是檢測成果常常會因檢測人員之訓練程度、經驗與主觀意識而有不一致現象^[2]，且評估結果有時與現場儀器檢測或載重實驗有甚大差異。再者，目視檢測僅能觀看到橋梁外部受損情形，無法評估橋梁因外力衝擊所造成內部性能損傷的狀況。

橋梁之自然振動頻率是評估橋梁安全的重要參數指標之一，當頻率發生變化的同時，極有可能是橋梁物理性質改變的徵兆。過去學者^[3]研究發現橋梁振動頻率的改變，相當反應著橋梁結構的惡化，原因可能來自橋梁結構其中任何一個桿件、連接介面、支撐點產生破壞，或是材料強度上發生老化的現象所造成。因此針對橋梁結構進行動力反應之量測，藉以求得橋梁的振動特性，再

由橋梁頻率的改變推估橋梁目前健康程度，為目前國內外監測橋梁進行防災預警的常用方法。

橋梁振動特性的量測方式可分為兩種：直接量測法和間接量測法。直接量測法主要利用安裝在橋梁墩柱之速度計，對橋梁作直接的振動量測，其量測結果準確，各振態皆可清楚於圖表上呈現，以作為判斷橋梁是否安全之依據，也是目前國內公路管理單位監測橋梁的普遍作法^[4]。然而由於台灣橋梁眾多，且多分佈於沿岸或高山縱谷間，全面安裝測量儀器不僅費時，且儀器安裝與維護成本亦非常巨大，因受限於預算限制，僅能針對少數重大橋梁進行監測。為此，楊永斌教授團隊^[5]由車橋互制理論概念首創間接量測法，相較於直接量測法，間接量測法只須藉由裝置在移動車輛上的速度計，即可擷取到待測橋梁橋面板之振動頻率，此方法具有移動性、迅速性、經濟性等優勢，然而過去對於間接量測法的研究重心，主要以橋梁或移動車輛之數值模擬、參數分析以及初步之現地試驗為主，目的在於證實間接量測法在理論上及實務上之可行性^[6]；目前之發展技術已可在現地間接量測到橋梁的頻率，但是間接量測所量測到橋面板之振動頻率是否能反應直接量測法量測到之橋墩振動頻率，並未作探討，而且對於所量測到之頻率如何分析評估橋梁安全性之研究，仍付之闕如，因此本計畫針對間接量測法作進一步之研究探討，透過橋梁所量測振動

頻率變化，分析評估橋樑之安全性。

本計畫針對公路總局所轄之橋樑，分兩個部分進行研究：1.驗證間接量測橋面板之振動頻率能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率：此部分驗證成果將作為後續研究之基礎，因此規劃分為實驗室試驗與現場調查兩部分進行驗證。首先，參考^[7]所建立縮尺模型之土工試驗成果，確認橋樑洪水沖刷與頻率之相關性，再藉由現地量測驗證間接量測能否反映直接量測之振動頻率；2.決定橋樑振動頻率基準值，以作為衡量判斷橋樑是否安全之標準：本計畫用數值分析方法，應用目前國內外常用之 SAP2000 軟體，建立橋樑有限元素模型，進行耐震與耐洪側推分析，推導求得橋樑損壞前後之頻率變化比值，將之定義為「地震損壞的臨界頻率比值」(R_{ec})與「洪水沖刷臨界頻率比值」(R_{sc})，此比值即可作為衡量評估橋樑健康度應用之基準。藉此，橋管單位可在災害前後，應用上述之快速量測方法，量測求得橋樑災害前後之頻率變化比值，然後再與理論 R_{ec} 或 R_{sc} 作比較，評估衡量橋樑安全性，於災時可作為橋樑封橋後能否開放通行之決策依據，平時

則可用來評估橋樑健康度，以作為橋樑維護之參考。

然而建立每座橋樑有限元素模型，進行耐震與耐洪之側推分析，其過程需具備專業知識，並耗費相當大的時間與人力，因此不可能針對公路總局轄下 2590 座橋樑作逐一的分析，求得各橋之 R_{ec} 、 R_{sc} 值，所以本研究以「橋樑通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋樑模型為基礎，在本計畫中將先前下部結構為固定(fixed)之假設解開，加入土壤性質，使數值分析更吻合於現場狀況，再針對地震與洪水沖刷重新分別進行結構模擬分析，並將分析結果建立案例庫，然後發展創新人工智慧(Artificial Intelligence, AI)推論模式，應用案例學習機制，找出案例初評因子(輸入)與詳評 R_{ec} 、 R_{sc} 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋樑之 R_{ec} 與 R_{sc} ，作為判斷各橋樑是否安全之振動頻率比值基準值，如此公路橋管單位在災時即可藉由災害前後所量測之橋樑振動頻率比值與基準值比較，作為衡量判斷橋樑封橋後能否開放通行之依據，在平時則可用來檢視橋樑健康度，作為橋樑維護之參考。

二、研究目的

根據前述之動機，為避免災害發生時，造成橋樑損壞導致交通中斷、居民受困或是人員傷亡等事件的發生，而須對現有橋樑進行全面快速檢測的前提下，本研究發展一套現地橋樑振動頻率

快速間接量測法與橋樑臨界頻率比值 AI 推論模式，然後將現地量測之振動頻率與推論模式推論之橋樑臨界頻率比值作比較，探討分析橋樑健康程度。在建立橋樑有限元素模型作數值分析方

面，除了考慮橋梁設計、地質狀況、初步評估與塑鉸性質外，為更貼近實際橋梁破壞情形，本計畫以交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋梁模型為基礎，將土壤反力係數納入考量，探討橋梁遭受地震與洪水等外力破壞時，反應在橋梁振動頻率變化之相關課題。綜合上述，本研究目的說明如下：

2.1 發展現地橋梁振動頻率快速間接量測方法

快速間接量測方法之建立主要分為三部份：

2.1.1 自動化資料收集與傳輸

此部份將針對量測頻率之速度計，開發軟體介面，擷取量測之頻率，顯示頻譜圖形，並以無線方式自動將資料傳回伺服器端，如此即可將現地橋梁所量測之頻率資料即時傳回，作後續之評估分析。

2.1.2 間接量測方法之建立

(1) 水工試驗確認水流流速對冲刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性結合本計畫共同主持人廖國偉執行之科技部計畫「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」^[7]所建立縮尺模型之水工試驗成果，模擬在不同水理參數條件下，求得洪水冲刷與橋梁振動頻率之歷時變化圖，進而確認水流流速對冲刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性。此階段之驗證成果係作為後續以振動頻率評估橋梁安全性之重要基礎。

(2) 建立間接量測法之標準作業流程
間接量測法在量測時，須考慮之因

素眾多，例如速度計放置位置(拖車上、轎車上或橋面板上)、量測方式(行進間或靜止)以及量測時橋上有無行車(正常或管制通行)，不同組合，其頻率量測結果均會有差異。因此此部份參考交通部「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」^[8]計畫，針對可行的組合，進一步作現地橋梁頻率量測試驗，彙整比較其振動頻率，確認何種間接量測法最為適當。

2.1.3 驗證間接量測能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率

將速度計分別安置在橋面版與橋墩(柱)上，固定其他橋梁條件，量測其頻率，再彙整分析比較兩者間之相關性。

2.2 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

在確認橋梁震動頻率間接量測之可行性後，接著為建立橋梁安全評估模式。在地震方面，建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式，此模式分為 4 步驟：

2.2.1 建置橋梁耐震有限元素模型

將以於交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋梁模型為基礎，在本計畫中，將先前下部結構為固定(fixed)之假設解開，加入土壤性質，使數值分析更吻合於現場狀況，並考量五種材料劣化程度，建置橋梁耐震有限元素模型。

2.2.2 進行側推分析案例

依上述已建立之橋梁耐震有限元素模型，再考量 RC 橋鋼筋腐蝕五種劣化程度，總計 135 筆模型資料重新進行側推分析，進而求得 135 筆橋梁耐震臨界頻率比值 (R_{ec})。

2.2.3 確立橋梁耐震臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本階段參考交通部公路總局計畫「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」^[9]與 TBMS 中所建立之橋梁基本資料及初步評估屬性，作為初步影響橋梁安全之因子(Input)， R_{ec} 為輸出，應用主成份分析法、類神經分析之多層感知法，及相關係數等分析法，對 135 筆資料做相關性分析，找出各輸入因子與輸出(R_{ec})之相關程度，據此篩選出重要影響因子，然後以所確認之影響因子作為輸入因子，側推分析求得之 R_{ec} 為輸出因子，建立此 27 座橋梁，鋼筋腐蝕 5 種劣化程度，共 135 筆資料之案例庫。

2.2.4 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

公路總局轄下橋梁共兩千餘座，若要對每座橋梁皆進行數值結構分析求得 R_{ec} 值，在運作上將會有時間及預算限制困難，故本研究應用創新人工智慧「演化式支持向量機推論模式」(ESIM)^[10]，結合上一步驟所建立之案例庫，透過案例訓練測試找出初評因子(輸入)與詳評 R_{ec} (輸出)間的映射關係，進而建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」。再以此模式推論公路總局轄下 2590 座橋梁之耐震臨界頻率比值(R_{ec})。

2.3 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式之建立步驟與耐震推論模式相類似，共分 4 步驟：

2.3.1 建置橋梁耐洪有限元素模型

本步驟採用相同 27 座橋梁模型與土壤條件，不同之處在於考量五種洪水沖刷深度，建置橋梁耐洪有限元素模型。

2.3.2 進行側推分析

針對 27 座橋梁，5 種沖刷深度，進行側推分析，求得 135 筆橋梁耐洪臨界頻率比值(R_{sc})。

2.3.3 確立橋梁耐洪臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

應用耐震推論模式中之因子篩選方法，確認選出影響耐洪臨界頻率之重要影響因子，作為本模式之輸入因子，上步驟側推分析求得之 R_{sc} 為輸出因子，建立此 27 座橋梁，5 種沖刷深度，共 135 筆資料之案例庫。

2.3.4 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

同樣地，結合演化式支持向量機推論模式(ESIM)與上步驟之案例庫，建立「橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式」。經由模式案例訓練測試結果，推論公路總局轄下 2590 座橋梁之耐洪臨界頻率比值(R_{sc})。

2.4 模式案例驗證與現地試驗

研究期間，在颱洪發生前後，按照本研究所建立之間接頻率量測方法，在洪水發生前後，量測所選定橋梁之振動頻率，計算求得災害前後之振動頻率變化比值 R_s ，比較 R_s 與 R_{sc} 值，若 $R_s > R_{sc}$ ，則橋梁健康度無疑慮，封閉橋梁可開放通行；若否，則該橋須作進一步之詳細檢測評估。在平時，則利用前後年量測之頻率變化比值與 R_{ec} 或 R_{sc} 比較，以作為橋梁維護補強之參考。

三、文獻回顧

本階段首先說明直接量測與間接量測之差別與優缺點，再探討橋梁臨界頻率等相關文獻。

3.1 橋梁振動量測簡介

為確保用路人行車安全與延長橋梁使用年限，例行性維修成為必要的工作；橋梁結構之檢測結果可為維修的時間點、範圍與程度之重要依據。因此，檢測的目的在於即時掌握橋梁結構之現況，包含發掘橋梁結構之損傷程度，用以評定橋梁之承載能力。評估橋梁之安全承載能力時，通常必須在合理的成本下，取得精確之檢測數據。然而橋梁檢測方法眾多，其中自然振動頻率一般均認為可做為橋梁健康與否的指標，因為若橋基受到嚴重的沖刷或破壞，則橋墩的振動頻率將隨之下降，因此若檢測過程中偵測到上述情形時，表示該橋量極有可能無法達到原設計之目標強度，橋梁亦可能發生非預期性之破壞，導致行車及用路人安全上的顧慮，故橋梁結構自然振動頻率檢測分析為本計畫主要檢測對象。以下為振動量測試驗之介紹，分別為直接量測法與間接量測法。

直接量測法利用直接安裝在橋墩之高敏感度、高精確度的感應振動計（如速度計、加速度計等）量測自然外力（如風力、地震力或車輛載重等）所產生的微小振動，進一步將結構物位移、速度或加速度的反應歷時轉換反應輸

出頻譜，即可求得結構物的振動頻率。直接量測法其頻率測量結果較準確，但需耗費時間及安裝成本與維護成本龐大，在有限經費與專業人力下，將無法對每座橋梁做測量^[4]。

間接測量法源自於 Yang 等人於車橋互制問題(Vehicle-Bridge Interactive Problem)上的研究所提出來的概念^[11]，係利用安裝有感應器之實驗車輛通過橋梁的方式，間接來量測橋梁頻率，取代以往直接由橋梁橋墩上的感應器取得其動力反應。這種量測方式不需要安裝任何設備在橋梁結構體上，所以在施作上將更為迅速且經濟，經由車輛與橋梁之間的互制作用後，系統的輸出包含橋梁與移動車輛的動力反應。Yang 等人研究間接量測法目的在於使其更貼近直接量測結果。以下為直接量測與間接量測優缺點比較表(表 1) 及相關文獻介紹(表 2)。

表 1、振動量測法優缺點比較表

檢測方法	優點	缺點
直接量測法	量測結果準確	耗時、安裝及維修成本龐大
間接量測法 (移動式振動檢測)	量測迅速、成本較低	量測結果有部分誤差需修正

表 2、相關文獻介紹

作者	研究內容	量測方法	
		直接	間接
S.A. Mirza and J.G. MacGregor(1979)	Variability of mechanical properties of reinforcing bars	✓	
Yang, Y.B., Lin, C.W., and Yau, J.D. (2004)	從經過的車輛的動態影響提取橋頻率的可行性。		✓
Lin, C.W., and Yang, Y.B. (2005)	由一個輕型拖曳車用接收的橋的振動基本頻率，利用傅力葉轉換去除其他雜訊，得到橋梁真正頻率，作為快速量測方法		✓
陳正興、李維峰、梅興泰(2009)	嘗試使用微振法得出頻率的下降程度診斷出結構是否安全或結構破壞的原因。	✓	
Yang, Y.B., and Chang, K.C. (2009a)	為了提高成功確定關注的橋頻率的概率，各個振幅比將被定義，用於評估成功識別從經過車輛的橋頻率作有用的指標。		✓
S. Foti, D. Sabia(2011)	Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge	✓	
石峰(2011)	根據現地橋體微振量測進行有效沖刷評估以至長期監測的方法。	✓	
李金翰(2011)	試圖以橋墩頻率的變化，對橋墩的臨界封橋頻率值作一明確的定義。	✓	✓
鄭明淵、歐昱辰、邱建國、廖國偉(2011)	透過非破壞性振動檢測、材料劣化評估與地震破壞潛勢、人工智慧機械學習推論模式及地表震動分析模式等方法之結合，進而發展一符合台灣地區特性之「橋梁通阻檢測分析模式」。		✓
S.H. Ju(2013)	Determination of scoured bridge natural frequencies with soil-structure interaction	✓	
L.J. Prendergast, D. Hester, K. Gavin, J.J. O'Sullivan(2013)	An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour	✓	
鄭明淵、廖國偉與吳育偉等(2013)	針對多種橋梁頻率量測法(包含直接與非直接量測)進行試驗，分析並比較其間差異，探討非直接量測法應用於實際橋梁之可行性。	✓	✓
陳旻昱(2014)	本文主要分為兩大部份，第一部份為使用直接量測法中的微振試驗，獲取目標試驗橋梁的振動資訊，並且分析其動力特性；第二部份為間接量測法試驗研究，包括試驗拖車的設計及其動力特性，以及間接量測法現地試驗。	✓	✓
吳侑軒(2014)	利用數值模擬進行間接量測法之探討。	✓	✓

本計畫將針對現地橋梁振動頻率檢測與分析進行研究，然而因台灣地區橋梁數量多，逐一設置固定式頻率監測儀器成本過高，且申請封橋程序過於繁複困難，亦須考慮當地居民之通行方便與否，因此在不影響交通前提下，快速量測橋梁頻率為本研究探討重點。

3.2 橋梁臨界頻率之相關研究文獻探討

橋梁之自然振動頻率是橋梁的重要參數指標之一，當其發生變化的同時，極有可能是橋梁物理性質改變的徵兆。過去的研究學者亦發現橋梁振動頻率的降低^[3]，極可能隱含著橋梁結構的惡化，可能是由於橋梁結構其中任何一個桿件、連接介面、支撐點產生破壞，或是材料強度上發生老化的現象所造成，表示該橋梁極有可能無法達到原設計之目標強度。

橋梁自然頻率的下降，即橋梁可能產生受損情況，在 M_{bridge} (橋梁質量) 不

會明顯改變的情況下， ω_{bridge} (橋梁震動頻率) 的下降極有可能是由於 K_{bridge} (橋梁自身勁度) 下滑所造成，以下為橋梁頻率與橋梁勁度及橋梁質量之間的關係式(1)。

$$\omega_{\text{bridge}} = \frac{K_{\text{bridge}}}{M_{\text{bridge}}} \quad (1)$$

橋梁振動頻率之量測具有必要性，其中主要的原因有二，其一，針對一座新完工落成之橋梁，利用現地量測法取得橋梁的基本動力性質，可做為橋梁基本性質的基準，也可以做為分析方法比較之依據。其二，當橋梁使用時間越長，其結構將越容易因為局部破壞或是老化現象，而與當初設計之目標產生偏差，其力學性質就更加難以掌握，因此利用現地量測法得到橋梁當下之動力性質，進而分析橋梁的現況^[12]。

四、橋梁臨界頻率比值推論模式架構

4.1 橋梁臨界頻率比值推論模式

透過文獻，彙整國內外橋梁自然振動頻率相關文獻資料，回顧橋梁頻率量測之方法作業流程，及影響頻率之相關因子(輸入與輸出因子)；另探討本計畫發展應用之相關技術，研擬如何將人工智慧 ESIM 導入橋梁安全臨界頻率比值之推論，建立橋梁臨界頻率比值推論模式。

(1) 橋梁耐震臨界頻率比值(R_{ec})

雖然工程師可以針對同一座橋梁

進行地震前後頻率之量測與比較，但若要分析評估橋梁之受損情況，則須訂定一明確臨界值，作為比較基準。在此，將地震破壞橋梁前後之頻率比值定義如下：

$$R_e = \frac{f_a}{f_b} \quad (2)$$

其中， f_a 為地震後橋墩的量測振動頻率， f_b 為地震前橋墩的量測振動頻率， R_e 為兩者之比值。

橋梁安全預警臨界頻率比值 R_{ec} 則定義如下：

$$R_{ec} = \frac{f_c}{f_o} \quad (3)$$

其中， f_c 為橋梁崩壞點所對應之頻率， f_o 為橋梁未受損前(原始)之頻率。崩壞點之定義為任一橋梁之極限側向抵抗力等於地震施加於該橋梁的外力。

$R_e < R_{ec}$ 則該橋梁有安全上的疑慮，封橋後不建議開放通行。

$R_e > R_{ec}$ 則該橋梁無安全上的疑慮，封橋後建議開放通行。

(2) 橋梁耐洪臨界頻率比值(R_{sc})

同樣地，洪水前後之頻率比值定義如下：

$$R_s = \frac{f_{sa}}{f_{sb}} \quad (4)$$

其中， f_{sa} 為洪水後橋墩的量測振動頻率(第一振態)， f_{sb} 為洪水前橋墩的量測振動頻率(第一振態)， R_s 為兩者之比值。

橋梁安全耐洪臨界頻率比值 R_{sc} 定義如下：

$$R_{sc} = \frac{f_{aa}}{f_{ab}} \quad (5)$$

其中， f_{aa} 為橋墩達到極限受損時的振動頻率(第一振態)， f_{ab} 為橋墩未受損的振動頻率(第一振態)。極限受損之定義為任一橋梁之極限側向抵抗力等於洪水施加於該橋梁的外力。

$R_s < R_{sc}$ 則該橋梁有安全上的疑慮，封橋後不建議開放通行。

$R_s > R_{sc}$ 則該橋梁無安全上的疑慮，

封橋後建議開放通行。

本計畫將以比值做為研判橋梁安全與否的指標，圖 1 為橋梁安全臨界頻率比值推論模式與安全評估之流程架構。

4.2 執行步驟

4.2.1 自動化資料收集分析與傳輸

本系統將自動下載速度計中所記錄之檔案，擷取出使用者所需的資料並且加以分析，最後將分析結果透過 4G 無線網路傳輸方式匯入至伺服器端^[13]，作後續模式之推論與評估分析。本階段共分為三部分：(1)資料收集(2)資料轉換分析(3)資料傳輸

4.2.2 間接量測方法之建立

(1) 水工試驗確認水流流速對冲刷深度的影響

本計畫參考共同主持人廖國偉教授執行之科技部計畫「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」^[7]所建立縮尺模型之水工試驗成果，該研究模在不同水理參數條件下，求得洪水冲刷與橋梁振動頻率之歷時變化圖，進而確認水流流速對冲刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性。而此部分之研究成果為本計畫後續以振動頻率評估橋梁安全性之重要基礎。

水工試驗的首要步驟為確認原流況與模型間具有相同之福祿數，即縮尺模型的建置必須確認對應於實驗對象環境，設置模型尺寸的另一個原則為在已知的試驗場地條件下，選擇較有利(大)的縮尺比例；在此條件下設計模擬之幾何與水理參數如：流速、流量與曼寧係數。該計畫模擬的對象為蘭陽溪流域之蘭陽大橋，根據上述原則，一旦決定所

試驗的對象(橋梁)後，即可進行相關參數的設定，如流速與流量。蘭陽大橋 100 重現期之平均流速為 2.27m/s，則試驗時所對應的流速為 $2.67/6=0.445\text{m/s}$ 。

(2) 建立間接量測法之標準作業流程

本研究根據移動式量測之特性，擬定移動式振動檢測作業流程如圖 2 所示。

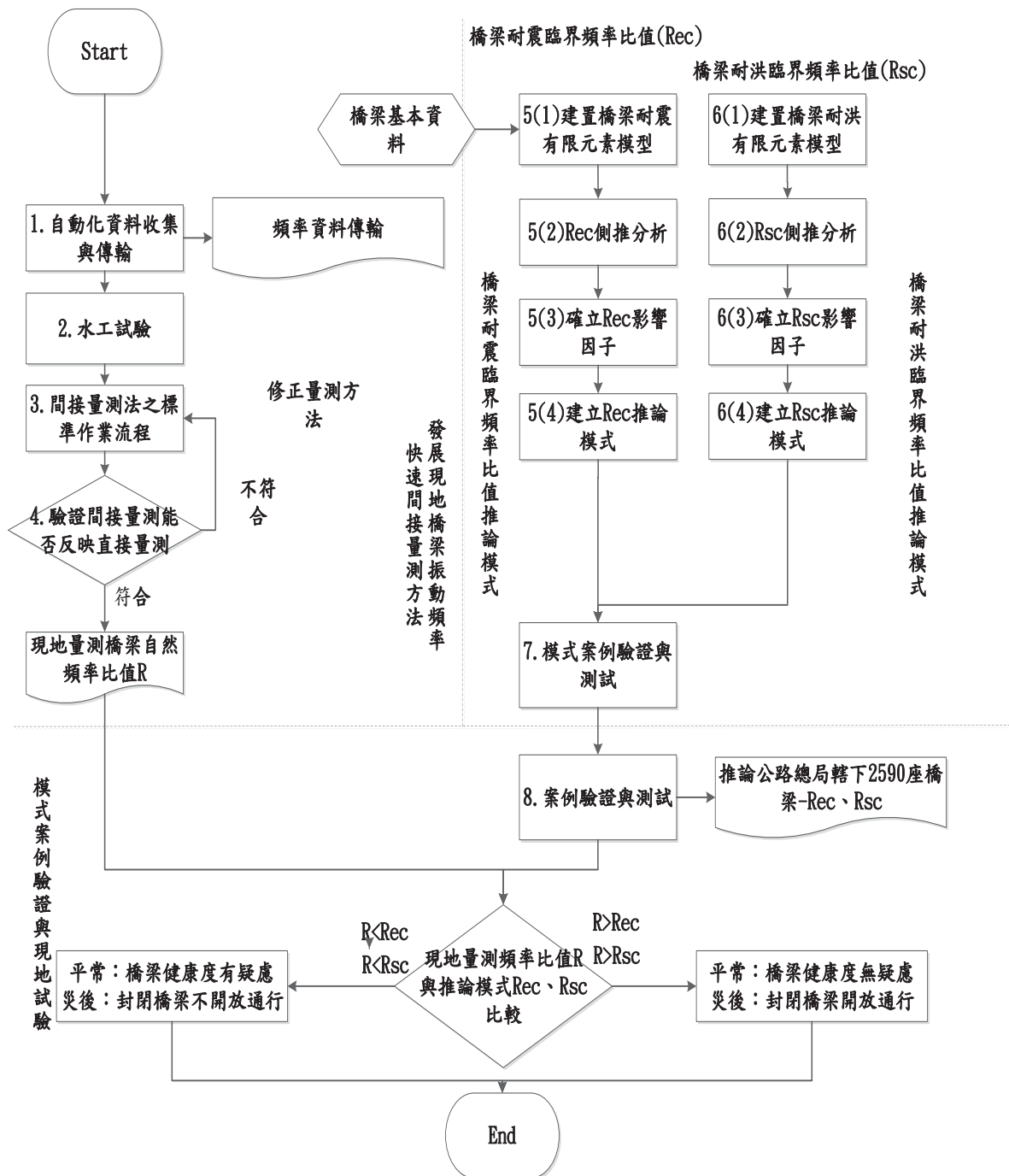


圖 1 橋梁臨界頻率比值推論模式與安全評估流程架構圖

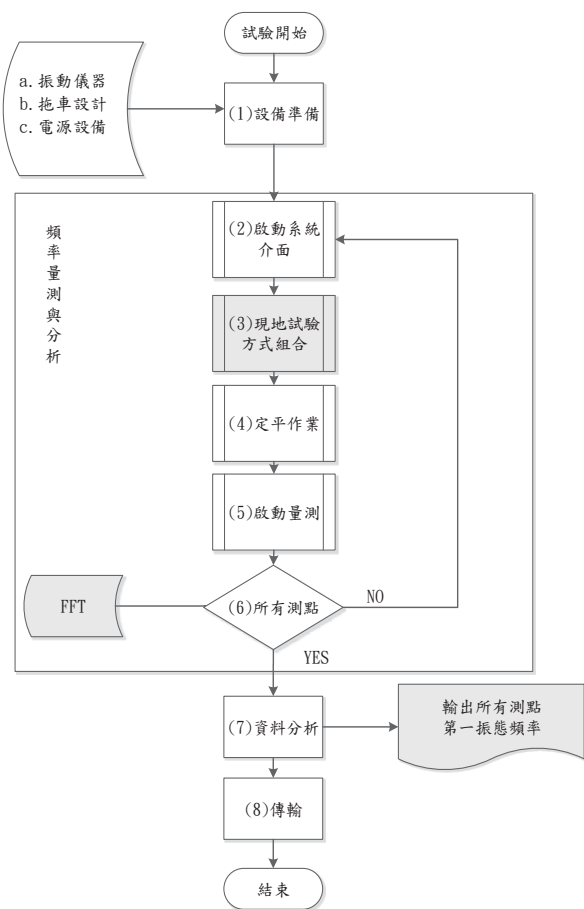


圖 2 臺灣地區建議之移動式振動檢測作業流程圖

4.2.3 驗證間接量測能否反映直接量測 法量測到橋墩振動頻率

在上述間接量測法標準流程建立後，本計畫將進一步驗證間接測量能否反映直接量測法所量測到之橋墩振動頻率，本計畫依據以下幾點選擇試驗對象：

- (1) 因間接量測技術於國內尚未成熟，為專注於技術開發，以簡支直線型橋梁為優先。
- (2) 為配合整體設計規劃，試驗橋梁需有竣工圖，以利相關後續分析。

4.2.4 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論 模式

(1) 建置橋梁耐震有限元素模型

本計畫以交通部運研所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」^[8]所建立 27 座橋梁之 SAP2000 數值模型為基礎，基於橋梁振動頻率會受基礎土壤性質的影響，因此需將先前假設橋梁基礎為固定之條件解開；再考量各橋梁會因材料劣化，如：鹽害、中性化等因素，造成鋼筋斷面腐蝕，降低橋梁耐震能力，進而影響橋梁之振動頻率，所以研究將針對每座橋考量 5 種不同鋼筋腐蝕程度，進行側推分析。27 座橋梁清單如表 3 所示。

表 3 分析橋梁總表

編號	橋名	縣市	路線
1	三星橋	宜蘭縣	臺 7 丙線
2	千鳥橋	臺南市	臺 20 線
3	中隘橋	新竹市	臺 1 線
4	中彰大橋	臺中市	臺 61 線
5	牛鬥橋	宜蘭縣	臺 7 丙線
6	平和橋	臺南市	臺 20 線
7	尖山大橋	苗栗縣	臺 1 線
8	朴子溪橋	嘉義縣	臺 19 線
9	老坑溪橋	桃園	臺 1 線
10	西湖橋	雲林縣	臺 17 線
11	東華大橋	花蓮縣	臺 11 丙線
12	枋山大橋	屏東縣	臺 1 線
13	虎尾溪橋	雲林縣	臺 1 線
14	南勝橋	高雄市	臺 21 線
15	急水溪橋	臺南市	臺 1 線
16	執信橋	宜蘭縣	臺 7 線
17	都威橋	臺東縣	臺 11 線
18	富林橋	桃園縣	臺 15 線
19	新潮州大橋	屏東縣	臺 1 線
20	福同橋	南投縣	臺 21 線
21	頭屋大橋	苗栗縣	臺 13 線
22	龍門橋	新北市	臺 2 線
23	豐源大橋	臺東縣	臺 11 線
24	蘭陽大橋	宜蘭縣	臺 9 線
25	北勢大橋	苗栗縣	臺 13 甲線
26	武陵橋	臺東縣	臺 9 線
27	仙人橋	南投縣	臺 14 線

(2) 進行側推分析

本研究使用：1.Xtract 2.SAP2000 兩套軟體，進行建模分析。在使用 SAP2000 套裝軟體建置橋梁模型前，應用 Xtract 斷面分析軟體分析橋墩斷面，再以 SAP2000 進行側推分析，求得橋梁之振動臨界頻率比值。詳細分析步驟如下：

關於 Xtract 部分：在取得橋梁竣工圖後，依據圖中橋梁相關尺寸與資訊，如橋墩高度、橋墩寬、基礎尺寸、鋼筋量等，應用在 Xtract 建置墩柱斷面模型，接著將 Xtract 軟體分析所得之墩柱降伏彎矩、極限彎矩、降伏曲率、極限曲率等相關係數，進行塑鉸之計算及破壞模式之判定，如此即可得知墩柱之塑鉸性質，並可判斷其破壞模式。

在 SAP 分析部分：此階段依據橋梁竣工圖中所提供之橋梁資料，例如：

橋梁材料強度、斷面尺寸、基礎及地盤型式、鋼筋混凝土構材配筋等細節資料，建置 SAP 模型，進行側推分析，以求取整體結構之水平側力及水平位移關係，進而求得橋梁的耐震臨界頻率比值^[15]。

(3) 確立橋梁耐震臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本研究參考交通部公路總局於 2009 計畫「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」^[9]與 TBMS 中所建立之橋梁基本屬性資料為基礎，並結合文獻中所收集之影響因子，運用問卷調查、統計相關性等方法進行篩選，找出影響橋梁耐震能力較高之因子，作為人工智慧推論模式之輸入因子，並以前述側推分析所求得之橋梁 Rec 值為輸出變數，建立案例庫。以下為影響因子篩選步驟，如圖 3 所示。

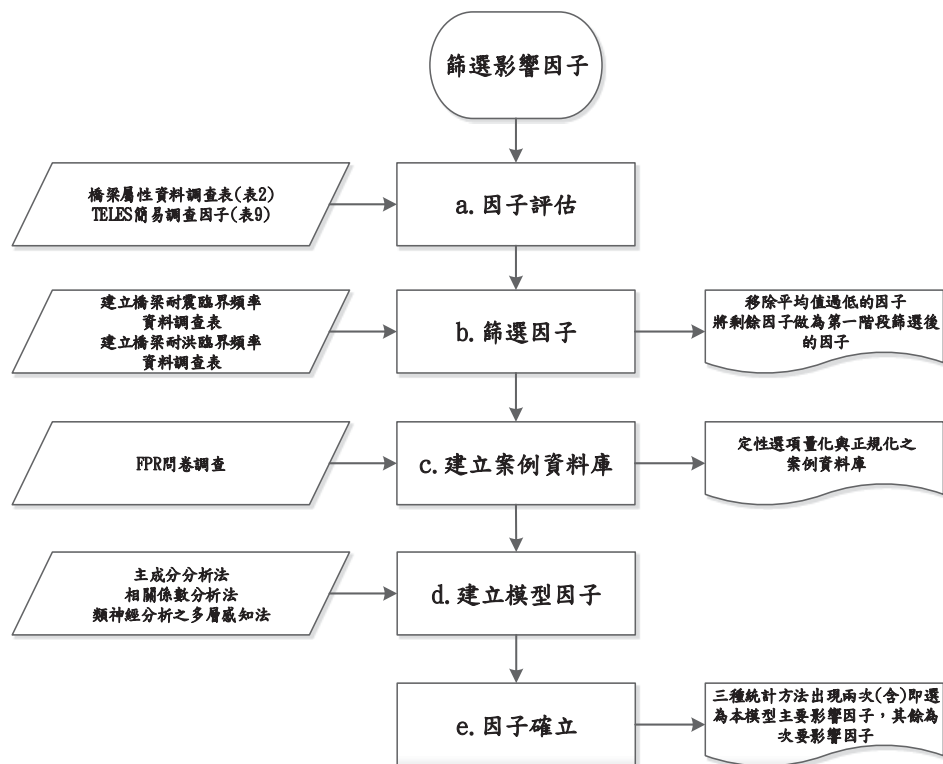


圖 3 篩選影響因子步驟圖

- a. 因子評估：根據上述，本研究初步確認 33 項影響因子，再依定量因子、定性因子及其他因子三項進行歸類，如表 4 所示。

表 4 初擬因子

輸入	定量因子	1.單垮最大垮距	5.設計水平加速度	9.歪斜角
		2.橋寬	6.橋長	10.垮數
		3.震動單元數	7.橋梁座標	
		4.基樁裸露深度	8.土壤液化類別	
	定性因子	11.結構型態	15.橋梁分類	19.防落設施
		12.橋墩型式	16.主梁型式	20.地盤種類
		13.橋台型式	17.橋墩基礎	21.設計年代
		14.支承裝置	18.橋台基礎	
	其他因子	22.橋梁名稱	26.路線名稱	30.竣工月
		23.工程處	27.里程數	31.ID
		24.工務段	28.公路總局橋梁編號	32.跨越河川或道路
		25.道路等級	29.竣工年	33.附設維生管線
輸出	橋梁耐震臨界頻率比值(Rec)			

- b. 篩選因子：設計「橋梁簡易調查因子耐震臨界頻率問卷」，對以上 33 項因子做橋梁耐震問卷調查，填寫人以自身主觀的認知勾選各項因子對於橋梁耐震的強弱關係，本問卷分為五個等級分別為無關、微相關、相關、極為相關、絕對相關。而各等級間再進一步細分折衷值，有助於專家學者勾填，再量化計算時由 0 到 10 分成 10 等份，每往右一間隔則相關性提高 1.25，依序計算之。根據統計結果，以平均值高至低作排序，再移除平均值低的因子，將剩餘的因子作為第一階段篩選後的因子。

- c. 建立案例資料庫：由於定性因子非

以數字呈現，無法明確表示出與橋梁耐震臨界頻率之關係，故本階段需先將各定性因子做量化動作，以便後續應用 AI 軟體做訓練。

本研究採用問卷調查的方式，結合模糊偏好關係(FPR)對定性因子進行調查，找出各不同屬性之因子對於耐震能力的高低關係，以便量化。

決策者考量評估問題的偏好，可運用乘積偏好關係矩陣(Multiplicative preference relation, MPR)來求出模糊偏好關係(FPR)，運用 FPR 理論可求得各影響因子與 Rec 之間的權重。

- d. 建立模型因子：本階段使用 SPSS 軟

體，應用主成分分析法、相關係數分析法及類神經分析之多層感知法，對 135 筆案例裡的因子與 Rec 做相關性分析，找出各輸入(因子)與輸出(Rec)的重要性程度，再依據結果，挑選出部分重要性因子，做為本研究之模型參數。

- e. 因子確立：針對上階段挑分析選出的橋梁重要性影響因子進行最後篩選，在三種統計方法中出現兩次(含)以上的因子，即選為本模型主要影響因子，其餘為次要影響因子。以上述所確認之影響因子(輸入)與 Rec(輸出)建立案例庫。

(4) 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

基於橋梁細部檢測與評估分析，所需耗費之人力、物力經費與時間相當龐大，分析成果之橋梁數有限且時效性不足，無法滿足公路管理單位轄下所有橋

梁作全面性安全評估之需求，因此本研究應用人工智慧，建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」，找出橋梁日常巡檢目視調查之耐震能力影響因子屬性資料與對應案例細部分析結果 Rec 值之映射關係，再針對其餘未進行細部分析之橋梁，利用訓練結果預測其餘橋梁之 Rec 值。

本研究使用^[10]以 ESIM 為架構發展而成的 Evolutionary Support Vector Machine Inference System「演化式支持向量機推論系統，ESIS」作為訓練與測試軟體。首先將橋梁耐震臨界頻率比值推論模式所需之參數設定值輸入軟體中，利用 ESIM 執行自我調適程序，系統會將最後搜尋出之最佳染色體，並解碼為橋梁耐震臨界頻率比值預測模式，以便使用者利用此一模式進行橋梁的耐震臨界頻率比值預測。其架構如圖 4 所示。

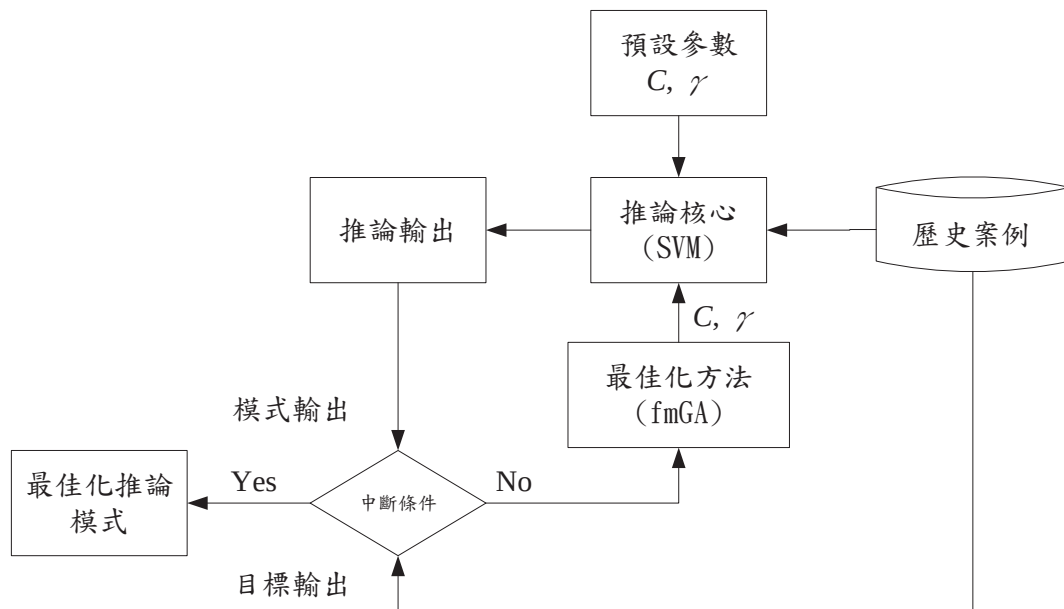


圖 4 支持向量機最佳化模式架構

此模式中，將藉由過去案例作為輸入訓練之用，使用初始 C 與 γ 參數值，運用 SVM 進行輸出之預測並與實際輸出進行比較，fmGA 則經由實際輸出與推估輸出之誤差與模式中支持向量數目作為目標函數，進行參數之最佳化。

依據 ESIM 之架構與特性，針對本研究預測橋梁耐震臨界頻率比值之特性進行評估，分析了解此課題是否適合以 ESIM 模式處理。

- a. ESIM 可以經由快速混雜基因演算法案例學習中，擷取最佳化容錯值參數 C 及核心函數(Kernl Fuction)中 γ (gamma)值，決定支持向量機最佳化重要參數。
- b. ESIM 以演化式支持向量機為架構，妥善的處理不確定的資訊，以解決不確定性的問題(uncertainty)，所以對於橋梁耐震狀況的不確定性已經被考慮在其中。
- c. ESIM 係以為支持向量機(SVM)為推論引擎，以處理複雜的輸入與輸出變數之間映射關係，能夠有效地描述出影響因子與 Rec 之映射關係。

4.2.5 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

(1) 建置橋梁耐洪有限元素模型

本步驟採用相同 27 座橋梁模型與土壤條件，不同之處在於改為考量五種洪水沖刷深度，建置橋梁耐洪有限元素模型。

(2) 橋梁耐洪側推分析

本步驟與 4(2)雷同，與耐震頻率比值分析不同的為將原本考慮 5 種劣化程

度改為 5 種洪水沖刷深度。本計畫參考^[7]提出以整體橋梁基礎為自由體，考量橋梁基礎裸露現狀、保護工施作與否、河川相關變數等，計算橋梁基礎可能發生之最大沖刷深度，並考量橋梁在可能外力，如活載中與水流力等作用下，橋梁基礎所承受之力量，並據以求得橋梁遭遇該河川之計畫洪水量侵襲時，基礎剩餘之極限承載能力。其中學者廖國偉加入橋梁基礎與土壤互制作用，可以依等值土壤彈簧根據不同的基面深度模擬周圍基礎，設置相對應的水平等質土壤彈簧；而基礎底部則設置一垂直等值土壤彈簧，模擬土壤現地狀況。最後獲得結論，河床沖刷導致基樁裸露，為影響橋梁耐洪能力重要因素之一。

耐洪安全臨界頻率比值需由橋梁是否已達極限受損狀態進一步求得，極限受損狀態則需藉由橋梁之容量與需求計算而得，而橋梁之容量(側向抵抗力)與需求(洪水施加於該橋梁的外力)則視沖刷深度而異，即不同沖刷深度下，橋梁的容量與需求均不同^[17]。橋梁的容量曲線可經由側推分析而得，而需求曲線則為水流力所引致之側向力，以下將逐一說明容量與需求之計算方法。

本計畫定義橋梁基礎耐洪能力之容量為側推分析中之降伏點。因此針對不同沖刷深度分別進行側推分析，範例如圖5所示。並將各側推分析之降伏點連成一曲線，即為橋梁耐洪能力之容量曲線，如圖6所示。

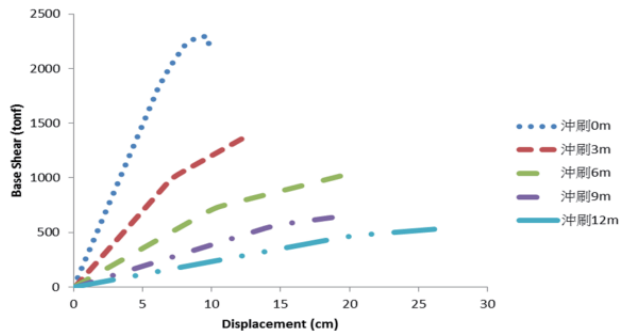


圖 5 各冲刷深度下之側推分析結果範例

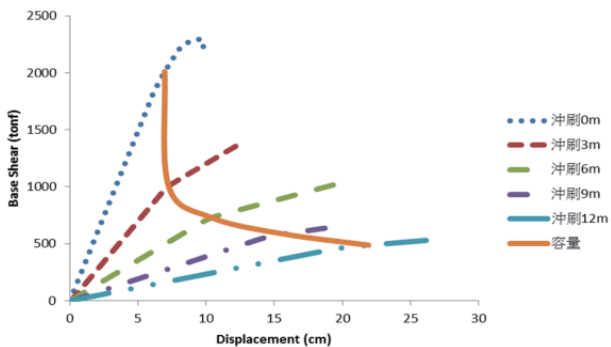


圖 6 橋梁耐洪能力之容量曲線範例

將水流作用力以水流壓力與水流流經橋墩面積之乘積計算而得，並將水流作用力對應於由側推分析後所得之各冲刷深度的容量曲線，則可對應出各冲刷深度之位移，將其連成一曲線。此線段即為本研究對於橋梁結構體需求之認定^[18]，圖 7 為一座橋梁在各冲刷深度下之需求與容量連線範例。

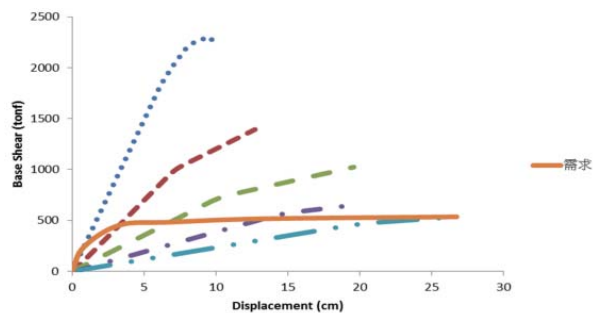


圖 7 各冲刷深度下之需求連線範例

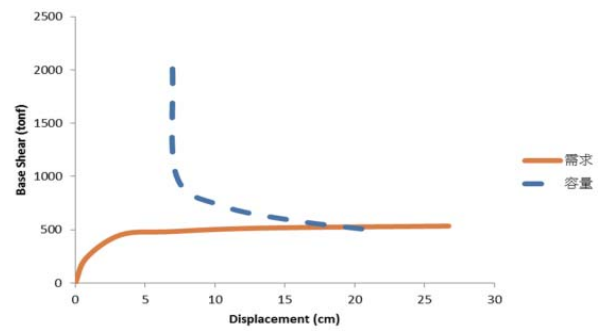


圖 8 各冲刷深度下之需求與容量連線範例

本計畫同樣經由 SAP2000 側推分析結果，求到各橋梁之容量與需求。關於橋梁的側推分析，國內外已有許多相關的研究，但將基礎冲刷深度納入評估過程則相對較少，較常見的情形為將基礎假設為固定端來進行側推分析；因本階段主要在評估橋梁冲刷後之安全評估，故基礎埋入土壤部分亦納入側推分析中。

由橋梁容量與需求之認定，可知橋梁結構體執行側推分析後，可得到其各冲刷深度下之容量，並可依據水流側向力得到橋梁結構體之需求。以圖 8 為例，極限受損時頻率之計算結果容量需求曲線相交於冲刷 9m 與冲刷 12m 之間，根據冲刷 9m 與冲刷 12m 的橋梁結構分別執行模態分析，得到此兩種狀態下之橋梁振動頻率，並透過內插方式求出需求與容量相交點之頻率，此即本文定義之極限受損頻率^[19]。由未受損與極限受損頻率，求得兩者之比值，即可得安全臨界頻率比值 R_{sc} 。

(3) 確立橋梁耐洪臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本階段同樣以前述之橋梁基本屬

性資料為基礎，並結合文獻中所收集之影響因子，運用敏感度分析、相關係數及問卷調查等方式進行篩選，找出影響橋梁耐洪臨界頻率比值較高之因子，作為人工智慧推論模式之輸入，如步驟4(3)所述，並以27座橋梁5種沖刷深度經側推分析求得之135筆橋梁 R_{sc} 值為模式之輸出，建立案例庫。

(4) 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

本階段同樣應用ESIM。建立「橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式」，找出橋梁日常巡檢目視調查之耐洪能力影響因子屬性資料與對應案例細部分析結果 R_{sc} 值之映射關係，再針對其餘未進行細部分析之橋梁，利用訓練結果預測其餘橋梁之 R_{sc} 值。

4.3 模式推論結果

檢驗模式預測能力的指標有許多種，本研究採用平均絕對誤差(MAE)、平均絕對誤差百分比(MAPE)、均方根誤差(RMSE)及相關係數(R)，此四種來衡量模式預測能力，如式(6)、(7)、(8)、(9)所示，其中 y_i 為第 i 筆案例之實際值， $\hat{y}_i$ 為第 i 筆案例之預測值，則 n 為預測案例之總筆數，橋梁耐震臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果於表6。

a. 平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)

平均絕對誤差是將各個實際值與預測值之誤差絕對值後取平均值，如式(6)所示，可藉由MAE值比較實際值與預測值之間的平均誤差，而不受正負抵消之影響。其MAE值愈小，表示誤差愈小。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

b. 平均絕對百分比誤差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

平均絕對百分誤差為實際值與預測值的誤差程度，以百分比表示，如式(7)所示。所得之MAPE值愈小，表示預測能力愈佳。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100\% \quad (7)$$

依據Lewis(1982)^[27]建議，模式依據MAPE大小能分為四種等級，如下表5所示。

表5、MAPE評估指標

MAPE(%)	預測能力
<10	高度準確
10~20	良好
20~50	合理
>50	不準確

c. 均方根誤差(Root Mean Squared Error, RMSE)

均方根誤差為實際值與預測值之誤差平方值之平方根，公式(8)所示。可藉由RMSE值衡量實際值與預測值間的離散程度，將誤差程度以該變數之實際值標準化。平方值的意義為給予各個實際值與預測值誤差不同的平方加權方式，強化誤差分配的群聚範圍，能得到更明確的比較結果，所得之RMSE值愈小，表示預測能力愈佳。

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{n} \quad (8)$$

d. 回歸模式之變異量(Coefficient of determination)

與相關係數 r 相似，在學術研究上最通俗的觀念是 R² 愈接近 1.0 愈好。

$$R^2 = SS_{Reg} / SS_{Total} \quad (9)$$

表 6、橋梁耐震臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果

	Training				Testing			
	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²
Fold1	0.0141	3.66	0.0269	0.9905	0.0420	11.81	0.0603	0.9001
Fold2	0.0096	2.17	0.0198	0.9944	0.0164	3.68	0.0235	0.9941
Fold3	0.0072	1.69	0.0127	0.9978	0.0607	11.96	0.1156	0.8483
Fold4	0.0060	1.37	0.0125	0.9979	0.0507	13.49	0.0746	0.9190
Fold5	0.0062	1.37	0.0134	0.9974	0.0404	8.69	0.0605	0.9673
Fold6	0.0101	2.24	0.0206	0.9943	0.035	9.22	0.0471	0.9621
Fold7	0.0071	1.49	0.0158	0.9965	0.0228	10.67	0.0284	0.9933
Fold8	0.0099	2.33	0.0207	0.9938	0.0337	13.34	0.0484	0.9802
Fold9	0.0097	2.18	0.0195	0.9948	0.0174	6.86	0.0255	0.9911
Fold10	0.0091	2.10	0.0192	0.9950	0.0276	7.51	0.0403	0.9793
Average	0.0089	2.06	0.0181	0.9952	0.0347	9.72	0.0524	0.9535

在橋梁沖刷後臨界頻率部分同樣採用平均絕對誤差(MAE)、平均絕對誤差百分比(MAPE)、均方根誤差(RMSE)及回歸模式之變異量，此四種來衡量模式預測能力。橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果於表 7。

表 7、橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果

	Training				Testing			
	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²
Fold1	0.0112	3.82	0.0181	0.9942	0.0376	8.27	0.0603	0.8864
Fold2	0.0113	3.36	0.0210	0.9915	0.0319	11.04	0.0372	0.9842
Fold3	0.0159	5.52	0.0285	0.9841	0.0848	10.87	0.1283	0.6761
Fold4	0.0162	4.82	0.0273	0.9862	0.0254	15.77	0.0378	0.9732
Fold5	0.0111	3.60	0.0173	0.9944	0.0383	15.49	0.0671	0.9506
Fold6	0.0178	5.83	0.0294	0.9844	0.036	9.33	0.0499	0.9515
Fold7	0.0167	5.57	0.0282	0.9850	0.0246	4.51	0.0378	0.9868
Fold8	0.0126	4.15	0.0231	0.9906	0.0281	9.61	0.0342	0.9627
Fold9	0.0118	3.86	0.0209	0.9923	0.0455	11.73	0.0558	0.9125
Fold10	0.0104	3.40	0.0208	0.9916	0.0491	24.15	0.0702	0.9348
Average	0.0135	4.39	0.0235	0.9894	0.0401	12.08	0.0579	0.9219

4.4 案例驗證

為驗證橋梁健康度，是否因為平常洪水沖刷造成橋梁日漸損壞，在颱風前後至南雲大橋進行現地頻率量測，檢驗橋梁振動頻率是否有明顯的差異。首先於 2016/06/17 至南雲大橋以振動量測儀器量測橋梁自然振動頻率，檢視橋墩處水流向之結果，橋墩水流方向第一振態約在 2.41Hz 附近。

2015/10/03 颱風後同樣至南雲大橋量測橋梁自然振動頻率，檢視橋墩處水流向之結果，橋墩水流方向第一振態約在 2.26Hz 附近。

表 8 為二次試驗與一次試驗結果之比較，根據表中數據，振動頻率數值並沒有太大的差異，表示此期間並未對南雲大橋造成顯著的沖刷影響。

表 8、洪水前後量測之頻率比較
(第一振態)

	橋墩振動頻率(H_z)
第一次試驗	2.41
第二次試驗	2.26

橋梁現地之自然振動頻率比值 R_s 經計算得 0.938。而南雲大橋在低流速下之 R_{sc} 值為 0.4428。因此橋梁健康度之依據可以 R_{sc} 值與 R_s 值兩者相比較。

若 $R_s > R_{sc}$ ，則橋梁健康度無虞；反之，則應考慮是否做詳細橋梁檢測與補強。經由計算比較兩數值，結果為 $R_s > R_{sc}$ ，故南雲大橋在此狀況下橋梁健康度無疑慮。而根據現地狀況亦發現在 2016 年度颱風洪水未對南雲大橋造成明顯之沖刷影響，因此建議後續研究可選擇易受沖刷危害之跨河橋梁進行振動頻率量測試驗，進一步驗證模式之適用性。

五、結論

本研究發展一套現地橋梁振動頻率快速間接量測法與橋梁臨界頻率比值 AI 推論模式，然後將現地量測之振動頻率與推論模式推論之橋梁臨界頻率比值作比較，探討分析橋梁健康程度。在建立橋梁有限元素模型作數值分析方面，除了考慮橋梁設計、地質狀況、初步評估與塑鉸性質外，為更貼近實際橋梁破壞情形，本計畫以交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[4]所建之 27 座橋梁模型為基礎，將土壤反力係數納入考量，探討橋梁遭受地震與洪水等外力破壞時，反應在橋梁振動頻率變化之相關課題，然後發展創新人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 推論模式，應用案例學習機制，找出案例初評因子(輸入)與詳評 Rec、Rsc 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋梁之 Rec 與 Rsc，作為判斷各橋梁是否安全之振動頻率比值基準值，如此公路橋管單位在災時即

可藉由災害前後所量測之橋梁振動頻率比值與基準值比較，作為衡量判斷橋梁封橋後能否開放通行之依據，在平時則可用來檢視橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。綜合前述之研究成果歸納以下幾點結論：

1. 應用人工智慧建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」，預測結果與實際值比較，為高精確且高度相關，所以此推論模式預測其他橋梁可得到高效率與準確率的橋梁耐震臨界頻率比值。
2. 以橋梁耐震臨界頻率比值推論模式與快速間接量測方法建立橋健康度診斷模式，希望由現有橋梁案例庫使用本研究所確立之模式推論其餘公路橋梁耐震臨界頻率比值，配合快速間接量測可以快速判斷橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。
3. 於地震發生後，可利用本研究建立之橋梁健康度診斷模式，判斷封橋

與否，可降低因為目視檢測只判斷橋梁外部損傷之缺點。

4. 於目前橋梁地震災害處理通報流程，目視檢測後封橋，可利用本研究建立之橋健康度診斷模式，作為封

橋後是否開通橋梁之參考。

5. 於洪汛發生後，水位退至正常水位，可利用本研究建立之橋梁健康度診斷模式，作為橋梁維護之參考。

參考文獻

1. 陳永銘、許阿明，「臺灣與美國之橋梁檢測系統與制度」，臺灣公路工程，2008。
2. 橋梁檢測基本理論，中國土木水利工程協會，2013。
3. 陳正興、李維峰與梅興泰，「振動量測於橋梁之識別分析」，第六屆公共工程非破壞檢測技術研討會，2009。
4. 石峰，「應用現地微振量測進行斜張橋之沖刷評估」，國立雲林科技大學，2011。
5. 陳旻昱，「橋梁振動特性實驗研究」，國立臺灣大學碩士論文，2014
6. Yang, Y.B., Lin, C.W., and Yau, J.D. (2004), "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration* 272: 471-493.
7. 廖國偉，「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」，科技部計畫，2013。
8. 鄭明淵、歐昱辰、邱建國、廖國偉，「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」，交通運輸研究所。
9. 王豐裕，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，交通部公路總局，2009。
10. Min-Yuan Cheng and Yu-Wei Wu*, (2009), "Evolutionary Support Vector Machine Inference System for Construction Management", *Automation in Construction*, 18(5), pp.597-604, UK, SCI, EI
11. Lin, C.W., and Yang, Y.B. (2005), "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification," *Engineering Structures* 27: 1865-1878. Yang, Y.B., and Chang, K.C.
12. 吳佑軒，「車橋互制理論於橋梁頻率間接量測法之應用」，國立臺灣大學，2014。
13. 鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，「移動式橋梁振動檢測及訊號分析與傳輸通報系統」，交通運輸研究所，2013。
14. 李金翰，「橋墩振動頻率作為封橋基準之研究」，國立臺灣科技大學，2011。
15. CSI,"SAP2000 : Integrated Finite Element Analysis and Design of

structures”, Computers and Structures, Inc., Berkely, California, (1996).

16. 陳正興，建築技術規則建築構造編基礎構造設計規範，內政部，1998。
。
17. 賈亦騰，「跨河橋梁耐洪能力之可靠度分析」，國立臺灣科技大學，2014。
18. 林怡君，「基礎沖刷深度對橋梁自然頻率的影響識別」，國立成功大學，2012。
19. (2009a), “Extracting the Bridge Frequencies Indirectly from a Passing Vehicle: Parametric Study,” Engineering Structures, 31(10): 2448-2459.
20. S.A. Mirza and J.G. MacGregor, “Variability of mechanical properties of reinforcing bars.” Jour. Struct. Div., ASCE, 105(ST5): 921-937, 1979.